

تعیین مکان و ظرفیت بهینه فیلترهای فعال با کنترل محلی در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی

حامد رضاپور^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ حمید فلقی^۲، دانشیار؛ مصطفی اسماعیلی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران - h.rezapour@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران - falaghi@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی کامپیوتر و صنایع- دانشگاه صنعتی بیرجند- بیرجند- ایران - esmaeli@birjandut.ac.ir

چکیده: نصب فیلترهای فعال یکی از کارآمدترین روش‌های ممکن برای کاهش آلودگی هارمونیکی شبکه‌های توزیع محسوب می‌شود. سیستم کنترل فیلترهای فعال در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه مکان‌یابی بهینه این فیلترها به صورت یکپارچه مدل‌سازی شده است و مکانیزم کنترل محلی آن‌ها تاکنون در این تحقیقات نادیده گرفته شده است. سیستم‌های کنترل یکپارچه به زیرساخت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری قدرتمندی نیاز دارند و از آنجاکه چنین زیرساخت‌هایی در بسیاری از شبکه‌های توزیع از جمله ایران وجود ندارد لذا پیاده‌سازی روش‌های موجود برای تعیین مکان و ظرفیت فیلترهای فعال در این شبکه‌ها عملاً غیرممکن و غیرعملی است. در سیستم کنترل محلی فیلترهای فعال، فیلتر با سنجش و تزریق عکس جریان‌های هارمونیکی عبوری از نقطه اتصال به شبکه، سعی می‌کند تا جریان شاخه بالادست محل نصب، تا حد ممکن به سینوسی کامل نزدیک شود. در این مقاله برای اولین بار تعیین مکان و ظرفیت بهینه فیلترهای فعال در شبکه‌های توزیع شعاعی با مدل‌سازی و در نظر گرفتن سیستم کنترل محلی آن‌ها فرمول‌بندی و حل شده است. برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده شده و در انتها نتایج حاصل از روش پیشنهادی در این مقاله با نتایج حاصل از روش مبتنی بر کنترل یکپارچه فیلترهای فعال توسط انجام چندین آزمایش بر روی دو شبکه توزیع ۹ و ۳۳ باسه مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هارمونیکی، مکان‌یابی فیلتر فعال، سیستم کنترل محلی، شبکه توزیع.

Optimal Siting and Sizing of Locally-controlled Shunt Active Power Filters in Electric Power Distribution Networks

H. Rezapour¹, MSc Student; H. Falaghi², Associate professor; M. Esmaeli³, Assistant professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: h.rezapour@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: falaghi@birjand.ac.ir

3- Faculty of Industrial and Computer Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran, Email: esmaeli@birjandut.ac.ir

Abstract: Installation of active power filters (APFs) is one of the most efficient ways to reduce harmonic pollution in distribution networks. In previous researches, APFs are considered with integrated control system and local control system of APFs is one of the items that has been ignored in optimal allocation of these devices. Integrated central control systems need powerful hardware and software infrastructures and since there is no such infrastructure in Iran distribution networks, such methods would be usefulness for optimal allocation of APFs. In this paper allocation of locally controlled APFs has been studied. Local control system of APFs make the current of upstream branch from their connection point sinusoidal by sensing the current passing through the connection point and injecting equal but opposite current to that point. Genetic algorithm has been used as the optimization tool and finally, the numerical results are discussed in two, 9-bus and 33-bus test systems.

Keywords: Harmonic pollution, active filter allocation, local control system, distribution network.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۷ و ۱۳۹۷/۰۹/۱۱

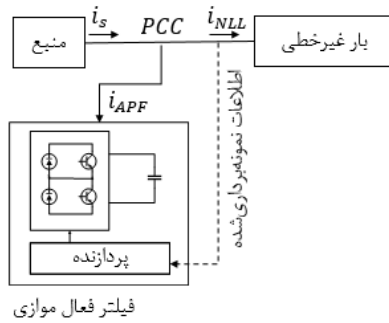
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۸

نام نویسنده مسئول: حمید فلقی

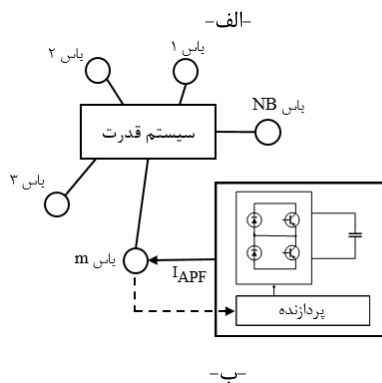
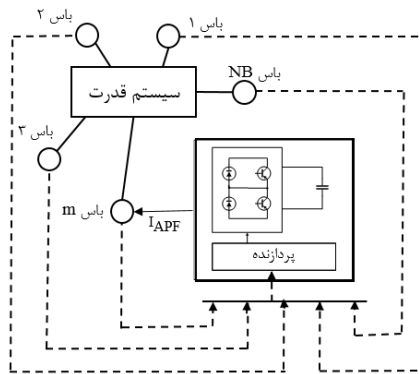
نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - انتهای بلوار شهید آوینی - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - گروه مهندسی قدرت.

۱- مقدمه

ایران، عملاً روش‌های موجود برای طراحی مکان و ظرفیت بهینه فیلترهای فعال در این شبکه‌ها کارایی ندارد.



شکل ۱: ساختار بلوکی فیلتر فعال



شکل ۲: ساختار شبکه در حضور فیلتر فعال؛ (الف) سیستم

کنترل یکپارچه، (ب) سیستم کنترل محلی

در این مقاله، مکانیزم سیستم کنترل محلی فیلترهای فعال در شبکه مدل‌سازی شده و با استفاده از این مدل‌سازی مکان‌یابی فیلترهای فعال انجام گرفته است. در این مکانیزم که در شکل ۲-ب نشان داده شده است، فیلتر فعال با نمونه‌گیری از جریان محل نصب بدون توجه به دیگر بخش‌های شبکه و فقط با توجه به ظرفیت خود سعی در جبران‌سازی جریان هارمونیک عبوری از محل نصب می‌کند تا جریان شاخه بالادست محل نصب خود را سینوسی کند. بنابراین جریان‌های تزریقی فیلتر فعال بسته به محل قرارگیری و ظرفیت فیلتر تعیین می‌گردد و مستقل از روش بهینه‌سازی است. لذا در مسئله مکان‌یابی فیلترهای فعال با استفاده از کنترل محلی فقط ظرفیت فیلتر و محل نصب آن تعیین می‌شود و جریان‌های تزریقی فیلتر بسته به محل نصب تعیین خواهند شد.

آلودگی هارمونیک یکی از مسائل مهمی است که امروزه کیفیت توان را در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. وجود هارمونیک‌های ولتاژ و جریان می‌تواند باعث بروز خساراتی از جمله عدم عملکرد صحیح تجهیزات حفاظتی و کاهش طول عمر تجهیزات شبکه می‌گردد [۳-۱]. مهم‌ترین منبع آلودگی هارمونیک، بارهای غیرخطی موجود در شبکه برق‌رسانی هستند که عمدتاً بر پایه ادوات الکترونیک قدرت بنا شده‌اند. امروزه با رشد تکنولوژی و به‌دلیل کنترل‌پذیری و قابلیت بالای ادوات الکترونیک قدرت، کاربرد این ادوات با وسعت و رشد بالایی روبرو شده است [۴]. بنابراین نیاز بهره‌گیری از راه‌حل‌های مناسب در جهت کاهش میزان آلودگی هارمونیک موجود در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی بیش از پیش احساس می‌شود.

یکی از رویکردهای مطرح برای کاهش آلودگی هارمونیک شبکه‌های توزیع، جبران جریان‌های هارمونیک توسط فیلترهای پسیو و فیلترهای فعال است [۵]. البته فیلترهای پسیو به‌علت وابستگی به ساختار شبکه و وجود هارمونیک‌های متغیر با زمان، امروزه کارآمدی لازم را در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی ندارند [۶، ۷] اما فیلترهای فعال با تکیه بر قابلیت کنترل‌پذیری بالای ادوات الکترونیک قدرت، تا حد زیادی قادر به جبران سازی جریان‌های هارمونیک هستند [۵]. این نوع فیلترها با سنجش جریان بار و استخراج بخش‌های هارمونیک مضر آن، با تزریق عکس این بخش‌های هارمونیک مضر، عملیات جبران‌سازی را انجام داده و به‌عنوان یک منبع جریان، باعث سینوسی‌شدن جریان منبع (شبهه) می‌گردند [۱۰-۵]. در شکل ۱ نمای شماتیک یک فیلتر فعال نشان داده شده است. سؤال مهمی که باید به آن پاسخ داده شود این است که این نوع فیلترها باید در چه مکانی از شبکه و با چه ظرفیتی نصب شوند تا بیشترین کارایی را در بهبود کیفیت توان به‌دنبال داشته باشند.

مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال در شبکه‌های توزیع از جمله مباحثی است که در سال‌های اخیر نظر پژوهشگران زیادی را به خود جذب کرده است. در اکثر قریب‌به‌اتفاق پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال، زیرساخت شبکه متناسب با شکل ۲-الف فرض شده است. در این زیرساخت تمامی اطلاعات شبکه از جمله ساختار شبکه و وضعیت بارهای خطی و غیرخطی در دسترس است و در یک سیستم کنترل یکپارچه مرکزی پردازش و بر مبنای آن جریان تزریقی فیلترهای فعال محاسبه و تعیین می‌شود. در این ساختار مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال عبارت است از تعیین ظرفیت، مکان و جریان تزریقی فیلترهای فعال به‌گونه‌ای که شرایط مطلوب مسئله برآورده شود.

پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال را در شرایط مختلف و با توابع هدف و ملاحظات متفاوت انجام داده‌اند که در جدول ۱ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در تمامی روش‌های پیشین با فرض وجود مکانیزم کنترل متمرکز و یکپارچه، مکان‌یابی فیلترهای فعال انجام شده است. با وجود دسترسی محدود به اطلاعات در شبکه‌های توزیع واقعی بسیاری از کشورها از جمله

جدول ۱: پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال

روش بهینه‌سازی	تابع هدف (کمینه‌سازی)	متغیرهای بهینه‌شده			تعداد فیلترها		ساختار فیلترهای فعال	نوع
		مکان فیلترها	اندازه فیلترها	جریان تزریقی فیلترها	یک فیلتر	چند فیلتر		
NLP ¹	ولتاژهای هارمونیک تمامی باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۱]
NLP	مجدور ولتاژهای هارمونیک باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۲]
	مجدور شاخص اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	
	ضریب اثرگذاری روی خطوط مخابراتی در تمامی باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	
NLP	تلفات بارهای موتور در تمامی باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۳]
	جریان تزریقی فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۴]
NLP & GRG2 ²	ولتاژهای هارمونیک تمامی باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۴]
GA ³	ولتاژهای هارمونیک تمامی باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۵]
	جریان تزریقی فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	
GBDT ⁴	تلفات توان شبکه در تمامی هارمونیک‌ها	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۵]
	مجدور شاخص اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	
	هزینه سرمایه‌گذاری فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	
GA	هزینه سرمایه‌گذاری فیلترهای فعال و فیلترهای پسیو	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۵]
MGS/DE ⁵	جریان تزریقی فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۶]
MHSA ⁶	شاخص اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۸]
	تلفات بارهای موتور در تمامی باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	
	جریان تزریقی فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	
	تلفات خطوط شبکه در تمامی هارمونیک‌ها	✓	✓	✓	-	✓	✓	
Fuzzy/MAPSO ⁷	اندازه فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۷]
PSO ⁸	شاخص اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۷]
	تلفات بارهای موتور در تمامی باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	
	اندازه فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	
	تلفات خطوط شبکه در تمامی هارمونیک‌ها	✓	✓	✓	-	✓	✓	
GA	جریان تزریقی فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۸]
	هزینه سرمایه‌گذاری فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	
Fuzzy/MABICA ⁹	هزینه سرمایه‌گذاری فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۱۹]
Trade-off/risk analysis	بیشترین مقدار میانگین ضرایب اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ باس‌ها	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۲۰]
	هزینه سرمایه‌گذاری فیلترهای فعال و تلفات هارمونیک شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	
	بیشترین مقدار شاخص اعوجاج کلی تقاضا	✓	✓	✓	-	✓	✓	
GBDT	شاخص اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ باس‌های شبکه	✓	✓	✓	-	✓	✓	[۲۱]
	مقدار مؤثر جریان تزریقی فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	
GA	هزینه سرمایه‌گذاری فیلترهای فعال	✓	✓	✓	-	✓	✓	روش پیشنهادی

1. Nonlinear Programming
2. Generalized Reduced Gradient
3. Genetic Algorithm
4. Generalized Benders Decomposition Theory
5. Multiple Gradient Summation/Differential Evolution
6. Modified Harmony Search Algorithm
7. Modified Adaptive Particle Swarm Optimization
8. Particle Swarm Optimization
9. Modified Adaptive Binary Imperialist Competitive Algorithm

یابی فیلترهای فعال به روش کنترل محلی و کنترل یکپارچه تعیین جریان‌های تزریقی فیلترها است که در روش مبتنی بر کنترل محلی

مکانیزم عملکرد فیلترهای فعال در پخش بار هارمونیک با در نظر گرفتن کنترل محلی در بخش ۲ شرح داده شده است. مهم‌ترین تفاوت مکان

$$y_{lb}^h = \frac{P_{lb}}{|v_b^1|^2} - j \frac{Q_{lb}}{h \cdot |v_b^1|^2} \quad (1)$$

$$y_{cb}^h = h \cdot y_{cb}^1 \quad (2)$$

$$y_{b,b+1}^h = \frac{1}{r_{b,b+1} + j \cdot h \cdot x_{b,b+1}} \quad (3)$$

بارهای غیرخطی در هارمونیک‌های بالاتر از فرکانس اصلی به‌عنوان منابع جریان مدل می‌شوند که بسته به نوع بار، ضرایب تزریق جریان هر کدام از هارمونیک‌ها نسبت به جریان هارمونیک اصلی مشخص است و از طریق روابط (۴) و (۵) می‌توان جریان تزریقی در هر هارمونیک را محاسبه کرد.

$$i_{nb}^1 = \left(\frac{P_{nb} + i \cdot Q_{nb}}{v_b^1} \right)^* \quad (4)$$

$$i_{nb}^h = c(h) \cdot i_{nb}^1 \quad (5)$$

اکنون با تشکیل ماتریس ادمیتانس در هر هارمونیک طبق رابطه (۶) ولتاژهای هارمونیکی شبکه را می‌توان از رابطه (۷) محاسبه کرد.

$$Y_{a,b}^h = \begin{cases} -y_{a,b}^h & \text{if } a \neq b \\ y_{a-1,b}^h + y_{a+1,a}^h + y_{cb}^h + y_{lb}^h & \text{if } a = b \end{cases} \quad (6)$$

$$V^h = (Y^h)^{-1} \cdot I^h \quad (7)$$

درنهایت با محاسبه ولتاژهای هارمونیکی در تمامی هارمونیک‌ها، شاخص اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ و شاخص اعوجاج هر هارمونیک ولتاژ در تمامی باس‌های شبکه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$THD_b = \left[\frac{\sum_{h \neq 1} |v_b^h|^2}{|v_b^1|^2} \right] \quad (8)$$

$$IHD_b^h = \frac{|v_b^h|}{|v_b^1|} \quad (9)$$

۲-۲- پخش بار هارمونیکی در شبکه‌های با یک فیلتر فعال

فیلترهای فعال متشکل از ادوات کلیدزنی و المان‌های ذخیره انرژی هستند. مغز فیلترهای فعال، مدار کنترل آن‌هاست که با نمونه‌گیری از جریان نقطه اتصال، جریان تزریقی فیلترهای فعال را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند تا جریان عبوری بالادست فیلتر تا حد ممکن به‌شکل سینوسی کامل نزدیک شود. باید توجه داشت که ظرفیت فیلتر فعال محدود است، لذا اگر مقدار مؤثر جریان هارمونیکی عبوری از ظرفیت فیلتر بیشتر باشد، آن فیلتر فقط تا حدی که ظرفیتش اجازه دهد به شبکه جریان تزریق خواهد کرد. لذا مدل‌سازی فیلترهای فعال در پخش بار هارمونیکی می‌تواند بر اساس همین اصل ساده صورت پذیرد به‌گونه‌ای که جریان تزریقی فیلترفعال برابر با کل یا بخشی از جریان هارمونیکی عبوری از نقطه اتصال باشد که در رابطه (۱۰) نشان داده شده است.

$$i^{APF}(t) = -\sum_{h \neq 1} \sqrt{2} \cdot RF \cdot |i^{PCC,h}| \cdot \sin(h\omega t + \phi^{PCC,h}) \quad (10)$$

که در این رابطه پارامتر RF ضریب کاهش و یا همان ضریب جبران‌سازی جریان فیلتر فعال بوده و از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

جریان‌های تزریقی بسته به محل نصب و در روند پخش بار تعیین می‌شود اما در روش مبتنی بر کنترل یکپارچه جریان‌های تزریقی فیلترها در روند بهینه‌سازی تعیین می‌شوند. شرح مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی فیلترهای فعال با در نظر گرفتن کنترل محلی در بخش ۳ آمده است. در بخش ۴ نحوه به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله توضیح داده شده است. نتایج عددی و نتیجه‌گیری به‌ترتیب در بخش‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.

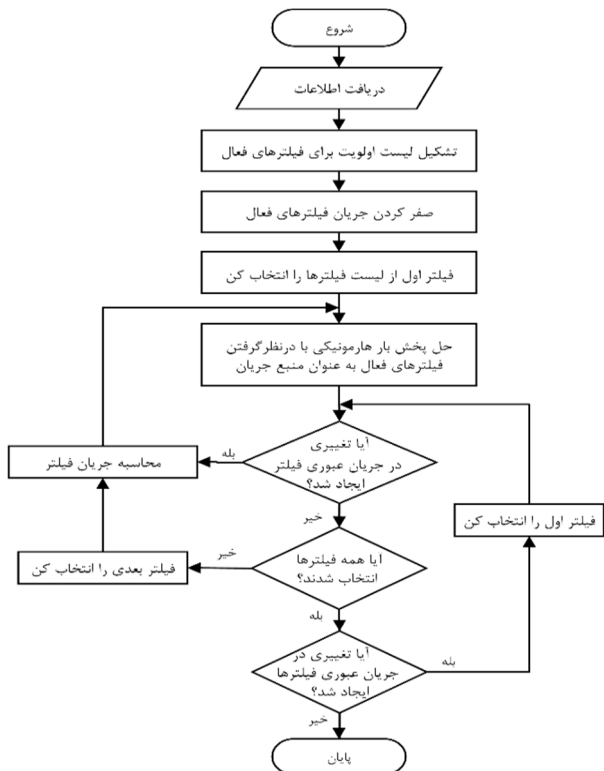
۲- مدل‌سازی فیلترهای فعال با در نظر گرفتن کنترل محلی

همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد، فیلترهای فعال ادواتی هستند که با سنجش جریان هارمونیکی بار و تزریق عکس این جریان به نقطه اتصال باعث سینوسی شدن جریان منبع (شبکه) می‌گردند. از آنجاکه این ادوات تزریق‌کننده جریان هستند می‌توان به شرط مشخص بودن جریان تزریقی، این ادوات را به‌عنوان بارهای غیرخطی با توان مصرفی یا تولیدی صفر در فرکانس اصلی منظور کرد. در این بخش برای مدل‌سازی عملکرد فیلترهای فعال با کنترل محلی در شبکه‌های توزیع شعاعی ابتدا پخش بار هارمونیکی در شبکه‌های توزیع بدون حضور فیلتر فعال تشریح می‌شود سپس پخش بار در شبکه‌های با یک فیلتر فعال و در انتها با معرفی یک روند بازگشتی پخش بار در شبکه‌های با چند فیلتر فعال شرح داده خواهد شد.

۲-۱- پخش بار هارمونیکی در شبکه‌های بدون فیلتر فعال

پخش بار هارمونیکی ابزاری برای مشخص کردن نحوه گسترش جریان‌ها و ولتاژهای هارمونیکی در شبکه‌های قدرت است. روش‌های پخش بار هارمونیکی به‌طور کلی به دو نوع هم‌زمان و مجزا تقسیم می‌شود. روش‌های حل هم‌زمان علاوه بر پیچیدگی و زمان بر بودن، به اطلاعات دقیق بارهای شبکه نیاز دارند که در برخی شبکه‌های واقعی با تعداد بار غیرخطی زیاد عملاً استفاده از این روش‌ها غیرممکن می‌شود. در روش‌های مجزا با صرف‌نظر از اثر هارمونیک‌ها روی یکدیگر، پخش بار هارمونیکی برای هر هارمونیک به‌طور جداگانه حل می‌شود. هرچند که دقت این روش‌ها در مقایسه با روش‌های هم‌زمان کمتر است، اما سادگی و سرعت نسبی این روش‌ها باعث شده است تا در بسیاری از پژوهش‌ها مورداستفاده قرار گیرند [۲۲]. استفاده از ماتریس ادمیتانس یکی از پرکاربردترین روش‌های پخش بار هارمونیکی مجزا است [۲۳] که به روش نفوذ هارمونیکی مشهور بوده و در آن ابتدا پخش بار شبکه در هارمونیک اصلی با در نظر گرفتن بارهای خطی و غیرخطی به‌عنوان باس‌های PQ، به هر روش دلخواه محاسبه شده و سپس در هر هارمونیک با تشکیل ماتریس ادمیتانس مربوطه، پخش بار برای آن هارمونیک به‌طور جداگانه حل می‌شود. در این روش با صرف‌نظر از اثر پوستی در فرکانس‌های بالا، مقادیر ادمیتانس بارهای خطی، ادمیتانس خازن‌های موازی و ادمیتانس خطوط شبکه طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۴]:

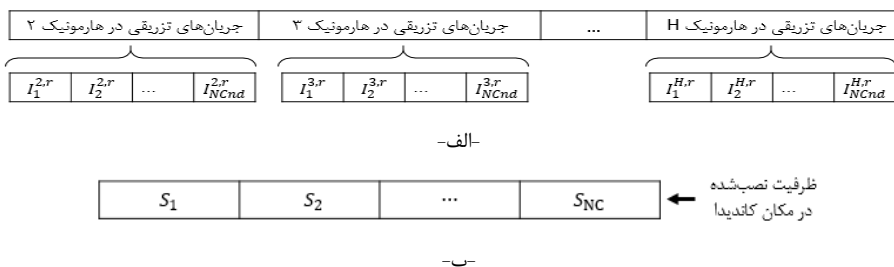
بود) با توجه به توضیحات بخش ۲-۲ تعیین خواهد شد. این روند مادامی که در دو دوره متوالی تغییری در جریان نقاط اتصال فیلترهای فعال به شبکه ایجاد نشود، ادامه خواهد داشت. شکل ۴ روند نمای روش پیشنهادی برای مدل‌سازی عملکرد چند فیلتر فعال با کنترل محلی در شبکه توزیع شعاعی را نمایش می‌دهد.



شکل ۴: روند نمای مدل‌سازی پیشنهادی حضور فیلترهای فعال با کنترل محلی در پخش بار هارمونیک شبکه‌های توزیع شعاعی

۳- فرمول‌بندی مسئله مکان‌یابی فیلترهای فعال با کنترل محلی

مسئله مکان‌یابی فیلترهای فعال یک مسئله غیرخطی آمیخته با عدد صحیح است که در آن مکان و ظرفیت فیلترهای فعال با توجه به قیود و اهداف مسئله تعیین می‌گردد. از دیدگاه اقتصادی این مسئله معمولاً با هدف کمینه‌سازی هزینه فیلترها و یا کمینه‌سازی جریان تزریقی فیلترهای فعال (که پیامدش همان کمینه‌سازی هزینه فیلترهای فعال است) ضمن رعایت قیود شبکه انجام می‌شود.



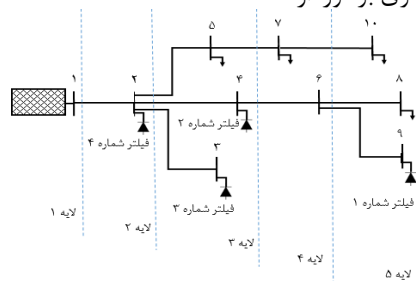
شکل ۵: ساختار کروموزوم مورد استفاده؛ (الف) با سیستم کنترل یکپارچه، (ب) با سیستم کنترل محلی

$$RF = \frac{1}{\max(1, \frac{I_{PCC,rms}}{S_{APF}})} \quad (11)$$

در حقیقت فیلترهای فعال در فرکانس‌های هارمونیک به‌عنوان منابع جریان وابسته مدل‌سازی می‌شوند. واضح است که جریان هارمونیک عبوری از نقطه اتصال، مجموع جریان هارمونیک بارهای غیرخطی و جریان هارمونیک بارهای خطی است. از آنجاکه حضور فیلتر فعال در وضعیت فرکانس اصلی شبکه تأثیری ندارد، جریان هارمونیک بارهای غیرخطی ثابت خواهد بود اما جریان هارمونیک بارهای خطی پس از تزریق جریان توسط فیلتر فعال به دلیل وابستگی به جریان‌های هارمونیک تزریقی دچار تغییر خواهند شد، بنابراین نیاز است تا پس از تزریق جریان توسط فیلتر فعال دوباره از نقطه اتصال نمونه‌برداری شده و جریان تزریقی فیلتر فعال اصلاح گردد. این روند مادامی که جریان هارمونیک عبوری نقطه اتصال ثابت نشده است، ادامه خواهد داشت.

۲-۳ پخش بار هارمونیک در شبکه‌های با چند فیلتر فعال

در روش پیشنهادی این مقاله، تعیین جریان فیلترهای فعال در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی شعاعی در حضور چند فیلتر فعال با استفاده از یک روند پسر از طریق تشکیل یک لیست اولویت انجام می‌شود. نحوه تشکیل لیست اولویت به این گونه است که ابتدا، شبکه لایه‌بندی می‌شود سپس بالاترین اولویت به فیلترهایی داده می‌شود که در دورترین لایه از پست فوق توزیع تغذیه‌کننده فیدر قرار دارند و هرچه فیلترها در لایه‌های نزدیک‌تر به پست فوق توزیع قرار داشته باشند از اولویت پایین‌تری برخوردارند.



شکل ۳: لایه‌بندی و تشکیل لیست اولویت فیلترهای فعال در یک فیدر توزیع نمونه

در شکل ۳ مثالی از نحوه لایه‌بندی و اولویت‌بندی فیلترهای فعال آمده است. حال با شروع از لیست اولویت جریان هر فیلتر با ثابت در نظر گرفتن جریان بقیه فیلترها (در دوره اول جریان بقیه فیلترها صفر خواهد

۳-۱- تابع هدف

هزینه فیلترهای فعال شامل یک بخش ثابت و یک بخش متغیر متناسب با ظرفیت فیلتر بوده که بخش ثابت معمولاً شامل هزینه زمین، هزینه نصب فیلتر و هزینه تعمیرات است و بخش متغیر نیز به طور معمول شامل هزینه‌های ادوات ذخیره‌کننده انرژی است. در این پژوهش فرمول‌بندی مسئله مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال با کنترل محلی با هدف کمینه‌سازی هزینه فیلترها با استفاده از تابع هدف (۱۲) انجام می‌شود.

$$\min C_T = \sum_{i=1}^N C(S_i^{APF}) \quad (12)$$

در این رابطه، $C(S_i^{APF})$ هزینه فیلتر است و به صورت زیر تعریف و محاسبه می‌شود:

$$C(S_i^{APF}) = C^{fix} + C^{var} \cdot S_i^{APF} \quad (13)$$

که در آن C^{fix} ، ضریب هزینه ثابت فیلترهای فعال و C^{var} ، ضریب هزینه متغیر فیلترهای فعال است.

۳-۲- محدودیت‌ها

محدودیت‌های مسئله را می‌توان به دو بخش شامل محدودیت‌های مرتبط با فیلترهای فعال و محدودیت‌های مرتبط با شبکه تقسیم نمود. محدودیت‌های فیلترهای فعال شامل کم‌تر بودن جریان تزریقی هر فیلتر فعال از ظرفیت آن فیلتر، حداکثر ظرفیت قابل نصب در هر مکان کاندیدا و انتخاب ظرفیت فیلترهای فعال از مقادیر استاندارد است. محدودیت‌های شبکه نیز شامل کم‌تر بودن شاخص اعوجاج هارمونیکی ولتاژ کل برای تمامی باس‌های شبکه از یک مقدار مشخص و کم‌تر بودن شاخص اعوجاج هر هارمونیکی ولتاژ در باس‌های شبکه از یک مقدار مشخص خواهد بود. روابط (۱۴) تا (۱۸) بیان ریاضی این محدودیت‌ها را نشان می‌دهند.

$$i_i^{ms} \leq S_i^{APF}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N. \quad (14)$$

$$S_i^{APF} \in \Omega, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

$$S_i^{APF} \leq S_i^{max}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N. \quad (16)$$

$$THD_b \leq THD^{max}, \quad \text{for } b = 1, 2, \dots, NB. \quad (17)$$

$$IHD_b^h \leq IHD^{max}, \quad \text{for } b = 1, 2, \dots, NB; h = 2, 3, \dots, H. \quad (18)$$

قید (۱۴) بیان می‌کند که جریان مؤثر تزریقی هر فیلتر باید کمتر از ظرفیت آن فیلتر باشد. رابطه (۱۵) بیانگر لزوم انتخاب ظرفیت فیلترهای فعال از مجموعه مقادیر استاندارد است. رعایت حداکثر ظرفیت فیلتر قابل نصب در هر مکان کاندیدا در قالب (۱۶) بیان شده است. قید (۱۷) که بهبود کیفیت ولتاژ کل شبکه را دربر دارد، نشان‌دهنده لزوم کم‌تر بودن شاخص اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ هر یک از باس‌های شبکه از یک مقدار مشخص است. لزوم رعایت مقدار حداکثر برای شاخص اعوجاج هر هارمونیکی ولتاژ در تمامی باس‌های شبکه در قالب قید (۱۸) بیان شده است.

۴- بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

در روش پیشنهادی این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مسئله استفاده شده است. ابتدایی‌ترین مرحله این الگوریتم تعریف ساختار کروموزوم مناسب برای حل مسئله است. همان‌گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، در روش‌های ارائه‌شده در پژوهش‌های پیشین در زمینه مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال که عملاً مبتنی بر ساختار کنترل یکپارچه فیلترها تدوین شده‌اند، جریان‌های تزریقی هر فیلتر نیز جزو مجهولات مسئله مکان‌یابی بوده است. از این‌رو برای اعمال الگوریتم ژنتیک ساختار کروموزوم مورد نیاز برای مکان‌یابی فیلترهای فعال با کنترل یکپارچه مطابق شکل ۵-الف است. اما در پژوهش حاضر چون جریان‌های تزریقی هر یک از فیلترهای فعال بسته به مکان قرارگیری آن فیلتر در فرآیند کنترل محلی (مطابق مدل‌سازی ارائه‌شده در بخش ۲) تعیین می‌شود، تنها مکان نصب و ظرفیت فیلترهای فعال در شبکه جزو مجهولات فرایند بهینه‌سازی خواهد بود. بنابراین کروموزوم پیشنهادی در این مقاله مطابق شکل ۵-ب است.

در اعمال الگوریتم ژنتیک، رعایت قیود یکی از مباحث مهم محسوب می‌شود. در روش پیشنهادی، قید (۱۴) به صورت خودکار در فرآیند مدل‌سازی عملکرد مکانیزم کنترل محلی فیلترهای فعال که در بخش ۲ ارائه شد، اعمال و رعایت می‌شود. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) در مراحل تشکیل جمعیت اولیه و تولید فرزندان اعمال می‌شوند. برای رعایت دو قید (۱۷) و (۱۸) از روش کاربرد ضریب جریمه در ارزیابی برازندگی کروموزوم‌ها استفاده شده است. تابع برازش متناسب با هر کروموزوم از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. قیود (۲۰) تا (۲۲) نیز با توجه به آنچه گفته شد باید در روند بهینه‌سازی برآورده شوند.

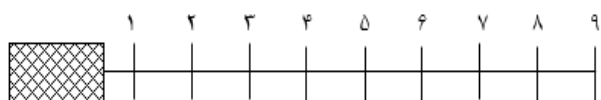
$$\min Fit = C_T + \alpha \cdot \left[\sum_{b=1}^{NB} \max(0, THD_b - THD^{max}) + \sum_{b=1}^{NB} \sum_{h \neq 1} \max(0, IHD_b^h - IHD^{max}) \right] \quad (19)$$

$$i_i^{ms} \leq S_i^{APF}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N. \quad \text{subject to:} \quad (20)$$

$$S_i^{APF} \in \Omega, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N. \quad (21)$$

$$S_i^{APF} \leq S_i^{max}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N. \quad (22)$$

برای اجرای الگوریتم ژنتیک نیاز است تا دیگر عملگرهای اساسی الگوریتم تعیین شوند. در روش پیشنهادی انتخاب نسل جدید بر اساس چرخ رولت انجام می‌شود و دیگر پارامترهای الگوریتم از جمله نرخ تقاطع، نرخ جهش، تعداد جمعیت و تعداد دوره‌های تکرار (تعداد نسل) الگوریتم با استفاده از تکنیک آنالیز حساسیت تنظیم شده‌اند. تکنیک آنالیز حساسیت یک روش عددی است که با تغییر پارامتر مدنظر و ثابت نگه‌داشتن دیگر پارامترها بهترین مقدار را برای پارامتر مورد مطالعه براساس مقدار تابع هدف (در این مقاله کمترین مقدار تابع هدف مطلوب است) و زمان اجرای برنامه تعیین می‌کند که در ادامه برای هر شبکه مورد مطالعه این مقادیر به‌طور جداگانه آورده شده‌اند.



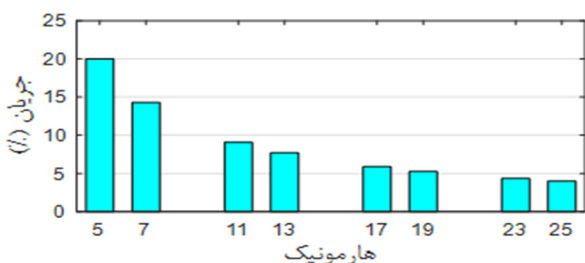
شکل ۶: دیاگرام تک خطی شبکه نمونه الف

جدول ۲: اطلاعات بارهای شبکه ۹ باسه

باس	kW خطی	KVAR خطی	KW غیرخطی	KVAR خطی	THD (%)
۱	۱۰۱۲	۲۵۳	۰	۰	۰/۸۳
۲	۵۳۹	۱۸۷	۰	۰	۲/۰۶
۳	۹۸۵	۲۴۵	۰	۰	۴/۶۰
۴	۰	۰	۱۵۹۸	۱۸۴۰	۵/۹۴
۵	۰	۰	۱۶۱۰	۶۰۰	۷/۳۲
۶	۴۲۹	۶۱	۰	۰	۷/۲۳
۷	۶۳۳	۳۳	۰	۰	۷/۱۴
۸	۵۳۹	۷۲	۰	۰	۷/۰۳
۹	۹۰۲	۱۱۰	۰	۰	۷/۰۱

جدول ۳: پارامترهای الگوریتم ژنتیک در شبکه نمونه الف

تعداد نسل	تعداد جمعیت	نرخ جهش	نرخ تقاطع	روش کنترلی
۶۰	۷۵	۰/۱	۰/۹	محلی
۱۰۰	۲۰۰	۰/۱	۰/۹	یکپارچه



شکل ۷: طیف هارمونیکی جریان تزریقی مبدل شش پالسه

نتایج حاصل از اجرای این آزمایش در جدول ۵ آمده است. همان طور که ملاحظه می شود، بهترین مکان برای نصب فیلتر فعال در شبکه موجود، مستقل از روش کنترلی، نزدیک ترین مکان کاندیدا به بارهای غیرخطی شبکه است و با دور شدن از بارهای غیرخطی، به تزریق بیشتر جریان برای جبران جریان های هارمونیکی شبکه نیاز است. در روش کنترلی یکپارچه هنگامی که فیلتر فعال در پایین دست بارهای غیرخطی قرار دارد ظرفیت و مقدار مؤثر جریان تزریقی آن نسبت به هنگامی که فیلتر در بالادست بارهای غیرخطی قرار دارد تا حد محسوسی کمتر است. علت این مسئله ساختار شبکه است به گونه ای که در زمان قرار گرفتن فیلتر در پایین دست بارهای غیرخطی امپدانس معادل بین فیلتر و بارهای غیرخطی کمتر است از امپدانس معادل بین فیلتر و بقیه بخش های شبکه نسبت به زمانی که فیلتر در بالادست بارهای غیرخطی قرار می گیرد.

۵- مطالعات عددی و تحلیل نتایج

مطالعات عددی با استفاده از کدنویسی در نرم افزار MATLAB در دو بخش انجام شده است، در بخش اول مکان یابی فیلترهای فعال در شبکه نمونه ۹ باسه و در بخش دوم مکان یابی بهینه فیلترهای فعال در شبکه نمونه ۳۳ باسه انجام شده و نتایج حاصل از بهینه سازی به هر دو روش مبتنی بر کنترل یکپارچه فیلترها و نیز مبتنی بر کنترل محلی فیلترها در حالت های مختلف باهم مقایسه شده اند.

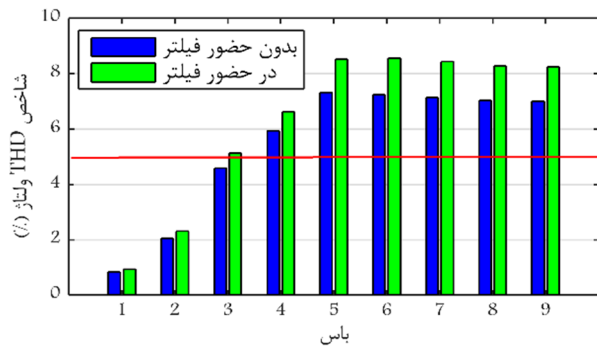
محدودیت های هارمونیکی ولتاژ شبکه با استفاده از استاندارد IEEE-519 منظور شده و حداکثر مجاز شاخص اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ ۵ درصد و شاخص اعوجاج هارمونیکی به ازای هر هارمونیکی ۳ درصد منظور شده است [۲۷]. ظرفیت فیلترهای فعال به صورت گسسته در قالب مضربی از ۱ درصد جریان مبنای شبکه و حداکثر ظرفیت مجاز فیلترهای فعال در هر مکان کاندیدا برابر ۸ درصد جریان مبنا انتخاب شده است. ضریب هزینه ثابت فیلترهای فعال ۱ میلیون دلار به ازای هر فیلتر و ضریب هزینه متغیر آن نیز ۱ میلیون دلار بر پرویونیت محسوب گردیده است. ضریب جریمه α نیز برابر ۵ میلیون فرض شده است.

۵-۱- شبکه نمونه الف

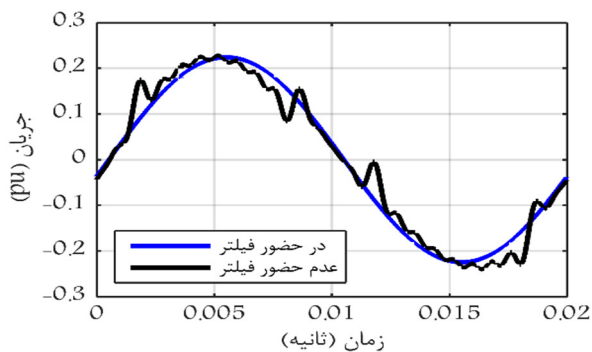
در این بخش از یک شبکه توزیع شعاعی ۹ باسه استفاده شده است. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل ۶ نمایش داده و اطلاعات بارهای آن در جدول ۲ لیست شده است. توان مبنای شبکه ۱۰ مگاوات آمپر و ولتاژ نامی آن ۲۳ کیلوولت است. اطلاعات خطوط شبکه نیز در مرجع [۲۴] موجود است. همان طور که در جدول ۲ واضح است، در این شبکه فقط بار باس های ۴ و ۵ غیرخطی و از نوع مبدل شش پالسه می باشند که ضرایب تزریق جریان این بارها مطابق شکل ۷ است. مکان یابی بهینه فیلترهای فعال در این شبکه در دو بخش مختلف انجام گرفته است که در بخش اول هدف برآورده ساختن شرایط استاندارد IEEE-519 با کمینه کردن هزینه فیلترهای فعال و هدف بخش دوم کمینه کردن ولتاژهای هارمونیکی موجود در شبکه است. پارامترها تنظیم شده برای الگوریتم ژنتیک در هر دو روش کنترلی برای شبکه نمونه الف در جدول ۳ آمده است.

۵-۱-۱- آزمایش الف-۱

در این آزمایش بهینه سازی با هدف کمینه کردن هزینه فیلترهای فعال در پنج حالت مختلف انجام شده است. حالت های مختلف آزمایش در این بخش شامل تفاوت در مکان های کاندیدا است که در جدول ۴ ارائه شده است، در این جدول علامت \checkmark مشخص کننده حضور باس مورد نظر در میان باس های کاندیدا بوده و علامت - به معنای عدم حضور باس مدنظر در میان باس های کاندیدا است. هدف از انجام این آزمایش نشان دادن تفاوت و وابستگی پاسخ های دو روش کنترلی محلی و یکپارچه به محل مکان های کاندیدای نصب فیلترهای فعال و موقعیت بارهای غیرخطی است.



شکل ۸: شاخص اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ باس‌های شبکه هنگام بهره‌برداری از پاسخ حاصل از بهینه‌سازی به روش کنترل یکپارچه در آزمایش الف-۱ حالت ۴، به صورت کنترل محلی



شکل ۹: جریان شاخه ۵ به ۶ هنگام بهره‌برداری از پاسخ حاصل از بهینه‌سازی به روش کنترل یکپارچه در آزمایش الف-۱ حالت ۴، به صورت کنترل محلی

۵-۱-۲- آزمایش الف-۲

در این بخش بهینه‌سازی با هدف جبران‌سازی کامل هارمونیک‌های موجود در شبکه نمونه الف انجام گرفته است. در اینجا هدف از بهینه‌سازی کمینه‌سازی ولتاژهای هارمونیک موجود در شبکه است. برای نیل به این هدف کافی است تا حداکثر مقدار مجاز شاخص اعوجاج هارمونیک کل و شاخص اعوجاج هارمونیک به‌ازای هر هارمونیک ولتاژ باس‌های شبکه در روند بهینه‌سازی صفر منظور شوند. واضح است که برای کمینه‌کردن هارمونیک‌های ولتاژی موجود در شبکه لازم است تا جریان‌های بارهای غیرخطی شبکه به‌طور کامل جبران شوند لذا در این شبکه، حداقل ۲ فیلتر فعال مورد نیاز است. در جدول ۶ نتایج حاصل از بهینه‌سازی به هر دو روش کنترل محلی و یکپارچه آمده است.

جدول ۶: نتایج حاصل از بهینه‌سازی در آزمایش الف-۲

پارامتر	روش کنترل محلی	روش کنترل یکپارچه
اندازه فیلتر نصب شده در باس ۴	۸	۸
مقدار مؤثر جریان تزریقی (%)	۷/۲۸	۷/۳۶
اندازه فیلتر نصب شده در باس ۵	۶	۶
مقدار مؤثر جریان تزریقی (%)	۵/۲۴	۵/۲۹
بیشینه مقدار THD (%)	۰/۰۰۰۹۶	۰/۰۰۰۹۵۱

جدول ۴: حالت‌های مختلف مکان کاندیدا در آزمایش الف-۱

باس	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵
۱	-	-	-	-	-
۲	✓	✓	✓	-	-
۳	✓	✓	✓	-	-
۴	✓	-	✓	-	-
۵	✓	-	-	-	-
۶	✓	-	-	✓	-
۷	✓	-	-	✓	✓
۸	✓	-	-	✓	✓
۹	✓	-	-	✓	✓

جدول ۵: نتایج حاصل از مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال

در آزمایش الف-۱

حالت	روش کنترلی	مکان قرار گرفتن فیلتر (ها) (باس)	اندازه فیلتر نصب شده (%)	مقدار مؤثر جریان تزریقی فیلتر (%)	بیشینه مقدار THD پس از بهینه‌سازی (%)
۱	محلی	۵	۴	۴	۴/۵۸
	یکپارچه	۵	۴	۳/۰۶	۵
۲	محلی	۳	۷	۷	۴/۹
	یکپارچه	۳	۷	۶/۱۱	۵
۳	محلی	۴	۵	۵	۵/۰۸
	یکپارچه	۴	۵	۴/۴۰	۴/۹۸
۴	محلی	-	-	-	۷/۳۲
	یکپارچه	۶	۴	۳/۲۵	۴/۹۹
۵	محلی	-	-	-	۷/۳۲
	یکپارچه	۷	۴	۳/۵۴	۴/۹۹

در حالت‌هایی که مکان‌های کاندیدا در بالادست بارهای غیرخطی قرار دارند، پاسخ‌های حاصل از دو روش به هم نزدیک هستند. درحالی‌که مکان‌های کاندیدا در پایین دست بارهای غیرخطی باشند، روش کنترل محلی قادر به جبران‌سازی جریان بارهای غیرخطی نیست و از آنجاکه نصب فیلتر فعال هزینه دارد و عملاً بهبودی در ولتاژهای شبکه ایجاد نمی‌کند، پاسخ نهایی این روش، عدم نصب فیلتر است.

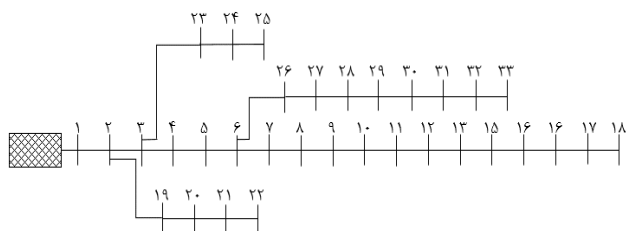
برای بررسی تفاوت عملکرد دو مکانیسم کنترلی محلی و یکپارچه، پاسخ حاصل از بهینه‌سازی مبتنی بر روش کنترل یکپارچه در حالت ۴ به صورت کنترل محلی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. شکل ۸ شاخص اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ باس‌های شبکه را در این وضعیت نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است علی‌رغم سینوسی شدن جریان شاخه بالادست محل نصب فیلتر (شکل ۹) وضعیت هارمونیک ولتاژهای شبکه بدتر شده است.

۵-۲- شبکه نمونه ب

دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه در این بخش در شکل ۱۲ آمده است. اطلاعات بارهای این شبکه در جدول ۷ لیست شده و اطلاعات خطوط شبکه در مرجع [۲۸] موجود است.

جدول ۷: اطلاعات بارهای شبکه نمونه ب

باس	kW خطی	kVAr خطی	kW غیرخطی	kVAr غیرخطی	THD (%)
۱	۰	۰	۰	۰	۳/۱۴
۲	۶۰	۳۶	۴۰	۲۴	۳/۲۸
۳	۵۴	۲۴	۳۶	۱۶	۳/۹۵
۴	۷۲	۴۸	۴۸	۳۲	۴/۳۱
۵	۳۶	۱۸	۲۴	۱۲	۴/۶۸
۶	۳۶	۱۲	۲۴	۸	۵/۹۸
۷	۱۲۰	۶۰	۸۰	۴۰	۶/۴۶
۸	۱۲۰	۶۰	۸۰	۴۰	۷/۳۲
۹	۳۶	۱۲	۲۴	۸	۷/۷۲
۱۰	۳۶	۱۲	۲۴	۸	۸/۰۹
۱۱	۲۷	۱۸	۱۸	۱۲	۸/۱۳
۱۲	۳۶	۲۱	۲۴	۱۴	۸/۱۸
۱۳	۳۶	۲۱	۲۴	۱۴	۸/۶۱
۱۴	۷۲	۴۸	۴۸	۳۲	۸/۸۳
۱۵	۳۶	۶	۲۴	۴	۸/۹۳
۱۶	۳۶	۱۲	۲۴	۸	۹/۰۲
۱۷	۳۶	۱۲	۲۴	۸	۹/۲۱
۱۸	۵۴	۲۴	۳۶	۱۶	۹/۲۶
۱۹	۵۴	۲۴	۳۶	۱۶	۹/۳۲
۲۰	۵۴	۲۴	۳۶	۱۶	۳/۵۸
۲۱	۵۴	۲۴	۳۶	۱۶	۳/۶۴
۲۲	۵۴	۲۴	۳۶	۱۶	۳/۷۰
۲۳	۵۴	۳۰	۳۶	۲۰	۴/۱۷
۲۴	۲۵۲	۱۲۰	۱۶۸	۸۰	۴/۶۲
۲۵	۲۵۲	۱۲۰	۱۶۸	۸۰	۴/۸۵
۲۶	۳۶	۱۵	۲۴	۱۰	۶/۹
۲۷	۳۶	۱۵	۲۴	۱۰	۶/۲۳
۲۸	۳۶	۱۲	۲۴	۸	۷/۱۳
۲۹	۷۲	۴۲	۴۸	۲۸	۷/۸۰
۳۰	۱۲۰	۳۶۰	۸۰	۲۴۰	۸/۰۲
۳۱	۹۰	۴۲	۶۰	۲۸	۸/۳۵
۳۲	۱۲۶	۶۰	۸۴	۴۰	۸/۴۲
۳۳	۳۶	۲۴	۲۴	۱۶	۸/۴۵

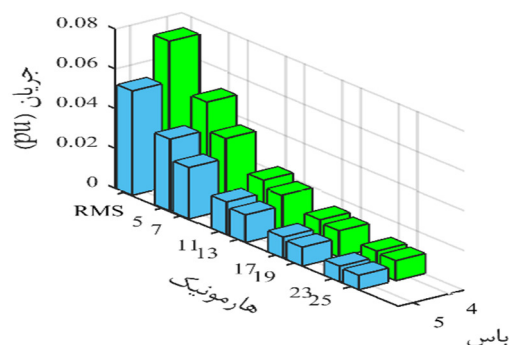


شکل ۱۲: دیاگرام تک خطی شبکه نمونه ب

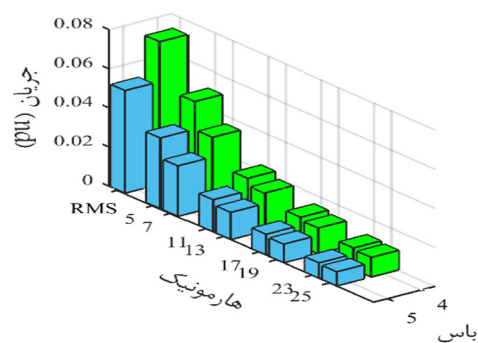
شبکه نمونه ب، شامل ۳۳ باس در ولتاژ نامی ۱۲/۶ کیلوولت با توان مبنای ۱۰ مگاوات آمپر است. بخشی از بار تمامی باس های شبکه غیرخطی و از نوع مبدل شش پالس با طیف هارمونیک مطابق شکل ۷ فرض شده است. همان طور که در جدول ۷ مشاهده می شود شاخص

اگرچه در مقدار مؤثر جریان تزریقی فیلترهای فعال اختلاف اندکی مشاهده می شود، همان طور که انتظار می رفت نتیجه هر دو روش (ظرفیت فیلترهای فعال) یکسان است.

در شکل ۱۰ طیف هارمونیک جریان تزریقی فیلترهای فعال در هر دو روش آمده است که نشان می دهد با تقریب بسیار خوبی جریان های تزریقی یکسان می باشند. شکل ۱۱ جریان هارمونیک بار غیرخطی باس شماره ۵ را در مقایسه با جریان غیرخطی فیلترهای فعال نشان می دهد، بر طبق انتظار جریان تزریقی فیلتر فعال کاملاً مخالف با جریان هارمونیک بار غیرخطی است. این مسئله نشان از جبران سازی کامل جریان بار غیرخطی می دهد و بر طبق انتظار ضریب جبران سازی (RF) در روش پیشنهادی برابر ۱ است.



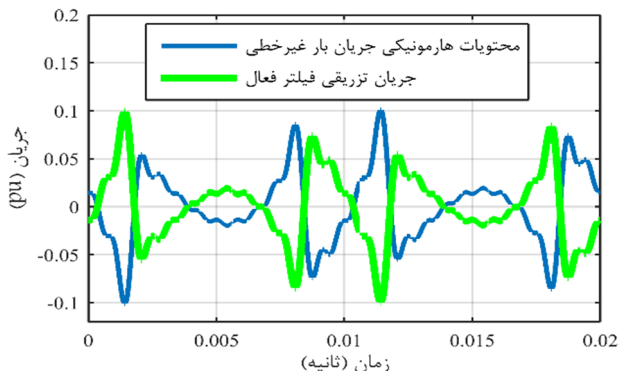
(الف)



(ب)

شکل ۱۰: جریان تزریقی فیلترهای فعال در آزمایش الف-۲؛

(الف) با کنترل محلی، (ب) با کنترل یکپارچه



شکل ۱۱: جریان تزریقی فیلتر فعال نصب شده روی باس ۵ در مقایسه با محتویات هارمونیک جریان بار غیرخطی باس ۵ در آزمایش الف-۲

جدول ۹: نتایج حاصل از مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال

در شبکه نمونه ب		
روش کنترلی	محل	یکپارچه
تعداد فیلترهای فعال	۲	۱
مکان فیلتر @ اندازه فیلتر (درصد)	۱@۱۱ و ۲@۶	۳@۷
مقدار تابع هدف (MS)	۲/۰۳	۱/۰۳

همان‌طور که در بخش ۲-۲ ذکر شد، در مدل ارائه شده در این مقاله فیلتر فعال با تزریق جریان سعی در جبران‌سازی جریان هارمونیک نقطه اتصال دارد حال آنکه در روش کنترل یکپارچه فیلتر فعال بدون توجه به جریان نقطه اتصال سعی در کاهش ولتاژهای هارمونیک شبکه دارد. شکل ۱۵ نشان‌دهنده تفاوت جریان شاخه ۵ به ۶ قبل و پس از بهینه‌سازی به هر دو روش است. همان‌طور که واضح است اعوجاج هارمونیک جریان در روش کنترل محلی کمتر از روش کنترل یکپارچه بوده است.

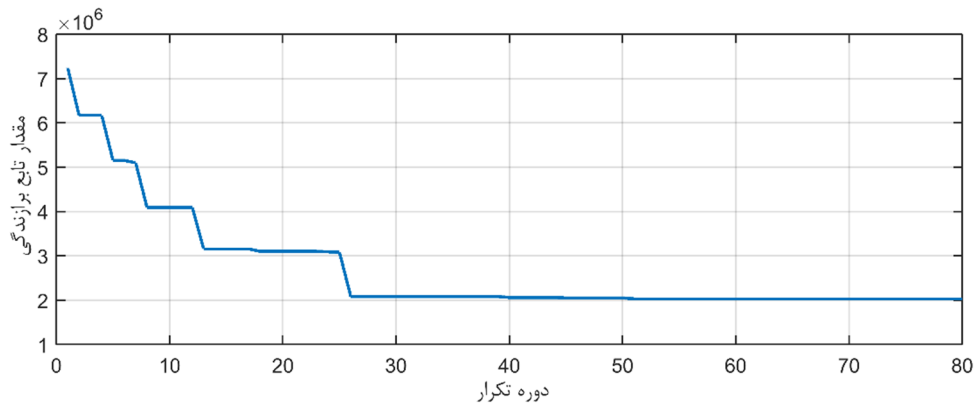
شکل ۱۶ نشان‌دهنده جریان خط ۱۰ به ۱۱ پیش و پس از نصب فیلتر فعال به روش کنترل محلی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان عبوری پس از نصب فیلتر کاملاً سینوسی شده و این مسئله بیان گر آن است که فیلتر فعال وظیفه خود را به درستی انجام داده است و جریان هارمونیک بارهای غیرخطی پایین دست محل اتصال خود را به‌طور کامل جبران نموده است. به عبارت دیگر ضریب جبران‌سازی فیلتر فعال (RF) در این حالت برابر مقدار واحد است.

اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ در بسیاری از باس‌های شبکه فراتر از حد مجاز استاندارد IEEE-519 است و لزوم جبران‌سازی آن را نشان می‌دهد. تمامی باس‌های شبکه در این آزمایش به‌عنوان مکان کاندیدا برای نصب فیلتر فعال فرض شده‌اند. پارامترهای الگوریتم ژنتیک در این شبکه نیز مطابق جدول ۸ تنظیم شده است.

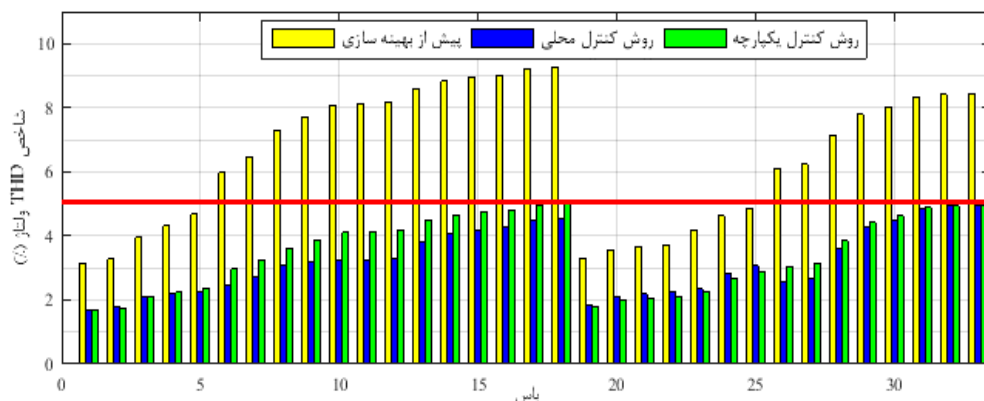
جدول ۸: پارامترهای الگوریتم ژنتیک در شبکه نمونه ب

تعداد نسل	تعداد جمعیت	نرخ جهش	نرخ تقاطع	روش کنترلی
۸۰	۱۰۰	۰/۱	۰/۹	محل
۱۰۰	۲۵۰	۰/۱	۰/۹	یکپارچه

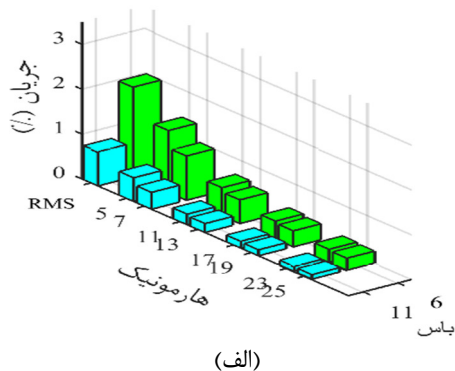
مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال در این شبکه به روش کنترل محلی با نتایج حاصل از روش کنترل یکپارچه در جدول ۹ مقایسه شده و نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای روش ارائه شده (روش مبتنی بر کنترل محلی) در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. شکل ۱۴ ضرایب اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ باس‌های شبکه را پس از بهینه‌سازی به هر دو روش کنترل محلی و یکپارچه نشان می‌دهد. در روش کنترل محلی شبکه به ۲ فیلتر فعال برای جبران‌سازی جریان‌های هارمونیک نیاز دارد در صورتی که در روش کنترل یکپارچه شبکه با استفاده از یک فیلتر فعال به شرایط مطلوب رسیده است. این تفاوت ناشی از نحوه عملکرد فیلترهای فعال در دو روش مذکور است.



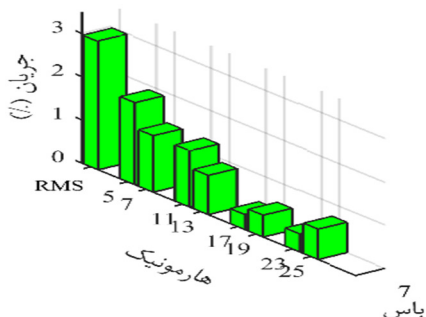
شکل ۱۳: نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای روش مبتنی بر کنترل محلی در آزمایش ب



شکل ۱۴: شاخص THD ولتاژ شبکه پیش و پس از جایابی بهینه فیلترهای فعال در آزمایش ب

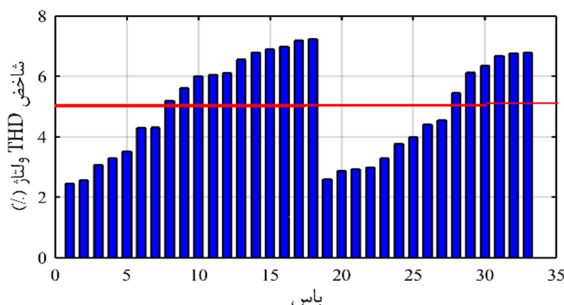


(الف)

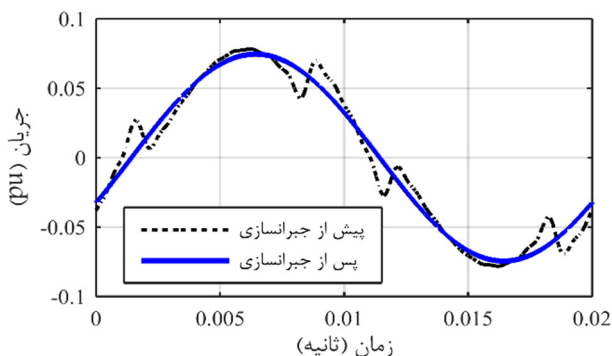


(ب)

شکل ۱۷: طیف هارمونیکی جریان تزریقی فیلترهای فعال در آزمایش ب؛ (الف) در سیستم با کنترل محلی، (ب) در سیستم با کنترل یکپارچه



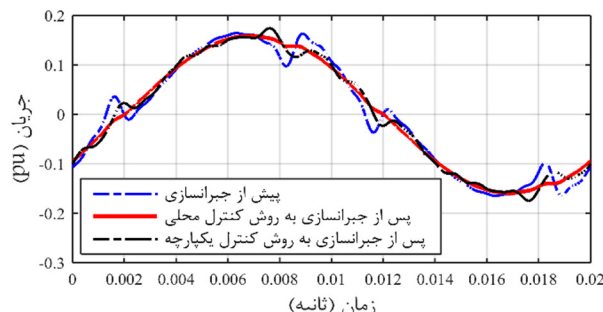
شکل ۱۸: نتایج THD ولتاژ در شبکه نمونه ب هنگام بهره‌برداری از پاسخ روش کنترل یکپارچه به صورت کنترل محلی



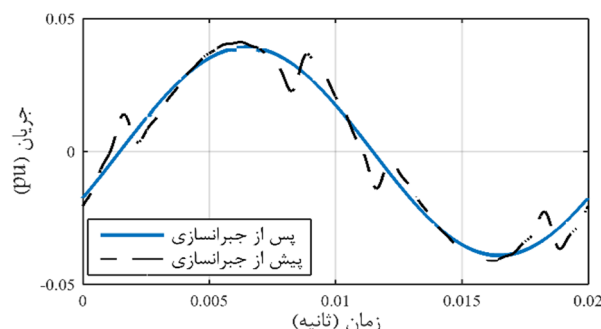
شکل ۱۹: جریان شین ۵ به ۶ در شبکه نمونه ب هنگام بهره‌برداری از پاسخ روش کنترل یکپارچه به صورت کنترل محلی

شکل ۱۷ جریان تزریقی فیلترهای فعال را در هارمونیک‌های مختلف نشان می‌دهد، در روش کنترل محلی از آنجاکه جریان تزریقی فیلتر برابر با جریان هارمونیکی عبوری نقطه اتصال و جریان عبوری نقطه اتصال، نسبتی از جریان هارمونیکی بارهای شبکه است، نسبت جریان‌های تزریقی با نسبت جریان‌های هارمونیکی بارها یکسان است. اما همان‌طور که در شکل ۱۷-الف مشخص است، جریان‌های تزریقی فیلتر فعال در روش کنترل یکپارچه نسبتی با جریان هارمونیکی بارهای موجود در شبکه ندارد به این علت که هدف تزریق جریان‌ها در این روش فقط کاهش ولتاژهای هارمونیکی شبکه است و این مسئله اولییتی را برای تزریق جریان در هارمونیک‌های مختلف ایجاد نمی‌کند.

شکل ۱۸ ضرایب اعوجاج هارمونیکی کلی ولتاژ باس‌های شبکه به ازای حالتی است که پاسخ به دست آمده از روش کنترل یکپارچه در قالب کنترل محلی مورد بهره‌برداری قرار گیرد. همان‌طور که مشخص است در این حالت فیلتر فعال قادر به جبران‌سازی جریان‌های هارمونیکی شبکه تا رسیدن به حد مجاز استاندارد IEEE-519 نیست هرچند همان‌طور که در شکل ۱۹ نمایان است، فیلتر تمام جریان‌های هارمونیکی عبوری از نقطه اتصال خود را به‌طور کامل جبران نموده است بدین معنا که ضریب جبران‌سازی فیلتر فعال (RF) در این حالت برابر ۱ است. نتایج فوق نشان‌گر آن است که در شبکه‌های فاقد امکانات و زیرساخت لازم برای کنترل یکپارچه فیلترهای فعال، نمی‌توان پاسخ حاصل از روش‌های پیشین را به‌کار برد و برای دستیابی به پاسخ کارا لازم است مطابق روش پیشنهادی این مقاله مکانیزم کنترل محلی فیلترها در فرایند تعیین مکان و ظرفیت این تجهیزات مدل‌سازی و اعمال شود.



شکل ۱۵: جریان شین ۵ به ۶ شبکه نمونه ب، پیش و پس از مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال



شکل ۱۶: جریان شین ۱۰ به ۱۱ شبکه نمونه ب، پیش و پس از مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال به روش کنترل محلی

۶- نتیجه‌گیری

جریان بار غیرخطی باس b در هارمونیک h	i_{nb}^h
ضریب تزریق جریان بار غیرخطی در هارمونیک h	$c(h)$
جریان عبوری شاخه محل اتصال فیلتر به شبکه	$i^{\text{PCC}h}$
مقدار مؤثر جریان هارمونیکی عبوری شاخه محل اتصال فیلتر به شبکه	$i^{\text{PCC},\text{rms}}$
زاویه جریان عبوری شاخه محل اتصال فیلتر به شبکه	$\phi^{\text{PCC}h}$
جریان فیلتر فعال i	i_i^{APF}
ضریب کاهش جریان فیلتر فعال	RF
ظرفیت فیلتر فعال i	S_i^{APF}
هزینه کلیه فیلترهای فعال نصب‌شده	C_T
هزینه فیلتر فعال i	$C(S_i^{\text{APF}})$

پارامترها و مجموعه‌ها

بیشینه هارمونیک‌های منظور شده در بهینه‌سازی	H
تعداد فیلترهای فعال نصب‌شده در شبکه	N
تعداد باس‌های شبکه	NB
تعداد باس‌های کاندیدا برای نصب فیلتر	NC
ضریب هزینه متغیر فیلترهای فعال	C^{var}
ضریب هزینه ثابت فیلترهای فعال	C^{fix}
ضریب جریمه	A
فرکانس زاویه‌ای شبکه در هارمونیک اصلی	ω
مجموعه ظرفیت‌های قابل انتخاب برای فیلتر فعال	Ω

سیستم کنترل، مکان و ظرفیت فیلترهای فعال نقش عمده‌ای در کاهش آلودگی هارمونیکی موجود در شبکه‌های توزیع دارد. در این مقاله مکانیزم کنترل محلی فیلترهای فعال مدل‌سازی و بر مبنای آن مکان و ظرفیت بهینه این تجهیزات با استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی تعیین شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با در نظر گرفتن سیستم کنترل محلی با نتایج حاصل در حالت کنترل یکپارچه مقایسه شد. نتایج حاصله نشان از تفاوت شاخص‌های آلودگی هارمونیکی به دلیل تفاوت در جریان‌های تزریقی در دو روش داشت. هم‌چنین مشاهده شد که حضور فیلتر فعال با کنترل محلی در شبکه‌های توزیع آلوده به هارمونیک نه تنها همواره باعث بهبود وضعیت هارمونیکی شبکه نمی‌گردد بلکه در برخی موارد می‌تواند باعث بدتر شدن وضعیت کلی شبکه نیز می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که برای شبکه‌هایی همچون ایران که امکانات تبادل اطلاعات و زیرساخت‌های لازم برای به‌کارگیری مکانیزم کنترل یکپارچه فیلترهای فعال وجود ندارد، نمی‌توان از روش‌های مکان‌یابی مبتنی بر تحقیقات پیشین استفاده کرد. برای مکان‌یابی کارآمد فیلترهای فعال در این شبکه‌ها که مبتنی بر کنترل محلی بهره‌برداری می‌شوند، لازم است تا مکانیزم کنترل محلی در فرایند بهینه‌سازی مکان‌یابی فیلترها مورد توجه قرار گیرد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که مدل و روش پیشنهادی این مقاله می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در مکان‌یابی بهینه فیلترهای فعال در شبکه‌های توزیع مشابه ایران مورد استفاده عملی قرار گیرد.

نمادها

شمارنده‌ها

t	شمارنده زمان
h	شمارنده هارمونیک
i	شمارنده فیلتر فعال
a, b	شمارنده‌های باس شبکه

متغیرها

P_{lb}	توان حقیقی خطی باس b
q_{lb}	توان موهومی خطی باس b
P_{nb}	توان حقیقی غیرخطی باس b
q_{nb}	توان موهومی غیرخطی باس b
v_b^h	ولتاژ باس b در هارمونیک h
y_{lb}^h	ادمیتانس بار خطی باس b در هارمونیک h
y_{cb}^h	ادمیتانس خازن موازی باس b در هارمونیک h
$y_{a,b}^h$	ادمیتانس شاخه $a-b$ در هارمونیک h
$r_{a,b}$	مقاومت شاخه $a-b$
$x_{a,b}$	راکتانس شاخه $a-b$
\mathbf{V}^h	بردار ولتاژ باس‌های شبکه در هارمونیک h
\mathbf{I}^h	بردار جریان‌های تزریقی به شبکه در هارمونیک h
\mathbf{Y}^h	ماتریس ادمیتانس شبکه در هارمونیک h

مراجع

- [۱] سید حسین طباطبایی و علیرضا جلیلیان، «کنترل بازیاب دینامیکی ولتاژ مبتنی بر فیلتر شکافی تطبیقی و میراساز فعال به‌منظور بهبود کیفیت توان»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۴، شماره ۲، صفحات ۳۴-۲۳، ۱۳۹۳.
- [۲] علی انشایی و رحمت‌الله هوشمند، «یک روش جدید برای شناسایی اغتشاشات کیفیت توان با استفاده از تبدیل S»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۴، صفحات ۴۹-۳۷، ۱۳۹۴.
- [3] V.E. Wagner, "Effects of harmonics on equipment," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 2, pp. 672-680, 1993.
- [4] J. Teng and C. Chang, "Backward/forward sweep-based harmonic analysis method for distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1665-1672, 2007.
- [5] Y. Zhao, H. Deng, J. Li, and D. Xia, "Optimal planning of harmonic filters on distribution systems by chance constrained programming," Electric Power System Research, vol. 68, no. 2, pp. 149-156, 2003.
- [6] R. Keypour, R. Seifi, and A. Varjani, "Genetic based algorithm for active power filter allocation and sizing," Electric Power System Research, vol. 71, no. 1, pp. 41-49, 2004.
- [7] I. Ziari, and A. Jalilian, "A new approach for allocation and sizing of multiple active power-line conditioners," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 2, pp. 1026-1035, 2010.
- [8] M. Shivaie, A. Salemnia, and M.T. Ameli, "A multi-objective approach to optimal placement and sizing of multiple active power filters using a music-inspired algorithm," Applied Soft Computing, vol. 22, pp. 189-204, 2014.

- of 2013 12th Int. Conf. on Environment and Elec.Eng. (EEEIC), Poland, 2013.
- [19] A. Moradi Far and A. Akbari Foroud, "Cost-effective optimal allocation and sizing of active power filters using a new fuzzy-MABICA method," *IETE Journal of Research*, vol. 62, no. 3, pp. 307-322, 2015.
- [20] G. Carpinelli, D. Proto, and A. Russo, "Optimal planning of active power filters in a distribution system using trade off/risk method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 2, pp. 841-851, 2017.
- [21] Y.Y. Hong and Y.K. Chang, "Determination of locations and sizes for active power line conditioners to reduce harmonics in power system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1610-1617, 1996.
- [22] A. Ulinuha, M. Masoum, and S. Islam, "Harmonic power flow calculations for a large power system with multiple nonlinear loads using decoupled approach," in *Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2007, Australia, 2007*.
- [23] Y.H. Yan, C.S. Chen, C.S. Moo, and C.T. Hsu, "Harmonic analysis for industrial customers," *IEEE Industry Applications Society*, vol. 30, no. 2, pp. 462-468, 1994.
- [24] T.S. Chung and H.C. Leung, "A genetic algorithm approach in optimal capacitor selection with harmonic distortion considerations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 21, no. 8, pp. 561-569, 1999.
- [25] Y. Baghzouz, "Effects of nonlinear loads on optimal capacitor placement in radial feeders," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 1, pp. 245-251, 1991.
- [26] H.C. Chin, "Optimal shunt capacitor allocation by fuzzy dynamic programming," *Electric Power Systems Research*, vol. 35, no. 2, pp. 133-139, 1995.
- [27] "IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems," *IEEE Std. 519-1992*, 1993.
- [28] R. Ranjan and D. Das, "Simple and Efficient Computer Algorithm to Solve Radial Distribution Networks," *Electric Power Components and Systems*, vol.31, pp. 95-107, 2003
- [9] W.M. Grady, M.J. Samotyj, and A.H. Noyola, "Survey of active power line conditioning methodologies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1536-1542, 1990.
- [10] B. Singh, K. Al. Haddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, 1999.
- [11] M.J. Samotyj, W.M. Grady, and A.H. Noyola, "Minimizing network harmonic voltage distortion with an active power line conditioner," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1690-1697, 1991.
- [12] W.M. Grady, M.J. Samotyj, and A.H. Noyola, "The application of network objective functions for actively minimizing the impact of voltage harmonics in power systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1379-1386, 1992.
- [13] W.K. Chang, W.M. Grady, and M.J. Samotyj, "Meeting IEEE-519 harmonic voltage and voltage distortion constraints with an active power line conditioner," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3, pp. 1531-1537, 1994.
- [14] W.K. Chang and W.M. Grady, "Minimizing harmonic voltage distortion with multiple current-constrained active power line conditioners," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, pp. 837-843, 1997.
- [15] Y.-Y. Hong, Y.-L. Hsu, and Y.-T. Chen, "Active power line conditioner planning using an enhanced optimal harmonic power flow method," *Electric Power System Research*, vol. 52, no. 2, pp. 181-188, 1999.
- [16] T.T. Chang and H.C. Chang, "An efficient approach for reducing harmonic voltage distortion in distribution systems with active power line conditioners," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 990-995, 2000.
- [17] A. Moradifar and H.R. Soleymanpour, "A fuzzy based solution for allocation and sizing of multiple active power filters," *Journal of Power Electronics*, vol. 12, no. 5, pp. 830-841, 2012.
- [18] D. Grabowski and M. Maciążek, "Cost effective allocation and sizing of active power filters using genetic algorithms," in *Proc.*