

تحلیل هارمونیکی جریان هجومی ترانسفورماتور نوع هسته‌ای پنج ستونه با استفاده از حوزه هارمونیک توسعه‌یافته

احسان کرمی^۱، کارشناسی ارشد؛ گئورگ قره‌پتیان^۲، استاد؛ پیمان کریمیان^۳، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- ehsankarami@aut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- grptian@aut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- peyman.sena@gmail.com

چکیده: در این مقاله، از حوزه هارمونیک توسعه‌یافته به منظور شبیه‌سازی و تحلیل دقیق هارمونیکی ترانسفورماتور نوع هسته‌ای پنج ستونه در شرایط گذرا علاوه بر حالت ماندگار استفاده می‌شود. برای این منظور، از مدل فرکانس پایین ترانسفورماتور همراه با در نظرگیری مدار مغناطیسی، مناسب برای مطالعات در محدوده فرکانسی عملکردی سیستم‌های قدرت استفاده خواهد شد. سپس نحوه مدل‌سازی هسته مغناطیسی غیر ایده‌آل مطرح شده و روابط ریاضی لازم به منظور پیاده‌سازی مناسب آن‌ها در حوزه هارمونیک توسعه‌یافته بسط داده خواهد شد. در نهایت، تحلیل جریان هجومی یک نمونه ترانسفورماتور با پیاده‌سازی روابط در نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی و به منظور بررسی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده با نتایج منتج از نرم‌افزار آنالیز حالت گذرا در سیستم‌های قدرت مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حوزه زمان، تحلیل حوزه فرکانس، کیفیت توان، حالات گذرا، ترانسفورماتور نوع هسته‌ای پنج ستونه، حوزه هارمونیک توسعه‌یافته

Harmonic Analysis of Inrush Current in Five-Limb Core Type Transformer by Using Extended Harmonic Domain

E. Karami¹, MSc; G. B. Gharehpetian², Professor; P. Karimyan³, PhD student

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: ehsankarami@aut.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: grptian@aut.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: peyman.sena@gmail.com

Abstract: In this paper, Extended Harmonic Domain is used in order to simulate and exact harmonic analysis of five-limb core type transformers during the transients in addition to steady state. To this aim, low frequency model of transformer along with considering magnetic circuit, appropriate for studies in the range of power system frequency, are used. Then, modeling procedure of non-ideal core is mentioned and required mathematical equations for their appropriate implementation in extended harmonic domain will be expanded. Finally, analyzing of inrush current of a sample transformer by implementing the equations in Matlab software is simulated and in order to investigate the accuracy of the proposed method, results of the performed simulation are compared with those results derived from transient analysis in power systems software.

Keywords: Time domain analysis, frequency domain analysis, power quality, transients, five-limb core type transformer, extended harmonic domain.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۹

نام نویسنده مسئول: گئورگ قره‌پتیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان حافظ - پلاک ۴۲۴ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده برق

۱- مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از تجهیزات غیرخطی و در نتیجه افزایش تزریق هارمونیک‌های مختلف ولتاژ و جریان در سیستم‌های قدرت مدرن، مسئله کیفیت توان به دلیل تأثیرگذاری بر بخش‌های مختلف شبکه به یکی از مسائل بسیار مهم در بهره‌برداری تبدیل شده است. از اثرات مخرب وجود هارمونیک‌ها در شبکه‌های قدرت می‌توان به تداخلات رادیویی، کاهش کیفیت توان و بیشتر شدن تلفات در بانک‌های خازنی و ترانسفورماتورهای قدرت اشاره نمود. در شرایط هارمونیک‌های شکل موج‌های ولتاژ و جریان معوج شده که ممکن است باعث عملکرد نادرست سیستم‌های کنترلی و حفاظتی گردد. ایجاد گشتاور ضربانی بر محور ماشین‌های الکتریکی و گرم شدن آن‌ها از دیگر مشکلات حضور هارمونیک‌ها در شبکه می‌باشد که موجب نیاز به استفاده از فیلترهای مناسب می‌گردد [۱-۳].

یکی از انواع حالات گذرا در شبکه‌های قدرت که با آلودگی هارمونیک قابل توجه همراه است، برق‌دار کردن ترانسفورماتور می‌باشد که این شرایط به واسطه وجود هسته مغناطیسی قابل اشباع به وجود می‌آید [۴-۵]. میزان این جریان تا حد قابل توجهی از جریان عملکرد عادی ترانسفورماتور بیش‌تر است و در بعضی حالات سبب عملکرد اشتباه رله حفاظتی می‌گردد. تحلیل صحیح این پدیده بسیار با اهمیت بوده و اساس عملکرد رله دیفرانسیل مبتنی بر آنالیز محتوای هارمونیک آن می‌باشد [۶-۸]. همچنین برق‌دار نمودن ترانسفورماتور ممکن است در شرایطی با پدیده فوق اشباع همراه باشد که موجب بروز اشکالاتی در عملکرد رله خواهد شد [۹]. بررسی هارمونیک‌های موجود در شبکه در شرایط ماندگار و گذرا را می‌توان براساس تحلیل مبتنی بر حوزه زمان، فرکانس و یا هر دو انجام داد [۱۰]. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی در برابر سایر روش‌ها می‌باشند.

در حوزه زمان معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله به صورت عددی و گام به گام با یک روش انتگرال‌گیری مناسب حل می‌گردند. دقت بالای پاسخ از ویژگی تحلیل حوزه زمان می‌باشد؛ در مقابل زمان نسبتاً بالای مورد نیاز جهت تحلیل و همچنین وابستگی زیاد روند تحلیل به شرایط اولیه از جمله معایب آن به شمار می‌رود. تحلیل هارمونیک در این حوزه مستلزم استفاده از عملیات ریاضی اضافی همچون تبدیل فوری به سریع به منظور تجزیه مؤلفه‌های هارمونیک می‌باشد که علاوه بر زمان مورد نیاز، حجم محاسبات را نیز افزایش می‌دهد. علاوه بر این استفاده از این روش‌ها در شرایط گذرا با خطای قابل توجه همراه می‌باشد [۱۰]. در حوزه فرکانس امکان بررسی وابستگی تجهیزات به فرکانس همچون اثر پوستی با دقت بسیار بالا وجود دارد [۱۱]. سرعت تحلیل در این حوزه بسیار بالا بوده و جهت برآورده‌سازی حدود ۹۵ درصد از نیازهای فنی کافی می‌باشد. تحلیل هارمونیک با مدل‌سازی منابع تولید هارمونیک به صورت منابع جریان و تزریق آن‌ها به شین‌های متناظر در فرکانس مربوطه صورت می‌گیرد. در مقابل این ویژگی‌های قابل توجه، عدم توانایی در دنبال کردن حالات

گذرا و همچنین عدم دقت کافی در شبیه‌سازی تجهیزات غیرخطی همچون ادوات کلیدزنی به کاررفته در مبدل‌های الکترونیک قدرت از معایب آن می‌باشند. بسیاری از نرم‌افزارهای مبتنی بر این حوزه از دینامیک‌های ناشی از هارمونیک‌ها در شرایط گذرا صرف‌نظر می‌کنند که با توجه به افزایش آلودگی هارمونیک موجب کاهش دقت می‌شود [۱۰]. در روش‌های حوزه زمان-فرکانس از مزایای هر دو حوزه استفاده می‌گردد به صورتی که شبکه به دو قسمت خطی و غیرخطی تجزیه شده و قسمت خطی در حوزه فرکانس و بخش غیرخطی در حوزه زمان تحلیل می‌شود و در نهایت پاسخ کلی به کمک روش‌های تکرار و روابط ریاضی مربوطه مشخص خواهد شد. از معایب آن می‌توان به پیچیدگی‌های پیاده‌سازی کامپیوتری اشاره نمود [۱۰].

یکی از روش‌های بسیار قدرتمند در حوزه فرکانس، حوزه هارمونیک توسعه یافته بوده که بر بسط سری فوری تابع تا دقت مورد نظر مبتنی می‌باشد. در این روش به کمک مجموعه‌ای از توابع ریاضی امکان بررسی دقیق حالات گذرای ناشی از هر هارمونیک همراه با سرعت بسیار بالا در حوزه فرکانس فراهم می‌گردد [۱۱]. همچنین می‌توان پاسخ حاصل از این روش را به کمک ماتریس‌های انتقال به شکل موج در حوزه زمان به منظور تحلیل و یا مقایسه تبدیل نمود.

از نمایش حوزه هارمونیک توسعه یافته جهت مدل‌سازی و پیاده‌سازی تعدادی از تجهیزات سیستم قدرت همچون خطوط انتقال، بانک ترانسفورماتوری، ادوات الکترونیک قدرت و ژنراتورهای سنکرون استفاده شده است [۱۲-۱۶]. کاربرد حوزه هارمونیک توسعه یافته در تحلیل پایداری گذرا در شرایط هارمونیک، اثر شیف‌ت فاز منبع ورودی بر طیف هارمونیک در حالت گذرا، بررسی اضافه ولتاژهای بلند مدت در زمان برق‌دار نمودن هم‌زمان بانک خازنی و ترانسفورماتور، مدل‌سازی سیستم‌های HVDC مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ و مدل‌سازی تک‌فاز عناصر سیستم قدرت در شرایط گذرا در [۱۷-۲۱] ارائه شده است.

در این مقاله از روش حوزه هارمونیک توسعه یافته جهت تحلیل هارمونیک دقیق ترانسفورماتور نوع هسته‌ای پنج شاخه در حالت گذرا با در نظرگیری مدار الکتریکی و مغناطیسی و ارتباط آن‌ها به منظور شبیه‌سازی و تحلیل جریان هجومی استفاده خواهد شد؛ به طوری که دنبال کردن تغییرات دقیق هر هارمونیک در طی فرآیند برق‌دار شدن ترانسفورماتور بدون انجام هرگونه محاسبه اضافی قابل انجام خواهد بود. روابط ریاضی در نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی و جهت حل بهینه معادلات دیفرانسیل حاصل از روش انتگرال‌گیری ذوزنقه‌ای استفاده شده است. به منظور بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از روش به کاررفته در این مقاله، جریان هجومی ترانسفورماتور مورد مطالعه به کمک نرم‌افزار EMTD مجدداً شبیه‌سازی شده و خروجی‌های حاصل باهم مقایسه می‌شوند.

۲- حوزه هارمونیک توسعه یافته

بسط به کمک سری فوری یکی از ایده‌های اصلی در حوزه هارمونیک توسعه یافته برای نمایش سیگنال‌های ورودی و خروجی است. اساس

حاصل ضرب دو تابع به کمک رابطه (۹) در حوزه هارمونیک توسعه یافته بر حسب عملگر G داده می شود [۱۵].

$$a(\tau) x(\tau) = G^T(\tau) [A] X(\tau) \quad (9)$$

در رابطه (۹)، ماتریس $[A]$ دارای ساختار قطری بوده و از محتوای هارمونیک $a(\tau)$ و براساس رابطه (۱۰) تشکیل می گردد.

$$A = \begin{bmatrix} A_0 & A_{-1} & \dots & A_{-h} & & & \\ A_1 & \ddots & \ddots & & \ddots & & \\ \vdots & \ddots & A_0 & A_{-1} & \ddots & & \\ A_h & & A_1 & A_0 & A_{-1} & \ddots & \\ & \ddots & & A_1 & A_0 & \ddots & \\ & & & & \ddots & \ddots & A_{-1} \\ & & & & & A_1 & A_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

از روابط فوق مشخص است که توابع متغیر با زمان در حوزه هارمونیک توسعه یافته به ماتریس هایی که دارای عناصر ثابت اند تبدیل خواهند شد. در پیاده سازی های کامپیوتری استفاده از اعداد ثابت سرعت روند تحلیل را به میزان قابل توجهی افزایش خواهد داد. روابط فوق اساس انتقال معادلات حوزه زمان به حوزه هارمونیک توسعه یافته را فراهم می سازند.

۱-۲- معادلات حالت در حوزه هارمونیک توسعه یافته

معادله (۱۱) حالت کلی یک سیستم را در حوزه زمان نمایش می دهد.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= a(t) x(t) + b(t) u(t) \\ y(t) &= c(t) x(t) + e(t) u(t) \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن توابع $a(t)$ ، $b(t)$ ، $c(t)$ و $e(t)$ دوره تناوب T_0 دارند. تنها شرط استفاده از حوزه هارمونیک توسعه یافته متناوب بودن توابع ذکر شده با دوره تناوب T_0 می باشد که در این صورت تابع $x(t)$ نیز با دوره تناوب T_0 متناوب خواهد بود.

$$\begin{aligned} G^T [D] X + G^T \dot{X} &= G^T [A] X + G^T [B] U \\ G^T Y &= G^T [C] X + G^T [E] U \end{aligned} \quad (12)$$

با حذف عملگر G از طرفین معادله فوق، فرم ساده شده معادلات حالت در حوزه هارمونیک توسعه یافته به صورت نمایش داده شده در رابطه (۱۳) حاصل می گردد [۱۵]. عملگر G پس از انجام محاسبات در حوزه فرکانس به منظور مشاهده پاسخ حوزه زمان براساس رابطه (۳) مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= [[A] - [D]] X + [B] U \\ Y &= [C] X + [E] U \end{aligned} \quad (13)$$

رابطه فوق معادله اصلی در توصیف رفتار سیستم در حوزه هارمونیک توسعه یافته می باشد. براساس این رابطه مشخص است که توابع متناوب تشکیل دهنده معادله دارای فرم خطی بوده که باعث می شود حجم محاسبات تا حد قابل ملاحظه ای کاهش یابد. اگر هدف در شبیه سازی رسیدن به پاسخ حالت ماندگار یعنی $\dot{X}(t) = 0$ باشد، آنگاه معادله به صورت (۱۴) ساده شده که نمایش حوزه هارمونیک می باشد.

تحلیل به کمک این روش بر مبنای بسط سری فوریه توابع تا مرتبه مورد نیاز جهت رسیدن به دقت کافی می باشد. تابع متناوب $x(\tau)$ با دوره تناوب T_0 که به صورت سری فوریه نوشته شده است را در نظر بگیرید.

$$x(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n(t) e^{jn\omega_0\tau} \quad (1)$$

در این رابطه $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ و $\tau = [t, t + T_0]$ می باشد. ضرایب در حالت کلی تابع زمان بوده و در یک دوره تناوب به کمک رابطه (۲) محاسبه می شوند.

$$X_n(t) = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(\tau) e^{-jn\omega_0\tau} d\tau \quad (2)$$

به کمک رابطه (۲) می توان تابع را در یک دوره تناوب محاسبه کرد. اگر در بازه مورد بررسی از سری فوریه متناهی استفاده کنیم در این صورت می توان رابطه (۱) را به کمک رابطه (۳) تقریب زد [۱۵].

$$x(\tau) \cong \sum_{n=-h}^h X_n(t) e^{jn\omega_0\tau} = G^T X \quad (3)$$

که در این رابطه h بالاترین مرتبه هارمونیک است. توابع G و X به ترتیب برابر با

$$G = \begin{bmatrix} e^{-jh\omega_0\tau} \\ \vdots \\ e^{-j\omega_0\tau} \\ 1 \\ e^{j\omega_0\tau} \\ \vdots \\ e^{jh\omega_0\tau} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$X = \begin{bmatrix} X_{-h}(t) \\ \vdots \\ X_{-1}(t) \\ X_0(t) \\ X_1(t) \\ \vdots \\ X_h(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

می باشند. برای بررسی رفتار دینامیک بر حسب زمان، باید تغییرات تابع بر حسب زمان محاسبه شود. با مشتق گیری از رابطه (۳) معادله زیر حاصل می گردد [۱۱].

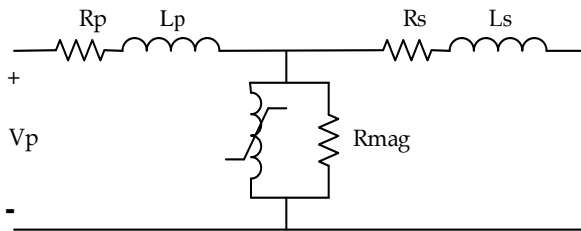
$$\dot{x}(\tau) = \frac{dG^T(\tau)}{d\tau} X(t) + G^T(\tau) \frac{dX(t)}{d\tau} \quad (6)$$

مشتق عملگر G را می توان به صورت زیر نمایش داد.

$$\dot{G}^T(\tau) = G^T(\tau) D(jh\omega_0) \quad (7)$$

که در آن ماتریس D دارای آرایشی قطری به صورت زیر است:

$$D(jh\omega_0) = \begin{bmatrix} -jh\omega_0 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & -j\omega_0 & & \\ & & & 0 & \\ & & & & j\omega_0 \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & jh\omega_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$



شکل ۳: مدل مناسب ترانسفورماتور جهت انجام مطالعات حالت گذرا در محدوده فرکانس عملکردی شبکه

بعد از پیاده‌سازی مدل ادمیتانسی هر تجهیز می‌توان از تحلیل گره برای حل معادلات شبکه به صورت زیر استفاده نمود.

$$[I] = [Y][V] \quad (۱۵)$$

که در آن بردار $[I]$ جریان‌های تزریقی به شین‌ها، $[V]$ ولتاژ شین‌ها و $[Y]$ ماتریس ادمیتانس شبکه می‌باشند. نکته مهم این است که در صورت وجود عناصر غیرخطی در شبکه باید از روش‌های تکرار استفاده نمود به طوری که ابتدا در هر گام زمانی، انتگرال‌گیری عددی همگرا شده و سپس گام زمانی بعدی حل شود؛ در غیر این صورت جواب‌های حاصل در هر گام زمانی معتبر نخواهند بود.

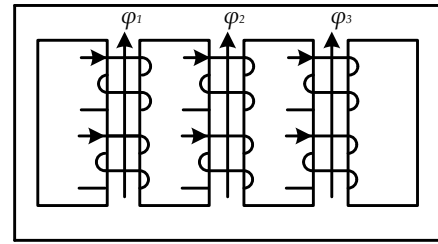
۳- ترانسفورماتور سه‌فاز پنج شاخه

۳-۱- مدار مغناطیسی و معادل رلوکتانسی هسته

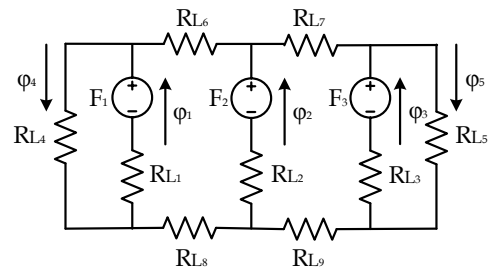
شکل ۱ مدار مغناطیسی یک ترانسفورماتور سه‌فاز پنج ستونه نوع هسته‌ای را نمایش می‌دهد که در آن سیم‌پیچ‌ها بر روی ستون‌های داخلی نصب شده‌اند. سطح مقطع دو ستونی که فاقد سیم‌پیچی می‌باشند نصف سطح مقطع ستون‌های سیم‌پیچی شده را دارند که در نتیجه وزن مجموعه کاهش می‌یابد. این ساختار به دلیل فراهم نمودن مسیر برای عبور شار توالی صفر (در نتیجه امپدانس توالی صفر کم‌تر) و همچنین اتلاف حرارت کمتر به طور گسترده‌ای برای ترانسفورماتورهایی با اتصال ستاره زمین شده به کار برده می‌شود. معادل رلوکتانسی این ساختار در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۳-۲- مدار الکتریکی ترانسفورماتور تک‌فاز

مدل‌های متفاوتی برای ترانسفورماتورها وجود دارند که با توجه به شرایط موجود در مسئله انتخاب می‌شوند. به‌عنوان مثال، برای مطالعات استاتیک در شبکه همچون حل مسئله پخش بار، استفاده از مدل ساده شده ترانسفورماتور به صورت امپدانس سری کافی می‌باشد، در حالی که برای سایر مطالعات مانند جریان هجومی در لحظه برق‌دار کردن ترانسفورماتور در سمت اولیه، استفاده از مدل‌های دقیق‌تر ضروری است. به همین علت در مطالعات حالت گذرا در نظر گرفتن شاخه مغناطیس‌کنندگی در ترانسفورماتور جهت تحلیل دقیق رفتار ماشین بسیار مهم می‌باشد. شکل ۳ مدار معادل یک ترانسفورماتور تک‌فاز مناسب برای مطالعات حالت گذرا در محدوده فرکانس عملکردی شبکه



شکل ۱: ترانسفورماتور سه‌فاز پنج ستونه



شکل ۲: نمایش ترانسفورماتور نوع هسته‌ای پنج ستونه با استفاده از مدار رلوکتانسی

$$X = -[A]^{-1} [B] U \quad (۱۴)$$

$$Y = [C] X + [E] U$$

این رابطه یکی از ویژگی‌های برجسته حوزه هارمونیک توسعه‌یافته را در مقابل حوزه زمان نمایش می‌دهد. در حالی که روند تحلیل در حوزه زمان حتی اگر مطلوب رسیدن به حالت ماندگار باشد، به مقدار زیادی به شرایط اولیه بستگی دارد، در حوزه هارمونیک توسعه‌یافته پاسخ حالت ماندگار تنها به کمک حل معادله (۱۴) امکان‌پذیر خواهد بود. این ویژگی سبب می‌شود که بتوان از معادله (۱۴) جهت اعمال شرایط اولیه به معادله (۱۳) استفاده نمود؛ در این صورت بررسی حالات گذرا را می‌توان از شرایط حالت ماندگار آغاز نمود.

۲-۲- حل معادلات حالت در حوزه هارمونیک توسعه یافته

حل معادلات در حوزه هارمونیک توسعه‌یافته مستلزم به کارگیری یک روش عددی است. یکی از روش‌های مناسب برای حل عددی معادلات دیفرانسیل روش انتگرال‌گیری دوزنقه‌ای است که به کمک آن می‌توان معادل نورتون را جهت انجام تحلیل گره را به دست آورد و دارای دقت و سرعت مناسب می‌باشد. گام زمانی انتگرال‌گیری تأثیر بسیار زیادی در دقت پاسخ، زمان مورد نیاز جهت حل معادلات و حتی همگرایی دارد. انتخاب گام زمانی مناسب در تحلیل حوزه زمان بسیار مهم بوده و عدم انتخاب صحیح آن می‌تواند منجر به پاسخ‌هایی دور از واقعیت (به‌ویژه در حالات گذرا) و حتی در بعضی موارد باعث واگرایی در روند تحلیل شبکه گردد. در بررسی حالات گذرا در شبکه‌های قدرت بزرگ به منظور افزایش دقت معمولاً گام زمانی مقدار کوچکی انتخاب شده اما در حالت ماندگار برای افزایش سرعت معمولاً مقدار نسبتاً بزرگ‌تری برای آن انتخاب می‌شود.

جدول ۱: پارامترهای عددی ماشین مورد مطالعه

مقدار	پارامتر
۴/۵ کیلوولت آمپر ۶۰ هرتز	توان ظاهری ماشین فرکانس
۰/۱۹۲ اهم ۳ میلی هانری	مقاومت سیم پیچی های سه فاز اندوکتانس خودی "a" و "c"
۳/۰۳۵ میلی هانری -۱/۲۳۸ میلی هانری	اندوکتانس خودی "b" اندوکتانس متقابل "a" و "b"
-۱/۲۳۸ میلی هانری -۰/۲۳۷ میلی هانری	اندوکتانس متقابل "b" و "c" اندوکتانس متقابل "a" و "c"
۶۱۲/۸۶ اهم	مقاومت شاخه مغناطیسی

لازم به ذکر است که در این مقاله، از اندوکتانس ناشی از مسیر هوا به منظور سادگی در محاسبات مدار مغناطیسی صرف نظر شده است. معادلات حاکم بر مدار مغناطیسی جهت محاسبه ماتریس اندوکتانس ترانسفورماتور در بخش ضمیمه ارائه شده اند.

۴- مطالعات موردی و نتایج

به منظور اجرای رویکردهای مطرح شده در قسمت های قبل، الگوریتم ها در محیط نرم افزار Matlab پیاده سازی و در قالب یک محیط کاربر پسند به یکدیگر متصل شده اند. شبیه سازی ها در یک کامپیوتر با مشخصات CPU: 2.10 GHz و Corei7، RAM: 6G انجام شده است.

ترانسفورماتور سه فاز دارای اتصال مثلث در اولیه و ستاره زمین شده در ثانویه می باشد. همچنین به منظور شبیه سازی جریان هجومی فرض می شود که اتصال ثانویه ماشین باز است.

پارامترهای ماشین مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. منابع ولتاژ ورودی به صورت سه فاز متعادل با اتصال ستاره زمین شده بوده و دارای دامنه ۶۰ ولت می باشند. زاویه ورودی منبع ولتاژ در فاز "a" برابر با ۳۰- درجه و زمان کلیدزنی که در هر سه فاز یکسان است برابر صفر می باشد و در این حالت ترانسفورماتور در شرایط بی باری برق دار می گردد. همچنین تعداد هارمونیک های مورد مطالعه در حوزه هارمونیک تو سعه یافته برابر با ۱۵ انتخاب می گردد. انتخاب مقدار بالاتر برای تعداد هارمونیک های مورد مطالعه موجب دقیق تر شدن پاسخ خروجی خواهد شد اما در مقابل زمان مورد نیاز جهت تحلیل افزایش می یابد. در نتیجه انتخاب صحیح این پارامتر جهت استفاده از مزایای حوزه فرکانس به ویژه سرعت تحلیل سیستم بسیار مهم می باشد.

تغییرات دامنه هارمونیک های جریان کشیده شده از فازهای "a"، "b" و "c" برحسب آمپر به ترتیب در شکل های ۴، ۵، ۶ آمده است. مطابق این شکل ها، تفاوت در شکل موج های تغییرات دامنه هارمونیک های مختلف در جریان های کشیده شده از سه فاز به همراه آلودگی هارمونیک بسیار بالا به خوبی قابل مشاهده است. همان طور که انتظار می رفت، با توجه به کوپلینگ بین شار در شاخه های مختلف دامنه هارمونیک ها در جریان های فاز متفاوت می باشند.

را از دیدگاه سیم پیچ اولیه نمایش می دهد. در این مدل، R_p و R_s مقاومت های اولیه و ثانویه، L_p و L_s اندوکتانس های ناشی اولیه و ثانویه، R_{mag} مدل کننده تلفات هسته و اندوکتانس غیر خطی مدل کننده رابطه بین شار مغناطیسی و جریان در ترانسفورماتور می باشد.

جهت مدل سازی شاخه مغناطیس کنندگی راهکارهای متفاوتی از جمله استفاده از تقریب تکه ای-خطی وجود دارد. اما استفاده از این نوع نمایش سبب تغییر ماتریس ادمیتانس در صورت تغییر نقطه کار ترانسفورماتور خواهد شد. در نتیجه زمان مورد نیاز تحلیل به ویژه در شرایطی که امکان تغییر نقطه کار وجود دارد (مانند مطالعات جریان هجومی) به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. روش دیگر استفاده از یک تابع ریاضی مناسب جهت توصیف منحنی شار - جریان است. این تابع ریاضی می تواند به صورت یک چند جمله مرتبه بالا (با توجه به نمای کلی منحنی) باشد که به کمک عملیات تطبیق منحنی حاصل خواهد شد. در این صورت شاخه مغناطیس کنندگی همچون یک منبع جریان عمل می کند که مقدار آن به شار هسته وابسته می باشد. در این صورت ماتریس ادمیتانس شبکه ثابت بوده و نیازی به بازنویسی و معکوس گیری از آن در هر گام زمانی نیست. در این مقاله، از رابطه (۱۶) به منظور توصیف ارتباط بین شار - جریان در هسته استفاده می شود.

$$i_N = 0.7576\phi + 1.03 \times 10^7 \phi^{19} \quad (16)$$

۳-۳- مدار الکتریکی ترانسفورماتور سه فاز

در یک ترانسفورماتور سه فاز با در نظرگیری اندوکتانس متقابل ناشی از شارهای بین سیم پیچ های مختلف و همچنین تعمیم مدار الکتریکی ترانسفورماتور تک فاز به ترانسفورماتور سه فاز، معادلات توصیف کننده به فرم ماتریسی به صورت نشان داده شده در (۱۷) می باشد.

$$v_s(t) = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (17)$$

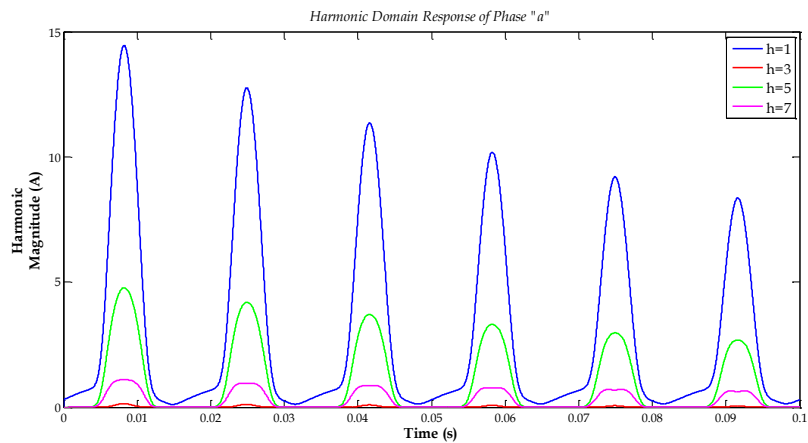
که در این رابطه:

$$\begin{aligned} v_s(t) &= [v_{sa}(t) \quad v_{sb}(t) \quad v_{sc}(t)]^t \\ i(t) &= [i_a(t) \quad i_b(t) \quad i_c(t)]^t \\ \psi(t) &= [\psi_a(t) \quad \psi_b(t) \quad \psi_c(t)]^t \end{aligned} \quad (18)$$

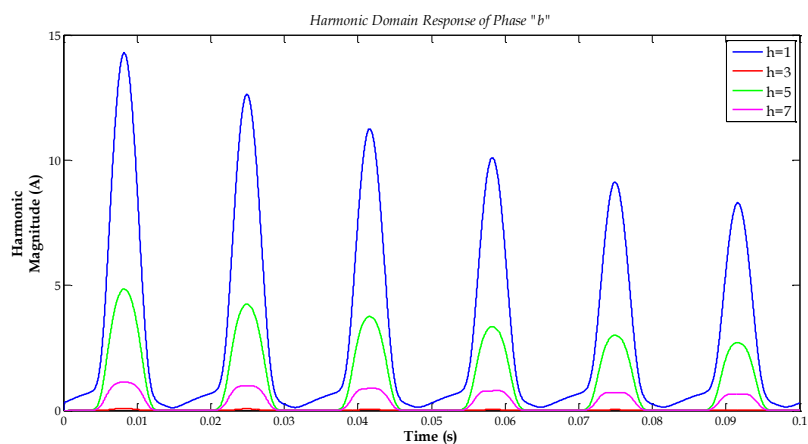
در (۱۷)، ماتریس مقاومت و اندوکتانس به صورت زیر تعریف می شوند:

$$R = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} L_{aa} & m_{ab} & m_{ac} \\ m_{ba} & L_{bb} & m_{bc} \\ m_{ca} & m_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (19)$$

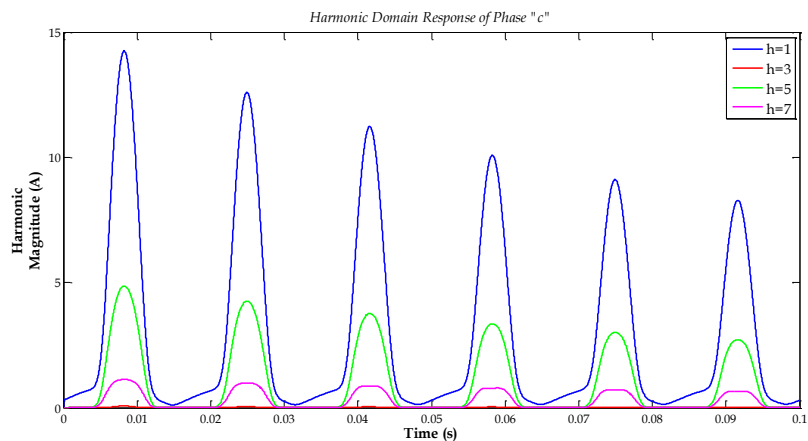
لازم به ذکر است که در این مقاله، ماتریس اندوکتانس براساس مدار معادل رلوکتانسی نشان داده شده در شکل ۲ محاسبه می گردد. در این صورت یک ارتباط صریح بین شار جاری شده در ستون ها و نیرو محرکه مغناطیسی بر حسب رلوکتانس شاخه ها قابل استخراج خواهد بود.



شکل ۴: تغییرات دامنه هارمونیک‌ها در فاز "a"



شکل ۵: تغییرات دامنه هارمونیک‌ها در فاز "b"



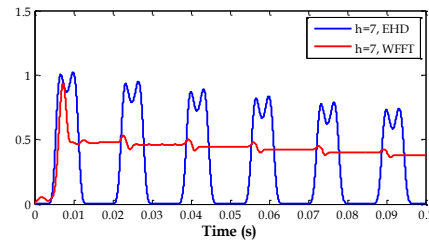
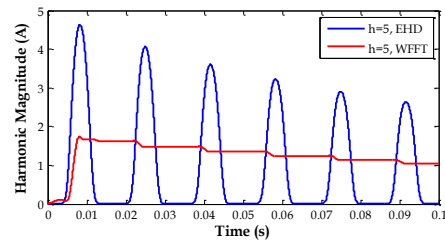
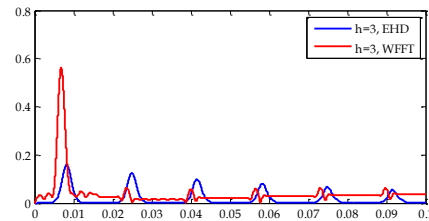
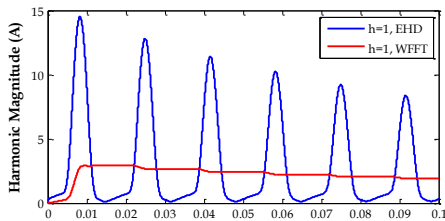
شکل ۶: تغییرات دامنه هارمونیک‌ها در فاز "c"

در صورت استفاده از روش WFFT به منظور استخراج هارمونیک‌های زوج جریان فاز "a"، نتایج نشان داده شده در شکل ۸ محاسبه می‌شوند و این در حالی است که مطابق نتایج حاصل از روش حوزه هارمونیک توسعه‌یافته در تحلیل سیستم، هارمونیک‌های زوج در شکل موج‌ها وجود ندارند. میزان حداکثر مؤلفه اصلی در جریان فازهای "a"، "b" و "c" در سیکل اول به ترتیب برابر با ۱۴/۵۲ آمپر، ۱۴/۳۴ آمپر و ۱۴/۳۱ آمپر می‌باشد.

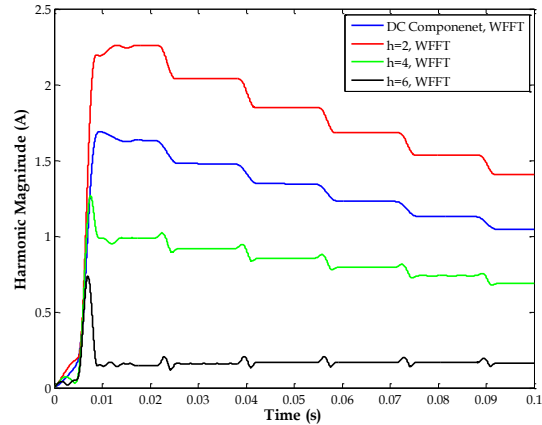
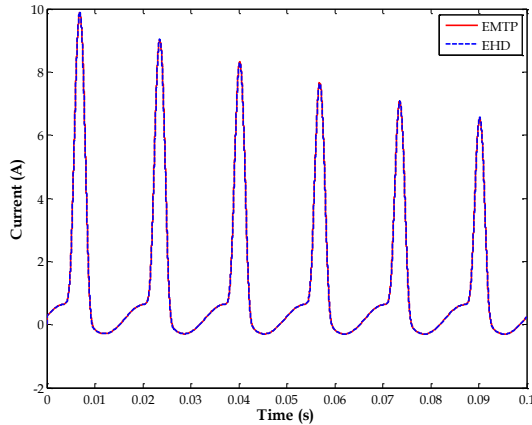
از نکات قابل ذکر در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ می‌توان به نبود هارمونیک‌های زوج در شکل موج‌ها اشاره نمود. در صورت استفاده از تبدیلات زمان-فرکانس مانند WFFT و اعمال آن به پاسخ حوزه زمان نمی‌توان به نتایج مشابهی رسید. به عنوان مثال، در صورت استفاده از روش WFFT و اعمال آن به شکل موج حوزه زمان جریان فاز "a" به منظور استخراج محتوای هارمونیک، نتایج نمایش داده شده در شکل ۷ برای هارمونیک‌های فرد حاصل می‌گردد.

جدول ۲: میزان حداکثر هارمونیک‌ها در مقایسه با مؤلفه اصلی در سیکل اول

رتبه هارمونیک	دامنه هارمونیک‌ها نسبت به مؤلفه اصلی در فاز "a" (%)	دامنه هارمونیک‌ها نسبت به مؤلفه اصلی در فاز "b" (%)	دامنه هارمونیک‌ها نسبت به مؤلفه اصلی در فاز "c" (%)
۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۳	۱/۰۷	۰/۶۶	۰/۵۶
۵	۳۱/۸۹	۳۲/۷۰	۳۲/۸۲
۷	۷/۰۳	۷/۳۳	۷/۲۷



شکل ۷: محتوای هارمونیک جریان کشیده شده از فاز "a" به وسیله روش حوزه هارمونیک توسعه یافته و WFFT

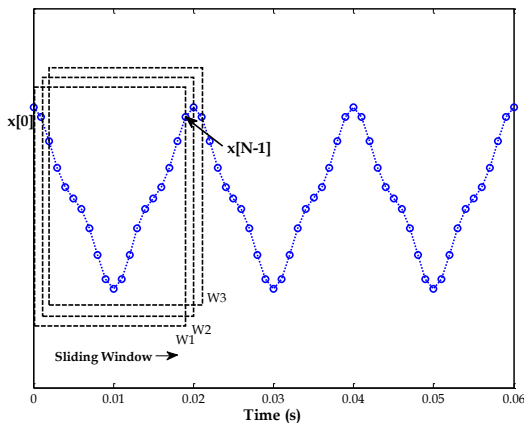


شکل ۹: پاسخ حوزه زمان جریان کشیده شده از فاز "a"

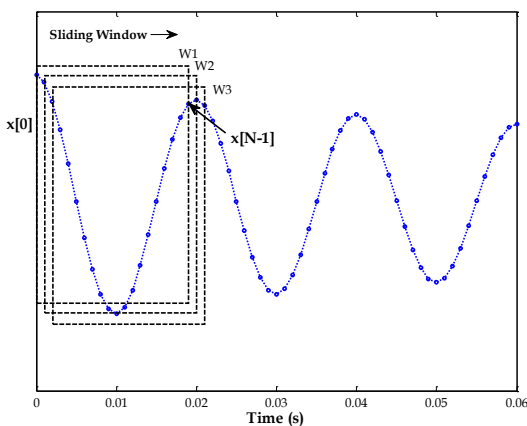
شکل ۸: استخراج هارمونیک‌های زوج توسط روش WFFT

داده شده مبتنی بر روش حوزه هارمونیک توسعه یافته برابر ۱۰۰ میکروثانیه می‌باشد. شکل ۹ پاسخ حوزه زمان جریان کشیده شده از فاز "a" که به کمک روش حوزه هارمونیک توسعه یافته و نرم افزار EMTP حاصل شده است را نمایش می‌دهد. براساس این شکل مشخص است که پاسخ‌های حاصل از هر دو روش کاملاً بر هم منطبق‌اند. در صورتی که تعداد هارمونیک‌های مورد مطالعه کمتر از مقدار ۷ انتخاب گردد پاسخ خروجی روش حوزه هارمونیک توسعه یافته به ویژه در چند سیکل اول (که دامنه هارمونیک‌های مرتبه بالا قابل توجه است) دارای اختلاف قابل توجه با پاسخ حاصل از نرم افزار EMTP می‌باشد.

جدول ۲ مقدار حداکثر دامنه هارمونیک‌ها در سیکل اول در مقایسه با مؤلفه اصلی را نمایش می‌دهد. مطابق این جدول می‌توان مشاهده نمود که دامنه هارمونیک سوم در جریان‌های کشیده شده از منبع در مقایسه با مؤلفه اصلی بسیار کم بوده که با توجه به وجود اتصال مثلث در اولیه ترانسفورماتور قابل انتظار می‌باشد. به منظور بررسی صحت پاسخ‌های خروجی، از نرم افزار آنالیز حالت گذرای EMTP به منظور تحلیل شکل موج‌های حوزه زمان استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که در این نرم افزار گام انتگرال گیری زمانی برابر ۱ میکروثانیه بوده در حالی که این مقدار در الگوریتم‌های توسعه



شکل ۱۱: پنجره چرخان در طول سیگنال گسسته (شرایط ماندگار)

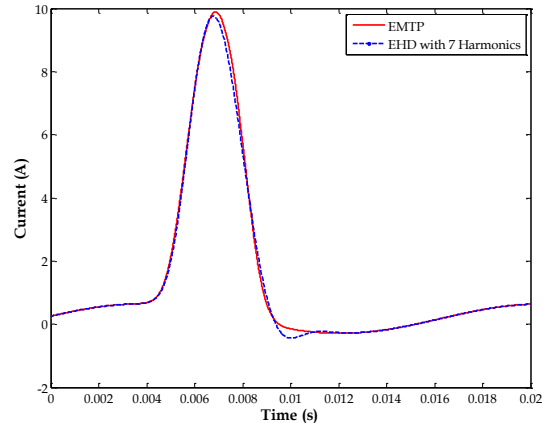


شکل ۱۲: پنجره چرخان در طول سیگنال گسسته (شرایط گذرا)

به منظور درک چگونگی عملکرد روش FFT و همچنین دلیل وجود خطا در خروجی در شرایط گذرا به منظور استخراج طیف هارمونیک شکل ۱۱ را در نظر بگیرید. با توجه به این که شکل موج در شرایط ماندگار قرار دارد می توان نتیجه گرفت که $x[N]$ برابر $x[0]$ می باشد. در نتیجه در پنجره های $W1$ ، $W2$ و $W3$ با وجود تفاوت در نمونه های سیگنال محتوای هارمونیک کاملاً یکسان است. اکنون شکل ۱۲ را در نظر بگیرید که در آن سیگنال در حالت گذرا قرار دارد. با توجه به این که شکل موج در شرایط گذرا قرار دارد، در این صورت $x[N]$ برابر $x[0]$ نمی باشد. در نتیجه شرط اساسی روش FFT یعنی پرودیک بودن برقرار نبوده و استفاده از آن منجر به بروز خطا خواهد شد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روش حوزه هارمونیک توسعه یافته به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت تحلیل هارمونیک شبکه های قدرت مطرح گردید. مزایای آن شامل تحلیل هارمونیک مستقیم شبکه بدون استفاده از هرگونه ابزار اضافی، افزایش سرعت روند تحلیل، دنبال کردن دقیق دینامیک هر هارمونیک در حالات گذرا و رسیدن به پاسخ حالت ماندگار



شکل ۱۰: مقایسه پاسخ حاصل از نرم افزار EMTP و حوزه هارمونیک توسعه یافته با ۷ هارمونیک مورد مطالعه

برای درک بهتر تأثیر تعداد هارمونیک های انتخاب شده و همچنین بررسی تأثیرات هارمونیک ها بر هم در یک سیستم غیر خطی، پاسخ زمانی شکل ۱۰ ترسیم می گردد که مطابق آن مشاهده می شود که پاسخ ها کاملاً بر هم منطبق نمی باشند. این خطا ممکن است در مواردی قابل صرف نظر کردن باشد ولی در مواردی که دامنه هارمونیک های مرتبه بالا در خروجی قابل توجه باشد (مانند مطالعه مبدل های الکترونیک قدرت با تکنیک کلیدزنی مدولاسیون عرض پالس)، میزان این خطا قابل قبول نمی باشد.

لازم به ذکر است که زمان مورد نیاز جهت تحلیل سیستم به مدت ۰/۱ ثانیه به کمک نرم افزار EMTP برابر با ۴/۶۳ ثانیه بوده در حالی که این مقدار با استفاده از حوزه هارمونیک توسعه یافته و برای ۱۵ هارمونیک مورد مطالعه برابر با ۳/۰۸ ثانیه و برای ۷ هارمونیک مورد مطالعه برابر با ۱/۱۸ ثانیه می باشد.

۵- مقایسه بین روش حوزه هارمونیک توسعه یافته و روش های مبتنی بر FFT

لازم به ذکر است که بین روش حوزه هارمونیک توسعه یافته و تبدیلات مورد استفاده جهت دنبال نمودن هارمونیک ها تفاوت اساسی وجود دارد. در حقیقت روش حوزه هارمونیک توسعه یافته امکان دنبال نمودن هارمونیک ها را با محاسبه ضرایب سری فوریه به صورت گام به گام در طول زمان در حالت گذرا و ماندگار فراهم می کند و شکل موج ولتاژ و یا جریان را نتیجه می دهد. هدف از محاسبه این شکل موج می تواند بررسی دامنه و زاویه هارمونیک های مختلف و یا مقایسه پاسخ حوزه زمان محاسبه شده به کمک حوزه هارمونیک توسعه یافته با پاسخ خروجی آنالیز حوزه زمان باشد. اما روش های FFT و یا موجک مبتنی بر سیگنال ورودی می باشند که این سیگنال ورودی ممکن است خروجی زمانی حاصل شده از روش حوزه هارمونیک توسعه یافته بوده و یا مستقیماً پاسخ خروجی حوزه زمان باشد.

$$m_{ac} = m_{ca} = -N^2 (R_{L_4}^2 R_{L_1}) / 2cons. \quad (31)$$

مقدار ثابت $cons.$ در روابط (۳۱)–(۲۸) براساس رابطه (۳۲) محاسبه می‌گردد.

$$cons. = (R_{L_1}^2 + 1.5R_{L_1}R_{L_4} + R_{L_1}R_{L_6} + R_{L_4}R_{L_6})(R_{L_4}R_{L_1} + 2R_{L_4}R_{L_6} + 2R_{L_1}R_{L_6}) \quad (32)$$

باید عنوان گردد که اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌های "b" و "a"، "b"، "c" و "c"، و "b" نیز برابر با مقدار محاسبه شده در رابطه (۳۰) می‌باشد.

مراجع

- [1] J. Arrillaga, N.R. Watson, *Power System Harmonics: Computer Modelling and Analysis*, New York: Wiley, 2003.
- [2] E.B. Makram, L. Setzer, S. Varadan, "Effects of harmonic sources on customer loads," *Electric Power Syst. Res.*, vol. 29, no. 1, pp. 51-55, 1994.
- [3] علیرضا حسنی اصل، مهدی معلم و محمد کیوان‌فرد، «بهبود عملکرد فیلترهای هارمونیک جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو برای کوره‌های قوس الکتریکی با آنالیز حساسیت و استفاده از نتایج عملی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، ۷۵-۸۶، ۱۳۹۵.
- [4] H. S. Bronzeado, P. B. Brogan and R. Yacamini, "Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 2051-2056, Nov. 1996.
- [5] Specht, T. R., "Transformer magnetizing inrush current", *AIEE Trans.*, Vol. 70, No.1, pp. 323-328, 1951.
- [6] Mathews, C. A., "An improved transformer differential relay", *AIEE Trans.*, Vol. 73, No.3, pp. 645-650, 1954.
- [7] Wiszniewski, A., Ungrad, H., Winkler, W., *Protection Techniques in Electrical Energy Systems*, New York: Marcel Dekker, 1995.
- [8] Numerical Differential Protection Relay for Transformers, Generators, Motors and Mini Bus bars, Instruction Manual, SIEMENS AG, 2006.
- [9] Lin, X., Liu, P., "The Ultra-Saturation Phenomenon of Loaded Transformer Energization and Its Impacts on Differential Protection", *IEEE Trans. on Power Del.*, Vol. 20, No. 2, pp. 1265-1272, 2005.
- [10] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Interfacing techniques for time-domain and frequency-domain simulation methods," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 3, pp. 1796-1807, 2010.
- [11] J. J. Rico, M. Madrigal, and E. Acha, "Dynamic harmonic evolution using the extended harmonic domain," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 2, pp. 587-594, 2003.
- [12] J. J. Chavez and A. Ramirez, "Dynamic harmonic domain modeling of transients in three-phase transmission lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 4, pp. 2294-2301, 2008.
- [13] E. Karami, M. Madrigal, S. M. Kouhsari and S. M. Mazhari, "A dynamic harmonic domain-based framework to detect 3-phase balanced systems under dynamic transients: the test case of inrush current in transformers," *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, vol. 27, no. 2, 2017.

بدون وابستگی به شرایط اولیه می‌باشد. در کنار این مزایا، معایبی همچون بالا بودن مرتبه ماتریس‌های به کاررفته و همچنین افزایش زمان مورد نیاز جهت تحلیل در حضور عناصر غیرخطی که با چندجمله‌ای تقریب زده می‌شوند، وجود دارد که به کمک تکنیک‌های خاصی می‌توان آن‌ها را تا حدود زیادی بهبود بخشید. همچنین در این مقاله، تحلیل جامع هارمونیک جریانی هجومی ترانسفورماتور نوع هسته‌ای پنج شاخه در حوزه هارمونیک توسعه‌یافته با انجام سناریوهای مختلف و بررسی تأثیرات آن‌ها انجام گردید. نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌خوبی مزایای استفاده از حوزه هارمونیک توسعه‌یافته را برابر حوزه‌های زمان و فرکانس نمایش دادند. این روش می‌تواند در نرم‌افزارهای مبتنی بر فازور جهت آنالیز هارمونیک در حالت گذرا به‌کاربرده شود.

پیوست

در این قسمت ماتریس اندوکتانس ترانسفورماتور نوع هسته‌ای پنج شاخه به کمک مدار مغناطیسی شکل (۲) محاسبه می‌گردد. با توجه به قانون افت نیرو محرکه مغناطیسی در شاخه‌ها روابط (۲۳)–(۲۰) و با توجه به پخش شار مغناطیسی در شاخه‌ها رابطه (۲۴) قابل استنتاج می‌باشد.

$$-R_{L_4}\phi_4 + F_1 - R_{L_1}\phi_1 = 0 \quad (20)$$

$$-F_1 + R_{L_1}\phi_1 + R_{L_6}\phi_1 - R_{L_6}\phi_4 + F_2 - R_{L_2}\phi_2 + R_{L_8}\phi_1 - R_{L_8}\phi_4 = 0 \quad (21)$$

$$-F_2 + R_{L_2}\phi_2 + R_{L_7}\phi_5 - R_{L_7}\phi_3 + F_3 - R_{L_3}\phi_3 + R_{L_9}\phi_5 - R_{L_9}\phi_3 = 0 \quad (22)$$

$$R_{L_3}\phi_3 - F_1 + R_{L_5}\phi_5 = 0 \quad (23)$$

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = \phi_4 + \phi_5 \quad (24)$$

در روابط (۲۰)–(۲۴) $F_1 = N_1 I_1$ ، $F_2 = N_2 I_2$ و $F_3 = N_3 I_3$ که در آن‌ها N_1 ، N_2 و N_3 برابر با تعداد دورها می‌باشند.

ارتباط بین شار-دورها، ماتریس اندوکتانس و جریان‌های جاری

شده در سیم‌پیچ‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

$$N_1\phi_1 = L_{aa}I_a + m_{ab}I_b + m_{ac}I_c \quad (25)$$

$$N_2\phi_2 = m_{ba}I_a + L_{bb}I_b + m_{bc}I_c \quad (26)$$

$$N_3\phi_3 = m_{ca}I_a + m_{cb}I_b + L_{cc}I_c \quad (27)$$

با فرض برقراری شرایط $N_1 = N_2 = N_3 = N$ و $R_{L_6} = R_{L_7} = R_{L_8} = R_{L_9}$ و $R_{L_4} = R_{L_5}$ ، R_{L_3} متقابل به‌صورت زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$L_{aa} = L_{cc} = N^2 \left(\frac{R_{L_1}^2 R_{L_1} + R_{L_1}^2 R_{L_4} + 2R_{L_6}^2 R_{L_1}}{+2R_{L_1}^2 R_{L_6} + R_{L_4}^2 R_{L_6} + 4R_{L_1} R_{L_4} R_{L_6}} \right) / cons. \quad (28)$$

$$L_{bb} = N^2 (R_{L_1} + R_{L_4}) / \left(\frac{R_{L_1}^2 + 1.5R_{L_1}R_{L_4} + R_{L_1}R_{L_6} + R_{L_4}R_{L_6}}{R_{L_1}R_{L_6} + R_{L_4}R_{L_6}} \right) \quad (29)$$

$$m_{ab} = -N^2 (R_{L_4}^2 R_{L_1} + 2R_{L_4}^2 R_{L_1} + 2R_{L_1} R_{L_4} R_{L_6}) / 2cons. \quad (30)$$

- Power Systems,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 10, no. 11, pp. 2720-2730, 2016.
- [18] E. Karami, G. B. Gharehpetian and M. Madrigal, “A Step Forward in Application of Dynamic Harmonic Domain: Phase Shifting Property of Harmonics,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 32, no. 1, pp. 219–225, 2017.
- [19] E. Karami, S. M. Kouhsari, and S. M. Mazhari, “Dynamic Harmonic Analysis of Long Term over Voltages Based on Time Varying Fourier series in Extended Harmonic Domain,” Amirkabir Int. J. Electr. Electron. Eng., vol. 48, no. 1, pp. 29–39, 2016.
- [20] E. Karami, M. Madrigal, and G. B. Gharehpetian, “Dynamic Harmonic Modeling and Analysis of VSC-HVDC Systems,” Amirkabir Int. J. Electr. Electron. Eng., vol. 49, no. 1, pp. 41–52, 2017.
- [21] E. Karami, M. Madrigal, G. B. Gharehpetian, K. Rouzbehi and P. Rodriguez, “Single-Phase Modeling Approach in Dynamic Harmonic Domain,” IEEE Trans. Power Syst., DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2686985.
- [14] M. Madrigal, “*Modelling of Power Electronics Controllers for Harmonic Analysis in Power Systems*,” Ph.D. dissertation, Univ. Glasgow, 2001.
- [15] J. J. Chavez, A. Ramirez, and V. Dinavahi, “Dynamic harmonic domain modelling of synchronous machine and transmission line interface,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 5, no. 9, pp. 912-920, 2011.
- [16] سیما شاه‌محمدی، سیدحسین حسینی، ابراهیم بابایی، مهران صباحی و جابر فلاح، «آنالیز تحلیلی هارمونیک‌های خروجی اینورترهای چندسطحی در حالت کلیدزنی نامتقارن»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۱، ۲۰۹–۲۱۹، ۱۳۹۵.
- [17] S. M. Mazhari, S. M. Kouhsari, A. Ramirez, and E. Karami, “Interfacing Transient Stability and Extended Harmonic Domain for Dynamic Harmonic Analysis of