

بهبود اغتشاشات هارمونیک و افزایش ضریب توان با اصلاح ساختار فیلتر هیبرید با استفاده از الگوریتم فرااکتشافی چند هدفه فازی

علیرضا حسین پور*، پوریا رحمتی کهخا

گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

چکیده. هارمونیک‌ها در سیستم‌های قدرت اثرات نامطلوبی مانند اشباع هسته‌های آهنی ترانس‌ها و ماشین‌ها، عملکرد نادرست رله‌های حفاظتی و افزایش تلفات دارند لذا کاهش آنها امری ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، ضریب قدرت پایین منجر به اشغال ظرفیت خطوط با توان راکتیو می‌شود که منجر به اعمال هزینه‌های اضافی در سیستم می‌شود. همین موضوع باعث می‌شود که شرکتهای برق منطقه‌ای برای مشترکینی که ضریب قدرت پایین دارند جرابی در نظر بگیرند. کاهش اعوجاجات هارمونیک و افزایش ضریب قدرت دو هدف مهم در بهبود کیفیت توان می‌باشند. برای جبران ضریب قدرت می‌توان از خازن استفاده نمود که احتمال به وقوع پیوستن رزونانس در این موارد وجود دارد. جهت تحصیل اهداف مذکور، یک فیلتر قدرت هیبریدی پیشنهاد می‌شود که از فیلتر غیرفعال و فیلتر فعال تشکیل گردیده است. فیلتر فعال شامل سه بخش شناسایی، مدولاسیون و اینورتر می‌باشد. برای کاهش سطح قدرت اینورتر فیلتر فعال، از فیلتر غیرفعال در کنار آن استفاده می‌شود. پارامترهای این فیلتر باید به نحوی تعیین شود که هم اعوجاجات هارمونیک مینیمم شود و هم ضریب قدرت ماکزیمم گردد لذا این کار با الگوریتم فرااکتشافی چند هدفه انجام می‌شود که در این مقاله از الگوریتم SPEA-II استفاده گردیده است. در پایان کارایی طرح پیشنهادی با شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB نشان داده شده است.

۱. سرآغاز

امروزه استفاده از ادوات الکترونیک قدرت در سطوح مختلف محبوبیت زیادی پیدا کرده است. علت این محبوبیت وافر بازده بالا و قابلیت کنترل است ولی این ادوات منبع اصلی تولید هارمونیک هستند. هارمونیک‌ها در سیستم قدرت عوارض نامطلوبی دارند و موجب کاهش کیفیت توان، ضریب قدرت و افزایش تلفات می‌شوند [۱، ۲، ۳]. این اثرات را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: الف- اثرات کوتاه مدت: اثرات کوتاه مدت شامل اعوجاج ولتاژ، لغزش بارهای حساس، گرم و اشباع شدن هسته‌های آهنی موجود در سیستم قدرت (مانند ماشین‌های الکتریکی، ترانسفورماتورها و...) است. ب- اثرات بلند مدت: اثرات بلند مدت شامل افزایش تلفات و استرس ولتاژ می‌باشد [۴].

هر یک از موارد فوق می‌تواند مشکلات دیگری را به دنبال داشته باشد مثلاً استرس ولتاژ می‌تواند منجر به عملکرد نادرست رله، اعمال فشار اضافی به دی‌الکتریک خازن‌ها و... بشود. یکی از روش‌های کاهش هارمونیک استفاده از فیلترهای غیر فعال (مدارات RLC) است، کاربرد این روش عمدتاً در خطوط HVDC می‌باشد، این فیلترها علاوه بر کاهش هارمونیک، ضریب قدرت را نیز بهبود می‌دهند، لیکن فقط می‌توانند حالت خاصی از سیستم قدرت را اصلاح نمایند (حالتی که برای آن طراحی شده‌اند) و نمی‌توانند خود را با تغییر شرایط سیستم وفق دهند [۵]، به علاوه احتمال وقوع رزونانس با امپدانس سیستم هم وجود دارد. با توجه به مشکلات مطرح شده ضرورت پیشنهاد طرحی که معایب فوق را برطرف نماید احساس می‌گردید، لذا برای این منظور فیلتر فعال در سال ۱۹۷۱ توسط Sasaki و Machida پیشنهاد شد [۶]. فیلترهای فعال در سیستم قدرت اعمالی مانند جبران توان راکتیو، کاهش هارمونیک، جبران توالی منفی ولتاژ یا جریان و تنظیم ولتاژ را انجام می‌دهند [۷]. دو نوع فیلتر فعال سری و موازی وجود دارد. فیلترهای فعال موازی برای جبران جریان بکاربرده می‌شوند در حالیکه فیلترهای فعال سری وظیفه جبران ولتاژ را بر عهده دارند [۷، ۸]. نوع دیگری از فیلترها، فیلترهای ترکیبی (هیبرید) است که از ترکیب فیلترهای فعال و غیر فعال تشکیل شده است [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲]. در مقاله [۱۳] یک فیلتر هیبرید که مجهز به اینورتر سه سطحی پیشنهاد شده است که، THD جریان را به ۳/۱۱٪ کاهش می‌دهد. علاوه بر این، یک فیلتر هیبرید موازی THD ولتاژ و جریان را به ترتیب به ۵/۳٪ و ۱۶/۴۹٪ کاهش می‌دهد [۱۴] لیکن در موارد فوق از ضریب قدرت سخنی به میان نیامده است. با بررسی آثار مقالات اخیر منتشر شده در این زمینه مشخص می‌شود که فیلترهای فعال در صورت حذف برخی از هارمونیک‌ها و

روش‌های پیچیده [۵] بسیار موثر هستند، اما اگر از فیلتر فعال به تنهایی استفاده کنیم، هزینه فیلتر بالا خواهد بود.

در این مقاله هدف کاهش هارمونیک جریان و بهبود ضریب قدرت سیستم به صورت همزمان است برای تأثیر گذاشتن بر هارمونیک‌ها و توان راکتیو، کل جریان‌های هارمونیکی و جریان‌های پسیو در اینورتر جاری می‌شود لذا اینورتر توان بالا نیاز است که منجر به افزایش هزینه می‌گردد. برای حل این مشکل از ترکیب فیلتر فعال و غیرفعال استفاده می‌شود تا ظرفیت اینورتر کاهش یابد [۱۰، ۱۱، ۱۲]. نحوه تعیین عناصر فیلتر غیر فعال در عملکرد فیلتر بسیار موثر می‌باشد که با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه با اهداف کاهش اغتشاشات هارمونیکی و افزایش ضریب قدرت این کار انجام می‌شود.

ابتدا انواع فیلترهای قدرت و ساختار فیلتر هیبریدی در بخش‌های ۲ و ۳ معرفی می‌گردد. در بخش بعدی، نحوه محاسبه توابع هدف یعنی ضریب قدرت و هارمونیک جریان همراه با قیدها ارائه می‌شود. بعد از آن، الگوریتم بهینه سازی دو هدفه SPEA-II^۱ در بخش ۵ بیان می‌گردد. در پایان سیستم قدرت بدون حضور فیلتر هیبریدی و با حضور آن در نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفته است.

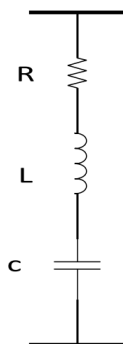
۲. انواع فیلترهای قدرت

همانطور که گفته شد یکی از روش‌های جبران‌سازی توان راکتیو و در نتیجه افزایش ضریب توان استفاده از فیلترهای قدرت می‌باشد. که این فیلترها به سه دسته فیلترهای قدرت غیرفعال، فعال و هیبرید تقسیم می‌شوند. انتخاب نوع فیلتر به نوع مشکل و میزان هزینه‌ای که می‌توان برای آن مشکل صرف کرد، بستگی دارد، در ادامه فیلترهای مذکور شرح داده می‌شود.

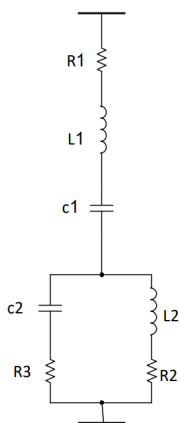
۱.۲. فیلترهای قدرت غیر فعال. یکی از روش‌های سنتی جبران توان راکتیو استفاده از فیلترهای پسیو (غیر فعال) است. این نوع فیلترها از مقاومت، خازن و سلف تشکیل میشوند و بصورت موازی با بار در شبکه قرار می‌گیرند. همان هزینه پایین و بازده مناسب مهمترین مزایای آنها است [۱۵]. مقادیر عناصر در فیلترهای پسیو ثابت است لذا قابلیت تطبیق با تغییرات بار و شبکه قدرت را ندارند. همچنین ممکن است برای فرکانس طراحی شده عملکرد مطلوبی داشته باشند ولی با تغییرات شبکه در اثر اتصال کوتاه منجر به رزونانس شوند. لذا امروزه کمتر از این نوع فیلتر بطور مجزا استفاده می‌شود، لیکن طراحی فیلترهای غیرفعال یکی از مهمترین بخش‌های طراحی فیلترهای هیبرید قدرت است.

¹Strength Pareto Evolutionary Algorithm-II

این فیلترها به انواع تک‌تنظیمه^۱، دو‌تنظیمه^۲ و... تقسیم بندی می‌شوند که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار فیلترپسیو تک‌تنظیمه



شکل ۲: ساختار فیلترپسیو دو‌تنظیمه

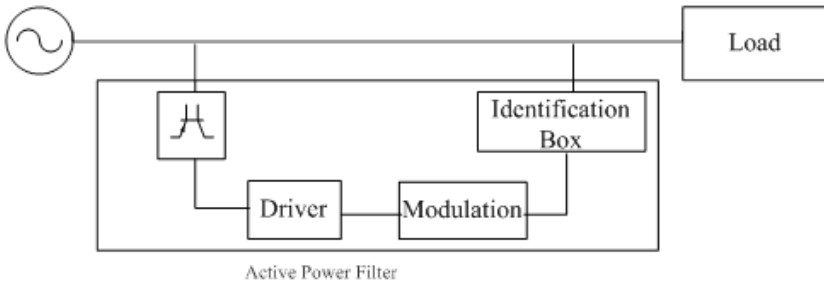
۲.۲. فیلترهای قدرت فعال. با توسعه ادوات الکترونیک قدرت در دهه ۷۰ میلادی، استفاده از فیلتر فعال جهت افزایش ضریب قدرت پیشنهاد گردید. فیلتر فعال از سه بخش،

^۱Single-tuned Filter

^۲Double-tuned Filter

باکس شناسایی، اینورتر و مدولاسیون تشکیل می‌گردد که ساختار آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

این فیلترها مزایایی همچون قابلیت افزایش ضریب قدرت، تطابق با تغییرات بار و عدم وابستگی به امپدانس شبکه را دارند لیکن هزینه ساخت آنها بیشتر است که کاربرد آن را محدود می‌کند.



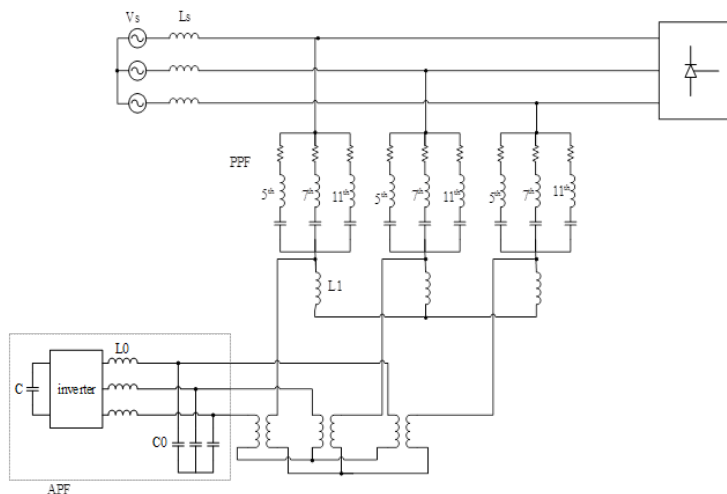
شکل ۳: ساختار فیلتر فعال

۳.۲. فیلترهای قدرت هیبرید. ساختار فیلترهای قدرت ترکیبی (هیبرید) بر اساس فیلترهای فعال و فیلترهای غیر فعال تقریباً در اواخر دهه هشتاد میلادی پیشنهاد شد [۱۰]. این فیلتر نه تنها مشخصه‌های جبران‌سازی فیلترهای پسیو ساده را بطور قابل توجهی بهبود بخشیده بلکه امکان استفاده از فیلترهای فعال برای کاربردهای توان بالا را با هزینه کمتر فراهم می‌سازد [۱۱].

۳. ساختار فیلتر پیشنهادی

در این مقاله برای کاهش اغتشاشات هارمونیک و افزایش ضریب توان یک فیلتر فعال هیبرید پیشنهاد می‌شود که فیلتر غیر فعال آن فرکانس‌های ۵ و ۷ و ۱۱ را حذف می‌نماید، پارامترهای این فیلتر (یعنی مقاومت، خازن و سلف آن) با الگوریتم دو هدفه SPEA-II تعیین می‌شود. فیلتر فعال شامل سه مرحله روش شناسایی، مدولاسیون و اینورتر می‌باشد که قسمتهای مذکور در ادامه تشریح می‌گردد. جهت تحویل اهداف اقتصادی از اینورتر سه فاز چهارسوئیچ

به جای نمونه شش سوئیچه است. توپولوژی فیلتر هیبرید بکارگرفته شده در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴: ساختار فیلتر هیبرید پیشنهادی

۱.۳. روش شناسایی. روش‌های تولید جریان مرجع برای جبران‌سازی توان راکتیو به دو دسته حوزه زمان و حوزه فرکانس تقسیم می‌شوند. روش‌های حوزه زمان مانند تئوری توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای [۱۲]، دوگان نظریه $p - q$ و... بر مبنای اندازه‌گیری و تبدیلات سه فاز است ولی روش‌های حوزه فرکانس مانند فیلترهای میان‌گذر و... بر پایه FFT^۱ استوار است. در این مقاله از روش توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای استفاده شده است که در ادامه شرح داده می‌شود. در این روش ابتدا جریان و ولتاژ در مختصات abc اندازه‌گیری شده و پس از آن با تبدیل کلارک به مختصات $\alpha\beta$ انتقال می‌شود.

$$(۱.۳) \quad \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

^۱Fast Fourier Transform

$$(۲.۳) \quad \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

که V_{α} و V_{β} ولتاژ در محور α, β و I_{α} و I_{β} ولتاژ در محور α, β ، V_a, V_b, V_c ولتاژ در محور a, b, c و I_a, I_b, I_c جریان در محور a, b, c می‌باشد. سپس توان‌ها طبق رابطه‌ی زیر بدست می‌آیند.

$$(۳.۳) \quad \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix}$$

توان اکتیو و راکتیو از دو جز مقدار متوسط و بخش نوسانی تشکیل شده است:

$$(۴.۳) \quad p = \bar{p} + \tilde{p}$$

$$(۵.۳) \quad q = \bar{q} + \tilde{q}$$

که در آن \bar{p} مقدار متوسط توان اکتیو، \tilde{p} بخش نوسانی توان اکتیو، \bar{q} مقدار متوسط توان راکتیو و \tilde{q} بخش نوسانی توان راکتیو می‌باشد. اگر هدف جبران‌سازی توان راکتیو یا همان افزایش ضریب قدرت باشد توان جبران‌ساز باید برابر قرینه‌ی مجموع مولفه‌های توان‌های راکتیو باشد.

$$(۶.۳) \quad \begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -(\tilde{q} + \bar{q}) \end{bmatrix}$$

که $I_{c\alpha}$ و $I_{c\beta}$ جریان جبران‌سازی در محور α, β می‌باشد. حالا باید جریان‌های حاصل را با رابطه (۷.۳) از مختصات $\alpha\beta$ به مختصات abc منتقل کنیم.

$$(۷.۳) \quad \begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix}$$

که I_{ca}, I_{cb}, I_{cc} جریان جبران‌سازی در محور a, b, c می‌باشد. سپس جریان مرجع تولیدی به بخش مدولاسیون برای تولید پالس سوئیچ‌های اینورتر اعمال می‌شود که در اینجا از روش مدولاسیون پهنای پالس استفاده گردیده است.

۲.۳. اینورتر چهارسوئیچه. اینورترهای چهار سوئیچه اولین بار در دهه ۸۰ میلادی پیشنهاد شدند. در بسیاری از کاربردها مخصوصا مصرف کنندگان مبدل‌های توان پائین کاهش هزینه تمام شده اینورتر بسیار مهم می‌باشد که برای دستیابی به این موضوع اینورترهایی با حداقل‌سازی در قطعات به کار رفته، پیشنهاد شده است. یکی از حداقل‌سازی‌هایی که مورد توجه قرار گرفت کاهش در تعداد سوئیچ‌های اینورتر می‌باشد [۱۵]. اینورترهای سه فاز چهار سوئیچه یکی از پیشنهادات مناسب برای حداقل‌سازی در تعداد سوئیچ‌های اینورتر می‌باشد. کاهش هزینه محسوس در ساخت اینورتر، همچنین کاهش در مدارات کنترلی و راه‌اندازی سوئیچ‌ها و کاهش تلفات سوئیچینگ مزایای این نوع اینورتر نسبت به نوع شش سوئیچه است.

۴. طراحی بهینه فیلتر پسیو

در این مقاله، عناصر فیلتر غیرفعال با الگوریتم‌های فراابتکاری دو هدفه تعیین شده است. کاهش هارمونیک و افزایش قدرت توابع هدف و عناصر فیلتر به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشند. جزئیات این طراحی در ادامه شرح داده خواهد شد.

۱.۴. توابع هدف و قیدها. همانطور که پیش از این گفته شد، به منظور دستیابی به مناسب‌ترین پارامترهای بهینه فیلترپسیو، از الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه استفاده می‌گردد که توابع هدف آن در روابط (۱.۴) و (۲.۴) بیان شده است:

۱. مینیمم‌سازی اعوجاج هارمونیک جریان

$$(۱.۴) \quad f_1: \min \left\{ \sqrt{\sum_{n=5,7,11} \left(\frac{I_{sn}}{I_1} \right)^2} \right\}$$

که در معادله بالا، I_{sn} جریان منبع در فرکانس هارمونیک m ام، I_1 مولفه اصلی جریان می‌باشد.

۲. ماکزیمم‌سازی ضریب قدرت

$$(۲.۴) \quad f_2: \max \left\{ \frac{P_L}{V_L I_s} = \frac{\sum_{n=5,7,11} V_{Ln} I_{sn} \cos(\theta_n - \varphi_n)}{\sqrt{\sum_{n=5,7,11} I_{sn}^2 \sum_{n=5,7,11} V_{Ln}^2}} \right\}$$

که در معادله بالا P_L توان اکتیو بار، V_L ولتاژبار، I_s جریان منبع، V_{Ln} ولتاژبار در فرکانس هارمونیک m ام، θ_n زاویه V_{Ln} ، φ_n زاویه I_{sn} می‌باشد. در این مطالعه

بهینه‌سازی تحت قیود زیر انجام می‌شود

$$10\mu F \leq C_5 \leq 100\mu F$$

(۳.۴)

$$10\mu F \leq C_v \leq 100\mu F$$

$$10\mu F \leq C_{11} \leq 100\mu F$$

۵. الگوریتم‌های فراابتکاری

یکی از اهداف مهم بهینه‌سازی چندهدفه ایده‌آل، یافتن جواب‌هایی متنوع با پراکندگی گسترده در مجموعه نامغلوب نهایی است. یافتن و نگهداری جواب‌های چندگانه در یک اجرا ویژگی منحصر به فرد تکنیک‌های بهینه‌سازی تکاملی است. برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم SPEA-II استفاده شده است.

۱.۵. الگوریتم SPEA-II. الگوریتم SPEA معایی دارد که اهم آنها، احتمال حذف پاسخ‌های مرزی و عدم حضور عامل ثانویه برای اپراتور تصمیم‌گیری تورنومنت باینری می‌باشد. برای رفع موارد مذکور الگوریتم SPEA-II پیشنهاد گردیده است [۱۸] که از ویژگی مهم به شرح زیر برخوردار است:

۱- رویکرد جدیدی برای تعریف برازندگی که در آن، هم مجموعه پاسخ‌های مغلوب شونده و هم مجموعه پاسخ‌های مغلوب کننده تاثیر دارند.

۲- برای پیاده‌سازی عامل ثانویه از روش k نزدیکترین همسایگی برای کنترل توزیع استفاده شده است.

۳- رویکردی مبتنی بر توزیع داده‌ها برای حذف پاسخ‌های اضافی بکار گرفته می‌شود

مراحل الگوریتم SPEA-II به شرح زیر می‌باشد:

مرحله ۱: آماده‌سازی: تولید جمعیت اولیه P و جمعیت آرشیو خالی ($\bar{P} = \emptyset$) و قرار دادن $t = 0$.

مرحله ۲: محاسبه برازندگی: محاسبه مقادیر برازندگی اعضا در مجموعه P_t و \bar{P}_t .

مرحله ۳: انتخاب: انتقال اعضای نامغلوب P_t و \bar{P}_t به \bar{P}_{t+1} اگر تعداد اعضای نامغلوب از \bar{P}_{t+1} بیشتر شود، آنگاه با استفاده از عملگرهای حذف، تعداد اضافی اعضا می‌شوند و اگر اندازه \bar{P}_{t+1} کمتر از \bar{N} باشد، آنگاه کمبود تعداد اعضا در \bar{N} با اعضای مغلوب شده در P_t و \bar{P}_t جبران می‌شود.

مرحله ۴: شرایط خاتمه: اگر تعداد تکرارها (t) از تکرار بیشینه (T) بیشتر شود، A برابر با

اعضای نامغلوب آرشیو \bar{P}_{t+1} ، قرار داده می‌شود و الگوریتم متوقف می‌گردد. مرحله ۵: انتخاب مسابقه‌ای: استفاده از انتخاب مسابقه‌ای، جهت انتخاب والدین از مجموعه \bar{P}_{t+1} .

مرحله ۶: متنوع سازی: استفاده از عملگرهای ترکیب و جهش بر روی والدین به منظور ایجاد مجموعه P_{t+1} .

افزایش یک واحد به شمارنده t ($t = t + 1$) و رفتن به مرحله ۲.

۱.۱.۵. تخصیص برازندگی. برای هر عضو i در مجموعه آرشیو \bar{P}_t و جمعیت P_t ، یک مقدار قوت $S(i)$ تخصیص داده می‌شود که بیان کننده تعداد پاسخ‌هایی است که مغلوب می‌کند. به بیان ریاضی، تعداد پاسخ‌هایی که از مجموعه P_t و \bar{P}_t توسط عضو i مغلوب می‌شوند به صورت رابطه (۱.۵) محاسبه می‌شود.

$$(۱.۵) \quad S(i) = |\{j | j \in P_t + \bar{P}_t \cap i \succ j\}|$$

مقدار برازندگی خام به صورت رابطه (۲.۵) محاسبه می‌شود که این برازندگی خام برای همه اعضای جمعیت و آرشیو مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

$$(۲.۵) \quad R(i) = \sum_{j \in P_t + \bar{P}_t, i \succ j} S(j)$$

هنگامی که همگی اعضای آن نامغلوب هستند برای مقایسه دو سطح پارتو، سطح پارتویی بهتر است که از تنوع جواب یکسانی برخوردار باشد و بتواند پاسخ‌ها را با تنوع بیشتری در فضای اهداف پخش کند. به همین دلیل، تنها استفاده از تابع برازندگی خام کافی نیست و نیاز به معیار ثانویه‌ای می‌باشد تا بتواند پاسخ‌ها را در فضای توابع هدف، با تنوع مناسبی ارائه نماید. زیتیلر و همکاران [۱۶] از تکنیک تخمین تراکم در SPEA-II استفاده کردند که از مفهوم k امین نزدیکترین همسایه استفاده می‌کند که تراکم در هر نقطه تا k امین نزدیکترین همسایه می‌باشد. مطابق رابطه (۳.۵) می‌باشد:

$$(۳.۵) \quad D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2}$$

در رابطه (۴.۵) از معکوس فاصله به عنوان تخمینی از تراکم پاسخ‌ها استفاده شده است. که σ_i^k فاصله عضو i ام از k امین نزدیکترین همسایه‌اش می‌باشد. k برابر با ریشه دوم اندازه نمونه

است [۱۸] در نتیجه خواهیم داشت:

$$(۴.۵) \quad k = \sqrt{N + \bar{N}}$$

در نهایت مقدار برازندگی نهایی به صورت مجموع برازندگی خام و میزان تراکم به صورت رابطه (۵.۵) محاسبه می‌شود.

$$(۵.۵) \quad F(i) = R(i) + D(i)$$

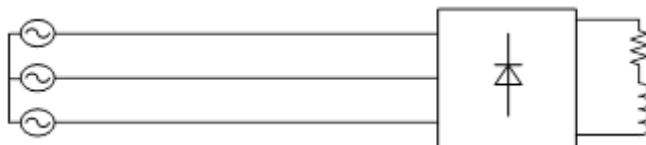
هر چه مقدار $F(i)$ کمتر باشد، بهتر و به سطح پارتو نزدیکتر خواهد بود. برای انتخاب یک نقطه از سطح پارتو از روش ماکزیمم-مینیمم فازی استفاده می‌شود که این روش در بخش ۲.۵ ارائه می‌گردد.

۲.۵. روش ماکزیمم-مینیمم فازی. هریک از نقاط جبهه پارتو می‌تواند به عنوان نقطه بهینه انتخاب شود. برای انتخاب جواب نهایی در بین این نقاط از روش ماکزیمم-مینیمم فازی استفاده می‌کنیم. در این روش ابتدا بیشترین و کمترین مقدار برای اولین خروجی تعیین می‌شود. سپس این متغیر به صورت توابع عضویت فازی بیان می‌گردد و مقدار هر الگو با توجه به تابع عضویت فازی مرحله قبل محاسبه می‌شود و مقدار ماکزیمم آن تعیین می‌شود. مراحل مذکور برای خروجی دوم هم تکرار می‌گردد و مقدار ماکزیمم آن مشخص می‌شود. اگر بیش از دو تابع هدف وجود داشته باشد به همین صورت ادامه پیدا می‌کند تا تمامی خروجی‌ها فازی شوند و مقدار ماکزیمم آنها تعیین گردد. در نهایت بین مقادیر ماکزیمم بدست آمده، هر کدام کمتر باشد به عنوان نقطه بهینه انتخاب می‌شود. جزئیات روش مذکور در مراجع [۱۷، ۱۸] ارائه شده است.

۶. شبیه‌سازی

در طراحی فیلترها معمولاً یکسوساز پل دیودی به عنوان یک بار غیرخطی در نظر گرفته می‌شود. خروجی این پل به یک بار القایی متصل می‌گردد. شکل ۵ ساختار این سیستم و جدول ۱ مشخصات آن را ارائه می‌کند.

۱.۶. سیستم جبران نشده. اگر شبکه معرفی شده با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شود. نمودار جریان و طیف هارمونیک آن مطابق شکل (آ) ۶ و (ب) ۶ می‌گردد. نه تنها THD جریان خارج از محدوده مجاز استاندارد IEEE-519 است بلکه میزان ضریب قدرت



شکل ۵: باریکسوساز پل دیودی

جدول ۱: مشخصات سیستم

ولتاژ منبع	فرکانس	توان اکتیو بار	توان راکتیو بار
۳۸۰ ولت	۵۰ هرتز	۵۰ کیلووات	۶۲/۵ کیلووار

آن ۰/۷۳ می‌باشد. لذا هر دو شاخص می‌بایست اصلاح گردد لذا از فیلتر قدرت هیبریدی پیشنهاد شده استفاده می‌شود.

۲.۶. سیستم اصلاح شده با فیلتر قدرت هیبریدی. برای عملکرد مناسب سیستم قدرت معرفی شده باید فیلتر هیبریدی با استفاده از روش‌های هوشمند طراحی شود. الگوریتم‌های فرااکتشافی معمولاً قابلیت مینیمم کردن توابع هدف را دارند. در اینجا دو تابع هدف THD جریان و ضریب قدرت هستند که اولی/دومی می‌بایست مینیمم/ماکزیمم شود. با توجه به اینکه ضریب قدرت همواره پارامتر مثبتی است لذا به جای آنکه ماکزیمم شود معکوس آن مینیمم می‌شود. در حقیقت با یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه به صورت زیر وجود دارد.

$$(۱.۶) \quad \text{Min} (f_1, \frac{1}{f_2})$$

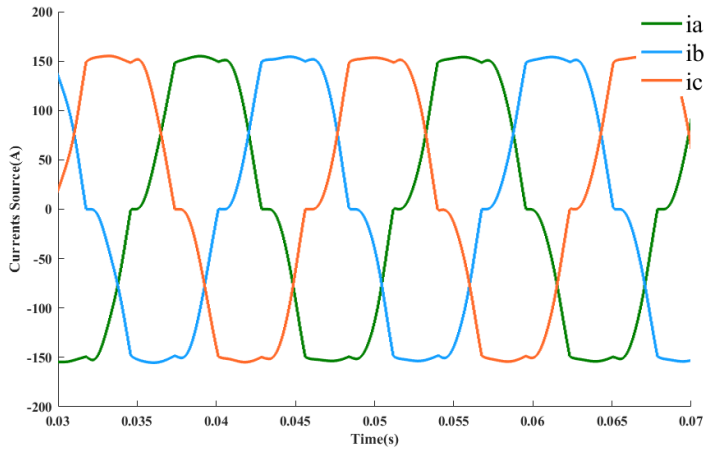
s.t.

$$۱۰\mu\text{F} \leq C_5 \leq ۱۰۰\mu\text{F}$$

$$(۲.۶) \quad ۱۰\mu\text{F} \leq C_7 \leq ۱۰۰\mu\text{F}$$

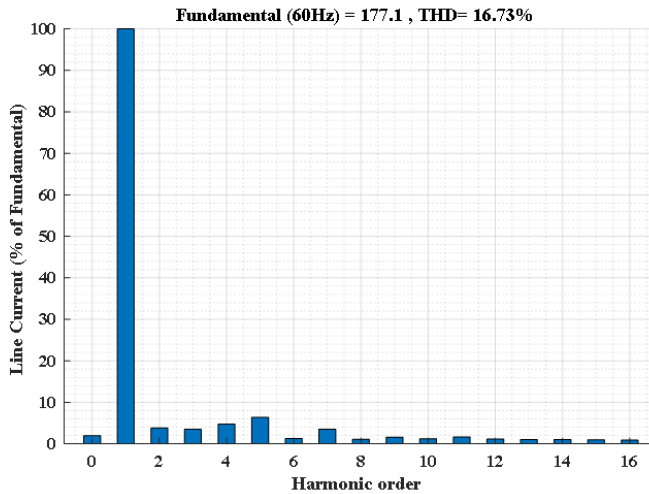
$$۱۰\mu\text{F} \leq C_{11} \leq ۱۰۰\mu\text{F}$$

که توابع f_1 و f_2 به ترتیب در معادلات (۱.۴) و (۲.۴) معرفی شده‌اند. اگر این مسئله بهینه‌سازی با الگوریتم SPEA-II بهینه‌سازی گردد سطح پارتوی مطابق شکل ۷ حاصل می‌شود



[]

[]

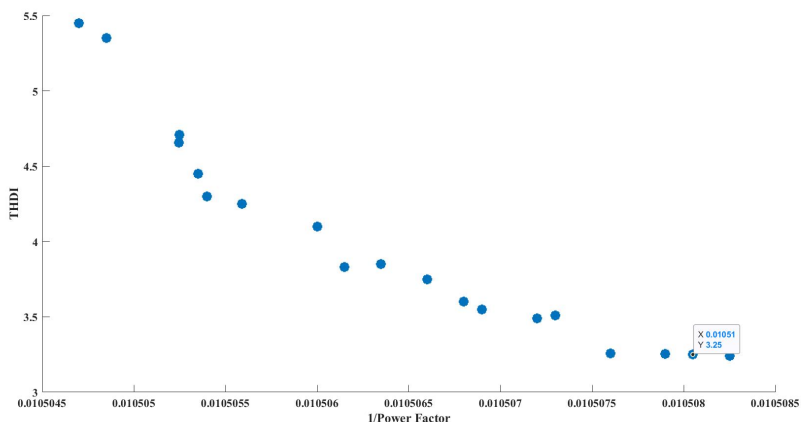


شکل ۶: شکل موج جریان بدون حضور جبران ساز (آ) حوزه زمان (ب) طیف فرکانسی

سپس با استفاده از روش ماکزیمم-مینیمم فازی نقطه مشخص شده انتخاب می‌گردد. مقادیر عناصر فیلتر غیرفعال برای نقطه بهینه در جدول ۲ ارائه شده است. حال اگر شبکه قدرت با

جدول ۲: پارامترهای بهینه‌سازی شده فیلتر هیبرید پیشنهادی

C_{Δ}	C_V	C_{11}	L_{Δ}	L_V	L_{11}	R_{Δ}	R_V	R_{11}
$42/654\mu F$	$34/8280\mu F$	$12/5103\mu F$	$6/61mH$	$4/12mH$	$4/63mH$	$0/2491\Omega$	$0/2174\Omega$	$0/3842\Omega$

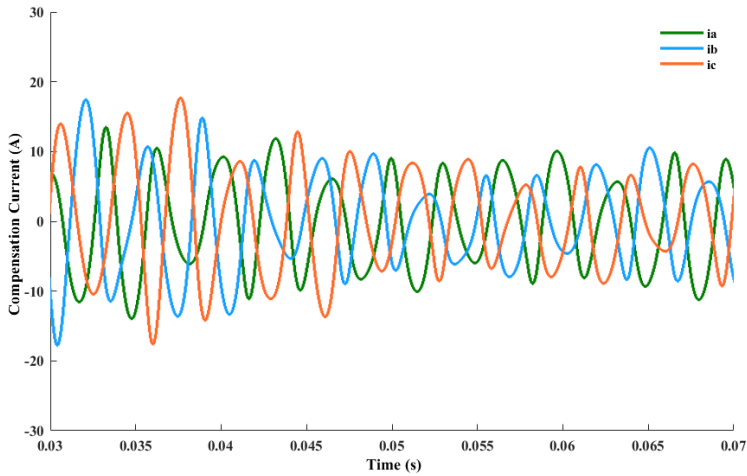


شکل ۷: سطح پارتو برای بهینه‌سازی فیلتر هیبرید

فیلتر طراحی شده تجهیز شود میزان هارمونیک جریان از $۱۶/۷۳\%$ به $۳/۲۵\%$ کاهش می‌یابد. همچنین ضریب قدرت از $۰/۷۳$ به بیش از $۰/۹۵$ افزایش می‌یابد که طبق استاندارد IEC ضریب قدرت بیش از $۰/۹$ مشمول جریمه نخواهد شد. شکل موج جریان تزریق شده به خط و جریان حاصل شده و به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. علاوه بر این، از مقایسه طیف هارمونیک‌های جریان اصلاح شده (شکل ۹-ب) با جریان اولیه (شکل ۶-ب) مشخص می‌شود که تنها میزان آلودگی هارمونیک‌ها کاهش یافته است بلکه مقدار موثر هارمونیک پایه نیز افزایش یافته است.

۷. نتیجه‌گیری

فیلتر هیبریدی با توجه به نوع ساختار قابلیت بهبود چندین پارامتر کیفیت توان را دارد. در این مقاله کاهش هارمونیک جریان و افزایش ضریب قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. مدار پیشنهاد شده برای فیلتر پس‌ویو قابلیت حذف سه هارمونیک را دارد. با توجه به اینکه هارمونیک سوم و مضارب آن با اتصال ستاره مثلث حذف می‌شوند لذا عناصر فیلتر پس‌ویو با هدف بهبود اهداف مذکور با الگوریتم فرا ابتکاری SPEA-II به نحوی تعیین شده‌اند که هارمونیک‌های پنجم، هفتم و یازدهم را حذف کنند. فیلتر طراحی شده هم هارمونیک جریان را از $۱۶/۷۳\%$ به $۳/۲۵\%$ کاهش می‌دهد و هم ضریب قدرت را از $۰/۷۳$ به $۰/۹۵$ افزایش می‌دهد. مقایسه

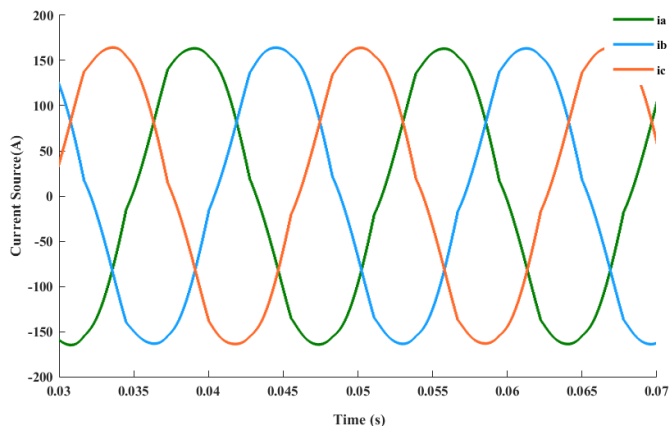


شکل ۸: جریان مرجع تزریقی توسط فیلتر هیبرید

عملکرد این فیلتر با موارد پیشنهادی قبلی در جدول ۳ ارائه شده است. اگر چه برخی مراجع مقدار هارمونیک جریانی بهتری دارند ولی ضریب قدرت در آنها بررسی نشده است. همچنین THD کمتر از ۵٪ قابل قبول می باشد لذا میزان هارمونیک این روش در محدوده قابل قبول است. لذا با روش پیشنهادی این مقاله می توان برای بهبود تمامی پارامترهای کیفیت توان مانند نامتعادلی، نوسانات ولتاژ و ... به صورت تک هدفه و چند هدفه اقدام نمود.

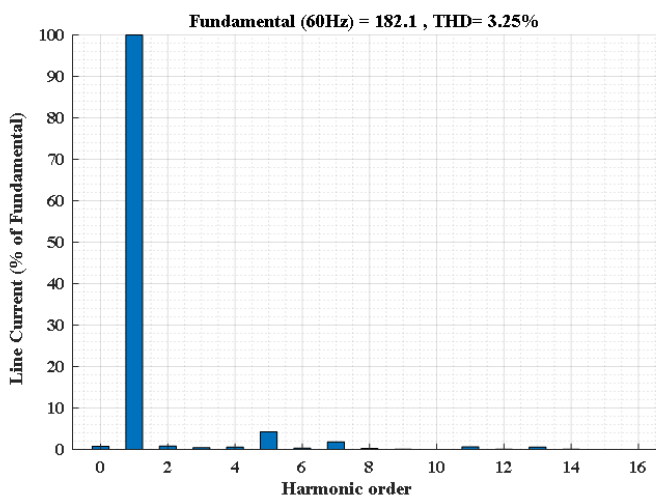
جدول ۳: پارامترهای بهینه سازی شده فیلتر هیبرید پیشنهادی

شماره مرجع	نوع فیلتر	در صد هارمونیک جریان کاهش یافته	ضریب قدرت بهبود یافته
۱	فعال	۴/۴۵	بررسی نشده
۲	فعال	۲/۸۴	بررسی نشده
۴	فعال	۲/۱۵	بررسی نشده
۵	فعال	۱/۸۶	بررسی نشده
۷	فعال	۸/۰۶	بررسی نشده
۸	فعال	۴/۰۲	بررسی نشده
روش پیشنهادی	هیبرید	۳/۲۵	۰/۹۵



[]

[]



شکل ۹: شکل موج جریان با حضور فیلتر هیبرید آ) حوزه زمان ب) طیف هارمونیکی

مراجع

- [1] Hoseinpour, A. (2010). Three phase active filter with four switching inverter and variable index modulation. In *2010 First Power Quality Conferance*.
- [2] Hoseinpour, A., & Ghazi, R. (2012). Harmonic reduction in wind turbine generators using a shunt active filter. *International Review on Modelling & Simulations*, 5(4) 722–730.

- [3] Marei, M. I., El-Saadany, E. F., & Salama, M. M. A. (2002). A new contribution into performance of active power filter utilizing SVM based HCC technique. In IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2, pp. 1022–1026.
- [4] Hosseinpour, A., & Sadeq, M. O. (2022). Harmonic reduction of current by using phase shifting and shunt-active filter trained by fuzzy particle swarm optimization. *International Journal of Fuzzy Systems*, 24(6), 2729–2739.
- [5] HossienPour, A., & Ghazi, R. (2020). Using of a three-phase four-switch inverter equipped with a variable index PWM to improve the power quality of a wind power plant. *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization*, 3(3), 213–222.
- [6] Sasaki, H., & Machida, T. (1971). A new method to eliminate AC harmonic currents by magnetic flux compensation-considerations on basic design. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 90(5), 2009–2019.
- [7] Hoseinpour, A., & Ghazi, R. (2010). Three phase active filter manufacturing correction with economy consideration for sinusoidal and none sinusoidal sources. In 2010 First Power Quality Conference, pp. 1–6.
- [8] Hoseinpour, A. R., & Ghazi, R. (2011). Application of VIPWM technique on three phase shunt active filters. In 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference.
- [9] Chen, L., Xie, Y., & Zhang, Z. (2008). Comparison of hybrid active power filter topologies and principles. In 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 2030–2035.
- [10] Yu, J., Li, Y., Cao, Y., & Xu, Y. (2018). An impedance-match design scheme for inductively active power filter in distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 638–649.
- [11] Khan, A., Gastli, A., & Ben-Brahim, L. (2018). Modeling and control for new LLCL filter based grid-tied PV inverters with active power decoupling and active resonance damping capabilities. *Electric power systems research*, 155, 307–319.
- [12] Li, D., Yang, K., Zhu, Z. Q., & Qin, Y. (2016). A novel series power quality controller with reduced passive power filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1), 773–784.
- [13] Akbari, E., & Seyyedi, A. Z. G. (2023). Power quality enhancement of distribution grid using a photovoltaic based hybrid active power filter with three level converter. *Energy Reports*, 9, 5432–5448.
- [14] Venkedesh, R., AnandhaKumar, R., & Renukadevi, G. (2022). THD reduction in measurement of H-Bridge multilevel inverter using pulse modulated switching integrated with linear quadratic Regulator. *Measurement: Sensors*, 24, 100435.

- [15] Jian, W., Na, H., & Dianguo, X. (2008). A 10KV shunt hybrid active filter for a power distribution system. In 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 927–932.
- [16] Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. TIK report, 103.
- [17] Cheng, H., Huang, W., Zhou, Q., & Cai, J. (2013). Solving fuzzy multi-objective linear programming problems using deviation degree measures and weighted max–min method. *Applied Mathematical Modelling*, 37(10-11), 6855–6869.
- [18] Chen, C. H., Hong, T. P., & Tseng, V. S. (2012). Finding pareto-front membership functions in fuzzy data mining. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 5(2), 343–354.