

روشی جدید برای شناسایی و تعیین سهم هر یک از فیدرهای متصل به یک باس در آلودگی هارمونیکی ولتاژ باس در شبکه‌های شعاعی

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

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

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

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

چکیده: در سال‌های اخیر به علت گسترش تجهیزات غیرخطی نظیر ادوات الکترونیک قدرت، کوره‌های قوس الکتریکی و... شبکه‌های برق دچار آلودگی هارمونیکی شده‌اند. در این مقاله روشی جدید برای شناسایی و تعیین سهم هر یک از فیدرهای متصل به یک باس در آلودگی هارمونیکی ولتاژ باس در شبکه‌های شعاعی، ارائه می‌شود. در هر شبکه‌ای که ساختاری شعاعی داشته باشد، با استفاده از این روش می‌توان در باس‌هایی که دچار اعوجاج هارمونیکی در ولتاژ شده‌اند، اولاً فیدرهای مقصر (فیدرهایی که منشأ این اعوجاج هارمونیکی بوده‌اند) را از بین همه‌ی فیدرهای متصل به آن، شناسایی کرد؛ ثانیاً سهم هارمونیکی (میزان مقصر بودن) هر یک از فیدرها را به‌صورت کمی تعیین کرد. در این روش سهم هارمونیکی هر یک از فیدرهای متصل به یک باس (از یک شبکه‌ی شعاعی)، در اعوجاج هارمونیکی ولتاژ آن باس، برای هر یک از مراتب هارمونیکی، به‌صورت مجزا تعیین می‌شود؛ علاوه بر آن، سهم هارمونیکی هر یک از این فیدرها، در اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ آن باس نیز تعیین می‌شود. این روش مبتنی بر مقایسه‌ی هر یک از فیدرها با فیدر خطی متناظر با آن‌ها هست. در این مقاله روش جدیدی برای مدل‌سازی هارمونیکی هر یک از فیدرهای متصل به یک باس (از یک شبکه‌ی شعاعی) نیز ارائه می‌شود، که مبتنی بر رگرسیون خطی بین نمونه‌های ولتاژ و جریان و کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا هست.

واژه‌های کلیدی: شناسایی مقصر هارمونیکی، تعیین سهم هارمونیکی، مدل‌سازی هارمونیکی، سهم هارمونیکی اعوجاج هارمونیکی کل، سهم هارمونیکی ولتاژ، شبکه‌های شعاعی.

A New Procedure for Identifying and Determining the Contribution of Each Feeder Connected to A Bus in Harmonic Contamination of the Bus Voltage in Radial Networks

Javad Momenpour Akerdi¹, 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: In recent years, electrical networks have been subjected to harmonic pollution due to the expansion of nonlinear loads such as power electronic devices, electric arc furnaces and etc. In this paper, a new method is presented for identifying and determining the harmonic contribution of each feeder connected to a bus in the radial networks. In these networks, using this method, in the buses that has been subjected to the voltage harmonic distortion, it is possible; firstly, the responsible feeder to voltage harmonic could be identified from all feeders connected to the desired bus. Secondly, the harmonic contribution of each feeder could be quantified. In this method, the harmonic contribution of each feeder connected to a bus is separately determined in a voltage harmonic distortion for each harmonic order; in addition, the harmonic contribution of each feeder on total harmonic distortion of the bus is also determined. This method is based on the comparison of each feeder with the ideal feeder corresponding to them. Also, in this paper, a new method for harmonic modeling of each feeder connected to a bus (from a radial network) is also presented, which is based on linear regression between voltage and current samples and minimization of the sum of least mean squares (LMS) errors.

Keywords: Harmonic responsible identifying, Harmonic contribution determination, Harmonic modeling, Total harmonic distortion contribution, Harmonic voltage contribution, Radial networks.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۵، ۱۳۹۷/۱۱/۱۶، ۱۳۹۸/۰۱/۲۷ و ۱۳۹۸/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸

نام نویسنده مسئول: بهروز وحیدی

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۱- مقدمه

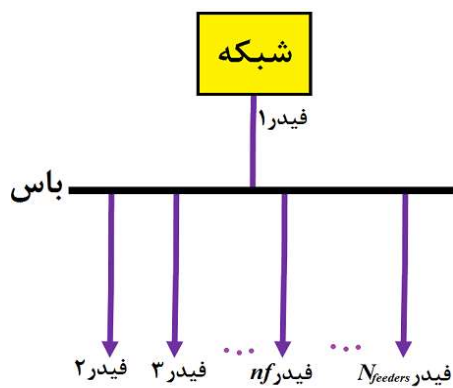
اهمیت بحث هارمونیک‌ها به‌عنوان یکی از پدیده‌های مقوله‌ی کیفیت توان روزبه‌روز در حال افزایش است زیرا از یک‌طرف کاربرد بارهای غیرخطی آلوده‌کننده نظیر کوره‌های قوس الکتریکی، کوره‌های القایی، درایوها و یکسو کننده‌ها افزایش یافته است و از طرف دیگر بارهای حساس به پدیده‌های کیفیت توان، نظیر میکروپروسورها، کامپیوترها، پردازنده‌ها و کنترل‌کننده‌های دیجیتال نیز در حال گسترش هستند. وجود اعوجاج در ولتاژ و جریان چالش‌های زیادی را هم برای شبکه‌ی برق و هم برای مشتریان ایجاد کرده است، لذا در صورت عدم‌اصلاح و بهبود کیفیت توان، خسارات و مشکلات جبران‌ناپذیری برای این بارهای حساس و نیز تجهیزات شبکه به‌وجود خواهد آمد [۱، ۲]. وجود هارمونیک در سیستم‌های قدرت آسیب‌های زیادی نظیر افزایش تلفات توان، افزایش حرارت تجهیزات، پدیده‌ی رزونانس، 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 است. قدم بعدی این است که هر یک از این منابع به‌طور واقعی چه میزان در اعوجاج هارمونیک مورد بررسی، سهم داشته است و به‌عبارت‌دیگر چه میزان مقصر بوده است. در سال‌های گذشته تعیین سهم هارمونیک بین شبکه و مشترک در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه (PCC)، با روش‌های مختلفی انجام شده است. در مقاله‌ی [۳] روشی برای تشخیص مکان منبع هارمونیک بر مبنای جهت شارش توان حقیقی در باس PCC ارائه شده است. در این روش هر سمت که توان هارمونیک بزرگ‌تری داشته باشد به‌عنوان مکان منبع هارمونیک تشخیص داده می‌شود. چندی بعد ثابت شده است که روش مذکور نمی‌تواند لزوماً پاسخ درست بدهد زیرا جهت شارش توان حقیقی وابسته به زاویه بین ولتاژهای سمت مشترک و شبکه است و به دامنه‌ی ولتاژهای آن‌ها وابسته نیست [۴]. روش دیگری که برای شناسایی منبع تولید هارمونیک در PCC ارائه شده است روش تصویر کردن بردارها است، که در آن مدار معادل نورتون شبکه و مشترک از دید باس PCC به دست آورده می‌شود و سپس تصویر بردارهای جریان یا ولتاژ ناشی از هر یک از منابع تولید هارمونیک در باس PCC بر به ترتیب بردار جریان یا ولتاژ ناشی از حضور هم‌زمان دو منبع هارمونیک، به دست آورده می‌شود. بزرگی و جهت هر یک از بردارهای تصویر، نشان‌دهنده‌ی سهم هارمونیک هر منبع است [۵]. مقالات [۶] و [۷] روش‌هایی را برای شناسایی منبع هارمونیک در باس PCC ارائه می‌کنند که به ترتیب بر اساس مقایسه‌ی دامنه‌ی ولتاژ و امپدانس بحرانی، می‌باشند؛ و در آن‌ها نیاز به چندین تست کلید زنی برای تشخیص امپدانس سیستم است.

در سال ۲۰۰۸، روشی مبتنی بر محاسبه‌ی اعوجاج هارمونیک برآیند (THD)^۲، برای محاسبه‌ی سهم مشترک و شبکه در اعوجاج هارمونیک شبکه‌های توزیع مطرح شده است [۸]. در روش مذکور به

دلیل اینکه فاز منابع هارمونیک در نظر گرفته نشده است، لذا این روش دقت لازم را ندارد [۹]. مقالات [۸-۳] صرفاً شبکه‌های شعاعی را مدنظر قرار داده‌اند؛ این در حالی است که در [۹] تعیین سهم هارمونیک شبکه و مشترک را در شبکه‌های به‌هم‌پیوسته‌ی ضعیف^۳، نیز انجام شده است. مقاله‌ی [۱۰] با یک نگاه متفاوت، مسئله‌ی تعیین سهم هارمونیک را برای یک‌بار به‌خصوص را از بین چند بار هارمونیک متصل به یک باس، انجام می‌دهد. یکی از ویژگی‌های مثبت آن، در نظر گرفتن تغییرات هارمونیک پس‌زمینه است. در [۱۱] و [۱۲] روش‌هایی مبتنی بر تخمین حالت هارمونیک (HSE)^۴، برای تعیین سهم هارمونیک در شبکه‌های انتقال مطرح شده است. از جمله روش‌های دیگری که مسئله‌ی تعیین سهم هارمونیک را در شبکه‌های انتقال حل می‌کنند، روش آنالیز مؤلفه‌ی نا وابسته (ICA)^۵ [۱۳، ۱۴] و روش تخمین حداقل مربعات وزن‌دار (WLSE)^۶ [۱۵] می‌باشند. مهم‌ترین ایرادهایی که به روش‌های معرفی شده، می‌توان وارد کرد، نیاز به اندازه‌گیری‌های فراوان و همچنین محاسبات سنگین آن‌ها است [۹]. در سال ۲۰۱۴ از یک روش جدید برای تشخیص منبع هارمونیک در باس PCC مبتنی بر متد «پیش‌نویس بردار»^۷ ارائه شده است. در روش مذکور برای شناسایی منبع هارمونیک باس PCC، از اسپکتوگرام فاز (PS)^۸ و اسپکتوگرام فرکانس (FS)^۹ برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود [۱۶]. در سال ۲۰۱۵ روشی برای تعیین سهم هارمونیک در شرایط متغیر بودن هارمونیک پس‌زمینه ارائه شده است. این روش در واقع ترکیب روش فیلتر کردن نوسان غالب^{۱۰} (باهدف تخمین امپدانس هارمونیک شبکه) و روش رگرسیون (باهدف تعیین سهم هارمونیک) است [۱۷]. اگرچه روش اخیر در تخمین امپدانس هارمونیک روش کاملی است اما یک نقص مهم این روش این است که در مواردی که هارمونیک پس‌زمینه غالب باشد مؤثر نخواهد بود. روش مبتنی بر رگرسیون جزئی خطی^{۱۱} این نقص را برطرف نموده است. این روش هم در حالتی که هارمونیک پس‌زمینه غالب باشد و هم در حالتی که غالب نباشد، قادر به تخمین امپدانس هارمونیک است [۱۸]. در سال ۲۰۱۶ روشی مبتنی بر دسته‌بندی خوشه‌ای K-means^{۱۲} و حداقل جزء-مربعات بایسین^{۱۳} برای تعیین سهم هارمونیک ارائه شده است. این روش از دقت بالایی برخوردار بوده و نسبت به تغییرات هارمونیک پس‌زمینه تطبیق‌پذیری مناسبی دارد [۱۹]. در سال ۲۰۱۸ روشی مبتنی بر توان ظاهری هارمونیک برای شناسایی منبع هارمونیک غالب در نقطه‌ی PCC ارائه شده است. مزیت این روش این است که به‌صورت جامع و توأمان اثرات ولتاژ و جریان هارمونیک منبع هارمونیک را در نظر می‌گیرد و آن را مبنای تعیین منبع هارمونیک غالب در نظر می‌گیرد [۲۰]. با توجه به توضیحات فوق می‌توان دریافت که:

- عمده‌ی تحقیقات انجام‌شده، مسئله‌ی شناسایی مقصر آلودگی هارمونیک و نیز تعیین سهم هارمونیک را صرفاً بین شبکه و مشترک در نظر گرفته‌اند. به عبارتی صرفاً حالتی مورد بررسی قرار گرفته است که به یک باس، یک فیدر ورودی (فیدر شبکه) و

مقایسه‌ی هر یک از فیدها با فیدر خطی متناظر با آن‌ها که در واقع شرکت برق از آن فیدر انتظار دارد، است. هدف، تعیین سهم هر یک از فیدهای خروجی و فیدر شبکه، در آلودگی هر یک از مراتب هارمونیک و نیز اعوجاج هارمونیک کل (THD) ولتاژ یک باس مشابه شکل (۱)، است. در این شکل، تعداد $N_{feeders}$ فیدر از یک شبکه‌ی شعاعی نشان داده شده است که به یک باس متصل شده‌اند. در این شکل و نیز در روابطی که در ادامه می‌آیند، فیدر ۱ به‌عنوان فیدر ورودی (فیدر شبکه) و فیدهای ۲ تا $N_{feeders}$ به‌عنوان فیدهای خروجی (فیدهای بار) در نظر گرفته می‌شوند.



شکل (۱): نمایش یک باس نوعی از یک شبکه‌ی شعاعی با تعداد $N_{feeders}$ فیدر

۲-۱- مدل‌سازی هر یک از فیدها:

در این روش در قدم اول نیاز است که مدل هر یک از فیدها در مرتبه‌ی هارمونیک مورد بررسی که در اینجا h فرض می‌شود، به دست آورده شود. چنانچه هدف یافتن سهم هارمونیک هر یک از فیدها در اعوجاج هارمونیک کل (THD) ولتاژ باس نیز باشد، می‌بایست مدل‌های هارمونیک هر یک از فیدها را برای همه‌ی مراتب هارمونیک مورد بررسی (مثلاً تا هارمونیک ۱۹ ام) به دست آورد. بدین منظور در این مقاله با به‌کارگیری روشی نوین و بسیار نزدیک به رفتار واقعی هر یک از فیدها، مدل هر یک از فیدها برای هر یک از مراتب هارمونیک به دست آورده می‌شود. این مدل مبتنی بر رگرسیون خطی بین جریان و ولتاژ است [۱۷، ۱۸]. در این روش، اطلاعات ولتاژ و جریان هر یک از فیدها (برای هر یک از سه فاز) در یک بازه‌ی زمانی مورد بررسی، مورد نیاز است. رابطه‌ی (۱) بیانگر مدل نورتون هارمونیک h ام فیدر n_f ام است. جهت جریان هر یک از فیدها (حتی فیدر شبکه) در این روش، به سمت خارج باس فرض شده است.

$$I_{nf,h} = \alpha_{nf,h} V_{nf,h} + \beta_{nf,h} \quad (1)$$

در رابطه‌ی اخیر، $I_{nf,h}$ و $V_{nf,h}$ به ترتیب جریان هارمونیک h ام فیدر n_f ام و ولتاژ هارمونیک h ام باس در حالت فازوری می‌باشند. در این رابطه، $\alpha_{nf,h}$ و $\beta_{nf,h}$ ضرایب ثابت مربوط به مدل هارمونیک h ام فیدر n ام می‌باشند.

صرفاً یک فیدر خروجی (فیدر مشترک) متصل شده است. در حالی که در واقعیت عموماً از یک باس چندین فیدر خارج می‌شود و برای شرکت برق اهمیت شناسایی و تعیین سهم هارمونیک بین تک تک فیدها، بسیار بالاتر از این است که کل فیدهای خروجی از باس صرفاً به‌صورت یک فیدر (فیدر مشترکین) در نظر گرفته شود.

- اغلب تحقیقات انجام شده، صرفاً توانایی شناسایی و معرفی مقصر غالب را دارند اما نمی‌توانند به‌صورت کمی میزان سهم هارمونیک هر یک از مقصرین را تعیین کنند.
- غالب تحقیقات انجام شده، تمرکز کافی روی مدل‌سازی صحیح رفتار هارمونیک یک فیدر (فیدر خروجی و نیز فیدر شبکه) نداشته‌اند و مستقیماً از یک مدل نورتون بسیار قدیمی و ساده استفاده کرده‌اند. این در حالی است که در مسئله‌ی شناسایی و تعیین سهم هارمونیک، مدل‌سازی صحیح هر یک از فیدها، اهمیت بسیار بالایی دارد؛ چراکه مدل‌سازی نادرست یک فیدر منجر به فاصله گرفتن از واقعیت و در نتیجه منجر به ایجاد خطا در شناسایی مقصر و تعیین سهم آن می‌شود.

در این مقاله روشی ارائه می‌شود که با استفاده از بتوان در یک باس از شبکه‌ی شعاعی که چندین فیدر به آن متصل‌اند، اولاً مقصرین اعوجاج هارمونیک ولتاژ این باس را شناسایی کرد؛ و ثانیاً سهم هر یک از فیدها را در اعوجاج هارمونیک ولتاژ این باس، به‌صورت کمی مشخص کرد. لازم به ذکر است که در این مقاله مسئله شناسایی و تعیین سهم هارمونیک ولتاژ، هم به‌صورت مجزا برای هر یک از مراتب هارمونیک در نظر گرفته شده است، و هم برای پارامتر اعوجاج هارمونیک کل (THD) این ولتاژ، در نظر گرفته شده است.

در بخش ۲ روش پیشنهادی به‌طور مفصل تشریح می‌شود. لازم به ذکر است که در بخش ۱-۲ روشی جدید برای مدل‌سازی هارمونیک هر یک از فیدهای شعاعی، نیز ارائه می‌شود که علاوه بر اینکه در مسائل تعیین سهم هارمونیک می‌توان از آن استفاده کرد، در سایر آنالیزهایی که نیاز به مدل‌سازی هارمونیک فیدر باشد، نیز می‌توان از آن بهره برد. در بخش ۳ شبیه‌سازی روش پیشنهادی همراه با نتایج آن آورده شده است. نهایتاً در بخش ۴ نتیجه‌گیری آمده است.

۲- روش پیشنهادی

در این بخش روشی ارائه می‌شود که با استفاده از آن بتوان به‌سادگی سهم هر یک از فیدهای متصل به یک باس از شبکه‌های شعاعی را در میزان آلودگی هارمونیک ولتاژ آن باس تعیین کرد. لازم به ذکر است در صورتی که سیستم نامتعادل باشد لازم است روشی که در ادامه تشریح می‌شود برای هر یک از سه فاز سیستم به‌صورت جداگانه اجرا شود.

در بحث هارمونیک، شرکت برق اساساً انتظار دارد همه‌ی فیدها، به‌صورت خطی رفتار کنند؛ و فیدهایی که رفتار غیرخطی دارند فیدهایی نامطلوب محسوب می‌شوند، چراکه منجر به ایجاد آلودگی هارمونیک در شبکه می‌شوند. روش ارائه شده در این مقاله مبتنی بر

۲-۲- تعیین فیدر خطی متناظر هر یک از فیدرها:

از نظر شرکت برق در بحث هارمونیک‌ها، فیدری ایده‌آل است که رفتاری خطی داشته باشد. یعنی در مورد فیدرهای خروجی (بارها) مطلوب این است که اگر امپدانس مؤلفه‌ی اصلی فیدر، Z_1 باشد، آنگاه امپدانس فیدر در فرکانس هارمونیک مرتبه‌ی h برابر خواهد بود با:

$$\text{Re}[Z_1] + j(h \cdot \text{Im}[Z_1])$$

در هر یک از فیدرهای خروجی ($nf \geq 2$) به منظور دستیابی به مدل فیدر خطی متناظر آن‌ها، مؤلفه‌ی اصلی ولتاژ و جریان هر یک از N نمونه، مورد نیاز است. رابطه‌ی (۵) و رابطه‌ی (۶) به ترتیب مؤلفه‌های اصلی ولتاژ و جریان فیدر nf را در حالت فازوری، برای N نمونه نشان می‌دهند.

$$\underline{V}_{nf,1} = [V_{nf,1}^{(1)} \quad V_{nf,1}^{(2)} \quad \dots \quad V_{nf,1}^{(n)} \quad \dots \quad V_{nf,1}^{(N)}] \quad (5)$$

$$\underline{I}_{nf,1} = [I_{nf,1}^{(1)} \quad I_{nf,1}^{(2)} \quad \dots \quad I_{nf,1}^{(n)} \quad \dots \quad I_{nf,1}^{(N)}] \quad (6)$$

با تقسیم هر یک از درایه‌های ماتریس $\underline{V}_{nf,1}$ بر درایه‌ی نظیر آن از ماتریس $\underline{I}_{nf,1}$ ، ماتریس امپدانس‌های مؤلفه‌ی اصلی هر یک از نمونه‌ها از فیدر nf یعنی ماتریس $\underline{Z}_{nf,1}$ مطابق رابطه‌ی (۷) به دست خواهد آمد.

$$\underline{Z}_{nf,1} = [Z_{nf,1}^{(1)} \quad Z_{nf,1}^{(2)} \quad \dots \quad Z_{nf,1}^{(n)} \quad \dots \quad Z_{nf,1}^{(N)}] ; Z_{nf,1}^{(n)} = \frac{V_{nf,1}^{(n)}}{I_{nf,1}^{(n)}} \quad (7)$$

با در اختیار داشتن ماتریس $\underline{Z}_{nf,1}$ رابطه‌ی (۷)، می‌توان مقدار متوسط امپدانس مؤلفه‌ی اصلی فیدر nf را مطابق رابطه‌ی (۸) تعیین کرد.

$$Z_{nf,1}^{Avg} = \frac{\sum_{n=1}^N Z_{nf,1}^{(n)}}{N} \quad (8)$$

مطابق این روش، فیدر خطی متناظر با فیدر خروجی nf فیدری است که به‌طور میانگین امپدانس مؤلفه‌ی اصلی آن $Z_{nf,1}^{Avg}$ و امپدانس فرکانس هارمونیک مرتبه‌ی h آن $h \cdot \text{Im}[Z_{nf,1}^{Avg}] + \text{Re}[Z_{nf,1}^{Avg}]$ است. به این ترتیب می‌توان تعیین کرد که اگر فیدری مانند فیدر nf خطی می‌باشد، آنگاه به‌طور میانگین چه مدلی می‌داشت و چگونه رفتار می‌کرد. با استفاده از روابط بیان‌شده، می‌بایست برای هر یک از فیدرهای خروجی مدل خطی متناظر با آن، به دست آورده می‌شود.

به‌منظور تعیین مدل خطی متناظر فیدر شبکه ($nf=1$) نیز مشابه فیدرهای خروجی می‌بایست امپدانس مؤلفه‌ی اصلی شبکه را معیار قرار داد. بدین منظور از ولتاژ نامی شبکه ($V_{Nominal}$)، سطح اتصال کوتاه شبکه (SSc) و نسبت راکتانس (X) به مقاومت (R) آن، مطابق رابطه‌ی (۹) استفاده می‌شود.

$$K = \frac{X}{R} \quad (9) \quad \begin{cases} R_{net} = \frac{V_{Nominal}^2}{SSc \sqrt{1+K^2}} \\ X_{net} = K \cdot R_{net} \end{cases} \Rightarrow Z_{net} = R_{net} + jX_{net}$$

بنابراین می‌توان بیان کرد که در صورتی که شبکه خطی می‌بود، امپدانس ظاهری آن در هر یک از مراتب هارمونیک برابر با $R_{net} + j(h \cdot X_{net})$ می‌بود.

لازم به ذکر است که در رابطه‌ی (۱) ضرایب α و β مربوط به مدل یک فیدر برای هر یک از مراتب هارمونیک به‌صورت مجزا محاسبه می‌شوند؛ یعنی هر یک از مراتب هارمونیک ضرایب α و β مختص خود را دارند. به‌منظور محاسبه‌ی ضرایب $\alpha_{nf,h}$ و $\beta_{nf,h}$ نیاز به نمونه‌هایی است که پیش‌تر در مورد آن اشاره شد. با در اختیار داشتن N نمونه ولتاژ و جریان برای فیدر nf ام، تعداد N نمونه ولتاژ و جریان برای هارمونیک h ام فیدر nf ام در اختیار خواهد بود. با جایگذاری هر یک از این نمونه‌ها در رابطه‌ی (۱) و با فرض ثابت بودن ضرایب $\alpha_{nf,h}$ و $\beta_{nf,h}$ ، نهایتاً رابطه‌ی به‌صورت رابطه‌ی (۲) خواهیم داشت.

$$\begin{bmatrix} I_{nf,h}^{(1)} \\ I_{nf,h}^{(2)} \\ \vdots \\ I_{nf,h}^{(n)} \\ \vdots \\ I_{nf,h}^{(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{nf,h}^{(1)} & 1 \\ V_{nf,h}^{(2)} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ V_{nf,h}^{(n)} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ V_{nf,h}^{(N)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{nf,h} \\ \beta_{nf,h} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{E}_{nf,h}^{(1)} \\ \mathcal{E}_{nf,h}^{(2)} \\ \vdots \\ \mathcal{E}_{nf,h}^{(n)} \\ \vdots \\ \mathcal{E}_{nf,h}^{(N)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

در این رابطه، نماد (n) نشان‌دهنده‌ی نمونه‌ی n ام است. در رابطه با تعداد نمونه‌های مورد نیاز این روش، ذکر این نکته ضروری است که تعداد نمونه‌ها باید بیش از دو باشد (تعداد درایه‌های ماتریس ضرایب ($N > 2$)) باشد؛ همچنین هر چه تعداد نمونه‌ها بیشتر باشد، طبیعی است که مدل به واقعیت نزدیک‌تر خواهد شد.

لازم به ذکر است که چون ضرایب $\alpha_{nf,h}$ و $\beta_{nf,h}$ برای همه‌ی نمونه‌ها یکسان است لذا به‌گونه‌ای به دست می‌آیند که تا حد قابل قبولی همه‌ی این روابط (N تعداد، رابطه‌ای که با جایگذاری هر یک از N نمونه ولتاژ و جریان هارمونیک h ام فیدر nf ام، در رابطه‌ی (۱) به وجود می‌آیند) را ارضا کنند، بنابراین طبیعی است که ارضای هم‌زمان همه‌ی روابط با مقدار خطای صفر ممکن نیست؛ بدین منظور برای هر یک از روابط مقداری خطا نیز در نظر گرفته شده است. $\mathcal{E}_{nf,h}^{(n)}$ نشان‌دهنده‌ی خطای ارضای معادله‌ی حاصل از جایگذاری نمونه‌ی n ام ولتاژ و جریان هارمونیک h ام فیدر nf ام در رابطه‌ی (۱)، توسط $\alpha_{nf,h}$ و $\beta_{nf,h}$ است.

هدف یافتن ضرایب $\alpha_{nf,h}$ و $\beta_{nf,h}$ به قسمی است که در رابطه‌ی (۲) مجموع مربعات اندازه‌ی خطاها، کمینه شود. به عبارتی هدف کمینه‌سازی پارامتر $\Psi_{nf,h}$ از رابطه‌ی (۳) است.

$$\Psi_{nf,h} = \sum_{n=1}^N |\mathcal{E}_{nf,h}^{(n)}|^2 \quad (3)$$

نتیجه‌ی کمینه‌سازی پارامتر $\Psi_{nf,h}$ نهایتاً منجر به حصول رابطه‌ی (۴) می‌شود [۱۷].

$$\begin{bmatrix} \alpha_{nf,h} \\ \beta_{nf,h} \end{bmatrix} = (V'_{nf,h} \times V_{nf,h})^{-1} \times V'_{nf,h} \times I_{nf,h} \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴) نماد « \times » نشان‌دهنده‌ی اعمال هم‌زمان ترانزپوز و مزدوج مختلط ماتریس است. به این ترتیب هر یک از ضرایب $\alpha_{nf,h}$ و $\beta_{nf,h}$ به دست خواهند آمد و در نتیجه مدل نورتون هر یک از فیدرها در هر یک از مراتب هارمونیک قابل تعیین است.

هر یک از فیدرها در باس موردبررسی نصب گردد و این مقادیر به صورت همزمان اندازه‌گیری شوند تا بتوان از این مقادیر در مدل‌سازی هر یک از فیدرها که در بخش ۲-۱ تشریح شده است، استفاده کرد. به‌منظور محاسبه ولتاژ هارمونیک h ام باس در حالت فعلی (حالت واقعی)، از رابطه‌ی (۱۱) استفاده می‌شود. این رابطه در واقع از اعمال KCL^۲ در باس موردبررسی ایجاد شده است. مدل هر یک از فیدرها مطابق رابطه‌ی (۱) است؛ چنانچه جریان همه‌ی فیدرها (که خود از رابطه‌ی (۱) تبعیت می‌کنند) با یکدیگر جمع شوند و این مجموع طبق KCL برابر صفر قرار داده شود، نهایتاً ولتاژ باس در هارمونیک h ام مطابق رابطه‌ی (۱۱) به دست می‌آید.

$$V_h = - \frac{\sum_{nf=1}^{N_{feeders}} \beta_{nf,h}}{\sum_{nf=1}^{N_{feeders}} \alpha_{nf,h}} \quad (11)$$

رابطه‌ی (۱۲)، ولتاژ هارمونیک h ام باس را برای حالتی نشان می‌دهد که فیدر nf تبدیل به فیدر موردعلاقه‌ی شرکت برق شود، یعنی فیدر nf کاملاً خطی رفتار کند و بقیه‌ی فیدرها در وضعیت واقعی خود باشند. این ولتاژ با پارامتر $\tilde{V}_{nf,h}$ نمایش داده شده است. این رابطه نیز مشابه رابطه‌ی (۱۱) با استفاده از اعمال KCL در باس موردبررسی به دست می‌آید. تفاوت آن با رابطه‌ی (۱۱) در این است که مدل فیدر nf مطابق رابطه‌ی (۱) نبوده بلکه با ادمیتانس برابر با $\frac{1}{\text{Re}[\tilde{Z}_{nf,1}] + j(h \cdot \text{Im}[\tilde{Z}_{nf,1}])}$ مدل می‌شود؛ لذا در رابطه‌ی (۱۲) از عبارت $m \neq nf$ استفاده شده و ادمیتانس مذکور در مخرج کسر ظاهر شده است.

$$\tilde{V}_{nf,h} = - \frac{\sum_{m=1, m \neq nf}^{N_{feeders}} \beta_{m,h}}{\left(\sum_{m=1, m \neq nf}^{N_{feeders}} \alpha_{m,h} \right) + \left(\frac{1}{\text{Re}[\tilde{Z}_{nf,1}] + j(h \cdot \text{Im}[\tilde{Z}_{nf,1}])} \right)} \quad (12)$$

با به دست آمدن مقادیر V_h و $\tilde{V}_{nf,h}$ از روابط (۱۱) و (۱۲) می‌توان مطابق رابطه‌ی (۱۳) محاسبه کرد که رفتار غیرخطی فیدر nf به چه مقدار در دامنه‌ی هارمونیک h ام ولتاژ باس تأثیر داشته است. پارامتر $\Delta_{nf,h}$ از رابطه‌ی (۱۳) به صورت کمی این مقدار را نشان می‌دهد.

$$\Delta_{nf,h} = \left| V_h \right| - \left| \tilde{V}_{nf,h} \right| \quad (13)$$

در رابطه‌ی (۱۳) ممکن است مقدار $\Delta_{nf,h}$ منفی نیز حاصل شود. مفهوم منفی شدن پارامتر $\Delta_{nf,h}$ این است که رفتار غیرخطی فیدر nf منجر به کاهش دامنه‌ی هارمونیک h ام ولتاژ باس شده است. یعنی اگر این فیدر به صورت خطی رفتار می‌کرد، دامنه‌ی هارمونیک h ام ولتاژ باس مقدار بزرگ‌تری می‌داشت. علت اینکه رفتار غیرخطی یک فیدر ممکن است تأثیر مثبت بر دامنه‌ی هارمونیک ولتاژ یک باس داشته باشد، این است که در چنین شرایطی رفتار غیرخطی این‌گونه فیدرها، با رفتار

لازم به ذکر است یکی از نقاط ضعف مدل‌سازی فیدر شبکه به روش مذکور، نیاز آن به در اختیار داشتن سطح اتصال کوتاه شبکه‌ی بالادست است. البته روش‌های متنوعی برای تعیین سطح اتصال کوتاه شبکه‌ی بالادست وجود دارد که بررسی آن خارج از موضوع اصلی این مقاله است. با استفاده از روابط (۸) و (۹)، می‌توان رابطه‌ی کلی ادمیتانس مؤلفه‌ی اصلی فیدر nf را به صورت رابطه‌ی (۱۰) نوشت.

$$\tilde{Z}_{nf,1} = \begin{cases} Z_{net} & nf = 1 \\ Z_{nf,1}^{Avg} & nf \geq 2 \end{cases} \quad (10)$$

۲-۳- تعیین سهم هارمونیک هر یک از فیدرها در اعوجاج هارمونیک مرتبه‌ی h ام ولتاژ باس:

به‌منظور تعیین سهم هر یک از فیدرها در اعوجاج هارمونیک مرتبه‌ی h ام ولتاژ باس، می‌بایست میزان اثرگذاری رفتار غیرخطی هر یک از فیدرها را در ایجاد اعوجاج هارمونیک مرتبه‌ی h ام ولتاژ باس، مورد ارزیابی قرار داد. ولتاژ باس در حالت واقعی دارای میزان مشخصی اعوجاج در هارمونیک مرتبه‌ی h ام خود است؛ حال اگر فرضاً فیدر nf مطابق خواسته‌ی شرکت برق کاملاً به صورت خطی عمل می‌کرد، این میزان اعوجاج هارمونیک مرتبه‌ی h ام، مقدار مشخص دیگری را اخذ می‌کرد؛ به‌این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که فیدر nf به میزان اختلاف این دو مقدار، در ایجاد اعوجاج هارمونیک مرتبه‌ی h ام، مقصر است. به‌عبارت دیگر، فیدر nf به میزانی در ایجاد اعوجاج هارمونیک h ام ولتاژ باس مقصر است که تبدیل شدن این فیدر از فیدر خطی متناظر آن (موردعلاقه‌ی شرکت برق) به فیدر فعلی (واقعی)، منجر به ایجاد آن میزان تغییر در اعوجاج هارمونیک h ام ولتاژ آن باس شود. به‌طور ساده‌تر می‌توان بیان کرد که اگر یک فیدر، خواسته‌ی شرکت برق را به‌طور کامل برآورده می‌کرد و در واقع رفتاری کاملاً خطی می‌داشت، طبیعتاً در آن حالت این فیدر هیچ نقشی در ایجاد میزان اعوجاج هارمونیک ولتاژ مربوط به آن حالت، نمی‌داشت؛ بنابراین می‌توان گفت تا این مقدار از اعوجاج هارمونیک را این فیدر مقصر نیست؛ در چنین شرایطی اگر این فیدر به صورت واقعی رفتار کند، مقداری تغییر در اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس ایجاد می‌شود، که آن مقدار را به‌طور کامل این فیدر مقصر است، چراکه رفتار غیرخطی این فیدر منجر به ایجاد چنین تغییری در اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس شده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده پرواضح است که هر یک از فیدرها مشخصاً به مقداری که رفتار غیرخطی خود آن‌ها آلودگی هارمونیک ایجاد کرده است، مقصر شناخته می‌شوند؛ و تأثیر هارمونیک پس‌زمینه از آن مجزا شده است. این موضوع مزیت مهم این روش است که در واقع، تفکیک شدن اثر هارمونیک پس‌زمینه از اثر رفتار غیرخطی خود فیدر، به صورت واضح، قابل لمس است.

بر اساس توضیحات داده شده، لازم است برای هر یک از فیدرها، تغییر ولتاژ هارمونیک h ام باس، از حالت موردعلاقه‌ی شرکت برق (حالت خطی بودن فیدر) به حالت فعلی (حالت واقعی فیدر)، به دست آورده شود. بدین منظور لازم است تجهیزات اندازه‌گیری ولتاژ باس و جریان

ندارد که پس از تغییر نقطه‌ی کار سیستم نیز مقصر شناخته نشوند. به‌عنوان مثال فرض شود در یک شبکه‌ی شعاعی، یک باس با یک فیدر ورودی و چهار فیدر خروجی، فرضاً پارامتر $\Delta_{nf,h}$ فیدر ۳، مقداری منفی داشته باشد؛ در این شرایط بقیه‌ی فیدرها که پارامتر $\Delta_{nf,h}$ آن‌ها مثبت است مقصر شناخته شده و سهم هارمونیک مشخصی برای هارمونیک h ام ولتاژ این باس، به هر یک از فیدرهای دیگر اختصاص می‌یابد؛ پس از اعلام سهم هارمونیک هر یک از فیدرها، اگر فرضاً فیدرهای مقصر اقدام به کاهش تولید هارمونیک h ام (با نصب فیلترهای هارمونیک، جایگزین کردن تجهیزات با تجهیزات با رفتار خطی تر و ...) کنند، آنگاه نقطه‌ی کار سیستم عوض می‌شود؛ با اصلاح رفتار فیدرهای غیرخطی که در مرحله‌ی اول مقصر شناخته شده بودند، نقطه‌ی کار سیستم تغییر کرده و یک‌بار دیگر تعیین سهم هارمونیک مشابه مرحله‌ی اول انجام می‌شود؛ اما این-بار پارامتر $\Delta_{nf,h}$ فیدر ۳، مثبت شده و مقصر شناخته می‌شود.

۲-۴- تعیین سهم هارمونیک هر یک از فیدرها در اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ باس:

یکی از موضوعاتی که برای شرکت برق اهمیت زیادی دارد این است که بتوان تشخیص داد که هر یک از فیدرهای متصل به یک باس، به چه میزان در THD ولتاژ یک باس نقش دارند. در بخش قبل، تعیین سهم هارمونیک هر یک از فیدرها، به‌صورت مجزا برای هر یک از مراتب هارمونیک انجام شده است؛ در این بخش همه‌ی مراتب هارمونیک باهم در نظر گرفته می‌شوند. اساس روش ارائه شده در این بخش دقیقاً مشابه روش ارائه شده در بخش قبل است، با این تفاوت که در بخش قبل پارامتر مورد ارزیابی، دامنه‌ی ولتاژ هارمونیک h ام باس بوده، درحالی که در این بخش پارامتر مورد ارزیابی، مقدار THD است.

در حالت فعلی (حالت واقعی) سیستم، مقدار THD ولتاژ باس را می‌توان با استفاده از N تعداد، نمونه‌ای که در اختیار است، محاسبه کرد. بدین منظور لازم است THD هر یک از نمونه‌های ولتاژ، مطابق رابطه‌ی (۱۶) محاسبه شود. در نهایت THD ولتاژ باس به‌طور متوسط، مطابق رابطه‌ی (۱۷) به‌دست خواهد آمد.

$$THDV^{(n)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H |V_h^{(n)}|^2}}{|V_1^{(n)}|} \quad (16)$$

$$THDV = \frac{\sum_{n=1}^N THDV^{(n)}}{N} \quad (17)$$

در رابطه‌ی (۱۶)، $THDV^{(n)}$ مقدار THD ولتاژ نمونه‌ی n ام باس است. در این رابطه، H آخرین مرتبه‌ی هارمونیک مورد بررسی است. همچنین $V_h^{(n)}$ نشان دهنده‌ی ولتاژ هارمونیک h ام و $V_1^{(n)}$ نشان دهنده‌ی ولتاژ مؤلفه‌ی اصلی نمونه‌ی n ام، در حالت فازوری، می‌باشند.

در ادامه روش محاسبه‌ی THD ولتاژ باس، در حالتی که در آن، فیدر nf مطابق حالت مطلوب شرکت برق بوده و رفتاری کاملاً خطی می‌داشت، بیان می‌شود. اگر فیدر nf خطی می‌بود، ولتاژ هارمونیک h ام باس،

غیرخطی فیدرهای دیگر مخالفت می‌کند و به عبارتی اثر فیدرهای غیرخطی دیگر را خنثی می‌کند. همین موضوع سبب می‌شود که رفتار غیرخطی یک فیدر گاهی مفید واقع شود.

در بحث تعیین سهم هارمونیک فیدرهایی که پارامتر $\Delta_{nf,h}$ آن‌ها منفی حاصل شده است، با توجه به توضیحات ذکر شده، در وهله‌ی اول نمی‌توان آن‌ها را نیز مقصر اعلام کرد. در مسئله‌ی تعیین سهم هارمونیک قدم اول شناسایی مقصرین و قدم دوم تعیین کمی سهم هر یک از مقصرین است. با عنایت به این موضوع، برای شناسایی مقصرین (قدم اول)، پارامتر $q_{nf,h}$ مطابق رابطه‌ی (۱۴) تعریف شده است.

$$q_{nf,h} = \begin{cases} 0 & \Delta_{nf,h} < 0 \\ 1 & \Delta_{nf,h} \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

در رابطه‌ی (۱۴) مقدار $q_{nf,h}$ برای فیدرهایی که پارامتر $\Delta_{nf,h}$ آن‌ها منفی است، «۰» در نظر گرفته شده است؛ و این به معنای این است که این فیدر مقصر نیست و در نتیجه در تعیین کمی سهم هر یک از مقصرین (قدم دوم) شرکت نخواهد کرد. همچنین مقدار $q_{nf,h}$ برای فیدرهایی که پارامتر $\Delta_{nf,h}$ آن‌ها مثبت است، «۱» در نظر گرفته شده است؛ و این به معنای این است که این فیدر مقصر است و در نتیجه می‌بایست در تعیین کمی سهم هر یک از مقصرین (قدم دوم)، شرکت کند.

در بحث کمی‌سازی سهم هارمونیک هر یک از مقصرین (قدم دوم)، می‌بایست سهم هر یک از فیدرها را متناسب با میزان تأثیرگذاری رفتار غیرخطی آن‌ها در افزایش دامنه‌ی ولتاژ هارمونیک باس، در نظر گرفت. بدین منظور سهم هر یک از فیدرها متناسب با پارامتر $\Delta_{nf,h}$ آن‌ها، معرفی می‌شود. پارامتر $\zeta_{nf,h}$ از رابطه‌ی (۱۵)، نشان دهنده‌ی مقدار کمی سهم فیدر nf در اعوجاج هارمونیک h ام ولتاژ باس، است.

$$\zeta_{nf,h} (\%) = \frac{q_{nf,h} \times \Delta_{nf,h}}{\sum_{m=1}^{N_{feeders}} (q_{m,h} \times \Delta_{m,h})} \times 100 \quad (15)$$

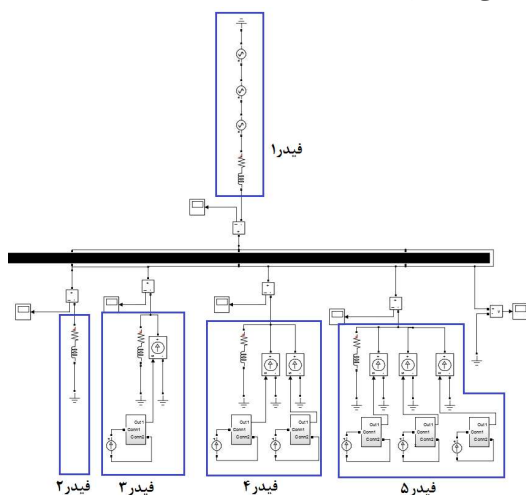
با استفاده از رابطه‌ی (۱۵) می‌توان سهم هارمونیک هر یک از فیدرهای متصل به یک باس از شبکه‌ی شعاعی را در اعوجاج هارمونیک h ام ولتاژ آن باس را تعیین کرد.

موضوع مهمی که در این قسمت نیاز به توضیح دارد این است که فیدرهای غیرخطی که پارامتر $\Delta_{nf,h}$ آن‌ها منفی شده است، باینکه رفتاری غیرخطی دارند اما (بنا به دلیلی که پیش‌تر ذکر شد) سهمی برای آن در نظر گرفته نشده است و جریمه‌ای به آن‌ها تعلق نمی‌گیرد. نکته این است که تا زمانی که نقطه‌ی کار فعلی سیستم به‌گونه‌ای باشد که فیدرهای مورد بحث به کاهش دامنه‌ی هارمونیک ولتاژ باس کمک کنند، سهم هارمونیک این فیدرها صفر در نظر گرفته می‌شود و جریمه‌ای به آن‌ها تعلق نمی‌گیرد؛ اما به محض اینکه نقطه‌ی کار سیستم به‌گونه‌ای تغییر کند که پارامتر $\Delta_{nf,h}$ آن‌ها را مثبت کند، این فیدرها نیز دارای سهم هارمونیک می‌شوند. به همین خاطر است که در توضیحاتی که پیش‌تر ارائه شد، بیان شد که فیدرهایی که پارامتر $\Delta_{nf,h}$ آن‌ها منفی است «در وهله‌ی اول» مقصر شناخته نمی‌شوند؛ بنابراین الزامی وجود

در روش ارائه شده روابط تعیین سهم هارمونیک مبتنی بر مدل نورتن هر یک فیدرها است. به این مفهوم که در وهله اول نیاز است مدل نورتن هر یک از فیدرها به دست آید. به این ترتیب پرواضح است که برای یک باس در دل یک شبکه غیر شعاعی که فیدرهای متصل به آن لزوماً فیدرهای با ساختار شعاعی نیستند (مثلاً فیدر به صورت خطی باشد که به یک باس دیگر متصل شده و از آن باس مجدداً با ساختار حلقوی توسط خطی به باس مورد بررسی متصل باشد)، امکان مدل سازی آن ها به صورت مدل نورتن وجود ندارد. لذا روابط ارائه شده برای تعیین سهم هارمونیک محدود به ساختار شعاعی هستند.

۳- شبیه سازی و نتایج

در این قسمت روش پیشنهادی در این مقاله، روی سیستمی مطابق شکل (۲)، شبیه سازی شده و نتایج آن بررسی می شود. مطابق شکل (۲) یک باسبار ۲۰ کیلوولت با یک فیدر تغذیه و چهار فیدر خروجی، در نرم افزار متلب شبیه سازی شده است. در سیستم شکل (۲)، به منظور مدل سازی هارمونیک پس زمینه شبکه، از دو منبع ولتاژ استفاده شده است. با توجه به سناریوی مورد بررسی، صرفاً هارمونیک مرتبه ۵ ام و ۷ ام برای هارمونیک پس-زمینه شبکه در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور مدل سازی رفتار غیر خطی فیدرهای خروجی، از منبع جریان استفاده شده است؛ در این فیدرها نیز با توجه به سناریوی مورد بررسی، برای هر یک از آن ها مراتب هارمونیک به خصوصی در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که فیدر ۲، یک فیدر کاملاً خطی در نظر گرفته شده است و هیچ منبع هارمونیک برای آن لحاظ نشده است.



شکل (۲): سیستم شبیه سازی شده شامل باسبار، یک فیدر تغذیه و سه فیدر خروجی

همچنین در این شکل، فیدر ۳ شامل منبع هارمونیک مرتبه ۷ ام، فیدر ۴ شامل منابع هارمونیک مرتبه ۵ ام و ۷ ام و فیدر ۵ شامل منابع هارمونیک مرتبه ۵ ام، ۷ ام و ۱۱ ام است. به منظور نزدیک تر شدن بیش تر به واقعیت، برای دامنه و فاز این منابع هارمونیک تغییراتی در رنج ۵٪ و متناظر با تابع توزیع نرمال استاندارد، در نظر گرفته شده

مطابق رابطه (۱۲) برابر با $\tilde{V}_{nf,h}$ می بود. با محاسبه پارامتر $\tilde{V}_{nf,h}$ فیدر nf ، برای همه مراتب هارمونیک مورد بررسی (از هارمونیک ۲ ام تا H ام)، می توان مطابق رابطه (۱۸) مقدار THD ولتاژ باس را برای حالتی که فیدر nf خطی بوده، به دست آورد؛ این پارامتر با نماد \overline{THDV}_{nf} نمایش داده شده است.

$$\overline{THDV}_{nf} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H |\tilde{V}_{nf,h}|^2}}{|\tilde{V}_{nf,1}|} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، ولتاژ مؤلفه اصلی باس در حالت مذکور است. لازم به ذکر است ولتاژ مؤلفه اصلی باس در این حالت هیچ تفاوتی با حالت واقعی ندارد؛ یعنی، چه در حالتی که فیدر nf خطی می بود و چه در حالتی واقعی (حالت فعلی)، ولتاژ مؤلفه اصلی باس، به یک صورت است. علت این است که خطی بودن فیدر nf صرفاً رفتار این فیدر را برای هر یک از مراتب هارمونیک تحت تأثیر قرار می دهد اما در مؤلفه اصلی تغییری ایجاد نمی کند؛ یعنی خطی بودن فیدر nf منجر به این می شود که امپدانس فیدر در هر یک از مراتب هارمونیک از رابطه $R + j(h.X)$ تبعیت کند، اما تأثیری روی امپدانس مؤلفه اصلی فیدر $(R + jX)$ ندارد. بنابراین امپدانس مؤلفه اصلی فیدر nf در هر دو حالت به یک صورت بوده و در نتیجه ولتاژ مؤلفه اصلی باس در دو حالت یکسان است.

با توجه به توضیحات فوق، برای محاسبه پارامتر $\tilde{V}_{nf,1}$ بیان شده در رابطه (۱۸)، می توان مطابق رابطه (۱۹) از متوسط ولتاژ مؤلفه اصلی نمونه های واقعی استفاده کرد.

$$\tilde{V}_{nf,1} = \frac{\sum_{n=1}^N V_1^{(n)}}{N} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، $V_1^{(n)}$ مؤلفه اصلی ولتاژ نمونه n ام باس است. با در اختیار داشتن پارامترهای \overline{THDV}_{nf} و \overline{THDV} از به ترتیب رابطه (۱۷) و رابطه (۱۸) می توان به سادگی سهم فیدر nf در THD ولتاژ باس را مشابه روش بیان شده در بخش ۲-۳ به دست آورد. لذا روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) به ترتیب به صورت روابط (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) بازنویسی می شوند.

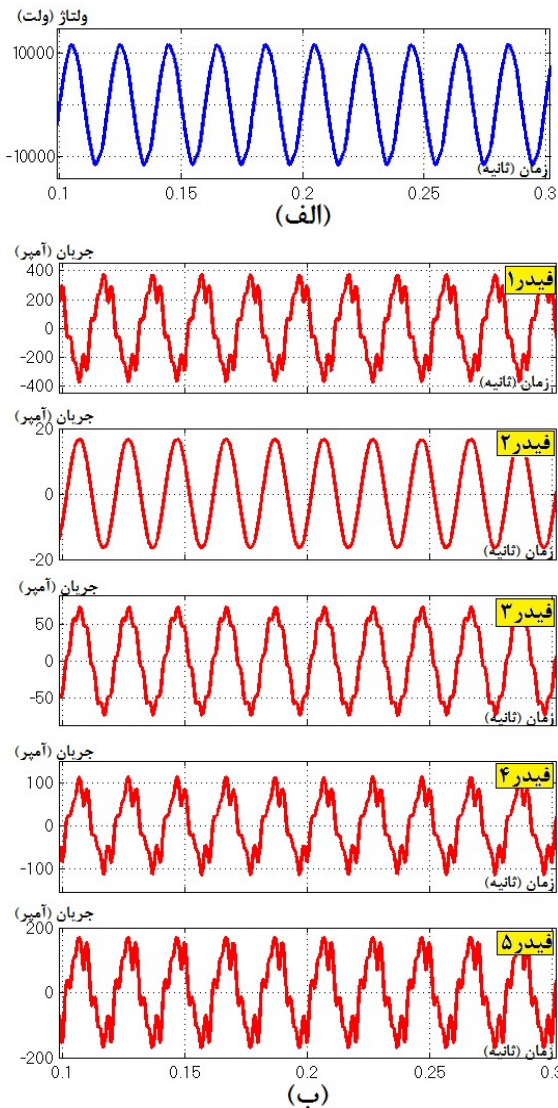
$$\Delta_{nf,THD} = \overline{THDV} - \overline{THDV}_{nf} \quad (20)$$

$$q_{nf,THD} = \begin{cases} 0 & \Delta_{nf,THD} < 0 \\ 1 & \Delta_{nf,THD} \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\zeta_{nf,THD}(\%) = \frac{q_{nf,THD} \times \Delta_{nf,THD}}{\sum_{m=1}^{N_{feeders}} (q_{m,THD} \times \Delta_{m,THD})} \times 100 \quad (22)$$

به این ترتیب می توان سهم هارمونیک هر یک از فیدرها در THD ولتاژ باس را با استفاده از رابطه (۲۲) به دست آورد.

لازم به توضیح است ویژگی روش ارائه شده برای تعیین سهم هارمونیک که آن را محدود به شبکه های شعاعی می کند، این است که



شکل (۳): شکل موج‌های ولتاژ و جریان مربوط به فاز A سیستم مورد مطالعه الف) ولتاژ باس ب) جریان هر یک از فیدرها

جدول (۲): مقادیر درصد دامنه‌ی هارمونیک‌های هر یک از مراتب هارمونیک و اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ باس مورد بررسی

مرتبه‌ی هارمونیک	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
درصد هارمونیک	۰	۰	۰	۲/۱۵	۰	۱/۵۲	۰	۰	۰
مرتبه‌ی هارمونیک	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹
درصد هارمونیک	۰/۴۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
درصد اعوجاج هارمونیک کل	۲/۶۶								

است؛ به این ترتیب نوسانات هارمونیک سیستم نیز در شبیه‌سازی لحاظ می‌شود. مقادیر مربوط به پارامترهای سیستم مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده

فیدرها	پارامترها
فیدر ۱ (فیدر شبکه)	$V_{Nominal,ph} = \frac{20000}{\sqrt{3}}V$ $f = 50Hz$ $V_{S_1} = \%2.8 V_{Nominal,ph} \angle 31.22^\circ$ $V_{S_2} = \%1.7 V_{Nominal,ph} \angle -40.00^\circ$ $R = 79.603m\Omega$ $L = 2.534mH$
فیدر ۲	$R = 577.997\Omega$ $L = 1140218mH$
فیدر ۳	$R = 144.499\Omega$ $L = 285.056mH$ $I_{S_1} = \%11.95 I_1 \angle 87.11^\circ$
فیدر ۴	$R = 102.4\Omega$ $L = 244.462mH$ $I_{S_1} = \%23.30 I_1 \angle 55.68^\circ$ $I_{S_2} = \%16.89 I_1 \angle 85.20^\circ$
فیدر ۵	$R = 64\Omega$ $L = 152.789mH$ $I_{S_1} = \%22.35 I_1 \angle 80.63^\circ$ $I_{S_2} = \%21.27 I_1 \angle 85.20^\circ$ $I_{S_3} = \%3.39 I_1 \angle 143.56^\circ$

هدف شناسایی و تعیین سهم هر یک از پنج فیدر متصل به باس سیستم مذکور، در اعوجاج هارمونیک ولتاژ هر یک از مراتب هارمونیک مورد نگرانی، و نیز شناسایی و تعیین سهم هر یک از این پنج فیدر در اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ باس است. لازم به ذکر است در این بخش مسئله صرفاً برای فاز A سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ فازهای B و C سیستم نیز به‌طور کاملاً مشابه قابل بررسی هستند. شکل موج‌های ولتاژ و جریان مربوط به فاز A سیستم در شکل (۳) آورده شده است. به‌منظور بررسی وضعیت هارمونیک ولتاژ باس مورد بررسی، اولین قدم به‌دست آوردن درصد دامنه‌ی هارمونیک‌های هر یک از مراتب هارمونیک و اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ این باس، است. جدول (۲) مقادیر مذکور را نشان می‌دهد.

مطابق جدول (۲)، و همان‌طور که از سیستم مورد مطالعه انتظار می‌رفت، اعوجاج هارمونیک ولتاژ صرفاً در هارمونیک ۵ ام، ۷ ام و ۱۱ ام وجود دارد و در بقیه‌ی مراتب هارمونیک وجود ندارد. مقادیر هارمونیک ۵ ام، ۷ ام و ۱۱ ام ولتاژ باس به ترتیب ۲/۱۵٪، ۱/۵۲٪ و ۰/۴۲٪ می‌باشند. همچنین مقدار اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ این باس ۲/۶۶٪ است.

۵ ام ولتاژ این باس مقصر نیستند؛ این موضوع با انتظاری که از این سیستم می‌رود کاملاً مطابقت دارد و صحت نتایج روش پیشنهادی را تأیید می‌کند؛ توضیح اینکه با متمرکز شدن روی سیستم مورد بررسی قابل درک است که حتی اگر این دو فیدر رفتاری کاملاً خطی هم می‌داشتند (کما اینکه فیدر ۲ در حال حاضر نیز کاملاً خطی است) یعنی حتی تمامی منابع هارمونیک آن‌ها خاموش می‌بود، مقدار اعوجاج هارمونیک ۵ ام ولتاژ این باس، به همین میزان (یعنی همین ۲/۱۵٪) می‌بود. بنابراین پرواضح است که این دو فیدر نقشی در اعوجاج هارمونیک ۵ ام ولتاژ باس ندارند. بنابراین می‌توان بیان کرد که در رابطه با شناسایی هر یک از مقصرین اعوجاج هارمونیک ۵ ام ولتاژ این باس و تعیین سهم هارمونیک آن‌ها، نتیجه‌ی شبیه‌سازی روش پیشنهادی با آنچه از سیستم انتظار می‌رفت تطبیق دارد.

با توجه به جدول (۲)، در خصوص هارمونیک ۷ ام، فیدرهای مقصر، فیدر ۱، فیدر ۳، فیدر ۴ و فیدر ۵ می‌باشند. در این هارمونیک، بیش‌ترین سهم هارمونیک مربوط به فیدر ۵ (با مقدار ۲۸/۶۵٪) و پس‌از آن به ترتیب مربوط به فیدر ۴ (با مقدار ۲۷/۰۲٪)، فیدر ۳ (با مقدار ۲۳/۹۵٪) و فیدر ۱ (با مقدار ۲۰/۳۸٪) است. با توجه به رفتار کاملاً خطی فیدر ۲، مطابق انتظار، سهم هارمونیک فیدر ۲ صفر برآورد شده است.

در مورد هارمونیک ۱۱ ام ولتاژ باس مورد بررسی، مطابق جدول (۴) تنها مقصر هارمونیک فیدر ۵ تشخیص داده می‌شود و بقیه‌ی فیدرها هیچ نقشی در اعوجاج هارمونیک ۱۱ ام ولتاژ این باس ندارند؛ سهم هارمونیک فیدر ۵ در اعوجاج هارمونیک ۱۱ ام ولتاژ باس مورد بررسی ۱۰۰٪ و سهم هارمونیک بقیه‌ی فیدرها صفر بیان شده است. با توجه به عدم وجود منبع هارمونیک ۱۱ ام در دیگر فیدرها، کاملاً این انتظار می‌رفت که سهم همه‌ی فیدرها غیر از فیدر ۵ در اعوجاج هارمونیک مرتبه‌ی ۱۱ ام ولتاژ باس مورد مطالعه، صفر برآورد شود؛ لذا نتیجه‌ی شبیه‌سازی روش پیشنهادی، در هارمونیک مرتبه‌ی ۱۱ ام نیز صحت روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

در سیستم شبیه‌سازی شده علاوه بر اینکه مسئله‌ی شناسایی مقصرین هارمونیک و تعیین سهم آن‌ها، برای هر یک از مراتب هارمونیک اعم از هارمونیک مرتبه‌ی ۵ ام، ۷ ام و ۱۱ ام به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است، برای پارامتر اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ نیز این بررسی انجام شده است. مطابق جدول (۴) مقصرین اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ باس مورد مطالعه، همه‌ی فیدرها غیر از فیدر ۲ می‌باشند. بیش‌ترین سهم مربوط به فیدر ۵ (با مقدار ۳۹/۴۱٪)، پس‌از آن به ترتیب فیدر ۱ (با مقدار ۳۵/۴۷٪)، فیدر ۴ (با مقدار ۱۸/۳۴٪) و فیدر ۳ (با مقدار ۶/۷۸٪) بیش‌ترین سهم را در اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ این باس دارند. در خصوص فیدر ۲ نیز همان‌طور که از رفتار خطی آن انتظار می‌رود، سهم آن در اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ آن، صفر برآورد شده است. در مجموع می‌توان اذعان داشت که نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی در سیستم شبیه‌سازی شده، به‌صورت کاملاً منطقی و قابل قبول، صحت روش پیشنهادی را مورد تأیید قرار می‌دهند.

پس از تشخیص مقادیر هارمونیک، قدم بعدی شناسایی مقصرین و تعیین سهم هارمونیک آن‌ها است. بدین منظور مطابق روش ارائه‌شده ابتدا مدل‌سازی هر یک از فیدرها در مراتب هارمونیک مورد بررسی انجام می‌شود. به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی فیدرها، مقدار ولتاژ باس در هر یک از مراتب هارمونیک در حالت واقعی با مقادیر متناظر حاصل از مدل‌سازی فیدرها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. برای این مقایسه تفاضل ولتاژ حاصل از مدل‌سازی از ولتاژ مقدار واقعی در هر یک از مراتب هارمونیک در جدول (۳) آورده شده است. مطابق این جدول میزان خطای مدل‌سازی فیدرها بسیار کوچک بوده و مدل‌سازی مورد پذیرش خواهد بود.

جدول (۳): تفاضل ولتاژ حاصل از مدل‌سازی از ولتاژ مقدار واقعی

در هر یک از مراتب هارمونیک			
مقدار تفاضل ولتاژ (%)	مرتبه‌ی هارمونیک	مقدار تفاضل ولتاژ (%)	مرتبه‌ی هارمونیک
۰/۰۰۲	۱۱	۰/۰۰۳	۲
۰/۰۰۷	۱۲	۰/۰۰۱	۳
۰/۰۰۴	۱۳	۰/۰۰۱	۴
۰/۰۰۱	۱۴	۰/۰۰۶	۵
۰/۰۰۳	۱۵	۰/۰۰۴	۶
۰/۰۰۸	۱۶	۰/۰۰۸	۷
۰/۰۰۱	۱۷	۰/۰۰۱	۸
۰/۰۰۱	۱۸	۰/۰۰۲	۹
۰/۰۰۱	۱۹	۰/۰۰۱	۱۰

با استفاده از روش پیشنهادی نتیجه‌ی تعیین سهم هارمونیک در مراتب هارمونیک مذکور و نیز نتیجه‌ی تعیین سهم هارمونیک در اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ باس مورد بررسی، در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): نتیجه‌ی تعیین سهم هارمونیک هر یک از فیدرها در

مرتبه‌ی هارمونیک	سهم هارمونیک فیدر (%)				
	فیدر ۱	فیدر ۲	فیدر ۳	فیدر ۴	فیدر ۵
۵ ام	۰/۰۰	۴۸/۴۹	۰/۰۰	۱۰/۲۳	۴۲/۲۸
۷ ام	۰/۰۰	۲۰/۳۸	۰/۰۰	۲۷/۰۲	۲۸/۶۵
۱۱ ام	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
اعوجاج هارمونیک کل	۳۵/۴۷	۰/۰۰	۶/۷۸	۱۸/۳۴	۳۹/۴۱

مطابق جدول (۴) نتیجه‌ی تعیین سهم هارمونیک مرتبه‌ی ۵ ام ولتاژ باس، نشان از آن دارد که مقصرین اعوجاج هارمونیک مرتبه‌ی ۵ ام ولتاژ باس مورد بررسی، فیدر ۱، فیدر ۴ و فیدر ۵ می‌باشند. بیش‌ترین سهم هارمونیک مربوط به فیدر ۱ (با مقدار ۴۸/۴۹٪) است؛ این به این مفهوم است که شبکه بیش‌ترین تأثیر را در اعوجاج هارمونیک مرتبه‌ی ۵ ام ولتاژ این باس دارد. پس‌از آن به ترتیب فیدر ۵ (با مقدار ۳۹/۴۱٪) و فیدر ۴ (با مقدار ۱۰/۲۳٪) بیش‌ترین سهم را دارند. سهم هارمونیک فیدر ۲ و فیدر ۳ در اعوجاج هارمونیک مرتبه‌ی ۵ ام ولتاژ این باس، صفر برآورد شده است و مفهوم آن این است که این دو فیدر در اعوجاج هارمونیک

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی ارائه شده است که با استفاده از آن بتوان در هر نوع شبکه‌ی شعاعی که چندین فیدر به یک باس متصل‌اند، هر یک از فیدرهای مقصر در اعوجاج هارمونیک و ولتاژ آن باس را شناسایی و سهم هارمونیک هر یک از آن‌ها را نیز مشخص کرد. تعیین سهم هارمونیک هم به صورت مجزا برای هر یک از مراتب هارمونیک انجام می‌شود و هم برای پارامتر اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ باس انجام می‌شود. در روش پیشنهادی نهایتاً شاخص‌هایی کمی برای شناسایی مقصرین هارمونیک و تعیین سهم آن‌ها ارائه شده است. شبیه‌سازی روش پیشنهادی روی یک سیستم نوعی نیز نتایج کاملاً قابل قبول و منطقی در پی داشته و صحت روش پیشنهادی را مورد تأیید قرار می‌دهد. با توجه به سادگی استفاده از روش پیشنهادی و همچنین دسترسی آسان به داده‌های اندازه‌گیری موردنیاز، این روش می‌تواند به راحتی در شبکه‌های توزیع و فوق توزیع پیاده‌سازی شود و مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر، روش ارائه شده در مقایسه با سایر روش‌ها نظیر روش نقطه PCC، اولاً خطای کمتری داشته و ثانیاً از نظر عملی به راحتی قابل پیاده‌سازی بوده و ثالثاً می‌تواند علاوه بر هارمونیک‌های تکی، سهم THD را نیز تعیین کند.

مراجع

- [1] علی‌رضا حسنی اصل، مهدی معلم، محمد کیوان فرد، «بهبود عملکرد فیلترهای هارمونیک جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو برای کوره‌های قوس الکتریکی با آنالیز حساسیت و استفاده از نتایج عملی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۷۵-۸۶، ۱۳۹۵.
- [2] محسن محمودی، علی عجمی، ابراهیم سیفی نجمی، «طراحی و کنترل ساختارهای جدید پایش‌گریکپارچه کیفیت توان بین خطی بر اساس مبدل‌های چندپورته AC/AC»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحات ۲۳۷-۲۵۰، ۱۳۹۵.
- [3] K. M. S. Islam and A. H. Samra, "Identification of harmonic sources in power distribution systems," IEEE Southeastcon '97. Engineering new New Century, pp. 301-303, 1997
- [4] W. Xu, X. Liu and Y. Liu. "An investigation on the validity of power direction method for harmonic source determination," IEEE Transaction 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,"
- [6] N. Hamzah, A. Mohamed and A. Hussain, "Harmonic source location at the point of common coupling based on voltage magnitude," IEEE Region 10 Conference TENCON, pp. 220-223, 2004.
- [7] C. Chen, X. Liu, D. Koval, Wilsun Xu and T. Tayjasanant, "Critical impedance method - a new detecting harmonic sources method in distribution systems," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 19, no. 1, pp. 288-297, 2004.
- [8] S. Ferreira and J. Carlos, "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.
- [9] 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, 2012, pp. 222-229, 2012.
- [10] H. Hua, X. Jia, D. Cao and C. Zhao, "Practical method to determine the harmonic contribution of a specific harmonic load," IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 769-773, 2012.
- [11] Z. P. 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.
- [12] 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.
- [13] E. Gursoy and D. Niebur, "Harmonic load identification using complex independent component analysis," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 24, no. 1, pp. 285-292, 2009.
- [14] K. Pulimera and P. K. Rajan, "Independent component analysis for harmonic source estimation from piecewise constant parameter mixed measurements," IEEE 43rd Southeastern Symposium on System Theory, pp. 81-86, 2011.
- [15] 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.
- [16] 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," IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, pp. 110-114, 2014.
- [17] M. Bremer, Multiple Linear Regression, Math261A, Spring 2012. Retrieved from: <http://mezeylab.cb.bscb.cornell.edu/labmembers/documents/supplement%205%20-%20multiple%20regression.pdf>
- [18] M. Lamich, J. Balcells, M. Corbalán, and E. Griful, "Nonlinear loads model for harmonics flow prediction, using multivariate regression," IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 64, no. 6, pp. 4820-4827, 2017.

زیرنویس‌ها

⁹Frequency Spectrogram¹⁰dominant fluctuation filtering method¹¹Partial Linear Regression (PLR)¹²Hierarchical K-Means Clustering (HKMC)¹³Bayesian Least Squares partial (BPLS)¹⁴Kirchhoff's current law¹Point of Common Coupling²Total Harmonic Distortion³weakly meshed networks⁴Harmonic State Estimation⁵Independent Component Analysis⁶Weighted Least Squared Estimates⁷vector draft⁸Phase Spectrogram