

به کارگیری فیلتر فعال قدرت موازی بر مبنای آشکارسازی ولتاژ در یک فیدر شعاعی توزیع با هدف کاهش مؤثر پدیده‌های انتشار هارمونیک و Whack-a-mole

حمیدرضا عزتی^(۱) - علی یزدیان ورجانی^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۹۰ تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۱

خلاصه: به منظور میرا کردن پدیده انتشار هارمونیک، فیلترهای فعال قدرت موازی روی سیستم‌های توزیع نصب می‌شوند. نصب فیلتر فعال قدرت موازی بر اساس آشکارسازی ولتاژ کار می‌کند و با هدف کاهش مؤثر و جبران‌سازی پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک به کار رفته، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. دو مطالعه موردی اتصال منبع ولتاژ هارمونیک به شبکه شعاعی و نیز اتصال منبع جریان هارمونیک بررسی شده است. در این مقاله با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، برای یک فیدر توزیع قدرت شعاعی ده باسه در حالت‌های مختلف اتصال بار غیرخطی (منبع ولتاژ یا جریان هارمونیک) با انتخاب بهره ثابت که متناسب با عکس امپدانس مشخصه است دو پدیده فوق به طور مؤثر کاهش می‌یابد. به علت ماهیت متغیر بودن امپدانس مشخصه فیدر توزیع قدرت، تنظیم خودکار بهره کنترل فیلتر فعال صرفنظر از شرایط سیستم مورد نیاز خواهد بود. با تنظیم خودکار بهره فیلتر قدرت می‌توان جریان مخرب هارمونیک را با روش آشکارسازی ولتاژ، جداسازی کرده و با کنترل این بهره با هدف کاهش و استانداردسازی اعوجاج هارمونیک کل، جریان جبران‌سازی تولید می‌شود و با تزریق این جریان با فاز مخالف به شبکه شعاعی می‌توان از بروز انتشار هارمونیک و Whack-a-mole در طول فیدر جلوگیری نمود. چون این روش استخراج جریان هارمونیک بر اساس کنترل ولتاژ و اعوجاج هارمونیک کل می‌باشد، به نام آشکارسازی ولتاژ شناخته می‌شود.

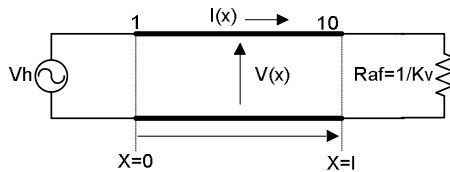
کلمات کلیدی: انتشار هارمونیک، نوسان هارمونیک، امپدانس مشخصه، بهره فیلتر فعال قدرت.

اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان افزایش یافته به علت تشدید هارمونیک در یک دستگاه صنعتی را بیان می‌کند. مراجع [۶-۷] به تفصیل بیان می‌کنند که چگونه انتشار هارمونیک در سیستم‌های توزیع قدرت الکتریکی 6.6 KV در ژاپن تحت شرایط بار سبک در شب اتفاق می‌افتد. مرجع [۸] نیز اشاره دارد به اینکه در شبکه توزیع با مشخصات 6.6 KV و به طول 17 km که دارای خازن‌های اصلاح کننده ضریب توان با ظرفیت کل 245 kVA است، ولتاژ هارمونیک پنجم در باس

۱- **مقدمه:** در سالهای اخیر، مسائل و مشکلات ناشی از انتشار هارمونیک در صنعت و سیستم‌های توزیع برق بسیار حائز اهمیت شده است. تشدید هارمونیک یا انتشار هارمونیک بین خازن‌ها که به منظور تصحیح ضریب توان در شبکه قدرت به کار می‌روند و سلفهای موجود در کابلها، خطها و ترانسفورماتورها هارمونیک‌های ولتاژ و جریان را در دستگاههای صنعتی و سیستم‌های توزیع قدرت الکتریکی بشدت افزایش داده‌اند [۱-۸]. مراجع [۳-۴] مقادیر محاسبه شده و

موازی با خط توزیع قرار می‌گیرد. فیدر توزیع به کار رفته شعاعی ساده بوده و دارای شاخه فرعی روی باس‌ها نمی‌باشد. علاوه بر اینها چون مساله انتشار هارمونیک در شرایط بی‌باری بسیار جدی و حاد می‌باشد بنابراین شبکه در حالت بی‌باری بررسی می‌گردد [۱-۲].

شکل (۲) مدل پارامتر توزیع شده فیدر توزیع قدرت را نمایش می‌دهد که در آن l طول فیدر و X فاصله از باس یک می‌باشد. یک منبع ولتاژ هارمونیک روی باس ۱ وجود دارد، همچنین یک مقاومت $R_{AF} (= \frac{1}{K_V})$ به باس انتهایی فیدر متصل شده است.



شکل (۲): مدل پارامتر توزیع شده فیدر توزیع قدرت

Fig. (2): Distributed parameter model of power distribution feeder

امپدانس مشخصه یک فیدر کلی، Z_C ، به صورت (۱) تعریف می‌شود:

$$Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{(R + jL\omega)}{(G + jC\omega)}} \quad (1)$$

طول موج λ و ثابت انتشار γ برای فیدر توزیع به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y} = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)} = \alpha + j\beta \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (3)$$

برای فیدر بدون تلفات، امپدانس مشخصه به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{1}{f\sqrt{LC}}$$

همان طور که در شکل (۲) دیده می‌شود موج ایستان ولتاژ هارمونیک $V(x)$ و موج ایستان جریان هارمونیک $I(x)$ را می‌توان به صورت تابعی از فاصله، X ، به صورت رابطه (۵) بیان کرد [۹].

$$V(x) = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (5)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} (Be^{-\gamma x} - Ae^{\gamma x})$$

منبع ولتاژ هارمونیک V_h به باس ابتدایی فیدر متصل است، همچنین مقاومت میراکننده $R_{AF} (= \frac{1}{K_V})$ به باس انتهایی فیدر

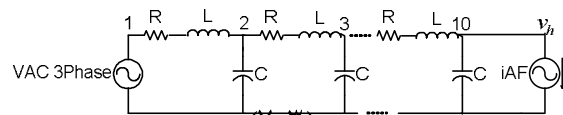
انتهایی فیدر توزیع معمولاً 3.5 برابر مقدار این ولتاژ روی باس ابتدایی فیدر است. مساله جبران‌سازی هارمونیک‌ها به صورت پایه‌ای از حدود سال ۱۹۷۰ میلادی شروع شده است و بیشتر تحقیقات روی فیلترهای فعال و کاربردهای عملی آنها انجام گرفته است.

اگر فرکانس تشدید ناشی از تشدید سری/ موازی بین سلفها و خازن‌های خط نزدیک یکی از فرکانس‌های هارمونیک ایجاد شده توسط بار غیرخطی باشد، آنگاه جریان هارمونیک بزرگی ایجاد خواهد شد که بین سلف و خازن نوسان کرده و باعث ایجاد پدیده انتشار هارمونیک در خطوط طولانی توزیع می‌شود. به منظور میرا کردن این پدیده، فیلترهای فعال قدرت روی سیستم‌های توزیع نصب می‌شوند. نصب فیلتر فعال قدرت روی باس‌ها ممکن است باعث ایجاد پدیده نوسان هارمونیک (Whack-a-mole) شود [۱]. محاسبات و آنالیز تئوری نشان می‌دهد که در حالت‌های مختلف اتصال منابع ولتاژ و جریان هارمونیک به ترتیب روی باس ابتدایی و باس‌های میانی فیدر توزیع، با نصب فیلتر فعال موازی با بهره ثابت « $K_V = \frac{1}{Z_C}$ » بر روی

باس انتهایی فیدر شعاعی توزیع دو پدیده انتشار و نوسان هارمونیک به طور مؤثری کاهش می‌یابند [۱-۲]. اما دانستن امپدانس مشخصه در یک سیستم توزیع قدرت واقعی غیر ممکن است. بنابراین تنظیم خودکار بهره کنترل فیلتر صرفنظر از شرایط سیستم مورد نیاز خواهد بود. در این مقاله کنترل کننده بهره فیلتر فعال موازی قدرت به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند با تولید جریان جبران‌سازی مناسب و تزریق این جریان به فیدر شعاعی توزیع اعوجاج هارمونیک ولتاژ باسی که فیلتر فعال روی آن نصب شده است را پایین‌تر از یک حد مشخص نگه دارد. در این مقاله نشان داده شده است که برای یک فیدر توزیع قدرت ده باسه با در نظر گرفتن فیلتر فعال با بهره ثابت « $K_V = \frac{1}{Z_C}$ » پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک کنترل شده و کاهش می‌یابد. دو مطالعه موردی نیز با اتصال منبع ولتاژ هارمونیک به شبکه شعاعی و نیز اتصال منبع جریان هارمونیک به باس‌های میانی فیدر توزیع قدرت ساده ۱۰ باسه، انجام شده است.

۲- ساختار فیدر توزیع قدرت

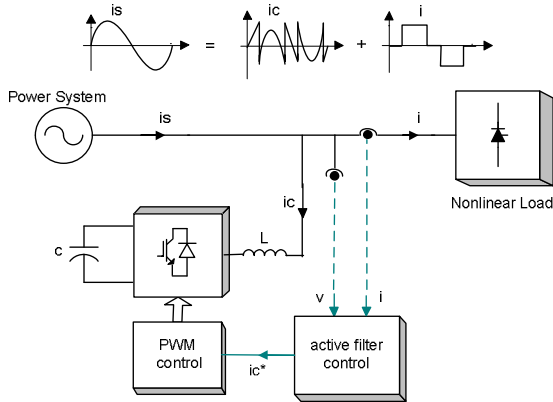
شکل (۱) یک فیدر توزیع قدرت سه فاز را نمایش می‌دهد.



شکل (۱): توپولوژی فیدر توزیع قدرت سه فاز

Fig. (1): Topology of three-phase power distribution feeder

در ساختار فوق خط هوایی بین هر باس و باس مجاورش می‌تواند به صورت یک مدار R-L فشرده نمایش داده شود. خازن C نیز به صورت



شکل (۳): ساختار کلی فیلتر فعال موازی و جزئیات اتصال آن به شبکه قدرت
Fig. (3): The overall structure of the parallel active filter and details of its connections to the power grid

در یک فیلتر فعال موازی برای جبران جریان‌های راکتیو و هارمونیک بار اعمال زیر نیاز است:

(الف) آشکارسازی مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو بار که توسط بخش مولد سیگنال مرجع انجام می‌گیرد.

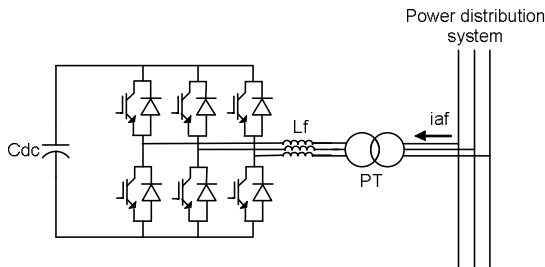
(ب) تعیین جریان تلفات فیلتر که یک جریان اکتیو همفاز با ولتاژ شبکه می‌باشد. مقدار این جریان توسط کنترل‌کننده ولتاژ تعیین می‌شود (وظیفه کنترل‌کننده ولتاژ تثبیت ولتاژ لینک dc در اینورتر منبع ولتاژ می‌باشد).

(ج) تولید جریان مرجع از مجموع جریان‌های هارمونیک و راکتیو بار و جریان جبران تلفات فیلتر

(د) تولید یک استراتژی کلیدزنی مناسب به طوری که جریان فیلتر، جریان مرجع را دنبال کند. این عمل توسط کنترل‌کننده جریان انجام می‌گیرد.

۴- ساختار و اصول عملکرد فیلتر فعال قدرت با بهره‌ی ثابت K_V نصب شده بر روی فیدر توزیع

ساختار فیلتر فعال به کار رفته در شبیه‌سازی به صورت شکل (۴) است.



شکل (۴): ساختار فیلتر فعال قدرت
Fig. (4): The structure of active power filter

این ساختار از یک اینورتر منبع ولتاژ با شش سوئیچ IGBT تشکیل شده است. فیلتر فعال قدرت از طریق یک مبدل به باس انتهایی فیدر

متصل شده است که این مقاومت در فرکانس‌های هارمونیک می‌باشد.

ثابت‌های A و B با در نظر گرفتن شرایط مرزی ابتدا، $x = 0$ ، و انتهای فیدر، $x = 1$ ، تعیین می‌شوند. با جایگذاری ثابت‌های A و B، موج ایستادن ولتاژ هارمونیک به صورت روابط (۶-الف) و (۶-ب) محاسبه می‌شود.

$$V(x) = \frac{\cosh \gamma(1-x) + K_V Z_C \sinh \gamma(1-x)}{(\cosh \gamma l + K_V Z_C \sinh \gamma l)} V_h \quad (۶-الف)$$

$$V(x) = \frac{\cos \beta(1-x) + jK_V Z_C \sin \beta(1-x)}{(\cos \beta l + jK_V Z_C \sin \beta l)} V_h \quad (۶-ب)$$

ضریب بزرگنمایی ولتاژ^۲ را می‌توان به صورت رابطه (۷) بیان کرد:

$$VMF = \left| \frac{V(x)}{V_h} \right| \quad (۷)$$

$$= \left| \frac{\cosh \gamma(1-x) + K_V Z_C \sinh \gamma(1-x)}{(\cosh \gamma l + K_V Z_C \sinh \gamma l)} \right|$$

$$= \left| \frac{R_{AF} \cosh \gamma(1-x) + Z_C \sinh \gamma(1-x)}{(R_{AF} \cosh \gamma l + Z_C \sinh \gamma l)} \right|$$

۳- اصول عملکرد و کنترل فیلترهای فعال قدرت موازی

یک فیلتر فعال موازی از سه بخش تشکیل یافته است. بخش اول مولد یا آشکارساز سیگنال مرجع، بخش دوم منبع جریان تزریق هارمونیک که یک اینورتر منبع ولتاژ یا جریان است و بخش سوم شامل کنترل‌کننده‌ها می‌باشد. فیلتر فعال موازی در یک مدار حلقه بسته به کار می‌رود و به طور مستمر جریان بار، i ، را اندازه‌گیری نموده و مقدار لحظه‌ای جریان جبران‌سازی مینا، i_c^* ، را برای مبدل PWM تولید می‌نماید (شکل ۳).

اگر فرکانس سوئیچینگ PWM به حد لازم زیاد باشد جریان خروجی اینورتر، i_c ، شامل هارمونیک‌های فرکانس بالا نیز خواهد بود، البته این هارمونیک‌های فرکانس بالا را می‌توان به آسانی با یک فیلتر پسیو کوچک بالاگذر حذف نمود. به صورت ایده‌آل می‌توان مبدل PWM را یک تقویت‌کننده قدرت خطی فرض نمود که جریان i_c^* را تبدیل به i_c می‌نماید. در یک فیلتر فعال موازی از نوع اینورتر منبع ولتاژ، مولد سیگنال مرجع نقش جدا کردن سیگنال‌های هارمونیک و راکتیو از جریان‌های بار را دارد. منبع جریان تزریق هارمونیک یک اینورتر قدرت می‌باشد که با کلیدزنی مناسب به جبران جریان‌های هارمونیک و راکتیو بار می‌پردازد. کنترل‌کننده‌ها در واقع شامل دو کنترل‌کننده می‌باشد، یکی کنترل‌کننده جریان که خطای بین جریان آشکارساز و جریان فیلتر را کوچک نگه می‌دارد و دیگری کنترل‌کننده ولتاژ که ولتاژ لینک dc را در مقدار مرجع تثبیت می‌کند.

با استفاده از فیلترهای بالاگذر فوق مؤلفه‌های \tilde{v}_d و \tilde{v}_q از ولتاژهای v_d و v_q قابل جدا شدن می‌باشند. \tilde{v}_d و \tilde{v}_q همان مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ می‌باشند. مؤلفه‌های جریانی i_{cd}^* و i_{cq}^* به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} i_{cd}^* &= K_V \cdot \tilde{v}_d \\ i_{cq}^* &= K_V \cdot \tilde{v}_q \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن $K_V = \frac{1}{Z_C}$ بهره فیلتر فعال قدرت است.

با استفاده از تبدیل معکوس d-q جریان‌های $i_{cd}^* + \Delta i_{cd}^*$ و i_{cq}^* به مختصات abc (جریان‌های i_{ca}^* ، i_{cb}^* ، i_{cc}^*) تبدیل می‌شوند (رابطه ۱۲). در این رابطه مؤلفه جریانی Δi_{cd}^* ، تلفات کلیدزنی سوئیچ‌های مبدل را مدل می‌کند.

$$\begin{pmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0.5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{cd}^* + \Delta i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{pmatrix} \quad (12)$$

۵- نتایج شبیه‌سازی در دو حالت فیدر توزیع قدرت با یک امیدانس مشخصه و اتصال منابع ولتاژ و یا جریان هارمونیک

پدیده انتشار هارمونیک در شرایط بی‌باری بسیار جدی و خطرناک است [۱-۲]، بنابراین شبکه توزیع در حالت بی‌باری شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شده است. برای فیدر توزیع قدرت شکل (۱) و با پارامترهای مداری نشان داده شده در جدول (۱)، نتایج شبیه‌سازی در دو حالت (۱-۵) و (۲-۵) ارائه شده است.

Table. (1): Parameters of the power distribution feeder
جدول (۱): مقادیر پارامترهای فیدر توزیع قدرت

ولتاژ خط	6.6 kV
فرکانس خط	50 Hz
طول فیدر	9 km
ظرفیت کل خازن‌ها	3 MVA
تعداد پاسب‌ها	10
L: اندوکتانس خط	1.98 mH/km
R: مقاومت خط	0.36 Ω /km
C: ظرفیت خازن	25 μ F/km

توزیع متصل شده است. همچنین خازن $C_{dc} = 3300\mu F$ به طرف dc اینورتر وصل شده است. سلف $L_f = 2.5mH$ نیز به طور سری با هر فاز خط قرار گرفته است.

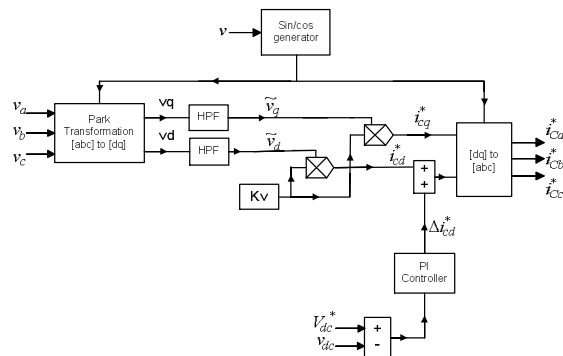
برای میرا کردن انتشار هارمونیک در سرتاسر سیستم‌های توزیع قدرت، فیلتر فعال قدرت که بر مبنای آشکارسازی ولتاژ کار می‌کند، روی باس انتهایی فیدر توزیع نصب شده است. بر این اساس ولتاژ در نقطه اتصال فیلتر فعال آشکار می‌شود و سپس ولتاژ هارمونیک v_h توسط بهره کنترل K_V تقویت می‌شود تا جریان مرجع جبران‌سازی i_c^* مانند زیر حاصل شود [۱] و [۹-۱۱]:

$$i_c^* = K_V \cdot v_h \quad (8)$$

مدار تولید جریان مرجع جبران‌سازی در حالتی که فیلتر فعال قدرت با بهره ثابت K_V استفاده شده است در شکل (۵) آمده است.

در بلوک دیاگرام شکل (۵) ولتاژهای سه فاز در محل نصب فیلتر فعال بر روی فیدر توزیع آشکار می‌شوند، v_a ، v_b ، v_c و v_0 . با فرض اینکه سیستم سه فاز متقارن است، $v_a + v_b + v_c = 0$ ، بنابراین مؤلفه

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_a + v_b + v_c) = 0 \text{ صفر خواهد بود.}$$



شکل (۵): مدار تولید جریان مرجع جبران‌سازی

Fig. (5): Compensated reference current generating circuit

تبدیل abc-dq را می‌توان به صورت (۹) بیان کرد.

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \cos \omega_s t & \sin \omega_s t \\ -\sin \omega_s t & \cos \omega_s t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \quad (9)$$

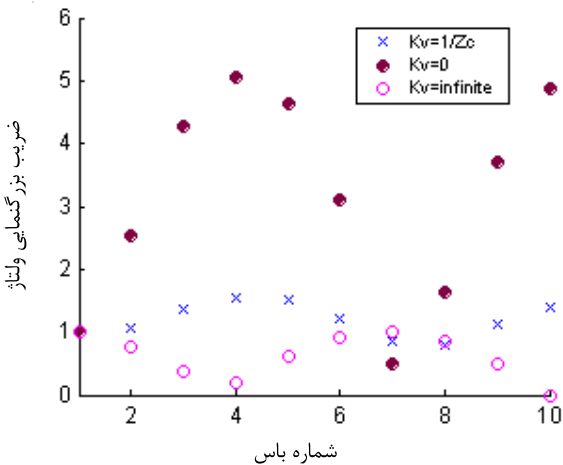
که در آن $\omega_s t$ فاز خط می‌باشد. ω_s فرکانس اصلی شبکه توزیع است که توسط حلقه قفل شونده به فاز تعیین می‌شود. برای جداسازی مؤلفه‌های ac در مختصات dq (که همان مؤلفه‌های هارمونیک مختصات abc می‌باشند) از دو فیلتر بالاگذر مرتبه اول با فرکانس قطع 13 Hz استفاده شده است. تابع تبدیل فیلتر بالاگذر در رابطه (۱۰) نشان داده شده است.

$$HPF(s) = \frac{0.0122s}{0.0122s + 1} \quad (10)$$

و بالاخره حالتی که « $K_V = \frac{1}{Z_C}$ »، تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ در طول فیدر به حداقل مقدار خود می‌رسد و انتشار هارمونیک در این حالت کمترین است.

شکل (۷) تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک هفتم، نسبت ولتاژ هارمونیک هفتم روی هر باس به ولتاژ هارمونیک هفتم باس یک را برای حالت‌های مختلف « $K_V = 0$ »، « $K_V = \frac{1}{Z_C}$ » و « $K_V = \infty$ » نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود در حالت $K_V = 0$ ، تغییرات ولتاژ هارمونیک در طول فیدر بسیار شدید است، انتشار هارمونیک در روی باس چهار (باس میانی فیدر) بیشترین است. ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک در روی باس ۷ فیدر توزیع کمترین است. ضریب بزرگنمایی ولتاژ در حالت $K_V = \infty$ تقریباً در روی تمام باس‌ها کمتر از واحد است. این ضریب در روی باس ۴ دارای یک کمینه محلی است در حالی که در روی باس ۷، بیشترین است و در روی باس انتهایی فیدر (باس ۱۰) صفر می‌شود.



شکل (۷): تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک هفتم
Fig. (7): The variations of seventh harmonic voltage magnifying coefficient

در حالت $K_V = \frac{1}{Z_C}$ ، تغییرات ولتاژ هارمونیک کمترین است. در این حالت ضریب بزرگنمایی ولتاژ در روی باس ۴، بیشترین و در روی باس ۸، کمترین است. اما اختلاف این دو مقدار چندان زیاد نیست. با دقت در نتایج شبیه‌سازی می‌توان دریافت که در حالت « $K_V = \frac{1}{Z_C}$ »، ضریب بزرگنمایی ولتاژ در روی باس‌ها دارای کمترین مقدار تغییرات خواهد بود و انتشار و نوسان هارمونیک در این حالت کمتر اتفاق می‌افتد.

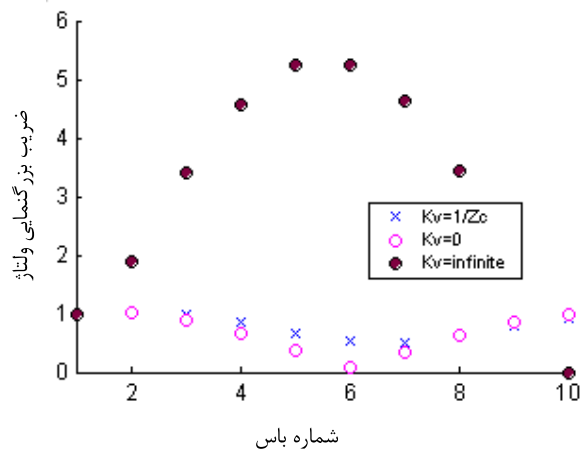
در حالت (۵-۱) منابع ولتاژ هارمونیک مراتب پنجم و هفتم به طور مجزا بر روی باس یک فیدر توزیع قرار گرفته‌اند و برای هر دو نوع منبع ولتاژ هارمونیک تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک (نسبت ولتاژ هارمونیک هر باس به ولتاژ هارمونیک باس یک) [۱] در طول فیدر توزیع به ازای K_V های مختلف نشان داده شده است.

در حالت (۵-۲) تغییرات ولتاژ هارمونیک باس‌های مختلف فیدر توزیع به ازای اتصال منابع جریان هارمونیک مراتب پنجم و هفتم به ترتیب بر روی باس‌های ۵ و ۳ فیدر توزیع قدرت شکل (۱) و برای K_V های مختلف بررسی شده است.

۵-۱- فیدر توزیع قدرت با یک امپدانس مشخصه و منبع ولتاژ هارمونیک

شکل (۶) تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک پنجم، نسبت ولتاژ هارمونیک پنجم روی هر باس به ولتاژ هارمونیک پنجم باس یک، را برای حالت‌های مختلف « $K_V = 0$ »، « $K_V = \frac{1}{Z_C}$ » و « $K_V = \infty$ » نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود در حالت عدم اتصال فیلتر فعال « $K_V = 0$ »، ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک تقریباً برای تمامی باس‌ها کمتر از واحد است. روی باس‌های میانی فیدر، این ضریب به تدریج کاهش می‌یابد و در روی باس ۶ به حداقل مقدار خود می‌رسد و برای باس‌های بعدی به تدریج افزایش می‌یابد.



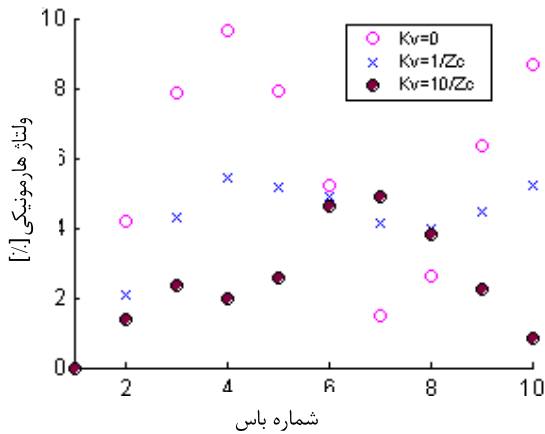
شکل (۶): تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک پنجم
Fig. (6): The variation of fifth harmonic voltage magnifying coefficient

در حالتی که باس انتهایی فیدر توزیع اتصال کوتاه باشد « $K_V = \infty$ »، ضریب بزرگنمایی ولتاژ به تدریج افزایش می‌یابد و در روی باس‌های ۵ و ۶ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. ولتاژ هارمونیک باس ۶، ۵.۲۵ برابر ولتاژ هارمونیک باس یک است. برای باس‌های بعدی این ضریب کاهش می‌یابد و در روی باس انتهایی فیدر صفر می‌شود.

۲-۵ فیدر توزیع قدرت با یک امیدانس مشخصه و منبع جریان هارمونیک

در این حالت منبع جریان هارمونیک مرتبه پنجم بر روی باس ۵ فیدر توزیع قدرت شکل (۱) قرار گرفته است. در این حالت هیچ ولتاژ هارمونیک روی باس ابتدایی فیدر توزیع وجود ندارد. شکل (۸) درصد ولتاژ هارمونیک مرتبه پنجم، نسبت ولتاژ هارمونیک پنجم روی هر باس به ولتاژ خط به خط اصلی را برای حالت‌های مختلف « $K_V = 0$ »، « $K_V = \frac{1}{Z_C}$ » و « $K_V = \frac{10}{Z_C}$ » نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود در حالت « $K_V = 0$ » ولتاژ هارمونیک باس‌های ابتدایی فیدر توزیع کمتر از ۲٪ است. اما ولتاژ هارمونیک باس‌های انتهایی فیدر توزیع قدرت بتدریج افزایش می‌یابد و در روی باس ۱۰ به حداکثر می‌رسد (حدود ۶٪).



شکل (۹): تغییرات ولتاژ هارمونیک مرتبه هفتم در حالت اتصال منبع جریان هارمونیک مرتبه هفتم بر روی باس ۳ فیدر

Fig. (9): The seventh-order harmonic variations in the case of seventh-order harmonic current source connection on the third bus of feeder

یادآوری می‌شود که در تحلیل این حالت، یک منبع جریان هارمونیک مرتبه هفتم بر روی باس ۳ فیدر توزیع شکل (۱) قرار گرفته است. همانطور که از شکل (۹) مشاهده می‌شود در حالت « $K_V = 0$ » ولتاژ هارمونیک مرتبه هفتم دارای تغییرات شدیدی است و در این حالت انتشار هارمونیک در طول فیدر بسیار شدید است. با دقت در شکل (۹) قابل مشاهده است که ولتاژ هارمونیک بر روی باس‌های ۴ و ۱۰ به حداکثر مقدار خود می‌رسد و این ولتاژ بر روی باس ابتدایی فیدر و باس ۷ دارای کمترین مقدار است. همانطور که مشاهده می‌شود در حالت « $K_V = 0$ »، پدیده نوسان هارمونیک (Whack-a-mole) به شدت رخ می‌دهد.

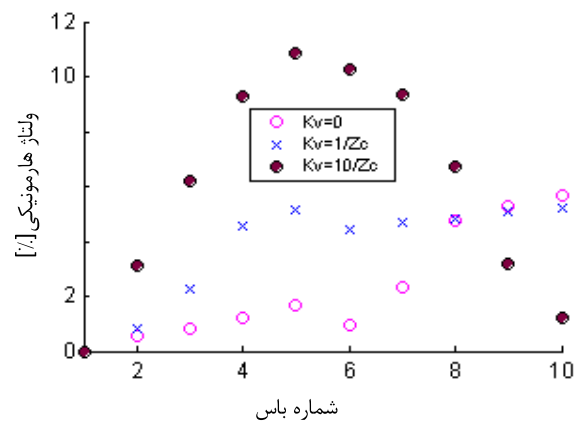
حالت « $K_V = \frac{1}{Z_C}$ » حالتی است که تغییرات ولتاژ هارمونیک برای آن کمترین است. به عبارت دیگر پدیده‌های انتشار هارمونیک و «Whack-a-mole» در این حالت کمتر اتفاق می‌افتد.

در حالت « $K_V = \frac{10}{Z_C}$ »، نیز تغییرات ولتاژ هارمونیک نسبتاً زیاد است. باس‌های ۱ و ۱۰ دارای کمترین ولتاژ هارمونیک و باس ۷ دارای بیشترین ولتاژ هارمونیک است.

۶- کنترل خودکار بهره فیلتر فعال قدرت موازی به منظور میرا کردن پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک

اساس کنترل بهره فیلتر فعال بدین ترتیب است که مقدار اعوجاج هارمونیک ناشی از ولتاژهای آشکار شده در محل نصب فیلتر فعال کمتر از یک مقدار مرجع نگهداشته شود. شکل (۱۰) بلوک دیاگرام کنترل فیلتر فعال را نشان می‌دهد.

در این بلوک دیاگرام پس از جداسازی مؤلفه‌های ac، \tilde{v}_h و \tilde{v}_q (که همان مؤلفه‌های هارمونیک در مختصات abc می‌باشند) مؤلفه مربع



شکل (۸): تغییرات ولتاژ هارمونیک مرتبه پنجم در حالت اتصال منبع جریان هارمونیک مرتبه پنجم بر روی باس ۵ فیدر

Fig. (8): The fifth-order harmonic variations in the case of fifth-order harmonic current source connection on the fifth bus of feeder

در حالت « $K_V = \frac{10}{Z_C}$ »، ولتاژ هارمونیک بر روی باس‌های میانی فیدر توزیع دارای بیشترین مقدار است. مقدار این ولتاژ هارمونیک بر روی باس‌های ابتدا و انتهایی فیدر کاهش چشمگیری دارد.

حالت « $K_V = \frac{1}{Z_C}$ » حالتی است که در آن تغییرات ولتاژ هارمونیک در طول فیدر توزیع قدرت کمترین است. در این حالت ولتاژ هارمونیک باس‌های ابتدایی فیدر به تدریج افزایش می‌یابد اما از باس‌های میانی، ولتاژ هارمونیک تثبیت می‌شود به عبارت دیگر پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک در این حالت کاهش چشمگیری دارد. شکل (۹) تغییرات ولتاژ هارمونیک مرتبه هفتم باس‌های مختلف فیدر توزیع را برای K_V های مختلف نشان می‌دهد.

بلوک کنترل کننده بهره فیلتر، مقدار بهره فیلتر (K_V) را تعیین می کند.

بالاخره اینکه جریان های جبران سازی مرجع i_{cq}^* و i_{cd}^* توسط تبدیل زیر (رابطه ۱۵) به جریان های جبران سازی در مختصات abc تبدیل شده اند.

$$\begin{pmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0.5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \omega_s t & -\sin \omega_s t \\ \sin \omega_s t & \cos \omega_s t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{pmatrix} \quad (15)$$

با دقت در مطالب ارائه شده در مراجع [۱۰-۱۱] و نتایج شبیه سازی این مراجع باس انتهایی یک فیدر شعاعی توزیع بدترین وضعیت نوسان هارمونیک را دارا می باشد. با توجه به ساختار شبکه توزیع که شعاعی می باشد با کنترل اعوجاج هارمونیک در باس انتهایی فیدر شعاعی و نگهداشتن THD در یک حد مشخص (THD^*)، همچنین با توجه به روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) که روند تولید جریان جبران سازی مناسب را برای حذف نوسانات و ریپل ولتاژ هارمونیک برای فیدر شعاعی توزیع نشان می دهند، نوسانات هارمونیک در کل شبکه توزیع میرا می شود.

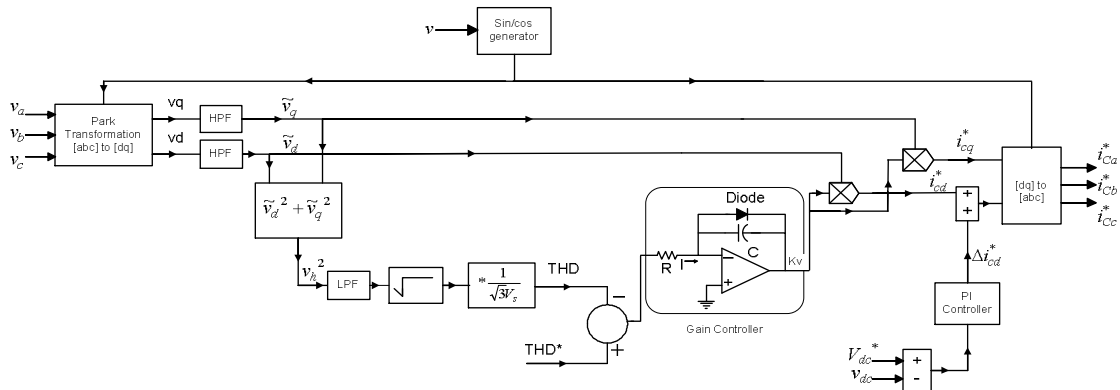
ولتاژ هارمونیک v_h^2 را استخراج می کنیم. وقتی که فقط ولتاژهای هارمونیک پنجم و هفتم از رابطه $v_h^2 = \tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2$ استخراج می شوند، v_h^2 را می توان به صورت رابطه (۱۳) نوشت. سیگنال v_h^2 مجموع مؤلفه های dc و ac در فرکانس هارمونیک ۱۲ام می باشد. در رابطه (۴)، $\omega_6 = 6\omega_s$ و $\omega_{12} = 12\omega_s$ می باشد که فرکانس اصلی شبکه است که توسط حلقه قفل شونده به فاز PLL^۳ دنبال می شود.

$$\begin{aligned} v_h^2 &= \tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2 \\ &= \frac{3}{2} [\sqrt{2}V_5 \cos(\omega_6 t + \phi_5) + \sqrt{2}V_7 \cos(\omega_6 t + \phi_7)]^2 \\ &\quad + \frac{3}{2} [-\sqrt{2}V_5 \sin(\omega_6 t + \phi_5) + \sqrt{2}V_7 \sin(\omega_6 t + \phi_7)]^2 \\ &= 3 [V_5^2 + V_7^2 + 2V_5V_7 \cos(\omega_{12} t + \phi_5 + \phi_7)] \end{aligned} \quad (13)$$

مؤلفه های dc از v_h^2 توسط فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع ۵ هرتز استخراج شده اند، بنابراین اعوجاج هارمونیک ولتاژ را می توان به صورت (۱۴) نوشت:

$$\begin{cases} THD = \frac{1}{V_s} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \frac{1}{\sqrt{3}V_s} \sqrt{(\tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2)_{dc}} \\ V_h = \sqrt{(\tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2)_{dc}} \\ \Rightarrow THD = \frac{V_h}{\sqrt{3}V_s} \end{cases} \quad (14)$$

زیر نویس dc معرف مؤلفه dc ولتاژ می باشد. V_h دامنه مؤلفه dc ولتاژ هارمونیک و V_s دامنه ولتاژ منبع تغذیه است. THD از رابطه فوق با مقدار مرجعش (THD^*) مقایسه شده و تفاوت این دو بعد از عبور از



شکل (۱۰): بلوک دیاگرام کنترل فیلتر فعال
Fig. (10): Active filter control block diagram

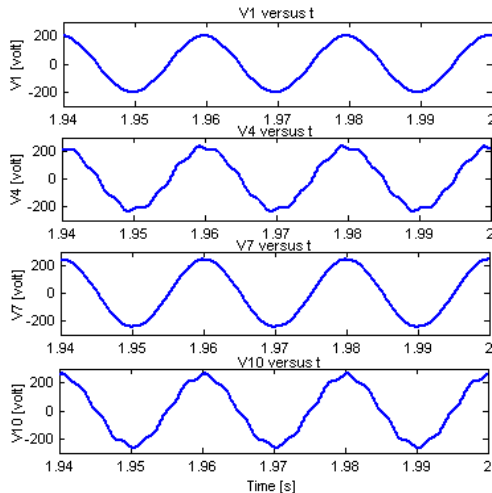
مقدار اعوجاج هارمونیک کل از مقدار مرجعش بزرگتر باشد، آنگاه با توجه به جهت جریان، در این حالت دیود قطع بوده و خازن شروع به شارژ شدن می کند و بهره K_V افزایش می یابد. این افزایش بهره تا زمانی ادامه می یابد که THD به مقدار مرجعش بسیار نزدیک شود. عملکرد مدار فوق را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

اگر:

$$(33)$$

۶-۱ اصول عملکرد بلوک تنظیم کننده خودکار بهره فیلتر فعال قدرت

عملکرد کنترل کننده بهره به این صورت است که زمانی که $THD < THD^*$ باشد با توجه به فیدبک منفی و همچنین وجود زمین مجازی بر روی پایه معکوس کننده، دیود هدایت کرده و بهره $K_V = 0$ خواهد شد. همچنین مادامی که $THD > THD^*$ باشد،



شکل (۱۱): ولتاژ باس‌های فیدر توزیع در حالت عدم اتصال فیلتر فعال
 Fig. (11): Distribution feeder buses voltage in the absence of active filter

با توجه به شکل (۱۱) نوسانات ولتاژ هارمونیک در طول فیدر توزیع قدرت کاملاً مشهود است. ولتاژ هارمونیک باس ۴ فیدر افزایش یافته، اما برای باس‌های بعدی به تدریج کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل (۱۱) دیده می‌شود ولتاژ هارمونیک باس ۷ فیدر پایین است. ولتاژ هارمونیک برای باس‌های انتهایی فیدر توزیع قدرت نیز افزایش یافته و در روی باس انتهایی فیدر (باس ۱۰) به حداکثر می‌رسد. به منظور جبران‌سازی پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک، فیلتر فعال قدرت روی باس‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ (باس انتهایی) فیدر توزیع نصب شده است. شکل موج ولتاژ باس‌های فیدر توزیع با نصب فیلتر فعال بر روی باس‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ فیدر توزیع به ترتیب در شکل‌های (۱۲)، (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نمایش داده شده است.

با دقت در شکل‌های نشان داده شده و همچنین نتایج عددی ارائه شده در جدول (۳) (جدول ۳ در پیوست مقاله آمده است) مشاهده می‌شود که در حالت اتصال فیلتر فعال موازی قدرت به باس انتهایی فیدر (باس ۱۰) تغییرات و نوسانات ولتاژ هارمونیک باس‌های مختلف فیدر نزدیک یکدیگر است. به عبارت دیگر پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک در سراسر فیدر کاملاً کنترل و جبران شده است.

در حالت اتصال فیلتر فعال موازی قدرت بر روی باس‌های ۴ و ۷ فیدر، ولتاژهای هارمونیک پنجم و هفتم در روی باس‌های میانی فیدر (باس‌های ۶ و ۷ فیدر) کاهش چشمگیری داشته، در حالی که ولتاژ هارمونیک در روی باس‌های ابتدایی و انتهایی فیدر بیشتر است. بنابراین در این حالت پدیده نوسان هارمونیک در طول فیدر توزیع وجود داشته و جبران نشده است.

با اتصال فیلتر فعال موازی قدرت به باس یک نیز تغییرات ولتاژ هارمونیک در روی باس‌های ابتدایی و انتهایی فیدر کم است در حالی که این تغییرات و نوسانات در روی باس‌های میانی فیدر توزیع نسبت به باس ابتدایی فیدر (باس یک) افزایش می‌یابد.

$$THD < THD^* \Rightarrow I = \frac{(THD^* - THD)}{R} > 0$$

$$\xrightarrow{\text{Diode=on}} K_V = 0$$

در غیر این صورت اگر

$$THD > THD^* \Rightarrow I = \frac{(THD^* - THD)}{R} < 0$$

$$\xrightarrow{\text{Diode=off}} K_V = \frac{-(THD^* - THD)}{RCs}$$

به عبارت دیگر مدار فوق نقش یک انتگرالگیر غیرخطی را بازی می‌کند که سعی بر این دارد اختلاف THD^* و THD را به حداقل برساند.

۷- نتایج شبیه‌سازی

به منظور به کارگیری فیلتر فعال قدرت که بر مبنای آشکارسازی ولتاژ کار می‌کند و با هدف کاهش مؤثر پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک در فیدر شعاعی ساده توزیع ده باسه سه حالت بررسی شده است. الف) فیدر توزیع قدرت با یک امپدانس مشخصه و با اتصال منبع ولتاژ هارمونیک به باس ابتدایی فیدر (باس یک).

ب) فیدر توزیع قدرت با دو امپدانس مشخصه و با اتصال منبع ولتاژ هارمونیک به باس یک فیدر

ج) فیدر توزیع قدرت با یک امپدانس مشخصه و با اتصال منبع جریان هارمونیک (بار غیرخطی) به باس چهار فیدر

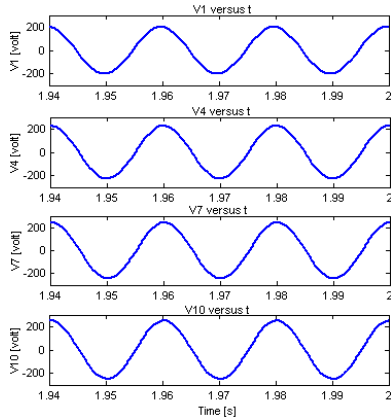
۷-۱ فیدر توزیع قدرت با یک امپدانس مشخصه و منبع ولتاژ هارمونیک

با در نظر گرفتن فیدر شعاعی توزیع ۱۰ باسه با مشخصات پارامتری ارائه شده در جدول (۲) و با اتصال منبع ولتاژ هارمونیک به باس یک فیدر، مکان مناسب نصب فیلتر فعال قدرت به منظور کاهش مؤثر پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک پیدا می‌شود.

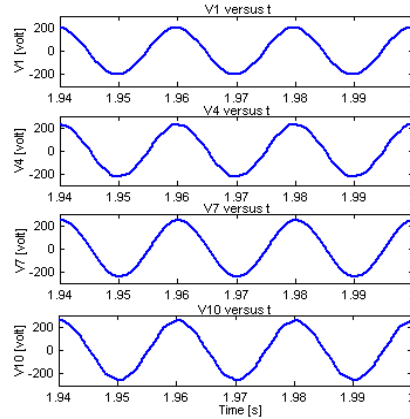
Table. (2): The quantities of ten buses power distribution feeder parameters with the connection of harmonic voltage source
 جدول (۲): مقادیر پارامترهای فیدر توزیع قدرت ۱۰ باسه با اتصال منبع ولتاژ هارمونیک

دامنه ولتاژ اصلی شبکه	200 V
دامنه ولتاژ هارمونیک پنجم روی باس ۱	3 V
دامنه ولتاژ هارمونیک هفتم روی باس ۱	3 V
فرکانس خط	50 Hz
تعداد باس‌ها	10
L: اندوکتانس خط	1.98 mH
R: مقاومت خط	0.36 Ω
C: ظرفیت خازن	25 μF

شکل موج ولتاژ باس‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ فیدر توزیع قدرت قبل از اتصال فیلتر فعال در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱۵): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۱۰
Fig. (15): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 10



شکل (۱۲): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس یک
Fig. (12): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 1

با دقت در نتایج جدول (۳) مشاهده می‌شود که در حالت اتصال منبع ولتاژ هارمونیک به باس ابتدایی فیدر (باس یک)، مناسبترین مکان نصب فیلتر فعال برای کاهش پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک باس انتهایی فیدر توزیع شعاعی (باس ۱۰) است.

۷-۲- فیدر توزیع قدرت با دو امپدانس مشخصه و منبع ولتاژ هارمونیک

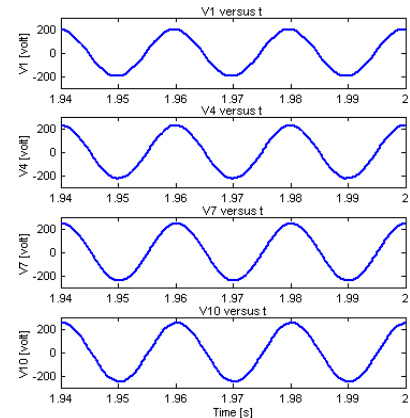
در این حالت با توجه به تغییرات مقادیر R ، L و C فیدر توزیع قدرت، امپدانس مشخصه فیدر توزیع ثابت نیست. مقادیر پارامترهای فیدر توزیع قدرت در این حالت در جدول (۴) نمایش داده شده است.

Table. (4): The quantities of distribution feeder parameters with two characteristic impedances

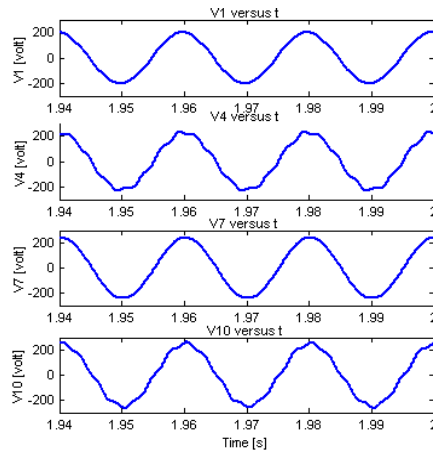
جدول (۴): مقادیر پارامترهای فیدر توزیع با دو امپدانس مشخصه

دامنه ولتاژ اصلی شبکه	200 V
دامنه ولتاژ هارمونیک پنجم روی باس ۱	5 V
دامنه ولتاژ هارمونیک هفتم روی باس ۱	5 V
فرکانس خط	50 Hz
تعداد باس‌ها	10
اندوکتانس خط L_1 to L_8	1.98 mH
$L_9 = L_{10}$	3.96 mH
مقاومت خط R_1 to R_8	0.36 Ω
$R_9 = R_{10}$	0.72 Ω
ظرفیت خازن C_1 to C_8	25 μF
$C_9 = C_{10}$	30 μF

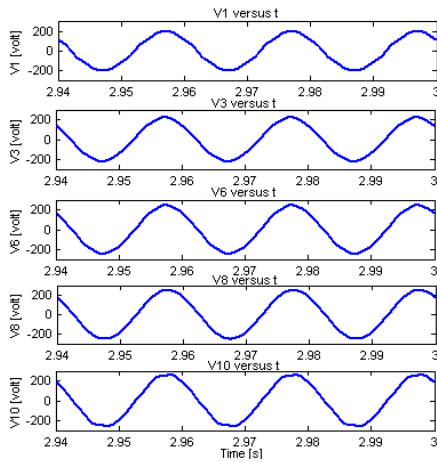
شکل موج ولتاژ باس‌های ۱، ۳، ۶، ۸ و ۱۰ فیدر توزیع پیش از نصب فیلتر فعال قدرت در شکل (۱۶) آمده است.



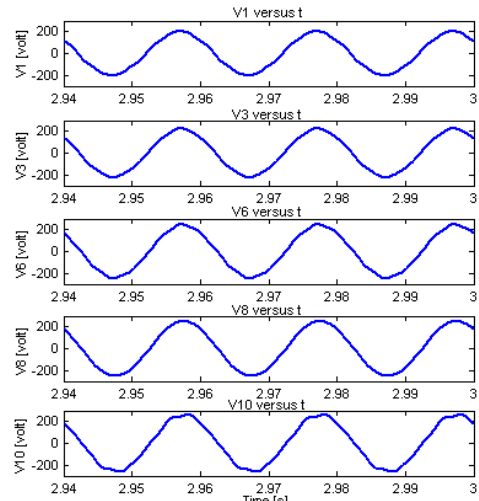
شکل (۱۳): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۴
Fig. (13): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 4



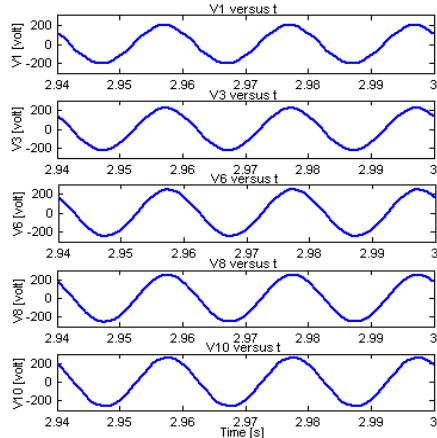
شکل (۱۴): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۷
Fig. (14): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 7



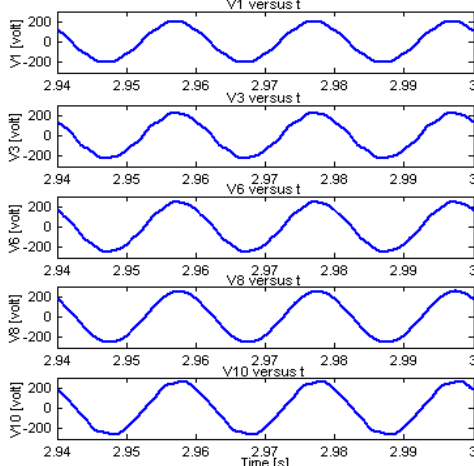
شکل (۱۷): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۱
 Fig. (17): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 1



شکل (۱۶): شکل موج ولتاژ باس‌ها بدون اتصال فیلتر فعال موازی
 Fig. (16): Distribution feeder buses voltage in the absence of an active filter



شکل (۱۸): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۴
 Fig. (18): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 4



شکل (۱۹): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۷
 Fig. (19): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 7

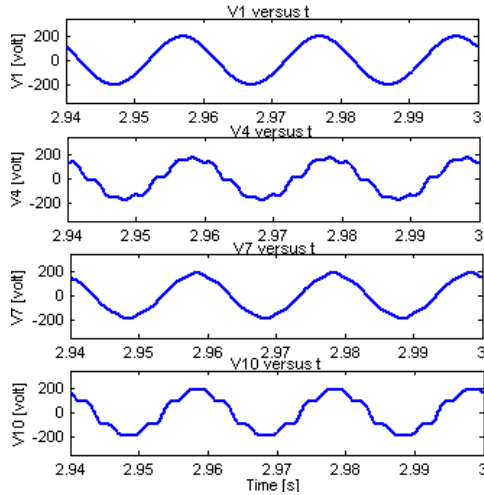
با توجه به شکل فوق، نوسانات ولتاژ هارمونیک در روی باس‌های مختلف فیدر توزیع مشاهده می‌شود. همان طور که از شکل (۱۶) دیده می‌شود ولتاژ هارمونیک در روی باس ۳ کمتر از باس ۶ است. همچنین ولتاژ هارمونیک در روی باس ۸ نیز نسبت به باس ۶ کاهش محسوسی دارد. ولتاژ هارمونیک باس انتهایی فیدر توزیع نسبت به سایر باس‌ها بیشتر است.

برای جبران‌سازی انتشار و نوسان هارمونیک فیلتر فعال قدرت موازی بر روی فیدر توزیع نصب می‌شود. با نصب فیلتر فعال بر روی باس‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ فیدر توزیع اثرات جبران‌سازی بررسی شده و مکان مناسب نصب فیلتر فعال پیدا می‌شود.

شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ فیدر شعاعی توزیع ۱۰ باسه در شکل‌های (۱۷)، (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) نمایش داده شده است.

با دقت در شکل‌های فوق و همچنین نتایج عددی ارائه شده در جدول (۵) (این جدول در پیوست آمده است) مشاهده می‌شود که با نصب فیلتر فعال قدرت بر روی باس‌های ۱، ۴ و ۷ فیدر توزیع، تغییرات و نوسانات ولتاژ هارمونیک وجود داشته و این تغییرات ولتاژ نسبت به ولتاژهای هارمونیک باس ابتدایی فیدر (باس یک) جبران نشده است.

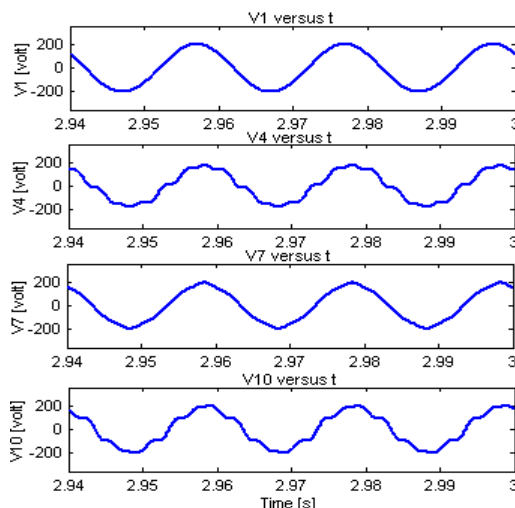
شکل موج ولتاژ باس‌ها پیش از اتصال فیلتر فعال موازی قدرت در شکل (۲۱) نشان داده شده است.



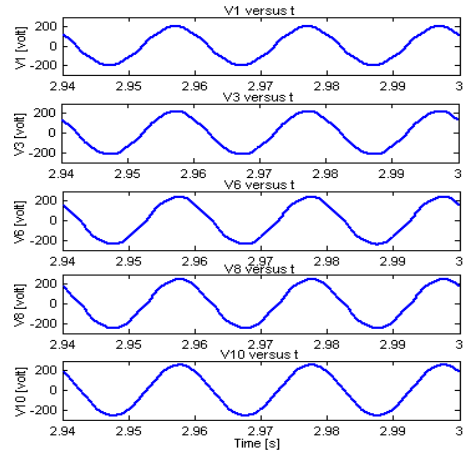
شکل (۲۱): شکل موج ولتاژ باس‌ها پیش از نصب فیلتر فعال
Fig. (21): Buses voltage waveform before installing active filter

همان طور که از شکل (۲۱) مشاهده می‌شود، در طول فیدر توزیع نوسانات ولتاژ هارمونیک وجود دارد. ولتاژ هارمونیک باس ۴ فیدر افزایش یافته و در روی باس ۷ کاهش می‌یابد. ولتاژ هارمونیک در روی باس انتهایی فیدر نیز نسبت به باس ابتدایی فیدر افزایش چشمگیری دارد.

به منظور جبران نوسانات ولتاژ هارمونیک باس‌های فیدر توزیع، فیلتر فعال قدرت بر روی باس‌های مختلف فیدر توزیع نصب می‌شود. با نصب فیلتر فعال موازی قدرت بر روی باس‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ فیدر توزیع، شکل موج ولتاژ باس‌ها در شکل‌های (۲۲)، (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) نمایش داده شده است.



شکل (۲۲): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۱
Fig. (22): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 1



شکل (۲۰): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۱۰
Fig. (20): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 10

با نصب فیلتر فعال قدرت بر روی باس انتهایی فیدر (باس ۱۰)، تغییرات و نوسانات ولتاژ هارمونیک در روی باس‌های فیدر کاهش یافته، همچنین جبران‌سازی هارمونیک صورت گرفته است.

با دقت در نتایج شبیه‌سازی در دو حالت (۶-۱) و (۶-۲) مشاهده می‌شود که در حالتی که منبع ولتاژ هارمونیک روی باس ابتدایی فیدر قرار دارد در هر دو حالت فیدر توزیع با یک یا دو امپدانس مشخصه مناسب‌ترین مکان نصب فیلتر فعال موازی قدرت به منظور جبران‌سازی پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک، باس انتهایی فیدر شعاعی توزیع است.

۳-۷ فیدر توزیع قدرت با یک امپدانس مشخصه و منبع جریان هارمونیک

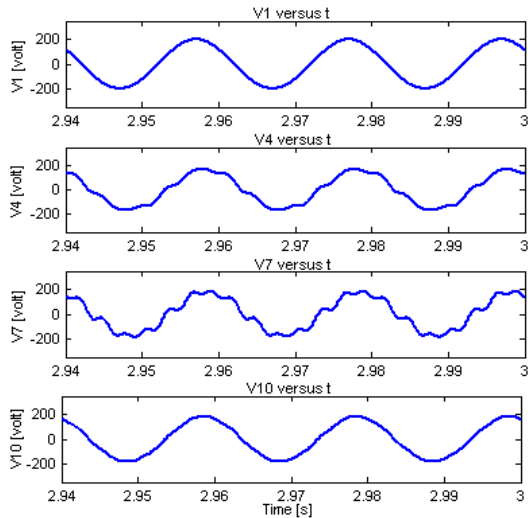
بار غیرخطی استفاده شده به منظور شبیه‌سازی، از اتصال سری منابع ولتاژ هارمونیک شامل هارمونیک‌های پنجم و هفتم با مقاومت R تشکیل شده است. با اتصال این منبع جریان هارمونیک به باس ۴ فیدر و با در نظر گرفتن فیدر توزیع با مشخصات ارائه شده در جدول (۶)، مکان مناسب نصب فیلتر فعال قدرت برای جبران‌سازی پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک پیدا می‌شود.

Table. (6): The quantities of distribution feeder parameters with one characteristic impedance

جدول (۶): مقادیر پارامترهای فیدر توزیع با یک امپدانس مشخصه و با اتصال

منبع جریان هارمونیک

دائمه ولتاژ اصلی شبکه	200 V
مشخصات بار غیرخطی متصل به باس ۴	$\begin{cases} V_{h5} = 20 \text{ V} \\ V_{h7} = 20 \text{ V} \end{cases}, R = 5 \Omega$
فرکانس خط	50 Hz
تعداد باس‌ها	10
L: اندوکتانس خط	1.98 mH
R: مقاومت خط	0.36 Ω
C: ظرفیت خازن	25 μF



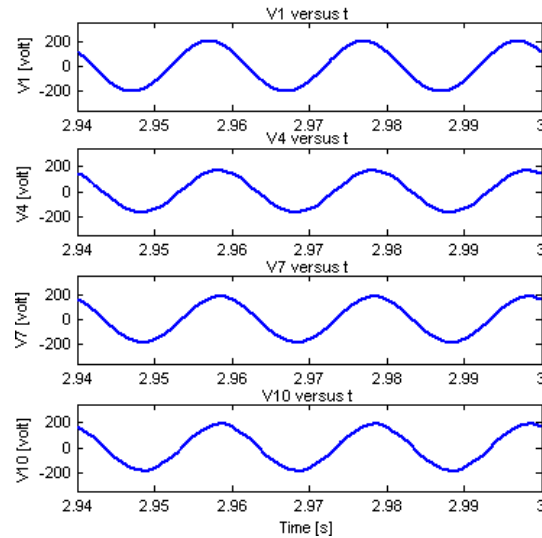
شکل (۲۵): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۱۰
Fig. (25): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 10

با وجود منبع جریان هارمونیکی (بار غیرخطی) بر روی فیدر توزیع، مناسبترین مکان نصب فیلتر فعال قدرت بمنظور حذف و یا کاهش پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیکی همان باسی است که بار غیرخطی به آن متصل است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله فیلتر فعال قدرت موازی که بر اساس آشکارسازی ولتاژ کار می‌کند و با هدف کاهش مؤثر و جبران‌سازی پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیکی به کار رفته، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. یک فیدر شعاعی ساده توزیع ۱۰ باسه به عنوان شبکه مورد مطالعه انتخاب شده است. در حالت اتصال منبع ولتاژ هارمونیکی به باس ابتدایی فیدر با یک یا دو امپدانس مشخصه هم با محاسبه و هم با شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که با نصب فیلتر فعال موازی با بهره ثابت « K_V » (که عکس امپدانس مشخصه Z_C است) بر روی باس انتهایی فیدر شعاعی، دو پدیده انتشار و نوسان هارمونیکی به طور مؤثری کاهش می‌یابد.

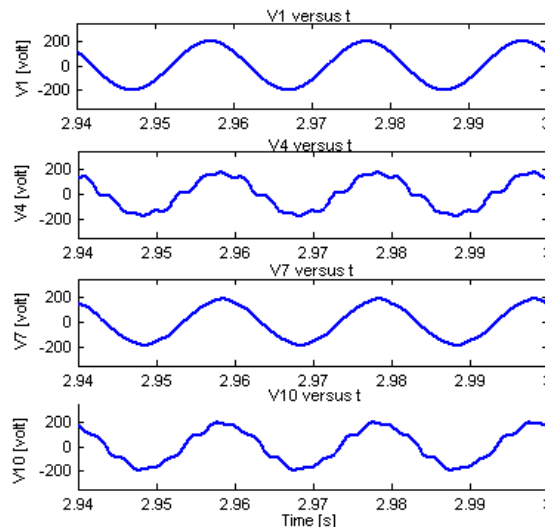
به علت ماهیت متغیر بودن امپدانس مشخصه فیدر توزیع قدرت، تنظیم خودکار بهره کنترل فیلتر فعال صرفنظر از شرایط سیستم مورد نیاز خواهد بود. با تنظیم خودکار بهره فیلتر قدرت می‌توان جریان مخرب هارمونیکی را با روش آشکارسازی ولتاژ، جداسازی کرده و با کنترل این بهره با هدف کاهش و استانداردسازی اعوجاج هارمونیکی کل، جریان جبران‌سازی تولید می‌شود و با تزریق این جریان با فاز مخالف به شبکه شعاعی می‌توان از بروز انتشار هارمونیکی و Whack-a-mole در طول فیدر جلوگیری نمود. چون این روش استخراج جریان هارمونیکی بر اساس کنترل ولتاژ و اعوجاج هارمونیکی کل می‌باشد، به نام آشکارسازی ولتاژ شناخته می‌شود.



شکل (۲۳): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۴
Fig. (23): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 4

نتایج عددی مربوط به ولتاژ باس‌ها در جدول (۷) نمایش داده شده است (این جدول در پیوست مقاله آمده است).

با دقت در شکل‌ها و نتایج عددی جدول (۷) مشاهده می‌شود که با اتصال فیلتر فعال موازی قدرت بر روی باس‌های ۱، ۷ و ۱۰ جبران‌سازی ولتاژ هارمونیکی به طور مناسبی صورت نمی‌گیرد و نوسانات ولتاژ هارمونیکی در طول فیدر توزیع وجود خواهد داشت. با نصب فیلتر فعال بر روی باس ۴ (باسی که بار غیرخطی روی آن قرار دارد) جبران‌سازی هارمونیک به نحو مطلوبی صورت نمی‌گیرد و نوسانات ولتاژ هارمونیکی در سرتاسر فیدر به طور مؤثر کاهش می‌یابد.



شکل (۲۴): شکل موج ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال بر روی باس ۷
Fig. (24): Buses voltage waveform after installing active filter on bus 7

قدرت با هدف دستیابی به کمترین اعوجاج هارمونیکی کل و کاهش Whack-a-mole است که هدف این مقاله است. شبیه‌سازی‌های فوق برای منابع ولتاژ و جریان هارمونیکی مراتب پنجم و هفتم که دارای بیشترین دامنه هارمونیکی در سیستم‌های توزیع می‌باشند انجام شده و از هارمونیک‌های مراتب بالاتر در انجام شبیه‌سازی صرفنظر شده است.

پی‌نوشت:

- 1- Distributed-parameter Model
- 2- Voltage- magnifying factor
- 3- Phase Locked Loop

دو مطالعه موردی اتصال منبع ولتاژ هارمونیکی به شبکه شعاعی و نیز اتصال منبع جریان هارمونیکی بررسی شده است. در حالت استفاده از فیلتر با بهره کنترل‌شده برای یک فیدر شعاعی توزیع با یک یا دو امپدانس مشخصه و با اتصال منبع ولتاژ هارمونیکی بر روی باس ابتدایی فیدر (باس یک)، مناسبترین مکان نصب فیلتر فعال موازی قدرت به منظور کاهش پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیکی، باس انتهایی فیدر شعاعی است. با وجود منبع جریان هارمونیکی (بار غیرخطی) بر روی فیدر توزیع، مناسبترین مکان نصب فیلتر فعال موازی همان باسی است که بار غیرخطی قرار دارد درحصول این نتیجه، شکل و نوع بار غیرخطی تاثیری ندارد و معیار تعیین مکان مناسب نصب فیلتر فعال

References

- [1] K. Wada, H. Fujita, H. Akagi, "Considerations of a shunt active filter based on voltage detection installation on a long distribution feeder", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.38, No.4, July/Aug. 2002.
- [2] P. Jintakosonwit, H. Akagi, H. Fujita, S. Ogasawara, "Implementation and performance of automatic gain adjustment in a shunt active filter for harmonic damping throughout a power distribution system", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.17, No.3, May 2002.
- [3] P. Jintakosonwi, H. Fujita, H. Akagi, S. Ogasawara, "Implementation and performance of cooperative control of shunt active filters for harmonic damping throughout a power distribution system", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.39, No.2, March/April 2003.
- [4] E.J. Currence, J.E. Plizga, H.N. Nelson, "Harmonic resonance at a medium-sized industrial plant", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol.31, pp.682-690, July/Aug. 1995.
- [5] D. Andrews, M.T. Bishop, J.F. Witte, "Harmonic measurements, analysis, and power factor correction in a modern steel manufacturing facility", *IEEE Transactions Industrial Application*, Vol.32, pp.617- 624, May/June 1996.
- [6] K. Oku, O. Nakamura, K. Uemura, "Measurement and analysis of harmonics in power distribution systems, and development of a harmonic suppression method", (in Japanese), *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.114-B, No.3, pp.234-241, 1994.
- [7] K. Oku, O. Nakamura, J. Inoue, M. Kohata, "Suppression effects of active filter on harmonics in a power distribution system including capacitors", *Denki Genba Gijyutu*, Vol.115-B, No.9, pp.1023-1028, 1995.
- [8] H. Sumiya, M. Kaneko, "Development of a measuring instrument harmonic frequency", (in Japanese), *Denki Genba Gijyutu*, Vol.34, No.402, pp.23-28, 1995.
- [9] H. Akagi, H. Fujita, K. Wada, "A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol.35, pp.638-645, May/June 1999.
- [10] P. Jintakosonwit, H. Fujita, H. Akagi, "Control and performance of a fully-digital-controlled shunt active filter for installation on a power distribution system", *IEEE Transactions on power electronics*, Vol.17, No.1, pp.132-140, January 2002.
- [11] P. Jintakosonwit, H. Fujita, H. Akagi, "Performance of automatic gain adjustment in shunt active filters for harmonic damping throught power distribution systems", pp.1389- 1395, *IEEE* 2001.

Table. (3): Numerical results of buses voltage after installing active filter on different buses of distribution feeder with a characteristic impedance

جدول (۳): نتایج عددی ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال روی باس‌های مختلف فیدر توزیع با یک امپدانس مشخصه

ولتاژ باس‌ها	فیدر توزیع قدرت با یک امپدانس مشخصه و منبع ولتاژ هارمونیک روی باس یک														
	بدون اتصال فیلتر فعال			فیلتر فعال روی باس ۱			فیلتر فعال روی باس ۴			فیلتر فعال روی باس ۷			فیلتر فعال روی باس ۱۰		
	هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h		
	1	5	7	1	5	7	1	5	7	1	5	7	1	5	7
$V_1[V]$	200	3	3	200	3	3	200	3	3	200	3	3	200	3	3
$V_2[V]$	209.8	3.03	7.64	209.7	2.77	3.56	209.6	2.84	3	209.6	3.1	7.45	209.6	3.1	2.75
$V_3[V]$	218.8	2.7	12.8	218.6	2.44	5.9	218.4	2.4	3.2	218.4	2.76	12.3	218.4	3	2.87
$V_4[V]$	226.9	2.03	15.14	226.7	1.84	6.98	226.3	1.75	3.37	226.2	2.14	14.3	226.2	2.68	3.16
$V_5[V]$	233.9	1.14	13.9	233.7	1	6.4	233.3	0.98	3.1	233	1.3	13.13	233	2.25	3.3
$V_6[V]$	239.9	0.28	9.35	239.7	0.26	4.33	239.3	0.25	2.1	238.8	0.43	8.76	238.8	1.87	3.14
$V_7[V]$	244.8	1	2.71	244.6	0.92	1.27	244.1	0.88	0.6	243.4	0.96	2.5	243.4	1.76	2.73
$V_8[V]$	248.4	1.92	4.59	248.6	1.74	2.27	247.8	1.66	1.1	247	1.8	4.5	246.9	2	2.73
$V_9[V]$	250.9	2.6	11.1	250.7	2.36	5.11	250	2.24	2.45	249.5	2.43	10.11	249.2	2.36	2.37
$V_{10}[V]$	252	2.96	14.6	251.9	2.7	6.7	251.5	2.56	3.42	250.8	2.75	13.22	250.3	2.68	2.72

Table. (5): Numerical results of buses voltage after installing active filter on different buses of distribution feeder with two characteristic impedances

جدول (۵): نتایج عددی ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال روی باس‌های مختلف فیدر توزیع با دو امپدانس مشخصه

ولتاژ باس‌ها	فیدر توزیع قدرت با دو امپدانس مشخصه و منبع ولتاژ هارمونیک روی باس یک														
	بدون اتصال فیلتر فعال			فیلتر فعال روی باس ۱			فیلتر فعال روی باس ۴			فیلتر فعال روی باس ۷			فیلتر فعال روی باس ۱۰		
	هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h		
	1	5	7	1	5	7	1	5	7	1	5	7	1	5	7
$V_1[V]$	200	5	5	200	5	5	200	5	5	200	5	5	200	5	5
$V_2[V]$	210.4	5.87	2.52	210.3	4.22	1.7	210.1	4.42	3.85	210	5.85	5.96	210	3.95	4.9
$V_3[V]$	220	6	1.75	219.7	4.34	1.2	219.5	3.6	2.22	219.4	6	7.7	219.4	4	3.88
$V_4[V]$	228.6	5.56	4.2	228.4	3.98	2.86	228	2.86	2	227.7	5.5	8.35	227.8	5	2.35
$V_5[V]$	236.2	4.38	6	236	3.15	4.12	235.6	2.27	2.88	235.1	4.3	7.9	235.3	6.24	1.97
$V_6[V]$	242.8	2.72	6.53	242.6	1.95	4.44	242.1	1.42	3.1	241.5	2.65	6	241.6	7	3.35
$V_7[V]$	248.3	0.94	5.46	248	0.68	3.7	247.6	0.5	2.6	146.7	0.83	4.1	246.8	7.18	4.55
$V_8[V]$	252.5	1.64	3.1	252.3	1.18	2.12	251.8	0.84	1.48	250.9	1.54	2.23	250.9	6.62	4.82
$V_9[V]$	258.6	5.33	3.2	258.4	3.82	2.17	257.9	2.75	1.52	257	5	2.4	256.6	4.51	3.43
$V_{10}[V]$	261.7	7.55	7.55	261.5	5.4	5.12	260.9	3.9	3.6	260	7.1	5.66	259.4	3.37	1.7

Table. (7): Numerical results of buses voltage after installing active filter on different buses of distribution feeder with a characteristic impedance and harmonic current source connection
 جدول (۷): نتایج عددی ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال روی باس‌های مختلف فیدر توزیع با یک امپدانس مشخصه و با اتصال منبع جریان هارمونیک

فیدر توزیع قدرت با یک امپدانس مشخصه و منبع جریان هارمونیک روی باس چهار															
ولتاژ باس‌ها	بدون اتصال فیلتر فعال			فیلتر فعال روی باس ۱			فیلتر فعال روی باس ۴			فیلتر فعال روی باس ۷			فیلتر فعال روی باس ۱۰		
	هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h			هارمونیک مرتبه h		
	1	5	7	1	5	7	1	5	7	1	5	7	1	5	7
V_1 [V]	200	0	0	200	0	0	200	0	0	200	0	0	200	0	0
V_2 [V]	187.7	5.12	8.6	187.5	3.4	4.3	186.8	1.48	1.65	187.5	5.4	8.53	186.9	6.28	3.32
V_3 [V]	177.4	9.6	15.15	177.2	7.8	10.74	175.5	2.77	2.9	176.9	10.15	15	175.9	11.8	5.83
V_4 [V]	169.5	12.9	18	169.4	11.6	15.85	166.6	3.68	3.44	168.8	13.65	17.9	167.5	15.9	6.95
V_5 [V]	174.8	7.25	16.6	174.6	6.5	14.6	171.8	2.1	3.17	173.9	9.4	16	172.2	18.2	15.4
V_6 [V]	179.3	1.8	11.15	179.1	1.62	9.8	176.2	0.52	2.13	178.2	4.56	10.4	175.9	18.2	22.55
V_7 [V]	182.8	6.46	3.23	182.7	5.8	2.84	179.8	1.86	0.62	181.6	4	2.6	179	16.3	24.7
V_8 [V]	185.6	12.23	5.9	185.4	10.95	5.18	182.5	3.52	1.12	184.4	7.54	4.76	181.5	12.4	21.15
V_9 [V]	187.5	16.55	13.22	187.3	14.84	11.62	184.3	4.76	2.52	186.2	10.2	10.7	182.5	7.42	12.76
V_{10} [V]	188.4	18.87	17.4	188.2	16.9	15.3	185.2	5.42	3.32	187	11.64	14	182.8	3	2.9

