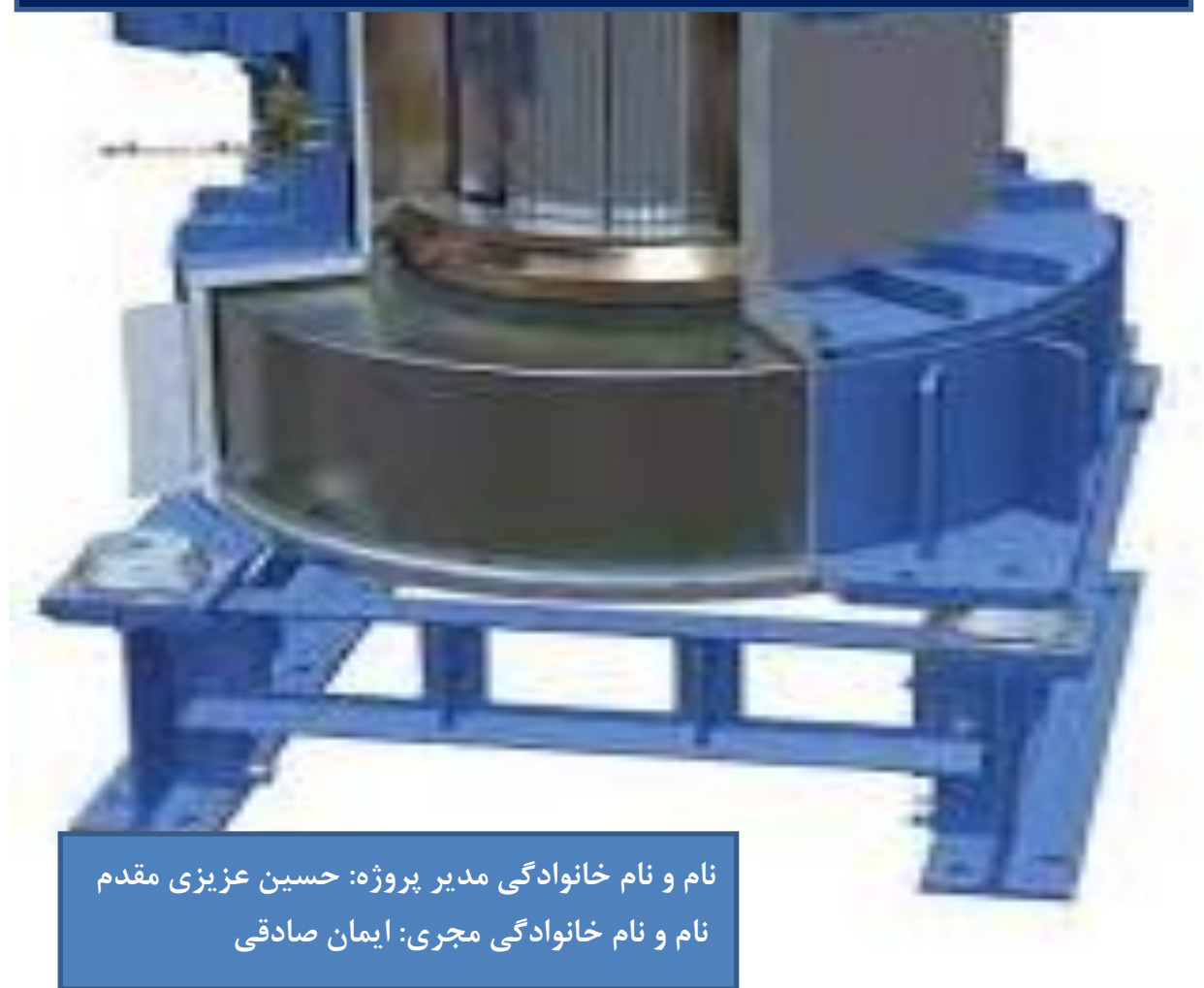




امکان‌سنجی فنی و اقتصادی بومی‌سازی و تجاری‌سازی فناوری فلابویل در کشور



نام و نام خانوادگی مدیر پروژه: حسین عزیزی مقدم
نام و نام خانوادگی مجری: ایمان صادقی



امکان‌سنجی فنی و اقتصادی بومی‌سازی و تجاری‌سازی فناوری فلایویل در کشور

مدیر پروژه:

حسین عزیزی مقدم

همکاران پروژه:

ناصر تقوی

مجری:

ایمان صادقی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

کد گزارش: NRI-ER-746-PETPN08-4-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.313

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی
امکان‌سنجی فنی و اقتصادی بومی‌سازی و تجاری‌سازی فناوری فلاپویل در کشور/ مدیر
پروژه: حسین عزیزی مقدم کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۱۴۸ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. تقوی، ناصر، همکار پروژه. ۲. صادقی، ایمان، مجری.



انتشارات پژوهشگاه نیرو

نام گروه: مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، 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 : ناصر تقوی

پیشگفتار

یکی از انواع تکنولوژی های نوظهور که در چند سال اخیر بسیار مورد توجه محققین و سرمایه گذاران صنعت برق قرار گرفته، فن آوری ذخیره ساز انرژی الکترومکانیکی (فلاپویل) می باشد. با وجود توسعه دانش طراحی این نوع از ذخیره سازها و ارائه نمونه های متعدد محصولات تجاری سازی شده در سطح بین الملل، بومی سازی و شناسایی نقش و جایگاه این فن آوری در صنعت برق کشور همواره مورد اغفال قرار گرفته است. با وجود مزایای استثنایی تکنولوژی فلاپویل در مقایسه با انواع دیگر ذخیره سازهای متداول، استفاده از این تکنولوژی می تواند در حل بسیاری از معضلات شبکه و رفع چالشهای آینده صنعت برق کشور گره گشا باشد. بر همین مبنی مطالعات انجام گرفته در این پروژه با هدف امکان سنجی بومی سازی و توسعه دانش فنی تکنولوژی ذخیره ساز فلاپویل در داخل کشور بر اساس اولویت های آینده صنعت برق انجام گرفته است. در مرحله اول پروژه رصد فن آوری ذخیره ساز فلاپویل و سوابق پژوهشی دانشگاهی و مراکز پژوهشی در داخل کشور انجام گرفته است. در این بخش سعی شده تا پروژه های محصول محور در زمینه طراحی و ساخت ذخیره ساز فلاپویل مورد شناسایی و ارزیابی قرار گیرد. در مرحله دوم پروژه پس از تعیین معیارهای اولویت بندی، حوزه های مختلف کاربردی ذخیره ساز فلاپویل در داخل کشور بر اساس روش تصمیم گیری چند معیاره تاپسیس مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله سوم آنالیز هزینه یابی چرخه عمر برای ذخیره ساز فلاپویل سرعت پایین، ذخیره ساز سرعت بالا و ابر خازن (به عنوان یکی از رقبای فلاپویل) مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفت. در نهایت در فصل چهارم توجیه پذیری اقتصادی کاربرست فن آوری ذخیره ساز فلاپویل برای ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس پس از مدلسازی برای سناریو های مختلف آنالیز گردید. پیرو مذاکرات انجام گرفته با مدیران و کارشناسان مدیریت شبکه و نتایج بدست آمده از آنالیز اقتصادی در فصل چهارم، بومی سازی ذخیره ساز فلاپویل برای ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس به عنوان یکی از حوزه های کاربردی اصلی در آینده این فن آوری در داخل کشور می باشد. فصل اول این گزارش توسط همکار پاره وقت آقای مهندس ناصر تقوی انجام شد و فصل های ۲، ۳ و ۴ توسط آقای حسین عزیزی مقدم انجام گردید. همچنین آقایان مهندس صادقی و مهندس سهراب امینی ولاشانی به عنوان مجری و مدیر واحد مجری همکاری موثری در انجام این پروژه داشته اند. در پایان از زحمات ناظر محترم پروژه آقای مهندس حسن ابراهیمی راد قدردانی می گردد.

فهرست مطالب

۱.....	مقدمه.....	۱
۲.....	فصل اول.....	۱
۳.....	مقدمه.....	۱-۱
۳.....	معرفی ذخیره ساز فلاپیول و اصول عملکرد.....	۱-۱
۶.....	انواع ساختارهای طراحی ذخیره ساز فلاپیول.....	۱-۳
۷.....	- چالشهای تکنولوژی های مرتبط با ذخیره ساز فلاپیول.....	۱-۴
۸.....	۵-۱ - رصد فناوری ذخیره ساز فلاپیول در داخل کشور.....	۵-۱
۹.....	۱-۵-۱ مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه ذخیره ساز فلاپیول.....	۱-۵-۱
۱۲.....	۱-۵-۱-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه علم و صنعت.....	۱-۵-۱-۱
	ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه علم و صنعت در قالب یک رساله دکتری در سال ۹۲ به	۲-۱-۵-۱
	طراحی ، بهینه سازی و ساخته شده است. در ادامه در حال انجام رساله خود در زمینه کاربرد ذخیره ساز فلاپیول در ایستگاه های	
۱۲.....	شارژ خودرو می باشد. در ادامه به جزئیات این پروژهها میپردازیم:.....	۱۲
۱۳.....	۳-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در پژوهشگاه رانشگرهای فضایی تبریز.....	۳-۱-۵-۱
۱۴.....	۴-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه شهید بهشتی.....	۴-۱-۵-۱
۱۴.....	۵-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه شهید بهشتی.....	۵-۱-۵-۱
۱۵.....	۶-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه شیراز.....	۶-۱-۵-۱
۱۵.....	۷-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه خواجه نصیر.....	۷-۱-۵-۱
۱۵.....	۸-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه یزد.....	۸-۱-۵-۱
۱۶.....	۹-۱-۵-۱ دانشگاه فناوریهای پیشرفته کرمان.....	۹-۱-۵-۱
۱۶.....	۱-۶ -پروژههای محصول محور.....	۱-۶
۱۷.....	۱-۷ زمینهای کاری صورت گرفته پیرامون فلاپیولها.....	۱-۷
۱۸.....	۱-۸ یاطاقان مغناطیسی.....	۱-۸
۱۸.....	۱-۹ مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه یاطاقانهای مغناطیسی.....	۱-۹
۲۴.....	۱-۱۰ پروژههای محصول محور در حوزه یاطاقانهای مغناطیسی.....	۱-۱۰
۲۵.....	۱-۱۱ درایو و مبدل های الکترونیک قدرت.....	۱-۱۱
۲۵.....	۱-۱۲ مواد کامپوزیتی مورد استفاده در ذخیره ساز فلاپیول.....	۱-۱۲
۲۷.....	۱-۱۳ موتورهای سرعت بالا مورد استفاده در ذخیره ساز فلاپیول.....	۱-۱۳
۲۸.....	۱-۱۴ استانداردها و دستورالعملها مربوط به ذخیره ساز فلاپیول.....	۱-۱۴
۲۸.....	۱-۱۵ نتیجه گیری.....	۱-۱۵

۲۹	فصل دوم	۲
۳۰	مقدمه	۲-۱
۳۰	معرفی انواع کاربردهای ذخیره ساز فلاپیول	۲-۲
۳۳	کاربردهای کیفیت توان	۲-۳
۳۳	تنظیم فرکانس شبکه	۲-۳-۱
۳۴	جبران افت ولتاژ شبکه	۲-۳-۲
۳۴	همراه با ادوات بهبود کیفیت توان	۲-۳-۳
۳۵	کاربردهای نظامی در قالب سیستم‌های توان پالسی	۲-۳-۴
۳۶	کاربردهای فضایی	۲-۳-۵
۳۶	منابع تغذیه اضطراری ها برای حفاظت از بارهای حساس	۲-۳-۶
۳۷	حمل و نقل الکتریکی	۲-۳-۷
۳۷	انرژی های تجدید پذیر	۲-۳-۸
۳۸	الویت بندی کاربردهای ذخیره ساز فلاپیول در کشور	۲-۴
۴۱	رتبه بندی زمینه های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول با استفاده از الگوریتم تصمیم گیری چند معیاره	۲-۵
۴۸	فصل سوم	۳
۴۹	مقدمه	۳-۱
۵۰	بررسی مارکتینگ ذخیره ساز فلاپیول در سطح بین الملل	۳-۲
۵۲	بازار ذخیره ساز فلاپیول	۳-۳
۵۵	بررسی چند پروژه نصب ذخیره ساز فلاپیول	۳-۴
۵۶	هزینه یابی چرخه عمر ذخیره ساز	۳-۵
۵۹	محاسبات هزینه یابی چرخه عمر ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و سرعت پایین	۳-۵-۱
۶۱	هزینه یابی چرخه عمر ذخیره ساز ابرخازن	۳-۵-۲
۷۰	نتیجه گیری	۳-۶
۷۲	فصل چهارم	۴
۷۳	مقدمه	۴-۱
۷۴	توجیه پذیری اقتصادی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول برای کاربرد تنظیم فرکانس	۴-۲
۷۵	محاسبه هزینه های ارائه خدمات جانبی تنظیم فرکانس با مشارکت واحد های نیروگاهی	۴-۲-۱
۷۶	هزینه نصب و راه اندازی	۱-۱-۲-۴
۷۶	هزینه بهره برداری، تعمیر و نگهداری و سایر هزینه ها	۲-۱-۲-۴
۷۷	هزینه های تعمیر و نگهداری	۳-۱-۲-۴
	مقایسه ارزیابی اقتصادی ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس با استفاده از ذخیره ساز فلاپیول و واحد های	۴-۲-۲

نیروگاهی.....	۱۳.....
بررسی نتایج محاسبات اقتصادی برای ذخیره ساز فلاپیول و رزرو چرخان.....	۴-۲-۳..... ۱۵.....
مبالغ پرداختی بابت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس.....	۱-۳-۲-۴..... ۸۵.....
میزان مشارکت نیروگاهها در خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه.....	۲-۳-۲-۴..... ۸۶.....
محاسبات اقتصادی بکار گیری از رزرو نیروگاهی جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس.....	۳-۳-۲-۴..... ۸۷.....
محاسبات اقتصادی بکار گیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا جهت ارائه خدمات جانبی.....	۴-۳-۲-۴.....
کنترل فرکانس.....	۸۹.....
محاسبات اقتصادی بکار گیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس.....	۵-۳-۲-۴..... ۹۲.....
محاسبات اقتصادی بکار گیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و سرعت پایین با در نظر گرفتن مزایای اقتصادی حاصل از جایگزینی این فن آوری.....	۶-۳-۲-۴..... ۹۵.....
فصل پنجم.....	۱۰۲..... ۵
نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۵-۱..... ۱۰۳.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ساختار کلی ذخیره ساز فلاپویل ۳
- شکل ۱-۲: اتصال فلاپویل به شبکه DC (الف) و اتصال به شبکه AC (ب) مبدل پشت به پشت سمت ۴
- شکل ۱-۳: ساختار ماژولار ذخیره ساز فلاپویل ۵
- شکل ۱-۴: ذخیره ساز فلاپویل سرعت پایین ۶
- شکل ۱-۵: طراحی ذخیره ساز فلاپویل مبتنی بر انرژی (الف) ذخیره ساز انرژی فلاپویل سرعت بالا (ب) ۶
- شکل ۱-۶: ساختار متداول ذخیره ساز فلاپویل ۷
- شکل ۱-۷: ساختار رتور بیرونی ذخیره ساز فلاپویل ۷
- شکل ۱-۸: ساختار یکپارچه ذخیره ساز فلاپویل ۷
- شکل ۱-۹: حوزه های تحقیقات در آینده در زمینه فلاپویل [۱۷] ۸
- شکل ۲-۱: ساختار کلی ذخیره ساز فلاپویل ۳۱
- شکل ۲-۲: حوزه های کاربردی ذخیره ساز انرژی بر حسب زمان ذخیره سازی و تعداد دفعات شارژ و دشارژ ۳۲
- شکل ۲-۳: حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپویل بر حسب زمان ذخیره سازی ۳۲
- شکل ۲-۴: تقسیم بندی حوزه های مختلف کاربردی ذخیره ساز فلاپویل ۳۳
- شکل ۲-۵: استفاده از ذخیره ساز فلاپویل در DSTATCOM ۳۴
- شکل ۲-۶: استفاده از ذخیره ساز فلاپویل در DVR ۳۵
- شکل ۲-۷: ظرفیت توان و ظرفیت انرژی مورد نیاز ذخیره سازهای مورد کاربرد در حوزه های مختلف ۴۰
- شکل ۲-۸: رتبه بندی حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپویل ۴۶
- شکل ۳-۱: نمودار چرخه حیات فن آوری های مختلف ذخیره ساز انرژی ۴۹
- شکل ۳-۲: مقایسه پروژه های ذخیره ساز در سطح جهانی در سال ۲۰۱۳ ۵۰
- شکل ۳-۳: تعداد پروژه ها و ظرفیت ذخیره ساز فلاپویل در زمینه های کاربردی مختلف (سال ۲۰۱۰) ۵۱
- شکل ۳-۴: میزان فلاپویل نصب شده در سال ۲۰۱۴ در صحرای جنوب آفریقا ۵۱
- شکل ۳-۵: ظرفیت نصب شده جهانی در سال ۲۰۱۷ (ظرفیت کل ۱/۹ گیگا وات) ۵۲
- شکل ۳-۶: پیش بینی بازار ذخیره ساز فلاپویل در ۱۰ سال آینده ۵۳
- شکل ۳-۷: میزان بازار جهانی فلاپویل در سال ۲۰۱۹ طراحی شده توسط نرم افزار ۵۴
- شکل ۳-۸: میزان بازار فلاپویل در آمریکا طراحی شده توسط نرم افزار ۵۴
- شکل ۳-۹: پیش بینی بازار فلاپویل در سال های ۲۰۲۰-۲۰۲۴ ۵۵

- شکل ۳-۱۰: مشخصات فنی چند پروژه ذخیره ساز فلاپیول در سالهای اخیر ۵۶
- شکل ۳-۱۱: توزیع توان و تلفات در ذخیره سازهای انرژی [۲۴] ۵۸
- شکل ۳-۱۲: اجزاء کلی ذخیره ساز فلاپیول ۶۲
- شکل ۳-۱۳: محاسبات هزینه یابی چرخه عمر فلاپیول سرعت بالا ۶۶
- شکل ۳-۱۴: محاسبات هزینه یابی چرخه عمر فلاپیول سرعت پایین ۶۸
- شکل ۳-۱۵: محاسبات هزینه یابی چرخه عمر ابر خازن ۶۹
- شکل ۳-۱۶: مقایسه شاخص LCOS برای ذخیره سازهای فلاپیول سرعت پایین، فلاپیول سرعت بالا و ابر خازن ۷۱
- شکل ۴-۱: محدوده زمانی پاسخ جبران سازهای فرکانس نیروگاه ها ۷۴
- شکل ۴-۲: مولفه های هزینه ایی تامین انرژی با استفاده از نیروگاه های سوخت فسیلی (lew and others 2013) ۷۵
- شکل ۴-۳: هزینه فرسودگی ناشی از عملکرد گاورنر در پاسخ به سیستم کنترل فرکانس (2014) ۸۱
- شکل ۴-۴: هزینه فرسودگی ناشی از عملکرد گاورنر بر حسب درصد از ظرفیت نیروگاه ۸۱
- شکل ۴-۵: محاسبات اقتصادی سناریوی استفاده از رزرو نیروگاه گازی برای کنترل فرکانس ۸۸
- شکل ۴-۶: جریان نقدی ورودی و خروجی برای سناریوی استفاده از رزرو نیروگاه گازی برای کنترل فرکانس ۸۸
- شکل ۴-۷: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمیعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از رزرو نیروگاه گازی برای کنترل فرکانس ۸۹
- شکل ۴-۸: محاسبات اقتصادی سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا ۹۰
- شکل ۴-۹: جریان نقدی ورودی و خروجی برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا ۹۰
- شکل ۴-۱۰: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمیعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا ۹۱
- شکل ۴-۱۱: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمیعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با نرخ پایه پیشنهادی ۱۰۰۰۰۰ تومان ۹۲
- شکل ۴-۱۲: محاسبات اقتصادی سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین ۹۳
- شکل ۴-۱۳: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمیعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین ۹۴
- شکل ۴-۱۴: جریان نقدی ورودی و خروجی برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا ۹۴
- شکل ۴-۱۵: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمیعی تنزیل شده برای سناریوی ۹۶
- شکل ۴-۱۶: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمیعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز

- فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ و با در نظر گرفتن حذف هزینه های نیروگاهی ۹۷
- شکل ۱۷-۴: سیگنال جبران‌ساز فرکانس و تفکیک آن به مولفه های فرکانس پایین و فرکانس بالا و تخصیص آن به منابع تامین ۹۹
- شکل ۱۸-۴: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمیعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و رزرو چرخان با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ ۹۹
- شکل ۱۹-۴: جریان نقدی ورودی و خروجی برای برای سناریوی استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و رزرو چرخان با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ ۱۰۰
- شکل ۲۰-۴: مقایسه محاسبات اقتصادی سناریوی استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و رزرو چرخان با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ با سناریوی فقط ذخیره ساز فلاپیول ۱۰۱
- شکل ۱-۵: رتبه بندی حوزه های کاربردی مختلف ذخیره سازی فلاپیول برای بومی سازی داخل کشور ۱۰۴
- شکل ۲-۵: اجزاء کلی ذخیره ساز فلاپیول ۱۰۵
- شکل ۳-۵: مقایسه شاخص LCOS برای ذخیره سازهای فلاپیول سرعت پایین، فلاپیول سرعت بالا و ابر خازن ۱۰۸
- شکل ۴-۵: کاهش هزینه سرمایه گذاری و کاهش هزینه بهره برداری با استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول در کنار رزرو نیروگاهی ۱۱۱

فهرست جداول

جدول ۱-۱: شاخص های عملکردی ذخیره ساز فلاپیول.....	۵
جدول ۱-۲: لیست دانشگاه های فعال در زمینه ذخیره ساز فلاپیول.....	۹
جدول ۱-۳: مشخصات ذخیره ساز فلاپیول امیر کبیر.....	۱۰
جدول ۱-۴: مشخصات فنی فلاپیول.....	۱۲
جدول ۱-۵: مشخصات فلاپیول دانشگاه علم و صنعت.....	۱۳
جدول ۱-۶: مشخصات فلاپیول دانشگاه شهید بهشتی.....	۱۴
جدول ۱-۷: مشخصات فنی نمونه های ساخته شده ذخیره ساز فلاپیول.....	۱۶
جدول ۱-۸: مشخصات فنی نمونه های ساخته شده ذخیره ساز فلاپیول.....	۱۷
جدول ۱-۹: مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه یا طاقان مغناطیسی.....	۱۹
جدول ۱-۱۰: خلاصه پژوهشهای انجام گرفته در زمینه ذخیره ساز فلاپیول.....	۲۳
جدول ۱-۱۱: نمونه های آزمایشگاهی یا طاقان مغناطیسی.....	۲۴
جدول ۱-۱۲: شرکت های فعال در زمینه درایو و کنترل موتور.....	۲۵
جدول ۱-۱۳: شرکت های فعال در زمینه مواد کامپوزیتی.....	۲۶
جدول ۱-۱۴: شرکت های سازنده قطعات کامپوزیتی.....	۲۷
جدول ۱-۱۵: شرکتها، مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه ساخت موتورهای دور بالا.....	۲۸
جدول ۲-۱: جدول تصمیم گیری رتبه بندی کاربردهای ذخیره ساز فلاپیول.....	۴۳
جدول ۲-۲: ماتریس تصمیم گیری (تعداد گزینه ها: ۸ و تعداد معیارها: ۱۰).....	۴۴
جدول ۲-۳: ماتریس نرمال شده.....	۴۴
جدول ۲-۴: معیارها و تعیین وزن هر یک از معیارها.....	۴۴
جدول ۲-۵: ماتریس نرمال موزون.....	۴۵
جدول ۲-۶: ایده آل های مثبت و منفی.....	۴۵
جدول ۲-۷: فاصله گزینه ها تا ایده آل های مثبت و منفی.....	۴۵
جدول ۳-۱: علائم و پارامترهای اختصاری محاسبات هزینه یابی چرخه عمر.....	۵۸
جدول ۳-۲: جدول خلاصه مولفه های هزینه ایی TCC.....	۵۹
جدول ۳-۳: مشخصات فنی ذخیره ساز فلاپیول.....	۶۳
جدول ۳-۴: مشخصات فنی مبدل BTB مورد استفاده در ذخیره ساز فلاپیول.....	۶۴
جدول ۳-۵: مولفه های هزینه ایی و پارامترهای آنالیز هزینه چرخه عمر ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا.....	۶۵
جدول ۳-۶: مولفه های هزینه ایی و پارامترهای آنالیز هزینه چرخه عمر ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین.....	۶۶
جدول ۳-۷: مولفه های هزینه ایی و پارامترهای آنالیز هزینه چرخه عمر ذخیره ساز ابر خازن.....	۶۸
جدول ۴-۱: هزینه نصب و راه اندازی (TCC) انواع نیروگاه ها و مقادیر تخمینی تا سال ۲۰۵۰.....	۷۶
جدول ۴-۲: هزینه تعمیر و نگهداری انواع نیروگاه ها.....	۷۸

جدول ۳-۴: پارامترهای مربوط به cycling نیروگاه ها.....	۸۲
جدول ۴-۴: هزینه چرخه کاری برای انواع نیروگاه ها.....	۸۲
جدول ۴-۵: مولفه های هزینه ایی ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا.....	۸۳
جدول ۴-۶: مولفه های هزینه ایی ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین.....	۸۴
جدول ۴-۷: مولفه های هزینه ایی ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا.....	۸۴
جدول ۴-۸: پارامترهای مفروض جهت محاسبات اقتصادی.....	۸۵
جدول ۴-۹: مبالغ پرداختی بابت خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه.....	۸۶
جدول ۴-۱۰: مقدار ثابت و متغیر کنترل فرکانس اولیه در سالهای ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸.....	۸۷
جدول ۴-۱۱: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از رزرو نیروگاه گازی برای کنترل فرکانس.....	۸۹
جدول ۴-۱۲: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا.....	۹۱
جدول ۴-۱۳: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه فعلی.....	۹۴
جدول ۴-۱۴: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت.....	۹۵
جدول ۴-۱۵: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه پیشنهادی.....	۹۵
جدول ۴-۱۶: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ و با در نظر گرفتن حذف هزینه های نیروگاهی.....	۹۶
جدول ۴-۱۷: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ و با در نظر گرفتن حذف هزینه های نیروگاهی.....	۹۷
جدول ۴-۱۸: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه صفر و با در نظر گرفتن حذف هزینه های نیروگاهی.....	۹۸
جدول ۵-۱: کاربردهای شناسایی شده برای ذخیره ساز فلاپیول.....	۱۰۴
جدول ۵-۲: مشخصات فنی ذخیره ساز فلاپیول.....	۱۰۶
جدول ۵-۳: مشخصات فنی مبدل BTB مورد استفاده در ذخیره ساز فلاپیول.....	۱۰۷
جدول ۵-۴: مقایسه نتایج هزینه های TCC و LCC ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و سرعت پایین.....	۱۰۸
جدول ۵-۵: سناریو های مختلف آنالیز اقتصادی ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس.....	۱۰۸
جدول ۵-۶: خلاصه محاسبات اقتصادی برای سناریو های مختلف.....	۱۰۹

مقدمه

ذخیره ساز فلاپیول در کاربردهایی که نیاز به چگالی حجمی و وزنی بالای انرژی، ظرفیت توان بالا، سرعت پاسخ دینامیکی بالا، تعداد سیکل‌های بسیار بالای شارژ و دشارژ، طول عمر و قابلیت اطمینان بالا، راندمان بالا و حداقل تعمیر و نگهداری باشد، انتخاب مناسبی نسبت به انواع تکنولوژی‌های ذخیره ساز انرژی می‌باشد. بر همین اساس در چند سال اخیر در بسیاری از کاربردها مانند، مسطح سازی توان تولیدی منابع انرژی تجدید پذیر، جبرانسازهای کیفیت توان، حمل و نقل، منابع تغذیه بدون وقفه و ... این نوع از ذخیره سازها بصورت منفرد یا بصورت ترکیبی در کنار انواع دیگر ذخیره ساز انرژی مورد استفاده قرار گیرد.

در همین راستا در این گزارش پس از معرفی مختصر ذخیره ساز فلاپیول و شناسایی فن‌آوری‌های کلیدی مورد استفاده در این نوع از ذخیره سازها، در گام نخست پس از معرفی رصد این فن‌آوری و اقدامات پژوهشی صورت گرفته در داخل کشور مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه حوزه‌های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول بر اساس مطالعات مراجع و ارزیابی نمونه‌های خارجی معرفی می‌گردد. در بخش بعد شاخص‌های مورد نیاز جهت انتخاب و رتبه‌بندی کاربردهای مختلف ذخیره ساز فلاپیول در داخل کشور معرفی می‌گردد. در پایان با تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری و بر اساس محاسبات روش تاپسیس حوزه‌های کاربردی مختلف رتبه‌بندی می‌گردد.

در در فصل سوم به منظور مقایسه تکنولوژی‌های ذخیره ساز انرژی فلاپیول و ابر خازن هزینه‌یابی چرخه عمر این دو فن‌آوری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

در فصل چهارم، به منظور ارزیابی اقتصادی کاربری فن‌آوری ذخیره ساز انرژی فلاپیول برای کاربرد کنترل فرکانس در مقایسه با رزرو چرخان، سناریوهای مختلف مورد تحلیل و آنالیز اقتصادی قرار گرفت. در هر مورد میزان سرمایه‌گذاری اولیه (TCC)، جریان نقدی ورودی و خروجی سالانه و محاسبه شاخص‌های سرمایه‌گذاری محاسبه و آنالیز گردیده است.

فصل اول

رصد فن آوری و بررسی سوابق فعالیتهای پژوهشی در

زمینه طراحی و ساخت ذخیره ساز فلاپیول در داخل کشور

۱-۱ مقدمه

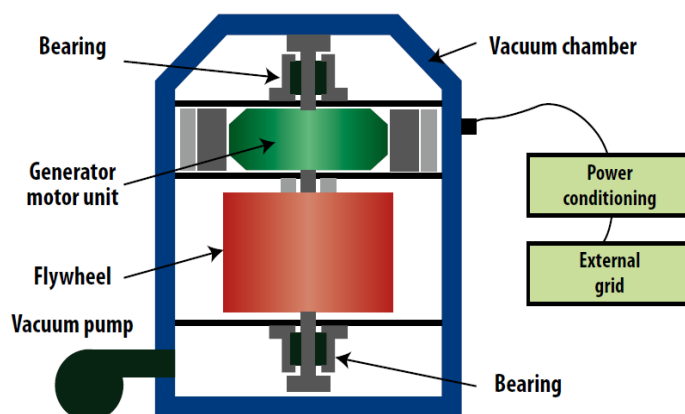
در این فصل پس از معرفی مفاهیم پایه تکنولوژی ذخیره ساز فلاپیول و انواع ساختارهای طراحی ارائه شده، سوابق تحقیقات انجام شده در زمینه توسعه دانش فنی و بومی سازی این محصول در داخل کشور مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. همچنین پتانسیل‌های موجود در داخل کشور در هر یک از حوزه‌های فن آوری‌های مرتبط با ذخیره ساز فلاپیول (موتورهای پرسرعت، یاتاقان مغناطیسی، مواد کامپوزیتی و ...) مورد شناسایی و بررسی قرار گرفت.

۱-۲ معرفی ذخیره ساز فلاپیول و اصول عملکرد

چرخ طیار یا ذخیره ساز انرژی فلاپیول یکی از تکنولوژی‌های نوین ذخیره و بازیابی انرژی الکتریکی مطرح در بسیاری از زمینه‌های کاربردی می‌باشد. مطابق با شکل ۱-۱، عنصر اصلی در این نوع از ذخیره سازهای انرژی یک جرم چرخان متصل به ماشین الکتریکی می‌باشد. در حالت شارژ انرژی الکتریکی ورودی را به انرژی جنبشی و برعکس در حالت دشارژ انرژی جنبشی دیسک دوار را به انرژی الکتریکی در ترمینال‌های ذخیره ساز تبدیل می‌کند. مقدار انرژی ذخیره شده در دیسک دوار بر اساس رابطه ۱-۱ محاسبه می‌گردد [۱].

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1-1)$$

در این رابطه، E انرژی جنبشی ذخیره شده، I ممان اینرسی فلاپیول [kg.m^2] و ω سرعت زاویه ای [rad / s] می‌باشد. با در نظر گرفتن محدودیت‌های الکتریکی و مکانیکی، عملکرد مطلوب ذخیره ساز فلاپیول در یک محدوده سرعت بیشینه و کمینه قابل دستیابی می‌باشد.



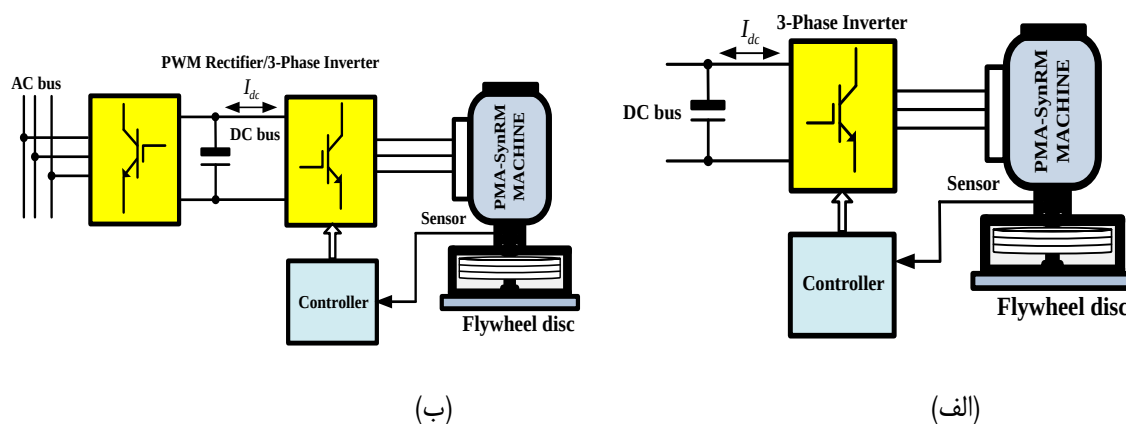
Source: International Renewable Energy Agency, based on Luo et al., 2015.

شکل ۱-۱: ساختار کلی ذخیره ساز فلاپیول

بنابراین انرژی مفید فلاپیول که دارای کمینه سرعت ($\omega_{\min}$) و بیشینه سرعت ($\omega_{\max}$) می‌باشد طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲-۴]:

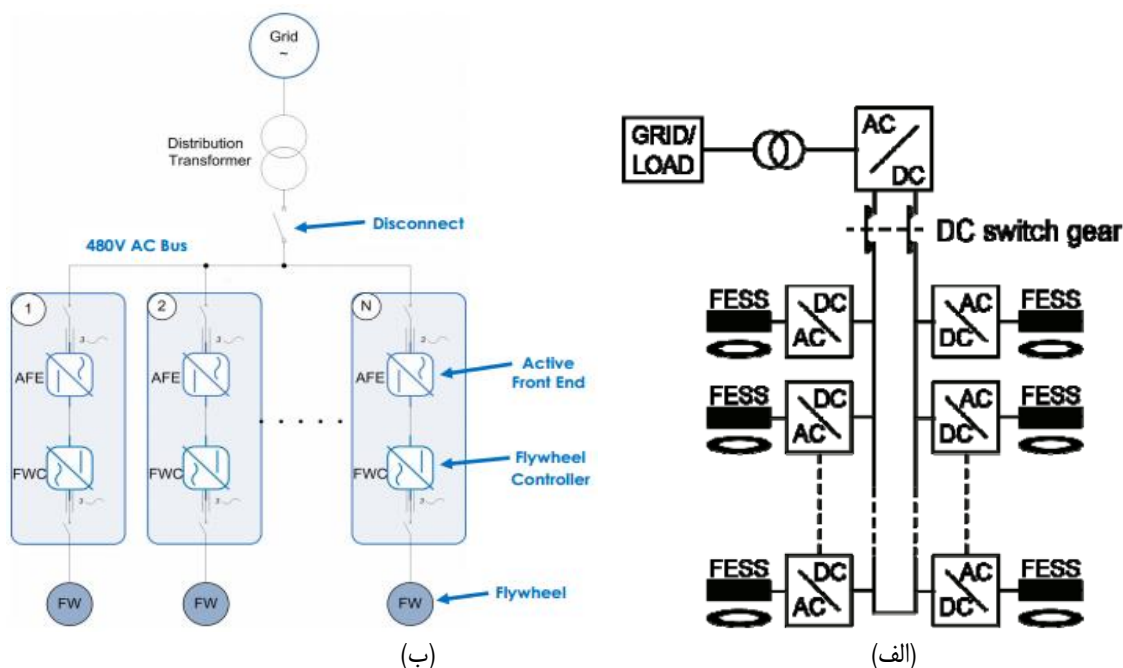
$$E = \frac{1}{2} J (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) = \frac{1}{2} J \omega_{\max}^2 \left(1 - \frac{\omega_{\min}^2}{\omega_{\max}^2}\right) \quad (1-1)$$

انرژی الکتریکی مطابق شکل (۱-۲) معمولاً از طریق یک لینک DC جریان ثابت به (از) یک موتور (ژنراتور) از طریق یک مبدل الکتریکی تزریق می‌گردد. این مبدل در فرایند شارژ، ولتاژ ۳ فاز را از این لینک DC به منظور تغذیه موتور الکتریکی تولید می‌کند و در فرایند دشارژ ولتاژ سه فاز تولیدی توسط ژنراتور را به ولتاژ DC تبدیل می‌کند [۵-۸].



شکل ۱-۲: اتصال فلاپیول به شبکه DC (الف) و اتصال به شبکه AC (ب) مبدل پشت به پشت سمت

یکی از قابلیت‌های ذخیره ساز فلاپیول امکان استفاده مازولار و دستیابی به ظرفیت های انرژی و توان دلخواه می باشد. همانگونه که در شکل ۳-۱ نشان داده شده اتصال مازول های ذخیره ساز فلاپیول به صورت شین AC مشترک (شکل ۳-۱-۳-الف) یا شین DC مشترک (شکل ۳-۱-۳-ب) امکان پذیر می باشد. در این حالت بر حسب نیاز انرژی و توان با اتصال تعداد مشخص ذخیره ساز فلاپیول دستیابی به ظرفیت دلخواه فراهم می گردد.





(ج)

شکل ۳-۱: ساختار ماژولار ذخیره ساز فلابیول

به منظور ارزیابی عملکرد انواع ذخیره سازهای انرژی و مقایسه مشخصات فنی و اقتصادی آنها شاخص‌هایی ارائه شده که خلاصه آن در جدول ۱-۱ خلاصه شده است.

جدول ۱-۱: شاخص‌های عملکردی ذخیره ساز فلابیول

عنوان	شاخصهای کارایی ذخیره ساز
انرژی مخصوص	Specific energy[wh/kg]
چگالی انرژی	Energy Density[wh/m ³]
توان مخصوص	Specific Power[w/kg]
چگالی توان	Power Density[kw//m ³]
راندمان	Efficiency[%]
طول عمر	Lifespan[yr]
تعداد دفعات شارژ و دشارژ مجاز	Cycle Life[cycles]
دشارژ خودی	Self-Discharge Rate[%/day]
ظرفیت توان	Scale[Mw]
هزینه سرمایه‌ای انرژی	Energy Capital Cost[US\$/kwh]
هزینه سرمایه‌ای توان	Power Capital Cost[US\$/kw]
کاربرد ها	Application
میزان بلوغ تکنولوژی	Technical Maturity
اثرات محیطی و سازگاری با محیط زیست	Enviromental Impact

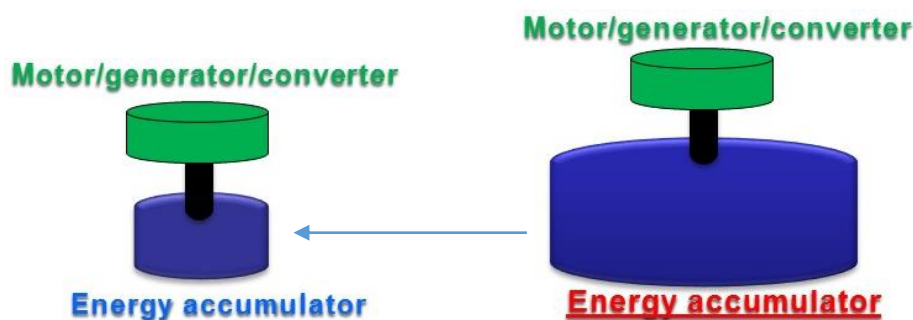
۱-۳ انواع ساختارهای طراحی ذخیره ساز فلاپیول

در یک تقسیم بندی کلی دو نوع ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین و سرعت بالا مطرح می باشد. شکل ۱-۴ ساختار کلی ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین را نمایش می دهد. فلاپیول سرعت پایین و متوسط - دیسک فلاپیول از جنس فولاد با اینرسی پایین (حجم و وزن پایین) و ظرفیت توان بالای ماشین الکتریکی و مبدل واسط می باشد. در این نوع از ذخیره ساز فلاپیول نسبت انرژی به توان (زمان) بسیار پایین در حد ثانیه و دقیقه می باشد [۹۸].



شکل ۱-۴: ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین

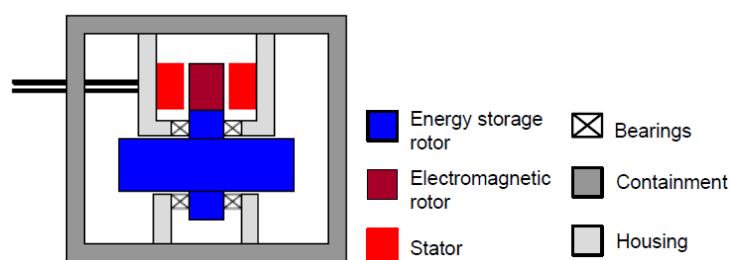
در فلاپیول های سرعت بالا نسبت انرژی به توان مقدار بالا در محدوده چند دقیقه تا ساعت باشد. طراحی این نوع از ذخیره سازها مبتنی بر ظرفیت انرژی می باشد. در این شرایط استفاده از ذخیره ساز سرعت پایین یا متوسط، نیاز به ابعاد بسیار بزرگ دیسک دوار خواهد بود. به منظور رفع این چالش با استفاده از فن آوری ماشین های الکتریکی سرعت و مواد کامپوزیتی با نسبت تنش تسلیم به چگالی وزنی بالا، افزایش سرعت فلاپیول امکان پذیر می باشد. با توجه به رابطه ۱، مقدار ظرفیت انرژی ذخیره سال فلاپیول با مجذور سرعت رابطه مستقیم دارد و به این ترتیب مطابق شکل ۱-۵ - ب به ازای یک ظرفیت انرژی مشخص با افزایش سرعت، حجم و وزن ذخیره ساز کاهش خواهد یافت.



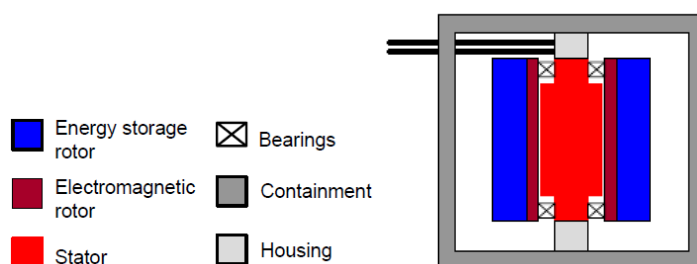
شکل ۱-۵: طراحی ذخیره ساز فلاپیول مبتنی بر انرژی (الف) ذخیره ساز انرژی فلاپیول سرعت بالا (ب)

ساختارهای مختلف طراحی ذخیره ساز فلاپیول در شکل ۱-۶ نمایش داده شده است. ساده ترین طراحی، که نوع متداول آن نیز می باشد، رتور از جنس فولاد و مطابق شکل ۱-۶ دیسک دوار از طریف یک کوپلینگ مکانیکی در خارج از رتور به محور موتور انجام می گردد. این طراحی عمدتاً در فلاپیول های سرعت پایین استفاده می شود و با وجود هزینه پایین، چگالی

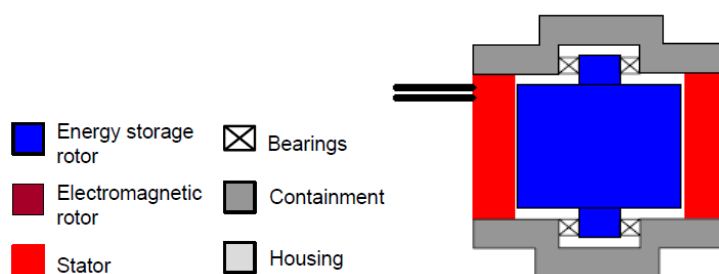
انرژی آنها پایین می باشد. مطابق شکل ۷-۱، ساختار دوم نوع رتور بیرونی^۱ می باشد که رتور و دیسک دوار در بخش بیرونی و استاتور در بخش داخلی نصب می گردد. این نوع طراحی عموماً برای فلاپیول رتور کامپوزیتی و سرعت بالا استفاده می شود. شکل ۸-۱ که در فلاپیول های مدرن استفاده می شود مبتنی بر طراحی یکپارچه^۲ می باشد. با این حال بر خلاف دیگر ساختارها، در طراحی یکپارچه محفظه خلاء و استاتور موتور حجم بزرگی از ذخیره ساز را شامل می شود [۸-۱۲].



شکل ۶-۱: ساختار متداول ذخیره ساز فلاپیول



شکل ۷-۱: ساختار رتور بیرونی ذخیره ساز فلاپیول

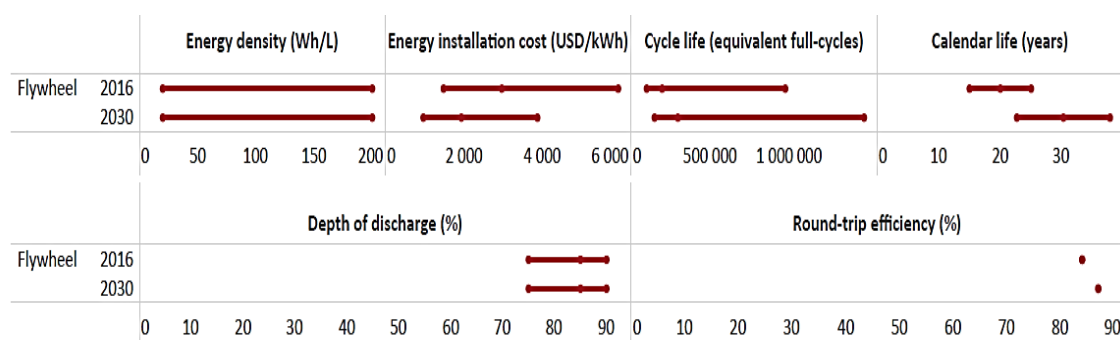


شکل ۸-۱: ساختار یکپارچه ذخیره ساز فلاپیول

۴-۱ - چالشهای تکنولوژی های مرتبط با ذخیره ساز فلاپیول

با توجه به پیشرفت های حاصل شده در زمینه طراحی و ساخت ماشین های الکتریکی سرعت بالا و مواد کامپوزیتی سبک، مستحکم و ارزان، امکان بلوغ هر چه بیشتر این فن آوری و گسترش روز افزون حوزه های کاربردی آن فراهم می باشد. شکل ۹-۱ پیش بینی های انجام شده در مورد آینده ذخیره ساز فلاپیول تا سال ۲۰۳۰ را نمایش می دهد.

1 - barrel or inside-out design
2- Integrated design



Source: International Renewable Energy Agency.

شکل ۹-۱: حوزه های تحقیقات در آینده در زمینه فلاپیول [۱۷]

از جمله چالش‌ها پیش روی بومی‌سازی و تجاری‌سازی این نوع از ذخیره‌سازها در داخل کشور به شرح زیر می‌باشد:

- **مواد کامپوزیتی ارزان:** یکی از چالش‌های توسعه فن آوری فلاپیول، استفاده از مواد کامپوزیتی با قابلیت تحمل تنش مکانیکی بالا و سبک برای دستیابی به سرعت‌های بالا و در نتیجه چگالی انرژی بالا می‌باشد. دستیابی به مواد کامپوزیتی با قیمت مناسب می‌تواند یک چالش اساسی در زمینه بومی‌سازی و تجاری‌سازی ذخیره‌ساز فلاپیول باشد.
- **ماشین‌های الکتریکی پرسرعت:** یکی از اجزاء کلیدی ذخیره‌ساز فلاپیول ماشین الکتریکی می‌باشد که راندمان، سرعت پاسخ دینامیکی و قیمت تمام شده ذخیره‌ساز تحت تاثیر این بخش می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین چالش‌های بومی‌سازی ذخیره‌ساز فلاپیول، طراحی و ساخت ماشین الکتریکی سرعت بالا و توان بالا با در نظر گرفتن کلیه ملاحظات فنی و اقتصادی می‌باشد.
- **یاطاقان مغناطیسی:** در ذخیره‌سازهای فلاپیول پیشرفته استفاده از یاتاقان‌های مغناطیسی فعال و غیر فعال با هدف کاهش تلفات مکانیکی همواره یکی از چالش‌های طراحی و ساخت ذخیره‌ساز فلاپیول بوده است.
- **سیستم درایو و مدیریت انرژی:** عملکرد ایمن و بهینه ذخیره‌ساز فلاپیول مستلزم دستیابی به سیستم‌های درایو پیشرفته موتورهای دور بالا با دقت و قابلیت اطمینان بالا می‌باشد. علاوه بر سیستم درایو و میدل‌های الکترونیک قدرت واسط با شبکه قدرت، سیستم مدیریت انرژی و کنترل وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز منطبق بر پروتکل‌های انتقال داده و شبکه مدیریت شبکه یکی از چالش‌های اساسی بومی‌سازی این نوع از ذخیره‌سازها می‌باشد.

۵-۱ رصد فناوری ذخیره‌ساز فلاپیول در داخل کشور

در این بخش سوابق فعالیت‌های انجام شده در حوزه توسعه فناوری طراحی و ساخت فلاپیول توسط شرکت‌های دانش بنیان، دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی با هدف برآورد توان علمی و صنعتی کشور برای توسعه کامل فناوری و تولید انبوه فلاپیول بررسی می‌گردد. بخش‌های چالش برانگیز در بومی‌سازی ذخیره‌ساز فلاپیول ساخت رتور کامپوزیتی با قابلیت کار در دورهای بالا،

ساخت ماشین های الکتریکی دوربالا و سیستم درایو آنها و همچنین ساخت یاطاقان مغناطیسی فعال و غیر فعال می باشد. در ادامه پتانسیل های موجود در کشور در این زمینه ها با جزییات بررسی می گردد.

۱-۵-۱ مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه ذخیره ساز فلاپیول

طبق بررسی های انجام شده حدود ۱۰ گروه تحقیقاتی در دانشگاه ها و مراکز علمی پژوهشی کشور در زمینه سیستم های ذخیره ساز فلاپیول در حال فعالیت هستند و یا فعالیت کرده اند. در ادامه لیستی از این مراکز تحقیقاتی ارائه شده است و زمینه کاری آن ها مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱-۲: لیست دانشگاه های فعال در زمینه ذخیره ساز فلاپیول

شماره	نام مرکز تحقیقاتی	شماره	نام مرکز تحقیقاتی
۱	دانشگاه امیر کبیر	۶	دانشگاه نوشیروانی بابل
۲	دانشگاه علم و صنعت	۷	دانشگاه یزد
۳	پژوهشگاه نیرو	۸	دانشگاه شیراز
۴	پژوهشگاه فضایی تبریز	۹	دانشگاه کرمان
۵	دانشگاه شهید بهشتی	۱۰	دانشگاه خواجه نصیر

۱-۴-۱-۱ - سابقه پژوهش در دانشگاه امیرکبیر

عمده ترین کارهای تحقیقاتی صورت گرفته در کشور به استناد مقالات، پایان نامه ها و سایر منابع موجود در شبکه توسط تیم های تحقیقاتی دانشکده برق دانشگاه امیرکبیر انجام گرفته است. این فعالیت ها عبارتند از:

- ساخت دستگاه ذخیره ساز فلاپیول به منظور کنترل لحظه ای فرکانس شبکه

کارفرمای پروژه: دفتر تحقیقات و توسعه شرکت توانیر

این پژوهش در قالب یک پروژه با سرپرستی دکتر گئورگ قره پتیان و با مدیریت فنی دکتر حسین عزیزی مقدم انجام گردید. هدف اصلی از اجرای این طرح تحقیقاتی، شبیه سازی، طراحی و ساخت یک مجموعه آزمایشگاهی به منظور ارزیابی عملکرد جبران ساز کاهش نوسانات فرکانس شبکه قدرت مبتنی بر ذخیره ساز فلاپیول بوده است.

سیستم آزمایشگاهی پیاده سازی شده شامل امولاتور توان، امولاتور بار، مولد سمت شبکه، درایو سیستم فلاپیول، ماشین القایی و دیسک فلاپیول می باشد. با توجه به پیچیدگی دستگاه و نیاز قطعی به یک سیستم اتوماسیون برای مدیریت دستگاه تست جهت مراحل راه اندازی، اجرای سناریوهای تست، پایش لحظه ای کمیته ها، حفاظت دستگاه و ارتباط آسان با هر یک از ماژول ها، یک پروتکل ارتباط داده مد باس بین هر یک از چهار برد کنترلی و یک محیط GUI نرم افزاری Labview در این پروژه پیاده سازی گردیده است. مشخصات فلاپیول طراحی شده در این پروژه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۳-۱: مشخصات ذخیره ساز فلابویل امیر کبیر

سطح ولتاژ DC	سطح توان	ظرفیت انرژی	سرعت فلابویل	روش کنترلی	مدهای کنترلی	ولتاژ خط خروجی
۵۰۰-۶۰۰ ولت	۳ کیلووات	۱۴ کیلوژول	۱۵۰۰-۳۰۰۰ دور در دقیقه	روش کنترل برداري غیرمستقیم	مد کنترل سرعت(شارژ) مد کنترل توان (دشارژ)	۴۰۰ ولت موثر خط

- طراحی و ساخت ذخیره ساز چرخ طیار و سیستم درایو آن با هدف کاربرد در جبران سازه های کیفیت توان

در این طرح تحقیقاتی طراحی و ساخت ذخیره ساز چرخ طیار سرعت پایین نوع فولاد و سیستم درایو آن بررسی گردیده است. هدف از طراحی و ساخت این محصول ارائه ی یک ذخیره ساز، با دینامیک سریع و قابل استفاده در کلیه ی جبران سازه های کیفیت توان اعم از جبران ساز فرکانس، منابع تغذیه ی اضطراری و حذف اغتشاشات کیفیت توان در ریز شبکه ها می باشد. ارزیابی عملکرد سیستم طراحی شده، شبیه سازی و تست های آزمایشگاهی ذخیره ساز چرخ طیار نشان می دهد این تکنولوژی می تواند جایگزین مناسبی برای باتری در بسیاری از جبران سازه های کیفیت توان استفاده گردد علاوه بر این نصب این نوع ذخیره ساز در کنار ذخیره سازه های معمول (مانند باتری) ضمن افزایش طول عمر آنها موجب بهبود شاخص های کیفیت توان گردد. نمونه ی آزمایشگاهی استفاده شده در این مقاله همان نمونه ی قبلی می باشد.

- مدل سازی و کنترل سیستم ذخیره سازی انرژی فلابویل مبتنی بر دستگاه القایی برای تنظیم فرکانس پس از جزیره شدن میکرو شبکه

در این طرح تحقیقاتی، یک مدل دقیق از ذخیره ساز فلابویل ارائه شده و استراتژی های کنترلی آن برای تنظیم فرکانس پیشنهاد و بحث گردیده است. روش کنترل برداری برای کنترل مبدل سمت ماشین القایی فلابویل استفاده شده است. عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهادی توسط MATLAB / Simulink برای دو سناریوی مختلف جزیره شدن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی عملکرد خوب ذخیره ساز فلابویل را با توجه به تغییرات فرکانس در ریز شبکه نشان می دهد.

- روش کنترل فرکانس پیشرفته برای سیستم ذخیره ساز انرژی فلابویل متصل به ریز شبکه

در این طرح تحقیقاتی، یک سیستم کنترل فرکانس پیشرفته برای ذخیره ساز انرژی فلابویل ارائه شده است تا تغییرات فرکانس ریز شبکه را کاهش دهد. سیستم کنترل پیشنهادی به صورت سه لایه برای مبدل سمت ماشین القایی شامل کنترل کننده ولتاژ لینک DC، کنترل کننده سرعت و یک سیستم کنترل برداری ارائه شده است. بر خلاف روش های کنترل متداول، در روش پیشنهادی، کنترل فرکانس در مبدل سمت شبکه برای افزایش سرعت رمپ 1 (رسیدن از سرعت صفر به نامی) فلابویل و کاهش انحراف فرکانس در برابر تغییرات بار اجرا می شود. همچنین، سیستم کنترل سه لایه پیشنهادی برای مبدل سمت ماشین القایی، تغییرات ولتاژ لینک DC را کاهش می دهد. علاوه بر این، هنگامی که حالت عملکرد فلابویل از مد کنترل سرعت به مد کنترل فرکانس ریز شبکه تغییر می کند، یک سیستم هماهنگ مد برای کاهش تغییرات ولتاژ لینک DC پیشنهاد شده است. برای نشان دادن مزیت روش پیشنهادی در مقایسه با روش مرسوم، ابتدا مدل خطی فلابویل در ریز شبکه استخراج شده و سپس تحلیل سیگنال کوچک برای طراحی بهینه کنترل کننده های انترگرالی تناسبی (PI) انجام گردیده است. دو استراتژی کنترلی به صورت تئوری ارائه شده و به منظور مقایسه نتایج به صورت آزمایشگاهی در یک ریز شبکه نمونه شامل یک شبیه ساز دیزل ژنراتور و یک شبیه ساز بار پیاده سازی شده است. سیستم کنترل فرکانس پیشنهادی در شرایط بارگیری مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و خروجی مطالعه برتری سیستم کنترل پیشنهادی بر سیستم کنترل مرسوم را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی اثبات کرده

است. نمونه‌ی آزمایشگاهی استفاده شده در این مقاله همان نمونه‌ی قبلی می‌باشد.

• تنظیم فرکانس ریز شبکه AUT با استفاده از کنترل کننده PI فازی اصلاح شده برای سیستم ذخیره انرژی فلاپیول

در این طرح تحقیقاتی برخلاف روش‌های معمول استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی فلاپیول برای تنظیم فرکانس که توسط دو اینورتر پشت به پشت (AC-DC-AC) در حالی که اینورتر سمت فلاپیول توان فعال و شار ماشین را تنظیم می‌کند و اینورتر سمت شبکه توان راکتیو و ولتاژ لینک DC را توسط کنترل کننده های جریان PI معمولی تنظیم می‌کند، کنترل توان فعال و راکتیو به اینورتر سمت شبکه و کنترل ولتاژ لینک DC و شار ماشین به اینورتر سمت فلاپیول منتقل می‌شود. به علاوه با توجه به اینکه برای تنظیم فرکانس، ذخیره ساز فلاپیول به طور مداوم با تغییر توان و نقطه کار مواجه است و عملکرد کنترل کننده PI به نقطه کار سیستم بستگی دارد در این طرح، یک نسخه اصلاح شده از کنترل کننده PI فازی برای کنترل اینورتر سمت شبکه پیشنهاد شده است که در آن مقادیر ضریب کنترل کننده PI به صورت بهینه برای نقطه کار با استفاده از خطی سازی فیدبک و جابجایی قطب تعیین می‌گردند و سپس سیستم فازی برای تغییر ضرایب PI حول مقادیر نامی هنگام تغییر نقطه کار عمل می‌کند. در این پروژه نتایج تجربی حاصل از نمونه قبلی ساخته شده در دانشگاه امیرکبیر عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی را برای تنظیم فرکانس ریز شبکه AUT تأیید کرده است.

• تقویت فرکانس ریز شبکه حاصل از فرآیند جزیره‌ای شدن با استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی فلاپیول

در این طرح تحقیقاتی به تأثیرات کاربرد فلاپیول روی پاسخ گذرا ریز شبکه در طی فرآیند جزیره‌ای شدن پرداخته شده است. در ابتدا، مدل کاملی از ذخیره ساز فلاپیول و همچنین سایر اجزای یک ریز شبکه متشکل از نیروگاه خورشیدی، پیل سوختی و مجموعه‌ای از بارها ارائه شده است. سپس استراتژی‌های کنترلی برای فلاپیول و سایر مولفه‌های ریز شبکه بحث گردیده است. ادامه در حالتی که در لحظه جزیره‌ای شدن، ریز شبکه انرژی را از شبکه اصلی جذب می‌کند و در حالتی که، ریز شبکه انرژی را به شبکه اصلی تزریق می‌کند بررسی شده است. در دو حالت، شبیه سازی با و بدون فلاپیول انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که وجود ذخیره ساز فلاپیول در دو مورد می‌تواند کنترل فرکانس را بهبود بخشد.

• یک استراتژی کنترلی برای سیستم ذخیره ساز انرژی فلاپیول برای بهبود ثبات فرکانس در میکرو شبکه جزیره‌ای

در این پروژه، ساختار ذخیره ساز فلاپیول با جزئیات مدل شده و دو استراتژی کنترلی (کنترل V/f و PQ) اعمال می‌شود. علاوه بر این، به منظور بهبود فرکانس ریز شبکه و پایداری ولتاژ، دو کنترل کننده مکمل PI (معمولی و فازی) برای استراتژی کنترل V/f پیشنهاد شده است. یک شبکه ولتاژ پایین معمول، شامل ذخیره ساز فلاپیول برای چهار سناریوی مختلف (فلاپیول استراتژی کنترلی PQ دارد، فلاپیول استراتژی کنترلی V/f دارد، فلاپیول استراتژی V/f را داشته و به طور تکمیلی کنترل فرکانس را نیز بر عهده دارد و عملکرد ریز شبکه و فلاپیول را تحت شرایط تغییر بار بررسی می‌کند) در محیط MATLAB / Simulink شبیه سازی شده است. نشان داده شده است که کنترلر فازی عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده PI معمولی در ریز شبکه جزیره‌ای دارد.

• طراحی و نمونه سازی اولیه یک سیستم ذخیره انرژی فلاپیول جدید

ذخیره ساز انرژی فلاپیول آبشاری مفهومی جدیدی است که در این پروژه ارائه شده و اصول و مبانی آن مورد بحث قرار گرفته است. در این طرح تحقیقاتی فرآیند طراحی این فلاپیول بر اساس روابط توسعه یافته ارائه شده و ساختار پیشنهادی با ساختار دو فلاپیول معمول (سرعت بالا و سرعت پایین) مقایسه شده است. مشخص گردید که فلاپیول آبشاری پیشنهادی دارای مزایای قابل توجهی از جمله بهبود چگالی انرژی در مقایسه با هر دو ساختار رایج قبلی می‌باشد. اگرچه که هدف اصلی این کار

ثبات فرکانسی به ویژه در یک شبکه کوچک پرتنش می باشد به اعتقاد نویسندگان این ساختار می تواند به عنوان یک ذخیره ساز متحرک یا ثابت (غیرفعال یا فعال ، استاتیک یا پویا) نیز موثر باشد. در این پروژه نمونه اولیه کوچکی (به صورت سه مرحله ای) بر اساس روند طراحی پیشنهادی طراحی شده است که قادر به ذخیره ۱۵۸ کیلوژول انرژی و تزریق مجدد آن بدون افزایش درجه حرارت غیر عادی یا سایر مشکلات است. ساختار پیشنهادی در شرایط مختلف به صورت مستقل و همچنین به صورت متصل به شبکه مورد بررسی قرار گرفته است تا توانایی های آن ارزیابی گردد. مشخصات فلاپیول طراحی شده در این پروژه در جدول (۲-۳) آورده شده است.

جدول ۴-۱: مشخصات فنی فلاپیول

سطح توان	ظرفیت انرژی	سرعت فلاپیول	ماشین الکتریکی	ولتاژ خط خروجی
۲/۴ کیلوولت آمپر	۱۵۸ کیلوژول	۹۰۰۰ دور در دقیقه (حداکثر)	PMSM	۴۰۰ ولت موثر خط

- طراحی ساده شده ، بهینه سازی و مطالعه مقایسه ای موتورهای BLDC، SPM و Halbach برای باتری های الکترومکانیکی مورد استفاده در ماهواره

باتری های الکترومکانیکی در مقایسه با باتری های شیمیایی، خصوصاً در کاربردهای ماهواره ای در مدار پایین زمین 3 ، دارای مزایای مهم بسیاری هستند. ماشین های مختلف بدون شیار ، روتور خارجی ، آهن ربا دائمی پیشنهاد شده و در این سیستم ها به عنوان موتور / ژنراتور استفاده می شوند. ماشین سنکرون آهنرباهای دائمی ، DC بدون جاروبک و هالباخ سه نوعی هستند که بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. در این پروژه، بهترین ماشین با استفاده از یک مطالعه مقایسه ای معرفی می شود. مواد و ساختار مناسب برای کاربردهای فضایی معرفی و ساده شده است. روش های طراحی تحلیلی برای سه نوع ماشین ارائه شده است. سپس ، هر سه نوع ماشین بهینه می شوند تا مقایسه ای منصفانه داشته باشند. بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) به عنوان الگوریتم بهینه سازی و از شبیه سازی های مبتنی بر روش اجزای محدود برای تأیید روند طراحی و بهینه سازی استفاده می شود. سرانجام ، بهترین دستگاه بر اساس پارامترهای مهم در ریزماهواره ها معرفی می شود.

۱-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه علم و صنعت

۱-۱-۵-۱ ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه علم و صنعت در قالب یک رساله دکتری در سال ۹۲ به طراحی ، بهینه سازی و ساخته شده است. در ادامه در حال انجام رساله خود در زمینه کاربرد ذخیره ساز فلاپیول در ایستگاه های شارژ خودرو می باشد. در ادامه به جزئیات این پروژه ها می پردازیم:

- طراحی و بهینه سازی ماشین رلوکتانس سنکرون تقویت شده با آهنربای دائم (PMA-SynRM) برای کاربرد ذخیره ساز انرژی فلاپیول و ساخت نمونه آزمایشگاهی
- در این پروژه با هدف بررسی ذخیره ساز انرژی فلاپیول در ریزشبکه های ترکیبی مبتنی بر منابع انرژی نو، با توجه به مزایای

این ذخیره ساز، طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی شامل مولد توان نوسانی، بار قابل کنترل، ذخیره ساز باتری و ذخیره ساز فلاپیول انجام گرفته است. یکی از اجزاء کلیدی در تعیین کارایی ذخیره ساز فلاپیول، سیستم موتور-ژنراتور مورد استفاده در این تکنولوژی می باشد. بر همین اساس طراحی و بهینه سازی ماشین رلوکتانس سنکرون تقویت شده با آهنربای دائم برای کاربرد ذخیره ساز انرژی فلاپیول از اهداف اصلی این رساله می باشد. در مرحله اول بر اساس مشخصه شارژ-دشارژ مورد نیاز ذخیره ساز انرژی در ریز شبکه ها، طراحی مفهومی ذخیره ساز فلاپیول انجام می گیرد. پس از ارزیابی ماشین های الکتریکی مورد استفاده برای این کاربرد، ماشین رلوکتانس سنکرون به عنوان سیستم موتور-ژنراتور ذخیره ساز فلاپیول انتخاب می گردد. در ادامه ضمن طراحی ابعاد اصلی و محاسبه مقادیر اولیه پارامترهای هندسی ماشین، به منظور تحلیل دقیق ماشین و تعیین پارامترهای طراحی بهینه مدل اجزا محدود سه بعدی و دو بعدی ماشین در نرم افزار FLUX پیاده سازی می گردد. پس از آنالیز حساسیت متغیرهای طراحی و تعیین پارامترهای طراحی کلیدی، بهینه سازی سیستم موتور-ژنراتور مبتنی بر ماشین رلوکتانس سنکرون با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی ترکیبی مبتنی بر روش رهیافت تخمین پاسخ سطح و مدل اجزا محدود ارائه گردیده است. با توجه به محدودیت های مکانیکی و مغناطیسی دستیابی به مشخصه های کاری مطلوب برای ماشین رلوکتانس سنکرون تا حد مشخصی مقدور می باشد. بر همین اساس در ادامه، طراحی ماشین رلوکتانس سنکرون بهبود یافته با آهنربای دائم در راستای کار این پروژه قرار گرفته است. به منظور اطمینان از عملکرد ایمن سیستم به خصوص در دوره های بالا، توزیع تنش مکانیکی رتور و فرکانسهای طبیعی سیستم در نرم افزار ABAQOUS مورد ارزیابی گردیده است. همچنین پس از طراحی و بهینه سازی اجزا ماشین به منظور عملکرد مطلوب ذخیره ساز فلاپیول، روشهای کنترل ذخیره ساز فلاپیول با هدف درایو بهینه ماشین طراحی و شبیه سازی گردیده است. در مرحله نهایی رفتار حرارتی ماشین در شرایط کاری مختلف با استفاده از مدل حرارتی اجزا محدود ارزیابی گردیده است. در بخش نهایی پروژه با هدف مطالعه آزمایشگاهی سیستم ذخیره ساز فلاپیول طراحی شده، یک میز تست شامل مولد توان نوسانی، بار قابل کنترل، ذخیره ساز باتری و ذخیره ساز فلاپیول طراحی و پیاده سازی گردیده است. در این مجموعه آزمایشگاهی، امکان بررسی رفتار ذخیره ساز فلاپیول و سیستم کنترل توان در شرایط نوسان توان تولیدی واغتشاش بار با پروفیل دلخواه فراهم گردیده است. مشخصات فلاپیول طراحی شده در این پروژه در جدول (۲-۴) آورده شده است.

جدول ۵-۱: مشخصات فلاپیول دانشگاه علم و صنعت

سطح توان و انرژی	سرعت	ماشین الکتریکی
۳ کیلووات و ۴۵ کیلو ژول	۶۰۰۰ دور در دقیقه (حداکثر)	PMaSynRM

۱-۵-۳ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در پژوهشگاه رانشگرهای فضایی تبریز

• چرخ عکس العملی GEO و LEO به منظور استفاده در سیستم کنترل وضعیت ماهواره

چرخ عکس العملی از جمله تجهیزات کنترل وضعیت ماهواره به شمار می رود و برای تبادل مومنتم زاویه ای از آن استفاده می گردد. قسمت اصلی این وسیله از یک دیسک دوار تشکیل یافته که عموماً توسط یک موتور الکتریکی جریان مستقیم بدون جاروبک به چرخش درمی آید. عکس العمل گشتاور موتور که به محل نصب آن وارد می شود باعث چرخش ماهواره در جهت مخالف چرخش دیسک می گردد. طبق قانون بقاء اندازه حرکت، تغییر اندازه حرکت دیسک و ماهواره با یکدیگر در خلاف جهت و از نظر اندازه برابر است. با توجه به اینکه یک چرخ عکس العملی فقط با یک محور ماهواره تبادل مومنتوم انجام می دهد، برای کنترل سه محوره ماهواره حداقل سه چرخ عکس العملی لازم است، که هر کدام روی یک محور نصب می شوند، به طوری که محور چرخش آن به موازات محور مربوطه ماهواره باشد. این محصول از تکنولوژی یاتاقان مغناطیسی با مزایایی از جمله کاهش

توان مصرفی، کاهش گشتاورهای اغتشاشی و ... بهره خواهد می برد. از کاربردهای این محصول می توان به تثبیت و کنترل وضعیت ماهواره در مدار، انجام مانورهای وضعیت، غلبه و جبران اغتشاشات مداری، سمت دهی محورهای ماهواره نسبت به یک دستگاه مرجع و پایدارسازی این وضعیت، سمت دهی ماهواره به منظور قرارگیری پنل های خورشیدی، آنتن ها و دوربین ها به سمت خاص اشاره نمود. پژوهشگاه رانشگرهای فضایی تبریز این چرخ های عکس العملی را در قالب محصول به بازار هدف عرضه می کند.

۱-۵-۴ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه شهید بهشتی

- طراحی بهینه موتور آهن ربای دایم با هدف افزایش چگالی گشتاور در کاربرد فلاپیول: طراحی، تحلیل المان محدود و ساخت

در این پروژه طراحی بهینه موتور آهن ربای دایم بدون جاروبک رتور خارجی برای کاربرد در ذخیره ساز فلاپیول با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات به منظور دستیابی به چگالی گشتاور بیشینه در یک بازه سرعت انجام گرفته است. ابتدا معادلات طراحی موتور که مورد استفاده توابع ارزیابی الگوریتم می باشند ارائه شده و سپس روند پیاده سازی الگوریتم برای بهینه سازی موتور با تابع هدف چگالی گشتاور تشریح شده است. روند بهینه سازی تابع به همراه تعریف محدودیت های طراحی و مقادیر اولیه پارامترهای موتور به طراحی بهینه ابعاد آن منجر شده است. نتایج طراحی و بهینه سازی با استفاده از روش آنالیز المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفته و پارامترهای عملکردی ماشین محاسبه و تحلیل شده اند. در نهایت مدل ساخته شده موتور به همراه نتایج عملی ارائه شده که نشان دهنده کاربردی بودن الگوریتم پیشنهاد شده می باشد.

جدول ۶-۱: مشخصات فلاپیول دانشگاه شهید بهشتی

سطح توان	سرعت موتور	نوع موتور
۱۰۰ وات	۵۰۰۰ دور در دقیقه	آهنربای دائم بدون جاروبک رتور خارجی

۱-۵-۵ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه شهید بهشتی

سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه نوشیروانی بابل

- کنترل ولتاژ و فرکانس در سیستم های توزیع هوشمند در حضور DER با استفاده از سیستم ذخیره انرژی فلاپیول
- در این پروژه، یک مبدل و استراتژی کنترلی جدید برای سیستم های ذخیره ساز انرژی فلاپیول به منظور برقراری تعادل انرژی و تنظیم فرکانس شبکه در یک شبکه هوشمند متشکل از مولدهای بادی، PV ها و واحدهای حرارتی معمول ارائه شده است. مبدل پیشنهادی در این طرح یک اینورتر نه کلیدی به عنوان اینورتر دو خروجی به منظور کاهش هزینه ادوات قدرت و همچنین اثر حرارتی، و کاهش تعداد کلیدهای نیمه هادی می باشد. این طرح پاسخ فرکانسی سیستم را به اختلالات بهبود می بخشد. اعتبار روش پیشنهادی با استفاده از تجزیه و تحلیل شبیه سازی رایانه ای با استفاده از MATLAB Simulink ارزیابی شده است.

۶-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه شیراز

سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه شیراز

• یک طراحی مدولار جدید برای روتور فلاپیول چند حلقه ای برای بهینه سازی مصرف انرژی در قطارهای سبک مترو در این طرح تحقیقاتی، یک روتور فلاپیول چند حلقه ای به عنوان یک ماژول اساسی برای طراحی مدولار یک سیستم ذخیره سازی انرژی بهینه، انتخاب شده است تا با پیدا کردن بهترین ظرفیت و تعداد ماژول روتور فلاپیول بهینه شده برای هر قطار، مصرف انرژی را در قطارهای سبک مترو کاهش دهد. پس از یافتن ظرفیت کافی و بهینه سازی مشخصات هندسی حلقه های روتور، تأثیر استفاده از سیستم ذخیره انرژی فلاپیول مدولار در کاهش مصرف انرژی قطارهای سبک شهری بررسی شده است. چهار روتور مختلف با ظرفیت های مختلف ذخیره انرژی انتخاب شده اند، به طوری که از نتایج می توان برای طیف گسترده ای از قطارهای سبک با دامنه تقاضای انرژی ۳۴۲۰-۱۶۲۰ کیلووات استفاده کرد. در الگوریتم بهینه سازی، انرژی در واحد حجم به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در این پروژه طراحی مدولار ارائه شده، برای سیستم قطار شهری شیراز با استفاده از داده های سرعت و شتاب در زمان واقعی 5 بررسی شده است. فلاپیول سه لایه با ظرفیت ذخیره انرژی ۵۰۰ وات ساعت به عنوان یک نمونه عملی نتیجه می‌دهد. در انتها، اثر تعداد مسافران، اوج و ساعات کم مصرف انرژی در ظرفیت ذخیره ساز انرژی سیستم نیز بررسی می‌شود. در این طرح تحقیقاتی نشان داده شده است که استفاده از ۱۵ عدد ماژول فلاپیول منجر به صرفه جویی ۳۵/۱ درصدی انرژی در این خط می‌شود.

۷-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه خواجه نصیر

سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه خواجه نصیر

• استراتژی کنترل DTC-SVM برای ماشین القایی مبتنی بر مبدل ماتریس غیر مستقیم در سیستم ذخیره انرژی فلاپیول

در این پروژه یک فلاپیول سرعت پایین با استراتژی کنترلی DTC-SVM برای ماشین القایی مبتنی بر مبدل ماتریس غیر مستقیم 6 بررسی می‌شود. در این سیستم، DTC-SVM با ایجاد وضعیت جابجایی سریع و مکرر بین حالت‌های موتوری و ژنراتوری در ماشین القایی، راندمان سیستم ذخیره ساز انرژی را افزایش داده و توان خروجی فعال نیروگاه بادی را تسهیل می‌کند. استراتژی مدولاسیون بردار فضایی (SVM) در مبدل ماتریس غیر مستقیم، کنترل کاملی از بردار ولتاژ خروجی و زاویه جابجایی جریان ورودی لحظه‌ای را فراهم می‌کند. مدل سیستم در نرم افزار MATLAB/SIMULINK برای وضعیت‌های مختلف ذخیره ساز مانند: حالت شارژ، دشارژ و آماده به کار شبیه سازی شده است.

۸-۱-۵-۱ سابقه پژوهش ذخیره ساز فلاپیول در دانشگاه یزد

• ذخیره ساز انرژی فلاپیول توسعه یافته با ابر خازن های چرخان داخلی

ذخیره ساز انرژی فلاپیول می تواند مقادیر زیادی انرژی جنبشی را در قسمت‌های چرخان خود ذخیره کند، اما اینرسی آن سرعت تبادل توان را محدود می‌کند. از طرف دیگر، ذخیره ساز ابر خازنی توانایی تبادل مقدار زیادی توان لحظه‌ای را دارد.

بنابراین، ترکیب این دو سیستم می تواند به طور قابل توجهی پاسخ دینامیکی ذخیره ساز انرژی معمولی فلاپویل را بهبود بخشد. در این پروژه یک طرح جدید برای این سیستم ترکیبی پیشنهاد شده است که در آن ابر خازن ها درون دیسک چرخان قرار دارند. بنابراین، ابرخازن ها می توانند به طور قابل توجهی عملکرد دینامیکی ذخیره ساز انرژی فلاپویل را با تأثیرات ناچیز روی اندازه و وزن آن بهبود بخشند. علاوه بر این، توانایی ابر خازن های چرخان در ذخیره انرژی الکتریکی و همچنین ذخیره انرژی جنبشی، ظرفیت ذخیره انرژی فلاپویل پیشنهادی را افزایش می دهد. در این پروژه، ساختارهای پیشنهادی با ابر خازن های چرخان داخلی به صورت مکانیکی توسط CATIA و ABAQUS تحلیل شده اند. علاوه بر این، ذخیره ساز انرژی فلاپویل توسعه یافته، که مجهز به ماشین سنکرون آهنربای دائم و کنترل برداری غیرمستقیم اصلاح شده است، در MATLAB / Simulink تحت شرایط مختلف شبیه سازی گردیده است.

۹-۱-۵-۱ دانشگاه فناوری های پیشرفته کرمان

- استفاده از سیستم ذخیره انرژی فلاپویل برای کاهش نوسانات ولتاژ و توان ناشی از جنبه های آلاستیک توربین های بادی

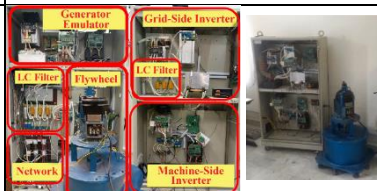
در این پروژه، یک نیروگاه بادی متشکل از چهار توربین بادی با سرعت ثابت شبیه سازی شده است و فلاپویل برای کاهش نوسانات توان و ولتاژ ناشی از جنبه های آیرودینامیکی توربین بادی پیشنهاد شده است. برای مدل سازی جامع یک توربین بادی در این پروژه، از جعبه ابزار FAST و AeroDyn در بستر سیمولینک استفاده شده است. نتایج شبیه سازی، اثر فلاپویل را در کاهش نوسانات ولتاژ و توان نشان می دهد. علاوه بر این در این پروژه قابلیت فلاپویل در کاهش نوسانات ولتاژ با STATCOM مقایسه شده است.

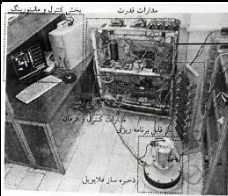
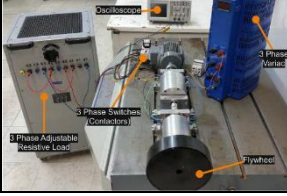
۱-۶ - پروژه های محصول محور

در بخش ۲-۲ پژوهشهای دانشگاهی در زمینه ذخیره ساز فلاپویل بررسی گردید. در این بخش پروژه های محصول محور در زمینه طراحی و ساخت ذخیره ساز انرژی فلاپویل بطور خلاصه بررسی می گردد.

جدول ۱-۷: مشخصات فنی نمونه های ساخته شده ذخیره ساز فلاپویل

شماره	پروژه های محصول محور (طراحی و ساخت)	کارفرما	مجری	سال اجرا
۱	ارزیابی عملکرد جبران ساز کاهش نوسانات فرکانس شبکه قدرت مبتنی بر ذخیره ساز فلاپویل	توانیر	دانشگاه امیرکبیر	۱۳۹۷



۱۳۹۷	دانشگاه شهید بهشتی	دانشگاه شهید بهشتی		طراحی بهینه موتور آهن ربای دایم با هدف افزایش چگالی گشتاور در کاربرد فلاپیول: طراحی، تحلیل المان محدود و ساخت	۴
۱۳۹۲	دانشگاه علم و صنعت	دانشگاه علم و صنعت		طراحی و بهینه سازی ماشین رلوکتانس سنکرون تقویت شده با آهنربای دائم (PMA-SynRM) برای کاربرد ذخیره ساز انرژی فلاپیول و ساخت نمونه آزمایشگاهی	۵
محصول	پژوهشگاه فضایی تبریز	پژوهشگاه رانشگرهای فضایی تبریز		چرخ عکس العملی LEO و GEO به منظور استفاده در سیستم کنترل وضعیت ماهواره	۷
۱۳۹۵	دانشگاه امیرکبیر	دانشگاه امیرکبیر		طراحی و نمونه سازی اولیه یک سیستم ذخیره انرژی فلاپیول جدید	۸

۱-۷ زمینه‌های کاری صورت گرفته پیرامون فلاپیول‌ها

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته تا کنون هیچ نمونه تجاری ذخیره ساز فلاپیول مورد بهره برداری قرار نگرفته است. حوزه‌های کاربردی نمونه‌های آزمایشگاهی ذخیره ساز فلاپیول و پژوهشهای دانشگاهی انجام گرفته در زمینه فن آوری فلاپیول به صورت خلاصه در جدول ۷-۲ آورده شده است.

جدول ۸-۱: مشخصات فنی نمونه‌های ساخته شده ذخیره ساز فلاپیول

شماره	زمینه‌های کاری بررسی شده
۱	ارزیابی عملکرد جبران ساز کاهش نوسانات فرکانس شبکه قدرت مبتنی بر ذخیره ساز فلاپیول
۲	طراحی و ساخت ذخیره ساز چرخ طیار و سیستم درایو آن با هدف کاربرد در جبران سازهای کیفیت توان
۳	مدل سازی و کنترل سیستم ذخیره سازی انرژی فلاپیول مبتنی بر ماشین القایی برای تنظیم فرکانس پس از جزیره‌ای شدن ریز شبکه
۴	تنظیم فرکانس میکرو شبکه AUT با استفاده از کنترل کننده PI فازی اصلاح شده برای سیستم ذخیره انرژی فلاپیول
۵	یک استراتژی کنترلی برای سیستم ذخیره ساز انرژی فلاپیول برای بهبود ثبات فرکانس در ریز شبکه جزیره‌ای
۶	کنترل فرکانس پیشرفته برای ریز شبکه متصل به سیستم ذخیره ساز انرژی فلاپیول
۷	تقویت فرکانس ریز شبکه حاصل از فرآیند جزیره سازی با استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی فلاپیول
۸	طراحی و بهینه سازی ماشین رلوکتانس سنکرون تقویت شده با آهنربای دائم (PMA-SynRM) برای کاربرد ذخیره ساز انرژی فلاپیول و ساخت نمونه آزمایشگاهی

۹	کنترل ولتاژ و فرکانس در سیستم های توزیع هوشمند در حضور DER با استفاده از سیستم ذخیره انرژی فلاپیول
۱۰	طراحی بهینه موتور آهن ربای دایم با هدف افزایش چگالی گشتاور در کاربرد فلاپیول؛ طراحی، تحلیل المان محدود و ساخت
۱۱	استفاده از سیستم ذخیره انرژی فلاپیول برای کاهش نوسانات ولتاژ و توان ناشی از جنبه های آلستیک توربین های بادی
۱۲	استراتژی کنترل DTC-SVM برای ماشین القایی مبتنی بر مبدل ماتریس غیر مستقیم در سیستم ذخیره انرژی فلاپیول
۱۳	چرخ عکس العملی GEO و LEO به منظور استفاده در سیستم کنترل وضعیت ماهواره
۱۴	ذخیره ساز انرژی فلاپیول توسعه یافته با ابر خازن های چرخان داخلی
۱۵	طراحی و نمونه سازی اولیه یک سیستم ذخیره انرژی فلاپیول جدید
۱۶	یک طراحی مدولار جدید برای روتور فلاپیول چند حلقه ای برای بهینه سازی مصرف انرژی در قطارهای سبک مترو
۱۸	طراحی ساده شده، بهینه سازی و مطالعه مقایسه ای موتورهای BLDC، SPM و Halbach برای باتری های الکترومکانیکی مورد استفاده در ماهواره

۱-۸ یاطاقان مغناطیسی

یکی از گلوگاه های تکنولوژیکی انواع ذخیره ساز های فلاپیول ضرورت استفاده از یاطاقان های مغناطیسی بجای نوع مکانیکی می باشد. در ذخیره سازهای فلاپیول سرعت بالا، یاطاقان های مکانیکی کارایی خود را از دست می دهند چراکه نه تنها دارای محدودیت های سرعت هستند بلکه با افزایش سرعت تلفات اصطکاکی آنها افزایش یافته و باعث افزایش تلفات خودبخودی و کاهش راندمان کلی سیستم می شوند. یاطاقان های مغناطیسی چند دهه است که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند. یاطاقان های مغناطیسی مزایای فراوانی دارند از جمله می توان به توانایی کار در سرعت های بالا و قابلیت عملکرد بدون روغن کاری در محیط خلا اشاره نمود. این یاطاقان ها بدون اصطکاک کار می کنند، فرسایش کمی دارند، در حین دوران نسبت به بقیه یاطاقان ها ارتعاشات بسیار کمتری ایجاد می کنند، می توانند شفت را به دقت کنترل کنند، نیروهای خارجی وارد بر شفت را اندازه بگیرند و حتی شرایط کاری ماشین را مانیتور کنند. امروزه رشد تکنولوژی، به ویژه در کنترل و پردازش دیجیتال، یاطاقان های مغناطیسی را به سوی طراحی نیرومندتر و به صرفه تر نسبت به گذشته هدایت کرده است. در داخل کشور نیز تحقیقات زیادی روی این تکنولوژی انجام شده و نمونه های آزمایشگاهی و نیمه صنعتی یاطاقان مغناطیسی در مراکز تحقیقاتی و دانشگاه های داخل کشور ساخته شده است.

۱-۹ مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه یاطاقان های مغناطیسی

در ادامه مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه یاطاقان های مغناطیسی در جدول (۲-۸) آورده شده است.

- شرکت پژوهشی سیستم های پیشرو

- طراحی و ساخت سیستم تعلیق مغناطیسی فعال در راستای عمودی با هدف حذف سوزن، ساچمه و روغن از دمپر پایین ماشین سانتریفیوژ.

با توجه به محدودیت در طراحی و ساخت ساچمه و سوزن مورد نیاز در دمپر و یاطاقان پایین ماشین های سانتریفیوژ نسل های آینده که روتورهای سنگین تر و بلندتری دارند (یا فلاپیول های سنگین ذخیره کننده انرژی) هدف از اجرای این طرح، پیاده سازی

سیستم تعلیق و تکیه گاه بدون تماس به کمک فتر و دمپر مغناطیسی غیرفعال در راستای شعاعی و همچنین تعلیق مغناطیسی فعال در راستای محوری می باشد تا بتوان در شرایط کاری سیستم به کمک فیدیک حلقه بسته و کنترل کننده سیستم تعلیق مغناطیسی فعال، پایداری محوری و شعاعی روتور ماشین سانتریفیوژ را تامین کرد.

جدول ۹-۱: مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه یاطاقان مغناطیسی

شماره	مرکز تحقیقاتی	شماره	مرکز تحقیقاتی
۱	پژوهشگاه رانشگرهای فضایی تبریز	۹	دانشگاه صنعتی اراک
۲	شرکت پژوهشی سیستم های پیشرو	۱۰	دانشگاه یزد
۳	دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت مدرس	۱۱	دانشگاه شیراز
۴	دانشکده مکانیک دانشگاه شریف	۱۲	دانشگاه آزاد شهر قدس
۵	شرکت پدیده فناوران هوشمند کهربا	۱۳	دانشگاه یزد
۶	دانشکده مکانیک دانشگاه ملایر	۱۴	دانشگاه ولیعصر
۷	دانشگاه مالک اشتر	۱۵	دانشگاه تبریز
۸	دانشگاه علم و صنعت	۱۶	

- شرکت دانش بنیان پدیده فناوران هوشمند کهربا

شرکت پدیده فناوران هوشمند کهربا در سال ۱۳۹۳ تاسیس و در زمینه طراحی، ساخت و تولید سیستم های الکترونیکی پیشرفته مانند درایورها و اینورترهای پیشرفته، سیستم های مکترونیکی پیشرفته مانند یاتاقانهای مغناطیسی فعال برای روتورهای سرعت بالا، سیستم های تعلیق پیشرفته، سنسورهای پیشرفته مانند سنسورهای جابجائی بدون تماسی القائی برای کاربردهای خاص، عملگرهای الکترومغناطیسی خاص، سیستم های کنترل بلادرنگ، سیستم های پیشرفته صرفه جوئی انرژی فعالیت دارد. شرح ویژگی های فنی محصول تولیدی این شرکت به قرار زیر می باشد:

- تعلیق ۵ درجه آزادی ماشین های دوار
- عدم نیاز به روغنکاری
- تعلیق کاملاً بدون تماس مکانیکی
- یاطاقان های مغناطیسی فعال نیازی به پمپ ها، مخزن ها، و گیربکس ها ندارند
- کارائی در یک طراحی فشرده (یاطاقان مغناطیسی فعال یکپارچه، هر آنچه را که به آن نیاز دارد، از قسمت های الکترونیکی و الکترومغناطیسی گرفته تا انواع الگوریتم های کنترلی را در درون خود جای داده است)
- دارا بودن سیستم مانیتورینگ سلامت ماشین (هم بصورت هوشمند و هم بصورت ریموت)
- کنترل فعال ارتعاشات روتور
- سرعت های دورانی بالا
- نقطه شاخص موقعیت روتور می تواند آزادانه تعیین شود
- ویژگی های یاطاقان از قبیل میرائی و سختی می توانند بصورت دینامیکی تنظیم شوند.
- سنسورهای موقعیت سیستم های یاطاقان مغناطیسی فعال، بعنوان ابزار دقیق نهفته در سیستم عمل می کنند
- توسعه انواع ابزارهای پردازش داده، نظارت، تست و سرویس

دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت مدرس

• طراحی و ساخت یاطاقان مغناطیسی فعال برای کار در دوم ۵۰۰۰ دور در دقیقه در این پروژه یک یاطاقان مغناطیسی فعال برای تعلیق یک رتور توخالی در سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه طراحی و ساخته شده است. در این یاطاقان از ۴ عدد سنسور القایی مغناطیسی برای تعیین موقعیت رتور یک سیستم کنترلی پیشفاز نرم افزار متلب و جعبه ابزارهای آن مانند XPCTARGET، SIMULINK و یک کارت DAQ با فرکانس نمونه برداری ۲۰ کیلوهرتز برای انتقال اطلاعات استفاده شده است.

• بررسی پارامترهای مؤثر سامانه یاطاقان مغناطیسی فعال به صورت تجربی و عددی در این طرح تحقیقاتی، یک سامانه یاطاقان مغناطیسی فعال طراحی و ساخته شده که در آن، با اعمال جریان کنترل شده به سیم پیچ ها، توسط یک کنترل کننده PID، نیروی جاذبه الکترومغناطیسی ایجاد و فاصله بین میله و آهنرباها کنترل می شود. سپس تأثیر پارامترهایی مانند فرکانس نمونه برداری، الگوی تحریک آهنرباها و فاصله هوایی بین رتور و استاتور بر پایداری سامانه یاطاقان مغناطیسی به صورت آماری با استفاده از نتایج آزمایشی تجربی تحلیل و بررسی شده است. همچنین تحلیل دینامیکی و تأثیر میدان مغناطیسی و تحلیل نیرو با استفاده از تحلیل عددی ارائه شده است. با توجه به غیر خطی بودن سامانه تعلیق یاطاقان مغناطیسی، از نتایج این آزمایش برای بررسی اثر غیر خطی و کنترل مناسب تر سامانه استفاده شده است. در تحلیل عددی نحوه و شکل خطوط میدان مغناطیسی، پراکندگی و توزیع چگالی شار مغناطیسی و نیروی مغناطیسی اعمال شده بر میله آهنی به دو روش کار مجازی و تنسور تنش ماکسول بررسی شده است. در تحلیل آماری، نتایج تجربی مربوط به تأثیر تغییرات فرکانس و فاصله هوایی بین رتور و استاتور برای تعیین نقاط پایدار کاری استفاده شده است.

دانشکده مکانیک دانشگاه شریف

پروژه طراحی و ساخت یک یاطاقان مغناطیسی فعال در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شریف نیز مطرح شده که اجرای آن را سید مهدی دربندی، دانشجوی دکتری، به راهنمایی دکتر مهدی بهزاد بر عهده داشته است. ویژگی اصلی یاطاقان مغناطیسی ساخته شده، استفاده از سه قطب برای کنترل ارتعاشات محور دوار است. مزیت اصلی یاطاقان مغناطیسی سه قطبی، فرآیند ساخت ساده تر و همچنین هزینه تجهیزات کمتر آن است. البته مشکلاتی نظیر دینامیک غیرخطی در مورد این نوع یاطاقان مغناطیسی وجود دارد که کنترل آن را با دشواری هایی روبرو می سازد. یاطاقان مغناطیسی ساخته شده، توانایی کنترل و کاهش ارتعاشات ناشی از نامیزانی در محور دوار را داشته و قابلیت کاربرد در تجهیزات دوار با ابعاد بسیار کوچک را نیز دارد.

-دانشکده مکانیک دانشگاه ملایر

• کنترل ارتعاشات رتور جفکات نابالانس توسط یاطاقان مغناطیسی منابع اصلی ارتعاش در سیستم های رتور دینامیک، جرم های نابالانس و خطاهای ساخت یاطاقان های بکاررفته در سیستم رتور می باشند. روشی که امروزه برای کاهش و کنترل ارتعاشات روتورها در صنعت به کار رفته، استفاده از جاذب های مغناطیسی می باشد که با استفاده از نیروی مغناطیسی محاسبه شده، موقعیت رتور را کنترل کرده و ارتعاشات آن را کاهش می دهد. در این تحقیق جاذب مغناطیسی با اعمال نیروی سیستم جاذب دینامیکی و ایجاد دو فرکانس طبیعی جدید، سیستم را از حالت تشدید خارج می کند. همچنین به منظور کاهش بیشتر دامنه ارتعاشات، دو نوع مختلف جاذب دینامیکی طراحی شده است که هر کدام در یک محدوده خاص فرکانس دوران رتور، توسط جاذب مغناطیسی بررسی می شوند. در سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی نیروی پوستانه ای که از طرف جرم جاذب به سیستم اصلی وارد می شود، به صورت نیروی ناپیوسته در ۱۶ سطح بازسازی شده است

و مشاهده شده که در این حالت ارتعاشات در نواحی فرکانس‌های طبیعی سیستم، به میزان ۱۳ درصد نسبت به حالت شبیه‌سازی سیستم جاذب در نظر گرفته شده است و مشاهده شده که در حالت اجرای جاذب‌های دینامیکی با نیروی پیوسته، کاهش یافته است. در این تحقیق دو نسبت جرمی متفاوت برای هر یک از دو سیستم جاذب در نظر گرفته شده است و مشاهده شده که در حالت اجرای جاذب‌های دینامیکی با نسبت جرمی بالاتر، دامنه ارتعاشات روتور و ماکزیمم دامنه نیروی سیستم جاذب دینامیکی کمتر می‌باشد که این موضوع منجر به افزایش دقت عملکرد سیستم جاذب مغناطیسی در بازسازی نیروی سیستم جاذب دینامیکی شده و همچنین کاهش مصرف انرژی الکتریکی سیستم کنترل‌کننده را به دنبال خواهد داشت.

دانشگاه آزاد شهر قدس

• مطالعه یاطاقان‌های مغناطیسی و ارتجاعات آن‌ها

در این پروژه در ابتدا یاطاقان مغناطیسی غیر فعال مورد تحلیل قرار گرفته و سپس مشخصه‌های عملکردی آن مطالعه شده است. یاطاقان مغناطیسی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت شامل محور، لایه داخلی مغناطیسی مستقر در اطراف محور و یک حلقه خارجی مغناطیسی است. بررسی جامعی درباره نیروی اعمال شده توسط مغناطیس دائمی یاطاقان که بر روی محور وارد می‌شود تا آن را به حالت توازن اولی هاش برگرداند، انجام گرفته است. رابطه بین نیروی اعمال شده و اندازه جابه جایی محور از حالت تعادل مطالعه شده است تا بتوان اندازه سفتی را تعیین کرد. مطالعه پارامتری برای پیش بینی تأثیرات خواصی مانند جنس مغناطیس، اندازه خارجی و ضخامت مغناطیس بر عملکرد یاطاقان مغناطیسی انجام گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات شعاعی قسمت چرخشی یعنی محور و مغناطیس داخلی حلقه، باعث ایجاد نیرویی می‌شود که تمایل دارد قسمت چرخشی را به موقعیت تعادل اولیه خود برگرداند. همچنین تغییرات جنس مواد مغناطیس، تأثیر بیشتری نسبت تغییرات شعاعی در مقدار مغناطیس دارد. وقتی شعاع محور بیشتر می‌شود، فنریت آن کمتر می‌شود. در ضخامت کمتر از مدل اصلی، دیده شد که فنریت یاطاقان مغناطیسی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که افزایش ضخامت حالت ارتجاعی یاطاقان را بهبود می‌بخشد. همچنین مشاهده شد که تعداد یاطاقان‌های چیده شده در کنار هم، باعث افزایش فنریت می‌شود. اما واقعیت این است که محدودیت‌هایی برای تعداد یاطاقان‌های چیده شده روی هم وجود دارد.

• مدل سازی یاطاقان مغناطیسی با استفاده از نرم افزار Ansoft

در این مقاله به بررسی معادلات ماکسول سه بعدی در نرم افزار Ansoft پرداخته شده است. راه حل‌های Ansoft بیشتر بر اساس معادلات ماکسول و تحلیل اجزای محدود برنامه ریزی شده است. چنانکه تحلیل ساده ای جهت محاسبه نیروی مغناطیسی موجود میان دو قطب مغناطیسی همنام که مقابل یکدیگر قرار گرفته اند انجام گرفته و مدل سازی در نرم افزار Ansoft شرح داده و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند جنس مواد و ابعاد هندسی بر مقدار نیروی مغناطیسی بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن حالت خاصی از جنس مواد و ابعاد هندسی مقدار نیروی مغناطیسی ۱۸/۰۹۱۳۳ نیوتن است. در پایان تعدادی انتخاب که می‌توانستند در نرم افزار Ansoft مدل و تحلیل استفاده شود استخراج گردید.

دانشگاه صنعتی اصفهان

• تأثیر سختی یاطاقان مغناطیسی بر ارتعاشات آشوبناک روتور انعطاف پذیر

در این مقاله، رفتار غیرخطی سیستم در حضور یاطاقان‌های مغناطیسی فعال بررسی شده است. سیستم دارای یک دیسک صلب نابالانس بوده، به صورت انعطاف پذیر و با هشت درجه آزادی (چهار درجه برای دیسک و دو درجه برای هر یاطاقان) مدل و نیروهای ژيروسکوپی ناشی از انعطاف پذیری روتور نیز در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم به صورت غیر خطی و کوپله استخراج و با روش رانگ کوتای مرتبه چهار حل شده‌اند. تحلیل با سه نوع یاطاقان مغناطیسی و سه سختی متفاوت انجام شده است. برای شناسایی رفتارهای غیرخطی سیستم از تکنیک‌های شناسایی، مانند تاریخچه زمانی، منحنی‌های صفحه فاز، نمودارهای طیف توان، مقاطع پوانکاره، نمودارهای دو شاخه‌ای شدن و ماکزیمم نمای لیاپانوف استفاده می‌شود. نتایج بیانگر وقوع حرکت‌های پریودیک، زیر هارمونیک، شبه پریودیک، آشوبناک در پاسخ سیستم بوده، با افزایش سختی یاطاقان مغناطیسی،

محدوده‌های وقوع آشوب دچار تغییر می‌شود.

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

- طراحی کنترل کننده برای موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان با در نظر گرفتن تزویج بین سیم‌پیچ‌های گشتاور و تعلیق مغناطیسی

موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان نوع جدیدی از ماشین‌های الکتریکی است که حاصل ترکیب مشخصات موتور سنکرون آهنربای دائم معمولی و یاتاقان مغناطیسی می‌باشد. در اغلب تحقیقاتی که پیرامون طراحی کنترل کننده این موتور گزارش شده، از مدل‌های ریاضی بدون در نظر گرفتن تزویج بین سیم‌پیچ‌های گشتاور و تعلیق مغناطیسی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در این پروژه نشان می‌دهد که اگر کنترل کننده بر مبنای مدل ریاضی بدون تزویج طراحی شده و سپس همین کنترل کننده برای مدل ریاضی با تزویج مغناطیسی که نشان دهنده مدل دقیق‌تر و واقعی‌تر موتور است، مورد استفاده قرار گیرد پاسخ سیستم همراه با خطا خواهد بود. بنابراین تزویج بین دو سیم‌پیچ قابل چشم‌پوشی نیست و برای اطمینان از صحت عملکرد سیستم کنترل باید طراحی کنترل کننده با در نظر گرفتن تزویج انجام شود. در این پروژه کنترل کنند ای برای موتور طراحی شده که در آن تزویج بین سیم‌پیچ‌های گشتاور و تعلیق مغناطیسی در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب نشان می‌دهد که به هنگام تغییر ناگهانی سیگنال‌های مرجع مؤلفه‌های جابه‌جایی شعاعی رتور یا تغییر ناگهانی گشتاور بار، سیستم تعلیق مغناطیسی پایدار بوده و از عملکرد مطلوبی برخوردار است. بنابراین صحت روش کنترلی پیشنهادی تأیید می‌شود.

پژوهشگاه رانشگرهای فضایی تبریز

- طراحی، شبیه سازی FEM و پیاده سازی سیستم یاتاقان مغناطیسی غیرفعال بر عملکرد چرخ عکس‌العملی در این پروژه، یاتاقان مغناطیسی غیرفعال برای عملکرد چرخ عکس‌العملی، عملکردی که برای تغییر و کنترل وضعیت ماهواره-های فضایی به کار می‌رود، طراحی و با استفاده از نرم‌افزار کامسول تحلیل شده و عملکرد آن پس از ساخت در حالت‌های مختلف بررسی شده است. یاتاقان مغناطیسی غیرفعال در چرخ عکس‌العملی، وقتی روتور از موقعیت مرکزی محور دورانی خارج می‌شود، نیروی بازگردانی که نتیجه دافعه میان قطب‌های همانام آهنرباها است را ایجاد می‌کند و روتور را به موقعیت محور مرکزی هدایت می‌نماید. در این پروژه ساختار یاتاقان مغناطیسی غیرفعال محوری بر مبنای الزامات فیزیکی و مغناطیسی، طراحی و توزیع چگالی شار مغناطیسی و خصوصیات استاتیک نیرویی یاتاقان با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول برآورد شده و ضریب سفتی از خصوصیات استاتیکی به دست آمده است. انتخاب صحیح چینش‌ها و استحصال سفتی بالا نقش به‌سزایی در کاهش توان مصرفی و نگهداری چرخ عکس‌العملی دارد که در این پروژه به تحلیل و طراحی آن پرداخته شده و ساختار متناسب بر روی آن پیاده شده و نتایج عملکردی دورانی و توان مصرفی آن آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود نشان دهنده تأثیرات ساختار انباشته مغناطیسی بر روی مشخصات نیرویی و سفتی مغناطیسی یاتاقان بوده و آزمایشات تجربی حاکی از افزایش سرعت دورانی و مومنتوم چرخ عکس‌العملی در حالت استفاده ترکیبی یاتاقان مغناطیسی غیرفعال و یاتاقان مکانیکی است.

دانشگاه یزد

- مدل سازی دینامیکی سیستم روتور یک یاتاقان مغناطیس فعال، بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد و طراحی سیستم کنترل آن

هدف این پروژه بررسی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال و ارائه‌ی یک روش عددی برای کنترل بهینه‌ی آن‌ها در زمان‌های متناهی است. در این پروژه در ابتدا یاتاقان‌های مغناطیسی فعال و نحوه عملکرد آن‌ها معرفی شده و جایگاه آن‌ها در میان سایر یاتاقان‌ها و کاربردهای آن‌ها توضیح داده شده است. همچنین روش مستقیم و مزایای آن در حل مسائل کنترل بهینه که روش

عددی مورد استفاده در این پروژه است مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی یاطاقان‌های مغناطیسی با روتورهای یک درجه آزادی و دو درجه آزادی انجام شده و پارامترها و معادلات لازم برای کنترل آن‌ها استخراج گردیده است. پس از آن روش مستقیم برای حل مسائل کنترل بهینه با افق متناهی به کمک توابع متعامد هار و لژاندر برای حل چند مسئله مربوط به کنترل بهینه روتورهای یک درجه و دو درجه آزادی به کار گرفته شده و با مقایسه نتایج عددی با نتایج حل‌های دقیق به دست آمده از روش‌های تحلیلی، کارایی آن در حل مسائل کنترل بهینه با افق متناهی مقید و نامقید مربوط به یاطاقان‌های مغناطیسی فعال نشان داده شده است.

دانشگاه ولیعصر رفسنجان

• طراحی کنترل کننده ی PID رام شده برای کنترل مقاوم یک سیستم یاطاقان مغناطیسی فعال

این پروژه یک طرح کنترل PID مقاوم را در حوزه فرکانس برای کنترل یک سیستم یاطاقان مغناطیسی فعال، ارایه داده است. در این پژوهش، عملکرد کنترلی یاطاقان مغناطیسی در حضور اغتشاش بررسی شده است. استراتژی کنترلی پیشنهادی در برابر تغییرات پارامترهای سیستم، نویز اندازه گیری مقاوم است. در این راستا، در مرحله اول، کنترل کننده ی PID مرسوم برای تحقق اهداف کنترلی پیشنهاد شده و سپس جهت رسیدن به پایداری سیستم حلقه بسته و رسیدن به دقت تعریف شده، کنترل کننده PID مرسوم با اضافه کردن فیلتر مناسب انجام گردیده است. در این پروژه برای نشان دادن کارایی و اثر بخشی طرح کنترلی پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده های مرسوم از نتایج شبیه سازی استفاده شده است.

دانشگاه صنعتی اراک

• کنترل فعال نیرو یاطاقان مغناطیسی فعال با استفاده از الگوریتم یادگیری تدریجی و شبکه عصبی

در این پژوهش به علت دقت کم و عملکرد پایین کنترلر PID در اغتشاشات سرعت بالا از روش کنترل فعال نیرو 8 استفاده شده است. تخمین جرم یا اینرسی از روش الگوریتم یادگیری تدریجی و شبکه عصبی مصنوعی انجام شده است و نتایج هردوی آن‌ها در پایان با یکدیگر و با کنترلر PID مقایسه گردیده است.

دانشگاه علم و صنعت

• تحلیل و طراحی جامع یاطاقان‌های مغناطیسی غیرفعال

در این پروژه ابتدا ساختارها مختلف یاطاقان‌های مغناطیسی غیر فعال که توانایی تولید نیروی سختی و میرایی زیادی داشته باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. این ساختارها عبارتند از ساختار ساده، استاندارد محوری (با فواصل آهنی)، استاندارد شعاعی (با آهن و یا مس پستی)، هالباخ کامل (با لایه ی مسی میانی) و ساختار هالباخ کاهش یافته. در ادامه سختی و میرایی در این یاطاقان ها با روش تحلیلی محاسبه شده است و سپس توسط شبیه سازی FEM صحت نتایج بررسی گردیده است. همچنین ابعاد این یاطاقان ها برای بیشترین نیرو بهینه شده است و روند طراحی هر کدام از آن‌ها آورده شده است.

جدول ۱۰-۱: خلاصه پژوهشهای انجام گرفته در زمینه ذخیره ساز فلاپویل

شماره	زمینه کاری انجام شده
۱	طراحی و ساخت یاطاقان مغناطیسی غیرفعال
۲	طراحی و ساخت یاطاقان مغناطیسی فعال در سرعت پایین

۳	طراحی و ساخت یاطاقان مغناطیسی فعال برای ماشین سانتریفیوژ
۴	مدل سازی دینامیکی سیستم روتور یک یاتاقان مغناطیسی فعال، بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد و طراحی سیستم کنترل آن
۵	کنترل ارتعاشات رتور نابالانس با یاطاقان مغناطیسی فعال
۶	مطالعه یاطاقان های مغناطیسی و ارتعاشات آنها
۷	مدل سازی یاطاقان مغناطیسی با استفاده از نرم افزار Ansoft
۸	بررسی پارامترهای موثر سامانه یاطاقان مغناطیسی فعال به صورت تجربی و عددی
۹	تأثیر سختی یاطاقان مغناطیسی فعال بر ارتعاشات آشوبناک روتور انعطاف پذیر
۱۰	مدل سازی و طراحی یاتاقان های مغناطیسی فعال چند قطبی
۱۱	طراحی کنترل کننده برای موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان با در نظر گرفتن تزویج بین سیم پیچ های گشتاور و تعلیق مغناطیسی
۱۲	کنترل فعال نیرو یاطاقان مغناطیسی فعال با استفاده از الگوریتم یادگیری تدریجی و شبکه عصبی
۱۳	طراحی کنترل کننده ی PID رام شده برای کنترل مقاوم یک سیستم یاطاقان مغناطیسی فعال
۱۴	طراحی، شبیه سازی FEM و پیاده سازی سیستم یاطاقان مغناطیسی غیرفعال بر روی عملگر چرخ عکس العملی
۱۵	تحلیل و طراحی جامع یاطاقان های مغناطیسی غیرفعال

در نهایت نیز مقایسه ای بین تمام ساختارهای پیشنهاد شده انجام شده و بهینه ترین آنها برای کاربردهای متفاوت معرفی گردیده اند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که یاطاقان های مغناطیسی پسیوی با مقادیر بزرگ سختی و میرایی با کمترین استفاده از آهن ربا می تواند بدست آید و این یاطاقان ها می توانند جایگزین نوع پیچیده اکتیو برای پایدارسازی در یک جهت شوند. تا کنون پژوهشی در زمینه استفاده از یاطاقان های مغناطیسی در ذخیره ساز فلاپیول انجان نگرفته است. خلاصه پژوهش های انجام گرفته در زمینه یاطاقان های مغناطیسی در داخل کشور در جدول (۲-۹) آورده شده است.

۱-۱۰ پروژه های محصول محور در حوزه یاطاقان های مغناطیسی

نمونه های ساخته شده یاطاقان مغناطیسی در جدول (۲-۱۰) به طور خلاصه آورده شده است.

جدول ۱-۱۱: نمونه های آزمایشگاهی یاطاقان مغناطیسی

شماره	پروژه های محصول محور (طراحی و ساخت)	کارفرما	مجری	سال اجرا
۱	طراحی و ساخت یاطاقان مغناطیسی غیرفعال	پژوهشگاه فضایی	دانشگاه تبریز	۱۳۹۸
۲	طراحی و ساخت یاطاقان مغناطیسی فعال برای ماشین سانتریفیوژ	سازمان انرژی اتمی	شرکت پژوهشی سیستم های پیشرو	۱۳۹۵

۱۳۸۸	دانشگاه تربیت مدرس	دانشگاه تربیت مدرس		طراحی و ساخت یاطاقان مغناطیسی فعال برای سرعت پایین	۳
۱۳۹۵	دانشگاه ملایر	دانشگاه ملایر		کنترل ارتعاشات رتور نابالانس با یاطاقان مغناطیسی فعال	۴
۱۳۹۲	دانشگاه شریف	دانشگاه شریف		طراحی و ساخت یاطاقان مغناطیسی	۵

۱-۱۱ درایو و مبدل های الکترونیک قدرت

در زمینه درایو و مبدل های الکترونیک قدرت تحقیقات گسترده ای در کشور انجام شده است در نتیجه با بهره گیری از دانش بومی و با تجهیزات موجود شرایط لازم جهت طراحی و ساخت مدارات قدرت و کنترل بخش درایو و مبدل های الکترونیک قدرت برای موتورهای پر سرعت در کشور فراهم است. در ادامه مهم ترین شرکت ها و گروه های تحقیقاتی فعال در زمینه طراحی و ساخت مدارات درایو و مبدل های الکترونیک قدرت در جدول (۱-۲) آورده شده است.

جدول ۱-۲: شرکت های فعال در زمینه درایو و کنترل موتور

شماره	نام شرکت / مجموعه	زمینه فعالیت
۱	مهندسی و ساخت برق و کنترل مینا (مکو)	سیستم های کنترل و تحریک و راه انداز نیروگاهی
۲	جهاد دانشگاهی علم و صنعت	تولیدی، تحقیقاتی در زمینه صنعت برق
۳	گروه پژوهشی الکترونیک قدرت پژوهشگاه نیرو	تحقیق و پژوهش و همچنین طراحی و ساخت تجهیزات الکترونیک مورد نیاز صنعت برق کشور
۴	نیان الکترونیک	طراح و سازنده انواع مبدل های انرژی الکترونیکی، طراح و سازنده انواع تابلوهای برق و کابینت باتری
۵	مهندسی توان پژوهان فناور پاسارگارد	طراحی و ساخت تجهیزات الکترونیکی شامل منابع تغذیه و مبدل های نیرو
۶	برق و الکترونیک پرتو صنعت	تولید کنترل دور الکتروموتور تا رنج ۴۰۰ کیلووات

۱-۱۲ مواد کامپوزیتی مورد استفاده در ذخیره ساز فلاپویل

با پیشرفت شگرفی که در علم مواد و به ویژه ساخت الیاف مصنوعی بوجود آمده است شرایط لازم جهت ساخت مواد سبک با

استحکام بالا فراهم گردیده است. این مواد را می‌توان به راحتی و با ایمنی بالا برای استفاده در روتورهایی که با دور خیلی زیاد مورد استفاده قرار داد. ساخت مواد کامپوزیتی یک تکنولوژی جدید می‌باشد که در کشور ما هم امروزه تحقیق‌ها و تلاش‌های زیادی در این زمینه شده است. به گونه‌ای که امروزه کارگاه‌هایی چه به صورت آزمایشگاهی و چه به صورت صنعتی قابلیت ساخت این مواد را دارا می‌باشند. در جدول (۲-۱۲) لیست شرکت‌هایی که در زمینه تهیه و تولید مواد اولیه کامپوزیتی فعال هستند و در جدول (۲-۱۳) لیست شرکت‌هایی که سازنده قطعات کامپوزیتی (مرتبط با موضوع) هستند آورده شده‌اند.

جدول ۱۳-۱: شرکت‌های فعال در زمینه مواد کامپوزیتی

شماره	نام شرکت	موضوع فعالیت	شرح فعالیت
۱	مرکز تحقیق و توسعه الیاف پیشرفته	تولید مواد اولیه	تولید الیاف کربن
۲	مواد مهندسی مکرر	تولید مواد اولیه	تولید رزین اپوکسی
۳	مجتمع کارخانجات ساینا	تولید مواد اولیه	تولید الیاف شیشه و منسوجات آن
۴	صنایع شیمیایی پلیمر ایران	تولید مواد اولیه	تولید رزین پلی استر
۵	دیبا فایبر گلاس	تولید مواد اولیه	الیاف شیشه و مواد کامپوزیت
۶	آریا رزین	تولید مواد اولیه	تولید رزین
۷	بلورین تار	تولید مواد اولیه	تحقیقات، ماشین‌سازی، تولید الیاف
۸	پتروشیمی خوزستان	تولید مواد اولیه	تولید رزین اپوکسی
۹	کیمیا فایبر	توزیع مواد اولیه	تامین مواد اولیه
۱۰	فراپلیمر شریف	توزیع مواد اولیه	تامین مواد اولیه
۱۱	سازه صنعت پویش	توزیع مواد اولیه	توزیع الیاف

جدول ۱۴-۱: شرکت‌های سازنده قطعات کامپوزیتی

شماره	نام شرکت	موضوع فعالیت	شرح فعالیت	فرآیند
۱	آتی کامپوزیت ایرانیان	ساخت	تولید مخازن تحت فشار و شفت کامپوزیتی	رشته پیچی
۲	شیمی سازه	ساخت	تحقیق، طراحی و ساخت	قالب گیری فشاری
۳	کامپوزیت البرز	ساخت	مشاوره، آموزش، ساخت قطعات مهندسی	نفوذ در خلا، پالترژن، رشته پیچی
۴	لاوان پلیمر	ساخت	طراحی و ساخت انواع سازه‌های کامپوزیتی	رشته پیچی، RTM
۵	نورایستاپلاستیک	ساخت	ساخت قطعه	قالب گیری فشاری، RTM، SMC، BMC
۶	فرآوری الیاف و رزین آسیا	ساخت	تولید قطعات کامپوزیتی	دستی
۷	سرو صنعت سپاهان	ساخت	تولید قطعات کامپوزیتی	قالب گیری فشاری، SMC
۸	تیوا صنعت	ساخت	تولید قطعه	دستی، RTM، رشته پیچی
۹	اصفهان سامر	ساخت	ساخت قطعات	دستی، پاششی

علاوه بر شرکت‌های فعال در این زمینه، پژوهشگاه مواد و انرژی و مجموعه کامپوزیت دانشگاه علم و صنعت از جمله مراکز پژوهشی در زمینه توسعه مواد کامپوزیتی می‌باشند.

۱-۱۳ موتورهای سرعت بالا مورد استفاده در ذخیره ساز فلاپویل

با توجه کاربردهای خاص موتورهای سرعت بالا، طراحی و ساخت این موتورها عمدتاً در مراکز حساس نظامی و هسته‌ای در کشور انجام می‌شود که اطلاعات فنی در این زمینه محدود می‌باشد. با این حال با استفاده از اطلاعات میدانی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که دو شرکت تسلا و شرکت پژوهشی سیستم‌های پیشرو در این زمینه فعالیت کرده‌اند بعلاوه پژوهشگاه نیرو نیز موفق به ساخت یک نمونه اولیه از یک توربو ژنراتور دور بالا شده است. در جدول (۲-۱۴)، شرکت‌ها، مراکز تحقیقاتی فعال و مشخصات موتورهای طراحی شده در دسترس این مجموعه‌ها آورده شده است این جدول در ادامه پروژه از طریق مکاتبات لازم تکمیل می‌گردد.

جدول ۱۵-۱: شرکت ها، مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه ساخت موتورهای دور بالا

شرکت فعال	سرعت	توان	ساختار	نمونه سازی
تسا	۵۴۰۰۰ دور در دقیقه	حدود ۲۰۰ وات	هیستریزیس	در مرحله نمونه سازی
شرکت پژوهشی سیستم های پیشرو	۸۰۰۰۰ دور در دقیقه	۳ کیلووات	القایی قفس سنجابی و سنکرون آهنربای دائم	سال ۹۵ در مرحله نمونه سازی بوده است
پژوهشگاه نیرو	۴۵۰۰۰ دور بر دقیقه	۷۵ کیلووات		نمونه سازی شده
جهاد دانشگاهی	-	-	-	-
دانشگاه خواجه نصیر	-	-	-	-
پژوهشگاه هوافضا	-	-	-	-
الکتروموتور آریا	-	-	-	-

۱-۱۴ استانداردها و دستورالعمل ها مربوط به ذخیره ساز فلاپیول

با توجه به اینکه در کشور ذخیره ساز فلاپیول به صورت صنعتی و با حجم تولید بالا استفاده نشده است، استاندارد و دستورالعمل مشخصی برای آن در کشور وجود ندارد در نتیجه تدوین استاندارد و دستورالعمل ها به عنوان یکی از پیش نیازهای اولیه بومی سازی و توسعه دانش فنی ذخیره ساز فلاپیول ها می باشد. در نمونه های تجاری سازی شده در خارج از کشور نیز استاندارد مشخصی قید نگردیده است.

۱-۱۵ نتیجه گیری

با هدف امکان سنجی فنی و اقتصادی بومی سازی و تجاری سازی فناوری فلاپیول در کشور در مرحله اول پروژه رصد فن آوری و بررسی سوابق فعالیتهای پژوهشی در زمینه طراحی و ساخت ذخیره ساز فلاپیول و شناسایی و اولویت بندی حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول در داخل کشور در گزارش ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. رصد پژوهشهای انجام گرفته در زمینه طراحی و ساخت ذخیره ساز فلاپیول نشان می دهد عمده تحقیقات انجام شده در سطح دانشگاهی و ساخت نمونه های آزمایشگاهی بوده و نمونه تجاری این نوع از ذخیره سازها در داخل کشور موجود نمی باشد. در ارتباط با فن آوری های مرتبط با ذخیره ساز فلاپیول دانش طراحی و ساخت موتورهای پرسرعت، یاطاقان های مغناطیسی و مواد کامپوزیتی در سطح دانشگاهی و مراکز پژوهشی دانش فنی و تجربی قابل قبولی شناسایی شده که می تواند پاسخگوی بخش عمده نیاز فنی توسعه دانش فنی ذخیره ساز فلاپیول باشد.

فصل دوم

شناسایی و اولویت‌بندی حوزه‌های کاربردی ذخیره‌ساز فلابویل در داخل کشور بر اساس مطالعات نیاز‌سنجی

۲-۱ مقدمه

در این مرحله از پروژه با هدف شناسایی حوزه‌های کاربردی ذخیره‌ساز فلاپویل در حوزه‌های مختلف صنعت برق، در گام نخست هر یک از زمینه‌های کاربردی مختلف ذخیره‌ساز فلاپویل بطور مختصر معرفی می‌گردد. در ادامه با هدف رتبه‌بندی حوزه‌های کاربردی جهت تجاری‌سازی ذخیره‌ساز فلاپویل در داخل کشور، معیارهای فنی و اقتصادی معرفی و تشریح می‌گردند. در ادامه با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، انتخاب‌های مختلف جهت بومی‌سازی فن‌آوری فلاپویل بر اساس مقادیر گردآوری شده برای معیارها مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در پایان انتخاب‌های برتر بر اساس رتبه‌بندی انجام شده معرفی می‌شوند.

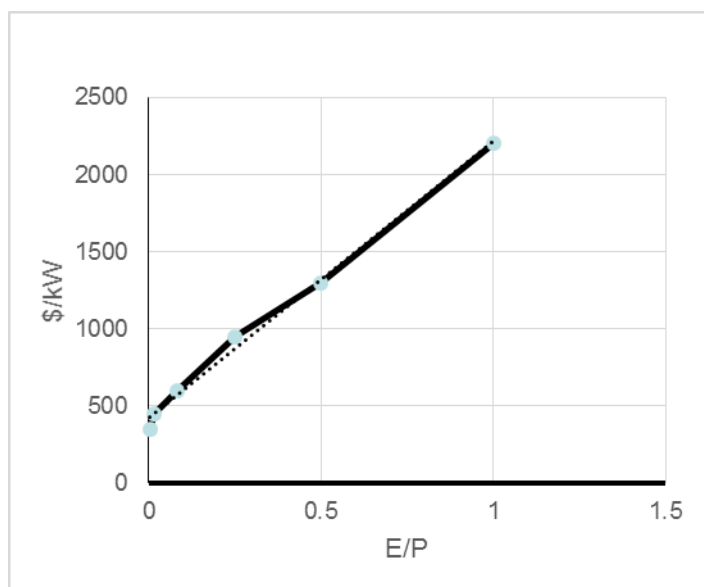
۲-۲ معرفی انواع کاربردهای ذخیره‌ساز فلاپویل

ذخیره‌ساز فلاپویل در مقایسه با انواع دیگر ذخیره‌سازهای انرژی دارای مزیت‌های ویژه می‌باشد که همین امر امکان توسعه کاربردهای این فن‌آوری را در مقیاس کوچک در سطح توزیع و در مقیاس‌های بزرگ در سطوح تولید و انتقال را میسر کرده است. از جمله مزیت‌های ذخیره‌ساز فلاپویل در مقایسه با سایر فن‌آوری‌ها به شرح زیر می‌باشد [۱-۱۲]:

- چگالی انرژی ذخیره‌شده بالا (انرژی در واحد حجم و وزن بیشتر)
- قابلیت تولید توان پالسی با ramp rate بالا
- بازده ذخیره‌سازی - بازیابی بالاتر نسبت به باتریهای الکتروشیمیایی. در نوع فلاپویل سرعت بالا، بازده می‌تواند تا حدود ۹۵٪ برسد.
- طول عمر بالا و قابلیت اطمینان بیشتر. ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی فلاپویل با افزایش عمر سیستم کاهش نمی‌یابد در حالی که در باتریها اینگونه نیست و با گذشت زمان کارایی آنها کاسته می‌شود
- قابلیت تحمل تعداد دفعات شارژ و دشارژ بسیار بالا (High cycling)
- قابلیت شارژ مجدد سریع (شارژ و دشارژ سریع با نسبت ۱:۱)
- مقاوم در مقابل عمق دشارژهای بالا (DOD)
- عدم پیچیدگی تعیین وضعیت شارژ (SOC) ذخیره‌ساز فلاپویل نسبت به باتری (وضعیت شارژ و دشارژ فلاپویل به طور مستقیم با داشتن سرعت آن مشخص می‌گردد)
- راندمان و کارایی ذخیره‌ساز فلاپویل تحت تاثیر دما نیست و در یک محدوده وسیع دمایی در شرایط کار مختلف سیستم فلاپویل به خوبی عمل می‌کند. این در حالی است که عملکرد باتریهای شیمیایی به شدت تحت تاثیر حرارت و دیگر شرایط محیطی می‌باشد.
- ذخیره‌ساز فلاپویل برخلاف باتریها به حداقل تعمیر و نگهداری نیاز دارند. هزینه نگهداری، تعمیر و جابجایی در چرخه عمر بسیار پایین می‌باشد.
- سازگار با محیط زیست و حداقل هزینه دفع مواد زائد

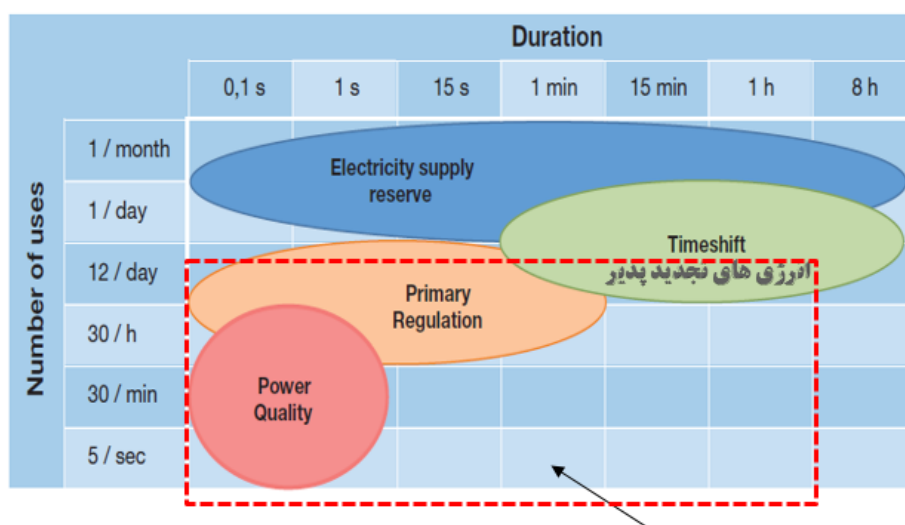
همانگونه که قبلاً نیز بررسی گردید قابلیت استفاده ماژولار از فلاپویل‌ها دستیابی به سطوح بالاتری از انرژی و توان را ممکن می‌سازد. یکی از پارامترهای کلیدی در تعیین حوزه‌های کاربردی ذخیره‌ساز فلاپویل نسبت ظرفیت انرژی به ظرفیت توان (زمان

ذخیره سازی بر حسب ساعت یا دقیقه) می باشد. این نسبت تا حد زیادی تعیین کننده فن آوری های مورد استفاده در ذخیره ساز فلاپیول و قیمت تمام شده آن می باشد. شکل ۱-۲ تحلیل آماری هزینه $\$/kW$ چند نمونه ذخیره ساز تجاری شده بر حسب نسبت E/P را نمایش می دهد [۱۴].



شکل ۱-۲: ساختار کلی ذخیره ساز فلاپیول

زمان ذخیره سازی بر حسب نوع کاربرد می تواند متفاوت باشد. شکل ۲-۲ یک تقسیم بندی کلی از حوزه های کاربردی مختلف ذخیره ساز انرژی بر حسب زمان ذخیره سازی و تعداد دفعات بکارگیری آنها را نمایش می دهد. همانگونه که قبلا بررسی گردید بکارگیری ذخیره ساز فلاپیول برای کاربرد های با زمان ذخیره سازی کوتاه مدت توجیه پذیر تر می باشد و با افزایش زمان ذخیره سازی نیاز به استفاده از تکنولوژی های پیشرفته مانند یاطاقان های مغناطیسی، پمپ خلاء، موتور پرسرعت، دیسک کامپوزیتی و مواد مغناطیسی با تلفات پایین و طراحی پیچیده تر اجراء دوار می باشد. این مساله موجب می گردد با افزایش نسبت E/P هزینه ذخیره ساز به طور چشم گیر افزایش یابد. بر همین اساس همانگونه که در کادر خط چین قرمز رنگ در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، حوزه های کاربردی کیفیت توان، تنظیم فرکانس اولیه و در برخی از انواع انرژی های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی به منظور مدیریت انرژی و حذف نوسانات ذاتی توان تولیدی بیشترین توجیه پذیری فنی و اقتصادی را خواهد داشت.



شکل ۲-۲: حوزه‌های کاربردی ذخیره‌ساز انرژی بر حسب زمان ذخیره‌سازی و تعداد دفعات شارژ و دشارژ

در شکل ۲-۲ زمینه‌های کاربردی ذخیره‌سازها به حوزه‌های مختلف کاربردی شبکه قدرت محدود شده است. این در حالی است که بر اساس رصد این فن‌آوری در دنیا نشان می‌دهد این نوع از ذخیره‌سازها در بسیاری از حوزه‌ها در حال توسعه و تجاری‌سازی می‌باشد. شکل ۳-۲ یک تقسیم‌بندی جامع‌تر از زمان ذخیره‌سازی انرژی را در سایر حوزه‌ها مانند حمل و نقل، منابع تغذیه اضطراری و... را نمایش می‌دهد [۱۳-۲۲].

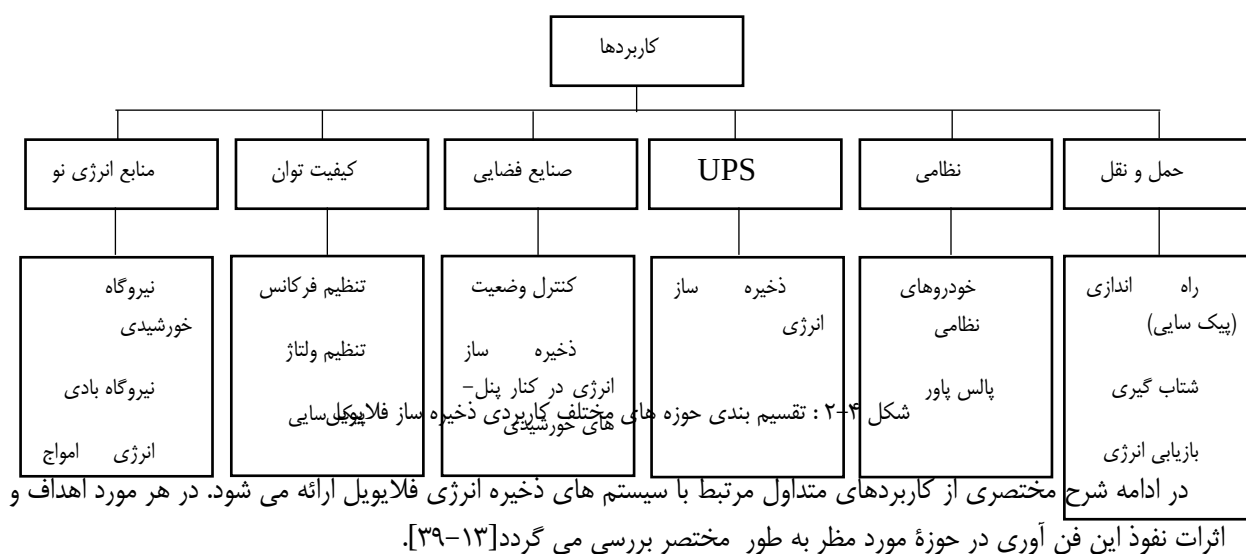
ساعت	دقیقه	ثانیه	رنج زمانی ذخیره‌ساز:
• تولید پراکنده: پیک سایی	• رزرو گردان: زمان پاسخ‌گویی سریع زمان پاسخ‌گویی تا ۱۰ دقیقه	• کیفیت توان: تنظیم فرکانس کمبود ولتاژ	
• پیک سایی: شبکه مصرف‌کننده	• تطبیق تولید انرژی نو:	• حمل و نقل: بازیابی انرژی تامین بار پیک	
• تطبیق تولید انرژی نو:	• منابع تغذیه بدون وقفه:	• منابع تغذیه بدون وقفه:	
• منابع تغذیه بدون وقفه:			

شکل ۳-۲: حوزه‌های کاربردی ذخیره‌ساز فلاپیول بر حسب زمان ذخیره‌سازی

به طور کلی از سیستم‌های ذخیره‌ساز فلاپیول در کاربردهایی که نیاز به وزن و حجم کم، تعداد دفعات شارژ و دشارژ بالا، قابلیت اطمینان بالا، پیک توان بالا در مدت زمان کوتاه، راندمان ذخیره‌سازی و بازیابی انرژی بالا و تعمیر و نگهداری کم باشد، استفاده می‌شود. این ویژگی‌ها موجب شده است علاوه بر تقسیم‌بندی فوق، مطابق شکل ۳-۲ فلاپیول این فن‌آوری در سایر حوزه‌های کاربردی مورد توجه قرار گیرد [۱۹، ۲۶ و ۳۵]:

- کاربردهای کیفیت توان

- کاربردهای نظامی در قالب سیستم‌های توان پالسی
- کاربردهای فضایی
- UPS ها برای حفاظت از بارهای حساس
- تسطیح بار
- حمل و نقل (خودروهای الکتریکی و هیبریدی - حمل و نقل ریلی)
- تطبیق تولید انرژی‌های نو



۲-۳ کاربردهای کیفیت توان

به عنوان بخشی از الزامات کیفیت توان ، فرکانس و ولتاژ سیستم باید در حد قابل قبولی حفظ شود و از انحراف بیشتر جلوگیری شود. وقتی بارها به شبکه اضافه یا کم می شوند، ولتاژ و فرکانس سیستم نیز کاهش یا افزایش می یابد. سیستم های ذخیره ساز انرژی، به ویژه آنهایی که عملکرد سریع مانند فلاپیول دارند، می توانند به سرعت انرژی به شبکه تزریق یا از آن انرژی بگیرند تا ولتاژ و فرکانس سیستم را در محدوده قابل قبول قرار دهند. در ادامه کاربرد فلاپیول در رابطه با این موضوع بحث می‌شود.

۲-۳-۱ تنظیم فرکانس شبکه

نوسانات فرکانس تحت تاثیر تغییر بار شبکه اتفاق می‌افتد. از آن جایی بار شبکه دائم در حال تغییر است فرکانس شبکه نیز دائم تغییر خواهد کرد. به منظور اجتناب از این نوسانات علاوه بر سیستم کنترل اولیه ژنراتورها ، قسمتی از ظرفیت ژنراتور به عنوان رزرو برای پاسخگویی به اغتشاشات فرکانس در نظر گرفته می‌شود. در شرایط اعمال اغتشاشات شدید به شبکه، سیستم کنترل ژنراتورهای سنکرون قادر نیست که با سرعت کافی سیستم قدرت را پایدار سازد. در این شرایط اگر یک کنترل کننده توان اکتیو و راکتیو با سرعت بالا در دسترس باشد، از حذف بار یا ناپایداری ژنراتور جلوگیری می‌شود. با توجه به دوره کاری بالای

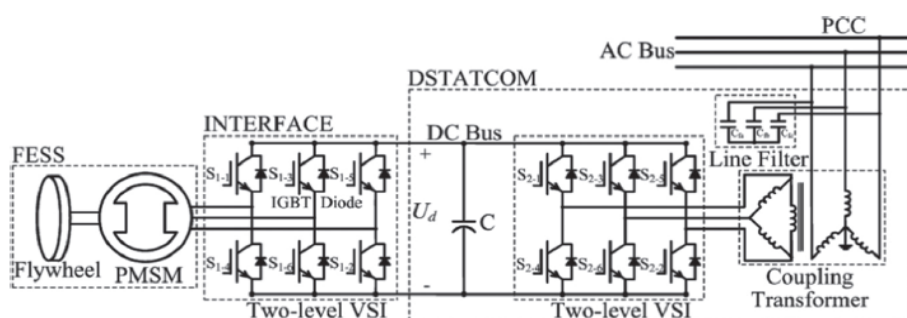
فلاپیول، طول عمر زیاد، پاسخ دینامیکی سریع و ماهیت نوسانی بودن فرکانس شبکه تحت تاثیر تغییرات غیر قابل پیش بینی بار استفاده از این ذخیره سازها در بسیاری از پژوهش های صورت گرفته در این زمینه پیشنهاد شده است.

۲-۳-۲ جبران افت ولتاژ شبکه

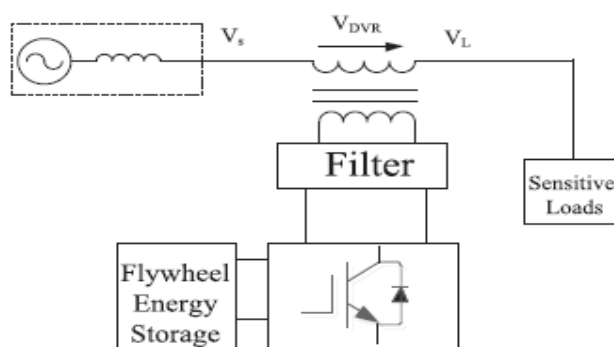
افت ولتاژ در شبکه برق که ۹۲ درصد از مشکلات کیفیت توان ناشی از آن است و در ۸۰ درصد موارد بین ۲۰ تا ۵۰ میلی ثانیه طول می کشد، در روش های سنتی با در نظر گرفتن ژنراتورهای رزرو و تزریق توان در صورت تقاضا این افت ولتاژ جبران می شود. در حالی که در روش های جدید از ذخیره سازهای انرژی برای کاهش مشکلات ولتاژ شبکه استفاده می گردد. سیستم ذخیره ساز انرژی در زمان هایی که تولید بیشتر از تقاضا است، به منظور ثابت نگه داشتن ولتاژ شبکه شارژ می شود و در زمان هایی که تقاضا بیشتر از تولید است دشارژ می گردد این امر باعث کاهش هزینه و کاهش نیاز به واحدهای تولیدی بیش از ظرفیت می شود. فلاپیول با توجه به طول عمر بالا، دوره ی کاری بالا، سرعت پاسخگویی بالا و چگالی توان بالا گزینه مناسبی برای بکارگیری در این کاربردها است.

۲-۳-۳ همراه با ادوات بهبود کیفیت توان

ادوات بهبود کیفیت توان به دلیل مزایای بسیاری مانند بهبود عملکرد خطوط انتقال AC طویل و کنترل پخش توان، در حال توسعه هستند. یکی از اصلی ترین مولفه هایی که می تواند بر عملکرد این ادوات تأثیر بگذارد، سیستم ذخیره ساز انرژی است. فلاپیول به دلیل سرعت پاسخگویی بالا یکی از بهترین کاندیدها برای این کاربرد در آینده است. در شکل های (۲-۵) و (۲-۶) دو نمونه از این کاربردها به ترتیب در ادوات DSTATCOM و DVR نمایش داده شده است.



شکل ۲-۵: استفاده از ذخیره ساز فلاپیول در DSTATCOM



شکل ۶-۲: استفاده از ذخیره ساز فلاپویل در DVR

افت ولتاژ در شبکه برق می تواند توسط این ادوات بهبود کیفیت توان (جبران ساز ولتاژ دینامیکی) کاهش یابد. لینک DC در جبران سازهای ولتاژ دینامیکی همانطور که در شکل (۲-۶) نشان داده شده است توسط یک فلاپویل تغذیه می شود. این جبران ساز به صورت سری با بار متصل است و برای جبران افت ولتاژی استفاده می شود، که ممکن است به دلیل نقص در سیستم برق یا تغییرات بار مانند شروع به کار موتور رخ داده باشد.

۴-۳-۲ کاربردهای نظامی در قالب سیستم های توان پالسی

سیستم های الکتریکی در کاربردهای نظامی مانند کشتی ها، وسایل نقلیه زمینی، سلاح ها، ناوبری، ارتباطات و سیستم های هوشمند مرتبط با آن ها جایگاه ویژه ای دارد. این استفاده از انرژی الکتریکی با نرخ های مختلف و سطوح مختلف توان نیاز به ذخیره ساز انرژی دارد تا به سرعت و با قابلیت اطمینان بالا به این تقاضای متغیر پاسخ دهد. منابع انرژی ترکیبی برای خودروهای جنگی آینده متناسب با سطوح مورد نیاز برای انجام کاربردهای برنامه ریزی شده ضروری می باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، فلاپویل نیز همچون سایر فناوری های پیچیده و گران قیمت مانند ابرخازن ها و ذخیره سازهای انرژی مغناطیسی ابرسانا چگالی توان بالایی (۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ وات بر لیتر) را فراهم می کند. در نتیجه این سیستم ذخیره ساز انرژی به عنوان یک فناوری مناسب برای این کاربردها بکار گرفته می شود. آن ها با ابر خازن ها ترکیب می شوند تا توان مورد نیاز سیستم های پر سرعت را در کمتر از ۱۰ میکروثانیه تامین کنند.

همچنین از فلاپویل به منظور راه اندازی و بهبود کیفیت توان در کشتی های نیروی دریایی و هواپیماها به ترتیب استفاده شده است. در کاربرد سیستم راه انداز هواپیما، سرعت فلاپویل برابر با ۵۶۰۰ دور در دقیقه، انرژی ذخیره شده برابر با ۱۲۶ مگا ژول و پیک جریان فاز ۶۴۰۰ آمپر می باشد. در واقع پاسخ گویی سریع و چگالی توان بالای فلاپویل، آن را به عنوان کاندیدی مناسب برای ژنراتورهای توان پالسی ساخته است. همچنین تحقیقاتی در زمینه کاربرد این نوع از ذخیره ساز ها در شتابدهنده ها و توپ های الکترومغناطیسی (ریل گان و کوئل گان) انجام گرفته است.

با توجه به اینکه بسیاری از بارهای الکتریکی نظامی ماهیتی پالسی دارند (مانند درایو لیزر، ادوات مخابراتی و...)، یکی دیگر از کاربردهای نظامی ذخیره ساز فلاپویل، حذف اغتشاشات بار بر روی شبکه قدرت (که در اغلب موارد بصورت ایزوله از شبکه است) می باشد. با توجه به حساسیت های موجود در رابطه با امنیت شبکه برق پایگاه های نظامی، ضروری است تا برق این پایگاه ها با استفاده از منابع تولید پراکنده مستقل از شبکه عمدتاً شامل منابع انرژی تجدید پذیر در ترکیب با دیزل ژنراتورها تامین

شود در این شرایط فلاپویل‌ها گزینه مناسبی برای کاهش وابستگی تولید به دیزل ژنراتورها، پاسخگویی به بارهای با چگالی توان بالا، تسطیح بار و افزایش عمر باتری‌های استفاده شده در مجموعه با توجه به دوره‌ی کاری بالای آن‌ها و زمان شارژ کامل تا دشارژ کامل در حد چند ثانیه می‌باشند.

۵-۳-۲ کاربردهای فضایی

با توجه به اینکه منبع اصلی انرژی در کاربردهای فضایی خورشید می‌باشد ضرورت استفاده از ذخیره‌سازها به منظور تامین انرژی در مدت زمانی که ماهواره در بخش تاریک مداری قرار می‌گیرد بسیار حیاتی می‌باشد. با توجه به طول عمر بالا، نداشتن اثر مخرب برای محیط زیست، سرعت پاسخگویی بالا بدون تولید گرما، راندمان بازیابی انرژی بالا و وزن و حجم کمتر در مقایسه با باتری‌ها، فلاپویل را می‌توان در فضاپیماها، ماهواره‌ها و ایستگاه‌های فضایی بین‌المللی برای کنترل وضعیت، مدیریت حرکت، سیستم ذخیره انرژی الکتریکی اصلی و سیستم ذخیره انرژی پشتیبان استفاده کرد. بعلاوه در کاربردهای فضایی دوره کاری بالایی نیاز است که طول عمر باتری‌ها را کاهش می‌دهد در حالی که فلاپویل‌ها به ویژه فلاپویل‌های ابررسانای دمای بالا از این نظر برتری محسوسی نسبت به باتری‌ها دارند. سازمان ناسا در چند دهه اخیر تحقیقات بسیار وسیعی را با هدف جایگزینی ذخیره ساز فلاپویل با باتری‌ها را در دستور کار قرار داده است.

۶-۳-۲ منابع تغذیه اضطراری‌ها برای حفاظت از بارهای حساس

یکی دیگر از کاربردهای ذخیره ساز فلاپویل، استفاده آنها در منابع تغذیه بدون وقفه برای تامین توان پیوسته برای بارهای حساس می‌باشد. زمان ذخیره سازی در منابع تغذیه اضطراری از کسری از ثانیه تا ساعت می‌تواند باشد. استفاده از این تکنولوژی در منابع تغذیه بدون وقفه نسبت به باتری، کاهش ۱۰ برابری وزن و همچنین کاهش سه برابری حجم UPS می‌باشد. این مزیت بخصوص در کاربردهایی که کاهش حجم و وزن دارای اهمیت بالایی باشد، می‌تواند استفاده از ذخیره ساز فلاپویل در منابع تغذیه اضطراری را توجیه پذیر نماید. اساسی‌ترین تفاوت بین یک منبع تغذیه بدون وقفه بر اساس فلاپویل و یک منبع تغذیه بدون وقفه بر اساس باتری، ذخیره انرژی به صورت انرژی جنبشی به جای ذخیره انرژی به صورت انرژی شیمیایی می‌باشد. یکی دیگر از مزایای فلاپویل نسبت به باتری بازده ذخیره-بازیابی آن می‌باشد که در برخی از انواع فلاپویل تا حدود ۹۰ درصد می‌رسد اما در باتری در بهترین حالت به حوالی ۸۰ درصد می‌رسد. یک نکته مهم استفاده از فلاپویل در کاربرد منبع تغذیه بدون وقفه این است که وضعیت شارژ^۱ به سرعت رتور گردان بستگی دارد که به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد در حالی که سطح شارژ باتری یک متغیر مشخص نیست که به راحتی قابل اندازه‌گیری باشد و مستقیماً با اندازه‌گیری ولتاژ نمی‌توان از سطح شارژ آگاهی پیدا کرد. از لحاظ نگهداری نیز فلاپویل نسبت به باتری‌ها که نیاز به نگهداری ویژه دارند اوضاع بهتری دارد و در طول عمر مفید خود به ندرت به نگهداری و تعمیر نیاز پیدا می‌کند. یکی از بزرگترین چالش‌های فلاپویل در این کاربرد کاهش تلفات دشارژ خودی می‌باشد. تنها راه حل موجود برای غلبه بر این چالش استفاده از تکنولوژی فلاپویل سرعت بالا شامل یاطاقان مغناطیسی (در برخی از موارد نوع ابر رسانا)، پمپ خلاء، مواد با کیفیت و گران می‌باشد که این مساله افزایش چشمگیر هزینه تمام شده را منجر می‌گردد.

¹ State of charge

۲-۳-۷ حمل و نقل الکتریکی

فلاپویل با توجه به ویژگی‌های از جمله حجم و وزن کمتر، ظرفیت بیشتر و زمان شارژ کمتر، پاسخگویی سریعتر، بازدهی بالاتر و سازگاری با محیط زیست در مقایسه با باتری‌ها در شبکه حمل و نقل استفاده می‌گردد. از فلاپویل در اتوبوس‌های برقی و هیبریدی (تزریق توان در سر بالایی‌ها-شتاب‌گیری-پشتیبانی خطوط ولتاژ)، راه آهن برقی (بازیابی انرژی ترمزی-شتاب‌دهی اولیه-پشتیبانی خطوط ولتاژ) و سیستم‌های حمل و نقل دریایی (تامین پیک مورد نیاز در زمان راه اندازی) استفاده شده است. استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی فلاپویل در کاربرد حمل و نقل می‌تواند شامل دو حالت مختلف باشد: اول اینکه سیستم روی وسیله سوار باشد و دوم اینکه سیستم فلاپویل از وسیله نقلیه جدا باشد. بحث در این زمینه به فاکتورهای مختلفی از جمله دسترسی به فضای مناسب، وزن، مسائل مربوط به ایمنی، بازدهی و تداخل مکانیکی بستگی دارد. مزایای استفاده از فلاپویل در سیستم‌های حمل و نقل به شرح زیر می‌باشد:

- صرفه جویی در مصرف برق و مدیریت مصرف انرژی
- بهبود ظرفیت و عملکرد قطار برقی با دسترسی به توان به صورت لحظه‌ای
- کاهش تلفات حرارتی و همچنین کاهش تiaz به سیستم HVAC
- کاهش استرس روی تجهیزات توان سیستم کششی قطار و سیستم ترمز
- فراهم سازی موثر، ایمن و قابل اطمینان سیستم ذخیره و تحویل انرژی
- کمینه سازی نشر گاز دی اکسید کربن در سیستم‌های حمل و نقل و سازگاری کامل با محیط زیست
- افزایش ظرفیت پیک توان در نتیجه کاهش هزینه در ابعاد پست‌های برق و در نتیجه کاهش هزینه سرمایه گذاری
- افزایش چگالی توان و انرژی سیستم تغذیه
- متعادل سازی مصرف توان در شبکه قدرت و ایجاد یک راه‌حل مناسب برای بهبود کیفیت توان با کمترین هزینه نگهداری
- کاهش تاخیر در سیستم و افزایش عملکرد سیستم
- منبع توان پشتیبان در شرایط خاموشی شبکه

۲-۳-۸ انرژی‌های تجدید پذیر

در بحث توان تولیدی از انرژی باد اگر یک سیستم ذخیره ساز انرژی با مزرعه بادی ترکیب شود بسیاری از مشکلات مربوط به عملکرد سیستم و مشکلات اتصال به شبکه حل خواهد شد و از جمله این مشکلات می‌توان به مسائل کیفیت توان (تغییر فرکانس، ولتاژ و هارمونیک‌ها) و پایداری ولتاژ اشاره نمود. فلاپویل می‌تواند هم به عنوان یک بافر و هم به عنوان یک منبع متعادل بین تغییرات سرعت باد، عمل کند. فلاپویل به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارد می‌تواند در این کاربرد بسیار مفید واقع شود. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به نرخ افزایش توان بیش از ۱۰۰ برابر سریعتر از ذخیره سازه‌های مرسوم از جمله باتری‌ها، چرخه شارژ و دشارژ بالا بدون هیچ افت عملکردی، عمر مفید بالای ۲۰ سال، سازگاری کامل با محیط زیست و ظرفیت بالای توان اشاره کرد. انرژی باد به دلیل ویژگی‌های ذاتی و طبیعی خود دارای تغییراتی است که سبب نوسان توان می‌شود که این نوسانات باید با اعمال روش‌هایی میرا شوند از جمله این روش‌ها:

- افزایش رزرو گردان در شبکه

• استفاده از ذخیره سازهای انرژی در نیروگاه بادی

یکی از موارد استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی فلاپیول در نیروگاه هیبریدی باد-دیزل می‌باشد. در این نیروگاه‌ها در شرایطی که نیروی باد قادر به تولید توان کافی می‌باشد ژنراتور دیزل در حالت استراحت قرار می‌گیرد و عملاً از ظرفیت آن استفاده‌ای نمی‌شود. بنا به این دلایل نیروگاه‌های هیبریدی چندان به صرفه و کارآمد نمی‌باشند. با اضافه کردن سیستم ذخیره ساز فلاپیول به نیروگاه باد، در شرایطی که توان از حد مورد نظر بیشتر باشد انرژی اضافه باعث شارژ سیستم ذخیره ساز می‌شود و در هنگامی که نیروی باد کم باشد، انرژی ذخیره شده در سیستم ذخیره ساز به شبکه تحویل داده می‌شود. همچنین با اضافه شدن سیستم ذخیره ساز فلاپیول به نیروگاه باد به جای دیزل ژنراتورها، مصرف سوخت فسیلی کمتر شده و بنابراین هم از لحاظ اقتصادی و هم از جنبه زیست محیطی به صرفه و مناسب می‌باشد. بنابراین فلاپیول بنا به ویژگی‌های منحصر به فردی از قبیل: طول عمر، چگالی توان بالا و توانایی فراهم کردن توان اکتیو و راکتیو برای کاربرد نیروگاه باد بسیار ایده آل است. به طور مشابه در مولدهای خورشیدی نیز به دلیل نوسانات سطح تابش در شرایط جوی مختلف بهره‌گیری از ذخیره ساز فلاپیول می‌تواند نقش موثری در حذف نوسانات توان و مدیریت بهینه مولد خورشیدی ایفا نماید.

۴-۲ الویت بندی کاربردهای ذخیره ساز فلاپیول در کشور

در بخش قبل حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول در خارج از کشور مورد بررسی اجمالی قرار گرفت. در ادامه لازم است تا برای بومی سازی و تجاری سازی ذخیره سازی فلاپیول در داخل کشور به یک سوال اساسی پاسخ داده شود. **تولید دانش فنی و توسعه فن آوری فلاپیول در کدامیک از حوزه های کاربردی می تواند از نظر فنی و اقتصادی دارای برتری می باشد.** به عبارتی سرمایه گذاری در زمینه توسعه دانش فنی این محصول در داخل کشور به ترتیب در کدامیک از حوزه های کاربردی بیشترین منافع را برای ذی نفعان (سرمایه گذار، مدیریت شبکه، صنایع مرتبط و مصرف کننده های نهایی) به همراه خواهد داشت. بر همین اساس در این مرحله اولویت بندی حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول بر اساس مطالعات نیازسنجی فنی و ارزیابی شاخص های سرمایه گذاری مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور مطابق شکل ۲-۴ حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول را از نظر بازه ی زمانی ذخیره سازی به سه بازه ی ثانیه، دقیقه و ساعت تقسیم بندی می گردد که شامل:

۱. زمان ذخیره سازی در حد ثانیه:

- کیفیت توان (تنظیم فرکانس، جبران سازی کمبود ولتاژ)
- حمل و نقل (بازیابی انرژی، تامین بار پیک)
- منابع تغذیه بدون وقفه

۲. زمان ذخیره سازی در حد دقیقه:

- رزرو گردان
- تطبیق تولید انرژی نو
- منابع تغذیه بدون وقفه

۳. زمان ذخیره سازی در حد ساعت:

- تولید پراکنده (پیک سایی)
- پیک سایی مصرف کننده

- تطبیق تولید انرژی نو
- منابع تغذیه بدون وقفه

با هدف ارزیابی دقیق حوزه های کاربردی مختلف ذخیره ساز فلاپویل گام نخست تعیین معیارهای ارزیابی و کمی سازی شاخص ها جهت رتبه بندی کمی آنها می باشد. برای این منظور در ادامه این معیار ها معرفی و تشریح می گردد.

۱. سود حاصل از صنعت فلاپویل برای سرمایه گذار

در صورت سرمایه گذاری با هدف بومی و تجاری سازی فلاپویل در یک حوزه کاربردی خاص، شانس موفقیت اقتصادی به صورت یک شاخص تعیین می گردد. (در اینجا ذی نفع سرمایه گذار و تولید کننده فلاپویل است). معیار ارزش گذاری بر اساس برآورد اولیه از قیمت تمام شده محصول (در آن حوزه کاربردی) و میزان فروش بر اساس حجم بازار پیش بینی شده می باشد.

۲. مزیت اقتصادی برای بهره بردار ذخیره ساز فلاپویل در حوزه کاربردی خاص

با فرض تجاری سازی ذخیره ساز فلاپویل و استفاده از آن در حوزه کاربردی خاص، میزان منافع اقتصادی برای بهره بردار اصلی به صورت یک شاخص تعیین می گردد (در اینجا ذی نفع بهره بردار اصلی می باشد مانند مدیریت شبکه، خودرو ساز، ساتبا و...). برای نمونه استفاده از ذخیره ساز فلاپویل برای کنترل فرکانس از دید ذی نفع مدیریت شبکه چه میزان منافع اقتصادی برای آنها خواهد داشت. این شاخص نشان دهنده توجیه پذیری فنی و اقتصادی کاربست فن آوری فلاپویل برای مصرف کننده و تضمین کننده بازگشت سود سرمایه گذاری برای سرمایه گذار تولید کننده می باشد.

۳. میزان مزیت اقتصادی و رضایت مندی مشترکین و مصرف کننده نهایی

در صورت بکار گیری ذخیره ساز فلاپویل در یک حوزه خاص میزان بهره اقتصادی و رضایت مندی در مصرف کننده نهایی بر اساس این شاخص ارزیابی می شود. برای نمونه در صورت استفاده از فلاپویل در خودرو های الکتریکی علاوه بر ارزش افزوده برای تولید کننده خودرو (با بهبود قابلیت شاخص های فنی خودرو و افزایش رقابت پذیری در بازار خودرو) برای مصرف کننده نهایی نیز مزایایی (مانند کاهش مصرف سوخت و کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری) به همراه خواهد داشت.

در سه شاخص قبلی تاثیر بکارگیری ذخیره ساز فلاپویل از دیدگاه سه ذی نفع اصلی یعنی سرمایه گذار تولید کننده، بهره بردار و مصرف کننده نهایی لحاظ گردیده است. **بدیهی است برای کاربردهایی که توسعه این فن آوری منجر به بهبود همزمان این سه شاخص گردد، بیشترین شانس برای توسعه پایدار و تضمین شده این فن آوری در آینده صنعت برق کشور قابل پیش بینی می باشد.**

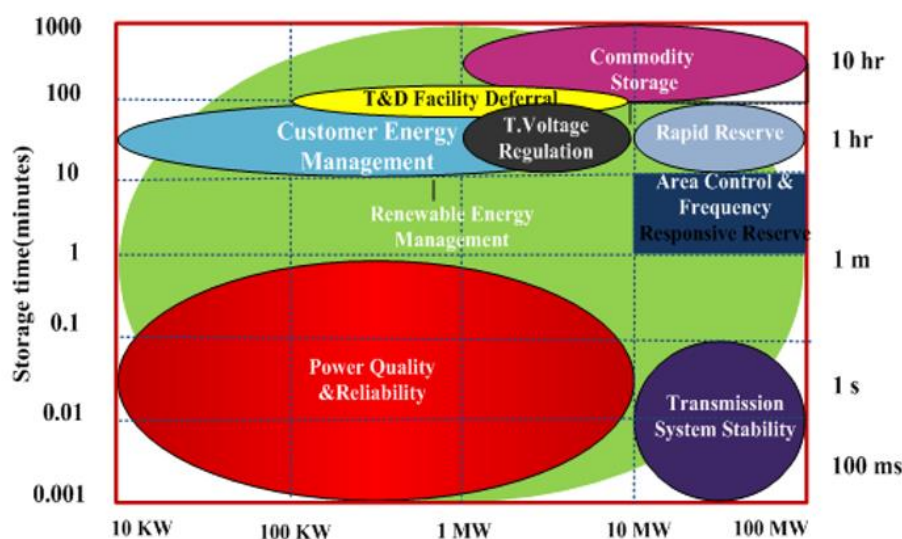
۴. رنج پذیری و قابلیت تعمیم دانش فنی بدست آمده به حوزه های کاربردی دیگر

در یک ذخیره ساز فلاپویل ظرفیت توان و ظرفیت انرژی به عنوان دو پارامتر کلیدی طراحی می باشند که این دو پارامتر تاثیر مستقیم بر سطح تکنولوژی مورد استفاده و هزینه تمام شده آن خواهد داشت. در شکل ۱-۷ نیازمندی ظرفیت توان و ظرفیت انرژی در حوزه های کاربردی مختلف را نشان می دهد. برای نمونه کاربرد انرژی نو محدوده بسیار وسیعی از سطوح توان و انرژی را شامل می شود، در صورتیکه این دو پارامتر برای کاربرد تنظیم فرکانس در رنج محدود تری قرار می گیرد. بررسی محصولات تجاری سازنده های مطرح در زمینه ذخیره ساز فلاپویل در دنیا نشان می دهد تقریباً تمام سازندگان فلاپویل تلاش بی وقفه ای را جهت گسترش محصول نهایی خود در گستره وسیعی از حوزه های کاربردی انجام می دهند. **به عبارتی توسعه دانش فنی ذخیره ساز فلاپویل در حوزه ای که**

بیشترین همپوشانی را با کاربردهای دیگر دارد می‌تواند یک امتیاز برای آینده سرمایه‌گذاری و افزایش نرخ نفوذ این فن آوری در سایر حوزه‌های کاربردی باشد. همانگونه که در شکل ۲-۷ نمایش داده شده توسعه کاربرد ذخیره ساز فلاپویل در حوزه انرژی تجدید پذیر بیشترین ضریب همبستگی را با حوزه‌های دیگر دارد. هر میزان این شاخص بیشتر باشد امکان توسعه محصول نهایی به حوزه‌های دیگر با کمترین تغییرات در محصول اولیه فراهم می‌باشد.

۵. اندازه بازار و رقابت پذیری فن آوری (توسعه پذیری غیر اشباع شونده)

با توجه به مجموع ظرفیت مورد نیاز نصب و بهره برداری ذخیره ساز فلاپویل در حوزه‌های مختلف کاربردی، تیراژ محصول نهایی قابل تخمین می‌باشد. با توجه به اشباع پذیر بودن بازار این محصول در برخی از کاربردها، سرمایه‌گذاری در آن حوزه توجیه پذیر نخواهد بود. یکی از ریسک‌های توسعه این محصول فن آورانه در داخل کشور بازار هدف محدود و اشباع سریع بازار هدف می‌باشد.



شکل ۲-۷: ظرفیت توان و ظرفیت انرژی مورد نیاز ذخیره سازهای مورد کاربرد در حوزه‌های مختلف

بر همین مبنی بازار پایدار و رقابت پذیر می‌تواند یک از معیارهای اولویت بندی انتخاب حوزه کاربردی باشد. برای نمونه برای موضوع کنترل فرکانس با توجه به ظرفیت محدود مورد تقاضای این محصول لازم است تا شاخص‌های اقتصادی برای این بازار هدف محدود مورد ارزیابی قرار گیرد.

۶. میزان وابستگی به تکنولوژی ساخت پیشرفته و امکان‌سنجی تجاری سازی

بر اساس مطالعات صورت گرفته در برخی از حوزه‌های کاربردی ذخیره ساز فلاپویل که نسبت ظرفیت انرژی به ظرفیت توان بیشتر است، نیاز به استفاده از دانش طراحی پیچیده‌تر، مواد پیشرفته و پرهزینه، ماشین آلات گرانتر می‌باشد. بنابراین کاربردهایی که نیاز به تجاری سازی ذخیره سازهای فلاپویل با تکنولوژی سطح بالایی می‌باشد علاوه بر هزینه بسیار بالای دستیابی به دانش فنی و ساخت، زمان بازگشت سرمایه و رقابت پذیری با نمونه‌های خارجی نیز پیچیده‌تر می‌گردد. بر اساس این شاخص، حوزه‌های کاربردی ذخیره ساز فلاپویل که از تکنولوژی بالاتری برخوردار باشد امتیاز کمتری خواهد داشت.

۷. معیار ریسک سرمایه‌گذاری

در این مرحله بر اساس ریسک‌های متعدد سرمایه‌گذاری بر روی ذخیره ساز فلاپیول در حوزه‌های کاربردی مختلف شناسایی شده ارزیابی می‌گردند. این ریسک‌ها می‌تواند شامل: پیش‌بینی پذیر نبودن بازار، توانایی مشتریان در خرید محصول، تامین منابع مالی، تغییر فن‌آوری در سال‌های فن‌آوری، فن‌آوری‌های جایگزین، افزایش زمان راه‌اندازی تجاری‌سازی، اخذ مجوزها و تاییدیه‌ها، ریسک وجود رقبای خارجی، تغییر نرخ تورم و افزایش هزینه‌های عملیاتی، محدودیت در تامین مواد اولیه، نرخ ارز، ریسک‌های سیاسی و شبه‌سیاسی باشد.

۸. درصد نفوذ حوزه کاربردی در آینده

این شاخص بر اساس مطالعه اسناد بالادستی و راهبردهای کلان کشور و همچنین آینده‌پژوهی‌های انجام گرفته در حوزه‌های کاربردی مختلف ذخیره ساز فلاپیول در چند سال آینده در داخل و خارج کشور می‌باشد. این شاخص به نوعی یک نگاه به آینده ذخیره ساز فلاپیول در حوزه‌های مختلف کاربردی در داخل و خارج کشور دارد. برای نمونه در حوزه انرژی‌های نو: حدود ۱۵۰ هزار مگاوات ظرفیت احداث نیروگاه خورشیدی در کشور وجود دارد که حدود ۸۴۰ مگاوات بهره‌برداری شده. بر اساس وضعیت موجود استفاده از ذخیره ساز فلاپیول برای کاربرد نیروگاه خورشیدی چندان بازار بزرگی نیست، این درحالی است که با در نظر گرفتن پتانسیل‌های موجود و آینده نیروگاه خورشیدی در کشور و میزان رشد سالانه این نیروگاه‌ها بر اساس ترند‌های بدست آمده می‌توان ارزیابی واقع‌بینانه‌ای نسبت به قابلیت بهره‌برداری ذخیره ساز فلاپیول در هر یک از حوزه کاربردی داشت.

۹. میزان بهبود شاخص‌های محیط زیستی (kg/year) و سازگاری با محیط زیست

این معیار نشان می‌دهد در صورت استفاده از ذخیره ساز فلاپیول در هر یک از حوزه‌های کاربردی چه میزان بر روی شاخص‌های زیست محیطی بهبود حاصل می‌گردد. به عنوان نمونه در صورت استفاده از فلاپیول بجای باتری در خودرو اثرات زیست محیطی آن چشمگیر خواهد بود یا برای کاربرد کنترل فرکانس، استفاده از فلاپیول بجای ظرفیت رزرو نیروگاه‌ها، کاهش مصرف سوخت نیروگاه‌ها و کاهش آلایندگی‌ها را نتیجه می‌دهد. بر اساس این معیار میزان اثر گذاری استفاده از ذخیره ساز فلاپیول در حوزه‌های کاربردی مختلف ارزیابی می‌گردد.

۱۰. درصد قطعیت داده‌های گردآوری شده

از آنجاییکه کیفیت داده‌های موجود به منظور تعیین مقادیر کمی شاخص‌های ۹ گانه متفاوت می‌باشد، این معیار نشان‌دهنده میزان عدم قطعیت داده‌های گردآوری شده می‌باشد. تعیین وزن این شاخص در مرحله نهایی و پس از شناسایی منابع گردآوری داده‌ها تعیین می‌شود.

۲-۵. رتبه‌بندی زمینه‌های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری چند معیاره

در این مرحله با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره حوزه‌های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول بر اساس معیارهای معرفی

شده در مرحله ۱-۲ رتبه بندی می شود. برای این منظور از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس استفاده شده است. روش تاپسیس یکی از تکنیک‌های مورد استفاده در تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) است. در این روش تصمیم‌گیری تعدادی گزینه و تعدادی معیار برای تصمیم‌گیری وجود دارد که باید با توجه به معیارها، گزینه‌ها رتبه‌بندی شوند، و یا اینکه به هر یک از آنها یک نمره کارایی اختصاص داده شود. فلسفه کلی روش تاپسیس این است که با استفاده از گزینه‌های موجود، دو گزینه فرضی تعریف می‌شوند. یکی از این گزینه‌ها مجموعه‌ای است از بهترین مقادیر مشاهده شده در ماتریس تصمیم‌گیری. این گزینه را اصطلاحاً ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) می‌نامیم. ضمن اینکه یک گزینه فرضی دیگر تعریف می‌شود که شامل بدترین حالت‌های ممکن باشد. این گزینه ایده‌آل منفی نام دارد. معیارها می‌تواند دارای ماهیت مثبت یا منفی باشند، همچنین واحد اندازه‌گیری آنها نیز می‌تواند متفاوت باشد. در پایان بر مبنی وزن معیارها و مقادیر معیارها برای هر یک از گزینه‌ها (در اینجا حوزه های کاربردی)، رتبه بندی نهایی تعیین می گردد.

در گام نخست لازم است تا ماتریس تصمیم‌گیری براساس داده های گردآوری شده تکمیل گردد. منابع داده اصلی برای تکمیل ماتریس تصمیم‌گیری به شرح زیر می باشد.

- مقالات داخلی و خارجی
- مصاحبه‌ها و گزارش‌های متخصصان و مسئولین حوزه‌های مربوطه
- داده‌های قابل دسترس از پروژه‌های اجرا شده توسط کمپانی‌های فعال در هر یک از حوزه های کاربردی
- تهیه فرم های نظر سنجی از خبرگان حوزه های مختلف

جدول تصمیم‌گیری رتبه بندی کاربردهای ذخیره سازی فلاپیول در جدول ۱-۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱-۲: جدول تصمیم گیری رتبه بندی کاربردهای ذخیره ساز فلاپویل

شاخص ها		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
		سود حاصل از صنعت فلاپویل برای سرمایه گذار	مزیت اقتصادی برای بهره بردار ذخیره ساز فلاپویل در حوزه کاربردی	میزان مزیت اقتصادی و رضایت مندی مشترکین و مصرف کننده نهایی	رنج پذیری و قابلیت تعمیم دانش فنی بدست آمده به حوزه های کاربردی دیگر	اندازه بازار و رقابت پذیری (توسعه پذیر اشباع شونده)	میزان وابستگی به تکنولوژی ساخت پیشرفته و امکان سنجی تجاری سازی	معیار ریسک سرمایه گذاری	درصد نفوذ حوزه کاربردی در آینده	میزان بهبود شاخص های محیط زیستی (kg/year) وسازگاری با محیط زیست	درصد قطعییت داده های گردآوری شده
A1	کیفیت توان و تنظیم فرکانس (در حد ثانیه)	۸۰	۶۰	۶۰	۵۰	۸۰	۸۰	۸۰	۷۰	۷۰	۷۰
A2	حمل و نقل الکتریکی (محدوده ثانیه تا دقیقه)	۴۰	۴۰	۴۰	۳۰	۵	۲۵	۱۰	۱۰	۴۰	۵۰
A3	رزرو گردان (در حد دقیقه)	۶۰	۶۰	۶۰	۴۰	۳۰	۶۰	۴۰	۴۰	۳۰	۶۰
A4	منابع تغذیه بدون وقفه (در محدوده ثانیه و دقیقه)	۵۰	۶۰	۶۰	۶۰	۷۰	۶۰	۶۰	۵۰	۴۰	۷۰
A5	منابع تغذیه بدون وقفه (در محدوده ساعت)	۳۰	۵۰	۴۰	۶۰	۷۰	۲۰	۳۰	۵۰	۸۰	۷۰
A6	انرژی های تجدید پذیر (محدوده ساعت)	۶۰	۵۰	۳۰	۸۰	۶۰	۲۰	۲۵	۷۰	۸۰	۷۰
A7	انرژی های تجدید پذیر (محدوده دقیقه و ثانیه)	۳۰	۷۰	۶۰	۸۰	۶۰	۷۰	۶۰	۷۰	۳۰	۷۰
A8	پیک سایی مصرف کننده (در حد ساعت)	۲۰	۵۰	۵۰	۶۰	۵۰	۷۰	۳۰	۴۰	۸۰	۶۰

خلاصه محاسبات روش تاپسیس در جداول ۲-۲ تا ۲-۷ نمایش دهنده شده است. نتایج رتبه بندی در شکل ۲-۸ نشان می دهد حوزه های کیفیت توان و تنظیم فرکانس، منابع تغذیه بدون وقفه و منابع انرژی های تجدید پذیر در محدوده ذخیره سازی ثانیه و دقیقه انتخاب های مناسب برای بومی سازی و تجاری سازی این نوع از ذخیره سازها می باشد.

جدول ۲-۲: ماتریس تصمیم گیری (تعداد گزینه ها: ۸ و تعداد معیارها: ۱۰)

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	
۸۰	۶۰	۶۰	۵۰	۸۰	۸۰	۸۰	۷۰	۷۰	۷۰	A1
۴۰	۴۰	۴۰	۳۰	۵	۲۵	۱۰	۱۰	۴۰	۵۰	A2
۶۰	۶۰	۶۰	۴۰	۳۰	۶۰	۴۰	۴۰	۳۰	۶۰	A3
۵۰	۶۰	۶۰	۶۰	۷۰	۶۰	۶۰	۵۰	۴۰	۷۰	A4
۳۰	۵۰	۴۰	۶۰	۷۰	۲۰	۳۰	۵۰	۸۰	۷۰	A5
۶۰	۵۰	۳۰	۸۰	۶۰	۲۰	۲۵	۷۰	۸۰	۷۰	A6
۳۰	۷۰	۶۰	۸۰	۶۰	۷۰	۶۰	۷۰	۳۰	۷۰	A7
۲۰	۵۰	۵۰	۶۰	۵۰	۷۰	۳۰	۴۰	۸۰	۶۰	A8

جدول ۲-۳: ماتریس نرمال شده

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	
۰,۵۶۷	۰,۳۸۱	۰,۴۱۴	۰,۲۹۶	۰,۴۸۸	۰,۵۰۸	۰,۶۰۱	۰,۴۶۲	۰,۴۱	۰,۳۷۹	A1
۰,۲۸۴	۰,۲۵۴	۰,۲۷۶	۰,۱۷۷	۰,۰۳۱	۰,۱۵۹	۰,۰۷۵	۰,۰۶۶	۰,۲۳۴	۰,۲۷	A2
۰,۴۲۵	۰,۳۸۱	۰,۴۱۴	۰,۲۳۷	۰,۱۸۳	۰,۳۸۱	۰,۳	۰,۲۶۴	۰,۱۷۶	۰,۳۲۴	A3
۰,۳۵۴	۰,۳۸۱	۰,۴۱۴	۰,۳۵۵	۰,۴۲۷	۰,۳۸۱	۰,۴۵۱	۰,۳۳	۰,۲۳۴	۰,۳۷۹	A4
۰,۲۱۳	۰,۳۱۸	۰,۲۷۶	۰,۳۵۵	۰,۴۲۷	۰,۱۲۷	۰,۲۲۵	۰,۳۳	۰,۴۶۹	۰,۳۷۹	A5
۰,۴۲۵	۰,۳۱۸	۰,۲۰۷	۰,۴۷۳	۰,۳۶۶	۰,۱۲۷	۰,۱۸۸	۰,۴۶۲	۰,۴۶۹	۰,۳۷۹	A6
۰,۲۱۳	۰,۴۴۵	۰,۴۱۴	۰,۴۷۳	۰,۳۶۶	۰,۴۴۴	۰,۴۵۱	۰,۴۶۲	۰,۱۷۶	۰,۳۷۹	A7
۰,۱۴۲	۰,۳۱۸	۰,۳۴۵	۰,۳۵۵	۰,۳۰۵	۰,۴۴۴	۰,۲۲۵	۰,۲۶۴	۰,۴۶۹	۰,۳۲۴	A8

جدول ۲-۴: معیارها و تعیین وزن هر یک از معیارها

عنوان معیار	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
تأثیر	مثبت	مثبت	مثبت	مثبت	مثبت	مثبت	مثبت	مثبت	مثبت	منفی
وزن (آنتروپی ی)	۰,۱۱۴	۰,۰۱۷	۰,۰۳۷	۰,۰۵۹	۰,۱۷۶	۰,۱۶۳	۰,۱۹	۰,۱۲۷	۰,۱۰۸	۰,۰۰۹

جدول ۵-۲: ماتریس نرمال موزون

	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
A1	۰,۰۰۳	۰,۰۴۴	۰,۰۵۹	۰,۱۱۴	۰,۰۸۳	۰,۰۸۶	۰,۰۱۷	۰,۰۱۵	۰,۰۰۶	۰,۰۶۵	
A2	۰,۰۰۲	۰,۰۲۵	۰,۰۰۸	۰,۰۱۴	۰,۰۲۶	۰,۰۰۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۴	۰,۰۳۲	
A3	۰,۰۰۳	۰,۰۱۹	۰,۰۳۴	۰,۰۵۷	۰,۰۶۲	۰,۰۳۲	۰,۰۱۴	۰,۰۱۵	۰,۰۰۶	۰,۰۴۸	
A4	۰,۰۰۳	۰,۰۲۵	۰,۰۴۲	۰,۰۸۶	۰,۰۶۲	۰,۰۷۵	۰,۰۲۱	۰,۰۱۵	۰,۰۰۶	۰,۰۰۴	
A5	۰,۰۰۳	۰,۰۵۱	۰,۰۴۲	۰,۰۴۳	۰,۰۲۱	۰,۰۷۵	۰,۰۲۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۵	۰,۰۲۴	
A6	۰,۰۰۳	۰,۰۵۱	۰,۰۵۹	۰,۰۳۶	۰,۰۲۱	۰,۰۶۴	۰,۰۲۸	۰,۰۰۸	۰,۰۰۵	۰,۰۴۸	
A7	۰,۰۰۳	۰,۰۱۹	۰,۰۵۹	۰,۰۸۶	۰,۰۷۲	۰,۰۶۴	۰,۰۲۸	۰,۰۱۵	۰,۰۰۸	۰,۰۲۴	
A8	۰,۰۰۳	۰,۰۵۱	۰,۰۳۴	۰,۰۴۳	۰,۰۷۲	۰,۰۵۴	۰,۰۲۱	۰,۰۱۳	۰,۰۰۵	۰,۰۱۶	

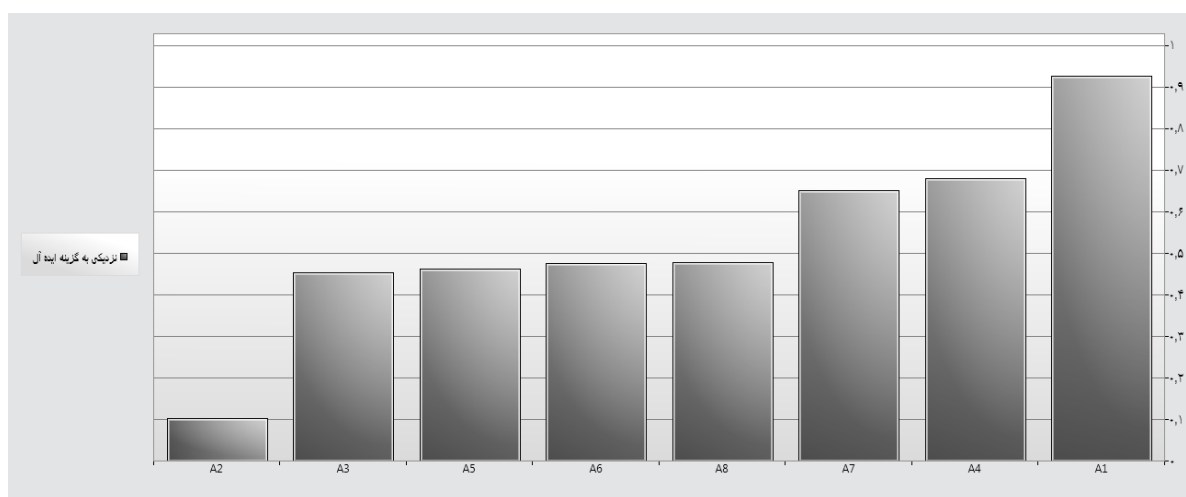
جدول ۶-۲: ایده آل‌های مثبت و منفی

معیارها	ایده آل مثبت	ایده آل منفی
C1	۰,۰۶۵	۰,۰۱۶
C2	۰,۰۰۸	۰,۰۰۴
C3	۰,۰۱۵	۰,۰۰۸
C4	۰,۰۲۸	۰,۰۰۱
C5	۰,۰۸۶	۰,۰۰۵
C6	۰,۰۸۳	۰,۰۳۱
C7	۰,۱۱۴	۰,۰۱۴
C8	۰,۰۵۹	۰,۰۰۸
C9	۰,۰۵۱	۰,۰۱۹
C10	۰,۰۰۲	۰,۰۰۳

جدول ۷-۲: فاصله گزینه‌ها تا ایده آل‌های مثبت و منفی

گزینه‌ها	فاصله تا ایده آل مثبت	فاصله تا ایده آل منفی	نزدیکی تا گزینه ایده آل
A1	۰,۰۱۳	۰,۱۶۲	۰,۹۲۶
A2	۰,۱۵۷	۰,۰۱۸	۰,۱۰۳

۰.۴۵۳	۰.۰۷۸	۰.۰۹۴	A3
۰.۶۸	۰.۱۱۷	۰.۰۵۵	A4
۰.۴۶۲	۰.۰۹	۰.۱۰۵	A5
۰.۴۷۷	۰.۰۹۵	۰.۱۰۴	A6
۰.۶۵۲	۰.۱۲	۰.۰۶۴	A7
۰.۴۷۸	۰.۰۸۸	۰.۰۹۶	A8



شکل ۸-۲: رتبه بندی حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول

۵-۲ - نتیجه گیری

با هدف امکان‌سنجی فنی و اقتصادی بومی‌سازی و تجاری‌سازی فناوری فلاپیول در کشور در مراحل اول و دوم پروژه رصد فن آوری و بررسی سوابق فعالیتهای پژوهشی در زمینه طراحی و ساخت ذخیره ساز فلاپیول و شناسایی و اولویت بندی حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول در داخل کشور در گزارش ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. رصد پژوهشهای انجام گرفته در زمینه طراحی و ساخت ذخیره ساز فلاپیول نشان می دهد عمده تحقیقات انجام شده در سطح دانشگاهی و ساخت نمونه های آزمایشگاهی بوده و نمونه تجاری این نوع از ذخیره سازها در داخل کشور موجود نمی باشد. در ارتباط با فن آوری های مرتبط با ذخیره ساز فلاپیول دانش طراحی و ساخت موتورهای پرسرعت، یاطاقان های مغناطیسی و مواد کامپوزیتی در سطح دانشگاهی و مراکز پژوهشی دانش فنی و تجربی قابل قبولی شناسایی شده که می تواند پاسخگوی بخش عمده نیاز فنی توسعه دانش فنی ذخیره ساز فلاپیول باشد. در مرحله دوم در گام نخست حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپیول در خارج از کشور مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با هدف رتبه بندی حوزه های کاربردی جهت تجاری سازی ذخیره ساز فلاپیول در داخل کشور، معیارهای فنی و اقتصادی معرفی و

تشریح گردید. در بخش پایانی پس از گردآوری و آنالیز داده‌های مورد نیاز و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس، رتبه‌بندی حوزه‌های کاربردی انجام گردید. پس از بررسی نتایج این آنالیز مشخص گردید از بین زمینه‌های مختلف کاربردی، حوزه‌های کیفیت‌توان و تنظیم فرکانس، منابع تغذیه بدون وقفه و منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در محدوده ذخیره‌سازی ثانیه و دقیقه به ترتیب بهترین انتخاب جهت بومی‌سازی و تجاری‌سازی این فن‌آوری می‌باشد.

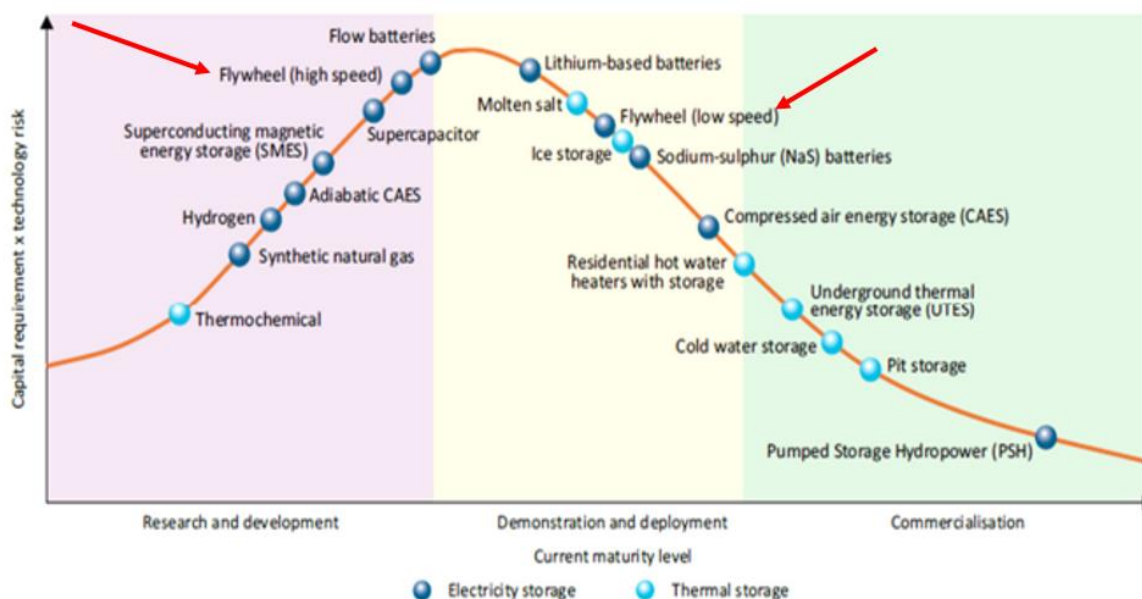
فصل سوم

هزینه یابی ذخیره ساز فلاپیول و مقایسه با ابر خازن

۳-۱ مقدمه

همانگونه که در فصل دوم بررسی گردید کاربردی ذخیره ساز فلاپیول در حوزه های کیفیت توان ، منابع انرژی های تجدید پذیر و منابع تغذیه بدون وقفه (در محدوده زمان ذخیره سازی ثانیه و دقیقه) به ترتیب بهترین انتخاب جهت بومی سازی و تجاری سازی این فن آوری می باشد.

رصد فن آوری ذخیره ساز فلاپیول در سطح ملی (در مرحله اول گزارش) نشان می دهد، ذخیره ساز فلاپیول نسبت به انواع دیگر ذخیره سازهای رایج در داخل کشور یک فن آوری با سطح بلوغ فن آوری (TRL) بسیار پایین می باشد. شکل ۳-۱ چرخه حیات فن آوری های مختلف ذخیره سازی انرژی در سطح بین الملل را نمایش می دهد. بطوریکه مشاهده می شود ذخیره سازهای انرژی فلاپیول سرعت پایین به مرحله قابل قبولی از بلوغ فن آوری دست یافته در حالیکه نوع سرعت بالای آن در حال بلوغ می باشد. از طرفی ذخیره ساز ابر خازن به عنوان یکی از رقبای اصلی ذخیره ساز فلاپیول در بسیاری از کاربردها می باشد. به همین منظور لازم است تا یک مقایسه فنی و اقتصادی بین این دو نوع تکنولوژی انجام گردد. همچنین ارزیابی اقتصادی ذخیره ساز فلاپیول جهت بومی سازی این تکنولوژی نیازمند هزینه یابی چرخه عمر و مقایسه آن با سایر فن آوری های رقیب می باشد. در این فصل ابتدا یک بررسی اولیه در مورد مارکتینگ ذخیره ساز فلاپیول در سطح بین الملل انجام می شود. در ادامه بر اساس هزینه یابی چرخه عمر هر یک از ذخیره سازهای فلاپیول، ذخیره ساز ابر خازن و ذخیره ساز باطری مقایسه ایی بین انواع این تکنولوژی ها انجام می گردد.

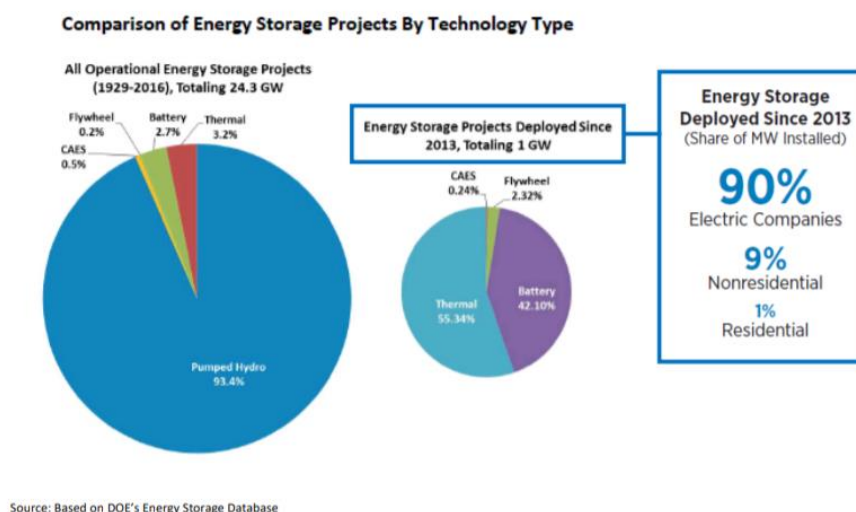


شکل ۳-۱: نمودار چرخه حیات فن آوری های مختلف ذخیره ساز انرژی

۳-۲ بررسی مارکتینگ ذخیره ساز فلاپویل در سطح بین الملل

هدف از این مطالعه، بررسی میزان ظرفیت نصب شده ذخیره ساز فلاپویل و میزان نرخ رشد بازار این فن آوری در چند سال اخیر می باشد. همچنین نتایج پیش بینی های انجام گرفته از آینده بازار این فن آوری در حوزه های کاربردی نیز مورد بررسی قرار می گیرد.

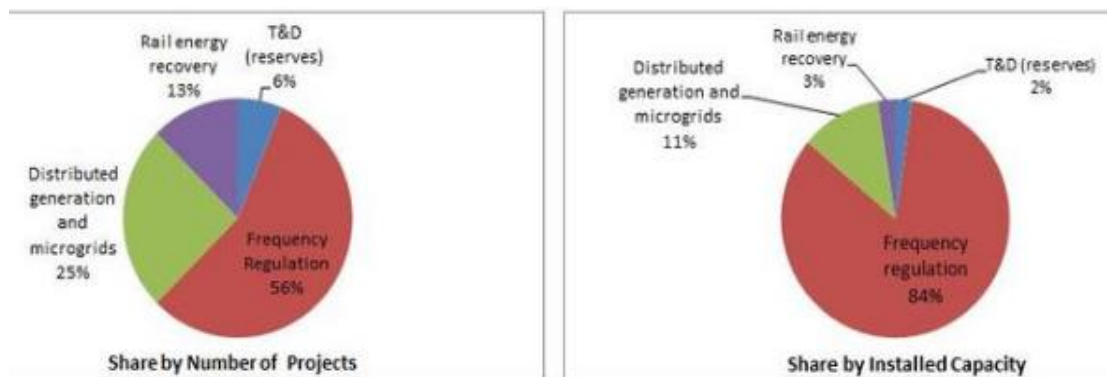
مقایسه پروژه های انجام شده برای انواع ذخیره ساز انرژی از سال ۱۹۲۹ تا ۲۰۱۶ در شکل ۳-۲ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود بخش عمده ظرفیت نصب شده (۹۳/۴٪) مربوط به ذخیره ساز تلمبه ذخیره ایی است و فقط ۰/۲٪ سهم ذخیره ساز فلاپویل بوده است. در حالیکه از سال ۲۰۱۳ به بعد، از ۱ گیگاوات ظرفیت نصب شده ۲/۳۲٪ مربوط به ذخیره ساز فلاپویل بوده است.



شکل ۳-۲: مقایسه پروژه های ذخیره ساز در سطح جهانی در سال ۱۴۰۱۳

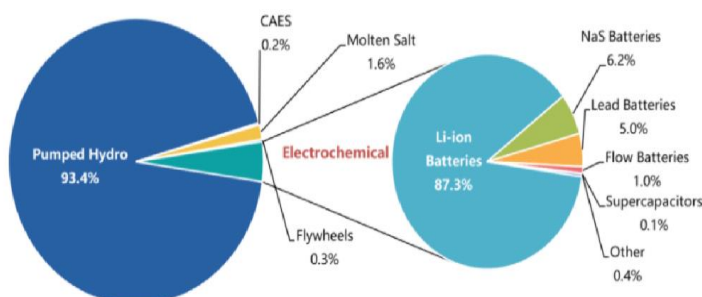
شکل ۳-۳ تعداد پروژه ها و ظرفیت نصب شده ذخیره ساز فلاپویل در حوزه های کاربردی مختلف را در سال ۲۰۱۰ نمایش می دهد. بررسی ها نشان می دهد کاربرد تنظیم فرکانس یکی از حوزه های کاربردی ذخیره ساز فلاپویل بوده که مورد توجه ویژه سرمایه گذاران حوزه برق و انرژی بوده است. به طوریکه از بین پروژه های انجام شده در زمینه ذخیره ساز فلاپویل و کل ظرفیت نصب شده به ترتیب ۵۶٪ و ۸۶٪ مربوط به کاربرد تنظیم فرکانس بوده است.

¹ DOE

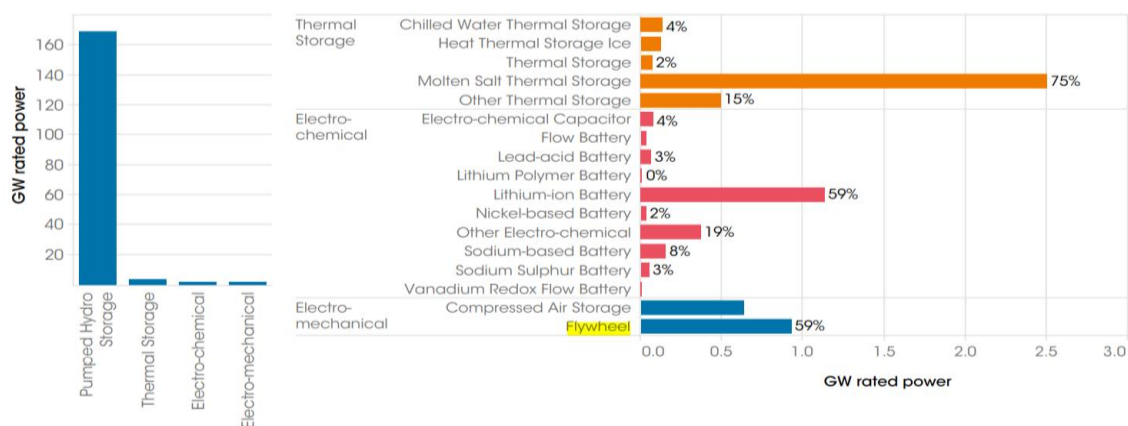


شکل ۳-۳: تعداد پروژه‌ها و ظرفیت ذخیره ساز فلاپیول در زمینه‌های کاربردی مختلف (سال ۲۰۱۰)

شکل‌های ۳-۴ سهم انواع ذخیره‌سازهای انرژی از کل ظرفیت نصب شده در سال ۲۰۱۴ در صحرای جنوب آفریقا را نمایش می‌دهد. بطوریکه ملاحظه می‌گردد سهم ذخیره ساز فلاپیول ۰/۳٪ در برابر سهم ناچیز ذخیره ساز ابر خازن ۰/۰۴۵٪ قابل توجه می‌باشد. در یک تقسیم بندی دیگر سهم انواع ذخیره‌سازهای تلمبه ذخیره‌ایی، حرارتی، الکتروشیمیایی و مکانیکی و همچنین درصد تفکیک شده هر یک از انواع ذخیره ساز در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است. در دسته ذخیره‌سازهای الکترومکانیکی، ذخیره ساز فلاپیول حدود ۶۰٪ ظرفیت نصب شده را به خود اختصاص داده است.



شکل ۳-۴: میزان فلاپیول نصب شده در سال ۲۰۱۴ در صحرای جنوب آفریقا^۱



¹ Regional academy on the united nation

شکل ۵-۳: ظرفیت نصب شده جهانی در سال ۲۰۱۷ (ظرفیت کل ۱/۹ گیگا وات)

۳-۳ بازار ذخیره ساز فلاپیول

اطلاعات مارکتینگ ذخیره ساز فلاپیول محدود و اغلب به صورت پراکنده ارائه شده است. در ادامه خلاصه برخی از آمار و داده های موجود در زمینه بازار این فن آوری مورد آنالیز قرار می گیرد.

سایت: A jot.com & market research

- درآمد جهانی فلاپیول برای سال های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ بیش از ۱.۵ میلیارد دلار پیش بینی شده است
- طبق پیش بینی انجام گرفته در سال ۲۰۱۸، در سال ۲۰۱۹ درآمد ۳/۰ میلیارد دلار از فروش فلاپیول حاصل خواهد شد.
- نرخ رشد سالیانه ۱۰/۲٪ پیش بینی شده است

سایت: CNESA.org

- نرخ رشد مرکب سالیانه فلاپیول کامپوزیتی ۹.۸٪ محاسبه شده است.
- بازار جهانی فلاپیول در سال ۲۰۱۹ به میزان ۳۱۲/۱ میلیون دلار بوده است. نرخ رشد مرکب ذخیره ساز فلاپیول از سال ۲۰۲۰-۲۰۲۷، ۷/۴٪ پیش بینی شده است.
- پیش بینی درآمد در سال ۲۰۲۷ به میزان ۵۵۲/۱ میلیون دلار

سایت: Grand view research.com

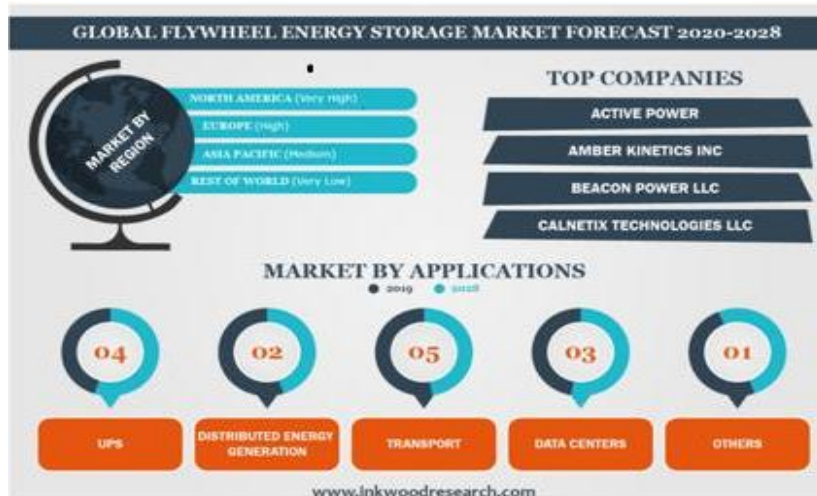
از نظر درآمد بازار آمریکای شمالی با ۷۸٪ بیشترین سهم را دارد. طبق تحقیقات انجام شده اولین گروه در بازار فلاپیول آمریکای شمالی، سپس اروپا و در نهایت چین و ژاپن و هند می باشند.

سایت Allied market research.com و KEMA report Inkwood research.com

- رشد بازار باتوجه به مطالعات سال ۲۰۱۹ و تخمین برای سال ۲۰۲۸: رشد سود دهی ۷.۵٪ - رشد فروش ۸.۳۲٪ و درآمد حاصل از فروش ۵۷۰/۷۴ میلیون دلار. بیشترین حجم بازار فلاپیول بین ذخیره ساز ها در ۲۰۱۹ به میزان ۲۱/۶٪ بوده است.
- بیشترین حجم بازار فلاپیول بین ذخیره ساز ها در ۲۰۱۹ به میزان 21.6%.
- رشد اروپا در این سال ها ۷.۸٪
- از نظر درآمد بازار آمریکای شمالی با ۷۸٪ بیشترین سهم را دارد.

- در سال ۲۰۱۵ بازار جهانی ۱۷۲/۲۳۶ میلیون دلار و در سال ۲۰۲۰ و برای سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۲۰ بازار ۲۶۴/۹۵۳ میلیون دلار با نرخ رشد ۶.۴٪ پیش‌بینی شده است. همچنین در سال ۲۰۱۱ آمریکا بودجه کلی ۱۸۵ میلیون دلار با ارزش ۷۷۲ میلیون دلار ارزش پروژه‌ها و ۵۷۳ مگاوات ظرفیت کلی ذخیره‌سازها که سهم فلاپیول از این سبد ۱۵٪ بوده است.

شکل ۳-۶، پیش‌بینی رشد بازار ذخیره‌ساز فلاپیول در محدوده سالهای ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۸ را برای ۵ شرکت اصلی سازنده ذخیره‌ساز فلاپیول در زمینه‌های کاربردی مختلف را نمایش می‌دهد. بر اساس این مطالعه، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۸ بازار ذخیره‌ساز فلاپیول در منابع تغذیه اضطراری و مرکز داده‌ها رشد بیشتری خواهد داشت.



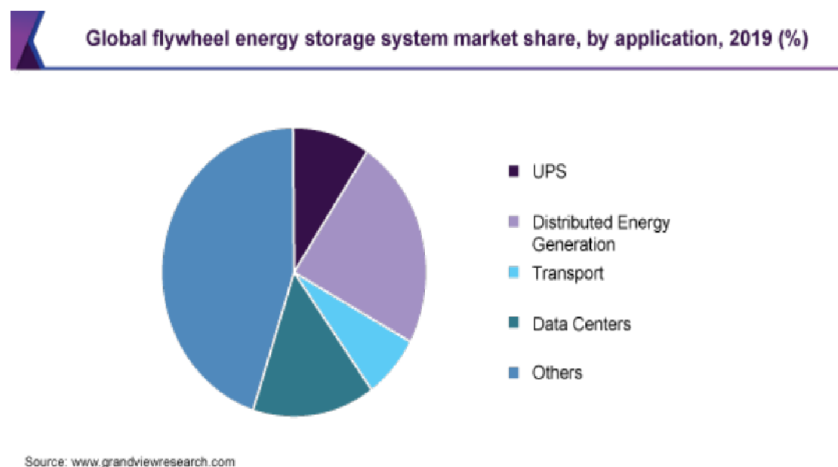
شکل ۳-۶: پیش‌بینی بازار ذخیره‌ساز فلاپیول در ۱۰ سال آینده^۳

شکل ۳-۷، پیش‌بینی Grandviewresearch در مورد سهم بازار جهانی ذخیره‌ساز فلاپیول در حوزه‌های مختلف کاربردی را نمایش می‌دهد. در این مطالعه پیش‌بینی شده ذخیره‌ساز فلاپیول در حوزه انرژی تجدیدپذیر و تولید پراکنده سهم بیشتری از بازار فلاپیول را شامل می‌گردد. بخش کاربردهای دیگر از این گراف شامل انواع کاربردهای کیفیت توان می‌باشد که سهم قابل توجهی می‌باشد.

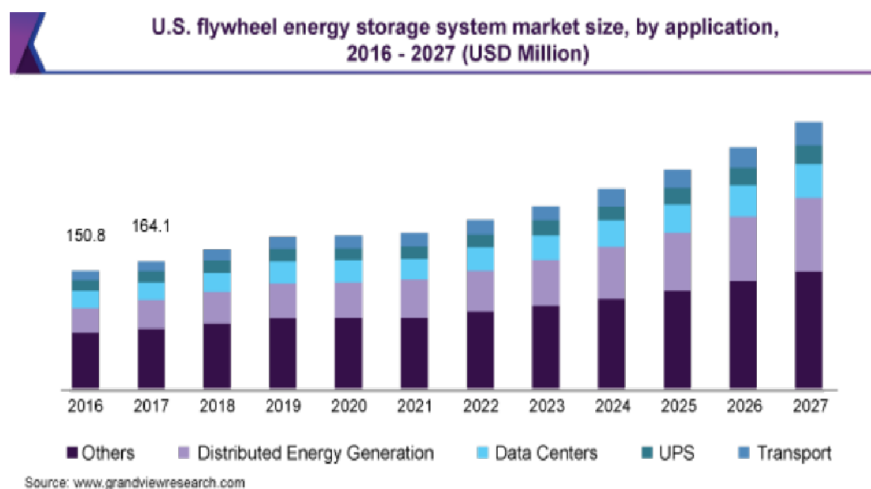
¹ Allied market research.com

² KEMA report

³ Inkwoodresearch.com



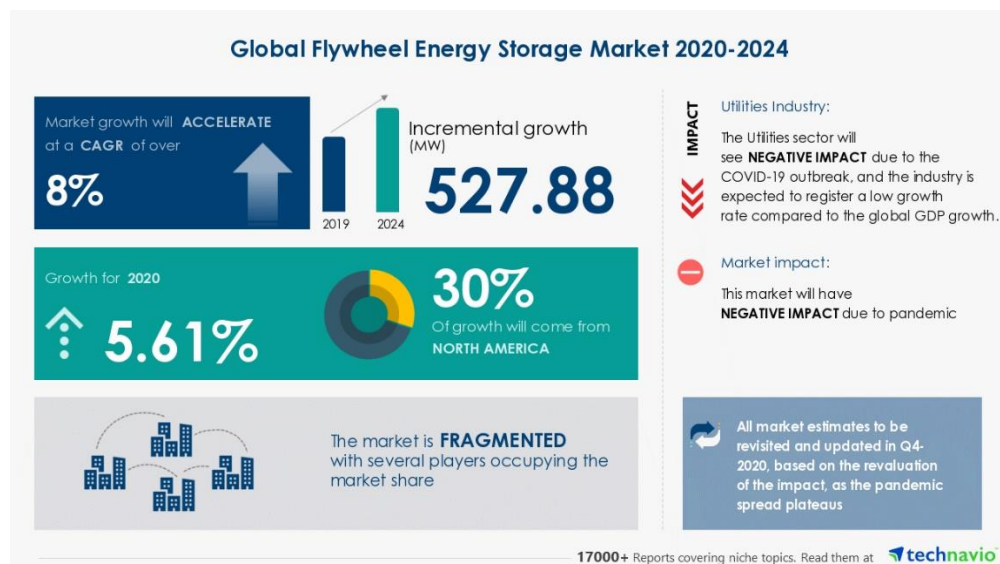
شکل ۷-۳: میزان بازار جهانی فلاپویل در سال ۲۰۱۹ طراحی شده توسط نرم افزار^۱



شکل ۸-۳: میزان بازار فلاپویل در آمریکا طراحی شده توسط نرم افزار

همچنین حجم بازار ذخیره ساز فلاپویل در آمریکا از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۷ به تفکیک نوع کاربرد در سالهای مختلف نمایش داده شده است. افزایش سهم بازار در زمینه انرژی تجدید پذیر و تولید پراکنده قابل ملاحظه می باشد. شکل ۳-۹ تحلیل Businesswire از بازار جهانی فلاپویل را ارائه می دهد. بر اساس این مطالعه نرخ رشد بازار ۸٪ از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ با افزایش ظرفیت ۵۲۷/۸۸ مگا وات پیش بینی شده است. همچنین در این آنالیز بر تاثیر منفی ویروس کرونا بر پیش بینی های انجام شده و ضرورت بازبینی مطالعات انجام گرفته تحت تاثیر این پاندومی تاکید شده است.

¹ Grandviewresearch.com-market research.com



شکل ۹-۳: پیش بینی بازار فلاپیول در سال های ۲۰۲۰-۲۰۲۴

۴-۳ بررسی چند پروژه نصب ذخیره ساز فلاپیول

در این بخش با هدف ارزیابی اقتصادی نمونه های نصب و بهره برداری شده ذخیره ساز انرژی فلاپیول، تعدادی از پروژه های مرتبط با این فن آوری در چند سال اخیر مورد بررسی قرار می گیرد.

- شرکت Amber kinetics در سال ۲۰۱۴ واحد های فلاپیول با ظرفیت 25kwh خود را در آلامدا کالیفرنیا نصب کرد. هزینه این پروژه \$۳,۶۹۴,۶۶۰-\$۳,۷۶۲,۹۳۱ بوده است. این شرکت در سال ۲۰۱۸ در غرب Boylston تعداد ۱۶ واحد ذخیره ساز فلاپیول به ظرفیت توان ۱۲۸ کیلو وات و ۵۱۲ کیلو وات ساعت را نصب و راه اندازی کرد. همچنین طبق گزارش های ارائه شده، پروژه های نصب فلاپیول در نیروگاه خورشیدی فیلیپین و در مترو مانیلا فیلیپین توسط این شرکت انجام شده است.

- سال ۲۰۱۸ شرکت آمریکایی (هاوایی الکتریک) از ذخیره سازهای فلاپیول با ظرفیت توان ۸ کیلو وات و ظرفیت انرژی ۳۲ کیلو وات ساعت توسط شرکت های Elemental Excelerator , Amber kinetics را در زمینه افزایش ظرفیت انرژی تجدید پذیر شبکه برق هاوایی^۲ اجرا کرده است.

- شرکت Beacon power در سال ۲۰۰۹ در شیکاگو ذخیره یاز فلاپیول با ظرفیت ۲۰ مگا وات را در زمینی به ابعاد ۳.۵ هکتار با کمک مالی ۲۴ میلیون دلار توسط DOE به پایان رساند. هزینه نهایی این پروژه ۴۸/۱ میلیون دلار بوده است و درآمد کلی از این پروژه ۷۹/۲ میلیون دلار بوده است. طبق گزارش های موجود هدف از انجام این پروژه کاهش ۰/۵ الی ۱/۵ درصدی مصرف سوخت بوده است. پروژه دیگر این شرکت در هازل پنسیلوانیا با ظرفیت ۲۰ مگا وات با بودجه ۵۳

¹ Businesswire.com

² Ajot.com

میلیون دلار در زمینی به ابعاد ۳/۵ تا ۵/۵ هکتار نصب شده است. این پروژه با کمک مالی ۲۴ میلیون دلاری توسط DOE و ۵ میلیون دلاری توسط اداره سرمایه گذاری پنسیلوانیا راه اندازی شد^۱. در شکل ۳-۱۰ مشخصات فنی تعدادی دیگر از پروژه های نصب ذخیره ساز فلاپویل در سالهای مختلف ارائه گردیده است.

2005	2008	2010	2015	2016
Flores Island PowerStore The Azores, Portugal	Kalbarri Western Australia	Marble Bar Western Australia	Kodiak Island Alaska, USA	Marsabit Kenya
ABB solution Supply, install and commission a Microgrid Plus System and a PowerStore-flywheel. The system smoothens out wind power fluctuations	ABB solution - Supply, install and commission a PowerStore-flywheel acting as a STATCOM - Smoothens the voltage of an end-of-grid network to which 2 x 800 kW wind turbines are connected	ABB solution - PV/diesel Microgrid with PowerStore grid-stabilizing technology and Microgrid Plus System The resulting system consists of: - Diesel (4 x 320 kW); - PV (1 x 300 kW); - PowerStore- (1 x 500 kW); - Microgrid Plus System	ABB solution Deliver two PowerStore-flywheel units to stabilize the power grid and increase renewable energy	ABB solution - Supply, installation and commissioning supervision of a PowerStore-flywheel - Stabilizes the connection of 2x 275 kW wind turbines to the grid
Customer benefits. - Increased wind power penetration. - Minimized diesel consumption. - Reliable and stable power supply	Customer benefits - Optimize the system - Reliable and stable power supply - Improved quality of electricity supply to Kalbarri ABB solution allows the integration of wind energy at the end-of-grid to provide about one third of the Klabbari community demand	Customer benefits - Minimize diesel consumption, 405,000 liters of fuel saved annually - Minimum environmental impact, 1,100 tons CO2 avoided annually - Reliable and stable power supply	Customer benefits - Provide voltage and frequency support for a new crane - Extend the life of the battery systems by up to 6 years - Help to manage the intermittencies from a 9 MW wind farm - Reduced reliance on diesel generators	Customer benefits - System optimization to avoid curtailment of excess wind power - Reliable and stable power supply

شکل ۳-۱۰: مشخصات فنی چند پروژه ذخیره ساز فلاپویل در سالهای اخیر^۲

۳-۵ هزینه یابی چرخه عمر ذخیره ساز

یکی از روشهای ارزیابی اقتصادی ذخیره سازهای انرژی، روش تحلیل هزینه چرخه عمر است. از روش هزینه چرخه عمر معمولاً در تعیین اقتصادی بودن طرح استفاده می شود. در این تحلیل هزینه های آتی به ارزش حال تنزیل داده می شود. از

¹ Final.ea.beacon power2011

² Iopscience.org

دیدگاه مالکیتی شاخص LCC^1 معیار مناسب تری جهت مقایسه و ارزیابی انواع مختلف ذخیره ساز انرژی می باشد. این شاخص منطبق بر کلیه هزینه های مربوط ذخیره ساز انرژی در کل چرخه عمر می باشد. این هزینه شامل مجموع هزینه TCC با مولفه های هزینه ایی $M\&O^2$ ثابت، هزینه $M\&O$ متغیر، مولفه هزینه های جایگزینی ادوات، مولفه دفع و بازیافت می باشد. هزینه را می توان بصورت هزینه یابی سالانه بیان کرد (€/kw yr) که شامل پرداخت های سالانه است که باید برای کلیه سرویسهای ذخیره ساز انرژی باید پرداخت شود. با هدف بررسی توجیه پذیری اقتصادی ذخیره ساز فلایویل و بومی سازی آن در داخل کشور، هزینه یابی چرخه عمر می تواند یک تحلیل مناسب جهت مقایسه هزینه ایی این فن آوری نسبت به فن آوری های رقیب می باشد. به طور کلی دو روش کلی برای مقایسه هزینه ایی ذخیره سازهای انرژی در چرخه عمر وجود دارد که شامل موارد زیر می باشد [۳۴ و ۳۵]:

۱- محاسبه هزینه ایی کل نصب و راه اندازی $(TCC)^3$

۲- محاسبه هزینه یابی چرخه عمر (LCC) ذخیره ساز
مولفه های هزینه سرمایه گذاری شامل:

- C_{PCS} : هزینه مربوط به سیستم تبدیل انرژی^۵

- C_{stor} : هزینه های مربوط به سیستم ذخیره سازی انرژی^۶. به عنوان مثال هزینه مربوط به ساخت بانک ذخیره انرژی و ...

- C_{OH} : هزینه سربار^۷ که هزینه های مربوط به مهندسی پروژه، تجهیزات اتصال به شبکه، حفاظت و

هزینه های سرمایه گذاری به صورت رابطه زیر مدل می شود که:

$$C_{Tcc} = C_{PCS} + C_{OH} + C_{stor} * cap \quad (۱-۳)$$

هزینه های چرخه عمر شامل موارد زیر می شود:

- $C_{O\&M,f}$: هزینه های ثابت بهره برداری و نگهداری

- $C_{O\&M,v}$: هزینه های متغیر بهره برداری و نگهداری

- C_R : هزینه های مربوط به تعویض سیستم ذخیره انرژی^۸

- C_{DR} : هزینه مربوط به دفع و بازیافت سیستم ذخیره انرژی^۹

این هزینه ها به صورت رابطه زیر مدل می شود که به صورت هزینه سالیانه^{۱۰} نوشته شده است:

$$C_{Lcc,a} = C_{Tcc,a} + C_{O\&M,a} + C_{R,a} + C_{DR,a} \quad (۲-۳)$$

¹ Life Cycle Cost (LCC)

² Fixed maintenance & operation

³ Total capital cost

⁴ Life cycle cost

⁵ Power Conversion System (PCS)

⁶ Energy storage related cost

⁷ overhead cost

⁸ Replacement cost

⁹ Disposal and recycling cost

¹⁰ Annual cost

$$C_{Tcc,a} = C_{Tcc} * CRF \quad (3-3)$$

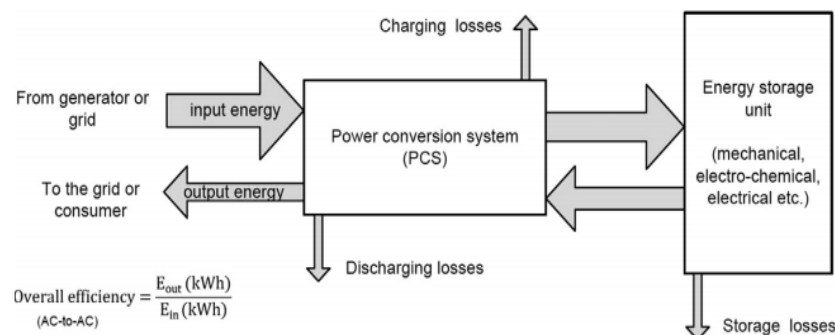
$$CRF = \frac{r*(1+r)^2}{(1+r)^T - 1} \quad (4-3)$$

$$C_{O\&M,a} = C_{O\&M,f} + C_{O\&M,v} * cap \quad (5-3)$$

$$C_{R,a} = CRF * \sum_{k=1}^r (1+i)^{-kt} * \left(\frac{C_R * cap}{\eta_{sys}} \right) \quad (6-3)$$

$$C_{DR,a} = C_{DR} * \frac{i}{(1+i)^T - 1} \quad (7-3)$$

در رابطه ۳-۶، η_{sys} راندمان کلی سیستم ذخیره ساز می باشد. شکل ۳-۱۱ توزیع توان در یک سیستم ذخیره ساز نوعی و مولفه های تلفات آن ها را نمایش می دهد [۲۴]. در این رابطه کلیه مولفه های تلفات مربوط به شارژ و دشارژ و تلفات مربوط به بخش ذخیره سازی شامل دشارژ خودبخودی^۱ و عمق دشارژ^۲، در بازه کل سیستم لحاظ شده است. لیست علائم و پارامترهای اختصاری در جدول ۳-۱ ارائه گردیده است.



جدول ۳-۱: علائم و پارامترهای اختصاری محاسبات هزینه یابی چرخه عمر

Nomenclature		
C_{BOP}	cost of balance of plant (€/kW)	$C_{R,a}$ annualized replacement costs (€/kW-yr)
C_{cap}	total capital costs per unit of power rating (€/kW)	C_{stor} cost of storage section (€/kWh)
$C_{cap,a}$	annualized value of total capital costs (€/kW-yr)	C_{VOM} variable operational and maintenance costs (€/kWh)
C_{DR}	disposal and recycling costs (€/kW)	E_{in} input energy in one cycle (kWh)
$C_{DR,a}$	annualized disposal and recycling costs (€/kW-yr)	E_{out} output energy in one cycle (kWh)
$C_{FOM,a}$	fixed operational and maintenance costs (€/kW-yr)	h discharge time (h)
$C_{LCC,a}$	annualized life cycle costs (€/kW-yr)	i interest rate (-)
$C_{O\&M,a}$	annualized operational and maintenance costs (€/kW-yr)	n number of discharge cycles per year
C_{PCS}	cost of power conversion system (€/kW)	r number of replacements
C_R	replacement costs (€/kWh)	t replacement period (yr)
		T lifetime (yr)
		η_{sys} overall efficiency of storage system (%)

در ادامه آنالیز هزینه چرخه عمر فن آوری ذخیره ساز فلاپیول با در نظر گرفتن هزینه های نصب و راه اندازی، هزینه نگهداری و جایگزینی تجهیزات مرتبط با ذخیره ساز فلاپیول بررسی می گردد.

¹ self-discharge

² Depth of Discharge(DOD)

۳-۵-۱ محاسبات هزینه یابی چرخه عمر ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا و سرعت پایین

این هزینه شامل کلیه هزینه‌هایی است که باید صرف خرید، نصب و تحویل واحد ذخیره ساز انرژی می‌باشد. مولفه‌های هزینه‌ای TCC در جدول (۳-۲) آمده است.

جدول ۳-۲: خلاصه مولفه‌های هزینه‌ای TCC

واحد	توضیح	مولفه‌های هزینه‌ای TCC
€/kw	هزینه مبدل‌های الکترونیک قدرت، یکسوساز، توربین، پمپ و...	مولفه هزینه بخش‌های تبدیل انرژی (PCS ¹)
€/kwh	هزینه باتری، دیسک دوار، مخزن آب و...	مولفه هزینه بخش مربوط به ذخیره سازی انرژی
€/kw یا €/kwh	هزینه زمین، نصب و احداث بنا، سیستم مانیتورینگ و کنترل، مدارات حفاظتی، ترانسوفورماتور، پمپ خلاء و...	مولفه هزینه‌ای BOP

مقدار TCC می‌تواند بصورت پریونت بر حسب توان خروجی ذخیره ساز محاسبه گردد. رابطه کلی محاسبه TCC به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$C_{cap} = C_{PCS} + C_{BOP} + C_{stor} \times h (\text{€/KW}) \quad (۳-۸)$$

در این رابطه h زمان شارژ و دشارژ می‌باشد. C_{cap} بر حسب €/kwh برای هر تکنولوژی ذخیره ساز قابل محاسبه می‌باشد. در گام اول $C_{cap,a}$ (هزینه TCC سالانه)، بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$C_{cap} = C_{PCS} + C_{BOP} + C_{stor} \times h \left(\frac{\text{€}}{KW} \right) \quad (۳-۹)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \quad (۳-۱۰)$$

$$C_{cap,a} = TCC \times CRF \left(\frac{\text{€}}{KW} - yr \right) \quad (۳-۱۱)$$

¹ Power conversion system

بر اساس ارزش فعلی پول، مقدار ضریب بازگشت سرمایه (CRF^1) بر حسب نرخ بهره (i) و طول عمر ذخیره ساز (T) محاسبه می‌گردد. هزینه کل بهره برداری و نگهداری سالانه ($C_{O\&M,a}$) می‌تواند بر اساس رابطه زیر محاسبه گردد:

$$C_{O\&M,a} = C_{FOM,a} + C_{VOM} \times n \times h \left(\frac{\text{€}}{KW} - yr \right) \quad (12-3)$$

که در این رابطه $C_{Fo\&M,a}$ هزینه بهره برداری و نگهداری سالانه ثابت، C_{vom} هزینه بهره برداری متغیر سالانه و n تعداد سیکل‌های دشارژ در یک سال می‌باشد. هزینه برق و هزینه سوخت می‌تواند جزء مولفه متغیر بهره برداری و نگهداری (C_{vom}) در نظر گرفته شود. برای ذخیره سازهای انرژی که قابلیت تعویض دارند، هزینه جایگزینی آینده (CR) بر حسب $\text{€}/kwh$ و سیکل تعویض t در هر سال باید مشخص می‌گردد. هزینه سالانه جایگزینی ($C_{R,a}$) بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$C_{R,a} = CRF \times \sum_{K=1}^r (1+i)^{-kt} \times \left(\frac{C_R \times h}{\eta_{sys}} \right) \left(\frac{\text{€}}{KW} - yr \right) \quad (13-3)$$

که در این رابطه r تعداد جایگزینی اجزاء ذخیره ساز در مدت زمان طول عمر ذخیره سازی باشد. لازم است تا زمان دشارژ (h) و راندمان کلی سیستم ذخیره ساز (η_{sys}) برای یک سیکل کامل در شرایط عمق دشارژ نامی مشخص باشد. همانگونه که قبلاً ذکر شد کلیه تلفات در مرحله شارژ و دشارژ و تلفات دیگر مانند دشارژ خودبخودی در پارامتر η_{sys} در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌های دفع و بازیافت^۲ (CDR) بطور معمول در محاسبه LCC صرفنظر می‌شود. هزینه دفع و بازیافت سالانه ($C_{DR,a}$) بر اساس رابطه (۶۸-۲) به صورت تابعی از نرخ بهره و طول عمر قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_{DR,a} = C_{DR} \times \frac{i}{(1+i)^T - 1} \left(\frac{\text{€}}{KW} - yr \right) \quad (14-3)$$

هزینه‌های سالانه LCC (ALCC)^۳ سیستم‌های ذخیره ساز انرژی ($C_{LCC,a}$) بر اساس رابطه (۱۵-۳) محاسبه می‌گردد.

$$+C_{O\&M,a} + C_{R,a} + C_{DR,a} \left(\frac{\text{€}}{KW} - yr \right) C_{LCC,a} = C_{cap,a} \quad (15-3)$$

هزینه برابر شده توان الکتریکی^۴ (LCOE) تحویلی توسط سیستم‌های ذخیره ساز انرژی را می‌توان بر اساس رابطه زیر و با دانستن تعداد ساعتهای کار سالانه ذخیره ساز محاسبه نمود.

$$LCOE = \frac{ALCC}{\text{yearly operating hours}} = \frac{C_{LCC,a}}{n \times h} \left(\frac{\text{€}}{KWh} \right) \quad (16-3)$$

اگر هزینه برق در مرحله شارژ ذخیره ساز را از LCOE کسر گردد، هزینه خالص ذخیره سازی (LCOS) بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

¹ Capital recovery factor

² Disposal and recycling costs

³ Annualized LCC costs

⁴ Levelized cost of electricity

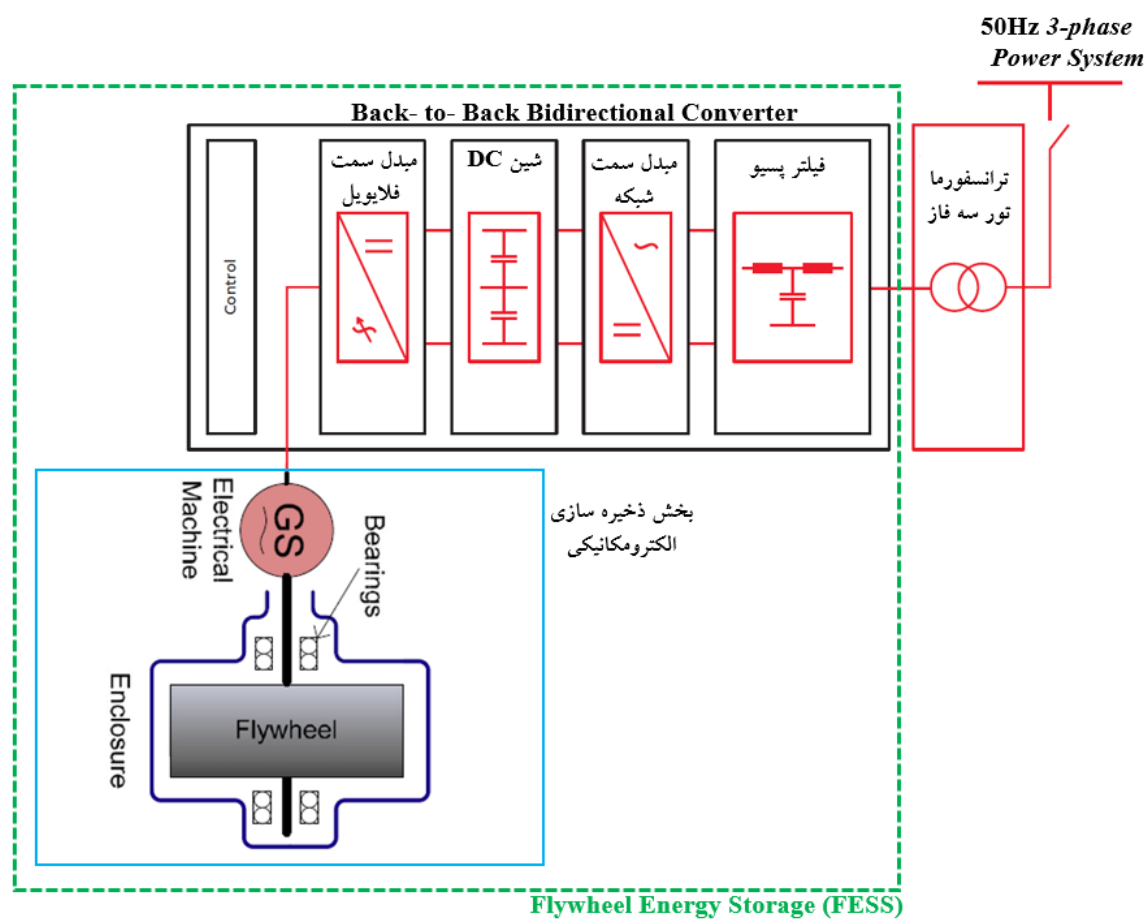
$$LCOS = LCOE - \frac{\text{price of charging power}}{\text{overall efficiency}} \left(\frac{\text{€}}{\text{KWh}} \right) \quad (17-3)$$

همانگونه که در روابط فوق نیز نشان داده شده زمان شارژ و دشارژ یکی از پارامترهای تعیین کننده در محاسبه شاخص های هزینه ایی ذخیره ساز می باشد. جدول ۳-۲ مدت زمان شارژ و دشارژ ذخیره ساز انرژی برای کاربردهای مختلف جبران سازی فرکانس را نمایش می دهد. برای کاربرد جبران سازی اغتشاشات فرکانس محدوده زمانی در محدوده زمانی چند دقیقه می باشد.

جدول ۳-۲: مقایسه زمان شارژ و دشارژ ذخیره ساز فلاپیول در کاربردهای مختلف

کاربرد فلاپیول	Time at max power (min)	Total operating time(min)
Frequency response	۰/۵	۱۴/۴
Frequency regulation	۴/۶	۱۴/۸
Spinning reserve	۳۵	۳۵

در گام بعدی، پس از گردآوری و آنالیز داده های هزینه ایی ذخیره ساز فلاپیول و تطبیق آن با امکانات ساخت داخل، ضرائب مولفه های هزینه ایی مطابق جدول ۳-۶ ارائه گردیده است. نتایج بررسی ها نشان می دهد داده های موجود در ارتباط با مولفه های هزینه ایی ذخیره ساز فلاپیول در مراجع مختلف متفاوت می باشد. بر اساس نتایج بدست آمده در مرحله دوم پروژه، بومی سازی و تجاری سازی ذخیره ساز فلاپیول در حوزه کیفیت توان (کاربردهای کنترل فرکانس) و انرژی های تجدید پذیر برای اولویت بالا می باشد. بر این اساس در این مرحله سعی شده تا مولفه های گردآوری شده برای نمونه های تجاری موجود مورد کاربرد در تنظیم فرکانس گردآوری گردد. پس از بررسی مشخصات فنی مورد نیاز ذخیره ساز فلاپیول برای کاربرد کیفیت توان و انرژی های تجدید پذیر و همچنین بررسی نمونه های تجاری موجود، زیر بخشهای مورد نیاز و مشخصات فنی ذخیره ساز فلاپیول جهت تجاری سازی و بومی سازی این محصول در جدول شکل ۳-۱۲ و جدول ۳-۳ و ۳-۴ ارائه گردیده است.



شکل ۱۲-۳: اجزاء کلی ذخیره ساز فلیویل

جدول ۳-۳: مشخصات فنی ذخیره ساز فلاپیول

دیف	عنوان	High power	Power & energy
	توان نامی (kw)	۲۲۵	۱۵۰
	ظرفیت انرژی (kwh) در حالت شارژ کامل	۱۵	۳۰
	زمان دشارژ در توان نامی (دقیقه)	۴	۱۲
	تلفات آماده به کار (MWh/MW/hour)		۰.۰۳
	سرعت پاسخ در بار نامی		<1 sec
	ولتاژ ورودی (ولت)		۳- phase ۲۸۰ v
	راندمان شارژ و دشارژ (round trip efficiency)		۸۵٪
	محدوده سرعت کاری		۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه (سرعت نامی ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه)
	محدوده دمایی		Transport -۴۰ to +۷۰ °C Storage -۴۰ to +۷۰ °C Operation -۳۰ to +۴۰ °C
۰	سطح رطوبت قابل تحمل		۹۵٪
۱	فشار محفظه		< ۱ millitorr
۲	نوع دیسک		کامپوزیت
۳	طول عمر (سال)		۲۰ (معادل ۱۰۰۰۰۰ مرتبه دشارژ با عمق دشارژ (DOD) ۱۰۰٪)
۴	نرخ های افزایش و کاهش توان خروجی (ramp rate) در توان نامی (میلی ثانیه)		۱۰۰
۵	شرایط نصب		نصب زیر زمین
۶	حداکثر ابعاد ذخیره ساز		۱۲۰*۱۲۰*۱۶۰ cm
۷	سطح نویز صوتی		۷۰ dbA
• قابلیت استفاده مازولار برای سطوح توان و انرژی دلخواه • قابلیت مانیتورینگ وضعیت ذخیره ساز فلاپیول			

جدول ۴-۳: مشخصات فنی مبدل^۱ BTB مورد استفاده در ذخیره ساز فلاپویل

ردیف	پارامتر	مقادیر
۱	توان ظاهری مبدل ها	۲۵۰ کیلو ولت آمپر (این مقدار پیشنهادی بوده و بر حسب نیاز در پروسه طراحی می تواند تغییر کند)
۲	ولتاژ ترمینال ورودی	۶۰۰-۳۸۰ ولت با $\pm 10\%$
۳	فرکانس ورودی	۵۰ ± 3 Hz / ۶۰ ± 3 Hz
۴	نوع حفاظت	اضافه جریان اتصال کوتاه قطع فاز اتصال به زمین اضافه ولتاژ کاهش ولتاژ اضافه دما برای درایو حفاظت اضافه بار قفل شفت برای موتور عدم تعادل بار قطع بار قطع فاز
۵	درجه حفاظتی محفظه	حداقل IP۵۵
۶	حداکثر سطح نویز صوتی	۶۰ dBA
۷	ضریب قدرت	بیش از ۹۵٪ برای بار بیشتر از ۲۰٪
۸	راندمان مبدل ها	بیش از ۹۶٪ درصد تحت بار نامی
۹	هارمونیک مجاز جریان سمت شبکه	۳٪ Max (مطابق با الزامات IEC۵۱۹)
۱۰	نوع سیستم خنک سازی	Air cooling with enclosed cabinet
۱۱	محدوده های مجاز حرارتی	Transport -۴۰ to +۷۰ °C Storage -۴۰ to +۷۰ °C Operation -۳۰ to +۴۰ °C
۱۲	پروتکل های ارتباطی مورد نیاز	Field bus interface: EtherCAT, PROFINET IO, PROFIBUS-DP, CANopen and Modbus, ControlNet, InterBus-S, DeviceNet Ethernet interface: Ethernet interface with PC browser is included Control tool link: Optical DDCS communication link for communication with PC tools as standard
۱۳	تحمل اضافه بار	۱۵۰٪ حداکثر ۴ دقیقه، حالت گذرا ۲۵۰٪
۱۴	حداکثر رطوبت	۹۵ درصد
۱۵	سازگاری مغناطیسی	مطابق با استاندارد EN ۶۱۸۰۰-۳

در مرحله اول محاسبات هزینه یابی چرخه عمر برای ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا انجام می گردد. برای این منظور ضرائب هزینه ایی و پارامترهای اولیه مطابق جدول ۳-۵ تعیین گردیده است. همانگونه که قبلا نیز ذکر گردید این پارامترها بر اساس داده های نمونه های تجاری ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا برای کاربرد تنظیم فرکانس تنظیم گردیده است. همچنین نرخ تنزیل، چرخه عمر ذخیره ساز، تعداد سیکل دشارژ در سال، تعداد و فاصله زمانی بین تعویض تجهیزات و

¹ Back-to-Back

ادوات مرتبط با ذخیره ساز در این جدول ارائه شده است.

جدول ۵-۳: مولفه های هزینه ایی و پارامترهای آنالیز هزینه چرخه عمر ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا

مقدار متوسط هزینه		المان‌های هزینه
۴۰۰		${}^a C_{PCS}(\frac{\text{€}}{kW})$
۱۱۵۲۰		$C_{stor}(\frac{\text{€}}{kWh})$
۱۰۰۰		$C_{CBOP}(\frac{\text{€}}{kWh})$
۵/۶		$C_{O\&M,f}(\frac{\text{€}}{kW - yr})$
۰/۴		$C_{O\&M,v}(\frac{\text{€}}{MWh})$
۱۷۰		${}^b C_R(\frac{\text{€}}{kW})$
۳		${}^d C_{DR}(\frac{\text{€}}{kW})$
۰/۸۶		overall η
i	نرخ تنزیل واقعی	٪۱۰
T	عمر ذخیره ساز به سال	۲۰
n	تعداد سیکل دشارژ در سال	$e^{۲۶۲۰۰۰}$
t	پریود جابجایی ادوات به سال	۴
r	تعداد جایگزینی ادوات در طول عمر ذخیره ساز	۵
h	مدت زمان دشارژ (دقیقه)	۱۲
a = شامل هزینه اورهال نیز می باشد		
b = هزینه مربوط به تعویض هر ۴ سال است		
d = هزینه دفع و بازیافت		
e = برای کاربرد تنظیم فرکانس نرخ شارژ و دشارژ ۳۰ بار در ساعت فرض شده است		

CPCS=	400	
CBOP=	1000	
CSTOR=	11520	
h=	0.2	
CCAP=	3704	$C_{cap} = C_{PCS} + C_{BOP} + C_{stor} * h \text{ (€/kW)}$
i=	0.1	
T	20	
CRF=	3.203571404	$CRF = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1}$
CCAP,a=	11866.02848	$C_{cap,a} = TCC \times CRF \text{ (€/kW - yr)}$
CFOM,a=	5.6	
CVOM	0.4	
n	262000	
CO&Ma=	20965.6	$C_{O\&M,a} = C_{FOM,a} + C_{VOM} \times n \times h \text{ (€/kW - yr)}$
efficiency=	0.85	
CR=	170	
t=	5	
r=	4	
Cra=	128.9712501	$C_{R,a} = CRF \times \sum_{k=1}^r (1+i)^{-kt} \times \left(\frac{C_R \times h}{\eta_{sys}} \right) \text{ (€/kW - yr)}$
CDR=	3	
CDR,a=	0.052378874	$C_{DR,a} = C_{DR} \times \frac{i}{(1+i)^T - 1} \text{ (€/kW - yr)}$
CLCC,a=	32960.65211	$C_{LCC,a} = C_{cap,a} + C_{O\&M,a} + C_{R,a} + C_{DR,a} \text{ (€/kW - yr)}$
LCOE=	0.629020078	$LCOE = \frac{ALCC}{\text{yearly operating hours}} = \frac{C_{LCC,a}}{n \times h} \text{ (€/kWh)}$
PRICE OF CHARGING POWER	0.05	
LCOS=	0.570196549	$LCOS = LCOE - \frac{\text{price of charging power}}{\text{overall efficiency}} \text{ (€/kWh)}$

شکل ۱۳-۳: محاسبات هزینه یابی چرخه عمر فلاپیول سرعت بالا

در ادامه بر اساس روابط ۳-۸ تا ۳-۱۷ کلیه محاسبات آنالیز هزینه چرخه عمر در نرم افزار اکسل محاسبه و نتایج آنالیز در شکل ۱۳-۳ نمایش داده شده است.

از آنجاییکه طراحی ذخیره ساز فلاپیول محدوده وسیعی از انواع ماشین الکتریکی و فن آوری های پیشرفته (مانند مواد کامپوزیتی، یاتاقان مغناطیسی و...) را در بر می گیرد، لازم است تا علاوه بر فلاپیول های سرعت بالا، آنالیز LCC برای ذخیره ساز نوع سرعت پایین نیز انجام گردد. به همین منظور محاسبات هزینه یابی چرخه عمر برای ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین تکرار شده است. پارامترهای هزینه ایی برای این نوع از ذخیره سازها در جدول ۳-۶ آورده شده است. پارامتر تعداد سیکلها و مدت زمان دشارژ متناسب با این نوع از ذخیره سازها تنظیم شده است. نتایج محاسبات هزینه یابی چرخه عمر برای ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین در شکل ۱۳-۳ ارائه شده است. همانگونه که انتظار می رفت در ذخیره سازهای فلاپیول سرعت پایین به دلیل استفاده دیسک فولادی و طراحی سرعت پایین اجزاء دوار هزینه های نصب و راه اندازی و هزینه های تعمیر و نگهداری کاهش قابل ملاحظه ایی خواهد داشت. البته در این حالت راندمان پایین ذخیره ساز و دشارژ خودبخودی می تواند موجب افزایش هزینه های بهره برداری می گردد.

جدول ۳-۶: مولفه های هزینه ایی و پارامترهای آنالیز هزینه چرخه عمر ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین

مقدار متوسط هزینه	المان های هزینه
۳۰۰	$C_{PCS} \left(\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right)$
۸۶۵	$C_{stor} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right)$

$C_{CBOP}(\frac{€}{kWh})$		۸۰
$C_{O\&M,f}(\frac{€}{kW - yr})$		۳
$C_{O\&M,v}(\frac{€}{MWh})$		۰/۱
${}^b C_R(\frac{€}{kW})$		۱۷۰
${}^d C_{DR}(\frac{€}{kW})$		۳
overall η		۰/۷۵
i	نرخ تنزیل واقعی	٪۱۰
T	عمر ذخیره ساز به سال	۲۰
n	تعداد سیکل دشارژ در سال	e ۲۶۲۰۰۰
t	پریود جابجایی ادوات به سال	۴
r	تعداد جایگزینی ادوات در طول عمر ذخیره ساز	۵
h	مدت زمان دشارژ (دقیقه)	۲
a = شامل هزینه اورهال نیز می باشد b = هزینه مربوط به تعویض هر ۴ سال است d = هزینه دفع و بازیافت e = برای کاربرد تنظیم فرکانس نرخ شارژ و دشارژ ۳۰ بار در ساعت فرض شده است		

CPCS=	300	
CBOP=	80	
CSTOR=	865	
h=	0.03	
CCAP=	405.95	$C_{cap} = C_{PCS} + C_{BOP} + C_{stor} * h \text{ (€/kW)}$
i=	0.1	
T	20	
CRF=	3.203571404	$CRF = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1}$
CCAP,a=	1300.489812	$C_{cap,a} = TCC \times CRF \text{ (€/kW - yr)}$
CFOM,a=	3	
CVOM	0.1	
n	262000	
CO&Ma=	789	$C_{O\&M,a} = C_{FOM,a} + C_{VOM} \times n \times h \text{ (€/kW - yr)}$
efficiency=	0.75	
CR=	170	
t=	5	
r=	4	
Cra=	21.92511251	$C_{R,a} = CRF \times \sum_{k=1}^r (1+i)^{-kt} \times \left(\frac{C_R \times h}{\eta_{sys}} \right) \text{ (€/kW - yr)}$
CDR=	3	
CDR,a=	0.052378874	$C_{DR,a} = C_{DR} \times \frac{i}{(1+i)^T - 1} \text{ (€/kW - yr)}$
CLCC,a=	2111.467303	$C_{LCC,a} = C_{cap,a} + C_{O\&M,a} + C_{R,a} + C_{DR,a} \text{ (€/kW - yr)}$
LCOE=	0.268634517	$LCOE = \frac{ALCC}{\text{yearly operating hours}} = \frac{C_{LCC,a}}{n \times h} \text{ (€/kWh)}$
PRICE OF CHARGING POWER	0.05	
LCOS=	0.20196785	$LCOS = LCOE - \frac{\text{price of charging power}}{\text{overall efficiency}} \text{ (€/kWh)}$

شکل ۱۴-۳: محاسبات هزینه یابی چرخه عمر فلاپیول سرعت پایین

۳-۵-۲ هزینه یابی چرخه عمر ذخیره ساز ابرخازن

با هدف مقایسه ذخیره ساز فلاپیول با ذخیره ساز ابر خازن برای کاربرد جبران‌سازی فرکانس ، محاسبات هزینه یابی چرخه عمر برای این نوع از ذخیره ساز انجام شده است. برای ذخیره ساز فلاپیول و ذخیره ساز ابر خازن ، بیشترین مقدار نسبت E/P ، به ترتیب ۰/۲۵ ساعت و ۰/۱۲۵ ساعت می باشد. این مقادیر نشان می دهد ابر خازن ها اصولاً برای کاربردهایی که زمان دشارژ در حد ثانیه باشد مورد کاربرد می باشد. مقادیر ضرائب هزینه ایی و پارامترهای آنالیز LCC ذخیره ساز ابر خازن در جدول ۳-۷ آورده شده است. نتایج محاسبات هزینه یابی چرخه عمر در شکل ۳-۱۴ نمایش داده شده است.

جدول ۳-۷: مولفه های هزینه ایی و پارامترهای آنالیز هزینه چرخه عمر ذخیره ساز ابر خازن

مقدار متوسط هزینه	المان‌های هزینه
۷۰۰	${}^a C_{PCS} \left(\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right)$

$C_{stor}(\frac{€}{kWh})$		۱۰۰۰۰
$C_{CBOP}(\frac{€}{kWh})$		۲۰۰
$C_{O\&M,f}(\frac{€}{kW - yr})$		۲
$C_{O\&M,v}(\frac{€}{MWh})$		۰/۰۰۳
${}^b C_R(\frac{€}{kW})$		۱۰۰۰۰
${}^d C_{DR}(\frac{€}{kW})$		۳
overall η		۰/۹۲
i	نرخ تنزیل واقعی	٪۱۰
T	عمر ذخیره ساز به سال	۲۰
n	تعداد سیکل دشارژ در سال	e ۲۶۲۰۰۰
t	پریود جابجایی ادوات به سال	۱۶
r	تعداد جایگزینی ادوات در طول عمر ذخیره ساز	۱
h	مدت زمان دشارژ (دقیقه)	۱
a = شامل هزینه اورهال نیز می باشد		
b = هزینه مربوط به تعویض هر ۴ سال است		
d = هزینه دفع و بازیافت		
e = برای کاربرد تنظیم فرکانس نرخ شارژ و دشارژ ۳۰ بار در ساعت فرض شده است		

CPCS=	700	
CBOP=	200	
CSTOR=	10000	
h=	0.0166	
CCAP=	1066	$C_{cap} = C_{PCS} + C_{BOP} + C_{stor} * h \quad (€ / kW)$
i=	0.1	
T	20	
CRF=	3.203571404	$CRF = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1}$
CCAP,a=	3415.007117	$C_{cap,a} = TCC \times CRF \quad (€ / kW - yr)$
CFOM,a=	2	
CVOM	0.003	
n	262000	
CO&Ma=	15.0476	$C_{O\&M,a} = C_{FOM,a} + C_{VOM} \times n \times h \quad (€ / kW - yr)$
efficiency=	0.92	
CR=	10000	
t=	16	
r=	1.25	
Cra=	581.7724868	$C_{R,a} = CRF \times \sum_{k=1}^r (1+i)^{-kt} \times \left(\frac{C_R \times h}{\eta_{sys}} \right) \quad (€ / kW - yr)$
CDR=	3	
CDR,a=	0.052378874	$C_{DR,a} = C_{DR} \times \frac{i}{(1+i)^T - 1} \quad (€ / kW - yr)$
CLCC,a=	4011.879583	$C_{LCC,a} = C_{cap,a} + C_{O\&M,a} + C_{R,a} + C_{DR,a} \quad (€ / kW - yr)$
LCOE=	0.922440813	$LCOE = \frac{ALCC}{\text{yearly operating hours}} = \frac{C_{LCC,a}}{n \times h} \quad (€ / kWh)$
PRICE OF CHARGING POWER	0.05	
LCOS=	0.868092987	$LCOS = LCOE - \frac{\text{price of charging power}}{\text{overall efficiency}} \quad (€ / kWh)$

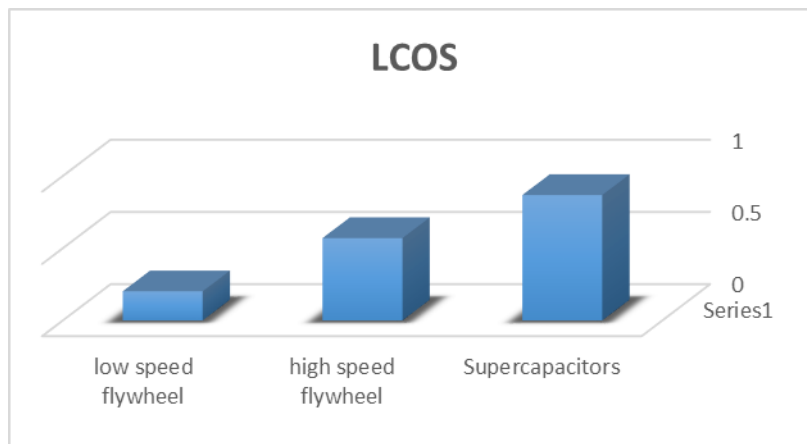
شکل ۱۵-۳: محاسبات هزینه یابی چرخه عمر ابر خازن

۳-۶ نتیجه گیری

در این فصل ابتدا وضعیت مارکتینگ بازار ذخیره ساز فلاپیول و میزان رشد این بازار در سطح جهانی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به منظور مقایسه ذخیره ساز فلاپیول با ذخیره ساز ابر رسانا از آنالیز هزینه یابی چرخه عمر استفاده شده است. هدف از انجام این آنالیز مقایسه هزینه ایی ذخیره ساز فلاپیول با ذخیره ساز ابر رسانا برای کاربرد جبران‌سازی فرکانس شبکه بوده است. از دیدگاه مالکیتی شاخص LCC یکی از معیارهای مناسب جهت مقایسه و ارزیابی انواع مختلف ذخیره ساز انرژی برای یک کاربرد خاص می باشد. این شاخص بر اساس آنالیز کلیه هزینه های مربوط ذخیره ساز انرژی در کل چرخه عمر می باشد. این هزینه شامل مجموع هزینه نصب و راه اندازی، هزینه های بهره برداری، نگهداری، جایگزینی و بازیافت بصورت هزینه یابی سالانه می باشد (€/kw yr). خلاصه نتایج آنالیز هزینه یابی چرخه عمر برای سه ذخیره ساز انرژی فلاپیول سرعت پایین، فلاپیول سرعت بالا و ذخیره ساز ابر خازن در جدول ۳-۸ ارائه شده است.

جدول ۳-۸: مقایسه نتایج هزینه های TCC و LCC ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و سرعت پایین

ذخیره ساز ابر خازن	فلاپیول ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین	فلاپیول ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا	المان‌های هزینه
۱۰۶۶	۴۰۵/۹۵	۳۷۰۴	C_{cap}
۳۴۱۵	۱۳۰۰/۴۸	۱۱۸۶۶	$C_{cap,a}$
۱۵/۰۴۷۵	۷۸۹	۲۰۹۶۵	$C_{O\&M,a}$
۵۸۱/۷۷۲	۲۱/۹۲۵	۱۲۸/۹۷	$C_{R,a}$
۰/۰۵۲۳۷	۰/۰۵۲۳۷	۰/۰۵۲۳	$C_{DR,a}$
۴۰۱۱/۸۷۹	۲۱۱۱/۴۶	۳۲۹۶۰/۶۵	$C_{LCC,a}$
۰/۹۲۲۴	۰/۲۶۸۶	۰/۶۲۹	$LCOE$
۰/۸۶۸۰	۰/۲۰۱۹	۰/۵۷۰	$LCOS$



شکل ۱۶-۳: مقایسه شاخص LCOS برای ذخیره‌سازهای فلاپیول سرعت پایین، فلاپیول سرعت بالا و ابر خازن

مقایسه شاخص‌های برابر شده توان الکتریکی (LCOE) و هزینه خالص ذخیره‌سازی (LCOS) برای ذخیره‌سازهای فلاپیول سرعت پایین، فلاپیول سرعت بالا و ابر خازن در شکل ۳-۱۵ نمایش داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد ذخیره‌ساز فلاپیول سرعت پایین از نظر هزینه خالص ذخیره‌سازی بیشترین توجه پذیری را نسبت به دو نوع دیگر دارد. همچنین ذخیره‌ساز ابرخازن نسبت به هر دو نوع ذخیره‌ساز فلاپیول سرعت پایین و سرعت بالا دارای هزینه خالص بیشتری می‌باشد. به این ترتیب برای کاربرد تنظیم فرکانس ذخیره‌ساز فلاپیول گزینه دارای اولویت می‌باشد.

فصل چهارم

مدل کسب و کار کاربرد ذخیره ساز فلایویل برای کاربرد تنظیم فرکانس

۴-۱ مقدمه

استفاده از ذخیره ساز فلاپیول برای کاربرد تنظیم فرکانس یکی از موارد جذاب کاربرد این نوع از ذخیره سازها می باشد. شکل ۴-۱ سلسه مراتب پاسخ گویی به یک اغتشاش فرکانسی شبکه را نمایش می دهد. در مراحل اولیه بروز اغتشاش در فرکانس ترمینال ژترانور (یا سرعت رتور ژتراتور)، بعد از اثر گذاری آنی اینرسی رتور ژتراتور، سیستم کنترل اولیه در سریع ترین زمان ممکن عمل جبران سازی را بطور اتوماتیک انجام می دهد. در گام بعد کنترل ثانویه و ثالثیه (رزرو چرخان و رزرو غیر چرخان) وارد عمل می شود. به طور کلی انواع خدمات جانبی کنترل فرکانس را می توان به سه دسته زیر تقسیم بندی نمود [۳۶-۳۸]:

- سرویس خدمات رگولاسیون فرکانس^۱: سرویسی جهت حذف انحرافات فرکانس جزئی که ناشی از عملکرد نرمال شبکه قدرت می باشد.

- سرویس خدمات رزرو حوادث اتفاقی^۲: ارائه خدمات کنترل فرکانس در شرایط وقع رویداد های غیر معمول و انحراف شدید فرکانس شبکه مانند خارج شدن ناگهانی یک نیروگاه بزرگ از شبکه

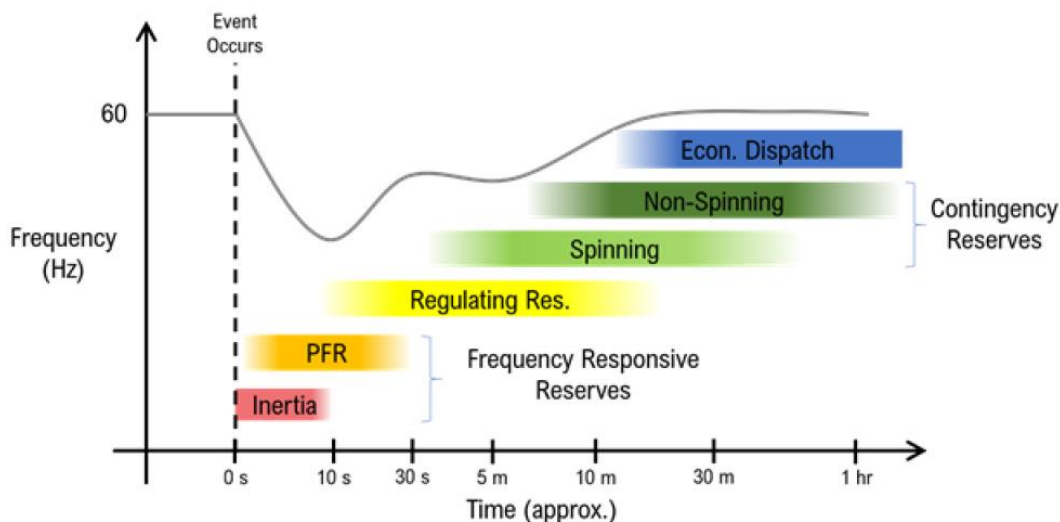
- سرویس خدمات کنترل نرخ تغییرات فرکانس^۳ (RoCoF): ارائه خدمات کنترل فرکانس با هدف محدود کردن نرخ تغییرات فرکانس در چند صد میلی ثانیه اول وقوع حوادث ناگهانی شبکه

همانگونه که در شکل ۴-۱ نمایش داده شده در محدوده زمان پاسخ چند ۱۰ ثانیه تا حدود ۱۵ دقیقه ، رزرو رگولاسیون فرکانس نیز می تواند نقش موثری در بهبود عملکرد سیستم کنترل اولیه داشته باشد [۳۹-۴۰]. بکار گیری ذخیره سازهای انرژی در این محدوده از سیستم کنترل فرکانس مستلزم پاسخ دینامیکی شارژ و دشارژ بالا (ramp rate بالا) و تحمل سیکل های بالای شارژ و دشارژ می باشد. با توجه به مطالعات صورت گرفته در فصل های گذشته، ذخیره ساز فلاپیول ذخیره ساز فلاپیول به دلیل سرعت شارژ و دشارژ بسیار بالا و تحمل سیکل های بسیار بالای شارژ و دشارژ برای این منظور می تواند انتخاب مناسبی باشد. با وجود مشخصات فنی قابل قبول ذخیره ساز فلاپیول، به منظور بومی سازی و توسعه دانش فنی این محصول در داخل کشور (برای کاربرد ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس) لازم است تا مزایای اقتصادی کاربست این فن آوری در این حوزه برای ذی نفعان اصلی مورد ارزیابی قرار گیرد. همانگونه که در شکل ۴-۲ نمایش داده شده، استخراج مدل کسب کار از دو دیدگاه قابل مطالعه و بررسی می باشد. هدف از انجام این مطالعات ارزیابی میزان مزایای اقتصادی حاصل از بکارگیری ذخیره ساز فلاپیول به منظور ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس برای مالکان نیروگاه ها و مدیریت شبکه بر اساس یک مدل کسب و کار می باشد.

¹ Frequency Regulation

² Contingency Reserve

³ Rate of Change of Frequency (RoCoF)



شکل ۱-۴: محدوده زمانی پاسخ جبران‌ساز های فرکانس نیروگاه ها

توجیه پذیری بکارگیری ذخیره ساز فلاویول در زمینه ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس نیازمند بررسی و مقایسه هزینه تمام شده کنترل فرکانس براساس روش کلاسیک تنظیم فرکانس و ذخیره ساز فلاویول می باشد. در بخش بعدی ابتدا هزینه های مستقیم و غیر مستقیم ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس در شبکه برق کشور در غالب یک مدل کسب و کار مورد آنالیز قرار می گیرد.

۲-۴ توجیه پذیری اقتصادی استفاده از ذخیره ساز فلاویول برای کاربرد تنظیم فرکانس

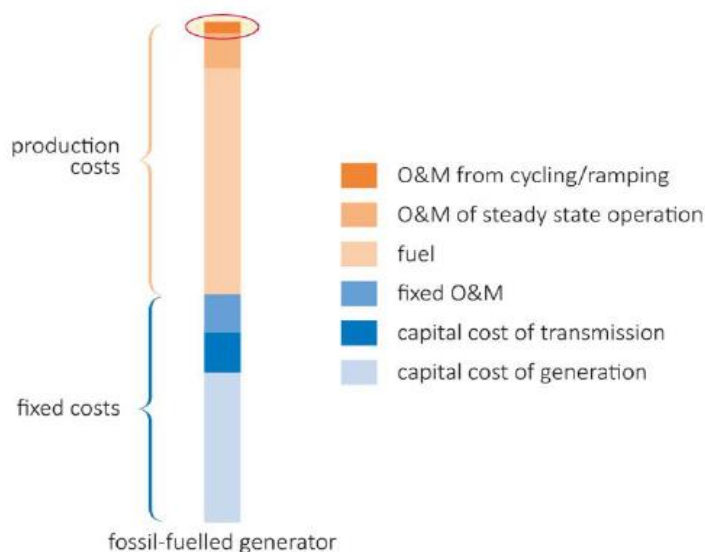
استفاده از فن آوری ذخیره ساز فلاویول برای اهداف کنترل فرکانس در شبکه قدرت سراسری و ریز شبکه ها در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بطوریکه در فصل سوم بررسی گردید طبق محاسبات هزینه یابی چرخه عمر، هزینه خالص ذخیره سازی سالانه برای فلاویول (بخصوص نوع سرعت پایین) نسبت به تکنولوژی رقیب یعنی ابر خازن تا یک چهارم پایین تر می باشد. با وجود این برتری، توجیه پذیری استفاده از این تکنولوژی به عنوان یک جایگزین مناسب بجای رزرو چرخان موضوعی است که برای امکان سنجی بومی سازی این فن آوری برای کنترل فرکانس نیاز به بررسی دقیق دارد. به عبارتی پاسخ به این سوال که استفاده از یک تکنولوژی جبران‌ساز بسیار سریع فرکانس با هزینه سرمایه گذاری هنگفت چه مزایایی را برای مالکین نیروگاه ها و مدیریت شبکه به همراه خواهد داشت. برای این منظور لازم است تا بر اساس مولفه های هزینه ای و درآمدی حاصل از این تکنولوژی در مقایسه با رزرو چرخان مدل اقتصادی در قالب یک بسته سرمایه گذاری مورد آنالیز قرار گرفته و بر این اساس میزان سود سالانه حاصل از این سرمایه گذاری و متعاقبا شاخص های ارزیابی اقتصادی شامل رزس خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و دوره بازگشت این سرمایه گذاری گردد.

محاسبه مولفه های هزینه ای ذخیره ساز فلاویول شامل هزینه نصب و راندازی و هزینه تعمیر و نگهداری در فصل سوم

مورد آنالیز قرار گرفت. در این فصل ابتدا مولفه های هزینه ای تحمیلی به نیروگاه ها در قبال ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس شناسایی می گردد. هدف از انجام این تحقیق برآورد هزینه های سرمایه گذاری و هزینه های تعمیر و نگهداری واحد های نیروگاهی به منظور ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس می باشد.

۴-۲-۱ محاسبه هزینه های ارائه خدمات جانبی تنظیم فرکانس با مشارکت واحد های نیروگاهی

در این بخش پس از مطالعه مراجع و گزارش های ارائه شده در ارتباط با هزینه های تحمیلی به نیروگاه ها در قبال ارائه خدمات جانبی، مولفه های هزینه ایی آنالیز می گردد. شکل ۴-۲ مولفه های هزینه تحویل انرژی (DCOE)^۱ بر اساس نیروگاه های با سوخت فسیلی و مقایسه تقریبی این هزینه ها را نسبت به یکدیگر نمایش می دهد [۳۹].



شکل ۴-۲: مولفه های هزینه ایی تامین انرژی با استفاده از نیروگاه های سوخت فسیلی (lew and others 2013)

در ادامه هر یک از مولفه های هزینه ایی مرتبط با ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس توسط نیروگاه ای با سوخت فسیلی مورد بررسی قرار می گیرد.

¹ Delivered cost of energy

۴-۲-۱-۱ هزینه نصب و راه اندازی

از آنجاییکه در حال حاضر ارائه خدمات کنترل فرکانس در داخل کشور با استفاده از ظرفیت رزرو چرخان انجام میشود، که عمدتاً از نوع نیروگاه های نوع گازی میباشد، لذا در ادامه هزینه احداث زیر ساخت های نیروگاهی به منظور ارائه خدمات کنترل فرکانس بر حسب یورو یا دلار بر کیلو وات تعیین می گردد. طبق داده های گردآوری شده در جدول ۴-۱، هزینه نصب و راه اندازی (TCC) انواع نیروگاه ارائه شده است. برای نیروگاه های گازی این هزینه حدود ۱۰۰۰ یورو بر کیلو وات میباشد [۳۹].

جدول ۴-۱: هزینه نصب و راه اندازی (TCC) انواع نیروگاه ها و مقادیر تخمینی تا سال ۲۰۵۰

Energy type	Capital cost, €/kW (2010)	2010	2020	2030	2040	2050
Coal	Hard coal – Advanced/Super C - w/o CCTS ¹	1300	1300	1300	1300	1300
	Hard coal – Advanced/Super C – w CCTS	2700	2624	2552	2484	2420
	Hard coal – Sub C – w/o CCTS	1200	1200	1200	1200	1200
	Hard coal – Sub C – w CCTS	2600	2524	2452	2384	2320
	Lignite – Advanced/BoA w/o CCTS	1500	1500	1500	1500	1500
	Lignite – Advanced/BoA w CCTS	2900	2824	2752	2684	2620
	Hard coal – IGCC – w/o CCTS	1800	1800	1800	1800	1800
	Hard coal – IGCC – w CCTS	3200	3124	3052	2984	2920
Gas	Gas combined cycle - w/o CCTS	800	800	800	800	800
	Gas combined cycle – w CCTS	1400	1367	1337	1308	1280
	Gas combustion turbine – w/o CCTS	400	400	400	400	400
	Gas combustion turbine – w CCTS	1000	967	937	908	880
	Gas steam turbine – w/o CCTS	400	400	400	400	400
Oil	Oil combustion turbine – w/o CCTS	400	400	400	400	400
	Oil combustion turbine – w CCTS	400	400	400	400	400
Wind	On-shore	1300	1240	1182	1127	1075
	Off-shore	3000	2742	2506	2290	2093
Solar	PV	1560	750	600	472	425
	CSP	3500	2841	2307	1872	1520
Bio	Biomass	2500	2350	2209	2076	1951
Geo	Geothermal	4200	3775	3392	3049	2740
Hydro	Pump storage or reservoir ²	2000	2000	2000	2000	2000
	Run-of-river	3000	3000	3000	3000	3000
Marine	Wave and tidal	5000	4246	3605	3062	2600
Nuclear	Nuclear generation ³	6000	6000	6000	6000	6000

Acronyms: Super C: Supercritical technology – Sub C: subcritical technology – w/o: without – w: with – CCTS: carbon capture, transport and storage – BoA: Braunkohlekraftwerk mit Optimierter Anlagentechnik (lignite-fired plant with optimised engineering) – IGCC: integrated gasification combined cycle – CSP: Concentrated solar power – PV: Photovoltaics

Footnotes:

1 CCTS costs reported are for 2010 although the technology as yet was not available for commercial application

2 Pump storage is in general more expensive than reservoir storage. Investment cost also depends on storage size

3 Includes decommissioning and waste disposal

۴-۲-۱-۲ هزینه بهره برداری، تعمیر و نگهداری و سایر هزینه ها

تابع هزینه هرکدام از واحدها شامل هزینه تولید، هزینه های مربوط به روشن و خاموش شدن و هزینه مربوط به میزان آمادگی برای رزرو چرخان است. بر اساس اطلاعات به دست آورده از گروه بازار برق، قیمت آمادگی رزرو ۱۸۵۰۰

تومان/مگاوات ساعت است. رابطه زیر این تابع هزینه را بیان می‌کند.

$$\min \left\{ \sum_t \sum_i (F_i(P_{it}) + SU_{it} + SD_{it} + r_{it}^{spin} * 18500) + \sum_t \sum_h (SU_{ht} + F_h(P_{ht}) + r_{ht}^{spin} * 18500) + \sum_t \sum_n (F_n(P_{nt}) + SU_{nt} + SD_{nt} + r_{nt}^{spin} * 18500) + \sum_t \sum_g (F_g(P_{gt}) + SU_{gt} + SD_{gt} + r_{gt}^{spin} * 18500) \right\} \quad (1-2)$$

$$F_i(P_{it}) = a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i \quad (2-2)$$

$$F_n(P_{nt}) = a_n P_{nt}^2 + b_n P_{nt} + c_n \quad (3-2)$$

$$F_g(P_{gt}) = a_g P_{gt}^2 + b_g P_{gt} + c_g \quad (4-2)$$

تابع $F_i(P_{it})$ تابع هزینه مربوط به واحدهای حرارتی است که a_i, b_i, c_i ضرایب مربوط به تابع هزینه واحد i ام هستند. SU_{it} هزینه روشن شدن SD_{it} و هزینه خاموشی هرکدام از واحدهای حرارتی شبکه است. P_{it} توان تولیدی هرکدام از این واحدها در زمان t است. تابع $F_h(P_{ht})$ تابع هزینه مربوط به واحدهای آبی است و SU_{ht} ، هزینه مربوط به روشن شدن واحدهای آبی است. تابع $F_n(P_{nt})$ تابع هزینه مربوط به واحدهای سیکل ترکیبی است که a_n, b_n, c_n ضرایب مربوط به تابع هزینه واحد n ام هستند. SU_{nt} هزینه روشن شدن و SD_{nt} هزینه خاموشی هرکدام از واحدهای سیکل ترکیبی شبکه است. P_{nt} توان تولیدی هرکدام از این واحدها در زمان t است. تابع $F_g(P_{gt})$ تابع هزینه مربوط به واحدهای گازی است که a_g, b_g, c_g ضرایب مربوط به تابع هزینه واحد g ام هستند. SU_{gt} هزینه روشن شدن و SD_{gt} هزینه خاموشی هرکدام از واحدهای گازی شبکه است. P_{gt} توان تولیدی هرکدام از این واحدها در زمان t است. همان‌طور که در روابط مربوط به هزینه تولید هرکدام از واحدها می‌بینیم، این روابط غیرخطی هستند که درنهایت سبب غیرخطی شدن تابع هدف می‌شود. در ادامه هر یک از هزینه‌های تحمیلی بر واحد های نیروگاهی به منظور ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس بررسی می‌گردد.

۳-۱-۲-۴ هزینه‌های تعمیر و نگهداری

با در نظر گرفتن هزینه سوخت و سایر هزینه‌های جانبی قیمت تمام شده برق به ازای هر کیلو وات تقریباً برابر ۵۰۰ تومان در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر هزینه سوخت مصرفی، مشارکت واحدهای نیروگاهی در ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس و آمادگی برای تامین رزرو چرخان هزینه‌هایی را به نیروگاه‌ها تحمیل می‌کند که در ادامه هر یک از این مولفه‌ها به تفکیک بررسی می‌شود. مقادیر متداول هزینه تعمیر و نگهداری انواع واحدهای نیروگاهی بر حسب دلار بر کیلو وات ساعت در جدول ۳-۴ ارائه شده است [۳۹].

جدول ۲-۴: هزینه تعمیر و نگهداری انواع نیروگاه‌ها

Table 3 Typical capital and operating costs for power plants. Note that these costs do not include subsidies, incentives, or costs such as water or air emissions controls (Blumsack, 2014)		
Technology	Capital cost, US\$/kW	Operating cost, US\$/kWh
Pulverised-coal combustion	500–1000	0.02–0.04
Natural gas combustion	400–800	0.04–0.10
Coal gasification combined cycle (IGCC)	1000–15000	0.04–0.08
Natural gas combined cycle (NGCC)	600–1200	0.04–0.10
Wind turbine (includes offshore wind)	1200–5000	<0.01
Nuclear	1200–5000	0.02–0.05
Photovoltaic solar	≥4500	<0.01
Hydroelectric	1200–5000	<0.01

- هزینه فرصت^۱

تامین رزرو چرخان به قیمت استفاده از بخشی از ظرفیت نیروگاه می باشد که می توانست برای مالکین ارزش مالی بیشتری فراهم کند. این مساله منجر به تحمیل هزینه فرصت برای ژنراتورهای مستقل می شود که می توانستند در فرصت های سرمایه گذاری بهتری کارکنند. هزینه فرصت محدود به هزینه های پولی یا مالی نمی شود و هر چیزی که دارای ارزش باشد و از آن صرف نظر شده باشد، می توان به عنوان هزینه فرصت تلقی شود. طبق تعریف هزینه فرصت از دست رفته برابر عایدی سودآورترین انتخاب منهای عایدی حاصل از انتخاب سرمایه گذاری فعلی می باشد. تامین رزرو چرخان نیازمند این است که تعدادی از ژنراتورهای شبکه به صورت جرئی بارگذاری شود که این مساله علاوه بر افزایش تعداد ژنراتورهای برخط، کاهش راندمان کلی تولید را به دلیل بارگذاری پایین نیروگاه ها منجر می گردد. بنابراین هزینه فرصت برای ژنراتورهایی که در تامین رزرو چرخان مشارکت دارند، مابه التفاوت بین درآمد حاصل از فروش برق با حداکثر تعرفه به مشترکین نسبت به فروش همین میزان انرژی به عنوان ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس می باشد [۴۰].

- هزینه مشارکت^۲

نیروگاه های که در تامین رزرو چرخان و تنظیم فرکانس شرکت می کنند، طوری کنترل می شوند تا با توجه به نیاز شبکه با حداکثر دینامیک پاسخ دهند. تامین رزرو بخصوص برای رگولاسیون فرکانس، نیاز به دنبال کنندگی سریع سیگنال کنترل تولید^۳ توسط سیستم گاورنر می باشد. بنابراین می توان گفت واحد های فعال در تامین رزرو همواره در حالت گذارا می باشند. این مساله موجب افزایش هزینه استهلاک و فرسودگی می شود که نتیجه آن کاهش راندمان ژنراتور و نیاز به مصرف سوخت بیشتر می

1 Opportunity cost

2 Movement cost

3 AGC signal

باشد. هزینه رزرو اغلب بر حسب انرژی، MWh بیان می‌شود. برای نمونه در یک ژنراتور با ظرفیت $500MW$ ، ظرفیت توان واقعی و رزرو می‌تواند به ترتیب $400MW$ و $50MW$ در نظر گرفته شود. همانگونه که در شکل ۴-۱ نشان داده شده، منابع مختلف با پاسخ‌های زمان‌های مختلف از سرعت بالا تا سرعت‌های پایین می‌تواند در تامین رزرو مشارکت کنند که عموماً انواع سرعت بالا گرانتر می‌باشند. به منظور مشارکت واحد‌ها در تامین رزرو لازم است تا هر یک از ژنراتورها دارای قابلیت‌ها و مشخصه‌های به شرح زیر باشد [۴۴-۴۰]:

- قابلیت اعلام آمادگی ژنراتورها: یک متغیر لاجیک که بیان‌کننده آمادگی ژنراتور مورد نظر برای مشارکت در تولید رزرو می‌باشد. اینکه ژنراتور مورد نظر دارای تجهیزات ارتباطی برای تولید برنامه ریزی شده تولید فرکانس را دارا می‌باشد.
- قابلیت سنکرون سازی ژنراتورها: یک متغیر لاجیک نشان‌دهنده اینکه ژنراتور رزرو به صورت آنلاین با شبکه سنکرون باشد.
- ظرفیت آزاد (سربار)^۱: اختلاف بین ظرفیت برنامه ریزی شده فعلی با حداکثر ظرفیت واحد یا حداقل سطح تولید آن ژنراتور
- نرخ شیب پاسخ^۲: نشان‌دهنده میزان سرعت افزایش یا کاهش توان خروجی ژنراتور بر حسب MW/h یا درصد از ظرفیت حداکثر در واحد زمان
- زمان شیب^۳: زمانی که طول می‌کشد تا از لحظه ایی که ژنراتور روشن می‌شود تا زمانی که ژنراتور می‌تواند انرژی خواسته شده را در حداقل ظرفیت خود به شبکه تحویل دهد
- حد عملیاتی پایین^۴: حداقل میزان توانی که بعد از روشن شدن یک واحد ژنراتور رزرو پس از روشن شدن می‌تواند تولید کند
- حداقل زمان راه‌اندازی: حداقل زمانی که لازم است تا یک نیروگاه بعد از استارت به کار خود ادامه دهد.
- نرخ پاسخ^۵: میزان تولید ژنراتور که می‌تواند بر اساس زمان پاسخ و نرخ شیب پاسخ^۶ ژنراتور تولید شود. برای نمونه اگر زمان پاسخ رزرو ۱۰ دقیقه باشد و نرخ شیب پاسخ ژنراتور ۲٪ بر دقیقه باشد، با فرض اینکه آن واحد ظرفیت رزرو خالی به اندازه کافی داشته باشد، می‌تواند ۲۰٪ از ظرفیت تولید خود را برای رزرو اختصاص دهد.

- هزینه بی‌باری^۷:

هزینه بی‌باری بعد از راه‌اندازی واحد و حالت آماده به کار برای دریافت سیگنال کنترلی و افزایش توان خروجی می‌باشد که بر حسب دلار بر مگاوات ساعت می‌باشد. تعبیر دیگر این هزینه بدون بار این است که این هزینه یک مقدار عدد ثابت مستقل از میزان انرژی تحویلی و میزان مشارکت آن واحد در تامین رزرو چرخان می‌باشد. این هزینه معمولاً درصدی از نرخ پایه تعیین می‌شود [۴۰ و ۴۱].

1 Headroom

2 Ramp time

3 Ramp time

4 lower operating limit

5 Response Rate

6 ramp rate

7 no load cost

- هزینه راندمان^۱

- هزینه کاهش راندمان واحد های نیروگاهی فعال در تامین رزرو چرخان از سه جنبه مختلف قابل بررسی می باشد:
- نرخ حرارت اغلب نیروگاه های فسیلی در حالت کار دائم دارای یک مقدار ماکزیمم است که بطور معمول نزدیک مقدار ماکزیمم دیسپاچینگ می باشد. کارکردن در نقطه کار بالاتر یا پایین تر از این نقطه کاهش راندمان و در نتیجه تحمیل هزینه برای آن واحد می شود.
 - مولفه هزینه دوم مربوط به تغییرات دینامیکی نقطه کار ژنراتور می باشد. پاسخ سریع سیستم گاورنر به تغییرات گذرای می تواند منجر به افت راندمان واحد ها گردد.
 - مولفه سوم هزینه راندمان مربوط به مد کاری توربین بخار می باشد. توربین هایی که با دریچه های کاملاً باز (VWO) کار می کنند، نمی توانند پاسخ سریع به تغییرات فرکانس را ارائه دهند. تنها مکانیسم برای افزایش توان، افزایش سریع تولید بخار در بویلر می باشد که این مساله می تواند منجر به کاهش کارایی گردد [۴۰ و ۴۱].

- هزینه فرسودگی^۲

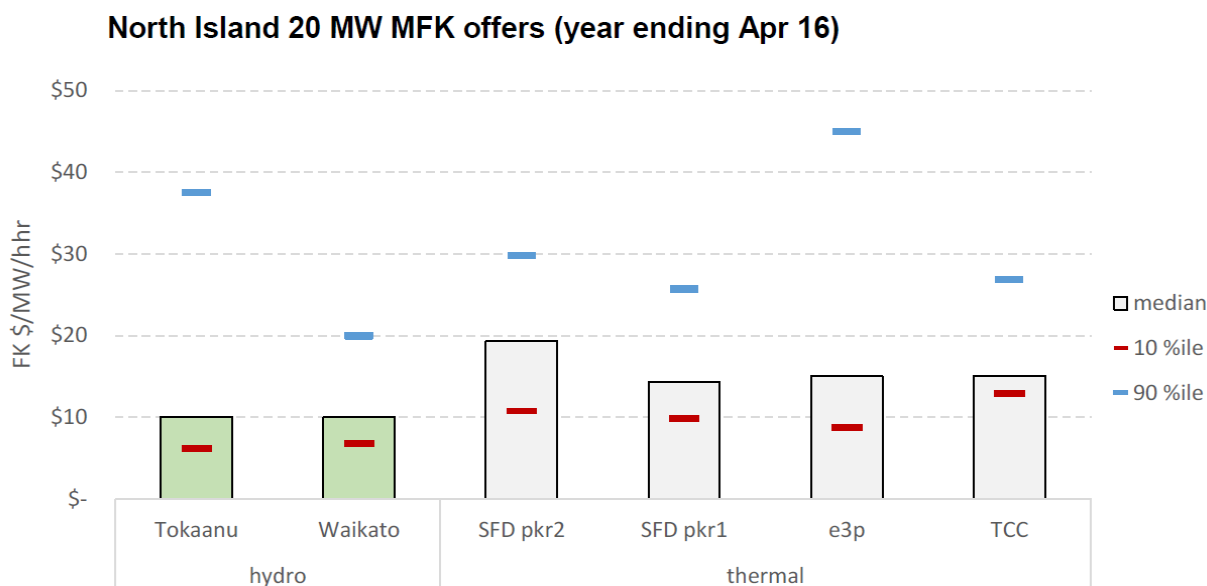
هزینه کنترل اولیه ژنراتورهای سنکرون اغلب با طیف گسترده ای از هزینه های مرتبط با چرخه های بالای کاری^۳ در ارتباط می باشد. این تغییرات دینامیکی می توانند موجب پیری سریعتر اجزای ژنراتور (به خصوص عملگرها) و کاهش طول عمر، افزایش هزینه های تعمیر و نگهداری و کاهش فواصل آن، افزایش نرخ قطع اجباری و افزایش آلودگی های زیست محیطی گردد. در عمل بررسی دقیق این اثرات پیچیده و داده های میدانی بسیار کمیاب می باشد. در یکی از جامع ترین مطالعاتی که در مورد هزینه های ناشی از چرخه بالای کاری در ژنراتورهای فعال در زمینه کنترل فرکانس که توسط NREL، GE، Aptech و دیگران انجام شد، نشان می دهد تقریباً بخش عمده هزینه چرخه های بالای کاری ناشی از مرحله راه اندازی نیروگاه ها می باشد. طبق برآورد انجام شده در این مطالعه هزینه فرسودگی ناشی از چرخه بالای کاری در ژنراتورهای فعال در تامین رزرو تقریباً در محدوده 0.14 تا 0.67 دلار در واحد مگا وات ساعت بوده است.

شکل ۳-۴ هزینه فرسودگی ناشی از عملکرد سیستم گاورنر ژنراتورهای فعال در ارائه خدمات کنترل فرکانس را برای چند نمونه ژنراتور 20MW ارائه شده است. مقادیر هزینه بر حسب دلار بر مگاوات بر نیم ساعت ارائه شده است. برای نیروگاه های حرارتی این مقدار بین ۱۵ تا ۲۰ دلار بر مگاوات بر نیم ساعت می باشد. شکل ۴-۴ این هزینه بر حسب درصد از ظرفیت نیروگاه بیان می کند [۴۰-۴۸].

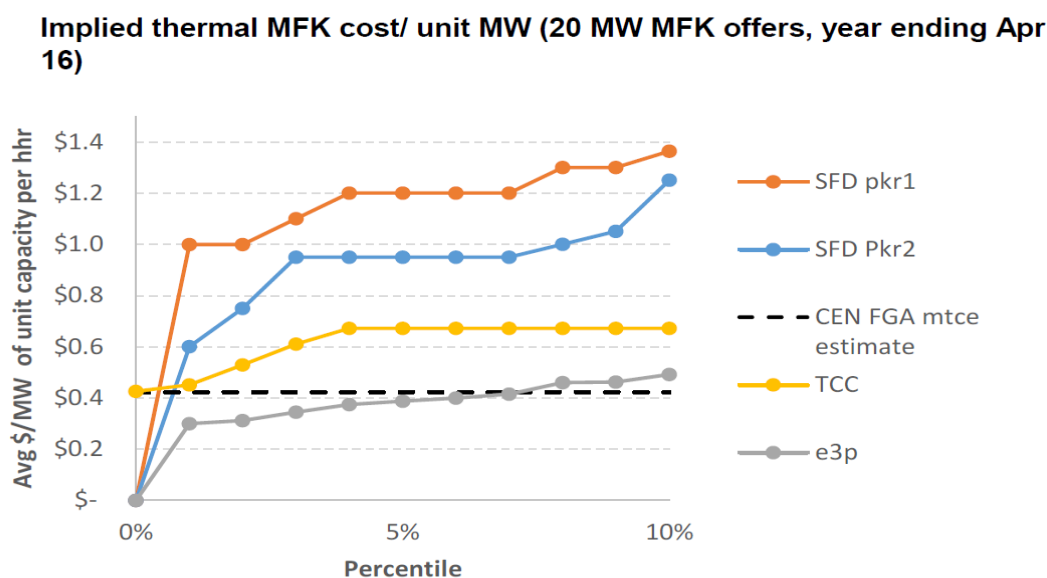
1 Efficiency Costs

2 Wear & Tear Costs.

³ cycling



شکل ۳-۴: هزینه فرسودگی ناشی از عملکرد گاورنر در پاسخ به سیستم کنترل فرکانس (2014)



شکل ۴-۴: هزینه فرسودگی ناشی از عملکرد گاورنر بر حسب درصد از ظرفیت نیروگاه

در مراجع دیگر محاسبات هزینه چرخه بالای کاری آورده شده است. جدول ۴-۵، پارامترهای مربوط به چرخه کاری انواع واحد های نیروگاهی را نمایش می دهد. برای نیروگاه های گازی حداقل توان ۴۰٪، ماکزیمم ظرفیت توان، نرخ شیب توان بین ۰.۸۶ تا ۶ درصد ماکزیمم ظرفیت توان در یک دقیقه، می باشد. بر این اساس هزینه چرخه کاری برای انواع نیروگاه ها در جدول ۴-۶ ارائه شده است [۳۹].

جدول ۳-۴: پارامترهای مربوط به **cycling** نیروگاه‌ها

Plants' cycling parameters (upper bound of minimum power output, lower bound of ramping gradients and upper bound of minimum up and down times) (Van den Bergh and Delarue, 2015)					
Plant type	Min output, %P _{max}	Ramping, %P _{max} /min	Start/stop ramping, %P _{max} /switch	Min up time, H	Min down time, H
Coal-fired	25-40	0.66-4	40-100	0.25-10	3-10
Lignite fired	40-60	0.66-4	60-100	0.25-10	3-10
Gas-fired	40	0.83-6	40-100	0.25-6	1-6
CCGT	30-50	0.83-10	50-100	0.25-1	0.5-6

جدول ۴-۴: هزینه چرخه کاری برای انواع نیروگاه‌ها

Lower-bound median costs of cycling for various power generation types, US\$ (Lew and others, 2013a)					
	Small subcritical coal 35-299 MW	Large subcritical coal 300-900 MW	Supercritical coal 500-1300 MW	Gas combined cycle (CT-ST and HRSG)	Gas steam 50-700 MW
Hot start, US\$/MW	94	59	54	35	36
Warm start, US\$/MW	157	65	64	55	58
Cold start, US\$/MW	147	105	104	79	75
Ramp, US\$/MW	3.34	2.45	1.96	0.64	1.92
Non-cyclic operation, US\$/MWh	2.82	2.68	2.96	1.02	0.92

- هزینه پایداری^۱

این هزینه‌ها مربوط به کارکرد واحد‌های ژنراتوری فعال در تامین رزرو در شرایط کاری که احتمالاً منجر به ناپایداری آنها می‌گردد. پاسخ گاورنر به تغییرات سریع فرکانس، بخصوص در شرایط افزایش فرکانس می‌تواند باعث بی‌ثباتی در احتراق توربین‌های گازی و در نتیجه تریپ دادن واحد‌ها شود. که این مساله خود می‌تواند موجب افزایش فرسودگی آن واحد گردد. در این شرایط لازم است تا سیستم کنترلی اصلاح و سرعت پاسخ محدود گردد.

1-Stability Costs

۴-۲-۲ مقایسه ارزیابی اقتصادی ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس با استفاده از ذخیره ساز فلاپویل و واحدهای نیروگاهی

به منظور ارزیابی میزان مزیت های اقتصادی بکارگیری از ذخیره ساز فلاپویل برای ارائه خدمات جانبی فرکانس در مقایسه با رزرو چرخان، در این بخش مدل کسب و کار هر یک از راهکارها آنالیز می گردد. پیرو مذاکرات انجام گرفته با مدیریت شبکه، ظرفیت نصب نیاز ذخیره ساز فلاپویل در داخل کشور ۱۵۰ مگاوات اعلام گردید که مدت دسترسی به این ظرفیت بسته به نوع رویداد ایجاد شده و شدت آن می تواند بین ۵ الی ۱۵ دقیقه باشد. بنابراین به منظور مقایسه توجیه پذیری اقتصادی بین راهکار استفاده از ذخیره ساز فلاپویل و راهکار سنتی رزرو چرخان می توان مسأله را به صورت دو پروژه سرمایه گذاری مستقل مورد آنالیز قرار داد. در ادامه ابتدا کلیه هزینه های سرمایه گذاری اولیه (TTC)، هزینه های بهره برداری و تعمیر و نگهداری برای هر یک از راهکارها محاسبه می گردد. در ادامه بر اساس میزان بازپرداخت و سود حاصل از هر یک از سرمایه گذاری ها شاخص های اقتصادی برای سناریو های مختلف مطالعه و بررسی می گردد. از آنجاییکه طبق بررسی های انجام شده، نیروگاه های گازی بیشترین مشارکت را در ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس دارند، در ادامه محاسبات هزینه ایی برای این نوع از نیروگاه ها انجام شده است. خلاصه هزینه های سرمایه گذاری، تعمیر و نگهداری و جایگزینی و هزینه های تعمیر و نگهداری برای ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا (مشابه جدول ۳-۵ فصل سوم) در جدول ۴-۷ ارائه شده است.

جدول ۴-۵: مولفه های هزینه ایی ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا

تعاریف	المان های هزینه	مقدار متوسط هزینه
هزینه نصب و راه اندازی	TCC	۳۷۰۴
هزینه تعمیر و نگهداری ثابت	$C_{O\&M,f}(\frac{\text{€}}{kW - yr})$	۵/۶
هزینه تعمیر و نگهداری متغیر	$C_{O\&M,v}(\frac{\text{€}}{MWh})$	۰/۴
هزینه جایگزینی	${}^b C_R(\frac{\text{€}}{kW})$	۱۷۰
هزینه بازیافت	${}^d C_{DR}(\frac{\text{€}}{kW})$	۳
راندمان ذخیره و بازیابی انرژی	overall η	۰/۸۶

بر اساس محاسبات انجام گرفته در فصل سوم و بر اساس محاسبات هزینه یابی چرخه عمر، هزینه سرمایه گذاری به منظور

نصب و راه اندازی سایت ذخیره ساز فلایویل میزان سرمایه گذاری لازم به صورت پریونیت برابر ۳۷۰۴ یورو به ازای هر کیلو وات میباشد. همچنین هزینه تعمیر و نگهداری ثابت و متغیر ، هزینه جایگزینی ، هزینه بازیافت نیز در جدول ۴-۷ آورده شده است. بنابر این بر اساس ظرفیت 150 MW مورد درخواست، میزان هزینه سرمایه گذاری اولیه برای ذخیره ساز فلایویل نوع سرعت بالا به صورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$555.6 \text{ Million } \text{€} \text{ Total investment} - \text{high speed flywheel} = 150 * 1000 * 3704 =$$

همچنین جدول ۴-۸ مولفه های هزینه ایی ذخیره ساز فلایویل سرعت پایین را بر اساس داده های گرد آوری شده در فصل سوم ارائه می دهد.

جدول ۴-۶: مولفه های هزینه ایی ذخیره ساز فلایویل سرعت پایین

تعاریف	المان های هزینه	مقدار متوسط هزینه
هزینه نصب و راه اندازی	TCC	۴۰۵/۹۵
هزینه تعمیر و نگهداری ثابت	$C_{O\&M,f} \left(\frac{\text{€}}{kW - yr} \right)$	۳
هزینه تعمیر و نگهداری متغیر	$C_{O\&M,v} \left(\frac{\text{€}}{MWh} \right)$	۰.۱
هزینه جایگزینی	${}^b C_R \left(\frac{\text{€}}{kW} \right)$	۱۷۰
هزینه بازیافت	${}^d C_{DR} \left(\frac{\text{€}}{kW} \right)$	۳
راندمان ذخیره و بازیابی انرژی	overall η	۰/۷۵

به طور مشابه هزینه سرمایه گذاری مورد نیاز جهت نصب و راه اندازی ظرفیت 150MW ذخیره ساز فلایویل سرعت پایین بر اساس رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$60.84 \text{ Million } \text{€} \text{ Total investment} - \text{low speed flywheel} = 150 * 1000 * 405.59 =$$

همچنین در جدول ۴-۹ ، هزینه سرمایه گذاری، تعمیر و نگهداری و سایر هزینه ها برای یک نیروگاه گازی آورده شده است. هزینه احداث نیروگاه ای گازی 1 میلیون دلار به ازای هر مگاوات می باشد. بر این اساس هزینه احداث نیروگاه گازی لازم جهت ارائه خدمات کنترل فرکانس بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود:

$$150 \text{ Million } \text{€} \text{ Total investment} - \text{gas power plant} = 150 * 1 =$$

جدول ۴-۷: مولفه های هزینه ایی ذخیره ساز فلایویل سرعت بالا

تعاریف	هزینه بر واحد MWh, MW	مقدار متوسط هزینه
هزینه نصب و راه اندازی Capital cost of generation	$\frac{\text{€}}{MWh}$	۱۰۰۰
هزینه تعمیر و نگهداری ثابت (O&M of steady stste operation)	$\frac{\$}{MWh}$	۴۰-۱۰۰

هزینه تعمیر و نگهداری متغیر (O&M from cycling /ramping) در چرخه عمر	$\frac{\$}{MW}$	۱۷۰.۹
هزینه تولید (Fuel cost)	$\frac{\$}{MWh}$	۸۰
Wear & Tear Costs هزینه فرسودگی	$\frac{\$}{MW / hh}$	۲۰

پارامترهای اولیه به منظور محاسبه مولفه های هزینه ایی شبیه سازی فرض شده جدول ۴-۶ محاسبات جریان های نقدی^۱ ورودی و خروجی برای بازه زمانی ۱۲ ساله انجام می گردد.

جدول ۴-۸: پارامترهای مفروض جهت محاسبات اقتصادی

i	نرخ تنزیل واقعی	۲۰٪
T	عمر ذخیره ساز به سال	۲۰
n	تعداد سیکل دشارژ در سال	۲۶۲۰۰۰
t	پریود جابجایی ادوات به سال	۴
h	مدت زمان دشارژ (دقیقه)	۱۵

۴-۲-۳ بررسی نتایج محاسبات اقتصادی برای ذخیره ساز فلاپویل و رزرو چرخان

به منظور آنالیز اقتصادی هر یک از مدل های کسب و کار ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس با استفاده از ذخیره ساز فلاپویل و رزرو چرخان، کلیه محاسبات شاخص های اقتصادی اعم از NPV، IRR، RRA و PBP در نرم افزار اکسل پیاده سازی و نتایج محاسبات ارائه گردیده است. در ادامه با هدف محاسبه مجموع بازپرداخت سالانه حاصل از مشارکت واحد های رزرو و همچنین واحد های ذخیره ساز انرژی نحوه بازپرداخت در قبال ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس مورد بررسی قرار می گیرد.

۴-۲-۳-۴ ۱-۳-۲-۴ مبالغ پرداختی بابت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

مبلغ پرداختی ثابت، متغیر، جرایم و مجموع پرداختی بابت خدمت کنترل فرکانس اولیه در سال ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۸ به شرح جدول ۴-۱۱ می باشد. طبق رویه خدمات جانبی کنترل فرکانس اولیه، نرخ پرداخت ثابت بابت توانایی ارائه خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه، نرخ پرداخت متغیر در زمان های فعال شدن سیستم کنترل فرکانس و نرخ کسر درآمد بابت عملکرد ناصحیح در ارائه خدمت کنترل فرکانس اولیه به ترتیب برابر با ۲۱٪، ۱۱۲٪ و ۶۶٪ نرخ پایه آمادگی در بازار عمده فروشی برق می باشد. نرخ پایه آمادگی در بازار عمده فروشی برق در سال های ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸، ۱۸۵.۰۰۰ ریال بر مگاوات برای هر ساعت بوده که این

¹ Cash flow

مقدار تا سال ۱۳۹۹ نیز تغییری نداشته است.

جدول ۹-۴: مبالغ پرداختی بابت خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه

سال	پرداختی ثابت (آمدگی) (میلیارد ریال)	پرداختی متغیر (بکارگیری) (میلیارد ریال)	جرایم (کسر) درآمد (میلیارد ریال)	مجموع پرداختی (میلیارد ریال)
۱۳۹۸	۲۹۱۳	۳۲۸۲	۷۵۲	۵۴۴۴
۱۳۹۷	۲۹۸۱	۲۷۸۵	۵۵۹	۵۲۰۸
۱۳۹۶	۱۷۹۷	۲۱۸۹	۱۰۷۹	۲۹۰۶
۱۳۹۵	۱۰۸	-	-	۱۰۸
۱۳۹۴	۱۰۳	-	-	۱۰۳
۱۳۹۳	۱۰۵	-	-	۱۰۵
۱۳۹۲	۶۴	-	-	۶۴

از سال ۱۳۹۶ ویرایش جدید خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه اجرائی و مبلغ پرداختی بابت پرداختی‌های متغیر، ثابت، و کسر درآمد به تفکیک در دسترس می‌باشد و در سال‌های قبل از سال ۹۶ مبنای پرداخت بابت این خدمات بر اساس صورتجلسه ۸۵ هیات تنظیم بازار برق بوده است که صرفاً بر اساس معیار دروپ و پرداخت آمدگی بابت این خدمات بوده است. مبلغ مجموع پرداختی کنترل فرکانس درج شده در جدول (۵-۱)، خالص بهای خرید خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه می‌باشد. خالص بهای خرید خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\{\text{بهای کسر درآمد} - \text{بهای متغیر} + \text{بهای ثابت} = \text{خالص بهای خرید خدمت}\}$$

در این رابطه منظور از بهای ثابت، پرداخت ثابت بابت توانایی ارائه خدمات کنترل فرکانس و منظور از بهای متغیر، پرداخت متغیر در زمان‌های فعال شدن سیستم کنترل فرکانس می‌باشد.

۴-۲-۳-۲ میزان مشارکت نیروگاه‌ها در خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه

با توجه به مجموع مبالغ ثابت، متغیر و جرایم پرداختی بابت خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه در سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸ و همچنین نرخ پرداخت ثابت، متغیر و کسر درآمد (۲۱٪، ۱۱۲٪ و ۶۶٪ نرخ پایه آمدگی)؛ مقدار ثابت و متغیر کنترل فرکانس

اولیه بر حسب مگاوات ساعت در سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸ به شرح جدول ۴-۱۲ محاسبه شده است.
جدول ۴-۱۰: مقدار ثابت و متغیر کنترل فرکانس اولیه در سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸

س ل	مقدار ثابت کنترل فرکانس اولیه (مگاوات ساعت)	مقدار متغیر کنترل فرکانس اولیه (مگاوات ساعت)	نسبت مقدار متغیر به مقدار ثابت
۱ ۳۹۸	۷۵.۰۰۳۶۲۱	۱۵.۸۴۲.۱۶۲	۲۱٪
۱ ۳۹۷	۷۶.۷۴۸.۱۱۱	۱۳.۴۴۴.۸۰۶	۱۷/۵٪
۱ ۳۹۶	۴۶.۲۶۰.۱۹۹	۱۰.۵۶۷.۲۶۳	۲۲٪

طبق رویه خدمات جانبی کنترل فرکانس اولیه، پرداختی ثابت، متغیر و جرایم بر اساس وضعیت باند مرده سیستم گاورنر و ضریب دروپ واحد که توسط مرکز اعلام می‌شود، انجام می‌پذیرد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار بهای متغیر کنترل فرکانس در سال ۱۳۹۶، ۲۲ درصد مقدار آمادگی ارائه خدمات کنترل فرکانس (پرداختی ثابت) بوده که این مقدار در سال ۱۳۹۸ به ۲۱ درصد رسیده است. طبق رویه خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه و همچنین نظر کارشناسان محترم شرکت مدیریت شبکه برق ایران، پرداختی ثابت و متغیر خدمت جانبی کنترل فرکانس اولیه بر اساس وضعیت باند مرده سیستم گاورنر و ضریب دروپ واحد که توسط مرکز اعلام می‌شود، انجام می‌پذیرد؛ بدین صورت که باند فعالیت اعلامی برای پرداختی ثابت، بازه بزرگتری را نسبت به حداکثر ظرفیت قابل تخصیص به واحد جهت پرداخت متغیر در بر می‌گیرد.

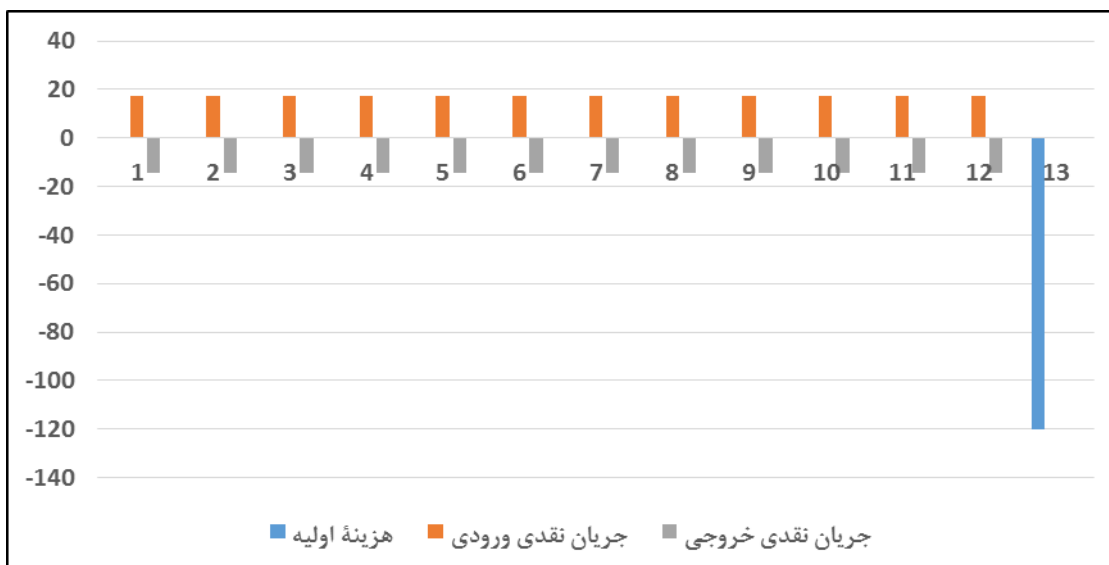
۴-۲-۳-۳ محاسبات اقتصادی بکارگیری از رزرو نیروگاهی جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

در ادامه به منظور ارزیابی اقتصادی کاربست فن آوری ذخیره ساز انرژی فلایویل برای کاربرد کنترل فرکانس در مقایسه با رزرو چرخان نیروگاه گازی میزان سرمایه گذاری اولیه (TCC)، جریان نقدی ورودی و خروجی سالیانه و محاسبه شاخص های سرمایه گذاری برای انجام می گردد. در هر مورد مشخصات داد های ورودی و نتایج محاسبات و شاخص های بدست آمده بررسی می گردد. در گام نخست برای سناریوی استفاده از ظرفیت رزرو نیروگاه های گازی برای کاربرد کنترل فرکانس مطابق شکل ۴-۵، بر اساس اطلاعات ورودی گرد آوری شده در بخش های قبلی، محاسبه هزینه سرمایه گذاری، کلیه مولفه های هزینه ای تعمیر و نگهداری، فرسودگی و چرخه کاری محاسبه می گردد. در ادامه بر اساس نرخ تعرفه تعیین شده و مگاوات ساعت مورد نیاز برای ارائه خدمات کنترل فرکانس در سال، بازپرداخت سرمایه گذاری در مدت یکسال محاسبه می گردد. بر اساس نرخ تنزیل ۲۰٪ محاسبات جریان نقدی^۱ تنزیل شده، ارزش خالص فعلی (NPV)، نرخ بازده داخلی (IRR) و نرخ بازگشت سرمایه (ROI) برای مدت زمان ۱۲ سال محاسبه می گردد.

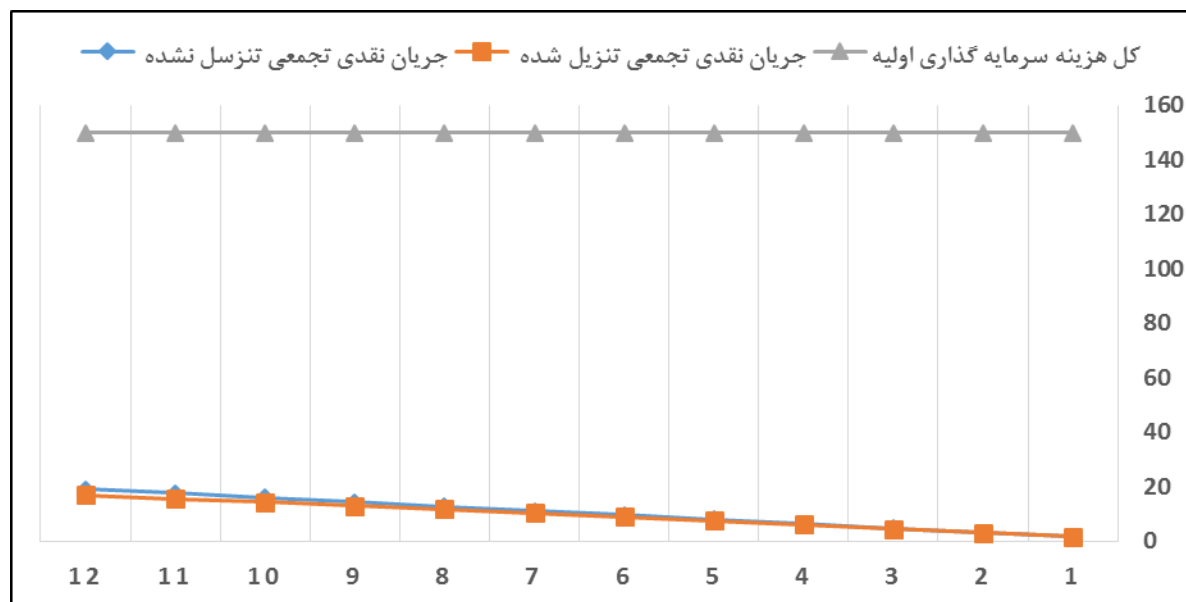
¹ Cash flow

20	مدت زمان چرخه عمر
20	نرخ تنزیل %
262000	تعداد سیکل شارژ و دشارژ در سال
15	مدت زمان دشارژ (دقیقه)
100	هزینه تعمیر و نگهداری ثابت Mw/\$ در سال
170.9	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر MW / \$ ناشی از cycling
5.41666667	هزینه تولید Mw/\$
0.14	هزینه فرسودگی Mw/\$
1	هزینه سرمایه گذاری اولیه tcc-Million \$/MW
0.21	نرخ پایه آمادگی mwh/\$
1.12	نرخ پرداختی بابت ارائه خدمت کنترل فرکانس mwh/\$
9825000	انرژی مورد نیاز برای ارائه خدمات کنترل فرکانس مگا وات ساعت
2.06325	میزان بازپرداخت ثابت میلیون دلار
11.004	میزان بازپرداخت برای ارائه خدمات کنترل فرکانس مگا وات ساعت
13.06725	مجموع پرداختی در سال به میلیون دلار
0.00203175	مجموع هزینه های تعمیر و نگهداری در سال - میلیون دلار
11.1759375	هزینه تولید در سال - میلیون دلار
0.288855	هزینه فرسودگی در سال
11.46682425	مجموع هزینه های تولید، cycling و فرسودگی نیروگاه ها در سال

شکل ۵-۴: محاسبات اقتصادی سناریوی استفاده از رزرو نیروگاه گازی برای کنترل فرکانس



شکل ۶-۴: جریان نقدی ورودی و خروجی برای سناریوی استفاده از رزرو نیروگاه گازی برای کنترل فرکانس



شکل ۷-۴: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از رزرو نیروگاه گازی برای کنترل فرکانس

بررسی نتایج محاسبات اقتصادی در شکل های ۴-۶ و ۴-۷ نشان می دهد با در نظر گرفتن هزینه بالای تعمیر و نگهداری ، هزینه cycling ، هزینه فرسودگی (ناشی از دینامیک بالای مورد نیاز برای ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس) و همچنین هزینه تولید انرژی مورد نیاز (هزینه سوخت نیز در نظر گرفته شد) این سرمایه گذاری توجیه اقتصادی ندارد. در صورت در نظر گرفتن هزینه فرصت و هزینه کاهش راندمان، به جریان نقدی خروجی (منفی) بزرگتر و شاخص ها بدتر نیز خواهد شد. همانگونه که در جدول ۴-۱۳ نمایش داده شده شاخص های اقتصادی محاسبه شده نشان می دهد از نظر سرمایه گذاری این سناریو غیر قابل توجیه می باشد.

جدول ۴-۱۱: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از رزرو نیروگاه گازی برای کنترل فرکانس

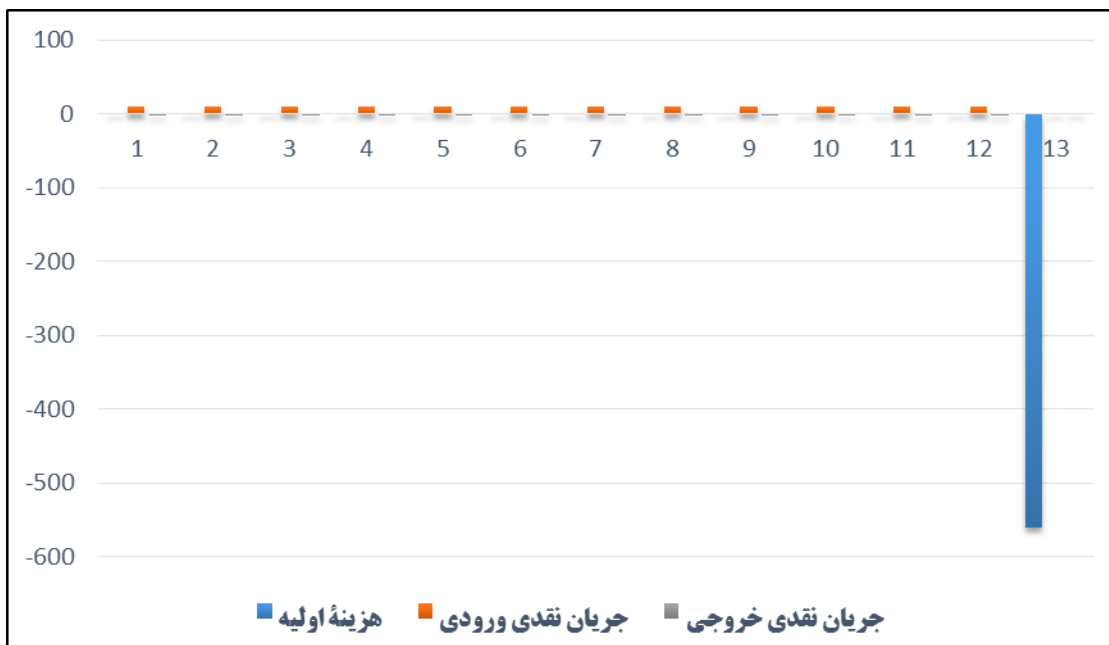
شاخص اقتصادی		مقدار
Net present value	ارزش خالص فعلی	-133.074952
Internal rate of return	نرخ بازده داخلی	-22.8214%
Return on Investmen	نرخ بازگشت سرمایه	-0.8871

۴-۳-۲-۴ محاسبات اقتصادی بکار گیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

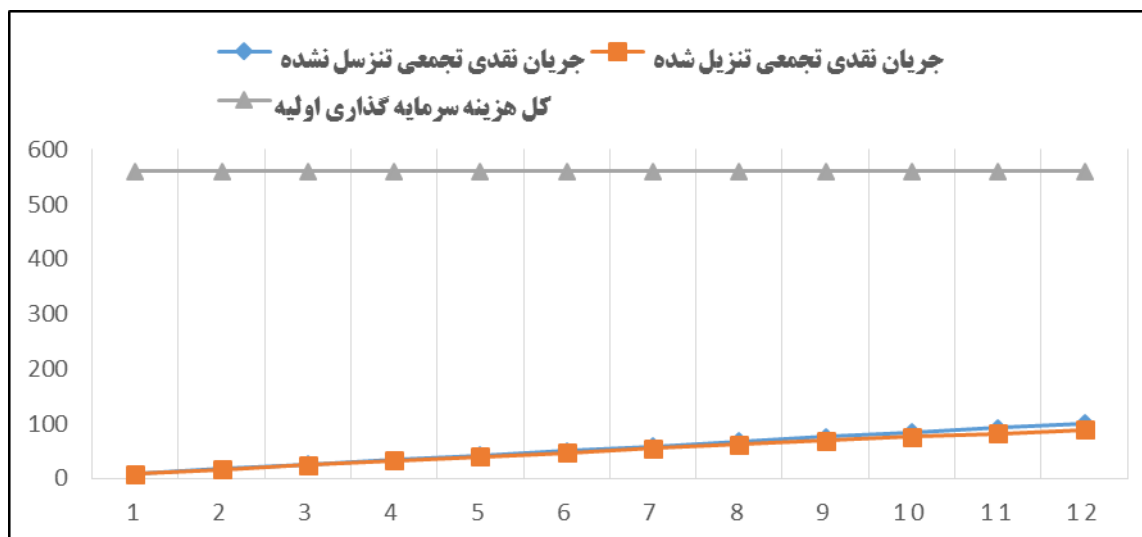
در ادامه بر اساس فرضیات مشابه بخش قبل، محاسبات اقتصادی برای سناریوی کاربست فن آوری ذخیره ساز فلاپیول پرسرعت برای ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس مورد ارزیابی قرار گرفته است. همانگونه که ملاحظه می گردد یکی از ویژگی های ذخیره ساز فلاپیول کاهش هزینه تعمیر و نگهداری و حذف هزینه تولید و همچنین حذف هزینه سوخت مصرفی می باشد. بطوریکه در فصل های ابتدایی بررسی شد، به دلیل مشخصه ذاتی این فن آوری و تحمل چرخه های بالای شارژ و دشارژ و در کنار آن پاسخ دینامیکی بسیار بالا، هزینه فرسودگی و تعمیر و نگهداری در این سناریو ناچیز می باشد.

150	ظرفیت توان مورد نیاز نصب ذخیره ساز فلاپویل MW
20	مدت زمان چرخه عمر
20	نرخ تنزیل %
262000	تعداد سیکل شارژ و دشارژ در سال
15	مدت زمان دشارژ (دقیقه)
5.6	هزینه تعمیر و نگهداری ثابت MW/\$ در سال
0.4	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر MW/\$ ناشی از cycling
0	هزینه تولید Mwh/\$
0	هزینه فرسودگی MWh/\$
3.74	هزینه سرمایه گذاری اولیه tcc-Million \$/MW
0.161875	نرخ پایه آمادگی mwh/\$
0.863333333	نرخ پرداختی بابت ارائه خدمت کنترل فرکانس mwh/\$
9825000	انرژی مورد نیاز برای ارائه خدمات کنترل فرکانس مگا وات ساعت
1.590421875	میزان بازپرداخت ثابت میلیون دلار
8.48225	میزان بازپرداخت برای ارائه خدمات کنترل فرکانس مگا وات ساعت
10.07267188	مجموع پرداختی در سال به میلیون دلار
1.6653	مجموع هزینه های تعمیر و نگهداری در سال - میلیون دلار
0	هزینه تولید در سال - میلیون دلار
0	هزینه فرسودگی در سال
1.6653	مجموع هزینه های تولید، cycling و فرسودگی نیروگاه ها در سال

شکل ۸-۴: محاسبات اقتصادی سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا



شکل ۹-۴: جریان نقدی ورودی و خروجی برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا



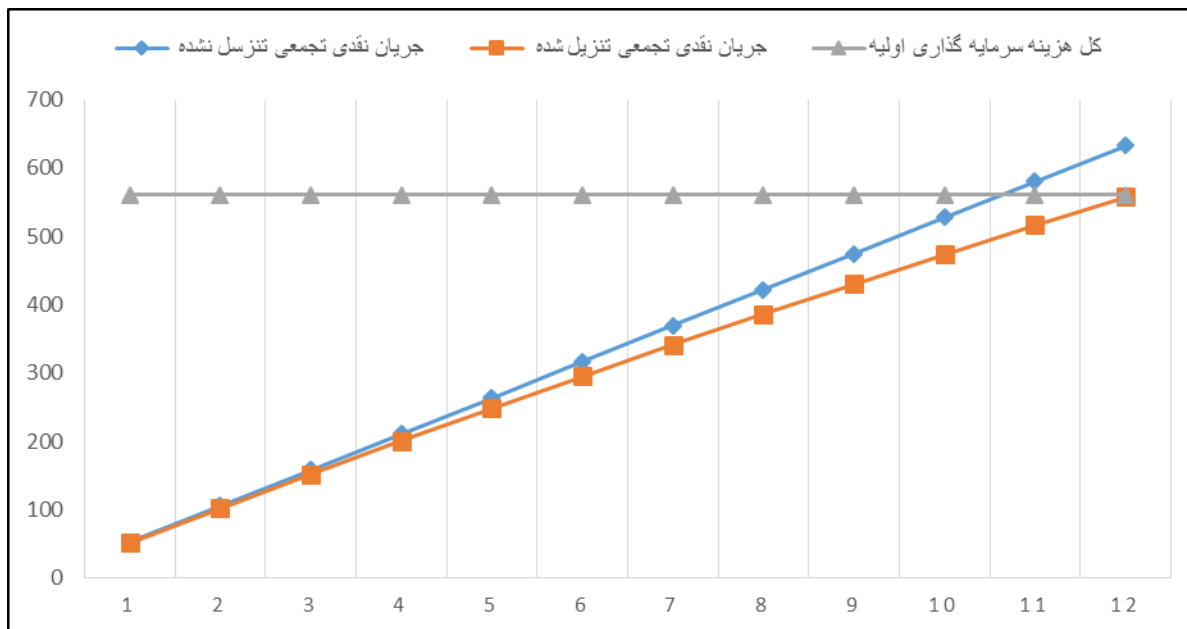
شکل ۴-۱۰: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا

با این وجود در ذخیره ساز نوع سرعت بالا به دلیل گران بودن این تکنولوژی هزینه سرمایه گذاری اولیه (TCC) بسیار بالا می باشد که این خود موجب عدم توجیه پذیری اقتصادی این راهکار می گردد. شکل های ۴-۸، ۴-۹ و ۴-۱۰ نتایج محاسبات اقتصادی را ارائه می دهد. با وجود مثبت بودن جریان نقدی خالص، دوره بازگشت این سرمایه گذاری بسیار طولانی و با توجه به نرخ تنزیل در نظر گرفته شده توجیه پذیر نیست. جدول ۴-۱۳ شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای این بسته سرمایه گذاری را نشان می دهد. بر این اساس می توان گفت بکار گیری ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا با نرخ تنزیل ۲۰٪ (معادل با نرخ سود تسهیلات بانکی) و نرخ پایه خرید خدمات جانبی کنترل فرکانس ۱۸۵۰۰ تومان به ازای هر مگا وات توجیه پذیر نمی باشد.

جدول ۴-۱۲: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا

شاخص اقتصادی		مقدار
Net present value	ارزش خالص فعلی	-472.089
Internal rate of return	نرخ بازده داخلی	-19.86152%
Return on Investmen	نرخ بازگشت سرمایه	-0.84151

بر اساس محاسبات انجام گرفته برای اینکه استفاده از ذخیره ساز فلاپویل سرعت بالا با نرخ تنزیل ۲۰٪ توجیه پذیر باشد لازم است تا مطابق شکل ۴-۱۱ نرخ پایه پیشنهادی خرید خدمات جانبی به مبلغ ۱۰۰۰۰۰ تومان به ازای هر مگا وات ساعت افزایش یابد در اینصورت بعد از ۱۲ سال، بازگشت سرمایه امکان پذیر خواهد بود.



شکل ۱۱-۴: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با نرخ پایه پیشنهادی ۱۰۰۰۰۰ تومان

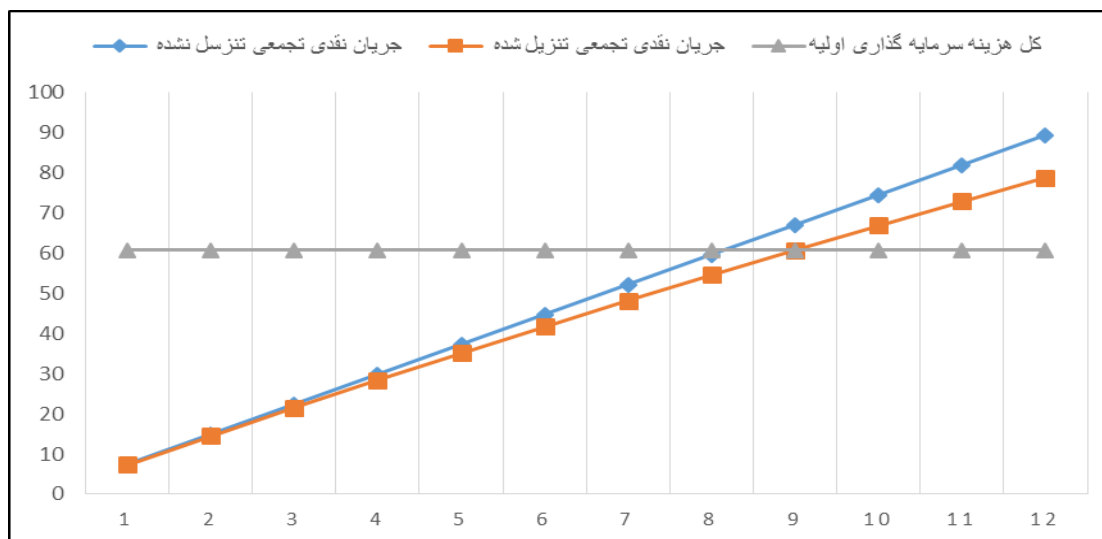
۴-۲-۳-۵ محاسبات اقتصادی بکارگیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

علاوه بر افزایش نرخ پایه ارائه خدمات جانبی (برای فلاپیول سرعت بالا)، راهکار دوم استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین (با هزینه سرمایه گذاری پایین تر) می باشد که مشخصات فنی و هزینه ایی آن در فصل های قبل مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر همین اساس در ادامه محاسبات اقتصادی برای ذخیره ساز سرعت پایین بر اساس سناریوی مشابه انجام گردیده است. ویژگی خاص ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین کاهش چشم گیر هزینه سرمایه گذاری و بهبود شاخص های اقتصادی می باشد. شکل ۴-۱۲ محاسبات اقتصادی کاربری فن آوری ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین برای ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس را نمایش می دهد.

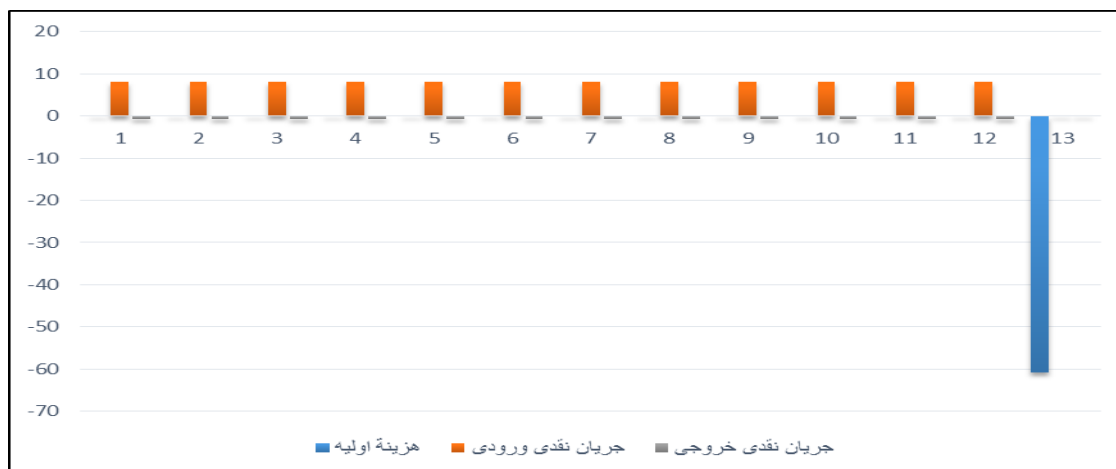
20	مدت زمان چرخه عمر
20	نرخ تنزیل %
262000	تعداد سیکل شارژ و دشارژ در سال
12	مدت زمان دشارژ (دقیقه)
3	هزینه تعمیر و نگهداری ثابت Mw/\$ در سال
0.1	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر MW / \$ ناشی از cycling
0	هزینه تولید Mw/\$
0	هزینه فرسودگی MWh/\$
0.405	هزینه سرمایه گذاری اولیه tcc—Million \$/MW
0.161875	نرخ پایه آمادگی mwh/\$
0.863333333	نرخ پرداختی بابت ارائه خدمت کنترل فرکانس mwh/\$
7860000	انرژی مورد نیاز برای ارائه خدمات کنترل فرکانس مگا وات ساعت
1.2723375	میزان بازپرداخت ثابت میلیون دلار
6.7858	میزان بازپرداخت برای ارائه خدمات کنترل فرکانس مگا وات ساعت
8.0581375	مجموع پرداختی در سال به میلیون دلار
0.61506	مجموع هزینه های تعمیر و نگهداری در سال — میلیون دلار
0	هزینه تولید در سال — میلیون دلار
0	هزینه فرسودگی در سال
0.61506	مجموع هزینه های تولید، cycling و فرسودگی نیروگاه ها در سال

شکل ۱۲-۴: محاسبات اقتصادی سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپویل سرعت پایین

بطوریکه مشهود است در این حالت هزینه سرمایه گذاری از ۵۶۰ میلیون دلار به حدود ۶۰ میلیون یورو کاهش یافته است. در این حالت مطابق شکل های ۴-۱۳ و ۴-۱۴، بررسی جریان نقدی ورودی و خروجی در بازه ۱۲ ساله نشان می دهد با تنزیل ۲۰٪ و نرخ پایه خرید خدمات ۱۸۵۰۰ تومان، سرمایه گذاری اولیه حدود ۹ سال به نقطه سربه سر خواهد رسید. همچنین شاخص های ارزیابی اقتصادی در جدول ۴-۱۴ نشان می دهد این سرمایه گذاری از نظر سود دهی اقتصادی و نرخ بازگشت سرمایه حدود ۳۰٪ قابل توجیه می باشد. با این وجود نرخ بازده داخلی حدود ۶٪ از نظر سرمایه گذاری چندان مطلوب نیست و برای عملیاتی شدن این طرح نیاز به در اختیار داشتن تسهیلات کم بهره می باشد.



شکل ۱۳-۴: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین

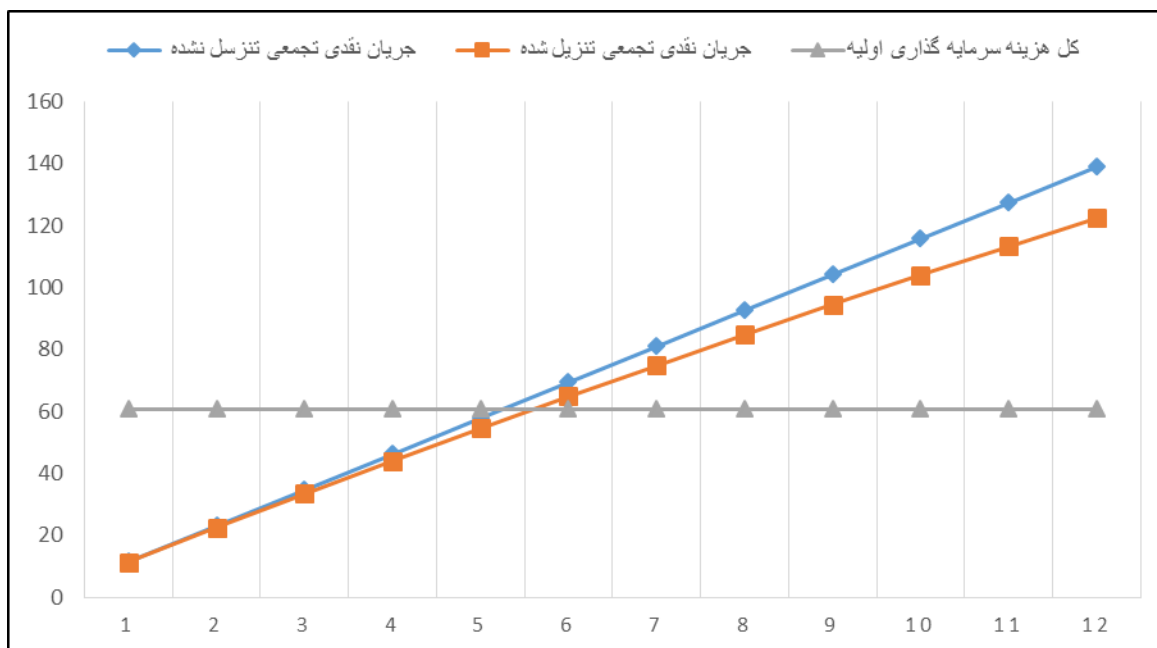


شکل ۱۴-۴: جریان نقدی ورودی و خروجی برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا

جدول ۱۳-۴: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه فعلی

شاخص اقتصادی		مقدار
Net present value	ارزش خالص فعلی	17.96
Internal rate of return	نرخ بازده داخلی	6.4926%
Return on Investmen	نرخ بازگشت سرمایه	0.2956

به منظور افزایش میزان جذابیت سرمایه گذاری در این سناریو پیشنهاد می شود نرخ پایه ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس اصلاح شود. بر همین اساس مطابق شکل ۴-۱۵ و جدول ۴-۱۵، با افزایش نرخ پایه به ۲۸۰۰۰ تومان، نرخ بازگشت سرمایه بعد از ۹ سال به ۵.۵ سال کاهش خواهد یافت. در اینصورت می توان نتیجه گیری کرد که سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه ۲۸۰۰۰ تومان از نظر سرمایه گذاری کاملاً توجیه پذیر می باشد.



جدول ۱۴-۴: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه پیشنهادی ۲۸۰۰۰ تومان

جدول ۱۵-۴: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه پیشنهادی ۲۸۰۰۰

شاخص اقتصادی		مقدار
Net present value	ارزش خالص فعلی	61.723
Internal rate of return	نرخ بازده داخلی	15%
Return on Investmen	نرخ بازگشت سرمایه	100%

۶-۳-۲-۴ محاسبات اقتصادی بکار گیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و سرعت پایین با در نظر گرفتن مزایای اقتصادی حاصل از جایگزینی این فن آوری

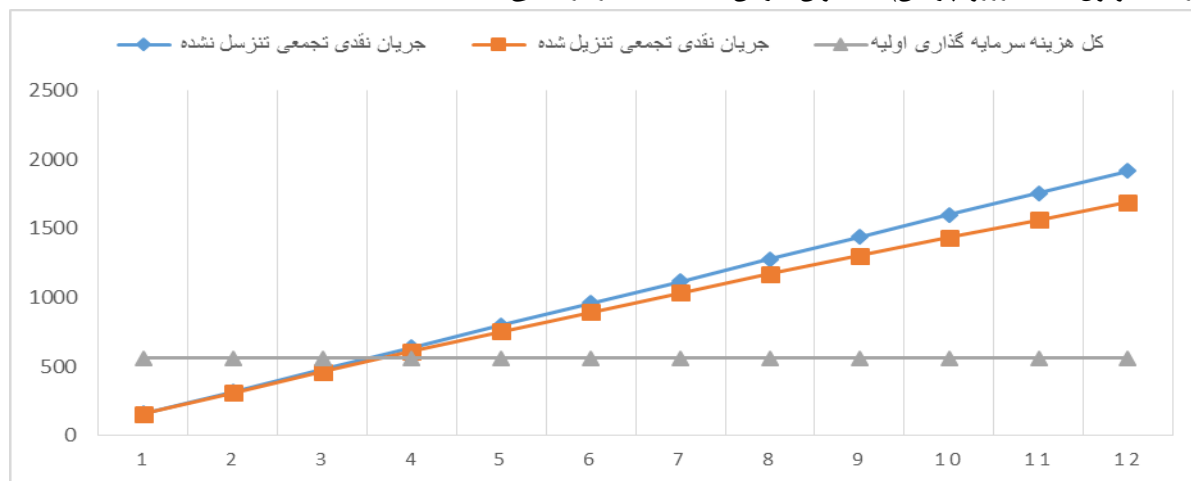
در سناریوی های بررسی شده قبلی، محاسبات اقتصادی برای هر یک از سناریو های رزرو چرخان و ذخیره ساز فلاپیول با این فرض انجام شد که هیچ گونه زیر ساختی برای هر یک از راهکار ها وجود نداشته و هزینه های زیر ساخت می باید از ابتدا در نظر گرفته می شد. البته این فرض برای ذخیره ساز فلاپیول با توجه به نوظهور بودن این تکنولوژی درست می باشد ولی در مورد رزرو چرخان بطوریکه مشهود است این زیر ساخت ها موجود و بخشی از ظرفیت آماده به کار نیروگاه ها می باشد. بنابراین جایگزینی تکنولوژی فلاپیول بارزرو چرخان به معنی آزاد شدن این ظرفیت و در نتیجه ایجاد مزایای اقتصادی برای مالکان نیروگاه خواهد بود. بر اساس مطالعات انجام شده در صورت استفاده از ذخیره ساز فلاپیول بجای رزرو چرخان بخشی از

- هزینه‌های تحمیلی اضافی بر واحد‌های نیروگاهی حذف خواهد شد که مهمترین این مولفه‌های هزینه‌ای عبارتند از:
- حذف هزینه تولید (مگا وات ساعت مورد درخواست برای ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس)
 - جبران هزینه فرصت (سرمایه گذاری ظرفیت آزاد شده برای سرمایه گذاری با عایدی بیشتر)
 - کاهش هزینه‌های فرسودگی، هزینه چرخه کاری بالای واحد‌های رزرو و هزینه کاهش راندمان (با حذف تنش‌های گذارای ناشی از مشارکت در ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس)
 - افزایش مجموع ظرفیت تولید نیروگاه‌های کشور با آزاد شدن ظرفیت رزرو چرخان و جبران بخشی از کمبود تولید برق کشور

بنا براین از دید کلان توسعه فن آوری ذخیره ساز فلاپیول نه تنها به طور مستقل دارای توجیه اقتصادی می‌باشد (نوع سرعت پایین با تعرفه اصلاح شده) بلکه با در نظر گرفتن مزایای اقتصادی بلند مدت (که در بالا به تعدادی از آنها اشاره شد) می‌تواند از نظر اقتصادی توجیه پذیری بیشتری داشته باشد. بر همین مبنی در ادامه محاسبات اقتصادی دو نوع ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و سرعت پایین با اضافه کردن جریان‌های نقدی ورودی (مثبت) حاصل از حذف هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم نیروگاهی مجدداً مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۱-۶-۳-۲-۴ محاسبات اقتصادی بکارگیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با در نظر گرفتن حذف هزینه‌های نیروگاهی ناشی از ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

شکل ۴-۱۶ و جدول ۴-۱۶ شاخص‌های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ خرید خدمات جانبی کنترل فرکانس و با در نظر گرفتن هزینه‌های نیروگاهی حذف شده (پس از جایگزینی فن آوری فلاپیول بجای رزرو چرخان) به عنوان جریان نقدی مثبت را ارائه می‌دهد.



شکل ۴-۱۵: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمعی تنزیل شده برای سناریوی

برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ و با در نظر گرفتن حذف هزینه‌های نیروگاهی

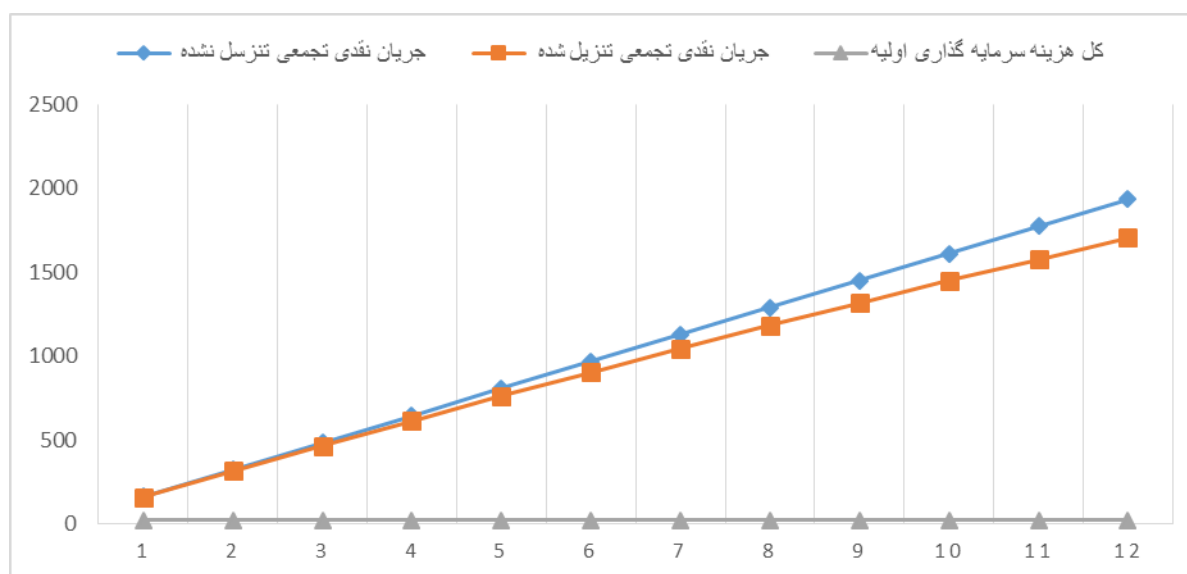
جدول ۴-۱۶: شاخص‌های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ و با در نظر گرفتن

حذف هزینه های نیروگاهی

شاخص اقتصادی	مقدار
Net present value	ارزش خالص فعلی 1235.47
Internal rate of return	نرخ بازده داخلی 28.8%
Return on Investmen	نرخ بازگشت سرمایه 2.20

آنالیز نتایج محاسبات اقتصادی بدست آمده نشان می دهد پس از حذف هزینه های تحمیلی بر نیروگا های فعال در زمینه ارائه خدمات کنترل فرکانس، با وجود سرمایه گذاری اولیه بالای فلاپیول سرعت بالا، در بازه زمانی ۳ الی ۴ سال به نقطه سربه سر خواهد رسید.

بطور مشابه نتایج محاسبات اقتصادی انجام شده برای ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین در شکل ۴-۱۷ و جدول ۴-۱۷ نمایش داده شده است. بطوریکه ملاحظه می شود در صورت استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین به عنوان جایگزین رزرو چرخان، بررسی شاخص های اقتصادی نشان می دهد بازگشت سرمایه به محض شروع بهره برداری به وقوع خواهد پیوست. در محاسبات ارائه شده شاخص ها بر اساس نرخ پایه ۱۸۵۰۰ انجام گرفته. بررسی نتایج محاسبات مشابه نشان می دهد حتی در صورت حذف پرداخت بابت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس، بازهم این سرمایه گذاری توجیه پذیر می باشد. در این حالت مطابق جدول ۴-۱۸، نرخ بازگشت سرمایه گذاری برای فلاپیول های سرعت پایین و سرعت بالا به ترتیب از مقادیر 28.4 و 2.2 به 27 و 2.01 کاهش می یابد. این تحلیل نشان می دهد با وجود سرمایه گذاری اولیه بسیار بالای ذخیره ساز فلاپیول، به دلیل حذف هزینه های تحمیلی نیروگاهی ناشی از کاربست این فن آوری این سرمایه گذاری برای هر دو نوع ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و سرعت پایین قابل توجیه می باشد.



شکل ۱۶-۴: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ و با در نظر گرفتن حذف هزینه های نیروگاهی

جدول ۱۷-۴: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ و با در نظر گرفتن

حذف هزینه های نیروگاهی

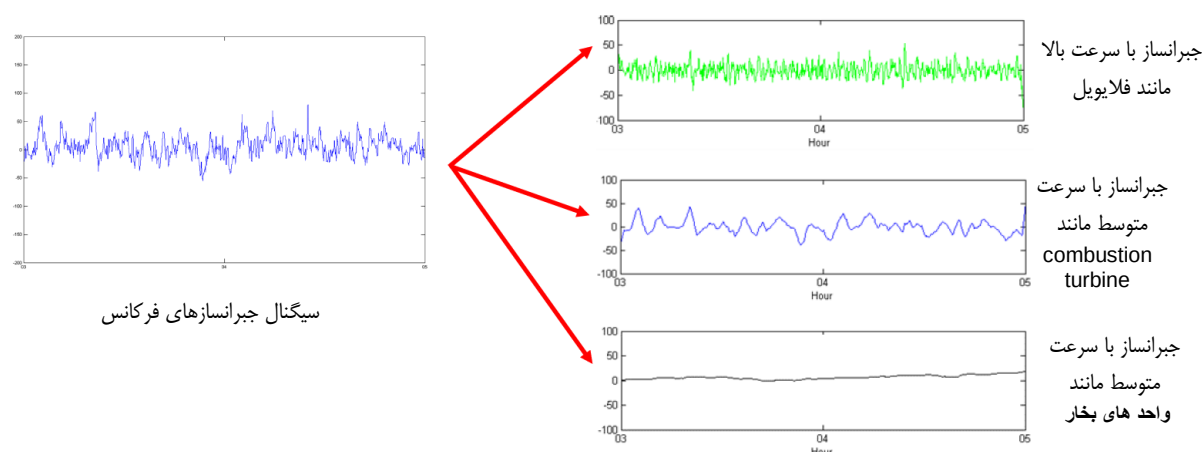
شاخص اقتصادی		مقدار
Net present value	ارزش خالص فعلی	1725.52
Internal rate of return	نرخ بازده داخلی	278%
Return on Investmen	نرخ بازگشت سرمایه	28.40

جدول ۱۸-۴: شاخص های اقتصادی محاسبه شده برای سناریوی استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین با نرخ پایه صفر و با در نظر گرفتن حذف هزینه های نیروگاهی

شاخص اقتصادی		مقدار
Net present value	ارزش خالص فعلی	1640.31
Internal rate of return	نرخ بازده داخلی	264.7%
Return on Investmen	نرخ بازگشت سرمایه	27

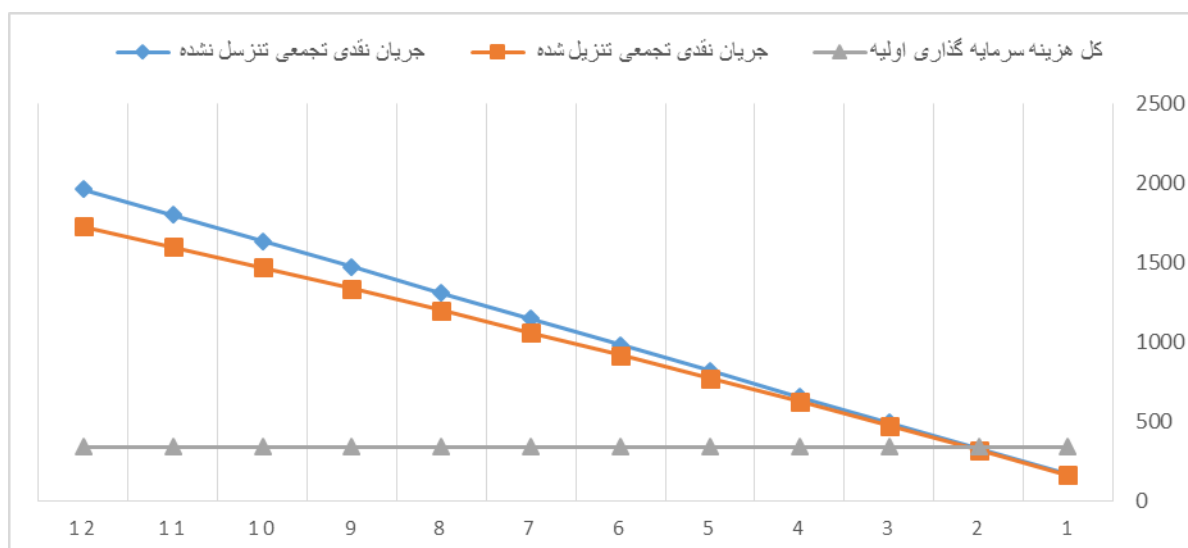
۲-۶-۳-۲-۴ محاسبات اقتصادی بکار گیری ترکیبی ذخیره ساز فلاپیول و رزرو چرخان جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

در سناریو های قبلی فرض بر این بود که کل ظرفیت رزرو مورد نیاز نیروگاهی با ذخیره ساز فلاپیول جایگزین گردد. همانگونه که بررسی گردید با وجود توجیه پذیری اقتصادی این سناریو، اجرای آن نیازمند سرمایه گذاری بسیار بالایی می باشد. با توجه به محدودیتهای منابع مالی کشور تحقق این چشم انداز چندان آسان نیست. در یک سناریوی دیگر استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول و رزرو چرخان می تواند یک مصالحه بین هزینه سرمایه گذاری اولیه و مزایای اقتصادی حاصل از بکار گیری ذخیره ساز فلاپیول باشد. همانگونه که قبلا نیز بررسی گردید یکی از ویژگی های ذخیره ساز فلاپیول سرعت پاسخ بسیار بالا (نرخ شیب پاسخ بالا) و تاب آوری چرخه های شارژ و دشارژ بسیار بالا می باشد. با توجه به این ویژگی ذاتی، مطابق شکل ۴-۱۸ ذخیره ساز فلاپیول می تواند برای جبران سازی مولفه های فرکانس بالای اغتشاش فرکانس استفاده شود، در حالیکه رزرو هایی نیروگاهی برای تامین مولفه های فرکانس پایین وارد عمل شوند.



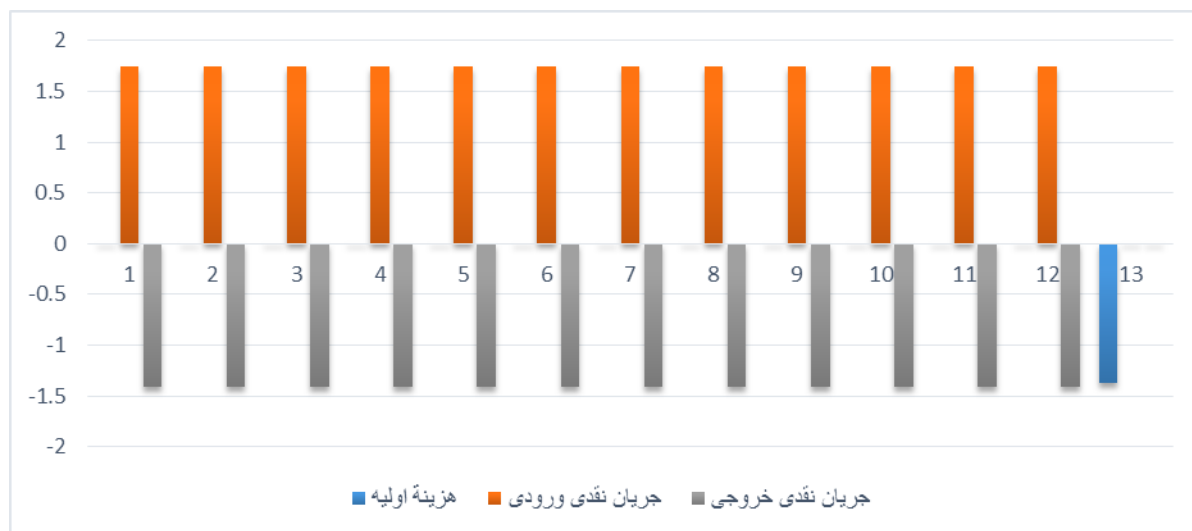
شکل ۱۷-۴: سیگنال جبران‌ساز فرکانس و تفکیک آن به مولفه های فرکانس پایین و فرکانس بالا و تخصیص آن به منابع تامین

یکی از مزایای سناریوی پیشنهادی کاهش تنش های ناشی از دینامیک های فرکانس بالای اعمالی به واحد های نیروگاهی و حذف هزینه های ناشی از فرسودگی و هزینه کاهش راندمان می باشد. بعلاوه استفاده ترکیبی از فلاپیول و رزرو چرخان و حذف پیک های توان لحظه ای، بخشی از ظرفیت رزرو نیروگاه ها آزاد می شود که این امر منافع اقتصادی به همراه خواهد داشت. با معاف شدن نیروگاه ها از تولید توان های پالسی با نرخ بالای شیب پاسخ (ramp rate بالا) و زیر راندمان نامی (در نتیجه کاهش سوخت مصرفی)، هزینه بهره برداری واحد های شرکت کننده در کنترل فرکانس کاهش می یابد. در ادامه محاسبات اقتصادی برای استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و رزرو انجام شده است. در این سناریو فرض می شود از کل ظرفیت ۱۵۰ مگاوات مورد نیاز، ۵۰ مگاوات با استفاده از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا تامین گردد و ۱۰۰ مگاوات باقی مانده از ظرفیت رزرو چرخان استفاده گردد. نتایج محاسبات در شکل های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ نمایش داده شده است. بررسی نتایج نشان می دهد زمان بازگشت این سرمایه گذاری در بازه زمانی حدود ۲ ساله می باشد. این در حالی است که مطابق شکل ۴-۱۰ استفاده از رزرو به تنهایی توجیه پذیر نبوده است.



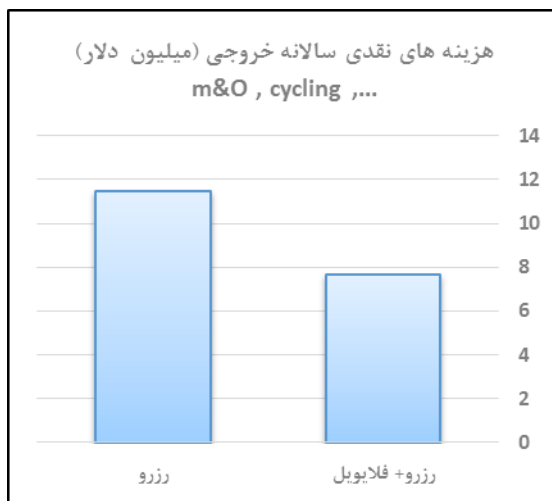
شکل ۱۸-۴: مقایسه هزینه سرمایه گذاری اولیه و جریان نقدی تجمعی تنزیل شده برای سناریوی استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و

رزرو چرخان با نرخ پایه ۱۸۵۰۰

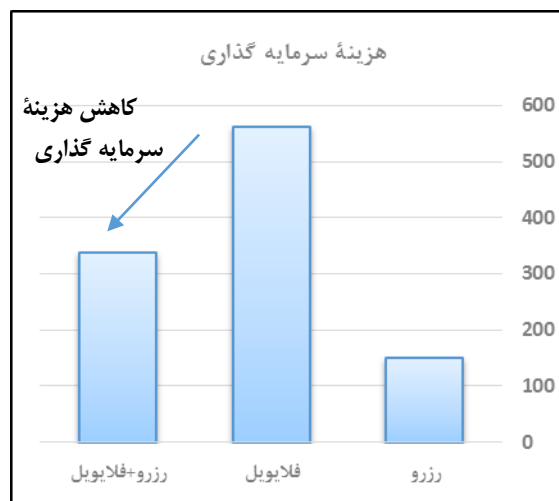


شکل ۱۹-۴: جریان نقدی ورودی و خروجی برای سناریوی استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و رزرو چرخان با نرخ پایه ۱۸۵۰۰

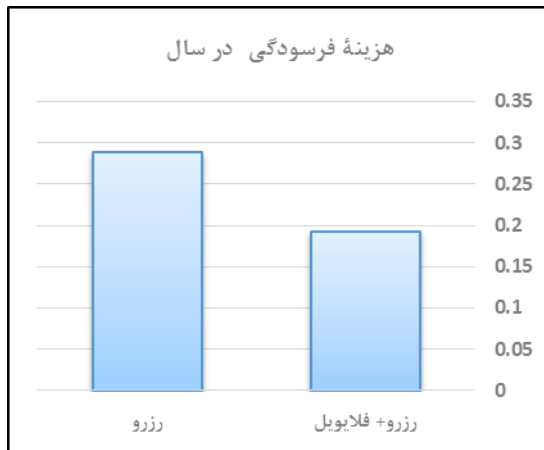
نتایج محاسبات نشان می دهد با استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول-رزرو چرخان، مطابق شکل ۴-۲۱ الف تا د، نسبت به حالت فقط فلاپیول تا ۴۰٪ کاهش هزینه سرمایه گذاری را منجر می گردد. از طرفی مجموع جریان نقدی خروجی سالانه با استفاده از سناریوی ترکیبی کاهش چشمگیری خواهد داشت. همچنین با توجه به اینکه هزینه سوخت در ذخیره ساز فلاپیول صفر است، هزینه بهره برداری کل، مطابق شکل ۴-۲۱ ج ۳۳٪ کاهش یافته است. همچنین به توجه به نقش تعیین کننده ذخیره ساز فلاپیول در جبران سازی اغتشاشات فرکانس بالای توان و کاهش تنش های شدید مکانیکی هزینه فرسودگی مطابق ۴-۲۱ د کاهش می یابد.



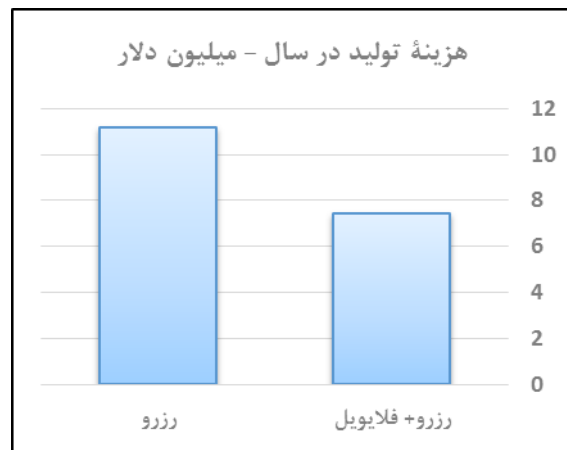
ب



الف



د



ج

شکل ۲۰-۴: مقایسه محاسبات اقتصادی سناریوی استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و رزرو چرخان با نرخ پایه ۱۸۵۰۰ با سناریوی فقط ذخیره ساز فلاپیول

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پروژه توسعه دانش فنی و بومی‌سازی تکنولوژی ذخیره‌ساز انرژی فلاپویل برای کاربرد در داخل کشور مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرحله اول: رصد فن‌آوری ذخیره‌ساز فلاپویل و تکنولوژی‌های مرتبط مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه این بررسی به شرح زیر بوده است:

- دانش فنی ذخیره‌ساز فلاپویل سرعت پایین در داخل کشور بومی‌سازی شده و از TRL بالا برخوردار است. علیرغم ساخت حداقل پنج نمونه آزمایشگاهی در سطح دانشگاه‌ها، این محصول بصورت صنعتی انبوه‌سازی نشده است.

- در زمینه ذخیره‌سازهای فلاپویل سرعت بالا طراحی و ساخت نمونه داخلی تاکنون انجام نشده و این نوع از فلاپویل‌ها از TRL پایین برخوردار می‌باشد. ذخیره‌ساز فلاپویل سرعت بالا ترکیبی از چند فن‌آوری‌های جانبی پیشرفته می‌باشد که نتیجه رصد این فن‌آوری‌ها در داخل کشور به شرح زیر بوده است:

- یاطاقان‌های مغناطیسی: علیرغم انجام پروژه‌های تحقیقاتی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، نمونه تجاری ساخته نشده است
- ساخت ماشین‌های الکتریکی دور بالا: دانش فنی موتورهای پر سرعت توان بسیار پایین در داخل کشور بومی‌سازی شده ولی در زمینه موتورهای پر سرعت توان بالا (مورد کاربرد در ذخیره‌ساز فلاپویل) اطلاعات بسیار محدود بوده است. عمده سازنده‌های موتورهای دور بالا وابسته به مراکز نظامی و هسته‌ای می‌باشند.

- مواد کامپوزیتی: در زمینه تولید و ساخت قطعات کامپوزیتی در سطح تجاری شرکت‌ها و مراکز متعددی فعال می‌باشند.

- درایو و کنترل موتور: دانش فنی طراحی و ساخت مدارات الکترونیک قدرت و درایو سمت فلاپویل و مبدل سمت در داخل کشور بومی‌سازی شده است.

بر اساس مطالعات انجام گرفته بومی‌سازی دانش فنی ذخیره‌ساز فلاپویل سرعت بالا نیازمند تحقیق، توسعه و حمایت از مراکز پژوهشی و دانشگاهی و شرکت‌های دانش‌بنیان به منظور دستیابی به دانش فنی فن‌آوری‌های پیش‌نیاز این محصول می‌باشد.

در مرحله دوم: در مرحله دوم این پروژه شناسایی و اولویت‌بندی حوزه‌های کاربردی ذخیره‌ساز فلاپویل در داخل کشور مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از رصد فن‌آوری فلاپویل در سطح بین‌الملل و مطالعه وضعیت مارکتینگ این محصول در دنیا، حوزه‌های کاربردی مناسب برای توسعه این محصول در آینده صنعت برق کشور مطابق جدول ۵-۱ شناسایی گردید. در ادامه با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (روش تاپسیس) بر اساس معیارهای زیر، حوزه‌های کاربردی ذخیره‌ساز فلاپویل رتبه‌بندی شدند:

۱. سود حاصل از صنعت فلاپویل برای سرمایه‌گذار
۲. مزیت اقتصادی برای بهره‌بردار ذخیره‌ساز فلاپویل در حوزه کاربردی خاص
۳. میزان مزیت اقتصادی و رضایت‌مندی مشترکین و مصرف‌کننده نهایی
۴. رنج‌پذیری و قابلیت تعمیم دانش فنی بدست آمده به حوزه‌های کاربردی دیگر
۵. اندازه بازار و رقابت‌پذیری فن‌آوری (توسعه‌پذیری غیر اشباع شونده)

۶. میزان وابستگی به تکنولوژی ساخت پیشرفته و امکان‌سنجی تجاری سازی

۷. معیار ریسک سرمایه گذاری

۸. درصد نفوذ حوزه کاربردی در آینده

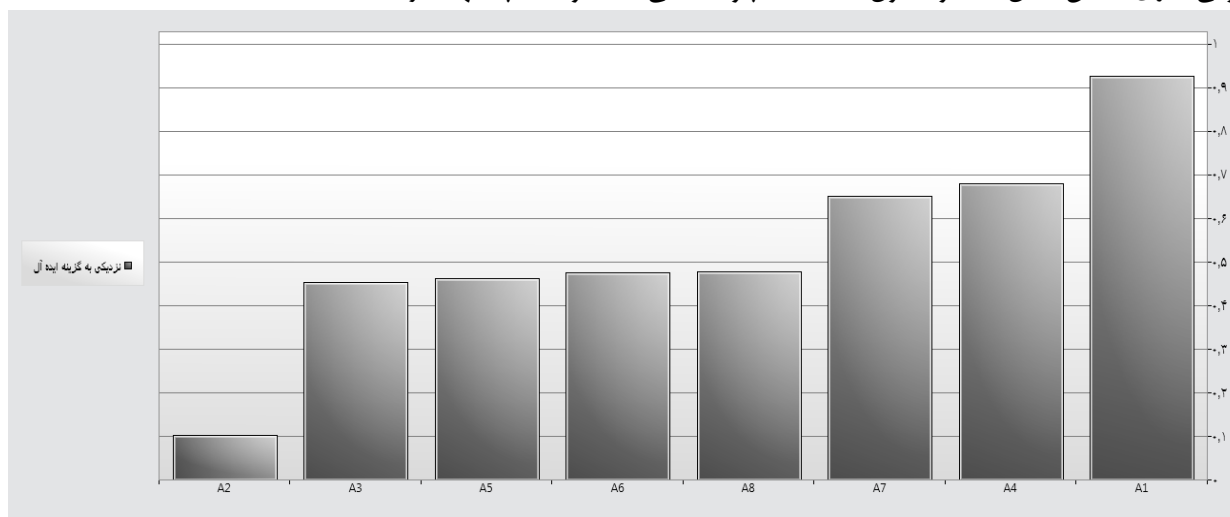
۹. میزان بهبود شاخص های زیست محیطی وسازگاری با محیط زیست

۱۰. درصد قطعیت داده های گردآوری شده

جدول ۱-۵: کاربردهای شناسایی شده برای ذخیره ساز فلاپیول

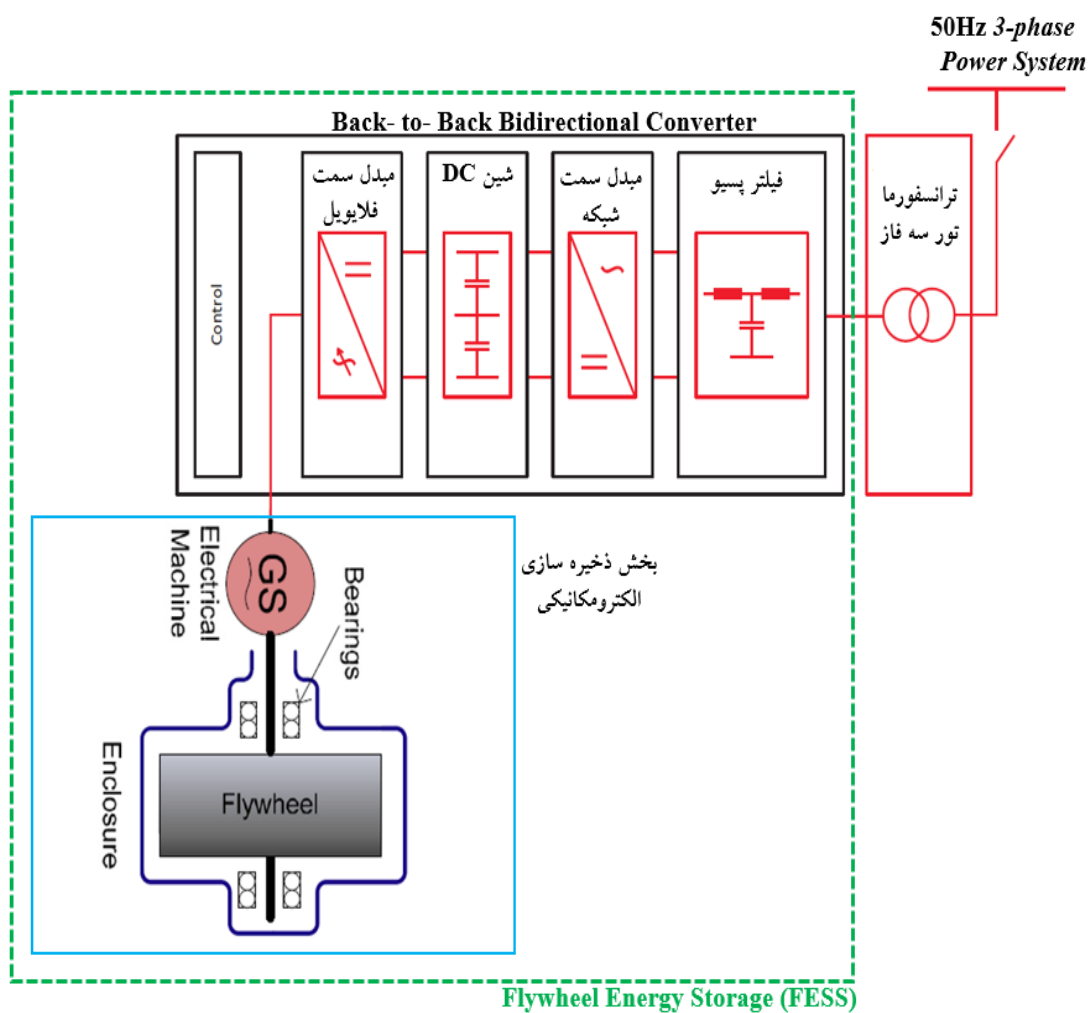
A1	کیفیت توان و تنظیم فرکانس (در حد ثانیه)
A2	حمل و نقل الکتریکی (محدوده ثانیه تا دقیقه)
A3	رزرو گردان (در حد دقیقه)
A4	منابع تغذیه بدون وقفه (در محدوده ثانیه و دقیقه)
A5	منابع تغذیه بدون وقفه (در محدوده ساعت)
A6	انرژی های تجدید پذیر (محدوده ساعت)
A7	انرژی های تجدید پذیر (محدوده دقیقه و ثانیه)
A8	پیک سایه مصرف کننده (در حد ساعت)

بعد از بررسی و گردآوری اطلاعات، از بین زمینه های مختلف کاربردی حوزه های کیفیت توان (تنظیم فرکانس)، منابع تغذیه بدون وقفه و منابع انرژی های تجدید پذیر در محدوده زمان ذخیره سازی ثانیه و دقیقه به ترتیب بهترین انتخاب جهت بومی سازی و تجاری سازی این فن آوری در داخل کشور شناسایی گردید. شکل ۱-۵ رتبه بندی حوزه های کاربردی مختلف را نمایش می دهد. پس از مطالعات نیاز سنجی و انجام مذاکرات با مدیران و کارشناسان مدیریت شبکه، بومی سازی اولین نمونه صنعتی ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا برای کاربرد ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس انتخاب گردید. بر اساس طراحی مفهومی انجام گرفته و مطابقت با محصولات خارجی برای کاربرد رگولاسیون فرکانس، مشخصات فنی ذخیره ساز فلاپیول مورد کاربرد جهت بومی سازی مطابق شکل ۲-۵ و جداول مشخصات پیوست فنی ۲-۵ و ۳-۵ پیشنهاد گردیده است.



شکل ۱-۵: رتبه بندی حوزه های کاربردی مختلف ذخیره سازی فلاپیول برای بومی سازی داخل کشور

مشخصات فنی ذخیره ساز فلابویل جهت بومی‌سازی در داخل کشور به شرح زیر می باشد:



شکل ۲-۵: اجزاء کلی ذخیره ساز فلابویل

جدول ۲-۵: مشخصات فنی ذخیره ساز فلاپیول

دیف	عنوان	High power	Power & energy
	توان نامی (kw)	۲۲۵	۱۵۰
	ظرفیت انرژی (kwh) در حالت شارژ کامل	۱۵	۳۰
	زمان دشارژ در توان نامی (دقیقه)	۴	۱۲
	تلفات آماده به کار (MWh/MW/hour)		۰.۰۳
	سرعت پاسخ در بار نامی		<1 sec
	ولتاژ ورودی (ولت)		۳-phase ۳۸۰ v
	راندمان شارژ و دشارژ (round trip efficiency)		۸۵٪
	محدوده سرعت کاری		۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه (سرعت نامی ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه)
	محدوده دمایی		Transport -۴۰ to +۷۰ °C Storage -۴۰ to +۷۰ °C Operation -۳۰ to +۴۰ °C
۰	سطح رطوبت قابل تحمل		۹۵٪
۱	فشار محفظه		< ۱ millitor
۲	نوع دیسک		کامپوزیت
۳	طول عمر (سال)		۲۰ (معادل ۱۰۰۰۰۰ مرتبه دشارژ با عمق دشارژ (DOD) ۱۰۰٪)
۴	نرخ های افزایش و کاهش توان خروجی (ramp rate) در توان نامی (میلی ثانیه)		۱۰۰
۵	شرایط نصب		نصب زیر زمین
۶	حداکثر ابعاد ذخیره ساز		۱۲۰*۱۲۰*۱۶۰ cm
۷	سطح نویز صوتی		۷۰ dbA
- قابلیت استفاده ماژولار برای سطوح توان و انرژی دلخواه - قابلیت مانیتورینگ وضعیت ذخیره ساز فلاپیول			

جدول ۳-۵: مشخصات فنی مبدل^۱ BTB مورد استفاده در ذخیره ساز فلاپیول

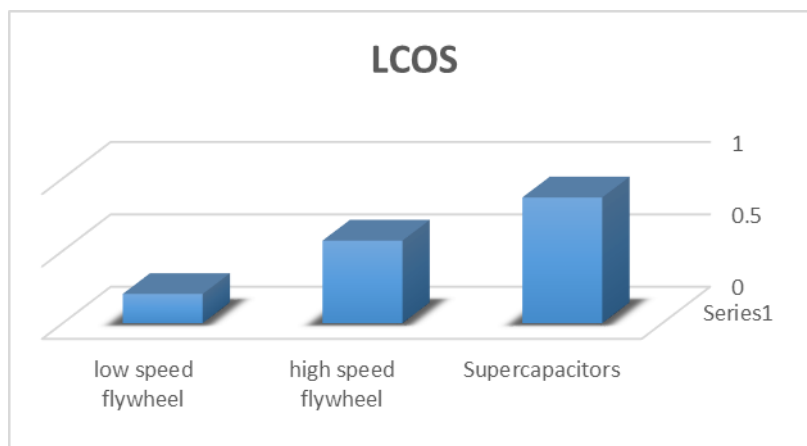
ردیف	پارامتر	مقادیر
۱	توان ظاهری مبدل ها	۲۵۰ کیلو ولت آمپر (این مقدار پیشنهادی بوده و بر حسب نیاز در پروژه طراحی می تواند تغییر کند)
۲	ولتاژ ترمینال ورودی	۳۸۰-۶۰۰ ولت با $\pm 10\%$
۳	فرکانس ورودی	$50 \pm 3 \text{ Hz} / 60 \pm 3 \text{ Hz}$
۴	نوع حفاظت	اضافه جریان اتصال کوتاه قطع فاز اتصال به زمین اضافه ولتاژ کاهش ولتاژ اضافه دما برای درایو حفاظت اضافه بار قفل شفت برای موتور عدم تعادل بار قطع بار قطع فاز
۵	درجه حفاظتی محفظه	حداقل IP۵۵
۶	حداکثر سطح نویز صوتی	۶۰ dBA
۷	ضریب قدرت	بیش از ۹۵٪ برای بار بیشتر از ۲۰٪
۸	راندمان مبدل ها	بیش از ۹۶٪ درصد تحت بار نامی
۹	هارمونیک مجاز جریان سمت شبکه	۳٪ Max (مطابق با الزامات IEC۵۱۹)
۱۰	نوع سیستم خنک سازی	Air cooling with enclosed cabinet
۱۱	محدوده های مجاز حرارتی	Transport -40 to +70 °C Storage -40 to +70 °C Operation -30 to +40 °C
۱۲	پروتکل های ارتباطی مورد نیاز	Field bus interface: EtherCAT, PROFINET IO, PROFIBUS-DP, CANopen and Modbus, ControlNet, InterBus-S, DeviceNet Ethernet interface: Ethernet interface with PC browser is included Control tool link: Optical DDCS communication link for communication with PC tools as standard
۱۳	تحميل اضافه بار	۱۵۰٪ حداکثر ۴ دقیقه، حالت گذرا ۲۵۰٪
۱۴	حداکثر رطوبت	۹۵ درصد
۱۵	سازگاری مغناطیسی	مطابق با استاندارد EN ۶۱۸۰۰-۳

در مرحله سوم: با وجود تکنولوژی ذخیره ساز ابر خازن به عنوان یکی از رقبای اصلی ذخیره ساز فلاپیول، هزینه یابی چرخه عمر این دو فن آوری در فصل سوم انجام گردید. بررسی نتایج محاسبات هزینه یابی چرخه عمر این دو فن آوری برای کاربرد کنترل فرکانس نشان می دهد هر دو نوع ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین و سرعت بالا دارای هزینه برابر شده (LCOE) و

¹ Back-to-Back

هزینه خالص ذخیره سازی (LCOS) کمتری نسبت به ذخیره ساز ابر خازن دارند و در نتیجه برای این کاربرد انتخاب بهتری می باشند. خلاصه نتایج محاسبات آنالیز هزینه یابی چرخه عمر در جدول ۴-۵ و شکل ۳-۵ نمایش داده شده است. جدول ۴-۵: مقایسه نتایج هزینه های TCC و LCC ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و سرعت پایین

ذخیره ساز ابر خازن	فلاپیول ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین	فلاپیول ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا	المان‌های هزینه
۱۰۶۶	۴۰۵/۹۵	۳۷۰/۴	C_{cap}
۳۴۱۵	۱۳۰۰/۴۸	۱۱۸۶۶	$C_{cap,a}$
۱۵/۰۴۷۵	۷۸۹	۲۰۹۶۵	$C_{OM,a}$
۵۸۱/۷۷۲	۲۱/۹۲۵	۱۲۸/۹۷	$C_{R,a}$
۰/۰۵۲۳۷	۰/۰۵۲۳۷	۰/۰۵۲۳	$C_{DR,a}$
۴۰۱۱/۸۷۹	۲۱۱۱/۴۶	۳۲۹۶۰/۶۵	$C_{LCC,a}$
۰/۹۲۲۴	۰/۲۶۸۶	۰/۶۲۹	LCOE
۰/۸۶۸۰	۰/۲۰۱۹	۰/۵۷۰	LCOS



شکل ۳-۵: مقایسه شاخص LCOS برای ذخیره سازهای فلاپیول سرعت پایین، فلاپیول سرعت بالا و ابر خازن

در مرحله چهارم: به منظور ارزیابی اقتصادی کاربری فن آوری ذخیره ساز انرژی فلاپیول برای کاربرد کنترل فرکانس در مقایسه با رزرو چرخان، سناریوهای مختلف مورد تحلیل و آنالیز اقتصادی قرار گرفت. در هر مورد میزان سرمایه گذاری اولیه (TCC)، جریان نقدی ورودی و خروجی سالیانه و محاسبه شاخص های سرمایه گذاری محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. سناریو های انجام شده در جدول ۵-۵ نمایش داده شده است:

جدول ۵-۵: سناریو های مختلف آنالیز اقتصادی ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

سناریو ۱	محاسبات اقتصادی بکار گیری از رزرو چرخان جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس
سناریو ۲	محاسبات اقتصادی بکار گیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

سناریو ۳	محاسبات اقتصادی بکارگیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت پایین جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس
سناریو ۴	محاسبات اقتصادی بکارگیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با در نظر گرفتن حذف هزینه های نیروگاهی ناشی از ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس
سناریو ۵	محاسبات اقتصادی بکارگیری از ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با در نظر گرفتن حذف هزینه های نیروگاهی ناشی از ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس
سناریو ۶	محاسبات اقتصادی بکارگیری ترکیبی ذخیره ساز فلاپیول و رزرو چرخان جهت ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

جدول ۶-۵: خلاصه محاسبات اقتصادی برای سناریو های مختلف

	Net present value ارزش خالص فعلی	Internal rate of return نرخ بازده داخلی		Return on Investment نرخ بازگشت سرمایه
سناریو ۱	-133.074952	-22.8214%		-0.8871
سناریو ۲	-472.089	-19.86152%		-0.84151
سناریو ۳	17.96	6.4926%		0.2956
سناریو ۴	1235.47	28.8%		2.20
سناریو ۵	1725.52	278%		28.40
سناریو ۶	1391.33	48.05		4.128

خلاصه محاسبات اقتصادی انجام شده برای هر یک از سناریو ها در جدول ۵-۶ ارائه شده است. تحلیل نتایج محاسبات اقتصادی سناریو های مختلف نشان می دهد:

- ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس با شرایط فعلی که عمدتاً مبتنی بر مشارکت واحد های گازی می باشد، از نظر اقتصادی توجیه پذیر نمی باشد. با وجو هزینه سرمایه نصب و راه اندازی پایین نیروگاه های گازی (نسبت به ذخیره ساز فلاپیول)، هزینه های بهره برداری (شامل هزینه تولید، هزینه تعمیر و نگهداری ثابت، هزینه فرصت، هزینه راندمان، هزینه فرسودگی و هزینه چرخه بالای کاری واحد های رزرو) بالا می باشد که این امر منجر به افت شاخص های اقتصادی و عدم توجیه اقتصادی این راهکار می باشد. علاوه بر این با توجه به نرخ شیب پاسخ (ramp rate) و زمان مرده واحد های گازی، کیفیت ارائه خدمات جانبی نیز چندان مطلوب نمی باشد.

- در صورت جایگزینی کامل ظرفیت رزرو موجود با تکنولوژی فلاپیول سرعت بالا (بدون در نظر گرفتن مزایای اقتصادی حاصل از این جایگزینی)، با توجه به هزینه سرمایه گذاری بسیار بالای نصب و راه اندازی ذخیره ساز فلاپیول با نرخ پایه فعلی توجیه پذیر نمی باشد. نتایج محاسبات نشان می دهد در صورتیکه نرخ پایه فعلی (۱۸۵۰۰) تا ۱۰۰۰۰۰ تومان بر مگا وات ساعت افزایش یابد در اینصورت با دوره بازگشت سرمایه گزاری ۱۲ ساله این سرمایه گذاری می تواند قابل توجیه باشد.

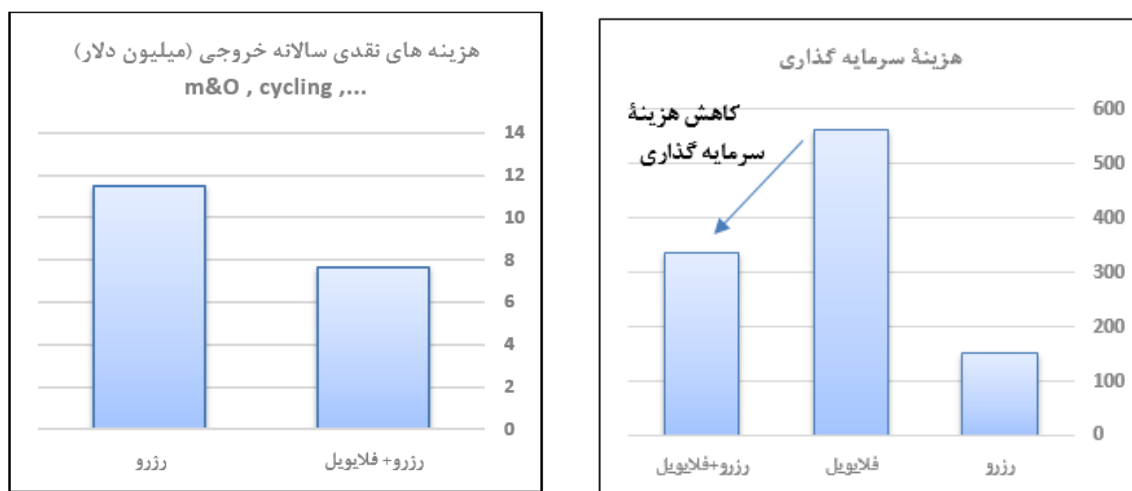
- با جایگزینی تکنولوژی فلاپیول بجای رزرو چرخان و معاف شدن نیروگاه‌ها از ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس، بخشی از هزینه‌های تحمیلی بر واحد‌های نیروگاهی مشارکت‌کننده در ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس حذف خواهد شد که مهمترین این هزینه‌ها عبارتند از:

- حذف هزینه تولید (مگا وات ساعت مورد درخواست برای ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس)
- جبران هزینه فرصت (سرمایه‌گذاری ظرفیت آزاد شده در فرصت‌های با عایدی بیشتر)
- کاهش هزینه فرسودگی، هزینه چرخه کاری، هزینه کاهش راندمان با حذف تنش‌های گذارای ناشی از عدم مشارکت واحد‌ها در ارائه خدمات جانبی کنترل فرکانس

- افزایش مجموع ظرفیت تولید نیروگاه‌های کشور با آزاد شدن ظرفیت رزرو چرخان

نتایج محاسبات اقتصادی نشان می‌دهد با حذف مولفه‌های هزینه‌ای فوق و در نظر گرفتن جریان نقدی سالانه مثبت حاصل از بکارگیری ذخیره ساز فلاپیول برای مالکین نیروگاه‌ها، بکارگیری ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا با دوره بازگشت سرمایه گذاری 3.5 قابل توجیه می‌باشد. این درحال ست که برای نوع سرعت پایین دوره بازگشت سرمایه از همان زمان شروع بهره برداری خواهد بود. در یک جمع بندی کلی می‌توان گفت **بکارگیری هر دو نوع ذخیره ساز فلاپیول سرعت بالا و سرعت پایین برای کاربرد جبران‌سازی فرکانس شبکه در سطح کلان صنعت برق از نظر اقتصادی قابل توجیه می‌باشد.** نتایج محاسبات نشان می‌دهد حتی با صفر کردن نرخ پایه خرید خدمات کنترل فرکانس باز هم **استفاده از ذخیره ساز فلاپیول برای مالکین نیروگاه‌ها قابل توجیه می‌باشد.** علاوه بر این با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد ذخیره ساز فلاپیول از نظر سرعت پاسخ دینامیکی (بالا ramp rate)، کیفیت ارائه خدمات جانبی نیز نسبت به رزرو چرخان بهتر خواهد بود که این مساله بهبود کیفیت توان و کاهش هزینه‌های ناشی از انحراف فرکانس برای کلیه مشترکین را به همراه خواهد داشت.

- از آنجاییکه ذخیره ساز فلاپیول (بخصوص نوع سرعت بالای آن) بسیار پرهزینه می‌باشد، تامین مالی جهت عملیاتی کردن این طرح یکی از چالش‌های پیش رو می‌باشد. **راهکار پیشنهادی در این پروژه استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول و رزرو چرخان می‌باشد که این ایده در واقع یک مصالحه بین هزینه سرمایه گذاری اولیه و مزایای فنی (کیفیت توان بهتر) و اقتصادی حاصل از بکارگیری یک فن آوری نوظهور می‌باشد.** در این راهکار ذخیره ساز فلاپیول می‌تواند برای جبران‌سازی مولفه‌های فرکانس بالای اغتشاش فرکانس استفاده شود، در حالیکه ظرفیت رزرو برای تامین مولفه‌های فرکانس پایین مورد بهره برداری قرار خواهد گرفت. در این شرایط با کاهش تنش‌های توان درخواستی با سیکل بالا از واحد‌های رزرو در شرایط بار سبک، هزینه بهره برداری واحد‌های رزرو کاهش خواهد یافت که در مجموع موجب کاهش هزینه بهره برداری خواهد شد. مزیت این راهکار کاهش ظرفیت مورد نیاز ذخیره ساز فلاپیول و در نتیجه کاهش هزینه سرمایه گذاری خواهد شد. در یک بررسی نتایج نشان می‌دهد با تخصیص ۵۰ مگا وات از ظرفیت مورد نیاز به ذخیره ساز فلاپیول و تامین ۱۰۰ مگاوات با استفاده از ظرفیت رزرو نیروگاهی (در مجموع ۱۵۰ مگا وات)، هزینه سرمایه گذاری را (نسبت به حالتی که کل ظرفیت مورد نیاز از طریق فلاپیول تامین شود) ۴۰٪ کاهش می‌دهد در حالیکه هزینه بهره برداری (نسبت به حالتی که فقط از رزرو استفاده شود) به میزان ۳۳٪ کاهش می‌دهد.



شکل ۴-۵: کاهش هزینه سرمایه گذاری و کاهش هزینه بهره برداری با استفاده ترکیبی از ذخیره ساز فلاپیول در کنار رزرو نیروگاهی

۶- فهرست مراجع

- [1] Pena-Alzola, R.; Sebastián, R.; Quesada, J.; Colmenar, "A. Review of Flywheel based Energy Storage Systems". In *Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Malaga, Spain*, 11–13 May 2011.
- [2] Smith, S.C., Sen, P.K., Kroposki, B, "Advancement of Energy Storage Devices and Applications in Electrical Power System", *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, 20-24 July 2008 Page(s):1- 8
- [3] Daoud, M.I.; Abdel-Khalik, A.S.; Massoud, A.; Ahmed, S.; Abbasy, N.H. "On The Development of Flywheel Storage Systems for Power System Applications", In *Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Marseille, France, 2–5 September 2012; pp. 2119–2125.
- [4] Alan Ruddell," Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies, Evaluation and recommended R&D strategy", storage technology report, *flywheel Project funded by the European Community under the 5th Framework Programme* (1998 - 2002), 2003-06-17
- [5] Park, J. Simple "flywheel energy storage using squirrel-cage induction machine for DC bus microgrid systems". In *Proceedings of the 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Glendale, AZ, USA, 7–10 November 2010; pp. 3040–3045.
- [6] Yu, Y.; Wang, Y.; Sun, F. The Latest Development of the Motor/Generator for the Flywheel Energy Storage System. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, Jilin, China, 19–22 August 2011; pp. 1228–1232.
- [7] Overview of storage technologies, "state of the art and trends of energy storage technologies"
- [8] Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage," 2014.
- [9] Siraj sabihuddin, Aristides E. Kiprakis and Markus mueller, "A numerical and graphical review of energy storage technologies", *energies open access journal* 2015, pp:172-216
- [10] Akhil, A.A.; Huff, G.; Currier, A.B.; Kaun, B.C.; Rastler, D.M.; Chen, S.B.; Cotter, A.L.; Bradshaw, D.T.; Gauntlett, W.D. *DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA; U.S. Department of Energy*: Oak Ridge, TN, USA, 2013.
- [11] J.I. San Martín, I. Zamora, J.J. San Martín V. Aperribay, P. Eguía, "Energy Storage Technologies for Electric Applications," 2011.
- [12] Genta, G. *Kinetic Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems*; Butterworth Heinemann Ltd.: London, UK, 1985.
- [13] IRENA (2017), *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [14] K Mongird , V Fotedar , V Viswanathan , V Koritarov , P Balducci , B Hadjerioua , J Alam", *Energy Storage Technology and Cost Characterization Report "* ,U.S. Department of Energy (DOE) , July 2019
- [15] Universitet, Uppsala, Sweden, 2011. 28. Parfomak, P.W. *Energy Storage for Power Grids and Electric Transportation: A Technology Assessment*; Congressional Research Services: Washington, DC, USA, 2012.

- [16] Hossein Azizi Moghaddam, Abolfazl Vahedi, Saeed Hasan Ebrahimi, "Design Optimization of Transversely Laminated Synchronous Reluctance Machine for Flywheel Energy Storage System Using Response Surface Methodology", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 64, Issue: 12, Dec. 2017
- [17] Liu, H.; Jiang, J. Flywheel energy storage—an upswing technology for energy sustainability. *Energy Build.* 2007, 39, 599–604
- [18] Bolund, B.; Bernhoff, H.; Leijon, M. Flywheel energy and power storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2007, 11, 235–258.
- [19] Pei Yulong, Andrea Cavagnino, Silvio Vaschetto, Chai Feng, Alberto Tenconi, "Flywheel energy storage systems for power systems application", *6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 27-29 June 2017, Pp 492-501
- [20] Gastón Orlando Suvire, Marcelo Gustavo Molina, , Pedro Enrique Mercado, "Improving the Integration of Wind Power Generation Into AC Microgrids Using Flywheel Energy Storage", *IEEE transaction on smart grid*, Volume: 3, Issue: 4, Dec. 2012
- [21] Francisco D'íaz-Gonzalez, Fernando D. Bianchi, Andreas Sumper , Member, IEEE, and Oriol Gomis-Bellmunt, *IEEE transaction on energy conversion* , "Control of a Flywheel Energy Storage System for Power Smoothing in Wind Power Plants"
- [22] Takahashi R, Tamura J (2007) Frequency Stabilization of Small Power system with Wind Farm by Using Flywheel Energy Storage System. In: *Proceeding of the IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)* Cracow, 6-8 Sept. 2007
- [23] Energy Storage Safety Strategic Plan, U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, December, 2014
- [24] vacuum for energy storage , Part 2: Solutions for stationary flywheel systems, PFEIFFER VACUUM
- [25] Jiancheng Zhang, Zhiye Chen, Lijun Cai, Yuhua Zhao, " Flywheel Energy Storage System Design for Distribution Network", *Power Engineering Society Winter Meeting*, IEEE, Volume 4, 23-27 Jan, 2000 Page(s):2619 - 2623 vol.4
- [26] Jiancheng Zhang, "Research on Flywheel Energy Storage System Using in Power Network", *Power Electronics and Drives Systems*, PEDS 2005. International Conference on Volume 2, 28-01 Nov. 2005 Page(s):1344 – 1347
- [27] Y. Suzuki, A. Koyanagi, M. Kobayashi, R. Shimada, "Novel applications of the flywheel energy storage system", *Energy Conference*, Elsevier, *Fuel and Energy* , Volume 47, Issue 1, January 2006, Pp. 20-26.
- [28] S. Eckroad, usan Schoenung, Consultant, Dan Mears and Harold Gottshall , " Handbook of Energy Storage for Transmission or Distribution Applications", *Advanced Energy Analysis*, EPRI PEAC, *Energy International*, Inc. December 2002
- [29] Bingsen Wang, Venkataramanan, G, "Dynamic Voltage Restorer Utilizing a Matrix Converter and Flywheel Energy Storage", *IEEE transaction on industry application*, VOL. 45, NO. 1, January/February 2009, Pp.222 – 231.
- [30] Bornemann, H.J., Sander, M., " Conceptual system design of a 5 MWh/100 MW superconducting flywheel energy storage plant for power utility applications ", *IEEE transaction on applied superconductivity* , VOL. 7, NO. 2, June 1997, Pp.398 – 401.
- [31] Satish Samineni, Brian K. Johnson, Herbert L. Hess, IEEE, and Joseph D. Law, "Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storage System for Voltage Sag Correction", *IEEE transaction on industry applications*, VOL. 42, NO. 1, January /February 2006

- [32]Cimuca, G.O.; Saudemont, C.; Robyns, B.; Radulescu, M.M., "Control and Performance Evaluation of a Flywheel Energy-Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator ", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Volume: 53, August 2009, Pp.1074 – 1085.
- [33]Xiang-Dong Sun; Kang-Hoon Koh; Byung-Gyu Yu; Matsui, M., "Fuzzy-Logic-Based v/f Control of an Induction Motor for a DC Grid Power-Leveling System Using Flywheel Energy Storage Equipment ", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.56, 2009. Pp. 3161 – 3168
- [34]Ana Rodrigues ID , Denise Machado and Tomaz Dentinho," *Electrical Energy Storage Systems Feasibility; the Case of Terceira Island, Sustainability* 2017
- [35] Behnam Zakeri n, SannaSyri , "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis ", *RenewableandSustainableEnergyReviews*, October 2014 , Pp.569–596
- [36]M. S. Mahdavi ; G. B. Gharehpetian ; P. Ranjbaran ; H. Azizi , " Frequency regulation of AUT microgrid using modified fuzzy PI controller for flywheel energy storage system" , *9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC2018)*
- [37]"Normal Frequency Management Strategic Review ",Information paper March 2017 , (<https://www.ea.govt.nz/development/advisory-technical-groups/disestablished-groups/wag/meeting-papers/2014/5-june-2014/>)
- [38]Information paper , " Frequency Control Essential System Services Acquisition: Cost Recovery and Governance" , August 2019
- [39]Herminé Nalbandian-Sugden , "Operating ratio and cost of coal power generation" @IEA clean coal centre ,December 2016
- [40]Jennie Jorgenson and Paul Denholm,"Modeling Primary Frequency Response for Grid Studies", *National Renewable Energy Laboratory(NREL),Technical Report* , NREL/TP-6A20-72355 , January 2019
- [41] Nicholas W. Miller , "Costs of Primary Frequency Regulation",Notes: 12/27/2017
- [42]L. Saarinen, P. Norrlund, W. Yang and U. Lundin, "Allocation of Frequency Control Reserves and Its Impact on Wear and Tear on a Hydropower Fleet," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 430-439, Jan. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2702280.
- [43]Yann Rebours, "A Comprehensive Assessment of Markets for Frequency and Voltage Control Ancillary Services", *Electric power. University of Manchester*, 2008
- [44]Report 2005-074 ,Costs for frequency reserve and regulation power options in IcelandECON-Report no 2005-074, Project no. 44380 Public ISSN: 0803-5113, ISBN 82-645-813-0, KLM/cjo, BTe, 27. September 2005
- [45]Peng Ji, Lipeng Zhu, Chao Lu, Wei Lin, Jürgen Kurths, "How Price-Based Frequency Regulation Impacts Stability in Power Grids" *A Complex Network Perspective , Complexity* (IF 2.833) , Pub Date : 2020-02-28 , DOI: 10.1155/2020/6297134
- [46]G. Verbic and F. Gubina, "Cost-based models for the power-reserve pricing of frequency control," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1853-1858, Nov. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.835668.
- [47]Brendan J. Kirby, "Frequency Regulation Basics and Trends",December 2004
- [48]U.S. Department of energy W. Chu and Y. Chen, "Feasible Strategy for Allocating Cost of Primary Frequency Regulation," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 508-515, May 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2012185.

