

# ارائه روش جدیدی مبتنی بر ماتریس ادمیتانس فرکانسی متقاطع به منظور تعیین سهم هارمونیکی مشترکین در اعوجاج هارمونیکی شبکه‌های به هم پیوسته

جواد مومن پور آکردی<sup>۱</sup> مهدی ترابیان اصفهانی<sup>۲</sup> بهروز وحیدی<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

[javad.momenpour@yahoo.com](mailto:javad.momenpour@yahoo.com)

۲- محقق پسا دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

شرکت برق منطقه‌ای اصفهان - اصفهان- ایران

[torabian\\_mehdi@yahoo.com](mailto:torabian_mehdi@yahoo.com)

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران- ایران

[vahidi@aut.ac.ir](mailto:vahidi@aut.ac.ir)

**چکیده:** امروزه به دلیل گسترش بارهای غیرخطی، اعوجاج هارمونیکی در شبکه‌های قدرت افزایش یافته است و منجر به کاهش کیفیت توان در آن‌ها شده است. با توجه به این که شرکت‌های برق مسئول تأمین کیفیت توان در نقاط تحویل انرژی الکتریکی به مشترکین هستند تعیین دقیق سهم هارمونیکی مشترکین اهمیت ویژه‌ای برای آن‌ها دارد. در این مقاله روش جدیدی مبتنی بر ماتریس ادمیتانس فرکانسی متقاطع برای تعیین سهم هر یک از مشترکین در اعوجاج هارمونیکی شبکه‌های به هم پیوسته، ارائه می‌شود. مبنای این روش، تفکیک رفتار خطی و غیرخطی بار و تأثیر آن بر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ و جریان در سراسر شبکه است. روش پیشنهادی در یک شبکه‌ی به هم پیوسته پنج‌باسه مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج آن صحت عمل کرد روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** سهم هارمونیکی، شبکه‌های به هم پیوسته، ماتریس ادمیتانس فرکانسی متقاطع، اعوجاج هارمونیکی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان حافظ - پلاک ۴۲۴ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر- دانشکده مهندسی برق

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدی ترابیان اصفهانی

اعوجاج هارمونیک یکی از معضلاتی است که امروزه به علت گسترش بارهای غیر خطی در شبکه‌ی قدرت، به وجود آمده است [۳-۱]. هارمونیک منجر به کاهش کیفیت توان در شبکه‌های برق شده است و مشکلات فراوانی در آن به وجود آورده است [۴,۵]. از جمله مشکلاتی که هارمونیک‌ها در سیستم‌های قدرت به وجود می‌آورند آسیب‌هایی نظیر کاهش کیفیت توان، افزایش تلفات توان، افزایش حرارت تجهیزات، پدیده‌ی رزونانس، تاثیرات منفی بر تجهیزات مخابراتی، افزایش احتمال عملکرد اشتباه سیستم‌های حفاظتی و کاهش قابلیت اطمینان سیستم هستند. اولین اقدامی که در مقابله با هارمونیک‌ها صورت می‌گیرد شناسایی منابع هارمونیک است. با شناسایی منابع هارمونیک، در قدم بعدی باید مشخص شود که هر یک از منابع هارمونیک به چه میزان در اعوجاج هارمونیک مقصر هستند و به عبارتی سهم هارمونیک هر یک از منابع هارمونیک چه مقدار است. با انجام این کار متولیان شرکت برق می‌توانند برنامه ریزی مناسبی برای جلوگیری از هارمونیک‌ها تدوین کنند. در سال‌های گذشته روش‌های مختلفی برای تعیین سهم هارمونیک بین شبکه و مشترک در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه<sup>۱</sup> ارائه شده است. یکی از اولین روش‌ها برای تشخیص مکان منبع هارمونیک در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه، روشی مبتنی بر جهت شارش توان حقیقی است. در این روش مکان منبع هارمونیک، سمتی است که توان اکتیو هارمونیک بزرگتری داشته باشد [۶]. چندی بعد ثابت شده است که روش مذکور نمی‌تواند لزوماً در همه‌ی شرایط پاسخ‌گو باشد؛ چرا که جهت شارش توان حقیقی وابسته به زاویه بین ولتاژهای سمت مشترک و شبکه است و به دامنه‌ی ولتاژهای آن‌ها وابسته نیست [۷]. روش دیگری که برای شناسایی منبع تولید هارمونیک در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه ارائه شده است مبتنی بر تصویر بردارهای ولتاژ و جریان است. در این روش ابتدا مدار معادل نورتن شبکه و مشترک از دید نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه تعیین می‌شود؛ سپس تصویر بردارهای جریان یا ولتاژ ناشی از هر منبع هارمونیک بر به ترتیب بردار جریان یا ولتاژ ناشی از حضور همزمان دو منبع هارمونیک، محاسبه می‌شود. بزرگی و جهت هر یک از بردارهای تصویر، نشان دهنده‌ی سهم هارمونیک هر منبع است [۸]. مراجع [۹] و [۱۰] به ترتیب روشی مبتنی بر مقایسه‌ی دامنه‌ی ولتاژ هارمونیک و روشی مبتنی بر امیدانس هارمونیک بحرانی را برای شناسایی منبع هارمونیک در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه ارائه کرده‌اند. در دو روش اخیر، نیاز به چندین تست کلیدزنی<sup>۲</sup> برای تشخیص امیدانس سیستم است. یکی از روش‌هایی که در سال ۲۰۰۸ برای محاسبه‌ی سهم مشترک و شبکه در اعوجاج هارمونیک شبکه‌های توزیع مطرح شده است، روشی مبتنی بر محاسبه‌ی اعوجاج هارمونیک کل<sup>۳</sup>، بوده است [۱۱]. لحاظ نشدن فاز منابع هارمونیک در این روش منجر به کاهش دقت آن شده است [۱۲]. مقالات [۶-۱۱] تعیین سهم هارمونیک را روی شبکه‌های

شعاعی انجام داده اند اما مقاله‌ی [۱۲] این کار را روی شبکه‌های به هم پیوسته‌ی ضعیف<sup>۴</sup> نیز انجام داده است. در این روش از مدار معادل نورتن برای مدل‌سازی هارمونیک مشترک استفاده می‌شود. در این مدار معادل، امیدانس مشترک توسط مدل مقاومت-سلف-خازن<sup>۵</sup> موازی بیان می‌شود. در مقاله‌ی [۱۳] روشی برای تعیین سهم هارمونیک یک بار خاص متصل به نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه، با در نظر گرفتن تغییرات هارمونیک پس زمینه، ارائه شده است. از جمله روش‌هایی است که تعیین سهم هارمونیک را در شبکه‌های انتقال انجام داده اند، روش‌هایی مبتنی بر تخمین حالت هارمونیک<sup>۶</sup> [۱۴,۱۵]، آنالیز مولفه‌ی ناوابسته<sup>۷</sup> [۱۶,۱۷] و تخمین حداقل مربعات وزن دار<sup>۸</sup> [۱۸] بوده اند. ایرادی که می‌توان به این روش‌ها گرفت، محاسبات سنگین و اندازه‌گیری‌های فراوان آن‌ها است [۱۲]. روش دیگری که برای شناسایی منبع هارمونیک در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است، روشی است که در آن از پیش‌نویس بردار<sup>۹</sup> استفاده شده است. در این روش با استفاده از اسپکتروگرام فاز<sup>۱۰</sup> و اسپکتروگرام فرکانس<sup>۱۱</sup>، اندازه‌گیری در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه انجام می‌گیرد تا منبع هارمونیک شناسایی شود [۱۹]. در سال ۲۰۱۵ روشی برای تخمین تأثیر هارمونیک جداگانه‌ی بارها با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی چندگانه<sup>۱۲</sup> ارائه شده است. در این روش بر خلاف روش‌های مبتنی بر تخمین حالت هارمونیک نیازی به مدل شبکه و اندازه‌گیری‌های فراوان نیست [۲۰]. روشی مبتنی بر رگرسیون خطی جزئی<sup>۱۳</sup> با هدف محاسبه‌ی سهم هارمونیک مشترکین یک باس در سال ۲۰۱۶ ارائه شده است. این روش قادر به محاسبه‌ی امیدانس هارمونیک مشترکین و محاسبه‌ی سهم هارمونیک آن‌ها در شرایط نوسان هارمونیک پس‌زمینه است [۲۱]. مقاله‌ی [۲۲] روشی مبتنی بر دسته‌بندی خوشه‌ای K-Means<sup>۱۴</sup> و حداقل جزء-مربعات بایسین<sup>۱۵</sup> برای تعیین سهم هارمونیک در شبکه‌های شعاعی ارائه کرده است. در این روش با استفاده از فیلتر کردن نوسانات غالب امیدانس هارمونیک تخمین زده می‌شود و نهایتاً با استفاده از روش حداقل جزء-مربعات بایسین تعیین سهم هارمونیک انجام می‌شود. در سال ۲۰۱۷ با استفاده از داده‌های فازوری هارمونیک روشی برای سنجیدن اثرات هارمونیک هر یک از مشترکین در شبکه‌های به هم پیوسته و شعاعی ارائه شده است. این روش مبتنی بر جداسازی نوسانات مستقل منابع هارمونیک است [۲۳]. روشی مبتنی بر توان ظاهری هارمونیک به منظور شناسایی منابع هارمونیک در سال ۲۰۱۸ ارائه شده است. این روش صرفاً قادر به شناسایی منبع اصلی هارمونیک در نقطه‌ی اتصال مشترک است و نمی‌تواند به صورت کمی مقدار آن را مشخص کند [۲۴].

واضح است که عمده‌ی تحقیقات حوزه‌ی تعیین سهم هارمونیک‌ها، با هدف تعیین سهم هارمونیک بین مشترک و شبکه در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه، انجام شده است؛ اما امروزه به علت مسائلی مانند افزایش قابلیت اطمینان، بسیاری از شبکه‌های انرژی

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ I_K \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1j} & \dots & y_{1K} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2j} & \dots & y_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{k1} & y_{k2} & \dots & y_{kj} & \dots & y_{kK} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{K1} & y_{K2} & \dots & y_{Kj} & \dots & y_{KK} \end{bmatrix}}_Y \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_j \\ \vdots \\ \Delta V_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ \vdots \\ I_{refk} \\ \vdots \\ I_{refK} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $Y$  ماتریس ادمیتانس فرکانسی متقاطع می‌باشد.  $\Delta V_j$  تفاضل ولتاژ هارمونیک  $Z$  ام ( $V_j$ ) از مقدار آن در نقطه‌ی کار ( $V_{jref}$ ) بوده و  $I_{refk}$  جریان هارمونیک  $k$  ام نقطه‌ی کار بار است (یعنی به صورت ماتریسی می‌توان نوشت:  $\Delta V = V - V_{ref}$ ).

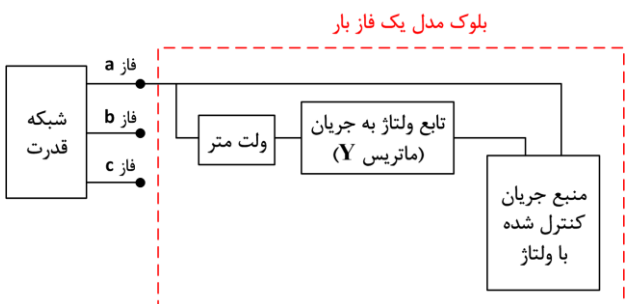
برای به‌دست آوردن درایه‌های ماتریس  $Y$ ، لازم است که در ابتدا، تعداد  $N$  نمونه (که  $N > K$ ) از ولتاژ و جریان بار حول نقطه‌ی کار را از دستگاه‌های اندازه‌گیری به‌دست آورده شود. با استفاده از روش حداقل مربعات خطا، درایه‌های سطر  $k$  ام ماتریس  $Y$  نهایتاً از رابطه‌ی (۲) به‌دست خواهد آمد.

$$Y_k = [Q'Q]^{-1} Q'W_k^T$$

$$\begin{cases} Y_k = [y_{k1} & y_{k2} & \dots & y_{kj} & \dots & y_{kK}] \\ Q = [q_{nj}]_{N \times K}; & q_{nj} = V_{nj} - V_{refj} \\ W_k = [w_{n1}]_{N \times 1}; & w_{n1} = I_{nk} - I_{refk} \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $Y_k$  ماتریس متشکل از درایه‌های سطر  $k$  ام ماتریس  $Y$  است.  $V_{nj}$  مولفه‌ی هارمونیک  $Z$  ام از ولتاژ نمونه‌ی  $n$  ام بار است.  $V_{refj}$  مولفه‌ی هارمونیک  $Z$  ام ولتاژ مرجع بار می‌باشد.  $I_{nk}$  مولفه‌ی  $k$  ام از جریان نمونه‌ی  $n$  ام بار است.  $I_{refk}$  مولفه‌ی  $k$  ام جریان مرجع بار می‌باشد. ماتریس  $Q'$  مزدوج مختلط و ترانهاده‌ی ماتریس  $Q$  است. همچنین منظور از نمادهای «-1» و «T» در این رابطه، به ترتیب معکوس ماتریس و ترانهاده‌ی ماتریس می‌باشند.

به‌دست آمدن ماتریس  $Y$  بار، به منزله‌ی مشخص شدن رابطه‌ی بین ولتاژ و جریان بار است؛ لذا می‌توان از بلوکی مشابه شکل (۱) برای مدل‌سازی یک بار هارمونیک استفاده کرد.



شکل (۱): بلوک دیاگرام مدل یک فاز از بار (فاز A)

در ابتدای این بخش اشاره شد که یک تغییر اساسی در روش بیان شده در مقاله‌ی [۲۵] داده خواهد شد که کاربرد آن را امکان‌پذیر

الکتریکی ساختار حلقوی یا به‌هم‌پیوسته به خود گرفته‌اند. لذا ضرورت دارد که مسأله‌ی تعیین سهم هارمونیک در این نوع شبکه‌ها که به واقعیت شبکه‌های امروزی نزدیک‌تر هستند، مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله روشی بر مبنای ماتریس ادمیتانس فرکانسی متقاطع<sup>۱۶</sup> برای تعیین سهم هارمونیک در شبکه‌های به‌هم‌پیوسته ارائه می‌شود. در این نوع شبکه‌ها بارهای هارمونیک در نقاط مختلف آن حضور دارند و هر کدام به میزان به‌خصوصی در هارمونیک شدن شبکه نقش دارند. با استفاده از روش مذکور اثر هارمونیک هر یک از مشترکین بر اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ و جریان شبکه تعیین می‌شود. یکی از مشکلات روش‌های گذشته این است که تعیین سهم هارمونیک در مرتبه هارمونیک به‌خصوصی انجام می‌شود؛ این موضوع سبب شده یک مشترک هارمونیک در مراتب هارمونیک مختلف سهم‌های هارمونیک مختلفی داشته باشد و در نتیجه مقصر اصلی هارمونیک در مجموع مجهول بماند. روش پیشنهادی با در نظر گرفتن همه‌ی مراتب هارمونیک این امکان را به وجود می‌آورد که نهایتاً مشخص شود رفتار غیرخطی هر یک از مشترکین چه میزان در اعوجاج هارمونیک شبکه نقش دارد.

## ۲- روش پیشنهادی

در این قسمت روش پیشنهادی برای حل مسأله‌ی تعیین سهم هارمونیک مشترکین هارمونیک در اعوجاج هارمونیک شبکه‌ی به‌هم‌پیوسته، مطرح می‌شود. با توجه به این‌که پیاده‌سازی روش پیشنهادی، مستلزم مدل‌سازی دقیق مشترکین هارمونیک است، لذا ابتدا در بخش ۲-۱ روش مدل‌سازی مشترکین هارمونیک ارائه می‌شود؛ سپس در بخش ۲-۲ روش پیشنهادی تعیین سهم هارمونیک در شبکه‌های به‌هم‌پیوسته، ارائه خواهد شد.

### ۲-۱- الگوریتم مدل‌سازی مشترکین (هارمونیک یا غیرهارمونیک)

در ادامه روشی ارائه می‌شود که با استفاده از آن بتوان هر یک از مشترکین (چه خطی و چه غیرخطی) را با دقت بالایی در نرم افزار متلب<sup>۱۷</sup> مدل کرد.

مقاله‌ی [۲۵] روشی برای مدل‌سازی بارهای هارمونیک با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان بار، در حالتی که بار به شبکه متصل است، ارائه می‌کند. روشی که برای مدل‌سازی مشترکین، مد نظر قرار گرفته است، مشابه آن است اما یک تغییر اساسی در آن داده شده است که باعث می‌شود کاربرد آن ساده‌تر شود و امکان پذیر باشد.

در این روش رابطه‌ی بین ولتاژ و جریان بار، توسط یک ماتریس، مشخص می‌شود. این ماتریس به ماتریس ادمیتانس فرکانسی متقاطع معروف است. ارتباط بین ولتاژ و جریان بار توسط این ماتریس، به صورت رابطه‌ی (۱) است.

سازد. اکنون این موضوع تشریح خواهد شد. در این روش پردازش به‌ازای هر سیکل از ولتاژ انجام می‌شود. یعنی هر سیکل از ولتاژ به عنوان یک نمونه محسوب می‌شود. مشکلی که وجود دارد این است که امکان این‌که از ولتاژ یک سیکل نمونه‌گیری شود و همزمان با آن جریان متناظر با این سیکل از شبکه کشیده شود وجود ندارد. زیرا سیکل ولتاژ باید تکمیل شود تا برنامه بتواند پردازش را انجام دهد و جریان متناظر با این سیکل را مشخص کند. به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت روش بیان‌شده در مقاله‌ی [۲۵] این قابلیت را دارد که اگر به عنوان مثال سیکل ولتاژ در بازه‌ی زمانی  $[t_1, t_1 + T]$  تکمیل شود، پردازش انجام می‌شود و مشخص می‌شود که جریان در بازه‌ی زمانی  $[t_1, t_1 + T]$  چگونه است؛ اما در حین این‌که ولتاژ سیکل خود را با شروع از لحظه‌ی  $t_1$  طی می‌کند تا در لحظه‌ی  $t_1 + T$  تکمیل شود، هیچ جریانی در بازه‌ی  $[t_1, t_1 + T]$  مشخص نمی‌شود. یعنی حتماً باید سیکل ولتاژ تکمیل شود تا مشخص شود که جریان در آن سیکل چه باید باشد.

برای رفع این مشکل، به جای این‌که رابطه‌ی بین ولتاژ و جریان (ماتریس  $Y$ ) در سیکل مشابه انجام شود، رابطه‌ی بین جریان یک سیکل و ولتاژ سیکل قبلیش تعیین می‌شود. یعنی ماتریس  $Y$  طوری مشخص می‌شود که جریان یک سیکل را به ولتاژ سیکل قبل آن، مرتبط سازد. به این ترتیب در بازه‌ی زمانی  $[t_1, t_1 + T]$  در حالی که ولتاژ این سیکل در حال تکمیل شدن است جریانی تولید می‌شود که از ولتاژ بازه‌ی تکمیل‌شده‌ی  $[t_1 - T, t_1]$  استفاده کرده است؛ و ولتاژ بازه‌ی زمانی  $[t_1, t_1 + T]$  پس از تکمیل شدن، استفاده می‌شود تا جریان سیکل بعدش یعنی بازه‌ی  $[t_1 + T, t_1 + 2T]$  را مشخص سازد. برای هر یک از سه فاز مشترک، مدل مختص به آن فاز به‌دست آورده می‌شود و نهایتاً به صورت یک بلوک سه فاز، آماده‌ی استفاده برای تعیین سهم هارمونیک خواهد بود. به طور خلاصه می‌توان مراحل مدل‌سازی هر فاز مشترک در نرم افزار متلب را به دو دسته تقسیم کرد:

(الف) مراحل به‌دست آوردن ماتریس  $Y$  هر فاز مشترک  
(ب) مراحل استفاده از ماتریس  $Y$  هر فاز مشترک.

(الف) مراحل به‌دست آوردن ماتریس  $Y$  هر فاز مشترک:

- (۱) اطلاعات ولتاژ و جریان آن فاز مشترک، در یک دوره، توسط شرکت برق در اختیار قرار می‌گیرد.
- (۲) تعداد ۳۰ سیکل از ولتاژ با شروع از  $t_1$  و تعداد ۳۰ سیکل از جریان با شروع از  $t_1 + T$  در نظر گرفته می‌شوند. (در این صورت چنانچه به ترتیب، یک به یک، متناظر شوند جریان هر سیکل به ولتاژ سیکل قبلیش مرتبط می‌گردد.)
- (۳) با در نظر گرفتن تعداد ۲۰ فرکانس (مولفه‌ی  $DC$  + مولفه‌ی اصلی + ۱۸ مولفه‌ی هارمونیک)، مقدار فازوری هر یک از مولفه‌ها، برای هر یک از سیکل‌های جریان و ولتاژ به‌دست آورده می‌شود.

به‌این‌ترتیب همگی مقادیر  $V_{nj}$  و  $I_{nk}$  رابطه‌ی (۲) به‌دست خواهد آمد.

(۴) مقادیر فازوری هر یک از مولفه‌های سیکل اول ولتاژ به عنوان مرجع ولتاژ در نظر گرفته می‌شوند. به طور مشابه مقادیر فازوری هر یک از مولفه‌های سیکل اول جریان به عنوان مرجع جریان در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین همگی مقادیر  $V_{ref}$  و  $I_{ref}$  به‌دست می‌آیند.

(۵) با استفاده از نتایج مراحل ۳ و ۴، می‌توان به سادگی با جایگذاری در رابطه‌ی (۲)، درایه‌های هر یک از سطرها‌ی ماتریس  $Y$  را به‌دست آورد. بنابراین در این مرحله نهایتاً ماتریس  $Y$  بار به‌دست می‌آید.

در هنگام اتصال بلوک مشترک به شبکه، برنامه طوری نوشته شده است که مراحل زیر به ترتیب انجام می‌گیرد.

(ب) مراحل استفاده از ماتریس  $Y$  هر فاز مشترک:

- (۶) چنانچه  $0 \leq t < T$  زمان جاری شبیه‌سازی است و  $T = \frac{1}{f}$  که در آن  $f$  فرکانس نامی شبکه است) باشد. جریان نمونه‌گیری شده‌ی سیکل اول (در مرحله‌ی ۴) به عنوان مقدار اولیه به شبیه‌سازی داده می‌شود. یعنی خروجی بلوک منبع جریان کنترل‌شده، جریان مذکور می‌باشد.
- (۷) هم‌زمان با این‌که منبع جریان کنترل‌شده، در بازه‌ی  $0 \leq t < T$  جریان مذکور در مرحله‌ی ۶ را از شبکه می‌کشد، ولتاژ بار در این بازه توسط ولت متر اندازه‌گیری و ذخیره می‌شود.
- (۸) به محض این‌که  $t = T$  شود، ولتاژ ذخیره‌شده در مرحله‌ی ۷، برای تعیین جریان سیکل دوم استفاده می‌شود. به‌این‌منظور، با در نظر گرفتن تعداد ۲۰ فرکانس (مولفه‌ی  $DC$  + مولفه‌ی اصلی + ۱۸ مولفه‌ی هارمونیک)، مقدار فازوری هر یک از مولفه‌ها، برای ولتاژ ذخیره‌شده در مرحله‌ی ۷، به‌دست آورده می‌شود و ماتریس  $V$  رابطه‌ی (۱) را تشکیل می‌دهند. با در نظر گرفتن ماتریس  $V_{ref}$  رابطه‌ی (۱) که از مرحله‌ی ۴ به‌دست آمده است، می‌توان نهایتاً ماتریس  $\Delta V$  رابطه‌ی (۱) را به صورت  $\Delta V = V - V_{ref}$  به‌دست آورد.
- (۹) با استفاده از ماتریس  $\Delta V$  مرحله‌ی ۸، ماتریس  $Y$  به‌دست آمده از مرحله‌ی ۵ و همچنین ماتریس  $I_{ref}$  به‌دست آمده از مرحله‌ی ۴، ماتریس  $I$  طبق رابطه‌ی (۱) به‌دست می‌آید.
- (۱۰) با استفاده از ماتریس  $I$  مرحله‌ی ۹ می‌توان جریان سیکل دوم را در حوزه‌ی زمان مشخص کرد. این جریان با استفاده از رابطه‌ی (۳) به‌دست می‌آید.

$$i(t) = \sum_{k=1}^K |I_k| \cos(2\pi(k-1)ft + \angle I_k) \quad (3)$$

۱۱) سیگنال جریان به دست آمده از مرحله ۹ به منبع جریان کنترل شده اعمال می شود تا در هر لحظه از بازه  $T \leq t < 2T$  مطابق با این سیگنال، از شبکه جریان بکشد.

۱۲) در بازه زمانی  $T \leq t < 2T$  همزمان با این که منبع جریان کنترل شده، جریان تعیین شده در مرحله ۱۰ را از شبکه می کشد، ولتاژ بار در این بازه توسط ولت متر اندازه گیری و ذخیره می شود؛ و آماده می شود تا به محض این که  $t = 2T$  شد، از آن برای تعیین جریان سیکل بعدی استفاده شود.

۱۳) روال مذکور آن قدر ادامه پیدا می کند تا شبیه سازی پایان یابد.

با استفاده از روش ذکر شده، می توان مدل دقیقی را برای هر مشترک چه هارمونیک و چه غیر هارمونیک، در محیط سیمولینک نرم افزار متلب، به صورت یک بلوک، ارائه کرد.

## ۲-۲- روش پیش نهادی برای تعیین سهم هارمونیک

### در شبکه های به هم پیوسته

در این قسمت روش پیش نهادی برای تعیین سهم هارمونیک مشترکین در اعوجاج هارمونیک شبکه به هم پیوسته، تشریح می شود. در یک شبکه به هم پیوسته، مشترکین هارمونیک می توانند در قسمت های مختلف آن حضور داشته باشند، بنابراین تأثیر هارمونیک که یک مشترک هارمونیک به خصوص، روی ولتاژ یک باس می گذارد، با تأثیر آن مشترک روی ولتاژ باس دیگر متفاوت است. این مسأله به طور مشابه در مورد جریان خطوط نیز برقرار است، به این معنی که تأثیر هارمونیک یک مشترک به خصوص، روی جریان یک خط، با تأثیر آن مشترک هارمونیک روی جریان خط دیگر متفاوت است. میزان تأثیری که یک مشترک هارمونیک روی ولتاژ یک باس مشخص یا جریان یک خط مشخص دارد، بستگی به توپولوژی شبکه و مقادیر پارامترها دارد. این موضوع سبب می شود که از دید ولتاژ یک باس به خصوص (یا جریان یک خط به خصوص)، یک مشترک هارمونیک به عنوان مقصر اصلی اعوجاج هارمونیک در آن شناخته شود؛ اما از دید ولتاژ یک باس دیگر (یا جریان یک خط دیگر)، این مشترک مقصر اصلی نباشد و مشترک هارمونیک دیگری به عنوان مقصر اصلی هارمونیک آن شناخته شود. به علاوه، مقصر هارمونیک با در نظر گرفتن مراتب هارمونیک مختلف، نیز می تواند متفاوت باشد؛ یعنی یک مشترک هارمونیک می تواند مقصر اصلی اعوجاج هارمونیک مرتبه ی به خصوصی از یک ولتاژ (یا جریان) مورد بررسی، شود؛ اما مقصر اصلی هارمونیک مرتبه ی دیگر از آن ولتاژ (یا جریان) نباشد. ذکر این نکته ضروری است که در حالتی که فرضاً یک مشترک هارمونیک به عنوان مقصر اصلی هارمونیک مرتبه ی  $h$  ام ولتاژ یک باس (یا جریان یک خط) شناخته شود، نصب فیلتر هارمونیک بدون بررسی تأثیرات جامع

آن، ممکن است حتی مشکلات هارمونیک را برای ولتاژ باس های دیگر یا جریان خط های دیگر افزایش دهد. علت این است که با توجه به توپولوژی شبکه و مقادیر پارامترها، برخی از هارمونیک ها یکدیگر را خنثی می کنند؛ بنابراین با نصب فیلتر هارمونیک، هارمونیک که منجر به خنثی کردن دیگری می شد حذف می شود و نمی تواند آن را خنثی کند؛ بنابراین ممکن است باعث افزایش دامنه ی هارمونیک ولتاژ باس های دیگر یا جریان خط های دیگر شود.

با توجه به موارد بیان شده، به نظر می رسد، این که تأثیرات هارمونیک یک مشترک هارمونیک به صورت جامع در کل شبکه به هم پیوسته، بررسی شود، راه کار منطقی تری برای مسأله ی مورد بحث است. لذا در ادامه روشی بیان می شود که تأثیر هارمونیک بودن یک مشترک را در همه ی مراتب هارمونیک ولتاژ همه ی باس ها و جریان همه ی خط ها، در نظر بگیرد. بدین منظور، برای یک شبکه با  $N$  باس و  $M$  خط شاخصی تحت عنوان  $\lambda$  مطابق رابطه ی (۴) معرفی می شود.

$$\lambda = \sum_{i=1}^N THD_i^V + \sum_{j=1}^M THD_j^I \quad (4)$$

که در آن  $THD_i^V$ ، اعوجاج هارمونیک کل برای ولتاژ باس  $i$ ، و  $THD_j^I$ ، اعوجاج هارمونیک کل برای جریان خط  $j$  است. پارامتر  $\lambda$  اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ همه ی باس ها و جریان همه ی خطوط را در نظر می گیرد. هر چه این پارامتر مقدار کم تری داشته باشد، شبکه شرایط بهتری دارد.

با توجه به این که در شبکه های برق مسأله ی شارش اعوجاج هارمونیک وجود دارد لذا حتی اگر یک مشترک کاملاً رفتار خطی هم داشته باشد در هر صورت وجود هارمونیک پس زمینه ی ولتاژ منجر به ایجاد جریان هارمونیک در بارهای خطی نیز می شود. لذا نمی توان لزوماً وجود هارمونیک در نقطه ی اتصال مشترک به شبکه را ناشی از مشترک دانست. به لحاظ مهندسی و از دید شرکت های برق، یک مشترک هارمونیک به میزانی که رفتار غیر خطی آن منجر به تزریق هارمونیک ها به شبکه شوند مقصر می باشند. لذا از دید آن ها، یک مشترک خطی حتی اگر هارمونیک پس زمینه ی شبکه منجر به ایجاد هارمونیک در آن شده باشد به هیچ عنوان مقصر نخواهد بود. ایده ی این مقاله برای تعیین میزان کمی مقصر بودن یک مشترک هارمونیک بر این پایه استوار است که هر یک از مشترکین هارمونیک به چه میزان از رفتار خطی فاصله دارند. یک مشترک غیر خطی در صورتی که خطی می بود، پارامترهای مدل مقاومت-سلف-خازن آن به گونه ای بود که امپدانس فرکانس مولفه ی اصلی مدل خطی آن (مدل مقاومت-سلف-خازن)، همان امپدانس فرکانس مولفه ی اصلی این مشترک غیر خطی باشد. به این ترتیب می توان برای هر مشترک غیر خطی تعیین کرد که اگر این مشترک غیر خطی، به صورت خطی می بود، پارامترهای مدل خطی متناظر آن، به چه نحو به دست می آیند. برای به دست آوردن میزان تأثیر کمی رفتار غیر خطی یک مشترک

هارمونیک‌های مشترک واقع در باس  $i$  ام، روی اعوجاج هارمونیک شبکه، می‌توان از رابطه‌ی (۵) استفاده کرد.

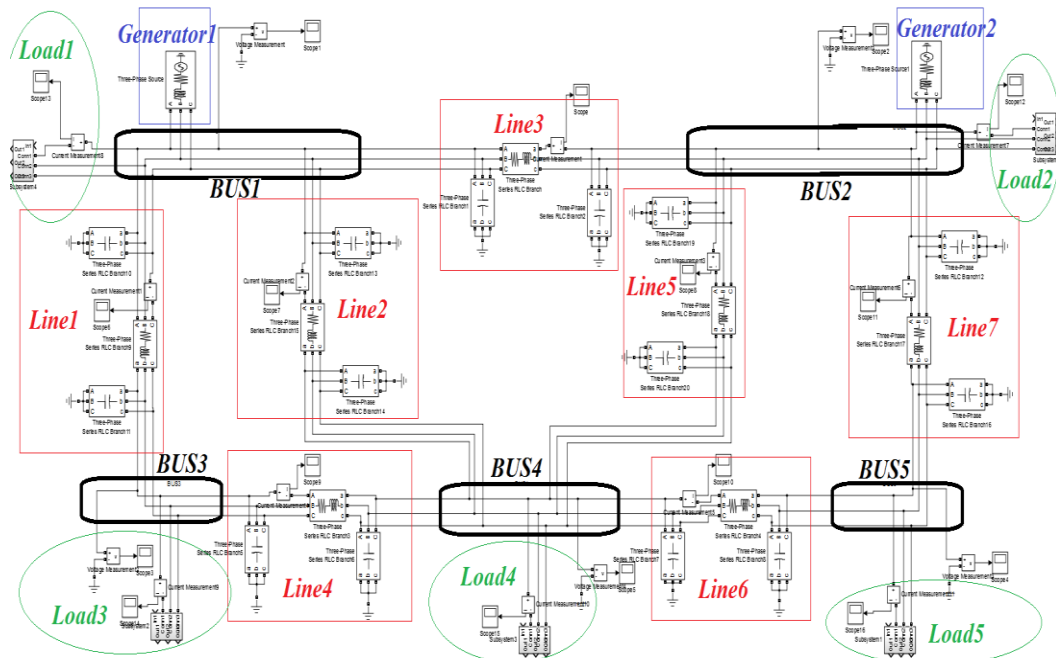
$$\Delta \lambda^i = \lambda_2 - \lambda_1^i \quad (5)$$

که در آن  $\lambda_1^i$  مقدار پارامتر  $\lambda$  از رابطه‌ی (۴) در حالتی است که همه‌ی مشترکین در حالت عادی خود باشند اما فقط مشترک متصل به باس  $i$  ام با بار خطی متناظرش جایگزین می‌شود.  $\lambda_2$  مقدار پارامتر  $\lambda$  از رابطه‌ی (۴) در حالتی است که هیچ کدام از مشترکین با بار خطی متناظرشان جایگزین نشوند و در حالت عادی خود باشند.  $\Delta \lambda^i$  که در واقع تفاضل پارامتر  $\lambda$  محاسبه‌شده در دو حالت مذکور می‌باشد، مشخص می‌کند که اگر مشترک هارمونیک  $i$  ام، از رفتار خطی به رفتار غیرخطی عادی خود برسد، چه میزان اعوجاج هارمونیک شبکه را افزایش می‌دهد. یعنی برای هر مشترک هارمونیک، مبنای سنجش میزان تأثیر هارمونیک مشترک، حالتی در نظر گرفته می‌شود که آن مشترک بهترین رفتار هارمونیک را از دید شرکت برق داشته باشد (یعنی رفتار خطی). در یک شبکه می‌توان تأثیر هارمونیک همه‌ی مشترکین را در اعوجاج هارمونیک شبکه، از طریق رابطه‌ی (۵) به دست آورد و سپس بر اساس مقادیر  $\Delta \lambda^i$ ، آن‌ها را به صورت صعودی مرتب کرد. مشترکی که بیش‌ترین مقدار  $\Delta \lambda^i$  را داشته باشد به عنوان بدترین و مشترکی که دارای کم‌ترین مقدار  $\Delta \lambda^i$  باشد به عنوان بهترین مشترک به لحاظ هارمونیک شناخته می‌شود. نکته‌ای که وجود دارد این است که ممکن است پارامتر  $\Delta \lambda^i$

برای برخی مشترکین، منفی به دست آید؛ این به این مفهوم است که رفتار غیرخطی این مشترکین منجر به کاهش سطح اعوجاج هارمونیک کل در شبکه می‌شوند. یعنی به عبارتی حضور این مشترکین غیرخطی، به نفع شبکه است. دلیل این موضوع این است که هارمونیک‌های تولیدی این دسته از مشترکین به گونه‌ای هستند که هارمونیک‌های مشترکین دیگر را خنثی می‌کنند. این که مشترکین این رفتار را داشته باشند به میزان زیادی وابسته به اختلاف فاز جریان‌های هارمونیک تولیدی آن‌ها با جریان‌های هارمونیک مشترکین دیگر است.

### ۳- شبیه‌سازی

در این قسمت با استفاده از روش پیش‌نهادی، سهم هارمونیک هر یک از مشترکین هارمونیک در اعوجاج هارمونیک یک شبکه‌ی ۵ باسه‌ی نوعی که در نرم افزار متلب مدل شده است، به دست آورده می‌شود. در این شبکه که در شکل (۲) نمایش داده شده است، مشترکین غیرخطی متصل به هر یک از باس‌ها، رکتیفایرهای (یکسوکننده‌هایی) در نظر گرفته شده است که در حال تغذیه‌ی بار خود در زاویه‌ی آتش مختص به خود هستند. شکل (۳) نشان‌دهنده‌ی باری است که توسط هر رکتیفایر تغذیه می‌شود. اطلاعات مربوط به شبکه و بارها به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آورده شده‌اند.



شکل (۲): شبکه‌ی ۵ باسه‌ی مورد مطالعه

جدول (۱): اطلاعات مربوط به پارامترهای شبکه

پارامتر	المان شبکه
$V_n = 132kV$ $f = 50Hz$ $S_{SC} = 1500MVA$ $\frac{X}{R} = 5$	ژنراتور ۱
$V_n = 132kV$ $f = 50Hz$ $S_{SC} = 1200MVA$ $\frac{X}{R} = 5$	ژنراتور ۲
$R = 0.674\Omega$ $L = 21.260mH$ $\frac{C}{2} = 0.110\mu F$	خط ۱
$R = 1.011\Omega$ $L = 31.890mH$ $\frac{C}{2} = 0.165\mu F$	خط ۲
$R = 0.843\Omega$ $L = 26.575mH$ $\frac{C}{2} = 0.138\mu F$	خط ۳
$R = 0.506\Omega$ $L = 15.945mH$ $\frac{C}{2} = 0.083\mu F$	خط ۴
$R = 1.078\Omega$ $L = 34.016mH$ $\frac{C}{2} = 0.176\mu F$	خط ۵
$R = 0.270\Omega$ $L = 8.504mH$ $\frac{C}{2} = 0.044\mu F$	خط ۶
$R = 1.348\Omega$ $L = 42.520mH$ $\frac{C}{2} = 0.220\mu F$	خط ۷

جدول (۲): اطلاعات مربوط مشترکین

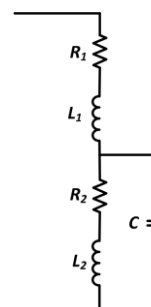
پارامترها	مشترکین
$R_1 = R_2 = 540\Omega$ $L_1 = L_2 = 20H$ $C = 350F$ $C_{Smoothing} = 50\mu F$ Firing angle = $34^\circ$	بار ۱
$R_1 = R_2 = 540\Omega$ $L_1 = L_2 = 20H$ $C = 400F$ $C_{Smoothing} = 50\mu F$ Firing angle = $85^\circ$	بار ۲
$R_1 = R_2 = 540\Omega$ $L_1 = L_2 = 20H$ $C = 120F$ $C_{Smoothing} = 50\mu F$ Firing angle = $45^\circ$	بار ۳
$R_1 = R_2 = 540\Omega$ $L_1 = L_2 = 20H$ $C = 410F$ $C_{Smoothing} = 50\mu F$ Firing angle = $14^\circ$	بار ۴
$R_1 = R_2 = 540\Omega$ $L_1 = L_2 = 20H$ $C = 0F$ $C_{Smoothing} = 50\mu F$ Firing angle = $48^\circ$	بار ۵

با استفاده از روش پیش‌نهادی، مقدار پارامتر  $\lambda_2$  از رابطه‌ی (۵)، برای شبکه‌ی مورد مطالعه برابر ۱۱/۱۳۸ برآورد شده است. مقادیر پارامترهای مدل خطی مقاومت-سلف-خازن سری متناظر با هر یک از مشترکین، که در واقع مقادیر  $R$ ،  $L$  و  $C$  امپدانس مولفه‌ی اصلی مشترک است، در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): اطلاعات مربوط به پارامترهای مدل خطی مقاومت-

## سلف-خازن سری متناظر با هر یک از مشترکین

پارامترهای مدل مقاومت-سلف-خازن	مشترکین
$R = 88.950\Omega$ $L = 0.169H$	بار ۱
$R = 79.712\Omega$ $L = 0.279H$	بار ۲
$R = 82.272\Omega$ $L = 0.194H$	بار ۳
$R = 91.580\Omega$ $L = 0.150H$	بار ۴
$R = 101.863\Omega$ $L = 0.257H$	بار ۵



شکل (۳): نمایش شکل بارهای متصل به یکسوکننده‌ها

چنانچه مدل خطی مقاومت-سلف-خازن سری متناظر با بار ۱ به جای بار ۱ قرار گیرد و بقیه‌ی مشترکین در حالت عادی خود (غیرخطی) باقی بمانند، مقدار پارامتر  $\lambda$  شبکه، که در واقع همان  $\lambda_1^1$  از (۵) است، برابر با ۹/۸۰۰ محاسبه می‌شود. اگر روالی مشابه برای هر یک از مشترکین طی شود، مقادیر  $\lambda_1^i$  مربوط به هر یک از مشترکین، به صورت جدول (۴) خواهد شد.

جدول (۴): مقادیر پارامترهای  $\lambda_1^i$  و  $\Delta\lambda^i$  هر یک از مشترکین

پارامتر مشترک	$\lambda_1^i$	$\Delta\lambda^i = \lambda_2 - \lambda_1^i$
بار ۱	9.800	$\Delta\lambda^1 = 11.138 - 9.800 = 1.338$
بار ۲	13.515	$\Delta\lambda^2 = 11.138 - 13.515 = -2.377$
بار ۳	5.551	$\Delta\lambda^3 = 11.138 - 5.551 = 5.587$
بار ۴	9.258	$\Delta\lambda^4 = 11.138 - 9.258 = 1.880$
بار ۵	6.601	$\Delta\lambda^5 = 11.138 - 6.601 = 4.537$

از بار خطی متناظرش به مشترک غیرخطی فعلی، منجر به آن میزان افزایش در اعوجاج هارمونیک شبکه شده باشد. روابطی ارائه شده است که با استفاده از آن‌ها تأثیرات هارمونیک هر یک از مشترکین، به صورت جامع در کل شبکه در نظر گرفته می‌شود. به علاوه با توجه به این که ممکن است تأثیرات هارمونیک مشترک بر شبکه در هر مرتبه‌ی هارمونیک متفاوت باشد، این مزیت را نیز دارند که همه‌ی مراتب هارمونیک را پوشش دهند. جهت بررسی روش پیش‌نهادی در شرایط واقعی، این روش روی یک شبکه‌ی ۵ باسه‌ی نوعی اعمال شده است و با استفاده از روش پیش‌نهادی سهم هارمونیک هر یک از مشترکین به دست آورده شده است.

## مراجع

- [1] Salles, D., Jiang, C., Xu, W., Freitas, W. and Mazin, H.E., "Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads—Part I: Methodology", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 4, pp. 1937-1946, 2012.
- [۲] حدادی امیر موسی، جلیلیان علیرضا، کاظمی احد، "تخمین بهینه هارمونیک‌ها با استفاده از الگوریتم IGHS"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال نهم، شماره دوم، صفحات ۴۹-۵۷، پاییز و زمستان ۱۳۹۱.
- [۳] معلم مهدی، فرخ پیام امیر، شیروانی حسین، کیوانفرد محمد، میرزائیان دهکردی بهزاد، "یک روش کارآمد برای تخمین حالت مؤلفه اصلی و هارمونیک در شبکه‌های توزیع شعاعی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هفتم، شماره اول، صفحات ۳۵-۵۲، بهار و تابستان ۱۳۸۹.
- [۴] همدانی گلشن محمد اسماعیل، رادمهر مسعود، "بررسی، تحلیل و مقایسه شاخص‌های جایگزین معرفی شده برای THD"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سوم، شماره دوم، صفحات ۳۲-۴۶، پاییز و زمستان ۱۳۸۵.
- [5] Santiago, I., López-Rodríguez, M.A., Gil-de-Castro, A., Moreno-Munoz, A. and Luna-Rodríguez, J.J., "Energy consumption of audiovisual devices in the residential sector: Economic impact of harmonic losses", Energy, Vol. 60, pp.292-301, 2013.
- [6] Islam, K.M. and Samra, A.H., "Identification of harmonic sources in power distribution systems", In Proceedings IEEE SOUTHEASTCON'97. 'Engineering the New Century', pp. 301-303, 1997.
- [7] Xu, W., Liu, X. and Liu, Y., "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.
- [8] Xu, W. and Liu, Y., "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.
- [9] Hamzah, N., Mohamed, A. and Hussain, A., "Harmonic source location at the point of common coupling based on voltage magnitude", In 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004, Vol. 100, pp. 220-223, 2004.

با استفاده از پارامتر  $\Delta\lambda^i$  مربوط به هر یک از مشترکین که مقادیر آن‌ها در جدول (۴) آمده است، می‌توان بیان کرد که به ترتیب بار ۳، بار ۵، بار ۴، بار ۱ و بار ۲ بیش‌ترین تأثیر را در اعوجاج هارمونیک شبکه دارا هستند. یعنی رفتار غیرخطی بار ۳ بیش‌ترین سهم را در هارمونیک شدن شبکه دارد. در نقطه‌ی مقابل آن بار ۲ است که با کم‌ترین میزان پارامتر  $\Delta\lambda^i$ ، کم‌ترین سهم را در اعوجاج هارمونیک شبکه دارا است. لازم به ذکر است که این مشترک نه تنها در اعوجاج هارمونیک شبکه مقصر نیست بلکه رفتار غیرخطی آن به نفع شبکه است؛ چرا که اگر به صورت خطی رفتار می‌کرد مقدار پارامتر  $\lambda$  شبکه ۱۳/۵۱۵ می‌شد که مقداری بیش‌تر از  $\lambda$  در حالت عادی شبکه (یعنی ۱۱/۱۳۸) است. بنابراین با استفاده از روش پیش‌نهادشده علاوه بر پیدا کردن مقصر اصلی اعوجاج هارمونیک در سراسر شبکه، میزان تأثیر هر یک از مشترکین در اعوجاج هارمونیک شبکه نیز به صورت کمی تعیین شده است.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی ارائه شده است که با استفاده از آن بتوان سهم هارمونیک هر یک از مشترکین را در اعوجاج هارمونیک یک شبکه‌ی به هم پیوسته به صورت کمی به دست آورد. این روش مبتنی بر این موضوع است که اگر یک مشترک غیرخطی، با بار خطی متناظرش جایگزین شود و رفتار مورد علاقه‌ی شرکت برق (یعنی رفتار خطی) را داشته باشد، میزان اعوجاج هارمونیک شبکه در این حالت ناشی از بقیه‌ی مشترکین است و این مشترک به هیچ عنوان در این میزان از اعوجاج هارمونیک نباید مقصر شناخته شود. یعنی مبنای روش پیش‌نهادی این است که یک مشترک هارمونیک، به میزانی در اعوجاج هارمونیک شبکه مقصر است که تبدیل شدن آن



Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 13, pp. 3220-3227, 2016.

- [23] Wang, Y., Xu, W., Yong, J. and Chen, K.L., "Estimating harmonic impact of individual loads using harmonic phasor data", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 27, No. 10, e2384, 2017.
- [24] Xu, L., Lin, R.X. and Xu, S.T., "Method of Harmonic Source Identification Based on Harmonic Apparent Power", In E3S Web of Conferences, Vol. 38, p. 01001, EDP Sciences, 2018.
- [25] Lamich, M., Balcells, J., Corbalán, M. and Griful, E., "Nonlinear loads model for harmonics flow prediction, using multivariate regression", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 6, pp. 4820-4827, 2017.

## زیر نویس ها

<sup>1</sup> Point of Common Coupling (PCC)

<sup>2</sup> Switching

<sup>3</sup> Total Harmonic Distortion (THD)

<sup>4</sup> Weakly meshed

<sup>5</sup> R-L-C

<sup>6</sup> Harmonic State Estimation (HSE)

<sup>7</sup> Independent Component Analysis (ICA)

<sup>8</sup> Weighted Least Squares Estimation (WLSE)

<sup>9</sup> Vector Draft

<sup>10</sup> Phase Spectrogram (PS)

<sup>11</sup> Frequency Spectrogram (FS)

<sup>12</sup> Multiple linear regression analysis

<sup>13</sup> Partial Linear Regression (PLR)

<sup>14</sup> Hierarchical K-Means Clustering(HKMC)

<sup>15</sup> Bayesian Partial Least Squares(BPLS)

<sup>16</sup> Crossed Frequency Admittance Matrix (CFAM)

<sup>17</sup> Matlab

- [10] Chen, C., Liu, X., Koval, D., Xu, W. and Tayjasanant, T., "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.
- [11] de Paula Silva, S.F. and de Oliveira, J.C., "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.
- [12] Farhoodnea, M., Mohamed, A., Shareef, H. and Zayandehroodi, H., "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.
- [13] Huichun, H., Xiufang, J. and Dongsheng, C., "Practical method to determine the harmonic contribution of a specific harmonic load", In 15th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power. Hong Kong: IEEE Power & Energy Society, pp. 769-773, 2012.
- [14] Du, Z.P., Arrillaga, J., Watson, N.R. and Chen, S., "Identification of harmonic sources of power systems using state estimation", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 1, pp. 7-12, 1999.
- [15] D'Antona, G., Muscas, C. and Sulis, S., "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.
- [16] Gursoy, E. and Niebur, D., "Harmonic load identification using complex independent component analysis", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 24, No. 1, pp. 285-292, 2008.
- [17] Pulimera, K. and Rajan, P.K., "Independent component analysis for harmonic source estimation from piecewise constant parameter mixed measurements", In 2011 IEEE 43rd Southeastern Symposium on System Theory, pp. 81-86, 2011.
- [18] Kumar, A., Das, B. and Sharma, J., "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.
- [19] Abdullah, A.R., Peng, G.Z., Ghani, S.A. and Jopri, M.H., "A new vector draft method for harmonic source detection at point of common coupling", In 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014), pp. 110-114, 2014.
- [20] Wang, Y., Mazin, H.E., Xu, W. and Huang, B., "Estimating harmonic impact of individual loads using multiple linear regression analysis", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 809-824, 2016.
- [21] Hua, H., Liu, Z. and Jia, X., "Partially linear model for harmonic contribution determination", IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 285-291, 2016.
- [22] Zang, T., He, Z., Fu, L., Wang, Y. and Qian, Q., "Adaptive method for harmonic contribution assessment based on hierarchical K-means clustering and Bayesian partial least squares regression", IET