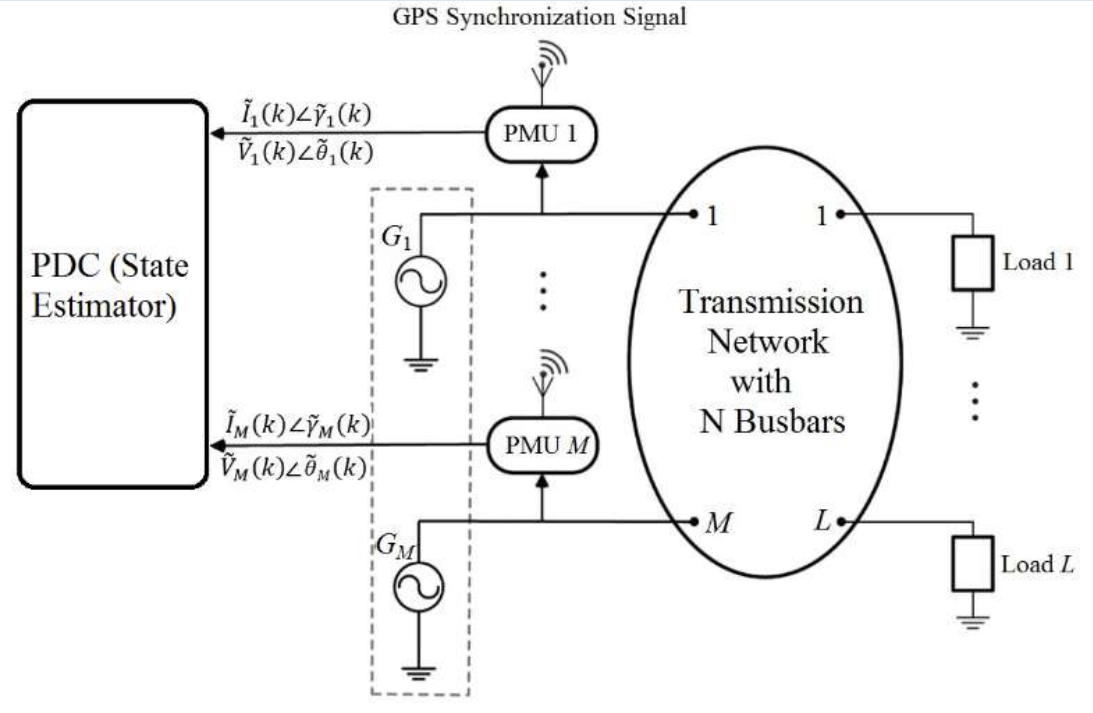
پژوهشگاه نیرو

NRI-ER-896-PDIPN19-00-L

طراحی و شبیه‌سازی ماژول تخمین‌گر حالت دینامیکی مورد نیاز سامانه SCADA/EMS مراکز دیسپاچینگ با درنظرگرفتن محدودیت‌های ارتباطی



مدیر پروژه: عطیه کشاورز محمدیان

واحد مجری: گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند

DOI: 10.30503/nripress.2020.248


بسم الله الرحمن الرحيم

طراحی و شبیه‌سازی ماژول تخمین‌گر حالت دینامیکی مورد نیاز سامانه SCADA/EMS مراکز دیسپاچینگ با در نظر گرفتن محدودیت‌های ارتباطی

مدیر پروژه: عطیه کشاورز محمدیان

گروه پژوهشی پشتیبان: سامانه‌های کنترل هوشمند

همکاران پروژه:

عطیه کشاورز محمدیان

محمد ستاره

واحد مجری: گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند

انتشارات پژوهشگاه نیرو

تیر ۱۴۰۱

کد ثبت گزارش: *NRI-ER-896-PDIPN19-00-L*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند

طراحی و شبیه‌سازی ماژول تخمین‌گر حالت دینامیکی مورد نیاز سامانه *SCADA/EMS* مراکز دیسپاچینگ با در نظر گرفتن محدودیت‌های ارتباطی/ مدیر پروژه: عطیه کشاورز محمدیان. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۲۳۶ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. کشاورز محمدیان، عطیه، همکار پروژه. ۲. ظفری، لیلا، مدیر واحد مجری. ۳. گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند ۴. محور پژوهشی سامانه‌های کنترل و مدیریت شبکه برق

انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: **تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳**

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: *www.nri.ac.ir*

پست الکترونیک انتشارات: *publications@nri.ac.ir*

پژوهشگاه نیرو

بسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
پیوست:

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب عطیه کشاورز محمدیان، مدیر پروژه طراحی و شبیه‌سازی ماژول تخمین‌گر حالت دینامیکی مورد نیاز سامانه *SCADA/EMS* مراکز دیسپاچینگ با در نظر گرفتن محدودیت‌های ارتباطی و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

☑ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

☐ گزارش حاصل انجام ..... مرحله از ..... مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. عطیه کشاورز محمدیان

۲. محمد ستاره

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پیشگفتار

گزارش حاضر تحت عنوان گزارش نهایی مربوط به مرحله ۱، مرحله ۲ و مرحله ۳ پروژه **"طراحی و شبیه‌سازی ماژول تخمین‌گر حالت دینامیکی مورد نیاز سامانه** SCADA/EMS **مراکز دیسپاچینگ با در نظر گرفتن محدودیت‌های ارتباطی"** است.

در این گزارش، به معرفی شبکه هوشمند برق، سامانه اندازه‌گیری ناحیه گسترده و اسناد بالادستی صنعت برق کشور در این دو زمینه، معرفی و علم‌سنجی مسأله تخمین حالت در سیستم‌های قدرت، بررسی روش‌های تخمین حالت استاتیکی و دینامیکی موجود در سیستم‌های قدرت، تبیین چالش‌های موجود در این زمینه و بررسی و تعیین راه‌حل‌های پیشنهادی برای رفع چالش‌های موجود پرداخته شده است.

در ادامه، به معرفی دینامیک سیستم قدرت و معادلات دینامیکی و جبری آن، ارائه مدل فضای حالت سیستم قدرت، معرفی، شبیه‌سازی و تحلیل سیستم IEEE ۶۸ باسه، فرمول‌بندی مسأله تخمین حالت غیرخطی، تعریف ریاضی روش تحریک-رویداد، مرور روش‌های تخمین حالت سیستم قدرت مبتنی بر استراتژی تحریک-رویداد و روش توزیع‌یافته، تبیین خلاءهای پژوهشی موجود، طراحی روش پیشنهادی تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر خطی‌سازی و استراتژی تحریک-رویداد و طراحی روش پیشنهادی تخمین حالت دینامیکی غیرخطی توزیع‌یافته با استفاده از قانون مکعبی و روش اجماع پرداخته شده است.

سپس، به شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم قدرت ۶۸ باسه، شبیه‌سازی برخی از روش‌های موجود تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت، شبیه‌سازی روش پیشنهادی تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر خطی‌سازی و استراتژی تحریک-رویداد و شبیه‌سازی روش پیشنهادی تخمین حالت دینامیکی غیرخطی توزیع‌یافته مبتنی بر قانون مکعبی و روش اجماع و مقایسه روش‌های پیشنهادی با روش‌های موجود پرداخته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ..... ش

فصل اول: شبکه هوشمند و سامانه اندازه‌گیری ناحیه‌گسترده ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- شبکه هوشمند برق ۲

۱-۲-۱- زیرسیستم‌های شبکه هوشمند برق ۷

۱ ۲ ۱ ۱ حوزه تولید انبوه ۸

۱ ۲ ۱ ۲ حوزه انتقال ۹

۱ ۲ ۱ ۳ حوزه توزیع ۹

۱ ۲ ۱ ۴ حوزه مشترکین و تولیدات پراکنده ۹

۱ ۲ ۱ ۵ حوزه بازار ۱۰

۱ ۲ ۱ ۶ حوزه بهره‌برداری ۱۰

۱ ۲ ۱ ۷ حوزه ارائه‌دهنده سرویس ۱۰

۱-۳- سامانه اندازه‌گیری ناحیه گسترده ۱۰

1-3-1- ساختار سامانه اندازه‌گیری ناحیه گسترده ۱۱

۱-۳-۲- واحد اندازه‌گیری فازوری ۱۳

۱ ۳ ۲ ۱ کیفیت داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط واحد اندازه‌گیری فازوری ۱۶

۱ ۳ ۲ ۲ استانداردها ۱۸

۱-۳-۳- سامانه سنکرون‌کننده ۲۱

۱-۳-۴- سامانه مخابراتی انتقال داده‌ها ۲۳

۱-۳-۵- متمرکزکننده داده‌های فازوری ۲۷

۱-۳-۶- کاربردهای سامانه اندازه‌گیری ناحیه گسترده ۲۸

۱ ۳ ۶ ۱ کاربردهای محلی ۲۸

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۱ ۳ ۶ ۲ کاربردهای فراگیر ۲۹
۱-۴- اسناد بالادستی صنعت برق کشور ۳۳
۱-۴-۱- سند راهبرد ملی توسعه دانش‌بنیان شبکه هوشمند برق ایران و سند برنامه اقدامات توسعه فن‌آوری‌های شبکه هوشمند برق ایران ۳۸
۱-۴-۲- نقشه‌راه بهره‌برداری و توسعه مرکز WAMS شبکه انتقال برق کشور ۴۱
فصل دوم: مسأله تخمین حالت در سیستم‌های قدرت ۴۴
۲-۱- مقدمه ۴۵
۲-۲- تخمین حالت در سیستم قدرت ۴۵
۲-۳- چارچوب‌های مختلف تخمین حالت در سیستم قدرت ۴۷
۲-۳-۱_ تخمین حالت استاتیکی ۵۰
۲-۳-۲- تخمین حالت ردیابی ۵۰
۲-۳-۳- تخمین حالت دینامیکی ۵۱
۲-۴- تاریخچه تخمین حالت در سیستم قدرت ۵۱
۲-۵- جایگاه مبحث تخمین حالت شبکه‌های برق در حوزه برق و انرژی ۵۲
۲-۶- علم‌سنجی مسأله تخمین حالت در سیستم قدرت با استفاده از پایگاه استنادی اسکوپوس و ابزارهای تحلیلی آن ۵۴
فصل سوم: تخمین حالت دینامیکی در شبکه‌های انتقال ۶۳
۳-۱- مقدمه ۶۴
۳-۲- تخمین حالت دینامیکی ۶۴
۳-۲-۱- انگیزه‌ها و کابردهای تخمین حالت دینامیکی ۶۶
۳-۳- تجزیه و تحلیل مشاهده‌پذیری برای تخمین حالت دینامیکی ۶۸
۳-۳-۱- روش مبتنی بر مشتق لی ۶۹
۳-۳-۲- روش مبتنی بر گرامیان مشاهده‌پذیری تجربی ۷۱
۳-۴- روش‌های موجود در زمینه تخمین حالت دینامیکی در شبکه‌های انتقال ۷۲
۳-۴-۱- بهبود پایداری عددی و آماری ۷۶

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۳-۵- تخمین حالت دینامیکی متمرکز و توزیع‌یافته ۷۷
۳-۶- جمع‌بندی ۷۸
۳-۶-۱- ادامه تحقیقات ۷۸
۳-۶-۲- تبیین چالش‌ها ۸۰
۳-۶-۳- تعیین راه‌حل‌ها ۸۱
۳ ۶ ۳ ۱ تخمین حالت دینامیکی بر اساس تحریک-رویداد ۸۱
۳ ۶ ۳ ۲ تخمین حالت دینامیکی به روش توزیع‌یافته ۸۲
فصل چهارم: معرفی سیستم قدرت ۸۳
۴-۱- مقدمه ۸۴
۴-۲- دینامیک سیستم قدرت ۸۴
۴-۲-۱- معادلات دینامیکی و جبری سیستم ۸۶
۴ ۲ ۱ ۱ معادلات دینامیکی ژنراتور ۸۸
۴ ۲ ۱ ۲ معادلات دینامیکی سیستم تحریک ۸۹
۴ ۲ ۱ ۳ معادلات دینامیکی توربین ۸۹
۴ ۲ ۱ ۴ معادلات جبری استاتور ۹۰
۴ ۲ ۱ ۵ معادلات جبری شارش توان ۹۰
۴ ۲ ۱ ۶ مدل بار ۹۱
۴ ۲ ۱ ۷ زاویه مرجع ۹۲
۴-۳- مدل فضای حالت ۹۲
۴-۳-۱- بردار حالت ۹۳
۴-۳-۲- بردار متغیرهای جبری ۹۳
۴-۳-۳- بردار ورودی و خروجی ۹۳
۴-۳-۴- مدل فرآیند و مشاهدات ۹۴
۴-۴- مطالعه موردی (سیستم ۶۸ باسه) ۹۵
۴-۵- جمع‌بندی ۹۶

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل پنجم: شبیه‌سازی و تحلیل سیستم قدرت ۹۷

۵-۱- مقدمه ۹۸

۵-۲- انتخاب نرم‌افزار شبیه‌سازی ۹۸

۵-۳- انتخاب روش شبیه‌سازی و حل‌کننده ۱۰۱

۵-۴- محاسبه شرایط اولیه سیستم ۱۰۲

۵-۵- افزایش سرعت شبیه‌سازی ۱۰۳

۵-۶- خلاصه الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم قدرت ۱۰۵

۵-۷- نتایج شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم ۶۸ باسه ۱۰۶

۵-۷-۱- نتایج تحلیل پخش بار ۱۰۷

۵-۷-۲- محاسبه شرایط اولیه سیستم ۱۱۱

۵-۷-۳- ترسیم و تحلیل نتایج شبیه‌سازی حوزه زمان ۱۱۵

۵-۸- خطی‌سازی سمبولیک ۱۳۰

۵-۹- تحلیل سیستم بر اساس خطی‌سازی ۱۳۴

۵-۹-۱- تحلیل مدال ۱۳۴

۵-۹-۲- تحلیل شکل مد ۱۳۹

۵-۹-۳- تحلیل ضریب مشارکت ۱۴۱

۵-۹-۴- تحلیل مانده مدال ۱۴۳

۵-۱۰- جمع‌بندی ۱۴۵

فصل ششم: مرور روش‌های موجود ۱۴۸

۶-۱- مقدمه ۱۴۹

۶-۲- مسأله تخمین حالت غیرخطی ۱۴۹

۶-۲-۱- تعریف ریاضی مسأله تخمین حالت غیرخطی ۱۴۹

۶-۲-۲- حل مسأله تخمین حالت غیرخطی با استفاده از تئوری بیز ۱۵۰

۶-۲-۳- روش‌های بهینه ۱۵۲

۶-۲-۱-۳-۲-۶ فیلتر کالمن ۱۵۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۶-۲-۴- روش‌های تقریب آماری ۱۵۵
۶-۳- مروری بر روش‌های تخمین حالت غیرخطی در سیستم قدرت ۱۵۵
۶-۴- مروری بر روش‌های تخمین حالت غیرخطی مبتنی بر تحریک-رویداد در سیستم قدرت ۱۵۸
۶-۴-۱- تعریف ریاضی روش تحریک-رویداد ۱۵۸
۶-۴-۲- استراتژی‌های تحریک-رویداد موجود ۱۶۱
۶-۴-۳- ساختار سیستم تحریک-رویداد ۱۶۲
۶-۴-۴- مرور پژوهش‌های موجود ۱۶۳
۶-۵- مروری بر روش‌های تخمین حالت غیرخطی توزیع‌یافته در سیستم قدرت ۱۶۵
۶-۵-۱- معرفی روش توزیع‌یافته و مزایای آن ۱۶۵
۶-۵-۲- مرور پژوهش‌های موجود ۱۶۷
۶-۶- خلاءهای پژوهشی ۱۶۹
۶-۷- جمع‌بندی ۱۷۲
فصل هفتم: طراحی تخمین‌گر حالت غیرخطی به روش تحریک-رویداد ۱۷۳
۷-۱- مقدمه ۱۷۴
۷-۲- مسأله تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت ۱۷۷
۷-۲-۱- مدل فضای حالت سیستم ۱۷۷
۷-۲-۲- تعریف مسأله ۱۸۰
۷-۳- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر خطی‌سازی ۱۸۱
۷-۳-۱- خطی‌سازی و وجود همبستگی ۱۸۱
۷-۳-۲- رفع همبستگی ۱۸۴
۷-۳-۳- الگوریتم پیشنهادی تخمین‌گر غیرخطی با در نظر گرفتن همبستگی ۱۸۶
۷-۴- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر خطی‌سازی و روش تحریک-رویداد ۱۸۹
۷-۴-۱- الگوریتم پیشنهادی در تخمین‌گر محلی ۱۹۲
۷-۴-۲- الگوریتم پیشنهادی در تخمین‌گر مرکزی (طراحی تخمین‌گر تحریک-رویداد) ۱۹۵
۷-۵- واریانس نویز PMUها ۱۹۹

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۷-۶- جمع‌بندی ۲۰۱
فصل هشتم: طراحی تخمین‌گر حالت غیرخطی به روش توزیع‌یافته ۲۰۴
۸-۱- مقدمه ۲۰۵
۸-۲- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر قانون مکعبی ۲۰۷
۸-۳- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر قانون مکعبی در فضای اطلاعات ۲۱۴
۸-۴- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی توزیع‌یافته مبتنی بر قانون مکعبی و روش اجماع ۲۲۰
۸-۵- جمع‌بندی ۲۲۶
فصل نهم: شبیه‌سازی روش‌های موجود ۲۲۸
۹-۱- مقدمه ۲۲۹
۹-۲- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته ۲۲۹
۹-۲-۱- معرفی فیلتر کالمن توسعه‌یافته ۲۲۹
۹-۲-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط فیلتر کالمن توسعه‌یافته ۲۳۰
۹ ۲ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت ۲۳۱
۹ ۲ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر ۲۵۳
۹-۳- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از فیلتر کالمن مکعبی ۲۵۴
۹-۳-۱- معرفی فیلتر کالمن مکعبی ۲۵۴
۹-۳-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط فیلتر کالمن مکعبی ۲۵۶
۹ ۳ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت ۲۵۶
۹ ۳ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر ۲۶۸
۹-۴- جمع‌بندی ۲۶۹
فصل دهم: شبیه‌سازی روش پیشنهادی مبتنی بر خطی‌سازی و روش تحریک-رویداد ۲۷۰
۱۰-۱- مقدمه ۲۷۱
۱۰-۲- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C ۲۷۱
۱۰-۲-۱- تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C ۲۷۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۱۰-۲-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C ۲۷۳
۱۰ ۲ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت ۲۷۳
۱۰ ۲ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر ۲۸۵
۱۰-۳- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C-ET ۲۸۶
۱۰-۳-۱- تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C-ET ۲۸۶
۱۰-۳-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C-ET ۲۸۹
۱۰ ۳ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت ۲۸۹
۱۰ ۳ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر ۳۰۲
۱۰-۴- جمع‌بندی ۳۰۳
فصل یازدهم: شبیه‌سازی روش پیشنهادی مبتنی بر قانون مکعبی و رویکرد توزیع‌یافته ۳۰۵
۱۱-۱- مقدمه ۳۰۶
۱۱-۲- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی CKF-IE ۳۰۶
۱۱-۲-۱- تخمین‌گر پیشنهادی CKF-IE ۳۰۶
۱۱-۲-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی CKF-IE ۳۰۸
۱۱ ۲ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت ۳۰۸
۱۱ ۲ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر ۳۱۹
۱۱-۳- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE ۳۲۰
۱۱-۳-۱- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE ۳۲۰
۱۱-۴- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE-D ۳۲۱
۱۱-۴-۱- تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE-D ۳۲۱
۱۱-۴-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE-D ۳۲۲
۱۱ ۴ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت ۳۲۳
۱۱ ۴ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر ۳۲۸
۱۱-۵- جمع‌بندی و مقایسه کلی ۳۲۹
نتیجه‌گیری ۳۳۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پیوست۱ : داده‌ها ۳۳۵

پ۱ ۱ مقدمه ۳۳۶

پ۱ ۲ داده‌های باس ۳۳۶

پ۱ ۳ داده‌های خط و ترانسفورماتور ۳۳۸

پ۱ ۴ داده‌های ژنراتور ۳۴۲

پ۱ ۵ داده‌های سیستم تحریک و توربین بخار ۳۴۳

پیوست۲ روابط برخی از تخمین‌گرهای معروف ۳۴۴

پ۲ ۱ مقدمه ۳۴۵

پ۲ ۲- فیلتر کالمن استاندارد ۳۴۵

پ۲ ۳- فیلتر کالمن توسعه‌یافته ۳۴۶

پ۲ ۴- فیلتر کالمن بی‌رد ۳۴۸

پ۲ ۵- فیلتر کالمن مکعبی ۳۴۹

پ۲ ۶- فیلتر ذره‌ای ۳۵۱

فهرست منابع ۳۵۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ ساختار شبکه برق ۶

شکل ۱-۲ حوزه‌های مختلف شبکه هوشمند برق و ارتباط بین آن‌ها ۸

شکل ۱-۳ ساختار سامانه WAMS ۱۳

شکل ۱-۴ ساختار یک PMU نمونه ۱۵

شکل ۱-۵ ارسال و دریافت اطلاعات در PMU ۱۶

شکل ۱-۶ شمای مدارهای ماهواره‌های سامانه GPS ۲۲

شکل ۱-۷ سیر تکاملی استفاده از بسترهای ارتباطی مختلف در شبکه‌های برق ۲۴

شکل ۱-۸ انواع فن‌آوری‌های ارتباطی برای انتقال داده‌های فازوری ۲۵

شکل ۱-۹ خصوصیات فن‌آوری‌های ارتباطی مختلف برای انتقال داده فازوری ۲۶

شکل ۱-۱۰ کاربردهای سامانه WAMS ۲۸

شکل ۱-۱۱ نقشه‌راه بهره‌برداری و توسعه مرکز WAMS شبکه انتقال برق کشور ۴۱

شکل ۱-۱۲ چشم‌انداز بهره‌برداری و توسعه مرکز WAMS شبکه انتقال برق کشور ۴۲

شکل ۱-۱۳ برنامه‌ریزی توسعه نرم‌افزاری مرکز WAMS ۴۳

شکل ۲-۱ دسته‌بندی انواع پایداری در سیستم قدرت ۴۹

شکل ۲-۲ رابطه بین حوزه‌ها، خوشه‌ها و عناوین در پایگاه سای‌ول ۵۴

شکل ۲-۳ تعداد مستندات به تفکیک سال ۵۵

شکل ۲-۴ تعداد مستندات در ۱۰ مجله برتر در طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۰ ..... ۵۹

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شکل ۲-۵ انواع مستندات حوزه "Power System State Estimation" ۶۰
شکل ۲-۶ تعداد مستندات به تفکیک کشورها ۶۱
شکل ۲-۷ ده نویسنده برتر با بیش‌ترین مستندات چاپ‌شده ۶۱
شکل ۲-۸ ارتباط کلیدواژه "Power System State Estimation" با دیگر کلیدواژه‌ها ۶۲
شکل ۴-۱ شبکه انتقال نمونه ۸۵
شکل ۴-۲ مدار معادل ژنراتور سنکرون ۸۵
شکل ۴-۳ نمودار تک‌خطی سیستم ۶۸ باسه ۹۶
شکل ۵-۱ نمودار زمانی متغیر حالت اول ۱۱۶
شکل ۵-۲ نمودار زمانی متغیر حالت دوم ۱۱۷
شکل ۵-۳ نمودار زمانی متغیر حالت سوم ۱۱۸
شکل ۵-۴ نمودار زمانی متغیر حالت چهارم ۱۱۹
شکل ۵-۵ نمودار زمانی متغیر حالت پنجم ۱۲۰
شکل ۵-۶ نمودار زمانی متغیر حالت ششم ۱۲۱
شکل ۵-۷ نمودار زمانی متغیر حالت هفتم ۱۲۲
شکل ۵-۸ نمودار زمانی متغیر حالت هشتم ۱۲۳
شکل ۵-۹ نمودار زمانی متغیر حالت نهم ۱۲۴
شکل ۵-۱۰ نمودار زمانی متغیر حالت دهم ۱۲۵
شکل ۵-۱۱ نمودار زمانی متغیر حالت یازدهم ۱۲۶
شکل ۵-۱۲ نمودار زمانی دامنه جریان باس‌های متصل به ژنراتور ۱۲۷
شکل ۵-۱۳ نمودار زمانی زاویه فاز جریان باس‌های متصل به ژنراتور ۱۲۸

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شکل ۵-۱۴ نمودار زمانی دامنه ولتاژ تمامی باس‌ها ۱۲۹
شکل ۵-۱۵ نمودار زمانی زاویه فاز ولتاژ تمامی باس‌ها ۱۳۰
شکل ۵-۱۶ تحلیل شکل مد ۱۴۱
شکل ۵-۱۷ تحلیل ضریب مشارکت ۱۴۳
شکل ۵-۱۸ تحلیل مانده مدال ۱۴۵
شکل ۶-۱ ساختار سیستم تخمین حالت مبتنی بر تحریک-رویداد با تخمین‌گر محلی ۱۶۳
شکل ۷-۱ تأخیر کلی در تخمین حالت زمان-واقعی شبکه هوشمند ۱۷۵
شکل ۷-۲ مقدار واقعی و اندازه‌گیری‌شده دامنه ولتاژ باس شماره ۱ ..... ۲۰۱
شکل ۹-۱ تخمین متغیرحالت اول ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۳۲
شکل ۹-۲ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۳۳
شکل ۹-۳ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۳۴
شکل ۹-۴ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۳۵
شکل ۹-۵ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۳۶
شکل ۹-۶ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۳۷
شکل ۹-۷ تخمین متغیرحالت هفتم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۳۸
شکل ۹-۸ تخمین متغیرحالت هشتم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۳۹
شکل ۹-۹ تخمین متغیرحالت نهم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۴۰
شکل ۹-۱۰ تخمین متغیرحالت دهم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۴۱
شکل ۹-۱۱ تخمین متغیرحالت یازدهم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF ۲۴۲
شکل ۹-۱۲ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت اول ۲۴۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شکل ۹-۱۳ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت دوم ۲۴۴
شکل ۹-۱۴ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت سوم ۲۴۵
شکل ۹-۱۵ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت چهارم ۲۴۶
شکل ۹-۱۶ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت پنجم ۲۴۷
شکل ۹-۱۷ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت ششم ۲۴۸
شکل ۹-۱۸ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت هفتم ۲۴۹
شکل ۹-۱۹ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت هشتم ۲۵۰
شکل ۹-۲۰ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت نهم ۲۵۱
شکل ۹-۲۱ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت دهم ۲۵۲
شکل ۹-۲۲ خطای RMSE تخمین‌گر EKF برای متغیر حالت یازدهم ۲۵۳
شکل ۹-۲۳ تخمین متغیرحالت اول ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF ۲۵۷
شکل ۹-۲۴ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF ۲۵۸
شکل ۹-۲۵ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF ۲۵۹
شکل ۹-۲۶ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF ۲۶۰
شکل ۹-۲۷ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF ۲۶۱
شکل ۹-۲۸ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF ۲۶۲
شکل ۹-۲۹ خطای RMSE تخمین‌گر CKF برای متغیر حالت اول ۲۶۳
شکل ۹-۳۰ خطای RMSE تخمین‌گر CKF برای متغیر حالت دوم ۲۶۴
شکل ۹-۳۱ خطای RMSE تخمین‌گر CKF برای متغیر حالت سوم ۲۶۵
شکل ۹-۳۲ خطای RMSE تخمین‌گر CKF برای متغیر حالت چهارم ۲۶۶

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شکل ۹-۳۳ خطای RMSE تخمین‌گر CKF برای متغیر حالت پنجم ۲۶۷
شکل ۹-۳۴ خطای RMSE تخمین‌گر CKF برای متغیر حالت ششم ۲۶۸
شکل ۱۰-۱ تخمین متغیرحالت اول ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C ۲۷۴
شکل ۱۰-۲ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C ۲۷۵
شکل ۱۰-۳ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C ۲۷۶
شکل ۱۰-۴ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C ۲۷۷
شکل ۱۰-۵ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C ۲۷۸
شکل ۱۰-۶ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C ۲۷۹
شکل ۱۰-۷ خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C برای متغیر حالت اول ۲۸۰
شکل ۱۰-۸ خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C برای متغیر حالت دوم ۲۸۱
شکل ۱۰-۹ خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C برای متغیر حالت سوم ۲۸۲
شکل ۱۰-۱۰خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C برای متغیر حالت چهارم ۲۸۳
شکل ۱۰-۱۱خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C برای متغیر حالت پنجم ۲۸۴
شکل ۱۰-۱۲خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C برای متغیر حالت ششم ۲۸۵
شکل ۱۰-۱۳تخمین متغیرحالت اول ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C-ET ۲۹۰
شکل ۱۰-۱۴تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C-ET ۲۹۱
شکل ۱۰-۱۵تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C-ET ۲۹۲
شکل ۱۰-۱۶تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C-ET ۲۹۳
شکل ۱۰-۱۷تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C-ET ۲۹۴
شکل ۱۰-۱۸تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر EKF-C-ET ۲۹۵

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شکل ۱۰-۱۹خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C-ET برای متغیر حالت اول ۲۹۶
شکل ۱۰-۲۰خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C-ET برای متغیر حالت دوم ۲۹۷
شکل ۱۰-۲۱خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C-ET برای متغیر حالت سوم ۲۹۸
شکل ۱۰-۲۲خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C-ET برای متغیر حالت چهارم ۲۹۹
شکل ۱۰-۲۳خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C-ET برای متغیر حالت پنجم ۳۰۰
شکل ۱۰-۲۴خطای RMSE تخمین‌گر EKF-C-ET برای متغیر حالت ششم ۳۰۱
شکل ۱۰-۲۵نشان‌گر تحریک ۳۰۲
شکل ۱۱-۱ تخمین متغیرحالت اول ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF-IE ۳۰۸
شکل ۱۱-۲ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF-IE ۳۰۹
شکل ۱۱-۳ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF-IE ۳۱۰
شکل ۱۱-۴ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF-IE ۳۱۱
شکل ۱۱-۵ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF-IE ۳۱۲
شکل ۱۱-۶ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CKF-IE ۳۱۳
شکل ۱۱-۷ خطای RMSE تخمین‌گر CKF-IE برای متغیر حالت اول ۳۱۴
شکل ۱۱-۸ خطای RMSE تخمین‌گر CKF-IE برای متغیر حالت دوم ۳۱۵
شکل ۱۱-۹ خطای RMSE تخمین‌گر CKF-IE برای متغیر حالت سوم ۳۱۶
شکل ۱۱-۱۰خطای RMSE تخمین‌گر CKF-IE برای متغیر حالت چهارم ۳۱۷
شکل ۱۱-۱۱خطای RMSE تخمین‌گر CKF-IE برای متغیر حالت پنجم ۳۱۸
شکل ۱۱-۱۲خطای RMSE تخمین‌گر CKF-IE برای متغیر حالت ششم ۳۱۹
شکل ۱۱-۱۳تخمین متغیرحالت اول ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CIF-IE-D ۳۲۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شکل ۱۱-۱۴تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CIF-IE-D..... ۳۲۴

شکل ۱۱-۱۵تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CIF-IE-D..... ۳۲۵

شکل ۱۱-۱۶تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CIF-IE-D..... ۳۲۶

شکل ۱۱-۱۷تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CIF-IE-D..... ۳۲۷

شکل ۱۱-۱۸تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور G13 توسط تخمین‌گر CIF-IE-D..... ۳۲۸

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱ تعریف شبکه هوشمند برق توسط مراجع مختلف ۲
جدول ۱-۲ مقایسه برخی از ویژگی‌های سامانه اسکادا و WAMS ۱۱
جدول ۱-۳ اسناد مرتبط با حوزه شبکه هوشمند و پیاده‌سازی کاربردهای سامانه WAMS ۳۴
جدول ۱-۴ اهداف خرد سند برنامه اقدامات توسعه فن‌آوری‌های شبکه هوشمند برق ایران ۴۰
جدول ۲-۱ تعداد مستندات مرتبط با "تخمین حالت در سیستم قدرت" در مجلات و کنفرانس‌ها ۵۵
جدول ۴-۱ نمادها و تعاریف ۸۷
جدول ۴-۲ پارامترهای مدل‌سازی بار ۹۱
جدول ۵-۱ الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم قدرت ۱۰۵
جدول ۵-۲ تنظیمات اولیه شبیه‌سازی ۱۰۶
جدول ۵-۳ الگوریتم پیشنهادی نمایش و خطی‌سازی سیستم به صورت سمبولیک ۱۳۳
جدول ۵-۴ مدهای نوسانی سیستم با ضریب میرایی پایین ۱۳۸
جدول ۶-۱ انواع استراتژی‌های تحریک-رویداد برای سیستم‌های خطی ۱۶۱
جدول ۷-۱ خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت مبتنی بر خطی‌سازی با قابلیت مقابله با همبستگی ۱۸۸
جدول ۷-۲ خلاصه الگوریتم پیشنهادی در تخمین‌گر محلی ۱۹۴
جدول ۷-۳ خلاصه الگوریتم پیشنهادی در تخمین‌گر مرکزی ۱۹۸
جدول ۸-۱ خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت مبتنی بر قانون مکعبی ۲۱۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۸-۲ خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت توزیع‌یافته مبتنی بر قانون مکعبی و روش اجماع ۲۲۵
جدول ۹-۱ مراحل و معادلات تخمین‌گر EKF ۲۳۰
جدول ۹-۲ عملکرد تخمین‌گر EKF ۲۵۴
جدول ۹-۳ مراحل و معادلات تخمین‌گر CKF ۲۵۵
جدول ۹-۴ عملکرد تخمین‌گر CKF ۲۶۹
جدول ۱۰-۱ مراحل و معادلات تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C ۲۷۱
جدول ۱۰-۲ عملکرد تخمین‌گر EKF-C ۲۸۶
جدول ۱۰-۳ مراحل و معادلات تخمین‌گر محلی پیشنهادی EKF-C-ET ۲۸۶
جدول ۱۰-۴ مراحل و معادلات تخمین‌گر مرکزی پیشنهادی EKF-C-ET ۲۸۷
جدول ۱۰-۵ عملکرد تخمین‌گر EKF-C-ET ۳۰۲
جدول ۱۰-۶ تأثیر آستانه تحریک بر نرخ ارسال و عملکرد تخمین‌گر EKF-C-ET ۳۰۳
جدول ۱۱-۱ مراحل و معادلات تخمین‌گر پیشنهادی CKF-IE ۳۰۷
جدول ۱۱-۲ عملکرد تخمین‌گر CKF-IE ۳۲۰
جدول ۱۱-۳ عملکرد تخمین‌گر CIF-IE ۳۲۱
جدول ۱۱-۴ مراحل و معادلات تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE-D ۳۲۱
جدول ۱۱-۵ عملکرد تخمین‌گر CIF-IE-D ۳۲۹
جدول ۱۱-۶ تأثیر تعداد گام‌های اجماع بر عملکرد تخمین‌گر CIF-IE-D ۳۲۹
جدول ۱۱-۷ مقایسه کلی روش‌های موجود و پیشنهادی ۳۳۱
جدول پ ۱-۱ داده‌های باس ۳۳۶

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول پ ۱-۲ داده‌های خط و ترانسفورماتور ۳۳۸
جدول پ ۱-۳ داده‌های ژنراتور ۳۴۲
جدول پ ۱-۴ داده‌های سیستم تحریک و توربین بخار ۳۴۳
جدول پ ۲-۱ مراحل و معادلات فیلتر کالمن استاندارد ۳۴۶
جدول پ ۲-۲ مراحل و معادلات فیلتر کالمن توسعه‌یافته ۳۴۷
جدول پ ۲-۳ مراحل و معادلات فیلتر کالمن بی‌رد ۳۴۸
جدول پ ۲-۴ مراحل و معادلات فیلتر کالمن مکعبی ۳۵۰
جدول پ ۲-۵ مراحل و معادلات فیلتر ذره‌ای ۳۵۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مقدمه

سیستم قدرت امروزی به دلیل رشد روزافزون بار و در پی آن تولید انرژی و از سویی دیگر کافی‌نبودن میزان رشد ظرفیت خطوط انتقال و توزیع به میزان مورد نیاز، تحت فشار بوده و لذا در نزدیکی مرز بیشینه ظرفیت خود بهره‌برداری می‌شود. از طرف دیگر در دهه‌های اخیر، تغییر و تحولات گسترده‌ای در سیستم قدرت به وجود آمده است. در این زمینه می‌توان به گسترش نفوذ منابع انرژی پراکنده[۱] (*DER*) و ریزشبکه‌ها[۲]، گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، فعال‌سازی و بهره‌برداری از روش‌های مدیریت پاسخ تقاضا[۳]، توسعه خودروهای برقی و غیره اشاره نمود. با وارد شدن تمامی این تغییرات و افزوده شدن سایر روش‌ها، تجهیزات و فن‌آوری‌های نوین به شبکه برق، "شبکه هوشمند[۴]" به عنوان نسل جدیدی از شبکه‌های برق پا به عرصه وجود گذاشته است. طبق تعریف کارگروه شبکه هوشمند اروپا[۵]، شبکه هوشمند شبکه‌ای است که به صورت کارآمد بر عملکرد کلیه کاربران این شبکه شامل مولدها، مصرف‌کننده‌ها و انتقال‌دهندگان برق، نظارت می‌کند تا از راندمان اقتصادی بالا، پایداری شبکه قدرت، تلفات پایین، کیفیت و امنیت بالا و راحتی تولید انرژی اطمینان یابد. برای بهره‌برداری امن شبکه هوشمند به داده‌های قابل اطمینانی از متغیرهای مهم شبکه، بیشتر از آن چیزی که از اندازه‌گیری‌های مستقیم شبکه حاصل می‌شود نیاز است. متغیرهای مهم سیستم نشان‌دهنده شرایط بهره‌برداری سیستم نسبت به مرز پایداری و سلامت تجهیزات و هم‌چنین اقدامات کنترلی و بهره‌برداری لازم می‌باشند. بنابراین لازم است که توابع و قابلیت‌های جدیدی به مراکز دیسپاچینگ[۶] افزوده شوند. یکی از این قابلیت‌ها که نقش بسیار اساسی در سیستم مدیریت انرژی (*EMS*[۷]) دارد، قابلیت *تخمین حالت*[۸] می‌باشد.

---

۱ Distributed Energy Resources

۲ Microgrid

۳ Demand Response Management

۴ Smart Grid

۵ European SG Task Force

۶ Dispatching

۷ Energy Management System

۸ State Estimation

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

چنان‌چه می‌دانیم، نمایش فضای حالت[۱] یک سیستم دینامیکی برخلاف توصیف تابع تبدیل[۲] سیستم که تنها رابطه بین خروجی و ورودی یک سیستم دینامیکی را نمایش می‌دهد، رابطه بین متغیرهای داخلی سیستم دینامیکی را نیز نمایش می‌دهد. این متغیرهای داخلی سیستم دینامیکی (که متغیرهای حالت[۳] سیستم نامیده می‌شوند) برخلاف متغیرهای ورودی و خروجی، همیشه قابل اندازه‌گیری نیستند. این متغیرها را می‌توان توسط یک تخمین‌گر حالت[۴] (رؤیت‌گر یا مشاهده‌گر حالت[۵]) تخمین زد. تخمین حالت فرآیندی است که بر اساس مدل فضای حالت سیستم و اندازه‌گیری‌های ورودی و خروجی‌های سیستم به تخمین مقادیر متغیرهای حالت سیستم مورد نظر می‌پردازد. در سیستم‌های واقعی مانند شبکه برق، در اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده از سیستم خطا وجود دارد. علاوه بر این، ممکن است برخی از اندازه‌گیری‌ها اضافی[۶] باشند. در تخمین حالت در شبکه برق، اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده از سیستم‌های اسکادا[۷] و یا واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU[۸]) به مراکز دیسپاچینگ فرستاده می‌شوند. تخمین‌گر حالت بر اساس این اندازه‌گیری‌ها و فیلتر نمودن نویز موجود در آن‌ها به تخمین متغیرهای حالت سیستم می‌پردازد. استفاده از نظریه تخمین حالت در شبکه برق برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ توسط شوئپه[۹] انجام شد. از آن زمان تاکنون، روش‌های مختلفی در این زمینه ارائه شده‌اند.

روش‌های تخمین حالت را می‌توان به دو دسته تخمین حالت استاتیکی[۱۰] و دینامیکی[۱۱] تقسیم‌بندی نمود. درصورتی‌که بردار حالت سیستم در زمان k تنها از اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده در همان زمان k تخمین زده شود، تخمین‌گر حالت استاتیکی می‌باشد. در این زمینه می‌توان به روش کمترین مربعات وزن‌یافته

---

۱ State Space

۲ Transfer Function

۳ State Variables

۴ State Estimator

۵ State Observer

۶ Redundant

۷ Scada (Supervisory Control And Data Acquisition)

۸ Phasor Measurement Unit

۹ Schweppe

۱۰ Static State Estimation (SSE)

۱۱ Dynamic State Estimation (DSE)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

(*WLS*[1]) اشاره نمود. از آن‌جایی که در روش استاتیکی، از اطلاعات مقادیر بردار حالت تخمین‌زده‌شده و اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های قبلی استفاده نمی‌شود، لازم است که عملیات تخمین حالت استاتیکی در زمان $k+1$ نیز به طور کامل اجرا شود. درنتیجه، بار محاسباتی این روش به علت افزایش روزافزون مقیاس و پیچیدگی سیستم قدرت امروزی افزایش می‌یابد. برای غلبه بر این مشکل، از روش‌های تخمین حالت دینامیکی استفاده می‌شود. در روش دینامیکی، بردار حالت در زمان k به صورت بازگشتی و از روی مقادیر تخمین‌زده شده در زمان قبل $k-1$ و مقادیر اندازه‌گیری زمان k به‌روزرسانی می‌شود. بار محاسباتی پایین‌تر و قابلیت پیش‌بینی از مزایای روش دینامیکی نسبت به روش استاتیکی می‌باشند.

سیستم‌های اسکادای متداول کنونی که در سیستم *EMS* به کار می‌روند، قادر به اجرای عملیات پایش و کنترل ابتدایی در نواحی با مقیاسی کوچک‌تر در مقایسه با سامانه‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده[2] (*WAMS*) می‌باشند. علاوه بر این، سیستم‌های اسکادا به علت نرخ پایین در جمع‌آوری داده و مشاهدات آسنکرون قادر به تخمین حالت دینامیکی دقیق از سیستم قدرت نمی‌باشند. پیشرفت‌های سریع در فن‌آوری اطلاعات و ارتباطات (*ICT*[3]) و ابداع روش اندازه‌گیری فازوری سنکرون به کمک *PMU*ها با نرخ نمونه‌برداری بالا و استفاده از سیگنال هم‌زمان‌کننده سامانه موقعیت‌یاب جهانی (*GPS*[4])، تحول شگرفی در پایش و کنترل شبکه‌های گسترده و به‌هم‌پیوسته قدرت ایجاد نموده‌اند. به بیان دیگر، برای رسیدن به سرعت بالاتر در پایش اطلاعات در سیستم‌های *WAMS* از واحدهای *PMU* زمان-واقعی[5] با برچسب زمانی و مجهز به *GPS* استفاده می‌شود. بنابراین، مسأله تخمین حالت دینامیکی زمان-واقعی بر اساس اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده از *PMU*ها (سنکروفازورها[6]) به یکی از مسائل مهم روز تبدیل شده است.

یکی از چالش‌های موجود در این زمینه این است که تخمین حالت دینامیکی بر اساس سنکروفازورها نیازمند قابلیت اطمینان[7] بالا و تأخیر زمانی کوچک در لینک‌های ارتباطی بین شبکه هوشمند و مراکز تخمین حالت می‌باشد. با وجود این که افزایش پهنای باند لینک‌های ارتباطی به عنوان یک راه‌حل بدیهی

---

[1] Weighted Least Square

[2] Wide Area Monitoring System

[3] Information and Communications Technology

[4] Global Positioning System

[5] Real-Time

[6] Synchrophasor

[7] Reliability

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

برای این مسأله به نظر می‌رسد، مسائلی مانند هزینه بالا و نیاز به مدت زمان بسیار طولانی برای ارتقاء تمامی لینک‌های ارتباطی، مؤید این مطلب هستند که رویکردهای دیگری برای حل این مسأله مورد نیاز می‌باشند.

چالش دیگری که در زمینه تخمین حالت دینامیکی در شبکه هوشمند وجود دارد، غیرخطی‌گری بسیار بالای سیستم قدرت می‌باشد. این غیرخطی‌گری با گسترش منابع پراکنده، ریزشبکه‌ها و انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یافته است. با وجود این که تاکنون از روش‌های غیرخطی مختلفی مانند فیلتر کالمن توسعه‌یافته[۱] (*EKF*) و یا فیلتر کالمن بی‌رد[۲] (*UKF*) برای تخمین حالت در شبکه قدرت استفاده شده است، تحقیقات در زمینه طراحی یک تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مناسب برای شبکه قدرت ادامه دارد.

با توجه به مسائل بیان شده، طراحی یک تخمین‌گر حالت دینامیکی غیرخطی با قابلیت کاهش تأخیر و بهبود عملکرد و قابلیت اطمینان در حضور محدودیت‌های ارتباطی شبکه هوشمند هدف اصلی این پروژه می‌باشد. رویکردهای مختلفی را می‌توان برای رسیدن به این هدف مدنظر قرار داد که از آن میان می‌توان به تخمین حالت غیرخطی به روش توزیع‌یافته[۳] و تخمین حالت غیرخطی بر اساس روش تحریک-رویداد[۴] اشاره نمود.

چنان‌چه گفته شد، در شبکه برق هوشمند با مقیاس وسیع، یک تخمین‌گر حالت سریع و دقیق مورد نیاز می‌باشد. هرچند در چنین شبکه‌ای، بردار اندازه‌گیری‌ها و بردار متغیرهای حالت ابعاد بسیار بزرگی خواهند داشت. برای این که بردار حالت کل سیستم در تمامی نواحی در دسترس باشد، لازم است که حجم بسیار بزرگی از داده‌ها از *PMU*ها به مراکز تخمین حالت متمرکز انتقال یابند. در این صورت، لینک‌های ارتباطی بسیار پرهزینه‌ای مورد نیاز خواهند بود. انتقال داده در حجم زیاد و در فواصل طولانی مصرف انرژی بسیار بالایی را در پی داشته و همچنین احتمال تلفات داده را افزایش خواهد داد. یک راه‌حل جایگزین برای حل این مسأله استفاده از ساختار غیرمتمرکز می‌باشد؛ به این صورت که شبکه وسیع برق به نواحی کوچک‌تر تقسیم شده و در هر ناحیه از یک تخمین‌گر حالت محلی[۵] برای به دست آوردن تخمین حالت سراسری[۶]

---

[۱] Extended Kalman Filter

[۲] Unscented Kalman Filter

[۳] Distributed

[۴] Event-Trigger

[۵] Local

[۶] Global

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

استفاده شود. در یک ساختار کاملاً غیرمتمرکز و بدون پردازشگر مرکزی، هر تخمین‌گر محلی تنها با تخمین‌گرهای در همسایگی خود به تبادل داده می‌پردازد. روش تخمین حالت توزیع‌یافته مزایای قابل توجهی نسبت به روش متمرکز دارد که از آن میان می‌توان کاهش چشم‌گیر پیچیدگی محاسباتی و افزایش قابلیت اطمینان و قوام[1] سیستم را نام برد. با توجه به این توضیحات، طراحی یک تخمین‌گر حالت دینامیکی غیرخطی توزیع‌یافته برای غلبه بر غیرخطی‌گری بالای مدل سیستم قدرت و کاهش بار محاسباتی و ارتباطی به عنوان یک راه‌حل برای مقابله با چالش‌های مذکور پیشنهاد می‌شود.

از طرف دیگر، روش تخمین حالت بر اساس تحریک-رویداد که یک استراتژی زمان‌بندی برای افزایش فاصله انتقال اطلاعات در الگوریتم تخمین حالت می‌باشد، مزایایی مانند کاهش بار ارتباطی و حجم داده‌های انتقالی در عین حفظ دقت و پایداری تخمین‌گر دارد. در این روش، تنها در صورت وقوع یک رویداد خاص، اطلاعات به‌دست‌آمده از *PMU*ها به تخمین‌گر انتقال می‌یابند. درنتیجه، با توجه به غیرخطی‌گری بالای سیستم قدرت و محدودیت لینک‌های ارتباطی، طراحی یک تخمین‌گر غیرخطی بر اساس تحریک-رویداد برای تخمین حالت شبکه هوشمند به عنوان راه‌حلی برای حل چالش‌های موجود در این زمینه پیشنهاد می‌شود. طراحی چنین تخمین‌گری مستلزم طراحی یک قانون[2] تحریک مناسب و همچنین یک الگوریتم تخمین غیرخطی مناسب بر اساس تحریک-رویداد می‌باشد.

تاکنون پژوهش‌های مختلفی در قالب مقاله یا پایان‌نامه در زمینه طراحی تخمین‌گر حالت دینامیکی در شبکه هوشمند در نقاط مختلف دنیا ارائه شده است. هرچند استفاده از استراتژی تحریک-رویداد در تخمین‌گرهای غیرخطی و توزیع‌یافته یکی از مسائل باز و پراهمیت می‌باشد که تا کنون به صورت عملی در صنعت پیاده‌سازی نشده است. شرکت‌های مختلفی در دنیا ماژول‌های تخمین حالت قابل عرضه ارائه می‌کنند. البته قیمت این ماژول‌ها بسیار بالا می‌باشد. به طور مثال قیمت ماژولی که توسط شرکت *DigSILENT* ارائه می‌شود، در حالت تک‌کاربره برابر با ۲۰ هزار یورو بوده و در حالت دوکاربره بالغ بر ۳۵ هزار یورو می‌باشد. با توجه به بالا بودن این مبالغ، طراحی یک نمونه بومی از ماژول تخمین حالت به عنوان گام‌های بعد از این پروژه پیشنهاد می‌شود و توجیه اقتصادی دارد.

[1] Robustness

[2] Trigger Law

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل اول: شبکه هوشمند و سامانه اندازه‌گیری ناحیه‌گسترده

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۱-۱- مقدمه

در این فصل، شبکه هوشمند برق، سامانه اندازه‌گیری ناحیه گسترده (*WAMS*) و اجزای تشکیل‌دهنده آن به تفکیک شرح داده می‌شوند. سپس اسناد بالادستی کشور که مرتبط با حوزه شبکه هوشمند و پیاده‌سازی کاربردهای سامانه *WAMS* می‌باشند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. بدین وسیله، ضرورت پرداختن به مسأله تخمین حالت در شبکه‌های انتقال با استفاده از سامانه *WAMS* که موضوع پروژه حاضر می‌باشد، توجیه می‌شود.

۱-۲- شبکه هوشمند برق

تعاریف و رویکردهای مختلفی نسبت به شبکه هوشمند برق وجود دارد. اما آن‌چه به طور کلی مشخص است، شبکه هوشمند به دنبال افزایش سطح مشاهده‌پذیری[۱] (رؤیت‌پذیری) و کنترل‌پذیری[۲] مدیریت انرژی در تمامی سطوح تولید، انتقال، توزیع و مصرف می‌باشد. شبکه هوشمند تنها به معنای به‌کارگیری مجموعه‌ای از سیستم‌ها و ابزارها به منظور مدیریت شبکه نیست؛ بلکه بیان‌گر دست‌یابی به شبکه‌ای امن و پایدار، انعطاف‌پذیر، بهینه و با کارایی بالا و ایمن نیز می‌باشد. این شبکه، تأمین‌کننده بسیاری از نیازهای جدید ذی‌نفعان شبکه است. به طور کلی می‌توان گفت شبکه هوشمند برق حاصل افزوده‌شدن فن‌آوری‌های ارتباطات دوطرفه به شبکه سنتی برق است که زمینه‌ساز به‌کارگیری فن‌آوری‌های متعدد برای ایجاد قابلیت‌های جدید به شبکه برق می‌شود. تعاریف متعددی توسط مراجع معتبر در جهان ارائه شده است که در جدول ۱-۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱-۱ تعریف شبکه هوشمند برق توسط مراجع مختلف

شرح	مرجع
An automated, widely distributed energy delivery network characterized by a two-way flow of electricity and information, capable of monitoring and responding to changes in everything from power plants to customer preferences to individual appliances.	IEEE (Heile, 2009)
“Smart Grid” is one of the major trends and markets which involves the whole energy conversion chain from generation to consumer. The power flow will change from a unidirectional power flow (from centralized generation via the transmission grids and distribution grids to the customers) to a bidirectional power flow. Furthermore, the way a power system is operated changes from the hierarchical top-down approach to a distributed control. One of the main points about Smart Grid is an increased level of observability and controllability of a complex power system. This can only be achieved by an increased level of information sharing between the individual components and sub-systems of the power system.	IEC Smart Grid Standardization Roadmap (2010)

[۱] Observability

[۲] Controllability

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مرجع	شرح
	Standardization plays a key role in providing the ability of information sharing which will be required to enable the development of new applications for a future power system.
US Department of Energy (Mohsenian-Rad, 2011)	A smart grid is an electricity network that uses digital and other advanced technologies to monitor and manage the transport of electricity from all generation sources to meet the varying electricity demands of end-users.
European Technology Platform for Smart Grids (ETPS, 2006)	Smart grid generally refers to a class of technologies that people are using to bring utility electricity delivery systems into the 21st century, using computer-based remote control and automation. These systems are made possible by two-way digital communications technologies and computer processing that has been used for decades in other industries. They offer many benefits to utilities and consumers – mostly seen in big improvements in energy efficiency and reliability on the electricity grid and in energy users' homes and office.
Standards Australia	Smart grid is an electricity system incorporating electricity and communications networks, which can intelligently integrate the actions of parties connected to it.
International Energy Agency (OECD/IEA, 2015)	Smart grid is an electricity network system that uses digital technology to monitor and manage the transport of electricity from all generation sources to meet the varying electricity demands of end-users. Such grids can coordinate the needs and capabilities of end-users and electricity market stakeholders in such a way that they can optimise asset utilisation and operation and, in the process, minimise both costs and environmental impacts while maintaining system reliability, resilience and stability.
The Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA)	An electricity network that can intelligently integrate the actions of all users connected to it - generators, consumers and those that do both - in order to efficiently deliver sustainable, economic and secure electricity supplies. A smart grid employs innovative products and services together with intelligent monitoring, control, communication, and self-healing technologies in order to: Better facilitate the connection and operation of generators of all sizes and technologies; Allow consumers to play a part in optimising the operation of the system; Provide consumers with greater information and options for choice of supply; Significantly reduce the environmental impact of the whole electricity supply system; Maintain or even improve the existing high levels of system reliability, quality and security of supply; Maintain and improve the existing services efficiently; Foster market integration towards European integrated market.
European Commission, 2012	A modernization of the Nation's electricity transmission and distribution system to maintain a reliable and secure electricity infrastructure that can meet future demand growth and achieve the ultimate goals that together define a Smart Grid.
Electric Power Research Institute (EPRI)	A Smart Grid is one that incorporates information and communications technology into every aspect of electricity generation, delivery and consumption in order to minimize environmental impact, enhance markets, improve reliability and service, and reduce costs and improve efficiency.
National Institute of Standards and Technology (NIST, 2019)	A modernized grid that enables bidirectional flows of energy and uses two-way communication and control capabilities that will lead to an array of new functionalities and applications.
Independent Electricity System Operator (IESO, 2010)	A smart grid is a modern electricity system. It uses sensors, monitoring, communications, automation and computers to improve the exibility, security, reliability, eficiency, and safety of the electricity system.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شرح	مرجع
The smart grid takes the existing electricity delivery system and makes it ‘smart’ by linking and applying seamless communications systems that can: gather and store data and convert the data to intelligence; communicate intelligence omnidirectionally among components in the ‘smart’ electricity system; and allow automated control that is responsive to that intelligence.	National Association of Regulatory Utility Commissioners (NARUC, 2009)
Smart Grid is to further develop the electrical power grid so that it can handle a large proportion of renewable electricity production, such as wind and solar, as well as new loads, such as electric vehicles. This means that the flexibility in the electrical power grid must increase	ABB Company
شبکه هوشمند برق حاصل افزوده‌شدن فن‌آوری‌های اطلاعات و ارتباطات (فاوا) و اینترنت اشیاء به شبکه سنتی برق و فراهم‌آمدن امکان جریان دوسویه داده و انرژی میان مشترکین و شبکه برق است که زمینه‌ساز به‌کارگیری فن‌آوری‌های متعدد برای ایجاد قابلیت‌های جدید در شبکه برق می‌شود. به طور کلی شبکه هوشمند بر نیازمندی‌های مشترکی صحه می‌گذارد که عبارت‌اند از: تأمین و مصرف کارا و پایدار برق بهره‌مندی از سیستم مقیاس گسترده تأمین برق بر اساس فن‌آوری‌های مدرن و پیشرفته فاوا ارتقاء و گذار زیرساخت‌های موجود به زیرساختی نوین، پویا و کارآمد یکپارچه‌سازی مولدهای پراکنده و تجهیزات ذخیره انرژی یکپارچه‌سازی مصرف‌کننده‌ها به صورت تولیدکننده استفاده از تجهیزات هوشمند و مزایای آن به‌کارگیری فن‌آوری‌های عملیات غیرمتمرکز شبکه بهره‌مندی از محصولات و خدمات بازارهای جدید انرژی به‌کارگیری و ارتقاء فن‌آوری‌ها و خدمات فاوا بر اساس عملیات مدیریت به منظور توسعه سیستم‌های مدیریت انرژی، سیستم‌های مدیریت شبکه و غیره	سند راهبرد ملی توسعه دانش‌بنیان شبکه هوشمند برق ایران (شورای عالی علوم، تحقیقات و فن‌آوری، ۱۳۹۵)

می‌توان گفت که برداشت تعاریف مختلف از شبکه هوشمند برق بر اساس سه رویکرد متفاوت صورت می‌گیرد که عبارت‌اند از:

- رویکرد اول تعریف بر اساس الزاماتی است که شبکه هوشمند می‌بایست محقق کند. این الزامات، مدیریت بهینه نقطه پیک، خود ترمیمی[1]، مدیریت انرژی مصرف‌کننده نهایی و غیره می‌باشند.
- رویکرد دوم بر مبنای فن‌آوری‌های کاربردی است که شبکه می‌بایست دارا باشد. این فن‌آوری‌ها

[1] Self Healing

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شامل کنتورهای هوشمند[۱] (*AMI*) و غیره است.

- رویکرد سوم نیز بر اساس کاربردهای مطلوب خواسته‌شده از شبکه هوشمند است که شامل کاربردهای *plug and play* است.

با مطالعه این تعاریف و شناخت فن‌آوری‌های آن درخواهیم یافت که تقریباً همه تعاریف شبکه هوشمند بر نیازمندی‌های مشترکی صحه می‌گذارند که عبارت‌اند از:

- یکپارچه‌سازی مولدهای پراکنده و تجهیزات ذخیره انرژی
- سیستم مقیاس گسترده تأمین برق بر اساس *ICT* مدرن و پیشرفته
- تأمین کارا و پایدار برق
- ارتقاء و گذار زیرساخت‌های موجود به یک سیستم کلی جدید فن‌آوری‌های عملیات غیرمتمرکز شبکه
- یکپارچه‌سازی مصرف‌کننده‌ها به صورت تولیدکننده (*Prosumer*)
- به کاربردن هوشمندانه تجهیزات هوشمند
- محصولات و خدمات بازارهای انرژی جدید
- به‌کارگیری و ارتقاء *ICT* بر اساس عملیات مدیریت برای سیستم‌های *EMS* و سیستم‌های مدیریت توزیع[۲] (*DMS*)

بدین‌ترتیب انتظار می‌رود که با استفاده از فن‌آوری‌های شبکه هوشمند برق، زنجیره تأمین انرژی از مولدها و نیروگاه‌ها تا مصرف‌کننده نهایی متحول گردد. با تغییرات فن‌آوری‌ها و نیازهای جامعه، زنجیره تأمین صنعت برق از شکل سنتی یک‌طرفه، متمرکز و سلسله‌مراتبی[۳] به شکلی غیرمتمرکز، شبکه‌ای و خودکار تغییر پیدا خواهد نمود. شکل ۱-۱ تحول زنجیره تأمین سنتی شبکه برق را نشان می‌دهد. شبکه برق به

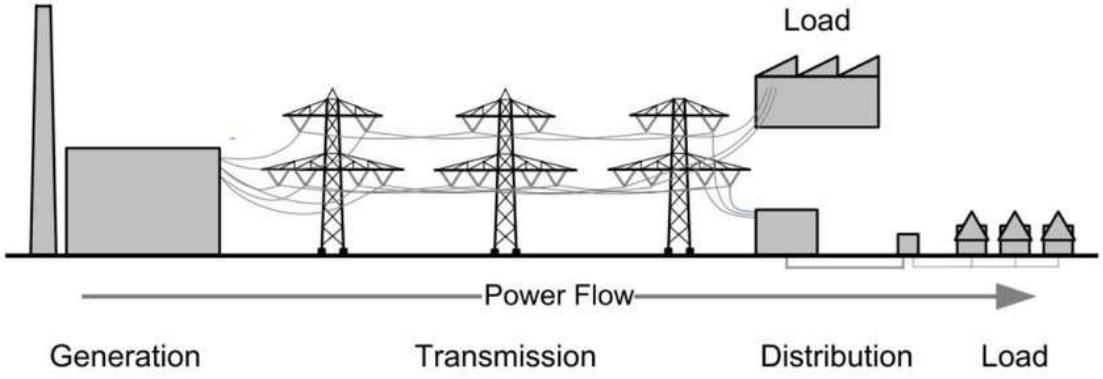
[۱] Advanced Metering Infrastructure

[۲] Distribution Management System

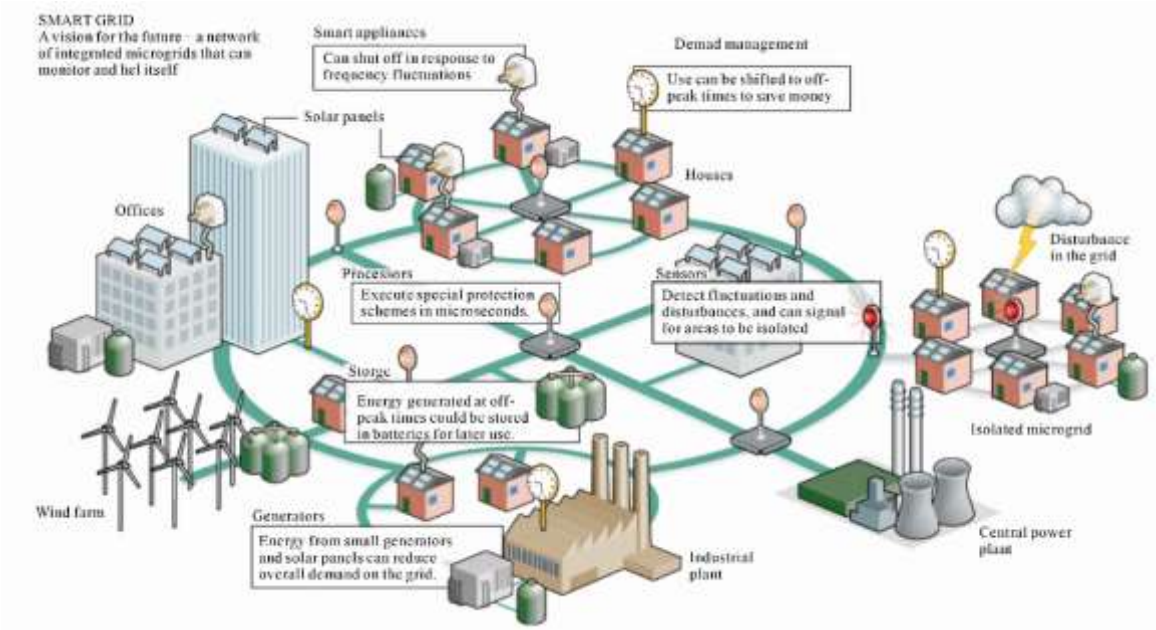
[۳] Hierarchical

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شکلی گسترده‌تر، مجهزتر و با اتصالات متقابل بیشتر درآمده و سیستم‌های توزیع هوشمند، توانمندی‌های مشترکین و نیروگاه‌ها را افزایش می‌دهند [۱]–[۳].



(الف)



(ب)

شکل ۱-۱ ساختار شبکه برق

(الف) ساختار سنتی، (ب) ساختار هوشمند

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شبکه هوشمند برق دارای ضرورت‌های متعددی در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است که اهم موارد آن عبارت‌اند از [۴], [۵]:

- ارتقاء کارایی و قابلیت اطمینان شبکه انتقال و توزیع برق
- کاهش تلفات شبکه انتقال و توزیع برق
- تعویق سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت‌های جدید تولید، انتقال و توزیع
- مدیریت بهینه دارایی‌ها و صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی
- کاهش میزان اوج مصرف
- مدیریت بهینه مصرف انرژی
- ایجاد زیرساختی جهت توسعه مولدهای پراکنده اعم از مولدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP[۱]) و موادهای تجدیدپذیر
- ارتقاء سطح پایداری و امنیت انرژی
- ارائه خدمات بهتر و ارتقاء سطح رضایت‌مندی مشترکین برق
- استفاده از زیرساخت ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات
- کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی

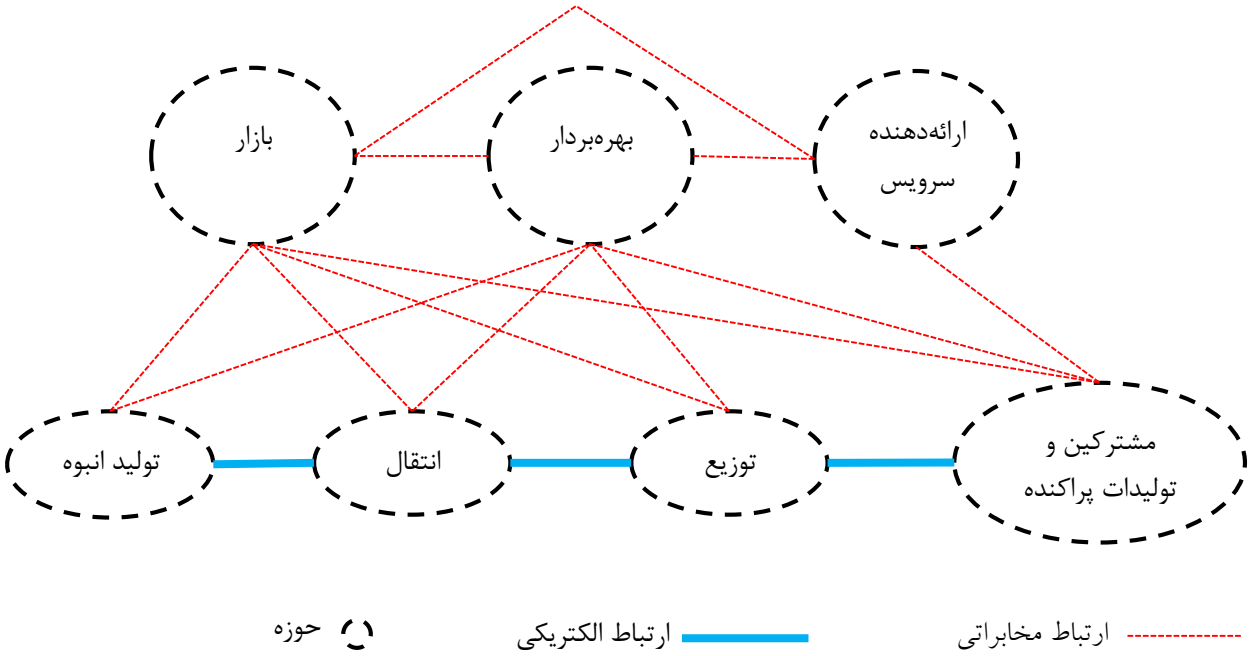
۱-۲-۱- زیرسیستم‌های شبکه هوشمند برق

سیستم قدرت را می‌توان بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین ماشین (سیستم) ساخته‌شده توسط انسان دانست که امروزه با پیدایش مفهوم شبکه هوشمند برق، پیچیدگی آن دوچندان شده است. در حالت کلی برای شناسایی یک سیستم پیچیده، آن را می‌توان به سیستم‌های کوچک‌تری تقسیم نمود؛ به‌گونه‌ای که هر یک از این زیرسیستم‌ها دارای وظایف و عملکردهای همگنی باشند. اولین گام در تعیین زیرسیستم‌های شبکه هوشمند برق، تعیین حوزه‌های آن است. در این راستا می‌توان حوزه مشترکین، ارائه‌دهنده سرویس، بازار،

[۱] Combined Heat and Power

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

تولید، انتقال، توزیع و بهره‌برداری را تعریف نمود [۶]–[۹]. حوزه‌ها و ارتباط بین آن‌ها در شکل ۱-۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱-۲ حوزه‌های مختلف شبکه هوشمند برق و ارتباط بین آن‌ها

۱ ۱ ۲ ۱ حوزه تولید انبوه

منابع تولید در این حوزه به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

- واحدهای تجدیدپذیر و متغیر مانند مزارع بادی و نیروگاه‌های خورشیدی: عدم قطعیت برنامه‌ریزی تولید در این واحدها مهم‌ترین چالش بهره‌برداری از آن‌ها است.
- واحدهای تجدیدپذیر و نامتغیر مانند نیروگاه‌های آبی، زیست‌توده و تلمبه-ذخیره‌ای: این واحدها علی‌رغم اتکا به منابع تجدیدپذیر، می‌توانند با عدم قطعیت اندک در برنامه‌ریزی تولید مشارکت نمایند.
- واحدهای غیرتجدیدپذیر و نامتغیر مانند نیروگاه‌های گازی، بخاری، سیکل ترکیبی، دیزلی و هسته‌ای: این واحدها در حال حاضر ستون اصلی تولید برق هستند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

زیرسیستم‌های کنترل، حفاظت، پایش و اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات و غیره از جمله بخش‌های ارتباطات مخابراتی در این حوزه هستند.

۲۱۲۱ حوزه انتقال

حوزه انتقال واسط الکتریکی بین حوزه‌های تولید و توزیع است. از مهم‌ترین ادوات و سیستم‌های این حوزه می‌توان به ترانسفورماتورها، رله‌های حفاظتی، کلیدها، سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر[۱]، *PMU*ها، سامانه اسکادا و اتوماسیون پست و غیره اشاره نمود. در واقع، شبکه هوشمند می‌تواند شبکه انتقال را مشاهده‌پذیرتر نموده و همچنین اتوماسیون سیستم مخصوصاً اتوماسیون پست‌های فشارقوی را تسهیل نماید. سامانه پایش، حفاظت و کنترل ناحیه گسترده[۲] (*WAMPAC*) بر مبنای اندازه‌گیری‌های سراسری در شبکه برق توسط *PMU*ها منجر به هوشمند شدن هرچه بیشتر شبکه برق در حوزه انتقال شده‌اند؛ زیرا با کمک سامانه *WAMPAC*، پیاده‌سازی بسیاری از برنامه‌های کنترلی و حفاظتی هوشمند میسر شده است.

۲۱۲۱ حوزه توزیع

شبکه هوشمند کارکردهای متنوعی در سیستم توزیع دارد که از آن جمله می‌توان به سیستم‌های پایش ترانسفورماتورها، سیستم تشخیص عیب[۳]، سیستم‌های مانور و تغییر پیکربندی به صورت خودکار و یا کنترل از راه دور، سیستم پایش و کنترل منابع تولید و یا ذخیره‌سازی پراکنده و همچنین خودروهای برقی، سیستم‌های مربوط به پایش و کنترل کلید و کنترل ولتاژ اشاره نمود.

۲۱۲۱ حوزه مشترکین و تولیدات پراکنده

حوزه مشترکین به طور کلی به سه زیرحوزه خانگی، صنعتی و تجاری تقسیم می‌شود. دستگاه اندازه‌گیری (کنتور) نقش رابط بین مشترک و دیگر حوزه‌ها را ایفا می‌کند. کنتورهای هوشمند با اندازه‌گیری انرژی مصرفی، ولتاژ و پارامترهای مربوط به کیفیت توان و ارسال داده مربوطه، با استفاده از بستر مهیاشده از طریق سیستم *AMI*، نقش مهمی در ارتقاء کیفیت توان و پایایی و تسهیل امور مربوط به توزیع ایفا می‌کنند [۱۰]. یکی دیگر از زیرسیستم‌های مهم در حوزه مشترکین، ذخیره‌سازی و تولید پراکنده است. منابع تولید

[۱] Flexible AC Transmission System

[۲] Wide Area Monitorinh, Protection and Control

[۳] Fault Detection

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پراکنده را می‌توان با استفاده از زیرساخت‌های شبکه هوشمند برق به صورت کارآمد مدیریت نمود. علاوه بر این، می‌توان از این منابع در قالب ریزشبکه و به صورت بهینه بهره‌برداری نمود.

۱۲۱۵ حوزه بازار

تفاوت بازار برق با دیگر بازارها در این است که محصول ارائه شده که همان برق است باید در هر لحظه مصرف شود و به بیان دیگر در لحظه تعادل تولید و مصرف برقرار است. این ویژگی، نیاز به بهره‌گیری از شبکه هوشمند برق را آشکار می‌نماید؛ زیرا عملیات مربوط به بازار مانند: جمع‌آوری داده‌ها و پیشنهادهای خرید و فروش، تسویه بازار و غیره باید بسیار سریع و دقیق انجام شوند. هرچه شبکه هوشمند گسترده‌تر باشد، بر تعداد شرکت‌کنندگان در این حوزه افزوده می‌شود و بازار از حالت انحصاری به بازار کاملاً رقابتی نزدیک‌تر می‌شود. نیروگاه‌های سنتی بزرگ و منابع تولید پراکنده مهم‌ترین عرضه‌کنندگان در بازار برق هستند.

۱۲۱۶ حوزه بهره‌برداری

در بهره‌برداری از سیستم انتقال، از سیستم‌های *EMS* و در حوزه توزیع از سیستم‌های *DMS* بهره‌گیری می‌شود. از زیرسیستم‌های مربوط به این بخش می‌توان به سیستم‌های پایش شبکه، مدیریت عیب[۱]، کنترل و تحلیل شبکه، محاسبات پایایی، آموزش پرسنل بخش بهره‌برداری و تهیه آمارها و گزارش‌های مربوط به بهره‌برداری اشاره نمود.

۱۲۱۷ حوزه ارائه‌دهنده سرویس

خدمات این حوزه به دو دسته کلی خدمات اصلی و جانبی تقسیم می‌شوند. بخش‌های ارتباط با مشترکین، نصب و تعمیرات جانبی، صدور صورت‌حساب و غیره از خدمات اصلی مربوط به مشترکین هستند. هرچه به سمت تکمیل هوشمندسازی شبکه برق حرکت شود، مسلماً خدمات بیشتری قابل ارائه و پیاده‌سازی خواهند بود. به عنوان مثال، کنترل خودکار مصرف انرژی مشترکین مسکونی از جمله این خدمات است که در آینده در دنیا پیاده‌سازی خواهد شد.

۱-۳- سامانه اندازه‌گیری ناحیه گسترده

در کنار سامانه اسکادا، به‌تازگی سامانه دیگری به نام سامانه اندازه‌گیری ناحیه گسترده (*WAMS*) مطرح شده است که هدف آن جبران کاستی‌های موجود در سامانه اسکادا است. در ادامه، توضیح مختصری در

[۱] Fault Management

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

ارتباط با ساختار سامانه *WAMS* داده شده و کاربردهای آن در شبکه‌های هوشمند برق بررسی می‌شوند. در جدول ۱-۲، ویژگی‌های دو سامانه اسکادا و *WAMS* مقایسه شده‌اند.

جدول ۱-۲ مقایسه برخی از ویژگی‌های سامانه اسکادا و *WAMS*

ویژگی	سامانه اسکادا	سامانه *WAMS*
نرخ اندازه‌گیری	۱ نمونه در هر ۲ تا ۴ ثانیه	۱۰ تا ۶۰ نمونه در هر ثانیه
سنکرون‌سازی	خیر	بلی
اندازه‌گیری زاویه ولتاژ و جریان	خیر	بلی
پایش دینامیکی سیستم قدرت	خیر	بلی
تجزیه و تحلیل عیب	تجزیه و تحلیل به صورت آفلاین[۱] و بعد از رخداد عیب	تجزیه و تحلیل در حالت زمان-واقعی

۱-۳-۱- ساختار سامانه اندازه‌گیری ناحیه گسترده

ایده اصلی سامانه‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده، جمع‌آوری داده‌ها از نقاط مختلف سیستم قدرت است که به صورت هم‌زمان و همگام‌شده نمونه‌برداری می‌شوند. هدف از تحلیل این داده‌ها، ارزیابی شرایط بهره‌برداری واقعی سیستم در هر لحظه و مقایسه متغیرهای شبکه (مقادیر ولتاژ، جریان و زوایای آن‌ها، توان اکتیو و راکتیو) با حدود استاندارد یا مقادیر از پیش تعیین شده است. همچنین به کمک الگوریتم‌های معینی، حاشیه امنیت پایداری سیستم از مرز پایداری، تخمین زده شده و به طور کلی همه شاخص‌های مورد نیاز جهت ارزیابی وضعیت سیستم تعیین می‌شود [۱۱]–[۱۹].

شکل ۱-۳ ساختار کلی سامانه *WAMS* را نشان می‌دهد. در شکل (الف) از یک متمرکزکننده داده‌های فازوری (*PDC*[۲]) و در شکل (ب) از چندین *PDC* استفاده شده است. به این دو ساختار به ترتیب ساختار متمرکز و غیرمتمرکز می‌گویند. در ساختار متمرکز، همه داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط *PMU*ها به یک *PDC* ارسال می‌شوند که وظیفه پردازش اطلاعات را هم دارد. اما در ساختار غیرمتمرکز، چندین *PDC* وجود دارد که به صورت سلسله‌مراتبی پردازش اطلاعات را انجام می‌دهند. بدین معنی که در هر سطح، مقداری پردازش اطلاعات متناسب با سطح قرارگیری *PDC* انجام می‌شود و سپس نتایج پردازش به *PDC*

[۱] Offline

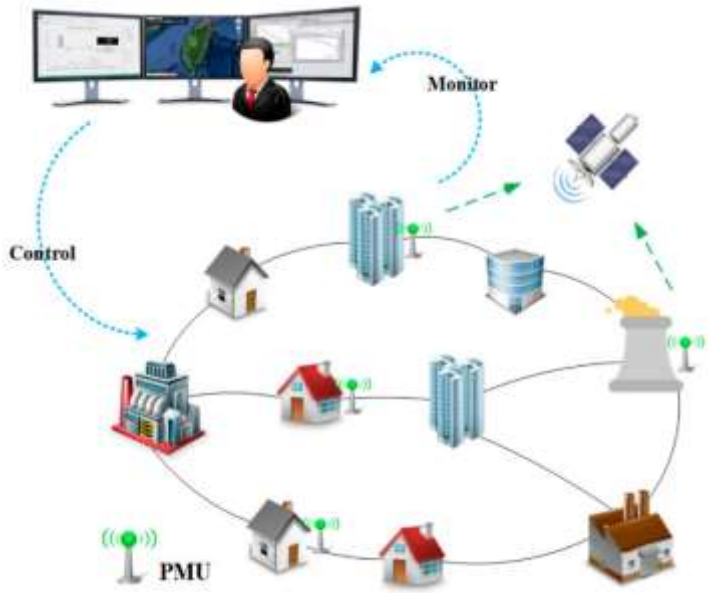
[۲] Phasor Data Concentrator

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

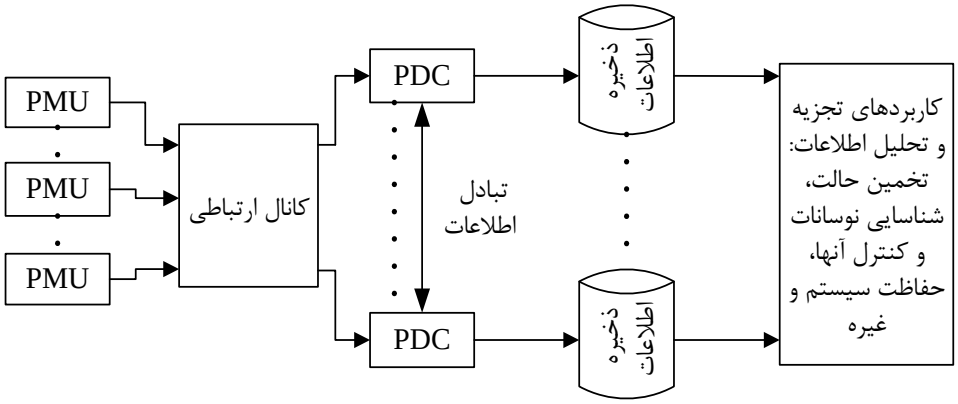
در سطح بالاتر ارسال می‌شود. مزیت این ساختار در این است که علاوه بر این که حجم بسیار عظیم داده‌های اندازه‌گیری فقط به یک *PDC* ارسال نمی‌شود، بلکه تجزیه و تحلیل‌هایی هم در سطوح پایین‌تر کنترلی انجام می‌شود.

به طورکلی هر سامانه *WAMS* مشتمل بر فرآیندهای زیر است:

- اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده‌ها
- تبادل و تحویل داده‌ها
- تجزیه و تحلیل داده‌ها



(الف)



(ب)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شکل ۱-۳ ساختار سامانه *WAMS*

(الف) ساختار متمرکز، (ب) ساختار غیر متمرکز

به همین دلیل این سامانه باید دارای اجزای زیر باشد [۱۱], [۲۰]–[۲۳]:

- واحدهای اندازه‌گیری فازوری
- سامانه سنکرون‌کننده
- سامانه مخابراتی انتقال داده‌ها
- متمرکزکننده داده‌های فازوری

در ادامه، به معرفی اجزای مختلف سامانه *WAMS* پرداخته می‌شود.

۱-۳-۲- واحد اندازه‌گیری فازوری

واحدهای اندازه‌گیری فازوری یا همان *PMU*ها، رکن اصلی سامانه‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده بوده و به‌مثابه پایانه‌های راه دور[۱] (*RTU*) هستند که با سیگنال هم‌زمان‌کننده سامانه *GPS* مجهز شده‌اند. تجهیز *PMU*ها با *GPS*، هم‌زمانی در انجام اندازه‌گیری‌ها را فراهم می‌آورد. این واحدها همچنین قادرند بر روی داده‌های اندازه‌گیری‌شده، تجزیه و تحلیل اولیه‌ای (نظیر تبدیل فوریه سریع و غیره) هم داشته باشند و نتایج این تحلیل را به صورت داده‌های آماده برای مرکز کنترل ارسال کنند. این روش منجر به کاهش بار محاسباتی در مرکز کنترل و سرعت بخشیدن به عملیات متعاقب آن می‌شود.

ایده رله‌های دیستانس مولفه متقارن[۲] با ایده استفاده از کامپیوتر در حفاظت سیستم‌های قدرت در دهه ۱۹۶۰ میلادی مطرح گردید، ولی با توجه به امکانات موجود در آن زمان، این ایده چه از نظر اقتصادی و چه از نظر فنی امکان‌پذیر نبود. در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ میلادی کامپیوترها سریع‌تر و ارزان‌تر شدند و برخی الگوریتم‌های حفاظتی برای کامپیوترهای آن زمان طراحی شد. یکی از تلاش‌ها ابداع رله دیستانس مولفه متقارن برای حفاظت خطوط انتقال فشارقوی بود. در این نوع رله، ولتاژ و مولفه‌های مثبت و منفی و صفر جریان اندازه‌گیری می‌شد و برای تشخیص محل عیب فقط نیاز به محاسبات کمی بود که با توجه به ضعف کامپیوترهای آن زمان، امکان محاسبه آن مزیت بزرگی محسوب می‌شد. یکی از نتایج این توسعه، ابداع الگوریتم سری فوریه گسترده مولفه‌های متقارن بود. استفاده از این الگوریتم نشان داد که اندازه‌گیری

[۱] Remote Terminal Unit (RTU)

[۲] Symmetric Component Distance Relay (SCDR)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

دقیق یک کمیت الکتریکی در فرکانس پایه و توالی مثبت، در صورت سنکرون بودن در کل سیستم قدرت، تا چه اندازه مفید است. در آن زمان امکان هم‌زمان‌سازی دستگاه‌های اندازه‌گیری در یک منطقه‌ی جغرافیایی وسیع وجود نداشت و طبیعی بود که قدم بعدی هم‌زمان‌سازی نمونه‌برداری‌ها باشد [۱۱], [۲۴].

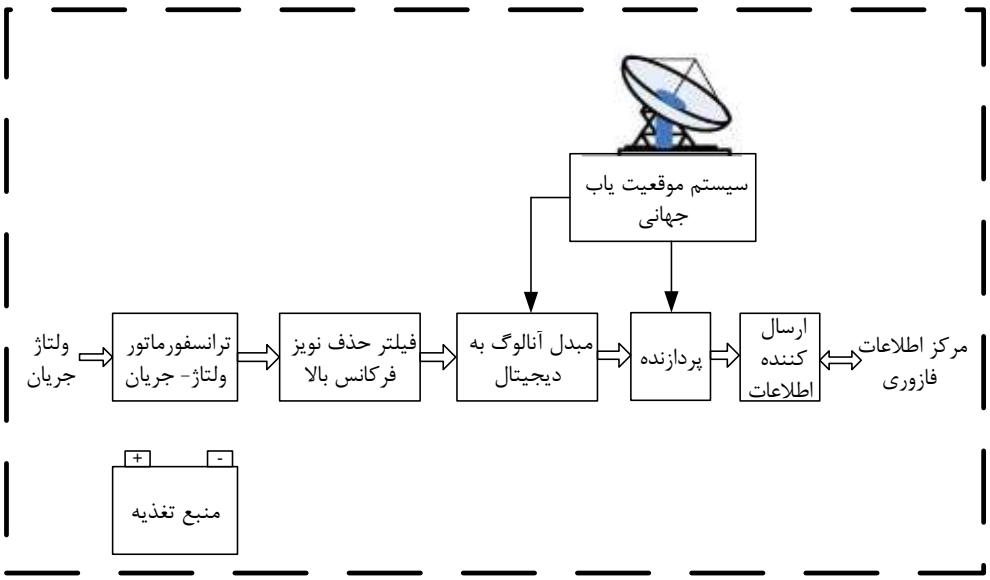
درصورتی‌که اندازه‌گیری کمیت‌ها در سیستم قدرت با یک برچسب زمانی[۱] همراه شود، آن‌گاه می‌توان مقدار کمیت‌ها را در هر لحظه خاص در اختیار داشت. امکان هم‌زمان‌سازی لحظه‌های نمونه‌برداری یا الصاق برچسب زمانی به اطلاعات، با راه‌اندازی سامانه *GPS* فراهم شد. دقت این سامانه در سال‌های ابتدایی به مقدار کافی نبود؛ ولی اکنون سامانه *GPS* هم‌زمان‌سازی اندازه‌گیری‌ها با دقت یک میکروثانیه یا بهتر را فراهم کرده است [۱۲], [۲۴]–[۲۶].

با توجه به الگوریتم استفاده‌شده در رله‌های دیستانس مولفه متقارن و امکان هم‌زمان‌سازی اندازه‌گیری‌ها، نمونه تحقیقاتی اولیه *PMU* در دانشگاه *Virginia Tech* در سال ۱۹۸۸ میلادی ساخته شد. پس از آن، شرکت‌های *ABB* و *Macrodyne* دست به تولید نمونه‌های تجاری از این *PMU*ها زدند. در سال ۱۹۹۵ میلادی نیز اولین استاندارد برای *PMU*ها تألیف شد [۲۵].

ساختار اصلی یک *PMU* از یک پردازشگر دیجیتال سیگنال تشکیل شده است. این پردازشگر دیجیتالی از سیگنال‌های ولتاژ و جریان با نرخ بالا نمونه‌برداری می‌کند. کمیت‌های آنالوگ ولتاژ و جریان قبل از نمونه‌برداری از یک فیلتر ضد تداخل عبور داده می‌شوند تا بدین‌ترتیب فرکانس‌های گذرا از اطلاعات اصلی سیگنال‌های ولتاژ و جریان حذف شوند. سپس اطلاعات آنالوگ به داده‌های دیجیتال تبدیل می‌شوند. سایر کمیت‌های الکتریکی از قبیل توان‌های حقیقی و راکتیو و غیره توسط پردازشگر دیجیتال محاسبه می‌شوند و از طریق مودم به *PDC* (پردازشگر محلی و یا منطقه‌ای فازورها) ارسال می‌شوند. نتایج اندازه‌گیری‌ها معمولاً با نرخ ۲۰ الی ۱۰۰ نمونه در هر ثانیه به واحد کنترل محلی و یا مرکزی ارسال می‌شود. از سیگنال هم‌زمان‌کننده سامانه *GPS* برای هم‌زمان‌کردن اطلاعات ارسال‌شده توسط *PMU*ها استفاده می‌شود [۱۱], [۲۵], [۲۷]. در شکل ۱-۴، ساختار یک *PMU* نمونه نشان داده شده است [۲۶].

[۱] Time Tag

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱-۴ ساختار یک *PMU* نمونه

پیام‌های ارسالی و یا دریافتی توسط *PMU*ها به چهار بخش تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از [۱۱]:

- پیکربندی[۱] (یا تنظیمات): پیامی کامپیوتری شامل توضیحاتی در مورد اطلاعات ارسال، ضرایب کالیبره، شماره شناسایی *PMU* و غیره است.
- داده[۲]: اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط *PMU* است.
- فرمان[۳]: پیامی جهت مدیریت و کنترل است.
- سربرگ[۴]: بخش توضیحی در مورد کل اطلاعات ارسالی، الگوریتم‌ها و فیلترهای آنالوگ است.

مطابق شکل ۱-۵، پیام‌های داده، پیکربندی و سربرگ توسط *PMU* ارسال می‌شوند؛ درحالی‌که پیام فرمان توسط این واحد دریافت می‌شود.

[۱] Configuration

[۲] Data

[۳] Command

[۴] Header

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱-۵ ارسال و دریافت اطلاعات در *PMU*

۱ ۲ ۳ ۱ کیفیت داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط واحد اندازه‌گیری فازوری

واحد اندازه‌گیری فازوری از ولتاژ و جریان محل نصب با نرخ بالا داده‌برداری کرده و سپس توسط الگوریتم‌های مختلفی مانند تبدیل فوریه گسسته زمان، فازور ولتاژ و جریان را محاسبه کرده و به *PDC* که در مرکز کنترل شبکه قدرت قرار دارد، ارسال می‌نماید. این فرآیند ممکن است از ابتدا (مرحله اندازه‌گیری) تا انتها (مرحله دریافت اطلاعات) دچار نقص شود. نقص در این فرآیند منجر به این خواهد شد که یا داده‌های فازوری از دقت خوبی برخوردار نباشند و یا حتی دریافت اطلاعات فازوری منقطع گردد. کیفیت داده‌های فازوری تحت تأثیر موارد متعددی است که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از:

- کیفیت پاسخ فرکانسی ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری ولتاژ (*PT, CVT*) و جریان (*CT*)
- مقدار نویز اندازه‌گیری در محل نصب
- دقت الگوریتم محاسباتی *PMU* برای تخمین فازور
- تأخیر ایجادشده ناشی از زمان مورد نیاز برای تخمین فازور
- دقت سامانه سنکرون‌کننده نصب‌شده در *PMU* برای برچسب‌گذاری زمانی فازورها
- تأخیر ناشی از سامانه ارتباطی انتقال داده‌های فازوری به *PDC*
- دقت و امنیت سامانه ارتباطی انتقال داده‌های فازوری به *PDC* برای جلوگیری از حملات سایبری

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

- خرابی هریک از اجزای سامانه *WAMS* و قطع ارسال داده توسط *PMU* و یا محوشدن آن در طی انتقال و یا دریافت نادرست داده توسط *PDC*

همان‌طور که مشاهده شد، عوامل مختلفی وجود دارند که می‌توانند منجر به کاهش کیفیت داده‌های فازوری شوند. تأثیر کیفیت داده‌های فازوری در تجزیه و تحلیل‌های مختلف سیستم قدرت مانند مدل‌سازی بار و ارزیابی پایداری سیگنال-کوچک[۱] بررسی شده و نشان داده شده است که اگر داده‌های فازوری از کیفیت و دقت پایینی برخوردار باشند، منجر به نتایج کاملاً غلط خواهند شد. این امر می‌تواند باعث عواقب جبران‌ناپذیری در بهره‌برداری از سیستم قدرت شود [۲۸] و [۲۹]. ذکر این نکته حائز اهمیت است که یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در کاهش کیفیت داده‌های فازوری نویز اندازه‌گیری است که اگر قدرت آن زیاد باشد حتی می‌تواند داده اصلی را محو کرده و منجر به یک داده کاملاً بی‌کیفیت شود.

در ادامه، به معرفی انواع خطای اندازه‌گیری در *PMU*ها پرداخته شده است. خطای مشاهدات اندازه‌گیری‌شده را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود [۲۹]، [۳۰]، [۳۱].

- نویز: نویز همان خطای رندوم اندازه‌گیری است که به علت محدودیت دقت تجهیزات اندازه‌گیری و لینک‌های ارتباطی به وجود می‌آید. در محل نصب *PMU* در پست برق، تجهیزات متعدد اندازه‌گیری و فشارقوی وجود دارد که منجر به تولید نویزهای مختلفی می‌شوند. این نویزها در هنگام اندازه‌گیری ولتاژ و جریان توسط ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری که به *PMU* متصل شده‌اند، خود را نشان می‌دهند. به طور معمول در تحقیقات فرض می‌شود که نویز و خطای اندازه‌گیری دارای توزیع تصادفی گوسی[۲] است. این فرض در [۳۱] و [۳۲] برای داده‌های فازوری سامانه *WAMS* مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که فرض نویز گوسی برای داده‌های اندازه‌گیری فازروی معتبر است. نویز موجود در داده‌ها توسط تخمین‌گر حالت فیلتر می‌شود. چگونگی مقابله با نویز و فیلتر آن بستگی به نوع روش تخمین حالت دارد.

- داده بد[۳] (خطای فاحش/ناخالصی[۴]): داده‌های بد در مقایسه با نویز شدت بیشتری داشته و ماهیت و

---

[۱] Small-Signal Stability

[۲] Gaussian

[۳] Bad Data

[۴] Gross Error

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

منشأ پیدایش آن‌ها با نویز متفاوت می‌باشد. داده بد ممکن است بر اثر وجود بایاس در مقادیر اندازه‌گیری‌شده، از کار افتادن یا خرابی تجهیزات اندازه‌گیری یا وقوق نقص در لینک ارتباطی انتقال داده‌ها به وجود آیند. برخی از داده‌های بد را می‌توان به سادگی قبل از اجرای تخمین حالت تشخصی داده و حذف نمود. در این زمینه می‌توان به منفی بودن مقادیر دامنه ولتاژ یا اختلاف زیاد بین جریان ورودی و خروجی در یک گره اشاره نمود. اما همه داده‌های بد به راحتی قابل تشخیص نیستند. در [۳۴] تا [۳۵] تا کنون الگوریتم‌های مختلفی برای تشخیص داده‌های بد و حذف آن‌ها ارائه شده است

- خطای پارامتر در اثر عدم قطعیت در پارامترهای مدل مانند ادمیتانس خط به وجود می‌آید.
- خطای توپولوژی در اثر اطلاعات غیرصحیح از توپولوژی شبکه به وجود می‌آید که می‌تواند در دسته‌بندی داده بد قرار گیرد.

۲ ۲ ۳ ۱ استانداردها

تاکنون استانداردهای مختلفی در ارتباط با *PMU*ها تدوین شده است که عبارت‌اند از [۳۶]–[۴۰]:

- *IEEE 1344: IEEE Standard for Synchrophasers for Power Systems*
- *IEEE C37.118-2005: IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems*
- *IEEE C37.118.1-2011: IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*
- *IEEE C37.118.2-2011: IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems*
- *IEEE C37.242-2013: IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control*
- *IEEE C37.118.1a-2014: IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems -- Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements*
- *IEEE/IEC 60255-118-1-2018: IEEE/IEC International Standard - Measuring Relays and Protection Equipment - Part 118-1: Synchrophasor for Power Systems – Measurements*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مفهوم یک فازور سنکرون‌شده با سیستم قدرت (سنکروفازورها) در دهه ۱۹۸۰ معرفی شد. در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار استاندارد *IEEE 1344* برای آن به وجود آمد. این استاندارد با هدف معرفی سنکروفازورها در صنعت برق و پایه‌گذاری مفاهیم اساسی برای اندازه‌گیری‌ها و تبادل داده تدوین شد. این استاندارد یک *PMU* را به عنوان یک وسیله یا تابع تعریف کرد که معادل سنکروفازور یک سیگنال *AC* را تخمین می‌زند.

در سال ۲۰۰۵، *IEEE C37.118-2005* جایگزین آن شد و مسائل مربوط به استفاده از *PMU*ها در سیستم‌های برق را مورد بررسی قرار داد. این استاندارد، روش اندازه‌گیری، دقت اندازه‌گیری، آزمون‌ها و الزامات صدور گواهینامه برای تأیید صحت کارکرد و فرم و پروتکل انتقال اطلاعات برای ارتباطات داده به صورت زمان-واقعی را توصیف می‌کند.

هدف از تدوین هر دو استاندارد فوق تعیین الزامات اندازه‌گیری و تبادل داده برای تسهیل در امر توسعه تجهیزات سازگار با یکدیگر بود. از آن‌جا که در زمان تدوین و انتشار استاندارد *IEEE 1344* تجهیزات کمی در دسترس بود، الزامات بر اساس تجربیات محدودی تدوین شدند. در استاندارد *IEEE C37.118-2005* نیز به علت محدودیت در تجربیات و آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌های دینامیکی در نظر گرفته نشده‌اند. علاوه بر این، هیچ گونه الزاماتی برای اندازه‌گیری‌های فرکانس در این استاندارد گنجانده نشده است. این مسائل و نیاز روزافزون به سازگاری این استاندارد با استاندارد *IEC 61850* منجر به تدوین نسخه جدیدی از آن در سال ۲۰۱۱ شد [۴۱].

این استاندارد با هدف هماهنگ بودن با استاندارد *IEC 61850* به دو بخش اندازه‌گیری و تبادل داده (*IEEE C37.118.1-2011* شامل تخمین فازور و *IEEE C37.118.2-2011* شامل پروتکل ارتباطات) تقسیم شده است. همچنین دو طبقه‌بندی *PMU*، یعنی طبقه‌بندی *M* و طبقه‌بندی *P* در این استاندارد معرفی شده‌اند. طبقه‌بندی (کلاس) *M* برای کاربردهای پایش سیستم قدرت مناسب است و لذا دارای دقت زیاد در تخمین فازور می‌باشد؛ هرچند مقدار فازور را نسبت به طبقه‌بندی *P* با تأخیر بیشتری تخمین می‌زند. طبقه‌بندی *P* برای کاربردهای حفاظتی سیستم قدرت مناسب است؛ لذا مقدار فازور را به سرعت ولی با دقت کمتری تخمین می‌زند. به همین دلیل، در شرایط دینامیکی سیستم قدرت، عملکرد مناسبی دارد.

در سال ۲۰۱۴، موسسه *IEEE* با توجه به این که سازندگان *PMU* قادر به برآورده‌کردن برخی از الزامات استاندارد *IEEE C37.118.1-2011* نبودند، آن را اصلاح نموده و اصلاحیه استاندارد را تحت عنوان *IEEE C37.118.1a-2014* منتشر نمود.

در سال ۲۰۱۸، با همکاری دو موسسه *IEC* و *IEEE*، استاندارد *IEEE/IEC 60255-118-1-2018* تهیه شد. این قسمت از استاندارد *IEC 60255* به سیستم‌های اندازه‌گیری سنکروفازور در سیستم قدرت اختصاص

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

داده شده است. این استاندارد به معرفی سنکروفازور، فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس (*ROCOF*[۱]) و تعیین برچسب زمانی و الزامات سنکرون‌سازی برای اندازه‌گیری‌های هر سه کمیت فوق پرداخته است. در این استاندارد، روش‌های ارزیابی این اندازه‌گیری‌ها و الزامات برای هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی تعیین شده است. این استاندارد *PMU* را به عنوان یک واحد فیزیکی مستقل یا تابعی از یک واحد فیزیکی دیگر تعریف می‌کند. سخت‌افزار، نرم‌افزار و روش محاسبه فازورها، فرکانس و *ROCOF* در این استاندارد مشخص نشده است.

استاندارد دیگری که مرتبط با *PMU*ها می‌باشد *IEEE C37.242-2013* است. این استاندارد شامل الزامات و دقت سیستم سنکرون‌سازی، آزمایش و کالیبراسیون *PMU*ها در شرایط آزمایشگاهی و میدانی، آزمایش لینک‌های ارتباطی برای اتصال *PMU* به سایر تجهیزات مانند *PDC* و همچنین الزامات نصب و بهره‌برداری *PMU*ها در سیستم قدرت تدوین شده است [۳۶]–[۴۰].

❖ دیگر استانداردهای مرتبط با *PMU*:

- *OPC*[۲] *XML*[۳]*-DA*[۴]: پروتکل *OPC DA* یک رابط مبتنی بر مایکروسافت ویندوز شامل استانداردها و مشخصات ارتباطات صنعتی است. پروتکل *OPC XML-DA* نسخه تعمیم‌یافته *OPC DA* بر اساس *XML* می‌باشد. عموماً دیتافریم‌های *C37-118* توسط پروتکل *IP* منتقل می‌شوند. با استفاده از پروتکل *IP*، تعداد اتصالات هم‌زمان به *PDC* محدود می‌شود. شرایط مختلفی وجود دارد که در آن نیاز است که مهندسین یا نرم‌افزارها بدون اشغال یکی از این اتصالات به اندازه‌گیری‌های *PMU* دسترسی یابند. علاوه بر این، مهم است که داده‌های فازوری در مکان‌های مختلفی قابل نمایش به صورت گرافیکی باشند تا کاربر سیستم توانایی مشاهده و تفسیر داده‌های فازوری را داشته باشد. پروتکل *OPC XML-*

[۱] Rate of Change of Frequency

[۲] OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control (Changed to Open Platform Communications in 2011)

[۳] Extensible Markup Language

[۴] Data Access

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

DA به همین منظور ارائه شده است [۴۲]، [۴۳].

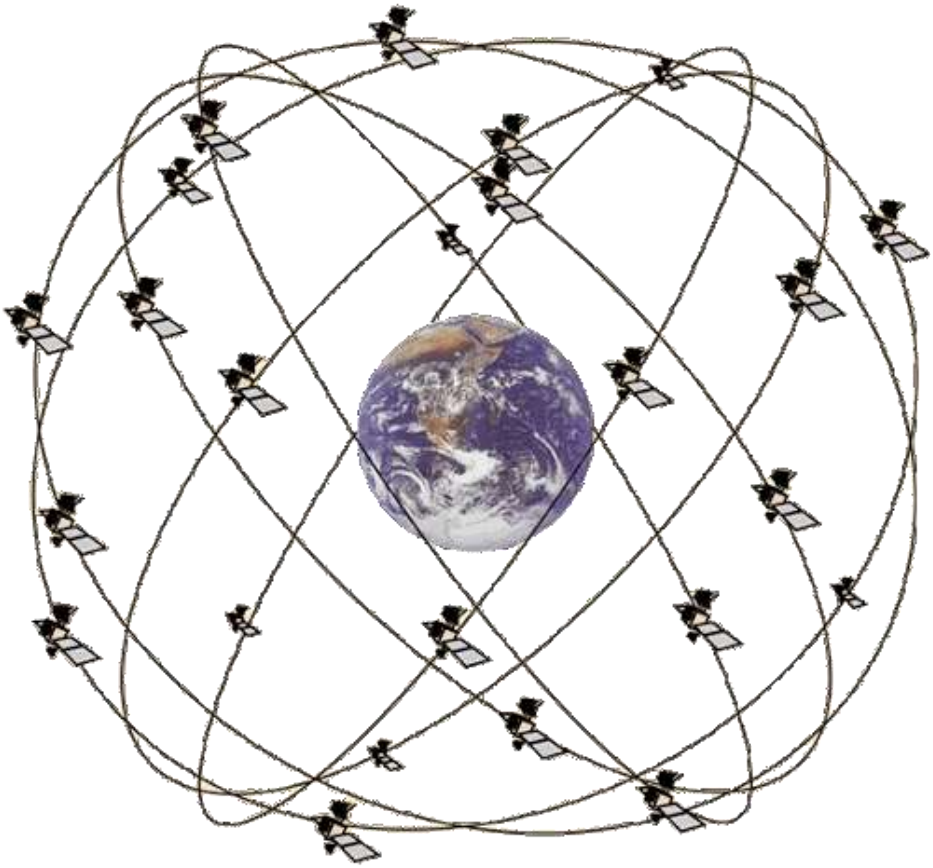
- استاندارد *IEC 61850*: استانداری برای سیستم‌ها و شبکه‌های ارتباطی برای اتوماسیون پست‌های الکتریکی
- *BPA PDC Stream*: این استاندارد به منظور توسعه *IEEE 1344* تدوین شده است و یک نسخه تغییریافته از *IEEE 1344* است که توسط *PDC*های اداره برق بونوویل (*BPA*[۱]) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۳-۳- سامانه سنکرون‌کننده

سامانه سنکرون‌کننده مورد استفاده در *PMU* درواقع همان سامانه موقعیت‌یاب جهانی (*GPS*) است. این سامانه حداقل شامل ۲۴ ماهواره است که زمین را دور می‌زنند. در هر مدار حداقل ۴ ماهواره قرار دارد. راکت‌های کوچکی این ماهواره‌ها را در مسیر درست نگاه می‌دارند (شکل ۱-۶ ***Error! Reference source not found.***). به این ماهواره‌ها نوستار (*NAVSTAR*) گفته می‌شود. این ماهواره‌ها از محاسبات ریاضی ساده‌ای برای پخش اطلاعات استفاده می‌کنند که به عنوان طول و عرض و بلندی جغرافیایی گیرنده‌های روی زمین نشان داده می‌شوند. سامانه *GPS* بدون وابستگی به گیرنده‌های تلفن یا اینترنت عمل می‌کند. با این فن‌آوری‌ها می‌توان اطلاعات دریافتی از این سامانه موقعیت‌یاب را بهتر و کاربردی‌تر کرد. سامانه *GPS* می‌تواند توانایی حیاتی در زمینه موقعیت‌یابی برای کاربری نظامی یا همگانی در سراسر جهان فراهم کند. پروژه *GPS* در سال ۱۹۷۳ و توسط ایالات متحده آمریکا برای غلبه بر محدودیت‌های سامانه‌های موقعیت‌یابی پیشین، آغاز شد. وزارت دفاع ایالات متحده آمریکا سامانه‌ای را توسعه داد که به شکل پیش‌فرض ۲۴ ماهواره را به کار می‌برد. درواقع، طراحی، توسعه و پشتیبانی این سامانه بر عهده وزارت دفاع ایالات متحده آمریکا است. سامانه *GPS* در هر زمان و در همه جهان قابل استفاده بوده و هیچ هزینه‌ای برای این خدمات گرفته نمی‌شود. ماهواره‌های *GPS*، هر روز دو بار در یک مدار دقیق به دور زمین می‌چرخند و سیگنال‌های اطلاعات را در همه لحظات به زمین ارسال می‌کنند.

[۱] Bonneville Power Administration

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱-۶ شمای مدارهای ماهواره‌های سامانه *GPS*

اساس کار دستگاه موقعیت‌یاب *GPS* تعیین موقعیت است و این کار با دریافت امواج ماهواره‌های موقعیت‌یاب که در مدارهایی به دور کره زمین در چرخش هستند، انجام می‌شود. برای تعیین موقعیت، گیرنده موقعیت‌یاب زمان‌های دریافت شده را با زمان خود مقایسه می‌کند. تفاوت این دو، مشخص‌کننده فاصله گیرنده موقعیت‌یاب از ماهواره مزبور است. این عملی است که دقیقاً یک گیرنده موقعیت‌یاب انجام می‌دهد. با استفاده از دست‌کم سه ماهواره یا بیشتر، موقعیت‌یاب می‌تواند طول و عرض جغرافیایی (دوبعدی) مکان خود را تعیین نماید. با تبادل با چهار و یا تعداد بیشتری ماهواره یک موقعیت‌یاب می‌تواند موقعیت سه‌بعدی مکان خود را تعیین نماید که شامل طول و عرض جغرافیایی و بلندی است. با انجام پیوسته این محاسبات، موقعیت‌یاب می‌تواند سرعت حرکت خود را نیز به دقت مشخص نماید. امروزه در بعضی مکان‌های ایران، امکان دریافت اطلاعات تا ۱۰ ماهواره و دست‌کم دسترسی به ۴ تا ۵ ماهواره در هر زمان از شبانه‌روز و در هر مکان وجود دارد. هرقدر شمار ماهواره‌های قابل‌مشاهده بیشتر شود، معادلات اساسی تعیین موقعیت بیشتر خواهند شد و بنابراین زمان لازم برای تعیین موقعیت یک نقطه کاهش یافته و دقت تعیین موقعیت نیز افزایش خواهد یافت.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

سامانه‌های مشابهی نیز وجود دارند که در حال استفاده یا طراحی هستند. برخی از این سامانه‌ها ماهواره‌ای و برخی دیگر، زمینی هستند. برخی کشورها نیز برای خود، سامانه موقعیت‌یاب جداگانه و محلی دارند. در ادامه به برخی از این سامانه‌ها اشاره شده است:

- سامانه روسی گلوناس[۱] که توسط دولت اتحاد جماهیر شوروی سوسیالیستی ساخته شده و اکنون توسط کشور روسیه اداره می‌شود، مهم‌ترین آن‌هاست که تقریباً همزمان با جی‌پی‌اس پیشرفت کرده است؛ اما از سال ۲۰۰۸ به بهره‌برداری کامل رسیده است. دقت گلوناس به اندازه سامانه *GPS* نمی‌باشد.
- سامانه گالیلئو[۲] توسعه داده‌شده توسط اتحادیه اروپا است و کشورهای اسرائیل، هند، عربستان سعودی، کره جنوبی، اوکراین، چین و مراکش را پوشش می‌دهد.
- سامانه بیدو[۳] که به صورت مستقل چین را پوشش می‌دهد.
  - ❖ سامانه ماهواره‌ای کواسی–زنیث[۴] در ژاپن
  - ❖ سامانه ماهواره‌ای ناوبری منطقه‌ای هند

ذکر این نکته لازم است که در حال حاضر، همه سامانه‌های *WAMS* نصب‌شده در شبکه‌های برق از سامانه *GPS* استفاده کرده و برای برچسب‌گذاری زمانی و هم‌زمان‌سازی نمونه‌های اندازه‌گیری‌شده از آن استفاده می‌کنند.

۱-۳-۴- سامانه مخابراتی انتقال داده‌ها

از دیرباز تاکنون، سامانه ارتباطی انتقال داده در شبکه‌های برق مورد توجه بوده و همواره هدف بر انتقال داده با قابلیت اطمینان بالا و با کمترین تأخیر زمانی بوده است. در شکل ۱-۷ سیر تکاملی استفاده از بسترهای ارتباطی مختلف در شبکه‌های برق نشان داده شده است [۴۴].

---

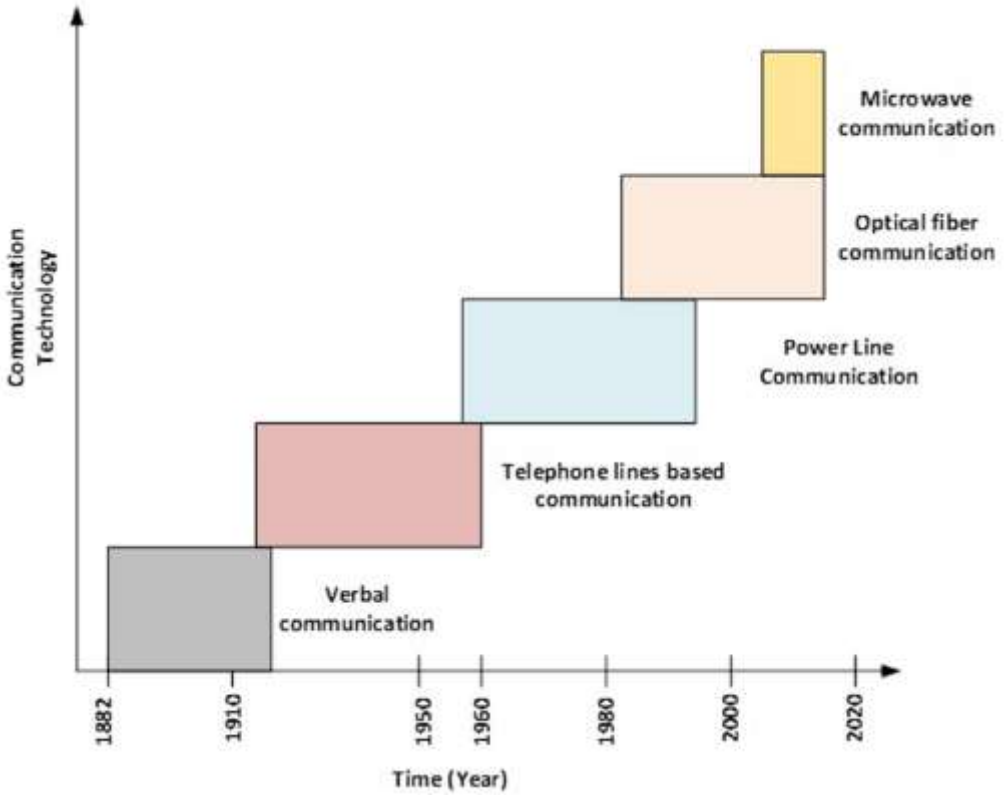
[۱] GLONASS: GLObal NAvigation Satellite System

[۲] Galileo

[۳] Beidou

[۴] Quasi-Zenith

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



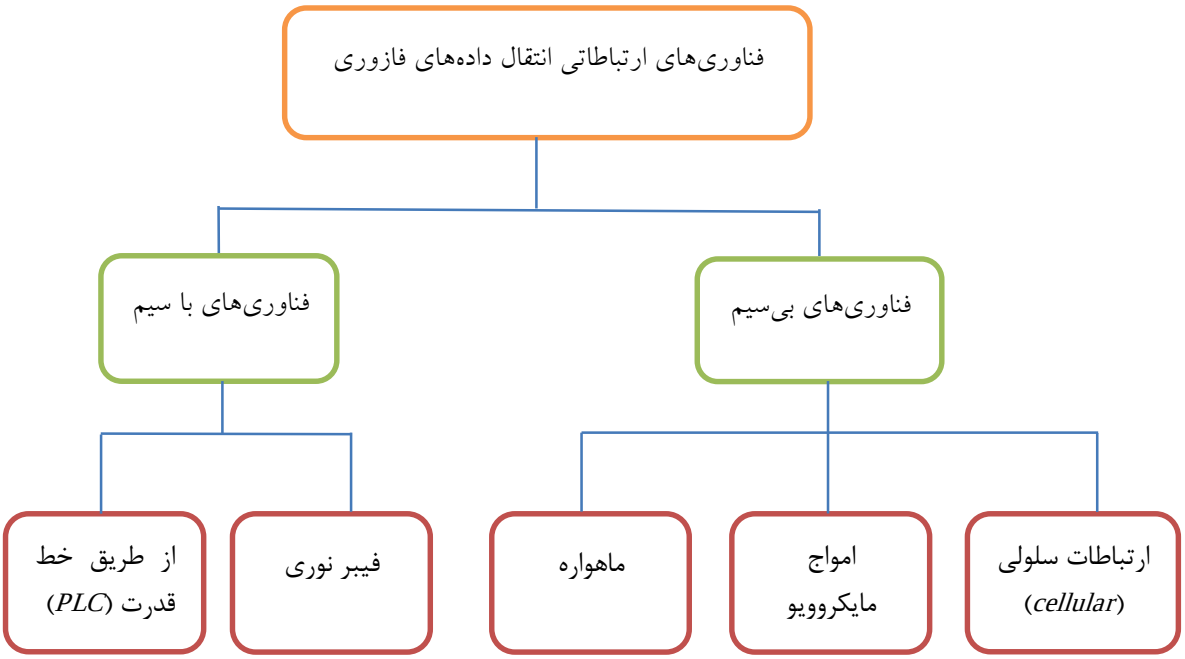
شکل ۱-۷ سیر تکاملی استفاده از بسترهای ارتباطی مختلف در شبکه‌های برق

فن‌آوری‌های کلیدی ارتباطات برای انتقال داده‌های فازوری به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از:

- فن‌آوری ارتباطات سیمی: قابلیت اطمینان بالا، پهنای باند عظیم و محافظت در برابر تداخل از ویژگی‌های برجسته این دسته است.
- فن‌آوری بی‌سیم: استقرار سریع، هزینه‌های کم نصب و نگهداری، دسترسی به مکان‌های جغرافیایی از راه دور و غیره از ویژگی‌های این دسته است.

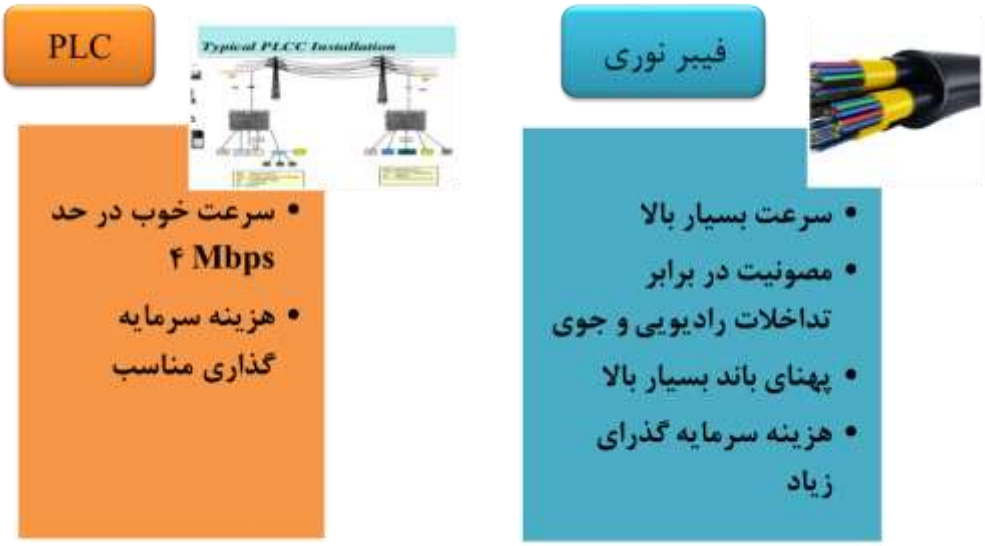
در شکل ۱-۸ انواع فن‌آوری‌های ارتباطی مورد استفاده برای انتقال داده‌های فازوری در سامانه *WAMS* نشان داده شده است [۴۴]. همچنین در شکل ۱-۹ خصوصیات این فن‌آوری‌ها نوشته شده است. خوشبختانه شبکه برق ایران، از بستر بسیار مناسب فیبر نوری برخوردار است که تقریباً در سراسر شبکه برق وجود دارد. به همین دلیل، پتانسیل بسیار قوی برای انتقال داده با قابلیت اطمینان بالا و با کم‌ترین تأخیر در شبکه برق ایران وجود دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱-۸ انواع فن‌آوری‌های ارتباطی برای انتقال داده‌های فازوری

DOI: 10.30503/nripress.2020.248





شکل ۱-۹ خصوصیات فن‌آوری‌های ارتباطی مختلف برای انتقال داده فازوری

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۱-۳-۵- متمرکزکننده داده‌های فازوری

متمرکزکننده داده‌های فازوری یا *PDC* درواقع همان رایانه‌ای است که در مرکز کنترل شبکه برق قرار گرفته و وظیفه دریافت، ذخیره‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های فازوری دریافتی از *PMU*ها را بر عهده دارد. اولین نمونه *PDC* در سال ۱۹۹۶ در اداره برق بونوویل طراحی و ساخته شد.

بر روی رایانه *PDC*، یک نرم‌افزار واسط نصب شده است که تجزیه و تحلیل‌های مختلف زمان-واقعی مانند تخمین فرکانس، تخمین زاویه ولتاژ شین، تخمین مُدهای[۱] الکترومکانیکی سیستم، پایداری ولتاژ و غیره را اجرا می‌کند. لذا هم خصوصیات سخت‌افزاری و هم خصوصیات نرم‌افزاری *PDC* از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

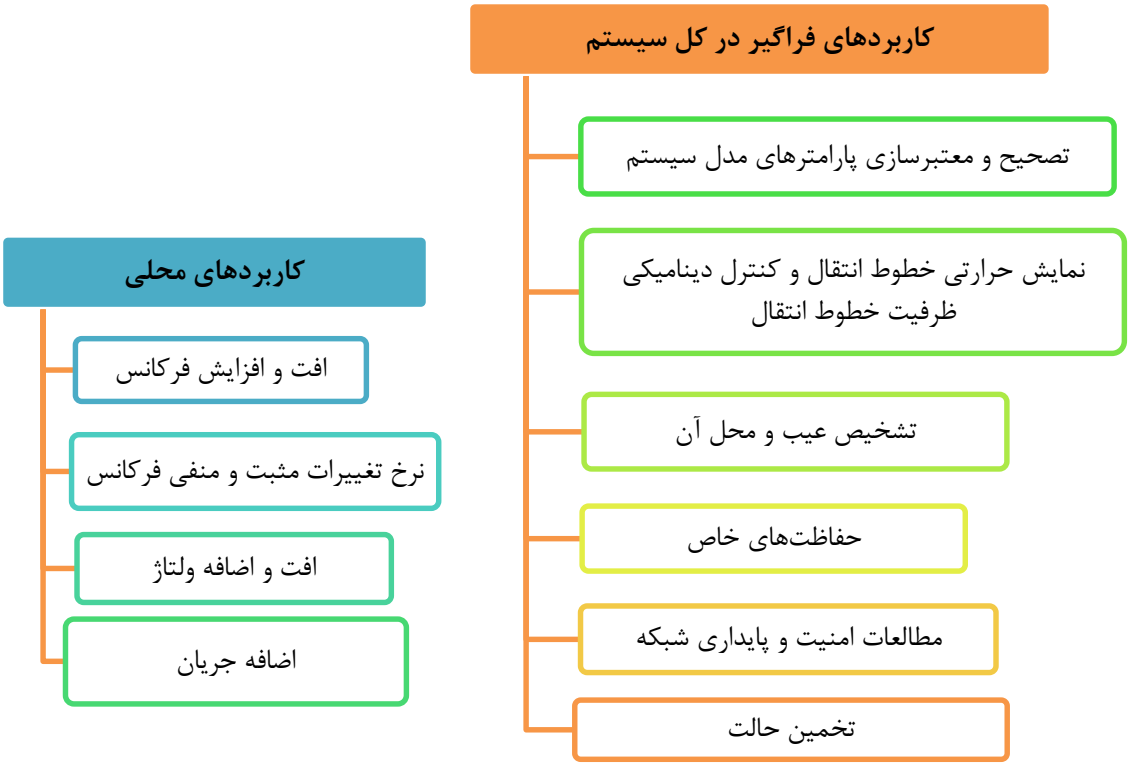
مهم‌ترین استانداردی که در این زمینه وجود دارد، استاندارد *IEEE C37.247-2019* می‌باشد [45]. در این استاندارد، *PDC* به عنوان مجموعه‌ای از توابع که ممکن است بر روی داده‌های سنکروفازوری اجرا شوند، تعریف شده است. این استاندارد شبکه اندازه‌گیری *PMU* را معرفی نموده و جایگاه *PDC* در آن را تعیین می‌کند. در این استاندارد، در مورد حداقل الزامات سخت‌افزاری، نحوه دریافت اطلاعات ارسالی از *PMU*ها، مرتب‌سازی اطلاعات دریافتی جهت تجزیه و تحلیل آن‌ها، امنیت سایبری، آزمایش اعتبارسنجی نصب و بهره‌برداری *PDC* و دیگر مسائل مربوطه به طور مفصل بحث شده است.

[۱] Mode

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۱-۳-۶- کاربردهای سامانه اندازه‌گیری ناحیه گسترده

از دیدگاه محل کاربرد، کاربردهای سامانه *WAMS* به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. این تقسیم‌بندی در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۱-۱۰ کاربردهای سامانه *WAMS*

۱ ۶ ۳ ۱ کاربردهای محلی

از دیرباز تاکنون، در پست‌ها روش‌های کنترلی و نظارتی زیادی به صورت محلی و به منظور حفظ شرایط و قیود بهره‌برداری به کار گرفته شده است. به عنوان نمونه می‌توان به تنظیم ولتاژ، جبران توان راکتیو، حذف بار ولتاژی و فرکانسی اشاره نمود. به منظور دست‌یابی به اهداف مذکور، مقادیر مربوطه در پست اندازه‌گیری شده و در صورت وجود مقادیر خارج از محدوده مجاز، اعمال اصلاحی خودکار صورت می‌گیرد. همچنین بسته به شرایط سیستم ممکن است توابع کنترلی پست‌ها توسط مرکز کنترل فعال یا غیرفعال شود. به کمک واحدهای اندازه‌گیری فازوری و فازورهای اندازه‌گیری شده توسط آن، امکان هماهنگی مؤثر بین اعمال محلی با شرایط کلی سیستم به منظور اداره‌کردن بهتر اغتشاش‌های گسترده سیستم وجود دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

تعدادی از توابع نظارتی که می‌توانند در پست‌ها و با استفاده از اطلاعات واحدهای اندازه‌گیری فازوری به کار برده شوند، عبارت‌اند از [۱۱]:

- افت و افزایش فرکانس
- نرخ تغییرات مثبت و منفی فرکانس
- افت و اضافه ولتاژ
- اضافه جریان

۲۶۳۱ کاربردهای فراگیر

کاربردهای فراگیر در کل سیستم، کاربردهایی هستند که در آن‌ها با استفاده از اطلاعات کامل سیستم قدرت در یک کامپیوتر مرکزی، تصمیمات لازم صورت می‌گیرد. هم‌زمان با ایجاد سامانه‌های *WAMS* که به صورت یک‌طرفه اطلاعات اجزا را برداشت کرده و به مرکز کنترل می‌فرستاد، ایده استفاده از این امکانات فراگیر جهت کنترل از راه دور اجزای کنترلی توزیع‌شده در سراسر شبکه برای انجام اقدامات لازم جهت حفظ پایداری سیستم مطرح شد؛ که با توجه به مزایای این روش کنترلی، سریعاً مورد توجه محققان قرار گرفت. به‌این‌ترتیب ایده *WAMPAC* جهت کنترل هماهنگ ادوات حفاظتی، کنترلی و کلیدزنی بار و تولید در کاربردهای مختلف شکل گرفت [۱۱], [۱۳], [۴۶], [۴۷].

در ادامه تعدادی از این کاربردها که اساس آن‌ها استفاده از اطلاعات فازوری است، بررسی می‌شوند.

- **تصحیح و معتبرسازی پارامترهای مدل سیستم**

با گسترش و پیچیده‌شدن سیستم قدرت، تنها راه بهره‌برداران سیستم برای شناخت رفتار سیستم، استفاده از شبیه‌سازی است. برای این‌که این شبیه‌سازی‌ها با رفتار واقعی سیستم منطبق باشند نیاز به شناخت مدل دقیق اجزای سیستم است. بهبود مدل‌های دینامیکی و حالت ماندگار اجزای سیستم، مانند پارامترهای خطوط انتقال [۴۸] و ژنراتورهای سنکرون [۴۹]–[۵۱]، یکی از اولین و ساده‌ترین کاربردهای سامانه *WAMS* است.

- **نمایش حرارتی خطوط انتقال و کنترل دینامیکی ظرفیت خطوط انتقال**

به طور سنتی، حد حرارتی یک خط انتقال بر اساس معیارهای ثابت و محافظه‌کارانه، یعنی در نظر گرفتن مقاومت ثابت به ازای حداکثر دمای ممکن هوا در منطقه و عدم وزش باد، تعیین می‌شود. واضح است که با توجه به چنین فرضی حداکثر استفاده از ظرفیت ممکن خط انتقال صورت نخواهد گرفت؛ چراکه شرایط

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

محیطی اغلب بهتر بوده و امکان خنک‌سازی خط انتقال توسط باد، اجازه استفاده بیشتر از ظرفیت خط انتقال را می‌دهد. با استفاده از اندازه‌گیری فازوری در دو سر خط انتقال، امکان ارزیابی لحظه‌ای حد حرارتی و بارگذاری خط انتقال فراهم می‌شود [۱۳].

- **تشخیص عیب و محل آن**

شناسایی سریع و دقیق عیب‌ها و مکان آن‌ها یک امر بسیار حیاتی در بهره‌برداری شبکه به منظور حفظ پایداری آن، تأمین بار مصرف‌کننده و فرآیند تعمیر و نگهداری است. با توجه به استفاده از *GPS*، زمان نمونه‌برداری واحدهای اندازه‌گیری فازوری که صدها کیلومتر باهم فاصله دارند با تقریب بسیار خوبی یکسان است؛ لذا با استفاده از اندازه‌گیری‌های سنکرون توسط این واحدها که در دو طرف خط قرارگرفته‌اند، دقت تشخیص و تعیین محل عیب در خطوط انتقال افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. برای این منظور، الگوریتم‌ها و روش‌های کنترل تطبیقی مبتنی بر اندازه‌گیری فازوری جهت تشخیص و مکان‌یابی عیب در [۵۲]–[۵۵] ارائه شده‌اند.

- **حفاظت‌های خاص**[۱]

زمینه دیگری که سامانه *WAMS* نقش مهمی در آن ایفا می‌کند، موضوع افزایش قابلیت اعتماد در عملکرد صحیح سیستم‌های حفاظتی در شرایط تنش است. سیستم معمول حفاظتی شامل یک حفاظت اولیه است که با تعدادی حفاظت پشتیبان حمایت می‌شود. این سیستم حفاظتی قابلیت اطمینان بالایی دارد؛ زیرا به هر حال عیب توسط حفاظت اصلی و یا حفاظت‌های پشتیبان رفع می‌شود. موضوع حائز اهمیت در این مقوله، عملکرد بعضی حفاظت‌های خاص در سیستم نظیر تریپ[۲] ژنراتور در اثر عملکرد رله‌های گریز از همگامی[۳] و یا عملکرد رله‌های قطع بار ولتاژی یا فرکانسی در سیستم قدرت است. در هنگام وقوع اغتشاشات سخت، شرایطی وجود دارد که عملکرد سیستم حفاظتی باعث افزایش دامنه عیب و وقوع قطعی‌های متوالی[۴] می‌شود؛ لذا به تأخیر انداختن یا بلوکه‌کردن عملکرد این نوع حفاظت‌ها و یا وابسته‌کردن عملکرد آن‌ها به دریافت اطلاعات وسیع‌تری از سایر نقاط سیستم، نتایج بهتری از نظر نجات سیستم از فروپاشی در پی دارد. بدین‌ترتیب، یک حفاظت تطبیقی با استفاده از نگاه وسیع‌تر به حادثه رخ‌داده در کل شبکه ایجاد می‌شود [۵۶], [۵۷].

---

[۱] Special Protection System (SPS)

[۲] Trip

[۳] Out-of-Step

[۴] Cascade Outage

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

- **مطالعات امنیت و پایداری شبکه**

امنیت سیستم قدرت عبارت است از آن که سیستم، توانایی گذر موفق از اغتشاشات وارد شده بر آن را در پی پیشامدهای[۱] گوناگون بدون قطع سرویس‌دهی برای تمامی یا گروهی از مشترکان داشته باشد. این امر بستگی به میزان مقاوم بودن سیستم در برابر اغتشاشات قریب‌الوقوع دارد و لذا به شرایط بهره‌برداری و همچنین احتمال وقوع اغتشاشات وابسته است. در این فرآیند، علاوه بر اینکه شرایط جدید بهره‌برداری باید قابل‌قبول باشد، سیستم باید از مسیر بین این دو نقطه‌کار نیز با موفقیت گذر کرده باشد.

مطالعات امنیت شبکه کاربرد فراوانی در طراحی، توسعه، اصلاح عملکرد شبکه و یا حفظ پایداری سیستم قدرت دارد. این مطالعات می‌توانند به یکی از دو صورت آنلاین[۲] یا آفلاین انجام شوند که هر یک کاربردهای خاص خود را دارند. این کاربردها عبارت‌اند از [۵۸]–[۶۵]:

- مطالعات آفلاین که توسط شبیه‌سازی سیستم قدرت موجود (با افزودن طرح‌های توسعه آتی) در صورت نیاز انجام می‌شوند. در این مطالعات، نقاط ضعف سیستم با اعمال سناریوهای خروج مختلف شناسایی شده و ساختار سیستم با افزودن ادوات کنترلی، نصب خطوط جدید و غیره اصلاح می‌شود. این کار جهت مکان‌یابی و طراحی تجهیزات کنترلی در شبکه بسیار مناسب است و در مرحله طراحی و توسعه شبکه به کار می‌رود.

- مطالعات آنلاین در مرحله بهره‌برداری از شبکه مطرح است و جهت اعمال سناریوهای کنترلی مناسب با استفاده از کنترل‌کننده‌های موجود در شبکه، کلیدزنی ادوات تولیدکننده توان راکتیو و خطوط انتقال، جابجایی تولید ژنراتورها، بارزدایی و غیره به کار می‌رود. مطالعات امنیت آنلاین بر روی شبکه در حال بهره‌برداری، در هرلحظه اطلاعات زیر را در اختیار بهره‌برداران و اپراتورهای مرکز کنترل سیستم قرار می‌دهد:

۱) برآورد وضعیت سیستم از نظر میزان مستعد بودن آن برای وقوع ناپایداری یا برآورد حاشیه امنیت سیستم تا نقطه ناپایداری: این کار در مورد هر یک از انواع ناپایداری ولتاژ، زاویه‌ای روتور و ناپایداری فرکانسی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت انجام می‌شود. به کمک این مطالعات می‌توان با

[۱] Contingency

[۲] Online

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

استفاده از روش‌های کنترلی مبتنی بر رویکرد پیش‌کنش‌گری[1]، وضعیت پایداری سیستم را بهبود بخشید.

۲) برآورد نوع و شدت ناپایداری قریب‌الوقوع: در این حالت، حاشیه امنیت سیستم از دست رفته است و یا با وقوع پیشامدی بحرانی در حال از دست رفتن است و باید از نتایج تجزیه و تحلیل، به‌سرعت برای اعمال کنترل‌های اضطراری در شبکه جهت محدودسازی دامنه ناپایداری و بازگرداندن سیستم به وضعیت پایدار استفاده کرد. این کنترل‌ها با توجه به کوتاه بودن فرصت اعمال کنترل اضطراری و سخت بودن شدت عیب به وقوع پیوسته، شامل بارزدایی سریع است.

جهت انجام این مطالعات، باید درک صحیحی از وقوع اغتشاش، محل وقوع و نوع عیب به وقوع پیوسته داشت. در سیستم‌های معمول، این اطلاعات تنها می‌توانند با توجه به پایش عملکرد سیستم حفاظتی تعیین شوند و در صورت نیاز توسط سامانه اسکادا به مرکز کنترل ارسال شوند. با توجه به محدودیت سرعت و پهنای باند سامانه اسکادا، دریافت این‌گونه اطلاعات به صورت زمان-واقعی، فقط از تعداد محدودی موقعیت‌های حساس در شبکه قابل انجام است؛ که آن‌هم با توجه به کندی و محدودیت باند سامانه اسکادا به کندی صورت می‌گیرد. بنابراین تجزیه و تحلیل زمان-واقعی امنیت شبکه و اعمال کنترل‌های متعاقب آن با استفاده از امکانات سامانه اسکادا، به‌خصوص در مورد تغییر حالت‌های ناگهانی و سریع و نشانه‌های وقوع ناپایداری‌های کوتاه‌مدت در شبکه عملی نیست.

با استفاده از امکانات سامانه *WAMS*، تصویر لحظه‌ای از ساختار شبکه، عملکرد تجهیزات حفاظتی، وضعیت تجهیزات کنترلی، مشخصه‌های بار و تولید، به حد رسیدن یا نرسیدن منابع تولید توان راکتیو و وضعیت فرمان رله‌ها تهیه‌شده و در اختیار نرم‌افزارهای تجزیه و تحلیل امنیت در مراکز کنترل قرار می‌گیرد. به‌علاوه، تخمین حالت سیستم قدرت در لحظه قبل از وقوع عیب موجود است که می‌تواند به عنوان حالت پایه و شرایط اولیه برای شروع به کار نرم‌افزارهای تحلیل شبکه باشد. در مورد وقوع عیب‌های متوالی، ترتیب زمانی وقوع عیب، محل تقریبی هر عیب و عملکرد سیستم‌های حفاظتی و اثرات آن در سیستم و همچنین محدوده‌های تأثیر عیب به‌روشنی در اختیار مراکز کنترل قرار می‌گیرد. لذا نتایج بررسی امنیت دینامیکی سیستم با استفاده از داده‌های فازوری جهت تعیین اقدامات کنترلی لازم، برای پیشگیری از وقوع عیب‌های گسترده و افزایش حاشیه امنیتی سیستم و یا انجام اقدامات سریع اضطراری برای جلوگیری از ناپایداری و خاموشی‌های گسترده به کار می‌رود. ارزیابی و بهبود آنلاین پایداری سیگنال-کوچک یکی از مباحث امنیت دینامیکی شبکه قدرت است که با کمک سامانه *WAMS* انجام می‌شود.

[1] Proactive

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

- **تخمین حالت**

روش‌های تخمین حالت در سیستم قدرت در دهه ۱۹۷۰ میلادی ابداع شدند. در این روش‌ها، توان حقیقی و راکتیو خطوط و اندازه‌های ولتاژ شین‌ها با استفاده از تعداد محدودی اندازه‌گیری به دست آمده و با سیستم اسکادا به یک واحد مرکزی برای انجام محاسبات ارسال می‌شدند. با توجه به کند بودن شبکه مخابراتی، محدودیت پهنای باند فرکانسی و عدم وجود هم‌زمانی در جمع‌آوری داده‌های اندازه‌گیری‌شده از بخش‌های مختلف شبکه، حالت تخمین‌زده‌شده تنها در حالت ماندگار از دقت مناسب برخوردار بود. با در نظر گرفتن امکان بروز تغییرات و فعال‌شدن دینامیک شبکه در این محدوده زمانی، نتایج تخمین حالت تنها تقریبی از حالت واقعی سیستم را نشان می‌دهد که در خوش‌بینانه‌ترین نگاه، مقدار متوسطی از حالت واقعی سیستم بوده و لذا به نام تخمین حالت استاتیکی خوانده می‌شود. سرعت و هم‌زمانی ایجادشده در روش اندازه‌گیری فازوری ولتاژها و جریان‌های شبکه باعث شده که این روش به طور مستقیم ابزار طبیعی انجام اندازه‌گیری حالت در شبکه محسوب شود [۲۷].

تخمین حالت سیستم قدرت اولین مرحله برای هر نوع تجزیه و تحلیلی است و به همین دلیل از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. هرچه تخمین حالت با دقت و سرعت بیشتری انجام شود آن‌گاه امکان پیاده‌سازی برنامه‌های کنترلی و مدیریتی بیشتری در کوتاه‌ترین زمان ممکن و به صورت آنلاین میسر می‌شود. سامانه اندازه‌گیری فازوری امکان پیاده‌سازی تخمین حالت به صورت دینامیکی را با توجه به تهیه داده‌های فازوری با نرخ بالای نمونه‌برداری فراهم کرده است و به همین دلیل تحقیقات بسیار زیادی در این زمینه انجام شده و در حال حاضر هم در حال انجام است.

۱-۴- اسناد بالادستی صنعت برق کشور

در این بخش، اسناد بالادستی صنعت برق کشور در زمینه شبکه هوشمند و سامانه *WAMS* و لزوم تحقیقات در خصوص پیاده‌سازی روش‌های نوین تخمین حالت سیستم قدرت بررسی می‌شود. اسناد بالادستی مختلف دیگری وجود دارد که به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم به این حوزه مربوط هستند و پس از بررسی‌های به عمل‌آمده در جدول ۱-۳ نوشته شده‌اند. در این جدول، ۳۳ سند با مشخصات حوزه مکانی و موضوعی هریک از آن‌ها مشخص شده است و ترتیب نوشتن آن‌ها بدین گونه است که اسناد تهیه‌شده توسط نهاد بالاتر در ردیف‌های ابتدایی جدول نوشته شده است. بدین ترتیب، مسلماً اسنادی که در ردیف‌هایی ابتدایی قرار دارند دارای موضوعات کلی و اهداف و سیاست‌های کلان هستند و هرچه به ردیف‌های پایین جدول نزدیک می‌شویم، اسناد با موضوع تخصصی‌تر نوشته شده است. با نگاه اجمالی به این جدول می‌توان نتیجه گرفت که اسناد، ابلاغیه و دستورالعمل‌های بسیار زیادی در حوزه حرکت به سمت هوشمندسازی شبکه برق و پیاده‌سازی و بهره‌مندی از امکانات آن در کشور وجود دارد. این امر ضرورت تحقیق و توسعه در این حوزه را توسط پژوهشگران و مراکز تحقیقاتی و پژوهشگاه‌ها کاملاً توجیه می‌نماید.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۱-۳ اسناد مرتبط با حوزه شبکه هوشمند و پیاده‌سازی کاربردهای سامانه WAMS

شماره	نام سند	حوزه مکانی	حوزه موضوعی	سال تصویب
۱	سیاست‌های اقتصاد مقاومتی ابلاغی مقام معظم رهبری	مقام معظم رهبری	سیاست‌های کلی اقتصاد با رویکرد جهادی، انعطاف‌پذیر، فرصت‌زا، مولد، درون‌زا، پیش‌رو و برون‌گرا	۱۳۹۲
۲	سیاست‌های کلی محیط‌زیست ابلاغی مقام معظم رهبری	مقام معظم رهبری	مدیریت جامع، هماهنگ و نظام‌مند منابع حیاتی مبتنی بر توان و پایداری زیست‌بوم	۱۳۹۴
۳	سیاست‌های کلی نظام در بخش انرژی، ابلاغی از سوی مقام معظم رهبری	مقام معظم رهبری	سیاست‌های کلی منابع انرژی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کسب دانش بومی	۱۳۷۷
۴	سند چشم‌انداز بیست ساله کشور	مجمع تشخیص مصلحت نظام با ابلاغ مقام معظم رهبری	چشم‌انداز جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴ هجری شمسی در کلیه بخش‌های اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فرهنگی، نظامی و ...	۱۳۸۲
۵	قانون اجرای سیاست‌های کلی اصل ۴۴ قانون اساسی	مجلس شورای اسلامی	تعیین قلمرو فعالیت‌های هر یک از بخش‌های دولتی، تعاونی و خصوصی	۱۳۸۶
۶	قانون هدفمندکردن یارانه‌ها	مجلس شورای اسلامی	اصلاح قیمت حامل‌های انرژی با بهره‌برداری بهینه مصرف انرژی	۱۳۸۷
۷	سند نقشه جامع علمی کشور	مجلس شورای اسلامی	اهداف، اولویت‌ها و راهبردهای نظام علم و فن‌آوری کشور	۱۳۸۹
۸	قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی	مجلس شورای اسلامی	ارتقاء بهره‌وری مصرف انواع انرژی و استفاده هرچه بیشتر از منابع تجدیدپذیر	۱۳۸۹
۹	قانون عضویت دولت جمهوری اسلامی ایران در آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (*IRENA*)	مجلس شورای اسلامی	رعایت قوانین بین‌المللی حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌مندی از تسهیلات بین‌المللی	۱۳۹۱
۱۰	قانون برنامه ششم توسعه و اسناد پشتیبان آن	مجلس شورای اسلامی و سازمان برنامه و بودجه کشور	برنامه‌ریزی جامع مدیریت کشور در همه حوزه‌ها در افق زمانی ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۰	۱۳۹۶

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شماره	نام سند	حوزه مکانی	حوزه موضوعی	سال تصویب
۱۱	سند ملی راهبردی انرژی کشور	مصوب هیئت وزیران و شورای عالی انرژی	راهبردهای مدیریت بخش انرژی کشور شامل: نفت و گاز- برق- انرژی اتمی و زغال‌سنگ	۱۳۹۶
۱۲	سند ملی توسعه دانش‌بنیان انرژی‌های تجدیدپذیر	شورای عالی انقلاب فرهنگی	چشم‌اندازها، سیاست‌ها و اهداف توسعه انرژی تجدیدپذیر با تاکید بر دانش بومی	۱۳۹۳
۱۳	***سند راهبرد ملی توسعه دانش‌بنیان شبکه هوشمند برق ایران***	***شورای عالی عتف***	***چشم‌اندازها، سیاست‌ها و اهداف توسعه شبکه‌های هوشمند انرژی با تاکید بر دانش بومی***	***۱۳۹۵***
۱۴	سند راهبرد ملی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر کشور	ستاد توسعه فن‌آوری انرژی‌های تجدیدپذیر معاونت علمی و فن‌آوری ریاست جمهوری	نقشه راه و برنامه‌های عملیاتی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور، حمایت از تأسیس مراکز تحقیقات کاربردی و نیز ایجاد قطب‌های تخصصی و ...	۱۳۹۳
۱۵	تسهیلات ارزی و ریالی صندوق توسعه ملی	صندوق توسعه ملی جمهوری اسلامی ایران	قوانین اعطای تسهیلات مالی	همواره در حال به‌روزرسانی
۱۶	دستورالعمل محیط‌زیست، بهداشت و ایمنی نیروگاه‌های بادی	سازمان برنامه و بودجه کشور- سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق	الزامات محیط‌زیست، بهداشت و ایمنی برای ساخت، احداث و بهره‌برداری از نیروگاه‌های بادی	۱۳۹۷
۱۷	سند راهبرد ملی و نقشه راه توسعه صنعت باد ایران	وزارت نیرو	مطالعات فنی و اقتصادی توسعه صنعت انرژی بادی و نقشه راه نصب و بهره‌برداری از نیروگاه‌های بادی در ایران	۱۳۹۰
۱۸	سند چشم‌انداز و برنامه راهبردی وزارت نیرو تا افق ۱۴۰۴	وزارت نیرو	نقشه راه مأموریت‌ها، چشم‌انداز و ارزش‌های وزارت نیرو در بخش‌های مختلف شامل: برق، آب، پژوهش و...	۱۳۹۲
۱۹	سند مسیر راه فن‌آوری صنعت برق ایران	وزارت نیرو	تبیین مسیر راه توسعه فناوری‌های صنعت برق در ایران در کنار	۱۳۹۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شماره	نام سند	حوزه مکانی	حوزه موضوعی	سال تصویب
			تصویری از مسیر رشد و تکامل فناوری‌ها در این صنعت در جهان	
۲۰	دستورالعمل حمایت از بومی‌سازی فن‌آوری نیروگاه‌های تجدیدپذیر و پاک	وزارت نیرو	حمایت از ساخت تجهیزات نیروگاه‌های تجدیدپذیر	۱۳۹۷
۲۱	سند چشم‌انداز توانیر در افق ۱۴۰۴	شرکت توانیر	اهدافی ۱۲ گانه برای صنعت برق ازجمله: تاب‌آوری شبکه و توانمندی صنعت در مدیریت بحران و پدافند غیرعامل، اتوماسیون و هوشمندسازی شبکه برق، کسب فناوری‌های نوین و کاربردی، مرکزیت تبادل برق در منطقه و مدیریت عرضه و تقاضای برق	۱۳۹۶
۲۲	سند راهبردی و نقشه راه توسعه فن‌آوری‌های مرتبط با انرژی خورشیدی	پژوهشگاه نیرو	مطالعات فنی و اقتصادی ضرورت توسعه صنعت انرژی خورشیدی و نقشه راه نصب و بهره‌برداری از نیروگاه‌های خورشیدی در ایران	۱۳۹۴
۲۳	سند راهبردی و نقشه‌ی راه خودروی برقی	پژوهشگاه نیرو	دست‌یابی به فن‌آوری مورد نیاز ایستگاه‌های شارژ و تهیه زیرساخت‌های لازم برای تأمین انرژی مورد نیاز خودروهای برقی در شبکه‌های هوشمند انرژی در افق ۱۴۰۴	۱۳۹۴
۲۴	سند راهبرد ملی و نقشه‌ی راه توسعه‌ی فن‌آوری‌های مرتبط با انرژی زمین‌گرمایی در ایران	پژوهشگاه نیرو	ارتقاء توانمندیهای فناورانه در بخش تولید انرژی با تکیه بر توانمندی بومی در راه‌اندازی فن‌آوری‌های حوزه زمین‌گرمایی در شبکه‌های هوشمند برق در افق ۱۴۰۴	۱۳۹۴
۲۵	سند راهبرد ملی و نقشه‌ی راه توسعه فن‌آوری‌های مرتبط با انرژی زیست‌توده	پژوهشگاه نیرو	نقشه‌راه طراحی، اجرا و مدیریت فن‌آوری‌های اولویت‌دار حوزه تولید برق زیست‌توده در شبکه‌های	۱۳۹۴

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شماره	نام سند	حوزه مکانی	حوزه موضوعی	سال تصویب
	در ایران		هوشمند برق در افق ۱۴۰۴	
۲۶	سند راهبردی و نقشه‌ی راه توسعه فن‌آوری‌های نوین حفاظت در شبکه‌ی ایران	پژوهشگاه نیرو	نقشه‌راه توسعه فن‌آوری حفاظت شبکه برق ایران با تاکید بر ساخت و توسعه فناورانه تجهیزات حفاظتی و واحدهای اندازه‌گیری فازوری	۱۳۹۴
۲۷	سند راهبردی و نقشه‌ی راه فن‌آوری طراحی، پیاده‌سازی و توسعه نرم‌افزارهای تحلیل، مطالعه و راهبری شبکه‌ی برق ایران	پژوهشگاه نیرو	نقشه‌راه نحوه پیمودن مسیر، منابع و امکانات لازم برای تهیه و تکمیل نرم‌افزارهای شبیه‌ساز و تحلیل شبکه‌های برق	۱۳۹۴
۲۸	سند راهبردی و نقشه راه طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی ذخیره‌سازهای انرژی در صنعت برق	پژوهشگاه نیرو	نقشه‌راه دست‌یابی به دانش فنی طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سامانه‌های اولویت‌دار، نیاز کشور در ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی متناسب با کاربردهای شبکه برق (کنترل فرکانس، ارتقاء کیفیت توان، پیک‌سایی، پایداری شبکه)، خودروهای برقی و انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های هوشمند برق	۱۳۹۵
۲۹	سند توسعه فن‌آوری انرژی باد کشور ایران	پژوهشگاه نیرو	نقشه راه انرژی بادی با مشخص نمودن حوزه‌های مختلف انرژی بادی و تدوین اهداف در تعیین اقدامات لازم در افق زمانی مدنظر	۱۳۹۵
۳۰	سند راهبردی برنامه‌ریزی جامع انرژی کشور	پژوهشگاه نیرو	سازمان‌دهی طرح‌های کلان برنامه‌ریزی انرژی کشور	۱۳۹۵
۳۱	***برنامه اقدامات توسعه فن‌آوری‌های شبکه هوشمند برق ایران***	***پژوهشگاه نیرو و دانشگاه صنعتی امیرکبیر***	***استخراج راهبردها، سیاست‌ها و در نهایت برنامه اقدامات و نقشه راه توسعه فن‌آوری‌های شبکه هوشمند***	***۱۳۹۷***

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شماره	نام سند	حوزه مکانی	حوزه موضوعی	سال تصویب
۳۲	*نقشه راه بهره‌برداری و توسعه مرکز WAMS شبکه انتقال برق کشور*	*شرکت مدیریت شبکه برق ایران*	*چشم‌انداز کوتاه‌مدت (۲ سال)، میان‌مدت (۵ سال) و بلندمدت (۱۰ سال) و اقدامات لازم برای بهره‌برداری و برنامه‌ریزی توسعه مرکز WAMS*	*۱۳۹۳*
۳۳	دستورالعمل صادرات برق انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک غیردولتی	سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)	شرایط و ضوابط و روش صادرات برق تجدیدپذیر	۱۳۹۷

همان‌طور که در جدول ۱-۳ مشخص شده است، اسناد شماره ۱۳، ۳۱ و ۳۲ ارتباط بسیار نزدیکی با موضوع پروژه تحقیقاتی حاضر دارند و به همین دلیل در ادامه به طور مفصل بررسی می‌شوند. سند شماره ۳۱ در واقع برنامه تفصیلی اقدامات عملیاتی مشخص‌شده در سند ۱۳ است و لذا توضیحات تکمیلی این دو سند، ذیل سند شماره ۱۳ آورده شده‌اند.

۱-۴-۱- سند راهبرد ملی توسعه دانش‌بنیان شبکه هوشمند برق ایران و سند برنامه اقدامات توسعه فن‌آوری‌های شبکه هوشمند برق ایران

بر اساس این دو سند، چشم‌انداز شبکه هوشمند برق ایران به صورت زیر تعریف شده است [۴], [۵]:

"جمهوری اسلامی ایران در یک افق زمانی ده ساله تا سال ۱۴۰۴، در راستای اهداف توسعه شبکه هوشمند برق به عنوان شبکه‌ای کارا، امن، منعطف و پایدار که برق با کیفیت و قابلیت اطمینان مورد درخواست مشترکین و ذی‌نفعان را در اختیار آنان قرار می‌دهد و با استفاده از فن‌آوری‌های اطلاعات و ارتباطات، سامانه‌های هوشمند مدیریت، فن‌آوری‌های نوین شبکه قدرت، اینترنت اشیاء و قابلیت یکپارچه‌سازی منابع پراکنده اعم از مولدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت، تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها موجبات تعامل پویای ذی‌نفعان کل سیستم انرژی الکتریکی و نیز مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آن در بازار رقابتی را فراهم می‌آورد و به دنبال تثبیت و ارتقاء جایگاه ایران به عنوان کشور اول منطقه در توسعه فن‌آوری و توان پیاده‌سازی شبکه هوشمند برق خواهد بود."

در سند "راهبرد ملی توسعه دانش‌بنیان شبکه هوشمند برق ایران"، ۱۱ هدف کلان مشخص شده است که یک مورد از آن‌ها که کاملاً مرتبط با موضوع پروژه تحقیقاتی حاضر می‌باشد عبارت است از:

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

- خوداتکایی در طراحی، تولید نرم‌افزارها و پیاده‌سازی مراکز پایش و کنترل شبکه اصلی برق

شش راهبرد کلان برای تحقق اهداف تعیین‌شده در سند مذکور تعریف شده است که راهبرد اول عبارت است از: "*توسعه دانش فنی و بومی‌سازی فن‌آوری‌های اولویت‌دار شبکه هوشمند برق*". این راهبرد، ۸ حوزه را پوشش می‌دهد که در زیر نوشته شده‌اند:

- فن‌آوری کنتورهای هوشمند
- فن‌آوری‌های سمت مشترکین
- فن‌آوری‌های ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات
- سامانه‌های شبکه توزیع و انتقال برق
- سامانه‌های پایش ناحیه گسترده
- مراکز پایش و کنترل (دیسپاچینگ) شبکه اصلی برق
  - دست‌یابی به دانش طراحی و معماریِ پایش و کنترل شبکه شامل: تدوین سند راهبردی توسعه فن‌آوری کنترل و مدیریت شبکه اصلی برق کشور- تدوین مشخصات فنی مرکز بومی پایش و کنترل شبکه اصلی برق، طراحی نرم‌افزارهای سامانه پایش مرکز- طراحی نرم‌افزارهای کاربردی قدرت و کنترل مرکز
  - اجرای حداقل یک مورد از هر یک از سطوح و انواع مراکز پایش و کنترل
  - *تولید کلیه نرم‌افزارهای پایش و راهبری شبکه*
- سامانه‌های حفاظت شبکه برق
- فن‌آوری‌های نوین و یکپارچه‌سازی مولدهای پراکنده

همان‌طور که مشخص است، حوزه مربوط به مراکز پایش و کنترل شبکه برق و زیر حوزه "تولید کلیه نرم‌افزارهای پایش و راهبری شبکه" دقیقاً در راستای موضوع پروژه تحقیقاتی حاضر است.

از طرفی دیگر در سند "برنامه اقدامات توسعه فن‌آوری‌های شبکه هوشمند برق ایران" که برنامه تفصیلی اقدامات عملیاتی سند "راهبرد ملی توسعه دانش‌بنیان شبکه هوشمند برق ایران" را به تفکیک توضیح داده است، در ذیل هدف کلان *خوداتکایی در طراحی، تولید نرم‌افزارها و توسعه سامانه‌ها و برنامه‌های کاربردی*،

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

هدف خرد *توسعه و پیاده‌سازی سامانه ملی تخمین حالت شبکه* تعریف شده است که دقیقاً منطبق بر موضوع تحقیقاتی پروژه حاضر است. در جدول ۱-۴، اهداف خرد فناورانه در سند "برنامه اقدامات توسعه فن‌آوری‌های شبکه هوشمند برق ایران" نوشته شده‌اند.

جدول ۱-۴ اهداف خرد سند برنامه اقدامات توسعه فن‌آوری‌های شبکه هوشمند برق ایران

اهداف کلان	اهداف خرد
توسعه تجهیزات	دستیابی به فن‌آوری ساخت *PMU* به طور بومی و با قابلیت رقابتی در منطقه
	دستیابی به فن‌آوری ساخت متمرکزکننده داده‌های فازوری (*PDC*) به طور بومی و با قابلیت رقابتی در منطقه
	ایجاد قابلیت هوشمندی در تجهیزات موجود در شبکه (به منظور تبادل داده و دریافت و اجرای فرامین)
	دستیابی به فن‌آوری تجهیزات و سخت‌افزارهای مربوط به تولید سنسورها و سایر دستگاه‌های اندازه‌گیری
	توسعه و تکمیل شبکه سنکروفازور با مکان‌یابی و نصب *PMU*ها و *PDC*ها و ایجاد زیرساخت‌های ارتباطی
توسعه سامانه‌ها و برنامه‌های کاربردی	دستیابی به دانش فنی طراحی یک سیستم اسکادای ملی
	دستیابی به دانش فنی طراحی سیستم‌های مانیتورینگ و کنترل شبکه
	ایجاد سامانه ملی پایش خطوط انتقال و فوق توزیع و سیستم گزارش‌دهی بلادرنگ وقایع و تعرضات
	ایجاد سامانه ملی مدیریت نگهداری و تعمیرات عناصر شبکه (*Asset Management*)
	ایجاد سامانه ملی پایش اضافه‌بار حرارتی و تعیین زمان-واقعی ظرفیت حرارتی تجهیزات (*RTTR*[1])
	توسعه و پیاده‌سازی سامانه ملی تخمین حالت شبکه (state estimation)
	توسعه سامانه ملی پایش پایداری شبکه و پایدارساز گسترده سیستم قدرت

در سند "برنامه اقدامات توسعه فن‌آوری‌های شبکه هوشمند برق ایران"، لیست پروژه‌های پیشنهادی برای برنامه حمایت از طرح‌ها، پروژه‌ها، پایان‌نامه‌ها و مقالات دانشگاهی در حوزه‌های اولویت‌دار شبکه هوشمند برق ارائه شده است. این پروژه‌های پیشنهادی در سه رده دسته‌بندی شده‌اند. رده اول پروژه‌های فن‌آوری‌های اولویت A هستند، دسته دوم پروژه‌های فن‌آوری‌های اولویت B هستند. همچنین ذکر شده است که به منظور تقویت توان بازیگران بخش تحقیق و توسعه برای دوره میان‌مدت و بلندمدت، پروژه‌هایی در سطح طراحی فن‌آوری قابل تعریف است که در پایان هر دوره زمانی می‌توان از نظر در اولویت قرارگرفتن نسبت

[1] Real Time Thermal Rating

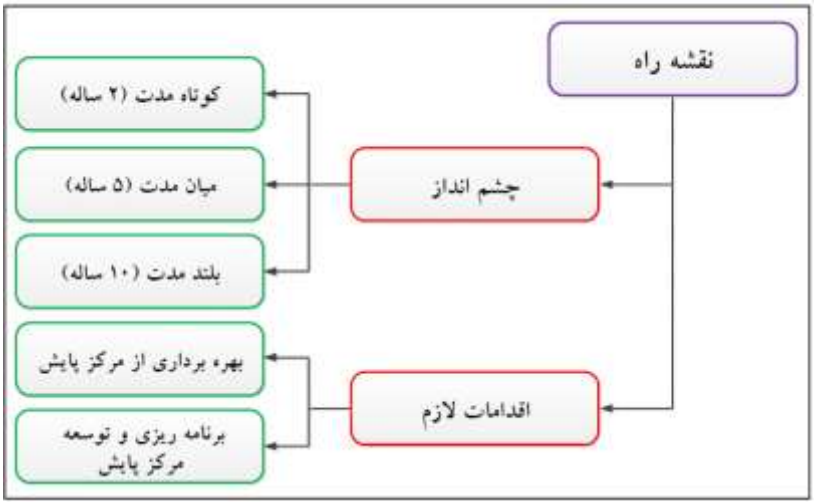
DOI: 10.30503/nripress.2020.248

به ارزیابی و تعیین اولویت مجدد آن‌ها اقدام کرد و در صورت در اولویت قرارگرفتن، طرح‌های حمایتی به سمت آن‌ها جهت‌دهی می‌شود. در ادامه، عناوین پروژه‌های پیشنهادی در سند مذکور در راستای موضوع تحقیقاتی تخمین حالت سیستم قدرت نوشته شده است.

- پروژه تحقیقاتی *توسعه و پیاده‌سازی سامانه ملی تخمین حالت شبکه*: این پروژه در رده پروژه‌های پیشرفته میان‌مدت و بلندمدت در سطح دست‌یابی به دانش فنی طراحی فن‌آوری در نظر گرفته شده است.

۱-۴-۲- نقشه‌راه بهره‌برداری و توسعه مرکز *WAMS* شبکه انتقال برق کشور

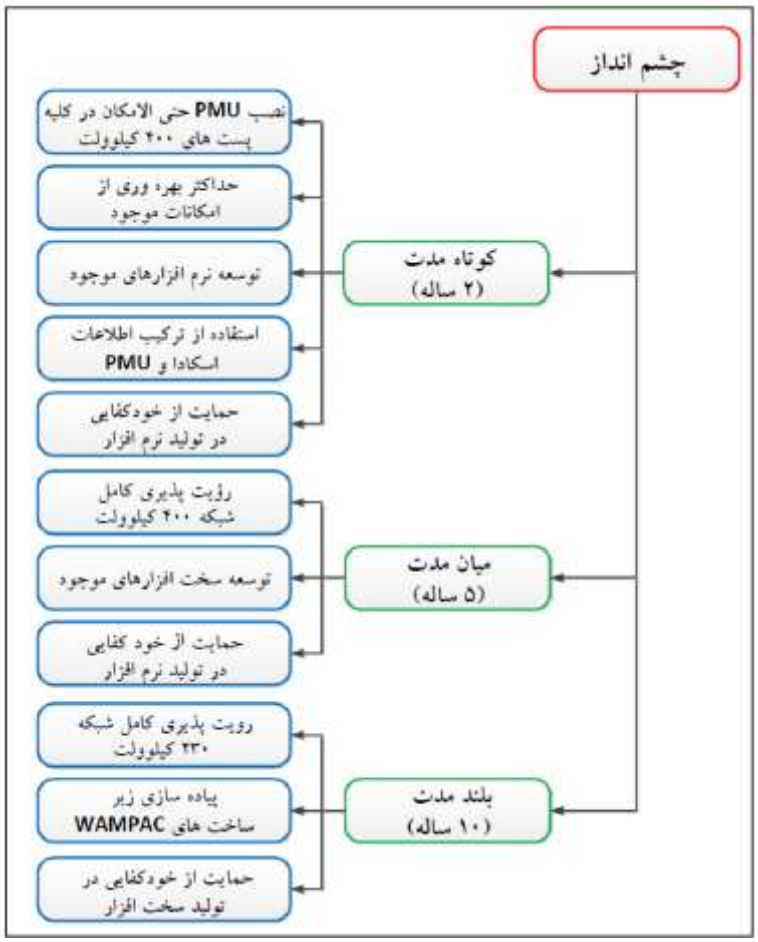
با احداث و بهره‌برداری از مرکز پایش لحظه‌ای داده‌های فازوری، سند "نقشه‌راه بهره‌برداری و توسعه مرکز *WAMS* شبکه انتقال برق کشور" در اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۳ در شرکت مدیریت شبکه برق ایران، تهیه و تدوین گردیده است. مطالب ارائه‌شده در این نقشه‌راه مطابق با شکل ۱-۱۱ در دو بخش چشم‌انداز و اقدامات لازم دسته‌بندی شده است. چشم‌اندازهای کوتاه‌مدت (۲ سال)، میان‌مدت (۵ سال) و بلندمدت (۱۰ سال) و اقدامات لازم برای بهره‌برداری و برنامه‌ریزی توسعه مرکز *WAMS* به تفکیک مشخص شده و از متخصصین کشور به منظور تحقیق و توسعه امکانات سامانه *WAMS* برای پیاده‌سازی نرم‌افزارهای کاربردی با استفاده از داده‌های سامانه *WAMS* دعوت به همکاری شده است [۱۷].



شکل ۱-۱۱ نقشه‌راه بهره‌برداری و توسعه مرکز *WAMS* شبکه انتقال برق کشور

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در شکل ۱-۱۲، چشم‌انداز در افق دید کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت نمایش داده شده است. در چشم‌انداز کوتاه‌مدت، بخشی تحت عنوان "استفاده از ترکیب اطلاعات اسکادا و *PMU*" وجود دارد و تخمین حالت ترکیبی مهم‌ترین زیرمجموعه آن است.



شکل ۱-۱۲ چشم‌انداز بهره‌برداری و توسعه مرکز *WAMS* شبکه انتقال برق کشور

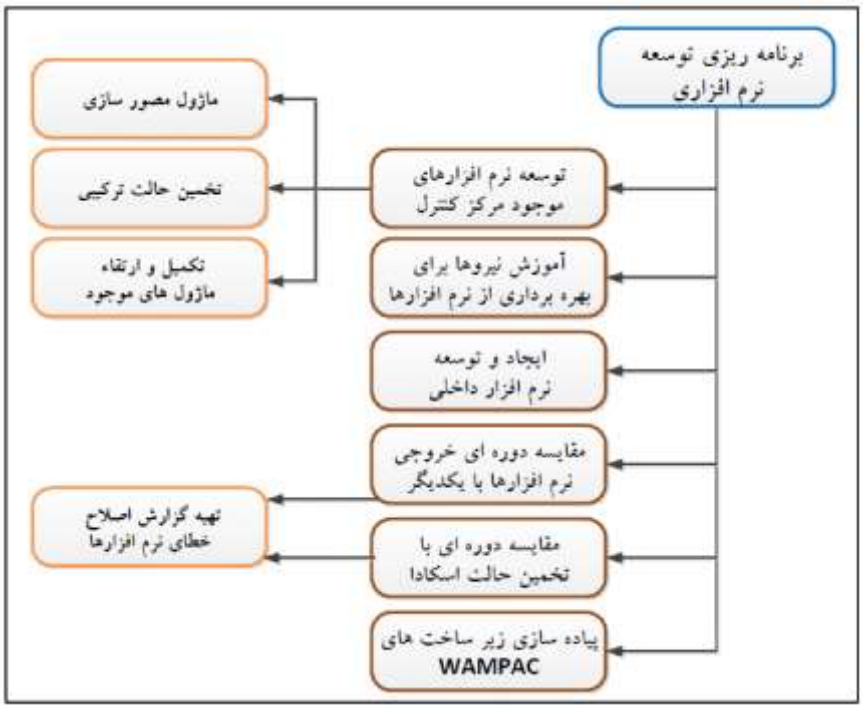
از طرف دیگر مطابق شکل ۱-۱۱، بخش اقدامات لازم دارای زیربخش برنامه‌ریزی و توسعه مرکز پایش لحظه‌ای است. سه مجموعه اقدامات برای بخش برنامه‌ریزی و توسعه مرکز پایش *WAMS* تعریف شده است که عبارت‌اند از:

- برنامه‌ریزی توسعه نرم‌افزاری

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

- برنامه‌ریزی توسعه سخت‌افزاری
- تحقیقات و برنامه‌ریزی

در شکل ۱-۱۳، ابعاد مورد نظر در بخش برنامه‌ریزی توسعه نرم‌افزاری مرکز *WAMS* نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، موضوع تخمین حالت ترکیبی در اولویت‌های بالا قرار گرفته است. مسلماً با گسترش شبکه فازوری کشور، تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده بیشتر از داده‌های فازوری میسر می‌شود. در صورتی که شبکه برق با استفاده از سامانه *WAMS* مشاهده‌پذیر شود، آن‌گاه پیاده‌سازی تخمین حالت سیستم قدرت مبتنی بر داده‌های فازوری و بدون استفاده از اطلاعات اسکادا امکان‌پذیر می‌شود.



شکل ۱-۱۳ برنامه‌ریزی توسعه نرم‌افزاری مرکز *WAMS*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل دوم: مسأله تخمین حالت در سیستم‌های قدرت

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۲-۱- مقدمه

در این فصل، به معرفی مسأله تخمین حالت در سیستم قدرت و بررسی چارچوب‌های مختلف آن (شامل تخمین حالت استاتیکی، ردیابی و دینامیکی) پرداخته شده است. سپس تاریخچه مسأله تخمین حالت در شبکه‌های برق ارائه شده است. در ادامه، جایگاه مبحث تخمین حالت شبکه‌های برق در حوزه برق و انرژی بررسی شده و سپس مطالعات علم‌سنجی مبحث تخمین حالت در سیستم‌های قدرت با استفاده از ابزارهای علم‌سنجی موجود در پایگاه استنادی اسکوپوس[۱] انجام شده است.

۲-۲- تخمین حالت در سیستم قدرت

سیستم قدرت امروزی به دلیل رشد روزافزون بار و در پی آن تولید انرژی و از سویی دیگر کافی‌نبودن میزان رشد ظرفیت خطوط انتقال و توزیع به میزان مورد نیاز، تحت فشار بوده و لذا در نزدیکی مرز بیشینه ظرفیت خود بهره‌برداری می‌شود. از طرف دیگر در دهه‌های اخیر، تغییر و تحولات گسترده‌ای در سیستم قدرت به وجود آمده است. در این زمینه می‌توان به گسترش نفوذ منابع انرژی پراکنده و ریزشبکه‌ها، گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، فعال‌سازی و بهره‌برداری از روش‌های مدیریت پاسخ تقاضا، توسعه خودروهای برقی و غیره اشاره نمود. با وارد شدن تمامی این تغییرات و افزوده شدن سایر روش‌ها، تجهیزات و فن‌آوری های نوین به شبکه برق، "شبکه هوشمند" به عنوان نسل جدیدی از شبکه‌های برق پا به عرصه وجود گذاشته است. طبق تعریف کارگروه شبکه هوشمند اروپا، شبکه هوشمند شبکه‌ای است که به صورت کارآمد بر عملکرد کلیه کاربران این شبکه شامل مولدها، مصرف‌کننده‌ها و انتقال‌دهندگان برق، نظارت می‌کند تا از راندمان اقتصادی بالا، پایداری شبکه قدرت، تلفات پایین، کیفیت و امنیت بالا و راحتی تولید انرژی اطمینان یابد. برای بهره‌برداری امن شبکه هوشمند به داده‌های قابل اطمینانی از متغیرهای مهم شبکه، بیشتر از آن چیزی که از اندازه‌گیری‌های مستقیم شبکه حاصل می‌شود نیاز است. متغیرهای مهم سیستم نشان‌دهنده شرایط بهره‌برداری سیستم نسبت به مرز پایداری و سلامت تجهیزات و هم‌چنین اقدامات کنترلی و بهره‌برداری لازم می‌باشند. بنابراین لازم است که توابع و قابلیت‌های جدیدی به مراکز دیسپاچینگ افزوده شوند. یکی از این قابلیت‌ها که نقش بسیار اساسی در سیستم مدیریت انرژی (EMS[۲]) دارد، قابلیت تخمین حالت می‌باشد.

اهداف تخمین حالت در سیستم قدرت عبارت‌اند از [۶۶], [۶۷]:

- فراهم‌نمودن یک نمای مناسب از شرایط زمان-واقعی سیستم قدرت

---

[۱] Scopus

[۲] Energy Management System

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

- فراهم‌نمودن یک نمایش استوار از سیستم برای تجزیه و تحلیل امنیت (نظیر پخش بار آنلاین، تجزیه و تحلیل پیشامدها، کنترل بار فرکانس)
- تهیه داده‌هایی برای مدل‌سازی و نگهداری سیستم
- تشخیص اندازه‌گیری‌های نامعتبر در سیستم
- تخمین پارامترهای شبکه بر اساس افزونگی در اندازه‌گیری

به طورکلی می‌توان گفت تخمین حالت جهت به دست آوردن بهترین تخمین از متغیرهای حالت حالت سیستم قدرت بر اساس مجموعه اندازه‌گیری‌های موجود و سایر داده‌های مفید سیستم می‌باشد که نتایج آن، پایگاه داده زمان-واقعی را برای سایر برنامه‌های کاربردی سیستم قدرت، مانند ارزیابی امنیت، کنترل و پخش بار اقتصادی و غیره فراهم می‌آورد.

تخمین حالت از اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی، داده‌های مربوط به بار، داده‌های مربوط به توپولوژی شبکه و اطلاعات شبکه مثل امپدانس خطوط، داده‌های کاذب، داده‌های ساختگی و غیره استفاده می‌کند. در صورت کافی بودن میزان اندازه‌گیری‌ها، شبکه مشاهده‌پذیر می‌باشد و می‌توان بدون استفاده از داده‌های بار، حالت سیستم را تخمین زد. خروجی تخمین حالت شامل ولتاژ شین‌ها، جریان خطوط و به طورکلی متغیرهای حالت سیستم، نتایج پردازش خطای اندازه‌گیری‌ها، تخمینی از تمام داده‌های اندازه‌گیری‌شده و اندازه‌گیری‌نشده سیستم و مشخص‌کردن داده‌های ناسازگار می‌باشد. داده‌های کاذب درواقع همان داده‌های تاریخی مانند تخمین میزان بار مصرفی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده در گذشته تا کنون می‌باشند. در سیستم قدرت ممکن است شین‌های با تزریق توان حقیقی و راکتیو صفر وجود داشته باشد (به عبارتی دیگر، شین مربوطه بار مصرفی نداشته باشد). این‌گونه از تزریق‌های شین با وجود عدم سنجش را می‌توان به‌عنوان اندازه‌گیری‌های بدون خطا در مسأله تخمین حالت به کار برد که تحت عنوان اندازه‌گیری‌های مجازی خوانده می‌شوند. نکته قابل ذکر این است که داده‌های کاذب و ساختگی معمولاً دقت کمتری نسبت به اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی دارند. همان‌طور که بیان شد، با استفاده از مجموع داده‌های زمان-واقعی و دیگر داده‌ها، تخمین حالت با هدف تخمین متغیرهای حالت سیستم اجرا می‌شود و سپس داده‌های حاصل از تخمین، برای ارزیابی امنیت سیستم و آنالیز پیشامد زمان-واقعی سیستم به کار می‌روند.

همواره در مدل‌های تخمین حالت فرض می‌شود که توپولوژی شبکه و داده‌های آن مانند امپدانس خطوط معلوم می‌باشد؛ ولی در مورد پارامترهای شبکه همواره ممکن است خطایی وجود داشته باشد. خطاهای توپولوژی و پارامترهای سیستم قدرت به شدت دقت تخمین حالت را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به همین دلیل تحقیقاتی در مورد شناسایی خطاهای توپولوژی و پارامترهای شبکه صورت گرفته است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی در سیستم قدرت از طریق سیستم *SCADA* و یا سامانه *WAMS* جمع‌آوری می‌شوند. داده‌ها شامل توان حقیقی و راکتیو خطوط، توان حقیقی و راکتیو تزریقی به شین‌ها و ولتاژ شین ها و زاویه ولتاژ شین‌ها می‌باشند. این داده‌های جمع‌آوری‌شده دارای خطا هستند. مهم‌ترین دلایل وجود خطا عبارت‌اند از:

- کالیبراسیون غیردقیق مبدل‌ها
- تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال
- نویزهای سیستم ارتباطی
- فازهای غیرمتعادل

در فرآیند تخمین حالت، داده‌های ناصحیح، تصحیح می‌شوند و علت این امر آن است که مقادیر فیزیکی (توان خطوط، ولتاژها و...) و درنتیجه مقادیر اندازه‌گیری‌شده این کمیت‌ها، در شبکه قدرت به یکدیگر وابسته می‌باشند [۶۸].

تا چندین سال پیش مهندسین تصور می‌کردند که داده‌های اسکادا دقیق هستند. با این حال، آن‌ها دریافتند که با استفاده از اسکادا، اندازه‌گیری‌ها همچنان در معرض خطا قرار می‌گیرند و بعضی اوقات حتی در دسترس نیستند [۶۹]. سامانه اسکادا داده‌هایی از قبیل توان حقیقی و راکتیو، دامنه و زاویه فاز ولتاژ و جریان را از *RTU*ها جمع‌آوری می‌کند. برای مدت طولانی، دریافت زاویه فاز ولتاژ و جریان دشوار بود؛ زیرا نیاز به مرجع زمان برای سنکرون‌سازی اندازه‌گیری‌ها است [۷۰]. به منظور حل این مشکل، مهندسان شروع به استفاده از سامانه *GPS* برای سنکرون‌سازی اندازه‌گیری‌ها کردند و واحدهای اندازه‌گیری فازوری (*PMU*) مجهز به گیرنده‌های *GPS* شدند. با انجام این کار، اندازه‌گیری‌ها با یک برچسب زمانی به مرکز کنترل تحویل داده می‌شود که به محاسبه زاویه فاز ولتاژ و جریان کمک می‌کند [۷۱]. روابط بین اندازه‌گیری‌های فازوری و متغیرهای حالت باعث می‌شود تا روش‌های تخمین حالت مبتنی بر استفاده از سنکروفازورها بسیار سریع‌تر از روش‌های سنتی باشند. بنابراین، ایده جایگزینی اسکادا با *PMU* پیشنهاد شد، اما به دلیل هزینه‌های بالای جانشینی هنوز مسیر بسیار طولانی در پیش است. با این وجود، *PMU*ها می‌توانند برای بهبود روش‌های سنتی مورد استفاده در تخمین‌گرهای حالت که براساس داده‌های اسکادا هستند، استفاده شوند.

۲-۳- چارچوب‌های مختلف تخمین حالت در سیستم قدرت

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در این بخش، به معرفی چارچوب‌های مختلف تخمین حالت در سیستم قدرت پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا پایداری حالت ماندگار[۱]، پایداری حالت گذرا[۲] و پایداری دینامیکی[۳] در سیستم قدرت معرفی می‌شوند. پایداری یک سیستم به توانایی آن سیستم برای بازگشت به حالت ماندگار پس از وقوع یک اغتشاش گفته می‌شود. در شبکه برق AC با ژنراتورهای سنکرون، پایداری سیستم قدرت عبارت از توانایی آن برای بازگشت به حالت ماندگار بدون از دست دادن همزمانی[۴] می‌باشد. به عبارت دیگر، پایداری سیستم قدرت، به توانایی ماشین‌های سنکرون سیستم برای باقی ماندن در حالت سنکرون در مواجهه با هر گونه اغتشاش گفته می‌شود. به همین دلیل است که به این نوع پایداری، پایداری سنکرون نیز گفته می‌شود. پایداری سیستم قدرت را می‌توان به پایداری حالت ماندگار، پایداری حالت گذرا و پایداری دینامیکی دسته‌بندی نمود [۷۲]. در ادامه، این سه نوع پایداری شرح داده شده‌اند.

- پایداری حالت ماندگار (یا شبه‌ماندگار[۵]): پایداری حالت ماندگار به توانایی ماشین‌های مختلف سیستم در بازیابی و ماندن در حالت سنکرون، بعد از یک اغتشاش کوچک و آرام، مانند تغییر تدریجی بار گفته می‌شود. مطالعات پایداری حالت ماندگار به تغییرات کوچک و تدریجی در شرایط عملیاتی سیستم قدرت محدود می‌شوند. در پایداری حالت ماندگار، ولتاژ باس‌ها در نزدیکی مقادیر نامی خود نگاه داشته می‌شوند. همچنین، اطمینان حاصل می‌شود که زوایای فاز بین دو باس خیلی بزرگ نباشند. علاوه بر این، اضافه بار تجهیزات و خطوط انتقال مورد بررسی قرار می‌گیرند. این بررسی‌ها عموما توسط مطالعات پخش بار انجام می‌شوند. در حالت ماندگار، نقطه عملکرد سیستم تنها به دلیل تغییرات آهسته و روان بار و یا تغییرات کوچک منابع تجدیدپذیر تغییر می‌کند. در این حالت، متغیرهای حالت سیستم تغییرات بسیار ناچیزی داشته و تقریبا ثابت می‌باشند [۷۲].

- پایداری حالت گذرا: مطالعات پایداری حالت گذرا در شرایطی انجام می‌شود که یک اغتشاش ناگهانی و شدید (مانند وقوع عیب، از کار افتادن یک ژنراتور، عملیات کلیدزنی و تغییر بار بزرگ) در سیستم قدرت رخ دهد. هدف از مطالعات پایداری حالت گذرا این است که متغیرهای سیستم پس از رفع

---

۱ Steady-State Stability

۲ Transient Stability

۳ Dynamic Stability

۴ Synchronism

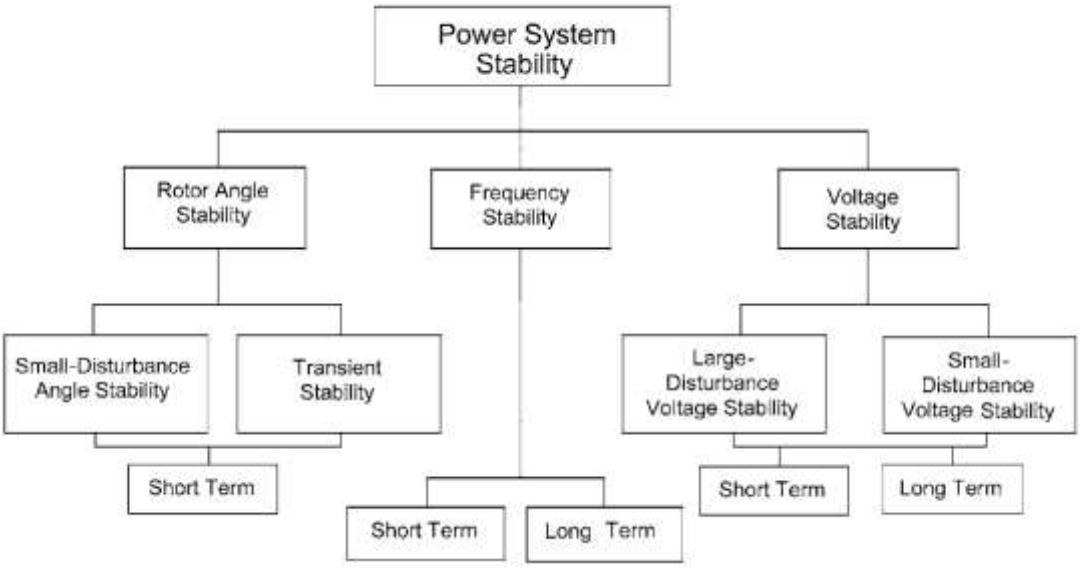
۵ Quasi-Steady

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

اغتشاش به حالت ماندگار برسند [۷۲].

- پایداری دینامیکی: این نوع پایداری حالتی بین پایداری ماندگار و گذرا است. به توانایی سیستم قدرت در حفظ پایداری تحت اغتشاشات کوچک، پایداری دینامیکی گفته می‌شود. اغتشاشات کوچک می‌توانند بر اثر نوسانات رندوم در بار و یا میزان تولید رخ دهند. این اغتشاشات توسط تنظیم‌کننده‌های ولتاژ، کنترل‌کننده‌ها و گاورنرها برطرف می‌شوند. در این نوع پایداری، اغتشاشات کوچک ۱۰ تا ۳۰ ثانیه‌ای مورد نظر است [۷۲].

لازم به ذکر است که کارگروه *IEEE/CIGRE*[۱]، مفاهیم پایداری دینامیکی و حالت ماندگار را ترکیب کرده و تحت نام پایداری سیگنال-کوچک در نظر گرفته است [۷۳]. در شکل ۲-۱، دسته‌بندی پایداری سیستم قدرت توسط این کارگروه نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ دسته‌بندی انواع پایداری در سیستم قدرت

در ادامه، چارچوب‌های مختلف تخمین حالت در سیستم قدرت معرفی شده‌اند.

[۱] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۲-۳-۱- تخمین حالت استاتیکی

درصورتی‌که بردار حالت سیستم در زمان k تنها از اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده در همان زمان k تخمین زده شود، تخمین‌گر حالت استاتیکی می‌باشد. در این زمینه می‌توان به روش کمترین مربعات وزن‌یافته (WLS[۱]) اشاره نمود. از آن‌جایی که در روش استاتیکی، از اطلاعات مقادیر بردار حالت تخمین‌زده‌شده و اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های قبلی استفاده نمی‌شود، لازم است که عملیات تخمین حالت استاتیکی در زمان $k+1$ نیز به طور کامل اجرا شود. درنتیجه، بار محاسباتی این روش به علت افزایش روزافزون مقیاس و پیچیدگی سیستم قدرت امروزی افزایش می‌یابد.

به عبارت دیگر، در تخمین حالت استاتیکی، اطلاعات انتقال حالت[۲] کاملاً نادیده گرفته می‌شود. درنتیجه در روش تخمین حالت استاتیکی، اطلاعات اندازه‌گیری و تخمین‌زده‌شده در زمان‌های گذشته در نظر گرفته نمی‌شود. این روش حافظه گذشته را در زمان حال به همراه ندارد و نمی‌تواند دینامیک‌های واقعی سیستم (حالت‌های دینامیکی ژنراتورها، بارها و غیره) را ردیابی کند.

۲-۳-۲- تخمین حالت ردیابی[۳]

روش‌های تخمین حالت ردیابی بر اساس توسعه تخمین حالت استاتیکی به دست می‌آیند. این روش یک حالت شبه‌ماندگار را برای سیستم فرض می‌کند که در آن حالت سیستم در زمان k به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$X(k) = X(k-1) + \omega(k) \qquad (۱-۲)$$

در این رابطه، $X(k)$ نشان‌دهنده بردار حالت در زمان k بوده و $\omega(k)$ یک نویز سفید گوسی با میانگین صفر است که ماتریس کوواریانس آن معلوم است. یکی از چالش‌های موجود در فرمول‌نویسی روش تخمین حالت ردیابی عدم وجود یک مدل مناسب برای نشان دادن پویایی و دینامیک وضعیت سیستم است. روش تخمین حالت ردیابی یک حالت شبه‌ماندگار را برای سیستم فرض می‌کند که در آن حالت سیستم بدون تغییر باقی می‌ماند؛ البته به غیر از نویز گوسی $\omega(k)$. با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده و بارهای انعطاف‌پذیر، دیگر نمی‌توان تغییرات متغیرهای حالت سیستم را تنها با یک نویز سفید گوسی مدل نمود. این وضعیت در حضور تغییر توپولوژی شبکه و پارامترهای خطوط انتقال و ترانسفورماتورها، کلیدزنی

---

[۱] Weighted Least Square

[۲] State Transition Information

[۳] Tracking State Estimation (TSE)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

بانک‌های خازنی و راکتورهای موازی نیز تشدید می‌شود. درنتیجه، اتخاذ روش تخمین حالت ردیابی برای کاربردهای عملی به یک چالش بزرگ تبدیل می‌شود.

۲-۳-۳- تخمین حالت دینامیکی

برای غلبه بر مشکلات روش‌های تخمین حالت استاتیکی و ردیابی، از روش‌های تخمین حالت دینامیکی استفاده می‌شود. در روش دینامیکی، بردار حالت در زمان k به صورت بازگشتی و از روی مقادیر تخمین‌زده شده در زمان قبل $k-1$ و مقادیر اندازه‌گیری زمان k به‌روزرسانی می‌شود.

بار محاسباتی پایین‌تر و قابلیت پیش‌بینی از مزایای روش دینامیکی نسبت به روش استاتیکی می‌باشند. قابلیت پیش‌بینی بردار حالت یک گام به جلو در روش دینامیکی، زمان تصمیم‌گیری بیشتری به اپراتور می‌دهد. در روش دینامیک، به مدل دینامیکی فضای حالت سیستم نیاز می‌باشد؛ در حالی که روش‌های تخمین حالت استاتیکی و ردیابی بی‌نیاز از این مدل می‌باشند [۲۹].

شایان ذکر است که روش تخمین حالت استاتیکی ممکن است در صورت بروز تغییرات ناگهانی عملکرد بهتری نسبت به روش تخمین حالت ردیابی داشته باشد. با این حال، قابلیت ردیابی دینامیکی سیستم را برخلاف روش تخمین حالت دینامیکی ندارد. علاوه بر این، تخمین حالت استاتیکی (برخلاف تخمین حالت دینامیکی)، مستلزم این است که بردار حالت تنها با آخرین مجموعه اندازه‌گیری‌های موجود مشاهده‌پذیر باشد [۷۴], [۷۵].

۲-۴- تاریخچه تخمین حالت در سیستم قدرت

در سال ۱۹۶۸، شوئپه از دانشگاه *MIT* مسأله تخمین حالت سیستم قدرت را مطرح کرد. وی تخمین حالت را به عنوان الگوریتم پردازش داده برای تبدیل قرائت اندازه‌گیرها و سایر اطلاعات در دسترس به تخمینی از حالت سیستم قدرت تعریف کرد. بیست سال بعد تخمین حالت به عنوان یکی از ابزارهای استاندارد در بهره‌برداری سیستم قدرت معرفی شد. در سال ۱۹۹۹، مونیچلی[۱] کتابی به نام "تخمین حالت در سیستم‌های قدرت[۲]" [۷۶] منتشر کرد که یک رویکرد کلی در مورد آن موضوع بود. وی در کتاب خود موضوع تخمین حالت را در سطح عمیق‌تر و به طور خاص روش حداقل مربعات وزن‌دار[۳] معرفی کرده است. روش حداقل مربعات وزن‌دار امروزه نیز کاربرد فراوانی در تخمین حالت استاتیکی سیستم قدرت دارد. مونیچلی مباحث

[۱] A. Monticelli

[۲] State Estimation in Electric Power Systems

[۳] Weighted Least Saquare (WLS)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

بسیاری از جمله روش تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از معادلات تجزیه و تحلیل پخش بار استاندارد، روش پخش بار مجزاشده[۱] و پخش بار *DC*، تجزیه و تحلیل داده‌های بد، تجزیه و تحلیل مشاهده‌پذیری در مسأله تخمین حالت و روش‌های حل ماتریس و بسیاری موارد کاربردی دیگر را در کتاب خود مورد بحث قرار داده است. در سال ۲۰۰۴، علی ابور[۲] و آنتونیو گومز اکسپوزیتو[۳] کتاب دیگری را تحت عنوان "تخمین حالت سیستم قدرت، تئوری و پیاده‌سازی[۴]" [۳۰] منتشر کردند که مروری بر عملکرد سیستم قدرت و نقش تخمین حالت در مدیریت انرژی را پوشش می‌دهد. از آن زمان تا کنون، تحقیقات در زمینه تخمین حالت سیستم قدرت و انواع روش‌ها برای بهبود دقت و کاهش بار محاسباتی و... در حال انجام است. امروزه تخمین حالت یک جزء مهم تمام سیستم‌های *EMS* و یک ابزار پایه برای اطمینان از بهره‌برداری امن سیستم قدرت می‌باشد.

۲-۵- جایگاه مبحث تخمین حالت شبکه‌های برق در حوزه برق و انرژی

اسکوپوس بزرگ‌ترین پایگاه چکیده و نمایه‌های استنادی جهان است و یکی از ابزارهای سریع و جامع برای جستجو به شمار می‌رود. اسکوپوس اواخر سال ۲۰۰۴ توسط ناشر هلندی *الزویر*[۵] راه‌اندازی شد و خیلی سریع به معتبرترین پایگاه اطلاعاتی تبدیل شد. این پایگاه استنادی، اطلاعات مقالات علمی را از سال ۱۹۷۰ میلادی بایگانی نموده است. استفاده از اطلاعات این پایگاه به صورت رایگان فراهم نیست. این پایگاه ابزار خوبی برای پژوهشگران در حوزه‌های مختلف است که نه تنها اطلاعات مقالات و چکیده آن‌ها بلکه میزان استنادات آن‌ها را نیز بیان می‌کند. به عبارت دیگر علاوه بر جستجو و دسترسی به مقالات معتبر می‌توان فعال‌ترین نویسنده، سازمان، مراکز تحقیقاتی و مجلات معتبر و پرطرفدار را در حوزه موضوعی خاص تعیین و رتبه‌بندی کرد. این پایگاه با پوشش میان‌رشته‌ای وسیع خود، مجلات علمی، کتب و مجموعه مقالات کنفرانسی را در زمینه‌های مختلف فن‌آوری، پزشکی، علوم پایه، علوم اجتماعی، هنر و علوم انسانی و غیره ارائه می‌دهد. همچنین امکان جستجو در ثبت اختراعات را نیز فراهم می‌کند. اسکوپوس در حال حاضر

---

[۱] Decouple

[۲] Ali Abur

[۳] Antonio Gómez Expósito

[۴] Power System State Estimation: Theory and Implementation

[۵] Elsevier

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

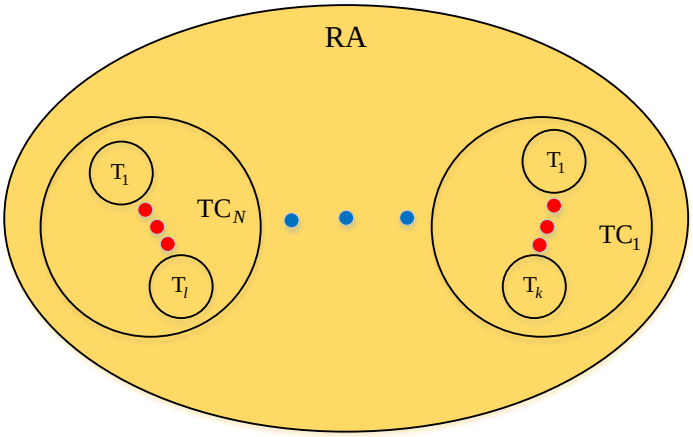
اطلاعات کتاب‌شناختی بیش از ۵۶ میلیون سند از بیش از ۵۰۰۰ ناشر جهان را جمع‌آوری کرده است. درمجموع این پایگاه اطلاعات بیش از ۲۰۰۰۰ مجله علمی پژوهشی را در خود نمایه کرده است.

در پایگاه استنادی اسکوپوس، پایگاه تجزیه و تحلیل استنادی سای‌ول[۱] وجود دارد که در سال ۲۰۰۹ معرفی شد. این پایگاه امکان تجزیه و تحلیل‌های استنادی پیشرفته و عمیق را بر مبنای داده‌های پایگاه اسکوپوس فراهم می‌سازد. بدین‌ترتیب، پایگاه استنادی سای‌ول یک نمایه استنادی محسوب نمی‌شود، بلکه یک پایگاه استنادی تجزیه و تحلیل پژوهشی است که امکان مقایسه نتایج به دست آمده را با میانگین‌ها و استانداردهای جهانی ایجاد می‌کند. بدین‌ترتیب، با استفاده از سای‌ول می‌توان عملکرد پژوهشی یک پژوهشگر، سازمان، کشور، منطقه، مجله، گروه پژوهشی و مانند آن‌ها را ارزیابی کرد. همچنین استفاده از این پایگاه، در مطالعات علم‌سنجی از جایگاهی مؤثر برخوردار است.

ابزار علم‌سنجی سای‌ول، امکان بررسی در سه حالت را به کاربر می‌دهد که عبارت‌اند از:

- حوزه تحقیقاتی *Research Area (RA)*
- خوشه عنوان *Topic Cluster (TC)*
- عنوان *Topic (T)*

در این سامانه، *TC*ها خوشه‌هایی از موضوعات در زیرمجموعه یک *RA* هستند. لذا هر *RA* شامل چندین *TC* می‌شود. همچنین *T*ها عناوین موضوعاتی است که زیرمجموعه هر *TC* هستند. لذا هر *TC* شامل چندین *T* می‌شود. توضیحات فوق در شکل ۲-۲ کاملاً مشهود است.



[۱] SciVal

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شکل ۲-۲ رابطه بین حوزه‌ها، خوشه‌ها و عناوین در پایگاه سای‌ول

با بررسی پایگاه سای‌ول به این نتیجه رسیده شد که یکی از *RA* های از پیش تعریف‌شده در این پایگاه عبارت است از "*Energy Engineering and Power Technology*". در این حوزه تحقیقاتی تعداد ۳۸ خوشه عنوان و ۲۴۴۲ عنوان از پیش تعریف‌شده وجود دارد. تمامی ۲۴۴۲ عنوان بر اساس شاخص تعداد مستندات رده‌بندی شده‌اند. در این حوزه تحقیقاتی، ۲ عدد موضوع از پیش تعریف‌شده مرتبط با تخمین حالت شبکه‌های برق وجود دارد که عبارت‌اند از:

1) *State estimation; Electric power transmission networks; FDI attacks*
2) *State estimation; Electric power distribution; Meter placement*

موضوع تحقیقاتی شماره ۱ مربوط به تخمین حالت شبکه برق در سطح انتقال و موضوع شماره ۲ مربوط به تخمین حالت در شبکه‌های توزیع برق است. در رده‌بندی ارائه‌شده پایگاه سای‌ول، موضوع تحقیقاتی شماره ۱ در رده ۱۰۹ و موضوع تحقیقاتی شماره ۲ در رده ۳۴۹ قرار دارند. با توجه به این آمار نتیجه گرفته می‌شود که هر دو موضوع تحقیقاتی در بین ۱۵٪ موضوعات برتر حوزه تحقیقاتی مذکور هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که موضوع تخمین حالت در شبکه‌های برق یک موضوع تحقیقاتی مهم و همچنین مورد علاقه محققین حوزه برق و انرژی است.

۲-۶- علم‌سنجی مسأله تخمین حالت در سیستم قدرت با استفاده از پایگاه استنادی اسکوپوس و ابزارهای تحلیلی آن

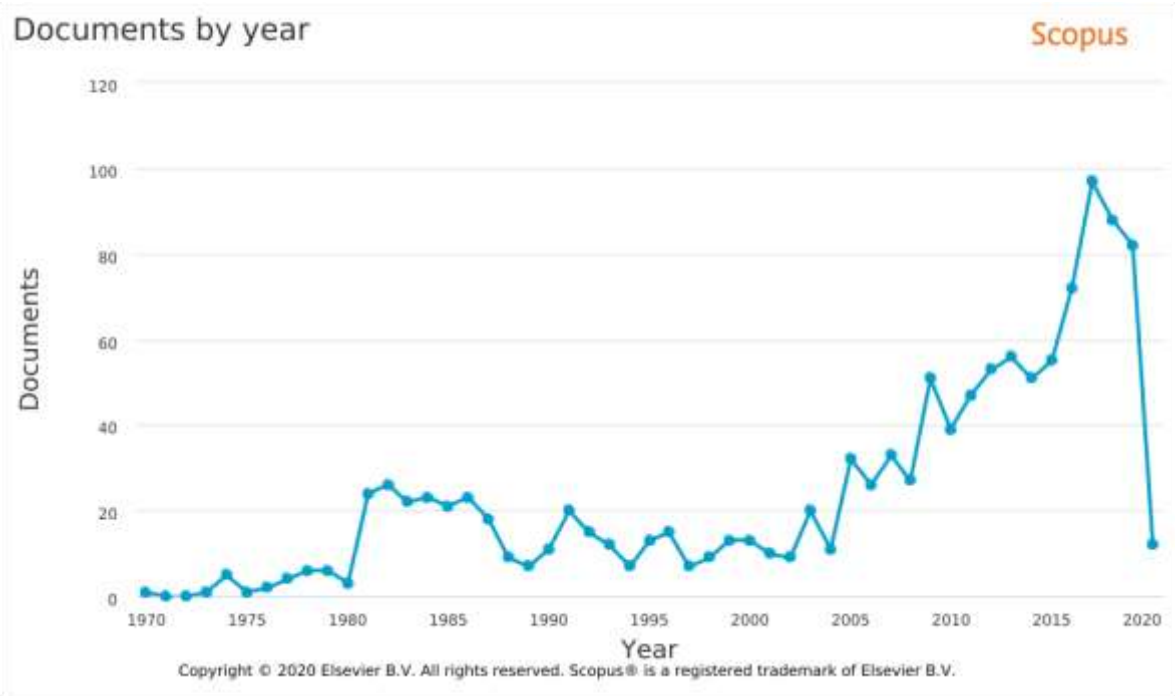
توجه: پیش از ارائه مطالب این بخش باید توجه نمود که با تغییر کلیدواژه انتخابی، مسلماً نتایج ارائه‌شده در این بخش تغییر خواهد کرد. اما در هر صورت، در این بخش سعی شده که کلیدواژه انتخابی کاملاً تخصصی انتخاب شود تا دامنه تحقیقات دقیقاً منطبق بر موضوع تحقیقاتی تخمین حالت سیستم قدرت باشد.

کلیدواژه *"power system state estimation"* در پایگاه استنادی اسکوپوس جستجو شده است و سپس با استفاده از ابزار تجزیه و تحلیل نتایج[۱] این پایگاه داده، نتایج زیر به دست آمده است. در شکل ۲-۳ تعداد مستندات به تفکیک سال نشان داده شده است. همان‌طور که از منحنی رسم‌شده مشخص است، پوش منحنی به صورت یک منحنی نمایی صعودی است و این بدین معنی است که تحقیقات در زمینه تخمین

[۱] Analyze Search Results

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

حالت سیستم قدرت همچنان در حال افزایش و تکامل است. این روند افزایشی از حدود سال ۲۰۰۰ به بعد کاملاً مشهود است و این به دلیل ظهور مفاهیم شبکه‌های هوشمند انرژی و همچنین اختراع *PMU* و پیدایش مفاهیم اولیه سامانه *WAMS* است. لذا تحقیقات در زمینه تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از این ابزار و مفاهیم جدید، شکل جدیدی به خود گرفته و روند کاملاً افزایشی پیدا کرده است.



شکل ۲-۳ تعداد مستندات به تفکیک سال

در جدول ۲-۱، نام مجلاتی (این مجلات شامل دفترچه مقالات چاپ‌شده در کنفرانس هم هستند) که در پایگاه استنادی اسکوپوس نمایه می‌شوند و این مستندات در آن‌ها به چاپ رسیده است به ترتیب تعداد مستندات نوشته شده است.

جدول ۲-۱ تعداد مستندات مرتبط با "تخمین حالت در سیستم قدرت" در مجلات و کنفرانس‌ها

ردیف	نام مجله	تعداد مستندات
1	IEEE Transactions on Power Systems	164
2	Electric Power Systems Research	34
3	IEEE Power Engineering Review	31

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

ردیف	نام مجله	تعداد مستندات
4	International Journal of Electrical Power And Energy Systems	29
5	Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao / Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering	24
6	IEEE Transactions on Smart Grid	17
7	Dianli Xitong Zidonghua / Automation of Electric Power Systems	14
8	IET Generation Transmission and Distribution	14
9	Dianli Xitong Baohu Yu Kongzhi / Power System Protection and Control	11
10	Electric Power Components and Systems	9
11	IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)	8
12	IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	8
13	Electric Machines and Power Systems	7
14	IEEE AFRICON Conference	7
15	International Transactions on Electrical Energy Systems	7
16	Lecture Notes in Computer Science Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics	7
17	Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference	7
18	Dianwang Jishu / Power System Technology	5
19	Energies	5
20	IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing	5
21	IEEE Transactions on Signal Processing	5
22	IEEJ Transactions on Power and Energy	5
23	Proceedings IEEE International Symposium on Circuits and Systems	5
24	Proceedings of the IEEE	5
25	Proceedings of The Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON	5
26	Radiophysics and Quantum Electronics (English Translation of Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Radiofizika)	5

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

ردیف	نام مجله	تعداد مستندات
27	Conference Record IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference	4
28	Dianli Xitong Zidonghue / Automation of Electric Power Systems	4
29	Engineering News Record	4
30	IEE Conference Publication	4
31	IEEE Journal on Selected Areasin Communications	4
32	IEEE Systems Journal	4
33	IEEE Transactions on Control of Network Systems	4
34	IEEE Transactions on Power Delivery	4
35	IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	4
36	Przeglad Elektrotechniczny	4
37	2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting Conference Proceedings	3
38	Advances in Intelligent Systems and Computing	3
39	AIP Conference Proceedings	3
40	Applied Mechanics and Materials	3
41	Electrical Engineering in Japan	3
42	ICASSP IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings	3
43	IEE Colloquium Digest	3
44	IEEE Access	3
45	IEEE Transactions on Industrial Informatics	3
46	IFAC Papersonline	3
47	Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science	3
48	International Journal of Emerging Electric Power Systems	3
49	International Journal of Power and Energy Systems	3
50	Lecture Notes in Electrical Engineering	3

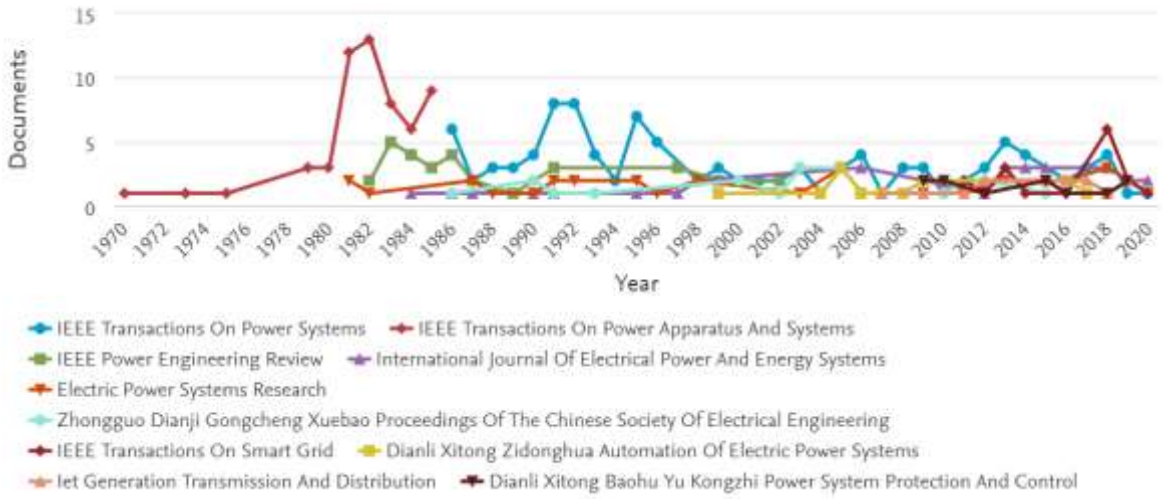
DOI: 10.30503/nripress.2020.248

ردیف	نام مجله	تعداد مستندات
51	Measurement Journal of the International Measurement Confederation	3
52	Midwest Symposium on Circuits and Systems	3
53	Archives of Electrical Engineering	2
54	Automatica	2
55	Canadian Electrical Engineering Journal	2
56	Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering	2
57	Conference Record Asilomar Conference on Signals Systems and Computers	2
58	Dianli Zidonghua Shebei / Electric Power Automation Equipment	2
59	E3S Web of Conferences	2
60	Energy Procedia	2
61	European Journal of Scientific Research	2
62	Expert Systems With Applications	2
63	IEEE Computer Applications in Power	2
64	IEEE Region 10 Annual International Conference Proceedings TENCON	2
65	IEEE Transactions on Automatic Control	2
66	IEEE Transactions on Industrial Electronics	2
67	IFAC Proceedings Volumes IFAC Papersonline	2
68	International Journal of Applied Engineering Research	2
69	International Journal of Control	2
70	International Review on Modelling and Simulations	2
71	Iop Conference Series: Materials Science And Engineering	2
72	Journal of Electrical Engineering and Technology	2
73	Neurocomputing	2
74	Proc Inst Electr Eng London	2
75	Procedia Computer Science	2

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

ردیف	نام مجله	تعداد مستندات
76	Proceedings of the ACM Conference on Computeran d Communications Security	2
77	Proceedings of the Annual Southeastern Symposium on System Theory	2

در شکل ۲-۴، سیر تاریخی تعداد مستندات در ۱۰ مجله‌ای که بیش‌ترین مقالات در آن‌ها به چاپ رسیده است نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل ۲-۴، مجله *IEEE Transaction On Power Apparatus And Systems* نام قدیمی مجله *IEEE Transaction On Power Systems* است که از سال ۱۹۸۷ نام آن تغییر کرده است. دو مجله *IEEE Transaction On Power Systems* و *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* در طول تاریخ همواره مورد علاقه محققان برای انتشار نتایج تحقیقات خود در زمینه تخمین حالت سیستم‌های قدرت بوده‌اند. البته مجله *IEEE Transaction On Smart Grid* که یک مجله نوظهور است توجه محققان زیادی را برای چاپ مقالات به خود جلب کرده است.

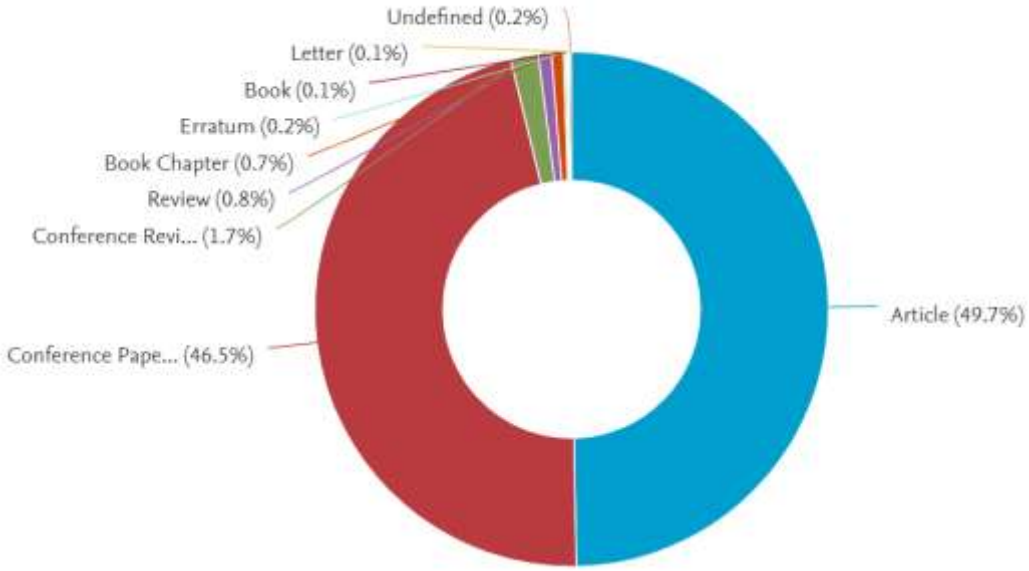


شکل ۲-۴ تعداد مستندات در ۱۰ مجله برتر در طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۰

در شکل ۲-۵، انواع مستندات نمایه‌شده در پایگاه استنادی اسکوپوس در حوزه تخمین حالت سیستم‌های قدرت و درصد تجمعی هر یک از آن‌ها نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، عمده مستندات

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

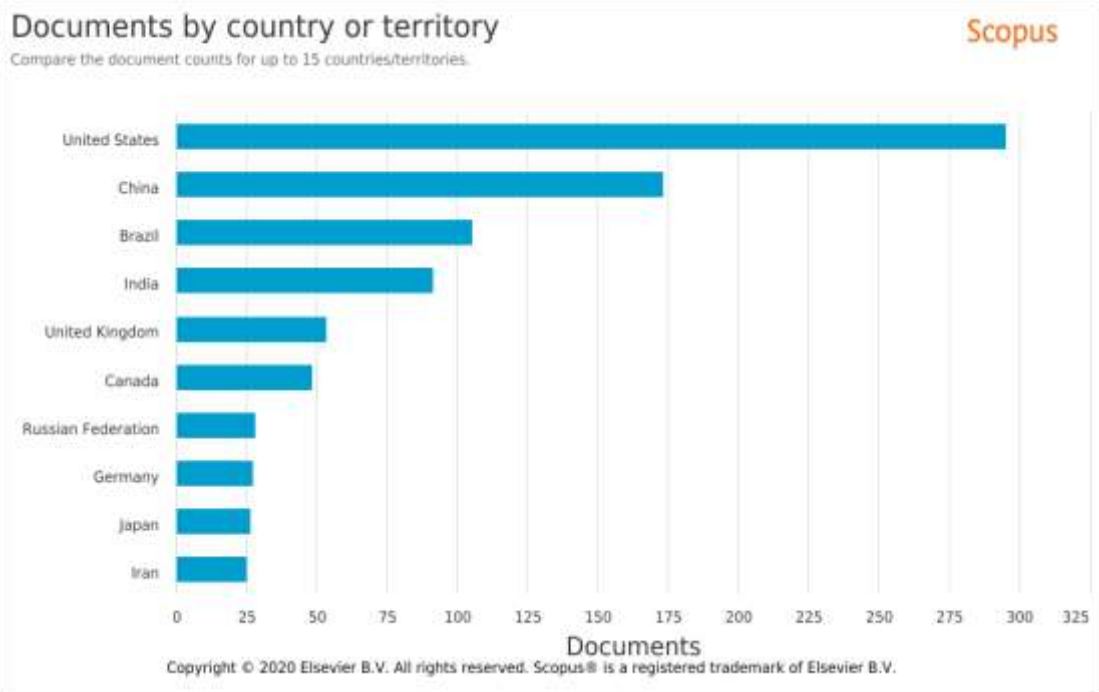
از نوع مقاله هستند. از کل مستندات، ۴۹,۷٪ مقاله چاپ‌شده در مجلات و ۴۶,۵٪مقالات ارائه‌شده در کنفرانس‌ها هستند.



شکل ۲-۵ انواع مستندات حوزه *"Power System State Estimation"*

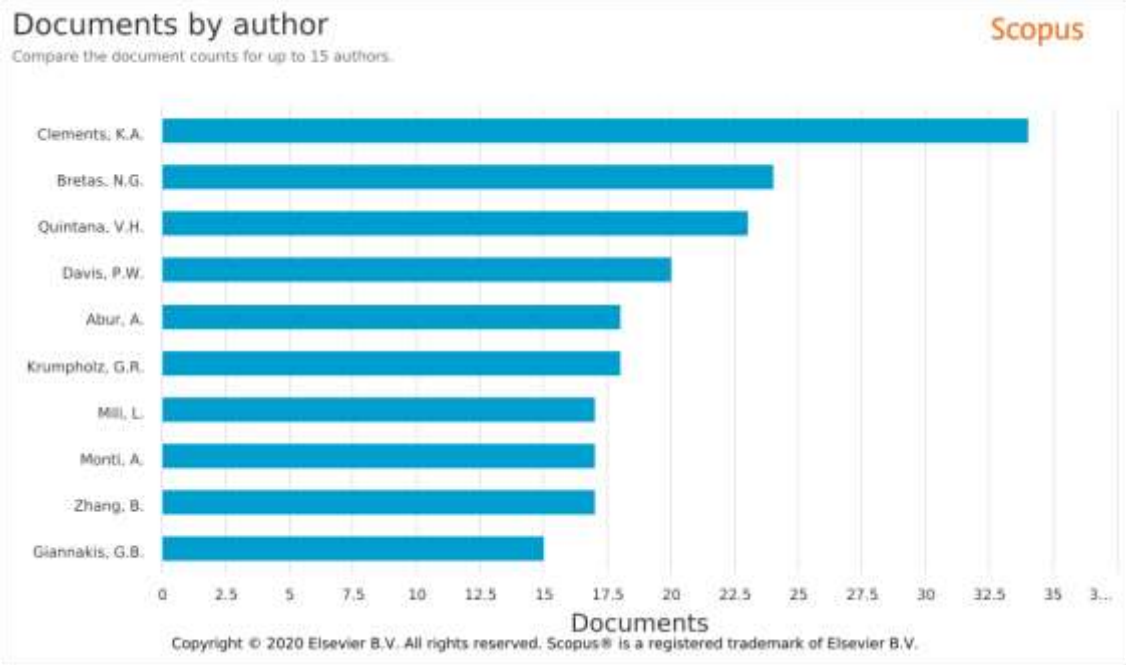
در شکل ۲-۶، عملکرد کشورها طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۰ در انتشار مستندات علمی در حوزه تخمین حالت سیستم‌های قدرت نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ایران در رده خوب ۱۰ ام قرار دارد. همچنین کشور ایران در رده اول در بین کشورهای منطقه قرار گرفته است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۲-۶ تعداد مستندات به تفکیک کشورها

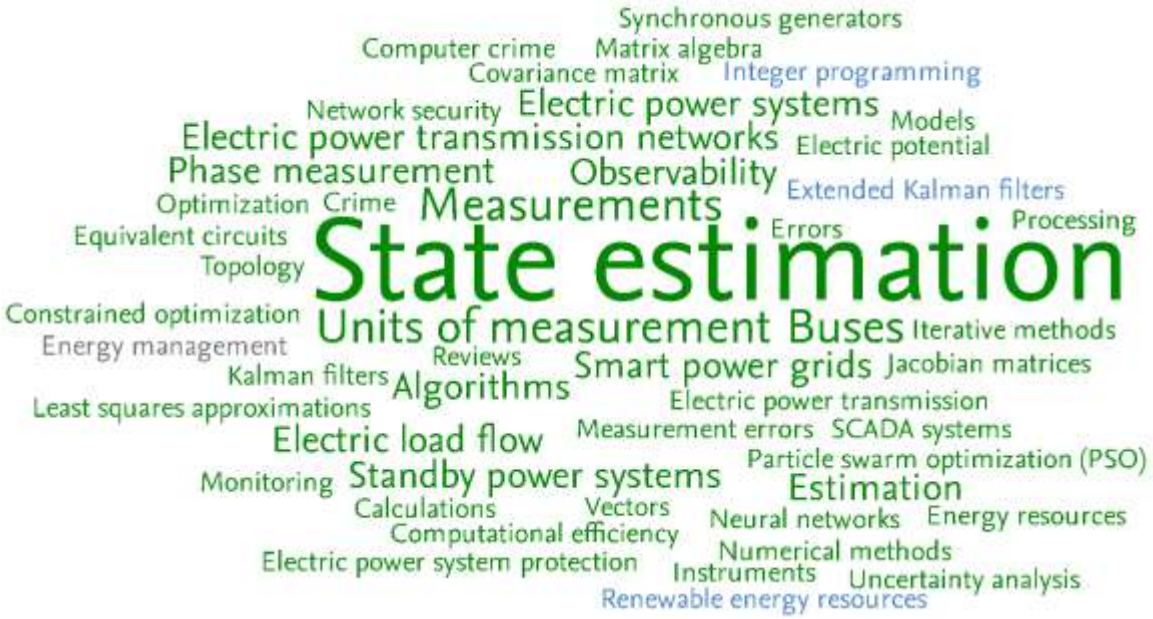
در شکل ۲-۷، اسامی ده نویسنده برتر در نتایج جستجوی کلیدواژه *"power system state estimation"* نشان داده شده است.



شکل ۲-۷ ده نویسنده برتر با بیش‌ترین مستندات چاپ‌شده

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در شکل ۲-۸، ارتباط کلیدواژه *"power system state estimation"* با دیگر کلیدواژه‌ها و موضوعات نشان داده شده است. این شکل با استفاده از ابزار علم‌سنجی سای‌ول در پایگاه استنادی اسکوپوس به دست آمده است. اطلاعات این شکل، کمک شایانی به یافتن ارتباط موضوع تخمین حالت سیستم‌های قدرت با دیگر حوزه‌های علم می‌کند. به عنوان مثال می‌توان فهمید که فیلتر کالمن و انواع نسخه‌های توسعه‌یافته آن کاربرد زیادی در تخمین حالت سیستم قدرت دارد.



شکل ۲-۸ ارتباط کلیدواژه *"Power System State Estimation"* با دیگر کلیدواژه‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل سوم: تخمین حالت دینامیکی در شبکه‌های انتقال

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۳-۱- مقدمه

در این فصل، تخمین حالت دینامیکی در سیستم قدرت (در سطح شبکه‌های انتقال) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین‌منظور ابتدا به معرفی روش تخمین حالت دینامیکی و مقایسه آن با روش‌های تخمین حالت استاتیکی و ردیابی پرداخته می‌شود. سپس انگیزه‌ها و کاربردهای تخمین حالت دینامیکی در سیستم قدرت بیان می‌شوند. سپس روش‌های ارزیابی مشاهده‌پذیری سیستم قدرت دینامیکی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. سپس به مطالعه انواع روش‌های موجود که در زمینه تخمین حالت دینامیکی ارائه شده‌اند، پرداخته شده و دسته‌بندی تخمین حالت دینامیکی به دو دسته متمرکز و توزیع‌یافته انجام می‌شود. در انتها، به ارائه زمینه‌های کاری برای ادامه تحقیقات در زمینه تخمین حالت دینامیکی سیستم قدرت و تبیین چالش‌های پیش رو و بررسی و تعیین راه‌حل‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۲- تخمین حالت دینامیکی

همان‌طور که در فصل قبل گفته شد، برای غلبه بر مشکلات روش‌های تخمین حالت استاتیکی و ردیابی، از روش‌های تخمین حالت دینامیکی استفاده می‌شود.

از مشکلات روش تخمین حالت استاتیکی می‌توان به این مسأله اشاره کرد که چون در این روش از اطلاعات مقادیر بردار حالت تخمین‌زده‌شده و اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های قبلی استفاده نمی‌شود، لازم است که عملیات تخمین حالت استاتیکی در زمان $k+1$ نیز به طور کامل اجرا شود. درنتیجه، بار محاسباتی این روش به علت افزایش روزافزون مقیاس و پیچیدگی سیستم قدرت امروزی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در تخمین حالت استاتیکی، اطلاعات انتقال حالت[۱] کاملاً نادیده گرفته می‌شود. درنتیجه در روش تخمین حالت استاتیکی، اطلاعات اندازه‌گیری و تخمین‌زده‌شده در زمان‌های گذشته در نظر گرفته نمی‌شود. این روش حافظه گذشته را در زمان حال به همراه ندارد و نمی‌تواند دینامیک‌های واقعی سیستم (حالت‌های دینامیکی ژنراتورها، بارها و غیره) را ردیابی کند. شایان ذکر است که روش تخمین حالت استاتیکی ممکن است در صورت بروز تغییرات ناگهانی عملکرد بهتری نسبت به روش تخمین حالت ردیابی داشته باشد. با این حال، قابلیت ردیابی دینامیکی سیستم را برخلاف روش تخمین حالت دینامیکی ندارد. علاوه بر این، تخمین حالت استاتیکی (برخلاف تخمین حالت دینامیکی)، مستلزم این است که بردار حالت تنها با آخرین مجموعه اندازه‌گیری‌های موجود مشاهده‌پذیر باشد.

از مشکلات روش تخمین حالت ردیابی نیز می‌توان به عدم وجود یک مدل مناسب برای نشان دادن پویایی و دینامیک وضعیت سیستم اشاره نمود. روش تخمین حالت ردیابی یک حالت شبه‌ماندگار را برای سیستم فرض می‌کند که در آن حالت سیستم بدون تغییر باقی می‌ماند (البته به غیر از افزوده شدن یک نویز

[۱] State Transition Information

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

گوسی). با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده و بارهای انعطاف‌پذیر، دیگر نمی‌توان تغییرات متغیرهای حالت سیستم را تنها با یک نویز سفید گوسی مدل نمود. این وضعیت در حضور تغییر توپولوژی شبکه و پارامترهای خطوط انتقال و ترانسفورماتورها، کلیدزنی بانک‌های خازنی و راکتورهای موازی تشدید می‌شود. درنتیجه، اتخاذ روش تخمین حالت ردیابی برای کاربردهای عملی به یک چالش بزرگ تبدیل می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق و این مطلب که سیستم قدرت واقعی یک سیستم پیچیده، غیرخطی و دینامیک است، تخمین حالت دینامیکی بیش از تخمین حالت استاتیکی (و یا ردیابی) با طبیعت سیستم قدرت هم‌راستا می‌باشد. تخمین حالت دینامیکی، که دارای قابلیت‌های پیش‌بینی کننده است، می‌تواند وضعیت عملکرد زمان-واقعی از سیستم قدرت فراهم کند. بنابراین، یکی از بخش‌های مهم سیستم EMS به شمار می‌رود.

در روش دینامیکی، بردار حالت در زمان k به صورت بازگشتی و از روی مقادیر تخمین‌زده شده در زمان قبل $k-1$ و مقادیر اندازه‌گیری زمان k به‌روزرسانی می‌شود. بار محاسباتی پایین‌تر و قابلیت پیش‌بینی از مزایای روش دینامیکی نسبت به روش استاتیکی می‌باشند. قابلیت پیش‌بینی بردار حالت یک گام به جلو در روش دینامیکی، زمان تصمیم‌گیری بیشتری به اپراتور می‌دهد.

در روش تخمین حالت دینامیکی، به مدل دینامیکی فضای حالت سیستم نیاز می‌باشد. نمایش فضای حالت یک سیستم دینامیکی برخلاف توصیف تابع تبدیل سیستم که تنها رابطه بین خروجی و ورودی یک سیستم دینامیکی را نمایش می‌دهد، رابطه بین متغیرهای داخلی سیستم دینامیکی را نیز نمایش می‌دهد. این متغیرهای داخلی سیستم دینامیکی (که متغیرهای حالت سیستم نامیده می‌شوند) برخلاف متغیرهای ورودی و خروجی، همیشه قابل اندازه‌گیری نیستند. این متغیرها را می‌توان توسط یک تخمین‌گر حالت دینامیکی تخمین زد. تخمین حالت دینامیکی فرآیندی است که بر اساس مدل دینامیکی فضای حالت سیستم و اندازه‌گیری‌های ورودی و خروجی‌های سیستم به تخمین مقادیر متغیرهای حالت سیستم مورد نظر می‌پردازد.

سیستم‌های قدرت به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که به صورت سلسله‌مراتبی بهره‌برداری و کنترل می‌شوند [۷۷]. این کنترل‌ها به طور خاص برای مقابله با انواع پدیده‌های دینامیکی در مقیاس‌های زمانی چندگانه طراحی شده‌اند [۷۳]. به عنوان مثال، کنترل خودکار ولتاژ ژنراتور سنکرون فقط بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی عمل می‌کند. با این حال، هنگام دریافت فرمان از مرکز کنترل، می‌توان نقاط تنظیم ولتاژ آن‌ها را تغییر داد. از این رو، یک کنترل حلقه بسته غیرمتمرکز سلسله‌مراتبی وجود دارد که به تغییرات سیستم و فرمان تغییرات نقاط مرجع پاسخ می‌دهد. کنترل متمرکز حلقه باز پس از یک فرآیند تصمیم‌گیری توسط اپراتور آغاز می‌شود. مطابق با این فلسفه طراحی، اکثر برنامه‌های نظارت و کنترل در مرکز کنترل به مدل حالت ماندگار سیستم متکی هستند. با این حال، در واقعیت، سیستم‌های قدرت هرگز در شرایط حالت

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

ماندگار عمل نمی‌کنند؛ زیرا تغییرات تصادفی در تقاضا و تولید وجود دارد. با ادغام هرچه بیشتر منابع انرژی پراکنده در سمت تولید، و بارهای پیچیده و فن‌آوری‌های جدید "پاسخ تقاضا" در سمت تقاضا (مانند وسایل نقلیه برقی و اینترنت اشیا) این وضعیت تشدید می‌شود. چنین تغییراتی باعث نایقینی بیشتر در رفتار دینامیکی سیستم می‌شوند. درنتیجه، فرض حالت ماندگار زیر سؤال می‌رود و روش‌های تخمین حالت استاتیکی قادر به ضبط این دینامیک در یک محیط عملیاتی نیستند. درنتیجه، روش‌های تخمین حالت استاتیکی که در سیستم‌های *EMS* امروزی استفاده می‌شوند، باید با ابزارهای جدید نظارت نظیر تخمین حالت دینامیکی مجدداً ارزیابی و تقویت شوند. تخمین حالت دینامیکی قادر است با استفاده از فن‌آوری‌های جدید در طرف تولید و تقاضا نقش مهمی در کنترل و محافظت از سیستم قدرت ایفا کند [۷۸]–[۸۱]، به‌ویژه با افزایش پیچیدگی ناشی از عدم قطعیت‌هایی که به دلیل ظهور فن‌آوری‌های هوشمند جدید تولید و سمت بار، به وجود آمده‌اند.

با استقرار گسترده *PMU*ها و زیرساخت‌های ارتباطی پیشرفته در سیستم‌های قدرت [۱۴], [۸۲]، توسعه ابزار سریع و قوی تخمین حالت دینامیکی امکان‌پذیر شده است. با وجود تحقیقات گسترده در مورد این موضوع، هنوز هم توافق مشترکی در مورد آن‌چه تخمین حالت دینامیکی تشکیل می‌دهد، این که چگونه باید در سیستم *EMS* امروزی قرار داده شود و به طور مؤثر مورد استفاده قرار گیرد، وجود ندارد. به‌ویژه، انگیزه‌های تخمین حالت دینامیکی به‌طور کامل مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است. درنتیجه، ارزش مهندسی آن در حال حاضر آن‌گونه که شایسته است برای صنعت برق و توسعه‌دهندگان نرم‌افزارهای تخصصی مهندسی سیستم‌های قدرت مشخص نیست.

۳-۲-۱- انگیزه‌ها و کابردهای تخمین حالت دینامیکی

با افزایش روزافزون منابع تولید پراکنده، بارهای پاسخ‌گو، ریزشبکه‌ها و سایر روش‌ها و فن‌آوری‌های نوین، سیستم قدرت در معرض انواع مختلفی از شرایط دینامیکی قرار گرفته است. به عنوان مثال، ویژگی‌های تصادفی و متناوب منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، احتمال تغییر ناگهانی در فازورهای ولتاژ شین‌ها را در یک بازه زمانی کوتاه افزایش می‌دهند [۸۳]. این تغییرات عمدتاً ناشی از تغییر در تزریقات توان حقیقی یا راکتیو است که باعث تغییر بیشتر در متغیرهای حالت ژنراتور مانند سرعت روتور و زاویه روتور می‌شود. اکثر ابزارهای پایش و کنترل امروزی در مرکز کنترل مدیریت انرژی مبتنی بر مدل‌های حالت ماندگار سیستم هستند که نمی‌توانند دینامیک سیستم را ضبط کنند [۸۴]. این محدودیت در درجه اول به این دلیل است که توابع سیستم *EMS* به سیستم‌های اسکادا متکی هستند که در مقایسه با دینامیک سیستم قدرت کند بوده و اندازه‌گیری‌هایشان فاقد برچسب زمانی می‌باشند. بنابراین، تخمین حالت هر چند ثانیه تا چند دقیقه به‌روز می‌شود و اکثر برنامه‌های کنترلی مرتبط با ژنراتورها یا تجهیزات *FACTS* بر اساس اطلاعات و اندازه‌گیری‌های محلی تهیه می‌شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

با افزایش تعداد *PMU*های نصب‌شده، توسعه تخمین حالت دینامیکی برای نظارت، کنترل و حفاظت از سیستم قدرت امکان‌پذیر می‌شود. مزایا و کاربردهای استفاده از تخمین حالت دینامیکی شامل موارد زیر است [۸۵].

- تجزیه و تحلیل مُدال[۱] و کنترل نوسانات: متغیرهای حالت دینامیکی تخمین‌زده‌شده می‌توانند برای انجام تجزیه و تحلیل مُدال مورد استفاده قرار گیرند [۸۶]. از مُدهای شناسایی‌شده در تحلیل مُدال می‌توان برای تنظیم پایدارسازهای سیستم قدرت (*PSS*[۲]) استفاده کرد و بدین ترتیب به میرایی[۳] بهتری از نوسان‌های بین‌ناحیه‌ای دست یافت. به عنوان مثال، سرعت تخمین‌زده‌شده روتور و حالت‌های دیگر می‌توانند به عنوان سیگنال ورودی برای کنترل سیستم‌های تحریک ماشین‌های سنکرون، [۸۷], [۸۸] یا تجهیزات *FACTS* [۸۹] مورد استفاده قرار گیرند تا نوسانات را میرا نمایند.

- حفاظت مبتنی بر تخمین دینامیکی[۴]: این نوع حفاظت که به نام حفاظت بدون تنظیمات[۵] نیز شناخته می‌شود، توانایی این را دارد که حفاظت ناحیه‌ای[۶] را به شدت بهبود بخشیده و حفاظت تمامی نواحی را به صورت متمرکز در یک پست الکتریکی تجمیع کند. این نوع حفاظت در واقع از حفاظت تفاضلی[۷] الهام گرفته شده و می‌توان آن را توسعه‌یافته روش تفاضلی دانست. در روش تفاضلی، جریان الکتریکی در تمامی ترمینال‌های یک ناحیه حفاظتی اندازه‌گیری می‌شوند. مجموع این جریان‌ها در هر لحظه باید برابر با صفر باشد (قانون *KCL*). بنابراین در روش حفاظتی تفاضلی در هر لحظه مجموع جریان‌ها محاسبه شده و تا زمانی که برابر با صفر یا نزدیک به صفر باشد هیچ‌گونه عملیات حفاظتی اجرا نمی‌شود. در حفاظت مبتنی بر تخمین دینامیکی، تمامی اندازه‌گیری‌های موجود در یک ناحیه حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این اندازه‌گیری‌ها می‌توانند شامل جریان‌ها و ولتاژهای ترمینال‌های ناحیه

---

۱ Modal

۲ Power System Stabilizer

۳ Damping

۴ Dynamic State Estimation Based Protection (EPB)

۵ Setting-less Protection

۶ Zone Protection

۷ Differential Protection

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

حفاظتی، جریان‌ها و ولتاژهای داخل ناحیه، سرعت و گشتاور و یا حتی سایر اندازه‌گیری‌های داخلی مانند اندازه‌گیری‌های دمایی باشند. تمامی این اندازه‌گیری‌ها باید از قوانین فیزیکی (*KVL*، *KCL*، قوانین حرکت و قوانین ترمودینامیکی) پیروی کنند. این قوانین فیزیکی در مدل دینامیکی فضای حالت سیستم گنجانده می‌شوند. در صورت عدم وقوع عیب در ناحیه حفاظتی، باید اندازه‌گیری‌ها در مدل دینامیکی صدق کنند. با به کارگیری اندازه‌گیری‌های سنکروفازور و بررسی این که مدل دینامیکی ناحیه حفاظتی را برآورده می‌سازند یا خیر، می‌توان هر نوع عیب داخلی و خارجی را بدون هیچ تنظیمات پیشین[۱] رله‌های حفاظتی تشخیص داده و در مقایسه با روش‌های حفاظتی سنتی، سیستم‌های حفاظتی قابل اطمینان‌تری به دست آورد. تخمین حالت سریع پیش‌شرط اجرای طرح‌های حفاظتی بی‌نقص است که می‌تواند از خاموشی‌های سراسری[۲] جلوگیری کند [۷۹], [۹۰]–[۹۲].

- بهبود مدل سیستم مورد استفاده در ارزیابی امنیت دینامیکی[۳]: برای ارزیابی امنیت دینامیکی نیاز به مدل دقیق ژنراتورها و کنترل‌کننده‌های مربوط به آن‌ها، بارها و غیره می‌باشد. با به‌کارگیری ابزار تخمین حالت دینامیکی، می‌توان هر دو مدل دینامیکی و استاتیکی سیستم را اعتیارسنجی کرد. در صورت صحیح نبودن مقادیر برخی از پارامترهای مدل، می‌توان آن‌ها را به عنوان متغیرهای حالت اضافی به مدل فضای حالت سیستم افزود و مقادیر آن‌ها را تخمین زد. بدین‌ترتیب، می‌توان مدل سیستم را بهبود داده و قابلیت اطمینان ارزیابی امنیت دینامیکی را افزایش داد [۴۹]، [۹۳]، [۹۴].
- کاربردهای دیگر: تشخیص اندازه‌گیری‌های بد و با تأخیر یا بازیابی داده‌های از دست‌رفته [۹۵]؛ بهبود تخمین فرکانس و مرکز جرم اینرسی [۹۶], [۹۷] و تشخیص خرابی در کنترل‌کننده‌ها مانند سیستم های تحریک، *PSS* و غیره [۹۸], [۹۹].

۳-۳- تجزیه و تحلیل مشاهده‌پذیری برای تخمین حالت دینامیکی

[۱] A-Priori

[۲] Blackouts

[۳] Dynamic Security Assessment (DSA)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مشاهده‌پذیری یک سیستم عبارت از توانایی تعیین مقدار منحصر به فرد برای حالت‌های سیستم با استفاده از اندازه‌گیری‌های موجود می‌باشد. برای مسأله تخمین حالت استاتیکی، تجزیه و تحلیل مشاهده‌پذیری با استفاده از روش‌های توپولوژیکی یا عددی انجام می‌شود [۳۰] و نتیجه‌ای دودویی حاصل می‌شود. در مقابل، برای روش تخمین حالت دینامیکی، ممکن است با سیستم‌های با مشاهده‌پذیری بسیار قوی و یا ضعیف مواجه شویم [۱۰۰]–[۱۰۲]. علاوه بر این، به دلیل غیرخطی‌بودن و ماهیت وابسته به زمان مسأله، نتایج مشاهده‌پذیری نیز وابسته به زمان است. مشاهده‌پذیری یک سیستم دینامیکی خطی متغیر با زمان را می‌توان به‌راحتی با استفاده از این شرط که آیا ماتریس مشاهده‌پذیری[۱] آن دارای رتبه کامل[۲] است یا خیر تعیین کرد. در مورد سیستم غیرخطی می‌توان خطی‌سازی را در اطراف یک نقطه عملیاتی معین انجام داد و میزان مشاهده‌پذیری محلی آن را ارزیابی کرد. اگرچه این رویکرد از دیدگاه محاسباتی می‌تواند سودمند باشد، اما گاهی اوقات منجر به نتایج نادرست در شرایط عملیاتی بسیار غیرخطی می‌شود. بنابراین استفاده از روش‌هایی که خطی‌سازی انجام نمی‌دهند، توصیه می‌شود. در این خصوص دو روش زیر معرفی شده‌اند.

- روش مبتنی بر مشتق *لی*[۳]
- روش مبتنی بر گرامیان مشاهده‌پذیری تجربی[۴]

۳-۳-۱- روش مبتنی بر مشتق *لی*

یک سیستم دینامیکی غیرخطی در $x = x_0$ مشاهده‌پذیر است، اگر ماتریس مشاهده‌پذیری غیرخطی به دست آمده با استفاده از مشتقات لی در $x = x_0$ از رتبه کامل برخوردار باشد [۱۰۲]. برای شرح این روش، سیستم غیرخطی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}\left(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{y}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{p}\right) + \boldsymbol{\omega}_k \qquad (۳\ ۱)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}\left(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{p}\right) + \boldsymbol{\upsilon}_k \qquad (۳\ ۲)$$

---

[۱] Observability Matrix

[۲] Full Rank

[۳] Lie Derivative

[۴] Empirical Observability Gramian

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در این سیستم، $\mathbf{x} \in \Re^n$ بردار حالت سیستم را نشان می‌دهد. حالت‌ها شامل متغیرهای حالت ژنراتورها، دینامیک بارها و ... هستند. $y \in \Re^m$ بردار کمیت‌های جبری را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که معادلات جبری شامل معادلات پخش بار و استاتور ژنراتورها است. $\mathbf{u}_k$ بردار ورودی سیستم و $\mathbf{p}$پارامترهای سیستم را نشان می‌دهند. $\mathbf{f}$ تابع غیرخطی توصیف‌کننده روابط سیستم بوده و $\boldsymbol{\omega}_k$ نویز مدل فرآیند[1] است که فرض می‌شود یک نویز سفید گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس معلوم است. $\mathbf{z}_k$ بردار اندازه‌گیری شامل شبه اندازه‌گیری‌ها، متغیرهای جبری اندازه‌گیری‌شده، توان‌های حقیقی و راکتیو تزریقی به شین‌ها و جاری روی خطوط، فازورهای جریان و غیره است. $\mathbf{h}$ تابع اندازه‌گیری غیرخطی و $\boldsymbol{\upsilon}_k$ خطای اندازه‌گیری است. معمولاً فرض می‌شود که $\boldsymbol{\upsilon}_k$ و $\boldsymbol{\omega}_k$ دارای توزیع نرمال با مقدار میانگین صفر و دارای ماتریس کوواریانس Q_k و R_k هستند. لازم به ذکر است که این دو نویز ترکیبی از منابع مختلف نویز/خطا هستند (به عنوان مثال از حسگرها، کانال‌های ارتباطی یا مدل‌ها) [۱۰۳].

مشتق *لی* از h با توجه به f به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_f\mathbf{h} = \nabla\mathbf{h} \bullet f \qquad (۳\ ۳)$$

با توجه به رابطه فوق، داریم:

$$L_f^0\mathbf{h} = \mathbf{h} \quad , \quad L_f^k\mathbf{h} = \frac{\partial\, L_f^{k-1}\mathbf{h}}{\partial x} \bullet f \qquad (۴\ ۳)$$

ماتریس $\boldsymbol{\Omega}$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} L_f^0(\mathbf{h}_1) & \dots & L_f^0(\mathbf{h}_m) \\ L_f^1(\mathbf{h}_1) & \dots & L_f^1(\mathbf{h}_m) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ L_f^{n-1}(\mathbf{h}_1) & \dots & L_f^{n-1}(\mathbf{h}_m) \end{bmatrix} \qquad (۵\ ۳)$$

و نهایتاً گرادیان ماتریس $\boldsymbol{\Omega}$ عبارت است از:

[1] Process Model

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\mathbf{O} = d\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} d\left(L_f^0(\mathbf{h}_1)\right) & \dots & d\left(L_f^0(\mathbf{h}_m)\right) \\ d\left(L_f^1(\mathbf{h}_1)\right) & \dots & d\left(L_f^1(\mathbf{h}_m)\right) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ d\left(L_f^{n-1}(\mathbf{h}_1)\right) & \dots & d\left(L_f^{n-1}(\mathbf{h}_m)\right) \end{bmatrix} \quad (۶۳)$$

برای این که سیستم مشاهده‌پذیر باشد، ماتریس مشاهده‌پذیری O باید دارای مرتبه n باشد. n برابر تعداد درایه‌های بردار حالت x است.

در [۱۰۲]، این روش برای تعیین میزان مشاهده‌پذیری چندین سیستم نمونه که در آن‌ها از مدل کلاسیک ژنراتورهای سنکرون استفاده شده است، به کار برده شده است. علاوه بر این، از نسبت بین کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین مقادیر منفرد[۱] ماتریس مشاهده‌پذیری به عنوان معیاری از درجه مشاهده‌پذیری استفاده شده است. این کار در مرجع [۱۰۲] که ژنراتورهای سنکرون با مدل دو محوری ارائه شده‌اند و شامل مدل سیستم تحریک *IEEE-Type1* هستند، توسعه داده شده و تکمیل‌تر شده است. شایان ذکر است که محاسبه ماتریس مشاهده‌پذیری مبتنی بر مشتق *لی* حتی برای سیستم‌های قدرت در مقیاس کوچک می‌تواند دشوار باشد. می‌توان از روش مشتق‌گیری خودکار[۲] [۱۰۴] برای کاهش بار محاسباتی مشتقات لی استفاده کرد.

۳-۳-۲- روش مبتنی بر گرامیان مشاهده‌پذیری تجربی

گرامیان‌های مشاهده‌پذیری تجربی [۱۰۴] یک راه برای تجزیه و تحلیل رفتار حالت خروجی سیستم غیرخطی فراهم می‌کنند. برخلاف تجزیه و تحلیل بر اساس خطی‌سازی، گرامیان‌های مشاهده‌پذیری تجربی در یک ناحیه کاری از مدل سیستم اصلی تعریف می‌شوند و مشاهده‌پذیری دینامیکی کامل غیرخطی را در محدوده درنظر گرفته‌شده نشان می‌دهند. یک ویژگی مهم این است که گرامیان مشاهده‌پذیری تجربی برای یک سیستم با خروجی‌های متعدد برابر با جمع گرامیان‌های تجربی محاسبه‌شده برای هر یک از خروجی‌ها به صورت جداگانه است. بنابراین، با محاسبه گرامیان‌های مشاهده‌پذیری تجربی برای هر سنسور، مقدار افزایش مشاهده‌پذیری پس از قرارگیری هر سنسور اندازه‌گیری را می‌توان ارزیابی کرد. در [۱۰۴]، مشاهده‌پذیری حالت‌های سیستم با محاسبه مقدار گرامیان‌های مشاهده‌پذیری تجربی تعیین شده است. در [۱۰۰]، مقدار سطح مشاهده‌ناپذیری سیستم غیرخطی توسط یک شاخص مشاهده‌ناپذیری که با کوچک‌ترین مقدار ویژه ماتریس گرامیان مشاهده‌پذیری تجربی تقریب زده شده، ارزیابی شده است. در [۱۰۵]، شاخص‌های مختلفی از گرامیان مشاهده‌پذیری تجربی، شامل دترمینان، حداقل مقادیر ویژه، عدد

---

[۱] Singular

[۲] Automatic Differentiation

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

حالت (عدد شرطی)[۱] و غیره مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در این مرجع نشان داده شده که هنگامی که میزان مشاهده‌پذیری ضعیف است، شاخص‌های حداقل مقدار ویژه و عدد حالت، معیارهای بهتری برای تعیین میزان مشاهده‌پذیری هستند. در مقابل، هنگامی‌که مشاهده‌پذیری بسیار قوی باشد، مقدار دترمینان معیار بهتری است.

۳-۴- روش‌های موجود در زمینه تخمین حالت دینامیکی در شبکه‌های انتقال

از منظر بیزین[۲]، مسأله تخمین حالت دینامیکی شامل محاسبه بردار حالت در زمان k به صورت بازگشتی و با استفاده از داده‌های تا زمان فعلی است. بنابراین، لازم است که تابع چگالی احتمال شرطی $p\left(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_{1:k}\right)$ محاسبه شود. این تابع ممکن است به صورت بازگشتی و توسط تخمین حالت‌ها و گام‌های به‌روزرسانی به دست آید. فرض نمایید که $p\left(\mathbf{x}_{k-1}|\mathbf{z}_{1:k-1}\right)$ در زمان $k-1$ موجود است، بنابراین تخمین حالت‌ها در زمان $k-1$ (مقدار $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$) و ماتریس کوواریانس آن $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$ معلوم است. لذا مرحله پیش‌بینی[۳] توسط رابطه (۳-۱) برای محاسبه تابع چگالی احتمال پیشین[۴] در زمان k به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$p\left(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_{1:k-1}\right)=\int p\left(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1}\right)p\left(\mathbf{x}_{k-1}|\mathbf{z}_{1:k-1}\right)d\mathbf{x}_{k-1} \qquad (۳-۷)$$

مدل احتمالی تکامل حالت $p\left(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1}\right)$ توسط معادله سیستم رابطه (۳-۱) و همچنین تابع توزیع فرض‌شده برای $\boldsymbol{\omega}_k$ تعریف می‌شود. در زمان k ام، هنگامی‌که اندازه‌گیری‌ها/مشاهدات z_k در دسترس باشد، مرحله به‌روزرسانی[۵] و به دست آوردن تابع چگالی احتمال پسین $p\left(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_{1:k}\right)$ را می‌توان از طریق قانون بیز[۶] به صورت زیر انجام داد:

---

۱ Condition Number

۲ Bayesian

۳ Prediction

۴ Prior PDF

۵ Update

۶ Bayes Rule

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$p\left(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_{1:k}\right)=\frac{p\left(\mathbf{z}_k|\mathbf{x}_k\right)p\left(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_{1:k-1}\right)}{p\left(\mathbf{z}_k|\mathbf{z}_{1:k-1}\right)} \qquad (۳-۸)$$

ثابت نرمال‌سازی که برابر با $p\left(\mathbf{z}_k|\mathbf{z}_{1:k-1}\right)=\int p\left(\mathbf{z}_k|\mathbf{x}_k\right)p\left(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_{1:k-1}\right)d\mathbf{x}_k$ است، به تابع احتمال $p\left(\mathbf{z}_k|\mathbf{x}_k\right)$ وابسته است که با مدل مشاهدات در رابطه (۳-۲) و تابع توزیع $\boldsymbol{\upsilon}_k$ تعریف می‌شود.

روابط (۳-۷) و (۳-۸) پایه و اساس بهینه‌سازی بیزین را تشکیل می‌دهند، هرچند در سیستم‌های غیرخطی رابطه (۳-۸) حل تحلیلی ندارد [۱۰۶].

فیلتر کالمن استاندارد در صورت خطی بودن مدل‌های فرآیند و مشاهدات و همچنین گوسی بودن نویز در این مدل‌ها پاسخ بهینه یعنی کمترین خطای ممکن را نتیجه می‌دهد. هرچند در عمل سیستم قدرت یک سیستم به شدت غیرخطی بوده و هر دو مدل فرآیند و مشاهدات یعنی روابط (۳-۱) و (۳-۲) غیرخطی می‌باشند. بنابراین تخمین‌گرهایی بر اساس روش خطی‌سازی به عنوان گزینه‌ای برای تخمین حالت دینامیکی در سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در معروف‌ترین روش خطی‌سازی، یعنی فیلتر کالمن توسعه‌یافته (*EKF*)، از بسط سری تیلور[۱] برای خطی‌سازی مدل‌های غیرخطی فرآیند و مشاهدات در هر لحظه استفاده می‌شود. از آن‌جا که *EKF* تنها از بسط سری تیلور مرتبه اول برای خطی‌سازی مدل سیستم استفاده می‌کند، ممکن است برای سیستم‌های با غیرخطی‌گری بالا منجر به خطای تخمین غیرقابل قبول و یا حتی واگرایی[۲] گردد. همچنین در صورت گوسی نبودن نویز فرآیند و مشاهدات، عملکرد *EKF* به شدت تخریب خواهد شد. بنابراین در برخی پژوهش‌ها از دسته دیگری از روش‌های تخمین حالت غیرخطی به نام روش‌های تقریب آماری[۳] برای تخمین حالت دینامیکی در سیستم قدرت استفاده شده است. در این حوزه می‌توان به فیلتر کالمن بی‌رد (*UKF*) اشاره نمود. فیلتر *UKF* از تبدیل بی‌رد[۴] برای تقریب تابع چگالی احتمال پسین تا مرتبه دو (در صورت گوسی بودن نویزها تا مرتبه سه) استفاده می‌کند. بنابراین خطای خطی‌سازی *UKF* نسبت به *EKF* کمتر بوده و دقت تخمین آن بالاتر است. یکی دیگر از فیلترهایی که از روش‌های تقریب آماری برای تخمین حالت سیستم‌های غیرخطی استفاده می‌کند، فیلتر ذره‌ای (*PF*[۵]) است. فیلتر ذره‌ای قادر به تخمین حالت سیستم‌های با غیرخطی‌گری بالا و نویز غیرگوسی

[۱] Taylor Series Expansion

[۲] Divergence

[۳] Statistcal Approximation Methods

[۴] Unscented Transformation

[۵] Particle Filter

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

می‌باشد. در فیلتر ذره‌ای، تابع چگالی احتمال پسین توسط مجموعه‌ای از ذرات وزن‌دار تقریب زده می‌شود. در ادامه، انواع روش‌های تخمین حالت دینامیکی غیرخطی برای سیستم‌های قدرت مرور می‌شوند.

تحقیق اولیه در زمینه استفاده از *EKF* در سیستم قدرت در [۱۰۷] انجام شده است. در این مرجع فرض شده است که توان تزریقی و فرکانس در شین‌های ژنراتور با دقت زیاد و با نرخ نمونه‌گیری به اندازه کافی بالا اندازه‌گیری می‌شوند. با پیشرفت فن‌آوری‌های *PMU*، این فرضیات تا حدود زیادی به واقعیت نزدیک شده و عملیاتی شده‌اند. برای مثال، مرجع [۱۰۸] استفاده از داده‌های *PMU* را برای تخمین حالت زمان-واقعی با استفاده از *EKF* پیشنهاد کرده و مورد بررسی قرار داده است. در [۱۰۹], [۱۱۰] از داده‌های به دست آمده از رله‌های حفاظتی و *PMU*ها برای نظارت و کنترل گذراهای سیستم استفاده شده است. در [۱۱۱]، یک الگوریتم فیلتر کالمن توسعه‌یافته با استفاده از تکنیک دکوپله‌سازی مدل[۱] برای تخمین حالت‌ها و پارامترهای یک مدل ژنراتور کلاسیک ارائه شده است. در ادامه این تحقیقات، در مرجع [۱۱۲] برای مواردی که ولتاژ میدان ژنراتور به دلیل وجود سیستم تحریک بدون جاروبک قابل اندازه‌گیری نیست، یک تخمین حالت دینامیکی اصلاح‌شده مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه‌یافته پیشنهاد شده است. این کار بعداً با پیشنهاد یک تخمین حالت دینامیکی غیرمتمرکز و با فرض دانستن مقدار گشتاور مکانیکی، توسعه داده شد [۱۱۳]. اگر غیرخطی بودن سیستم دینامیکی قوی نباشد و مشتقات معادلات غیرخطی را محاسبه کنیم، روش‌های مبتنی بر خطی‌سازی عملکرد قابل قبولی خواهند داشت. با این حال، هر سیستمی می‌تواند در شرایط گذراهای شدید کار کند و لذا در این حالت، غیرخطی بودن سیستم دینامیکی بسیار قوی است. علاوه بر این، محاسبه مشتقات برای سیستم‌های بزرگ و پیچیده ممکن است بسیار چالش برانگیز باشد. در این شرایط، روش‌های بدون مشتق‌گیری (روش‌های تقریب آماری مانند *UKF* و *PF*) ترجیح داده می‌شوند.

در روش‌های بدون مشتق‌گیری، بردار حالت پیش‌بینی‌شده $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ و مشخصات آماری آن $p\left(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_{1:k-1}\right)$ از طریق مجموعه‌ای از نقاط از توزیع احتمال $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ محاسبه می‌شوند. ایده‌های اصلی این روش‌ها استفاده از تکنیک‌های نمونه‌برداری قطعی مانند انواع تبدیل بی‌رد و یا روش نمونه‌برداری مبتنی بر مونت کارلو، برای انتخاب مجموعه‌ای از نقاط نمونه است که دارای میانگین و کوواریانس یکسان با حالت‌های پیشین هستند [۱۱۴], [۱۱۵]. این نقاط سپس از طریق توابع غیرخطی f و h پخش می‌شوند و تخمینی از وضعیت حالت میانگین و کوواریانس ارائه می‌کنند. درنتیجه، هیچ محاسبه‌ای دشوار و پیچیده از ماتریس‌های ژاکوبین لازم نیست. بسته به نوع نقاط انتخاب‌شده، روش‌های مختلفی مانند انواع مختلف فیلتر کالمن بی‌رد (*UKF*)

[۱] Model Decoupling Technique

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

با استفاده از نقاط سیگما، فیلتر کالمن تجمعی (*EnKF*) و انواع مختلف فیلتر ذره‌ای (*PF*) با استفاده از تکنیک‌های نمونه‌برداری مبتنی بر روش مونت کارلو استفاده وجود دارد.

در [۱۱۶]تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر *UKF* با استفاده از یک مدل ژنراتور مرتبه چهارم برای تخمین حالات یک سیستم قدرت تک ماشین به شین بینهایت ارائه شده است. در همین راستا، یک فیلتر کالمن بی‌رد متمرکز[۱] (*CUKF*) در [۱۱۷], [۱۱۸] برای یک سیستم چند ماشینه استفاده شده است. در [۱۱۹] یک استراتژی غیرمتمرکز که نیازی به انتقال سیگنال‌های محلی ندارد به کار گرفته شده است و به طور قابل توجهی بار محاسباتی را کاهش داده است. یک روش مبتنی بر فیلتر کالمن بی‌رد غیرمتمرکز[۲] (*DUKF*) برای تخمین هم‌زمان متغیرهای حالت دینامیکی مدل ژنراتور مرتبه چهارم، ولتاژ میدان و گشتاور مکانیکی در مرجع [۱۲۰] ارائه شده است. همچنین این روش با توجه به رویکرد ارائه شده در [۱۱۳] بهبود یافته است. در [۱۲۱]، از فیلتر کالمن بی‌رد غیرمتمرکز با وارد کردن زاویه داخلی در مدل دینامیکی ژنراتور و جداسازی فرآیند تخمین در دو مرحله با بروزرسانی پیوسته واریانس‌های اندازه‌گیری استفاده شده است. در [۱۲۲] برای بهبود بیشتر دقت تخمین در فیلتر کالمن بی‌رد غیرمتمرکز، از داده‌های اندازه‌گیری *PMU*ها هم استفاده شده است.

به عنوان یک روش جایگزین بدون مشتق‌گیری، فیلتر کالمن تجمعی (*EnKF*) با استفاده از روش‌های مونت کارلو برای تخمین ماتریس کوواریانس خطا، یک مقدار تقریبی به مقادیر حالت‌های فیلترشده می‌دهد و یک مجموعه از شرایط اولیه را برای سیستم تخمین‌گر تولید می‌کند. این روش با *UKF* متفاوت است؛ زیرا نقاط سیگما بعد از فیلتر حالت در هر لحظه مجدداً محاسبه می‌شوند. روش *EnKF* برای ردیابی حالات دینامیکی ژنراتورها و بررسی حساسیت نسبت به خطاهای حالت اولیه، نویز اندازه‌گیری و خطاهای نامعلوم در [۱۲۳] بررسی شده است. این روش در مرجع [۱۲۴] به‌گونه‌ای توسعه داده شده تا توان ورودی مکانیکی متغیر با زمان در منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شود. در [۱۲۵]، یک فیلتر تجمعی بیشینه همانندی[۳] برای تخمین متغیرهای حالت با بهینه‌سازی یک تابع هزینه غیرخطی و فضای تجمعی با ابعاد کم برای محاسبه هسین[۴] تابع هزینه ارائه شده است. برخلاف فیلتر کالمن تجمعی، فیلتر ذره‌ای از ذرات تولیدشده از طریق نمونه‌برداری مونت کارلو برای انتشار و تقریب ویژگی‌های آماری متغیرهای حالت توابع غیرخطی استفاده می‌کند. یک نسخه توسعه‌یافته فیلتر ذره‌ای برای تخمین متغیرهای حالت مدل ژنراتور سنکرون

[۱] Centralized Unscented Kalman Filter

[۲] Decentralized Unscented Kalman Filter

[۳] Maximum Likelihood Ensemble Filter

[۴] Hessian

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مرتبه چهار با استفاده از یک فرآیند تکراری نمونه‌برداری و پخش ذرات در [۱۲۶] استفاده شده است. در [۱۲۷], [۱۲۸] از همین فیلتر ذره‌ای (*PF*) برای تخمین متغیرهای حالت مدل کامل ژنراتور سنکرون استفاده شده است.

۳-۴-۱- بهبود پایداری عددی و آماری

انواع فیلتر کالمن تحت فرضیات خاصی عملکرد بسیار خوبی دارند. این فرضیات عبارت‌اند از [۱۲۹]:

- نویز فرآیند و مشاهده در هر لحظه از زمان دارای میانگین صفر و ماتریس‌های کوواریانس Q_k و R_k معلوم باشند.
- نویز دارای توزیع گوسی در هر لحظه از زمان است. فیلتر کالمن در این حالت، عملکرد بهینه با حداقل واریانس (برای سیستم خطی) را دارد.
- فرض بر این است که مدل سیستم با دقت خوب شناخته شده است.

به هرحال در سیستم‌های واقعی، برقراری همه فرضیات فوق میسر نیست. همچنین محاسبه ماتریس‌های Q_k و R_k در سیستم‌های واقعی مشکل است. توابع h و f به صورت تقریبی و غیرخطی هستند و ممکن است همه غیرخطی‌گری‌های سیستم را درنظر نگیرند. برخی از پارامترهای مدل سیستم ممکن است ناشناس و یا غلط باشند؛ داده‌های اندازه‌گیری به دلیل نویزهای ارتباطی و یا حملات سایبری معتبر نباشند و دارای بایاس زیادی باشند.

در مرجع [۱۳۰] نشان داده شده که عملکرد فیلتر کالمن توسعه‌یافته (*EKF*)، فیلتر کالمن بی‌رد (*UKF*)، فیلتر کالمن تجمعی (*EnKF*) و فیلتر ذره‌ای (*PF*) در حضور داده‌های پرت به دلیل عدم مقاوم‌بودن این فیلترها در حضور این داده‌ها بسیار خراب می‌شود. در [۱۳۱]، یک تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر فیلتر کالمن بی‌رد مقاوم[۱] دو مرحله‌ای توزیع‌یافته با استفاده از تخمین‌گر کوچک‌ترین مقدار قدرمطلق[۲] (*LAV*) برای حل چالش داده‌های پرت در اندازه‌گیری‌های توسط *PMU*ها ارائه شده است. در [۱۳۲], [۱۳۳] فیلتر *GM-IEKF*[۳] برای حل چالش داده‌های پرت ارائه شده است اما در صورت وجود نویز غیرگوسی، بازده آماری

[۱] Robust

[۲] Least-Absolute-Value (LAV)

[۳] Generalized Maximum-Likelihood Iterated Extended Kalman Filter (GM-IEKF)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

این روش کاهش می‌یابد. در [۱۳۴], [۱۳۵] فیلتر *GM-UKF*[۱] برای بهبود مشخصات آماری فرآیند تخمین در حضور نویزهای غیرگوسی و داده‌های پرت نوآوری و مشاهده ارائه شده است. این روش در مرجع [۹۵] به‌گونه‌ای توسعه و بهبود یافته است که در حضور هر سه نوع داده‌های پرت، شامل داده‌های پرت مشاهده، نوآوری و ساختاری[۲] نیز مقاوم باشد. این داده‌های پرت می‌توانند توسط یک مدل دینامیکی غیرقابل اعتماد یا کیفیت پایین اندازه‌گیری زمان-واقعی فازوری به وجود آیند. در هر صورت، روش‌های تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر بیشینه همانندی تعمیم‌یافته[۳] ممکن است در حضور این داده‌های پرت و عدم قطعیت پارامترهای مدل سیستم، یک تخمین با خطای بایاس زیاد را انجام دهند. برای حل چالش خطای بایاس، فیلتر کالمن توسعه‌یافته (*EKF*) و فیلتر کالمن بی‌رد (*UKF*) مبتنی بر کنترل مقاوم H_∞ در [۱۳۶], [۱۳۷] پیشنهاد شده‌اند. در این مراجع نشان داده شده که این فیلترها می‌توانند اثر نایقینی‌های سیستم را در جواب تخمین بسیار کاهش دهند اما عملکرد مقاومی در حضور داده‌های پرت و نویزهای غیرگوسی ندارند.

نکته: هر روشی که معرفی شد دامنه امکان‌پذیری مربوط خود را دارد و فراتر از آن، عملکرد آن دیگر تضمین نمی‌شود. به دلیل مشکلات عددی، خطاهای مدل و حملات سایبری و غیره، تخمین حالت دینامیکی ممکن است همگرا نشود. یکی از مسیرهای تحقیقات آینده، بهبود مقاومت روش‌های تخمین حالت دینامیکی در برابر واگرایی است. نتایج تخمین حالت دینامیکی همچنین باید به دقت اعتبارسنجی شود تا از همگرایی به جواب‌های غلط جلوگیری شود. نکته مهم دیگر این است که در پژوهش‌های بسیار محدودی به محدودیت لینک‌های ارتباطی برای تخمین حالت دینامیکی بر اساس سنکروفازورها پرداخته شده است. یکی از چالش‌های موجود در زمینه تخمین حالت دینامیکی بر اساس سنکروفازورها این است که سرعت نمونه‌برداری *PMU* ها بالا بوده و حجم داده‌های ارسالی از *PMU*ها به *PDC* بسیار بالا می‌باشد. تخمین حالت دینامیکی در سیستم قدرت نیازمند قابلیت اطمینان بالا و تأخیر زمانی کوچک در لینک‌های ارتباطی بین *PMU*ها و *PDC* می‌باشد.

۳-۵- تخمین حالت دینامیکی متمرکز و توزیع‌یافته

به طور کلی دو راهبرد در پیاده‌سازی تخمین حالت دینامیکی وجود دارد که عبارت‌اند از راهبرد پیاده‌سازی متمرکز و راهبرد پیاده‌سازی توزیع‌یافته. در تخمین حالت دینامیکی متمرکز فرض می‌شود که سیستم قدرت توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری، مشاهده‌پذیر است. اطلاعات فازوری از تمامی *PMU*ها به یک

[۱] Generalized Maximum-Likelihood Unscented Kalman Filter (GM-UKF)

[۲] Structural Outliers

[۳] Generalized Maximum-Likelihood (GM)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

PDC منتقل شده و عملیات تخمین حالت سراسری با استفاده از این اطلاعات پیاده‌سازی می‌شود. در شبکه برق هوشمند با مقیاس وسیع، یک تخمین‌گر حالت سریع و دقیق مورد نیاز می‌باشد. هرچند در چنین شبکه‌ای، بردار اندازه‌گیری‌ها و بردار متغیرهای حالت ابعاد بسیار بزرگی خواهند داشت. برای این که بردار حالت کل سیستم در تمامی نواحی در دسترس باشد، لازم است که حجم بسیار بزرگی از داده‌ها از *PMU*ها به *PDC* انتقال یابند. در این صورت، لینک‌های ارتباطی بسیار پرهزینه‌ای مورد نیاز خواهند بود. انتقال داده در حجم زیاد و در فواصل طولانی مصرف انرژی بسیار بالایی را در پی داشته و همچنین احتمال تلفات داده را افزایش خواهد داد. یک راه‌حل جایگزین برای حل این مسأله استفاده از ساختار غیرمتمرکز می‌باشد. این راهبرد نیاز به اطلاعات کامل پارامترهای هر یک از اجزای سیستم و همچنین اطلاعات زمان-واقعی ناحیه گسترده توسط *PMU*ها دارد. در مقابل، راهبرد تخمین حالت دینامیکی توزیع‌یافته فقط توسط اندازه‌گیری‌های محلی *PMU*ها پیاده‌سازی می‌شود. شین پایانه تجهیز دینامیکی مورد مطالعه (به عنوان مثال ژنراتور سنکرون)، توسط اندازه‌گیری‌های *PMU* پایش می‌شود و بدین ترتیب شرط مشاهده‌پذیری برای تخمین متغیرهای حالت دینامیکی مورد نظر برقرار می‌شود.

تخمین حالت دینامیکی متمرکز امکان دست‌یابی به برنامه‌های نظارت و کنترل سراسری در شبکه قدرت را می‌دهد. با این حال، نیاز به محاسباتی سنگین و فرضیات قوی در مورد صحت مدل‌های کل سیستم دینامیکی دارد. در مقابل، تخمین حالت دینامیکی توزیع‌یافته فقط به اندازه‌گیری‌های محلی در شین‌های پایانه و مدل دینامیکی اجزای مورد مطالعه سیستم نیاز دارد. لذا به لحاظ محاسباتی، سریع اجرا می‌شود و با عدم دقت مدل سایر اجزای سیستم تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. با این حال، افزونگی اندازه‌گیری محلی کم است و بنابراین تخمین حالت دینامیکی توزیع‌یافته در برخورد باکیفیت پایین داده‌های *PMU* و مسائل امنیتی مشکل دارد. انتخاب بین دو طرح اجرایی بستگی به کاربردها و زیرساخت‌های ارتباطی مورد استفاده دارد [۱۳۸].

۳-۶- جمع‌بندی

اگرچه تحقیقات زیادی در زمینه تخمین حالت دینامیکی سیستم‌های قدرت تاکنون انجام شده است؛ اما همچنان فضاهای تحقیقاتی مناسبی برای بهبود روش‌ها وجود دارد.

۳-۶-۱- ادامه تحقیقات

برخی از این موارد برای ادامه تحقیقات عبارت‌اند از:

- بهبود دقت و امنیت تخمین حالت دینامیکی سیستم قدرت: کیفیت فیلتر مورد استفاده و به‌روزرسانی بردار حالت وابستگی بسیار زیادی به کیفیت داده‌های اندازه‌گیری و حالت‌های پیش‌بینی‌شده دارد. از دیدگاه مقاومت آماری، یک فیلتر تخمین حالت دینامیکی خوب باید

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در مقابل کیفیت پایین داده‌های اندازه‌گیری مانند: وجود نویز اندازه‌گیری غیرگوسی، داده‌های بد و غلط، حمله سایبری و از دست دادن داده‌ها مقاوم باشد. سیستم قدرت همواره تحت نایقینی‌های بسیاری است و یک فیلتر تخمین حالت دینامیکی مقاوم باید به‌گونه‌ای طراحی شود که تاثیر این عدم قطعیت‌ها را محدود نماید.

- غیرخطی‌گری بالای سیستم قدرت: مدل سیستم قدرت یک مدل غیرخطی است که امروزه با افزایش روز افزون تجهیزات الکترونیکی پیشرفته در سیستم قدرت مانند ادوات *FACTS*، منابع تجدیدپذیر مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک و دیگر منابع آسنکرون مانند توبین‌های بادی، درجه غیرخطی‌بودن آن به شدت افزایش یافته است که در هر زمان و با هر کلیدزنی در سیستم قدرت، مدل آن تغییر می‌کند. در حال حاضر با استفاده از سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده فازوری که اطلاعات اندازه‌گیری‌شده را با نرخ بالا در اختیار اپراتور قرار می‌دهد، امکان پیاده‌سازی تخمین حالت دینامیکی سیستم بیش از پیش فراهم شده است. از آنجایی که مدل سیستم قدرت یک مدل کاملاً غیرخطی است، استفاده از فیلتر کالمن برای تخمین حالت دینامیکی سیستم قدرت ملزم به استفاده از روش‌های مختلف خطی‌سازی است که مسلماً دقت تخمین را پایین می‌آورد. لذا ارائه روش‌های مقاوم در مقابل خطای خطی‌سازی و یا بهبود دقت روش‌های موجود برای تخمین حالت دینامیکی سیستم قدرت یک چالش بسیار داغ در این حوزه تحقیقات سیستم قدرت است.

- محدودیت‌های ارتباطی: با افزایش تعداد واحدهای اندازه‌گیری فازوری در سیستم قدرت، حجم اطلاعات ارسالی به مرکز داده فازوری روز به روز در حال افزایش است. یکی از چالش‌های مهم در این زمینه، محدودیت‌های ارتباطی است که عمدتاً منجر به تأخیر در طی ارسال تا دریافت داده‌های فازوری می‌شود. علاوه بر این، تأخیرهای مربوط به اندازه‌گیری تا محاسبه فازور توسط واحد اندازه‌گیری فازوری و همچنین تأخیر مربوط به مرکز داده فازوری که ناشی از زمان مورد نیاز برای مرتب‌سازی داده‌های دریافتی و همچنین اجرای الگوریتم‌های محاسباتی برای کاربردهای مختلف مانند تخمین حالت دینامیکی است، را باید اضافه نمود. در صورتی که مقدار این تأخیرها زیاد باشد آن‌گاه نمی‌توان به یک تخمین حالت دینامیکی زمان-واقعی دست یافت و لذا نمی‌توان از نتایج آن برای اجرای اقدامات کنترلی آنلاین در سیستم قدرت استفاده نمود. با توجه به این توضیحات، درنظر گرفتن

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

محدودیت‌های ارتباطی و جبران‌سازی تأخیر در الگوریتم‌های آنلاین سیستم قدرت مانند تخمین حالت دینامیکی ضروری است.

- تجزیه و تحلیل مشاهده‌پذیری: استفاده از کوچک‌ترین مقدار منفرد ماتریس مشاهده‌پذیری، خواه از نوع مشتقات لی یا سایر رویکردهای تقریبی خطی، برای تعیین درجه مشاهده‌پذیری یک سیستم دینامیکی غیرخطی، رسماً اثبات نشده است. اگرچه تعداد زیادی از موارد شبیه‌سازی، اعتبار آن را تأیید کرده‌اند، اما تحقیقات بیشتری لازم است تا یک اجرای محاسباتی کارآمد و نظری اثبات‌شده از تجزیه و تحلیل مشاهده‌پذیری را اثبات کند. همچنین شایسته است رابطه بین خطی‌سازی (تقریب سیگنال کوچک) و ماتریس‌های مشاهده‌پذیری مبتنی بر مشتقات لی بررسی شود تا ناحیه اعتبار روش‌های مبتنی بر خطی‌سازی (تقریب سیگنال کوچک) به‌خصوص در هنگام گذراهای سیستم تعریف شود.

- ارزیابی امنیت دینامیکی: به منظور انجام اقدامات اصلاحی درست و سریع اولیه در هنگام گذراهای سیستم، به یک تخمین حالت دینامیکی قوی با محاسبات کم نیاز است. برای شناسایی اشکالات و تنگناهای اصلی صنعت در اجرای روش‌های فعلی ارزیابی امنیتی دینامیکی و بهبود آن‌ها توسط تخمین حالت دینامیکی قوی، تحقیقات بسیار بیشتری لازم است.

- سیستم‌های حفاظت ناحیه گسترده: بهبود مشاهده‌پذیری سیستم از طریق تخمین دینامیکی زاویه و سرعت ژنراتورها، اجازه می‌دهد تابع انرژی گذرا[1] با دقت بیشتری محاسبه شود. این امر منجر به دستاوردهای قابل توجهی خواهد شد. به طور مثال تشخیص سریع‌تر گریز از همگامی ژنراتور و مکان صحیح ژنراتور از همگامی خارج‌شده و همچنین حداقل مقدار باری که باید برای حفظ پایداری و بدون اطلاع دقیق از توپولوژی سیستم قطع شود.

۳-۶-۲- تبیین چالش‌ها

از آن‌جایی که نتایج تخمین حالت سیستم قدرت به مثابه گام اول برای هر نوع تصمیم‌گیری در زمان بهره‌برداری زمان-واقعی سیستم قدرت است، لذا دستیابی به نتایج دقیق در الگوریتم تخمین حالت

[1] Transient Energy Function

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

دینامیکی سیستم قدرت، ضروری است و به همین دلیل در پروژه تحقیقاتی حاضر بر روی این موضوع تمرکز شده است. عواملی که منجر به کاهش دقت نتایج تخمین حالت دینامیکی می‌شوند عبارت‌اند از:

- مدل غیرخطی سیستم قدرت
- محدودیت‌های ارتباطی و تأخیر ناشی از آن‌ها
- نویزهای اندازه‌گیری و داده‌های غلط

به منظور ارائه یک روش تخمین حالت دینامیکی کاربردی و قابل اعتماد در زمان بهره‌برداری آنلاین سیستم قدرت باید از الگوریتم‌هایی استفاده نمود که در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با دقت قابل قبولی مقدار نتیجه تخمین حالت دینامکی را به‌روزرسانی نمایند. ارائه یک فیلتر قدرتمند که در برابر مشکلات فوق‌الذکر مقاوم باشد و نتایج تخمین حالت دینامیکی قابل قبولی را ارائه دهد، هدف پروژه تحقیقاتی حاضر است.

۳-۶-۳- تعیین راه‌حل‌ها

۱ ۳ ۶ ۳ تخمین حالت دینامیکی بر اساس تحریک-رویداد

تخمین حالت در شبکه هوشمند بر اساس اندازه‌گیری‌های به دست آمده از PMUها انجام می‌شود. نرخ بالای اندازه‌گیری‌های PMUها و ارسال تمامی این اطلاعات به مراکز تخمین حالت منجر به افزایش تأخیر در عملیات تخمین زمان-حقیقی خواهد شد. برای کاهش این تأخیر، می‌توان تنها اندازه‌گیری‌هایی را به مراکز تخمین ارسال نمود که حاوی اطلاعات مفیدی برای به‌روزرسانی بردار تخمین حالت باشند. این روش، تخمین حالت بر اساس تحریک-رویداد نام دارد. تاکنون روش‌های مختلفی در زمینه تخمین حالت خطی بر اساس استراتژی تحریک-رویداد انجام شده است. اما تحقیقات بسیار محدودی در زمینه طراحی تخمین‌گر غیرخطی بر اساس استراتژی تحریک-رویداد در شبکه هوشمند انجام شده است [۱۳۹]. بنابراین موضوع تخمین حالت دینامیکی در سیستم قدرت با استفاده از سنکروفازورها بر اساس روش تحریک رویداد به عنوان یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی در پروژه حاضر در نظر گرفته می‌شود. طراحی تخمین‌گر توسط این روش شامل دو مرحله زیر می‌باشد.

- طراحی قانون تحریک غیرخطی مناسب (قانون تحریک تعیین می‌کند که آیا اندازه‌گیری‌های به دست آمده در لحظه k به مرکز تخمین ارسال شوند یا نه. قوانین تحریک مختلفی در زمینه سیستم‌های خطی ارائه شده‌اند. هرچند، نیاز است که برای سیستم شبکه هوشمند با غیرخطی‌گری بالا یک قانون تحریک غیرخطی مناسب طراحی شود.)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

- طراحی تخمین‌گر غیرخطی تحریک-رویداد (تخمین‌گر تحریک-رویداد با استفاده از اطلاعات ارسالی بر اساس قانون تحریک، به تخمین بردار حالت سیستم می‌پردازد. در این بخش، می‌بایست به طراحی یک تخمین‌گر غیرخطی پرداخت که با استفاده از اطلاعات دریافتی بر اساس قانون تحریک به تخمین بردار حالت شبکه هوشمند با دقت و بار محاسباتی مطلوب بپردازد.)

۲ ۳ ۶ ۳ تخمین حالت دینامیکی به روش توزیع‌یافته

چنان‌چه گفته شد، در شبکه برق هوشمند با مقیاس وسیع، یک تخمین‌گر حالت سریع و دقیق مورد نیاز می‌باشد. هرچند در چنین شبکه‌ای، بردار اندازه‌گیری‌ها و بردار متغیرهای حالت ابعاد بسیار بزرگی خواهند داشت. برای این که بردار حالت کل سیستم در تمامی نواحی در دسترس باشد، لازم است که حجم بسیار بزرگی از داده‌ها از PMUها به مراکز تخمین حالت متمرکز انتقال یابند. در این صورت، لینک‌های ارتباطی بسیار پرهزینه‌ای مورد نیاز خواهند بود. انتقال داده در حجم زیاد و در فواصل طولانی مصرف انرژی بسیار بالایی را در پی داشته و همچنین احتمال تلفات داده را افزایش خواهد داد. یک راه‌حل جایگزین برای حل این مسأله استفاده از ساختار غیرمتمرکز می‌باشد؛ به این صورت که شبکه وسیع برق به نواحی کوچک‌تر تقسیم شده و در هر ناحیه از یک تخمین‌گر حالت محلی برای به دست آوردن تخمین حالت سراسری استفاده شود. در یک ساختار کاملا غیرمتمرکز و بدون پردازشگر مرکزی، هر تخمین‌گر محلی تنها با تخمین‌گرهای در همسایگی خود به تبادل داده می‌پردازد. با این توضیحات، طراحی تخمین‌گر در این بخش شامل دو مرحله زیر می‌باشد.

- طراحی روش تخمین حالت غیرخطی با بار محاسباتی پایین با در نظر گرفتن غیرخطی‌گری بالای شبکه هوشمند
- طراحی روش توزیع عملیات تخمین غیرخطی در شبکه به منظور کاهش حجم اطلاعات ارسالی در عین حفظ پایداری تخمین‌گر

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل چهارم: معرفی سیستم قدرت

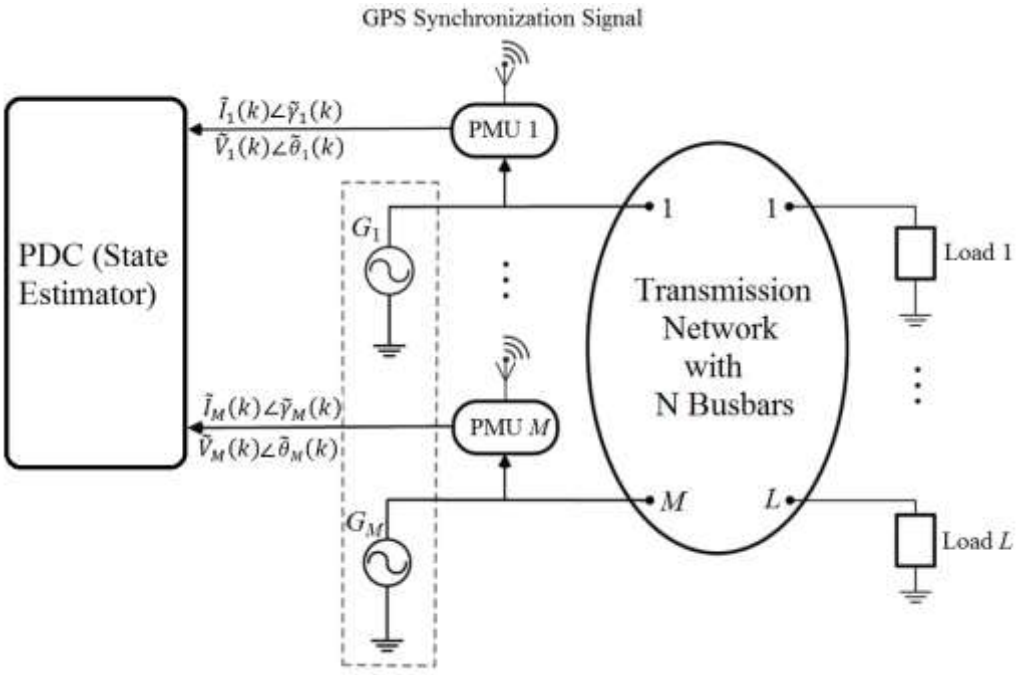
DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۴-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا دینامیک سیستم قدرت با معرفی یک شبکه انتقال با تعداد M ژنراتور، N باس و L بار بررسی می‌شود. سپس، معادلات دینامیکی و جبری و مدل فضای حالت این سیستم با در نظر گرفتن حالت گذرا و زیرگذرا[۱]، سیستم تحریک نوع ۱ (*IEEE TYPE1*) و سیستم توربین بخار به همراه گاورنر[۲] ارائه می‌شود. در انتها، یک مطالعه موردی بر روی سیستم ۶۸ باسه انجام می‌شود.

۴-۲- دینامیک سیستم قدرت

در این بخش، به معرفی دینامیک سیستم قدرت پرداخته می‌شود. بدین منظور، یک شبکه انتقال با تعداد M ژنراتور، N باس و L بار مطابق شکل ۴-۱ مد نظر قرار گرفته است. در این سیستم، فازور ولتاژ باس iام در زمان k توسط $\bar{V}_i(k) = V_i(k)\angle\theta_i(k)$ و فازور جریان ژنراتور iام در زمان k توسط $\bar{I}_i(k) = I_i(k)\angle\gamma_i(k)$ نشان داده می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در ترمینال هر ژنراتور، یک PMU نصب شده است که به اندازه‌گیری فازورهای ولتاژ و جریان خروجی آن ژنراتور می‌پردازد. PMUها با استفاده از سیگنال سامانه GPS به همزمان‌سازی اندازه‌گیری‌های خود می‌پردازند. مقادیر اندازه‌گیری‌شده و همزمان‌سازی‌شده توسط PMU شماره iام یعنی سنکروفازورهای $\tilde{I}_i(k)\angle\tilde{\gamma}_i(k)$ و $\tilde{V}_i(k)\angle\tilde{\theta}_i(k)$ توسط لینک‌های ارتباطی به PDC ارسال می‌شوند [۱۴۰].



[۱] Subtransient

[۲] Governor

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

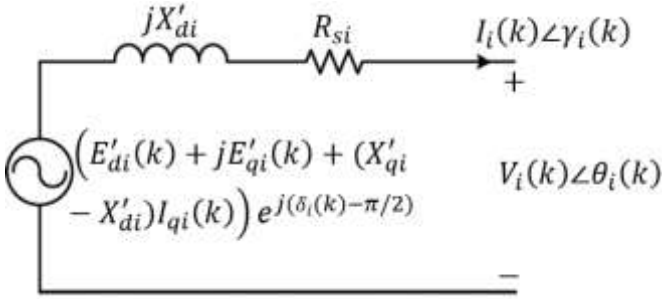
شکل ۴-۱ شبکه انتقال نمونه

مؤلفه‌های محور d و q جریان ژنراتور iام در زمان k به ترتیب با $I_{di}(k)$ و $I_{qi}(k)$ نشان داده می‌شوند. برای این جریان‌ها رابطه زیر برقرار است.

$$I_i(k)\angle\gamma_i(k) = \left(I_{di}(k) + jI_{qi}(k)\right) e^{j(\delta_i(k)-\pi/2)} \quad (۱-۴)$$

در این رابطه، $\delta_i(k)$ زاویه روتور ژنراتور iام می‌باشد [۱۴۰].

مدار معادل ژنراتور سنکرون iام با در نظر گرفتن حالت گذرا در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ مدار معادل ژنراتور سنکرون

در این شکل، X'_{di}، X'_{qi}، R_{si}، $E'_{di}(k)$ و $E'_{qi}(k)$ به ترتیب نشان‌دهنده راکتانس گذرای محور d[۱]، راکتانس گذرای محور q، مقاومت استاتور، ولتاژ داخلی گذرای محور d و ولتاژ داخلی گذرای محور q می‌باشند. با در نظر گرفتن افت ولتاژ در مدار شکل ۴-۲ و اعمال قانون KVL، می‌توان جریان‌های $I_{di}(k)$ و $I_{qi}(k)$ را به صورت زیر نوشت.

$$I_{di}(k) = \boldsymbol{\psi}_i\left(V_i(k), \theta_i(k), \delta_i(k), E'_{di}(k), E'_{qi}(k)\right) \quad (۲-۴)$$

$$I_{qi}(k) = \boldsymbol{\Phi}_i\left(V_i(k), \theta_i(k), \delta_i(k), E'_{di}(k), E'_{qi}(k)\right)$$

که $\boldsymbol{\psi}_i(.)$ و $\boldsymbol{\Phi}_i(.)$ توابع غیرخطی شناخته‌شده هستند [۱۴۰].

معادلات شارش توان برای باس‌های دارای ژنراتور به صورت زیر نوشته می‌شوند.

[۱] Transient d-axis Reactance

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$I_{di}(k)V_i(k)\,sin\big(\delta_i(k)-\theta_i(k)\big)+I_{qi}(k)V_i(k)\,cos\big(\delta_i(k)-\theta_i(k)\big)+ \quad (۳-۴)$$
$$P_{Li}(k)-\sum_{l=1}^{N}V_i(k)V_l(k)Y_{il}\,cos\big(e^{j(\theta_i-\theta_l-\alpha_{il})}\big)=0$$

$$I_{di}(k)V_i(k)\,cos\big(\delta_i(k)-\theta_i(k)\big)-I_{qi}(k)V_i(k)\,sin\big(\delta_i(k)-\theta_i(k)\big)+$$
$$Q_{Li}(k)-\sum_{l=1}^{N}V_i(k)V_l(k)Y_{il}\,sin\big(e^{j(\theta_i-\theta_l-\alpha_{il})}\big)=0$$

معادلات شارش توان برای سایر باس‌ها نیز به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$P_{Li}(k)-\sum_{l=1}^{N}V_i(k)V_l(k)Y_{il}\,cos\big(e^{j(\theta_i-\theta_l-\alpha_{il})}\big)=0 \quad (۴-۴)$$

$$Q_{Li}(k)-\sum_{l=1}^{N}V_i(k)V_l(k)Y_{il}\,sin\big(e^{j(\theta_i-\theta_l-\alpha_{il})}\big)=0$$

در این روابط، $Y_{il}\angle\alpha_{il}$ ادمیتانس بین باس iام و باس lام بوده و $P_{Li}(k)$ و $Q_{Li}(k)$ توان مصرفی اکتیو و راکتیو بارهای متصل به باس iام می‌باشند [۱۴۰]، [۱۴۱].

برای به دست آوردن $V_i(k)\angle\theta_i(k)$ در هر باس، می‌توان از تحلیل پخش بار[۱] در زمان k استفاده کرد. هرچند برای باس‌های متصل به ژنراتور که مجهز به PMU می‌باشند، دسترسی به مقادیر اندازه‌گیری شده $V_i(k)\angle\theta_i(k)$ و $I_i(k)\angle\gamma_i(k)$ یعنی سنکروفازورهای $\tilde{I}_i(k)\angle\tilde{\gamma}_i(k)$ و $\tilde{V}_i(k)\angle\tilde{\theta}_i(k)$ وجود دارد.

۴-۲-۱- معادلات دینامیکی و جبری سیستم

در این بخش، معادلات دینامیکی زمان-گسسته و معادلات جبری یک سیستم قدرت دارای M ژنراتور و N باس با در نظر گرفتن حالت گذرا و زیرگذرا، سیستم تحریک نوع ۱ (*IEEE TYPE1*) و سیستم توربین بخار به همراه گاورنر ارائه می‌شود. در [۱۴۱] و [۱۴۲]، معادلات تفاضلی-جبری (*DAE*[۲]) سیستم قدرت چندماشینه با M ژنراتور و N باس به صورت زمان-پیوسته[۳] ارائه شده‌اند. با استفاده از این معادلات، معادلات دینامیکی زمان-گسسته و معادلات جبری این سیستم در این بخش به دست آمده

[۱] Load Flow Analysis

[۲] Differential Algebraic Equations

[۳] Continuous-Time

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

و در ادامه ارائه می‌شوند. نمادهای[۱] به کار رفته در این معادلات در جدول ۴-۱ تعریف شده‌اند [۱۴۲]، [۱۴۳]. زیرنویس i برای هر نماد نشان‌دهنده پارامتر یا کمیت مورد نظر برای ژنراتور iام می‌باشد.

جدول ۴-۱ نمادها و تعاریف

Symbol	Definition	Symbol	Definition
R_{si}	Stator resistance (pu)	$\psi_{1di}(k)$	Damper winding 1d flux linkages (pu)
X_{di}	d-axis reactance (pu)	$\psi_{2qi}(k)$	Damper winding 2q flux linkages (pu)
X'_{di}	Transient d-axis reactance (pu)	$\delta_i(k)$	Rotor angle (rad)
X''_{di}	Sub-transient d-axis reactance (pu)	$\omega_i(k)$	Angular speed of generator (rad/sec)
X_{qi}	q-axis reactance (pu)	$\bar{V}_i(k)$	Complex voltage phasor
X'_{qi}	Transient q-axis reactance (pu)	$V_i(k)$	Magnitude of bus voltage (pu)
X''_{qi}	Sub-transient q-axis reactance (pu)	$\theta_i(k)$	Angle of bud voltage (rad)
H	Shaft inertia constant (sec)	$\bar{I}_i(k)$	Generator Complex Current phasor
ω_s	Generator synchronous speed (rad/sec)	$I_i(k)$	Generator Current Magnitude (pu)
T'_{do}	d-axis time constant associated with E'_q (sec)	$\gamma_i(k)$	Generator Current Angle (rad)
T''_{doi}	d-axis time constant associated with ψ_{1d} (sec)	$I_{di}(k)$	d-axis current (pu)
T'_{qoi}	q-axis time constant associated with E'_d (sec)	$I_{qi}(k)$	q-axis current (pu)
T''_{qoi}	q-axis time constant associated with ψ_{2q} (sec)	α_{il}	Angle of admittance $\boldsymbol{Y_{il}}$ (rad)
T_{Ei}	Exciter time constant (sec)	$E_{FDi}(k)$	Field voltage (pu)
T_{Fi}	Rate feedback time constant (sec)	$V_Ri(k)$	Exciter voltage (pu)
T_{Ai}	Amplifier time constant (sec)	$R_{Fi}(k)$	Rate Feedback (pu)
T_{CHi}	Incremental steam chest time constant (sec)	$T_{Mi}(k)$	Mechanical input torque (pu)
T_{SVi}	Steam valve time constant (sec)	$P_{SVi}(k)$	Steam valve position (pu)
K_{Ei}	Separate or self-excited constant	P_{Ci}	Control power input (pu)
K_{Fi}	Rate feedback gain	R_{Di}	Speed Regulation quantity (Hz/pu)
K_{Ai}	Amplifier gain	V_{refi}	Reference voltage input (pu)
$E'_{qi}(k)$	q-axis transient internal voltages (pu)	$S_{Ei}(.)$	Exciter saturation function
$E'_{di}(k)$	d-axis transient internal voltages (pu)	$T_{FWi}(k)$	Frictional windage torques
$E_i(k)$	Internal voltage (pu)	Δt	Sampling time (s)

[۱] Symbols

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۱ ۱ ۲ ۴ معادلات دینامیکی ژنراتور

معادلات دینامیکی زمان-گسسته ژنراتور سنکرون iام با در نظر گرفتن حالت گذرا و زیرگذرا به صورت زیر نوشته می‌شوند. در این معادلات، Δt نشان‌دهنده زمان نمونه‌برداری می‌باشد.

(۵-۴)

$$E'_{qi}(k+1)=\frac{\Delta t}{T'_{doi}}\Bigg(-E'_{qi}(k)-(X_{di}-X'_{di})\Bigg(I_{di}(k)-\frac{(X'_{di}-X''_{di})}{(X'_{di}-X_{ls})^2}\Big(\psi_{1di}(k)+$$

$$(X'_{di}-X_{ls})I_{di}(k)-E'_{qi}(k)\Big)\Bigg)+E_{FDi}(k)\Bigg)+E'_{qi}(k)$$

$$\psi_{1di}(k+1)=\frac{\Delta t}{T''_{doi}}\Big(-\psi_{1di}(k)+E'_{qi}(k)-(X'_{di}-X_{ls})I_{di}(k)\Big)+\psi_{1di}(k)$$

$$E'_{di}(k+1)=\frac{\Delta t}{T'_{qoi}}\Bigg(-E'_{di}(k)+\big(X_{qi}-X'_{qi}\big)\Bigg(I_{qi}(k)-\frac{\big(X'_{qi}-X''_{qi}\big)}{\big(X'_{qi}-X_{ls}\big)^2}\Big(\psi_{2qi}(k)+$$

$$\big(X'_{qi}-X_{ls}\big)I_{qi}(k)+E'_{di}(k)\Big)\Bigg)\Bigg)+E'_{di}(k)$$

$$\psi_{2qi}(k+1)=\frac{\Delta t}{T''_{qoi}}\Big(-\psi_{2qi}(k)-E'_{di}(k)-\big(X'_{qi}-X_{ls}\big)I_{qi}(k)\Big)+\psi_{2qi}(k)$$

$$\delta_i(k+1)=\Delta t(\omega_i(k)-\omega_s)+\delta_i(k)$$

$$\omega_i(k+1)=\frac{\omega_s\Delta t}{2H_i}\Bigg(T_{Mi}(k)-\frac{(X''_{di}-X_{ls})}{(X'_{di}-X_{ls})}E'_{qi}(k)I_{qi}(k)-\frac{(X'_{di}-X''_{di})}{(X'_{di}-X_{ls})}\psi_{1di}(k)I_{qi}(k)-$$

$$\frac{\big(X''_{qi}-X_{ls}\big)}{\big(X'_{qi}-X_{ls}\big)}E'_{di}(k)I_{di}(k)+\frac{\big(X'_{qi}-X''_{qi}\big)}{\big(X'_{qi}-X_{ls}\big)}\psi_{2qi}(k)I_{di}(k)-\big(X''_{qi}-X''_{di}\big)I_{di}(k)I_{qi}(k)-$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$T_{FWi}(k)\Big) + \omega_i(k)$$

در این روابط، $T_{FWi}(k) = D_m(w_i(k) - w_s)$ و D_m ضریب میرایی[1] ژنراتور می‌باشد که مقدار آن برای هر ژنراتور در سیستم ۶۸ باسه در پیوست ۱ ارائه شده است.

۴ ۲ ۱ ۲ ۴ معادلات دینامیکی سیستم تحریک

معادلات دینامیکی زمان-گسسته سیستم تحریک نوع ۱ به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$E_{FDi}(k+1) = \frac{\Delta t}{T_{Ei}}\Big(-\Big(K_{Ei} + S_{Ei}\big(E_{FDi}(k)\big)\Big)E_{FDi}(k) + V_{Ri}(k)\Big) + E_{FDi}(k) \quad (۶-۴)$$

$$R_{Fi}(k+1) = \frac{\Delta t}{T_{Fi}}\left(-R_{Fi}(k) + \frac{K_{Fi}}{T_{Fi}}E_{FDi}(k)\right) + R_{Fi}(k)$$

$$V_{Ri}(k+1) = \frac{\Delta t}{T_{Ai}}\Big(-V_{Ri}(k) + K_{Ai}R_{Fi}(k) - \frac{K_{Ai}K_{Fi}}{T_{Fi}}E_{FDi}(k) + K_{Ai}\Big(V_{refi} -$$

$$V_i(k)\Big)\Big) + V_{Ri}(k)$$

در این روابط، $S_{Ei}(.)$ تابع اشباع به صورت زیر می‌باشد.

$$S_{Ei}\big(E_{FDi}(k)\big) = A_x e^{B_x E_{FDi}(k)} \quad (۷-۴)$$

که در آن، A_x و B_x پارامترهای تابع اشباع سیستم تحریک هستند که مقادیر آن‌ها در پیوست ۱ ارائه شده است.

۴ ۲ ۱ ۳ معادلات دینامیکی توربین

معادلات دینامیکی زمان-گسسته توربین بخار به همراه گاورنر به صورت زیر نوشته می‌شوند.

[1] Damping Ratio

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$T_{Mi}(k+1) = \frac{\Delta t}{T_{CHi}}\left(-T_{Mi}(k) + P_{SVi}(k)\right) + T_{Mi}(k) \quad (۸-۴)$$

$$P_{SVi}(k+1) = \frac{\Delta t}{T_{SVi}}\left(-P_{SVi}(k) + P_{Ci} - \frac{1}{R_{Di}}\left(\frac{\omega(k)}{\omega_s} - 1\right)\right) + P_{SVi}(k)$$

با توجه به روابط (۴-۵)، (۴-۶) و (۴-۸) مشاهده می‌شود که در این سیستم، برای هر ژنراتور تعداد ۱۱ متغیر دینامیکی وجود دارد. بنابراین تعداد کل متغیرهای دینامیکی سیستم $11 \times M$ بوده و سیستم دینامیکی از مرتبه[۱] $11 \times M$ می‌باشد.

۴ ۱ ۲ ۴ معادلات جبری استاتور

معادلات جبری استاتور ژنراتور iام با استفاده از قانون KVL به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$R_{si}I_{di}(k) - X''_{qi}I_{qi}(k) - \frac{\left(X''_{qi}-X_{ls}\right)}{\left(X'_{qi}-X_{ls}\right)}E'_{di}(k) + \frac{\left(X'_{qi}-X''_{qi}\right)}{\left(X'_{qi}-X_{ls}\right)}\psi_{2qi}(k) + \quad (۹-۴)$$

$$V_i(k)\,sin\left(\delta_i(k) - \theta_i(k)\right) = 0$$

$$R_{si}I_{qi}(k) + X''_{di}I_{di}(k) - \frac{\left(X''_{di}-X_{ls}\right)}{\left(X'_{di}-X_{ls}\right)}E'_{qi}(k) - \frac{\left(X'_{di}-X''_{di}\right)}{\left(X'_{di}-X_{ls}\right)}\psi_{1qi}(k) +$$

$$V_i(k)\,cos\left(\delta_i(k) - \theta_i(k)\right) = 0$$

۴ ۱ ۲ ۵ معادلات جبری شارش توان

معادلات جبری شارش توان برای باس‌های متصل به ژنراتور به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$I_{di}(k)V_i(k)\,sin\left(\delta_i(k) - \theta_i(k)\right) + I_{qi}(k)V_i(k)\,cos\left(\delta_i(k) - \theta_i(k)\right) + \quad (۱۰-۴)$$

$$P_{Li}\left(V_i(k)\right) - \sum_{l=1}^{N} V_i(k)V_l(k)Y_{il}\,cos\left(\theta_i(k) - \theta_l(k) - \alpha_{il}(k)\right) = 0$$

$$I_{di}(k)V_i(k)\,cos\left(\delta_i(k) - \theta_i(k)\right) - I_{qi}(k)V_i(k)\,cos\left(\delta_i(k) - \theta_i(k)\right) +$$

[۱] System Order

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$Q_{Li}\big(V_i(k)\big) - \sum_{l=1}^{N} V_i(k)V_l(k)Y_{il}\, sin\big(\theta_i(k) - \theta_l(k) - \alpha_{il}(k)\big) = 0$$

معادلات جبری شارش توان برای سایر باس‌ها نیز به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$P_{Li}\big(V_i(k)\big) - \sum_{l=1}^{N} V_i(k)V_l(k)Y_{il}\, cos\big(\theta_i(k) - \theta_l(k) - \alpha_{il}(k)\big) = 0 \qquad (۱۱-۴)$$

$$Q_{Li}\big(V_i(k)\big) - \sum_{l=1}^{N} V_i(k)V_l(k)Y_{il}\, sin\big(\theta_i(k) - \theta_l(k) - \alpha_{il}(k)\big) = 0$$

۴ ۲ ۱ ۶ مدل بار

بارهای متصل به یک باس در عمل ترکیبی از بارهای توان-ثابت[۱]، جریان-ثابت[۲] و امپدانس-ثابت[۳] هستند. برای مدل‌سازی بارها، از روابط زیر استفاده می‌شود [۱۴۴].

$$P_{Li}\big(V_i(k)\big) = P_{Li}(0)\left(\frac{V_i(k)}{V_i(0)}\right)^{\alpha}, \quad Q_{Li}\big(V_i(k)\big) = Q_{Li}(0)\left(\frac{V_i(k)}{V_i(0)}\right)^{\beta} \qquad (۱۲-۴)$$

در این روابط، $P_{Li}(0)$، $Q_{Li}(0)$ و $V_i(0)$ به ترتیب برابر با مقادیر حالت ماندگار توان اکتیو، توان راکتیو و دامنه ولتاژ باس iام می‌باشند که با استفاده از تحلیل پخش بار و قبل از وقوع اغتشاش و به نوسان افتادن سیستم به دست می‌آیند. α و β نیز به ترتیب پارامترهای مدل‌سازی بار اکتیو و راکتیو هستند. برای بارهای مختلف، این پارامترها به صورت جدول ۴-۲ می‌باشند. برای داده‌های واقعی پارامترهای بار که از آزمایش‌های میدانی به دست می‌آیند، ممکن است این پارامترها کمی متفاوت با مقادیر این جدول باشند [۱۴۴].

جدول ۴-۲ پارامترهای مدل‌سازی بار

نوع بار	پارامترها
توان ثابت	$\alpha = 0, \beta = 0$
جریان ثابت	$\alpha = 1, \beta = 1$
امپدانس ثابت	$\alpha = 2, \beta = 2$

[۱] Constant Power

[۲] Constant Current

[۳] Constant Impedance

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۴-۱-۲-۷ زاویه مرجع

در یک سیستم دینامیکی که دارای اجزای چرخشی می‌باشد، می‌بایست یک مرجع برای متغیرهای چرخشی در نظر گرفت. در غیر این صورت، نمودارهای متغیرهای چرخشی (زاویه‌ای) به صورت پیوسته افزایش خواهند یافت. یک مرجع متداول مرکز اینرسی (COI[۱]) سیستم می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\delta_{COI}(k) = \frac{\sum_1^M M_i \delta_i(k)}{\sum_1^M M_i}, \quad \omega_{COI}(k) = \frac{\sum_1^M M_i \omega_i(k)}{\sum_1^M M_i} \tag{۴-۱۳}$$

در این روابط، $M_i = \frac{2H_i}{\omega_s}$ می‌باشد. ذکر این نکته حائز اهمیت می‌باشد که در روابط مربوط به معادلات جبری استاتور و شارش توان، متغیرهای زاویه‌ای به صورت تفاضلی در کنار هم ظاهر شده‌اند؛ بنابراین نیازی به افزودن زاویه مرجع به کمیت‌های زاویه‌ای نمی‌باشد، زیرا این مرجع‌ها در تفاضل دو زاویه یکدیگر را خنثی می‌کنند. اما در رابطه دینامیکی $\delta_i(k+1) = \Delta t(\omega_i(k) - \omega_s) + \delta_i(k)$ در (۴-۵)، ω_s با $\omega_{COI}(k)$ جایگزین شده و $\omega_{COI}(k)$ به عنوان مرجع برای اجزای چرخشی سیستم در نظر گرفته می‌شود [۱۴۱].

۴-۳- مدل فضای حالت

چنان‌چه گفته شد، نمایش فضای حالت یک سیستم دینامیکی برخلاف توصیف تابع تبدیل سیستم که تنها رابطه بین خروجی و ورودی یک سیستم دینامیکی را نمایش می‌دهد، رابطه بین متغیرهای داخلی سیستم دینامیکی را نیز نمایش می‌دهد. این متغیرهای داخلی سیستم دینامیکی (که متغیرهای حالت سیستم نامیده می‌شوند) برخلاف متغیرهای ورودی و خروجی، همیشه قابل اندازه‌گیری نیستند. این متغیرها را می‌توان توسط یک تخمین‌گر حالت تخمین زد. تخمین حالت فرآیندی است که بر اساس مدل فضای حالت سیستم و اندازه‌گیری‌های ورودی و خروجی‌های سیستم به تخمین مقادیر متغیرهای حالت سیستم مورد نظر می‌پردازد. در سیستم‌های واقعی مانند شبکه برق، در اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده از سیستم خطا وجود دارد. علاوه بر این، ممکن است برخی از اندازه‌گیری‌ها اضافی باشند. در تخمین حالت در شبکه برق، اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده از سیستم‌های اسکادا و یا PMUها به مراکز دیسپاچینگ فرستاده می‌شوند.

با این توضیحات، در بخش بعدی به ارائه مدل فضای حالت سیستم قدرت پرداخته شده است.

[۱] Center of Inertia

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۴-۳-۱- بردار حالت

بردار حالت سیستم قدرت معرفی‌شده در بخش ۴-۲، متشکل از تمامی متغیرهای دینامیکی سیستم و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$X(k) = \left[E_q^{'}(k) \quad \psi_{1d}(k) \quad E_d^{'}(k) \quad \psi_{2d}(k) \quad \delta(k) \quad \omega(k) \quad E_{FD}(k) \right. \tag{۱۴-۴}$$

$$\left. R_F(k) \quad V_R(k) \quad T_M(k) \quad P_{SV}(k)\right]^T$$

که در آن،

$$E_q'(k) = [E_{q1}'(k) \quad \dots \quad E_{qM}'(k)] \tag{۱۵-۴}$$

می‌باشد. در واقع، $E_q'(k)$ متشکل از $E_{qi}'(k)$ها برای تمامی ژنراتورها (ژنراتور 1ام تا ژنراتور Mام) می‌باشد. سایر عناصر بردار حالت $X(k)$ نیز به صورت مشابه تعریف می‌شوند. چنان‌چه مشاهده می‌شود، تعداد کل عناصر بردار حالت $X(k)$ برابر با $11 \times M$ می‌باشد.

۴-۳-۲- بردار متغیرهای جبری

در این پروژه همانند [۱۴۵]، فرض بر این است که دینامیک شبکه انتقال بسیار سریع‌تر از دینامیک ژنراتورها می‌باشد. بنابراین، ولتاژها و جریان‌های تمامی باس‌های شبکه یعنی $V_i(k)\angle\theta_i(k)$ و $I_i(k)\angle\gamma_i(k)$ به صورت لحظه‌ای تغییر کرده و می‌توان آن‌ها را به عنوان متغیرهای جبری در نظر گرفت. با این توضیحات، می‌توان بردار متغیرهای جبری سیستم را به صورت زیر نوشت.

$$A(k) = [I_{d1}(k) \quad \dots \quad I_{dM}(k) \quad I_{q1}(k) \quad \dots \quad I_{qM}(k) \quad V_1(k) \tag{۱۶-۴}$$

$$\dots \quad V_N(k) \quad \theta_1(k) \quad \dots \quad \theta_N(k)]^T$$

این بردار شامل مؤلفه‌های محور d و q جریان تمامی ژنراتورها و دامنه و فاز ولتاژ تمامی باس‌های شبکه می‌باشد. بنابراین، ابعاد این بردار برابر با $2M + 2N$ می‌باشد.

۴-۳-۳- بردار ورودی و خروجی

با نگاهی به روابط (۴-۵) تا (۴-۹) می‌توان دریافت که جریان باس‌های متصل به ژنراتور $I_i(k)\angle\gamma_i(k)$ توابع صریحی از ولتاژ باس‌ها $V_i(k)\angle\theta_i(k)$ و متغیرهای دینامیکی در لحظه k می‌باشند. متغیرهای دینامیکی در لحظه $k+1$ نیز توابع صریحی از ولتاژ باس‌ها $V_i(k)\angle\theta_i(k)$ و متغیرهای دینامیکی در

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

لحظه k می‌باشند. بنابراین، می‌توان جریان ژنراتورها را به عنوان خروجی سیستم و ولتاژ باس‌های متصل به ژنراتورها را به عنوان ورودی سیستم (ورودی مجازی[۱]) در نظر گرفت. با این توضیحات، بردار ورودی $U(k)$ و خروجی سیستم $Y(k)$ به صورت زیر انتخاب می‌شوند.

$$U(k) = [V_1(k) \quad ... \quad V_M(k) \quad \theta_1(k) \quad ... \quad \theta_M(k)]^T \tag{۱۷-۴}$$

$$Y(k) = [I_1(k) \quad ... \quad I_M(k) \quad \gamma_1(k) \quad ... \quad \gamma_M(k)]^T$$

۴-۳-۴- مدل فرآیند و مشاهدات

با تعریف بردارهای حالت، جبری، ورودی و خروجی سیستم، مدل غیرخطی فرآیند را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k)\big) \tag{۱۸-۴}$$

در این رابطه، $f(.)$ تابعی غیرخطی است که از روابط دینامیکی (۴-۵) تا (۴-۸) به دست می‌آید.

مدل غیرخطی مشاهدات نیز به صورت زیر قابل نوشتن می‌باشد.

$$Y(k) = h\big(X(k), U(k)\big) \tag{۱۹-۴}$$

در این رابطه، $h(.)$ تابعی غیرخطی است که به صورت زیر به دست آمده

$$h\big(X(k), U(k)\big) = [I_1(k) \quad ... \quad I_M(k) \quad \gamma_1(k) \quad ... \quad \gamma_M(k)]^T \tag{۲۰-۴}$$

و $I_i(k)$ و $\gamma_i(k)$ نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$I_i(k) = \sqrt{I_{di}^2(k) + I_{qi}^2(k)} \tag{۲۱-۴}$$

$$\gamma_i(k) = tan^{-1}\left(\frac{-I_{di}(k)}{I_{qi}(k)}\right) + \delta_i(k)$$

[۱] Pseudo-Input

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در این رابطه، $I_{di}(k)$ و $I_{qi}(k)$ را می‌توان توسط معادلات غیرخطی (۴-۹) نوشت.

۴-۴- مطالعه موردی (سیستم ۶۸ باسه)

در این پروژه، سیستم مدنظر برای طراحی و شبیه‌سازی، سیستم استاندارد ۶۸ باسه *IEEE* [۱۴۶] می‌باشد. در ادامه، به معرفی این سیستم که یک سیستم مقیاس-وسیع به حساب می‌آید، پرداخته می‌شود. این سیستم که متشکل از ۶۸ باس، ۱۶ ژنراتور و ۵ ناحیه جغرافیایی می‌باشد، یک معادل کاهش مرتبه یافته از سیستم نیواینگلند (*NETS*[۱]) و سیستم نیویورک (*NYPS*[۲]) می‌باشد. این سیستم در شکل ۴-۳ نمایش داده شده است. از ۵ ناحیه جغرافیایی در این سیستم، نواحی ۱ و ۲ به ترتیب مرتبط با سیستم‌های *NETS* و *NYPS* می‌باشند. سیستم *NETS* توسط ژنراتورهای *G1* تا *G9* و سیستم *NYPS* توسط ژنراتورهای *G10* تا *G13* نمایش داده می‌شوند. سه ناحیه دیگر که در همسایگی ناحیه *NYPS* می‌باشند، هر کدام توسط یک ژنراتور (*G14* تا *G16*) نمایش داده شده‌اند. در واقع توان دریافتی از هر کدام از این سه ناحیه توسط یک ژنراتور معادل تقریب زده شده است. چنان‌چه در شکل ۴-۳ مشاهده می‌شود، در این سیستم تعداد ۸ تای‌لاین[۳] وجود دارد که نواحی مختلف را به هم متصل می‌کنند. تای‌لاین‌های بین نواحی ۱ و ۲ دومداره[۴] و سایر تای‌لاین‌ها تک‌مداره[۵] می‌باشند. مدل سیستم ۶۸ باسه پس از خاموشی‌های سال ۱۹۶۵ طراحی شد که در واقع نشان‌دهنده بخش‌هایی از شبکه قدرت آن ناحیه در دهه ۱۹۷۰ می‌باشد [۱۴۶]، [۱۴۷]، [۱۴۸].

همان‌طور که در شکل ۴-۳ مشاهده می‌شود، در این سیستم ۴ مد بین ناحیه‌ای وجود دارد. یکی از چالش‌های مرتبط با سیستم ۶۸ باسه این است که دمپ نمودن[۶] مدهای درون‌ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای، با تکیه بر تنها *PSS* مشکل می‌باشد؛ زیرا بزرگ‌ترین ژنراتورهای این سیستم یعنی ژنراتورهای *G14* تا *G16* در واقع مدل معادل یک سیستم هستند، نه یک ژنراتور واحد. بنابراین در عمل، امکان دمپ نمودن مدهای مرتبط با این ژنراتورها توسط *PSS* وجود ندارد و می‌بایست از تجهیزاتی مانند *FACTS* برای این کار استفاده نمود [۱۴۸].

---

[۱] New England Test System

[۲] New York Power System

[۳] Tie-Line

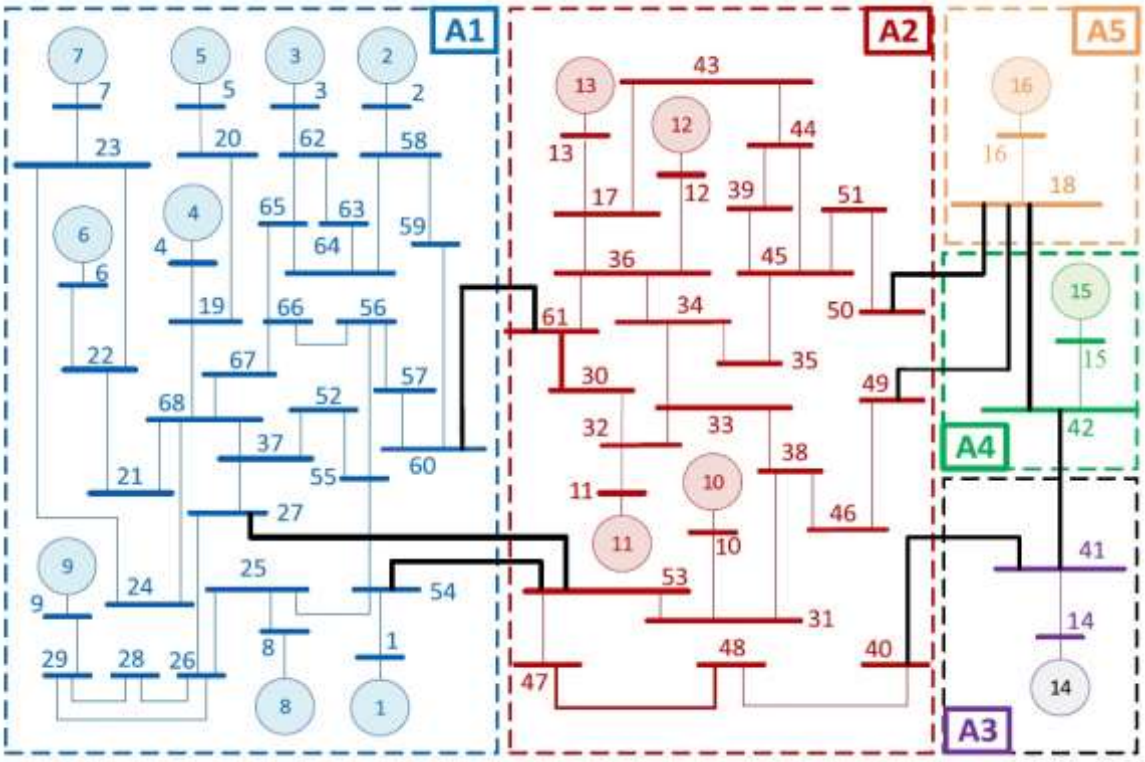
[۴] Double Circuit Line

[۵] Single Circuit Line

[۶] Damping

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

داده‌های مربوط به شارش توان و خطوط انتقال سیستم ۶۸ باسه و همچنین داده‌های مرتبط با دینامیک سیستم (داده‌های ژنراتور، سیستم تحریک و توربین) در پیوست ۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۴-۳ نمودار تک‌خطی سیستم ۶۸ باسه

۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا دینامیک سیستم قدرت با معرفی یک شبکه انتقال با تعداد M ژنراتور، N باس و L بار بررسی شد. سپس، معادلات دینامیکی و جبری و مدل فضای حالت این سیستم با در نظر گرفتن حالت گذرا و زیرگذرا، سیستم تحریک نوع ۱ و سیستم توربین بخار ارائه شد. مشاهده شد که این سیستم دارای ابعاد بالایی بوده و دارای $11 \times M$ متغیر حالت، $2 \times M$ ورودی و $2 \times M$ خروجی می‌باشد. در انتها، یک مطالعه موردی بر روی سیستم ۶۸ باسه انجام شد. این سیستم که یک سیستم مقیاس-وسیع به حساب می‌آید، متشکل از ۶۸ باس، ۱۶ ژنراتور و ۵ ناحیه جغرافیایی می‌باشد. یکی از چالش‌های مرتبط با سیستم ۶۸ باسه این است که دمپ نمودن مدهای درون‌ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای، با تکیه بر تنها *PSS* مشکل می‌باشد؛ زیرا بزرگ‌ترین ژنراتورهای این سیستم یعنی ژنراتورهای *G14* تا *G16* در واقع مدل معادل یک سیستم هستند، نه یک ژنراتور واحد. بنابراین در عمل، امکان دمپ نمودن مدهای مرتبط با این ژنراتورها توسط *PSS* وجود ندارد و می‌بایست از تجهیزاتی مانند *FACTS* برای این کار استفاده نمود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل پنجم: شبیه‌سازی و تحلیل سیستم قدرت

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۵-۱- مقدمه

رفتار یک سیستم قدرت به‌هم‌پیوسته را می‌توان توسط روش‌های تحلیل مختلفی مانند تحلیل در حوزه زمان، تحلیل مدال[۱] و تحلیل پاسخ فرکانسی[۲] مورد مطالعه قرار داد. در این فصل، به شبیه‌سازی و تحلیل سیستم قدرت در حوزه زمان پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا دلیل انتخاب نرم‌افزار متلب[۳] و دلیل استفاده از حل‌کننده‌های عددی آن برای شبیه‌سازی شرح داده می‌شود. سپس، روش‌های صریح[۴] و ضمنی[۵] برای حل معادلات *DAE* سیستم قدرت و همچنین روش مورد استفاده برای شبیه‌سازی در این پروژه معرفی می‌شوند. در ادامه، از تحلیل پخش بار در حالت ماندگار سیستم برای به دست آوردن شرایط اولیه قبل از اغتشاش استفاده می‌شود. سپس، راهکارهای مورد استفاده برای افزایش سرعت اجرای کد شبیه‌سازی معرفی می‌شوند. با شبیه‌سازی سیستم ۶۸ باسه توسط روش پیشنهادی، نتایج در قالب ترسیم و تحلیل نمودار زمانی متغیرهای حالت سیستم ارائه می‌شود. در انتها، با خطی‌سازی سیستم ۶۸ باسه، به تحلیل مدال، تحلیل شکل مد[۶]، تحلیل ضریب مشارکت و تحلیل مانده مدال[۷] برای این سیستم پرداخته می‌شود.

۵-۲- انتخاب نرم‌افزار شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی سیستم‌های قدرت، نرم‌افزارهای تجاری متعددی مانند *PSS/E*[۸]، *PowerWorld Simulator*، *ATP-EMTP*[۹] و *DIgSILENT* وجود دارند [۱۴۹]، [۱۵۰]، [۱۵۱]، [۱۵۲]. این نرم‌افزارها همگی به خوبی نوشته شده، دقیق و سریع بوده، کارآیی بالایی از نظر محاسباتی داشته و شامل اجزای

۱ Modal Analysis

۲ Frequency Response

۳ MATLAB

۴ Explicit

۵ Implicit

۶ Mode Shape

۷ Modal Residue Analysis

۸ Power System Simulation for Engineering

۹ Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

الکتریکی و مدل‌های متنوعی می‌باشند. هرچند، این نرم‌افزارهای تجاری سه مشکل اصلی به شرح زیر دارند [۱۵۳]، [۱۵۴].

- این نرم‌افزارها متن-بسته[۱] هستند و اجازه دسترسی و ویرایش کدهای منبع[۲] را به جز در حالات خاص نمی‌دهند.
- قیمت بالایی دارند.
- کدهای آموزشی کمی دارند و نیاز به دوره‌های آموزشی برای یادگیری دارند

در مقابل، نرم‌افزار متلب یک زبان برنامه‌نویسی سطح-بالا[۳] بوده، قیمت کمتری دارد و در اکثر مراکز دانشگاهی و پژوهشی در دسترس می‌باشد. برای شبیه‌سازی سیستم قدرت، تولباکس‌های مختلفی در متلب مانند *PST*[۴] [۱۵۵]، *PSAT*[۵] [۱۵۶]، *MatDyn* [۱۵۴] و *PowSysGUI* [۱۵۷] وجود دارند. تولباکس *PST* برای شبیه‌سازی و خطی‌سازی سیستم‌های قدرت چندماشینه کاربرد دارد. تولباکس *PSAT* نیز در محیط سیمیولینک[۶] به شبیه‌سازی سیستم قدرت و تحلیل آن می‌پردازد. بسته‌های نرم‌افزاری *MatDyn* و *PowSysGUI* نیز برای تحلیل دینامیکی سیستم قدرت کاربرد دارند.

با این حال، هیچ‌کدام از این تولباکس‌ها به طور کامل از مزایای حل‌کننده‌های[۷] قوی متلب استفاده نکرده و از کدهای مختص خودشان برای حل معادلات دینامیکی-جبری سیستم قدرت استفاده می‌کنند. بنابراین، در صورتی که حل‌کننده‌های مورد استفاده در این تولباکس‌ها موفق به حل مسأله نشوند، امکان تغییر دادن حل‌کننده به یکی دیگر از حل‌کننده‌های قوی متلب وجود ندارد.

---

۱ Closed-Source

۲ Source Codes

۳ High-Level Programming Language

۴ Power System Toolbox

۵ Power System Analysis Toolbox

۶ Simulink

۷ Solvers

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

به طور مثال، نشان داده شده است که *PSAT* در صورت مدل‌سازی بارها به صورت توان-ثابت و وقوع یک اغتشاش خاص، قادر به شبیه‌سازی یک سیستم ساده مانند سیستم ۹ باسه نمی‌باشد. همچنین *PSAT* تنها از دو روش عددی برای حل مسأله استفاده می‌کند. علاوه بر این‌ها، *PSAT* برای شبیه‌سازی سیستم‌های مقیاس-وسیع مانند سیستم ۶۸ باسه مناسب نمی‌باشد [۱۴۱].

تولباکس *PST* نیز با این که در مقایسه با *PSAT* سرعت بالاتری در شبیه‌سازی حوزه زمان و خطی‌سازی دارد، تنها از یک حل‌کننده عددی استفاده کرده و روش خطی‌سازی آن نیز بر مبنای یک تقریب اغتشاش[۱] و محاسبه عددی ژاکوبین‌ها[۲] می‌باشد [۱۴۱]. طبق چیزی که در راهنمای این تولباکس نوشته شده است، در صورت وجود مقدار ویژه[۳] صفر در سیستم (که یکی از مشخصه‌های اکثر سیستم‌های قدرت به-هم-پیوسته می‌باشد)، دقت نتایج پایین می‌آید [۱۵۸]. علاوه بر این، در تولباکس *PST* امکان نمایش معادلات دینامیکی-جبری به صورت سمبولیک و تحلیل و خطی‌سازی سمبولیک آن‌ها وجود ندارد [۱۴۱].

دو بسته نرم‌افزاری دیگر در متلب یعنی *MatDyn* و *PowSysGUI* نسبت به *PST* و *PSAT* جدیدتر می‌باشند؛ منتها تنها برای شبیه‌سازی موارد خاص سیستم قدرت مانند بارهای امپدانس-ثابت (برای حذف معادلات جبری در تحلیل پخش بار) به کار می‌روند. به علاوه، تولباکس *MatDyn* تنها از یک روش پارتیشن‌بندی[۴] برای حل مسأله استفاده می‌کند. *PowSysGUI* نیز مشابه *PSAT* در محیط سیمیولینک به شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم قدرت می‌پردازد [۱۴۱].

علاوه بر این مطالب، این تولباکس‌ها برای برخی امور مهم در سیستم قدرت مانند تحلیل مانده مدال، انتخاب سیگنال فیدبک[۵] کنترل‌کننده، مکان‌یابی بهینه کنترل‌کننده و تنظیم پارامترها طراحی نشده‌اند.

در سوی دیگر، حل‌کننده‌های قوی و پایدار-عددی[۶] مختلفی مانند *ode45*، *ode113*، *ode15s*، *ode23*، *ode23t*، *ode23tb* و *ode23s* در متلب وجود دارند که برای حل معادلات دینامیکی-جبری سخت[۷] و

---

[۱] Perturbation Approximation

[۲] Jacobians

[۳] Eigenvalue

[۴] Partitioning

[۵] Feedback

[۶] Numerically-Stable

[۷] Stiff

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

غیرسخت[۱] قابل استفاده هستند. برای هر کدام از این حل‌کننده‌ها، تنظیمات مختلفی برای مقابله با مشکلات عددی در حل معادلات سخت وجود دارد. برای حل معادلات غیرخطی جبری نیز، حل‌کننده‌های دیگری مانند *fsolve* و *lsqnonlin* در متلب وجود دارند که قابل استفاده برای شبیه‌سازی سیستم قدرت به روش صریح می‌باشند. این حل‌کننده‌ها نیز دارای تنظیمات مختلفی می‌باشند.

با توجه به این توضیحات، در این پروژه مشابه روش استفاده شده در [۱۴۱]، با استفاده از کدنویسی در محیط *mfile* متلب و استفاده از مزایای حل‌کننده‌های مختلف و تنظیمات آن‌ها به شبیه‌سازی سیستم قدرت و حل معادلات دینامیکی-جبری آن پرداخته می‌شود. در این صورت، امکان شبیه‌سازی هم برای سیستم‌های مقیاس-کوچک و هم برای سیستم‌های مقیاس-وسیع با استفاده از کدهای نوشته‌شده وجود دارد. علاوه بر این، امکان نمایش معادلات دینامیکی و جبری سیستم به صورت سمبولیک و خطی‌سازی تحلیلی و سمبولیک سیستم در قالب فضای حالت وجود دارد. همچنین با استفاده از کدهای نوشته شده توسط این روش می‌توان به انواع تحلیل‌ها و کاربردها مانند تحلیل ضریب مشارکت[۲]، مکان‌یابی بهینه کنترل‌کننده و تنظیمات پارامترهای سیستم پرداخت.

۵-۳- انتخاب روش شبیه‌سازی و حل‌کننده

یک سیستم قدرت چندماشینه را می‌توان به صورت ریاضی و توسط مجموعه‌ای از معادلات تفاضلی-جبری (*DAE*) نمایش داد. در [۱۴۱] و [۱۴۲]، معادلات *DAE* سیستم قدرت چندماشینه با M ژنراتور و N باس به صورت زمان-پیوسته ارائه شده‌اند. معادلات *DAE* را می‌توان به روش ضمنی یا صریح حل نمود.

در روش ضمنی، با استفاده از روش‌های اویلر[۳] یا ذوزنقه‌ای[۴]، معادلات تفاضلی به معادلات جبری تبدیل می‌شوند [۱۴۲]. مجوعه معادلات غیرخطی جدید که همگی جبری هستند قابل حل توسط یک حل‌کننده عددی هستند.

در روش صریح، معادلات تفاضلی با استفاده از یک روش انتگرال‌گیری عددی و به صورت مستقل برای متغیرهای دینامیکی حل شده و معادلات جبری به صورت جداگانه برای به دست آوردن متغیرهای جبری حل می‌شوند.

---

[۱] Non-stiff

[۲] Participation Factor Analysis

[۳] Euler

[۴] Trapezoidal

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در [۱۴۱]، با استفاده از هر دو روش ضمنی و صریح به شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم قدرت پرداخته شده است. در روش ضمنی، تمامی معادلات تفاضلی-جبری در یک *mfile* گنجانده شده و توسط یکی از حل‌کننده‌های *ode* فراخوانده می‌شوند. نتیجه شبیه‌سازی توسط این روش، داده‌های حوزه زمان برای متغیرهای جبری و دینامیکی است. هرچند، روش ضمنی تنها برای یک نوع اغتشاش (تغییر پله‌ای ورودی‌ها مانند ولتاژ مرجع یا ورودی مکانیکی) قابل استفاده است. برای اغتشاشات سمت شبکه[۱] (مانند تغییر بار، خروج خط یا فالت سه‌فاز) که متداول‌تر می‌باشند، حل‌کننده *ode* زمانی که شروع به کار می‌کند، به کاربر اجازه تغییر پارامترهای مسأله در حین حل را نمی‌دهد [۱۴۱].

برای رفع این محدودیت، دو روش وجود دارد. در روش اول که همان روش صریح است، معادلات *DAE* به دو دسته معادلات تفاضلی و معادلات جبری دسته‌بندی می‌شوند. معادلات جبری به صورت یک تابع تو در تو[۲] در داخل تابع اصلی که به حل معادلات تفاضلی می‌پردازد، قرار می‌گیرند. در این روش، از حل‌کننده *fsolve* یا *lsqnonlin* برای حل معادلات جبری و از یکی از دستورات *ode* برای حل معادلات تفاضلی استفاده می‌شود. در این روش، تمامی متغیرها و پارامترهای درون تابع داخلی در تابع اصلی قابل رؤیت هستند [۱۴۱].

در روش دیگر برای حل مسأله اغتشاشات سمت شبکه، می‌توان معادلات *DAE* را به صورت همزمان (روش ضمنی) ولی در سه فایل جداگانه (پیش از وقوع فالت-حین وقوع فالت-پس از وقوع فالت) حل نمود [۱۴۱].

در این پروژه، از آن‌جا که هدف نهایی از شبیه‌سازی سیستم قدرت، تخمین حالت دینامیکی زمان-واقعی می‌باشد، لازم است تا به شبیه‌سازی معادلات دینامیکی و جبری به صورت زمان-گسسته پرداخته شود. بنابراین، برای معادلات دینامیکی بازگشتی بخش ۴-۲، از روابط (۴-۵) تا (۴-۸) و حلقه *for* استفاده می‌شود. برای حل معادلات جبری در هر بازگشت نیز از دستور *lsqnonlin* استفاده می‌شود. مراحل الگوریتم پیشنهادی برای شبیه‌سازی سیستم قدرت در این پروژه در بخش ۵-۶ و در جدول ۵-۱ ارائه شده است.

۵-۴- محاسبه شرایط اولیه سیستم

اولین قدم در شبیه‌سازی یک سیستم دینامیکی، تعیین مقادیر اولیه متغیرهای جبری، تعیین مقادیر اولیه متغیرهای دینامیکی (متغیرهای حالت) و تعیین ورودی‌های ثابت سیستم می‌باشد. برای متغیرهای جبری مانند فازورهای ولتاژ باس $\bar{V}_i(0) = V_i(0)\angle\theta_i(0)$ و توان خروجی ژنراتورها $P_{Gi}(0) + Q_{Gi}(0)$، می‌توان از

[۱] Network Side Disturbance

[۲] Nested

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

تحلیل پخش بار توسط بسته نرم‌افزاری متن-باز[۱] *MATPOWER* قبل از وقوع اغتشاش در سیستم استفاده نمود. این بسته نرم‌افزاری شامل حل‌کننده‌ها و تنظیمات متعددی برای تحلیل پخش بار می‌باشد. پس از به دست آوردن مقادیر اولیه متغیرهای جبری و توان خروجی ژنراتورها توسط پخش بار، می‌توان با استفاده از این مقادیر و معادلات دینامیکی سیستم، به محاسبه مقادیر اولیه متغیرهای حالت دینامیکی پرداخت. بدین منظور، می‌بایست مقادیر مشتق در حوزه زمان-پیوسته (یا مقادیر تفاضل متغیرهای دینامیکی در حوزه زمان-گسسته) را برابر با صفر قرار داد [۱۵۹]. نتایج پخش بار و شرایط اولیه سیستم در بخش ۵-۷ ارائه شده است.

۵-۵- افزایش سرعت شبیه‌سازی

چنان‌چه در بخش ۴-۲-۱-۵ مشاهده شد، معادلات شارش توان (۴-۱۰) و (۴-۱۱) دارای عبارت‌های جمع (مانند $\left(\sum_{l=1}^{N} V_i(k)V_l(k)Y_{il}\,cos\left(\theta_i(k)-\theta_l(k)-\alpha_{il}(k)\right)\right.$) می‌باشند. وجود این عبارت‌ها در داخل معادلات و استفاده از حلقه‌های *for* برای این عبارات منجر به افزایش قابل ملاحظه زمان اجرای شبیه‌سازی و کاهش سرعت می‌شود. در این بخش، مشابه روش مورد استفاده در [۱۴۱] از یک مدل برداری برای محاسبه این عبارت‌ها و حذف حلقه‌های *for* استفاده می‌شود؛ تا سرعت شبیه‌سازی افزایش قابل توجهی پیدا کند. بدین‌منظور از روش ماتریس‌های شبکه‌ای[۲] و دستور *ndgrid* در متلب استفاده می‌شود. در ادامه، این روش با ذکر یک مثال در مورد سیستم ۹ باسه (دارای ۹ باس و ۳ ژنراتور) معرفی می‌شود. معادلات جبری (۴-۱۰) و (۴-۱۱) شامل عبارات مجموع شارش توان بین باس مدنظر و سایر باس‌ها می‌باشند. به منظور بردارسازی کردن این عبارات، ماتریس‌های زیر توسط تابع *ndgrid* تولید می‌شوند.

$$a=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1\\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2\\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3\end{bmatrix} \qquad (۱-۵)$$

$$b=\begin{bmatrix}1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9\\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9\\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9\end{bmatrix}$$

[۱] Open-Source

[۲] Matrix Grid

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$c = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 \\ 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 \\ 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$$

در این صورت، می‌توان عبارات مجموع در روابط (۴-۱۰) و (۴-۱۱) را با فرم بردارسازی شده به صورت زیر جایگزین نمود.

$$\sum_{l=1}^{N} V_i(k)V_l(k)Y_{il}\cos\big(\theta_i(k)-\theta_l(k)-\alpha_{il}(k)\big) = sum(V(1:M)'.*\, V(1:N).* \quad (۲-۵)$$

$$abs\big(Y(1:M,1:N)\big).*\, cos((\theta(a)-\theta(b)-arg(Y(1:M,1:N))),2)$$

$$\sum_{l=1}^{N} V_i(k)V_l(k)Y_{il}\sin\big(\theta_i(k)-\theta_l(k)-\alpha_{il}(k)\big) = sum(V(1:M)'.*\, V(1:N).*$$

$$abs\big(Y(1:M,1:N)\big).*\, sin((\theta(a)-\theta(b)-arg(Y(1:M,1:N))),2)$$

$$\sum_{l=1}^{N} V_i(k)V_l(k)Y_{il}\cos\big(\theta_i(k)-\theta_l(k)-\alpha_{il}(k)\big) = sum(V(M+1:N)'.*$$

$$V(1:N).*\, abs\big(Y(M+1:N,1:N)\big).*\, cos((\theta(c)-\theta(d)-arg(Y(M+$$

$$1:N,1:N))),2)$$

$$\sum_{l=1}^{N} V_i(k)V_l(k)Y_{il}\sin\big(\theta_i(k)-\theta_l(k)-\alpha_{il}(k)\big) = sum(V(M+1:N)'.*$$

$$V(1:N).*\, abs\big(Y(M+1:N,1:N)\big).*\, sin((\theta(c)-\theta(d)-arg(Y(M+$$

$$1:N,1:N))),2)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در این روابط، Y ماتریس ادمیتانس سیستم و V و θ بردار دامنه و فاز ولتاژ باس‌ها هستند. تابع sum با تنظیمات ۲ نشان‌دهنده جمع عناصر سطری ماتریس، علامت $*$. نشان‌دهنده ضرب عنصر به عنصر ماتریسی[۱]، علامت $'$ نشان‌دهنده ترانهاده[۲] ماتریس و abs و arg به ترتیب نشان‌دهنده دامنه و فاز می‌باشند. برای محاسبه عبارات مجموع می‌توان از دستور sum مشابه این روابط استفاده نمود که منجر به حذف حلقه‌های for و افازیش قابل توجه سرعت شبیه‌سازی می‌شود.

برای سیستم‌های دیگر مانند سیستم ۶۸ باسه نیز می‌توان از همین روش و تشکیل ماتریس‌های رابطه (۵-۱) با ابعاد مناسب استفاده نمود.

۵-۶- خلاصه الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم قدرت

در این بخش، به ارائه مراحل اجرای روش مورد استفاده در این پروژه برای شبیه‌سازی سیستم قدرت و ترسیم نتایج شبیه‌سازی توسط این روش پرداخته می‌شود. در جدول ۵-۱، مراحل اجرای روش پیشنهادی در این پروژه برای شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم قدرت خلاصه شده است.

جدول ۵-۱ الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم قدرت

۱- تنظیمات اولیه و تعریف داده‌ها
۱-۱ تنظیمات اولیه شامل تعداد ژنراتورها و باس‌ها، شماره باس محل وقوع فالت، زمان آغاز و پایان وقوع فالت، زمان نمونه‌برداری، مدت زمان شبیه‌سازی سیستم و تعیین ورودی‌های ثابت سیستم
۱-۲ تعریف داده‌های سیستم شامل داده‌های باس، داده‌های خطوط انتقال، داده‌های ژنراتور، داده‌های سیستم تحریک و داده‌های توربین مطابق پیوست ۱
۲- تحلیل پخش بار
۲-۱ تحلیل پخش بار با استفاده از تولباکس $MATPOWER$ و داده‌های باس و داده‌های خطوط انتقال
۲-۲ انتصاب مقادیر اولیه متغیرهای جبری در زمان $k = 0$ با استفاده از نتایج پخش بار
۲-۳ انتصاب مقادیر اولیه متغیرهای دینامیکی در زمان $k = 0$ با استفاده از معادلات دینامیکی سیستم و مقادیر اولیه متغیرهای جبری
۳- اجرای حلقه برای $k = 1, 2, 3, \ldots$
شروع حلقه

[۱] Element-by-Element Matrix Product

[۲] Transpose

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۳-۱ محاسبه *COI*

۳-۲ محاسبه مقادیر جدید متغیرهای دینامیکی با استفاده از معادلات دینامیکی بخش ۴-۲-۱ و داده‌های ژنراتور، داده‌های سیستم تحریک و داده‌های توربین

۳-۳ محاسبه مقادیر جدید متغیرهای جبری با حل معادلات جبری غیرخطی بخش ۴-۲-۱ توسط حل‌کننده *lsqnonlin* با استفاده از روش معرفی‌شده در بخش ۵-۵ برای افزایش سرعت

اتمام حلقه

۴- ترسیم نتایج شبیه‌سازی

۵-۷- نتایج شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم ۶۸ باسه

در ادامه به شبیه‌سازی سیستم ۶۸ باسه با استفاده از این روش پرداخته شده است. تنظیمات اولیه سیستم مانند زمان نمونه‌برداری، مدت‌زمان شبیه‌سازی و شماره باس محل وقوع فالت در جدول ۵-۲ خلاصه شده است. مدت زمان شبیه‌سازی سیستم برابر با $t = 20\ s$ و زمان نمونه‌برداری برابر با $\Delta t = 0.02\ s$ در نظر گرفته شده است. در بازه زمانی $t_{f1} = 1\ s$ تا $t_{f2} = 1.1\ s$ یک فالت سه‌فاز در باس شماره ۱۷ سیستم رخ داده و در زمان $t_{f2} = 1.1\ s$ این فالت برطرف می‌شود.

داده‌های سیستم شامل داده‌های باس، داده‌های خطوط انتقال، داده‌های ژنراتور، داده‌های سیستم تحریک و داده‌های توربین نیز مطابق پیوست ۱ تعیین می‌شوند.

جدول ۵-۲ تنظیمات اولیه شبیه‌سازی

مورد	مقدار
تعداد ژنراتورها	*16*
تعداد باس‌ها	*68*
مقدار پایه سیستم پریونیت	*100*
فرکانس	$60\ Hz$
شماره باس محل وقوع فالت	*17*
زمان آغاز فالت	$t_{f1} = 1\ s$
زمان پایان فالت	$t_{f2} = 1.1\ s$
پارامترهای بار (امپدانس ثابت)	$\alpha = 2, \beta = 2$
زمان نمونه‌برداری	$0.02\ s$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مدت‌زمان شبیه‌سازی	20 s

۵-۷-۱- نتایج تحلیل پخش بار

با استفاده از تولباکس *MATPOWER* و دستور *runpf*، نتایج تحلیل پخش بار سیستم به صورت زیر به دست می‌آید.

```
MATPOWER Version 7.1, 08-Oct-2020 -- AC Power Flow (Newton)

Newton's method power flow (power balance, polar) converged in 5 iterations.

Converged in 0.12 seconds
================================================================================
|     System Summary                                                          |
================================================================================

How many?                How much?              P (MW)            Q (MVAr)
---------------------    -------------------  -------------  -----------------
Buses            68     Total Gen Capacity   80000.0       -80000.0 to 80000.0
Generators       16     On-line Capacity     80000.0       -80000.0 to 80000.0
Committed Gens   16     Generation (actual)  17787.5           2496.0
Loads            35     Load                 17620.7           1971.8
  Fixed          35       Fixed              17620.7           1971.8
  Dispatchable    0       Dispatchable       -0.0 of -0.0      -0.0
Shunts           0     Shunt (inj)          -0.0              0.0
Branches         83     Losses (I^2 * Z)     166.83            3852.96
Transformers     19     Branch Charging (inj)     -            3328.7
Inter-ties       0     Total Inter-tie Flow 0.0               0.0
Areas            1

                        Minimum                      Maximum
                -------------------------  --------------------------------
Voltage Magnitude   0.837 p.u. @ bus 64        1.063 p.u. @ bus 51
Voltage Angle     -39.29 deg   @ bus 39        10.96 deg   @ bus 14
P Losses (I^2*R)             -                35.38 MW    @ line 17-36
Q Losses (I^2*X)             -                477.66 MVAr  @ line 13-17

================================================================================
|     Bus Data                                                                |
================================================================================
 Bus     Voltage          Generation             Load
  #   Mag(pu) Ang(deg)   P (MW)   Q (MVAr)   P (MW)   Q (MVAr)
----- ------- --------  --------  --------  --------  --------
    1  1.045   -8.956    250.00    196.00       -         -
```

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

2	0.980	-0.983	545.00	70.01	-	-
3	0.983	1.613	650.00	80.78	-	-
4	0.997	1.668	632.00	0.27	-	-
5	1.011	-0.628	505.00	116.57	-	-
6	1.050	3.842	700.00	254.49	-	-
7	1.063	6.031	560.00	290.83	-	-
8	1.030	-2.841	540.00	49.07	-	-
9	1.025	2.652	800.00	59.81	-	-
10	1.010	-9.644	500.00	-13.10	-	-
11	1.000	-7.224	1000.00	8.32	-	-
12	1.016	-22.631	1350.00	280.06	-	-
13	1.011	-28.654	3591.00	885.04	-	-
14	1.000	10.962	1785.00	47.48	-	-
15	1.000	0.017	1000.00	76.73	-	-
16	1.000	0.000*	3379.53	93.64	-	-
17	0.950	-36.027	-	-	6000.00	300.00
18	1.002	-5.805	-	-	2470.00	123.00
19	0.932	-4.263	-	-	-	-
20	0.981	-5.874	-	-	680.00	103.00
21	0.960	-7.054	-	-	274.00	115.00
22	0.994	-1.801	-	-	-	-
23	0.996	-2.161	-	-	248.00	85.00
24	0.959	-9.877	-	-	309.00	-92.00
25	0.998	-10.000	-	-	224.00	47.00
26	0.987	-11.019	-	-	139.00	17.00
27	0.968	-12.857	-	-	281.00	76.00
28	0.990	-7.497	-	-	206.00	28.00
29	0.992	-4.546	-	-	284.00	27.00
30	0.976	-19.710	-	-	-	-
31	0.984	-17.464	-	-	-	-
32	0.970	-15.238	-	-	-	-
33	0.974	-19.758	-	-	112.00	0.00
34	0.980	-26.116	-	-	-	-
35	1.043	-27.089	-	-	-	-
36	0.961	-28.827	-	-	102.00	-19.46
37	0.956	-11.788	-	-	-	-
38	0.989	-18.759	-	-	-	-
39	0.992	-39.290	-	-	267.00	12.60
40	1.044	-13.640	-	-	65.63	23.53
41	1.000	9.427	-	-	1000.00	250.00
42	0.999	-0.844	-	-	1150.00	250.00
43	0.976	-37.909	-	-	-	-
44	0.977	-37.986	-	-	267.55	4.84
45	1.047	-29.363	-	-	208.00	21.00
46	0.990	-20.531	-	-	150.70	28.50
47	1.018	-19.498	-	-	203.12	32.59
48	1.034	-18.376	-	-	241.20	2.20

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

49	0.994	-19.820	-	-	164.00	29.00	
50	1.060	-19.052	-	-	100.00	-147.00	
51	1.063	-27.288	-	-	337.00	-122.00	
52	0.955	-12.833	-	-	158.00	30.00	
53	0.986	-18.937	-	-	252.70	118.56	
54	0.986	-11.537	-	-	-	-	
55	0.957	-13.218	-	-	322.00	2.00	
56	0.921	-11.959	-	-	200.00	73.60	
57	0.910	-11.213	-	-	-	-	
58	0.909	-10.402	-	-	-	-	
59	0.904	-13.311	-	-	234.00	84.00	
60	0.906	-14.037	-	-	208.80	70.80	
61	0.956	-23.222	-	-	104.00	125.00	
62	0.912	-7.312	-	-	-	-	
63	0.910	-8.370	-	-	-	-	
64	0.837	-8.377	-	-	9.00	88.00	
65	0.913	-8.185	-	-	-	-	
66	0.919	-10.191	-	-	-	-	
67	0.928	-11.430	-	-	320.00	153.00	
68	0.948	-10.071	-	-	329.00	32.00	
		---------	---------	---------	---------		
	Total:	17787.53	2496.00	17620.70	1971.76		

Branch Data								
Brnch	From	To	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (I^2 * Z)	
#	Bus	Bus	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	54	250.00	196.00	-250.00	-178.43	0.000	17.57
2	2	58	545.00	70.01	-545.00	19.97	-0.000	89.98
3	3	62	650.00	80.78	-650.00	20.88	0.000	101.67
4	4	19	632.00	0.27	-628.78	65.06	3.220	65.33
5	5	20	505.00	116.57	-502.59	-68.41	2.408	48.16
6	6	22	700.00	254.49	-700.00	-178.89	-0.000	75.60
7	7	23	560.00	290.83	-558.24	-194.98	1.762	95.85
8	8	25	540.00	49.07	-538.25	18.47	1.747	67.55
9	9	29	800.00	59.81	-794.85	40.59	5.149	100.40
10	10	31	500.00	-13.10	-500.00	82.07	0.000	68.97
11	11	32	1000.00	8.32	-1000.00	132.30	0.000	140.62
12	12	36	1350.00	280.06	-1350.00	-130.55	0.000	149.50
13	13	17	3591.00	885.04	-3591.00	-407.38	0.000	477.66
14	14	41	1785.00	47.48	-1785.00	0.34	0.000	47.83
15	15	42	1000.00	76.73	-1000.00	-61.64	0.000	15.09
16	16	18	3379.53	93.64	-3379.53	249.26	0.000	342.90
17	17	36	-2517.71	198.99	2553.09	90.19	35.376	318.39
18	18	49	212.67	-38.80	-209.22	-24.94	3.450	51.80

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

19	18	50	839.77	-241.85	-831.12	230.23	8.652	207.65
20	19	68	451.10	-104.91	-447.20	125.62	3.903	47.57
21	20	19	-177.41	-34.59	177.68	39.85	0.267	5.27
22	21	68	359.38	61.35	-358.21	-64.86	1.167	19.69
23	22	21	637.10	216.88	-633.38	-176.35	3.715	65.02
24	23	22	-62.87	20.18	62.90	-37.99	0.029	0.47
25	24	23	-369.77	-71.10	373.11	89.80	3.344	53.20
26	24	68	60.77	163.10	-60.67	-167.28	0.102	2.01
27	25	54	257.04	-68.58	-252.14	60.25	4.907	6.03
28	26	25	-57.08	-54.07	57.21	3.11	0.133	1.34
29	27	37	-93.93	62.20	94.14	-89.21	0.205	2.73
30	27	26	-217.97	-112.00	218.83	98.16	0.862	9.05
31	28	26	126.47	-39.79	-125.77	-28.67	0.702	7.74
32	29	26	176.80	-48.47	-174.98	-32.42	1.810	19.85
33	29	28	334.06	-19.12	-332.47	11.79	1.588	17.13
34	30	53	-187.63	-135.34	188.03	92.84	0.402	3.72
35	30	61	642.40	143.88	-638.00	-155.55	4.407	42.45
36	31	30	203.35	13.83	-202.78	-37.65	0.567	8.16
37	31	53	150.31	-40.12	-149.92	19.80	0.386	3.94
38	32	30	253.66	-55.30	-251.99	29.11	1.668	20.02
39	33	32	-741.56	120.26	746.34	-77.00	4.778	59.13
40	34	33	-664.54	113.10	669.77	-57.72	5.230	74.65
41	34	35	246.53	-99.90	-246.47	104.78	0.066	4.88
42	36	34	-411.90	-102.78	418.01	-13.20	6.113	20.56
43	36	61	-893.19	162.60	903.14	-136.31	9.958	88.72
44	37	68	-296.72	99.33	297.48	-101.82	0.760	9.67
45	38	31	-146.08	35.29	146.35	-55.78	0.265	3.54
46	38	33	40.31	-3.05	-40.21	-62.53	0.095	1.17
47	40	41	-473.43	16.85	487.72	-145.91	14.290	200.06
48	40	48	407.80	-40.38	-404.73	-64.07	3.066	33.73
49	41	42	297.28	-104.43	-293.74	-67.15	3.540	53.10
50	42	18	143.74	-121.21	-142.91	-91.61	0.831	12.47
51	43	17	-108.60	97.79	108.71	-91.61	0.112	6.18
52	44	39	53.66	-32.82	-53.66	34.52	0.000	1.70
53	44	43	-108.57	98.04	108.60	-97.79	0.022	0.25
54	45	35	-246.07	-37.12	246.47	-104.78	0.396	9.91
55	45	39	213.34	87.85	-213.34	-47.12	0.000	40.74
56	45	44	213.94	108.36	-212.63	-70.06	1.311	38.29
57	46	38	-105.52	-6.59	105.77	-32.24	0.254	3.29
58	47	53	-40.03	108.79	40.44	-234.49	0.412	5.95
59	48	47	163.53	61.87	-163.09	-141.38	0.441	4.73
60	49	46	45.22	-4.06	-45.18	-21.91	0.039	0.59
61	51	45	389.84	116.32	-389.22	-180.09	0.625	16.40
62	51	50	-726.84	5.68	731.12	-83.23	4.280	105.10
63	52	37	-202.27	1.77	202.58	-10.11	0.315	3.69
64	52	55	44.27	-31.77	-44.24	12.59	0.030	0.36
65	54	53	304.03	-41.62	-300.70	12.82	3.332	39.12

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

66	55	54	-197.18	-173.37	198.10	159.81	0.922	10.71
67	56	55	81.08	-170.16	-80.58	158.77	0.497	8.14
68	57	56	80.29	-85.75	-80.16	76.49	0.124	1.99
69	58	57	444.71	-73.45	-444.22	76.24	0.491	6.38
70	59	58	-453.84	-15.44	455.36	29.37	1.514	23.21
71	60	57	-362.65	-3.74	363.93	9.51	1.281	17.94
72	60	59	-219.59	65.14	219.84	-68.56	0.258	2.96
73	61	60	-369.15	166.86	373.43	-132.19	4.287	67.65
74	63	58	356.14	-23.00	-355.06	24.11	1.075	12.60
75	63	62	-357.90	-19.35	358.52	19.97	0.621	6.67
76	63	64	1.76	42.34	-1.72	-41.28	0.039	1.06
77	65	62	-291.06	39.25	291.48	-40.85	0.415	4.46
78	65	64	7.33	48.11	-7.28	-46.72	0.051	1.39
79	66	56	201.30	-25.52	-200.91	20.07	0.387	6.24
80	66	65	-282.80	83.43	283.73	-87.35	0.939	10.54
81	67	66	-81.31	28.85	81.49	-57.91	0.180	2.17
82	68	67	239.60	176.34	-238.69	-181.85	0.913	9.54
83	27	53	30.90	-26.19	-30.56	-9.53	0.343	3.43
					--------	--------		
			Total:		166.832	3852.96		

۵-۷-۲- محاسبه شرایط اولیه سیستم

حال، مقادیر اولیه متغیرهای جبری در زمان $k = 0$ یعنی بردار $A(0)$ با استفاده از نتایج پخش بار تعیین شده و سپس مقادیر اولیه متغیرهای دینامیکی در زمان $k = 0$ یعنی بردار $X(0)$ نیز با استفاده از مقادیر اولیه متغیرهای جبری و معادلات دینامیکی سیستم (صفر قرار دادن مقادیر تفاضل متغیرهای دینامیکی سیستم) به صورت زیر به دست می‌آیند.

```
======================================
   System Initial Values
======================================
    A(0)          X(0)
  ----------    ----------
    2.1904        1.1027
    4.8717        0.9292
    5.7797        0.8975
    5.4130        0.7552
    4.5065        0.9669
    6.4022        1.0688
    5.4646        1.0873
    4.4047        0.8908
    6.6873        0.9776
    2.3458        0.9839
    7.7805        0.7747
```

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

11.3057	*1.0728*
29.0969	*0.9474*
5.6816	*0.9726*
2.4393	*0.9928*
25.5816	*0.8561*
2.1080	*1.0622*
2.7757	*0.7602*
3.3157	*0.7663*
3.2989	*0.6789*
2.4438	*0.7912*
3.0546	*0.8921*
2.3187	*0.9955*
2.8830	*0.7631*
4.0666	*0.7957*
4.3614	*0.9233*
6.2826	*0.7148*
7.5153	*0.9710*
22.1726	*0.8747*
16.9283	*0.9658*
9.7282	*0.9899*
22.1038	*0.7794*
1.0450	*0.0575*
0.9800	*0.5238*
0.9830	*0.5491*
0.9970	*0.6578*
1.0110	*0.5418*
1.0500	*0.5300*
1.0630	*0.5224*
1.0300	*0.5861*
1.0250	*0.5217*
1.0100	*0.2333*
1.0000	*0.6214*
1.0156	*0.3983*
1.0110	*0.4701*
1.0000	*0.2285*
1.0000	*0.1313*
1.0000	*0.5283*
0.9499	*-0.1191*
1.0023	*-0.6856*
0.9320	*-0.6850*
0.9806	*-0.7538*
0.9602	*-0.6916*
0.9937	*-0.6677*
0.9961	*-0.6024*
0.9587	*-0.7265*
0.9981	*-0.7125*
0.9869	*-0.4148*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

0.9679	*-0.7081*
0.9897	*-0.5486*
0.9921	*-0.5676*
0.9762	*-0.2641*
0.9838	*-0.1518*
0.9699	*-0.6476*
0.9738	*-0.0167*
0.9800	*0.9080*
1.0430	*0.9545*
0.9606	*1.0521*
0.9555	*0.8361*
0.9890	*0.8440*
0.9915	*0.7958*
1.0442	*0.8510*
0.9996	*0.9961*
0.9990	*0.3514*
0.9765	*0.7571*
0.9775	*0.3846*
1.0471	*0.1779*
0.9903	*0.4885*
1.0184	*0.1694*
1.0337	*0.8305*
0.9936	*376.9911*
1.0602	*376.9911*
1.0634	*376.9911*
0.9545	*376.9911*
0.9863	*376.9911*
0.9857	*376.9911*
0.9571	*376.9911*
0.9208	*376.9911*
0.9102	*376.9911*
0.9090	*376.9911*
0.9037	*376.9911*
0.9062	*376.9911*
0.9556	*376.9911*
0.9121	*376.9911*
0.9096	*376.9911*
0.8367	*376.9911*
0.9128	*1.2539*
0.9194	*2.0268*
0.9280	*2.0326*
0.9483	*1.9374*
-0.1563	*2.1566*
-0.0172	*2.3749*
0.0282	*2.4316*
0.0291	*1.9171*
-0.0110	*2.0047*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

0.0671	*1.2731*
0.1053	*1.6306*
-0.0496	*1.8642*
0.0463	*1.6487*
-0.1683	*1.0584*
-0.1261	*1.0296*
-0.3950	*1.5852*
-0.5001	*0.2257*
0.1913	*0.3648*
0.0003	*0.3659*
0.0000	*0.3487*
-0.6288	*0.3882*
-0.1013	*0.4275*
-0.0744	*0.4377*
-0.1025	*0.3451*
-0.1231	*0.3608*
-0.0314	*0.2292*
-0.0377	*0.2935*
-0.1724	*0.3356*
-0.1745	*0.2968*
-0.1923	*0.1905*
-0.2244	*0.1853*
-0.1308	*0.2853*
-0.0794	*1.5286*
-0.3440	*2.9241*
-0.3048	*2.9372*
-0.2659	*2.7281*
-0.3448	*3.2311*
-0.4558	*3.8181*
-0.4728	*3.9873*
-0.5031	*2.6852*
-0.2057	*2.8745*
-0.3274	*1.5570*
-0.6857	*2.1339*
-0.2381	*2.5759*
0.1645	*2.1660*
-0.0147	*1.2525*
-0.6616	*1.2136*
-0.6630	*2.0548*
-0.5125	*2.5000*
-0.3583	*5.4500*
-0.3403	*6.5000*
-0.3207	*6.3200*
-0.3459	*5.0500*
-0.3325	*7.0000*
-0.4763	*5.6000*
-0.2240	*5.4000*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

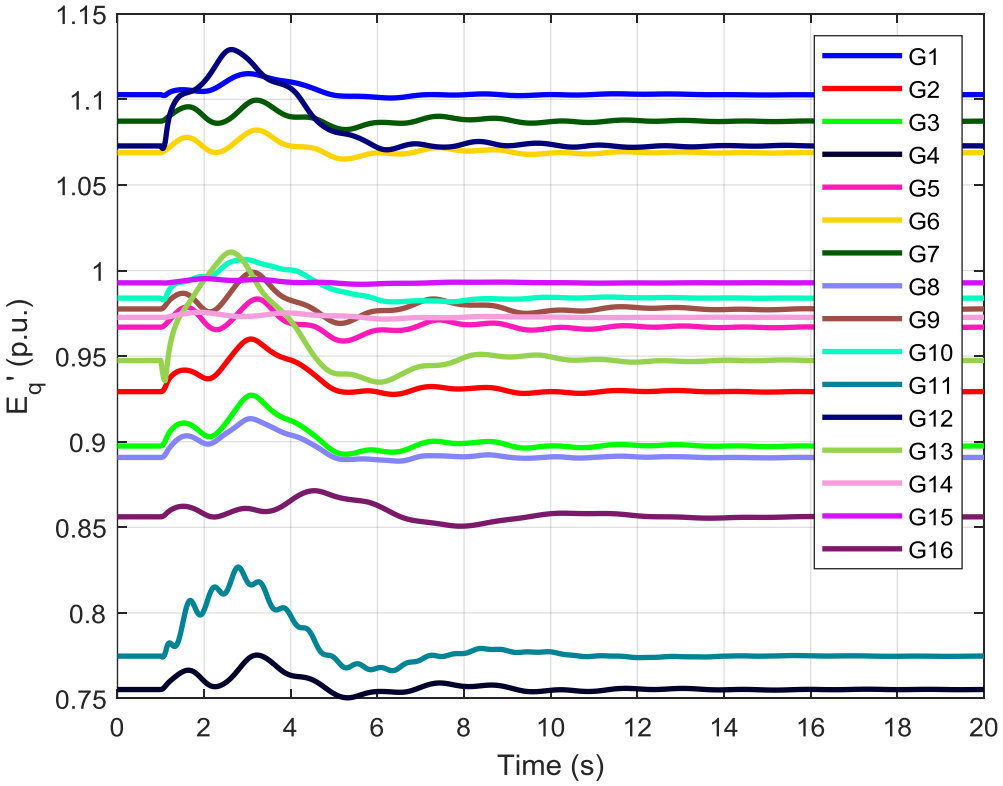
-0.3305	8.0000
-0.2014	5.0000
-0.2307	10.0000
-0.2087	13.5000
-0.1957	35.9100
-0.1816	17.8500
-0.2323	10.0000
-0.2450	33.7953
-0.4053	2.5000
-0.1276	5.4500
-0.1461	6.5000
-0.1462	6.3200
-0.1428	5.0500
-0.1779	7.0000
-0.1995	5.6000
-0.1758	5.4000
	8.0000
	5.0000
	10.0000
	13.5000
	35.9100
	17.8500
	10.0000
	33.7953

۵-۷-۳- ترسیم و تحلیل نتایج شبیه‌سازی حوزه زمان

همان‌طور که گفته شد، مدت زمان شبیه‌سازی سیستم برابر با $t = 20\ s$ و زمان نمونه‌برداری برابر با $\Delta t = 0.02\ s$ در نظر گرفته شده است. در بازه زمانی $t_{f1} = 1\ s$ تا $t_{f2} = 1.1\ s$ یک فالت سه‌فاز اتصال-کوتاه در باس شماره ۱۷ (متصل به بزرگترین ژنراتور از نظر تولید توان یعنی $G13$) رخ داده و در زمان $t_{f2} = 1.1\ s$ این فالت برطرف می‌شود. بدین‌منظور، در شبیه‌سازی سیستم مقدار دامنه و ولتاژ باس شماره ۱۷ سیستم در بازه زمانی $t_{f1} = 1\ s$ تا $t_{f2} = 1.1\ s$ برابر با صفر قرار می‌گیرد. حال مطابق جدول ۵-۱، به اجرای حلقه شبیه‌سازی برای $k = 1,2,3, \dots$ پرداخته و تمامی متغیرهای حالت و متغیرهای جبری سیستم در طول زمان محاسبه می‌شوند. در ادامه، هر کدام از متغیرهای حالت و متغیرهای جبری سیستم نمایش داده شده‌اند. چنان‌چه در شکل‌های زیر یعنی شکل ۵-۱ تا شکل ۵-۱۵ دیده می‌شود، پس از وقوع اغتشاش و به نوسان افتادن سیستم، مقادیر متغیرهای حالت دچار نوسان شده و پس از نوسان به مقدار اولیه خود همگرا می‌شوند و به حالت ماندگار می‌رسند. نوسانات این سیستم تحت تاثیر مدهای نوسانی به وجود می‌آیند. در مورد این مدها و نحوه محاسبه آن‌ها در بخش ۵-۹-۱ توضیح داده شده است. چنان‌چه قبلا گفته شد، سیستم ۶۸ باسه از ۵ ناحیه تشکیل شده است. ناحیه ۱ شامل ژنراتورهای $G1$ تا $G9$، ناحیه ۲

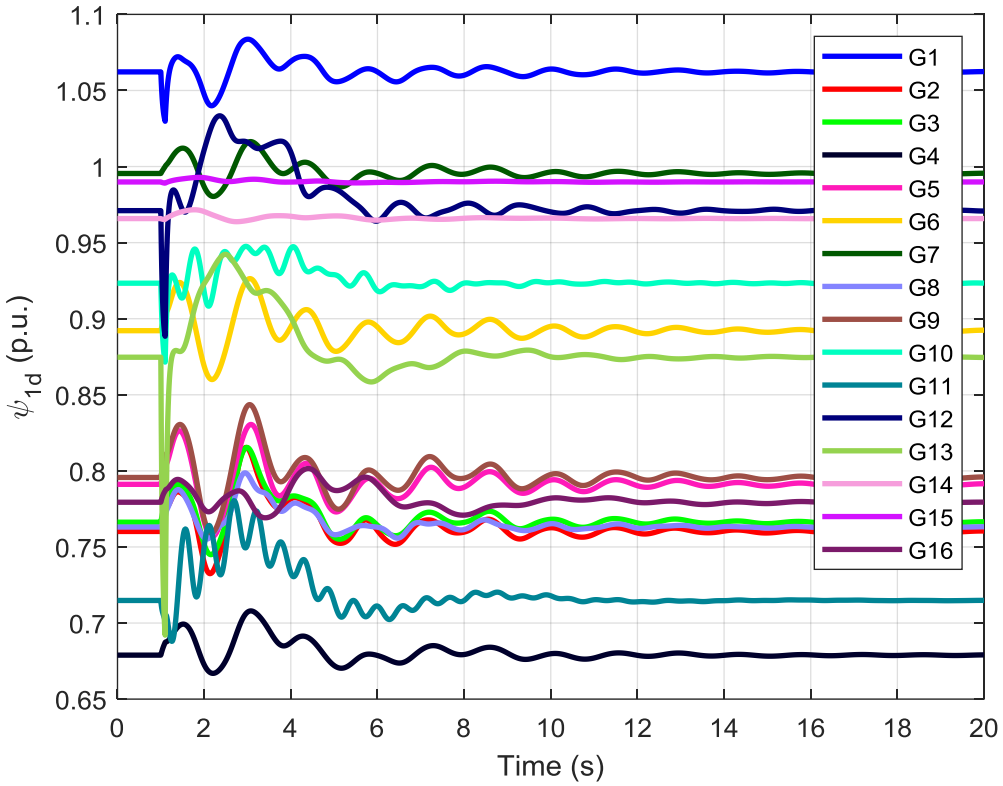
DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شامل ژنراتورهای *G10* تا *G13*، ناحیه ۳ شامل ژنراتور *G14*، ناحیه ۴ شامل ژنراتور *G15* و ناحیه ۵ شامل ژنراتور *G16* می‌باشند. با توجه به شکل‌های زیر می‌توان دریافت که ژنراتورهای موجود در ناحیه ۲ (جایی که فالت در آن رخ می‌دهد) شدیدترین نوسانات را در متغیرهای حالت خود دارند. همچنین با توجه به شکل‌ها می‌توان مشاهده نمود که متغیرهای جبری سیستم تغییرات ناگهانی پس از وقوع فالت دارند؛ در حالی که متغیرهای دینامیکی به علت ماهیت خود دارای تغییرات تدریجی هستند. چنان‌چه مشاهده می‌شود، ولتاژ باس شماره ۱۷ در زمان وقوع فالت اتصال-کوتاه سه‌فاز برابر با صفر بوده است. جریان ژنراتور *G13* (محل وقوع فالت) نیز در زمان وقوع فالت افزایش بسیار شدیدی داشته است.



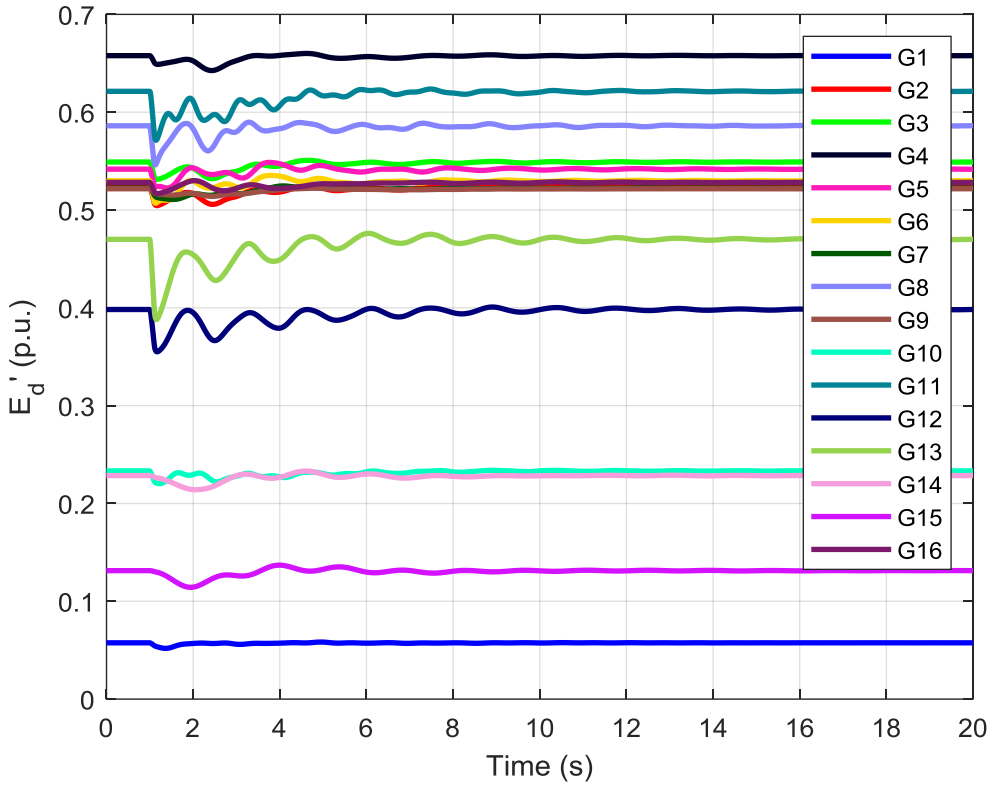
شکل ۵-۱ نمودار زمانی متغیر حالت اول

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



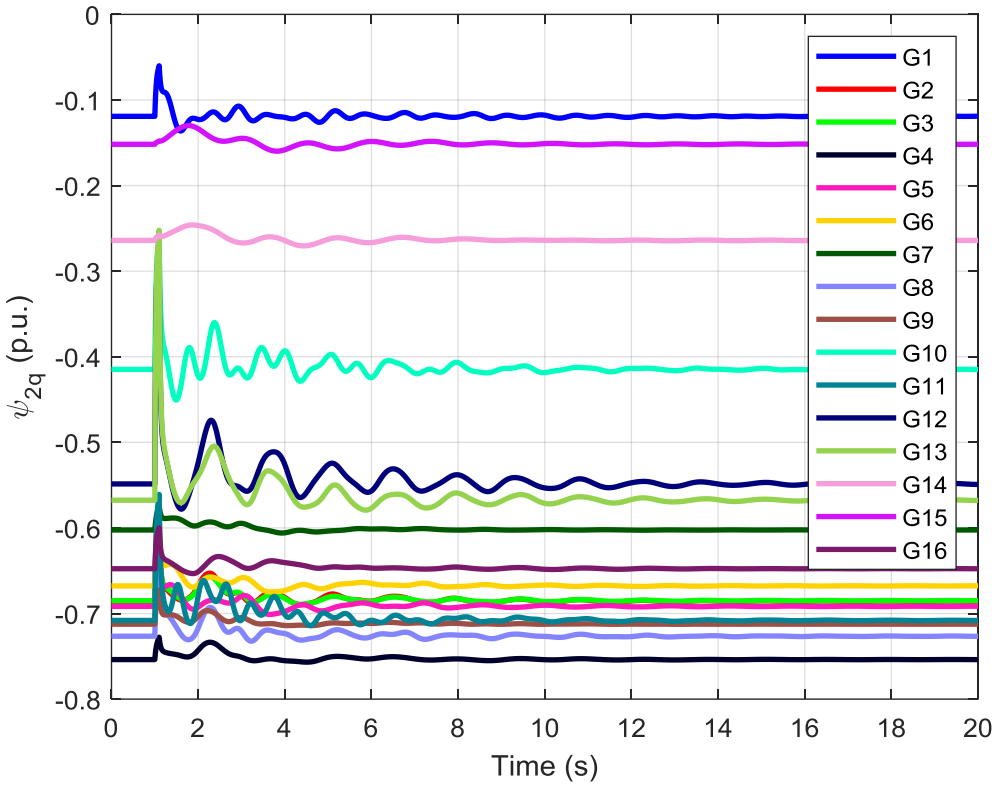
شکل ۵-۲ نمودار زمانی متغیر حالت دوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



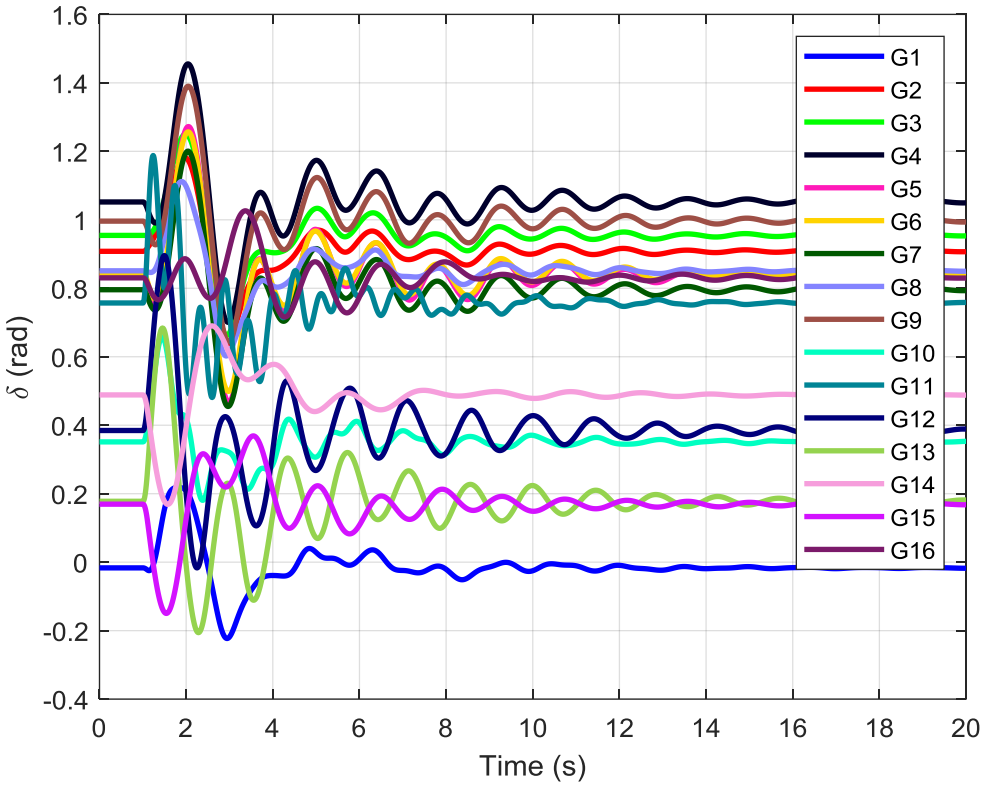
شکل ۵-۳ نمودار زمانی متغیر حالت سوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



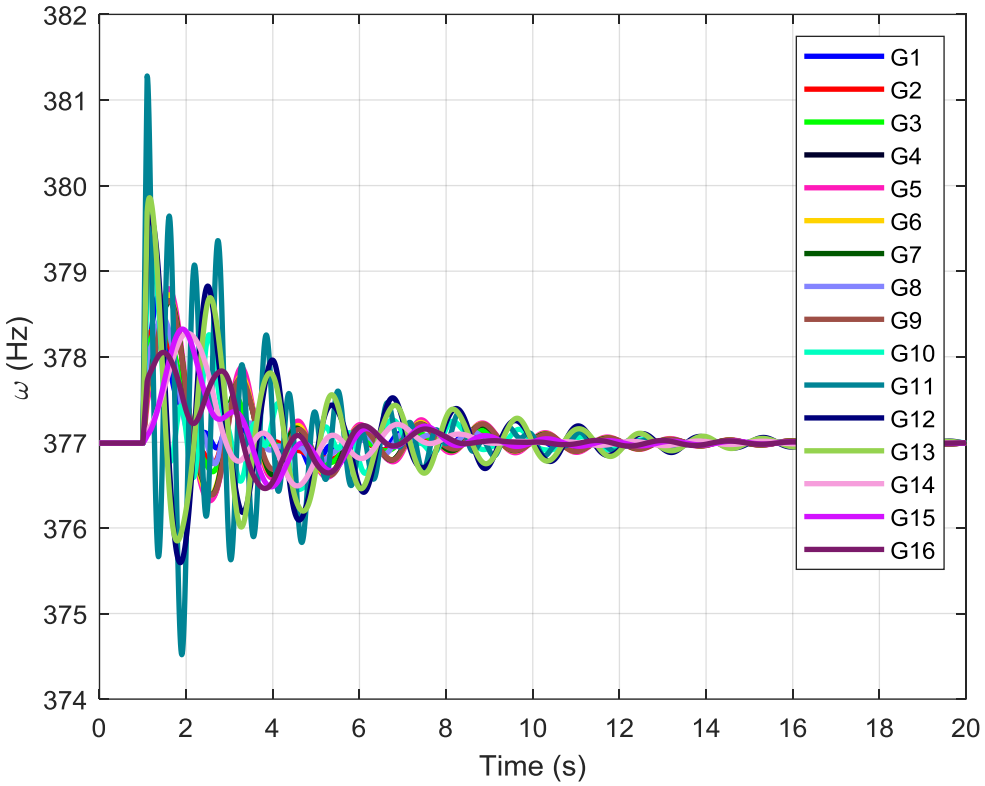
شکل ۵-۴ نمودار زمانی متغیر حالت چهارم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



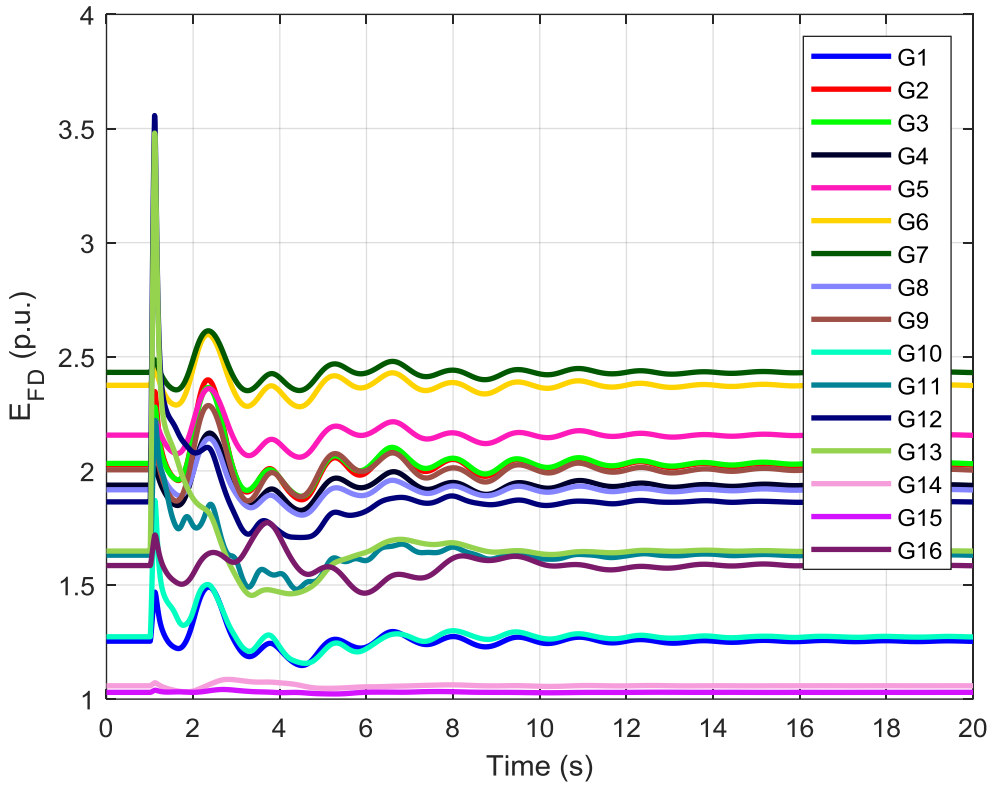
شکل ۵-۵ نمودار زمانی متغیر حالت پنجم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



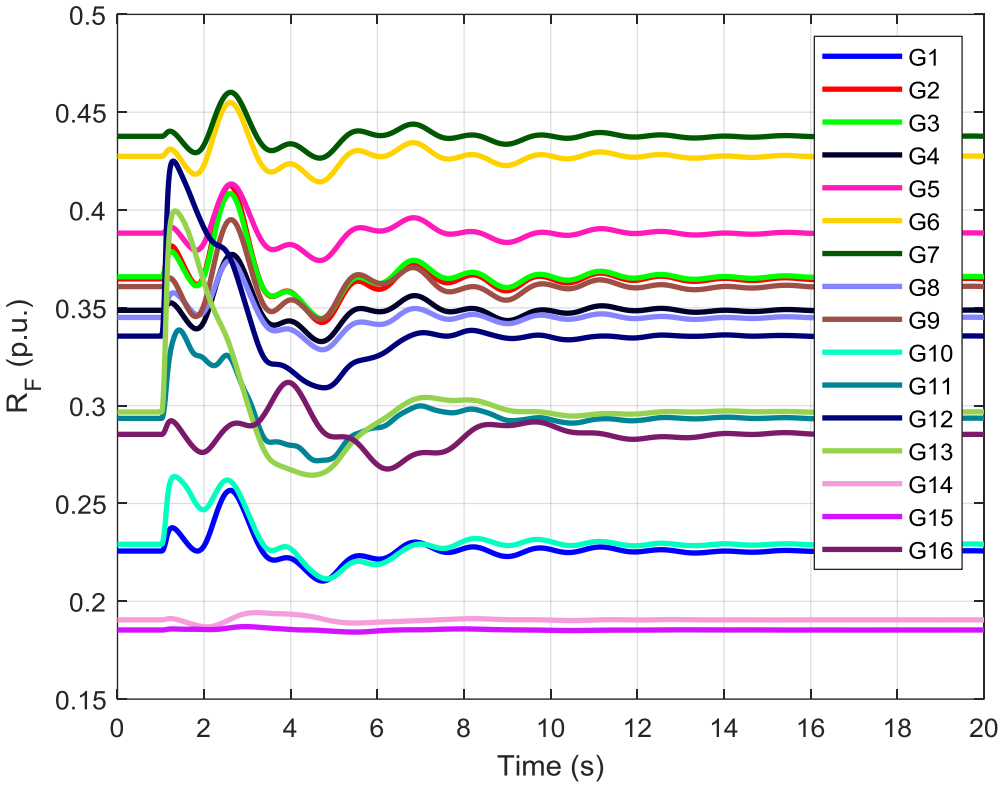
شکل ۵-۶ نمودار زمانی متغیر حالت ششم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



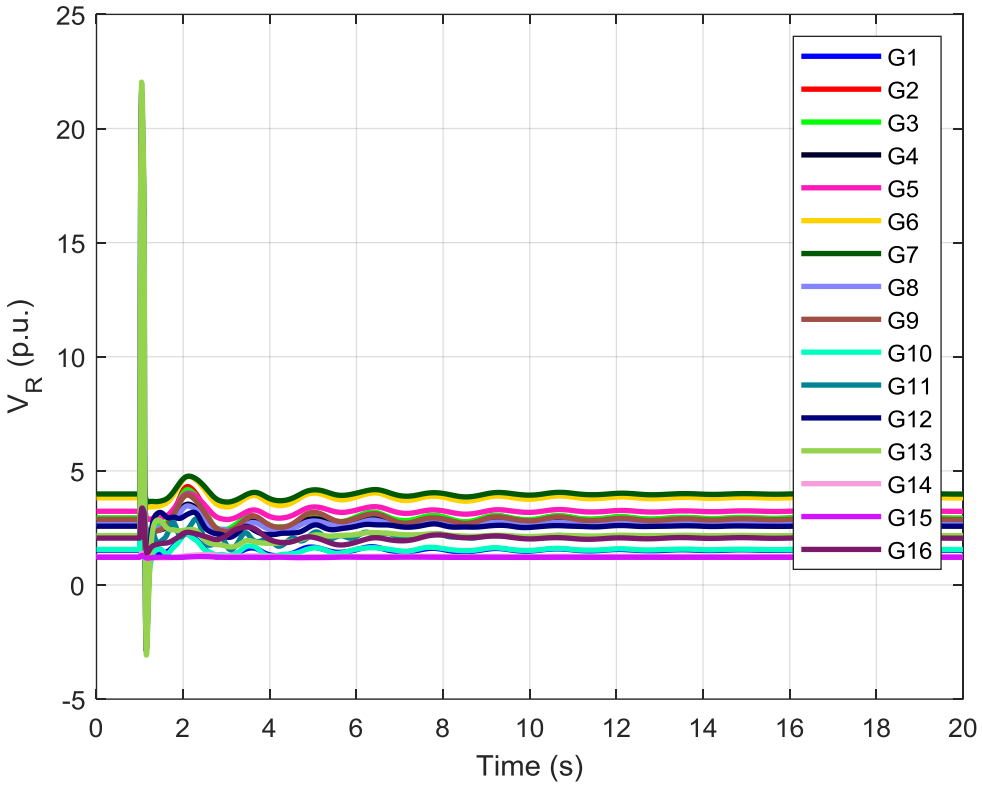
شکل ۵-۷ نمودار زمانی متغیر حالت هفتم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



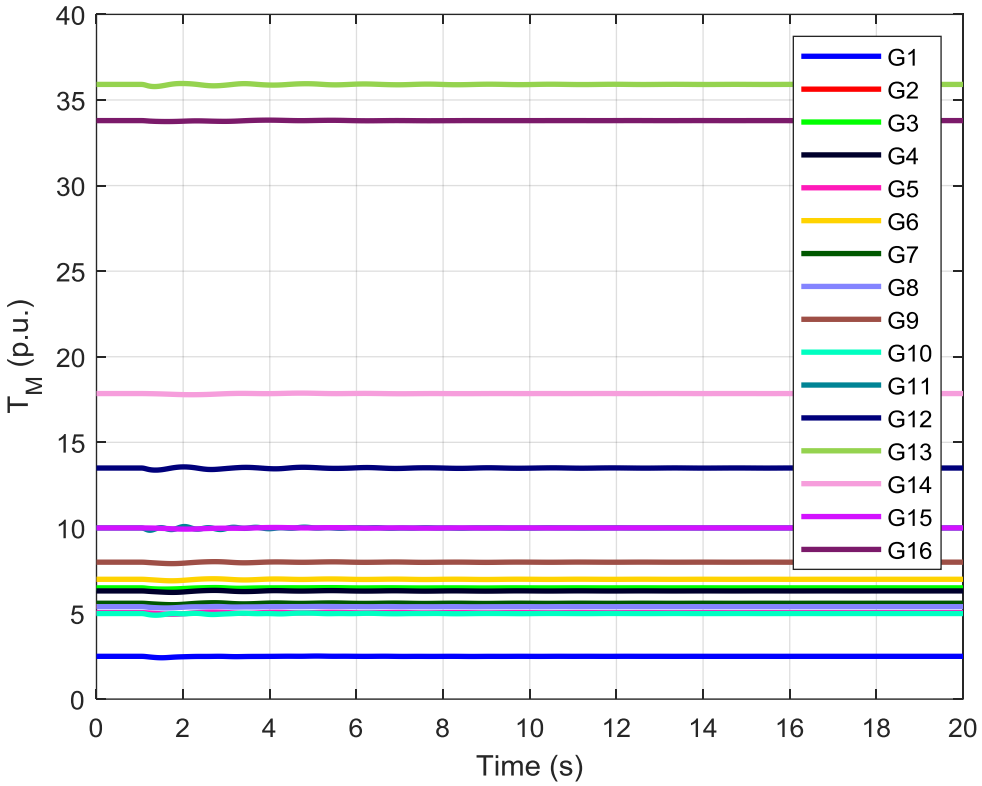
شکل ۵-۸ نمودار زمانی متغیر حالت هشتم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



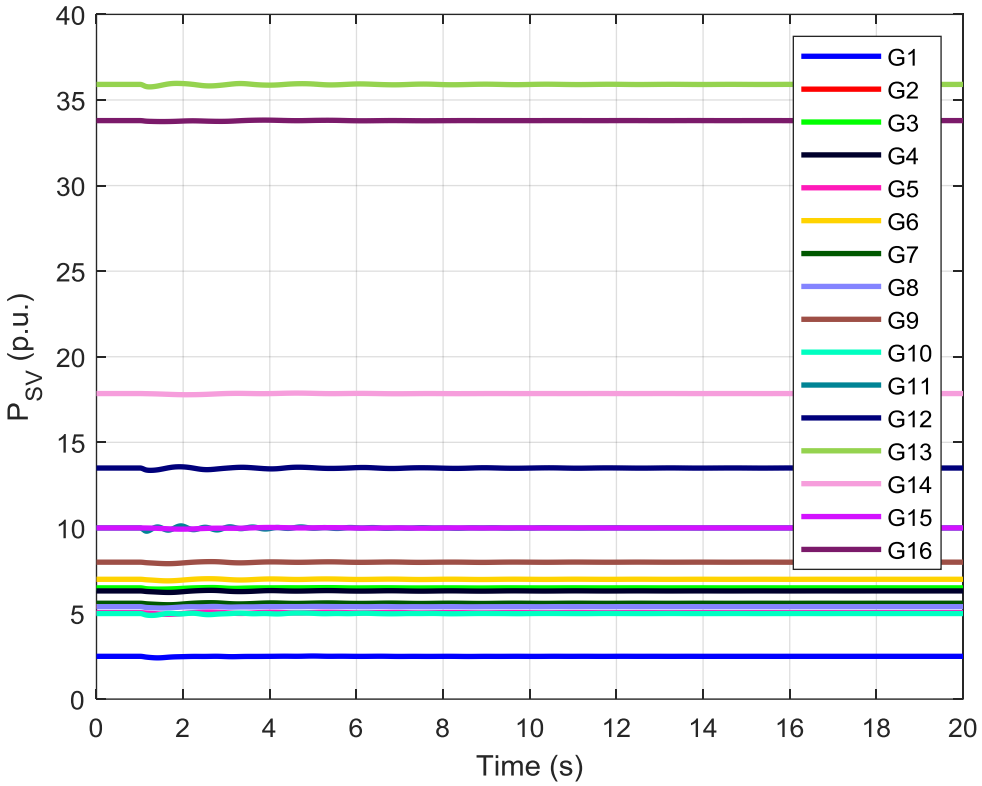
شکل ۵-۹ نمودار زمانی متغیر حالت نهم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



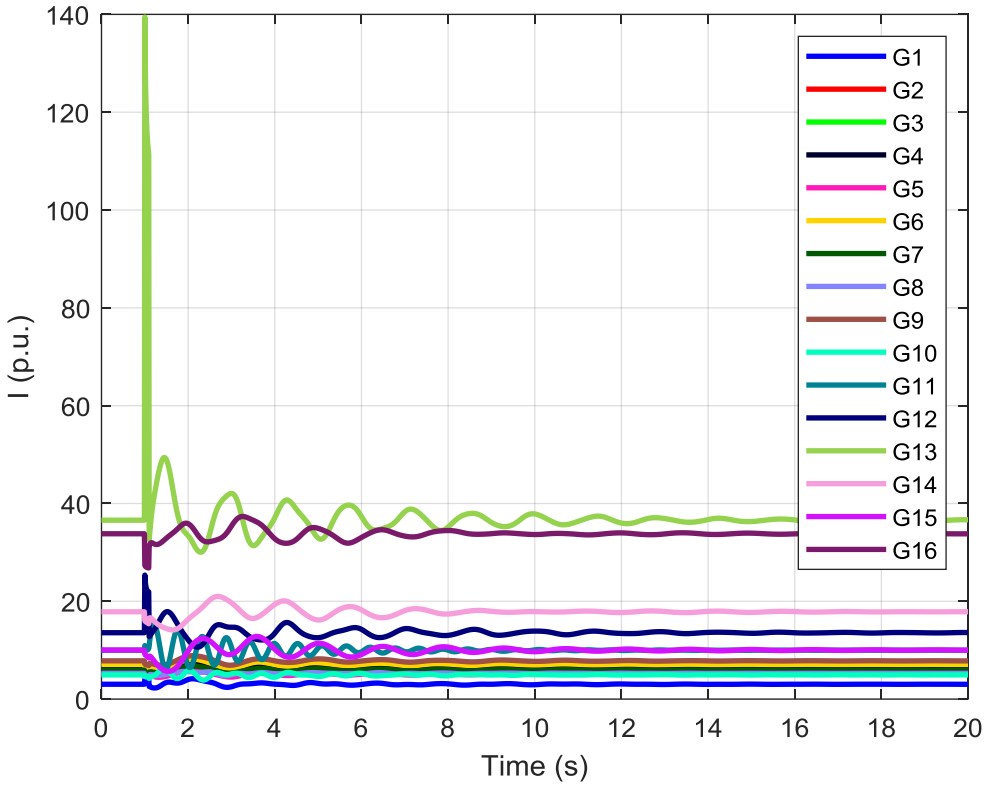
شکل ۵-۱۰ نمودار زمانی متغیر حالت دهم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



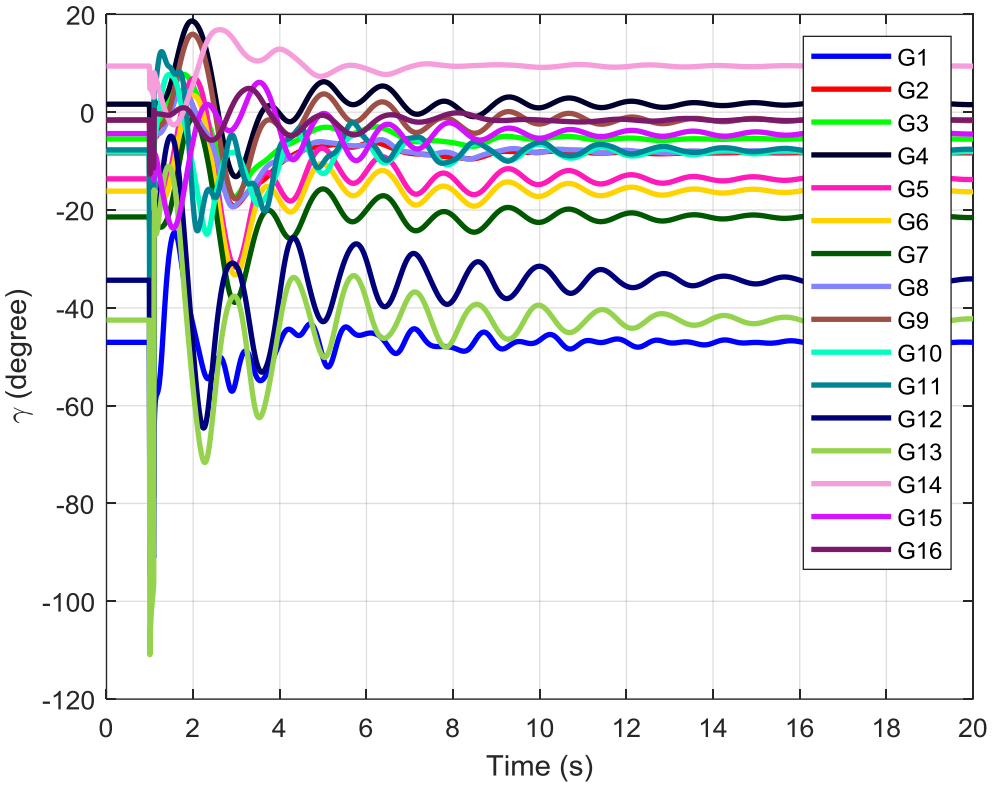
شکل ۵-۱۱ نمودار زمانی متغیر حالت یازدهم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



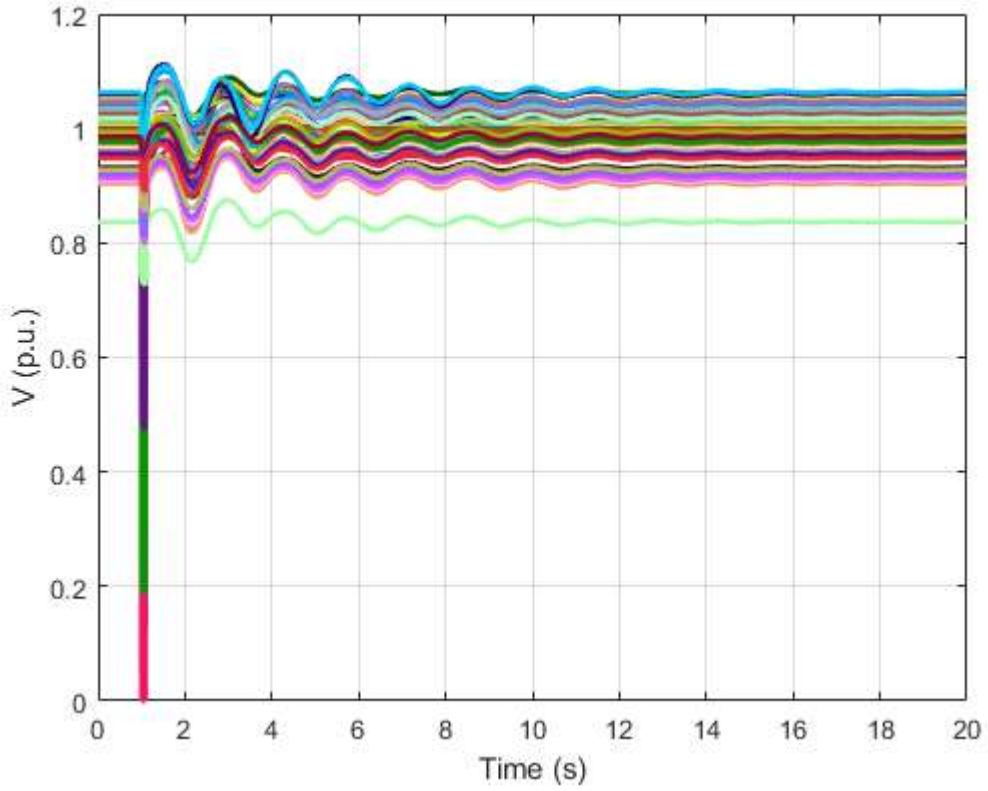
شکل ۵-۱۲ نمودار زمانی دامنه جریان باس‌های متصل به ژنراتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



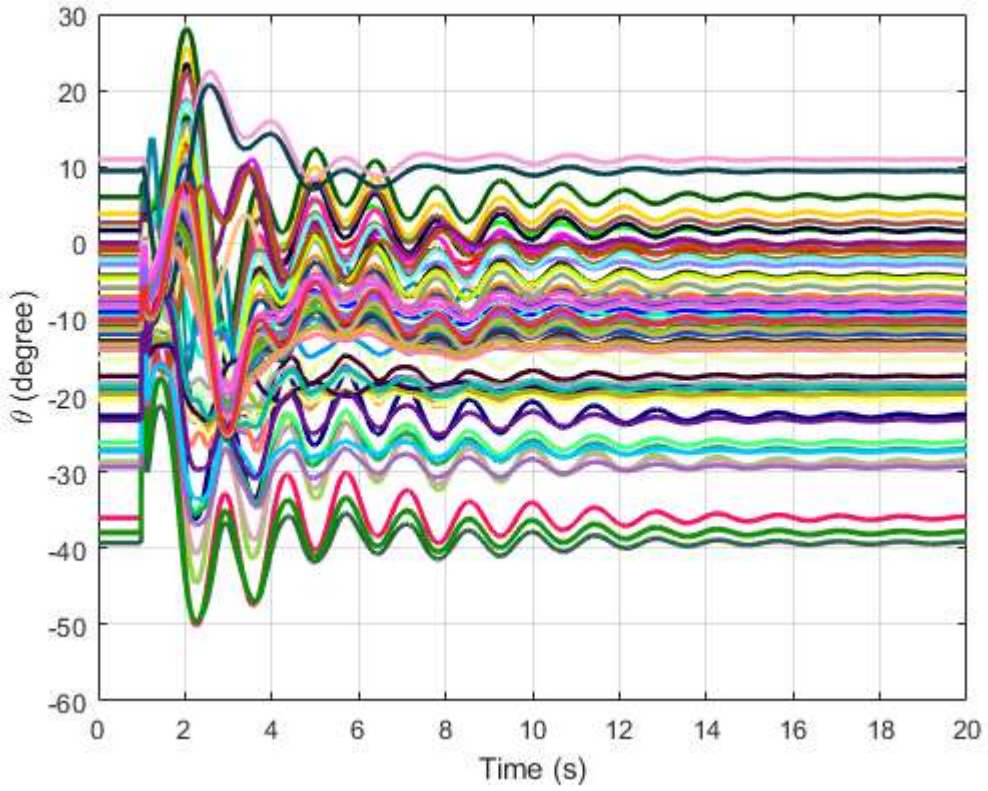
شکل ۵-۱۳ نمودار زمانی زاویه فاز جریان باس‌های متصل به ژنراتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۵-۱۴ نمودار زمانی دامنه ولتاژ تمامی باس‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۵-۱۵ نمودار زمانی زاویه فاز ولتاژ تمامی باس‌ها

۵-۸- خطی‌سازی سمبولیک

در بخش قبل، به تحلیل و شبیه‌سازی سیستم قدرت در حوزه زمان پرداخته شد. روش‌های دیگر تحلیل سیستم قدرت شامل تحلیل مدال و تحلیل پاسخ فرکانسی در مطالعات سیگنال-کوچک[۱] مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش‌ها، ابتدا معادلات غیرخطی سیستم حول یک نقطه‌کار[۲] خطی‌سازی شده و سیستم خطی در قالب فضای حالت نمایش داده می‌شود. در این بخش، ابتدا نحوه خطی‌سازی سمبولیک سیستم ارائه می‌شود. سپس، به تحلیل مدال سیستم، تحلیل شکل مد، تحلیل ضریب مشارکت و تحلیل مانده مدال سیستم پرداخته می‌شود.

برخی از روش‌های تخمین حالت دینامیکی و یا کنترل سیستم مانند یکی از روش‌های تخمین حالت پیشنهادی در این پروژه، مبتنی بر خطی‌سازی هستند. در این پروژه پیشنهاد می‌شود که به جای

[۱] Small-Signal

[۲] Operating Point

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مشتق‌گیری‌ها و محاسبه ژاکوبین‌ها در هر بازگشت که بسیار زمان‌بر هستند، ابتدا قبل از اجرای شبیه‌سازی، خطی‌سازی را به صورت تحلیلی و سمبولیک انجام داده و سپس در هر بازگشت تنها به جایگذاری نمادها با مقادیر محاسبه شده در هر بازگشت پرداخت. مزایای دیگری نیز برای نمایش سمبولیک سیستم و خطی‌سازی تحلیلی حول یک نقطه کار وجود دارد. با این توضیحات، در این بخش به نحوه خطی‌سازی سمبولیک سیستم پرداخته شده است.

مزایایی که برای نمایش سمبولیک سیستم و خطی‌سازی تحلیلی حول یک نقطه کار وجود دارد، به شرح زیر می‌باشند.

- قابل استفاده برای اهداف آموزشی
- چک کردن و بررسی صحت معادلات سیستم قبل از اجرای برنامه شبیه‌سازی اصلی
- بهینه‌سازی پارامترهای ثابت سیستم به این صورت که پارامترهای مدنظر به صورت کمیت‌های متغیر تعریف شوند و با استفاده از توابع بهینه‌سازی متلب و تعریف توابع هزینه[۱] مناسب به بهینه‌سازی و انتخاب بهینه این پارامترها پرداخت.
- بر خلاف تولباکس *PST* و سیمیولینک که از تقریب اغتشاش برای خطی‌سازی استفاده می‌کنند، این روش یک خطی‌سازی تحلیلی و دقیق انجام می‌دهد [۱۴۱].

در [۱۴۱]، از روش نمایش سمبولیک سیستم در متلب و خطی‌سازی تحلیلی حول یک نقطه کار استفاده شده است. در این روش، تمامی پارامترها، متغیرهای جبری، متغیرهای دینامیکی و معادلات دینامیکی و جبری سیستم توسط تولباکس سمبولیک[۲] متلب نوشته می‌شوند. در این پروژه نیز از روشی مشابه روش [۱۴۱] برای نمایش سمبولیک سیستم و تحلیل سیستم بر اساس خطی‌سازی استفاده می‌شود. بدین منظور، تحلیل سیستم در حوزه زمان-پیوسته انجام می‌شود.

مدل فضای حالت زمان-پیوسته سیستم با استفاده از معادلات سیستم در [۱۴۱] و [۱۴۲] و روابط بخش ۴-۲-۱ به صورت زیر قابل نوشتن می‌باشد.

[۱] Objective Function

[۲] Symbolic Math Toolbox

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\dot{X}(t) = F\big(X(t), U(t)\big) \quad (۳-۵)$$

$$Y(t) = H\big(X(t), U(t)\big)$$

که در آن، t نشان‌دهنده زمان در حوزه زمان-پیوسته بوده و F و H از روابط سیستم در حوزه زمان-پیوسته به دست می‌آیند. خطی‌سازی این معادلات حول نقطه کاری[۱] (X_0, U_0) به معادلات زیر می‌انجامد.

$$\dot{X}(t) = \hat{F}(t)X(t) + \hat{B}(t)U(t) \quad (۴-۵)$$

$$Y(t) = \hat{H}(t)X(t) + \hat{D}(t)U(t)$$

که در آن

$$\hat{F}(t) = \frac{\partial F}{\partial X}\Big|_{X_0,U_0} \quad (۵-۵)$$

$$\hat{B}(t) = \frac{\partial F}{\partial U}\Big|_{X_0,U_0}$$

$$\hat{H}(t) = \frac{\partial H}{\partial X}\Big|_{X_0,U_0}$$

$$\hat{D}(t) = \frac{\partial H}{\partial U}\Big|_{X_0,U_0}$$

[۱] Operating Point

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در این روابط، ماتریس‌های $\hat{F}(t)$، $\hat{B}(t)$، $\hat{H}(t)$ و $\hat{D}(t)$ مشتقات جزئی سیستم بوده و به ترتیب نشان‌دهنده ماتریس سیستم[۱]، ماتریس ورودی[۲]، ماتریس خروجی[۳] و ماتریس پیش‌خور[۴] هستند.

در این پروژه، برای نمایش، خطی‌سازی و تحلیل سیستم توسط روابط (۵-۵) از تولباکس سمبولیک متلب استفاده می‌شود. با تعریف تمامی پارامترها، متغیرهای جبری، متغیرهای دینامیکی، معادلات دینامیکی و جبری سیستم و نقطه کار دلخواه به صورت سمبولیک و استفاده از دستور *diff* می‌توان ماتریس‌های رابطه (۵-۵) را به صورت سمبولیک محاسبه نمود. مراحل اجرای کد تعریف سبمولیک و خطی‌سازی سیستم حول نقطه کار دلخواه در جدول ۵-۳ خلاصه شده است. خروجی این کد، مدل فضای حالت خطی سیستم به صورت سمبولیک خواهد بود. این روش، بر خلاف روش‌های تقریبی مورد استفاده در *PST* یا سیمیولینک، مدل خطی سیستم را به صورت تحلیلی و دقیق ارائه می‌هد. با جایگذاری تمامی نمادهای سمبولیک با مقادیر متناظر برای یک نقطه کار مشخص می‌توان به مدل فضای حالت خطی سیستم در آن نقطه کار دست یافته و بر اساس آن به تحلیل سیستم مبتنی بر خطی‌سازی پرداخت.

جدول ۵-۳ الگوریتم پیشنهادی نمایش و خطی‌سازی سیستم به صورت سمبولیک

۱- تنظیمات اولیه و تعریف سمبولیک متغیرها و پارامترها
۱-۱ تنظیمات اولیه شامل تعداد ژنراتورها و باس‌ها
۱-۲ تعریف پارامترهای ثابت سیستم به صورت سمبولیک
۱-۳ تعریف تمامی متغیرهای حالت و جبری سیستم به صورت سمبولیک
۲- محاسبه توابع غیرخطی سیستم به صورت سمبولیک
۲-۱ تعریف سمبولیک بردار ورودی سیستم (ولتاژ)
۲-۲ تعریف سمبولیک تابع غیرخطی F با استفاده از روابط (۴-۵) تا (۴-۹) در حوزه زمان-پیوسته
۲-۳ تعریف سمبولیک تابع غیرخطی H با استفاده از روابط (۴-۹)، (۴-۲۰) و (۴-۲۱) در حوزه زمان-پیوسته
۳- خطی‌سازی
۳-۱ تعریف سمبولیک تقطه کار سیستم شامل بردار حالت و ورودی
۳-۲ محاسبه سمبولیک ماتریس‌های $\hat{F}(t)$، $\hat{B}(t)$، $\hat{H}(t)$ و $\hat{D}(t)$ بر اساس رابطه (۵-۵) و دستور *diff*

[۱] System (State) Matrix

[۲] Input Matrix

[۳] Output Matrix

[۴] Feedforward Matrix

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۵-۹- تحلیل سیستم بر اساس خطی‌سازی

پس از خطی‌سازی سمبولیک سیستم، می‌توان با در نظر گرفتن یک نقطه کار مشخص و جایگذاری تمامی نمادها با مقادیر متناظر به تحلیل سیستم بر اساس خطی‌سازی پرداخت. بدین منظور، نقطه کار سیستم برابر با شرایط اولیه سیستم در حالت ماندگار و قبل از وقوع اغتشاش در نظر گرفته می‌شود. این نقطه کار در بخش ۲-۷-۲ به دست آمد. با جایگذاری تمامی نمادها با مقادیر متناظر در این نقطه کار می‌توان به محاسبه ماتریس‌های $\hat{F}(t)$، $\hat{B}(t)$، $\hat{H}(t)$ و $\hat{D}(t)$ (سیستم خطی‌شده زمان-پیوسته) و تحلیل سیستم بر اساس خطی‌سازی پرداخت.

۵-۹-۱- تحلیل مدال

برای تحلیل مدال سیستم از دستور *eig* متلب برای محاسبه مقادیر ویژه[۱] $\lambda = \sigma \pm j\omega$ و بردارهای ویژه[۲] سیستم استفاده می‌شود. فرکانس و ضریب میرایی متناظر با هر مد نوسانی نیز توسط روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \qquad (۶-۵)$$

$$\xi = -\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \times 100\%$$

نتیجه محاسبه مقادیر ویژه، ضریب میرایی و فرکانس متناظر با مدهای نوسانی به صورت زیر می‌باشد.

Eigenvalue	*Damping_ratio*	*Frequency*
-57.475+0i	*1*	*0*
-3.3919+19.892i	*0.16809*	*3.1659*
-3.3919-19.892i	*0.16809*	*3.1659*
-53.409+0i	*1*	*0*
-52.906+0i	*1*	*0*
-51.007+0i	*1*	*0*

[۱] Eigenvalue

[۲] Eigenvector

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

-50.086+0i	1	0
-49.662+0i	1	0
-49.164+0i	1	0
-49.052+0i	1	0
-48.615+0i	1	0
-48.411+0i	1	0
-48.208+0i	1	0
-47.13+0i	1	0
-46.156+0i	1	0
-46.418+0i	1	0
-45.56+0i	1	0
-43.13+0i	1	0
-2.4307+13.594i	0.17601	2.1636
-2.4307-13.594i	0.17601	2.1636
-1.6576+13.163i	0.12494	2.095
-1.6576-13.163i	0.12494	2.095
-2.0009+12.598i	0.15687	2.005
-2.0009-12.598i	0.15687	2.005
-1.5101+12.334i	0.12153	1.963
-1.5101-12.334i	0.12153	1.963
-2.0218+11.784i	0.1691	1.8754
-2.0218-11.784i	0.1691	1.8754
-1.1515+11.537i	0.099314	1.8362
-1.1515-11.537i	0.099314	1.8362
-1.0075+10.684i	0.093876	1.7005
-1.0075-10.684i	0.093876	1.7005
-1.4335+11.005i	0.12916	1.7516
-1.4335-11.005i	0.12916	1.7516
-1.923+10.817i	0.17503	1.7216
-1.923-10.817i	0.17503	1.7216
-1.7163+10.542i	0.1607	1.6778
-1.7163-10.542i	0.1607	1.6778
-28.877+0i	1	0
-1.2118+10.104i	0.11908	1.6081
-1.2118-10.104i	0.11908	1.6081
-1.0891+9.8615i	0.10977	1.5695
-1.0891-9.8615i	0.10977	1.5695
-27.421+0i	1	0
-27.333+0i	1	0
-1.2383+9.4488i	0.12994	1.5038
-1.2383-9.4488i	0.12994	1.5038
-0.79368+8.4354i	0.093675	1.3425
-0.79368-8.4354i	0.093675	1.3425
-25.902+0i	1	0
-25.856+0i	1	0
-25.804+0i	1	0
-25.561+0i	1	0

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

-25.117+0i	1	0
-24.598+0i	1	0
-24.975+0i	1	0
-24.705+0i	1	0
-24.894+0i	1	0
-24.797+0i	1	0
-24.815+0i	1	0
-23.42+0i	1	0
-22.679+0i	1	0
-6.1984+0i	1	0
-6.5972+0i	1	0
-6.7914+0i	1	0
-32.269+0i	1	0
-32.584+0i	1	0
-34.854+0i	1	0
-33.799+0i	1	0
-33.785+0i	1	0
-33.447+0i	1	0
-9.5941+0i	1	0
1.4977e-14+0i	0	0
-33.997+0i	1	0
-34.84+0i	1	0
-34.038+0i	1	0
-9.6531+0i	1	0
-9.9436+0i	1	0
-9.9729+0i	1	0
-9.9608+0i	1	0
-9.6862+0i	1	0
-9.7012+0i	1	0
-9.7595+0i	1	0
-9.7758+0i	1	0
-9.8217+0i	1	0
-9.8788+0i	1	0
-9.7284+0i	1	0
-9.8475+0i	1	0
-9.8599+0i	1	0
-9.7163+0i	1	0
-2.806+0i	1	0
-9.978+0i	1	0
-33.851+0i	1	0
-34.979+0i	1	0
-34.995+0i	1	0
-34.138+0i	1	0
-34.491+0i	1	0
-34.468+0i	1	0
-2.5077+0i	1	0
-2.2913+0i	1	0

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

-34.546+0i	1	0
-23.756+0i	1	0
-23.293+0i	1	0
-2.0618+0i	1	0
-1.8723+0i	1	0
-1.8055+0i	1	0
-1.7081+0i	1	0
-1.6957+0i	1	0
-21.95+0i	1	0
-20.35+0i	1	0
-1.5619+0i	1	0
-1.304+0i	1	0
-1.2315+0i	1	0
-20.102+0i	1	0
-20.199+0i	1	0
-20.328+0i	1	0
-20.24+0i	1	0
-20.31+0i	1	0
-20.286+0i	1	0
-20.303+0i	1	0
-20.274+0i	1	0
-20.253+0i	1	0
-20.259+0i	1	0
-1.0638+0i	1	0
-0.88932+0i	1	0
-21.39+0i	1	0
-20.042+0i	1	0
-20.028+0i	1	0
-20.026+0i	1	0
-20.036+0i	1	0
-20.301+0i	1	0
-21.366+0i	1	0
-0.68132+0.016458i	0.99971	0.0026194
-0.68132-0.016458i	0.99971	0.0026194
-0.19256+0i	1	0
-0.2034+0i	1	0
-0.22014+0i	1	0
-0.22443+0i	1	0
-0.24507+0i	1	0
-0.23484+0i	1	0
-0.25922+0i	1	0
-0.27557+0i	1	0
-0.2933+0i	1	0
-0.3053+0i	1	0
-0.31739+0.0079998i	0.99968	0.0012732
-0.31739-0.0079998i	0.99968	0.0012732
-0.34413+0i	1	0

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

-19.481+0i	1	0
-21.279+0i	1	0
-21.029+0i	1	0
-20.958+0i	1	0
-19.507+0i	1	0
-0.41231+0i	1	0
-20.784+0i	1	0
-19.243+0i	1	0
-19.212+0i	1	0
-0.54271+0i	1	0
-20.054+0i	1	0
-20.154+0i	1	0
-0.72541+0i	1	0
-0.70035+0i	1	0
-0.61373+0i	1	0
-0.57119+0i	1	0
-0.52054+0i	1	0
-0.54159+0i	1	0
-20.196+0i	1	0
-0.56932+0i	1	0
-0.56225+0i	1	0
-0.53562+0i	1	0
-0.39663+0i	1	0
-0.39375+0i	1	0
-0.36771+0i	1	0
-0.36434+0i	1	0
-0.45273+0i	1	0
-0.46252+0i	1	0
-0.46654+0i	1	0

مدهای نوسانی بحرانی سیستم با ضریب میرایی پایین (کمتر از ۱۰ درصد) در میان این نتایج هایلایت شده و نیز در جدول ۵-۴ نشان داده شده‌اند. چنان‌چه مشاهده می‌شود، این سیستم دارای سه مد نوسانی با ضریب میرایی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

جدول ۵-۴ مدهای نوسانی سیستم با ضریب میرایی پایین

Eigenvalue	*Damping Ratio (%)*	*Frequency (Hz)*
$-1.1515 \pm j11.537$	*9.9314*	*1.8362*
$-1.0075 \pm j10.684$	*9.3876*	*1.7005*
$-0.79368 \pm j8.4354$	*9.3675*	*1.3425*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۵-۹-۲- تحلیل شکل مد

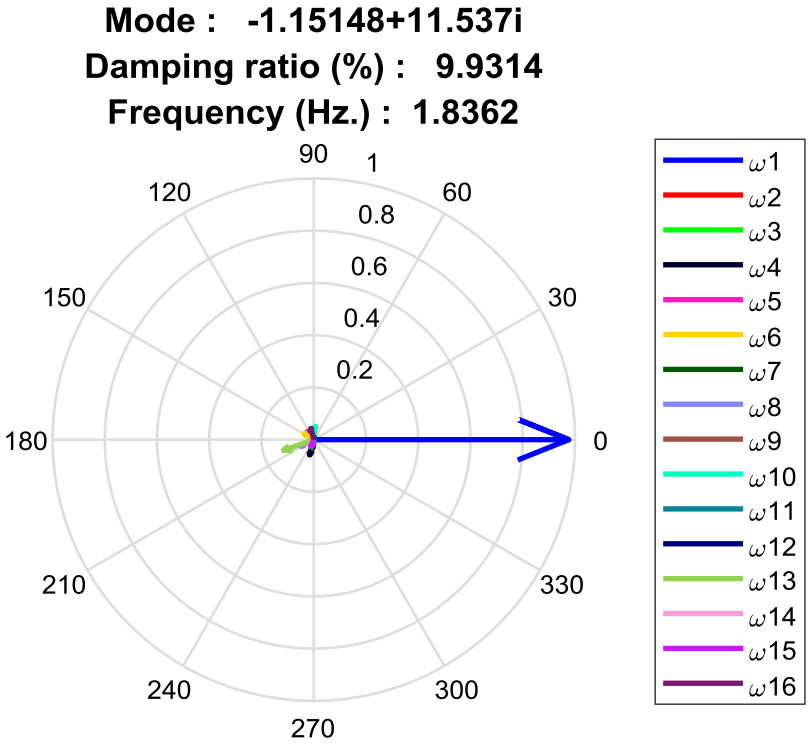
از تحلیل شکل مد برای سنجش کنش‌گری[۱] بین متغیرهای حالت و مدهای سیستم استفاده می‌شود. با استفاده از این تحلیل می‌توان به اطلاعات مهمی درباره سهم هر یک از متغیرهای حالت در تحریک مدهای بحرانی[۲] سیستم دست یافت. از منظر ریاضی، تحلیل شکل مد عبارت از ترسیم نمودار ماتریس بردارهای ویژه راست سیستم خطی‌شده در مختصات قطبی می‌باشد [۱۶۰]. در شکل ۵-۱۶، شکل مد برای متغیر دینامیکی سرعت زاویه‌ای ژنراتورها و سه مد سیستم با ضریب میرایی کمتر از ۱۰ درصد ترسیم شده است. دامنه شکل مد (طول فلش‌ها) نشان‌دهنده میزان سهم هر متغیر حالت در تحریک آن مد است. جابجایی زاویه فاز نیز نشان‌دهنده تقابل[۳] میان هر متغیر حالت و سایر متغیرها برای هر مد مشخص است. شکل مد ترسیم‌شده نشان‌دهنده این است که ژنراتور *G1* بیشترین سهم را در تحریک مد $-1.1515 \pm j11.537$، ژنراتور *G10* بیشترین سهم را در تحریک مد $-1.0075 \pm j10.684$ و ژنراتور *G12* بیشترین سهم را در تحریک مد بحرانی $-0.79368 \pm j8.4354$ (با کمترین ضریب میرایی) دارد.

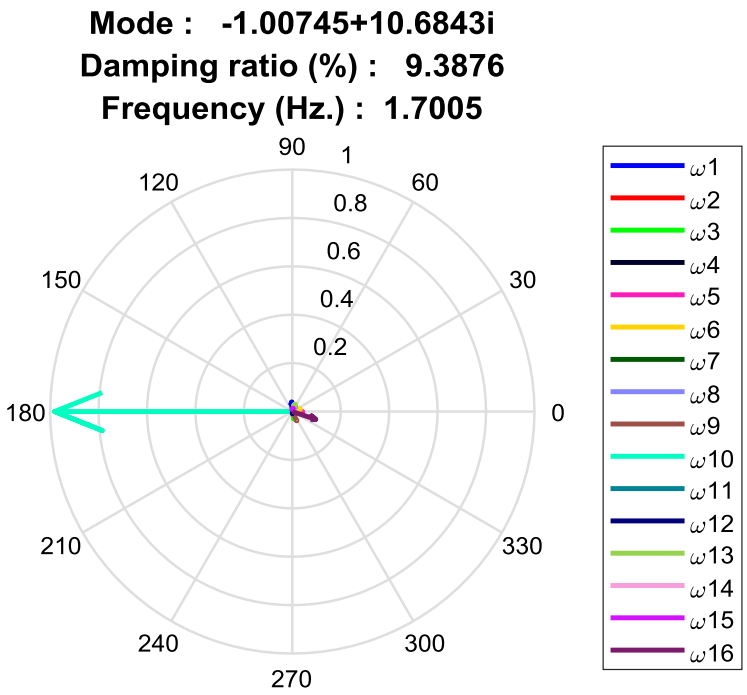
[۱] Activity

[۲] Critical Modes

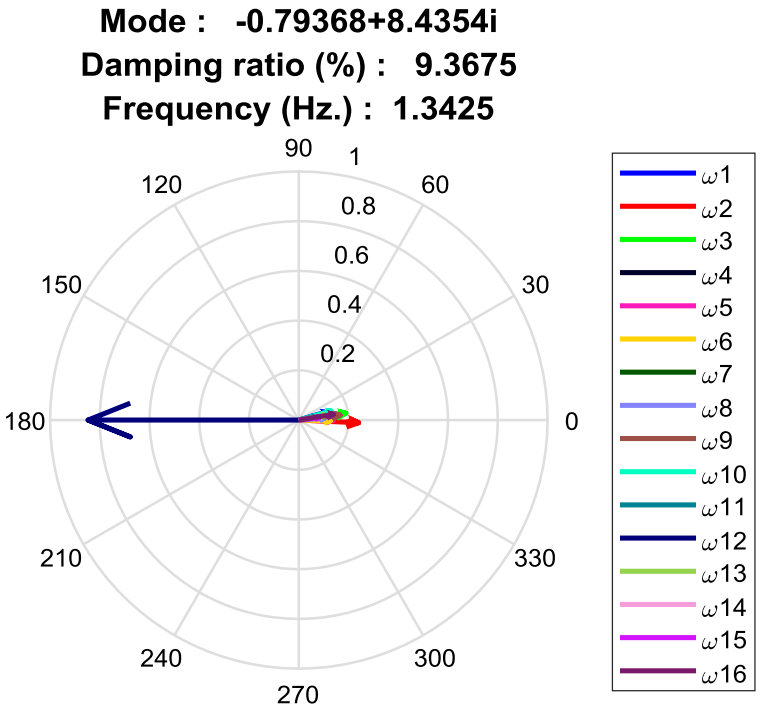
[۳] Interaction

DOI: 10.30503/nripress.2020.248





DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۵-۱۶ تحلیل شکل مد

۵-۹-۳- تحلیل ضریب مشارکت

حاصلضرب بردارهای ویژه راست و چپ سیستم خطی‌شده در یکدیگر اطلاعات عددی مفیدی در مورد میزان سهم هر یک از متغیرهای حالت در تحریک مدهای سیستم می‌دهد. از منظر ریاضی، ضریب مشارکت متغیر حالت iام در تحریک مد jام سیستم به صورت زیر محاسبه و نرمالیزه می‌شود [۱۴۱]، [۱۶۰].

$$p_{ij} = \frac{|v_{ij}||w_{ij}|}{\sum_{i=1}^{n_s}|v_{ij}||w_{ij}|} \quad (۷-۵)$$

$$p_{ij_{normalized}} = \frac{p_{ij}}{max|p_{ij}|}$$

در این رابطه، v_{ij} درایه (i,j)ام ماتریس بردار ویژه راست، w_{ij} درایه (i,j)ام ماتریس بردار ویژه چپ و n_s تعداد متغیرهای حالت سیستم می‌باشد. نتایج محاسبه ضرایب مشارکت برای مدهای نوسانی در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است. در این شکل، ضرایب مشارکت برای متغیرهای حالت بحرانی سیستم یعنی

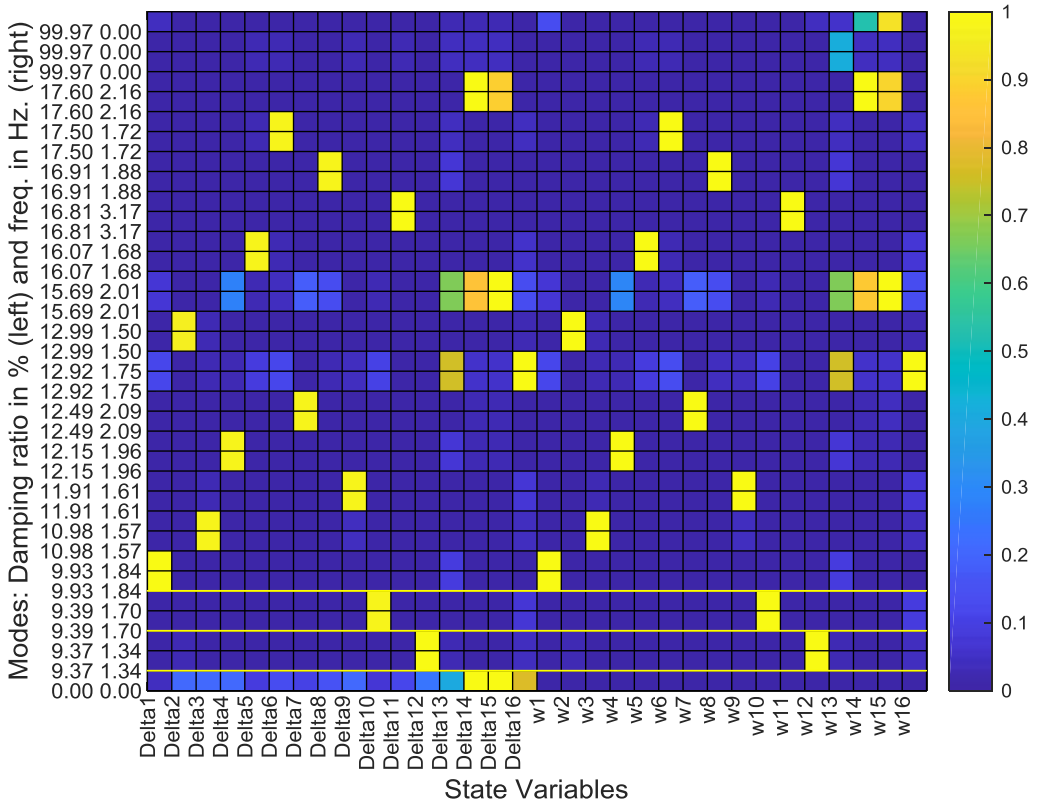
DOI: 10.30503/nripress.2020.248

متغیرهای الکترومکانیکی زاویه روتور و سرعت زاویه‌ای نشان داده شده‌اند. با استفاده از دستور *pcolor*، نمایشی سه‌بعدی از ضرایب مشارکت ترسیم شده است. در این شکل، محور افقی به متغیرهای حالت و محور عمودی به مدهای سیستم (که از میرایی کم به زیاد مرتب شده‌اند) اختصاص داده شده‌اند. میزان ضرایب مشارکت محاسبه‌شده نیز در بعد سوم و توسط رنگ مشخص شده‌اند. مدهای نوسانی بحرانی با ضریب میرایی زیر ۱۰ درصد نیز در این شکل توسط خطوط افقی زردرنگ مشخص شده‌اند. چنان‌چه مشاهده می‌شود، ژنراتور *G1* بیشترین سهم را در تحریک مد $-1.1515 \pm j11.537$، ژنراتور *G10* بیشترین سهم را در تحریک مد $-1.0075 \pm j10.684$ و ژنراتور *G12* بیشترین سهم را در تحریک مد بحرانی $-0.79368 \pm j8.4354$ (با کمترین ضریب میرایی) دارد. این نتایج با نتایج تحلیل شکل مد در بخش قبل مطابقت دارند.

ذکر این نکته قابل اهمیت می‌باشد که به دلیل عدم وجود باس بینهایت در سیستم، یک مقدار ویژه صفر به دلیل ازدیاد[۱] در تعداد متغیرهای حالت سیستم وجود دارد.

[۱] Redundancy

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۵-۱۷ تحلیل ضریب مشارکت

۵-۹-۴- تحلیل مانده مدال

روش تحلیل ضریب مشارکت در صورتی که ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم ثابت باشند، یک روش بسیار قوی برای تعیین میزان کنش‌گری بین متغیرهای حالت و مدهای سیستم است؛ منتها این روش اطلاعاتی در مورد تأثیر ورودی‌ها و خروجی‌های مختلف کنترل‌کننده بر ارتباط میان متغیرهای حالت و مدهای سیستم به دست نمی‌دهد. بنابراین این روش به تنهایی برای انتخاب مکان بهینه کنترل‌کننده و انتخاب سیگنال فیدبک قابل استفاده نمی‌باشد. در مقابل، روش تحلیل مانده مدال ورودی و خروجی سیستم را نیز در نظر می‌گیرد. از منظر ریاضی، مانده مدال به صورت زیر و توسط حاصلضرب رؤیت‌پذیری مدال[۱] ($\widehat{H}v_i$) و کنترل‌پذیری مدال[۲] ($w_i\hat{B}$) در یکدیگر محاسبه می‌شود.

[۱] Modal Observability

[۲] Modal Controllability

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

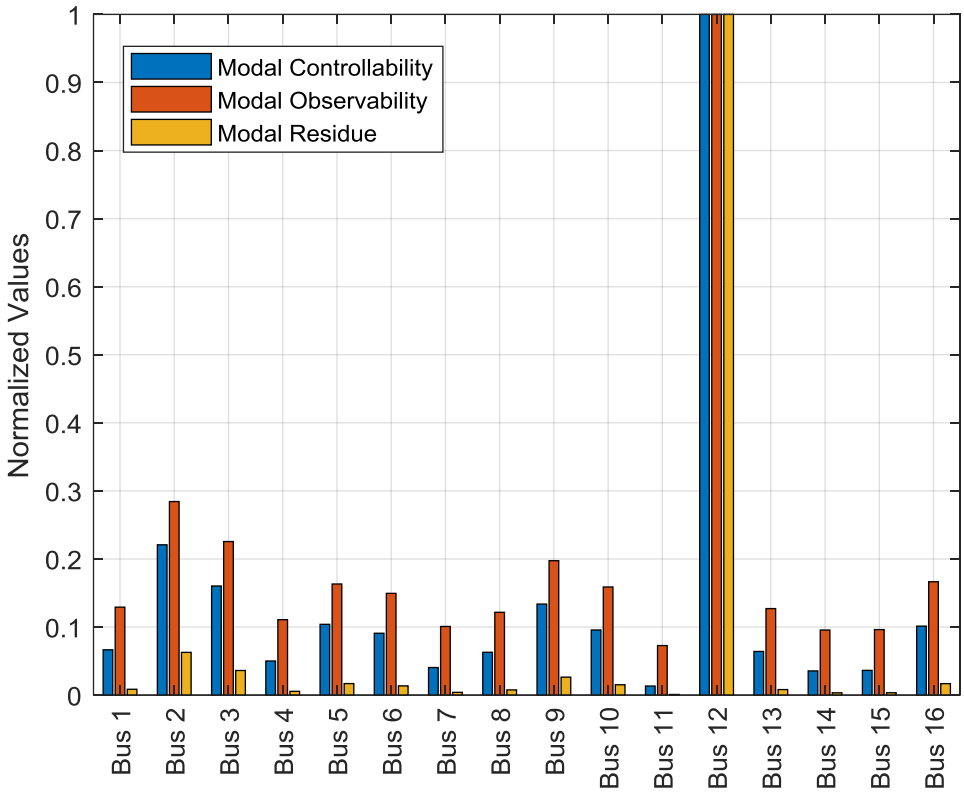
$$R_i = \hat{H} v_i w_i \hat{B} \quad (۸-۵)$$

در این رابطه، R_i نشان‌دهنده مانده مدال برای مد iام بوده و v_i و w_i به ترتیب برابر با بردار ویژه راست و چپ متناظر با مد iام هستند [۱۴۱]، [۱۶۰].

با استفاده از این تحلیل می‌توان مکان بهینه پایدارساز (PSS) را تعیین نمود. می‌توان باسی را که دارای بیشترین مقدار دامنه مانده می‌باشد، به عنوان مکان بهینه در نظر گرفت. مقدار فاز مانده نیز اطلاعات مفیدی در مورد مقدار فازی که باید برای جبران‌سازی تأخیر فاز[۱] به سیستم افزود به دست می‌دهد [۱۶۰]. در شکل ۵-۱۸، مقادیر کنترل‌پذیری مدال، رؤیت‌پذیری مدال و مانده مدال به صورت نرمالیزه‌شده برای باس‌های متصل به ژنراتور و مد بحرانی دارای کمترین ضریب میرایی نشان داده شده‌اند. برای محاسبه این مقادیر، ابتدا خطی‌سازی با در نظر گرفتن ورودی‌ها و خروجی‌های مختلف برای سیستم انجام شده است. به این صورت که ورودی (P_{Ci}) و خروجی (سرعت زاویه‌ای روتور ω_i) هر ژنراتور به عنوان ورودی و خروجی سیستم در نظر گرفته شده و ماتریس‌های متناظر $\hat{B}$ و $\hat{H}$ و مانده مدال برای هر جفت از این ورودی-خروجی‌ها محاسبه می‌شوند. چنان‌چه در شکل ۵-۱۸ مشاهده می‌شود، ژنراتور $G12$ بهترین مکان برای نصب PSS در جهت میرا نمودن نوسانات ناشی از مد بحرانی می‌باشد. این نتیجه با نتایج تحلیل شکل مد و ضریب مشارکت همخوانی دارد.

[۱] Phase Lag

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۵-۱۸ تحلیل مانده مدال

۵-۱۰- جمع‌بندی

در این فصل، نحوه انتخاب نرم‌افزار مناسب برای شبیه‌سازی سیستم قدرت، تعیین شرایط اولیه (بردار متغیرهای جبری و متغیرهای حالت اولیه) برای شبیه‌سازی و چگونگی افزایش سرعت شبیه‌سازی بررسی شد. با شبیه‌سازی سیستم توسط روش پیشنهادی، نتایج در قالب ترسیم و تحلیل نمودار زمانی متغیرهای حالت و جبری سیستم انجام شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از این بود که پس از وقوع اغتشاش و به نوسان افتادن سیستم، مقادیر متغیرهای حالت به نوسان افتاده و پس از نوسان به مقدار اولیه خود همگرا می‌شوند و به حالت ماندگار می‌رسند. همچنین دیده شد که ژنراتورهای موجود در ناحیه ۲ (جایی که فالت در آن رخ می‌دهد) شدیدترین نوسانات را در متغیرهای حالت خود دارند. همچنین با توجه به شکل‌ها مشاهده شد که متغیرهای جبری سیستم تغییرات ناگهانی پس از وقوع فالت دارند؛ در حال که متغیرهای دینامیکی به علت ماهیت خود دارای تغییرات تدریجی هستند. همچنین دیده شد که جریان ژنراتور *G13* در زمان وقوع فالت افزایش بسیار شدیدی داشته است.

سپس، دلایل، مزایا و چگونگی نمایش و خطی‌سازی سمبولیک سیستم شرح داده شد. با خطی‌سازی سیستم ۶۸ باسه به روش پیشنهادی، به تحلیل مدال، تحلیل شکل مد، تحلیل ضریب مشارکت و تحلیل مانده مدال

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

برای این سیستم پرداخته شد. نتایج تحلیل مدال نشان‌دهنده وجود سه مد نوسانی بحرانی در سیستم با ضریب میرایی پایین (کمتر از ۱۰ درصد) بود. تحلیل شکل مد و بررسی سه مد بحرانی سسیستم نشان داد که ژنراتور *G1* بیشترین سهم را در تحریک مد $-1.1515 \pm j11.537$، ژنراتور *G10* بیشترین سهم را در تحریک مد $-1.0075 \pm j10.684$ و ژنراتور *G12* بیشترین سهم را در تحریک مد بحرانی $-0.79368 \pm j8.4354$ (با کمترین ضریب میرایی) دارد. نتایج تحلیل ضریب مشارکت نیز با نتایج تحلیل شکل مد مطابقت داشت. تحلیل مانده مدال نیز نشان داد ژنراتور *G12* بهترین مکان برای نصب *PSS* در جهت میرا نمودن نوسانات ناشی از مد بحرانی می‌باشد.

در [۱۴۱] نشان داده شده است که استفاده از روش شبیه‌سازی که در این فصل مطرح شد، منجر به زمان اجرای بسیار کوتاه‌تر برای شبیه‌سازی سیستم نمونه ۶۸ باسه در مقایسه با استفاده از سیمولینک متلب یا *PST* و *PSAT* تحت شرایط یکسان خواهد شد. به طور مثال، مدت زمان اجرا برای شبیه‌سازی سیستم ۶۸ باسه توسط *PST* برابر با ۱۶۲ ثانیه و برای روش پیشنهادی در [۱۴۱] حدودا ۱۱ ثانیه بوده و کاهش بسیار قابل ملاحظه‌ای داشته است.

علاوه بر این، روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی و همچنین روش نمایش و خطی‌سازی سمبولیک سیستم مزایای دیگری به شرح زیر نیز دارد.

- استفاده از از مزایای حل‌کننده‌های قوی متلب بر خلاف سیمولینک و تولباکس‌هایی مانند *PST*، *PSAT*، *MatDyn* و *PowSysGUI*

- امکان شبیه‌سازی هم برای سیستم‌های مقیاس-کوچک و هم برای سیستم‌های مقیاس-وسیع بر خلاف برخی تولباکس‌ها مانند *PSAT* که برای شبیه‌سازی سیستم‌های مقیاس-وسیع مانند سیستم ۶۸ باسه مناسب نمی‌باشد.

- خطی‌سازی تحلیلی و دقیق ریاضی توسط روش سمبولیک بر خلاف *PST* و سیمولینک یا سایر نرم‌افزارها که از تقریب اغتشاش و محاسبه عددی ژاکوبین‌ها استفاده می‌کنند.

- امکان تحلیل سیستم قدرت مانند تحلیل مانده مدال، انتخاب سیگنال فیدبک کنترل‌کننده، مکان‌یابی بهینه کنترل‌کننده و تنظیم پارامترها با استفاده از خطی‌سازی سمبولیک

- افزایش سرعت شبیه سازی توسط بردارسازی و حذف حلقه‌های *for* برای محاسبه عبارات جمع

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

- قابلیت استفاده از نمایش سمبولیک سیستم و خطی‌سازی تحلیلی حول یک نقطه کار برای اهداف آموزشی
- چک کردن و بررسی صحت معادلات سیستم قبل از اجرای برنامه شبیه‌سازی اصلی
- بهینه‌سازی پارامترهای ثابت سیستم به این صورت که پارامترهای مدنظر به صورت کمیت‌های متغیر تعریف شوند و با استفاده از توابع بهینه‌سازی متلب و تعریف توابع هزینه مناسب به بهینه‌سازی و انتخاب بهینه این پارامترها پرداخت.

نکته: در آخر نیز می‌توان به این نکته مهم اشاره کرد که برخی از روش‌های تخمین حالت دینامیکی و یا کنترل سیستم (به طور مثال یکی از تخمین‌گرهای پیشنهادی این پروژه) مبتنی بر خطی‌سازی هستند. بنابراین در این پروژه پیشنهاد شده است تا به جای مشتق‌گیری‌ها و محاسبه ژاکوبین‌ها در هر بازگشت که بسیار زمان‌بر هستند، ابتدا قبل از اجرای شبیه‌سازی، خطی‌سازی را به صورت سمبولیک انجام داده و سپس در هر بازگشت تنها به جایگذاری نمادها با مقادیر محاسبه شده در هر بازگشت پرداخت. انتظار می‌رود استفاده از این روش برای اجرای تخمین حالت دینامیکی به کاهش قابل ملاحظه زمان محاسباتی در مقایسه با سایر روش‌های موجود بینجامد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل ششم: مرور روش‌های موجود

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۶-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا مسأله تخمین حالت غیرخطی و نحوه حل آن توسط تئوری بیز شرح داده می‌شود. سپس روش‌های موجود تخمین حالت بهینه و تقریبی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. سپس، تعریف ریاضی روش تحریک-رویداد ارائه شده و استراتژی‌های تحریک-رویداد موجود بررسی می‌شوند. با بررسی این استراتژی‌ها و بررسی مزایا و مشکلات هر کدام، استراتژی تحریک-رویداد مناسب برای این پروژه انتخاب می‌شود. سپس دو ساختار موجود برای روش تحریک-رویداد معرفی شده و ساختار مناسب برای این پروژه انتخاب می‌شود. در ادامه، مروری بر پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت دینامیکی سیستم قدرت با استفاده از روش تحریک-رویداد انجام می‌شود. سپس، با معرفی روش تخمین حالت توزیع‌یافته در سیستم قدرت و بررسی مزایای آن، به مرور پژوهش‌های اخیر در زمینه تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت پرداخته شده می‌شود. در انتها، خلاءهای پژوهشی موجود در هر دو زمینه روش تحریک-رویداد و روش توزیع‌یافته و لزوم پرداختن به این دو مسأله در این پروژه تبیین می‌شوند.

۶-۲- مسأله تخمین حالت غیرخطی

در این بخش، به تعریف مسأله تخمین حالت غیرخطی، توضیح چگونگی حل این مسأله توسط تئوری بیز و روش‌های بهینه و تقریبی حل این مسأله پرداخته می‌شود.

۶-۲-۱- تعریف ریاضی مسأله تخمین حالت غیرخطی

به صورت کلی، معادلات دینامیکی یک سیستم غیرخطی را می‌توان توسط مدل فضای حالت غیرخطی زمان-گسسته به صورت زیر نمایش داد.

$$X(k+1) = f\big(X(k), w(k)\big) \qquad (۱-۶)$$

که در این رابطه، $X(k)$ بردار حالت در زمان k، $w(k)$ نویز فرآیند و f تابع غیرخطی شناخته شده است که از معادلات دینامیکی سیستم به دست می‌آید.

معادلات مربوط به اندازه‌گیری (مدل مشاهدات) یک سیستم غیرخطی نیز به صورت کلی زیر قابل نمایش است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\tilde{Y}(k) = h\big(X(k), v(k)\big) \qquad (۲-۶)$$

که در این رابطه، $\tilde{Y}(k)$ بردار مقادیر اندازه‌گیری‌شده سیستم در زمان k، $v(k)$ نویز اندازه‌گیری یا مشاهدات و h تابع غیرخطی شناخته شده است که از معادلات سیستم و رابطه بین متغیرهای حالت و مقادیر اندازه‌گیری‌شده سیستم به دست می‌آید.

مقدار اولیه بردار حالت سیستم که با $X(0)$ نمایش داده می‌شود به صورت تصادفی و با تابع چگالی احتمال[۱] $p\big(X(0)\big)$ و به صورت کاملا مستقل از نویزهای فرآیند و مشاهدات فرض می‌شود. در اینجا، $p(.)$ نشان‌دهنده تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی می‌باشد.

با این توضیحات، می‌توان مسأله تخمین حالت غیرخطی این سیستم را به صورت زیر تعریف نمود.

مسأله تخمین حالت غیرخطی: هدف از تخمین حالت غیرخطی عبارت است از تخمین مقدار $X(k)$ با استفاده از مجموعه مشاهدات تا زمان k. در این مسأله فرض بر این است که $p\big(X(0)\big)$، تابع چگالی احتمال $w(k)$، تابع چگالی احتمال $v(k)$، تابع غیرخطی f و تابع غیرخطی h در هر لحظه از زمان کاملا شناخته شده هستند. مجموعه مشاهدات تا زمان k را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$Z(k) = \{\tilde{Y}(1), \tilde{Y}(2), \dots, \tilde{Y}(k)\} \qquad (۳-۶)$$

۶-۲-۲- حل مسأله تخمین حالت غیرخطی با استفاده از تئوری بیز

در مسأله تخمین حالت غیرخطی توسط تئوری بیز، هدف پیدا کردن تابع چگالی احتمال پسین[۲] سیستم یعنی $p\big(X(k)\big|Z(k)\big)$ می‌باشد. واضح است که در لحظه $k = 0$ که هنوز هیچ اندازه‌گیری در سیستم انجام نشده است، تابع چگالی احتمال پسین به صورت $p\big(X(0)\big|Z(0)\big) = p\big(X(0)\big)$ می‌باشد. با استفاده از تئوری بیز، می‌توان $p\big(X(k)\big|Z(k)\big)$ را با استفاده از $p\big(X(k-1)\big|Z(k-1)\big)$ به دست آورد. این کار طی دو مرحله پیش‌بینی[۳] و به‌روزرسانی[۴] و به صورت بازگشتی برای تمام زمان‌ها انجام می‌شود. تخمین‌گرهایی

[۱] Probability Density Function (PDF)

[۲] Posterior Probability Density Function (Posterior PDF)

[۳] Prediction

[۴] Update

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

که با استفاده از تئوری بیز به حل مسأله تخمین حالت می‌پردازند، تخمین‌گرهای بیزین یا فیلترهای بیزین نامیده می‌شوند.

در ادامه، مراحل پیش‌بینی و به روزرسانی تخمین‌گرهای بیزین شرح داده می‌شوند.

مرحله پیش‌بینی:

در مرحله پیش‌بینی، تابع چگالی احتمال پیش‌بینی یا تابع چگالی احتمال پیشین[۱] سیستم یعنی $p\big(X(k)\big|Z(k-1)\big)$، با توجه به معادله (۶-۱) (روابط دینامیکی سیستم) و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$p\big(X(k)\big|Z(k-1)\big)=\int p\big(X(k)\big|X(k-1)\big)\,p\big(X(k-1)\big|Z(k-1)\big)\,dX(k-1) \qquad (۶-۴)$$

در این رابطه، $p\big(X(k)\big|X(k-1)\big)$ تابع چگالی احتمال انتقال حالت[۲] است که با استفاده از معادله (۶-۱) (روابط دینامیکی سیستم) تعیین می‌شود.

مرحله به‌روزرسانی:

در مرحله به‌روزرسانی، با استفاده از اندازه‌گیری‌های جدید که در لحظه k به دست می‌آیند، به محاسبه تابع پسین پرداخته می‌شود. به عبارت دیگر تابع پسین $p\big(X(k)\big|Z(k)\big)$ با استفاده از $\tilde{Y}(k)$ و $p\big(X(k)\big|Z(k-1)\big)$ و قانون بیز به صورت زیر به دست می‌آید.

$$p\big(X(k)\big|Z(k)\big)=p\left(X(k)\middle|\tilde{Y}(k),Z(k-1)\right)= \qquad (۶-۵)$$

$$\frac{p\Big(\tilde{Y}(k)\Big|X(k),Z(k-1)\Big)p\big(X(k)\big|Z(k-1)\big)}{p\Big(\tilde{Y}(k)\Big|Z(k-1)\Big)}=\frac{p\Big(\tilde{Y}(k)\Big|X(k)\Big)p\big(X(k)\big|Z(k-1)\big)}{p\Big(\tilde{Y}(k)\Big|Z(k-1)\Big)}$$

[۱] Prior Probability Density Function (Prior PDF)

[۲] State Transition PDF

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در این رابطه، $p\left(\tilde{Y}(k)\middle|X(k)\right)$ که تابع درست‌نمایی[۱] نیز نامیده می‌شود، با استفاده از معادلات مشاهدات سیستم یعنی رابطه (۶-۲) تعیین می‌شود. مخرج کسر در رابطه (۶-۵) نیز یک ضریب نرمال‌سازی[۲] است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$p\left(\tilde{Y}(k)\middle|Z(k-1)\right)=\int p\left(\tilde{Y}(k)\middle|X(k)\right)\,p\big(X(k)\big|Z(k-1)\big)\,dX(k) \qquad (۶-۶)$$

در هر حلقه بازگشتی تخمین‌گر بیزین، مراحل پیش‌بینی و به روزرسانی (روابط (۶-۴) و (۶-۵) و (۶-۶)) برای زمان مورد نظر اجرا شده و تابع چگالی احتمال پسین برای همه زمان‌ها محاسبه می‌شود. با داشتن تابع پسین، می‌توان مقدار بردار حالت یعنی $X(k)$ را در هر لحظه تخمین زد. برای این کار می‌توان مقدار امید ریاضی[۳] تابع پسین و یا مقداری که تابع پسین را بیشینه کند را به عنوان بردار حالت تخمین‌زده شده در زمان k در نظر گرفت. با استفاده از عملگر امید ریاضی[۴] $\mathbb{E}$، می‌توان بردار حالت تخمین‌زده شده در زمان k یعنی $\hat{X}(k|k)$ را به صورت زیر تعیین نمود.

$$\hat{X}(k|k)\triangleq\mathbb{E}\big(X(k)|Z(k)\big)=\int X(k)\,p\big(X(k)\big|Z(k)\big)\,dX(k) \qquad (۶-۷)$$

در این رابطه، $\mathbb{E}(a|b)$ امید ریاضی a به شرط b را نشان می‌دهد.

۶-۲-۳- روش‌های بهینه

روابط مفهومی تخمین‌گر بیزین یعنی روابط (۶-۴)، (۶-۵) و (۶-۶) تنها در برخی حالات خاص دارای حل تحلیلی بوده و منجر به پاسخ بهینه می‌شوند. به طور مثال، اگر مدل دینامیکی و مشاهدات سیستم خطی بوده و نویزهای فرآیند و مشاهدات دارای توزیع گوسی[۵] باشند، روابط (۶-۴)، (۶-۵) و (۶-۶) دارای حل بهینه خواهند بود. تخمین‌گر حاصل از حل بهینه این روابط همان **فیلتر کالمن** معروف می‌باشد.

---

۱ Likelihood Function

۲ Normalization Factor

۳ Expected Value

۴ Expectation Operator

۵ Gaussian

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در این حالت، تابع پسین نیز دارای توزیع گوسی خواهد بود. چنان‌چه می‌دانیم، توزیع گوسی را می‌توان با داشتن تنها میانگین و کواریانس آن به صورت یکتا تعیین نمود.

در ادامه، فیلتر کالمن مورد معرفی قرار می‌گیرد.

۱ ۳ ۲ ۶ فیلتر کالمن

همان‌طور که گفته شد، روابط تخمین‌گر بیزین در صورت خطی بودن معادلات سیستم و گوسی بودن نویزها منجر به جواب بهینه خواهند شد. سیستم خطی را می‌توان به صورت کلی زیر نمایش داد.

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)w(k) \qquad (۸-۶)$$

$$\tilde{Y}(k) = H(k)X(k) + D(k)v(k)$$

در این روابط، ماتریس‌های $F(k)$، $G(k)$، $H(k)$ و $D(k)$ در همه لحظات معلوم بوده و نویزهای فرآیند و مشاهدات دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و مستقل از هم بوده و به صورت $w(k)\sim\mathcal{N}\big(0,Q(k)\big)$ و $v(k)\sim\mathcal{N}\big(0,R(k)\big)$ نمایش داده می‌شوند. در اینجا، $\mathcal{N}(a,b)$ نشان‌دهنده یک توزیع گوسی با میانگین a و ماتریس کواریانس b می‌باشد. ماتریس کواریانس نویزهای فرآیند و مشاهدات به صورت شناخته‌شده فرض می‌شوند.

همان‌طور که گفته شد، توابع گوسی را می‌توان توسط مقدار میانگین و ماتریس کواریانس آن‌ها به صورت یکتا نمایش داد. بنابراین، با در نظر گرفتن فرضیات فوق و حل روابط (۶-۴)، (۶-۵) و (۶-۶)، توابع توزیع پیشین و پسین به صورت زیر قابل نوشتن می‌باشند.

$$p\big(X(k)\big|Z(k-1)\big) = \mathcal{N}\left(X(k);\hat{X}(k|k-1),P(k|k-1)\right) \qquad (۹-۶)$$

$$p\big(X(k)\big|Z(k)\big) = \mathcal{N}\left(X(k);\hat{X}(k|k),P(k|k)\right)$$

در این روابط، $\mathcal{N}(x;\mu,\Sigma)$ نشان‌دهنده مقدار تابع چگالی احتمال گوسی در نقطه x است. μ و Σ نیز به ترتیب نشان‌دهنده میانگین و ماتریس کواریانس توزیع گوسی می‌باشند. همچنین، $\hat{X}(k|k)$ و $\hat{X}(k|k-1)$ به ترتیب نشان‌دهنده بردار حالت تخمین‌زده شده و بردار حالت پیش‌بینی شده و $P(k|k)$ و $P(k|k-1)$ نیز ماتریس کواریانس خطای تخمین و ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی به صورت زیر می‌باشند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$P(k|k) = cov\left(X(k) - \hat{X}(k|k)\middle|Z(k)\right) \quad (۱۰-۶)$$

$$P(k|k-1) = cov\left(X(k) - \hat{X}(k|k-1)\middle|Z(k)\right)$$

در اینجا، $cov(a|b)$ نشان‌دهنده کواریانس a به شرط b می‌باشد.

با استفاده از روابط (۶-۴)، (۶-۵) و (۶-۶)، مقادیر میانگین و ماتریس‌های کواریانس موجود در روابط (۶-۹) به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\hat{X}(k|k-1) = F(k-1)\hat{X}(k-1|k-1) \quad (۱۱-۶)$$

$$P(k|k-1) = F(k-1)P(k-1|k-1)F^T(k-1) + G(k-1)Q(k-1)G^T(k-1)$$

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)r(k)$$

$$P(k|k) = \big(I - K(k)H(k)\big)P(k|k-1)$$

در این روابط، $r(k)$ مانده[۱] و $K(k)$ بهره فیلتر کالمن[۲] می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$r(k) = \tilde{Y}(k) - H(k)\hat{X}(k|k-1) \quad (۱۲-۶)$$

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k)\big(H(k)P(k|k-1)H^T(k) + D(k)R(k)D^T(k)\big)^{-1}$$

[۱] Kalman Residual

[۲] Kalman Gain

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

روابط (۶-۹) تا (۶-۱۲) بیان‌گر فیلتر کالمن می‌باشند. همان‌طور که گفته شد، در صورت خطی بودن سیستم و گوسی بودن نویزهای فرآیند و مشاهدات، فیلتر کالمن منجر به پاسخ بهینه خواهد شد؛ بدین معنی که کمترین خطای میانگین مربعات (*MMSE*[۱]) را در مقایسه با سایر تخمین‌گرها خواهد داشت.

در پیوست ۱، مراحل اجرای فیلتر کالمن و نسخه‌های دیگر آن به صورت خلاصه ارائه شده است.

۶-۲-۴- روش‌های تقریب آماری

به صورت کلی در سیستم‌های عملی، فرضیات خطی بودن سیستم و گوسی بودن نویزها صحیح نمی‌باشند. بنابراین برای این سیستم‌ها حل بهینه‌ای برای مسأله فیلترینگ بیزین وجود نخواهد داشت. در این حالت، از روش‌های تقریبی برای حل مسأله فیلترینگ بیزین استفاده می‌شود که منجر به پاسخ غیر بهینه خواهند شد.

تاکنون روش‌های تقریبی مختلفی برای حل مسأله فیلترینگ بیزین ارائه شده‌اند [۱۶۱], [۱۶۲], [۱۷۱], [۱۷۲], [۱۶۳]–[۱۷۰]. برخی از این روش‌ها مانند *EKF* و سایر نسخه‌های آن از خطی‌سازی سیستم استفاده می‌کنند [۱۶۲], [۱۶۳]. در برخی از روش‌ها از روش‌های تقریب آماری استفاده می‌شود. در این زمینه می‌توان به فیلترهای *UKF*، *CKF* و *PF* و انواع آن‌ها اشاره نمود [۱۶۷]–[۱۷۲]. روش‌های دیگری مانند روش‌های گسسته‌سازی فضای حالت و روش‌های تقریب گوسی نیز برای حل تقریبی مسأله فیلترینگ بیزین وجود دارند [۱۶۶].

هر کدام از این روش‌ها بسته به مسأله مورد نظر و معیارهای ارزیابی مانند خطای تخمین، سرعت پاسخ و همگرایی و ... می‌توانند به عنوان تخمین‌گر در سیستم مورد نظر به کار گرفته شوند.

در پیوست ۲ معادلات مربوط به برخی از این تخمین‌گرها ارائه شده است.

۶-۳- مروری بر روش‌های تخمین حالت غیرخطی در سیستم قدرت

در این بخش، به مرور پژوهش‌هایی که در آن‌ها به تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت انجام شده است، پرداخته می‌شود.

تحقیق اولیه در زمینه استفاده از *EKF* در سیستم قدرت در [۱۰۷] انجام شده است. در این مرجع فرض شده است که توان تزریقی و فرکانس در شین‌های ژنراتور با دقت زیاد و با نرخ نمونه‌گیری به اندازه کافی بالا اندازه‌گیری می‌شوند. با پیشرفت فن‌آوری‌های *PMU*، این فرضیات تا حدود زیادی به واقعیت نزدیک

[۱] Minimum Mean Square Error

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

شده و عملیاتی شده‌اند. برای مثال، مرجع [۱۰۸] استفاده از داده‌های *PMU* را برای تخمین حالت زمان-واقعی با استفاده از *EKF* پیشنهاد کرده و مورد بررسی قرار داده است. در [۱۰۹] و [۱۱۰] از داده‌های به دست آمده از رله‌های حفاظتی و *PMU*ها برای نظارت و کنترل گذراهای سیستم استفاده شده است. در [۱۱۱]، یک الگوریتم *EKF* با استفاده از تکنیک دکوپله‌سازی مدل[۱] برای تخمین حالت‌ها و پارامترهای یک مدل ژنراتور کلاسیک ارائه شده است. در ادامه این تحقیقات، در مرجع [۱۱۲] برای مواردی که ولتاژ میدان ژنراتور به دلیل وجود سیستم تحریک بدون جاروبک قابل اندازه‌گیری نیست، یک تخمین حالت دینامیکی اصلاح‌شده مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه‌یافته پیشنهاد شده است. این کار بعداً با پیشنهاد یک تخمین حالت دینامیکی غیرمتمرکز و با فرض دانستن مقدار گشتاور مکانیکی، توسعه داده شد [۱۱۳]. اگر غیرخطی بودن سیستم دینامیکی قوی نباشد و مشتقات معادلات غیرخطی را محاسبه کنیم، روش‌های مبتنی بر خطی‌سازی عملکرد قابل قبولی خواهند داشت. با این حال، هر سیستمی می‌تواند در شرایط گذراهای شدید کار کند و لذا در این حالت، غیرخطی بودن سیستم دینامیکی بسیار قوی است. علاوه بر این، محاسبه مشتقات برای سیستم‌های بزرگ و پیچیده ممکن است بسیار چالش برانگیز باشد. در این شرایط، روش‌های بدون خطی‌سازی و مشتق‌گیری یعنی روش‌های تقریب آماری مانند *UKF* و *PF* ترجیح داده می‌شوند.

در روش‌های بدون مشتق‌گیری، بردار حالت پیش‌بینی‌شده $\hat{X}(k|k-1)$ و مشخصات آماری آن $P(k|k-1)$ از طریق مجموعه‌ای از نقاط از توزیع احتمال $\hat{X}(k-1|k-1)$ محاسبه می‌شوند. ایده‌های اصلی این روش‌ها استفاده از تکنیک‌های نمونه‌برداری قطعی مانند انواع تبدیل بی‌رد[۲] و یا روش نمونه‌برداری مبتنی بر مونت کارلو[۳]، برای انتخاب مجموعه‌ای از نقاط نمونه است که دارای میانگین و کواریانس یکسان با حالت‌های پیشین هستند [۱۱۴]، [۱۱۵]. این نقاط سپس از طریق توابع غیرخطی مدل فرآیند و مشاهدات پخش می‌شوند و تخمینی از وضعیت حالت میانگین و کواریانس ارائه می‌کنند. درنتیجه، نیازی به محاسبات دشوار و پیچیده ماتریس‌های ژاکوبین نیست. بسته به نوع نقاط انتخاب‌شده، روش‌های مختلفی مانند انواع مختلف فیلتر کالمن بی‌رد (*UKF*) با استفاده از نقاط سیگما، فیلتر کالمن تجمعی (*EnKF*) و انواع مختلف فیلتر ذره‌ای (*PF*) با استفاده از تکنیک‌های نمونه‌برداری مبتنی بر روش مونت کارلو وجود دارد.

در [۱۱۶] تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر *UKF* با استفاده از یک مدل ژنراتور مرتبه چهارم برای تخمین حالات یک سیستم قدرت تک ماشین به شین بینهایت ارائه شده است. در همین راستا، یک فیلتر کالمن

[۱] Model Decoupling Technique

[۲] Unscented Transform

[۳] Monte-Carlo

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

بی‌رد متمرکز[۱] (CUKF) در [۱۱۷] و [۱۱۸] برای یک سیستم چند ماشینه استفاده شده است. در [۱۴۵] یک استراتژی غیرمتمرکز که نیازی به انتقال سیگنال‌های محلی ندارد به کار گرفته شده و بار محاسباتی را کاهش داده است. یک روش مبتنی بر فیلتر کالمن بی‌رد غیرمتمرکز[۲] (DUKF) برای تخمین هم‌زمان متغیرهای حالت دینامیکی مدل ژنراتور مرتبه چهارم، ولتاژ میدان و گشتاور مکانیکی در مرجع [۱۲۰] ارائه شده است. همچنین این روش با توجه به رویکرد ارائه شده در [۱۱۳] بهبود یافته است. در [۱۲۱]، از فیلتر کالمن بی‌رد غیرمتمرکز با وارد کردن زاویه داخلی در مدل دینامیکی ژنراتور و جداسازی فرآیند تخمین در دو مرحله با به‌روزرسانی پیوسته واریانس نویز مشاهدات استفاده شده است. در [۱۲۲] برای بهبود بیشتر دقت تخمین در فیلتر کالمن بی‌رد غیرمتمرکز، از اندازه‌گیری‌های PMUها هم استفاده شده است.

روش *EnKF* برای ردیابی حالات دینامیکی ژنراتورها و بررسی حساسیت نسبت به خطاهای حالت اولیه، نویز اندازه‌گیری و خطاهای نامعلوم در [۱۲۳] بررسی شده است. این روش در مرجع [۱۲۴] به‌گونه‌ای توسعه داده شده تا توان ورودی مکانیکی متغیر با زمان در منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شود. در [۱۲۵]، یک فیلتر تجمعی بیشینه درست‌نمایی[۳] برای تخمین متغیرهای حالت با بهینه‌سازی یک تابع هزینه غیرخطی و فضای تجمعی با ابعاد کم برای محاسبه هسین[۴] تابع هزینه ارائه شده است. برخلاف فیلتر کالمن تجمعی، فیلتر ذره‌ای از ذرات تولیدشده از طریق نمونه‌برداری مونت کارلو برای انتشار و تقریب ویژگی‌های آماری متغیرهای حالت توابع غیرخطی استفاده می‌کند. یک نسخه توسعه‌یافته فیلتر ذره‌ای برای تخمین متغیرهای حالت مدل ژنراتور سنکرون مرتبه چهار با استفاده از یک فرآیند تکراری نمونه‌برداری و پخش ذرات در [۱۲۶] استفاده شده است. در [۱۲۷] و [۱۴۰] از همین فیلتر ذره‌ای (*PF*) برای تخمین متغیرهای حالت مدل کامل ژنراتور سنکرون استفاده شده است.

در مرجع [۱۳۰] نشان داده شده است که عملکرد فیلتر کالمن توسعه‌یافته (*EKF*)، فیلتر کالمن بی‌رد (*UKF*)، فیلتر کالمن تجمعی (*EnKF*) و فیلتر ذره‌ای (*PF*) در حضور داده‌های پرت به دلیل عدم مقاوم‌بودن این فیلترها در حضور این داده‌ها بسیار خراب می‌شود. در [۱۳۱]، یک تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر فیلتر کالمن بی‌رد مقاوم[۵] دو مرحله‌ای توزیع‌یافته با استفاده از تخمین‌گر کوچک‌ترین مقدار قدرمطلق[۶]

[۱] Centralized Unscented Kalman Filter

[۲] Decentralized Unscented Kalman Filter

[۳] Maximum Likelihood Ensemble Filter

[۴] Hessian

[۵] Robust

[۶] Least-Absolute-Value (LAV)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

(*LAV*) برای حل چالش داده‌های پرت در اندازه‌گیری‌های توسط *PMU*ها ارائه شده است. در [۱۳۲] و [۱۷۳] فیلتر *GM-IEKF*[۱] برای حل چالش داده‌های پرت ارائه شده است اما در صورت وجود نویز غیرگوسی، بازده آماری این روش کاهش می‌یابد. در [۱۳۴] و [۱۳۵] فیلتر *GM-UKF*[۲] برای بهبود مشخصات آماری فرآیند تخمین در حضور نویزهای غیرگوسی و داده‌های پرت نوآوری و مشاهده ارائه شده است. این روش در مرجع [۹۵] به‌گونه‌ای توسعه و بهبود یافته است که در حضور هر سه نوع داده‌های پرت، شامل داده‌های پرت مشاهده، نوآوری و ساختاری[۳] نیز مقاوم باشد. این داده‌های پرت می‌توانند توسط یک مدل دینامیکی غیرقابل اعتماد یا کیفیت پایین اندازه‌گیری زمان-واقعی فازوری به وجود آیند. در هر صورت، روش‌های تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر بیشینه درست‌نمایی تعمیم‌یافته[۴] ممکن است در حضور این داده‌های پرت و عدم قطعیت پارامترهای مدل سیستم، یک تخمین با خطای بایاس زیاد را انجام دهند. برای حل چالش خطای بایاس، فیلتر کالمن توسعه‌یافته (*EKF*) و فیلتر کالمن بی‌رد (*UKF*) مبتنی بر کنترل مقاوم H_∞ در [۱۳۶] و [۱۳۷] پیشنهاد شده‌اند. در این مراجع نشان داده شده که این فیلترها می‌توانند اثر نایقینی‌های سیستم را در جواب تخمین بسیار کاهش دهند اما عملکرد مقاومی در حضور داده‌های پرت و نویزهای غیرگوسی ندارند.

۶-۴- مروری بر روش‌های تخمین حالت غیرخطی مبتنی بر تحریک-رویداد در سیستم قدرت

در اکثر پژوهش‌هایی که در [۱۰۷] تا [۵۴] انجام شده است، محدودیت‌های ارتباطی سیستم قدرت نادیده گرفته شده است. در این میان، در تعداد محدودی از پژوهش‌ها از استراتژی تحریک-رویداد برای حل مسأله محدودیت‌های ارتباطی استفاده شده است.

قبل از مرور این پژوهش‌ها، به تعریف ریاضی روش تحریک-رویداد و بررسی انواع استراتژی‌های تحریک-رویداد می‌پردازیم.

۶-۴-۱- تعریف ریاضی روش تحریک-رویداد

برای تعریف ریاضی روش تحریک-رویداد، سیستم غیرخطی زیر را می‌توان در نظرگرفت.

---

[۱] Generalized Maximum-Likelihood Iterated Extended Kalman Filter (GM-IEKF)

[۲] Generalized Maximum-Likelihood Unscented Kalman Filter (GM-UKF)

[۳] Structural Outliers

[۴] Generalized Maximum-Likelihood (GM)

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$X(k+1) = f\big(X(k), w(k)\big) \qquad (۱۳-۶)$$

$$\tilde{Y}(k) = h\big(X(k), v(k)\big)$$

بر خلاف روش‌های نمونه‌برداری پریودیک که در فواصل زمانی مشخص اقدام به ارسال داده‌ها می‌کنند، در روش تحریک-رویداد با بررسی شرط تحریک-رویداد[۱] و در صورت برقرار بودن آن شرط، به ارسال داده‌ها پرداخته می‌شود. در این راستا، یک متغیر منطقی $\rho(k)$ به صورت زیر تعریف می‌شود که نشان‌دهنده این است که آیا در زمان k اندازه‌گیری‌ها باید به مرکز تخمین ارسال شوند یا خیر.

$$\rho(k) = \begin{cases} 1, & \tilde{Y}(k)\ is\ transferred \\ 0, & \tilde{Y}(k)\ is\ not\ transferred \end{cases} \qquad (۱۴-۶)$$

فرض بر این است که هدررفت بسته[۲] و تأخیر زمانی در لینک ارتباطی وجود ندارد. به صورت کلی می‌توان تمام استراتژی‌های تحریک-رویداد را به صورت زیر نمایش داد.

$$\rho(k) = \begin{cases} 1, & if\ \tilde{Y}(k) \notin \Xi(k) \\ 0, & if\ \tilde{Y}(k) \in \Xi(k) \end{cases} \qquad (۱۵-۶)$$

در این رابطه، $\Xi(k)$ مجموعه تحریک[۳] نامیده می‌شود که توسط انواع استراتژی‌های تحریک-رویداد قابل طراحی است.

اطلاعاتی که در لحظه k به مرکز تخمین می‌رسد را می‌توان به صورت زیر نمایش داد.

$$\mathcal{Y}(k) = \begin{cases} \{\tilde{Y}(k)\}, & if\ \rho(k) = 1 \\ \tilde{Y}(k) \in \Xi(k), & if\ \rho(k) = 0 \end{cases} \qquad (۱۶-۶)$$

همان‌طور که در این رابطه دیده می‌شود، در صورتی که $\rho(k) = 1$ باشد، تحریک صورت گرفته و اندازه‌گیری‌های $\tilde{Y}(k)$ به مرکز تخمین ارسال می‌شوند. اما در صورتی که $\rho(k) = 0$ باشد، تحریک صورت

---

[۱] Event-Triggered Condition

[۲] Packet Dropout

[۳] Trigger Set

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

نگرفته و اندازه‌گیری‌ها ارسال نمی‌شوند. در این صورت، تنها اطلاعاتی که در مرکز تخمین وجود خواهد داشت این است که اندازه‌گیری‌ها متعلق به مجموعه تحریک $\Xi(k)$ می‌باشند یعنی $\tilde{Y}(k) \in \Xi(k)$.

مشاهداتی که تا لحظه k به مرکز تخمین می‌رسد را نیز می‌توان به صورت زیر نمایش داد.

$$\mathfrak{F}(k) \triangleq \{\mathcal{Y}(0), \dots, \mathcal{Y}(k)\} \quad (۱۷-۶)$$

با این توضیحات، بردار حالت تخمین‌زده شده، بردار حالت پیش‌بینی، ماتریس‌های کواریانس آن‌ها، خروجی پیش‌بینی شده و ماتریس کواریانس خروجی پیش‌بینی شده به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\hat{X}(k|k) = \mathbb{E}\big(X(k)\big|\mathfrak{F}(k)\big) \quad (۱۸-۶)$$

$$\hat{X}(k|k-1) = \mathbb{E}\big(X(k)\big|\mathfrak{F}(k-1)\big)$$

$$P(k|k) = cov\left(X(k) - \hat{X}(k|k)\middle|\mathfrak{F}(k)\right)$$

$$P(k|k-1) = cov\left(X(k) - \hat{X}(k|k-1)\middle|\mathfrak{F}(k-1)\right)$$

$$\hat{Y}(k|k-1) = \mathbb{E}\left(\tilde{Y}(k)\middle|\mathfrak{F}(k-1)\right)$$

$$P_Y(k|k-1) = cov\left(\tilde{Y}(k) - \hat{Y}(k|k-1)\middle|\mathfrak{F}(k-1)\right)$$

حال می‌توان مجموعه و شرط تحریک برای هر استراتژی را تعریف نمود. به طور مثال مجموعه تحریک در استراتژی مبتنی بر ابداعات (*InnoB*[۱]) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\Xi(k) = \left\{\tilde{Y}(k) \in \mathbb{R}^{n_y}\middle|\left\|C^T(k)\left(\tilde{Y}(k) - \hat{Y}(k|k-1)\right)\right\|_\infty \le \xi\right\} \quad (۱۹-۶)$$

[۱] Innovation-Based Trigger Strategy

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در این رابطه، $\xi \in \mathbb{R}^+$ آستانه تحریک[۱] ثابت بوده و $C(k)$ تجزیه چولسکی[۲] ماتریس کواریانس خروجی پیش‌بینی شده می‌باشد؛ به عبارت دیگر $C^T(k)C(k) = P_Y^{-1}(k|k-1)$ می‌باشد. n_y نیز نشان‌دهنده سایز بردار خروجی سیستم (تعداد اندازه‌گیری‌ها) است.

۶-۴-۲- استراتژی‌های تحریک-رویداد موجود

انواع استراتژی‌های تحریک رویداد که برای سیستم‌های خطی موجود می‌باشند، در جدول ۶-۱ خلاصه شده‌اند [۱۳۹]. در این جدول، آستانه تحریک تمامی روش‌ها به جز روش تصادفی با ξ نمایش داده شده و ثابت می‌باشند. در روش تصادفی، آستانه تحریک با $\xi(k)$ نمایش داده شده و در هر لحظه از زمان توسط یک توزیع یکنواخت[۳] تولید می‌شود. در روش حلقه‌باز، Y_{st} مشاهدات به دست آمده از بردار حالت سیستم پایدار بوده و Y_1 یک ماتریس وزنی ثابت است که توسط طراح تعیین می‌شود. در روش SoD، τ_k عبارت است از آخرین لحظه زمانی که اندازه‌گیری‌ها ارسال شده‌اند. Y_2 یک ماتریس وزنی ثابت است که توسط طراح تعیین می‌شود. در روش مبتنی بر کواریانس، ماتریس H ماتریس ضرب‌شده در بردار حالت در مدل مشاهدات خطی سیستم بوده و $\underline{P}$ کران پایین کواریانس خطای فیلتر کالمن در حالتی است که ارسال اطلاعات در تمامی زمان‌ها انجام شود. در روش تصادفی، $\varphi\left(\tilde{Y}(k) - \hat{Y}(k|k-1)\right)$ تابعی است که برد آن بازه $[0,1]$ می‌باشد. در روش مبتنی بر اطلاعات، D_{KL} معیار واگرایی کولبک-لیبلر[۴] بوده و $p_{tr} = P\left(X(k)\middle|\mathfrak{F}(k-1), \tilde{Y}(k)\right)$ و $p_{pr} = P\left(X(k)\middle|\mathfrak{F}(k-1)\right)$ می‌باشند.

جدول ۶-۱ انواع استراتژی‌های تحریک-رویداد برای سیستم‌های خطی

استراتژی	شرط تحریک
حلقه‌باز (OL[۵])	$\Xi(k) = \{\tilde{Y}(k) \in \mathbb{R}^M \middle\| (\tilde{Y}(k) - Y_{st})Y_1(\tilde{Y}(k) - Y_{st}) \leq \xi\}$
SoD[۶]	$\Xi(k) = \{\tilde{Y}(k) \in \mathbb{R}^M \middle\| (\tilde{Y}(k) - Y_{\tau_k})Y_2(\tilde{Y}(k) - Y_{\tau_k}) \leq \xi\}$

[۱] Trigger Threshold

[۲] Cholesky Decomposition

[۳] Uniform Distribution

[۴] Kullback-Leibler

[۵] Open-Loop

[۶] Send-on-Delta Trigger Strategy

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مبتنی بر ابداعات (*InnoB*)	$\Xi(k)=\left\{\tilde{Y}(k)\in\mathbb{R}^M\middle\vert\left\|C^T(k)\left(\tilde{Y}(k)-\hat{Y}(k\vert k-1)\right)\right\|_\infty\le\xi\right\}$
مبتنی بر کواریانس (*CovB*[1])	$\Xi(k)=\{\tilde{Y}(k)\in\mathbb{R}^M\vert H\left(P(k\vert k)-\underline{P}\right)H^T\le\xi I\}$
تصادفی[2]	$\Xi(k)=\left\{\tilde{Y}(k)\in\mathbb{R}^M\middle\vert\varphi\left(\tilde{Y}(k)-\hat{Y}(k\vert k-1)\right)\le\xi(k)\right\}$
مبتنی بر اطلاعات (*InfB*[3])	$\Xi(k)=\{\tilde{Y}(k)\in\mathbb{R}^M\vert D_{KL}(p_{tr},p_{pr})\le\xi\}$

در بین روش‌های تحریک-رویداد خطی موجود که در جدول ۶-۱ معرفی شدند، دو روش اول یعنی روش حلقه‌باز و روش *SoD* فقط قابل استفاده برای سیستم‌های خاص هستند. به طور مثال روش *SoD* را نمی‌توان برای سیستم‌های نوسانی به کار برد. بنابراین این دو روش مناسب برای سیستم‌های قدرت نمی‌باشند. در صورت خطی بودن سیستم، در روش مبتنی بر کواریانس می‌توان شرط تحریک را به صورت آفلاین بررسی نمود؛ زیرا در بررسی شرط تحریک در این روش نیازی به $\tilde{Y}(k)$ وجود ندارد. هرچند برای سیستم‌های غیرخطی این ویژگی دیگر برای روش مبتنی بر کواریانس وجود ندارد؛ زیرا محاسبه $P(k|k)$ بدون داشتن $\tilde{Y}(k)$ امکان‌پذیر نیست. همچنین در یک سیستم غیرخطی، شرط گوسی بودن را به دلیل ماهیت غیرخطی بودن سیستم نمی‌توان تضمین کرد؛ در نتیجه استفاده از روش تصادفی تنها بار محاسباتی را افزایش خواهد داد. در مورد روش مبتنی بر اطلاعات نیز محاسبه p_{tr} و p_{pr} برای یک سیستم غیرخطی بسیار دشوار می‌باشد [۱۳۹]، [۱۷۴]، [۱۷۵].

در نتیجه، مناسب‌ترین روش برای سیستم‌های قدرت با غیرخطی‌گری بالا روش مبتنی بر ابداعات می‌باشد که در این پروژه از آن استفاده خواهد شد.

۶-۴-۳- ساختار سیستم تحریک-رویداد

همان‌طور که در بخش قبل مشاهده شد، برای تصمیم‌گیری در مورد این که در لحظه k بردار اندازه‌گیری به مرکز تخمین ارسال شود یا خیر باید شرط تحریک را بررسی نمود. واضح است که این شرط باید در مبدأ (در سیستم قدرت در محل نصب *PMU*) بررسی شود. بنابراین لازم است که در مبدأ به برخی اطلاعات حاصل از تخمین (به طور مثال به $\hat{Y}(k|k-1)$ و $C(k)$ در روش مبتنی بر ابداعات) دسترسی داشت. این دسترسی از طریق دو ساختار ممکن است. در روش اول می‌توان اطلاعات مورد نیاز را در هر لحظه از مرکز تخمین به مبدأ فرستاد تا بررسی شوند. این ساختار خود بار ارتباطی را افزایش داده و از هدف کاهش بار

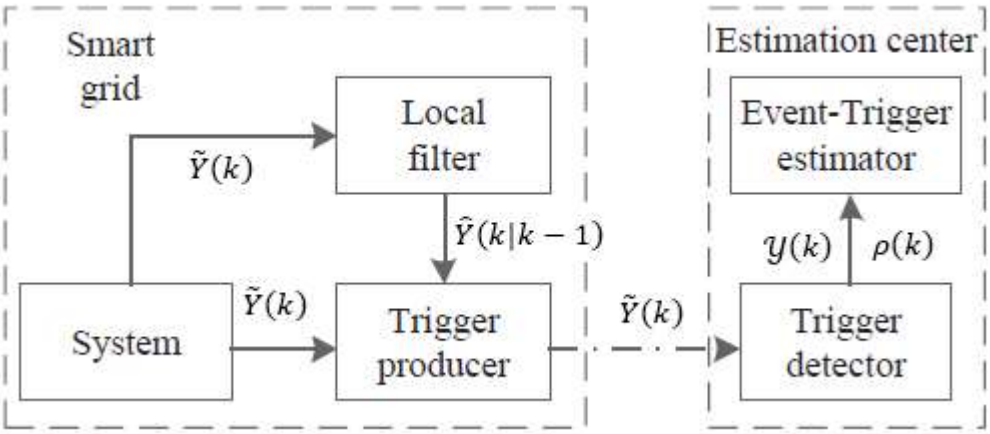
[1] Covariance-Based Trigger Strategy

[2] Stochastic Trigger Strategy

[3] Information-Based Trigger Strategy

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

ارتباطی توسط روش تحریک-رویداد منحرف می‌شود. در ساختار دیگری که در اکثر پژوهش‌ها از آن استفاده می‌شود از یک تخمین‌گر محلی در مبدأ (مکان نصب *PMU*) استفاده می‌شود. این تخمین‌گر مستقل از تخمین‌گر اصلی در مرکز تخمین عمل نموده و اطلاعات حاصل از تخمین را که برای بررسی شرط تحریک مورد نیاز است محاسبه می‌کند. از آن‌جا که قدرت پردازش در مکان نصب *PMU* پایین‌تر از مرکز تخمین می‌باشد، لازم است که تخمین‌گر محلی بار محاسباتی پایینی داشته باشد تا به صورت عملی قابل اجرا در محل نصب *PMU* باشد. با توجه به این توضیحات، ساختار انتخابی برای روش تحریک-رویداد در این پروژه، ساختار دارای تخمین‌گر محلی است که در شکل ۶-۱ نمایش داده شده است. چنان‌چه در این شکل مشاهده می‌شود، یک تخمین‌گر محلی به محاسبه اطلاعات مورد نیاز (مانند خروجی پیش‌بینی شده $\hat{Y}(k|k-1)$) برای بررسی شرط تحریک پرداخته و سپس در صورت برقراری شرط تحریک؛ اندازه‌گیری‌ها به مرکز تخمین ارسال می‌شوند.



شکل ۶-۱ ساختار سیستم تخمین حالت مبتنی بر تحریک-رویداد با تخمین‌گر محلی

۶-۴-۴- مرور پژوهش‌های موجود

همین‌طور که گفته شد، در تعداد محدودی از پژوهش‌ها از استراتژی تحریک-رویداد برای حل مسأله محدودیت‌های ارتباطی در مسأله تخمین حالت غیرخطی سیستم قدرت استفاده شده است.

به طور مثال در [۱۷۶] به تخمین حالت سیستم ۳۹ باسه مرتبه ۷ پرداخته شده است. در این پژوهش از تخمین‌گر *CKF* برای تخمین حالت غیرخطی و از روش مبتنی بر ابداعات برای تحریک-رویداد استفاده شده است. عملکرد تخمین‌گر *CKF* در این مقاله با تخمین‌گر *UKF* مقایسه شده که نشان‌گر برتری *CKF* از نظر دقت تخمین بوده است. بار ارتباطی نیز با استفاده از روش تحریک-رویداد مبتنی بر ابداعات به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در [۱۳۹] به تخمین حالت سیستم ۳۹ باسه مرتبه ۸ پرداخته شده است. در این پژوهش از فیلتر ذره‌ای برای تخمین حالت غیرخطی و از روش مبتنی بر ابداعات برای تحریک-رویداد استفاده شده است. نرخ رسیدن اطلاعات در این روش تضمین شده است که برای طراحی ساختار شبکه *ICN*[۱] مفید است. عملکرد این روش با روش *PF-I*[۲] (که به صورت پریودیک اندازه‌گیری‌ها را ارسال می‌کند) مقایسه شده و نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی (دقت بالاتر برای نرخ ارسال یکسان) این مقاله بوده است. اما از آن‌جا که بار محاسباتی فیلتر ذره‌ای در مقایسه با انواع فیلتر کالمن بسیار بالاتر می‌باشد، لازم است تا از روش‌هایی مانند معماری مبتنی بر *GPU*[۳] یا مبتنی بر *VLSI*[۴] برای کاهش بار محاسباتی فیلتر ذره‌ای استفاده کرد تا روش پیشنهادی در این مقاله قابل استفاده برای تخمین حالت زمان-واقعی سیستم قدرت باشد.

در [۱۷۷] به تخمین حالت سیستم ۱۴۵ باسه مرتبه ۷ پرداخته شده است. در این مقاله از فیلتر *CKF* برای تخمین حالت غیرخطی استفاده شده است. همان‌طور که در این مقاله مطرح شده است، فیلتر *CKF* بار محاسباتی بسیار پایین‌تری در مقایسه با فیلتر ذره‌ای دارد. از طرف دیگر در مقایسه با فیلتر *UKF* که بار محاسباتی مشابه *CKF* دارد، فیلتر *CKF* دارای پایداری عددی بهتر و دقت بالاتر می‌باشد. روش تحریک-رویداد مورد استفاده در این مقاله روش تصادفی است که همان‌طور که قبلا گفته شد روش مناسبی برای سیستم‌های غیرخطی نبوده و تنها بار محاسباتی را بالا می‌برد.

در [۱۷۸] نیز به تخمین حالت سیستم ۳۹ باسه مرتبه ۷ پرداخته شده است. در این مقاله نیز از فیلتر *CKF* برای تخمین حالت غیرخطی و از دو روش تحریک-رویداد تصادفی و مبتنی بر ابداعات استفاده شده است. مقایسه دو روش تصادفی و مبتنی بر ابداعات نشان‌گر این بوده است که روش تصادفی عملکرد کمی بهتری در مقایسه با روش مبتنی بر ابداعات داشته است. هرچند مقایسه‌ای بر روی بار محاسباتی این دو روش صورت نگرفته است.

همان‌طور که گفته شد، به منظور جلوگیری از افزایش بار ارتباطی ناشی از ارسال اطلاعات از مرکز تخمین به محل نصب *PMU*، از یک فیلتر محلی در ساختار سیستم استفاده می‌شود. چنان‌چه گفته شد، قدرت پردازش در مکان نصب *PMU* چندان بالا نبوده و نمی‌توان از تخمین‌گرهای با بار محاسباتی بالا در فیلتر محلی استفاده نمود. چنان‌چه گفته شد در [۱۳۹] از فیلتر ذره‌ای برای تخمین حالت سیستم قدرت استفاده شده است. در روش پیشنهادی [۱۳۹] هم در مرکز تخمین و هم در محل نصب *PMU* از فیلتر ذره‌ای

[۱] Information-Centric Network

[۲] Intermittent

[۳] Graphics Processing Unit

[۴] Very-Large-Scale Integration

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

استفاده شده است. برای کاهش بار محاسباتی در محل نصب *PMU*، در [۱۷۴] از روشی مشابه روش [۱۳۹] برای تخمین حالت سیستم ۳۹ باسه استفاده شده است با این تفاوت که در فیلتر محلی از تخمین‌گر *UKF* استفاده شده است. هر چند این روش نیز برای عملی بودن تخمین حالت توسط فیلتر ذره‌ای در مرکز تخمین نیاز به روش‌های پردازش موازی[۱] مانند روش‌های مبتنی بر *GPU* و *VLSI* دارد.

در [۱۷۹] به تخمین حالت یک سیستم تک‌ژنراتوره مرتبه ۴ توسط فیلتر *CKF* و روش تحریک-رویدادی مشابه *SoD* پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نشان‌گر برتری *CKF* به *UKF* از نظر دقت تخمین بوده است. همچنین روش تحریک-رویداد در این مقاله با روش ارسال پریودیک مقایسه شده و نشان‌گر کاهش قابل ملاحظه بار ارتباطی با دقت تقریبا یکسان بوده است.

در [۱۷۵] که یکی از آخرین پژوهش‌ها در این زمینه بوده و در سال ۲۰۲۱ منتشر شده است، به تخمین حالت سیستم ۳۹ باسه مرتبه ۴ توسط فیلتر *CKF* و روش تحریک-رویداد مبتنی بر ابداعات پرداخته شده است. در این مقاله برای غلبه بر غیرگوسی بودن سیستم که ناشی از تبدیل غیرخطی است، از قانون مکعبی کروی-شعاعی[۲] مرتبه ۳ برای طراحی فیلتر *CKF* استفاده شده است. تحلیل پایداری تصادفی تخمین‌گر تحریک-رویداد پیشنهادی در این مقاله نیز توسط استخراج رابطه بین عملکرد تخمین و نرخ ارسال و پارامتر طراحی انجام شده است.

۶-۵- مروری بر روش‌های تخمین حالت غیرخطی توزیع‌یافته در سیستم قدرت

۶-۵-۱- معرفی روش توزیع‌یافته و مزایای آن

بیشتر پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت دینامیکی سیستم قدرت دارای ساختار متمرکز می‌باشند. در ساختار متمرکز، تمامی اندازه‌گیری‌های به دست آمده از سیستم به یک مرکز تخمین منتقل شده و عملیات تخمین حالت سراسری با استفاده از این اطلاعات پیاده‌سازی می‌شود. اما این ساختار متمرکز دارای مشکلاتی به شرح زیر می‌باشد.

- از آن‌جا که سیستم قدرت یک سیستم مقیاس-وسیع می‌باشد، بار محاسباتی و بار ارتباطی بالایی در مرکز تخمین به وجود می‌آید که می‌تواند منجر به مشکلات فراوانی شود [۱۸۰]. در یک سیستم قدرت

[۱] Parallel Processing

[۲] Spherical-Radial

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

با مقیاس وسیع، بردار اندازه‌گیری‌ها ابعاد بسیار بزرگی خواهند داشت. بنابراین لازم است که حجم بسیار بزرگی از داده‌ها از سراسر شبکه به مرکز تخمین انتقال یابند. در این صورت، لینک‌های ارتباطی بسیار پرهزینه‌ای مورد نیاز خواهند بود. انتقال داده در حجم زیاد و در فواصل طولانی احتمال تلفات داده را افزایش خواهد داد. علاوه بر این، بردار متغیرهای حالت در شبکه برق هوشمند با مقیاس وسیع نیز ابعاد بزرگی خواهد داشت. در نتیجه، بار محاسباتی تخمین‌گر حالت دینامیکی در مرکز تخمین بسیار بالا بوده و ممکن است سرعت پایین تخمین‌گر مشکلاتی را در تخمین آنلاین و زمان-واقعی سیستم ایجاد کند.

- مشکل دیگری که در تخمین حالت با ساختار متمرکز وجود دارد این است که در صورت از کار افتادن و یا مورد حمله واقع شدن مرکز تخمین، عملیات تخمین حالت دینامیکی با شکست مواجه می‌شود [۱۸۰].

- مورد دیگری که می‌تواند در تخمین حالت متمرکز مشکل‌ساز شود این است که ممکن است به دلایل مربوط به حفاظت حریم خصوصی، امکان جمع‌آوری و انتقال تمامی اطلاعات شبکه به مرکز تخمین بسیار مشکل باشد [۱۸۰].

بنابراین رویکرد دیگری به نام رویکرد توزیع‌یافته در برخی از پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در تخمین حالت توزیع‌یافته چند-ناحیه‌ای سیستم قدرت، سیستم به چندین ناحیه جغرافیایی بدون همپوشانی تقسیم می‌شود. برای هر ناحیه یک تخمین‌گر حالت محلی مدنظر قرار می‌گیرد تا بتواند با تبادل اطلاعات با تخمین‌گرهای در همسایگی خود، به تخمین حالت سیستم قدرت بپردازد. در این رویکرد، نیازی به یک واحد مرکزی برای جمع‌آوری تمامی اطلاعات نمی‌باشد. بنابراین، امنیت، تاب‌آوری و حفاظت حریم خصوصی در این ساختار بهبود می‌یابد [۱۸۰].

از طرف دیگر، مقررات‌زدایی[۱] صنعت برق، نیاز به تخمین حالت توزیع‌یافته و مانیتورینگ مقیاس-وسیع را بیش از پیش افزایش خواهد داد [۱۸۱].

به طور خلاصه، مزایای زیر را می‌توان برای تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت ذکر نمود.

[۱] Deregulation

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

- به دلیل تقسیم سیستم به چند ناحیه، بار محاسباتی و بار ارتباطی برای هر تخمین‌گر محلی در مقایسه با روش متمرکز کاهش می‌یابد. بنابراین احتمال تلفات داده کاهش یافته، بار محاسباتی در هر تخمین‌گر پایین آمده و در نتیجه تخمین حالت زمان-واقعی سیستم امکان‌پذیرتر می‌شود.

- بر خلاف روش متمرکز که تمامی نتایج حاصل از تخمین حالت در یک مرکز واحد وجود دارد، تخمین حالت سیستم در هر تخمین‌گر به صورت محلی محاسبه می‌شود. در نتیجه، در صورت از کار افتادن و یا مورد حمله واقع شدن یکی از تخمین‌گرهای محلی، دسترسی در سایر تخمین‌گرها وجود دارد.

با وجود تمام مزایایی که روش توزیع‌یافته دارد، در تعداد کمی از پژوهش‌ها برای تخمین حالت سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته است. با این توضیحات، در این پروژه به طراحی یک تخمین‌گر حالت دینامیکی توزیع‌یافته برای سیستم قدرت پرداخته شده است.

۶-۵-۲- مرور پژوهش‌های موجود

تاکنون پژوهش‌های کمی در زمینه تخمین حالت غیرخطی سیستم قدرت از ساختار توزیع‌یافته به جای ساختار متمرکز استفاده نموده‌اند. در همین تعداد محدود پژوهش‌ها نیز نخمین حالت دینامیکی زمان-واقعی بدان معنا که در این پروژه مد نظر قرار دارد انجام نشده است. در مسأله مد نظر این پروژه، فرض بر این است که شبکه هوشمند مجهز به تعداد قابل توجهی *PMU* بوده و با استفاده از اندازه‌گیری‌های فازورهای ولتاژ و جریان باس‌ها توسط *PMU*ها به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم در شرایط نوسانات پس از وقوع اغتشاش و با نرخ بالا (برابر با نرخ نمونه‌برداری *PMU*ها) پرداخته می‌شود. در حالی که در هیچ‌یک از پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت که در این بخش بررسی می‌شوند، این مسأله مد نظر قرار نگرفته است. در این پژوهش‌ها بردار حالتی که باید تخمین زده شود شامل دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌ها می‌باشند. دینامیک سیستم نیز یک دینامیک کند در حالت شبه ماندگار[۱] می‌باشد که توسط تغییرات ناگهانی بار تعیین می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نیز شامل دامنه ولتاژ، توان تزریقی و شارش توان (توسط اسکادا یا *RTU*[۲]) می‌باشند. برخی از این پژوهش‌ها نیز در کنار اسکادا یا *RTU* از تعداد کمی *PMU* برای اندازه‌گیری دامنه و زاویه فاز برخی از باس‌ها استفاده کرده‌اند.

در ادامه به مرور این پژوهش‌ها پرداخته شده است.

---

[۱] Quasi Steady-State

[۲] Remote Terminal Unit

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در [۱۸۲] و [۱۸۳] از یک ساختار غیرکامل به جای ساختار کاملا توزیع‌یافته[۱] استفاده شده است. در این روش‌ها، بر خلاف روش کاملا توزیع‌یافته که نیازی به واحد مرکزی تخمین ندارد، اطلاعات هر تخمین‌گر محلی به یک مرکز واحد ارسال می‌شود.

در [۱۸۴]، یک روش تخمین حالت توزیع‌یافته با استفاده از روش اجماع-ابداعات[۲] طراحی شده است. در این پژوهش، همگرایی نتایج هر تخمین‌گر محلی به تخمین حالت سراسری در صورت برقرار بودن برخی شرایط اثبات شده است

در [۱۸۵]، یک الگوریتم تخمین حالت توزیع‌یافته بر اساس روش *ADMM*[۳] ارائه شده و همگرایی تخمین محلی به تخمین سراسری حتی در صورت عدم رؤیت‌پذیری محلی اثبات شده است.

در [۱۸۶]، سیستم قدرت به چند ناحیه بدون همپوشانی تقسیم شده و در هر ناحیه از یک تخمین‌گر *UKF* استفاده شده است. ارتباط بین تخمین‌گرهای محلی توسط روش اجماع انجام شده است.

در [۱۸۷] از روش‌های بهینه‌سازی برای تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت استفاده شده است.

در [۱۸۸] که در سال ۲۰۲۰ منتشر شده است، از تخمین‌گر *UIF*[۴] در فضای اطلاعات[۵] برای تخمین حالت محلی استفاده شده است. سپس از روش توزیع‌یافته بازگشتی برای به دست آوردن تخمین سراسری در هر تخمین‌گر محلی استفاده شده است. نتایج این تخمین‌گر با تخمین‌گر *MAP*[۶] مبتنی بر خطی‌سازی مقایسه شده که نشان‌گر برتری این تخمین‌گر بوده است.

در [۱۸۰] که در سال ۲۰۲۱ منتشر شده است، سیستم قدرت به چند ناحیه تقسیم شده و تخمین حالت توزیع‌یافته به روش اجماع-ابداعات انجام شده است. در این پژوهش، بر خلاف تمامی پژوهش‌های قبلی، گراف سیستم ثابت در نظر گرفته نشده و بین مجموعه‌ای متناهی از گراف‌ها سوئیچ می‌کند. همگرایی

---

[۱] Fully-Distributed

[۲] Consensus+Innovation

[۳] Alternating Direction Method of Multipliers

[۴] Unscented Information Filter

[۵] Information Space

[۶] Maximum a Posteriori

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

تخمین محلی به تخمین سراسری، توسط بسط دوجمله‌ای ضرب ماتریسی[۱] و نظریه گراف جبری[۲] اثبات شده است.

در [۱۸۹] که در سال ۲۰۲۱ منتشر شده است، از یک روش کاملا توزیع‌یافته و مقاوم بر اساس معیار بیشینه درست‌نمایی برای تخمین حالت سیستم قدرت با فرض توزیع t برای نویز *PMU*ها استفاده شده است. همچنین از روش شکافت ماتریسی[۳] برای محاسبه معکوس ماتریس‌های دارای ابعاد بزرگ به صورت توزیع‌یافته استفاده شده است که منجر به کاهش بار محاسباتی می‌شود.

۶-۶- خلاءهای پژوهشی

در این بخش، با مرور پژوهش‌های پیشین در زمینه هر دو روش تحریک-رویداد و روش توزیع‌یافته، لزوم پرداختن به این دو مسأله در این پروژه تبیین می‌شود.

با مطالعه پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت مبتنی بر استراتژی تحریک-رویداد، می‌توان دید که با وجود این که تاکنون روش‌های مختلفی در زمینه تخمین حالت خطی بر اساس استراتژی تحریک-رویداد انجام شده است. اما تحقیقات در زمینه طراحی تخمین‌گر غیرخطی بر اساس استراتژی تحریک-رویداد در شبکه هوشمند ادامه دارد؛ زیرا همان‌طور که گفته شد در مسأله تخمین حالت دینامیکی در شبکه هوشمند، علاوه بر این‌که دقت تخمین بسیار مهم می‌باشد، مسأله تأخیر نیز از اهمیت بالایی برای تخمین زمان-واقعی برخوردار می‌باشد. تأخیر کلی در فرآیند تخمین حالت زمان-واقعی [۱۹۰] شامل تأخیر *PMU*ها، تأخیر شبکه ارتباطی و تأخیر در مرکز تخمین می‌باشد. بنابراین برای کاهش تأخیر کلی در فرآیند تخمین زمان-حقیقی می‌توان به تلاش برای طراحی تخمین‌گر با بار محاسباتی پایین‌تر با هدف کاهش تأخیر در مرکز تخمین پرداخت. برخی از روش‌های موجود در این زمینه مانند [۱۴۰]، [۱۲۷]، [۱۳۹]، [۱۷۴] از فیلتر ذره‌ای و برخی از پژوهش‌ها مانند [۱۱۸]، [۱۸۸]، [۱۳۵]، [۱۱۶]، [۱۴۵]، [۱۳۴]، [۱۷۶]، [۱۷۹]، [۱۷۷] از فیلترهای *UKF* و *CKF* در مرکز تخمین استفاده کرده‌اند. اما همان‌طور که می‌دانیم فیلتر ذره‌ای بار محاسباتی بسیار بالایی در مقایسه با تخمین‌گرهای مبتنی بر فیلتر کالمن دارد و پیاده‌سازی آن به صورت زمان-واقعی برای تخمین حالت سیستم قدرت نیاز به روش‌های مانند پردازش موازی دارد. تخمین‌گرهای *UKF* و *CKF* نیز با این که بار محاسباتی پایین‌تری در مقایسه با فیلتر ذره‌ای دارند، ممکن است با توجه به بالا بودن ابعاد سیستم قدرت مقیاس-وسیع به صورت زمان-واقعی قابل پیاده‌سازی نباشند. با این توضیحات، در فصل چهارم این پروژه به طراحی یک روش تخمین حالت بر اساس خطی‌سازی

[۱] Binomial Expansion of Matrix Products

[۲] Algebraic Graph Theories

[۳] Matrix Splitting

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

سمبلیک سیستم پرداخته شده است تا بتوان بار محاسباتی در مرکز تخمین را تا حد امکان کاهش داد. علاوه بر این‌ها، در فصل چهارم نشان داده شده است که در صورت در نظر گرفتن فازورهای ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده توسط *PMU*ها به عنوان ورودی و خروجی سیستم، به مدل فضای حالت خاصی از سیستم غیرخطی خواهیم رسید که نویز اندازه‌گیری ولتاژ توسط *PMU*ها در داخل هر دو تابع غیرخطی فرآیند و مشاهدات قرار داشته و به صورت غیرجمعی در مدل فضای حالت وارد می‌شود. بنابراین بر خلاف پژوهش‌های موجود در این زمینه مانند [۱۳۹] تا [۱۹۱] که نویز فرآیند و مشاهدات را به صورت جمعی و دارای ماتریس کواریانس ثابت در نظر گرفته‌اند، در این پروژه به طراحی یک تخمین‌گر حالت دینامکی غیرخطی مبتنی بر استراتژی تحریک-رویداد با قابلیت مقابله با این نویز غیرجمعی پرداخته شده است. فصل چهارم این گزارش به این طراحی اختصاص داده شده است.

با مطالعه پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت نیز می‌توان دید که پژوهش‌های بسیار کمی در این زمینه انجام شده است. در همین تعداد محدود پژوهش‌ها نیز نخمین حالت دینامیکی آنلاین بدان معنا که در این پروژه مد نظر قرار دارد انجام نشده است و خلاء پژوهشی در این زمینه وجود دارد. در مسأله مد نظر این پروژه، فرض بر این است که شبکه هوشمند مجهز به تعداد قابل توجهی *PMU* بوده و با استفاده از اندازه‌گیری‌های فازورهای ولتاژ و جریان باس‌ها توسط *PMU*ها به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم در شرایط نوسانات پس از وقوع اغتشاش و با نرخ بالا (برابر با نرخ نمونه‌برداری *PMU*ها) پرداخته می‌شود. در حالی که در هیچ‌یک از پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت که در این بخش بررسی می‌شوند، این مسأله مد نظر قرار نگرفته است. در این پژوهش‌ها بردار حالتی که باید تخمین زده شود شامل دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌ها می‌باشند. دینامیک سیستم نیز یک دینامیک کند در حالت شبه ماندگار می‌باشد که توسط تغییرات ناگهانی بار تعیین می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نیز شامل دامنه ولتاژ، توان تزریقی و شارش توان (توسط اسکادا یا *RTU*) می‌باشند. برخی از این پژوهش‌ها نیز در کنار اسکادا یا *RTU* از تعداد کمی *PMU* برای اندازه‌گیری دامنه و زاویه فاز برخی از باس‌ها استفاده کرده‌اند.

به طور مثال در [۱۸۴] و [۱۸۷] تنها از اندازه‌گیری‌ها اسکادا استفاده شده است.

در [۱۸۸] از اندازه‌گیری‌های اسکادا و *PMU* به صورت ترکیبی برای تخمین بردار حالت شامل دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌ها استفاده شده است. دینامیک سیستم نیز یک دینامیک کند می‌باشد که توسط تغییرات ناگهانی بار تعیین می‌شود. برای حل مشکل پایین‌تر بودن نرخ نمونه‌برداری اسکادا در مقایسه با *PMU*، مقدار میانگین زمانی اندازه‌گیری‌های *PMU*ها در هر دوره نمونه‌برداری اسکادا محاسبه شده و به عنوان اندازه گیری *PMU* در نظر گرفته شده است. واضح است که نرخ نمونه‌برداری در این روش برابر با نرخ اسکادا و بسیار پایین‌تر از نرخ *PMU* می‌باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در [۱۸۶] نیز متغیرهای حالت برابر با دامنه و فاز ولتاژ باس‌ها در نظر گرفته شده‌اند که دینامیک آن‌ها توسط تغییر بار سیستم تعیین می‌شود. اندازه‌گیری‌های سیستم نیز شامل دامنه ولتاژ، توان تزریقی در هر باس و شارش توان بین باس‌ها در نظر گرفته شده است. در این پژوهش تنها سه *PMU* برای سیستم ۱۱۸ باسه در نظر گرفته شده است.

در [۱۸۰]، [۱۸۲] و [۱۸۳] نیز متغیرهای حالت برابر با دامنه و فاز ولتاژ باس‌ها در نظر گرفته شده‌اند. سپس با استفاده از یک تقریب بر اساس تحلیل پخش بار *DC*، بردار حالتی که باید تخمین زده شود به زاویه فاز ولتاژ برخی از باس‌های شبکه کاهش یافته و مدل مشاهدات نیز خطی می‌گردد. اندازه‌گیری‌ها در این پژوهش‌ها شامل دامنه ولتاژ و توان تزریقی و شارش توان توسط *RTU* و دامنه و زاویه فاز ولتاژ توسط تعداد کمی *PMU* می‌باشد.

تنها در یکی از پژوهش‌های اخیر که در سال ۲۰۱۹ انجام شده است [۱۹۲]، حالت نوسانی سیستم پس از وقوع اغتشاش در نظر گرفته شده است؛ هر چند در این پژوهش نیز تنها به تخمین پارامترهای مدهای نوسانی سیستم شامل فرکانس‌ها و ضرایب میرایی مدها پرداخته شده است. در این پژوهش، عنوان شده است که تخمین آنلاین پارامترهای نوسانات شبکه اطلاعات مهمی برای جلوگیری از ناپایداری و خاموشی شبکه به دست می‌دهد. بنابراین، با استفاده از اطلاعات *PMU*ها و تخمین‌گر *EKF* به تخمین پارامترهای نوسانان سیستم یعنی تخمین فرکانس و ضرایب میرایی مدهای نوسانی سیستم قدرت پرداخته شده است. برای کاهش بار محاسباتی و افزایش امنیت، از یک ساختار کاملا توزیع‌یافته بر اساس روش انتشار[۱] استفاده شده است. کارآیی این روش هم توسط داده‌های شبیه‌سازی‌شده و هم با استفاده از داده‌های واقعی شرکت برق *State Grid Jiangsu Electric Power Company* در چین بررسی شده است.

همان‌طور که توضیح داده شد، هیچ‌یک از پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت که در این بخش بررسی شدند، به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم قدرت در شرایط نوسان پس از وقوع اغتشاش نپرداخته‌اند. در این پژوهش‌ها تنها به تخمین دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌ها در حالت شبه ماندگار پرداخته شده است. اندازه‌گیری‌ها در این پژوهش‌ها نیز توسط اسکادا یا *RTU* و بدون *PMU* (یا با تعداد کمی *PMU*) به دست آمده‌اند.

با این توضیحات، در این پروژه به طراحی یک تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی توزیع‌یافته برای تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم (شامل متغیرهای دینامیکی ژنراتورها، سیستم تحریک و توربین) پرداخته شده است. فصل پنجم این گزارش به این طراحی اختصاص داده شده است. در این طراحی، فرض بر این است که تمامی باس‌های متصل به ژنراتور در شبکه مجهز به *PMU* بوده و فازورهای جریان و ولتاژ این

[۱] Diffusion

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

باس‌ها با نرخ نمونه‌برداری بالا اندازه‌گیری می‌شوند. سیستم قدرت نیز به چند ناحیه بدون همپوشانی تقسیم شده و در هر ناحیه از یک *PDC* برای جمع‌آوری اندازه‌گیری‌های *PMU*های درون آن ناحیه و تخمین متغیرهای حالت سیستم استفاده می‌شود. فرض بر این است که هر *PDC* تنها با *PDC*های در همسایگی خود به تبادل اطلاعات می‌پردازد. در این طراحی همانند [۱۴۵] فرض شده است که دینامیک شبکه انتقال بسیار سریع‌تر از دینامیک ژنراتورها می‌باشد. بنابراین، ولتاژها و جریان‌های تمامی باس‌های شبکه به صورت لحظه‌ای تغییر کرده و می‌توان آن‌ها را به عنوان متغیرهای جبری در نظر گرفت. پس از وقوع یک اغتشاش، سیستم قدرت دچار نوسان شده و متغیرهای دینامیکی سیستم (شامل متغیرهای دینامیکی ژنراتورها، سیستم تحریک و توربین) دچار نوسانات می‌شوند. با استفاده از مدل فضای حالت سیستم قدرت که در فصل اول ارائه شد و با استفاده از اندازه‌گیری‌های *PMU*ها به تخمین متغیرهای حالت سیستم با نرخ نمونه‌برداری بالا (برابر با نرخ *PMU*) پرداخته خواهد شد.

۶-۷- جمع‌بندی

در این فصل، مسأله تخمین حالت غیرخطی و نحوه حل آن توسط تئوری بیز شرح داده شد. سپس روش‌های موجود تخمین حالت بهینه و تقریبی مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، تعریف ریاضی روش تحریک-رویداد و استراتژی‌های تحریک-رویداد موجود بررسی شدند. با بررسی این استراتژی‌ها این نتیجه به دست آمد که استراتژی تحریک-رویداد مبتنی بر ابداعات برای سیستم‌های با غیرخطی‌گری بالا مناسب می‌باشد. بنابراین این استراتژی برای استفاده در مسأله طراحی تخمین‌گر حالت دینامیکی غیرخطی مبتنی بر تحریک-رویداد در این پروژه انتخاب شد. سپس دو ساختار موجود برای روش تحریک-رویداد معرفی شده و روش مناسب برای این پروژه یعنی استفاده از یک تخمین‌گر محلی در محل نصب *PMU* به جای ارسال اطلاعات مورد نیاز در هر لحظه از مرکز تخمین به مبدأ انتخاب شد. در ادامه، مروری بر پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت دینامیکی سیستم قدرت با استفاده از روش تحریک-رویداد انجام شد. سپس، با معرفی روش تخمین حالت توزیع‌یافته در سیستم قدرت و بررسی مزایای آن، به مرور پژوهش‌های اخیر در زمینه تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت پرداخته شد. در انتها، خلاءهای پژوهشی در هر دو زمینه روش تحریک-رویداد و روش توزیع‌یافته بررسی و لزوم پرداختن به این دو مسأله در این پروژه تبیین شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل هفتم: طراحی تخمین‌گر حالت غیرخطی به روش تحریک–رویداد

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۷-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا به معرفی مسأله تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت شامل مدل فضای حالت سیستم و تعریف ریاضی مسأله پرداخته می‌شود. سپس نشان داده می‌شود که مدل فضای حالت این سیستم یک مدل غیرخطی خاص می‌باشد که دارای نویز غیرجمعی هم در مدل فرآیند و هم در مدل مشاهدات است. در ادامه، با خطی‌سازی سیستم نشان داده می‌شود که در سیستم خطی‌شده، نویز فرآیند و مشاهدات دارای همبستگی می‌باشند. سپس به طراحی تخمین‌گر غیرخطی مناسب با قابلیت مقابله با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات پرداخته می‌شود. در روش پیشنهادی، با استفاده از خطی‌سازی سیستم به روش سمبلیک و آفلاین که در فصل دوم بدان پرداخته شده است، طراحی تخمین‌گر با بار محاسباتی پایین‌تر در مقایسه با روش‌های دیگر انجام شده است. در ادامه، به طراحی تخمین‌گر تحریک-رویداد مناسب برای سیستم پرداخته می‌شود. در انتهای فصل نیز به تعیین مقدار واریانس نویز *PMU*ها پرداخته شده است.

چنان‌چه پیش از این گفته شد، تخمین حالت دینامیکی در شبکه هوشمند بر اساس اندازه‌گیری‌های به دست آمده از *PMU*ها انجام می‌شود. بدین‌صورت که اندازه‌گیری‌های *PMU*ها به یک *PDC* (مرکز تخمین) ارسال شده و با انجام محاسبات مربوط به تخمین‌گر، به تخمین بردار حالت سیستم در هر لحظه پرداخته می‌شود. در مسأله تخمین حالت دینامیکی در شبکه هوشمند، علاوه بر این‌که دقت تخمین بسیار مهم می‌باشد، مسأله تأخیر نیز از اهمیت بالایی برای تخمین زمان-واقعی برخوردار می‌باشد. نرخ بالای اندازه‌گیری‌های *PMU*ها و ارسال اندازه‌گیری‌های آن‌ها به مراکز تخمین حالت در تمام بازه‌های زمانی نمونه‌برداری منجر به افزایش بار ارتباطی و همچنین افزایش تأخیر در عملیات تخمین زمان-واقعی خواهد شد. چنان‌چه در گزارش مرحله ۱ گفته شد، یکی از چالش‌های موجود در زمینه تخمین حالت دینامیکی زمان-واقعی بر اساس سنکروفازورها این است که این نوع تخمین حالت نیازمند قابلیت اطمینان[۱] بالا و تأخیر زمانی کوچک در لینک‌های ارتباطی بین شبکه هوشمند و مراکز تخمین حالت می‌باشد. برای ارتباط بین *PMU*ها و *PDC* در شبکه هوشمند می‌توان از شبکه ارتباطی اطلاعات-محور (*ICN*) استفاده نمود [۱۳۹]. این شبکه نسل جدیدی از شبکه ارتباطی است که ارتباطات در آن به جای تکیه بر آدرس‌دهی بر اساس *IP*، با توجه به تولید یا مصرف اطلاعات مورد علاقه کاربرها شکل می‌گیرند. هدف این شبکه‌ها، اعلان محتواهای موجود در شبکه، جستجوی محتوای مورد علاقه کاربرها، و در نهایت تحویل محتوای مد نظر به متقاضی است. به عبارتی عملگرهای اصلی در این شبکه‌ها، اعلان و انتشار محتوا و در نهایت استخراج محتوا

[۱] Reliability

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

است. این محتواها در قالب مجموعه‌ای از قطعات داده نامگذاری‌شده هستند که به کمک نامشان آدرس‌دهی می‌شوند [۱۹۳].

با استفاده از شبکه *ICN* و تمرکز بر روی اطلاعات/داده‌ها به جای آدرس میزبان، می‌توان از تراکم بین شبکه به *PDC* جلوگیری نمود. در نتیجه، عامل اصلی در افزایش تأخیر در چنین شبکه‌ای، حجم بالای اندازه‌گیری‌های *PMU*ها خواهد بود [۱۳۹].

در [۱۹۰]، برای تخمین زمان-واقعی شبکه هوشمند با ساختار *ICN*، بیشترین تأخیر مجاز در کل فرآیند تخمین حالت زمان-واقعی برابر با ۱۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. تأخیر کلی در فرآیند تخمین حالت زمان-واقعی از بخش‌های مختلفی تشکیل شده که در شکل ۷-۱ نشان داده شده‌اند.

PMU		Transmission	Estimation center	
Signal acquisition	Data processing	Telco network delay	Data frame time-alignment	State Estimation
30ms	1ms	$T_{Tr}+T_{Qu}$	0-20ms	1-5ms

Latency time

شکل ۷-۱ تأخیر کلی در تخمین حالت زمان-واقعی شبکه هوشمند

چنان‌چه در این شکل مشاهده می‌شود، تأخیر کلی شامل تأخیر *PMU*ها، تأخیر شبکه ارتباطی و تأخیر در مرکز تخمین می‌باشد. برای کاهش تأخیر کلی در فرآیند تخمین زمان-حقیقی می‌توان در راستای کاهش تأخیر در مرکز تخمین (طراحی تخمین‌گر با بار محاسباتی پایین‌تر) و یا کاهش تأخیر در شبکه ارتباطی تلاش نمود. در این فصل، برای کاهش تأخیر در مرکز تخمین از یک روش مبتنی بر خطی‌سازی استفاده شده است که در مقایسه با روش‌های مبتنی بر *UKF*، *CKF* و *PF* بار محاسباتی پایین‌تری دارد.

از سوی دیگر، همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تأخیر شبکه ارتباطی متشکل از تأخیر صف‌بندی T_{Qu} و تأخیر انتقال T_{Tr} است. T_{Tr} و T_{Qu} هر دو متأثر از پهنای باند هستند. T_{Qu} علاوه بر پهنای باند متأثر از حجم داده انتقالی نیز می‌باشد. بنابراین برای کاهش تأخیر در شبکه ارتباطی دو راه وجود دارد. یک راه حل بدیهی افزایش پهنای باند می‌باشد؛ اما مسائلی مانند هزینه بالا و نیاز به مدت زمان بسیار طولانی برای ارتقاء تمامی لینک‌های ارتباطی، مؤید این مطلب هستند که رویکرد کاهش حجم داده‌های انتقالی (کاهش تأخیر صف‌بندی) راه حل مناسب‌تری می‌باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

برای کاهش حجم داده‌های انتقالی، می‌توان تنها در برخی بازه‌های زمانی که اندازه‌گیری‌ها حاوی اطلاعات مفیدی برای به‌روزرسانی بردار تخمین حالت باشند، به ارسال اطلاعات پرداخت. این روش، تخمین حالت بر اساس تحریک-رویداد نام دارد. چنان‌چه گفته شد، تاکنون روش‌های مختلفی در زمینه تخمین حالت خطی بر اساس استراتژی تحریک-رویداد انجام شده است. اما تحقیقات در زمینه طراحی تخمین‌گر غیرخطی بر اساس استراتژی تحریک-رویداد در شبکه هوشمند ادامه دارد.

در این فصل به طراحی تخمین‌گر حالت غیرخطی به روش تحریک-رویداد برای سیستم قدرت پرداخته می‌شود. در این طراحی، سعی بر این است که با استفاده از خطی‌سازی سمبلیک به کاهش بار محاسباتی تخمین‌گر و با استفاده از روش تحریک-رویداد به کاهش تأخیر در ارسال اطلاعات پرداخت.

در این فصل ابتدا به تعریف مسأله تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت شامل تشکیل مدل فضای حالت سیستم و تعریف ریاضی مسأله پرداخته می‌شود. نشان داده می‌شود که بر خلاف تمام پژوهش‌های پیشین (به طور مثال [۱۳۹] تا [۱۹۱])، مدل فضای حالت سیستم یک مدل غیرخطی خاص با نویز غیرجمعی در مدل فرآیند و مشاهدات می‌باشد. سپس، با استفاده از خطی‌سازی سیستم، نشان داده می‌شود که نویز فرآیند و مشاهدات سیستم خطی‌شده دارای همبستگی می‌باشند. در نتیجه، در این فصل به طراحی یک تخمین‌گر مبتنی بر خطی‌سازی با قابلیت مقابله با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات پرداخته شده است. انتظار می‌رود که روش طراحی شده در این فصل، در مقایسه با سایر پژوهش‌ها که این همبستگی را در نظر نگرفته‌اند (به طور مثال در [۱۳۹] تا [۱۹۱]) دقت بالاتری در تخمین حالت سیستم قدرت داشه باشد. در این پژوهش‌ها، نویز فرآیند و مشاهدات سیستم غیرخطی قدرت به صورت جمعی و با ماتریس کواریانس ثابت در نظر گرفته شده‌اند که در این فصل نشان داده شده فرض صحیحی نبوده و بنابراین برای پیاده‌سازی در عمل مناسب نمی‌باشند. همچنین انتظار می‌رود روش تخمین حالت طراحی شده در این پروژه بار محاسباتی بسیار پایین‌تری در مقایسه با روش‌های موجود مانند [۱۴۰]، [۱۲۷]، [۱۳۹]، [۱۷۴] (که از فیلتر ذره‌ای استفاده کرده‌اند) و [۱۱۸]، [۱۸۸]، [۱۳۵]، [۱۱۶]، [۱۴۵]، [۱۳۴]، [۱۷۶]، [۱۷۹]، [۱۷۷] (که از فیلترهای *UKF* و *CKF* استفاده کرده‌اند) داشته باشد؛ زیرا در روش پیشنهادی این پروژه با استفاده از خطی‌سازی سیستم به روش سمبلیک که در فصل دوم بدان پرداخته شد، طراحی تخمین‌گر با بار محاسباتی پایین‌تر در مقایسه با روش‌های دیگر مبتنی بر خطی‌سازی انجام شده است. در این فصل از یک روش مبتنی بر خطی‌سازی برای طراحی تخمین‌گر استفاده شده است؛ با این تفاوت که از خطی‌سازی سمبلیک برای کاهش بار محاسباتی و همچنین محاسبه مدل خطی دقیق و تحلیلی سیستم استفاده شده است. سپس به طراحی روش تحریک-رویداد مناسب برای مسأله مدنظر پرداخته شده است. در انتهای فصل نیز به تعیین مقدار واریانس نویز *PMU*ها پرداخته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

نوآوری‌های موجود در این فصل را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.

- نشان دادن غیرجمعی بودن نویز در مدل فرآیند و مشاهدات سیستم قدرت در صورت در نظر گرفتن ولتاژ و جریان به عنوان ورودی و خروجی سیستم، که در هیچ یک از پژوهش‌های پیشین به آن پرداخته نشده است.
- خطی‌سازی سیستم و نشان دادن وجود همبستگی بین نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده
- ارائه یک تخمین‌گر حالت مبتنی بر خطی‌سازی برای مقابله با این همبستگی
- طراحی تخمین‌گر غیرخطی تحریک-رویداد برای سیستم خطی‌شده دارای همبستگی

۷-۲- مسأله تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت

۷-۲-۱- مدل فضای حالت سیستم

چنان‌چه در فصل اول گفته شد، معادلات فضای حالت غیرخطی سیستم قدرت با بردار حالت $X(k)$ و ورودی $U(k)$ را می‌توان توسط مدل زمان-گسسته زیر نمایش داد.

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k)\big) \qquad (۱-۷)$$

$$Y(k) = h\big(X(k), U(k)\big)$$

در این روابط، $Y(k)$ بردار خروجی واقعی سیستم و $U(k)$ بردار ورودی واقعی سیستم می‌باشد. $X(k)$ نیز چنان‌چه قبلا گفته شد، بردار حالت سیستم است که به صورت زیر (شامل تمامی متغیرهای دینامیکی سیستم) در نظر گرفته شده است.

$$X(k) = [E'_q(k) \quad \psi_{1d}(k) \quad E'_d(k) \quad \psi_{2d}(k) \quad \delta(k) \quad \omega(k) \quad E_{FD}(k) \qquad (۲-۷)$$

$$R_F(k) \quad V_R(k) \quad T_M(k) \quad P_{SV}(k)]^T$$

که در آن،

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$E'_q(k) = [E'_{q1}(k) \quad ... \quad E'_{qM}(k)] \tag{۳-۷}$$

می‌باشد. در واقع، $E'_q(k)$ متشکل از $E'_{qi}(k)$ها برای تمامی ژنراتورها (ژنراتور 1ام تا ژنراتور Mام) می‌باشد. سایر عناصر بردار حالت $X(k)$ نیز به صورت مشابه تعریف می‌شوند. چنان‌چه مشاهده می‌شود، تعداد کل عناصر بردار حالت $X(k)$ برابر با $11 \times M$ می‌باشد.

چنان چه قبلا گفته شد، با نگاهی به روابط (۴-۵) تا (۴-۹) می‌توان دریافت که جریان باس‌ها $I_i(k)\angle\gamma_i(k)$ و متغیرهای دینامیکی در لحظه $k+1$ توابع صریحی از ولتاژ باس‌ها $V_i(k)\angle\theta_i(k)$ و متغیرهای دینامیکی در لحظه k می‌باشند. بنابراین، می‌توان مشابه [۱۳۹] تا [۱۹۱] جریان ژنراتورها را به عنوان خروجی سیستم و ولتاژ باس‌های متصل به ژنراتورها را به عنوان ورودی سیستم (ورودی مجازی) در نظر گرفت. با این توضیحات، بردار ورودی $U(k)$ و خروجی سیستم $Y(k)$ به صورت زیر انتخاب می‌شوند.

$$U(k) = [V_1(k) \quad ... \quad V_M(k) \quad \theta_1(k) \quad ... \quad \theta_M(k)]^T \tag{۴-۷}$$

$$Y(k) = [I_1(k) \quad ... \quad I_M(k) \quad \gamma_1(k) \quad ... \quad \gamma_M(k)]^T$$

توابع $f(.)$ و $h(.)$ نیز توابعی غیرخطی شناخته‌شده هستند که از معادلات سیستم قدرت به دست می‌آیند. تابع $f(.)$ از روابط دینامیکی (۴-۵) تا (۴-۸) به دست می‌آید. تابع $h(.)$ نیز از معادلات سیستم و رابطه بین متغیرهای حالت و مقادیر اندازه‌گیری‌شده سیستم به صورت زیر به دست می‌آید.

$$h\big(X(k), U(k)\big) = [I_1(k) \quad ... \quad I_M(k) \quad \gamma_1(k) \quad ... \quad \gamma_M(k)]^T \tag{۵-۷}$$

که $I_i(k)$ و $\gamma_i(k)$ نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$I_i(k) = \sqrt{I_{di}^2(k) + I_{qi}^2(k)} \tag{۶-۷}$$

$$\gamma_i(k) = tan^{-1}\left(\frac{-I_{di}(k)}{I_{qi}(k)}\right) + \delta_i(k)$$

در این رابطه، $I_{di}(k)$ و $I_{qi}(k)$ را می‌توان توسط معادلات غیرخطی (۴-۹) نوشت.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

چنان‌چه در گزارش مرحله ۱ این پروژه شرح داده شد، اندازه‌گیری‌های *PMU*ها مانند اندازه‌گیری‌های سایر تجهیزات اندازه‌گیری، دارای مقادیری از خطا می‌باشند. انواع خطای اندازه‌گیری در *PMU*ها را می‌توان به چهار دسته نویز، داده بد، خطای پارامتر و خطای توپولوژی دسته‌بندی نمود [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]. در این میان، یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در کاهش کیفیت داده‌های فازوری، نویز اندازه‌گیری است که در این پروژه به آن پرداخته شده است. نویز همان خطای رندوم اندازه‌گیری است که به علت محدودیت دقت تجهیزات اندازه‌گیری و لینک‌های ارتباطی به وجود می‌آید. در محل نصب *PMU* در پست برق، تجهیزات متعدد اندازه‌گیری و فشارقوی وجود دارد که منجر به تولید نویزهای مختلفی می‌شوند. این نویزها در هنگام اندازه‌گیری ولتاژ و جریان توسط ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری که به *PMU* متصل شده‌اند، خود را نشان می‌دهند. به طور معمول در تحقیقات فرض می‌شود که نویز و خطای اندازه‌گیری دارای توزیع تصادفی گوسی است. این فرض در [۳۰] و [۳۱] برای داده‌های فازوری سامانه *WAMS* مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که فرض نویز گوسی برای داده‌های اندازه‌گیری فازروی معتبر است.

با توجه به این توضیحات، بردار خروجی و ورودی اندازه‌گیری‌شده سیستم قدرت (فازور ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده توسط *PMU*ها) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\tilde{U}(k) = U(k) + \eta_U(k) \tag{۷-۷}$$

$$\tilde{Y}(k) = Y(k) + \eta_Y(k)$$

در این روابط، $U(k)$ و $Y(k)$ ورودی و خروجی واقعی سیستم یعنی مقادیر واقعی فازورهای ولتاژ و جریان هستند. $\tilde{U}(k)$ و $\tilde{Y}(k)$ نیز برابر با ورودی و خروجی اندازه‌گیری‌شده سیستم یعنی به ترتیب فازور ولتاژ و فازور جریان اندازه‌گیری شده توسط *PMU*ها می‌باشند. $\eta_U(k) \sim \mathcal{N}(0, Q_U)$ و $\eta_Y(k) \sim \mathcal{N}(0, Q_Y)$ نیز نویز اندازه‌گیری *PMU*ها با توزیع گوسی و میانگین صفر و ماتریس کواریانس Q_U و Q_Y هستند. در مورد مقادیر کواریانس نویزها در بخش ۷-۵ توضیح داده شده است.

با توجه به این که مقادیر واقعی $U(k)$ و $Y(k)$ در دسترس نبوده و تنها مقادیر اندازه‌گیری‌شده $\tilde{U}(k)$ و $\tilde{Y}(k)$ در دسترس می‌باشند، می‌توان مدل فضای حالت سیستم را به صورت زیر در نظر گرفت.

$$X(k+1) = f\left(X(k), \tilde{U}(k)\right) = f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) \tag{۸-۷}$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\tilde{Y}(k) = h\left(X(k), \tilde{U}(k)\right) + \eta_Y(k) = h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) + \eta_Y(k) \quad (۹-۷)$$

چنان‌چه مشاهده می‌شود، این مدل یک مدل خاص از سیستم غیرخطی می‌باشد که بر خلاف پژوهش‌های موجود در این زمینه مانند [۱۳۹] تا [۱۹۱] که نویز فرآیند و مشاهدات را به صورت جمعی و دارای ماتریس کواریانس ثابت در نظر گرفته‌اند، هم در مدل فرآیند و هم در مدل مشاهدات دارای نویز غیرجمعی می‌باشد. در بخش ۴-۳-۱ با خطی‌سازی سیستم نشان داده خواهد شد که سیستم خطی‌شده دارای همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات می‌باشد.

۷-۲-۲- تعریف مسأله

سیستم قدرت با فضای حالت به دست آمده در بخش قبل به صورت زیر را در نظر بگیرید.

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) \quad (۱۰-۷)$$

$$\tilde{Y}(k) = h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) + \eta_Y(k)$$

در این سیستم، مقدار اولیه بردار حالت سیستم که با $X(0)$ نمایش داده می‌شود از تحلیل پخش بار سیستم که در فصل اول شرح داده شد به دست می‌آید. بردار حالت تخمین‌زده شده سیستم در زمان k را نیز می‌توان با $\hat{X}(k|k)$ نمایش داد. $\hat{X}(0|0)$ به صورت تصادفی و با تابع چگالی احتمال $P\big(X(0)\big)$ و به صورت کاملا مستقل از نویزهای فرآیند و مشاهدات فرض می‌شود.

با این توضیحات، می‌توان مسأله مدنظر را به صورت زیر تعریف نمود.

مسأله تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت: هدف در این مسأله عبارت است از تخمین مقدار $X(k)$ (محاسبه $\hat{X}(k|k)$) با استفاده از مجموعه مشاهدات تا زمان k. در این مسأله فرض بر این است که $P\big(X(0)\big)$، تابع چگالی احتمال $\eta_U(k)$، تابع چگالی احتمال $\eta_Y(k)$، تابع غیرخطی f و تابع غیرخطی h همگی در هر لحظه از زمان کاملا شناخته شده هستند. در این مسأله، مجموعه مشاهدات تا زمان k را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$Z(k) = \{\tilde{Y}(1), \tilde{Y}(2), \dots, \tilde{Y}(k)\} \quad (۱۱-۷)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۷-۳- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر خطی‌سازی

در این بخش به طراحی تخمین‌گر حالت غیرخطی بر اساس خطی‌سازی تحلیلی سیستم پرداخته می‌شود. بدین‌منظور ابتدا تعاریف زیر ارائه می‌شوند.

$$Z(k) = \{\tilde{Y}(1), \tilde{Y}(2), \dots, \tilde{Y}(k)\} \quad (۱۲-۷)$$

$$\hat{X}(k|k) \triangleq \mathbb{E}\big(X(k)|Z(k)\big) \quad (۱۳-۷)$$

$$\hat{X}(k|k-1) \triangleq \mathbb{E}\big(X(k)|Z(k-1)\big) \quad (۱۴-۷)$$

$$P(k|k) \triangleq cov\left(X(k) - \hat{X}(k|k)|Z(k)\right) \quad (۱۵-۷)$$

$$P(k|k-1) \triangleq cov\left(X(k) - \hat{X}(k|k-1)|Z(k-1)\right) \quad (۱۶-۷)$$

$$\hat{Y}(k|k-1) \triangleq \mathbb{E}\left(\tilde{Y}(k)|Z(k-1)\right) \quad (۱۷-۷)$$

$$P_Y(k|k-1) \triangleq cov\left(\tilde{Y}(k) - \hat{Y}(k|k-1)|Z(k-1)\right) \quad (۱۸-۷)$$

۷-۳-۱- خطی‌سازی و وجود همبستگی

برای طراحی تخمین‌گر در این فصل، از خطی‌سازی تحلیلی استفاده شده است. بدین منظور ابتدا بسط سری تیلور مرتبه اول تابع چندمتغیره $f(x,y)$ حول نقاط a و b به صورت زیر معرفی می‌شود [۱۹۴].

$$f(x,y) \sim f(a,b) + f'_x(a,b)(x-a) + f'_y(a,b)(y-b) \quad (۱۹-۷)$$

همان‌طور که در بخش ۴-۲-۲ گفته شد، مدل فرآیند سیستم را می‌توان به صورت زیر نوشت.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) \quad (۲۰-۷)$$

حال با استفاده از بسط سری تیلور مرتبه اول، مدل فرآیند سیستم حول $\hat{X}(k|k)$ و $\widetilde{U}(k)$ به صورت زیر خطی می‌شود.

$$X(k+1) \approx f\left(\hat{X}(k|k), \widetilde{U}(k)\right) \quad (۲۱-۷)$$

$$+\frac{\partial f}{\partial X}\Big|_{\hat{X}(k|k),\widetilde{U}(k)}\left(X(k)-\hat{X}(k|k)\right)$$

$$+\frac{\partial f}{\partial U}\Big|_{\hat{X}(k|k),\widetilde{U}(k)}\left(U(k)-\widetilde{U}(k)\right)$$

$$+\frac{\partial f}{\partial \eta_U}\Big|_{\hat{X}(k|k),\widetilde{U}(k)}(\eta_U(k)-0)$$

$$\approx \frac{\partial f}{\partial X}\Big|_{\hat{X}(k|k),\widetilde{U}(k)}X(k)$$

$$+\frac{\partial f}{\partial U}\Big|_{\hat{X}(k|k),\widetilde{U}(k)}U(k)$$

$$+\frac{\partial f}{\partial \eta_U}\Big|_{\hat{X}(k|k),\widetilde{U}(k)}\eta_U(k)$$

بنابراین مدل فرآیند سیستم به صورت زیر خطی‌سازی می‌شود.

$$X(k+1) = \hat{F}(k)X(k) + \hat{B}(k)U(k) + w(k) \quad (۲۲-۷)$$

که در آن، $w(k) = \hat{G}(k)\eta_U(k)$ نویز فرآیند بوده و ماتریس‌های $\hat{F}(k)$ و $\hat{B}(k)$، $\hat{G}(k)$ به صورت زیر تعریف شده‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{F}(k) = \frac{\partial f}{\partial X} \Big|_{\hat{X}(k|k),\tilde{U}(k)} \quad (۲۳-۷)$$

$$\hat{B}(k) = \frac{\partial f}{\partial U} \Big|_{\hat{X}(k|k),\tilde{U}(k)}$$

$$\hat{G}(k) = \frac{\partial f}{\partial \eta_U} \Big|_{\hat{X}(k|k),\tilde{U}(k)}$$

مدل غیرخطی خروجی سیستم نیز در بخش ۴-۲-۲ به صورت زیر به دست آمد.

$$\tilde{Y}(k) = h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) + \eta_Y(k) \quad (۲۴-۷)$$

به روش مشابه، خطی‌سازی مدل خروجی به صورت زیر و حول $\hat{X}(k|k-1)$ و $\tilde{U}(k)$ انجام شده و ماتریس‌های سیستم خطی‌شده و نویز خروجی $v(k)$ به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\tilde{Y}(k) = \hat{H}(k)X(k) + \hat{D}(k)U(k) + v(k) \quad (۲۵-۷)$$

$$\hat{H}(k) = \frac{\partial h}{\partial X} \Big|_{\hat{X}(k|k-1),\tilde{U}(k)}$$

$$\hat{D}(k) = \frac{\partial h}{\partial U} \Big|_{\hat{X}(k|k-1),\tilde{U}(k)}$$

$$\hat{E}(k) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U} \Big|_{\hat{X}(k|k-1),\tilde{U}(k)}$$

$$v(k) = \hat{E}(k)\eta_U(k) + \eta_Y(k)$$

چنان‌چه مشاهده می‌شود، نویز فرآیند و مشاهدات سیستم به ترتیب برابر با $w(k)$ و $v(k)$ می‌باشند. حال مقادیر میانگین و ماتریس کواریانس این نویزها محاسبه شده و همچنین نشان داده می‌شود که این نویزها دارای همبستگی می‌باشند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\mathbb{E}\{w(k)\} = \mathbb{E}\{\hat{G}(k)\eta_U(k)\} = \hat{G}(k)\mathbb{E}\{\eta_U(k)\} = 0 \quad (۲۶-۷)$$

$$\mathbb{E}\{v(k)\} = \mathbb{E}\{\hat{E}(k)\eta_U(k) + \eta_Y(k)\} = \hat{E}(k)\mathbb{E}\{\eta_U(k)\} + \mathbb{E}\{\eta_Y(k)\} = 0$$

$$Q(k) = \mathbb{E}\{w(k)w^T(k)\} = \hat{G}(k)Q_U\hat{G}^T(k)$$

$$R(k) = \mathbb{E}\{v(k)v^T(k)\} = \hat{E}(k)Q_U\hat{E}^T(k) + Q_Y$$

$$S(k) = \mathbb{E}\{w(k)v^T(k)\} = \hat{G}(k)Q_U\hat{E}^T(k)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود نویزهای فرآیند و مشاهدات در این سیستم دارای میانگین صفر بوده و به ترتیب ماتریس کواریانس‌های $Q(k)$ و $R(k)$ دارند. مشاهده می‌شود که در سیستم خطی‌شده بر خلاف [۱۳۹] تا [۱۹۱] ماتریس کواریانس نویزهای فرآیند و مشاهدات ثابت نمی‌باشند. علاوه بر این می‌توان مشاهده نمود که این دو نویز مستقل از یکدیگر نبوده و دارای همبستگی $S(k) \neq 0$ می‌باشند. در صورتی که این همبستگی در روابط تخمین‌گر مبتنی بر خطی‌سازی در نظر گرفته نشود، می‌تواند منجر به خطای تخمین بزرگ و یا حتی واگرایی تخمین‌گر گردد. همان‌طور که گفته شد، هیچ یک از پژوهش‌های پیشین در این زمینه، نویزهای دارای همبستگی در سیستم خطی‌شده را در نظر نگرفته‌اند. بنابراین در ادامه، به ارائه روشی برای رفع همبستگی می‌پردازیم.

۷-۳-۲- رفع همبستگی

در این بخش، به ارائه روشی برای رفع همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات به منظور کاهش خطای تخمین در سیستم خطی‌شده پرداخته شده است. بدین منظور یک معادله شبه فرآیند[۱] مشابه [۱۹۵] به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) + T(k)\Big(\tilde{Y}(k) - h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) - \quad (۲۷-۷)$$

[۱] Pseudo Process Equation

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$\eta_Y(k)\big)$

این رابطه را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) - T(k)h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) + \quad (۲۸-۷)$$

$$T(k)\tilde{Y}(k) - T(k)\eta_Y(k)$$

حال با تعریف تابع غیرخطی f^* به صورت زیر

$$f^*\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) = f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) - T(k)h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) \quad (۲۹-۷)$$

می‌توان مدل فرآیند غیرخطی جدید را به صورت زیر نوشت.

$$X(k+1) = f^*\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) + T(k)\tilde{Y}(k) - T(k)\eta_Y(k) \quad (۳۰-۷)$$

با خطی‌سازی این مدل، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$X(k+1) = \left(\hat{F}(k) - T(k)\hat{H}(k)\right)X(k) + \left(\hat{B}(k) - T(k)\hat{D}(k)\right)U(k) + \quad (۳۱-۷)$$

$$T(k)\tilde{Y}(k) + w(k) - T(k)v(k)$$

حال می‌توان معادله فرآیند خطی‌شده جدید را به صورت زیر نوشت.

$$X(k+1) = F^*(k)X(k) + B^*(k)U(k) + T(k)\tilde{Y}(k) + w^*(k) \quad (۳۲-۷)$$

$$F^*(k) = \hat{F}(k) - T(k)\hat{H}(k)$$

$$B^*(k) = \hat{B}(k) - T(k)\hat{D}(k)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$w^*(k) = w(k) - T(k)v(k)$$

که در آن، $F^*(k)$ و $B^*(k)$ ماتریس‌های سیستم خطی‌شده جدید بوده و $w^*(k)$ نویز فرآیند جدید با میانگین صفر و ماتریس کواریانس $Q^*(k)$ به صورت زیر می‌باشد.

$$Q^*(k) = \mathbb{E}\{w^*(k)w^{*T}(k)\} = \mathbb{E}\left\{\big(w(k) - T(k)v(k)\big)\big(w(k) - T(k)v(k)\big)^T\right\} = \quad (۳۳-۷)$$

$$\mathbb{E}\{w(k)w^T(k)\} + T(k)\mathbb{E}\{v(k)v^T(k)\}T^T(k) - \mathbb{E}\{w(k)v^T(k)\}T^T(k) -$$

$$T(k)\mathbb{E}\{v(k)w^T(k)\} = Q(k) + T(k)R(k)T^T(k) - S(k)T^T(k) - T(k)S^T(k) =$$

$$Q(k) - S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$$

حال باید $T(k)$ به نحوی انتخاب گردد که همبستگی بین نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم جدید برابر با صفر شود. در این صورت، فرضیات در نظر گرفته شده برای تخمین‌گر مبتنی بر خطی‌سازی برای سیستم با مدل فرآیند جدید برقرار بوده و می‌توان به طراحی تخمین‌گر بر اساس خطی‌سازی پرداخت. با انتخاب $T(k) = S(k)R^{-1}(k)$، تابع همبستگی بین نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم جدید به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$S^*(k) = \mathbb{E}\{w^*(k)v^T(k)\} = \mathbb{E}\big\{\big(w(k) - T(k)v(k)\big)v^T(k)\big\} = \mathbb{E}\{w(k)v^T(k)\} - \quad (۳۴-۷)$$

$$\mathbb{E}\{T(k)v(k)v^T(k)\} = S(k) - T(k)R(k) = S(k) - S(k)R^{-1}(k)R(k) = 0$$

چنان‌چه مشاهده می‌شود، در صورت انتخاب $T(k) = S(k)R^{-1}(k)$، تابع همبستگی بین این دو نویز برابر با صفر بوده و از یکدیگر مستقل می‌باشند. در نتیجه انتظار می‌رود که در صورت استفاده از مدل فرآیند جدید سیستم در طراحی مرحله پیش‌بینی تخمین‌گر، خطای تخمین در مقایسه با روش‌های موجود کمتر شود.

۷-۳-۳- الگوریتم پیشنهادی تخمین‌گر غیرخطی با در نظر گرفتن همبستگی

با این توضیحات می‌توان مراحل پیش‌بینی و به روزرسانی تخمین‌گر پیشنهادی با قابلیت مقابله با همبستگی را به صورت زیر ارائه نمود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مرحله پیش‌بینی:

$$\hat{X}(k+1|k) = f^*\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)\tilde{Y}(k) \quad (۳۵-۷)$$

$$P(k+1|k) = F^*(k)P(k|k)F^{*T}(k) + Q^*(k)$$

که در آن

$$f^*\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) = f\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) - T(k)h\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) \quad (۳۶-۷)$$

$$F^*(k) = \hat{F}(k) - T(k)\hat{H}(k)$$

$$Q^*(k) = Q(k) - S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$$

مرحله به‌روزرسانی:

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)r(k+1) \quad (۳۷-۷)$$

$$P(k+1|k+1) = \left(I - K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1|k)$$

که در آن $r(k+1)$ مانده و $K(k+1)$ بهره کالمن می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$r(k+1) = \tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1|k) \quad (۳۸-۷)$$

$$K(k+1) = P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)\right)^{-1}$$

$\hat{Y}(k+1|k)$ نیز خروجی پیش‌بینی شده است که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{Y}(k+1|k) = h\left(\hat{X}(k+1|k), \tilde{U}(k+1)\right) \quad (۳۹-۷)$$

خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت مبتنی بر خطی‌سازی با قابلیت مقابله با همبستگی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۷-۱ خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت مبتنی بر خطی‌سازی با قابلیت مقابله با همبستگی

مرحله پیش‌بینی در زمان $k+1$	
محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\tilde{U}(k)$ و $\hat{X}(k\|k)$	$\hat{F}(k) = \frac{\partial f}{\partial X}\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{G}(k) = \frac{\partial f}{\partial \eta_U}\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{H}(k) = \frac{\partial h}{\partial X}\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{E}(k) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U}\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$R(k) = \hat{E}(k)Q_U\hat{E}^T(k) + Q_Y$ $S(k) = \hat{G}(k)Q_U\hat{E}^T(k)$ $T(k) = S(k)R^{-1}(k)$ $\hat{X}(k+1\|k) = f^*\left(\hat{X}(k\|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)\tilde{Y}(k)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام	$F^*(k) = \hat{F}(k) - T(k)\hat{H}(k)$ $Q(k) = \hat{G}(k)Q_U\hat{G}^T(k)$ $Q^*(k) = Q(k) - S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$ $P(k+1\|k) = F^*(k)P(k\|k)F^{*T}(k) + Q^*(k)$
مرحله به‌روزرسانی در زمان $k+1$	
محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k+1\|k)$ و $\tilde{U}(k+1)$	$\hat{H}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial X}\|_{\hat{x}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$ $\hat{E}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U}\|_{\hat{x}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$
محاسبه مانده و بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{Y}(k+1\|k) = h\left(\hat{X}(k+1\|k), \tilde{U}(k+1)\right)$ $r(k+1) = \tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$R(k+1) = \hat{E}(k+1)Q_U\hat{E}^T(k+1) + Q_Y$ $K(k+1) = P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)\right)^{-1}$	
$\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k) + K(k+1)r(k+1)$	**محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام**
$P(k+1\|k+1) = \left(I - K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$	**تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام**

چنان‌چه در جدول ۷-۱ مشاهده می‌شود، در مرحله پیش‌بینی الگوریتم پیشنهادی نیاز به محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده یعنی $\hat{F}(k)$، $\hat{G}(k)$، $\hat{H}(k)$ و $\hat{E}(k)$ و در مرحله به‌روزرسانی نیاز به محاسبه ماتریس‌های $\hat{H}(k+1)$ و $\hat{E}(k+1)$ می‌باشد. از آن‌جا که محاسبه این ژاکوبین‌ها به خصوص در سیستم‌های دارای ابعاد بالا مانند سیستم ۶۸ باسه در هر بازگشت بسیار زمان‌بر می‌باشد، در این پروژه از روش خطی‌سازی سمبلیک برای کاهش بار محاسباتی استفاده شده است. بدین صورت که خطی‌سازی سیستم ابتدا به صورت آفلاین انجام شده و این ماتریس‌ها به صورت سمبلیک و آفلاین به دست می‌آیند. سپس در هنگام شبیه‌سازی روش تخمین حالت پیشنهادی، نقطه کار سیستم در هر بازگشت محاسبه شده و مقادیر متناظر در مقادیر سمبلیک ماتریس‌های سیستم خطی‌شده جایگذاری می‌شوند. بدین ترتیب بار محاسباتی روش پیشنهادی کاهش بسیار زیادی خواهد یافت.

۷-۴- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر خطی‌سازی و روش تحریک-رویداد

چنان‌چه گفته شد به علت نرخ بالای نمونه‌برداری *PMU*ها، ارسال اندازه‌گیری‌های آن‌ها به *PDC* در تمام بازه‌های زمانی منجر به افزایش تأخیر صف‌بندی و در نتیجه افزایش تأخیر در عملیات تخمین زمان-واقعی خواهد شد. برای کاهش این تأخیر، می‌توان تنها در زمان‌هایی که اندازه‌گیری‌ها حاوی اطلاعات مفیدی برای به‌روزرسانی بردار تخمین حالت باشند، به ارسال اندازه‌گیری‌ها پرداخت. این روش، تخمین حالت بر اساس تحریک-رویداد نام دارد.

در اکثر پژوهش‌هایی که در زمینه تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت انجام شده است (به طور مثال در [۱۰۷] تا [۵۴])، محدودیت‌های ارتباطی و تأخیر نادیده گرفته شده‌اند. در این میان، در تعداد محدودی از پژوهش‌ها (در [۱۷۶]، [۱۳۹]، [۱۷۴]، [۱۷۸]، [۱۷۵]، [۱۷۷]) از استراتژی تحریک-رویداد

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

برای حل مسأله محدودیت‌های ارتباطی در سیستم قدرت استفاده شده است. در تمامی این پژوهش‌ها نیز مدل فضای حالت سیستم قدرت دارای نویز جمعی فرآیند و مشاهدات و با ماتریس کواریانس ثابت در نظر گرفته شده که همان‌طور که نشان داده شد فرض صحیحی نبوده و در صورت اعمال به سیستم واقعی ممکن است منجر به خطای تخمین بسیار بزرگ و یا حتی واگرایی گردند.

با این توضیحات در طراحی تخمین‌گر مبتنی بر تحریک-رویداد در این فصل، بدین مسأله نیز پرداخته شده است.

حال به تعریف ریاضی مسأله شرح داده شده پرداخته می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم، بر خلاف روش‌های نمونه‌برداری پریودیک که در فواصل زمانی مشخص اقدام به ارسال داده‌ها می‌کنند، در روش تحریک-رویداد با بررسی شرط تحریک-رویداد و در صورت برقرار بودن آن شرط به ارسال داده‌ها پرداخته می‌شود. در این راستا، یک متغیر منطقی $\rho(k)$ به صورت زیر تعریف می‌شود که نشان‌دهنده این است که آیا باید در زمان k مشاهدات به مرکز تخمین ارسال شوند یا خیر.

$$\rho(k)=\begin{cases}1, & \tilde{Y}(k)\ is\ transferred\\ 0, & \tilde{Y}(k)\ is\ not\ transferred\end{cases} \qquad (۴۰-۷)$$

فرض بر این است که هدررفت بسته و تأخیر زمانی در لینک‌های ارتباطی وجود ندارد. چنان‌چه در فصل سوم گفته شد، می‌توان تمام استراتژی‌های تحریک-رویداد را به صورت کلی زیر نمایش داد.

$$\rho(k)=\begin{cases}1, & if\ \tilde{Y}(k)\notin \Xi(k)\\ 0, & if\ \tilde{Y}(k)\in \Xi(k)\end{cases} \qquad (۴۱-۷)$$

در این رابطه، $\Xi(k)$ مجموعه تحریک نامیده می‌شود که توسط انواع استراتژی‌های تحریک-رویداد قابل طراحی است.

مشاهداتی که در لحظه k از PMUها به PDC (مرکز تخمین) می‌رسد را می‌توان به صورت زیر نمایش داد.

$$\mathcal{Y}(k)=\begin{cases}\{\tilde{Y}(k)\}, & if\ \rho(k)=1\\ \tilde{Y}(k)\in \Xi(k), & if\ \rho(k)=0\end{cases} \qquad (۴۲-۷)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

همان‌طور که در این رابطه دیده می‌شود، در صورتی که $\rho(k) = 1$ باشد، تحریک صورت گرفته و مشاهدات $\tilde{Y}(k)$ به مرکز تخمین ارسال می‌شوند. اما در صورتی که $\rho(k) = 0$ باشد، تحریک صورت نگرفته و مشاهدات ارسال نمی‌شوند. در این صورت، تنها اطلاعاتی که در مرکز تخمین وجود خواهد داشت این است که مشاهدات متعلق به مجموعه تحریک $\Xi(k)$ می‌باشند یعنی $\tilde{Y}(k) \in \Xi(k)$.

حال می‌توان اطلاعاتی را که تا لحظه k به مرکز تخمین می‌رسد، به صورت زیر نمایش داد.

$$\mathfrak{F}(k) \triangleq \{\mathcal{Y}(0), \dots, \mathcal{Y}(k)\} \quad (۴۳-۷)$$

با این توضیحات، بردار حالت تخمین‌زده شده، بردار حالت پیش‌بینی، ماتریس‌های کواریانس خطای آن‌ها، خروجی پیش‌بینی شده و ماتریس کواریانس خطای خروجی پیش‌بینی شده به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\hat{X}(k|k) = \mathbb{E}\{X(k)|\mathfrak{F}(k)\} \quad (۴۴-۷)$$

$$\hat{X}(k|k-1) = \mathbb{E}\{X(k)|\mathfrak{F}(k-1)\}$$

$$P(k|k) = cov\{X(k) - \hat{X}(k|k)|\mathfrak{F}(k)\}$$

$$P(k|k-1) = cov\{X(k) - \hat{X}(k|k-1)|\mathfrak{F}(k-1)\}$$

$$\hat{Y}(k|k-1) = \mathbb{E}\{\tilde{Y}(k)|\mathfrak{F}(k-1)\}$$

$$P_Y(k|k-1) = cov\{\tilde{Y}(k) - \hat{Y}(k|k-1)|\mathfrak{F}(k-1)\}$$

همان‌طور که در فصل سوم نتیجه‌گیری شد، مناسب‌ترین استراتژی تحریک-رویداد برای سیستم‌های قدرت با غیرخطی‌گری بالا روش مبتنی بر ابداعات می‌باشد. مجموعه تحریک در استراتژی مبتنی بر ابداعات را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\Xi(k) = \left\{\tilde{Y}(k) \in \mathbb{R}^{2M} \middle| \left\| C^T(k)\left(\tilde{Y}(k) - \hat{Y}(k|k-1)\right)\right\|_\infty \leq \xi\right\} \quad (۴۵-۷)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در این رابطه، $\xi \in \mathbb{R}^+$ آستانه تحریک ثابت بوده و $C(k)$ تجزیه چولسکی ماتریس کواریانس خروجی پیش‌بینی شده می‌باشد؛ به عبارت دیگر $C^T(k)C(k) = P_Y^{-1}(k|k-1)$ می‌باشد. $2M$ نیز نشان‌دهنده سایز بردار خروجی سیستم (تعداد اندازه‌گیری‌ها)در سیستم قدرت است.

همان‌طور که در فصل قبل گفته شد، بررسی شرط تحریک در مبدأ (در سیستم قدرت در محل نصب *PMU*) انجام می‌شود. بنابراین لازم است که در مبدأ به $\hat{Y}(k|k-1)$ و $C(k)$ دسترسی داشت. این دسترسی از طریق دو ساختار ممکن است. در روش اول می‌توان $\hat{Y}(k|k-1)$ و $C(k)$ را در هر بازه نمونه‌برداری از مرکز تخمین به مبدأ فرستاد تا بررسی شوند. این ساختار خود بار ارتباطی را افزایش داده و از هدف کاهش بار ارتباطی توسط روش تحریک-رویداد منحرف می‌شود. در ساختار دیگری که در اکثر پژوهش‌ها از آن استفاده می‌شود از یک تخمین‌گر محلی در مبدأ (مکان نصب *PMU*) استفاده می‌شود. این تخمین‌گر محلی مستقل از تخمین‌گر اصلی در مرکز تخمین عمل نموده و اطلاعات حاصل از تخمین را که برای بررسی شرط تحریک مورد نیاز است محاسبه می‌کند و سپس در صورت برقراری شرط تحریک؛ اندازه‌گیری‌ها به مرکز تخمین ارسال می‌شوند.

با توجه به این توضیحات، در این فصل نیز از یک تخمین‌گر محلی در محل نصب *PMU* و یک تخمین‌گر مرکزی در *PDC* استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت در هر یک از این تخمین‌گرها در ادامه ارائه شده است.

۷-۴-۱- الگوریتم پیشنهادی در تخمین‌گر محلی

مراحل پیش‌بینی و به روزرسانی تخمین‌گر پیشنهادی محلی با قابلیت مقابله با همبستگی به صورت زیر ارائه می‌شوند.

مرحله پیش‌بینی تخمین‌گر محلی

$$\hat{X}(k+1|k) = f^*\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)\tilde{Y}(k) \quad (۴۶-۷)$$

$$P(k+1|k) = F^*(k)P(k|k)F^{*T}(k) + Q^*(k)$$

که در آن

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$f^*\left(\hat{X}(k|k),\tilde{U}(k)\right)=f\left(\hat{X}(k|k),\tilde{U}(k)\right)-T(k)h\left(\hat{X}(k|k),\tilde{U}(k)\right) \quad (۴۷-۷)$$

$$F^*(k)=\hat{F}(k)-T(k)\hat{H}(k)$$

$$Q^*(k)=Q(k)-S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$$

مرحله به‌روزرسانی تخمین‌گر محلی

$$\hat{X}(k+1|k+1)=\hat{X}(k+1|k)+K(k+1)r(k+1) \quad (۴۸-۷)$$

$$P(k+1|k+1)=\left(I-K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1|k)$$

که در آن $r(k+1)$ مانده و $K(k+1)$ بهره کالمن می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$r(k+1)=\tilde{Y}(k+1)-\hat{Y}(k+1|k) \quad (۴۹-۷)$$

$$K(k+1)=P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1)+R(k+1)\right)^{-1}$$

خروجی پیش‌بینی $\hat{Y}(k+1|k)$ و ماتریس کواریانس آن نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\hat{Y}(k+1|k)=h\left(\hat{X}(k+1|k),\tilde{U}(k+1)\right) \quad (۵۰-۷)$$

$$P_Y(k+1|k)=\hat{H}(k+1)P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1)+R(k+1)$$

با داشتن $\hat{Y}(k+1|k)$ و $P_Y(k+1|K)$، شرط تحریک به صورت زیر بررسی می‌شود و در صورتی که $\rho(k+1)=1$ باشد، اندازه‌گیری‌های PMUها در زمان $k+1$ به تخمین‌گر مرکزی ارسال می‌شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$C^T(k+1)C(k+1) = P_Y^{-1}(k+1|k) \qquad (۵۱-۷)$$

$$\rho(k+1) = \begin{cases} 1, & \left\| C^T(k+1)\left(\tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1|k)\right)\right\|_\infty > \xi \\ 0, & \left\| C^T(k+1)\left(\tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1|k)\right)\right\|_\infty \le \xi \end{cases}$$

خلاصه الگوریتم پیشنهادی برای تخمین‌گر محلی در جدول ۷-۲ ارائه شده است.

جدول ۷-۲ خلاصه الگوریتم پیشنهادی در تخمین‌گر محلی

مرحله پیش‌بینی در زمان $k+1$	
$\hat{F}(k) = \frac{\partial f}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{G}(k) = \frac{\partial f}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{H}(k) = \frac{\partial h}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{E}(k) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$	**محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k\|k)$ و $\tilde{U}(k)$**
$R(k) = \hat{E}(k)Q_U\hat{E}^T(k) + Q_Y$ $S(k) = \hat{G}(k)Q_U\hat{E}^T(k)$ $T(k) = S(k)R^{-1}(k)$ $\hat{X}(k+1\|k) = f^*\left(\hat{X}(k\|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)\tilde{Y}(k)$	**محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام**
$F^*(k) = \hat{F}(k) - T(k)\hat{H}(k)$ $Q(k) = \hat{G}(k)Q_U\hat{G}^T(k)$ $Q^*(k) = Q(k) - S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$ $P(k+1\|k) = F^*(k)P(k\|k)F^{*T}(k) + Q^*(k)$	**محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام**
مرحله به‌روزرسانی در زمان $k+1$	
$\hat{H}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$ $\hat{E}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$	**محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k+1\|k)$ و $\tilde{U}(k+1)$**

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پیش‌بینی خروجی و محاسبه ماتریس کواریانس آن در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{Y}(k+1\|k) = h\left(\hat{X}(k+1\|k), \tilde{U}(k+1)\right)$ $P_Y(k+1\|k) = \hat{H}(k+1)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)$
بررسی شرط تحریک و محاسبه $\rho(k+1)$	$C^T(k+1)C(k+1) = P_Y^{-1}(k+1\|k)$ $\rho(k+1) = \begin{cases} 1, & \left\|C^T(k+1)\left(\tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)\right\|_\infty > \xi \\ 0, & \left\|C^T(k+1)\left(\tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)\right\|_\infty \le \xi \end{cases}$
محاسبه مانده و بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام	$r(k+1) = \tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)$ $R(k+1) = \hat{E}(k+1)Q_U\hat{E}^T(k+1) + Q_Y$ $K(k+1) = P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)\right)^{-1}$
محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k) + K(k+1)r(k+1)$
تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k+1) = \left(I - K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$

۷-۴-۲- الگوریتم پیشنهادی در تخمین‌گر مرکزی (طراحی تخمین‌گر تحریک-رویداد)

مراحل پیش‌بینی و به روزرسانی تخمین‌گر پیشنهادی مرکزی بر اساس استراتژی تحریک-رویداد و با قابلیت مقابله با همبستگی به صورت زیر ارائه می‌شوند.

مرحله پیش‌بینی تخمین‌گر مرکزی

چنان‌چه در روابط مربوط به پیش‌بینی تخمین‌گر پیشنهادی مشاهده می‌شود، بر خلاف روش‌های موجود تحریک-رویداد در این زمینه [۱۳۹]-[۱۷۸]، در مرحله پیش‌بینی در بازه زمانی $k+1$ام، نیاز به $\tilde{Y}(k)$ (مشاهدات در بازه زمانی قبلی) می‌باشد؛ زیرا بر خلاف روش‌های موجود، برای رفع همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات سیستم خطی‌شده، از مدل شبه فرآیند سیستم استفاده شده و عبارت $T(k)\tilde{Y}(k)$ در معادله پیش‌بینی بردار حالت ظاهر شده است. بنابراین اگر $\rho(k) = 1$ باشد (یعنی در بازه زمانی قبلی مشاهدات به PDC ارسال شده باشند)، $\tilde{Y}(k)$ در دسترس بوده و مرحله پیش‌بینی به صورت زیر قابل اجرا می‌باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{X}(k+1|k) = f^*\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)\tilde{Y}(k) \quad (۵۲-۷)$$

$$P(k+1|k) = F^*(k)P(k|k){F^*}^T(k) + Q^*(k)$$

که در آن

$$f^*\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) = f\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) - T(k)h\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) \quad (۵۳-۷)$$

$$F^*(k) = \hat{F}(k) - T(k)\hat{H}(k)$$

$$Q^*(k) = Q(k) - S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$$

اما اگر $\rho(k) = 0$ باشد (یعنی در بازه زمانی قبلی اندازه‌گیری‌های PMUها به PDC ارسال نشده باشند)، $\tilde{Y}(k)$ در دسترس نبوده و به صورت زیر تقریب زده می‌شود.

$$\tilde{Y}(k) = h\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) \quad (۵۴-۷)$$

حال مرحله پیش‌بینی به صورت زیر قابل اجرا می‌باشد.

$$\hat{X}(k+1|k) = f^*\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)h\left(\hat{X}(k|k), \tilde{U}(k)\right) \quad (۵۵-۷)$$

$$P(k+1|k) = F^*(k)P(k|k){F^*}^T(k) + Q^*(k)$$

مرحله به‌روزرسانی تخمین‌گر مرکزی

اگر $\rho(k+1) = 1$ باشد (یعنی در بازه زمانی فعلی مشاهدات به PDC ارسال شوند)، $\tilde{Y}(k+1)$ در دسترس بوده و بردار حالت و ماتریس کواریانس آن به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)r(k+1) \quad (۵۶-۷)$$

$$P(k+1|k+1) = \left(I - K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1|k)$$

که در آن $r(k+1)$ مانده و $K(k+1)$ بهره کالمن می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$r(k+1) = \tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1|k) \quad (۵۷-۷)$$

$$K(k+1) = P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)\right)^{-1}$$

خروجی پیش‌بینی‌شده و ماتریس کواریانس آن نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\hat{Y}(k+1|k) = h\left(\hat{X}(k+1|k), \tilde{U}(k+1)\right) \quad (۵۸-۷)$$

$$P_Y(k+1|k) = \hat{H}(k+1)P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)$$

اما اگر $\rho(k+1) = 0$ باشد (یعنی در بازه زمانی فعلی مشاهدات به PDC ارسال شوند)، $\tilde{Y}(k+1)$ در دسترس نمی‌باشد. در این صورت، بردار حالت و ماتریس کواریانس آن به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شوند.

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) \quad (۵۹-۷)$$

$$P(k+1|k+1) = \left(I - \lambda(\xi)K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1|k)$$

که در آن $K(k+1)$ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$K(k+1) = P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1|k)\hat{H}^T(k+1) + \quad (۶۰-۷)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$R(k+1)\Big)^{-1}$$

که در آن $\lambda(\xi)$ به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷۵].

$$\lambda(\xi)=\frac{2}{\sqrt{2\pi}}\xi\, exp(-\frac{\xi^2}{2})\left(1-2\mathcal{D}(\xi)\right)^{-1} \quad (۶۱-۷)$$

در این رابطه، $exp(.)$ تابع نمایی بوده و $\mathcal{D}(\xi)$ تابع *Q-Function* استاندارد به صورت زیر می‌باشد.

$$\mathcal{D}(\xi)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{\xi}^{\infty} exp(-\frac{\xi^2}{2})\, d\xi \quad (۶۲-۷)$$

خلاصه الگوریتم پیشنهادی برای تخمین‌گر مرکزی در جدول ۷-۳ ارائه شده است.

جدول ۷-۳ خلاصه الگوریتم پیشنهادی در تخمین‌گر مرکزی

مرحله پیش‌بینی در زمان $k+1$	
محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k\|k)$ و $\tilde{U}(k)$	$\hat{F}(k)=\frac{\partial f}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{G}(k)=\frac{\partial f}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{H}(k)=\frac{\partial h}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{E}(k)=\frac{\partial h}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$R(k)=\hat{E}(k)Q_U\hat{E}^T(k)+Q_Y$ $S(k)=\hat{G}(k)Q_U\hat{E}^T(k)$ $T(k)=S(k)R^{-1}(k)$ $If \quad \rho(k)=1$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$\hat{X}(k+1\|k) = f^*\left(\hat{X}(k\|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)\tilde{Y}(k)$ *Else If* $\rho(k) = 0$ $\hat{X}(k+1\|k) = f^*\left(\hat{X}(k\|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)h\left(\hat{X}(k\|k), \tilde{U}(k)\right)$	
$F^*(k) = \hat{F}(k) - T(k)\hat{H}(k)$ $Q(k) = \hat{G}(k)Q_U\hat{G}^T(k)$ $Q^*(k) = Q(k) - S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$ $P(k+1\|k) = F^*(k)P(k\|k)F^{*T}(k) + Q^*(k)$	**محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام**
مرحله به‌روزرسانی در زمان $k+1$	
$\hat{H}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial X}\Big\|_{\hat{X}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$ $\hat{E}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{X}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$	**محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k+1\|k)$ و $\tilde{U}(k+1)$**
If $\rho(k) = 1$ $\hat{Y}(k+1\|k) = h\left(\hat{X}(k+1\|k), \tilde{U}(k+1)\right)$ $r(k+1) = \tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)$ $P_Y(k+1\|k) = \hat{H}(k+1)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)$	**محاسبه مانده و پیش‌بینی خروجی در مرحله زمانی $k+1$ام**
$R(k+1) = \hat{E}(k+1)Q_U\hat{E}^T(k+1) + Q_Y$ $K(k+1) = P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)\right)^{-1}$	**محاسبه بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام**
If $\rho(k) = 1$ $\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k) + K(k+1)r(k+1)$ *Else If* $\rho(k) = 0$ $\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k)$	**محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام**
If $\rho(k) = 1$ $P(k+1\|k+1) = \left(I - K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$ *Else If* $\rho(k) = 0$ $\lambda(\xi) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}}\xi\, exp(-\frac{\xi^2}{2})\left(1 - 2\mathcal{D}(\xi)\right)^{-1}$ $P(k+1\|k+1) = \left(I - \lambda(\xi)K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$	**تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام**

۷-۵- واریانس نویز *PMU*ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

تمامی *PMU*های به کار رفته در سیستم قدرت توسط *GPS* همزمان می‌شوند. استاندارد *IEEE* برای اندازه‌گیری سنکروفازورها دقت همزمان‌سازی را برابر با $\pm 0.2\ \mu s$ تعیین کرده است [۴۰]. به طور مثال در فرکانس ۵۰ هرتز، این میزان دقت معادل با دقت اندازه‌گیری زاویه فاز $\pm 0.06\ mrad$ خواهد بود [۱۹۶]. بنابراین *PMU*ها باید دقتی حدودا برابر با $\pm 0.1\ mrad$ برای اندازه‌گیری زاویه فاز داشته باشند. دقت *PMU*ها برای اندازه‌گیری دامنه ولتاژ و دامنه جریان نیز توسط دقت ترانسفورماتورهای *CT* و *PT* تعیین می‌شود. چنان‌چه می‌دانیم، *PMU*ها از ترانسفورماتورهای *CT* و *PT* به ترتیب برای اندازه‌گیری مقادیر آنالوگ شکل موج جریان و ولتاژ استفاده می‌کنند. این اندازه‌گیری‌ها توسط *GPS* همزمان شده و سپس نمونه‌برداری می‌شوند [۲۷]. شکل موج‌های به دست آمده از ترانسفورماتورها دارای خطا هم در مقدار دامنه و هم در فاز می‌باشند؛ اما خطای موجود در فاز را می‌توان توسط روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال (*DSP*[۱]) جبران‌سازی و کالیبره نمود [۱۹۷]. خطای اندازه‌گیری دامنه نیز تحت تأثیر کلاس ترانسفورماتور به کار رفته در *PMU* می‌باشد. دو استاندارد [۱۹۸] و [۱۹۹] دقت اندازه‌گیری دامنه ولتاژ و جریان را برابر با $\pm 0.1\%$ ($10^{-3}\ p.u.$) تا $\pm 0.3\%$ تعیین می‌کنند.

با توجه به این توضیحات، می‌توان انحراف معیار نویز اندازه‌گیری زاویه فاز ولتاژ و جریان باس iام را برابر با $\sigma_{\theta i} = 10^{-4}\ rad$ و انحراف معیار نویز اندازه‌گیری دامنه ولتاژ و جریان باس iام را برابر با $\sigma_{Vi} = 10^{-3}\ p.u.$ و $\sigma_{Ii} = 10^{-3}\ p.u.$ در نظر گرفت [۱۹۶]. بنابراین می‌توان ماتریس‌های کواریانس معرفی‌شده در بخش ۴-۲-۱ را به صورت زیر نوشت.

$$Q_U = diag\left(\begin{bmatrix}\sigma_{V1}^2 & \dots & \sigma_{VM}^2 & \sigma_{\theta 1}^2 & \dots & \sigma_{\theta M}^2\end{bmatrix}^T\right) = \quad (۶۳-۷)$$

$$diag([10^{-6} \quad \dots \quad 10^{-6} \quad 10^{-8} \quad \dots \quad 10^{-8}]^T)$$

$$Q_Y = diag\left(\begin{bmatrix}\sigma_{I1}^2 & \dots & \sigma_{IM}^2 & \sigma_{\gamma 1}^2 & \dots & \sigma_{\gamma M}^2\end{bmatrix}^T\right) =$$

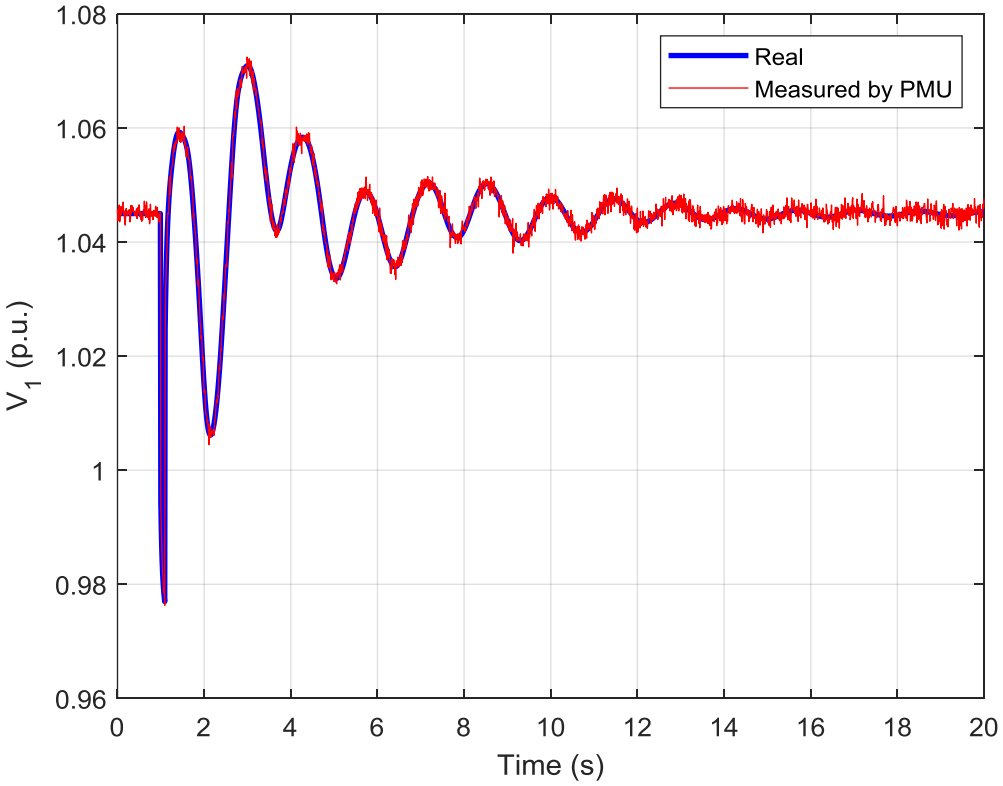
$$diag([10^{-6} \quad \dots \quad 10^{-6} \quad 10^{-8} \quad \dots \quad 10^{-8}]^T)$$

در این رابطه، $diag(.)$ نشان‌دهنده ماتریس قطری تشکیل‌شده از بردار مورد نظر است.

[۱] Digital Signal Processing

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

با اضافه کردن نویزهای سفید $\eta_U(k)\sim\mathcal{N}(0,Q_U)$ و $\eta_Y(k)\sim\mathcal{N}(0,Q_Y)$ به مقادیر ولتاژ و جریان در نتایج شبیه‌سازی سیستم قدرت، می‌توان خروجی اندازه‌گیری‌شده توسط PMUها را شبیه‌سازی نمود. در ادامه، نمودار زمانی مقدار واقعی دامنه ولتاژ ژنراتور $G1$ به همراه مقدار اندازه‌گیری‌شده آن توسط PMU که توسط شبیه‌سازی به دست آمده، نمایش داده شده است.



شکل ۷-۲ مقدار واقعی و اندازه‌گیری‌شده دامنه ولتاژ باس شماره ۱

۷-۶- جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا به معرفی مسأله تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت شامل مدل فضای حالت سیستم و تعریف ریاضی مسأله پرداخته شد. سپس نشان داده شد که مدل فضای حالت این سیستم یک مدل غیرخطی خاص می‌باشد که دارای نویز غیرجمعی هم در مدل فرآیند و هم در مدل مشاهدات است. در ادامه، با خطی‌سازی سیستم نشان داده شد که در سیستم خطی‌شده، نویز فرآیند و مشاهدات دارای همبستگی می‌باشند. سپس به طراحی تخمین‌گر غیرخطی مناسب با قابلیت مقابله با همبستگی

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

میان نویز فرآیند و مشاهدات پرداخته شد. در روش پیشنهادی، با استفاده از خطی‌سازی سیستم به روش سمبلیک و آفلاین که در فصل دوم بدان پرداخته شده است، طراحی تخمین‌گر با بار محاسباتی پایین‌تر در مقایسه با روش‌های دیگر انجام شد. در ادامه، به طراحی تخمین‌گر تحریک-رویداد مناسب برای سیستم خطی‌شده دارای همبستگی پرداخته شد. در انتهای فصل نیز به مقدار واریانس نویز *PMU*ها تعیین شد.

چنان‌چه گفته شد، نوآوری‌های این فصل به شرح زیر می‌باشد.

- نشان دادن غیرجمعی بودن نویز در مدل فرآیند و مشاهدات سیستم قدرت در صورت در نظر گرفتن ولتاژ و جریان به عنوان ورودی و خروجی سیستم، که در هیچ یک از پژوهش‌های پیشین به آن پرداخته نشده است.
- خطی‌سازی سیستم و نشان دادن وجود همبستگی بین نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده
- ارائه یک تخمین‌گر حالت مبتنی بر خطی‌سازی برای مقابله با این همبستگی
- طراحی تخمین‌گر غیرخطی تحریک-رویداد برای سیستم خطی‌شده دارای همبستگی

همان‌طور که مشاهده شد، در روش پیشنهادی این فصل از خطی‌سازی سیستم استفاده شده است. برای کاهش بار محاسباتی تخمین‌گر، پیشنهاد شد که خطی‌سازی سیستم ابتدا به صورت آفلاین انجام شده و این ماتریس‌ها به صورت سمبلیک و آفلاین به دست می‌آیند. سپس در هنگام شبیه‌سازی روش تخمین حالت پیشنهادی، نقطه کار سیستم در هر بازگشت محاسبه شده و مقادیر متناظر در مقادیر سمبلیک ماتریس‌های سیستم خطی‌شده جایگذاری می‌شوند. بدین ترتیب انتظار می‌رود که بار محاسباتی روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود مانند [۱۴۰]، [۱۲۷]، [۱۳۹]، [۱۷۴]، [۱۱۸]، [۱۸۸]، [۱۳۵]، [۱۱۶]، [۱۴۵]، [۱۳۴]، [۱۷۶]، [۱۷۹]، [۱۷۷] که از فیلتر ذره‌ای یا *UKF* و *CKF* استفاده کرده‌اند، کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

علاوه بر این، در این فصل نشان داده شد که در صورت در نظر گرفتن فازورهای ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده توسط *PMU*ها به عنوان ورودی و خروجی سیستم، به مدل فضای حالت خاصی از سیستم غیرخطی خواهیم رسید که نویز فرآیند و مشاهدات در آن به صورت غیرجمعی وارد می‌شوند. بنابراین بر خلاف پژوهش‌های موجود در این زمینه مانند [۱۳۹] تا [۱۹۱] که نویز فرآیند و مشاهدات را به صورت جمعی و دارای ماتریس کواریانس ثابت در نظر گرفته‌اند، در این فصل به طراحی یک تخمین‌گر حالت دینامکی مبتنی بر خطی‌سازی و تحریک-رویداد با قابلیت مقابله با این نویز غیرجمعی پرداخته شد. در

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

نتیجه، انتظار می‌رود با در نظر گرفتن مدل فضای حالت با نویز غیرجمعی (یا همبستگی نویزها در سیستم خطی‌شده)، روش پیشنهادی دقت تخمین بالاتری در مقایسه با روش‌های موجود داشته باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل هشتم: طراحی تخمین‌گر حالت غیرخطی به روش توزیع‌یافته

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۸-۱- مقدمه

این فصل به طراحی تخمین‌گر حالت دینامیکی غیرخطی توزیع‌یافته برای سیستم قدرت اختصاص داده شده است. بدین‌منظور، ابتدا با استفاده از روش بردار حالت افزوده و استفاده از قانون مکعبی به طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی برای مقابله با نویز غیرجمعی و غیرخطی‌گری مدل فضای حالت سیستم قدرت پرداخته شده است. سپس روابط تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات استخراج شده‌اند. سپس با تقسیم سیستم به چند ناحیه بدون همپوشانی و استفاده از روش اجماع، رویکرد توزیع‌یافته تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات به دست آمده است.

چنان‌چه پیش از این گفته شد، بیشتر پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت دینامیکی سیستم قدرت دارای ساختار متمرکز می‌باشند. در ساختار متمرکز، تمامی اندازه‌گیری‌های به دست آمده از سیستم به یک مرکز تخمین منتقل شده و عملیات تخمین حالت سراسری با استفاده از این اطلاعات پیاده‌سازی می‌شود. اما این ساختار متمرکز دارای مشکلاتی می‌باشد. از آن‌جا که سیستم قدرت یک سیستم مقیاس-وسیع می‌باشد، بار محاسباتی و بار ارتباطی بالایی در مرکز تخمین به وجود می‌آید که می‌تواند منجر به مشکلات فراوانی شود. مشکل دیگری که در تخمین حالت با ساختار متمرکز وجود دارد این است که در صورت از کار افتادن و یا مورد حمله واقع شدن مرکز تخمین، عملیات تخمین حالت دینامیکی با شکست مواجه می‌شود. مورد دیگری که می‌تواند در تخمین حالت متمرکز مشکل‌ساز شود این است که ممکن است به دلایل مربوط به حفاظت حریم خصوصی، امکان جمع‌آوری و انتقال تمامی اطلاعات شبکه به مرکز تخمین بسیار مشکل باشد. بنابراین رویکرد دیگری به نام رویکرد توزیع‌یافته در برخی از پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در تخمین حالت توزیع‌یافته چند-ناحیه‌ای سیستم قدرت، سیستم به چندین ناحیه جغرافیایی بدون همپوشانی تقسیم می‌شود. برای هر ناحیه یک تخمین‌گر حالت محلی مدنظر قرار می‌گیرد تا بتواند با تبادل اطلاعات با تخمین‌گرهای در همسایگی خود، به تخمین حالت سیستم قدرت بپردازد. در این رویکرد، نیازی به یک واحد مرکزی برای جمع‌آوری تمامی اطلاعات نمی‌باشد. بنابراین، امنیت، تاب‌آوری و حفاظت حریم خصوصی در این ساختار بهبود می‌یابد [۱۸۰]. در تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت، به دلیل تقسیم سیستم به چند ناحیه، بار محاسباتی و بار ارتباطی برای هر تخمین‌گر محلی در مقایسه با روش متمرکز کاهش می‌یابد. بنابراین، احتمال تلفات داده کاهش یافته، بار محاسباتی در هر تخمین‌گر پایین آمده و در نتیجه تخمین حالت زمان-واقعی سیستم امکان‌پذیرتر می‌شود. علاوه بر این، بر خلاف روش متمرکز که تمامی نتایج حاصل از تخمین حالت در یک مرکز واحد وجود دارد، تخمین حالت سیستم در هر تخمین‌گر به صورت محلی محاسبه می‌شود. در نتیجه، در صورت از کار افتادن و یا مورد حمله واقع شدن یکی از تخمین‌گرهای محلی، دسترسی در سایر تخمین‌گرها وجود دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

با وجود تمام مزایایی که روش توزیع‌یافته دارد، تاکنون پژوهش‌های کمی در زمینه تخمین حالت غیرخطی سیستم قدرت از ساختار توزیع‌یافته به جای ساختار متمرکز استفاده نموده‌اند. در همین تعداد محدود پژوهش‌ها نیز نخمین حالت دینامیکی بدان معنا که در این پروژه مد نظر قرار دارد انجام نشده است و خلاء پژوهشی در این زمینه وجود دارد. در مسأله مد نظر این پروژه، فرض بر این است که شبکه هوشمند مجهز به تعداد قابل توجهی *PMU* بوده و با استفاده از اندازه‌گیری‌های فازورهای ولتاژ و جریان باس‌ها توسط *PMU*ها به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم در شرایط نوسانات پس از وقوع اغتشاش و با نرخ بالا (برابر با نرخ نمونه‌برداری *PMU*ها) پرداخته می‌شود. در حالی که در هیچ‌یک از پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت که در فصل سوم بررسی شدند، این مسأله مد نظر قرار نگرفته است. در این پژوهش‌ها بردار حالتی که باید تخمین زده شود شامل دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌ها می‌باشند. دینامیک سیستم نیز یک دینامیک کند در حالت شبه ماندگار می‌باشد که توسط تغییرات ناگهانی بار تعیین می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نیز شامل دامنه ولتاژ، توان تزریقی و شارش توان (توسط اسکادا یا *RTU*) می‌باشند. برخی از این پژوهش‌ها نیز در کنار اسکادا یا *RTU* از تعداد کمی *PMU* برای اندازه‌گیری دامنه و زاویه فاز برخی از باس‌ها استفاده کرده‌اند. به طور مثال در [۱۸۴] و [۱۸۷] تنها از اندازه‌گیری‌ها اسکادا استفاده شده است. در [۱۸۸] از اندازه‌گیری‌های اسکادا و *PMU* به صورت ترکیبی برای تخمین بردار حالت شامل دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌ها استفاده شده است. در [۱۸۶] نیز تنها سه *PMU* برای سیستم ۱۱۸ باسه در نظر گرفته شده است. در [۱۸۰]، [۱۸۲] و [۱۸۳] نیز متغیرهای حالت برابر با دامنه و فاز ولتاژ باس‌ها در نظر گرفته شده‌اند. سپس با استفاده از یک تقریب بر اساس تحلیل پخش بار *DC*، بردار حالتی که باید تخمین زده شود به زاویه فاز ولتاژ برخی از باس‌های شبکه کاهش یافته و مدل مشاهدات نیز خطی می‌گردد. اندازه‌گیری‌ها در این پژوهش‌ها شامل دامنه ولتاژ و توان تزریقی و شارش توان توسط *RTU* و دامنه و زاویه فاز ولتاژ توسط تعداد کمی *PMU* می‌باشد.

تنها در یکی از پژوهش‌های اخیر که در سال ۲۰۱۹ انجام شده است [۱۹۲]، حالت نوسانی سیستم پس از وقوع اغتشاش در نظر گرفته شده است؛ هر چند در این پژوهش نیز تنها به تخمین پارامترهای مدهای نوسانی سیستم شامل فرکانس‌ها و ضرایب میرایی مدها پرداخته شده است.

همان‌طور که توضیح داده شد، هیچ‌یک از پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت که در این بخش بررسی شدند، به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم قدرت در شرایط نوسان پس از وقوع اغتشاش نپرداخته‌اند. در این پژوهش‌ها تنها به تخمین دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌ها در حالت شبه ماندگار پرداخته شده است. اندازه‌گیری‌ها در این پژوهش‌ها نیز توسط اسکادا یا *RTU* و بدون *PMU* (یا با تعداد کمی *PMU*) به دست آمده‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

با این توضیحات، در این فصل به طراحی یک تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی توزیع‌یافته برای تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم (شامل متغیرهای دینامیکی ژنراتورها، سیستم تحریک و توربین) پرداخته شده است. این طراحی، فرض بر این است که تمامی باس‌های متصل به ژنراتور در شبکه مجهز به *PMU* بوده و فازورهای جریان و ولتاژ این باس‌ها با نرخ نمونه‌برداری بالا اندازه‌گیری می‌شوند. سیستم قدرت نیز به چند ناحیه بدون همپوشانی تقسیم شده و در هر ناحیه از یک *PDC* برای جمع‌آوری اندازه‌گیری‌ها *PMU*های درون آن ناحیه و تخمین متغیرهای حالت سیستم استفاده می‌شود. فرض بر این است که هر *PDC* تنها با *PDC*های در همسایگی خود به تبادل اطلاعات می‌پردازد.

طراحی تخمین‌گر در این فصل شامل نوآوری‌های زیر می‌باشد.

- تخمین حالت توزیع‌یافته متغیرهای دینامیکی سیستم قدرت در شرایط گذرای نوسانی
- طراحی روش تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر قانون مکعبی برای مقابله با غیرخطی‌گری سیستم و استفاده از روش بردار حالت افزوده برای مقابله با نویز غیرجمعی سیستم
- استخراج روابط تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات
- استفاده از روش اجماع برای به دست آوردن رویکرد توزیع‌یافته تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات

با این توضیحات، در ادامه به طراحی تخمین‌گر پیشنهادی پرداخته شده است. ابتدا در بخش ۸-۲-، به طراحی تخمین‌گر متمرکز غیرخطی مبتنی بر قانون مکعبی و روش بردار حالت افزوده پرداخته شده است. سپس در بخش ۸-۳، معادلات این تخمین‌گر در فضای اطلاعات استخراج شده‌اند. در انتها در بخش ۸-۴، نسخه توزیع‌یافته تخمین‌گر پیشنهادی با استفاده از روش اجماع به دست آمده است.

۸-۲- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر قانون مکعبی

چنان‌چه در فصل قبل مشاهده شد، در صورت در نظر گرفتن فازورهای ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده توسط *PMU*ها به عنوان ورودی و خروجی سیستم، به مدل فضای حالت زیر می‌رسیم که یک مدل خاص غیرخطی با نویز غیرجمعی در مدل مشاهدات و فرآیند می‌باشد.

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) \qquad (۱-۸)$$

$$\tilde{Y}(k) = h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) + \eta_Y(k)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

بنابراین بر خلاف پژوهش‌های موجود در این زمینه مانند [۱۳۹] تا [۱۹۱] که نویز فرآیند و مشاهدات را به صورت جمعی و دارای ماتریس کواریانس ثابت در نظر گرفته‌اند، در این فصل به طراحی یک تخمین‌گر حالت دینامیکی غیرخطی با قابلیت مقابله با این نویز غیرجمعی پرداخته خواهد شد.

چنان‌چه پیش از این گفته شد، تخمین‌گرهای مبتنی بر خطی‌سازی مانند *EKF* ممکن است در مواجهه با غیرخطی‌گری بالای یک سیستم دقت پایینی در مقایسه با تخمین‌گرهایی مانند *UKF*، *CKF* و فیلتر ذره‌ای داشته باشند. از طرف دیگر، بار محاسباتی این تخمین‌گرها به خصوص فیلتر ذره‌ای در مقایسه با *EKF* بسیار بالاتر است. مسأله دیگری که در فصل گذشته بدان توجه شد این است که استفاده از روش‌های مبتنی بر خطی‌سازی مانند *EKF* برای سیستم‌های دارای ابعاد بزرگ، بار محاسباتی بسیار بالایی دارد؛ زیرا محاسبه ژاکوبین‌ها در هر بازگشت بسیار مشکل و زمان‌بر بوده و تخمین زمان-واقعی را دچار مشکل می‌کند. بنابراین در فصل گذشته پیشنهاد شد که از خطی‌سازی سمبلیک سیستم برای کاهش بار محاسباتی تخمین‌گر پیشنهادی مبتنی بر خطی‌سازی استفاده شود. در روش پیشنهادی، ماتریس‌های سیستم خطی‌شده با محاسبه ژاکوبین‌ها به صورت سمبلیک و پیش از اجرای شبیه‌سازی محاسبه شد و مشتق توابع غیرخطی به صورت دقیق و تحلیلی و بدون استفاده از روش‌های تقریبی به دست آمد. سپس در هر بازگشت از تخمین‌گر پیشنهادی، با جایگذاری مقادیر مربوط به نقطه کاری آنلاین سیستم به جای نمادهای سمبلیک، محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده با سرعت بسیار بیشتری انجام شد.

در این فصل، با توجه به این که از روش توزیع‌یافته استفاده خواهد شد، انتظار می‌رود بار محاسباتی هر تخمین‌گر محلی در مقایسه با تخمین‌گرهای متمرکز کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای مقابله با غیرخطی‌گری بالای سیستم قدرت به جای استفاده از خطی‌سازی سیستم از قانون مکعبی برای طراحی تخمین‌گر غیرخطی استفاده شود. در پژوهش‌های پیشین نشان داده شده است که تخمین‌گرهای مبتنی بر قانون مکعبی مانند *CKF* و دیگر نسخه‌های آن، بار محاسباتی بسیار پایین‌تری در مقایسه با فیلتر ذره‌ای داشته و دقت آن‌ها نیز برای سیستم‌های دارای ابعاد بزرگ از تخمین‌گر *UKF* مبتنی بر تبدیل بی‌رد بالاتر می‌باشد [۱۷۵]، [۱۷۹].

چنان‌چه گفته شد، در این فصل برای مقابله با نویز غیرجمعی و تبدیل مدل فضای حالت سیستم به یک مدل استاندارد، از روش بردار حالت افزوده استفاده می‌شود. بردار حالت افزوده سیستم به صورت زیر و با گنجاندن نویز اندزه‌گیری فازور ولتاژ در بردار حالت تعریف می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$X^a(k) = \begin{bmatrix} X(k) \\ \eta_U(k) \end{bmatrix} \quad (۲-۸)$$

از آن‌جا که $\eta_U(k)$ نویز سفید است، $\eta_U(k+1) = \eta_U(k)$ بوده و می‌توان مدل فرآینده سیستم افزوده‌شده[۱] را به صورت زیر نوشت.

$$X^a(k+1) = f'\big(X^a(k), U(k)\big) \quad (۳-۸)$$

که در آن

$$f'\big(X^a(k), U(k)\big) = \begin{bmatrix} X(k+1) \\ \eta_U(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) \\ \eta_U(k) \end{bmatrix} \quad (۴-۸)$$

می‌باشد. به طور مشابه برای مدل مشاهدات می‌توان رابطه زیر را نوشت.

$$\tilde{Y}(k) = h'\big(X^a(k), U(k)\big) + \eta_Y(k) \quad (۵-۸)$$

که در آن

$$h'\big(X^a(k), U(k)\big) = h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) \quad (۶-۸)$$

می‌باشد. بنابراین مدل فضای حالت غیرخطی افزوده سیستم را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$X^a(k+1) = f'\big(X^a(k), U(k)\big) \quad (۷-۸)$$

$$\tilde{Y}(k) = h'\big(X^a(k), U(k)\big) + \eta_Y(k)$$

[۱] Augmented System

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

چنان‌چه مشاهده می‌شود، این مدل یک مدل غیرخطی استاندارد بوده که می‌توان از روابط فیلتر کالمن مکعبی برای طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی برای آن استفاده نمود. در این مدل، نویز فرایند وجود نداشته و فقط نویز مشاهدات $\eta_Y(k) \sim \mathcal{N}(0, Q_Y)$ وجود دارد.

حال بردار حالت تخمین‌زده شده سیستم در زمان k را می‌توان با $\hat{X}^a(k|k)$ نمایش داد. $\hat{X}^a(0|0)$ به صورت تصادفی و با تابع چگالی احتمال $P\left(X^a(0)\right)$ و به صورت کاملا مستقل از نویز مشاهدات فرض می‌شود.

با این توضیحات، می‌توان مسأله مدنظر را به صورت زیر تعریف نمود.

مسأله تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت: هدف در این مسأله عبارت است از تخمین مقدار $X^a(k)$ (محاسبه $\hat{X}^a(k|k)$) با استفاده از مجموعه مشاهدات تا زمان k. در این مسأله فرض بر این است که $P\left(X^a(0)\right)$، تابع چگالی احتمال $\eta_Y(k)$، تابع غیرخطی f' و تابع غیرخطی h' همگی در هر لحظه از زمان کاملا شناخته شده هستند. در این مسأله، مجموعه مشاهدات تا زمان k را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$Z(k) = \{\tilde{Y}(1), \tilde{Y}(2), \dots, \tilde{Y}(k)\} \quad (۸-۸)$$

حال تعاریف زیر ارائه می‌شوند.

$$\hat{X}^a(k|k) \triangleq \mathbb{E}\left(X^a(k)|Z(k)\right) \quad (۹-۸)$$

$$\hat{X}^a(k|k-1) \triangleq \mathbb{E}\left(X^a(k)|Z(k-1)\right) \quad (۱۰-۸)$$

$$P(k|k) \triangleq cov\left(X^a(k) - \hat{X}^a(k|k)|Z(k)\right) \quad (۱۱-۸)$$

$$P(k|k-1) \triangleq cov\left(X^a(k) - \hat{X}^a(k|k-1)|Z(k-1)\right) \quad (۱۲-۸)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{Y}(k|k-1) \triangleq \mathbb{E}\left(\tilde{Y}(k)|Z(k-1)\right) \quad (۱۳-۸)$$

$$P_Y(k|k-1) \triangleq cov\left(\tilde{Y}(k) - \hat{Y}(k|k-1)|Z(k-1)\right) \quad (۱۴-۸)$$

حال با استفاده از قانون مکعبی می‌توان مراحل پیش‌بینی و به روزرسانی تخمین‌گر پیشنهادی را به صورت زیر نوشت.

مرحله پیش‌بینی:

تولید نقاط مکعبی به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\mathcal{X}_j(k-1|k-1) = \hat{X}^a(k-1|k-1) + \sqrt{P(k-1|k-1)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s \quad (۱۵-۸)$$

که در آن، n_s بعد فضای حالت سیستم می‌باشد که برای سیستم افزوده‌شده برابر با $n_s = 11M + 2M$ است. ξ_j نیز به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\xi_j = \begin{cases} \sqrt{n_s}e_j & , \quad j = 1, \dots, n_s \\ -\sqrt{n_s}e_{j-n_s} & , \quad j = n_s + 1, \dots, 2n_s \end{cases} \quad (۱۶-۸)$$

که در آن e_j عبارت است از jامین عنصر از مجموعه بردارهای n_s-بعدی زیر.

$$\left\{\begin{bmatrix}1\\0\\\vdots\\0\end{bmatrix}, \begin{bmatrix}0\\1\\\vdots\\0\end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix}0\\0\\\vdots\\1\end{bmatrix}\right\} \quad (۱۷-۸)$$

حال پیش‌بینی روی نقاط مکعبی به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\mathcal{X}_j(k|k-1) = f'\left(\mathcal{X}_j(k-1|k-1), \tilde{U}(k-1)\right) \quad (۱۸-۸)$$

سپس بردار حالت افزوده پیش‌بینی‌شده و ماتریس کواریانس خطای آن به صورت زیر به دست می‌آیند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{X}^a(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s} \mathcal{X}_j(k|k-1) \quad (۱۹-۸)$$

$$P(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s} \left(\mathcal{X}_j(k|k-1) - \hat{X}^a(k|k-1)\right)\left(\mathcal{X}_j(k|k-1) - \hat{X}^a(k|k-1)\right)^T$$

مرحله به‌روزرسانی:

تولید نقاط مکعبی به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\mathcal{X}_j(k|k-1) = \hat{X}^a(k|k-1) + \sqrt{P(k|k-1)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s \quad (۲۰-۸)$$

حال خروجی برای هر کدام از نقاط مکعبی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\mathcal{Y}_j(k|k-1) = h'\left(\mathcal{X}_j(k|k-1), \tilde{U}(k)\right), \quad j = 1, \dots, 2n_s \quad (۲۱-۸)$$

سپس خروجی پیش‌بینی‌شده و ماتریس کواریانس خطای آن به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\hat{Y}(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s} \mathcal{Y}_j(k|k-1) \quad (۲۲-۸)$$

$$P_Y(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s} \left(\mathcal{Y}_j(k|k-1) - \hat{Y}(k|k-1)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k|k-1) - \hat{Y}(k|k-1)\right)^T + Q_Y$$

ماتریس کواریانس متقابل خطای بردار حالت و خطای خروجی نیز به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$P_{XY}(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s} \left(\mathcal{X}_j(k|k-1) - \hat{X}^a(k|k-1)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k|k-1) - \right. \quad (۲۳-۸)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{Y}(k|k-1)\Big)^T$$

حال می‌توان بهره کالمن و مانده را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$K(k) = P_{XY}(k|k-1)P_Y^{-1}(k|k-1) \qquad (۲۴-۸)$$

$$r(k) = \tilde{Y}(k) - \hat{Y}(k|k-1)$$

در نهایت، بردار حالت افزوده تخمین‌زده‌شده و ماتریس کواریانس خطای آن به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شوند.

$$\hat{X}^a(k|k) = \hat{X}^a(k|k-1) + K(k)r(k) \qquad (۲۵-۸)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - K(k)P_Y(k|k-1)K^T(k) = P(k|k-1) -$$

$$K(k)P_{XY}^T(k|k-1)$$

خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت مبتنی بر قانون مکعبی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۸-۱ خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت مبتنی بر قانون مکعبی

مرحله پیش‌بینی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_j(k\|k) = \hat{X}^a(k\|k) + \sqrt{P(k\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{X}_j(k+1\|k) = f'\left(\mathcal{X}_j(k\|k), \tilde{U}(k)\right)$ $\hat{X}^a(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{X}_j(k+1\|k)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k) - \hat{X}^a(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k) - \hat{X}^a(k+1\|k)\right)^T$
مرحله به‌روزرسانی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_j(k+1\|k) = \hat{X}^a(k+1\|k) + \sqrt{P(k+1\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

محاسبه خروجی پیش‌بینی‌شده، مانده و بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{Y}_j(k+1\|k) = h'\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k), \tilde{U}(k+1)\right), \quad j = 1, \dots, 2n_s$ $\hat{Y}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s} \mathcal{Y}_j(k+1\|k)$ $P_Y(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)^T + Q_Y$ $P_{XY}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k) - \hat{X}^a(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)^T$ $K(k+1) = P_{XY}(k+1\|k)P_Y^{-1}(k+1\|k)$ $r(k+1) = \tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)$
محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}^a(k+1\|k+1) = \hat{X}^a(k+1\|k) + K(k+1)r(k+1)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای تخمین به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k+1) = P(k+1\|k) - K(k+1)P_Y(k+1\|k)K^T(k+1)$

۸-۳- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر قانون مکعبی در فضای اطلاعات

در این بخش، به استخراج روابط تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات پرداخته شده است.

چنان‌چه می‌دانیم، نسخه‌های فضای حالت و فضای اطلاعات تخمین‌گرها به صورت جبری با یکدیگر هم ارز می‌باشند [۲۰۰]. به بیان دیگر، عملکرد یک تخمین‌گر متمرکز در فضای حالت و فضای اطلاعات تحت شرایط یکسان برابر خواهد بود. هرچند در تخمین‌گرهای توزیع‌یافته، پیاده‌سازی در فضای اطلاعات دارای مزیت‌های متعددی نسبت به فضای حالت می‌باشد. بار محاسباتی کمتر، راه‌اندازی ساده‌تر و سادگی الگوریتم از مزیت‌های تخمین‌گر توزیع‌یافته در فضای اطلاعات نسبت به فضای حالت می‌باشند [۲۰۱]. در تخمین‌گرهایی که در فضای اطلاعات عمل می‌کنند، احتیاجی به تخمین حالت ابتدایی برای راه‌اندازی نبوده و مقدار آن برابر با صفر قرار داده می‌شود. همچنین در تخمین‌گرهای فضای اطلاعات، ابعاد ماتریس‌هایی که باید معکوس‌سازی شوند، کاهش می‌یابد. از آن‌جا که دستورات مربوط به محاسبه معکوس ماتریس‌ها در نرم‌افزارها بار محاسباتی بالایی در مقایسه با سایر دستورات دارد، اجرای تخمین‌گرها در فضای

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

اطلاعات به منظور کاهش ابعاد معکوس‌سازی ماتریس‌ها منطقی به نظر می‌رسد. با این توضیحات، در ادامه به استخراج روابط تخمین‌گر پیشنهادی بخش قبل در فضای اطلاعات پرداخته شده است.

برای به دست آوردن معادل فضای اطلاعات روابط مربوط به تخمین‌گر پیشنهادی، ابتدا بردارهای اطلاعات $q(k|k)$ و $q(k|k-1)$؛ و ماتریس‌های اطلاعات $\Omega(k|k)$ و $\Omega(k|k-1)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$q(k|k) \triangleq P^{-1}(k|k)\hat{X}^a(k|k) \quad (۲۶-۸)$$

$$q(k|k-1) \triangleq P^{-1}(k|k-1)\hat{X}^a(k|k-1)$$

$$\Omega(k|k) \triangleq P^{-1}(k|k)$$

$$\Omega(k|k-1) \triangleq P^{-1}(k|k-1)$$

با این تعاریف، در ادامه روابط مربوط به مراحل پیش‌بینی و به روزرسانی تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات به دست می‌آیند.

مرحله پیش‌بینی:

تولید نقاط مکعبی به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\mathcal{X}_j(k-1|k-1) = \hat{X}^a(k-1|k-1) + \sqrt{\Omega^{-1}(k-1|k-1)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s \quad (۲۷-۸)$$

حال پیش‌بینی روی نقاط مکعبی به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\mathcal{X}_j(k|k-1) = f'\left(\mathcal{X}_j(k-1|k-1), \tilde{U}(k-1)\right) \quad (۲۸-۸)$$

حال بردار حالت پیش‌بینی‌شده به صورت زیر محاسبه می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{X}^a(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s} \mathcal{X}_j(k|k-1) \quad (۲۹-۸)$$

سپس ماتریس اطلاعات پیش‌بینی‌شده و بردار اطلاعات پیش‌بینی‌شده به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\Omega(k|k-1) = \left(\frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_j(k|k-1) - \hat{X}^a(k|k-1)\right)\left(\mathcal{X}_j(k|k-1) - \hat{X}^a(k|k-1)\right)^T\right)^{-1} \quad (۳۰-۸)$$

$$q(k|k-1) = \Omega(k|k-1)\hat{X}^a(k|k-1)$$

مرحله به‌روزرسانی:

رابطه به‌روزرسانی تخمین‌گر پیشنهادی در بخش قبل به صورت زیر نوشته شد.

$$\hat{X}^a(k|k) = \hat{X}^a(k|k-1) + K(k)r(k) \quad (۳۱-۸)$$

برای به دست آوردن معادل فضای اطلاعات این رابطه، آن را به‌علاوه و منهای عبارت $K(k)P_{XY}^T(k|k-1)\Omega(k|k-1)\hat{X}^a(k|k-1)$ کرده و به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم.

$$\hat{X}^a(k|k) = \left(I - K(k)P_{XY}^T(k|k-1)\Omega(k|k-1)\right)\hat{X}^a(k|k-1) + K(k)\left(r(k) + P_{XY}^T(k|k-1)\Omega(k|k-1)\hat{X}^a(k|k-1)\right) \quad (۳۲-۸)$$

سپس عبارت $I - K(k)P_{XY}^T(k|k-1)\Omega(k|k-1)$ که در رابطه بالا ظاهر شده است، از سمت راست در $P(k|k-1)P^{-1}(k|k-1)$ ضرب شده و رابطه زیر به دست می‌آید.

$$I - K(k)P_{XY}^T(k|k-1)\Omega(k|k-1) = \left(P(k|k-1) - K(k)P_{XY}^T(k|k-1)\Omega(k|k-1)P(k|k-1)\right)P^{-1}(k|k-1) \quad (۳۳-۸)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در نتیجه

$$I - K(k)P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1) = P(k|k)P^{-1}(k|k-1) \quad (۳۴-۸)$$

رابطه محاسبه بهره نیز در بخش قبل به صورت زیر نوشته شد.

$$K(k) = P_{XY}(k|k-1)P_{Y}^{-1}(k|k-1) \quad (۳۵-۸)$$

این رابطه را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$K(k) = P_{XY}(k|k-1) \quad (۳۶-۸)$$

$$\times (P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1) + Q_Y)^{-1}$$

حال عبارت $P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1) + Q_Y$ را از سمت راست در دو طرف رابطه بالا ضرب می‌کنیم.

$$K(k)(P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1) + Q_Y) = P_{XY}(k|k-1) \quad (۳۷-۸)$$

در نتیجه

$$K(k) = \big(I - K(k)P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)\big)P_{XY}(k|k-1)Q_{Y}^{-1} \quad (۳۸-۸)$$

حال با جایگذاری (۸-۳۴) در رابطه بالا، می‌توان نوشت

$$K(k) = P(k|k)P^{-1}(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)Q_{Y}^{-1} \quad (۳۹-۸)$$

سپس با جایگذاری (۸-۳۴) و رابطه بالا در رابطه (۸-۳۲) به رابطه زیر می‌رسیم.

$$\hat{X}^{a}(k|k) = P(k|k)P^{-1}(k|k-1)\hat{X}^{a}(k|k-1) + \quad (۴۰-۸)$$

$$P(k|k)P^{-1}(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)Q_{Y}^{-1}\big(r(k) +$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)\hat{X}^{a}(k|k-1)\Big)$$

حال با ضرب $P^{-1}(k|k)$ در دو طرف رابطه بالا از سمت چپ خواهیم داشت.

$$q(k|k) = q(k|k-1) + \Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)Q_{Y}^{-1}\Big(r(k) + \quad (۴۱-۸)$$

$$P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)\hat{X}^{a}(k|k-1)\Big)$$

سپس با تعریف بردار ابداعات $\delta q(k)$ به صورت زیر

$$\delta q(k) = \Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)Q_{Y}^{-1}\Big(r(k) + \big(\Omega(k|k- \quad (۴۲-۸)$$

$$1)P_{XY}(k|k-1)\big)^{T}\hat{X}^{a}(k|k-1)\Big)$$

می‌توان رابطه (۸-۴۱) را به صورت زیر نوشت.

$$q(k|k) = q(k|k-1) + \delta q(k) \quad (۴۳-۸)$$

این رابطه، رابطه به‌روزرسانی بردار اطلاعات می‌باشد.

رابطه به‌روزرسانی ماتریس کواریانس خطای تخمین در بخش قبل نیز به صورت زیر به دست آمد.

$$P(k|k) = P(k|k-1) - K(k)P_{XY}^{T}(k|k-1) \quad (۴۴-۸)$$

حال برای به دست آوردن رابطه به‌روزرسانی ماتریس اطلاعات، ابتدا رابطه بالا به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$P(k|k) = \big(I - K(k)P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)\big)P(k|k-1) \quad (۴۵-۸)$$

سپس این رابطه را به علاوه و منهای عبارت $P(k|k-1)\Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)K^{T}(k)$ می‌کنیم.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$P(k|k) = \big(I - K(k)P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)\big)P(k|k-1) - \quad (۴۶-۸)$$
$$P(k|k-1)\Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)K^{T}(k) +$$
$$P(k|k-1)\Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)K^{T}(k)$$

در نتیجه خواهیم داشت.

$$P(k|k) = \big(I - K(k)P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)\big)P(k|k-1)\big(I - \quad (۴۷-۸)$$
$$K(k)P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)\big)^{T} + K(k)Q_{Y}K^{T}(k)$$

حال با جایگذاری (۸-۳۴) و (۸-۳۹) در رابطه بالا می‌توان نوشت.

$$P(k|k) \quad (۴۸-۸)$$
$$= P(k|k)P^{-1}(k|k-1)P(k|k)$$
$$+ P(k|k)P^{-1}(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)Q_{Y}^{-1}P_{XY}^{T}(k|k-1)P^{-1}(k|k-1)P(k|k)$$

با ضرب $P^{-1}(k|k)$ در دو طرف رابطه بالا هم از سمت چپ و هم از سمت راست خواهیم داشت.

$$\Omega(k|k) = \Omega(k|k-1) + \quad (۴۹-۸)$$
$$\Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)Q_{Y}^{-1}P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1)$$

سپس با تعریف ماتریس ابداعات[۱] به صورت زیر

$$\delta\Omega(k) = \Omega(k|k-1)P_{XY}(k|k-1)Q_{Y}^{-1}P_{XY}^{T}(k|k-1)\Omega(k|k-1) \quad (۵۰-۸)$$

رابطه به‌روزرسانی ماتریس اطلاعات به صورت زیر نوشته می‌شود.

[۱] Innovation Matrix

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\Omega(k|k) = \Omega(k|k-1) + \delta\Omega(k) \quad (۵۱-۸)$$

۸-۴- طراحی تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی توزیع‌یافته مبتنی بر قانون مکعبی و روش اجماع

در طراحی تخمین‌گر دینامیکی توزیع‌یافته در این پروژه سیستم قدرت را به چند ناحیه جغرافیایی بدون همپوشانی تقسیم کرده و برای هر ناحیه از یک *PDC* استفاده می‌کنیم. هر *PDC* یک تخمین‌گر محلی بوده و با تبادل اطلاعات با *PDC*های در همسایگی خود به تخمین حالت سیستم می‌پردازد.

در روش‌های موجود تخمین حالت توزیع‌یافته، سیستم به صورت یک گراف در نظر گرفته شده و هر تخمین‌گر به عنوان یک رأس[۱] گراف در نظر گرفته می‌شود. انواع روش‌های موجود توزیع‌یافته بر حسب چگونگی تبادل اطلاعات بین رئوس همسایه[۲] تقسیم‌بندی می‌شوند. در میان روش‌های توزیع‌یافته، روش اجماع به علت مزایایی چون قابلیت اطمینان بیشتر در برابر خطای از کار افتادن یک رأس یا یال[۳] و همگرایی تخمین‌های محلی به تخمین سراسری سیستم، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. بنابراین در این پروژه از روش اجماع برای به دست آوردن رویکرد توزیع‌یافته تخمین‌گر پیشنهادی در این فصل استفاده شده است. در این روش، هر رأس اطلاعات خود را به صورت بازگشتی با رئوس همسایه خود مبادله می‌کند. با افزایش تعداد تکرارها، اطلاعات در سرتاسر سیستم پراکنده می‌شوند. در روش‌های اجماع، هر تخمین‌گر تنها با تخمین‌گرهای همسایه خود به تبادل اطلاعات پرداخته و به صورت بازگشتی به محاسبه حاصل‌جمع، میانگین، بیشینه و یا کمینه یک کمیت مورد نظر، که از تخمین‌گرهای محلی به دست آمده است، می‌پردازد [۲۰۲].

در بخش قبل، روابط مربوط به به‌روزرسانی بردار و ماتریس اطلاعات به صورت زیر به دست آمد.

$$q(k|k) = q(k|k-1) + \delta q(k) \quad (۵۲-۸)$$

[۱] Vertex

[۲] Neighboring Vertices

[۳] Edge

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\Omega(k|k) = \Omega(k|k-1) + \delta\Omega(k)$$

حال فرض می‌شود که به جای استفاده از یک تخمین‌گر مرکزی، سیستم قدرت به P ناحیه بدون همپوشانی تقسیم شده و در هر ناحیه از یک PDC استفاده می‌شود. هر PDC با استفاده از یک تخمین‌گر محلی و تبادل اطلاعات با PDCهای در همسایگی خود، به تخمین حالت سیستم می‌پردازد. تخمین‌گر مورد استفاده در pامین PDC را تخمین‌گر pامین می‌نامیم. حال تمامی نمادها و کمیت‌ها را برای تخمین‌گر pامین مشابه بخش قبل و با زیرنویس p تعریف می‌کنیم. به طور مثال، بردار و ماتریس اطلاعات و بردار و ماتریس ابداعات تخمین‌گر pامین به ترتیب با $q_p(k|k)$، $\Omega_p(k|k)$، $\delta q_p(k)$ و $\delta\Omega_p(k)$ تعریف می‌شوند. حال از آن‌جا که روابط (۸-۵۲) دارای ساختار قطری-گروهی[۱] [۲۰۳] می‌باشند، روابط مربوط به به‌روزرسانی بردار و ماتریس اطلاعات تخمین‌گر pامین را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$q_p(k|k) = q_p(k|k-1) + \sum_{p=1}^{P} \delta q_p(k) \qquad (۸-۵۳)$$

$$\Omega_p(k|k) = \Omega_p(k|k-1) + \sum_{p=1}^{P} \delta\Omega_p(k)$$

در این روابط، $\delta q_p(k)$ و $\delta\Omega_p(k)$ بردار و ماتریس ابداعات هر کدام تخمین‌گرها بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\delta q_p(k) = \Omega_p(k|k-1)P_{XY_p}(k|k-1)Q_{Y_p}^{-1}\Big(r_p(k) + P_{XY_p}^{T}(k|k-1)\Omega_p(k|k-1)\hat{X}_p^{a}(k|k-1)\Big) \qquad (۸-۵۴)$$

$$\delta\Omega_p(k) = \Omega_p(k|k-1)P_{XY_p}(k|k-1)Q_{Y_p}^{-1}P_{XY_p}^{T}(k|k-1)\Omega_p(k|k-1)$$

در این رابطه نیز تمامی اندیس‌های p نشان‌دهنده کمیت مورد نظر برای تخمین‌گر pامین می‌باشند. به طور مثال، $\hat{X}_p^{a}(k|k-1)$ نشان‌گر بردار حالت تخمین‌زده‌شده سیستم توسط تخمین‌گر pامین و $r_p(k) =$

[۱] Group-Diagonal

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$\tilde{Y}_p(k) - \hat{Y}_p(k|k-1)$ مانده تخمین‌گر pام و $\tilde{Y}_p(k)$ بردار شامل اندازه‌گیری‌های PMUهای نصب‌شده درون ناحیه pام می‌باشد.

چنان‌چه گفته شد، با استفاده از روش اجماع می‌توان به صورت بازگشتی به محاسبه حاصل‌جمع، میانگین، بیشینه و یا کمینه یک کمیت مورد نظر، که از تخمین‌گرهای محلی به دست آمده است، پرداخت. بنابراین با استفاده از این روش به محاسبه عبارت‌های مجموع در رابطه (۸-۵۳) پرداخته و به طراحی رویکرد توزیع‌یافته تخمین‌گر پیشنهادی این فصل می‌پردازیم. مراحل پیش‌بینی و به روزرسانی تخمین‌گر محلی pام در ادامه شرح داده شده‌اند.

مرحله پیش‌بینی:

تولید نقاط مکعبی به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\mathcal{X}_{j_p}(k-1|k-1) = \hat{X}_p^a(k-1|k-1) + \sqrt{\Omega_p^{-1}(k-1|k-1)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s \tag{۸-۵۵}$$

حال پیش‌بینی روی نقاط مکعبی به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\mathcal{X}_{j_p}(k|k-1) = f'\left(\mathcal{X}_{j_p}(k-1|k-1), \tilde{U}_p(k-1)\right) \tag{۸-۵۶}$$

بردار حالت پیش‌بینی‌شده به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\hat{X}_p^a(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{X}_{j_p}(k|k-1) \tag{۸-۵۷}$$

سپس ماتریس اطلاعات پیش‌بینی‌شده و بردار اطلاعات پیش‌بینی‌شده به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\Omega_p(k|k-1) = \left(\frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_{j_p}(k|k-1) - \hat{X}_p^a(k|k-1)\right)\left(\mathcal{X}_{j_p}(k|k-1) - \right.\right. \tag{۸-۵۸}$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{X}_p^a(k|k-1)\Big)^T\Big)^{-1}$$

$$q_p(k|k-1) = \Omega_p(k|k-1)\hat{X}_p^a(k|k-1)$$

مرحله به‌روزرسانی:

تولید نقاط مکعبی به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\mathcal{X}_{j_p}(k|k-1) = \hat{X}_p^a(k|k-1) + \sqrt{\Omega_p^{-1}(k|k-1)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s \tag{۵۹-۸}$$

حال خروجی برای هر کدام از نقاط مکعبی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\mathcal{Y}_{j_p}(k|k-1) = h_p'\Big(\mathcal{X}_{j_p}(k|k-1), \widetilde{U}_p(k)\Big), \quad j = 1, \dots, 2n_s \tag{۶۰-۸}$$

در این رابطه، h_p' تابع غیرخطی شناخته‌شده متناظر با بردار خروجی ناحیه pام است. سپس خروجی پیش‌بینی‌شده و ماتریس کواریانس خطای آن برای تخمین‌گر pام به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\hat{Y}_p(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{Y}_{j_p}(k|k-1) \tag{۶۱-۸}$$

$$P_{Y_p}(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\Big(\mathcal{Y}_{j_p}(k|k-1) - \hat{Y}_p(k|k-1)\Big)\Big(\mathcal{Y}_{j_p}(k|k-1) -$$

$$\hat{Y}_p(k|k-1)\Big)^T + Q_{Y_p}$$

حال ماتریس کواریانس متقابل خطای بردار حالت و خطای خروجی برای تخمین‌گر pام به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$P_{XY_p}(k|k-1) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\Big(\mathcal{X}_{j_p}(k|k-1) - \hat{X}_p^a(k|k-1)\Big)\Big(\mathcal{Y}_{j_p}(k|k-1) - \tag{۶۲-۸}$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$\hat{Y}_p(k|k-1)\Big)^T$$

حال مانده تخمین‌گر pام به صورت زیر محاسبه شده

$$r_p(k) = \tilde{Y}_p(k) - \hat{Y}_p(k|k-1) \quad (۶۳-۸)$$

سپس بردار و ماتریس ابداعات تخمین‌گر pام به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\delta q_p(k) = \Omega_p(k|k-1)P_{XY_p}(k|k-1)Q_{Y_p}^{-1}\Big(r_p(k) + P_{XY_p}^T(k|k-1)\Omega_p(k|k- \quad (۶۴-۸)$$

$$1)\hat{X}_p^a(k|k-1)\Big)$$

$$\delta\Omega_p(k) = \Omega_p(k|k-1)P_{XY_p}(k|k-1)Q_{Y_p}^{-1}P_{XY_p}^T(k|k-1)\Omega_p(k|k-1)$$

حال برای به دست آوردن مجموع بردارهای ابداعات و ماتریس‌های ابداعات تمام نواحی از روش اجماع با T گام به صورت زیر استفاده می‌شود.

$$\delta q_p^{t+1}(k) = \sum_{q\in\mathcal{S}^p}\pi_{p,q}\delta q_q^t(k), \quad \delta q_p^0(k) = \delta q_p(k) \quad (۶۵-۸)$$

$$\delta\Omega_p^{t+1}(k) = \sum_{q\in\mathcal{S}^p}\pi_{p,q}\delta\Omega_q^t(k), \quad \delta\Omega_p^0(k) = \delta\Omega_p(k)$$

در این روابط، $t+1 = 1, \dots, T$ نشان‌دهنده شماره گام در الگوریتم اجماع، $\delta q_p^t(k)$ و $\delta\Omega_p^t(k)$ بردار و ماتریس ابداعات تخمین‌گر pام پس از اجرای گام tام، $\mathcal{S}^p$ مجموعه PDCهای در همسایگی pام و PDC pام و $\pi_{p,q}$ وزن اجماع بین pام و qام با خاصیت $\sum_{q\in\mathcal{S}^p}\pi_{p,q} = 1$ می‌باشد. با اجرای روابط اجماع فوق، بردار و ماتریس ابداعات تخمین‌گرها به صورت بازگشتی و در T گام با یکدیگر ترکیب شده و در نتیجه منجر به به‌روزرسانی بردار تخمین حالت محلی با استفاده از اطلاعات به دست آمده از کل سیستم می‌شود. عملکرد روش اجماع با افزایش تعداد گام‌های اجماع بهبود یافته و نتایج تخمین محلی توزیع‌یافته به تخمین متمرکز همگرا می‌شوند. حال روابط به‌روزرسانی بردار و ماتریس اطلاعات را می‌توان به صورت زیر نوشت.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$$q_p(k|k) = q_p(k|k-1) + \delta q_p^{t+1}(k) \qquad (۶۶-۸)$$

$$\Omega_p(k|k) = \Omega_p(k|k-1) + \delta \Omega_p^{t+1}(k)$$

خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت توزیع‌یافته مبتنی بر قانون مکعبی و روش اجماع (در *PDC* شماره pام) در جدول ۸-۲ ارائه شده است.

جدول ۸-۲ خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین حالت توزیع‌یافته مبتنی بر قانون مکعبی و روش اجماع

مرحله پیش‌بینی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_{j_p}(k\|k) = \hat{X}_p^a(k\|k) + \sqrt{\Omega_p^{-1}(k\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) = f'\left(\mathcal{X}_{j_p}(k\|k), \tilde{U}_p(k)\right)$ $\hat{X}_p^a(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k)$
محاسبه بردار و ماتریس اطلاعات پیش‌بینی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\Omega_p(k+1\|k) = \left(\frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{X}_p^a(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{X}_p^a(k+1\|k)\right)^T\right)^{-1}$ $q_p(k+1\|k) = \Omega_p(k+1\|k)\hat{X}_p^a(k+1\|k)$
مرحله به‌روزرسانی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) = \hat{X}_p^a(k+1\|k) + \sqrt{\Omega_p^{-1}(k+1\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه خروجی پیش‌بینی‌شده و مانده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k) = h_p'\left(\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k), \tilde{U}_p(k+1)\right), \quad j = 1, \dots, 2n_s$ $\hat{Y}_p(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k)$ $P_{Y_p}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{Y}_p(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{Y}_p(k+1\|k)\right)^T + Q_{Y_p}$ $P_{XY_p}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{X}_p^a(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{Y}_p(k+1\|k)\right)^T$ $r_p(k+1) = \tilde{Y}_p(k+1) - \hat{Y}_p(k+1\|k)$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

محاسبه بردار و ماتریس ابداعات در مرحله زمانی $k+1$ام	$\delta q_p(k+1) = \Omega_p(k+1\|k) P_{XY_p}(k+1\|k) Q_{Y_p}^{-1} \left(r_p(k+1) + P_{XY_p}^T(k+1\|k) \Omega_p((k+1\|k) \hat{X}_p^a(k+1\|k)) \right)$ $\delta \Omega_p(k+1) = \Omega_p(k+1\|k) P_{XY_p}(k+1\|k) Q_{Y_p}^{-1} P_{XY_p}^T(k+1\|k) \Omega_p(k+1\|k)$
اجرای الگوریتم اجماع	$\delta q_p^{t+1}(k+1) = \sum_{q \in S^p} \pi_{p,q} \delta q_q^t(k+1), \quad \delta q_p^0(k+1) = \delta q_p(k+1)$ $\delta \Omega_p^{t+1}(k+1) = \sum_{q \in S^p} \pi_{p,q} \delta \Omega_q^t(k+1), \quad \delta \Omega_p^0(k+1) = \delta \Omega_p(k+1)$
محاسبه بردار و ماتریس اطلاعات به‌روزرسانی‌شده روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$q_p(k+1\|k+1) = q_p(k+1\|k) + \delta q_p^{t+1}(k+1)$ $\Omega_p(k+1\|k+1) = \Omega_p(k+1\|k) + \delta \Omega_p^{t+1}(k+1)$
محاسبه بردار حالت تخمین‌زده‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}_p^a(k+1\|k+1) = \Omega_p^{-1}(k+1\|k+1) q_p(k+1\|k+1)$

۸-۵- جمع‌بندی

در این فصل، به طراحی تخمین‌گر حالت دینامیکی غیرخطی توزیع‌یافته برای سیستم قدرت پرداخته شد. با استفاده از روش بردار حالت افزوده و استفاده از قانون مکعبی یک تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی برای مقابله با نویز غیرجمعی و غیرخطی‌گری مدل فضای حالت سیستم قدرت طراحی شد. سپس به استخراج روابط تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات پرداخته شد. با تقسیم سیستم به چند ناحیه بدون همپوشانی و استفاده از روش اجماع، رویکرد توزیع‌یافته تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات به دست آمد.

چنان‌چه گفته شد، نوآوری‌های این فصل به شرح زیر می‌باشد.

- تخمین حالت توزیع‌یافته متغیرهای دینامیکی سیستم قدرت در شرایط گذرای نوسانی
- طراحی روش تخمین حالت دینامیکی مبتنی بر قانون مکعبی برای مقابله با غیرخطی‌گری سیستم و استفاده از روش بردار حالت افزوده برای مقابله با نویز غیرجمعی سیستم
- استخراج روابط تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات
- استفاده از روش اجماع برای به دست آوردن رویکرد توزیع‌یافته تخمین‌گر پیشنهادی در فضای اطلاعات

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

همان‌طور که مشاهده شد، در روش پیشنهادی این فصل برای مقابله با نویز غیرجمعی سیستم از روش بردار حالت افزوده استفاده شد. بنابراین انتظار می‌رود روش پیشنهادی دقت تخمین بالاتری در مقایسه با پژوهش‌های موجود در این زمینه مانند [۱۳۹] تا [۱۹۱] که نویز فرآیند و مشاهدات را به صورت جمعی و دارای ماتریس کواریانس ثابت در نظر گرفته‌اند، داشته باشد.

همچنین بر خلاف تمامی پژوهش‌های موجود در زمینه تخمین حالت توزیع‌یافته سیستم قدرت که به تخمین دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌ها در شرایط شبه ماندگار پرداخته‌اند، با استفاده از اندازه‌گیری‌های PMUها به تخمین زمان-واقعی متغیرهای دینامیکی سیستم (شامل متغیرهای دینامیکی ژنراتورها، سیستم تحریک و توربین) در شرایط نوسان بعد از اغتشاشات پرداخته شد

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل نهم: شبیه‌سازی روش‌های موجود

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۹-۱- مقدمه

در این فصل، به شبیه‌سازی برخی از روش‌های موجود برای تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت پرداخته خواهد شد. بدین منظور دو تخمین‌گر معروف فیلتر کالمن توسعه‌یافته (*EKF*) و فیلتر کالمن مکعبی (*CKF*) که مبنای طراحی تخمین‌گر در این پروژه هستند، مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از این تخمین‌گرها در قالب ترسیم نتایج تخمین متغیرهای حالت دینامیکی، ترسیم خطای *RMSE* در حوزه زمان و محاسبه خطای *RMSE* کل و مدت زمان محاسباتی ارائه شده است.

۹-۲- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته

در این بخش، ابتدا فیلتر کالمن توسعه‌یافته معرفی شده و روابط و مراحل اجرای آن در قالب جدول ارائه می‌شود. سپس با استفاده از این تخمین‌گر به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم ۶۸ باسه که در فصل قبل ترسیم شدند، پرداخته شده و نتایج تخمین حالت در قالب نمودار و جدول ارائه می‌شوند.

۹-۲-۱- معرفی فیلتر کالمن توسعه‌یافته

مراحل و معادلات فیلتر کالمن توسعه‌یافته (*EKF*) برای سیستم غیرخطی زیر در جدول پ ۲-۲ ارائه شده است.

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k)\big) + w(k) \qquad (۱-۹)$$

$$\tilde{Y}(k) = h\big(X(k), U(k)\big) + v(k)$$

$$w(k) \sim \mathcal{N}\big(0, Q(k)\big)$$

$$v(k) \sim \mathcal{N}\big(0, R(k)\big)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۹-۱ مراحل و معادلات تخمین‌گر *EKF*

مرحله پیش‌بینی	
محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k\|k)$	$\hat{F}(k)=\frac{\partial f}{\partial X}\mid_{\hat{X}(k\|k)}$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}(k+1\|k)=f\left(\hat{X}(k\|k),\tilde{U}(k)\right)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k)=\hat{F}(k)P(k\|k)\hat{F}^T(k)+Q(k)$
مرحله به‌روزرسانی	
محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k+1\|k)$	$\hat{H}(k+1)=\frac{\partial h}{\partial X}\mid_{\hat{X}(k+1\|k)}$
بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام	$K(k+1)=P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1)+R(k+1)\right)^{-1}$ $r(k+1)=\tilde{Y}(k+1)-h\left(\hat{X}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)\right)$
محاسبه تخمین حالت به‌روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}(k+1\|k+1)=\hat{X}(k+1\|k)+K(k+1)r(k+1)$
تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k+1)=\left(I-K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$

۹-۲-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط فیلتر کالمن توسعه‌یافته

برای محاسبه نتایج حاصل از این تخمین‌گر و همچنین تمامی تخمین‌گرهایی که در ادامه این گزارش مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند، نیاز است تا شبیه‌سازی تحت شرایط یکسان صورت گیرد تا بتوان مقایسه عادلانه‌ای بین آن‌ها انجام داد. بنابراین تنظیمات یکسانی برای تمامی این تخمین‌گرها در نظر گرفته شده است. این تنظیمات شامل واریانس نویز *PMU*ها، مقدار اولیه تخمین حالت، مقدار اولیه ماتریس کواریانس

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

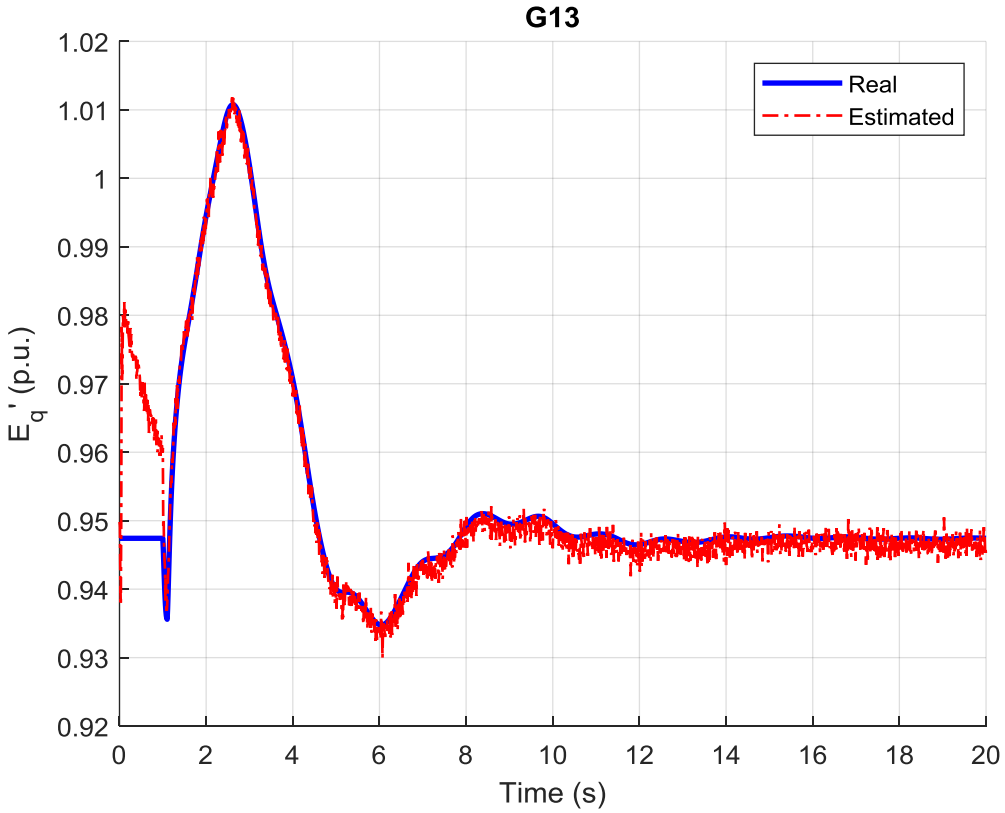
خطای تخمین بردار حالت، زمان نمونه‌برداری و تعداد اجراهای مونت-کارلو می‌باشد. چنان‌چه در فصل اول گفته شد، زمان نمونه‌برداری برابر با $\Delta t = 0.01\ s$ در نظر گرفته شده است. بنابراین در شبیه‌سازی تخمین‌گرهای موجود و پیشنهادی، مدت زمان نمونه‌برداری به طور یکسان و برابر با $\Delta t = 0.01\ s$ در نظر گرفته می‌شود.

در ادامه، به ترسیم نمودار زمانی نتایج تخمین حالت و ارائه نتایج (شامل خطای *RMSE* و مدت زمان محاسباتی) در قالب جدول پرداخته شده است.

۱ ۲ ۲ ۹ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت

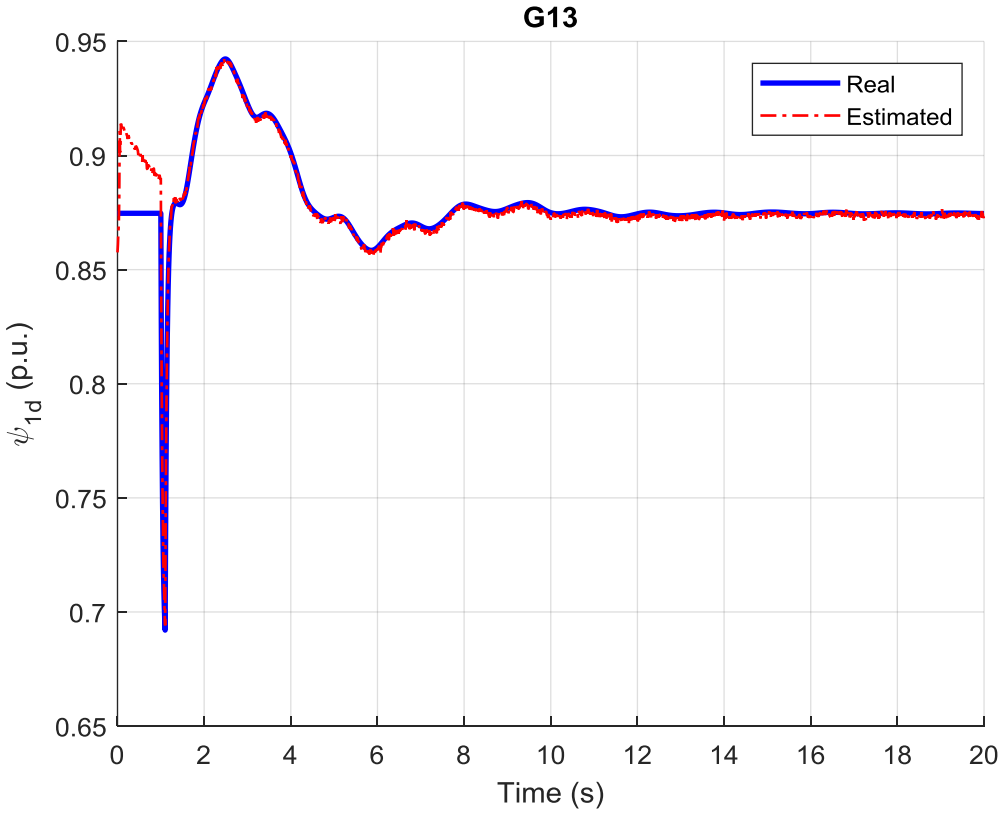
در شکل‌های زیر، مقادیر واقعی و تخمین‌زده‌شده هر یک از متغیرهای حالت در طول زمان ترسیم شده‌اند. به منظور وضوح نتایج، تنها به ترسیم متغیرهای حالت یکی از ژنراتورها (ژنراتور *G13* با بیشترین نوسانات پس از وقوع اغتشاش) پرداخته شده است. چنان‌چه در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود، تخمین‌گر *EKF* قادر به تخمین متغیرهای حالت دینامیکی سیستم بوده است اما نتایج تخمین دارای نوسانات زیاد و خطای قابل توجهی هستند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



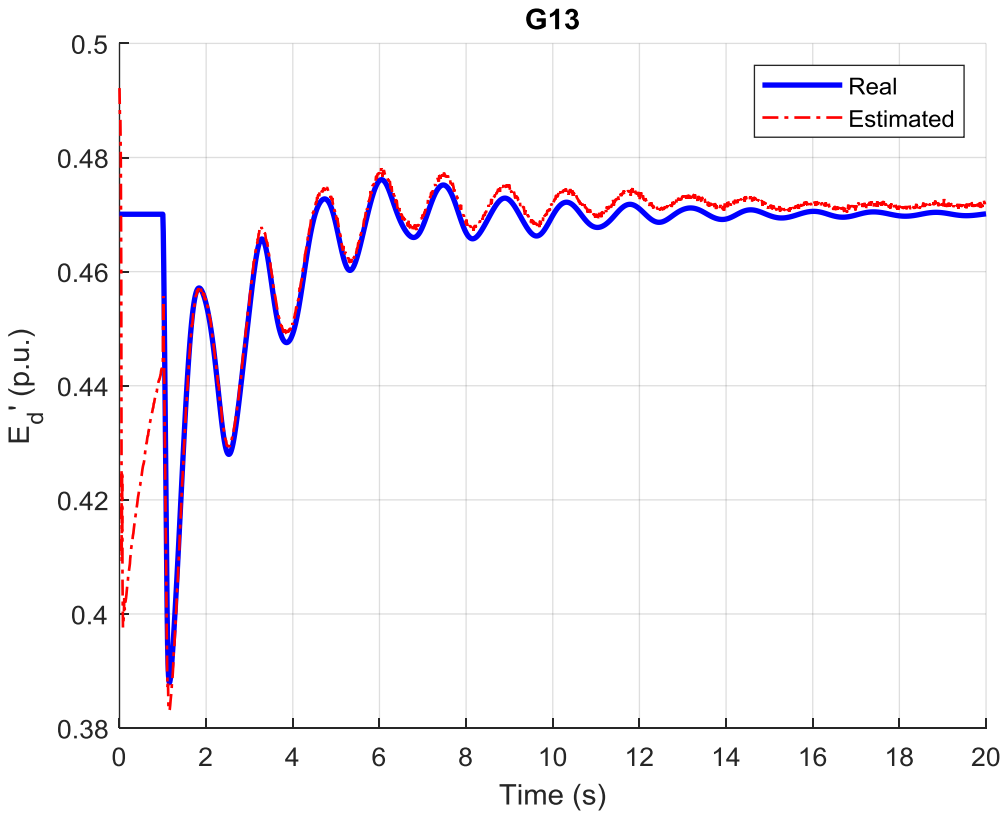
شکل ۹-۱ تخمین متغیر حالت اول ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



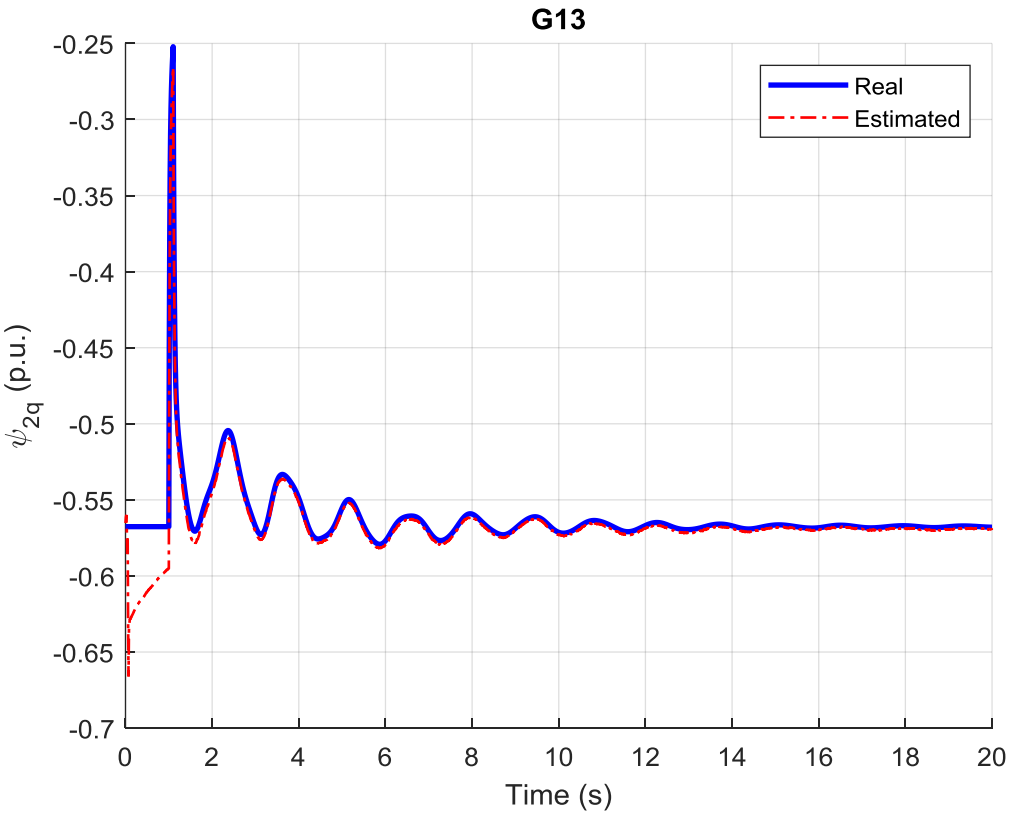
شکل ۹-۲ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



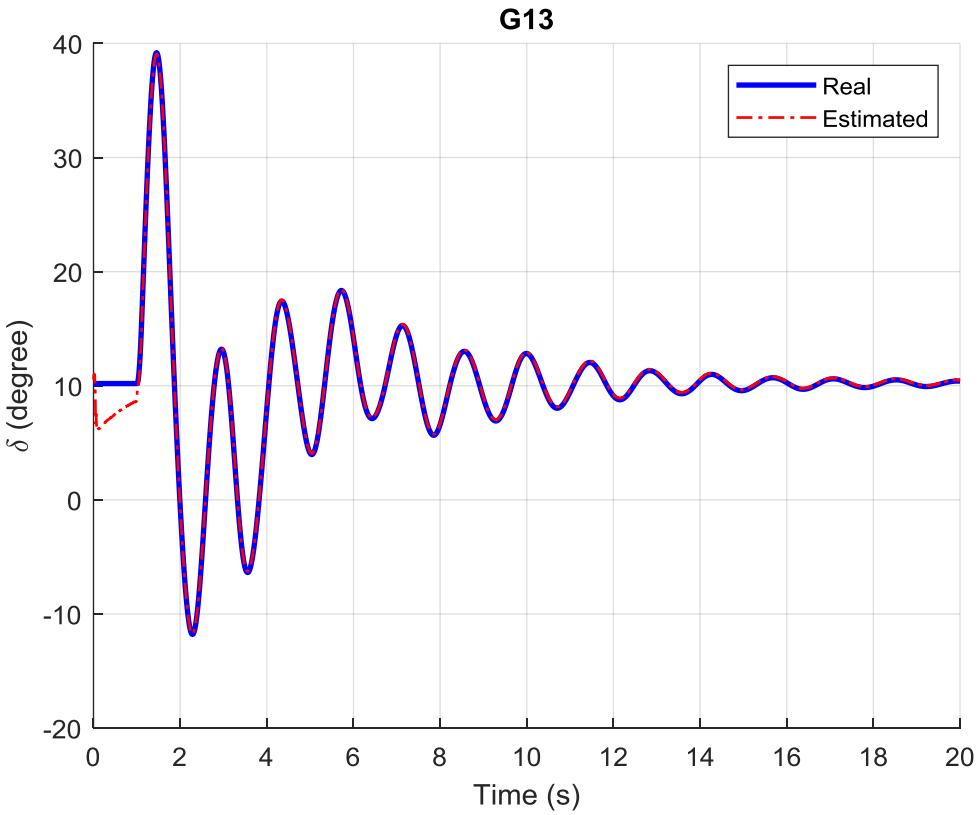
شکل ۹-۳ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



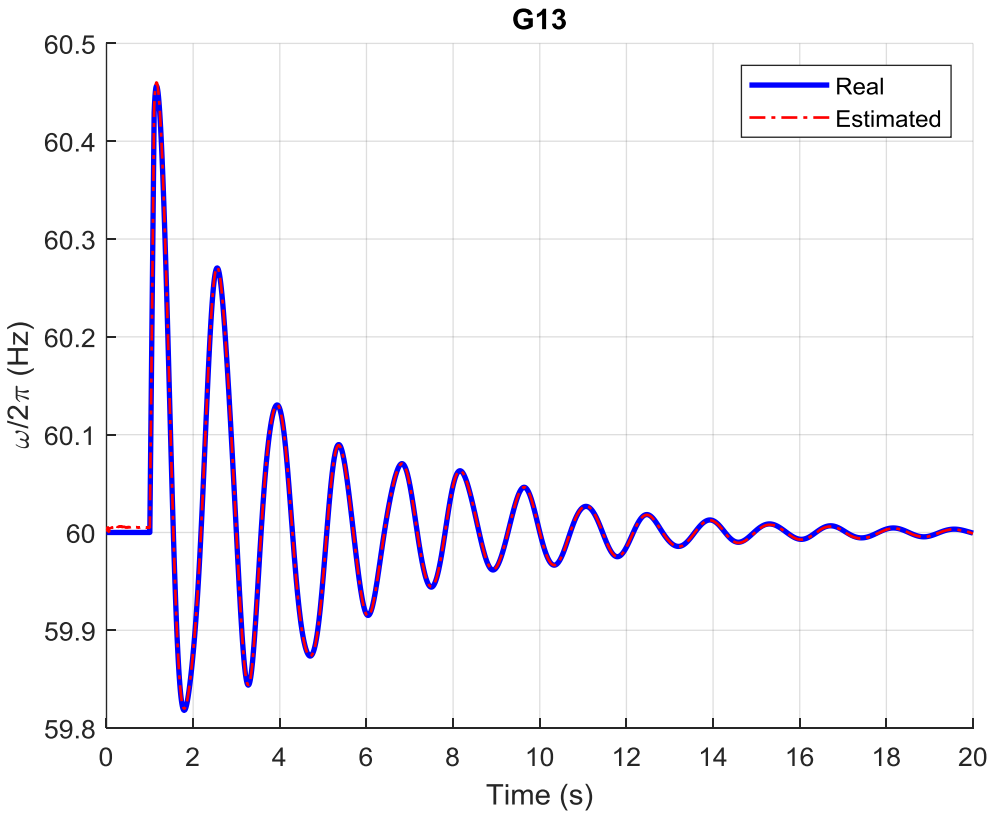
شکل ۹-۴ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



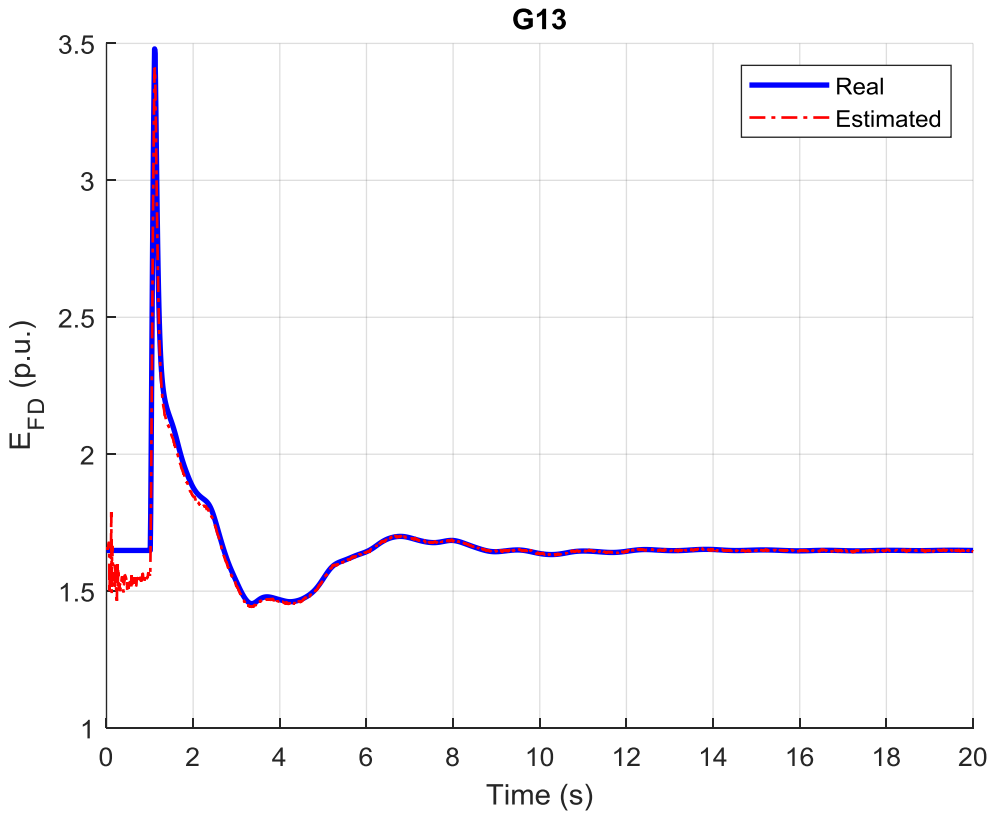
شکل ۹-۵ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



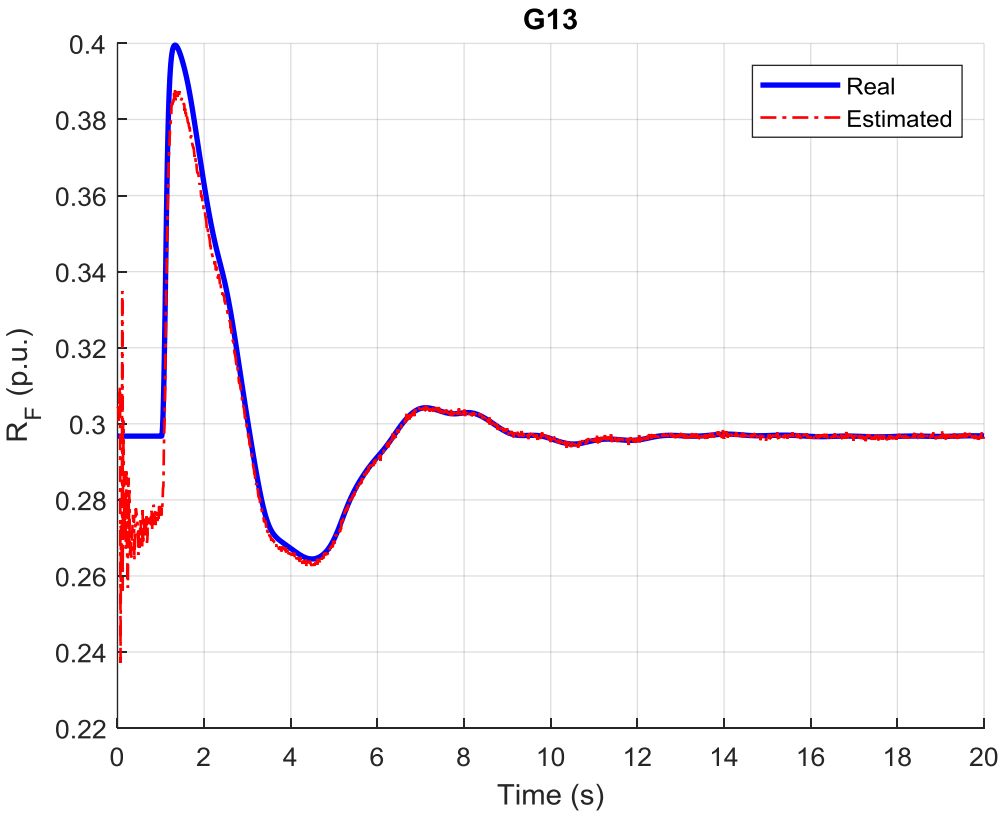
شکل ۹-۶ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



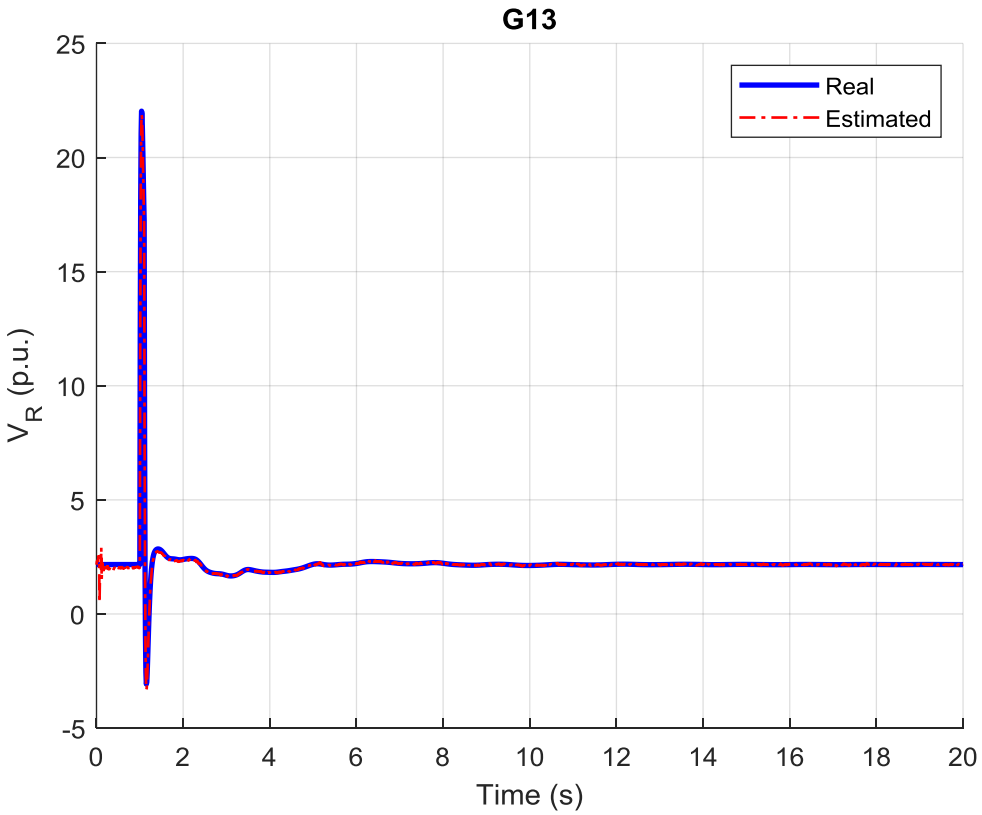
شکل ۹-۷ تخمین متغیرحالت هفتم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



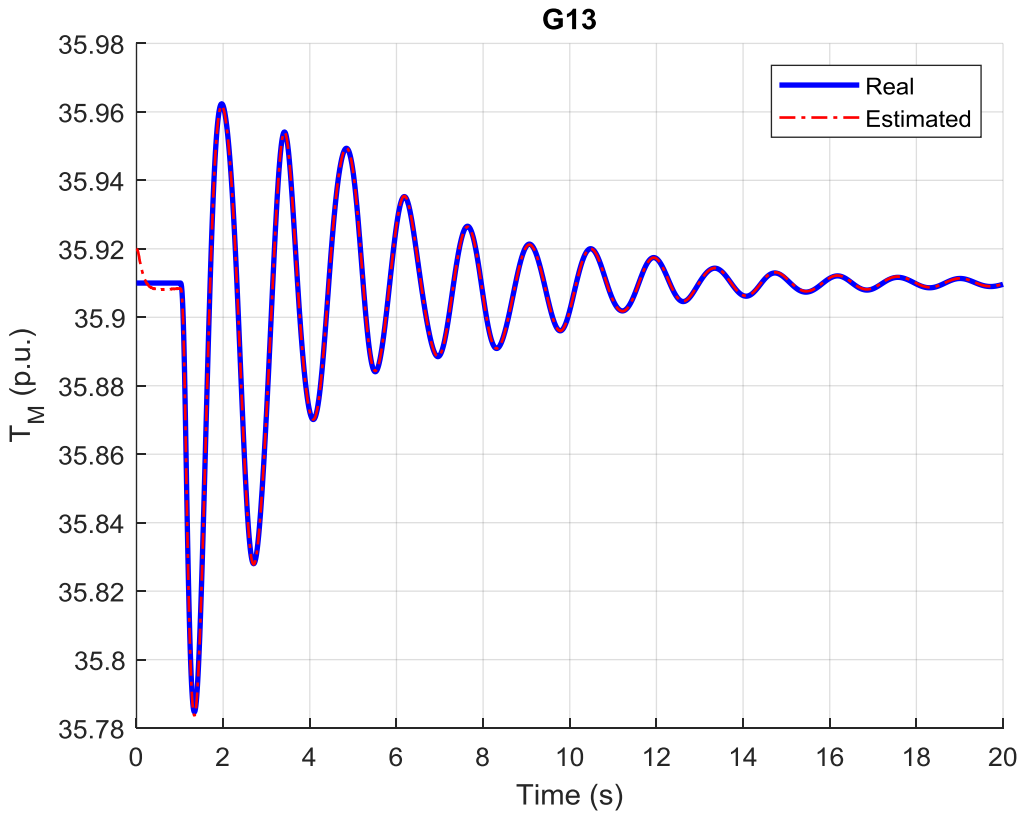
شکل ۹-۸ تخمین متغیرحالت هشتم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



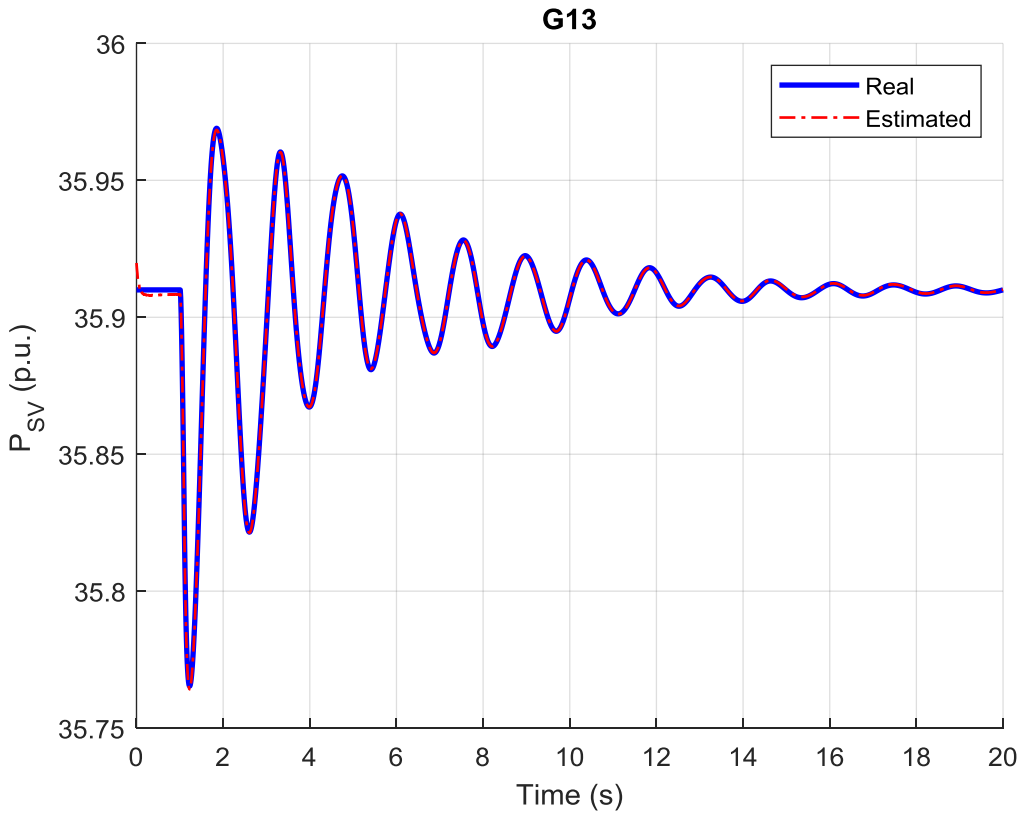
شکل ۹-۹ تخمین متغیرحالت نهم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۹-۱۰ تخمین متغیرحالت دهم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۹-۱۱ تخمین متغیرحالت یازدهم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF*

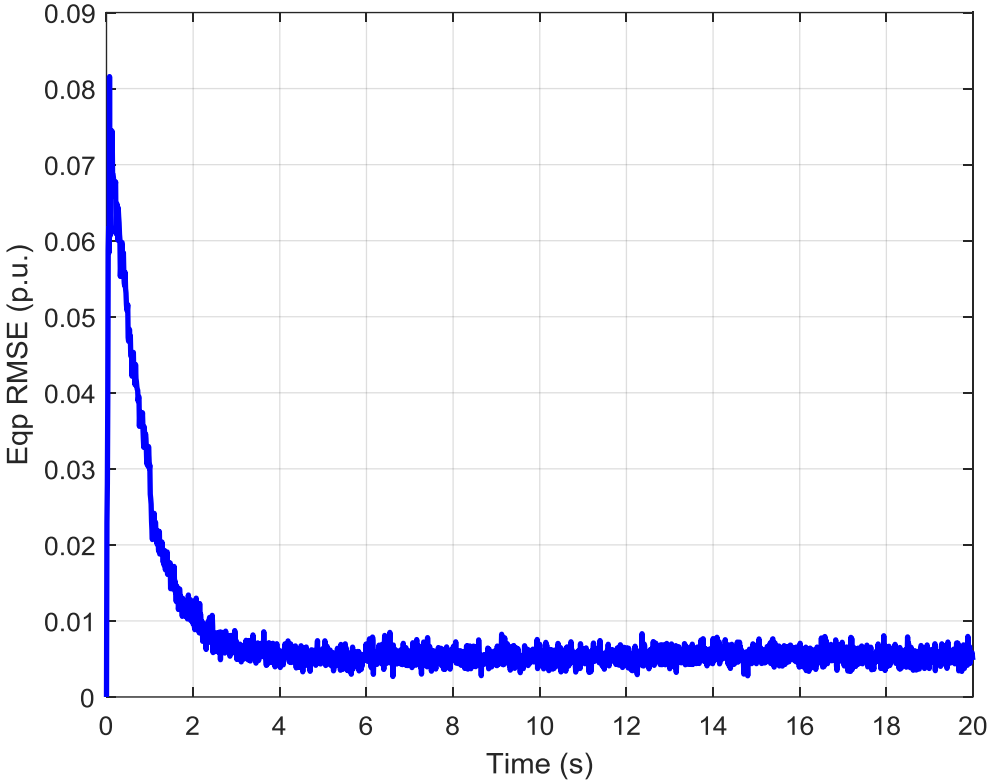
در ادامه، به ترسیم خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* در طول زمان پرداخته شده است. برای محاسبه خطای *RMSE* هر کدام از متغیرهای حالت (به طور مثال $\delta(k)$) در لحظه k از رابطه زیر استفاده شده است.

$$RMSE_{\delta}(k) = \sqrt{\frac{1}{MC}\sum_{mc=1}^{MC}\|\delta(k) - \hat{\delta}(k)\|^2} \qquad (۹-۲)$$

در این رابطه، $\delta(k)$ برداری شامل مقدار واقعی زاویه روتور تمامی ژنراتورها، $\hat{\delta}(k)$ مقدار تخمین‌زده‌شده این بردار در لحظه k و MC تعداد تکرارهای مونت-کارلو می‌باشد.

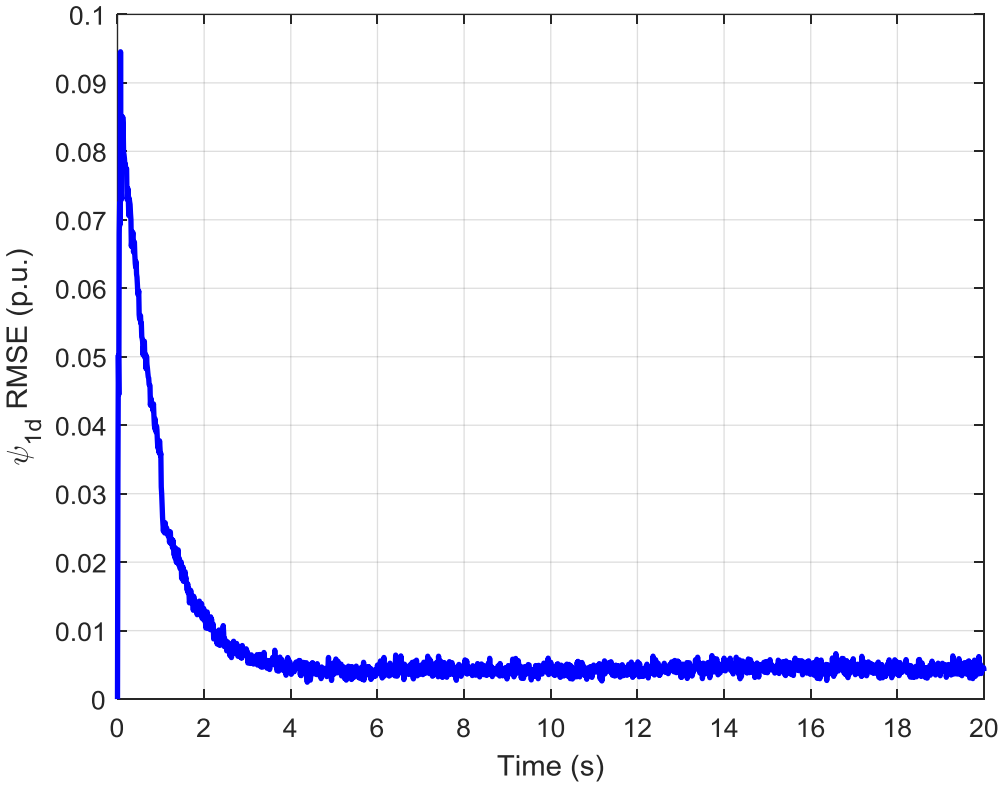
DOI: 10.30503/nripress.2020.248

با $MC = 20$ بار تکرار مونت-کارلو به محاسبه خطای *RMSE* این تخمین‌گر در هر لحظه برای متغیرهای حالت مختلف تمامی ژنراتورها پرداخته شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، خطای *RMSE* این تخمین‌گر در طول زمان کاهش یافته است اما دارای نوسانات بوده و مقدار قابل توجهی نیز دارد.



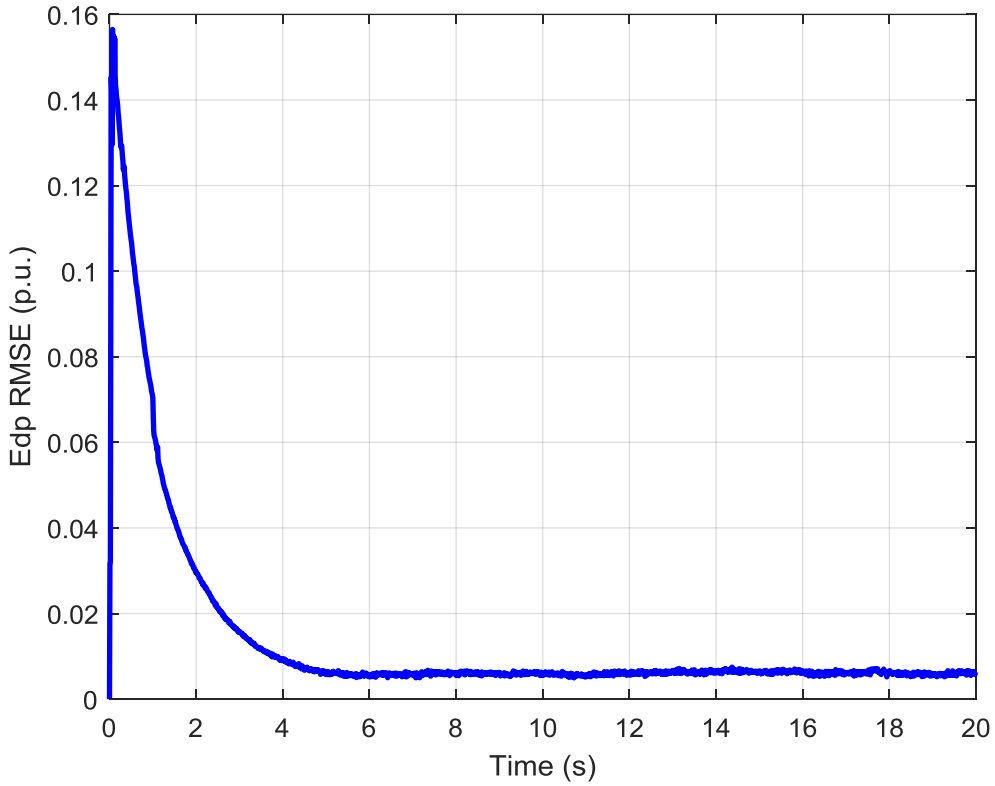
شکل ۹-۱۲ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت اول

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



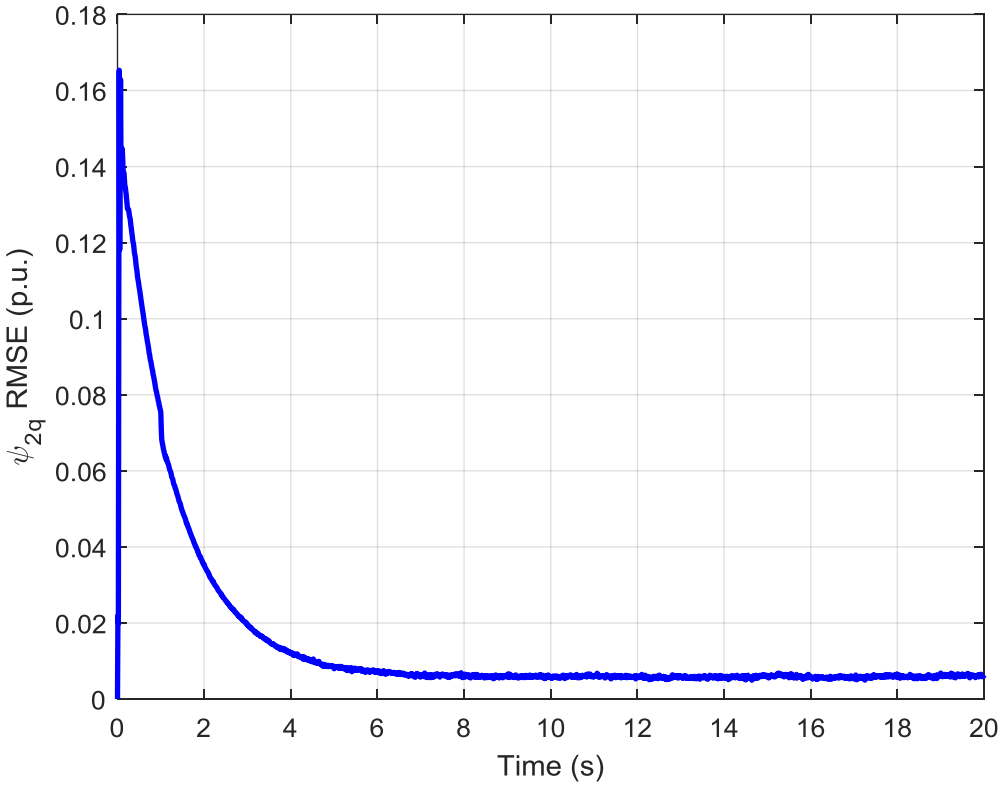
شکل ۹-۱۳ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت دوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



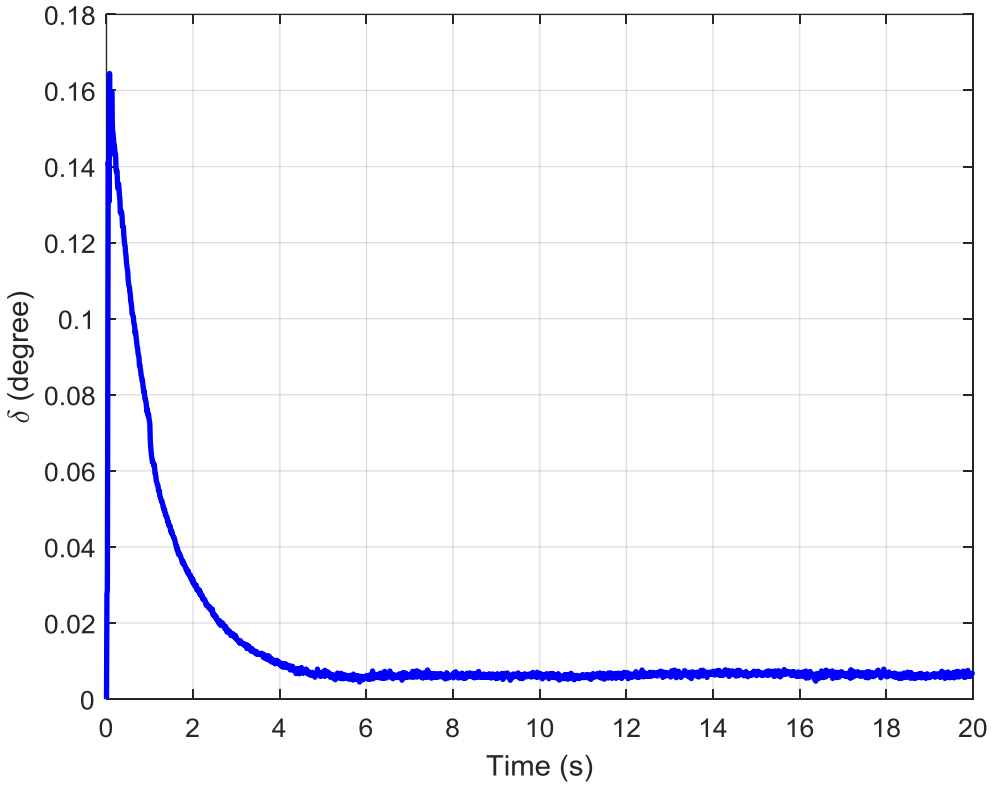
شکل ۹-۱۴ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت سوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



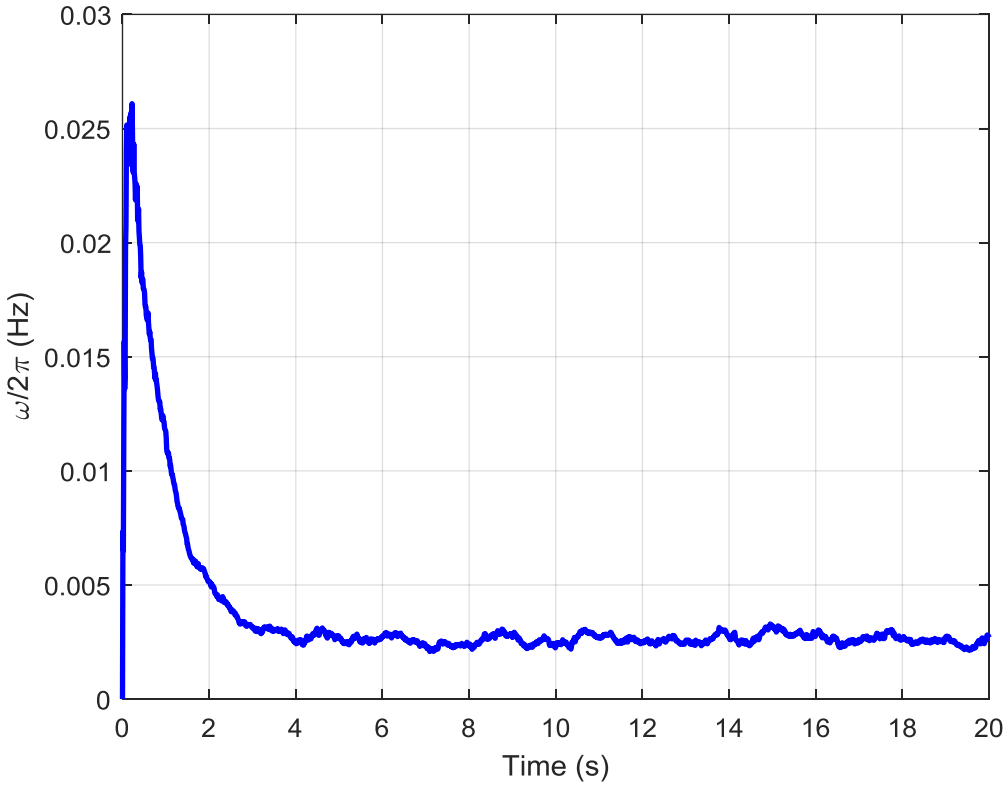
شکل ۹-۱۵ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت چهارم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



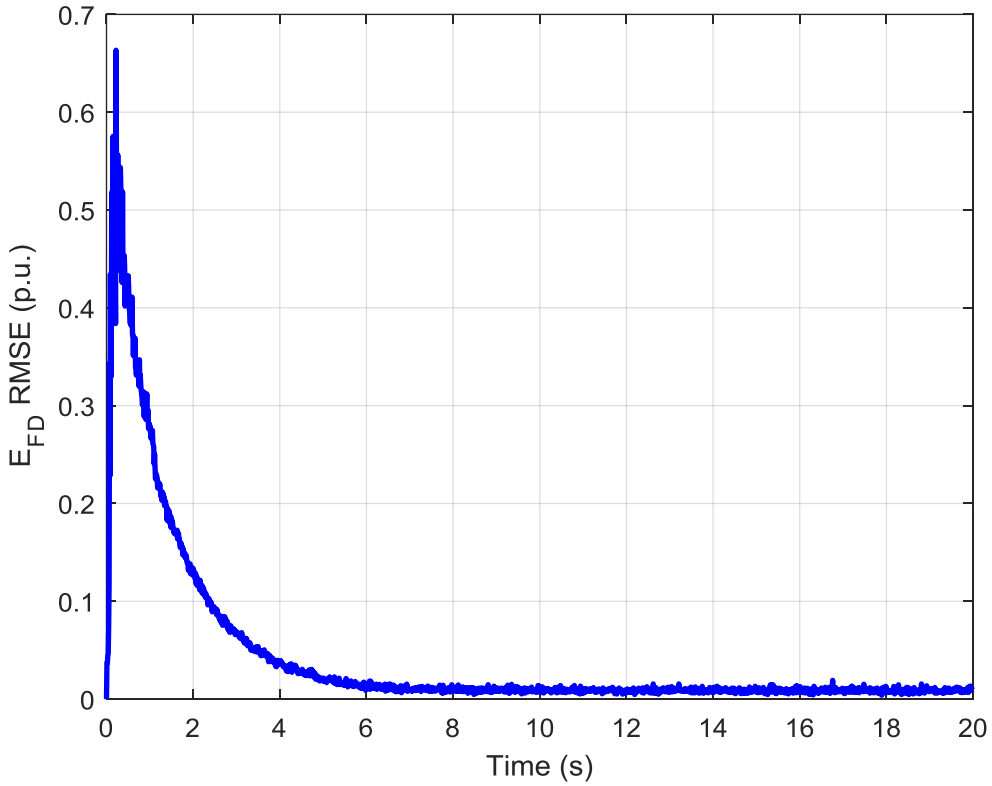
شکل ۹-۱۶ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت پنجم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



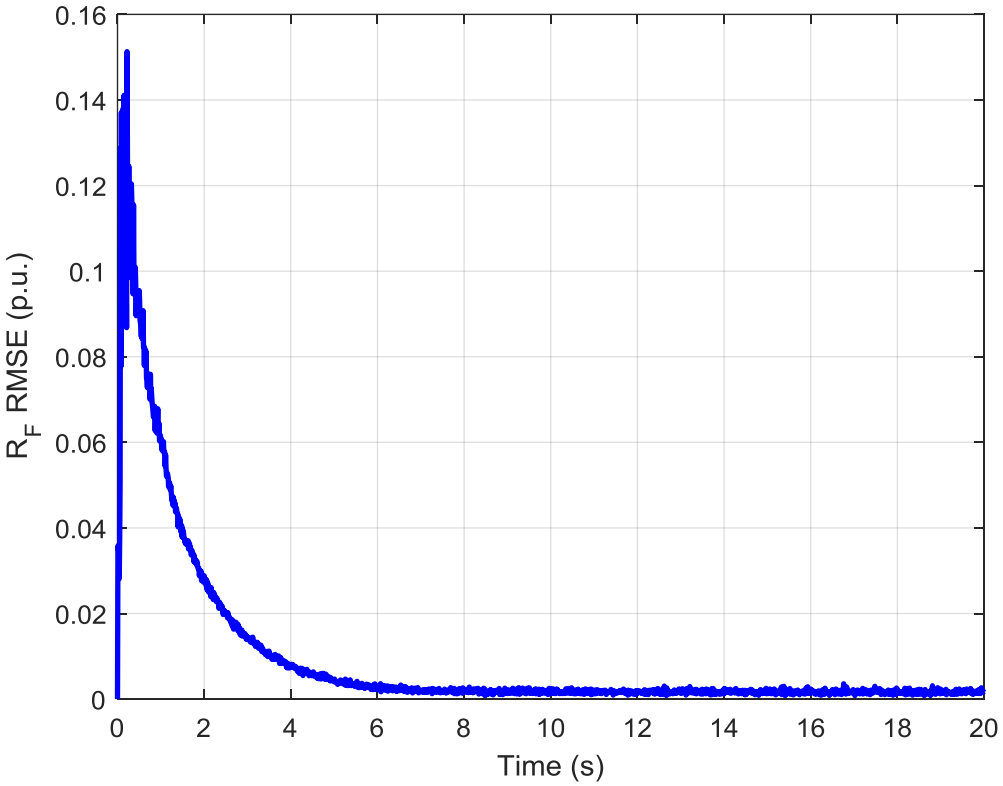
شکل ۹-۱۷ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت ششم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



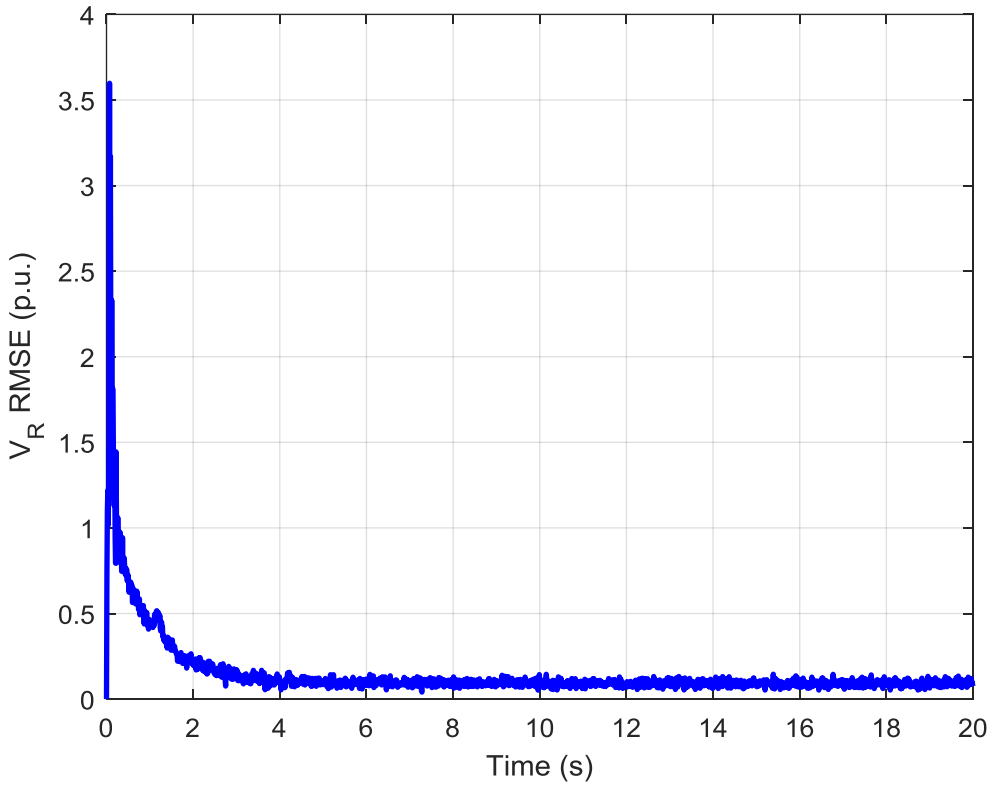
شکل ۹-۱۸ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت هفتم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



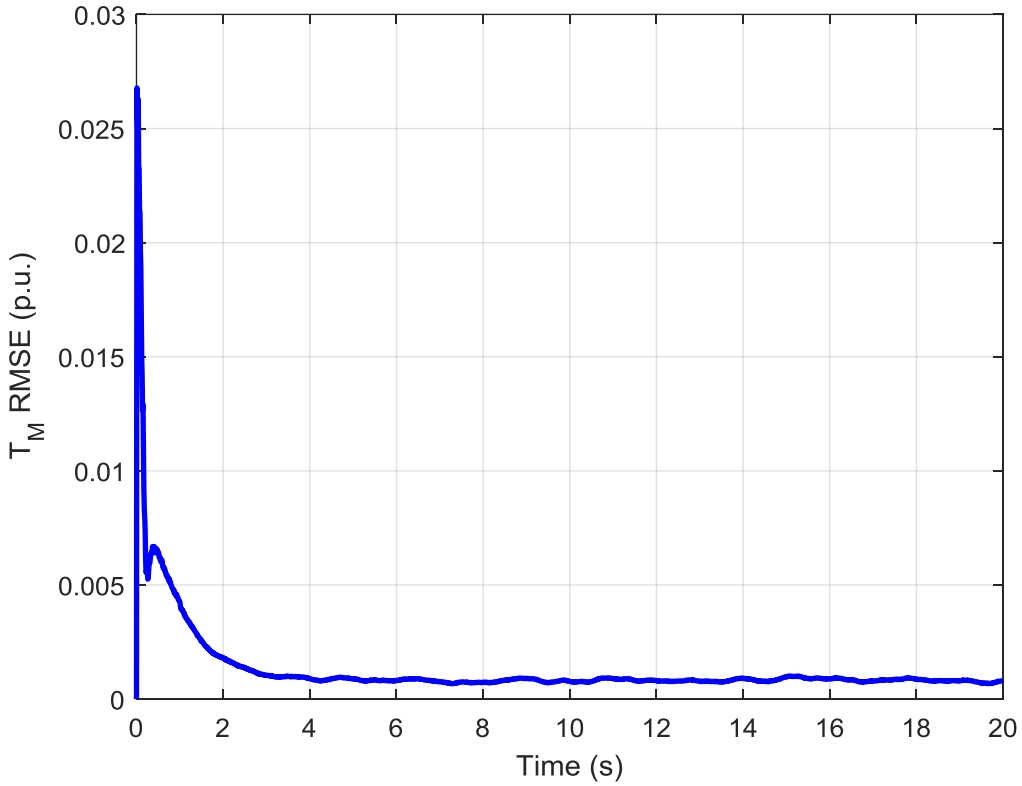
شکل ۹-۱۹ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت هشتم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



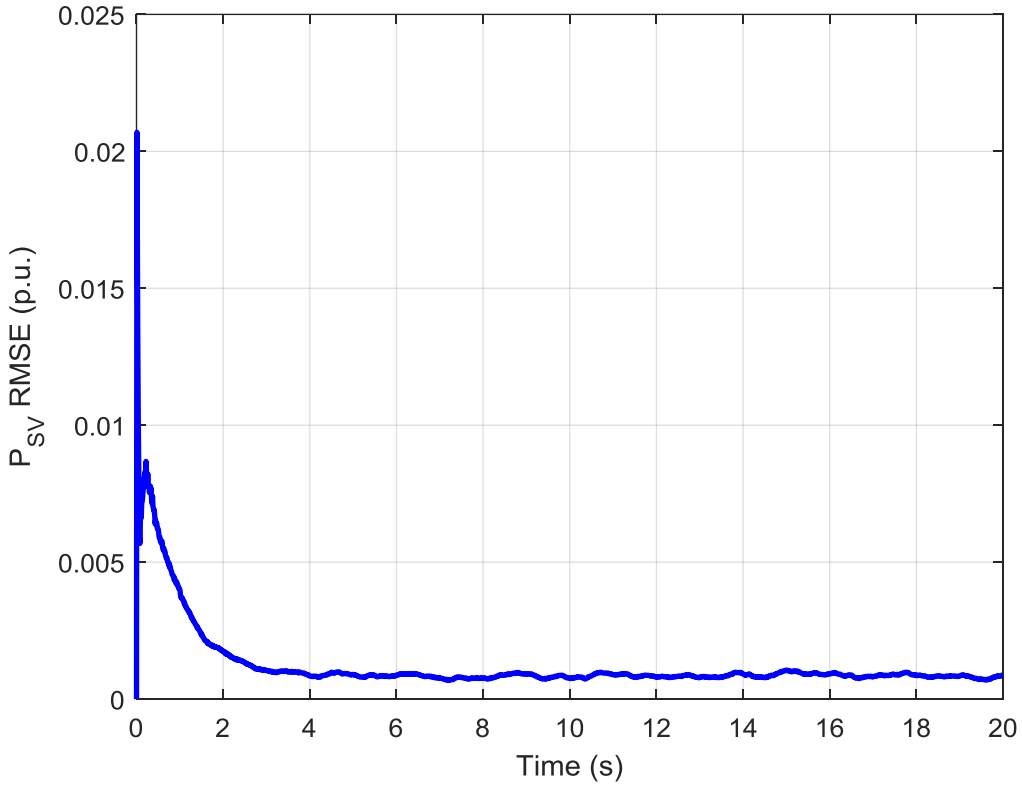
شکل ۹-۲۰ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت نهم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۹-۲۱ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت دهم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۹-۲۲ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* برای متغیر حالت یازدهم

۹ ۲ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر

به منظور حصول درک بهتر از عملکرد هر یک از تخمین‌گرهای مورد بررسی در این گزارش، به محاسبه میانگین زمانی خطای *RMSE* و همچنین مدت زمان محاسباتی برای اجرای هر بازگشت از این تخمین‌گرها و ارائه آن‌ها در قالب جدول پرداخته شده است. در جدول زیر، میانگین زمانی خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF* و مدت زمان محاسباتی آن در هر بازگشت ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده در این بخش از روش پیشنهادی خطی‌سازی آفلاین و سمبولیک به منظور کاهش بار محاسباتی استفاده شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، مدت زمان محاسباتی مورد نیاز برای هر بازگشت برابر با $0.0129\ s$ می‌باشد. با توجه به این که زمان نمونه‌برداری مناسب برای سیستم قدرت مجهز به *PMU* برابر با 0.02 یا 0.01 می‌باشد، روش پیشنهادی در صورت اجرا توسط یک پردازشگر قوی قادر خواهد بود بدون نیاز به روش‌های پردازش موازی و سایر روش‌های موجود در این زمینه در مدت زمانی

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

کمتر از زمان نمونه‌برداری سیستم به انجام محاسبات مورد نیاز در هر بازگشت بپردازد. بنابراین به صورت زمان-واقعی و بدون نیاز به روش‌های پردازش موازی یا سایر روش‌های موجود در این زمینه قابل پیاده‌سازی خواهد بود.

جدول ۹-۲ عملکرد تخمین‌گر EKF

$RMSE_{E_q'}(pu)$	$RMSE_{\psi_{1d}}(pu)$	$RMSE_{E_d'}(pu)$	$RMS\psi_{2q}(pu)$	$RMSE_{\delta}(deg)$	$RMSE_{\omega}(Hz)$
0.0084	*0.0082*	*0.0161*	*0.0149*	*0.933*	*0.038*
$RMSE_{E_{FD}}(pu)$	$RMSE_{R_F}(pu)$	$RMSE_{V_R}(pu)$	$RMSE_{T_M}(pu)$	$RMSE_{P_{SV}}(pu)$	*Computation Time (s)*
0.0415	*0.0092*	*0.1517*	*0.0014*	*0.0013*	*0.0129*

۹-۳- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از فیلتر کالمن مکعبی

در این بخش، ابتدا فیلتر کالمن مکعبی (*CKF*) معرفی شده و روابط و مراحل اجرای آن در قالب جدول ارائه می‌شود. سپس با استفاده از این تخمین‌گر به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم ۶۸ باسه تحت شرایط یکسان با تخمین‌گر *EKF* پرداخته می‌شود.

۹-۳-۱- معرفی فیلتر کالمن مکعبی

مراحل و روابط فیلتر کالمن مکعبی(*CKF*) برای سیستم غیرخطی (۹-۱) در جدول ۹-۳ ارائه شده است. در این روابط n_s تعداد متغیرهای حالت سیستم بوده و ξ_j به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\xi_j = \begin{cases} \sqrt{n_s}e_j & , \quad j = 1, \dots, n_s \\ -\sqrt{n_s}e_{j-n_s} & , \quad j = n_s+1, \dots, 2n_s \end{cases} \tag{۹-۳}$$

که در آن، e_j عبارت است از j امین عنصر از مجموعه بردارهای n_s-بعدی زیر.

$$\left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \right\} \tag{۹-۴}$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۹-۳ مراحل و معادلات تخمین‌گر CKF

مرحله پیش‌بینی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_j(k\|k) = \hat{X}(k\|k) + \sqrt{P(k\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی ام$k+1$	$\mathcal{X}_j(k+1\|k) = f\left(\mathcal{X}_j(k\|k), \tilde{U}(k)\right), \quad j = 1, \dots, 2n_s$ $\hat{X}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s} \mathcal{X}_j(k+1\|k)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی ام$k+1$	$P(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(X_j(k+1\|k) - \hat{X}(k+1\|k)\right)\left(X_j(k+1\|k) - \hat{X}(k+1\|k)\right)^T + Q(k)$
مرحله به‌روزرسانی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_j(k+1\|k) = \hat{X}(k+1\|k) + \sqrt{P(k+1\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه خروجی پیش‌بینی‌شده و بهره کالمن در مرحله زمانی ام$k+1$	$\mathcal{Y}_j(k+1\|k) = h\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k), \tilde{U}(k+1)\right), \quad j = 1, \dots, 2n_s$ $\hat{Y}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s} Y_j(k+1\|k)$ $P_{XY}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k) - \hat{X}(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)^T$ $P_Y(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)^T + R(k+1)$ $K(k+1) = P_{XY}(k+1\|k)P_Y^{-1}(k+1\|k)$
محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی ام$k+1$	$\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k) + K(k+1)\left(\tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)$
تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله	$P(k+1\|k+1) = P(k+1\|k) - K(k+1)P_Y(k+1\|k)K^T(k+1) = P(k+1\|k) - K(k+1)P_{XY}^T(k+1\|k)$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

زمانی $k+1$ام

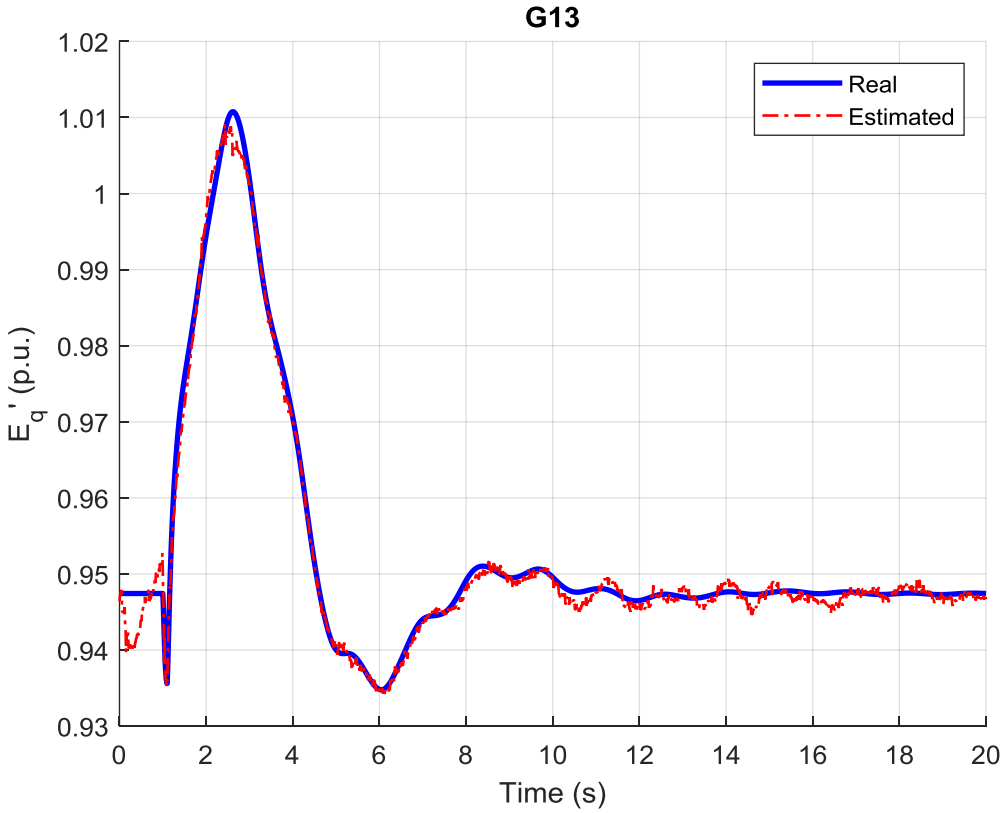
۹-۳-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط فیلتر کالمن مکعبی

همانطور که گفته شد، برای محاسبه نتایج حاصل از تمامی تخمین‌گرهایی که در ادامه این گزارش مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند، نیاز است تا شبیه‌سازی تحت شرایط یکسان صورت گیرد تا بتوان مقایسه عادلانه‌ای بین آن‌ها انجام داد. بنابراین تنظیمات این تخمین‌گر نیز مشابه بخش قبل در نظر گرفته شده است. در ادامه، به ترسیم نمودار زمانی نتایج تخمین حالت و ارائه نتایج (شامل خطای *RMSE* و مدت زمان محاسباتی) در قالب جدول پرداخته شده است.

۹ ۳ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت

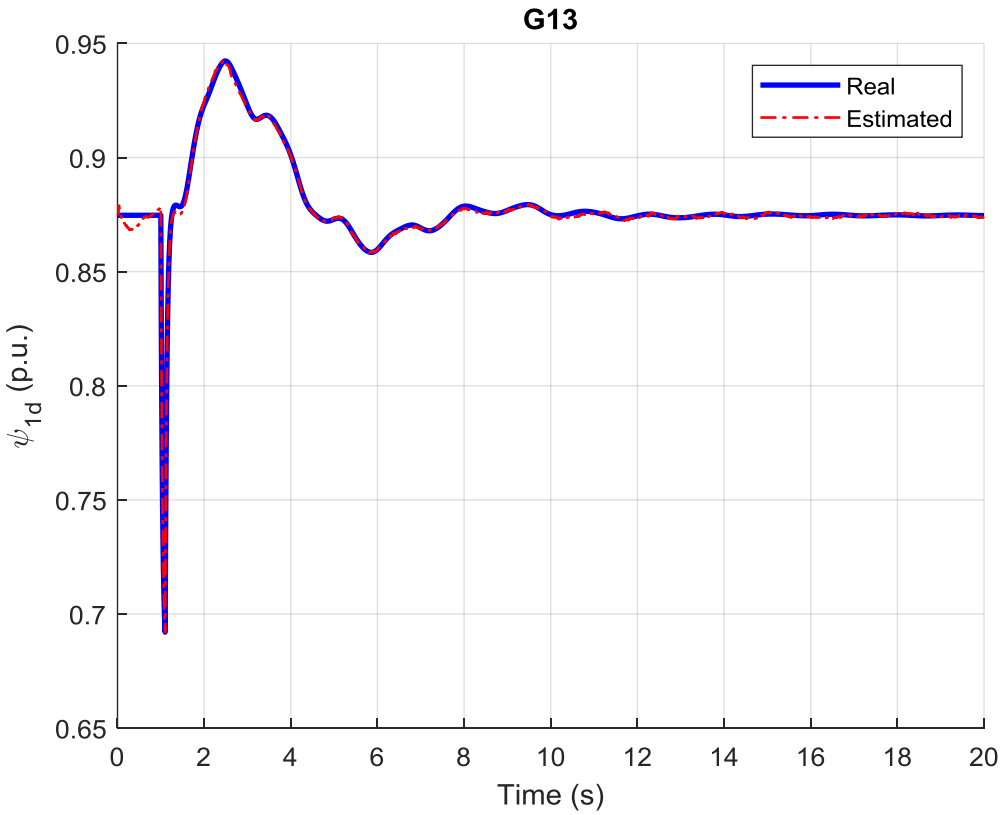
در شکل‌های زیر، مقادیر واقعی و تخمین‌زده‌شده هر یک از متغیرهای حالت در طول زمان ترسیم شده‌اند. به منظور جلوگیری از ترسیم نمودارهای متعدد، تنها به ترسیم ۶ متغیر حالت اول ژنراتور *G13* بسنده شده است. چنان‌چه در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود، این تخمین‌گر نیز قادر به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم بوده است اما به دلیل عدم در نظر گرفتن فرم خاص غیرخطی سیستم قدرت که در گزارش مرحله قبل بدان پرداخته شد، دارای خطای قابل توجهی می‌باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



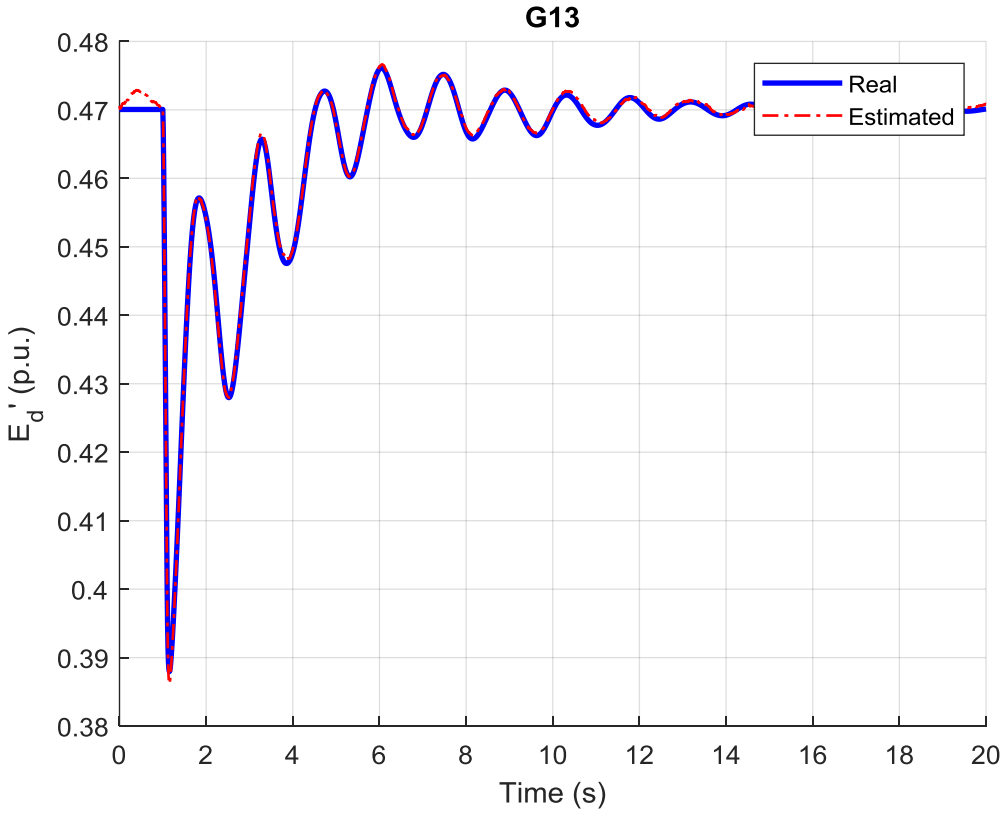
شکل ۹-۲۳ تخمین متغیرحالت اول ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



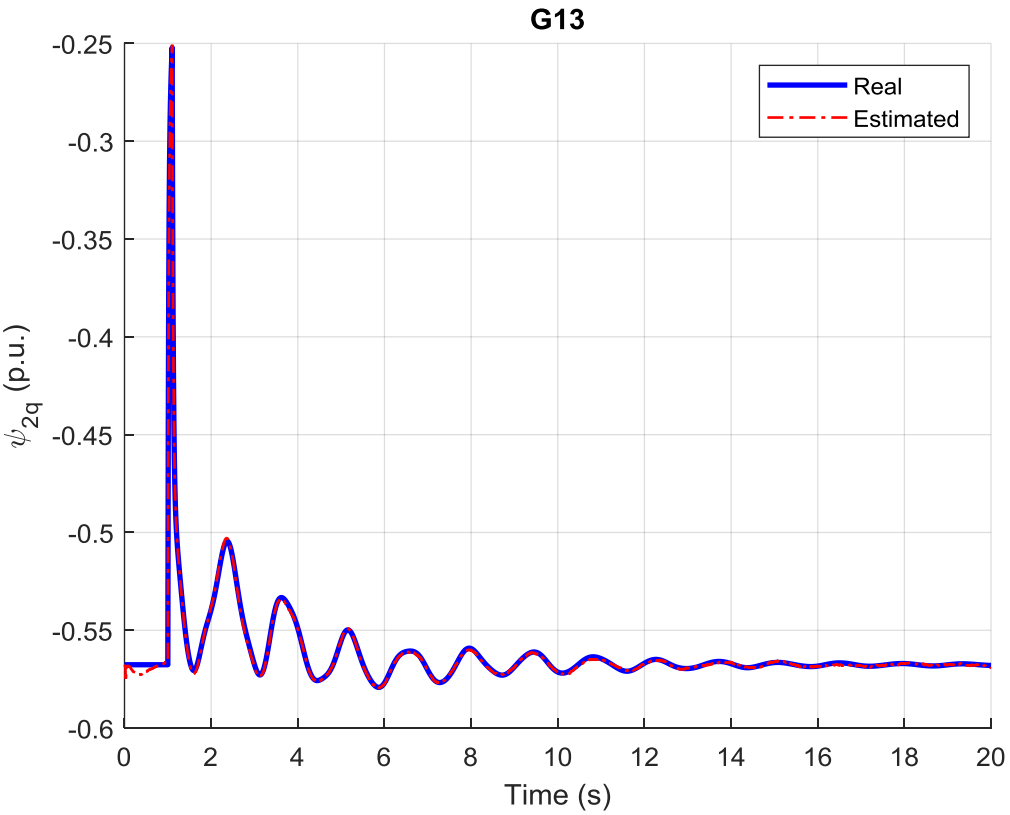
شکل ۹-۲۴ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



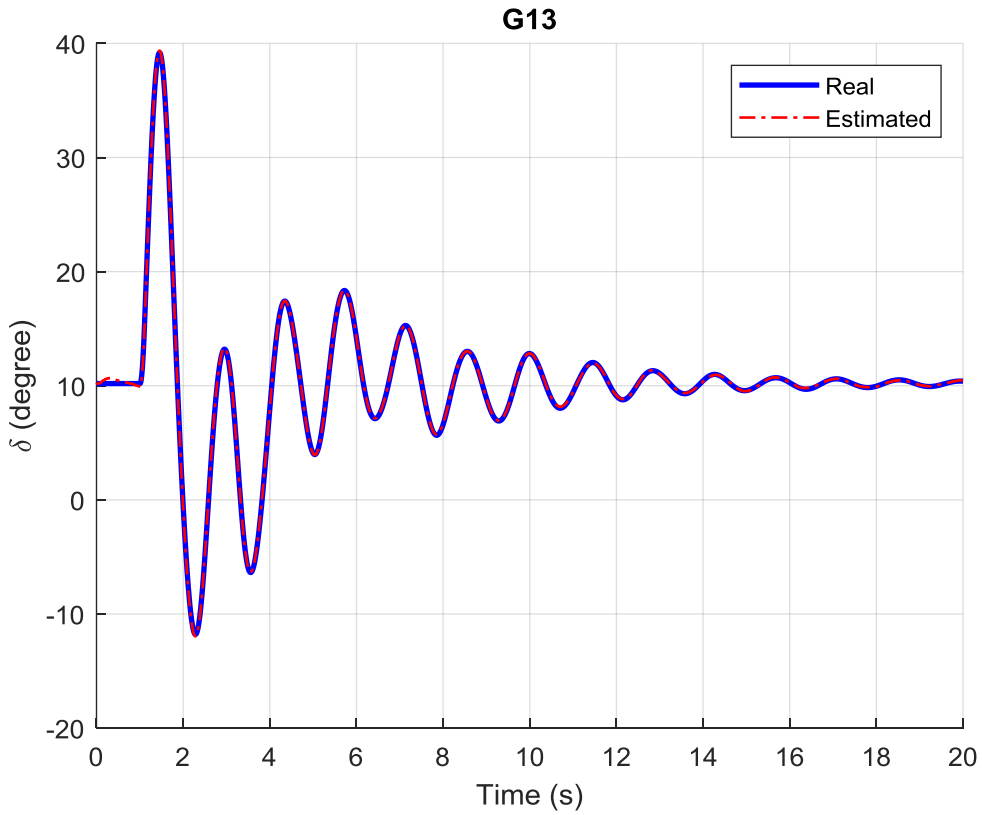
شکل ۹-۲۵ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



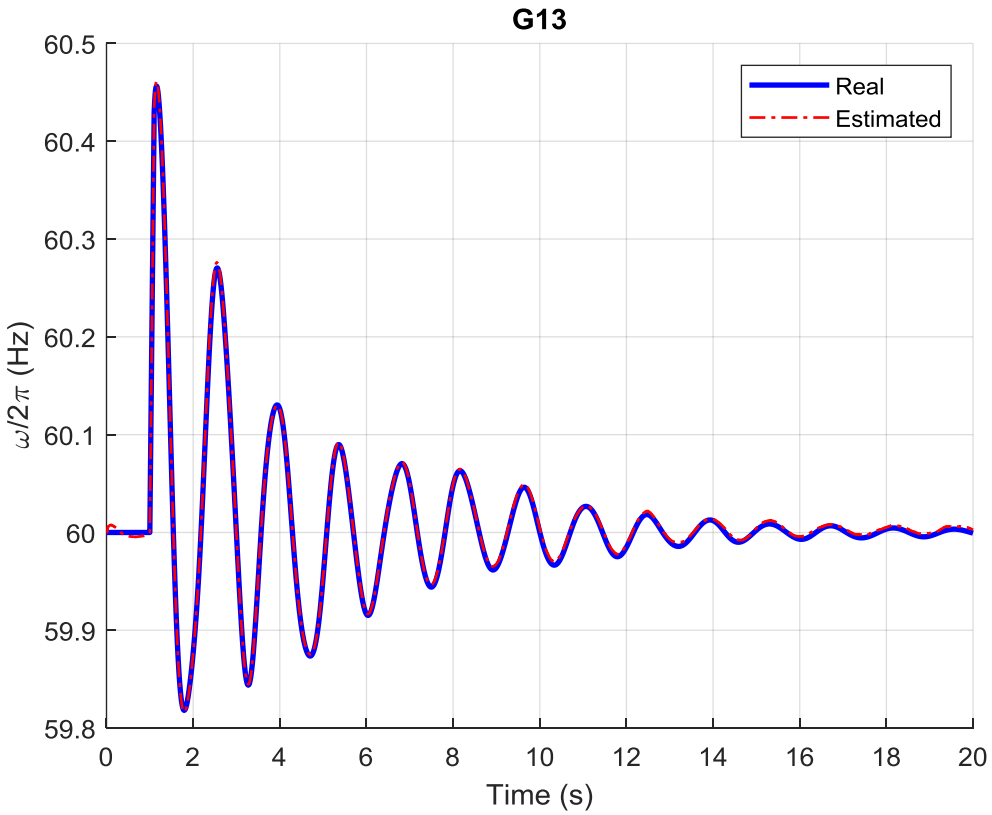
شکل ۹-۲۶ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۹-۲۷ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF*

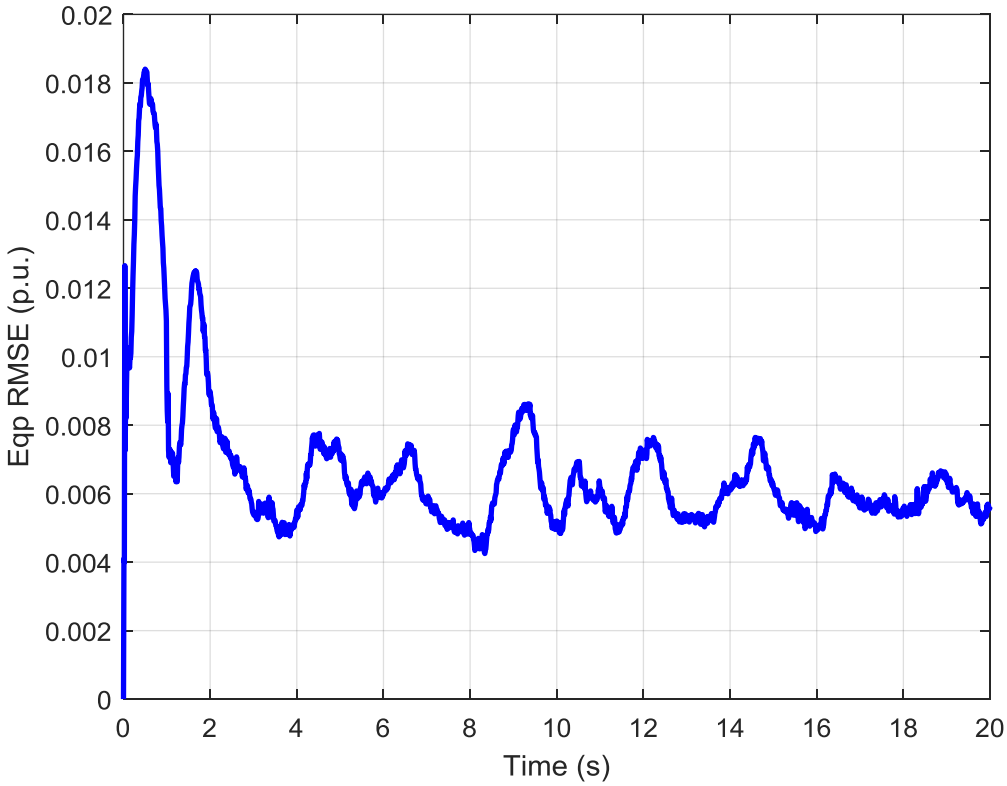
DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۹-۲۸ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF*

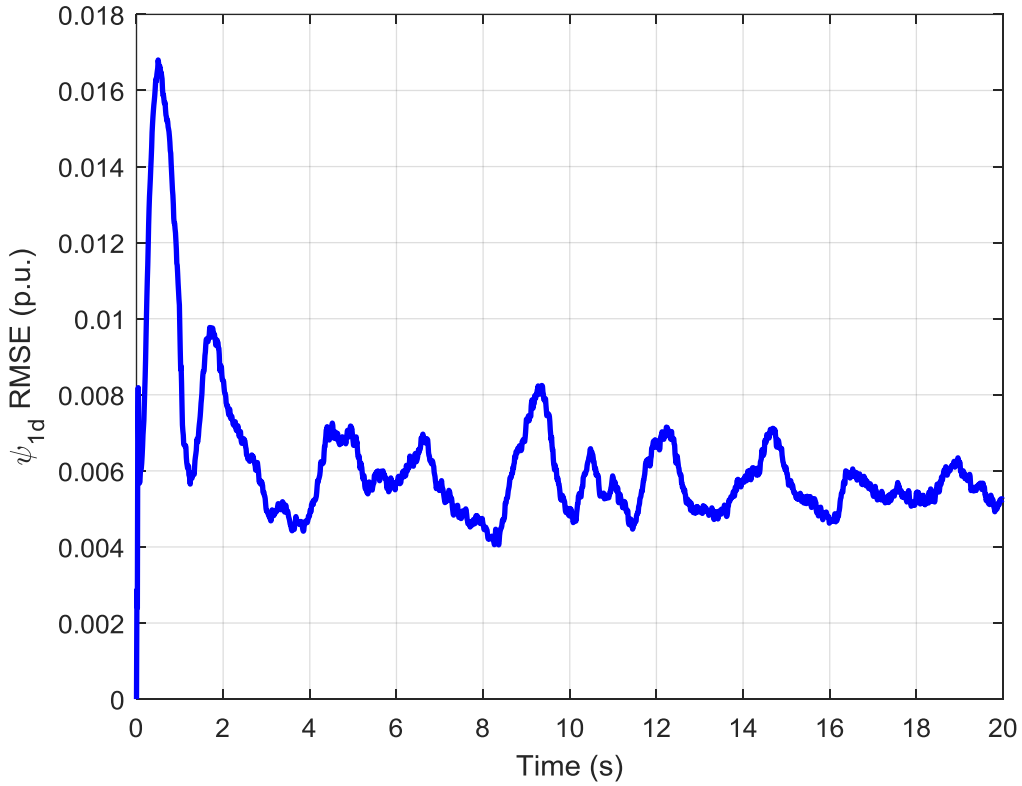
در ادامه، به ترسیم خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* در طول زمان پرداخته شده است. با $MC = 20$ بار تکرار مونت-کارلو به محاسبه خطای *RMSE* این تخمین‌گر در هر لحظه برای متغیرهای حالت مختلف تمامی ژنراتورها پرداخته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



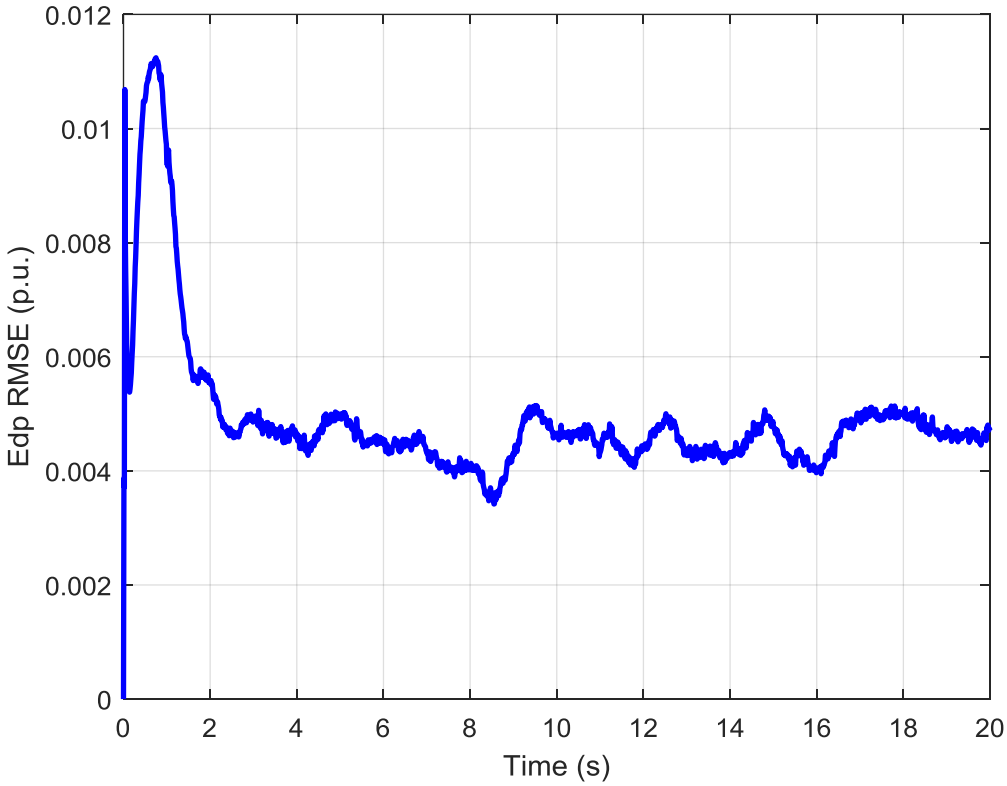
شکل ۹-۲۹ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* برای متغیر حالت اول

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



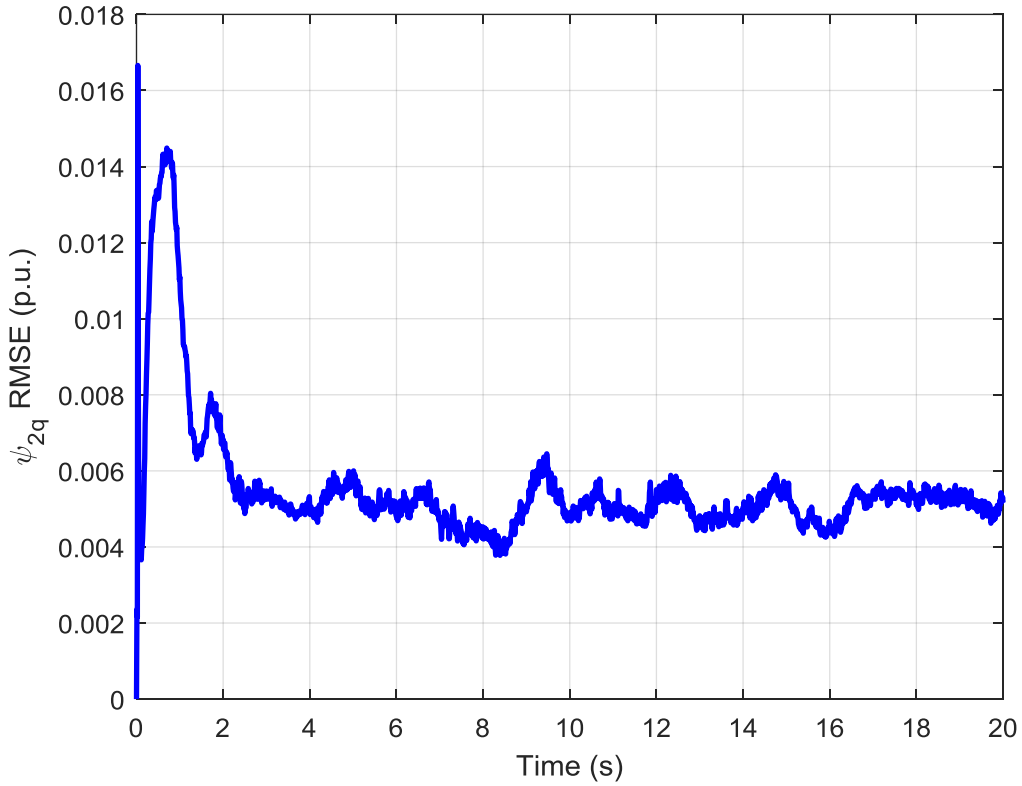
شکل ۹-۳۰ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* برای متغیر حالت دوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



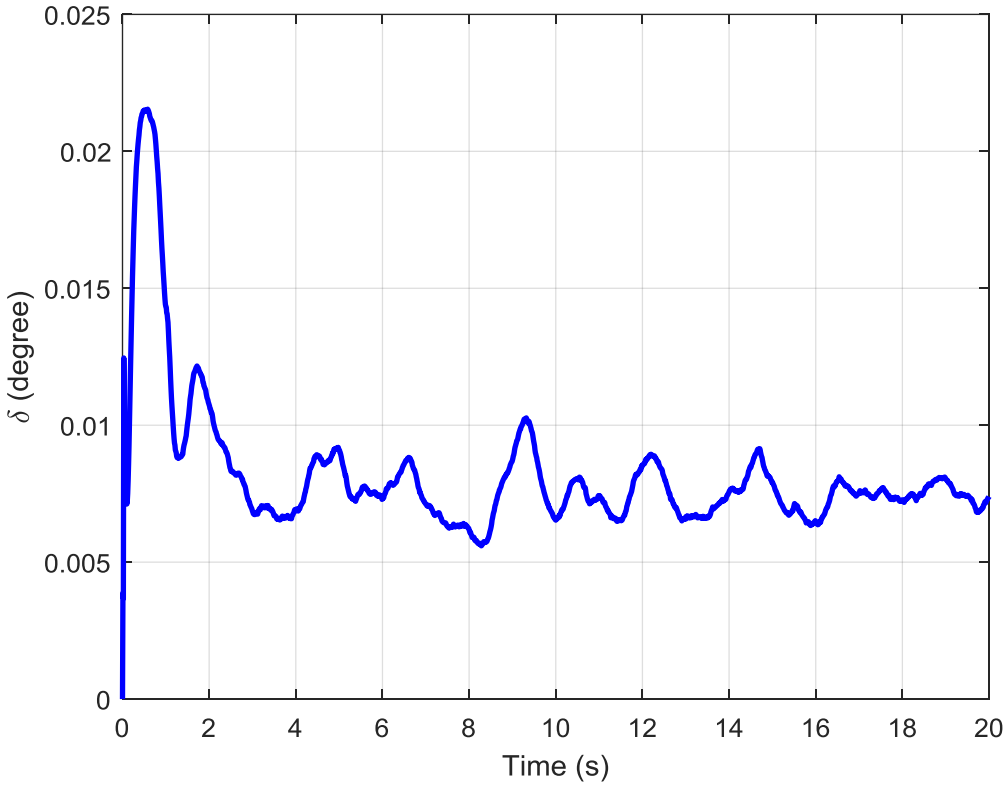
شکل ۹-۳۱ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* برای متغیر حالت سوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



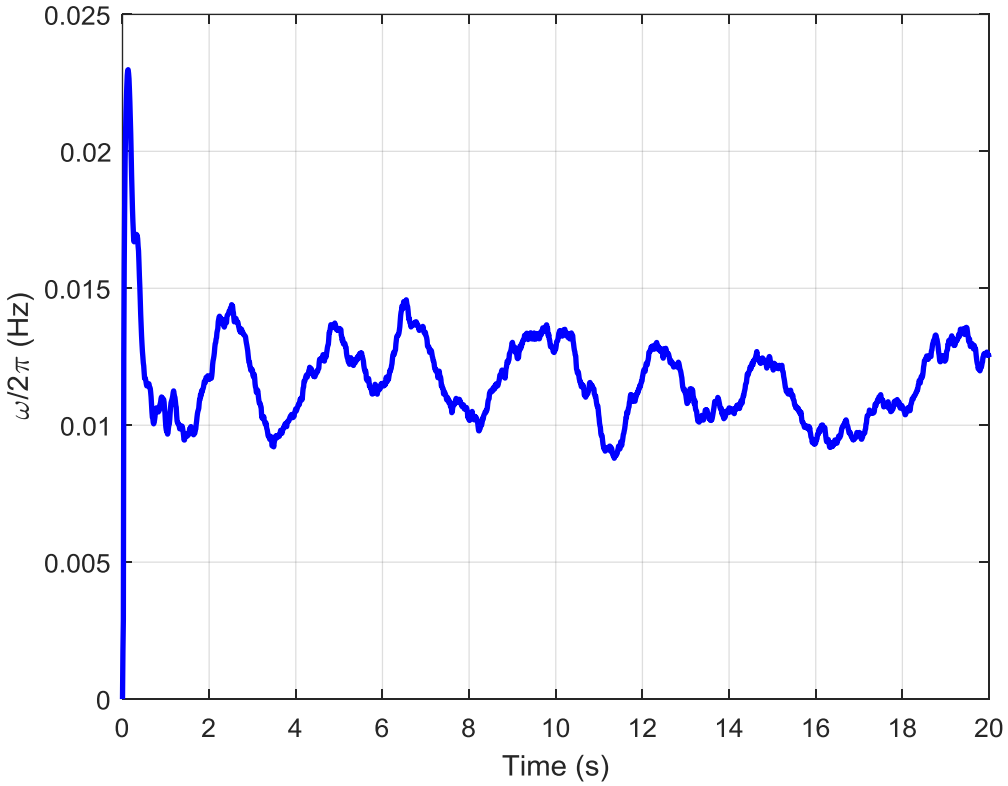
شکل ۹-۳۲ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* برای متغیر حالت چهارم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۹-۳۳ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* برای متغیر حالت پنجم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۹-۳۴ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* برای متغیر حالت ششم

۹ ۳ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر

در جدول زیر، میانگین زمانی خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* و مدت زمان محاسباتی آن در هر بازگشت ارائه شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، خطای *RMSE* این تخمین‌گر کمی کمتر از تخمین‌گر *EKF* می‌باشد، زیرا همان‌طور که گفته شد تخمین‌گر *CKF* بر خلاف *EKF* مبتنی بر خطی‌سازی نبوده و از قانون مکعبی برای غلبه بر غیرخطی‌گری سیستم استفاده می‌کند. از طرف دیگر، چنان‌چه مشاهده می‌شود، مدت زمان محاسباتی این تخمین‌گر نسبت به *EKF* بیشتر می‌باشد، زیرا همان‌طور که گفته شد در بخش قبل از روش خطی‌سازی سمبلیک و آفلاین برای محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده در هر بازگشت استفاده شد که منجر به کاهش مدت زمان محاسباتی در مقایسه با سایر روش‌ها شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۹-۴ عملکرد تخمین‌گر *CKF*

$RMSE_{E_q'}(pu)$	$RMSE_{\psi_{1d}}(pu)$	$RMSE_{E_d'}(pu)$	$RMS\psi_{2q}(pu)$	$RMSE_{\delta}(deg)$	$RMSE_{\omega}(Hz)$
0.0066	*0.0061*	*0.0048*	*0.0055*	*0.4693*	*0.0116*
$RMSE_{E_{FD}}(pu)$	$RMSE_{R_F}(pu)$	$RMSE_{V_R}(pu)$	$RMSE_{T_M}(pu)$	$RMSE_{P_{SV}}(pu)$	*Computation Time (s)*
0.0073	*0.0011*	*0.0951*	*0.0037*	*0.0038*	*0.0713*

۹-۴- جمع‌بندی

در این فصل، به شبیه‌سازی دو روش موجود تخمین حالت غیرخطی سیستم قدرت یعنی فیلتر کالمن توسعه‌یافته (*EKF*) و فیلتر کالمن مکعبی (*EKF*) که مبنای طراحی تخمین‌گر در این پروژه هستند، پرداخته شد. نتایج حاصل از این تخمین‌گرها در قالب ترسیم نتایج تخمین متغیرهای حالت دینامیکی، ترسیم خطای *RMSE* در حوزه زمان و محاسبه خطای *RMSE* کل و مدت زمان محاسباتی ارائه شد.

چنان‌چه مشاهده شد، برای تخمین‌گر *EKF* مدت زمان محاسباتی مورد نیاز برای هر بازگشت برابر با 0.0129 *s* به دست آمد. با توجه به این که زمان نمونه‌برداری مناسب برای سیستم قدرت مجهز به *PMU* برابر با 0.02 یا 0.01 می‌باشد، روش پیشنهادی در صورت اجرا توسط یک پردازشگر قوی قادر خواهد بود بدون نیاز به روش‌های پردازش موازی و سایر روش‌های موجود در این زمینه در مدت زمانی کمتر از زمان نمونه‌برداری سیستم به انجام محاسبات مورد نیاز در هر بازگشت بپردازد. بنابراین به صورت زمان-واقعی و بدون نیاز به روش‌های پردازش موازی یا سایر روش‌های موجود در این زمینه قابل پیاده‌سازی خواهد بود.

همچنین مشاهده شد که خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* کمی کمتر از تخمین‌گر *EKF* می‌باشد، زیرا همان‌طور که گفته شد تخمین‌گر *CKF* بر خلاف *EKF* مبتنی بر خطی‌سازی نبوده و از قانون مکعبی برای غلبه بر غیرخطی‌گری سیستم استفاده می‌کند. از طرف دیگر، چنان‌چه مشاهده شد، مدت زمان محاسباتی این تخمین‌گر نسبت به *EKF* بیشتر می‌باشد، زیرا همان‌طور که گفته شد در پیاده‌سازی *EKF* در این پروژه از روش خطی‌سازی سمبلیک و آفلاین برای محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده در هر بازگشت استفاده شده است که منجر به کاهش مدت زمان محاسباتی در مقایسه با سایر روش‌ها می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل دهم: شبیه‌سازی روش پیشنهادی مبتنی بر خطی‌سازی و روش تحریک–رویداد

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۱۰-۱- مقدمه

در این فصل، به شبیه‌سازی روش پیشنهادی در فصل ۷ پرداخته شده است. ابتدا نتایج تخمین حالت توسط تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر خطی‌سازی با قابلیت مواجهه با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات (که از این پس *EKF-C* نامیده می‌شود) ارائه شده است. سپس نتایج تخمین حالت توسط این روش و با استفاده از استراتژی تحریک-رویداد پیشنهادی (که از این پس *EKF-C-ET* نامیده می‌شود) ارائه شده است. نتایج حاصل از تخمین‌گر پیشنهادی شامل ترسیم نتایج تخمین متغیرهای حالت دینامیکی، ترسیم خطای *RMSE* در حوزه زمان و محاسبه خطای *RMSE* کل و مدت زمان محاسباتی می‌باشد.

۱۰-۲- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C*

در این بخش، ابتدا روابط و مراحل اجرای تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* در قالب جدول ارائه می‌شود. سپس با استفاده از این تخمین‌گر به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم ۶۸ باسه پرداخته شده و نتایج تخمین حالت در قالب نمودار و جدول ارائه می‌شوند.

۱۰-۲-۱- تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C*

مراحل و معادلات تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* مبتنی بر خطی‌سازی با قابلیت مقابله با همبستگی برای سیستم غیرخطی زیر در جدول ۱۰-۱ ارائه شده است.

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) \qquad (۱-۱۰)$$

$$\tilde{Y}(k) = h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) + \eta_Y(k)$$

$$\eta_U(k) \sim \mathcal{N}(0, Q_U)$$

$$\eta_Y(k) \sim \mathcal{N}(0, Q_Y)$$

جدول ۱۰-۱ مراحل و معادلات تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C

مرحله پیش‌بینی در زمان $k+1$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$\hat{F}(k) = \frac{\partial f}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{G}(k) = \frac{\partial f}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{H}(k) = \frac{\partial h}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{E}(k) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$	**محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k\|k)$ و $\tilde{U}(k)$**
$R(k) = \hat{E}(k)Q_U\hat{E}^T(k) + Q_Y$ $S(k) = \hat{G}(k)Q_U\hat{E}^T(k)$ $T(k) = S(k)R^{-1}(k)$ $\hat{X}(k+1\|k) = f^*\left(\hat{X}(k\|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)\tilde{Y}(k)$	**محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام**
$F^*(k) = \hat{F}(k) - T(k)\hat{H}(k)$ $Q(k) = \hat{G}(k)Q_U\hat{G}^T(k)$ $Q^*(k) = Q(k) - S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$ $P(k+1\|k) = F^*(k)P(k\|k)F^{*T}(k) + Q^*(k)$	**محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام**
مرحله به‌روزرسانی در زمان $k+1$	
$\hat{H}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$ $\hat{E}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$	**محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k+1\|k)$ و $\tilde{U}(k+1)$**
$\hat{Y}(k+1\|k) = h\left(\hat{X}(k+1\|k), \tilde{U}(k+1)\right)$ $r(k+1) = \tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)$ $R(k+1) = \hat{E}(k+1)Q_U\hat{E}^T(k+1) + Q_Y$ $K(k+1) = P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)\right)^{-1}$	**محاسبه مانده و بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام**
$\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k) + K(k+1)r(k+1)$	**محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام**
$P(k+1\|k+1) = \left(I - K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$	**تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام**

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

چنان‌چه در این جدول مشاهده می‌شود، در مرحله پیش‌بینی الگوریتم پیشنهادی نیاز به محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده یعنی $\hat{F}(k)$، $\hat{G}(k)$، $\hat{H}(k)$ و $\hat{E}(k)$ و در مرحله به‌روزرسانی نیاز به محاسبه ماتریس‌های $\hat{H}(k+1)$ و $\hat{E}(k+1)$ می‌باشد. از آن‌جا که محاسبه این ژاکوبین‌ها به خصوص در سیستم‌های دارای ابعاد بالا مانند سیستم ۶۸ باسه در هر بازگشت بسیار زمان‌بر می‌باشد، در این پروژه از روش خطی‌سازی سمبلیک برای کاهش بار محاسباتی استفاده شده است. بدین صورت که خطی‌سازی سیستم ابتدا به صورت آفلاین انجام شده و این ماتریس‌ها به صورت سمبلیک و آفلاین به دست می‌آیند. سپس در هنگام شبیه‌سازی روش تخمین حالت پیشنهادی، نقطه کار سیستم در هر بازگشت محاسبه شده و مقادیر متناظر در مقادیر سمبلیک ماتریس‌های سیستم خطی‌شده جایگذاری می‌شوند. بدین ترتیب زمان محاسباتی روش پیشنهادی کاهش بسیار زیادی خواهد یافت.

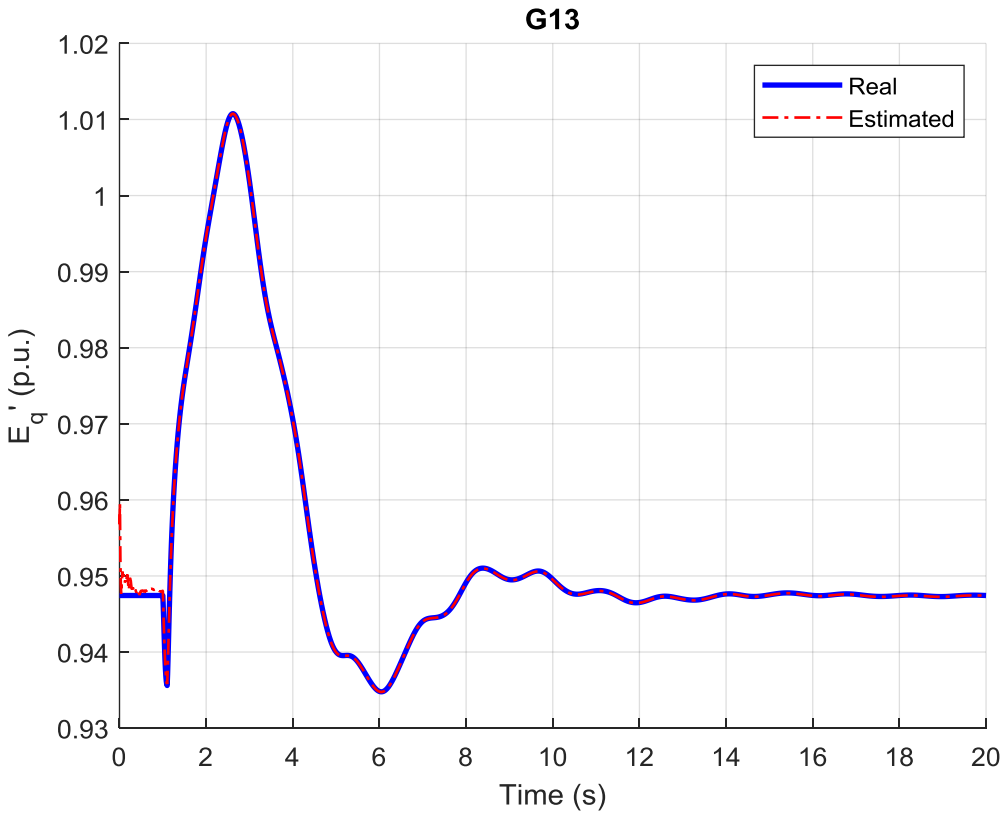
۱۰-۲-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C*

همانطور که گفته شد، برای محاسبه نتایج حاصل از تمامی تخمین‌گرهایی که در این گزارش مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند، نیاز است تا شبیه‌سازی تحت شرایط یکسان صورت گیرد تا بتوان مقایسه عادلانه‌ای بین آن‌ها انجام داد. بنابراین تنظیمات این تخمین‌گر نیز مشابه فصل قبل در نظر گرفته شده است. در ادامه، به ترسیم نمودار زمانی نتایج تخمین حالت و ارائه نتایج (شامل خطای *RMSE* و مدت زمان محاسباتی) در قالب جدول پرداخته شده است.

۱۰ ۲ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت

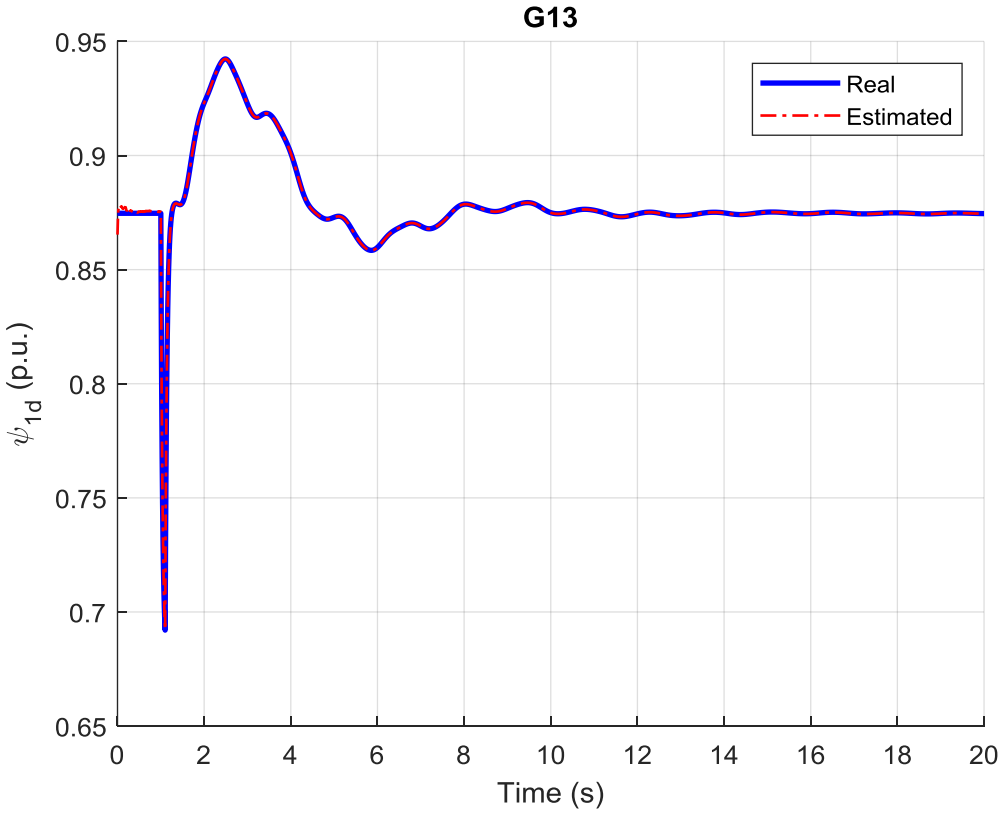
در شکل‌های زیر، مقادیر واقعی و تخمین‌زده‌شده هر یک از متغیرهای حالت در طول زمان ترسیم شده‌اند. به منظور جلوگیری از ترسیم نمودارهای متعدد، تنها به ترسیم ۶ متغیر حالت اول ژنراتور *G13* بسنده شده است. چنان‌چه در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود، عملکرد تخمین حالت در این روش در مقایسه با تخمین‌گر *EKF* بهبود قابل توجهی یافته است. علت این امر این است که در تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* بر خلاف روش‌های موجود، همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده در نظر گرفته شده و منجر به کاهش قابل ملاحظه خطای تخمین شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



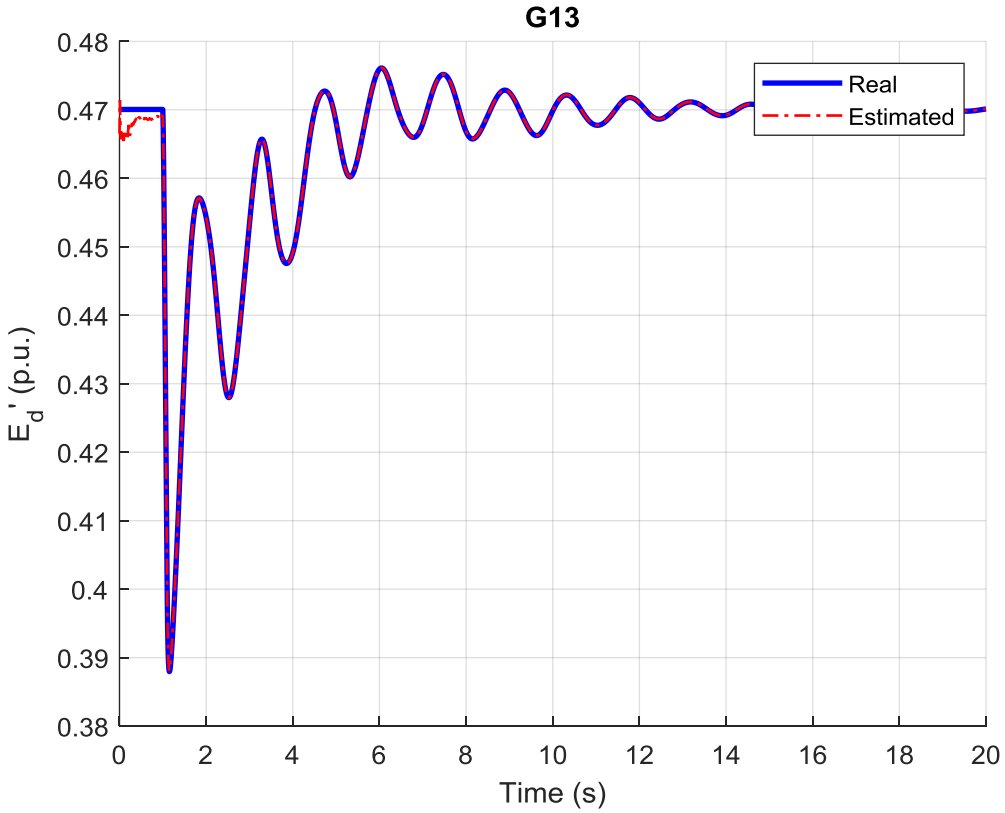
شکل ۱۰-۱ تخمین متغیرحالت اول ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



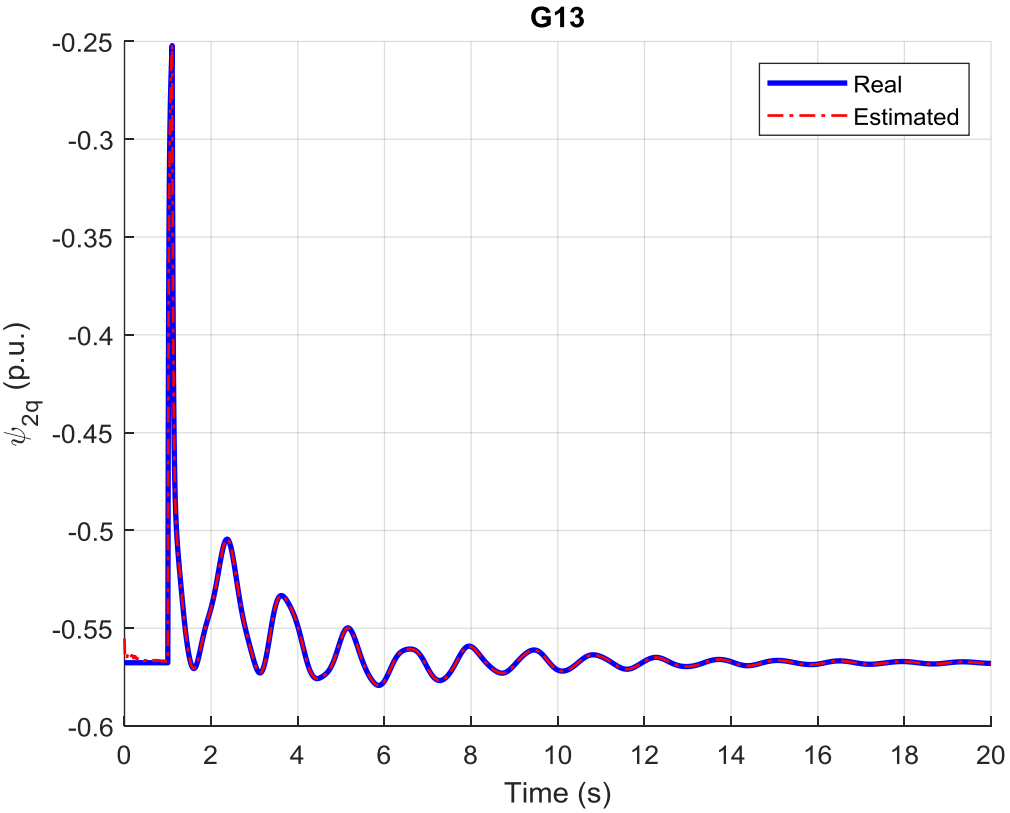
شکل ۱۰-۲ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



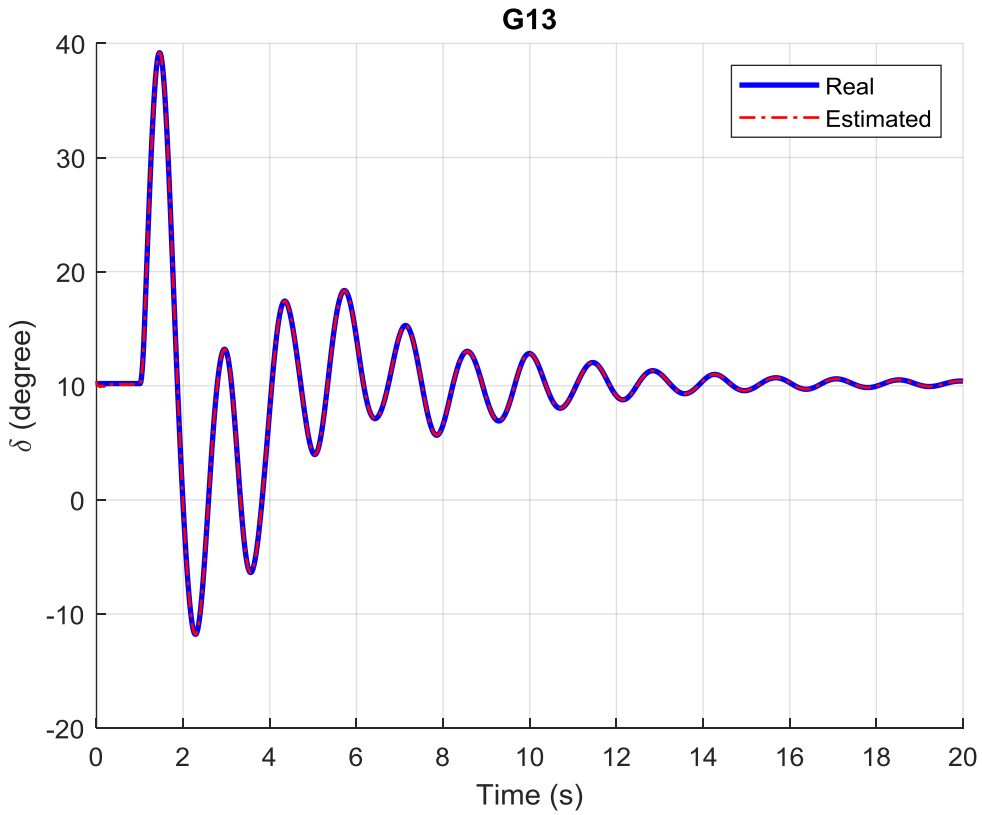
شکل ۱۰-۳ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



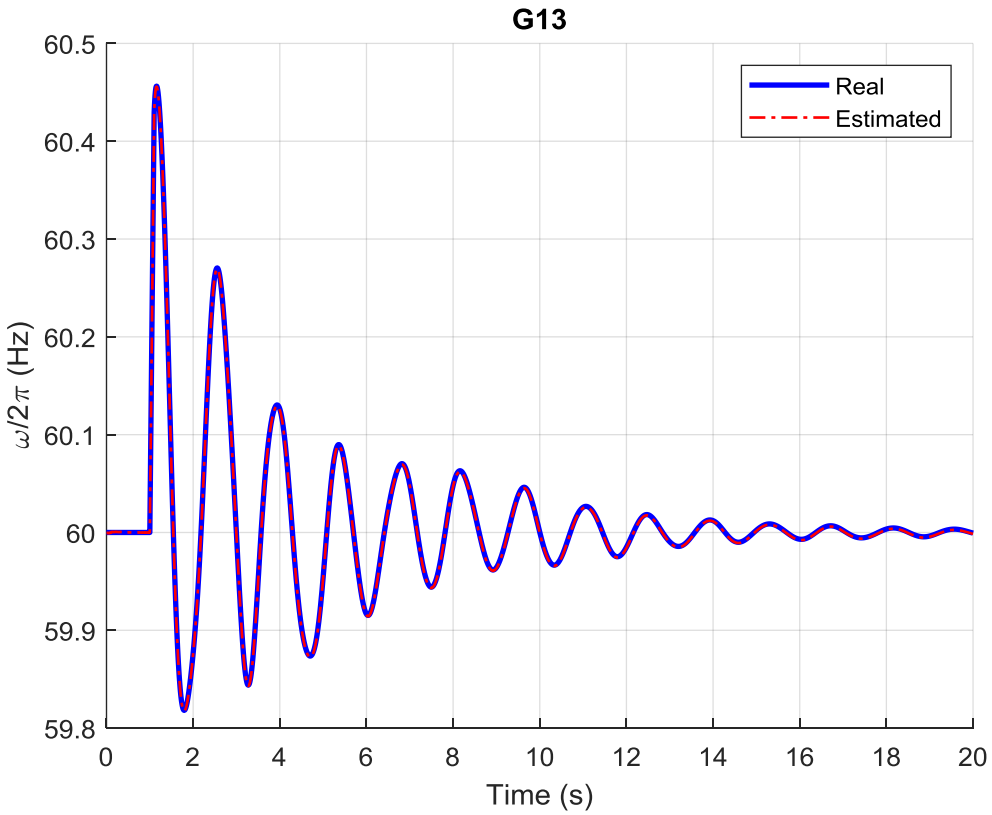
شکل ۱۰-۴ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۰-۵ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C*

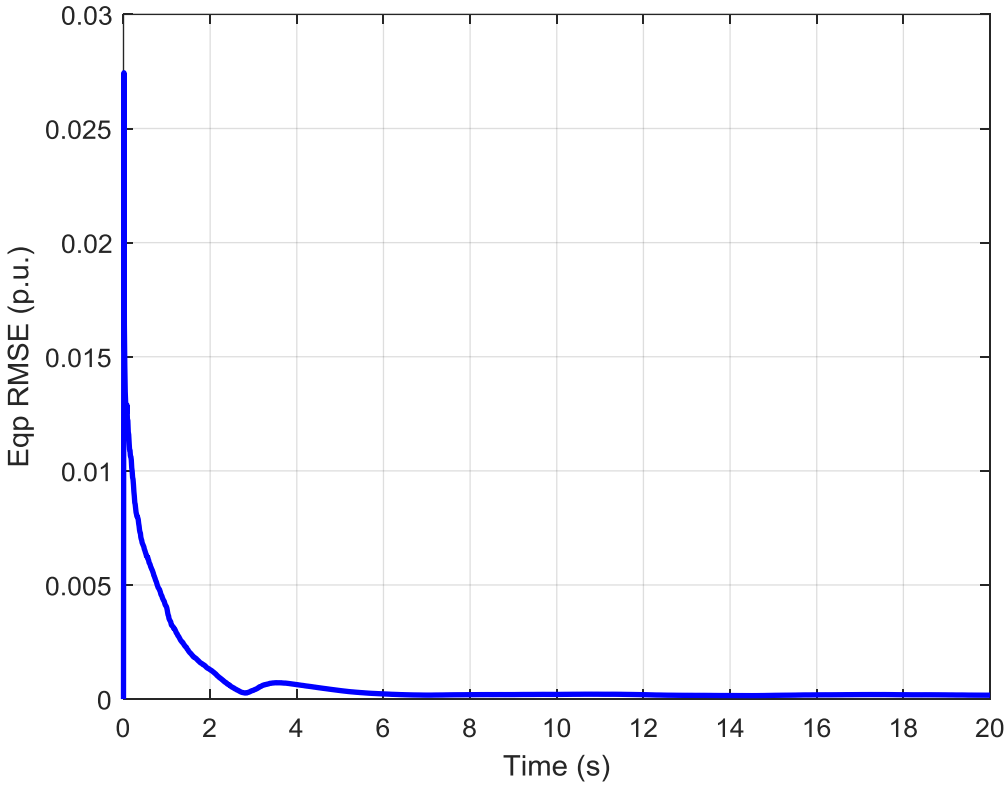
DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۰-۶ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C*

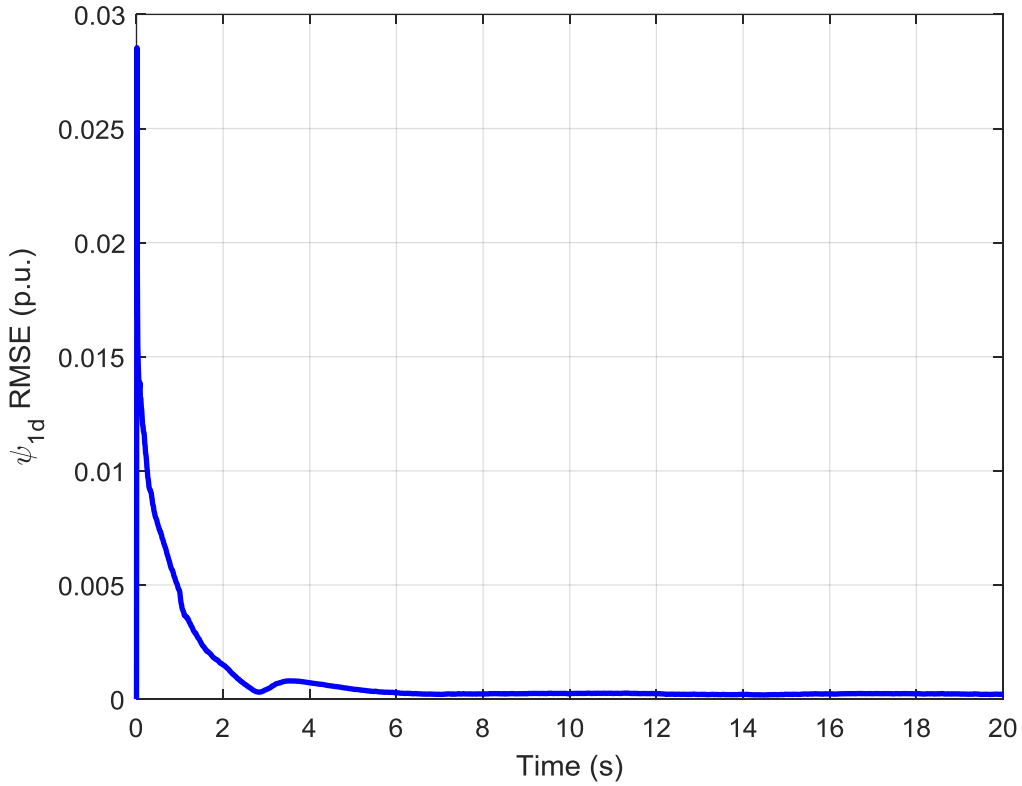
در ادامه، به ترسیم خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C* در طول زمان پرداخته شده است. با $MC = 20$ بار تکرار مونت-کارلو به محاسبه خطای *RMSE* این تخمین‌گر در هر لحظه برای متغیرهای حالت مختلف تمامی ژنراتورها پرداخته شده است. چنان‌چه در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود، خطای *RMSE* تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* به علت در نظر گرفتن همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات نسبت به روش‌های موجود که در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفتند، کاهش قابل توجهی داشته است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



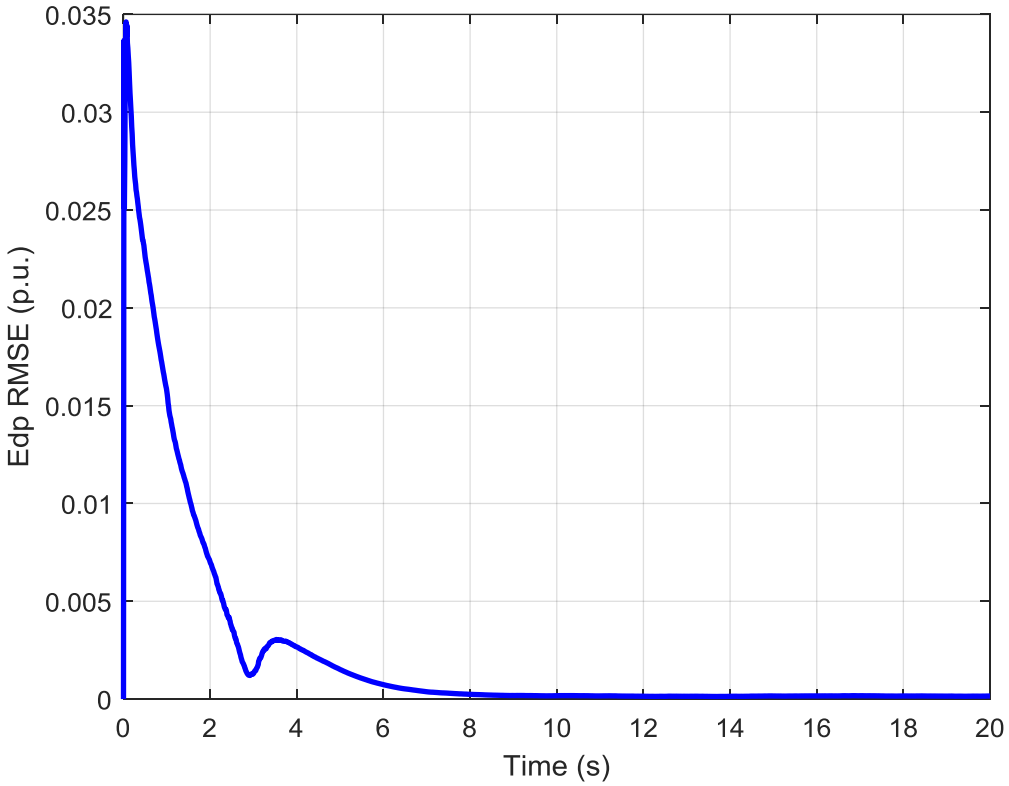
شکل ۱۰-۷ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C* برای متغیر حالت اول

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



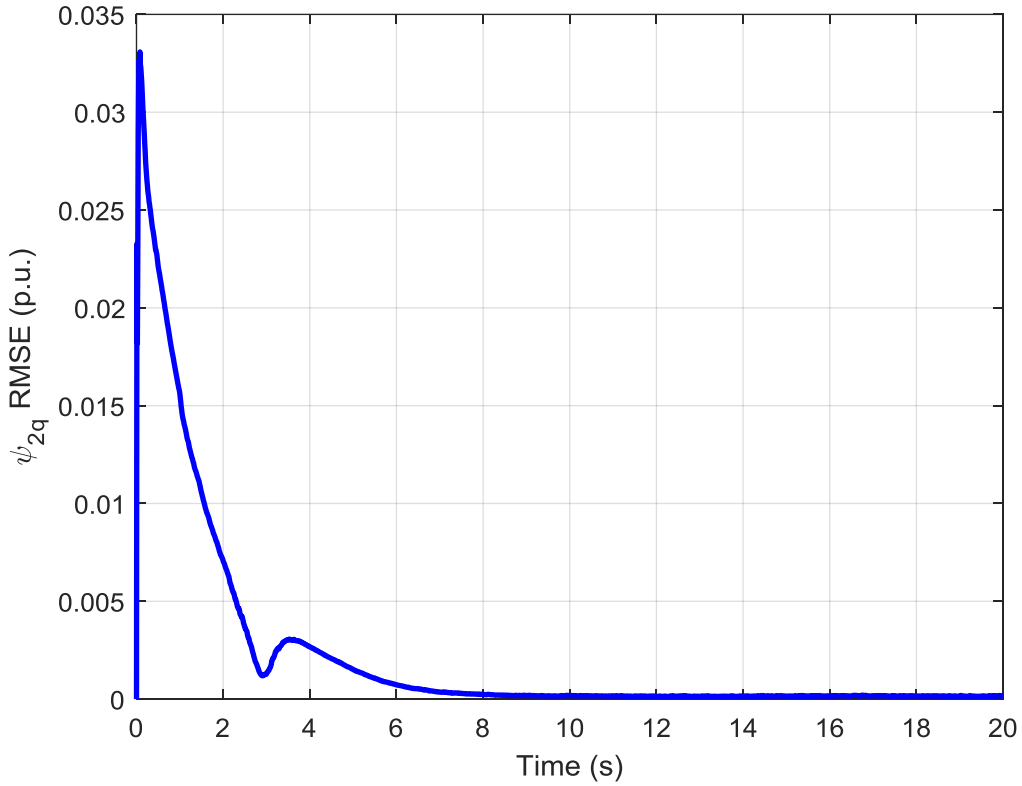
شکل ۱۰-۸ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C* برای متغیر حالت دوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



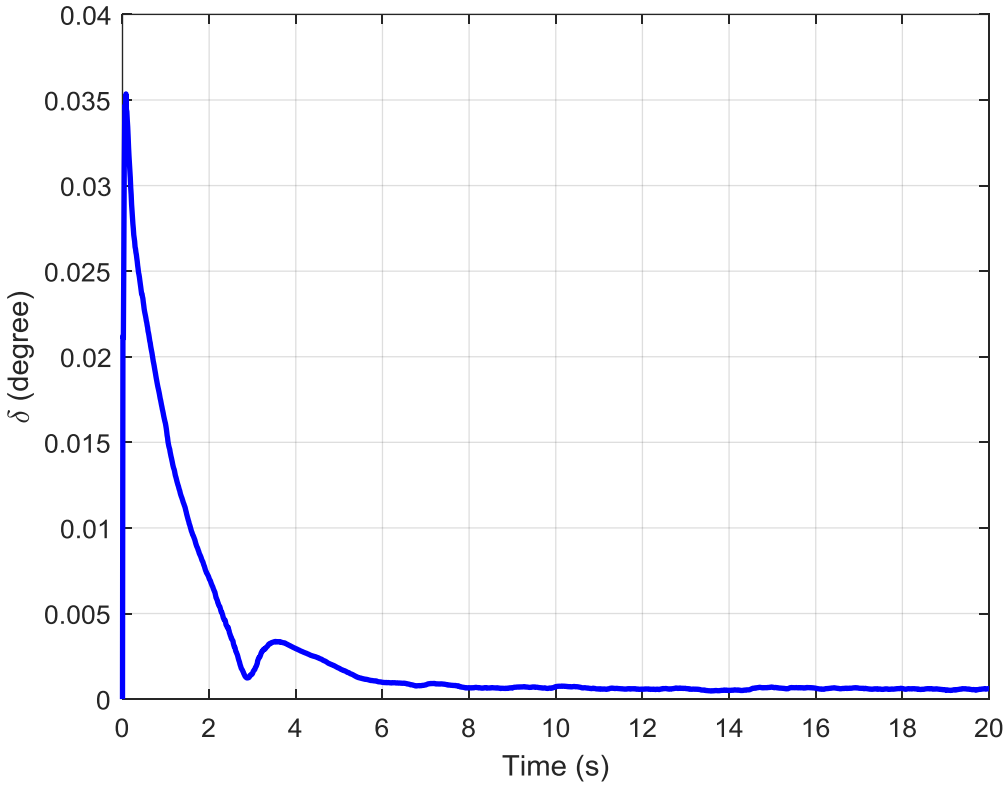
شکل ۱۰-۹ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C* برای متغیر حالت سوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



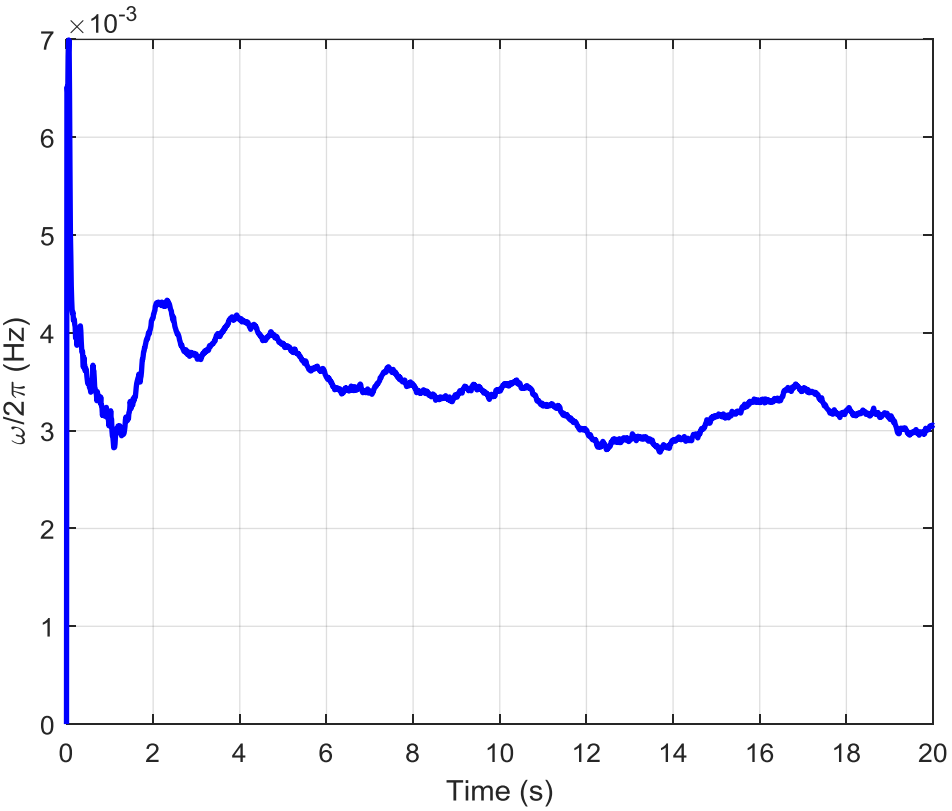
شکل ۱۰-۱۰ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C* برای متغیر حالت چهارم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۰-۱۱ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C* برای متغیر حالت پنجم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۰-۱۲ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C* برای متغیر حالت ششم

۱۰ ۲ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر

در جدول زیر، میانگین زمانی خطای *RMSE* تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* و مدت زمان محاسباتی آن در هر بازگشت ارائه شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، خطای *RMSE* این تخمین‌گر پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود *EKF* و *CKF* کاهش بسیار قابل توجهی داشته است در صورتی که مدت زمان محاسباتی آن حدودا با روش *EKF* برابر بوده و برای تخمین حالت سیستم قدرت با زمان نمونه‌برداری $0.02\ s$ یا $0.01\ s$ قابل پیاده‌سازی به صورت زمان-واقعی و بدون نیاز به روش‌های پردازش موازی خواهد بود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۱۰-۲ عملکرد تخمین‌گر EKF-C

$RMSE_{E_q'}(pu)$	$RMSE_{\psi_{1d}}(pu)$	$RMSE_{E_d'}(pu)$	$RMS\psi_{2q}(pu)$	$RMSE_{\delta}(deg)$	$RMSE_{\omega}(Hz)$
0.0007	0.0008	0.0023	0.0022	0.1535	0.0034
$RMSE_{E_{FD}}(pu)$	$RMSE_{R_F}(pu)$	$RMSE_{V_R}(pu)$	$RMSE_{T_M}(pu)$	$RMSE_{P_{SV}}(pu)$	Computation Time (s)
0.0048	0.0011	0.0159	0.0013	0.0012	0.0164

۱۰-۳- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C-ET

در این بخش، ابتدا روابط و مراحل اجرای تخمین‌گر پیشنهادی مبتنی بر روش تحریک-رویداد یعنی تخمین‌گر *EKF-C-ET* در قالب جدول ارائه می‌شود. سپس با استفاده از این تخمین‌گر به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم ۶۸ باسه پرداخته شده و نتایج تخمین حالت در قالب نمودار و جدول ارائه می‌شوند.

۱۰-۳-۱- تخمین‌گر پیشنهادی EKF-C-ET

مراحل و معادلات تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C-ET* مبتنی بر خطی‌سازی با قابلیت مقابله با همبستگی و مبتنی بر روش تحریک-رویداد برای سیستم غیرخطی بخش قبل در جداول زیر ارائه شده است.

جدول ۱۰-۳ مراحل و معادلات تخمین‌گر محلی پیشنهادی EKF-C-ET

مرحله پیش‌بینی در زمان $k+1$	
محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k\|k)$ و $\tilde{U}(k)$	$\hat{F}(k) = \frac{\partial f}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{G}(k) = \frac{\partial f}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{H}(k) = \frac{\partial h}{\partial X}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{E}(k) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U}\Big\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$R(k) = \hat{E}(k)Q_U\hat{E}^T(k) + Q_Y$ $S(k) = \hat{G}(k)Q_U\hat{E}^T(k)$ $T(k) = S(k)R^{-1}(k)$ $\hat{X}(k+1\|k) = f^*\left(\hat{X}(k\|k), \tilde{U}(k)\right) + T(k)\tilde{Y}(k)$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$F^*(k) = \hat{F}(k) - T(k)\hat{H}(k)$ $Q(k) = \hat{G}(k)Q_U\hat{G}^T(k)$ $Q^*(k) = Q(k) - S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$ $P(k+1\|k) = F^*(k)P(k\|k)F^{*T}(k) + Q^*(k)$	**محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام**
مرحله به‌روزرسانی در زمان $k+1$	
$\hat{H}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial X}\|_{\hat{x}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$ $\hat{E}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial \eta_U}\|_{\hat{x}(k+1\|k),\tilde{U}(k+1)}$	**محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k+1\|k)$ و $\tilde{U}(k+1)$**
$\hat{Y}(k+1\|k) = h\left(\hat{X}(k+1\|k), \tilde{U}(k+1)\right)$ $P_Y(k+1\|k) = \hat{H}(k+1)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)$	**پیش‌بینی خروجی و محاسبه ماتریس کواریانس آن در مرحله زمانی $k+1$ام**
$C^T(k+1)C(k+1) = P_Y^{-1}(k+1\|k)$ $\rho(k+1) = \begin{cases} 1, & \left\|C^T(k+1)\left(\tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)\right\|_\infty > \xi \\ 0, & \left\|C^T(k+1)\left(\tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)\right\|_\infty \le \xi \end{cases}$	**بررسی شرط تحریک و محاسبه $\rho(k+1)$**
$r(k+1) = \tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)$ $R(k+1) = \hat{E}(k+1)Q_U\hat{E}^T(k+1) + Q_Y$ $K(k+1) = P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)\right)^{-1}$	**محاسبه مانده و بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام**
$\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k) + K(k+1)r(k+1)$	**محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام**
$P(k+1\|k+1) = \left(I - K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$	**تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام**

جدول ۱۰-۴ مراحل و معادلات تخمین‌گر مرکزی پیشنهادی *EKF-C-ET*

مرحله پیش‌بینی در زمان $k+1$	
$\hat{F}(k) = \frac{\partial f}{\partial X}\|_{\hat{x}(k\|k),\tilde{U}(k)}$	**محاسبه ماتریس‌های سیستم**

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$\hat{G}(k)=\frac{\partial f}{\partial \eta_U}\Big\vert_{\hat{x}(k\vert k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{H}(k)=\frac{\partial h}{\partial X}\Big\vert_{\hat{x}(k\vert k),\tilde{U}(k)}$ $\hat{E}(k)=\frac{\partial h}{\partial \eta_U}\Big\vert_{\hat{x}(k\vert k),\tilde{U}(k)}$	**خطی‌شده حول $\hat{X}(k\vert k)$ و $\tilde{U}(k)$**
$R(k)=\hat{E}(k)Q_U\hat{E}^T(k)+Q_Y$ $S(k)=\hat{G}(k)Q_U\hat{E}^T(k)$ $T(k)=S(k)R^{-1}(k)$ *If* $\rho(k)=1$ $\hat{X}(k+1\vert k)=f^*\left(\hat{X}(k\vert k),\tilde{U}(k)\right)+T(k)\tilde{Y}(k)$ *Else If* $\rho(k)=0$ $\hat{X}(k+1\vert k)=f^*\left(\hat{X}(k\vert k),\tilde{U}(k)\right)+T(k)h\left(\hat{X}(k\vert k),\tilde{U}(k)\right)$	**محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام**
$F^*(k)=\hat{F}(k)-T(k)\hat{H}(k)$ $Q(k)=\hat{G}(k)Q_U\hat{G}^T(k)$ $Q^*(k)=Q(k)-S(k)R^{-1}(k)S^T(k)$ $P(k+1\vert k)=F^*(k)P(k\vert k)F^{*T}(k)+Q^*(k)$	**محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام**
مرحله به‌روزرسانی در زمان $k+1$	
$\hat{H}(k+1)=\frac{\partial h}{\partial X}\Big\vert_{\hat{x}(k+1\vert k),\tilde{U}(k+1)}$ $\hat{E}(k+1)=\frac{\partial h}{\partial \eta_U}\Big\vert_{\hat{x}(k+1\vert k),\tilde{U}(k+1)}$	**محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k+1\vert k)$ و $\tilde{U}(k+1)$**
If $\rho(k)=1$ $\hat{Y}(k+1\vert k)=h\left(\hat{X}(k+1\vert k),\tilde{U}(k+1)\right)$ $r(k+1)=\tilde{Y}(k+1)-\hat{Y}(k+1\vert k)$ $P_Y(k+1\vert k)=\hat{H}(k+1)P(k+1\vert k)\hat{H}^T(k+1)+R(k+1)$	**محاسبه مانده و پیش‌بینی خروجی در مرحله زمانی $k+1$ام**
$R(k+1)=\hat{E}(k+1)Q_U\hat{E}^T(k+1)+Q_Y$ $K(k+1)=P(k+1\vert k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k+1)P(k+1\vert k)\hat{H}^T(k+1)+R(k+1)\right)^{-1}$	**محاسبه بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام**
If $\rho(k)=1$ $\hat{X}(k+1\vert k+1)=\hat{X}(k+1\vert k)+K(k+1)r(k+1)$ *Else If* $\rho(k)=0$ $\hat{X}(k+1\vert k+1)=\hat{X}(k+1\vert k)$	**محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام**

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام	*If* $\rho(k)=1$ $P(k+1\|k+1)=\left(I-K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$ *Else If* $\rho(k)=0$ $\lambda(\xi)=\frac{2}{\sqrt{2\pi}}\xi\, exp(-\frac{\xi^2}{2})\left(1-2\mathcal{D}(\xi)\right)^{-1}$ $P(k+1\|k+1)=\left(I-\lambda(\xi)K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$

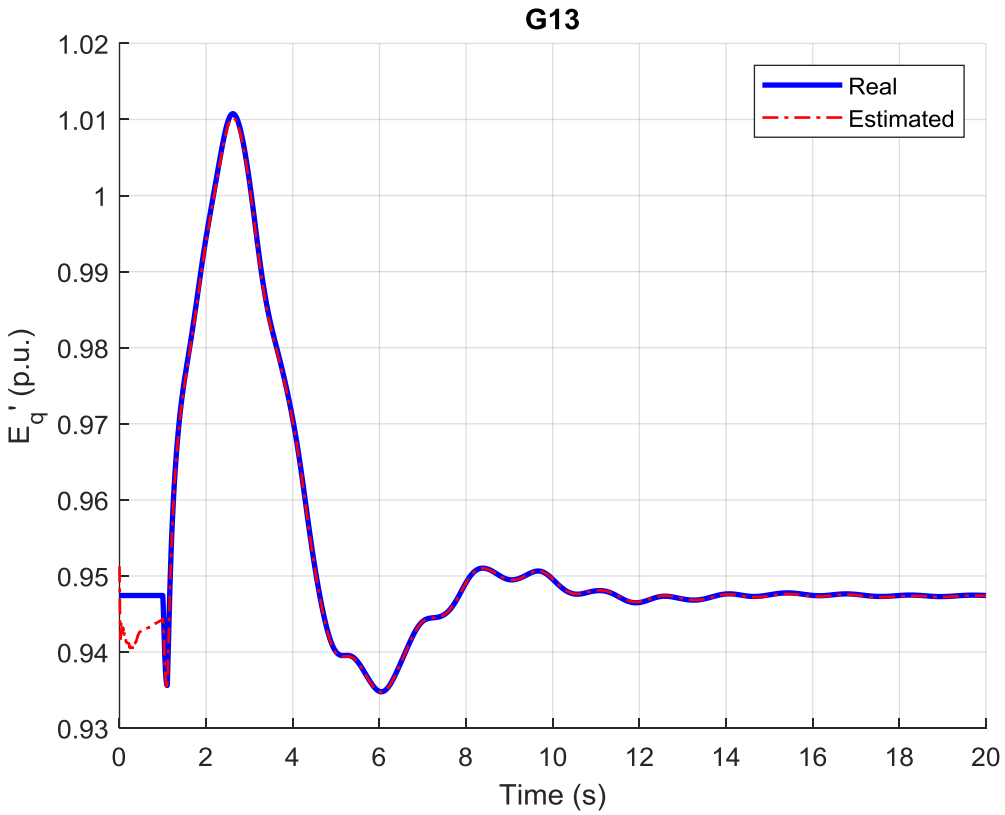
۱۰-۳-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C-ET*

تنظیمات این تخمین‌گر نیز مشابه فصل قبل در نظر گرفته شده است. در ادامه، به ترسیم نمودار زمانی نتایج تخمین حالت و ارائه نتایج (شامل خطای *RMSE* و مدت زمان محاسباتی) در قالب جدول پرداخته شده است. مقدار آستانه تحریک در این بخش برابر با $\xi = 0.007$ در نظر گرفته شده است.

۱۰ ۳ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت

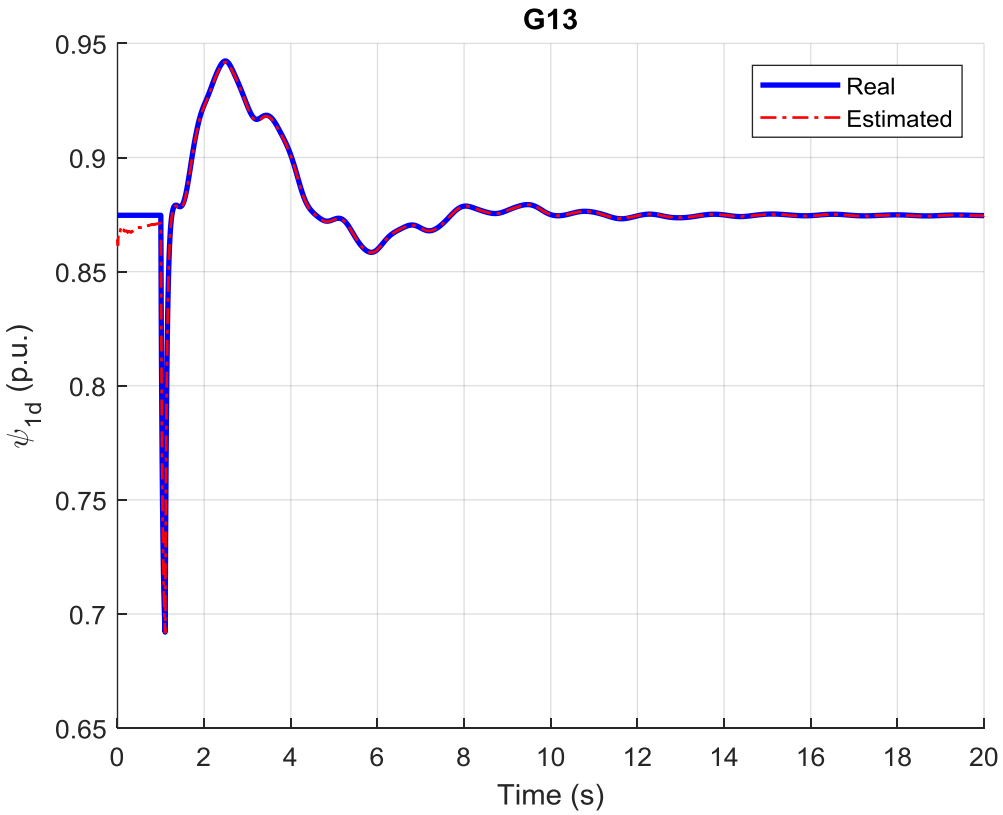
در شکل‌های زیر، مقادیر واقعی و تخمین‌زده‌شده هر یک از متغیرهای حالت در طول زمان ترسیم شده‌اند. به منظور جلوگیری از ترسیم نمودارهای متعدد، تنها به ترسیم ۶ متغیر حالت اول ژنراتور *G13* بسنده شده است. چنان‌چه در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود، تخمین‌گر پیشنهادی عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های موجود داشته است. همان‌طور که گفته شد، در این روش از استراتژی تحریک-رویداد برای کاهش بار ارتباطی استفاده شده است. بنابراین انتظار می‌رود خطای تخمین در این بخش کمی بالاتر از خطای تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* باشد؛ زیرا تخمین‌گر *EKF-C* در تمام بازه‌های نمونه‌برداری به ارسال داده‌های *PMU* به *PDC* می‌پردازد؛ در صورتی که تخمین‌گر پیشنهادی تحریک-رویداد *EKF-C-ET* به منظور کاهش بار ارتباطی، تنها در برخی بازه‌های نمونه‌برداری و در صورت برقرار بودن شرط تحریک به ارسال داده‌ها می‌پردازد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



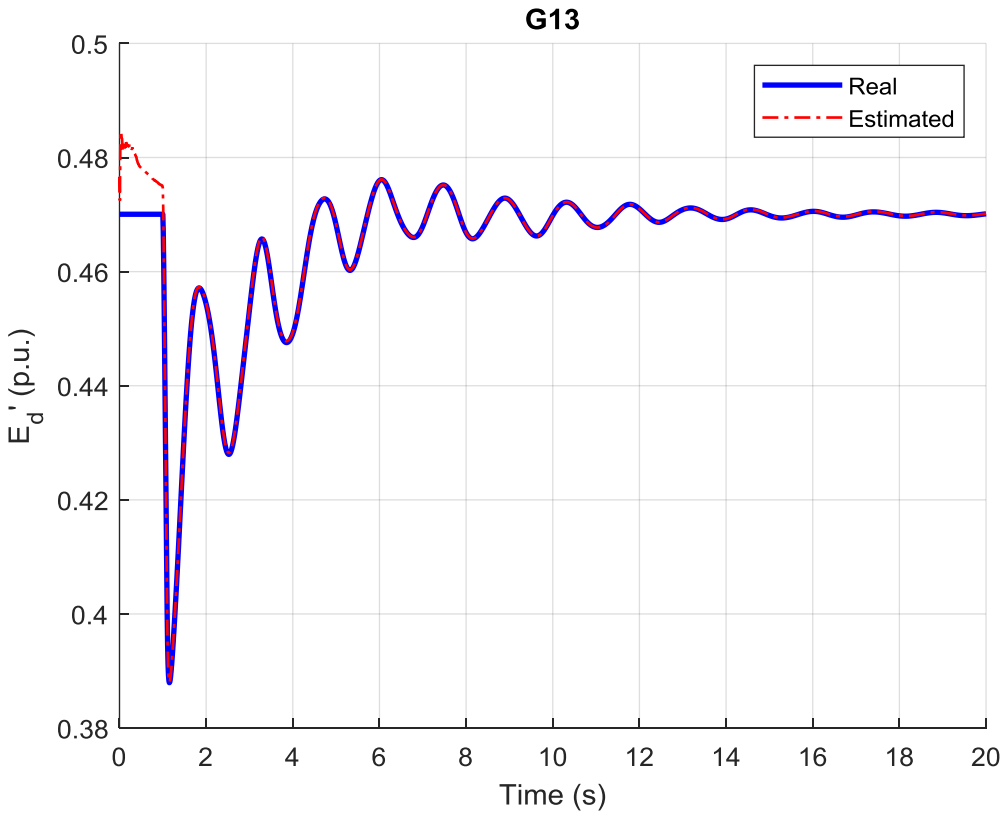
شکل ۱۰-۱۳ تخمین متغیرحالت اول ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C-ET*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



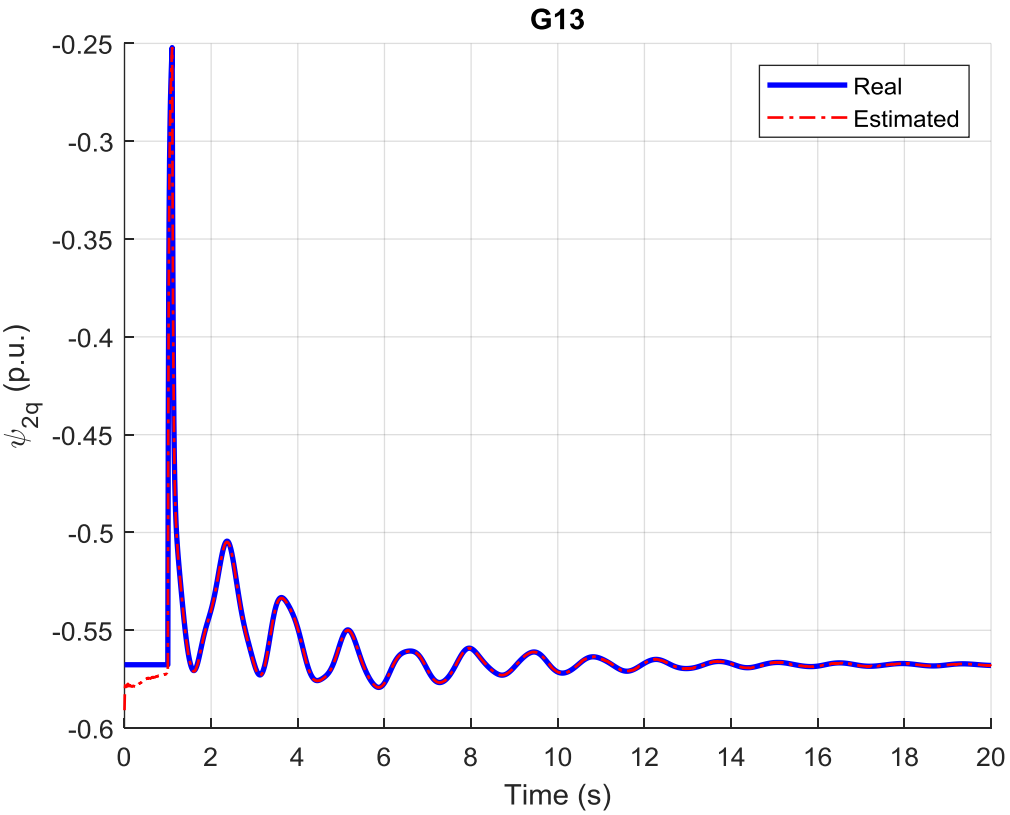
شکل ۱۰-۱۴ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C-ET*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



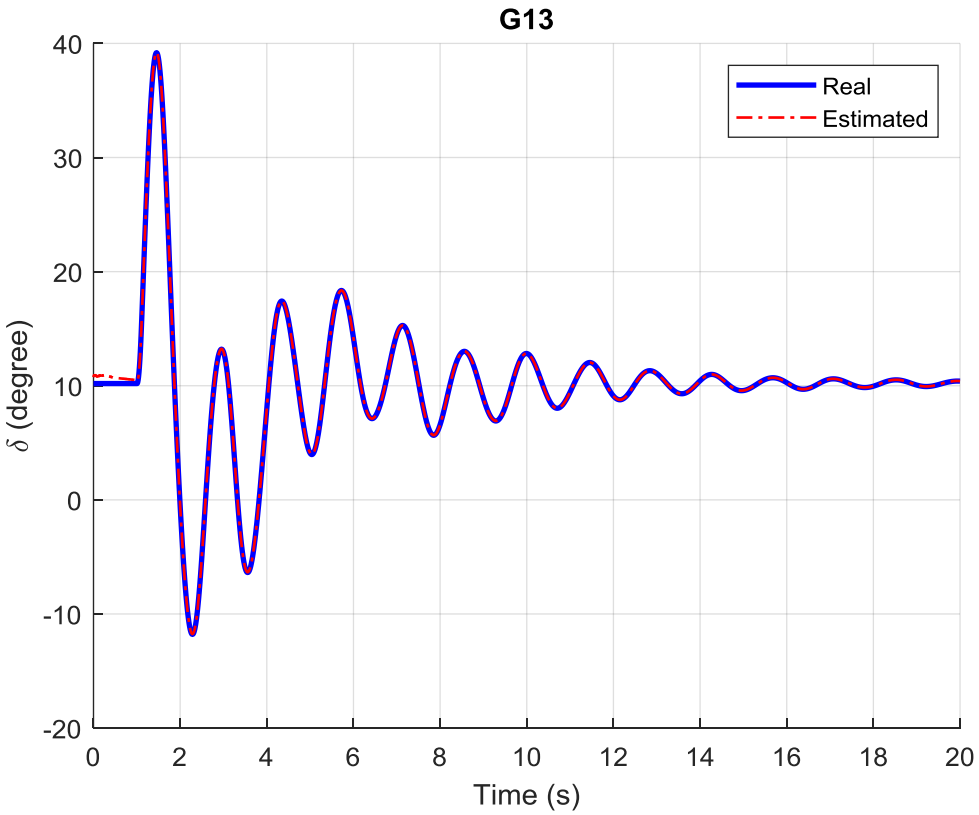
شکل ۱۰-۱۵ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C-ET*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



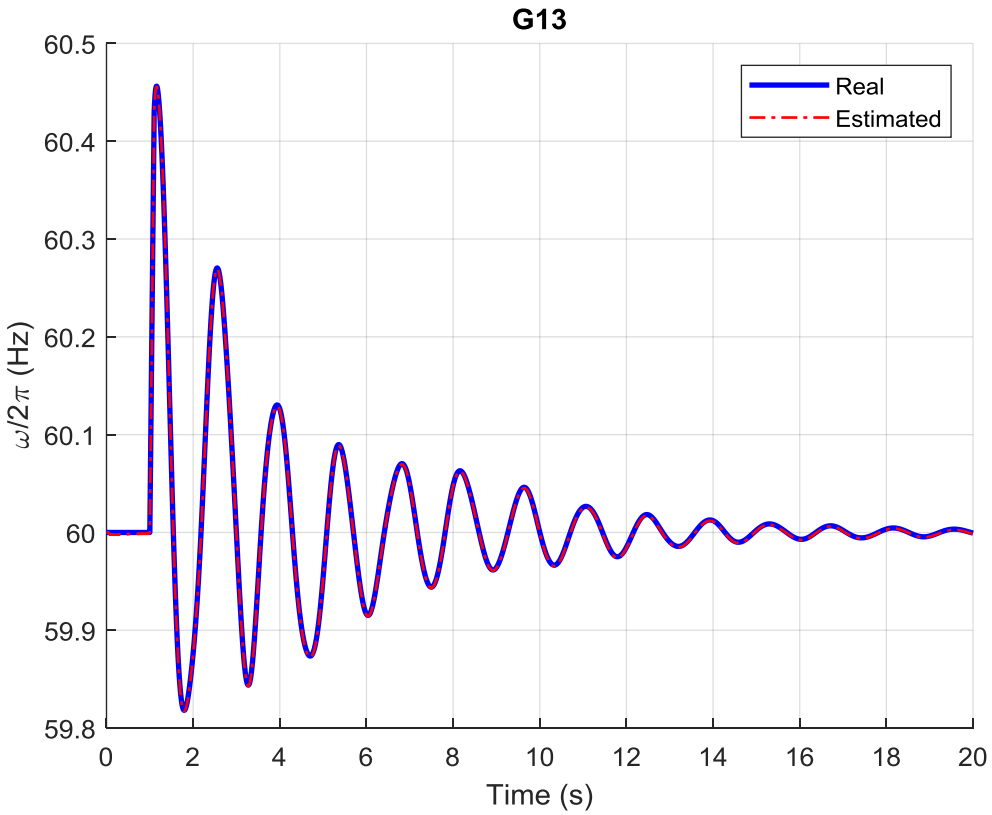
شکل ۱۰-۱۶ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C-ET*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۰-۱۷ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C-ET*

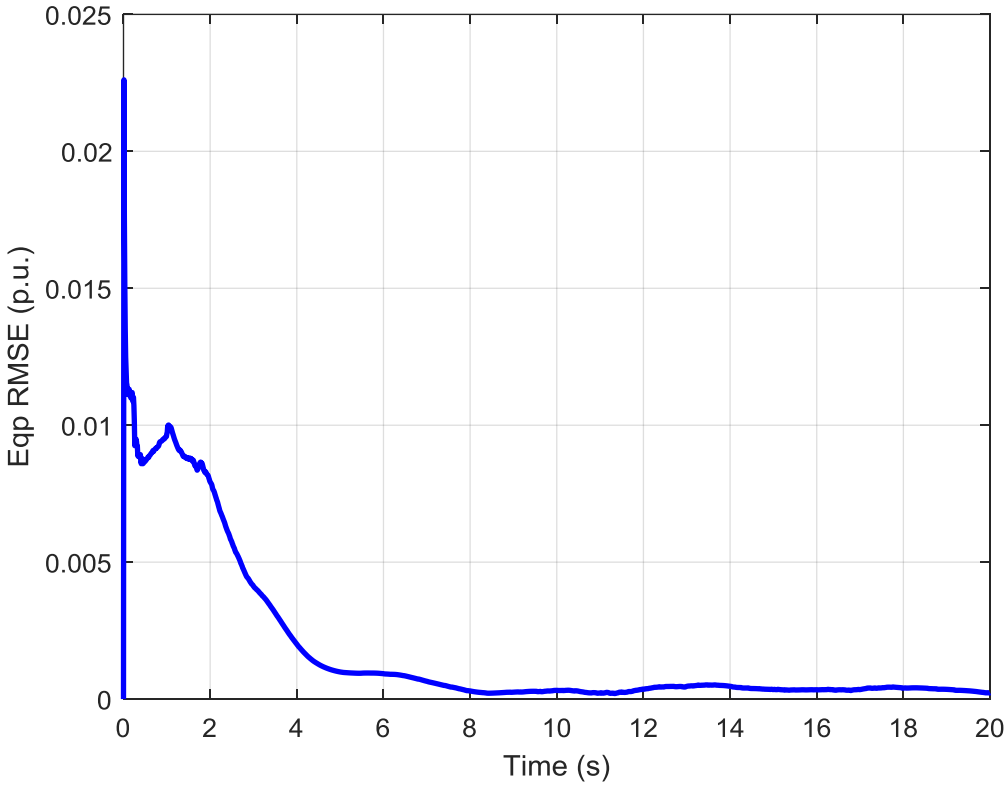
DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۰-۱۸ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *EKF-C-ET*

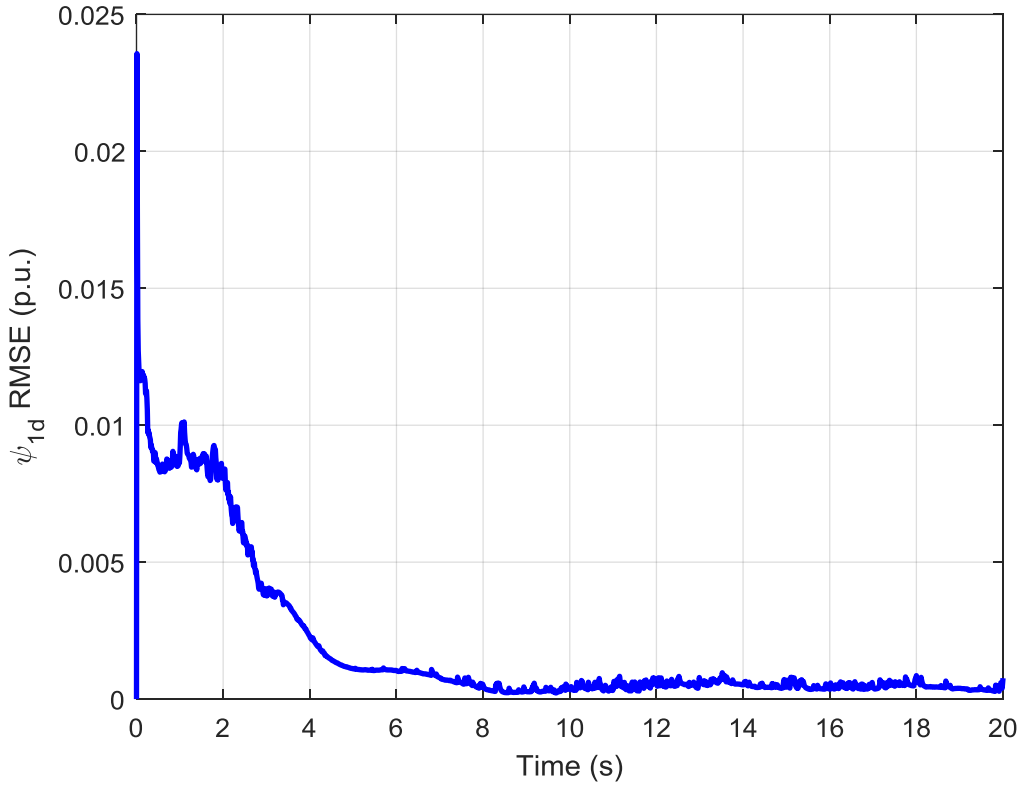
در ادامه، به ترسیم خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C-ET* در طول زمان پرداخته شده است. با $MC = 20$ بار تکرار مونت-کارلو به محاسبه خطای *RMSE* این تخمین‌گر در هر لحظه برای متغیرهای حالت مختلف تمامی ژنراتورها پرداخته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



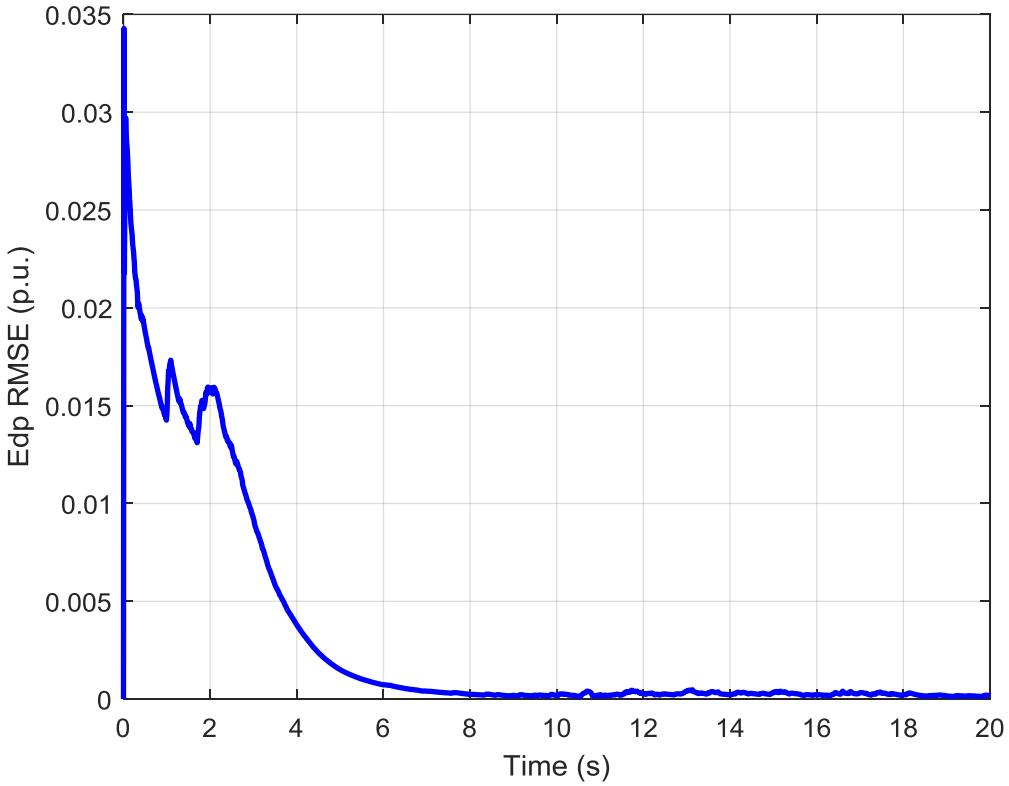
شکل ۱۰-۱۹ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C-ET* برای متغیر حالت اول

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



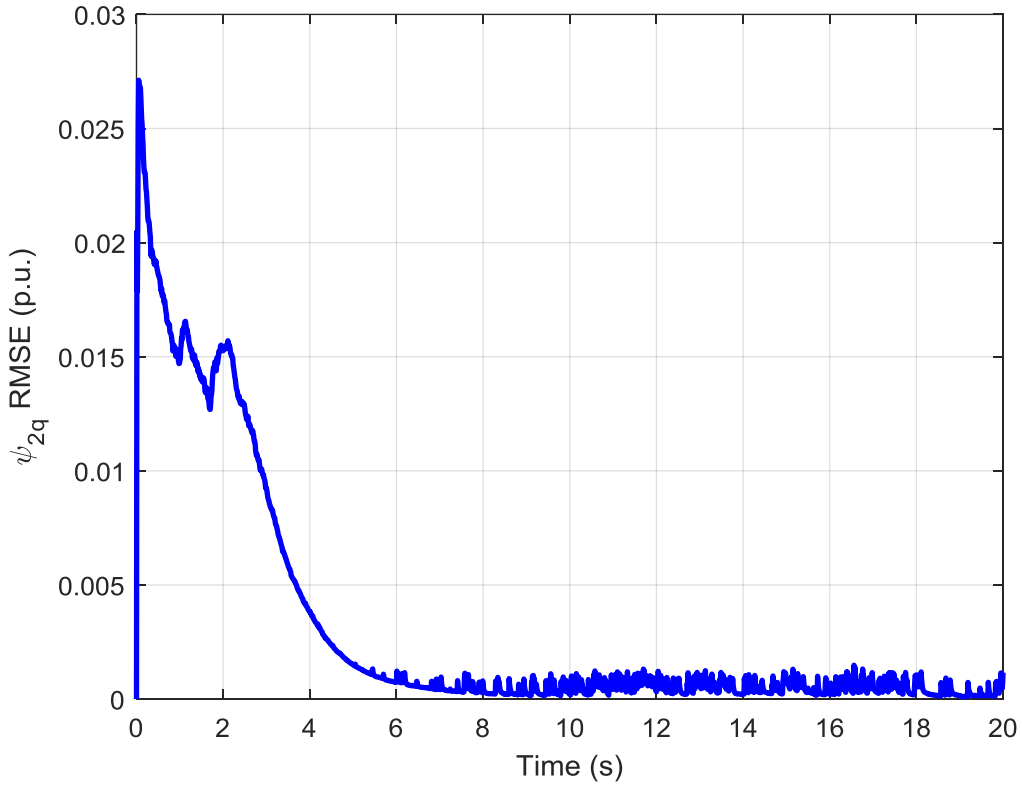
شکل ۱۰-۲۰ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C-ET* برای متغیر حالت دوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



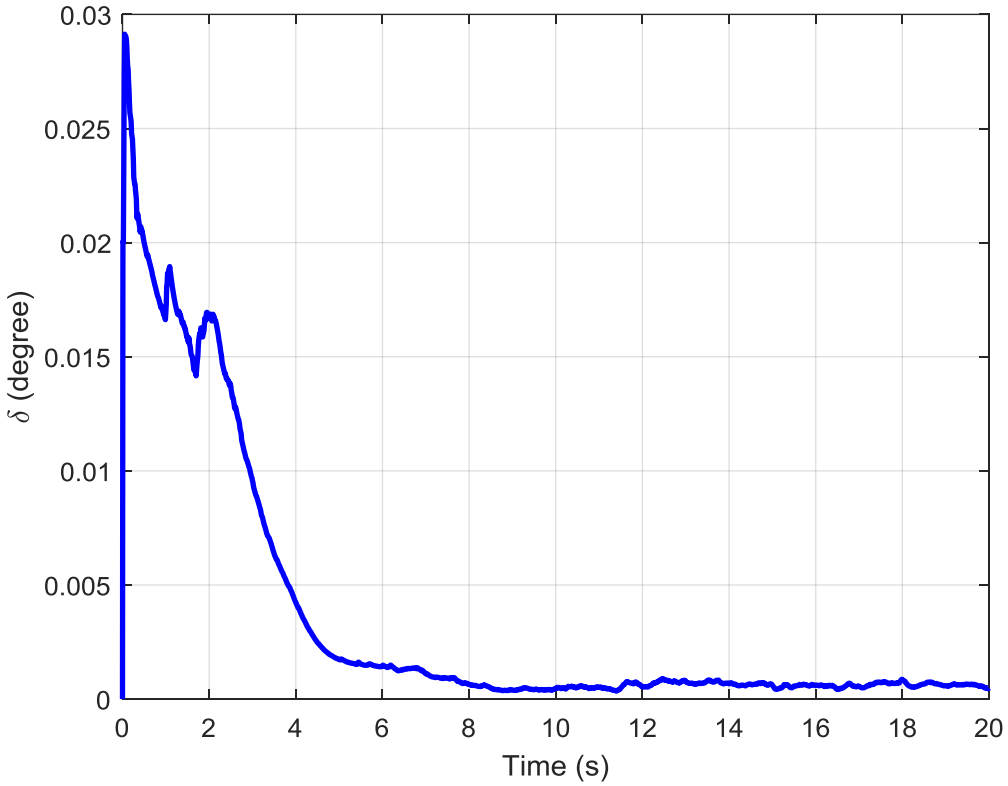
شکل ۱۰-۲۱ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C-ET* برای متغیر حالت سوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



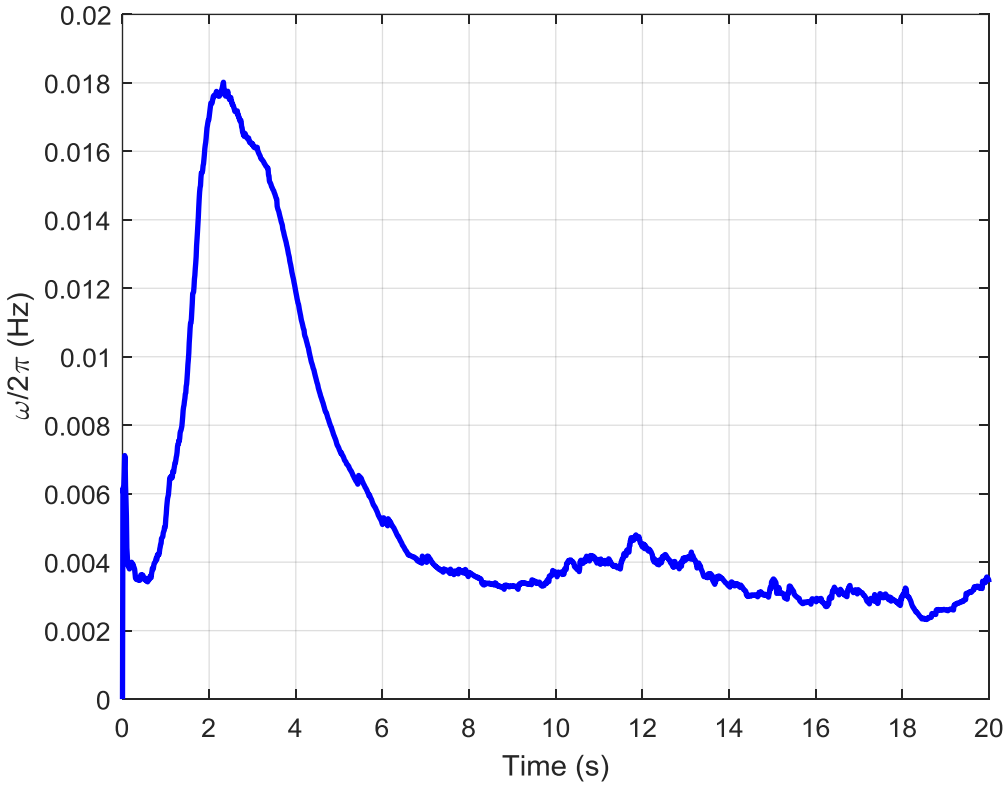
شکل ۱۰-۲۲ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C-ET* برای متغیر حالت چهارم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۰-۲۳ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C-ET* برای متغیر حالت پنجم

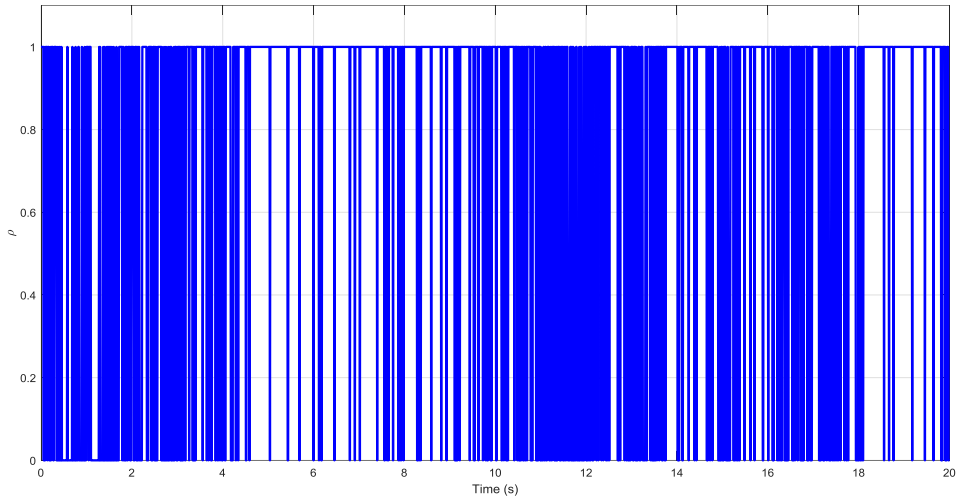
DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۰-۲۴ خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C-ET* برای متغیر حالت ششم

همان‌طور که گفته شد، تخمین‌گر پیشنهادی تحریک-رویداد *EKF-C-ET* بر خلاف روش‌های دیگر، تنها در برخی بازه‌های نمونه‌برداری و در صورت برقرار بودن شرط تحریک، به ارسال داده‌های *PMU* به *PDC* می‌پردازد. در این روش، یک متغیر منطقی $\rho(k)$ تعریف می‌شود که نشان‌دهنده این است که آیا در زمان k اندازه‌گیری‌ها باید به مرکز تخمین ارسال شوند یا خیر. در شکل زیر به ترسیم این متغیر منطقی که نشان‌گر تحریک در بازه‌های نمونه‌برداری مختلف می‌باشد، پرداخته شده است. در مواقعی که $\rho(k) = 1$ می‌باشد ارسال داده‌ها صورت گرفته و در صورتی که $\rho(k) = 0$ باشد، داده‌ای از *PMU*ها به *PDC* ارسال نمی‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۰-۲۵ نشان‌گر تحریک

۱۰-۳-۲-۲ عملکرد تخمین‌گر

در جدول زیر، میانگین زمانی خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C-ET* و مدت زمان محاسباتی آن در هر بازگشت ارائه شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، تخمین‌گر پیشنهادی به علت در نظر گرفتن همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات عملکرد بسیار بهتری در مقایسه با روش‌های موجود داشته است، هرچند خطای تخمین افزایش ناچیزی در مقایسه با روش پیشنهادی *EKF-C* داشته است؛ زیرا در روش *EKF-C-ET* از استراتژی تحریک-رویداد برای کاهش بار ارتباطی استفاده شده است و افزایش ناچیز خطا در این روش هزینه‌ای است که بابت کاهش بار ارتباطی پرداخته می‌شود.

جدول ۱۰-۵ عملکرد تخمین‌گر EKF-C-ET

$RMSE_{E_q'}(pu)$	$RMSE_{\psi_{1d}}(pu)$	$RMSE_{E_d'}(pu)$	$RMS\psi_{2q}(pu)$	$RMSE_{\delta}(deg)$	$RMSE_{\omega}(Hz)$
0.0017	*0.0018*	*0.003*	*0.0031*	*0.2029*	*0.0055*
$RMSE_{E_{FD}}(pu)$	$RMSE_{R_F}(pu)$	$RMSE_{V_R}(pu)$	$RMSE_{T_M}(pu)$	$RMSE_{P_{SV}}(pu)$	*Computation Time (s)*
0.0126	*0.0027*	*0.055*	*0.002*	*0.0019*	*0.0145*

به منظور بررسی میزان کاهش بار ارتباطی در تخمین‌گر پیشنهادی تحریک-رویداد به محاسبه نرخ ارسال داده و همچنین مقدار خطای *RMSE* به ازای مقادیر مختلف آستانه تحریک پرداخته شده است. نتایج در

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول زیر قابل مشاهده می‌باشند. چنان چه دیده می‌شود، برای مقادیر بزرگ‌تر آستانه تحریک، نرخ ارسال (درصد زمان‌هایی که تحریک رخ می‌دهد به زمان کل) کوچک‌تر بوده ولی خطای *RMSE* بزرگ‌تر می‌باشد. بدین معنی که هرچقدر بار ارتباطی کاهش بیشتری یابد، هزینه بیشتری در قالب افزایش خطای *RMSE* پرداخته خواهد شد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، حتی برای $\xi = 0.011$ که منجر به کاهش حدودا ۷۰ درصدی بار ارتباطی می‌شود، خطای *RMSE* کمتری در مقایسه با روش‌های موجود *EKF* و *CKF* (که بار ارتباطی بسیار بالاتری دارند) به دست آمده است.

جدول ۱۰-۶ تأثیر آستانه تحریک بر نرخ ارسال و عملکرد تخمین‌گر EKF-C-ET

	$\xi = 0.005$	$\xi = 0.007$	$\xi = 0.009$	$\xi = 0.011$
Communication Rate (%)	*86.15*	*74.1*	*64.85*	*32.4*
$RMSE_{E_q'}(pu)$	*0.0008*	*0.0017*	*0.0036*	*0.0061*
$RMSE_{\delta}(deg)$	*0.0922*	*0.2029*	*0.2676*	*0.6054*
$RMSE_{\omega}(Hz)$	*0.0031*	*0.0055*	*0.0059*	*0.0457*

۱۰-۴- جمع‌بندی

در این فصل، به شبیه‌سازی روش پیشنهادی در فصل ۴ گزارش قبل پرداخته شد. ابتدا نتایج تخمین حالت توسط تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر خطی‌سازی با قابلیت مواجهه با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات (*EKF-C*) ارائه شد. سپس نتایج تخمین حالت توسط این روش و با استفاده از استراتژی تحریک-رویداد پیشنهادی (*EKF-C-ET*) ارائه شد. نتایج حاصل از تخمین‌گر پیشنهادی در قالب ترسیم نتایج تخمین متغیرهای حالت دینامیکی، ترسیم خطای *RMSE* در حوزه زمان و محاسبه خطای *RMSE* کل و مدت زمان محاسباتی ارائه شد.

چنان‌چه مشاهده شد، عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* در مقایسه با تخمین‌گر *EKF* بهبود بسیار قابل توجهی یافته است. علت این امر این است که در تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* بر خلاف روش‌های موجود، همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده در نظر گرفته شده و منجر به کاهش قابل ملاحظه خطای تخمین شده است. در صورتی که مدت زمان محاسباتی آن حدودا با روش *EKF* برابر بوده و برای تخمین حالت سیستم قدرت با زمان نمونه‌برداری $0.02\ s$ یا $0.01\ s$ قابل پیاده‌سازی به صورت زمان-واقعی و بدون نیاز به روش‌های پردازش موازی خواهد بود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

همچنین مشاهده شد که تخمین‌گر پیشنهادی تحریک-رویداد *EKF-C-ET* عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های موجود داشته است. همان‌طور که گفته شد، در این روش از استراتژی تحریک-رویداد برای کاهش بار ارتباطی استفاده شده است. بنابراین انتظار می‌رود خطای تخمین در این بخش کمی بالاتر از خطای تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* باشد؛ زیرا تخمین‌گر *EKF-C* در تمام بازه‌های نمونه‌برداری به ارسال داده‌های *PMU* به *PDC* می‌پردازد؛ در صورتی که تخمین‌گر پیشنهادی تحریک-رویداد *EKF-C-ET* به منظور کاهش بار ارتباطی، تنها در برخی بازه‌های نمونه‌برداری و در صورت برقرار بودن شرط تحریک به ارسال داده‌ها می‌پردازد. به منظور بررسی میزان کاهش بار ارتباطی در تخمین‌گر پیشنهادی تحریک-رویداد به محاسبه نرخ ارسال داده و همچنین مقدار خطای *RMSE* به ازای مقادیر مختلف آستانه تحریک پرداخته شد. چنان چه دیده شد، برای مقادیر بزرگ‌تر آستانه تحریک، نرخ ارسال کوچک‌تر بوده ولی خطای *RMSE* بزرگ‌تر می‌باشد. بدین معنی که هرچقدر بار ارتباطی کاهش بیشتری یابد، هزینه بیشتری در قالب افزایش خطای *RMSE* پرداخته خواهد شد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، حتی برای $\xi = 0.011$ که منجر به کاهش حدودا ۷۰ درصدی بار ارتباطی می‌شود، خطای *RMSE* کمتری در مقایسه با روش‌های موجود *EKF* و *CKF* (که بار ارتباطی بسیار بالاتری دارند) به دست آمده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فصل یازدهم: شبیه‌سازی روش پیشنهادی مبتنی بر قانون مکعبی و رویکرد توزیع‌یافته

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۱۱-۱- مقدمه

در این فصل، به شبیه‌سازی روش پیشنهادی در فصل ۵ گزارش قبل پرداخته شده است. ابتدا نتایج تخمین‌گر پیشنهادی مبتنی بر قانون مکعبی و بردار حالت افزوده هم در فضای حالت و هم در فضای اطلاعات (که از این پس به ترتیب *CKF-IE* و *CIF-IE* نامیده می‌شوند) و سپس نتایج رویکرد توزیع‌یافته این تخمین‌گر پیشنهادی (که از این پس *CIF-IE-D* نامیده می‌شود) ارائه شده است. نتایج حاصل از تخمین‌گر پیشنهادی شامل ترسیم نتایج تخمین متغیرهای حالت دینامیکی، ترسیم خطای *RMSE* در حوزه زمان و محاسبه خطای *RMSE* کل و مدت زمان محاسباتی می‌باشد.

۱۱-۲- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی CKF-IE

در این بخش، ابتدا روابط و مراحل اجرای تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در قالب جدول ارائه می‌شود. سپس با استفاده از این تخمین‌گر به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم ۶۸ باسه پرداخته شده و نتایج تخمین حالت در قالب نمودار و جدول ارائه می‌شوند.

۱۱-۲-۱- تخمین‌گر پیشنهادی CKF-IE

مراحل و معادلات تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* مبتنی بر قانون مکعبی و روش بردار حالت افزوده با قابلیت مقابله با فرم خاص سیستم غیرخطی زیر در جدول ۱۱-۱ ارائه شده است.

$$X(k+1) = f\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) \qquad (۱-۱۱)$$

$$\tilde{Y}(k) = h\big(X(k), U(k), \eta_U(k)\big) + \eta_Y(k)$$

$$\eta_U(k) \sim \mathcal{N}(0, Q_U)$$

$$\eta_Y(k) \sim \mathcal{N}(0, Q_Y)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۱۱-۱ مراحل و معادلات تخمین‌گر پیشنهادی CKF-IE

مرحله پیش‌بینی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_j(k\|k) = \hat{X}^a(k\|k) + \sqrt{P(k\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{X}_j(k+1\|k) = f'\left(\mathcal{X}_j(k\|k), \tilde{U}(k)\right)$ $\hat{X}^a(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{X}_j(k+1\|k)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k) - \hat{X}^a(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k) - \hat{X}^a(k+1\|k)\right)^T$
مرحله به‌روزرسانی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_j(k+1\|k) = \hat{X}^a(k+1\|k) + \sqrt{P(k+1\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه خروجی پیش‌بینی‌شده، مانده و بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{Y}_j(k+1\|k) = h'\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k), \tilde{U}(k+1)\right), \quad j = 1, \dots, 2n_s$ $\hat{Y}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{Y}_j(k+1\|k)$ $P_Y(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)^T + Q_Y$ $P_{XY}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k) - \hat{X}^a(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)^T$ $K(k+1) = P_{XY}(k+1\|k)P_Y^{-1}(k+1\|k)$ $r(k+1) = \tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)$
محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}^a(k+1\|k+1) = \hat{X}^a(k+1\|k) + K(k+1)r(k+1)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای تخمین به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k+1) = P(k+1\|k) - K(k+1)P_Y(k+1\|k)K^T(k+1)$

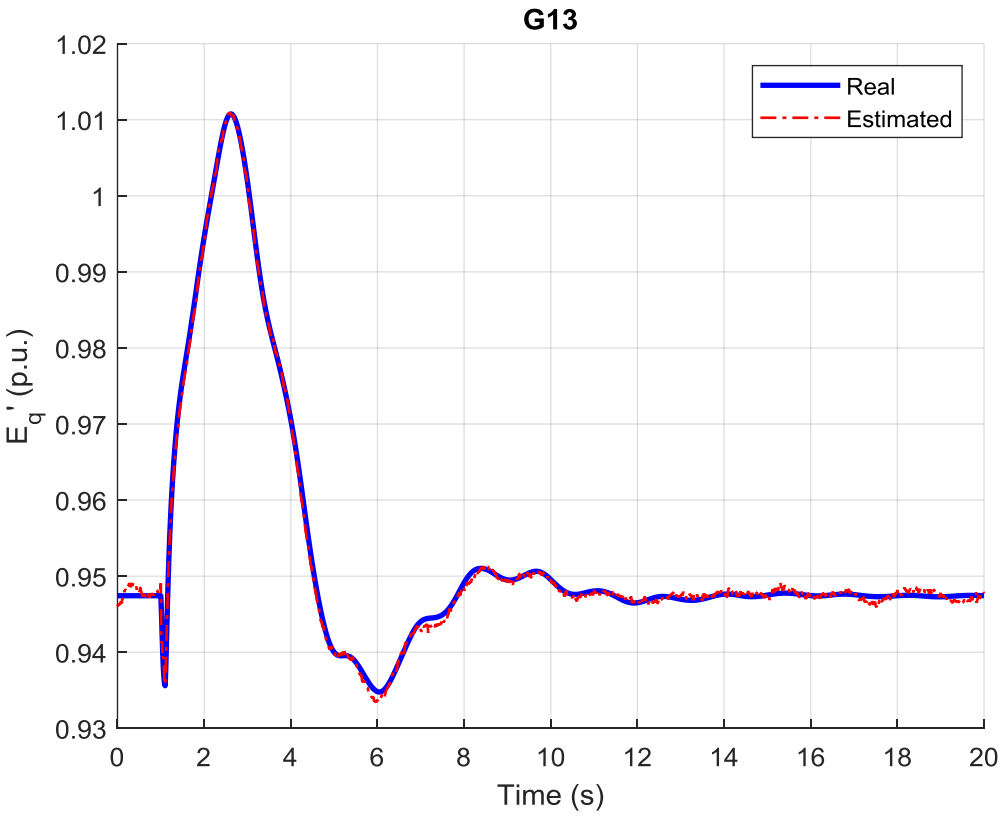
DOI: 10.30503/nripress.2020.248

۱۱-۲-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی CKF-IE

تنظیمات این تخمین‌گر نیز مشابه تخمین‌گرهای قبلی در نظر گرفته شده است. در ادامه، به ترسیم نمودار زمانی نتایج تخمین حالت و ارائه نتایج (شامل خطای *RMSE* و مدت زمان محاسباتی) در قالب جدول پرداخته شده است.

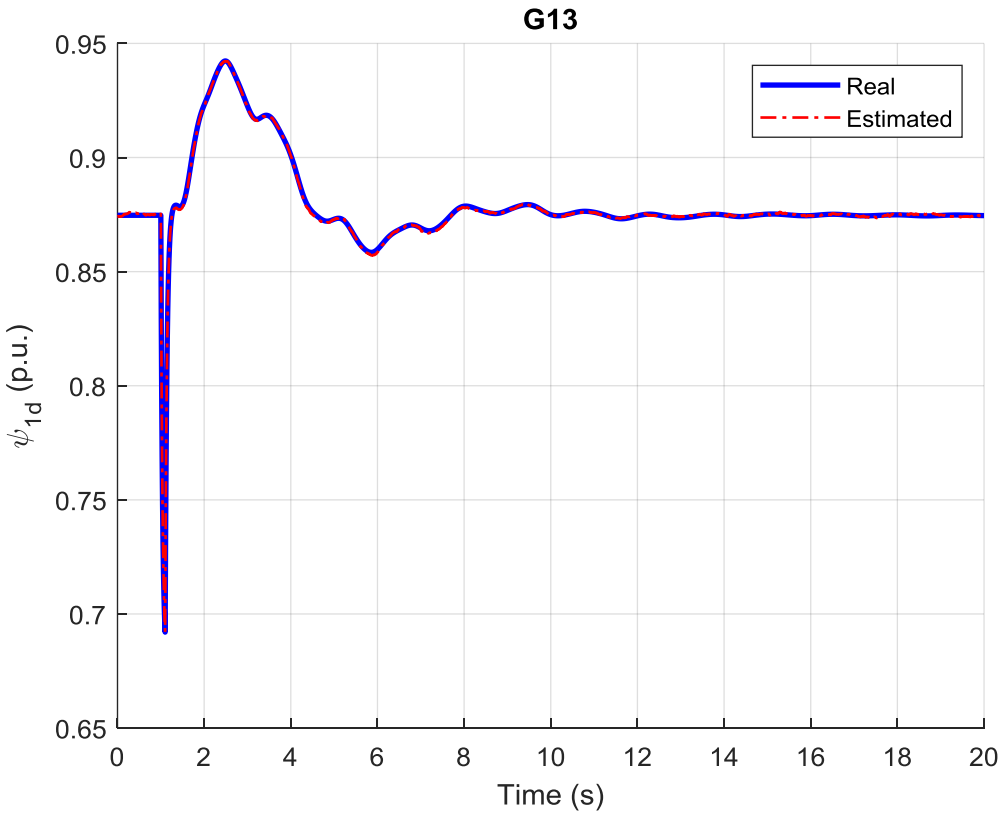
۱۱ ۲ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت

در شکل‌های زیر، مقادیر واقعی و تخمین‌زده‌شده هر یک از متغیرهای حالت در طول زمان ترسیم شده‌اند. به منظور جلوگیری از ترسیم نمودارهای متعدد، تنها به ترسیم ۶ متغیر حالت اول ژنراتور *G13* بسنده شده است. چنان‌چه در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود، تخمین‌گر پیشنهادی در این بخش که از روش بردار حالت افزوده برای غلبه بر فرم خاص غیرخطی سیستم قدرت استفاده می‌کند، عملکرد خوبی در تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم داشته است.



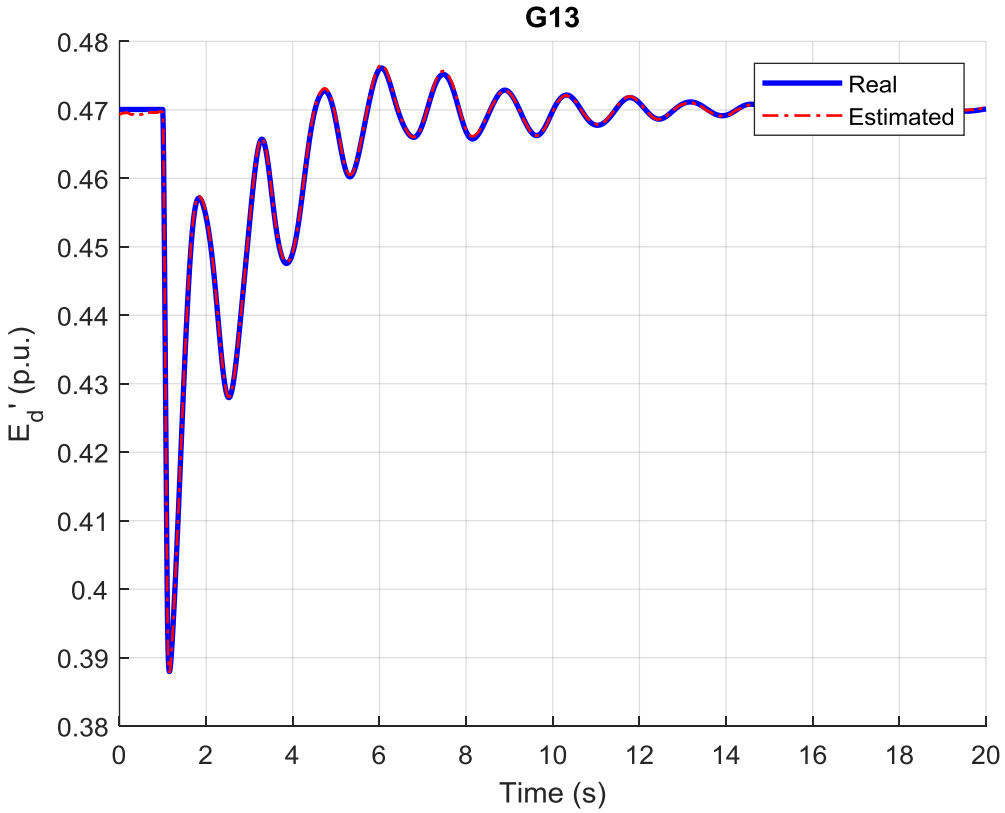
شکل ۱۱-۱ تخمین متغیرحالت اول ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF-IE*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



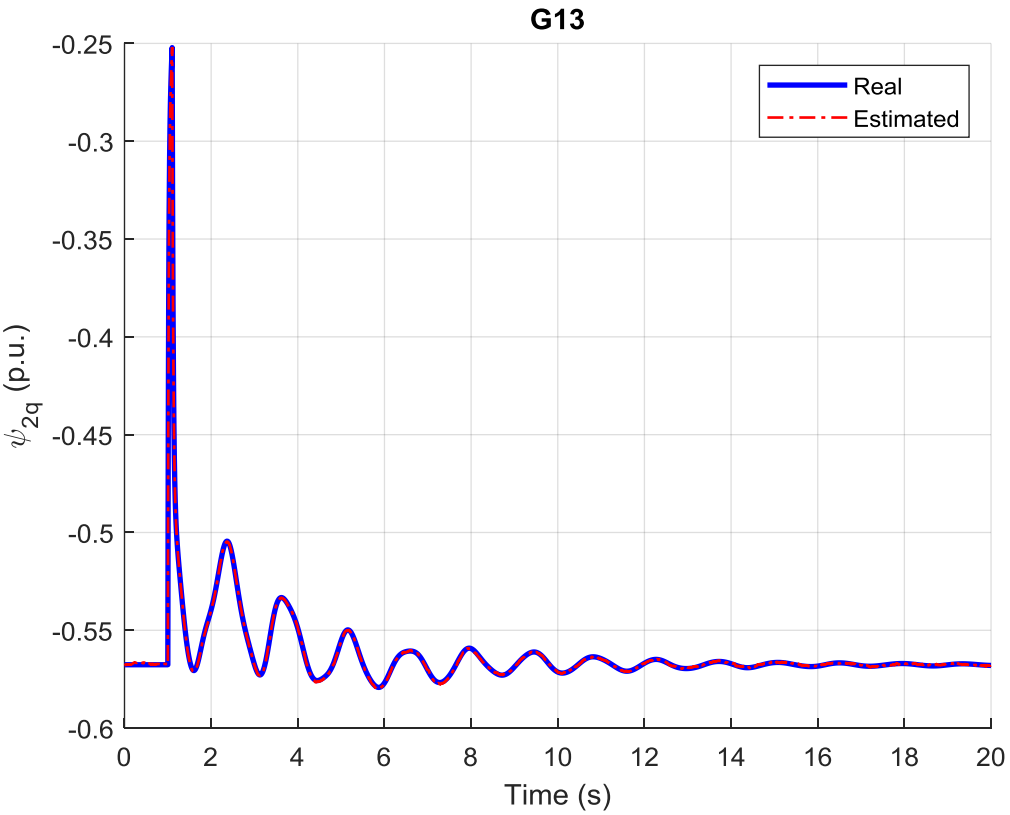
شکل ۱۱-۲ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF-IE*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



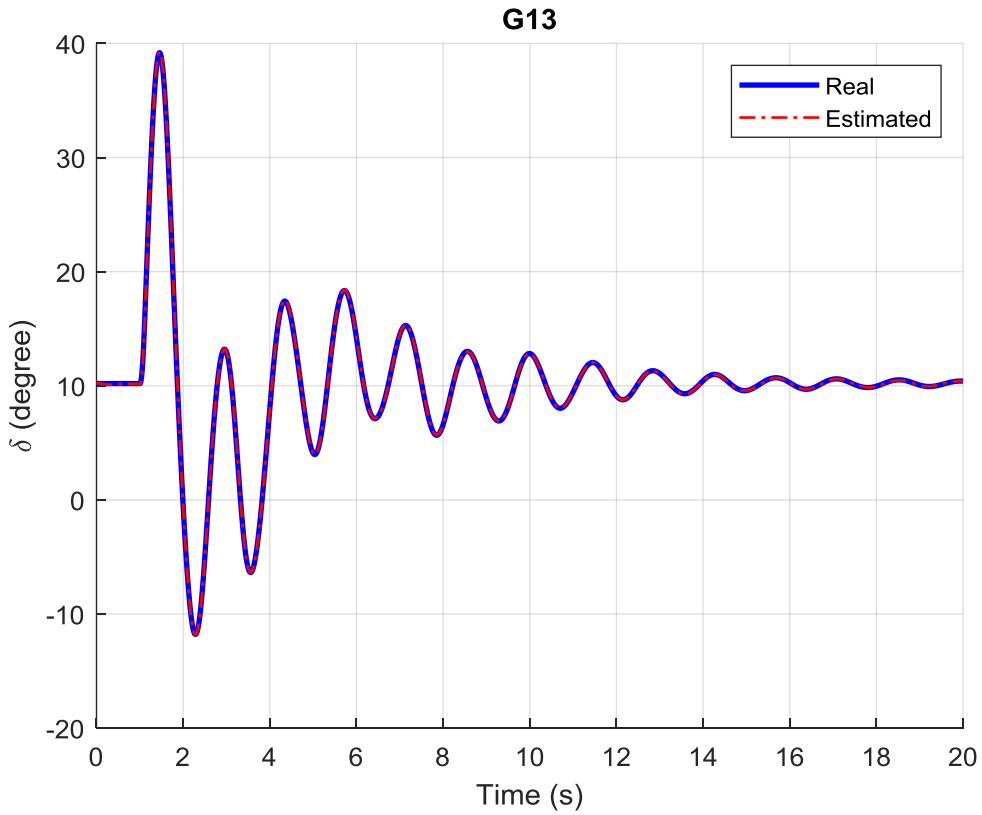
شکل ۱۱-۳ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF-IE*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



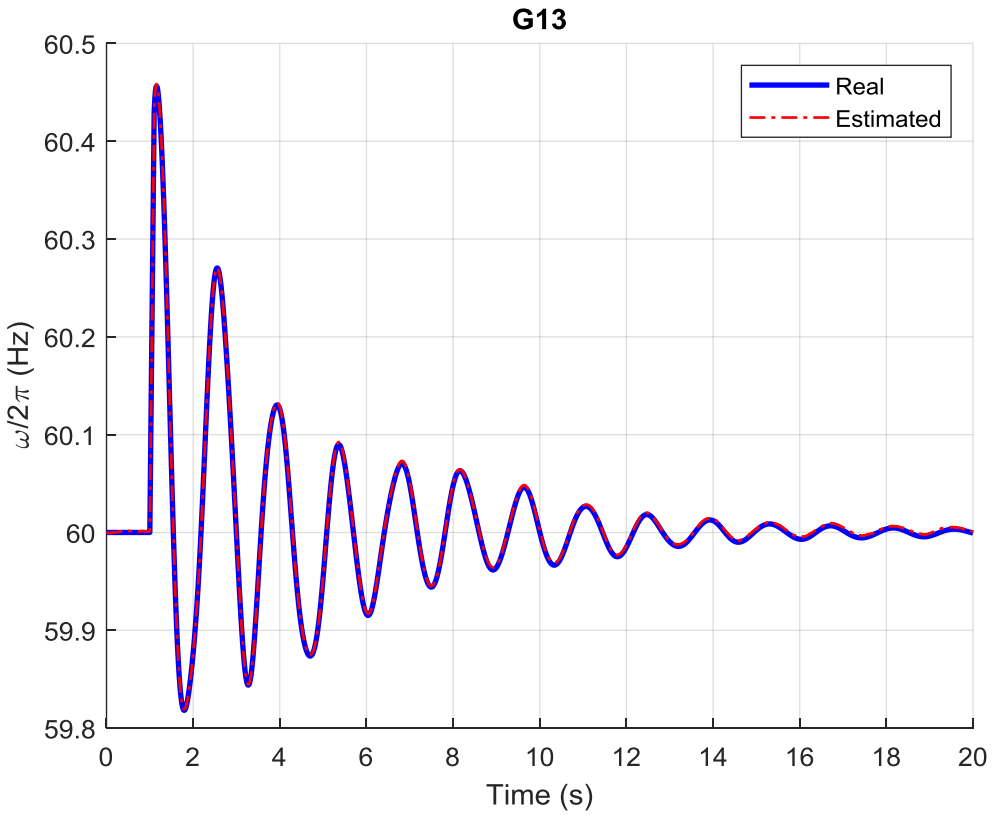
شکل ۱۱-۴ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF-IE*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۱-۵ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF-IE*

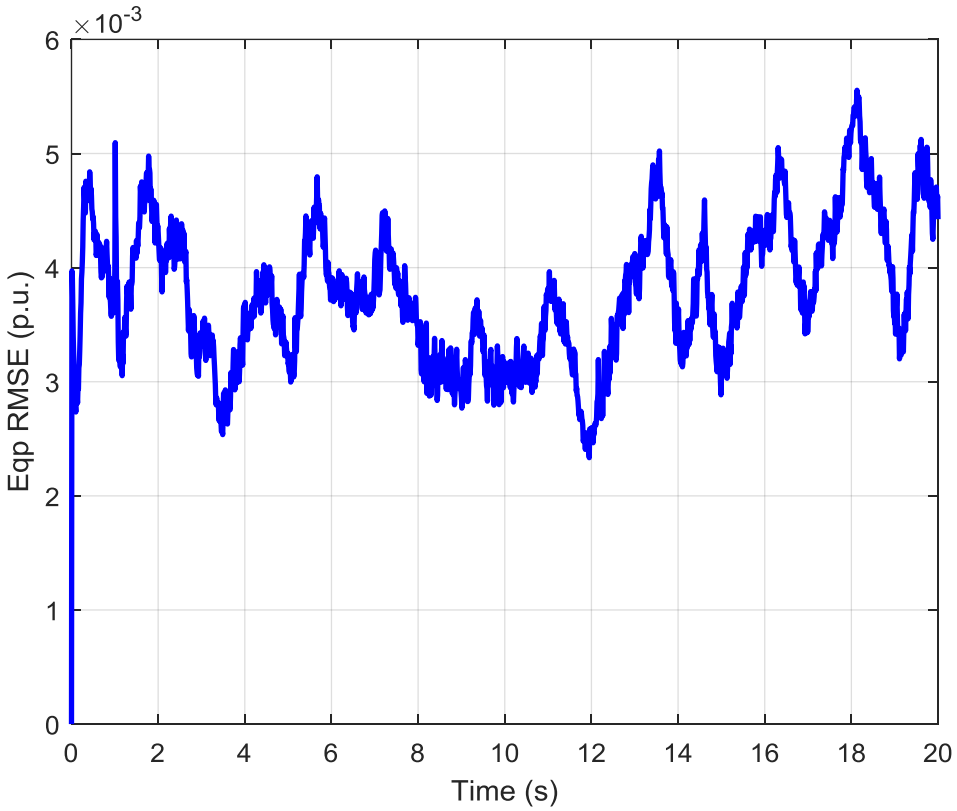
DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۱-۶ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CKF-IE*

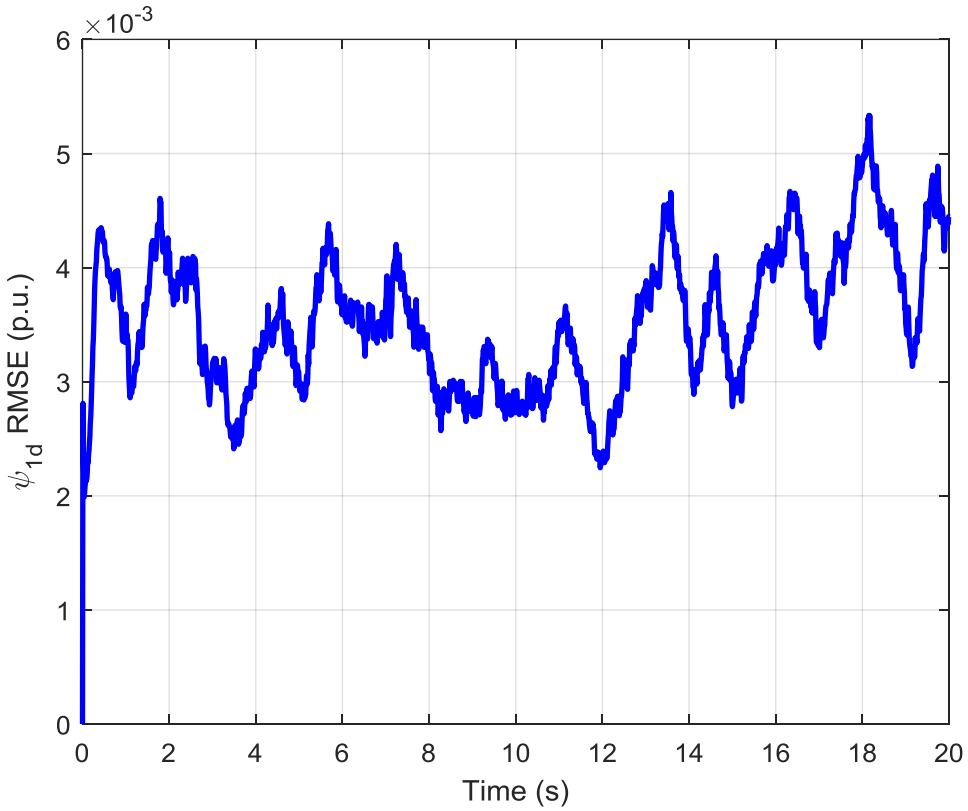
در ادامه، به ترسیم خطای *RMSE* تخمین‌گر *EKF-C* در طول زمان پرداخته شده است. با $MC = 20$ بار تکرار مونت-کارلو به محاسبه خطای *RMSE* این تخمین‌گر در هر لحظه برای متغیرهای حالت مختلف تمامی ژنراتورها پرداخته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



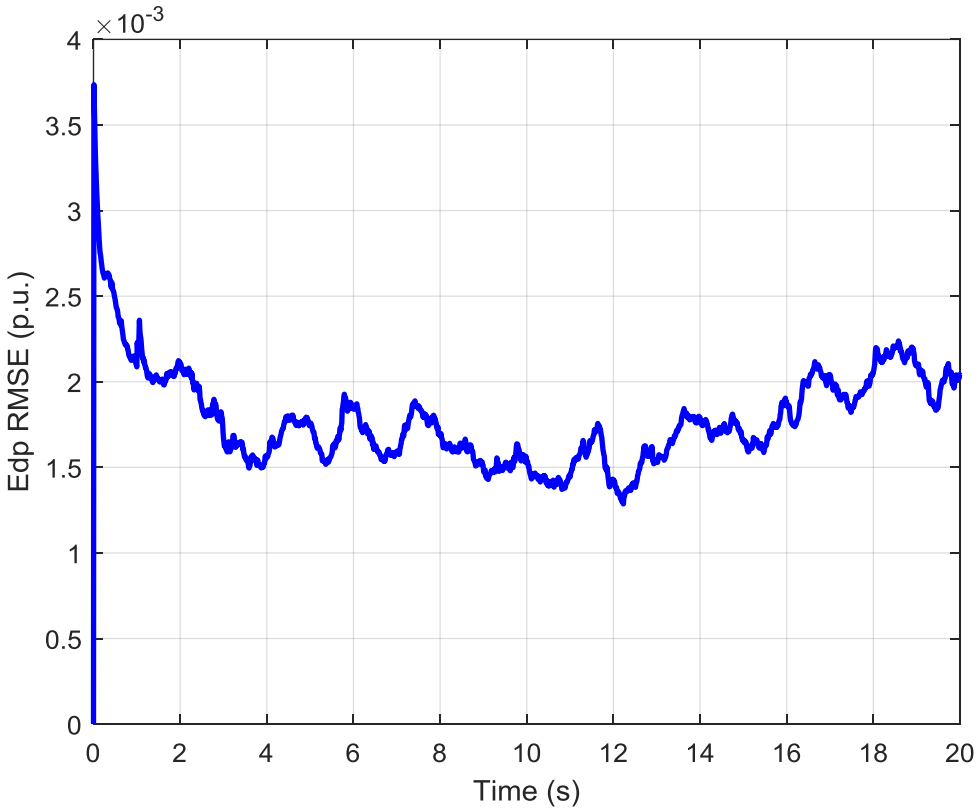
شکل ۱۱-۷ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF-IE* برای متغیر حالت اول

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



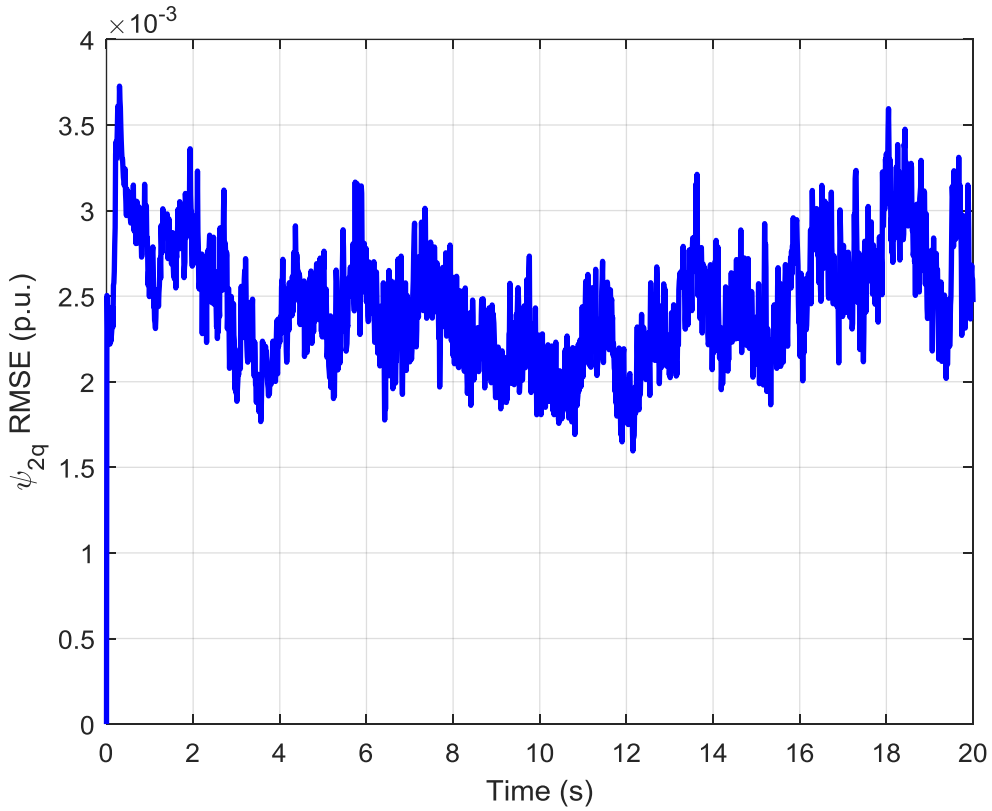
شکل ۱۱-۸ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF-IE* برای متغیر حالت دوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



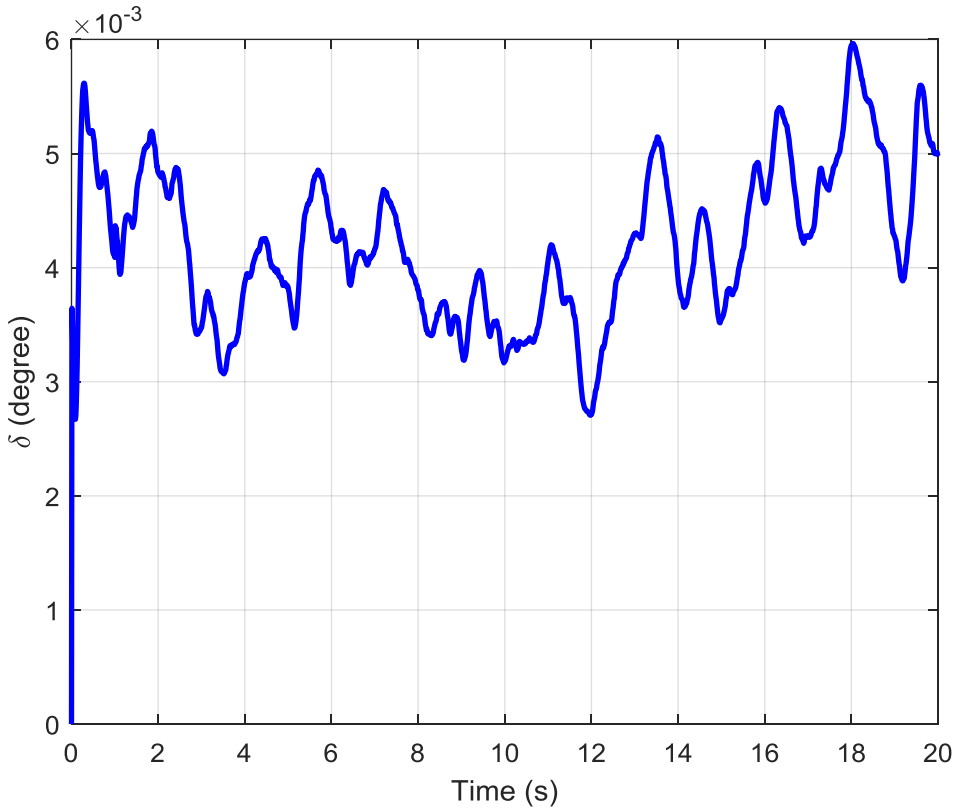
شکل ۱۱-۹ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF-IE* برای متغیر حالت سوم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



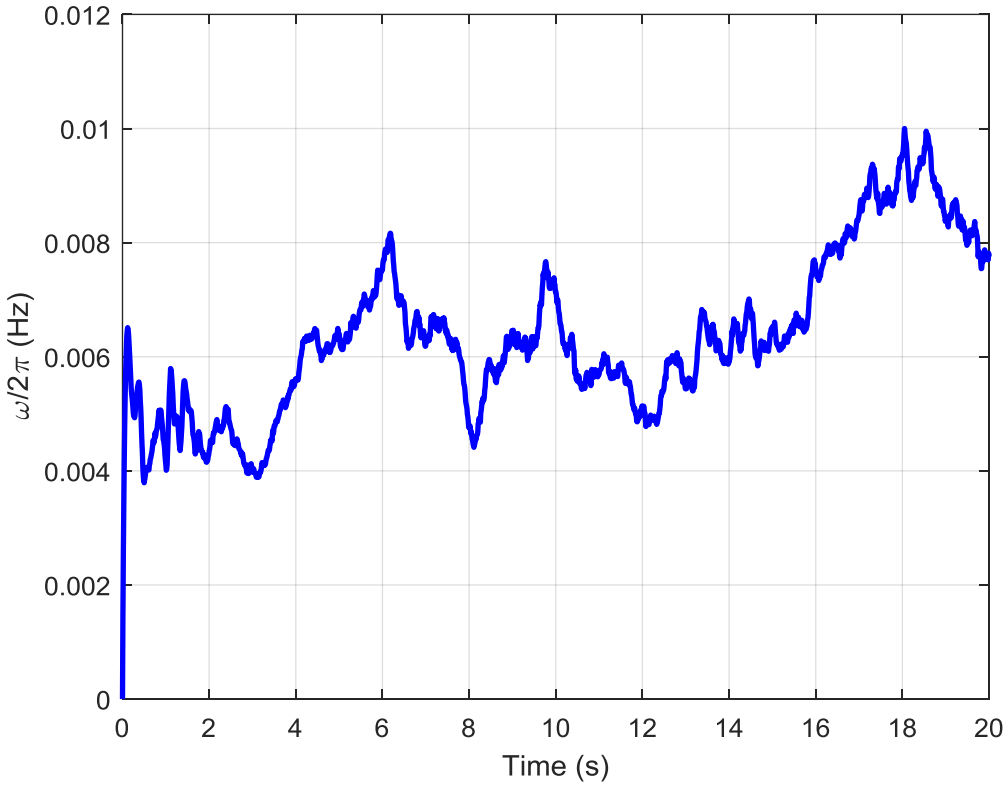
شکل ۱۱-۱۰ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF-IE* برای متغیر حالت چهارم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۱-۱۱ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF-IE* برای متغیر حالت پنجم

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۱-۱۲ خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF-IE* برای متغیر حالت ششم

۱۱ ۲ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر

در جدول زیر، میانگین زمانی خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF-IE* و مدت زمان محاسباتی آن در هر بازگشت ارائه شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، عملکرد این روش در مقایسه با روش‌های موجود *EKF* و *CKF* بهبود یافته است. علت این است که در این تخمین‌گر از روش بردار حالت افزوده برای غلبه بر فرم خاص غیرخطی سیستم قدرت استفاده می‌شود. هرچند مشاهده می‌شود که تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* در فصل قبل، موفقیت کمتری در بهبود عملکرد تخمین حالت داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی برای مقابله با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده نسبت به روش بردار حالت افزوده در روش مبتنی بر قانون مکعبی نتایج بهتری در بر داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که بار محاسباتی تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

مقایسه با روش پیشنهادی *EKF-C* بسیار بالاتر بوده و از جنبه پیاده‌سازی زمان-واقعی نیز روش پیشنهادی *EKF-C* عملکرد بهتری نسبت به روش پیشنهادی *CKF-IE* داشته است.

جدول ۱۱-۲ عملکرد تخمین‌گر *CKF-IE*

$RMSE_{E_q'}(pu)$	$RMSE_{\psi_{1d}}(pu)$	$RMSE_{E_d'}(pu)$	$RMS\psi_{2q}(pu)$	$RMSE_{\delta}(deg)$	$RMSE_{\omega}(Hz)$
0.0037	*0.0035*	*0.0017*	*0.0024*	*0.241*	*0.0063*
$RMSE_{E_{FD}}(pu)$	$RMSE_{R_F}(pu)$	$RMSE_{V_R}(pu)$	$RMSE_{T_M}(pu)$	$RMSE_{P_{SV}}(pu)$	*Computation Time (s)*
0.0067	*0.001*	*0.0932*	*0.002*	*0.002*	*0.112*

۱۱-۳- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی *CIF-IE*

تخمین‌گر پیشنهادی *CIF-IE* نسخه فضای اطلاعات همان تخمین‌گر *CKF-IE* می‌باشد. همان‌طور که در گزارش مرحله قبل گفته شد، نسخه‌های فضای حالت و فضای اطلاعات تخمین‌گرها به صورت جبری با یکدیگر هم ارز می‌باشند [۲۰۰]. به بیان دیگر، عملکرد یک تخمین‌گر متمرکز در فضای حالت و فضای اطلاعات تحت شرایط یکسان برابر خواهد بود. بنابراین انتظار می‌رود که عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی *CIF-IE* مشابه عملکرد تخمین‌گر *CKF-IE* باشد. بنابراین به منظور جلوگیری از تکرار نمودارهای مشابه، تنها به ارائه نتایج عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی *CIF-IE* در قالب جدول بسنده شده است.

۱۱-۳-۱- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE

تنظیمات این تخمین‌گر نیز مشابه تخمین‌گرهای قبلی در نظر گرفته شده است. در ادامه، به ارائه نتایج (شامل خطای *RMSE* و مدت زمان محاسباتی) در قالب جدول پرداخته شده است.

در جدول زیر، میانگین زمانی خطای *RMSE* تخمین‌گر *CIF-IE* و مدت زمان محاسباتی آن در هر بازگشت ارائه شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، نتایج مشابه بخش قبل می‌باشند، زیرا نسخه فضای اطلاعات این تخمین‌گر هم‌ارز با نسخه فضای حالت آن می‌باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۱۱-۳ عملکرد تخمین‌گر CIF-IE

$RMSE_{E_q'}(pu)$	$RMSE_{\psi_{1d}}(pu)$	$RMSE_{E_d'}(pu)$	$RMS\psi_{2q}(pu)$	$RMSE_{\delta}(deg)$	$RMSE_{\omega}(Hz)$
0.0033	0.003	0.0016	0.0022	0.2111	0.0048
$RMSE_{E_{FD}}(pu)$	$RMSE_{R_F}(pu)$	$RMSE_{V_R}(pu)$	$RMSE_{T_M}(pu)$	$RMSE_{P_{SV}}(pu)$	Computation Time (s)
0.0065	0.0009	0.0922	0.0015	0.0015	0.111

۱۱-۴- تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE-D

در این بخش، ابتدا روابط و مراحل اجرای تخمین‌گر توزیع‌یافته پیشنهادی یعنی *CIF-IE-D* در قالب جدول ارائه می‌شود. سپس با استفاده از این تخمین‌گر به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم ۶۸ باسه پرداخته شده و نتایج تخمین حالت در قالب نمودار و جدول ارائه می‌شوند. نتایج در این بخش با در نظر گرفتن تعداد گام اجماع برابر با $L = 3$ به دست آمده‌اند.

۱۱-۴-۱- تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE-D

مراحل و معادلات تخمین‌گر توزیع‌یافته پیشنهادی *CIF-IE-D* (مبتنی بر قانون مکعبی و روش بردار حالت افزوده و روش اجماع) در *PDC* شماره pام در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۱۱-۴ مراحل و معادلات تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE-D

مرحله پیش‌بینی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_{j_p}(k\|k) = \hat{X}_p^a(k\|k) + \sqrt{\Omega_p^{-1}(k\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) = f'\left(\mathcal{X}_{j_p}(k\|k), \tilde{U}_p(k)\right)$ $\hat{X}_p^a(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k)$
محاسبه بردار و ماتریس اطلاعات پیش‌بینی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\Omega_p(k+1\|k) = \left(\frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{X}_p^a(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{X}_p^a(k+1\|k)\right)^T\right)^{-1}$ $q_p(k+1\|k) = \Omega_p(k+1\|k)\hat{X}_p^a(k+1\|k)$
مرحله به‌روزرسانی	

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) = \hat{X}_p^a(k+1\|k) + \sqrt{\Omega_p^{-1}(k+1\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه خروجی پیش‌بینی‌شده و مانده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k) = h'_p\left(\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k), \tilde{U}_p(k+1)\right), \quad j = 1, \dots, 2n_s$ $\hat{Y}_p(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k)$ $P_{Y_p}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{Y}_p(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{Y}_p(k+1\|k)\right)^T + Q_{Y_p}$ $P_{XY_p}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{X}_p^a(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_{j_p}(k+1\|k) - \hat{Y}_p(k+1\|k)\right)^T$ $r_p(k+1) = \tilde{Y}_p(k+1) - \hat{Y}_p(k+1\|k)$
محاسبه بردار و ماتریس ابداعات در مرحله زمانی $k+1$ام	$\delta q_p(k+1) = \Omega_p(k+1\|k)P_{XY_p}(k+1\|k)Q_{Y_p}^{-1}\left(r_p(k+1) + P_{XY_p}^T(k+1\|k)\Omega_p((k+1\|k)\hat{X}_p^a(k+1\|k)\right)$ $\delta\Omega_p(k+1) = \Omega_p(k+1\|k)P_{XY_p}(k+1\|k)Q_{Y_p}^{-1}P_{XY_p}^T(k+1\|k)\Omega_p(k+1\|k)$
اجرای الگوریتم اجماع	$\delta q_p^{t+1}(k+1) = \sum_{q\in\mathcal{S}^p}\pi_{p,q}\delta q_q^t(k+1), \quad \delta q_p^0(k+1) = \delta q_p(k+1)$ $\delta\Omega_p^{t+1}(k+1) = \sum_{q\in\mathcal{S}^p}\pi_{p,q}\delta\Omega_q^t(k+1), \quad \delta\Omega_p^0(k+1) = \delta\Omega_p(k+1)$
محاسبه بردار و ماتریس اطلاعات به‌روزرسانی‌شده روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$q_p(k+1\|k+1) = q_p(k+1\|k) + \delta q_p^{t+1}(k+1)$ $\Omega_p(k+1\|k+1) = \Omega_p(k+1\|k) + \delta\Omega_p^{t+1}(k+1)$
محاسبه بردار حالت تخمین‌زده‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}_p^a(k+1\|k+1) = \Omega_p^{-1}(k+1\|k+1)q_p(k+1\|k+1)$

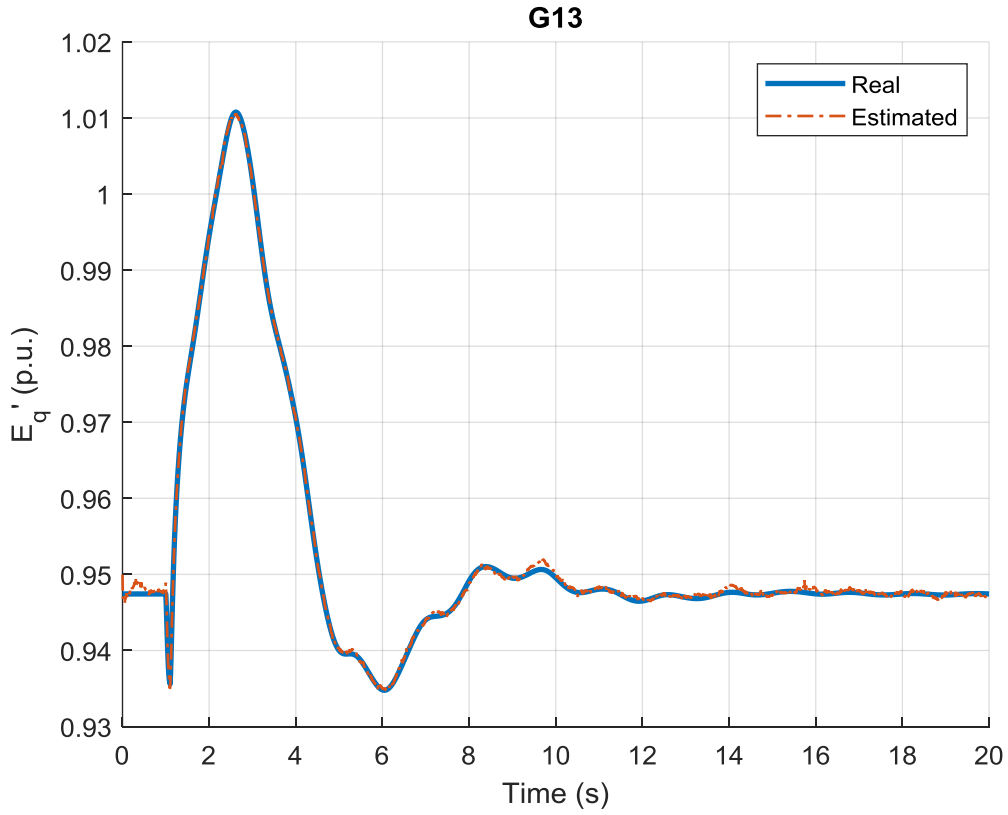
۱۱-۴-۲- نتایج تخمین حالت سیستم ۶۸ باسه توسط تخمین‌گر پیشنهادی CIF-IE-D

تنظیمات این تخمین‌گر نیز مشابه تخمین‌گرهای قبلی در نظر گرفته شده است. در ادامه، به ترسیم نمودار زمانی نتایج تخمین حالت و ارائه نتایج (شامل خطای *RMSE* و مدت زمان محاسباتی) در قالب جدول پرداخته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

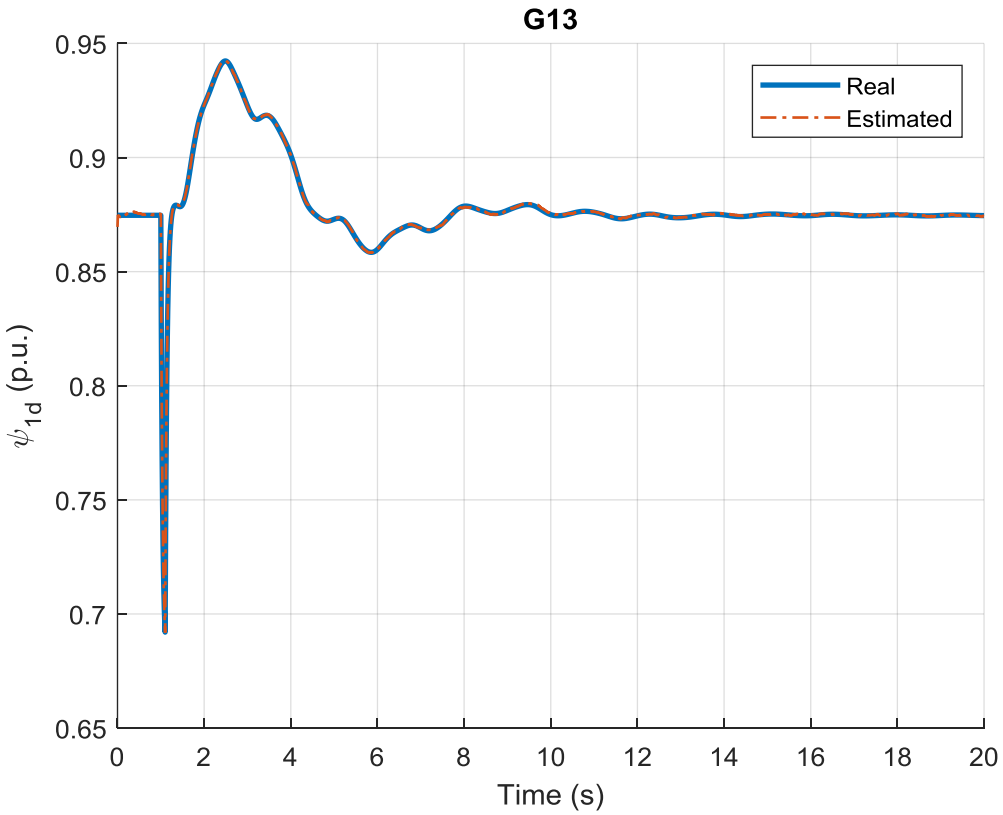
۱۱ ۴ ۲ ۱ نمودار زمانی نتایج تخمین حالت

در شکل‌های زیر، مقادیر واقعی و تخمین‌زده‌شده هر یک از متغیرهای حالت در طول زمان ترسیم شده‌اند. به منظور جلوگیری از ترسیم نمودارهای متعدد، تنها به ترسیم ۶ متغیر حالت اول ژنراتور *G13* بسنده شده است. چنان‌چه در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود، تخمین‌گر توزیع‌یافته پیشنهادی قادر به تخمین متغیرهای دینامیکی سیستم بوده است.



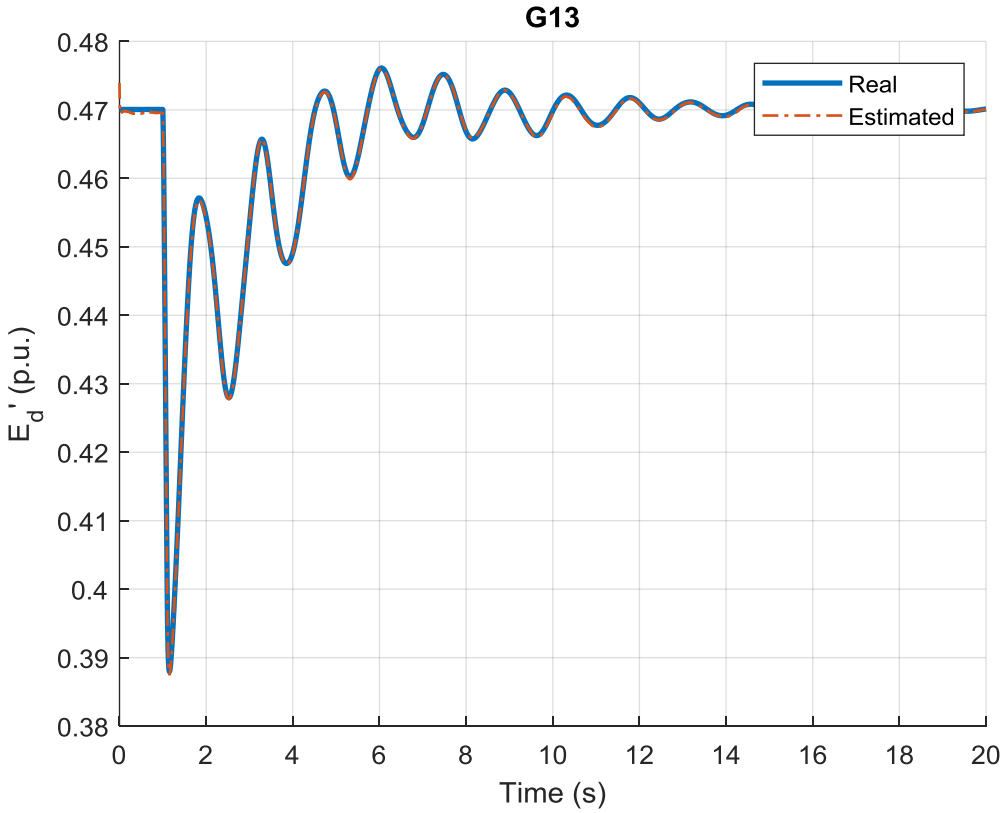
شکل ۱۱-۱۳ تخمین متغیرحالت اول ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CIF-IE-D*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



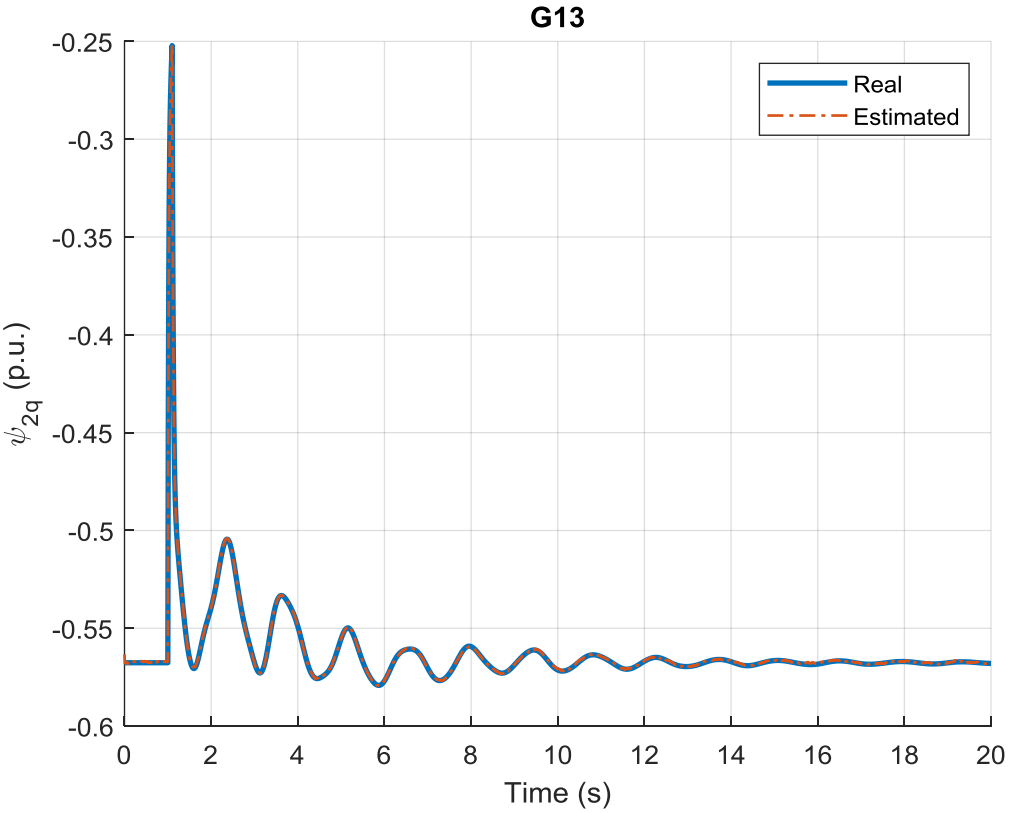
شکل ۱۱-۱۴ تخمین متغیرحالت دوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CIF-IE-D*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



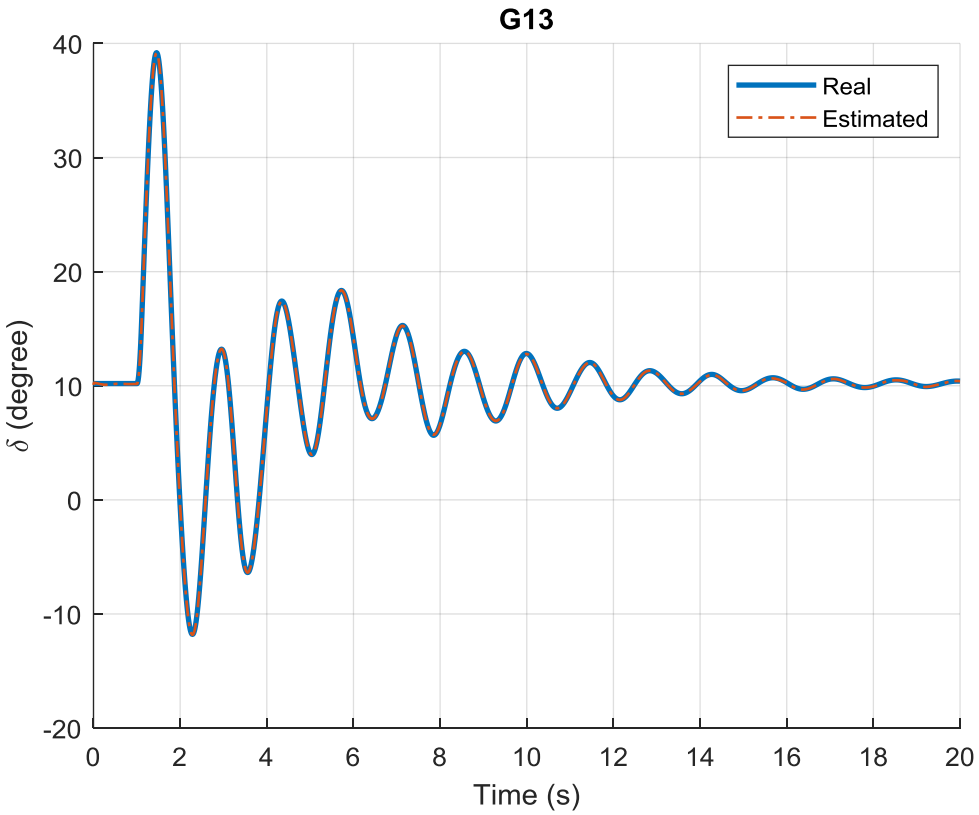
شکل ۱۱-۱۵ تخمین متغیرحالت سوم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CIF-IE-D*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



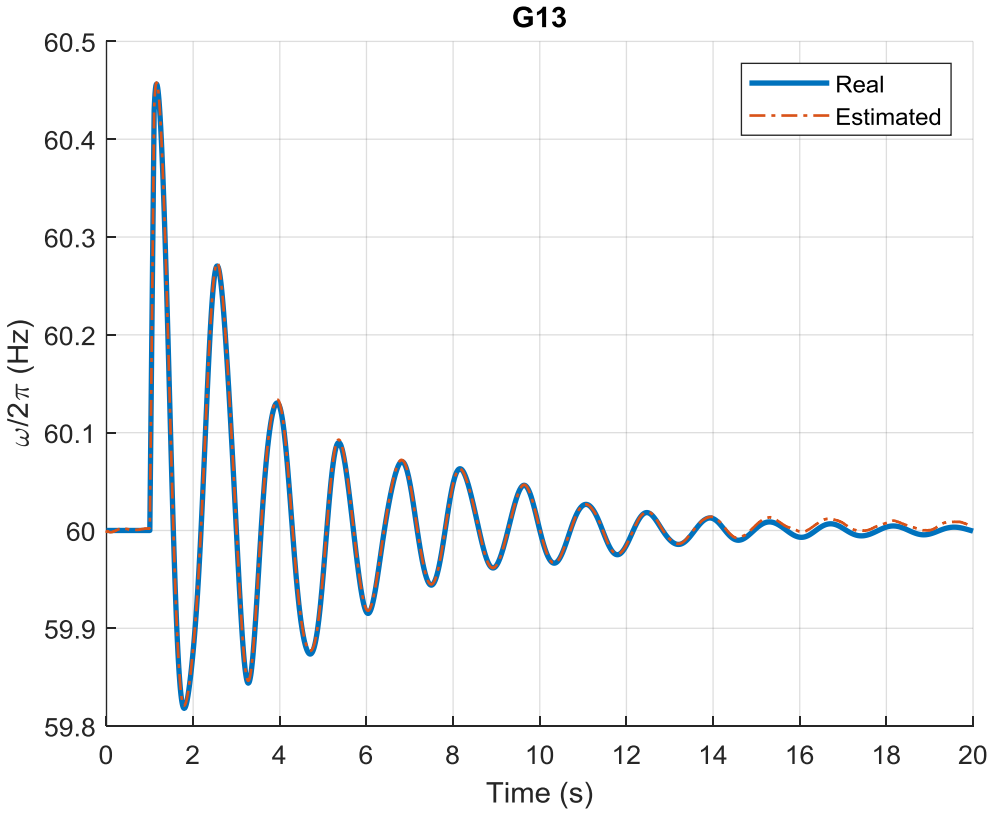
شکل ۱۱-۱۶ تخمین متغیرحالت چهارم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CIF-IE-D*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۱-۱۷ تخمین متغیرحالت پنجم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CIF-IE-D*

DOI: 10.30503/nripress.2020.248



شکل ۱۱-۱۸ تخمین متغیرحالت ششم ژنراتور *G13* توسط تخمین‌گر *CIF-IE-D*

۱۱ ۴ ۲ ۲ عملکرد تخمین‌گر

در جدول زیر، میانگین زمانی خطای *RMSE* تخمین‌گر توزیع‌یافته پیشنهادی *CIF-IE-D* و مدت زمان محاسباتی آن در هر بازگشت برای *PDC* واقع در ناحیه ۵ سیستم ۶۸ باسه ارائه شده است. تعداد گام‌های اجماع در این محاسبات برابر با $L = 3$ در نظر گرفته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۱۱-۵ عملکرد تخمین‌گر CIF-IE-D

$RMSE_{E_q'}(pu)$	$RMSE_{\psi_{1d}}(pu)$	$RMSE_{E_d'}(pu)$	$RMS\psi_{2q}(pu)$	$RMSE_{\delta}(deg)$	$RMSE_{\omega}(Hz)$
0.0039	*0.0037*	*0.0018*	*0.0026*	*0.2585*	*0.01*
$RMSE_{E_{FD}}(pu)$	$RMSE_{R_F}(pu)$	$RMSE_{V_R}(pu)$	$RMSE_{T_M}(pu)$	$RMSE_{P_{SV}}(pu)$	*Computation Time (s)*
0.0058	*0.0008*	*0.0922*	*0.0032*	*0.0033*	*0.0981*

همان‌طور که گفته شد، در روش توزیع‌یافته پیشنهادی *CIF-IE-D*، به هر ناحیه جغرافیایی در سیستم ۶۸ باسه یک *PDC* اختصاص داده شده و هر *PDC* تنها قادر به دریافت مستقیم داده‌های *PMU*های همان ناحیه می‌باشد. در این تخمین‌گر، با استفاده از روش اجماع پیشنهادی، *PDC*ها در مرحله به‌روزرسانی تخمین‌گر به مبادله بردارهای ابداعات خود طی تکرار L گام اجماع می‌پردازند. بدیهی است هر چه تعداد گام‌های اجماع افزایش یابد، عملکرد تخمین‌گر توزیع‌یافته به عملکرد تخمین‌گر متمرکز *CIF-IE* نزدیک‌تر می‌شود. در جدول زیر، به بررسی تأثیر تعداد گام اجماع بر عملکرد تخمین‌گر توزیع‌یافته پرداخته شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، برای $L = 1$ گام اجماع، خطای تخمین‌گر واگرا شده است، زیرا تنها یک گام اجماع برای پخش شدن اطلاعات موجود در *PDC*ها در کل شبکه کافی نمی‌باشد. از طرفی برای گام‌های اجماع بزرگ‌تر خطای تخمین‌گر توزیع‌یافته کاهش یافته و به عملکرد تخمین‌گر متمرکز نزدیک‌تر شده است.

جدول ۱۱-۶ تأثیر تعداد گام‌های اجماع بر عملکرد تخمین‌گر CIF-IE-D

	$L = 1$	$L = 2$	$L = 3$	*Centralized CIF-IE*
$RMSE_{E_q'}(pu)$	*Divergence*	*0.005*	*0.0039*	*0.0033*
$RMSE_{\delta}(deg)$	*Divergence*	*0.3393*	*0.2585*	*0.2111*
$RMSE_{\omega}(Hz)$	*Divergence*	*0.0145*	*0.01*	*0.0048*

۱۱-۵- جمع‌بندی و مقایسه کلی

در این فصل، به شبیه‌سازی روش پیشنهادی در فصل ۸ پرداخته شد. ابتدا نتایج تخمین‌گر پیشنهادی مبتنی بر قانون مکعبی و بردار حالت افزوده هم در فضای حالت و هم در فضای اطلاعات (به ترتیب *CKF*-

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

IE و *CIF-IE*) و سپس نتایج رویکرد توزیع‌یافته این تخمین‌گر پیشنهادی با استفاده از روش اجماع (*CIF-IE-D*) ارائه شد. نتایج حاصل از تخمین‌گر پیشنهادی شامل ترسیم نتایج تخمین متغیرهای حالت دینامیکی، ترسیم خطای *RMSE* در حوزه زمان و محاسبه خطای *RMSE* کل و مدت زمان محاسباتی ارائه شد.

چنان‌چه مشاهده شد، عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با روش‌های موجود *EKF* و *CKF* بهبود یافته است. علت این است که در این تخمین‌گر از روش بردار حالت افزوده برای غلبه بر فرم خاص غیرخطی سیستم قدرت استفاده می‌شود. هرچند مشاهده می‌شود که تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* در فصل قبل، موفقیت کمتری در بهبود عملکرد تخمین حالت داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی برای مقابله با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده نسبت به روش بردار حالت افزوده در روش مبتنی بر قانون مکعبی نتایج بهتری در بر داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که بار محاسباتی تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با روش پیشنهادی *EKF-C* بسیار بالاتر بوده و از جنبه پیاده‌سازی زمان-واقعی نیز روش پیشنهادی *EKF-C* عملکرد بهتری نسبت به روش پیشنهادی *CKF-IE* داشته است.

همچنین مشاهده شد که در نسخه توزیع‌یافته تخمین‌گر پیشنهادی یعنی *CIF-IE-D*، برای $L = 1$ گام اجماع، خطای تخمین‌گر واگرا شده است، زیرا تنها یک گام اجماع برای پخش شدن اطلاعات موجود در *PDC*ها در کل شبکه کافی نمی‌باشد. از طرفی برای گام‌های اجماع بزرگ‌تر خطای تخمین‌گر توزیع‌یافته کاهش یافته و به عملکرد تخمین‌گر متمرکز نزدیک‌تر شده است.

حال، یک مقایسه کلی بر روی دو روش موجود تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت یعنی *EKF* و *CKF* و روش‌های پیشنهادی در این پروژه انجام می‌شود. در این راستا، با اجرای کدهای هر کدام از تخمین‌گرها با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو (با ۲۰ تکرار)، به مقایسه خطای *RMSE* کل و همچنین مدت زمان محاسباتی هر کدام از تخمین‌گرها در جدول زیر پرداخته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول ۱۱-۷ مقایسه کلی روش‌های موجود و پیشنهادی

	Existing Methods		***Proposed Methods***				
	EKF	***CKF***	***EKF-C***	***EKF-C-ET (with 70% Communication Rate)***	***CKF-IE***	***CIF-IE***	***CIF-IE-D (with L = 3)***
$RMSE_{E'_q}(pu)$	*0.0084*	*0.0066*	*0.0007*	*0.0017*	*0.0037*	*0.0033*	*0.0039*
$RMSE_{\delta}(deg)$	*0.933*	*0.4693*	*0.1535*	*0.2029*	*0.241*	*0.2111*	*0.2585*
$RMSE_{\omega}(Hz)$	*0.038*	*0.0116*	*0.0034*	*0.0055*	*0.0063*	*0.0048*	*0.01*
Computation Time (s)	*0.0129*	*0.0713*	*0.0164*	*0.0145*	*0.112*	*0.111*	*0.0981*

چنان‌چه در این جدول مشاهده می‌شود، تمامی روش‌های پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود، عملکرد بهتری از نظر خطای تخمین داشته‌اند. این برتری حتی در روش *EKF-C-ET* با نرخ ارسال حدودا ۷۰ درصد نیز مشاهده می‌شود. زیرا این تخمین‌گر پیشنهادی با در نظر گرفتن همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در مدل خطی‌شده، به تخمین حالت سیستم پرداخته است.

همچنین مشاهده می‌شود که از بین دو روش پیشنهادی *EKF-C* و *CKF-IE*، تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C*، موفقیت کمتری در بهبود عملکرد تخمین حالت داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی برای مقابله با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده نسبت به روش بردار حالت افزوده در روش مبتنی بر قانون مکعبی نتایج بهتری در بر داشته است.

همچنین مشاهده می‌شود که بار محاسباتی تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با روش پیشنهادی *EKF-C* بالاتر بوده و از جنبه پیاده‌سازی زمان-واقعی نیز روش پیشنهادی *EKF-C* عملکرد بهتری نسبت به روش پیشنهادی *CKF-IE* داشته است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

نتیجه‌گیری

در فصل دهم، به شبیه‌سازی روش پیشنهادی در فصل ۷ پرداخته شد. ابتدا نتایج تخمین حالت توسط تخمین‌گر دینامیکی غیرخطی مبتنی بر خطی‌سازی با قابلیت مواجهه با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات (*EKF-C*) ارائه شد. سپس نتایج تخمین حالت توسط این روش و با استفاده از استراتژی تحریک-رویداد پیشنهادی (*EKF-C-ET*) ارائه شد. نتایج حاصل از تخمین‌گر پیشنهادی در قالب ترسیم نتایج تخمین متغیرهای حالت دینامیکی، ترسیم خطای *RMSE* در حوزه زمان و محاسبه خطای *RMSE* کل و مدت زمان محاسباتی ارائه شد.

در فصل یازدهم، به شبیه‌سازی روش پیشنهادی در فصل ۸ پرداخته شد. ابتدا نتایج تخمین‌گر پیشنهادی مبتنی بر قانون مکعبی و بردار حالت افزوده هم در فضای حالت و هم در فضای اطلاعات (به ترتیب *CKF-IE* و *CIF-IE*) و سپس نتایج رویکرد توزیع‌یافته این تخمین‌گر پیشنهادی با استفاده از روش اجماع (*CIF-IE-D*) ارائه شد. نتایج حاصل از تخمین‌گر پیشنهادی شامل ترسیم نتایج تخمین متغیرهای حالت دینامیکی، ترسیم خطای *RMSE* در حوزه زمان و محاسبه خطای *RMSE* کل و مدت زمان محاسباتی ارائه شد.

چنان‌چه مشاهده شد، برای تخمین‌گر *EKF* با استفاده از روش خطی‌سازی سمبلیک و آفلاین مدت زمان محاسباتی مورد نیاز برای هر بازگشت برابر با $0.0129\ s$ به دست آمد. با توجه به این که زمان نمونه‌برداری مناسب برای سیستم قدرت مجهز به *PMU* برابر با 0.02 یا 0.01 می‌باشد، روش پیشنهادی در صورت اجرا توسط یک پردازشگر قوی قادر خواهد بود بدون نیاز به روش‌های پردازش موازی و سایر روش‌های موجود در این زمینه در مدت زمانی کمتر از زمان نمونه‌برداری سیستم به انجام محاسبات مورد نیاز در هر بازگشت پرداخته و بنابراین به صورت زمان-واقعی و بدون نیاز به روش‌های پردازش موازی یا سایر روش‌های موجود در این زمینه قابل پیاده‌سازی خواهد بود.

همچنین مشاهده شد که خطای *RMSE* تخمین‌گر *CKF* کمی کمتر از تخمین‌گر *EKF* می‌باشد، زیرا همان‌طور که گفته شد تخمین‌گر *CKF* بر خلاف *EKF* مبتنی بر خطی‌سازی نبوده و از قانون مکعبی برای غلبه بر غیرخطی‌گری سیستم استفاده می‌کند. از طرف دیگر، چنان‌چه مشاهده شد، مدت زمان محاسباتی این تخمین‌گر نسبت به *EKF* بیشتر می‌باشد، زیرا همان‌طور که گفته شد در پیاده‌سازی *EKF* در این پروژه از روش خطی‌سازی سمبلیک و آفلاین برای محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده در هر بازگشت استفاده شده است که منجر به کاهش مدت زمان محاسباتی در مقایسه با سایر روش‌ها می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

در فصل ۱۰، مشاهده شد که عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* در مقایسه با تخمین‌گر *EKF* بهبود بسیار قابل توجهی یافته است. علت این امر این است که در تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* بر خلاف روش‌های موجود، همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده در نظر گرفته شده و منجر به کاهش قابل ملاحظه خطای تخمین شده است. در صورتی که مدت زمان محاسباتی آن حدودا با روش *EKF* برابر بوده و برای تخمین حالت سیستم قدرت با زمان نمونه‌برداری s 0.02 یا s 0.01 قابل پیاده‌سازی به صورت زمان-واقعی و بدون نیاز به روش‌های پردازش موازی خواهد بود.

همچنین مشاهده شد که تخمین‌گر پیشنهادی تحریک-رویداد *EKF-C-ET* عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های موجود داشته است. همان‌طور که گفته شد، در این روش از استراتژی تحریک-رویداد برای کاهش بار ارتباطی استفاده شده است. بنابراین انتظار می‌رود خطای تخمین در این بخش کمی بالاتر از خطای تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C* باشد؛ زیرا تخمین‌گر *EKF-C* در تمام بازه‌های نمونه‌برداری به ارسال داده‌های *PMU* به *PDC* می‌پردازد؛ در صورتی که تخمین‌گر پیشنهادی تحریک-رویداد *EKF-C-ET* به منظور کاهش بار ارتباطی، تنها در برخی بازه‌های نمونه‌برداری و در صورت برقرار بودن شرط تحریک به ارسال داده‌ها می‌پردازد. به منظور بررسی میزان کاهش بار ارتباطی در تخمین‌گر پیشنهادی تحریک-رویداد به محاسبه نرخ ارسال داده و همچنین مقدار خطای *RMSE* به ازای مقادیر مختلف آستانه تحریک پرداخته شد. چنان چه دیده شد، برای مقادیر بزرگ‌تر آستانه تحریک، نرخ ارسال کوچک‌تر بوده ولی خطای *RMSE* بزرگ‌تر می‌باشد. بدین معنی که هرچقدر بار ارتباطی کاهش بیشتری یابد، هزینه بیشتری در قالب افزایش خطای *RMSE* پرداخته خواهد شد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، حتی برای $\xi = 0.011$ که منجر به کاهش حدودا ۷۰ درصدی بار ارتباطی می‌شود، خطای *RMSE* کمتری در مقایسه با روش‌های موجود *EKF* و *CKF* (که بار ارتباطی بسیار بالاتری دارند) به دست آمده است.

در فصل ۱۱، مشاهده شد که عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با روش‌های موجود *EKF* و *CKF* بهبود یافته است. علت این است که در این تخمین‌گر از روش بردار حالت افزوده برای غلبه بر فرم خاص غیرخطی سیستم قدرت استفاده می‌شود. هرچند مشاهده می‌شود که تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C*، موفقیت کمتری در بهبود عملکرد تخمین حالت داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی برای مقابله با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده نسبت به روش بردار حالت افزوده در روش مبتنی بر قانون مکعبی نتایج بهتری در بر داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که بار محاسباتی تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با روش پیشنهادی *EKF-C* بسیار بالاتر بوده و از جنبه پیاده‌سازی زمان-واقعی نیز روش پیشنهادی *EKF-C* عملکرد بهتری نسبت به روش پیشنهادی *CKF-IE* داشته است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

همچنین مشاهده شد که در نسخه توزیع‌یافته تخمین‌گر پیشنهادی یعنی *CIF-IE-D*، برای $L = 1$ گام اجماع، خطای تخمین‌گر واگرا شده است، زیرا تنها یک گام اجماع برای پخش شدن اطلاعات موجود در *PDC*ها در کل شبکه کافی نمی‌باشد. از طرفی برای گام‌های اجماع بزرگ‌تر خطای تخمین‌گر توزیع‌یافته کاهش یافته و به عملکرد تخمین‌گر متمرکز نزدیک‌تر شده است.

همچنین در انتهای فصل ۱۱، یک مقایسه کلی بر روی دو روش موجود تخمین حالت دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت یعنی *EKF* و *CKF* و روش‌های پیشنهادی در این پروژه صورت گرفت. در این راستا، با اجرای کدهای هر کدام از تخمین‌گرها با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو (با ۲۰ تکرار)، به مقایسه خطای *RMSE* کل و همچنین مدت زمان محاسباتی هر کدام از تخمین‌گرها پرداخته شد.

طبق این مقایسه، تمامی روش‌های پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود عملکرد بهتری از نظر خطای تخمین داشته‌اند. این برتری حتی در روش *EKF-C-ET* با نرخ ارسال حدودا ۷۰ درصد نیز مشاهده می‌شود. زیرا این تخمین‌گر پیشنهادی با در نظر گرفتن همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در مدل خطی‌شده، به تخمین حالت سیستم پرداخته است.

همچنین مشاهده شد که از بین دو روش پیشنهادی *EKF-C* و *CKF-IE*، تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با تخمین‌گر پیشنهادی *EKF-C*، موفقیت کمتری در بهبود عملکرد تخمین حالت داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی برای مقابله با همبستگی میان نویز فرآیند و مشاهدات در سیستم خطی‌شده نسبت به روش بردار حالت افزوده در روش مبتنی بر قانون مکعبی نتایج بهتری در بر داشته است.

علاوه بر این مشاهده شد که بار محاسباتی تخمین‌گر پیشنهادی *CKF-IE* در مقایسه با روش پیشنهادی *EKF-C* بالاتر بوده و از جنبه پیاده‌سازی زمان-واقعی نیز روش پیشنهادی *EKF-C* عملکرد بهتری نسبت به روش پیشنهادی *CKF-IE* داشته است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پیوست۱ : داده‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پ۱ ۱ مقدمه

در این پیوست، داده‌های مربوط به شارش توان و خطوط انتقال سیستم ۶۸ باسه و همچنین داده‌های مرتبط با دینامیک سیستم (داده‌های ژنراتور، سیستم تحریک و توربین بخار به همراه گاورنر) ارائه شده‌اند [۱۴۶]، [۱۴۷]، [۱۴۸]، [۱۶۰].

پ۱ ۲ داده‌های باس

جدول پ ۱-۱ داده‌های باس

Bus No.	Type 1: swing 2: PV 3: PQ	Voltage		Load		Generator			Voltage Limits	
		V	theta	MW	MVar	MW	MVar	Unit No.	Vmin	Vmax
1	2	1.045	0	0	0	2.5	1.75	G1	0.94	1.06
2	2	0.98	0	0	0	5.45	3.815	G2	0.94	1.06
3	2	0.983	0	0	0	6.5	4.55	G3	0.94	1.06
4	2	0.997	0	0	0	6.32	4.424	G4	0.94	1.06
5	2	1.011	0	0	0	5.05	3.535	G5	0.94	1.06
6	2	1.05	0	0	0	7	4.9	G6	0.94	1.06
7	2	1.063	0	0	0	5.6	3.92	G7	0.94	1.06
8	2	1.03	0	0	0	5.4	3.78	G8	0.94	1.06
9	2	1.025	0	0	0	8	5.6	G9	0.94	1.06
10	2	1.01	0	0	0	5	3.5	G10	0.94	1.06
11	2	1	0	0	0	10	7	G11	0.94	1.06
12	2	1.0156	0	0	0	13.5	9.45	G12	0.94	1.06
13	2	1.011	0	0	0	35.91	25.137	G13	0.94	1.06
14	2	1	0	0	0	17.85	12.495	G14	0.94	1.06
15	2	1	0	0	0	10	7	G15	0.94	1.06
16	1	1	0	0	0	40	28	G16	0.94	1.06
17	3	1	0	60	3	0	0	—	0.94	1.06
18	3	1	0	24.7	1.23	0	0	—	0.94	1.06
19	3	1	0	0	0	0	0	—	0.94	1.06
20	3	1	0	6.8	1.03	0	0	—	0.94	1.06
21	3	1	0	2.74	1.15	0	0	—	0.94	1.06
22	3	1	0	0	0	0	0	—	0.94	1.06

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Bus No.	Type 1: swing 2: PV 3: PQ	Voltage		Load		Generator			Voltage Limits	
		V	theta	MW	MVar	MW	MVar	Unit No.	Vmin	Vmax
23	3	1	0	2.48	0.85	0	0	–	0.94	1.06
24	3	1	0	3.09	0.92	0	0	–	0.94	1.06
25	3	1	0	2.24	0.47	0	0	–	0.94	1.06
26	3	1	0	1.39	0.17	0	0	–	0.94	1.06
27	3	1	0	2.81	0.76	0	0	–	0.94	1.06
28	3	1	0	2.06	0.28	0	0	–	0.94	1.06
29	3	1	0	2.84	0.27	0	0	–	0.94	1.06
30	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
31	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
32	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
33	3	1	0	1.12	0	0	0	–	0.94	1.06
34	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
35	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
36	3	1	0	1.02	0.1946	0	0	–	0.94	1.06
37	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
38	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
39	3	1	0	2.67	0.126	0	0	–	0.94	1.06
40	3	1	0	0.6563	0.2353	0	0	–	0.94	1.06
41	3	1	0	10	2.5	0	0	–	0.94	1.06
42	3	1	0	11.5	2.5	0	0	–	0.94	1.06
43	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
44	3	1	0	2.6755	0.0484	0	0	–	0.94	1.06
45	3	1	0	2.08	0.21	0	0	–	0.94	1.06
46	3	1	0	1.507	0.285	0	0	–	0.94	1.06
47	3	1	0	2.0312	0.3259	0	0	–	0.94	1.06
48	3	1	0	2.412	0.022	0	0	–	0.94	1.06
49	3	1	0	1.64	0.29	0	0	–	0.94	1.06
50	3	1	0	1	1.47	0	0	–	0.94	1.06
51	3	1	0	3.37	1.22	0	0	–	0.94	1.06
52	3	1	0	1.580	0.3	0	0	–	0.94	1.06
53	3	1	0	2.527	1.1856	0	0	–	0.94	1.06

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Bus No.	Type 1: swing 2: PV 3: PQ	Voltage		Load		Generator			Voltage Limits	
		V	theta	MW	MVar	MW	MVar	Unit No.	Vmin	Vmax
54	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
55	3	1	0	3.22	0.02	0	0	–	0.94	1.06
56	3	1	0	2	0.736	0	0	–	0.94	1.06
57	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
58	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
59	3	1	0	2.340	0.84	0	0	–	0.94	1.06
60	3	1	0	2.088	0.708	0	0	–	0.94	1.06
61	3	1	0	1.04	1.25	0	0	–	0.94	1.06
62	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
63	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
64	3	1	0	0.09	0.88	0	0	–	0.94	1.06
65	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
66	3	1	0	0	0	0	0	–	0.94	1.06
67	3	1	0	3.2	1.53	0	0	–	0.94	1.06
68	3	1	0	3.29	0.32	0	0	–	0.94	1.06

پ۱ ۳ داده‌های خط و ترانسفورماتور

جدول پ ۱-۲ داده‌های خط و ترانسفورماتور

Line Data					Transformer Tap	
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
1	54	0	0.0181	0	1.025	0
2	58	0	0.0250	0	1.07	0
3	62	0	0.0200	0	1.07	0
4	19	0.0007	0.0142	0	1.07	0
5	20	0.0009	0.0180	0	1.009	0

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Line Data					Transformer Tap	
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
6	22	0	0.0143	0	1.025	0
7	23	0.0005	0.0272	0	0	0
8	25	0.0006	0.0232	0	1.025	0
9	29	0.0008	0.0156	0	1.025	0
10	31	0	0.0260	0	1.04	0
11	32	0	0.0130	0	1.04	0
12	36	0	0.0075	0	1.04	0
13	17	0	0.0033	0	1.04	0
14	41	0	0.0015	0	1	0
15	42	0	0.0015	0	1	0
16	18	0	0.0030	0	1	0
17	36	0.0005	0.0045	0.3200	0	0
18	49	0.0076	0.1141	1.1600	0	0
18	50	0.0012	0.0288	2.0600	0	0
19	68	0.0016	0.0195	0.3040	0	0
20	19	0.0007	0.0138	0	1.06	0
21	68	0.0008	0.0135	0.2548	0	0
22	21	0.0008	0.0140	0.2565	0	0
23	22	0.0006	0.0096	0.1846	0	0
24	23	0.0022	0.0350	0.3610	0	0
24	68	0.0003	0.0059	0.0680	0	0
25	54	0.0070	0.0086	0.1460	0	0
26	25	0.0032	0.0323	0.5310	0	0
27	37	0.0013	0.0173	0.3216	0	0
27	26	0.0014	0.0147	0.2396	0	0
28	26	0.0043	0.0474	0.7802	0	0
29	26	0.0057	0.0625	1.0290	0	0
29	28	0.0014	0.0151	0.2490	0	0
30	53	0.0008	0.0074	0.4800	0	0
30	61	0.0010	0.0092	0.5800	0	0
31	30	0.0013	0.0187	0.3330	0	0
31	53	0.0016	0.0163	0.2500	0	0

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Line Data					Transformer Tap	
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
32	30	0.0024	0.0288	0.4880	0	0
33	32	0.0008	0.0099	0.1680	0	0
34	33	0.0011	0.0157	0.2020	0	0
34	35	0.0001	0.0074	0	0.946	0
36	34	0.0033	0.0111	1.4500	0	0
36	61	0.0011	0.0098	0.6800	0	0
37	68	0.0007	0.0089	0.1342	0	0
38	31	0.0011	0.0147	0.2470	0	0
38	33	0.0036	0.0444	0.6930	0	0
40	41	0.0060	0.0840	3.1500	0	0
40	48	0.0020	0.0220	1.2800	0	0
41	42	0.0040	0.0600	2.2500	0	0
42	18	0.0040	0.0600	2.2500	0	0
43	17	0.0005	0.0276	0	0	0
44	39	0	0.0411	0	0	0
44	43	0.0001	0.0011	0	0	0
45	35	0.0007	0.0175	1.3900	0	0
45	39	0	0.0839	0	0	0
45	44	0.0025	0.0730	0	0	0
46	38	0.0022	0.0284	0.4300	0	0
47	53	0.0013	0.0188	1.3100	0	0
48	47	0.0013	0.0134	0.8000	0	0
49	46	0.0018	0.0274	0.2700	0	0
51	45	0.0004	0.0105	0.7200	0	0
51	50	0.0009	0.0221	1.6200	0	0
52	37	0.0007	0.0082	0.1319	0	0
52	55	0.0011	0.0133	0.2138	0	0
54	53	0.0035	0.0411	0.6987	0	0
55	54	0.0013	0.0151	0.2572	0	0
56	55	0.0013	0.0213	0.2214	0	0
57	56	0.0008	0.0128	0.1342	0	0
58	57	0.0002	0.0026	0.0434	0	0

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Line Data					Transformer Tap	
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
59	58	0.0006	0.0092	0.1130	0	0
60	57	0.0008	0.0112	0.1476	0	0
60	59	0.0004	0.0046	0.0780	0	0
61	60	0.0023	0.0363	0.3804	0	0
63	58	0.0007	0.0082	0.1389	0	0
63	62	0.0004	0.0043	0.0729	0	0
63	64	0.0016	0.0435	0	1.06	0
65	62	0.0004	0.0043	0.0729	0	0
65	64	0.0016	0.0435	0	1.06	0
66	56	0.0008	0.0129	0.1382	0	0
66	65	0.0009	0.0101	0.1723	0	0
67	66	0.0018	0.0217	0.3660	0	0
68	67	0.0009	0.0094	0.1710	0	0
27	53	0.0320	0.3200	0.4100	0	0

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پ۱ ۴ داده‌های ژنراتور

جدول پ ۱-۳ داده‌های ژنراتور

Unit No.	R_s	X_{ls}	X_d	X'_d	X''_d	X_q	X'_q	X''_q	T'_{do}	T''_{do}	T'_{qo}	T''_{qo}	H	D_m
1	0	0.0125	0.1	0.031	0.025	0.069	0.0417	0.025	10.2	0.05	1.5	0.035	42	4
2	0	0.035	0.295	0.0697	0.05	0.282	0.0933	0.05	6.56	0.05	1.5	0.035	30.2	9.75
3	0	0.0304	0.2495	0.0531	0.045	0.237	0.0714	0.045	5.7	0.05	1.5	0.035	35.8	10
4	0	0.0295	0.262	0.0436	0.035	0.258	0.0586	0.035	5.69	0.05	1.5	0.035	28.6	10
5	0	0.027	0.33	0.066	0.05	0.31	0.0883	0.05	5.4	0.05	0.44	0.035	26	3
6	0	0.0224	0.254	0.05	0.04	0.241	0.0675	0.04	7.3	0.05	0.4	0.035	34.8	10
7	0	0.0322	0.295	0.049	0.04	0.292	0.0667	0.04	5.66	0.05	1.5	0.035	26.4	8
8	0	0.028	0.29	0.057	0.045	0.28	0.0767	0.045	6.7	0.05	0.41	0.035	24.3	9
9	0	0.0298	0.2106	0.057	0.045	0.205	0.0767	0.045	4.79	0.05	1.96	0.035	34.5	14
10	0	0.0199	0.169	0.0457	0.04	0.115	0.0615	0.04	9.37	0.05	1.5	0.035	31	5.56
11	0	0.0103	0.128	0.018	0.012	0.123	0.0241	0.012	4.1	0.05	1.5	0.035	28.2	13.6
12	0	0.022	0.101	0.031	0.025	0.095	0.0420	0.025	7.4	0.05	1.5	0.035	92.3	13.5
13	0	0.003	0.0296	0.0055	0.004	0.0286	0.0074	0.004	5.9	0.05	1.5	0.035	248	33
14	0	0.0017	0.018	0.0029	0.0023	0.0173	0.0038	0.0023	4.1	0.05	1.5	0.035	300	100
15	0	0.0017	0.018	0.0029	0.0023	0.0173	0.0038	0.0023	4.1	0.05	1.5	0.035	300	100
16	0	0.0041	0.0356	0.0071	0.0055	0.0334	0.0095	0.0055	7.8	0.05	1.5	0.035	225	50

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پ۱ ۵ داده‌های سیستم تحریک و توربین بخار

جدول پ ۱-۴ داده‌های سیستم تحریک و توربین بخار

Unit No.	Excitation System								Turbine		
	K_A	T_A	K_E	T_E	K_F	T_F	A_x	B_x	T_{CH}	T_{SV}	R_D
1	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
2	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
3	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
4	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
5	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
6	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
7	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
8	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
9	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
10	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
11	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
12	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
13	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
14	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05
15	40	0.02	1	0.785	0.063	0.35	0.07	0.91	0.1	0.05	0.05

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پیوست۲ روابط برخی از تخمین‌گرهای معروف

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پ۲ ۱ مقدمه

در این پیوست، روابط مربوط به برخی از معروف‌ترین تخمین‌گرها مانند فیلتر کالمن استاندارد، *EKF*، *UKF*، *CKF* و فیلتر ذره‌ای ارائه شده است.

پ۲ ۲ فیلتر کالمن استاندارد

مراحل و روابط فیلتر کالمن استاندارد برای سیستم خطی زیر در جدول پ ۲-۱ ارائه شده است.

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)w(k) \qquad (پ۲-۱)$$

$$\tilde{Y}(k) = H(k)X(k) + D(k)v(k)$$

$$w(k) \sim \mathcal{N}\big(0, Q(k)\big)$$

$$v(k) \sim \mathcal{N}\big(0, R(k)\big)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول پ ۲-۱ مراحل و معادلات فیلتر کالمن استاندارد

مرحله پیش‌بینی	
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}(k+1\|k) = F(k)\hat{X}(k\|k)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k) = F(k)P(k\|k)F^T(k) + G(k)Q(k)G^T(k)$
مرحله به‌روزرسانی	
بهره بهینه کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام	$K(k+1) = P(k+1\|k)H^T(k+1)\big(H(k+1)P(k+1\|k)H^T(k+1) + D(k+1)R(k+1)D^T(k+1)\big)^{-1}$
محاسبه تخمین حالت به‌روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k) + K(k+1)\big(\tilde{Y}(k+1) - H(k+1)\hat{X}(k+1\|k)\big)$
تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k+1) = \big(I - K(k+1)H(k+1)\big)P(k+1\|k)$

پ۲ ۳ فیلتر کالمن توسعه‌یافته

مراحل و روابط فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) برای سیستم غیرخطی زیر در جدول پ ۲-۲ ارائه شده است.

$$X(k+1) = f\big(X(k)\big) + w(k) \qquad \text{(پ۲-۲)}$$

$$\tilde{Y}(k) = h\big(X(k)\big) + v(k)$$

$$w(k) \sim \mathcal{N}\big(0, Q(k)\big)$$

$$v(k) \sim \mathcal{N}\big(0, R(k)\big)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول پ ۲-۲ مراحل و معادلات فیلتر کالمن توسعه‌یافته

مرحله پیش‌بینی	
محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k\|k)$	$\hat{F}(k) = \frac{\partial f}{\partial X}\|_{\hat{X}(k\|k)}$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}(k+1\|k) = f\left(\hat{X}(k\|k)\right)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k) = \hat{F}(k)P(k\|k)\hat{F}^T(k) + Q(k)$
مرحله به‌روزرسانی	
محاسبه ماتریس‌های سیستم خطی‌شده حول $\hat{X}(k+1\|k)$	$\hat{H}(k+1) = \frac{\partial h}{\partial X}\|_{\hat{X}(k+1\|k)}$
بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام	$K(k+1) = P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1)\left(\hat{H}(k)P(k+1\|k)\hat{H}^T(k+1) + R(k+1)\right)^{-1}$
محاسبه تخمین حالت به‌روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k) + K(k+1)\left(\tilde{Y}(k+1) - h\left(\hat{X}(k+1\|k)\right)\right)$
تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k+1) = \left(I - K(k+1)\hat{H}(k+1)\right)P(k+1\|k)$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پ۲ ۴ فیلتر کالمن بی‌رد

مراحل و روابط فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) برای سیستم غیرخطی (پ۲-۲) در جدول پ ۲-۳ ارائه شده است. در این روابط، κ ثابت طراحی و n_s تعداد متغیرهای حالت سیستم است.

جدول پ ۲-۳ مراحل و معادلات فیلتر کالمن بی‌رد

مرحله پیش‌بینی	
تولید نقاط سیگما	$\mathcal{X}_0(k\|k) = \hat{X}(k\|k), \quad \eta_0 = \frac{\kappa}{n_s+\kappa}$ $\mathcal{X}_j(k\|k) = \hat{X}(k\|k) + \left(\sqrt{(n_s+\kappa)P(k\|k)}\right)_j, \quad \eta_j = \frac{1}{2(n_s+\kappa)}, \quad j = 1,\dots,n_s$ $\mathcal{X}_j(k\|k) = \hat{X}(k\|k) - \left(\sqrt{(n_s+\kappa)P(k\|k)}\right)_{j-n_s}, \quad \eta_j = \frac{1}{2(n_s+\kappa)}, \quad j = n_s+1,\dots,2n_s$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{X}_j(k+1\|k) = f\left(\mathcal{X}_j(k\|k)\right), \quad j = 0,\dots,2n_s$ $\hat{X}(k+1\|k) = \sum_{j=0}^{2n_s} \eta_j \mathcal{X}_j(k+1\|k)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k) = \sum_{j=0}^{2n_s} \eta_j \left(X_j(k+1\|k) - (k+1\|k)\right)\left(X_j(k+1\|k) - \hat{X}(k+1\|k)\right)^T + Q(k)$
مرحله به‌روزرسانی	
تولید نقاط سیگما	$\mathcal{X}_0(k+1\|k) = \hat{X}(k+1\|k), \quad \eta_0 = \frac{\kappa}{n_s+\kappa}$ $\mathcal{X}_j(k+1\|k) = \hat{X}(k+1\|k) + \left(\sqrt{(n_s+\kappa)P(k+1\|k)}\right)_j, \quad \eta_j = \frac{1}{2(n_s+\kappa)}, \quad j = 1,\dots,n_s$ $\mathcal{X}_j(k+1\|k) = \hat{X}(k+1\|k) - \left(\sqrt{(n_s+\kappa)P(k+1\|k)}\right)_{j-n_s}, \quad \eta_j = \frac{1}{2(n_s+\kappa)}, \quad j = n_s+1,\dots,2n_s$
محاسبه خروجی پیش‌بینی‌شده و بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{Y}_j(k+1\|k) = h\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k)\right), \quad j = 0,\dots,2n_s$ $\hat{Y}(k+1\|k) = \sum_{j=0}^{2n_s} \eta_j \mathcal{Y}_j(k+1\|k)$ $P_{XY}(k+1\|k) = \sum_{j=0}^{2n_s} \eta_j \left(\mathcal{X}_j(k+1\|k) - \hat{X}(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)^T$ $P_Y(k+1\|k) = \sum_{j=0}^{2n_s} \eta_j \left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) -$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

$\hat{Y}(k+1\|k)\Big)\Big(y_j(k+1\|k)-\hat{Y}(k+1\|k)\Big)^T+R(k+1)$ $K(k+1)=P_{XY}(k+1\|k)P_Y^{-1}(k+1\|k)$	
$\hat{X}(k+1\|k+1)=\hat{X}(k+1\|k)+K(k+1)\Big(\tilde{Y}(k+1)-\hat{Y}(k+1\|k)\Big)$	**محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام**
$P(k+1\|k+1)=P(k+1\|k)-K(k+1)P_Y(k+1\|k)K^T(k+1)=P(k+1\|k)-K(k+1)P_{XY}^T(k+1\|k)$	**تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام**

پ۲ ۵ فیلتر کالمن مکعبی

مراحل و روابط فیلتر کالمن مکعبی(CKF) برای سیستم غیرخطی (پ۲-۲) در جدول پ ۲-۴ ارائه شده است. در این روابط، ξ_j به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\xi_j=\begin{cases}\sqrt{n_s}e_j & , \quad j=1,\dots,n_s\\ -\sqrt{n_s}e_{j-n_s} & , \quad j=n_s+1,\dots,2n_s\end{cases} \qquad (پ۲-۳)$$

که در آن، e_j عبارت است از j امین عنصر از مجموعه بردارهای n_s-بعدی زیر.

$$\left\{\begin{bmatrix}1\\0\\\vdots\\0\end{bmatrix},\begin{bmatrix}0\\1\\\vdots\\0\end{bmatrix},\dots,\begin{bmatrix}0\\0\\\vdots\\1\end{bmatrix}\right\} \qquad (پ۲-۴)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

جدول پ ۲-۴ مراحل و معادلات فیلتر کالمن مکعبی

مرحله پیش‌بینی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_j(k\|k) = \hat{X}(k\|k) + \sqrt{P(k\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه تخمین حالت پیش‌بینی‌شده (پیشین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{X}_j(k+1\|k) = f\left(\mathcal{X}_j(k\|k)\right), \quad j = 1, \dots, 2n_s$ $\hat{X}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\mathcal{X}_j(k+1\|k)$
محاسبه ماتریس کواریانس خطای پیش‌بینی در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(X_j(k+1\|k) - \hat{X}(k+1\|k)\right)\left(X_j(k+1\|k) - \hat{X}(k+1\|k)\right)^T + Q(k)$
مرحله به‌روزرسانی	
تولید نقاط مکعبی	$\mathcal{X}_j(k+1\|k) = \hat{X}(k+1\|k) + \sqrt{P(k+1\|k)}\xi_j, \quad j = 1, \dots, 2n_s$
محاسبه خروجی پیش‌بینی‌شده و بهره کالمن در مرحله زمانی $k+1$ام	$\mathcal{Y}_j(k+1\|k) = h\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k)\right), \quad j = 1, \dots, 2n_s$ $\hat{Y}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}Y_j(k+1\|k)$ $P_{XY}(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{X}_j(k+1\|k) - \hat{X}(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)^T$ $P_Y(k+1\|k) = \frac{1}{2n_s}\sum_{j=1}^{2n_s}\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)\left(\mathcal{Y}_j(k+1\|k) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)^T + R(k+1)$ $K(k+1) = P_{XY}(k+1\|k)P_Y^{-1}(k+1\|k)$
محاسبه تخمین حالت به روزرسانی‌شده در مرحله زمانی $k+1$ام	$\hat{X}(k+1\|k+1) = \hat{X}(k+1\|k) + K(k+1)\left(\tilde{Y}(k+1) - \hat{Y}(k+1\|k)\right)$
تخمین کواریانس به‌روزرسانی‌شده (پسین) در مرحله زمانی $k+1$ام	$P(k+1\|k+1) = P(k+1\|k) - K(k+1)P_Y(k+1\|k)K^T(k+1) = P(k+1\|k) - K(k+1)P_{XY}^T(k+1\|k)$

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

پ۲ ۶ فیلتر ذره‌ای

مراحل و روابط فیلتر ذره‌ای(PF) برای سیستم غیرخطی زیر در جدول پ ۲-۵ ارائه شده است. در این روابط، N_{PF} تعداد ذرات فیلتر ذره‌ای، $X^{(j)}(k)$ ذره jام، $\omega^{(j)}(k)$ وزن نرمالیزه‌شده ذره jام، $\tilde{\omega}^{(j)}(k)$ وزن نرمالیزه‌نشده ذره jام، $p\left(\tilde{Y}(k)\middle|X^{(j)}(k)\right)$ تابع درست‌نمایی و $q\left(X^{(j)}(k)\middle|X^{(j)}(k-1),\tilde{Y}(k)\right)$ و $Resample\left[\{X^{(j)}(k),\omega^{(j)}(k)\}_{j=1}^{Np}\right]$ به ترتیب تابع نمونه‌برداری اعتباری[۱] و تابع بازنمونه‌برداری[۲] هستند که هر دو بسته به نوع فیلتر ذره‌ای طراحی می‌شوند.

$$X(k+1)=f\big(X(k),w(k)\big) \qquad (۹\ ۳)$$

$$\tilde{Y}(k)=h\big(X(k),v(k)\big)$$

جدول پ ۲-۵ مراحل و معادلات فیلتر ذره‌ای

مرحله راه‌اندازی در $k=0$	
نمونه‌برداری ابتدایی ذرات و اختصاص وزن‌ها	$X^{(j)}(0)\sim p\big(X(0)\big),\quad j=1,\dots,N_{PF}$ $\omega^{(j)}(k)=1/N_{PF}$
اجرای حلقه برای $k=1,\dots$	
نمونه‌برداری اعتباری ذرات در مرحله زمانی kام	$X^{(j)}(k)\sim q\left(X^{(j)}(k)\middle\|X^{(j)}(k-1),\tilde{Y}(k)\right)$
محاسبه و نرمالیزه کردن وزن ذرات در مرحله زمانی kام	$\tilde{\omega}^{(j)}(k)=\frac{p\left(\tilde{Y}(k)\middle\|X^{(j)}(k)\right)p\left(X^{(j)}(k)\middle\|X^{(j)}(k-1)\right)}{q\left(X^{(j)}(k)\middle\|X^{(j)}(k-1),\tilde{Y}(k)\right)}\omega^{(j)}(k-1)$ $\omega^{(j)}(k)=\tilde{\omega}^{(j)}(k)/\sum_{j=1}^{N_{PF}}\tilde{\omega}^{(j)}(k)$
محاسبه تخمین حالت در مرحله زمانی kام	$\hat{X}(k\|k)=\sum_{j=1}^{N_{PF}}\omega^{(j)}(k)X^{(j)}(k)$
بازنمونه‌برداری ذرات در مرحله زمانی kام	$\left[\{X^{(i)}(k),\omega^{(i)}(k)\}_{i=1}^{N_{PF}}\right]=Resample\left[\{X^{(j)}(k),\omega^{(j)}(k)\}_{j=1}^{N_{PF}}\right]$

[۱] Importance Sampling Function

[۲] Resampling Function

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

فهرست منابع

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

[1] T. Vijayapriya and D. P. Kothari, "Smart grid: an overview," Smart Grid Renew. Energy, vol. 2, no. 4, pp. 305–311, 2011.
[2] I. E. Commission, "IEC smart grid standardization roadmap," SMB Smart Grid Strateg. Gr. (SG3), June, 2010.
[3] G. Dileep, "A survey on smart grid technologies and applications," Renew. Energy, vol. 146, pp. 2589–2625, 2020.
[4] ''سند راهبرد ملی توسعه دانش بنیان شبکه هوشمند برق ایران." شورای عالی علوم، تحقیقات و فناوری، کارگروه نظارت و تایید فنی اسناد بالادستی طرح‌های کلان ملی, ۱۳۹۵.
[5] دانشگاه صنعتی امیرکبیر, "برنامه اقدامات توسعه فناوری های شبکه هوشمند برق ایران." پژوهشگاه نیرو.
[6] س. س. م. ک. پ. ش. س. فرشی, "زیرسیستم‌های شبکه هوشمند و چالش‌های پیاده‌سازی آن‌ها," ۱۳۹۱.
[7] "Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap." EPRI, 2009.
[8] "Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System, End-Use Applications, and Loads." IEEE Std., 2011.
[9] "NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards." NIST Special Publication 1108, Release 1.0, 2010.
[10] K. D. McBee and M. G. Simões, "Utilizing a smart grid monitoring system to improve voltage quality of customers," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 738–743, 2012.
[11] س. نیک اخلاق, "واحد اندازه گیری فازوری و کاربردهای آن در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت," ماهنامه صنعت برق.1388 ,25–16 .pp ,156 .vol ,
[12] S. E. Stanton, C. Slivinsky, and K. Martin, "Application of phasor measurements and partial energy analysis in stabilizing large disturbances," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 1, pp. 297–306, 1995, doi: 10.1109/59.373953.
[13] Working Group C4.601, "Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement." CIGRE Technical Brochure 330, pp. 1–116, 2007.
[14] J. De La Ree, V. Centeno, J. S. Thorp, and A. G. Phadke, "Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 20–27, Jun. 2010, doi: 10.1109/TSG.2010.2044815.
[15] D. Atanackovic, J. H. Clapauch, G. Dwernychuk, J. Gurney, and H. Lee, "First steps to wide area control," IEEE Power Energy Mag., vol. 6, no. 1, pp. 61–68, 2008, doi: 10.1109/MPAE.2008.4412941.
[16] J. Thorp, A. Abur, M. Begovic, J. Giri, and R. Avila-Rosales, "Gaining a

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Wider Perspective," IEEE Power Energy Mag., vol. 6, no. 5, pp. 43–51, 2008, doi: 10.1109/MPE.2008.927475.

[17] *شبکه انتقال* WAMS *همکاران, "نقشه راه بهره‌برداری و توسعه‌ی مرکز* and *د. فرخزاد کشور." شرکت مدیریت شبکه برق ایران, ۱۳۹۳.*

[18] "Improved Power System Performance through Wide Area Monitoring, Protection and Control." ABB Switzerland Ltd.

[19] D. Karlsson, M. Hemmingsson, and S. Lindahl, "Wide area system monitoring and control," IEEE Power Energy Mag., vol. 2, no. 5, pp. 68–76, Sep. 2004, doi: 10.1109/MPAE.2004.1338124.

[20] D. Yan, "Wide-area Protection and Control System With WAMS Based," in 2006 International Conference on Power System Technology, Oct. 2006, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICPST.2006.321827.

[21] غ. کوهساری, م. جاویدی دشت بیاض ,م. شهرآئینی, "جانمایی بهینه ی ادوات سیستم اندازه گیری ناحیه گسترده," بیست و هفتمین کنفرانس بین المللی برق.2012 .Nov .

[22] M. Zima, M. Larsson, P. Korba, C. Rehtanz, and G. Andersson, "Design Aspects for Wide-Area Monitoring and Control Systems," Proc. IEEE, vol. 93, no. 5, pp. 980–996, May 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.846336.

[23] U. Häger, C. Rehtanz, and N. I. Voropaĭ, Monitoring, control and protection of interconnected power systems. Springer, 2014.

[24] A. Gomez-Exposito and A. Abur, "Foreword for the special section on synchrophasor applications in power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1907–1909, May 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2254311.

[25] M. Shahraeini and M. Javidi, "Wide Area Measurement System," Adv. Top. Meas., pp. 303–322, 2012.

[26] P. Zhang and K. W. Chan, "Reliability evaluation of phasor measurement unit using Monte Carlo dynamic fault tree method," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1235–1243, Sep. 2012, doi: 10.1109/TSG.2011.2180937.

[27] A. G. Phadke and J. S. Thorp, "Synchronized Phasor Measurements and their Applications," Springer, p. 246, 2008, doi: 10.1007/978-0-387-76537-2.

[28] A. Srivastava, S. Pandey, M. Zhou, P. Banerjee, and Y. Wu, "Ensemble based technique for synchrophasor data quality and analyzing its impact on applications," in Proc. North Amer. Synchrophasor Initiative, 2017, pp. 1–24.

[29] A. Gulati, N. Gulati, and S. K. Solanki, "Overview of State Estimation Technique for Power System Control," IOSR J. Electr. Electron. Eng., vol. 8, no. 5, pp. 51–55, 2013.

[30] A. Abur and A. G. Exposito, Power system state estimation: theory and

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

implementation. CRC press, 2004.
[31] A. Tarali, "BAD DATA DETECTION IN TWO STAGEESTIMATION USING PHASOR MEASUREMENTS," Northeastern University Boston Massachusetts, 2012.
[32] S. Wang, J. Zhao, Z. Huang, and R. Diao, "Assessing Gaussian assumption of PMU measurement error using field data," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 33, no. 6, pp. 3233–3236, 2017.
[33] M. Brown, M. Biswal, S. Brahma, S. J. Ranade, and H. Cao, "Characterizing and quantifying noise in PMU data," in 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016, pp. 1–5.
[34] M. Farrokhifard, M. Hatami, and M. Parniani, "Novel approaches for online modal estimation of power systems using PMUs data contaminated with outliers," Electr. Power Syst. Res., vol. 124, pp. 74–84, Jul. 2015, doi: 10.1016/J.EPSR.2015.03.004.
[35] M. Khosravi, M. Banejad, and H. T. Shandiz, "Robust dynamic state estimation of power system using imperialist competitive algorithm," Can. J. Electr. Comput. Eng., vol. 41, no. 2, pp. 64–76, 2018.
[36] P. System, R. Committee, I. Power, and E. Society, IEEE Guide for Synchronization , Calibration , Testing , and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control IEEE Power and Energy Society, no. March. 2013. doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6475134.
[37] "C37.118.2-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems - IEEE Standard."
[38] "IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems - Measurements," IEC/IEEE 60255-118-1:2018, pp. 1–78, 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8577045.
[39] Power System Relaying Society: IEEE and P. Engineering, "C37.118-2005 - IEEE Standard for Synchrophasors for Power System," vol. 2005, no. March, 2006.
[40] "C37.118.1-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems," 2011. doi: 10.1109/ieeestd.2011.6111219.
[41] K. E. Martin, "Synchrophasor Standards Development - IEEE C37.118 & IEC 61850," in 44th Hawaii International Conference on System Sciences, 2011, pp. 1–8.
[42] "https://www.opclabs.com/products/quickopc/opc-specifications/opc-xml-da."
[43] "https://www.automationworld.com/home/article/13301900/opc-client-monitors-synchrophasor-devices."
[44] B. Appasani and D. K. Mohanta, "A review on synchrophasor

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

communication system: communication technologies, standards and applications," Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 3, no. 1. Springer, pp. 1–17, Dec. 2018. doi: 10.1186/s41601-018-0110-4.

[45] "C37.247-2019 - IEEE Standard for Phasor Data Concentrators for Power Systems - IEEE Standard."

[46] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Safdarian, A. Davoudi, and M. Shahidehpour, "Synchrophasor Measurement Technology in Power Systems: Panorama and State-of-the-Art," IEEE Access, vol. 2, pp. 1607–1628, 2014, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2389659.

[47] V. Terzija et al., "Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks," Proc. IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 80–93, Jan. 2011, doi: 10.1109/JPROC.2010.2060450.

[48] Jun Zhu and A. Abur, "Improvements in Network Parameter Error Identification via Synchronized Phasors," IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 1, pp. 44–50, Feb. 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2030274.

[49] Z. Huang, P. Du, D. Kosterev, and S. Yang, "Generator dynamic model validation and parameter calibration using phasor measurements at the point of connection," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1939–1949, May 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2251482.

[50] L. Fan, Z. Miao, and Y. Wehbe, "Application of Dynamic State and Parameter Estimation Techniques on Real-World Data," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 4, no. 2, pp. 1133–1141, Jun. 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2230031.

[51] ب. م. ایواتلو، "پایش پایداری سیگنال کوچک سیستمهای قدرت با استفاده از داده های PMU," پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷.

[52] Joe-Air Jiang, Jun-Zhe Yang, Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, and Jih-Chen Ma, "An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. I. Theory and algorithms," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 15, no. 2, pp. 486–493, Apr. 2000, doi: 10.1109/61.852973.

[53] N. Kang and Y. Liao, "Double-Circuit Transmission-Line Fault Location Utilizing Synchronized Current Phasors," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 28, no. 2, pp. 1040–1047, Apr. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2246587.

[54] سلیمی، سعید، "مکان یابی خطا روی خطوط انتقال به وسیله PMU," پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۸.

[55] رضایی جگرلویی، محمد، "جایابی خطا در شبکه های انتقال نیرو با مکان یابی بهینه محلPMU ها." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۲.

[56] J. Bertsch, C. Carnal, D. Karlson, J. McDaniel, and Khoi Vu, "Wide-Area Protection and Power System Utilization," Proc. IEEE, vol. 93, no. 5, pp. 997–1003, May 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.847266.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

[57] S. Horowitz, D. Novosel, V. Madani, and M. Adamiak, "System-wide Protection," IEEE Power Energy Mag., vol. 6, no. 5, pp. 34–42, 2008, doi: 10.1109/MPE.2008.927473.
[58] M. Setareh, M. Parniani, and F. Aminifar, "Non-Stationary Stabilized Fast Transversal RLS Filter for Online Power System Modal Estimation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 4, pp. 2744–2754, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2898168.
[59] M. Hatami, M. M. Farrokhifard, and V. M. Venkatasubramanian, "Modal Damping Estimation: An Alternative for Hilbert Spectral Analysis," in 2019 North American Power Symposium (NAPS), 2019, pp. 1–6.
[60] M. Hatami, M. Farrokhifard, and M. Parniani, "A non-stationary analysis of low-frequency electromechanical oscillations based on a refined Margenau-Hill distribution," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 2, pp. 1567–1578, 2015.
[61] B. Mohammadi-Ivatloo, M. Shiroei, and M. Parniani, "Online small signal stability analysis of multi-machine systems based on synchronized phasor measurements," Electr. Power Syst. Res., vol. 81, no. 10, pp. 1887–1896, 2011.
[62] M. Setareh and M. Parniani, "Damping inter-area Oscillations using Restructuring Corrective Actions," in 2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Oct. 2018, pp. 662–667. doi: 10.1109/APPEEC.2018.8566612.
[63] M. Setareh, M. Parniani, and F. Aminifar, "Ambient Data-Based Online Electromechanical Mode Estimation by Error–Feedback Lattice RLS Filter," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 4, pp. 3745–3756, Jul. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2767105.
[64] M. Setareh and M. Parniani, "Sensitivity-Based Generators Redispatch to Improve Electromechanical Mode Damping Considering Transmission Lines Resistance," in 2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Apr. 2019, pp. 491–496. doi: 10.1109/IranianCEE.2019.8786440.
[65] M. Hatami, M. Farrokhifard, and M. Parniani, "A Non-Stationary Analysis of Low-Frequency Electromechanical Oscillations Based on a Refined Margenau-Hill Distribution," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 2, pp. 1567–1578, Mar. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2428893.
[66] C. E. Bandak, "POWER SYSTEMS STATE ESTIMATION," California State University, Sacramento, 2013.
[67] F. Ahmad, A. Rasool, E. Ozsoy, R. Sekar, A. Sabanovic, and M. Elitaş, "Distribution system state estimation-A step towards smart grid," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81. Elsevier Ltd, pp. 2659–2671, Jan. 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.071.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

[68] F. F. Wu, "Power system state estimation: a survey," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 12, no. 2, pp. 80–87, Apr. 1990, doi: 10.1016/0142-0615(90)90003-T.
[69] N. Singh, "State Estimation: Reality Check and practical considerations," 2006.
[70] J. Chien, "Measurement Enhancement for State Estimation," Texas A&M University, 2008.
[71] A. Gomez-Exposito, A. Abur, P. Rousseaux, A. de la Villa Jaen, and C. Gomez-Quiles, "On the use of PMUs in power system state estimation," Proc. 17th PSCC, 2011.
[72] "https://nptel.ac.in/courses/108/104/108104051/."
[73] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, and G. Andersson, "Definition and Classification of Power System Stability- IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," IEEE Trans. POWER Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
[74] J. Zhao, G. Zhang, Z. Y. Dong, and M. La Scala, "Robust forecasting aided power system state estimation considering state correlations," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 2658–2666, 2016.
[75] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheblé, Power generation, operation, and control., 3rd ed. Wiley, 2017.
[76] A. Monticelli, State Estimation in Electric Power Systems : a Generalized Approach. Springer US, 1999.
[77] M. Ilic and S. Liu, Hierarchical power systems control: its value in a changing industry. Springer Science & Business Media, 2012.
[78] Y. Liu, A. P. S. Meliopoulos, R. Fan, L. Sun, and Z. Tan, "Dynamic state estimation based protection on series compensated transmission lines," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 32, no. 5, pp. 2199–2209, 2017.
[79] A. P. S. Meliopoulos et al., "Dynamic state estimation-based protection: Status and promise," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 32, no. 1, pp. 320–330, 2016.
[80] Y. Cui, R. G. Kavasseri, and S. M. Brahma, "Dynamic state estimation assisted out-of-step detection for generators using angular difference," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 32, no. 3, pp. 1441–1449, 2016.
[81] R. Fan, A. P. S. Meliopoulos, G. J. Cokkinides, L. Sun, and Y. Liu, "Dynamic state estimation-based protection of power transformers," in 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1–5.
[82] V. Terzija et al., "Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks," Proc. IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 80–93, 2010.
[83] M. Hassanzadeh, C. Y. Evrenosoğlu, and L. Mili, "A short-term nodal voltage phasor forecasting method using temporal and spatial correlation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 5, pp. 3881–3890, 2015.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

[84] I. Kamwa, L. Geoffroy, S. R. Samantaray, and A. Jain, "Synchrophasors data analytics framework for power grid control and dynamic stability monitoring," IET Eng. Technol. Ref., pp. 1–22, 2016.
[85] J. Z. et Al., "Power System Dynamic State Estimation: Motivations, Definitions, Methodologies and Future Work," IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 4, pp. 3188–3198, 2019.
[86] F. TP462, "Identification of electromechanical modes in power systems," IEEE Task Force Rep., 2012.
[87] A. K. Singh and B. C. Pal, "Decentralized control of oscillatory dynamics in power systems using an extended LQR," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 3, pp. 1715–1728, 2015.
[88] A. K. Singh and B. C. Pal, "Decentralized nonlinear control for power systems using normal forms and detailed models," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 2, pp. 1160–1172, 2017.
[89] M. Ghandhari, G. Andersson, and I. A. Hiskens, "Control Lyapunov functions for controllable series devices," IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 4, pp. 689–694, 2001.
[90] M. A. M. Ariff and B. C. Pal, "Adaptive protection and control in the power system for wide-area blackout prevention," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 31, no. 4, pp. 1815–1825, 2016.
[91] E. Farantatos, R. Huang, G. J. Cokkinides, and A. P. Meliopoulos, "A predictive generator out-of-step protection and transient stability monitoring scheme enabled by a distributed dynamic state estimator," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 31, no. 4, pp. 1826–1835, 2015.
[92] H. F. Albinali and A. P. Meliopoulos, "A centralized substation protection scheme that detects hidden failures," in 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016, pp. 1–5.
[93] et al. Vittal, Vijay, "Next generation on-line dynamic security assessment," 2011.
[94] "Power Plant Dynamic Model Verification using PMUs," 2016.
[95] J. Zhao and L. Mili, "Power System Robust Decentralized Dynamic State Estimation Based on Multiple Hypothesis Testing," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 4, pp. 4553–4562, Jul. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2785344.
[96] J. Zhao, L. Mili, and F. Milano, "Robust Frequency Divider for Power System Online Monitoring and Control," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 4, pp. 4414–4423, Jul. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2785348.
[97] J. Zhao, Y. Tang, and V. Terzija, "Robust online estimation of power system center of inertia frequency," IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 1, pp. 821–825, Jan. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2879782.
[98] G. Anagnostou, F. Boem, S. Kuenzel, B. C. Pal, and T. Parisini, "Observer-

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Based Anomaly Detection of Synchronous Generators for Power Systems Monitoring," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 4, pp. 4228–4237, Jul. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2771278.

[99] A. Rouhani and A. Abur, "A robust dynamic state estimator against exciter failures," Nov. 2016. doi: 10.1109/NAPS.2016.7747998.

[100] K. Sun, J. Qi, and W. Kang, "Power system observability and dynamic state estimation for stability monitoring using synchrophasor measurements," Control Eng. Pract., vol. 53, pp. 160–172, 2016.

[101] J. Qi, K. Sun, and W. Kang, "Optimal PMU placement for power system dynamic state estimation by using empirical observability Gramian," IEEE Trans. power Syst., vol. 30, no. 4, pp. 2041–2054, 2014.

[102] A. Rouhani and A. Abur, "Observability analysis for dynamic state estimation of synchronous machines," IEEE Trans. Power Syst., vol. 32, no. 4, pp. 3168–3175, 2016.

[103] S. Wang, J. Zhao, Z. Huang, and R. Diao, "Assessing Gaussian assumption of PMU measurement error using field data," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 33, no. 6, pp. 3233–3236, Dec. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2762927.

[104] G. Wang, C. Liu, N. Bhatt, E. Farantatos, and M. Patel, "Observability of nonlinear power system dynamics using synchrophasor data," Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 26, no. 5, pp. 952–967, 2016.

[105] J. Qi, K. Sun, and W. Kang, "Adaptive optimal PMU placement based on empirical observability gramian," IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 18, pp. 482–487, 2016.

[106] M. S. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, and T. Clapp, "A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking," IEEE Trans. Signal Process., vol. 50, no. 2, pp. 174–188, Feb. 2002, doi: 10.1109/78.978374.

[107] H. Modir and R. A. Schlueter, "A dynamic state estimator for dynamic security assessment," IEEE Trans. Power Appar. Syst., no. 11, pp. 4644–4652, 1981.

[108] Z. Huang, K. Schneider, and J. Nieplocha, "Feasibility studies of applying Kalman filter techniques to power system dynamic state estimation," in 2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007), 2007, pp. 376–382.

[109] S. Meliopoulos, G. Cokkinides, R. Huang, E. Farantatos, S. Choi, and Y. Lee, "Wide area dynamic monitoring and stability controls," in 2010 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control-VIII (IREP), 2010, pp. 1–8.

[110] E. Farantatos, G. K. Stefopoulos, G. J. Cokkinides, and A. P. Meliopoulos, "PMU-based dynamic state estimation for electric power systems," in 2009

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1–8.
[111] L. Fan and Y. Wehbe, "Extended Kalman filtering based real-time dynamic state and parameter estimation using PMU data," Electr. Power Syst. Res., vol. 103, pp. 168–177, 2013.
[112] E. Ghahremani and I. Kamwa, "Dynamic state estimation in power system by applying the extended Kalman filter with unknown inputs to phasor measurements," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 4, pp. 2556–2566, 2011.
[113] E. Ghahremani and I. Kamwa, "Local and wide-area PMU-based decentralized dynamic state estimation in multi-machine power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 1, pp. 547–562, Jan. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2400633.
[114] G. Evensen, "The Ensemble Kalman Filter: Theoretical formulation and practical implementation," Ocean Dyn., vol. 53, no. 4, pp. 343–367, 2003, doi: 10.1007/s10236-003-0036-9.
[115] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "Unscented filtering and nonlinear estimation," in Proceedings of the IEEE, Mar. 2004, vol. 92, no. 3, pp. 401–422. doi: 10.1109/JPROC.2003.823141.
[116] E. Ghahremani and I. Kamwa, "Online state estimation of a synchronous generator using unscented Kalman filter from phasor measurements units," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 26, no. 4, pp. 1099–1108, Dec. 2011, doi: 10.1109/TEC.2011.2168225.
[117] J. Qi, K. Sun, J. Wang, and H. Liu, "Dynamic state estimation for multi-machine power system by unscented kalman filter with enhanced numerical stability," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 2, pp. 1184–1196, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2580584.
[118] S. Wang, W. Gao, and A. P. S. Meliopoulos, "An alternative method for power system dynamic state estimation based on unscented transform," IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 2, pp. 942–950, May 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2175255.
[119] A. K. Singh and B. C. Pal, "Decentralized dynamic state estimation in power systems using unscented transformation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 2, pp. 794–804, Mar. 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2281323.
[120] G. Anagnostou and B. C. Pal, "Derivative-Free Kalman Filtering Based Approaches to Dynamic State Estimation for Power Systems With Unknown Inputs," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 1, pp. 116–130, Apr. 2017, doi: 10.1109/tpwrs.2017.2663107.
[121] A. K. Singh and B. C. Pal, "Decentralized Robust Dynamic State Estimation in Power Systems Using Instrument Transformers," IEEE Trans. Signal Process., vol. 66, no. 6, pp. 1541–1550, Mar. 2018, doi: 10.1109/TSP.2017.2788424.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

[122] J. Zhao, "Power System Dynamic State Estimation Considering Measurement Correlations," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 32, no. 4, pp. 1630–1632, Dec. 2017, doi: 10.1109/TEC.2017.2742405.
[123] Y. Li, Z. Huang, N. Zhou, B. Lee, R. Diao, and P. Du, "Application of ensemble Kalman filter in power system state tracking and sensitivity analysis," 2012. doi: 10.1109/TDC.2012.6281499.
[124] W. S. Rosenthal, A. M. Tartakovsky, and Z. Huang, "Ensemble Kalman Filter for Dynamic State Estimation of Power Grids Stochastically Driven by Time-Correlated Mechanical Input Power," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 4, pp. 3701–3710, Jul. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2764492.
[125] B. Uzunoglu and M. A. Ulker, "Maximum Likelihood Ensemble Filter State Estimation for Power Systems," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 67, no. 9, pp. 2097–2106, Sep. 2018, doi: 10.1109/TIM.2018.2814066.
[126] N. Zhou, D. Meng, and S. Lu, "Estimation of the dynamic states of synchronous machines using an extended particle filter," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 4, pp. 4152–4161, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2262236.
[127] Y. Cui and R. Kavasseri, "A Particle Filter for Dynamic State Estimation in Multi-Machine Systems with Detailed Models," IEEE Trans. Power Syst., vol. 30, no. 6, pp. 3377–3385, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2387792.
[128] K. Emami, T. Fernando, H. Iu, Hieu Trinh, and Kit Po Wong, "Particle filter approach to dynamic state estimation of generators in power systems," Nov. 2016, pp. 1–1. doi: 10.1109/pesgm.2016.7741239.
[129] D. Simon, "Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches." John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2006.
[130] N. Zhou, D. Meng, Z. Huang, and G. Welch, "Dynamic state estimation of a synchronous machine using PMU data: A comparative study," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 450–460, 2014.
[131] A. Rouhani and A. Abur, "Linear phasor estimator assisted dynamic state estimation," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 1, pp. 211–219, Jan. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2548244.
[132] J. Zhao, M. Netto, and L. Mili, "A Robust Iterated Extended Kalman Filter for Power System Dynamic State Estimation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 32, no. 4, pp. 3205–3216, Jul. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2628344.
[133] J. Zhao, L. Mili, and A. Abdelhadi, "Robust dynamic state estimator to outliers and cyber attacks," in IEEE Power and Energy Society General Meeting, Jan. 2018, vol. 2018-Janua, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2017.8274708.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

[134] J. Zhao and L. Mili, "Robust unscented Kalman filter for power system dynamic state estimation with unknown noise statistics," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 1215–1224, Mar. 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2761452.
[135] J. Zhao and L. Mili, "A robust generalized-maximum likelihood unscented kalman filter for power system dynamic state estimation," IEEE J. Sel. Top. Signal Process., vol. 12, no. 4, pp. 578–592, Aug. 2018, doi: 10.1109/JSTSP.2018.2827261.
[136] J. Zhao, "Dynamic State Estimation With Model Uncertainties Using H∞ Extended Kalman Filter," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 1, pp. 1099–1100, Mar. 2017, doi: 10.1109/tpwrs.2017.2688131.
[137] J. Zhao and L. Mili, "A Decentralized H-infinity Unscented Kalman Filter for Dynamic State Estimation Against Uncertainties," IEEE Trans. Smart Grid, Sep. 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2870327.
[138] A. Paul, I. Kamwa, and G. Joos, "Centralized dynamic state estimation using a federation of extended Kalman filters with intermittent PMU data from generator terminals," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 6, pp. 6109–6119, 2018.
[139] X. L. et Al., "Event-Trigger Particle Filter for Smart Grids With Limited Communication Bandwidth Infrastructure," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6918–6928, 2018.
[140] K. Emami, T. Fernando, H. H.-C. Iu, and H. Trinh, "Particle Filter Approach to Dynamic State Estimation of Generators in Power Systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 30, no. 5, pp. 2665–2675, 2015.
[141] I. Abdulrahman, "MATLAB-Based Programs for Power System Dynamic Analysis," IEEE Open Access J. Power Energy, vol. 7, pp. 59–69, 2020.
[142] P. Sauer, M. A. Pai, and J. H. Chow, Power System Dynamics and Stability, 2nd ed. Wiley, 2017.
[143] "IEEE Std 421.5: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," 2005.
[144] W. Xu, E. Vaahedi, Y. Mansour, and J. Tamby, "Voltage stability load parameter determination from field tests on BC Hydro's system," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 3, pp. 1290–1297, 1997.
[145] A. K. Singh and B. C. Pal, "Decentralized dynamic state estimation in power systems using unscented transformation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 2, pp. 794–804, 2014.
[146] A. K. Singh and B. C. Pal, "IEEE PES Task Force on Benchmark Systems for Stability Controls, Report on the 68-Bus, 16-Machine, 5-Area System," 2013.
[147] I. Abdulrahman and G. Radman, "Simulink-Based Program for Simulating Multi-Machine Power Systems," in IEEE Power & Energy Society General

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Meeting (PESGM), 2018, pp. 1–5.
[148] C. Canizares, "Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 32, no. 1, pp. 715–722, 2017.
[149] "https://pss-store.siemens.com/store?Action=list&SiteID=sipti&categoryID=4844334200."
[150] "https://www.powerworld.com/."
[151] "https://www.emtp.org/."
[152] "https://www.digsilent.de/en/."
[153] L. Vanfretti and F. Milano, "Experience with PSAT as free and opensource software for power system education and research," Int. J. Electr. Eng. Educ., vol. 47, no. 1, pp. 47–62, 2008.
[154] S. Cole and R. Belmans, "MatDyn, a new MATLAB-based toolbox for power system dynamic simulation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 3, pp. 1129–1136, 2011.
[155] J. H. Chow and K. W. Cheung, "A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research," IEEE Trans. Power Syst., vol. 7, no. 4, pp. 1559–1564, 1992.
[156] F. Milano, "An open source power system analysis toolbox," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 3, pp. 1199–1206, 2005.
[157] S. Ekinci, A. Demiroren, and H. Zeynelgil, "PowSysGUI: A new educational software package for power system stability studies using MATLAB/Simulink," Int. J. Electr. Eng. Educ., vol. 54, no. 44, pp. 283–298, 2017.
[158] J. Chow and G. Rogers, "Power System Toolbox Manual, Version 3.0," 2008.
[159] I. Abdulrahman and G. Radman, "Wide-area-based adaptive neuro-fuzzy SVC controller for damping interarea oscillations," Can. J. Electr. Comput. Eng., vol. 41, no. 3, pp. 133–144, 2018.
[160] B. Pal and B. Chaudhuri, Robust Control in Power Systems. Springer, 2005.
[161] B. Ristic, M. S. Arulampalam, and N. Gordon, "Beyond the Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications," Artech House, London, 2004.
[162] G. Kallianpur, "Nonlinear stochastic Filtering: A Brief Survey," J. Math. Sci., vol. 120, no. 3, 2004.
[163] Y. Bar-Shalom, X. R. Li, and T. Kirubaranjan, Estimation with Applications to Tracking and Navigation. John Wiley & Sons, 2001.
[164] E. A. W. and R. van der Merwe, "The uncented Kalman Filter for nonlinear estimation," in IEEE Symposium on Adaptive Systems for Signal Processing, Communications and Control, 2000, pp. 153–158.
[165] M. S. Arulampalam, "A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Gaussian Bayesian tracking," IEEE Trans. Signal Process., vol. 50, no. 1, 2002.
[166] G. Terejanu, P. Singla, T. Singh, and P. D. Scott, "A novel Gaussian Sum Filter Method for accurate solution to the nonlinear filtering problem," in 11th International Conference on Information Fusion, 2008, vol. 17, pp. 1–8.
[167] E. Hill, S. A. Gadsden, and M. Biglarbegian, "Adaptive Control Strategies based on the Unscented Kalman Filter and Interacting Multiple Models," in 2021 American Control Conference (ACC), 2021, pp. 2442–2448.
[168] X. Li, A. J. Cheng, and H. X. Lin, "Sample Regenerating Particle Filter Combined With Unequal Weight Ensemble Kalman Filter for Nonlinear Systems," IEEE Access, vol. 9, pp. 109612–109623, 2021.
[169] S. Huang, T. Wang, T. Ji, and M. Jin, "Adaptive Cubature Kalman Filter Based Dynamic State Estimation for Grid-connected Photovoltaic System," in 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), 2021, pp. 570–575.
[170] Z. Sun and Y. Chen, "Dynamic State Estimation of DFIG Using Square-root Cubature Kalman Filter," in IEEE 10th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS), 2021, pp. 784–789.
[171] Q. Chen, C. Yin, J. Zhou, Y. Wang, X. Wang, and C. Chen, "Hybrid Consensus-Based Cubature Kalman Filtering for Distributed State Estimation in Sensor Networks," IEEE Sens. J., vol. 18, no. 11, pp. 4561–4569, 2018.
[172] Z. Yang, R. Gao, and W. He, "A Review of The Research on Kalman Filtering in Power System Dynamic State Estimation," in IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2021, pp. 856–861.
[173] J. Zhao, L. Mili, and A. Abdelhadi, "Robust dynamic state estimator to outliers and cyber attacks," in 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2017, pp. 1–5.
[174] S. Li, L. Li, and Z. Li, "Event-Trigger Heterogeneous Nonlinear Filter for Wide-Area Measurement Systems in Power Grid," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 2752–2764, 2019.
[175] S. Li and Z. Li, "Application of Event-Triggered Cubature Kalman Filter for Remote Nonlinear State Estimation in Wireless Sensor Network," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 68, no. 6, pp. 5133–5145, 2021.
[176] S. Li, Z. Li, J. Li, and Q. Wang, "Event-based Cubature Kalman Filter for Smart Grid Subject to Communication Constraint," IFAC-PapersOnLine, vol. 50, no. 1, pp. 49–54, 2017.
[177] S. Li, Y. Hu, L. Zheng, and Z. Li, "Stochastic Event-Triggered Cubature Kalman Filter for Power System Dynamic State Estimation," IEEE Trans.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

Circuits Syst. II Express Briefs, vol. 66, no. 9, pp. 1552–1556, 2019.
[178] L. Zheng, Z. Chen, W. Su, S. Li, and X. Chen, "Event-Trigger Strategy Design and Its Comparative Study for Dynamic State Estimation in Power Systems," in IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2019, pp. 1–5.
[179] M. Kooshkbaghi, H. J. Marquez, and W. Xu, "Event-Triggered Approach to Dynamic State Estimation of a Synchronous Machine Using Cubature Kalman Filter," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 28, no. 5, 2020.
[180] J. Wang and T. Li, "Distributed Multi-Area State Estimation for Power Systems With Switching Communication Graphs," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 12, no. 1, pp. 787–797, 2021.
[181] V. Terzija, G. Valverde, and D. Cai, "Widearea monitoring, protection, and control of future electric power networks," Proc. IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 80–93, 2011.
[182] L. Zhao and A. Abur, "Multi area state estimation using synchronized phasor measurements," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 2, pp. 611–617, 2005.
[183] G. N. Korres, "A Distributed Multiarea State Estimation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 73–84, 2011.
[184] L. Xie, D. Choi, S. Kar, and H. V. Poor, "Fully Distributed State Estimation for Wide-Area Monitoring Systems," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 1154–1169, 2012.
[185] V. Kekatos and G. B. Giannakis, "Distributed Robust Power System State Estimation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1617–1626, 2013.
[186] X. Qing, H. R. Karimi, Y. Niu, and X. Wang, "Decentralized unscented Kalman filter based on a consensus algorithm for multi-area dynamic state estimation in power systems," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 65, pp. 26–33, 2015.
[187] G. Wang, G. B. Giannakis, and J. Chen, "Robust and Scalable Power System State Estimation via Composite Optimization," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 6, pp. 6137–6147, 2019.
[188] J. Yang, W. Zhang, and F. Guo, "Dynamic State Estimation for Power Networks by Distributed Unscented Information Filter," EEE Trans. Smart Grid, vol. 11, no. 3, pp. 2162–2171, 2020.
[189] T. Chen, Y. Cao, L. Sun, X. Qing, and J. Zhang, "A Distributed Robust Power System State Estimation Approach Using t-Distribution Noise Model," IEEE Syst. J., vol. 15, no. 1, pp. 1066–1076, 2021.
[190] W. K. Chai, N. Wang, and K. V. Katsaros, "An information-centric communication infrastructure for real-time state estimation of active distribution networks," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, no. 4, pp. , July .," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, no. 4, pp. 2134–2146, 2015.

DOI: 10.30503/nripress.2020.248

[191] Z. Guo, S. Li, X. Wang, and W. Heng, "Distributed Point-Based Gaussian Approximation Filtering for Forecasting-Aided State Estimation in Power Systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 4, pp. 2597–2608, 2016.
[192] Z. Yu, D. Shi, Z. Wang, and Q. Zhang, "Distributed estimation of oscillations in power systems: An extended Kalman filtering approach," CSEE J. Power Energy Syst., vol. 5, no. 2, pp. 181–189, 2019.
[193] ب. ش. قهفرخی, "شبکه های داده محور (ICN) و امکان سنجی استفاده از آن برای انتشار محتوای تلویزیونی," ۱۳۹۷.
[194] C. Canuto and A. Tabacco, Mathematical Analysis I. Springer, 2015.
[195] G. Chang, "Alternative formulation of the Kalman filter for correlated process and observation noise," IET Sci. Meas. Technol., vol. 8, no. 5, pp. 310–318, 2014.
[196] A. K. Singh, "Decentralized Estimation and Control for Power Systems," Imperial College London, 2014.
[197] K. Tam, "Current-Transformer Phase-Shift Compensation and Calibration," 2001.
[198] "IEC Standard for Instrument Transformers, IEC Std 60044," 2003.
[199] "IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers, IEEE Std C57.13," 2008.
[200] S. Wang, J. Feng, and C. K. Tse, "A class of stable square-root nonlinear information filters," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 59, no. 7, pp. 1893–1898, 2014.
[201] A. G. O. Mutambara, Decentralized Estimation and Control for Multisensor Systems. CRC Press, 1998.
[202] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 49, no. 9, pp. 1520–1533, 2004.
[203] D. J. Lee, "Nonlinear estimation and multiple sensor fusion using unscented information filtering," IEEE Signal Process. Lett., vol. 15, pp. 861–864, 2008.