

توپولوژی جدیدی از اکتیو فیلتر جهت اصلاح ضریب توان، جبران سازی هارمونیک‌ها و کنترل توان راکتیو و متعادل سازی بار در سیستم‌های سه فاز چهار سیمه

داریوش نظرپور مرتضی تیموری دکتر سید حسین حسینی
گروه مهندسی برق دانشکده فنی دانشگاه تبریز

چکیده:

خطاهای ممکنه مقاوم بوده و همچنان عملکرد مطلوبی را جهت جبران سازی تضمین می‌نماید. عملکرد توپولوژی جدید اکتیو فیلتر موازی با الگوریتم کنترلی پیشرفته با استفاده از نرم افزار matlab شبیه سازی می‌شود و نتایج حاصل آورده می‌شود.

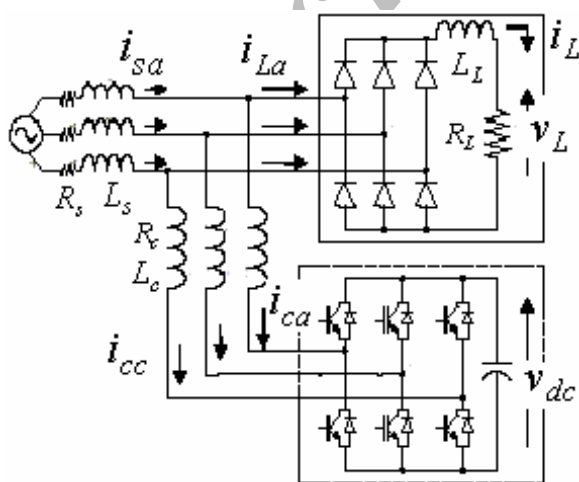
این مقاله توپولوژی جدیدی از اکتیو فیلتر (AF1) موازی با الگوریتم کنترلی پیشرفته ارائه می‌کند. تئوری توان راکتیو مدارهای سه فاز جهت بدست آوردن جریانهای مرجع اکتیو فیلتر موازی استفاده شده است. الگوریتم کنترلی پیشرفته ابتدا توسط مدل استاندارد اکتیو فیلتر، آزمایش می‌شود و سپس این الگوریتم به توپولوژی جدید اکتیو فیلتر اعمال می‌شود. آرایش جدید اکتیو فیلتر موازی قادر به جبران سازی هارمونیکها، توان راکتیو، اصلاح ضریب توان و نامتعادلی سیستمهای سه فاز چهار سیمه با بارهای متعادل/ نامتعادل خطی/ غیرخطی می‌باشد. همچنین آرایش جدید اکتیو فیلتر موازی قادر به جبران سازی کامل جریان سیم خنثی سیستمهای سه فاز چهار سیمه با بارهای نامتعادل و غیر خطی می‌باشد بدین ترتیب مانع از افزایش گرمای هادی خنثی و عواقب ناشی از آن می‌شود. آرایش جدید اکتیو فیلتر موازی در مقابل

۱. مقدمه:

اکثر سیستمهای قدرت سه فاز بوده و برای عملکرد متعادل طراحی می‌شوند. عملکرد نامتعادل منجر به ایجاد جریانهای توالی صفر و منفی می‌شود. اینگونه مولفه‌های جریان اثرات نامطلوبی چون تلفات اضافی در خطوط انتقال، موتورهای الکتریکی و مولدها، گشتاورهای نوسانی در ماشینهای AC، افزایش ریپل در یکسو سازها، عملکرد غلط انواع تجهیزات، اشباع ترانسفورماتورها، جریانهای اضافی سیم زمین و پایین آمدن امکان استفاده از ظرفیت کل شبکه را به دنبال خواهد داشت. مفاهیمی چون توان راکتیو، توان اکتیو و کمپانزاسیون توان راکتیو برای سیستمهای سه فاز در سالهای اخیر بیشتر متداول شده و مورد توجه واقع

۲. توپولوژی پایه اکتیو فیلتر:

مدار قدرت اکتیو فیلتر موازی می‌تواند از اینورتر منبع ولتاژ (*Voltage Source Inverter*) *VSI* یا اینورتر منبع جریان (*Current Source Inverter*) *CSI* تشکیل یابد. هر کدام از این ادوات در کنار کنترل جریان باند هیستریزس انجام وظیفه می‌نمایند. در این مقاله از اینورتر منبع ولتاژ جهت جبران سازی استفاده میشود. شکل ۱ توپولوژی پایه اکتیو فیلتر موازی به همراه بار غیر خطی را نشان می‌دهد. این شکل شامل یکسو ساز پل دیودی به همراه بار اهمی- سلفی و اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با جریان که به عنوان منبع جریان برای هارمونیکهای بار و توان راکتیو عمل می‌نماید، می‌باشد. شکل ۱ جهت آزمایش عملکرد الگوریتم کنترلی پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرد. حال به منظور اینکه جریانهای طرف منبع متعادل، سینوسی و هم فاز با ولتاژهای متناظر شوند بایستی اکتیو فیلتر قسمت توان هارمونیک و توان راکتیو جذب شده توسط بار را تامین نماید و فقط توان اکتیو متوسط از سوی منبع تامین شود.



شکل ۱: آرایش پایه اکتیو فیلتر موازی به همراه بار غیر خطی

شده است. طرحها و روشهای مختلفی جهت بهبود ضریب توان، حذف هارمونیکهای ایجاد شده و جبران توان راکتیو ارائه گردیده است [1-7]. این طرحها معمولاً از اینورترهای منبع ولتاژ تک فاز یا سه فاز که توسط یک خازن *dc* شارژ شده و در مد کنترل جریان برای دنبال کردن جریانهای مرجع کار می‌کنند، استفاده می‌نمایند.

در این مقاله از تئوری توان راکتیو جهت بدست آوردن الگوریتم کنترلی استفاده می‌شود. نشان داده شده است این شیوه در عمل جبران سازی منجر به بروز مشکلاتی می‌شود. و این موضوع به خاطر عدم دسترسی به پردازنده‌ها و سوئیچهایی با سرعت بالا به هنگام پیشنهاد تئوری توسط آقای *Akagi* می‌باشد [1]. همچنین که با این روش جبران سازی *THD* جریانهای طرف منبع نمی‌تواند به زیر استانداردهای *IEEE-519* آورده شود و این موضوع به خاطر وجود جهشهایی (*spikes*) در جریانهای طرف منبع می‌باشد. این جهشها به هنگام تغییر گذرای جریان بار از یک پله به پله دیگر اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب تئوری توان راکتیو چنان اصلاح می‌شود تا جریانهای طرف منبع فاقد هرگونه جهش جریانی باشد. نهایتاً الگوریتم کنترلی جدید به توپولوژی جدیدی از اکتیو فیلتر موازی اعمال می‌شود. آرایش جدید اکتیو فیلتر در مقابل خطاهای سیستم مقاوم بوده و عملکرد مطلوبی را برای جبران سازی تضمین می‌نماید. توپولوژی جدید اینورتر قادر به جبران سازی هارمونیکها، توان راکتیو، نامتعادلی و اصلاح ضریب توان انواع بارهای غیر خطی متصل شده به سیستمهای سه فاز چهار سیمه می‌باشد. عملکرد توپولوژی جدید اکتیو فیلتر موازی با الگوریتم کنترلی پیشرفته با استفاده از نرم افزار *matlab* شبیه سازی می‌شود و نتایج حاصل آورده می‌شود.

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{L\alpha} & v_{L\beta} \\ -v_{L\beta} & v_{L\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4)$$

و نهایتاً جریانها را می توان بدین صورت نوشت:

$$i_{L\alpha} = \frac{v_{L\alpha}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \bar{p} + \frac{v_{L\alpha}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \tilde{p} + \frac{-v_{L\beta}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \bar{q} + \frac{-v_{L\beta}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \tilde{q} \quad (5)$$

$$i_{L\beta} = \frac{v_{L\beta}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \bar{p} + \frac{v_{L\beta}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \tilde{p} + \frac{v_{L\alpha}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \bar{q} + \frac{v_{L\alpha}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \tilde{q} \quad (6)$$

در این رابطه \bar{p}, \tilde{p} به ترتیب قدرت اکتیو متوسط و

قدرت اکتیو نوسانی بار و \bar{q}, \tilde{q} به ترتیب قدرت

راکتیو متوسط و قدرت راکتیو نوسانی بار می باشند. به

منظور داشتن جریانهای سینوسی باضریب توان واحد

در طرف منبع بایستی اکتیو فیلتر جملات دوم، سوم و

چهارم جریانهای روابط (5) و (6) را جبران سازی نماید.

در اینجا دو روش کنترلی جهت تولید جریانهای

مرجع اینورتر منبع ولتاژ بیان می شود ۱- روش مستقیم

کنترل جریان ۲- روش غیر مستقیم کنترل جریان

۴. روش کنترل جریان مستقیم اینورتر منبع ولتاژ:

در روش کنترل جریان مستقیم سیگنالهای

سویچینگ اکتیو فیلتر از مقایسه جریانهای مرجع

محاسبه شده ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) و جریانهای خروجی

اندازه گیری شده اکتیو فیلتر (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc})

بدست می آید. جریانهای مرجع در حوزه $\alpha\beta$ بدین

صورت از معادلات (5) و (6) حاصل می شوند:

$$i_{ca}^* = \left(\frac{-v_{L\beta}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \bar{q} + \frac{v_{L\alpha}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \tilde{p} + \frac{-v_{L\beta}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \tilde{q} \right) \quad (7)$$

$$i_{cb}^* = \left(\frac{v_{L\alpha}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \bar{q} + \frac{v_{L\beta}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \tilde{p} + \frac{v_{L\alpha}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} \tilde{q} \right) \quad (8)$$

۳. الگوریتم کنترلی و دیده گاهای عملی جهت

جبران سازی هارمونیکها و توان راکتیو:

پرفسور Akagi et al مفاهیم جدیدی از توانهای

اکتیو و راکتیو لحظه ای که در طول پریود گذرا و برای

شکل موجهای کلی ولتاژ و جریان معتبر می باشند،

معرفی نمود. این تئوری علاوه بر سیستمهای سه فاز

سه سیمه در سیستمهای سه فاز چهار سیمه نیز اعتبار

دارد.

تبدیل $\alpha\beta o$ یک تبدیل جبری از ولتاژها

و جریانها در مرجع ساکن می باشد که به تبدیل

Clarke نیز مشهور می باشد. تبدیل $\alpha\beta o$ ولتاژهای

سه فاز و تبدیل عکس آن توسط روابط زیر بیان

می شود.

$$\begin{bmatrix} v_{Lo} \\ v_{L\alpha} \\ v_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{Lo} \\ i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

یکی از امتیازات تبدیل $\alpha\beta o$ جداسازی مولفه

توالی صفر در یک محور جداگانه o می باشد

(متغیرهای i_o, v_o). توانهای لحظه ای تعریف شده در

مرجع $\alpha\beta o$ عبارتند از توان اکتیو p و توان راکتیو q و

توان مولفه توالی صفر P_o که این توانها توسط رابطه

زیر داده می شود:

$$\begin{bmatrix} P_o \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{Lo} & 0 & 0 \\ 0 & v_{L\alpha} & v_{L\beta} \\ 0 & -v_{L\beta} & v_{L\alpha} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{Lo} \\ i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

بدین ترتیب می توان جریانهای بار در مرجع $\alpha\beta$

را بدین صورت محاسبه نمود:

ملاحظه می‌شود که جریانهای طرف منبع بعد از جبران سازی دارای جهشهایی (spikes) هنگام تغییرات پله ای بار، می‌باشد. این موضوع به خاطر فقدان جبران سازی لحظه ای هارمونیکها و همچنین عدم اطلاع کنترلر جریان PWM از شکل واقعی جریانهای منبع می‌باشد. و این مسئله از آنجا ناشی میشود که کنترل جریان بر اساس محاسبه جریانهای مرجع (i_{ca}^* , i_{cb}^* , i_{cc}^*) و اندازه گیری جریانهای خروجی اکتیو فیلتر (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) بنا نهاده شده است.

۵. روش کنترل جریان غیر مستقیم:

در روش کنترل جریان غیر مستقیم سیگنالهای سوئیچینگ اکتیو فیلتر از مقایسه جریانهای مرجع محاسبه شده (i_{sa}^* , i_{sb}^* , i_{sc}^*) و جریانهای اندازه گیری شده طرف منبع (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) بدست می‌آید. با توجه به اینکه منبع فقط بایستی فقط توان اکتیو مورد نیاز بار را تامین نماید، جریانهای مرجع در حوزه $\alpha\beta$ بدین صورت از معادلات (۳) و (۴) حاصل می‌شوند:

$$i_{sa}^* = \frac{v_{L\alpha}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} p \quad (9)$$

$$i_{sb}^* = \frac{v_{L\beta}}{v_{L\alpha}^2 + v_{L\beta}^2} p \quad (10)$$

اکتیو فیلتر شکل ۱ توسط الگوریتم کنترلی جریان غیر مستقیم اصلاح شده، تست می‌شود و نتایج حاصله در شکل ۳ آورده می‌شود.

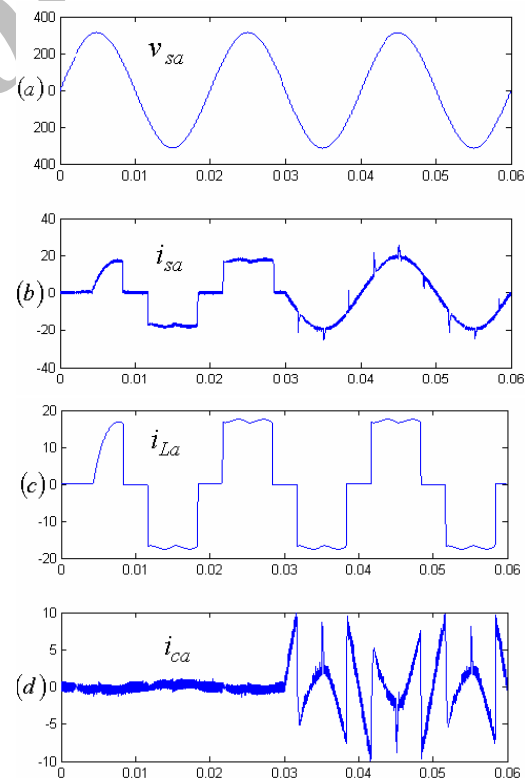
۶. بهبود الگوریتم کنترلی جریان غیر مستقیم:

توان حقیقی (P) بکار رفته در معادلات (۹) و (۱۰) شامل دو مولفه می‌باشد، مولفه dc (P) و مولفه ac

جملات دوم و سوم عبارتهای (۷) و (۸) از توان هارمونیک سرچشمه می‌گیرند درحالی که عبارت اول از متوسط توان راکتیو مورد نیاز بار تاثیر می‌پذیرد. بدین ترتیب اکتیو فیلتر بایستی کل توان هارمونیک و قدرت متوسط مورد نیاز بار را تامین نماید. علامت منفی پشت پارانتزها جهت تزریق توان از سوی اکتیو فیلتر به بار را بیان می‌نماید.

در تئوری توان راکتیو پایه گذاری بر مبنای الگوریتم کنترل جریان مستقیم توسط Akagi et al در مراجع [1,3] جمله دوم عبارتهای (۷) و (۸) جبران سازی نمی‌شود.

اکتیو فیلتر شکل ۱ توسط الگوریتم کنترلی جریان مستقیم اصلاح شده تست می‌شود و نتایج حاصله در شکل ۲ آورده می‌شود.

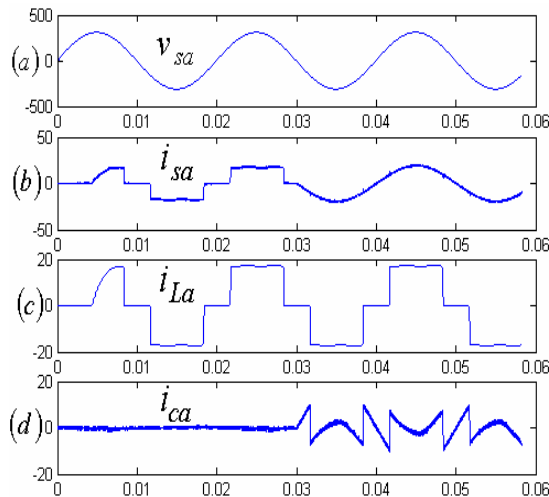


شکل ۲: (a) ولتاژ فاز a (ولت) و (b) جریان طرف منبع فاز a (آمپر) $THD = 10.2\%$ (c) جریان بار فاز a (آمپر) $THD = 29.9\%$ (d) جریان تزریقی اکتیو فیلتر فاز a (آمپر)

$$i_{sa}^* = \frac{v_{La}}{v_{La}^2 + v_{L\beta}^2} \bar{p} \quad (11)$$

$$i_{s\beta}^* = \frac{v_{L\beta}}{v_{La}^2 + v_{L\beta}^2} \bar{p} \quad (12)$$

اکتیو فیلتر شکل ۱ توسط الگوریتم کنترلی جریان مستقیم بهبود یافته تست می‌شود و نتایج حاصله در شکل ۴ آورده می‌شود.



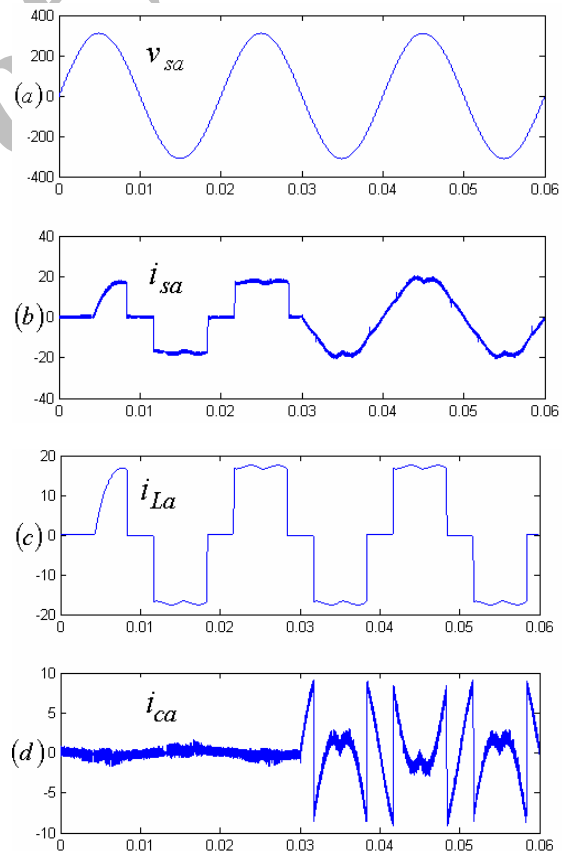
شکل ۴: (a) ولتاژ فاز a (ولت) (b) جریان طرف منبع فاز a (آمپر) (c) جریان بار فاز a (آمپر) $THD = 3.2\%$ (d) جریان تزریقی اکتیو فیلتر فاز a (آمپر) $THD = 29.9\%$

۷. الگوریتم کنترلی بهبود یافته جهت کنترل

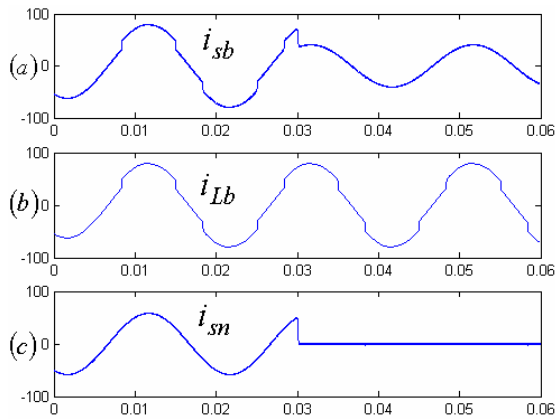
توپولوژی جدید اکتیو فیلتر

الگوریتم کنترلی بهبود یافته جهت کنترل توپولوژی جدید اکتیو فیلتر پیشنهادی که در شکل ۵ نشان داده شده است، بکار گرفته شده است. بار در این حالت ترکیبی از بارهای خطی / غیر خطی و نامتعادل می‌باشد. نتایج شبیه سازی در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. از نتایج شبیه سازی چنین بر می‌آید که با بکار بردن الگوریتم کنترلی بهبود یافته جهت کنترل توپولوژی جدید اکتیو فیلتر می‌توان در سیستمهای سه فاز چهار سیمه به جبران سازی

(\tilde{P}) به منظور داشتن جریانهای سینوسی و هم فاز با ولتاژهای متناظر بایستی مولفه dc (\bar{P}) توان حقیقی از سوی منبع تامین شود و مجموع توانهای هارمونیک و متوسط توان راکتیو $\tilde{q} + \tilde{p} + \tilde{q}$ مورد نیاز بار از سوی اکتیو فیلتر به بار جاری شود. با توجه به جریانهای طرف منبع شکل ۳ ملاحظه میشود که این جریانها شامل اعوجاج می‌باشند این اعوجاج به خاطر تغذیه قسمت هارمونیک توان اکتیو مورد نیاز بار (\tilde{P}) توسط منبع می‌باشد. بدین ترتیب معادلات (۹) و (۱۰) به این صورت اصلاح می‌شوند:



شکل ۳: (a) ولتاژ فاز a (ولت) (b) جریان طرف منبع فاز a (آمپر) (c) جریان بار فاز a (آمپر) $THD = 7\%$ (d) جریان تزریقی اکتیو فیلتر فاز a (آمپر) $THD = 29.9\%$

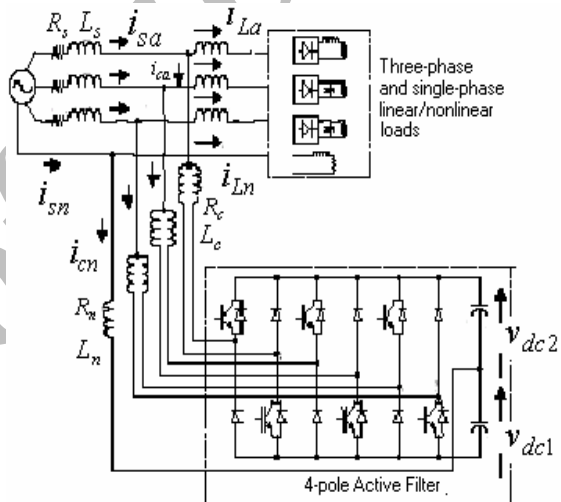


شکل ۷: (a) جریان طرف منبع فاز b (آمپر) (b) جریان بار فاز b (آمپر) (c) جریان سیم خنثی طرف منبع (آمپر)

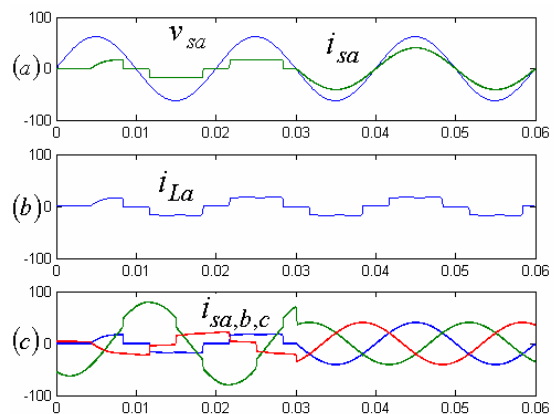
۸. نتیجه گیری:

در این مقاله با استفاده از تئوری توان راکتیو، الگوریتم کنترلی جدیدی جهت استخراج جریانهای مرجع اکتیو فیلتر استخراج گردید. الگوریتم کنترلی جدید و بهبود یافته، نیازی به مدار کنترلی PLL (phase lock loop) ندارد و فقط بر اساس اندازه گیری جریانها و ولتاژهای بار عمل می نماید. این الگوریتم کنترلی حتی تحت شرایط نامتعادلی ولتاژهای شبکه به نحو مطلوبی عمل می نماید. الگوریتم کنترلی جدید به آرایش جدیدی از اکتیو فیلتر موازی اعمال شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که آرایش جدید اکتیو فیلتر موازی با الگوریتم کنترلی بهبود یافته بطرز مطلوبی عمل می نماید. ملاحظه شد که با این شیوه جبران سازی جریانهای طرف منبع هم فاز با ولتاژهای متناظر، متعادل و سینوسی می شوند. همچنین جریان سیم خنثی بطور کامل جبران سازی می شود و به مقدار صفر تنظیم می شود.

هارمونیکها و توان راکتیو، اصلاح ضریب توان و متعادل سازی بار پرداخت. با توجه به شکل ملاحظه می شود از لحظه ای که اکتیو فیلتر به شبکه سوچ می شود جریانها سینوسی و هم فاز با ولتاژهای متناظر می شوند. همچنین جریان سیم خنثی ناشی از نامتعادلی جریانهای سه فاز، بعد از جبران سازی صفر می شود. بدین ترتیب با این شبیه سازی مفید بودن توپولوژی جدید اکتیو فیلتر پیشنهادی با الگوریتم کنترلی بهبود یافته معلوم می گردد.



شکل ۸: آرایش جدید اکتیو فیلتر موازی به همراه بارهای خطی و غیر خطی نامتعادل. جهت استفاده در سیستمهای سه فاز چهار سیمه



شکل ۹: (a) ولتاژ فاز a (ولت) و جریان طرف منبع فاز a (آمپر) (b) جریان بار فاز a (آمپر) (c) جریانهای سه فاز طرف منبع (آمپر)

۹. مراجع:

- [1]. H.Akagi, Y. Kanazawa, " Instantaneous Reactive Power Compensator Comperising Switching Devices Without Energy Storage components," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.IA-20 , no.3, 1984, PP. 625-630
- [2]. H.Akagi and A.Nabae, " The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions", The Journal of ETEP, vol.3,no.1,January/February 1993,pp.37-31.
- [3]. L. Gyugyi, "Reactive power generation and control by thyristor circuits" , IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-15, no. 5, September/October 1978.
- [4]. M. Rastogi, N. Mohan , and A. A.Edris, " Filtering of harmonics currents and damping of resonances in power systems with a hybrid-active filter", IEEE Applied Power Electronics Conference(APEC), Dallas/USA 1995,pp. 607-612
- [5]. S. Bhattacharya, A. Veltman, D. Divan and R. D. Lorenz, " Flux based active filter controller", IEEE Industry Application Society Annual meeting , Orlando/USA 1995,pp. 2483-2491.
- [6]. Bhim Singh, Brij N. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "DSP-based implementation of an improved control algorithm of a three-phase active filter for compensation of unbalanced non-linear loads",The Journal of ETEP, vol.10,no.1,January/February 2000,pp.29-34
- [7]. Bhim Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, "A new control approach to three-phase active filter for harmonics and reactive power compensation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, no. 1, February 1998, 133-138.