



بررسی جامع سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی باتری برای تنظیم فرکانس اولیه در سیستم‌های قدرت

سینا صمدی قره‌ورن^{1*}، مهروز نصیری²

1- دکتری مهندسی برق دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، s.samadi@tabrizu.ac.ir

2- دکتری مهندسی برق، شرکت توزیع نیروی برق استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران، m.nasiry@eaedc.ir

خلاصه

توسعه‌های اخیر در بخش برق نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر را تشویق می‌کند. علاوه بر این، سیاست‌های جهانی به دنبال استقرار گسترده خودروهای الکتریکی و حل نگرانی‌های فزاینده در مورد تغییرات آب‌وهوا هستند. به دلیل ویژگی‌های غیرقابل کنترل این بارها، این بارها چالش‌های جدیدی را در شبکه‌های توزیع ایجاد کرده‌اند که باعث افزایش دشواری اپراتورهای سیستم توزیع برای تضمین عملکرد ایمن و قابل اعتماد شبکه شده است. نیروگاه‌های متداول وظیفه تنظیم فرکانس و حفظ ثبات شبکه برق را بر عهده داشته‌اند، اما با کاهش سهم آنها، توانایی تنظیم فرکانس نیز کاهش می‌یابد. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری به‌عنوان یک راه‌حل وارد می‌شوند. این سیستم‌ها می‌توانند به سرعت پاسخ دهند و انرژی را در مقیاس بزرگ ذخیره و آزاد کنند، آنها می‌توانند نوسانات فرکانس را جبران کنند و ثبات شبکه را بهبود بخشند. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری با ارائه پاسخ سریع و چگالی انرژی بالا، یک دارایی ارزشمند برای شبکه‌های برق مدرن هستند. این مقاله به بررسی جامع نقش سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری در تنظیم فرکانس اولیه و مزایای آنها در افزایش انعطاف‌پذیری و مقاومت شبکه می‌پردازد.

کلمات کلیدی: تنظیم فرکانس، ذخیره‌سازی انرژی باتری، انرژی تجدیدپذیر، شبکه‌های مدرن انرژی

1. مقدمه

جایگزینی سیستم‌های تولید متداول با منابع تولید انرژی تجدیدپذیر متناوب دو تأثیر قابل توجه بر سیستم‌های برق دارد، یعنی کاهش اینرسی سیستم و ناپایداری فرکانس سیستم؛ بنابراین، تنظیم فرکانس به یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در سیستم‌های برق با اینرسی کاهش‌یافته تبدیل شده است. در شبکه‌های برق مدرن، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، تولید انرژی تجدیدپذیر و مدیریت سمت تقاضا به‌عنوان راه‌حل‌های بالقوه برای خدمات تنظیم فرکانس شناخته می‌شوند [1]. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، به‌عنوان مثال، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری، ابرخازن‌ها، سیستم‌های ذخیره‌سازی



انرژی چرخ گردان، و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی ابرسانا، به عنوان قابل‌اعتمادترین راه‌حل‌ها در میان این جایگزین‌ها در نظر گرفته می‌شوند. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی متمایز ویژگی‌های مختلفی دارند، یعنی زمان پاسخ، چگالی انرژی، چگالی توان، طول عمر و کارایی، و انتخاب یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی مناسب برای یک مرحله خاص از خدمات تنظیم فرکانس باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های فوق انجام شود. شایان ذکر است که سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری در حال حاضر برای خدمات تنظیم فرکانس استفاده می‌شود؛ زیرا دارای چگالی انرژی بالا، پاسخ سریع، نرخ خود - تخلیه پایین و تنوع مواد استفاده شده است [2]. در میان نوع شیمیایی مختلف باتری، باتری‌های لیتیوم - یون به عنوان فناوری غالب به خاطر مزیت‌های قابل توجه است.

این به طور متداول، روش‌های تنظیم فرکانس اولیه فرکانس سیستم را پس از یک رویداد اضطراری فرکانس به یک حالت پایدار جدید با استقرار کامل در 30 ثانیه می‌رسانند؛ بنابراین، نیازمند توان پیوسته برای یک دوره نسبتاً طولانی هستند [3]. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری یک گزینه مناسب برای هدف تنظیم فرکانس اولیه هستند؛ زیرا دارای پاسخ سریع و ظرفیت انرژی بالا هستند که می‌تواند تولید و تقاضا را با جذب یا تأمین توان بر اساس نیازهای شبکه متعادل کند.

این در حال حاضر، رزرو توان Hornsdale در جنوب استرالیا بزرگ‌ترین باتری لیتیوم - یون با نرخ 100 مگاوات/129 مگاوات ساعت است و از سال 2017 دو سرویس متمایز از جمله معاملات انرژی (خرید انرژی ارزان قیمت خارج از پیک مصرف و فروش آن در دوره‌های قیمت بالا) و ذخیره گردان اضطراری (پاسخ سریع به یک شرایط اضطراری) را ارائه می‌دهد. در سال 2017، پس از یک قطعی غیرمنتظره یک نیروگاه بزرگ زغال سنگ، رزرو توان Hornsdale توانست در چند میلی‌ثانیه با تزریق چندین مگاوات توان به سیستم پاسخ دهد و از یک خاموشی احتمالی را جلوگیری کرد [4]. چندین مطالعه برای تحلیل تأثیر سیستم‌های ذخیره ساز انرژی بر روی تنظیم فرکانس اولیه بر اساس بهبود پاسخ فرکانس و امکان‌پذیری اقتصادی انجام شده است. در [5]، یک راه‌حل ذخیره‌سازی چرخ گردان باتری هیبریدی، توسعه یافته توسط Schwungrad Energie Limited، ایرلند، برای ارائه پاسخ افت متغیر ارائه شده است.

فرکانس یکی از مهم‌ترین معیارهایی است که ثبات یک سیستم برق را نشان می‌دهد. هرگونه عدم تطابق بین تقاضا و تولید نوسانات فرکانس را ایجاد می‌کند. مازاد تولید باعث افزایش فرکانس می‌شود، درحالی‌که کمبود تولید باعث کاهش فرکانس می‌شود. برای دستیابی به عملکرد پایدار، لازم است فرکانس در محدوده مجاز نگهداری شود تا احتمال قطع تولید و بار کاهش یابد. مجموعه‌های مختلفی از استانداردهای تنظیم فرکانس توسط اپراتورهای مختلف سیستم برای رویدادهای اسمی و اضطراری تعریف شده است. استانداردهای عملیاتی فرکانس تعریف شده توسط شبکه اروپایی اپراتورهای سیستم انتقال برای برق (ENTSO-E) در جدول 1 ارائه شده است.

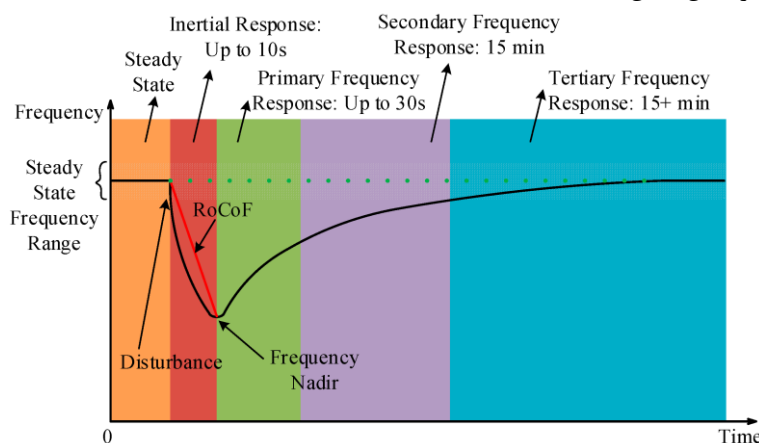
جدول 1- اطلاعات شبکه ENTSO-E [1]

انگلستان	قاره اروپا	
± 2	± 0.05	محدوده انحراف فرکانس استاندارد (هرتز)
0.8	0.8	حداکثر انحراف فرکانس لحظه‌ای (هرتز)
0.5	0.2	حداکثر انحراف فرکانس حالت پایدار (هرتز)
± 0.5	-	محدوده بازیابی فرکانس (هرتز)
60	-	زمان بازیابی فرکانس (ثانیه)
0.2	-	محدوده بازیابی فرکانس (هرتز)
600	900	زمان بازیابی فرکانس (ثانیه)



در سیستم‌های برق متداول، ژنراتورهای سنکرون به طور آنی و طبیعی، یعنی بدون کنترل یا اندازه‌گیری، سرعت را با جذب/تأمین انرژی به سیستم برق در صورت عدم تطابق تولید و تقاضا افزایش/کاهش می‌دهند. تغییرات معمولی فرکانس پس از وقوع یک رویداد و اقدامات لازم برای کاهش انحراف فرکانس در شکل 1 نشان داده شده است. در یک سیستم برق متداول، در طول رویدادهای فرکانس، ژنراتورهای سنکرون دینامیک فرکانس را با آزادسازی یا جذب انرژی جنبشی ذخیره شده در رزروهای چرخان خود بهبود می‌بخشند. این ویژگی ذاتی پاسخ اینرسی نامیده می‌شود. معمولاً تا 10 ثانیه طول می‌کشد که به ویژگی‌های سیستم بستگی دارد. این مرحله توسط تنظیم فرکانس اولیه دنبال می‌شود که فرکانس را در عرض چند ثانیه (معمولاً در عرض 30 ثانیه) به یک مقدار پایدار جدید پایدار می‌کند. تنظیم فرکانس ثانویه انحراف حالت پایدار را که پس از تنظیم فرکانس اولیه ظاهر می‌شود، حذف می‌کند و فرکانس را به مقدار اسمی خود در عرض 30 تا 30 دقیقه بازمی‌گرداند [3]. در سیستم‌های برق مدرن با تعداد کمی ژنراتور سنکرون، کاربردهای چندین جایگزین از جمله منابع تولید انرژی تجدیدپذیر (توربین بادی و خورشیدی فتوولتائیک)، بارهایی که از مدیریت سمت تقاضا استفاده می‌کنند و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی برای خدمات تنظیم فرکانس مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از میان آنها، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر برای بهبود پاسخ فرکانس به دلیل پاسخ سریع و ظرفیت ذخیره‌سازی قابل توجه نشان داده شده‌اند [6].

ذخیره‌سازهای مقیاس - کاربردی اغلب به‌عنوان ذخایر عملیاتی استفاده می‌شوند و خدمات جانبی را ارائه می‌دهند که در مقیاس‌های زمانی متفاوتی، از ثانیه تا ساعت، عمل می‌کنند. از آنجاکه باتری‌ها می‌توانند به سرعت شارژ/دشارژ شوند، برای خدمات جانبی کوتاه‌مدت مانند تنظیم فرکانس اولیه مناسب هستند؛ بنابراین، کنترل افت فرکانس - توان باتری بهبود قابل توجهی در تنظیم فرکانس نشان داده است [7].



شکل 1 - مراحل پاسخ فرکانس مشخص شده توسط ENTSO-E [1].

2. تکنیک‌های تنظیم فرکانس اولیه

مطالعات زیادی برای بررسی استفاده از ژنراتورهای توربین بادی با سرعت متغیر برای خدمات تنظیم فرکانس اولیه انجام شده است. برای انجام این کار، ژنراتورهای توربین بادی با سرعت متغیر (به‌عنوان مثال، ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه) باید به صورت کمینه‌سازی عمل کنند و توان خروجی کمتری نسبت به توان در دسترس ارائه دهند [8]. این امر در دسترس بودن یک ذخیره گردان را برای ارائه توان اکتیو در صورت وقوع رویداد اضطراری فرکانس تضمین می‌کند. کم‌بار



شدن به دو نوع، یعنی حالت دلتا و حالت متعادل تقسیم می‌شود [9]. در حالت دلتا، خروجی با یک درصد تعریف شده از توان در دسترس کاهش می‌یابد، درحالی‌که در حالت متعادل، توان خروجی با یک مقدار ثابت کاهش می‌یابد. کم‌بار شدن اغلب با پیچاندن پره‌ها انجام می‌شود. با انجام این کار، توان مرجع برای کنترل پره به یک مقدار خاص تنظیم می‌شود تا یک سطح کم‌بار شدن هدفمند حاصل شود.

بیشتر مطالعات یک روش کنترل افت را برای ارائه تنظیم فرکانس اولیه توسط توربین‌های بادی اتخاذ کرده‌اند که دوباره به کنترل افت ثابت و متغیر تقسیم می‌شود. کنترل افت ثابت شبیه کنترل فرمان ژنراتور سنکرون متداول است که توان اکتیو را بر اساس انحراف فرکانس تأمین می‌کند. در روش کنترل افت متغیر، شیب باند مرده می‌تواند بر اساس سطح کم‌بار شدن و سرعت باد تنظیم شود. گفته می‌شود که این روش پاسخ فرکانس را بهبود می‌بخشد درحالی‌که بار اضافی سازه‌ای را کاهش می‌دهد و به هر توربین بادی اجازه می‌دهد تا بر اساس ذخیره توان در دسترس خود بر اساس سرعت باد محلی در تنظیم فرکانس اولیه شرکت کند [10].

در مقالات، روش‌های کنترل فرکانس اولیه رایج استفاده شده با استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی شامل کنترل کم‌بار شدن و کنترل توان دلتا است. در کنترل کم‌بار شدن، سیستم نیروگاه‌های خورشیدی با بهره‌برداری دور از نقطه توان حداکثری خود به کنترل فرکانس اولیه کمک می‌کند. هدف این است که بخشی از خروجی نیروگاه را به‌عنوان ذخیره نگه دارد تا هر زمان که افزایشی در توان بار وجود داشته باشد، بتوان از توان ذخیره برای تنظیم فرکانس استفاده کرد. در [11]، کنترل افت مرسوم در حلقه کنترل گنجانده شده است تا توان نیروگاه خورشیدی را بر اساس انحراف فرکانس تنظیم کند. یک تکنیک کم‌بار شدن تطبیقی در [12] معرفی شده است که به نیروگاه اجازه می‌دهد تا خروجی توان خود را بر اساس انحراف سریع فرکانس تنظیم کند. کنترل توان دلتا یک روش دیگر است که به مجموعه خاصی از پانل‌های خورشیدی اجازه می‌دهد تا در نقطه توان حداکثری خود عمل کنند درحالی‌که دیگران کم‌بار می‌شوند تا یک ذخیره ایجاد کنند. نقطه کار را برای محدود کردن خروجی توان سلول خورشیدی تنظیم می‌کنند که منجر به تولید توان دلتا می‌شود. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در با جذب/تأمین توان از/به شبکه بر اساس انحراف فرکانس شرکت می‌کنند. انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از: ابرخازن‌ها، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی چرخ گردان، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی ابررسانا و باتری‌ها.

ابرخازن‌ها ویژگی‌های باتری‌های الکتروشیمیایی و خازن‌های مرسوم را دارند. برای دستیابی به عملکرد بالا، ظرفیت یک ابرخازن می‌تواند با استفاده از نانومواد برای افزایش سطح الکترود خود افزایش یابد. ابرخازن‌ها در تنظیم فرکانس اولیه و تنظیم فرکانس ثانویه بر اساس یک کنترل پیش‌بینی تطبیقی شرکت می‌کنند. با این حال، به دلیل چگالی توان بالا و کارایی بالا، آنها برای برنامه‌های کوتاه‌مدت به جای برنامه‌های بلندمدت مناسب هستند [13]. سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ گردان یک دستگاه ذخیره‌سازی الکترومکانیکی است که انرژی را به‌صورت انرژی جنبشی یک توده چرخان ذخیره می‌کند که شامل یک استوانک چرخان جفت شده با یک ماشین الکتریکی است که در هنگام شارژ و دشارژ به ترتیب به‌عنوان موتور و ژنراتور عمل می‌کند. یک روش کنترل افت بر اساس ظرفیت شارژ چرخ‌های گردان به‌منظور شرکت در تنظیم فرکانس اولیه پیشنهاد شده است و بیان شده است که مشارکت چرخ گردان نیاز به توربین‌های بادی برای عمل در حالت کم‌بار شدن را کاهش داده است. با این حال، چرخ گردان دارای چگالی انرژی پایین هستند که باعث می‌شود کار با آنها به‌عنوان یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی مستقل دشوار باشد [14].



جدول 2- ویژگی‌های سیستم‌های مختلف ذخیره‌ساز انرژی

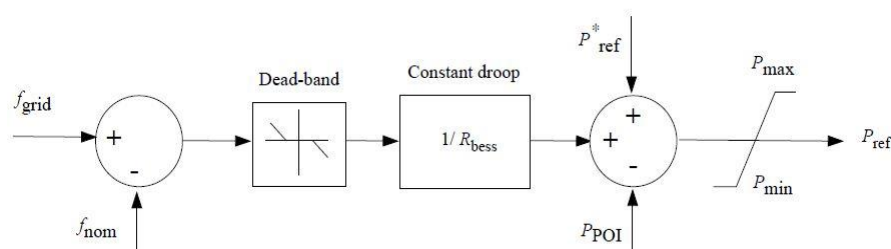
نوع	چگال توان (MW/m ³)	چگالی انرژی (kWh/m ³)	هزینه انرژی (\$/kWh)	راندمان چرخه (%)	چرخه عمر
چرخ گردان	1 - 2/5	20 - 100	1000 - 14000	90 - 95	20000 - 100000
باتری لیتیوم - یونی	0/4 - 2	200 - 600	240 - 2500	90 - 97	بالاتر 20000
مغناطیسی ابرسانا	1 - 4	20 - 100	1000 - 10000	95 - 98	20000 - 100000
ابرخازن	0/4 - 10	4 - 100	500 - 15000	90 - 97	50000 - 100000

3. تنظیم فرکانس اولیه توسط ذخیره‌سازهای باتری

کاربردهای تنظیم فرکانس اولیه رایج ذخیره‌ساز باتری استراتژی‌های کنترل مبتنی بر قانون، کنترل، پیش‌بینی مدل و روش‌های کنترل افت (روش‌های افت ثابت و متغیر) هستند. در [15]، یک روش کنترل مبتنی بر قانون که محدودیت‌های وضعیت شارژ را بر اساس تحلیل آماری اندازه‌گیری فرکانس تنظیم می‌کند، برای باتری پیشنهاد شده است تا تنظیم فرکانس را ارائه دهد. هدف اصلی این روش بهینه‌سازی ظرفیت باتری برای حداکثر سود سرمایه گذاری است. بنابراین، تأثیر این روش بر فرکانس شبکه به طور کامل در نظر گرفته نشده است. یک استراتژی کنترل مبتنی بر ماشین حالت برای باتری‌های شرکت‌کننده برنامه تنظیم ولتاژ اولیه در برای پشتیبانی از نیروگاه‌های بادی توصیف شده است و به جای اینکه اجازه دهد وضعیت شارژ باتری بین حداکثر و حداقل محدودیت‌ها تغییر کند، آن را برای کار در یک مقدار بهینه 50 درصد برای حفظ طول عمر باتری کنترل می‌کند. روش‌های کنترل افت عمدتاً به دو نوع کنترل افت ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند.

1.3 کنترل افت ثابت

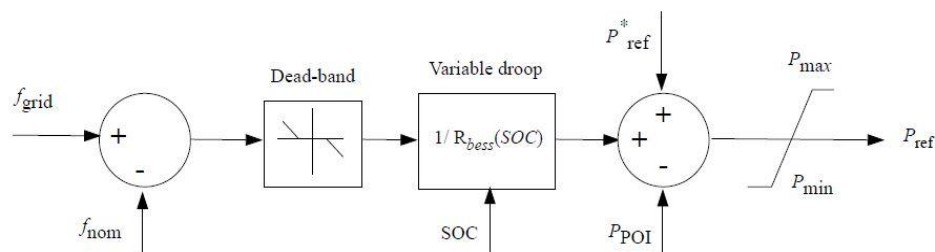
همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است، یک روش کنترل افت ثابت رابطه خطی بین فرکانس و خروجی توان باتری دارد. در شکل 2، f_{grid} فرکانس شبکه و f_{nom} فرکانس اسمی است. یک باند مرده اعمال می‌شود تا اطمینان حاصل شود که تنظیم فرکانس اولیه فقط پس از انحراف فرکانس $f_{grid} - f_{nom}$ از یک مقدار از پیش تعریف شده (به عنوان مثال، ± 0.003 pu) تأمین می‌شود. P_{ref}^* نقطه تنظیم مرجع نیروگاه و P_{POI} توان اندازه‌گیری شده در نقطه اتصال است. R_{bess} ضریب افت است. ضریب افت ژنراتورهای متداول به طور معمول در 0.04 یا 0.05 pu تنظیم می‌شود. P_{min} و P_{max} حداکثر و حداقل محدودیت‌های توان هستند. در [16]، کنترل افت متداول با ضریب افت قابل تنظیم، حداکثر/حداقل توان قابل تنظیم و باند مرده قابل تنظیم برای یک ذخیره ساز باتری 1 مگاواتی پیشنهاد شده است تا تنظیم فرکانس را برای جزایر هاوایی فراهم کند.



شکل 2 – روش کنترل افت ثابت [17]

2.3 کنترل افت متغیر

با یک روش کنترل افت ثابت، در طول رویدادهای زیر فرکانس، ذخیره‌ساز باتری می‌تواند به محدوده وضعیت شارژ حداقل برسد درحالی‌که رویدادهای بیش از فرکانس می‌تواند باعث شود این مقدار به حداکثر برسد؛ بنابراین، شارژ بیش از حد ممکن است رخ دهد که منجر به تخریب باتری می‌شود [17]. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است، یک روش کنترل افت متغیر وضعیت شارژ باتری را در نظر می‌گیرد تا از چنین سناریوهایی اجتناب شود. R_{bess} ضریب افت متغیر است. در [18]، چندین روش کنترل افت اصلاح شده با ضریب افت متمایز برای شارژ/دشارژ برای باتری ارائه‌دهنده تنظیم ولتاژ اولیه پیشنهاد شده است. تمرکز اصلی این روش‌ها حفظ طول عمر باتری با اجازه دادن به باتری‌هایی با وضعیت شارژ بالا برای ارائه توان بیشتر و باتری‌هایی با وضعیت شارژ پایین برای ارائه توان کمتر در طول یک رویداد دشارژ است.



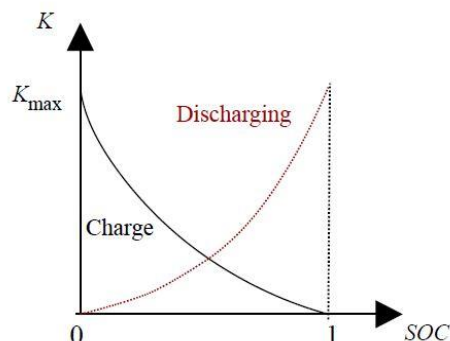
شکل 3 – روش کنترل افت متغیر [17]

1.2.3 روش محافظه کارانه

استراتژی محافظه کارانه یک روش کنترل مبتنی بر وضعیت شارژ در دسترس باتری را طبق رابطه (1) پیشنهاد می‌کند.

$$k = k_{\max} * \begin{cases} SOC^2 (\Delta f \leq 0) \\ (1 - SOC)^2 (\Delta f > 0) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن $k_{\max}$ حداکثر مقدار افت و K ضریب افت است. شکل 4 رابطه بین ضریب افت و وضعیت باتری را نشان می‌دهد که باتوجه به وضعیت شارژ نسبت توان خروجی را تعیین می‌کند.

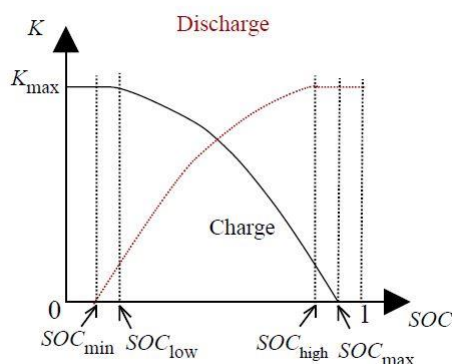


شکل 4 - روش محافظه کارانه

2.2.3 روش رادیکال

همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است، استراتژی رادیکال از حداکثر وضعیت شارژ (SOC_{max})، حداقل (SOC_{min})، و همچنین وضعیت شارژ بالا (SOC_{high}) و پایین (SOC_{min}) برای محدود کردن خروجی توان باتری استفاده می‌کند. در [20]، برای SOC_{min} و SOC_{high} مقادیر 20٪ و 80٪ برای حفظ طول عمر باتری به کار می‌روند.

$$k = k_{max} * \begin{cases} (1 - (\frac{SOC - SOC_{high}}{SOC_{min} - SOC_{high}})^2)(\Delta f \leq 0) \\ (1 - (\frac{SOC - SOC_{low}}{SOC_{max} - SOC_{low}})^2)(\Delta f > 0) \end{cases} \quad (2)$$



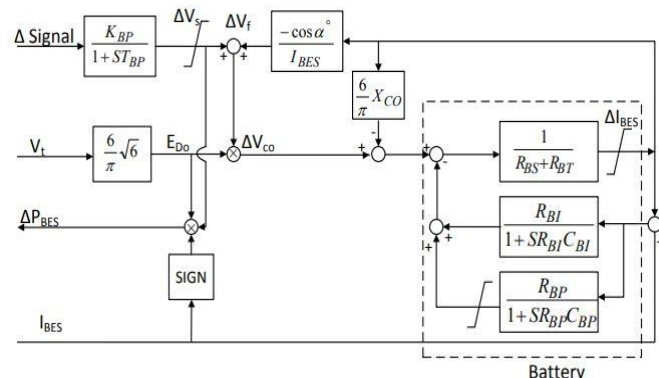
شکل 5 - روش رادیکال

4. مدل‌های دینامیکی باتری برای تنظیم فرکانس

چندین مدل باتری با مزایا و محدودیت‌های مختلف برای خدمات تنظیم فرکانس، از جمله مدل Thevenin، مدل غیرخطی Shephard، مدل تأخیر مرتبه اول، مدل تأخیر مرتبه اول با وضعیت شارژ باتری و مدل افزایشی ذخیره‌ساز باتری در [20] پیشنهاد شده است. با یک منبع ولتاژ، مقاومت سری و یک شاخه RC موازی، مدل Thevenin رفتار دینامیکی



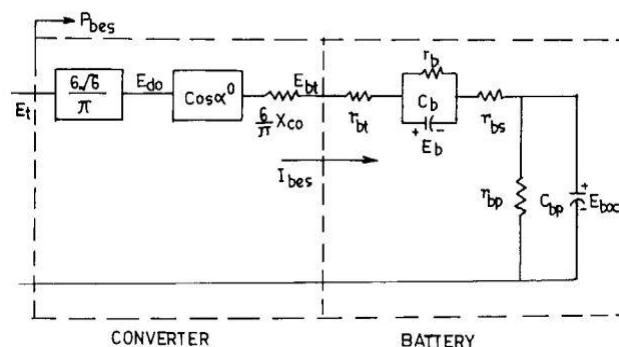
یک باتری را تا حد زیادی نشان می‌دهد. اضافه کردن بیشتر شاخه‌های RC می‌تواند پاسخ دینامیکی را بهبود بخشد، اما به دلیل سازش بین پیچیدگی و هزینه محاسباتی، برای خدمات تنظیم فرکانس مناسب نیست.



شکل 6 - مدل دینامیکی مدار معادل باتری [21]

در [21]، مدل Thevenin برای مطالعات تنظیم فرکانس اولیه به کار گرفته می‌شود، وابستگی وضعیت باتری به پارامترهای باتری نادیده گرفته می‌شود. مدل‌های تأخیر مرتبه اول و مدل‌های تأخیر مرتبه اول با وضعیت شارژ اغلب برای خدمات تنظیم فرکانس استفاده می‌شوند، به ویژه برای مطالعات تنظیم فرکانس ثانویه.

در [22]، یک مدل تأخیر مرتبه اول برای ارزیابی عملکرد یک کنترل‌کننده PI برای تنظیم فرکانس در یک سیستم ترکیبی حرارتی خورشیدی-بادی استفاده می‌شود. هدف بهینه‌سازی سود کنترل‌کننده‌های PI در سیستم ترکیبی است. در [23]، یک مدل تأخیر مرتبه اول با وضعیت شارژ برای کاهش انحراف فرکانس در تولید انرژی بادی استفاده می‌شود و عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از یک مدل کنترل فرکانس بار دو ناحیه شبیه‌سازی می‌شود. حتی اگر فقط یک پارامتر (ثابت زمانی) مورد نیاز باشد، ویژگی‌های داخلی در هیچ‌یک از مدل‌های فوق‌الذکر نشان داده نمی‌شوند. در [24]، ذخیره ساز باتری با استفاده از یک مدل که یک باتری معادل را متصل می‌کند، نشان داده شده است که در آن باتری به عنوان یک ظرفیت و مقاومت معادل نشان داده می‌شود. با این حال، یک شاخه RC موازی برای توصیف تغییرات انرژی و ولتاژ در طول شارژ یا دشارژ اضافه می‌شود؛ وابستگی وضعیت شارژ در نظر گرفته نشده است. مدل افزایشی شبیه مدار معادل باتری است و به طور گسترده‌ای در مطالعات کنترل فرکانس بار استفاده می‌شود [25]. تنها تفاوت در مدل باتری افزایشی این است که ولتاژ ترمینال باتری به عنوان یک سیگنال ورودی در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل 7 - مدار معادل ذخیره‌ساز باتری [25]



در [26]، باتری به عنوان یک منبع ولتاژ در سری با یک مقاومت نشان داده می‌شود. با این حال، دینامیک مبدل dc-dc و مبدل‌های منبع ولتاژ در نظر گرفته نمی‌شوند؛ اثر وضعیت شارژ در نظر گرفته نشده است. مدل باتری به کار گرفته شده در این تحقیق مدل Shephard است که رفتار الکتروشیمیایی یک باتری را به لحاظ ولتاژ ترمینال، ولتاژ مدار باز، مقاومت داخلی، جریان شارژ/دشارژ و وضعیت شارژ توصیف می‌کند.

5. نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی جامع نقش سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری در تنظیم فرکانس اولیه و مزایای آنها در افزایش انعطاف‌پذیری و مقاومت شبکه می‌پردازد. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری با ارائه پاسخ سریع و چگالی انرژی بالا، یک دارایی ارزشمند برای شبکه‌های برق مدرن هستند. اگر استفاده از ذخیره‌ساز انرژی باتری به عنوان یک خدمات جانبی مثل تنظیم ولتاژ اولیه پیشنهاد شود، مهم است که فرکانس را بالاتر از محدودیت‌های قطع بار حفظ کنیم تا زمانی که ذخایر غیرگردان به خدمت گرفته شوند. در میان تکنیک‌های مختلف ذخیره‌ساز باتری برای تنظیم این ویژگی، استراتژی کنترل افت متغیر به عنوان یک روش ساده و آسان برای پیاده‌سازی در نظر گرفته می‌شود. یک ویژگی ضروری برای داشتن در این روش‌های کنترل افت متغیر، تعادل مناسب بین ارائه خدمات تنظیم فرکانس اولیه و حفظ وضعیت شارژ باتری است. از آنجاکه اولویت‌دادن به تعادل وضعیت شارژ به جای شرکت در تنظیم فرکانس اولیه می‌تواند منجر به شکست تنظیم شود، هزینه جریمه ارزیابی شده برای شکست تنظیم را افزایش می‌دهد.

7. مراجع

- 1.Akram, U., Nadarajah, M., Shah, R., & Milano, F. (2020). A review on rapid responsive energy storage technologies for frequency regulation in modern power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109626.
- 2.Zhu, D., & Zhang, Y. J. A. (2018). Optimal coordinated control of multiple battery energy storage systems for primary frequency regulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(1), 555-565.
- 3.Kundur, P. (2007). Power system stability. *Power system stability and control*, 10, 7-1.
- 4.Ahrari, M., Shirini, K., Gharehveran, S. S., Ahsae, M. G., Haidari, S., & Anvari, P. (2024). A security-constrained robust optimization for energy management of active distribution networks with presence of energy storage and demand flexibility. *Journal of Energy Storage*, 84, 111024.
- 5.Sørensen, D. A., Pombo, D. V., & Iglesias, E. T. (2023). Energy storage sizing for virtual inertia contribution based on ROCOF and local frequency dynamics. *Energy Strategy Reviews*, 47, 101094.
- 6.Cheng, Y., Azizipanah-Abarghooee, R., Azizi, S., Ding, L., & Terzija, V. (2020). Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review. *Applied Energy*, 279, 115798.



7. Tejaswi, P., & Gnana Swathika, O. V. (2023). A Review on Optimum Location and Sizing of DGs in Radial Distribution System. *Integrated Green Energy Solutions Volume 2*, 103-132.
8. Li, L., Zhu, D., Zou, X., Hu, J., Kang, Y., & Guerrero, J. M. (2023). Review of frequency regulation requirements for wind power plants in international grid codes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113731.
9. Gharehveran, S. S., Zadeh, S. G., & Rostami, N. (2023). Resilience-oriented planning and pre-positioning of vehicle-mounted energy storage facilities in community microgrids. *Journal of Energy Storage*, 72, 108263.
10. Buckspan, A., Aho, J., Fleming, P., Jeong, Y., & Pao, L. (2012, July). Combining droop curve concepts with control systems for wind turbine active power control. In *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications* (pp. 1-8). IEEE.
11. Lyu, X., Xu, Z., & Zhao, J. (2018). A coordinated frequency control strategy for photovoltaic system in microgrid. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 8(1), 37-43.
12. Yan, G., Liang, S., Jia, Q., & Cai, Y. (2019). Novel adapted de-loading control strategy for PV generation participating in grid frequency regulation. *The Journal of Engineering*, 2019(16), 3383-3387.
13. Gharehveran, S. S., Ghassemzadeh, S., & Rostami, N. (2022). Two-stage resilience-constrained planning of coupled multi-energy microgrids in the presence of battery energy storages. *Sustainable Cities and Society*, 83, 103952.
14. Kani, S. A. P., Wild, P., & Saha, T. K. (2018). Improving predictability of renewable generation through optimal battery sizing. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(1), 37-47.
15. Gammanpila, W., Jayasooriya, N., & Kularathna, A. S. (2024, May). Review on Economic Analysis of Grid-tied Battery Storage Systems and Optimization Strategies. In *Proceedings of Conference on Transdisciplinary Research in Engineering* (Vol. 1, No. 1).
16. Stein, K., Tun, M., Matsuura, M., & Rocheleau, R. (2018). Characterization of a fast battery energy storage system for primary frequency response. *Energies*, 11(12), 3358.
17. Lu, X., Sun, K., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Huang, L., & Teodorescu, R. (2012, May). SoC-based droop method for distributed energy storage in DC microgrid applications. In *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 1640-1645). IEEE.
18. Fang, C., Tang, Y., Ye, R., Lin, Z., Zhu, Z., Wen, B., & Ye, C. (2020). Adaptive control strategy of energy storage system participating in primary frequency regulation. *Processes*, 8(6), 687.
19. Li, X., Huang, Y., Huang, J., Tan, S., Wang, M., Xu, T., & Cheng, X. (2014, October). Modeling and control strategy of battery energy storage system for primary frequency regulation. In *2014 International Conference on Power System Technology* (pp. 543-549). IEEE.



20. Chatzigeorgiou, N. G., Theocharides, S., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2024). A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector. *Journal of Energy Storage*, 86, 111192.
21. Lei, B., Li, X. R., Huang, J. Y., & Tan, S. J. (2014). Droop configuration and operational mode setting of battery energy storage system in primary frequency regulation. *Applied Mechanics and Materials*, 448, 2235-2238.
22. Falope, T., Lao, L., Hanak, D., & Huo, D. (2024). Hybrid energy system integration and management for solar energy: A review. *Energy Conversion and Management*: X, 100527.
23. Toge, M., Kurita, Y., & Iwamoto, S. (2013, July). Supplementary load frequency control with storage battery operation considering SOC under large-scale wind power penetration. In 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1-5). IEEE.
24. Mao, S., Chen, J., & Liu, M. (2024). A review of the energy storage system as a part of power system: Modelling, simulation and prospect. *Electric Power Systems Research*, 233, 110448.
25. Ram Babu, N., Bhagat, S. K., Saikia, L. C., Chiranjeevi, T., Devarapalli, R., & García Márquez, F. P. (2023). A comprehensive review of recent strategies on automatic generation control/load frequency control in power systems. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(1), 543-572.
26. Calero, F., Cañizares, C. A., & Bhattacharya, K. (2020). Dynamic modeling of battery energy storage and applications in transmission systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1), 589-598.