



کاربرد روش فیلتر القایی فعال جهت بهبود کیفیت توان در شبکه‌های توزیع

شروین صمیمیان طهرانی^۱، پیمان سلمانپور بندقییری^۲، محمد کمندی^۳، احمد فلاحتیان^۴، و مونا حقانی حقیقی^۵

۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران

(*Sh.samimian@aut.ac.ir*)

۲ کارشناسی ارشد، شرکت برق منطقه‌ای خوزستان، ایران

(*Psalman@aut.ac.ir*)

۳ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران

(*Kamandi.mohammad@aut.ac.ir*)

۴ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران

(*Falahatian@aut.ac.ir*)

۵ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران

(*Haghani_mona@yahoo.com*)

چکیده

این مقاله یک روش فیلتر القایی فعال را برای بهبود کیفیت توان نه تنها برای شبکه توزیع، بلکه برای سیستم منبع تغذیه (بار غیرخطی) متصل به شبکه پیشنهاد می‌کند. در ابتدا، یک شماتیک مداری جدید برای اجرای روش فیلتر القایی فعال ارائه شده است که شامل یک ترانسفورماتور فیلتر شده القایی و شاخه مداری کاملاً تنظیم شده توسط یک اینورتر می‌باشد. یک مطالعه موردی به منظور بررسی ویژگی‌های عملکرد روش فیلتر القایی فعال مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های تجربی و مطالعات موردی نشان می‌دهد که روش فیلتر القایی فعال می‌تواند به طور مؤثر از شارش مولفه‌های هارمونیک به سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور جلوگیری کند. از آنجا که مولفه‌های هارمونیک در نزدیکی منبع هارمونیک دمپ می‌شوند، استفاده از این روش برای تغذیه بار غیرخطی و برای ترانسفورماتور مبدل مناسب است. علاوه بر این، از آنجا که جریان هارمونیک نزدیک منبع هارمونیک محدود می‌شود، کیفیت توان شبکه توزیع را می‌توان کاملاً تضمین نمود.

واژه‌های کلیدی: اینورتر منبع ولتاژ، شبکه توزیع، هارمونیک، فیلتر القایی، کیفیت توان.



Application of Inductively Active Filtering Method for Power-Quality Improvement of Distribution Networks

Shervin, Samimian Tehrani ¹; Peyman, Salmanpour Bandaghi ²; Mohammad, Kamandi ³;
Ahmad, Falahatian ⁴; Mona, Haghani Haghghi ⁵

- 1- Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
(*Sh.samimian@aut.ac.ir*)
- 2- Electrical Engineering, Khuzestan Regional Electricity Company, Ahwaz, Iran
(*Psalman@aut.ac.ir*)
- 3- Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
(*Kamandi.mohammad@aut.ac.ir*)
- 4- Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
(*Falahatian@aut.ac.ir*)
- 5- Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
(*Haghani_mona@yahoo.com*)

Abstract

This paper proposes an inductively active filtering (IAF) method to comprehensively improve the power quality for not only the distribution network but also the power-supply system (nonlinear load) connected to the network. At first, a new main-circuit topology for implementing the IAF method is presented, which consists of an inductively filtered transformer and a fully tuned branch controlled by an inverter. A case study is investigated in detail to illustrate the operating characteristics of the IAF method. Both the theoretical and the case studies show that the IAF method can effectively prevent harmonic components from flowing into the primary winding of the transformer. Since the harmonic components are suppressed near the harmonic source, it is good for the power-supply system and the converter transformer. Besides, since the harmonic flow is limited to near the harmonic source, the power quality of the public network can be guaranteed completely.

Keywords: *Voltage Source Inverter, Distribution Network, Harmonic, Inductive Filtering Method, Power Quality.*



۱- مقدمه

در سال های اخیر، تجهیزات الکترونیک قدرت بیشتری در شبکه های توزیع استفاده و نصب شده اند برای مثال، انرژی باد و انرژی خورشیدی توسط مبدل های منبع جریان و یا مبدل های منبع ولتاژ به شبکه متصل شده اند. اغلب شبکه منبع تغذیه ای برای انواع مختلف بارهای غیرخطی مانند یکسوسازهای دیودی / تائرسوری سه فاز برای درایوهای موتوری ولتاژ متوسط یا الکترولیز صنعتی قدرت بالا فراهم می نماید [۱]. از آنجایی که عملکرد تجهیزات و دستگاه های الکترونیک قدرت ذاتاً غیرخطی است، به ناچار مسئله و مشکلات کیفیت توان در شبکه توزیع و سیستم تغذیه توان متصل شده به شبکه توزیع و همچنین به شبکه وجود دارد.

از آنجا که هیچ طرح موثری برای بهبود کیفیت توان فعال در سمت الکترونیک قدرت ترانسفورماتور وجود ندارد لذا تمام مولفه های هارمونیک و توان راکتیو آزادانه سیلان می یابند که باعث می شود در سیم پیچ های ترانسفورماتور یک سری از مشکلات مانند تلفات اضافی، افزایش دما، لرزش و نویز ایجاد شود [۲].

برای غلبه بر این مشکلات، یک روش فیلترالقایی در سال های اخیر پیشنهاد شده است. این روش می تواند از سیلان مولفه های توان راکتیو و هارمونیک به داخل سیم پیچ (شبکه) اولیه ترانسفورماتور، جلوگیری نماید و بدین ترتیب به طور موثر این روش می تواند مشکلات کیفیت توان در سیستم تغذیه را حل نماید. در اصل این روش با استفاده از تعادل پتانسیل مغناطیسی هارمونیک ترانسفورماتور جهت انجام فیلتراسیون قدرت برای بدست آوردن عملکرد فیلترینگ خوب به یک پیش شرط نیاز داریم. برای تحقق این پیش شرط، مرتبه جریان هارمونیک شاخه FT^۱ متصل شده به تپ سیم پیچ باید به رزونانس (تشدید) سری در مرتبه فرکانس هارمونیک برسد. تا به حال، از مدار خازن-راکتور برای ایجاد یک چنین پیش شرطی استفاده می شد. با این حال در عمل، با توجه به خطای اولیه طراحی و دیگر عوامل موثر، شاخه FT نمی تواند به طور کامل به رزونانس برسد. علاوه بر این، روش فعلی فیلتر کردن القایی تنها می تواند مرتبه های هارمونیک ثابتی را توسط طراحی امپدانس ثابت برای ترانسفورماتور و شاخه FT متوقف نماید. بنابراین سیستم فیلترالقایی کنونی براساس مشخصات هارمونیک بار غیرخطی طراحی شده است. اگر بار غیرخطی هارمونیک های متنوعی و یا مشخصه هارمونیک ناشناخته ای را تولید کند، عملکرد فیلتر نمی تواند به طور کامل تضمین شده باشد [۳-۴].

برخلاف روش فیلترینگ فوق، این گزارش یک روش فیلتر القایی فعال^۲ پیشنهاد می دهد که ترکیبی از مزایای روش فیلترالقایی و روش فیلتر فعال است و می تواند سبب بهبود کیفیت توان در شبکه توزیع و سیستم تغذیه توان خودش شود. بسیار مهم است که به صورت آنلاین می توان پیگیری وضعیت تغییر در تولید هارمونیک توسط بار غیرخطی بوده و همیشه عملکرد فیلترینگ مولفه های هارمونیک را به شکل موثر، حفظ کرد [۵-۶].

۲- پیکربندی (شماتیک) مدار اصلی

شکل های ۱، ۲ و ۳ شماتیک یک فیلتر قدرت فعال^۳ متداول را با یک فیلتر القایی فعال پیشنهاد شده، مقایسه می کند. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می کنید، فیلتر قدرت فعال متداول به طور کلی در نقطه کوپلینگ مشترک^۴ پیکربندی شده و معمولاً توسط یک ترانسفورماتور متصل شده به یک رابط به سیستم قدرت متصل می شود. برای بارهای غیرخطی، مانند یک بار DC صنعتی قدرت بالا، به یک ترانسفورماتور مبدل جهت ایزوله کردن (جداسازی) سیستم تغذیه DC از شبکه توزیع نیاز داریم.

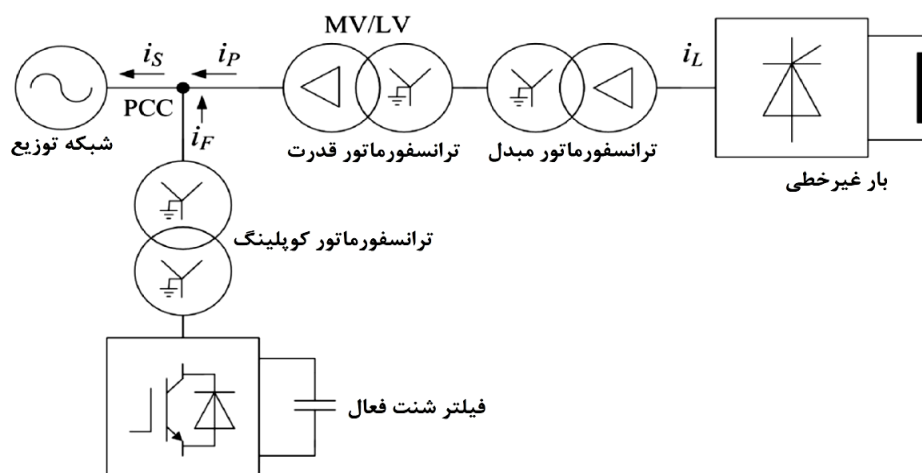
¹ Fully Tuned

² IAF: Inductively Active Filtering

³ APF: Active Power Filtering

⁴ PCC: Point of Common Coupling

به طور کلی، یک ترانسفورماتور با سیم پیچ های ولتاژ متوسط و ولتاژ ضعیف^۱ برای اتصال بار غیرخطی به شبکه توزیع ولتاژ متوسط استفاده می شود.



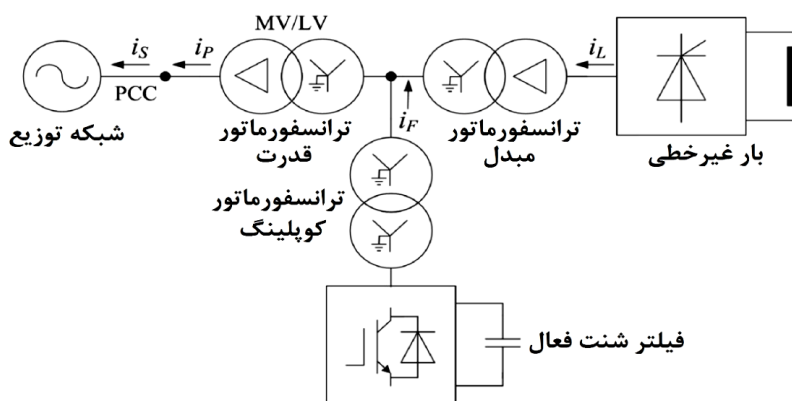
شکل ۱: مقایسه شماتیک های مداری؛ فیلتر قدرت فعال متداول که در سمت نقطه کوپلینگ مشترک نصب شده است

برای این کار از یک طرح سیم بندی استفاده می شود. هنگام تجزیه و تحلیل جریان هارمونیک متوجه می شویم که شارش جریان بار به داخل PCC از طریق ترانسفورماتور مبدل و ترانسفورماتور قدرت انجام می شود. سیلان مولفه های توان راکتیو و هارمونیک موجب تلفات اضافی، افزایش دما، لرزش و نویز در این دو ترانسفورماتور می شود. در عمل، این ترانسفورماتورها به طور کلی در مناطق مختلفی واقع شده اند و سیلان هارمونیک ها در سیستم منبع تغذیه ممکن است باعث از بین رفتن محیط الکترومغناطیسی سیستم و مناطق اطراف می شود.

علاوه بر این، شکل ۲ پیکربندی دیگری را نشان می دهد که در آن فیلتر قدرت فعال در سمت ثانویه ترانسفورماتور قدرت نصب شده و ترانسفورماتور مبدل در سمت اولیه است. اگر چه این پیکربندی می تواند به طور موثری مشکلات کیفیت توان در ترانسفورماتور قدرت را حل نماید اما ترانسفورماتور مبدل هنوز باید با تمام مشکلات کیفیت توان که ناشی از بار غیرخطی است، روبرو باشد. در این جا باید توجه داشت که فرآیند کموتاسیون مبدل منبع جریان^۲ احتیاج به پشتیبانی راکتانس کموتاسیون دارد که توسط ترانسفورماتور مبدل فراهم شده است. وقتی فیلتر قدرت فعال به طور مستقیم با پل مبدل موازی است، فرآیند کموتاسیون ممکن است توسط امپدانس فیلتر قدرت فعال تحت تاثیر قرار بگیرد، بنابراین در یک طرح متداول مشکلات کیفیت توان برای ترانسفورماتور مبدل اجتناب ناپذیر است.

¹ MV/LV: Medium voltage/low voltage

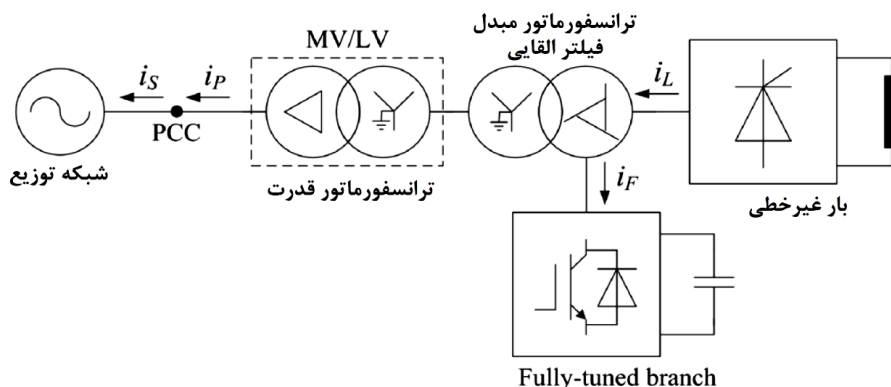
² CSC: Current Source Converter



شکل ۲: مقایسه شماتیک‌های مداری؛ فیلتر قدرت فعال متداول که در سمت اولیه ترانسفورماتور مبدل نصب شده- است

برخلاف پیکربندی معمولی فیلتر قدرت فعال، شکل ۳ توپولوژی پیشنهاد شده برای فیلتر القایی فعال را نشان می‌دهد. در این شکل، یک ترانسفورماتور مبدل فیلتر القایی بین بار غیر خطی و ترانسفورماتور قدرت قرار گرفته است. این ترانسفورماتور مبدل یک طرح سیم بندی مخصوص دارد. سیم پیچ ثانویه آن به صورت دلتا (مثلی) توسعه یافته است. بین سیم پیچ های توسعه یافته و سیم پیچ های مثلی، یک نقطه اتصال به شاخه FT وجود دارد. شاخه FT بوسیله یک اینورتر که می تواند غالباً تمام مولفه های هارمونیک سیلان یافته در این شاخه را جذب نماید، کنترل می شود. تحت این شرایط، پتانسیل مغناطیسی هارمونیک بین سیم پیچ های توسعه یافته و سیم پیچ های مثلی متعادل شده است. بنابراین مولفه های هارمونیک خیلی کمی در سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور مبدل وجود دارند. به این ترتیب، مولفه های هارمونیک در نزدیک بار غیر خطی (منبع هارمونیک) متوقف می شوند. این بدان معنی است که مسیر جریان هارمونیک در یک ناحیه کوچک محدود شده و به طور چشمگیری اثرات هارمونیک ها را بر سیستم تغذیه کاهش می دهد [۷].

علاوه بر این، از آن جایی که جریان در سیم پیچ اولیه یک موج سینوسی خوب است، ما می توانیم حتی سیم پیچی ولتاژ فشار متوسط (Medium Voltage) ترانسفورماتور قدرت را با سیم پیچی اولیه ادغام نماییم تا بدون نیاز به پیکربندی، یک ترانسفورماتور قدرت مستقل برای اتصال به شبکه توزیع بوجود آوریم.



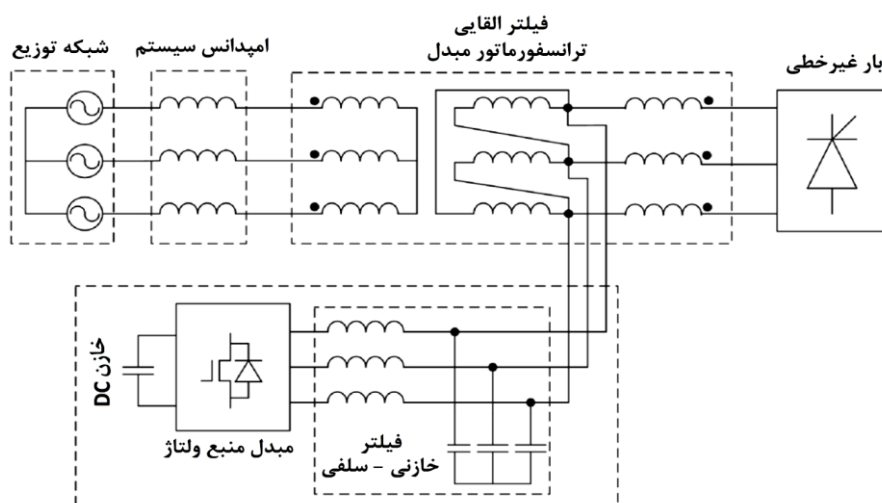
شکل ۳: مقایسه شماتیک‌های مداری؛ فیلتر القایی فعال پیشنهادی هماهنگ شده با ترانسفورماتور مبدل

۳- مدل سازی ریاضی و تجزیه و تحلیل مکانیزم فیلترینگ

مفهوم فیزیکی روش فیلتر القایی فعال را می توان به سادگی به صورت زیر توضیح داد. شاخه FT مولفه های هارمونیک جریان سمت بار را تشخیص می دهد. مولفه های هارمونیک را که به درون شاخه سیلان می یابند، پیش بینی می کند و مولفه های هارمونیک مخالفی را برای از بین بردن آن ها تولید می کند. در همان زمان، وقتی مولفه های هارمونیک به داخل سیم پیچ توسعه یافته ثانویه سیلان می یابند، سیم پیچ مثلی ثانویه در مجاری مولفه های متناظر باعث تعادل آن ها شده و در نهایت، هیچ کدام از آن مولفه ها در سیم پیچی اولیه حضور نخواهند داشت [۸].

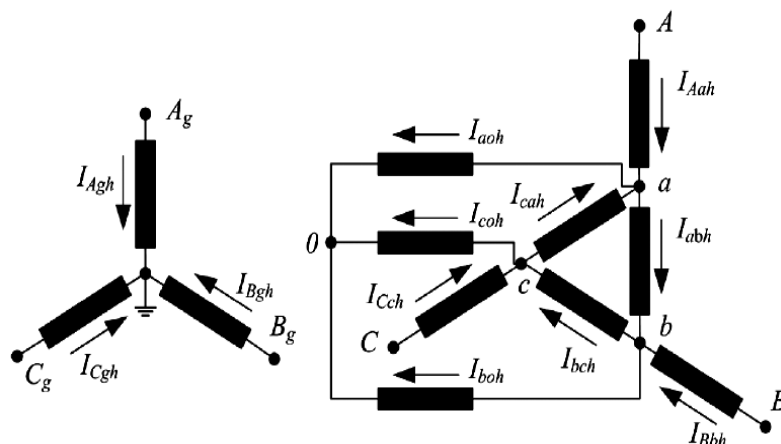
۳-۱- مدل مدار معادل

شکل ۴ طرح سیم کشی فیلتر القایی فعال را نشان می دهد. در این طرح، سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور مبدل به صورت سیم بندی مثلی توسعه یافته تبدیل می شود. برای هر فاز، یک نقطه اتصال و پیوند وجود دارد که با شاخه FT کنترل شده، بین سیم پیچ مثلی و توسعه یافته متصل شده است. این سیم کشی ویژه جهت ایجاد تعادل و موازنه در پتانسیل مغناطیسی هارمونیک در اطراف سیم پیچ ثانویه می باشد. بنابراین جریان ها نمی توانند به داخل سیم پیچ (شبکه) اولیه القا شوند.



شکل ۴: طرح سیم کشی فیلتر القایی فعال

با توجه به شکل ۴، مدل مدار معادل سه فاز برای ترانسفورماتور مبدل فیلتر القایی و شاخه FT در شکل ۵ نشان داده شده است. در این مدل، هر سیم پیچ ترانسفورماتور معادل با یک امپدانس است و شاخه FT می تواند متناظر با یک امپدانس کنترل شده در نظر گرفته شود. برای راحتی تجزیه و تحلیل مکانیزم فیلترینگ، جهت جریان های هارمونیک و اصلی از بار به سمت شبکه را توسط فلش (پیکان) نمایش داده می شود.



شکل ۵: مدار معادل سه فاز

۳-۲- مدل ریاضی پایه

بر اساس نظریه ترانسفورماتورهای چندسیم پیچه و ترکیب مدل مدار معادل نشان داده شده در شکل ۵، معادلات ولتاژ در فرکانس های هارمونیک و اصلی را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

(۱)

$$V_{Aah} - k_{12}^{-1} V_{agh} = -k_{12} I_{Agh} Z_{h12} - K_{32} I_{abh} Z_{2h}$$

$$V_{Aah} - K_{32}^{-1} V_{abh} = -k_{32} I_{abh} Z_{h23} - k_{12} I_{agh} Z_{2h}$$

$$V_{Bbh} - K_{12}^{-1} V_{Bgh} = -k_{12} I_{Bgh} Z_{h21} - k_{32} I_{bch} Z_{2h}$$

$$V_{Bbh} - K_{32}^{-1} V_{bch} = -k_{32} I_{bch} Z_{h23} - k_{12} I_{Bgh} Z_{2h}$$

$$V_{Cch} - K_{12}^{-1} V_{Cgh} = -k_{12} I_{Cgh} Z_{h21} - k_{32} I_{cah} Z_{2h}$$

$$V_{Cch} - K_{32}^{-1} V_{cah} = -k_{32} I_{cah} Z_{h23} - k_{12} I_{Cgh} Z_{2h}$$

در جایی که Z_{h21} و Z_{h23} از طریق آزمایش اتصال کوتاه و Z_{2h} توسط محاسبات بر اساس Z_{h21} ، Z_{h23} و Z'_{h13} (علامت ' به معنای مقدار امیدانسی است که در سمت سیم پیچ توسعه یافته ثانویه کاهش یافته است) بدست می آیند:

(۲)

$$Z_{2h} = \frac{1}{2} (Z_{h21} + Z_{h23} - Z'_{h13})$$

با توجه به اصل تعادل پتانسیل مغناطیسی ترانسفورماتور و چشم پوشی از جریان های القایی بسیار کم، معادلات جریان در فرکانس های هارمونیک و اصلی به صورت زیر محاسبه می شود:

(۳)

$$I_{Aah} + K_{12} I_{Agh} + K_{32} I_{abh} = 0$$

$$I_{Bbh} + K_{12} I_{Bgh} + k_{32} I_{bch} = 0$$

$$I_{Cch} + k_{12} I_{Cgh} + k_{32} I_{cah} = 0$$



مطابق با قانون قانون جریان کیرشهف^۱، معادلات زیر برای نمایش روابط بین جریان سمت بار و جریان سیم پیچ و همچنین بین جریان سیم پیچ و جریان شاخه FT به ترتیب بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 I_{Aah} &= I_{ALh} \\
 I_{Aah} &= I_{abh} + I_{a0h} - I_{cah} \\
 I_{Bbh} &= I_{BLh} \\
 I_{Bbh} &= I_{bch} + I_{b0h} - I_{abh} \\
 I_{Cch} &= I_{CLh} \\
 I_{Cch} &= I_{cah} + I_{c0h} - I_{bch} \\
 I_{abh} + I_{bch} + I_{cah} &= 0 \\
 I_{Aah} + I_{Bbh} + I_{Cch} &= 0
 \end{aligned} \tag{۴}$$

در جایی که I_{ALh} ، I_{BLh} و I_{CLh} می‌توانند برای بیان مشخصات هارمونیک بار غیرخطی استفاده شوند. بعلاوه با توجه به قانون ولتاژ کیرشهف^۲، معادلاتی که بیانگر رابطه بین سیم پیچ ترانسفورماتور و ولتاژ شاخه FT می‌باشند، به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 V_{abh} &= -V_{b0h} + V_{a0h} \\
 V_{bch} &= -V_{c0h} + V_{b0h} \\
 V_{cah} &= -V_{a0h} + V_{c0h} \\
 V_{a0h} &= I_{a0h} Z_{Fah} \\
 V_{b0h} &= I_{a0h} Z_{Fbh} \\
 V_{c0h} &= I_{c0h} Z_{Fch}
 \end{aligned} \tag{۵}$$

در جایی که Z_{Fch} ، Z_{Fbh} ، Z_{Fah} توسط اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده می‌باشند. معادلات (۱)-(۵) بیانگر ساختار مدل ریاضی برای ترانسفورماتور فیلترالقایی و شاخه FT می‌باشند. براساس این مدل، می‌توان به آسانی به بررسی ویژگی‌های عملیاتی و خصوصیات ویژه فیلترینگ در روش فیلتر القایی فعال پرداخت. همچنین به کمک این مدل می‌توان یک راهنما برای هماهنگی امپدانس و طراحی کنترل کننده سیستم فیلتر القایی فعال فراهم نمود.

۳-۳- مشخصات فیلتر

با توجه به معادلات (۱)-(۵)، جریانی که از سمت بار به سمت سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور سیلان می‌یابد را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned}
 I_{Agh} &= -\frac{k_{12}(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{12}k_{32}Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{ALh} + \frac{k_{12}k_{32}Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{BLh} \\
 I_{Bgh} &= -\frac{k_{12}(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{12}k_{32}Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{BLh} + \frac{k_{12}k_{32}Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{CLh} \\
 I_{Cgh} &= -\frac{k_{12}(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{12}k_{32}Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{CLh} + \frac{k_{12}k_{32}Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{ALh}
 \end{aligned} \tag{۶}$$

¹ KCL: Kirchhoff's Current Law

² KVL: Kirchhoff's Voltage Law



به طور مشابه، جریانی که از سمت بار به سمت سیم پیچ مثلثی ثانویه سیلان می یابد را نیز می توان بدست آورد:

$$\begin{aligned}
 I_{abh} &= -\frac{k_{32}Z_{1h} - k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{ALh} - \frac{k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{BLh} \\
 I_{bch} &= -\frac{k_{32}Z_{1h} - k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{BLh} - \frac{k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{CLh} \\
 I_{cah} &= -\frac{k_{32}Z_{1h} - k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{CLh} - \frac{k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{ALh}
 \end{aligned} \quad (7)$$

با توجه به معادله (۶)، می توان متوجه شد که عملکرد فیلتر در روش فیلتر القایی فعال وابسته به معادلات امیدانس در سیم پیچ مثلثی ثانویه و شاخه FT است (Z_{Fh} و Z_{3h}). در حالت ایده آل، برای اطمینان از این که جریان هارمونیک مرتبه h ام به داخل سیم پیچی شبکه سیلان نمی یابد، می توان گفت، $I_{Agh} = I_{Bgh} = I_{Cgh} = 0$ ، پارامترهای امیدانسی در فرکانس هارمونیک مرتبه h ام باید محدودیت زیر را داشته باشند:

$$Z_{3h} = Z_{Fh} = 0 \quad (8)$$

در واقع، معادله (۸) یک نمونه کامل از توقف و ممانعت از سیلان هارمونیک است. در عمل ما تنها به ضمانت در فرکانس اصلی نیاز داریم، راکتانس های معادل سیم پیچ ثانویه و شاخه FT تقریباً برابر صفر در نظر گرفته می شود ($L_4=0$ و $L_3=0$) یا این دو راکتانس را بسیار کمتر از راکتانس معادل سیم پیچ شبکه در نظر گرفت. ($L_F \ll L_1$ و $L_3 \ll L_1$) پس از آن می توان به عملکرد موثر فیلترینگ دست یافت. علاوه بر این، با توجه به اجرای روش فیلتر القایی فعال، و مطابق با معادلات (۴)، (۷) و (۸)، معادلاتی در مورد تعادل پتانسیل مغناطیسی در فرکانس هارمونیک مرتبه h ام به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned}
 I_{abh} &= -k_{32}^{-1} I_{Aah} \\
 I_{bch} &= -k_{32}^{-1} I_{Bbh} \\
 I_{cah} &= -k_{32}^{-1} I_{Cch}
 \end{aligned} \quad (9)$$

معادله (۹) نشان می دهد که پتانسیل مغناطیسی هارمونیک ترانسفورماتورمبدل فیلترالقایی بین سیم پیچ مثلثی و توسعه یافته ثانویه متعادل شده است و سیم پیچی (شبکه) اولیه در این تعادل پتانسیل مغناطیسی هارمونیک شرکت نمی کند. به عبارت دیگر، جریان های هارمونیک نمی توانند به داخل سیم پیچی شبکه سیلان نمایند و آن ها را از سیم پیچی شبکه و سمت شبکه جدا کرده اند.

جدول ۱: فهرست علائم

| علائم | توضیحات |
|-----------------------------|---|
| i_s | جریان منبع |
| i_p | جریان در سمت اولیه یک ترانسفورماتور قدرت |
| i_F | جریان خروجی فیلتر فعال قدرت یا شاخه کاملاً تنظیم شده |
| i_L | جریان در سمت بار غیر خطی |
| K_{12}, K_{32} | نسبت تبدیل بین سیم پیچ شبکه و سیم پیچ توسعه یافته و همچنین سیم پیچ مثلثی (دلتا) و سیم پیچ توسعه یافته |
| $V_{Aah}, V_{Bbh}, V_{Cch}$ | ولتاژ ثانویه سه فاز سیم پیچ توسعه داده شده ثانویه |



| | |
|---|-----------------------------|
| ولتاژ سه فاز سیم پیچ مثلثی (دلتا) ثانویه | $V_{abh}, V_{bch}, V_{cah}$ |
| ولتاژ سه فاز سیم پیچ اولیه | $V_{Agh}, V_{Bgh}, V_{Cgh}$ |
| ولتاژ سه فاز شاخه FT | $V_{aoh}, V_{boh}, V_{coh}$ |
| جریان ثانویه سه فاز سیم پیچ توسعه داده شده ثانویه | $I_{Aah}, I_{Bbh}, I_{Cch}$ |
| جریان سه فاز سیم پیچ مثلثی (دلتا) ثانویه | $I_{abh}, I_{bch}, I_{cah}$ |
| جریان سه فاز سیم پیچ اولیه | $I_{Agh}, I_{Bgh}, I_{Cgh}$ |
| جریان سه فاز شاخه FT | $I_{aoh}, I_{boh}, I_{coh}$ |
| امپدانس اتصال کوتاه بین سیم پیچ شبکه و توسعه یافته و همچنین بین سیم پیچ مثلثی و توسعه یافته | Z_{h21}, Z_{h23} |
| امپدانس معادل اولیه، سیم پیچ مثلثی ثانویه و سیم پیچ توسعه یافته ثانویه | Z_{1h}, Z_{2h}, Z_{3h} |
| امپدانس معادل سه فاز شاخه FT | $Z_{Fah}, Z_{Fbh}, Z_{Fch}$ |

۴- طراحی کنترل کننده

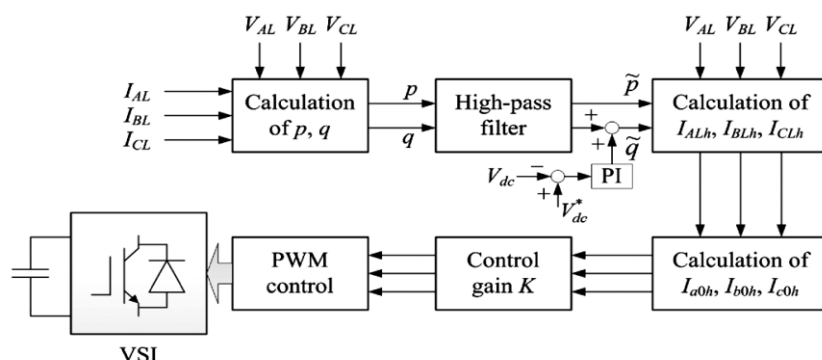
برای استراتژی کنترل روش فیلتر القایی فعال، یک کار بسیار مهم آن است که چگونه تمام مولفه های هارمونیکی که از سمت بار به شاخه FT سیلان یافته اند را جذب نمود و پیش شرطی برای تعادل پتانسیل مغناطیسی هارمونیکی بین سیم پیچ مثلثی و توسعه یافته ثانویه ایجاد نماییم. در اینجا، روش فعال برای این کار استفاده شده است. برخلاف روش فیلتر قدرت فعال موجود، در روش فیلتر القایی فعال، کنترل شاخه FT شامل چندین قسمت است:

- ا. پیگیری تغییر مولفه های هارمونیکی در سمت بار
- ب. پیش بینی میزان مولفه هارمونیکی که باید بداخل شاخه FT سیلان نماید.
- ج. تولید مولفه های هارمونیکی مخالف برای از بین بردن آن ها.

به این ترتیب، شاخه FT بیانگر یک حالت تشدید در فرکانس های هارمونیکی است. همانطور که در معادله (۸) مشاهده می کنید، $Z_{Fh}=0$ به عنوان یک پیش شرط جهت اجرای روش فیلتر القایی فعال می باشد.

۴-۱- روند کنترل

دیگرام کنترلی برای شاخه FT در شکل ۶ نشان داده شده است. به طور کلی، روند کنترل شاخه FT شامل مراحل و قسمت های زیر است:



شکل ۶: دیاگرام کنترلی برای شاخه کامل تنظیم شده

ا. محاسبه p و q : براساس ولتاژ سه فاز V_{AL}, V_{BL}, V_{CL} و جریان I_{AL}, I_{BL}, I_{CL} در سمت بار، توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای براساس مقادیر α و β با استفاده از تئوری $p-q$ بدست می‌آیند. به طور کلی، ولتاژ فاز در سمت درجه AC پل مبدل غیرسینوسی است بنابراین مشکل است بنابراین ولتاژ سه فاز را به مقادیر α و β تبدیل نماییم. برای غلبه بر این مشکل، ما می‌توانیم ولتاژ سمت اولیه ترانسفورماتور مبدل را اندازه گیری نموده و به صورت غیرمستقیم ولتاژ در سمت بار را با استفاده از ترانسفورماتور بالقوه با همان سیم کشی به ترانسفورماتور مبدل بدست آوریم و یا با توجه به عامل تغییر فاز^۱ ترانسفورماتور مبدل و محاسبه غیرمستقیم ولتاژ سمت درجه با استفاده از ولتاژ سمت شبکه این کار را انجام دهیم [۹-۱۰].

ب. فیلتر بالاگذر^۲: فیلتر بالاگذر برای فیلتر DC و مولفه‌های فرکانس پایین در p و q استفاده می‌شود. بنابراین مولفه‌های فرکانس بالا باقی می‌مانند که \tilde{p} ، \tilde{q} می‌باشند. عملکرد فیلتر بالا گذر به تنظیمات فرکانس مشخصه f_c وابسته است. در این جا به منظور جذب مولفه‌های هارمونیک از جریان سمت بار به شاخه FT و در همان زمان، جلوگیری از مولفه اصلی، f_c بر روی فرکانس 100 هرتز تنظیم می‌شود.

ج. محاسبه مولفه‌های هارمونیک جریان سمت بار: مولفه های هارمونیک جریان سمت بار توسط \tilde{p} ، \tilde{q} و ولتاژ سمت بار (V_{AL}, V_{BL}, V_{CL}) استخراج می‌شوند.

د. علاوه بر این، ولتاژ DC اینورتر منبع ولتاژ با یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی^۳ کنترل می‌شود. خروجی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی یک مولفه اضافی برای توان راکتیو فیلتر شده در محور q دارد.

ه. محاسبه مولفه‌های هارمونیک جذب شده توسط شاخه FT : با توجه به محدودیت جریان‌های هارمونیک در گستره سیم پیچ مثلثی و توسعه یافته ثانویه، مولفه‌های هارمونیک جذب شده توسط شاخه FT که $I_{a0h}, I_{b0h}, I_{c0h}$ می‌باشند و در شکل ۶ نیز نشان داده شده‌اند مستقیماً از سمت بار نیستند.

و. کنترل تقویت کننده K : جریان‌های محاسبه شده $I_{a0h}, I_{b0h}, I_{c0h}$ در K ضرب شده تا مرجع جریان برای مدولاسیون عرض پالس^۴ اینورتر منبع ولتاژ تولید شود. مرجع با خروجی جریان AC اینورتر منبع ولتاژ مقایسه شده که برای تولید موج های PWM جهت کنترل جریان مستقل اینورتر منبع ولتاژ استفاده می‌شود.

¹ Phase Shift Factor

² HPF: High-Pass Filter

³ PI: Proportional Integral

⁴ PWM: Pulse-Width Modulation



ز.

۴-۲- محاسبه جریان های هارمونیک جذب شده توسط شاخه FT

جریان های هارمونیک I_{a0h} , I_{b0h} , I_{c0h} که از سمت بار توسط شاخه FT جذب شده اند، توسط جریان های هارمونیک در سیم پیچ های ثانویه ترانسفورماتور مبدل تعیین و مشخص می شوند. با توجه به معادلات (۴) و (۷) می توان به آسانی این جریان ها را مطابق با معادله (۱۰) بدست آورد.

(۱۰)

$$I_{a0h} = \left[1 + \frac{k_{32}Z_{1h} - 2k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} \right] I_{ALh} + \frac{k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{BLh} - \frac{k_{32}Z_{1h} - 2k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{CLh}$$

$$I_{b0h} = \left[1 + \frac{k_{32}Z_{1h} - 2k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} \right] I_{BLh} + \frac{k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{CLh} - \frac{k_{32}Z_{1h} - 2k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{ALh}$$

$$I_{c0h} = \left[1 + \frac{k_{32}Z_{1h} - 2k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} \right] I_{CLh} + \frac{k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{ALh} - \frac{k_{32}Z_{1h} - 2k_{12}^2Z_{Fh}}{k_{12}^2(Z_{3h} + 3Z_{Fh}) + k_{32}^2Z_{1h}} I_{BLh}$$

با مشاهده معادله (۱۰) می توان متوجه شد که جریان های هارمونیک جذب شده توسط شاخه FT وابسته به پارامترهای امیدانسی Z_{1h} , Z_{2h} , Z_{3h} هستند. هنگامی که از روش فیلتر القایی فعال استفاده می کنیم، مطابق معادله (۸) می توان معادله (۱۰) را به صورت زیر ساده و مجدداً بازنویسی نمود:

$$I_{a0h} = (1 + k_{32}^{-1})I_{ALh} - k_{32}^{-1}I_{CLh}$$

$$I_{b0h} = (1 + k_{32}^{-1})I_{BLh} - k_{32}^{-1}I_{ALh}$$

$$I_{c0h} = (1 + k_{32}^{-1})I_{CLh} - k_{32}^{-1}I_{BLh}$$
(۱۱)

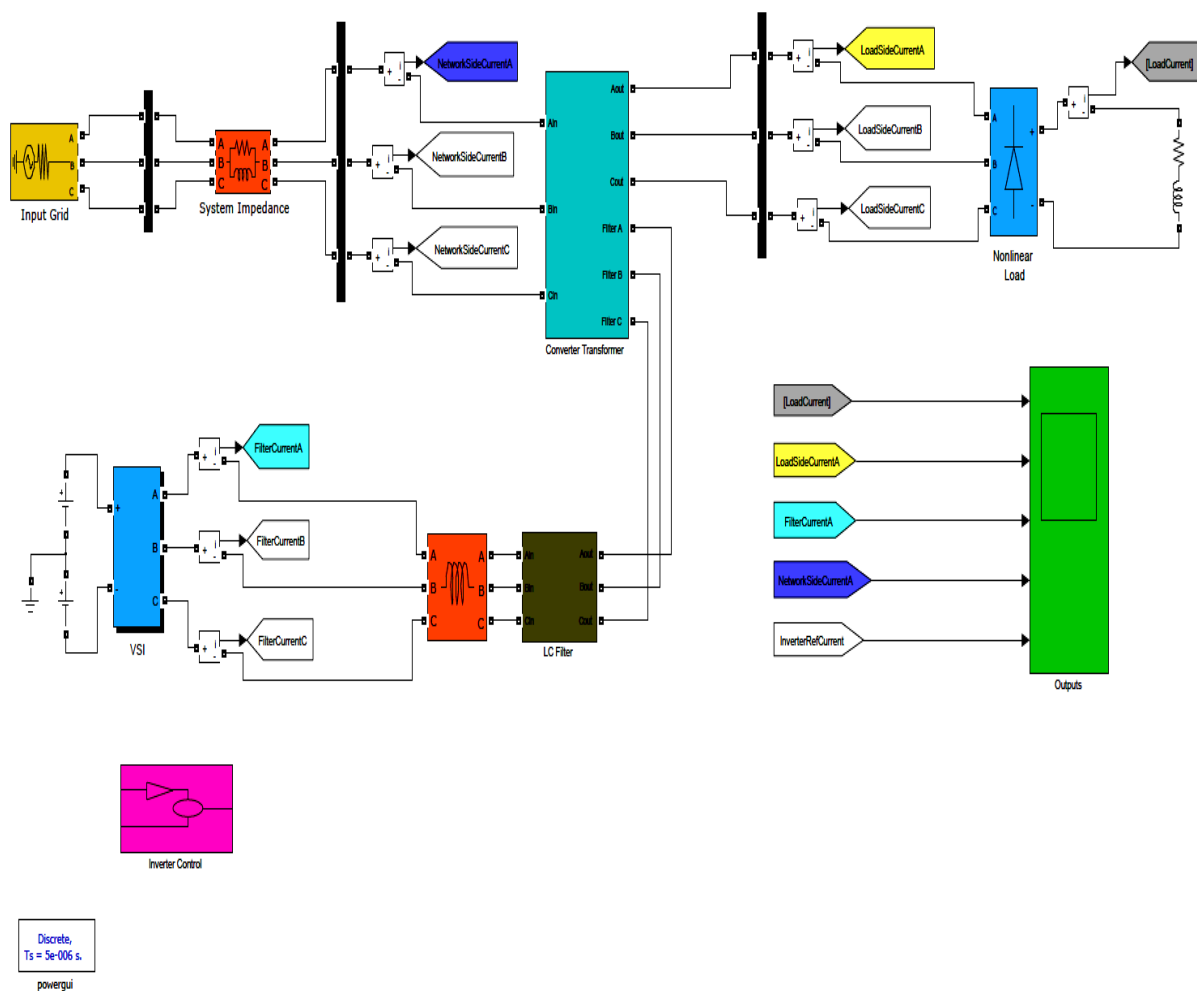
در حقیقت، معادله (۱۱) بیانگر مجموع مقادیر جریان های هارمونیک است که به داخل شاخه FT سیلان می یابند. به همین طریق، شاخه FT باید توسط تولید جریان های هارمونیک مخالف برای از بین بردن آن ها کنترل شود و این بدان معنی است که K باید یک مقدار منفی باشد. به این ترتیب، شاخه FT یک حالت اتصال کوتاهی را در فرکانس های هارمونیک نشان می دهد که می تواند جریان های هارمونیک که توسط معادله (۱۱) بیان گردید را جذب نماید. در نتیجه تعادل پتانسیل مغناطیسی هارمونیک بین سیم پیچ مثلی و توسعه یافته ترانسفورماتور محقق می شود. علاوه بر این، براساس معادله (۱۱)، نرخ ولت آمپر (P_{FT}) شاخه FT کنترل شده را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$P_{FT} = \sqrt{3} \times \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_F}{\sqrt{2}}$$

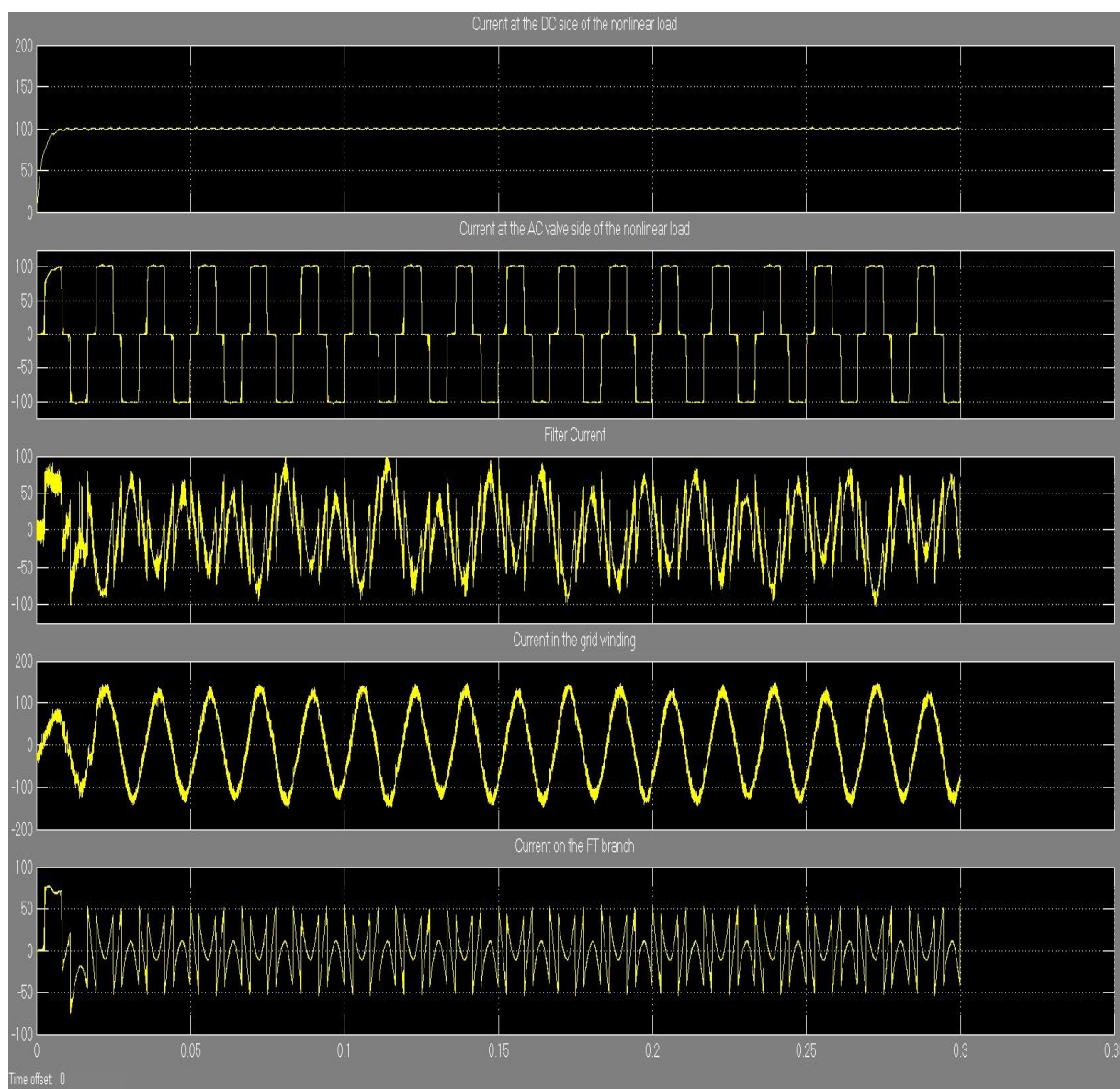
در جایی که V_{dc} برابر با ولتاژ DC اینورتر منبع ولتاژ است و I_F جریان خروجی شاخه FT کنترل شده است، برای یک تعادل و موازنه ایده آل سیستم سه فاز $|I_F| = |I_{a10h}| = |I_{b10h}| = |I_{c10h}|$ در نظر گرفته می شود.

۵- نتایج شبیه سازی

به منظور بررسی معادلات و نتایج نظری بیان شده، یک شبکه توزیع با بار غیرخطی را با استفاده از نرم افزار MATLAB/SIMULINK شبیه سازی نموده و نتایج خروجی آن را در شکل ۸ مشاهده می نمایم.



شکل ۷: شبکه توزیع با بارهای غیر خطی



شکل ۸: پاسخ دینامیکی به تغییرات بار غیر خطی



۶- نتیجه گیری

در این گزارش از روش فیلتر القایی فعال که با یک ترانسفورماتور مبدل فیلترالقایی و نیز شاخه FT کنترل شده مشخص می شود برای بهبود کیفیت توان شبکه توزیع و همچنین سیستم تغذیه (سمت مصرف کننده توان) متصل شده با بارهای غیرخطی پیشنهاد می شود. مدل مدار معادل سه فاز و مدل ریاضی پایه جهت بیان چنین روش فیلترینگ قدرت جدیدی نوشته شد. بر پایه مدل ریاضی بیان شده، روش کنترل و ساختار کنترل کننده برای شاخه FT طراحی گردید که این کنترل کننده برای ایجاد پیش شرط جهت تعادل پتانسیل مغناطیسی هارمونیکی در سیم پیچ های ترانسفورماتورمبدل استفاده می شود. نتایج نظری و شبیه سازی شده نشان می دهند که بوسیله روش فیلتر القایی فعال، جریان های هارمونیکی در سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتورمبدل متعادل شده بنابراین، در آنجا هیچ یا تنها مقدار کمی جریان های هارمونیکی القاشده در داخل سیم پیچ (شبکه) اولیه وجود دارد. این روش در سیستم های صنعتی و شبکه های توزیع که توسط واسط به تولیدپراکنده متصل شده اند، کاربرد دارد.



۷- مراجع

- [1] Z. Chen, F. Blaabjerg, and J. K. Pedersen, "Hybrid compensation arrangement in dispersed generation systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pt. 2, pp. 1719–1727, Apr. 2005.
- [2] R. Li, S. Bozhko, and G. Asher, "Frequency control design for offshore wind farm grid with LCC-HVDC link connection," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1085–1092, May 2008.
- [3] M. Popat, B. Wu, and N. R. Zargari, "A novel decoupled interconnecting method for current-source converter-based offshore wind farms," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 10, pp. 4224–4233, Oct. 2012.
- [4] M. E. Baran, H. Hooshyar, Z. Shen, and A. Huang, "Accommodating high PV penetration on distribution feeders," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 1039–1046, Jun. 2012.
- [5] A. Yazdani and P. P. Dash, "A control methodology and characterization of dynamics for a photovoltaic (PV) system interfaced with a distribution network," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1538–1551, Jul. 2009.
- [6] H. Akagi and R. Kondo, "A transformerless hybrid active filter using a three-level pulsewidth modulation (PWM) converter for a mediumvoltage motor drive," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 1365–1374, Jun. 2010.
- [7] Y. Li, L. Luo, C. Rehtanz, S. Rüberg, and D. Yang, "An industrial DC power supply system based on an inductive filtering method," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 2, pp. 714–722, Feb. 2012.
- [8] A. R. Oliva and J. C. Balda, "A PV dispersed generator: A power quality analysis within the IEEE 519," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 2, pp. 525–530, Apr. 2003.
- [9] M. Aiello, A. Cataliotti, S. Favuzza, and G. Graditi, "Theoretical and experimental comparison of total harmonic distortion factors for the evaluation of harmonic and interharmonic pollution of grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 3, pp. 1390–1397, Jul. 2006.
- [10] S. H. E. A. Aleem, A. F. Zobaa, and M. M. A. Aziz, "Optimal-type passive filter based on minimization of the voltage harmonic distortion for nonlinear loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 1, pp. 281–289, Jan. 2012.