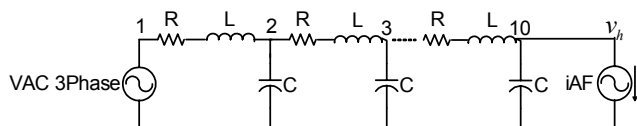


مقایسه جبران سازی پدیده های انتشار هارمونیک و Whack-a-mole در فیدر شعاعی توزیع با بکارگیری فیلتر فعال موازی قدرت با بهره های ثابت و کنترل شده

حمیدرضا عزتی و علی یزدیان ورجانی



شکل ۱: توپولوژی فیدر توزیع قدرت سه فاز.

میانی فیدر توزیع، با نصب فیلتر فعال موازی با بهره $K_V = 1/Z_C$ بر روی باس انتهایی فیدر شعاعی توزیع دو پدیده انتشار و نوسان هارمونیک بطور مؤثری کاهش می یابند [۱] و [۲]. اما دانستن امپدانس مشخصه در یک سیستم توزیع قدرت واقعی غیر ممکن است. حتی اگر این امپدانس مشخصه از قبل معلوم باشد، دارای مقدار ثابتی نخواهد بود، چون ساختار و پیکره سیستم توزیع بنا به عملکرد و شرایط عیب سیستم تغییر خواهد کرد. به عبارت دیگر شرایط و محل انتشار هارمونیک به صورت خودکار، روز به روز یا فصل به فصل و سال به سال تغییر می کند. بنابراین تنظیم خودکار بهره کنترل فیلتر صرف نظر از شرایط سیستم مورد نیاز خواهد بود. در این مقاله کنترل کننده بهره فیلتر فعال موازی قدرت بگونه ای طراحی شده است که بتواند اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس انتهایی فیدر شعاعی که فیلتر فعال روی آن نصب شده است را پایین تر از یک حد مشخص نگه دارد و بدین ترتیب انتشار و نوسان هارمونیک را در سرتاسر فیدر شعاعی توزیع بطور مؤثری کاهش دهد. در این مقاله برای یک فیدر توزیع قدرت ده باسه با در نظر گرفتن فیلتر فعال با بهره ثابت $K_V = 1/Z_C$ و تولید جریان های جبران سازی مناسب پدیده های انتشار و نوسان هارمونیک کنترل شده و کاهش می یابد. در ادامه با طراحی کنترل کننده خودکار بهره فیلتر فعال و با کنترل اعوجاج هارمونیک باس انتهایی فیدر توزیع بدون توجه به امپدانس مشخصه فیدر توزیع، پدیده های انتشار و نوسان هارمونیک کاهش می یابد.

۲- ساختار فیدر توزیع قدرت

شکل ۱ یک فیدر توزیع قدرت سه فاز را نمایش می دهد. در ساختار فوق خط هوایی بین هر باس و باس مجاورش می تواند به صورت یک مدار R-L فشرده نمایش داده شود. از اثر خازن های سرگردان خط برای ولتاژ و جریان هارمونیک های پنجم و هفتم چشم پوشی می گردد. خازن C نیز بصورت موازی با خط توزیع قرار می گیرد. فیدر توزیع بکار رفته شعاعی ساده بوده و دارای شاخه فرعی روی باس ها نمی باشد. علاوه بر اینها چون مساله انتشار هارمونیک در شرایط بی باری بسیار جدی و حاد می باشد بنابراین شبکه در حالت بی باری بررسی می گردد [۱].

امپدانس مشخصه یک فیدر کلی، Z_C ، بصورت (۱) تعریف می شود که در آن Z امپدانس سری خط و Y ادmittانس موازی خط در هر کیلومتر است.

چکیده: به منظور میرا کردن پدیده انتشار هارمونیک، فیلترهای فعال قدرت روی سیستم های توزیع نصب می شوند. نصب فیلتر فعال قدرت روی باس ها ممکن است باعث ایجاد پدیده نوسان هارمونیک Whack-a-mole شود. در این مقاله با استفاده از نتایج شبیه سازی، برای یک فیدر توزیع قدرت شعاعی ده باسه در حالت های مختلف اتصال بار غیر خطی (منبع ولتاژ یا جریان هارمونیک) با انتخاب بهره ثابت $K_V = 1/Z_C$ دو پدیده فوق بطور مؤثر کاهش می یابند. اما دلیل معلوم نبودن و نیز متغیر بودن امپدانس مشخصه، Z_C ، نیاز به کنترل پویای بهره فیلتر فعال قدرت خواهد بود. در این مقاله کنترل کننده بهره فیلتر فعال موازی بگونه ای طراحی شده است که با تولید جریان جبران سازی مناسب، اعوجاج هارمونیک در روی باس نصب فیلتر فعال قدرت کنترل شده و با نگه داشتن اعوجاج هارمونیک در یک محدوده مجاز از بروز پدیده های انتشار و نوسان هارمونیک جلوگیری گردد. با کنترل بهره فیلتر فعال قدرت، جریان مؤثر مرجع جبران سازی و در نتیجه تلفات و هزینه فیلتر کاهش می یابد که این نیز از مزایای استفاده از فیلتر فعال با بهره کنترل شده است.

کلید واژه: امپدانس مشخصه، انتشار هارمونیک، بهره فیلتر فعال، پدیده نوسان هارمونیک (Whack-a-mole).

۱- مقدمه

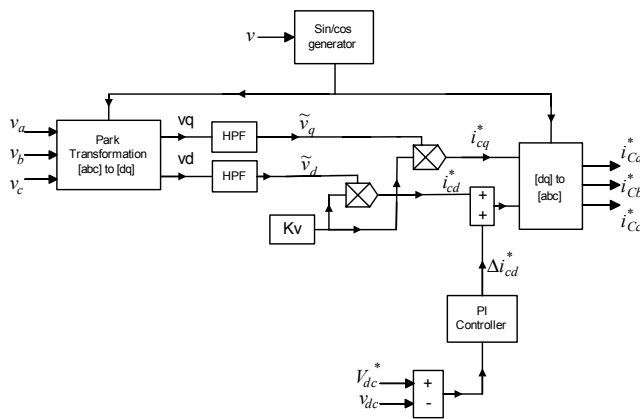
در سال های اخیر، مسائل و مشکلات ناشی از انتشار هارمونیک در صنعت و سیستم های توزیع برق بسیار حائز اهمیت شده است. برای میرا کردن پدیده انتشار هارمونیک، فیلترهای فعال قدرت روی سیستم های توزیع نصب می شوند. نصب فیلتر فعال قدرت روی باس ها ممکن است باعث ایجاد پدیده نوسان هارمونیک شود. برای جلوگیری از انتشار هارمونیک در طول خط توزیع بگونه ای که منجر به ایجاد پدیده نوسان هارمونیک نشود، فیلتر فعال قدرت که بر مبنای آشکارسازی ولتاژ هارمونیک کار می کند روی باس انتهایی فیدر شعاعی ساده توزیع نصب می شود. فیلتر فعال نصب شده روی باس انتهایی فیدر در فرکانس های هارمونیک شبیه یک مقاومت رفتار می کند و این مقاومت این امکان را ایجاد می کند که انتشار هارمونیک در سرتاسر فیدر توزیع میرا شود [۱].

محاسبات و آنالیز تئوری نشان می دهد که در حالت های مختلف اتصال منبع ولتاژ و جریان هارمونیک به ترتیب روی باس ابتدایی و باس های

این مقاله در تاریخ ۱۲ شهریور ماه ۱۳۸۴ دریافت و در تاریخ ۲۸ اسفند ماه ۱۳۸۴ بازنگری شد.

حمیدرضا عزتی، گروه قدرت، بخش برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (email: hamid_r_ezzati@yahoo.com).

علی یزدیان ورجانی، گروه قدرت، بخش برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (email: yazdian@modares.ac.ir).



شکل ۳: مدار تولید جریان مرجع جبران سازی.

است. تابع تبدیل فیلتر بالاگذر به صورت (۵) نشان داده شده است

$$HPF(s) = \frac{0.122s}{0.122s + 1} \quad (5)$$

با استفاده از فیلترهای بالاگذر فوق مؤلفه‌های ac، \tilde{v}_q و \tilde{v}_d از ولتاژهای v_q و v_d قابل جدا شدن می‌باشند. \tilde{v}_q و \tilde{v}_d همان مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ هستند. مؤلفه‌های جریانی i_{cq}^* و i_{cd}^* برابرند با

$$\begin{aligned} i_{cd}^* &= K_V \cdot \tilde{v}_d \\ i_{cq}^* &= K_V \cdot \tilde{v}_q \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن $K_V = 1/Z_C$ 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 [۲].

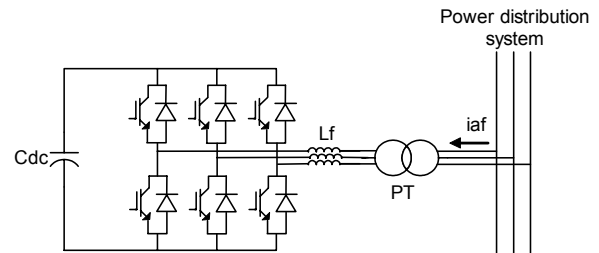
$$\begin{pmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0.5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{cd}^* + \Delta i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{pmatrix} \quad (7)$$

مؤلفه جریانی Δi_{cd}^* ، تلفات کلیدزنی سوئیچ‌های مبدل را مدل می‌کند.

۴- نتایج شبیه‌سازی در دو حالت فیلتر توزیع قدرت با یک امپدانس مشخصه و اتصال منابع ولتاژ و یا جریان هارمونیک

پدیده انتشار هارمونیک در شرایط بی‌باری بسیار جدی و خطرناک است [۱]، بنابراین شبکه توزیع در حالت بی‌باری شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شده است. برای فیلتر توزیع قدرت شکل ۱ و با پارامترهای مداری نشان داده شده در جدول ۱، نتایج شبیه‌سازی در دو حالت (۱-۴) و (۲-۴) ارائه شده است.

در حالت (۱-۴) منابع ولتاژ هارمونیک مراتب پنجم و هفتم بطور مجزا بر روی باس یک فیلتر 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 فیلتر توزیع به ازای K_V های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲: ساختار کلی فیلتر فعال قدرت.

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

در فیلتر بدون تلفات $R=0$ و $G=0$ است. بنابراین برای فیلتر بدون تلفات، امپدانس مشخصه به صورت (۲) تعریف می‌شود

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

۳- ساختار و اصول عملکرد فیلتر فعال قدرت با بهره ثابت K_V نصب شده بر روی فیلتر توزیع

ساختار کلی فیلتر فعال بکار رفته در شبیه‌سازی به صورت شکل ۲ است. این ساختار از یک اینورتر منبع ولتاژ با شش سوئیچ IGBT تشکیل شده است. فیلتر فعال قدرت از طریق یک مبدل به باس انتهایی فیلتر توزیع متصل شده است. همچنین خازن $C_{dc} = 3300 \mu F$ به طرف dc اینورتر وصل شده است. سلف $L_f = 2.5 \text{ mH}$ نیز بطور 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 فیلتر 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 جبران سازی i_c^* مانند زیر حاصل شود [۱] و [۳] تا [۶]

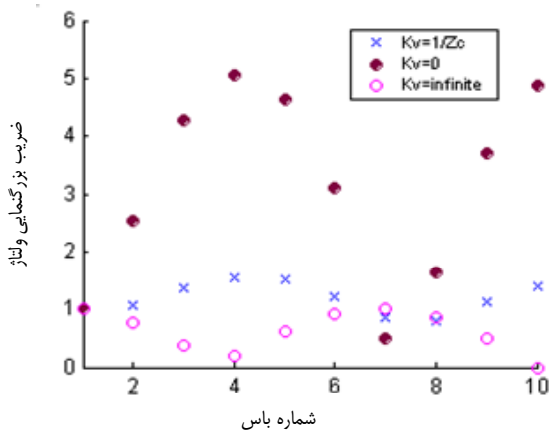
$$i_c^* = K_V \cdot v_h \quad (3)$$

برای اینکه فیلتر فعال بتواند پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک را بطور مؤثر میرا کند باید $K_V = 1/Z_C$ انتخاب شود که Z_C امپدانس مشخصه فیلتر توزیع است.

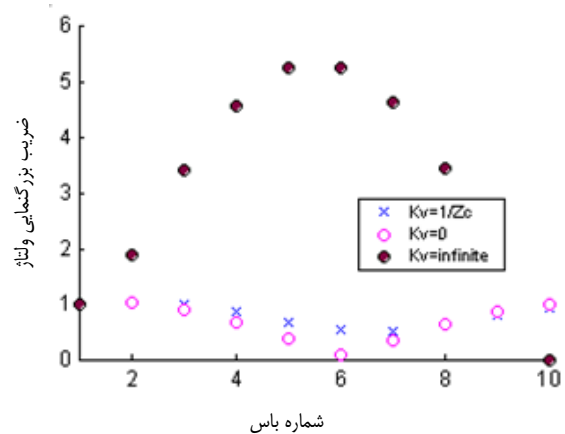
مدار تولید جریان مرجع جبران سازی در حالتی که فیلتر فعال قدرت با بهره ثابت K_V استفاده شده است، در شکل ۳ آمده است. در بلوک دیاگرام شکل ۳ ولتاژهای سه‌فاز در محل نصب فیلتر فعال بر روی فیلتر توزیع آشکار می‌شوند، v_a ، v_b و v_c . با فرض اینکه سیستم سه‌فاز متقارن است، $v_a + v_b + v_c = 0$ ، بنابراین مؤلفه می‌توان به صورت (۴) بیان کرد

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \omega_s t & \sin \omega_s t \\ -\sin \omega_s t & \cos \omega_s t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

که در آن $\omega_s t$ فاز خط می‌باشد. ω_s فرکانس اصلی شبکه توزیع است که توسط حلقه قفل‌شونده 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 ۱۳ استفاده شده



شکل ۵: تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک هفتم به ازای K_V های مختلف.



شکل ۴: تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک پنجم به ازای K_V های مختلف.

شکل ۵ تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک هفتم، نسبت ولتاژ هارمونیک هفتم روی هر باس به ولتاژ هارمونیک هفتم باس یک را برای حالت های مختلف $K_V = 0$ ، $K_V = 1/Z_C$ و $K_V = \infty$ نشان می دهد.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود 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 باس ها کمتر از واحد است. این ضریب در روی باس ۴ دارای یک کمیته محلی است در حالی که در روی باس ۷، بیشترین است و در روی باس انتهایی فیدر (باس ۱۰) صفر می شود.

در حالت $K_V = 1/Z_C$ ، 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 شبیه سازی می توان دریافت که در حالت $K_V = 1/Z_C$ ، ضریب بزرگنمایی ولتاژ در روی باس ها دارای کمترین مقدار تغییرات خواهد بود و انتشار و نوسان هارمونیک در این حالت کمتر اتفاق می افتد.

۴-۲ فیدر توزیع قدرت با یک امپدانس 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 ۶ درصد ولتاژ هارمونیک مرتبه پنجم، نسبت ولتاژ هارمونیک پنجم روی هر باس به ولتاژ خط به خط اصلی را برای حالت های مختلف $K_V = 0$ ، $K_V = 1/Z_C$ و $K_V = 10/Z_C$ نشان می دهد.

همانطور که از شکل ۶ مشاهده می شود در حالت $K_V = 0$ ولتاژ هارمونیک باس های ابتدایی فیدر توزیع کمتر از ۲٪ است. اما ولتاژ هارمونیک باس های انتهایی فیدر توزیع قدرت بتدریج افزایش می یابد و در روی باس ۱۰ به حداکثر می رسد (حدود ۶٪).

در حالت $K_V = 10/Z_C$ ، ولتاژ هارمونیک بر روی باس های میانی فیدر توزیع دارای بیشترین مقدار است. مقدار این ولتاژ هارمونیک بر روی باس های ابتدا و انتهایی فیدر کاهش چشمگیری دارد.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای فیدر توزیع قدرت

ولتاژ خط	۶۶kV
فرکانس خط	۵۰ Hz
طول فیدر	۹ km
ظرفیت کل خازن ها	۳ MVA
تعداد باس ها	۱۰
L : اندوکتانس خط	۱٫۹۸ mH/km
R : مقاومت خط	۰٫۳۶ Ω /km
C : ظرفیت خازن	۲۵ μ F/km

در حالت (۲-۴) تغییرات ولتاژ هارمونیک باس های مختلف فیدر توزیع به ازای اتصال منابع جریان هارمونیک مراتب پنجم و هفتم به ترتیب بر روی باس های ۵ و ۳ فیدر توزیع قدرت شکل ۱ و برای K_V های مختلف بررسی شده است.

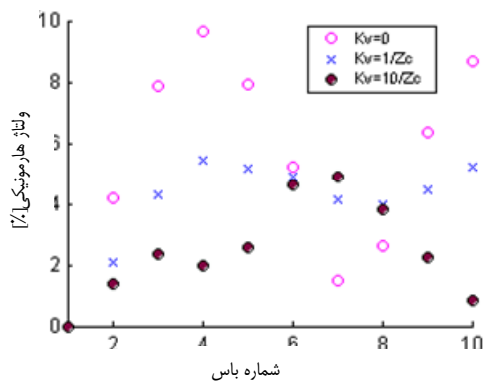
۴-۱ فیدر توزیع قدرت با یک امپدانس مشخصه و منبع ولتاژ هارمونیک

شکل ۴ تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک پنجم، نسبت ولتاژ هارمونیک پنجم روی هر باس به ولتاژ هارمونیک پنجم باس یک، را برای حالت های مختلف $K_V = 0$ ، $K_V = 1/Z_C$ و $K_V = \infty$ نشان می دهد.

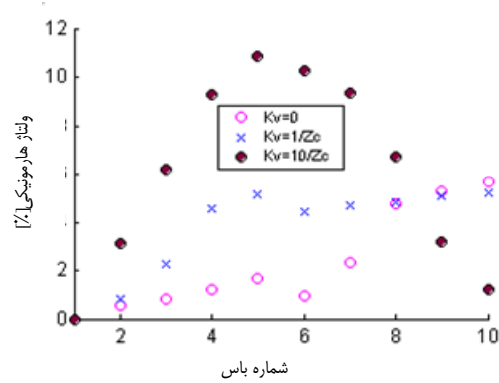
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، در حالت عدم اتصال فیلتر فعال $K_V = 0$ ، ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک تقریباً برای تمامی باس ها کمتر از واحد است. روی باس های میانی فیدر، این ضریب بتدریج کاهش می یابد و در روی باس ۶ به حداقل مقدار خود می رسد و برای باس های بعدی بتدریج افزایش می یابد.

در حالتی که باس انتهایی فیدر توزیع اتصال کوتاه باشد $K_V = \infty$ ، ضریب بزرگنمایی ولتاژ بتدریج افزایش می یابد و در روی باس های ۵ و ۶ به حداکثر مقدار خود می رسد. ولتاژ هارمونیک باس ۶، ۵/۲۵ برابر ولتاژ هارمونیک باس یک است. برای باس های بعدی این ضریب کاهش می یابد و در روی باس انتهایی فیدر صفر می شود.

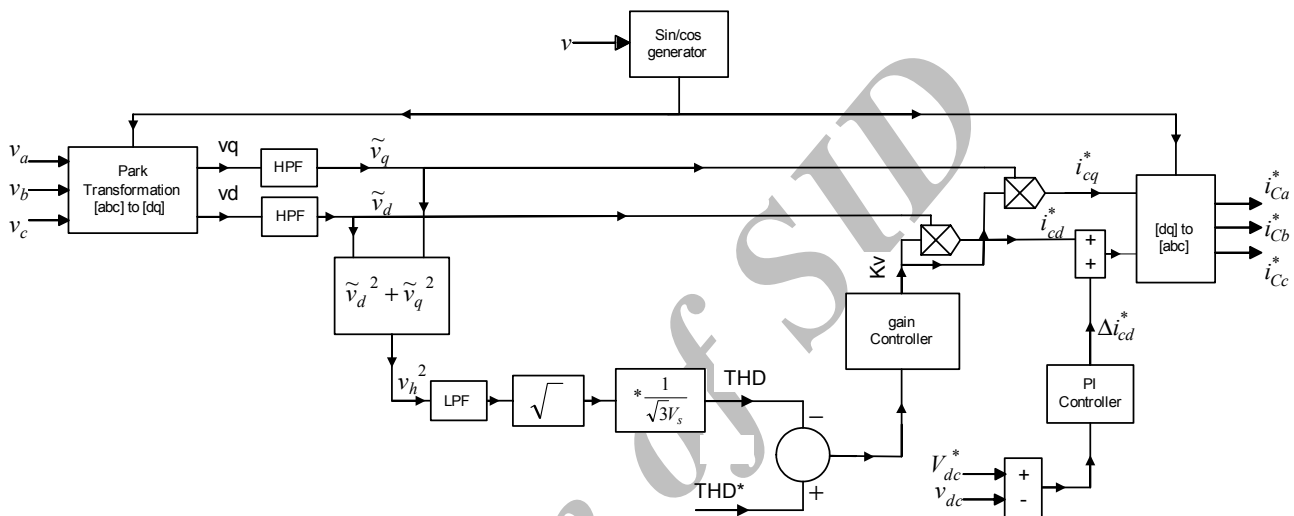
و بالاخره حالتی که $K_V = 1/Z_C$ ، تغییرات ضریب بزرگنمایی ولتاژ در طول فیدر به حداقل مقدار خود می رسد و انتشار هارمونیک در این حالت کمترین است.



شکل ۷: تغییرات ولتاژ هارمونیک مرتبه هفتم باس‌های فیدر توزیع قدرت در حالت اتصال منبع جریان هارمونیک مرتبه هفتم بر روی باس ۳ فیدر و به ازای K_V های مختلف.



شکل ۸: تغییرات ولتاژ هارمونیک مرتبه پنجم باس‌های فیدر توزیع قدرت در حالت اتصال منبع جریان هارمونیک مرتبه پنجم بر روی باس ۵ فیدر و به ازای K_V های مختلف.



شکل ۸: بلوک دیاگرام کنترل فیلتر فعال.

نتایج شبیه‌سازی در دو بخش ۱-۴ و ۲-۴ به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

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

با توجه به مراجع [۱] و [۲] و نتایج شبیه‌سازی بخش‌های (۱-۴) و (۲-۴) مشاهده می‌شود که با انتخاب بهره فیلتر مساوی با عکس امپدانس مشخصه فیدر توزیع ($K_V = 1/Z_C$) می‌توان از بروز پدیده‌های انتشار و نوسان هارمونیک بطور مؤثر جلوگیری کرد. اما امپدانس مشخصه فیدر توزیع ثابت نیست چون شرایط و محل انتشار هارمونیک به صورت خودکار، روز به روز، فصل به فصل و سال به سال تغییر می‌کند. بنابراین تنظیم خودکار بهره فیلتر، صرفنظر از شرایط سیستم مورد نیاز خواهد بود.

شکل ۸ بلوک دیاگرام کنترل فیلتر فعال را نشان می‌دهد. 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 نگه داشته شود. در بلوک دیاگرام شکل ۸ پس از جداسازی مؤلفه‌های ac، \tilde{v}_d و \tilde{v}_q (که همان مؤلفه‌های هارمونیک در مختصات abc می‌باشند) مؤلفه مربع ولتاژ هارمونیک v_h^2 را استخراج می‌کنیم. وقتی که فقط ولتاژهای هارمونیک پنجم و هفتم از رابطه $v_h^2 = \tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2$ استخراج می‌شوند، v_h^2 را می‌توان به صورت زیر نوشت

حالت $K_V = 1/Z_C$ ، حالتی است که در آن تغییرات ولتاژ هارمونیک در طول فیدر توزیع قدرت کمترین است. در این حالت، ولتاژ هارمونیک باس‌های ابتدایی فیدر بتدریج افزایش می‌یابد اما تغییرات ولتاژ هارمونیک باس‌های میانی و انتهایی فیدر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر انتشار و نوسان هارمونیک در این حالت کاهش چشمگیری دارد.

شکل ۷ تغییرات ولتاژ هارمونیک مرتبه هفتم باس‌های مختلف فیدر توزیع را برای K_V های مختلف نشان می‌دهد. 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 ۷ مشاهده می‌شود در حالت $K_V = 0$ ولتاژ هارمونیک مرتبه هفتم دارای تغییرات شدیدی است. در این حالت انتشار هارمونیک در طول فیدر بسیار شدید است. 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 بشدت رخ می‌دهد.

در حالت $K_V = 10/Z_C$ ، نیز تغییرات ولتاژ هارمونیک نسبتاً زیاد است. باس‌های ۱ و ۱۰ دارای کمترین ولتاژ هارمونیک و باس ۷ دارای بیشترین ولتاژ هارمونیک است.

حالت $K_V = 1/Z_C$ ، 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.

جدول ۲: نتایج عددی ولتاژ باس‌های فیدر توزیع ۱۰ باسه دارای یک امیدانس مشخصه در حالت اتصال منبع ولتاژ هارمونیک به باس ۱ فیدر

فیدر توزیع قدرت با یک امیدانس مشخصه و منبع ولتاژ هارمونیک												
ولتاژ باس‌ها	در حالت عدم اتصال فیلتر فعال فیلتر، $K_V = 0$				اتصال فیلتر با بهره ثابت $K_V = 1/Z_C$				اتصال فیلتر با بهره $K_V = \infty$			
	$h=5$		$h=7$		$h=5$		$h=7$		$h=5$		$h=7$	
	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$	$V_i[V]$
V_1	۵	۵	۱	۱	۵	۵	۱	۱	۵	۵	۱	۱
V_2	۵,۰۴	۱۲,۷	۱	۲,۵۴	۵,۱۴	۵,۳۵	۱,۰۳	۱,۰۷	۹,۴	۳,۸۲	۱,۸۸	۰,۷۶
V_3	۴,۴۸	۲۱,۴	۰,۹	۴,۲۸	۴,۸۶	۶,۸	۰,۹۷	۱,۳۶	۱۶,۹۵	۱,۸۱	۳,۳۹	۰,۳۶
V_4	۳,۳۸	۲۵,۳	۰,۶۸	۵,۰۶	۴,۲	۷,۷۷	۰,۸۴	۱,۵۵	۲۲,۹	۱,۰۵	۴,۵۸	۰,۲۱
V_5	۱,۹	۲۳,۲	۰,۳۸	۴,۶۴	۳,۳۳	۷,۵۴	۰,۶۷	۱,۵۱	۲۶,۱۵	۳,۱۵	۵,۲۳	۰,۶۳
V_6	۰,۴۷	۱۵,۶	۰,۱	۰,۱۲	۲,۶۱	۶,۱۴	۰,۵۲	۱,۲۳	۲۶,۲۶	۴,۶۵	۵,۲۵	۰,۹۳
V_7	۱,۶۹	۲,۵۲	۰,۳۴	۰,۵	۲,۵۷	۴,۳۵	۰,۵۱	۰,۸۷	۲۳,۱۶	۵,۰۵	۴,۶۳	۱,۰۱
V_8	۳,۱۹	۸,۲۵	۰,۶۴	۱,۶۵	۳,۲۱	۴,۰۵	۰,۶۴	۰,۸۱	۱۷,۲	۴,۲۴	۳,۴۴	۰,۸۵
V_9	۴,۳۳	۱۸,۵	۰,۸۷	۳,۷	۴	۵,۶	۰,۸	۱,۱۲	۹,۱۸	۲,۴۱	۱,۸۴	۰,۴۸
V_{10}	۴,۹۳	۲۴,۳	۰,۹۹	۴,۸۶	۴,۵۴	۶,۹۷	۰,۹۱	۱,۳۹	۰	۰	۰	۰

جدول ۳: نتایج عددی درصد ولتاژ هارمونیک باس‌های فیدر توزیع ۱۰ باسه دارای یک امیدانس مشخصه در حالت اتصال منبع جریان هارمونیک به میانی فیدر

فیدر توزیع قدرت با یک امیدانس مشخصه و منبع جریان هارمونیک						
ولتاژ باس‌ها	در حالت عدم اتصال فیلتر $K_V = 0$		اتصال فیلتر با بهره ثابت $K_V = 1/Z_C$		اتصال فیلتر با بهره $K_V = 10/Z_C$	
	ولتاژ هارمونیک	ولتاژ هارمونیک	ولتاژ هارمونیک	ولتاژ هارمونیک	ولتاژ هارمونیک	ولتاژ هارمونیک
	پنجم [%]	هفتم [%]	پنجم [%]	هفتم [%]	پنجم [%]	هفتم [%]
V_1	۰	۰	۰	۰	۰	۰
V_2	۰,۵۳	۴,۲	۰,۸۵	۲,۱	۳,۱۲	۱,۳۸
V_3	۰,۸۵	۷,۸۵	۲,۲۳	۴,۳	۶,۱۹	۲,۲۷
V_4	۱,۲۲	۹,۶۷	۴,۵۳	۵,۴۴	۹,۲۷	۱,۹۸
V_5	۱,۶۴	۷,۹	۵,۱۲	۵,۱۷	۱۰,۸۸	۲,۵۵
V_6	۰,۹۲	۵,۲	۴,۴۴	۴,۸۸	۱۰,۲۹	۴,۶۷
V_7	۲,۳	۱,۵	۴,۶۷	۴,۱۱	۹,۳۳	۴,۸۷
V_8	۴,۷۷	۲,۶۴	۴,۸۵	۳,۹۵	۶,۷	۳,۸۲
V_9	۵,۲۷	۶,۳۳	۵,۱	۴,۴۷	۳,۲	۲,۲۲
V_{10}	۵,۶۶	۸,۶۶	۵,۲۲	۵,۲۴	۱,۲	۰,۸۳

زیر نوشت

$$THD = \frac{1}{V_s} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \frac{1}{\sqrt{3}V_s} \sqrt{(\tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2)_{dc}} \quad (9)$$

$$V_h = \sqrt{(\tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2)_{dc}}$$

$$\Rightarrow THD = \frac{V_h}{\sqrt{3}V_s}$$

زیر نویس dc معرف مؤلفه dc ولتاژ می‌باشد. V_s و V_h نیز به ترتیب مقدار مؤثر ولتاژ خط به خنثی است. THD از رابطه فوق با مقدار مرجعش THD^* مقایسه شده و تفاوت این دو بعد از عبور از بلوک کنترل‌کننده بهره فیلتر، مقدار بهره فیلتر (K_V) را تعیین می‌کند. بالاخره اینکه جریان‌های جبرانسازی مرجع i_{cd}^* و i_{cq}^* توسط (۱۰) به جریان‌های جبرانسازی در مختصات abc تبدیل شده‌اند

$$v_h^2 = \tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2 = \frac{2}{3} [\sqrt{2}V_d \cos(\omega_s t + \phi_d) + \sqrt{2}V_q \cos(\omega_s t + \phi_q)]^2 + \frac{2}{3} [-\sqrt{2}V_d \sin(\omega_s t + \phi_d) + \sqrt{2}V_q \sin(\omega_s t + \phi_q)]^2 = 2 [V_d^2 + V_q^2 + 2V_d V_q \cos(\omega_s t + \phi_d + \phi_q)] \quad (10)$$

سیگنال v_h^2 مجموع مؤلفه‌های dc و ac در فرکانس هارمونیک ۱۲ می‌باشد. در (۱۰)، $\omega_s = 6\omega_s$ و $\omega_s = 12\omega_s$ می‌باشد که فرکانس اصلی شبکه است که توسط حلقه قفل‌شونده به فاز (PLL) دنبال می‌شود.

مؤلفه‌های dc از v_h^2 توسط فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع ۵ هرتز استخراج شده‌اند، بنابراین اعوجاج هارمونیک ولتاژ را می‌توان به صورت

جدول ۴: مقادیر پارامترهای فیدر توزیع قدرت ده‌باسبه شکل ۱

دامنه ولتاژ اصلی شبکه	۲۰۰ V
دامنه ولتاژ هارمونیک پنجم روی باس ۱	۲ V
دامنه ولتاژ هارمونیک هفتم روی باس ۱	۲ V
فرکانس خط	۵۰ Hz
تعداد باس‌ها	۱۰
L: اندوکتانس خط	۰٫۲ mH
R: مقاومت خط	۰٫۰۵ Ω
C: ظرفیت خازن	۲۵ μF

و همچنین وجود زمین مجازی بر روی پایه معکوس‌کننده، دیود هدایت کرده و بهره $K_V = 0$ خواهد شد. همچنین مادامی که $THD > THD^*$ باشد، 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 می‌کند و بهره K_V افزایش می‌یابد. این افزایش بهره تا زمانی ادامه می‌یابد که THD به مقدار مرجعش بسیار نزدیک شود. عملکرد مدار فوق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد

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

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

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

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

بعبارت دیگر مدار فوق نقش یک انتگرالگیر غیرخطی را بازی می‌کند که سعی بر این دارد اختلاف THD و THD^* را به حداقل برساند. با انتخاب $RC = 10$ کنترل‌کننده عملکرد مناسبی دارد.

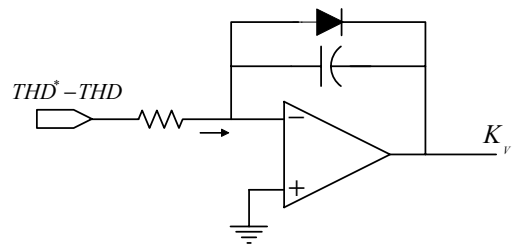
۷- نتایج شبیه‌سازی در حالت کنترل خودکار بهره فیلتر فعال قدرت

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شده است. در این شبیه‌سازی دو حالت بررسی می‌شود: الف) حالت نخست اینکه منبع ولتاژ هارمونیک (شامل هارمونیک‌های پنجم و هفتم) روی باس ابتدایی فیدر، باس ۱، توزیع قدرت که دارای امپدانس مشخصه ثابت در طول فیدر توزیع می‌باشد، واقع است. ب) حالت دوم بررسی حالتی که منبع ولتاژ هارمونیک (شامل هارمونیک‌های پنجم و هفتم) روی باس ابتدایی فیدر، باس ۱، واقع است اما فیدر توزیع شامل دو خط مختلف با دو امپدانس مشخصه مختلف می‌باشد.

چون پدیده انتشار هارمونیک در حالت بی‌باری بسیار جدی و خطرناک است، بنابراین دو تحلیل فوق در حالت بی‌باری بررسی می‌شود.

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

پارامترهای فیدر توزیع قدرت در این حالت در جدول ۴ نمایش داده شده است. در حالت عدم اتصال فیلتر فعال به فیدر توزیع، حالت $K_V = 0$ ، ولتاژ باس‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ در شکل ۱۰ نشان داده شده است (برای فاز a).



شکل ۹: بلوک تنظیم بهره.

$$\begin{pmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0.5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \omega_s t & -\sin \omega_s t \\ \sin \omega_s t & \cos \omega_s t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{pmatrix} \quad (10)$$

علاوه بر این موارد ولتاژ خازن dc، v_{dc} ، در طرف dc فیلتر فعال آشکار شده و سپس با ولتاژ dc مرجع V_{dc}^* مقایسه شده است. اختلاف سیگنال بین v_{dc} و ولتاژ dc مرجع V_{dc}^* توسط یک کنترل کننده PI، به اختلاف جریان Δi_{cd}^* تبدیل شده است که این اختلاف جریان برای جبران‌سازی به مؤلفه جریانی i_{cd}^* افزوده می‌گردد. مؤلفه جریانی Δi_{cd}^* باعث می‌شود مقدار کمی توان اکتیو جذب/آزاد شده تا اینکه اختلاف ولتاژ مرجع dc و ولتاژ دو سر خازن به حداقل برسد. به منظور کنترل مناسب ولتاژ dc خازن بهره تناسبی، K_p برابر ۰٫۲ و بهره انتگرالی، K_I ، برابر ۰٫۵ در نظر گرفته شده‌اند.

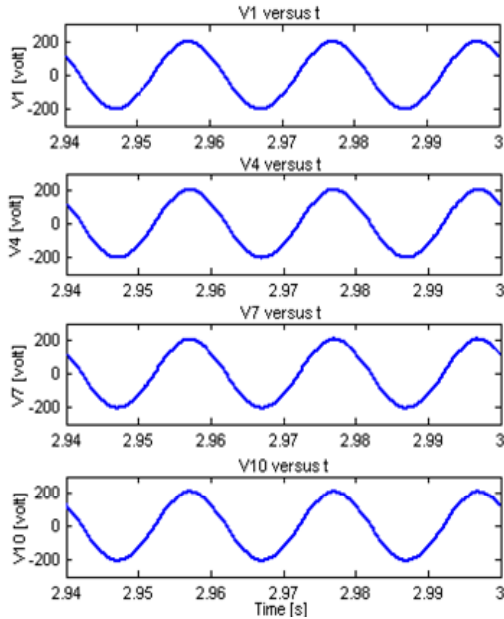
۶- تنظیم خودکار بهره فیلتر فعال

۱-۶ ایده طراحی

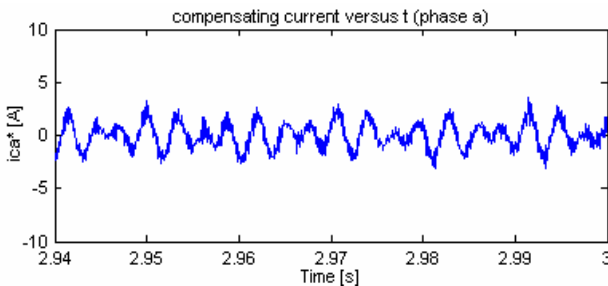
هدف تنظیم خودکار بهره، نگهداشتن ولتاژ هارمونیک در باس نصب فیلتر فعال در یک محدوده مشخص است. برای انجام این مهم دو ایده امکانپذیر است. اولی این است که بهره را به صورت خودکار برای ولتاژهای هارمونیک در فرکانس‌های تشدید تنظیم کنیم، بطوری که بهره را برای فرکانس‌های دیگر کوچک نگه داریم. چون دانستن فرکانس‌های تشدید در یک سیستم توزیع قدرت واقعی مشکل است، ما مجبوریم هارمونیک‌های ولتاژ را بطور مجزا محاسبه کنیم، بنابراین به چندین تبدیل dq و عکس این تبدیل نیاز است. ایده دوم این است که برای تمام فرکانس‌های هارمونیک یک بهره معمولی در نظر بگیریم و سپس این بهره را طوری تنظیم کنیم تا مقدار اعوجاج ولتاژ هارمونیک را کمتر از یک محدوده مشخص که در استاندارد IEEE-۵۱۹ تعیین شده است نگه داریم. در این حالت فقط یک تبدیل dq و عکس آن کافی بوده، باعث می‌شود محاسبات به زمان کمتری نیاز داشته باشد. از ای نیرو ایده دوم طراحی ترجیح داده شده است.

۲-۶ اصول عملکرد بلوک تنظیم‌کننده خودکار بهره فیلتر فعال قدرت

ساختار بلوک تنظیم‌کننده خودکار بهره در بلوک دیاگرام کنترل فیلتر فعال شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که از بلوک تقویت‌کننده فوق بر می‌آید، زمانی که $THD < THD^*$ باشد با توجه به فیدبک منفی



شکل ۱۲: ولتاژ باس‌های فیدر توزیع در حالت اتصال فیلتر فعال با بهره کنترل شده.



شکل ۱۳: شکل موج جریان مرجع جبران‌سازی.

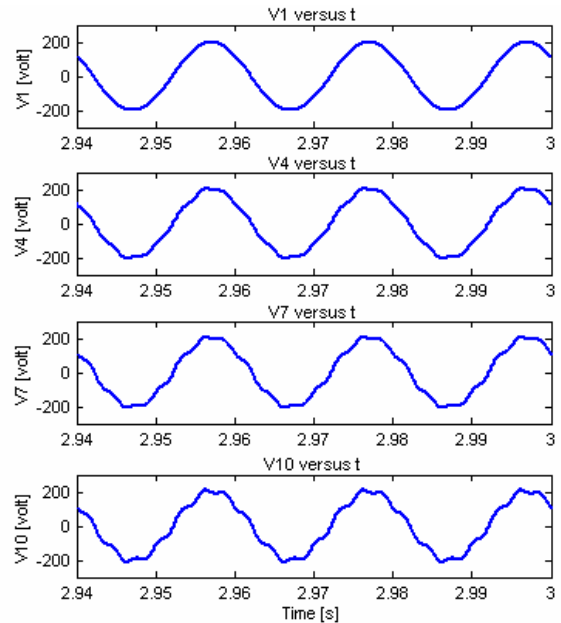
شرایط هارمونیک را داراست (قبل از نصب فیلتر فعال بر روی این باس)، دو پدیده انتشار و نوسان هارمونیک را کنترل کرده و این دو را کاهش می‌دهیم.

شکل موج ولتاژ باس‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ فیدر توزیع ۱۰ باسه پس از کنترل خودکار بهره فیلتر فعال در شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل موج جریان مرجع جبران‌سازی در شکل ۱۳ آمده است.

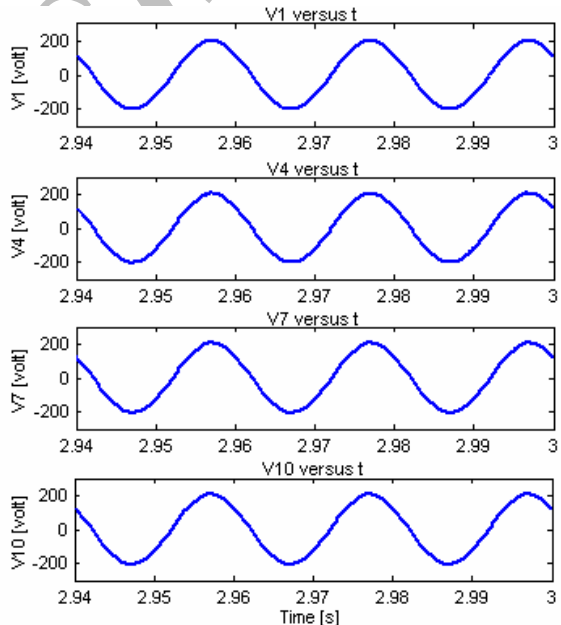
شکل موج بهره کنترل فیلتر فعال و همچنین شکل موج اختلاف $THD^* - THD$ در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

ولتاژهای مؤلفه اصلی و هارمونیک، اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس‌ها، همچنین جریان مؤثر مرجع جبران‌سازی در جدول ۵ ارائه شده است.

همانطور که از این جدول مشاهده می‌شود، هارمونیک مرتبه هفتم بدترین شرایط هارمونیک را داراست. همچنین ولتاژ باس انتهایی فیدر (باس ۱۰) نیز دارای بیشترین مقدار هارمونیک‌های مراتب پنجم و هفتم است. با نصب فیلتر فعال قدرت روی باس ۱۰ فیدر و انتخاب بهره ثابت $K_V = 1/Z_C$ برای آن، انتشار هارمونیک بطور مؤثری کنترل شده و کاهش می‌یابد. بویژه اینکه دامنه ولتاژ هارمونیک مرتبه هفتم از $16/8$ به $3/18$ ولت کاهش می‌یابد. در حالت کنترل بهره فیلتر فعال وضعیت کاهش هارمونیک بهتر می‌شود و دامنه ولتاژ هارمونیک از $16/8$ ولت به $2/43$ کاهش می‌یابد، همچنین مزیت دیگر کنترل بهره فیلتر، کاهش جریان مؤثر مرجع جبران‌سازی است. با کاهش جریان جبران‌سازی تلفات و هزینه فیلتر فعال کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰: ولتاژ باس‌های فیدر توزیع در حالت عدم اتصال فیلتر فعال.

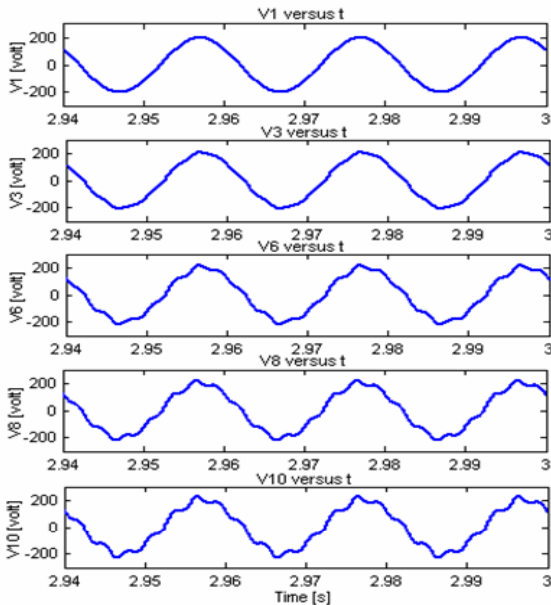


شکل ۱۱: ولتاژ باس‌های فیدر توزیع در حالت اتصال فیلتر فعال با بهره ثابت.

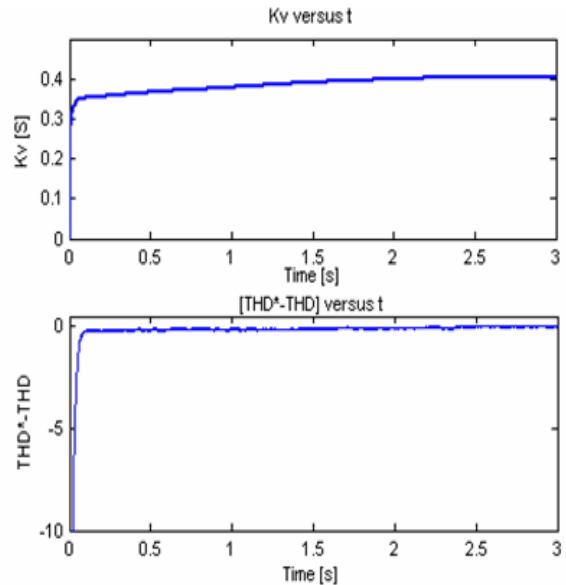
همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، باس انتهایی فیدر (باس ۱۰) بدترین شرایط هارمونیک را داراست. با نصب فیلتر فعال با بهره ثابت $K_V = 1/Z_C = \sqrt{C/L} = 0.3526S$ بر روی باس انتهایی فیدر توزیع، شکل موج ولتاژ باس‌ها در شکل ۱۱ نمایش داده شده است (برای فاز a).

با مقایسه دو شکل ۱۰ و ۱۱ می‌توان دریافت که اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس‌های فیدر توزیع، بویژه باس انتهایی فیدر، پس از نصب فیلتر فعال بطور مؤثری کاهش یافته و به عبارت دیگر انتشار هارمونیک کنترل می‌شود. با کنترل انتشار هارمونیک و محدود کردن آن ولتاژ همه باس‌ها تقریباً یکسان شده و به عبارت دیگر ضریب بزرگنمایی ولتاژ هارمونیک یا تقریباً واحد می‌شود. بنابراین پدیده نوسان هارمونیک یا Whack-a-mole رخ نمی‌دهد.

با کنترل بهره فیلتر فعال و بدون توجه به امیدانس مشخصه فیدر توزیع و تنها با کنترل اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس انتهایی فیدر که بدترین



شکل ۱۵: شکل موج ولتاژ باس‌های فیدر توزیع با دو امیدانس مشخصه در حالت بی‌باری بدون اتصال فیلتر فعال.



شکل ۱۴: شکل موج‌های بهره کنترل فیلتر، K_V ، و اختلاف اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس انتهایی فیدر از مقدار مرجع آن.

جدول ۵: ولتاژهای مؤلفه اصلی و هارمونیک، اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس‌ها و جریان مؤثر مرجع جبران‌سازی در فیدر توزیع در حالت بی‌باری

ولتاژها و جریان‌ها	در حالت عدم اتصال فیلتر $K_V = 0$				اتصال فیلتر با بهره ثابت $K_V = 1/Z_C$				اتصال فیلتر با بهره کنترل شده			
	$h=1$	$h=5$	$h=7$	THD	$h=1$	$h=5$	$h=7$	THD	$h=1$	$h=5$	$h=7$	THD
$V_1 [V]$	۲۰۰	۲	۲	۰٫۷۱٪	۲۰۰	۲	۲	۰٫۷۱٪	۲۰۰	۲	۲	۰٫۷۱٪
$V_3 [V]$	۲۰۲٫۵	۳	۸٫۸۴	۲٫۳٪	۲۰۲٫۵	۲٫۳۹	۲٫۳۸	۰٫۸۳٪	۲۰۲٫۴	۲٫۳۷	۱٫۹۸	۰٫۷۶٪
$V_6 [V]$	۲۰۴	۳٫۷۴	۱۴٫۲۴	۳٫۶۱٪	۲۰۴	۲٫۷۲	۲٫۹۵	۰٫۹۸٪	۲۰۳٫۸	۲٫۶۹	۲٫۱۸	۰٫۸۵٪
$V_8 [V]$	۲۰۴٫۵	۴٫۰۴	۱۶٫۸	۴٫۲۲٪	۲۰۴٫۴	۲٫۷۸	۳٫۱۸	۱٪	۲۰۴٫۳	۲٫۷	۲٫۴۳	۰٫۸۹٪
$I_C [A]$.				۱٫۲۴				۱٫۰۲۵			

جدول ۶: مقادیر پارامترهای فیدر توزیع قدرت ده‌باسه با دو امیدانس مشخصه

دامنه ولتاژ اصلی شبکه	۲۰۰ V
دامنه ولتاژ هارمونیک پنجم روی باس ۱	۲ V
دامنه ولتاژ هارمونیک هفتم روی باس ۱	۲ V
فرکانس خط	۵۰ Hz
تعداد باس‌ها	۱۰
L_1 تا L_n : اندوکتانس خط	۰٫۲ mH
$L_n = L_1$	۰٫۴ mH
R_1 to R_n : مقاومت خط	۰٫۰۵ Ω
$R_n = R_1$	۰٫۱ Ω
C_1 to C_n : ظرفیت خازن	۲۵ μF
$C_n = C_1$	۳۰ μF

با نصب فیلتر فعال قدرت با بهره کنترل شده بر روی باس انتهایی فیدر توزیع قدرت، انتشار هارمونیک را در طول فیدر کاهش می‌دهیم. شکل موج ولتاژ باس‌ها، همچنین جریان مرجع جبران‌سازی برای فاز a برای این حالت در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.

ولتاژهای مؤلفه اصلی و هارمونیک، اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس‌ها، همچنین جریان مؤثر مرجع جبران‌سازی در جدول ۷ ارائه شده است.

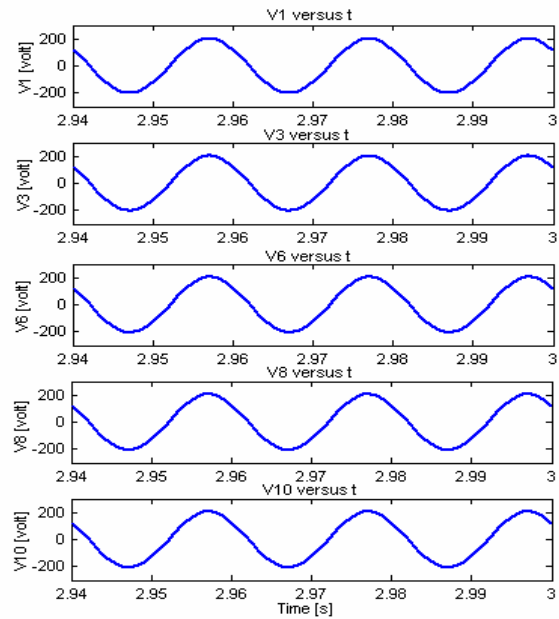
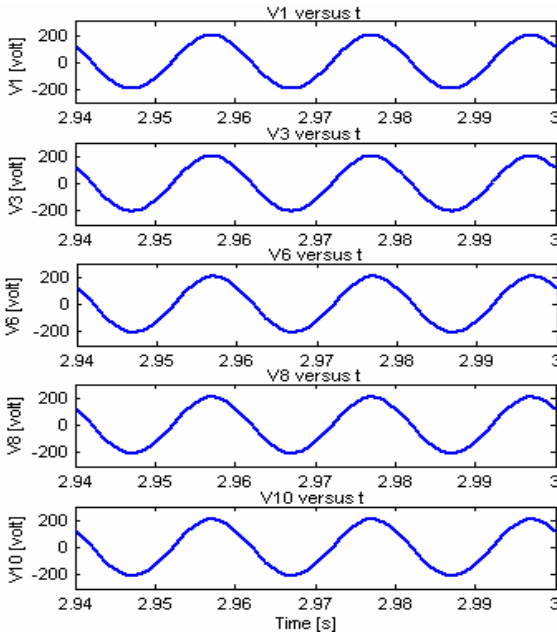
دامنه ولتاژ هارمونیک هفتم باس ۱۰ فیدر توزیع در حالت عدم اتصال فیلتر فعال ۲۳/۲۵ ولت است. با نصب فیلتر فعال قدرت با بهره کنترل شده، دامنه ولتاژ هارمونیک هفتم باس انتهایی فیدر به ۲/۶ ولت می‌رسد که

۷-۲ فیدر توزیع قدرت با یک امیدانس مشخصه و منبع ولتاژ هارمونیک

در این حالت فیدر توزیع ده‌باسه شکل ۱ دارای دو امیدانس مشخصه Z_{C1} و Z_{C2} است. به عبارت دیگر امیدانس مشخصه در طول فیدر ثابت نیست. پارامترهای فیدر توزیع در جدول ۶ نمایش داده شده است. امیدانس‌های مشخصه Z_{C1} و Z_{C2} برای فیدر توزیع قدرت با مشخصات ارائه شده در جدول ۶ عبارتند از

$$\begin{cases} Z_{C1} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \sqrt{\frac{0.2 \text{ mH}}{25 \mu\text{F}}} = 2.8284 \Omega \\ Z_{C2} = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} = \sqrt{\frac{0.4 \text{ mH}}{30 \mu\text{F}}} = 3.6515 \Omega \end{cases}$$

شکل موج ولتاژ باس‌های فیدر توزیع در حالتی که فیلتر فعالی روی فیدر توزیع نصب نیست، $K_V = 0$ ، در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز باس انتهایی فیدر توزیع قدرت دارای بدترین شرایط هارمونیک است. با توجه به مقادیر امیدانس مشخصه فیدر، بهره ثابت $K_V = 0.4 \text{ S}$ مقدار مناسبی بنظر می‌رسد. هر چند با کنترل بهره فیلتر، نیازی به دانستن مقادیر امیدانس مشخصه فیدر نیست. شکل موج‌های ولتاژ باس‌ها پس از نصب فیلتر فعال با بهره ثابت فوق در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

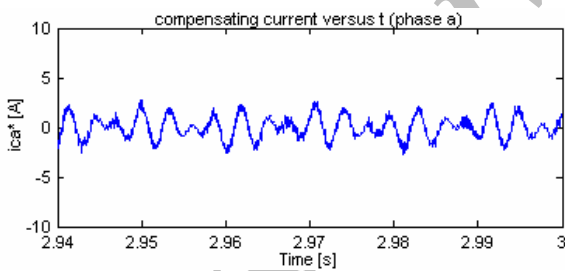


شکل ۱۷: شکل موج ولتاژ باس های فیدر توزیع با دو امپدانس مشخصه در حالت بی باری با اتصال فیلتر فعال با بهره کنترل شده.

شکل ۱۶: شکل موج ولتاژ باس های فیدر توزیع با دو امپدانس مشخصه در حالت بی باری با اتصال فیلتر فعال با بهره ثابت.

جدول ۷: ولتاژهای مؤلفه اصلی و هارمونیک، اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس ها و جریان مؤثر مرجع جبران سازی در فیدر توزیع ۱۰ باس با دو امپدانس مشخصه در حالت بی باری

ولتاژها و جریان ها	در حالت عدم اتصال فیلتر $K_f = 0$				اتصال فیلتر با بهره ثابت				اتصال فیلتر با بهره کنترل شده			
	$h=1$	$h=5$	$h=7$	THD	$h=1$	$h=5$	$h=7$	THD	$h=1$	$h=5$	$h=7$	THD
$V_1 [V]$	۲۰۰	۲	۲	۰٫۷۱٪	۲۰۰	۲	۲	۰٫۷۱٪	۲۰۰	۲	۲	۰٫۷۱٪
$V_r [V]$	۲۰٫۱۸	۲٫۸۲	۶٫۸۳	۱٫۸۳٪	۲۰٫۱۸	۲٫۲۱	۲٫۱	۰٫۷۶٪	۲۰٫۱۸	۲٫۲	۲٫۱	۰٫۷۵٪
$V_f [V]$	۲۰٫۳۷	۳٫۸	۱۵٫۳	۳٫۸۷٪	۲۰٫۳۸	۲٫۴۷	۲٫۳۳	۰٫۸۳٪	۲۰٫۳۶	۲٫۴۴	۲٫۳۱	۰٫۸۳٪
$V_a [V]$	۲۰٫۴۵	۴٫۲	۱۹٫۲۷	۴٫۸۲٪	۲۰٫۴۳	۲٫۵۹	۲٫۴۵	۰٫۸۷٪	۲۰٫۴۴	۲٫۵۴	۲٫۴۱	۰٫۸۶٪
$V_c [V]$	۲۰٫۵۲	۴٫۶۲	۲۳٫۲۵	۵٫۷۷٪	۲۰٫۵	۲٫۶۴	۲٫۶	۰٫۹٪	۲۰٫۵	۲٫۵۸	۲٫۶	۰٫۸۹٪
$I_c [A]$						۱٫۲۱				۱٫۰۳		



شکل ۱۸: جریان مرجع جبران سازی در حالت بی باری با نصب فیلتر فعال با بهره کنترل شده.

پیوست

در شبکه های توزیع، هارمونیک های پنجم و هفتم مهم ترین و مؤثرترین هارمونیک ها در ایجاد پدیده های انتشار و نوسان هارمونیک Whack-a-mole می باشند. بنابراین با در نظر گرفتن این مؤلفه های هارمونیک، ولتاژهای سه فاز abc را می توان به صورت رابطه (پ-۱) نوشت

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{2}V_s \cos(\omega_s t) + \sum_{h=5,7} \sqrt{2}V_h \cos(\omega_h t + \phi_h) \\ \sqrt{2}V_s \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) + \sum_{h=5,7} \sqrt{2}V_h \cos(\omega_h t - \frac{2\pi}{3} + \phi_h) \\ \sqrt{2}V_s \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) + \sum_{h=5,7} \sqrt{2}V_h \cos(\omega_h t + \frac{2\pi}{3} + \phi_h) \end{pmatrix} \quad (پ-۱)$$

کاهش چشمگیری را نشان می دهد. به عبارت دیگر THD باس انتهایی فیدر از ۵٫۷۷٪ پیش از نصب فیلتر فعال قدرت به ۰٫۸۹٪ پس از نصب فیلتر فعال با بهره کنترل شده می رسد. به عبارت دیگر در حالت استفاده از فیلتر با بهره کنترل شده بدون توجه به امپدانس مشخصه، انتشار هارمونیک کاهش یافته و کاملاً کنترل می شود.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله در حالت اتصال منبع ولتاژ بر روی فیدر توزیع قدرت با یک یا دو امپدانس مشخصه، مشاهده می شود که با نصب فیلتر فعال موازی با بهره ثابت $K_f = 1/Z_c$ امپدانس مشخصه فیدر توزیع (است) بر روی باس انتهایی فیدر شعاعی، دو پدیده انتشار و نوسان هارمونیک بطور مؤثری کاهش می یابد. به علت ماهیت متغیر بودن امپدانس مشخصه فیدر توزیع قدرت، تنظیم خودکار بهره کنترل فیلتر فعال صرف نظر از شرایط سیستم مورد نیاز خواهد بود.

در این مقاله با کنترل خودکار بهره فیلتر فعال، پدیده های انتشار و نوسان هارمونیک حتی با وجود دو امپدانس مشخصه برای فیدر شعاعی توزیع بطور مؤثری کاهش یافت. با کنترل بهره فیلتر فعال جریان مؤثر مرجع جبران سازی کاهش می یابد. بنابراین با بکارگیری فیلتر با بهره کنترل شده، تلفات، همچنین هزینه فیلتر کاهش می یابد که این نیز از مزایای استفاده از فیلتر فعال با بهره کنترل شده است.

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \omega_s t & \sin \omega_s t \\ -\sin \omega_s t & \cos \omega_s t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (۲-پ)$$

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \sqrt{2}V_s \cos \omega_s t + \sqrt{2}V_2 \cos(\omega_s t + \phi_2) + \sqrt{2}V_v \cos(\omega_s t + \phi_v) \\ \sqrt{2}V_s \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}V_2 \cos(\omega_s t - \frac{10\pi}{3} + \phi_2) + \sqrt{2}V_v \cos(\omega_s t - \frac{14\pi}{3} + \phi_v) \\ \sqrt{2}V_s \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}V_2 \cos(\omega_s t + \frac{10\pi}{3} + \phi_2) + \sqrt{2}V_v \cos(\omega_s t + \frac{14\pi}{3} + \phi_v) \end{pmatrix} \quad (۲-پ)$$

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \sqrt{2}V_s \cos^2 \omega_s t + \sqrt{2}V_2 \cos \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \phi_2) + \sqrt{2}V_v \cos \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \phi_v) - \dots - \dots - \sqrt{2}V_s \cos \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \\ - \sqrt{\frac{3}{2}}V_s \sin \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) - \dots - \dots - \sqrt{2}V_v \cos \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \frac{14\pi}{3} + \phi_v) - \sqrt{\frac{3}{2}}V_v \sin \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \frac{14\pi}{3} + \phi_v) \\ - \sqrt{2}V_s \sin \omega_s t \cdot \cos \omega_s t - \sqrt{2}V_2 \sin \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \phi_2) - \sqrt{2}V_v \sin \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \phi_v) + \dots + \dots + \sqrt{2}V_s \sin \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \\ - \sqrt{\frac{3}{2}}V_s \cos \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) + \dots + \dots + \sqrt{2}V_v \sin \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \frac{14\pi}{3} + \phi_v) - \sqrt{\frac{3}{2}}V_v \cos \omega_s t \cdot \cos(\omega_s t + \frac{14\pi}{3} + \phi_v) \end{pmatrix} \quad (۳-پ)$$

- [2] P. Jintakosonwit, H. Akagi, H. Fujita, and 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, pp. 438-447, May 2002.
- [3] H. Akagi, H. Fujita, and K. Wada, "A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 3, pp. 638-645, May/Jun. 1999.
- [4] P. Jintakosonwit, H. Fujita, and H. Akagi, "Control and performance of a fully-digital-controlled shunt active filter for installation on a power distribution system," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 132-140, Jan. 2002.
- [5] P. Jintakosonwit, H. Fujita, and H. Akagi, "Performance of automatic gain adjustment in shunt active filters for harmonic damping through power distribution systems," in *Proc. IEEE/PELS PESC Conf.*, pp. 1389-1395, 2001.
- [6] P. Jintakosonwit, H. Akagi, H. Fujita, and S. Ogasawara, "Implementation and performance of cooperative control of shunt active filters for harmonic damping throughout a power distribution system," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 39, no. 2, pp. 556-564, Mar./Apr. 2003.

حمیدرضا عزتی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در رشته مهندسی برق-الکترونیک از دانشگاه تبریز و کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کیفیت توان، ادوات FACTS، فیلترهای فعال قدرت.

علی یزدیان ورجانی در سال ۱۳۶۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف دریافت نمود. ایشان در سالهای ۱۳۷۴ و ۱۳۷۸ بترتیب مدرک کارشناسی ارشد و دکترای خود را از دانشگاه والنگونگ استرالیا دریافت نمود. از سال ۱۳۷۹ تاکنون، ایشان به عنوان استادیار بخش برق، گروه قدرت دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس فعالیت دارد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند کیفیت توان، ادوات FACTS، پردازش سیگنال دیجیتال، فناوری اطلاعات و مدیریت شبکه‌های کامپیوتری می‌باشد.

در (۱-پ)، v_a ، v_b و v_c ولتاژهای abc سه‌فاز و V_s و V_h نیز به ترتیب ولتاژهای مؤثر فرکانس اصلی و فرکانس هارمونیک مرتبه h ام می‌باشند. ω_s فرکانس اصلی شبکه و ω_h نیز به ترتیب فرکانس و فاز هارمونیک مرتبه h ام می‌باشند. با استفاده از (۱-پ) و بکارگیری تبدیل abc-dq، می‌توان (۲-پ) را نوشت.

با ساده‌کردن (۲-پ)، مؤلفه‌های v_d و v_q را می‌توان به صورت (۳-پ) نوشت.

پس از عبور مؤلفه‌های ولتاژ v_d و v_q از فیلتر بالاگذر نشان داده شده در (۵) و حذف مؤلفه‌های dc و نیز پس از ساده‌سازی و با در نظر گرفتن $\omega_s = \omega_1$ مؤلفه‌های هارمونیک \tilde{v}_d و \tilde{v}_q را می‌توان به صورت (۴-پ) نوشت

$$\begin{pmatrix} \tilde{v}_d \\ \tilde{v}_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \sqrt{2}V_s \cos((\omega_s + \omega_1)t + \phi_s) + \sqrt{2}V_v \cos((\omega_v - \omega_1)t + \phi_v) \\ -\sqrt{2}V_s \sin((\omega_s + \omega_1)t + \phi_s) + \sqrt{2}V_v \sin((\omega_v - \omega_1)t + \phi_v) \end{pmatrix} \quad (۴-پ)$$

در رابطه فوق $\omega_s = 5\omega_1$ و $\omega_v = 7\omega_1$ است، بنابراین می‌توان نوشت

$$\begin{aligned} \omega_s + \omega_1 &= 6\omega_1 = \omega_6 \\ \omega_v - \omega_1 &= 6\omega_1 = \omega_6 \end{aligned} \quad (۵-پ)$$

با جایگذاری تساوی‌های فوق در (۴-پ) و محاسبه $v_h^\top = \tilde{v}_d^\top + \tilde{v}_q^\top$ ، (۸) حاصل می‌شود (این رابطه در متن مقاله آمده است).

مراجع

- [1] K. Wada, H. Fujita, and H. Akagi, "Considerations of a shunt active filter based on voltage detection installation on a long distribution feeder," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 1123-1130, Jul./Aug. 2002.