

تشخیص و تعیین سهم منابع میان‌هارمونیک در سیستم‌های قدرت با استفاده از نرون خطی وفقی و روش جمع آثار و تصویر

پریسا سرافرازی و حمیدرضا محمدی

شکل موج و در نتیجه فلیکر را ایجاد می‌کنند این روش‌ها می‌توانند برای تشخیص منابع میان‌هارمونیک نیز به کار روند. این مراجع راه حلی را متکی بر توان اکتیو فلیکر ارائه می‌دهند. این روش قادر است بالادست یا پایین‌دست بودن منبع فلیکر را نسبت به نقطه اتصال مشترک و بار^۱ (PCC) تعیین کند. اما اگر بیش از یک منبع میان‌هارمونیک، حتی با فرکانس‌های مختلف، در هر دو سمت نقطه PCC وجود داشته باشد این روش نمی‌تواند محل هر یک از آنها را تعیین کند.

در [۱۲] روشی بر مبنای امیدانس میان‌هارمونیک ارائه شده و از آنجایی که این روش تنها به اندازه تقریبی امیدانس میان‌هارمونیک‌ها نیاز دارد نسبت به روش‌های مبتنی بر جهت توان اکتیو قوی‌تر است. اما زمانی که دو یا بیش از دو بار، میان‌هارمونیک یکسان تولید می‌کنند هیچ یک از این روش‌ها قادر به تعیین سهم آنها نمی‌باشند.

ملاحظه می‌شود در شرایطی که چندین منبع میان‌هارمونیک به ویژه با فرکانس‌های میان‌هارمونیک یکسان در سیستم وجود داشته باشند امکان تشخیص هر یک از آنها و به خصوص تعیین میزان سهم هر یک از آنها به کمک روش‌های موجود ممکن نخواهد بود.

در این مقاله روش جدیدی برای تعیین سهم هر یک از بارها در تولید جریان میان‌هارمونیک ارائه شده است. به این ترتیب با داشتن سهم هر یک از بارها در تولید میان‌هارمونیک، می‌توان تصمیمات درستی جهت طراحی جبران‌سازهای مخصوص هر یک از بارها اتخاذ نمود. برای اعمال روش پیشنهادی ابتدا بایستی دامنه و زاویه فاز مؤلفه‌های میان‌هارمونیک تخمین زده شوند. تخمین مؤلفه‌های میان‌هارمونیک بسیار مشکل است زیرا (۱) دامنه مؤلفه‌های میان‌هارمونیک بسیار کوچک است، (۲) فرکانس و دامنه میان‌هارمونیک‌ها متغیر است و (۳) حساسیت آنها به پدیده پخش توان بسیار بالاست. در این مقاله از نرون خطی وفقی دومرحله‌ای (آدلاین) جهت تخمین این مؤلفه‌ها استفاده شده است [۱۳].

ساختار این مقاله از بخش‌های زیر تشکیل شده است. در بخش ۲ نرون خطی وفقی دومرحله‌ای برای تخمین مؤلفه‌های میان‌هارمونیک توضیح ارائه و در بخش ۳ روش نورتن برای مدل کردن بارها و شبکه توضیح داده شده است. در بخش ۴ روش جمع آثار و تصویر برای تعیین سهم هر یک از منابع میان‌هارمونیک در تولید میان‌هارمونیک نقطه مشترک ارائه می‌شود. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی نمایش داده شده و در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۶ آمده است.

۲- تخمین مؤلفه‌های میان‌هارمونیک یک سیگنال

به منظور تشخیص منابع میان‌هارمونیک و تعیین سهم آنها، ابتدا بایستی مؤلفه‌های میان‌هارمونیک تخمین زده شوند. به این منظور از ساختار نرون خطی وفقی (آدلاین) دومرحله‌ای در این مقاله استفاده شده

چکیده: در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص بارهای تولیدکننده میان‌هارمونیک در سیستم قدرت و همچنین تعیین سهم هر یک از این بارها در تولید میان‌هارمونیک جریان در نقطه اتصال مشترک ارائه شده است. اساس این روش بر پایه روش جمع آثار و تصویر می‌باشد که به مدار معادل نورتن بارها و شبکه نیاز دارد. همچنین در روش پیشنهادی، از نرون خطی وفقی دومرحله‌ای برای تعیین مؤلفه‌های میان‌هارمونیک سیگنال استفاده شده است. کارایی روش پیشنهادی به کمک شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی مؤید قابلیت روش فوق در جایی منابع میان‌هارمونیک و تعیین سهم آنها می‌باشد.

کلیدواژه: منبع میان‌هارمونیک، روش جمع آثار و تصویر، نرون خطی وفقی، تعیین سهم منابع میان‌هارمونیک.

۱- مقدمه

هارمونیک به مؤلفه‌هایی از ولتاژ یا جریان اطلاق می‌شود که فرکانس آنها مضرب صحیحی از فرکانس اصلی باشد. در مقابل، میان‌هارمونیک‌ها مؤلفه‌هایی از ولتاژ یا جریان می‌باشند که فرکانس آنها مضرب غیر صحیحی از فرکانس اصلی است. حضور میان‌هارمونیک‌ها اثرات منفی از قبیل افزایش تلفات، کاهش عمر مفید تجهیزات، نوسان ولتاژ، تداخل مخابراتی و فلیکر را به همراه دارد و از این رو جبران‌سازی میان‌هارمونیک‌ها از اولویت‌های جدید محققین کیفیت توان محسوب می‌شود. بدیهی است بهبود کیفیت برق و جبران مؤلفه‌های میان‌هارمونیک زمانی امکان‌پذیر خواهد بود که منابع میان‌هارمونیک تشخیص داده شده و سهم آنها در مؤلفه‌های میان‌هارمونیک در نقطه اتصال مشترک مشخص شود.

برای تشخیص منابع هارمونیک در سیستم‌های قدرت روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند [۱] تا [۵] اما در زمینه تشخیص منابع میان‌هارمونیک مطالعات کمی صورت گرفته است. مراجع [۶] و [۷] منبع میان‌هارمونیک را با استفاده از روش جهت توان اکتیو تشخیص می‌دهند. اگرچه این روش در این زمینه موفق بوده است اما محدودیت اصلی این روش کوچک بودن اندازه توان میان‌هارمونیک‌ها می‌باشد که اندازه‌گیری را مشکل کرده و ممکن است منجر به نتیجه‌گیری نادرست شود [۸].

در مطالعات دیگری که صورت گرفته، روش‌هایی برای تعیین منبع فلیکر ارائه شده است [۹] تا [۱۱]. از آنجایی که میان‌هارمونیک‌ها نوسانات

این مقاله در تاریخ ۱۷ آبان ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۲۴ خرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

پریسا سرافرازی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، بلوار قطب راوندی، کاشان، (email: parisa.sarafraz@yahoo.com).

حمیدرضا محمدی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، بلوار قطب راوندی، کاشان، (email: mohammadi@kashanu.ac.ir).

تخمین پارامترها بر اساس مینیمم‌سازی مجموع مربعات خطا بین داده‌های اندازه‌گیری شده $y'(k)$ و مقادیر تخمینی $y(k)$ می‌باشد

$$\mathcal{E} = \sum_{k=1}^{2M} |y'(k) - y(k)|^2 \quad (5)$$

حل این معادله غیر خطی مشکل است اما روش پرونی آن را به حل یک معادله خطی با ضرایب ثابت مانند (۶) تبدیل می‌کند [۱۶]. به این صورت که برای به دست آوردن پارامترهای (۴)، چندجمله‌ای $p(z)$ در (۷) که M ترم نمایی به عنوان ریشه‌هایش دارد را تعریف می‌کند

$$y'(k) = -\sum_{m=1}^M a_m y'(k-m) \quad (6)$$

$$p(z) = \prod_{m=1}^M (z - z_m) = \sum_{m=1}^M a_m z^{M-m}, \quad a_m = 1 \quad (7)$$

به این ترتیب در صورتی که a_m ها مشخص باشند با محاسبه ریشه‌های معادله $p(z)$ فرکانس‌های سینوسی از رابطه زیر به دست می‌آیند

$$f_m = \frac{\tan^{-1} \frac{\text{Im}\{z_m\}}{\text{Re}\{z_m\}}}{2\pi\Delta t} \quad (8)$$

با فرض $e(k) = y'(k) - y(k)$ ، به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$y(k) = -\sum_{m=1}^M a_m y(k-m) + \sum_{m=1}^M a_m e(k-m), \quad a_m = 1 \quad (9)$$

با تعریف

$$u(k) = \sum_{m=1}^M a_m e(k-m), \quad a_m = 1 \quad (10)$$

معادله (۹) به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$y(k) = -\sum_{m=1}^M a_m y(k-m) + u(k), \quad a_m = 1 \quad (11)$$

با مینیمم‌سازی $u(k)$ یعنی $u(k) = 0$ ، داریم

$$\sum_{m=1}^M a_m y(k-m) = 0, \quad a_m = 1 \quad (12)$$

برای $2M \dots M+1, k$ ، به صورت ماتریسی زیر درمی‌آید

$$\begin{bmatrix} y(M) & y(M-1) & \dots & y(1) \\ y(M+1) & y(M) & \dots & y(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(2M-1) & y(2M-2) & \dots & y(M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_M \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

$$-\begin{bmatrix} y(M+1) \\ y(M+2) \\ \vdots \\ y(2M) \end{bmatrix}$$

یا

$$Y\underline{a} = -\underline{y} \quad (14)$$

و a به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$a = -Y^{-1}\underline{y} \quad (15)$$

است. بنابراین روش آدلاین و همچنین روش پرونی که در این ساختار استفاده شده در بخش‌های بعد توضیح داده می‌شود.

۲-۱ نرون خطی وقتی (آدلاین)

نرون خطی وقتی، یک شبکه عصبی یک‌لایه با n ورودی و یک خروجی است به قسمی که خروجی آن برابر با ترکیب خطی ورودی‌ها می‌باشد. نرون خطی وقتی به صورت آدلاین آموزش دیده و برای تخمین پارامترهای یک سیگنال استفاده می‌شود.

برای فرموله کردن این مسأله، شکل موج ولتاژ یا جریان اندازه‌گیری شده در یک سیستم قدرت با فرکانس اصلی f را به صورت مجموع تمام مؤلفه‌های هارمونیک با دامنه و زاویه فاز نامعلوم در نظر می‌گیریم. در این صورت فرم گسسته سیگنال تخمینی y به این صورت خواهد بود

$$y(k) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(\varphi_m + 2\pi m f k \Delta t) = \sum_{m=1}^M (A_m \cos \varphi_m \sin 2\pi m f k \Delta t + A_m \sin \varphi_m \cos 2\pi m f k \Delta t) \quad (1)$$

$$= \sum_{m=1}^M w_{\varphi_{m-1}} \sin \theta_m + w_{\varphi_m} \cos \theta_m$$

که در این رابطه A_m و φ_m به ترتیب دامنه و زاویه فاز هارمونیک m ام، M تعداد کل هارمونیک‌ها، k گام زمانی شبیه‌سازی، Δt پریود نمونه‌برداری و همچنین $w_{\varphi_{m-1}} = A_m \cos \varphi_m$ ، $w_{\varphi_m} = A_m \sin \varphi_m$ است. $\theta_m = 2\pi m f k \Delta t$

با استفاده از آموزش آدلاین و حداقل کردن خطا به روش گرادین کاهشی، دامنه و زاویه فاز هارمونیک m ام به این صورت محاسبه می‌شود

$$A_m = \sqrt{w_{\varphi_{m-1}}^2 + w_{\varphi_m}^2} \quad (2)$$

$$\varphi_m = \tan^{-1} \frac{w_{\varphi_m}}{w_{\varphi_{m-1}}}, \quad -\pi \leq \varphi_m \leq \pi \quad (3)$$

از آنجایی که انحراف فرکانس اصلی و حضور میان‌هارمونیک‌ها بر دقت و همگرایی این روش تأثیر خواهند داشت لذا آدلاین دومرحله‌ای که در ساختار آن از روش پرونی استفاده شده است برای تخمین فرکانس میان‌هارمونیک به کار می‌رود. روش پرونی در قسمت بعد توضیح داده شده است.

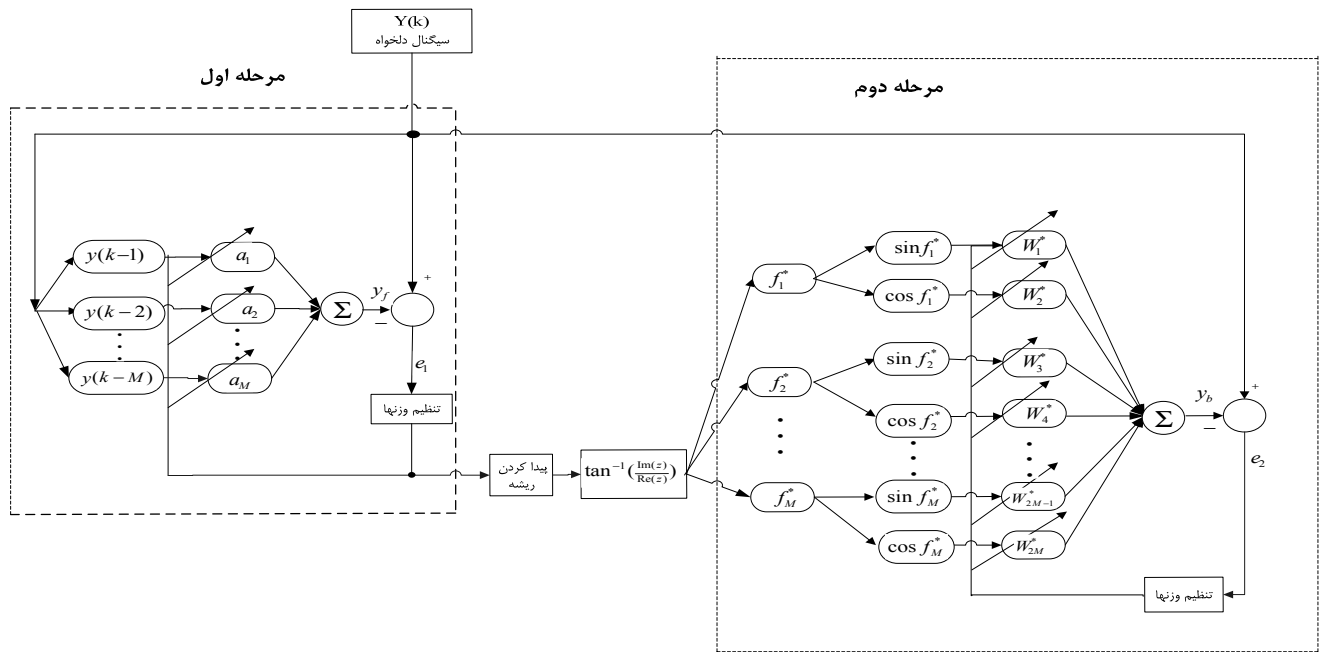
۲-۲ روش پرونی

در [۱۴] و [۱۵] اثبات شده که روش پرونی نسبت به روش تبدیل فوریه گسسته در استخراج دقیق اطلاعات فرکانسی سیگنال اندازه‌گیری شده، تفکیک فرکانسی بهتری دارد. روش پرونی ابتدا پارامترهای یک چندجمله‌ای خطی را حساب می‌کند و سپس از ریشه‌های چندجمله‌ای برای تخمین فرکانس مؤلفه‌های سیگنال استفاده می‌کند.

چنانچه $2M$ نمونه $(k = 1, 2, \dots, 2M)$ از سیگنال y' برای محاسبه M ترم نمایی در دست باشد روش پرونی به این صورت عمل می‌کند که سیگنال را به صورت مجموع توابع نمایی در نظر می‌گیرد

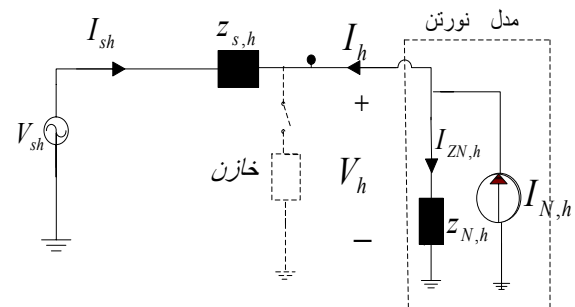
$$y'(k) = \sum_{m=1}^M A_m e^{(j2\pi f_m)(k-1)\Delta t + j\varphi_m} = \sum_{m=1}^M w_m z_m^{k-1} \quad (4)$$

که $y'(k)$ نمونه‌های ورودی را نشان می‌دهد، Δt زمان نمونه‌برداری، A_m دامنه، f_m فرکانس بر حسب هرتز، φ_m فاز اولیه مؤلفه m ام بر حسب رادیان و همچنین $w_m = A_m e^{j\varphi_m}$ و $z_m = A_m e^{j2\pi f_m \Delta t}$ می‌باشند.



شکل ۱: آدلاین دومرحله‌ای برای تخمین مؤلفه‌های هارمونیک و میان‌هارمونیک [۱۳].

و مسأله فرکانس در آدلاین حل گردد. آدلاین دومرحله‌ای مطرح‌شده از روش حداقل مربعات خطا برای تنظیم وزن‌ها به منظور اندازه‌گیری هارمونیک‌ها و میان‌هارمونیک‌ها استفاده می‌کند. شکل ۱ ساختار این آدلاین دومرحله‌ای و رابطه بین پارامترهای مربوطه را نشان می‌دهد. در این ساختار از روی بردار وزن‌ها از مرحله اول فرکانس‌های موجود در سیگنال اندازه‌گیری شده و از روی بردار وزن‌ها در مرحله دوم دامنه و زاویه فاز هر یک از مؤلفه‌ها محاسبه می‌شوند [۱۳].



شکل ۲: به دست آوردن مدار معادل نورتن بار.

۳- مدار معادل نورتن

همان طور که در مقدمه اشاره شد، در این مقاله یک روش جدید برای تعیین سهم هر یک از بارها در تولید مؤلفه‌های میان‌هارمونیک جریان در نقطه اتصال مشترک ارائه شده و برای این منظور از روش جمع آثار و تصویر استفاده گردیده که اعمال این روش مستلزم در اختیار داشتن مدار معادل نورتن بار و شبکه می‌باشد [۱۷].

بنابراین قبل از ارائه روش تشخیص منابع میان‌هارمونیک و تعیین سهم آنها روش نورتن در مدل کردن شبکه توزیع در حالت هارمونیک ارائه خواهد شد. به منظور تخمین مدار معادل نورتن نشان داده شده در شکل ۲ مؤلفه هارمونیک جریانی و ولتاژ در نقطه مورد نظر (I_h, V_h) در دو شرایط مختلف باید اندازه‌گیری شود. به عنوان مثالی از این تغییرات که باعث ایجاد شرایط متفاوت می‌شود می‌توان به سوئیچ کردن خازن شنت، قطع کردن ترانس موازی یا تغییرات دیگری که در امپدانس هارمونیک تغذیه سیستم تغییر ایجاد می‌کنند، اشاره کرد.

در شکل ۲ v_{sh} ولتاژ هارمونیک شبکه، منبع z_{sh} امپدانس معادل هارمونیک شبکه، I_{sh} جریان هارمونیک سمت شبکه، v_h ولتاژ هارمونیک سمت بار، I_h جریان هارمونیک تزریق شده به شبکه، $I_{N,h}$ جریان هارمونیک تولیدشده توسط بار، $I_{ZN,h}$ جریان هارمونیک عبوری از امپدانس نورتن و $Z_{N,h}$ امپدانس نورتن می‌باشند. با توجه به شکل واضح است که تغییر در ساختار شبکه باعث تغییر در ولتاژ هارمونیک v_h و جریانی‌های هارمونیک I_h و $I_{ZN,h}$ می‌گردد. با توجه به این شکل می‌توان برای هر مؤلفه میان‌هارمونیک، جریان اندازه‌گیری شده را به صورت زیر محاسبه نمود

۳-۲ آدلاین دومرحله‌ای

زمانی که میان‌هارمونیک‌ها حضور دارند نتایج اندازه‌گیری دقیق نخواهد بود که البته این مشکل در تمام روش‌های مبتنی بر آدلاین مشترک است. از طرف دیگر روش پرونی به علت تفکیک فرکانسی بالاتر از FFT می‌تواند برخی از کاستی‌ها را جبران نماید [۱۵].

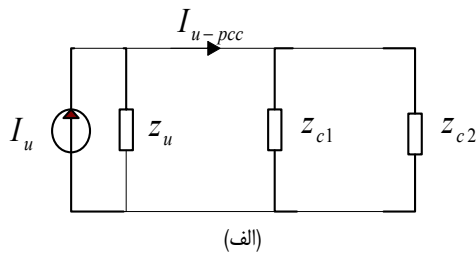
با مشاهده روش حل پرونی، حاصل ضرب داخلی ردیف اول ماتریس Y و بردار a در (۱۳) به فرم زیر خواهد بود

$$-y(M+1) = a_1 y(M) + a_2 y(M-1) + \dots + a_M y(1) \quad (16)$$

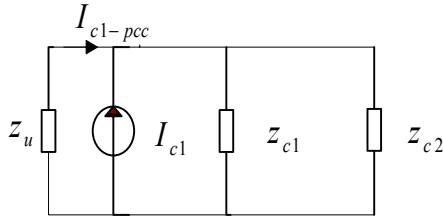
معادله (۱۶) را می‌توان با جایگذاری k به جای $M+1$ بازنویسی کرد و به فرم عمومی تری از آن دست یافت

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_M y(k-M) = -\sum_{i=1}^M a_i y(k-i) \quad (17)$$

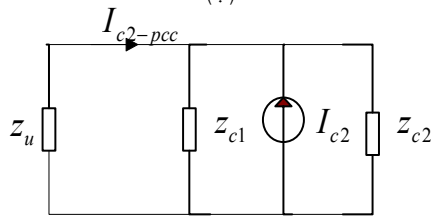
قبل از ارزیابی پارامترهای مربوط به (V) بایستی a_m و z_m به دست آیند و $2M$ نمونه داده برای سیگنال اندازه‌گیری شده و حل کردن تمام ضرایب چندجمله‌ای لازم است و بنابراین فرم ماتریسی (۱۴) برای ساختار آدلاین مناسب نیست. با مقایسه ساختار عمومی آدلاین و (۱۷) درمی‌یابیم که فرم ریاضی این معادلات شبیه‌اند و بنابراین به کار بردن آدلاین ایده مناسبی است تا به این صورت همه a_m ‌ها از روش پرونی به دست آمده



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴: تعیین سهم بارها و منبع در ایجاد مؤلفه میان‌هارمونیک جریان در نقطه اتصال مشترک. تعیین سهم (الف) منبع، (ب) بار ۱ و (ج) بار ۲.

شبکه می‌باشد. همچنین Z_{c1} و Z_{c2} امپدانس میان‌هارمونیک بار و Z_u امپدانس میان‌هارمونیک شبکه می‌باشد.

سهم هر بار در تولید میان‌هارمونیک طبق اصل جمع آثار همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$I_{u-pcc} = \frac{I_u Z_u}{[(Z_{c1} \parallel Z_{c2}) + Z_u]} \quad (27)$$

$$I_{c1-pcc} = \frac{I_{c1} (Z_{c1} \parallel Z_{c2})}{[(Z_{c1} \parallel Z_{c2}) + Z_u]} \quad (28)$$

$$I_{c2-pcc} = \frac{I_{c2} Z_{c2}}{(Z_{c1} \parallel Z_u) + Z_{c2}} \quad (29)$$

در این رابطه I_{u-pcc} ، I_{c1-pcc} و I_{c2-pcc} به ترتیب سهم منبع، بار ۱ و بار ۲ در I_{pcc} می‌باشد. از آنجایی که

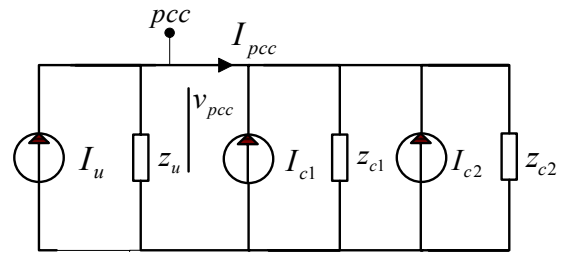
$$I_{pcc} = I_{u-pcc} - I_{c1-pcc} - I_{c2-pcc} \quad (30)$$

با تصویر نمودن بردارهای مربوط به سهم جریان بارها و منبع بر روی بردار جریان نقطه اتصال مشترک همانند شکل ۵، رابطه زیر را می‌توان نوشت

$$|I_{pcc}| = I_{u-f} + I_{c1-f} + I_{c2-f} \quad (31)$$

که I_{u-f} تصویر I_{u-pcc} روی I_{pcc} و I_{c1-f} و I_{c2-f} (شماره بار) تصویر I_{c1-pcc} و I_{c2-pcc} روی I_{pcc} می‌باشد.

توجه شود که برای سادگی، جریان یک بار در شکل ۵ نشان داده شده است. هر دوی I_{u-f} و I_{c1-f} اسکالر بوده و ممکن است علامت یکسان یا مخالف یکدیگر داشته باشند و چنانچه این دو کمیت هم‌علامت باشند، تصاویر برداری جریان مربوط به شبکه و بار با هم جمع شده و چنانچه مختلف‌العلامه باشند از یکدیگر کم می‌شوند و جریان I_{pcc} را به وجود می‌آورند. این دو حالت در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳: مدار معادل نورتن میان‌هارمونیک بارها و منبع در سیستم نمونه.

$$I_{h,\gamma} = I_{N,h} - I_{ZN,h,\gamma} \quad (18)$$

$$I_{h,\tau} = I_{N,h} - I_{ZN,h,\tau} \quad (19)$$

که تمامی پارامترها مختلط هستند. اندیس ۱ مربوط به مقادیر متغیرها قبل از اعمال تغییر و اندیس ۲ مربوط به شرایط بعد از تغییرات می‌باشد. همچنین جریان عبوری از امپدانس معادل نورتن در شرایط قبل و بعد از تغییر در سیستم تغذیه به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌گردند

$$I_{ZN,h,\gamma} = \frac{V_{h,\gamma}}{Z_{N,h}} \quad (20)$$

$$I_{ZN,h,\tau} = \frac{V_{h,\tau}}{Z_{N,h}} \quad (21)$$

با جایگذاری (۲۰) و (۲۱) در (۱۸) و (۱۹) داریم

$$I_{h,\gamma} = I_{N,h} - \frac{V_{h,\gamma}}{Z_{N,h}} \quad (22)$$

$$I_{h,\tau} = I_{N,h} - \frac{V_{h,\tau}}{Z_{N,h}} \quad (23)$$

چنانچه طرفین (۲۲) و (۲۳) را از هم کم کنیم خواهیم داشت

$$I_{h,\tau} - I_{h,\gamma} = \frac{V_{h,\gamma} - V_{h,\tau}}{Z_{N,h}} \quad (24)$$

با توجه به (۲۴) امپدانس معادل نورتن برای هر میان‌هارمونیک برابر خواهد بود با

$$Z_{N,h} = \frac{V_{h,\gamma} - V_{h,\tau}}{I_{h,\tau} - I_{h,\gamma}} \quad (25)$$

و منبع جریان نورتن میان‌هارمونیک نیز به صورت زیر محاسبه می‌گردند

$$I_{N,h} = I_{h,\gamma} + \frac{V_{h,\gamma}}{Z_{N,h}} \quad (26)$$

۴- تشخیص منابع میان‌هارمونیک

در شرایطی که چندین منبع میان‌هارمونیک، مؤلفه‌های میان‌هارمونیک یکسان تولید می‌کنند بایستی سهم هر یک از آنها در تولید جریان میان‌هارمونیک نقطه اتصال مشترک مشخص گردد.

در این بخش استفاده از روش جمع آثار و تصویر برای تعیین سهم بارهای مختلف در تولید مؤلفه‌های میان‌هارمونیک یکسان همانند شکل ۳ ارائه شده است. برای توضیح این روش از یک سیستم نمونه شامل یک منبع سینوسی و دو بار میان‌هارمونیک‌زا استفاده شده است. مدار معادل نورتن این سیستم در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل I_{c1} و I_{c2} منبع جریان میان‌هارمونیک بار و I_u منبع جریان میان‌هارمونیک

جدول ۲: مدار معادل نورتن تخمینی برای بارها در مؤلفه میان‌هارمونیک ۱۱۰ هرتز.

$f = 110$	بار ۱	بار ۲	بار ۳
Z_N	$0.337 + j1.282i$	$0.5115 + j1.8365i$	$1 + j3.34i$
i_N	$15.5038 \angle 1$	$8.039 \angle -0.206$	-4×10^{-3}

جدول ۳: مدار معادل نورتن تخمینی برای بارها در مؤلفه میان‌هارمونیک ۱۷۰ هرتز.

$f = 170$	بار ۱	بار ۲	بار ۳
Z_N	$0.33 + j1.9168i$	$0.5 + j2.8752i$	$1 + j5.7505i$
i_N	$11.99 \angle 0$	$6.03 \angle 0.2$	2×10^{-3}

جدول ۴: مدار معادل نورتن تخمینی برای بارها در مؤلفه میان‌هارمونیک ۲۶۰ هرتز.

$f = 260$	بار ۱	بار ۲	بار ۳
Z_N	$0.33 + j2.99i$	$0.5 + j4.4866i$	$0.99 + j8.9732i$
i_N	$4 \angle 0.3$	$2.01 \angle 0$	3×10^{-3}

جدول ۵: مؤلفه میان‌هارمونیک هر یک از بارها در فرکانس‌های مختلف.

f	$I_{c-f-pcc}$	$I_{u-f-pcc}$	I_{u-f}
۱۱۰	$10.598 \angle 16.29$	$4.936 \angle 38.04$	1.2×10^{-3}
۱۷۰	$9.28 \angle 31.14$	$4.596 \angle 15.77$	3.3×10^{-3}
۲۶۰	$3.453 \angle 13.93$	$1.7579 \angle 22.76$	1.6×10^{-3}

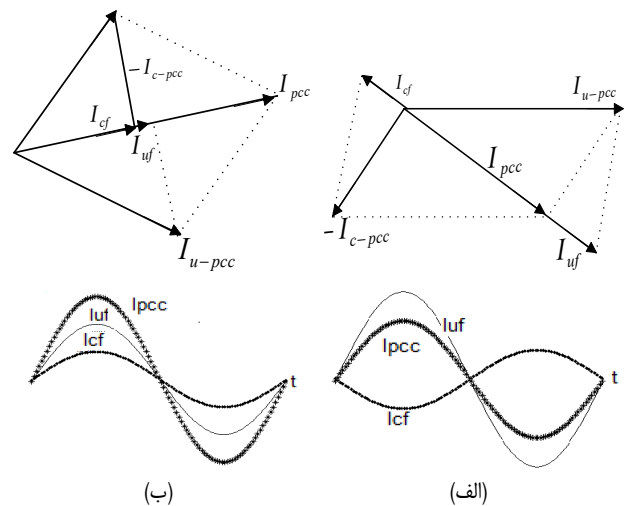
جدول ۶: سهم هر یک از بارها در تولید مؤلفه‌های میان‌هارمونیک.

سهم بارها	مقدار محاسبه شده			مقدار واقعی
	$f = 110$	$f = 170$	$f = 260$	
سهم بار ۱	%۶۷.۴	%۶۵.۶	%۶۶.۲	%۶۶
سهم بار ۲	%۳۲.۳۲	%۳۳.۳	%۳۲.۷	%۳۳
سهم بار ۳	%۰	%۰	%۰	%۰

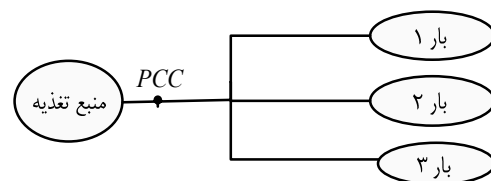
با استفاده از آدلاین دومرحله‌ای جریان نقطه اتصال مشترک I_{pcc} تحلیل شده و مشاهده گردیده که این جریان شامل مؤلفه‌های ۶۰، ۱۱۰، ۱۷۰ و ۲۶۰ هرتز می‌باشد. بنابراین فرکانس‌های میان‌هارمونیک این سیستم ۱۷۰، ۱۱۰ و ۲۶۰ هرتز است. دامنه جریان‌ها و ولتاژها در این فرکانس‌ها با استفاده از آدلاین دومرحله‌ای محاسبه شده و با استفاده از این نتایج، مدار معادل نورتن هر یک از بارها به کمک روش نورتن به دست می‌آید. نتایج برای فرکانس‌های ۱۱۰، ۱۷۰ و ۲۶۰ هرتز به ترتیب در جداول ۲، ۳ و ۴ گردآوری شده اند.

در این جداول Z_N و i_N به ترتیب امیدانس معادل نورتن و منبع جریان نورتن بار می‌باشند. در ادامه مؤلفه‌های میان‌هارمونیک بارها با استفاده از روش جمع آثار و تصویر محاسبه شده و نتایج در جدول ۵ ارائه شده‌اند. در نهایت سهم هر یک از بارها در تولید مؤلفه‌های میان‌هارمونیک با استفاده از روش جمع آثار و تصویر محاسبه شده و نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است.

بر اساس این نتایج، بار ۳ هیچ سهمی در تولید میان‌هارمونیک ندارد اما بارهای ۱ و ۲ هر دو در تولید میان‌هارمونیک‌ها سهیم هستند. نتایج به دست آمده کاملاً با واقعیت مطابقت دارد زیرا بار ۳ یک بار خطی بوده و مؤلفه میان‌هارمونیک تولید نمی‌کند. ضمناً مؤلفه‌های میان‌هارمونیک تولیدشده توسط بار ۱ دو برابر مؤلفه‌های میان‌هارمونیک تولیدشده توسط بار ۲ می‌باشد.



شکل ۵: تصویرنمودن مؤلفه جریان بار و منبع بر روی جریان I_{pcc} ، I_{c-f} (الف) و I_{u-f} از هم کم و (ب) و I_{c-f} و I_{u-f} با هم جمع می‌شوند.



شکل ۶: سیستم نمونه مورد مطالعه در شبیه‌سازی.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی.

ولتاژ منبع	۱۰۰ V		
فرکانس منبع	۶۰ Hz		
بار ۳: بار خطی R-L	$R = 1 \Omega$		
	$L = 0.5 H$		
فرکانس‌های میان‌هارمونیک	۱۱۰ Hz	۱۷۰ Hz	۲۶۰ Hz
مؤلفه‌های میان‌هارمونیک بار ۱	۱۶ A	۱۲ A	۴ A
مؤلفه‌های میان‌هارمونیک بار ۲	۸ A	۶ A	۲ A

به این ترتیب سهم بارها و شبکه به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\% I_{cn-f} = \frac{I_{cn-f}}{I_{pcc}} \times 100, \quad n = 1, 2 \quad (32)$$

$$\% I_{u-f} = \frac{I_{u-f}}{I_{pcc}} \times 100 \quad (33)$$

۵- نتایج شبیه‌سازی

به منظور تأیید صحت روش پیشنهادی برای تشخیص منابع میان‌هارمونیک و تعیین سهم آنها در یک سیستم قدرت، یک سیستم نمونه شامل یک بار خطی، دو بار میان‌هارمونیک‌زا و یک منبع تغذیه طبق شکل ۶ در دو حالت مختلف توسط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده و در ادامه نتایج شبیه‌سازی در این دو حالت ارائه و تحلیل شده‌اند.

۵-۱ منبع تغذیه سینوسی

در حالت اول منبع تغذیه سینوسی در نظر گرفته شده و بارهای غیر خطی چندین مؤلفه میان‌هارمونیک تولید می‌کنند. پارامترهای شبیه‌سازی نیز در جدول ۱ گزارش شده است.

هرتز با دامنه ۴ آمپر تولید می‌کند. مدار معادل نورتن هر یک از بارها و شبکه در تولید میان‌هارمونیک ۱۱۰ Hz در جدول ۷ گردآوری شده است. مؤلفه میان‌هارمونیک بارها و شبکه در نقطه مشترک با استفاده از روش جمع آثار محاسبه شده و نتایج در جدول ۸ ارائه شده‌اند. در نهایت سهم هر یک از بارها و شبکه در تولید این مؤلفه میان‌هارمونیک با استفاده از روش جمع آثار و تصویر محاسبه شده و نتایج در جدول ۹ نشان داده شده است.

همان طور که ملاحظه می‌شود به کمک این روش سهم هر یک از بارهای ۱ و ۲ و همچنین سهم شبکه در تولید مؤلفه میان‌هارمونیک ۱۱۰ Hz در نقطه اتصال مشترک به درستی تشخیص داده شده‌اند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص و تعیین سهم منابع میان‌هارمونیک‌ها در نقطه اتصال مشترک در یک سیستم قدرت ارائه گردید. علاوه بر تشخیص منابع میان‌هارمونیک‌ها، روش پیشنهادی قادر است در مواردی که بارهای میان‌هارمونیک‌ها مؤلفه‌های یکسان تولید می‌کنند، سهم هر یک از بارها را در ایجاد مؤلفه میان‌هارمونیک جریان در نقطه اتصال مشترک تعیین نماید. در خصوص تعیین سهم منابع میان‌هارمونیک‌ها روش ارائه شده منحصر به فرد می‌باشد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار SIMULINK/MATLAB کارایی روش پیشنهادی در حالات کاری مختلف از جمله ایجاد چندین مؤلفه میان‌هارمونیک توسط بارها و همچنین وجود مؤلفه میان‌هارمونیک در سمت شبکه، نشان داده شده است.

پیوست

پارامترها و متغیرهای استفاده شده مقاله در جدول پ-۱ آمده است.

مراجع

- [1] J. D. Srinivasan, W. S. Ng, and A. C. Liew, "The neural-network-based signature recognition for harmonic source identification," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 398-405, Jan. 2006.
- [2] E. Gursoy and D. Niebur, "The harmonic load identification using complex independent component analysis," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 285-292, Oct. 2009.
- [3] H. E. Mazin, W. Xu, and B. Huang, "Determining the harmonic impacts of multiple harmonic producing loads," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 1187-1195, Oct. 2011.
- [4] S. Nath, P. Sinha, and S. Kumar Goswami, "A wavelet based novel method for the detection of harmonic sources in power systems," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 40, no. 1, pp. 54-61, Sept. 2012.
- [5] D. Saxena, S. Bhaumik, and S. N. Singh, "Identification of multiple harmonic sources in power system using optimally placed voltage measurement devices," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 61, no. 5, pp. 2483-2492, May 2014.
- [6] T. Tayjasanant and W. Xu, "A case study of flicker/interharmonic problems caused by a variable frequency drive," in *Proc. Int. Conf. Harmonics Quality of Power*, pp. 72-76, Lake Placid, NY, USA, 12-15 Sept. 2004.
- [7] T. Kim, E. J. Powers, W. M. Grady, and A. Araposta, "Real and reactive power analysis for interharmonics," in *Proc. IEEE ElectricShip Technologies Symp.*, pp. 244-247, 27-27 Jul. 2005.
- [8] M. B. Rifai, T. H. Ortmeier, and W. J. McQuillan, "Evaluation of current interharmonics from AC drives," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 1094-1098, Jul. 2000.
- [9] A. M. Dan, "Identification of a flicker source," in *Proc. Int. Conf. Harmonics Quality of Power*, pp. 1179-1181, Athens, Greece, Oct. 1998.

۲-۵ منبع تغذیه غیر سینوسی

در ادامه برای نشان دادن کارایی روش در تمامی شرایط، سیستم جدول ۷: مدار معادل نورتن تخمینی برای بارها و شبکه.

$f=110$	Z_N	I_N
بار ۱	$0.33 + 1.22i$	$16 \angle -0.2$
بار ۲	$0.499 + 1.8427i$	$7.99 \angle -0.5$
بار ۳	$1 + 3.689i$	$1 \times 10^{-9} \angle 0$
شبکه	۱	$4 \angle -0.01$

جدول ۸: مؤلفه میان‌هارمونیک هر یک از بارها و شبکه در نقطه مشترک.

I_{c-pcc}	$11.042 \angle 14.9$
I_{ct-pcc}	$4.9167 \angle 38.37$
I_{ct-pcc}	$1.2 \times 10^{-9} \angle 3.44$
I_{u-pcc}	$3.336 \angle -27.783$

جدول ۹: سهم هر یک از بارها و شبکه در تولید مؤلفه میان‌هارمونیک ۱۱۰ Hz.

سهم بارها	مقدار محاسبه شده $f=110$	مقدار واقعی
سهم بار ۱	۵۸.۰۴٪	۵۷.۱٪
سهم بار ۲	۲۶.۶٪	۲۸.۶٪
سهم بار ۳	۰٪	۰٪
سهم شبکه	۱۵.۰۳٪	۱۴.۳٪

جدول پ-۱: پارامترها و متغیرها.

x	بردار ورودی آدلاین
y_d	خروجی مطلوب آدلاین
y_f و y_b	خروجی آدلاین
w, a	بردار وزن آدلاین
e_v, e_r	خطای خروجی آدلاین
A_m	دامنه هارمونیک m
φ_m	زاویه فاز هارمونیک m
v_{sh}	ولتاژ هارمونیک شبکه
I_{sh}	جریان هارمونیک شبکه
f	فرکانس اصلی
I_h	جریان هارمونیک سمت بار
v_h	ولتاژ هارمونیک سمت بار
$Z_{N,h}$	امپدانس معادل نورتن
$I_{N,h}$	منبع جریان نورتن
I_{pcc}	جریان نقطه اتصال مشترک
z_u, z_c	امپدانس شبکه و بار
I_{cn-pcc}	سهم بار n در I_{pcc}
I_{u-pcc}	سهم شبکه در I_{pcc}
I_{cn-f}	تصویر I_{cn-pcc} روی I_{pcc}
I_{u-f}	تصویر I_{u-pcc} روی I_{pcc}

شبیه‌سازی شده در قسمت قبل در حالتی مورد بررسی قرار گرفته که شبکه نیز دارای مؤلفه میان‌هارمونیک می‌باشد. پارامترهای شبیه‌سازی مطابق جدول ۱ می‌باشد و به علاوه شبکه، مؤلفه میان‌هارمونیک ۱۱۰

[17] E. Thunberg and L. Soder, "A norton approach to distribution network modeling for harmonic studies," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 4, no. 1, pp. 174-182, Jan. 1999.

پریسا سرافرازی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی برق الکترونیک و کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳ در دانشگاه کاشان به پایان رسانده است. ایشان در حال حاضر در زمینه ارائه دروس آزمایشگاهی رشته مهندسی برق با دانشگاه کاشان همکاری دارند.

حمیدرضا محمدی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق در سال ۱۳۷۲ در دانشگاه صنعتی شریف و در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق در سال ۱۳۷۴ در دانشگاه تبریز به پایان رسانید. ایشان از سال ۱۳۷۴ الی ۱۳۸۲ به تدریس دروس رشته مهندسی برق در دانشگاه‌های مختلف اشتغال داشت و پس از آن به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه تربیت مدرس وارد شده و در سال ۱۳۸۷ موفق به اخذ مدرک دکتری در رشته مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. از سال ۱۳۸۷ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان مشغول به فعالیت گردیده و هم اکنون عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کیفیت توان، طراحی و کنترل فیلترهای اکتیو و میدلهای الکترونیک قدرت.

- [10] P. G. V. Axelberg and M. J. Bollen, "An algorithm for determining the direction to a flicker source," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 2, pp. 755-760, Apr. 2006.
- [11] P. G. V. Axelberg, M. J. Bollen, and I. Y. Gu, "Trace of flicker sources by using the quantity of flicker power," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 465-471, Jan. 2008.
- [12] A. B. Nassif, J. Yong, H. Mazin, X. Wang, and W. Xu, "An impedance-based approach for identifying interharmonic sources," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 333-340, Jan. 2011.
- [13] G. W. Chang, C. I. Chen, and Q. W. Liang, "A two-stage ADALINE for harmonics and interharmonics measurement," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2220-2228, Jun. 2009.
- [14] H. Li, Z. Li, W. A. Halang, B. Zhang, and G. Chen, "Analyzing chaotic spectra of DC-DC converters using the Prony method," *IEEE Trans. on Circuits Syst.*, vol. 54, no. 1, pp. 61-65, Jan. 2007.
- [15] E. A. Feilat, "Detection of voltage envelope using Prony analysis-Hilberttransform method," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 2091-2093, Oct. 2007.
- [16] M. M. Tawfic and M. M. Morcos, "ANN-based techniques for estimating fault location on transmission lines using Prony method," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 219-224, Apr. 2001.