



پژوهشگاه نیرو

Niroo Research Institute

طراحی و ساخت میز تست چند منظوره ماشین‌های الکتریکی و درایو



کارفرما : پژوهشگاه نیرو

NRI-ER-904-PEMPN17-00-L

NRI-ER-904-PEMPN17-00-L

واحد مجری: گروه ماشین‌های الکتریکی دوار

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



طراحی و ساخت میز تست چند منظوره ماشین های الکتریکی و درایو

مدیر پروژه: حسین عزیزی مقدم

مجری: ایمان صادقی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۱

کد گزارش: NRI-ER-904-PEMPN17-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.338

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه/مرکز پژوهشی ماشین های الکتریکی دوار
طراحی و ساخت میز تست چند منظوره ماشین های الکتریکی و درایو/ مدیر پروژه. کارفرما:
پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.
۲۵۲ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. صادقی، ایمان، مجری. ۲. فرهادی، آرمان، همکار پروژه. ۳. ضیغمی،
محمدصادقی، همکار پروژه.



انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی ماشین های الکتریکی دوار

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

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

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب حسین عزیزی مقدم متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :

۱. آرمان فرهادی (همکاری پاره وقت در انجام مرحله اول پروژه)
۲. محمد صادق ضیغمی (همکاری پاره وقت در انجام مرحله سوم پروژه)

نام گزارش: گزارش نهایی پروژه

کد گزارش - ویرایش: PEMPN17/TO1

عنوان پروژه: طراحی و ساخت میز تست چند منظوره ماشین های الکتریکی و درایو

واحد مجری طرح/پروژه: گروه ماشین های الکتریکی دوار

مجری پروژه: ایمان صادقی

مدیر طرح/پروژه: حسین عزیزی مقدم

تاریخ: فروردین ۱۴۰۱

پیشگفتار

ارزیابی و مطالعه آزمایشگاهی ماشین های الکتریکی و سیستم درایو آنها در بسیاری از کاربردهای تحقیقاتی و صنعتی تضمین کننده طراحی و بهره برداری بهینه محرکه های الکتریکی می باشد. بر همین اساس از ابتدای تجاری سازی موتورهای الکتریکی استانداردهای تست و تجهیزات مورد نیاز آنها نیز ارائه گردیده است. در مطالعات آزمایشگاهی به منظور ارزیابی دقیق تر مشخصه بارهای صنعتی بر عملکرد ماشین الکتریکی و سیستم درایو ، راه حل ایده آل استفاده از بارهای واقعی در آزمایشگاه است. بکارگیری بارهای واقعی هزینه اجرای مطالعات آزمایشگاهی را به شدت افزایش می دهد و از طرفی انجام تست های برنامه ریزی شده در این شرایط امکان پذیر نمی باشد. به منظور انجام تست های برنامه ریزی شده با حداقل هزینه و دقت بالا استفاده از یک شبیه سازی بارهای مکانیکی ضروری می باشد. بر همین اساس انواع مختلف سیستم های دینامومتری مانند فوکو، دینامومتر الکتریکی و هیدرو لیکی ارائه گردیده اند. هدف از انجام این پروژه طراحی و ساخت سیستم دینامومتر جهت تست الکتروموتورهای صنعتی می باشد. جهت مدلسازی دینامیکهای غیر خطی بارهای صنعتی در این پروژه یک سیستم کنترل دینامومتر با سرعت پاسخ بالا طراحی گردیده است. بهره گیری از این دینامومتر در کنار سنسورهای الکتریکی و مکانیکی و یک محیط نرم افزاری گرافیکی امکان ارزیابی عملکرد ماشین الکتریکی و سیستم درایو تحت شرایط اعمال مشخصه های مختلف بارهای استاتیکی و دینامیکی فراهم می گردد. در این مرحله از پروژه ساخت اجزاء سخت افزاری و نرم افزاری دستگاه دینامومتر مشتمل بر برد DSP ، بردهای سنسور، برد تغذیه، مدارت فرمان ، نرم افزار Labview و... اجرا گردیده است. پس از ساخت ماژول های دستگاه و انجام تستهای اولیه ، سیستم تست دینامومتری جمع گردید و تستهای نهایی با اتصال سیستم دینامومتر به یک موتور و درایو تحت تست مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج حاصل از تستهای آزمایشگاهی نشان می دهد دستگاه دینامومتری ساخته شده قابلیت تولید مشخصه های انواع بارهای خطی و غیر خطی استاتیکی و دینامیکی را با دقت و دینامیک بسیار بالایی برخوردار می باشد. علاوه بر دستگاه دینامومتر ساخته شده یک نرم افزار در محیط Labview پیاده سازی شده تا علاوه بر نمونه داده برداری و استخراج نتایج تست، امکان برنامه ریزی و انجام تنظیمات تست برای کاربر فراهم گردد. در مرحله پایانی این پروژه منابع خطا و نحوه کالیبراسیون دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. مراحل این پروژه با همکاری آقایان حسین عزیزی مقدم، آرمان فرهادی و محمد صادق ضیغمی انجام گردید. همچنین آقای مهندس سهراب امینی در ارزیابی نهایی گزارش تهیه شده به عنوان ناظر این پروژه همکاری نموده اند.

چکیده ۱

فصل ۱- معرفی سیستم دینامومتر، طراحی و شبیه سازی سیستم کنترلی..... ۲

۳	۱-۱- مقدمه.....
۳	۱-۲- معرفی اجزاء میز تست ماشین های الکتریکی.....
۵	۱-۲-۱- انواع روشهای دینامومتری.....
۶	۱-۲-۲- دینامومتر ترمز ریسمان.....
۶	۱-۲-۳- دینامومتر ترمز اسب.....
۷	۱-۲-۴- دینامومتر جذب.....
۱۰	۱-۳- گشتاور بارهای مکانیکی مرسوم.....
۱۱	۱-۴- دسته بندی انواع بارهای صنعتی.....
۱۱	۱-۵- مدل ریاضی گشتاور بارهای غیرخطی.....
۱۲	۱-۶- گشتاور بارهای غیرخطی کوپلینگ.....
۱۲	۱-۶-۱- رزونانس مکانیکی.....
۱۴	۱-۶-۲- بکلاش (Backlash).....
۱۶	۱-۶-۳- نا هم محوری.....
۱۸	۱-۷- گشتاور بارهای غیرخطی ناخواسته هرز.....
۱۸	۱-۷-۱- عدم تعادل.....
۱۹	۱-۷-۲- اصطکاک چرخشی.....
۲۱	۱-۸- گشتاور بارهای غیرخطی خواسته.....
۲۱	۱-۸-۱- بازوی مکانیکی.....
۲۳	۱-۸-۲- مکانیزم بادامکی.....
۲۵	۱-۸-۳- مکانیزم میل لنگ.....
۲۸	۱-۹- کنترل سیستم دینامومتر بر اساس روش دینامیک معکوس.....
۳۱	۱-۱۰- روش کنترل تطبیقی سیستم دینامومتر.....
۳۲	۱-۱۰-۱- تعریف کنترل تطبیقی.....
۳۴	۱-۱۰-۲- مقایسه روش تطبیقی و روش فیدبک معمولی.....
۳۴	۱-۱۰-۳- روش کنترل تطبیقی.....
۳۷	۱-۱۱- انتخاب کنترل کننده تطبیقی.....
۳۷	۱-۱۱-۱- کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع.....
۳۸	۱-۱۱-۲- کنترل تطبیقی جایاب قطب ها.....
۳۹	۱-۱۲- شبیه سازی سیستم دینامومتر به روش PI و تطبیقی.....

فصل ۲- طراحی مفهومی اجزاء مبدل قدرت سیستم دینامومتر..... ۴۶

۴۷	۲-۱- مقدمه.....
۴۷	۲-۲- مشخصات الکتریکی سیستم دینامومتر.....
۵۰	۲-۳- مدارات حفاظتی.....
۵۱	۲-۳-۱- حفاظت اتصال کوتاه.....
۵۲	۲-۳-۲- خطای اضافه جریان (اضافه بار) :.....
۵۳	۲-۳-۳- حفاظت جریان های ناشی فرکانس بالا:.....
۵۴	۲-۳-۴- حفاظت از مازول سوئیچ الکترونیک قدرت:.....
۵۸	۲-۴- مدل اجزاء الکترونیک قدرت.....
۵۹	۲-۴-۱- اینورتر خروجی و یکسوساز فعال ورودی.....
۶۱	۲-۴-۲- کلید قدرت.....
۶۱	۲-۵- طراحی ظرفیت خازن لینک DC.....
۶۲	۲-۶- طراحی فیلتر سمت شبکه.....
۶۲	۲-۶-۱- محاسبه پارامترهای فیلتر LCL.....
۶۴	۲-۶-۲- دستورالعمل ساخت سلف.....
۶۸	۲-۷- طراحی ترمز دینامیکی.....
۷۰	۲-۸- طراحی مقاومت تخلیه شارژ خازن.....
۷۱	۲-۹- تحلیل حرارتی و طراحی خنک‌ساز برای مبدل BTB.....
۷۱	۲-۹-۱- تحلیل حرارتی اینورتر خروجی.....
۷۴	۲-۹-۲- تحلیل حرارتی یکسوساز ورودی.....
۷۶	۲-۹-۳- تحلیل حرارتی SSR.....
۷۷	۲-۱۰- نقشه تابلو برق.....
۸۲	۲-۱۱- نتایج شبیه‌سازی.....

فصل ۳- طراحی مفهومی و طراحی تفصیلی برد های الکترونیک..... ۸۵

۸۶	۳-۱- مقدمه.....
۸۶	۳-۲- برد سنسور ولتاژ و جریان اثر هال.....
۸۷	۳-۳- طراحی برد سنسور جریان.....
۸۸	۳-۴- طراحی برد سنسور ولتاژ.....
۹۰	۳-۵- طراحی برد سنسور ولتاژ.....
۹۲	۳-۶- نقشه صنعتی برد های سنسور ولتاژ و جریان باس AC.....
۹۴	۳-۷- برد درایو مازول هوشمند IGBT (IPM).....
۹۷	۳-۸- برد کنترل مبتنی بر پردازشگر دیجیتال DSP-TMS320F335.....
۹۹	۳-۹- سنسور اندازه گیری سرعت.....
۱۰۴	۳-۱۰- برد حفاظت و مدیریت دما.....
۱۰۸	۳-۱۱- برد منبع تغذیه.....

۱۱۱.....	۳-۱۲- رابط گرافیکی دستگاه میز تست مبتنی بر نرم افزار LABVIEW
۱۱۶.....	۳-۱۳- نتیجه گیری.....

فصل ۴- پیاده سازی اجراء سخت افزاری دستگاه دینامومتر..... ۱۱۷

۱۱۸.....	۴-۱- مقدمه.....
۱۲۷.....	۴-۲- موتور القایی مورد استفاده به عنوان دینامومتر.....
۱۲۸.....	۴-۳- اینورتر خروجی و یکسوساز فعال ورودی.....
۱۲۹.....	۴-۴- کلید انتقالی قدرت الکترونیکی (SSR).....
۱۳۰.....	۴-۵- پیاده سازی خازن لینک DC.....
۱۳۰.....	۴-۶- ساخت فیلتر سمت شبکه.....
۱۳۵.....	۴-۷- پیاده سازی ترمز دینامیکی.....
۱۳۶.....	۴-۸- پیاده سازی مقاومت تخلیه شارژ خازن.....
۱۳۶.....	۴-۹- پیاده سازی خنک ساز برای سیستم دینامومتر.....
۱۳۷.....	۴-۱۰- مونتاژ و ساخت بردهای الکترونیکی و کنترلی.....
۱۳۹.....	۴-۱۱- پیاده سازی تابلو سیستم دینامومتر.....
۱۴۶.....	۴-۱۲- نتیجه گیری.....

فصل ۵- تجمیع دستگاه دینامومتر و بررسی نتایج تست..... ۱۴۷

۱۴۸.....	۵-۱- مقدمه.....
۱۴۸.....	۵-۲- تست سیستم درایو دینامومتر در مد کنترل سرعت.....
۱۵۲.....	۵-۲-۱- سناریوی ۱: ورودی پله از 200rpm به 600rpm.....
۱۵۴.....	۵-۲-۲- سناریوی ۲: ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$
۱۵۷.....	۵-2-3- سناریوی ۴: ورودی مرجع شیب.....
۱۵۸.....	۵-۲-۴- سناریوی ۴: ورودی مرجع سینوسی.....
۱۶۰.....	۵-۳- تست سیستم درایو دینامومتر در مد کنترل گشتاور.....
۱۶۱.....	۵-۳-۱- سناریوی ۱: ورودی گشتاور مرجع پالسی $\pm 3N.m$
۱۶۲.....	۵-۳-۲- سناریوی ۲: ورودی گشتاور مرجع سینوسی $\pm 3N.m$
۱۶۴.....	۵-۳-۳- سناریوی ۳: گشتاور ثابت و مولفه های گشتاور سینوسی $\pm 1.5N.m$
۱۶۴.....	۵-۳-۴- سناریوی ۴: گشتاور بار دینامیکی.....
۱۶۷.....	۵-۴- نتایج آزمایشگاهی تست های دینامومتری موتور تحت تست.....
۱۶۹.....	۵-۴-۱- سناریوی ۱: بارگذاری گشتاور بار ثابت قابل برنامه ریزی.....
۱۷۲.....	۵-۴-۲- سناریوی ۲: بارگذاری گشتاور دینامیکی قابل برنامه ریزی.....
۱۷۳.....	۵-۴-۳- سناریوی ۳: بارگذاری گشتاور بار اصطکاکی و نوع فن قابل برنامه ریزی.....
۱۷۵.....	۵-۴-۳- سناریوی ۴: بارگذاری مولفه های پیچیده و غیر خطی بار.....
۱۷۹.....	5-4-4- دینامومتری بار نوع مکانیسم بادامک.....
۱۸۴.....	5-4-5- دینامومتری بار نوع میل لینگ.....
۱۸۵.....	۵-۵- نتیجه گیری.....

فصل ۶- رابط گرافیکی دستگاه میز تست مبتنی بر نرم افزار LABVIEW ۱۸۷

۱۸۸.....	۶-۱- مقدمه.....
۱۸۸.....	۶-۲- معرفی قابلیت های نرم افزار Labview دستگاه دینامومتر.....
۱۸۸.....	۶-۲-۱- پنجره تنظیمات و مقدار دهی اولیه (Configuration and Initialization).....
۱۹۰.....	۶-۲-۲- پنجره تحلیل در حوزه زمان (Transient time domain analysis).....
۱۹۲.....	۶-۲-۳- آنالیز توان و انرژی (Power , energy , power factor & thermal analysis).....
۱۹۲.....	۶-۲-۴- تحلیل در حوزه فرکانس (Frequency domain & harmonic analysis).....
۱۹۳.....	۶-۳- استخراج مشخصه های خروجی موتور تحت تست.....
۱۹۳.....	۶-۳-۱- مشخصات خروجی موتور تحت تست با استفاده از سیستم موتور- ژنراتور.....
۱۹۶.....	۶-۳-۲- مشخصات خروجی موتور تحت تست با استفاده از سیستم دینامومتر.....
۲۰۰.....	۶-۳-۳-۲-۴- نتیجه گیری.....

فصل ۷- کالیبراسیون سیستم دینامومتر ۲۰۱

۲۰۲.....	۷-۱- مقدمه.....
۲۰۳.....	7-2- کالیبراسیون سنسور گشتاور.....
۲۰۴.....	۷-۲-۱- کالیبراسیون دوره ایی سنسور گشتاور RT2A.....
۲۰۷.....	7-3- سنسور ولتاژ و جریان اثر هال.....
۲۱۰.....	7-4- کالیبراسیون سنسور سرعت.....
۲۱۱.....	۷-۵- نتیجه گیری.....

فصل ۸- نتیجه گیری و پیشنهادات ۲۱۲

۲۱۳.....	۸-۱- نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۲۱۴.....	۸-۲- پیشنهادات.....

فصل ۹- پیوست ۲۱۵

۲۱۸.....	9-1- تاییدیه استاندارد و کالیبراسیون سنسور گشتاور RT2A.....
۲۲۰.....	۹-۲- تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر دیجیتال.....
۲۲۴.....	۹-۳- تاییدیه کالیبراسیون سرعت سنج استروسکوپ.....
۲۲۶.....	9-4- تاییدیه کالیبراسیون دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396.....
۲۳۰.....	۹-۵- تاییدیه کالیبراسیون دستگاه اسیلوسکوپ.....

مراجع ۲۳۱

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: ساختار کلی دینامومتر.....	۴
شکل ۱-۲: دینامومتر ریسمان ترمزی.....	۶
شکل ۱-۳: دینامومتر ترمز اسب.....	۷
شکل ۱-۴: دینامومتر جذب.....	۷
شکل ۱-۵: مشخصه گشتاور سرعت یک سیستم درایو.....	۱۰
شکل ۱-۶: مدل مکانیکی یک سیستم دو جرم.....	۱۲
شکل ۱-۷: پاسخ سیستم درایو تحت شرایط رزونانس مکانیکی و ضریب سختی $Kt = 1500 \text{ N.mrad}$	۱۴
شکل ۱-۸: پاسخ سیستم درایو تحت شرایط رزونانس مکانیکی و ضریب سختی $Kt = 15000 \text{ N.mrad}$	۱۴
شکل ۱-۹: (الف) مدل مکانیکی سیستم با در نظر گرفتن اثر بکلاش (ب) مدل ناحیه مرده.....	۱۵
شکل ۱-۱۰: پاسخ سیستم درایو با در نظر گرفتن سیستم چرخنده با زاویه شکاف $\alpha = 1^\circ$	۱۶
شکل ۱-۱۱: پاسخ سیستم درایو با در نظر گرفتن سیستم چرخنده با زاویه شکاف $\alpha = 5^\circ$	۱۶
شکل ۱-۱۲: مدل مکانیکی نا هم محوری.....	۱۷
شکل ۱-۱۳: پاسخ سیستم درایو با در نظر گرفتن مشکل نا هم محوری.....	۱۸
شکل ۱-۱۴: طیف هارمونیک گشتاور موتور در حالت زوم با در نظر گرفتن اثر نا هم محوری در سرعت RPM.....	۱۸
شکل ۱-۱۵: مدل یک بار نامتعادل.....	۱۹
شکل ۱-۱۶: پاسخ سیستم درایو در شرایط بار نامتعادل در سیستم درایو.....	۲۰
شکل ۱-۱۷: طیف هارمونیک گشتاور موتور در حالت زوم با در نظر گرفتن اثر عدم تعادل در سرعت RPM ۱۰۰۰ ... ۲۰.....	۲۰
شکل ۱-۱۸: پاسخ سیستم درایو در شرایط اصطکاک چرخشی در سیستم درایو.....	۲۱
شکل ۱-۱۹: شماتیک یک بازوی مکانیکی دو حلقه ای.....	۲۲
شکل ۱-۲۰: نتایج شبیه سازی زاویه و گشتاور حلقه اول یک بازوی مکانیکی دو حلقه ای.....	۲۳
شکل ۱-۲۱: شماتیک مکانیزم بادامک.....	۲۴
شکل ۱-۲۲: نتایج شبیه سازی سرعت و گشتاور یک مکانیزم بادامک.....	۲۴
شکل ۱-۲۳: طیف هارمونیک گشتاور موتور در حالت زوم برای مکانیزم بادامک در سرعت RPM ۱۰۰۰.....	۲۵
شکل ۱-۲۴: مدل معادله مکانیکی یک مکانیزم میل لنگ.....	۲۶
شکل ۱-۲۵: نتایج شبیه سازی سرعت و گشتاور یک مکانیزم میل لنگ.....	۲۷
شکل ۱-۲۶: طیف هارمونیک گشتاور موتور در حالت زوم برای مکانیزم میل لنگ در سرعت RPM ۱۰۰۰.....	۲۷
شکل ۱-۲۷: ساختار طرز کلی دینامومتر ۴ ناحیه ای مبتنی بر موتور القایی.....	۲۸
شکل ۱-۲۸: بلوک دیاگرام شبیه سازی رفتار بار مکانیکی به روش دینامیک معکوس.....	۲۹
شکل ۱-۲۹: بلوک دیاگرام سیستم درایو دینامومتر.....	۳۰
شکل ۱-۳۰: اساس طراحی سیستم کنترل کلاسیک.....	۳۲

شکل ۳۱-۱: اساس عملکرد مدل تطبیقی.....	۳۳
شکل ۳۲-۱: روش جدول بندی بهره.....	۳۵
شکل ۳۳-۱: روش های سوئیچینگ و کلید زنی.....	۳۵
شکل ۳۴-۱: تقسیم بندی انواع کنترل کننده های تطبیقی مبتنی بر شناساگر.....	۳۶
شکل ۳۵-۱: کنترل کننده تطبیقی غیر مستقیم.....	۳۶
شکل ۳۶-۱: کنترل کننده تطبیقی مستقیم.....	۳۷
شکل ۳۷-۱: کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع.....	۳۸
شکل ۳۸-۱: بلوک دیاگرام سیمولینک سیستم دینامومتر.....	۴۰
شکل ۳۹-۱: بلوک دیاگرام سیمولینک کنترل کننده سیستم درایو دینامومتر.....	۴۰
شکل ۴۰-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت مدل دلخواه بار با کنترل کننده PI و اینرسی 0.001 Kg.m^2	۴۲
شکل ۴۱-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت مدل دلخواه بار با کنترل کننده تطبیقی و اینرسی 0.001 Kg.m^2	۴۲
.....	
شکل ۴۲-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت مدل دلخواه بار با کنترل کننده PI و اینرسی 0.003 Kg.m^2	۴۳
شکل ۴۳-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت مدل دلخواه بار با کنترل کننده تطبیقی و اینرسی 0.003 Kg.m^2	۴۴
شکل ۴۴-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت تغییر مقاومت روتور و اندوکتانس مغناطیس کنندگی با کنترل کننده PI	۴۴
شکل ۴۵-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت تغییر مقاومت روتور و اندوکتانس مغناطیس کنندگی با کنترل کننده تطبیقی.....	۴۵
شکل ۲-۱: مبدل قدرت سیستم دینامومتر.....	۴۷
شکل ۲-۲: دیاگرام کلی میز تست.....	۵۱
شکل ۲-۳: انواع خطاهای اتصال کوتاه.....	۵۲
شکل ۲-۴: مدار معادل انواع خطاهای اتصال کوتاه (الف) روشن شدن همزمان سویچها روی یک ساق (ب) خطای فاز به فاز (ج) خطای فاز به زمین.....	۵۲
شکل ۲-۵: رله اضافه جریان الکترونیکی.....	۵۳
شکل ۲-۶: خازن های پارازیتی موجود در سیستم درایو.....	۵۳
شکل ۲-۷: معماری داخلی 7MPB75RA120 و واحد تشخیص خطای داخلی.....	۵۵
شکل ۲-۸: دیاگرام زمانی مدار حفاظت اضافه جریان.....	۵۶
شکل ۲-۹: دیاگرام زمانی مدار حفاظت اتصال کوتاه.....	۵۷
شکل ۲-۱۰: جریان کلکتور IGBT اینورتر بر حسب ولتاژ کلکتور-امپتر.....	۵۹
شکل ۲-۱۱: جریان دیود معکوس بر حسب ولتاژ حالت وصل دیود.....	۶۰
شکل ۲-۱۲: جریان کلکتور IGBT چایر ترمز دینامیکی بر حسب ولتاژ کلکتور-امپتر.....	۶۰
شکل ۲-۱۳: توان تلف شده در SSR سه فاز بر حسب جریان.....	۶۱
شکل ۲-۱۴: یکسو ساز فعال سه فاز با فیلتر LCL.....	۶۲
شکل ۲-۱۵: رابطه بین کاهش هارمونیک در فرکانس سوئیچینگ و نسبت r بین سیگنال های شبکه و یکسوساز.....	۶۳
شکل ۲-۱۶: مشخصات الکتریکی و مکانیکی سلف.....	۶۶

شکل ۱۷-۲: منحنی B-H هسته‌های ۵۲- و ۱۸-.....	۶۷
شکل ۱۸-۲: دیاگرام نشان دهنده عمق پوسته یک سیم دایره ای به دلیل اثر پوستی.....	۶۷
شکل ۱۹-۲: تغییرات اندوکتانس سلف به ازای جریان های مختلف.....	۶۸
شکل ۲۰-۲: شماتیک ترمز دینامیکی.....	۶۹
شکل ۲۱-۲: هیت سینک P 3.....	۷۲
شکل ۲۲-۲: تلفات مازول و دمای مازول 7MBP75RA120 به ازای یک دیود و IGBT در یک سیکل کامل	۷۳
شکل ۲۳-۲: تلفات مازول و دمای مازول 7MBP75RA120 به ازای یک دیود و IGBT در یک سیکل کامل	۷۵
شکل ۲۴-۲: نتایج تحلیل حرارتی و تلفات مازول 7MBP75RA120.....	۷۶
شکل ۲۵-۲: منحنی ماکزیمم جریان SGT867350 بر حسب دمای محیط.....	۷۷
شکل ۲۶-۲: ابعاد هیت سینک P3.....	۷۷
شکل ۲۷-۲: ابعاد فن 3 SKF.....	۷۸
شکل ۲۸-۲: ابعاد رله حالت جامد SGT867350.....	۷۸
شکل ۲۹-۲: ابعاد اینورتر 7MBP75RA120.....	۷۹
شکل ۳۰-۲: ابعاد هسته T250-52.....	۸۰
شکل ۳۱-۲: ابعاد خازن ۳۳۰۰ میکروفاراد.....	۸۰
شکل ۳۲-۲: نقشه جابجایی قطعات میز تست درایو موتور القایی.....	۸۱
شکل ۳۳-۲: نتایج شبیه سازی پاسخ درایو موتور توسط اینورتر خروجی.....	۸۳
شکل ۳۴-۲: نتایج شبیه سازی پاسخ یکسوساز سمت شبکه.....	۸۴
شکل ۱-۳: ساختار مدارى سنسور جریان اثر هال.....	۸۶
شکل ۲-۳: مدار الکتریکی سنسور جریان LA55-P.....	۸۷
شکل ۳-۳: مدار الکتریکی سنسور ولتاژ اثر هال LV25P.....	۸۸
شکل ۴-۳: مدار الکتریکی سنسور اثر هال ولتاژ.....	۸۹
شکل ۵-۳: نقشه شماتیک برد سنسور ولتاژ و جریان باس DC.....	۹۰
شکل ۶-۳: نمایش سه بعدی برد سنسور ولتاژ و جریان باس DC.....	۹۱
شکل ۷-۳: نقشه مونتاژ برد سنسور ولتاژ و جریان باس DC.....	۹۱
شکل ۸-۳: نقشه مونتاژ برد سنسور ولتاژ و جریان باس AC.....	۹۳
شکل ۹-۳: نمایش سه بعدی سنسور ولتاژ و جریان باس AC.....	۹۳
شکل ۱۰-۳: نقشه مونتاژ برد سنسور ولتاژ و جریان باس AC.....	۹۴
شکل ۱۱-۳: لیست BOM برد سنسور ولتاژ و جریان باس AC.....	۹۴
شکل ۱۲-۳: نقشه شماتیک برد درایو IPM.....	۹۵
شکل ۱۳-۳: نمایش سه بعدی برد درایو IPM.....	۹۶
شکل ۱۴-۳: نقشه مونتاژ برد درایو IPM.....	۹۶
شکل ۱۵-۳: لیست BOM برد درایو IPM.....	۹۷
شکل ۱۶-۳: نمونه گیری جریان و ارسال آن به مبدل دیجیتال.....	۹۸
شکل ۱۷-۳: مشخصه مبدل آنالوگ به دیجیتال.....	۹۸

- شکل ۱۸-۳: ساختار کلی انکودر افزایشی..... ۹۹
- شکل ۱۹-۳: ساختار کلی انکودر افزایشی سنسور سرعت از نوع انکودر افزایشی و مشخصات مداری آن..... ۱۰۰
- شکل ۲۰-۳: پالسهای خروجی سنسور..... ۱۰۰
- شکل ۲۱-۳: شماتیک برد DSP..... ۱۰۱
- شکل ۲۲-۳: نمایش سه بعدی برد DSP..... ۱۰۲
- شکل ۲۳-۳: نقشه مونتاژ برد DSP..... ۱۰۲
- شکل ۲۴-۳: نقشه شماتیک برد حفاظت و مدیریت دما..... ۱۰۶
- شکل ۲۵-۳: نمایش سه بعد برد حفاظت و مدیریت دما..... ۱۰۷
- شکل ۲۶-۳: نقشه مونتاژ برد حفاظت و مدیریت دما..... ۱۰۷
- شکل ۲۷-۳: نقشه شماتیک برد منبع تغذیه..... ۱۰۹
- شکل ۲۸-۳: نمایش سه بعدی برد تغذیه..... ۱۱۰
- شکل ۲۹-۳: نقشه مونتاژ برد تغذیه..... ۱۱۰
- شکل ۳۰-۳: لیست BOM برد منبع تغذیه..... ۱۱۱
- شکل ۳۱-۳: ساختار میز تست و کمیت‌های اندازه گیری شده..... ۱۱۳
- شکل ۳۲-۳: نمودار دیاگرامی مدار آنالوگ سوئیچ و برد واسط کارت I/O..... ۱۱۵
- شکل ۱-۴: نتایج طراحی تفصیلی و لیست المان های اصلی سیستم درینامو متر..... ۱۲۲
- شکل ۲-۴: ساختار کلی میز تست..... ۱۲۷
- شکل ۳-۴: مبدل قدرت موتور القایی مورد استفاده در آزمایشگاه..... ۱۲۷
- شکل ۴-۴: مشخصات موتور دینامومتر..... ۱۲۸
- شکل ۵-۴: مازول 7MBP75RA120..... ۱۲۸
- شکل ۶-۴: مدار درایو گیت IGBT نصب شده بر روی مازول IPM..... ۱۲۹
- شکل ۷-۴: رله حالت جامد SSR (الف) ساخت رله SSR متصل به DSP..... ۱۲۹
- شکل ۸-۴: نصب خازن های لینک DC روی وروق فلزی..... ۱۳۰
- شکل ۹-۴: آرایش خازن های لینک DC روی ورق فلزی به وسیله شمش مسی..... ۱۳۰
- شکل ۱۰-۴: یکسو ساز فعال سه فاز با فیلتر LCL..... ۱۳۱
- شکل ۱۱-۴: پیاده سازی مقاومت و خازن فیلتر سمت شبکه..... ۱۳۱
- شکل ۱۲-۴: هسته پودر آهن T250-52..... ۱۳۲
- شکل ۱۳-۴: جدا سازی ۸۸ رشته سیم..... ۱۳۲
- شکل ۱۴-۴: نحوه تابیدن ۸۸ رشته سیم به یکدیگر..... ۱۳۲
- شکل ۱۵-۴: نحوه سیم پیچی سلف..... ۱۳۳
- شکل ۱۶-۴: سلف های پیچیده شده مورد نیاز برای فیلتر سمت شبکه..... ۱۳۳
- شکل ۱۷-۴: سلف آغشته شده به عایق شارلاک..... ۱۳۳
- شکل ۱۸-۴: تصویر نهایی فیلتر ساخته شده..... ۱۳۴
- شکل ۱۹-۴: اتصال عملی فیلتر به موتور به منظور تست فیلتر..... ۱۳۴
- شکل ۲۰-۴: شکل موج ولتاژ خروجی فیلتر (پایینی به رنگ زرد) و شکل موج جریان فیلتر (بالایی به رنگ آبی)..... ۱۳۵

- شکل ۴-۲۱: شماتیک ترمز دینامیکی..... ۱۳۵
- شکل ۴-۲۲: مقامت های ترمز دینامیکی..... ۱۳۶
- شکل ۴-۲۳: اتصال مقاومت تخلیه شارژ خازن به لینک DC..... ۱۳۶
- شکل ۴-۲۴: هیت سینک P 3..... ۱۳۷
- شکل ۴-۲۵: نصب ماژول های قدرت روی هیت سینگ..... ۱۳۷
- شکل ۴-۲۶: مونتاژ نهایی سیستم خنک سازی شامل هیت سینگ و فن تکفاز..... ۱۳۷
- شکل ۴-۲۷: سنسورهای ولتاژ و جریان باس AC و DC..... ۱۳۷
- شکل ۴-۲۸: برد تغذیه مدارت فرمان و الکترونیک..... ۱۳۸
- شکل ۴-۲۹: برد تغذیه مدارت فرمان و الکترونیک..... ۱۳۸
- شکل ۴-۳۰: سنسور سرعت نوع انکودر افزایشی نصب شده روی موتور دینامومتر..... ۱۳۹
- شکل ۴-۳۱: سنسور سرعت نوع انکودر افزایشی نصب شده روی موتور دینامومتر..... ۱۳۹
- شکل ۴-۳۲: نقشه جابجایی قطعات میز تست درایو موتور القایی..... ۱۴۰
- شکل ۴-۳۳: پیاده سازی سیم کشی تابلو سیستم دینامومتر..... ۱۴۰
- شکل ۴-۳۴: پیاده سازی تابلو سیستم دینامومتر..... ۱۴۱
- شکل ۴-۳۵: کانکتورهایسه فاز مورد استفاده در تابلو سیستم دینامومتر..... ۱۴۲
- شکل ۴-۳۶: تابلو سیستم دینامومتر از نمای جانبی..... ۱۴۲
- شکل ۴-۳۷: نصب ماژول IPM بر روی هیت سینگ..... ۱۴۲
- شکل ۴-۳۸: پیاده سازی ماژول اینورتر خروجی، گیت درایو و DSP آن در تابلو..... ۱۴۳
- شکل ۴-۳۹: مونتاژ برد DSP در تابلو..... ۱۴۳
- شکل ۴-۴۰: خازن های لینک DC، مقاومت های ترمز دینامیکی و مقاومت تخلیه شارژ خازن..... ۱۴۳
- شکل ۴-۴۱: منابع تغذیه کمکی بردهای اینورتر خروجی..... ۱۴۴
- شکل ۴-۴۲: پیاده سازی ماژول IPM و سوئیچ حفاظتی SSR..... ۱۴۴
- شکل ۴-۴۳: فیلتر سمت شبکه..... ۱۴۵
- شکل ۴-۴۴: ترانسفوماتورهای برد تغذیه گیت درایو..... ۱۴۵
- شکل ۴-۴۵: کانکتور های قدرت و سیگنال متصل به تابلو..... ۱۴۵
- شکل ۴-۴۶: برد سنسورهای جریان و ولتاژ سمت ورودی..... ۱۴۶
- شکل ۵-۱: دیاگرام کلی سیم درایو دینامومتر..... ۱۴۹
- شکل ۵-۲: تست آپ آزمایشگاهی تست سیستم درایو دینامومتر..... ۱۵۰
- شکل ۵-۳: محیط نرم افزار CCS و پیاده سازی روش کنترلی..... ۱۵۱
- شکل ۵-۴: برد DAC دو کاناله متصل به برد DSP..... ۱۵۲
- شکل ۵-۵: سرعت مرجع و سرعت رتور، خطای ردیابی سرعت و جریان استاتور موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی پله..... ۱۵۲
- شکل ۵-۶: سرعت رتور، موقعیت تخمینی شار رتور و جریان فاز a استاتور موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی پله..... ۱۵۳
- شکل ۵-۷: سرعت رتور و گشتاور موتور در پاسخ به ورودی پله..... ۱۵۳
- شکل ۵-۸: جریان مرجع روی محور q و جریان اندازه گیری روی محور Q موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی پله..... ۱۵۳

- شکل ۵-۹: جریان مرجع روی محور d و جریان اندازه گیری روی محور d موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی پله... ۱۵۴
- شکل ۵-۱۰: پاسخ سیستم درایو دینامومتر به ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$ و خطای ردیابی سرعت..... ۱۵۴
- شکل ۵-۱۱: موقعیت تخمینی شار رتور، سرعت رتور و جریان فاز a استاتور موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$ ۱۵۴
- شکل ۵-۱۲: جریان مرجع روی محور q و جریان اندازه گیری روی محور q موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$ ۱۵۵
- شکل ۵-۱۳: جریان مرجع روی محور d و جریان اندازه گیری روی محور d موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$ ۱۵۵
- شکل ۵-۱۴: سرعت رتور و گشتاور موتور در پاسخ به ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$ ۱۵۵
- شکل ۵-۱۵: شار رتور (λ_r) و سرعت لغزش (wsl) موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$ ۱۵۶
- شکل ۵-۱۶: ولتاژهای مرجع $vde * vqe$ ، روی محورهای d, q اعمالی به موتور دینامومتر به ازای ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$ ۱۵۶
- شکل ۵-۱۷: پاسخ سیستم درایو دینامومتر به ورودی مرجع مربعی $\pm 800 \text{ rpm}$: سرعت مرجع، سرعت رتور و خطای ردیابی سذغت (الف) موقعیت تخمینی شار رتور، جریان استاتور و سرعت (ب) جریان مرجع و جریان اندازه گیری شده روی محور q (ب) سرعت و گشتاور تولیدی موتور (ج) سرعت رتور و لغزش رتور (ه) ولتاژهای روی محور d, q ۱۵۷
- شکل ۵-۱۸: پاسخ سیستم درایو دینامومتر به ورودی مرجع مثلثی $\pm 800 \text{ rpm}$ و خطای ردیابی سرعت..... ۱۵۸
- شکل ۵-۱۹: جریانهای مرجع و اندازه گیری شده روی محورهای d (الف) و جریانهای مرجع و اندازه گیری شده روی محورهای d (ب) ورودی مرجع مثلثی $\pm 800 \text{ rpm}$ ۱۵۸
- شکل ۵-۲۰: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$ و فرکانس 0.05Hz ۱۵۹
- شکل ۵-۲۱: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$ و فرکانس 0.1Hz ۱۵۹
- شکل ۵-۲۲: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$ و فرکانس 0.25Hz ۱۵۹
- شکل ۵-۲۳: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$ و فرکانس 0.55Hz ۱۶۰
- شکل ۵-۲۴: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$ و فرکانس 0.65Hz ۱۶۰
- شکل ۵-۲۵: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$ و فرکانس 0.75Hz ۱۶۰
- شکل ۵-۲۶: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پالسی با $\pm 3\text{N.m}$ ۱۶۱
- شکل ۵-۲۷: گشتاور تولیدی موتور دینامومتر و پاسخ سرعت سیستم درایو به ازای گشتاور مرجع پالسی با $\pm 3\text{N.m}$ ۱۶۱
- شکل ۵-۲۸: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 1Hz ۱۶۲
- شکل ۵-۲۹: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 5Hz ۱۶۲

- شکل ۳۰-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 10Hz..... ۱۶۳
- شکل ۳۱-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 20Hz..... ۱۶۳
- شکل ۳۲-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 30Hz..... ۱۶۳
- شکل ۳۳-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 40Hz..... ۱۶۴
- شکل ۳۴-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 50Hz..... ۱۶۴
- شکل ۳۵-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پله با $\pm 3N.m$ و 4Hz و گشتاور ثابت 2N.m..... ۱۶۴
- شکل ۳۶-۵: اینرسی سیستم دینامومتر و موتور تحت تست..... ۱۶۵
- شکل ۳۷-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پله $\pm 3N.m$ و اینرسی $J_{demand} = J_{dynamo}$ ۱۶۶
- شکل ۳۸-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پله $\pm 3N.m$ و اینرسی $J_{demand} = 2 * J_{dynamo}$ ۱۶۶
- شکل ۳۹-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پله $\pm 3N.m$ و اینرسی $J_{demand} = 4 * J_{dynamo}$ ۱۶۶
- شکل ۴۰-۵: دیاگرام کلی سیستم دینامومتر مبتنی بر روش ردیابی گشتاور مرجع..... ۱۶۸
- شکل ۴۱-۵: موتور و درایو تحت تست..... ۱۶۹
- شکل ۴۲-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز به ازای گشتاور بار پله ایی با مقدار پیک $4N.m$ ۱۷۰
- شکل ۴۳-۵: کنترل هیستریزس ولتاژ شین DC با استفاده از ترمز دینامیکی (D.B)..... ۱۷۰
- شکل ۴۴-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز به ازای گشتاور بار پله ایی با مقدار پیک $9N.m$ ۱۷۰
- شکل ۴۵-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز به ازای گشتاور بار پله ایی با مقدار پیک $12N.m$ ۱۷۱
- شکل ۴۶-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار پله ایی قابل برنامه ریزی $\pm 12N.m$ ۱۷۱
- شکل ۴۷-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان استاتور موتور تحت تست به ازای گشتاور بار شیب قابل برنامه ریزی $\pm 12N.m$ ۱۷۱
- شکل ۴۸-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار پله ایی $\pm 12N.m$ و اینرسی $J_{demand} = 0.5 * J_{dynamo}$ ۱۷۲
- شکل ۴۹-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار پله ایی $\pm 12N.m$ و اینرسی $J_{demand} = 0.5 * J_{dynamo}$ ۱۷۲
- شکل ۵۰-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز بار پله ایی $\pm 9N.m$ و اینرسی $J_{demand} = 0.5 * J_{dynamo}$ ۱۷۳
- شکل ۵۱-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار اصطکاکی و اینرسی $J_{demand} = 0.5 * J_{dynamo}$ ۱۷۴

- شکل ۵۲-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز Break ، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار اصطکاکی و اینرسی $J=50*J_0$ ۱۷۴
- شکل ۵۳-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز Break ، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار فن..... ۱۷۵
- شکل ۵۴-۵: مدل مکانیکی نا هم محوری..... ۱۷۶
- شکل ۵۵-۵: محاسبات مولفه های گشتاور بار ناشی از عدم هم محوری در DSP..... ۱۷۶
- شکل ۵۶-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز ، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار عدم هم محوری به ازای پارامترهای $\beta = 25^\circ$ و $\theta l = 10^\circ$ ۱۷۷
- شکل ۵۷-۵: تاثیر تاثیر نوسانات گشتاور بار در حالت گذرا و دائم. سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای پارامترهای $\beta = 0^\circ$ و $\theta l = 0^\circ$ (الف) و $\beta = 25^\circ$ و $\theta l = 10^\circ$ (ب)..... ۱۷۷
- شکل ۵۸-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار عدم هم محوری به ازای پارامترهای $\beta = 45^\circ$ و $\theta l = 15^\circ$ ۱۷۸
- شکل ۵۹-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای به ازای گشتاور بار عدم هم محوری به ازای پارامترهای $\beta = 60^\circ$ و $\theta l = 15^\circ$ ۱۷۸
- شکل ۶۰-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز ، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار عدم هم محوری به ازای پارامترهای $\beta = 25^\circ$ و $\theta l = 10^\circ$ با تغییر سرعت موتور تحت تست ۱۷۹
- شکل ۶۱-۵: شماتیک مکانیزم بادامک..... ۱۷۹
- شکل ۶۲-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک با پارامترهای $dc=0.03m, kf=1500, mc=4, pn=4n.m$ ۱۸۰
- شکل ۶۳-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک با پارامترهای $dc=0.03m, kf=1500, mc=4, pn=4n.m$ سرعت 600rpm (الف) و 1000rpm (ب)..... ۱۸۱
- شکل ۶۴-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک $dc=0.03m, kf=1500, mc=4, pn=4n.m$ برای حالت شیب..... ۱۸۱
- شکل ۶۵-۵: گشتاور تولیدی دینامومتر و طیف فرکانسی آن به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک به ازای $dc=0.03m$ $kf=1500, mc=4, pn=4n.m$ برای سرعت های 200rpm (الف) ، 300rpm (الف) و 450rpm (الف)..... ۱۸۲
- شکل ۶۶-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز Break ، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک با پارامترهای $dc=0.03, kf=1500, mc=4, p=6n.m$ ۱۸۲
- شکل ۶۷-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز Break ، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار cam mechanism به ازای پارامترهای $dc=0.03, kf=1500, mc=4, p=8n.m$ ۱۸۳
- شکل ۶۸-۵: کسر سرعت موتور تحت تست و گشتاور تولیدی دینامومتر برای مکانیزم بادامک به ازای پارامترهای $dc=0.03, kf=1500, mc=4, p=8n.m$ تحت تاثیر تغییر سرعت موتور تحت تست..... ۱۸۴
- شکل ۶۹-۵: نمایش هندسی مکانیزم میل لنگ..... ۱۸۴

- شکل ۷۰-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار میل لنگ به ازای پارامترهای $fn=100$ ۱۸۵
- شکل ۷۱-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار میل لنگ به ازای پارامترهای $fn=100$ و تغییر سرعت..... ۱۸۶
- شکل ۱-۶: ساختار کلی میز تست و ارتباط آن با نرم افزار Labview..... ۱۸۸
- شکل ۲-۶: فرم تنظیمات و مقدار دهی اولیه در محیط نرم افزار Labview..... ۱۸۹
- شکل ۳-۶: محیط نرم افزار مقدار دهی اولیه و تنظیمات سیستم دینامومتری..... ۱۹۰
- شکل ۴-۶: فرم تنظیمات و مقدار دهی اولیه در محیط نرم افزار Labview..... ۱۹۱
- شکل ۵-۶: فرم محاسبه توان در محیط نرم افزار Labview..... ۱۹۲
- شکل ۶-۶: پنجره تحلیل هارمونیک موتور تحت تست در محیط نرم افزار Labview..... ۱۹۳
- شکل ۷-۶: دیاگرام کلی ست آپ طراحی شده با استفاده از بار ژنراتوری..... ۱۹۴
- شکل ۸-۶: پیاده سازی سیستم آزمایشگاهی برگذاری روی موتور تحت تست با استفاده از بار ژنراتوری..... ۱۹۴
- شکل ۹-۶: مقاومت های سوئیچ شونده..... ۱۹۵
- شکل ۱-۷: المان ها و زیر بخشهای تعیین کننده در دقت دستگاه..... ۲۰۲
- شکل ۲-۷: سنسور گشتاور سنج دینامیکی RT2A..... ۲۰۳
- شکل ۳-۷: کالیبراسیون سنسور گشتاور با استفاده از ATCplus..... ۲۰۴
- شکل ۴-۷: کوپلینگ حلزونی مورد استفاده در سنسور گشتاور نحوه اتصال سنسور گشتاور بین موتور تحت تست و موتور دینامومتر ([1]) (الف) کوپلینگ پیاده سازی شده در نمونه آزمایشگاهی (ب)..... ۲۰۶
- شکل ۵-۷: کالیبراسیون ولتاژ و جریان با استفاده از مولتی متر کالیبره شده PC520M..... ۲۰۸
- شکل ۶-۷: کد DSP به منظور کالیبراسیون و افست گیری سنسورهای ولتاژ و جریان..... ۲۰۹
- شکل ۷-۷: کالیبراسیون انکودر سرعت با استفاده از سرعت سنج استروسکوپ TESTO475..... ۲۱۰
- شکل ۸-۷: بازیابی نتایج با استفاده از آنالیزور توان HIOKI1396..... ۲۱۰
- شکل ۹-۷: اندازه گیری خروجی تست با استفاده از دستگاه اسیلوسکوپ GPS11048..... ۲۱۱
- شکل ۱-۹: تاییدیه استاندارد EN 61326-1(2013) و EN 61010-1(2013) کالای سنسور گشتاور RT2A..... ۲۱۸
- شکل ۲-۹: تاییدیه کالیبراسیون سنسور گشتاور در جهت ساعتگرد و پاد ساعتگرد سنسور RT2A..... ۲۱۹
- شکل ۳-۹: تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر دیجیتال PC520M..... ۲۲۰
- شکل ۴-۹: تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر دیجیتال PC520M..... ۲۲۱
- شکل ۵-۹: تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر دیجیتال PC520M..... ۲۲۲
- شکل ۶-۹: تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر دیجیتال PC520M..... ۲۲۳
- شکل ۷-۹: تاییدیه کالیبراسیون سرعت سنج استروسکوپ مدل TESTO475..... ۲۲۴
- شکل ۸-۹: تاییدیه کالیبراسیون سرعت سنج استروسکوپ مدل TESTO475..... ۲۲۵
- شکل ۹-۹: تاییدیه کالیبراسیون دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396..... ۲۲۶
- شکل ۱۰-۹: تاییدیه کالیبراسیون دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396..... ۲۲۷
- شکل ۱۱-۹: تاییدیه کالیبراسیون دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396..... ۲۲۸

- شکل ۹-۱۲: تاییدیه کالیبراسیون دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396..... ۲۲۹
- شکل ۹-۱۳: تاییدیه کالیبراسیون سرعت سنج استروسکوپ مدل GPS11048..... ۲۳۰

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱: مقایسه انواع دینامومترهای صنعتی.....	۸
جدول ۱-۲: مقایسه سیستم کنترل تطبیقی با سیستم کنترل فیدبک معمولی.....	۳۴
جدول ۱-۳: تنظیمات کنترل کننده سیستم دینامومتر.....	۴۱
جدول ۲-۱: مشخصات موتور القایی.....	۴۸
جدول ۲-۲: پارامترهای تقریبی موتور القایی.....	۴۹
جدول ۲-۳: خطاها و روش حفاظت از آن ها در سیستم دینامومتر.....	۵۰
جدول ۲-۴: دیاگرام زمانی حفاظت اضافه دمای بدنه مازول IPM.....	۵۸
جدول ۲-۵: شرایط الکتریکی و مکانیکی سلف.....	۶۵
جدول ۲-۶: مشخصات هیت سینک P 3.....	۷۲
جدول ۲-۷: مشخصات فن های SKF.....	۷۲
جدول ۲-۸: شرایط الکتریکی اینورتر.....	۷۳
جدول ۲-۹: نتایج تحلیل حرارتی و تلفات مازول 7MBP75RA120.....	۷۴
جدول ۲-۱۰: شرایط الکتریکی یکسوساز.....	۷۴
جدول ۲-۱۱: ابعاد عناصر پسیو.....	۷۹
جدول ۲-۱۲: ابعاد مقاومت RB100.....	۸۰
جدول ۲-۱۳: ابعاد بردهای الکترونیکی.....	۸۱
جدول ۳-۱: مشخصات سنسور جریان LA55-P.....	۸۷
جدول ۳-۲: مشخصات سنسور اثر هال ولتاژ LV25P.....	۸۸
جدول ۳-۳: لیست BOM برد سنسور ولتاژ و جریان باس DC.....	۹۲
جدول ۳-۴: مشخصات فنی انکودر افزایشی.....	۱۰۰
جدول ۳-۵: لیست اول BOM برد DSP.....	۱۰۳
جدول ۳-۶: لیست دوم BOM برد DSP.....	۱۰۴
جدول ۳-۷: لیست BOM برد حفاظت و مدیریت دمل.....	۱۰۸
جدول ۳-۸: سیگنال های اندازه گیری شده میز تست.....	۱۱۳
جدول ۳-۹: مدهای اندازه گیری و کدهای متناظر.....	۱۱۴

جدول ۱۰-۳: مدهای اندازه گیری و سیگنالهای متناظر با هر یک از ورودیهای آنالوگ کارت I/O.....	۱۱۴
جدول ۱۱-۳: مدهای اندازه گیری و سیگنالهای متناظر با هر یک از ورودیهای آنالوگ کارت I/O.....	۱۱۵
جدول ۱-۴: مقایسه پردازشگرهای دیجیتال ۳۲ بیتی مورد کاربرد در دستگاه دینامومتر.....	۱۲۱
جدول ۲-۴: پارامترهای فیلتر سمت شبکه.....	۱۳۱
جدول ۱-۵: سناریوهای شبیه سازی ردیابی سرعت.....	۱۵۱
جدول ۲-۵: سناریوهای شبیه سازی ردیابی سرعت.....	۱۶۱
جدول ۳-۵: مشخصات موتور تحت تست.....	۱۶۷
جدول ۴-۵: سناریوهای شبیه سازی تست دینامومتری.....	۱۶۹
جدول ۵-۵: پارامترهای گشتاور بار نوع میل لنگ.....	۱۸۴
جدول ۱-۶: لیست پارامترهای ورودی کارت I/O.....	۱۸۹
جدول ۱-۷: مشخصات سنسور گشتاور دینامیکی RT2A.....	۲۰۳
جدول ۲-۷: محیط نرم افزار TorqueKAL جهت کالیبراسیون سنسور گشتاور.....	۲۰۵
جدول ۳-۷: کالیبراسیون و حذف افست سنسور گشتاور در DSP.....	۲۰۷
جدول ۴-۷: مشخصات اندازه گیری و دقت سنسور ولتاژ LV25.....	۲۰۷
جدول ۵-۷: مشخصات اندازه گیری و دقت سنسور جریان LA55.....	۲۰۸
جدول ۱-۹: پارامترهای موتور.....	۲۱۶
جدول ۲-۹: پارامترهای بازوی مکانیکی دو حلقه ای.....	۲۱۶
جدول ۳-۹: پارامترهای مکانیزم بادامکی.....	۲۱۶
جدول ۴-۹: پارامترهای مکانیزم میل لنگ.....	۲۱۷

چکیده

هدف از طراحی و ساخت سیستم دینامومتر پیاده سازی یک مجموعه نرم افزاری- سخت افزاری جهت بارگذاری پروفایل های مختلف گشتاور بارهای صنعتی می باشد. یک سیستم دینامومتری پیشرفته باید قابلیت شبیه سازی مشخصه های استاتیکی و دینامیکی بارهای صنعتی را دارا باشد. بر همین اساس در این پروژه یک سیستم دینامومتری از نوع ac موتور مبتنی بر موتور القایی طراحی و پیاده سازی گردید. گزارش ارائه شده بطور عمده به مراحل ساخت و انجام سناریو های مختلف تست دستگاه می پردازد.

در فصل چهارم این گزارش به مراحل ساخت مازول های سخت افزاری و اجزاء ساخته شده سیستم دینامومتری می پردازد. در این بخش نحوه پیاده سازی عملی میدل های الکترونیک قدرت و مدارات فرمان، بردهای الکترونیک و DSP، مدارات تغذیه، سیستم خنک سازی، تابلو دستگاه و فیلتر ورودی پرداخته می شود.

پس از ساخت زیر بخشهای سخت افزاری دستگاه، در فصل پنجم تستهای عملکردی با هدف ارزیابی عملکرد سیستم کنترل دینامومتر انجام شده است. برای این منظور سناریو های مختلفی طراحی و مورد آزمون قرار گرفت. عملکرد سیستم درایو در مد کنترل سرعت و گشتاور، تست دینامومتری به ازای مشخصه های متداول پروفایل بارهای صنعتی، تست دینامومتری مشخصه دینامیکی بارهای صنعتی، بارهای غیر خطی از جمله این سناریو ها بوده است. بررسی و آنالیز نتایج بدست آمده از تست های آزمایشگاهی عملکرد سیستم دینامومتر را تایید می کند.

در فصل ششم محیط نرم افزار پیاده سازی شده در محیط Labview ارائه می شود. از جمله قابلیت های این نرم افزار تحلیل حوزه زمان، آنالیز توان موتور تحت تست، تحلیل هارمونیک می باشد.

در فصل هفتم با هدف کالیبراسیون دستگاه ابتدا المان های تاثیر گذار بر دقت و عدم قطعیت دستگاه معرفی و پارامترهای تاثیر گذار بر دقت این المان ها تشریح می گردد. در ادامه مراحل کالیبراسیون سنسورهای ولتاژ، جریان، گشتاور و سرعت مورد آنالیز قرار گرفته است. در مرحله پایانی کالیبراسیون دستگاه با استفاده از تجهیزات تست کالیبره شده مرجع انجام گردیده است.

فصل ۱- معرفی سیستم دینامومتر، طراحی و شبیه سازی سیستم کنترلی

۱-۱- مقدمه

وظیفه اصلی یک سیستم دینامومتر مدسازی دقیق و شبیه سازی پروفایل بارهای مکانیکی صنعتی می باشد. در ابتدا این فصل به توصیف ساختار کلی دینامومتر و اجزاء تشکیل دهنده پرداخته خواهد شد. بارهای های صنعتی را از لحاظ رفتار دینامیکی می توان به دو دسته مرسوم و پیچیده غیرخطی تقسیم بندی نمود. ویژگی های بارهای مرسوم صنعتی با روابط ریاضی گشتاور و سرعت آن ها را می توان در متون مختلف درایوهای الکتریکی جستجو کرد. اما تاکنون دسته بندی مناسب و جامعی در مورد انواع بارهایی که رفتار پیچیده و غیر خطی دارند انجام نشده است. بنابراین در ادامه این فصل به مطالعه انواع بارهای غیرخطی با توصیف رفتار گشتاور بار به وسیله روابط ریاضی پرداخته شده است. همچنین به وسیله شبیه سازی تاثیر انواع بارهای غیر خطی روی دینامیک گشتاور و سرعت نشان داده خواهند شد. پس از بررسی انواع بارهای صنعتی غیرخطی نیاز است که به کنترل کننده مناسب در سیستم درایو دینامومتر در نظر گرفته شود که دارای پویای دینامیکی سریع و مناسبی باشد. کنترل درایو به روش کلاسیک جهت یابی میدان انجام شده است. در این روش ولتاژ مرجع مدولاتور اینورتر خروجی به وسیله کنترل کننده های سرعت و شار به دست می آید. در روش های مرسوم درایو به روش جهت یابی میدان یک کنترل کننده PI برای تنظیم سرعت در نظر گرفته می شود. به منظور بهبود پاسخ دینامیکی سیستم درایو دینامومتر در انتها این فصل پیشنهاد شده است که به جای کنترل کننده PI از کنترل کننده تطبیقی برای تنظیم سرعت استفاده شود. به وسیله نتایج شبیه سازی نشان داده خواهد شد که برای شبیه سازی رفتار بارهای مختلف کنترل کننده تطبیقی پاسخ دینامیکی سریع تر و مناسب تر دارد.

۱-۲- معرفی اجزاء میز تست ماشین های الکتریکی

اجزاء تشکیل دهنده سیستم دینامومتر شامل سیستم کنترل انرژی (مبدل قدرت)، موتور بارگذاری، سیستم انتقال قدرت (کوپلینگ) و موتور تحت تست می باشند. سه مؤلفه اول مجموعاً سیستم محرکه یا درایو نامیده می شوند، اگر چه مرسوم است که کلمه درایو فقط به سیستم کنترل انرژی الکتریکی اطلاق شود. سیستم محرکه انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می کند که سپس موتور بارگذاری این انرژی مکانیکی را روی موتور تحت تست اعمال می کند. امروزه با پیشرفت هایی که در زمینه الکترونیک قدرت و سیستم های کنترل صورت گرفته است، محرکه های الکتریکی با سرعت قابل تنظیم در بسیاری از کاربردها و کنترل حرکت در دسترس اند. وظیفه اصلی یک محرکه الکتریکی تبدیل قدرت الکتریکی به مکانیکی به نحو مطلوب و کنترل شده است [۱] و [۲].

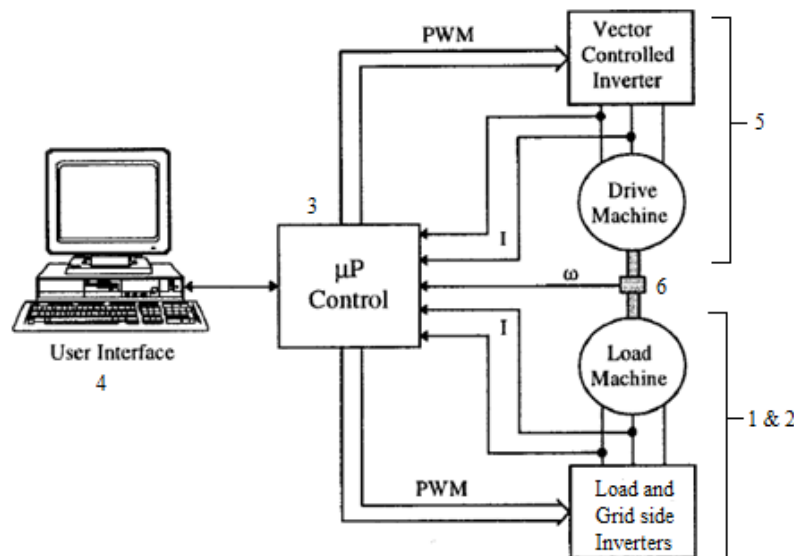
به منظور اعمال بارهای مختلف روی موتور تحت تست توسط سیستم دینامومتر، سیستم کنترل انرژی باید بتواند هم انرژی به موتور تحت تست بدهد و هم از آن انرژی دریافت کند. یک مبدل قدرت مرسوم که این قابلیت را دارا می باشد مبدل (BTB)^۱ است. این مبدل از دو اینورتر تشکیل شده که به صورت پشت به پشت از طریق یک لینک DC خازنی بهم متصل شده اند. یکی از اینورترها به موتور بارگذاری وصل می شود و گشتاور و سرعت موتور را تحت کنترل قرار می دهد. اینورتر دیگر از طریق یک فیلتر به منبع ولتاژ سه فاز متصل می گردد تا توان را با با ضریب قدرت واحد از شبکه دریافت کند یا به شبکه تحویل دهد [۳].

برای تست ماشین های الکتریکی استفاده از دینامومترهای بار کنترل شده توسط گشتاور امری معمول است. در این کاربردها، موتور یا دستگاه الکتریکی به طور معمول تحت شرایط پایدار و یا تغییرات آرام مورد آزمایش قرار می گیرد. در

¹ Back to Back

بسیاری از تحقیقات انجام شده برای برخورداری از دینامیک سریع تر، شبیه سازی بار در حلقه کنترل سرعت یا موقعیت قرار نگرفته است و به صورت حلقه باز کنترل می‌شود. برای ارزیابی مناسب تر کنترل کننده های درایو موتور شبیه سازی دینامیک بار باید تحت شرایط حلقه بسته انجام شود [۴].

در شکل ۱-۱ ساختار کلی یک سیستم دینامومتر را نشان داده شده است. به طور کلی سیستم دینامومتر شامل بخش‌های زیر است:



شکل ۱-۱: ساختار کلی دینامومتر

- ۱- مولد بار (یا دینامومتر) و مدارات درایو و سیستم کنترلی آن
- ۲- اینورتر متصل به شبکه و مدارات درایو و سیستم کنترلی آن
- ۳- سنسورها، مدارات واسط، سیستم اکتساب داده
- ۴- محیط نرم افزاری به منظور کنترل و تنظیم پارامترهای سیستم دینامومتر و مانیتورینگ کمیتهای تست
- ۵- موتور و درایو تحت تست
- ۶- سازه مکانیکی قابل تنظیم جهت کوپل موتورهای با فریم مختلف به دینامومتر

در یک سیستم دینامومتر، تولید بار برای ماشین تحت تست توسط مولد بار یا دینامومتر انجام می‌شود. دینامومتر باید بتواند گشتاور بار مورد نیاز کاربر را در شرایط استاتیکی و دینامیکی برای موتور تحت تست تولید کند. علاوه بر بخش مولد بار، یک سیستم اندازه گیری الکترونیکی دقیق با استفاده از کارتهای I/O با نرخ نمونه برداری بالا امکان پایش لحظه ایی کلیه کمیتهای تست در یک محیط GUI را فراهم می‌نماید. مسئله مهم دیگر در سیستم دینامومتر اتصال درایو بخش دینامومتر به شبکه با استفاده از یک میدل است که قابلیت بازگشت توان از دینامومتر به شبکه در شرایط بار ترمزی یا ژنراتوری برای موتور را فراهم می‌کند. از ویژگیهای مهم یک سیستم دینامومتر مطلوب عبارتند از:

- ۱- محدوده وسیع از تغییرات سرعت و گشتاور ماشین با قابلیت برنامه ریزی سناریو های بار
- ۲- توانایی تست ماشین در هر ۴ ناحیه کاری مشخصه گشتاور- سرعت
- ۳- توانایی بازگشت توان به شبکه

- ۴- سرعت نمونه گیری مناسب بردهای الکترونیک به منظور تحلیل دقیق تر حالت‌های گذرا و رفتار دینامیکی ماشین
 - ۵- قابلیت تست ساختارهای کنترلی مختلف درایو تحت تست
 - ۶- انعطاف پذیری سیستم دینامومتر بطوریکه امکان تست موتورهای مختلف با فریم های دلخواه با حداقل تغییرات در ساختار سیستم دینامومتر قابل اجرا باشد.
 - ۷- قابلیت اطمینان و استحکام و پایداری تجهیزات اندازه گیری در محیط کاری و حفاظت مکانیکی و الکتریکی سیستم دینامومتر
 - ۸- قابلیت اتصال به تجهیزات جانبی اندازه گیری مانند آنالایزر توان و ...
 - ۹- قابلیت ذخیره سازی داده و نتایج تست به منظور انجام پردازش بیشتر و امکان تهیه گزارش از نتایج تست طرح پیشنهادی طراحی و ساخت سیستم دینامومتر با هدف تست و آنالیز عملکرد موتورهای الکتریکی و سیستم درایو آنها در محدوده توان زیر ۱۰ KW ارایه می گردد.
 - از جمله قابلیت‌های این دستگاه عبارتند از:
 - ۱- اندازه گیری و نمایش همزمان کمیتهای الکتریکی شامل ولتاژ و جریان سمت منبع، ولتاژ و جریان شین DC، ولتاژ و جریان موتور و آنالیز در حوزه زمان و فرکانس (تحلیل هارمونیک)
 - ۲- اندازه گیری گشتاور و سرعت موتور و آنالیز در حوزه زمان و فرکانس
 - ۳- قابلیت محاسبه توان تلفاتی در هریک از بخشهای اینورتر سمت شبکه، اینورتر سمت دینامومتر، موتور و تعیین راندمان هر یک از بخشهای سیستم
 - ۴- اندازه گیری دمای نقاط دلخواه موتور و حفاظت حرارتی میز تست
 - ۵- محیط GUI با استفاده از نرم افزار Labview با هدف پایش لحظه‌ای کمیت‌های تست، پردازش سیگنال‌های تست، ذخیره و بازیابی نتایج تست و تهیه گزارش.
 - ۶- قابلیت پیاده سازی و تست روشهای درایو با استفاده از پردازشگر DSP و مازول اینورتر سمت شبکه و اینورتر سمت دینامومتر
 - ۷- محاسبه kwh مصرفی سیستم درایو به منظور ارزیابی اقتصادی سیستم درایو تحت تست
 - ۸- قابلیت پیاده سازی رویتگر شار و گشتاور و تکنیکهای تخمین گر سرعت
- ۱-۲-۱- انواع روشهای دینامومتری

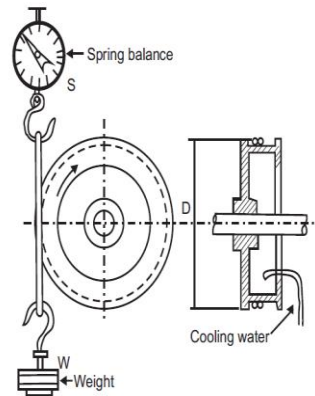
مقدمه

دستگاه دینامومتر یک تجهیز آزمایشگاهی جهت اندازه گیری نیرو، گشتاور و توان ترمز مورد نیاز تست ماشین های الکتریکی و سیستم درایو بوده است. در اغلب دینامومترها توان جذب شده تبدیل به حرارت می شود. توان تولیدی می تواند از یک محرکه الکتریکی یا یک ماشین درونسوز تولید گردد. با اندازه گیری همزمان گشتاور و سرعت دورانی، توان سیستم درایو اندازه گیری می گردد. دینامومتر در برخی کاربردها (مانند پمپ ها) در حالت موتوری کار می کند که در این حالت به آن دینامومتر پسو می گویند. در برخی کاربردها (مانند خودروهای برقی) ملزم به تست سیستم موتور - درایو در حالت ژنراتوری می باشد. برای این منظور دینامومتر مورد استفاده باید قادر باشد تا علاوه بر حالت موتوری حالت ژنراتوری را نیز پشتیبانی کند

. انواع مختلف سیستم دینامومتری برای کاربردهای مختلف ارائه گردیده است که در ادامه این فصل به آن پرداخته خواهد شد.

۱-۲-۲- دینامومتر ترمز ریسمان^۲

دینامومتر ترمز ریسمان که در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است یک دستگاه برای اندازه گیری قدرت ترمز یک موتور است. این دینامومتر متشکل از تعدادی ریسمان است که به دور یک استوانه چرخان متصل به شفت خروجی وصل شده اند. یک طرف ریسمان متصل به یک فنر تعادل است و طرف دیگر به یک دستگاه بارگذاری اتصال دارد. توان ترمز در این دینامومتر تبدیل به حرارت می گردد.



شکل ۱-۲: دینامومتر ریسمان ترمزی

با توجه به **Error! Reference source not found.** گشتاور ترمز در این نوع دینامومتر بر اساس رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$P_{brake}(b_p) = \pi DN(W - S) \quad (1-1)$$

این نوع دینامومتر ارزان و ساخت آن ساده می باشد ولی امکان اندازه گیری دقیق توان ترمز به دلیل وابستگی ضریب اصطکاک به دما دقیق نمی باشد.

۱-۲-۳- دینامومتر ترمز اسب^۳

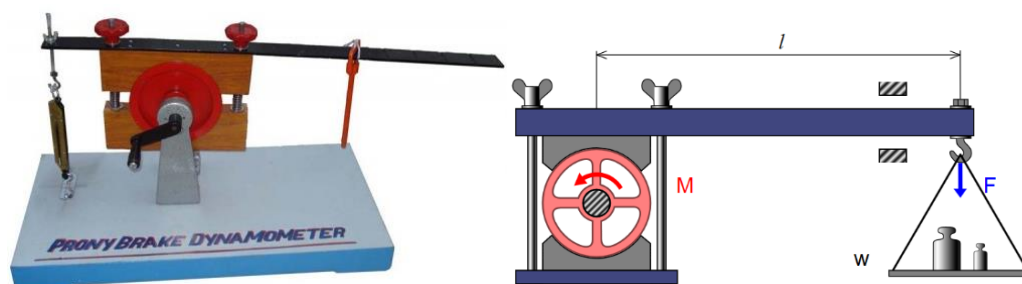
دینامومتر ترمز اسب یکی از ساده ترین دینامومترها برای اندازه گیری قدرت ترمز خروجی است (**Error! Reference source not found.**). همانگونه که در **Error! Reference source not found.** نمایش داده شده است اجزاء این نوع دینامومتر متشکل از بلوک چوبی، فریم، طناب، کشک ترمز و فلایویل می باشد. اساس کار این نوع دینامومتر مبتنی بر تبدیل توان به حرارت بر اساس اصطکاک خشک می باشد. فنرهای پیچ و مهره شده با هدف افزایش تماس بیشتر بلوک های چوبی و افزایش اصطکاک استفاده شده اند. از آنجایی که کل توان جذب شده در این نوع دینامومتر تبدیل به حرارت می شود، استفاده از یک سیستم خنک ساز الزامی می باشد. مطابق شکل ۱-۵ توان ترمز در این نوع دینامومتر بر اساس رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$P_{brake}(b_p) = 2\pi NT$$

$$T = (W) \times (l) \quad (2-1)$$

² Rope brake dynamometer

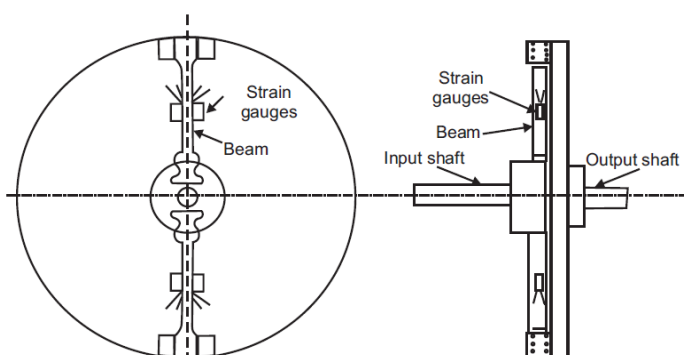
³ Prony Brake Dynamometer



شکل ۳-۱: دینامومتر ترمز اسب

۴-۲-۱- دینامومتر جذب^۴

دینامومتر جذب به گشتاور متر معروف است. این دینامومترها اکثرا متشکل از یک فشارسنج ثابت شده روی یک محور چرخان هستند. گشتاور به وسیله تغییر شکل زاویه ای محوری که روی آن فشار سنج است اندازه گیری می شود. در **Error!** **Reference source not found.** شماتیک دینامومتر جذب نشان داده است.



شکل ۴-۱: دینامومتر جذب

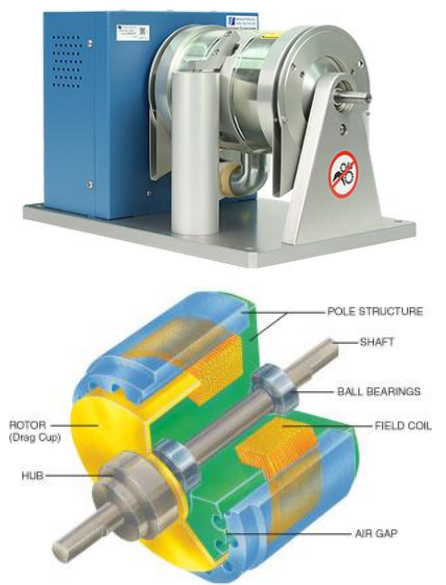
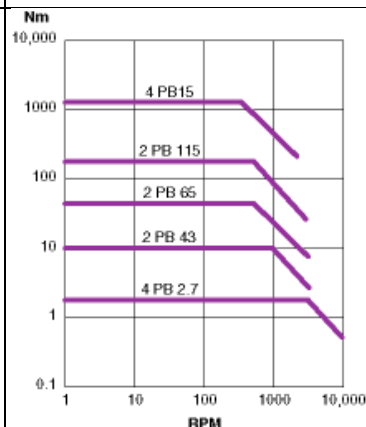
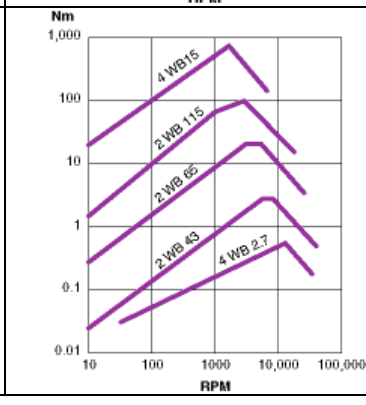
در اغلب موارد از یک مجموعه از سنسور های اندازه گیری فشار^۵ که روی شفت دوار نصب می گردد. در این روش گشتاور بر اساس خمیدگی زاویه ای محور موتور اندازه گیری می شود. عموما به منظور کاهش اثرات حرارتی چهار بازو مجهز به گیج استفاده می گردد. به منظور حذف بارگذاری های محوری چینش زوج های سنسورها از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. این روش اندازه گیری گشتاور دارای دقت بالایی می باشد.

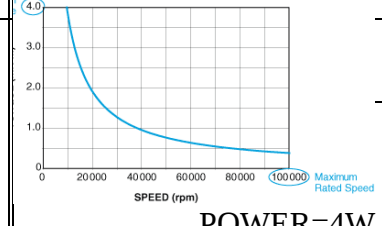
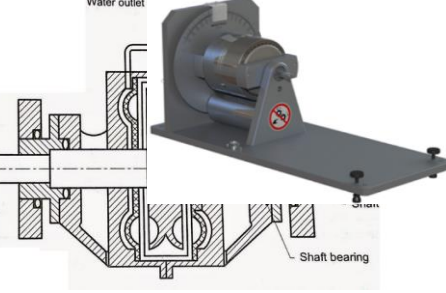
با وجود دینامومترهای کلاسیک ارائه شده در بخش فوق، تست های پیشرفته موتورهای الکتریکی نیازمند طراحی و ساخت دینامومترهای پیشرفته با قابلیت مدلسازی محدوده وسیعی از بار های صنعتی می باشد. علاوه بر این استفاده از یک سیستم اکتساب داده و نرم افزار پردازش سیگنال از الزامات اصلی یک میز تست پیشرفته می باشد. بر همین اساس در چند سال اخیر نسل جدیدی از انواع دینامومتر های صنعتی در محدوده وسیعی از سرعت، گشتاور و توان ارائه گردیده است. مشخصات فنی انواع دینامومترهای نسل جدید در جدول ۱-۱ آورده شده است. اصول عملکرد، محدوده سرعت، محدوده گشتاور و توان، دقت و موارد کاربرد هر یک از انواع دینامومترها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

⁴ Absorption Dynamometers

⁵ strain-gauges

جدول ۱-۱: مقایسه انواع دینامومترهای صنعتی

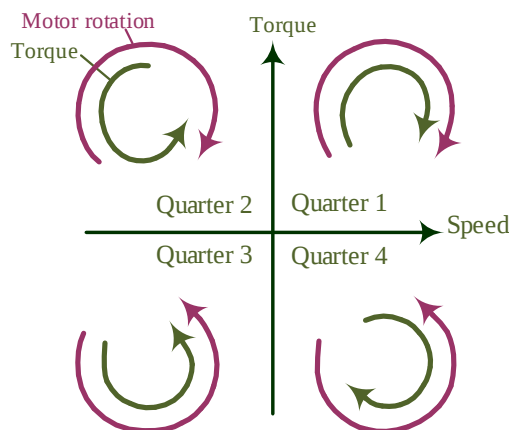
نوع دینامومتر	اصول عملکرد	شکل	محدوده گشتاور-سرعت و توان	کاربردها	دقت
Hyster esis Braking System	- یک گشتاور ترمزی مسطح مستقل از سرعت با استفاده از یک ترمز هیستریزیس منحصر بفرد فراهم می‌آورد. این دینامومتر متشکل از دو بخش می‌باشد که یک ساختار قطب مشبک و اسمبلی خاص دارد. رتور و شفت هیچ گونه تماس مکانیکی با یکدیگر ندارند. قبل از انرژی دار کردن قطب‌ها drag cup آزادانه حول شفت می‌چرخد. با انرژی دار شدن قطب‌ها یک میدان مغناطیسی در فاصله هوایی شکل می‌گیرد و رتور بواسطه نیروی الکترومغناطیسی ترمز می‌کند و بدین ترتیب یک ترمز بین قطب‌ها و رتور ایجاد می‌گردد. - خنک سازی با روش همرفت اجباری انجام می‌شود.		7-12000 W-continuos 35-14000 w-5 minutes 8000-30000 RPM 0.018-56.5 N.m	- مناسب برای تست در محدوده توان پایین تا متوسط. - امکان تست در محدوده سرعت صفر تا سرعت نامی با حداکثر گشتاور (مستقل از سرعت) - برای کاربردهای سرعت پایین و سرعت متوسط یا برای کاربردهای گشتاور متوسط تا گشتاور خیلی بالا - انواع موتورهای الکتریکی، هیدرولیک، درونسوز و.. - تست انواع پمپها - تست خودرو و سایر محرک	0.2 5% to $\pm$ 0.5% (Full Scale)
Powder r Brake Dynamometers (PB Series)	- جریان الکتریکی عبوری از کوئل‌ها یک میدان مغناطیسی تولید می‌کند که مشخصات پودر را تغییر می‌دهد - گشتاور ترمزی مسطح در سرتهای پایین - امکان تولید گشتاور ترمزی نامی در سرعت صفر - خنک ساز آبی			- برای کاربردهای سرعت پایین و سرعت متوسط یا برای کاربردهای گشتاور متوسط تا گشتاور خیلی بالا - تست‌های کارایی و قابلیت اطمینان موتورهای الکتریکی - سیستم‌های هیدرولیک، موتورهای درونسوز، تست انواع پمپها، تست خودرو و سایر محرک‌ها - سروو موتور، فن‌ها، موتورهای دنده ای، تجهیزات پنوماتیکی، سیستم‌های انتقال هیدرولیکی و موتورهای کاربرد خانگی	$\pm$ 0.3% to 0.5% full scale
Eddy- Current Dynamometers (WB Series)	- گشتاور ترمزی بر اساس ترمز فوکو می‌باشد. - در این مکانیزم گشتاور ترمز متناسب با سرعت می‌باشد بطوریکه در سرعت نامی به پیک گشتاور خود می‌رسد. - سیستم خنک ساز مبتنی بر گردش آب در استاتور می‌باشد.			- مناسب برای کاربردهایی که نیاز به سرعت بالا و توان متوسط تا بالا دارند. - انواع موتورهای الکتریکی، هیدرولیک، درونسوز و.. - تست انواع پمپها - تست خودرو و سایر محرک‌ها	$\pm$ 0.3% to 0.5% full scale

نوع دینامومتر دینامومتر	اصول عملکرد اصول عملکرد	شکل شکل	محدوده گشتاور-سرعت و توان محدوده گشتاور-سرعت و توان	کاربردها کاربردها	دقت دقت
Micro Dynamometer System Test System	گشتاور ترمزی با استفاده از درایو ۴ ناحیه ایی : ۱- دینامومتر مورد استفاده از نوع هیستریزس می باشد. توان برای سرعت ها و گشتاورهای بالا ۲- سروموتور و سیستم درایو با قابلیت برگشت توان برای سرعت ها و گشتاورهای پایین		 AC Induction 50-200 KW 36-147 N.M 2000-3600 RPM POWER=4W 2.0 mN·m to 4.0 mN·m mode Servo Motor	- شبیه سازی رفتار - به عنوان موتور دینامومتر انحصارا برای تست های حلقه بسته میشی و موتورهای و بارهای گشتاور پایین می سرعت بسیار بالا مورد استفاده قرار می گیرد - تست در سرعت های - موتورهای مورد استفاده در رباتیک، کاربردهای	SPE ED: < 1 % of Full Scale TO RQUE: < 0.02% of Reading
Engine Dynamometers (ED Series) Hydra	- دینامومتر مورد استفاده از نوع هیستریزس می باشد. - قابلیت سرعت بالا - گشتاور مستقل از سرعت حتی در سرعت صفر - شفت استیل با استحکام بالا - انرژی مکانیکی اعمالی توسط موتور تحت تست به سیستم خنک ساز مایع حرارت تبدیل می شود. جریان آب از محفظه بسته		Power= 3400-7000 w- 5 minutes Power= 3000-6000 W- continuos Torque= 6.2 N·m to 28 N·m Speed=12000-25000 Medium range: 1MW/500N.m/5600rpm To 7.2MW/6200N.m/3000rpm	تحت شرایط ماشین های گازسوز کوچک کاربردهای توان بسیار بالا - ماشین های دیزل - موتورهای گازسوز	0.25 % ± 0.2% F.S 0.1 %
ulic Dynamom Dial eter Weight Dynamome ters	برای خنک سازی جابجا می شود. در این روش ترکیبی از هوا و آب در محفظه بسته فر اهم می گردد کی پس از آنکه به سیستم خنک سازی و انتقال ساخته از آب تو مخزن و شفت استیل با محور گرد د عملی می باشد.		7-300 W-continuos Large range: 35-1400 w-continuos 800N.m/3000rpm To 0.5-200 OZ-INCH 1-400 OZ-INCH 2-800 OZ-INCH Oz-inch(ounce - inch) =141.611N.m	- واحد های ژنراتوری - کاربردهای توربین ها به تکرار پذیری بالا با حداقل نیاز به تعمیر و نگهداری ها - اجزای مکانیکی	± 0.2% F.S 0.1 %

از بین انواع دینامومترهای ارائه شده در جدول ۱-۱ ترمز هیستریزس، ترمز پودر مغناطیسی، ترمز فوکو، میکرو دینامومتر، Engine Dynamometers، Dial Weight Dynamometers و دینامومتر هیدرولیکی قابلیت تولید گشتاور بار در حالت استاتیکی را دارند و انرژی ناشی از ترمز بصورت حرارت تلف می شود. در دینامومتر نوع چهار ناحیه ایی گشتاور ترمز تولیدی توسط یک موتور الکتریکی و سیستم درایو با پاسخ دینامیکی بالا تولید می گردد. این قابلیت موجب می گردد علاوه بر گشتاور استاتیکی، امکان تولید گشتاورهای ترمزی با دینامیک بالا فراهم گردد. همچنین برگشت انرژی ترمز به شبکه در این نوع دینامومتر امکان پذیر می باشد. در این پروژه با هدف دستیابی به یک دینامومتر چهار ناحیه ایی با قابلیت تولید انواع گشتاور های بار استاتیکی، دینامیکی و مولفه های بارهای غیر خطی می باشد. در گام اول طراحی به منظور ارزیابی دقیق سیستم دینامومتر لازم است تا مشخصه انواع بارهای مکانیکی شناسایی و مورد ارزیابی قرار گیرد. طراحی سیستم کنترل دینامومتر، مبدل های الکترونیک قدرت واسط و الگوریتم بازتولید گشتاور بار تحت تاثیر مشخصه گشتاور ترمزی مورد انتظار از سیستم دینامومتر می باشد. بر همین اساس در ادامه علاوه بر بررسی رفتار دینامیکی سیستم درایو و بار، مشخصه انواع بارهای صنعتی و ترم های غیر خطی انواع بارها مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۳-۱- گشتاور بارهای مکانیکی مرسوم

برای ارزیابی گشتاور بار یک سیستم درایو الکتریکی، چهار منطقه باید در مشخصه سرعت گشتاور مورد توجه قرار گیرد. مشخصه سرعت گشتاور مرسوم یک سیستم درایو در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. در ربع اول و سوم که جهت سرعت مشابه علامت گشتاور است، درایو به صورت یک موتور کار می کند. در ربع دوم و چهارم، موتور خلاف علامت گشتاور گردش می کند. از این رو، درایو به صورت یک ترمز عمل می کند که انرژی سیستم را از دست می دهد و یا به صورت یک ژنراتور انرژی را به منبع باز می گرداند. گشتاور های مختلف بار را می توان به دو دسته کلی بارهای فعال و غیر فعال تقسیم کرد. گشتاور بارهای فعال قادر به راندن موتور تحت شرایط تعادل است. به عنوان مثال، گشتاور بارهای که به علت نیروی گرانشی یا تغییر شکل در بدن الاستیک ایجاد می شوند، گشتاور بار فعال هستند. هنگام تغییر جهت چرخش موتور، علامت گشتاور بار فعال معمولاً ثابت نگه داشته می شود. اما گشتاور بارهای غیر فعال که معمولاً به علت اصطکاک یا برش هستند مخالف جهت چرخش عمل می کنند علامت آنها همواره معکوس جهت حرکت است [۵] و [۶].



شکل ۵-۱: مشخصه گشتاور سرعت یک سیستم درایو

۴-۱- دسته بندی انواع بارهای صنعتی

در سیستم های درایو صنعتی، گشتاور بار موتور در یک طبقه بندی متعارف بر اساس رفتار گشتاور را می توان به شش دسته زیر تقسیم نمود [۷]-[۹].

- گشتاور ثابت: بار دارای یک گشتاور مستقل از سرعت است. به عنوان مثال در اصطکاک کولومب و نوار نقاله.
- گشتاور خطی: باری که گشتاور آن به صورت خطی سهمی از سرعت است. به عنوان مثال در اصطکاک چسبندگی.
- گشتاور درجه دوم: باری که گشتاور آن سهمی از مجذور سرعت است. به عنوان مثال در کاربرد های فن و پمپ است.
- توان ثابت: گشتاور باری که نسبت متناسب با عکس سرعت است و توان آن همواره ثابت است. به عنوان مثال در ماشین آلات حفاری و فرز.
- گشتاور بار متغیر با مسیر: گشتاور باری که وابسته به رفتار مسیر ردیابی شده توسط بار در طی حرکت آن است. به عنوان مثال در وسایل نقلیه بالابر و ماشین‌های برنامه ریزی.
- گشتاور بار وابسته به زاویه روتور: گشتاور بار تابعی از زاویه روتور است که می تواند سری فوریه داشته باشد. به عنوان مثال کاربردهای کمپرسور و اره قاب^۱.

با توجه به دسته های مرسوم داده شده در بالا، چند نوع دیگر از بارهای مکانیکی پیچیده و غیر خطی در نظر گرفته نشده است. می توان پیشنهاد نمود که گشتاورهای بار غیرخطی را به دو گروه خواسته^۲ و ناخواسته^۳ تقسیم نمود. گشتاورهای بار غیرخطی خواسته برای انجام یک کار مکانیکی مفید در نظر گرفته می شوند. این گشتاورها یک حرکت چرخشی را به یک حرکت انتقالی یا بلعکس با استفاده از یک مکانیسم طراحی شده، که قابل پیش بینی و قابل تکرار است، تبدیل می کنند. گشتاورهای بار ناخواسته یا ناشی از خطاهای سیستم کوپلینگ هستند یا گشتاورهای هرزی هستند که به دلیل برهم کنش بین بار و یک اثر نامطلوب به وجود می آیند. مدل ریاضی و نتایج شبیه سازی رفتار بارهای غیرخطی مختلف که اغلب در سیستم های درایو صنعتی دیده می شود، در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۵-۱- مدل ریاضی گشتاور بارهای غیر خطی

یک سیستم موتور-بار که به طور کامل سخت در نظر گرفته می شود می تواند با عنوان یک سیستم تک جرم معروف مدل سازی شود و با معادله ابتدایی زیر شرح داده می شود [۱۰]:

$$T_m = J\dot{\omega} + T_l \quad (3-1)$$

در اینجا J ، T_m و T_l به ترتیب ممان اینرسی سیستم گشتاور موتور و گشتاور بار هستند. موقعیت سیستم می تواند به صورت $\theta = \omega t$ مدل شود. همانطور که مشاهده می شود، گشتاور موتور باید با دو گشتاور استاتیکی T_l و گشتاور دینامیکی $J\dot{\omega}$ مخالفت کند.

¹ Frame saws

² Intended

³ Non-intended

15

$$\dot{x} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{C_t}{J_m} & \frac{C_t}{J_m} & -\frac{K_t}{J_m} \\ \frac{C_t}{J_l} & -\frac{C_t}{J_l} & \frac{K_t}{J_l} \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}}_A x + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_u} T_m + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{J_l} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_w} T_l \quad (5-1)$$

که در آن $x = [\omega_m \quad \omega_l \quad \theta_t]^t$ که $\theta_t = \theta_m - \theta_l$. تابع انتقال (5-1) T_m نسبت به ω_m می‌تواند بصورت زیر نوشته شود:

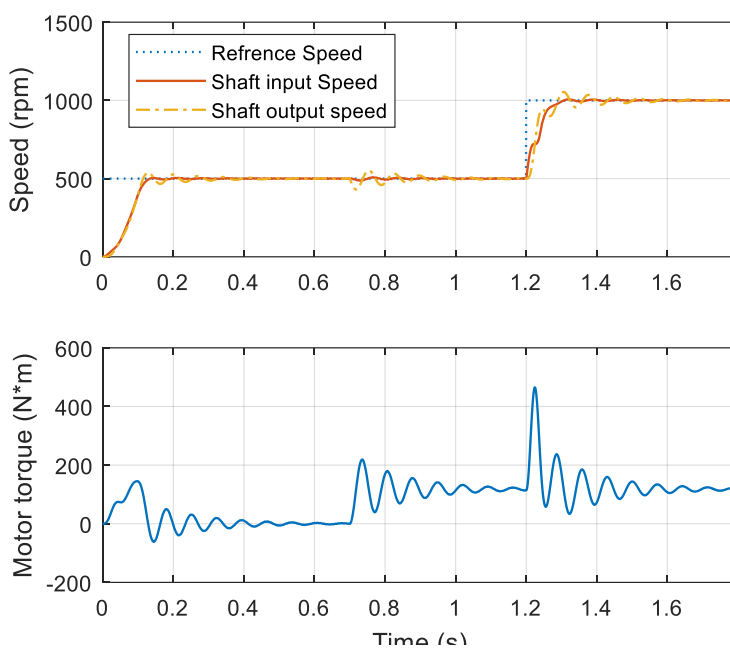
$$\begin{aligned} \frac{\omega_m(s)}{T_m(s)} &= [1 \quad 0 \quad 0](sI - A)^{-1}B_u \\ &= \frac{1}{s} \frac{s^2 + \frac{C_t}{J_l}s + \frac{K_t}{J_l}}{J_m \left(s^2 + C_t \left(\frac{1}{J_m} + \frac{1}{J_l} \right) s + K_t \left(\frac{1}{J_m} + \frac{1}{J_l} \right) \right)} \end{aligned} \quad (6-1)$$

اگر ضریب C_t نادیده گرفته می‌شود، آن گاه فرکانس‌های ضد رزونانس f_{ares} ¹ و رزونانس f_{res} عبارتند از:

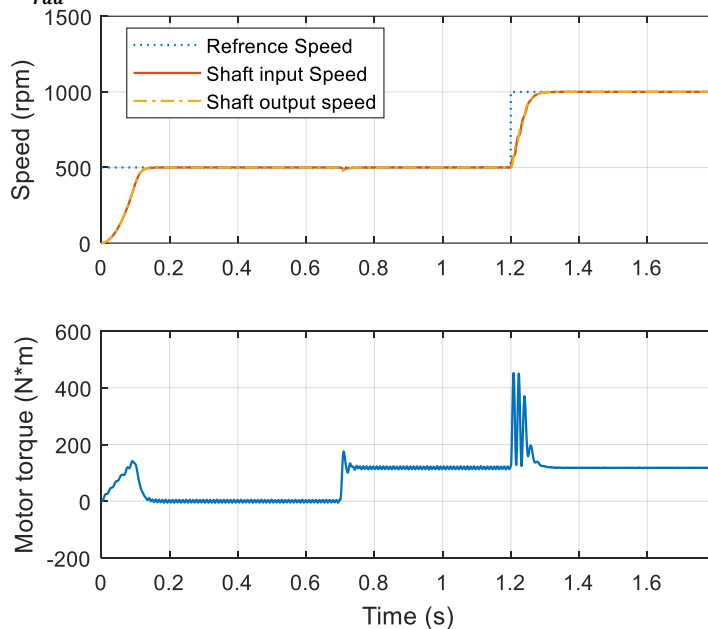
$$\begin{aligned} f_{ares} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_t}{J_l}} \\ f_{res} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{K_t \left(\frac{1}{J_m} + \frac{1}{J_l} \right)} \end{aligned} \quad (7-1)$$

نتایج شبیه‌سازی سیستم محرکه الکتریکی برای $K_t = 1500 \text{ N} \cdot \frac{m}{rad}$ و $K_t = 15000 \text{ N} \cdot \frac{m}{rad}$ به ترتیب در **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** نشان داده شده‌اند. تاثیر رزونانس در گشتاور و نوسان‌های سرعت در حالت گذرا می‌توان مشاهده نمود. هرچه ضریب شفت کوچکتر باشد، نوسان گشتاور و سرعت بیشتر است. بنابراین، در نظر گرفتن پدیده رزونانس مکانیکی در کنترل کننده برای از بین بردن تاثیر آن ضروری است.

¹ anti-resonance



شکل ۷-۱: پاسخ سیستم درایو تحت شرایط رزونانس مکانیکی و ضریب سختی $K_t = 1500 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$



شکل ۸-۱: پاسخ سیستم درایو تحت شرایط رزونانس مکانیکی و ضریب سختی $K_t = 15000 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$

۲-۶-۱- بکلاش (Backlash)

پدیده بکلاش را می‌توان به صورت یک رفتار غیر خطی ناشی از سستی حرکت در برخی سیستم‌های کوپلینگ مانند سیستم‌های چرخنده‌ای [۱۵] و درایوهای زنجیری ذکر کرد [۱۶]. همانطور که در **Error! Reference source not found.** مشاهده می‌شود، بکلاش ناحیه مرده^۱ ایجاد شده توسط فاصله هوایی بین موقعیت ورودی و خروجی سیستم انتقال

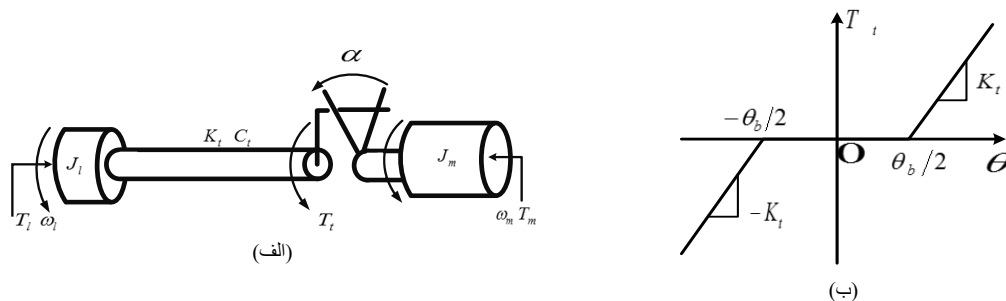
¹ Dead zone

رخ می‌دهد [۱۷]. پدیده بکلاش به طور نامناسبی روی پایداری و عملکرد سیستم تاثیر می‌گذارد [۱۸]-[۲۱]. با در نظر گرفتن شکاف α در یک سیستم دو جرمی نشان داده شده در **Error! Reference source not found.** الف، گشتاور سیستم انتقال (۴-۱) باید بصورت زیر اصلاح شود:

$$T_t = K_t(\theta_t - \theta_b) + C_t(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_b) \quad (۸-۱)$$

که در آن θ_b زاویه بکلاش است. مشتق زاویه بکلاش در معادله زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\theta}_b = \begin{cases} \max \left(0, \dot{\theta}_b + \frac{K_t}{C_t}(\theta_t - \theta_b) \right), & \theta_b = -\alpha \\ \dot{\theta}_b + \frac{K_t}{C_t}(\theta_t - \theta_b), & |\theta_b| < \alpha \\ \min \left(0, \dot{\theta}_b + \frac{K_t}{C_t}(\theta_t - \theta_b) \right), & \theta_b = \alpha \end{cases} \quad (۹-۱)$$

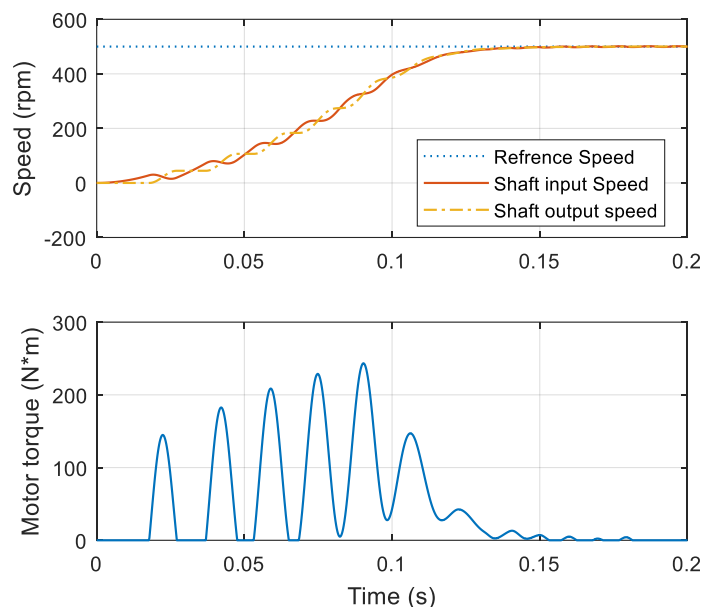


شکل ۹-۱: (الف) مدل مکانیکی سیستم با در نظر گرفتن اثر بکلاش (ب) مدل ناحیه مرده

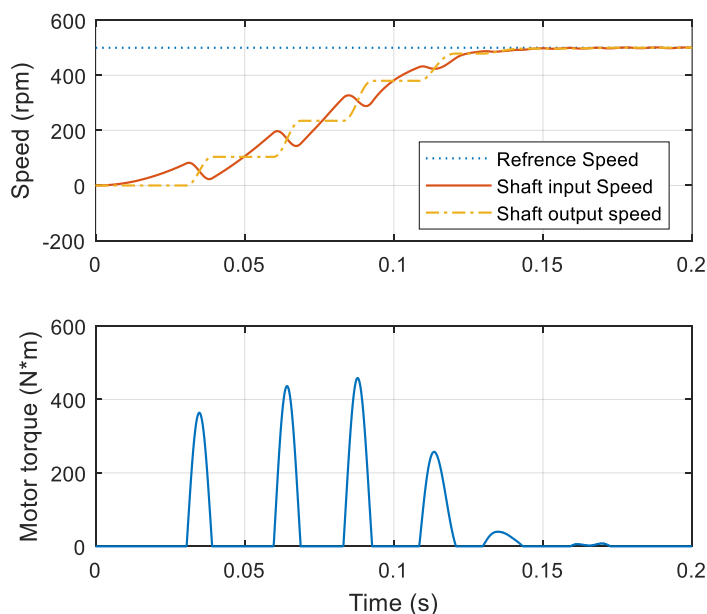
اگر ضریب میرایی C_t نادیده گرفته شود، گشتاور سیستم انتقال به مدل ناحیه مرده^۱ نشان داده شده در **Error! Reference source not found.** تغییر می‌کند.

با در نظر گرفتن مدل ناحیه مرده برای گشتاور سیستم انتقال، **Error! Reference source not found.** و نتایج **Error! Reference source not found.** MERGEFORMAT * \ Ref528274265 \h_ REF شبیه‌سازی یک شفت متصل شده به بار با زاویه‌های شکاف چرخنده به ترتیب $\alpha = 1^\circ$ و $\alpha = 5^\circ$ را نشان می‌دهند. هنگامیکه سرعت موتور در حال تغییر است، چرخنده موتور بر چرخنده بار تاثیر می‌گذارد. با افزایش سرعت سیستم هر بار که چرخنده ضربه می‌زند یک گشتاور پیک بر موتور تحمیل می‌شود. هرچه زاویه شکاف دنده وسیع‌تر باشد، گشتاور پیک موتور بیشتر است که می‌تواند به شفت آسیب برساند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پدیده بکلاش فقط در شرایط گذرا رخ می‌دهد. بنابراین، در برخی سیستم‌های محرک مانند آسانسورهای که به یک راه اندازی نرم با حداقل ارتعاشات یا نوسانات نیاز دارند، سیستم کنترل باید برای کاهش این اثر طراحی شود.

¹ dead-zone



شکل ۱۰-۱: پاسخ سیستم درایو با در نظر گرفتن سیستم چرخنده با زاویه شکاف $\alpha=1^\circ$



شکل ۱۱-۱: پاسخ سیستم درایو با در نظر گرفتن سیستم چرخنده با زاویه شکاف $\alpha=5^\circ$

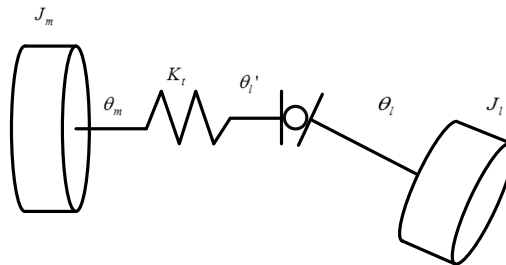
۳-۶-۱- نا هم محوری^۱

یک مشکل عمده در عملکرد سیستم‌های درایو نا هم محوری است که به علت جفت نشدن شفت موتور و شفت بار رخ می‌دهد [۲۲] - [۲۴]. مشکل نا هم محوری منجر به نیروهای واکنشی در شفت موتور می‌شود که این اتفاق باعث شکست‌های زودرس و لرزش می‌شود [۲۵]. نا هم محوری ممکن است به شکل‌های مختلف زاویه ای، موازی و ترکیب زاویه و موازی در

¹ Misalignment

سیستم پدیدار شود که در [۲۶] گزارش شده است. برای خلاصه کردن توصیف ریاضی نا هم محوری، فقط نوع زاویه‌ای ارائه خواهد شد. مدل مکانیکی نا هم محوری زاویه‌ای برای دو شفت، متصل کننده موتور و بار به یکدیگر مانند یک مفصل قابل تنظیم، با یک زاویه تقاطع β در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. رابطه‌ای که سرعت دو شفت بر اساس مرجع [۲۷] ارائه می‌دهد بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\omega'_l}{\omega_l} = \frac{\cos(\beta)}{1 - \sin^2(\beta)\sin^2(\theta_l)} \quad (10-1)$$



شکل ۱۲-۱: مدل مکانیکی نا هم محوری

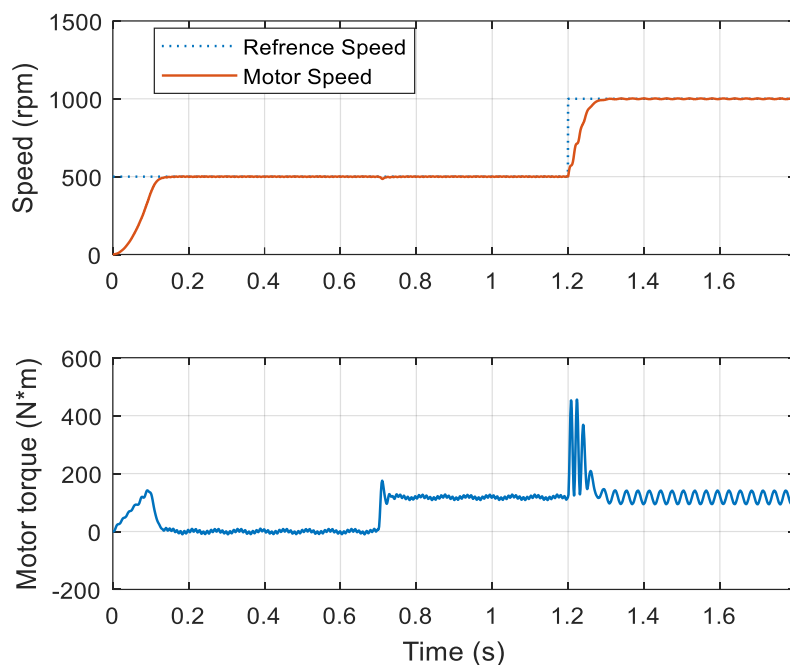
که در آن ω'_l سرعت سمت دیگری است که به بار متصل می‌شود. معادله بالا می‌تواند به دو عبارت ثابت و یک عبارت نوسانی، که دو برابر فرکانس سرعت سیستم را دارد، تقریب زده شود. هنگامیکه مقدار توان مکانیکی محور سمت موتور $T_t\omega_m$ شبیه به مقدار توان مکانیکی سمت دیگر $T'_t\omega'_m$ است، رابطه‌ی گشتاورها می‌تواند بصورت زیر شرح داده شود:

$$\frac{T'_t}{T_t} = \frac{1 - \sin^2(\beta)\sin^2(\theta_l)}{\cos(\beta)} \quad (11-1)$$

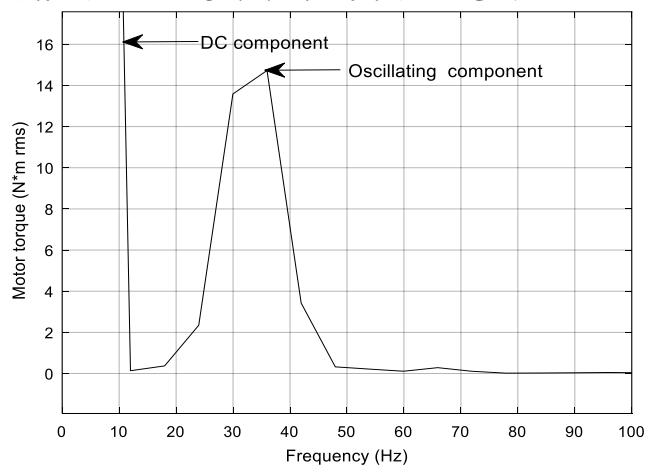
اگر معادله بالا تجزیه شود، یک مولفه نوسانی با فرکانس دوبرابر سرعت سیستم مشاهده خواهد شد. بنابراین، معادله دینامیکی (۴-۱) می‌تواند بصورت زیر اصلاح شود:

$$\begin{aligned} J_m \dot{\omega}_m &= T_m - T'_t \\ J_l \dot{\omega}_l &= T_t - T_l \\ T'_t &= K_t(\theta'_m - \theta_l) + C_t(\omega'_m - \omega_l) \end{aligned} \quad (12-1)$$

به منظور نشان دادن تاثیر نا هم محوری، نتایج شبیه‌سازی‌ها در **Error! Reference source not found.** برای $\beta = 5^\circ$ نشان داده شده است. همانگونه که در **Error! Reference source not found.** مشاهده می‌شود، گشتاور موتور یک نوسان در حالت پایدار دارد که پس از اینکه سرعت بالا رفت دامنه‌ی آن افزایش یافته است. طیف فرکانسی گشتاور موتور در **Error! Reference source not found.** ارائه شده است، همانطور که انتظار می‌رفت، فرکانس اعوجاج گشتاور در ۳۶ Hz پدیدار شده است که تقریباً دو برابر فرکانس سرعت سیستم (۱۰۰۰ rpm) در فرکانس ۱۶/۶۷ Hz است.



شکل ۱۳-۱: پاسخ سیستم درایو با در نظر گرفتن مشکل نا هم محوری



شکل ۱۴-۱: طیف هارمونیک گشتاور موتور در حالت زوم با در نظر گرفتن اثر نا هم محوری در سرعت ۱۰۰۰ RPM

۱-۷-۱- گشتاور بارهای غیر خطی ناخواسته هرز

۱-۷-۱-۱- عدم تعادل^۱

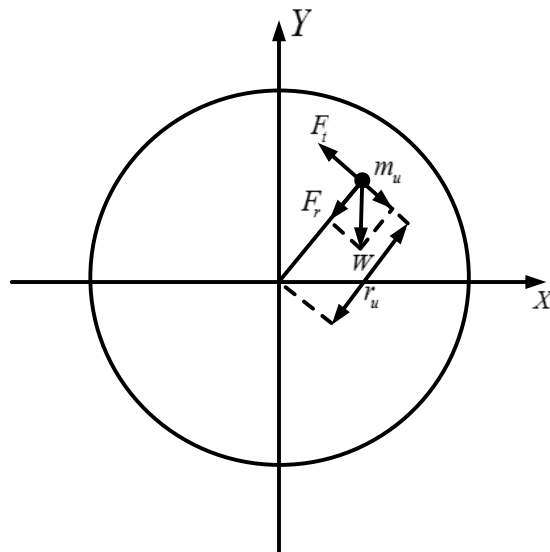
سازندگان سیستم‌های درایو همواره سعی می‌کنند بخش‌های مکانیکی سیستم درایو را بدون هیچ عدم تعادلی مونتاژ کنند. اما در عمل به دلیل عواملی مانند ناهمگونی چگالی در مواد تشکیل دهنده یا عدم تعادل ناشی از اجزاء یک شفت بلند مشکل عدم تعادل می‌تواند رخ دهد. در این شرایط مرکز جرم سیستم با محور چرخش آن یکسان نیست که این اتفاق می‌تواند منجر به نوسان با فرکانس سرعت سیستم در گشتاور سیستم درایو شود [۲۸]–[۳۱]. فرض شود مطابق **Error! Reference**

^۱ Unbalancing

source not found. یک جرم m_u در فاصله r_u از مرکز جرم قطعات در حال چرخش واقع شده است. آن گاه، گشتاور نامتعادل T_u ناشی از نیروی وزن مماسی F_t جرم بصورت زیر به دست می آید:

$$T_u = r_u F_t = m_u g r_u \cos(\theta) \quad (1-13)$$

که در آن g شتاب گرانشی است. همانطور که مشاهده می شود، گشتاور T_u بصورت یک نوسان در یک فرکانس چرخشی پدیدار می شود.



شکل ۱۵-۱: مدل یک بار نامتعادل

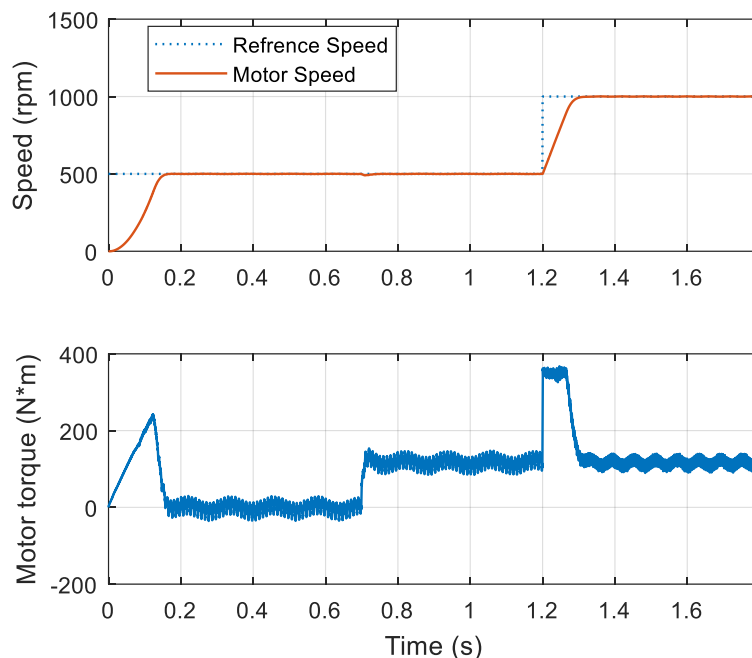
علاوه براین، جرم بار نامتعادل یک اینرسی تولید می کند که بصورت $J_u = m_u r_u^2$ بیان می شود. از اینرو رابطه (۳-۱) باید بصورت زیر اصلاح شود:

$$T_m = (J + J_u) \dot{\omega} + T_u + T_l \quad (1-14)$$

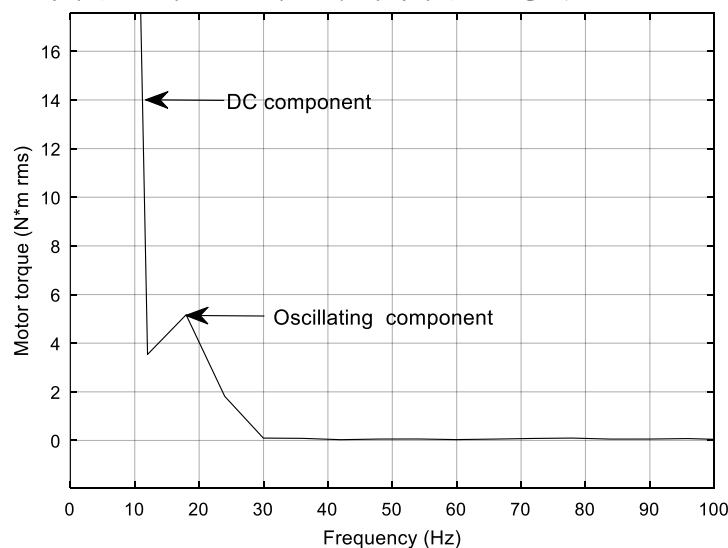
نتایج شبیه سازی برای یک سیستم موتور-بار با جرم $m_u = 3 \text{ kg}$ و واقع شده در یک فاصله $\text{Cmr}_u = 25$ از مرکز جرم قطعات در حال چرخش در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. گشتاور موتور یک نوسان در حالت پ ایدار دارد که پس از اینکه سرعت بالا رفته است دامنه آن افزایش یافته است. فرکانس نوسان گشتاور بر اساس طیف فرکانس نشان داده شده در **Error! Reference source not found.** ۱۷ Hz است، که تقریباً برابر با فرکانس سرعت سیستم (۱ rpm) ۰۰۰ یعنی ۱۶/۶۷ Hz است.

۲-۷-۱- اصطکاک چرخشی

گشتاور اصطکاک چرخشی که توسط اصطکاک ناشی از تماس حرکات نسبی جسم متحرک ایجاد می شود، تقریباً در تمام سیستم‌های محرک صنعتی مانند ترمزها، تسمه محرک، چرخ یا ریل و غیره رخ می دهد. این گشتاور در برابر حرکت مقاومت می کند و به سطح اجزای سیستم آسیب می‌رساند [۳۲]-[۳۴].



شکل ۱۶-۱: پاسخ سیستم درایو در شرایط بار نامتعادل در سیستم درایو



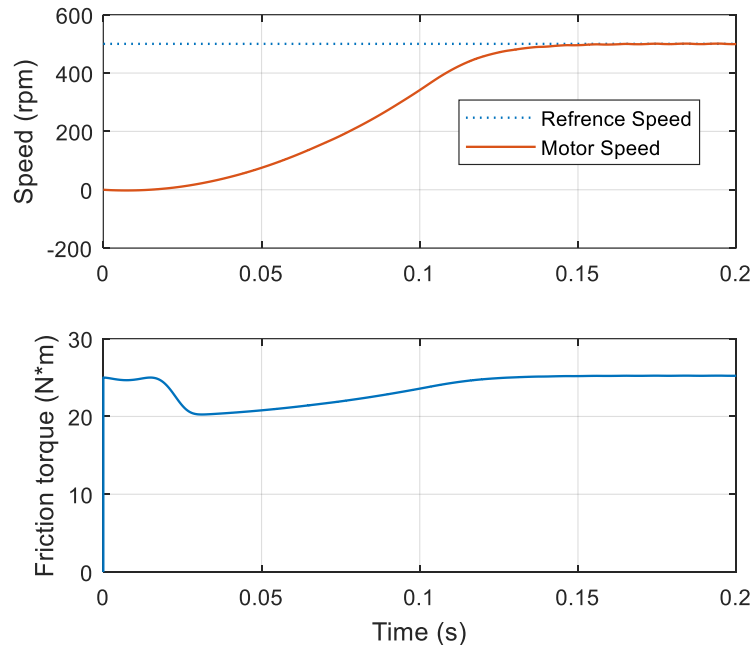
شکل ۱۷-۱: طیف هارمونیک گشتاور موتور در حالت زوم با در نظر گرفتن اثر عدم تعادل در سرعت ۱۰۰۰ RPM

گشتاور اصطکاک چرخشی بصورت تابعی از سرعت فرضی مجموع مولفه‌های خطی، گشتاور اصطکاک چسبنده، و مولفه‌های غیرخطی، شامل گشتاورهای کولن T_c و گسیختگی T_b تعریف می‌شود، و بصورت زیر شرح داده می‌شود [۳۵]:

$$T_m = (J + J_u)\dot{\omega} + T_u + T_l \quad (1-15)$$

که در آن T_f ، ω_b و B_l به ترتیب گشتاور اصطکاک چرخشی، آستانه سرعت گسیختگی و ضریب اصطکاک چسبنده‌ی بار هستند. بنابراین، هنگامیکه اصطکاک چرخشی در سیستم وجود دارد، گشتاور T_f باید به (۱-۳) افزوده شود.

نتایج شبیه‌سازی برای گشتاور اصطکاک و سرعت یک محرکه، دارای گشتاور کولن $N.mT_c = 20$ ، گشتاور گسیختگی $N.mT_b = 25$ ، آستانه سرعت گسیختگی $1 \text{ rad/s}\omega_b$ ، و ضریب اصطکاک چسبنده $B_l = 0.1$ در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. در سرعت پایین، یک گشتاور با شیب منفی به دلیل مولفه غیرخطی اصطکاک چرخشی در گشتاور موتور وجود دارد. در حالت پایدار، اثر یک گشتاور ثابت ناشی از مجموع گشتاورهای کولن و اصطکاک چسبنده مشاهده می‌شود.



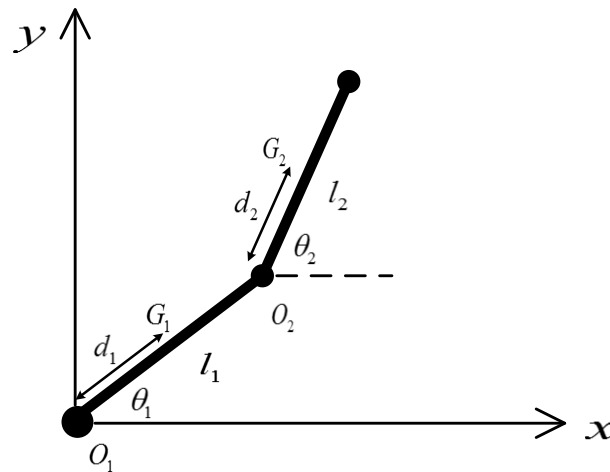
شکل ۱۸-۱: پاسخ سیستم درایو در شرایط اصطکاک چرخشی در سیستم درایو

۱-۸- گشتاور بارهای غیرخطی خواسته

۱-۸-۱- بازوی مکانیکی^۱

بازوهای مکانیکی یکی از مهمترین مکانیسم‌های قابل توجه در ساخت و اتوماسیون صنعتی هستند. مکانیسم‌های بازوی مکانیکی بطور کلی برای افزایش مشخصه‌های عملکرد مانند سرعت، تکرارپذیری، و دقت استفاده می‌شوند. علاوه بر این، آنها می‌توانند برای جایگزین کارهای دستی در محیط‌های خطرناک برای کارهای روزمره به کار گرفته شوند [۳۶]–[۳۸]. بازوهای مکانیکی یک ساختار پیچیده با چندین حلقه زنجیر و بازو دارند. به منظور ساده کردن معادله دینامیک یک بازوی مکانیکی، یک بازوی مکانیکی دو حلقه‌ای معمولی نشان داده شده در **Error! Reference source not found.** توصیف خواهد شد. ک ه در آن l_1 و d_1 به ترتیب طول حلقه اول و فاصله از مرکز گرانش اولین حلقه تا نقطه O_1 هستند. بطور مشابه، l_2 و d_2 به ترتیب طول حلقه دوم و فاصله از مرکز گرانش حلقه دوم تا نقطه O_2 هستند.

¹ Manipulator



شکل ۱۹-۱: شماتیک یک بازوی مکانیکی دو حلقه‌ای

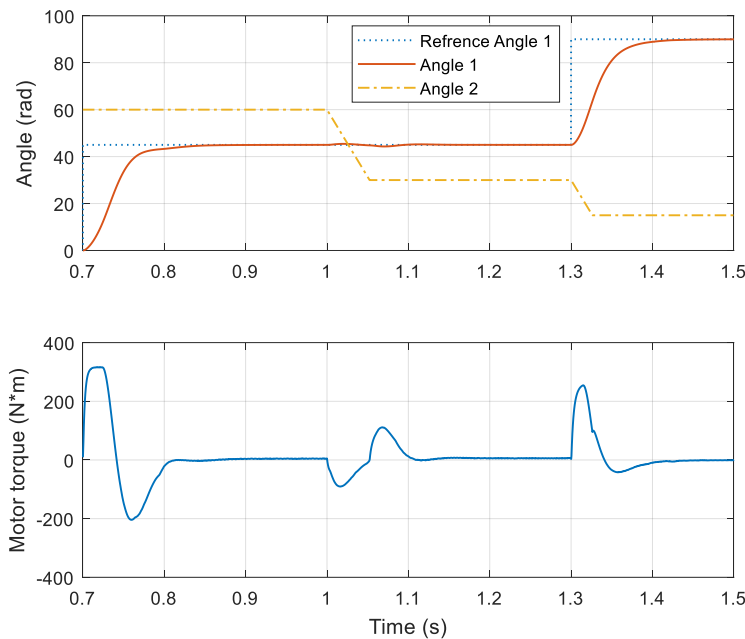
معادله حرکت برای بازوی مکانیکی دو حلقه‌ای، گزارش شده [۳۹]، بصورت زیر ارائه می‌شود:

$$T_m = (J + J_u)\dot{\omega} + T_u + T_l \quad (۱-۱۶)$$

که در آن T_{m1} و T_{m2} گشتاورهای اعمال شده موتورها به ترتیب در نقاط O_1 و O_2 هستند. موقعیت زاویه‌ای اولین حلقه و دومین حلقه به ترتیب با θ_1 و θ_2 نشان داده شده‌اند. پارامترهای دیگر بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} D_{11} &= J_1 + J_2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 d_2 \cos(\theta_2) \\ D_{12} &= D_{21} = J_2 + m_2 l_1 d_2 \cos(\theta_2) \\ D_{22} &= J_2 \\ C_1 &= -m_2 l_1 d_2 \sin(\theta_2)(\dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ C_2 &= m_2 l_1 d_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 \\ G_1 &= g(m_1 d_1 + m_2 l_1) \cos(\theta_1) + g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ G_2 &= g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (۱-۱۷)$$

که در آنها m_1 و m_2 به ترتیب جرم حلقه اول و حلقه دوم هستند. پارامترهای J_1 و J_2 گشتاور اینرسی پیرامون یک محور به ترتیب از مرکز جرم اولین حلقه و دومین حلقه هستند. به منظور نشان دادن عملکرد سیستم تحت یک بازوی مکانیکی دو حلقه‌ای، یک شبیه‌سازی برای سیستم محرک متصل شده به اولین حلقه‌ی بازوی مکانیکی انجام خواهد شد. پارامترهای بازوی مکانیکی در جدول ۲-در پیوست ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. د



شکل ۲۰: نتایج شبیه سازی زاویه و گشتاور حلقه اول یک بازوی مکانیکی دو حلقه ای

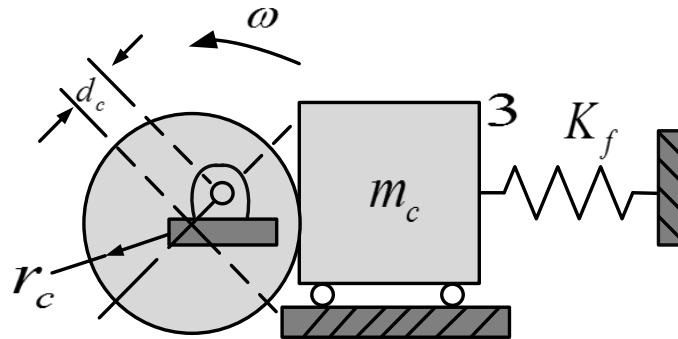
ر این شبیه سازی در لحظه ۱ ثانیه حلقه دوم با یک سیستم محرک دیگری می چرخد که زاویه ای آن از ۶۰ تا ۳۰ درجه تغییر می کند و سپس از زاویه ۳۰ درجه تا ۱۵ درجه در زمان $1/3$ s گردش می کند. در زمان $0/7$ s تا $0/8$ s، سیستم محرکه یک گشتاور غیرخطی دارای شکل موج سینوسی برای چرخیدن حلقه اول از ۰ درجه تا ۴۵ درجه تولید می کند. در زمان ۱ s تا $1/1$ s، حلقه دوم یک گشتاور غیرخطی با شکل موج سینوسی به حلقه اول در هنگامیکه زاویه اش کاهش یافته است، تحمیل می شود. در زمان $1/1$ s تا $1/3$ s، زاویه ای هر دو حلقه تغییر می کنند که منجر به پاسخ گشتاور متفاوت از پاسخ گشتاور در زمان $0/7$ s تا $0/8$ s می شود. تمام این رفتارهای غیرخطی گشتاور در معادله حرکت غیر خطی ریشه دارند که در (۱-۱۴) بیان شده است.

۲-۸-۱- مکانیزم بادامکی

یک مکانیزم بادامک^۱ که شامل دو حلقه، یک بادامک و یک جرم پیرو است یک حرکت چرخشی را به یک حرکت انتقالی یا بالعکس تبدیل می کند [۴۰]-[۴۲]. مکانیزم بادامک یکی از مهمترین مکانیزم ها در ماشین آلات صنعتی مانند ماشین آلات پیچ^۲، ماشین آلات دنده-برش، ماشین آلات بافت، و پرس های چاپ است [۴۳]. یک مکانیزم بادامک گزارش شده در [۴۴]، متشکل از یک صفحه با یک میل بادامک، یک جرم پیرو و یک فنر نگهدارنده در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است.

¹ Cam mechanism

² screw machines



شکل ۱-۲۱: شماتیک مکانیزم بادامک

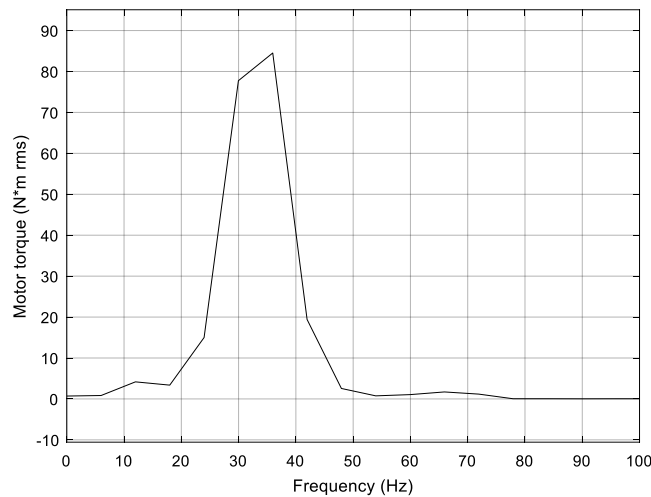
اگر موتور به نقطه "O" متصل شود، گشتاور بار ذکر شده در (۱-۳) باید بصورت زیر تعریف شود:

$$T_l = F_c r_c \sin(\theta) \\ = d_c (K_f d_c + P) \sin(\theta) + \frac{1}{2} d_c^2 (m_c \omega^2 - K_f) \sin(2\theta) \quad (1-18)$$

که در آن d_c فاصله بین مرکز صفحه و مرکز میل بادامک است. پارامترهای K_f و m_c و P به ترتیب سختی فنر، جرم پیرو، و نیروی اولیه فنر بیان می کنند.

نتایج شبیه سازی برای یک مکانیزم بادامک با پارامترهای جدول ۳-۱ در پیوست ا در **Error! Reference source not found**. نشان داده شده است. گشتاور موتور یک شکل هارمونیک دارد که دامنه آن با افزایش سرعت افزایش می یابد. این امر به این دلیل است که (۱-۱۶) یک فرکانس نوسانی ۳۶ Hz در دو برابر فرکانس سرعت موتور یعنی فرکانس ۱۶/۶۷ Hz دارد که در **Error! Reference source not found** می توان آن را مشاهده نمود.

شکل ۱-۲۲: نتایج شبیه سازی سرعت و گشتاور یک مکانیزم بادامک



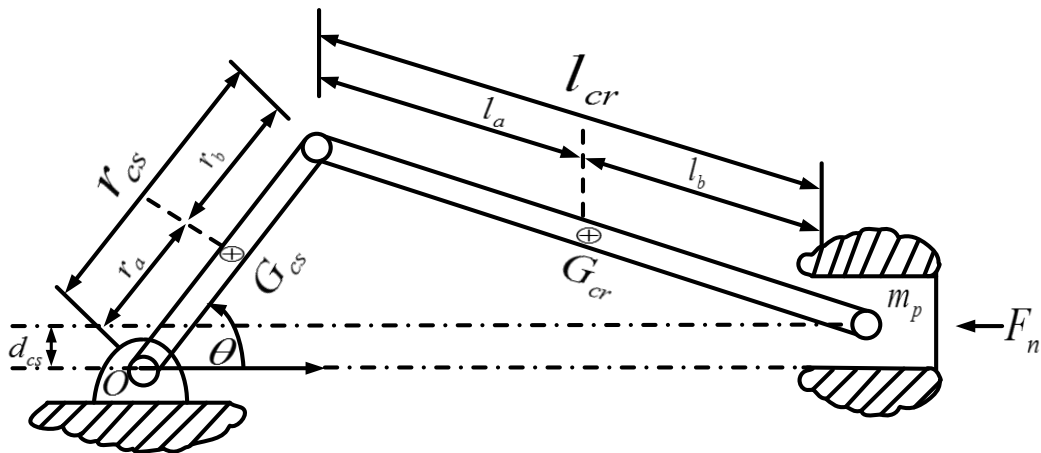
شکل ۲۳-۱: طیف هارمونیکی گشتاور موتور در حالت زوم برای مکانیزم بادامک در سرعت ۱۰۰۰ RPM

۳-۸-۱- مکانیزم میل لنگ^۱

مکانیسم‌های میل لنگ با استفاده از چهار مولفه یک حرکت چرخشی را به یک حرکت رفت و برگشتی رو یا بلعکس تبدیل می‌کنند. مکانیسم میل لنگ بصورت گسترده در کمپرسورها، دستگاه‌های بافندگی نساجی، پمپ‌های سنگ و غیر استفاده می‌شود [۴۵]–[۴۷]. مدل معادل یک مکانیسم میل لنگ در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است که متشکل از یک هندل، یک موتور الکتریک متصل شده به هندل در نقطه "O"، یک میله اتصال دهنده و یک پیستون است. محل مرکز گرانش هندل و میله اتصال دهنده در مرکز طول آنها قرار می‌گیرد و طول‌ها را به دو بخش "a" و "b" تقسیم می‌کند. با توجه به گشتاور موتور، ذکر شده در (۱-۳)، گشتاور بصورت توابعی از موقعیت موتور به شرح زیر اصلاح می‌شود [۴۸]:

$$T_m = (J + J_{cs}(\theta))\dot{\omega} + F_n r_{cs} \left(\sin(\theta) + \frac{\frac{r_{cs}}{l_{cr}} \sin(2\theta)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r_{cs}}{l_{cr}} \sin(\theta)\right)^2}} \right) \quad (1-19)$$

¹ Crankshaft



شکل ۲۴-۱: مدل معادله مکانیکی یک مکانیزم میل لنگ

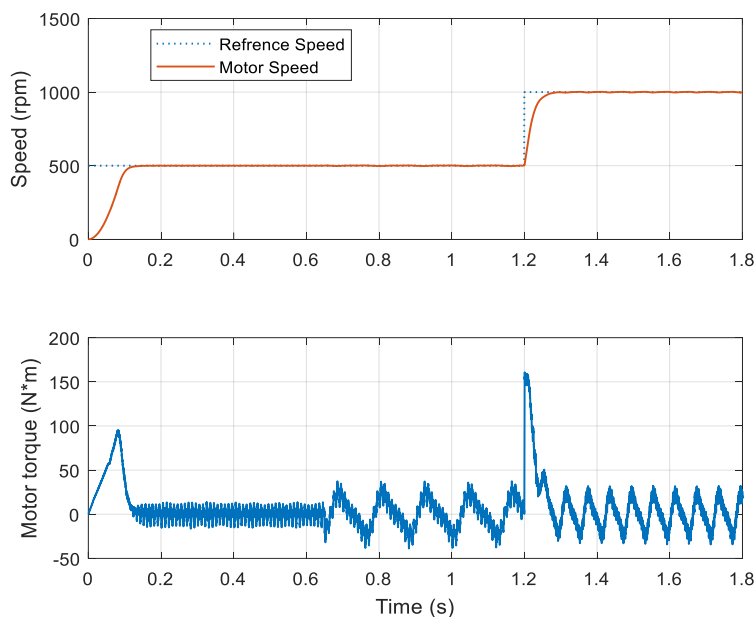
که در آن r_{cs} ، l_{cr} و F_n به ترتیب طول هندل، طول میل اتصال دهنده، و یک نیروی نرمال (می‌توان آنها را در نیروی گاز یک کمپرسور مشاهده کرد) هستند. $J_{cs}(\theta)$ گشتاور اینرسی مکانیزم میل لنگ پیرامون نقطه "O" است. اگر گشتاور اینرسی میله اتصال دهنده پیرامون GCR (مرکز گرانش میله اتصال دهنده) به صورت رابطه اینرسی $J_{Gcr} = m_{cr} l_a l_b$ فرض شود، $J_{cs}(\theta)$ می‌تواند بصورت زیر تقریب زده شود:

$$J_{cs}(\theta) = J_{Gcs} + \frac{m_{cr} l_b}{l_{cr}} r_{cs}^2 + \left(\frac{m_{cr} l_a}{l_{cr}} + m_p \right) r_{cs}^2 f(\theta) \quad (1-20)$$

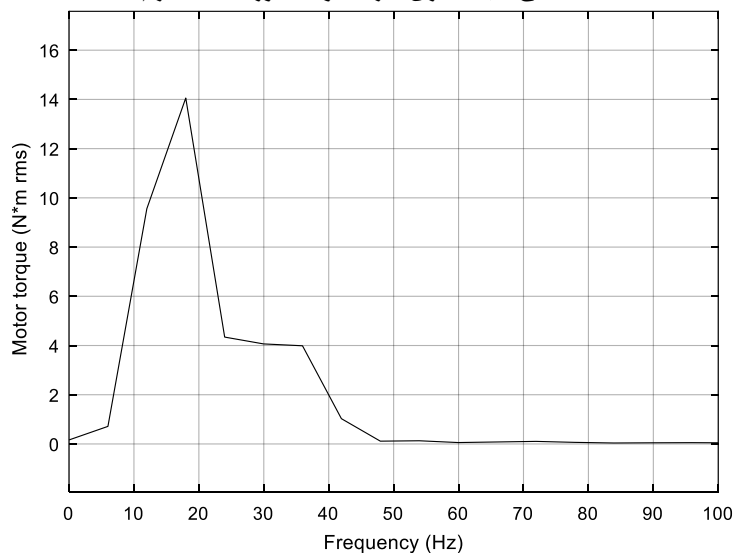
که در آن m_{cr} ، m_p و J_{Gcs} به ترتیب جرم میله اتصال دهنده و جرم پیستون هستند. گشتاور اینرسی هندل پیرامون مرکز گرانش GCR برابر است با $J_{Gcs} = m_{cs} r_a r_b$ که m_{cs} جرم هندل است. $f(\theta)$ بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(\theta) = \left(\sin(\theta) + \frac{\frac{r_{cs}}{2l_{cr}} \sin(2\theta) - \frac{d_{cs}}{l_{cr}} \cos(\theta)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r_{cs}}{l_{cr}} \sin(\theta) - \frac{d_{cs}}{l_{cr}} \right)^2}} \right)^2 \quad (1-21)$$

نتایج شبیه سازی یک مکانیزم میل لنگ عمودی با پارمترهای جدول ۴-۱ در پیوست ا نشان داده می‌شوند، در **Error!** **Reference source not found.** نشان داده شده است. گشتاور میل لنگ یک ریپل کوچک قبل از ۰/۶۵ s به دلیل عبارت اول (۱۹-۱) دارد. هنگامیکه نیروی نرمال در ۰/۶۵ s اعمال می‌شود، گشتاور یک شکل نوسانی پیدا می کند که هنگامیکه سرعت افزایش می‌یابد، فرکانس آن نیز افزایش می‌یابد. این گشتاور دو مولفه اصلی دارد (که در عبارت دوم (۱۹) نشان داده شده) که در فرکانس اول و دوم سرعت می‌توان آن را در طیف فرکانسی گشتاور **Error! Reference source not found.** مشاهده نمود.



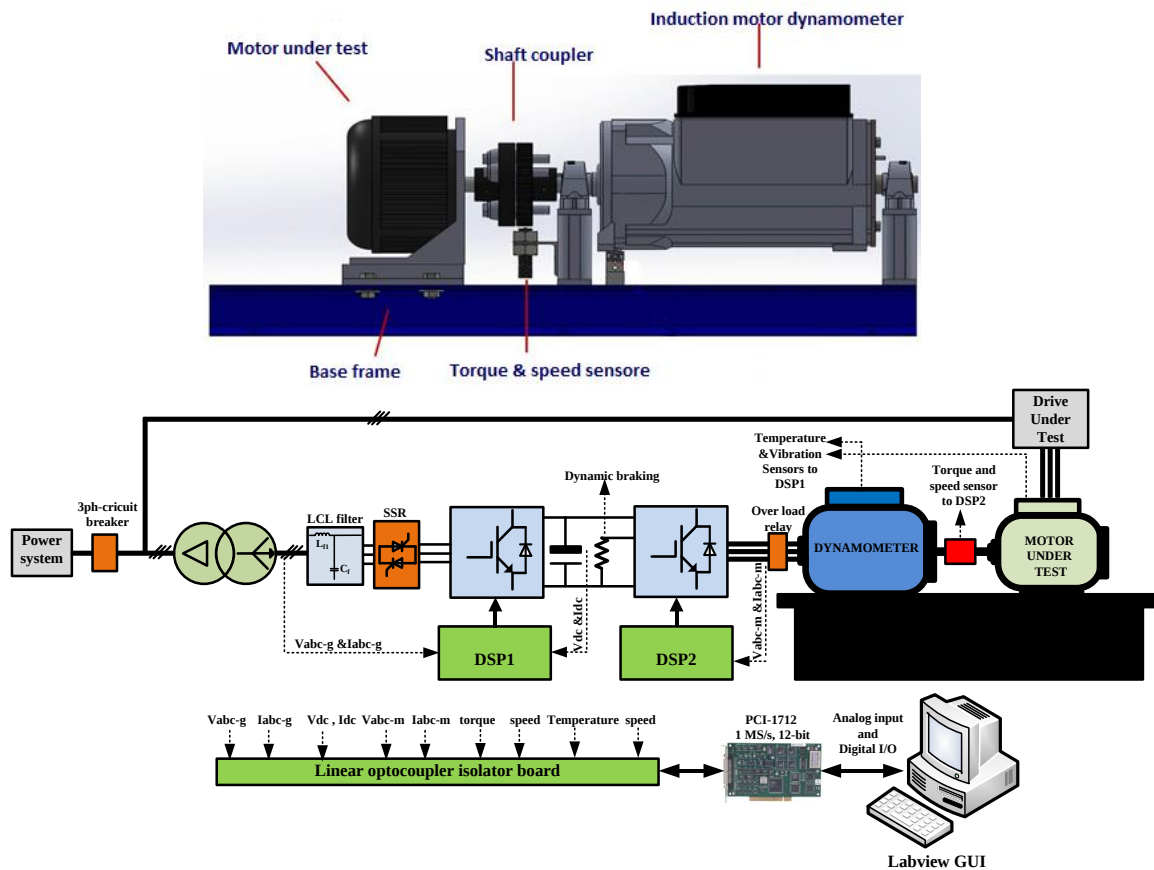
شکل ۲۵-۱: نتایج شبیه سازی سرعت و گشتاور یک مکانیزم میل لنگ



شکل ۲۶-۱: طیف هارمونیک گشتاور موتور در حالت زوم برای مکانیزم میل لنگ در سرعت ۱۰۰۰ RPM

پس از شناسایی مشخصه گشتاور انواع بارهای صنعتی، در بخش بعدی طراحی سیستم کنترل دینامومتر و روش مورد استفاده جهت شبیه سازی آزمایشگاهی مشخصه بار مورد ارزیابی قرار می گیرد. **Error! Reference source not found.** ساختار کلی سیستم تست موتور الکتریکی بر اساس دینامومتر ۴ ناحیه ایی با استفاده از موتور القایی را نمایش می دهد. هدف از طراحی سیستم کنترلی، درایو موتور القایی (به عنوان دینامومتر) به گونه ایی که مشخصه گشتاور ترمزی تولید شده خروجی دینامومتر در حالت دینامیکی و استاتیکی پروفایل بار صنعتی دلخواه را دنبال نماید. بر اساس این ایده سیستم کنترل دینامومتر مستقل از درایو موتور تحت تست عمل می کند و گشتاور لحظه ایی دینامومتر به گونه ایی کنترل می گردد تا در سرعت (یا موقعیت) دلخواه همان مولفه های گشتاور که از بار واقعی دیده می شود توسط دینامومتر برای برای موتور

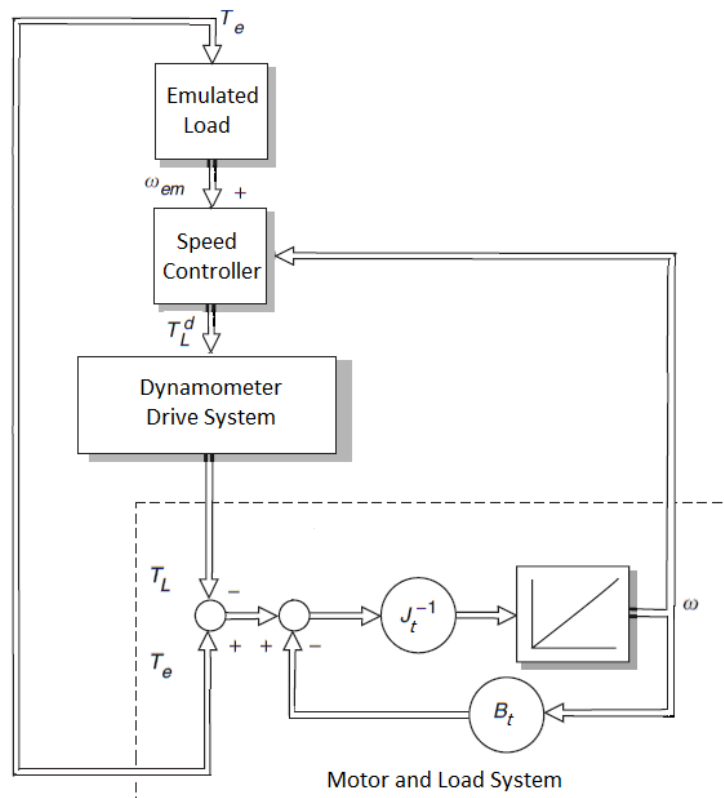
تحت تست شبیه سازی می گردد. در بخش بعدی سیستم درایو دینامومتر و روش کنترل مورد استفاده مورد ارزیابی و شبیه سازی قرار می گیرد.



شکل ۲۷-۱: ساختار طرز کلی دینامومتر ۴ ناحیه ایی مبتنی بر موتور القایی

۹-۱- کنترل سیستم دینامومتر بر اساس روش دینامیک معکوس

سیستم دینامومتر وظیفه دارد که رفتار بارهای مختلف مکانیکی توسط موتور بارگذاری و از طریق سیستم کوپلینگ مکانیکی روی موتور تحت تست شبیه سازی کند. در سیستم دینامومتر موتور تحت تست مستقیم به منبع ولتاژ وصل می شود و به وسیله یک مبدل قدرت درایو نمی شود. اما موتور بارگذاری به یک مبدل قدرت BTB دو سویه متصل است که قابلیت کنترل گشتاور و سرعت موتور را دارد. به این روش شبیه سازی بار روی موتور تحت تست اصطلاحاً دینامیک معکوس گفته می شود که بلوک دیاگرام آن در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. همانطور که در **Error! Reference source not found.** مشاهده می شود، گشتاور موتور بارگذاری T_L و گشتاور موتور تحت تست T_e وارد سیستم موتور-بار می شوند.



شکل ۲۸-۱: بلوک دیاگرام شبیه سازی رفتار بار مکانیکی به روش دینامیک معکوس

با توجه به دینامیک سیستم موتور-بار که در رابطه (۲۲-۱) نشان داده شده است، سرعت سیستم ω تعیین می شود.

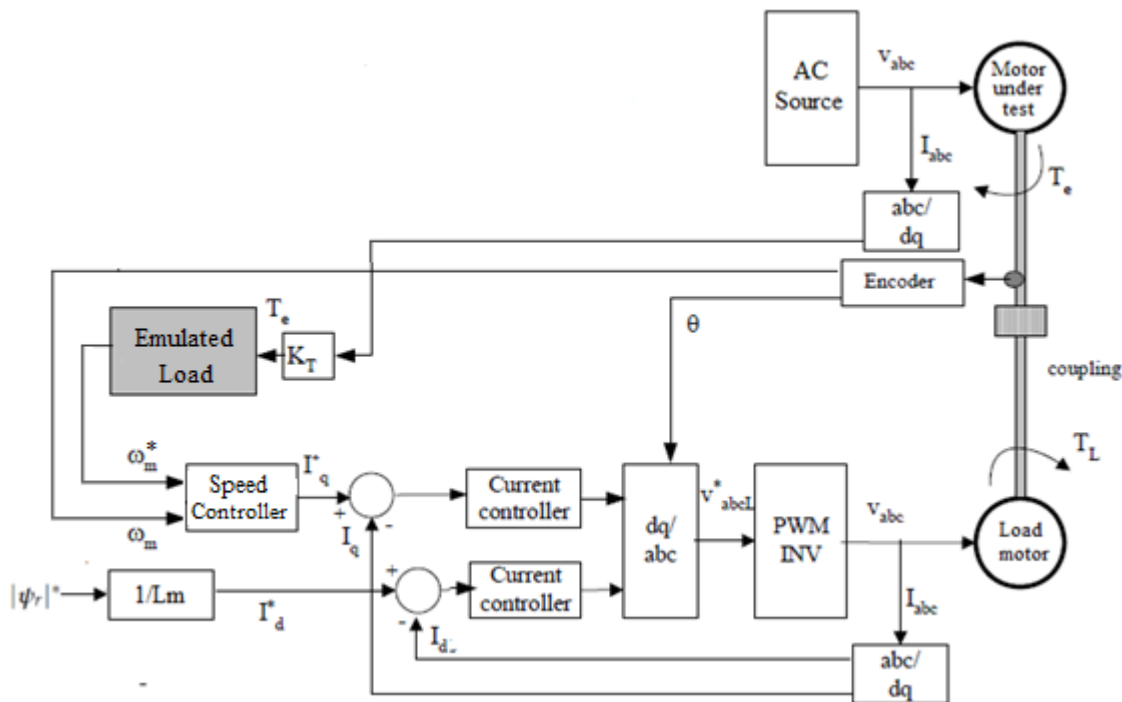
$$T_e - T_L = J_t \frac{d\omega}{dt} + B_t \omega: \quad (22-1)$$

در اینجا J_t و B_t به ترتیب مجموع اینرسی و ضریب اصطکاک سیستم موتور-بار را نشان می دهند. طبق رابطه فوق موتور تحت تست باید گشتاوری را تامین کند که بتواند بر گشتاور موتور بارگذاری و اینرسی سیستم غلبه کند. برای اینکه موتور بارگذاری بتواند گشتاور دلخواه را روی موتور تحت تست اعمال کند، باید گشتاور موتور تحت تست اندازه گیری شود و دینامیکی مدل بار دلخواه به صورت زیر به آن اضافه گردد:

$$T_e = (J_t + J_{em}) \frac{d\omega_{em}}{dt} + (B_t + B_{em}) \omega_{em} + T_{em} \quad (23-1)$$

در اینجا J_{em} ، B_{em} و T_{em} به ترتیب ضریب اصطکاک، اینرسی و گشتاور استاتیکی بار دلخواه را بیان می کنند. پس از حل معادله دیفرانسیل رابطه (۲۱-۱) سرعت مرجعی که سیستم موتور بار باید داشته باشد تا مدل بار دلخواه پیاده سازی شود، به دست می آید. این سرعت مرجع به کنترل کننده سرعت داده می شود. کنترل کننده با توجه به سرعت مرجع و سرعت اندازه گیری شده مرجع گشتاور را تعیین می کند. در نهایت سیستم درایو دینامومتر این گشتاور مرجع را در خروجی روی موتور پیاده سازی می کند.

کنترل سیستم درایو دینامومتر به وسیله روش کلاسیک جهت‌یابی میدان (FOC)^۱ انجام می‌شود. بلوک دیاگرام کنترل کننده FOC پیاده سازی روش دینامیک معکوس در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. در این روش مقادیر مرجع و اندازه‌گیری شده سرعت و شار روتور برای کنترل کننده FOC فراهم می‌شوند. سرعت توسط سنسور سرعت یا انکدر^۲ اندازه‌گیری می‌شود. مقدار شار روتور به وسیله اندازه‌گیری جریان و سرعت با استفاده از روش تخمین شار در راستای شار روتور که جزئیات آن در [۴۹] گزارش شده به دست آورده می‌شود. اندازه مرجع شار روتور برابر شار دور نامی موتور است که در فصل بعدی نحوه محاسبه آن ارائه خواهد شد.



شکل ۲۹-۱: بلوک دیاگرام سیستم درایو دینامومتر

همانطور که گفته شد، مرجع سرعت نیز در سیستم دینامومتر توسط مدل بار دلخواه تعیین می‌شود. سرعت اندازه‌گیری شده و سرعت مرجع به کنترل کننده سرعت داده می‌شود تا جریان مرجع در راستای محور q یعنی I_q^* به دست آورده شود. معمولاً مرسوم است که کنترل کننده سرعت به صورت PI پیاده‌سازی شود. در این روش خطای سرعت مرجع و سرعت مرجع در ضرایب PI ضرب ضرب می‌شوند تا مرجع گشتاور T_L^* به دست آید. آن گاه با استفاده از رابطه زیر جریان I_q^* به دست خواهد آمد:

$$I_q^* = \frac{2L_r T_L^*}{3P L_m |\Psi_r|} \quad (۲۴-۱)$$

در اینجا L_r ، L_m و P به ترتیب بیانگر اندوکتانس مغناطیس کنندگی، اندوکتانس روتور، شار روتور و تعداد جفت قطب‌های موتور بارگذاری هستند. جریان مرجع در راستای محور d یعنی I_d^* از مرجع شار روتور به دست می‌آید. پس از محاسبه جریان‌های مرجع در راستای دو محور dq با استفاده از کنترل کننده‌های جریان مراجع ولتاژ اینورتر خروجی به

^۱ Field-Oriented Control

^۲ Encoder

دست می‌آیند. در نهایت مدولاتور پالس‌های PWM برای کلیدزنی اینورتر را با توجه به ولتاژهای مرجع محاسبه شده فراهم می‌کند.

لازم به ذکر است که گشتاور موتور تحت تست یا به وسیله سنسور گشتاور اندازه‌گیری می‌شود یا با استفاده از تخمین نشان داده شده در **Error! Reference source not found.** به وسیله اندازه‌گیری جریان استاتور موتور تحت تست در راستای محور q یعنی I_{qu} از رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$T_e = \frac{3P_u L_{mu} |\Psi_{ru}| I_{qu}}{2L_{ru}} \quad (25-1)$$

در اینجا P_u ، $|\Psi_{ru}|$ ، L_{ru} ، L_{mu} به ترتیب بیانگر اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی، اندوکتانس روتور، شار روتور و تعداد جفت قطب‌های موتور تحت تست هستند. رفتار دینامیکی سیستم موتور تحت تست متصل به دینامومتر بسته به نوع موتور تحت تست و مشخصه گشتاور بار دلخواه بسیار پیچیده و وابسته به پارامترهای زیادی می‌باشد. بر همین اساس به منظور دستیابی به یک سیستم کنترلی مطلوب نیاز به طراحی یک سیستم کنترلی با قابلیت تطبیق با تغییرات مختلف پارامترهای سیستم و مشخصه‌های پیچیده بار باشد. پس از بررسی انواع روشهای کنترلی، روش کنترل تطبیقی به عنوان روش کنترل سیستم درایو دینامومتر انتخاب گردیده است. در بخش بعدی روش کنترل تطبیقی و مفاهیم آن بررسی و نتایج شبیه‌سازی برای سیستم دینامومتر ارائه می‌گردد.

۱-۱- روش کنترل تطبیقی سیستم دینامومتر

مقدمه

با پیش رفت سیستم‌های سروو درایو در چند دهه اخیر استفاده از روش‌های کنترل جدید مانند روش‌های کنترل تطبیقی، هوشمند، پیش‌بین و غیره توجه محققان را به خود جلب کرده اند [۵۰]–[۵۴]. این روش‌های کنترل یک ویژگی بسیار مهم دارند که در برابر عدم قطعیت و دینامیک‌های غیرخطی مقاوم هستند که معمولاً طراحان مورد توجه قرار نمی‌گیرند. بنابراین، عملکرد این روش‌های کنترلی باید با در نظر گرفتن رفتارهای غیرخطی و پیچیده بار که نیاز به شناسایی و مدل‌سازی دارند مورد ارزیابی قرار گیرند. علاوه بر این بسیاری از سیستم‌های دینامومتر توسعه یافته [۵۵]–[۵۸] قادر به شبیه‌سازی همه این رفتارهای غیر خطی و پیچیده نیستند. در برخی موارد ساده‌تر به منظور اعتبارسنجی روش‌های کنترل مرسوم معمولاً نتایج با استفاده از یک ماشین متصل به یک بانک مقاومتی (که اصطلاحاً چسبندگی را شبیه‌سازی می‌کند) یا یک ماشین کنترل شده توسط گشتاور که بار پله یا اغتشاش گشتاور را شبیه‌سازی می‌کند، ارزیابی می‌شوند. برای تأیید اثربخشی این روش‌های کنترل جدید، بهتر است باری که در آن پارامترهای مکانیکی (مانند اینرسی و اصطکاک) می‌توانند برنامه ریزی شده باشند یا با سرعت یا موقعیت متفاوت (به عنوان مثال، کاربردهای های میل لنگ و ربات‌ها) باشند، به وسیله یک سیستم دینامومتر شبیه‌سازی گردند. در چنین مواردی بسیار مهم است که شبیه‌سازی پوشش مکانیکی مدل را حفظ کند.

بنابراین مسئله عمده در سیستم دینامومتر، مدل‌سازی دقیق و برنامه ریزی شده پروفیل بارهای دلخواه صنعتی برای موتور و درایو تحت تست می‌باشد. سیستم‌های سروو امروزی برخلاف کاربردهای تنظیم سرعت و موقعیت مرسوم نیاز به یک کنترل‌کننده دارند که حالت گذرای آن به طور قابل اطمینانی در طیف گسترده‌ای از شرایط عملکرد تضمین شده باشد. این امر به خصوص در سیستم دینامومتر که نیاز به شبیه‌سازی مناسب رفتار بار برای موتور تحت تست را دارد، بسیار ضروری می‌باشد. همانطور که در بخش قبلی بیان شد، برای به دست آوردن گشتاور مرجع کنترل‌کننده FOC دینامومتر معمولاً از روش PI استفاده می‌شود. کنترل‌کننده سرعت به روش PI ممکن است نسبت به تغییرات دستورالعمل یا اختلالات بار شبیه

سازی شده نتواند به خوبی پاسخ دهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای تنظیم سرعت در کنترل کننده سرعت سیستم دینامومتر از روش کنترل تطبیقی بهره برده شود. زیرا این روش نسبت به روش PI دارای پاسخ دینامیکی سریع تر و مقاوم تر است [۵۹].

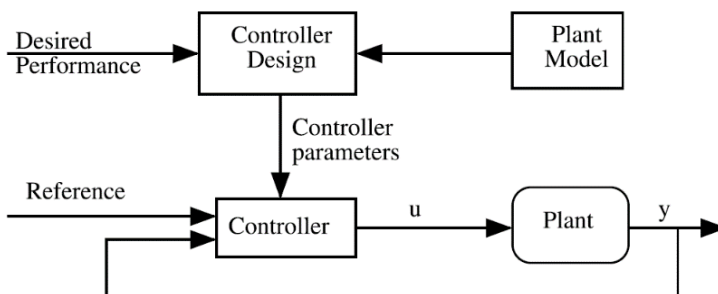
کنترل تطبیقی یک تکنیک است که تنظیم خودکار کنترلر را در زمان واقعی فراهم می‌کند. تنظیم خودکار به منظور حفظ عملکرد سیستم کنترل در صورتی که پارامترهای سیستم ناشناخته یا متغیر با زمان باشند، انجام می‌شود [۶۰]. کنترل تطبیقی به روش های مختلفی قابل اعمال بر سیستم مورد نظر است که در مرجع [۶۱] گزارش شده اند و در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۱-۱۰-۱- تعریف کنترل تطبیقی

اولین گام طراحی سیستم کنترل حلقه بسته کلاسیک مدل سازی و شناسایی پارامترهای فرآیند تحت کنترل می باشد. بدون شناسایی مدل پروسه تحت کنترل، طراحی و تحلیل پایداری سیستم امکان پذیر نخواهد بود. بطور متداول به منظور دستیابی به رفتار مطلوب سیستم کنترلی از سیستم کنترل فیدبک پس خورد یا پیش خورد استفاده می شود (**Error!** **Reference source not found.**). در این روش تنظیم پارامترهای کنترل کننده بر اساس مدل سیستم انجام می شود.

به منظور طراحی سیستم کنترلی موارد زیر مورد نیاز می باشد:

- مشخص نمودن اجزای حلقه کنترل مورد نظر
- شناسایی مدل دینامیکی فرآیند که باید کنترل گردد
- در اختیار داشتن روش طراحی کنترل کننده به منظور دستیابی به کارایی مطلوب



شکل ۳۰-۱: اساس طراحی سیستم کنترل کلاسیک

به طور کلی در بسیاری از مسایل کنترل عملی ممکن است با مشکلاتی از قبیل زیر مواجه شویم :

- (۱) اغتشاشات داخلی و خارجی ناخواسته
- (۲) تغییرات غیر قابل پیش بینی پارامترهای سیستم
- (۳) دینامیک های غیر خطی در سیستم های پیچیده
- (۴) ناشی از بروز خطاهای ناگهانی
- (۵) پارامترهای ناشناخته فرآیند

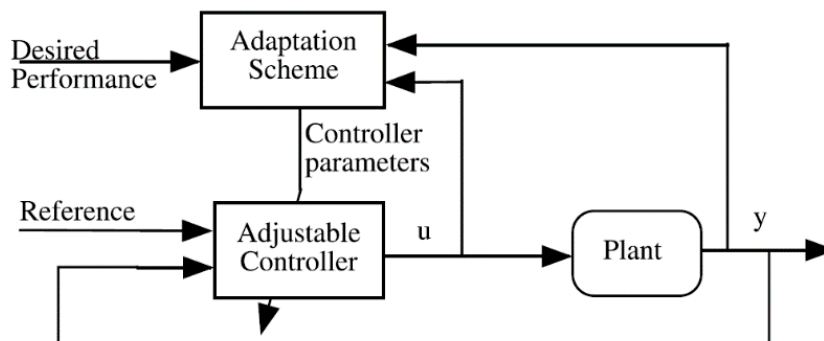
سه راهکار اساسی در مواجهه با موارد فوق در بهبود عملکرد سیستم عبارتند از:

۱- طراحی حلقه کنترل فیدبکی که عملکرد سیستم حلقه بسته را نسبت به تغییرات پارامترهای مدل سیستم اصلی غیر حساس نماید. این روش تنها در محدوده کوچکی از تغییرات پارامترها پاسخگو خواهد بود.

۲- اندازه‌گیری همزمان پارامترهای مدل سیستم و اصلاح پارامترهای قانون کنترل بر حسب آن. در این روش امکان اندازه‌گیری برخی از پارامترها و یا حداقل امکان اندازه‌گیری و تعیین لحظه به لحظه آنها امکان پذیر نمی باشد.

۳- مقایسه لحظه به لحظه شاخص‌های مورد نظر از عملکرد واقعی سیستم کنترل با شاخص‌های مطلوب و اصلاح قانون کنترل فیدبک بر اساس اختلاف مشاهده شده بین آنها (روش کنترل تطبیقی)

در صورتیکه پارامترهای پروسه نامعلوم یا متغیر با زمان باشد، روش‌های کنترل کلاسیک جوابگو نمی باشد. در شرایطی که پارامترهای دستگاه با زمان تغییر کنند، سیستم کنترل تطبیقی به طور موثری جوابگوی عملکرد مطلوب خواهند بود. هدف از طراحی سیستم کنترل تطبیقی آن است که قانون کنترلی طراحی شده بتواند در مقابل تغییرات آرام در سیستم و همچنین خطاهای مدل‌سازی پاسخ مناسب بدهد. کنترل تطبیقی به مجموعه روش‌های سیستماتیک اطلاق می شود که برای تنظیم زمان واقعی کنترل کننده‌ها، به منظور دستیابی به کارایی مطلوب سیستم کنترلی در شرایطی که پارامترهای مدل دینامیکی سیستم نامشخص یا متغیر با زمان باشند، مورد استفاده قرار می گیرند. سیستم کنترل تطبیقی در واقع طراحی و تنظیم کنترل کننده‌ها به صورت زمان واقعی می باشد. تنظیم کنترل کننده بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از سیستم به صورت زمان واقعی می باشد. (Error! Reference source not found). روشی که داده‌های سیستم برای تنظیم کنترل کننده به صورت زمان واقعی به منظور دستیابی به پاسخ مطلوب پردازش می شوند، انواع روش‌های کنترل تطبیقی را مشخص می کند.



شکل ۳۱-۱: اساس عملکرد مدل تطبیقی

تکنیک کنترل تطبیقی یک روش اتوماتیک می باشد که اطلاعات پیوسته‌ای در مورد وضعیت حالت‌های فعلی فرآیند و به منظور شناسایی فرآیند، تولید می کند. سپس عملکرد سیستم فعلی با وضعیت مطلوب یا بهینه مقایسه شده و بر اساس آن تصمیم‌گیری بمنظور تطبیق سیستم صورت می گیرد. در نهایت بمنظور رسیدن به وضعیت مطلوب، تصحیح مناسب در سیستم اعمال می شود. بنابراین سه عمل شناسایی، تصمیم‌گیری و تصحیح در یک سیستم تطبیقی وجود خواهد داشت. فرآیندهای یک سیستم تطبیقی به شرح زیر می باشند:

(۱) شناسایی پارامترهای ناشناخته یا اندازه‌گیری یک شاخص عملکرد (IP)

(۲) تصمیم‌گیری بر روی روش کنترل.

(۳) تصحیح پارامترهای کنترلر یا سیگنال ورودی

سیستم کنترل تطبیقی یک سیستم سلسله مراتبی می باشد:

سطح ۱: حلقه کنترل تطبیقی شامل فرآیند و کنترل کننده (کنترل فیدبک متداول)

سطح ۲: حلقه تطبیقی با قابلیت تنظیم پارامتر

۲-۱۰-۱- مقایسه روش تطبیقی و روش فیدبک معمولی

تغییرات نامعلوم و غیرقابل اندازه‌گیری پارامترهای یک فرآیند موجب کاهش کارایی یک سیستم کنترل می‌گردد. روش فیدبک اساساً در سیستم‌های کنترل متداول به منظور حذف اثر اغتشاشات بر متغیرهای خروجی استفاده می‌گردد. در این حالت سیستم کنترلی به گونه‌ای عمل می‌کند تا مقدار این متغیرها به مقدار مطلوب برساند. در این روش مقدار متغیر اندازه‌گیری و با مقدار مرجع مقایسه و خطای محاسبه شده به کنترل‌کننده ارسال می‌گردد تا سیگنال کنترلی مناسب تولید گردد. نحوه عملکرد سیستم در شرایط اغتشاش در پارامترهای سیستم نیز به همین روش می‌باشد. مطابق **Error! Reference source not found.** روش کنترل تطبیقی مقدار شاخص کارایی سیستم کنترلی را بر اساس ورودی‌ها، حالت‌ها، خروجی‌ها و اغتشاشات معلوم (قابل اندازه‌گیری) اندازه‌گیری می‌کند. سپس شاخص اندازه‌گیری شده با مقدار مطلوب شاخص کارایی مقایسه می‌شود. در مرحله بعد مکانیزم تطبیقی مورد استفاده پارامترهای کنترلی را به گونه‌ای کنترل می‌کند تا شاخص‌های کارایی به مقدار مطلوب برسد. این سیستم یک سیستم دینامیکی قابل تنظیم می‌باشد که کارایی آن می‌تواند با اصلاح پارامترهای کنترل‌کننده یا سیگنال کنترلی تنظیم می‌شود.

با وجود این که طراحی حلقه فیدبک با فرض معلوم و ثابت بودن پارامترها انجام گرفته، سیستم کنترل تطبیقی علاوه بر حلقه ی کنترل فیدبک دارای یک حلقه تکمیلی با پارامترهای قابل تنظیم می‌باشد که شاخص کارایی سیستم را با وجود اغتشاشات پایش می‌کند.

طراحی سیستم کنترل فیدبک معمولی با هدف حذف اثرات اغتشاشات روی متغیرهای کنترل شونده انجام می‌شود. در حالیکه طراحی سیستم کنترل تطبیقی با هدف حذف اثرات اغتشاشات پارامترها روی شاخص کارایی سیستم کنترلی می‌باشد. بنابراین سیستم کنترل تطبیقی را می‌توان یک سیستم کنترل فیدبک در نظر گرفت که متغیرهای کنترل شونده شاخص کارایی می‌باشند.

جدول ۲-۱: مقایسه سیستم کنترل تطبیقی با سیستم کنترل فیدبک معمولی

سیستم کنترل تطبیقی	سیستم کنترل فیدبک متداول
هدف: پایش شاخص کارایی عملکرد سیستم کنترلی برای متغیرهای نامعلوم و متغیر	هدف: پایش متغیرهای کنترل شونده بر اساس یک شاخص کارایی معین بر مبنای پارامترهای معلوم
شاخص‌های کارایی	متغیرهای کنترل
اندازه‌گیری شاخص کارایی	سنسورها
مقدار مطلوب شاخص کارایی	مقادیر مرجع
بلوک مقایسه‌کننده تصمیم‌گیرنده	مقایسه‌کننده
مکانیزم تطبیقی	کنترل‌کننده

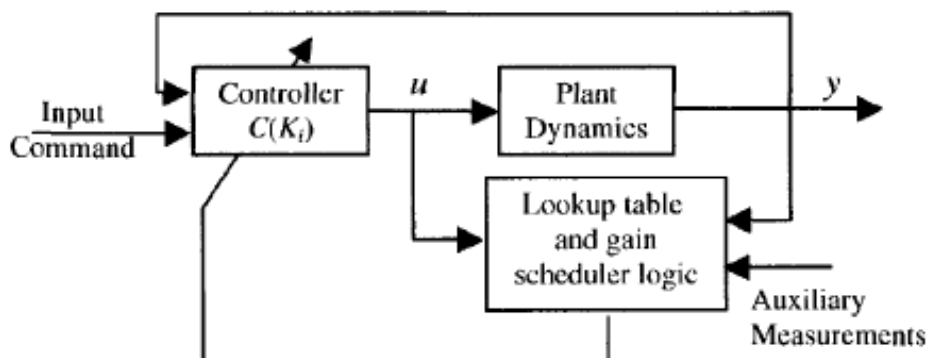
۳-۱۰-۱- روش کنترل تطبیقی

کنترل‌کننده تطبیقی بطور کلی به دو دسته تقسیم می‌شود:

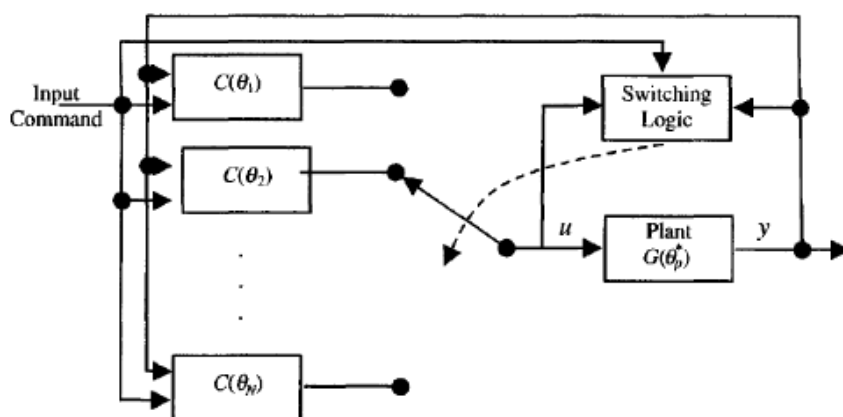
۱- کنترل‌کننده تطبیقی غیرمبتنی بر شناساگر

در این روش‌ها از هیچ تخمین گر پارامتری استفاده نمی‌شود بلکه از روشهای جستجو برای پیدا کردن کنترلر در فضای پارامترهای ممکن استفاده می‌شود یا از روش‌های سوئیچینگ میان کنترلرهای ثابت استفاده می‌شود. از جمله این روشهای

می توان به روش جدول بندی بهره^۱ و روش های سوئیچینگ (Error! Reference source not found.) و کلید زنی^۲ (Error! Reference source not found.) اشاره کرد.



شکل ۳۲-۱ روش جدول بندی بهره



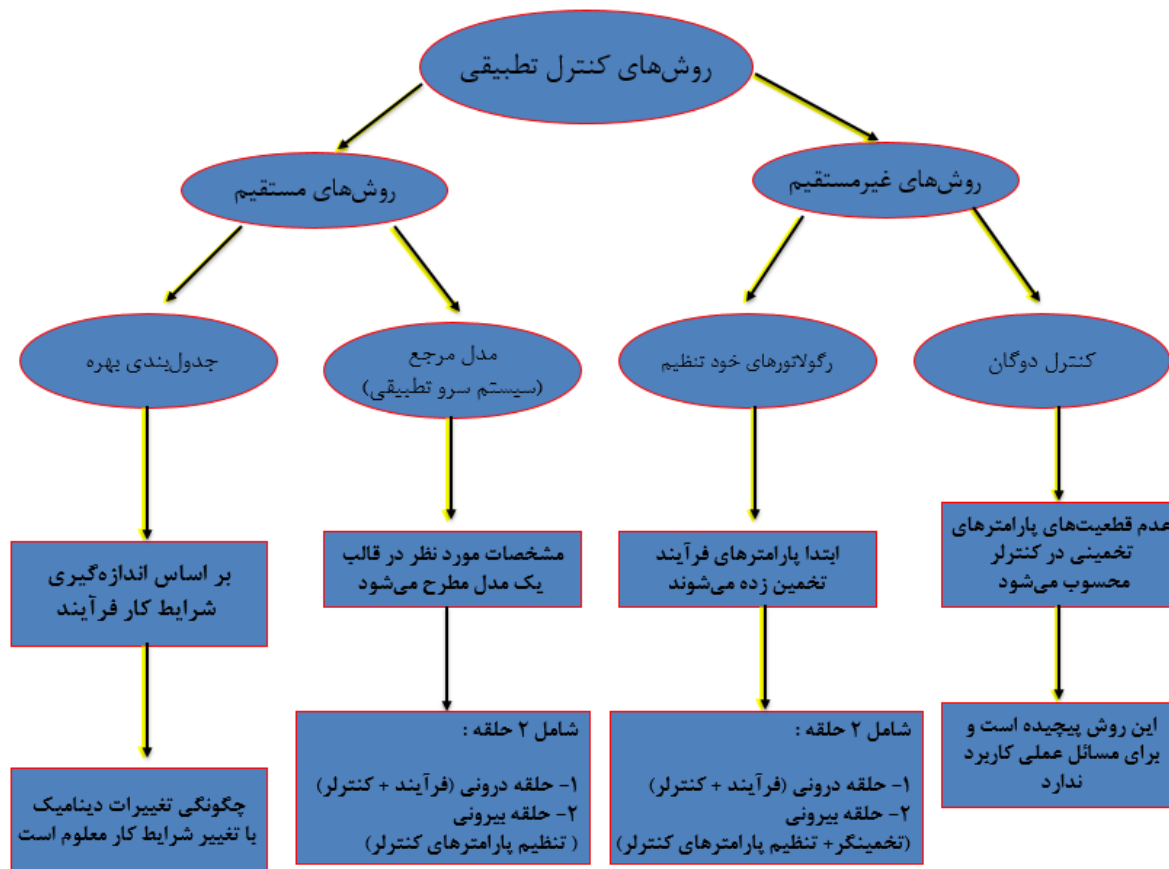
شکل ۳۳-۱: روش های سوئیچینگ و کلید زنی

۲- کنترل کننده های تطبیقی مبتنی بر شناساگر:

در این روش ها کنترل کننده تطبیقی متضمن یک قانون کنترل و یک تخمین گر پارامتر است که پارامترهای نامعلوم را در هر لحظه از زمان تخمین می زند و معمولاً قانون تطبیق نامیده می شود. این روش ها به صورت Error! Reference source not found. تقسیم بندی می شوند.

¹ Gain Scheduling

² Multiple Models And Switching Schemes



شکل ۳۴-۱: تقسیم بندی انواع کنترل کننده های تطبیقی مبتنی بر شناساگر

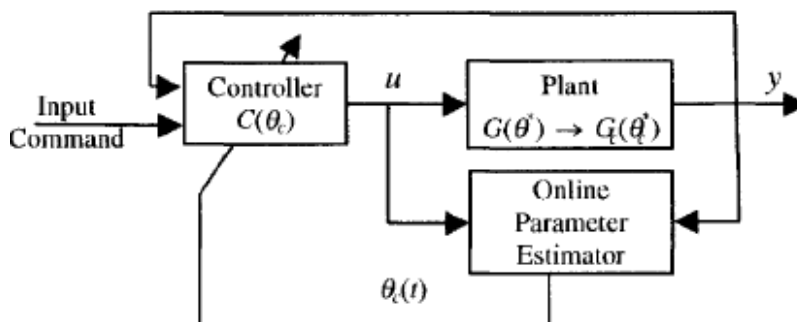
الف) کنترل کننده تطبیقی غیر مستقیم:

در این روش‌ها پارامترهای دستگاه به صورت آنلاین تخمین زده می شوند و سپس با انجام یک سری محاسبات میانی پارامترهای کنترل کننده از روی آنها محاسبه خواهند شد. (Error! Reference source not found.)

شکل ۳۵-۱: کنترل کننده تطبیقی غیر مستقیم

(ب) کنترل کننده تطبیقی مستقیم:

در این روش ها پارامترهای کنترلر به صورت مستقیم و بدون محاسبات میانی تخمین زده می شود (**Error!**).
(Reference source not found).



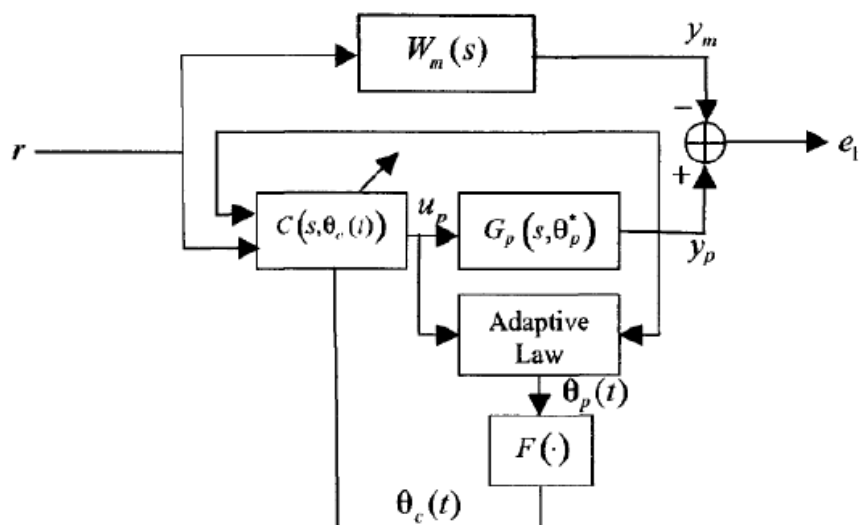
شکل ۳۶-۱: کنترل کننده تطبیقی مستقیم

۱-۱۱-۱ انتخاب کنترل کننده تطبیقی

در این بخش الگوریتم کنترل تطبیقی برای دستگاه های خطی تغییر ناپذیر با زمان مورد بررسی قرار می گیرد. روش کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع و جایاب قطب به صورت مستقیم و غیر مستقیم بررسی می گردد.

۱-۱۱-۱-۱ کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع

در طراحی این دسته از کنترل کننده ها ، رفتار و مشخصات مطلوب دستگاه را با یک مدل مرجع با تابع تبدیل مشخص توصیف می کنیم. برای نمونه بر اساس یک پاسخ خروجی با مشخصات پاسخ گذرای دلخواه نظیر زمان صعود و فراجاهش معین یک تابع تبدیل مرتبه دوم پایدار طراحی می شود. سپس یک کنترل کننده به گونه ایی طراحی می کنیم که پاسخ سیستم حلقه بسته رفتار مدل مرجع را دنبال نماید. برای این منظور باید تابع تبدیل حلقه بسته سیستم کنترل با تابع تبدیل مدل مرجع یکسان باشد. برای دست یابی به این تطابق تابع تبدیل ، کنترل کننده می بایست به گونه ایی طراحی شود که خطای میان خروجی مدل مرجع و خروجی دستگاه به صفر همگرا شود. مطابق **Error! Reference source not found.** تخمین گر پارامتر در هر لحظه با اندازه گیری ورودی و خروجی دستگاه تخمینی از پارامترهای دستگاه را فراهم می کند. سپس پارامترهای کنترل کننده با انجام یک سری محاسبات میانی از روی پارامترهای تخمین زده شده دستگاه محاسبه می شوند و کنترل کننده را بروز رسانی می کنند. توجه کنید که کنترل کننده مدل مرجع باید به گونه ایی طراحی شود که پاسخ سیستم حلقه بسته خروجی مدل مرجع را دنبال نماید. با تخمین مستقیم بهره های کنترلی و حذف محاسبات میانی یک کنترل کننده تطبیقی مستقیم خواهیم داشت.



شکل ۳۷-۱: کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع

۲-۱۱-۱- کنترل تطبیقی جایاب قطب‌ها

روش کنترل جایاب قطب یکی از معمول ترین روش های طراحی کنترل کننده در حوزه فضای حالت است که در تئوری سیستم های کنترل مدرن ارائه می شود. چنانچه دستگاه شرایط کنترل پذیری و مشاهده پذیری را برآورده سازد، طراحی یک کنترل کننده و در صورت لزوم یک روئیتگر به صورت اصولی به سادگی با جایابی قطب ها در محل های مطلوبشان انجام می شود. ابتدا، با فرض پارامترهای معلوم کنترل کننده جایاب قطب طراحی می شوند. سپس با توجه به اصل هم ارزی قطعیت به جای پارامترهای نامعلوم تخمین آن ها را جایگزین کرده و با آن ها مشابه پارامترهای معلوم رفتار می شود. با نوشتن مدل پارامتری و طراحی قوانین مبتنی بر تئوری پایداری لیاپانوف طراحی یک کنترل کننده تطبیقی جایاب قطب انجام می شود. همانطو که اشاره شد، فرض حداقل فاز بودن دستگاه در کنترل کننده های تطبیقی جایاب قطب برداشته می شود. بنابراین، این کنترل کننده ها به دسته وسیعی از دستگاه ها قابل اعمال می باشند. این کنترل کننده ها به دو شکل مستقیم و غیر مستقیم می توانند طراحی شوند. طراحی کنترل کننده های جایاب مستقیم به صورت غیر اصولی و ابتکاری انجام می شود و بدون محاسبات میانی پارامترهای کنترل کننده (بهره فیدبک حالت و بهره پیش خور) مستقیماً توسط قوانین تطبیق تخمین زده می شود. متأسفانه، با افزایش مرتبه دستگاه طراحی روش مستقیم پیچیده تر می شود. این روش طراحی به دسته محدودی از دستگاه ها قابل اعمال است. در مقابل روش طراحی غیر مستقیم به صورت کاملاً اصولی و مرحله به مرحله انجام می شود و قابل اعمال به دسته وسیعی از دستگاه ها است. در این روش، پارامترهای دستگاه با قوانین تطبیق تخمین زده می شود و سپس تخمین بهره های کنترل کننده با یک سری محاسبات میانی از روی تخمین پارامترهای دستگاه، محاسبه می شوند. خوشبختانه، با افزایش مرتبه دستگاه طراحی روش غیرمستقیم به سادگی قابل انجام است. تنها عیب روش غیرمستقیم احتمال از دست رفتن پایداری کنترل کننده تطبیقی در انجام محاسبات میانی است. در واقع، این مشکل با نزدیک شدن تخمین پارامترهای بهره به صفر رخ می دهد. با اصلاح قوانین تطبیق با استفاده از روش هایی نظیر تصویر پارامتر برای دوری از صفر شدن شدن تخمین پارامترها می توان جلوی این ناپایداری را گرفت. پیشنهاد می شود برای تولید گشتاور مرجع کنترل کننده FOC سیستم دینامومتر با توجه به سرعت اندازه گیری شده و سرعت مرجع محاسبه شده در معادله (۱-۲۳) از بین پیاده سازی های مختلف کنترل تطبیقی، که از روش جایاب قطب ها استفاده شود. چون نیازی به محاسبه تابع تبدیل صفر و قطب

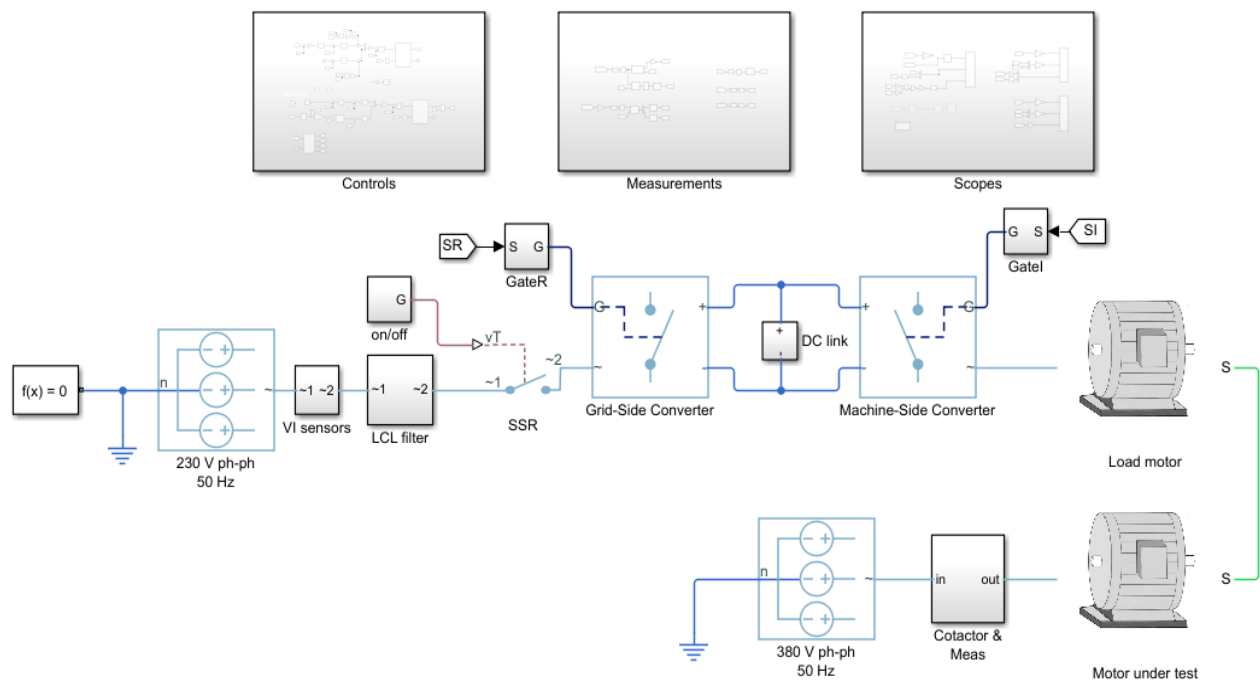
های کل سیستم دینامومتر ندارد و در نتیجه حجم محاسبات کنترل کننده را کاهش می دهد. مطابق آن چه در [۶۱] گزارش شده است، می توان گشتاور مرجع T_L^* برای کنترل کننده سیستم دینامومتر را از روابط زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned} T_e^* &= -k_1 e - k_2 \omega_{em} - k_3 \dot{\omega}_{em} \\ \dot{k}_1 &= \gamma_1 e^2 \operatorname{sgn}(T_{em}) \\ \dot{k}_2 &= \gamma_2 e \omega \operatorname{sgn}(T_{em}) \\ \dot{k}_3 &= \gamma_3 e \dot{\omega} \operatorname{sgn}(T_{em}) \end{aligned} \quad (۲۶-۱)$$

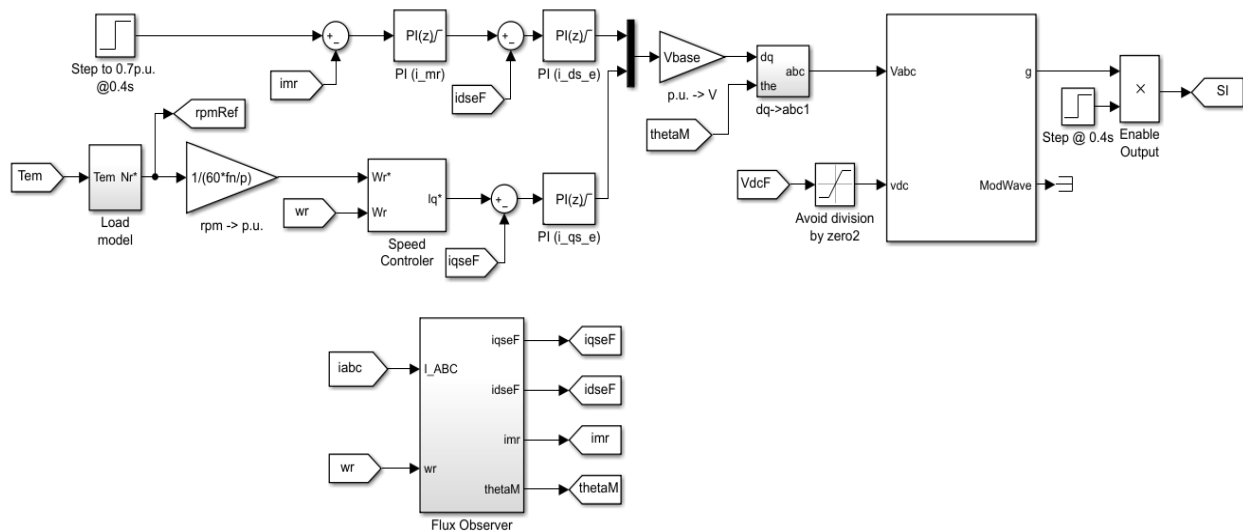
در اینجا e بیانگر خطا بین سرعت اندازه گیری شده ω_{em} و سرعت مرجع ω_{em}^* است. مقادیر γ_1 ، γ_2 و γ_3 ضرایب ثابت هستند.

۱-۱۲- شبیه سازی سیستم دینامومتر به روش PI و تطبیقی

به وسیله نتایج شبیه سازی در محیط Simulink می توان پاسخ سیستم دینامومتر در صورت تعریف یک مدل دلخواه بار به ازای دو کنترل کننده سرعت PI و تطبیقی مقایسه کرد. در اینجا یک سیستم دینامومتر ۱۰ KW در نظر گرفته شده که طراحی مشخصات آن در فصل بعدی توضیح داده خواهد شد. موتور تحت تست مستقیم به شبکه ۳۸۰ V متصل شده است. بلوک دیاگرام سیمولینک شبیه سازی سیستم دینامومتر در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. تمامی قسمت های بخش مبدل قدرت سیستم دینامومتر و موتور القایی از قسمت Simscape نرم افزار سیمولینک انتخاب شده اند. بلوک دیاگرام سیمولینک کنترل کننده سیستم درایو دینامومتر با توجه به آنچه در بخش ۱-۸ توضیح داده شد، در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. محاسبات کنترل کننده به صورت پریونیتی م ی باشد و پارامترهای موتور بارگذاری در فصل بعدی ارائه شده است. نتایج شبیه سازی پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت مدل دلخواه بار به ازای یک گشتاور ثابت با اندازه ۳۲.۸ N.m و ممان اینرسی مدل دلخواه بار ۰.۰۰۱ Kg.m² به ازای کنترل کننده های PI و تطبیقی به ترتیب در **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** نشان داده شده اند. ضرایب کنترل کننده سیستم دینامومتر در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده اند. ضرایب تنظیم کننده سرعت به روش PI مطابق **Error! Reference source not found.** است. چون در روش تطبیقی تنظیم کننده سرعت متفاوت است بنابراین ضرایب مخصوص آن به صورت $\gamma_1 = 1000$ ، $\gamma_2 = 1$ و $\gamma_3 = 0$ تعریف شده اند.



شکل ۳۸-۱: بلوک دیاگرام سیمولینک سیستم دینامومتر

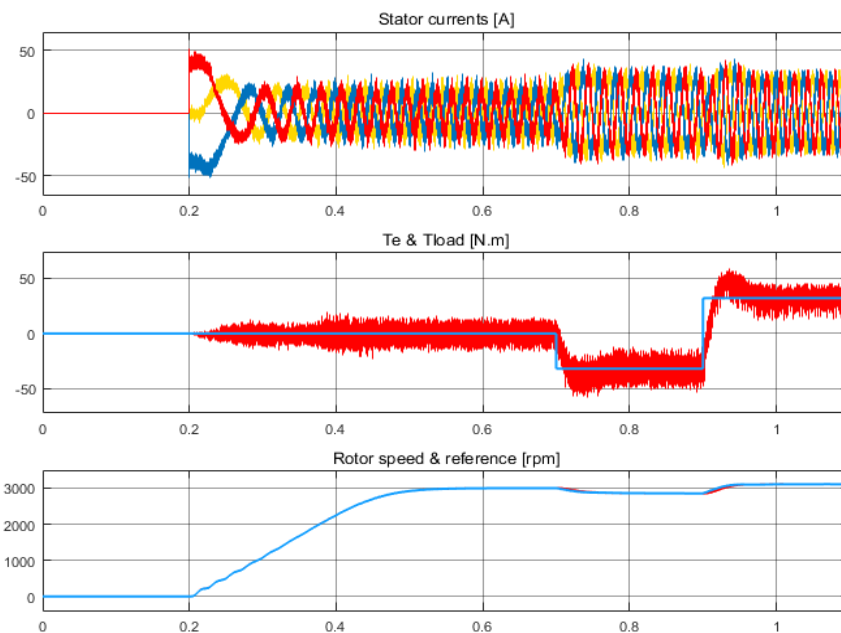


شکل ۳۹-۱: بلوک دیاگرام سیمولینک کنترل کننده سیستم درایو دینامومتر

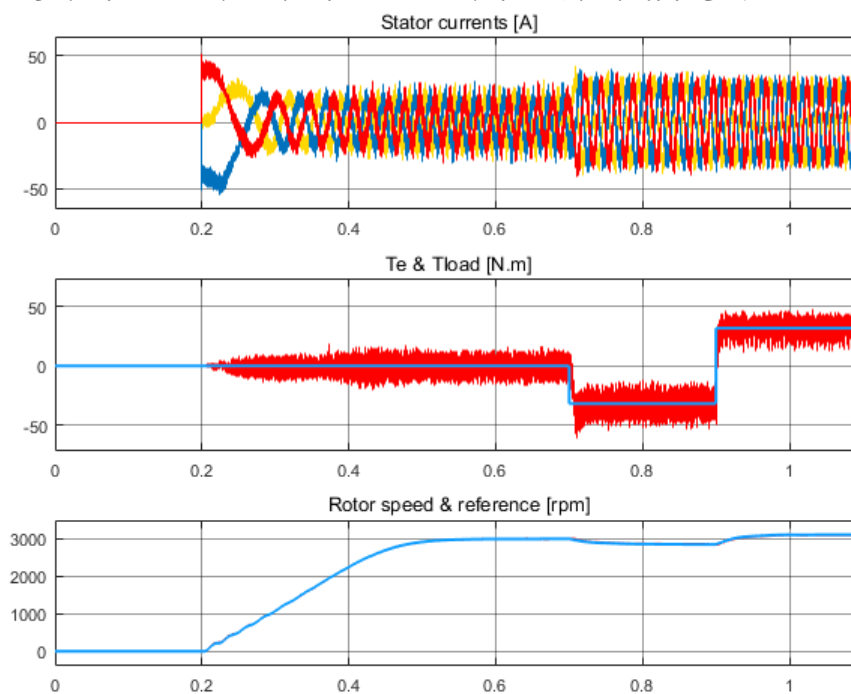
جدول ۳-۱: تنظیمات کنترل کننده سیستم دینامومتر

ضریب تناسب تنظیم کننده شار رتور	$K_{P_pr} = 52.22$
ضریب انتگرال تنظیم کننده شار رتور	$K_{I_pr} = 2790.51$
محدود کننده تنظیم کننده شار رتور	0 & 2 pu
ضریب تناسب تنظیم کننده سرعت	$K_{P_w} = 65.47$
ضریب انتگرال تنظیم کننده سرعت	$K_{I_w} = 3134.24$
محدود کننده تنظیم کننده سرعت	± 2 pu
ضریب تناسب تنظیم کننده جریان I_d	$K_{P_d} = 1.08$
ضریب انتگرال تنظیم کننده جریان I_d	$K_{I_d} = 207.58$
محدود کننده تنظیم کننده جریان I_d	± 2 pu
ضریب تناسب تنظیم کننده جریان I_q	$K_{P_q} = 1.08$
ضریب انتگرال تنظیم کننده جریان I_q	$K_{I_q} = 210.02$
محدود کننده تنظیم کننده جریان I_q	± 2 pu

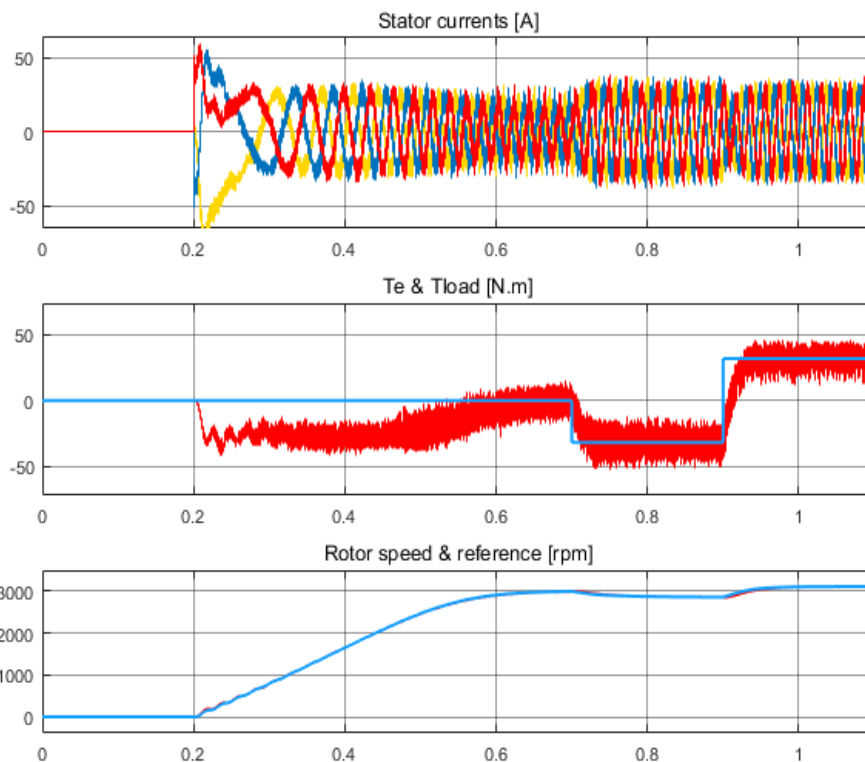
همانطور که مشاهده می‌شود موتور پس از ۰.۲۵ ثانیه پس از راه‌اندازی به سرعت 3000 rpm دست یافته است. در لحظه ۰.۷ ثانیه گشتاور ثابت مثبت و در لحظه ۰.۷ ثانیه یک گشتاور ثابت منفی به موتور اعمال شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، روش تطبیقی هنگام بارگذاری دارای دارای پاسخ دینامیکی سریع تر و بدون فراجش نسب به روش PI است. در **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** مشابه همین شبیه سازی به ترتیب برای کنترل کننده های PI و تطبیقی انجام شده است ولی با این تفاوت که ممان اینرسی مدل دلخواه بار 0.03 Kg.m^2 در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پاسخ دینامیکی موتور تغییر کرده است و تقریباً پس از ۰.۴ ثانیه از راه اندازی به سرعت 3000 rpm رسیده است. در نتیجه می‌توان دریافت که با تعریف یک مدل دلخواه برای بار در کنترل کننده سیستم دینامومتر پاسخ این بار را روی موتور مشاهده کرد و روش تطبیقی دارای پاسخ دینامیکی سریع تر و فراجش کمتری است.



شکل ۴۰-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت مدل دلخواه بار با کنترل کننده PI و اینرسی 1 Kg.m^2

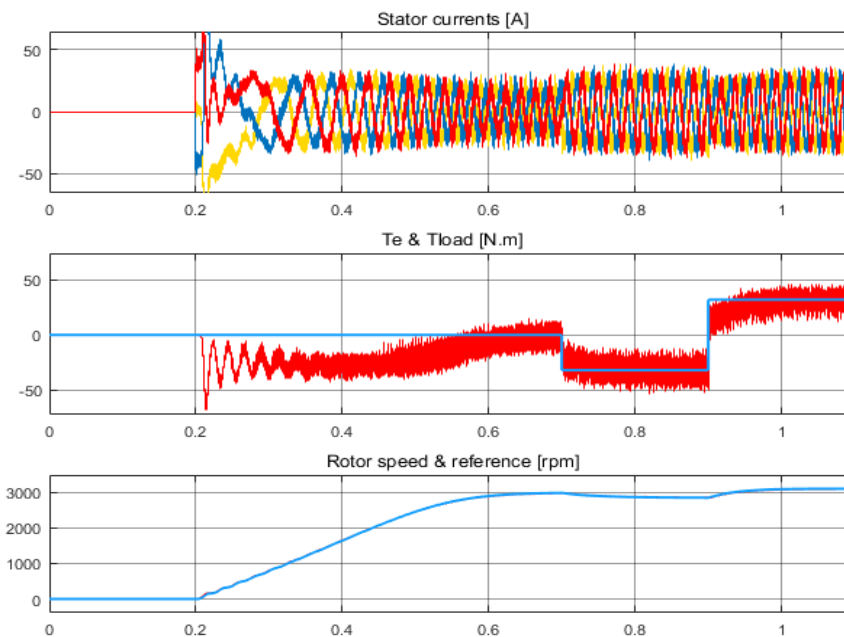


شکل ۴۱-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت مدل دلخواه بار با کنترل کننده تطبیقی و اینرسی 1 Kg.m^2

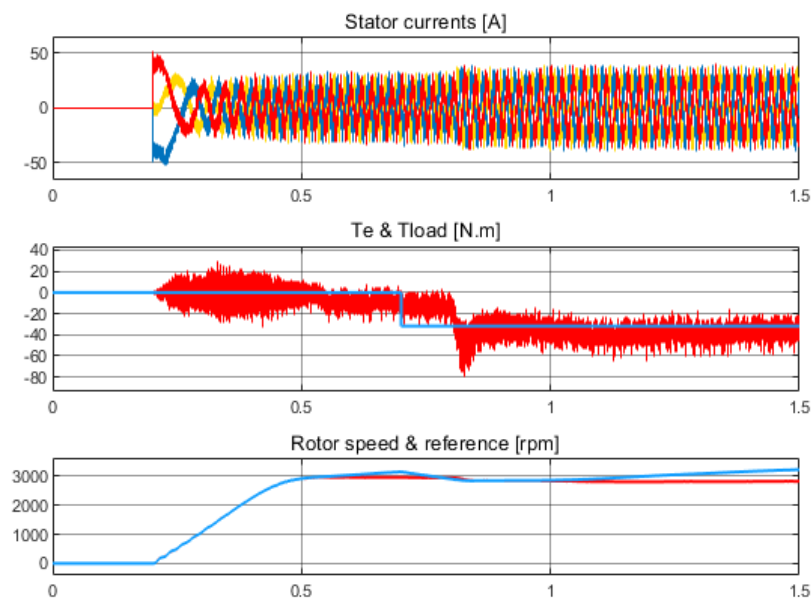


شکل ۴۲-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت مدل دلخواه بار با کنترل کننده PI و اینرسی 0.03 Kg.m^2

در برخی شرایط خاص ممکن است پارامترهای موتور دچار تغییر شوند که این امر سبب خطا در محاسبات کنترل کننده می شود. این خطا روی پاسخ دینامیکی و پاسخ نهایی سیستم دینامومتر تاثیر می گذارد. مقاومت روتور به دلیل اثر پوستی می تواند افزایش یابد و همچنین مقدار اندوکتانس مغناطیس کنندگی به دلیل اشباع هسته ممکن است دچار تغییر شود. به منظور مقایسه مقاوم بودن دو روش کنترلی PI و تطبیقی در صورت تغییر مقاومت رتور و اندوکتانس مغناطیس کنندگی دو شبیه سازی در **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** انجام شده است.

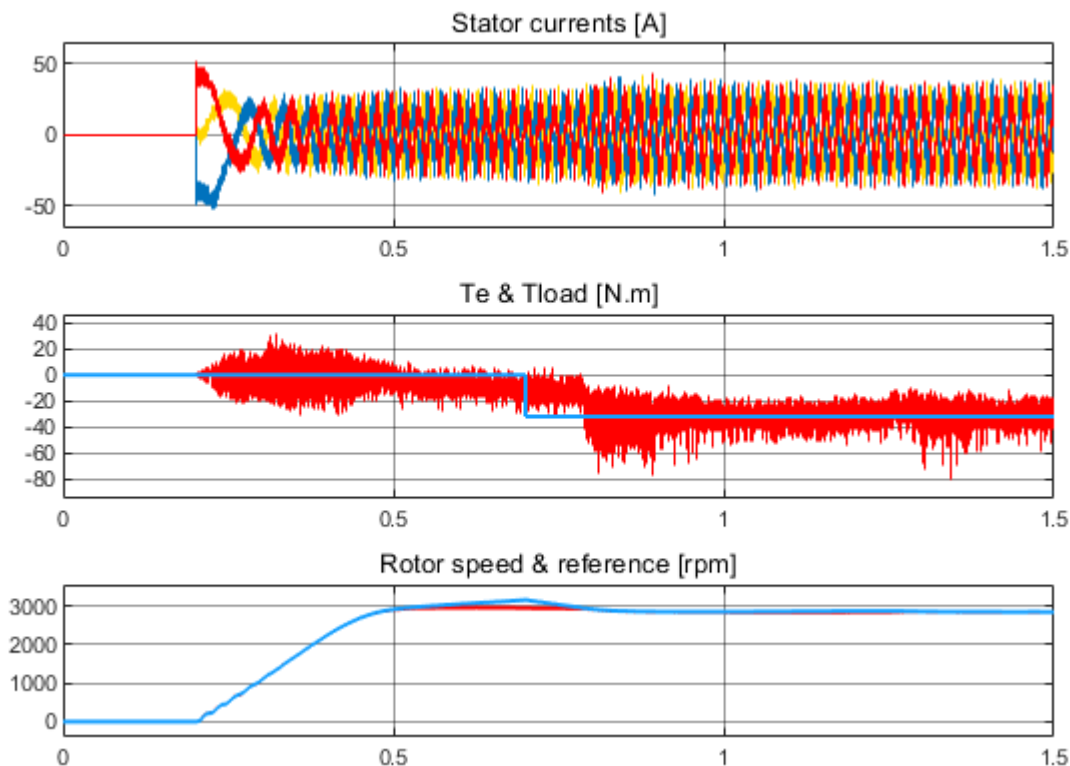


شکل ۴۳-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت مدل دلخواه بار با کنترل کننده تطبیقی و اینرسی 0.03 Kg.m^2



شکل ۴۴-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت تغییر مقاومت روتور و اندوکتانس مغناطیس کنندگی با کنترل کننده

PI



شکل ۴۵-۱: پاسخ موتور بارگذاری دینامومتر تحت تغییر مقاومت روتور و اندوکتانس مغناطیس کنندگی با کنترل کننده تطبیقی

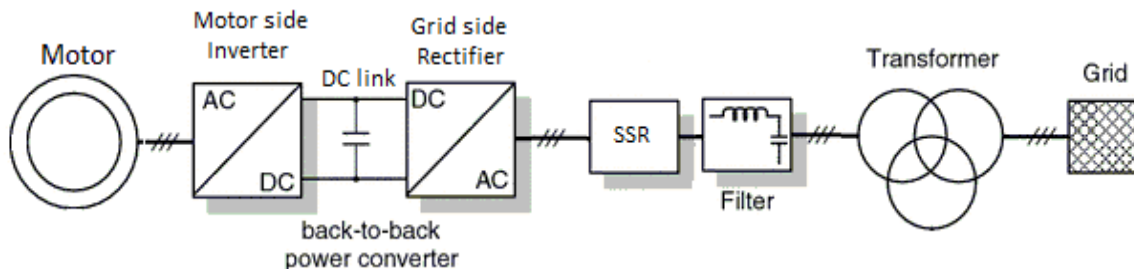
در اینجا از ابتدا شبیه سازی فرض شده است که مقاومت رتور ۲ برابر و اندوکتانس مغناطیس کنندگی ۱.۵ شده اند. همانطور که مشاهده می شود، سرعت موتور در روش تطبیقی با مرجع تعیین شده توسط مدل دلخواه بار در حالت پایدار یکسان شده است. اما در روش PI بین سرعت و مرجع خطا وجود دارد. همچنین پاسخ دینامیکی روش تطبیقی به مراتب بهتر از روش PI است. بنابراین می توان گفت روش تطبیقی در برابر تغییرات پارامترهای موتور مقاوم تر از روش PI است.

فصل ۲- فصل دوم: طراحی مفهومی اجزاء مبدل قدرت سیستم دینامومتر

۲-۱- مقدمه

اجزاء تشکیل دهنده مبدل قدرت (BTB)^۱ سیستم دینامومتر در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. این اجزاء شامل منبع تغذیه سه فاز، ترانسفورماتور سه فاز، فیلتر LCL سمت شبکه، رله حالت جامد (SSR)^۲، یکسوساز فعال سمت شبکه، لینک DC و اینورتر سمت موتور می باشند.

ترانسفورماتور سه فاز برای کاهش ولتاژ شبکه و ایزوله کردن دینامومتر از شبکه قرار داده شده است. وظیفه SSR قطع و وصل کردن ولتاژ تغذیه ورودی به صورت یک کلید الکترونیکی است. به منظور بهبود شکل موج جریان سمت شبکه از فیلتر LCL استفاده شده است. یکسوساز فعال سمت شبکه به صورت کاملاً کنترل شده ولتاژ AC شبکه را به یک ولتاژ DC قابل تنظیم تبدیل می کند. لینک DC شامل تعدادی خازن است که ولتاژ DC مبدل سمت شبکه را تثبیت می کند. اینورتر سمت موتور، ولتاژ لینک DC را به یک ولتاژ AC سه فاز با فرکانس و دامنه قابل تنظیم تبدیل می کند. در بخش‌های بعدی به طراحی هر کدام از این قسمت‌ها پرداخته می شود.



شکل ۲-۱: مبدل قدرت سیستم دینامومتر

۲-۲- مشخصات الکتریکی سیستم دینامومتر

موتوری که در این پروژه برای سیستم دینامومتر در نظر گرفته شده است یک موتور القایی ۱۱ KW موجود در آزمایشگاه با مشخصات پلاک نشان داده شده در جدول ۲-۱ است. چون در عمل نباید توان نامی دینامومتر از ۱۰ KW تجاوز کند، گشتاور نامی این موتور به دینامومتر اعمال نخواهد شد. در نتیجه گشتاور T_m اعمال شده به موتور در توان $P_m = 10 \text{ KW}$ از رابطه (۲-۲) قابل محاسبه خواهد بود [۶۲]:

$$T_m = \frac{P_m}{(2\pi/60)N_{nom}} = \frac{10000}{2\pi/60 \times 2910} \cong 32.8 \text{ N.m} \quad (2-1)$$

با محاسبه بازده این موتور η_m به وسیله رابطه (۲-۲) می توان حداکثر جریان استاتور I_m را از رابطه (۲-۳) به دست آورد:

$$\eta_m = \frac{P_{nom}}{\sqrt{3}V_{nom}I_{nom}\cos\phi} = \frac{11000}{\sqrt{3} \times 380 \times 22 \times 0.91} \cong 0.83 \quad (2-2)$$

$$I_m = \frac{P_m}{\sqrt{3}V_{nom}\eta_m\cos\phi} = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.83 \times 0.91} \cong 20.1 \text{ A} \quad (2-3)$$

به منظور شبیه سازی عملکرد این موتور تحت سیستم دینامومتر باید پارامترهای این موتور موجود باشد. در عمل برای به دست آوردن پارامترهای موتور از آزمایش های مدار باز و روتور قفل شده استفاده می شود. اما برای شبیه سازی می توان از

^۱ Back-to-back converter

^۲ Solid-State Relay

تخمین پارامترهای موتور القایی موجود در مطلب با توجه به مشخصات **Error! Reference source not found.** استفاده ک
رد. با استفاده از این تخمین گر پارامترهای تقریبی این موتور به صورت

به دست می‌آیند.

برای محاسبه شار دور نامی موتور، ابتدا باید ولتاژ محرکه موتور E_{nom} را از روابط زیر به دست آورد [۴۰]:

$$E_{nom}^{pu} = |V_{ph}^{pu} - (R_s + jL_{ls})I_{nom}^{pu}| \quad (۴-۲)$$

$$E_{nom}^{pu} = \left| \frac{1}{\sqrt{3}} - (0.08191 + j0.01942) \times 1 \right| = 0.4958 \text{ pu}$$

$$E_{nom} = 0.4958 \times 380 = 188.4 \text{ V} \quad (۲-۵)$$

حال شار دور نامی موتور λ_{nom} با فرض ضریب سیم پیچی $k_w = 0.95$ ، از روابط زیر می‌توان به دست آورد:

$$E_{nom} = 4.44\lambda_{nom}f_{nom}k_w \quad (۶-۲)$$

$$\lambda_{nom} = \frac{187.948}{4.44 \times 50 \times 0.95} \cong 0.9 \text{ Wb} \quad (۷-۲)$$

پیک ولتاژ اعمال شده توسط اینورتر به موتور باید از مقدار نامی ولتاژ موتور کمتر باشد. بنابراین مقدار ولتاژ لینک DC باید از پیک ولتاژ نامی موتور تقسیم بر اندیس مدولاسیون کمتر انتخاب شود. مولفه فرکانس اصلی ولتاژ خط نسبت به اندیس مدولاسیون m_a به صورت خطی افزایش می‌یابد. با توجه به [۶۳] حداکثر دامنه ولتاژ لینک DC V_{dc} از رابطه (۸-۲) محاسبه می‌شود:

$$V_{dc} \leq \frac{2\sqrt{2}V_{nom}}{\sqrt{3}m_a} = \frac{2 \times \sqrt{2} \times 380}{\sqrt{3} \times m_a} \cong \frac{621}{m_a} \text{ V} \quad (۲-۸)$$

بنابراین بر حسب تغییرات اندیس مدولاسیون حداکثر ولتاژ لینک DC می‌تواند تغییر کند. معمولاً به دلیل بهینه سازی اعوجاج هارمونیکی ولتاژ اینورتر اندیس مدولاسیون بین ۰.۸ تا ۱ در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه حداکثر ولتاژ لینک DC بین ۶۲۱ تا ۷۷۷ ولت می‌تواند تغییر کند که برای ادامه محاسبات می‌توان مقدار متوسط ۷۰۰ ولت را برای لینک DC در نظر گرفت.

جدول ۱-۲: مشخصات موتور القایی

مقدار	توصیف	متغیر
۱۱ KW	توان نامی	P_{nom}
۳۸۰ V	ولتاژ نامی خط	V_{nom}
۲۲ A	جریان نامی	I_{nom}
۵۰ Hz	فرکانس نامی موتور	f_{nom}

$\cos\phi$	ضریب قدرت	۰.۹۱
p	تعداد جفت قطب	۱
N_{nom}	سرعت نامی	۲۹۱۰ RPM

جدول ۲-۲: پارامترهای تقریبی موتور القایی

مقدار	توصیف	متغیر
$0.08191 pu$	مقاومت استاتور	R_s
$0.01942 pu$	اندوکتانس نشتی استاتور	L_{ls}
$0.01942 pu$	اندوکتانس نشتی روتور	L'_{lr}
$0.04368 pu$	مقاومت روتور	R'_r
$1.357 pu$	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی	L_M
$0.039 Kgm^2$	ممان اینرسی	J

تغذیه لینک DC به وسیله‌ی یک یکسوساز فعال مطابق **Error! Reference source not found.** تامین می‌شود. ی کسوساز فعال از سمت خروجی به لینک DC متصل شده و در سمت ورودی از طریق یک فیلتر به وسیله ترانسفوماتور سه فاز تغذیه می‌شود. چون در سمت اولیه یکسوساز فعال سلف وجود دارد، این مبدل به صورت افزایشنده ولتاژ عمل می‌کند. بنابراین ولتاژ خط اولیه یکسوساز فعال باید از ولتاژ لینک DC کوچک‌تر باشد. ولتاژ خط اولیه ایجاد شده توسط ترانسفوماتور معمولاً حداقل یک سوم ولتاژ لینک DC در نظر گرفته می‌شود. در این حالت با توجه به ولتاژ ۷۰۰ ولت لینک DC، ولتاژ خط اولیه یکسوساز فعال تقریباً ۲۳۴ ولت می‌تواند در نظر گرفته شود. با استفاده از کنترل یکسوساز و فیلتر می‌توان یک جریان با اعوجاج هارمونیک پایین و ضریب قدرت واحد از منبع دریافت کرد. جریان منبع را می‌توان از رابطه (۲-۹) به دست آورد:

$$I_s = \frac{P_n / \eta_s}{\sqrt{3} V_s} \quad (2-9)$$

در اینجا η_s بازده دیناموتر را بیان می‌کند. اگر بازده دینامومتر ۰.۸ در نظر گرفته شود، آن گاه جریان منبع را می‌توان از (۲-۱۰) محاسبه کرد. البته تلفات و بازده واقعی مبدل را می‌توان به وسیله نتایج شبیه سازی با تخمین مناسب تر به دست آورد.

$$I_s = \frac{10000 / 0.8}{\sqrt{3} \times 234} = 29.6 A \quad (2-10)$$

۳-۲- مدارات حفاظتی

با هدف حفاظت از مازول های قدرت تحت شرایط بروز خطا مدارات حفاظتی پیش بینی گردیده است. انواع خطاهای متداول در یک سیستم درایو در جدول ۳-۲ خلاصه گردیده است. برای حفاظت از سیستم دینامومتر در برابر خطاهای ناخواسته ای که در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است، تدابیر مختلفی اندیشیده شده است. علاوه بر موارد ذکر شده در جدول ۳-۲ حفاظت های دیگری جهت جلوگیری از آسیب رسیدن به مازول اینورتر خروجی سیستم درایو در نظر گرفته شده که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

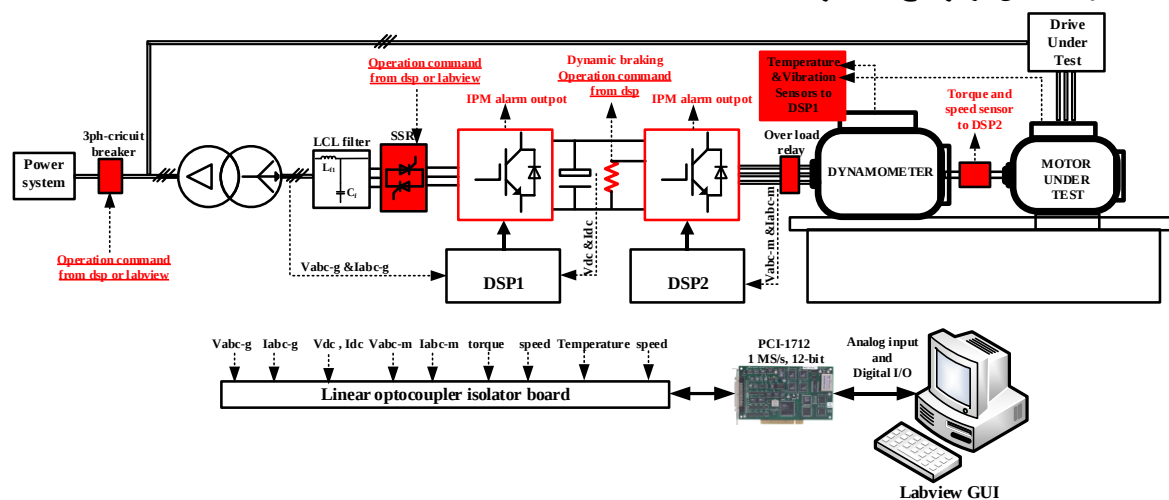
جدول ۳-۲: خطاها و روش حفاظت از آن ها در سیستم دینامومتر

نوع خطا	روش حفاظت	محدوده مجاز
حفاظت اضافه ولتاژ لینک DC	اندازه گیری ولتاژ لینک DC با سنسور ولتاژ و فعال کردن ترمز دینامیکی	۷۰۰ ولت با باند هیسرزیس ۱۰ ولت
حفاظت کمبود ولتاژ لینک DC	اندازه گیری ولتاژ لینک DC با سنسور ولتاژ و قطع رله الکترونیک سه فاز ورودی در صورت کاهش شدید ولتاژ	۵۰۰ ولت با باند هیسرزیس ۱۰ ولت
اضافه سرعت	اندازه گیری سرعت رتور با استفاده از انکودر سرعت و Shutdown دستگاه توسط DSP در صورت افزایش شدید سرعت	
اضافه گشتاور	اندازه گیری گشتاور و Shutdown دستگاه توسط DSP	
اضافه جریان	اندازه گیری جریان با سنسور اثر هال و محدود سازی توان دستگاه	۳۰ آمپر با باند هیسرزیس ۱ آمپر
حفاظت اتصال کوتاه	اندازه گیری جریان با سنسور اثر هال و و Shutdown دستگاه توسط DSP	۴۵ آمپر
اضافه حرارت	اندازه گیری دمای بدنه موتور با سنسور حرارتی و فعال سازی سیستم خنک سازی توسط DSP	دمای بدنه موتور ۷۰ درجه سانتیگراد
ارتعاشات مکانیکی	اندازه گیری دامنه ارتعاشات با استفاده از سنسور ارتعاشات و توقف دستگاه در صورت بروز رزونانس مکانیکی و افزایش شدید سطح ارتعاشات	افزایش شدید سطح ارتعاشات در اثر رزونانس طبیعی
حفاظت جریان های ناشی فرکانس بالا	استفاده از خازن های حذف اسپایک ولتاژ (خازن اسنابر) در ورودی اینورتر و نحوه چینش مناسب اجزاء قدرت	-

Error! Reference source not found. دیاگرام کلی سیستم میز تست را نمایش می دهد. بخش های با رنگ ق

رمز مازول های مرتبط با حفاظت دستگاه را نمایش می دهد. بروز هر گونه خطا اعم از خطای اتصال کوتاه، اضافه جریان و

اضافه حرارت توسط مازول IPM آشکار و علاوه بر حفاظت سوئیچ‌های قدرت، پالس خطای خروجی این مازول به بردهای DSP ارسال و از طریق رله‌های ورودی امکان توقف ایمن دستگاه در شرایط بروز خطا فراهم می‌گردد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد کلیه کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی (ولتاژ، جریان، سطح ارتعاشات، سرعت و گشتاور) از طریق برد DSP اندازه‌گیری شده و در صورتی که هر یک از این کمیت‌ها مطابق جدول ۲-۳ از محدوده مجاز تعریف شده تجاوز نماید سیستم کنترلی فرمان‌های حفاظتی را به رله‌های الکترونیک ارسال می‌نماید. برای نمونه در صورتیکه ولتاژ شین DC به هر دلیلی از حد مجاز ۷۰۰ ولت بیشتر گردد برد DSP بطور اتوماتیک ترمز دینامیکی را فعال و انرژی برگشتی به شین DC را در این مقاومت مستهلک می‌کند. در صورت افزایش ولتاژ از ۷۵۰ ولت سیستم کنترلی فرمان قطع رله‌های SSR ورودی و کنتاکتور ورودی را صادر می‌کند. به منظور اطمینان از عملکرد ایمن دستگاه کلیه سیگنال‌های اندازه‌گیری شده از طریق یک برد ایزوله به کارت I/O ارسال می‌گردد. در محیط Labview پیاده‌سازی شده در کامپیوتر این کمیت‌ها پردازش و در صورت بروز هر گونه خطا در دستگاه اخطارهای لازم به کاربر داده می‌شود و از طریق خروجی‌های دیجیتال فرمان قطع به رله‌های ورودی ارسال می‌گردد. بنابراین علاوه بر بردهای DSP، برنامه Labview نیز بطور موازی حفاظت دستگاه و عملکرد ایمن اجزاء میز تست را تضمین می‌کند. در بخش‌های بعدی در مورد حفاظت‌های مورد نیاز مازول‌های قدرت مفصل‌تر توضیح داده خواهد شد.

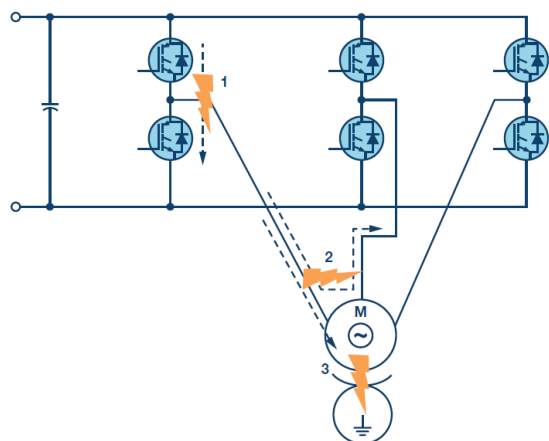


شکل ۲-۲: دیاگرام کلی میز تست

۲-۳-۱- حفاظت اتصال کوتاه

یکی از حفاظت‌های اساسی در یک سیستم درایو، حفاظت اتصال کوتاه می‌باشد. مطابق **Error! Reference source not found.** سه نوع خطای اتصال اتصال کوتاه در بخش اینورترتر محتمل می‌باشد:

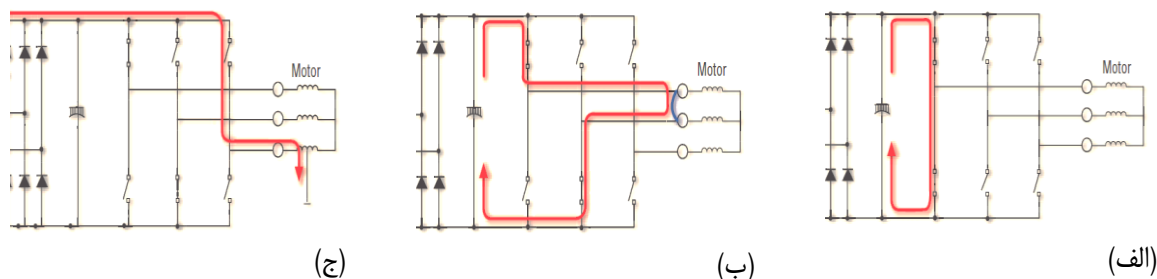
- (الف) اتصال کوتاه به دلیل روشن شدن همزمان دو سوئیچ روی یک ساق: این خطا می‌تواند در اثر تداخل مغناطیسی یا اختلال در عملکرد سیستم کنترل رخ دهد.
- (ب) اتصال کوتاه فاز به فاز: این خطا معمولاً در شرایطی از قبیل شکست عایقی بین سیم پیچ‌های فاز فرسوده، اضافه حرارت و اضافه ولتاژ شدید رخ می‌دهد.
- (ج) اتصال کوتاه فاز به زمین: این خطا می‌تواند به دلایل شکست عایقی بین سیم پیچی‌های موتور با بدنه فرسوده، اضافه حرارت یا اضافه ولتاژ شدید واقع شود.



شکل ۳-۲: انواع خطاهای اتصال کوتاه

در **Error! Reference source not found.** می‌توان مدار معادل انواع خطاهای اتصال کوتاه را مشاهده ن

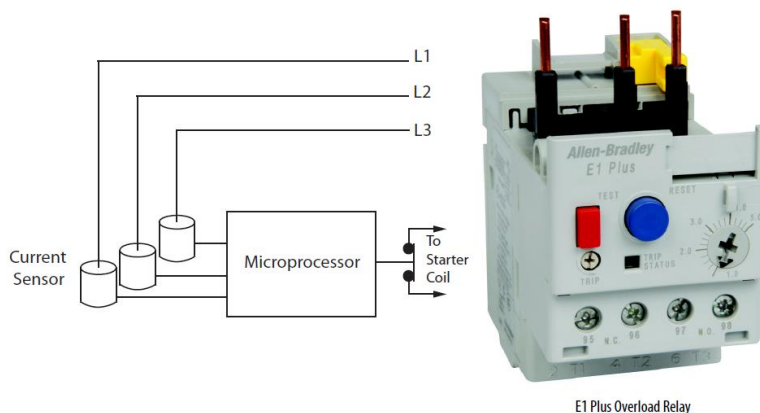
مود.



شکل ۴-۲: مدار معادل انواع خطاهای اتصال کوتاه (الف) روشن شدن همزمان سوییچها روی یک ساق (ب) خطای فاز به فاز (ج) خطای فاز به زمین

۲-۳-۲- خطای اضافه جریان (اضافه بار):

به منظور حفاظت اضافه بار از رله محافظ الکترونیکی استفاده می‌گردد. در این رله ها با افزایش جریان مقدار حد آستانه تعیین شده، پس از یک زمان تاخیر قابل تنظیم فرمان قطع صادر می‌گردد. **Error! Reference source not found.** ک نمونه از رله های اضافه جریان الکترونیکی را نمایش می دهد. در این نوع از رله ها دو پارامتر حد آستانه جریان و تاخیر زمانی قابل تنظیم می باشد.

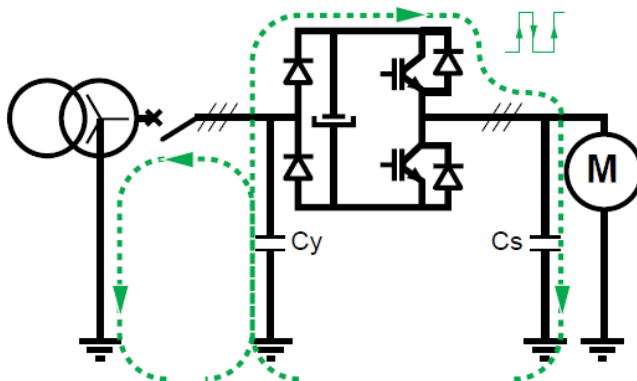


شکل ۵-۲: رله اضافه جریان الکترونیکی

۲-۳-۳- حفاظت جریان های ناشی فرکانس بالا:

وجود خازن های پارازیتی بین اجزاء مختلف سیستم درایو و اعمال ولتاژهای پالسی در خروجی سوئیچ های قدرت موجب
 نیست جریان های فرکانس بالا بین بخش های مختلف سیستم درایو می گردد (**Error! Reference source not found.**). برخی از این خازن های پارازیتی عبارتند از:

- خازن های پارازیتی مابین ماژول های IGBT ، هادی ها و کیس دستگاه
- خازن های پراکندگی بین سیم پیچ های موتور و زمین که وابسته به ظرفیت موتور می باشد.
- خازن بین تغذیه ورودی و زمین دستگاه
- خازن پراکندگی بین هادی های خروجی اینورتر و زمین دستگاه
- خازن حذف اسپایک ولتاژ و تداخل امواج



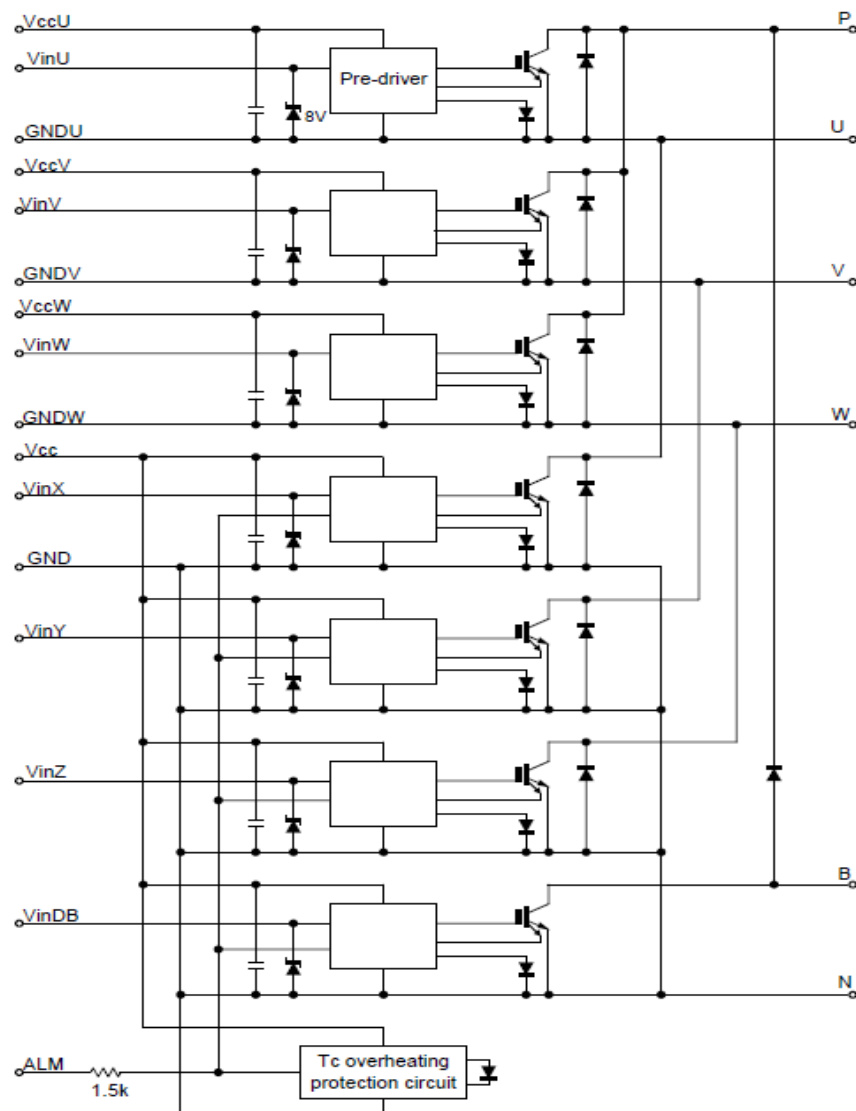
شکل ۶-۲: خازن های پارازیتی موجود در سیستم درایو

نقاطی از سیستم درایو که دارای تغییرات ولتاژ شدید می باشد (dv/dt بالا) وجود این خازن های پارازیتی مسیری را
 برای عبور جریان های پارازیتی فراهم می آورد که می تواند مشکل ساز باشد. این مساله بخصوص در بردهای سنسور
 الکترونیک و برد کنترل می تواند موجب افزایش نویز و اختلال در سیستم کنترلی گردد. بر همین اساس در این پروژه ضمن

استفاده از خازن های حذف اسپایک ولتاژ (خازن اسنابر) در ورودی اینورتر، نحوه چینش اجزاء قدرت و مدارات الکترونیک باید به گونه ایی باشد تا حداقل جریان پارازیتی را موجود باشد. در بخش طراحی تابلو چیدمان اجزاء تابلو ارائه گردیده است.

۴-۳-۲- حفاظت از مازول سوئیچ الکترونیک قدرت:

یکی از بخشهای حساس سیستم درایو سوئیچ های الکترونیک قدرت می باشند. بر اساس طراحی انجام گرفته در این دستگاه از یک مازول IGBT قدرت مدل 7MPB75RA120 استفاده گردیده است که در بخش ۲-۴ در مورد آن مفصل تر توضیح داده خواهد شد. با توجه به هزینه بالای مازول های هوشمند IPM لازم است تا در شرایط بروز هر کدام از خطاهای اضافه جریان، اضافه حرارت یا اتصال کوتاه سیستم کنترلی بصورت ایمن مازول اینورتر را متوقف و اقدامات لازم بعدی را طبق الگوریتم مدیریت خطای پیاده سازی شده انجام دهد. **Error! Reference source not found.** معماری داخلی این مازول ۷ تایی IGBT را نمایش می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد در کنار مدارات درایو گیت یک واحد حفاظت اضافه جریان، اضافه حرارت و حفاظت اتصال کوتاه جریان در این مازول هوشمند پیاده سازی گردیده تا در صورت بروز هر کدام از این خطاها پالسهای ورودی متوقف و از طریق پایه ALM یک پالس خطا جهت انجام الگوریتم خطا به مدارات کنترل ارسال می گردد. در ادامه برای هر کدام از بخش های حفاظت از مازول سوئیچ الکترونیک قدرت توضیحاتی ارائه خواهد شد.



شکل ۷-۲: معماری داخلی 7MPB75RA120 و واحد تشخیص خطای داخلی

الف) حفاظت اضافه جریان:

Error! Reference source not found. عملکرد سیستم حفاظت مازول IPM را در شرایط مختلف بروز خ

طای اضافه جریان نشان می دهد. عملکرد سیستم حفاظتی در مراحل مختلف به شرح زیر بررسی می گردد:

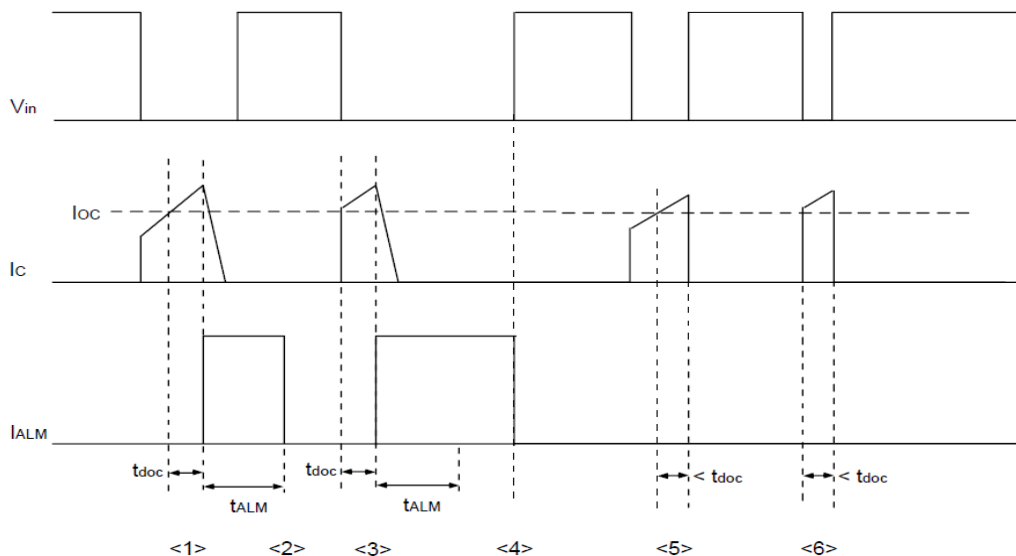
(۱) همانگونه که ملاحظه می گردد در صورتیکه جریان کلکتور از حد آستانه IOC بیشتر گردد و زمان آن نیز از TDOC

تجاوز نماید پایه ALM فعال می گردد.

(۲) بعد از گذشت زمان t_{ALM} و در صورت off بودن پالس ورودی خروجی ALM بازنشانده می شود. در این شرایط

جریان به محدوده مجاز قرار دارد.

(۳) و (۴) در صورت وجود خطای اضافه جریان مرحله اول مجدد تکرار شده و خروجی ALM ظاهر می‌گردد. در این حالت مشابه حالت (۲) پس از گذشت زمان t_{ALM} به دلیل روشن بودن سوئیچ خروجی آلارم همچنان فعال می‌ماند تا زمانیکه سوئیچ در وضعیت OFF قرار گیرد ریست نمی‌شود.



شکل ۸-۲: دیاگرام زمانی مدار حفاظت اضافه جریان

(۵) و (۶) در صورتیکه با روشن شدن سوئیچ و افزایش جریان از حد مجاز IOC در صورتیکه قبل از سپری شدن زمان TDOC سوئیچ خاموش شود در این صورت خروجی مدار حفاظت غیر فعال و مازول IPM عملکرد نرمال خود را خواهد داشت.

ب) حفاظت اتصال کوتاه:

Error! Reference source not found. دیاگرام زمانی مدار حفاظت از اتصال کوتاه مازول را نمایش می‌دهد. ع

ملکرد سیستم حفاظتی در مراحل مختلف به شرح زیر بررسی می‌گردد:

(۱): در صورتیکه جریان کلکتور از حد آستانه ISC بیشتر گردد و از مدت زمان TDOC تجاوز نماید خروجی ALM فعال شده و سوئیچ به آرامی خاموش می‌شود. در این حالت اتصال کوتاه بار بعد از مدت کوتاهی از شرایط نرمال روشن شدن سوئیچ اتفاق افتاده است.

(۲): بعد از گذشت زمان TALM در صورتیکه پالس ورودی در وضعیت خاموش باید خروجی ALM ریست می‌شود.
(۳): بعد از ریست شدن خروجی ALM با روشن شدن مجدد سوئیچ در صورتیکه مشکل اتصال کوتاه رفع نشده باشد مشابه مرحله (۱) خروجی آلارم فعال و سوئیچ به صورت ایمن خاموش می‌شود. در این حالت مطابق شکل اتصال کوتاه در همان لحظه روشن شدن سوئیچ اتفاق افتاده است

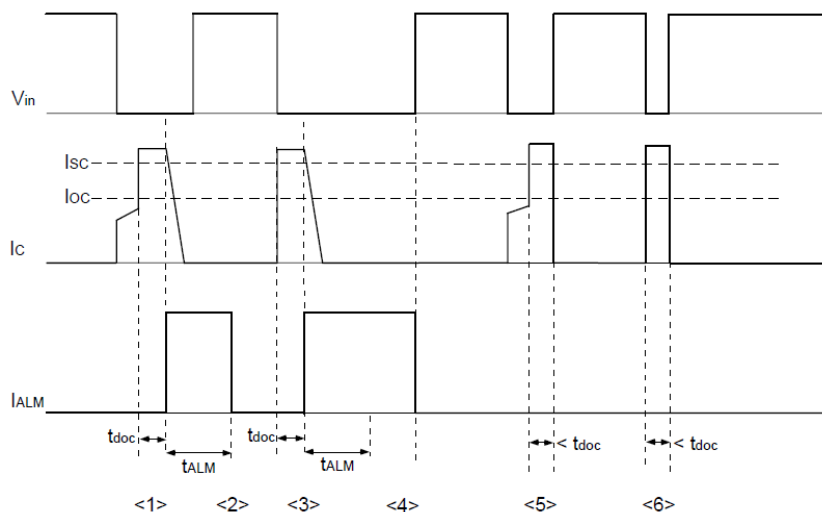
(۴): با گذشت زمان TALM در صورتیکه وضعیت پالس ورودی در حالت ON باشد خروجی ALM همچنان فعال و اجازه روشن شدن سوئیچ داده نمی‌شود.

(۵) و (۶): با تغییر وضعیت پالس ورودی به حالت OFF خروجی ALM ریست شده و با اعمال پالس ورودی در حالت ON سوئیچ روشن می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌شود در صورت اتصال کوتاه بار (بعد از روشن شدن سوئیچ یا کمی

بعد از آن (با وجود تجاوز جریان از حد ISC در صورتیکه قبل از گذشت زمان TDOC سوئیچ خاموش گردد خروجی ALM غیر فعال خواهد ماند و ماژول IPM عملکرد عادی خود را ادامه می دهد.

ج) اضافه حرارت دمای بدنه :

جدول ۲-۴ دیاگرام زمانی عملکرد سیستم حفاظت حرارتی دمای بدنه ماژول IPM را نمایش می دهد. مراحل مختلف کاری به شرح زیر بررسی می گردد:



شکل ۹-۲: دیاگرام زمانی مدار حفاظت اتصال کوتاه

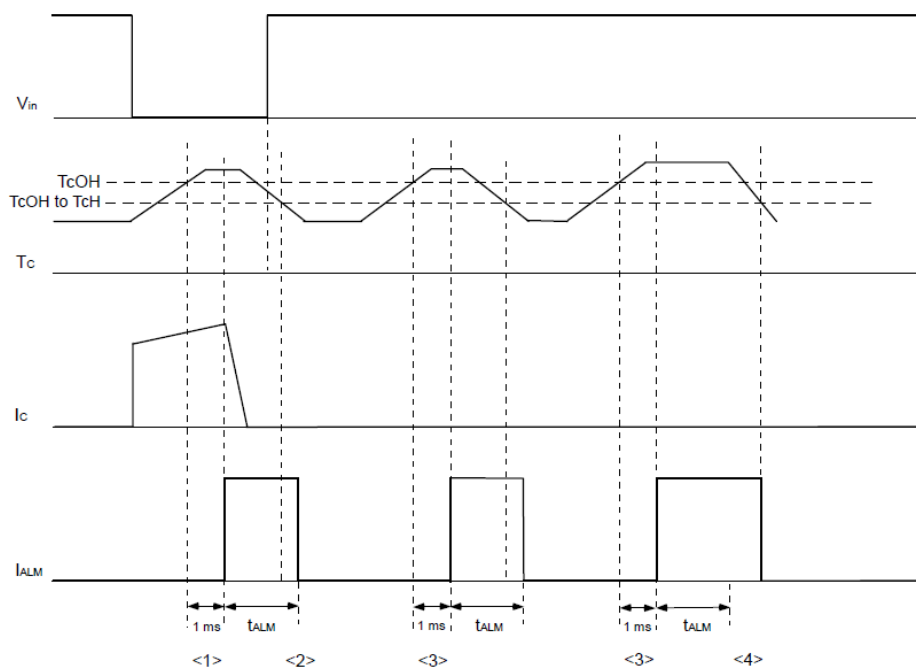
(۱) : در صورتیکه دمای بدنه T_c از مقدار آستانه $TCOH^1$ از مدت زمان 1msec تجاوز نماید و پالس ورودی نیز در وضعیت on باشد کلیه سوئیچهای ساق پایینی ماژول IPM بصورت ایمن خاموش می شود و خروجی ALM فعال می گردد.

(۲) : در صورتیکه TC قبل از اینکه زمان TALM سپری شود به مقدار TCOH-TCH برسد، خروجی خطا ریست می شود.

(۳) : در صورتیکه TC بطور پیوسته برای بازه زمانی 1msec از حد آستانه TCOH تجاوز نماید، خروجی ALM علارغم وضعیت خاموش سوئیچها همواره فعال خواهد بود و اجازه روشن شدن سوئیچ را نمی دهد.

(۴) : در صورتیکه قبل از طی شدن زمان TALM دمای بدنه به TCOH-TCH کاهش پیدا نکند خروجی ALM ریست نمی شود. فقط زمانی که دمای بدنه کمتر از TCOH-TCH گردد خروجی ALM ریست می شود. به منظور حفاظت اضافه حرارت چیپ های داخلی ماژول IPM مداری طراحی گردیده تا مشابه جدول ۲-۴ مانع افزایش دمای اتصالات نیمه اتصالات نیمه هادی داخلی ماژول IPM می گردد.

¹ Temperature Case Overheating Protection



جدول ۲-۴ دیگرام زمانی حفاظت اضافه دمای بدنه مازول IPM

۲-۴-۲- مدل اجزاء الکترونیک قدرت

اجزاء الکترونیک قدرت سیستم دینامومتر شامل سه بخش یکسوساز فعال ورودی، اینورتر خروجی و کلید قدرت هستند. به منظور به دست آوردن مدل اجزاء الکترونیک قدرت سیستم دینامومتر، ابتدا باید نوع المان‌ها را با توجه جریان حالت دائمی در حالت وصل، پیک جریان حالت گذرا و پیک ولتاژ در حالت قطع انتخاب کرد. پیک جریان حالت گذرا بستگی به شرایط درایو در لحظات راه‌اندازی دارد که با توجه به نتایج شبیه سازی می‌توان مقدار آن را به دست آورد. به منظور تامین عملکرد مناسب اجزاء الکترونیک قدرت و همچنین حفاظت از آن‌ها در شرایط اضافه ولتاژ و اضافه جریان، باید مشخصه پیک ولتاژ را تقریباً دو برابر مقدار محاسبه شده و جریان عبوری حالت دائمی را سه برابر مقدار محاسبه شده برای انتخاب المان‌ها در نظر گرفت.

جریان عبوری و پیک ولتاژ کلیدهای اینورتر خروجی را می‌توان به ترتیب تقریباً برابر جریان موتور یعنی ۲۰.۱ آمپر و ولتاژ لینک DC مقدار ۷۰۰ ولت در نظر گرفت. همچنین، جریان ورودی و پیک ولتاژ دیودهای یکسوساز فعال را می‌توان به ترتیب تقریباً برابر جریان مقدار ۲۹.۵ آمپر و ولتاژ لینک DC ۷۰۰ ولت در نظر گرفت. بنابراین دو مازول اینورتر ۱۲۰۰ ولت با جریان ۷۵ آمپر می‌تواند برای یکسوساز و اینورتر خروجی مناسب باشند. از آن جایی که کلید قدرت عملکرد سوئیچینگ ندارد نیازی نیست جریان نامی آن سه برابر جریان عبوری باشد. بنابراین یک کلید قدرت سه فاز با ولتاژ ۳۸۰ ولت و جریان ۴۰ آمپر می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

با توجه به نمودار ولتاژ-جریان اجزاء الکترونیک قدرت در حالت وصل می‌توان روابط خطی (۲-۱۱) تا (۲-۱۳) را به ترتیب برای کلیدهای اینورتر، دیود معکوس کلیدهای اینورتر و کلید قدرت نوشت:

$$V_{CE}^{inv} = V_{on_s}^{inv} + R_{on_s}^{inv} \times I_C^{inv} \quad (2-11)$$

$$V_{ce}^{br} = V_{on_s}^{br} + R_{on_s}^{br} \times I_c^{br} \quad (2-12)$$

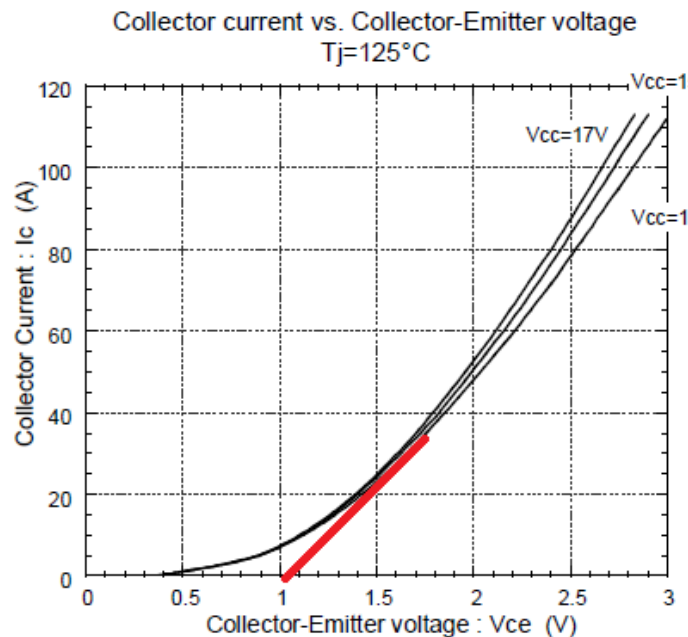
$$P_{ssr} = 3 \times R_{on_s}^{ssr} \times I_{ssr3}^2 \quad (2-13)$$

۲-۴-۱- اینورتر خروجی و یکسوساز فعال ورودی

از بین ماژول‌های اینورتر، اینورتر (IPM) ساخت شرکت FUGI می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد. چون، مجهز به یک IC کنترل است که مدارهای گیت درایو IGBT و مدارهای حفاظتی در آن تعبیه شده است. بنابراین طراحی مدارهای جانبی آن آسان است و از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است. ماژول IPM مجهز به حفاظت اضافه جریان، حفاظت اتصال کوتاه، حفاظت افت ولتاژ قدرت و حفاظت اضافه حرارت به همراه سیگنال‌های خروجی هشدار دهنده است. نوع ۷ تایی IPM علاوه بر شش کلید مرسوم اینورتر، یک کلید اضافه به صورت چاپر به عنوان ترمز دینامیکی برای تخلیه ولتاژ خازن در هنگام عملکرد ژنراتوری موتور دارد. با توجه به مشخصات فنی مورد انتظار، ماژول 7MBP75RA120 می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. ولتاژ نامی و جریان حالت دائمی این IMP در دمای 25°C به ترتیب 1200V و 75A آمپر است [۶۴].

شکل ۲-۲ تغییرات جریان کلکتور اینورتر IPM را بر حسب ولتاژ کلکتور-امیتر در بدترین شرایط دمای 125°C نشان می‌دهد. اگر برای هر دو اینورتر خروجی و ورودی متوسط جریان 25A آمپر لحاظ شود آن گاه با توجه به نمودار می‌توان ولتاژ حالت وصل $V_{on_s}^{inv}$ و مقاومت داخلی IGBT $R_{on_s}^{inv}$ را بر حسب عرض از مبدا و شیب نمودار به صورت رابطه (۲-۱۴) تخمین زد:

$$\begin{aligned} V_{on_s}^{inv} &= 1\text{V} \\ R_{on_s}^{inv} &= \frac{1.5}{25} = 0.06\ \Omega \end{aligned} \quad (2-14)$$

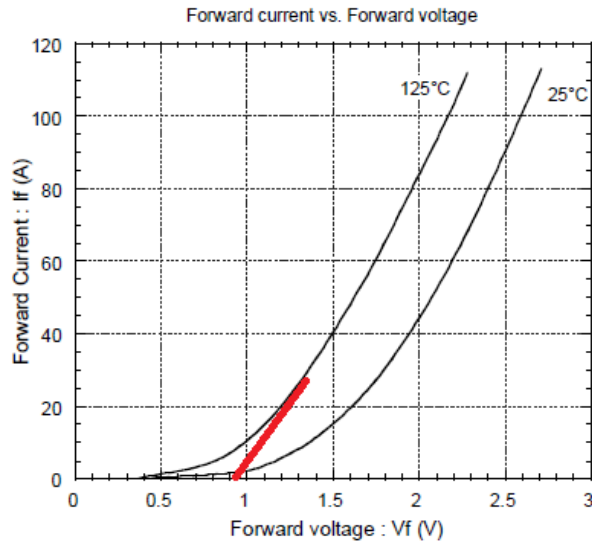


شکل ۲-۱۰: جریان کلکتور IGBT اینورتر بر حسب ولتاژ کلکتور-امیتر

¹ IPM Intelligent Power Module

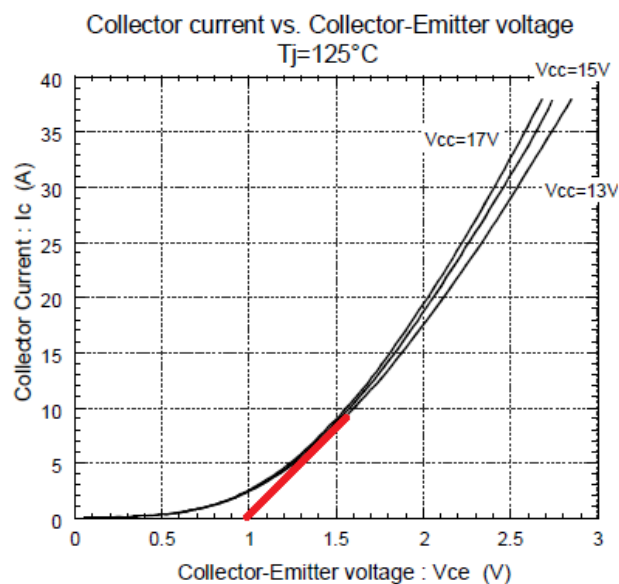
در شکل ۲-۳ منحنی جریان دیود معکوس بر حسب ولتاژ حالت وصل آن نشان داده شده است. با توجه به نمودار می توان ولتاژ حالت وصل $V_{on_d}^{inv}$ و مقاومت داخلی دیود معکوس $R_{on_d}^{inv}$ هر کدام از سوئیچ‌ها را بر حسب عرض از مبدا و شیب منحنی، از رابطه (۲-۱۵) به طور تقریبی محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} V_{on_d}^{inv} &= 0.9 \text{ V} \\ R_{on_d}^{inv} &= \frac{1.3}{25} = 0.052 \Omega \end{aligned} \quad (2-15)$$



شکل ۲-۱۱: جریان دیود معکوس بر حسب ولتاژ حالت وصل دیود

مطابق دیتاشیت ماژول، IGBT چار در حالت دائمی حداکثر جریان ۲۵ آمپر را می‌تواند عبور دهد. بنابراین برای حفاظت از IGBT یک سوم این جریان در حالت دائمی یعنی تقریباً ۸ آمپر برای آن در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲-۴ تغییرات جریان کلکتور چار ترمز دینامیکی IPM را بر حسب ولتاژ کلکتور-امیتر در دمای 125°C نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۲: جریان کلکتور IGBT چار ترمز دینامیکی بر حسب ولتاژ کلکتور-امیتر

با توجه به نمودار می‌توان ولتاژ حالت وصل $V_{on_s}^{br}$ و مقاومت داخلی IGBT $R_{on_s}^{br}$ را بر حسب عرض از مبدا و شیب نمودار به صورت رابطه (۱۶-۲) به دست آورد:

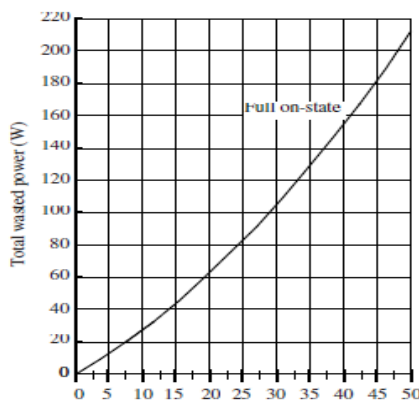
$$\begin{aligned} V_{on_s}^{br} &= 1 \text{ v} \\ R_{on_s}^{br} &= \frac{1.6}{8} = 0.2 \Omega \end{aligned} \quad (2-16)$$

۲-۴-۲- کلید قدرت

رله حالت جامد یا SSR یک المان سوئیچینگ الکترونیکی است که در آن با یک سیگنال کنترلی می‌توان جریان یا ولتاژ بزرگتر را کنترل کرد. عملکرد SSR شبیه رله‌های الکترومکانیکی می‌باشد با این تفاوت که در این المان هیچ قسمت متحرکی وجود نداشته و نسبت به آن دارای ابعاد کوچکتری می‌باشد. عدم قسمت متحرک در SSR موجب افزایش عمر قطعه شده و در مداراتی که تعداد دفعات کلید زدن زیاد می‌باشد کاربرد دارد. جریان خروجی و ولتاژ عملکرد SSR را می‌توان به ترتیب تقریباً برابر جریان منبع یعنی ۲۹.۵ آمپر و ولتاژ منبع ۲۳۰ ولت در نظر گرفت. با توجه به مشخصات فنی مورد نظر، سه فاز SGT867350 ساخت شرکت Celduc برای قسمت منبع ولتاژ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. SSR سه فاز مذکور می‌تواند جریان نامی تا ۵۰ آمپر را عبور دهد ولتاژ عملکرد آن ۵۲۰ ولت است.

نمودار شکل ۲-۵ تغییرات توان تلف شده SSR سه فاز بر حسب جریان آن را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مقاومت داخلی SSR R_{on}^{SSR} بر حسب شیب منحنی در جریان ۳۰ آمپر را می‌توان توسط رابطه زیر تقریب زد:

$$R_{on}^{SSR} = \frac{100}{3 \times 30^2} = 0.037 \Omega \quad (2-17)$$



شکل ۲-۱۳: توان تلف شده در SSR سه فاز بر حسب جریان

۲-۵- طراحی ظرفیت خازن لینک DC

ولتاژ خروجی یکسوساز فعال سمت شبکه دارای رپیل بالایی است که می‌تواند دامنه هارمونیک‌ها در ولتاژ خروجی اینورتر را افزایش دهد. به منظور کاهش رپیل ولتاژ خروجی این یکسوساز معمولاً از یک بانک خازنی در لینک DC استفاده می‌شود که سبب صاف‌تر شدن ولتاژ لینک DC می‌گردد. انتخاب خازن لینک DC برای دو مبدل اینورتر و یکسوساز فعال دینامومتر به صورت یک مصالحه بین اعوجاج ولتاژ، طول عمر و کنترل سریع ولتاژ لینک DC می‌باشد. با در نظر گرفتن این موضوع ظرفیت خازنی لینک DC C_{dc} از رابطه (۱۸-۲) قابل محاسبه است [۶۵]:

$$C_{dc} = \frac{S_n}{4\pi f_{min} V_{dc} \Delta V_{dc}} \quad (2-18)$$

در اینجا S_n توان ظاهری دینامومتر، f_{min} حداقل فرکانس نامی بین شبکه و موتور، و ΔV_{dc} ریبیل مجاز ولتاژ لینک DC بیان می‌کنند. توان ظاهری سیستم فقط شامل توان اکتیو است که در قسمت قبلی در نظر گرفته شد. هر دو فرکانس نامی موتور و شبکه ۵۰ Hz هستند. معمولاً ریبیل مجاز ولتاژ لینک DC ۲ درصد دامنه آن در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه ظرفیت خازنی لینک DC به صورت رابطه (۲-۱۹) محاسبه می‌گردد:

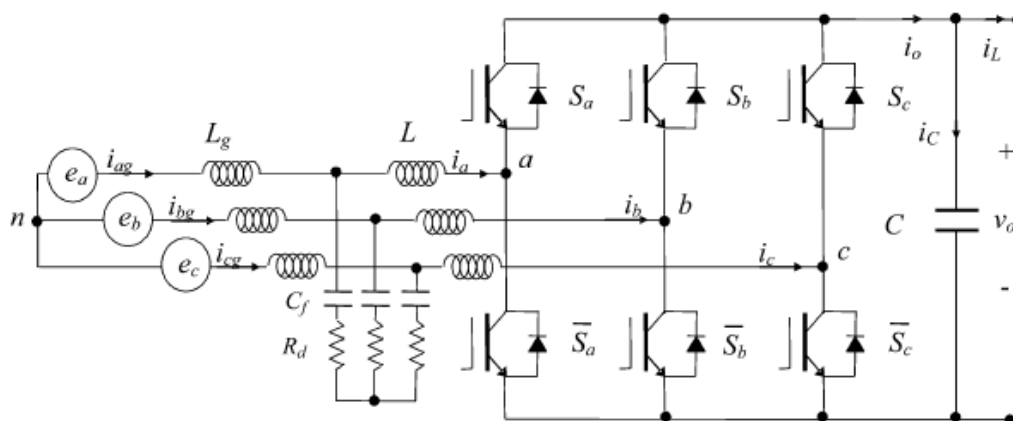
$$C_{dc} = \frac{10000/0.8}{4\pi \times 50 \times 700 \times (0.02 \times 700)} \cong 1.95 \text{ mF} \quad (2-19)$$

یک بانک خازنی می‌تواند به چندین روش مختلف ساخته شود. در اینجا از خازن‌های $3300 \mu\text{F}$ با ولتاژ ۴۰۰ V و مقاومت داخلی (ESR) 0.025Ω استفاده شده است. پیکربندی خازن‌ها به صورت دو شاخه با سه خازن سری در هر شاخه است که در مجموع ظرفیت خازنی معادل ۲.۲ mF را برای لینک DC تامین می‌کند. سه خازن سری در هر شاخه، حداکثر ولتاژ قابل تحمل ۱۲۰۰ ولت را برای لینک DC فراهم می‌کنند.

۲-۶- طراحی فیلتر سمت شبکه

یکسوساز سمت شبکه می‌تواند فرکانس‌های سوئیچینگ بین ۲ تا ۱۵ کیلوهرتز داشته باشد که باعث ایجاد هارمونیک‌هایی با مرتبه بالا می‌شود. این اتفاق می‌تواند برای بارها یا تجهیزات حساس دیگر در شبکه اختلال ایجاد کند و همچنین می‌تواند باعث خسارت شود [۶۶]. یک راه حل جذاب برای این مشکل، استفاده از یک فیلتر LCL است که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. با استفاده از این راه حل، در محدوده ولتاژ قدرت تا صدها کیلوولت آمپر، به وسیله‌ای مقادیر بسیار کمی از سلف‌ها و خازن‌ها نتایج بهینه برای جریان به دست آورد [۶۷].

فیلتر LCL از دو سلف، یک خازن و یک مقاومت تشکیل شده است که ابتدا مقادیر این پارامترها را با توجه به مراجع [۶۸] و [۶۹] می‌توان به دست آورد. در مرحله بعد باید ملاحظات عملی همچون انتخاب هسته، انتخاب سیم و ... برای ساخت فیلتر در نظر گرفته شود.



شکل ۲-۱۴: یکسوساز فعال سه فاز با فیلتر LCL

۲-۶-۱- محاسبه پارامترهای فیلتر LCL

اندوکتانس سلف سمت یکسوساز (L) را بر اساس اختلاف حداکثر اعوجاج جریان در سلف (Δi_{max}) انتخاب می‌شود. یک تخمین بدترین شرایط از حداکثر اعوجاج جریان در سلف برای یک اینورتر سه فاز با مدولاسیون بردار فضای معمولی

(SVM) را می‌توان از اصل بالانس ولت-ثانیه سلف در یک پریود سوئیچینگ ($1/f_{sw}$) به صورت رابطه (۲۰-۲) به دست آورد:

$$L = \frac{V_{dc}}{24f_{sw}\Delta i_{max}} \quad (2-20)$$

پارامتر Δi_{max} معمولاً ۱۰ درصد پیک جریان ورودی I_{max} در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta i_{max} = 0.1I_{max} = 0.1(\sqrt{2}I_s) = 0.1 \times \sqrt{2} \times 29.6 = 4.19 \text{ A} \quad (2-21)$$

حال با در نظر گرفتن فرکانس سوئیچینگ ۱۰ KHz اندوکتانس سلف سمت یکسوساز به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

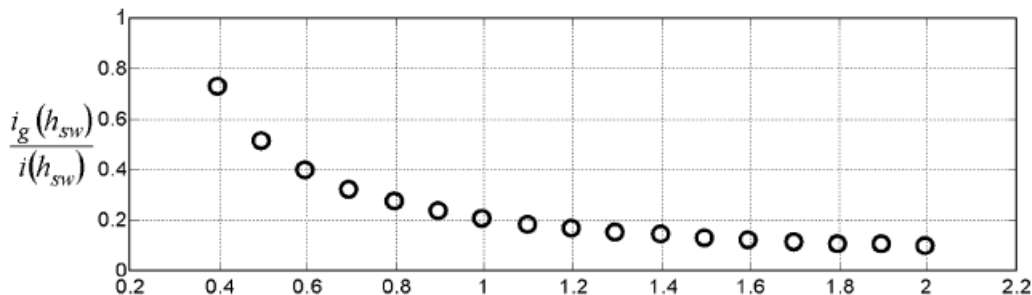
$$L = \frac{700}{24 \times 10000 \times 4.44} \cong 700 \mu\text{H} \quad (2-22)$$

مقدار اندوکتانس سلف سمت شبکه (L_g) می‌تواند به عنوان تابعی از اندوکتانس سلف سمت یکسوساز بر حسب شاخص r به صورت رابطه (۲۳-۲) تعیین شود:

$$L_g = rL \quad (2-23)$$

شاخص r با نسبت دامنه هارمونیک‌های کلیدزنی جریان سلف سمت شبکه به جریان اندوکتانس سلف سمت یکسوساز یا به عبارت دیگر $i_g(h_{sw})/i(h_{sw})$ به صورت منحنی شکل ۲-۷ رابطه دارد. معمولاً نسبت $i_g(h_{sw})/i(h_{sw})$ ۲۰ درصد در نظر می‌گیرند که در این شرایط $r = 1$ می‌شود. در نتیجه مقدار اندوکتانس سلف سمت شبکه نیز از رابطه (۲۴-۲) به دست می‌آید:

$$L_g = 1 \times 700 \times 10^{-6} = 700 \mu\text{H} \quad (2-24)$$



شکل ۲-۱۵: رابطه بین کاهش هارمونیک در فرکانس سوئیچینگ و نسبت r بین سیگنال‌های شبکه و یکسوساز

مجموع امپدانس دو سلف فیلتر باید از ۰.۱ پریونیت کمتر باشد تا افت ولتاژ زیادی ایجاد نکند. مجموع امپدانس دو سلف بر حسب پریونیت L_T به صورت رابطه (۲۵-۲) محاسبه می‌گردد:

$$L_T = \frac{(L + L_g)(2\pi f_s)S_n}{V_s^2} = \frac{(0.0007 + 0.0007)(2\pi \times 50) 10000/0.8}{234^2} = 0.096 \text{ pu} \quad (2-25)$$

ظرفیت خازنی فیلتر LCL بر حسب x درصد ظرفیت خازنی مینا از رابطه (۲۶-۲) به دست می‌آید. مقدار x باید تا ۵ درصد محدود شود تا ضریب قدرت را کاهش دهد.

$$C_f = x \frac{S_n}{2\pi f_s V_s^2} = 0.05 \times \frac{10000/0.8}{2\pi \times 50 \times 234^2} \cong 34.9 \mu F \quad (2-26)$$

در اینجا f_s بیانگر فرکانس شبکه است. ظرفیت خازن به دست آمده برای خازن با اتصال ستاره است. خازن های سه فاز موجود در بازار به صورت اتصال مثلث هستند که در نتیجه ظرفیت خازن را باید یک سوم مقدار به دست آمده یعنی $11.63 \mu F$ در نظر گرفته شود. به منظور انتخاب خازن می بایست نزدیک ترین خازن موجود در بازار با ظرفیت $13.7 \mu F$ برای فیلتر در نظر گرفته شود.

مقاومت سری با خازن فیلتر باعث ضعیف تر شدن اعوجاج در فرکانس سوئیچینگ به منظور از بین بردن اثر رزونانس می شود. مقدار این مقاومت باید یک سوم از امپدانس خازن فیلتر در فرکانس رزونانس باشد. فرکانس رزونانس و محدوده مجاز آن از روابط زیر به دست می آیند:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L + L_g}{LL_g C_f}} \quad (2-27)$$

$$10f_s < f_{res} < 0.5f_{sw}$$

$$f_{res} = 1349 \text{ Hz} \quad (2-28)$$

$$500 < f_{res} < 5000$$

همانطور که مشاهده می شود، فرکانس رزونانس در محدوده مجاز قرار دارد. مقدار مقاومت فیلتر را می توان از رابطه (۲-۲۹) به دست آورد:

$$R_d = \frac{1}{3(2\pi f_s)C_f} = \frac{1}{3 \times 2\pi \times 1349 \times 3 \times 13.7 \times 10^{-6}} \cong 0.96 \Omega \quad (2-29)$$

نزدیک ترین مقاومت موجود در بازار به مقدار محاسبه شده در رابطه (۲-۲۹) مقاومت 1Ω می باشد.

۲-۶-۲- دستورالعمل ساخت سلف

حال باید شرایط عملی برای ساخت سلف های سمت یکسوساز و شبکه نظیر هزینه و موجود بودن هسته در نظر گرفته شود. سلف ها دارای اندوکتانس $700 \mu H$ هستند و حداکثر جریان عبوری از آن ها $29.5 A$ در فرکانس 50 Hz شبکه است. برای طراحی این سلف باید چهار مشخصه نوع هسته، اندازه هسته، تعداد دور سیم پیچی و نوع سیم طراحی شود. هسته پودر آهن نوع ۵۲- از لحاظ کاهش ریپل جریان، کاهش تلفات هسته و هزینه مطابق مرجع [۷۰] گزینه مناسبی است. برای انتخاب اندازه هسته ابتدا باید انرژی ذخیره شده در آن $1/2LI^2$ محاسبه گردد. سپس از بین هسته های موجود با توان ذخیره سازی انرژی مورد نظر در [۷۰] بهترین هسته از لحاظ اندازه انتخاب گردد. یک راه حل ساده تر برای جستجو هسته با اندازه مناسب مراجعه به نرم افزار MICROMATERIAL است. در این نرم افزار با انتخاب گزینه POWER LINE شرایط جدول ۳-۲ برای انتخاب سلف در نظر گرفته می شود.

نرم افزار گزینه های مختلفی را ارائه می دهد که با توجه به هزینه و هسته های موجود در بازار هسته T250-52 گزینه مناسبی می تواند باشد. علاوه بر این نرم افزار سیم 8 AWG با ۳۹ دور سیم پیچی را برای طراحی سلف پیشنهاد می دهد. سیم 8 AWG دارای قطر 3.26 mm و سطح مقطع 8.37 mm^2 است که برای سیم پیچی سلف انعطاف پذیری بسیار پایینی دارد.

بنابراین بهتر است با موازی کردن ۱۶۴ رشته سیم های 30 AWG با قطر ۰.۲۵۴ mm و سطح مقطع ۰.۰۵۰۹ mm² معادل سیم 8 AWG را ساخت. چون در عمل موازی کردن و تابیدن ۱۶۴ رشته سیم کاملاً فشرده کار دشواری است و ممکن است فضای داخلی هسته با کمبود مواجه شود بهتر است تقریباً از نصف این تعداد سیم یعنی ۸۸ رشته سیم 30 AWG استفاده کرد. در این حالت به دلیل کوچک تر شدن قطر معادل سیم ها مقاومت سیم افزایش می یابد که منجر به افزایش تلفات و دما هسته می‌شود. بنابراین بهتر است با استفاده از نرم افزار دما هسته را پیش بینی کرد. مشخصات الکتریکی و مکانیکی سلف در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، دمای سلف در بدترین شرایط تا ۷۳.۷۸ درجه سانتی گراد می‌تواند افزایش یابد که دما بالایی است. در نتیجه برای سلف ها حتماً باید خنک ساز فن قرار داده شود تا دما آن کاهش یابد. علاوه بر محاسبات نرم‌افزار، با استفاده از رابطه (۲-۳۰) نیز می‌توان به طور تقریبی تعداد دورها را محاسبه کرد:

$$N = \sqrt{\frac{L_F}{\mu_0 A_L}} \quad (2-30)$$

در اینجا L_F ، μ_0 و A_L به ترتیب اندوکتانس بر حسب نانو هانری، نسبت نفوذپذیری اولیه و اندوکتانس سلف به ازای یک دو سیم پیچی بر حسب نانو هانری را بیان می‌کنند.

جدول ۲-۵: شرایط الکتریکی و مکانیکی سلف

مقدار	توصیف
-۵۲	نوع هسته
۷۰۰ μH	اندوکتانس در جریان ماکزیمم
۲۹.۶ A	ماکزیمم جریان
۵۰ Hz	فرکانس
۴۰ °C	دما محیط
۴۰ °C	حداکثر افزایش دما
۲	تعداد هسته سری
۱	تعداد رشته سیم موازی

ELECTRICAL PROPERTIES:

INDUCTANCE	771 u	Henry	CORE LOSS	10.9	W
DC RESISTANCE	22.9 m	OHMS	COPPER LOSS	19.9	W
AC RESISTANCE		OHMS	BUILD	2.262	mm
RIPPLE CURRENT		AMPS p-p	SURFACE AREA	176.4	Sq cm
DC BIAS		OES	TEMP RISE @ 0 HRS	73.8	DEG C
AC FLUX DENSITY	10742	GAUSS	Time To 115 % Loss	3e+05	Hours
PERCENT PERM	105	PCT	Life Limit	1e+08	Hours
CORE AL VALUE	484	nH			

MECHANICAL PROPERTIES:

CORE OD	63.500	mm	WIRE WEIGHT	218.874	gm
CORE ID	31.750	mm	SURFACE AREA	176.43	Sq cm
CORE HEIGHT	50.800	mm	TOT LOSSES	30.8	WATTS
CORE WEIGHT	806.400	gm	TEMP RISE	73.78	DEG. C
CORE VOLUME	115.200	Cubic cm	WINDING BUILD	2.262	mm
MAGNETIC Ac	7.680	Sq cm	WINDOW FILL	22.0	PERCENT
MAGNETIC Lm	15.000	cm	WOUND OD	65.567	mm
WIRE DIA	0.302	mm	WOUND HEIGHT	52.867	mm
WIRE LENGTH	5.5	m			

شکل ۱۶-۲: مشخصات الکتریکی و مکانیکی سلف

مقدار A_L برای یک هسته مطابق دیتاشیت T250-52 برابر 242 nH است. در اینجا چون از دو هسته روی هم استفاده شده است مقدار A_L در مجموع 484 nH می‌شود. نفوذپذیری هسته 52 در شرایطی که سلف به اشباع نرود $\mu_0 = 75$ است. همانطور که در شکل ۲-۱۸ مشاهده می‌شود، مقدار μ_0 به 105 درصد مقدار اولیه‌اش کاهش یافته است. در نتیجه تعداد دور تحت این شرایط به صورت $(2-31)$ به دست می‌آید:

$$N = \sqrt{\frac{700000}{1.05 \times 484}} \cong 39 \quad (2-31)$$

به منظور محاسبه μ_0 بر حسب درصد مطابق دیتاشیت هسته 52 ، از رابطه $(2-32)$ می‌توان استفاده کرد:

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{a + cH + eH^2}{1 + bH + cH^2}} \quad (2-32)$$

$a = 10240; b = 6.71 \times 10^{-3}; c = 24.7;$
 $d = 7.75 \times 10^{-4}; e = -0.0105;$

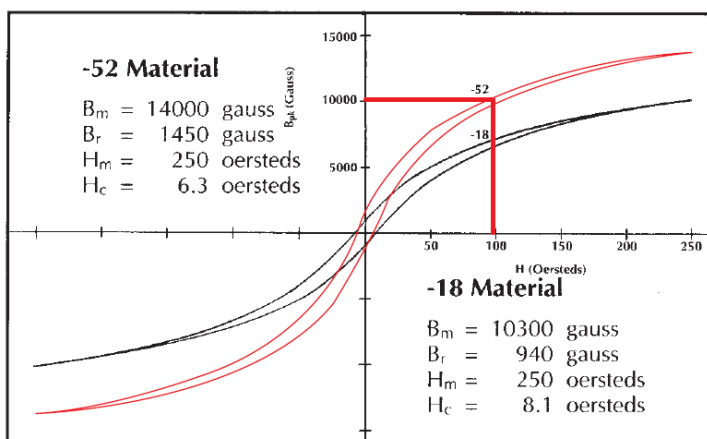
در اینجا H شدت میدان مغناطیسی در واحد Oersteds است. مطابق دیتاشیت هسته T250-52 طول موثر هسته 15 cm و ضرایب ثابت رابطه $(2-32)$ مقادیر بیان شده در $(2-33)$ را دارند. با جایگذاری این مقادیر در رابطه $(2-32)$ مقدار μ_0 برابر 105 درصد خواهد شد.

$$a = 10240; b = 6.71 \times 10^{-3}; c = 24.7;$$

$$d = 7.75 \times 10^{-4}; e = -0.0105;$$

$$H = \frac{0.4\pi N I_{avg}}{l_e} = \frac{0.4 \times \pi \times 39 \times 29.6}{15} = 96.38 \text{ Oersteds} \quad (2-33)$$

مطابق منحنی B-H شکل ۲-۹ در دینامیت هسته ۵۲-، چگالی شار در شدت میدان مغناطیسی ۹۶۳۸ اورستد برابر ۱۰۰۰۰ گوس یا ۱ تسلا می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، هسته به طور کامل به اشباع نرفته است. به دلیل پدیده اثر پوستی^۱ جریان در یک هادی جامد در حاشیه متمرکز می‌شود. هر چه فرکانس افزایش می‌یابد، عمق پوسته^۲ ای که جریان در آن جاری می‌شود، کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۱۷: منحنی B-H هسته‌های ۵۲- و ۱۸-

به عبارت دیگر جریان فقط در یک لایه بیرونی در سیم عبور می‌کند و هسته داخلی سیم بلا استفاده باقی می‌ماند. بنابراین، به منظور استفاده از کل مساحت سیم باید شعاع سیم از عمق پوسته کمتر باشد. به منظور محاسبه عمق پوسته δ یک سیم مسی به صورت شکل ۲-۱۰ در فرکانس در فرکانس کلیدزنی ۱۰ KHz از رابطه (۲-۳۴) می‌توان استفاده کرد:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{0.066}{\sqrt{f}} = \frac{0.066}{\sqrt{10000}} = 0.66 \text{ mm} \quad (2-34)$$

در این اینجا μ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مس (1.26×10^{-6} H/m) و σ ضریب رسانایی مس (5.96×10^7 S/m) بیان می‌کنند. بنابراین قطر هر رشته سیم سلف باید کمتر از ۰.۶۶ mm باشد. قطر سیم سایز 30 AWG از این مقدار کمتر است. در نتیجه از کل ظرفیت سیم استفاده خواهد شد.

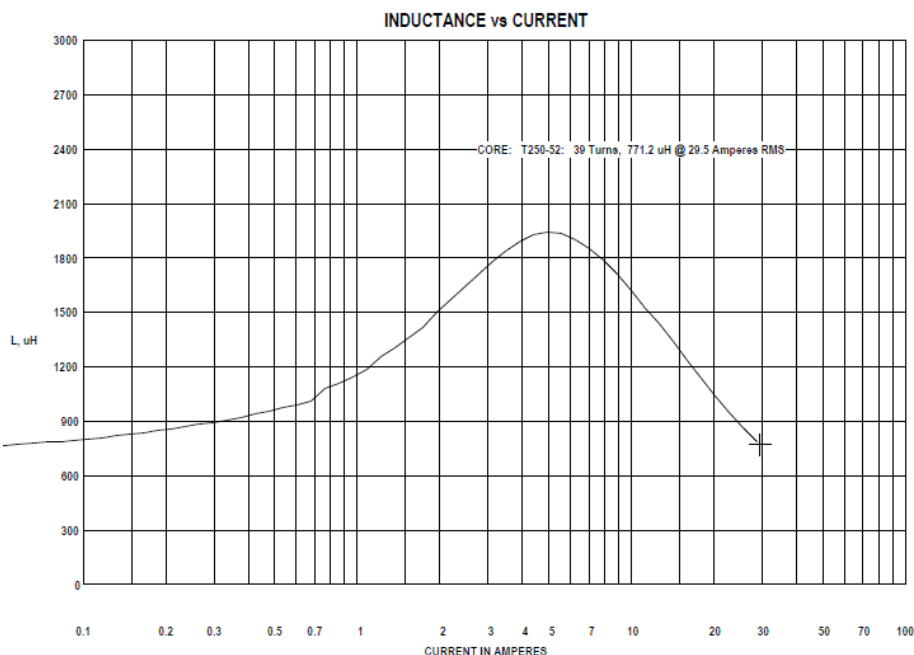


شکل ۲-۱۸: دیاگرام نشان دهنده عمق پوسته یک سیم دایره ای به دلیل اثر پوستی

¹ Skin Effect

² Skin Depth

در شکل ۲-۱۱ تغییرات اندوکتانس سلف به ازای تغییرات جریان نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اندوکتانس سلف در شرایط بی باری تقریباً به $750 \mu\text{H}$ می‌رسد.



شکل ۲-۱۹: تغییرات اندوکتانس سلف به ازای جریان های مختلف

۲-۷- طراحی ترمز دینامیکی

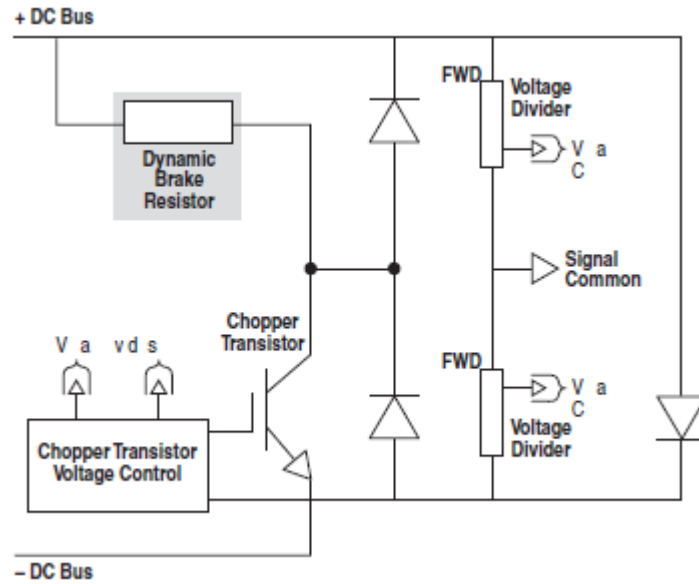
هنگامی که روتور یک موتور القایی با یک شتاب مثبت در جهت افزایش سرعت درایو چرخانده می‌شود، موتور انرژی الکتریکی حاصل از درایو را به انرژی مکانیکی موجود در شفت موتور تبدیل می‌کند. این فرایند با عنوان موتوری^۱ نامیده می‌شود. هنگامی که روتور با یک شتاب منفی به در جهت کاهش سرعت چرخانده می‌شود، موتور انرژی مکانیکی موجود در شفت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند که می‌تواند به درایو منتقل شود. این حالت با عنوان ژنراتوری^۲ شناخته می‌شود. اغلب درایوهای AC، توان AC را از شبکه برق با فرکانس ثابت به توان DC با استفاده از یک پل یکسوساز دیودی یا SCR کنترل شده قبل از تبدیل به فرکانس متغیر AC، تبدیل می‌کنند. یکسوسازهای پل دیودی و SCR مقرون به صرفه هستند، اما فقط می‌توانند در جهت موتوری توان را انتقال دهند. بنابراین، اگر موتور در حالت ژنراتوری قرار گیرد، از آنجاییکه یکسوساز پل نمی‌تواند جریان DC منفی مورد نیاز را هدایت کند در نتیجه ولتاژ DC افزایش می‌یابد و اضافه ولتاژ بالا در درایو را ایجاد می‌کند. یک راه حل مقرون به صرفه این است که به درایو اجازه داده شود، توان ژنراتوری را در یک مقاومت به انرژی حرارتی تبدیل کند. این فرایند به عنوان ترمز دینامیکی^۳ نامیده می‌شود. در این پروژه یکسوساز فعال موجود در ورودی مبدل می‌تواند جریان را به منبع هدایت کند. اما ممکن است در عمل هدایت جریان به منبع به خوبی انجام نشود بنابراین بهتر است از ترمز دینامیکی نیز استفاده کرد تا اضافه ولتاژ ایجاد نشود.

¹ Motoring

² Regeneration

³ Dynamic Braking

ترمز دینامیکی شامل یک چاپر (ترانزیستور و مدارات کنترل آن) و یک مقاومت ترمز دینامیکی به صورت شکل ۲-۱۲ است. فقط زمانی ترانزیستور چاپر روشن می‌شود که افزایش ولتاژ DC را حس کند، در این حالت انرژی اضافی در مقاومت ترمز دینامیکی تلف می‌شود. در حالت عادی ترانزیستور چاپر قطع است و مقاومت ترمز دینامیکی را از لینک DC ایزوله می‌کند.



شکل ۲-۲۰: شماتیک ترمز دینامیکی

طراحی مقاومت ترمز دینامیکی بر اساس مرجع [۷۱] انجام می‌شود. در شرایط بی باری که سرعت موتور از سرعت نامی به سرعت صفر می‌رسد، بیشترین توان ژنراتوری ایجاد می‌شود. ابتدا باید پیک توان ترمزی مطابق رابطه (۲-۳۵) محاسبه گردد:

$$P_b = \frac{J N_{nom} (N_{nom} - N_0)}{(30/\pi)^2 \times \Delta t} \quad (2-35)$$

در اینجا N_0 و Δt به ترتیب حداقل سرعت ممکن (در بدترین حالت صفر در نظر گرفته شده است) و زمان کاهش سرعت از سرعت نامی به حداقل سرعت را بیان می‌کنند. مقدار ممان اینرسی موتور مطابق مقدار بیان شده جدول ۲-۲ $J = 0.039 \text{ Kg.m}^2$ است. در عمل چون موتور از طریق یک شفت به یک موتور دیگر کوپل می‌شود بهتر است ممان اینرسی را مقداری بیش‌تر در حدود $J = 0.1 \text{ Kg.m}^2$ در نظر گرفته شود. حال پیک توان ترمزی P_b جهت کاهش سرعت از سرعت نامی در مدت ۳ ثانیه از رابطه (۲-۳۶) به دست می‌آید:

$$P_b = \frac{J N_{nom} (N_{nom} - N_0)}{(30/\pi)^2 \times \Delta t} = \frac{0.1 \times 2910 \times (2910 - 0)}{(30/\pi)^2 \times 2} \cong 3095 \text{ w} \quad (2-36)$$

در اینجا N_0 و Δt به حداقل سرعت ممکن (در بدترین حالت صفر در نظر گرفته شده است) و زمان کاهش سرعت از سرعت نامی به حداقل سرعت را بیان می‌کنند. مقاومت ترمزی معمولاً در ۱۲۰ درصد ولتاژ لینک dc فعال می‌شود. بنابراین ولتاژ فعال سازی V_{act} مقاومت ترمزی به صورت رابطه (۲-۳۷) محاسبه می‌شود:

$$V_{act} = 1.2 \times V_{dc} = 1.2 \times 700 = 840 \text{ v} \quad (2-37)$$

حال مقاومت ترمزی R_{db} از رابطه (۲-۳۸) محاسبه می‌شود:

$$R_{db} = \frac{V_{act}^2}{P_b} = \frac{840^2}{3095} \cong 228 \Omega \quad (38-2)$$

به منظور محاسبه انرژی تلف شده در مقاومت نیز می‌توان از رابطه (39-2) استفاده کرد:

$$E_b = \frac{P_b}{2} \times \Delta t = \frac{3095}{2} \times 3 = 4642.5 J \quad (39-2)$$

یک مقاومت طلایی ۱۰۰ وات ساخت شرکت ATE می‌تواند در مدت ۵ ثانیه ۵ برابر توان نامی خود یعنی ۲۵۰۰ ژول انرژی تلف کند [۷۲]. بنابراین، در نتیجه با موازی کردن دو مقاومت ۱۰۰ وات می‌توان ۴۶۴۲.۵ ژول انرژی محاسبه شده در رابطه (39-2) را در مدت سه ثانیه تلف کرد. چون از دو مقاومت موازی استفاده شده است باید مقاومت معادل آن‌ها برابر مقدار محاسبه شده در (38-2) باشد. با توجه به مقاومت‌های موجود در بازار دو مقاومت موازی ۴۷۰ اهم می‌توانند ۲۳۵ اهم مقاومت معادل برای ترمز دینامیکی ایجاد کنند. در نتیجه، پیک جریان IGBT چاپر نیز از رابطه (40-2) می‌توان محاسبه نمود:

$$I_{peak} = \sqrt{\frac{P_b}{R_{db}}} = \sqrt{\frac{3095}{235}} = 3.63 A \quad (40-2)$$

همانطور که قبلاً گفته شد، IGBT چاپر در حالت دائمی حداکثر ۲۵ آمپر را می‌تواند تحمل کند که بسیار بزرگتر از مقدار محاسبه شده در (40-2) است.

۲-۸- طراحی مقاومت تخلیه شارژ خازن

در زمان خاتمه عملکرد دینامومتر خازن‌های لینک DC شارژ هستند که از لحاظ ایمنی این اتفاق خطرناک است. به همین علت از یک مقاومت برای تخلیه شارژ لینک DC هنگام خاتمه عملکرد مبدل BTB استفاده می‌شود. مقاومت به صورت موازی با خازن‌های لینک DC متصل شده به علت بزرگ بودن اندازه آن در هنگام عملکرد مبدل BTB جریان بسیار کوچکی از آن عبور می‌کند که خللی در عملکرد مدار ایجاد نخواهد کرد. در هنگام خاتمه عملکرد مبدل BTB مقاومت تخلیه شارژ R_t و خازن یک مدار مرتبه اول با ثابت زمانی $\tau = R_t C_{dc}$ را تشکیل می‌دهند. تخلیه شارژ خازن‌های لینک DC معمولاً در ۵ ثابت زمانی صورت می‌گیرد. بنابراین اگر فرض شود که خازن‌های لینک DC در مدت ۵۰ ثانیه تخلیه شوند، آن‌گاه مقدار مقاومت تخلیه شارژ R_t از رابطه (41-2) به دست می‌آید:

$$R_t = \frac{\Delta t}{5C_{dc}} = \frac{50}{5 \times 2.2 \times 10^{-3}} = 4545.5 \Omega \quad (41-2)$$

با موازی کردن ۴ مقاومت آجری ۱۸ KΩ با توان ۱۰ W موجود در بازار می‌توان به مقاومت معادل ۴۵۰۰ Ω دست یافت. ماکزیمم توان عبوری از مقاومت در لحظه اول تخلیه شارژ خازن ایجاد می‌شود که می‌توان مقدار آن P_t را از رابطه (42-2) محاسبه کرد:

$$P_t = \frac{V_{dc}^2}{R_t} = \frac{700^2}{4500} = 108.9 W \quad (42-2)$$

متوسط توان تلف شده در مقاومت را می‌توان مقداری کمتر از نصف مقدار ماکزیمم آن در نظر گرفت. در نتیجه توان معادل ۴۰ W مقاومت‌ها از پس تلف کردن توان محاسبه P_t می‌تواند برآید. جریان عبوری از مقاومت تخلیه شارژ خازن I_t هنگام عملکرد مبدل نیز را می‌توان از رابطه (43-2) به دست آورد:

$$I_t = \frac{V_{dc}}{R_t} = \frac{700}{4500} \cong 0.16 \text{ A} \quad (2-43)$$

جریان بسیار پایین ۰.۱۶ A مشکلی برای عملکرد مبدل BTB به وجود نخواهد آورد.

۲-۹- تحلیل حرارتی و طراحی خنک‌ساز برای مبدل BTB

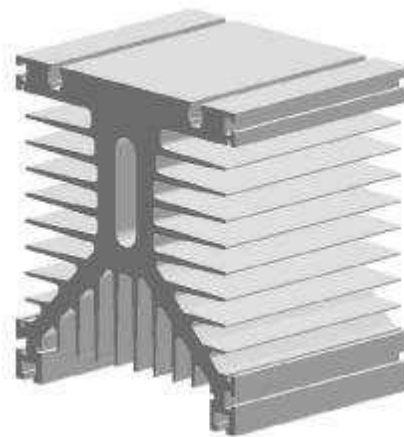
پارامترهای مقاومت حرارتی، جریان هوا، حجم، طول و عرض در انتخاب هیت سینک مناسب، اهمیت فراوان دارند. مقاومت حرارتی یکی از پارامترهایی است که با توجه به میزان جریان هوا به صورت دینامیکی تغییر می‌کند که به محاسبه آن پرداخته خواهد شد. جریان هوا معمولاً با واحد متر بر ثانیه (m/s) یا متر مکعب بر ساعت (m³/h) اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً سازندگان فن به دلیل احتساب مقدار هوایی که یک فن می‌تواند جابه‌جا نماید، از واحد (m³/h) استفاده می‌کنند، در حالی که سرعت جابه‌جایی هوا (m/s) برای انتقال گرما از سطح برد پارامتر مهم‌تری است. جریان هوا به دو طریق می‌تواند شارش داشته باشد، حالت اول به صورت طبیعی که شارش بسته به دمای هوای اطراف برد جابه‌جا می‌گردد و حالت دوم با استفاده از نیروی اعمال شده به هوا از طریق فن یا سایر لوازم انجام می‌شود.

محدودیت حجم و سطح مبدل سبب محدودیت در انتخاب هیت سینک می‌گردد. پارامتر مهم دیگر در انتخاب هیت سینک عرض آن می‌باشد. افزایش عرض هیت سینک با ضریب دو، سه یا چهار سبب افزایش ظرفیت حرارت تلفاتی دو، سه یا چهار برابر می‌گردد. به طور مشابه ریشه دوم طول هیت سینک متناسب با ظرفیت حرارت تلفاتی است. به عنوان مثال با افزایش طول هیت سینک به میزان دو، سه یا چهار برابر، ظرفیت حرارت تلفاتی هیت سینک تنها ۱.۴، ۱.۷ و ۲ برابر خواهد شد. بنابراین اگر در برد فضای کافی باشد، منطقی است که برای افزایش ظرفیت حرارتی تلفاتی عرض هیت سینک را افزایش داد. در ادامه به تحلیل حرارتی اینورتر، یکسوساز و SSR و انتخاب هیت سینک مناسب برای آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۹-۱- تحلیل حرارتی اینورتر خروجی

به منظور تحلیل حرارتی ماژول اینورتر، استفاده از نرم‌افزار مربوط به شرکت فوجی الکترونیک Fuji IGBT simulator پیشنهاد می‌شود. در ابتدا با استفاده از این نرم‌افزار مشخصات اینورتر 7MBP7RA120 انتخاب می‌شود. دمای محیط برابر ۴۰ درجه سانتی گراد (بدترین حالت در نظر گرفته شده است) و مقاومت از بدنه IGBT تا هیت سینک برابر ۰.۰۵ سلسیوس بر وات، اطلاعات مورد نیاز برای نرم‌افزار تکمیل می‌گردد. در مرحله بعد با در نظر گرفتن دمای محیط برابر ۴۰ درجه سانتی گراد، نوع هیت سینک باید انتخاب شود.

برای انتخاب هیت سینک، با توجه به بازار ایران، ابعاد برد و حداقل مقاومت حرارتی ممکن، هیت سینک P 3 (مطابق دیتاشیت شرکت Semikron) که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است، می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. همانطور که گفته شد، هر چه طول هیت سینک افزایش یابد مقاومت حرارتی آن نیز کم می‌شود. مقاومت حرارتی هیت سینک P 3 در سه طول ۱۲۰، ۱۸۰ و ۳۰۰ میلی‌متر در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است. به منظور کاهش مقاومت حرارتی هیت سینک معمولاً از فن در کنار هیت سینک استفاده می‌شود. برای هیت سینک مورد نظر می‌توان از فن‌های SKF ساخت شرکت Semikron استفاده کرد که اطلاعات آن‌ها در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲-۱۴ مشاهده می‌شود، استفاده از فن منجر به کاهش قابل توجهی در مقاومت حرارتی هیت سینک می‌شود.



شکل ۲۱-۲: هیت سینک P 3

Standard lengths	n	b / d Ø mm	R_{thha} natural cooling K/W	R_{thha} with Fan SKF 3-230-01 K/W	w kg
P 3/120	1	20	0,55 (100W)	0,167	2,1
P 3/180	3	20	0,43 (150W)	0,147	3,1
	2		0,39 (150W)	0,132	
	3		0,36 (180W)	0,12	
	6		0,33 (200W)	0,108	
	1	34		0,144	
P 3/300	3	34		0,118	5,3
	3			0,0847	

جدول ۶-۲: مشخصات هیت سینک P 3

Types	Ident No.		f Hz	V_1 V	Max volume m ³ /h	P W	T_{amb} max °C	Weight kg	Noise dB
SKF 3-230-01	30031061		50 / 60	230	159 / 190	15 / 14	70	0,55	37 / 41
SKF 3-115-01	30031110		50 / 60	115	160 / 190	15,5 / 14,5	70	0,55	37 / 41
SKF 3-24c-01	VE001030		DC	24	185	7,5	70	0,26	43
SKF 8-230-01	30145431		50	230	325	45	50	1,1	48
SKF 9-230-01	30142395		50	230	375	24	70	1	54

جدول ۷-۲: مشخصات فن‌های SKF

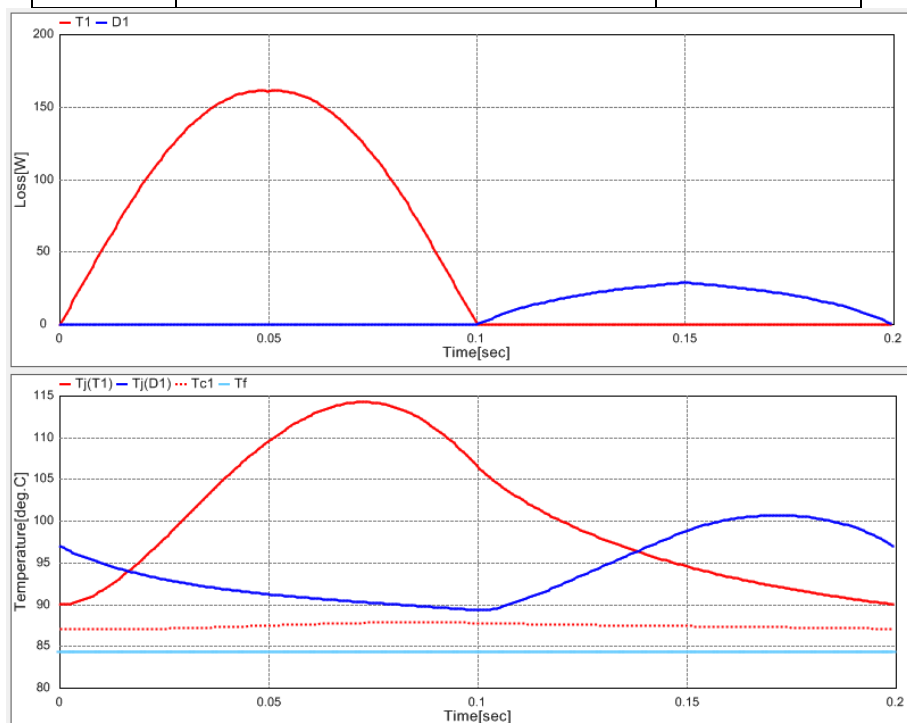
با در نظر گرفتن هیت سینک P3_180 (با طول ۱۸۰ میلی متر) و فن SKF 3-230-01 (این فن دارای ماکزیمم شارش هوا ۱۵۹ m³/h است ولی در عمل شارش هوا فن برای این هیت سینک مطابق دیتاشیت ۸۰ m³/h است)، مقاومت حرارتی بین هیت سینک و محیط برابر ۰.۱۲ K/W می‌شود. در مرحله بعد مشخصات الکتریکی اینورتر خروجی در بدترین شرایط با توجه به جدول ۴-۲ برای نرم‌افزار تکمیل می‌گردد.

دما و تلفات مازول به ازای یک دیود D₁ و یک IGBT T₁ در یک سیکل کاری در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است. این تلفات به ازای کار در شرایط تعیین شده و اطلاعات دیتاشیت می‌باشد. اطلاعات تحلیل حرارتی به طور خلاصه در شکل ۲-۱۷ به نمایش در آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، حداکثر دما یک IGBT و دیود به ترتیب ۱۰۰.۷ و ۱۱۴.۳ درجه سانتی گراد است. بنابراین با این شرایط کاری، دمای سوئیچ و مازول حداکثر به ۱۱۴.۳ درجه سانتی گراد خواهد رسید. این در

حالی است که حداکثر دمای سوئیچ بر اساس دیتاشیت برابر ۱۵۰ درجه سانتی گراد است. همچنین، کل تلفات مازول در این شرایط ۳۶۹.۸ وات گزارش شده است.

جدول ۸-۲: شرایط الکتریکی اینورتر

متغیر	توصیف	مقدار
f_o	فرکانس خروجی اینورتر	۵ Hz
I_o	جریان خروجی اینورتر	۲۰.۱ A
f_{sw}	فرکانس کلیدزنی	۱۰ kHz
PF	ضریب قدرت	۱
m_a	اندیس مدولاسیون	۰.۹
V_{dc}	ولتاژ لینک dc	۷۰۰ V



شکل ۲۲-۲: تلفات مازول و دمای مازول 7MBP75RA120 به ازای یک دیود و IGBT در یک سیکل کامل

7MBP75RA120

Loss(W)

Total (/arm) Total (/system)

	T1	D1	T2	D2	D5
Total	52.3	9.3			
Conduction	11.3	1.6			
Turn on (Recovery)	22.7	7.7			
Turn off	18.3				

Temperature(°C)

	T1	D1	T2	D2	D5
Tvj (peak)	114.3	100.7			
Tvj (ave)	100.5	94.3			
Tvj-c (ave)	13.1	6.8			
ΔTvj	24.3	11.4			

	Tc1	Tc2	Tc5
Tc (peak)	87.9		
Tc (ave)	87.5		

Condition

3-Phase 2-Level Inverter

Fo(Hz)

Io(Arms)

Fc(kHz)

pf

Mod

Duty

Vdc(V)

T1 RG(on)

T1 RG(off)

T2 RG(on)

T2 RG(off)

Temperature(°C)

Tf (peak)

Tf (ave)

Ta

جدول ۹-۲: نتایج تحلیل حرارتی و تلفات مازول 7MBP75RA120

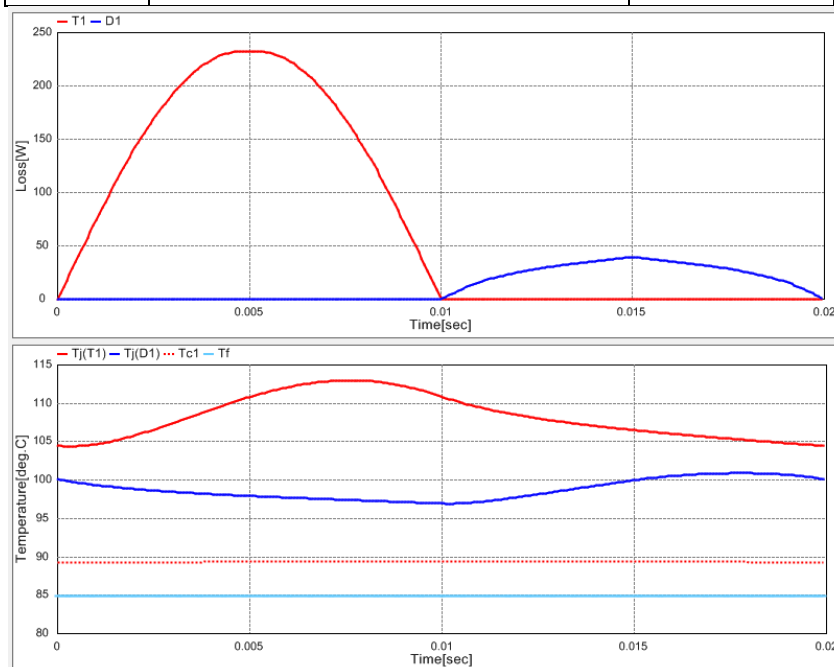
۲-۹-۲- تحلیل حرارتی یکسوساز ورودی

به منظور تحلیل حرارتی یکسوساز فعال ورودی، می‌توان مشابه اینورتر خروجی عمل کرد. پس از تعیین شرایط دمایی برای نرم افزار مشابه اینورتر خروجی باید شرایط الکتریکی را برای آن تعیین نمود. در این حالت بدترین شرایط کلیدزنی مطابق جدول ۲-۵ در نظر گرفته می‌شود. اگر هیت سینک مازول اینورتر مشابه هیت سینک اینورتر خروجی انتخاب شود، آنگاه باید به دلیل مقاومت حرارتی کوچک آن، طول هیت سینک بزرگتر انتخاب شود و همچنین از فن قوی‌تری استفاده کرد. با در نظر گرفتن هیت سینک P3_300 (با طول ۳۰۰ میلی متر) و فن SKF 9-230-01 (این فن دارای ماکزیمم شارش هوا $375 \text{ m}^3/\text{h}$ است ولی در عمل شارش هوا فن برای این هیت سینک مطابق دیتاشیت $135 \text{ m}^3/\text{h}$ است)، مقاومت حرارتی بین هیت سینک و محیط برابر 0.0847 K/W می‌شود. دما و تلفات مازول به ازای یک دیود D1 و یک IGBT T1 در یک سیکل کاری در شکل ۱۸-۲ نشان داده شده است. اطلاعات تحلیل حرارتی به طور خلاصه در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است. در این شرایط دمای سوئیچ و مازول حداکثر به 113°C درجه سانتی گراد خواهد رسید. این در حالی است که حداکثر دمای سوئیچ بر اساس دیتاشیت برابر 150°C درجه سانتی گراد است. همچنین، کل تلفات مازول در این شرایط 530.5 وات است.

جدول ۱۰-۲: شرایط الکتریکی یکسوساز

مقدار	توصیف	متغیر
۵۰ Hz	فرکانس خروجی اینورتر	f_o
۲۹.۶ A	جریان خروجی اینورتر	I_o

f_{sw}	فرکانس کلیدزنی	۱۰ kHz
PF	ضریب قدرت	۱
m_a	اندیس مدولاسیون	۰.۹
V_{dc}	ولتاژ لینک dc	۷۰۰ V



شکل ۲۳-۲: تلفات مازول و دمای مازول 7MBP75RA120 به ازای یک دیود و IGBT در یک سیکل کامل

7MBP75RA120

Loss(W)

Total (/arm) Total (/system)

	T1	D1	T2	D2	D5
Total	75.5	12.9			
Conduction	19.2	2.6			
Turn on (Recovery)	32.3	10.3			
Turn off	24.0				

Temperature(°C)

	T1	D1	T2	D2	D5
Tvj (peak)	113.0	100.9			
Tvj (ave)	108.2	98.8			
Tvj-c (ave)	18.9	9.4			
ΔTvj	8.6	4.0			

	Tc1	Tc2	Tc5
Tc (peak)	89.4		
Tc (ave)	89.4		

Condition
3-Phase 2-Level Inverter

Fo(Hz)
Io(Arms)
Fc(kHz)
pf
Mod
Duty
Vdc(V)
T1 RG(on)
T1 RG(off)
T2 RG(on)
T2 RG(off)

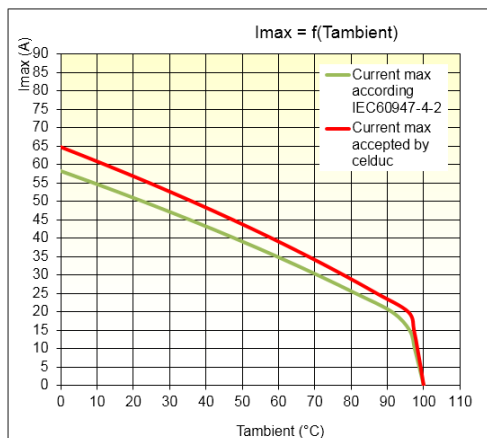
Temperature(°C)

Tf (peak)
Tf (ave)
Ta

شکل ۲۴-۲: نتایج تحلیل حرارتی و تلفات مازول 7MBP75RA120

۳-۹-۲- تحلیل حرارتی SSR

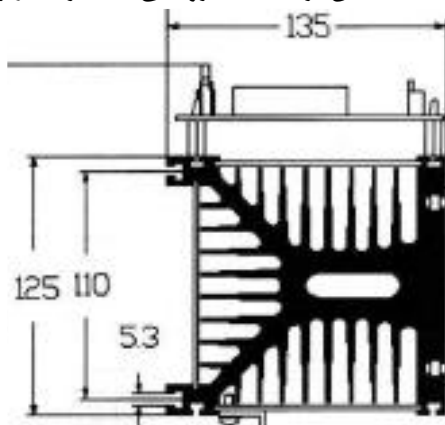
برای تحلیل حرارتی SSR سه فاز SGT867350 می‌توان به فایل exel شرکت Celduc مراجعه کرد. در اینجا SSR روی همان هیت سینک طراحی شده برای یکسوساز قرار داده می‌شود. به عبارت دیگر مقاومت حرارتی بین هیت سینک و محیط برابر 0.0847 K/W در نظر می‌شود. منحنی ماکزیمم جریان SSR سه فاز بر حسب دمای محیط مطابق فایل exel در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، SSR سه فاز مطابق استاندارد IEC باید بتواند در دمای 40°C سانی گراد جریان نامی بیش از ۴۲ آمپر را تحمل کند. SSR شرکت Celduk در این شرایط می‌تواند تا ۴۷ آمپر را بی‌هیچ مشکلی عبور دهد. این در حالی است که SSR در شرایط بار نامی ۲۹.۶ آمپر را عبور می‌دهد.



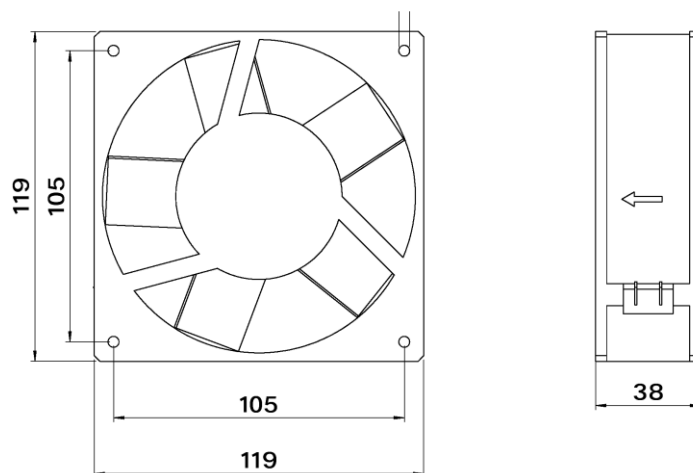
شکل ۲۵-۲: منحنی ماکزیمم جریان SGT867350 بر حسب دمای محیط

۲-۱۰- نقشه تابلو برق

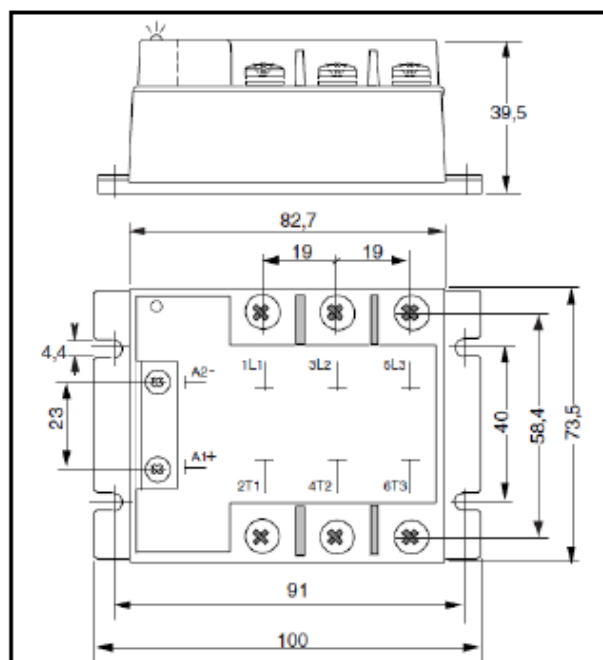
در شکل‌های ۲-۲۱ تا ۲-۲۴ به ترتیب ابعاد هیت سینک، فن، SSR و IPM ها نشان داده شده است. با توجه به محاسبات تحلیل حرارتی در بخش ۲-۲-۷، می‌توان یکسوساز و SSR را روی یک هیت سینک با طول ۳۰ cm قرار داد و همچنین برای اینورتر یک هیت سینک با طول ۱۸ cm در نظر گرفت. ابعاد عناصر پسیو همچون مقاومت، خازن و هسته سلف در شکل‌های ۲-۲۵ تا ۲-۲۷ و جدول ۲-۶ به نمایش در آمده است. علاوه بر موارد ذکر شده تعدادی برد الکترونیکی در قسمت‌های مختلف تابلو قرار داده خواهد. ابعاد این بردهای الکترونیکی به همراه کاربردها در جدول ۲-۷ بیان شده است.



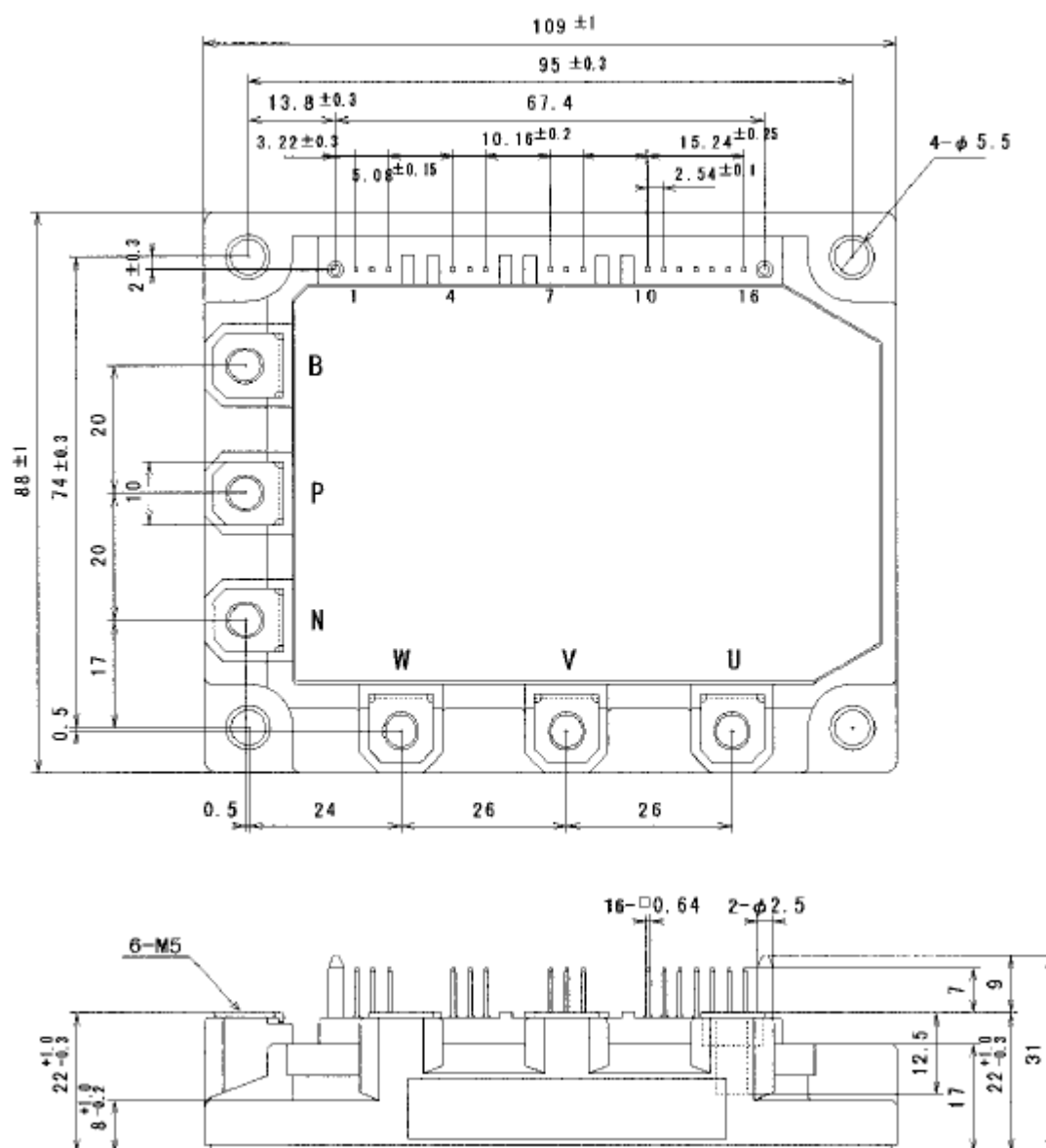
شکل ۲۶-۲: ابعاد هیت سینک P3



شکل ۲۷-۲: ابعاد فن SKF 3



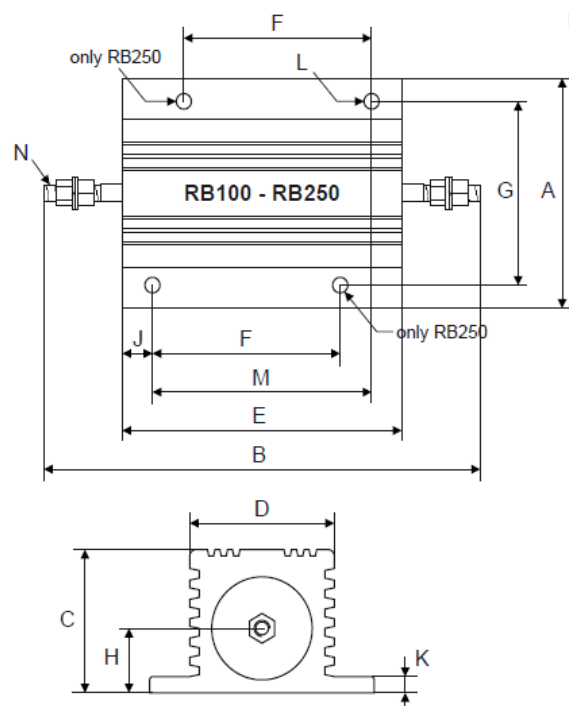
شکل ۲۸-۲: ابعاد رله حالت جامد SGT867350



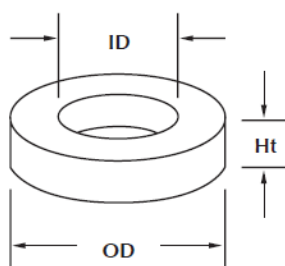
شکل ۲۹-۲: ابعاد اینورتر 7MBP75RA120

جدول ۱۱-۲: ابعاد عناصر پسیو

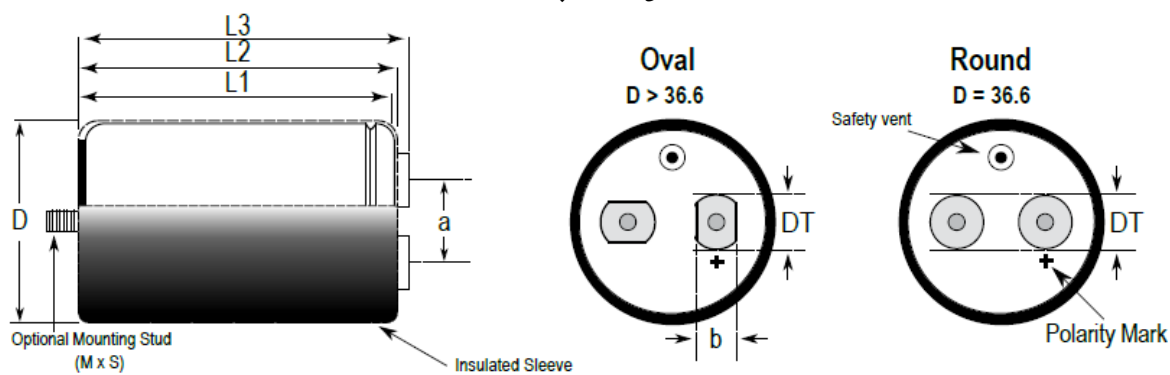
المان	ابعاد (mm)	تعداد
مقاومت	B=139 , E=89 , A=71.5	۲
خازن	L ₃ =145.4 , D=75	۶
سلف	OD=63.5, Ht=25.4	۱۲



جدول ۱۲-۲: ابعاد مقاومت RB100



شکل ۳۰-۲: ابعاد هسته T250-52

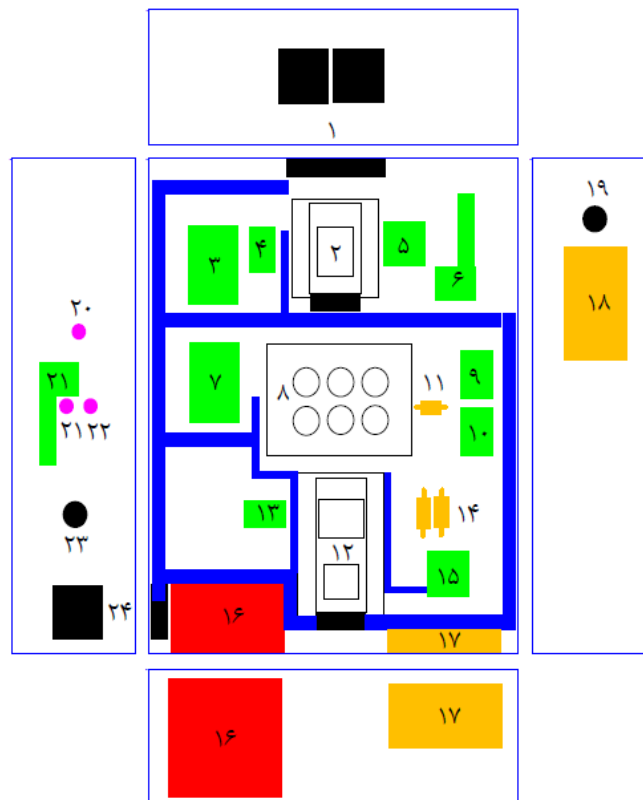


شکل ۳۱-۲: ابعاد خازن ۳۳۰۰ میکروفاراد

جدول ۱۳-۲: ابعاد بردهای الکترونیکی

برد	توصیف	ابعاد (mm)
DSP	برد پردازنده دیجیتال	۱۲۰×۱۷۵
AC Sensor	برد سنسورهای ولتاژ و جریان AC	۹۵×۲۳۵
DC Sensor	برد سنسورهای ولتاژ و جریان DC	۶۰×۱۰۰
Supply Board	برد تغذیه DSP و گیت درایو	۱۵۰×۲۱۰

نقشه جابجایی قطعات و داکت‌ها سیستم دینامومتر از نماهای رو به رو، چپ، راست، بالا و پایین در تابلو با استفاده از نرم‌افزار EPLAN در شکل ۲-۲۸ نشان داده شده است. ابعاد تابلو $90 \times 110 \text{ cm}^2$ در نظر گرفته شده تا تمام قطعات در آن قرار داده شوند. هیت سینک‌ها و همچنین خازن‌ها به وسیله ورق‌های پل مانند باید روی بدنه تابلو قرار داده می‌شوند تا امکان نصب داشته باشند و هر زمان نیاز بود از تابلو جدا شوند. بنابراین باید اندازه بزرگتری برای مکان آنها در نظر گرفته شود. مسیرهایی که در حاشیه و برخی قسمت‌های مرکزی تابلو رسم شده‌اند مسیر سیم‌کشی بردهای الکترونیکی و تغذیه فن‌ها هستند. توضیحات در مورد قسمت‌هایی که روی نقشه تابلو شماره زده شده است به شرح زیر می‌باشند:



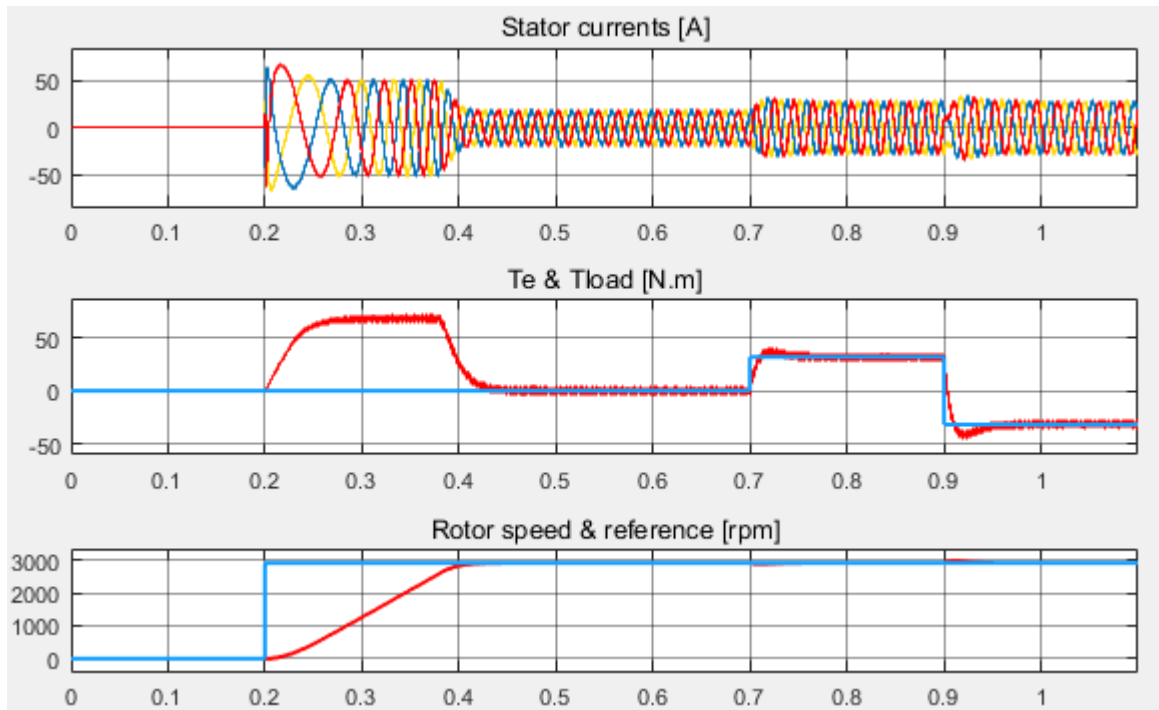
شکل ۳۲-۲: نقشه جابجایی قطعات میز تست درایو موتور القایی

۱. دو عدد فن که روی سقف تابلو قرار داده شده تا هوا داخل تابلو را به بیرون انتقال دهند.
۲. ماژول اینورتر خروجی و یک فن هیت سینک نصب شده و هیت سینک نیز روی یک پل قرار داده شده است.

۳. برد DSP اینورتر خروجی
۴. برد اتصال انکدر به DSP
۵. برد تغذیه گیت درایو اینورتر خروجی
۶. برد سنسورهای جریان و ولتاژ سمت خروجی
۷. برد DSP اینورتر یکسوساز فعال ورودی
۸. خازن‌های لینک DC که روی یک پل قرار گرفته اند.
۹. منبع تغذیه کمکی بردهای اینورتر خروجی
۱۰. منبع تغذیه کمکی بردهای یکسوساز ورودی
۱۱. مقاومت تخلیه شارژ خازن‌های لینک DC
۱۲. مازول یکسوساز ورودی، SSR و یک عدد فن روی هیت سینک نصب شده و هیت سینک نیز روی یک پل قرار داده شده است.
۱۳. برد سنسور ولتاژ و جریان لینک DC
۱۴. مقاومت‌های ترمز دینامیکی
۱۵. برد تغذیه گیت درایو یکسوساز ورودی
۱۶. فیلتر ورودی که شامل شش عدد سلف، سه عدد مقاومت و یک خازن سه فاز است.
۱۷. ترانسفورماتورهای برد تغذیه گیت درایو یکسوساز ورودی
۱۸. ترانسفورماتورهای برد تغذیه گیت درایو اینورتر خروجی
۱۹. کانکتور سه فاز خروجی تابلو جهت برقرار کردن اتصال بین موتور و اینورتر خروجی
۲۰. کانکتور انکدر متصل به موتور جهت اتصال به DSP
۲۱. سنسورهای جریان و ولتاژ سمت ورودی شبکه
۲۲. کانکتور تک فاز تغذیه منبع تغذیه ها و ترانسفورماتورها
۲۳. کانکتور سه فاز ورودی تابلو جهت برقرار کردن اتصال بین منبع تغذیه سه فاز و یکسوساز ورودی
۲۴. یک عدد فن که هوا بیرون را به داخل تابلو انتقال می‌دهد و همچنین خنک‌ساز سلف ها می‌باشد.

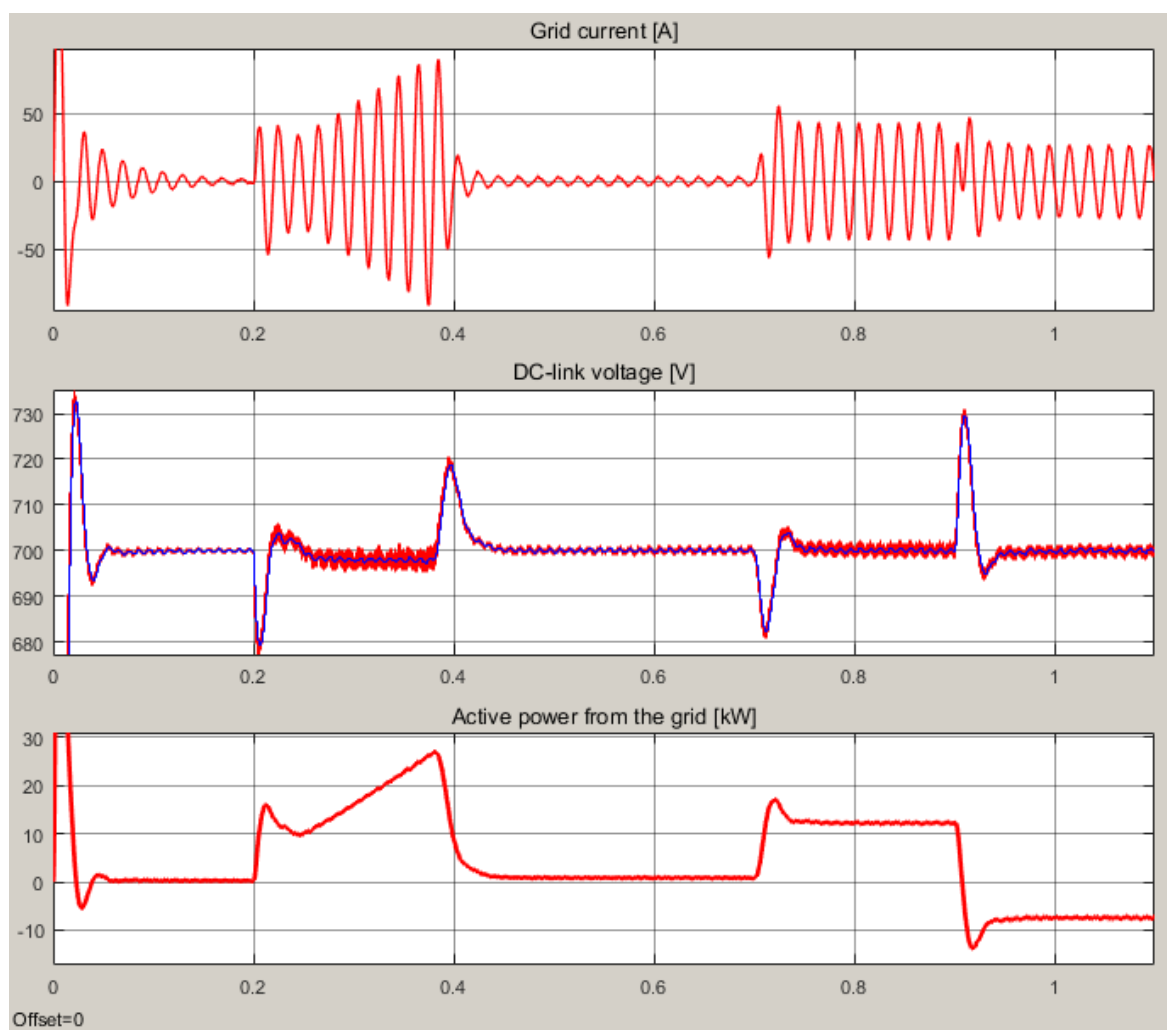
۱۱-۲- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی سیستم دینامومتر به وسیله نرم‌افزار Simulink باتوجه به طراحی‌های انجام شده در قسمت‌های قبلی ارائه خواهد شد. در شکل ۲-۲۱ پاسخ جریان استاتور، گشتاور و سرعت سیستم دینامومتر نشان داده شده است. در زمان ۰.۲ ثانیه اینورتر خروجی شروع به درایو موتور کرده است. در لحظات ۰.۷ ثانیه و ۰.۹ ثانیه به ترتیب بارهای ۳۲۸ N.m و ۳۲۸ N.m- به موتور اعمال شده اند. همانطور که مشاهده می‌شود. موتور در مدت ۰.۴ ثانیه به سرعت ۲۹۱۰ rpm رسیده است و در شرایط بارگذاری نیز سرعت خود را حفظ کرده است.



شکل ۲۳-۲: نتایج شبیه سازی پاسخ درایو موتور توسط اینورتر خروجی

در شکل ۲۲-۲ نتایج شبیه سازی یکسوساز فعال سمت شبکه نشان داده شده است. توان دریافت شده از شبکه در شرایط سرعت نامی و بار 32.8 N.m همان 12 KW است که از ابتدا در نظر گرفته شده بود. لینک DC نیز به ولتاژ 700 V رسیده است و رپل ولتاژ آن بسیار کوچک است. جریان سمت شبکه نیز شکل موج سینوسی دارد و اعوجاج هارمونیک بسیار پایینی دارد. طیف هارمونیک جریان سمت شبکه در شکل ۲۳-۲ به نمایش در آمده است. همان طور که مشاهده می شود، جریان سمت شبکه دارای THD برابر با ۲ درصد است که از استاندارد ۱۰ درصد بسیار پایین تر است.



شکل ۳۴-۲: نتایج شبیه سازی پاسخ یکسوساز سمت شبکه

فصل ۳- فصل سوم: طراحی مفهومی و طراحی تفصیلی برد های الکترونیک

۳-۱- مقدمه

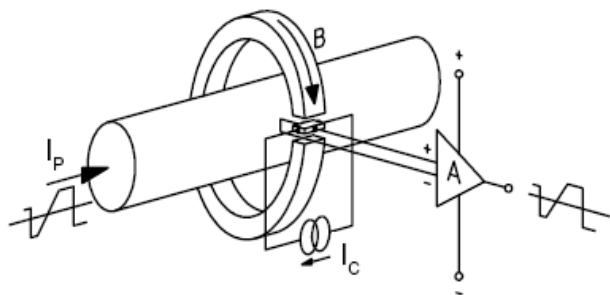
در فصل دوم طراحی مفهومی و طراحی تفصیلی مازول‌های قدرت بر اساس مشخصات مورد نیاز میز تست انجام گردیده است. در این فصل طراحی جزئی کلیه بردهای الکترونیک مورد نیاز دستگاه انجام می‌گردد. بردهای الکترونیک شامل برد سنسور ولتاژ و جریان باس DC، برد سنسور ولتاژ و جریان باس AC، برد درایو گیت مازول IPM-IGBT، برد حفاظت و مدیریت دما، برد DSP، برد منبع تغذیه می‌باشند. در هر مورد جزئیات طراحی و محاسبات، نقشه شماتیک، نمایش سه بعدی برد طراحی شده، نقشه مونتاژ و لیست قطعات مورد نیاز (BOM) ارائه گردیده است.

۳-۲- برد سنسور ولتاژ و جریان اثر هال

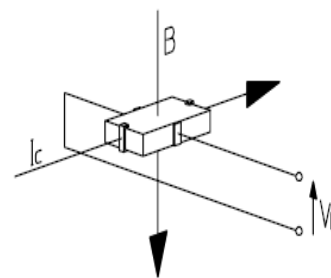
با هدف اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی (شامل ولتاژ، جریان، توان و...) و آنالیز کمیت‌ها در حوزه زمان و فرکانس نیاز به استفاده از سنسورهای ولتاژ و جریان با دقت و پهنای باند وسیع می‌باشد. پس از بررسی سنسورهای موجود در بازار، سنسور جریان اثر هال، به عنوان سنسور جریان انتخاب و مورد استفاده قرار گرفته. امروزه استفاده از سنسورهای اثر هال در کاربردهای درایو ماشین‌های الکتریکی بسیار معمول می‌باشد. **Error! Reference source not found.** اساس ک و ساختار کلی سنسور جریان اثر هال حلقه بسته و حلقه باز را نشان می‌دهد. اثر هال در سال ۱۸۷۹ توسط Herbert Hall کشف شد. اساساً اثر هال، وجود نیروی لورنتز می‌باشد که بر روی الکترون‌های حامل یک هادی که در معرض میدانی عمود بر این هادی می‌باشد، اعمال می‌گردد به این ترتیب که، در صورتی که از یک نیمه هادی مطابق **Error! Reference source not found.** قسمت (الف) و (ب) جریان I_C عبور کند و این لایه نیمه هادی در معرض میدانی عمود بر جریان B قرار گیرد، نیرویی بر حامل‌های در حال حرکت در این نیمه هادی اعمال می‌شود که منجر به جابجایی تعدادی از این بارها در دو لبه این لایه نیمه هادی می‌شود و این امر منجر به ایجاد یک اختلاف پتانسیل در دو لبه لایه می‌شود و ولتاژ هال V_H را تولید می‌کند که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۴۵].

$$V_H = (K/d).I_C.B \quad (۱-۳)$$

K, d به ترتیب ضریب هال و ضخامت لایه نیمه هادی می‌باشند.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱: ساختار مداری سنسور جریان اثر هال

ولتاژ خروجی این سنسور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

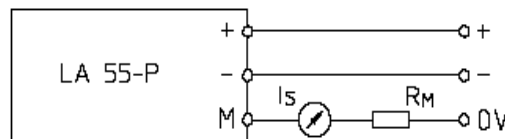
$$V_H = (K/d).I_C.a.I_P \quad (2-3)$$

در این رابطه به جز I_P تمام کمیتها مقادیری ثابت هستند و رابطه نهایی به صورت زیر بدست می آید:

$$V_H = K_t.I_P \quad (3-3)$$

۳-۳- طراحی برد سنسور جریان

استفاده از سنسور جریان نیاز به طراحی خاصی ندارد. پس از انتخاب مناسب این سنسور با مراجعه به مشخصات این سنسور از کاتالوگ طراحی این سنسور به انتخاب یک مقاومت خروجی به منظور تبدیل جریان خروجی به تغییرات ولتاژ مورد نیاز محدود می شود. **Error! Reference source not found.** مدار الکتریکی مورد نیاز به منظور استفاده از این سنسور را نشان می دهد.



شکل ۳-۲: مدار الکتریکی سنسور جریان LA55-P

در این طرح از سنسور جریان $LA-55P$ ساخت شرکت سوئیسی LEM می باشد. این سنسور به صورت حلقه بسته طراحی و ساخته شده و دارای مشخصات زیر می باشد:

جدول ۳-۱: مشخصات سنسور جریان LA55-P

مقدار معرفی شده در کاتالوگ	نام متغیر	معرفی کمیت
50 A	I_{PN}	جریان نامی موثر قابل اندازه گیری
$0....\pm 70 A$	I_P	رنج جریان قابل اندازه گیری
50mA	I_{SN}	جریان موثر نامی ثانویه
1: 2000	K_N	نسبت تبدیل سیم پیچ اولیه به ثانویه
$\pm 12....\pm 15 volt$	V_c	ولتاژ تغذیه
$> 200 \frac{A}{\mu s}$	$\frac{di}{dt}$	حداکثر رنج تغییرات زمانی جریان
DC....200 KHz	f	پهنای باند فرکانسی

برای این منظور با در نظر گرفتن جریان ثانویه به ازای حداکثر جریان اولیه و نسبت تبدیل سنسور خواهیم داشت:

$$\hat{I}_S = \frac{50}{2000} = 25 AmA \quad (4-3)$$

با توجه به تغییرات جریان خروجی این سنسور به ازای حداکثر جریان اولیه در صورتی که بخواهیم ولتاژ خروجی سنسور به ازای تغییرات جریان بین ۰ تا ۲۵ آمپر از ۰ تا ۲/۵ ولت تغییر کند، مقدار مقاومت خروجی (در شرایط $V_{dc} = \pm 12V, T = 75^0 C$) برابر خواهد بود با:

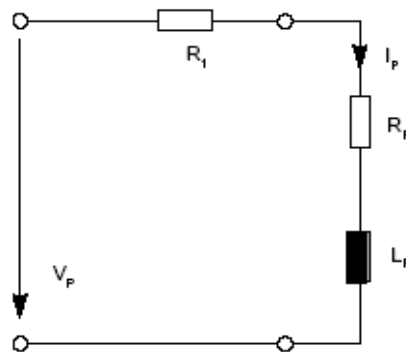
$$R_m = \frac{2.5V}{25mA} = 100\Omega \quad (5-3)$$

بنابر این با قرار دادن مقاومت ۱۰۰ اهم در خروجی این سنسور، حداکثر ولتاژ خروجی به ازای ماکزیمم جریان اولیه برابر خواهد بود با:

$$V_m = R_m \hat{I}_s = 100 \times 25mA = 2.5V \quad (6-3)$$

۳-۴- طراحی برد سنسور ولتاژ

اساس کار سنسور ولتاژ اثر هال مشابه سنسور جریان می باشد، با این تفاوت که در این سنسور سیم پیچ های دارای تعداد دور زیاد می باشد. در این حالت آمپر دور مورد نیاز جهت تولید القاء مغناطیسی در سیم پیچ اولیه با عبور جریان پایینی از سیم پیچ اولیه تولید می شود. در واقع سنسور اثر هال ولتاژ، یک سنسور جریان است که لازم است تا یک مقاومت محدود کننده خارجی با سیم پیچی اولیه آن سری شود تا جریان آن را محدود کند. **Error! Reference source not found.** سیم پیچی اولیه و مقاومت خارجی را نشان می دهد.



شکل ۳-۳: مدار الکتریکی سنسور ولتاژ اثر هال LV25P

$$\hat{I}_p = 50A, V_C = \pm 12V, R_m = 100\Omega, T_A = 70^\circ C \quad (7-3)$$

در این طرح اندازه گیری ولتاژ از طریق سنسور ولتاژ LV-25P ساخت شرکت LEM انجام می گیرد. این سنسور به صورت حلقه بسته طراحی و ساخته شده و دارای مشخصات **Error! Reference source not found.** می باشد:

جدول ۳-۲: مشخصات سنسور اثر هال ولتاژ LV25P

مقدار معرفی شده در کاتالوگ	نام متغیر	معرفی کمیت
$(10...500)V$	V_{PN}	ولتاژ نامی موثر قابل اندازه گیری
$10mA$	I_{PN}	جریان موثر نامی اولیه
$(0... \pm 14)mA$	I_p	رنج جریان اولیه قابل اندازه گیری
$2500 : 1000$	K_N	نسبت تبدیل سیم پیچ اولیه به ثانویه
250Ω	R_p	مقاومت سیم پیچ اولیه
110Ω	R_s	مقاومت سیم پیچ ثانویه
$40\mu sec$	t_r	سرعت پاسخ زمانی

جریان موثر نامی ثانویه	I_{SN}	25mA
ولتاژ تغذیه	V_C	$\pm 12V$

Error! Reference source not found. مدار الکتریکی، به منظور اندازه‌گیری ولتاژ از طریق این سنسور را ن

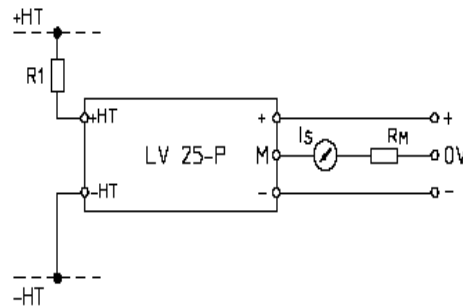
شان می‌دهد. مقاومت R_1 ، مقاومت محدود کننده جریان اولیه می‌باشد و طراحی این مقاومت بر اساس روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$R_1 = \frac{V_{PN}}{I_{PN}} - R_p = \frac{500V}{10mA} - 250 = 49.75K\Omega \quad (8-3)$$

همچنین در محاسبه این مقاومت مقدار تلفات حرارتی در حداکثر رنج قابل اندازه‌گیری باید لحاظ گردد. محاسبات توان تلفاتی این مقاومت در رابطه (9-3) نشان داده شده است.

$$P_L = (10)^2 mA \times 49.75K\Omega = 4.975W$$

$$R_1 = (49.75K\Omega) \& P_L > 10W \quad (9-3)$$



شکل ۴-۳: مدار الکتریکی سنسور اثر هال ولتاژ

در این حالت مقاومت کل در سیم پیچ اولیه برابر است با:

$$R_{total-primery} = R_p + R_1 = 50K\Omega \quad (10-3)$$

خروجی این سنسور ولتاژ به صورت جریان می‌باشد و با قرار دادن یک مقاومت می‌توانیم این جریان را به ولتاژ تبدیل کنیم. روابط (11-3) تا (18-3) طراحی مقاومت خروجی R_M را با در نظر گرفتن تغییرات رنج ولتاژ قابل اندازه‌گیری از ۵۰۰ ولت تا ۷۰۰ ولت در حالت گذرا را نشان می‌دهد.

$$\hat{I}_p = \frac{700}{50K\Omega} = 14mA - peak \quad (11-3)$$

$$\hat{I}_s = \sqrt{2} \times 25mA = 35.35mA \rightarrow R_{max} = 100\Omega \quad (12-3)$$

$$\hat{V}_A = (R_s + R_{max}) \times \hat{I}_s = (110\Omega + 100\Omega) \cdot 25mA = 7.42455V \quad (13-3)$$

$$\hat{I}_s = 2.5 \cdot 14mA = 35mA \quad (14-3)$$

$$R_{\max} = \frac{7.42455}{35mA} - 110 = 210\Omega \quad (15-3)$$

$$\hat{V}_A = 210 \times 35mA = 7.35V \quad (16-3)$$

$$R_{\max} = \frac{7.35}{35mA} - 110 = 100\Omega \quad (16-3)$$

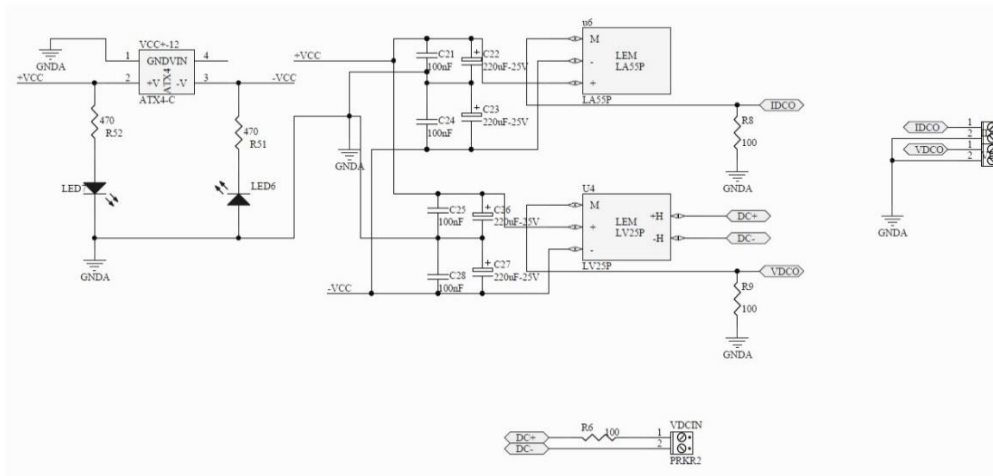
$$R_{\max} = \frac{7.35}{35mA} - 110 = 100\Omega \quad (17-3)$$

$$(0 < V_{IN} < 500) \& (V_{peak-max} = 700) \rightarrow R_{\max} = 100\Omega \& V_m = I_{sec} \times 100\Omega \quad (18-3)$$

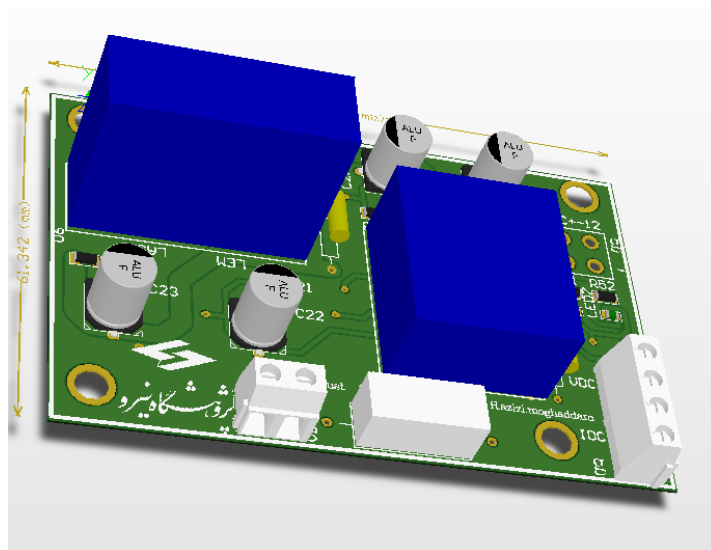
بنابر این با انتخاب این مقاومت، ولتاژ خروجی سنسور در حداکثر رنج آن (۵۰۰ ولت)، ولتاژی معادل ۲/۵ ولت می باشد.

۵-۳- طراحی برد سنسور ولتاژ

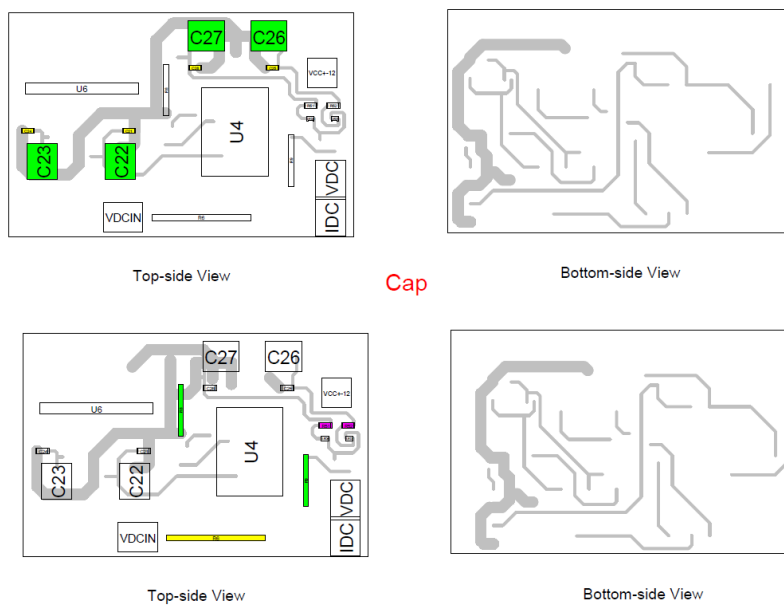
یکی از سیگنال‌های حساس جهت ارزیابی عملکرد سیستم درایو ولتاژ و جریان باس DC میباشد. از جمله این موارد می توان به اندازه گیری توان باس DC، آنالیز هارمونیک جریان باس DC، حفاظت دستگاه در برابر اضافه جریان، اضافه ولتاژ باس DC، کمبود ولتاژ باس DC اشاره نمود. نقشه های صنعتی خروجی طراحی تفصیلی برد سنسور باس DC در شکل های (۵-۳) تا (۸-۳) آورده شده است.



شکل ۵-۳: نقشه شماتیک برد سنسور ولتاژ و جریان باس DC



شکل ۶-۳: نمایش سه بعدی برد سنسور ولتاژ و جریان باس DC



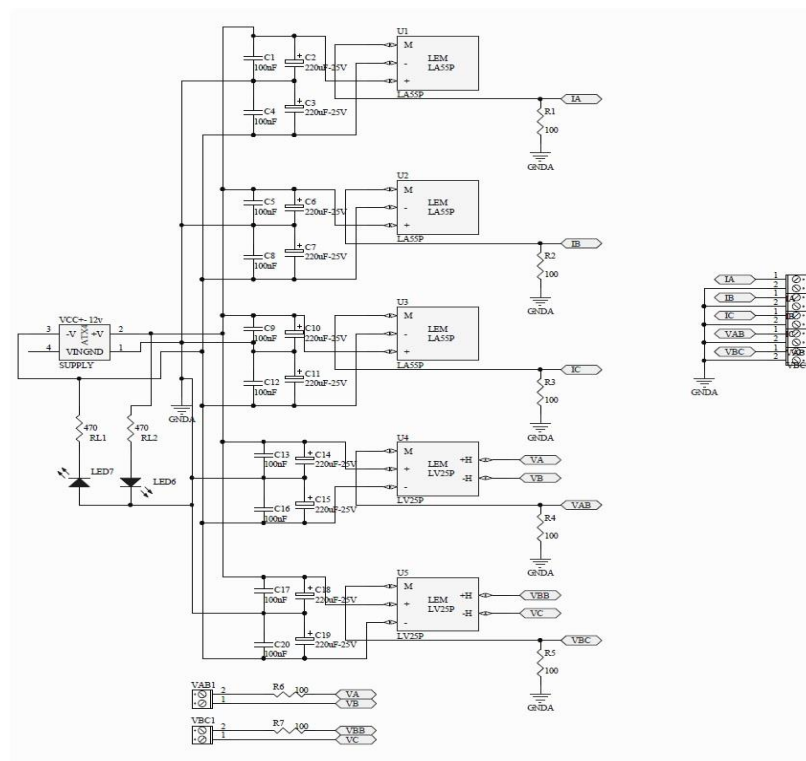
شکل ۷-۳: نقشه مونتاژ برد سنسور ولتاژ و جریان باس DC

DesignItemId	Quantity	Footprint	Designator	Comment
Cap				
0603C-100NF-25V-X7R-	4	1206_R	C21, C24, C25, C28	100nF
PANACAP-100UF-25V-FI	4	PANACAP-F	C22, C23, C26, C27	100uF-25V
Res				
Res3	1	AXIAL-1.0	R6	مقاومت آجری 47 کیلو
Res3	2	AXIAL-0.5	R8, R9	مقاومت نظامی 100 اهم
Res3	2	1206_R	R51, R52	مقاومت 1.5kohm پکیج
Conector and others				
ATX4-C	1	PCBCompor	VCC+ -12	کانکتور atx
PRKR2	3	PRKR2	IDC, VDC, VDCIN	کانکتور فونیکس
LED1	2	0805C-GENE	LED6, LED7	LED1
LV25P	1	LV25P	U4	LV25P
LA55P	1	PCBCompor	U6	LA55P

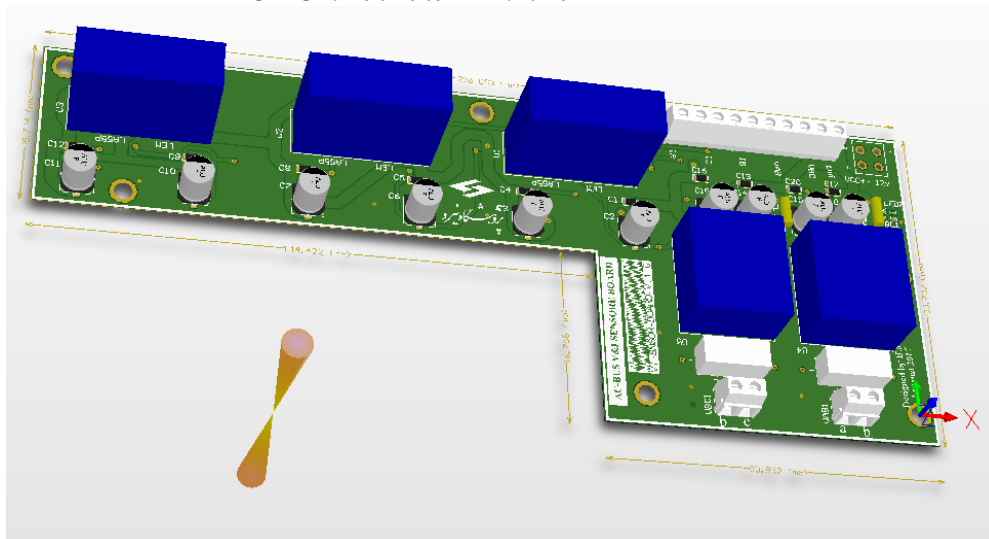
جدول ۳-۳: لیست BOM برد سنسور ولتاژ و جریان باس DC

۳-۶- نقشه صنعتی برد های سنسور ولتاژ و جریان باس AC

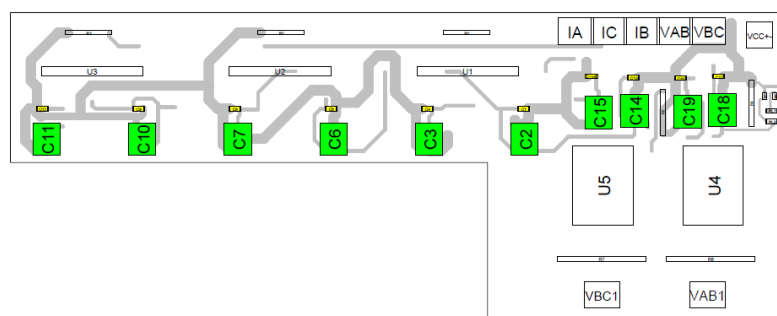
برد سنسور ولتاژ و جریان باس AC با هدف پیاده سازی روش درایو مورد مطالعه، اندازه گیری توان اکتیو و راکتیو نقاط مختلف باس AC، تحلیل هارمونیکی ولتاژ و جریان AC و حفاظت ولتاژ و جریان دستگاه طراحی گردیده است. مشخصات سنسور ولتاژ و جریان مشابه برد سنسور DC میباشد. از آنجاییکه در اغلب موارد ولتاژ سه فاز متعادل بوده به منظور کاهش تعداد سنسورها بطور معمول از دو عدد سنسور ولتاژ استفاده می گردد. در این حالت ولتاژ فاز سوم برابر منفی مجموع دو ولتاژ دیگر بدست می آید. با این حال به دلیل عملکرد نامتعادل بار (مثلا به دلیل عدم تقارن سیم پیچیهای موتور) ممکن است جریان های سه فاز نامتعادل باشند که در این حالت استفاده از سه عدد سنسور جریان الزامی میباشد. در شکل های (۳-۹) تا (۳-۱۲) نقشه های خروجی طراحی و نقشه مونتاژ این برد آورده شده است.



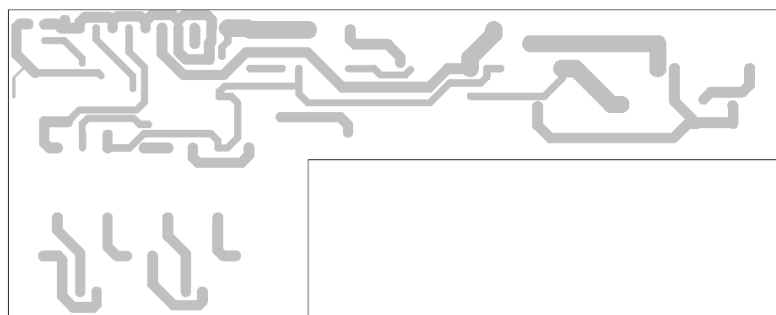
شکل ۸-۳: نقشه مونتاژ برد سنسور ولتاژ و جریان باس AC



شکل ۹-۳: نمایش سه بعدی سنسور ولتاژ و جریان باس AC



Top-side View



Bottom-side View

شکل ۱۰-۳: نقشه مونتاژ برد سنسور ولتاژ و جریان باس AC

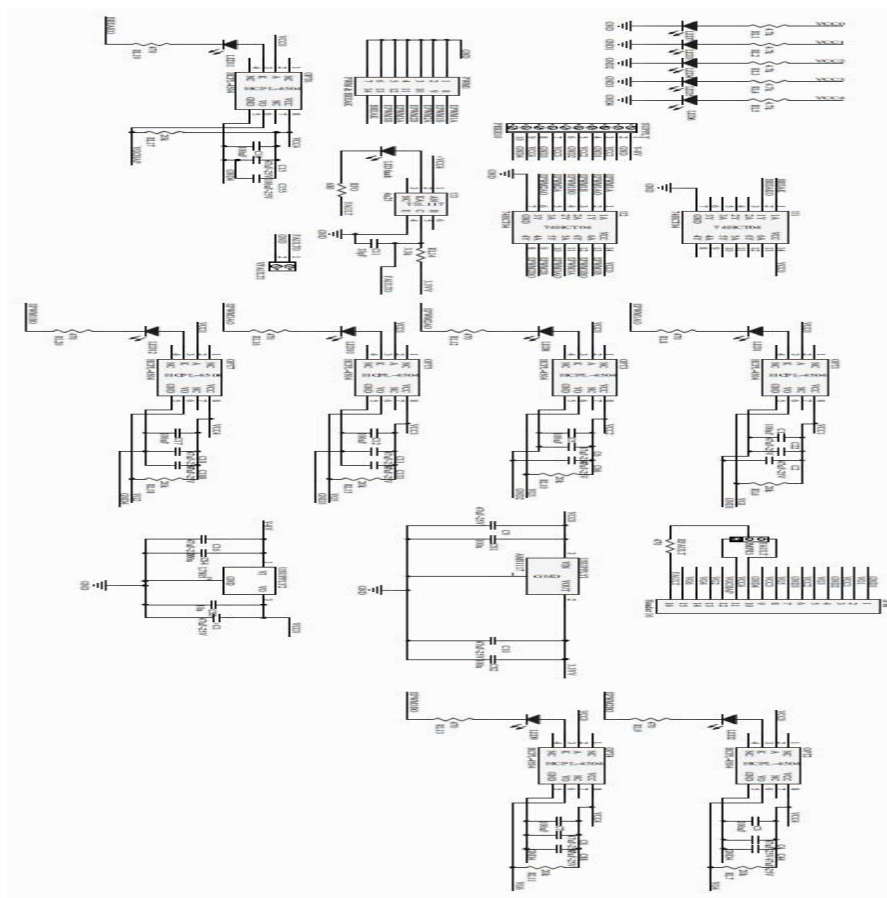
DesignItemId	Qty	Footprint	Designator	Comment
Cap				
0603C-100NF-25V-X7R-TDK	10	1206_R	C1, C4, C5, C8, C9, C12, C13, C16, C17, C20	100nF
PANACAP-100UF-50V-FK	10	PANACAP-F-GENER	C2, C3, C6, C7, C10, C11, C14, C15, C18, C19	خازن الکترولیت
Res				
Res3	5	AXIAL-0.5	R1, R2, R3, R4, R5	مقاومت نظامی 100 اهم axial
Res3	2	AXIAL-1.0	R6, R7	مقاومت آجری 47 کیلو
Res3	2	1206_R	RL1, RL2	مقاومت 1.5kohm پکیج 1206
Conector and other				
PRKR2	5	PRKR2	IA, IB, IC, VAB, VBC	PRKR2
PRKR2	2	PRKR2	VAB1, VBC1	کانکتور فونیکس
ATX4-C	1	PCBComponent_1	VCC+- 12v	کانکتور atx
LED1	2	0805C-GENERIC	LED6, LED7	رنگ LED1
LA55P	3	PCBComponent_1	U1, U2, U3	LA55P
LV25P	2	LV25P	U4, U5	LV25P

شکل ۱۱-۳: لیست BOM برد سنسور ولتاژ و جریان باس AC

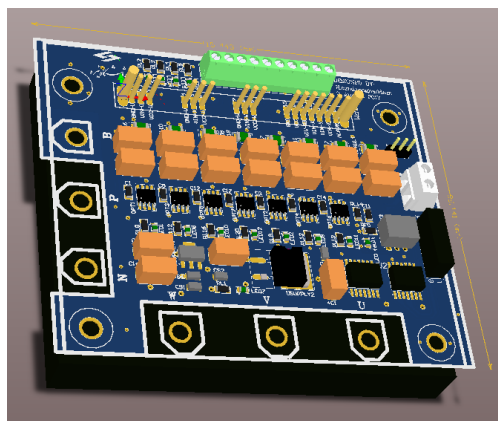
۳-۷- برد درایو مازول هوشمند IGBT (IPM)

در فصل اول در مورد انتخاب مازول IPM بحث گردیده است. در این بخش طراحی برد الکترونیک درایو گیت مازول IPM ارائه می گردد. پالسهای PWM مورد نیاز جهت خاموش و روشن کردن سوئیچهای الکترونیک قدرت بر اساس روش کنترل پیاده سازی شده توسط برد DSP تولید می گردد. پالسهای خروجی برد DSP دارای سطح ولتاژ و توان بسیار پایینی می باشد (بین ۰ تا ۳/۳ ولت) و قابلیت خاموش و روشن کردن سوئیچهای IPM نمیباشد. علاوه براین به منظور اعمال

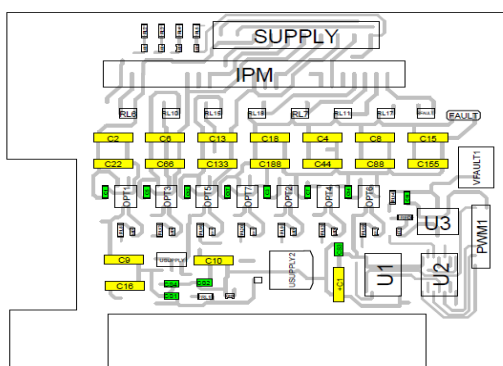
پالسهای PWM به مازول IPM نیاز به چهار منبع تغذیه ایزوله می باشد که زمین هر یک از آنها با زمین DSP ایزوله می باشد. بطور معمول در درایوهای پیشرفته از کوپلاژ نوری استفاده می گردد. برای این منظور از چیپ HCPL4504 استفاده گردیده است. البته پالسهای خروجی برد DSP در یک مرحله توسط بافر معکوس کننده 74HCT04 تقویت می گردد و سطح ولتاژ آن به ۵ ولت افزایش داده می شود. نقشه شماتیک و نمایش سه بعدی برد درایو IPM طراحی شده به ترتیب در **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** نمایش داده شده اس ت. ورودیهای برد چهار تغذیه ایزوله ۱۵ ولت، تغذیه ۱۲ ولت (با زمین مشترک با DSP)، ۶ پالس PWM، می باشد. با هدف کاهش نویزهای سوئیچینگ و به حداقل رساندن سیم کشی مدارات فرمان طراحی برد درایو IPM به گونه ایی صورت گرفته تا برد بدون هیچ گونه سیم کشی روی مازول IPM نصب گردد. پایه های مازول IPM بصورت سوزنی می باشد که به راحتی برد فرمان روی آن قرار می گیرد. همچنین در صورت بروز هر گونه خطای اضافه جریان یک سیگنال خطا از طریق این برد با یک واسط نوری به DSP ارسال می گردد تا در صورت نیاز اقدامات لازم توسط برنامه نویس DSP انجام گردد. نقشه مونتاژ در **Error! Reference source not found.** و لیست BOM این برد در **Error! Reference source not found.** نمایش داده شده اند.



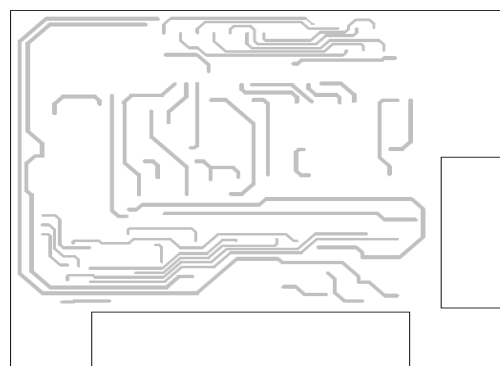
شکل ۱۲-۳: نقشه شماتیک برد درایو IPM



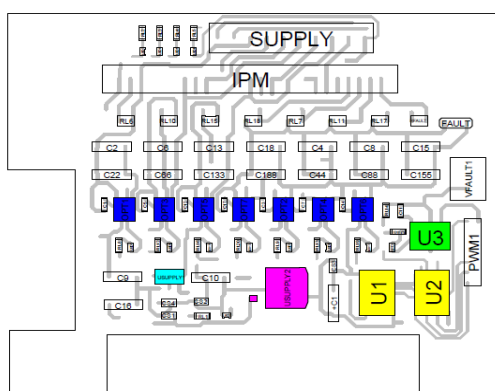
شکل ۱۳-۳: نمایش سه بعدی برد درایو IPM



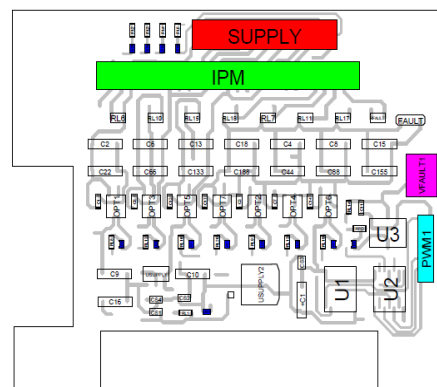
Top-side View



Bottom-side View



Top-side View



Top-side View

شکل ۱۴-۳: نقشه مونتاژ برد درایو IPM

DesignItemId	Footprint	Qty	Designator	Comment
Cap				
47u-25v	D	18	C9,C10,+C1,C2, C4, C6, C8, C13, C15, C16, C18, C22, C44, C66, C88, C133, C155, C188	Cap
100NF	I206_R	8	C1, C3, C5, C7, C11, C12, C14, C17, CS1, CS2, CS3, CS4	Cap
Res				
Res3	I206C-GENER	8	RFAULT, RL6, RL7, RL10, RL11, RL15, RL17, RL18	Res3-22k
Res3	I206_R	14	RFO, RL1, RL2, RL3, RL4, RL5, RL8, RL9, RL12, RL13, RL14, RL16, RL19, RL20	Res3-3.3k
IC				
74HCT04	SO14W	2	U1, U2	74HCT04
TIL117	DIP-6	1	U3	TIL117
AMS1117	SOT-223_L	1	USUPPLY1	AMS1117-3.3v
L7815-TO220	D2PAK	1	USUPPLY2	L7805
HCPL-4504	SO8	7	OPT1, OPT2, OPT3, OPT4, OPT5, OPT6, OPT7	HCPL-4504
Conector and LED				
JMPR3	JMPR3	1	FAULT	JMPR3
Header 7X2A	HDR2X7_CEN	1	PWM1	PWM & BREAK
PRKR2	PRKR2	1	VFAULT1	PRKR2
PRKR10	PRKR10-3.8M	1	SUPPLY	PRKR10
LED1	LED_0805	13	LED1, LED2, LED3, LED4, LED5, LED6, LED7, LED8, LED9, LED10, LED11, LED12, LED fault	LED1

شکل ۱۵-۳: لیست BOM برد درایو IPM

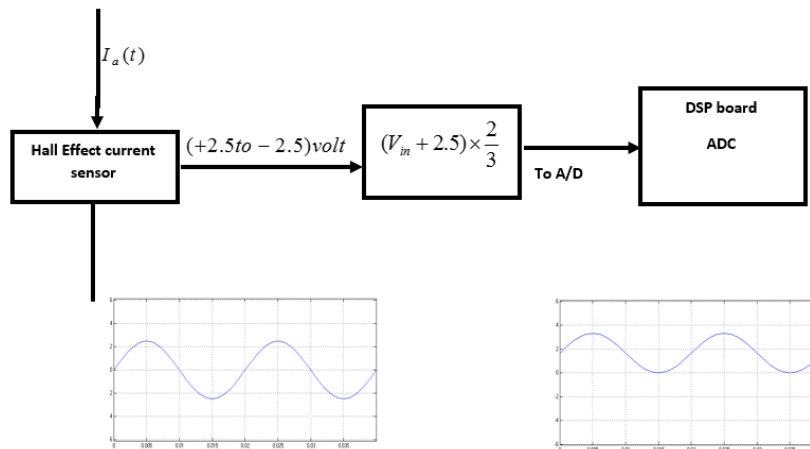
۸-۳- برد کنترل مبتنی بر پردازشگر دیجیتال DSP-TMS320F335

با هدف پیاده سازی الگوریتم کنترلی سیستم درایو و حفاظت از مدارات الکترونیک قدرت یک برد پردازشگر دیجیتال مبتنی بر هسته پردازشی سری C2000 شرکت تگزاس طراحی گردیده است. از جمله قابلیت‌های برد DSP می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- امکان اتصال ۷ ورودی آنالوگ مجهز به مدارات آماده ساز سیگنال^۱ و فیلتر حذف نویز
 - واسط JTAG-14PIN جهت پروگرام کردن برنامه و دیباگ کردن برنامه با اتصال همزمان برد به سخت افزار
 - رابط مدباس RS485-RTU جهت انتقال داده و اتصال به شبکه با تغذیه ایزوله
 - قابلیت اتصال انکودر سرعت- موقعیت با تغذیه ایزوله
 - مبدل دیجیتال به آنالوگ (DAC) ۱۲ بیتی
 - رابط CAN با تغذیه ایزوله
 - حافظه EEPTOM 2K (256 x 8) خارجی با ارتباط I2C
 - قابلیت اتصال به LCD گرافیکی
 - امکان اتصال ورودی ۴ تا ۲۰ میلی آمپر استاندارد مجهز به مبدل ابزار دقیق
- در تراشه TMS320F335، ۱۶ کانال مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی با زمان تبدیل ۸۰ نانو ثانیه طراحی شده که این مبدل‌ها امکان نمونه برداری از سیگنال آنالوگ و تبدیل آن به مقادیر دیجیتال را فراهم می‌آورد. لازم به ذکر است که ولتاژ ورودی مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال بین ۰ تا ۳/۳ ولت می‌باشد و لازم است تا سیگنال‌های خروجی سنسور در این بازه

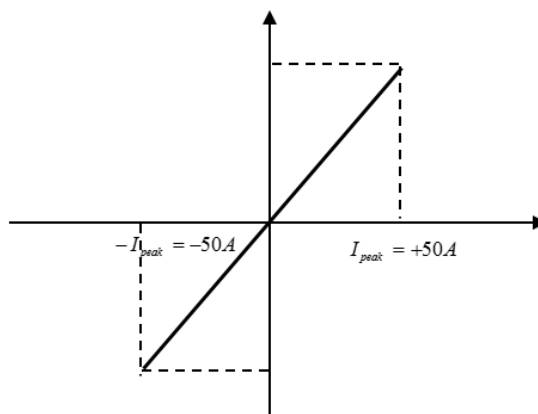
¹ Signal condition

محدود شود خروجی سنسور جریان در حداکثر رنج جریان قابل اندازه گیری ($50A$)، یک ولتاژ (با رابطه خطی با جریان) محدود بین $+2/5$ تا $-2/5$ می باشد. به منظور اعمال سیگنال خروجی سنسور به ورودی مبدل های آنالوگ به دیجیتال کارت DSP، به یک مدار واسط نیاز داریم تا همواره، در شرایط کاری مختلف ولتاژ ورودی به مبدلهای آنالوگ به دیجیتال کارت DSP در رنج 0 تا $3/3$ ولت محدود گردد. نحوه اندازه گیری جریان فاز a ، محدود کردن ولتاژ خروجی سنسور در رنج 0 تا $3/3$ ولت و اعمال آن به مبدل آنالوگ، در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. ه مانگونه که ملاحظه می گردد با اضافه کردن یک ولتاژ آفست $2/5$ ولت DC، به ولتاژ خروجی سنسور و قرار دادن یک تقویت کننده عملیاتی با بهره $2/3$ ، سیگنال خروجی سنسور در محدوده مورد نظر قرار خواهد گرفت.



شکل ۱۶-۳: نمونه گیری جریان و ارسال آن به مبدل دیجیتال

در برنامه نرم افزاری، مقدار آفست ۵ از مقدار تبدیل شده کم می شود تا مقدار صحیح علامت دار جریان محاسبه شود. به این ترتیب مطابق با مشخصه **Error! Reference source not found.** ولتاژ آنالوگ ورودی به داده دیجیتال تبدیل می شود.



شکل ۱۷-۳: مشخصه مبدل آنالوگ به دیجیتال

۹-۳- سنسور اندازه گیری سرعت

پیاده سازی روشهای مختلف سیستم دایو ماشین های الکتریکی ملزم به تعیین موقعیت رتور و اندازه گیری سرعت میباشد. اندازه گیری سرعت موتور از طریق سنورهای نوری ، مغناطیسی یا تاکومتر امکان پذیر می باشد. علاوه بر موارد ذکر شده امروزه در کاربردهای دقیق از انکودر نوع افزایشی یا انکودر مطلق به عنوان سنسور سرعت یا موقعیت استفاده می شود. **Error! Reference source not found.** ساختمان داخلی یک انکودر نوع افزایشی را نشان می دهد.

شکل ۱۸-۳: ساختار کلی انکودر افزایشی

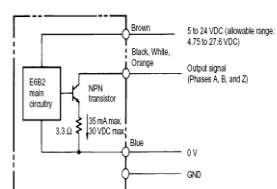
تعداد پالس در هر دور	۲۰۰۰ پالس
خروجیها	A,B,Z
نوع خروجی	کلکتور باز
منبع تغذیه	۵ تا ۲۵ ولت DC
جریان مصرفی	۸۰mA
حداکثر پاسخ فرکانسی	100 KHZ
اختلاف فاز خروجی	90 ± 45^0 بین فازهای A,B
زمان صعود و نزول خروجی	به ازای مقاومت خروجی $1K\Omega$ و ولتاژ تغذیه 5V برابر $1\mu sec$ می باشد
حداکثر سرعت قابل اندازه گیری	6000rpm
ممان اینرسی	$10g - cm^2$

تعدادی از پارامترهای مهم یک نمونه سنسور سرعت صنعتی از نوع انکودر افزایشی را نشان می دهد. نحوه عملکرد این سنسور در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد، این سنسور دارای سه خروجی A,B,Z می باشد که به صورت کلکتور باز می باشند. به ازای هر دور کامل ۲۰۰۰ پالس در خروجی های A,B تولید می گردد. فرکانس پالس در خروجی های A,B یکسان می باشند با این تفاوت که دارای اختلاف فاز 90 ± 45^0 که با یکدیگر می باشند. همانطور که ملاحظه می گردد، علامت اختلاف فاز پالسهای خروجی A,B تعیین کننده جهت سرعت می باشد. خروجی Z در هر دور کامل یک پالس تولید می کند و به منظور تعیین موقعیت اولیه رتور مناسب می باشد. پالسهای خروجی سنسور سرعت به واحد شمارش پالس انکودر QEP1، ارسال می گردد. با فعال شدن واحد QEP،

پالسهای ورودی این واحد (A,B) توسط مدارات این بخش شمرده می شود و پالسهای ورودی و جهت شمارش تایمر مربوط به واحد تسخیر را تامین می کند. مطابق **Error! Reference source not found.** اندازه گیری سرعت بر اساس شمارش تعداد پالسهای خروجی واحد QEP در یک فاصله زمانی خاص انجام می شود.

جدول ۴-۳: مشخصات فنی انکودر افزایشی

تعداد پالس در هر دور	۲۰۰۰ پالس
خروجیها	A,B,Z
نوع خروجی	کلکتور باز
منبع تغذیه	۵ تا ۲۵ ولت DC
جریان مصرفی	۸۰mA
حداکثر پاسخ فرکانسی	100 KHZ
اختلاف فاز خروجی	$90 \pm 45^\circ$ بین فازهای A,B
زمان صعود و نزول خروجی	به ازای مقاومت خروجی $1K\Omega$ و ولتاژ تغذیه 5V برابر $1\mu\text{sec}$ می باشد
حداکثر سرعت قابل اندازه گیری	6000rpm
ممان اینرسی	$10\text{g} - \text{cm}^2$

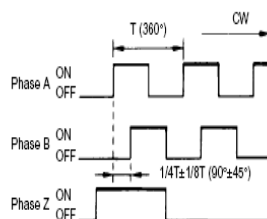


Wire Color Code
IEC colors are shown.

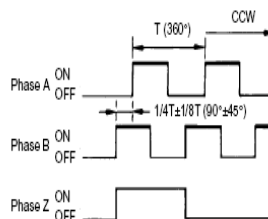
Color	Terminal
Brown	Power supply (+V)
Black	Output phase A
White	Output phase B
Orange	Output phase Z
Blue	0 V (common)

شکل ۱۹-۳: ساختار کلی انکودر افزایشی سنسور سرعت از نوع انکودر افزایشی و مشخصات مداری آن

Direction of rotation: CW
Clockwise as viewed
from the shaft
→ CW direction



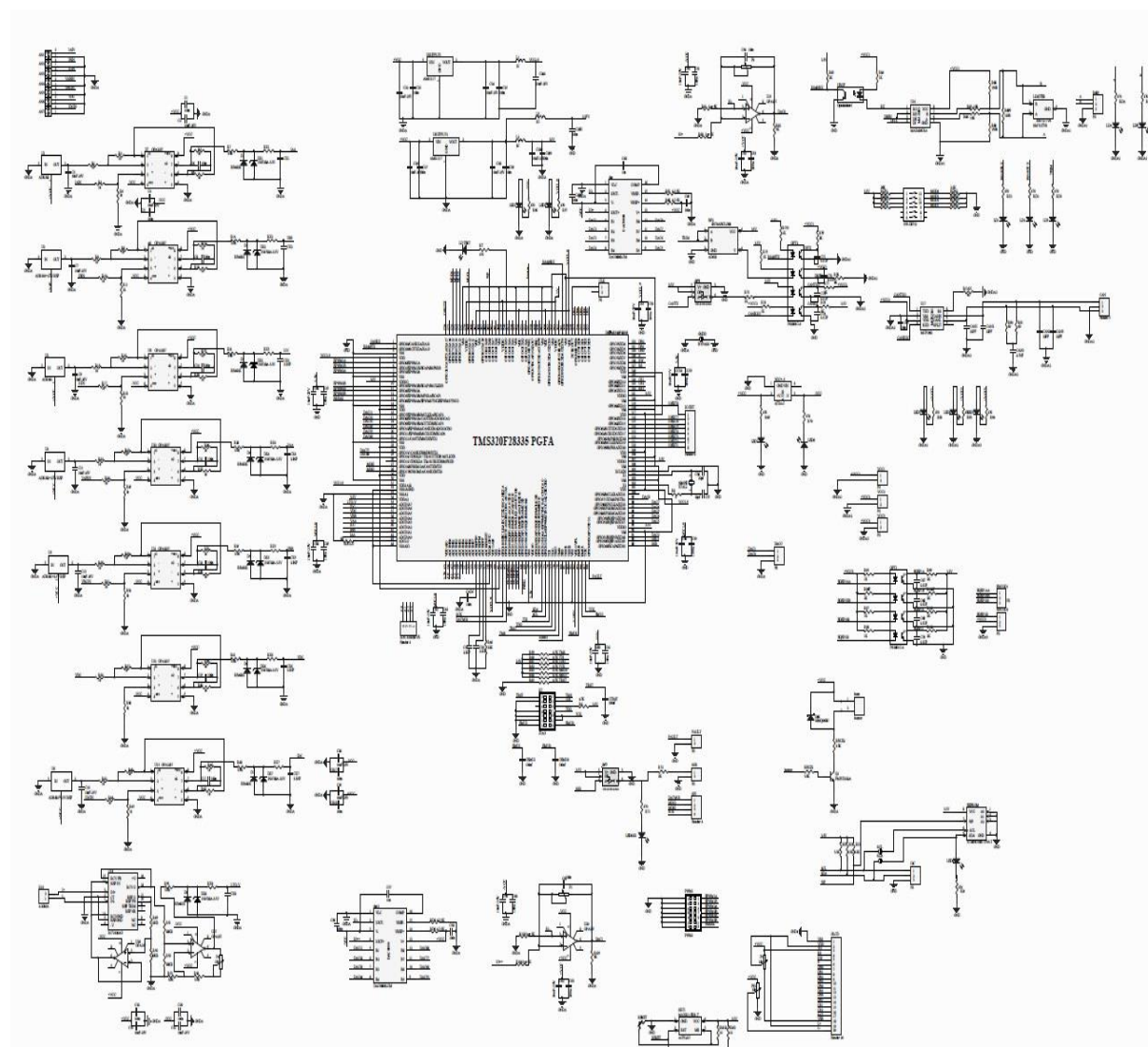
Direction of rotation: CCW
Counterclockwise as viewed
from the shaft
→ CCW direction



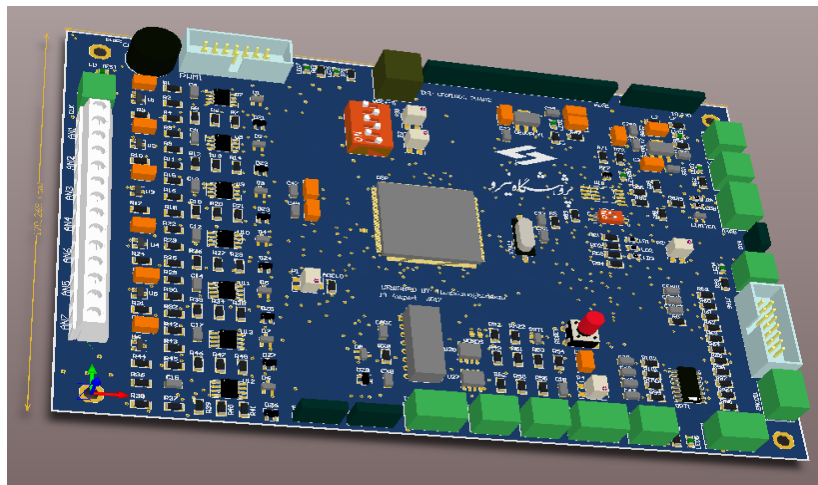
شکل ۲۰-۳: پالسهای خروجی سنسور

با اندازه گیری ولتاژ، جریان و موقعیت رتور محاسبات سیستم کنترل موتور انجام می گردد. در نهایت فرمان کنترلی بصورت پالسهای سوئیچینگ در واحد PWM پردازشگر DSP تولید و از طریق کانکتور مخصوص به برد درایو IPM ارسال می گردد. به منظور عملکرد صحیح پردازشگر دیجیتال نیاز به منبع تغذیه $1/8$ ولت و $3/3$ ولت تنظیم شده می باشد. در برد طراحی شده منبع تغذیه مجهز به فیلتر LC خروجی و مدارات حفاظتی طراحی گردیده است. علاوه بر محاسبات سیستم کنترلی کلیه الگوریتم های حفاظتی شامل حفاظت اضافه ولتاژ و کمبود ولتاژ باس DC، حفاظت اضافه

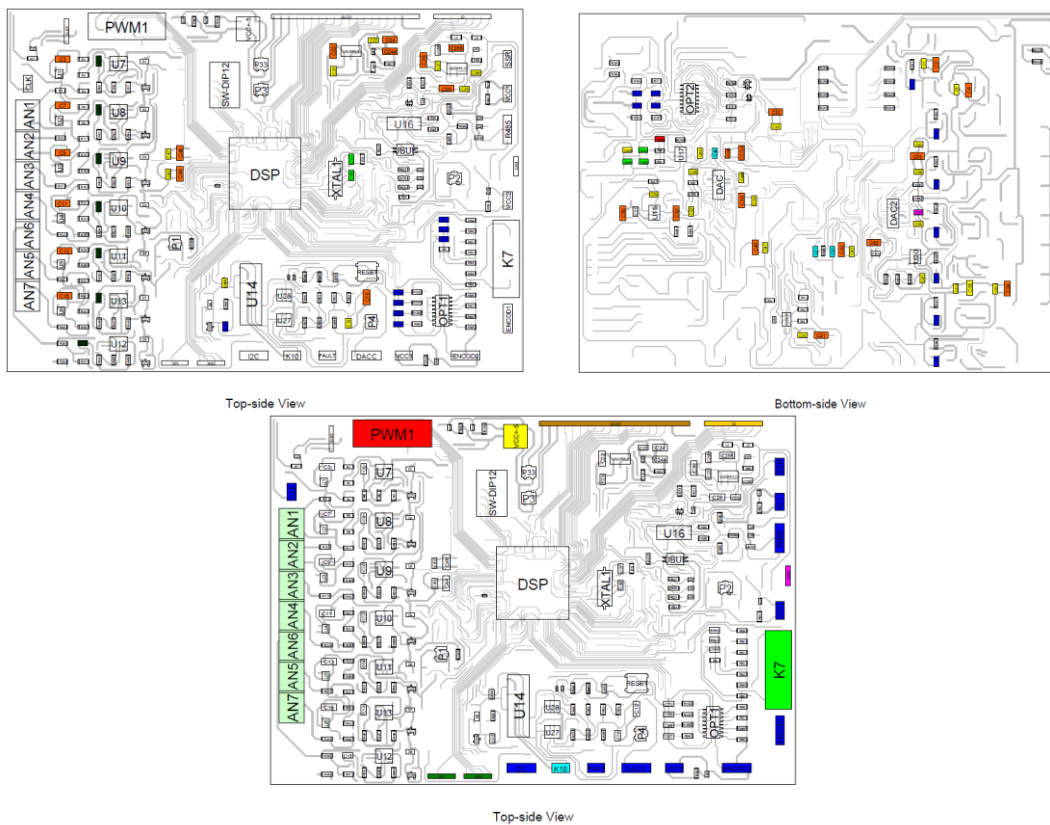
جریان، قطعی فاز، انواع اتصال کوتاه در برد DSP انجام می‌گردد. در شکل‌های (۳-۲۲) تا (۳-۲۶) نقشه‌های خروجی طراحی و نقشه‌ی مونتاژ برد DSP آورده شده است.



شکل ۲۱-۳: شماتیک برد DSP



شکل ۲۲-۳: نمایش سه بعدی برد DSP



شکل ۲۳-۳: نقشه مونتاژ برد DSP

DesignItemId	Qty	Footprint	Designator	Comment
Cap				
100nf	30	1206	C1, C5, C18, C20, C23, C25, C27, C29, C29D, C33, C35, C39, C41, C43, C45, C47, C49, C51, C53, C54, C56, C58, C60, C61, C63, C65, C488, CADC, CS17, CS18	cap
22pf	4	1206	C36, C37, CAN1, CAN2, CAN4, CAN5	cap
47nf	1	1206	CAN3	cap
2.2uf	2	1206	C30, C31	cap
10nf	2	1206	C48, C57	cap
100pf	7	1206	C6, C8, C10, C12, C14, C15, C17	cap
نیازی به مونتاژ نیست	17	C1207	C67, C68, C69, C70, C71, C72, C73, C74, CX1, CX2, CX3, CX4, CX5, CX6, CX7, CTRST, CEMU0, CEMU2	5.3M2
Cap Semi -47uf-10v	29	A	C2, C3, C4, C7, C9, C11, C13, C16, C19, C21, C22, C24, C26, C28, C32, C34, C38, C40, C42, C44, C46, C50, C52, C59, C62, C244, C288, CC34, CC36	Cap
Res1				
Res 0 ohm 1206	8	1206	R0, RX1, RX2, RX3, RX4, RX5, RX6, RX7, RX8, RS	res
Res 3.3 kohm 1206	34	1206	R1, R3, R5, R6, R8, R10, R12, R13, R15, R17, R19, R20, R22, R24, R26, R27, R29, R31, R33, R34, R36, R39, R40, R42, R44, R46, R47, R63, R64, R65, R11, R12, R13, R14	res
دو عدد 3.3 کیلو موارزی	28	1206	R2, R4, R9, R11, R16, R18, R23, R25, R30, R32, R37, R38, R43, R45	res
Res 220 ohm 1206	9	1206	R7, R14, R21, R28, R55, R48, R41, R35, R755, R899	res
Res 12k kohm 1206	2	1206	R49, R82	res
Res 4.7 kohm 1206	13	1206	R51, R53, R54, R67, R68, R72, R80, R81, R103, R104, R105, RD5, RD6	res
Res 442 ohm 1206	8	1206	R76, R77, R78, R79, R99, R101, R102, R100f	res
R-TRIM-SMD-15k	5	TRIM3224	P1, P2, P3, P33, P4	15k
Res 1.5k kohm 1206	7	1206	R69, R70, R71, R92, R94, RD1, RD, RD3	res
نیازی به مونتاژ نیست	11	1206	R59, R60, R61, R62, RUP1, RUP2, RUP3, RDN1, RDN2, RDN3, RDN4	res
Res 2				
Res 470 ohm 1206	3	1206	R73, R74, R75	res
Res 10 ohm 1206	4	1206	R85, R86, RM2, RM22	res
Res 150 ohm 1206	2	1206	R57, R88, R89	res
Res 120 ohm 1206	3	1206	R90, R91, RCAN	res
Res 330 ohm 1206	4	1206	R95, R96F, R97, R98	res
Res 1 kohm 1206	3	1206	R84, RT, RDA, RD8, R8uz1, R8uz2	res
RUP-2.2k	4	1206	RUP4, R52	res
Res 22 kohm 1206	1	1206	R50, R66	res
Res 2.2k kohm 1206	3	1206	R56, R83, R93	res
IC1				
AD623	1	SOT23-5	BF2	AD623

جدول ۵-۳: لیست اول BOM برد DSP

AMS1117	2	SOT-223	USUPPLY1, USUPPLY2	AMS
DAC0800LCN	2	127P600	dac, dac2	DAC
MAX485	1	SO8W	U16	MAX485
MCP2561	1	127P600	U17	MCP
SM712TVS	1	SOT23-3	LIMITER	SM7
TMS320F28335	1	PGF176_L	DSP	DSP
AT24C08BN-SP25-T	1	RS1_N	EEPROM	AT24C
NC7SZ126	2	SC70-5	BF3, BF7	valueV
PS2501L	1	5-4 Gull W	U8BUF	valueV
BZX84C3v3	8	OT23-DIO	DZ1, DZ2, DZ3, DZ4, DZ5, DZ6, DZ7, DZ8	728A-3
BAT54C	8	SOT23_M	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	8481K
			IC2	
PMBT2222A	1	SOT23_N	Q2	PMB
RCV420AG	1	DIP-16	U14	V420A
OPA2177	4	QIC-SN8	U15, U20, U27, U28	PA217
PS2801C-4-F3	2	SO16	OPT1, OPT2	CPL22
MAX811MEU5	1	OT-143	NSRT1	CPL22
SM4007	1	SMA	D66	M4007
TC55	2	OT23-123	U1, U3	DR38
TC56	4	OT23-124	U2, U4, U5, U6	21+2.5
OPA2237	7	MSOP8	U7, U8, U9, U10, U11, U12, U13	A2237
			Conector	
ATX4-C	1	Componer	VCC+-5	TX4-C
IDC14	1	IDC14-B	K7	JTAG
IDC14	1	IDC14-B	PWM1	PWM1
Header 2	1	Componer	K10	20MA
Header 2	11	Componer	CLK, DACC, ENCOD1, ENCOD2, FAULT, I2C, R485, SSR, VCC1, VCC2, VCC3	H1
Header 3	1	HDR1X3	CAN	Header
Header 4	2	HDR1X4	ADC RESERVE, SPI	Header
Header 8	1	HDR1X8	IO EXT	Header
Header 20	1	HDR1X20	GLCD	Header 2
PRKR2	7	PRKR2	AN1, AN2, AN3, AN4, AN5, AN6, AN7	PRKR2
			Inductor and others	
3U3-IHLP2020-VISHAY	1	1206_R	L1	1U
3U3-IHLP2020-VISHAY	2	1206_R	L2, LF	2.2U
LED1	10	SC-GENE	LED TEST, LED1, LED2, LED3, LED4, LED5, LED6, LED7, LED8, LEDSSR	LED1
LED1	5	805R-12K	LD1, LD2, LD3, LDA, LD8	LED1
buzzer	1	buzzer	buzzer	buzzer
SW-DIP12	1	SW-DIP12		SW
XTAL	1	AL-RU49	XTAL1	20MHZ
نیازی به مونتاژ نیست	3	BYPASS	GNDD, SCL, SDA	YPASS
SW-PB-A-RED	1	PB	RESET	SW

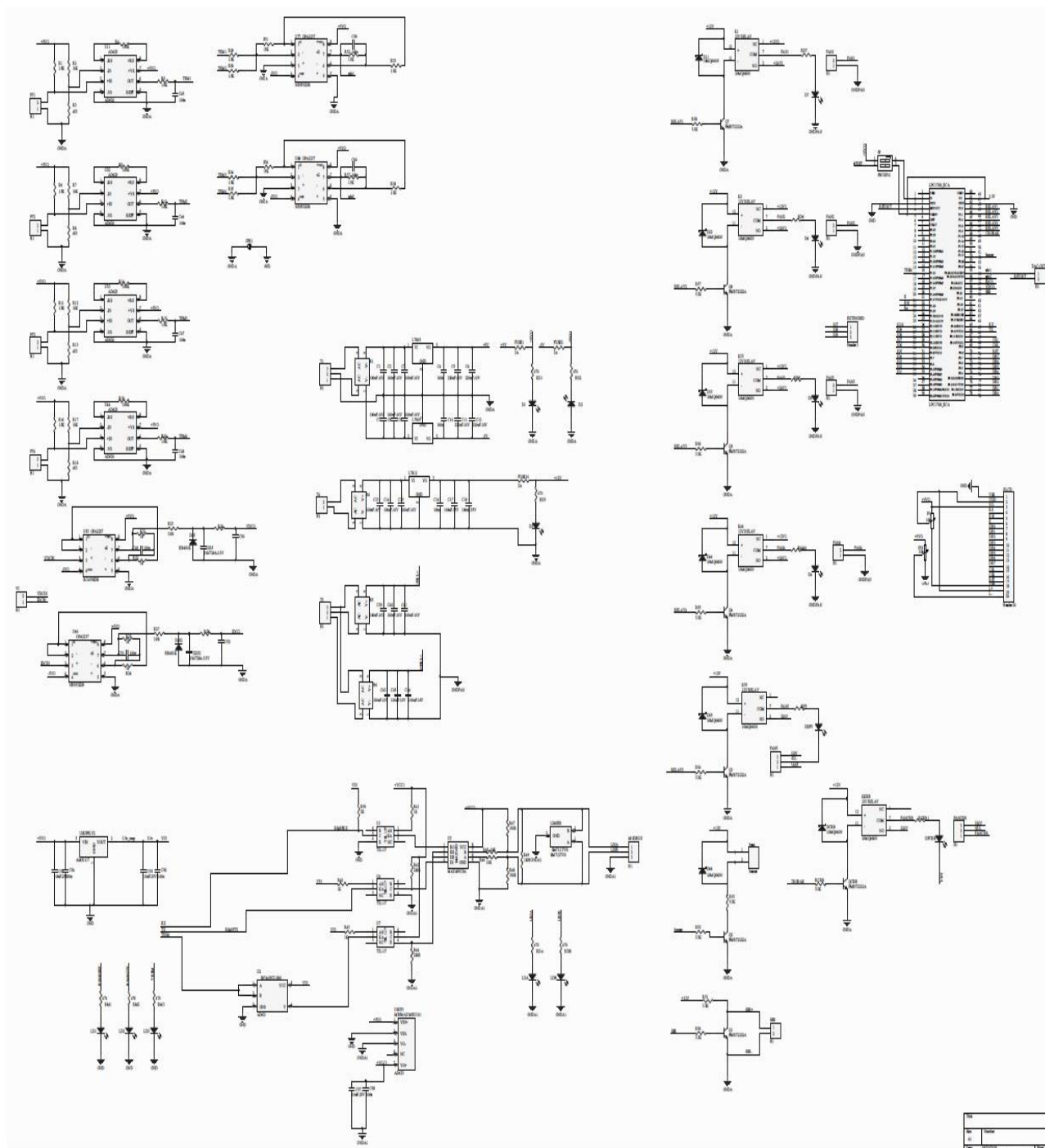
جدول ۶-۳: لیست دوم BOM برد DSP

۳-۱۰- برد حفاظت و مدیریت دما

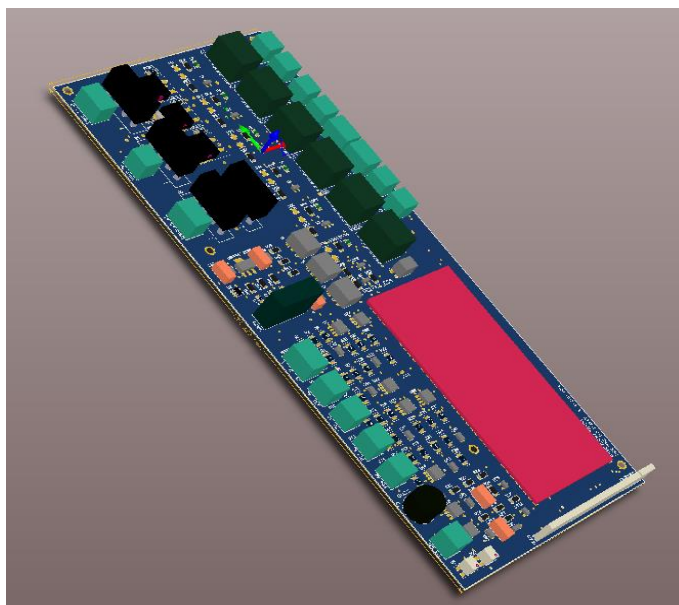
با وجود مازول های قدرت (یکسوساز، SSR ، IPM) افزایش دمای سوئیچ های قدرت اجتناب ناپذیر می باشد. در فصل اول تحلیل حرارتی و طراحی سیستم خنک ساز مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور مدیریت دمایی مازول های قدرت و دمای داخل تابلوی دستگاه یک برد الکترونیکی طراحی گردیده است. **Error! Reference source not found.** قشه شماتیک برد حفاظتی و مدیریت دما را نمایش می دهد. از جمله قابلیت های این برد عبارتند از:

- امکان اتصال ۴ عدد سنسور دمای PT100 و اندازه گیری دمای بدنه هیت سینک
- استفاده از میکرو کنترلر LPC1768 جهت اندازه گیری دما و اعمال فرمان به رله های تغذیه فن
- مجهز به ۴ رله متصل به فن DC و دو عدد فن AC با قابلیت فرمان از میکرو ARM
- قابلیت درایو فن های DC در دو سرعت متوسط و سرعت بالا در صورت افزایش شدید دما
- قابلیت اتصال به LCD گرافیکی جهت نمایش کمیتها

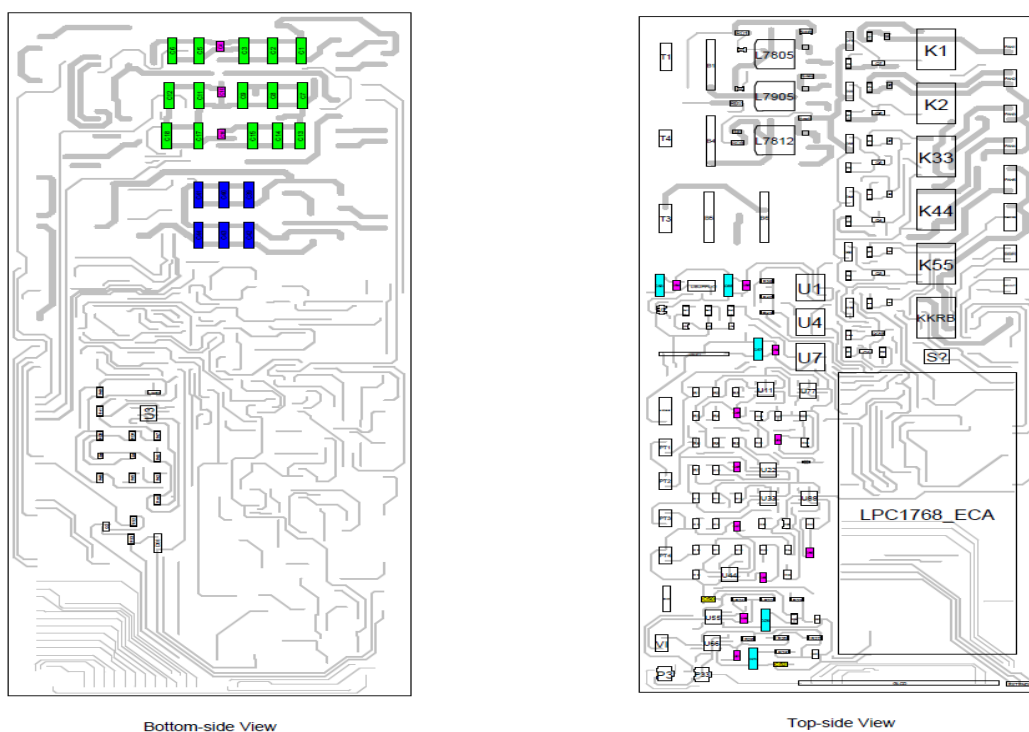
- مجهز به ماژول ارتباط به شبکه مد باس RS485-RTU
 - اندازه گیری ولتاژ و جریان باس DC و حفاظت از دستگاه در برابر اضافه ولتاژ و جریان باس DC
- Error! Reference source not found.** نقشه شماتیک برد حفاظتی و برد کنترل دما را نمایش می دهد. منبع تغذیه مورد نیاز این برد و تغذیه فن ها روی این برد پیاده سازی گردیده است. نمایش سه بعدی برد حفاظتی طراحی شده ، نقشه مونتاژ و لیست کامل قطعات مورد نیاز در شکل های (۳-۲۸) و (۳-۳۰) نمایش داده شده است.



شکل ۲۴-۳: نقشه شماتیک برد حفاظت و مدیریت دما



شکل ۲۵-۳: نمایش سه بعدی بعد از برد حفاظت و مدیریت دما



شکل ۲۶-۳: نقشه مونتاژ برد حفاظت و مدیریت دما

DesignItemid	Qty	Footprint	Designator	Comment
Cap				
نیازی به مونتاژ نیست	2	C1206	C50, C52	cap
Cap Semi-47uf-25v	15	D	C1, C2, C3, C5, C6, C7, C8, C9, C11, C12, C13, C14, C15, C17, C18	cap
Cap Semi 100nf	14	C1206	C4, C10, C16, C45, C46, C47, C48, C49, C51, C54, C56, C58, C59, C60	cap
Cap Semi-47 uf -10v	5	B	C53, C55, C57, DZ5, DZ52	cap
Cap Semi-100uf-35v	6	D	C39, C40, C41, C42, C43, C44	cap
Res				
Res-1.5k	8	1206	R1, R6, R16, R4444, RD5, RD6, RD7, R11	res
Res-10k	6	1206	R2, R7, R12, R17, R30, R35	res
Res-680 ohm	10	1206	R3, R8, R13, R18, RM1, RM2, RM3, RD1, RD2, RD3	res
Res-4.7k	8	1206	R4, R9, R14, R19, R32, R33, R37, R38	res
Res-000 ohm	5	1206	R5, R10, R15, R20, R24, R28	res
نیازی به مونتاژ نیست	7	1206	R21, R22, R25, R26, R23, R27, R25, RF5	res
Res-3.9k	2	1206	R29, R34	res
Res-5.6k	2	1206	R31, R36	res
Res-1k	3	1206	R53, R47, R48, R40, R43	res
Res-18k	1	1206	R52	res
Res-2.2k	2	1206	R39, R42, R44, RDA, RDB	res
Res-18 ohm	2	1206	R45, R46	res
Res-150 ohm	1	1206	R41	res
Res-120 ohm	1	1206	R49	res
Res-470k	1	1206	R51	res
Res-3.3k	7	1206	R50, R54, R55, R56, R57, R58, RCRB	res
Res-15.4k	1	1206	RCRB1	res
R-TRIM-SMD-10k	2	TRIM3224	P3, P33	pot
IC				
AD623	4	SO-8_M	U11, U22, U33, U44	AD623
SN74AHL-G00 (NOR GAT	1	SOT23-5	U2	SN74
mau202	1	0805C-GENERIC	USUP1	mau
AMS1117-3.3V	1	SOT-223_L	USUPPLY2	AMS1117
MAX485	1	SOIC-0A8_L	U3	MAX
SM712TVS	1	SOT23-3	UIMIER	SM712TVS
TIL117	3	DIP-6	U1, U4, U7	TIL
Bridge2	4	KBU	B1, B4, B5, B6	Bridge
BAT54C	2	SOT23_M	D55, D552	BAT54C
L7905-TO220	1	D2PAK	L7905	L7905
L7815-TO220	2	D2PAK	L7805-L7812	L7815
PMBT2222A	8	SOT23_N	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, QCRB	PMBT2222A
SM4007	7	SMA	D11, D22, D33, D44, D55, D66, DCRB	SM
relay	6	0805C-GENERIC	K1, K2, K33, K44, K55, KKR8	relay
OP2177	3	SOIC-SN8_M	U55, U66, U77, U88	OP2177
Concetor and other				
Header 2, Header 2, Hea	17	PCBComponent_1	DAC-OUT, FAN1, FAN2, FAN3, FAN4, FAN5, FANCRB, MODBUS, PT1, PT2, PT3, PT4, SSR, T1, T3, T4, VI	Concetor
نیازی به مونتاژ نیست	1	HDR1X3	EXTENDED	Concetor

جدول ۷-۳: لیست BOM برد حفاظت و مدیریت دما

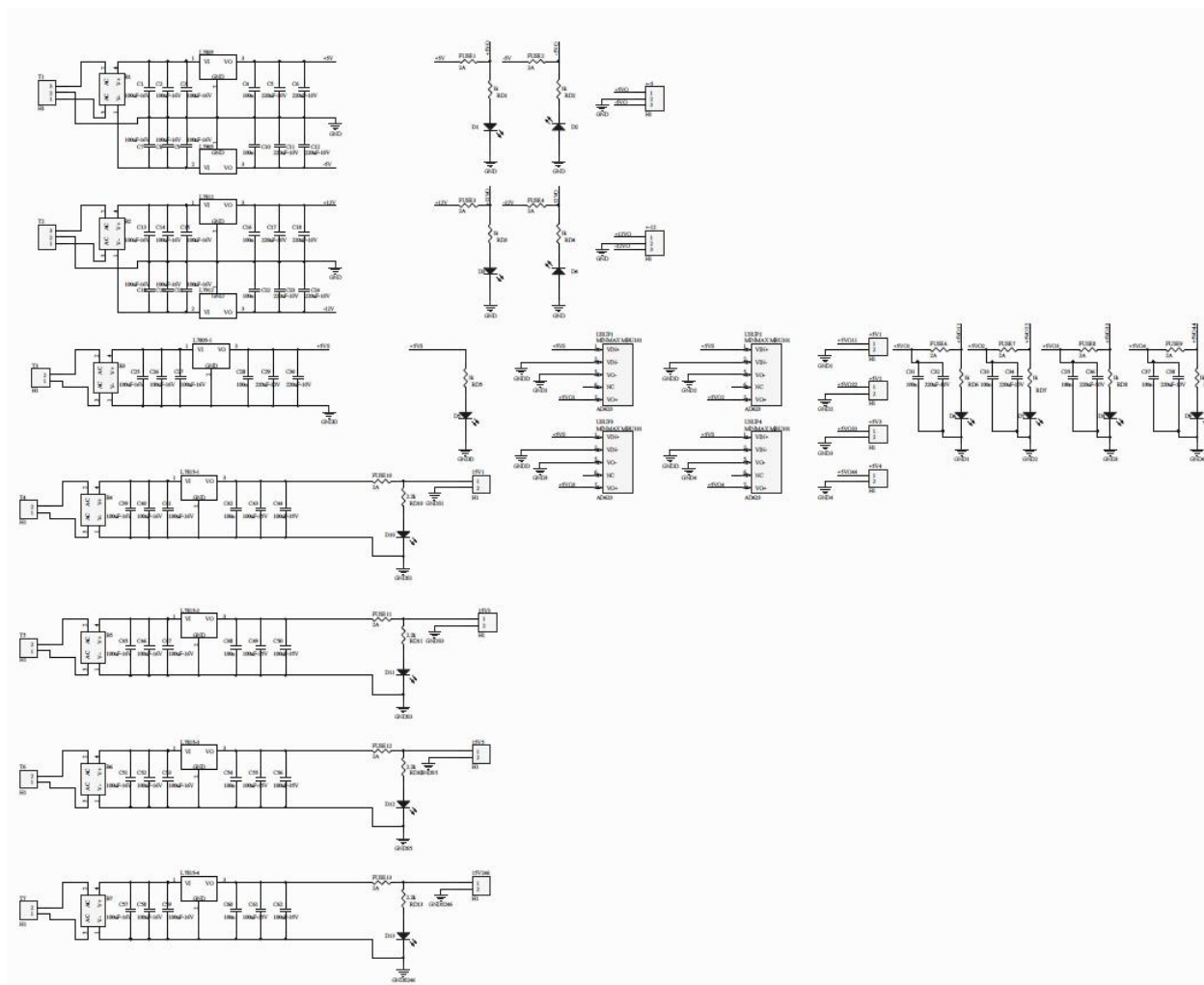
۱-۳- برد منبع تغذیه

به منظور تغذیه کلیه بردهای الکترونیکی مورد استفاده در دستگاه تست نیاز به یک منبع تغذیه با ضریب تنظیم مناسب و حداقل اعوجاج در ولتاژ خروجی می باشد. هر گونه اعوجاج در ولتاژ منبع تغذیه موجب اختلال در عملکرد مدارات آنالوگ و چیپ های پردازشگر دیجیتال می گردد. علاوه براین در صورت بروز هر گونه خطا در مدارات الکترونیک، حفاظت‌های لازم انجام گردد. **Error! Reference source not found.** نقشه شماتیک برد تغذیه را نمایش می دهد. با هدف کاهش س طح نویز از منبع تغذیه خطی (ترانس و یکسوساز) استفاده گردیده است. مشخصات خروجی منبع تغذیه DC به شرح زیر می باشد:

-ولتاژ $\pm 5V$ و جریان 1.5A-ولتاژ $\pm 12V$ و جریان 1.5A

-سه عدد خروجی ولتاژ 5V و جریان 200Ma کاملاً ایزوله با استفاده از ماژول minmax-mau202

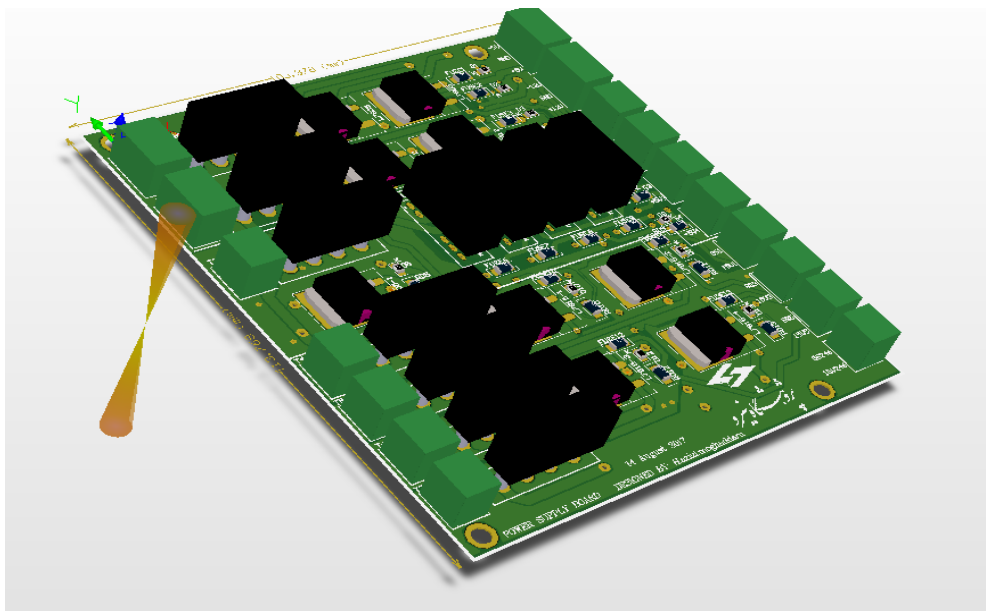
-۴ عدد ولتاژ خروجی ۱۵ ولت کاملاً ایزوله جهت تامین منابع تغذی برد درایو IPM



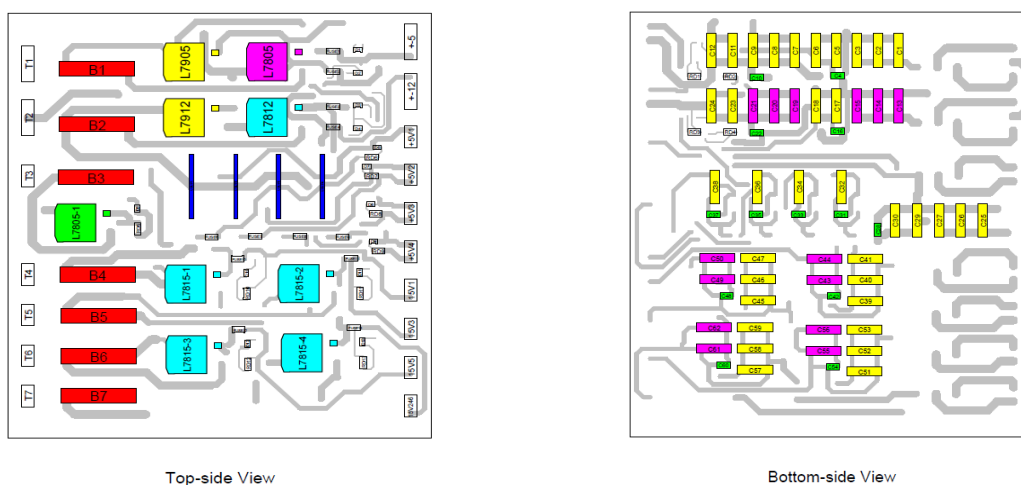
شکل ۲۷-۳: نقشه شماتیک برد منبع تغذیه

Error! Reference source not found. نمایش سه بعدی برد تغذیه را نمایش می دهد. در این طراحی از ی

کسوساز KBU-810 استفاده گردیده است. نقشه موتاژ و لیست قطعات مورد استفاده در این برد به ترتیب در شکل های (۳-۳۳) و (۳-۳۴) ارائه گردیده است.



شکل ۲۸-۳: نمایش سه بعدی برد تغذیه



Top-side View

Bottom-side View

شکل ۲۹-۳: نقشه مونتاژ برد تغذیه

DesignItemid	Qty	Footprint	Designator	Comm
Cap				
47-25v	35	D	C1, C2, C3, C5, C6, C7, C8, C9, C11, C12, C17, C18, C23, C24, C25, C26, C27, C29, C30, C32, C34, C36, C38, C39, C40, C41, C45, C46, C47, C51, C52, C53, C57, C58, C59	Cap
100nf	13	C1206	C4, C10, C16, C22, C28, C31, C33, C35, C37, C42, C48, C54, C60	Cap
33u-20v	14	D	C13, C14, C15, C19, C20, C21, C43, C44, C49, C50, C55, C56, C61, C62	Cap
IC				
L7905-TO220	2	D2PAK	L7905, L7912	L7905
L7815-TO220	1	D2PAK	L7805-1	L7805
L7815-TO220	1	D2PAK	L7805	L7805
L7815-TO220	5	D2PAK	L7812, L7815-1, L7815-2, L7815-3, L7815-4	L7815
mau202	4	mmmax	USUP1, USUP2, USUP3, USUP4	AD623
Bridge2	7	KBU	B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7	Bridge
Conector_Fuse_LED				
Header 2	17	Component	+5V1, +5V2, +5V3, +5V4, +-5, +-12, 15V1, 15V3, 15V5, 15V246, T1, T2, T3, T4, 15V, T5, 15V, T6, 15V, T7, 15V	H1
فیوز 1 آمپر	25	1206	FUSE1, FUSE2, FUSE3, FUSE4, FUSE6, FUSE7, FUSE8, FUSE9, FUSE10, FUSE11, FUSE12, FUSE13, RD1, RD2, RD3, RD4, RD5, RD6, RD7, RD8, RD9, RD10, RD11, RD12, RD13	Res3
LED	13	2835R-12K	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13	LED1

شکل ۳۰-۳: لیست BOM برد منبع تغذیه

۳-۱۲- رابط گرافیکی دستگاه میز تست مبتنی بر نرم افزار LABVIEW

به منظور پایش و اندازه گیری کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی میز تست یک محیط نرم افزاری گرافیکی طراحی و پیاده سازی می گردد. علاوه بر این مدیریت سناریو های تست، حفاظت دستگاه، پردازش داده ها و تهیه گزارش نهایی در این محیط انجام می گردد. در این نرم افزار چند پنجره مجزا پیش بینی گردیده که در هر کدام اهداف مشخصی دنبال می گردد. محیط های گرافیکی طراحی شده عبارتند از:

- Initialization
- Transient time domain analysis
- Frequency domain & harmonic analysis
- Power , energy , power factor & thermal analysis
- Vibration analysis

در ادامه هر یک از محیط های گرافیکی بطور مختصر تشریح می گردد.

Initialization (مقدار دهی اولیه): این tab که به عنوان صفحه نخست نمایش می باشد که شامل تنظیماتی مربوط به فرکانس نمونه برداری، تعریف مشخصه بار دلخواه کاربر و گامهای زمانی اعمال پروفیل بار اعمالی روی موتور تحت تست، تعیین مقادیر حداقل و حداکثر کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی دستگاه جهت حفاظت دستگاه، وارد کردن مقادیر ضرایب اصلاح و کالیبراسیون سنسورها، و افست گیری سنسورها و تنظیمات فیلترهای نرم افزاری و... میباشد.

Transient time domain analysis (آنالیز در حوزه زمان): در این tab کلیه کمیت‌های ولتاژ و جریان، گشتاور، سرعت، دما و سیگنال ارتعاشات به صورت همزمان اندازه گیری و نمایش داده می شود. همچنین ثبت و ذخیره داده ها، نمایش داده ها بصورت off-line و تهیه گزارش از آنها امکان پذیر می باشد.

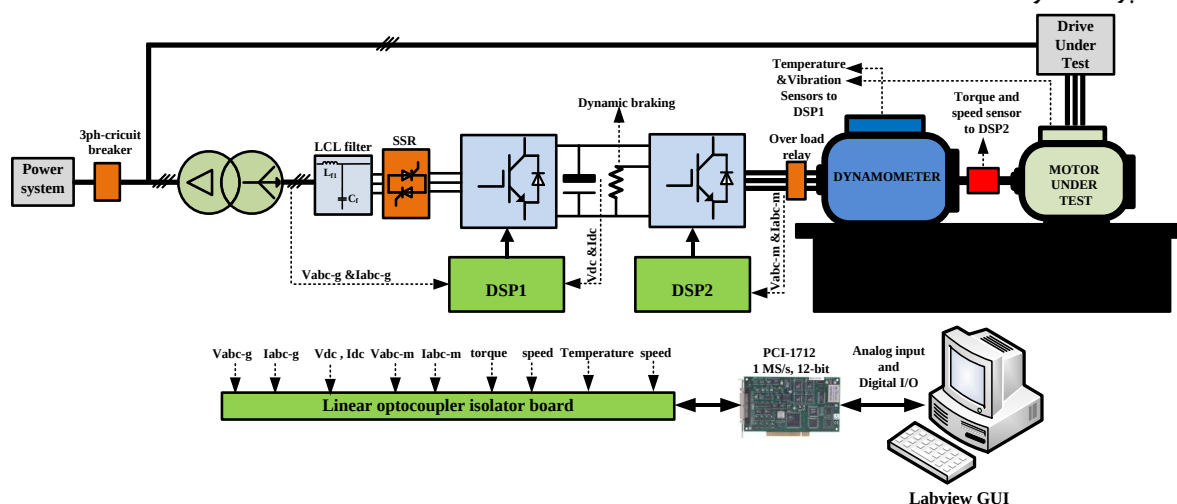
Frequency domain & harmonic analysis (آنالیز در حوزه فرکانس): در این tab تحلیل هارمونیکی کمیت‌های ولتاژ و جریان نقاط مختلف سیستم تست بصورت on-line و off-line امکان پذیر می باشد. به منظور اعمال FFT با کیفیت مطلوب در هر مرحله دو سیگنال انتخاب و سپس دامنه و فاز مولفه های هارمونیکی و مقدار THD محاسبه می گردد و بصورت گرافیکی نمایش داده می شود. همچنین امکان ذخیره سازی داده ها و تهیه گزارش از آنالیز هارمونیکی فراهم می گردد.

Power , energy , power factor & thermal analysis (آنالیز توان و انرژی): در این tab بر اساس خروجی سنسورهای اندازه گیری ولتاژ، جریان، گشتاور و سرعت کلیه مولفه های توان اکتیو و راکتیو بخشهای مختلف سیستم تست

(موتور تحت تست، دینامومتر، مبدل سمت دینامومتر، مبدل سمت شبکه، یک محاسبه و نمایش داده میشود. در این محیط تلفات، راندمان، مصرف انرژی بخشهای مختلف سیستم تست و ضریب توان به صورت on-line و off-line قابل محاسبه و نمایش می باشد. همچنین امکان اندازه گیری دمای دو نقطه از سیستم تست پیش بینی گردیده است. در حالت off-line سیگنالهای ورودی این tab می تواند از سیگنالهای ذخیره شده بخش Transient time domain analysis میباشد. Vibration analysis (آنالیز ارتعاشات): در این tab خروجی سه عدد سنسور ارتعاشات اندازه گیری و نمایش داده می شوند. با استفاده از ابزارهای محاسباتی شتاب، سرعت و جابجایی خروجی بصورت به صورت on-line و off-line محاسبه و نمایش داده می شود. همچنین تحلیل فرکانسی سیگنالهای ارتعاشی در این محیط محاسبه و نمایش داده می شود. امکان توسعه برنامه نویسی labview برای کارهای بعدی فراهم گردد.

مطابق. **Error! Reference source not found.** به منظور حفاظت از سیستم اکتساب داده و کاهش نویز ه ای اندازه گیری، کمیت‌های خروجی سنسور از طریق یک برد تقویت کننده اپتو ایزولاتور خطی به کارت I/O ارسال می گردد. کارت I/O مورد استفاده در این پروژه از نوع PCI-1712 Advantech با ۱۶ کانال ورودی آنالوگ و نرخ نمونه برداری 1Ms/sec میباشد. همانگونه که در جدول ۳-۴ نمایش داده شده تعداد کمیت‌های اندازه گیری شده بیشتر از تعداد کانالهای آنالوگ ورودی میباشد. با طراحی یک مدار آنالوگ سوئیچ امکان انتخاب کمیت‌های مورد نیاز کاربر از طریق محیط نرم افزاری فراهم می گردد. مطابق. **Error! Reference source not found.** چهار مد اندازه گیری اصلی ت عریف شده که در حالت کمیت‌های مشخصی انتخاب و به کارت I/O ارسال می گردد. حالت‌های اندازه گیری MODE0 تا MODE4 از طریق لب ویو با سه خروجی IO0 تا IO1 مشخص می گردد. با انتخاب هر یک از مدهای اندازه گیری توسط کاربر در محیط لب ویو، کدهای متناظر از طریق خروجی دیجیتال کارت I/O (مطابق

(به مدارات آنالوگ سوئیچ اعمال و سیگنالهای متناظر مطابق جدول ۳-۷ به ورودیهای آنالوگ کارت I/O ارسال می گردد. بسته به حالت های آنالوگ سوئیچ سیگنالهای آنالوگ از پیش تعیین شده به ورودی آنالوگ AN0 تا AN15 اعمال می گردد. حالت‌های آنالوگ سوئیچ های S0 تا S15 از طریق یک میکرو AVR اعمال می گردد. نحوه ارتباط خروجی دیجیتال کارت I/O با مدارات آنالوگ سوئیچ را نمایش می دهد. پیاده سازی بخش نرم افزار دستگاه مرحله سوم این پروژه می باشد که جزئیات پیاده سازی و نتایج خروجی آن در گزارش بخش نرم افزار با جزئیات بیشتری پرداخته خواهد شد.



شکل ۳-۳۱: ساختار میز تست و کمیت‌های اندازه گیری شده

جدول ۳-۸: سیگنال های اندازه گیری شده میز تست

شماره	خروجی سنسور	شماره	خروجی سنسور
1	Vag	16	Vad
2	Vbg	17	Vbd
3	Iag1	18	Iad
4	Ibg1	19	Ibd
5	Vdc1	20	Iag2
6	Idc1	21	Ibg2
7	Vam	22	Vib1
8	Vbm	23	Vib2
9	Iam	24	Vib3
10	Ibm	25	T1
11	W(speed)	26	T2
12	Te	27	Vdc2
13	Vp	28	Idc2
14	Ip	29	Vs-line
15	Vsec	30	Is-in

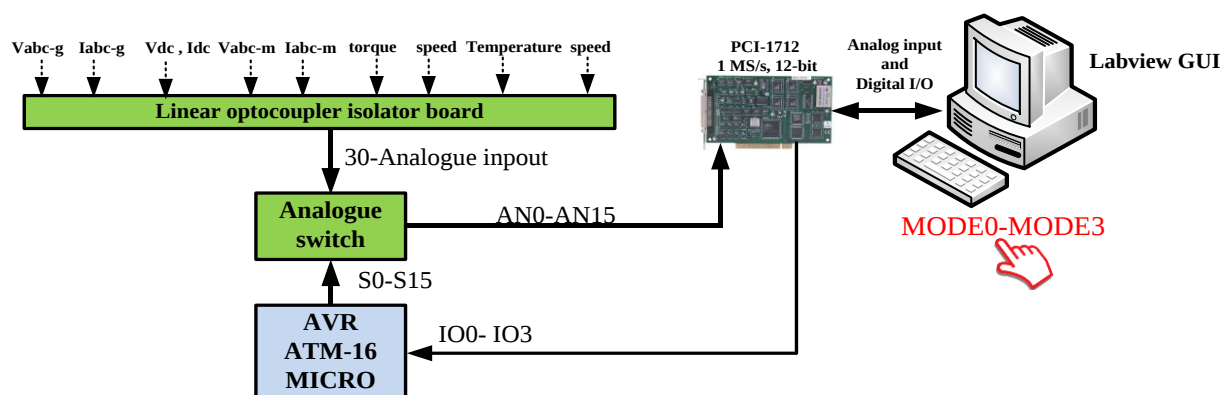
جدول ۹-۳: مدهای اندازه گیری و کدهای متناظر

مد اندازه گیری	خروجی IO0 تا IO3
MODE0	000
MODE1	001
MODE2	010
MODE3	011
MODE4	100

جدول ۱۰-۳: مدهای اندازه گیری و سیگنالهای متناظر با هر یک از ورودیهای آنالوگ کارت I/O

تست ارتعاشات		دینامومتر		دینامومتر و موتور	
Mode5 (100)		Mode4 (011)		Mode3 (010)	
Vad	16	Vad	16	Vad	16
Vbd	17	Vbd	17	Vbd	17
Iad	18	Iad	18	Iad	18
Ibd	19	Ibd	19	Ibd	19
		Ibg2	21	Vdc1	5
				Idc1	6
Vam	7			Vam	7
Vbm	8			Vbm	8
Iam	9			Iam	9
Ibm	10	Iag2	20	Ibm	10
W(speed)	11	W(speed)	11	W(speed)	11
Te	12	Te	12	Te	12
Vib1	22	T1	25	T1	25
Vib2	23	T2	26	T2	26
Vib3	24	Vdc2	27	Vdc2	27
		Idc2	28	Idc2	28

جدول ۱۱-۳: مدهای اندازه‌گیری و سیگنالهای متناظر با هر یک از ورودیهای آنالوگ کارت I/O



شکل ۳۲-۳: نمودار دیاگرامی مدار آنالوگ سوئیچ و برد واسط کارت I/O

۱۳-۳- نتیجه گیری

هدف اصلی این پروژه طراحی و پیاده سازی یک میز تست ماشین‌های الکتریکی مبتنی بر دینامومتر موتور القایی می باشد. همانطور که گفته شد، سیستم دینامومتر این قابلیت را دارد که با داشتن معادله ریاضی هر نوع بار (خطی یا غیرخطی) رفتار آن را روی موتور تحت تست شبیه سازی کند. شبیه سازی رفتار بارهای مختلف صنعتی در آزمایشگاه ماشین‌های الکتریکی مستلزم شناسایی معادلات حاکم بر دینامیک بارهای مختلف می باشد. بر همین مبنی در ابتدای این پژوهش ابتدا دسته بندی بارهای مختلف صنعتی شامل انواع بارهای خطی، بارهای غیر خطی ارائه گردیده و شبیه سازی اثرات غیر خطی این بارها بر عملکرد سروو درایو ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور از تجهیزات دینامومتری جهت بازتولید گشتاور بار دلخواه استفاده می شود. در این پروژه از سیستم دینامومتر نوع ماشین الکتریکی از نوع موتور القایی استفاده می گردد. در ادامه به منظور کنترل سیستم دینامومتر، روش کنترل برداری غیر مستقیم تطبیقی و حلقه کنترل بیرونی مبتنی بر روش دینامیک معکوس استفاده گردیده است. به منظور اعمال گشتاور ترمزی استاتیکی و دینامیکی دلخواه بر یک ماشین تحت تست نیاز به یک سیستم درایو دقیق و مقاوم نسبت به عدم قطعیت های موجود در سیستم می باشد. استفاده از روش کنترل تطبیقی بجای روش PID معمولی علاوه بر دینامیک سریع تر و در نتیجه پهنای باند وسیع تر، عملکرد مقاوم تری در برابر تغییر پارامترها دارد. نتایج شبیه سازی اثربخشی پاسخ شبیه سازی بار روی موتور تحت تست به وسیله سیستم دینامومتر با روش کنترل تطبیقی را نشان داد. در فصل دوم طراحی کلیه اجزاء مدار قدرت سیستم دینامومتر شامل مبدل اینورتری، مبدل سمت طراحی شدند. طراحی های انجام شده برای مدار قدرت به وسیله شبیه سازی مورد آزمون قرار گرفت تا علاوه بر ارزیابی پاسخ دینامیکی و دقت سیستم کنترلی، تنش های حرارتی و الکتریکی اعمالی بر ادوات قدرت پیش بینی و ملاحظات لازم انجام گردد. در فصل سوم تمام بردهای الکترونیک مورد نیاز شامل برد DSP، برد تغذیه، برد درایو گیت، برد های سنسور طراحی گردیده است. همچنین لیست کلیه قطعات الکترونیک و المان های مورد نیاز بصورت جداول BOM ارائه گردیده است. در پایان مشخصات سیستم اکتساب داده، امکانات نرم افزاری و پردازشی پیش بینی شده در محیط لب ویو ارائه گردیده است.

فصل ۴- فصل چهارم : پیاده سازی اجراء سخت افزاری دستگاه دینامومتر

۴-۱- مقدمه

در گزارش مرحله ۱ طراحی مفهومی و طراحی تفصیلی اجزاء مختلف میز تست انجام گردید. مراحل انتخاب و طراحی المان‌های قدرت، قطعات الکترونیک، سنسورها و پردازشگر دیجیتال، اجزاء فیلتر ورودی و خروجی و طراحی تابلو و ... به تفصیل در گزارش فصل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. جدول ۴-۱ خلاصه‌ای از نتایج طراحی تفصیلی و لیست المان‌ها و ماژول‌های اصلی دستگاه می‌باشد.

ماژول IPM: به منظور پیاده‌سازی مدار اینورتر در این پروژه از یک ماژول IPM مجهز به ۶ سوئیچ IGBT و ترمز دینامیکی استفاده شده است. مزایای استفاده از ماژول IPM در مقایسه با سوئیچ‌های مجزای IGBT به شرح زیر است:

- کاهش حجم و وزن اینورتر و امکان جمع‌پذیری دستگاه
- مجهز بودن IPM به انواع حفاظت اضافه جریان، حفاظت اتصال کوتاه و حفاظت افزایش دمای بدنه موجب عملکرد ایمن دستگاه در مراحل تست و دیباگینگ سیستم کنترلی در نمونه اولیه آزمایشگاهی می‌گردد.
- با در نظر گرفتن هزینه تمام شده طراحی و ساخت اینورتر با استفاده از سوئیچ‌های IGBT مجزا به همراه مدارات حفاظت اضافه جریان، حفاظت اتصال کوتاه و حفاظت حرارتی، ترمز دینامیکی و مدارات درایو گیت به همراه هزینه‌های نصب و سیسم‌کشی برای نمونه اولیه آزمایشگاهی، به مراتب بیشتر از هزینه یک ماژول IPM می‌باشد.
- با توجه به قرار گرفتن ۶ سوئیچ IGBT و سوئیچ ترمز دینامیکی در یک پکیج واحد در ماژول IPM نیاز به سیستم خنک‌سازی مجزا برای ۷ سوئیچ IGBT نیست و این مساله علاوه بر کاهش هزینه سیستم خنک‌سازی، ابعاد سیستم را کاهش می‌دهد.

بر این اساس در این پروژه انتخاب ماژول IPM نسبت به استفاده از سوئیچ‌های مجزا دارای برتری می‌باشد. مدار درایو گیت IPM: پالسه‌های تولیدی DSP دارای سطح ولتاژ 3.3 ولت می‌باشند. ابتدا با استفاده از یک مدار جابجا کننده ولتاژ^۱، پالسه‌ها به سطح ولتاژ ۵ تغییر می‌یابد. سپس از طریق ایزولاتور نوری HCPL4504 پالسه‌ها به گیت سوئیچ‌های ماژول IPM اعمال می‌گردد. برد درایو گیت و مدارات مربوطه به گونه‌ای طراحی شده که روی ماژول IPM نصب می‌شود. این امر موجب کاهش سیم‌کشی‌های زائد و به طور موثر موجب کاهش نویزهای سوئیچینگ دستگاه می‌گردد. هیت سینک ماژول IPM: مدلسازی حرارتی ماژول IPM و طراحی سیستم خنک‌سازی در گزارش فصل ۲ بررسی گردید. انتخاب روش‌های خنک‌سازی بین هیت سینک با جابجایی سیال (هوا) طبیعی، هیت سینک با جابجایی سیال (هوا) اجباری و هیت سینک آب خنک مورد ارزیابی قرار گرفت. استفاده از روش خنک‌سازی هیت سینک با جابجایی سیال طبیعی به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین و نیاز به ابعاد بسیار بزرگ هیت سینک (برای دستیابی به ضریب حرارتی مورد نیاز) از نظر هزینه و حجم و وزن دستگاه توجیه پذیر نمی‌باشد. نوع آب خنک نیز به دلیل هزینه بالا و نیاز به تجهیزات جانبی برای این پروژه مناسب نبوده است. در نهایت خنک‌ساز هیت سینک با جابجایی سیال (هوا) اجباری انتخاب شده است.

سنسور سرعت/انکودر/فرشی: در این پروژه سنسور سرعت انکودر افزایشی authonix E5058 استفاده شده است. با توجه به اینکه در این پروژه سیستم دینامومتر با هدف استفاده در یک تجهیز ابزار دقیق طراحی شده، در انتخاب سنسورها (اعم از

¹ -Level shifter

سنسورهای سرعت، ولتاژ و جریان و گشتاور) در مقایسه با دقت و قابلیت اطمینان خروجی‌های سنسور، هزینه اقتصادی دارای اولویت پایین‌تری می‌باشد. معیارهای اصلی انتخاب سنسور سرعت عبارتند از:

- دقت بالا در محدوده وسیع اندازه‌گیری
- حداقل تأثیر نویز و افست پایین
- پهنای باند بالا
- محدوده دمایی قابل قبول
- قابلیت تحمل شرایط محیطی سخت (شوک مکانیکی، رطوبت و...)

از بین سنسورهای انکودر موجود در بازار از نظر دقت و نویز پذیری دو شاخص مورد توجه قرار گرفته است. در اولویت اول تعداد پالس در هر دور مکانیکی (دقت و رزولیشن به تعداد پالس بستگی دارد) معیار انتخاب بوده است. موضوع بعدی نویز پذیری سنسور انکودر می‌باشد. فرمت خروجی سنسور انکودر و نحوه انتقال پالسهای خروجی انکودر به ۴ دسته زیر تقسیم می‌شود:

- T: Totem pole output
- N: NPN open collector output
- V: Voltage output
- L: Line driver output

نوع line driver به دلیل انتقال پالسها بصورت تفاضلی و حذف نویزهای مد مشترک از نظر نویز پذیری عملکرد بهتری نسبت به انواع دیگری دارد. این نوع از انکودر ها برای انتقال پالسهای خروجی انکودر برای فواصل طولانی انتخاب مناسبی می‌باشد. با توجه به فاصله تقریباً سه متری موتور دینامومتر از تابلو دستگاه، در این پروژه از این نوع انکودر با تعداد ۲۰۰۰ پالس در هر دور استفاده شده است تا ضمن کاهش اثرات نویز، دقت و رزولیشن قابل قبول در اندازه‌گیری سرعت و موقعیت رتور حاصل گردد.

سنسور ولتاژ و جریان: به منظور اندازه‌گیری کمیت‌های ولتاژ و جریان AC و DC در نقاط مختلف دستگاه، سنسور ولتاژ اثر هال LV25P و سنسور جریان اثر هال LA55 شرکت LEM انتخاب شده‌اند. این نوع از سنسور ها به دلیل دقت بالا، افست پایین، پهنای باند بالا نسبت به سایر سنسور ها در اغلب سیستم‌های درایو و الکترونیک قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در چند سال در کنار سنسور های LEM، سنسور های جریان شرکت Allegro نیز در بازار داخل کشور در دسترس قرار گرفته است. در مقایسه با سنسور های LEM، این سنسور ها نسبتاً دارای قیمت پایین‌تری می‌باشند ولی دارای پهنای باند کمتری می‌باشند که برای کاربردهای ابزار دقیق و تجهیزات دقیق اندازه‌گیری انتخاب مناسبی نمی‌باشند. خروجی سنسور های LV25P و LA55 به صورت سیگال جریان می‌باشد که این قابلیت (انتقال سیگنال اندازه‌گیری به صورت جریان) موجب کاهش اثرات نویز های محیطی می‌گردد. بنابراین برای دستگاه دینامومتر استفاده از سنسورهای ولتاژ و جریان LEM بر انواع دیگر سنسور های ولتاژ و جریان ترجیح داده شده است.

پردازشگر دیجیتال: با توجه به حجم بالای محاسبات سیستم کنترل دستگاه دینامومتر و ضرورت دستیابی به دقت بالای محاسبات سیستم کنترلی، لازم است تا از یک پردازشگر (حداقل) ۳۲ بیتی با کلاک بالا استفاده گردد. متناسب با نیازهای دستگاه دینامومتر، دقت محاسباتی بالا، سرعت محاسبات بالا و سازگاری با نویز های محیطی از جمله معیار های انتخاب پردازشگر می‌باشد. انتخاب یک پردازشگر دیجیتال با کلاک بیشتر با قابلیت محاسبات ضرب و تقسیم های اعشاری (دارای واحد FPU) می‌تواند شرایط پیاده سازی الگوریتم های کنترلی پیچیده با دقت بالا را تا حد قابل قبولی فراهم آورد. در یک

تقسیم بندی کلی پردازشگرهای دیجیتال را می توان به دو دسته ممیز ثابت^۱ و ممیز شناور^۲ تقسیم بندی نمود. در نوع ممیز ثابت، ضرب و تقسیم های اعشاری به صورت نرم افزاری انجام می شود (کد نویسی پیچیده تر و افزایش حجم برنامه). این مساله موجب صرف تعداد کلاک های بیشتر جهت انجام ضرب و تقسیم های اعشاری و در نتیجه افزایش زمان محاسبات عددی با تکرار های بالا می گردد. به همین دلیل پردازشگرهای ممیز ثابت در کاربردهایی که نیاز به حجم بالایی از محاسبات و پیاده سازی الگوریتم های پیچیده باشد جوابگو نمی باشند. پردازشگر های ممیز شناور دارای یک واحد سخت افزاری ضرب اعشاری^۳ می باشند که قابلیت انجام محاسبات ضرب و تقسیم با حداقل کلاک را دارا می باشند. این امر موجب می گردد تا برای کاربردهایی که دارای محاسبات پیچیده با حجم داده های زیاد هستند از پردازشگر های ممیز اعشاری استفاده کنیم. جدول ۲-۴، لیست پردازشگر های دیجیتال ممیز اعشاری شرکت های ARM، DSP-TI، STM، ATMEAL مناسب جهت استفاده در این پروژه را ارائه می دهد. انتخاب این پردازشگر ها از بین انواع متنوع پردازشگرهای دیجیتال ارائه شده توسط سازندگان، دقت بالای محاسبات (۳۲ بیت) و دارا بودن بخشهای جانبی مخصوص درایو و کنترل دور موتور (واحد PWM، واحد QEP و...) بوده است. در ادامه مقایسه بین پردازشگر های مختلف و انتخاب چپ نهایی برای ای پروژه بررسی می گردد. پردازشگر های دیجیتال شرکت TI، با هسته مرکزی C2000 در دو نوع ممیز ثابت و ممیز شناور در بازار ایران موجود می باشند و در کاربردهای الکترونیک قدرت و درایو به دفعات استفاده شده است. برای کاربردهای با حجم محاسبات بالا چپ dsp-tms320f335 (نوع ممیز شناور) نسبت به نوع ممیز ثابت (dsp-tms320f2812) به دلیل سرعت محاسبات بالا انتخاب بهتری می باشد. یکی از مزایای پردازشگرهای TI، دسترسی به کتابخانه های محاسباتی ارائه شده توسط شرکت سازنده و امکان پیاده سازی کدنویسی بهینه تر (حداقل تعداد خط برنامه و زمان اجرای کمتر) روش های کنترلی در مرحله ساخت می باشد.

پردازشگر های سری STM32H7 (شرکت STMicro electronics) دارای فرکانس کلاک بالا می باشند ولی به دلیل قیمت تقریباً دو برابر نسبت به DSP-28335 از نظر اقتصادی توجیه پذیر نیستند. همچنین پردازشگر نوع STM32F1 علاوه بر کلاک پایین تر (سرعت محاسبات کمتر)، دارای قیمت بیشتری نسبت سایر چپ ها می باشد و نمی تواند انتخاب مناسبی برای این پروژه باشد. پردازشگر سری SAMS70 دارای کلاک دو برابر نسبت به DSP-335 می باشد ولی در داخل کشور موجود نمی باشد و پیش بینی می شود قیمت سفارش خارج آن تا دو برابر قیمت DSP-335 موجود در بازار باشد. پردازشگرهای سری SAMD5X با وجود قیمت پایینتر، به دلیل کلاک کمتری نسبت به انواع دیگر پردازشگرها از نظر سرعت محاسبات دارای محدودیت می باشد. پردازشگر SAME70 شرکت ATMEAL نیز با کلاک 120MHZ، از سرعت پایین تری نسبت به DSP-335 برخوردار می باشد. بر این اساس پس از مقایسه چپ های مختلف، پردازشگر DSPTMS320F335 انتخاب گردید که در واقع یک مصالحه بین قیمت و سرعت پردازش برای اجرای الگوریتم های کنترلی پروژه دینامومتر می باشد.

¹ - fixed point

² - float pint

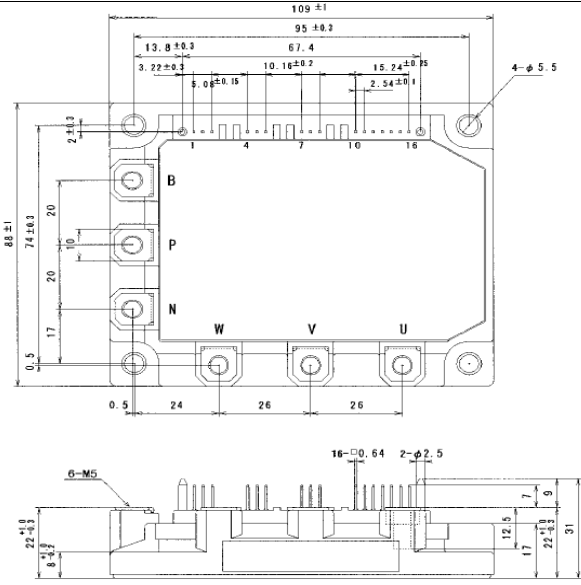
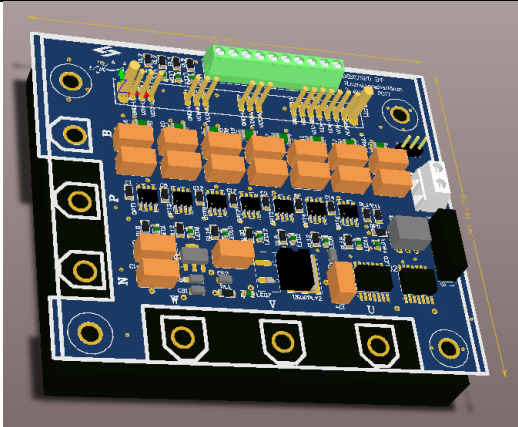
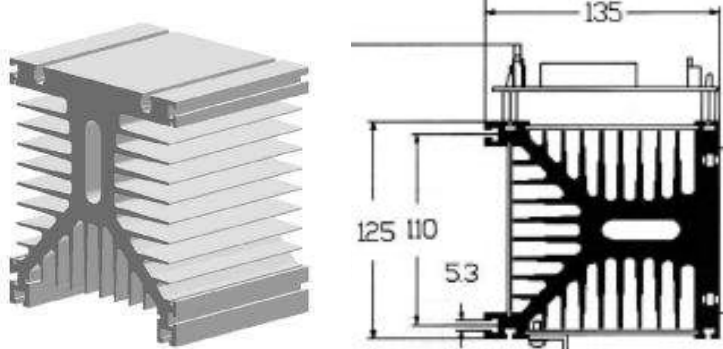
³ -Float point unit(FPU)

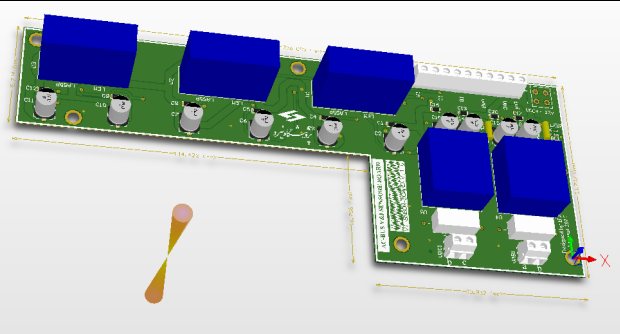
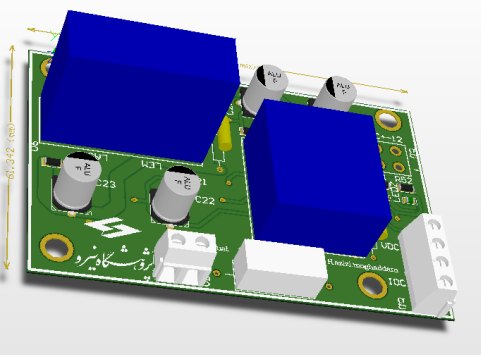
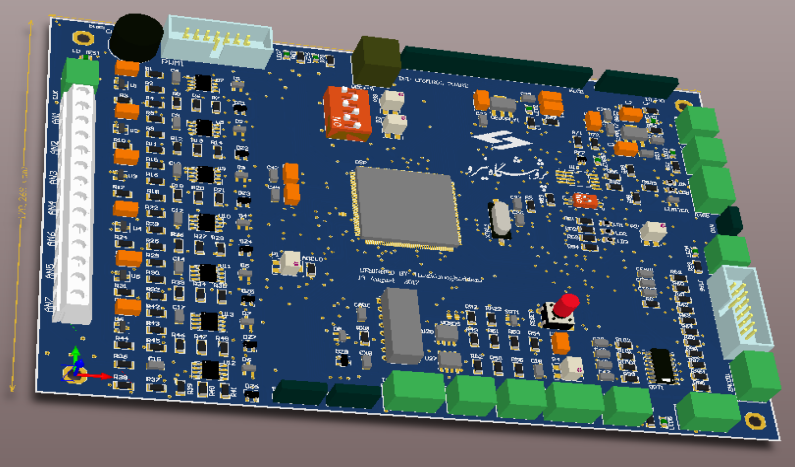
جدول ۱-۴: مقایسه پردازشگرهای دیجیتال ۳۲ بیتی مورد کاربرد در دستگاه دینامومتر

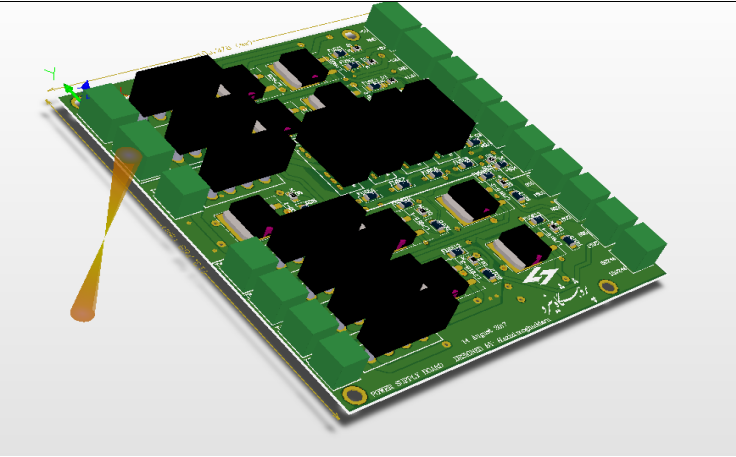
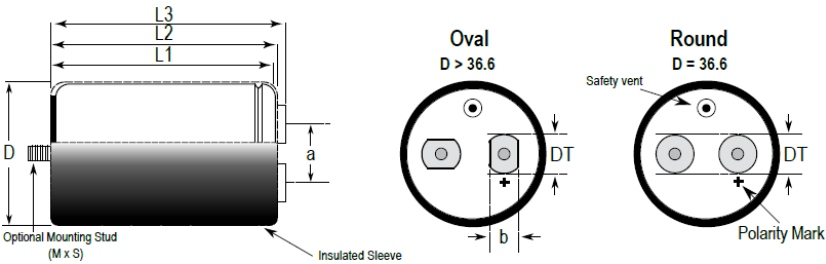
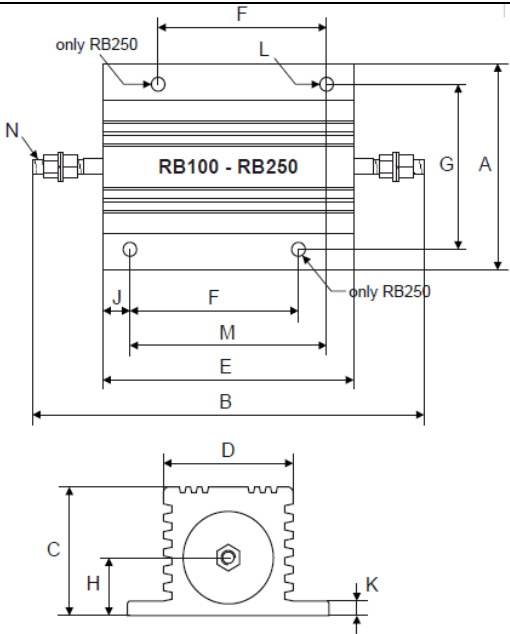
پروازشگر دیجیتال	مشخصات	قیمت
DspTMS320f2812 شرکت سازنده (Texas instruments)	DSP - Digital Signal Processors & Controllers 150 MHz 32 bit Fixed Point	0.689 میلیون تومان مرجع قیمت : https://www.javanelec.com/Shops?searchFilter=F2812#dtl/11249
DspTMS320f335 شرکت سازنده (Texas instruments)	DSP - Digital Signal Processors & Controllers 150 MHz 32 bit Floating Point	0.520 میلیون تومان مرجع قیمت : https://www.javanelec.com/Shops?searchFilter=F28335#dtl/11250
STM32H742xI/G STM32H743xI/G STM32H7 series STM32H7 series includes microcontrollers with single- and dual-core architectures. شرکت سازنده (STMicro electronics)	32-bit Arm® Cortex®-M7 core with double-precision FPU 32-bit RISC core operating at up to 480 MHz / 3*ADC Floating Poin	1.130 میلیون تومان مرجع قیمت : https://afranik.ir/stm32h743vih6.html
stm32f103ret6 STM32 Family STM32F1 Series Microcontrollers ARM MCU, Motor Control, STM32 Family STM32F1 Series Microcontrollers, ARM Cortex-M3, 32bit, 72 MHz شرکت سازنده (STMicro electronics) ATSAMS70J21A-AN	Core: Arm ® 32-bit Cortex® -M3 CPU 32bit, 72 MHz	1.72 میلیون تومان مرجع قیمت : https://www.javanelec.com/Shops?searchFilter=F2812#dtl/11232
SAM S70 300 MHz Arm Cortex-M7 Based MCUs with Up to 2 MB Flash شرکت سازنده (Microchip) ATSAMD51P20A-AU	32-bit Arm Cortex-M7 running at up to 300 MHz, Floating Poin	20.4\$ ناموجود در داخل کشور
SAM D5x Series شرکت سازنده (Microchip)	120 MHz Arm Cortex-M4 Based MCUs with Up to 1 MB Flash Floating Point	9.86\$ ناموجود در داخل کشور
SAME70Q21 SAM E70 ATMEL شرکت سازنده (Atmel)	Atmel ® SMART SAM E70 is a high-performance Flash microcontroller (MCU) based on the 32-bit ARM ® Cortex ® - M7 RISC (5.04 CoreMark/120MHz) processor with floating point unit (FPU)	20.8\$ ناموجود در داخل کشور

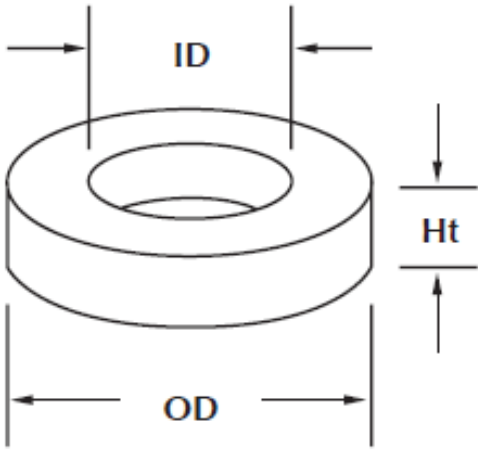
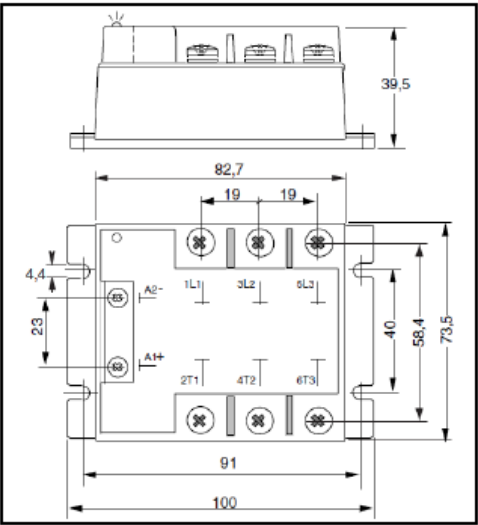
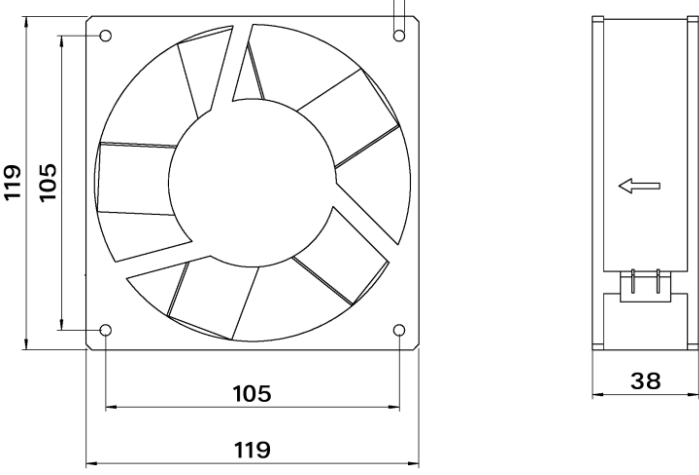
ماژول منبع تغذیه: طراحی منبع تغذیه بردهای الکترونیکی و مدار فرمان گیت IGBT از نوع خطی بوده است. در مقایسه با منبع تغذیه سوئیچینگ، منبع تغذیه خطی دارای نویز کمتر و مشکلات EMI کمتری می باشد. هزینه تمام شده منبع تغذیه خطی نیز نسبت به نوع سوئیچینگ به مراتب کمتر می باشد.

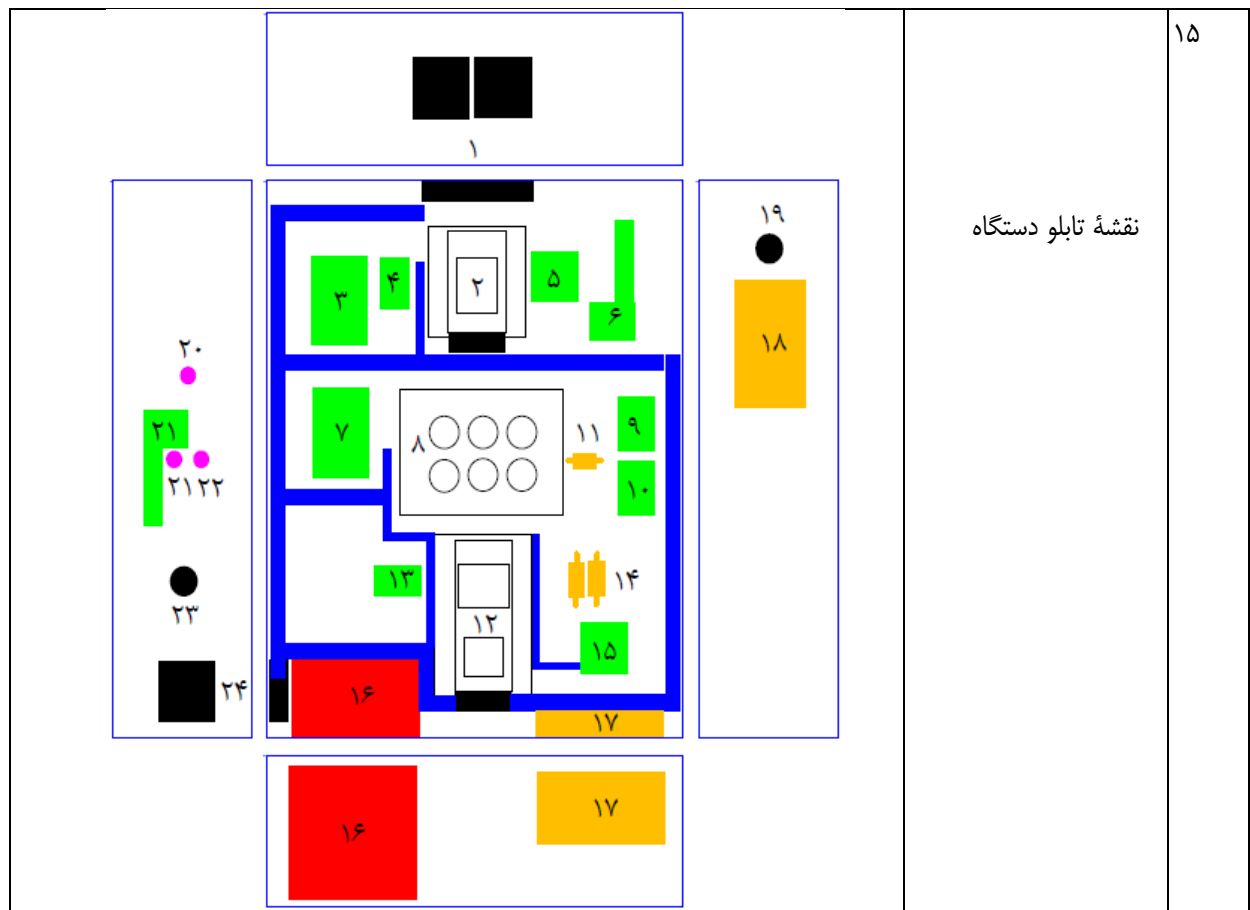
شکل ۱-۴: نتایج طراحی تفصیلی و لیست المان‌های اصلی سیستم درینامو متر

ردیف	نام قطعه	توضیحات
۱	ماژول IPM: I7MPB75RA120	 ماژول IGBT ۶ تایی با ترمز دینامیکی
۲	برد درایو گیت IGBT ماژول IPM: با استفاده از اپتوکوپلر HCPL4504	
۳	هیت سینک ماژول IPM	

	انکودر افزایشی authonix E5058 - Line driver output	۴
	برد سنسور باس AC با استفاده از سنسور ولتاژ LV25P و سنسور جریان LA55	۵
	برد سنسور باس DC با استفاده از سنسور ولتاژ LV25P و سنسور جریان LA55	۶
	برد پردازشگر دیجیتال بر مبنی DSPTMS320F335	۷
	برد منبع تغذیه الکترونیک و مدارا درایو گیت	۸

		
	خازن ۳۳۰۰ میکروفاراد ۴۰۰ ولت	۹
	مقاومت RB100 ترمز دینامیکی	۱۰

	هسته T250-52 سلف ۷۰۰ میکرو هانری	۱۲
	SSR سه فاز SGT867350	۱۳
	فن SKF 3	۱۴



-تابلو و چینش ماژول‌ها:

در گزارش مرحله ۲ (بخش ۲-۱۰) نقشه ساخت تابلو و نحوه جابجایی ماژول‌های مختلف ارائه گردیده است. معیارهای اصلی در طراحی و چینش اجزاء تابلو به شرح زیر بوده است:

-حداقل سیم کشی بخشهای الکترونیک و قدرت. کاهش فاصله سیم کشی ها و در نتیجه کاهش امپدانس مسیر و نهایتاً کاهش تداخل امواج مغناطیسی.

-فراهم آوردن شرایط بهتر جابجایی سیال هوا از مسیر های تعیین شده و نصب فن های تهویه مناسب جهت خنک سازی بهتر ماژول های قدرت

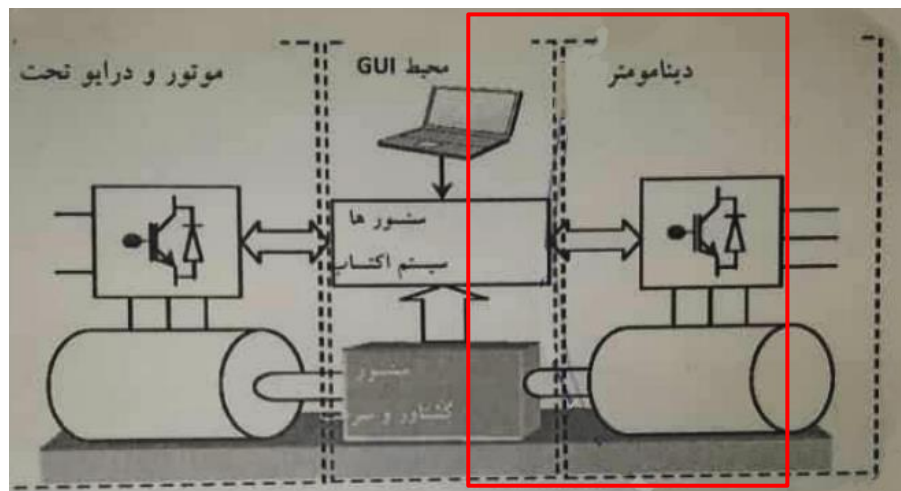
-امکان دسترسی آسان به نقاط مختلف مدارات الکترونیک و بخشهای قدرت نصب شده در داخل تابلو. جهت ارزیابی سیگنالهای خروجی حین تست و رفع عیوب احتمالی در مرحله ساخت نمونه آزمایشگاهی فاصله ماژول ها نسبت به نمونه های رایج صنعتی بیشتر در نظر گرفته شده تا شرایط ایمن جهت اندازه گیری و اصلاح مدارت فراهم گردد.

پس از انتخاب المان های اصلی، طراحی تفصیلی هر یک از ماژول ها انجام گردید که نتیجه آن ارائه نقشه های ساخت و لیست کامل قطعات مورد نیاز (BOM) بوده است. جزئیات محاسبات و مقادیر المان ها در فصل های ۲ و ۳ ارائه گردید. همانگونه که در شکل ۴-۱ نمایش داده شده، میز تست ماشین از سه جزء اصلی تشکیل شده است که شامل:

واحد دینامومتر

سنسور ها ، ابزار دقیق و نرم افزار GUI

سیستم موتور و درایو تحت تست



شکل ۲-۴: ساختار کلی میز تست

پس از تکمیل مرحله اول پروژه به دلیل عدم امکان تهیه و تامین سنسور گشتاور مورد نیاز پروژه، پس از انجام مذاکره با مجری پروژه، مقرر گردید موضوع پروژه از طراحی و ساخت میز تست به طراحی و ساخت دستگاه دینامومتر تغییر یابد. بر این اساس ادامه کار این پروژه با محوریت طراحی و ساخت دستگاه دینامومتر با هدف بارگذاری انواع مشخصه های بارهای صنعتی بر موتور و درایو تحت تست باز تعریف گردید. لازم به ذکر است با وجود تغییری که در محصول هدف پروژه ایجاد گردید، ساخت اجزاء دستگاه دینامومتر عمدتاً منطبق بر خروجی های گزارش طراحی تفصیلی مرحله اول پروژه و بر اساس نقشه های ساخت تهیه شده در آن مرحله بوده است. از جمله تغییرات ایجاد شده، تغییر ظرفیت توان موتور القایی مورد استفاده در دستگاه دینامومتر می باشد. در گزارش مرحله اول ظرفیت توان دینامومتر 10KW انتخاب گردید در حالیکه در ادامه کار از یک موتور القایی با ظرفیت 4KW در دستگاه دینامومتر استفاده گردید. از آنجایی که هدف اصلی در ساخت دستگاه دینامومتر، پیاده سازی الگوریتم کنترلی دینامومتر بوده، نتایج بدست آمده از نمونه با ظرفیت 4kw به سادگی برای دینامومترهای با ظرفیت توان بالاتر قابل تعمیم و توسعه می باشد.

در ادامه مراحل پیاده سازی بخش های سخت افزاری بر اساس نتایج طراحی تفصیلی ارائه شده در جدول ۴-۱ مورد بررسی قرار می گیرد.

۲-۴- موتور القایی مورد استفاده به عنوان دینامومتر

بطوریکه قبلاً ذکر گردید، موتوری القایی مورد استفاده برای سیستم دینامومتر یک موتور القایی 4 KW می باشد که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. پارامترهای اندازه گیری شده موتور دینامومتر در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.



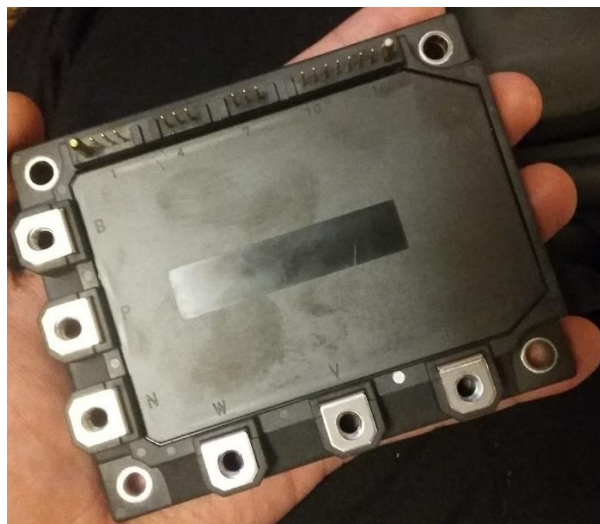
شکل ۳-۴: مبدل قدرت موتور القایی مورد استفاده در آزمایشگاه

PN (KW)	4
VL(volt)	380
I(amp)	7.6
Nr (rpm)	2880
Rs(Ohm)	5.4
Rr(Ohm)	3.469633117
Lm (H)	0.514122039
Ls(H)	0.018409568
Lr (H)	0.018409568
J(KG.M ²)	0.046

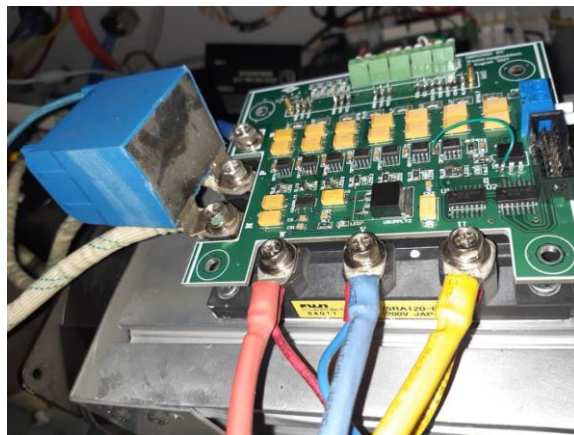
شکل ۴-۴: مشخصات موتور دینامومتر

۳-۴- اینورتر خروجی و یکسوساز فعال ورودی

با توجه به مشخصات فنی مورد انتظار، ماژول 7MBP75RA120 که در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. نمونه ساخته شده ماژول IPM بصورت تجمع شده با مدار فرمان در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است. اتصال مستقیم مدار فرمان بر روی ماژول IPM، موجب حذف سیم کشی های اضافی و کاهش نویز و تنش های ولتاژی بر روی سوئیچ می شود. در همین راستا یک خازن اسنابر با ظرفیت 2.2 میکروفاراد بطور مستقیم بر روی ترمینال های DC ماژول IPM نصب شده است. وجود این خازن تا حد مطلوبی اسپایک های ولتاژ تحمیلی بر روی سوئیچ های IGBT را کاهش می دهد. وجود این خازن می تواند تا حد زیادی موجب کاهش EMI تولیدی مبدل و عملکرد ایمن مدارت کنترلی خواهد داشت.



شکل ۴-۵: ماژول 7MBP75RA120



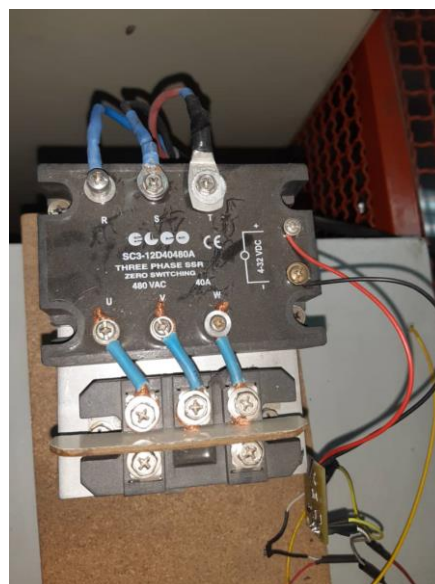
شکل ۶-۴: مدار درایو گیت IGBT نصب شده بر روی مازول IPM

۴-۴- کلید انتقالی قدرت الکترونیکی (SSR)

همانگونه که در گزارش مرحله ۱ بررسی گردید، به منظور قطع و وصل منبع تغذیه در مواقع لزوم می‌توان از SSR به عنوان کلید سه فاز استفاده کرد. ر با توجه به مشخصات فنی مورد نظر، SSR سه فاز نشان داده شده در **Error! Reference source not found.** الف و ب ساخت شرکت Gold برای قسمت منبع ولتاژ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. SSR سه فاز مذکور می‌تواند جریان نامی تا ۵۰ آمپر را عبور دهد ولتاژ عملکرد آن ۶۰۰ ولت است.



الف



ب

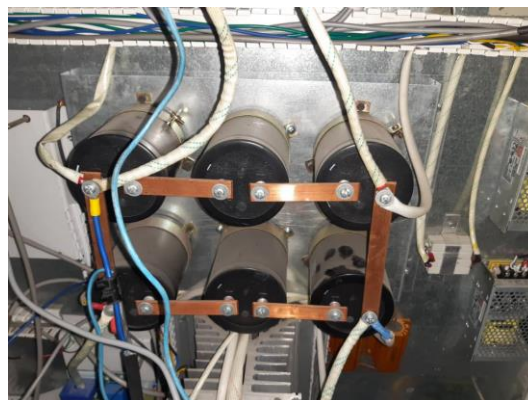
شکل ۷-۴: رله حالت جامد SSR (الف) ساخت رله SSR متصل به DSP

۵-۴- پیاده سازی خازن لینک DC

ولتاژ خروجی یکسوساز فعال سمت شبکه دارای رپیل بالایی است که می‌تواند دامنه هارمونیک‌ها در ولتاژ خروجی اینورتر را افزایش دهد. به منظور کاهش رپیل ولتاژ خروجی این یکسوساز معمولاً از یک بانک خازنی در لینک DC استفاده می‌شود که سبب صاف‌تر شدن ولتاژ لینک DC می‌گردد. در این بخش از خازن‌های $3300 \mu F$ با ولتاژ $400 V$ و مقاومت داخلی (ESR) 0.025Ω استفاده شده است. پیکربندی خازن‌ها به صورت دو شاخه با سه خازن سری در هر شاخه است که در مجموع ظرفیت خازنی معادل $2.2 mF$ را برای لینک DC تامین می‌کند. برای پیاده سازی این آرایش ابتدا باید خازن‌ها را روی یک ورق فلزی مانند شکل ۴-۷ نصب شوند. سپس به وسیله شمش مسی مانند شکل ۴-۸ اتصالات سری و موازی بین خازن‌ها برقرار شود.



شکل ۸-۴: نصب خازن‌های لینک DC روی ورق فلزی



شکل ۹-۴: آرایش خازن‌های لینک DC روی ورق فلزی به وسیله شمش مسی

۶-۴- ساخت فیلتر سمت شبکه

یکسوساز سمت شبکه می‌تواند فرکانس‌های سوئیچینگ بین ۲ تا ۱۵ کیلوهرتز داشته باشد که باعث ایجاد هارمونیک‌هایی با مرتبه بالا می‌شود. یک راه حل جذاب برای این مشکل، استفاده از یک فیلتر LCL است که در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. هر فاز فیلتر LCL از دو سلف، یک خازن و یک مقاومت تشکیل شده است که مقادیر این پارامترها را با توجه به گزارش طراحی در جدول ۴-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۴: هسته پودر آهن T250-52

به منظور ایجاد اندوکتانس مورد نیاز توسط سلف‌ها باید از سیم 8 AWG با ۳۹ دور سیم پیچی دور هر کدام از سلف‌ها استفاده کرد. سیم 8 AWG دارای قطر ۳.۲۶ mm و سطح مقطع ۸.۳۷ mm^2 است که برای سیم پیچی سلف انعطاف پذیری بسیار پایینی دارد. بنابراین بهتر است با موازی کردن و بهم تابیدن ۸۸ رشته سیم 30 AWG که دارای قطر ۰.۲۵۴ mm و سطح مقطع ۰.۰۵۰۹ mm^2 هستند، معادل سیم مورد نیاز را ساخت. برای ایجاد ۳۹ دور سیم پیچی باید حداقل ۵.۵ متر سیم برای هر سلف استفاده شود. اما بهتر است ۷ متر سیم برای هر سلف در نظر گرفته شود تا برای اتصال سلف به مبدل و منبع با کمبود سیم مواجه نشد. با در نظر گرفتن ۶ عدد سلف که هر کدام به ۸۸ رشته سیم با طول ۷ متر نیاز دارند، در مجموع باید یک قرقره سیم نمره ۰.۲۵ (معادل 30 AWG در بازار) که طول سیم آن حداقل ۳۶۹۶ متر است تهیه شود. برای جداسازی ۸۸ رشته سیم از قرقره اصلی می‌توان ۸ دفعه ۱۱ رشته سیم به طول ۷ متر مانند شکل ۴-۱۲ اندازه گرفت و جدا کرد. به منظور تابیدن ۸۸ رشته سیم به یک دیگر باید ۸ رشته ۱۱ تایی سیم‌ها را به صورت شکل ۴-۱۳ با استفاده از یک دریل به یکدیگر تاباند.



شکل ۱۳-۴: جدا سازی ۸۸ رشته سیم



شکل ۱۴-۴: نحوه تابیدن ۸۸ رشته سیم به یکدیگر

در ادامه با پیچیدن سیم ۸۸ رشته‌ای ساخته شده به دور دو عدد هسته سری به صورت شکل ۴-۱۴ سیم پیچی سلف مورد نیاز به اتمام می‌رسد. حال با تکرار مراحل فوق در مجموع ۶ عدد سلف مورد نیاز فیلتر سمت شبکه فراهم می‌شود (شکل ۴-۱۵).



شکل ۱۵-۴: نحوه سیم پیچی سلف



شکل ۱۶-۴: سلف‌های پیچیده شده مورد نیاز برای فیلتر سمت شبکه

در مرحله بهره‌برداری از سلف‌های ساخته شده معمولاً در اثر عبور جریان‌های بالا و هارمونیک‌های فرکانس بالا سر و صدا زیادی به دلیل لرزش سیم‌ها تولید ایجاد می‌شود. برای جلوگیری از بروز این معضل با استفاده از شارلاک می‌توان سیم پیچ‌ها را محکم روی سلف نگه داشت و از لرزش آن‌ها جلوگیری کرد. در شکل ۴-۱۶ یک عدد از سلف‌ها را که به شارلاک آغشته شده است را می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۱۷-۴: سلف آغشته شده به عایق شارلاک

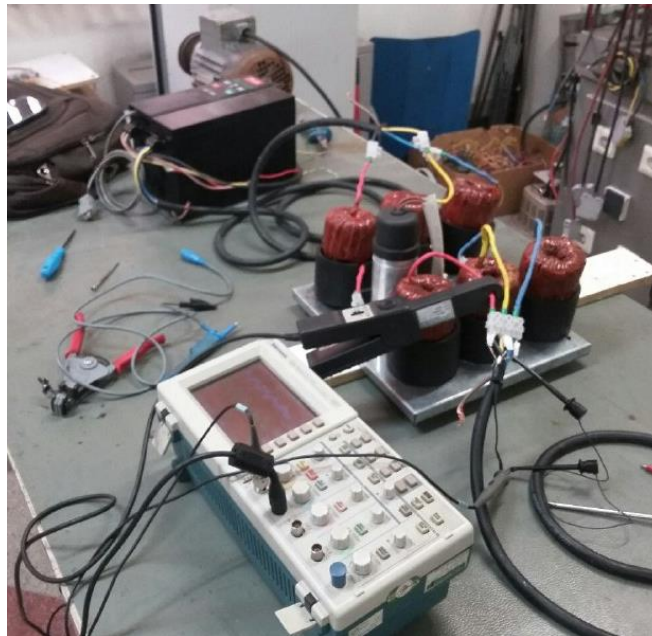
در نهایت می‌توان سلف‌ها را روی سینی از جنس ورق گالوانیزه به مقاومت‌ها و خازن‌های متصل می‌گردد. نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که قرار دادن مستقیم سلف‌ها روی ورق فلزی باعث عبور شار تولید شده توسط آن‌ها و منجر به تلفات و تولید نویز برای سایر تجهیزات الکترونیکی و حساس می‌شود. برای جلوگیری از این اتفاق سلف‌ها را روی پایه‌های عبق از جنس تفلون نصب شده‌اند تا از تماس مستقیم آن‌ها با ورق فلزی جلوگیری به عمل آید. در نهایت با رعایت تمامی موارد ذکر شده فیلتر ساخته

شده در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. عملکرد فیلتر ساخته شده باید تحت شرایط آزمایشگاهی با عبور جریان از آن تست شود. بدین منظور می‌توان خروجی فیلتر را به یک موتور به عنوان بار متصل کرد و نیز سمت ورودی آن را به یک اینورتر مطابق شکل ۴-۱۸ وصل کرد.

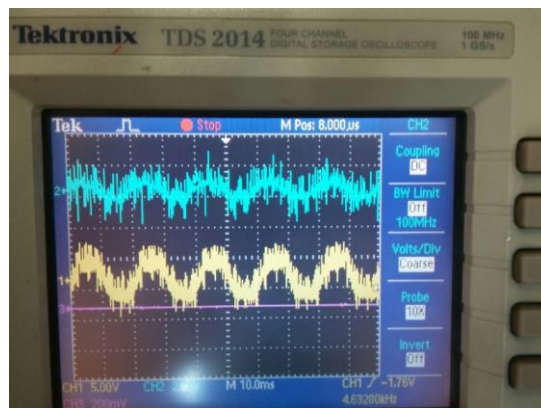


شکل ۱۸-۴ تصویر نهایی فیلتر ساخته شده

شکل موج ولتاژ و جریان خروجی فیلتر را می‌توان در شکل ۴-۱۹ مشاهده نمود. همانطور که مشاهده می‌شود، ولتاژ و جریان سینوسی هستند. دلیل وجود اندکی اعوجاج روی شکل موج ولتاژ و جریان فیلتر، تست عملکرد آن در جریان‌های پایین حدود ۵ آمپر می‌باشد. در واقع این فیلتر برای جریان‌های حدود ۳۰ آمپر ساخته شده است و در این جریان می‌تواند ولتاژ را به خوبی سینوسی کند.



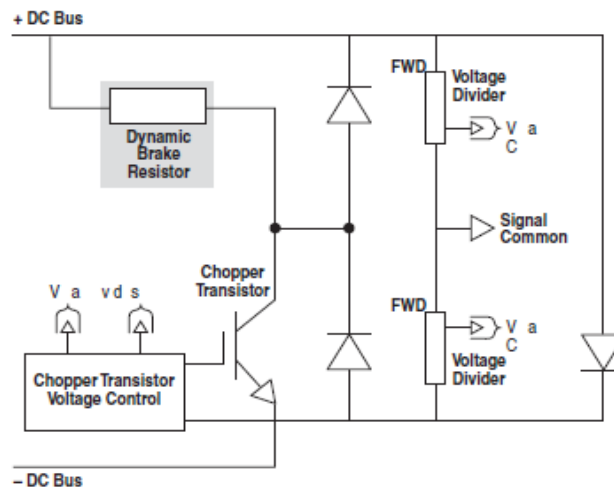
شکل ۱۹-۴: اتصال عملی فیلتر به موتور به منظور تست فیلتر



شکل ۲۰-۴: شکل موج ولتاژ خروجی فیلتر (پایینی به رنگ زرد) و شکل موج جریان فیلتر (بالایی به رنگ آبی)

۴-۷- پیاده سازی ترمز دینامیکی

در حالت کار ژنراتوری موتور دینامومتر، انرژی ترمز حاصل از بارگذاری روی موتور تحت تست به شین DC برگردانده می شود. این مساله می تواند منجر به افزایش شدید ولتاژ شین DC و آسیب به مدارات اینورتر گردد. برای این منظور از واحد ترمز دینامیکی موجود در مازول IPM استفاده می گردد. ترمز دینامیکی مطابق شکل ۴-۲۰ شامل یک چاپر (ترانزیستور و مدارات کنترل آن) و یک مقاومت ترمز دینامیکی می باشد که در صورت بازگشت انرژی با شین DC، این انرژی با فعال شدن سوئیچ در مقاومت تلف می شود. در حالت عادی ترانزیستور چاپر قطع است و مقاومت ترمز دینامیکی را از لینک DC ایزوله می کند.



شکل ۲۱-۴: شماتیک ترمز دینامیکی

مقدار مقاومت ترمز دینامیکی مطابق گزارش فصل ۲ تعیین گردیده است. بر این اساس دو مقاومت موازی ۴۷۰ اهم ساخت شرکت ATE مطابق شکل ۴-۲۱ می توانند معادل مورد نیاز برای ترمز دینامیکی ایجاد کنند.



شکل ۲۲-۴: مقاومت های ترمز دینامیکی

۴-۸- پیاده سازی مقاومت تخلیه شارژ خازن

در زمان خاتمه عملکرد دینامومتر، خازن‌های لینک DC ولتاژ دارند که این اتفاق از لحاظ ایمنی خطرناک است. به همین علت از یک مقاومت برای تخلیه شارژ لینک DC هنگام خاموشی دستگاه یا در مواقع وقوع خطا استفاده می‌شود. مقاومت به صورت موازی با خازن‌های لینک DC متصل شده به علت بزرگ بودن اندازه آن جریان بسیار کوچکی از آن عبور می‌کند که خللی در عملکرد مدار ایجاد نخواهد کرد. با موازی کردن ۴ مقاومت آجری $18\text{ K}\Omega$ با توان 10 W مطابق شکل ۴-۲۲ می‌توان به مقاومت مورد نیاز جهت تخلیه شارژ خازن‌ها دست یافت.

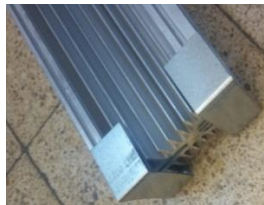


شکل ۲۳-۴: اتصال مقاومت تخلیه شارژ خازن به لینک DC

۴-۹- پیاده سازی خنک‌ساز برای سیستم دینامومتر

پارامترهای مقاومت حرارتی، جریان هوا، حجم، طول و عرض در انتخاب هیت سینک مناسب، اهمیت فراوان دارند. مقاومت حرارتی یکی از پارامترهایی است که با توجه به میزان جریان هوا به صورت دینامیکی تغییر می‌کند که به محاسبه آن پرداخته خواهد شد.

انتخاب هیت سینک برای اینورتر خروجی و همچنین یکسوساز و SSR ورودی، با توجه به بازار ایران، ابعاد برد و حداقل مقاومت حرارتی ممکن، هیت سینک P 3 (مطابق دیتاشیت شرکت Semikron) که در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است، می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. چون این نوع هیت سینک دارای پره‌های زیادی است و می‌تواند حرارت تولید شده توسط اینورتر، یکسوساز و SSR را به خوبی به بیرون انتقال دهد. مقاومت حرارتی هیت سینک P 3 در دو طول ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر به ترتیب برای اینورتر خروجی و همچنین یکسوساز و SSR ورودی در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است. به منظور کاهش مقاومت حرارتی هیت سینک معمولاً از فن در کنار هیت سینک استفاده می‌شود. برای هیت سینک مورد نظر می‌توان از فن‌های تک فاز نشان داده شده در شکل ۴-۲۵ استفاده کرد.



شکل ۲۴-۴: هیت سینک P 3



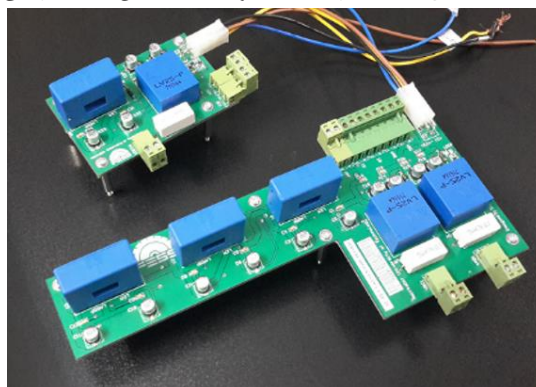
شکل ۲۵-۴: نصب ماژول‌های قدرت روی هیت سینک



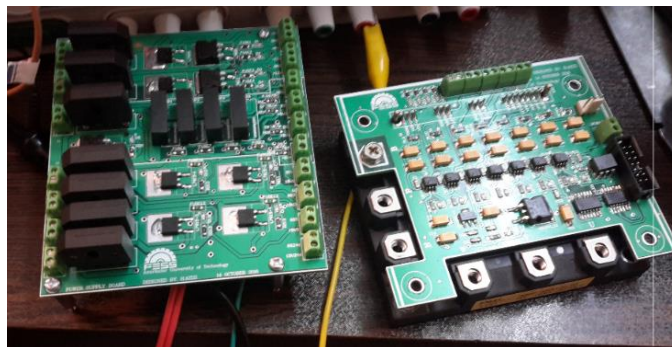
شکل ۲۶-۴: مونتاژ نهایی سیستم خنک سازی شامل هیت سینک و فن تکفاز

۴-۱۰- مونتاژ و ساخت بردهای الکترونیکی و کنترلی

طراحی تفصیلی بردهای الکترونیکی و کنترلی دستگاه در گزارش مرحله اول آورده شده است. بر اساس نقشه‌های مدار چاپی تهیه شده، برد مدار چاپی تهیه و پس از خرید قطعات و المان‌های مورد نیاز مونتاژ بردها انجام گردید. شکل ۲۶-۴ برد سنسور ولتاژ و جریان شین‌های AC و DC نمایش داده شده است. در مدار سنسور از سنسورهای اثر هال LV25 و LA55 به ترتیب برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان استفاده گردیده است. یکی از نیازهای اساسی در پیاده‌سازی مبدل اینورتری طراحی و ساخت منبع تغذیه ایزوله برای مدار تغذیه درایو گیت و تغذیه کلیه بردهای الکترونیک می‌باشد. در طراحی منبع تغذیه از ترکیبی از منبع تغذیه خطی و سوییچینگ استفاده شده. شکل ۲۷-۴ برد تغذیه مورد نیاز بخش‌های فرمان و الکترونیک را نمایش می‌دهد.



شکل ۲۷-۴: سنسورهای ولتاژ و جریان باس AC و DC



شکل ۲۸-۴: برد تغذیه مدارت فرمان و الکترونیک

یکی از بردهای حساس طراحی شده برای دستگاه دینامومتر در این پروژه، برد DSP میباشد. کلیه الگوریتم‌های کنترلی، حفاظتی و اندازه‌گیری در پردازشگر DSP پیاده‌سازی می‌گردد. در این برد از پردازشگر TMS320F28335 استفاده شده است. مدارات تطبیق دهنده سیگنال، مبدل ۴ تا ۲۰ میلی آمپر، مبدل uart به rs485، پورت I2C، پورت SPI، خروجی DAC دو کاناله از جمله قابلیت‌های برد ساخته شده میباشد. شکل ۲۸-۴ برد DSP ساخته شده برای سیستم دینامومتر را نمایش می‌دهد.



شکل ۲۹-۴: برد تغذیه مدارت فرمان و الکترونیک

سنسور انکودر مورد استفاده در این پروژه از نوع Line drive و ۲۵۰۰ پالس در هر دور میباشد. شکل ۲۹-۴ نحوه نصب سنسور سرعت به موتور دینامومتر را نمایش می‌دهد. خروجی سنسور انکودر پالسهای خروجی بر اساس پروتکل RS-422 می‌باشد. از طرفی برای کاهش اثرات نویز موتور بر پالسهای انکودر از ایزولاتورهای نوری بین انکودر و DSP استفاده شده است. بر همین اساس مطابق شکل ۳۰-۴ یک برد واسط با هدف تبدیل پالسهای تفاضلی به UART و ایزوله کردن خروجی انکودر از برد DSP طراحی و ساخته شده است.



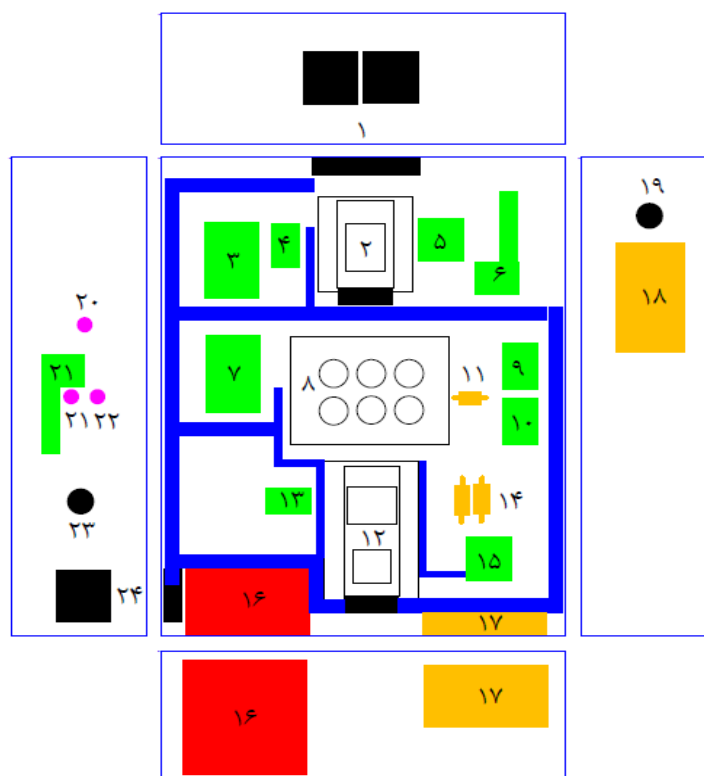
شکل ۳۰-۴: سنسور سرعت نوع انکودر افزایشی نصب شده روی موتور دینامومتر



شکل ۳۱-۴: سنسور سرعت نوع انکودر افزایشی نصب شده روی موتور دینامومتر

۴-۱۱- پیاده‌سازی تابلو سیستم دینامومتر

نقشه جایابی قطعات و داکت‌ها سیستم دینامومتر از نماهای رو به رو، چپ، راست، بالا و پایین در تابلو با استفاده از نرم‌افزار EPLAN در شکل ۴-۳۱ داده شده است. ابعاد تابلو $90 \times 110 \text{ cm}^2$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳۲-۴: نقشه جایابی قطعات میز تست درایو موتور القایی



شکل ۳۳-۴: پیاده سازی سیم کشی تابلو سیستم دینامومتر

مسیرهایی که در حاشیه و برخی قسمت‌های مرکزی تابلو رسم شده‌اند مسیر سیم‌کشی بردهای الکترونیکی و تغذیه فن‌ها هستند که پیاده‌سازی عملی آن را می‌توان در شکل ۴-۳۲ مشاهده نمود. در اینجا سینی کف تابلو جدا شده است تا سیم‌کشی بردهای الکترونیک و مدارات قدرت راحت‌تر انجام شود. بردهای الکترونیک شامل بردهای DSP، بردهای سنسور ولتاژ و جریان، بردهای تغذیه گیت درایو و منابع تغذیه هستند که برای برقراری اتصالات بین این بردها از سیم‌های شیلد دار استفاده شده است. سیم‌های شیلد دار نوپزه‌ای ایجاد شده توسط مدارات قدرت را در شیلد بیرونی خود جذب می‌کنند و به زمین انتقال می‌دهند تا بردهای الکترونیک با مشکل مواجه نشوند. در شکل ۴-۳۳ پیاده‌سازی تمام اجزاء تابلو مطابق نقشه شکل ۴-۳۱ به نمایش در آمده است. هیت سینک‌ها و همچنین خازن‌ها به وسیله ورق‌های پل مانند روی بدنه تابلو قرار داده شده‌اند تا امکان نصب داشته باشند و هر زمان نیاز بود از تابلو جدا شوند. هیت سینک‌های موجود در تابلو در جریان‌های بالا از خود حرارت بالایی تولید می‌کنند که ممکن است به سیم‌های اتصالات الکترونیکی و قدرت آسیب برسانند برای جلوگیری از این اتفاق همانطور که در شکل ۴-۳۳ نشان داده شده است، همه سیم‌های معلق به وسیله روکش نسوز سفید رنگ حفاظت شده‌اند. توضیحات در مورد قسمت‌هایی که روی نقشه شکل ۴-۳۲: نقشه جایابی قطعات میز تست درایو موتور القایی

تابلو شماره زده شده است در ادامه توضیح داده خواهد شد.



شکل ۴-۳۴: پیاده‌سازی تابلو سیستم دینامومتر

شماره ۱: دو عدد فن که روی سقف تابلو قرار داده شده تا هوا داخل تابلو را به بیرون انتقال دهند.

شماره ۲۰: کانکتور انکدر متصل به موتور جهت اتصال به DSP

شماره ۲۲: کانکتور تک فاز منبع تغذیه‌ها و ترانسفورماتورها که دارای یک فیلتر جهت حذف نویزهای شبکه می‌باشد.

شماره ۲۳: کانکتور سه فاز ورودی تابلو جهت برقرار کردن اتصال بین منبع تغذیه سه فاز و یکسوساز ورودی

شماره ۲۴: یک عدد فن که هوا بیرون را به داخل تابلو انتقال می‌دهد و همچنین خنک‌ساز سلف‌ها می‌باشد.

در شکل ۴-۳۴ به ترتیب کانکتورهای تهیه شده انکدر، سه فاز ورودی و خروجی و کانکتور تک فاز ورودی از راست به چپ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۴-۵۳ تابلو سیستم دینامومتر از نما سمت چپ و بالا که شامل موارد فوق است نشان داده است.



شکل ۴-۳۵: کانکتورهای سه فاز مورد استفاده در تابلو سیستم دینامومتر

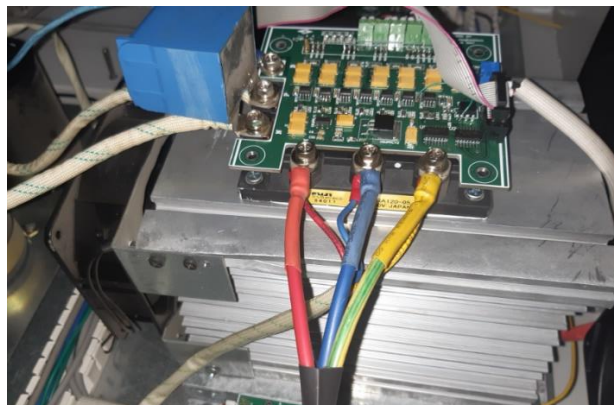


شکل ۴-۳۶: تابلو سیستم دینامومتر از نمای جانبی

شماره ۲: در شکل ۴-۳۶ ماژول اینورتر خروجی نصب شده روی هیت سینک نشان داده شده است.

شماره ۳: برد DSP اینورتر خروجی (شکل ۴-۳۷)

شماره ۵: برد تغذیه گیت درایو اینورتر خروجی (شکل ۴-۳۷)



شکل ۴-۳۷: نصب ماژول IPM بر روی هیت سینک



شکل ۳۸-۴: پیاده سازی ماژول اینورتر خروجی، گیت درایو و DSP آن در تابلو

شماره ۴: برد اتصال انکدر به DSP

شماره ۶: برد سنسورهای جریان و ولتاژ اینورتر خروجی

شماره ۷: برد DSP اینورتر یکسوساز فعال ورودی (شکل ۳۸-۴)



شکل ۳۹-۴: مونتاژ برد DSP در تابلو

شماره ۸: خازن‌های لینک DC که روی یک پل قرار گرفته اند (شکل ۳۹-۴)

شماره ۱۱: مقاومت تخلیه شارژ خازن‌های لینک DC (شکل ۳۹-۴)

شماره ۱۴: مقاومت‌های ترمز دینامیکی (شکل ۳۹-۴)

شماره ۹: منبع تغذیه کمکی بردهای گیت درایو اینورتر خروجی برای تامین ولتاژ مثبت (شکل ۴۰-۴)

شماره ۱۰: منبع تغذیه کمکی بردهای گیت درایو یکسوساز ورودی برای تامین ولتاژ مثبت (شکل ۴۰-۴)



شکل ۴۰-۴: خازن‌های لینک DC، مقاومت‌های ترمز دینامیکی و مقاومت تخلیه شارژ خازن



شکل ۴۱-۴: منابع تغذیه کمکی بردهای اینورتر خروجی

شماره ۱۲: مازول یکسوساز ورودی، SSR و یک عدد فن نصب شده روی هیت سینک (شکل ۴-۴۱)

شماره ۱۵: برد تغذیه گیت درایو یکسوساز ورودی (شکل ۴-۴۲)



شکل ۴۲-۴: پیاده سازی مازول IPM و سوئیچ حفاظتی SSR

شماره ۱۶: فیلتر ورودی که شامل شش عدد سلف، سه عدد مقاومت و یک خازن سه فاز است (شکل ۴-۴۳). این فیلتر از یک طرف به SSR و یکسوساز ورودی وصل شده است و از طرف دیگر از طریق یک کلید مینیاتوری به سه فاز منبع متصل شده است.

شماره ۱۷ و ۱۸: ترانسفوماتورهای برد تغذیه گیت درایو یکسوساز ورودی که در یک باکس جایگذاری شده اند، در

شکل ۴۴-۴: ترانسفوماتورهای برد تغذیه گیت درایو

نشان داده شده است. از طریق این ترانسفوماتورها و برد تغذیه گیت درایو ولتاژ منفی مورد نیاز مازول اینورتر و برد DSP تامین

می شود.

شماره ۱۹: کانکتور سه فاز خروجی تابلو جهت برقرار کردن اتصال بین موتور و اینورتر خروجی (شکل ۴-۴۶)

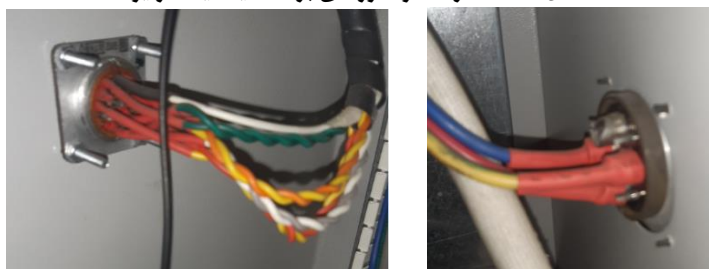
شماره ۲۱: برد سنسورهای جریان و ولتاژ سمت ورودی شبکه (شکل ۴-۴۷)



شکل ۴۳-۴: فیلتر سمت شبکه



شکل ۴۴-۴: ترانسفوماتورهای برد تغذیه گیت درایو



شکل ۴۵-۴: کانتکتورهای قدرت و سیگنال متصل به تابلو



شکل ۴۶-۴: برد سنسورهای جریان و ولتاژ سمت ورودی

۴-۱۲- نتیجه گیری

در این فصل مراحل مختلف ساخت و مونتاژ زیر بخشهای مختلف دستگاه دینامومتر ارائه گردید. ساخت کلیه بردهای الکترونیک و کنترلی و ساخت ماژول های قدرت و نحوه نصب آن داخل تابلو مورد بررسی قرار گرفته است. چپش و جایدی ماژول ها در داخل تابلو به گونه ایی انجام گرفته تا اهداف زیر حاصل گردد:

- کوتاه ترین مسیر سیم کشی با هدف کاهش اثرات EMI
- فاصله مجاز ماژول های قدرت از بردهای حساس الکترونیکی و به حداقل رساندن اثرات نویزپذیری دستگاه
- استفاده از زمین ایزوله در بخشهای مختلف با هدف کاهش اثرات نویز
- نصب و جایدی مناسب ماژول های قدرت و هیت سینکهای خنک ساز مجهز به فن، با هدف ایجاد تهویه مناسب سیال هوا و خنک سازی موثر تر
- دسترسی آسان به نقاط مختلف مدارات و امکان نمونه برداری سیگنالها در مرحله تست و رفع ایرادات احتمالی سیستم

فصل ۵- جمع‌بندی دستگاه دینامومتر و بررسی نتایج تست

۱-۵- مقدمه

در فصل قبل، مراحل مختلف ساخت اجزاء دستگاه دینامومتر مورد بررسی قرار گرفت. بطوریکه شرح داده شد پس از ساخت مازول‌های قدرت و الکترونیک ابتدا هر یک از واحدها در تابلو نصب و کلیه اتصالات الکتریکی بین مدارات الکترونیک، کنترل و قدرت انجام برقرار گردید. در ادامه به منظور اطمینان از عملکرد بخشهای سخت افزاری، تستهای اولیه هر یک از مازولها بطور مستقل در تابلو انجام شده است. این تست‌ها شامل تست مدارات درایو گیت، منبع تغذیه الکترونیک، برد DSP، سنسورهای ولتاژ، جریان، سرعت و گشتاور، سیستم خنک سازی و مدارات حفاظتی بوده است. پس از اطمینان از صحت عملکرد مازولها، در گام بعدی الگوریتم کنترلی سیستم دینامومتر در پردازشگر DSP-TMS320F335 پیاده سازی و پس از تست و رفع ایرادات برنامه و تنظیم ضرائب کنترل کننده‌ها، نتایج تست سیستم دینامومتر بر اساس سناریوهای از پیش تعیین شده مورد تست و ارزیابی قرار گرفته است. به طوریکه قبلاً نیز بررسی گردید دینامیک و دقت عملکرد سیستم دینامومتر به پاسخ دینامیکی حلقه سرعت و گشتاور سیستم درایو موتور دینامومتر وابسته است. به همین منظور در این فصل ابتدا عملکرد سیستم درایو دینامومتر پیاده سازی شده در مدهای کنترل سرعت و گشتاور مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در بخش پایانی این فصل تست‌های دینامومتری با اتصال دستگاه دینامومتر ساخته شده به یک سیستم موتور- درایو تحت تست به ازای پروفایل‌های مختلف انجام می‌گردد.

۲-۵- تست سیستم درایو دینامومتر در مد کنترل سرعت

همانگونه که قبلاً نیز بررسی گردید، دستیابی به یک سیستم درایو با دینامیک قابل قبول یکی از الزامات اولیه یک دستگاه دینامومتر از نوع AC می‌باشد. در این حالت سیستم درایو موتور دینامومتر باید بتواند با دقت بالا مقادیر مرجع ورودی اعم از گشتاور یا سرعت را دنبال کند.

شکل ۵-۱ بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری مد کنترل سرعت را نمایش می‌دهد. در مرحله اول خطای سرعت به کنترل کننده PI اعمال می‌گردد و بر اساس خروجی این کنترل کننده (گشتاور مرجع) جریان مرجع i_q^* بر اساس رابطه (۵-۱) محاسبه می‌گردد.

برای کانال شار نیز پس از محاسبه جریان i_d مرجع بر اساس رابطه ۵-۲، این جریان با مقدار i_d اندازه گیری شده مقایسه و خطای آن به کنترل کننده PI شار اعمال می گردد.

$$i_d^{e*} = \frac{\lambda_d^{e*}}{L_m} \quad (5-2)$$

خروجی این کنترل کننده مقدار ولتاژ v_d مرجع می باشد که پس از اضافه کردن محاسبه ترم های مجزاساز مطابق رابطه ۵-۳، مقادیر ولتاژ مرجع روی محورهای d, q نهایی محاسبه و به محاسبه گر تبدیل ولتاژ های $d-q$ سنکرون به سه فاز abc ارسال می شود. بعد از نرمالایز کردن مقادیر ولتاژ مرجع، این سیگنال به عنوان موج مرجع به واحد PWM ارسال می شود. یکی از محاسبات کلیدی در روش کنترل برداری غیر مستقیم با جهت یابی شار رتور تخمین سرعت لغزش و سرعت سنکرون و اندازه گیری لحظه ایی موقعیت شار رتور می باشد. معادلات حاکم بر سرعت لغزش و مراحل محاسبات در روابط ۵-۳ تا ۵-۵ ارائه گردیده است.

$$i_d^e = (1 + s\tau_r)i_m^e \quad (5-3)$$

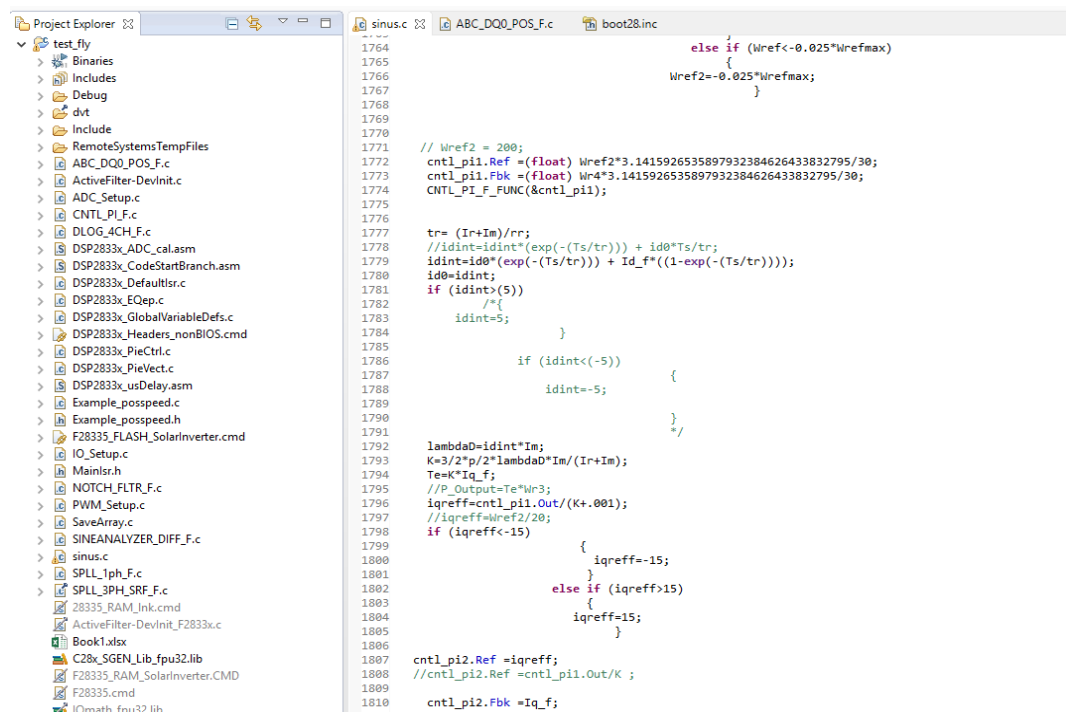
$$\tau_r = \frac{L_r'}{Rr} \quad (5-4)$$

$$\omega_{sl} = \frac{i_q^e}{\tau_r i_m^e} \quad (5-5)$$

با هدف پاسخ دینامیکی سیستم درایو دینامومتر در مدهای کنترل سرعت و گشتاور، مطابق شکل ۵-۲ ست آپ آزمایشگاهی آماده می گردد. در این مرحله از تست موتور تحت تست به تغذیه وصل نمی باشد. لازم به توضیح می باشد کلیه مراحل محاسباتی روش کنترل برداری و پیاده سازی کلیه الگوریتم های کنترلی در محیط نرم افزار Code Composer Studio پیاده سازی گردیده است. چیپ DSP مورد استفاده در این پروژه از نوع اعشاری (float) می باشد که این قابلیت امکان انجام حجم بالای محاسبات با تعداد رقم اعشاری بالا را با دقت بسیار بالا فراهم می آورد. شکل ۵-۳ محیط کد نویسی پردازشگر DSP را نمایش می دهد.



شکل ۵-۲: ست آپ آزمایشگاهی تست سیستم درایو دینامومتر



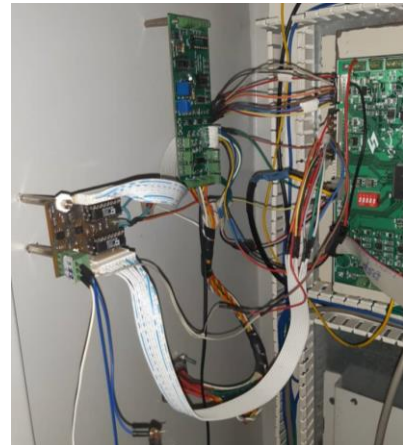
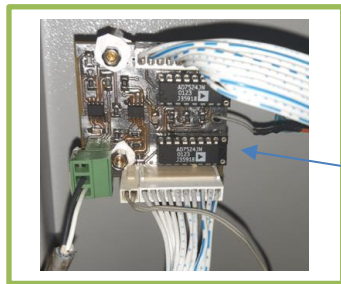
شکل ۳-۵: محیط نرم افزار CCS و پیاده سازی روش کنترلی

بخشهای اصلی کد نویسی سیستم داریو شامل نمونه برداری و فرمت داده های ورودی، روتین اندازه گیری سرعت از طریق پالسهای انکودر، تنظیمات PWM، تنظیمات وقفه ها، الگوریتم های حفاظتی، تنظیمات PI های کنترلی و محاسبات تبدیل پارک و عکس تبدیل پارک از جمله بخشهای اصلی کد پیاده سازی شده بر روی DSP میباشد. پس از پیاده سازی کلیه ماژول های کنترلی و تنظیمات ضرائب PI، نتایج تست های سیستم داریو در مد کنترل سرعت استخراج گردید. سناریو های تست شده جهت ارزیابی سیستم داریو در حالت ردیابی سرعت مرجع ورودی در جدول ۵-۱ ارائه شده است. از آنجاییکه چالش اصلی سیستم های داریو عمدتاً در محدوده های سرعت پایین می باشد، بیشتر سناریو ها در محدوده سرعت پایین بررسی گردیده است. هدف از انجام این تستها ارزیابی عملکرد سیستم داریو دینامومتر AC در شرایط مختلف گذارا و دائم و کیفیت ردیابی سیگنال مرجع سرعت ورودی می باشد.

جدول ۵-۱: سناریو های شبیه سازی ردیابی سرعت

سناریوی ۱	ورودی پله از 200rpm به 600rpm
سناریوی ۲	ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$ و $\pm 800 \text{ rpm}$
سناریوی ۳	ورودی مرجع شیب $\pm 800 \text{ rpm}$
سناریوی ۴	ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$

در هر یک از سناریوی های تست سیگنالهای سرعت مرجع، خطای ردیابی سرعت، سیگنالهای جریان روی محور d, q ، جریان فاز a استاتور، ولتاژ های روی محور d, q ، شار رتور، سرعت لغزش مورد ارزیابی قرار می گیرد.

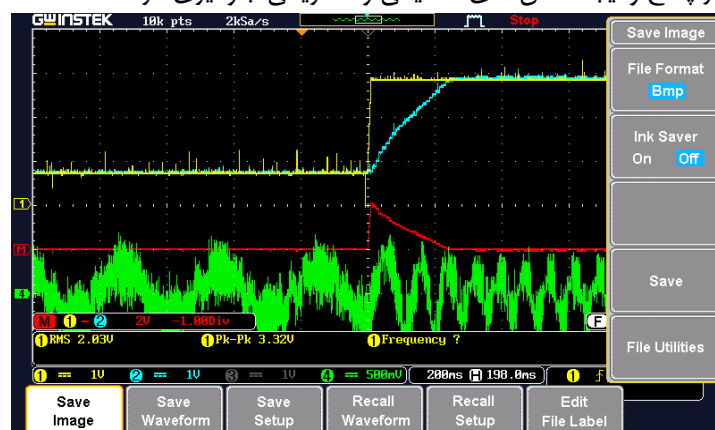


شکل ۴-۵: برد DAC دو کاناله متصل به برد DSP

از آنجایی که پردازشگر DSP-TMS320F28335 فاقد مبدل دیجیتال به آنالوگ بوده، جهت مشاهده و ثبت سیگنال‌های مختلف الکتریکی و مکانیکی در این پروژه یک برد DAC دو کاناله با استفاده از چیپ AD7524JN طراحی و ساخته شده که بصورت موازی به پورت‌های I/O چیپ DSP متصل شده و در هر مرحله از تست مشاهده و ثبت همزمان دو سیگنال از طریق این مبدل امکان پذیر می باشد. شکل ۴-۵ برد واسط DAC متصل به DSP را نمایش می دهد.

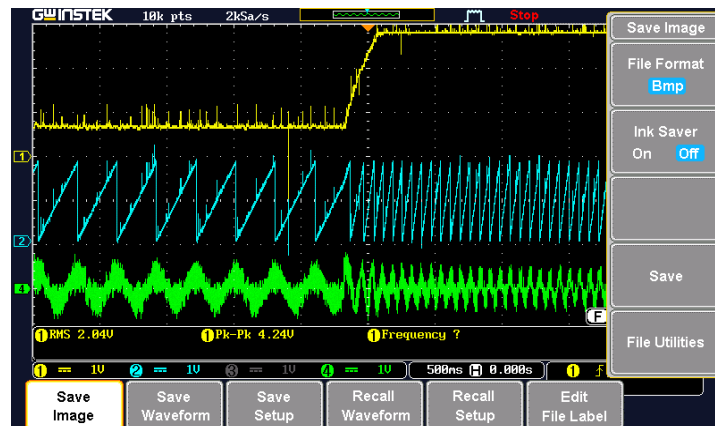
۱-۲-۵- سناریوی ۱: ورودی پله از 200rpm به 600rpm

در این سناریو پاسخ سیستم درایو به ازای تغییرات سرعت مرجع ورودی از ۲۰۰ دور بر دقیقه به ۶۰۰ دور بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفته است. شکل ۵-۵، پاسخ سرعت مرجع و سرعت رتور (منحنی زرد و آبی)، خطای ردیابی سرعت (منحنی قرمز) و جریان فاز a استاتور (منحنی سبز) را نمایش می دهد. بطوریکه ملاحظه می شود سرعت رتور با دقت بالایی مقدار سرعت مرجع را دنبال می کند. در این شرایط خطای ردیابی سرعت در حالت کار دائم با دینامیک قابل قبولی به سمت صفر میل می کند. تنظیم ضرایب PI به گونه ای انجام شد تا از بروز فراجش در پاسخ و ایجاد تنش‌های مکانیکی و الکتریکی جلوگیری گردد.

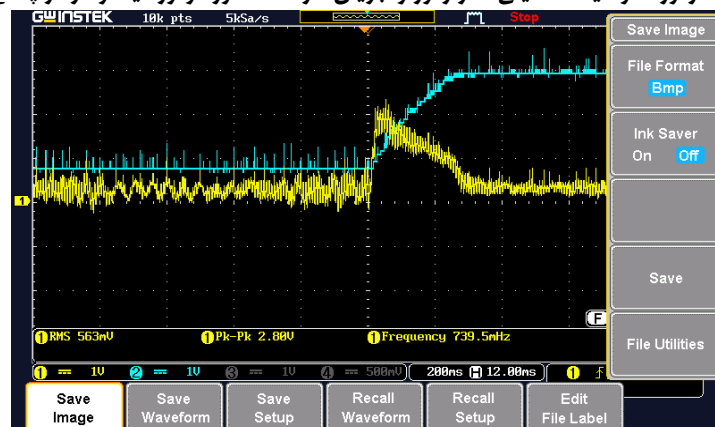


شکل ۵-۵: سرعت مرجع و سرعت رتور، خطای ردیابی سرعت و جریان استاتور موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی پله

همانگونه که بررسی گردید در روش کنترل برداری تخمین موقعیت شار رتور بسیار حائز اهمیت می باشد که در شکل ۵-۶ موقعیت رتور در مقایسه با سرعت رتور و جریان استاتور تایید کننده عملکرد دقیق تخمین موقعیت شار رتور می باشد. شکل ۵-۷ گشتاور تولیدی موتور تحت اعمال ورودی مرجع پله را نمایش می دهد. با توجه به بالا بودن خطای سرعت در لحظه اعمال ورودی پله، کنترل کننده PI به اشباع می رود که در این شرایط حداکثر فرمان گشتاور مرجع تولید می شود و موتور شروع به شتابگیری می کند. در ادامه با افزایش سرعت فرمان گشتاور و در نتیجه گشتاوری تولیدی کاهش می یابد. پس از رسیدن به سرعت مرجع در حالت کار دائم گشتاور تولیدی کاهش می یابد و گشتاور تولیدی موتور برای غلبه بر اصطکاک و تلفات بادخوری می باشد.



شکل ۵-۶: سرعت رتور، موقعیت تخمینی شار رتور و جریان فاز a استاتور موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی پله

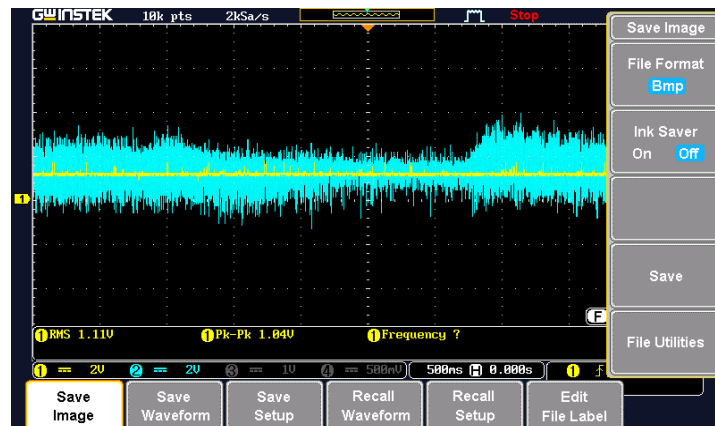


شکل ۵-۷: سرعت رتور و گشتاور موتور در پاسخ به ورودی پله

شکل های ۵-۸ و ۵-۹ به ترتیب جریان های (i_q, i_q^*) و (i_d, i_d^*) به ازای ورودی پله را نمایش می دهد. همانگونه که ملاحظه می شود کنترل کننده های جریان با دینامیک قابل قبولی مقادیر مرجع را دنبال می کنند. با توجه به اینکه سیستم درایو در سرعت های پایین تر از سرعت نامی و در ناحیه شار ثابت کار می کند، جریان روی محور d همواره باید مقدار ثابت را دنبال کند.



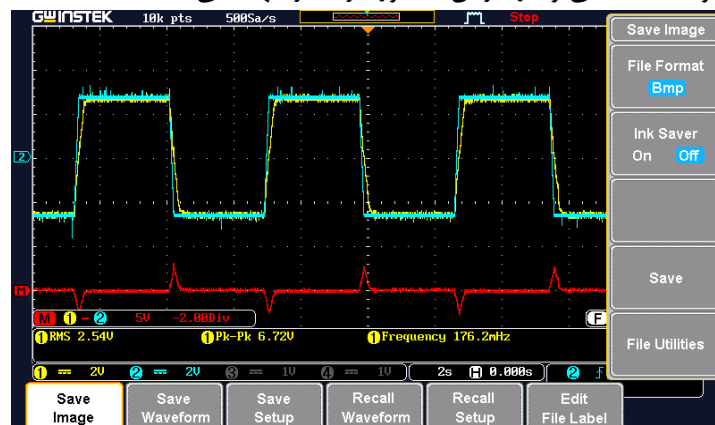
شکل ۵-۸: جریان مرجع روی محور q و جریان اندازه گیری روی محور q موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی پله



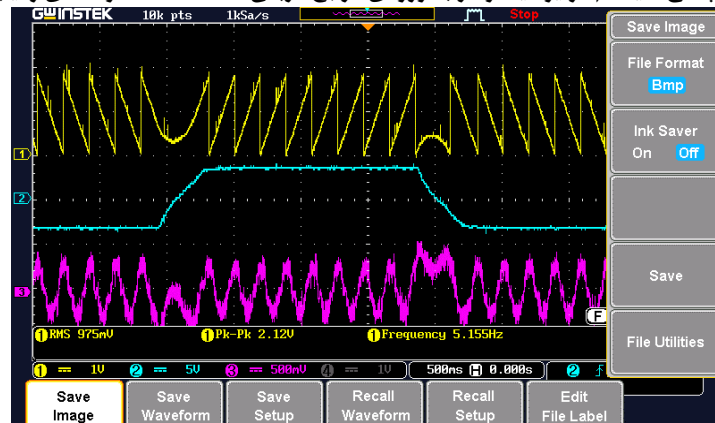
شکل ۹-۵: جریان مرجع روی محور d و جریان اندازه گیری روی محور d موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی پله

۵-۲-۲ سناریوی ۲: ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$

در ادامه عملکرد سیستم درایو تحت شرایط تغییرات سرعت مرجع در دو جهت راستگرد و چپگرد (ناحیه اول و سوم مشخصه گشتاور سرعت) مورد آزمون قرار گرفته است. سرعت مرجع (منحنی آبی رنگ) پاسخ سرعت (منحنی زرد رنگ) و خطای ردیابی سرعت در شکل ۱۰-۵ نمایش داده شده است. بررسی نتایج نشان می دهد سرعت سیستم با دقت بسیار قابل قبولی مقدار مرجع را در هر دو جهت دنبال می کند. در شکل ۵-۱۱، به ترتیب از بالا موقعیت شار رتور، سرعت رتور و جریان استاتور نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد با تغییر جهت سرعت، موقعیت تخمینی و فاز جریان استاتور نیز تغییر جهت می یابد.



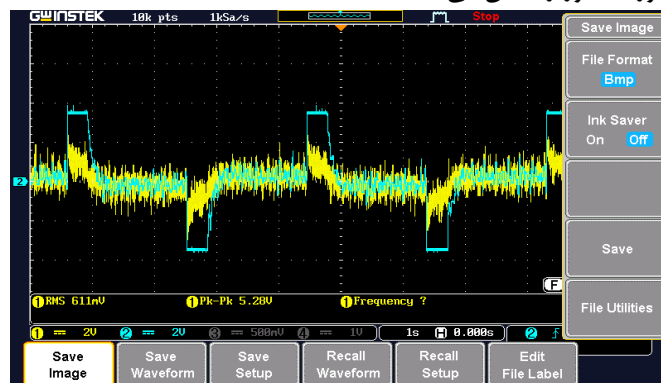
شکل ۱۰-۵: پاسخ سیستم درایو دینامومتر به ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$ و خطای ردیابی سرعت



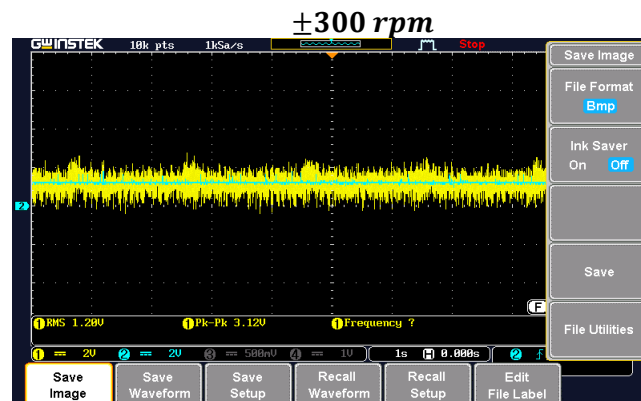
شکل ۱۱-۵: موقعیت تخمینی شار رتور، سرعت رتور و جریان فاز a استاتور موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی مرجع مربعی

$\pm 300 \text{ rpm}$

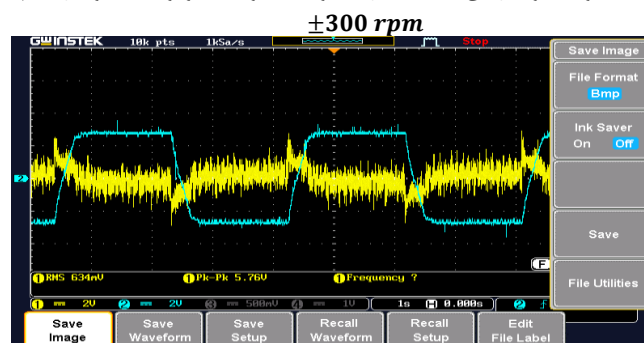
مولفه‌های مرجع و مقادیر اندازه‌گیری شده جریان‌های (i_q, i_q^*) و (i_d, i_d^*) به ترتیب در شکل‌های ۵-۱۲ و ۵-۱۳ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود جریان روی محور Q بسته به گشتاور مورد نیاز مقدار و علامت آن تغییر می‌یابد در حالیکه کنترل کننده جریان روی محور d (با توجه به ثابت بودن شار) به گونه‌ای عمل می‌کند که جریان همواره ثابت باشد. بسته به تنظیمات ضرائب کنترل کننده تناسبی و انتگرال گیر، پاسخ کنترل کننده‌های جریان متفاوت خواهد بود که مقادیر نهایی بر اساس یک مصالحه بین پاسخ گذرا و پاسخ حالت دائم تنظیم شده است. برای جریان روی محور Q، به دلیل بالا بودن ضریب کنترل کننده انتگرال‌گیر، مقدار جریان مرجع خیلی سریع به اشباع می‌رود و پس از رسیدن سرعت رتور به مقدار مرجع شروع به کاهش می‌کند. شکل ۵-۱۴ سرعت (منحنی آبی) و گشتاور خروجی سنسور گشتاور را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۲: جریان مرجع روی محور Q و جریان اندازه‌گیری روی محور Q موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی مرجع مربعی



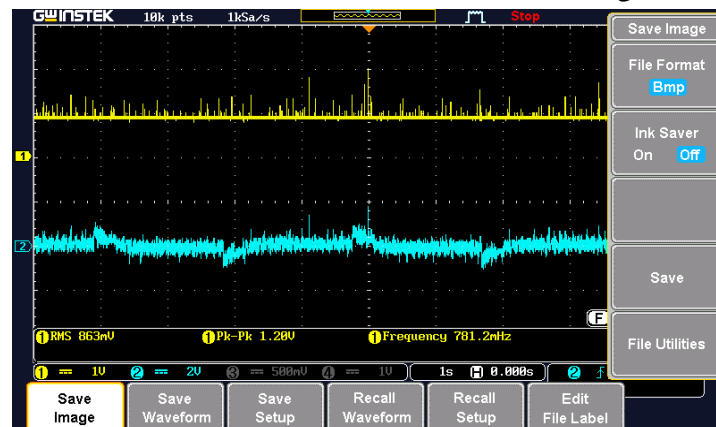
شکل ۵-۱۳: جریان مرجع روی محور d و جریان اندازه‌گیری روی محور d موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی مرجع مربعی



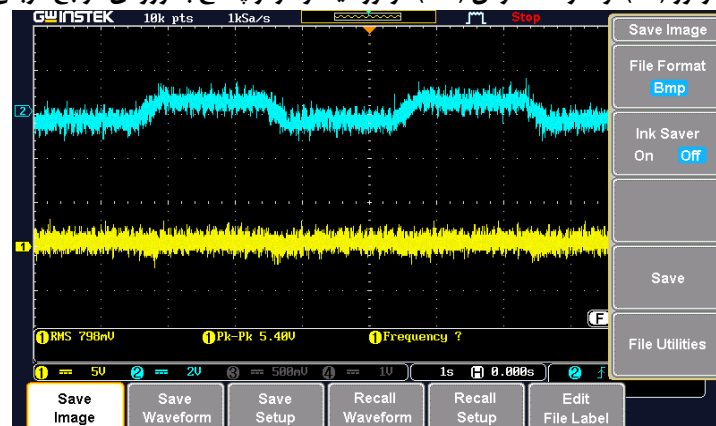
شکل ۵-۱۴: سرعت رتور و گشتاور موتور در پاسخ به ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$

بررسی نتایج نشان می‌دهد با تغییر جهت سرعت رتور، گشتاور مورد نیاز برای تغییر پلاریته سرعت و دستیابی به سرعت مرجع با دینامیک قابل قبولی تولید می‌گردد. همانگونه که در روابط ۵-۳ تا ۵-۶ بررسی گردید، تخمین مقادیر لحظه‌ای شار و سرعت لغزش موتور دینامومتر در عملکرد دقیق سیستم درایو نقش کلیدی خواهد داشت. در شکل ۵-۱۵، مقدار شار تخمینی (منحنی زرد) و سرعت

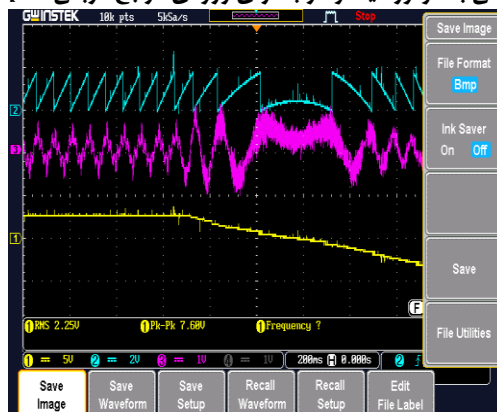
لغزش (منحنی آبی) نمایش داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد شار رتور با دقت قابل قبولی مقدار شار مرجع را دنبال می‌کند و سرعت لغزش بعد از یک تغییر گذرا در زمان‌های تغییرات پله‌ای سرعت مرجع، به سرعت به محدوده مجاز همگرا می‌شود. سرعت لغزش بالا به منزله راندمان پایین سیستم درایو و عملکرد نامطلوب سیستم کنترل برداری می‌باشد. مقادیر ولتاژهای مرجع روی محورهای d و q (V_d^{e*} , V_q^{e*}) در شکل ۵-۱۶ نمایش داده شده است.



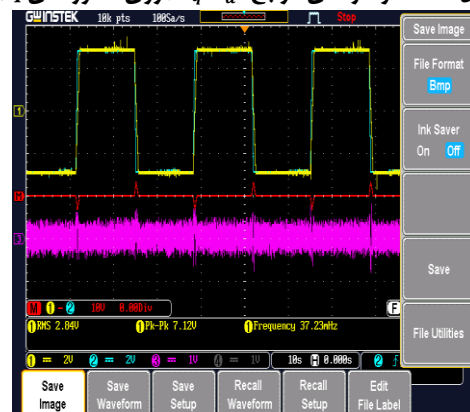
شکل ۵-۱۵: شار رتور (λ_r) و سرعت لغزش (wsl) موتور دینامومتر در پاسخ به ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$



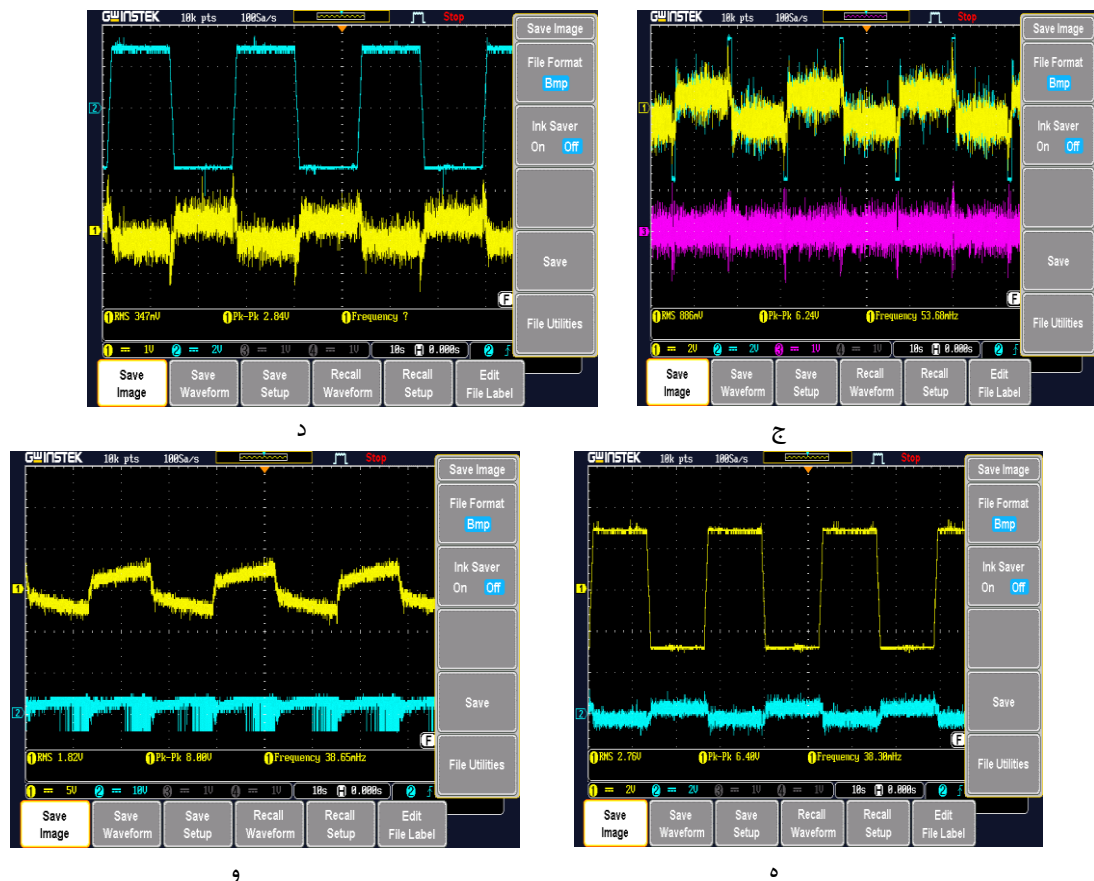
شکل ۵-۱۶: ولتاژهای مرجع V_d^{e*} , V_q^{e*} روی محورهای d, q اعمالی به موتور دینامومتر به ازای ورودی مرجع مربعی $\pm 300 \text{ rpm}$



ب



الف



شکل ۱۷-۵: پاسخ سیستم درایو دینامومتر به ورودی مرجع مربعی $\pm 800 \text{ rpm}$: سرعت مرجع، سرعت رتور و خطای ردیابی سذمت (الف) موقعیت تخمینی شار رتور، جریان استاتور و سرعت (ب) جریان مرجع و جریان اندازه گیری شده روی محور q (ب) سرعت و گشتاور تولیدی موتور (ج) سرعت رتور و لغزش رتور (د) ولتاژهای روی محور d,q

در ادامه پاسخ سیستم به ازای ورودی پله در سرعت $\pm 800 \text{ rpm}$ در شکل ۱۷-۵ سرعت مرجع، سرعت رتور و خطای ردیابی سرعت، موقعیت تخمینی شار رتور، جریان استاتور و سرعت، جریان مرجع و جریان اندازه گیری شده روی محور d,q T سرعت و گشتاور تولیدی موتور، سرعت رتور و لغزش رتور، ولتاژهای روی محور d,q به ترتیب از الف تا و ارائه شده است. بررسی نتایج تست های مشابه در سرعت های مختلف تایید کننده عملکرد مطلوب سیستم درایو دینامومتر در ردیابی سرعت پالسی می باشد.

۳-۲-۵- سناریوی ۴: ورودی مرجع شیب

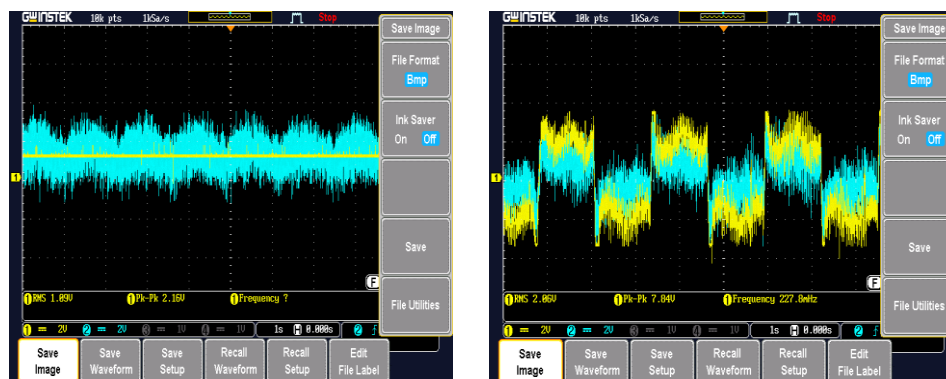
در این سناریو پاسخ سیستم به ازای ورودی شیب مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی نتایج تست ارائه شده در شکل های ۱۸ و ۱۹-۵ نشان می دهد سیستم درایو دینامومتر در مد کنترل سرعت با دقت بسیار بالایی ورودی مرجع شیب را دنبال می کند. خطای ردیابی سرعت مرجع (منحنی قرمز شکل ۱۸-۵) نشان می دهد سیستم درایو با سرعت همگرایی بالا خطای ردیابی را به مقدار صفر همگرا می کند.



شکل ۱۸-۵: پاسخ سیستم درایو دینامومتر به ورودی مرجع مثلی $\pm 800 \text{ rpm}$ و خطای ردیابی سرعت

۴-۲-۵- سناریوی ۴: ورودی مرجع سینوسی

همانگونه که در گزارش فصل اول (بخش ۱-۵ تا ۱-۸) بررسی گردید، بسیاری از رفتارهای غیر خطی بارهای مکانیکی مانند عدم هم محوری، رزونانس و... منجر به بروز نوسانات فرکانس بالا در گشتاور بار می شود. بر همین مبنی یکی از قابلیت‌های سیستم درایو دینامومتر پهنای باند بالای سیستم درایو دینامومتر و ردیابی سریع و دقیق دینامیک‌های بالای مقادیر مرجع سرعت و گشتاور ورودی می باشد.



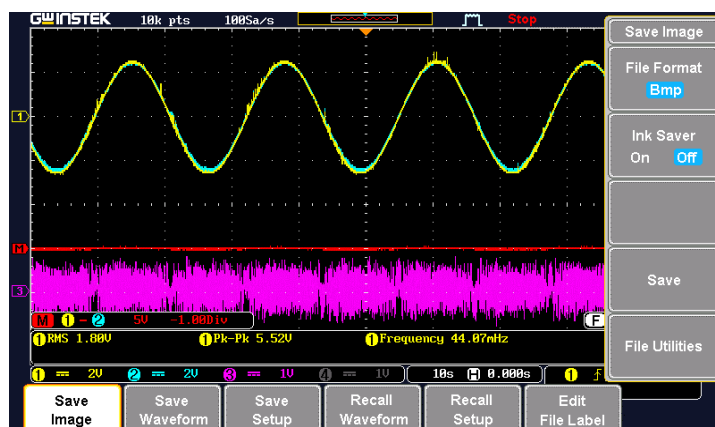
ب

الف

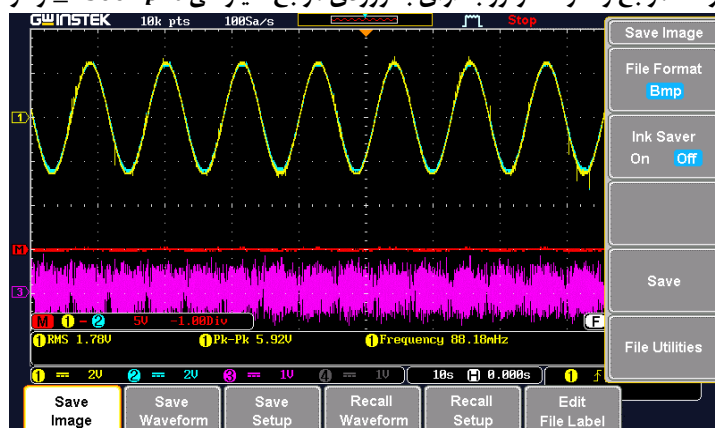
شکل ۱۹-۵: جریان‌های مرجع و اندازه‌گیری شده روی محورهای d (الف) و جریان‌های مرجع و اندازه‌گیری شده روی محورهای d

(ب) ورودی مرجع مثلی $\pm 800 \text{ rpm}$

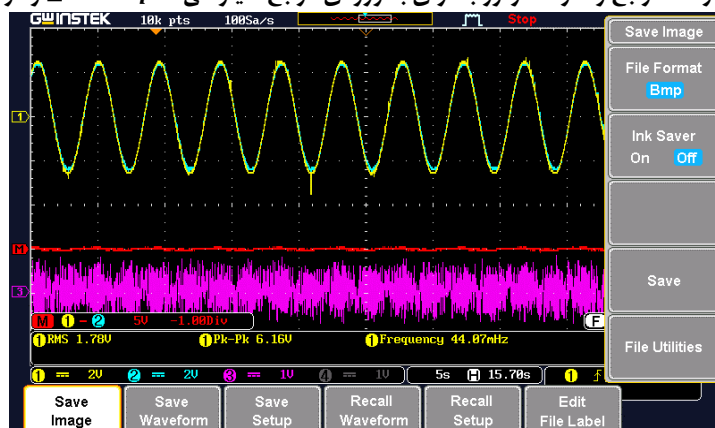
به منظور ارزیابی سرعت پاسخ دینامیکی سیستم درایو دینامومتر، در این سناریو پاسخ سیستم درایو به ازای ورودی سرعت مرجع سینوسی با فرکانس‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می گیرد. نتایج تست‌های انجام شده به ازای ورودی مرجع سینوسی با فرکانس‌های 0.05Hz ، 0.1Hz ، 0.25Hz ، 0.55Hz ، 0.65 و 0.75Hz به ترتیب در شکل‌های ۵-۲۰ تا ۵-۲۵ نمایش داده شده است. بررسی نتایج تست نشان می دهد در مد کنترل سرعت تا فرکانس 0.55Hz سرعت موتور با دقت بالا مقدار مرجع ورودی را دنبال می کند. همانگونه که در شکل‌های ۵-۲۴ و ۵-۲۵ نشان داده شده به ازای ورودی مرجع سرعت بالاتر از 0.55Hz سیستم کنترل قادر به ردیابی سرعت مرجع ورودی نمی باشد. در این حالت خطای ردیابی (منحنی قرمز) به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. لازم به ذکر است محدودیت ردیابی سرعت مرجع ورودی تا حد زیادی به تنظیم ضرائب کنترلی و مقادیر آستانه تعیین شده برای محدود کننده‌های جریان (و در نتیجه گشتاور موتور) می باشد. در صورت انتخاب موتور با چگالی جریان مجاز بالاتر و استفاده از سیستم‌های خنک سازی مناسب، امکان اعمال فرمان‌های گشتاور بالا و در نتیجه دستیابی به پاسخ دینامیکی سرعتی فراهم می شود.



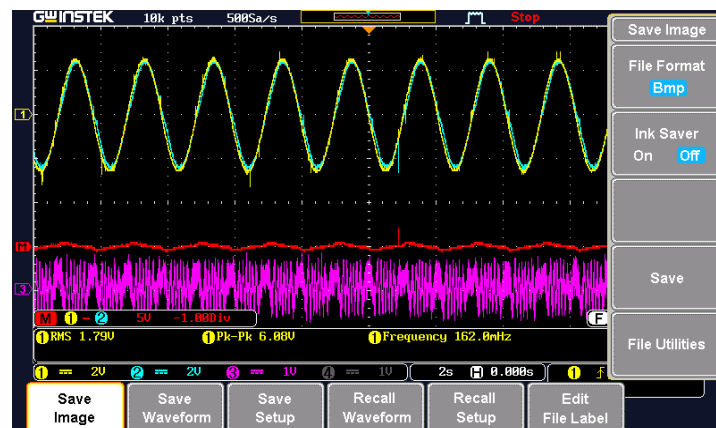
شکل ۲۰-۵: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$ و فرکانس 0.05 Hz



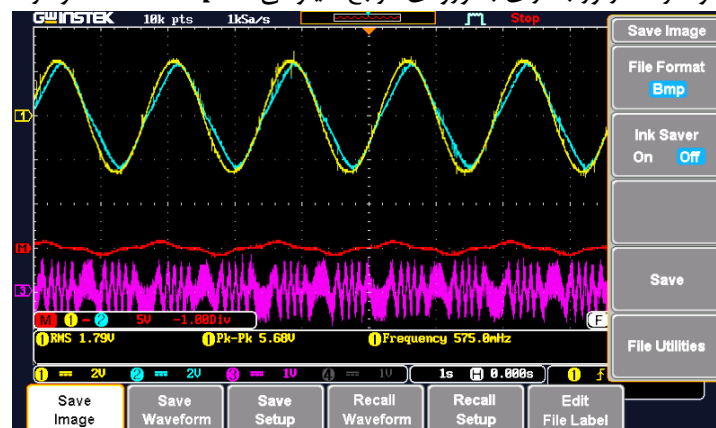
شکل ۲۱-۵: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$ و فرکانس 0.1 Hz



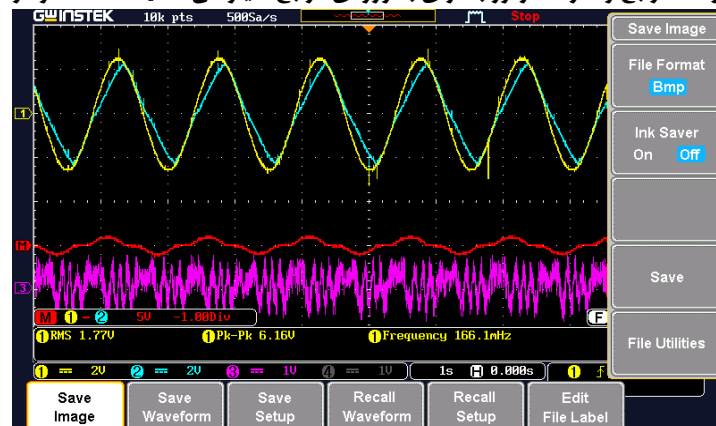
شکل ۲۲-۵: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $\pm 2500 \text{ rpm}$ و فرکانس 0.25 Hz



شکل ۲۳-۵: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $2500 \text{ rpm} \pm$ و فرکانس 0.55 Hz



شکل ۲۴-۵: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $2500 \text{ rpm} \pm$ و فرکانس 0.65 Hz



شکل ۲۵-۵: سرعت مرجع و سرعت رتور به ازای به ورودی مرجع سینوسی $2500 \text{ rpm} \pm$ و فرکانس 0.75 Hz

۳-۵- تست سیستم درایو دینامومتر در مد کنترل گشتاور

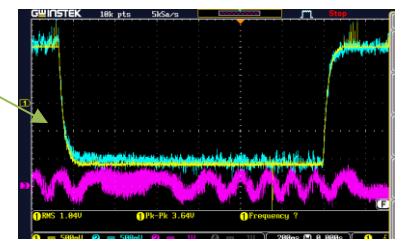
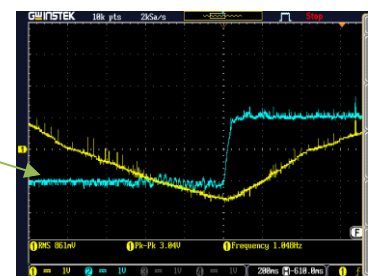
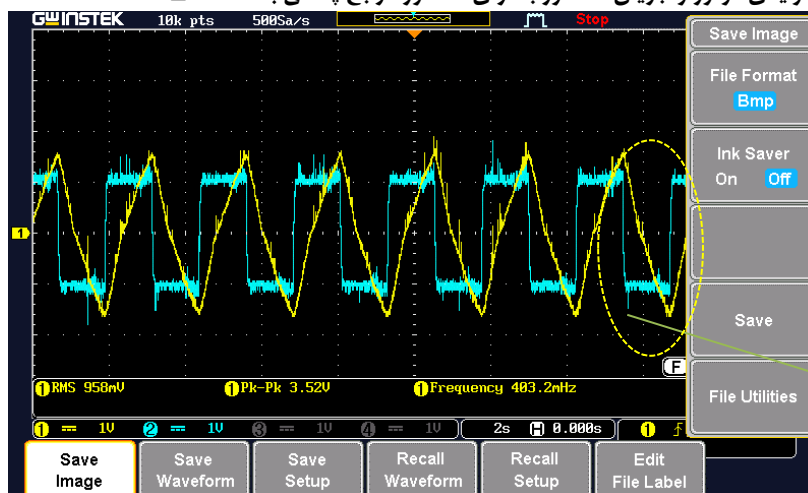
در این بخش عملکرد سیستم کنترل دینامومتر در مد کنترل گشتاور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سناریوهای تست انجام گرفته در این بخش در جدول ۱-۲ خلاصه گردیده است. هدف از انجام این تستها ارزیابی عملکرد سیستم کنترل گشتاور مبتنی بر روش کنترل برداری غیر مستقیم در ردیابی سیگنال گشتاور مرجع می‌باشد.

جدول ۲-۵: سناریوهای شبیه‌سازی ردیابی سرعت

سناریوی ۱	ورودی گشتاور مرجع پالسی $\pm 3N.m$
سناریوی ۲	ورودی مرجع سینوسی $\pm 3N.m$
سناریوی ۳	گشتاور ثابت و مولفه‌های گشتاور سینوسی $\pm 1.5N.m$
سناریوی ۴	گشتاور بار دینامیکی

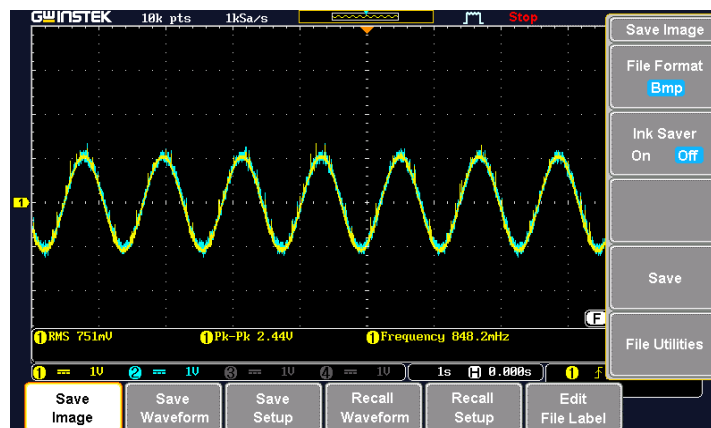
۱-۳-۵- سناریوی ۱: ورودی گشتاور مرجع پالسی $\pm 3N.m$

در این مرحله پاسخ سیستم درایو به ازای ورودی مرجع گشتاور پالسی در نواحی دوم و سوم مشخصه گشتاور- سرعت موتور مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۵-۲۶ گشتاور مرجع پالسی $\pm 3N.m$ (منحنی زرد) و گشتاور تولیدی موتور (منحنی آبی) و جریان استاتور نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود گشتاور تولیدی موتور با دقت بالایی مقدار لحظه‌ای گشتاور مرجع را دنبال می‌کند. به دلیل اینکه در مد کنترل گشتاور، سرعت پاسخ تحت تاثیر ثابت زمانی‌های الکتریکی استاتور بوده (بر خلاف روش کنترل سرعت که سرعت پاسخ به ثابت زمانی مکانیکی وابسته است) در این حالت سرعت پاسخ دینامیکی بسیار بالا می‌باشد. شکل ۵-۲۷ گشتاور موتور (منحنی آبی) و سرعت موتور (منحنی زرد) را نمایش می‌دهد. در این حالت سرعت سیستم درایو تابعی از اینرسی و دامنه گشتاور تولیدی موتور باشد.

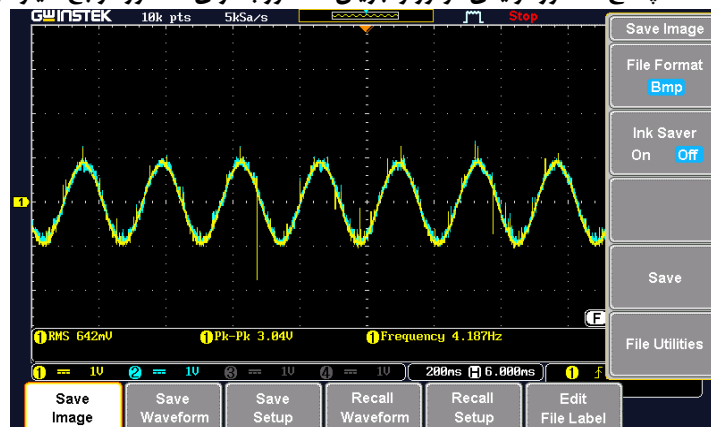
شکل ۲۶-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پالسی با $\pm 3N.m$ شکل ۲۷-۵: گشتاور تولیدی موتور دینامومتر و پاسخ سرعت سیستم درایو به ازای گشتاور مرجع پالسی با $\pm 3N.m$

۲-۳-۵: سناریوی ۲: ورودی گشتاور مرجع سینوسی $\pm 3N.m$

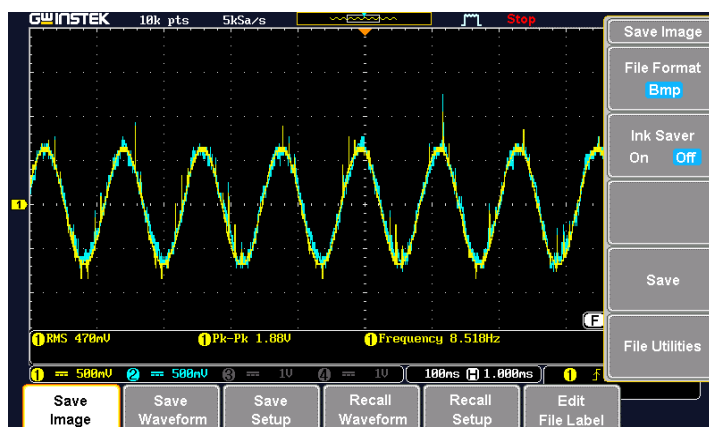
همانگونه که قبلاً بررسی گردید، رفتارهای غیر خطی بارهای صنعتی و ایجاد نوسانهای نامطلوب فرکانس بالا در گشتاور بار اعمالی به سیستم موتور و درایو امری اجتناب ناپذیر می باشد. این مولفه ها از گشتاور بار بطور معمول دارای مولفه های فرکانس بالا می باشند و تولید این مولفه های فرکانس بالای بارهای مکانیکی در سیستم دینامومتر مستلزم به کارگیری یک سیستم درایو با سرعت پاسخ دینامیکی بالا (پهنای باند بالا) می باشد. به منظور ارزیابی سیستم کنترل گشتاور پیاده سازی شده در ردیابی مولفه های بالای گشتاور بار، پاسخ سیستم درایو دینامومتر به ازای گشتاور ورودی مرجع سینوسی $\pm 3N.m$ و فرکانس های ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ هرتز مورد تست قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از تست های انجام شده به ترتیب در شکل‌های ۵-۲۸ تا ۵-۳۴ آورده شده است. بررسی نتایج تست نشان می دهد سیستم درایو پیاده سازی شده قادر است تا گشتاور مرجع سینوسی تا فرکانس ۴۰ هرتز را با دقت و دینامیک بالایی دنبال می کند. همانگونه که در شکل ۵-۳۴ ملاحظه می گردد برای گشتاور مرجع سینوسی با فرکانس ۵۰ هرتز و بالاتر، سیستم کنترلی قادر به ردیابی دقیق گشتاور مرجع نمی باشد. همانگونه که در شکل ۵-۳۴ نمایش داده شده، علاوه بر محدودیت پاسخ دینامیکی، محدودیت سوئیچ زنی مبدل و توپولوژی اینورتر دو سطحی پیاده سازی شده در این پروژه، ریلپ گشتاور افزایش خواهد یافت. در صورتیکه نیاز به مدلسازی مولفه های فرکانس بالاتر گشتاور بار باشد لازم است تا از اینورتر چند سطحی یا فرکانس کلید زنی بالاتر استفاده شود.



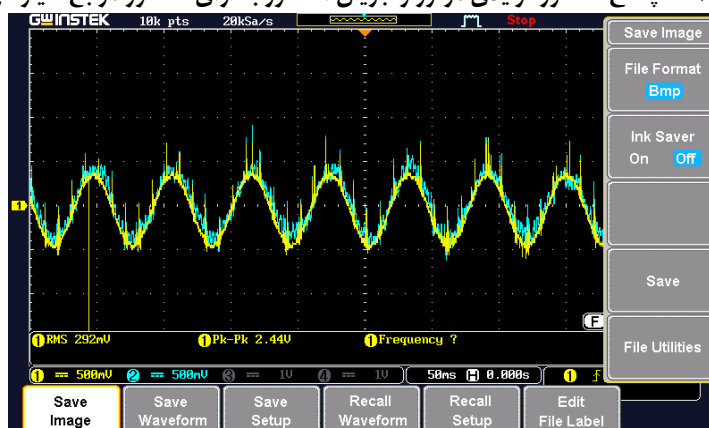
شکل ۵-۲۸: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 1Hz



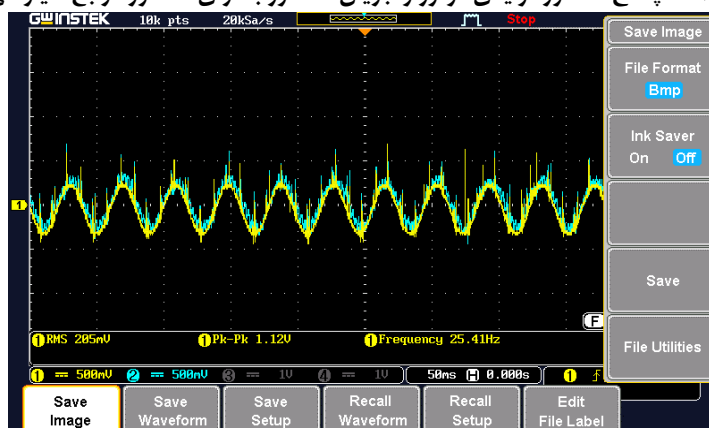
شکل ۵-۲۹: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 5Hz



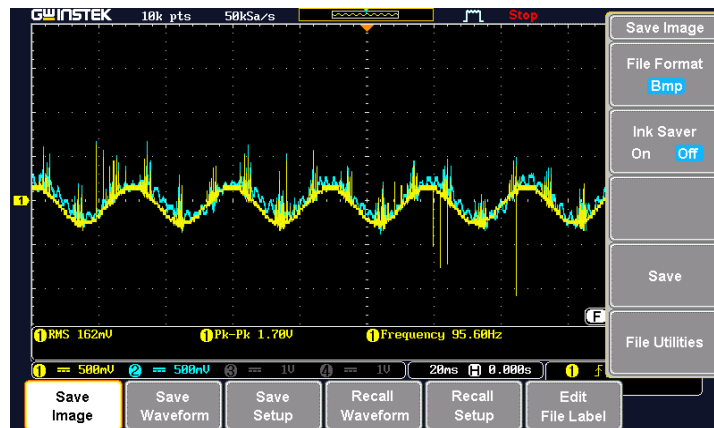
شکل ۳۰-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 10Hz



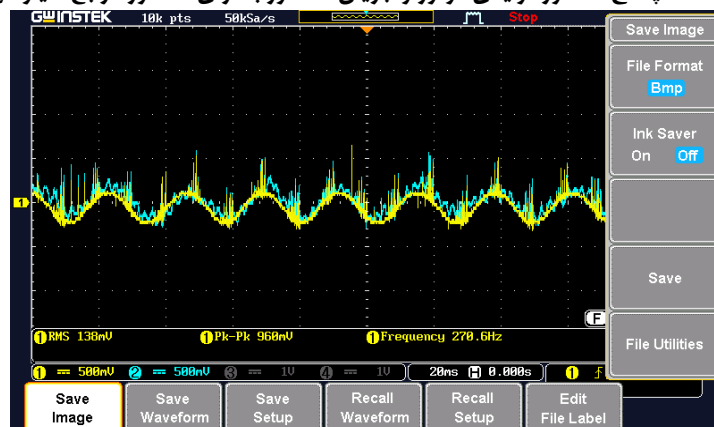
شکل ۳۱-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 20Hz



شکل ۳۲-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 30Hz



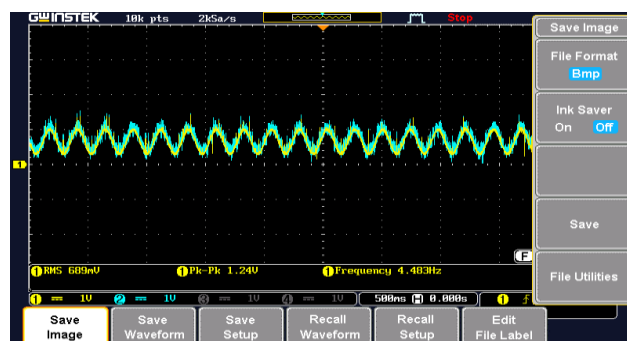
شکل ۳۳-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 40Hz



شکل ۳۴-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع سینوسی فرکانس 50Hz

۳-۳-۵: سناریوی ۳: گشتاور ثابت و مولفه های گشتاور سینوسی $\pm 1.5N.m$

یکی از قابلیت‌های سیستم دینامومتر پیاده سازی شده قابلیت تولید ترکیبی از مولفه های گشتاور بار می باشد. در این سناریو ترکیبی از گشتاور ثابت و گشتاور نوسانی به عنوان سیگنال مرجع به سیستم درایو دینامومتر ارسال می گردد. شکل ۵-۳۵ پاسخ سیستم درایو دینامومتر برای این سناریو را نمایش می دهد. همانگونه که مشاهده می شود، گشتاور تولیدی موتور دینامومتر کاملاً منطبق بر گشتاور مرجع می باشد. بررسی نتایج شبیه سازی های مختلف نشان می دهد انواع پروفایل بارهای صنعتی مانند بار اصطکاکی، بار فن و... با استفاده از سیستم کنترل گشتاور قابل پیاده سازی می باشد. بررسی نتایج تست انواع پروفایل بارها در بخش تست های دینامومتری ارائه خواهد شد.



شکل ۳۵-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پله با $\pm 3N.m$ و 4Hz و گشتاور ثابت 2N.m

۳-۳-۴: سناریوی ۴: گشتاور بار دینامیکی

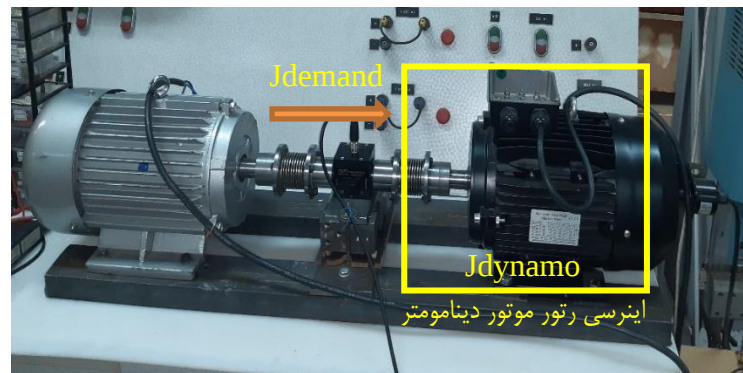
همانگونه که در فصل اول بررسی گردید، گشتاور بارهای صنعتی از دو مولفه گشتاور استاتیکی و دینامیکی تشکیل شده است.

$$T_{load} = T_{static} + J_{load} \frac{d\omega}{dt} \quad (5-6)$$

یکی از قابلیت‌های سیستم دینامومتر پیاده سازی شده در این پروژه بارگذاری اثرات گشتاور دینامیکی ناشی از اینرسی بار می باشد. این قابلیت سیستم های دینامومتر در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی موتور و درایو بخصوص در سیستم های حمل و نقل الکتریکی کاربرد دارد. بر همین اساس در این مرحله از تست ها تاثیر اینرسی بار بر گشتاور تولیدی سیستم دینامومتر مورد آزمایش قرار می گیرد. لازم به ذکر است مطابق شکل ۵-۳۶، موتور دینامومتر خود دارای یک اینرسی می باشد ($J_{dynamo}=0.046$) که این اینرسی به اینرسی موتور تحت تست اضافه می شود. معادله دینامیکی سیستم در حالت اتصال موتور تحت تست به دینامومتر بر اساس رابطه ۵-۷ توصیف می گردد.

$$T_M - T_{dynamo} = J \frac{d\omega^*}{dt} = (J_M + J_{demand} + J_{dynamo}) \frac{d\omega}{dt} \quad (5-7)$$

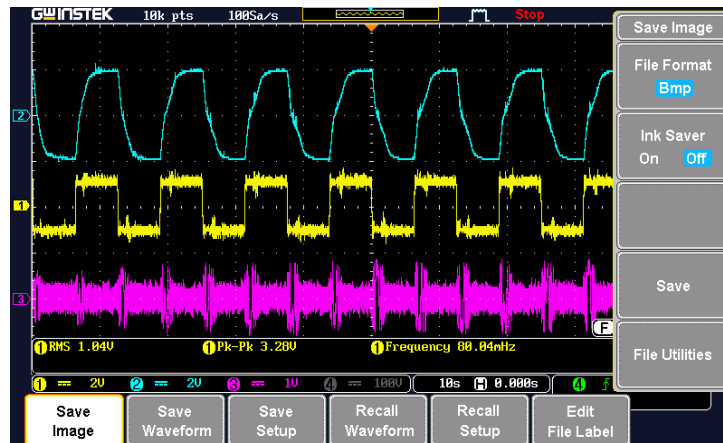
که در این رابطه J_M ، J_{dynamo} و J_{demand} به ترتیب اینرسی موتور تحت تست، اینرسی موتور دینامومتر و اینرسی مرجع خواسته شده برای برارگذاری روی موتور تحت تست می باشد. اینرسی J_{demand} می تواند مقادیر کمتر یا بیشتر از J_{dynamo} باشد.



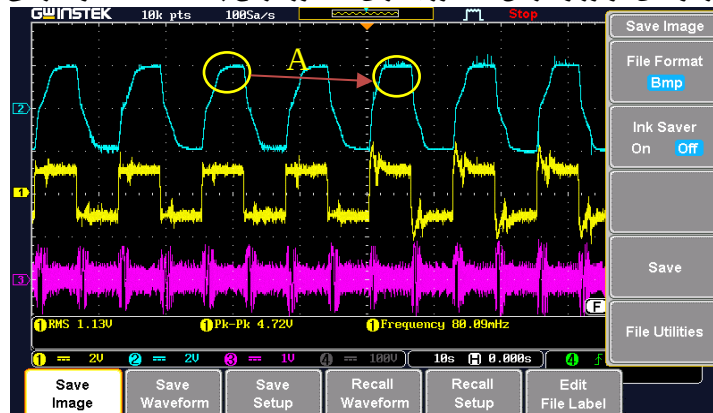
شکل ۳۶-۵: اینرسی سیستم دینامومتر و موتور تحت تست

بر اساس این رابطه و با در نظر گرفتن این نکته که یک اینرسی ناشی از رتور موتور دینامومتر بر موتور تحت تست تحمیل می شود، مقدار گشتاور دینامیکی مرجع که موتور دینامومتر باید تولید کند برابر با $(J_{demand} - J_{dynamo}) \frac{d\omega}{dt}$ خواهد بود. شکل ۵-۳۷ پاسخ سرعت (منحنی آبی) و گشتاور (منحنی زرد) و جریان استاتور (منحنی قرمز) سیستم درایو به ازای $J_{demand} = J_{dynamo}$ را نمایش می دهد. طبق رابطه ۵-۷ در این حالت مقدار گشتاور دینامیکی مرجع تولیدی صفر خواهد بود ($J \frac{d\omega^*}{dt} = 0$). بنابراین مطابق با شکل ۵-۳۷ هیچ گشتاوری دینامیکی به مولفه گشتاور استاتیکی اضافه نمی شود. در مرحله بعد نتایج تست به ازای $J_{demand} = 2 * J_{dynamo}$ انجام می گردد. در این حالت طبق رابطه ۵-۷، مقدار گشتاور دینامیکی با مقدار $J_{dynamo} \frac{d\omega}{dt}$ ، به گشتاور استاتیکی (گشتاور ثابت) اضافه می شود. مطابق با شکل ۵-۳۸ از لحظه A این ترم گشتاور دینامیکی در گشتاور تولیدی موتور دینامومتر ظاهر می شود. همانگونه که ملاحظه می گردد سیستم درایو دینامومتر از لحظه A، ترم گشتاور دینامیکی را به گشتاور ثابت تولیدی اضافه می کند که کم یا زیاد شدن این مولفه گشتاور از منظر موتور تحت تست معادل کاهش یا افزایش اینرسی بار می باشد. بطوریکه ملاحظه می شود پس از افزایش ترم گشتاور دینامیکی توسط سیستم دینامومتر، پاسخ دینامیکی دینامیکی سرعت موتور تحت تاثیر این ترم گشتاور دینامیکی سریعتر میگردد. شکل ۵-۳۹ مدلسازی اینرسی بار توسط سیستم درایو دینامومتر مد کنترل گشتاور به ازای $J_{demand} = 4 * J_{dynamo}$ را نمایش می دهد. همانگونه که انتظار می رود در این تست با افزایش گشتاور دینامیکی سرعت شتاب گیری موتور دینامومتر سریع تر می گردد. لازم به ذکر است ترم گشتاور دینامیکی در این تستها به موتور دینامومتر اعمال گردید. در حالت اتصال دینامومتر به

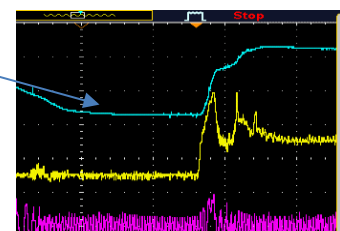
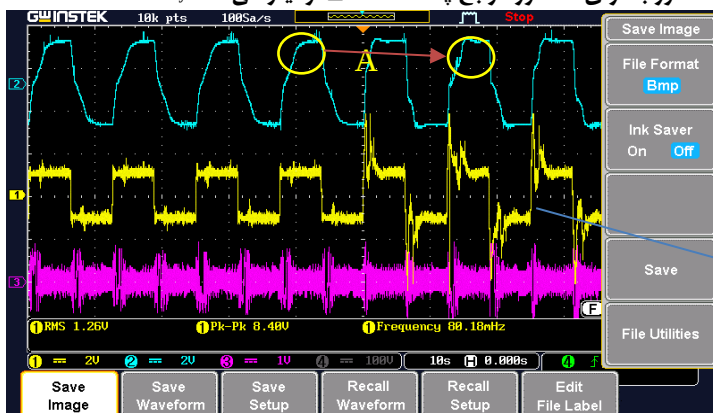
موتور تحت تست این ترم گشتاور دینامیکی بصورت ترمزی به موتور تحت تست اعمال می‌شود که در این شرایط با افزایش J_{demand} پاسخ سرعت کندتر خواهد شد.



شکل ۳۷-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پله $\pm 3N.m$ و اینرسی $J_{demand} = J_{dynamo}$



شکل ۳۸-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پله $\pm 3N.m$ و اینرسی $J_{demand} = 2 * J_{dynamo}$



شکل ۳۹-۵: پاسخ گشتاور تولیدی موتور و جریان استاتور به ازای گشتاور مرجع پله $\pm 3N.m$ و اینرسی $J_{demand} = 4 * J_{dynamo}$ تست‌های انجام گرفته در این بخش با هدف ارزیابی عملکرد سیستم درایو موتور دینامومتر بدون اتصال به موتور تحت تست در مد‌های کنترل سرعت و گشتاور بوده است. بررسی نتایج تست‌های انجام شده برای سناریوهای مختلف تایید کننده عملکرد سیستم

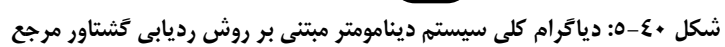
کنترل دینامومتر (در دو مد کنترل سرعت و گشتاور) به منظور تولید پروفایل گشتاور بار استاتیکی و دینامیکی انواع بارهای صنعتی می باشد.

۴-۵- نتایج آزمایشگاهی تست های دینامومتری موتور تحت تست

پس از ارزیابی عملکرد سیستم درایو دینامومتر در مدهای کنترل سرعت و گشتاور، روش کنترل گشتاور با توجه سرعت پاسخ دینامیک بالا و پهنای باند بیشتر انتخاب می گردد. شکل ۵-۴۰ سیستم کنترل دینامومتر مبتنی بر روش کنترل گشتاور را نمایش می دهد. در این روش ابتدا سرعت روی محور اندازه گیری و سپس بر اساس رابطه تحلیلی بین گشتاور بار و سرعت، مقدار گشتاور به صورت لحظه ای محاسبه و به عنوان گشتاور مرجع به سیستم درایو دینامومتر اعمال می گردد. وظیفه سیستم درایو دینامومتر ردیابی لحظه ای گشتاور مرجع تولیدی می باشد. مطابق شکل ۵-۴۱ با هدف ارزیابی عملکرد سیستم دینامومتر AC پیاده سازی شده، یک موتور القایی سه فاز با مشخصات ارائه شده در جدول ۵-۳ به عنوان موتور تحت تست به موتور دینامومتر متصل شده است. موتور تحت تست از طریق یک سیستم درایو نوع EURO THERM DRIVE AC690+SEERIES وظیفه درایو موتور تحت تست را بر عهده دارد. سیستم درایو موتور تحت تست مبتنی بر روش V/F می باشد.

جدول ۳-۵: مشخصات موتور تحت تست

4kw	توان نامی
380 (Δ)	ولتاژ
660 (Y)	
4.7 (Δ)	جریان
8.17 (Y)	
2	تعداد قطب
2890	دور نامی
0.046 kgm ²	اینرسی





شکل ۴۱-۵: موتور و درایو تحت تست

جدول ۴-۵، سناریوهای تست سیستم دینامومتر با هدف بارگذاری بر موتور و درایو تحت تست را نمایش می‌دهد. هدف از انجام این سناریوها ارزیابی عملکرد سیستم دینامومتر در بارگذاری پروفیل‌های مختلف چند نمونه بار متداول بر موتور و درایو تحت تست و بررسی پاسخ رفتار دینامیکی آنها می‌باشد.

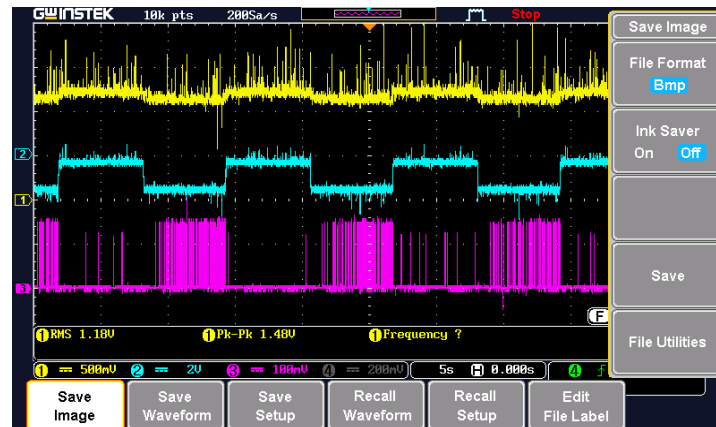
جدول ۴-۵: سناریوهای شبیه‌سازی تست دینامومتری

سناریوی ۱	بارگذاری گشتاور بار ثابت قابل برنامه ریزی
سناریوی ۲	بارگذاری گشتاور دینامیکی قابل برنامه ریزی
سناریوی ۳	بارگذاری گشتاور بار اصطکاکی و نوع فن قابل برنامه ریزی
سناریوی ۴	بارگذاری مولفه‌های پیچیده و غیر خطی بار

۱-۴-۵- سناریوی ۱: بارگذاری گشتاور بار ثابت قابل برنامه ریزی

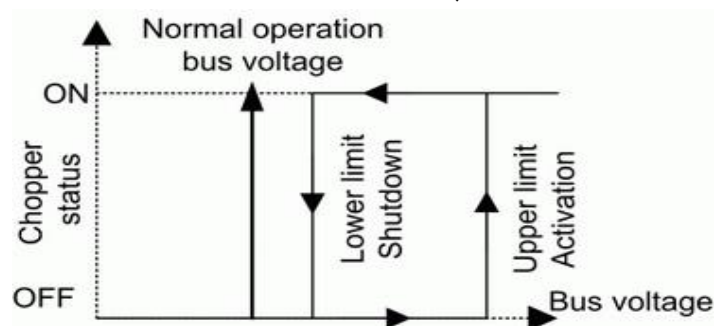
در گام نخست، عملکرد سیستم دینامومتر پیاده‌سازی شده با هدف بارگذاری مشخصه بار گشتاور ثابت و اعمال آن به موتور تحت تست مورد آزمون قرار گرفته است. شکل ۴۲-۵ سرعت موتور تحت تست (منحنی زرد)، گشتاور ترمزی تولیدی سیستم دینامومتر (منحنی آبی)، جریان تزریقی به مقاومت ترمز دینامیکی شین DC (منحنی قرمز) به ازای گشتاور ترمزی پالسی با مقدار پیک $4N.m$ را نمایش می‌دهد. بطوریکه ملاحظه می‌گردد با توجه به اینکه موتور تحت تست با استفاده از یک سیستم درایو V/F درایو می‌شود، پس از اعمال گشتاور بار سرعت موتور تحت تست کاهش یافته و به محض کاهش گشتاور ترمزی دینامومتر به مقدار $1 N.m$ سرعت موتور مجدداً افزایش می‌یابد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد به اعمال گشتاور بار ترمزی $4N.m$ به موتور تحت تست، سرعت موتور دینامومتر در جهت ساعت گرد و گشتاور آن منفی خواهد (ناحیه چهارم مشخصه گشتاور-سرعت) بود که در این حالت برگشت انرژی ترمز از طریق سیستم درایو به شین DC تزریق می‌شود. به منظور جلوگیری از افزایش ولتاژ شین DC، مطابق شکل ۴۳-۵ با استفاده از یک کنترل کننده هیستریزس به محض افزایش سطح ولتاژ شین DC از باند هیستریزس (۲٪) سوئیچ ترمز دینامیکی روشن و انرژی برگشتی را در مقاومت تلف می‌کند. منحنی قرمز در شکل ۴۲-۵ جریان عبوری از مقاومت $D.B$ را نمایش می‌دهد. در ادامه عملکرد سیستم دینامومتر به ازای گشتاور بارهای بزرگتر $9N.m$ و $12N.m$ مورد آزمایش قرار گرفته است. همانگونه که در شکل‌های ۴۴-۵ و ۴۵-۵ نمایش داده شده با افزایش گشتاور ترمزی بار میزان افت سرعت نیز بیشتر شده که نشان دهنده افزایش میزان بارگذاری می‌باشد. بررسی نتایج تست نشان می‌دهد سیستم دینامومتر پیاده‌سازی شده قابلیت بارگذاری روی موتور تحت تست از حالت بی‌باری تا بار نامی به موتور و درایو تحت تست را دارا می‌باشد. همانگونه که در فصل‌های ابتدایی بررسی گردید یکی از مزایای سیستم

دینامومتر بارگذاری برنامه ریزی شده موتور تحت تست بر اساس پروفایل گشتاور دلخواه بار توسط کاربر می باشد. شکل ۵-۴۶ سرعت موتور تحت تست (منحنی زرد)، گشتاور ترمزی بار (منحنی آبی)، جریان استاتور موتور تحت (جریان موتور تحت تست) را در شرایط اعمال پلکانی گشتاور ترمزی بار از حالت بی باری تا گشتاور نامی را نمایش می دهد.

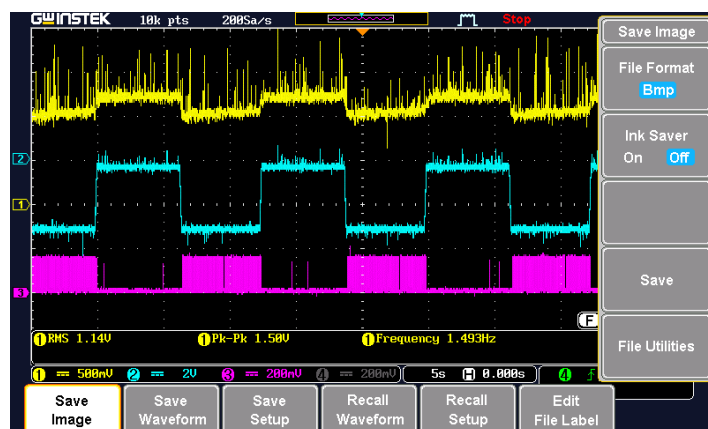


شکل ۵-۴۲: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز به ازای گشتاور بار پله ایی با مقدار

پیک $-4N.m$

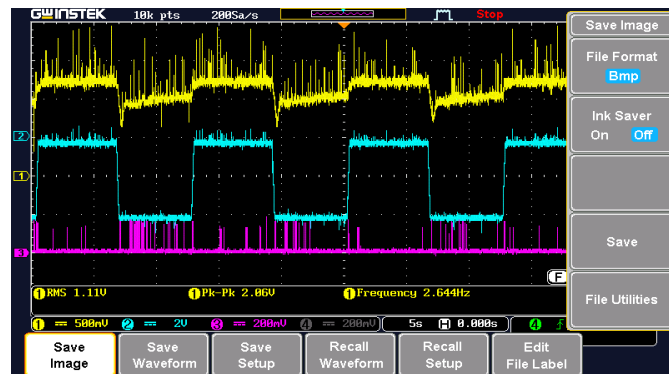


شکل ۵-۴۳: کنترل هیستریزس ولتاژ شین DC با استفاده از ترمز دینامیکی (D.B)



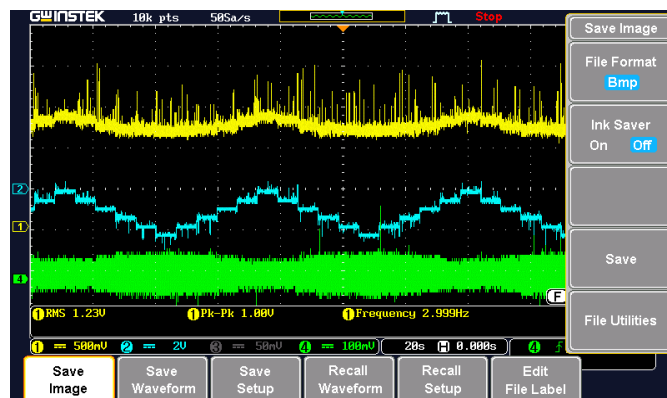
شکل ۵-۴۴: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز به ازای گشتاور بار پله ایی با مقدار

پیک $-9N.m$

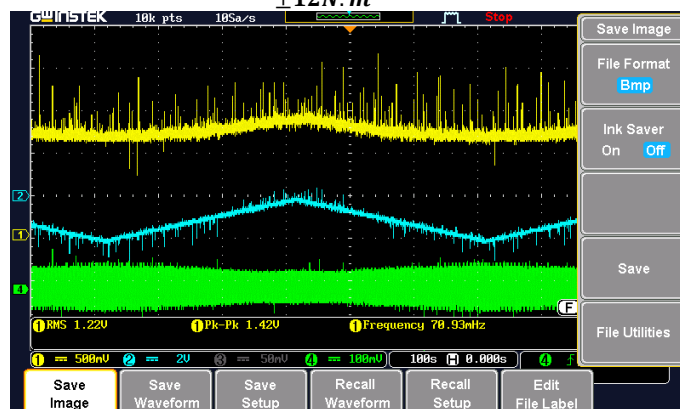


شکل ۴۵-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز به ازای گشتاور بار پله ایی با مقدار پیک $12N.m$ -

با استفاده از این قابلیت امکان انجام تست موتور بصورت اتوماسیون شده فراهم می گردد. بطوریکه در هر گام بعد از رسیدن به نقطه کار دائم مقادیر کمیتهای الکتریکی و مکانیکی اندازه گیری و داده های مورد نیاز استخراج گردد و این پروسه برای هر پله از تغییرات گشتاور بار تکرار شود. در نهایت با اتصال نقاط بدست آمده مشخصه مورد نیاز استخراج خواهد شد. لازم به ذکر است تعداد گام ها و فواصل زمانی اعمال گشتاور بار قابل برنامه ریزی می باشد. همچنین در صورتیکه تعداد گام ها افزایش داده شود (به ازای مقادیر پله های بسیار کوچک) مطابق شکل ۴۷-۵ پروفایل گشتاور بار بصورت تابع شیب خواهد بود که میزان شیب و مقدار پیک گشتاور قابل برنامه ریزی خواهد بود.



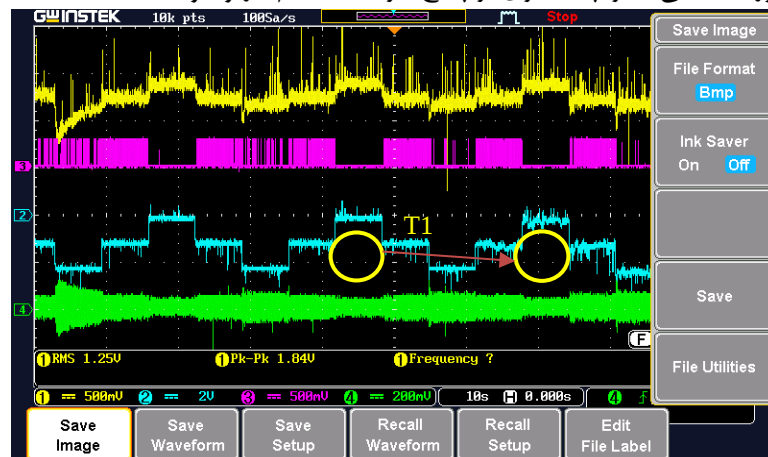
شکل ۴۶-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار پله ایی قابل برنامه ریزی $\pm 12N.m$



شکل ۴۷-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان استاتور موتور تحت تست به ازای گشتاور بار شیب قابل برنامه ریزی $\pm 12N.m$

۲-۴-۵- سناریوی ۲: بارگذاری گشتاور دینامیکی قابل برنامه ریزی

در این سناریو علاوه بر گشتاور استاتیکی، مولفه گشتاور دینامیکی نیز به موتور تحت تست اعمال می‌گردد. ابتدا گشتاور دینامیکی معادل $J_{demand} = 0.5 * J_{dynamo}$ تنظیم می‌گردد ($J_{dynamo} = 0.046$). در این حالت طبق رابطه ۵-۷ مولفه گشتاور $J_{dynamo} \frac{d\omega}{dt}$ به گشتاور استاتیکی اضافه می‌شود. شکل ۵-۴۸ سرعت موتور تحت تست (منحنی زرد)، جریان D.B (منحنی قرمز)، گشتاور ترمزی دینامومتر (منحنی آبی) و جریان استاتور (منحنی سبز) را به ازای گشتاور بار ثابت و اعمال گشتاور دینامیکی از لحظه T1 را نمایش می‌دهد. به منظور مقایسه دقیق تر شکل ۵-۴۹ مقایسه گشتاور بار و سرعت موتور تحت تست را قبل و بعد از اعمال گشتاور دینامیکی با یکدیگر مقایسه گردیده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد پس از تولید گشتاور دینامیکی $J_{demand} = 0.5 * J_{dynamo}$ توسط موتور دینامومتر و اعمال آن به موتور تحت تست میزان فرافروش پاسخ سرعت با اعمال گشتاور پله افزایش می‌یابد. به این ترتیب با استفاده سیستم دینامومتر پیشنهادی امکان مدلسازی گشتاورهای دینامیکی دلخواه فراهم می‌گردد. در شکل ۵-۵۰ شبیه سازی گشتاور دینامیکی به ازای $J_{demand} = 0.2 * J_{dynamo}$ را نمایش می‌دهد. بطوریکه انتظار داشتیم با کاهش اینرسی و در نتیجه افزایش گشتاور دینامیکی بار (به خصوص در لحظه اعمال گشتاور پله) یک مولفه گشتاور دینامیکی با فرافروش بالا در گشتاور ترمزی دینامومتر ظاهر می‌گردد که این مولفه گشتاور دینامیکی تاثیر چشمگیری بر پاسخ سرعت سیستم داریو خواهد داشت.



شکل ۴۸-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار

پله ایی $\pm 12N.m$ و اینرسی $J_{demand} = 0.5 * J_{dynamo}$



ب

الف

شکل ۴۹-۵: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار

پله ایی $\pm 12N.m$ و اینرسی $J_{demand} = 0.5 * J_{dynamo}$



شکل ۵-۵۰: سرعت موتور تحت تست، گشتاور دینامومتر، جریان تزریقی به مقاومت ترمز بار پله ایی $\pm 9N.m$ و اینرسی $J_{demand}=0.5* J_{dynamo}$

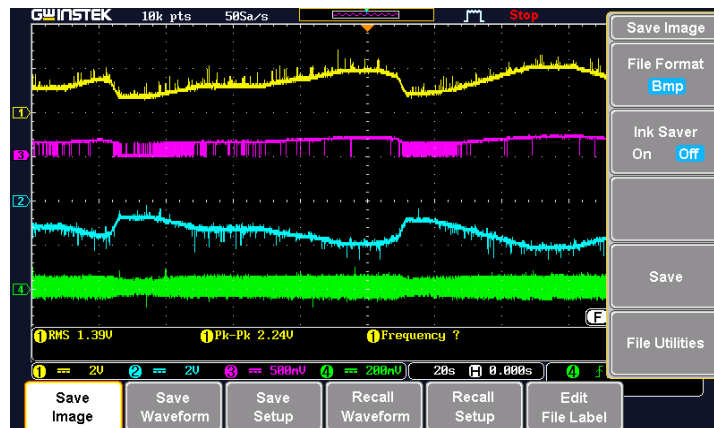
۵-۴-۲ سناریوی ۳: بارگذاری گشتاور بار اصطکاکی و نوع فن قابل برنامه ریزی

در این سناریو دینامومتری بارهای اصطکاکی و فن به عنوان دو نوع از بارهای متداول صنعتی مورد آزمایش قرار می گیرد. روابط ۵-۸ و ۵-۹ معادلات حاکم بر مشخصه گشتاور و سرعت دو نوع بار تست شده در این سناریو را ارائه می دهد.

$$T_{fric} = k_{fric} * \omega \quad (5-8)$$

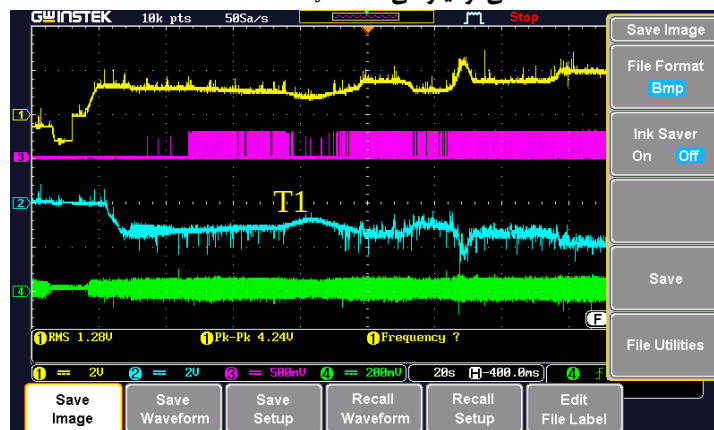
$$T_{fan} = k_{fan} * \omega^2 \quad (5-9)$$

شکل ۵-۵۱ سرعت موتور تحت تست (منحنی زرد)، جریان مقاومت D.B (منحنی قرمز)، گشتاور ترمزی دینامومتر (منحنی آبی) و جریان استاتور موتور تحت تست (منحنی سبز) را برای پروفایل گشتاور اصطکاکی به ازای $k_{fric}=0.02$ نمایش می دهد. در این آزمایش سرعت موتور تحت تست با استفاده از تنظیمات پنل کنترلی درایو توسط کاربر تغییر داده می شود. با تغییر سرعت، مقدار گشتاور مرجع اعمالی به سیستم درایو دینامومتر بر اساس رابطه ۵-۸ محاسبه می شود. سیگنال گشتاور محاسبه شده به عنوان گشتاور مرجع به کنترل کننده گشتاور دینامومتر ارسال می شود. مطابق شکل ۵-۵۱ گشتاور ترمزی تولید شده توسط موتور دینامومتر (منحنی آبی) به موتور تحت تست اعمال می شود. همانگونه که ملاحظه می شود پروفایل گشتاور بار اعمالی منطبق با سرعت موتور تحت تست می باشد، بطوریکه با افزایش سرعت، گشتاور بار اصطکاکی نیز افزایش می یابد. در این حالت تغییرات پوش جریان استاتور موتور تحت تست کاملاً منطبق بر گشتاور براگذاری شده موتور تحت تست می باشد. در ادامه مدلسازی بار اصطکاکی با در نظر گرفتن اینرسی بار مورد آزمایش قرار می گیرد. در این حالت مطابق رابطه ۵-۷، مقدار اینرسی بار اصطکاکی از لحظه $T1$ برابر $J_{demand}=0.5* J_{dynamo}$ در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل ۵-۵۲ ملاحظه می شود، با کاهش اینرسی بار، دینامیک گشتاور تولیدی دینامومتر و سرعت موتور تحت تست تاثیر اینرسی پایین بار قرار می گیرد. در این حالت اثر میرا سازی رپل های گشتاور از طریق اینرسی بار کاهش می یابد که این امر منجر به افزایش ارتعاشات مکانیکی و افزایش نویز صوتی شده است.



شکل ۵-۵۱: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار

اصطکاک و اینرسی $J_{demand}=0.5*J_{dynamo}$

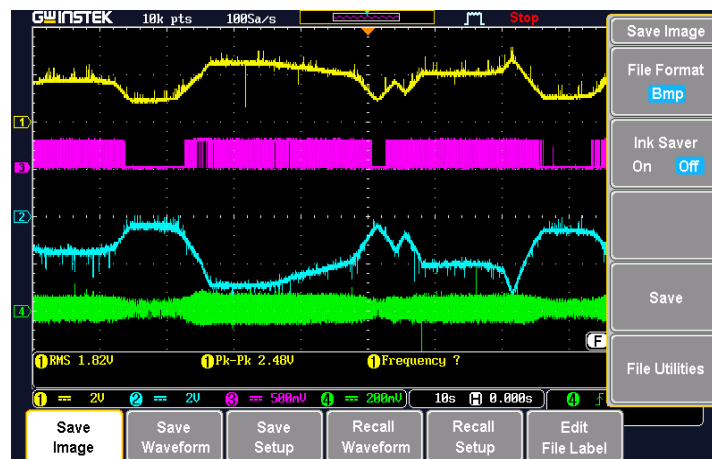


شکل ۵-۵۲: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز Break، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای

گشتاور بار اصطکاک و اینرسی $J=50*J_0$

در ادامه مدلسازی آزمایشگاهی بار نوع فن که از بارهای متداول در صنعت می باشد، مورد آزمایش قرار می گیرد. برای این منظور بر اساس رابطه ۸-۵، گشتاور بار فن به ازای ضریب $k_{fan}=0.000033$ تولید و به سیستم درایو سیستم دینامومتر اعمال می شود. در این تست سرعت موتور تحت تست با استفاده از سیستم درایو توسط کاربر تغییر داده می شود. در این حالت بر اساس رابطه ۵-۹، برای هر سرعت نمونه برداری شده یک مقدار گشتاور مرجع محاسبه و به سیستم درایو دینامومتر ارسال می شود. شکل ۵-۵۳ سرعت موتور تحت تست (منحنی زرد)، جریان D.B، گشتاور ترمزی دینامومتر و جریان فاز A استاتور موتور تحت تست را در شرایط بارگذاری بار نوع فن نمایش می دهد. همانگونه که انتظار می رفت گشتاور ترمزی تولیدی سیستم دینامومتر متناسب با مجذور سرعت می باشد و تاثیر این بار گذاری بر پوش جریان استاتور موتور تحت تست کاملاً مشهود می باشد.

انجام تست های مختلف به ازای مقادیر مختلف ضرائب k_{fric} و k_{fan} انجام گردید. یکی از قابلیت های سیستم دینامومتر پیاده سازی شده امکان ترکیب مولفه های مختلف گشتاور بار و براگذاری بر روی موتور و درایو تحت تست می باشد. بنابراین امکان در نظر گرفتن بار فن، با در نظر گرفتن اصطکاک بخش های مکانیکی و اینرسی بار بطور همزمان وجود دارد.



شکل ۵-۵۳: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز Break، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار فن

۳-۴-۵- سناریوی ۴: بارگذاری مولفه‌های پیچیده و غیر خطی بار

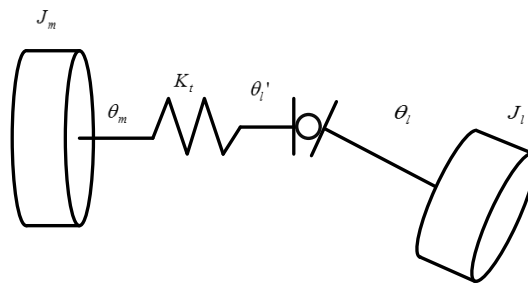
همانگونه که در فصل اول بررسی گردید بروز رفتارهای پیچیده و غیر خطی در بارهای صنعتی امری اجتناب ناپذیر می باشد. این مولفه‌های گشتاور بار در برخی موارد ناخواسته و غیر قابل پیش بینی بوده که می تواند به دلیل بروز مشکلات در کوپلینگ و بخش های مکانیکی (مانند ناهم محوری، رزنانس و...) یا در برخی موارد مانند مکانیزم مکانیسم بادامک^۱ و مکانیسم‌های میل لنگ^۲ مولفه‌های فرکانس بالا بخشی از رفتار طبیعی بار می باشد که قابل پیش بینی و مدلسازی می باشند. دینامومترهای موجود (نمونه های تجاری موجود) قابلیت مدلسازی این مولفه های گشتاور بار را دارا نمی باشند. با توجه به پیشرفت های روزافزون در زمینه الگوریتم های کنترلی پیشرفته، بخصوص در کاربردهای حساس مانند خودرو های الکتریکی، ارزیابی آزمایشگاهی موتور و درایو با در نظر گرفتن رفتارهای غیر خطی بار اعمالی می تواند نقش ویژه ایی در توسعه سیستم های محرکه الکتریکی نوین داشته باشد. انجام این دسته از تستهای دینامومتری کمک می کند تا عملکرد سیستم موتور و درایو تحت شرایط نزدیک به شرایط واقعی مورد آزمایش قرار می گیرد که این قابلیت از صرف زمان و هزینه بالا در مراحل صنعتی سازی یک سیستم درایو جلوگیری می کند.

یکی از نوآوری های این پروژه ارائه یک سیستم دینامومتر با قابلیت شبیه سازی آزمایشگاهی رفتارهای غیر خطی بارهای صنعتی بصورت برنامه ریزی شده و اعمال آن بر موتور تحت تست می باشد. در ادامه سه نوع از این رفتارهای غیر خطی بصورت آزمایشگاهی مورد تست و بررسی قرار می گیرد.

دینامومتری عدم هم محوری^۳ بین بار و موتور

شکل ۵-۸، دیاگرام هندسی عدم هم محوری بین بار و موتور را نمایش می دهد. همانگونه که قبلا بررسی گردی در این حالت رابطه بین مولفه گشتاور نوسانی با میزان زاویه عدم هم محوری و اختلاف موقعیت ابتدا و انتهای شفت بر اساس رابطه ۵-۱۰ محاسبه می گردد. شکل ۵-۵ پیاده سازی محسبات مولفه های بارهای غیر خطی را در DSP نمایش می دهد.

1 - cam mechanism
2 - Crank shaft
3 - Misalignment



شکل ۵-۴: مدل مکانیکی نا هم محوری

$$\frac{\omega'_l}{\omega_l} = \frac{\cos(\beta)}{1 - \sin^2(\beta)\sin^2(\theta_l)} \quad (۵-۱۰)$$

در ادامه بارگذاری اثرات ناشی از عدم هم محوری بین بار و موتور توسط سیستم دینامومتر بر موتور تحت تست مورد آزمایش قرار می گیرد. شکل ۵-۵۶، سرعت موتور تحت تست، جریان مقاومت D.B گشتاور دینامومتر و جریان استاتور موتور تحت تست را تحت شرایط اعمال گشتاور پالسی نشان می دهد. در این سناریو از لحظه T1، عدم هم محوری به ازای پارامترهای $\beta = 25^\circ$ و $\theta_l = 10^\circ$ به گشتاور بار ثابت اضافه می گردد. بطوریکه ملاحظه می شود بعد از لحظه T1، نوسانات گشتاور بار ناشی از عدم هم محوری بار در گشتاور دینامومتر قابل مشاهده می باشد. در این حالت دامنه نوسانات وابسته به میزان باگذاری می باشد و با افزایش دامنه گشتاور بار، دامنه نوسانات نیز افزایش می یابد.

```

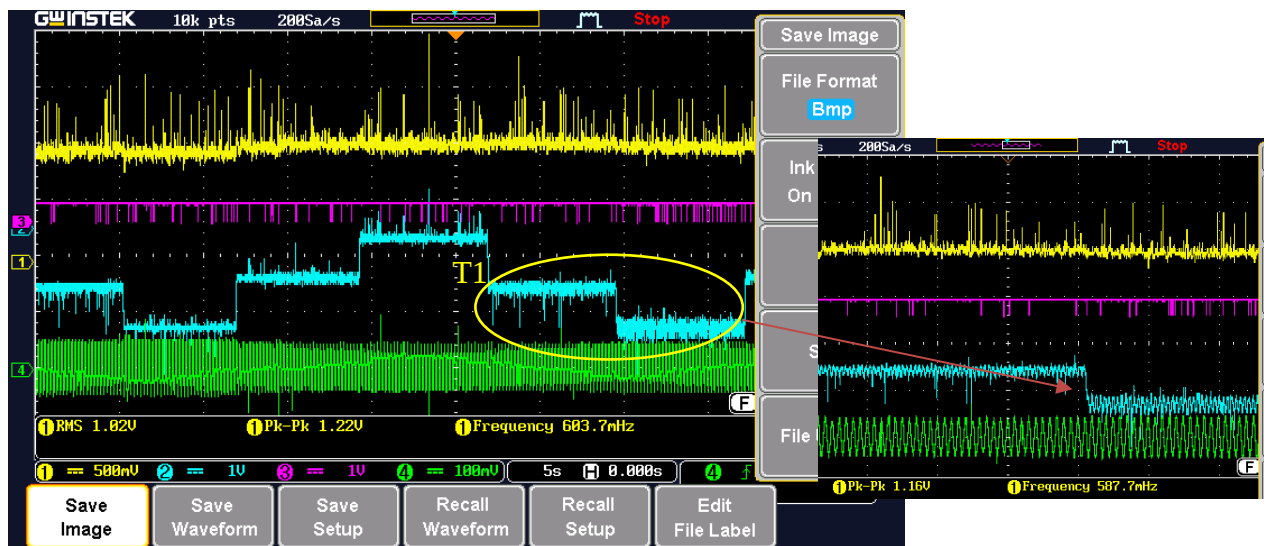
//*****Misalignment load.....
beta_ma=60*3.1415926535897932384626433832795/180;
theta_ma=theta_r-(3*3.1415926535897932384626433832795/180);
Wref2=Wref2*(1-((sin(beta_ma))*(sin(beta_ma))))*(sin(theta_ma))*(sin(theta_ma)))/cos(beta_ma);

//*****Cam Mechanism*****
dc_ma=.01;
Kf_ma=50;
p_ma=5;
mc_ma=2;
T_ma=-200*(dc_ma*(Kf_ma*dc_ma+p_ma)*sin(theta_r)+0.5*(dc_ma*dc_ma)*(mc_ma*Wr5*Wr5-kf_ma)*sin(2*theta_r));

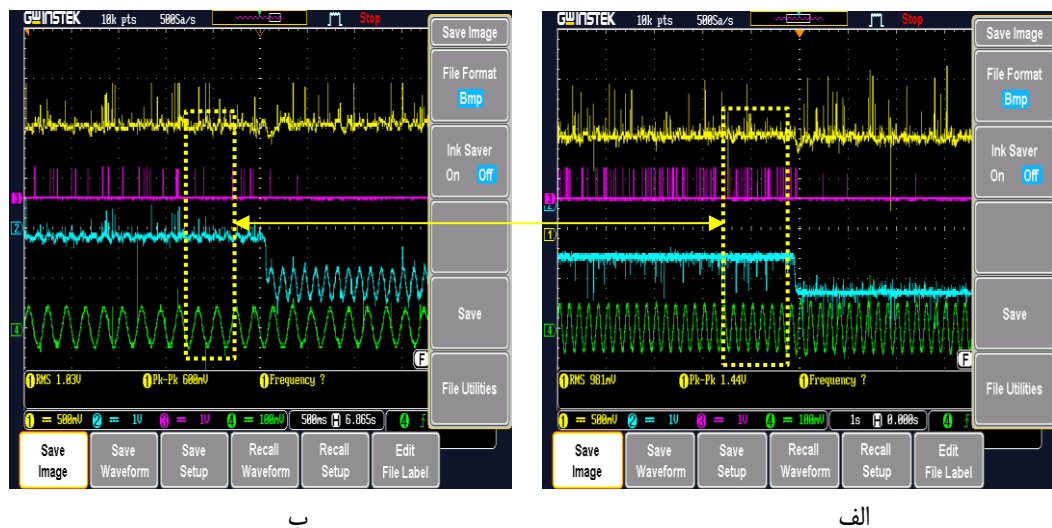
//*****Crankshaft Mechanisms*****
term1=((rcs/lcr)*sin(2*theta_r))/sqr(1-(((rcs/lcr)*sin(theta_r*2))^2))
JGcs_tetha=mcs*ra*rb
term2=(rcs/(2*lcr))*sin(2*theta_r)-((dcs/lcr)*cos(theta_r));
term3=sqr(1-(((rcs*sin(theta_r)/lcr)-(dcs/lcr))^2));
f_tetha=sin(theta_r)+(term2)/(term3);
Jcs_tetha=JGcs_tetha+(mcr*lb*(rcs^2)/lcr)+((mcr*la/lcr)+mp)*(rcs^2)*f_tetha
T_Crank=(J_cs+Jcs_tetha)*(dw/dt)+Fn*rcs(sin(theta_r)+term1)

```

شکل ۵-۵۵: محاسبات مولفه های گشتاور بار ناشی از عدم هم محوری در DSP



شکل ۵۶-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار عدم هم محوری به ازای پارامترهای $\theta_l = 10^\circ$ و $\beta = 25^\circ$

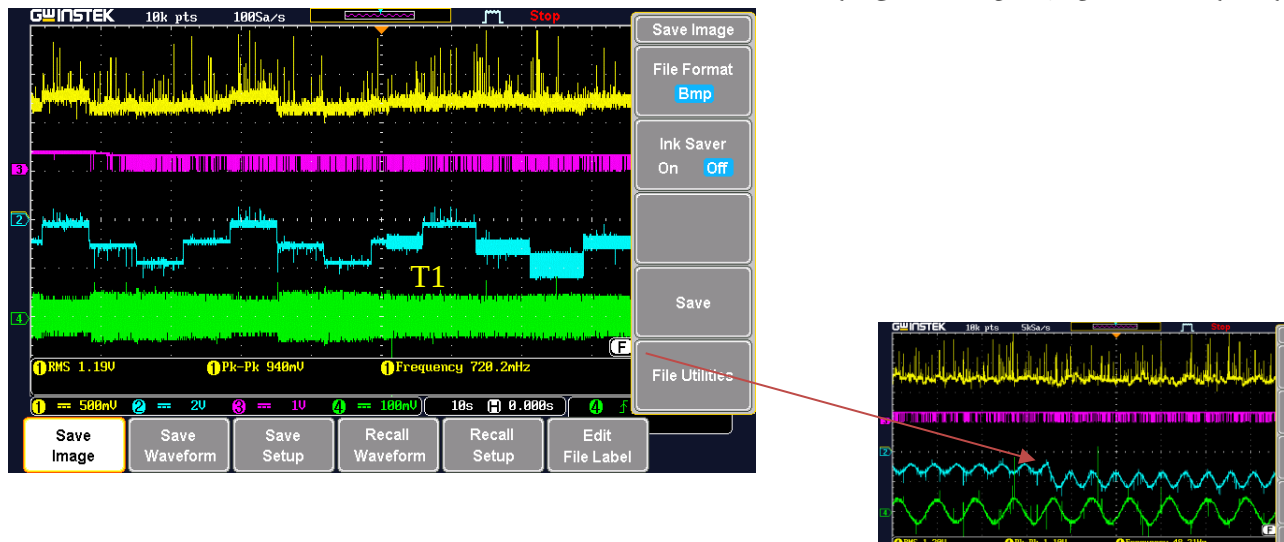


شکل ۵۷-۵: تاثیر تاثیر نوسانات گشتاور بار در حالت گذرا و دائم. سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای پارامترهای $\theta_l = 0^\circ$ و $\beta = 0^\circ$ (الف) و $\theta_l = 10^\circ$ و $\beta = 25^\circ$ (ب).

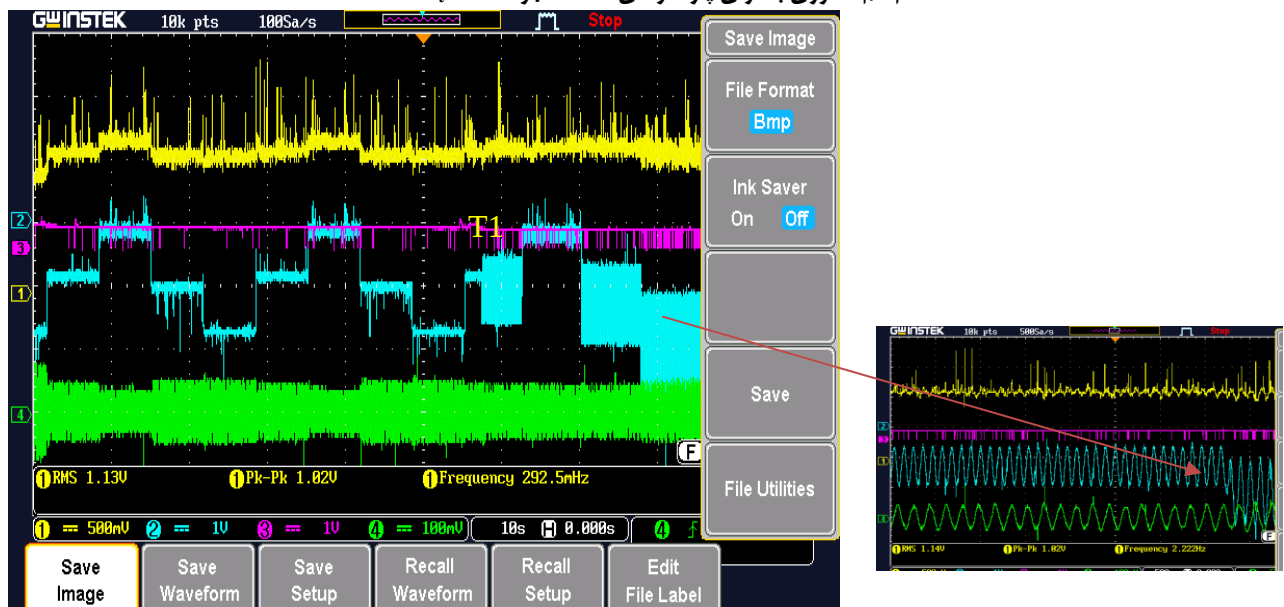
شکل های ۵-۵۷ و ب مقایسه بارگذاری بر روی موتور تحت تست بدون وجود عدم هم محوری (الف) و با وجود عدم هم محوری $\beta = 25^\circ$ (ب) را نمایش می دهد. همانگونه که مشاهده می شود علاوه بر تاثیر عدم هم محوری در شرایط کار دائم، در حالت گذاری تغییر گشتاور بار تاثیر نوسانات گشتاور بار ناشی از عدم هم محوری بر رفتار گذرای سیستم موتور تحت تست کاملاً مشهود می باشد.

یکی از قابلیت‌های ویژه سیستم دینامومتر پیاده سازی شده این است که کاربر می تواند پارامترهای گشتاور نوسانی ناشی از عدم هم محوری را به دلخواه تغییر داده و تاثیر آن را بر روی عملکرد سیستم موتور و درایو تحت تست مورد آزمایش قرار دهد. برای نمونه نتایج تست های آزمایشگاهی در شرایط عدم هم محوری های شدیدتر بین محور موتور با بار، به ازای مقادیر $\beta = 45^\circ$ و $\beta = 60^\circ$ از لحظه T1 به ترتیب در شکل های ۵-۵۸ و ۵-۵۹ نمایش داده شده است. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد با افزایش زاویه نا هم

محوری ضربانه‌های نوسان در گشتاور بار شدید تر می شود بطوریکه تاثیر این اغتشاشات فرکانس بالا بر روی سرعت موتور تحت تست بصورت نوسانات با همین فرکانس مشاهده می شود.

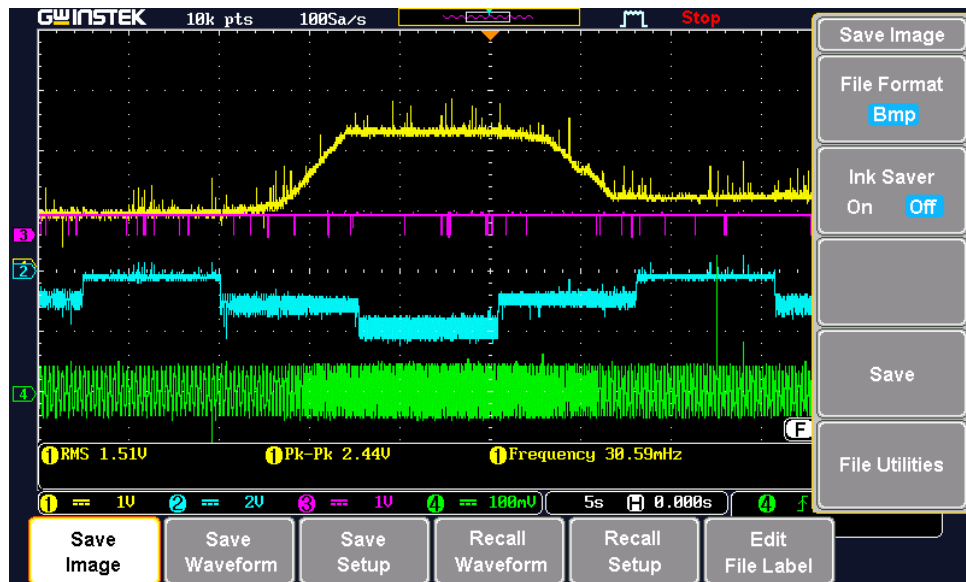


شکل ۵-۸: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار عدم هم محوری به ازای پارامترهای $\theta_l = 15^\circ$ و $\beta = 45$



شکل ۵-۹: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای به ازای گشتاور بار عدم هم محوری به ازای پارامترهای $\theta_l = 15^\circ$ و $\beta = 60$

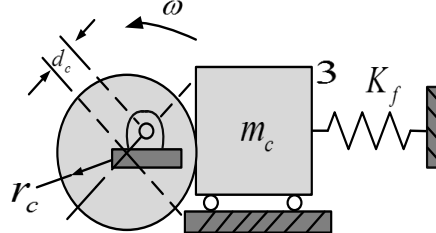
بررسی نتایج آزمایشگاهی تایید می کند سیستم دینامومتر پیاده سازی شده قادر به بارگذاری سناریو های مختلف از عدم هم محوری بین بار و موتور تحت تست می باشد. برای نمونه شکل ۵-۶ نتایج تست را در شرایط وجود عدم هم محوری و همزمان تغییر سرعت موتور تحت تست را نمایش می دهد. همانگونه که ملاحظه میشود در این حالت فرکانس نوسانات نیز تحت تاثیر سرعت موتور می باشد. به این ترتیب سیستم دینامومتری پیاده سازی شده انعطاف پذیری لازم برای بارگذاری ترکیب های مختلف از مولفه های بارهای مختلف در سرعت های مختلف را دارا می باشد.



شکل ۶-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار عدم هم محوری به ازای پارامترهای $\beta = 25^\circ$ و $\theta_l = 10^\circ$ با تغییر سرعت موتور تحت تست

۴-۴-۵- دینامومتری بار نوع مکانیسم بادامک

شکل ۵-۸، ساختار کلی بار مکانیکی نوع cam mechanism را نمایش می دهد. همانگونه که قبلاً بررسی گردی در این حالت رابطه گشتاور بار با مشخصات هندسی سیستم به صورت زیر می باشد:

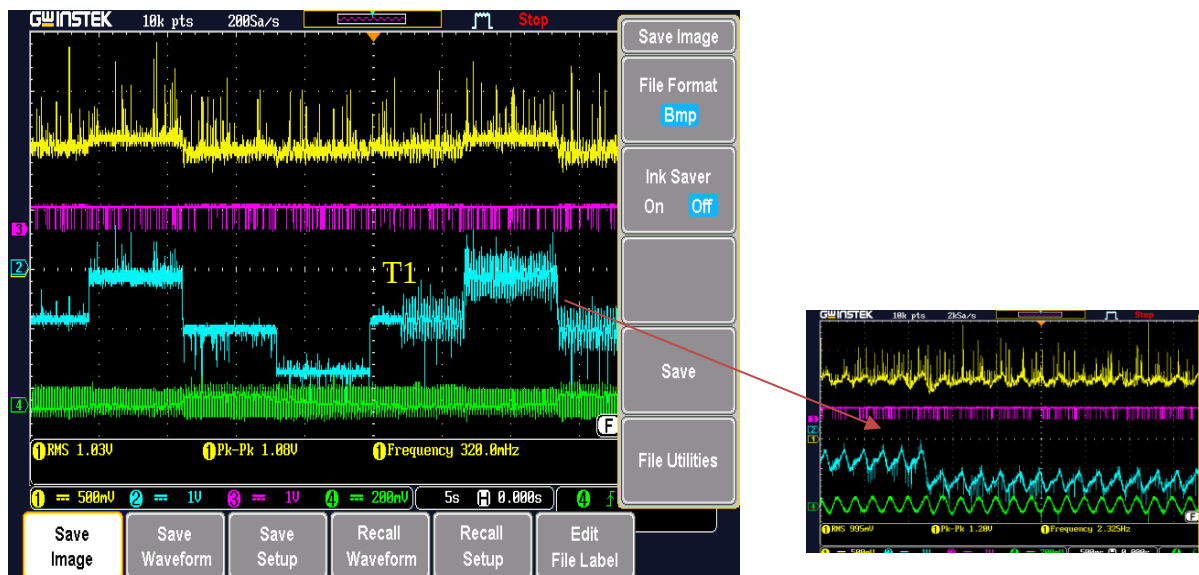


شکل ۶-۵: شماتیک مکانیزم بادامک

روابط بخش ۱-۸-۲

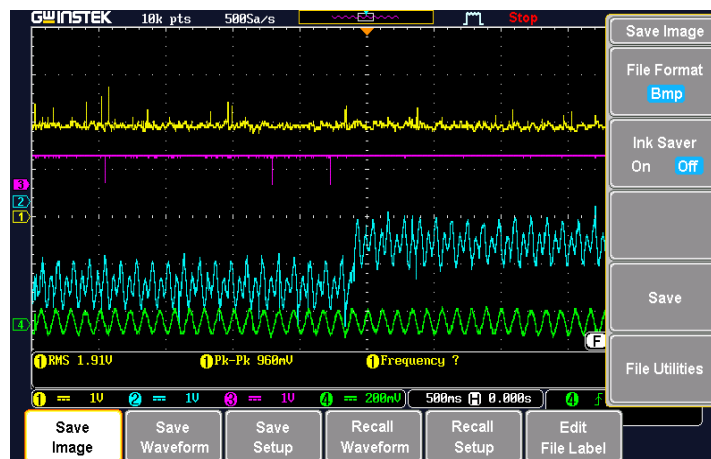
$$\begin{aligned}
 T_l &= F_c r_c \sin(\theta) \\
 &= d_c (K_f d_c + P) \sin(\theta) \\
 &\quad + \frac{1}{2} d_c^2 (m_c \omega^2 - K_f) \sin(2\theta)
 \end{aligned} \quad (5-11)$$

همانگونه که ملاحظه می گردد برای این نوع از بارهای مکانیکی، فرکانس نوسانات به سرعت نیز وابسته است. شکل ۵-۶۲ سرعت موتور تحت تست، جریان مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر و جریان استاتور موتور تحت تست را تحت تاثیر این مولفه گشتاور بار نمایش می دهد. برنامه ریزی سیستم دینامومتر به گونه ای انجام گرفته تا مولفه گشتاور بار بادامک از لحظه T1 به موتور تحت تست اعمال شده است. همانگونه که ملاحظه می شود تا قبل از این لحظه گشتاور ترمزی دینامومتر یک گشتاور ثابت و پله ای بوده که به محض اضافه شدن اثرات غیر خطی مکانیزم بادامک، نوسانات گشتاور مطابق رابطه ۵-۱۱ به گشتاور بار اضافه می گردد. در این شرایط بر اثر بارگذاری این نوسانات گشتاور بطوریکه در قسمت بزرگمایی شده نشان داده شده سرعت موتور تحت تاثیر این نوسانات گشتاور دچار اغتشاش می گردد.

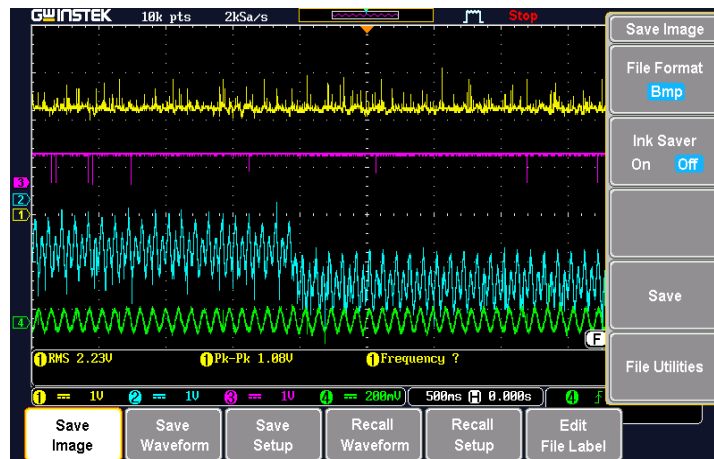


شکل ۶۲-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک با پارمترهای $dc=0.03m$, $k_f=1500$, $mc=4$, $pn=4n.m$

همانگونه که در رابطه ۵-۱۱ نشان داده شده فرکانس نوسانات ناشی از مکانیزم بادامک وابسته به سرعت رتور می باشد. این ویژگی در شکل های ۵-۶۳ و ب با بررسی نتایج تست در دو سرعت مختلف نمایش داده شده است. با افزایش سرعت موتور تحت تست، فرکانس نوسانات گشتاور تولیدی دینامومتر نیز افزایش می یابد و می توان تاثیر آن را بر روی رفتار موتور و درایو تحت تست بصورت آزمایشگاهی مطالعه نمود.



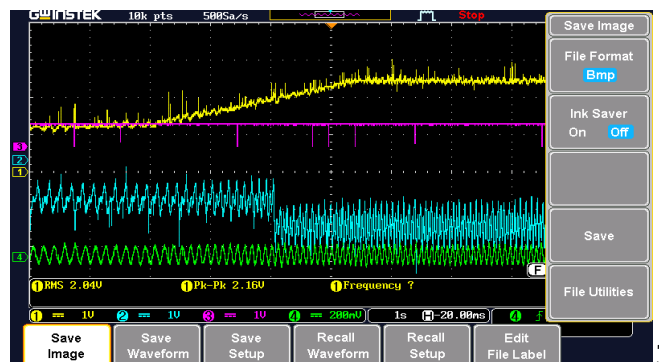
الف



ب

شکل ۶۳-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک با پارمترهای $dc=0.03m$, $k_f=1500$, $mc=4$, $pn=4n.m$ سرعت 600rpm (الف) و 1000rpm (ب)

در شکل ۶۴-۵ بطور همزمان تغییرات شیب سرعت موتور تحت تست و گشتاور بار پله ایی به موتور تحت تست اعمال شده که در این حالت سیستم دینامومتر علاوه بر تولید گشتاور بار ترمزی ثابت، گشتاور بار غیر خطی ناشی از مکانیزم بادامک را به موتور تحت تست اعمال می کند. طبق رابطه ۵-۱۱، مولفه گشتاور نوسانی تولیدی ناشی از مکانیزم بادامک مجموع مولفه های $\sin(\theta)$ و $\sin(2\theta)$ در گشتاور تولیدی دینامومتر ظاهر می شود. طیف فرکانسی گشتاور تولیدی دینامومتر به ازای مقادیر مختلف سرعت موتور تحت تست از طریق جعبه ابزار FFT دستگاه اسیلوسکوپ اندازه گیری و در شکل های ۵-۶۵ الف تا ج نمایش داده شده است.

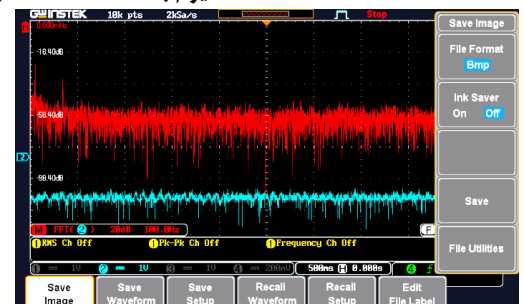


3

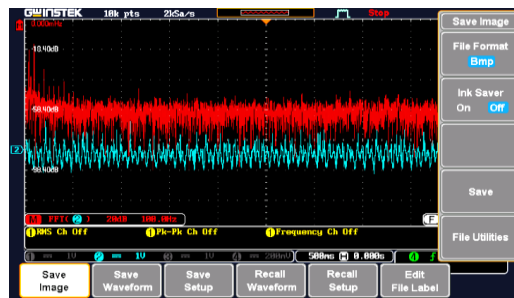
شکل ۶۴-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک $dc=0.03m$, $k_f=1500$, $mc=4$, $pn=4n.m$ برای حالت شیب



(ب)



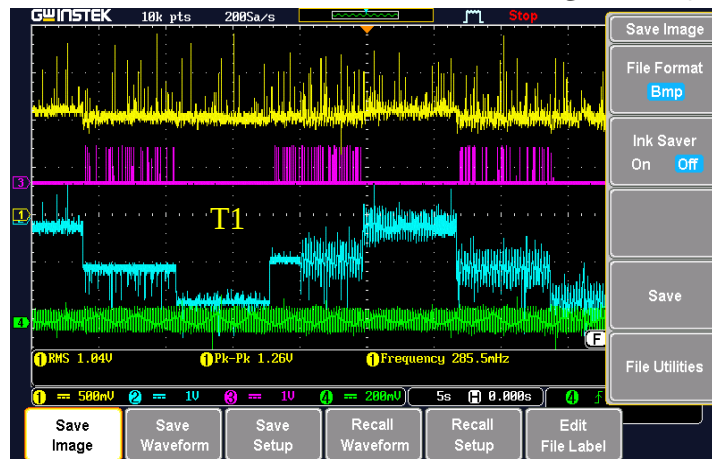
(الف)



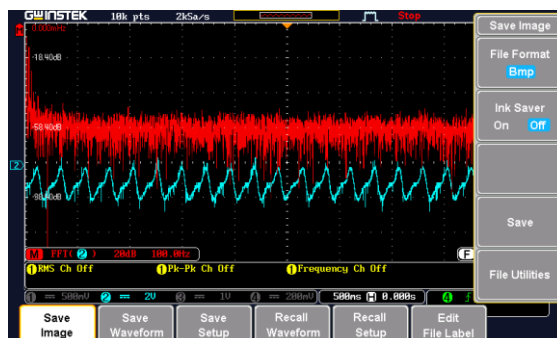
(ج)

شکل ۶۵- گشتاور تولیدی دینامومتر و طیف فرکانسی آن به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک به ازای $dc=0.03m$, $kf=1500$, $mc=4$, pn برای سرعت‌های 200rpm (الف)، 300rpm (الف) و 450rpm (الف) $=4n.m$

یکی از قابلیت‌های سیستم دینامومتر پیاده سازی شده، تست آزمایشگاهی پارامترهای تعیین کننده مشخصه گشتاور بار بر روی موتور تحت تست می باشد. برای نمونه در شکل ۶۶-۵ الف نتایج تست پس از تغییر پارامتر PN از مقدار اولیه ۴ به ۶ نیوتن . متر را نمایش می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد در این حالت با افزایش این پارامتر، دامنه نوسانات گشتاور مکانیزم بادامک افزایش می یابد. شکل ۶۶-۵ ب گشتاور نوسانی بزرگنمایی شده و طیف فرکانسی آن را نمایش می دهد. همچنین در شکل ۶۷-۵ این تست به ازای $PN=8$ و سرعت بالاتر را نمایش می دهد. در این حالت با توجه به رابطه ۵-۱۱، دامنه نوسانات ناشی از مکانیزم بادامک بسیار شدید بوده بطوریکه سرعت موتور تحت تست و جریان استاتور موتور تحت تست را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد. دامنه این نوسانات در طیف فرکانسی گشتاور نیز قابل ملاحظه می باشد.

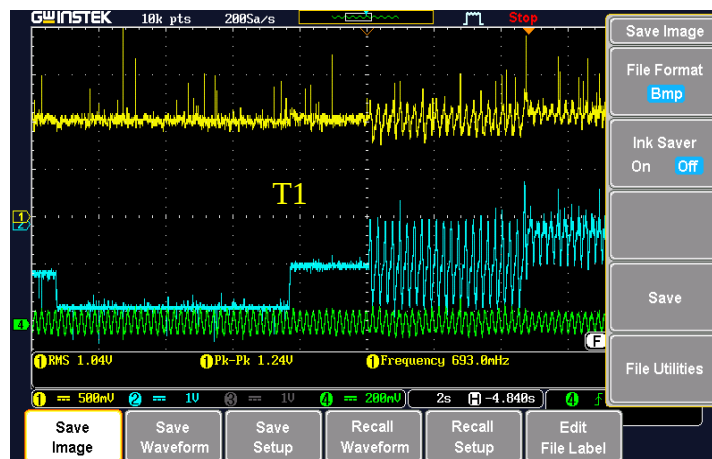


الف

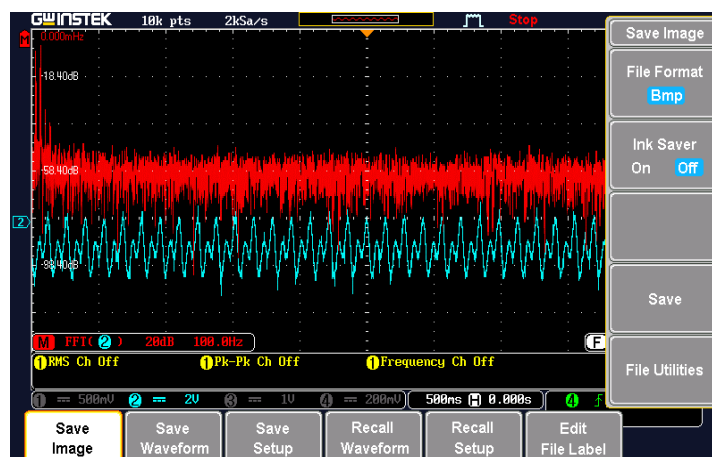


ب

شکل ۶۶-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز Break، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار مکانیزم بادامک با پارامترهای $dc=0.03$, $kf=1500$, $mc=4$, $p=6n.m$

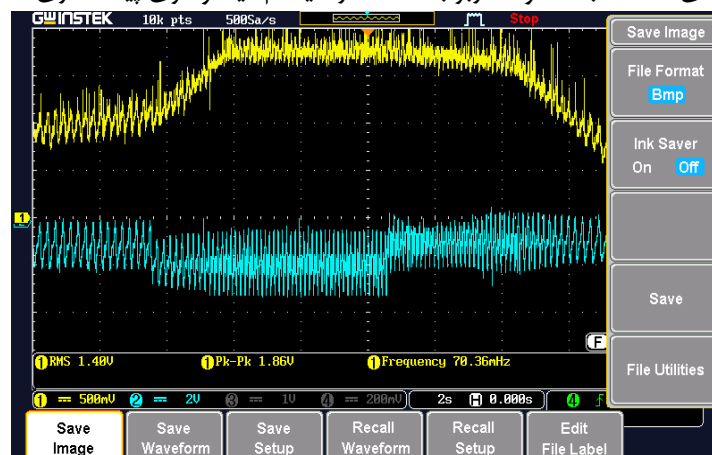


الف



ب

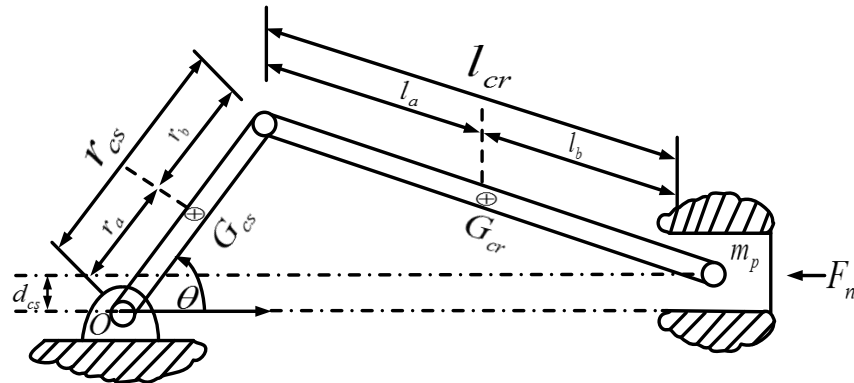
شکل ۶۷-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز Break، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار cam mechanism به ازای پارامترهای $dc=0.03$, $k_f=1500$, $mc=4$, $p=8n.m$ ، تغییرات پله ای گشتاور بار و تغییر سرعت موتور تحت تست بطور همزمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی نتایج نشان می دهد با استفاده از سیستم دینامومتری پیاده سازی شده امکان بررسی رفتار موتور و درایو تحت تست با تغییر همزمان هر یک از پارامترهای فیزیکی و هندسی بار و همچنین سرعت موتور تحت تست فراهم می باشد. به این ترتیب سناریوهای مختلف به دلخواه کاربر با استفاده از سیستم دینامومتری پیاده سازی شده قابل اجرا می باشد.



شکل ۶۸-۵: کسرعت موتور تحت تست و گشتاور تولیدی دینامومتر برای مکانیزم بادامک به ازای پارامترهای $dc=0.03$ ، $kf=1500$ ، $mc=4$ ، $p=8n.m$ تحت تاثیر تغییر سرعت موتور تحت تست

۵-۴-۵- دینامومتری بار نوع میل لنگ

شکل ۶۹-۵ ساختار کلی بار مکانیکی نوع میل لنگ را نمایش می دهد. کمپرسورهای مجهز به سیستم درایو یکی از مواردی می باشد که بارگذاری روی موتور و سیستم درایو مطابق با مکانیزم میل لنگ (crank shaft) مطابقت دارد.



شکل ۶۹-۵: نمایش هندسی مکانیزم میل لنگ

بطوریکه در فصل اول (بخش ۱-۸-۳) بررسی گردید در این نوع از بارها رابطه گشتاور بار با سرعت، موقعیت، اینرسی و سایر پارامترهای هندسی سیستم بر اساس روابط زیر مدلسازی می شود:

$$T_m = (J + J_{cs}(\theta))\dot{\omega} + F_n r_{cs} \left(\sin(\theta) + \frac{\frac{r_{cs}}{l_{cr}} \sin(2\theta)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r_{cs}}{l_{cr}} \sin(\theta)\right)^2}} \right) \quad (5-12)$$

$$J_{cs}(\theta) = J_{Gcs} + \frac{m_{cr} l_b}{l_{cr}} r_{cs}^2 + \left(\frac{m_{cr} l_a}{l_{cr}} + m_p \right) r_{cs}^2 f(\theta) \quad (5-13)$$

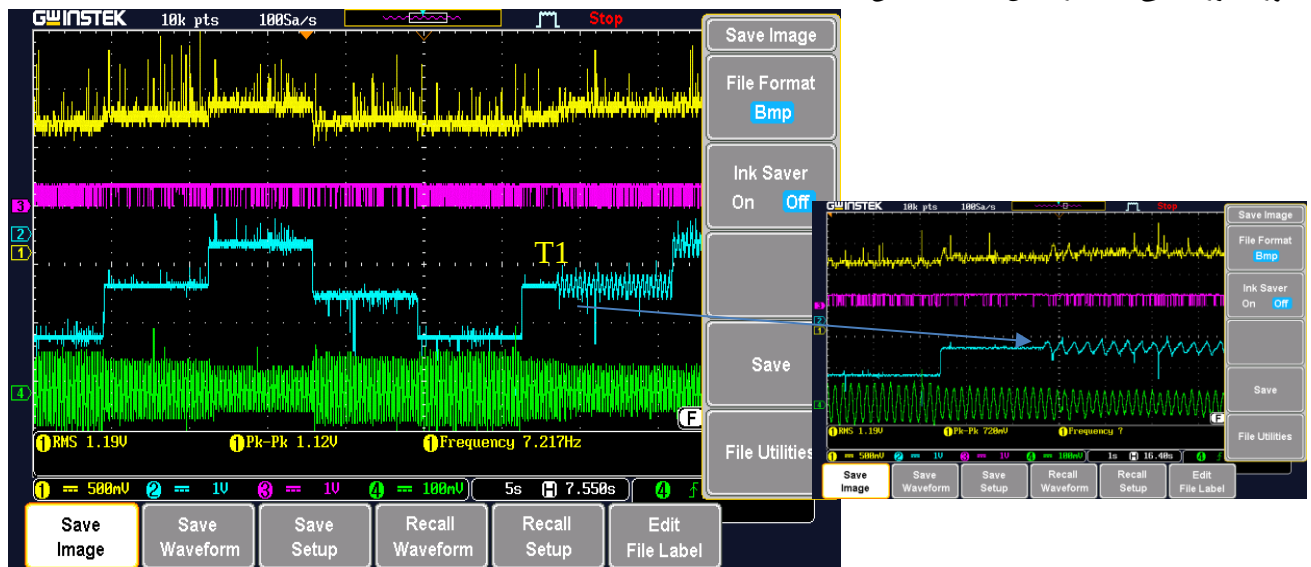
$$f(\theta) = \left(\sin(\theta) + \frac{\frac{r_{cs}}{2l_{cr}} \sin(2\theta) - \frac{d_{cs}}{l_{cr}} \cos(\theta)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r_{cs}}{l_{cr}} \sin(\theta) - \frac{d_{cs}}{l_{cr}}\right)^2}} \right)^2 \quad (5-14)$$

توضیحات تکمیلی این نوع از بارها به تفصیل در بخش ۱-۸-۳ آورده شده است. شکل ۷۰-۵، سرعت موتور تحت تست، جریان مقاومت ترمز، گشتاور ترمزی دینامومتر و جریان استاتور موتور تحت تست را قبل و بعد از اعمال اثرات غیر خطی ناشی از گشتاور بار میل لنگ را نمایش می دهد. در این سناریو مولفه گشتاور نوسانی ناشی از اعمال بار میل لنگ از لحظه T1 به بعد به موتور تحت تست اعمال می گردد. پارامترهای هندسی بار میل لنگ در این آزمایش در جدول ۵-۵ ارائه شده است.

جدول ۵-۵: پارامترهای گشتاور بار نوع میل لنگ

Parameter	Symbol	Value
The crank length	r_{cs}	10 cm
The connecting rod length	l_{cr}	30 cm
The distance between the center of piston and the point "O"	d_{cs}	2 cm
The connecting rod mass	m_{cr}	3 Kg
The piston mass	m_p	1 Kg
The normal force	F_n	200 N

همانگونه که در نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده (قسمت بزرگنمایی شده شکل ۵-۷)، سیستم کنترل گشتاور دینامومتر علاوه بر گشتاور استاتیکی بار، از لحظه T1 به بعد مقدار گشتاور نوسانی ناشی از رفتار غیر خطی بار میل لنگ را تولید و مجموع این دو مولفه را به موتور تحت تست اعمال می‌کند. تاثیر مولفه های نوسانی ناشی از گشتاور بار میل لنگ بر پاسخ سرعت و جریان استاتور موتور تحت تست قابل ملاحظه می باشد. همچنین شکل ۵-۷۱ رفتار سیستم دینامومتر در شرایط تغییر سرعت موتور تحت تست و تحت شرایط اعمال گشتاور ترمزی استاتیکی 5N.M بعلاوه گشتاور ناشی از بار میل لنگ را نمایش می دهد. همانگونه که در روابط ۵-۱۲ تا ۵-۱۴ نشان داده شده ، گشتاور غیر خطی به موقعیت و مشتق سرعت وابسته است بطوریکه با تغییر سرعت موتور ، فرکانس نوسانات دامنه آن تحت تاثیر سرعت موتور تغییر می کند. تاثیر این نوسانات بر پاسخ سرعت در حالت گذار و حالت کار دائم موتور تحت تست بصورت بزرگنمایی شده در شکل ۵-۷۱ نمایش داده شده است.

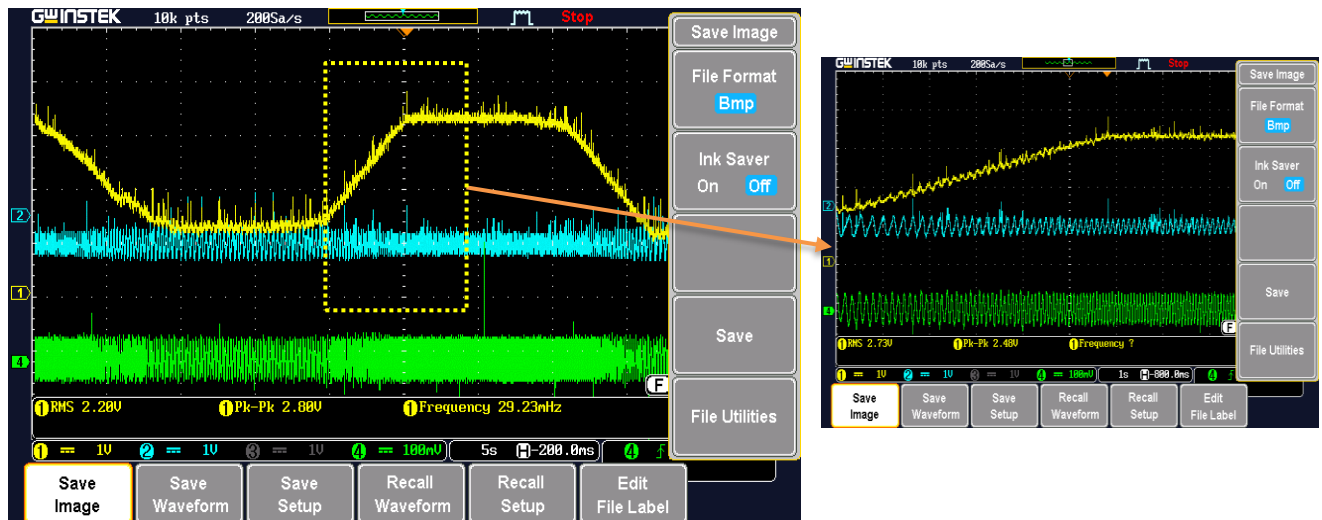


شکل ۵-۷۰: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز ، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار میل لنگ به ازای پارامترهای $f_n=100$

بررسی نتایج آزمایشگاهی به ازای مقادیر مختلف پارامترهای بار میل لنگ نشان می دهد سیستم دینامومتر پیاده سازی شده قابلیت باز تولید رفتارهای غیر خطی انواع بارهای مکانیکی را دارا می باشد. در این حالت کاربر قادر است با تغییر هر یک از پارامترهای هندسی مشخصه بار، تاثیر آن را بر موتور و درایو تحت تست بصورت آزمایشگاهی مورد آنالیز قرار دهد.

۵-۵- نتیجه گیری

در این فصل از گزارش، ابتدا مراحل ساخت زیر بخش های مختلف سیستم دینامومتر مورد بررسی قرار گرفت. پس از ساخت اجزاء سیستم دینامومتر و انجام تست های اولیه، کلیه ماژول ها در تابلوی دستگاه نصب و یکپارچه سازی گردید. در ادامه الگوریتم های کنترلی در محیط کدنویسی DSP پیاده سازی شد و با انجام تست های متعدد، پارامترهای کنترلی تنظیم گردید. در ادامه گزارش این فصل به تست های عملکردی سیستم دینامومتر پرداخته شد. این تست ها در سه دسته مختلف سناریو بندی گردید که در دسته اول و دوم به ترتیب عملکرد سیستم دینامومتر در مد های کنترل گشتاور و سرعت مورد آزمون قرار گرفت. نتایج بدست آمده از تست های آزمایشگاهی نشان می دهد سیستم درایو دینامومتر در هر دو مد کنترل گشتاور و سرعت دارای عملکرد مطلوبی بوده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد برای کاربرد دینامومتر روش کنترل گشتاور با توجه به پهنای باند بالاتر برای این پروژه مناسب تر بوده است.



شکل ۷۱-۵: سرعت موتور تحت تست، جریان تزریقی به مقاومت ترمز، گشتاور دینامومتر، جریان موتور تحت تست به ازای گشتاور بار میل لنگ به ازای پارامترهای $f_n=100$ و تغییر سرعت

در سناریوهای بعدی با اتصال یک سیستم موتور درایو تحت تست به سیستم دینامومتر پیاده سازی شده، انواع مختلف بارهای استاتیکی، دینامیکی و مولفه های غیر خطی و فرکانس بالای بارهای متداول صنعتی بصورت آزمایشگاهی پیاده سازی و در هر مورد پاسخ سیستم دینامومتر و سیستم موتور-درایو تحت تست مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. بررسی نتایج بدست آمده نشان می دهد سیستم دینامومتر پیاده سازی شده قادر به مدلسازی طیف وسیعی از مشخصه های بارهای صنعتی را بصورت آزمایشگاهی دارد. با استفاده از سیستم دینامومتری پیاده سازی شده کاربر قادر خواهد بود ترکیب های مختلفی از مولفه های مختلف انواع بارهای صنعتی (استاتیکی، دینامیکی و مولفه های غیر خطی) را بصورت برنامه ریزی شده به موتور تحت تست اعمال و رفتار سیستم موتور-درایو تحت تست را مورد آنالیز قرار دهد.

فصل ۶- رابط گرافیکی دستگاه میز تست مبتنی بر نرم افزار **LABVIEW**

۱-۶- مقدمه

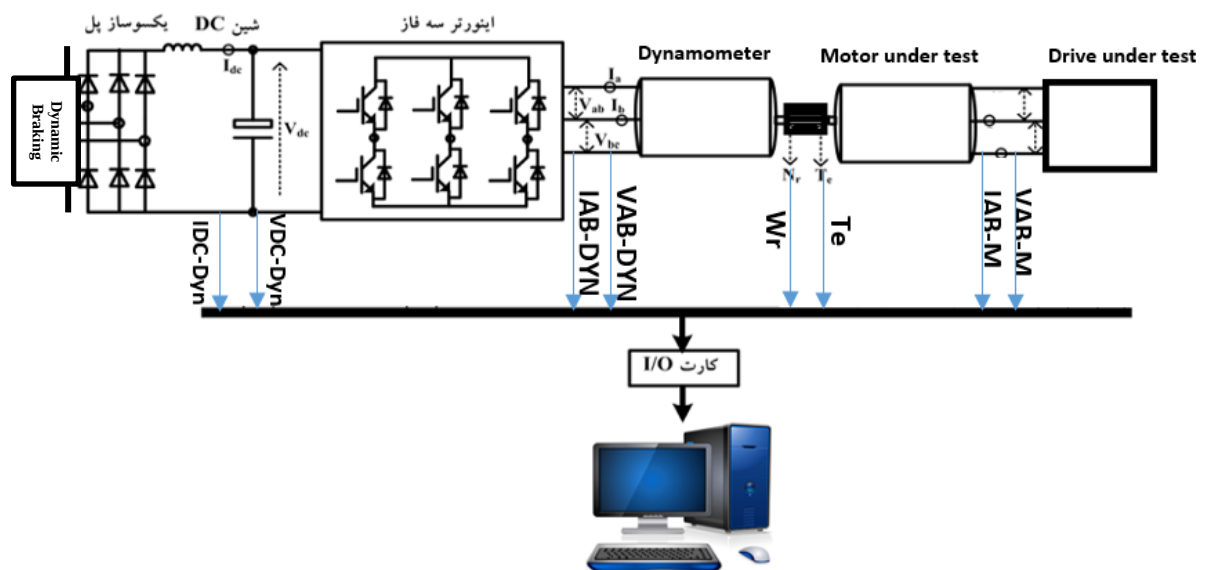
به منظور پایش و اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی سیستم دینامومتر و موتور تحت تست یک بسته نرم‌افزاری گرافیکی در محیط Labview طراحی و پیاده‌سازی شده است. علاوه بر این مدیریت سناریوهای تست، حفاظت دستگاه، پردازش داده‌ها و تهیه گزارش نهایی در این محیط انجام می‌گردد. در این نرم‌افزار به منظور مقداردهی اولیه و پردازش داده‌های در حوزه زمان و فرکانس و آنالیز توان و انرژی، فرم‌های مجزایی در نظر گرفته شده است.

۲-۶- معرفی قابلیت‌های نرم‌افزار Labview دستگاه دینامومتر

در این بخش مشخصات نرم‌افزار و محیط گرافیکی طراحی شده معرفی می‌شود. همانگونه که در فصل اول (بررسی گردید در این دستگاه از یک کارت I/O نوع Advantech PCI-1712 با نرخ نمونه برداری 1M/sec با رزولوشن ۱۲ بیت استفاده شده است. پس از پیاده‌سازی نرم‌افزار گرافیکی در محیط Labview، خروجی سنسورها به کارت I/O متصل شده و پس از گردآوری داده‌ها نتایج بصورت آنالاین و آفلاین نمایش داده می‌شود. در ادامه قابلیت‌های هر یک از زیربخش‌های نرم‌افزار پیاده‌سازی شده معرفی می‌گردد.

۱-۲-۶- پنجره تنظیمات و مقداردهی اولیه (Configuration and Initialization)

در این بخش از نرم‌افزار، مقادیر آستانه پارامترهای الکتریکی و مکانیکی دستگاه برای حفاظت از سیستم دینامومتر و ضرایب هم‌سان‌سازی سیگنال‌های ورودی اعمال می‌شود. یکی از قابلیت‌های این بخش از نرم‌افزار امکان بارگذاری پروفایل گشتاور بار دلخواه به عنوان مرجع دستگاه دینامومتر می‌باشد. شکل ۶-۱ ساختار کلی میز تست دینامومتری و سیگنال‌های نمونه برداری شده را نمایش می‌دهد. لیست سیگنال‌های نمونه برداری شده جهت نمونه برداری در نرم‌افزار Labview در جدول ۶-۱ آورده شده است. شکل ۶-۲ محیط گرافیکی فرم مربوط به تنظیمات و مقداردهی اولیه را نمایش می‌دهد. سمت راست این فرم مقادیر مجاز کمیت‌ها برای حفاظت از عملکرد دستگاه در شرایط بروز خطا توسط کاربر تنظیم می‌شود. همچنین مقادیر a و b به ترتیب ضرایب هم‌سان‌سازی و افست‌گیری سیگنال‌های نمونه برداری شده می‌باشد که می‌تواند توسط کاربر ویرایش گردد. از آنجاییکه سیگنال‌های آنالوگ ورودی در حداکثر رنج بین مقادیر ± 5 ولت محدود می‌گردند، این ضرایب علاوه بر کالیبراسیون به منظور تبدیل سیگنال آنالوگ و ورودی به مقادیر واقعی کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی می‌باشد.

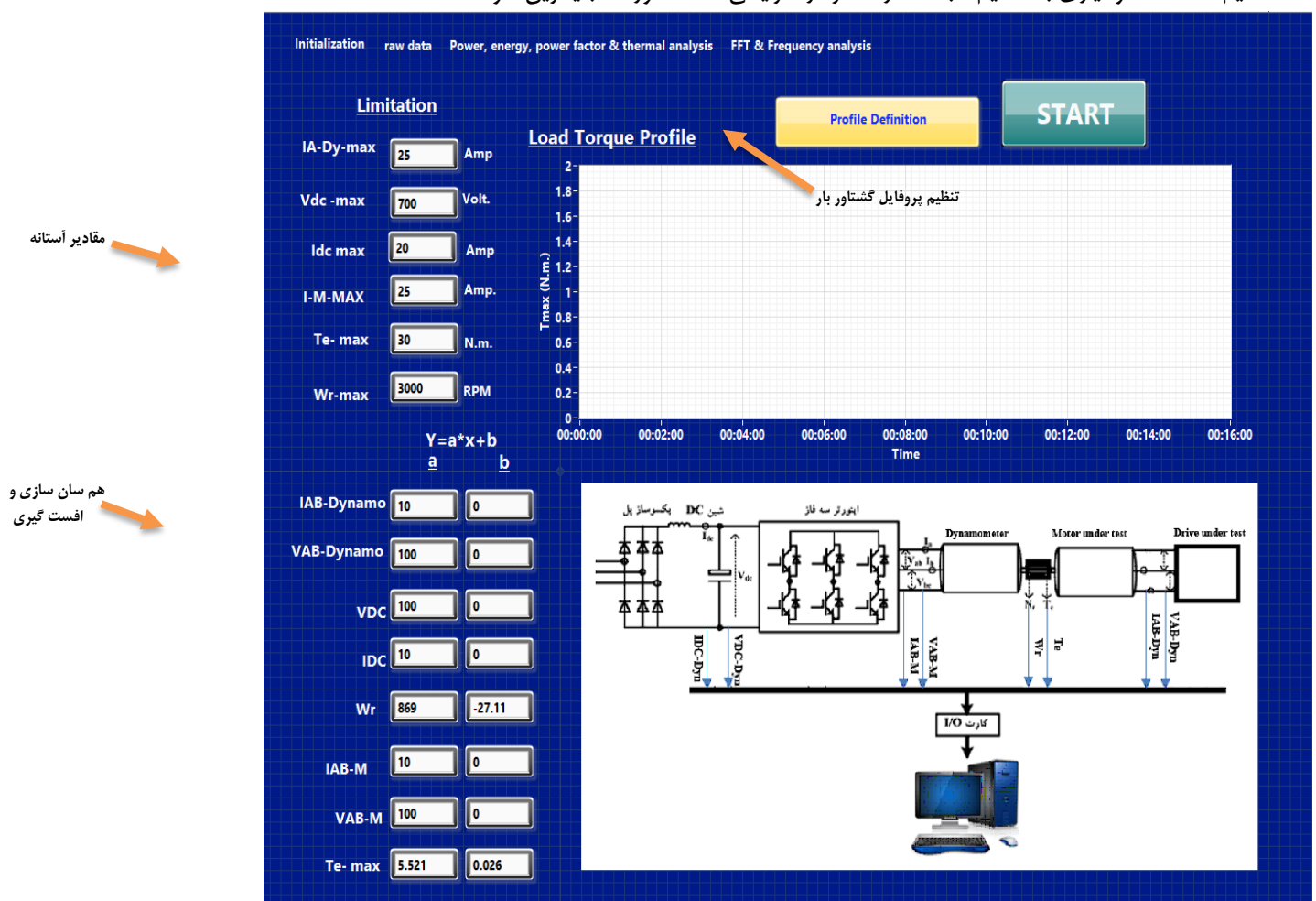


شکل ۶-۱: ساختار کلی میز تست و ارتباط آن با نرم‌افزار Labview

جدول ۱-۶: لیست پارامترهای ورودی کارت I/O

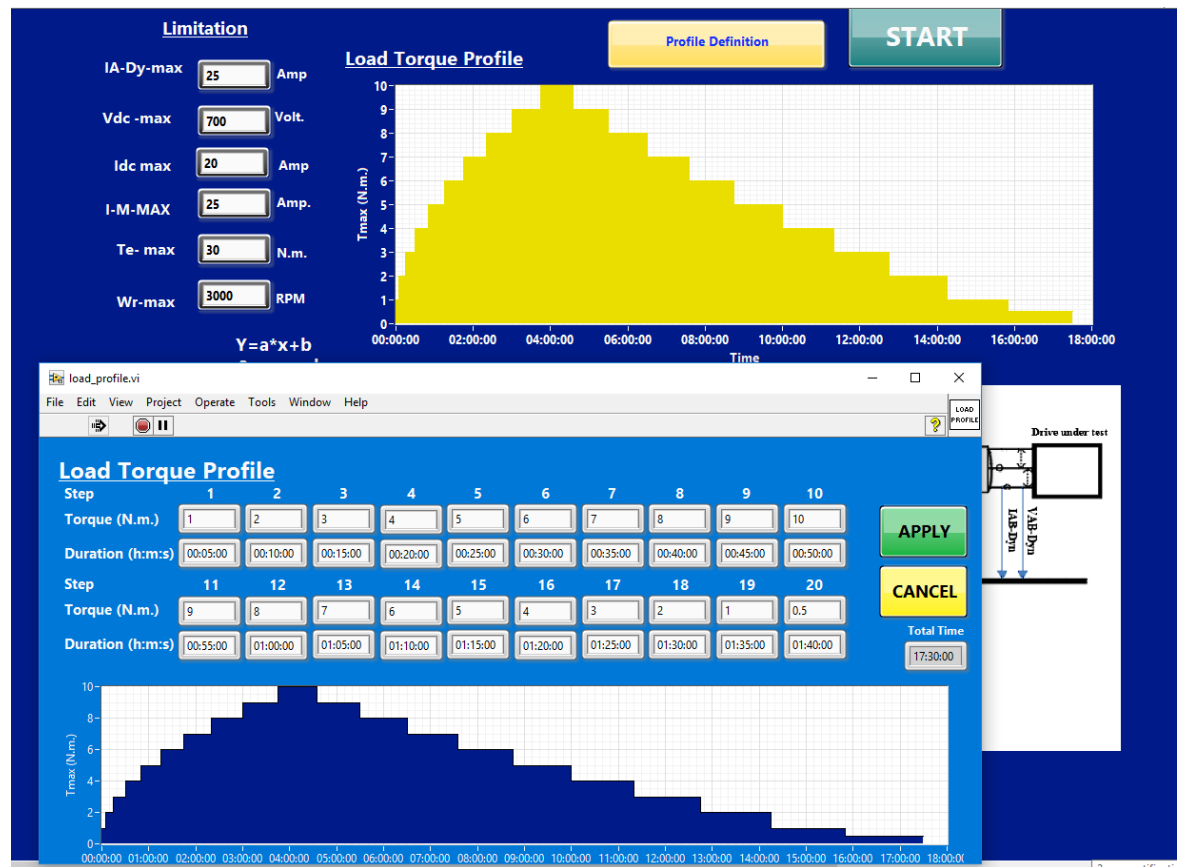
شماره آنالوگ ورودی	نام متغیر	توضیح
AN0	IAB-Dynamo	جریان فاز a موتور دینامومتر
AN1	VAB-Dynamo	ولتاژ خط vab موتور دینامومتر
AN2	VDC	ولتاژ شین DC درایو دینامومتر
AN3	IDC	جریان شین DC درایو دینامومتر
AN4	Wr	سرعت روی محور
AN5	IAB-M	جریان فاز a موتور دینامومتر
AN6	VAB-M	ولتاژ خط vab موتور دینامومتر
AN7	Te	گشتاور دینامومتر

برای نمونه برای سنسورهای جریان این ضریب مقدار ۱۰ بدست آمده است، به این معنی که سیگنال آنالوگ خوانده شده توسط کارت I/O با ضرب در عدد ۱۰ تبدیل به کمیت جریان واقعی می شود. علاوه بر این در صورت نیاز کاربر می تواند از طریق مقدار دهی پارامتر 'b' نسبت به افست گیری هر یک از سنسورها اقدام کند. البته این مقادیر برای سنسورهای مورد استفاده در این پروژه یکبار تنظیم شده است و نیازی به تنظیم مجدد ندارد مگر در شرایطی که سنسور ها جایگزین شوند.



شکل ۲-۶: فرم تنظیمات و مقدار دهی اولیه در محیط نرم افزار Labview

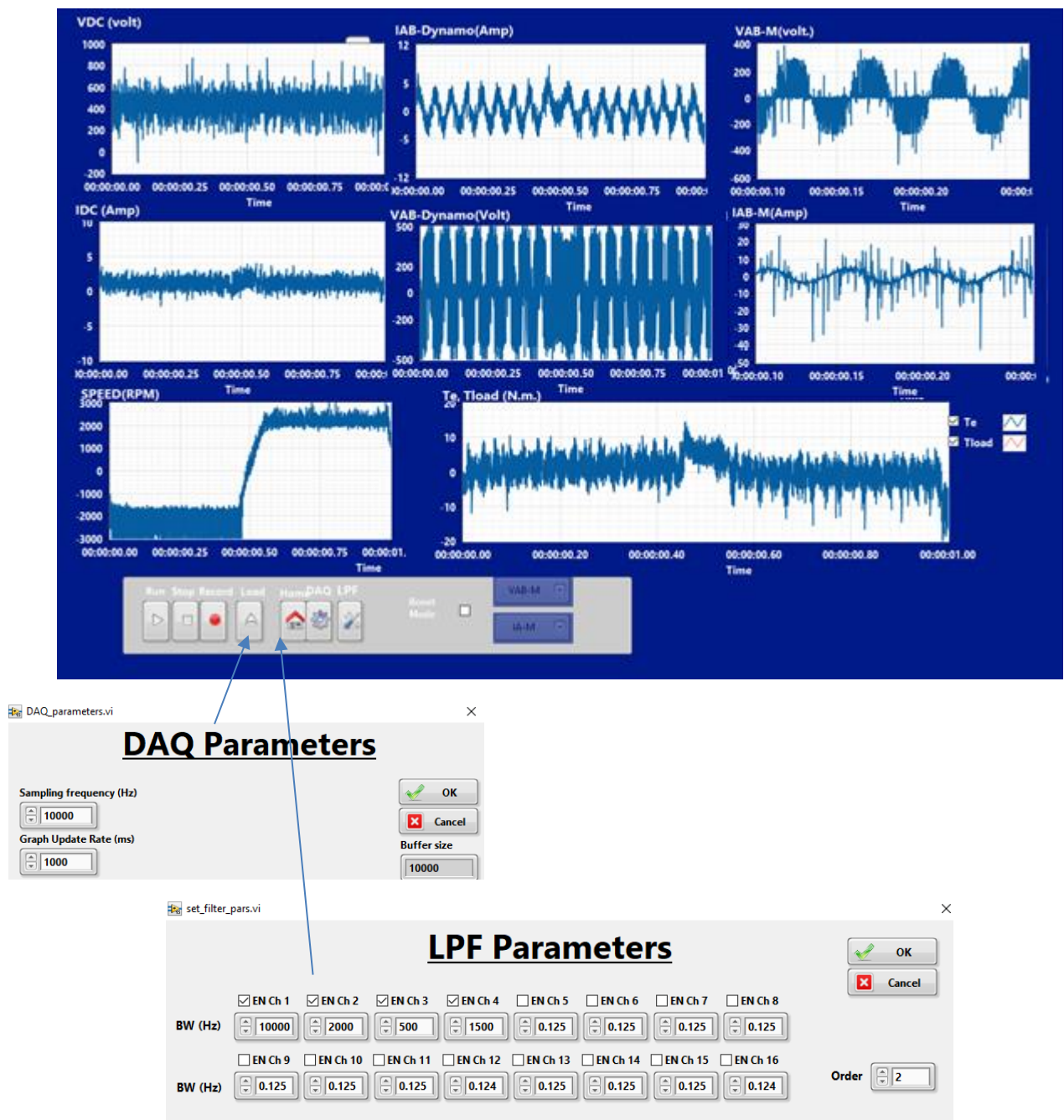
یکی از قابلیت‌های نرم افزار پیاده سازی شده امکان تنظیم پروفایل گشتاور بار اعمالی به موتور تحت تست توسط کاربرد می باشد. شکل ۶-۳ پنجره تنظیم پارامتر در محیط نرم افزار و یک نمونه پروفایل گشتاور بارگذاری شده را نمایش می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد کاربر می تواند مقدار دامنه و مدت زمان بارگذاری را در هر یک از گام ها به دلخواه تعیین نماید.



شکل ۶-۳: محیط نرم افزار مقدار دهی اولیه و تنظیمات سیستم دینامومتری

۲-۶- پنجره تحلیل در حوزه زمان (Transient time domain analysis)

هدف از ایجاد این پنجره در نرم افزار Labview، اندازه گیری و نمایش برخط کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی و بررسی رفتار حالت گذاری دستگاه تست توسط کاربر می باشد. از جمله کمیت‌های قابل مشاهده در این فرم عبارتند از ولتاژ و جریان موتور تحت تست، گشتاور و سرعت روی محور، ولتاژ و جریان موتور دینامومتر و ولتاژ و جریان شین dc دینامومتر می باشد. با استفاده از کارت I/O (۱۶ کاناله) مورد استفاده در این پروژه، امکان نمونه برداری و نمایش لحظه ایی سیگنال‌های ولتاژ، جریان نقاط دیگر دستگاه، دما و سیگنال ارتعاشات (در صورت استفاده از سنسورهای دما و ارتعاش) در مراحل توسعه دستگاه به صورت همزمان وجود خواهد داشت. شکل ۶-۴ پنجره تحلیل حوزه زمان نرم افزار Labview را نمایش می دهد. همانگونه که ملاحظه میگردد امکان تنظیم فرکانس نمونه برداری، نرخ به روز رسانی نمایش گراف ها و اندازه بافر توسط کاربر قابل تنظیم می باشد. حداکثر فرکانس کلید زنی ۶۲۵۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۶: فرم تنظیمات و مقدار دهی اولیه در محیط نرم افزار Labview

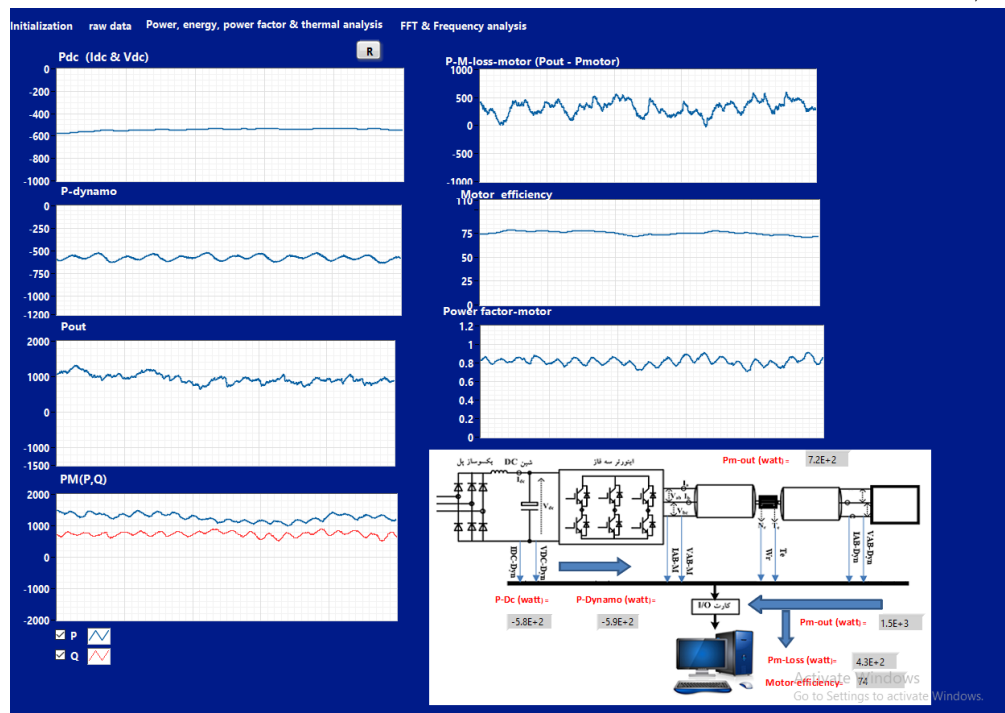
به دلیل وجود سوئیچینگ مبدل‌های الکترونیک قدرت و میدان‌های مغناطیسی ناشی از عملکرد موتور، وجود نویزهای اندازه‌گیری در سیگنال‌های نمونه برداری شده امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. به همین منظور در این نرم افزار مطابق شکل ۴-۶، هر یک از سیگنال‌های نمونه برداری شده بطور مستقل از یک فیلتر پایین گذر عبور داده شده است. تنظیمات فرکانس قطع توسط کاربر بطور مجزا برای هر کانال امکان پذیر است. همچنین مرتبه فیلتر نیز توسط کاربر قابل تنظیم می‌باشد. یکی دیگر از ویژگیهای انرم افزار در این فرم، امکان ذخیره کلیه داده‌ها و بازیابی آنها برای تحلیل off line می‌باشد. در این حالت با فعال کردن دکمه play داده تا زمان فشار دادن دکمه record ضبط و در مسر مشخص شده با فرمت text یا excel ذخیره می‌شود. در صورتیکه نیاز کاربر می‌تواند داده‌های ذخیره شده را بازیابی و بصورت off line آنالیز نماید.

۳-۲-۶- آنالیز توان و انرژی (Power , energy , power factor & thermal analysis)

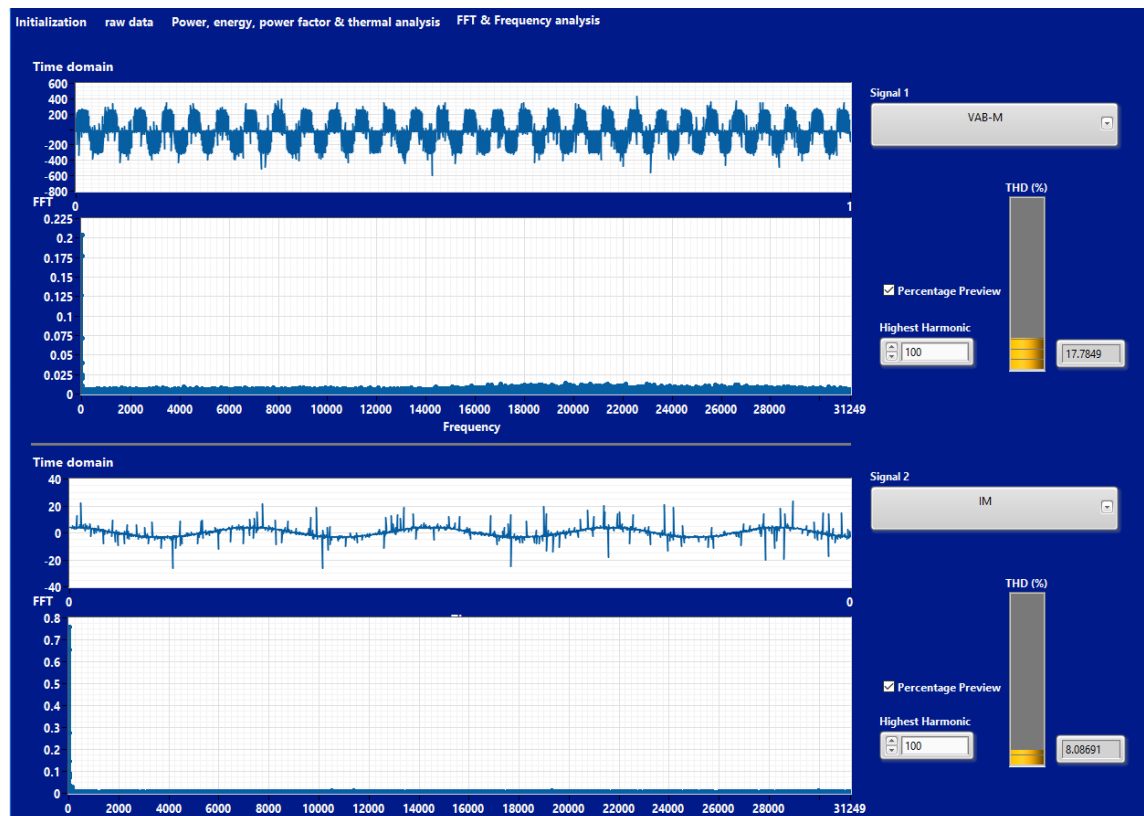
در این بخش از نرم افزار بر اساس سیگنالهای ولتاژ، جریان، گشتاور و سرعت اندازه گیری شده، توان ورودی و خروجی سیستم دینامومتر و موتور تحت تست محاسبه می گردد. مطابق شکل ۶-۱ این مولفه ها شامل توان ورودی اکتیو و راکتیو موتور تحت تست، توان روی محور متصل بین دینامومتر و موتور تحت تست، توان ورودی موتور دینامومتر و توان شین DC دینامومتر می باشد. با محاسبه این مولفه های توان تلفات، راندمان، ضریب توان موتور تحت تست محاسبه می گردد.

۴-۲-۶- تحلیل در حوزه فرکانس (Frequency domain & harmonic analysis)

در این بخش از نرم افزار تحلیل حوزه فرکانس سیگنالهای ولتاژ و جریان اندازه گیری شده انجام می شود. هدف از پیاده سازی از این بخش از نرم افزار آنالیز هارمونیک موتور تحت تست در شرایط کاری مختلف می باشد. برای این منظور در هر مرحله از تست حداکثر دو سیگنال ورودی توسط کاربر انتخاب می شود و سپس با اعمال FFT مقادیر دامنه و فاز مولفه های هارمونیک و مقدار THD محاسبه و بصورت گرافیکی نمایش داده می شود. علاوه بر ولتاژ و جریان، امکان تحلیل فرکانسی گشتاور و سرعت موتور تحت تست نیز فراهم شده است.



شکل ۵-۶: فرم محاسبه توان در محیط نرم افزار Labview



شکل ۶-۶: پنجره تحلیل هارمونیک موتور تحت تست در محیط نرم افزار Labview

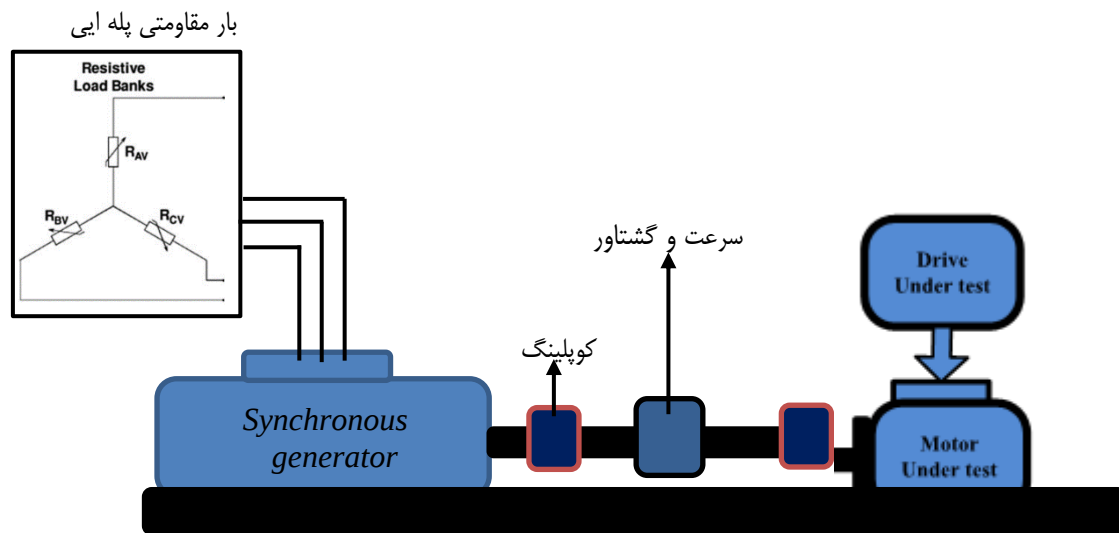
۶-۳-۲- استخراج مشخصه های خروجی موتور تحت تست

با هدف استخراج مشخصه های کاری موتور تحت تست با استفاده از دستگاه دینامومتر در گام نخست مشخصه های موتور تحت تست با استفاده از سیستم موتور- ژنراتور موجود در آزمایشگاه به ازای بارگذاری های مختلف استخراج می گردد. در گام بعدی مشخصات موتور تحت تست با استفاده از سیستم دینامومتر ساخته شده و نرم افزار پیاده سازی شده استخراج گردیده و با یکدیگر مقایسه می گردد.

۶-۳-۱- مشخصات خروجی موتور تحت تست با استفاده از سیستم موتور- ژنراتور

مطابق شکل ۶-۷، موتور تحت تست از طریق کوپلینگ انعطاف پذیر و سنسور گشتاور به سیستم ژنراتور متصل می گردد. خروجی ژنراتور سنکرون به تعدادی بار مقاومتی متصل شده که با تغییر مقدار بار مصرفی در ترمینال خروجی ژنراتور، گشتاور ترمزی اعمالی به موتور تحت تست تغییر می کند.

مطابق شکل ۶-۹، مقدار مقاومت خروجی ژنراتور با استفاده از سوئیچهایی که در تابلوی بار نصب شده قابل تغییر می باشد. با توجه حالتهای مختلف سوئیچ های تابلو بار مقادیر توان خروجی ژنراتور مطابق جدول ۶-۳ سناریو سازی شده است. مقادیر توان مقاومت های سه فاز شامل مقادیر بارهای ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۲۴۰۰ و ۳۰۰۰ وات می باشد که با ترکیب این بارها مقادیر مختلف بارگذاری برای ۱۶ حالت قابل برنامه ریزی می باشد. لازم به ذکر است در حالت بی باری ژنراتور (به دلیل وجود تلفات بی باری) حدود ۷۰۰ وات توان مکانیکی را بر روی محور موتور تحت تست همواره خواهیم داشت.



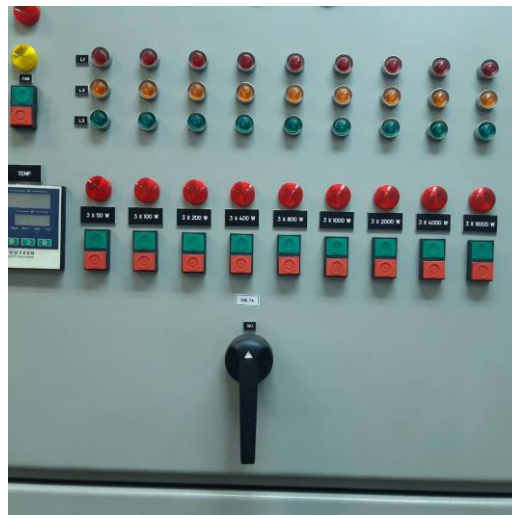
شکل ۶-۷: دیاگرام کلی ست آپ طراحی شده با استفاده از بار ژنراتوری



شکل ۶-۸: پیاده سازی سیستم آزمایشگاهی برگذاری روی موتور تحت تست با استفاده از بار ژنراتوری

به منظور اندازه گیری توان اکتیو و راکتیو و ضریب توان موتور (تحت تست) از یک دستگاه پاورآنالیزور HIOKI1396 استفاده گردیده است. پس از پیاده سازی سیستم تست آزمایشگاهی پیشنهادی، مراحل انجام تست های بارگذاری با استفاده از ست ژنراتور به شرح اجرا گردیده است:

- راه اندازی موتور تحت تست و تنظیم مقدار سرعت موتور به سرعت نامی ۲۸۰۰ دور بر دقیقه
- اتصال مقاومت خروجی با استفاده از ترکیبهای مختلف بار به ترمینال خروجی ژنراتور مطابق با سناریوی تست جدول ۶-۲



شکل ۹-۶: مقاومت های سوئیچ شونده

جدول ۶-۲ گام های تغییر مقاومت بار سه فاز

توضیحات	توان بار مقاومتی خروجی ژنراتور	
موتور بدون بار	0	۱
اتصال موتور تحت تست به ژنراتور بدون اعمال بار در خروجی ژنراتور	700	۲
اتصال بار سه فاز ۱۵۰ وات	850	۳
اتصال بار سه فاز ۳۰۰ وات	1000	۴
اتصال همزمان بار سه فاز ۱۵۰ و ۳۰۰ وات	1150	۵
اتصال همزمان بار سه فاز ۱۵۰ و ۶۰۰ وات	1450	۶
اتصال همزمان بار سه فاز ۶۰۰ و ۳۰۰ وات	1600	۷
اتصال بار سه فاز ۱۲۰۰ وات	1900	۸
اتصال همزمان بار سه فاز ۱۵۰ و ۳۰۰ وات	2200	۹
اتصال همزمان بار سه فاز ۱۲۰۰ و ۶۰۰ وات	2500	۱۰
اتصال همزمان بار سه فاز ۱۲۰۰ ، ۶۰۰ و ۳۰۰ وات	2800	۱۱
اتصال بار سه فاز ۲۴۰۰ وات	3100	۱۲
اتصال همزمان بار سه فاز ۲۴۰۰ و ۱۵۰ وات	3250	۱۳
اتصال همزمان بار سه فاز ۲۴۰۰ و ۳۰۰ وات	3400	۱۴
اتصال بار سه فاز ۳۰۰۰ وات	3700	۱۵
اتصال همزمان بار سه فاز ۳۰۰۰ و ۱۵۰ وات	3850	۱۶

- قرائت مقادیر توان اکتیو و راکتیو ورودی ، ضریب توان ، جریان ، سرعت ، گشتاور و... در حالت کار دائم و ثبت داده ها
- محاسبه راندمان و سرعت لغزش موتور تحت تست

- رسم منحنی‌های راندمان، ضریب توان، جریان و سرعت لغزش بر حسب درصد بارگذاری بر روی موتور تحت تست. در مراحل انجام تست مقادیر گشتاور اندازه‌گیری شده (از خروجی سنسور گشتاور) به ازای مقادیر مختلف بارگذاری (مطابق جدول ۳-۶) در سرعت نامی اندازه‌گیری می‌گردد. همانگونه که قبلاً ذکر گردید در هر یک از حالت‌های بارگذاری‌ها با استفاده از ژنراتور سنکرون، مقادیر اندازه‌گیری شده ثبت گردیده می‌گردد.

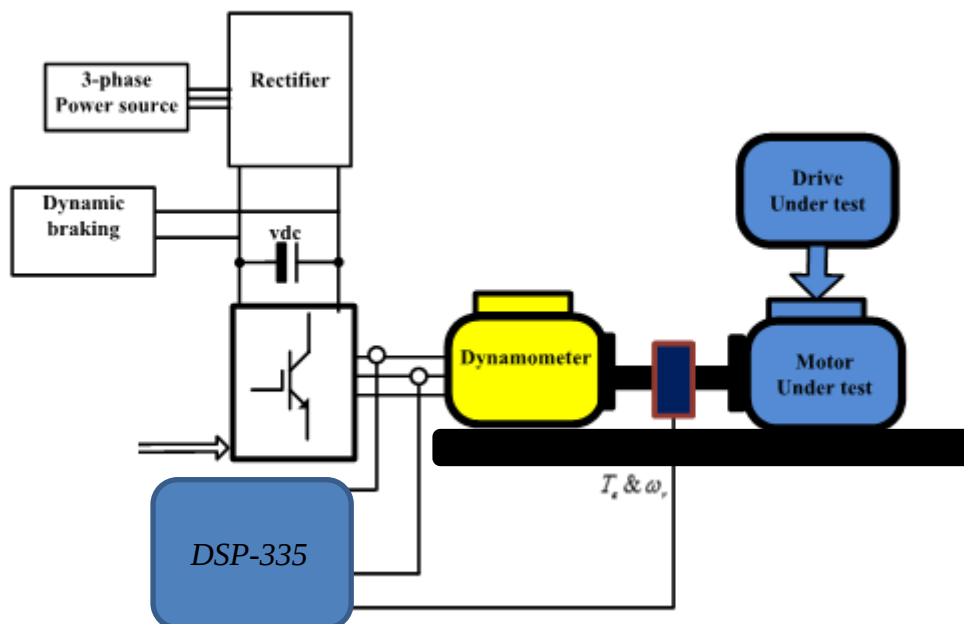
جدول ۶-۴ گشتاور اندازه‌گیری شده در سرعت نامی (فرکانس تغذیه ۵۰ هرتز)

توان بار مقاومتی خروجی ژنراتور	گشتاور اندازه گیری شده در خروجی سنسور گشتاور	درصد بارگذاری نسبت به گشتاور نامی 13.26N.m
۰	۰	۰
۷۰۰	2.321078	17.5
۸۵۰	2.873716	21.66667
۱۰۰۰	3.426353	25.83334
۱۱۵۰	3.978991	30.00001
۱۴۵۰	5.084266	38.33334
۱۶۰۰	5.636904	42.50001
۱۹۰۰	6.742179	50.83335
۲۲۰۰	7.847454	59.16668
۲۵۰۰	8.95273	67.50002
۲۸۰۰	10.058	75.83335
۳۱۰۰	11.16328	84.16669
۳۲۵۰	11.71592	88.33335
۳۴۰۰	12.26856	92.50002
۳۷۰۰	13.37383	100.8334
۳۸۵۰	13.92647	105

۲-۳-۶- مشخصات خروجی موتور تحت تست با استفاده از سیستم دینامومتر

پس از بارگذاری در ۱۶ گام از بی‌بار تا بار کامل و ثبت داده‌ها با استفاده از ست ژنراتور، لازم است تا همین تست‌ها با استفاده از دستگاه دینامومتر تکرار گردد. برای این منظور ابتدا مطابق شکل ۶-۱۰ و ۶-۱۱ (ساختار ارائه شده در فصل پنجم گزارش پروژه)، موتور تحت تست به موتور دینامومتر متصل و مقادیر گشتاور اندازه‌گیری شده در جدول ۶-۴ به عنوان مقدار گشتاور مرجع به سیستم درایو دینامومتر اعمال می‌گردد. به این ترتیب مشخصه‌های خروجی موتور تحت تست در هر یک از ۱۶ نقطه تست

بارگذاری و نتایج تست استخراج می‌گردد. همانگونه که در بخش ۴-۵-۱ نیز بررسی گردید، سیستم دینامومتر با دقت بسیار بالایی قادر به بارگذاری گشتاور مرجع ورودی به موتور تحت تست می‌باشد.

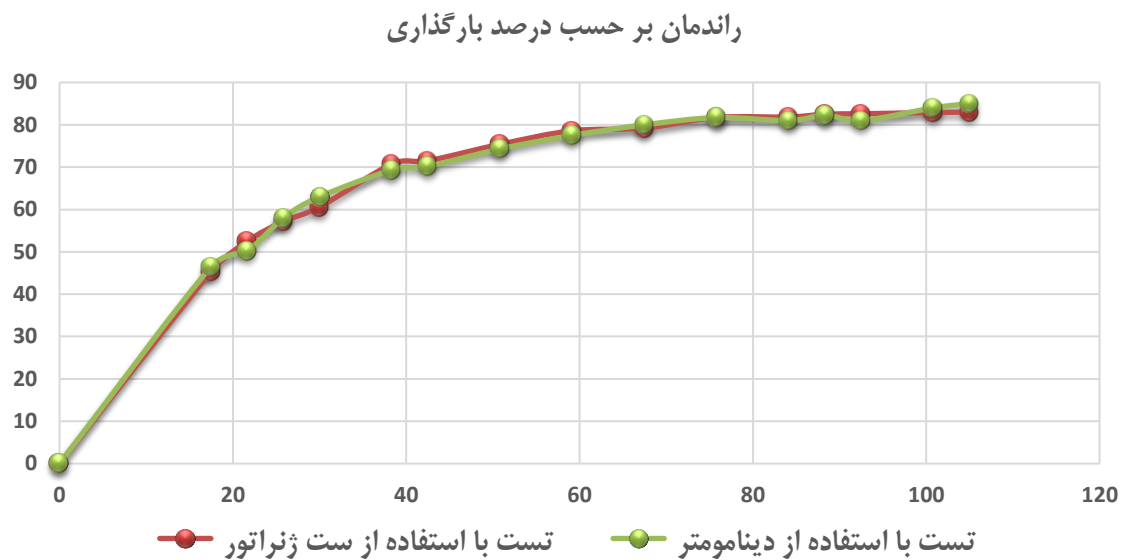


شکل ۶-۱۰. دیاگرام کلی ست آپ طراحی شده با استفاده از دینامومتر

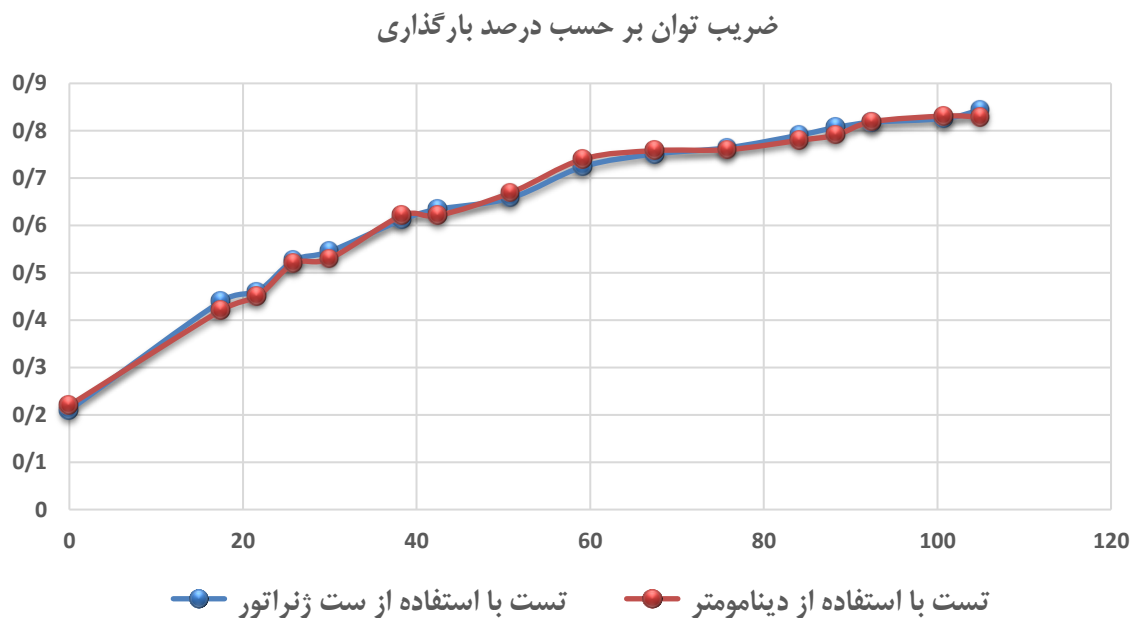


شکل ۶-۱۱. پیاده سازی سیستم آزمایشگاهی بارگذاری روی موتور تحت تست با استفاده از دینامومتر

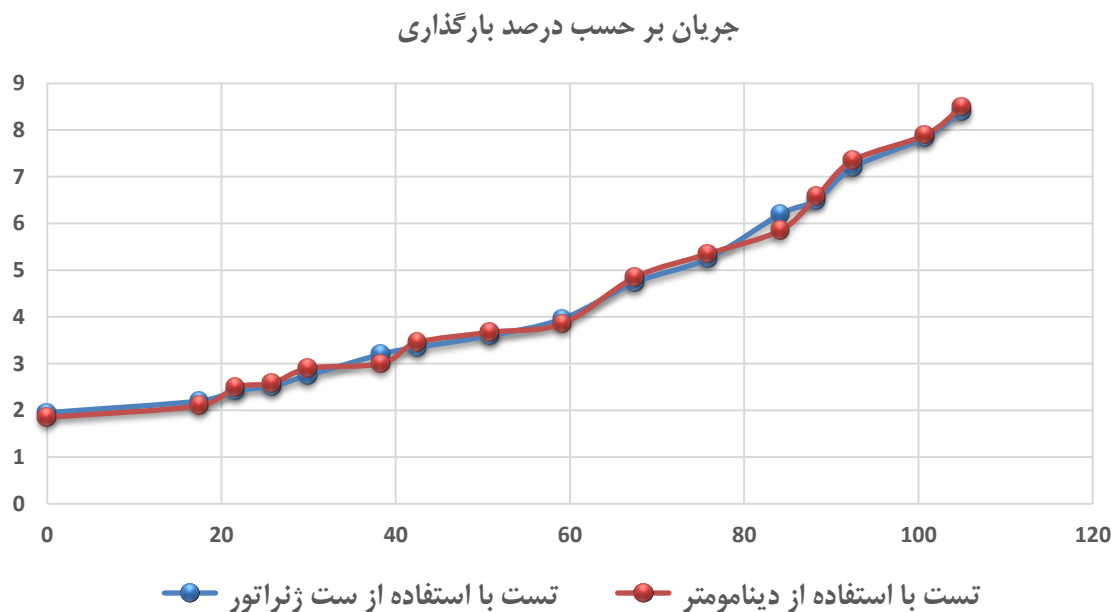
پس از انجام سناریوهای مختلف تست و استخراج و ذخیره سازی نتایج بدست آمده مشخصه‌های راندمان، ضریب توان، جریان و سرعت لغزش موتور تحت تست از طریق نرم افزار labview اندازه گیری و داده‌های آن ثبت گردیده است. در ادامه نتایج حاصل از بارگذاری موتور تحت تست و مشخصه‌های خروجی تست با استفاده از ژنراتور و دستگاه دینامومتر به ترتیب در شکل‌های ۶-۱۲ تا ۶-۱۵ ارائه گردیده است.



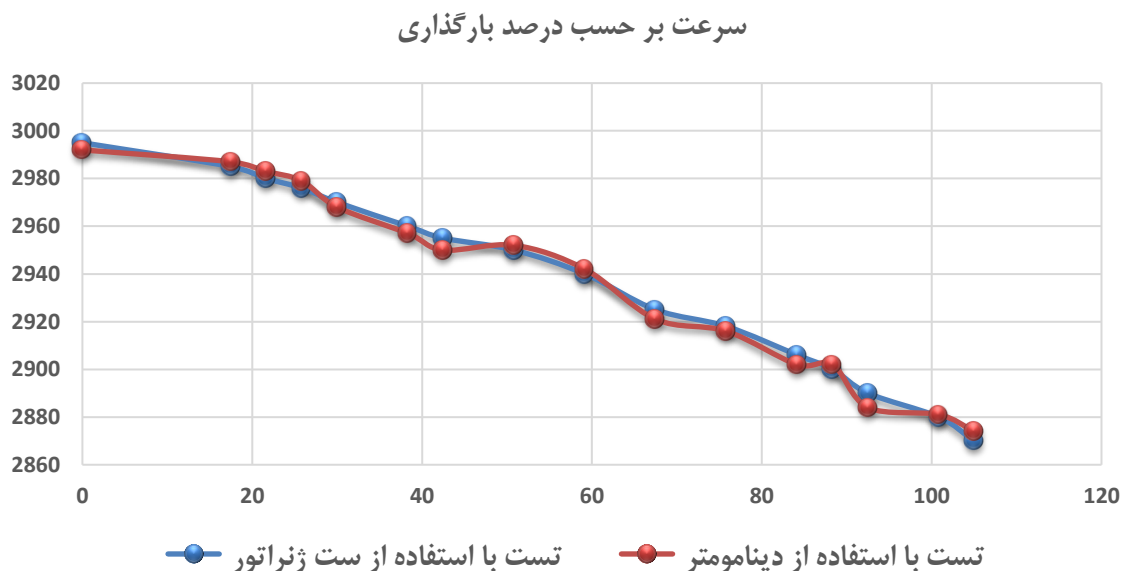
شکل ۶-۱۲ مقایسه مشخصه راندمان بر حسب درصد بارگذاری با استفاده از ست ژنراتور و سیستم دینامومتر



شکل ۶-۱۳ مقایسه مشخصه ضریب توان بر حسب درصد بارگذاری با استفاده از ست ژنراتور و سیستم دینامومتر



شکل ۶-۱۴ مقایسه مشخصه جریان بر حسب درصد بارگذاری با استفاده از ست ژنراتور و سیستم دینامومتر



شکل ۶-۱۵ مقایسه مشخصه سرعت بر حسب درصد بارگذاری با استفاده از ست ژنراتور و سیستم دینامومتر

بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مشخصات خروجی استخراج شده از دو روش بارگذاری با دقت قابل قبولی منطبق بر یکدیگر می‌باشند. از آنجاییکه سنسور گشتاور مورد استفاده در هر دو روش از یک نوع بوده، بنابراین از نظر اندازه گیری گشتاور شرایط یکسان بوده و تفاوت‌هایی که در خروجی‌ها وجود دارد ناشی از خطاهای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان و محاسبه توان، راندمان، ضریب توان و.... می‌باشد. همچنین وجود خطا و عدم قطعیت در سنسورهای اندازه‌گیری و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال نیز در بروز این اختلاف‌ها موثر می‌باشد.

۲-۳-۶-۴-۶-نتیجه گیری

در این فصل نرم افزار رابط گرافیکی دستگاه تست دینامومتری معرفی و قابلیت های آن مورد بررسی قرار گرفت. هدف از پیاده سازی این نرم افزار پایش و اندازه گیری کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی سیستم دینامومتر و موتور تحت تست می باشد. محیط نرم افزاری پیاده سازی شامل :

۱- پنجره مقدار دهی اولیه و تنظیم ضرایب هم سان سازی و افست گیری

۲- پنجره آنالیز حوزه زمان و تحلیل گذرا

۳- پنجره تحلیل توان و تلفات

۴- تحلیل هارمونیک و آنالیز هارمونیک

با استفاده از نرم افزار پیاده سازی شده امکان مدیریت دستگاه تست، اکتساب و پردازش داده ها و پایش کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی برای کاربر فراهم می گردد.

در بخش پایانی این فصل مشخصه های خروجی موتور تحت تست با استفاده دستگاه دینامومتر ساخته شده و ست ژنراتور (به عنوان گشتاور بار) استخراج و مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی نتایج بدست آمده عملکرد قابل قبول نمونه آزمایشگاهی دستگاه دینامومتر ساخته شده را نشان می دهد.

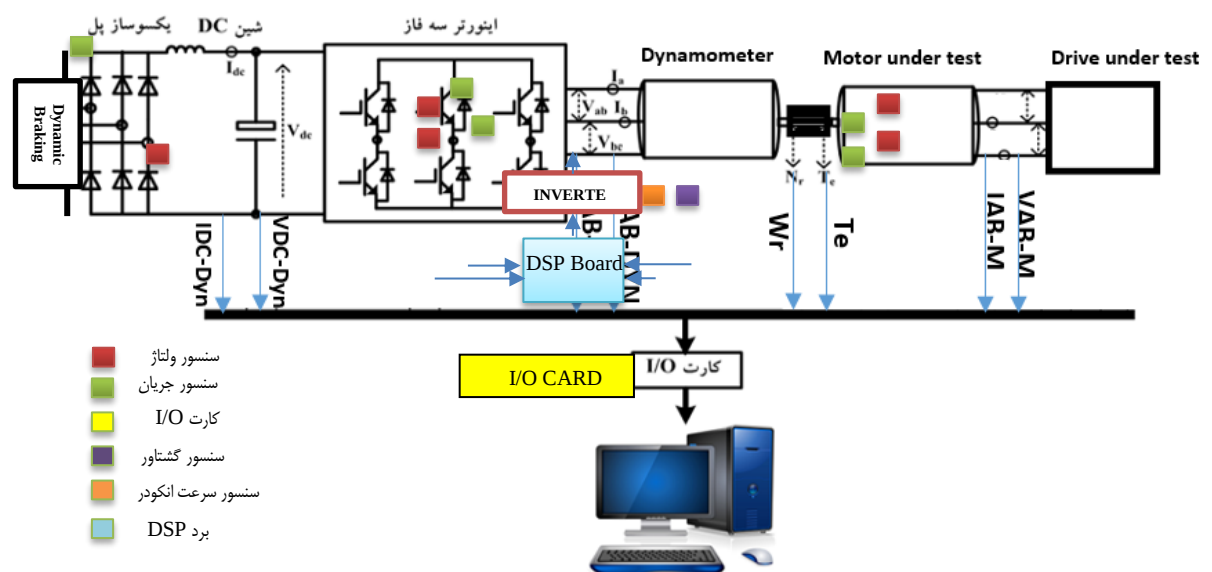
فصل ۷- کالیبراسیون سیستم دینامومتر

۷-۱- مقدمه

همانگونه که در فصل‌های گذشته بررسی گردید هدف از طراحی و ساخت سیستم دینامومتر تولید گشتاور ترمزی و اعمال آن به محور موتور تحت تست و آنالیز رفتار موتور و درایو تحت تست می‌باشد. در این فصل المان‌های تأثیر گذار بر خطای اندازه‌گیری و نحوه کالیبراسیون سنسورها ارائه می‌گردد. سنسور گشتاور یکی از المان‌های کلیدی دستگاه دینامومتر می‌باشد، بطوریکه دقت دینامومتر به دقت سنسور گشتاور و دقت سیستم درایو دینامومتر می‌باشد. علاوه بر این پس از اعمال گشتاور بار ترمزی بر سیستم موتور و درایو تحت تست، ولتاژ و جریان‌های موتور تحت تست از طریق سنسورهای ولتاژ و جریان اثر هال اندازه‌گیری و به منظور پردازش و استخراج مشخصه‌های خروجی مورد نیاز به محیط نرم افزار ارسال می‌شود. سیگنال خروجی سنسورها از طریق کارت I/O نمونه برداری و پس از گردآوری و پردازش داده‌ها توسط نرم افزار Labview، مشخصه‌های خروجی محاسبه و نمایش داده می‌شود. به منظور دستیابی به دقت بالا و اطمینان از نتایج تست لازم است تا کلیه ماژول‌های اندازه‌گیری و محاسباتی از جنبه دقت و کالیبراسیون مورد ارزیابی و آنالیز قرار گیرد. به همین منظور در این فصل برای هر یک از زیربخشهای سخت افزاری و نرم افزاری تأثیر گذار بر دقت دستگاه بررسی می‌گردد. در هر مورد دقت، عدم قطعیت، میزان نویز پذیری، افسد پذیری، پهنای باند، تکرارپذیری، باند مرده (در صورت وجود) و میزان خطی بودن سنسور بر اساس مشخصات فنی ارائه شده توسط سازندگان، تشریح می‌گردد. لیست المان‌های تأثیر گذار بر دقت دستگاه به شرح زیر می‌باشد:

- سنسور گشتاور
- سنسور سرعت
- سنسور ولتاژ
- سنسور جریان
- پردازشگر DSP
- کارت I/O

شکل ۷-۱ المان‌ها و ماژول‌های تأثیر گذار بر دقت دستگاه را نمایش می‌دهد. در ادامه هر یک از المان‌ها بررسی می‌گردد.



شکل ۷-۱: المان‌ها و زیر بخشهای تعیین کننده در دقت دستگاه

۷-۲- کالیبراسیون سنسور گشتاور

یکی از المان کلیدی در دستگاه دینامومتر سنسور گشتاور می باشد که کاربرد آن در دستگاه دینامومتر، علاوه بر فیدبک حلقه بسته درایو دینامومتر، اندازه گیری گشتاور و روی محور و ارسال آن به نرم افزار GUI برای پردازش و استخراج مشخصه های خروجی می باشد. مطابق شکل ۷-۲، سنسور گشتاور مورد استفاده در این پروژه یک گشتاور سنج دینامیکی با خروجی آنالوگ با نام تجاری RT2A از شرکت AEP transducers می باشد [۷۳].



شکل ۷-۲: سنسور گشتاور سنج دینامیکی RT2A

مشخصات فنی این سنسور در جدول ۷-۱ خلاصه گردیده است. همانگونه که ملاحظه می گردد خطای هیستریزیس و غیر خطی سنسور $\pm 0.2\%$ و نوسانات گشتاور تا فرکانس حداکثر ۵ کیلو هرتز قابل اندازه گیری است. حساسیت سنسور گشتاور طبق اطلاعات سازنده $0.1V/1\text{ N.m}$ می باشد که به ازای گشتاور حداکثر ± 100 ولتاژ آنالوگ خروجی ± 10 ولت در خروجی سنسور ظاهر می شود. بدیهی است با وجود نویزهای محیطی، نسبت سیگنال به نویز در محدوده های گشتاور نامی سنسور (100 N.M) نسبت به محدوده های بسیار پایین بیشتر می باشد. محدوده حداکثر سرعت مجاز سنسور، ۴۰۰۰ دور بر دقیقه است که پاسخگوی محدوده وسیعی از انواع موتورهای تحت تست صنعتی می باشد. همچنین محدوده ماکزیمم گشتاور و گشتاور نقطه شکست به ترتیب 150% و بزرگتر از 300% مقدار نامی می باشد. همچنین مقدار گشتاور دینامیکی (ریپل گشتاور) مجاز به ازای مقدار گشتاور استاتیکی نامی، برابر 70% (مقدار نامی) می باشد.

جدول ۷-۱: مشخصات سنسور گشتاور دینامیکی RT2A

Linearity and hysteresis	$\leq \pm 0.2\%$	
Temperature effect(1°C):	on zero	$\leq \pm 0.02\%$
	on sensitivity	$\leq \pm 0.02\%$
sensitivity	Nominal sensitivity: $\pm 10\text{v}/100\text{N.m}$	
	sensitivity tolerance : $\leq \pm 0.2\%$	
Response frequency	from 1 to 5kHz	
Limit mechanical values:		
service torque	100%	
max. permissible torque	150%	
breaking torque	>300%	
highly dynamic torque	70%	
nominal speed	40000 rpm	
Working temperature range	$-10/+70^\circ\text{C}$	

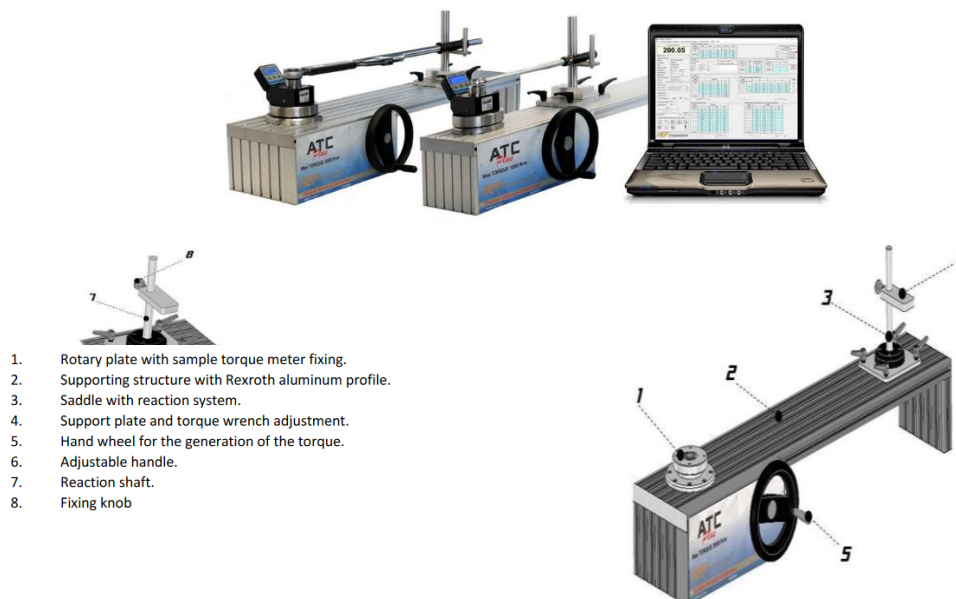
سنسور تهیه شده برای دستگاه دینامومتر دارای گواهی تاییدیه کالیبراسیون و تاییدیه کالا طبق استاندارد های معتبر بین المللی می باشد. گواهی تاییدیه استاندارد EN 61326-1(2013) و EN 61010-1(2013) محصول و گواهی تاییدیه کالیبراسیون سنسور گشتاور به ترتیب در پیوست ۹-۱ و ۹-۲ آورده شده است. لازم به ذکر است کالیبراسیون گشتاور در هر دو جهت راستگرد و چپ گرد سنسور گشتاور سنج انجام شده و داده های آن پیوست گردیده است. بر این اساس برای سنسور گشتاور مورد استفاده در این پروژه نیازی به اخذ تاییدیه کالیبراسیون جداگانه نمی باشد.

۱-۲-۷- کالیبراسیون دوره ای سنسور گشتاور RT2A

بر اساس استاندارد (2017) ISO 6789-1 and ISO 6789-2 ، زمان دوره ای کالیبراسیون سنسور گشتاور هر ۱۲ ماه یا پس از ۵۰۰۰ مرتبه کارکرد سنسور می باشد . برای این منظور کمپانی سازنده سنسور یک تجهیز ابزار دقیق خاص با نام تجاری ATCplus با مشخصات زیر را با هدف کالیبراسیون دوره ای عرضه کرده است. قابلیت های ویژه این تجهیز عبارتند از:

- مجهز به سنسور گشتاور اتاتیکی در محدوده از 0.5 تا 2000 نیوتن متر (BTR2)
- مجهز به نرم افزار TorqueKAL برای اندازه گیری ، کالیبراسیون، آرشیو و پرینت برگه گزارش کالیبراسیون سنسور گشتاور

شکل ۷-۳ اجزاء سیستم ATCplus جهت کالیبراسیون سنسور گشتاور را نمایش می دهد.



شکل ۷-۳: کالیبراسیون سنسور گشتاور با استفاده از ATCplus

سنسور گشتاور BTR2 مورد استفاده در دستگاه ATCplus یک گشتاور سنج استاتیکی مجهز به نمایشگر دیجیتالی DTR2 می باشد. دقت این سنسور 0.2% می باشد که برای اهداف کالیبراسیون ایده آل می باشد. به منظور ارائه گارانتی کلاس ۱ استاندارد UNI 113114 برای کالیبراسیون سنسور گشتاور مورد استفاده در این پروژه (RT2A-100N.M) نیاز به تجهیز BTR2 مدل 100 N • m BTR2 می باشد که سنسورهای در محدوده گشتاور ۱۰ تا ۱۰۰ نیوتن متر را برای کالیبراسیون پوشش می دهد.

شکل ۷-۴ نرم افزار ارائه شده برای کالیبراسیون سنسور گشتاور را نمایش می دهد. این نرم افزار بر اساس استاندارد UNI EN ISO 6789-1 (2017) و استاندارد UNI EN ISO 6789-2 (20107) تهیه و ارائه گردیده است.

The screenshot displays the REP transducers software interface. The main display shows a large value of 200.05. Below this, there are several sections for data entry and results:

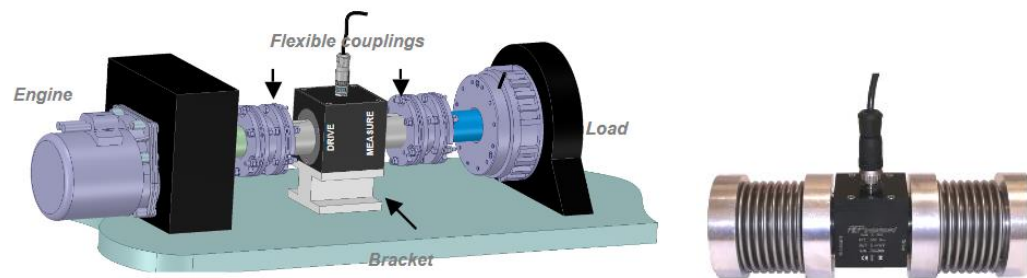
- ISO 6789-1:** A table showing data for five cycles (Ciclo 1 to Ciclo 5) with columns for Coppia (Nm), Medio (Nm), and Scostamento (Nm).
- ISO 6789-2:** A table showing data for four positions (I, II, III, IV) with columns for Coppia (Nm), Medio (Nm), and Scostamento (Nm).
- Effetto Punto di Applicazione della Forza:** A table showing data for two positions (10mm and 10mm) with columns for Coppia (Nm), Medio (Nm), and Scostamento (Nm).
- Effetto Intercambio Adattatore Attacco e Sistema di Calibrazione:** A table showing data for four positions (0°, 90°, 180°, 270°) with columns for Coppia (Nm), Medio (Nm), and Scostamento (Nm).

The interface also includes various input fields for parameters like Range (N.m), Unità di Misura, and Standard, as well as buttons for file operations and logging.

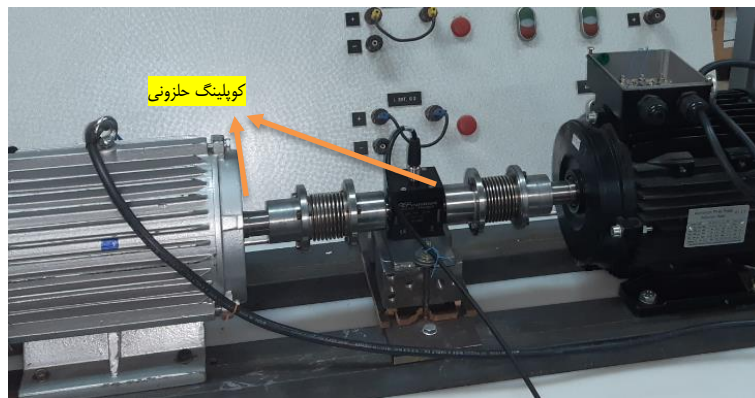
جدول ۲-۷: محیط نرم افزار TorqueKAL جهت کالیبراسیون سنسور گشتاور

بر اساس استاندارد به منظور کالیبراسیون سنسور ابتدا اندازه گیری گشتاور برای نقاطی شامل کمترین گشتاور (۲۰٪) و مقادیر گشتاور ۶۰٪ و ۱۰۰٪ گشتاور ماکزیمم انجام می شود. طبق استاندارد لازم است تا برای هر نقطه اندازه گیری ۵ الی ۱۰ مرتبه تکرار شود. لازم به ذکر است تعداد نقاط و درصد گشتاور قابل اصلاح می باشد. در پایان نرم افزار برای هر نقطه تست مقدار متوسط خوانده شده و میزان ماکزیمم درصد انحراف را محاسبه می کند. پس از مقایسه با مقادیر حداکثر مجاز انحراف نمونه مورد تست رد یا تایید و ضرائب کالیبراسیون محاسبه می گردد.

علاوه بر کالیبراسیون سنسور گشتاور، شرایط نصب و بهره برداری صحیح سنسور نیز از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. کوپلینگ مناسب سنسور گشتاور بخصوص در مواردی که بررسی رپیل گشتاور موتور تحت تست مورد نظر باشد نیاز به ملاحظات ویژه ای می باشد. وجود نوسانات گشتاور مزاحم ناشی از عدم هم محوری یا خرابی کوپلینگ ها می تواند خطای قابل ملاحظه ای را در اندازه گیری گشتاور به همراه داشته باشد. برای جلوگیری از این مشکل، به توصیه شرکت سازنده در مرحله اتصال سنسور گشتاور بین سیستم دینامومتر و موتور تحت تست مطابق شکل ۷-۵ از کوپلینگ های حلزونی استفاده شده تا با مجزاسازی ارتعاشات دو موتور بر یکدیگر، ارتعاشات نامطلوب در سیگنال خروجی سنسور گشتاور ناشی از عدم هم محوری یا اثرات متقابل اعوجاجات گشتاور تولیدی هر یک از موتورهابر دیگری را تا حد ممکن کاهش دهد. میزان انحراف ابعادی در مرحله نصب $\pm 0.1\text{mm}$ توسط سازنده توصیه شده است.



الف



ب

شکل ۴-۷: کوپلینگ حلزونی مورد استفاده در سنسور گشتاور نحوه اتصال سنسور گشتاور بین موتور تحت تست و موتور دینامومتر ([1])
(الف) کوپلینگ پیاده سازی شده در نمونه آزمایشگاهی (ب)

طبق داده های سازنده سنسور گشتاور، خروجی سنسور گشتاور در حداکثر محدوده کاری ($\pm 100\text{N.m}$)، برابر $\pm 10\text{V}$ می باشد. براین اساس به ازای مقدار واحد گشتاور، ولتاژ آنالوگ 0.1V در خروجی سنسور ظاهر می گردد. با در نظر گرفتن حداکثر گشتاور 40N.m تولیدی موتور دینامومتر، حداکثر ولتاژ خروجی سنسور $\pm 2\text{V}$ خواهد بود. مدار تطبیق دهنده واسط بین سنسور گشتاور و DSP به گونه ای طراحی شده که به ازای گشتاور پیک 40N.m ، ولتاژ 1.75V در ورودی آنالوگ DSP تولید می شود. با توجه به اینکه مبدل ADC این چیپ ۱۲ بیتی می باشد، رزولیشن اندازه گیری گشتاور برابر است با:

$$ReS_{DSP-Torque} = \frac{40}{2^{12}} = 9.76 \text{ mN.m} \quad (7-1)$$

برای سیگنالهای نمونه برداری شده خروجی سنسور گشتاور در محیط نرم افزار Labview به واسطه کارت I/O 1712 ، با advantech ADC های ۱۲ مشابه رابطه ۷-۱ میباشد. با توجه به پهنای باند بالای سنسور گشتاور (5KHZ) و رزولیشن بالای مدارات نمونه برداری سیگنال گشتاور، امکان اندازه گیری دقیق گشتاور سیستم دینامومتر فراهم گردیده است.

```

023
024 Torque=(double) (AdcMirror.ADCRESULT6);
025
026 if (tt<1500)
027 {
028     torque_sum =torque_sum +Torque;
029     tt=tt+1;
030 }
031 else
032 {
033     torque_offset=(torque_sum/1500);
034     Torque= Torque-torque_offset;
035 }
036 Torque_f=alfatorque*Torque + (1-alfatorque)*Torque_old;
037 Torque_old=Torque_f;
038 Torque_m=((Torque_f*0.001508)+.00508)*10;
039
040

```

جدول ۳-۷: کالیبراسیون و حذف افست سنسور گشتاور در DSP

۳-۷- سنسور ولتاژ و جریان اثر هال

مطابق شکل ۷-۱، جهت اندازه‌گیری ولتاژ و جریان بخش‌های مختلف دستگاه از سنسور ولتاژ و جریان استفاده شده است. به این ترتیب اندازه‌گیری کلیه مشخصه‌های الکتریکی دستگاه شامل مقادیر موثر ولتاژ و جریان، توان، راندمان، THD و... بر اساس خروجی این دو سنسور بوده و دقت آنها بر دقت دستگاه اندازه‌گیری سیستم موثر خواهد بود. همانگونه که در فصل اول نیز بررسی گردید، در این پروژه از سنسورهای ولتاژ LV25 و سنسور جریان LA55 استفاده شده است. دقت، میزان خطی بودن، افست و میزان تأثیر دما بر عملکرد سنسورهای ولتاژ و جریان به ترتیب در جداول ۷-۲ و ۷-۳ ارائه شده است. بر اساس داده‌های ارائه شده دقت سنسورهای ولتاژ و جریان در بدترین شرایط از ۱٪ بیشتر نمی‌باشد. یکی از نکات کلیدی در انتخاب سنسور ولتاژ و جریان پهنای باند فرکانسی آنها می‌باشد. پهنای باند سنسورهای ولتاژ و جریان، وابسته به حداکثر فرکانس مورد نیاز در اندازه‌گیری مولفه‌های هارمونیک ولتاژ و جریان می‌باشد. در این پروژه با توجه به اینکه دستگاه دینامومتر برای کاربرد موتورهای صنعتی با حداکثر فرکانس ۳۰۰۰ دور بر دقیقه طراحی شده، با فرض فرکانس کلید زنی حداکثر 20KHZ و فرکانس موج اصلی ۵۰ هرتز، پهنای باند مورد نیاز برای اندازه‌گیری هارمونیک ۴۹ ام و باندهای هارمونیک فرکانس بالای سوئیچینگ بیشتر از ۱۰۰ کیلو هرتز نمی‌باشد.

جدول ۴-۷: مشخصات اندازه‌گیری و دقت سنسور ولتاژ LV25

Accuracy - Dynamic performance data		
پارامتر شاخص خطا	شرایط کاری	مقادیر معمول
Linearity error	-	<0.2 %
Offset current	$I_p=0, T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Temperature variation of I_o	محدوده دمایی ۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد	0.06 $\pm\text{mA}$
	محدوده دمایی ۲۵ تا ۷۰ درجه سانتیگراد	0.1 $\pm\text{mA}$
Total error	$I_{pN}, T=25\text{ }^{\circ}\text{C}, 12-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm V$	0.9 $\pm\%$

جدول ۵-۷: مشخصات اندازه‌گیری و دقت سنسور جریان LA55

Accuracy - Dynamic performance data		
پارامتر شاخص خطا	شرایط کاری	مقادیر معمول
Linearity error		$<0.15\%$
Offset current	$I_p=0, T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Temperature variation of I_o	محدوده دمایی 0 تا 25 درجه سانتیگراد	$0.1 \pm \text{mA}$
	محدوده دمایی 25 تا 70 درجه سانتیگراد	$0.2 \pm \text{mA}$
Total error	$I_p N, T=25\text{ }^{\circ}\text{C}, 12-15 \pm V$	$0.9 \pm \%$

با توجه به پهنای باند 200 کیلو هرتز سنسور ولتاژ و جریان مورد استفاده، برای کاربرد اندازه‌گیری کمیتهای الکتریکی سیستم های درایو صنعتی دستگاه دینامومتر این پروژه مناسب می باشد.

خروجی سنسورهای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان به یک مدار تطبیق سیگنال اعمال می گردد. چراکه خروجی سنسور ها به ازای مقادیر نامی ولتاژ و جریان ورودی حداکثر به $\pm 5V$ محدود می گردد. از آنجاییکه این سیگنال قابل اعمال به پردازشگر DSP نیست (ورودی آنالوگ DSP حداکثر 0 تا 3.3 ولت). برای این منظور مدار تطبیق دهنده، علاوه بر اضافه کردن یک ولتاژ افست، دامنه سیگنال را نیز به حداکثر 3.3 ولت محدود می کند. پردازشگر DSP مجهز به یک مبدل ADC، 12 بیتی می باشد که به ازای 3.3 ولت، حداکثر عدد باینری 4096 را تولید می کند. برای تبدیل این عدد باینری به مقادیر اعشاری، لازم است تا ضریب کالیبراسیون محاسبه و به سیگنال ورودی اعمال گردد. برای این منظور مطابق شکل ۷-۶، از مولتی متر PC520M کالیبره شده به عنوان دستگاه مرجع استفاده شده است. تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر مورد استفاده در بخش پیوست ۹-۲ شکلهای ۹-۳ تا ۹-۶ ارائه شده است. در این مرحله به ازای مقادیر مختلف جریان موتور، مقادیر خوانده شده در حافظه DSP ثبت می گردد بطوریکه برای هر جریان موتور یک مقدار باینری در DSP اندازه‌گیری می شود. در مرحله بعد با استفاده از جعبه ابزار CFTOOL مطلب، مشخصه کالیبراسیون استخراج و بر مقادیر اندازه‌گیری شده اعمال می گردد.



شکل ۵-۷: کالیبراسیون ولتاژ و جریان با استفاده از مولتی متر کالیبره شده PC520M

به‌طور مشابه همین روش برای کالیبراسیون مقادیر خروجی سنسور ولتاژ انجام گردید و ضرائب کالیبراسیون محاسبه و اعمال شد. برای رفع افست خروجی سنسور در ابتدای شروع به کار دستگاه (قبل از روشن شدن بخش قدرت) از هریک از سنسورهای ولتاژ و جریان ۱۵۰۰ بار نمونه برداری می‌شود. از آنجاییکه بخش قدرت غیر فعال و جریان عبوری صفر است، خروجی سنسورها در حالت ایده آل باید صفر باشد. بطور معمولاً به دلیل افست خروجی سنسور و مدارات تطبیق دهنده، وجود چند ۱۰ افست در خروجی ولتاژ اندازه‌گیری شده امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. بنابراین با محاسبه مقدار متوسط جریان و ولتاژ، مقدار میانگین افست محاسبه و در مراحل انجام محاسبات کنترلی این مقدار از خروجی سنسورها کم یا اضافه می‌گردد. شکل ۷-۷ کدنویسی DSP برای کالیبراسیون و افست‌گیری سنسورهای ولتاژ و جریان را نمایش می‌دهد.

```

967 I_R1=(double) (AdcMirror.ADCRESULT0)*(-4.6/309);  /// A0
968
969 if (IRR<ISAMPLE)
970 {
971     IR_sum =IR_sum +I_R1;
972     IRR=IRR+1;
973 }
974 else
975 {
976     IRR_offset=(IR_sum/ISAMPLE);
977     I_R2= I_R1-IRR_offset;
978 }
979
980 I_S1=(double) (AdcMirror.ADCRESULT1)*(-4.6/309);  ///A1
981
982 if (ISS<ISAMPLE)
983 {
984     IS_sum =IS_sum +I_S1;
985     ISS=ISS+1;
986 }
987 else
988 {
989     ISS_offset=(IS_sum/ISAMPLE);
990     I_S2= I_S1-ISS_offset;
991 }
992
993 /**Line voltage sampling and calibration
994 vuv=(double) (AdcMirror.ADCRESULT3)*-0.2857142857;
995 // LOW PASS FILTER
996 //float32 alfa3=1;
997 vuvLP=alfa3*vuv + (1-alfa3)*vuvLP0;
998 vuvLP0=vuvLP;
999 // HIGH PASS FILTER
1000 vuv2=alfa4*vuv1 + alfa4*(vuvLP-vuv11);
1001 vuv11=vuvLP;
1002 vuv1=vuv2;
1003
1004 /**
1005 vvw=(double) (AdcMirror.ADCRESULT4)*-0.2857142857;
1006 // LOW PASS FILTER
1007 //float32 alfa3=1;
1008 vvwLP=alfa3*vwv + (1-alfa3)*vwvLP0;
1009 vvwLP0=vwvLP;
1010 // HIGH PASS FILTER
1011 vvw2=alfa4*vwv1 + alfa4*(vwvLP-vvw11);
1012 vvw11=vwvLP;
1013 vvw1=vwv2;
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2097
2098
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2178
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2197
2198
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2278
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2288
2289
2290
2291
2292
2293
2294
2295
2296
2297
2298
2299
2300
2301
2302
2303
2304
2305
2306
2307
2308
2309
2310
2311
2312
2313
2314
2315
2316
2317
2318
2319
2320
2321
2322
2323
2324
2325
2326
2327
2328
2329
2330
2331
2332
2333
2334
2335
2336
2337
2338
2339
2340
2341
2342
2343
2344
2345
2346
2347
2348
2349
2350
2351
2352
2353
2354
2355
2356
2357
2358
2359
2360
2361
2362
2363
2364
2365
2366
2367
2368
2369
2370
2371
2372
2373
2374
2375
2376
2377
2378
2379
2380
2381
2382
2383
2384
2385
2386
2387
2388
2389
2390
2391
2392
2393
2394
2395
2396
2397
2398
2399
2400
2401
2402
2403
2404
2405
2406
2407
2408
2409
2410
2411
2412
2413
2414
2415
2416
2417
2418
2419
2420
2421
2422
2423
2424
2425
2426
2427
2428
2429
2430
2431
2432
2433
2434
2435
2436
2437
2438
2439
2440
2441
2442
2443
2444
2445
2446
2447
2448
2449
2450
2451
2452
2453
2454
2455
2456
2457
2458
2459
2460
2461
2462
2463
2464
2465
2466
2467
2468
2469
2470
2471
2472
2473
2474
2475
2476
2477
2478
2479
2480
2481
2482
2483
2484
2485
2486
2487
2488
2489
2490
2491
2492
2493
2494
2495
2496
2497
2498
2499
2500
2501
2502
2503
2504
2505
2506
2507
2508
2509
2510
2511
2512
2513
2514
2515
2516
2517
2518
2519
2520
2521
2522
2523
2524
2525
2526
2527
2528
2529
2530
2531
2532
2533
2534
2535
2536
2537
2538
2539
2540
2541
2542
2543
2544
2545
2546
2547
2548
2549
2550
2551
2552
2553
2554
2555
2556
2557
2558
2559
2560
2561
2562
2563
2564
2565
2566
2567
2568
2569
2570
2571
2572
2573
2574
2575
2576
2577
2578
2579
2580
2581
2582
2583
2584
2585
2586
2587
2588
2589
2590
2591
2592
2593
2594
2595
2596
2597
2598
2599
2600
2601
2602
2603
2604
2605
2606
2607
2608
2609
2610
2611
2612
2613
2614
2615
2616
2617
2618
2619
2620
2621
2622
2623
2624
2625
2626
2627
2628
2629
2630
2631
2632
2633
2634
2635
2636
2637
2638
2639
2640
2641
2642
2643
2644
2645
2646
2647
2648
2649
2650
2651
2652
2653
2654
2655
2656
2657
2658
2659
2660
2661
2662
2663
2664
2665
2666
2667
2668
2669
2670
2671
2672
2673
2674
2675
2676
2677
2678
2679
2680
2681
2682
2683
2684
2685
2686
2687
2688
2689
2690
2691
2692
2693
2694
2695
2696
2697
2698
2699
2700
2701
2702
2703
2704
2705
2706
2707
2708
2709
2710
2711
2712
2713
2714
2715
2716
2717
2718
2719
2720
2721
2722
2723
2724
2725
2726
2727
2728
2729
2730
2731
2732
2733
2734
2735
2736
2737
2738
2739
2740
2741
2742
2743
2744
2745
2746
2747
2748
2749
2750
2751
2752
2753
2754
2755
2756
2757
2758
2759
2760
2761
2762
2763
2764
2765
2766
2767
2768
2769
2770
2771
2772
2773
2774
2775
2776
2777
2778
2779
2780
2781
2782
2783
2784
2785
2786
2787
2788
2789
2790
2791
2792
2793
2794
2795
2796
2797
2798
2799
2800
2801
2802
2803
2804
2805
2806
2807
2808
2809
2810
2811
2812
2813
2814
2815
2816
2817
2818
2819
2820
2821
2822
2823
2824
2825
2826
2827
2828
2829
2830
2831
2832
2833
2834
2835
2836
2837
2838
2839
2840
2841
2842
2843
2844
2845
2846
2847
2848
2849
2850
2851
2852
2853
2854
2855
2856
2857
2858
2859
2860
2861
2862
2863
2864
2865
2866
2867
2868
2869
2870
2871
2872
2873
2874
2875
2876
2877
2878
2879
2880
2881
2882
2883
2884
2885
2886
2887
2888
2889
2890
2891
2892
2893
2894
2895
2896
2897
2898
2899
2900
2901
2902
2903
2904
2905
2906
2907
2908
2909
2910
2911
2912
2913
2914
2915
2916
2917
2918
2919
2920
2921
2922
2923
2924
2925
2926
2927
2928
2929
2930
2931
2932
2933
2934
2935
2936
2937
2938
2939
2940
2941
2942
2943
2944
2945
2946
2947
2948
2949
2950
2951
2952
2953
2954
2955
2956
2957
2958
2959
2960
2961
2962
2963
2964
2965
2966
2967
2968
2969
2970
2971
2972
2973
2974
2975
2976
2977
2978
2979
2980
2981
2982
2983
2984
2985
2986
2987
2988
2989
2990
2991
2992
2993
2994
2995
2996
2997
2998
2999
3000
3001
3002
3003
3004
3005
3006
3007
3008
3009
3010
3011
3012
3013
3014
3015
3016
3017
3018
3019
3020
3021
3022
3023
3024
3025
3026
3027
3028
3029
3030
3031
3032
3033
3034
3035
3036
3037
3038
3039
3040
3041
3042
3043
3044
3045
3046
3047
3048
3049
3050
3051
3052
3053
3054
3055
3056
3057
3058
3059
3060
3061
3062
3063
3064
3065
3066
3067
3068
3069
3070
3071
3072
3073
3074
3075
3076
3077
3078
3079
3080
3081
3082
3083
3084
3085
3086
3087
3088
3089
3090
3091
3092
3093
3094
3095
3096
3097
3098
3099
3100
3101
3102
3103
3104
3105
3106
3107
3108
3109
3110
3111
3112
3113
3114
3115
3116
3117
3118
3119
3120
3121
3122
3123
3124
3125
3126
3127
3128
3129
3130
3131
3132
3133
3134
3135
3136
3137
3138
3139
3140
3141
3142
3143
3144
3145
3146
3147
3148
3149
3150
3151
3152
3153
3154
3155
3156
3157
3158
3159
3160
3161
3162
3163
3164
3165
3166
3167
3168
3169
3170
3171
3172
3173
3174
3175
3176
3177
3178
3179
3180
3181
3182
3183
3184
3185
3186
3187
3188
3189
3190
3191
3192
3193
3194
3195
3196
3197
3198
3199
3200
3201
3202
3203
3204
3205
3206
3207
3208
3209
3210
3211
3212
3213
3214
3215
3216
3217
3218
3219
3220
3221
3222
3223
3224
3225
3226
3227
3228
3229
3230
3231
3232
3233
3234
3235
3236
3237
3238
3239
3240
3241
3242
3243
3244
3245
3246
3247
3248
3249
3250
3251
3252
3253
3254
3255
3256
3257
3258
3259
3260
3261
3262
3263
3264
3265
3266
3267
3268
3269
3270
3271
3272
3273
3274
3275
3276
3277
3278
3279
3280
3281
3
```

براساس مقادیر بدست آمده، سنسورهای ولتاژ و جریان مورد استفاده از رزولیشن قابل قبولی برخوردار می باشند.

۷-۴- کالیبراسیون سنسور سرعت

سنسور سرعت مورد در این پروژه یک انکودر افزایشی مدل authonix E5058 بوده که تعداد پالس در هر دور مکانیکی آن ۲۰۰۰ می باشد و محدوده سرعت آن حداکثر تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه می باشد. با ارسال پالسهای خروجی انکودر به چیپ DSP سرعت رتور با نرخ بروز رسانی ۲۰ میلی ثانیه بروز رسانی می گردد. با توجه به رزولیشن بالای انکودر مورد استفاده (۲۰۰۰ پالس بر دور مکانیکی) در این دستگاه دقت تعیین موقعیت 0.18 درجه می باشد. با این جود برای کالیبراسیون سرعت از یک دستگاه سرعت سنج نوع استروبوسکوپ مدل TESTO475 استفاده شده که مطابق شکل ۷-۸ برای بازبینی و کالیبراسیون سنسور سرعت از آن استفاده شده است. تاییدیه کالیبراسیون دستگاه استروبوسکوپ TESTO475 در پیوست ۹-۳ شکلهای ۹-۷ و ۹-۸ آورده شده است.



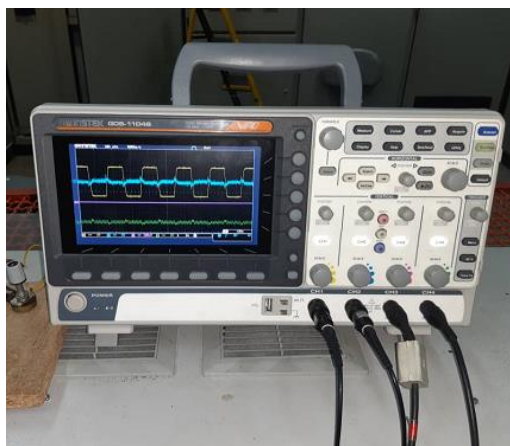
شکل ۷-۷: کالیبراسیون انکودر سرعت با استفاده از سرعت سنج استروبوسکوپ TESTO475

به منظور اطمینان از کالیبراسیون دستگاه، در مرحله تست های نهایی مطابق شکل ۷-۸ خروجی توان و مقادیر ولتاژ و جریان با استفاده از یک دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396 کالیبره شده مورد بازبینی (cross check) قرار گرفته است. تاییدیه دستگاه آنالیزور توان در پیوست ۹-۴ شکلهای ۹-۹ تا ۹-۱۲ آورده شده است.



شکل ۷-۸: بازبینی نتایج با استفاده از آنالیزور توان HIOKI1396

مطابق شکل ۷-۱۰، کلیه اندازه گیری های انجام شده در مراحل تست و شکل موجهای ثبت شده در گزارش فصل ۵ با استفاده از یک دستگاه اسیلوسکوپ GPS11048 انجام شده که تاییدیه کالیبراسیون آن در پیوست ۹-۵ شکل ۹-۱۳ ارائه شده است.



شکل ۷-۹: اندازه‌گیری خروجی تست با استفاده از دستگاه اسیلوسکوپ GPS11048

۷-۵- نتیجه‌گیری

در این فصل اجزاء و المان‌های موثر بر دقت دستگاه مورد بررسی قرار گرفت. در هر مورد منابع خطا و دقت المان‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین در هر بخش روش کالیبراسیون سنسورها تشریح و نحوه فرمت سیگنال‌های نمونه برداری شده بصورت آنالوگ و دیجیتال مورد بررسی قرار گرفت. برای هر یک از این المانها نحوه کالیبراسیون به اختصار به شرح زیر می باشد:

سنسور گشتاور: سنسور گشتاور دینامیکی به عنوان یکی از المان‌های کلیدی در دستگاه تست دینامومتری دارای تاییدیه استاندارد EN 61326-1(2013) و EN 61010-1(2013) محصول و گواهی تاییدیه کالیبراسیون می باشد.

نحوه تطبیق سیگنال خروجی با چیپ DSP و کارت I/O متصل به نرم افزار Labview در این بخش بررسی گردید. سنسور سرعت: کالیبراسیون سنسور سرعت با استفاده از سرعت سنج استروبوسکوپ و تطبیق خروجی آن با نتایج بدست آمده از سنسور انکودر انجام گردید. پس از انجام تست در نقاط مختلف ضریب تصحیح محاسبه و به سرعت اندازه گیری شده از طریق انکودر اعمال گردید.

سنسور ولتاژ و جریان: کالیبراسیون سنسورهای ولتاژ و جریان و تعیین ضریب تبدیل سنسور با استفاده از یک مولتی متر دقیق کالیبراسیون شده بصورت آزمایشگاهی انجام گردید. ضرایب حاصل از کالیبراسیون به صورت نرم افزاری در DSP نرم افزار Labview مورد استفاده قرار گرفت.

پس از مونتاژ نهایی و یکپارچه سازی سیستم تست، خروجی سنسورها شامل ولتاژ، جریان، سرعت و گشتاور با استفاده از دستگاه آنالیزور توان، مولتی متر و سرعت سنج با خروجی دستگاه مقایسه و صحت گذاری گردید.

فصل ۸- نتیجه گیری و پیشنهادات

۸-۱- نتیجه گیری و پیشنهادات

هدف این پژوهش دستیابی به دانش طراحی و ساخت یک سیستم دینامومتری جهت بازتولید پروفایل بارهای صنعتی به صورت برنامه ریزی شده و بارگذاری آن بر روی سیستم موتور و درایو صنعتی تحت تست بوده است. این پروژه به شرح خلاصه زیر در چهار مرحله انجام گردید:

مرحله اول: طراحی تفصیلی و شبیه سازی سیستم دینامومتر؛ در این مرحله انواع سیستم های دینامومتری و نمونه های تجاری مورد بررسی قرار گرفت. پس از رصد فن آوری های موجود و بررسی مقالات و سوابق پژوهشی انجام گرفته در این زمینه، طراحی مفهومی و تفصیلی اجزاء میز تست شامل کلیه زیر بخشهای الکترونیک، ابزار دقیق، کنترل و الکترونیک قدرت انجام گرفت. پس از بررسی روش های کنترلی مختلف، روش کنترل برداری غیر مستقیم با جهت یابی شار رتور به عنوان روش کنترل سیستم دینامومتر مبتنی بر موتور القایی انتخاب گردید. همچنین در این مرحله مدلسازی دینامیکی سیستم دینامومتر در محیط مطلب انجام و عملکرد سیستم درایو مورد شبیه سازی و ارزیابی قرار گرفت. در ادامه این مرحله ساختار کلی نرم افزار دستگاه تست و قابلیت های آن معرفی گردید. در بخش پایانی مرحله اول پروژه، لیست قطعات (BOM) و نقشه های ساخت بردهای الکترونیک و قدرت و نقشه تابلو دستگاه ارائه گردید.

مرحله دوم: ساخت و پیاده سازی زیر بخشهای سخت افزاری و نرم افزاری دستگاه

در این مرحله از پروژه بر اساس نقشه های ساخت ارائه شده در مرحله نخست پروژه، هر یک از زیر بخشهای دستگاه میز تست پیاده سازی گردید. از جمله ماژول های ساخته شده در این بخش شامل برد DSP، ماژول IPM و مدار فرمان IGBT، منبع تغذیه بردهای الکترونیک، بردهای سنسور ولتاژ و جریان، برد واسط سنسور انکودر اندازه گیری سرعت، برد DAC دو کاناله، فیلتر سمت شبکه، سیستم خنک سازی، مدارت حفاظتی، تابلو و شینه های دستگاه و مقاومت دینامیکی شین DC بوده است. در هر مرحله از ساخت، اجزاء ساخته شده قبل از نصب در داخل تابلو برای اطمینان از عملکرد صحیح مورد آزمون قرار گرفته اند.

مرحله سوم: جمع سیستم و انجام تستهای عملکردی

پس از ساخت و مونتاژ اجزاء در داخل تابلو و جمع سیستم، تست های مختلف با هدف ارزیابی عملکرد سیستم دینامومتر انجام گردید. در این مرحله سناریو های مختلفی مورد آزمون قرار گرفت که نتیجه گیری نهایی این تست ها به شرح زیر اعلام می گردد: سیستم کنترل دینامومتر در مد کنترل سرعت به ازای مقادیر ورودی سرعت مرجع با پروفایلهای مختلف اعم از پله، مثلثی و سینوسی مورد تست قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می دهد سیستم دینامومتر ساخته شده از دینامیک قابل قبولی برخوردار می باشد. بر اساس نتایج تستهای انجام گرفته حداکثر فرکانس ردیابی ورودی مرجع در مد کنترل سرعت حدود 0.5HZ می باشد. سیستم کنترل دینامومتر در مد کنترل گشتاور به ازای پروفایل های مختلف گشتاور مرجع مورد آزمون قرار گرفت. نتایج تست ها نشان می دهد سیستم دینامومتر در مد کنترل گشتاور ورودی مرجع گشتاور سینوسی با فرکانس حداکثر 40HZ را با دینامیک قابل قبولی ردیابی می کند. بر این اساس با توجه به دینامیک بالای کنترل مد گشتاور، این روش کنترلی به عنوان روش درایو دینامومتر انتخاب گردید.

در ادامه با اتصال موتور و درایو تحت تست به دستگاه دینامومتر، انواع مشخصه های گشتاور بار های صنعتی مورد آزمون قرار گرفت. بررسی نتایج تست نشان می دهد دستگاه دینامومتر ساخته شده با دقت مناسب قابلیت بارگذاری مشخصه های گشتاور استاتیکی انواع بارهای صنعتی را دارا می باشد. همچنین قابل ذکر است سیستم دینامومتر پیاده سازی شده علاوه بر گشتاور بار استاتیکی، قابلیت تولید مولفه گشتاور دینامیکی بارهای صنعتی (ناشی از اینرسی بار) را دارا می باشد. نتایج تست های آزمایشگاهی نشان می دهد سیستم دینامومتر پیاده سازی شده قابلیت اعمال گشتاور دینامیکی ناشی از اینرسی های مختلف بار بر روی موتور تحت تست را دارا می باشد. یکی از قابلیت های نوآورانه سیستم دینامومتر پیاده سازی شده در این پروژه، امکان بارگذاری رفتارهای پیچیده و غیر خطی بارهای صنعتی بر روی سیستم موتور و درایو تحت تست می باشد. چند نمونه از رفتارهای غیر خطی معمول در بارهای صنعتی شامل عدم هم محوری، مکانیزم بادامک و مکانیزم میل لنگ مورد تست قرار گرفتند. نتایج تست به ازای مقادیر مختلف پارامترهای قابل تنظیم این نوع

از بارها نشان می‌دهد سیستم دینامومتر پیاده‌سازی شده قادر است تا این رفتارهای غیر خطی را در محدوده وسیع فرکانسی تولید و به موتور و درایو تحت تست اعمال نماید. لازم به ذکر است این ویژگی دستگاه دینامومتر ساخته شده در این پروژه در هیچ یک از نمونه‌های تجاری سیستم دینامومتر وجود نداشته است.

مرحله چهارم: راه‌اندازی سیستم/اكتساب داده و پیاده‌سازی نرم‌افزار Labview:

در این مرحله به منظور پایش و اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی دستگاه دینامومتر یک رابط گرافیکی در محیط نرم‌افزار Labview پیاده‌سازی شده است. مدیریت سناریوهای تست، حفاظت دستگاه، پردازش داده‌ها در حوزه زمان و فرکانس و آنالیز توان سیستم تست از جمله قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌باشد. در این مرحله با ارسال سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به نرم‌افزار پیاده‌سازی شده قابلیت‌های مختلف نرم‌افزار مورد آنالیز و صحت‌گذاری قرار گرفته است.

در بخش پایانی گزارش مرحله چهارم المان‌های تاثیر گذار بر دقت دستگاه معرفی و محدوده هر یک از پارامترها ارائه می‌گردد. در این بخش روش کالیبراسیون سنسورهای ولتاژ، جریان و سرعت مورد استفاده در این پروژه تشریح گردید. سنسور گشتاور به عنوان یکی از المان‌های کلیدی در این دستگاه دارای تاییدیه کالیبراسیون بوده است.

پس از مونتاژ نهایی و یکپارچه‌سازی سیستم تست، کلیه کمیت‌های اندازه‌گیری شده (ولتاژ، جریان، سرعت) با استفاده از دستگاه آنالیزور توان، مولتی متر و سرعت سنج صحت‌گذاری و در صورت نیاز کالیبره گردید.

۲-۸-پیشنهادهات

بر اساس نتایج بدست آمده از این پروژه پیشنهادات زیر جهت توسعه دانش فنی سیستم دینامومتر AC و تجاری‌سازی این محصول ارائه می‌گردد:

- استفاده از روش‌های کنترلی پیشرفته مانند روش پیش بین به منظور افزایش پهنای باند سیستم دینامومتر
- از آنجایی که سیستم دینامومتر یک تجهیز ابزار دقیق مرجع می‌باشد، استفاده از روش‌های کنترلی (مانند کنترل مد لغزشی) که نسبت به تغییر پارامترها و عدم قطعیت‌های سیستم مقاوم هستند می‌تواند عملکرد سیستم را در بلند مدت تضمین کند.
- یکی از قابلیت‌های سیستم دینامومتر، امکان تست انواع موتورهای الکتریکی با اندازه فریم‌های مختلف (در محدوده مجاز توان و سرعت دینامومتر) می‌باشد. برای این منظور لازم است تا یک سازه مکانیکی قابل تنظیم در سه جهت طول و عرض و ارتفاع طراحی و ساخته شود.

- نمونه ساخته شده سیستم دینامومتر در این پروژه، اولین نمونه بومی سازی شده دینامومتر AC می‌باشد. پس از انجام این پروژه TRL این فن آوری از صفر به محدوده ۵ ارتقاء پیدا کرده است. با هدف تجاری‌سازی و توسعه این فن آوری پیشنهاد می‌شود ساخت یک نمونه صنعتی دستگاه تست دینامومتری در آزمایشگاه ماشین‌های الکتریکی در دستور کار قرار گیرد.

فصل ۹- پیوست

پیوست ۱: پارامترهای گشتاور بارهای غیر خطی

در جداول زیر پارامترهای مربوط به شبیه سازی های گشتاور بارهای غیر خطی نشان داده شده اند.

جدول ۹-۱: پارامترهای موتور

پارامتر	نماد	مقدار
توان نامی	P_n	50 Hp
ولتاژ نامی	V_n	400 V
فرکانس نامی	f_n	50 Hz
جفت قطب ها	p	2
ممان اینرسی موتور	J_m	0.18 Kg.m ²
ممان اینرسی بار	J_l	0.18 Kg.m ²

جدول ۹-۲: پارامترهای بازوی مکانیکی دو حلقه ای

پارامتر	نماد	مقدار
جرم حلقه اول	m_1	5 Kg
جرم حلقه دوم	m_2	5 Kg
طول حلقه اول	l_1	50 Cm
طول حلقه دوم	l_2	50 Cm
فاصله از مرکز جرم حلقه اول	d_1	25 Cm
فاصله از مرکز جرم حلقه دوم	d_2	25 Cm
ممان اینرسی حلقه اول	J_1	0.18 Kg.m ²
ممان اینرسی حلقه دوم	J_2	0.18 Kg.m ²

جدول ۹-۳: پارامترهای مکانیزم بادامکی

پارامترها	نماد	مقدار
فاصله بین مرکز صفحه و مرکز میل بادامک	d_c	5 Cm
سختی فنر	K_f	5 N.m/rad
جرم پیرو	m_c	10 Kg
نیروی اولیه فنر	P	75 N.m

پیوست ۲: پارامترهای مکانیزم میل لنگ

پارامتر	نماد	مقدار
The crank length	r_{cs}	10 Cm
The connecting rod length	l_{cr}	30 Cm
The distance between the center of piston and the point "O"	d_{cs}	2 Cm
The connecting rod mass	m_{cr}	3 Kg
The piston mass	m_p	1 Kg
The normal force	F_n	200 N

پیوست ۲: تاییدیه های سنسور ها و تجهیزات اندازه گیری

DICHIAZIONE DI CONFORMITÀ <i>Declaration of conformity</i>		
Costruttore:	AEP transducers SRL	Manufacturer:
Indirizzo:	Via Bottego 33/A 41126 Cognento MODENA Italia	Address:
DICHIARA CHE IL SEGUENTE PRODOTTO: <i>Declares that the following product</i>		
Nome prodotto:	RT2 – RT2A	Product name:
Tipo:	TORSIOMETRO <i>Torque transducer</i>	Type:
È CONFORME AI REQUISITI DEFINITI DALLE SEGUENTI NORME <i>Conforms to the requirements defined by the following norms</i>		
EN 61326-1 (2013) EN 61010-1 (2013)		
È CONFORME AI REQUISITI DEFINITI DALLE SEGUENTI DIRETTIVE <i>Conforms to the requirements defined by the following directives</i>		
2004/108/CE 2006/95/CE 2011/65/UE (RoHS) 2012/19/UE (RAEE/WEEE)		
È CONFORME AL REGOLAMENTO <i>Conforms to the regulation</i>		
1907/2006 (REACH)		
Il prodotto è stato provato nella configurazione tipica di installazione, descritta nel manuale di istruzioni. Il prodotto sopra descritto soddisfa i requisiti delle Norme citate, sulla base dei risultati delle prove e delle valutazioni descritte nel Fascicolo Tecnico. Io sottoscritto dichiaro che il prodotto sopra descritto soddisfa i requisiti delle Direttive, delle Norme e dei regolamenti sopra citati. Questa dichiarazione copre tutte le opzioni specificate nel catalogo di vendita. Sistema Qualità certificato secondo lo schema normativo EN ISO 9001 (2008).		
The product has been tested in the typical installation configuration, as described in the instruction manual. Above described product meets the requirements of mentioned Norms, basing on both test results and considerations listed in the Technical File. I declare that above described product meets the requirements of the Directives, Norms and Regulations above mentioned. This declaration covers all the options specified in the sales catalogue. Quality System certified according to the EN ISO 9001 (2008) norm.		
41126 Cognento MODENA Italia Data: 11/04/2014		
Lioli Giovanni Direttore Tecnico Technical Manager		
Tel: +39-(0)59-346441 Fax: +39-(0)59-346437 E-mail: aep@aep.it Web site: www.aep.it		

شکل ۹-۱: تاییدیه استاندارد EN 61010-1(2013) و EN 61326-1(2013) کالای سنسور گشتاور RT2A




Via Bottego, 33/A
41126 Cognento (MO)
Tel. 059 346441
Fax 059 2922007
aep@aep.it
http://www.aep.it

Celle di carico • Dinamometri • Trasduttori di pressione • Manometri digitali • Torsionometri • Strumentazione
Load cells • Dynamometers • Pressure transducers • Pressure gauges • Torque transducers • Instrumentations

RAPPORTO DI TARATURA N° 00014C (Calibration Report No.)

Destinatario (Addressee): -
 Data delle misure (Date of measurements): 07/03/14
 Temperatura di prova (Room temperature): 20 °C

SISTEMA CAMPIONE (STANDARD SYSTEM)

Oggetto (Device): Calibratore resistivo (Calibration unit)
 Costruttore (Manufacturer): HBM
 Tipo (Type): K 3608
 N° di serie (Serial number): 42311
 Campo di misura (Measurement range): (-3 ÷ 3) mV/V
 Campione munito di certificato di taratura N°: 13-0542-01 (INRIM)
 (Standard validated by certificate of calibration No.)
 Incertezza dello strumento campione: 0,002 %
 (Expanded Uncertainty of standard):

SISTEMA IN TARATURA (SYSTEM TO BE CALIBRATED)

Oggetto (Device): Indicatore digitale (Digital indicator)
 Costruttore (Manufacturer): AEP transducers
 Tipo (Type): MP10
 N° di serie (Serial Number): 6218
 Campo di misura (max range): (-2 ÷ 2) mV/V
 Risoluzione (Resolution): 0,00001 mV/V

NOTE (NOTES): Taratura eseguita sul canale 0 dell'indicatore.

MISURE (MEASUREMENTS)

Punti di misura (Measure points) n°	Segnale positivo (Positive signal)		Segnale negativo (Negative signal)	
	Segnale nominale (Nominal signal) mV/V	Segnale misurato (Measured signal) mV/V	Segnale nominale (Nominal signal) mV/V	Segnale misurato (Measured signal) mV/V
0	0,0	0,00000	0,0	0,00000
1	0,4	0,40001	-0,2	-0,40000
2	0,8	0,80001	-0,4	-0,80001
3	1,2	1,20000	-0,6	-1,19999
4	1,6	1,60000	-0,8	-1,60000
5	2,0	1,99998	-1,0	-1,99999

Operatore Tecnico
(Technical Operator)

Il Centro di taratura ACCREDIA LAT N° 093 collabora con i settori di produzione di AEP transducers per assicurare la tracciabilità delle misure al Sistema Internazionale delle Unità (SI)
 ACCREDIA Calibration Centre LAT N° 093 cooperates with production sectors of AEP transducers to ensure the measurements traceability to the International System of Units (SI)

شکل ۲-۹: تاییدیه کالیبراسیون سنسور گشتاور در جهت ساعتگرد و پاد ساعتگرد سنسور RT2A

۹-۱- تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر دیجیتال

شرکت دانش بنیان مهندسی سنجش کوشا
FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS
Calibration & measurement Certificate / test report

سانجش کوشا
ENGINEERING

Certificate No :	0000517-01	شماره گواهی :
Customer Name :	پژوهشگاه نیرو-ان ماشینهای الکتریکی	نام مشتری :
Equipment / Tools :	DIGITAL MULTIMETER	نام دستگاه :
Model :	PC520M	مدل :
SerialNo:	2148787	سریال :
Code :	103	کد :
Manufacture :	SANWA	سازنده :
Receipt Date :	1400/03/22	تاریخ پذیرش :
Calibration Date :	1400/03/24	تاریخ کالیبراسیون :
Issue Date :	1400/03/30	تاریخ صدور :
Due Date :		تاریخ انقضاء :

Traceability : The reference standards are traceably calibrated at an accredited calibration laboratory or a national metrology institute.

Ambient Condition : Temperature : $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ Humidity : $(40 \pm 15)\%$

Method(s) : IDS-GDL-0316, IDS331, IDS351

Reference(s) :
1- Multifunction Calibrator Model M-142 (C/N:9901569-07)
2- Digital Multimeter Model 34401A (C/N:9900753-03)

Uncertainty : The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor ($k=2$), providing a level of confidence of approximately 95%

Remarks :
1- The test report or calibration certificate shall not be reproduced except in full, without written approval of the SKE laboratory.
2- This certificate without the SKE laboratory stamp is not valid.

Accomplished by : 113

Approved by : محمد حسین جوادى نیا

LAB.Stamp:

Page NO. 1 of 4

0000517-01

تهران، خیابان آزادی، بعد از دانشگاه صنعتی شریف، رویروی بلوار استاد معین، بلوار شهید اکبری، کوی عباس شرقی، پلاک 9
Tel: (+9821)66062854-S Fax: (+9821)66017336 Email: info@sanjeshkoosha.ir Web: www.sanjeshkoosha.ir
Rev Date: Nov 2019

شکل ۳-۹: تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر دیجیتال PC520M

شرکت دانش بنیان
مهندسی سنجش کوشا
FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS.
Calibration & measurement Certificate / test report

SANTOSH KOUSHI
SK
ENGINEERING

PARAMETER	REF. SETTING	UUT. READING	ERROR	EXP. UNC.
DC VOLTAGE TEST :	1.000 mV	0.99 mV	- 0.01 mV	± 0.0074 mV
Range: 20 mV	2.000	1.99	- 0.01	± 0.0074 mV
	4.000	3.98	- 0.02	± 0.0074 mV
	8.000	7.97	- 0.03	± 0.0075 mV
	10.000	9.97	- 0.03	± 0.0076 mV
	15.000	14.96	- 0.04	± 0.0078 mV
	20.000	19.94	- 0.06	± 0.0079 mV
Range: 200 mV	40.000 mV	39.93 mV	- 0.07 mV	± 0.0088 mV
	80.000	79.9	- 0.1	± 0.058 mV
	100.00	99.9	- 0.1	± 0.058 mV
	150.00	149.9	- 0.1	± 0.058 mV
	200.00	199.8	- 0.2	± 0.058 mV
Range: 500 mV	50.00 mV	50.0 mV	0.0 mV	± 0.058 mV
	100.00	99.9	- 0.1	± 0.058 mV
	200.00	199.8	- 0.2	± 0.058 mV
	400.00	399.7	- 0.3	± 0.059 mV
	500.00	499.6	- 0.4	± 0.059 mV
Range: 5 V	1.0000 V	0.999 V	- 0.001 V	± 0.00058 V
	2.0000	1.998	- 0.002	± 0.00058 V
	4.0000	3.996	- 0.004	± 0.00058 V
	5.0000	4.996	- 0.004	± 0.00058 V
Range: 50 V	10.000 V	9.99 V	- 0.01 V	± 0.0058 V
	20.000	19.98	- 0.02	± 0.0058 V
	40.000	39.96	- 0.04	± 0.0058 V
	50.000	49.95	- 0.05	± 0.0058 V
Range: 500 V	100.00 V	99.9 V	- 0.1 V	± 0.058 V
	200.00	199.9	- 0.1	± 0.058 V
	400.00	399.7	- 0.3	± 0.066 V
	500.00	499.7	- 0.3	± 0.068 V
Range: 1000 V	600.0 V	600 V	0 V	± 0.58 V
	800.0	800	0	± 0.58 V
	1000.0	1000	0	± 0.58 V

Page NO. 2 of 4

101

0000517-01

شکل ۴-۹: تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر دیجیتال PC520M

  شرکت دانش بنیان مهندسی سنجش کوشا FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS. <i>Calibration & measurement Certificate / test report</i>  				
PARAMETER	REF. SETTING	UUT. READING	ERROR	EXP. UNC.
AC VOLTAGE TEST : @ 50 Hz Range: 500 mV Range: 5 V Range: 50 V Range: 500 V Range: 1000 V	50.00 mV	50.1 mV	+0.1 mV	± 0.12 mV
	100.00	99.6	- 0.4	± 0.15 mV
	400.00	394.8	- 5.2	± 0.13 mV
	500.00	491.7	- 8.3	± 0.14 mV
	1.0000 V	0.997 V	- 0.003 V	± 0.00060 V
	2.0000	1.987	- 0.013	± 0.00064 V
	4.0000	3.949	- 0.051	± 0.0013 V
	5.0000	4.917	- 0.083	± 0.0013 V
	10.000 V	9.96 V	- 0.04 V	± 0.0060 V
	20.000	19.87	- 0.13	± 0.0064 V
	40.000	39.47	- 0.53	± 0.014 V
	50.000	49.15	- 0.85	± 0.015 V
	100.00 V	99.7 V	- 0.3 V	± 0.062 V
	200.00	198.7	- 1.3	± 0.068 V
	400.00	394.5	- 5.5	± 0.24 V
	500.00	491.3	- 8.7	± 0.26 V
	600.0 V	601 V	+1 V	± 0.64 V
	800.0	800	0	± 0.66 V
	1000.0	998	- 2	± 0.68 V
DC CURRENT TEST Range: 500 - 5000 μ A Range: 50 - 500 mA Range: 5 - 10 A	500.00 μ A	499.7 μ A	- 0.3 μ A	± 0.18 μ A
	5000.0	4997	- 3	± 1.13 μ A
	50.000 mA	49.96 mA	- 0.04 mA	± 0.010 mA
	500.00	494.7	- 5.3	± 0.14 mA
	5.0000 A	5.055 A	+0.055 A	± 0.0061 A
	9.0000	9.02	+0.02	± 0.0064 A
AC CURRENT TEST @ 50 Hz Range: 500 - 5000 μ A Range: 50 - 500 mA Range: 5 - 10 A	500.00 μ A	489.1 μ A	- 10.9 μ A	± 0.70 μ A
	5000.0	4896	- 104	± 7.52 μ A
	50.000 mA	48.96 mA	- 1.04 mA	± 0.082 mA
	500.00	488.3	- 11.7	± 1.10 mA
	5.0000 A	5.086 A	+0.086 A	± 0.015 A
	9.0000	8.97	- 0.03	± 0.025 A



شرکت دانش بنیان
مهندسی سنجش کوشا
 FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS.
Calibration & measurement Certificate / test report



PARAMETER	REF. SETTING	UUT. READING	ERROR	EXP. UNC.
RESISTANCE TEST Range: 500 Ω	10.000 Ω	10.27 Ω	+0.27 Ω	$\pm 0.0058 \Omega$
	50.000	50.13	+0.13	$\pm 0.0058 \Omega$
	100.00	100.0	0.0	$\pm 0.058 \Omega$
	200.00	199.7	- 0.3	$\pm 0.058 \Omega$
	500.00	498.7	- 1.3	$\pm 0.058 \Omega$
CAPACITANCE TEST	50.000 nF	48.64 nF	- 1.36 nF	$\pm 0.20 \text{ nF}$
	500.00	491.1	- 8.9	$\pm 4.34 \text{ nF}$
	5.0000 μF	4.907 μF	- 0.093 μF	$\pm 0.048 \mu\text{F}$
	50.000	49.18	- 0.82	$\pm 0.48 \mu\text{F}$
	500.00	491	- 9	$\pm 4.87 \mu\text{F}$
	900.00	882	- 18	$\pm 7.26 \mu\text{F}$
FREQUENCY TEST	10.000 Hz	10.00 Hz	0.00 Hz	$\pm 0.0058 \text{ Hz}$
	100.00	100.0	0.0	$\pm 0.0058 \text{ Hz}$
	1.0000 kHz	1.000 kHz	0.000 kHz	$\pm 0.00060 \text{ kHz}$
	10.000	10.00	0.00	$\pm 0.0060 \text{ kHz}$
	100.000	99.99	- 0.01	$\pm 0.0060 \text{ kHz}$
	150.000	150.0	0.0	$\pm 0.060 \text{ kHz}$
	200.000	200.0	0.0	$\pm 0.06 \text{ kHz}$
CONTINUITY TEST	< 70 Ω	PASS	-	-
DIODE TEST	-	3.067 V DC	-	-

NOTE : RESISTANCE RANGE LIMITED TO 500 OHM.



Page NO. 4 of 4 0000517-01

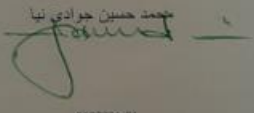
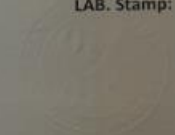
Abbreviations

UUT. : Unit Under Test REF. : Reference TOL. : Tolerance EXP. UNC. : Expanded Uncertainty

Form No: SKP79802 Rev. No: 00 Rev. Date: Nov 2019

شکل ۶-۹: تاییدیه کالیبراسیون مولتی متر دیجیتال PC520M

۹-۲- تاییدیه کالیبراسیون سرعت سنج استروسکوپ

  		
شرکت دانش بنیان مهندسی سنجش کوشا FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS. <i>Calibration & measurement Certificate / test report</i>		
Certificate No :	9602731-01	شماره گواهی :
Customer Name :	پژوهشگاه نیرو	نام مشتری :
Equipment / Tools :	STROBOSCOPE	نام دستگاه :
Model :	TESTO 475	مدل :
Serial No:	EM-02	سریال :
Code :		کد :
Manufacture :	TESTO	سازنده :
Receipt Date :	1396/12/16	تاریخ پذیرش :
Calibration Date :	1397/01/21	تاریخ کالیبراسیون :
Issue Date :	1397/01/21	تاریخ صدور :
Due Date :		تاریخ انقضاء :
Traceability :	The reference standards are traceably calibrated at an accredited calibration laboratory or a national metrology institute.	
Ambient Condition :	Temperature : (23±2)°C	Humidity : (40±15)%
Method(s) :	IDS337	
Reference(s) :	1- Tachometer Test Machine Model P077C2 (C/N:9500063-04) 2- Photo Contact tachometer Model DT-2236 (C/N:9502891-07)	
Uncertainty :	The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor (k=2), providing a level of confidence of approximately 95%	
Remarks :	1- The test report or calibration certificate shall not be reproduced except in full, without written approval of the SKE laboratory. 2- This certificate without the SKE laboratory stamp is not valid.	
Accomplished by :	Approved by :	LAB. Stamp:
		
Page NO. 1 of 2	9602731-01	
تهران، خیابان آزادی، بعد از دانشگاه صنعتی شریف، رویروی بلوار استاد مبین، بلوار شهید اکبری، گوی عباس شرفی، پلاک 9 Tel: (+9821)66062854-5 Fax: (+9821)66017336 Email: info@sanjeshkoosha.ir Web: www.sanjeshkoosha.ir Form No: SF51002 Rev. No: 05 Rev. Date: May 2015		

شکل ۹-۷: تاییدیه کالیبراسیون سرعت سنج استروسکوپ مدل TESTO475

شرکت دانش بنیان
مهندسی سنجش کوشا
FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS.
Calibration & measurement Certificate / test report

SANEESH KOOSIA
ENGINEERING

NACI
NACHI138
FS-ATSC-103
UR/1

PARAMETER	UUT. SETTING	REF. READING	ERROR	EXP.UNC.
RPM TEST: (Photo Mode)	100 rpm	100.0 rpm	0.0 rpm	± 0.90 rpm
	200	200.0	0.0	± 0.95 rpm
	400	400.0	0.0	± 1.05 rpm
	800	799.9	+0.1	± 1.25 rpm
	1000	1000	0	± 2.25 rpm
	1200	1200	0	± 2.35 rpm
	1500	1500	0	± 2.50 rpm
	2000	2000	0	± 2.75 rpm
	2500	2500	0	± 3.00 rpm
	3000	3000	0	± 3.25 rpm
	5000	5000	0	± 4.25 rpm
	6000	6000	0	± 4.75 rpm
	7000	7000	0	± 5.25 rpm
	8000	8000	0	± 5.75 rpm
	10000	10000	0	± 6.75 rpm
	15000	15000	0	± 9.25 rpm
	20000	20000	0	± 11.75 rpm
RPM TEST: (Contact Mode)	200.0 rpm	200.0 rpm	0.0 rpm	± 0.11 rpm
	400.0	400.0	0.0	± 0.21 rpm
	800.0	800.0	0.0	± 0.40 rpm
	1000.0	1000	0	± 0.78 rpm
	2000.0	2000	0	± 1.16 rpm
	4000.0	4000	0	± 2.09 rpm
	6000.0	6000	0	± 3.06 rpm
	8000.0	8000	0	± 4.05 rpm
	9000.0	9000	0	± 4.54 rpm

شکل ۸-۹: تاییدیه کالیبراسیون سرعت سنج استروسکوپ مدل TESTO475

۹-۳- تاییدیه کالیبراسیون دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396

شرکت دانش بنیان مهندسی سنجش کوشا
 FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS
 Calibration & measurement Certificate / test report

سانجش کوشا
 SANJESH KOOSHA
 ENGINEERING

Certificate No :	0000342-01	شماره گواهی :
Customer Name :	پژوهشگاه نیرو-از ماشینهای الکتریکی	نام مشتری :
Equipment / Tools :	AC POWER QUALITY ANALYZER	نام دستگاه :
Model :	3196	مدل :
SerialNo:	030916931	سریال :
Code :	EM-10	کد :
Manufacture :	HIOKI	سازنده :
Receipt Date :	1400/02/28	تاریخ پذیرش :
Calibration Date :	1400/03/02	تاریخ کالیبراسیون :
Issue Date :	1400/03/10	تاریخ صدور :
Due Date :		تاریخ انقضاء :

Traceability : The reference standards are traceably calibrated at an accredited calibration laboratory or a national metrology institute.

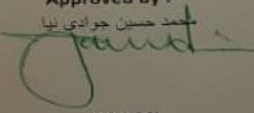
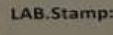
Ambient Condition : Temperature : (23±2)*C Humidity : (40±15)%

Method(s) : IDS324

Reference(s) : Portable Three Phase Calibrator Model YC99T-5C (C/N:9902229-01)

Uncertainty : The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor (k=2), providing a level of confidence of approximately 95%

Remarks : 1- The test report or calibration certificate shall not be reproduced except in full, without written approval of the SKE laboratory.
 2- This certificate without the SKE laboratory stamp is not valid.

Accomplished by :  Approved by :  LAB.Stamp: 

0000342-01

تهران، خیابان آزادی، بعد از دانشگاه صنعتی شریف، روبروی بلوار استاد معین، بلوار شهید اکبری، کوی عباس شرفی، پلاک 9
 Tel: (+9821)66062854 Fax: (+9821)66017336 Email: info@sanjeshkoosha.ir Web: www.sanjeshkoosha.ir
 Form No: SKP 03002 Rev No: 00 Rev Date: Nov 2019

شکل ۹-۹: تاییدیه کالیبراسیون دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396

شرکت دانش بنیان
مهندسی سنجش کوشا
FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS
Calibration & measurement Certificate / test report

SANTOSH KOOSHA
ENGINEERING

PARAMETER	REF. SETTING	UUT. READING			ERROR			EXP. UNC.
		CH1	CH2	CH3	CH1	CH2	CH3	
AC Voltage Test: @ 50 Hz Range : 600 V	10.000 V	10.01V	10.01V	10.02V	+0.01V	+0.01V	+0.02V	± 0.0060 V
	20.000	20.00	20.02	20.03	0.00	+0.02	+0.03	± 0.0064 V
	50.000	50.06	50.10	50.07	+0.06	+0.10	+0.07	± 0.016 V
	100.000	100.15	100.16	100.10	+0.15	+0.16	+0.10	± 0.023 V
	120.000	120.10	120.14	120.11	+0.10	+0.14	+0.11	± 0.025 V
	200.000	200.20	200.26	200.12	+0.20	+0.26	+0.12	± 0.036 V
	250.000	250.24	250.28	250.15	+0.24	+0.28	+0.15	± 0.21 V
	300.000	300.32	300.45	300.19	+0.32	+0.45	+0.19	± 0.22 V
	400.000	400.40	400.62	400.25	+0.40	+0.62	+0.25	± 0.24 V
	500.000	500.50	500.82	500.40	+0.50	+0.82	+0.40	± 0.26 V
	590.000	590.70	590.85	590.40	+0.70	+0.85	+0.40	± 0.27 V

Page NO: 2 of 10

101

0000342-01

شکل ۱۰-۹: تاییدیه کالیبراسیون دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396

  شرکت دانش بنیان مهندسی سنجش کوشا FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS. Calibration & measurement Certificate / test report 				
PARAMETER	REF. SETTING	UUT. READING	ERROR	EXP. UNC.
AC Current Test : @ 50 Hz Range : 5 A Clamp S/N : 031044997 CH1	0.50000 A	0.5011 A	+0.0011 A	± 0.00028 A
	1.00000	1.000	0.000	± 0.00048 A
	1.50000	1.506	+0.006	± 0.00068 A
	2.00000	2.008	+0.008	± 0.00088 A
	3.00000	3.008	+0.008	± 0.0070 A
	4.00000	4.009	+0.009	± 0.0078 A
	5.00000	5.006	+0.006	± 0.0086 A
AC Power Test : @ 50 Hz CH1	50.000 W	0.0501 kW	+0.0001 kW	± 0.00018 kW
	100.000	0.1002	+0.0002	± 0.00020 kW
	200.000	0.2010	+0.0010	± 0.00026 kW
	500.000	0.5022	+0.0022	± 0.00053 kW
	800.000	0.8029	+0.0029	± 0.00082 kW
	1,00000 kW	1.0039	+0.0039	± 0.0010 kW
AC Current Test : @ 50 Hz Range : 100 A Clamp S/N : 030535970 CH1	10.000 A	10.03 A	+0.03 A	± 0.014 A
	20.000	20.05	+0.05	± 0.021 A
	30.000	30.08	+0.08	± 0.069 A
	40.000	40.08	+0.08	± 0.080 A
	50.000	50.10	+0.10	± 0.10 A
	60.000	60.12	+0.12	± 0.12 A
	70.000	70.15	+0.15	± 0.14 A
	80.000	80.17	+0.17	± 0.16 A
	100.000	100.22	+0.22	± 0.20 A
AC Power Test : @ 50 Hz CH1	2.0000 kW	2.008 kW	+0.008 kW	± 0.0027 kW
	5.0000	5.016	+0.016	± 0.0053 kW
	10.0000	10.028	+0.028	± 0.010 kW
	15.0000	15.044	+0.044	± 0.015 kW
	18.0000	18.053	+0.053	± 0.18 kW
	20.0000	20.060	+0.060	± 0.20 kW

شرکت دانش بنیان
مهندسی سنجش کوشا
FLIGHT & ISO/IEC 17025 STANDARDS ACCREDITED LABS
Calibration & measurement Certificate / test report

PARAMETER	REF. SETTING	UUT. READING	ERROR	EXP. UNC.
AC Current Test : @ 50 Hz Range : 500 A Clamp S/N : 20820382 CH1	5.000 A	5.02 A	+0.02 A	± 0.010 A
	10.000	10.02	+0.02	± 0.013 A
	20.000	20.03	+0.03	± 0.021 A
	50.000	50.06	+0.06	± 0.10 A
	100.000	100.11	+0.11	± 0.20 A
	150.000	150.08	+0.08	± 0.30 A
	200.000	200.09	+0.09	± 0.40 A
	300.000	300.08	+0.08	± 0.60 A
	400.000	400.09	+0.09	± 0.80 A
	500.000	500.05	+0.05	± 1.00 A
AC Power Test : @ 50 Hz CH1	1.000 kW	1.00 kW	0.00 kW	± 0.017 kW
	5.000	5.01	+0.01	± 0.018 kW
	10.000	10.02	+0.02	± 0.020 kW
	20.000	20.02	+0.02	± 0.026 kW
	50.000	50.03	+0.03	± 0.052 kW
	80.000	80.02	+0.02	± 0.081 kW
	100.000	100.03	+0.03	± 0.101 kW
AC Current Test : @ 50 Hz Range : 1000 A Clamp S/N : 031127269 CH1	10.000 A	0.0100 kA	0.0000 kA	± 0.000059 kA
	50.000	0.0500	0.0000	± 0.00012 kA
	100.000	0.1000	0.0000	± 0.00021 kA
	200.000	0.2000	0.0000	± 0.00040 kA
	400.000	0.4000	0.0000	± 0.00080 kA
	600.000	0.6000	0.0000	± 0.0012 kA
	800.000	0.7995	- 0.0005	± 0.0016 kA
	900.000	0.8995	- 0.0005	± 0.0018 kA
AC Power Test : @ 50 Hz CH1	10.000 kW	10.01 kW	+0.01 kW	± 0.020 kW
	20.000	20.02	+0.02	± 0.026 kW
	50.000	50.04	+0.04	± 0.052 kW
	80.000	80.05	+0.05	± 0.081 kW
	100.000	100.07	+0.07	± 0.10 kW
	120.000	120.07	+0.07	± 0.10 kW

Page NO. 4 of 10

101

0000342-01

شکل ۹-۱۲: تاییدیه کالیبراسیون دستگاه آنالیزور توان HIOKI1396

۴-۹- تاییدیه کالیبراسیون دستگاه اسیلوسکوپ

Simply Reliable

GW INSTEK

DECLARATION OF TRACEABLE CALIBRATION

Manufacturer: GW Instek
 Model: GDS-1104B
 Description: DIGITAL STORAGE OSCILLOSCOPE
 Serial Number: GET121015
 Temperature: 23 ± 5 °C
 Relative Humidity: Under 80 %

*Date in Service:
 **Next Calibration Date:

**Denotes the date customer receives and initially powers on the unit
 **Denotes the date of next calibration needed for the unit. Recommended calibration interval is 12 months after "Date in Service". Both dates are to be filled in by customer.*

This certifies that the above product was calibrated following Good Will instrument' calibration procedure, which is in compliance with the quality system of ISO 9001 registered.

Calibration Procedure: GWS-Q3-2S-010

GW Instek certifies the above product meets or exceeds its published specifications. Before the product being shipped out from the factory, it has been well calibrated using the calibration equipment traceable to the International System of Units (SI), consensus standards or ratio type measurements through national standards realized and maintained by the NML Taiwan, NIM China, NIST U.S or other National Measurement Institutes signatories to the CIPM MRA. This certificate shall not be reproduced, except in full, without the written approval of the calibration facility.

CALIBRATION EQUIPMENT USED:

Mfg./Model	Description	ID#
FLUKE/5820A	Oscilloscope Calibrator	070111007

Issued by: Joe Wu Manager: Serango Wang

ISO-9001 CERTIFIED MANUFACTURER

GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD. No. 2-1, Jhongxing Road, Tucheng Dist., New Taipei City, 236, Taiwan T (886) 2 2268-0389 F (886) 2 2268-1033 www.gwin1248.com

شکل ۱۳-۹: تاییدیه کالیبراسیون سرعت سنج استروسکوپ مدل GPS11048

مراجع

- [1] Qiang S, Lin L. Mechanical decoupling algorithm applied to electric drive test bed. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014;
- [2] Fajri P. Electric-drive vehicle emulation using advanced test bench.
- [3] Yin L, Zhao Z, Lu T, He F, Yuan L. A predictive DC voltage control scheme for back-to-back converters based on energy balance modeling. In *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on* 2011 Aug 20 (pp. 1-6). IEEE.
- [4] Akpolat ZH. Dynamic emulation of mechanical loads using a vector-controlled induction motor-generator set. *IEEE Trans Ind Electron* 1999
- [5] Fuengwarodsakul NH, Menne M, Inderka RB, De Doncker RW. High-dynamic four-quadrant switched reluctance drive based on DITC. *IEEE Trans Ind Appl* 2005.
- [6] Leonhard W. *Control of Electrical Drives*. 2001.
- [7] de Almeida AT, Ferreira FJTE, Both D. Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems. *IEEE Trans Ind Appl* 2005.
- [8] Oy, A.B.B. 7 Technical guide, Dimensioning of a drive system. 2011.
- [9] Pillai SK. *A first course on electrical drives*. New Age International; 1990.
- [10] Ohnishi K, Matsui N, Hori Y. Estimation, identification, and sensorless control in motion control systems. *Proc IEEE* 1994.
- [11] Bossio JM, Bossio GR, De Angelo CH. Angular misalignment in induction motors with flexible coupling. *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf., 2009*.
- [12] Szabat K, Orłowska-Kowalska T. Vibration suppression in a two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks - Comparative study. *IEEE Trans Ind Electron* 2007.
- [13] Lee DH, Lee JH, Ahn JW. Mechanical vibration reduction control of two-mass permanent magnet synchronous motor using adaptive notch filter with fast Fourier transform analysis. *IET Electr Power Appl* 2012.
- [14] Saarakkala SE, Hinkkanen M. State-space speed control of two-mass mechanical systems: Analytical tuning and experimental evaluation. *IEEE Trans Ind Appl* 2014.
- [15] Yang M, Wang C, Xu D, Zheng W, Lang X. Shaft Torque Limiting Control Using Shaft Torque Compensator for Two-Inertia Elastic System With Backlash. *IEEE/ASME Trans Mechatronics* 2016;21:2902–11.
- [16] Conwell JC, Johnson GE. Experimental investigation of link tension and roller-sprocket impact in roller chain drives. *Mech Mach Theory* 1996;31:533–44.
- [17] Merzouki R, Medjaher K, Djeziri MA, Ould-Bouamama B. Backlash fault detection in mechatronic system. *Mechatronics* 2007.
- [18] Fuglede N, Thomsen JJ. Kinematic and dynamic modeling and approximate analysis of a roller chain drive. *J Sound Vib* 2016. doi:10.1016/j.jsv.2015.12.028.
- [19] Nordin M, Gutman PO. Controlling mechanical systems with backlash - A survey. *Automatica* 2002.
- [20] Calvini M, Carpita M, Formentini A, Marchesoni M. PSO-based self-commissioning of electrical motor drives. *IEEE Trans Ind Electron* 2015.
- [21] Bogiatzidis IX, Safacas AN, Mitronikas ED. Detection of backlash phenomena appearing in a single cement kiln drive using the current and the electromagnetic torque signature. *IEEE Trans Ind Electron* 2013.
- [22] Bogiatzidis IX, Safacas AN, Mitronikas ED. Detection of backlash phenomena appearing in a single cement kiln drive using the current and the electromagnetic torque signature. *IEEE Trans Ind Electron* 2013. doi:10.1109/TIE.2012.2194950.
- [23] Lees AW. Misalignment in rigidly coupled rotors. *J Sound Vib* 2007. doi:10.1016/j.jsv.2007.04.008.
- [24] Patel TH, Darpe AK. Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors. *Mech Syst Signal Process* 2009. doi:10.1016/j.ymsp.2009.04.004.

- [25] Al-Hussain KM. Dynamic stability of two rigid rotors connected by a flexible coupling with angular misalignment. *J Sound Vib* 2003.
- [26] Sekhar AS, Prabhu BS. Effects of coupling misalignment on vibrations of rotating machinery. *J Sound Vib* 1995.
- [27] Sinha JK, Lees AW, Friswell MI. Estimating unbalance and misalignment of a flexible rotating machine from a single run-down. *J Sound Vib* 2004.
- [28] Jalan AK, Mohanty AR. Model based fault diagnosis of a rotor-bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition. *J Sound Vib* 2009.
- [29] Sudhakar GNDS, Sekhar AS. Identification of unbalance in a rotor bearing system. *J. Sound Vib.*, 2011.
- [30] Huang DG. Characteristics of torsional vibrations of a shaft with unbalance. *J Sound Vib* 2007.
- [31] Ferraz UB, Seixas PF, Aguiar WE. A Simplified Model for Mechanical Loads under Angular Misalignment and Unbalance. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2013 Jan 1;7(7):2006-13.
- [32] Severin D, Dörsch S. Friction mechanism in industrial brakes. *Wear* 2001. doi:10.1016/S0043-1648(01)00806-7.
- [33] Childs THC, Cowburn D. Contact observations on and friction of rubber drive belting. *Wear* 1984.
- [34] Hardwick C, Lewis S, Lewis R. The effect of friction modifiers on wheel/rail isolation at low axle loads. *Proc Inst Mech Eng Part F J Rail Rapid Transit* 2014.
- [35] Marques F, Flores P, Pimenta Claro JC, Lankarani HM. A survey and comparison of several friction force models for dynamic analysis of multibody mechanical systems. *Nonlinear Dyn* 2016.
- [36] Kim SH, Shin YJ, Kim KS, Kim S. Design and control of robot manipulator with a distributed actuation mechanism. *Mechatronics*, 2014. doi:10.1016/j.mechatronics.2014.09.015.
- [37] Patarinski SP, Botev RG. Robot force control: A review. *Mechatronics* 1993. doi:10.1016/0957-4158(93)90012-Q.
- [38] Chiou K-C, Huang S-J. An adaptive fuzzy controller for robot manipulators. *Mechatronics* 2005.
- [39] Oh S, Kong K. Two-degree-of-freedom control of a two-link manipulator in the rotating coordinate system. *IEEE Trans Ind Electron* 2015. doi:10.1109/TIE.2015.2408556.
- [40] Van De Straete HJ, De Schutter J. Hybrid cam mechanisms. *IEEE/ASME Trans Mechatronics* 1996.
- [41] Torabi A, Akbarzadeh S, Salimpour M, Khonsari MM. On the running-in behavior of cam-follower mechanism. *Tribol Int* 2018.
- [42] Ouyang T, Wang P, Huang H, Zhang N, Chen N. Mathematical modeling and optimization of cam mechanism in delivery system of an offset press. *Mech Mach Theory* 2017.
- [43] Rothbart H a., Klipp DL. *Cam Design Handbook*. 2004.
- [44] Uicker JJ, Pennock GR, Shigley JE. *Theory of machines and mechanisms*. New York, NY: Oxford University Press; 2011.
- [45] Li W, Yan Q, Xue J. Analysis of a crankshaft fatigue failure. *Eng Fail Anal* 2015.
- [46] Levecque N, Mahfoud J, Violette D, Ferraris G, Dufour R. Vibration reduction of a single cylinder reciprocating compressor based on multi-stage balancing. *Mech Mach Theory* 2011.
- [47] Vodovozov V, Bakman I. Performance improvement of pumps fed by the variable speed drives. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2013 Dec 1;4(1):45-51.
- [48] Chen BC, Wu YY, Hsieh FC. Estimation of engine rotational dynamics using Kalman filter based on a kinematic model. *IEEE Transactions on vehicular technology*. 2010 Oct;59(8):3728-35.
- [49] Vas P. *Sensorless vector and direct torque control*. Oxford Univ. Press; 1998.
- [50] Cortés P, Kazmierkowski MP, Kennel RM, Quevedo DE, Rodriguez J. Predictive Control in Power Electronics and Drives. *IEEE Trans Ind Electron* 2008.
- [51] Gadoue SM, Giaouris D, Finch JW. MRAS Sensorless Vector Control of an Induction Motor Using New Sliding-Mode and Fuzzy-Logic Adaptation Mechanisms. *IEEE Trans Energy Convers* 2010.

- [52] Nasir Uddin M, Huang ZR, Siddique Hossain ABM. Development and implementation of a simplified self-tuned neuro-fuzzy-based im drive. IEEE Trans Ind Appl 2014.
- [53] Wang H, Ge X, Liu Y-C. Second-Order Sliding-Mode MRAS Observer Based Sensorless Vector Control of Linear Induction Motor Drives for Medium-Low Speed Maglev Applications. IEEE Trans Ind Electron 2018.
- [54] Schauder C. Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors Without Rotational Transducers. IEEE Trans Ind Appl 1992.
- [55] Akpolat ZH. Dynamic emulation of mechanical loads using a vector-controlled induction motor-generator set. IEEE Trans Ind Electron 1999.
- [56] Rodic M, Jezernik K, Trlep M. Dynamic emulation of mechanical loads: an advanced approach. IEE PROCEEDINGS-ELECTRIC POWER Appl 2006.
- [57] Zhang Z, Wang L, Zhang J, Ma R. Study on requirements for load emulation of the vehicle with an electric braking system. IEEE Trans Veh Technol 2017.
- [58] Song-Manguelle J, Ekemb G, Mon-Nzongo DL, Jin T, Doumbia ML. A theoretical analysis of pulsating torque components in AC machines with variable frequency drives and dynamic mechanical loads. IEEE Trans Ind Electron 2018.
- [59] Shibata H, Mitsukawa N. Comparison of robustness between adaptive control and PID control. InTENCON'93. Proceedings. Computer, Communication, Control and Power Engineering. 1993 IEEE Region 10 Conference on 1993 Oct 19 (Vol. 4, pp. 34-37). IEEE.
- [60] Astrom, K., Wittenmark, B.: *Adaptive Control*. USA. Addison-Wesley, 1989.
- [61] Ioannou PA, Sun J. Robust adaptive control. Upper Saddle River, NJ: PTR Prentice-Hall; 1996 Jan.
- [62] Chapman S. Electric machinery fundamentals. Tata McGraw-Hill Education; 2005.
- [63] Wu, Bin, and Mehdi Narimani. High-power converters and AC drives. John Wiley & Sons, 2017.
- [64] Phase T, State S. Relais Statique Triphasé 2016:2–5.
- [65] Quéval L, Ohsaki H. Back-to-back converter design and control for synchronous generator-based wind turbines. InRenewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on 2012 Nov 11 (pp. 1-6). IEEE.
- [66] Hill WA, Kapoor SC. Effect of two-level PWM sources on plant power system harmonics. InIndustry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE 1998 Oct 12 (Vol. 2, pp. 1300-1306). IEEE.
- [67] Blasko V, Kaura V. A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter. IEEE Transactions on industry applications. 1997 Mar;33(2):542-50.
- [68] Liserre M, Blaabjerg F, Hansen S. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. IEEE Transactions on industry applications. 2005 Sep;41(5):1281-91.
- [69] Beres RN, Wang X, Liserre M, Blaabjerg F, Bak CL. A review of passive power filters for three-phase grid-connected voltage-source converters. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2016 Mar;4(1):54-69.
- [70] Power Conversion & Line Filter Applications, Micrometals Inc., Issue L, Printed February 2007.
- [71] PowerFlex Dynamic Braking Resistor Calculator, Application Technique, Allen-Bradly
- [72] Wirewound FP, Housed RA, Specifications E. Rb series 2010:5–6.
- [73] http://www.torque-sensors.eu/RT2.604.R9_ntt_2020.pdf

www.nri.ac.ir

تهران - شهرک قدس - انتهای بلوار شهید دادمان (پونک باختری) - صندوق پستی ۵۱۷-۱۴۶۶۵
تلفن : ۸۸۰۷۹۴۰۰ - فاکس : ۸۸۰۷۸۲۹۶