

مکانیابی بهینه فیلترهای اکتیو در شبکه های توزیع انرژی برق با استفاده از الگوریتم PSO

حجت حاتمی*^۱، علی اکبری^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، موسسه آموزش عالی سراج، تبریز

۲- کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی سراج و شرکت برق منطقه ای آذربایجان، تبریز

چکیده

امروزه استفاده از روشهای هوشمند و الگوریتم های کامپیوتری پیشرفته بر مبنای کدنویسی یکی از مهمترین روشها برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه می باشد. در این میان وجود روابط غیرخطی بین پارامترهای اساسی یک مساله مهندسی نیاز به استفاده از این روشها را افزایش می دهد. یکی از مسائل بسیار مهمی که حوزه شبکه های انرژی الکتریکی در سالهای اخیر با آن مواجه بوده است با عنوان کیفیت توان مطرح می شود. گسترش روزافزون تجهیزات الکترونیک قدرت، منجر به بروز آلودگی های شدید هارمونیکی در ولتاژ و جریان شبکه قدرت و ایجاد مسائل کیفیت توان شده است. از ادوات مهم برای رفع این مشکل، فیلترها هستند. فیلترهای اکتیو نسبت به فیلترهای پسیو دارای انعطاف و توانایی بالاتر و در نتیجه مقبولیت بیشتری هستند. با افزایش بارهای غیرخطی، تعیین ظرفیت و بهینه سازی این فیلترها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به گستردگی شبکه های توزیع برق، یکی از روش های مطلوب برای بهبود کیفیت توان در این نوع از شبکه ها، بکارگیری چندین فیلتر فعال، به صورت توزیع شده است که تاثیر مهمی در افزایش قابلیت اطمینان شبکه خواهد داشت. هدف اصلی این مقاله، مشخص نمودن تعداد، مکان و اندازه بهینه چندین فیلتر فعال توزیع شده، جهت کاهش آلودگی هارمونیکی سیستم، با بکارگیری الگوریتم PSO می باشد. بدین منظور، یک تابع بهینه سازی چند هدفه، جهت حداقل نمودن جریان تزریقی و تعداد فیلترها، برای دستیابی به کیفیت ولتاژ استاندارد در همه باس های یک شبکه ۲۰ کیلوولت، معرفی شده است. در نهایت، الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۳۷ باسه IEEE پیاده سازی شده و نتایج حاصل مورد تحلیل قرار گرفته است. انجام محاسبات مربوطه، نتایج روش به کار گرفته شده را تایید می کند.

کلمات کلیدی: اعوجاج هارمونیکی، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، کیفیت توان، فیلترهای فعال توزیع شده، مکانیابی بهینه

* Corresponding author: hojat hatami
Email: hojat_hatami@yahoo.com

۱. مقدمه

افزایش روند خصوصی‌سازی شرکت‌های توزیع نیروی برق و ایجاد فضای رقابتی هر چه بیشتر از یک سو و افزایش آگاهی مشترکین به مسائل و مشکلات کیفیت توان از سوی دیگر باعث توجه هر چه بیشتر پژوهشگران و صنعتگران به مسائل و مشکلات کیفیت توان در چند دهه اخیر شده است. جامع‌ترین تعریفی که برای کیفیت توان به کار می‌رود عبارت است از "هر گونه مشکلی که باعث تغییر در ولتاژ، جریان و یا فرکانس گردد و موجب خرابی و یا عملکرد نادرست تجهیزات مصرف‌کننده شود" [۱ و ۲].

امروزه راه‌کارهای مختلفی برای بهبود کیفیت توان مطرح می‌شود که یکی از آن‌ها استفاده از فیلترهای پسیو و فیلترهای فعال می‌باشد. فیلترهای پسیو به دلیل مشکلاتی مانند ایجاد رزونانس، محدود بودن کاربرد آن‌ها در حذف هارمونیک‌ها و کند بودن سرعت جبران، برای کاربردهای صنعتی با هارمونیک‌های متغیر گزینه مناسبی نمی‌باشند. با توجه به اینکه اعوجاجات بالای هارمونیک‌های جریانی و مصرف بالای توان راکتیو مشترکین و فیدرها از مهم‌ترین مشکلات کیفیت توان در اکثر شبکه‌های توزیع صنعتی محسوب می‌شوند، لذا قابلیت‌های فراوان فیلترهای فعال در حذف هارمونیک‌های ولتاژ و جریان، آنها را، بیش از سایر روشهای کنترل و بهبود کیفیت توان، مورد توجه قرار می‌دهد. با این حال تنها عامل بازدارنده در استفاده از فیلترهای فعال، قیمت نسبتاً بالای آن‌ها است. از طرفی با افزایش بارهای غیرخطی در صنایع، نیاز به افزایش ظرفیت فیلترهای فعال نیز وجود دارد. در چنین شرایطی استفاده از چندین فیلتر فعال توزیع‌شده در یک شبکه توزیع برق متشکل از چندین بار غیرخطی، می‌تواند بدلیل صرفه‌جویی در هزینه‌های طراحی، به کاهش قیمت و افزایش قابلیت اطمینان کمک کند [۳-۶]. با توجه به این راهکار، تعیین ظرفیت و مکانیابی بهینه برای نصب این فیلترها در شبکه‌های توزیع برای تامین اهداف چندگانه فنی و اقتصادی امری لازم و ضروری است. لذا روشهای مختلفی برای دستیابی همزمان به چندین مزیت فیلترهای فعال پیشنهاد گردیده است که از مهم‌ترین روشها می‌توان به روشهای بهینه‌سازی هوشمند مبتنی بر الگوریتم‌های ریاضی اشاره کرد. با توجه به توابع هدفی که برای حل این مساله پیشنهاد می‌گردد، الگوریتم‌های خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله نیز از الگوریتم بهینه‌سازی PSO با اجرای تابع هدف پیشنهادی چند هدفه مد نظر قرار دارد.

۲. اصلاح کیفیت توان

امروزه پیشرفت تکنولوژی الکترونیک قدرت باعث ازدیاد بارهای غیرخطی و کاهش کیفیت توان در سیستم‌های توزیع شده است. جریان غیرخطی به هر جریانی اطلاق می‌گردد که با ولتاژی که به بار اعمال شده است، رابطه خطی نداشته باشد. این جریان‌ها دارای هارمونیک‌هایی از فرکانس اصلی هستند. مشکلات به‌ظاهر کوچک در کیفیت توان می‌تواند خسارت‌های فراوانی را در صنایع به بار آورند. از آنجایی که قسمت عمده این مشکلات از جانب مصرف‌کننده ایجاد می‌شود، استانداردهایی برای بالابردن کیفیت برق و کاهش خسارات ناشی از آن تعریف شده است. در این استانداردها محدودیت‌هایی برای میزان اغتشاش تولیدی توسط مصرف‌کننده مشخص شده است. از جمله ادواتی که می‌توانند کیفیت توان را بهبود دهند فیلترها هستند. فیلترها می‌توانند برای کاهش مسائلی نظیر هارمونیک‌ها، توان راکتیو و نامتعادلی در شبکه‌های قدرت بکار روند و شامل انواع پسیو و اکتیو می‌باشند.

۲-۱. فیلترهای پسیو

روش سنتی برای حذف هارمونیک‌های جریانی فیلتر پسیو میباشد و نصب آن در شبکه‌های قدرت از اواسط سال ۱۹۴۰ رایج بوده است. وظیفه یک فیلتر جلوگیری از عبور جریانهای دارای هارمونیک و یا کاهش مقادیر هارمونیک جریانی در مسیر

اصلی است. گسترش روزافزون بارهای غیرخطی باعث شده است که استفاده از فیلترهای پسیو علی‌رغم داشتن مزایایی مانند سادگی ساختار، سرعت پاسخدهی بالا و مقرون به صرفه بودن، بعلاوه محدودیتهایی مانند عدم تناسب با بارهای متغیر، تغییرات ناگهانی در فرکانس تشدید فیلتر به خاطر حوادث سیستم، وابسته بودن فرکانس تنظیم فیلتر به مسائل حرارتی و طول عمر و عدم امکان جبران پیوسته توان راکتیو با مشکلاتی همراه گردد. لذا با پیشرفت تکنولوژی ساخت و کنترل ادوات نیمه هادی، ساختارهای قدرتمندتری مانند فیلترهای اکتیو برای اهداف اصلاح کیفیت توان پیشنهاد گردیده اند.

۲-۲. فیلترهای اکتیو

با توجه به پیشرفت روش‌های ساخت ادوات الکترونیک قدرت و روش‌های کنترلی مدرن، فیلترهای اکتیو در دهه ۱۹۷۰ برای حل مشکلات کیفیت توان ارائه شدند. فیلترهای اکتیو در سال‌های اخیر نیز شدیداً مورد توجه صنعت بوده اند. در حال حاضر این فیلترها دارای کاربردهای زیر می‌باشند.

- کاهش هارمونیک‌های ولتاژ و جریان
- جبران‌سازی توان راکتیو و بهبود ضریب توان
- جبران‌سازی نامتعادلی
- جبران‌سازی فلیکرها
- رگولاسیون ولتاژ

وظیفه اصلی فیلترهای فعال حذف هارمونیک‌های جریان و یا ولتاژ می‌باشد اما گاهی اصلاح ضریب توان و جبران توان راکتیو نیز مدنظر قرار می‌گیرد.

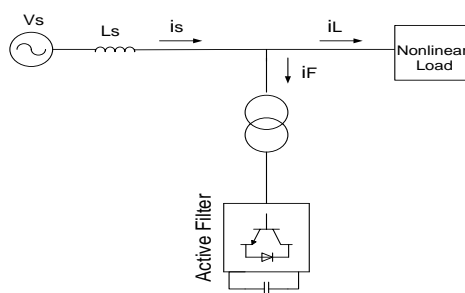
۱-۲-۲. طبقه بندی فیلترهای اکتیو

فیلترهای اکتیو برحسب قرار گرفتن در شبکه قدرت الکتریکی دارای دو گروه اصلی هستند که در این بخش به آنها اشاره می‌گردد.

الف) فیلتر اکتیو موازی

این گروه از فیلترها مهمترین و پرکاربردترین گروه در فیلترهای اکتیو می‌باشند که بطور گسترده‌ای در صنعت از آنها استفاده می‌شود. فیلترهای اکتیو موازی جریان‌های هارمونیکی تولید شده توسط بار را با تزریق جریان هارمونیکی هم‌اندازه ولی با علامت مخالف آن جبران‌سازی میکنند. در این شرایط فیلتر اکتیو مانند منبع جریانی عمل میکند که اندازه جریان تولید شده توسط آن با اندازه مؤلفه‌های هارمونیکی جریان بار برابر و فاز آن ۱۸۰ درجه شیفت داده شده است. در نتیجه مؤلفه‌های هارمونیکی جریان بار خنثی میشوند و جریان سینوسی و هم‌فاز از منبع کشیده میشود. علاوه بر این با استفاده از روشهای کنترلی مناسب میتوان از فیلتر اکتیو برای جبران توان راکتیو نیز استفاده کرد تا در نهایت مجموعه فیلتر اکتیو موازی و بار غیرخطی را بتوان به صورت بارخطی مقاومتی در نظر گرفت. شکل ۱ چگونگی قرارگیری فیلتر اکتیو موازی را در سیستم نشان می‌دهد.

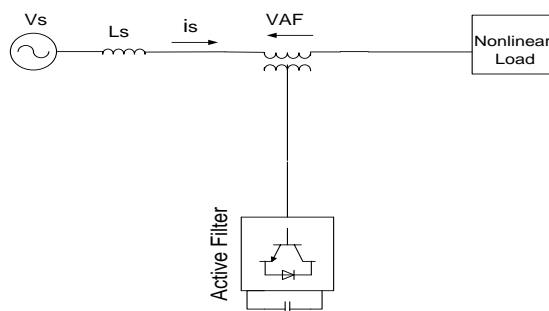
این فیلترها برای بارهای کوچک و متوسط در حد چند KVA تا چند MVA روش بسیار عملی برای جبران هارمونیک‌ها می‌باشند. فیلتر اکتیو به صورت یک منبع جریان هارمونیکی عمل کرده و لذا تغییرات امپدانس منبع مشخصات فرکانسی آن را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. هدف اصلی فیلتر اکتیو موازی، حذف هارمونیک‌های جریان بار است و در کنار آن برای جبران‌سازی توان راکتیو و متعادل‌سازی بار نیز استفاده می‌شود.



شکل ۱: فیلتر اکتیو موازی تک فاز یا سه فاز

(ب) فیلتر اکتیو سری

فیلترهای اکتیو سری در اواخر دهه ۱۹۸۰ معرفی شدند و بطور عمده برای ایجاد ولتاژهای متعادل و خالص سینوسی برای بارهای حساس به ولتاژ مانند ابررساناها و وسایل حفاظت سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فیلترها با تزریق ولتاژ هارمونیک به صورت سری با منبع ولتاژ مانند منابع ولتاژ کنترل شده‌های عمل می‌کنند که قابلیت جبران هارمونیکهای ولتاژ منبع و همچنین نامتعادلی آن را دارند. شکل ۲ چگونگی قرارگیری فیلتر اکتیو سری را در سیستم نشان می‌دهد. فیلترهای اکتیو سری در مقایسه با نوع موازی خود از عمومیت کمتری در صنعت برخوردارند، این بدان خاطر است که باید کل جریان بار از قسمت قدرت عبور کند، بنابراین در مقایسه با نوع موازی نرخ جریان از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشد. بخصوص در ثانویه ترانس کوپلاژ که تلفات بصورت مجذور جریان می‌باشد حجم فیزیکی فیلتر افزایش می‌یابد. مزیت عمده فیلترهای سری نسبت به نوع موازی آن در مناسب بودن این فیلترها جهت خنثی نمودن هارمونیک‌های ولتاژ و نیز استفاده جهت بالانس کردن منابع ولتاژ سه‌فاز می‌باشد.



شکل ۲: فیلتر اکتیو سری تک فاز یا سه فاز

۲-۲-۲. مدل فیلتر اکتیو

از آنجایی که فیلترهای اکتیو منابع جریانی هستند که جریان‌های هارمونیک تزریق می‌کنند، می‌توان آن‌ها را در هر هارمونیک به صورت یک منبع جریان مدل کرد. فازور جریان هارمونیک هر فیلتر اکتیو موجود در شبکه با I_m^h نمایش داده شده است.

$$I_m^h = I_m^{h,r} + j I_m^{h,i} \quad (1)$$

که m شماره باس متصل به آن و h مرتبه هارمونیک است. I و i نیز به ترتیب معرف قسمت‌های حقیقی و موهومی می‌باشند.

مقدار موثر جریان هر فیلتر را می‌توان از معادله زیر به دست آورد [۹].

$$I_m = \left[\sum_{h=2}^H \{ (I_m^{h,r})^2 + (I_m^{h,i})^2 \} \right]^{1/2} \quad (2)$$

۳. تعیین ظرفیت و مکانیابی بهینه فیلترها

استفاده از فیلترهای فعال یکی از روش‌های موثر جبران‌سازی توان راکتیو و حذف یا محدود نمودن هارمونیک‌های شبکه‌های توزیع است، در این میان توجه به محل نصب آن در شبکه اهمیت خاصی دارد. در صورت عدم انتخاب محل صحیح نصب فیلتر، امکان افزایش میزان هارمونیک‌ها در بعضی از باس‌های شبکه وجود دارد که موجب کاهش کیفیت توان کلی شبکه می‌گردد. از طرفی با افزایش بارهای غیرخطی در سیستم‌های قدرت، افزایش تعداد و ظرفیت و بهینه‌سازی عملکرد این فیلترها بسیار مورد توجه می‌باشد لذا استفاده از چندین فیلتر فعال در شبکه روش مطلوبی برای سیستم‌های امروزی می‌باشد اما با افزایش فیلترها، نیاز به جایابی مناسب آن‌ها و اندازه بهینه فیلترها جهت بدست آوردن THD مطابق با استانداردها، احساس می‌گردد.

جایابی فیلترهای فعال در شبکه یکی از موضوعات تحقیقاتی اخیر است که توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. فاکتورهای مهم در نصب فیلترهای فعال عبارتند از (۱) وضعیت آلودگی هارمونیکی شبکه (۲) استانداردهای هارمونیک (۳) مکان فیلتر و حداکثر جریان موثری که فیلتر می‌تواند به شبکه تزریق نماید (۴) وضعیت شبکه و غیره. مساله جایابی فیلترهای فعال توزیع شده در شبکه، در مراجع مختلف در چندین حالت مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور مشخص می‌توان مسئله جایابی را برحسب تعداد فیلتر نصب شده، تابع هدف مورد نظر و ... تقسیم‌بندی نمود. با توجه به اینکه مساله مکانیابی یک مساله غیرخطی است بنابراین برای حل این موضوع استفاده از روشها و الگوریتم‌های هوشمند بسیار مورد توجه می‌باشد.

۵-۱. مراحل اجرای الگوریتم مکانیابی

جهت تعیین ظرفیت و مکان بهینه نصب فیلترهای اکتیو در شبکه مراحل محاسباتی زیر اجرا می‌شود:

۵-۱-۱. ورود اطلاعات و پارامترهای سیستم

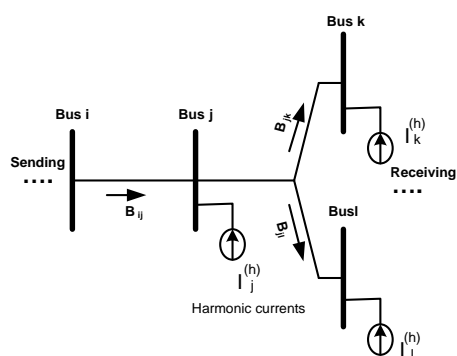
در این مرحله، مقادیر پارامترهای خط، بارهای خطی و غیرخطی، وضعیت شبکه، تعداد ژنراتورها و مقادیر اولیه ولتاژ و توان اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرفی سیستم مشخص می‌گردد. برای لحاظ نمودن مدل شبکه قدرت، شبکه را به صورت خطی فرض نموده و بارهای غیرخطی در هر فرکانس به‌صورت منابع جریان در آن فرکانس در نظر گرفته می‌شود. در این صورت می‌توان شبکه را در هر فرکانس به‌صورت مستقل از فرکانس‌های دیگر در نظر گرفت و با یک ماتریس امپدانس نمایش داد. این ماتریس‌ها را می‌توان هم با محاسبه و هم با اندازه‌گیری به‌دست آورد.

۵-۱-۲. انجام پخش بار هارمونیکی

در این محاسبات مقادیر دامنه و فاز ولتاژ فرکانس اصلی و هارمونیکها در کلیه باس‌ها با حل معادلات و ماتریسهای ادمیتانس بدست می‌آید (رابطه (۳)). برای این کار شماره باسی راکه قرار است فیلتر روی آن نصب شود را برابر صفر قرار داده، درحالیکه شماره باس‌ها از ۱ آغاز می‌شود.

$$V_h = Y_h \cdot I_h \quad (3)$$

المان‌ها و تجهیزات شبکه توزیع (مانند ترانس، کابل و ...) برای هارمونیک‌های مختلف مدل‌سازی شده و با انجام برخی محاسبات ولتاژ هارمونیک‌های مختلف در هر باس محاسبه می‌گردد. شکل ۳ قسمتی از یک سیستم توزیع و جریان‌های هارمونیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: سیستم توزیع و جریان‌های هارمونیک

همچنین در این روش، با توجه به نوع اتصال سه‌فاز ترانس توزیع در هر باس، انتقال یا عدم انتقال جریان‌های هارمونیک مضرب ۳، لحاظ می‌گردد.

جریان تزریقی معادل، به طور گسترده در سیستم‌های توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان تزریقی معادل باس i در k امین تکرار از برنامه پخش بار، از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$I_i^{(k)} = -\left(\frac{P_i + Q_i}{V_i^{(k-1)}}\right)^* \quad (4)$$

که در آن P_i و Q_i توان اکتیو و راکتیو مصرفی باس i و $V_i^{(k-1)}$ ولتاژ باس i در $(K-1)$ امین تکرار از برنامه پخش بار می‌باشد.

اگر امپدانس خط در فرکانس اصلی به صورت زیر داده شده باشد.

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (5)$$

آن‌گاه برای h امین هارمونیک امپدانس خط از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Z_L^{(h)} = R_L + jhX_L \quad (6)$$

مدل‌سازی ترانسفورماتور در فرکانس‌های هارمونیک به علت رفتار غیرخطی آن بسیار مشکل است. علاوه بر آن خود ترانس نیز به علت خاصیت اشباع هسته برخی هارمونیک‌ها را تولید می‌کند. در اینجا فرض می‌شود که ترانس در وضعیت نرمال عمل کرده و یک رفتار خطی تحت هارمونیک‌های مختلف از خود نشان می‌دهد. امپدانس ترانس در هارمونیک h ام از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Z_T^{(h)} = R_T + jhX_T \quad (7)$$

برای مدل‌سازی سلف و خازن در فرکانس‌های هارمونیک مختلف به سادگی با استفاده از رابطه زیر انجام می‌پذیرد.

$$X_L^{(h)} = 2\pi h f_1 L \quad (8)$$

$$X_C^{(h)} = \frac{1}{2\pi h f_1 C}$$

هنگامی که جریان هارمونیک تزریقی به شبکه در هر باس و ماتریس ادیتمانس متناظر با هر هارمونیک بدست آمد، مسئله پخش بار برای هارمونیک‌های مختلف با استفاده از رابطه زیر حل می‌گردد.

$$[Y]^{(h)} [V]^{(h)} = [I]^{(h)} \quad (9)$$

که در آن $[Y]^{(h)}$ ، $[V]^{(h)}$ ، $[I]^{(h)}$ به ترتیب ماتریس ادیتمانس شبکه، بردار ولتاژ باس‌ها و بردار جریان‌های تزریقی باس‌ها برای هارمونیک h ام می‌باشد.

۳-۱-۵. محاسبه THD در هریک از باس‌ها

در این مرحله میزان THD هر باس از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n |V_i^h|^2}}{|V_i|} \quad (10)$$

که در آن $V_i^{(h)}$ ولتاژ هارمونیک h ام باس i و V_i ولتاژ فرکانس اصلی باس i و $THD_i(\%)$ میزان THD باس i می‌باشد.

۴-۱-۵. محاسبه تابع هدف

تابع هدف را می‌توان بصورت زیر در نظر گرفت

$$OF = \max(THD_k) \quad (11)$$

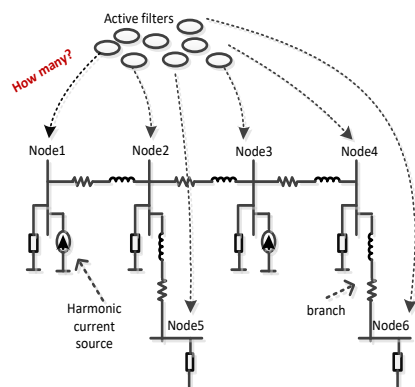
که در آن ماکزیمم THD برابر مقدار THD در باسی از شبکه است که بیشترین آلودگی هارمونیکی را داشته باشد. مسئله زمانی به جواب بهینه خواهد رسید که مقدار ماکزیمم THD ، کمتر از مقادیر تعیین شده در استاندارد ($THD < 5\%$) باشد. مقدار تابع هدف را همراه شماره باسی که فیلتر روی آن نصب شده است، ذخیره می‌شود. شماره باسی را که قرار است فیلتر روی آن قرار گیرد، یک واحد اضافه می‌شود و مراحل قبل تکرار می‌شود. مقدار تابع بهینه بدست آمده، همراه شماره باسی که فیلتر روی آن نصب شده است، به عنوان پاسخ الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است که این روش، عمل جایابی را بطور محدود مورد بررسی قرار داده است.

۲-۵. توسعه روش مکانیابی

در روش معرفی شده در شکل ۴، تابع هدف با یک هدف تعیین شده است و برای نصب یک فیلتر اکتیو در شبکه تلاش شده است. لذا تعیین تعداد، ظرفیت و مکان بهینه نصب فیلترهای مورد نیاز برای تامین چندین هدف کیفیت توان نیاز به یک برنامه ریزی کاملتر و حل مسائل پیچیده تری خواهد داشت. در واقع الگوریتم فوق بایستی توسعه داده شده و عمل مکان‌یابی فیلترهای فعال توزیع شده در شبکه توزیع را به منظور دستیابی به اندازه، تعداد و مکان بهینه نصب انجام گردد.

توابع هدف با قیود متنوعی را برای جایابی و اندازه‌یابی فیلترهای اکتیو می‌توان بیان نمود، که می‌توان به نمونه‌های زیر اشاره نمود: پاره‌ای از توابع در جهت کمینه‌سازی اغتشاشات ولتاژ تعریف می‌شوند و بدین ترتیب بدینال کاهش هرچه بیشتر اثرات سوء ناشی از حضور هارمونیک‌ها در شبکه می‌باشند. بدیهی است که می‌توان برای این حالت قیود محدودیت جریان فیلترهای اکتیو و تعداد فیلترهای بکارگرفته شده را اعمال نمود. گروه دیگر با در نظر گرفتن محدودیت‌های استاندارد برای ولتاژهای هارمونیک و THD در نقاط مختلف شبکه، به کمینه‌سازی جریان تزریقی فیلترهای اکتیو می‌پردازند. از آن‌جا که یکی از عوامل تعیین کننده قیمت فیلترهای اکتیو مجموع جریان موثری است که می‌توانند تزریق کنند، این فاکتور را می‌توان به عنوان فاکتور اصلی در کمینه‌سازی هزینه فیلترهای اکتیو در نظر گرفت. در حالت سوم می‌توان با اعمال محدودیت‌های استاندارد هارمونیک برای ولتاژ و THD در نقاط مختلف شبکه، و نیز میزان جریان تزریقی هر فیلتر، به کمینه‌سازی تعداد فیلترهای بکارگرفته شده پرداخت. لازم به ذکر است که انتخاب مناسب بین حالت دوم و سوم می‌تواند با اعمال شرایطی چون هزینه و کاهش تلفات و ... صورت گیرد. استفاده از فیلترهای پسیو نیز به همراه فیلترهای اکتیو می‌تواند عامل موثری در انتخاب بهترین گزینه برای بهینه‌سازی مسئله فیلترگذاری باشد.

بنابراین می‌توان مسئله را کمی توسعه داده و مقدار بهینه یک فیلتر یا تعدادی از فیلترها را همزمان با مکان بهینه نصب بدست آورد. در این حالت مسئله بهینه‌سازی به یک مسئله پیچیده برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل می‌شود، بمنظور حل مسئله فوق استفاده از الگوریتم‌های هوشمند راه حلی مناسب به نظر می‌رسد. شکل ۴ اصول جایابی بهینه فیلترهای اکتیو توزیع شده را در شبکه نشان می‌دهد.



شکل ۴: جایابی بیش از یک فیلتر فعال در شبکه توزیع

قیود بکاررفته در مسئله جایابی و اندازه‌یابی فیلترهای اکتیو، دو نوع می‌باشند. نوع اول قیودی هستند که بر ساختار فیلترهای اکتیو حاکم‌اند و شامل قیودی مانند محدودیت جریان موثری که هر فیلتر می‌تواند تحویل دهد (اندازه فیلتر اکتیو) می‌شوند. نوع دوم قیودی هستند که توسط استانداردهای هارمونیک، بر ولتاژهای هارمونیک و ضریب اعوجاج هارمونیک کل در نقاط مختلف شبکه، اعمال می‌شود. از جمله معروفترین استانداردها، استاندارد IEEE-519 است. جدول ۱ مقادیر مجاز هارمونیک ولتاژ در این استاندارد را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقادیر مجاز هارمونیک ولتاژ در استاندارد IEEE-519

ماکزیمم اعوجاج ولتاژ مجاز در شینه‌ها با ولتاژهای مختلف به درصد نسبت به ولتاژ نامی با فرکانس ۵۰ هرتز			
ولتاژ شینه	اعوجاج تکی هارمونیک ولتاژ		اعوجاج کلی ولتاژ
	فرد	زوج	
۳۸۰ ولت و ۲۰ کیلوولت	۳	۱/۵	۵
۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت	۱/۵	۰/۷	۲/۵
۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت	۱	۰/۵	۲/۵

۶. الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات

در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار PSO به عنوان یک روش جستجوی غیر خطی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح گشت، این الگوریتم از حرکت دسته‌جمعی پرندگان که به دنبال غذا می‌باشند الهام گرفته شده است. به هر راه‌حل یک ذره گفته می‌شود، هر ذره در الگوریتم PSO معادل یک پرند در الگوریتم حرکت جمعی پرندگان می‌باشد. هر ذره یک مقدار شایستگی دارد که توسط یک تابع شایستگی محاسبه می‌شود. هر چه ذره در فضای جستجو به هدف (غذا در مدل حرکت پرندگان) نزدیک‌تر باشد، شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر ذره دارای یک سرعت است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد.

هر ذره با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به حرکت خود در فضای مساله ادامه می‌دهد. به این شکل است که گروهی از ذرات PSO در آغاز کار به صورت تصادفی به وجود می‌آیند و با به‌روز کردن نسل‌ها سعی در یافتن راه حل بهینه می‌نمایند. در هر گام، هر ذره با استفاده از دو بهترین مقدار به روز می‌شود. اولین مورد، بهترین موقعیتی است که تا کنون ذره موفق به رسیدن به آن شده است. موقعیت مذکور شناخته و نگهداری می‌شود و بانام Pbest توسط الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهترین مقدار دیگر، بهترین موقعیتی است که تا کنون توسط جمعیت ذرات بدست آمده است. این موقعیت با Gbest نمایش داده می‌شود.

پس از یافتن بهترین مقادیر، سرعت و مکان هر ذره با استفاده از معادلات زیر به روز می‌شود.

$$\begin{aligned}
 V[] &= V[] + c_1 \times \text{rand}() \times (P_{best}[] - \text{position}[]) \\
 &+ c_2 \times \text{rand}() \times (G_{best}[] - \text{position}[]) \\
 \text{position}[] &= \text{position}[] + V[]
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

سمت راست معادله اول از سه قسمت تشکیل شده است که قسمت اول، سرعت فعلی ذره است و قسمت‌های دوم و سوم تغییر سرعت ذره و چرخش آن به سمت بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه گروه را به عهده دارند. اگر قسمت اول در این معادله در نظر گرفته نشود، آن‌گاه سرعت ذرات تنها با توجه به موقعیت فعلی و بهترین تجربه ذره و بهترین تجربه جمع تعیین می‌شود، به این ترتیب، بهترین ذره جمع، در جای خود ثابت می‌ماند و سایرین به سمت آن ذره حرکت می‌کنند. در واقع حرکت دسته جمعی ذرات بدون قسمت اول معادله اول، پروسه‌ای خواهد بود که طی آن فضای جستجو به تدریج کوچک می‌شود و جستجویی محلی حول بهترین ذره شکل می‌گیرد. در مقابل اگر فقط قسمت اول معادله در نظر گرفته شود، ذرات راه عادی خود را می‌روند تا به دیواره محدوده برسند و به نوعی جستجویی سراسری را انجام می‌دهند [۹ و ۱۰].

۷. الگوریتم پیشنهادی

در این مقاله مسئله جایابی فیلتر با سه مجموعه متغیر برای الگوریتم PSO به صورت زیر حل می‌شود: متغیر اول، مکان فیلترها خواهد بود که شامل یک ماتریس $N \times H$ خواهد بود که در آن N تعداد فیلترها و H تعداد هارمونیک‌های جبران‌سازی شده خواهد بود. متغیر دوم، اندازه فیلتر فعال جهت جبران مولفه حقیقی جریان تزریقی خواهد بود که یک ماتریس $N \times H$ می‌باشد. متغیر سوم، اندازه فیلتر فعال جهت جبران مولفه موهومی جریان تزریقی خواهد بود که یک ماتریس $N \times H$ می‌باشد.

ابتدا پخش بار پسرو پیشرو جهت بدست آوردن مقادیر ولتاژ باس‌ها برای هارمونیک اصلی انجام خواهد گرفت و ولتاژ بدست آمده هر باس در ماتریسی به عنوان ورودی جهت محاسبه THD به برنامه PSO داده می‌شود. انتخاب تابع هدف مناسب، نقش بسیار مهمی در انجام جایابی مطلوب فیلترها دارد، تابع هدف پیشنهادی، شامل ۴ قسمت می‌باشد و بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$OF = A \times THD_{harmonic} + B \times V_{harmonic} + C \times Sum_{of} I + D \times C_{factor} \tag{13}$$

که در آن A و B و C و D ضرایب تاثیر هریک از فاکتورها می‌باشند، در ادامه به بررسی هر یک از فاکتورها پرداخته می‌شود:

اولین هدف در جایابی فیلترهای فعال در شبکه توزیع، ارضای قیود استاندارد هارمونیک است، به منظور دستیابی به این هدف، پارامتر $THD_{harmonic}$ را جهت بدست آوردن THD کمتر از ۵ درصد و پارامتر $V_{harmonic}$ را جهت دستیابی به نسبت ولتاژ هارمونیک کمتر از ۳ درصد برای کلیه باس‌های شبکه توزیع، تعریف می‌شود. یکی دیگر از فاکتورهای مهم در بکارگیری فیلترها، قیمت تمام شده فیلترها می‌باشد، قیمت فیلترها رابطه مستقیمی با مقدار جریان تزریقی فیلترها دارد، لذا باید اندازه جریان تزریقی به حداقل مقدار خود برسد. مقدار جریان تزریقی از رابطه زیر بدست می‌آید.

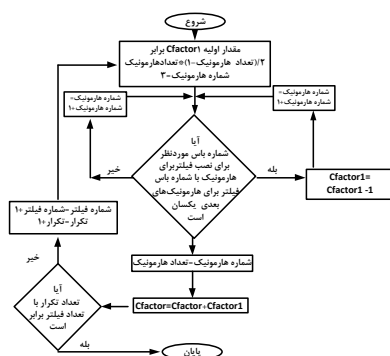
$$I_m = \left\{ \sum_{m=1}^{filternumber} \left[\alpha_m \times \sum_{h=2}^{harmonicnumber} \{ (I_m^{h,r})^2 + (I_m^{h,i})^2 \} \right] \right\}^{0.5} \tag{14}$$

که در آن $filternumber$ تعداد فیلترهای فعال توزیع شده بکارگرفته شده در شبکه توزیع برق و $harmonicnumber$ بر تعداد هارمونیک‌های مورد جبران‌سازی و α_m ضریب قیمتی فیلتر هارمونیک m می‌باشد. برنامه با در نظر گرفتن یک فیلتر متغیر برای هر هارمونیک بدنال پیدانمودن حداقل تعداد فیلتر مصرفی می‌باشد لذا جهت حداقل‌سازی تعداد فیلتر بکارگرفته شده، ضریب همگرایی در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود تا تعداد فیلتر مصرفی

را به سمت حداقل فیلترهای مورد نیاز هدایت نماید. میزان این ضریب در تابع هدف با افزایش تعداد فیلترهای پس‌یو بکارگرفته شده در یک باس کاهش خواهد یافت. مقدار این ضریب به صورت شکل ۵ محاسبه می‌شود. بدیهی است که میزان تاثیر این ضریب در جایابی، به هدف از فیلترگذاری بستگی خواهد داشت، اینکه هدف مکان‌یابی فیلترها در حداقل نقاط باشد و یا در حداقل اندازه، میزان تاثیر ضریب همگرایی را تغییر خواهد داد. شکل ۶ فلوچارت کلی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۸. شبیه‌سازی و نتایج

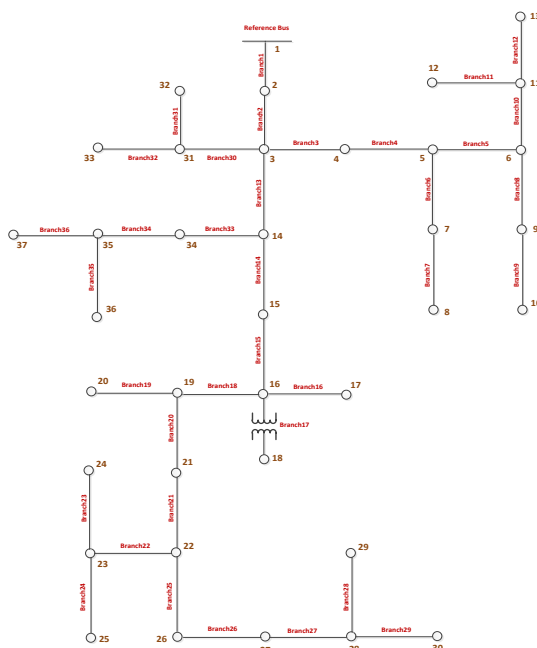
به منظور بررسی تاثیر محل نصب فیلترها، مکان یابی مناسب و بدست آوردن حداقل جریان تزریقی هر فیلتر، مطالعات بر روی یک شبکه توزیع نمونه ۳۷ باسه استاندارد IEEE (شکل ۷) بصورت زیر انجام می‌گردد.



شکل ۵: فلوچارت چگونگی تاثیر ضریب همگرایی در تابع هدف

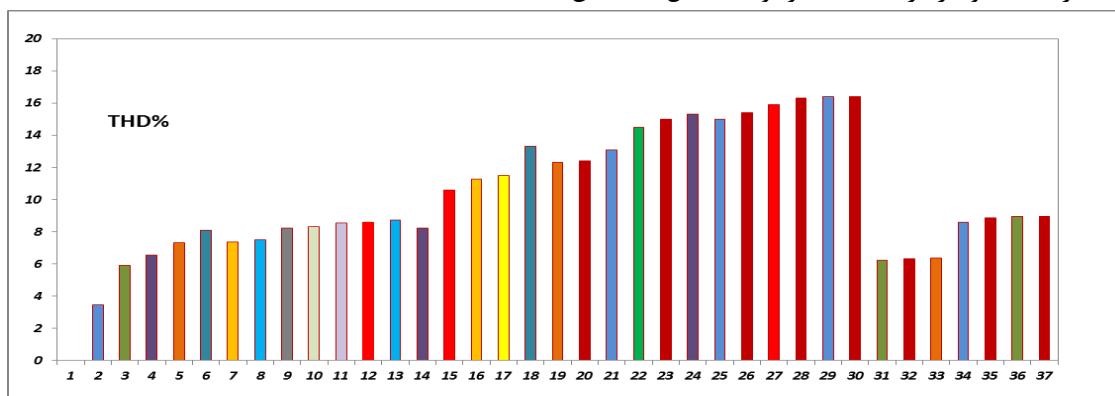


شکل ۶: فلوچارت کلی روش پیشنهادی



شکل ۷: شبکه استاندارد IEEE

مقادیر THD ولتاژ در شینه‌ها نیز توسط شکل ۸ نمایش داده شده‌اند.



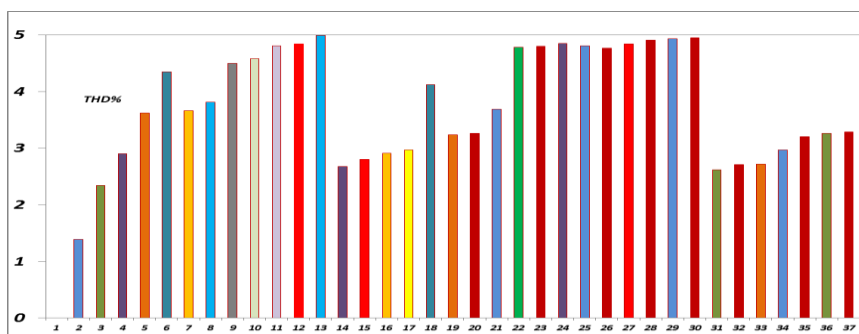
شکل ۸: مقادیر THD% ولتاژ شینه‌ها قبل از نصب فیلترها

۸-۱. جایابی فیلتر در شبکه شعاعی با استفاده از الگوریتم PSO

مساله جایابی فیلترها به منظور دستیابی به THD کمتر از ۵ درصد و ولتاژ هارمونیک کمتر از ۳ درصد در کل باس‌ها انجام گرفته است. پس از انجام پخش بار هارمونیک نتایج الگوریتم پیشنهادی با خروجی نصب دو فیلتر به صورت زیر حاصل شده است. جدول ۲ میزان جریان تزریقی فیلترها برای مکان بهینه پیشنهادی (باسهای ۱۶ و ۲۲) را نشان می‌دهد.

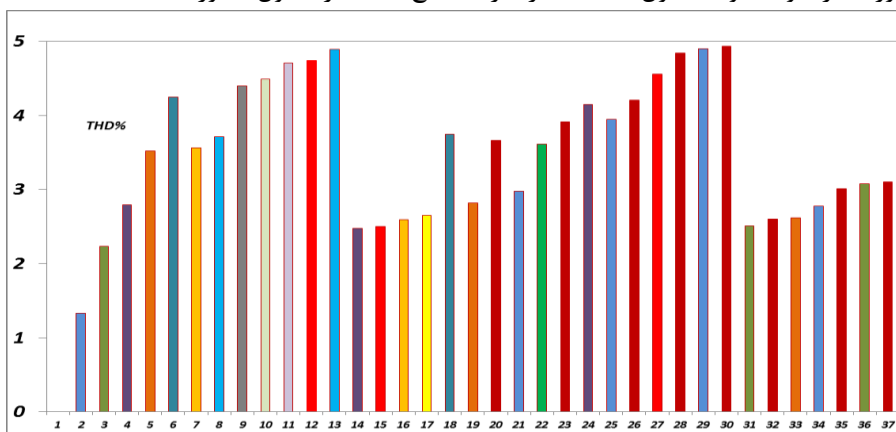
جدول ۲- میزان جریان تزریقی دو فیلتر

باس	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19	Total(pu)
۱۶	0	0	0	0	1+ 0.37j	1+ 0.1j	0	0	0	2.07
۲۲	0	0	0.17+ 0.2j	0	0	0	0	0.98+ 0.1j	0.98+ 0.4j	



شکل ۹: مقادیر THD% ولتاژ شینه‌ها بعد از نصب دو فیلتر

با تغییر ضریب همگرایی (ضریب D موجود در تابع هدف)، را می‌توان مشاهده نمود که عمل فیلترینگ با یک فیلتر فعال (فقط در باس ۱۶) نیز به هدف تابع منجر می‌گردد (شکل ۱۰). بدیهی است در این حالت فیلتر با میزان جریان تزریقی بیشتری مورد نیاز خواهد بود (جدول ۳). مقادیر ضرایب تابع هدف در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۱۰: مقادیر THD% ولتاژ شینه‌ها بعد از نصب یک فیلتر

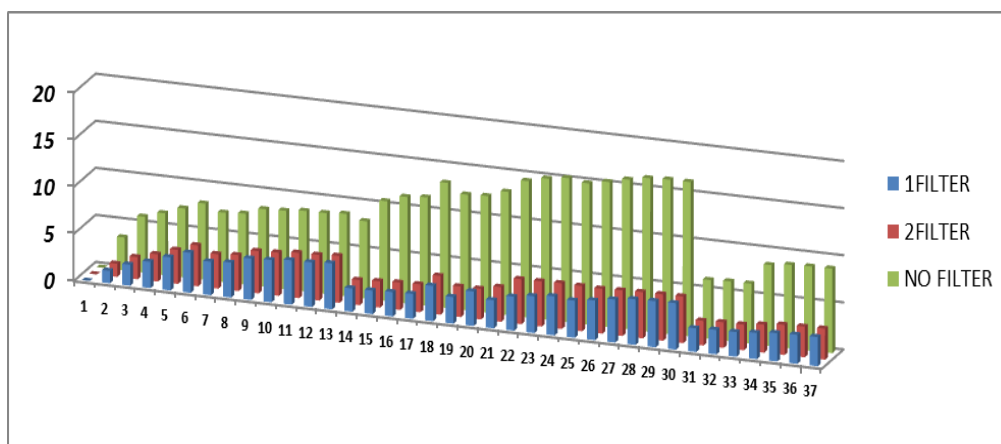
جدول ۳- میزان جریان تزریقی یک فیلتر

باس	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19	Total(pu)
۱۶	0	0	0.5	0	1+ 0.2j	1	0	1+ 0.15j	1+ 0.4j	2.114

جدول ۴: تاثیر ضرایب تابع بهینه در جایابی

نتیجه	ضریب A	ضریب B	ضریب C	ضریب D
یک فیلتر	1	1	0.01	0.001
دو فیلتر	1	1	0.01	0.0005

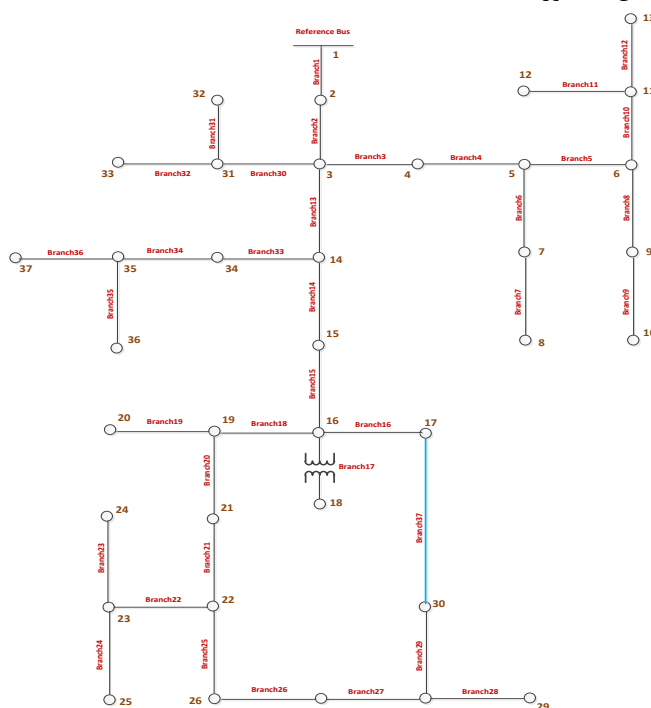
شکل ۱۱ نتایج نصب فیلترهای بهینه در مکانهای بهینه را بر روی مقدار THD کلیه باسهای شبکه مقایسه کرده و تاثیر نصب فیلترها را نشان می‌دهد.



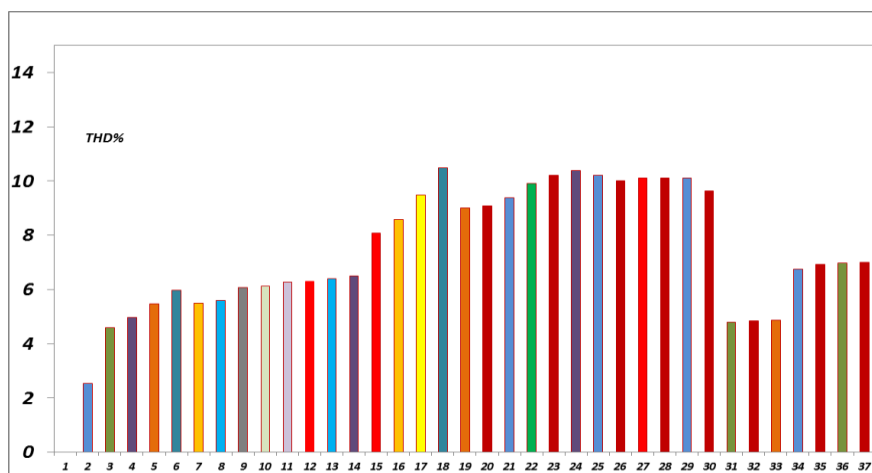
شکل ۱۱: مقایسه میزان THD (%) باس‌های مختلف شبکه به ازای نصب فیلتر

۸-۲. جابایی فیلتر در شبکه حلقوی

به منظور جابایی، در شبکه ۳۷ باسه نمونه، باس ۳۰ از طریق یک خط، به باس ۱۷ متصل می‌شود (شکل ۱۲). نتایج THD حاصل از پخش بار در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۲: شبکه ۳۷ باسه نمونه با اتصال حلقوی

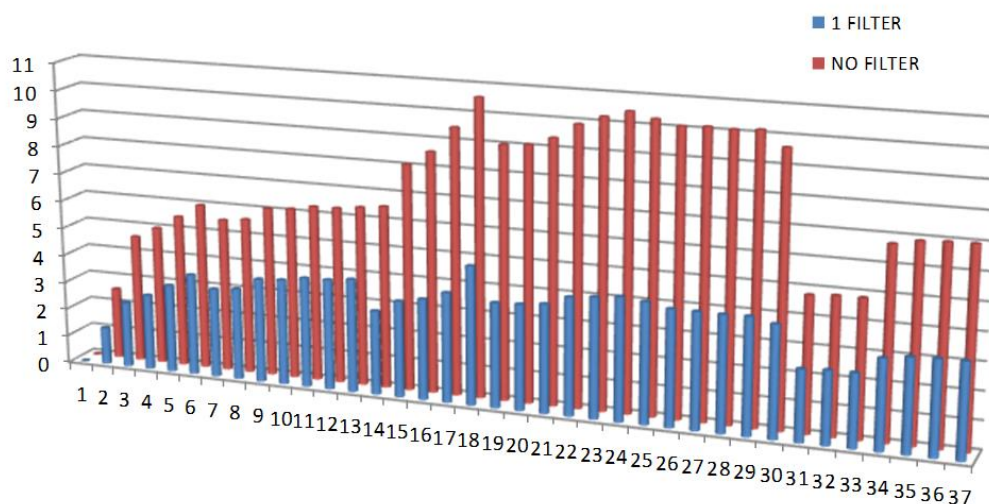


شکل ۱۳: نتایج THD حاصل از پخش بار قبل از نصب فیلتر در شبکه حلقوی

با انجام پخش بار هارمونیک و اجرای برنامه جایابی، بهترین مکان نصب باس ۲۲ با جریان تزریقی کل بدست می‌آید. مقدار جریان تزریقی برای هر هارمونیک و THD بعد از نصب فیلتر در جدول زیر آورده شده است. همچنین نتیجه مقایسه‌ای THD قبل از نصب، و بعد از نصب فیلتر در باس ۲۲، در شکل ۱۴ آورده شده است.

جدول ۵: میزان جریان تزریقی فیلتر نصب شده در باس ۲۲

باس	هارمونیک ۳	هارمونیک ۵	هارمونیک ۷	هارمونیک ۹	هارمونیک ۱۱	هارمونیک ۱۳	هارمونیک ۱۵	هارمونیک ۱۷	هارمونیک ۱۹	جریان تزریقی کل
۲۲	0	0	0+0.25j	0	0.25	1	0	1	1+0.1j	1.769



شکل ۱۴: مقایسه میزان THD(%) باس‌های مختلف شبکه به ازای نصب فیلتر در شبکه حلقوی

۹. نتیجه گیری

در این مقاله به تعیین اندازه، مکان و تعداد مناسب برای فیلترهای فعال توزیع شده جهت نصب در شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت برق پرداخته شد. در این راستا، به ارائه یک الگوریتم جایابی جامع با استفاده از PSO پرداخته شده است. در ادامه با پیاده‌سازی روش فوق بر روی یک شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت ۳۷ باسه شعاعی استاندارد با بارهای هارمونیکی پراکنده، و همچنین طرح یک شبکه حلقوی جهت آزمایش توانایی روش فوق برای جایابی فیلتر در شبکه‌ها، با بارهای غیرخطی فراوان مورد آزمایش قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی، موثر بودن روش را تایید می‌کند.

مراجع

- [1] A. Arranz-Gimon, A. Zorita-Lamadrid, D. Morinigo-Sotelo and O. Duque-Perez, "A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems", *Energies* 2021, 14, 6467.
- [2] A. Lakum and V. Mahajan, "A novel approach for optimal placement and sizing of active power filters in radial distribution system with nonlinear distributed generation using adaptive grey wolf optimizer", Received 25 April 2020, Revised 8 October 2020, Accepted 14 January 2021, Available online 27 February 2021.
- [3] A. Lakum, A. Mahajan, "Optimal placement and sizing of multiple active power filters in radial distribution system using grey wolf optimizer in presence of nonlinear distributed generation", Received 12 September 2018, revised 5 March 2019, Accepted 1 April 2019, Available online 9 May 2019.
- [4] D. Buła, D. Grabowski and M. Maciążek, "A Review on Optimization of Active Power Filter Placement and Sizing Methods", *Energies* 2022, 15, 1175.
- [5] D. Buła, D. Grabowski, M. Lewandowski, Marcin Maciążek and A. Piwowar, "Software Solution for Modeling, Sizing and Allocation of Active Power Filters in Distribution Networks", *Energies* 2021.
- [6] H. E. Shady, A. Aleem, A. F. Zobaa, "Optimal C-type filter for harmonics mitigation and resonance damping in industrial distribution systems", *Electr Eng* 99:107–118, 2017.
- [7] H. J. Teng and C. Y. Chang, "A Novel and Fast Three-Phase Load Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems", *IEEE Trans on Power Systems*, vol. 17, no. 4, November 2002.
- [8] M. Baszynski, K. Sowa and S. Pirog, "An Active Power Filter with Energy Storage and Double DC Conversion for Power Surge Compensation", *Electronics* 2020, 9, 1489.
- [9] R. Keypour, H. Seifi and A.Y. Varjani, "Genetic based algorithm for active power filter allocation and sizing", *Electric Power Systems Research* 71, 41–49, 2004.
- [10] U. Eminoglu and M. H. Hocaoglu, "Distribution Systems Forward/Backward Sweep-based Power Flow Algorithms: A Review and Comparison Study", *Electric Power Components and Systems*, Volume 37, Issue 1, pages 91-110, 2008.