PSC2009
24th International Power System Conference
09-F-PQA-0244
بیست و چهارمین
کنفرانس بین‌المللی برق

فیلترینگ و پردازش سیگنال‌های هارمونیکی با استفاده از تکنیک میانگین

ناصر خدابخشی جوینانی، محمد توکلی بینا
دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
تهران- ایران

واژه‌های کلیدی: سیگنال هارمونیکی، فیلتر پایین گذر درجه اول و دوم، تکنیک میانگین(A.T)، اپراتور میانگین(A.O)، اعوجاج کلی هارمونیکی، زیر-هارمونیکی و میان-هارمونیکی(THD،TIHD و TSHD)

چکیده

سیستمهای قدرت و الکترونیک قدرت با سیگنالهای هارمونیکی سروکار دارند. همچنین، کانورترهای کلید زنی یکی از منابع تولید هارمونیک شناخته می‌شوند. پردازش سیگنالهای هارمونیکی از اهمیت ویژه در کنترل سیستمهای برخوردار است. همچنین فیلترینگ این سیگنالها نیز اهمیت می‌یابد. در این پژوهش، سیگنال هارمونیکی نوعی، توسط تکنیک میانگین[1] پردازش می‌شود و با توجه به ویژگی این تکنیک در مدلسازی رفتارهای غالب، روشی برای عملیات فیلترینگ پیشنهاد می‌شود. همچنین این روش، قابلیت مقایسه با فیلترپایین گذر، به ویژه درجه اول، را دارد .برای ارزیابی صحت عملکرد این روش، از شاخص‌های اعوجاج مانند THD[2]، TIHD[3] و TSHD[4] استفاده می‌شود. یکی از اهداف این مقاله، سعی بر ارائه روشی برای دست یابی به آلودگی هارمونیکی کمینه، در مقایسه با فیلتر پایین گذر است. در روش میانگین، فرکانس میانگین‌گیری اهمیت فراوان دارد در حالیکه در فیلتر پایین گذر، ضریب بهره، فرکانس قطع و فاکتور میرایی اهمیت می یابند. در انتهای این پژوهش، کارایی روش های میانگین و فیلتر پایین گذر مقایسه می شود و جایگاه تکنیک میانگین در برابر دو درجه از فیلتر پایین‌گذر تحلیل خواهد شد.

۱-مقدمه

سیگنالهای آغشته به هارمونیک ممکن است در تمام سیستمها وجود داشته باشند. اما در اکثر موارد، تصمیم گیری و پردازش فقط بر روی مولفه‌ی پایه[5] صورت می‌گیرد. در بسیاری از فعالیتهایی که از مبدلهای الکترونیک قدرت استفاده می‌شود، تمرکز فعالیت‌ها بر روی مولفه‌ی پایه است[۱].

در مباحث مربوط به کیفیت توان وجبرانسازی‌های مربوط به آن، تخمین و تحلیل بر اساس مولفه‌ی پایه، از

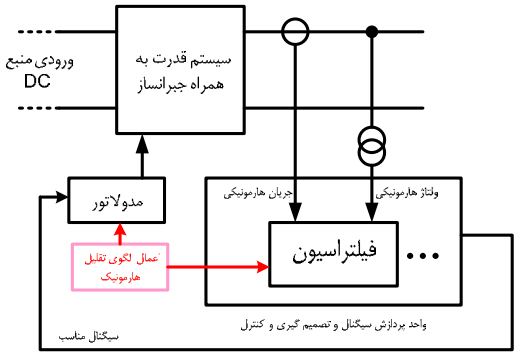
[1] Averaging Technique, A.T
[2] Total Harmonic Distortion, THD
[3] Total Inter-Harmonic Distortion, TIHD
[4] Total Sub-Harmonic Distortion, TSHD
[5] Fundamental Sequence

اهمیت فراوانی در جبرانسازی و بهبود پارامترهای کیفیت توان، برخوردار است[۱].

در مباحث الکترونیک قدرت، روشهای حذف یا تقلیل محتوای هارمونیکی، بیشتر، به الگوهای مختلف مدولاتورها پرداخته است تا به عمل فیلترینگ[۲],[۳]. به بیان دیگر، در این گونه فعالیتها، تاثیر فیلترهای سنتی ثابت پنداشته می‌شود و تمرکز، بر روی کاهش هارمونیکی، از طریق کار بر روی روشهای مدولاتوری است. بنابراین فعالیتهای مربوط به فیلترینگ هارمونیکها، هم در الگوهای مدولاتوری و هم در طراحی فیلتر پایین گذر امکان‌پذیر خواهد بود.

وجود هارمونیکهای مرتبه پایین، یکی از موضوعات نامطلوب به شمار می‌رود. زمانیکه سیگنال مورد پردازش، دارای هارمونیکهای مرتبه پایین باشد، طراحی فیلتر پایین گذر گران و پیچیده خواهد شد[۴],[۵].

شکل (۱)، تقسیم وظایف فیلترینگ هارمونیکی بین اجزای مختلف در یک کانورتر قدرت را نشان می‌دهد. فیلتر پایین گذر، در تخمین سیگنالهای متوسط و جداسازی سیگنالهای نوسانی از سیگنالهای اصلی نیز کاربرد دارد[۱]. این جداسازی، کاربرد بسیاری در مباحث "تئوری‌های توان" دارد. شکل (۲) یکی از کاربردهای مذکور را نشان می‌دهد [۱],[۶].

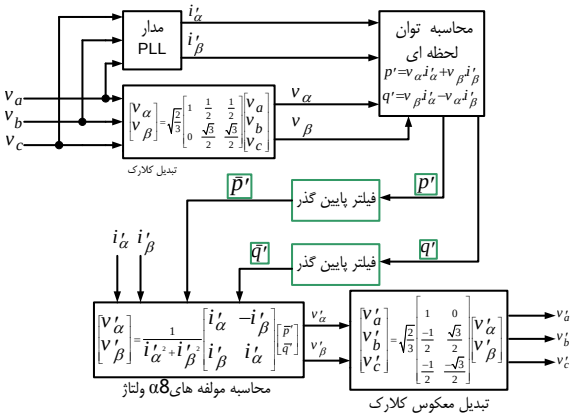


شکل ۱: شمای یک سیستم قدرت به همراه جبرانساز و عملیات کنترل آن با در نظر گرفتن ملاحظات هارمونیکی

در شکل (۱)، امکان ملاحظات هارمونیکی تنها در دو قسمت مدولاتور و فیلترینگ داخل واحد کنترل، امکان پذیر است. این در حالی است که با انتخاب فیلتر پایین گذر، مدولاتور، تنها محل برای انجام این ملاحظات، به نظر می‌رسد. در این مقاله سعی شده است با ارائه‌ی روشی، جایگزین مناسبی برای عملکرد فیلتر پایین گذر بیابیم. در این راه از تکنیک میانگین بهره‌مند خواهیم شد.

شاخصهای اعوجاج هارمونیکی، از معیارهای مهم ارزیابی کارایی یک فیلتر هستند و این معیارها مشخص می‌نمایند که عمل فیلترینگ با چه دقتی انجام گرفته و سیگنال هارمونیکی دارای چه میزان آلودگی است.

وجود هارمونیکها، میان–هارمونیکها و زیر–هارمونیکها، بسته به نوع کاربرد و محل اندازه‌گیری، اهمیت می‌یابند که استانداردهای موجود در سیستم قدرت می‌توانند سطح مجاز هرکدام از شاخص‌های بالا را، مخصوصا در مباحث کیفیت توان، معین کنند.



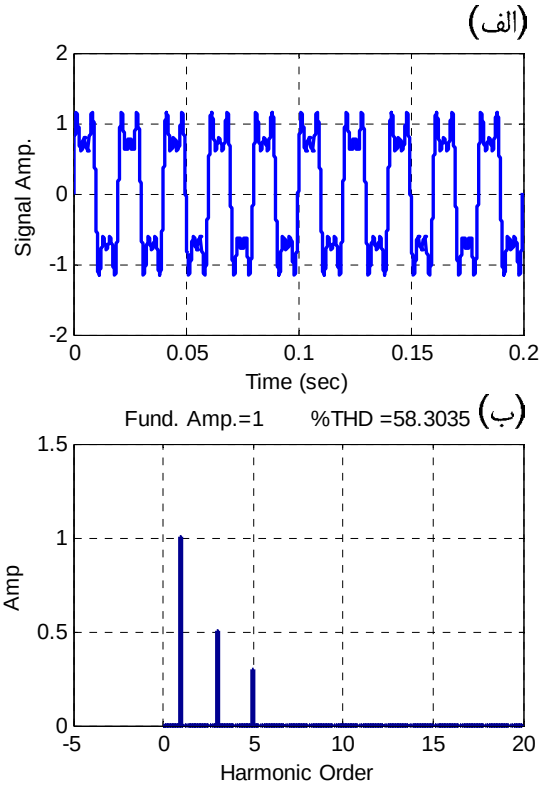
شکل ۲: کاربرد فیلتر پایین گذر در بحثهای توانهای لحظه‌ای، "آشکارساز مرتبه‌ی مثبت مولفه‌ی پایه ولتاژ[1] در مبحث فیلترهای اکتیو موازی"[*]

در این مقاله و در بخش بعدی، آزمایشی ترتیب داده خواهد شد که در آن ابتدا یک سیگنال هارمونیکی معین، توسط دو روش فیلترینگ، فیلتر پایین گذر و تکنیک میانگین، فیلتر می‌شود. مقاله در این بخش، در نظر دارد تا در ابتدا

[1] Fundamental Positive-Sequence Voltage Detector

[*] این بلوک دیاگرام، به صورت ترجمه شده، از مرجع [۱]، صفحه‌ی ۱۳۸، اقتباس شده است.

کفایت روش پیشنهادی را به اثبات برساند و در بخشهای آتی، به تشریح عملکرد روش پیشنهادی بپردازد. در بخشهای آتی، به تشریح روش پیشنهادی در قالب یک بلوک دیاگرام، پرداخته خواهد شد. بلوک‌های استفاده شده در این بلوک دیاگرام، زیر فصلهای بخشهای آتی را تشکیل می‌دهد که شامل بررسی سیگنال هارمونیکی، روش میانگین، فیلتر پایین گذر درجه اول و دوم، محاسبه اعوجاج سیگنال و الگوی تعیین فرکانس میانگین‌گیری است. در نهایت نتایج گرفته شده از مقایسه بین دو عملکرد فیلتری، توسط جدول داده‌ها با هم مقایسه شده و نتایج و پیشنهادات ارائه می‌گردد.



شکل ۳: سیگنال هارمونیکی اصلی، حاوی مرتبه‌های هارمونیکی ۳ و ۵
(الف)سیگنال زمانی (ب)طیف هارمونیکی آن

۲- طرح کلی

در روش پیشنهادی، هدف، بررسی کارایی تکنیک میانگین در برابر فیلتر پایین گذر، در عملیات فیلترینگ است.

برای این کار، یک سیگنال آلوده به هارمونیکهای مرتبه سوم و پنجم با دامنه‌های به ترتیب ۵۰ و ۳۰ درصد مولفه‌ی پایه، معرفی می‌گردند. پایین بودن مرتبه هارمونیک‌ها و همچنین قابل توجه بودن دامنه‌ی آنها موجب می‌گردد تا این سیگنال هارمونیکی، میدان مناسبی برای ارزیابی عملیات فیلترینگ برای دو روش باشد.

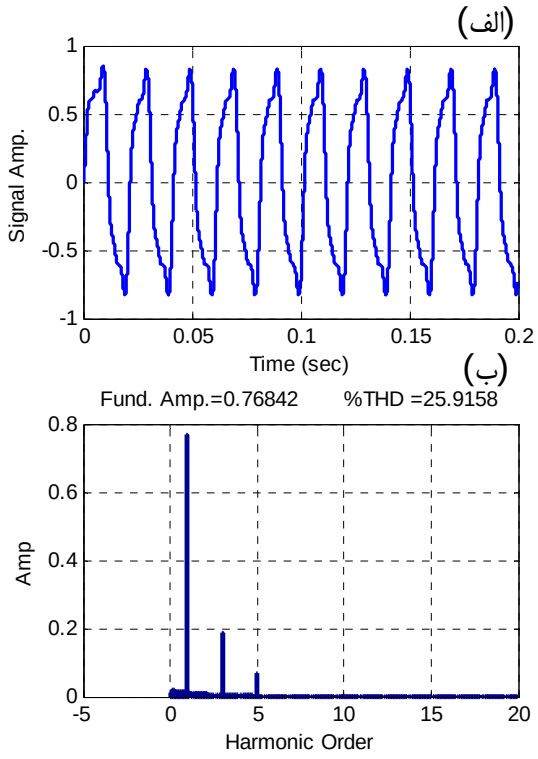
شکل (۳-الف)، این سیگنال هارمونیکی را بر حسب زمان و شکل (۳-ب)، طیف هارمونیکی آنرا نمایش می‌دهد. در این شکل، اعوجاج هارمونیکی ناشی از هارمونیکهای مرتبه‌ی سوم و پنجم مشهود است. با استفاده از روش متداول برای عمل فیلترینگ و انتخاب فیلتر پایین گذر درجه اول (معمولی)، سیگنال فیلتر شده به صورت شکل (۴) می‌باشد. همانگونه که در شکل (۴-ب) دیده می‌شود، طیف هارمونیکی سیگنال فیلتر شده نشان می‌دهد که دو مرتبه‌ی هارمونیکی ۳ و ۵، کماکان وجود دارند ولی تضعیف شده‌اند. اما شکل(۵) نشان دهنده‌ی عملیات فیلترینگ توسط روش میانگین است.

شکل (۵) نشان می‌دهد که تضعیف هارمونیکهای مرتبه‌ی سوم و پنجم بیشتر از مولفه‌ی پایه است که خود نشان از کارایی بهینه‌ی این روش دارد. همچنین در مقایسه بین شکل موجهای (۴-الف) و (۵-الف)، شکل (۵-الف)، حالت سینوسی بیشتری نسبت به شکل (۴-الف) دارد.

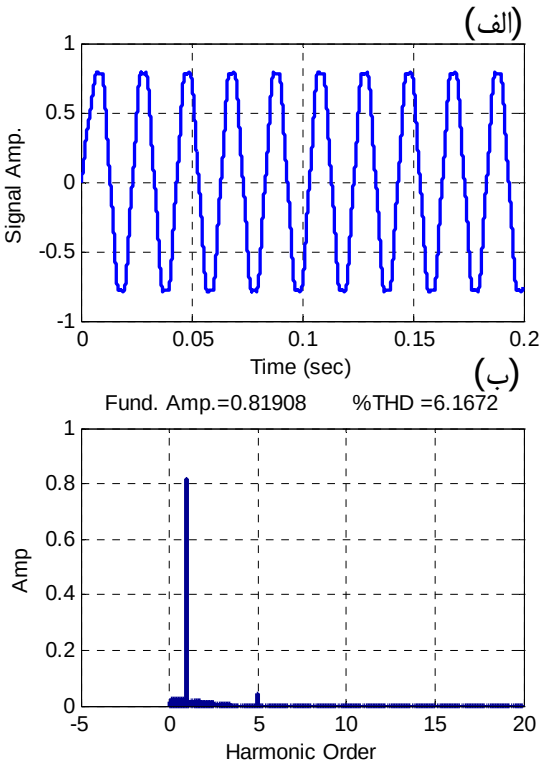
لازم به ذکر است که شکلهای مطرح شده در این بخش با تنظیمات خاصی شبیه‌سازی گردیده که در ادامه به آنها به صورت مشروح پرداخته خواهد شد.

۳-روش پیشنهادی مبتنی بر تکنیک میانگین

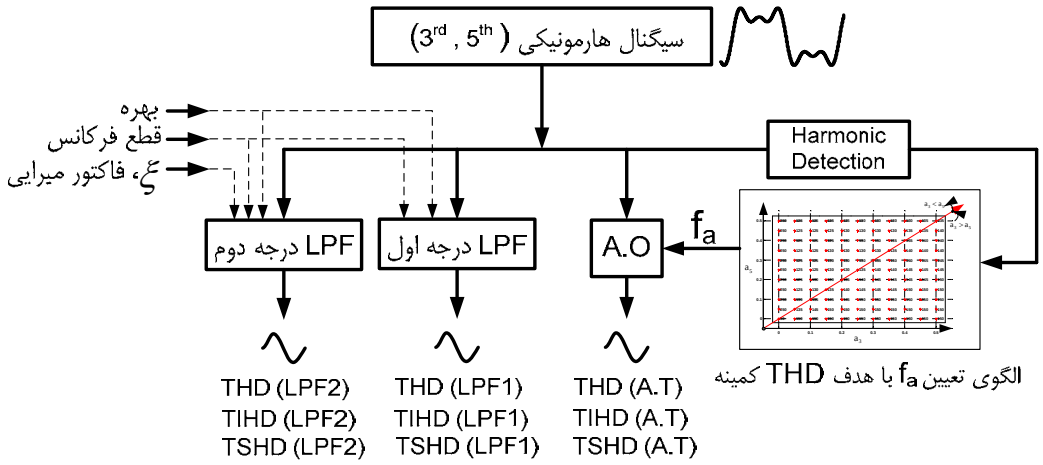
هدف این مقاله ارائه روشی کارآمدتر از فیلتر پایین‌گذر در تخمین سیگنال پایه و تضعیف سایر هارمونیکها در سیگنال آلوده به هارمونیک است. در این راه، سیگنال هارمونیکی که دارای هارمونیکهای مرتبه سوم و پنجم با دامنه‌های ذکر شده بود، معرفی گردید و حاصل کار در قسمت قبل مشاهده شد.



شکل ۴: سیگنال فیلتر شده توسط LPF (الف)سیگنال زمانی (ب)طیف هارمونیکی آن



شکل ۵: سیگنال فیلتر شده توسط A.T (الف)سیگنال زمانی (ب)طیف هارمونیکی آن



شکل ۶: بلوک دیاگرام انجام این پژوهش

شکل (۶)، بلوک دیاگرامی را نشان می‌دهد که کارکرد روش مطرح شده (پیشنهادی) را نشان می‌دهد. بلوک دیاگرام شکل (۶) نشان می‌دهد که از سیگنال هارمونیکی، توسط اپراتور میانگین[1]، میانگین گرفته می‌شود و نتایج حاصل شده از دو عملیات فیلترینگ توسط معیار مربوط به اعوجاج سیگنال، سنجیده می‌شود.

[1] Averaging Operator, A.O

یک فیلتر پایین گذر درجه اول، برای انجام عملیات فیلترینگ نیازمند بهره و فرکانس قطع است[۷]. تعیین این دو عامل نقش مهمی در دقت این فیلتر دارد[۸]. در مقابل، بلوک اپراتور میانگین فقط به فرکانس میانگین‌گیری که با f_a نمایش داده می‌شود، نیازمند است. تعیین f_a نیز نیازمند الگویی است که در ادامه به بررسی آن پرداخته خواهد شد. همچنین در ادامه به تشریح کار هرکدام از اجزای بلوک‌دیاگرامی شکل (۶) پرداخته خواهد شد.

۳-۱- سیگنال هارمونیکی

شکل موج یا سیگنال هارمونیکی بکارگرفته شده در این مقاله، به صورت رابطه (۱) است. در این رابطه، x(t) سیگنال هارمونیکی و $x_i(t)$ مولفه‌های هارمونیکی مرتبه‌ی i ام هستند. a_i دامنه هرکدام از مراتب هارمونیکی است و ω_i فرکانس زاویه‌ای مربوط به این مراتب است. سیگنال هارمونیکی برای مرتبه‌های سوم و پنجم در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} x(t) = x_1(t) + \sum_{i=3(odd)}^{n=5} x_i(t) \\ (1 \le i \le 5) \begin{cases} x_i(t) = a_i \sin(\omega_i t) \\ \omega_i = 100\pi \times i \end{cases} \end{cases} \qquad (۱)$$

۳-۲-محاسبه اعوجاج‌های هارمونیکی

استاندارد IEC 610004-7، تکنیکهایی برای اندازه‌گیری اعوجاج هارمونیکی در سیستم قدرت مطرح می‌کند. این استاندارد [۹]، برای فرموله کردن این اندازه‌گیری، هارمونیکها را به سه رده دسته‌بندی می‌کند:

۱-هارمونیکهای شبه ایستا[1]

۲-هارمونیکهای نوسانی

۳-هارمونیکهای با تغییرات سریع

یکی از معیارهای ارزیابی محتوای هارمونیکی و یا میزان آلودگی شکل موج از نظر هارمونیکی، THD است. THD بر اساس اندازه‌گیری مضارب صحیحی از مولفه‌ی اصلی استوار است. محتوای هارمونیکی شکل موج فیلتر نشده دارای THD ایست که می‌بایست توسط عملیات فیلترینگ، میزان آن کاهش یابد.

طبق رابطه‌ی (۲) که رابطه‌ی استاندارد در تعریف THD است، کاهش THD بعد از عمل فیلترینگ، به معنای افزایش دامنه‌ی مولفه‌ی پایه در برابر کاهش سایر مولفه‌های هارمونیکی است.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{n} a_h^{\,2}}}{a_1} \qquad (۲)$$

استاندارد IEC 610004-7، همچنین دارای یک زیر بخش کوچک در مورد میان-هارمونیکها[2] به عنوان گسترش بیشتر پدیده‌ی هارمونیکی است. اگرچه موضوعاتی از آن به صورت حل نشده باقی مانده‌اند ولی مواردی از قبیل محدوده‌ی فرکانسهایی که در نظر گرفته می‌شوند و یا فرکانس مرکزی که باید در مواجه با پدیده هایی مانند تاثیرات آنها روی گیرنده-های کنترل ریپل[3] یا فیلیکرها، در نظر گرفته شوند، وجود دارند[۱۰].

در صورت وجود میان-هارمونیکها در سیگنال هارمونیکی، می‌توان اعوجاج کلی میان-هارمونیکی[4] را به صورت رابطه‌ی (۳) تعیین نمود.

$$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} a_i^{\,2}}}{a_1} \qquad (۳)$$

که i تعداد کل میان هارمونیکهایی است که در نظر گرفته می‌شوند و n تعداد کل فرکانس‌هایی است که شامل زیر-هارمونیکها[5] نیز می‌باشد.

[1] Quasi-Stationary

[2] Inter Harmonics, I.H
[3] Ripple Control Receiver
[4] Total Inter-Harmonic Distrotion, TIHD
[5] Subharmonics

اگر زیرهارمونیکها نیز مهم باشند، می‌توان آنها را جداگانه محاسبه نمود که این محاسبه به تولید شاخصی می‌انجامد که اعوجاج کلی زیر هارمونیکی[1] نام دارد. رابطه‌ی (۴) آن را نشان می‌دهد.

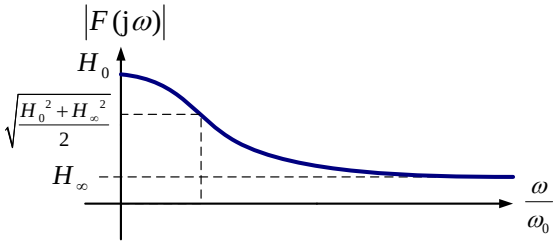
$$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{s=1}^{S} a_s^{\,2}}}{a_1} \qquad (۴)$$

که S تعداد کل فرکانسهایی است که در زیر فرکانس پایه موجودند. سایر فاکتورهای اعوجاج و ارزیابی‌های آماری هارمونیکها، می‌توانند برای ارزیابی زیرهارمونیکها در سیستم قدرت به کار روند [۱۰].

در این مقاله، شاخصهای THD، TIHD و TSHD برای شکل موج‌های بدست آمده در طول آزمایش، محاسبه و ارزیابی می‌گردند.

۳-۳-فیلتر پایین گذر

فیلتر یک مدار خطی است که به منظور عبور مولفه‌های فرکانسی مطلوب و حذف مولفه‌های فرکانسی نامطلوب به کار می‌رود [۸]. عبور مولفه‌های فرکانسی کمتر از فرکانس قطع، از ویژگی‌های یک فیلتر پایین گذر است. فیلتر پایین گذر به دو صورت فیلتر پایین گذر درجه اول و دوم تقسیم می‌شود که هر کدام دو طراحی حداقل فاز[2] و غیر حداقل فاز[3] دارند [۸] . شکل‌های (۷) و (۸) مشخصه‌ی دامنه دو فیلتر درجه اول و دوم را نشان می‌دهد.



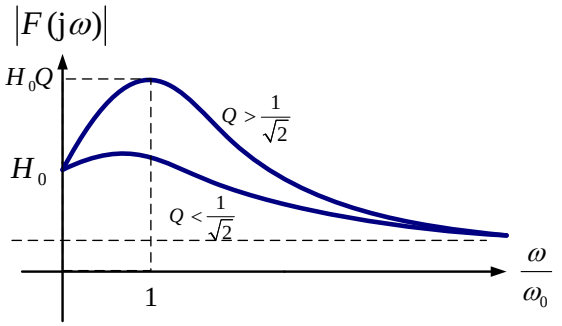
شکل ۷: مشخصه‌ی دامنه‌ی فیلتر پایین گذر درجه اول

روابط (۵) و (۶) به ترتیب بیانگر تابع تبدیل فیلتر پایین گذر درجه اول و دوم هستند.

$$F(s)=\frac{H_0+H_\infty\frac{s}{\omega_C}}{1+\frac{s}{\omega_C}} \qquad (۵)$$

$$\begin{cases} F(s)=\dfrac{H_0}{1+\frac{1}{Q}\frac{s}{\omega_C}+(\frac{s}{\omega_C})^2} \\ Q=\dfrac{1}{2\xi} \end{cases} \qquad (۶)$$

که در این روابط، H_0 دامنه تابع تبدیل در فرکانس صفر و H_∞، دامنه در فرکانس بی‌نهایت است. Q فاکتور کیفیت[4] نامیده می‌شود. ω_C نیز مبین فرکانس قطع است و ξ نیز ضریب میرایی[5] نام دارد.



شکل ۸: مشخصه‌ی دامنه‌ی فیلتر پایین گذر درجه دوم

فیلتر پایین گذر درجه اول، معمولترین نوع فیلتر در کاربردهای قدرت است که به راحتی و سرعت قابل طراحی است. اگر بهره‌ی فیلتر در بینهایت را صفر در نظر بگیریم، تابع تبدیل این درجه از فیلتر پایین گذر، فاقد صفر می‌باشد در حالیکه در فیلتر درجه اول، یک قطب و در فیلتر درجه دوم دو قطب وجود دارد.

استفاده از فیلتر درجه دوم علاوه بر اضافه نمودن یک قطب بیشتر به سیستم، موجب پیچیده شدن مرتبه کلی سیستم می‌گردد و تحلیل را با پیچیدگی همراه می‌سازد. همچنین این فیلتر برخلاف فیلتر درجه اول، علاوه بر بهره و فرکانس قطع، نیازمند فاکتور کیفیت، Q، و به تعبیری فاکتور میرایی، ξ،

[1] Total SubHarmonic Distortion, TSHD
[2] Minimum Phase
[3] Non-Minimum Phase
[4] Qualification Factor
[5] Damping Factor

است. فیلتر پایین گذر درجه دوم سبب می‌شود که فرکانس-های عبوری به نسبت فیلتر درجه اول، از تقویت بیشتری برخوردار شوند ولی این امر موجب می‌گردد در Q های بالا، فرکانس نزدیک به فرکانس اصلی نیز رشد یابند. این پدیده در بحثهای آتی مورد توجه قرار خواهد گرفت.

۳-۳-۱-طراحی فیلتر پایین گذر درجه اول

در شرایطی که می‌خواهیم در یک سیگنال هارمونیکی، از فرکانسی به بالا، حذف یا تضعیف گردد، سریعترین و ساده-ترین روش برای طراحی فیلتر، فیلتر درجه اول است که با یک مدار RC، به سادگی قابل پیاده‌سازی است.

در این طراحی، تنها فرکانس قطع و بهره‌ی dc، تابع تبدیل فیلتر درجه اول را تعیین می‌سازد. این تابع به شکل رابطه‌ی (۷) است [۷].

$$T(s)=k\frac{1}{1+\tau s} \qquad (۷)$$

که k بهره‌ی باند گذر فیلتر[1] یا همان بهره‌ی dc است و τ ثابت زمانی فیلتر نام دارد. رابطه‌ی (۸) نشان دهنده‌ی ارتباط ثابت زمانی فیلتر با فرکانس قطع است.

$$f_C=\frac{1}{2\pi\tau} \qquad (۸)$$

در این مقاله، با در نظر گرفتن مثال مطرح شده، تابع تبدیل فیلتر استفاده شده به صورت رابطه‌ی (۹) می‌باشد.

$$T(s)=\frac{377}{377+s} \qquad (۹)$$

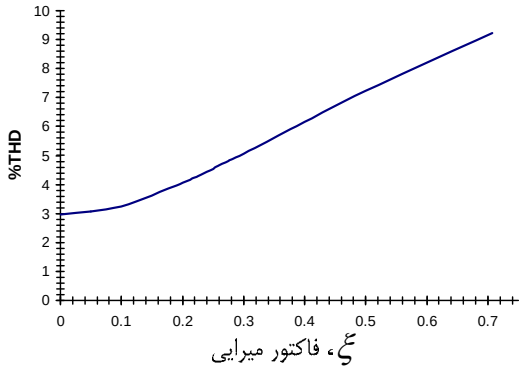
در این رابطه با توجه به فرکانس کاری ۵۰ هرتز، فرکانس قطع ۶۰ هرتز در نظر گرفته می‌شود. رابطه‌ی (۹) یک فیلتر پایین گذر و از نوع حداقل فاز می‌باشد که دارای بهره‌ی واحد است.

۳-۳-۲-طراحی فیلتر پایین گذر درجه دوم

در طراحی این نوع فیلتر، علاوه بر بهره و فرکانس قطع، فاکتور کیفیت، Q، نیز از اهمیت برخوردار است. همانگونه که از شکل (۸) مشخص است، فاکتور کیفیت در بهبود دامنه‌ی فرکانسهای عبوری موثر است به نحوی که این فرکانسها را تقویت و سایرین را تضعیف می‌نماید.

با توجه به اینکه در این فیلتر، انتخاب بهره و فرکانس قطع همانند بخش قبل، قابل محاسبه است، بنابراین کافیست تحلیل این فیلتر را بر اساس فاکتور میرایی مختلف انجام دهیم. سیگنال مورد آزمایش در این مقاله، بعد از اعمال به فیلتر پایین گذر درجه دوم و به ازای ζهای مختلف، از نظر اعوجاج‌های هارمونیکی بررسی گردید. برای این کار، طیف-های فرکانسی سیگنال فیلتر شده توسط فیلتر پایین‌گذر درجه دوم، بررسی می‌گردد و شاخصهای THD، TIHD و TSHD محاسبه می‌شود.

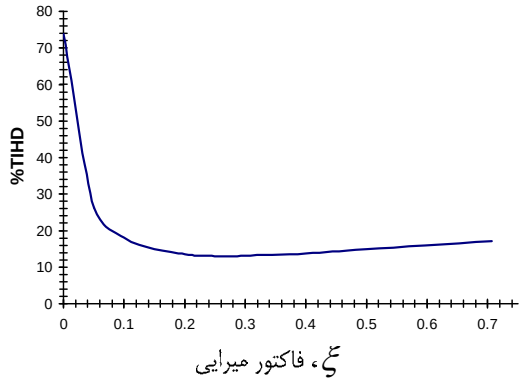
شکل (۹) تغییرات درصد THD هنگام تغییر ζ نشان می‌دهد. طبق این شکل، بهترین مقدار THD، ۲/۹۶٪ است. اما این THD بهینه، در صورتی رخ میدهد که فاکتور کیفیت، بینهایت شود که ممکن است عملی نباشد. اما آنچه از این شکل پیداست، کاهش THD در قبال کاهش فاکتور میرایی است.



شکل ۹: نمودار تغییرات درصد THD در برابر تغییرات فاکتور میرایی

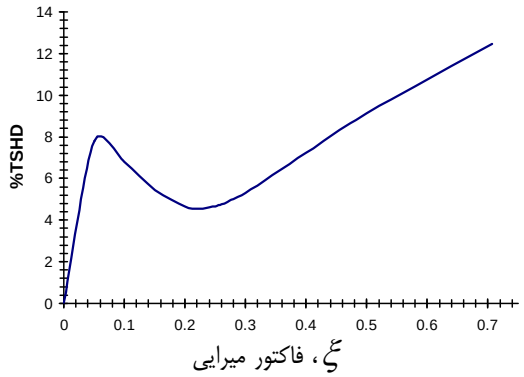
TIHD معیار محتوای میان-هارمونیکی یک سیگنال هارمونیکی است. در حالیکه ζهای کوچک، مشخصه‌ی THD خوبی به دست می‌دهند، اما شکل (۱۰) نشان می‌دهد که در این ζهای کوچک، TIHD مقادیر بالایی دارد به نحوی که در مقادیر ζی کمتر از ۰/۰۵، فرکانس قطع، ۶۰ هرتز، به مقدار قابل توجهی نسبت مولفه‌ی اصلی، شروع به رشد می‌کند.

[1] Filter Passband Gain

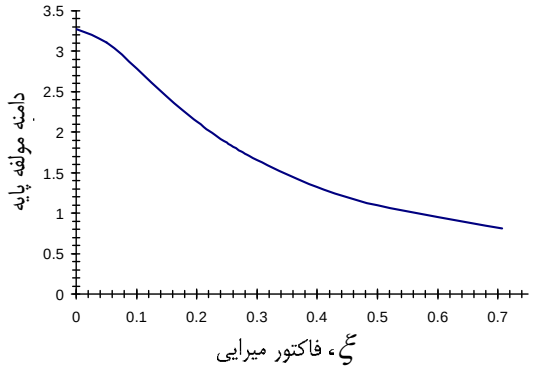


شکل ۱۰: نمودار تغییرات درصد TIHD در برابر تغییرات فاکتور میرایی

برخلاف TIHD، با کاهش ξ، TSHD کاهش می‌یابد. این نشاندهنده‌ی این واقعیت است که محتوای هارمونیکی زیر مولفه‌ی اصلی، در نقاطی که انتظار THD کم داریم، دارای روند ثابتی نیستند. این واقعیت را می‌توان در شکل (۱۱) مشاهده کرد.



شکل ۱۱: نمودار تغییرات درصد TSHD در برابر تغییرات فاکتور میرایی



شکل ۱۲: نمودار تغییرات دامنه مولفه‌ی پایه سیگنال خروجی فیلتر درجه دوم در برابر تغییرات فاکتور میرایی

فیلتر درجه دوم با افزایش دامنه‌ی فرکانس‌های عبوری باعث بهبود شاخص THD می‌شود. شکل (۱۲) افزایش دامنه‌ی مولفه‌ی پایه را با کاهش ξ نشان می‌دهد.

در ادامه به بررسی سایر اجزای طرح پیشنهادی میپردازیم.

۳-۴-روش میانگین

تاریخچه‌ی روش و تکنیک میانگین را می‌توان در حیطه ریاضیات و معادلات دیفرانسیل رهگیری کرد[۱۱]. روش میانگین، روش تقریب با دقت دلخواه است. این دقت با شاخص میانگین‌گیری[1] تعیین می‌شود[۱۲]. در تکنیک میانگین، سیستمها بگونه‌ای مدلسازی می‌گردند که رفتارهای غالب آنها مدل شود و از پدیده‌های ناچیز و کم اهمیت صرف نظر گردد[۱۳]. همچنین تکنیک میانگین، در کنترل تطبیقی و الکترونیک قدرت کاربرد دارد[۱۳]-[۱۶]. قابلیت بیان رفتارهای غالب توسط روش میانگین، موجب می‌گردد تا کاربری آن در عملیات فیلترینگ مطرح گردد.

برای استفاده از تکنیک میانگین، می‌بایست از اپراتور میانگین بهره ببریم. رابطه‌ی (۱۰) اپراتور میانگین گیری تک سیکل[2] نام دارد [۱۷].

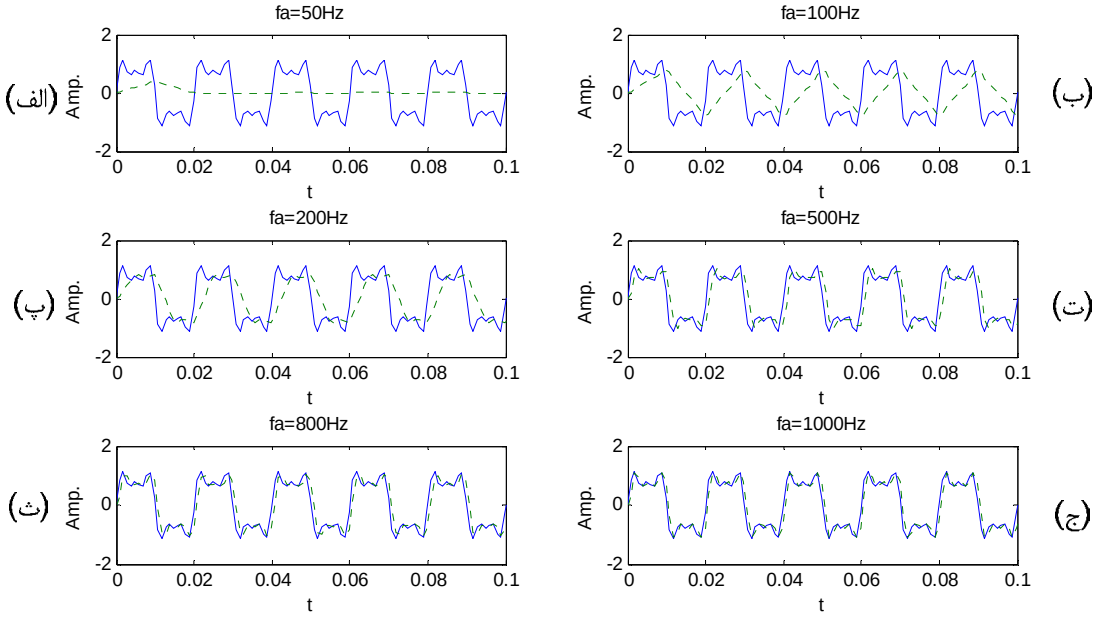
$$x_a(t) = \frac{1}{T_a}\int_{t-T_C}^{t} x(\tau)d\tau \qquad (۱۰)$$

که T_a دوره‌ی تناوب میانگین است و $x_a(t)$ نمایش میانگین از شکل موج $x(t)$ است.

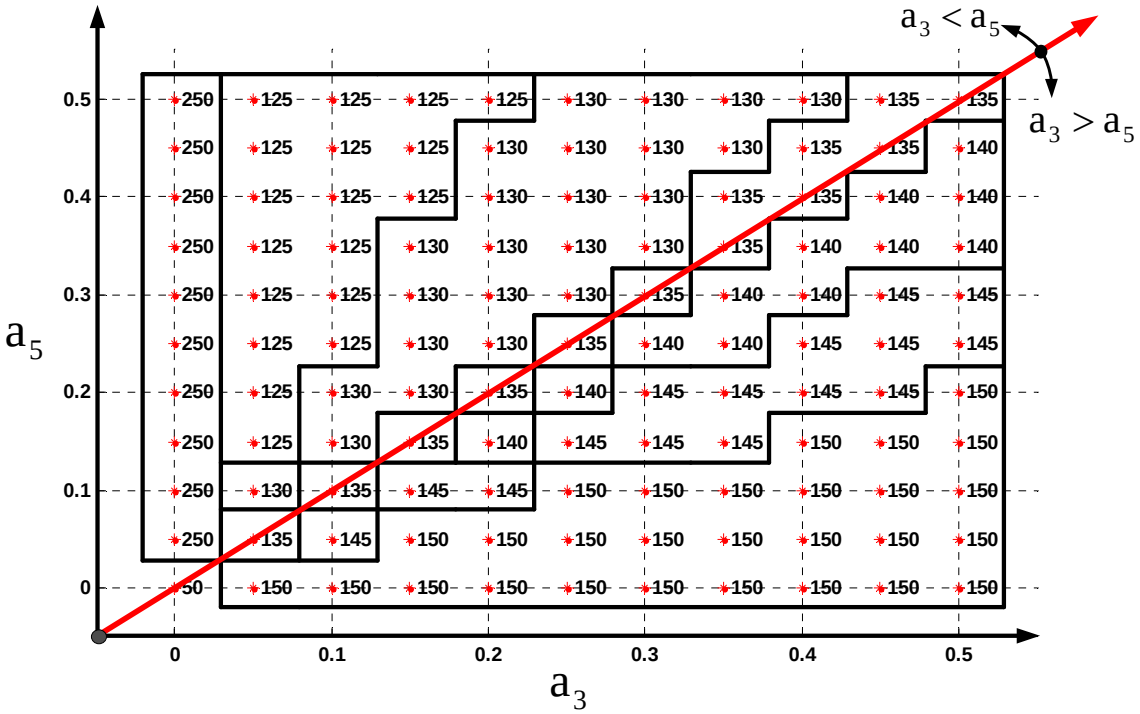
دقت بیان جزئیات توسط روش میانگین به فرکانس میانگین (یا فرکانس نمونه برداری)، f_a، بستگی دارد. هرچقدر این فرکانس بیشتر باشد، خروجی روش میانگین به سیگنال اصلی شبیه‌تر خواهد شد. در این رابطه، شکل (۱۳) نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس میانگین‌گیری، چگونه خروجی روش میانگین، به تدریج، به شکل موج اصلی نزدیک خواهد شد.

همانگونه که از این شکل برمی‌آید، با افزایش فرکانس میانگین، f_a ، خروجی روش میانگین به سیگنال اصلی شبیه‌تر خواهد شد و به بیان دیگر با افزایش f_a ، اپراتور، توانایی بیشتری در تخمین تمام جزئیات می‌یابد.

[1] Averaging Index
[2] One-Cycle Averaging Operator



شکل ۱۳: نمایش سیگنال اصلی و میانگین آن در فرکانسهای مختلف میانگین‌گیری (الف) فرکانس ۵۰ هرتز (ب) فرکانس ۱۰۰ هرتز (پ) فرکانس ۲۰۰ هرتز (ت) فرکانس ۵۰۰ هرتز (ث) فرکانس ۸۰۰ هرتز (ج) فرکانس ۱۰۰۰ هرتز



شکل ۱۴: الگوی دو بعدی تعیین f_a با هدف THD کمینه

۳-۵-الگوی تعیین فرکانس میانگین‌گیری f_a

همانگونه که پیشتر گفته شد، اپراتور میانگین برای تخمین و پردازش سیگنال هارمونیکی، نیازمند فرکانس میانگین گیری است. شکل (۱۴)، الگویی را مطرح می‌کند که با داشتن دامنه هارمونیک‌های سیگنال اصلی، بهترین فرکانس میانگین‌گیری با کمینه ترین هارمونیک بدست می‌آید. در شکل (۱۴) دو محور که بیانگر دامنه‌ی هارمونیک سوم و پنجم هستند، مشهود هستند و هر کدام تا ۵۰ درصد مقدار پایه مدرج شده‌اند. زمانیکه شناختی از مقدار و تعداد هارمونیکهای سیگنال اصلی داشته باشیم، با استفاده از این الگو می‌توانیم بهترین عملکرد را از روش پیشنهادی انتظار داشته باشیم. شکل (۱۴)، با استفاده از دو رابطه‌ی (۱) و (۱۰) بدست آمده است. این کار توسط برنامه کامپیوتری نوشته شده در محیط MATLAB، و محاسبات برای یافتن f_aی بهینه جهت حداقل نمودن THD، صورت گرفته است.

در مثالی که در این مقاله به آن پرداخته شد، دامنه هارمونیک سوم، ۵۰ و دامنه هارمونیک پنجم، ۳۰ درصد مقدار مولفه‌ی پایه است. با انتخاب این دو مقدار در شکل (۱۴)، بهترین انتخاب برای فرکانس میانگین گیری، ۱۴۵ هرتز می‌باشد. به بیان دیگر فرکانس ۱۴۵ هرتز، کمترین میزان آلودگی هارمونیکی سیگنال خروجی، بعد از عملیات فیلترینگ توسط روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. جدول ۱، میزان اعوجاج‌ها را در سه حالت، سیگنال فیلتر نشده، سیگنال فیلتر شده توسط LPF درجه اول و دوم و سیگنال فیلتر شده توسط روش پیشنهادی را به صورت کمی نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه روش پیشنهادی با فیلتر پایین گذر

نوع سیگنال			%THD	%TIHD	%TSHD
سیگنال اصلی			۵۸/۳۱	۰	۰
سیگنال فیلتر شده توسط LPF	درجه اول		۲۵/۹۱۵۸	۱۰/۲۷۰۲	۶/۹۲۷۵
	درجه دوم	ایده‌آل(ξ = ۰)	۲/۹۶۴۴	۷۳/۷۶۶۱	۰/۰۳۸۴
		بهینه(ξ = ۰/۱)	۳/۲۵۰۱	۱۸/۱۲۰۶	۶/۷۹۶۸
سیگنال فیلتر شده با تکنیک میانگین			۶/۰۷۴	۱۳/۸۸۳۲	۹/۵۹۵۱

۴-نتایج شبیه سازی

شکل (۱۴) نشان می‌دهد که با توجه به مقدار دامنه برای هارمونیک سوم و پنجم، چه فرکانسی می‌تواند برای اپراتور میانگین انتخاب شود تا کمترین THD به عنوان سیگنال خروجی این پردازش بدست آید. همچنین با استفاده از الگوی شکل (۱۴) می‌توان مثال پیشنهادی که دارای درصد آلودگی هارمونیکی برابر با ۵۸/۳٪ است را با انتخاب فرکانس میانگین برابر با ۱۴۵ هرتز، به مقدار ۶/۰۷۴٪ فیلتر کرد. این مقدار در روش فیلتر پایین گذر متفاوت است. زمانیکه از فیلتر درجه اول که معمولترین روش طراحی فیلتر پایین گذر در کاربردهای قدرت است، استفاده می‌شود، THD، ۲۵/۹٪ می‌باشد.

اگر از فیلتر درجه دوم استفاده شود این مقدار در حالت ایده‌ال، ξ = ۰، ۲/۹۶٪ خواهد شد ولی آلودگی میان‌هارمونیکی رشد فراوانی می‌یابد و به مقدار قابل توجه ۷۳/۷۶٪ خواهد رسید که نتیجه‌ی رشد فرکانس قطع می‌باشد. اما اگر مقدار بهینه‌تری برای ξ انتخاب شود به نحوی که شاخص TIHD نیز در حد مجاز باشد، می‌توان مقدار ξ = ۰/۱ را به عنوان حالت بهینه که در آن سه شاخص مطرح شده در زمینه آلودگی هارمونیکی مقدار مناسبی دارند، مطرح کرد.

با توجه به نتایج بدست آمده در کاربرد دو درجه فیلتر پایین گذر برای یک سیگنالی با THDی ۵۸/۳۱٪، روش پیشنهادی که از تکنیک میانگین بهره می‌برد، کارایی مناسب‌تری نسبت به فیلتر درجه اول دارد. اما در مقایسه با فیلتر درجه دوم، باید این نکته را متذکر شد که این فیلتر تنها در محدوده‌هایی از روش پیشنهادی بهتر عمل می‌نماید.

بهتر شدن شاخص THD در قبال بدتر شدن شاخص TIHD است. در حالیکه با انتخاب بهینه‌تر ξ، مقدار THD، ۰/۲۸٪ بدتر می‌شود اما مقدار TIHD، ۵۵٪ بهتر می‌شود.

به طور کلی روش پیشنهادی که مبتنی بر تکنیک میانگین است، از فیلتر درجه اول کارایی بهتری دارد و در مقایسه با فیلتر درجه دوم تنها در محدوده‌هایی (در این

آزمایش ۰/۴ > ζ)، از نظر THD، کارایی پایین‌تری دارد در-حالیکه در این محدوده‌ها، روش پیشنهادی مشخصه‌ی TIHD مناسبتری دارد.

از دیگر موضوعات قابل توجه، وابستگی THD به فرکانس میانگین گیری و دامنه‌ی هارمونیکها در روش پیشنهادی است در حالیکه طبق تعاریف استاندارد، THD صرفا وابسته به دامنه‌ی هارمونیکها بود. این حقیقت در رابطه-ی (۱۱) مشهود است.

$$THD = THD(f_a, a_i) \qquad (۱۱)$$

۵-نتیجه گیری

استفاده از فیلتر پایین‌گذر، روشی متداول و معمول برای کمینه کردن محتوای هارمونیکهایی است که دارای مرتبه‌ی بالایی نسبت به مرتبه پایه هستند.

استفاده از این روش فیلترینگ در مباحث تئوری توان نیز کاربرد فراوان دارد. هرچند که نزدیکی هارمونیکها به مولفه‌ی اصلی، علاوه بر گرانتر شدن فیلتر پایین‌گذر، موجب عملکرد نامطلوب فیلترینگ می‌گردد، اما این روش، تنها روش تقلیل هارمونیکی است.

در این پژوهش، سعی شده است تا از روش میانگین که در ریاضیات، کنترل و الکترونیک قدرت، ابزاری قدرتمند برای مدلسازی رفتارهای غالب به شمار می‌رود، برای تخمین مولفه‌ی پایه از سیگنال آغشته به هارمونیک، بکار گرفته شود. در این باره، THD، TIHD و TSHD، معیارهای مناسبی برای ارزیابی کارآمدی فیلترینگ می‌باشند.

بکارگیری روش میانگین، الگویی را بدست می‌دهد که بیانگر انتخاب فرکانس مناسب برای روش پیشنهادی است. همچنین دو نوع فیلتر پایین گذر نیز بررسی شد. فیلتر پایین گذر درجه اول که معمولترین نوع فیلتر در طراحی و استفاده است، دارای اعوجاج هارمونیکی کلی بیشتری نسبت به روش پیشنهادی است و تنها فیلتر درجه دوم، با توجه به اضافه نمودن درجه کلی سیستم، در محدوده‌هایی از نظر THD، بهتر از روش پیشنهادی عمل می‌نماید ولی در این محدوده‌ها میان-هارمونیکها، مخصوصا فرکانس قطع، رشد قابل ملاحظه-ای می‌یابد که مطلوب نیست.

به طور کلی روش پیشنهادی به جهت کاربری فیلترینگ دیجیتالی، به خصوص در جایگزینی فیلتر درجه اول، اکیدا پیشنهاد می‌گردد. همچنین این روش در مقایسه با فیلتر درجه دوم تنها ۳٪ در THD اختلاف دارند اما روش پیشنهادی از نظر محتوای میان-هارمونیکی بهتر است و مرتبه سیستم را به جای دو درجه (دو قطب) ، تنها یک درجه می‌افزاید.

در ضمن می‌توان این روش را برای هارمونیکهای بیشتر نیز مطرح کرد. به نحوی که n مرتبه‌ی هارمونیکی (به غیر از پایه)، بررسی در یک فضای n بعدی و تهیه الگوی n بعدی را می‌طلبد.

مراجع

[1] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, Wiley-Interscience, IEEE Press, 2007, ISBN: 978-0-470-10761-4.

[2] Ben-Sheng Chen, and et al., " An Analytical Approach to Harmonic Analysis and Controller Design of a STATCOM," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, January 2007

[3] Jian Sun and et al., "Optimal PWM Based on Real-Time Solution of Harmonic Elimination Equations," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, no. 4, july 1996, pp. 612-621

[4] Salvador Alepuz, and et al., Interfacing Renewable Energy Sources to the Utility Grid Using a Three-Level Inverter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 5, Oct. 2006, pp. 1504-1511

[۵] محمد توکلی بینا، "کنترل توانهای غیر اکتیو و هارمونیکها"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ اول، آبان ۱۳۸۲

[6] Y. Xu, L.M. Tolbert,, "A generalised instantaneous non-active power theory for STATCOM," IET Electr. Power Appl., 2007, 1, (6), pp. 853–861 853

[7] Dorf, R. C., and Bishop, R. H. (2001), Modern Control Systems, Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 9th ed.

[۸] دلیرروی فرد، رسول. فیلتر و سنتز مدار، مرکز نشر پروفسور حسابی، ۱۳۷۷

[9] IEC Standard 610004-7

[10] Jos Arrillaga, Et al., Power System Harmonic Analysis, John Wiley & Sons, 1997.

[11] M. M. Khapaev, “On the method of averaging and on certain problems connected with averaging Differential Equations," 1966, vol. 2, no. 5, pp. 310-314.

[12] Sanders, S.R and Verghese, G.C. Synthesis of Averaged Circuit Models for Switched Power Converters, Circuits and Systems, IEEE transactions on, Volume 38, Issue 8, Aug. 1991.

[13] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, 2nd edition, Kluwer Academic Publisher, 2000.

[14] M. T. Bina, Ashoka K. S. Bhat, "Averaging Technique for the Modeling of STATCOM and Active Filters," IEEE Trans. Power Electronics, 2008, vol. 23, (2), pp. 723-734.

[15] M. Tavakoli Bina, N. Khodabakhshi, "Generation of Voltage Reference Signal in Closed-Loop Control of STATCOM," Australasian Universities Power Engineering Conference 2008 (AUPEC 2008), University of New South Wales, Sydney, Australia, December 2008

[16] K. J. Astrom and B. Wittenmark, Adaptive Control, 2nd ed. Dover, New York, 2008. Originally published by Addison Wesley, 1995.

[17] S.R. Sanders and J.M. Novoroski, "Generalized in place averaging," IEEE-PESC Records, 1991, pp. 445-451