

یک سیستم کنترل ذخیره‌ساز انرژی باتری با قابلیت ارائه خدمات جانبی به شبکه توزیع برق

منصور رفیعی^۱ مهرداد مرسلی گلبوس^۲ زهرا رفیعی^۳

۱- استادیار - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

m_rafiee@sbu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

mehrdadmorsali.g@gmail.com

۳- دکتری - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

z_rafiee@sbu.ac.ir

چکیده: بارهای غیر خطی یکی از عوامل اصلی ایجاد هارمونیک در شبکه برق هستند. هارمونیک‌ها شکل موج سینوسی جریان و ولتاژ را تخریب کرده و موجب آسیب به اجزای شبکه برق می‌شوند. در این مقاله هدف تأمین و کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو همراه با کاهش جریان‌های هارمونیک شبکه و ایجاد شده توسط بارهای غیر خطی است. بنابراین، روش پیشنهادی با استفاده از یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری و ارائه یک شیوه کنترلی برای آن علاوه بر کنترل و تأمین مقدار توان اکتیو و راکتیو بار غیرخطی به طور مستقل از هم، کاهش هارمونیک‌های جریان شبکه نیز صورت می‌گیرد. سیستم کنترلی پیشنهادی به دو بخش کلی کنترل توان و کاهش هارمونیک تقسیم‌بندی می‌شود. برای کنترل توان از کنترل‌کننده‌های کلاسیک PI که ضرایب آن با روش زیگلر-نیکولز بدست آمده‌اند انجام می‌گردد و برای کاهش هارمونیک از کنترل‌کننده PI-Fuzzy استفاده می‌گردد. ورودی این کنترل‌کننده سیگنال هارمونیک جریانی است درحالیکه مولفه اصلی (۵۰ هرتز) از آن جدا شده است. نتایج شبیه سازی در سه سناریوی مختلف نشان می‌دهند که سیستم پیشنهادی توانایی کنترلی توان‌های اکتیو و راکتیو بار غیر خطی در شرایط متفاوت شارژ و دشارژ و کاهش هارمونیک‌های جریان تا هارمونیک ۳۱ را داراست.

واژه‌های کلیدی: توان اکتیو و راکتیو، هارمونیک، سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری (BESS)، کنترل‌کننده Fuzzy-PI

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.53

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر منصور رفیعی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - تهرانپارس - بلوار شهید عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی - پردیس شهید عباسپور - دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

بارهای غیر خطی یکی از عوامل اصلی ایجاد هارمونیک در شبکه برق هستند. هارمونیک‌ها شکل موج سینوسی جریان و ولتاژ را تخریب کرده و موجب آسیب به اجزای شبکه برق می‌شوند. همچنین، امروزه ذخیره انرژی یکی از چالش برانگیزترین مسائل صنعت برق می‌باشد [۱]. با توجه به افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر خورشیدی و بادی در سال‌های اخیر و ماهیت عدم قطعیت توان تولیدی این نوع منابع انرژی، ضرورت استفاده از ذخیره‌سازها روز به روز بیشتر احساس می‌شود [۲]. این ذخیره‌سازها در تکنولوژی‌های مختلفی نظیر ابررسانا، تلمبه ذخیره‌ای، چرخ طیار، حرارتی، هیدروژنی و باتری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. از طرف دیگر ذخیره‌سازها به عنوان یکی از بخش‌های مهم شبکه‌های هوشمند، توانایی پشتیبانی ولتاژ/فرکانس، پیکسای، ذخیره چرخان، تامین توان بدون وقفه و افزایش کیفیت توان را نیز دارند [۴،۵].

باتری‌ها یکی از مقرون به صرفه‌ترین ذخیره‌سازها هستند و سیستم ذخیره انرژی باتری (Battery Energy Storage System (BESS)) با پاسخ بسیار سریع و دوره ساخت کوتاه، کاربردهای بسیار موفقی داشته است [۶]. با پیشرفت تکنولوژی در این زمینه، هم اکنون باتری‌ها با بازدهی بالا، ظرفیت بالا و طول عمر زیاد تولید می‌شوند [۶]. از تکنولوژی‌های باتری‌های مورد استفاده جهت ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی نظیر اسید سرب، سدیم سولفور، سدیم نیکل کلرید، نیکل کادمیم، وانادیوم رداکس، روی بروم و لیتیم یون را نام برد [۷،۸]. هدف اصلی استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی، تامین توان اکتیو شبکه است. هرچند جبران (جذب یا تزریق) توان راکتیو مورد نیاز شبکه نیز توسط این ذخیره سازها قابل انجام است و پژوهش‌های بسیاری در این زمینه صورت گرفته است [۹-۱۱]. تامین توان اکتیو و راکتیو می‌تواند با اهداف پیکسای [۹] یا برای حفظ پایداری ولتاژ در حاشیه امن برای همه خطوط و کنترل توان راکتیو [۱۰] و یا به منظور کاهش نامتعادلی در شبکه [۱۱] به وسیله کنترل توان راکتیو با جبران جریان‌های توالی منفی انجام می‌شود. در [۹] نشان می‌دهد که ذخیره‌ساز توانایی پیکسای بالایی دارد و هر چقدر ظرفیت باتری بالاتر باشد پیکسای بیشتری صورت می‌گیرد، اما بدین صورت نیست که با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز دقیقاً پیکسای نیز همان‌قدر بهتر شود و نرخ پیکسای کمتر می‌شود. در نتیجه یک سایزینگ بهینه با هدف پیکسای ارائه داده است.

با توجه به پیشرفت فناوری‌های مرتبط با الکترونیک قدرت و افزایش کارایی تجهیزات این حوزه، از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی باتری می‌توان در حل مسائل کیفیت توان شامل رفع افت ولتاژ یا

اضافه ولتاژ، کنترل فرکانس، کاهش هارمونیک نیز استفاده کرد. در [۱۲] افت و اضافه ولتاژ با استفاده از بازیاب دینامیکی ولتاژ DVR با تغییر فاز به کمک یک ذخیره‌ساز باتری جبران می‌گردد. همچنین [۱۳] نشان می‌دهد که در شبکه‌های با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر، با پشتیبانی یک BESS چگونه می‌توان با واکنش سریع و دقیق با استفاده از روش کنترل افتی (Droop-Controlled)، انحراف فرکانس را جبران کرد. همچنین تاثیر ظرفیت باتری و ضریب افتادگی (Droop Coefficient Factor) نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

به صورت کلی برای کاهش هارمونیک‌های شبکه از فیلترهای اکتیو و پسیو استفاده می‌شود که فیلترهای پسیو معمولاً با استفاده از ترکیب سلف و خازن ساخته می‌شوند [۱۴]. به‌رحال، اساس عملکردی فیلترهای اکتیو بر مبنای کلیدهای الکترونیک قدرت می‌باشند که این فیلترها معمولاً به صورت موازی با شبکه قرار می‌گیرند و به دلیل کنترل آسان‌تر و سریع‌تر آن‌ها، استفاده از این فیلترها مورد توجه قرار گرفته‌اند.

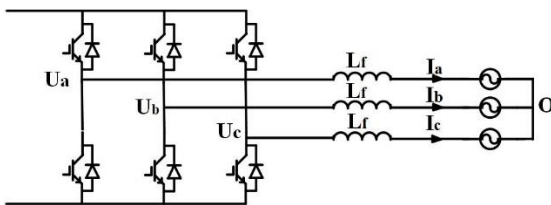
سیستم‌های کنترلی برای کاهش اعوجاج هارمونیک کلی در فیلترهای اکتیو از دو قاعده کلی پیروی می‌کنند: حذف هارمونیک‌های مرتبه انتخابی و کاهش هارمونیک کلی [۱۵-۲۰]. در حالت اول سیستم کنترل بر مبنای شناسایی مرتبه هارمونیک و تولید آن هارمونیک با علامت قرینه، سبب حذف آن هارمونیک می‌گردند [۱۷-۱۹]. برای طراحی این نوع از سیستم‌های کنترلی می‌توان از الگوریتم‌های هوش مصنوعی نظیر یادگیری ماشین (روش بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری TLBO) [۱۵]، شبکه‌های عصبی (استفاده از شبکه عصبی خطی تطبیقی ADALINE، برای تخمین هارمونیک و سپس خنثی‌سازی آن) [۱۶]، الگوریتم‌های فرا ابتکاری نظیر GA و PSO [۱۷،۱۸] استفاده کرد. در حالتی دیگر با نمونه برداری از جریان شبکه و جداسازی جریان اصلی و شناسایی جریان هارمونیکی که شامل مراتب مختلفی از هارمونیک است انجام می‌گردد و دامنه این جریان هارمونیکی به صورت کلی کاهش می‌یابد [۱۹،۲۰]. اما در اکثر این پژوهش‌ها به تنها کاهش هارمونیک یا جبران‌سازی توان راکتیو یا پیک سایی پرداخته شده‌است یا اینکه از ادوات سخت افزاری اضافه همانند فیلتر استفاده شده است [۲۱].

هدف از این مطالعه، تأمین و کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو بار غیر خطی با استفاده از ذخیره ساز انرژی باتری و همزمان کاهش جریان‌های هارمونیکی ایجاد شده توسط بارهای غیر خطی در شبکه است. روش پیشنهادی در این مقاله با استفاده از یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری و ارائه یک شیوه کنترلی برای آن علاوه بر کنترل و تامین مقدار توان اکتیو و راکتیو بار غیرخطی به طور مستقل از هم، کاهش هارمونیک‌های جریان شبکه نیز صورت می‌گیرد. روش

موازی هستند، ذخیره می‌شود. اتصالات سلول‌های باتری به منظور دستیابی به ولتاژ و ظرفیت مطلوب صورت می‌گیرد. هر سلول از دو الکتروود هادی و الکترولیت که با هم در محفظه‌ای ویژه و مهر و موم شده قرار دارند تشکیل شده است. این سلول می‌تواند به بار یا منبع خارجی متصل گردد. درحالی‌که الکترون‌ها از منبع خارجی شارژ می‌کنند، الکترولیت تبادل یون‌ها را بین دو الکتروود مهیا می‌سازد. سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری متشکل از باتری‌های ولتاژ پائینی است که به منظور دستیابی به مشخصه‌های مطلوب سری یا موازی شده‌اند [۲۴].

۲-۳- مبدل اینورتر

مبدل مورد استفاده در این روش یک پل کامل سه فاز با کلیدهای IGBT است که در شکل (۲) نشان داده شده است:



شکل (۲): مبدل پل کامل سه فاز متصل به شبکه [۲۵]

برای تعیین مدل ریاضی این مبدل جهت استفاده برای کنترل آن، از مرجع قاب گردان سنکرون استفاده شده که معادلات حالت به شکل زیر بدست می‌آیند [۲۴]:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \\ d_0 \end{bmatrix} u_{dc} + \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 \\ -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{3}u_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، L ، اندوکتانس فیلتر خروجی پل، e_d, e_q, e_0 مؤلفه‌های ولتاژ شبکه، i_d, i_q, i_0 مؤلفه‌های جریان شبکه و d_d, d_q, d_0 مؤلفه‌های سیکل کارکرد هستند که همه این مؤلفه‌ها در قاب مرجع گردان سنکرون می‌باشند.

۳-۳- فیلتر خروجی اینورتر

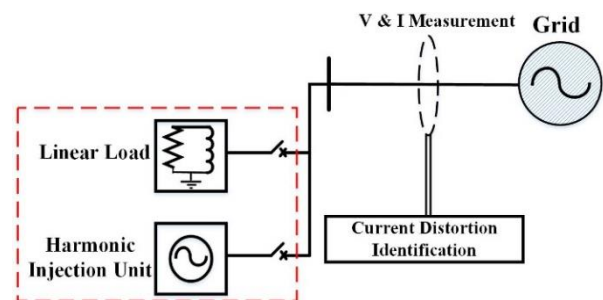
در خروجی اینورتر از یک سلف به عنوان فیلتر برای ایجاد شکل موج سینوسی و همچنین حذف نوسانات کوچک ناشی از کلیدزنی استفاده می‌گردد. مقدار اندوکتانس براساس ریبیل مجاز جریان عبوری از آن به دست می‌آید. با در نظر گرفتن مقدار نامی پیک جریان به عنوان ریبیل مجاز به میزان ده درصد، پیک جریان عبوری از رابطه (۲) بدست می‌آید [۱۱]:

$$\Delta I_{L-peak} = \frac{(V_{DC} - V_{AC})D}{L_{invs}} \quad (2)$$

کنترلی پیشنهادی توانایی تامین توان اکتیو به منظور پیکسای، مصرف یا تامین توان راکتیو مورد نیاز و همچنین کاهش هارمونیک در حالت‌های کاری شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی باتری به صورت مستقل از همدیگر را دارد. یکی از ویژگی‌های روش پیشنهادی این است که در بسیاری از مطالعات پیشین از ذخیره‌ساز جهت پیکسای [۲۲]، یا ترکیب ذخیره‌ساز با ادوات کنترلی برای کاهش هارمونیک شبکه استفاده شده است [۲۳] که هزینه را بالا برده و قابلیت اطمینان را کاهش می‌دهد، اما در روش پیشنهادی همزمان با کنترل توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل، همزمان کاهش هارمونیک بدون هیچگونه سخت افزار اضافی به عنوان خدمات جانبی صورت می‌گیرد. همانطور که گفته شد سیستم کنترلی پیشنهادی به دو بخش کلی کنترل توان و کاهش هارمونیک تقسیم‌بندی می‌شود در کنترل توان از کنترل‌کننده‌های کلاسیک PI که ضرایب آن با روش زیگلر-نیکولز بدست آمده‌اند انجام می‌گردد اما در کاهش هارمونیک از کنترل کننده PI-Fuzzy استفاده می‌گردد که ورودی این کنترل کننده سیگنال هارمونیک جریانی که مولفه‌ی اصلی (۵۰ هرتز) از آن جدا شده است می‌باشد. در ادامه بخش‌های مختلف شامل معرفی سیستم مورد مطالعه، تئوری کار و شبیه‌سازی‌ها مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه به صورت کلی مطابق شکل (۱) می‌باشد. همانطور که مشخص است یک بار محلی هارمونیک موجود می‌باشد که این بار توسط شبکه تغذیه می‌گردد. این بار با توجه به هارمونیک تولیدی‌اش باعث کاهش کیفیت توان شبکه می‌گردد.



شکل (۱): دیاگرام قدرت سیستم مورد مطالعه

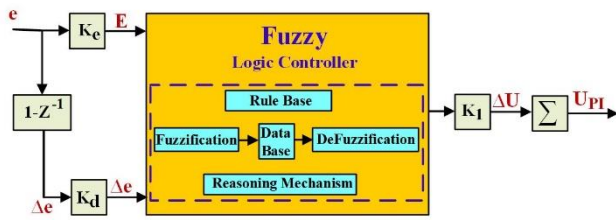
۳- تئوری کار

۱-۳- ذخیره‌ساز انرژی باتری (BESS)

باتری‌ها یکی از تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی هستند که بیشترین استفاده و حضور را در بازار دارند. در باتری انرژی به فرم الکتروشیمیایی داخل مجموعه‌ای از چندین سلول که به طور سری و یا

یک سیستم کنترل ذخیره‌ساز انرژی باتری با ... / رفیعی و همکاران

رابطه (۸) را تولید می‌کند [۲۷-۲۸]. شماییک کنترل کننده PI فازی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): شماییک کنترل کننده PI فازی

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (۷)$$

$$U_{PI} = K_p e(t) + T K_i \sum_{n=0}^t e(n) \quad (۸)$$

۴- روش کنترلی پیشنهادی

در روش پیشنهادی از یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی (BESS) برای تامین بار خطی و هارمونیک استفاده می‌گردد. این ذخیره‌ساز دارای مبدل اینورتری با کلیدهای IGBT بوده و از طریق (مبدل پهنای باند) PWM سیستم کنترلی آن قطع و وصل می‌گردد. برای ایجاد شکل موج‌های سینوسی و کاهش نوسانات کوچک ناشی از کلیدزنی از یک فیلتر سلفی استفاده شده است که با استفاده از روابط گفته شده در بخش قبل مقدار اندوکتانس آن مشخص می‌شود.

سیستم کنترلی پیشنهادی برای ذخیره‌ساز بر اساس روش کنترل PQ است. بدین ترتیب که توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز یا مازاد توسط ذخیره‌ساز با توجه به برنامه‌ریزی قبلی، تامین یا جذب می‌گردد. در این روش، سیستم توانایی کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو را دارا می‌باشد و می‌تواند به صورت خاص فقط توان اکتیو یا راکتیو یا هر دو آنها را تولید کند.

در روش پیشنهادی کنترل PQ، علاوه بر کنترل کننده اصلی، روش جدیدی بر مبنای کنترل کننده PI فازی جهت جبران سازی و کاهش هارمونیک شبکه که در اثر بار غیرخطی تولید می‌شود پیشنهاد می‌گردد.

۴-۱ کنترل PQ

در این روش کنترلی، توان‌های اکتیو و راکتیو به طور جداگانه و مستقل از همدیگر کنترل می‌شوند. بدین صورت که در مرجع قاب گردان، محور d برای ولتاژ هم جهت با بردار ولتاژ شبکه در نظر گرفته می‌شود. سپس محور های d و q برای جریان با توجه به مقادیر مورد نیاز توان اکتیو و راکتیو تعیین می‌شوند. در این تحقیق از جریان شبکه نمونه برداری شده و سپس با جریان مرجع که با توجه به روابط (۹) و (۱۰) از توان مرجع حاصل می‌شود، مقایسه می‌شود. سپس با استفاده

در رابطه (۲)، V_{DC} ولتاژ لینک مستقیم، f_s فرکانس کلیدزنی و D سیکل کاری کلیدها می‌باشد. V_{AC} و D به صورت روابط (۳) و (۴) تعریف می‌شود:

$$D = M \sin(\omega t) \quad (۳)$$

$$V_{AC} = V_{DC} M \sin(\omega t) \quad (۴)$$

در رابطه (۳)، M شاخص مدولاسیون می‌باشد و با فرض مدولاسیون PWM، برابر با نسبت دامنه موج سینوسی به دامنه موج دندان اره‌ای می‌باشد. با جایگذاری روابط (۳) و (۴) در رابطه (۲):

$$\Delta I_{L-peak} = \frac{0.25 V_{DC}}{L_{inv} f_s} \left[1 - (1 - 2M \sin(\omega t))^2 \right] \quad (۵)$$

در رابطه (۵) برای بدست آوردن مقدار حداکثر ریبیل باید از این رابطه استفاده می‌شود ($1 - 2M \sin(\omega t) = 0$) رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$\frac{\Delta I_{L-peak}}{I_{ref}} = \frac{V_{DC}}{4 L_{inv} f_s I_{ref}} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، I_{ref} مقدار پیک جریان نامی و ΔI_{L-peak} ریبیل جریان سمت اینورتر می‌باشد. انتخاب ریبیل جریان در طراحی، بر مبنای مصالحه بین تلفات کلیدزنی و اندازه اندوکتانس انجام می‌شود. مقدار مناسب برای ریبیل مجاز جریان عبوری، بین ۵ تا ۱۰ درصد پیشنهاد می‌شود.

۴-۳ تئوری منطق فازی

تئوری منطق فازی برای اولین بار توسط پروفیسور لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ برای توصیف ویژگی زمان واقعی بودن ارائه شد. مزیت اصلی منطق فازی این است که می‌تواند رفتارهای دینامیکی سیگنال کوچک را همانند سیگنال‌های بزرگ پوشش دهد که این کار در تکنیک‌های کنترل خطی امکان پذیر نمی‌باشد. کنترل منطق فازی شامل سه قسمت است [۲۶، ۲۷]:

۱- فازی سازی: تبدیل اعداد و ارقامی که باید پردازش شوند به مجموعه و اعداد فازی

۲- موتور استنتاج: میزان انطباق ورودی‌های حاصل از فازی سازی، با قوانین پایه که برای سیستم تعریف شده است را می‌سنجد.

۳- برگرداندن از فازی: تبدیل نتایج حاصل از استنتاج فازی به اعداد و ارقام کمی را انجام می‌دهد.

نحوه عملکرد کنترلر PI فازی بدین صورت است که با استفاده خطا طبق رابطه (۷) و تغییرات خطا و تبدیل آن‌ها به منطق و مجموعه فازی و سنجش آن‌ها با قوانین تنظیم شده پایه برای سیستم و سپس تبدیل دوباره آن‌ها به اعداد و ارقام کمی، سیگنال کنترلی

روابط برای حذف مولفه اصلی از دیگر مولفه‌ها با استفاده از سری فوریه (Fourier Series) که به صورت ذیل است:

رابطه

$$I(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (11)$$

$$I_{50Hz}(t) = (a_1 \cos(100\pi t) + b_1 \sin(100\pi t)) \quad (12)$$

$$I_h(t) = I(t) - I_{50Hz}(t) \quad (13)$$

در رابطه‌های بالا مقادیر a_0 ، a_n و b_n از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$a_0 = 2f \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} I(t) dt \quad (14)$$

$$a_n = 2f \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} I(t) \cos(n\omega t) dt \quad (15)$$

$$b_n = 2f \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} I(t) \sin(n\omega t) dt \quad (16)$$

در نهایت این سیگنال اعوجاجی جریان dq را به عنوان سیگنال خطا در نظر گرفته و به ورودی کنترل کننده‌های PI-fuzzy اعمال می‌گردد. پس از انجام عملیات بر روی این سیگنال‌های اعوجاجی dq با استفاده از منطق و قوانین فازی پارامترهای کنترل کننده‌های PI به صورت تطبیقی تغییر می‌کند و در نهایت سیگنال خروجی کنترل کننده‌های PI-fuzzy با علامت منفی به سیستم کنترلی اصلی اضافه می‌گردند و به سیستم اعمال می‌شوند، تا جبران‌سازی هارمونیک صورت گیرد. در نتیجه، روش پیشنهادی بر مبنای PI فازی قابلیت کاهش هارمونیک‌های جریان را دارد.

شماتیک دیاگرام نهایی کنترل کننده پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است.

پارامترهای سیستم تحت مطالعه و روش پیشنهادی در جدول (۱) داده شده‌اند. در این شبیه‌سازی یک بار محلی با توان‌های ۷۰kW و ۷۰kVAr در نظر گرفته شده‌است. در ابتدا با توجه به عدم وجود ذخیره‌ساز باتری، بار محلی از طرف شبکه تأمین می‌گردد. سپس ذخیره‌ساز باتری در مدار آمده و عملکرد آن در تأمین این بار و تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. همچنین باید ذکر کرده که برای اینکه یک منبع DC (خازن و اینورتر) بتواند یک ولتاژ ۳ فاز و ۴۰۰ ولت بسازد از رابطه روبرو پیروی می‌کند [۲۹]:

۵- شبیه‌سازی

MATLAB شبیه‌سازی و صحت‌سنجی روش پیشنهادی در نرم‌افزار

V_{DC} انجام شده‌است که در شکل (۷) نشان داده شده‌است.

$$1.1V_{AC} \cdot \sqrt{3} \quad (17)$$

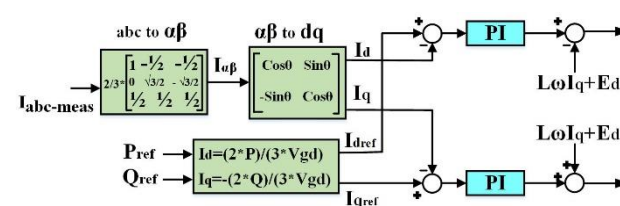
حاشیه ۱۰٪ نیز برای اهداف کنترلی اضافه می‌گردد. در این رابطه V_{AC} یک مقدار تقریبی از ولتاژ سایزینگ اینورتر است که با توجه به ولتاژ

از کنترل کننده PI که ضرایب آن از روش زیگلر-نیکولز بدست آمده‌اند توان مورد نظر تأمین می‌گردد. ساختار کنترلی برای توان‌های اکتیو و راکتیو طبق شکل (۴) می‌باشد [۲۸].

$$P(t) = \frac{3}{2} V_{g,d}(t) * i_d(t) \quad (9)$$

$$Q(t) = -\frac{3}{2} V_{g,d} * i_q(t) \quad (10)$$

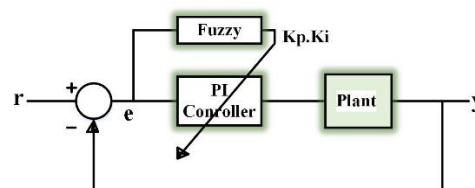
در روابط (۹) و (۱۰)، $V_{g,d}$ ولتاژ شبکه در مرجع d و همچنین i_d و i_q جریان تولیدی از سیستم ذخیره‌ساز در مرجع‌های d و q است.



شکل (۴): روش کنترلی مستقل توان اکتیو و راکتیو

۴-۲- روش پیشنهادی جهت کاهش هارمونیک شبکه

کنترل کننده‌های PID بخاطر کارآمدی در سیستم‌های خطی، طراحی آسان و هزینه‌های پایین به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه این کنترل کننده‌ها کارآمد هستند ولی برای سیستم‌های غیرخطی، مرتبه بالا و تاخیر زمانی مناسب نیستند و به همین دلیل در روش پیشنهادی با ترکیب این کنترل کننده با منطق‌های فازی، توانایی این کنترل کننده را بهبود داده شده‌است. همانند کنترل کننده‌های PID کلاسیک، PID فازی پیشنهادی نیز دارای حالت‌های کنترلی چهار P، PI، PD و PID هستند با توجه به اینکه ترم مشتقی در این موقعیت موجب تقویت اغتشاش می‌گردد، در نتیجه از آن صرف نظر شده و کنترلر مربوطه PI فازی خواهد بود. مبنای عملکرد کنترل کننده PI فازی، تغییر ضرایب PI با توجه به تغییرات سیستم می‌باشد که اصول آن در شکل (۵) ارائه شده است.

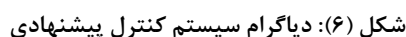


شکل (۵): تعیین ضرایب PI توسط کنترل کننده فازی

۴-۲-۱- آماده‌سازی سیگنال کنترلی با استخراج

مولفه‌های هارمونیک جریان شبکه

در روش پیشنهادی جهت کاهش هارمونیک‌های جریان شبکه ابتدا از جریان شبکه نمونه‌برداری شده و سپس با استفاده از تبدیل فوریه، در دو مرجع d و q یک سیگنال اعوجاجی با حذف کردن مولفه اصلی جریان بدست می‌آید که شامل هارمونیک‌های جریان است.

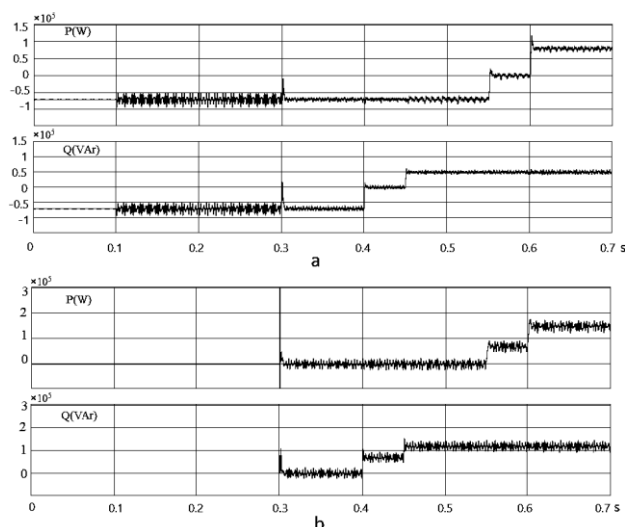


شبکه ۴۰۰ ولت و فیلتر انتخاب می‌گردد. با توجه به رابطهدر
شده، باتری با ولتاژ ۱۰۰۰ ولت انتخاب می‌گردد. به منظور ارزیابی
عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی، شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف
انجام می‌گردد تا مشخص گردد که این سیستم توانایی ارائه خدمات
اصلی و جانبی مورد نظر را در تمام این سناریوها دارد. سناریوهای
شبیه‌سازی عبارتند از:

۱. عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی در وضعیت دشوار.

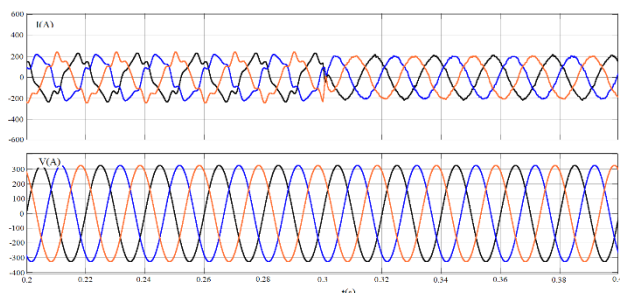
جدول (۱): مشخصات عناصر مورد استفاده

تجهیز	عنصر	مشخصات
باتری	نوع باتری	لیتیم یون
	ولتاژ نامی	1000 V
	ظرفیت	1200 Ah
	ولتاژ قطع	750 V
	مقاومت داخلی	0.00833 Ω
مبدل	فرکانس کلیدزنی	16 kHz
	فیلتر خروجی	1 mH
شبکه	نوع اتصال	ستاره زمین شده
	ولتاژ موثر فاز به فاز	400 V
	فرکانس	50 Hz
بار محلی	ولتاژ موثر فاز به فاز	400 V
	بار اکتیو	70 kW
	بار راکتیو	70 kVAr



شکل (۸): (a) توان‌های تبدیلی مربوط به شبکه و (b) توان‌های اکتیو و راکتیو BESS در حالت دشارژ

مجموع هارمونیک‌های شبکه قبل از جبران‌سازی ۱۷/۶۴٪ و بعد از جبران‌سازی به ۴/۴۴٪ رسیده‌است. شکل (۱۱) نیز اعوجاج هارمونیک کل با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی PI را نشان می‌دهد.



شکل (۹): جریان و ولتاژ مربوط در حالت دشارژ

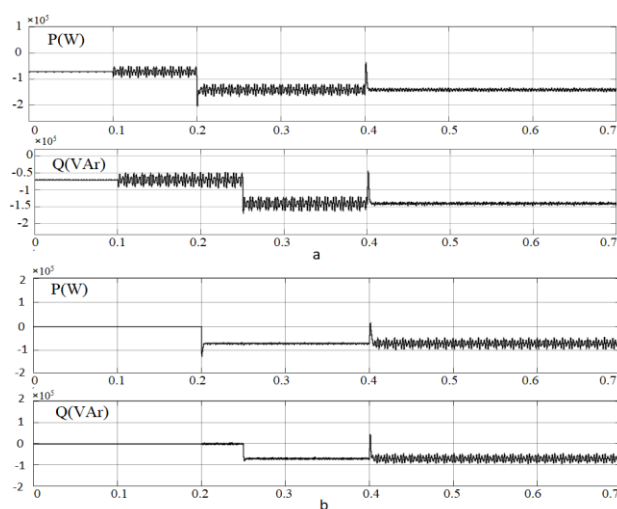
با توجه به شکل (۱۱) بار غیرخطی، جریان هارمونیک با مرتبه پنجم و هفتم به ترتیب با دامنه ۱۵ و ۸ درصد تولید می‌کند که THD در این حالت برابر با ۱۷/۶۴ درصد است. پس از جبران‌سازی، دامنه هارمونیک‌ها بسیار کاهش یافته و THD با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی PI (شکل ۱۱) برابر ۵/۱۸ درصد و با کنترل‌کننده Fuzzy-PI برابر ۴/۴۴ درصد شده است و می‌توان گفت Fuzzy-PI عملکرد بهتری داشته است.

۵-۱- نتایج شبیه‌سازی در حالت دشارژ

در ابتدا ذخیره‌ساز خارج از مدار بوده و تمام نیاز بار از طریق شبکه تأمین می‌گردد. در لحظه ۰/۱ s بار غیرخطی وارد مدار شده و باعث هارمونیک شدن جریان شبکه می‌گردد. در این حالت با توجه به وضعیت شبکه، در لحظه ۰/۳ s فرمان جبران‌سازی هارمونیک به سیستم کنترل ذخیره‌ساز باتری صادر می‌شود و سیستم پیشنهادی Fuzzy-PI بلافاصله وارد مدار شده و جبران‌سازی هارمونیک را شروع می‌کند. سپس ذخیره‌ساز باتری علاوه بر جبران‌سازی هارمونیک تغذیه بار محلی را نیز بر عهده می‌گیرد و توان مازاد را (در زمان اوج بار شبکه) به شبکه تحویل می‌دهد. شکل (۸(a)) توان‌های تبدیلی مربوط به شبکه و شکل (۸(b)) توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی توسط ذخیره‌ساز انرژی (BESS) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از روش پیشنهادی (Fuzzy-PI) و جبران‌سازی هارمونیک، هارمونیک‌ها در توان‌های مبادله شده شبکه کاهش یافته است و با افزایش توان، ذخیره‌ساز انرژی توان مازادی را به بار تحویل می‌دهد. شکل (۹) جریان و ولتاژهای شبکه را در حالت دشارژ و تزریق توان به بار نشان می‌دهد. همانگونه که منحنی‌های جریان نشان می‌دهد قبل از ورود ذخیره‌ساز انرژی و کاهش هارمونیک‌ها تا زمان ۰/۳s، جریان دچار اعوجاج شدیدی است ولی بعد از زمان ۰/۳s با ورود ذخیره‌ساز اعوجاج جریان کاهش یافته‌است. شکل (۱۰(a)) و شکل (۱۰(b)) نیز دامنه هارمونیک‌های شبکه و مجموع اعوجاج هارمونیک را قبل و بعد از کاهش هارمونیک‌های شبکه توسط روش پیشنهادی و جبران‌سازی نشان می‌دهد.

هارمونیک‌ها تا $t=0/4s$ جریان دچار اعوجاج شدیدی است ولی بعد از $t=0/4s$ اعوجاج جریان به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته‌است. شکل (۱۴(a)) و شکل (۱۴(b)) نیز دامنه هارمونیک‌های شبکه و مجموع اعوجاج هارمونیک را قبل و بعد از کاهش هارمونیک‌های شبکه توسط روش پیشنهادی جبران‌سازی نشان می‌دهد.

شکل (۱۴) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی (Fuzzy-PI) توانایی کاهش THD از $8/37\%$ به $1/98\%$ در حالت عملکردی شارژ BESS را نیز دارد. بدین ترتیب می‌توان گفت سیستم پیشنهادی توانایی کاهش هارمونیک را در تمام ۲۴ ساعت شبانه‌روز (هم در وضعیت شارژ و هم در وضعیت دشارژ) دارد.

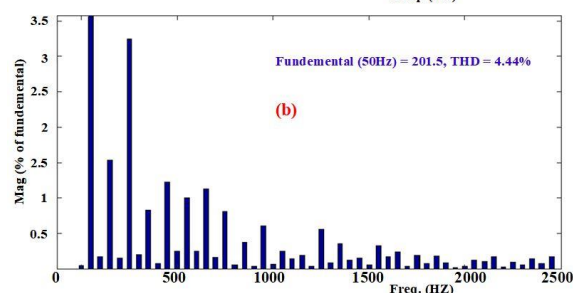
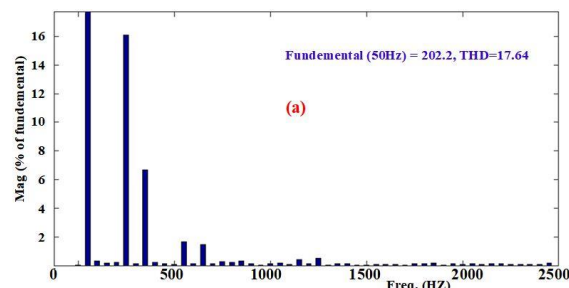


شکل (۱۲): (a) توان تبدیلی مربوط به شبکه و (b) توان جذب شده توسط BESS در حالت شارژ

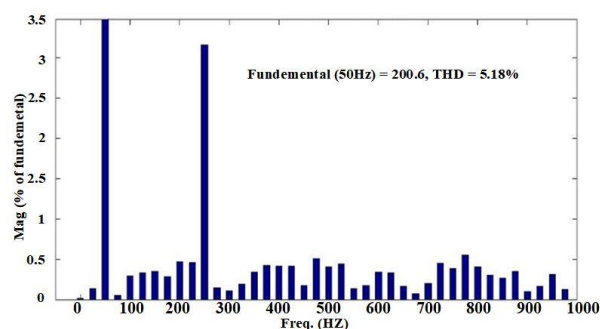
۵-۳- نتایج شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی برای

کاهش جریان‌های هارمونیک با مراتب مختلف

هر چند کارایی عملکرد روش پیشنهادی برای کاهش جریان‌های هارمونیک با مرتبه ۵ و ۷ نشان داده شد، اما در شبکه قدرت ممکن است هارمونیک‌های دیگری نیز وجود داشته باشد و سیستم پیشنهادی باید قادر به جبران سازی آنها نیز باشد. بنابراین در این تست جهت مقایسه مقدار درصد کاهش هارمونیک‌های مختلف توسط روش پیشنهادی، توسط بار محلی هر بار یکی از هارمونیک‌ها (هارمونیک‌های متداول در شبکه) را با دامنه یکسان $14/85\%$ به شبکه اعمال می‌شود. سپس کارایی روش پیشنهادی در حالت دشارژ و تزریق توان توسط BESS مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج بدست آمده در جدول (۲) با استفاده از روش پیشنهادی با توجه به عوامل نظیر فرکانس کلیدزنی و ضرایب کنترل‌کننده بدست آمده‌اند و قطعاً با تغییر این شرایط نتایج نیز تغییر می‌کند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲) می‌توان گفت هر چقدر مرتبه هارمونیک



شکل (۱۰): اعوجاج هارمونیک کل شبکه (a) قبل و (b) بعد از کاهش هارمونیک (در لحظه $t=0/3s$) با کنترلر PI فازی در حالت دشارژ باتری



شکل (۱۱): اعوجاج هارمونیک کل پس از جبران‌سازی هارمونیک با کنترل‌کننده PI در حالت دشارژ

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی در حالت شارژ

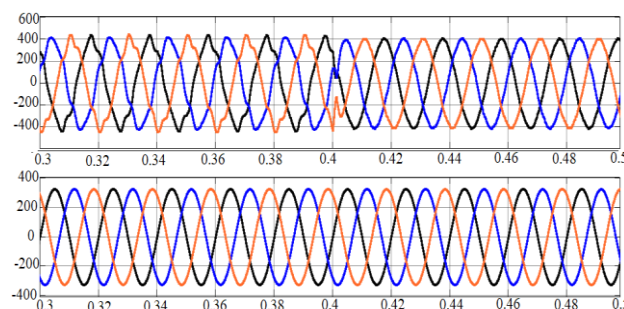
برای این سناریو، همان بار محلی ثابت و بار غیرخطی با هارمونیک‌های پنجم و هفتم به سیستم و شبکه اعمال می‌گردد. در لحظه $t=0/2s$ سیستم ذخیره‌ساز باتری وارد می‌گردد و در زمان $0/2s$ و $0/25s$ به ترتیب، توان‌های اکتیو $70 kW$ و راکتیو $70 kVAr$ را دریافت و شارژ می‌شود. سپس در زمان $0/4s$ ، بخش جبران‌سازی هارمونیک وارد مدار می‌گردد.

شکل (۱۲(a)) توان‌های تبدیلی مربوط به شبکه و شکل (۱۲(b)) توان‌های اکتیو و راکتیو جذب شده توسط ذخیره‌ساز انرژی (BESS) را در حالت شارژ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از روش پیشنهادی (Fuzzy-PI) و جبران‌سازی هارمونیک، هارمونیک‌ها در توان‌های مبادله شده شبکه و جذب شده در BESS به صورت قابل توجهی کاهش یافته است. شکل (۱۳) جریان و ولتاژهای شبکه را در حالت شارژ نشان می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود، جریان قبل از استفاده از روش پیشنهادی در جهت کاهش

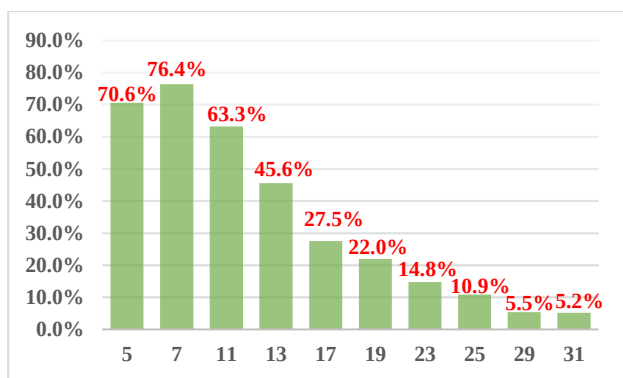
جدول (۲): دامنه هارمونیک قبل و بعد از جبران‌سازی برای مراتب

مرتبه هارمونیک	دامنه هارمونیک بدون جبران‌سازی	دامنه هارمونیک پس از جبران‌سازی	درصد کاهش دامنه هارمونیک
۵	۱۴/۸۵	۴/۳۶	۷۰/۶٪
۷	۱۴/۸۵	۳/۵۱	۷۶/۴٪
۱۱	۱۴/۸۵	۵/۴۵	۶۳/۳٪
۱۳	۱۴/۸۵	۸/۰۸	۴۵/۶٪
۱۷	۱۴/۸۵	۱۰/۷۶	۳۷/۵٪
۱۹	۱۴/۸۵	۱۱/۵۸	۲۲/۰٪
۲۳	۱۴/۸۵	۱۲/۶۵	۱۴/۸٪
۲۵	۱۴/۸۵	۱۳/۲۳	۱۰/۹٪
۲۹	۱۴/۸۵	۱۴/۰۴	۵/۵٪
۳۱	۱۴/۸۵	۱۴/۰۸	۵/۲٪

پایین‌تر باشد سیستم ارائه شده بهتر می‌تواند هارمونیک را تضعیف کند. البته این می‌تواند به این دلیل باشد که هارمونیک‌های مرتبه بالاتر خودشان دامنه کمی دارند



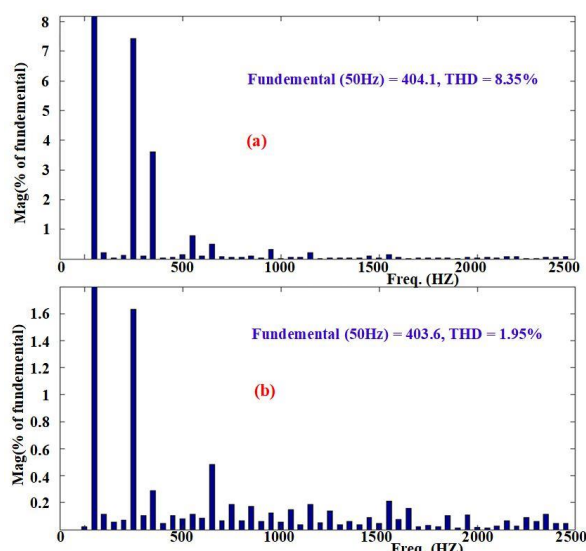
شکل (۱۳): جریان و ولتاژ شبکه در حالت شارژ



شکل (۱۵): درصد کاهش هارمونیک برای مراتب مختلف هارمونیک

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم ذخیره‌ساز باتری با قابلیت کنترل، توانایی جذب و تزریق توان اکتیو و راکتیو شبکه به صورت مستقل از یکدیگر و با توانایی کاهش هارمونیک‌های جریان شبکه پیشنهاد شد. در روش پیشنهادی از کنترل کننده PI و منطق فازی استفاده شده‌است. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، سیستم مورد بررسی تحت سه سناریو مورد آزمایش قرار گرفت. در سناریوی اول و حالت دشارژ، سیستم پیشنهادی هارمونیک‌های تولید شده توسط بار غیرخطی را به خوبی کاهش داده و مقدار THD را با بیش از ۷۳٪ کاهش، از ۱۶/۶۰٪ به ۴/۴۴٪ رساند. همچنین، توان‌های اکتیو و راکتیو مورد نیاز بار محلی توسط BESS تامین شد. در حالت شارژ، BESS از طریق شبکه شارژ می‌گردد، در حین اینکه به خوبی روش کنترلی کاهش هارمونیک پیشنهادی مقدار THD را با بیش از ۷۶٪ کاهش، از ۸/۴۲٪ به ۱/۹۸٪ می‌رساند. در نهایت جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی هارمونیک‌هایی با مراتب مختلف تا مرتبه ۳۱ به شبکه مورد بررسی تزریق شد که تا حد ممکن دامنه این هارمونیک‌ها کاهش پیدا کرد.



شکل (۱۴): اعوجاج هارمونیک کل شبکه (a) قبل و (b) بعد از جبران‌سازی هارمونیک (در لحظه ۰/۴s) در حالت شارژ باتری

همچنین نمودارهای شکل (۱۵) درصد کاهش جریان هارمونیک برای مرتبه هارمونیک ۵ تا ۳۱ را نشان می‌دهد. با توجه به فرکانس کلیدزنی ۱۶ کیلوهرتز مبدل و مدلسازی کلیدهای IGBT با پارامترهای واقعی و نیز وجود فیلتر سلفی در خروجی، نتایج نشان می‌دهد که سیستم تا هارمونیک مرتبه ۳۱ هنوز توانایی کاهش هارمونیک را دارد. با توجه به مرجع [۳۰] روش پیشنهادی بیشترین کاهش مرتبه هارمونیک را در مقایسه با دیگر روش‌ها دارد. بیشترین کاهش تا مرتبه ۲۹ مربوط به روش کنترلی ضرب و شتم مرده (Deadbeat) است [۳۱].

مراجع

- [13] Md Ruhul Amin, Michael Negnevitsky, Evan Franklin, Kazi Saiful Alam and Seyed Behzad Naderi. "Application of Battery Energy Storage Systems for Primary Frequency Control in Power Systems with High Renewable Energy Penetration", *Mdpi, Energies*, Vol. 14, No. 5, 3 March 2021.
- [14] W. Wu, Y. He, and F. Blaabjerg, "An LLCL power filter for single-phase grid-tied inverter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No.2, pp. 782-789, 2012.
- [15] A. Routray, R. Kumar Singh and R. Mahanty, "Harmonic Minimization in Three-Phase Hybrid Cascaded Multilevel Inverter Using Modified Particle Swarm Optimization", in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 15, No. 8, pp. 4407-4417, Aug. 2019..
- [16] M. Sujith, S. Padma, "Optimization of Harmonics with Active Power Filter Based on Adaline neural network", *Elsevier, MICPRO*, Vol. 73, march 2020.
- [17] Rafiee Z, Meyabadi AF, Heydari H. "PSS parameters values finding using SMVSDFT objective function and a new technique for multi-objective function in a multi-machine power system. *International Journal of Power and Energy Conversion*", Vol. 6, No. 3, pp. 252-66, 2015.
- [18] Keynia F, Sayadi F, Esmaeili S. "Two step Voltage and Reactive Power Control in Electrical Distribution Networks Based on Electrical Load and Output Forecasting", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 43-54, 2018.
- [19] Basama Abd El-Rahman¹, E. G. Shehata², Abou-Hashima El-Sayed³, Y. S. Mohamad⁴. "Performance Analysis of active power filter controllers for harmonics mitigation in power", *Journal of Advanced Engineering Trends (JAET)*, Vol. 39, No. 1. January 2020.
- [20] R. Senthil kumar, R. Surya Prakash, B. Yokesh Kiran, Anshuman Sahana. "Reduction and Elimination of Harmonics using Power Active Harmonic Filter", *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Vol .8, No. 2S3, pp. 180-184, July 2019.
- [21] Tao, Yibin, Jiaying Lei, Xinzhen Feng, Tianzhi Cao, Qinran Hu, and Wu Chen. "Analysis and Control of Battery Energy Storage System Based on Hybrid Active Third-Harmonic Current Injection Converter", *Energies*, Vol. 14, No. 11, pp. 3140, 2021.
- [22] Tagayi, Roland Kobla, and Jonghoon Kim. "Binary-phase service battery energy storage system strategy for peak demand shaving and enhanced power quality", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 52, 102328, 2022.
- [23] Meena, V. P., P. K. Meena, Surjeet Choudhary, Nitin Mathur, and V. P. Singh. "Impact of Storage Energy on Operation and Control of Smart Grid", In *Renewable Energy Towards Smart Grid*, Vol. 823, pp. 445-458. Springer, Singapore, 2022.
- [24] Paul Breeze. "Power System Energy Storage Technologies, chapter 4: Large Scale Batteries", Published by Elsevier, pages 33-45, 2018.
- [25] M. SUNITHA, B. N. KARTHEEK. "Elimination of Harmonics Using Active Power Filter Based on DQ Reference Frame Theory", *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, Vol. 4, No. 4, April 2013.
- [26] Zeb K, Islam SU, Din WU, Khan I, Ishfaq M, Busarello TD, Ahmad I, Kim HJ. "Design of fuzzy-PI and fuzzy-sliding mode controllers for single-phase two-
- [1] Esmaeili Z, Namavar Zeini Vandi M R, Anani E, Ehsan M. "A Review on Energy Storage Systems Planning in Active Distribution Networks and its Applications", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 19, No. 4, 2022.
- [2] Salmani S, Jadid S. "Optimal Operation of Smart Distribution Network in Presence of Distributed Energy Resources", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 13, No. 3 : pp. 1-10, 2016.
- [3] Hajiaghasi, Salman, Ahmad Salemnia, and Mohsen Hamzeh. "Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review", *Journal of Energy Storage*, Vol. 21, pp. 543-570, 2019.
- [4] Tan, Kang Miao, Thanikanti Sudhakar Babu, Vigna K. Ramachandaramurthy, Padmanathan Kasinathan, Sunil G. Solanki, and Shangari K. Raveendran. "Empowering smart grid: A comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration", *Journal of Energy Storage*, Vol. 3, 102591, 2021.
- [5] L. Maeyaert , L. Vandevelde , Th. Döring. "Battery Storage for Ancillary Services in Smart Distribution Grids", *Elsevier, Journal of Energy Storage*, Vol. 30, August 2020.
- [6] Guo, Caishan, Fengji Luo, Zexiang Cai, Zhao Yang Dong, and Rui Zhang. "Integrated planning of internet data centers and battery energy storage systems in smart grids", *Applied Energy*, Vol. 28, 116093, 2021.
- [7] Su, Tonglun, Nawei Lyu, Zhixing Zhao, Huairu Wang, and Yang Jin. "Safety warning of lithium-ion battery energy storage station via venting acoustic signal detection for grid application", *Journal of Energy Storage*, Vol. 38, 102498, 2021.
- [8] A. -A. Mamun, Z. Liu, D. M. Rizzo and S. Onori, "An Integrated Design and Control Optimization Framework for Hybrid Military Vehicle Using Lithium-Ion Battery and Supercapacitor as Energy Storage Devices," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 5, No. 1, pp. 239-251, March 2019.
- [9] Souza, João Paulo Assunção de, Leonardo Henrique de Melo Leite, Lucas de Godoi Teixeira, Wallace do Couto Boaventura, Danilo Derick Silva Alves, Marina Hassen de Souza, and Julio Cesar Mariz. "Analysis of Reactive Power Control Using Battery Energy Storage Systems for a Real Distribution Feeder", *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, pp. 1-19, 2022.
- [10] Oludamilare Bode Adewuyia, Ryuto Shigenobua, Kazuki Ooyaa, Tomonobu Senjyua, Abdul Motin Howladerb, "Static voltage stability improvement with battery energy storage considering optimal control of active and reactive power injection", *Elsevier, Electric Power system Research*, Vol. 172, pp. 303-312, July 2019.
- [11] Y.P. Gusev, P.V. Sobbotin, "Using Battery Energy Storage Systems for Load Balancing and Reactive Power Compensation in Distribution Grids", *IEEE, 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, pp. 25-29 March 2019.
- [12] Diksha Wasnik, Prof Radharaman Shaha, Pratik Ghutke. "Compensation of Sag and Swell Voltage by using Dynamic Voltage Restorer", *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*, Vol. 3, No. 4, May-Jun 2019.

- stages grid-connected transformerless photovoltaic inverter", *Electronics*, Vol. 8, No. 5:520, 2019 May 9.
- [27] Nazeri Ardekani A, Khodadoost Arani A A, Menhaj M B, Karrari M. "A Smart Fuzzy Controller for Microgrid Frequency Improvement Using PSO Algorithm Considering Nonlinear Conditions", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 15, No. 3, pp. 71-81, 2018.
- [28] Rafiee, Zahra, Mansour Rafiee, and Mohammadreza Aghamohammadi. "A new control strategy based on reference values changing for enhancing LVRT capability of DFIG in wind farm." *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, Vol. 9, No. 4, pp. 1626-1637, 2019.
- [29] Abad G, Lopez J, Rodriguez M, Marroyo L, Iwanski G. "Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation", John Wiley & Sons; 2011 Sep 28.
- [30] I. Khan, A. S. Vijay and S. Doolla, "Nonlinear Load Harmonic Mitigation Strategies in Microgrids: State of the Art," in *IEEE Systems Journal*, Vol. 16, No. 3, pp. 4243-4255, Sept. 2022.
- [31] Jarwar, Asif Raza, Amir Mahmood Soomro, Zubair Ahmed Memon, Shafiq Ahmed Odhano, Muhammad Aslam Uqaili, and Abdul Sattar Larik. "High dynamic performance power quality conditioner for AC microgrids." *IET Power Electronics*, Vol. 12, No. 3, pp. 550-556, 2019.