

ارائه روشی مبتنی بر روش‌های جمع آثار و امپدانس مرزی برای شناسایی عامل غالب در ایجاد اعوجاج‌های هارمونیک در باسبار PCC

مجید مرادلو و حمیدرضا کارشناس

چکیده: در این مقاله روش جدیدی ارائه شده است که در آن برای شناسایی عامل غالب در ایجاد اعوجاج‌های هارمونیک جریان و ولتاژ در باسبار PCC، حداقل نیاز به اطلاعات دقیق در مورد امپدانس هارمونیک مصرف‌کننده‌ها وجود داشته باشد. در روش پیشنهادی با استفاده از روش جمع آثار و تعریف سهم هارمونیک ارائه شده در آن، و نیز ترکیب این تعاریف با الگوریتم به‌کار رفته در روش امپدانس مرزی، شاخص‌های جدیدی تعریف گردیده و الگوریتمی ارائه شده است. با استفاده از این الگوریتم در شناسایی عامل غالب در ایجاد اعوجاج‌ها، بر خلاف روش امپدانس مرزی در هیچ یک از حالت‌ها نیاز به مقادیر دقیق امپدانس‌های هارمونیک مصرف‌کننده نبوده و احتمال تشخیص نادرست در شناسایی عامل غالب حتی در حالت‌هایی که سهم طرفین این باسبار به هم نزدیک باشد، وجود ندارد. این موضوع به‌وسیله مقایسه روش پیشنهادی با روش امپدانس مرزی نشان داده شده است. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی شبکه توزیع صنعتی ۱۳ باسه IEEE بر روی نرم‌افزار DIGSILENT، اعتبار روش پیشنهادی بررسی گردیده است.

روش متداولی که در صنعت برای شناسایی عامل اصلی ایجاد اعوجاج‌های هارمونیک استفاده می‌شود، روش مبتنی بر جهت توان هارمونیک در محل باسبار PCC است ولی نشان داده و اثبات شده است که این روش در همه حالت‌ها پاسخ صحیحی نمی‌دهد [۴] و [۵].

در [۶] مدل نورتن شبکه شامل منبع جریان هارمونیک موازی با امپدانس برای مدل‌سازی منابع هارمونیک پیشنهاد شده است که این مدل قابل تبدیل به مدل تونن نیز می‌باشد. در [۵] و [۷] شبکه‌های بالادست و پایین دست از دید باسبار PCC به صورت مدار معادل تونن و یا نورتن مدل شده و از طریق جمع آثار، سهم هارمونیک طرفین در ایجاد ولتاژ و جریان هارمونیک باسبار PCC تعریف گردیده است. استفاده از این تعریف برای تعیین سهم هارمونیک، نیاز به مقدار دقیق امپدانس‌های هارمونیک معادل شبکه‌های بالادست و پایین دست دارد که این امر به‌ویژه در مورد امپدانس مصرف‌کننده‌ها مشکل است. بدین منظور روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری و محاسبه امپدانس‌های هارمونیک ارائه شده که معمولاً پیچیده و گران بوده و بعضاً نیاز به ایجاد اختلال در شبکه دارند [۶] تا [۱۲]. در سال‌های اخیر از روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی نیز برای این منظور استفاده شده است [۱۳] تا [۱۵].

در [۵] با استفاده از تعریف ارائه شده برای سهم هارمونیک، نشان داده شده که برای شناسایی طرف دارای سهم بیشتر در ایجاد اعوجاج جریان (ولتاژ) در باسبار PCC، مقایسه بین اندازه منابع ولتاژ (جریان) متناظر با طرفین در مدل تونن (نورتن) هارمونیک کفایت می‌کند. بر این اساس روش‌های مختلفی پیشنهاد گردیده است [۱۶] تا [۱۹] که مهم‌ترین آن، روش امپدانس مرزی^۱ می‌باشد [۱۸] و [۱۹]. در الگوریتم پیشنهادی در [۱۹] فرض شده است که امپدانس هارمونیک شبکه بالادست تقریباً مشخص بوده و ماکزیمم و مینیمم مقادیر ممکن برای امپدانس هارمونیک مصرف‌کننده در دسترس باشد. مشکل این روش این است که شاخص مقایسه‌شونده که همان شاخص امپدانس مرزی است، به هر دوی کمیت‌های شبکه بالادست و پایین دست وابسته بوده و در نتیجه تعیین

کلید واژه: کیفیت توان، هارمونیک، امپدانس هارمونیک، روش امپدانس مرزی، سهم هارمونیک.

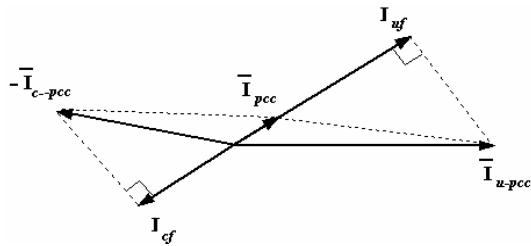
۱- مقدمه

اعوجاج‌های هارمونیک از جمله پدیده‌های کیفیت توان هستند که امروزه در شبکه‌های قدرت به شدت افزایش یافته‌اند. به‌طور کلی علت اصلی ایجاد اعوجاج‌های هارمونیک، بارهای غیر خطی متنوع موجود در شبکه هستند [۱] تا [۳]. بنابراین از یک دیدگاه، مصرف‌کنندگان همیشه عامل بروز این اعوجاج‌ها می‌باشند. با این وجود، گستردگی و پیچیدگی و توپولوژی شبکه و وجود خازن‌های تصحیح ضریب توان در آن باعث می‌گردد که این اعوجاج‌ها در کل شبکه، توزیع و پخش گردند. لذا در شبکه‌های نوین امروزی در صورت اندازه‌گیری هارمونیک‌ها در یک نقطه، نمی‌توان با قطعیت در مورد عامل به‌وجود آورنده آن یعنی شبکه بالادست یا پایین دست آن نقطه اظهار نظر نمود. باید به این نکته اشاره نمود که اندازه‌گیری‌های هارمونیک معمولاً به‌گونه‌ای است که شبکه پایین دست نمایشگر یک مصرف‌کننده و یا دسته مشخصی از مصرف‌کنندگان می‌باشد. بنابراین امروزه سؤال بسیار مهمی که در فرآیند اندازه‌گیری اعوجاج‌های

این مقاله در تاریخ ۱۱ آبان ماه ۱۳۸۷ دریافت و در تاریخ ۱۱ مرداد ماه ۱۳۸۹ بازنگری شد.

مجید مرادلو، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، کدپستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱ (email: m_moradlo@cc.iut.ac.ir).

حمیدرضا کارشناس، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، کدپستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱ (email: karshen@cc.iut.ac.ir).



شکل ۲: دیاگرام برداری برای حالتی که سهم دو طرف به هم نزدیک بوده و در خلاف جهت هم می‌باشند.

امپدانس هارمونیک سری با آن به‌ازای یک هارمونیک خاص مدل شوند. زیر نویس‌های u و c در شکل به‌ترتیب بیانگر کمیت‌های متناظر با شبکه بالادست^۱ و شبکه پایین‌دست یا مصرف‌کننده^۲ از دید باسبار PCC هستند. \bar{I}_{pec} و \bar{V}_{pec} نیز به‌ترتیب برابر با فازور جریان و ولتاژ هارمونیک اندازه‌گیری شده در باسبار PCC می‌باشند. مقادیر P و Q یعنی توان‌های اکتیو و راکتیو برای هارمونیک مورد نظر در باسبار PCC و با جهت نشان داده شده در شکل ۱، از (۱) حاصل می‌گردند

$$P + jQ = \bar{V}_{pec} \bar{I}_{pec}^* \quad (1)$$

اگر \bar{I}_{u-pec} برابر با جریان هارمونیک فقط ناشی از \bar{E}_u و \bar{I}_{c-pec} برابر با جریان هارمونیک فقط ناشی از \bar{E}_c در باسبار PCC باشند، روابط زیر با توجه به شکل ۱ و با استفاده از قانون جمع آثار قابل بیان می‌باشند

$$\bar{I}_{u-pec} = \frac{\bar{E}_u}{Z_u + Z_c} \quad (2)$$

$$\bar{I}_{c-pec} = \frac{\bar{E}_c}{Z_u + Z_c} \quad (3)$$

$$\bar{I}_{pec} = \bar{I}_{u-pec} - \bar{I}_{c-pec} \quad (4)$$

با تصویر کردن بردارهای \bar{I}_{u-pec} و $-\bar{I}_{c-pec}$ بر بردار \bar{I}_{pec} ، به‌ترتیب کمیت‌های اسکالر I_{uf} و I_{cf} حاصل می‌شوند که در [۵] این کمیت‌ها به‌ترتیب برابر با سهم شبکه و مصرف‌کننده در ایجاد جریان هارمونیک \bar{I}_{pec} تعریف شده‌اند و برابر با جمع جبری این دو کمیت است. باید توجه داشت که I_{uf} و I_{cf} می‌توانند هر دو مثبت و یا یکی مثبت و دیگری منفی گردد. علامت مثبت این دو کمیت وابسته به جهت \bar{I}_{pec} می‌باشد. به‌عنوان مثال در شکل ۲ حالتی نشان داده شده است که در آن I_{uf} مثبت و I_{cf} منفی است. یکی از مزایای این تعریف، تشخیص حالت حذف هارمونیک^۳ می‌باشد.

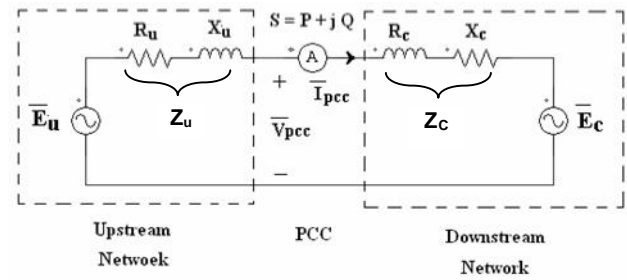
با استفاده از روابط فازوری، I_{cf} و I_{uf} در حالت کلی از (۵) و (۶) حاصل می‌شوند

$$I_{cf} = \frac{|\bar{I}_{pec}|^2 + |\bar{I}_{c-pec}|^2 - |\bar{I}_{u-pec}|^2}{2|\bar{I}_{pec}|} \quad (5)$$

$$I_{uf} = \frac{|\bar{I}_{pec}|^2 + |\bar{I}_{u-pec}|^2 - |\bar{I}_{c-pec}|^2}{2|\bar{I}_{pec}|} \quad (6)$$

۲-۲ سهم هارمونیک در ایجاد اعوجاج‌های ولتاژ

تعیین سهم هارمونیک برای اعوجاج‌های ولتاژ در باسبار PCC، در



شکل ۱: مدار معادل تونن هارمونیک شبکه و مصرف‌کننده از دید باسبار PCC برای یک هارمونیک مشخص.

دقیق این شاخص مشکل می‌باشد. لذا در مواردی که عدم قطعیت امپدانس هارمونیک مصرف‌کننده زیاد بوده و یا اطلاعات راجع به آن دارای خطای زیادی باشد، شاخص امپدانس مرزی نیز بسیار نامعین بوده و اگر سهم هارمونیک طرفین به هم نزدیک باشد، احتمال این که این روش نه تنها پاسخ صحیحی نداده بلکه طرف دارای سهم بیشتر را به‌طور نادرست تشخیص دهد، وجود دارد.

در این مقاله با به‌کارگیری تعریف سهم هارمونیک ارائه‌شده در [۵] و [۷] و نیز فرض‌های صورت‌گرفته در [۱۹] برای امپدانس‌های هارمونیک، روشی ارائه شده است که در آن فقط با استفاده از کمیت‌های اندازه‌گیری شده در باسبار PCC و نیز با در اختیار داشتن محدوده امپدانس‌های هارمونیک و حالت‌های ممکن برای آنها، شاخص‌هایی فقط وابسته به شبکه بالادست و یا فقط وابسته به شبکه پایین‌دست تعریف می‌گردند. در نتیجه به‌عنوان مثال شاخص مقایسه‌شونده‌ای که فقط وابسته به شبکه بالادست است، با فرض معلوم‌بودن تقریبی امپدانس هارمونیک شبکه مذکور، تقریباً مشخص می‌گردد. لذا بر خلاف روش امپدانس مرزی، شاخص مقایسه‌شونده مشخص بوده و بنابراین مکانیزم مقایسه حتی در حالت‌هایی که سهم طرفین به هم نزدیک باشد، به سادگی صورت می‌گیرد. همچنین در این مقاله نشان داده شده است که روش امپدانس مرزی ممکن است در برخی از حالت‌ها پاسخ نادرست بدهد، در حالی که روش پیشنهادی هر چند ممکن است پاسخ قطعی ندهد ولی پاسخ نادرست نیز نمی‌دهد.

در این مقاله پس از ارائه تعریف سهم هارمونیک، روش پیشنهادی تشریح گردیده و سپس مقایسه‌ای بین این روش و روش امپدانس مرزی صورت می‌گیرد. در انتها اعتبار روش پیشنهادی با شبیه‌سازی شبکه توزیع صنعتی ۱۳ باس IEEE [۲۰] بر روی نرم‌افزار DIGSILENT بررسی می‌شود.

۲-۲ تعریف سهم هارمونیک با استفاده از روش جمع آثار

در این بخش ابتدا تعاریف صورت‌گرفته در [۵] برای سهم هارمونیک ولتاژ و جریان در یک نقطه خاص ارائه شده و سپس نتیجه‌گیری حاصل از آن برای شناسایی عامل غالب در ایجاد اعوجاج‌های هارمونیک بیان می‌گردد.

۲-۱ سهم هارمونیک در ایجاد اعوجاج‌های جریان

تعیین سهم هارمونیک برای اعوجاج‌های جریان در باسبار PCC، در مواردی که کار می‌رود که یک مصرف‌کننده خاص یا دسته‌ای از مصرف‌کنندگان که معمولاً از یک فیدر اختصاصی تغذیه می‌گردند، مد نظر باشد. شکل ۱ مدار معادل الکتریکی چنین حالتی را نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۱ از دید باسبار PCC، شبکه‌های بالادست و پایین‌دست می‌توانند به‌صورت مدار معادل تونن شامل منبع ولتاژ و

1. Utility
2. Customer
3. Harmonic Cancellation

$$V_{uf} - V_{cf} = \frac{|\bar{V}_{u-pec}|^2 - |\bar{V}_{c-pec}|^2}{|\bar{V}_{pec}|^2} \quad (۱۳)$$

$$= \frac{|\bar{I}_u|^2 - |\bar{I}_c|^2}{|\bar{V}_{pec}|^2} \left(\frac{Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} \right)^2$$

با توجه به این روابط می‌توان به این نکته پی برد که برای شناسایی عامل غالب در ایجاد جریان هارمونیک \bar{I}_{pec} ، ارائه روشی با قابلیت انجام مقایسه بین $|\bar{E}_u|$ و $|\bar{E}_c|$ و برای شناسایی عامل غالب در ایجاد ولتاژ هارمونیک \bar{V}_{pec} ، ارائه روشی با قابلیت انجام مقایسه بین $|\bar{I}_c|$ و $|\bar{I}_u|$ کفایت می‌کند. بر این اساس روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند که مهم‌ترین آنها روش امیدانس مرزی می‌باشد [۱۶] تا [۱۹]. در این مقاله نیز از این ویژگی برای روش پیشنهادی استفاده گردیده است.

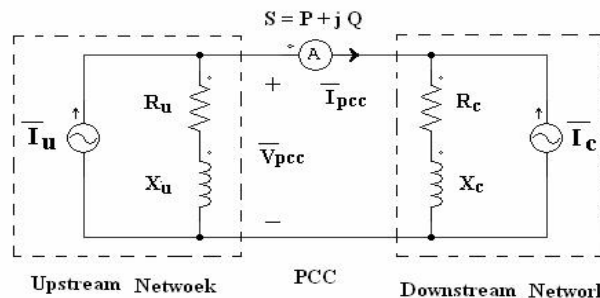
لازم به ذکر است که اگر علاوه بر کمیت‌های \bar{I}_{pec} و \bar{V}_{pec} که از طریق اندازه‌گیری در دسترس هستند، مقادیر امیدانس‌های هارمونیک نیز مشخص باشند، دیگر نیازی به روش‌های خاص نبوده و می‌توان به‌طور مستقیم از (۵)، (۶)، (۱۰) و (۱۱) برای محاسبه سهم هارمونیک طرفین استفاده کرد.

۳- تشریح روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی همانند روش امیدانس مرزی فرض می‌شود که امیدانس هارمونیک شبکه بالادست، یعنی Z_u ، تقریباً معلوم باشد [۱۹]. این فرض از آنجا ناشی می‌شود که عدم قطعیت در امیدانس‌های هارمونیک معادل، بیشتر ناشی از عدم قطعیت در امیدانس هارمونیک بارها می‌باشد و این نامعینی‌ها معمولاً تأثیر چندانی در امیدانس هارمونیک معادل شبکه بالادست ندارند. در مواردی که در شبکه بالادست، خازن اصلاح ضریب توان وجود نداشته باشد می‌توان امیدانس معادل را تقریباً برابر با امیدانس هارمونیک ترانسفورمر کاهنده که بر بقیه امیدانس‌های سیستم بالادست غالب است قلمداد کرد. در مواردی که در شبکه بالادست و در باسبارهای ترانسفورمر کاهنده از خازن استفاده شده باشد، نمی‌توان این فرض را انجام داد ولی باز هم می‌توان امیدانس شبکه بالادست را با در نظر گرفتن خازن تقریباً مشخص نمود. همچنین در مواقعی که بین امیدانس ترانسفورمر کاهنده و خازن، رزونانس به‌وجود آید، امکان این که امیدانس هارمونیک معادل شبکه بالادست دارای نامعینی زیادی باشد، وجود دارد که البته این حالت قابل تشخیص است [۱] تا [۳].

در مورد محاسبه Z_c باید توجه داشت که مدل‌سازی بارهای هارمونیک به‌صورت صرفاً منبع جریان و بدون لحاظ کردن بارهای خطی، موجب بروز خطا در نتیجه‌گیری می‌گردد. برای مثال در شکل ۳ اگر Z_c در مدل‌سازی در نظر گرفته نشود، آن‌گاه سهم شبکه بالادست در ایجاد \bar{I}_{pec} برابر با صفر می‌گردد که در واقعیت صحیح نمی‌باشد. در این مقاله همانند [۱۹] فرض می‌شود که محدوده تقریبی مقادیر ممکن برای امیدانس هارمونیک مصرف‌کننده یعنی Z_c ، به‌وسیله آنالیز بررسی فرکانسی^۱ و یا اندازه‌گیری و یا هر روش ممکن دیگر مشخص باشد. همین فرض را در مورد شبکه بالادست نیز در صورت عدم قطعیت بسیار زیاد امیدانس آن می‌توان انجام داد.

برای تشریح روش پیشنهادی ابتدا فرض می‌شود که هدف، شناسایی عامل غالب در ایجاد جریان هارمونیک \bar{I}_{pec} برای یک فیدر خاص در



شکل ۳: مدار معادل نورتن هارمونیک شبکه و مصرف‌کننده از دید باسبار PCC برای یک هارمونیک مشخص.

نقاط مختلف شبکه و نه لزوماً یک مصرف‌کننده خاص کاربرد دارد. بر اساس شکل ۳ از دید باسبار PCC، شبکه‌های بالادست و پایین‌دست می‌توانند به‌صورت مدار معادل نورتن شامل منبع جریان و امیدانس هارمونیک موازی با آن به‌ازای یک هارمونیک خاص مدل شوند. در واقع مدار معادل شکل ۳ دوگان مدار معادل شکل ۱ بوده و روابط $\bar{E}_c = Z_c \bar{I}_c$ و $\bar{E}_u = Z_u \bar{I}_u$ در آن برقرار می‌باشند. با توجه به شکل ۳ و با استفاده از جمع آثار و نیز مفهوم دوگانی، (۷) تا (۱۱) برای تعیین سهم هارمونیک ولتاژ قابل بیان می‌باشند

$$\bar{V}_{u-pec} = \frac{Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} \bar{I}_u \quad (۷)$$

$$\bar{V}_{c-pec} = \frac{Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} \bar{I}_c \quad (۸)$$

$$\bar{V}_{pec} = \bar{V}_{u-pec} + \bar{V}_{c-pec} \quad (۹)$$

$$V_{cf} = \frac{|\bar{V}_{pec}|^2 + |\bar{V}_{c-pec}|^2 - |\bar{V}_{u-pec}|^2}{2|\bar{V}_{pec}|^2} \quad (۱۰)$$

$$V_{uf} = \frac{|\bar{V}_{pec}|^2 + |\bar{V}_{u-pec}|^2 - |\bar{V}_{c-pec}|^2}{2|\bar{V}_{pec}|^2} \quad (۱۱)$$

در [۵] کمیت‌های V_{cf} و V_{uf} به‌ترتیب برابر با سهم شبکه و مصرف‌کننده در ایجاد ولتاژ هارمونیک \bar{V}_{pec} تعریف شده‌اند.

۳-۲ نحوه شناسایی عامل غالب در ایجاد اعوجاج‌های

هارمونیک بر اساس تعریف سهم هارمونیک

بر اساس (۲) تا (۱۱) برای تعیین دقیق سهم هارمونیک، علاوه بر کمیت‌های اندازه‌گیری شده در باسبار PCC، نیاز به مقادیر امیدانس‌های هارمونیک Z_u و Z_c نیز می‌باشد که این امر به‌دلیل نامعینی زیاد در امیدانس هارمونیک بارها مشکل است. لذا باید معیاری برای شناسایی عامل غالب در ایجاد اعوجاج‌های هارمونیک در صورت عدم دسترسی به مقادیر دقیق سهم هارمونیک پیدا کرد.

با استفاده از تفاضل (۵) و (۶) و نیز با استفاده از (۲) و (۳)، (۱۲) حاصل می‌شود

$$I_{uf} - I_{cf} = \frac{|\bar{I}_{u-pec}|^2 - |\bar{I}_{c-pec}|^2}{|\bar{I}_{pec}|^2} = \frac{|\bar{E}_u|^2 - |\bar{E}_c|^2}{|\bar{I}_{pec}|^2 |Z_u + Z_c|^2} \quad (۱۲)$$

به طریق مشابه با استفاده از تفاضل (۱۰) و (۱۱) و نیز با استفاده از (۷) و (۸)، (۱۳) حاصل می‌گردد

($P.F_{pcc}$) برای هارمونیک مورد نظر، می توان از مثبت بودن IC در بعضی از موارد اطمینان حاصل نمود و در نتیجه مصرف کننده را به عنوان عامل غالب شناسایی کرد

$$IU < 0, \left\{ \begin{array}{l} P < 0, \left\{ \begin{array}{l} Q \times \phi_c < 0 \\ Q \times \phi_c > 0, |P.F_{pcc}| \geq |\sin \phi_c| \end{array} \right\} \\ P > 0, Q \times \phi_c < 0, |P.F_{pcc}| \leq |\sin \phi_c| \end{array} \right\} \quad (22)$$

$$\Rightarrow IC > 0$$

با توجه به (۲۲) نیز می توان به عدم اعتبار روش مبتنی بر جهت توان هارمونیک پی برد. همان طور که مشاهده می شود حتی در حالتی که P مثبت است، سهم مصرف کننده می تواند بیشتر از سهم شبکه بالادست باشد.

الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی عامل غالب در ایجاد \bar{I}_{pcc} برای هارمونیک مورد نظر، در حالت کلی که هم دامنه و هم فاز Z_c دارای عدم قطعیت هستند، به شرح زیر می باشد:

(۱) اندازه گیری \bar{V}_{pcc} ، \bar{I}_{pcc} ، P و Q .

(۲) محاسبه IU با استفاده از (۱۹) و با فرض معلوم بودن Z_u .

(۳) اگر ϕ_c معلوم باشد و اگر یکی از حالت های (۲۲) برقرار گردد، سهم مصرف کننده یا شبکه پایین دست بیشتر از سهم شبکه بالادست بوده و الگوریتم پایان می یابد.

(۴) محاسبه IC_{min} و IC_{max} با در دست داشتن محدوده و مقادیر مختلف ممکن برای Z_c .

(۵) اگر $IU > IC_{max}$ باشد، سهم شبکه بالادست بیشتر از سهم مصرف کننده است و اگر $IU < IC_{min}$ باشد، سهم مصرف کننده بیشتر از شبکه بالادست می باشد.

(۶) اگر $IC_{min} < IU < IC_{max}$ باشد، اظهار نظر قطعی نمی توان کرد ولی اگر مقدار IU به مراتب به IC_{max} نزدیک تر از IC_{min} باشد (تقریباً با IC_{max} برابر باشد)، می توان نتیجه گرفت که سهم طرفین تقریباً در یک سطح بوده و سهم شبکه بالادست جزئی بیشتر است. همین موضوع برای نزدیکی IU به IC_{min} قابل بیان می باشد. اگر هیچ یک از این حالت ها برقرار نشد، از اظهار نظر قطعی خودداری می گردد تا منجر به نتیجه نادرست نشود.

در مواردی که عامل غالب با استفاده از الگوریتم پیشنهادی شناسایی گردد، می توان با استفاده از کمیت های I_{uf} و I_{cf} برآوردی از مقدار سهم طرفین و میزان تفاوت آنها نیز به دست آورد. ولی با توجه به این که I_{uf} و I_{cf} هر دو وابسته به پارامترهای هر دو طرف هستند، در شرایطی که سهم طرفین به هم نزدیک باشد نمی توان مقایسه ای مناسب بین این دو کمیت انجام داد.

با توجه به الگوریتم پیشنهادی مشاهده می شود که در هیچ یک از حالت ها نیاز به اطلاعات دقیق راجع به Z_c نمی باشد در حالی که در روش امپدانس مرزی [۱۹]، در ابتدا باید مقدار چرخش فاز β که وابسته به Z_c و Z_u است مشخص باشد. نکته مهم دیگر این است که چون کمیت های I_{uf} و I_{cf} هر دو وابسته به Z_c (نامعلوم) هستند، مقایسه بین آنها در شرایط نزدیکی سهم طرفین مشکل بوده و به همین دلیل از ابتدا از این کمیت ها به عنوان شاخص استفاده نشده است و کمیت های IU و IC که یکی معلوم و دیگری نامعلوم هستند، به کار رفته اند.

برای شناسایی عامل غالب در ایجاد ولتاژ هارمونیک \bar{V}_{pcc} نیز می توان از همین الگوریتم و البته با دوگان روابط و کمیت های به کار رفته در آن استفاده کرد. بدین منظور دوگان (۱۸) تا (۲۱) در روابط زیر بیان شده اند

باسبار PCC باشد. بر اساس (۱۲)، برای مقایسه بین I_{uf} و I_{cf} می توان از مقایسه بین $|\bar{E}_c|$ و $|\bar{E}_u|$ و یا بین $|\bar{E}_c|$ و $|\bar{E}_u|$ استفاده کرد. در [۱۶] تا [۱۹] از مقایسه بین $|\bar{E}_c|$ و $|\bar{E}_u|$ استفاده شده در حالی که در این مقاله برای بیان ساده تر روابط و نیز ارائه الگوریتم مناسب برای مقایسه، از مقایسه بین $|\bar{E}_c|$ و $|\bar{E}_u|$ استفاده می گردد.

با توجه به شکل ۱ و نیز با استفاده از قوانین مدار، روابط پریونیتی زیر در هارمونیک خاص قابل بیان هستند

$$\bar{E}_u = \bar{V}_{pcc} + (R_u + jX_u)\bar{I}_{pcc} \quad (14)$$

$$= \bar{V}_{pcc} + (R_u + jX_u)\left(\frac{P - jQ}{\bar{V}_{pcc}^*}\right)$$

$$\bar{E}_c = \bar{V}_{pcc} - (R_c + jX_c)\bar{I}_{pcc} \quad (15)$$

$$= \bar{V}_{pcc} - (R_c + jX_c)\left(\frac{P - jQ}{\bar{V}_{pcc}^*}\right)$$

با مرجع گرفتن فاز \bar{V}_{pcc} و تجزیه روابط به دو قسمت حقیقی و موهومی، روابط زیر حاصل می شوند

$$|\bar{E}_u|^2 = |Z_u|^2 |\bar{I}_{pcc}|^2 + |\bar{V}_{pcc}|^2 + 2(R_u P + X_u Q) \quad (16)$$

$$|\bar{E}_c|^2 = |Z_c|^2 |\bar{I}_{pcc}|^2 + |\bar{V}_{pcc}|^2 - 2(R_c P + X_c Q) \quad (17)$$

$$|\bar{E}_u|^2 - |\bar{E}_c|^2 = IU - IC \quad (18)$$

که در آن طبق تعریف، IU و IC عبارتند از

$$IU \triangleq |Z_u| \left[|Z_u| |\bar{I}_{pcc}|^2 + 2(P \cos \phi_u + Q \sin \phi_u) \right] \quad (19)$$

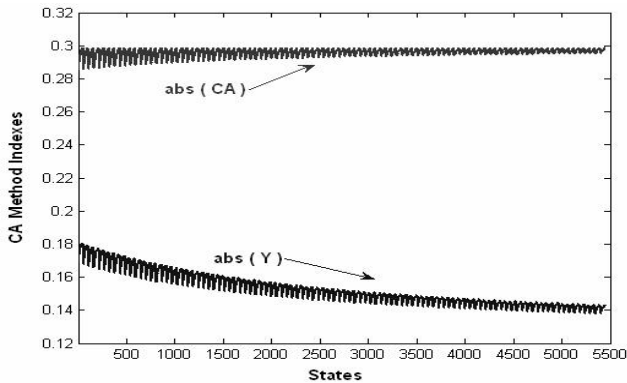
$$IC \triangleq |Z_c| \left[|Z_c| |\bar{I}_{pcc}|^2 - 2(P \cos \phi_c + Q \sin \phi_c) \right] \quad (20)$$

که ϕ_u و ϕ_c نیز توسط روابط زیر تعریف می گردند

$$\begin{cases} \phi_u \triangleq \tan^{-1}\left(\frac{X_u}{R_u}\right) \\ \phi_c \triangleq \tan^{-1}\left(\frac{X_c}{R_c}\right) \end{cases}, \quad -90^\circ < \phi_u, \phi_c < 90^\circ \quad (21)$$

با توجه به (۱۸) و نیز با توجه به مثبت بودن مخرج (۱۲) در تمامی حالات، مشاهده می شود که اگر IU بزرگ تر از IC باشد، سهم شبکه بالادست در ایجاد جریان هارمونیک \bar{I}_{pcc} بیشتر از سهم مصرف کننده است و بالعکس. همچنین بر اساس (۱۹) و (۲۰)، IU فقط تابعی از کمیت های اندازه گیری شده در باسبار PCC و نیز دامنه و فاز Z_u است و همچنین IC فقط به کمیت های اندازه گیری شده در باسبار PCC و نیز دامنه و فاز Z_c بستگی دارد. در نتیجه بر اساس فرض های صورت گرفته برای امپدانس های هارمونیک، مقدار IU تقریباً معلوم و مقدار IC نامعلوم می باشد. همچنین با در اختیار داشتن حدود و حالت های ممکن برای Z_c و با توجه به این که IC تابع پیوسته و کران داری از دامنه و فاز Z_c می باشد، می توان ماکزیمم و مینیمم IC را به دست آورد. این نکات مبنای بررسی های بعدی در این مقاله می باشد.

اگر مقدار ϕ_c تقریباً مشخص باشد، می توان در بعضی از حالت ها فقط با کمیت های اندازه گیری شده در PCC و بدون نیاز به اندازه Z_c ، طرف دارای سهم بیشتر را تشخیص داد که این حالت ها در (۲۲) نشان داده شده اند. برای مثال اگر در وضعیتی که ϕ_c معلوم است، IU منفی باشد، با در اختیار داشتن علامت های P و Q و نیز ضریب توان در باسبار PCC



شکل ۳: شاخص‌های روش امیدانس مرزی برای شناسایی عامل غالب در ایجاد ولتاژ هارمونیک به‌ازای حالت‌های مختلف برای عدم قطعیت همزمان دامنه و فاز Y_c .

جدول ۱: سهم واقعی طرفین و شاخص‌های مربوط به شناسایی عامل غالب در ایجاد ولتاژ هارمونیک.

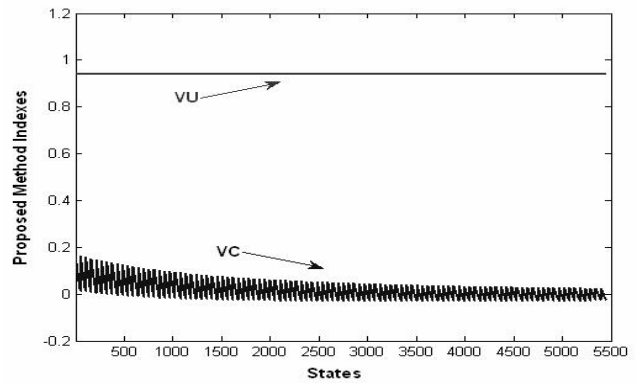
$ Y $	CA	VC	VU	V_{cf}	V_{uf}
۰٫۱۵۲	-۰٫۲۹۹	-۰٫۰۲	۰٫۹۹	۳٫۸٪	۹۶٫۲٪

با مقادیر نزدیک به آن نیز باشد، IC واقعی در بین مقادیر در دسترس IC یعنی بین IC_{min} و IC_{max} قرار خواهد داشت. در این حالت اگر مثلاً IU بزرگ‌تر از IC واقعی باشد (سهم واقعی شبکه بالادست بیشتر باشد)، قاعدتاً تحت هیچ شرایطی کوچک‌تر از IC_{min} نخواهد بود (بر اساس روش پیشنهادی، سهم شبکه پایین‌دست بیشتر از بالادست نیست). همچنین اگر IU کوچک‌تر از IC واقعی باشد (سهم واقعی شبکه بالادست کمتر باشد)، قاعدتاً تحت هیچ شرایطی بزرگ‌تر از IC_{max} نخواهد بود (بر اساس روش پیشنهادی، سهم شبکه بالادست بیشتر از پایین‌دست نیست). لذا مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی تحت هیچ حالتی پاسخ نادرست نخواهد داد. لازم به ذکر است که تمام این بحث‌ها برای حالتی صحیح است که Z_u معلوم فرض شود.

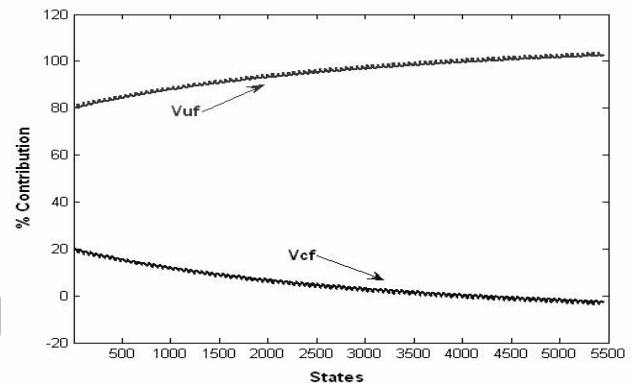
برای مقایسه بهتر بین روش پیشنهادی و روش امیدانس مرزی، از پارامترهای مدار معادل به‌کار رفته در [۱۹] استفاده می‌گردد. در این مدار، \bar{I}_u برابر با دامنه ۱ و فاز صفر، Z_u برابر با $1 + j\lambda$ ، Z_c برابر با $5 + j35$ و \bar{I}_c برابر با دامنه ۰٫۲ یا فاز ۹۰ درجه انتخاب شده‌اند. توضیح مختصری نیز راجع به روش امیدانس مرزی در پیوست آورده شده است. برای شناسایی عامل غالب در ایجاد \bar{V}_{pcc} ، سهم واقعی طرفین و نیز شاخص‌های مربوط به روش امیدانس مرزی و روش پیشنهادی محاسبه و در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که سهم شبکه بالادست به مراتب بیشتر از سهم شبکه پایین‌دست بوده و لذا شبکه بالادست عامل کاملاً غالب است. شاخص CA شاخص امیدانس مرزی ارائه شده در [۱۹] بوده و Y نیز برابر با مجموع Y_u و Y_c می‌باشد.

حال فرض می‌شود که دامنه و فاز Y_c به‌ترتیب دارای عدم قطعیت در محدوده $\pm 50\%$ و $\pm 45\%$ درجه باشند (فاز Y_c از $+90$ و -90 درجه تجاوز نمی‌کند). نتایج حاصل به‌ازای تمامی حالت‌های ممکن برای عدم قطعیت همزمان دامنه و فاز با گام‌های یک درصد و یک درجه، در شکل‌های ۴ تا ۶ مشاهده می‌گردند. هر یک از نقاط محور افقی، مربوط به یکی از حالت‌های موجود برای عدم قطعیت دامنه و فاز است. در هر یک از این حالت‌ها، به هر کدام از عدم قطعیت‌های دامنه و فاز Y_c مقداری در بازه مورد نظر اختصاص داده شده است.

در شکل ۴ محور عمودی به شاخص‌های VU و VC ذکرشده در روش پیشنهادی اختصاص داده شده است. مشاهده می‌شود که VU بزرگ‌تر از



شکل ۴: شاخص‌های روش پیشنهادی برای شناسایی عامل غالب در ایجاد ولتاژ هارمونیک به‌ازای حالت‌های مختلف برای عدم قطعیت همزمان دامنه و فاز Y_c .



شکل ۵: سهم طرفین در ایجاد ولتاژ هارمونیک به‌ازای حالت‌های مختلف برای عدم قطعیت همزمان دامنه و فاز Y_c .

$$|\bar{I}_u|^2 - |\bar{I}_c|^2 = VU - VC \quad (23)$$

$$VU \triangleq |Y_u| \left[|Y_u| |\bar{V}_{pcc}|^2 + 2(P \cos \gamma_u - Q \sin \gamma_u) \right] \quad (24)$$

$$VC \triangleq |Y_c| \left[|Y_c| |\bar{V}_{pcc}|^2 - 2(P \cos \gamma_c - Q \sin \gamma_c) \right] \quad (25)$$

$$Y_u = \frac{1}{Z_u} = g_u + jb_u, \quad Y_c = \frac{1}{Z_c} = g_c + jb_c \quad (26)$$

$$\begin{cases} \gamma_u \triangleq \tan^{-1} \left(\frac{b_u}{g_u} \right) \\ \gamma_c \triangleq \tan^{-1} \left(\frac{b_c}{g_c} \right) \end{cases}, \quad -90 < \gamma_u, \gamma_c < 90 \quad (27)$$

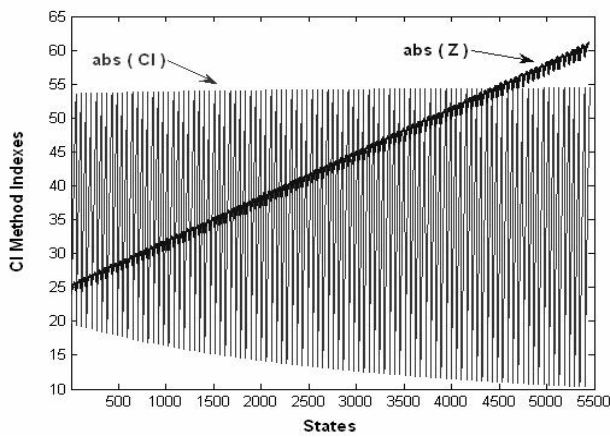
همچنین دوگان حالت‌های مربوط به (۲۲) به‌صورت (۲۸) بیان شده و در الگوریتم مورد نظر نیز به‌جای کمیت‌های جریان، از ولتاژ و به‌جای امیدانس، از ادمیتانس استفاده می‌گردد

$$VU < \cdot, \begin{cases} P < \cdot, \left\{ \begin{array}{l} Q \times \gamma_c > \cdot \\ Q \times \gamma_c < \cdot, |P.F_{pcc}| \geq |\sin \gamma_c| \end{array} \right\} \\ P > \cdot, Q \times \gamma_c > \cdot, |P.F_{pcc}| \leq |\sin \gamma_c| \end{cases} \quad (28)$$

$$\Rightarrow VC > \cdot$$

۴- مقایسه روش پیشنهادی با روش امیدانس مرزی

با توجه به عدم قطعیت در دامنه و فاز Z_c و یا وجود خطا در اطلاعات مربوط به مقادیر واقعی آنها، مقادیر مختلفی برای IC و VC ممکن است در دسترس باشند. اگر مقادیر در دسترس Z_c ، شامل مقدار واقعی Z_c و



شکل ۹: شاخص‌های روش امیدانس مرزی برای شناسایی عامل غالب در ایجاد جریان هارمونیک به‌ازای حالت‌های مختلف برای عدم قطعیت همزمان دامنه و فاز Y_c .

جدول ۲: سهم واقعی طرفین و شاخص‌های مربوط به شناسایی عامل غالب در ایجاد جریان هارمونیک.

$ Z $	CI	IC	IU	I_{cf}	I_{uf}
۴۳٫۴	-۴۹٫۵	۴٫۴	۲۰٫۲	۴۳٪	۵۷٪

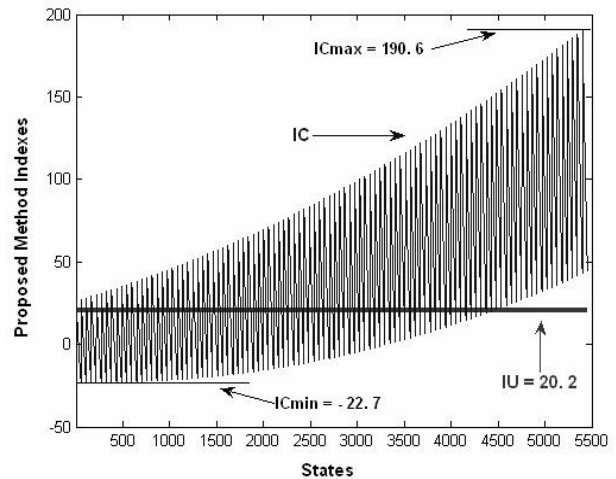
درجه در محدوده $\pm ۵۰\%$ و $\pm ۴۵\%$ درجه نشان داده شده‌اند. محور افقی همانند شکل‌های ۴ تا ۶ می‌باشد.

در شکل ۷ محور عمودی به شاخص‌های IU و IC ذکر شده در روش پیشنهادی اختصاص داده شده است. مشاهده می‌شود که IU بین IC_{max} و IC_{min} قرار دارد و لذا بر اساس گام ۶ از الگوریتم پیشنهادی، اظهار نظر قطعی نمی‌توان کرد.

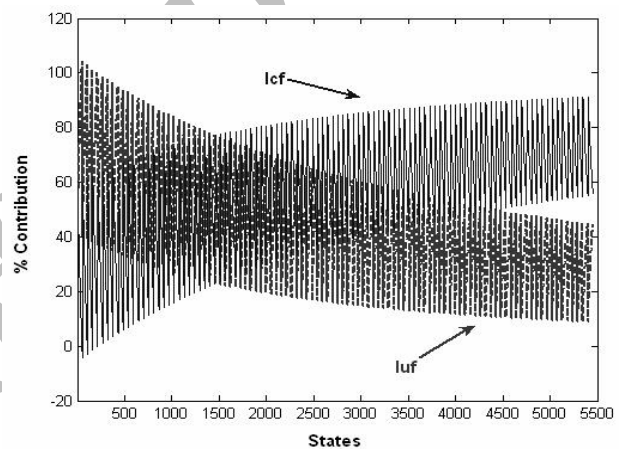
در شکل ۸ محور عمودی به شاخص‌های I_{cf} و I_{uf} یعنی سهم واقعی طرفین اختصاص داده شده است. مشاهده می‌گردد که مکانیزم مناسبی برای مقایسه بین مقادیر این دو کمیت وجود نداشته و نتیجه‌ای از این مقایسه مبنی بر این که سهم کدام طرف بیشتر است حاصل نمی‌گردد که دلیل آن، نزدیکی سهم طرفین می‌باشد. این موضوع، دلیل اصلی انتخاب شاخص‌های IC و IU به‌جای این دو کمیت (سهم واقعی طرفین) است.

در شکل ۹ محور عمودی به شاخص‌های CI و Z ذکر شده در روش امیدانس مرزی اختصاص داده شده است. نکته مهم این تحلیل در این شکل مشاهده می‌شود که شاخص مقایسه‌شونده در روش امیدانس مرزی یا همان CI ، در برخی از وضعیت‌ها (برخی از حالت‌های مربوط به عدم قطعیت دامنه و فاز Z_c) کوچک‌تر از $|Z|_{min}$ شده است. بر اساس روش امیدانس مرزی، در چنین وضعیت‌هایی سهم مصرف‌کننده بیشتر است که این نتیجه با نتیجه واقعی مغایرت دارد. لذا روش امیدانس مرزی ممکن است به دلیل وجود عدم قطعیت و یا وجود خطا در اطلاعات مربوط به دامنه و فاز Z_c ، پاسخ نادرست بدهد.

به‌طور کلی می‌توان گفت که روش امیدانس مرزی [۱۹]، در مواردی که سهم طرفین به هم نزدیک بوده و یا مقادیر مختلفی برای Z_c یا Y_c در دسترس باشد (به دلیل عدم قطعیت و یا وجود خطا در اطلاعات مربوط به آنها)، ممکن است در شناسایی طرف دارای سهم بیشتر در ایجاد اعوجاج‌های هارمونیک دچار اشتباه شود، در حالی که در روش پیشنهادی چنین نمی‌باشد (هر چند که ممکن است جواب قطعی نیز حاصل نگردد). نکته مهم دیگر این که در روش پیشنهادی در هیچ حالتی نیاز به مقدار واقعی Z_c نمی‌باشد در حالی که در روش امیدانس مرزی [۱۹]، برای محاسبه شاخص‌ها باید مقدار β که وابسته به Z_c و Z_u است مشخص باشد.



شکل ۷: شاخص‌های روش پیشنهادی برای شناسایی عامل غالب در ایجاد جریان هارمونیک به‌ازای حالت‌های مختلف برای عدم قطعیت همزمان دامنه و فاز Y_c .



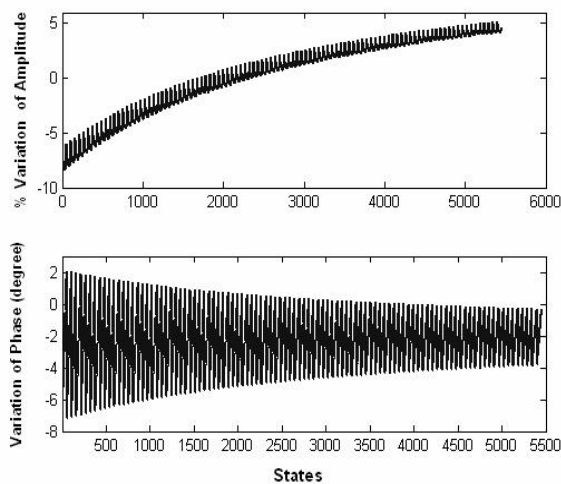
شکل ۸: سهم طرفین در ایجاد جریان هارمونیک به‌ازای حالت‌های مختلف برای عدم قطعیت همزمان دامنه و فاز Y_c .

VC_{max} (ماکزیمم مقدار VC در بین حالت‌های مختلف) بوده و لذا بر اساس گام ۵ از الگوریتم پیشنهادی، سهم شبکه بالادست بیشتر است.

در شکل ۵ محور عمودی به شاخص‌های V_{cf} و V_{uf} یعنی سهم واقعی طرفین اختصاص داده شده است. مشاهده می‌گردد که سهم واقعی شبکه بالادست به مراتب بیشتر است. شایان ذکر است که در این حالت حتی از همان ابتدا مقایسه بین V_{cf} و V_{uf} می‌توانست جایگزین مقایسه بین VC و VU شود و منجر به نتیجه درست به همراه ارزیابی بهتر از تفاوت سهم طرفین گردد.

در شکل ۶ محور عمودی به شاخص‌های CA و Y ذکر شده در روش امیدانس مرزی اختصاص داده شده است. مشاهده می‌شود که اندازه CA در همه حالت‌ها بزرگ‌تر از $|Y|_{max}$ می‌باشد که بر اساس روش امیدانس مرزی [۱۹]، شبکه بالادست عامل غالب بوده و لذا نتیجه صحیحی حاصل گردیده است. مشاهده می‌شود در این حالت که تفاوت سهم طرفین بسیار زیاد است، هر دو روش پاسخ قطعی صحیحی داده‌اند.

برای شناسایی عامل غالب در ایجاد I_{pcc} ، شاخص‌های مربوطه محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که در این حالت با وجود این که سهم شبکه بالادست بیشتر است ولی سهم طرفین به هم نزدیک بوده و عامل کاملاً غالب وجود ندارد. شاخص CI شاخص امیدانس مرزی ارائه‌شده در [۱۹] می‌باشد و Z نیز برابر با مجموع Z_c و Z_u است. در شکل‌های ۷ تا ۹، نتایج حاصل به‌ازای تمامی حالت‌های ممکن برای عدم قطعیت همزمان دامنه و فاز Z_c با گام‌های یک درصد و یک



شکل ۱۱: عدم قطعیت دامنه و فاز Z_u در هارمونیک مرتبه ۷ به‌ازای حالت‌های مختلف عدم قطعیت همزمان دامنه و فاز امیدانس بارهای هارمونیکی شبکه نمونه.

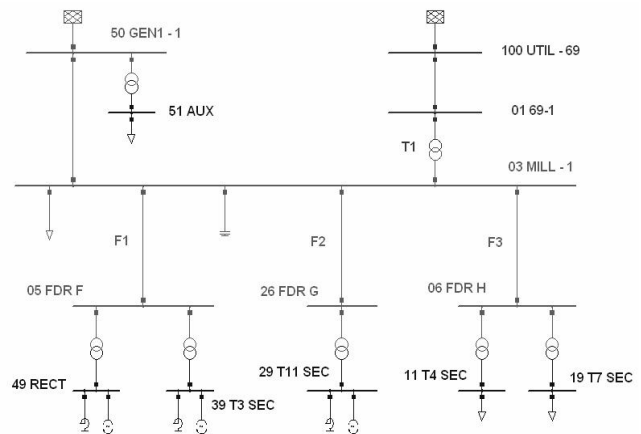
جدول ۴: سهم هارمونیک واقعی طرفین در باسبار PCC برای حالت ۱.

مرتبه هارمونیک	۵	۷	۱۱
$\% I_{uf}$	-۱۰٫۴	۶۲٫۳	۰٫۷۶
$\% I_{cf}$	۱۱۰٫۴	۳۷٫۷	۹۹٫۲۴
$\% V_{uf}$	۸۴٫۵	۱۱۳٫۹	۵۷
$\% V_{cf}$	۱۵٫۵	-۱۳٫۹	۴۳

حاصل از اندازه‌گیری در باسبار PCC برای هارمونیک‌های ۵، ۷ و ۱۱ در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. در این جدول، درصد نسبت هارمونیک‌های ولتاژ و جریان به مؤلفه اصلی آنها و همچنین مقادیر واقعی امیدانس‌های هارمونیکی شبکه‌های بالادست و پایین‌دست از دید باسبار PCC، با استفاده از داده‌های واقعی و به کمک نرم‌افزار قید شده‌اند. THD های ولتاژ و جریان به‌دست آمده در باسبار PCC نیز به‌ترتیب برابر با ۷/۶ و ۶/۶۴ درصد می‌باشند.

در جدول ۴ با استفاده از داده‌های واقعی و نیز با به کارگیری روابط مربوط به جمع آثار، درصد سهم طرفین در ایجاد هارمونیک‌های ولتاژ و جریان در باسبار PCC ارائه شده است. چون این پارامترها با استفاده از کمیت‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های واقعی محاسبه گردیده‌اند، فاقد هر گونه خطا هستند. علامت‌های منفی که در این جدول مشاهده می‌شوند، در اثر به‌وجود آمدن حالت حذف هارمونیک بین طرفین می‌باشند.

حال فرض می‌شود که دامنه و فاز امیدانس یا ادیمیتانس بارهای هارمونیکی، به‌ترتیب دارای عدم قطعیت در محدوده $\pm ۵\%$ و ± ۴۵ درجه باشد به شرطی که فاز آنها از $+۹۰$ و -۹۰ درجه تجاوز نکند. عدم قطعیت در اطلاعات مربوط به بارهای FDR F، موجب عدم قطعیت در اطلاعات مربوط به دامنه و فاز Z_c می‌شود. البته عدم قطعیت در اطلاعات مربوط به بار T۱۱ SEC: ۲۹ نیز موجب عدم قطعیت در اطلاعات مربوط به Z_u می‌گردد. با انجام شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که در صورت عدم قطعیت در محدوده $\pm ۵\%$ و ± ۴۵ درجه در اطلاعات مربوط به بار T۱۱ SEC: ۲۹، میزان عدم قطعیت دامنه و فاز Z_u در هارمونیک‌های ۵ و ۱۱، از یک درصد و یک درجه تجاوز نمی‌کند ولی برای هارمونیک ۷ همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، این عدم قطعیت می‌تواند اندکی بیشتر و تا حدود ۸% و ۷ درجه باشد. با این وجود، میزان این عدم قطعیت زیاد نبوده و می‌توان Z_u را تقریباً معلوم فرض کرد.



شکل ۱۰: شبکه ۱۳ باسه IEEE شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار Digsilent.

جدول ۳: نتایج حاصل از اندازه‌گیری در باسبار PCC برای حالت ۱.

مرتبه هارمونیک	۵	۷	۱۱
$\% \bar{I}_{pcc} $	۳٫۴۲	۲٫۱۱	۲٫۳۶
$\% \bar{V}_{pcc} $	۱٫۹۵	۷٫۰۶	۰٫۳۸
دامنه Z_c (اهم)	۳۱۱٫۵	۴۰۶٫۹	۶۰۶٫۹
فاز Z_c (درجه)	۶۳٫۳	۶۹٫۵	۷۶٫۲
دامنه Z_u (اهم)	۶٫۱۴	۱۱۳٫۷	۴۹٫۸
فاز Z_u (درجه)	۸۷٫۹	۷۰٫۳	-۸۹٫۶

۵- آزمایش روش پیشنهادی بر روی شبکه نمونه

برای آزمایش روش پیشنهادی، از شبکه توزیع صنعتی ۱۳ باسه IEEE [۲۰] استفاده شده است. شبکه مورد نظر برای آرایش نشان داده شده در شکل ۱۰ بر روی نرم‌افزار DIGSILENT شبیه‌سازی شده است. به‌منظور انجام ارزیابی بهتر و ایجاد حالت‌های مختلف، در این شبکه اصلاحاتی به شرح زیر انجام گرفته است:

(۱) نصف بار RECT به‌صورت منبع جریان با طیف هارمونیکی ASD ذکرشده در [۲۰] و نیمی دیگر به‌صورت بار امیدانسی پس‌فاز با همان ضریب توان بار RECT مدل شده است.

(۲) بار T۳ SEC: ۳۹ نیز به‌صورت بار هارمونیکی در نظر گرفته شده و مانند بار RECT مدل گردیده است.

(۳) بار T۱۱ SEC: ۲۹ نیز به‌صورت بار هارمونیکی در نظر گرفته شده و ۷۵ درصد آن به‌صورت بار امیدانسی پس‌فاز و ۲۵ درصد آن به‌صورت منبع جریان با طیف هارمونیکی ASD مدل گردیده است.

(۴) به باسبار ۱۰۰: UTIL-۶۹، هارمونیک‌های ولتاژ پیش‌زمینه با مرتبه‌های ۵، ۷ و ۱۱ و با دامنه‌های ۰٫۱۰۱۵، ۰٫۱۰۰۹ و ۰٫۱۰۰۵ پریونیت و فاز صفر درجه تزریق شده‌اند تا THD ولتاژ این باسبار به ۳٪ برسد.

شبیه‌سازی در دو حالت مختلف برای شبکه‌های بالادست و پایین‌دست باسبار PCC انجام شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است.

حالت ۱:

در این حالت باسبار ۱- MILL ۰۳ به‌عنوان باسبار PCC و فیدر F۱ به همراه ترانسفورمرها و بارهای پایین‌دست آن به‌عنوان مصرف‌کننده انتخاب شده و بقیه شبکه به‌عنوان شبکه بالادست در نظر گرفته شده است. بنابراین جریان F۱ نیز به‌عنوان \bar{I}_{pcc} محسوب گردیده است. نتایج

جدول ۸: سهم هارمونیک واقعی طرفین در باسبار PCC برای حالت ۲.

مرتبۀ هارمونیک	۵	۷	۱۱
$\%I_{uf}$	-۰٫۷۸	۱۳۲٫۵	۷۸٫۸
$\%I_{cf}$	۱۰۰٫۷۸	-۳۲٫۵	۲۱٫۲
$\%V_{uf}$	۷۷٫۴	۱۳۱٫۴	۴۶٫۷
$\%V_{cf}$	۲۲٫۶	-۳۱٫۴	۵۳٫۳

جدول ۹: شاخص‌های محاسبه‌شده برای شناسایی عامل غالب در ایجاد جریان هارمونیک توسط روش پیشنهادی در حالت ۲.

مرتبۀ هارمونیک	$IC_{max} (10^4)$	$IC_{min} (10^4)$	$IU (10^4)$
۵	-۲٫۸۵	۶۶٫۹	۹۱۰
۷	-۹۲٫۳	-۹۳٫۸۵	-۹۳٫۳
۱۱	۰٫۲	-۰٫۲۳	-۰٫۲۲

جدول ۱۰: شاخص‌های محاسبه‌شده برای شناسایی عامل غالب در ایجاد ولتاژ هارمونیک توسط روش پیشنهادی در حالت ۲.

مرتبۀ هارمونیک	VC_{max}	VC_{min}	VU
۵	۳۵۹	-۴٫۹۶	۱۸٫۵۸
۷	-۳۴۲۹	-۳۵۰۰	-۳۴۸۰
۱۱	-۱۷٫۹	-۱۸٫۲	-۱۲٫۳

ادمیتانس بارهای هارمونیک، همانند حالت ۱ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که در این حالت همه بارهای هارمونیک در شبکه پایین دست قرار دارند، لذا محدوده عدم قطعیت فقط بر روی مقدار Z_c اثر می‌گذارد و مقدار Z_u معلوم و برابر با امپدانس هارمونیک ترانسفورمر کاهنده T۱ در نظر گرفته می‌شود.

حال برای اعمال روش پیشنهادی به منظور شناسایی عامل غالب در ایجاد \bar{I}_{pcc} ، کمیت‌های IU ، IC_{min} و IC_{max} محاسبه و در جدول ۹ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌گردد که در هارمونیک ۵، IU کوچک‌تر از IC_{min} بوده و بر اساس گام ۵ از الگوریتم پیشنهادی، سهم مصرف‌کننده بیشتر است. همچنین ملاحظه می‌گردد که در هارمونیک‌های ۷ و ۱۱، IU بزرگ‌تر از IC_{max} بوده و در نتیجه بر اساس گام ۵، سهم شبکه بالادست بیشتر است. لذا نتایج حاصل از روش پیشنهادی، با نتایج واقعی در جدول ۸ مطابقت دارند. نکته مهمی که در جدول ۹ مشاهده می‌شود این است که در هارمونیک ۷، مقادیر IU ، IC_{min} و IC_{max} بسیار به هم نزدیک بوده و این به دلیل وجود رزونانس بین شبکه بالادست و پایین دست در این هارمونیک است.

برای اعمال روش پیشنهادی به منظور شناسایی عامل غالب در ایجاد \bar{V}_{pcc} ، کمیت‌های VU ، VC_{min} و VC_{max} برای هارمونیک‌های ۵، ۷ و ۱۱ محاسبه و در جدول ۱۰ نشان داده شده‌اند. در هارمونیک‌های ۵ و ۷، VU بزرگ‌تر از VC_{max} بوده و لذا سهم شبکه بالادست بیشتر است که این نتایج با نتایج واقعی در جدول ۸ تطابق دارند. در هارمونیک ۱۱، VU بین VC_{min} و VC_{max} قرار دارد و مقدار آن به مراتب به VC_{min} نزدیک‌تر از VC_{max} بوده و تقریباً با VC_{min} برابر است. لذا بر اساس گام ۶ از روش پیشنهادی، می‌توان گفت که سهم طرفین تقریباً در یک سطح بوده و احتمال اندکی بیشتر بودن سهم مصرف‌کننده وجود دارد که در واقعیت نیز چنین است. مشاهده می‌شود که با استفاده از روش پیشنهادی، در همه هارمونیک‌ها (حتی در هارمونیک ۱۱ که سهم طرفین به هم نزدیک می‌باشد) نتیجه صحیحی حاصل شده است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی در این بخش مشاهده می‌گردد که در روش

جدول ۵: شاخص‌های محاسبه‌شده برای شناسایی عامل غالب در ایجاد جریان هارمونیک توسط روش پیشنهادی در حالت ۱.

مرتبۀ هارمونیک	$IC_{max} (10^4)$	$IC_{min} (10^4)$	$IU (10^4)$
۵	۱۲۰۰	۱۵۸	-۱٫۸
۷	۳۰۰	-۹۴	۱۰٫۸
۱۱	۱۸۶۰	۱۹۳	-۰٫۱۸

جدول ۶: شاخص‌های محاسبه‌شده برای شناسایی عامل غالب در ایجاد ولتاژ هارمونیک توسط روش پیشنهادی در حالت ۱.

مرتبۀ هارمونیک	VC_{max}	VC_{min}	VU
۵	۸٫۸۴	۲٫۱	۴۵۵
۷	-۲٫۴	-۶	۴۷
۱۱	-۰٫۵۱	-۰٫۰۴	۴٫۷۷

جدول ۷: نتایج حاصل از اندازه‌گیری در باسبار PCC برای حالت ۲.

مرتبۀ هارمونیک	۵	۷	۱۱
$\% \bar{I}_{pcc} $	۲	۲۰٫۶	۱٫۸۱
دامنه Z_c (اهم)	۱۸۶٫۶	۹٫۲۸	۳٫۶۴
فاز Z_c (درجه)	-۲٫۸	-۸۸٫۵	-۸۹٫۷
دامنه Z_u (اهم)	۶	۸٫۴۴	۱۳٫۲۷
فاز Z_u (درجه)	۸۹٫۳	۸۹٫۵	۸۹٫۷

حال برای اعمال روش پیشنهادی به منظور شناسایی عامل غالب در ایجاد \bar{I}_{pcc} ، کمیت‌های IU ، IC_{min} و IC_{max} برای هارمونیک‌های ۵، ۷ و ۱۱ محاسبه و در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که در هارمونیک‌های ۵ و ۱۱، IU کوچک‌تر از IC_{min} بوده و لذا طبق گام ۵ از الگوریتم پیشنهادی، سهم مصرف‌کننده در این هارمونیک‌ها بیشتر است که این نتایج با نتایج واقعی در جدول ۴ تطابق دارند. ولی در هارمونیک ۷، IU بین IC_{min} و IC_{max} قرار دارد و فاصله آن از این دو کمیت تقریباً به یک اندازه است و در نتیجه اظهار نظر قطعی نمی‌توان کرد که این موضوع به دلیل نزدیکی تقریبی سهم طرفین می‌باشد.

برای اعمال روش پیشنهادی به منظور شناسایی عامل غالب در ایجاد \bar{V}_{pcc} ، کمیت‌های VU ، VC_{min} و VC_{max} برای هارمونیک‌های ۵، ۷ و ۱۱ محاسبه و در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که در همه هارمونیک‌ها، VU بزرگ‌تر از VC_{max} بوده و بر اساس گام ۵ از الگوریتم پیشنهادی، سهم شبکه بالادست بیشتر است که با نتایج واقعی مطابقت دارد. مشاهده می‌شود که حتی در هارمونیک ۱۱ که سهم طرفین در آن به هم نزدیک می‌باشد، به وسیله روش پیشنهادی پاسخ صحیحی حاصل گردیده است.

حالت ۲:

در این حالت نیز باسبار ۱ - ۳ MILL به عنوان باسبار PCC انتخاب شده است ولی ترانس T۱ و شبکه بالادست آن به عنوان شبکه بالادست باسبار PCC و بقیه شبکه به عنوان شبکه پایین دست این باسبار در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه جریان ثانویه ترانس T۱ به عنوان \bar{I}_{pcc} محسوب می‌شود. نتایج واقعی حاصل از اندازه‌گیری در باسبار PCC برای هارمونیک‌های ۵، ۷ و ۱۱ در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. THD جریان باسبار PCC نیز برابر با ۲۱٪ به دست آمده است. در جدول ۸ نیز درصد سهم واقعی طرفین در ایجاد هارمونیک‌های ولتاژ و جریان ارائه شده‌اند. در این حالت نیز محدوده عدم قطعیت برای مقادیر امپدانس یا

مراجع

- [1] J. Arrillaga, *Power System Harmonics*, 2nd Edition, John Wiley, New York, 2003.
- [2] IEEE 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (ANSI).
- [3] R. C. Dugan and M. F. Mc Granghan, *Electrical Power System Quality*, 2th Edition, Mc Graw - Hill, New York, 2004.
- [4] W. Xu, "Power direction method can not be used for harmonic source detection," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 873-876, Jul. 2000.
- [5] W. Xu, X. Liu, and Y. Liu, "An investigation on the validity of power - direction method for harmonic sources determination," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 214-219, Jan. 2003.
- [6] E. Thunberg and L. Soder, "A norton approach to distribution network modeling for harmonic studies," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, no. 1, pp. 272-277, Jan. 1999.
- [7] W. Xu and Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 804-811, Apr. 2000.
- [8] H. Yang, P. Pirotte, E. De Jaeager, and A. Robert, "Harmonic emission levels of industrial loads - statistical assessments," in *CIGRE*, paper 36-306, 1996.
- [9] B. Chazottes, T. Deflandre, F. Gorgette, J. Martinon, and J. C. Chataigner, "Estimating the true customers' contribution to the power system harmonic disturbances," in *Proc Power Quality Applcat. Conf., PQA'97-Europe*, Stockholm, Sweden, 16-18 Jun. 1997.
- [10] O. Gonbeau, L. Berthet, J. Javerzac, and D. Beudou, "Method to determine contribution of the customer and the power systems to the harmonic disturbances," in *Proc. 17th Int. Conf. on Electricity Distribution*, 6 pp., Barcelona, May 2003.
- [11] Z. Staroszczyk, "A metohd for real - time, wide - band identification of the source impedance in power systems," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 1, pp. 377-385, Feb. 2005.
- [12] J. Ortega, A. Expozito, A. Garcia, and M. Payan, "A state estimation method approach to harmonic polluting load characterization in distribution," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 765-772, May 2005.
- [13] J. Mazumdar, R. G. Harley, F. Lambert, and G. K. Venayagamoorthy, "A novel method for predicting harmonic current injection from non - linear loads using neural networks," in *Proc. 31th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society, IECON'2005*, 6, pp., Nov. 2005.
- [14] J. Mazumdar, R. G. Harley, and F. Lambert, "System and method for determining harmonic contributions from non - linear loads using recurrent neural networks," in *Proc. of Int. Joint Conf. on Neural Networks*, vol. 1, pp. 366-371, Montral, Canada, 31 Jul.-4 Aug. 2005.
- [15] D. Srinivasan, W. S. Ng, and A. C. Liew, "Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 398-405, Jan. 2006.
- [16] R. Pyzalski, R. Lukowski, and K. Wilkosz, "Utilization of the voltage rate to localization of harmonic source in a power systems," in *IEEE Melecon. Electrotechnical Conf.*, vol. 3, pp. 1091-1094, May 2004.
- [17] N. Hamzah, A. Mohamed, and A. Hussain, "Harmonic source location at the point of common coupling based on voltage magnitude," in *Proc. IEEE Region 10 Conf., TENCON'2004*, vol. 3, pp. 220-223, 21-24 Nov. 2004.
- [18] C. Chen, X. Liu, D. Koval, and W. Xu, "Critical impedance method-a new detecting harmonic sources method in distributions systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 286-297, Jan. 2004.
- [19] C. Liu and W. Xu, "A critical impedance-based method for identifying harmonic sources," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 671-678, Apr. 2004.
- [20] Transmission & Distribution Committee, IEEE Power Engineering Society, "Test system for harmonic modeling and simulation," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 579-583, Apr. 1999.

حمیدرضا کارشناس در سال ۱۳۶۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف و در سال ۱۳۷۶ مدرک دکترای مهندسی برق خود را از دانشگاه تورنتوی کانادا دریافت نمود. وی از سال ۱۳۷۶ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده مبدل‌های الکترونیک قدرت، کنترل

پیشنهادی احتمال این که در شناسایی عامل غالب در ایجاد اعوجاج‌های هارمونیک، پاسخ نادرست حاصل شود وجود ندارد. همچنین روش پیشنهادی به داشتن اطلاعات دقیق در مورد امیدانس‌های هارمونیک مجهول، نیازی ندارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی برای شناسایی عامل غالب در ایجاد جریان و ولتاژ هارمونیک در باسبار PCC ارائه شد. در این روش به غیر از نتایج اندازه‌گیری در باسبار PCC که توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری به‌راحتی قابل حصول است، فقط نیاز به اطلاعات تقریبی راجع به امیدانس‌های هارمونیک شبکه و مصرف‌کننده می‌باشد. در این مقاله با استفاده از تعاریف ارائه‌شده برای سهم هارمونیک ولتاژ و جریان، شاخص‌هایی تعریف گردیدند که یا فقط به پارامترهای شبکه بالادست باسبار PCC و یا فقط به پارامترهای شبکه پایین‌دست آن بستگی داشتند. در نتیجه با فرض معلوم بودن امیدانس هارمونیک شبکه بالادست، یکی از شاخص‌ها در همه حالت‌ها تقریباً معلوم بوده و لذا مکانیزم مقایسه بین شاخص‌ها حتی در حالت‌هایی که سهم هارمونیک طرفین باسبار PCC به هم نزدیک باشد به سادگی صورت می‌گیرد. این موضوع یکی از ویژگی‌های مثبت روش پیشنهادی نسبت به روش امیدانس مرزی می‌باشد. همچنین با مقایسه بین روش پیشنهادی و روش امیدانس مرزی نشان داده شد که در روش امیدانس مرزی، احتمال تشخیص نادرست عامل غالب وجود دارد در حالی که در روش پیشنهادی، پاسخ نادرست حاصل نمی‌گردد هر چند که ممکن است پاسخ قطعی نیز به‌دست نیاید. نکته مهم دیگر این که در روش پیشنهادی بر خلاف روش امیدانس مرزی، در هیچ حالتی نیاز به مقادیر دقیق امیدانس‌های هارمونیک وجود ندارد. این ویژگی‌ها با شبیه‌سازی شبکه توزیع صنعتی ۱۳ باسه IEEE بر روی نرم‌افزار DIGSILENT و پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی آن نیز بررسی گردیده و نشان داده شدند.

پیوست

دستورالعمل روش امیدانس مرزی برای شناسایی عامل غالب در ایجاد جریان هارمونیک \bar{I}_{pcc} :

(۱) محاسبه \bar{E}_u با استفاده از رابطه $\bar{E}_u = \bar{V}_{pcc} + Z_u \bar{I}_{pcc}$ با توجه به این که مقدار Z_u معلوم است.

(۲) یافتن Q_u از طریق رابطه $Q_u = -|\bar{E}_u| |\bar{I}_{pcc}| \sin(\theta + \beta)$ که θ برابر با مقدار تقدم فاز \bar{E}_u نسبت به \bar{I}_{pcc} و نیز β برابر با $\tan^{-1}(R_u + R_c / X_u + X_c)$ می‌باشند.

(۳) محاسبه شاخص امیدانس مرزی $CI = 2Q_u / |\bar{I}_{pcc}|^2$.

(۴) اگر CI مثبت باشد، مصرف‌کننده عامل اصلی ایجاد جریان هارمونیک \bar{I}_{pcc} است.

(۵) اگر CI منفی باشد، یکی از حالت‌های زیر پیش می‌آید:

الف) اگر $|CI| > |Z|_{\max}$ باشد، شبکه بالادست عامل اصلی است.

ب) اگر $|CI| < |Z|_{\min}$ باشد، مصرف‌کننده عامل اصلی است.

ج) اگر $|Z|_{\min} \leq |CI| \leq |Z|_{\max}$ ، اظهار نظر قطعی نمی‌توان کرد.

برای شناسایی عامل اصلی ایجاد ولتاژ هارمونیک \bar{V}_{pcc} با استفاده از روش امیدانس مرزی، از دوگان روش ارائه‌شده برای \bar{I}_{pcc} استفاده می‌شود. یعنی به‌جای کمیت‌های \bar{E}_u ، \bar{V}_{pcc} ، \bar{I}_{pcc} ، R ، X ، Z و β به ترتیب کمیت‌های \bar{I}_u ، \bar{I}_{pcc} ، \bar{I}_c ، \bar{V}_{pcc} ، \bar{Y} ، B ، G و γ جایگزین می‌شوند. γ برابر با $\tan^{-1}(G_u + G_c / B_u + B_c)$ می‌باشد.

سیستم‌های الکترونیک قدرت، کاربرد الکترونیک قدرت در سیستم‌های قدرت و کیفیت توان الکتریکی می‌باشد.

مجید مرادلو تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد برق - قدرت به ترتیب در سالهای ۱۳۸۴ و ۱۳۸۶ از دانشگاه‌های زنجان و صنعتی اصفهان به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکتری این رشته در دانشگاه صنعتی اصفهان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کیفیت توان الکتریکی، کاربرد الکترونیک قدرت در سیستم‌های قدرت، تولیدات پراکنده و انرژی‌های نو.

Archive of SID