

شناسایی مرتبه هارمونیک موثر بر افزایش تلفات شبکه‌های هارمونیک مبتنی بر توان لحظه‌ای نول و به‌کارگیری روش MP

نوربه ظهیرالدین^۱، علیرضا جلیلیان^۲ و سید محمد شهر تاش^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۳ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸	
واژگان کلیدی: تلفات سیم نول، تعادل در شبکه‌های فشارضعیف غیرهارمونیک و هارمونیک، توان لحظه‌ای، روش Matrix Pencil، بارهای هارمونیک موثر بر نامتعادلی.	<p>بارهای تک‌فاز با الگوی مصرفی متفاوت، عمده بارهای شبکه‌های توزیع فشارضعیف را تشکیل می‌دهند و با گسترش استفاده از ادوات الکترونیک_قدرت در تجهیزات الکتریکی بار مشترکین در اکثر شبکه‌های توزیع فشارضعیف علاوه بر عدم تعادل، دارای اعوجاجات هارمونیک هست. این عدم تعادل و اعوجاجات هارمونیک نه تنها به شبکه‌های بالادست منتقل شده و باعث بروز مشکل می‌شوند، بلکه در شبکه‌های فشارضعیف نیز موجب می‌شود تا مجموع جریان سه‌فاز صفر نگردد و با جاری شدن جریان برگشتی در هادی نول، تلفات این شبکه‌ها افزایش یابد. در این مقاله، در ابتدا، توان لحظه‌ای نول به عنوان معیاری جهت تشخیص تعادل یا عدم تعادل شبکه‌های فشارضعیف هارمونیک معرفی می‌شود، سپس با به‌کارگیری روش MP (Matrix Pencil Method)، فرکانس‌های موجود در شکل موج توان لحظه‌ای نول و مرتبه‌های هارمونیک بارهای هارمونیک مشخص شده تا بارهای موثر بر کاهش توان لحظه‌ای نول مشخص گردند و با جابه‌جایی و ایجاد آرایش مناسب این بارها در سه‌فاز شبکه، به کاهش نامتعادلی و تلفات شبکه بیانجامد.</p>

۱-مقدمه

یکی از علل افزایش تلفات و کاهش کیفیت توان در شبکه‌های توزیع، حضور بارهای هارمونیک از جمله رایانه‌ها، بالاست‌های روشنایی، درایورهای کنترل سرعت در هواسازها، یخچال‌ها و دیگر تجهیزات خانگی و اداری است [۱-۵]. به دلیل الگوی مصرفی متفاوت این بارها و تولید هارمونیک‌ها از جمله هارمونیک‌های مضرب سه، افزایش جریان در هادی نول چند برابر می‌شود و از آن جا که هادی نول این شبکه‌ها، دارای مقاومت قابل توجهی است، از این رو افزایش جریان برگشتی در هادی نول، موجب افزایش تلفات شبکه شده و کیفیت انرژی توزیع شده به مشترکین نیز کاهش می‌یابد [۶].

در [۷-۱۲]، مفاهیم تعادل و تقارن شبکه‌های هارمونیک در قالب یک تعریف گنجانده شده‌است. بر مبنای این تعریف، تفاوت میان سه وضعیت عدم ایجاد جریان برگشتی در هادی نول شبکه‌های غیرهارمونیک و هارمونیک، ایجاد جریان برگشتی در هادی نول در حضور بارهای دارای هارمونیک‌های مضرب سه و ایجاد جریان برگشتی در هادی نول ناشی از عدم تعادل بارهای هارمونیک در هر مرتبه قابل تشخیص نیست. بنابراین، در مقاله حاضر، از تعریف ارائه‌شده در [۱۸] که تعریفی مبتنی بر مفاهیم موجود در [۱۳-۱۷] است و با تفکیک دو مفهوم تعادل و تقارن نامتعادلی شبکه‌های غیرهارمونیک و هارمونیک با رویکرد کاهش تلفات ناشی از جریان هادی نول می‌باشد، استفاده

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shahrtash@iust.ac.ir

۱. دانشجو، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران،
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران،
۳. استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران.

موجود در شبکه است. ph مخفف فاز مربوطه است. توان لحظه‌ای نول شبکه‌های غیرهارمونیک و متعادل: به دلیل برابری دامنه ولتاژ و جریان سه‌فاز و همچنین اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه میان هر دو فاز، مجموع ولتاژ و جریان برابر صفر بوده و مقدار توان لحظه‌ای نول صفر می‌شود. توان لحظه‌ای نول شبکه غیرهارمونیک و نامتعادل: مجموع ولتاژ سه‌فاز و مجموع جریان سه‌فاز مخالف صفر بوده و توان لحظه‌ای نول مقدار غیر صفر دارد.

توان لحظه‌ای نول شبکه‌های هارمونیک و متعادل: با توجه به تعریف تعادل شبکه‌های هارمونیک که مطرح شد، مجموع ولتاژ سه‌فاز و مجموع جریان سه‌فاز در هارمونیک-های غیرمضرب سه برابر صفر شده و به دلیل صفر بودن دامنه ولتاژ و جریان در هارمونیک‌های مضرب سه، توان لحظه‌ای نول برابر با صفر می‌گردد.

توان لحظه‌ای نول شبکه هارمونیک و نامتعادل: در صورتی که شبکه هارمونیک نامتعادل باشد آنگاه توان لحظه‌ای نول مجموعه‌ای از چندین فرکانس خواهد بود که در ادامه نحوه محاسبه این فرکانس‌ها با استفاده از روش MP توضیح داده شده‌است. شایان ذکر است که تمامی فرکانس‌های محاسبه-شده مضرب صحیحی از فرکانس شبکه بوده، و در صفحه فرکانس به صورت مزدوج روی محور موهومی‌اند.

۳- روش Matrix Pencil

از روش MP برای تخمین قطب‌های یک سیگنال (بصورت مقادیر مختلط، بیانگر فرکانس‌های مولفه‌های سینوسی میراشونده یا نامیرای نمایی) استفاده می‌شود [۱۹ و ۲۰]. این روش در مقایسه با روش‌های مشابه از دقت بیشتری در شناسایی مولفه‌های فرکانسی سیگنال برخوردار است [۲۱]. این روش مبتنی بر تجزیه مقادیر تکین (Singular Value Decomposition, SVD) است و مرتبه انتخابی (تعداد قطب‌های مفروض برای سیگنال) نقش بسیار مهمی در شناسایی فرکانس‌های نوسانی ایفا می‌کنند. در روش‌های مبتنی بر تجزیه مقادیر تکین، امکان تفکیک مقادیر تکین مربوط به مقادیر ویژه سیگنال و مقادیر تکین مربوط به نویز میسر است [۱۹-۲۲]. به دلیل این قابلیت در روش MP، در این مقاله، برای شناسایی مولفه‌های فرکانسی سیگنال (مولفه‌های هارمونیک)، از روش MP استفاده شده‌است. سیگنال‌های خروجی سیستم قدرت متأثر از پاسخ طبیعی و یا پاسخ ورودی ضربه است که می‌توان آن را به صورت

گردیده‌است. طبق این تعریف، شبکه‌های فشارضعیف هارمونیک در صورتی متعادل‌اند که

- (۱) دامنه جریان سه‌فاز آن‌ها در مرتبه‌های هارمونیک غیرمضرب سه با هم برابر بوده؛ و
- (۲) اختلاف فاز ۱۲۰ درجه میان هر دو فاز آن نسبت به یکدیگر وجود داشته باشد؛ و همچنین
- (۳) دامنه جریان هارمونیک‌های مضرب سه آن برابر با صفر باشد.

در صورت عدم برقراری هر یک از این سه شرط، شبکه هارمونیک نامتعادل است.

تاکنون روش‌های متفاوتی برای شناسایی و تخمین فرکانس‌های گذرا و حالت دائم شبکه مطرح گردیده‌است. روش حداقل مربعات خطی و غیرخطی در [۱۱] و روش MP در [۱۸] از جمله روش‌های پیشنهادی برای تخمین فرکانس شبکه‌اند، که مطابق [۱۹-۲۲]، روش دوم در مقایسه با روش کلی حداقل مربعات، عملکرد بهتری را در داده‌های نویزی دارد. به همین دلیل در این مقاله، استفاده از روش MP برای شناسایی فرکانس‌های هارمونیک شبکه که از نوع فرکانس‌های حالت دائم‌اند، پیشنهاد شده است. ساختار این مقاله به شرح زیر است:

در بخش دوم، معیاری جهت تعیین تعادل و عدم تعادل شبکه‌های توزیع مبتنی بر مقدار توان لحظه‌ای نول پیشنهاد شده‌است. در بخش سوم تلاش شده‌است تا ابتدا توضیحی در خصوص روش MP ارائه گردد و سپس در بخش چهارم نحوه شناسایی فرکانس‌های موجود در توان لحظه‌ای و مرتبه‌های هارمونیک موثر بر آن پس از تعیین مرتبه‌های هارمونیک بارهای شبکه، با به‌کارگیری این روش و الگوریتم پیشنهادی توضیح داده شده‌است. در بخش پایانی، نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- محاسبه توان لحظه‌ای هادی نول شبکه‌های

فشارضعیف غیرهارمونیک و هارمونیک

توان لحظه‌ای هادی نول شبکه‌های فشارضعیف غیرهارمونیک و هارمونیک را می‌توان از حاصل ضرب مجموع سیگنال ولتاژ سه‌فاز در مجموع سیگنال جریان سه-فاز، مطابق رابطه (۱)، محاسبه نمود.

$$p_N(t) = \sum_{ph=1}^3 \sum_{h=1}^H v_{ph}(t) \times \sum_{ph=1}^3 \sum_{h=1}^H i_{ph}(t) \quad (1)$$

h، هر مرتبه هارمونیک و H تعداد کل هارمونیک‌های

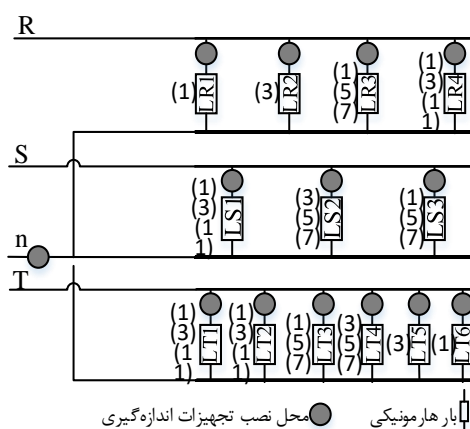
سیگنال و نویز با فیلتر کردن روی ماتریس داده‌ها از هم جدا می‌شوند و از داده‌های سیگنال برای تخمین مقادیر تکین استفاده می‌شود [۱۹ و ۲۰].

شایان ذکر است، مطابق نتایج به دست آمده، دقت این روش در تشخیص نامتعادلی برای محاسبه فرکانس‌های توان لحظه‌ای نول، بر حسب دامنه برابر با 10^{-9} و بر حسب زاویه 10^{-7} است.

در بخش چهارم، نحوه شناسایی بارهای هارمونیک مؤثر بر تلفات با تشریح نحوه شناسایی فرکانس‌های شکل موج توان لحظه‌ای نول با روش MP، اعمال این روش بر روی چند شکل موج نمونه و نحوه تعیین بارهای کانیدیا شرح داده شده است.

۴- روش شناسایی بارهای هارمونیک مؤثر بر نامتعادلی و تلفات شبکه

همانطور که اشاره شد، در صورتی که توان لحظه‌ای نول شبکه‌های هارمونیک مقدار متناوب و غیر صفر پیدا کند آن‌گاه شبکه نامتعادل بوده است و تلفات آن افزایش می‌یابد. در این صورت لازم است تا بارهای هارمونیک نامتعادل که منجر به بروز نامتعادلی و افزایش تلفات شده‌اند، شناسایی گردند. بنابراین، در این مقاله پیشنهاد می‌شود، که ابتدا فرکانس‌های موجود در شکل موج توان لحظه‌ای نول و مرتبه‌های هارمونیک بارهای شبکه با اعمال روش MP شناسایی شوند و سپس با تفکیک فرکانس‌های شناسایی شده در شکل موج توان لحظه‌ای نول، امکان تشخیص و جابه‌جایی بارهای هارمونیک مؤثر بر کاهش نامتعادلی و تلفات شبکه فراهم شود.



شکل ۱- شماتیکی از آرایش بارهای شبکه نامتعادل فشارضعیف

ترکیب خطی توابع نمایی از مقادیر ویژه، بر حسب مدهای موجود و همراه با نویز نوشت [۱۹] و [۲۰].

$$y(kT_s) = \sum_{i=1}^M R_i e^{(\alpha_i + j\omega_i)kT_s} + \mu, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

ها $ai + j\omega i$ ها یا همان z_i ها، مقادیر ویژه متمایز و R_i مانده‌های مقادیر ویژه‌اند، μ نیز نشان‌دهنده نویز سیگنال است. N تعداد نمونه‌ها در پنجره‌ای است که M سیگنال سینوسی در آن قرار دارند. k آمین نمونه زمانی از سیگنال مورد نظر است. با فرض صفر بودن مقدار نویز، ماتریس Y در ابعاد $(N-L) \times (L+1)$ برابر است با:

$$[Y] = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(L) \\ y(1) & y(2) & \dots & y(L+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M & M & 0 & M \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \dots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

که L در رابطه (۳)، همان پارامتر Pencil است. ماتریس‌های Y_1 و Y_2 به ترتیب با حذف ستون‌های آخر و اول از ماتریس Y به دست می‌آیند.

$$[Y_1] = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(L-1) \\ y(1) & y(2) & \dots & y(L) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M & M & 0 & M \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \dots & y(N-2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[Y_2] = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \dots & y(L) \\ y(2) & y(3) & \dots & y(L+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M & M & 0 & M \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \dots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

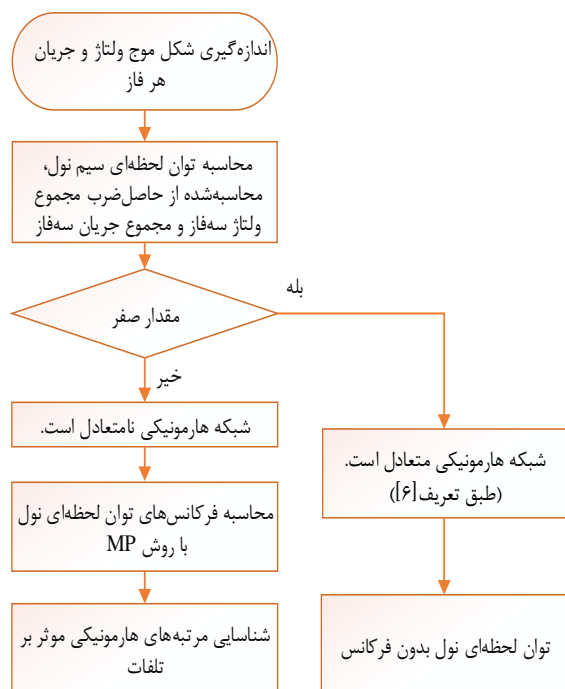
در حالیکه به علت مربعی نبودن ماتریس Y_1 ، به منظور محاسبه مقادیر ویژه از شبه معکوس آن استفاده می‌شود.

$$Y_1^+ = \{Y_1^H Y_1\}^{-1} Y_1^H \quad (6)$$

ماتریس Pencil $z_i I - Y_1^+ Y_2$ امیده می‌شود و با انتخاب پارامتر L به گونه‌ای که در شرط $M \leq L \leq N-M$ صدق کند، مقادیر ویژه تعمیم‌یافته جفت ماتریس Y_1 و Y_2 و همان مقادیر تکین به دست می‌آیند.

$$\det |z_i I - Y_1^+ Y_2| = 0 \quad (7)$$

می‌توان نشان داد که اگر $M \leq L \leq N-M$ باشد، هر کدام از $\{z_i: i=1, 2, \dots, M\}$ ها یک عدد کاهنده رتبه MP هستند. در حالتی که اگر $L < M$ و یا $L > N-M$ باشد، هیچ کدام از $\{z_i: i=1, 2, \dots, M\}$ ها عدد کاهنده رتبه MP نخواهند بود [۲۳]. در صورتی که داده‌ها $y(kT_s)$ حاوی نویز باشند، ابتدا



شکل ۲- روندنمای تشخیص وضعیت تعادل شبکه‌های

فشارضعیف مبتنی بر توان لحظه‌ای نول

با توجه به اینکه فرکانس‌های موجود در توان لحظه‌ای نول، ترکیبی از مرتبه‌های هارمونیک نامتعادل جریان و ولتاژ است، بنابراین با تجزیه فرکانس‌های ترکیبی توان لحظه‌ای نول و شناسایی فرکانس‌های موجود در هر یک از بارهای شبکه می‌توان بارهای هارمونیک موثر را جهت جابه‌جایی میان سه‌فاز شبکه و بهبود تعادل شبکه هارمونیک مشخص نمود.

روش پیشنهادی در این مقاله تجزیه براساس الگو و رابطه میان فرکانس‌های موجود و ترکیب آن‌ها است.

طبق اطلاعات دریافتی از کارشناسان شبکه‌های توزیع، مرتبه‌های هارمونیک ۳، ۵، ۷ و ۱۱، مرتبه‌های هارمونیک غیر از هارمونیک اصلی موجود در شبکه‌های توزیع کنونی است که منجر به افزایش تلفات شبکه می‌شوند.

بنابراین در این مقاله، الگوی شناسایی شده میان فرکانس‌های به دست‌آمده از توان لحظه‌ای نول و هارمونیک‌های موجود در شبکه و روند تشخیص بارهای موثر بر توان لحظه‌ای نول و تلفات که در جدول ۱ آورده شده است، مبتنی بر حضور این مرتبه‌های هارمونیک در شبکه است. در جدول ۱ تمامی ۳۲ دسته فرکانسی که از حضور این بارهای هارمونیک ایجاد می‌شوند، قابل ملاحظه هستند.

فرکانس‌های خروجی روش MP بر روی توان لحظه‌ای نول، مرتبط با مرتبه‌های هارمونیک بارهای شبکه است، به

همان‌طور که اشاره شد، به منظور شناسایی فرکانس‌ها و مرتبه‌های هارمونیک موجود در توان لحظه‌ای نول و توان لحظه‌ای بارها لازم است تا شکل موج توان لحظه‌ای در سمت هادی نول و بارهای شبکه مطابق شکل (۱) اندازه‌گیری شود تا پس از اعمال روش MP به نمونه‌های اندازه‌گیری شده از توان‌های لحظه‌ای، فرکانس‌های توان لحظه‌ای نول و مرتبه‌های هارمونیک بارها مشخص گردند.

پس از تعیین فرکانس‌های موجود در شکل موج توان لحظه‌ای نول شبکه و مرتبه‌های هارمونیک بارها، بارهای هارمونیک براساس مرتبه‌های هارمونیک موجود در آن‌ها و موثر بر ایجاد فرکانس‌های توان لحظه‌ای دسته‌بندی می‌شوند، تا با اعمال جابه‌جایی‌های مناسب بارها میان سه‌فاز میزان نامتعادلی و تلفات شبکه کاهش یابد.

در ادامه در بخش اول نحوه شناسایی فرکانس‌های موجود در شکل موج توان لحظه‌ای نول و در بخش دوم نحوه تعیین بارهای هارمونیک موثر بر مقدار توان لحظه‌ای نول (متناظر با ایجاد تلفات در سیم نول) از روی نتایج به دست آمده در بخش اول شرح داده شده است و سپس در بخش سوم پس از اعمال روش MP بر روی یک پنجره اطلاعاتی به مقدار یک سیکل (۲۰ میلی ثانیه) از شکل موج توان نول (که با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز به دست آمده است)، نحوه شناسایی بارهای کاندیدا برای جابه‌جایی بین سه‌فاز شبکه توضیح داده شده است.

۴-۱- شناسایی فرکانس‌های موجود در شکل موج

توان لحظه‌ای نول به کمک روش MP

در روندنمای شکل (۲)، پس از اندازه‌گیری و دریافت نمونه‌های توان لحظه‌ای نول، نحوه تشخیص تعادل و عدم تعادل شبکه‌های فشارضعیف هارمونیک و شناسایی فرکانس‌های هارمونیک که منجر به برهم‌زدن تعادل شبکه می‌شوند، مبتنی بر توان لحظه‌ای نول نشان داده شده است.

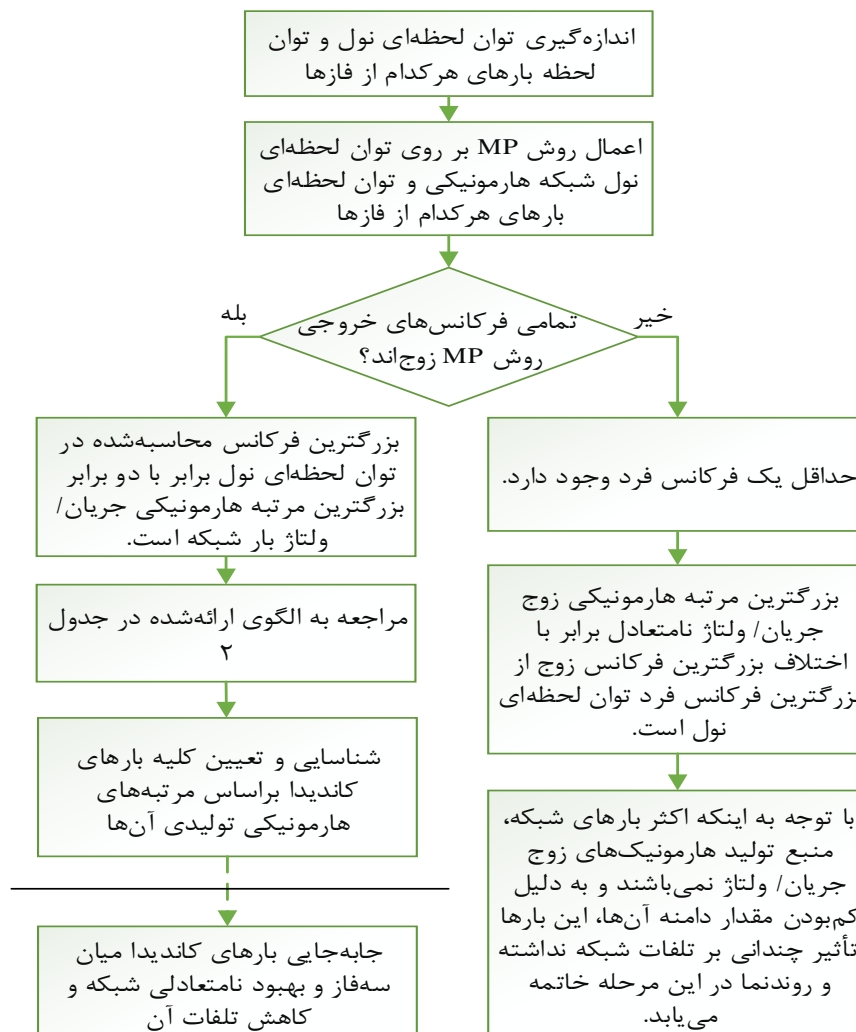
در ابتدا، توان لحظه‌ای نول شبکه از حاصل ضرب مجموع سیگنال‌های ولتاژی سه‌فاز در سیگنال‌های جریانی سه‌فاز محاسبه می‌شود. در صورتی که مقدار توان لحظه‌ای محاسبه‌شده، برابر با صفر باشد، شبکه هارمونیک متعادل است. اما در صورتی که، توان لحظه‌ای مخالف صفر بود، آن‌گاه شبکه هارمونیک نامتعادل بوده و با استفاده از روش MP می‌توان فرکانس‌های موجود در نول شبکه را شناسایی نمود.

هارمونیکی شناسایی شده است و در شکل (۴) روندنمای نحوه تصمیم‌گیری و تشخیص مرتبه‌های هارمونیکی بارها قابل مشاهده است، که پس از این تشخیص بارهای هارمونیکی نامتعادلی که موثر بر افزایش توان لحظه‌ای نول و تلفات شبکه هستند، مشخص شده و با تغییر آرایش و جابه‌جایی این بارها میان سه‌فاز شبکه، وضعیت عملکردی شبکه‌های نامتعادل هارمونیکی بهبود می‌یابد.

به طور خلاصه، روند تصمیم‌گیری بر مبنای توان لحظه‌ای نول و بارهای هارمونیکی شبکه به روش MP، همچنین شناسایی بارهای هارمونیکی موثر بر نامتعادلی و تلفات شبکه، در شکل (۳) قابل مشاهده است. موضوع اصلی این مقاله شناسایی نامتعادلی و بارهای موثر بر آن بوده است و بخش جابه‌جایی بارهای هارمونیکی موثر و بررسی تاثیرگذاری آن بر توان لحظه‌ای نول و تلفات شبکه در ادامه کار تحت بررسی قرار دارد.

عنوان مثال، همواره، بالاترین فرکانس توان لحظه‌ای نول برابر با دو برابر بالاترین فرکانس موجود در بارهای هارمونیکی شبکه است. همچنین، همان‌طور که اشاره شد تمامی فرکانس‌های هارمونیکی موجود در بارهای هارمونیکی شبکه توزیع کنونی فرد هستند و ترکیب آن‌ها فرکانس‌های زوج را تشکیل می‌دهد. به عبارت دیگر، در صورت مشاهده عدد فرد در فرکانس‌های شناسایی شده در توان لحظه‌ای نول، می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس‌های زوج نیز در شبکه وجود دارند.

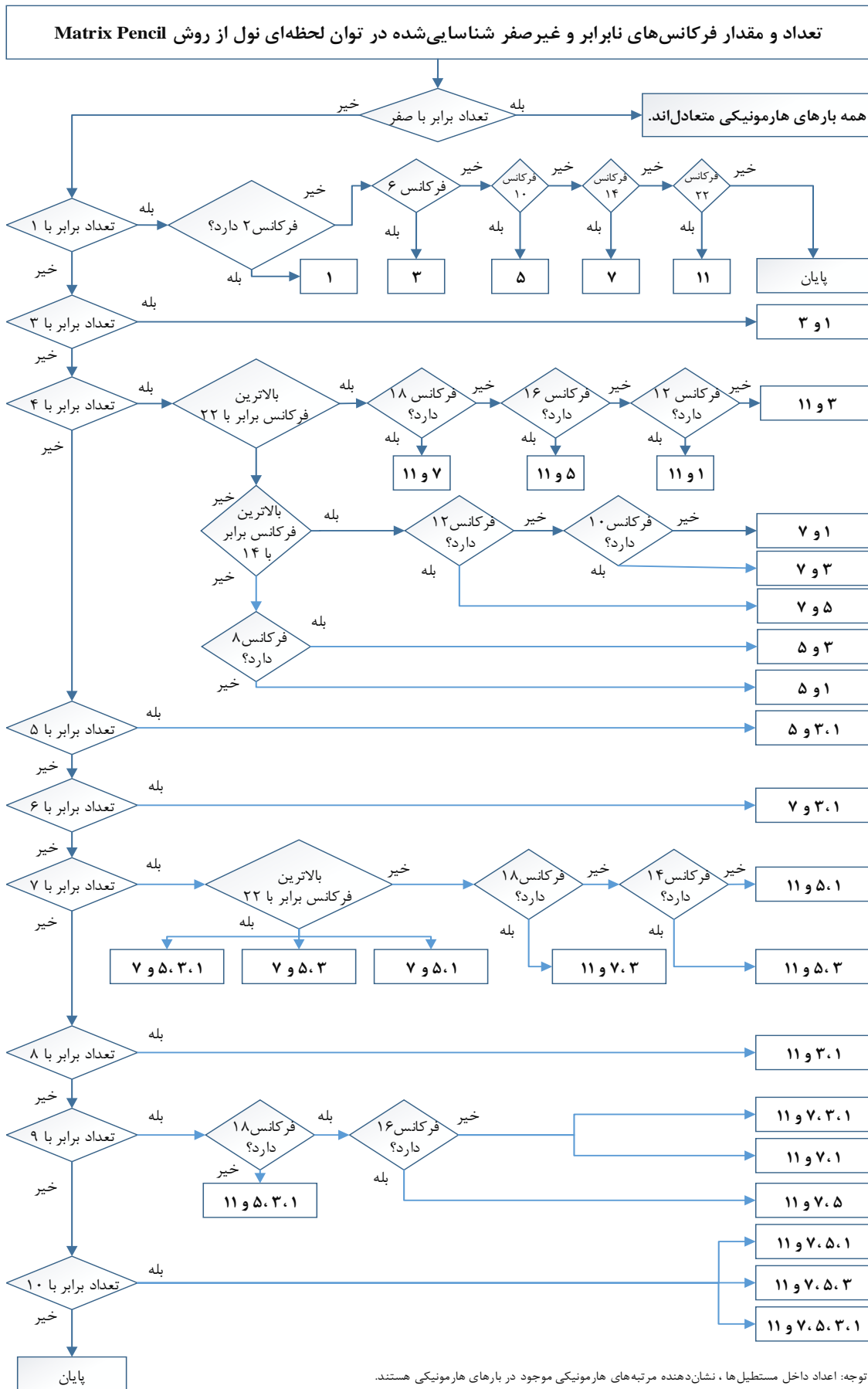
شایان ذکر است که در جدول ۱، سه ترکیب مشابه وجود دارد که در خصوص این ترکیب‌ها و نحوه تصمیم‌گیری پیرامون بارهای هارمونیکی دارای این مرتبه‌ها، در بخش (۳-۴) بحث شده است. در این مقاله، رابطه میان فرکانس‌های به دست آمده از به‌کارگیری روش MP بر روی توان لحظه‌ای نول و مرتبه‌های هارمونیکی موجود در بارهای



شکل ۳- روندنمای شناسایی بارهای کاندیدا برای جابه‌جایی بین سه‌فاز از توان لحظه‌ای نول شبکه و روش MP

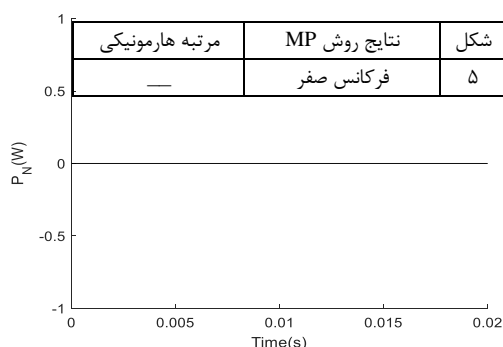
جدول ۱- الگوها در فرکانس‌های شناسایی شده با استفاده از روش MP بر روی توان لحظه‌ای نول

فرکانس‌های موجود در توان لحظه‌ای نول											شرایط	
۲۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۶	۴	۲	مرتبه هارمونیک نامتعادل	مرتبه هارمونیک متعادل
*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۱، ۷، ۵، ۳، ۱	-
*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۱، ۷، ۵، ۳	۱
*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۱، ۷، ۵، ۱	۳
*		*		*	*	*	*	*	*	*	۱۱، ۷، ۳، ۱	۵
*			*	*	*	*	*	*	*	*	۱۱، ۵، ۳، ۱	۷
				*	*	*	*	*	*	*	۷، ۵، ۳، ۱	۱۱
*		*	*	*	*	*		*	*	*	۱۱، ۷، ۵	۳ و ۱
*		*		*		*	*	*	*		۱۱، ۷، ۳	۵ و ۱
*			*	*		*	*	*		*	۱۱، ۵، ۳	۷ و ۱
				*	*	*	*	*	*	*	۷، ۵، ۳	۱۱ و ۱
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۱، ۷، ۱	۵ و ۳
*			*		*	*		*	*	*	۱۱، ۵، ۱	۷ و ۳
				*	*	*	*	*	*	*	۷، ۵، ۱	۱۱ و ۳
*				*	*	*	*	*	*	*	۱۱، ۳، ۱	۷ و ۵
				*		*	*	*	*	*	۷، ۳، ۱	۱۱ و ۵
						*	*	*	*	*	۵، ۳، ۱	۱۱ و ۷
*		*		*					*		۱۱، ۷	۵ و ۳، ۱
*			*			*			*		۱۱، ۵	۷ و ۳، ۱
				*	*	*				*	۷، ۵	۱۱ و ۳، ۱
*				*			*	*			۱۱، ۳	۷ و ۵، ۱
				*		*		*	*		۷، ۳	۱۱ و ۵، ۱
						*	*	*		*	۵، ۳	۱۱ و ۷، ۱
*					*	*				*	۱۱، ۱	۷ و ۵، ۳
				*			*	*		*	۷، ۱	۱۱ و ۵، ۳
						*		*	*	*	۵، ۱	۱۱ و ۷، ۳
								*	*	*	۳، ۱	۱۱ و ۷، ۵
*											۱۱	۷، ۵، ۳، ۱
				*							۷	۱۱، ۵، ۳، ۱
						*					۵	۱۱، ۷، ۳، ۱
								*			۳	۱۱، ۷، ۵، ۱
									*		۱	۱۱، ۷، ۵، ۳
											-	۱۱، ۷، ۵، ۳، ۱

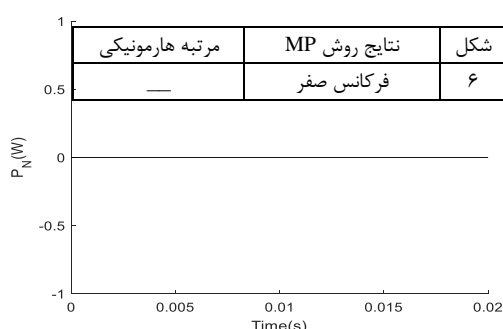


شکل ۴- روندنمای نحوه شناسایی بارهای هارمونیک کاندیدا مطابق با الگوی جدول ۱

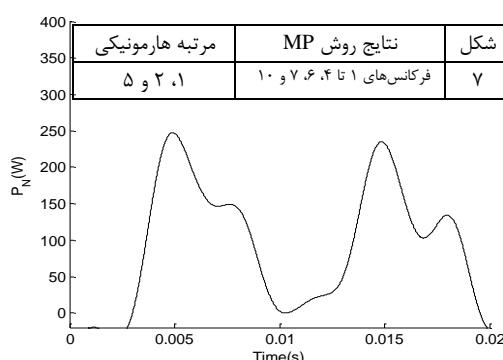
اختلاف دامنه بارهای هارمونیک مرتبه‌های ۵ و ۷ و ۱ و ۱۱ در سه فاز شبکه است. شایان ذکر است که فرکانس‌های قابل مشاهده در جدول نتایج شکل‌های (۱۰) و (۱۱) که با اعمال روش MP بر روی توان لحظه‌ای نول شبکه در این دو حالت محاسبه شده است، با هم برابر بوده که این برابری مطابق با الگوی ارائه شده در جدول ۱ بوده و به دلیل حضور بارهای هارمونیک دارای هارمونیک‌های این دو دسته است. همچنین در جدول نتایج شکل (۱۲)، فرکانس‌های منحصر به فرد توان لحظه‌ای نول در جدول ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۵- شبکه هارمونیک متعادل و نتیجه اجرای الگوریتم پیشنهادی



شکل ۶- شبکه غیرهارمونیک متعادل و نتیجه اجرای الگوریتم پیشنهادی



شکل ۷- شبکه هارمونیک نامتعادل (۱، ۲ و ۵ نامتعادل) و نتیجه اجرای الگوریتم پیشنهادی

۴-۲- اعمال روش MP بر روی شکل موج‌های نمونه

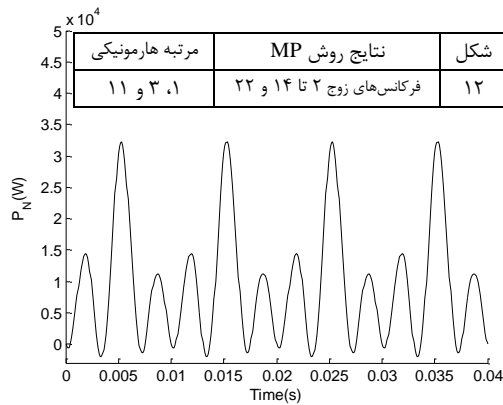
به منظور بررسی روش پیشنهادی، ابتدا سه سناریوی تئوریک و دو سناریو با کاربرد عملی در محیط نرم‌افزار متلب بررسی و پیاده‌سازی شده‌است، که این سناریوها به ترتیب به دسته‌بندی‌های زیر تقسیم شده‌اند.

- شبکه غیرهارمونیک متعادل
- شبکه هارمونیک متعادل
- شبکه هارمونیک دارای هارمونیک زوج نامتعادل
- شبکه غیرهارمونیک نامتعادل
- شبکه هارمونیک نامتعادل

شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب نمونه‌هایی از وضعیت توان لحظه‌ای نول شبکه در سه سناریوی تئوریک اول است. همانطور که در دو شکل (۵) و (۶) مشاهده می‌شود، در شبکه‌های غیر هارمونیک و هارمونیک متعادل توان لحظه‌ای نول برابر با صفر بوده و با اعمال روش MP به آن، فرکانس غیر صفری حاصل نمی‌گردد. همچنین، در شکل (۷) در صورتی که به فرض در شبکه هارمونیک، مرتبه هارمونیک زوج به عنوان مثال هارمونیک مرتبه دو نیز وجود داشته باشد، فرکانس‌های فرد از قبیل ۱، ۳ و غیره نیز ممکن است در توان لحظه‌ای نول و ترکیبات هارمونیک-ها ایجاد شود.

شکل‌های (۷) تا (۱۲) به ترتیب نمونه‌هایی از وضعیت توان لحظه‌ای نول شبکه در دو سناریوی با کاربرد عملی است. در شکل (۸)، توان لحظه‌ای نول در شبکه غیرهارمونیک نامتعادل نشان داده شده است. همانطور که در جدول نتیجه این شکل مشاهده می‌شود پس از اعمال روش MP فرکانس دو به دست می‌آید که بیان‌گر عدم تعادل شبکه در مرتبه اصلی است. همچنین، در شکل‌های شماره (۹) تا (۱۲) چهار حالت مختلف برای شبکه‌های هارمونیک نامتعادل بررسی شده‌است. در حالت اول فرض بر وجود هارمونیک مرتبه ۳ است و عدم تعادل شبکه هارمونیک ناشی از حضور هارمونیک مرتبه ۳ متقارن می‌باشد. همان‌طور که در جدول نتیجه شکل (۹) ملاحظه می‌شود، فرکانس خروجی روش MP، برابر با ۶ (دو برابر هارمونیک ۳) است-

در حالت دوم فرض بر وجود سه مرتبه هارمونیک نامتعادل است که عدم تعادل در این حالت، ناشی از اختلاف دامنه میان بارهای سه‌فاز شبکه در مرتبه‌های هارمونیک ۱، ۵ و ۷ نامتعادل است. در حالت سوم و چهارم، نامتعادلی شبکه هارمونیک ناشی از وجود هارمونیک مرتبه ۳ متقارن و



شکل ۱۲- شبکه هارمونیک نامتعادل (۱، ۳ و ۱۱ نامتعادل) و نتیجه اجرای الگوریتم پیشنهادی

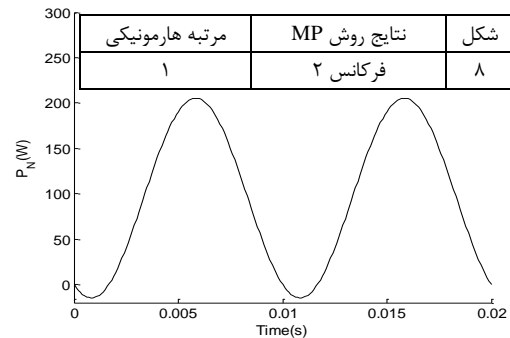
۴-۳- تعیین بارهای کانیدیدا برای کاهش نامتعادلی شبکه هارمونیک

مطابق توضیحات ارائه شده در دو بخش قبل، مرتبه‌های هارمونیک بارهای هر فاز مشخص بوده و پس از محاسبه فرکانس‌های موجود در شکل موج توان لحظه‌ای نول و شناسایی مرتبه‌های هارمونیک نامتعادل بارهای شبکه، لازم است تا بارهای هارمونیک کانیدیدا به منظور جابه‌جایی میان سه‌فاز شبکه‌های هارمونیک با هدف کاهش نامتعادلی و تلفات شبکه تعیین گردند.

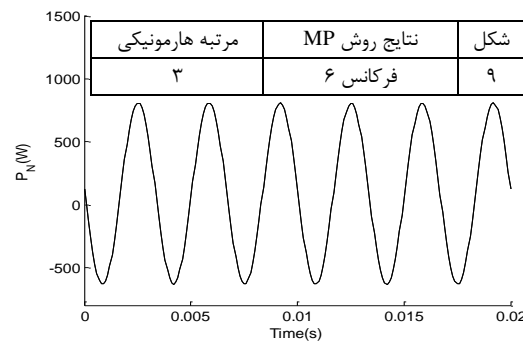
با توجه به مشاهدات صورت گرفته، در صورتی که نامتعادلی شبکه ناشی از حضور بارهای دارای مرتبه هارمونیک سه متقارن باشد، جابه‌جایی این بارها میان سه‌فاز شبکه، بهبودی در وضع تعادل و تلفات شبکه نداشته و این کار بی‌فایده است.

همچنین، مطابق جدول ۱، اکثر ۳۲ ترکیب موجود منحصر به فرد بوده و سه ترکیب متفاوت از بارهای هارمونیک (فرکانس‌های حاصل از متعادل بودن (۱ یا ۳ یا هیچکدام)، (۱۱ یا (۱ و ۱۱) یا (۳ و ۱۱)) و (۵ یا (۳ و ۵)) در حالی که بقیه نامتعادل اند) دارای فرکانس‌های مشابه در توان لحظه‌ای نول هستند. بنابراین، در صورتی که فرکانس‌های شکل موج توان لحظه‌ای نول هر یک از این سه ترکیب را ایجاد نماید، جابه‌جایی بارهای هارمونیک دارای مرتبه‌های هارمونیک مشابه در هر دسته، می‌تواند موثر بر کاهش نامتعادلی و تلفات شبکه هارمونیک باشد.

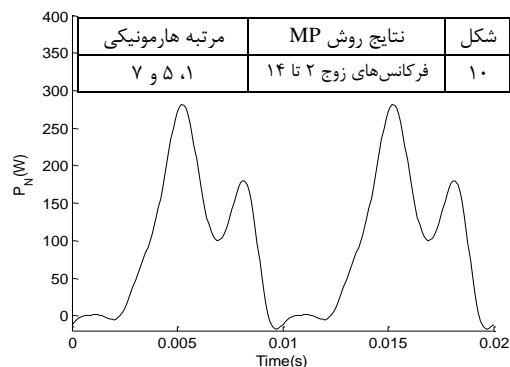
در نتیجه مطابق توضیحات ارائه شده در این بخش، پس از شناسایی فرکانس‌های موجود در شکل موج توان لحظه‌ای نول و مرتبه‌های هارمونیک بارهای هارمونیک، به طور کلی، قوانین جابه‌جایی بارهای هارمونیک به منظور کاهش



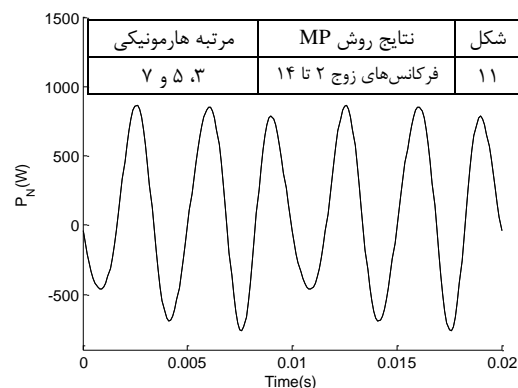
شکل ۸- شبکه غیرهارمونیک نامتعادل و نتیجه اجرای الگوریتم پیشنهادی



شکل ۹- شبکه هارمونیک نامتعادل (۳ متقارن) و نتیجه اجرای الگوریتم پیشنهادی



شکل ۱۰- شبکه هارمونیک نامتعادل (۱ و ۵ و ۷ نامتعادل) و نتیجه اجرای الگوریتم پیشنهادی



شکل ۱۱- شبکه هارمونیک نامتعادل (۳، ۵ و ۷ نامتعادل) و نتیجه اجرای الگوریتم پیشنهادی

اینکه فرکانس‌های محاسبه‌شده در این حالت، دارای حالت مشابه در جدول ۱ است، بنابراین طبق قانون سوم، بارهای LR3 در فاز R، LS2 و LS3 در فاز S و LT3 و LT4 در فاز T شکل (۱)، به عنوان بارهای کاندیدای جابه‌جایی برای مرحله بهینه‌سازی به منظور کاهش نامتعادلی و تلفات شبکه انتخاب می‌شوند. در این صورت نیازی به در نظر گرفتن مابقی بارهای شبکه در مرحله بهینه‌سازی نیست. شایان ذکر است که در صورتی که شکل موج اندازه‌گیری شده توان لحظه‌ای نول مشابه شکل (۱۱) نیز گردد، بارهای کاندیدا مشابه حالت قبل خواهد بود.

بنابراین، پس از تعیین فرکانس‌های موجود در شکل موج توان لحظه‌ای نول و مرتبه‌های هارمونیک موثر بر آن و تعیین مرتبه‌های هارمونیک بارهای هارمونیک شبکه، بارهای موثر شبکه مشخص شده و در دسته بارهای کاندیدا به منظور کاهش نامتعادلی و تلفات شبکه قرار می‌گیرند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به عدم تعادل و هارمونیک بودن شبکه‌های توزیع کنونی، که ناشی از حضور بارهای هارمونیک تک‌فاز با الگوی مصرفی متفاوت است، تلفات ناشی از جریان نول این شبکه‌ها افزایش یافته‌است. بنابراین، تشخیص عدم تعادل و شناسایی فرکانس‌ها و مرتبه‌های هارمونیک که منجر به افزایش تلفات می‌گردد، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در این مقاله، در ابتدا با استفاده از توان لحظه‌ای نول امکان تشخیص تعادل و عدم تعادل شبکه‌های فشارضعیف غیرهارمونیک و هارمونیک محقق شد. سپس، با شناسایی فرکانس‌های موجود در شکل موج توان لحظه‌ای نول و مرتبه‌های هارمونیک بارهای هر فاز به کمک روش MP بارهای هارمونیک که منجر به ایجاد نامتعادلی شده‌اند به عنوان بارهای کاندیدا تعیین شده تا با جابه‌جایی آن‌ها در شبکه‌های فشارضعیف تعادل و تلفات آن بهبود یابد. همان‌طور که اشاره شد، بحث اصلی در این مقاله نحوه شناسایی نامتعادلی شبکه و بارهای موثر بر آن بوده‌است و نتایج مربوط به جابه‌جایی بارهای هارمونیک موثر و بررسی تاثیرگذاری آن‌ها بر توان لحظه‌ای نول و تلفات شبکه در ادامه کار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فهرست علائم اختصاری

مرتبه هارمونیک	h
تعداد کل هارمونیک‌ها	H
هر فاز شبکه	ph

نامتعادلی شبکه و کمینه‌نمودن توان لحظه‌ای نول و تلفات را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

قانون اول: در صورتی که فرکانسی در شکل موج توان لحظه‌ای نول یافت نشود، تعادل شبکه برقرار بوده و نیازی به جابه‌جایی بارهای هارمونیک شبکه وجود ندارد.

قانون دوم: در صورتی که فرکانس‌های موجود در شکل موج توان لحظه‌ای نول، تنها ناشی از حضور بارهای هارمونیک مرتبه سه متقارن باشد، به دلیل اینکه جابه‌جایی این بارها تاثیری در میزان توان لحظه‌ای نول و نامتعادلی شبکه ندارد، نیازی به جابه‌جایی این بارهای هارمونیک نیست.

قانون سوم: در صورتی که فرکانس‌های شناسایی شده در شکل موج توان لحظه‌ای نول مطابق ترکیب‌های مستقل و غیر مشابه جدول ۱ باشد، جابه‌جایی هر یک از بارهای هارمونیک شبکه که دارای مرتبه‌های هارمونیک نامتعادل است می‌تواند موثر بر توان لحظه‌ای نول و تلفات شبکه باشد، بنابراین این بارهای به عنوان بارهای کاندیدا برای جابه‌جایی میان سه‌فاز شبکه تعیین می‌گردند.

قانون چهارم: در صورتی که فرکانس‌های شناسایی شده در شکل موج توان لحظه‌ای نول مطابق محدود ترکیب‌های غیر مستقل و مشابه جدول ۱ باشد، آن‌گاه کلیه بارهایی که دارای مرتبه‌های هارمونیک ترکیب‌های مشابه هستند به عنوان بارهای کاندیدا برای جابه‌جایی میان سه‌فاز و کاهش نامتعادلی شبکه تعیین می‌گردند. به عبارت دیگر، بارهای کاندیدا، اجتماعی از بارهای هارمونیک دارای فرکانس‌های ترکیبی مشابه در توان لحظه‌ای نول هستند.

اگر آرایش بارهای شبکه هارمونیک مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شود،

مثال اول: آنگاه در صورتی که شکل موج اندازه‌گیری شده توان لحظه‌ای نول مطابق شکل (۹) به دست آمده باشد، مطابق قانون دوم نامتعادلی تنها ناشی از حضور مرتبه هارمونیک مرتبه سه متقارن بوده و جابه‌جایی بارها تفاوتی ایجاد نمی‌کند و نیاز به جابه‌جایی بارهای هارمونیک نیست. مثال دوم: اگر شکل موج حاصل از اندازه‌گیری توان لحظه‌ای نول مطابق شکل (۱۲) گردد، آنگاه مطابق قانون چهارم، بارهای LR4 فاز R، LS1 فاز T و LT1 و LT2 فاز T به عنوان بارهای کاندیدای شبکه برای جابه‌جایی انتخاب می‌گردند.

مثال سوم: اما، در صورتی که شکل موج حاصل از اندازه‌گیری توان لحظه‌ای نول مطابق شکل (۱۰) گردد، به دلیل

زمان (ثانیه)	t
توان لحظه‌ای هادی نول (وات)	$p_N(t)$
ولتاژ لحظه‌ای هرفاز (ولت)	$v_{ph_n}(t)$
جریان لحظه‌ای هرفاز (آمپر)	$i_{ph_n}(t)$
ضریب میرایی	α_i
فرکانس زاویه‌ای	ω_i
مقادیر ویژه متمایز	z_i
مانده‌های مقادیر ویژه	R_i
نویز سیگنال	μ
تعداد نمونه‌ها	N
تعداد سیگنال سینوسی	M
گام زمانی	T_s
k آمین نمونه زمانی از سیگنال	$y(kT_s)$
ماتریس نمونه‌ها	$[Y]$
ماتریس Y بدون ستون آخر	$[Y_1]$
ماتریس Y بدون ستون اول	$[Y_2]$
پارامتر Pencil	L

مراجع

- [1] Z. Moravej, A. A. Abdoos, and M. Pazoki, "An intelligent method for detection and classification of power quality events", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 9, No. 27, Winter 2012, pp. 23-37.
- [2] Z. Moravej, and J. Azarakhsh, "Simulation and Classification of Power Quality Disturbances Using Neural Network", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 13, No. 41, summer 2015, pp. 137-146.
- [3] S. Pande, and J. G. Ghodekar, "Reduction of Power Loss of Distribution System by Distribution Network Management", *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, Vol. 3, No. 11, November 2012, pp. 21-24.
- [۴] محمدرضا والیزاده و بابک عبدی، "هارمونیک‌ها در سیستم‌های قدرت، علل ایجاد، اثرات و چگونگی کنترل آن"، کنفرانس بین‌المللی مهندسی کامپیوتر، برق و الکترونیک، کوالامپور، مالزی، ۱۵ خرداد، دوره ۵، ۱۳۹۵.
- [5] M. Z. Lowenstein, "Eliminating harmonic neutral current problems", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, United State of America, May 2008, pp. 1-4.
- [6] B. Singh, P. Jayaprakash, and D. P. Kothari, "Magnetics for neutral current compensation in three-phase four-wire distribution system", *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & Power*, New Delhi, India, December 2010, pp. 1-7.
- [7] A. Ahmad, M. KamilZia, and M. Tufail, "Widely Linear Matrix Pencil Based Frequency Estimation in Power Systems", *IEEE 9th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, Islamabad, Pakistan, December 2013, pp.1-5.
- [8] A.E. Emanuel, *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*, 1th ed., John Wiley & Sons, West Sussex, United Kingdom, 2010.
- [9] R. D. Patidar, and S. P. Singh, "Harmonic, Reactive and Neutral Currents Compensation and Load Balancing in 3P4W Distribution Systems", *International Conference on Computer Engineering and Technology*, Singapore, Malaya, February 2009, pp. 1-5.
- [10] J. C. Hernández, M. J. Ortegaa, J. De la Cruzb, and D. Verac, "Guidelines for the Technical Assessment of Harmonic, Ficker and Unbalance Emission Limits for PV-distributed Generation", *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, No. 7, July 2011, pp. 1247-1257.

[11] G. Chicco, P. Postolache, and C. Toader, "Triplen harmonics: Myths and reality, Electric Power Systems Research", Vol. 81, No. 7, July 2011, pp. 1541-1549.

[12] H. Liao, S. Abdelrahman, and J. V. Milanovic, "Zonal Mitigation of Power Quality Using FACTS Devices for Provision of Differentiated Quality of Electricity Supply in Networks With Renewable Generation", in IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 4, August 2017, pp. 1975-1985.

[13] Power System Instrumentation and Measurements Committee, "IEEE Standard 1459 Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balance, or Unbalance Conditions," March 2010, pp. 25-29.

[14] Transmission and Distribution Committee, "IEEE Standard 1159 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", 2009, pp. 15-19.

[۱۵] ترجمه رضا قاضی، "کاربرد ادوات توان سفارشی در بهبود کیفیت توان در شبکه‌های توزیع"، چاپ اول، انتشارات واژگان خرد، ایران، ۱۳۹۶.

[16] IEEE Power and Energy Society, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std. 519-2014 (Revision of IEEE Std. 519-1992), June 2014, pp.1-29.

[۱۷] دفتر نظارت بر توزیع معاونت هماهنگی توزیع توانیر، "پیش‌نویس دستورالعمل مدیریت بار پست‌ها و فیدرهای فشارضعیف در شبکه‌های توزیع نیروی برق"، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۲-۲۴.

[۱۸] نوریه ظهیرالدین، سید محمد شهرتاش، علیرضا جلیلیان و علی رامین‌فرد، "تعمیم شاخص‌های نامتعادلی بار به بارهای هارمونیک"، کنفرانس منطقه‌ای سیرد، تهران، ایران، ۲۶ و ۲۷ دی، دوره ۶، ۱۳۹۶.

[19] T. K. Sarkar, S. Park, J. Koh, and S. M. Rao, "Application of the Matrix Pencil Method for Estimating the SEM (Singularity Expansion Method) Poles of Source-Free Transient Responses from Multiple Look Directions", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 48, NO. 4, April 2000, pp. 612 - 618.

[۲۰] فواد شیرینی و محمدرضا آقامحمدی، "شناسایی مدهای الکترومکانیکی سیستم قدرت با استفاده از روش مجموع حداقل مربعات Hankel بهبود یافته و اندازه‌گیری‌های همزمان"، کنفرانس مهندسی برق ایران، تهران، ایران، ۲۶ تا ۲۸ اردیبهشت، دوره ۲۰، ۱۳۹۱.

[21] X. Lil, H. Zhao, Z. Chen, and J. Hu, "A Comparison between Fast Fourier Transform and Matrix Pencil Method for Spectral Integration Calculation", IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, Chengdu, China, October 2018, pp. 1-3.

[22] H. Sharifzadeh, and M. Jazaeri, "Design of State Estimator and Bad Data Detection Module in Power System by Using Perceptron Artificial Neural Network", Journal of Modeling in Engineering, Vol. 9, NO. 26, autumn 2011, pp. 13-22.

[23] T. K. Sarkar, and O. Pereira, "Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 37, NO. 1, February 1995, pp. 48 - 55.