

روی کردی جدید به منظور کمی سازی سهم هارمونیک ولتاژ و جریان هر یک از منابع هارمونیک‌زا در شبکه‌های به هم پیوسته مبتنی بر حداکثر کاهش دامنه هارمونیک

جواد مؤمن پور آکردی^۱، کارشناس ارشد؛ مهدی ترابیان اصفهانی^۲، محقق پسا دکترا؛ بهروز وحیدی^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- javad.momenpour@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- torabian_mehdi@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- vahidi@aut.ac.ir

چکیده: با عنایت به اهمیت تحلیل منشأ هارمونیک در شبکه‌های به هم پیوسته در این مقاله روشی برای شناسایی و تعیین مقدار کمی سهم مقصرین اصلی آلودگی هارمونیک ولتاژ یا جریان خط شبکه‌های به هم پیوسته ارائه می‌شود. در این مقاله نواقص استفاده از روش معروف «تصویرکردن بردارها» برای مسأله مذکور مطرح می‌شود و برای رفع نواقص آن، روشی مبتنی بر کاهش دامنه ولتاژ هارمونیک و جریان هارمونیک، ناشی از کاهش دامنه هارمونیک هر یک از منابع تولید هارمونیک، مطرح می‌شود. هر دو روش در شبکه ۶ باسه IEEE^۱، با استفاده از نرم‌افزارهای دیگسایلنت^۲ و متلب^۳ در فرکانس هارمونیک مشخصی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از ارزیابی دو روش نشان از این دارد که روش «تصویرکردن بردارها» برای حالتی که تعداد منابع هارمونیک بیش از دو باشد، لزوماً پاسخی صحیح و مورد انتظار نخواهد داد؛ این در حالی است که نتایج حاصل از روش پیشنهادی، بسیار منطقی است.

واژه‌های کلیدی: کیفیت توان، سهم هارمونیک، شبکه‌های به هم پیوسته.

A new approach for quantifying the voltage and current harmonic contribution of each harmonic source in interconnected networks based on maximum harmonic amplitude reduction

Javad Momenpour Akerd¹, MSc; Mehdi Torabian Esfahani², Post Doc. Research Fellow; Behrooz Vahidi³, Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: javad.momenpour@yahoo.com

2- Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: torabian_mehdi@yahoo.com

3- Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: vahidi@aut.ac.ir

Abstract: Due to importance of harmonic analysis in interconnected network. In this paper, a method is proposed that could be determined the main responsible of the harmonic pollution of the desired bus voltage or the current desired line in interconnected networks. In this paper, the defects of using the "vector projection" method are presented to solve the above problem; so, a method is proposed based on reducing the amplitude of the harmonic voltage and current due to the reduction of the harmonic amplitude. Both methods are evaluated in a 6-buses IEEE grid using Digsilent and MATLAB software at a specific harmonic frequency. The results of the evaluation of the two methods indicate that the method of "vector projection" is not necessarily the correct answer if the number of harmonic sources is more than two sources; consequently. However, the results of the proposed method are highly rational in the interconnected grids.

Keywords: Power quality, harmonic contribution, interconnected networks.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۳ و ۱۳۹۷/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۹

نام نویسنده مسئول: پروفسور بهروز وحیدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان حافظ - پلاک ۴۲۴ - دانشگاه صنعتی امیر کبیر - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

بحث کیفیت توان در شبکه‌های برق دارای اهمیت روزافزونی است زیرا از یک طرف کاربرد بارهای غیرخطی آلوده‌کننده نظیر کوره‌های قوس الکتریکی، کوره‌های القایی، درایوها و یکسوکننده‌ها به‌طور وسیعی در حال افزایش بوده و از طرف دیگر بارهای حساس به پدیده‌های کیفیت توان، نظیر میکروپروسورها، کامپیوترها، پردازنده‌ها و کنترل‌کننده‌های دیجیتال در حال گسترش هستند. لذا در صورت عدم اصلاح و بهبود کیفیت توان، خسارات و مشکلات جبران‌ناپذیری برای این بارهای حساس و تجهیزات شبکه به‌وجود خواهد آمد. بحث هارمونیک نیز به‌عنوان یکی از زیرشاخه‌های مقوله کیفیت توان بسیار حائز اهمیت است. وجود اعوجاج در ولتاژ و جریان چالش‌های زیادی را هم برای شبکه برق و هم برای مشتریان ایجاد کرده است [۲، ۱]. حضور هارمونیک در سیستم‌های قدرت آسیب‌های زیادی نظیر افزایش تلفات توان، افزایش حرارت تجهیزات، پدیده تشدید، کاهش کیفیت توان، تأثیرات منفی بر تجهیزات مخابراتی، افزایش احتمال عمل‌کرد اشتباه سیستم‌های حفاظتی و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان را در پی خواهد داشت. برای مقابله با این مشکل اولین قدم شناسایی منابع تولید هارمونیک می‌باشد. قدم بعدی این است که هر یک از این منابع به‌طور واقعی چه میزان در هارمونیک کردن ولتاژ یا جریان مورد بررسی، سهم داشته‌است و به‌عبارت دیگر چه میزان مقصر بوده‌است. در سال‌های گذشته تعیین سهم هارمونیک شبکه و مصرف‌کننده در نقطه اتصال مصرف‌کننده به شبکه (PCC^۱) انجام شده‌است.

در [۳] روشی برای تشخیص مکان منبع هارمونیک‌زا بر مبنای جهت شارش توان حقیقی در باس PCC ارائه شده‌است. در این روش هر سمت که توان هارمونیک بزرگ‌تری داشته‌باشد به‌عنوان مکان منبع هارمونیک‌زا تشخیص داده می‌شود. چندی بعد ثابت شده‌است که روش مذکور نمی‌تواند لزوماً پاسخ درست بدهد زیرا جهت شارش توان حقیقی وابسته به زاویه بین ولتاژهای سمت مصرف‌کننده و شبکه می‌باشد و به دامنه ولتاژهای آن‌ها وابسته نیست [۴]. یکی از روش‌های پرکاربردی که برای تعیین سهم هارمونیک ولتاژ و جریان بین مشترک و شبکه (در نقطه PCC) استفاده می‌شود، روش جمع آثار^۵ است. در این روش در مرتبه هارمونیک مورد بررسی، مدار معادل نورتین شبکه و مصرف‌کننده از دید باس PCC به‌دست آورده می‌شود و سپس تصویر بردارهای جریان یا ولتاژ ناشی از هر یک از منابع هارمونیک‌زا در باس PCC به‌ترتیب بر بردار جریان یا ولتاژ ناشی از حضور هم‌زمان دو منبع هارمونیک‌زا به‌دست آورده می‌شود. بزرگی و جهت هریک از بردارهای تصویر نشان‌دهنده سهم هارمونیک هر منبع است [۵]. در این تحقیق ابعاد مختلف کارایی یا عدم کارایی این روش در شبکه‌های به‌هم‌پیوسته، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است در ارزیابی مذکور، بحث استفاده از تصویر بردارها در روش جمع آثار، اهمیت زیادی دارد، لذا به‌منظور تقریب بیش‌تر ذهن به این موضوع، در این تحقیق از لفظ «تصویر کردن بردارها» برای روش جمع آثار استفاده خواهد شد. یکی از روش‌های دیگری که برای تعیین

سهم هارمونیک بین شبکه و مشترک (در نقطه PCC) مطرح شده‌است، استفاده از شاخص جریان نامطابق^۶ می‌باشد. این شاخص مبتنی بر جداسازی جریان PCC به دو مؤلفه جریان مطابق^۷ با ولتاژ (مؤلفه‌ای از جریان که شکل موج آن مشابه شکل موج ولتاژ است) و جریان نامطابق با ولتاژ (قسمت باقی‌مانده جریان) است. در این روش از مؤلفه جریان نامطابق با ولتاژ برای تعیین سهم استفاده می‌شود. این روش آن‌چنان مورد تأیید واقع نشد. علت نامناسب بودن این روش این است که در آن، برخی المان‌های خطی شامل خازن‌ها و راکتورهای موازی، اشتباهاً به‌عنوان مقصر هارمونیک معرفی می‌شوند [۶]. از جمله مقالات دیگری که نیازمند چندین آزمایش کلیدزنی برای تشخیص امپدانس سیستم هستند، [۸، ۷] می‌باشند، که به‌ترتیب بر اساس مقایسه دامنه ولتاژ و امپدانس بحرانی، منبع هارمونیک‌زا را شناسایی می‌کنند. در سال ۲۰۰۸ برای محاسبه سهم مصرف‌کننده و شبکه در اعوجاج هارمونیک شبکه‌های توزیع روشی مبتنی بر محاسبه اعوجاج هارمونیک برآیند (THD^۸) مطرح شده‌است [۹]. این روش به‌دلیل در نظر گرفتن فاز منابع هارمونیک از دقت کافی برخوردار نیست. مقالات [۹-۳] بر روی شبکه‌های شعاعی تمرکز داشته‌اند اما مقاله [۱۰] تعیین سهم هارمونیک شبکه و مصرف‌کننده را در شبکه‌های به‌هم‌پیوسته ضعیف^۹ نیز انجام داده‌است. در این روش از مدار معادل نورتین مصرف‌کننده برای مدل‌سازی مؤلفه‌های R-L-C مصرف‌کننده استفاده شده‌است. تعیین سهم هارمونیک برای یک بار خاص با در نظر گرفتن تغییرات هارمونیک پس‌زمینه در [۱۱] صورت گرفته‌است. روش‌های مبتنی بر تخمین حالت هارمونیک (HSE^{۱۰}) [۱۳، ۱۲]، آنالیز مؤلفه نوابسته (ICA^{۱۱}) [۱۵، ۱۴] و تخمین حداقل مربعات وزن‌دار (WLSE^{۱۲}) [۱۶] از جمله روش‌هایی هستند که بر روی شبکه‌های انتقال اعمال شده‌اند. عیب عمده این روش‌ها محاسبات سنگین و اندازه‌گیری‌های فراوان می‌باشد. در سال ۲۰۱۴ از یک روش «Vector Draft» جدید برای شناسایی منبع هارمونیک‌زا در باس PCC استفاده شده‌است. در این روش با استفاده از طیف‌نگار فاز (PS^{۱۳}) و طیف‌نگار فرکانس (FS^{۱۴}) و بر مبنای روش Vector Draft در باس PCC اندازه‌گیری انجام می‌شود تا منبع هارمونیک‌زا شناسایی شود [۱۷].

در این مقاله روشی ارائه می‌شود که بتوان در شبکه‌های به‌هم‌پیوسته سهم هارمونیک هر یک از منابع تولید هارمونیک در کاهش دامنه هارمونیک ولتاژ باس دلخواه، و همین‌طور سهم منابع هارمونیک در کاهش دامنه هارمونیک جریان خط دلخواه، مشخص کرد. این روش مبتنی بر معادلات جریان شبکه در فرکانس هارمونیک مورد نظر می‌باشد. با استفاده از معادلات جریان شبکه، ولتاژ باس مورد بررسی یا جریان خط مورد بررسی، در فرکانس هارمونیک مورد نظر بر حسب مقادیر منابع هارمونیک به‌دست خواهد آمد، در نتیجه می‌توان بیان کرد که ولتاژ یا جریان مورد بحث، در فرکانس هارمونیک مورد بررسی، شامل ترم‌هایی مستقل از هم می‌شود که هر ترم ناشی از یک منبع هارمونیک‌زا مشخص می‌شود. در قسمت ۲ کارایی روش «تصویر کردن بردارها» در شبکه‌های

به هم پیوسته، استفاده کرد. در واقع آن چه که در این تحقیق مد نظر است شبکه‌ای به هم پیوسته است که باس یا خط مورد بررسی در دل این شبکه حضور دارند و برخلاف شبکه شکل ۱ چندین منبع هارمونیک‌ها در نقاط مختلف آن قرار دارند.

در این قسمت تأثیر هر یک از منابع تولید هارمونیک را در هارمونیک شدن ولتاژ باس معلوم و جریان خط معلوم از شبکه به هم پیوسته محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر مقدار کمی سهم هر یک از منابع تولید هارمونیک در اندازه ولتاژ هارمونیک باس معلوم و جریان هارمونیک خط معلوم، در شبکه‌های به هم پیوسته تعیین می‌شود. برای این کار، از مدار معادل شبکه در مرتبه هارمونیک مورد نظر، استفاده می‌شود. در این مدار معادل به جای بارهای هارمونیک مدل نورتن آن‌ها در هارمونیک مورد نظر قرار می‌گیرد، و برای بقیه المان‌ها نیز مدل هارمونیک آن‌ها لحاظ می‌شود. بنابراین در یک شبکه n باس روابط (۱) تا (۴) حاکم خواهند بود.

$$I_{S,h} = \begin{pmatrix} I_{S_1} \\ I_{S_2} \\ \vdots \\ I_{S_i} \\ \vdots \\ I_{S_n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$V_h = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_i \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$Y_{bus,h} = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nn} \end{pmatrix} \Rightarrow Z_{bus,h} = Y_{bus,h}^{-1} \quad (3)$$

$$V_h = Z_{bus,h} I_{S,h} \quad (4)$$

که در آن $I_{S,h}$ ماتریس منابع جریان هارمونیک متصل به باس‌های شبکه ناشی از منابع هارمونیک می‌باشد، V_h ماتریس ولتاژ باس‌های شبکه در هارمونیک h ام می‌باشد. $Z_{bus,h}$ و $Y_{bus,h}$ به ترتیب ماتریس ادمیتانس و ماتریس امپدانس شبکه در هارمونیک h ام می‌باشند. بنابراین ولتاژ باس i ام شبکه در هارمونیک h ام از رابطه (۵) به دست خواهد آمد.

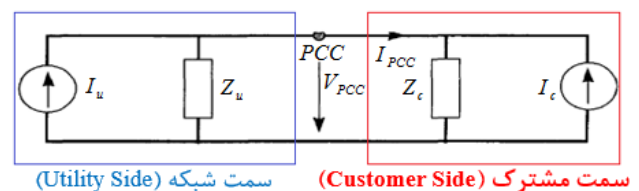
$$v_i = z_{i1} I_{S_1} + z_{i2} I_{S_2} + \dots + z_{ij} I_{S_j} + \dots + z_{in} I_{S_n} \quad (5)$$

پارامترهای v_i و $v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n}$ مطابق رابطه (۶) تعریف می‌شوند. در رابطه (۶)، $v_{i,j}$ به صورت ولتاژ باس i ناشی از منبع هارمونیک‌ها واقع در باس j در هارمونیک h ام تعریف می‌شود.

به هم پیوسته مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در قسمت ۳ روشی جدید برای تعیین سهم هارمونیک ولتاژ و جریان در شبکه‌های به هم پیوسته ارائه می‌شود. شبیه‌سازی تعیین سهم هارمونیک ولتاژ یک باس معلوم و جریان یک خط معلوم، از شبکه ۶ باسه IEEE، در قسمت ۴ آورده شده است. نهایتاً در قسمت ۵ نتیجه‌گیری آمده است.

۲- ارزیابی روش «تصویرکردن بردارها» در شبکه‌های به هم پیوسته

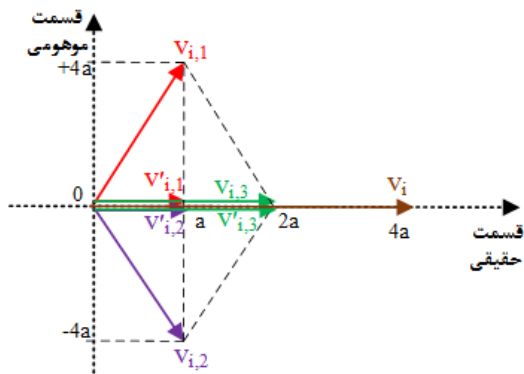
«تصویرکردن بردارها» یکی از روش‌هایی است که برای تعیین سهم هارمونیک ولتاژ و جریان در نقطه اتصال مصرف‌کننده به شبکه (PCC) استفاده می‌شود. این روش هم به صورت کیفی و هم به صورت کمی مشخص می‌کند که از میان شبکه و مصرف‌کننده، کدام یک و به چه میزان در هارمونیک شدن ولتاژ (یا جریان) نقطه PCC مقصر می‌باشند. در این روش همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود لازم است مدار معادل نورتن شبکه و مصرف‌کننده در فرکانس هارمونیک مورد نظر، از دید باس PCC محاسبه شود. مبنای این روش این است که ولتاژ (یا جریان) نقطه PCC ناشی از هر یک از منابع هارمونیک (سمت شبکه و سمت مصرف‌کننده) مولفه‌ای در راستا و مولفه‌ای عمود بر ولتاژ (یا جریان) نقطه PCC دارند. این که هر یک از منابع هارمونیک به چه میزان مؤلفه هم‌راستا با بردار ولتاژ (یا جریان) هارمونیک نقطه PCC دارند تعیین‌کننده میزان سهم آن‌ها است [۵].



شکل ۱: مدار معادل نورتن شبکه و مشترک از دید باس PCC در فرکانس هارمونیک h ام [۳]

روش «تصویرکردن بردارها» روش مناسبی برای تعیین سهم هارمونیک مصرف‌کننده و شبکه است و کاربرد عمده این روش در شبکه‌های شعاعی می‌باشد. حوزه بررسی مسأله تعیین سهم هارمونیک در تحقیقات مختلف تاکنون صرفاً شبکه‌ای مطابق شکل ۱ بوده است. یعنی تعیین سهم هارمونیک صرفاً در نقطه PCC بین شبکه و مصرف‌کننده انجام شده است؛ به عبارت دیگر صرفاً حالتی بررسی شده است که در آن تنها دو منبع هارمونیک‌ها وجود دارد. با توجه به این که امروزه شبکه‌های انتقال و فوق توزیع به صورت به هم پیوسته می‌باشند و حتی شبکه‌های شعاعی نیز به علت بحث قابلیت اطمینان به حالت حلقوی و به هم پیوسته درآمده‌اند، این سؤال مطرح می‌شود که آیا می‌توان روش «تصویرکردن بردارها» را تعمیم داد و از آن برای تعیین سهم هارمونیک ولتاژ یک باس معلوم یا جریان یک خط معلوم درون شبکه

در شبکه وجود داشته باشد، پاسخ منطقی ارائه می دهد، اما اگر در شبکه بیش از دو منبع هارمونیک وجود داشته باشد تعیین سهم به روش «تصویر کردن بردارها» نتایج مورد قبولی را نخواهد داشت. به عنوان مثال، فرض شود سه بردار $v_{i,1}$ ، $v_{i,2}$ و $v_{i,3}$ که در شکل ۳ نمایش داده شده اند مقادیر ولتاژ باس i ناشی از به ترتیب منبع I_{S1} ، I_{S2} و I_{S3} در شبکه ای با سه منبع هارمونیک باشند.



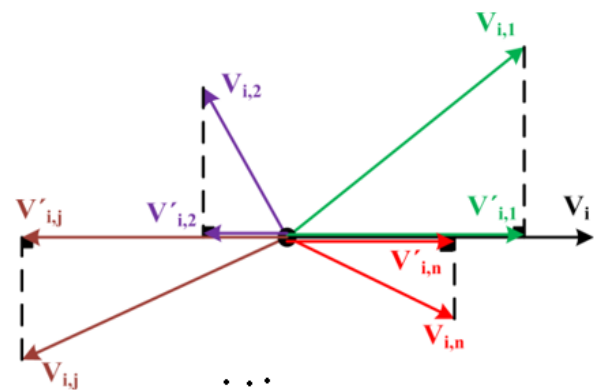
شکل ۳: نمایش برداری ولتاژ یک باس ناشی از منابع هارمونیک در یک شبکه نمونه با سه منبع هارمونیک

نتایج تعیین سهم هارمونیک این سه منبع هارمونیک در جدول ۱ آمده است. مطابق جدول ۱ و شکل ۳، سه بردار $v_{i,1} = a - 4aj$ ، $v_{i,2} = 2a$ و $v_{i,3} = a + 4aj$ مقادیر ولتاژ ناشی از هر یک از منابع هارمونیک در یک شبکه نمونه با سه منبع هارمونیک هستند. بردار $v_i = 4a$ برآیند این سه بردار می باشد. تصویر هر یک از سه بردار مذکور بر بردار برآیند (v_i)، به ترتیب بردارهای $v'_{i,1} = a$ ، $v'_{i,2} = 2a$ و $v'_{i,3} = a$ هستند. چنانچه از روش «تصویر کردن بردارها» برای تعیین سهم هارمونیک هر یک از سه منبع مذکور در اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس i استفاده شود، سهم هر یک از سه منبع به ترتیب برابر $\lambda_{i,1}^v = \frac{a}{4a} = 25\%$ ، $\lambda_{i,2}^v = \frac{2a}{4a} = 50\%$ و $\lambda_{i,3}^v = \frac{a}{4a} = 25\%$ محاسبه خواهند شد. این در حالی است که اندازه بردار ولتاژ برآیند با حذف به ترتیب منبع ۱، منبع ۲ و منبع ۳ به ترتیب برابر با $\sqrt{(3a)^2 + (4a)^2} = 5a$ ، $\sqrt{(2a)^2 + (4a)^2} = 4.47a$ و $\sqrt{(a)^2 + (4a)^2} = 4.12a$ خواهد شد؛ بنابراین کاهش اندازه بردار ولتاژ برآیند نسبت به حالت نرمال که مقداری برابر $|v_i| = 4a$ دارد، برای هر یک از منابع به ترتیب برابر با $4a - 5a = -a$ ، $4a - 4.47a = -0.47a$ و $4a - 4.12a = 0.28a$ خواهد شد. باتوجه به اینکه $\lambda_{i,1}^v$ مثبت است این انتظار وجود دارد که با حذف منبع هارمونیک زایی که این سهم مثبت را ایجاد کرده است ($I_{S1,h}$) یعنی ولتاژ هارمونیک باس مورد نظر کاهش پیدا کند، اما این اتفاق رخ نداده است. به صورت مشابه این اتفاق برای منبع $I_{S2,h}$ نیز رخ داده است. دلیل این موضوع این است که بردارهای $v_{i,1}$ و $v_{i,2}$ دارای مقدار بزرگی مؤلفه عمود بر بردار برآیند بوده اند که یکدیگر را خنثی می کردند اما بعد از حذف هر یک از آنها، دیگری مؤلفه عمود بزرگ خود را هم چنان خواهد داشت. این موضوع می تواند باعث شود که بردار برآیند

$$\begin{cases} v_{i,1} = z_{i1} I_{S1} \\ v_{i,2} = z_{i2} I_{S2} \\ \vdots \\ v_{i,j} = z_{ij} I_{Sj} \\ \vdots \\ v_{i,n} = z_{in} I_{Sn} \end{cases} \quad (6)$$

شکل ۲ نشان دهنده بردارهای ولتاژ v_i و $v_{i,1}$ ، $v_{i,2}$ ، $v_{i,3}$ ، $v_{i,n}$ می باشد.

بردارهای $v'_{i,1}$ ، $v'_{i,2}$ ، $v'_{i,3}$ ، $v'_{i,n}$ به ترتیب تصویر بردارهای $v_{i,1}$ ، $v_{i,2}$ ، $v_{i,3}$ ، $v_{i,n}$ می باشند.



شکل ۴: نمایش برداری بردارهای ولتاژ تشکیل دهنده بردار ولتاژ باس مورد بررسی به همراه تصویر آن ها بر بردار ولتاژ باس مورد بررسی

بنابراین طبق روش «تصویر کردن بردارها» سهم هارمونیک ولتاژ باس i ام ناشی از منابع هارمونیک، در فرکانس هارمونیک مورد بررسی، طبق رابطه (۷) به دست می آید.

$$\lambda_{i,j}^v = \frac{v'_{i,j}}{v_i} \quad (7)$$

در رابطه (۷) پارامتر $\lambda_{i,j}^v$ مقدار کمی سهم هارمونیک منبع j در ولتاژ باس i ام می باشد. طبق این روش اگر مقدار $\lambda_{i,j}^v$ مثبت باشد به این مفهوم است که منبع j در جهت افزایش دامنه ولتاژ هارمونیک باس i ام عمل می کند و اگر مقدار $\lambda_{i,j}^v$ منفی باشد به این مفهوم است که منبع j در جهت کاهش دامنه هارمونیک ولتاژ باس i ام عمل می کند. از طرف دیگر هر چه قدر مطلق $\lambda_{i,j}^v$ بیشتر باشد به معنای تأثیرگذاری بیشتر منبع j می باشد. هدف نهایی بعد از تعیین سهم منابع تولید هارمونیک در هارمونیک شدن ولتاژ یک باس این است که نسبت به کاهش و یا حذف منبع هارمونیک با بیشترین سهم، اقدام شود. این به این مفهوم است که حذف منبع هارمونیک با بیشترین سهم مثبت را در هارمونیک کردن ولتاژ باس i دارد، باید منجر به بیشترین کاهش در دامنه هارمونیک باس i شود.

اگر از روش «تصویر کردن بردارها» برای تعیین سهم هارمونیک استفاده شود، موضوع بیان شده در حالتی که فقط دو منبع هارمونیک

«تصویرکردن بردارها» سهم هارمونیک منبع هارمونیک m ام در هارمونیک کردن جریان خط p طبق رابطه (۱۳) به دست می آید.

$$\lambda_{p,m}^I = \frac{I_{p,m}^I}{I_p} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، $I_{p,m}^I$ تصویر بردار $I_{p,m}$ بر بردار I_p می باشد. به طور مشابه می توان اثبات کرد که تعیین سهم هارمونیک جریان در شبکه های به هم پیوسته به روش «تصویرکردن بردارها»، همانند تعیین سهم هارمونیک ولتاژ، ممکن است نتایج غیرمنطقی در پی داشته باشد. بنابراین در این قسمت ثابت شده است که روش «تصویرکردن بردارها» در شبکه های به هم پیوسته، کارایی لازم را برای تعیین سهم هارمونیک ولتاژ و جریان ندارد.

۳- روش پیشنهادی: تعیین حداکثر سهم هر یک از منابع هارمونیک، برای کاهش مقدار هارمونیک ولتاژ باس معلوم یا جریان خط معلوم، در شبکه های به هم پیوسته

در این قسمت روشی جدید برای تعیین سهم هارمونیک ولتاژ و جریان در شبکه های به هم پیوسته ارائه می شود. در شبکه های به هم پیوسته، رابطه (۷)، فقط می تواند بیان کند که در شبکه موجود، هر منبع هارمونیک می تواند به چه میزان مولفه ولتاژ در راستای ولتاژ هارمونیک باس مورد بررسی داشته باشد، اما نمی تواند تضمین کند که بعد از حذف یا کاهش منبع هارمونیک با سهم مثبت (حالت جدید شبکه)، ولتاژ هارمونیک باس مورد نظر کاهش پیدا کند. این قضیه به طور مشابه در مورد رابطه (۱۳) نیز وجود دارد. بنابراین روابط (۷) و (۱۳)، نمی توانند در شبکه های به هم پیوسته، برای کاربردی که از مسئله تعیین سهم هارمونیک انتظار می رود، مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه روشی جدید برای تعیین سهم هارمونیک ولتاژ و جریان ارائه می شود. در این روش با ارائه شاخصی، حداکثر سهم هر یک از منابع هارمونیک، برای کاهش دامنه هارمونیک ولتاژ باس مورد نظر یا جریان خط مورد نظر، تعیین خواهد شد.

۳-۱- روش پیشنهادی برای تعیین حداکثر سهم هارمونیک ولتاژ:

مقدار کاهش اندازه ولتاژ باس i ام بعد از کاهش دامنه منبع هارمونیک j ($\Delta v_{i,j}$)، در رابطه (۱۴) معرفی شده است.

جدید مقداری بزرگتر از بردار برآیند اولیه داشته باشد. بنابراین تعیین سهم هارمونیک ها به روش «تصویرکردن بردارها» برای حالاتی مشابه حالت مثال زده شده پاسخی منطقی نخواهد داد.

به طریق مشابه می توان سهم هارمونیک جریان خط معلوم از شبکه به هم پیوسته را به دست آورد. فرض شود خط p ام خطی باشد که دو باس i و j را به هم وصل می کند و $Z_{Line_{ij}}$ امپدانس آن باشد. در این صورت جریان جاری شده از باس i به باس j در خط p طبق رابطه (۸) به دست می آید.

$$I_p = I_{ij} = \frac{v_i - v_j}{Z_{Line_{ij}}} = -y_{ij}(v_i - v_j) \quad (8)$$

در رابطه (۸) پارامتر y_{ij} درایه سطر i ام و ستون j ام ماتریس ادمیتانس شبکه در هارمونیک h ام می باشد. با استفاده از روابط (۱) تا (۴)، ولتاژ باس i و ولتاژ باس j به ترتیب مطابق رابطه (۹) و رابطه (۱۰) می باشد.

$$v_i = z_{i1}I_{S_1} + z_{i2}I_{S_2} + \dots + z_{in}I_{S_n} \quad (9)$$

$$v_j = z_{j1}I_{S_1} + z_{j2}I_{S_2} + \dots + z_{jn}I_{S_n} \quad (10)$$

با جای گذاری روابط (۹) و (۱۰) در رابطه (۸) جریان خط p مطابق رابطه (۱۱) خواهد بود.

$$I_p = [-y_{ij}(z_{i1} - z_{j1})]I_{S_1} + [-y_{ij}(z_{i2} - z_{j2})]I_{S_2} + \dots + [-y_{ij}(z_{in} - z_{jn})]I_{S_n} \quad (11)$$

بنابراین مقادیر جریان خط p ناشی از هر یک از منابع هارمونیک به صورت رابطه (۱۲) می باشد.

$$\begin{cases} I_{p,1} = [-y_{ij}(z_{i1} - z_{j1})]I_{S_1} \\ I_{p,2} = [-y_{ij}(z_{i2} - z_{j2})]I_{S_2} \\ \vdots \\ I_{p,m} = [-y_{ij}(z_{im} - z_{jm})]I_{S_m} \\ \vdots \\ I_{p,n} = [-y_{ij}(z_{in} - z_{jn})]I_{S_n} \end{cases} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $I_{p,m}$ جریان خط p ناشی از منبع هارمونیک واقع در باس m در فرکانس مورد بررسی، می باشد. به طور مشابه طبق روش

جدول ۱: تعیین سهم هارمونیک منابع هارمونیک در اعوجاج هارمونیک باس i از یک شبکه نمونه با سه منبع هارمونیک ($a > 0$)

منبع هارمونیک	$v_{i,j}$	$\lambda_{i,j}^v$	اندازه بردار ولتاژ برآیند با حذف منبع مربوطه	کاهش اندازه بردار ولتاژ برآیند با حذف منبع مربوطه
I_{S_1}	$v_{i,1} = a + \varphi aj$	$\lambda_{i,1}^v = \frac{a}{\varphi a} = 25\%$	$\sqrt{(\varphi a)^2 + (\varphi a)^2} = \Delta a$	$\varphi a - \Delta a = -a$
I_{S_2}	$v_{i,2} = a - \varphi aj$	$\lambda_{i,2}^v = \frac{a}{\varphi a} = 25\%$	$\sqrt{(\varphi a)^2 + (\varphi a)^2} = \Delta a$	$\varphi a - \Delta a = -a$
I_{S_3}	$v_{i,3} = \varphi a$	$\lambda_{i,3}^v = \frac{\varphi a}{\varphi a} = 50\%$	φa	$\varphi a - \varphi a = \varphi a$

$$\gamma_{i,j}^v = \frac{\Delta v_{i,j,\max}}{\Delta v_{i,w,\max}} \quad (21)$$

هرچه شاخص $\gamma_{i,j}^v$ برای منبعی بیش تر باشد نشان دهنده این است که آن منبع قابلیت بیش تری را در کاهش ولتاژ هارمونیک باس i دارد.

۳-۲- روش پیشنهادی برای تعیین حداکثر سهم هارمونیک جریان:

برای تعیین حداکثر سهم منبع هارمونیک زای m در کاهش دادن اعوجاج هارمونیک جریان خط p روابط (۱۴) تا (۲۱) به صورت مشابه باز نویسی می شوند. نهایتاً رابطه (۲۲) به دست می آید.

$$\Delta I_{p,m,\max} = \begin{cases} \max[a, b, c] & \text{if } k_{\text{extremum}} \in (0,1) \\ \max[a, c] & \text{if } k_{\text{extremum}} \notin (0,1) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} a = \Delta I_{p,m}(k=0 \angle \theta) \\ b = \Delta I_{p,m}(k=k_{\text{extremum}} \angle \theta) \\ c = \Delta I_{p,m}(k=1 \angle \theta) \end{cases}$$

با استفاده از رابطه (۲۲) مقادیر حداکثر کاهش جریان خط k ناشی از هر یک از منابع را می توان محاسبه کرد. با فرض این که کم ترین مقدار مثبت از مجموعه $\{\Delta I_{p,1,\max}, \Delta I_{p,2,\max}, \dots, \Delta I_{p,m,\max}\}$ باشد، مقدار حداکثر سهم منبع m در کاهش جریان هارمونیک خط p در فرکانس هارمونیک مورد بررسی، به صورت رابطه (۲۳) به دست می آید.

$$\gamma_{p,m}^I = \frac{\Delta I_{p,m,\max}}{\Delta I_{p,w,\max}} \quad (23)$$

هر چه شاخص $\gamma_{p,m}^I$ برای منبعی بیش تر باشد نشان دهنده این است که آن منبع قابلیت بیش تری را در کاهش جریان هارمونیک خط p دارد.

۴- شبیه سازی و نتایج :

در این قسمت هدف این است که دو روش تعیین سهم هارمونیک ولتاژ که در قسمت های ۲ و ۳ مطرح شده اند، روی شبکه ۶ باسه IEEE با ولتاژ نامی ۱۳۲ kV ارزیابی شوند. شکل ۴ نمای تک خطی این شبکه را به همراه مصرف کنندگان آن نشان می دهد. هدف این است که سهم هارمونیک هر یک از منابع تولید هارمونیک در کم کردن هارمونیک ۱۱ ام ولتاژ باس ۵ به دست آورده شود؛ هم چنین سهم هارمونیک هر یک از منابع هارمونیک در کم کردن هارمونیک ۱۱ ام جریان خط متصل به باس ۳ و باس ۵ (خط ۱)، به دست آورده می شود.

اطلاعات مربوط به مقادیر بارهای خطی و غیر خطی در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است در نرم افزار دیگسایلنت دامنه جریان منبع هارمونیک h ام به صورت درصدی از دامنه جریان مؤلفه اصلی یعنی به صورت پارامتر ۱۰۰. $\frac{|I_{11}|}{|I_1|}$ وارد می شود؛ و فاز جریان این منبع، با در نظر گرفتن تغییر مبدأ زمانی ناشی از فرض شدن مؤلفه اصلی به صورت کسینوس خالص، به صورت $\varphi_{11} - 11\varphi_1$ وارد می شود. اطلاعات مربوط به

$$\Delta v_{i,j} = |v_{i,1} + v_{i,2} + \dots + v_{i,j} + \dots + v_{i,n}| - |v_{i,1} + v_{i,2} + \dots + kv_{i,j} + \dots + v_{i,n}| \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، ولتاژ هارمونیک باس i ام ناشی از منبع j در حالت فازوری می باشد. k ضریبی است برای نمایش کاهش دامنه منبع j و مقداری در بازه $[0,1]$ دارد. n تعداد کل باس های شبکه است. در این قسمت هدف این است که در مرحله اول محدوده k برای دستیابی به بیش ترین مقدار $\Delta v_{i,j}$ به دست آورده شود و در مرحله بعد مقدار حداکثر سهم هارمونیک معرفی شود.

فرض شود:

$$A = \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq j}}^n v_{i,t} \quad (15)$$

در این صورت:

$$\Delta v_{i,j} = |A + v_{i,j}| - |A + kv_{i,j}| \quad (16)$$

$$\Delta v_{i,j} = \sqrt{|A|^2 + |v_{i,j}|^2 + 2|A||v_{i,j}|\cos\theta} - \sqrt{|A|^2 + k^2|v_{i,j}|^2 + 2k|A||v_{i,j}|\cos\theta} \quad (17)$$

$$\frac{d \Delta v_{i,j}}{dk} = - \frac{k|v_{i,j}|^2 + |A||v_{i,j}|\cos\theta}{\sqrt{|A|^2 + k^2|v_{i,j}|^2 + 2k|A||v_{i,j}|\cos\theta}} \quad (18)$$

پارامتر θ در رابطه (۱۷) زاویه بین دو بردار A و $v_{i,j}$ می باشد.

$$\frac{d \Delta v_{i,j}}{dk} = 0 \Rightarrow k_{\text{extremum}} = - \frac{|A|\cos\theta}{|v_{i,j}|} \quad (19)$$

بیش ترین مقدار $\Delta v_{i,j}$ طبق رابطه (۲۰) به دست می آید:

$$\Delta v_{i,j,\max} = \begin{cases} \max[a, b, c] & \text{if } k_{\text{extremum}} \in (0,1) \\ \max[a, c] & \text{if } k_{\text{extremum}} \notin (0,1) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} a = \Delta v_{i,j}(k=0 \angle \theta) \\ b = \Delta v_{i,j}(k=k_{\text{extremum}} \angle \theta) \\ c = \Delta v_{i,j}(k=1 \angle \theta) \end{cases}$$

در رابطه (۲۰) حداقل مقداری که $\Delta v_{i,j,\max}$ می تواند اختیار کند به ازای $k=1$ خواهد بود و این مقدار صفر خواهد بود بنابراین همواره $\Delta v_{i,j,\max} \geq 0$ می باشد. با استفاده از رابطه (۲۰) می توان مقادیر $\{\Delta v_{i,1,\max}, \Delta v_{i,2,\max}, \dots, \Delta v_{i,n,\max}\}$ را به دست آورد. اگر فرض شود کمترین مقدار مثبت از این مجموعه باشد، در این صورت رابطه (۲۱) می تواند بیان گر شاخص مناسبی برای تعیین سهم هر یک از منابع تولید هارمونیک در کاهش ولتاژ باس i باشد.

بعد از انجام پخش بار هارمونیکی شبکه در $h=11$ با استفاده از مقادیر ولتاژ باس ها و جریان بارها و ژنراتورها، مقدار ادمیتانس متناظر با ژنراتورها و بارها محاسبه می شود. ماتریس $I_{S,h}$ با استفاده از پخش بار هارمونیکی در نرم افزار دیگسایلنت محاسبه شده است. هم چنین ماتریس $Y_{bus,h}$ با استفاده از نرم افزار متلب محاسبه شده است.

$$I_{S,h} = I_{S,11} = \begin{pmatrix} 9/4380 \angle -107/93^\circ \\ 13/4055 \angle -134/55^\circ \\ 12/4868 \angle -144/46^\circ \\ 62/4894 \angle -52/82^\circ \\ 3/8374 \angle -136/07^\circ \\ 44/3665 \angle 145/12^\circ \end{pmatrix} \quad (24)$$

با داشتن ماتریس های $I_{S,11}$ و $Y_{bus,h}$ و استفاده از روابط (۶) و (۱۲) در نرم افزار متلب، جداول ۳ و ۴ حاصل خواهند شد.

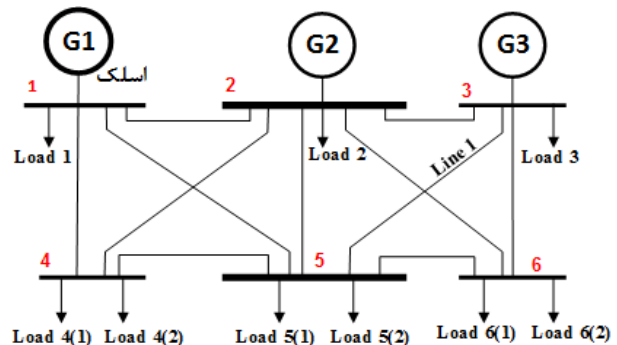
جدول ۳: مقادیر ولتاژهای خط به زمین ناشی از هر یک از منابع تولید هارمونیکی در باس ۵ ام، در هارمونیکی ۱۱ ام

$v_{i,j}$	مقدار
$v_{5,1}$	$2/7598 \angle -13/36^\circ$
$v_{5,2}$	$1/0936 \angle -38/98^\circ$
$v_{5,3}$	$6/0595 \angle -49/44^\circ$
$v_{5,4}$	$49/1701 \angle 39/78^\circ$
$v_{5,5}$	$7/3681 \angle -41/61^\circ$
$v_{5,6}$	$49/1869 \angle -121/13^\circ$

با استفاده از جدول ۳، تعیین سهم هارمونیکی هر یک از ۶ منبع هارمونیکی در ولتاژ هارمونیکی ۱۱ ام باس ۵ با دو روش بیان شده، انجام شده است و نتایج در جدول ۵ و ۶ آورده شده است. مطابق جدول ۵ با استفاده از روش «تصورکردن بردارها» بیشترین سهم مثبت مربوط به IS_4 و IS_6 تشخیص داده می شود اما میزان کاهش ولتاژی که ایجاد می کنند کمتر از بقیه منابع است. اما اگر از روش بیان شده در قسمت ۳ استفاده شود IS_4 و IS_6 همان طور که در جدول ۶ مشخص است کمترین سهم مثبت را دارا هستند.

با توجه به جدول ۶ کاهش تولید منبع واقع در باس ۵ می تواند بیشترین کاهش را در ولتاژ هارمونیکی ۱۱ باس ۵ ایجاد کند (منبع ۵ قابلیت دارد تقریباً $17/5$ برابر منبع ۶ کمک کننده باشد). روش ارائه شده در این مقاله این قابلیت را دارد که، محدوده کاهش دامنه هر یک از منابع هارمونیکی را برای این که تأثیر مثبت، در کاهش دامنه هارمونیکی ولتاژ باس مورد بررسی داشته باشند، مشخص کند. به عنوان مثال در جدول ۶ محدوده تغییرات k برای منابع ۱، ۲، ۳ و ۵

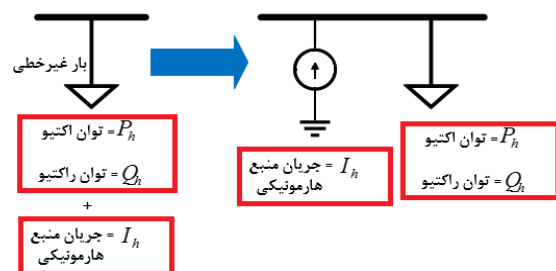
اندازه و فاز جریان منابع هارمونیکی در جدول ۲، نیز به همین صورت وارد شده اند [۱۸].



شکل ۴: شبکه ۶ باسه IEEE مورد بررسی با بارهای خطی و غیر خطی جدول ۲: مقادیر پارامترهای بارهای متصل به شبکه مورد بررسی

پارامتر	توان اکتیو (kW)	توان راکتیو (kVAr)	دامنه نسبی منبع $\frac{ I_{i1} }{ I_i }, \dots$	زاویه نسبی منبع یعنی $\varphi_{i1} - 1\varphi_i$ (درجه)
Load ۱	۴۵	۴۴	۳/۶	20°
Load ۲	۶۲	۶۱	۳/۷	0°
Load ۳	۵۴	۵۴	۴	0°
Load ۴ (۱)	۲۴۰	۲۲۰	۴/۷	$60/31^\circ$
Load ۴ (۲)	۷۰	۷۰	۰	-
Load ۵ (۱)	۳۸۰	۲۷۲	۰/۲	$-95/49^\circ$
Load ۵ (۲)	۷۰	۷۰	۰	-
Load ۶ (۱)	۱۵۰	۱۰۰	۶	$-194/76^\circ$
Load ۶ (۲)	۷۰	۷۰	۰	-

شبکه مورد بحث در نرم افزار دیگسایلنت مدل شده است. مدل معمول بار غیر خطی در هارمونیکی h ام به صورت مدار معادل نورتین (منبع جریان هارمونیکی) در هارمونیکی مورد نظر موازی شده با ادمیتانس قسمت خطی بار در هارمونیکی مورد نظر است. نرم افزار دیگسایلنت در تحلیل هارمونیکی مقدار ادمیتانس قسمت خطی بار غیر خطی را در نظر نمی گیرد و بار غیر خطی را فقط با یک منبع جریان در هارمونیکی مورد نظر مدل می کند. بنابراین در این مقاله برای دقت بیشتر و در نظر گرفتن مقدار ادمیتانس متناظر با قسمت خطی بار غیر خطی، در هنگام تحلیل هارمونیکی، باری خطی که مقدار توان اکتیو و راکتیو آن برابر مقدار توان اکتیو و راکتیو این بار غیر خطی است، با آن موازی می شود. شکل ۵ این موضوع را نمایش می دهد.



شکل ۵: نمایش مدل سازی بار غیر خطی برای استفاده در نرم افزار دیگسایلنت برای تحلیل هارمونیکی

با استفاده از جدول ۴ نتایج حاصل از تعیین سهم هارمونیک جریان خط ۱ در فرکانس هارمونیک ۱۱ ام، برای هر یک از دو روش، در جداول ۷ و ۸ آورده شده است.

جدول ۷: نتایج تعیین سهم هارمونیک جریان خط ۱ در فرکانس هارمونیک ۱۱ ام با روش «تصویر کردن بردارها»

منبع هارمونیک	$\lambda_{p,m}^l$	کاهش اندازه بردار جریان با حذف منبع مربوطه
I_{S1}	$\lambda_{1,1}^l = 3/4175\%$	۰/۴۰۱۷
I_{S2}	$\lambda_{1,2}^l = 2/3012\%$	۰/۲۷۹۹
I_{S3}	$\lambda_{1,3}^l = 25/4741\%$	۳/۰۶۳۷
I_{S4}	$\lambda_{1,4}^l = -34/0192\%$	-۸/۳۷۶۸
I_{S5}	$\lambda_{1,5}^l = 14/0286\%$	۱/۶۷۵۷
I_{S6}	$\lambda_{1,6}^l = 88/7978\%$	-۲/۸۹۲۶

مطابق جدول ۷ در روش «تصویر کردن بردارها» منبع واقع در باس ۶ دارای سهم مثبت می باشد و با توجه به مقدار سهم آن (۸۸/۷۹۷۸٪) منبعی است که کاهش آن باید بیشترین تأثیر را در کاهش دامنه جریان خط ۱ بگذارد، اما مقدار کاهش جریان ناشی از حذف کامل آن مقداری منفی به دست آمده است (۲/۸۹۲۶-). این به این مفهوم است که روش «تصویر کردن بردارها» تعیین سهم را به درستی انجام نمی دهد. با استفاده از روش پیشنهاد شده در این مقاله، سهم هارمونیک منبع ۶، در جریان خط ۱، مقداری برابر ۸/۲۳۲۶ برآورد شده است؛ به این مفهوم که اگر دامنه منبع ۶ به ۶۱ درصد مقدار آن برسد، می تواند ۸/۲۳۲۶ برابر منبع ۲، جریان هارمونیک ۱۱ ام خط ۱ را کاهش دهد. جدول ۸ نشان می دهد کاهش دامنه منبع ۴ نمی تواند به کاهش جریان هارمونیک ۱۱ خط ۱ کمک کند، در عوض کاهش دامنه منبع ۳ می تواند بیشترین تأثیر مثبت را در کاهش جریان هارمونیک ۱۱ خط ۱ داشته باشد. محدوده مناسب کاهش دامنه هارمونیک منبع برای منابع ۱، ۲، ۳ و ۵ کل بازه [۰، ۱] می باشد؛ این محدوده برای منبع ۴ بازه [۰/۶۱، ۱] می باشد.

کل بازه [۰، ۱] می باشد زیرا تابع $\Delta V_{5,j}$ هیچ اکسترمم نسبی در بازه [۰، ۱] ندارد.

بنابراین می توان k را از مقدار ۱ (کمترین مقدار کاهش دامنه منبع) تا مقدار ۰ (بیشترین مقدار کاهش دامنه منبع) انتخاب کرد. اما برای منابع ۴ و ۶ با توجه به این که اکسترمم نسبی تابع $\Delta V_{5,j}$ برای هر یک از این منابع داخل بازه [۰، ۱] رخ می دهد لذا کاهش k از مقدار ۱ تا حداکثر $k_{extremum}$ می تواند نقش مثبت در کاهش دامنه ولتاژ هارمونیک ۱۱ ام باس ۵ داشته باشد و کاهش بیش تر از $k_{extremum}$ نمی تواند کمک کننده باشد. یعنی برای منبع ۴ محدوده مناسب کاهش k در بازه [۰/۸۸، ۱] و برای منبع ۶ بازه [۰/۸۹، ۱] می باشد.

جدول ۴: مقادیر جریان های ناشی از هر یک از منابع تولید هارمونیک در باس ۱ در خط ۱، در هارمونیک ۱۱ ام

$I_{p,m}$	مقدار
$I_{1,1}$	$0/7324 \angle 78/78^\circ$
$I_{1,2}$	$0/3204 \angle 52/26^\circ$
$I_{1,2}$	$3/2398 \angle 39/82^\circ$
$I_{1,4}$	$13/1643 \angle 13/88^\circ$
$I_{1,5}$	$1/9235 \angle 50/6^\circ$
$I_{1,6}$	$18/5246 \angle -30/72^\circ$

جدول ۵: نتایج تعیین سهم هارمونیک ولتاژ برای هر یک از منابع تولید هارمونیک در باس ۵ در هارمونیک ۱۱ ام با روش «تصویر کردن بردارها»

منبع هارمونیک	$\lambda_{s,j}^v$	کاهش اندازه بردار ولتاژ برآیند (خط به زمین) با حذف منبع مربوطه
I_{S1}	$\lambda_{5,1}^v = 7/4277\%$	۲/۴۳۵۶
I_{S2}	$\lambda_{5,2}^v = 3/0758\%$	۱/۰۱۹۱
I_{S3}	$\lambda_{5,3}^v = 18/0545\%$	۵/۹۶۴۸
I_{S4}	$\lambda_{5,4}^v = 25/6420\%$	-۲۱/۰۴۰
I_{S5}	$\lambda_{5,5}^v = 22/2318\%$	۷/۳۶۵۴
I_{S6}	$\lambda_{5,6}^v = 23/5682\%$	-۲۱/۶۳۶۵

جدول ۶: نتایج تعیین سهم هارمونیک ولتاژ برای هر یک از منابع تولید هارمونیک در باس ۵ در هارمونیک ۱۱ ام با روش بیان شده در قسمت ۳

پارامتر منبع هارمونیک	$k_{extremum}$	$\Delta V_{5,j}(k = k_{extremum})$	$\Delta V_{5,j}(k = 0)$	$\Delta V_{5,j}(k = 1)$	$\Delta V_{5,j,max}$	$\gamma_{s,j}^v$
I_{S1}	-۹/۷۱	۱۸/۱۳۸۶	۲/۴۳۵۶	.	۲/۴۳۵۶	۵/۷۹۶
I_{S2}	-۳۱/۵۰	۳۲/۳۸۸۰	۱/۰۱۹۱	.	۱/۰۱۹۱	۲/۴۲۵
I_{S3}	-۴/۴۰	۲۷/۸۴۹۰	۵/۹۶۴۸	.	۵/۹۶۴۸	۱۴/۱۹۵
I_{S4}	۰/۸۸	-۰/۴۹۸۳	-۲۱/۲۰۴۰	.	-۰/۴۹۸۳	۱/۱۸۶۰
I_{S5}	-۳/۵۰	۳۲/۳۵۴۹	۷/۳۶۵۴	.	۷/۳۶۵۴	۱۷/۵۲۷۸
I_{S6}	۰/۸۹	-۰/۴۲۰۲	-۲۱/۶۳۶۴	.	-۰/۴۲۰۲	۱

جدول ۸: نتایج تعیین سهم هارمونیکى جریان خط ۱ در فرکانس هارمونیکى ۱۱ ام با روش بیان شده در قسمت ۳

پارامتر منبع هارمونیک‌زا	$k_{extremum}$	$\Delta I_{1,m}(k = k_{extremum})$	$\Delta I_{1,m}(k = 0)$	$\Delta I_{1,m}(k = 1)$	$\Delta I_{1,m,max}$	$\gamma'_{1,m}$
I_{S1}	-۸/۴۹	۲/۱۷۲۷	۰/۴۰۱۷	.	۰/۴۰۱۷	۱/۴۳۵۵
I_{S2}	-۳۲/۳۹	۶/۳۳۲۰	۰/۲۷۹۹	.	۰/۲۷۹۹	۱
I_{S3}	-۲/۶۱	۸/۷۷۴۲	۳/۰۶۳۷	.	۳/۰۶۳۷	۱۰/۹۴۶۸
I_{S4}	۱/۲۹	۰/۶۲۳۰	-۸/۳۷۶۹	.	.	.
I_{S5}	-۴/۶۵	۶/۶۴۴۰	۱/۶۷۵۷	.	۱/۶۷۵۷	۵/۹۸۷۳
I_{S6}	۰/۶۱	۲/۳۰۴۰	-۲/۸۹۲۶	.	۲/۳۰۴۰	۸/۲۳۲۶

- [4] W. Xu, X. Liu and Y. Liu, "An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 214-219, 2003.
- [5] W. Xu and Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, pp. 804-811, 2000.
- [6] C. Li and W. Xu, "On defining harmonic contributions at the point of common coupling," IEEE Power Engineering Review, vol. 22, no. 7, pp. 44-45, 2002.
- [7] N. Hamzah, A. Mohamed and A. Hussain, "Harmonic source location at the point of common coupling based on voltage magnitude," TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference, vol. 100, pp. 220-223, 2004.
- [8] C. Chen, X. Liu, D. Koval, W. Xu and T. Tayasanant, "Critical impedance method-a new detecting harmonic sources method in distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 1, pp. 288-297, 2004.
- [9] S. F. de Paula Silva and J. C. de Oliveira, "The sharing of responsibility between the supplier and the consumer for harmonic voltage distortion: A case study," Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 11, pp. 1959-1964, 2008.
- [10] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef and H. Zayandehroodi, "An enhanced method for contribution assessment of utility and customer harmonic distortions in radial and weakly meshed distribution systems," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 43, no. 1, pp. 222-229, 2012.
- [11] H. Hua, X. Jia, D. Cao and C. Zhao, "Practical method to determine the harmonic contribution of a specific harmonic load," Harmonics and Quality of Power (ICHQP), IEEE 15th International Conference, pp. 769-773, 2012.
- [12] Z. Po. Du, J. Arrillaga, N. R. Watson and S. Chen, "Identification of harmonic sources of power systems using state estimation," IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 146, no. 1, pp. 7-12, 1999.
- [13] G. D'Antona, C. Muscas and S. Sulis, "State estimation for the localization of harmonic sources in electric distribution systems," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 5, pp. 1462-1470, 2009.
- [14] E. Gursay, and D. Niebur, "Harmonic load identification using complex independent component analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 1, pp. 285-292, 2009.
- [15] K. Pulimera and P. K. Rajan, "Independent component analysis for harmonic source estimation from piecewise constant parameter mixed measurements," In System Theory (SSST), IEEE 43rd Southeastern Symposium, pp. 81-86, 2011.
- [16] A. Kumar, B. Das and J. Sharma, "Determination of location of multiple harmonic sources in a power system," International journal of electrical power & energy systems, vol. 26, no. 1, pp. 73-78, 2004.
- [17] A. R. Abdullah, G. Z. Peng, S. A. Ghani and M. H. Jopri, "A new vector draft method for harmonic source detection at point of common coupling," Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), IEEE 8th International, pp. 110-114, 2014.
- [18] PowerFactory - DiGSILENT, "1 Harmonic Load Characteristic," Retrieved June 2018, <https://www.digsilent.de/en/faq-reader-powerfactory/how-do-i-model-a-load-containing-harmonic-components-based-on-its-spectrum/tags/load%2Charmonics.html>

۵- نتیجه‌گیری

آنچه که هم روابط و هم نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند این است که استفاده از روش «تصویر کردن بردارها»، برای تعیین سهم هارمونیکى، در شبکه به‌هم‌پیوسته، فقط می‌تواند مشخص کند که در حالت فعلی شبکه، هر منبع هارمونیک‌زا، می‌تواند چه مقدار ولتاژ هارمونیکى با مؤلفه هم‌راستا با ولتاژ هارمونیکى آن باس ایجاد کند. اما نمی‌تواند کاربردی برای تصمیم‌گیری انتخاب درست منبع هارمونیک‌زا و تعیین میزان کاهش تولید هارمونیک آن منبع، داشته‌باشد. این قضیه به‌طور مشابه در مورد تعیین سهم هارمونیکى جریان نیز برقرار می‌باشد. باتوجه‌به روابط ارائه‌شده و همین‌طور نتایج حاصل از شبیه‌سازی، ثابت شده است که اگر از روش «تصویر کردن بردارها» در شبکه‌های به‌هم‌پیوسته، استفاده شود، این احتمال خطا وجود دارد که منابعی که کاهش دامنه آن‌ها تأثیر منفی در کاهش دامنه هارمونیکى ولتاژ باس یا جریان خط دارند، به‌عنوان منابع دارای سهم مثبت معرفی شوند. به علاوه احتمال خطای این موضوع نیز وجود دارد که، میزان کمی سهم منابعی که، سهمی بیش‌تر از بقیه منابع، در کاهش دامنه هارمونیکى دارند، کمتر از بقیه معرفی شود. روش ارائه‌شده عیب‌های روش «تصویر کردن بردارها» در شبکه به‌هم‌پیوسته را برطرف کرده و روش جدیدی را با رویکردی کاربردی‌تر، ارائه کرده‌است.

مراجع

- [۱] علیرضا حسنى اصل، مهدى معلم، محمد کیوان‌فرد، «بهبود عملکرد فیلترهای هارمونیکى جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو برای کوره‌های قوس الکتریکی با آنالیز حساسیت و استفاده از نتایج عملی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحات ۷۵-۸۶، بهار ۱۳۹۵.
- [۲] محسن محمودی، علی عجمی، ابراهیم سیفی نجمی، «طراحی و کنترل ساختارهای جدید پایش‌گر یکپارچه کیفیت توان بین خطی بر اساس مبدل‌های چندپورته AC/AC»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحات ۲۳۷-۲۵۰، تابستان ۱۳۹۵.
- [3] K. M. Islam, and A.H. Samra, "Identification of harmonic sources in power distribution systems," Southeastcon'97. Engineering new New Century. IEEE Proceedings, pp. 301-303, 1997.

زیر نویس ها

- | | |
|--|---------------------------------------|
| ⁸ Total Harmonic Distortion | ¹ IEEE 6-bus network |
| ⁹ weakly meshed networks | ² Digsilent |
| ¹⁰ Harmonic State Estimation | ³ Matlab |
| ¹¹ Independent Component Analysis | ⁴ Point of Common Coupling |
| ¹² Weighted Least Squares Estimator | ⁵ Superposition Method |
| ¹³ Phase Spectrogram | ⁶ Nonconforming Current |
| ¹⁴ Frequency Spectrogram | ⁷ Conforming Current |