

## بهبود کیفیت توان با استفاده از فیلتر سلفی کنترل شده، هنگام بکارگیری کوره القایی دوازده پالسه

فرهاد دانشی<sup>۱</sup>، حسن براتی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، daneshifarhad@gmail.com

\*۲- دانشیار، گروه مهندسی برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، Barati216@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۱

تاریخ دریافت: ۹۹/۱/۱۰

**چکیده:** در این مقاله روش تصحیح اعوجاج جریان شبکه با فیلتر سلفی قابل کنترل (CIPF) برای حل مسائل کیفیت توان موجود در بار کوره القایی پیشنهاد می‌گردد. این روش مبتنی بر تئوری تعادل پتانسیل مغناطیسی ترکیب شده با تکنولوژی فیلتر سلفی کنترل شده میباشد. در ابتدا ساختار سیستم و طرح سیم بندی فیلتر ارائه شده و مدار معادل آن به همراه مدل های ریاضیاتی سیستم فیلترینگ انجام می‌گیرد. سپس برای دستیابی به عملکرد بهتر فیلترینگ، یک استراتژی کنترلی اصلاح شده طراحی می‌گردد. ویژگی‌های فنی از قبیل حذف هارمونیک های ناشی از بار غیرخطی و میرایی تشدید به وسیله مکانیزم تجزیه و تحلیل نشان داده می‌شود. در نهایت مدل شبیه سازی سیستم فیلترینگ در محیط سیمولینک نرم افزار متلب پیاده‌سازی می‌شود. نتایج شبیه سازی، تحلیل تئوری را تایید می‌نماید و نشان می‌دهد که روش پیشنهادی با بهره کنترلی مناسب می‌تواند به طور موثر هارمونیک های عبوری از ترانسفورماتور را حذف نماید و اعوجاج در جریان شبکه ناشی از بار کوره القایی را بهبود دهد. ضمناً بهبود قابل توجه‌ای در ضریب قدرت شبکه قابل مشاهده است

**واژه‌های کلیدی:** کیفیت توان، فیلتر سلفی قابل کنترل، هارمونیک، کوره القایی

### ۱- مقدمه

شوند. به عنوان مثال، جریان های هارمونیک ناشی از بار غیرخطی منجر به تلفات و گرمای بیش از حد در ترانسفورماتور یکسوکننده می‌شوند [۱]. افزایش دما باعث پیری عایق ترانسفورماتور میشود و عمر سرویس آن را نیز کوتاه می‌کند علاوه بر این، ممکن است به اندازه ۵۰٪ ظرفیت ترانسفورماتور در محیط با اعوجاج هایی در شکل موج جریان وجود داشته باشد کاهش یابد. بر این اساس، به دنبال روشی برای بهبود کیفیت توان در نزدیکی منبع هارمونیک هستیم. با ترمیم مجدد در قسمت بار، جریانهای هارمونیک کمتر یا تولید نمی‌شوند [۲].

استراتژی های فعلی اتخاذ شده برای حذف هارمونیک در نزدیکی بار را می‌توان خلاصه کرد به شرح زیر:

الف) مدولاسیون پهنای پالس (PWM ب) ترانسفورماتور با فیلتر یکپارچه و روش فیلتر قدرت سلفی تنظیم شده پسیو (IPF) و فیلتر سلفی قدرت کنترل شده (CIPF).

با توجه به محدودیت‌های فنی مدیریت کیفیت توان در صنعت شیمیایی، متالورژی و سایر بنگاه های اقتصادی که دارای بارهای غیر خطی هستند، بسیاری از موارد کیفیت توان وجود دارد، که به شبکه های عمومی منتقل می‌شود، مانند آلودگی هارمونیک، ضریب توان کم. برای برآورده کردن نیازهای منبع تغذیه، IEEE یک سری از استانداردهای هارمونیک برای سیستم برق را صادر کرد. برای بهبود کیفیت توان و کاهش تلفات بهره برداری، معمولاً نصب دستگاه های فیلتر (مثلاً فیلتر پسیو، فیلتر اکتیو و فیلتر ترکیبی و غیره) در محل اتصال مشترک (PCC) نصب می‌شود. با این حال، طرح‌های فیلتر، که باعث شود اجزای توان هارمونیک و توان راکتیو آزادانه در سیستم قدرت صنعتی جریان پیدا کنند، منجر به اثرات منفی مختلف بر روی تجهیزات الکتریکی می‌

IFRT می تواند به طور قابل توجهی کاهش یافته و ناحیه آلوده شده توسط مولفه های هارمونیک می تواند تقلیل یابد.

۲- با کنترل امپدانس مجازی اینورتر روش CIPF می تواند حذف دو جهته هارمونیکها از بار خطی و بالادست آن را تحقق بخشد.

### ۳- مکانیزم عملکرد فیلتر

#### ۳-۱- مدلسازی سیستم

مدار معادل تک فاز سیستم تغذیه کوره القایی در شکل (۱) نشان داده شده است که،  $I_S$  جریان سمت شبکه،  $V_S$  ولتاژ شبکه و  $Z_S$  امپدانس سیستم است. جریان بار است، امپدانس معادل موازی شاخه های FT پنجم و هفتم است. ولتاژ خروجی اینورتر است که می تواند با رابطه (۱) بیان گردد:

$$V_C = K_n \cdot \sum_{n=5,7,\dots}^{\infty} I_n \quad (1)$$

که اندیس  $n$  بیانگر مولفه هارمونیک متغیرها است. ضریب میرایی هارمونیک با واحد اهم است که می تواند معادل با یک مقاومت مجازی متصل به منبع توان باشد.

باتوجه به تئوری ترانسفورماتور چندسیم پیچه معادلات انتقال ولتاژ ترانسفورماتور سه سیم پیچه می تواند به صورت رابطه (۲) حاصل شود:

$$-\frac{N_1}{N_3} \cdot Z_{3n} \cdot I_{3n} V_{1n} - \frac{N_1}{N_3} \cdot V_{3n} = Z_{1n} \cdot I_{1n} \quad (2)$$

که  $I_{in}$  و  $V_{in}$  ( $i=1, 2, 3$ ) به ترتیب جریان و ولتاژهای اولیه سیم پیچی سمت مصرف کننده و سیم پیچی فیلتر هستند، و  $Z_{in}$  امپدانس معادل مربوطه می باشد.

$$N_1 \cdot I_{1n} + N_2 \cdot I_{2n} + N_3 \cdot I_{3n} = 0 \quad (3)$$

که  $N_i$ ها به ترتیب تعداد دورهای سیم پیچ اولیه، تعداد دورهای سیم پیچی سمت مصرف کننده و سمت فیلتر هستند. با توجه به قانون ولتاژ (KVL) و جریان (KCL) کیرشهف، معادلات ولتاژ و جریان زیر می تواند به دست آید. با توجه به اصول تعادل پتانسیل مغناطیسی ترانسفورماتور و نادیده گرفتن جریان تحریک ترانسفورماتور داریم:

$$\begin{cases} V_{1n} = V_{sn} - Z_{sn} \cdot I_{sn} \\ V_{3n} = V_c - Z_{fn} \cdot I_{fn} \end{cases} \quad (4)$$

یکسو کننده مبتنی بر PWM در قسمت AC شکل موج سینوسی را قابل کنترل می سازد و ضریب توان را همزمان تصحیح می کند. یکسو کننده چند پالس، به عنوان اصلی ترین طرح برای از بین بردن هارمونیک در سیستم یکسو کننده های صنعتی، از چندین واحد اصلاح کننده تشکیل شده است که از طریق ترانسفورماتور جابجاکننده فاز نسبت به کاهش هارمونیک اقدام میکند [۳]. این طرح برای جابجایی فاز از نظر طراحی و ساخت آسانتر و دقیق تر است. یک روش جدید فیلتر با نام فیلتر سیم پیچ سوم با استفاده از سیم پیچ سوم ترانسفورماتور موجود برای ایجاد یک مسیر کم مقاومت امپدانس، به طوری که می توان هارمونیک ها را در فیلترهای پسیو گرفتار کرد بر خلاف فیلتر پسیو که یک مسیر اتصال کوتاه را برای هارمونیک ها ایجاد می کند، فیلتر پسیو مورد استفاده در روش (IPF) فقط برای القاء هارمونیک معکوس و جبران جریان های هارمونیک بار است [۴]. بنابراین می توان پدیده های هارمونیک را در قسمت ثانویه محافظت کرد. هنوز خطر تشدید سری / موازی را دارد که مشکل رایج در روش فیلتر پسیو است. در این مقاله با استفاده از روش فیلتر فعال، روش فیلتر توان القایی قابل کنترل (CIPF) برای بهبود کیفیت سیستم کوره القایی دوازده پالسه پیشنهاد می شود. این فیلتر به عنوان یک ایزولاتور هارمونیک قدرتمند بین شبکه برق و منبع هارمونیک عمل می کند، به این ترتیب که هارمونیک های از بالادست قابل محافظت باشد و خطر تشدید هارمونیک نیز کاهش می یابد. از این رو عملکرد کل سیستم فیلتر بهبود یافته است. در این مقاله در بخش دوم ساختار ترانس با فیلتر قدرت سلفی کنترل شده بیان شد، در بخش سوم مکانیسم عملکرد فیلتر به همراه روابط مربوطه شرح داده شد، در بخش چهارم نتایج شبیه سازی و در بخش پنجم نتایج حاصله از شبیه سازی عنوان گردید.

#### ۲- ساختار سیستم با روش CIPF

ترانسفورماتور تپ چنجر دار (OLTC) با سیم پیچی شبکه ترانسفورماتور یکسوساز فیلتر شده سلفی (IFRT) ادغام می گردد. شاخه فیلترینگ به یک تپ بین سیم پیچی اصلاح شده و سیم پیچی مثلث متصل می گردد. شاخه فیلترینگ شامل شاخه های تنظیم شده کامل (FT) بوده و با اینورتر منبع ولتاژ (VSI) به صورت سری قرار میگیرد. ویژگی این IFRT این است که سیم پیچی فیلتر از طراحی تطبیق امپدانس خاص برای ایجاد یک مسیر امپدانس صفر تقریبی در فرکانس هارمونیک خاص استفاده می کند، به طوری که تعادل پتانسیل مغناطیسی بین سیم پیچی فیلترینگ و سیم پیچی متصل به بار می تواند تحقق یابد. سیستم تغذیه توان dc جدید با روش CIPF پیشنهادی ویژگی های فنی زیر را دارد:

۱- جریان های هارمونیک عبوری از سیم پیچ متصل به بار از طریق بار غیر خطی با جریان های هارمونیک القا شده در سیم پیچی فیلتر متعادل می گردد که با توجه به اصول تعادل پتانسیل مغناطیسی در فرکانس های هارمونیک است. در این روش شار نشتی هارمونیک

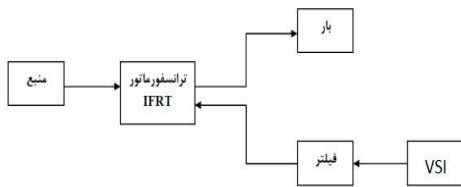
هارمونیکی عبوری از شاخه‌های فیلتر از طریق سیم پیچی شبکه جلوگیری به عمل می‌آورد.

### ۳-۳- استراتژی کنترلی

الگوریتم کنترلی روش CIPF دارای سه بخش است: بخش اول برای استخراج مولفه های هارمونیکی جریان های سمت شبکه، میرا نمودن تشدید هارمونیکی و بهبود قابلیت فیلترینگ می باشد. بخش دوم برای استخراج مولفه های هارمونیکی جریان های شاخه فیلترینگ به منظور تحقق طراحی امپدانس صفر است. و بخش آخر به منظور استخراج مولفه توان اکتیو از طریق ولتاژ dc برای تنظیم ولتاژ dc مبدل منبع ولتاژ (VSI) می باشد.

### ۳-۴- مدار سیستم فیلتر و بار کوره القایی

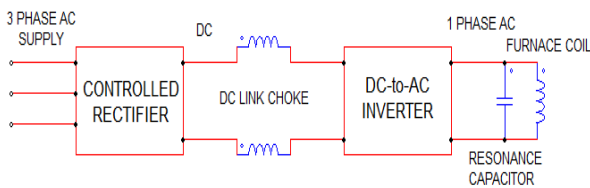
در شکل (۲) مدار پیاده‌سازی شده نشان میدهد که در سمت ثانویه ترانس دو سری سیم پیچ دارد که از یک سری برای تغذیه بار کوره القایی و از سیم پیچ دیگر برای سیستم فیلتر استفاده شده است.



شکل ۲: بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی

### ۴- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل نمودارها

نتایج شبیه سازی در نرم افزار سیمولینک متلب انجام شده است. برای مدل سازی کوره القایی بدین صورت عمل شد که جریان سه فاز متناوب را مطابق شکل (۳) دریافت می‌کند سپس توسط مبدل‌های تریستوری آن را تبدیل به جریان مستقیم تبدیل می‌کند چون به صورت دوازده پالسه می‌باشد، از دو مبدل شش پالسه سری استفاده شده، که خروجی این دوازده پالس توسط لینک جریان مستقیم مجدداً تبدیل به جریان متناوب می‌شود. اساس کار کوره القایی بدین صورت است که برای ذوب فلزات از جریان‌های فوکو استفاده می‌شود. که مدل این جریان‌ها را به صورت کوئل سیم پیچ موازی با خازن در نظر گرفته شده است، که در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۳): مدل کوره القایی دوازده پالسه

شکل (۴) شبیه سازی کوره القایی در سیمولینک متلب را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases} I_{1n} = I_{Sn} \\ I_{2n} = I_{Ln} \\ I_{3n} = I_{2n} - I_{fn} \end{cases} \quad (5)$$

معادلات (۱) تا (۵)، مدل ریاضی را به وسیله رابطه میان ولتاژ، جریان و امپدانس سیستم جدید با روش CIPF تشکیل می‌دهند.

### ۳-۲- تحلیل ویژگی های فیلترینگ

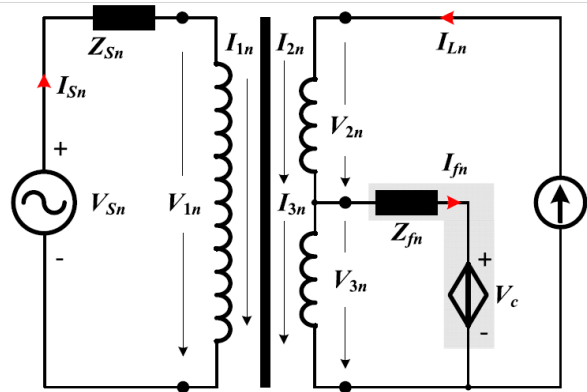
هنگام در نظر گرفتن ویژگی‌های فیلتر از نقطه نظر شاخه فیلترینگ میتوان جریان شاخه فیلتر را به صورت رابطه (۶) بیان نمود.

$$\begin{cases} I'_{fn} = \frac{(K_{21} + K_{31})(Z_{1n} + Z_{sn} + K_{13} \cdot K_n) + K_{13} \cdot Z_{3n}}{K_{31}(Z_{1n} + Z_{sn} + K_{13} \cdot K_n) + K_{13} \cdot (Z_{3n} + Z_{fn})} \cdot I_{Ln} \\ I''_{fn} = \frac{V_{sn}}{K_{31}(Z_{1n} + Z_{sn} + K_{13} \cdot K_n) + K_{13} \cdot (Z_{3n} + Z_{fn})} \end{cases} \quad (6)$$

که  $K_{21}$ ،  $K_{31}$  و  $K_{13}$  نسبت دورهای مربوط بین سیم پیچ های ترانسفورماتور هستند.

و نسبت دورها به صورت  $K_{21} = \frac{N_2}{N_1}$ ،  $K_{31} = \frac{N_3}{N_1}$ ،  $K_{13} = \frac{N_1}{N_3}$  است.

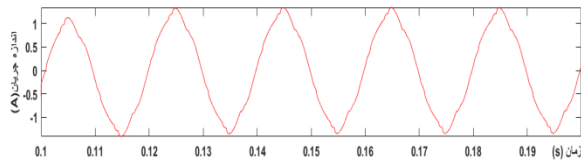
$$I_{fn} = (K_{23} + 1)I_{Ln} \quad (7)$$



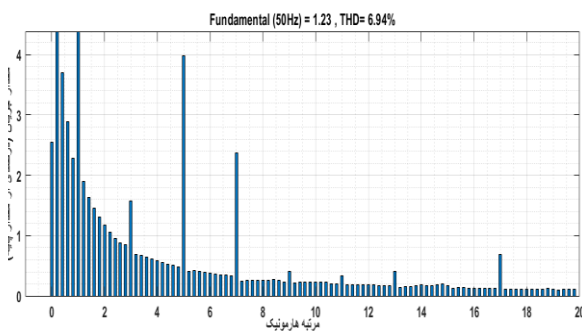
شکل ۱: مدل مدار معادل سیستم تغذیه کوره القایی

بر اساس شرایط اولیه امپدانس صفر دوگانه برای پیاده سازی روش IPF یعنی  $Z_{fn} = 0$  و  $Z_{3n} = 0$  می‌توانیم به این نتیجه برسیم که معادله اول رابطه (۶) می‌تواند با رابطه (۷) یکسان در نظر گرفته شود. بنابراین همه جریانهای هارمونیکی تولید شده توسط بار کوره القایی بین سیم پیچ های ثانویه حذف می‌شوند و این بدان معنی است که هیچ جریان هارمونیکی نمی‌تواند به طور آزادانه در سیم‌پیچی شبکه وجود داشته باشد. همچنین، می‌توان از طریق معادله دوم رابطه (۶) متوجه شد که  $K_n$  درست مثل یک مقاومت میرایی سری با امپدانس سیستم می‌باشد که به صورت جداساز هارمونیکی عمل کرده و از مولفه های

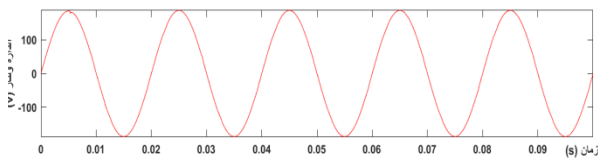
پس از استفاده از فیلتر سلفی قدرت کنترل شده (CIPF) شکل موج جریان مطابق شکل (۸) یکنواخت و کم اعوجاج گردیده، و همچنین مطابق شکل (۹) اعوجاج‌های هارمونیک کل از مقدار ۴۳٫۶۸٪ به مقدار ۶٫۹۴٪ کاهش یافت. که نسبت به حالت بدون فیلتر ۸۴٪ بهبود در اعوجاج‌های جریان منبع حاصل شده است.



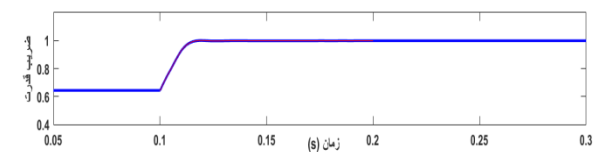
شکل (۸): شکل موج جریان سمت شبکه کوره القایی در حالت (CIPF) کوره القایی دوازده پالسه



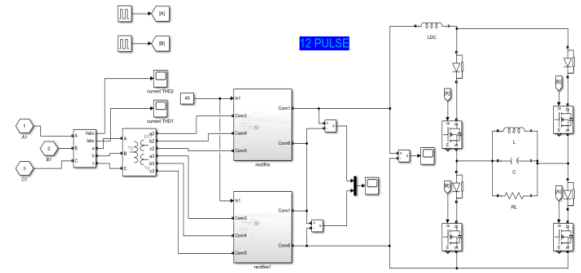
شکل (۹): اعوجاج‌های هارمونیک کل جریان شبکه در حالت فیلتر (CIPF) ولتاژ شبکه همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، در حالت استفاده از بار کوره القایی دوازده پالسه حالت سینوسی خود را حفظ کرده است.



شکل (۱۰): ولتاژ شبکه در حالت استفاده از بار کوره القایی دوازده پالسه  
 ضمناً استفاده از فیلتر (CIPF) باعث بهبود ضریب قدرت شبکه گردید. همان‌طور که در شکل (۱۱) مربوط به ضریب قدرت شبکه در حالت بار کوره القایی دوازده پالسه مشخص است تا قبل از یک دهم ثانیه که فیلتر وارد مدار شود مقدار ضریب قدرت شبکه ۶۵٪ می‌باشد، پس از یک دهم ثانیه که فیلتر وارد مدار گردید ضریب قدرت به مقدار ۹۸٪ افزایش یافت. دلیل این موضوع تزریق توان راکتیو به شبکه توسط فیلتر می‌باشد که حالت پس فازی شبکه را کم می‌کند و باعث بهبود ضریب قدرت شبکه می‌گردد.

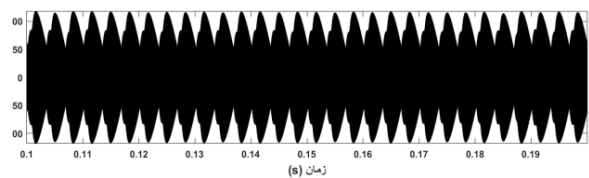


شکل (۱۱): ضریب قدرت شبکه قبل و بعد از ورود فیلتر (CIPF) مربوط به بار کوره القایی

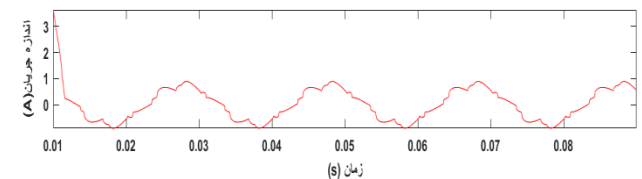


شکل (۴): بلوک دیاگرام کوره القایی دوازده پالسه

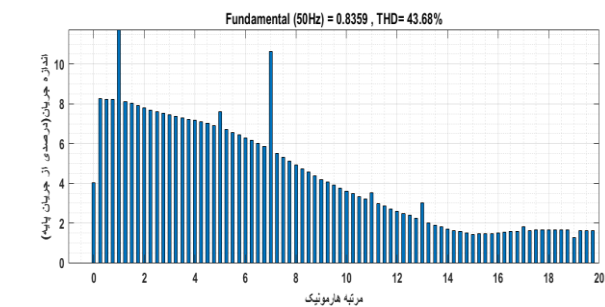
برای ایجاد ولتاژ متناوب با دامنه و فرکانس مورد نظر در کوره القایی از اینورتر ac به ac استفاده می‌کنیم. در واقع کاربرد این نوع اینورتر در تغییر دامنه، فرکانس و فاز مورد نظر در ولتاژ متناوب می‌باشد. ابتدا ولتاژ متناوب شبکه به ولتاژ مستقیم تبدیل کرده، سپس با مدولاسیون پهنای باند دامنه و فرکانس موج متناوب خروجی جهت کوره القایی تامین-گردید. شکل (۵) ولتاژ بار کوره القایی در فرکانس هشتاد کیلوهرتز را که مورد نیاز کوره القایی بوده و شبیه‌سازی آن در محیط متلب انجام شد را نشان می‌دهد.



شکل (۵): ولتاژ متناوب با فرکانس بالا، مربوط به بار کوره القایی دوازده پالسه  
 نمودار جریان شبکه و همچنین اعوجاج‌های هارمونیک مربوط به کوره القایی دوازده پالسه به صورت شکل‌های (۶) و (۷) نمایش داده شده است. عدم یکنواختی در نمودار جریان شبکه به وضوح دیده می‌شود و ضمناً اعوجاج‌های هارمونیک کل به مقدار ۴۳٫۶۸٪ بیانگر بار غیر خطی شدید می‌باشد که باعث خرابی نمودار جریان شبکه گردیده است.



شکل (۶) موج جریان سمت شبکه در حالت بدون فیلتر، بار کوره القایی



شکل (۷): اعوجاج‌های هارمونیک کل جریان سمت شبکه در حالت بدون فیلتر

## ۵- نتیجه گیری

با شبیه سازی انجام شده در سمیولینک متلب استفاده از فیلتر سلفی قدرت کنترل شده (CIPF) در تصحیح اعوجاج های جریان شبکه و در نتیجه بهبود کیفیت توان بطور موثر مفیده بوده است. به طوری که اعوجاج هارمونیک کل را از مقدار ۴۳٫۶۸٪ به مقدار ۴٫۹۶٪ کاهش داد. و هم چنین ضریب قدرت شبکه از مقدار ۰٫۶۵ به مقدار ۰٫۹۸ افزایش یافت که بیانگر کارا بودن استفاده از فیلتر سلفی کنترل شده می باشد.

## مراجع

- [1] Lee, T., Wang, Y., Li, J., & Guerrero, J. M. (2015). Hybrid active filter with variable conductance for harmonic resonance suppression in industrial power systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2), 746–756.
- [2] Li, Y., Liu, Q., Hu, S., Liu, F., Cao, Y., Luo, L., et al. (2017). A virtual impedance comprehensive control strategy for the controllably inductive power filtering system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(2), 920–926.
- [4] Li, X., Xu, W., & Ding, T. (2017). Damped high passive filter-A new filtering scheme for multipulse rectifier systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 117–124.
- [5] Liang, C., et al. (2017). Harmonic elimination using parallel delta-connected filtering windings for converter transformers in HVDC systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(2), 933–941.
- [6] Liu, Q., Li, Y., Hu, S., & Luo, L. (2019). A controllable inductive power filtering system: modeling, analysis and control design. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 105, 717–728.

## رزومه

**فرهاد دانشی** در رامهرمز متولد شده است (۱۳۵۲). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی مکانیک- طراحی جامدات در دانشگاه شهید چمران اهواز (۱۳۷۴)، کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی (۱۳۸۴) کارشناسی ارشد اقتصاد توسعه و برنامه ریزی



(۱۳۸۶) سپری کرده است. هم اکنون دانشجویی ترم آخر کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز (۱۳۹۸) است. فعالیت های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه کیفیت توان، تجهیزات شبکه های توزیع برق و بهره برداری از سیستم های قدرت است.

**حسن براتی** تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۷۱)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تبریز (۱۳۷۵) و دکتری مهندسی برق- قدرت از دانشگاه علوم و تحقیقات تهران (۱۳۸۶)



سپری کرده است. فعالیت های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، کیفیت توان، و بهره برداری از سیستم های قدرت و قابلیت اعتماد است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می باشد.

# Improving power quality using a controlled inductive power filter when using a twelve-pulse induction furnace

Farhad Daneshi<sup>1</sup>, Hassan Barati<sup>2</sup>

1- MSC - Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, daneshifarhad@gmail.com

2- Associated Professor - Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran, barati216@gmail.com

**Abstract:** In this paper, the method of correction of network current distortion with controllable inductive power filter (CIPF) is proposed to solve the quality problems of the power available in the induction furnace load. This method is based on the equilibrium potential theory of magnetic potential combined with controlled inductive power filter technology. First, the structure of the system and the filter wiring scheme are presented, and the equivalent circuit is performed along with the mathematical models of the filtering system. A modified control strategy is then designed to achieve better filtering performance. Technical characteristics such as the elimination of harmonics due to nonlinear load and intensification damping are shown by the analysis mechanism. Finally, the simulation model of the filtering system is implemented in the Simulink environment of MATLAB software. The simulation results confirm the theoretical analysis and show that the proposed method with appropriate control efficiency can effectively eliminate the harmonics passing through the transformer and improve the distortion in the network current caused by the induction furnace load.

**Keywords:** Power quality; controllable inductive power filter(CIPF); induction furnace; harmonic.