

انتخاب روش مناسب برای کاهش مرتبه مدل مشروح ترانسفورماتور قدرت

محمدحسین ناظمیⁱ؛ گئورگ قره‌پتیانⁱⁱ؛ مسعود شفیعیⁱⁱⁱ

چکیده

با توجه به اهمیت مسائل هماهنگی عایقی، تحلیل گذرای شبکه قدرت و تجهیزات آن، برای طراحان و بهره‌برداران اجتناب ناپذیر است. یکی از مشکلات موجود فعلی در تحلیل‌های گذرا، مدل‌سازی دقیق رفتار ترانسفورماتور در شبیه‌سازی سیستم قدرت است. سازندگان ترانسفورماتور، مدل دقیق مشروح (Detailed) را ارائه می‌دهند؛ اما به-کارگیری این مدل در شبیه‌سازی و تحلیل شبکه‌های نمونه به دلیل اجزای بسیار زیاد موجود در آن، مستقیماً امکان‌پذیر نیست و در عمل مدل‌های کاهش مرتبه یافته ترمینالی برای انجام این مطالعات مناسب‌تر است. در این مقاله، در راستای دستیابی به یک مدل دقیق کاهش یافته ترمینالی، مدل مشروح ترانسفورماتور به عنوان نقطه شروع انتخاب می‌شود؛ سپس روش‌های کاهش مرتبه به این مدل اعمال و ارزیابی می‌گردد. در نهایت، با توجه به محدودیت‌های موجود، الگوریتم مناسبی برای کاهش مرتبه مدل مشروح و رسیدن به مدل ترمینالی انتخاب می‌شود. مدل ترمینالی به دست آمده می‌تواند به راحتی و در کنار دیگر اجزای شبکه؛ چه در مرحله طراحی و چه در مرحله بهره‌برداری، در شبیه‌سازی سیستم‌های قدرت به کار رود و رفتار گذرای ترانسفورماتور را به خوبی بازنمایی کند.

کلمات کلیدی

ترانسفورماتور، مدل مشروح، مدل ترمینالی، EMTP، کاهش مرتبه

An Appropriate Method for Order Reduction of Power Transformer Detailed Model

M.H. Nazemi G.B. Gharehpetian M. Shafiee

ABSTRACT

Transient analysis of power network for insulation coordination is essential in both design and utility engineering fields. Accuracy modeling of equipment behavior in network simulation can effect on this study. Transformers are one of important equipment which has been developed in simulation softwares recently. Transformer manufacturers use detailed model for insulation coordination of windings, while terminal model of transformer is interested for utility engineers in simulation of global network analysis. Order reduced model of detailed model can be used in this purpose.

In this paper, transformer detailed model is used as a start point to achievement of accurate order reduced model. A number of order reduction methods have been applied to reference model and appropriate algorithm has been selected considering of simulation limits. Result model can be used in power network simulation simultaneously with other equipment easily. This model shows transient properties of network analysis as well as detailed model.

KEYWORDS

Transformer, Detailed model, Terminal model, Order reduction, EMTP

ⁱ عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی - واحد ساوه، mh.nazemi@gmail.com

ⁱⁱ دانشیار دانشکده برق؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (قطب علمی قدرت)، grptian@cic.aut.ac.ir

ⁱⁱⁱ استاد دانشکده برق؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (قطب علمی مخابرات)

در این مقاله، مدل ترمینالی، براساس تابع تبدیل به دست آمده از مدل مشروح کاهش مرتبه یافته، به صورت یک تابع تبدیل در نظر گرفته شده است. در این راستا، ابتدا براساس اطلاعات مدل مشروح و نتایج شبیه‌سازی آن در EMTP به کمک روش‌های کاهش مرتبه، مرتبه مدل مشروح را به درجه ۶ رسانده و سپس به صورت مدل ترمینالی، تابع تبدیل درجه ۶ را در EMTP به کار خواهیم برد. انتخاب درجه ۶ برای حداکثر درجه تابع تبدیل بر اساس محدودیت‌های ATP است. البته، روش‌هایی برای دور زدن این محدودیت وجود دارد؛ ولی چون در مقایسه نتایج این موضوع بی‌تاثیر است، لذا در این مقاله، همین محدودیت تا انتهای کار برای تمامی روش‌ها یکسان خواهد بود.

۲-۱- مدل مشروح ترانسفورماتور

در مدل‌سازی مشروح، اجزای مدل با موقعیت فیزیکی سیم‌پیچ‌ها رابطه مستقیمی دارد. در سیم‌پیچ فشارقوی، کوچک‌ترین واحد، حلقه‌های آن است که از روی هم قرار گرفتن حلقه‌ها در جهت افقی دیسک‌ها به وجود می‌آید و از اتصال دیسک‌ها در جهت عمودی، سیم‌پیچ فشارقوی حاصل می‌شود. در حالی که در سیم‌پیچ فشارضعیف، معمولاً قسمتی از لایه‌ها مفهوم فیزیکی واحد سیم‌پیچی را ایجاد می‌کند. هر واحد با عناصر متمرکز مدل شده و با واحدهای دیگر نیز در ارتباط است. با توجه به ظرفیت‌های خازنی بین دو بوبین فشارقوی و فشارضعیف، مدل مشروح کل ترانسفورماتور بصورت شکل (۱) بدست می‌آید. سیم‌پیچ‌های فشارقوی و فشارضعیف به ترتیب دارای n و m گره هستند.

در شکل (۱)، L_{hi} و L_{ij} به ترتیب اندوکتانس معادل واحد i ام از سیم‌پیچ‌های فشارقوی و فشارضعیف می‌باشد. $L_{h,ij}$ و $L_{i,j}$ القای متقابل بین واحد i و j سیم‌پیچ‌های فشارقوی و فشارضعیف و $L_{h,kj}$ القای متقابل بین واحد k از سیم‌پیچ فشارقوی و واحد j از سیم‌پیچ فشارضعیف است.

K_{hi} و K_{ij} ظرفیت طولی معادل برای واحد i ام از سیم‌پیچ‌های فشارقوی و فشارضعیف و C_{ei} و C_{eh} به ترتیب، ظرفیت خازنی بین واحد i ام از سیم‌پیچ‌های فشارقوی و فشارضعیف را نسبت به پتانسیل زمین نشان می‌دهد.

سیستم‌های قدرت، اگرچه در اکثر اوقات در حالت دائم کار می‌کند؛ اما تنش‌هایی که در حین بروز حالت‌های گذرا در آنها به وجود می‌آید، بررسی و محاسبات حالت‌های گذرا را در کنار مطالعات حالت دائم ضروری می‌کند. مدل‌سازی رفتار ترانسفورماتورهای قدرت در حالات گذرا نیز از این قاعده مستثنی نیست.

از سوی دیگر، نرم‌افزارهای شبیه‌ساز سیستم‌های قدرت، مهندسين طراح و بهره‌بردار سیستم قدرت را وادار کرده است که از مدل‌های ترمینالی و کاهش مرتبه یافته برای شبیه‌سازی استفاده کنند؛ ولی مدارمعادل T ترانسفورماتور، مدل ترانسفورماتور برای محاسبات اتصال کوتاه و پخش بار یا مدل آن به منظور تحلیل هارمونیک‌ها نمی‌تواند برای انجام بررسی‌های حالات گذرا به کار روند و باید مدل‌های مناسبی در این راستا مطرح شود [۱]. تلاش‌های مربوط به توصیف رفتار سیم‌پیچ ترانسفورماتور در حالات گذرا با اضافه کردن ظرفیت‌های طولی به موازات اندوکتانس‌های مدل خط انتقال به وسیله Wagner آغاز شد؛ سپس Blume اثر القای متقابل را وارد مدل کرد [۲] و Degeneff نیز یک روش کاهش مرتبه مدل مشروح را ارائه کرد [۳]. در سال‌های اخیر نیز تلاش‌های زیادی برای ایجاد مدلی با مرتبه کاهش یافته از مدل مشروح صورت گرفته [۴]، [۵]، [۶] و [۷] که نشان‌دهنده اهمیت موضوع است.

در این مقاله، با توجه به در اختیار داشتن مدل مشروح در نزد مهندسين طراح ترانسفورماتور، راهکار مناسبی برای تبدیل این مدل به مدل ترمینالی ارائه می‌شود. بدین ترتیب حتی در فاز طراحی نیز می‌توان مدل ترمینالی از ترانسفورماتور طراحی شده به دست آورد و آن را در کنار دیگر مدل‌های اجزای سیستم قدرت قرار داد. در این مقاله، با توجه به شبیه‌سازی‌های مدل مشروح به وسیله نرم افزار EMTP، مدل ترمینالی ترانسفورماتور با ابزار TACS آن و با در نظر گرفتن محدودیت‌های آن شبیه‌سازی خواهد شد [۸]، [۹] و [۱۰].

بخش دوم مقاله به معرفی مدل مشروح و مدل ترمینالی و بخش سوم به بررسی روش‌های کاهش مرتبه اختصاص یافته است. در این بخش، با توجه به هدف مقاله، چهار روش کاهش مرتبه، بررسی، ارزیابی و الگوریتم آنها شرح داده شده است. تبدیل مدل مشروح به مدل ترمینالی، در بخش چهارم ارائه می‌شود. در این بخش، روش مناسب کاهش مرتبه، انتخاب و در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی ارائه و تصدیق می‌گردد. در نهایت، بخش ششم، به نتایج حاصل از مقاله است.

برابر است با:

$$\Gamma = A^T M^{-1} A \quad (8)$$

تبدیلات

$$V = \dot{U} \quad (9)$$

$$\dot{V} = \ddot{U} \quad (10)$$

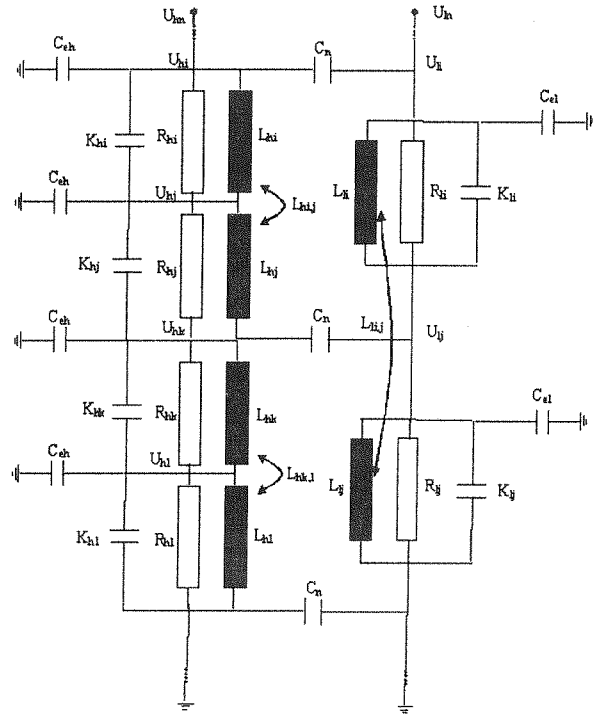
را به معادله (۷) اعمال می‌کنیم و آن را به فرم معادلات حالت می‌نویسیم:

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C^{-1}G & -C^{-1}\Gamma \\ E_{n+m} & 0_{n+m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^{-1} \\ 0_{n+m} \end{bmatrix} \dot{I} \quad (11)$$

در این رابطه E_{n+m} و 0_{n+m} به ترتیب ماتریس‌های واحد و صفر از بعد $n+m$ می‌باشد. ماتریس سیستم نیز از بعد $2(n+m)$ خواهد بود.

۲-۲- مدل ترمینالی ترانسفورماتور

مدل‌های ترمینالی را می‌توان در مرحله بهره‌برداری به کمک اندازه‌گیری‌ها یا در مرحله طراحی بعد از تعیین مدل مشروح، به صورت عددی به دست آورد [۶]. در مدل‌سازی به صورت یک جعبه سیاه روشهای متعددی وجود دارد که هدف آنها نمایش پاسخ فرکانسی به صورت یک شبکه از عناصر متمرکز [۱۱]، [۴] و یا نمایش به صورت یک تابع تبدیل [۹]، [۱۰]، [۴] است. در مجموع می‌توان گفت که بزرگ‌ترین مزیت مدل‌های ترمینالی مشتق شده از اندازه‌گیری‌ها، بالا بودن حد اعتبار فرکانسی آنها است [۱۱]. در واقع، این مدل‌ها اصولاً حد اعتبار فرکانسی محدودی ندارند؛ بلکه اندازه‌گیری‌ها به علت محدودیت‌های موجود در تجهیزات، فرکانس مدل را محدود می‌کند. مزیت دیگر این مدل‌ها امکان کاربرد آنها در کنار دیگر تجهیزات سیستم-های قدرت است. بدین ترتیب می‌توان بررسی حالات گذرای سیستم قدرت را برای مطالعات هماهنگی عایقی در مرحله طراحی به انجام رساند. بزرگ‌ترین نقطه ضعف این روش، عدم توانایی آن در توصیف رفتار نقاط داخلی سیم‌پیچ است؛ لذا طراح ترانسفورماتور مجبور است که در مرحله طراحی از مدل‌های مشروح استفاده کند؛ ولی مدل‌های مشروح، برای این که در فرکانس‌های بالا و برای مطالعات حالت‌های گذرای شبکه معتبر باشد باید به صورت حلقه به حلقه و با جزئیات کامل مدل شود. بنابراین مدل به دست آمده، در حکم یک سیستم با ابعاد وسیع (Large Scale System) است. تحلیل این گونه مدل‌ها مستقیماً در نرم‌افزارهای حالات گذرا ممکن نیست و باید از روشهای کاهش مرتبه برای ساده‌سازی آنها استفاده



شکل (۱): مدل مشروح ترانسفورماتور

R_{li} و R_{hi} تلفات الکتریکی را در عایق‌بندی i ام از سیم‌پیچ-های HV و LV مدل می‌کند.

C_n نیز ظرفیت خازنی توزیع شده بین سیم‌پیچ‌های فشارقوی و فشارضعیف را نشان می‌دهد.

بردار ولتاژ گره‌ها U و بردار جریان I (بردار تحریک) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = [U_{h1} \ U_{h2} \ \dots \ U_{hn-1} \ U_{hn} | U_{l1} \ U_{l2} \ \dots \ U_{lm-1} \ U_{lm}] \quad (1)$$

$$I = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ I_n | 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (2)$$

اکنون می‌توان قانون اول کیرشهف را به صورت برداری زیر نوشت:

$$I = I_C + I_G + I_L \quad (3)$$

در این رابطه خواهیم داشت:

$$I_C = C\dot{U} \quad (4)$$

$$I_G = GU \quad (5)$$

$$U = M\dot{I}_L \quad (6)$$

از روابط فوق می‌توان به دستگاه معادلات دیفرانسیل خطی مرتبه دو زیر رسید که دارای $n+m$ معادله است [۷]، [۹] و [۱۰]:

$$\dot{I} = C\dot{U} + GU + \Gamma U \quad (7)$$

در این رابطه Γ ماتریس القاگری گره‌ها نامیده می‌شود [۱] و

$$\hat{B} \equiv M^{-1}B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

به طور متناسب، تجزیه شده است.

بردار x_r را اصطلاحاً بردار متغیرهای حالت کند (Slow) و بردار x_{n-r} را بردار متغیرهای حالت سریع (Fast) سیستم اولیه می‌نامند. بدیهی است که عناصر x_r متناظر با r متغیر حالت مسلط (Dominant) سیستم اولیه و عناصر x_{n-r} نیز متناظر با $n-r$ متغیر حالت غیرمسلط سیستم خواهد بود.

بر همین اساس، تقریب $\dot{x}_{n-r} \approx 0$ را به کار گرفته و از آنجا، مدل دینامیکی کاهش یافته برای r مود کند و نیز مدل جبری متناظر با $n-r$ مود سریع سیستم اولیه را به دست می‌آورند:

$$\dot{x}_r = S_1 x_r + (B_1 - S_{12} S_2^{-1} B_2) u \quad (15)$$

$$x_{n-r} = -S_2^{-1} B_2 u \quad (16)$$

ملاحظه می‌شود که مدل کاهش یافته (۱۵) را می‌توان به

$$\dot{x}_r = A_r x_r + B_r u \quad \text{به ازای}$$

$$A_r = S_1$$

و

$$B_r = (B_1 - S_{12} S_2^{-1} B_2)$$

نیز نوشت. بدین ترتیب، با یافتن پاسخ دستگاه معادلات حالت (۱۵) برای r متغیر حالت مسلط سیستم و نیز، پاسخ دستگاه معادلات جبری (۱۶) برای $n-r$ متغیر حالت غیرمسلط و سپس استفاده از تبدیل $x(t) = M\hat{x}(t)$ می‌توان پاسخ بردار حالت سیستم اولیه (درجه کامل) را برای هر لحظه $t \geq t_0$ از روی پاسخ مدل کاهش یافته و دستگاه جبری همراه آن، تعیین کرد.

۳-۲- روش Balanced Realization

اصل این روش، براساس یافتن تبدیل هم‌گرادیان (Contragradient Transformation) در فضای حالت است؛ لذا اصول کلی آن برای کاهش مرتبه سیستم‌های مرتبه بالا با دو روش قبل متفاوت است. برای توضیح بیشتر این روش، سیستم LTI داده شده به وسیله معادله (۱۷) را در نظر بگیرید:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (17)$$

$$y(t) = Cx(t); \quad x(0) = x_0$$

در این معادله $X(t) \in R^n$ و $u(t) \in R^m$ و $y(t) \in R^r$ به ترتیب

بردارهای حالت، ورودی و خروجی و زوج (A, B) کنترل‌پذیر و زوج (C, A) رؤیت‌پذیر می‌باشد. ماتریس‌های گرامیان کنترل‌پذیری و گرامیان رؤیت‌پذیری بصورت زیر تعریف

۳- روش‌های کاهش مرتبه

از آنجا که هدف از کاهش مرتبه در این مطالعه، رسیدن از مدل مشروح ترانسفورماتور به مدل ترمینالی برای مطالعات حالت‌های گذرا است؛ لذا به دنبال روشی خواهیم بود که بتواند تا حد امکان، رفتار حالت گذرای ترانسفورماتور را به مدل مشروح نزدیک کند. در مطالعات انجام شده، چهار روش انتخاب و مقایسه شده است.

روش اول، موسوم به Schur-Aggregation است. اساس و پایه این روش، مبنی بر مفهوم Schur-Decomposition یا تجزیه Schur است [۱۴]. روش دوم، به تحقق بالانس (Balanced-Realization) موسوم است [۱۵]. الگوریتم حذف مرتبه‌های بالا در این روش متفاوت‌تر از روش‌های قبل است. روش سوم، روش موسوم به تئوری سیستم‌های سینگولار است که اخیراً مطرح شده و در سیستم‌های قدرت کاربرد یافته است [۱۶] و در نهایت، روش تبدیل موجک (Wavelet) نیز به عنوان یک روش جدید، مطرح و ارزیابی می‌شود.

۳-۱- روش Schur-Aggregation

الگوریتم این روش به صورت زیر قابل بررسی است:

الف- یافتن ماتریس مودال (Modal): ابتدا مقادیر ویژه سیستم اولیه را یافته و آنها را به ترتیب اهمیت (Dominancy)، مرتب و سپس با رعایت همین ترتیب، بردارهای ویژه متناظر به عنوان ستون‌های ماتریس مودال M جایگزین می‌شوند. بدین ترتیب، ستون I تا r ماتریس M ، در واقع همان بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه λ_r تا λ_r خواهد بود و به همین ترتیب در مورد سایر ستون‌ها.

ب- اعمال تبدیل $\hat{x} = M^{-1}x$ به سیستم اولیه و رسیدن به سیستم معادل زیر:

$$\dot{\hat{x}} = M^{-1}AM\hat{x} + M^{-1}Bu \quad (12)$$

$$= S\hat{x} + \hat{B}u$$

ج- اعمال تقسیم‌بندی مقادیر ویژه به مدل حاصل و تعیین مدل‌های تفکیک شده زیر:

$$\dot{x}_r = S_1 x_r + S_{12} x_{n-r} + B_1 u \quad (13)$$

$$\dot{x}_{n-r} = S_2 x_{n-r} + B_2 u \quad (14)$$

به طوری که:

$$\hat{x} \equiv \begin{bmatrix} \hat{x}_r \\ \hat{x}_{n-r} \end{bmatrix}$$

می‌شوند [۱۰] و [۴]:

متشابه $\bar{x} = T^{-1}x$ به فرم زیر تبدیل می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}_1 \\ \dot{\bar{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u$$

$$y = [C_1 \quad C_2] \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} + Du$$

که در آن \bar{x}_1 حالت مسلط و \bar{x}_2 حالت غیر مسلط است. حال برای کاهش مرتبه سیستم به دو طریق می‌توان عمل کرد، یا اثر حالت‌های غیر مسلط حذف گردد یا در حالت‌های مسلط ادغام شود اما در هر دو حالت ممکن است اثر برخی عوامل حذف شود و سیستم کاهش یافته ممکن است تفاوت زیادی با سیستم اصلی داشته باشد. به عنوان مثال اگر شرایط اولیه سیستم اصلی به نحوی باشند که $\bar{x}_2(0) = 0$ مخالف صفر باشد آنگاه مدل کاهش یافته رفتار درستی از خود نشان نمی‌دهد یا اگر مدهای سریع سیستم پاسخی شبیه به مشتق ورودی یا ضربه و ایمپالس را در خروجی تولید کنند، دیگر در پاسخ سیستم کاهش یافته شاهد این اثرات نخواهیم بود و مدل کاهش یافته رفتار درستی از خود نشان نمی‌دهد. بنابراین روشی جدید که در آن اثر عوامل فوق هم دیده می‌شود لازم می‌باشد که این روش در بخش بعدی معرفی می‌گردد.

۳-۳- معرفی سیستم تکین

سیستم‌های تکین (Singular) حالت جامع‌تری نسبت به سیستم‌های دینامیکی داشته، سیستم‌های دینامیکی همراه با قیدهای جبری را مدل می‌کند که پیچیدگی‌ها و تئوری‌های خاصی دارد، مسائل مربوط به سیستم‌های سینگولار پیچیده‌تر بوده و می‌بایست از روشهای متفاوتی حل شوند [۱۳]. مدل فضای حالت اولیه یک سیستم در فضای سینگولار به صورت زیر است:

$$E\dot{x} = Ax + Bu \quad (26)$$

که در آن دترمینان ماتریس E برابر صفر می‌باشد.

برای محاسبه جواب سیستم‌های سینگولار نیاز است که ابتدا به برخی تعاریف اشاره شود: رگولاریتی: اگر حداقل یک عدد λ وجود داشته باشد به شرطی که $\det(\lambda E - A) \neq 0$ برقرار باشد، سیستم را رگولار نامند که در اینصورت جواب سیستم وجود داشته و یکتا می‌باشد.

برای یک سیستم سینگولار رگولار ماتریس‌های زیر را تعریف می‌کنند که در محاسبه پاسخ سیستم و تعیین برخی خواص آن کاربرد دارند:

$$W_C = \int_0^\infty e^{A\tau} B B^T e^{A^T \tau} d\tau \quad (18)$$

$$W_O = \int_0^\infty e^{A^T \tau} C^T C e^{A\tau} d\tau \quad (19)$$

با در نظر گرفتن پایداری مجانبی ماتریس حالت A ، گرامیان-ها معادلات جبری زیر را برقرار می‌سازند [۱۰]، [۱۲] و [۱۵]:

$$A W_C + W_C A^T = -B B^T \quad (20)$$

$$A^T W_O + W_O A = -C^T C \quad (21)$$

هدف از الگوریتم تحقق بالانس یافتن تبدیلی است که به ازای آن تبدیل ماتریسهای گرامیان کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری با یکدیگر مساوی شود. تبدیل $X = T\bar{X}$ مدل فضای حالت را به صورت زیر تغییر می‌دهد:

$$(22)$$

$$\dot{\bar{x}} = T^{-1} A T \bar{x} + T^{-1} B u$$

$$y = C T \bar{x} + D u$$

$$\bar{x}(0) = T^{-1} x_0 \quad (23)$$

تبدیل T ، ماتریس‌های گرامیان را نیز به صورت زیر تغییر می‌دهد:

$$\bar{W}_C = T^{-1} W_C T^{-T} \quad (24)$$

$$\bar{W}_O = T^T W_O T \quad (25)$$

که در این حالت ماتریسهای \bar{W}_C و \bar{W}_O قطری و مساوی-اند. ماتریس انتقال T را ماتریس هم‌گردیان می‌نامند. با مرتب ساختن عناصر تکین (Singular Value) ماتریس قطری T و حذف مقادیر کوچک‌تر، مرتبه سیستم اصلی را کاهش می‌دهیم. در حقیقت، روش یاد شده، ماتریسی را ارائه می‌کند که تاثیر ورودی در خروجی را بیان می‌کند؛ پس با حذف مقادیری از این ماتریس؛ که غیرضروری است، مدهایی از سیستم؛ که تاثیر کمتری در پاسخ دارند، حذف می‌شود و پاسخ سیستم کاهش مرتبه یافته، رفتار مشابهی نسبت به مدل اصلی خواهد داشت.

نکته اصلی در روش Balanced-Realization نحوه یافتن ماتریس T است که روش‌های متفاوتی برای آن ذکر شده است [۱۵]، [۱۲]، [۱۷] و [۱۸].

با توجه به دو روش ارائه شده در فوق می‌توان به این جمع‌بندی رسید که روش‌های کاهش مرتبه در ابتدا سیستم را به دو زیرسیستم مسلط و غیرمسلط تجزیه می‌کند که زیرسیستم غیرمسلط از زیرسیستم مسلط مستقل است ولی زیرسیستم مسلط لزوماً مستقل از زیرسیستم غیرمسلط نمی‌باشد به بیانی دیگر معادلات سیستم به کمک یک تبدیل

(۲۷)

که در آن r تعداد حالت‌های مسلط سیستم و اندازه بردار \bar{x}_1 می‌باشد و سایر کمیت‌های معادله فوق قبلاً شرح داده شده‌اند.

بدیهی است که برای E تعریف شده در رابطه (۲۷) داریم:

$$\begin{aligned} \text{rank}(E) &= r < n \\ \det(E) &= 0 \end{aligned} \quad (28)$$

همان گونه که در قبل اشاره شد، برای رسیدن به فرم فوق ابتدا سیستم را به فرمی تجزیه می‌کنیم که حالت‌های مسلط و غیر مسلط تعیین شوند و زیر سیستم مربوط به هر کدام از هم جدا شوند تعیین مسلط یا غیر مسلط بودن نیز از هر روش دلخواهی مانند روش Schur-Aggregation یا روش Balanced Realization انجام می‌گیرد که از آنجا فرم ماتریس‌ها بدست می‌آید.

در روش‌های قبلی اثر حالت‌های غیر مسلط حذف می‌گردد یا در حالت‌های مسلط ادغام می‌شود اما در روش سینگولار اثر حالت‌های غیر مسلط به فرم معادلات قید جبری ظاهر می‌شود بنابراین پاسخ سیستم سینگولار حاوی بخشی است که مشتقات ورودی را در خود دارد (به جمله آخر معادله جواب سیستم-های سینگولار توجه شود) و در نتیجه بهتر می‌تواند پاسخ حالت گذرا را در خود حفظ کند زیرا به کمک این عوامل مشتق-گیر مدهای ضربه و ایمپالس‌های موجود در پاسخ سیستم کاهش یافته حفظ می‌گردد و جواب دقیق‌تری حاصل می‌شود.

۳-۴- روش تبدیل موجک

تبدیل موجک (Wavelet)، ادامه کار تبدیلات FFT و STFT است، با این تفاوت که بازه زمانی نمونه‌گیری از موج اصلی، در تبدیل موجک، افزایش یافته است. بدین ترتیب، می‌توان اطلاعات فرکانس بالا و فرکانس پایین موج اصلی را از هم جدا کرد.

در حوزه زمان، پاسخ بر حسب زمان و در تبدیل فوریه، پاسخ فرکانسی سیستم ارزیابی می‌شود. در STFT، در یک بازه زمانی کوتاه از تبدیل فوریه استفاده می‌شود و در نهایت، در تبدیل موجک، علاوه بر استفاده از مفهوم زمان، از مفهوم Scale نیز استفاده شده است (شکل (۲)). با استفاده از این مفهوم، مؤلفه‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین سیگنال از یکدیگر جدا می‌شود.

$$\hat{E} = (\lambda E - A)^{-1} E$$

$$\hat{A} = (\lambda E - A)^{-1} A = \lambda \hat{E} - I$$

$$\hat{B} = (\lambda E - A)^{-1} B, \hat{E}\hat{A} = \hat{A}\hat{E}$$

ایندکس: ایندکس یک سیستم کوچک‌ترین عدد k ای است که در رابطه زیر صدق کند:

$$\text{Rank}(\hat{E}^k) = \text{Rank}(\hat{E}^{k+1})$$

ایندکس بیان کننده برخی خصوصیات سیستم و درجه خوش‌خیمی آن می‌باشد.

معکوس دریزین: هر ماتریس تکین A را می‌توان به فرم زیر تبدیل نمود:

$$A = T \begin{bmatrix} A_C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} T^{-1}$$

که در آن A_C یک ماتریس غیر سینگولار و N یک ماتریس پوچ رتبه (Nilpotent) با ایندکس برابر با ایندکس A می‌باشد. در اینصورت معکوس دریزین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A^D = T \begin{bmatrix} A_C^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} T^{-1}$$

پاسخ سیستم: برای یک سیستم سینگولار با معادله (۲۶) پاسخ به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$x(t) = e^{(\hat{E}^D \hat{A})(t-t_0)} \hat{E} \hat{E}^D x(t_0) + e^{(\hat{E}^D \hat{A})(t)} \int_{t_0}^t e^{-(\hat{E}^D \hat{A})(\tau)} \hat{B} u(\tau) d\tau$$

$$- (I - \hat{E} \hat{E}^D) \sum_{i=0}^{k-1} (\hat{E} \hat{A}^D)^i \hat{A}^D \hat{B} u^{(i)}(t)$$

که در آن منظور از $u^{(i)}$ مشتق i ام ورودی است و شرط اولیه x_0 باید در قید $(I - \hat{E} \hat{E}^D) x_0 = 0$ صدق کند و اگر این قید برقرار نباشد ممکن است در لحظه اولیه در سیستم ایمپالس بوجود آید که در رابطه زیر n تعداد ایمپالس‌ها می‌باشند:

$$n = \text{rank}(E) - \text{degree}(\det(sE - A))$$

در حالت کلی در نظریه سیستم‌های سینگولار قیدی روی فرمت ماتریس‌ها وجود ندارد ولی در کاهش مرتبه به کمک تئوری سیستم‌های سینگولار این معادله به فرم زیر است:

$$\begin{bmatrix} I_{r \times r} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}_1 \\ \dot{\bar{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} + Du$$

۴- تبدیل مدل مشروح به مدل ترمینالی

۴-۱- مدل مرجع

برای ایجاد یک مرجع مقایسه، ابتدا یک مدل مرجع باید انتخاب شود. مدل مرجع این مقاله، مدل مشروح یک ترانسفورماتور است که از به هم پیوستن n بلوک $RLCM$ مدل مشروح سیمپیچ فشارقوی و m بلوک $RLCM$ مدل مشروح سیمپیچ فشارضعیف از طریق ظرفیت‌های خازنی C_n ؛ که هر دو بلوک فشارقوی را به یک بلوک فشارضعیف متصل می‌کند حاصل شده است. در این مدل، ۱۴ بلوک فشارقوی و ۷ بلوک فشارضعیف اختیار شده است. مقادیر پارامترها از مرجع [۱] بر مبنای نتایج اندازه‌گیری واقعی برای یک ترانسفورماتور 50MVA و 220/35 kV انتخاب شده است.

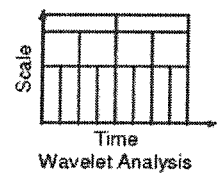
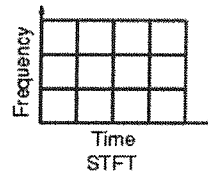
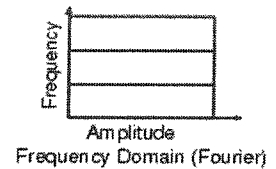
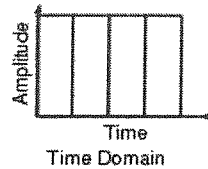
به منظور شبیه‌سازی رفتار حالت گذرای ترانسفورماتور، یک موج ضربه جریان به عنوان ورودی به سیمپیچ فشارقوی اعمال و ولتاژ دو سر سیمپیچ فشارضعیف نسبت به زمین به عنوان خروجی سیستم در نظر گرفته شده است. در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده، شکل کلی موج ضربه جریان اعمالی به فرم $I(t) = I_m(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ با جریان پیک $I_m = 20 \text{ kA}$ و ضرایب $\alpha = 4.4 \times 10^4$ ، $\beta = 4.6 \times 10^5$ است.

۴-۲- انتخاب روش کاهش مرتبه

در فرآیند کاهش مدل فضای حالت سیستم اولیه از مرتبه n به یک مدل فضای حالت از مرتبه $r < n$ ، ابتدا r متغیر حالت مسلط را - نسبت به سایر مدها که غیرمسلط نامیده می‌شوند - یافته و به طریقی سعی کردیم تا بردار شامل $n-r$ متغیر حالت غیرمسلط را از معادلات دینامیک صریح سیستم اولیه خارج کرده و در قالب یک دستگاه معادلات جبری (غیردینامیک) بگنجانیم. بدین ترتیب، حل یک سیستم، همراه با عملیات کاهش مدل آن، مستلزم حل مجزای یک دستگاه دینامیک و یک دستگاه جبری همزمان می‌باشد.

بدیهی است که در خلال چنین تحلیلی، برخی از خواص گذرا مربوط به مدل اولیه، آشکار نشده یا از دید ما پنهان خواهد ماند؛ چرا که رفتار دینامیکی مدهای فرکانس بالا و مؤثر در پاسخ حالت گذرای سیستم را به طور کامل صرفنظر نموده و آنها را همانند مدهای غیر دینامیک و تنها با خواص جبری در تحلیل پاسخ حالت دائمی سیستم در نظر گرفته‌ایم.

با این نگرش، بایستی به دنبال روشی باشیم تا ضمن حفظ مفهوم و نقش مدهای غیرمسلط در رفتار سیستم درجه کامل و کاستن از تعداد مدهای مؤثر در مدل دینامیک آن، بتواند



شکل (۲): پاسخ سیستم‌ها، در تبدیلات مختلف

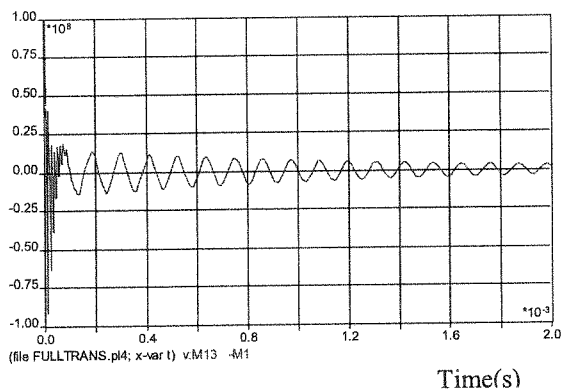
استفاده از فیلترهای فرکانس بالا و فرکانس پایین می‌تواند در چند سطح انجام شود. بدین ترتیب، با ترکیب فیلترهای مناسب، می‌توان به تجزیه پاسخ سیستم اصلی دست یافت. بنابراین، در هر بار عبور از فیلتر، سیگنال‌هایی که از موج اصلی فاصله می‌گیرد، کنار گذاشته می‌شود و مابقی موج مجدداً فیلتر می‌شود.

بنابراین، با انتخاب ترکیب مناسبی از فیلترها، می‌توان قسمت‌هایی از پاسخ اصلی را که مورد نظر و مطلوب است، حفظ کرد. در مرحله بعد، با عکس تبدیل موجک از اجزای (Details) و تقریب‌ها (approximation)، می‌توان به مدلی از سیستم اصلی رسید که مرتبه آن کاهش یافته است. در حقیقت، در این روش، فرکانس‌هایی از سیستم که نسبت به موج اصلی فاصله زیادی دارد، حذف می‌شود.

یکی از اشکالات روش تبدیل موجک، در این است که ترکیب‌های زیادی از فیلترهای بالا گذر و پایین گذر وجود دارد که بررسی آنها و انتخاب فیلتر مناسب، برای هر حالت مورد ارزیابی ممکن است متفاوت باشد. لذا روش تبدیل موجک در مطالعه موردی سودمند است؛ اما در حالت کلی ممکن است جواب‌های متفاوتی ارائه کند.

از دیگر اشکالات قابل ذکر برای این روش، می‌توان به این مورد اشاره کرد که در هنگام عکس تبدیل موجک برای رسیدن به موج اصلی، موج‌هایی که در مراحل تبدیل موجک حذف شده‌است، در مرحله عکس تبدیل موجک با موج صفر معادل‌سازی می‌شود. بنابراین، دقت شکل موج نهایی ممکن است دچار تغییرات شود.

در مجموع، می‌توان گفت که روش تبدیل موجک بیشتر در مدل‌های گرافیکی، تصویری و در سیستم‌های تعیین خطا و حفاظت شبکه‌های قدرت استفاده سودمندی دارد؛ اما در مورد کاهش مرتبه سیستم‌های مرتبه بالا کاربرد کمتری دارد.



شکل (۳): پاسخ مدل مشروح ترانسفورماتور به موج ضربه اعمالی

۵-۱- اعمال روش سیستم سینگولار بر مدل مشروح

با توجه به مفاهیم و تئوری‌های مطرح شده در بخش چهارم، مدل مشروح موجود به فرم سینگولار تبدیل و موج ضربه معرفی شده در بخش قبل به آن اعمال گردیده است. مهم‌ترین عامل در این روش، ایندکس سیستم است. در [۹] نشان داده شده است که با اجرای الگوریتم و محاسبه ایندکس سیستم به ازای تمامی حالات حذف، ایندکس سیستم همواره برابر یک است. طبق لم مطرح شده در [۹]، سیستم‌هایی با ایندکس برابر با یک، رفتار مشابهی با حالت‌های معمول حذف مدهای غیرمسلط دارند.

همچنین در این حالت مشتقی از ورودی در سیستم و خروجی تولید نمی‌شود. بی نظریه سیستم‌های تکین در مدل مورد مطالعه با سایر روش‌های کاهش مرتبه نظیر Schur-aggregation یکسان است. از سوی دیگر، با توجه به محدودیت TACS در نرم‌افزار EMTP، همواره به دنبال یافتن سیستم درجه ۶ (تابع تبدیل درجه ۶) می‌باشیم که روش مورد استفاده در کاهش مرتبه بایستی توانایی کاهش مدل شبیه‌سازی را تا درجه ۶ داشته باشد. براین اساس، پاسخ سیستم کاهش‌یافته به درجه ۶، براساس تئوری سیستم سینگولار که مشابه روش‌های معمولی کاهش مرتبه است در شکل (۴) نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیدا است، پاسخ مدل کاهش مرتبه یافته دقت کافی برای مدل‌سازی رفتار حالت گذرای سیم‌پیچ را ندارد.

ضعف مذکور را نیز تا حد امکان برطرف کند. بر این اساس، روش Schur-aggregation که در آن مستقیماً از این روش استفاده می‌شود، رفتار حالت گذرای سیستم را حذف می‌کند و برای مدل‌سازی مدل کاهش مرتبه ترانسفورماتور؛ که برای مقاصد گذرا کاربرد می‌یابد، با خطای زیادی مواجه است.

روش تحقق بالانس با الگوریتم متفاوتی نسبت به روش فوق کار می‌کند و مدهایی را از سیستم درجه کامل حذف می‌کند که تاثیر کمتری در پاسخ سیستم خواهد داشت؛ بنابراین، روش مذکور قابلیت بهتری داشته و انتظار می‌رود خطای کمتری نیز داشته باشد.

در روش سیستم تکین اگر چه ملاک حذف مدهای غیرمسلط، همان مقادیر ویژه است؛ اما ظاهر شدن جمله مشتقات ورودی در پاسخ سیستم سینگولار در حالات ایندکس بزرگتر از یک، باعث می‌شود که ضربه‌های سیستم در پاسخ حاضر شده و عملاً با این تکنیک، این روش نیز قادر به حفظ حالات گذرای سیستم اولیه است.

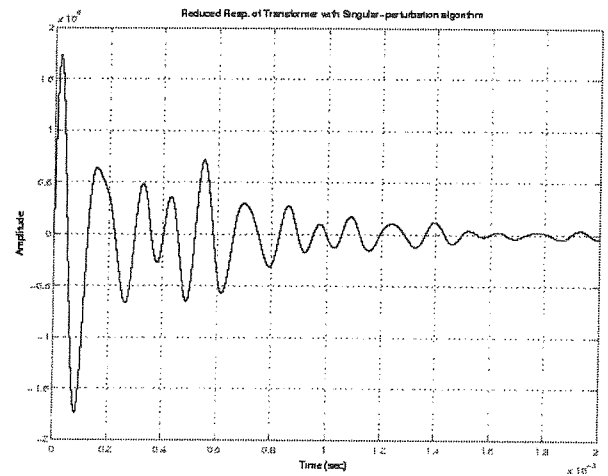
در خصوص روش تبدیل موجک (Wavelet) باید گفت که انتخاب این روش، به تعیین دقیق فیلتر مناسب در هر مورد شبیه‌سازی نیازمند است. از طرف دیگر، انتخاب‌های مختلف، ممکن است جواب‌های متنوعی بدهد که عملاً روند کاهش مرتبه را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین، استفاده از این تبدیل در فرآیند کاهش مرتبه مدل‌های با مرتبه بالا، در حالت عمومی توصیه نمی‌شود.

در نهایت، پس از جمع‌بندی مطالب ذکر شده، به این نتیجه می‌رسیم که روش‌های مناسب برای کار در این مقاله؛ که در حالت‌های گذرا اهمیت خاصی می‌یابد دو روش سیستم سینگولار و تحقق بالانس است. تلاش براین است که هر دو روش را بر مدل مرجع اعمال کنیم تا پس از شبیه‌سازی، روش دقیق‌تر انتخاب شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

شکل (۳) پاسخ مدل مرجع (مدل مشروح ترانسفورماتور) را نشان می‌دهد. معیار مقایسه، رسیدن به مدل ترمینالی ترانسفورماتور با پاسخی نزدیک به پاسخ شکل (۳) است.

Overvoltage(V)



Time(s)

شکل (۴): پاسخ مدل کاهش یافته درجه ۶ ترانسفورماتور با استفاده از نظریه سیستم سینگولار

۵-۲- اعمال روش تحقق متعادل بر مدل مشروح

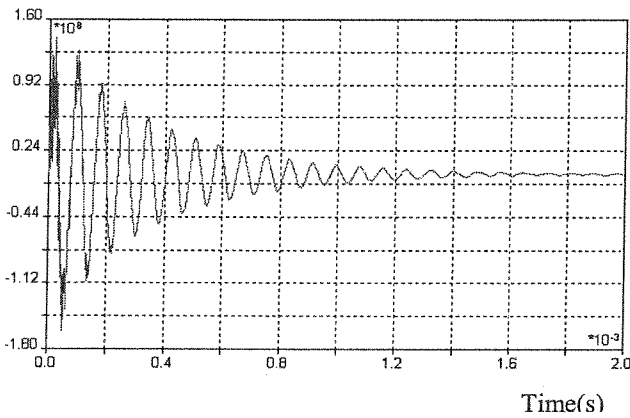
در هر مرحله از شبیه‌سازی، یک زوج مزدوج از قطب‌های سیستم بر اساس الگوریتم تحقق بالانس حذف شده است و بدین ترتیب مرتبه مدل مشروح به درجه ۶ رسیده است. مقادیر به دست آمده برای تابع تبدیل درجه ۶ ترانسفورماتور در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل (۵) مشخص می‌سازد که مودهای غیرمسلط، تا سیستم درجه ۶ حذف می‌شود و در نهایت، تابع درجه ۶ نیز دقت پاسخ حالت گذرا را حفظ می‌کند و برای استفاده در EMTP مناسب است.

درواقع، معیار حذف مودهای کم‌تاثیر در روش Balanced-Realization توانسته است بخوبی رفتار حالت گذرای ترانسفورماتور را حفظ کند.

جدول (۱): ضرایب تابع تبدیل مدل ترمینالی درجه ۶

ضریب مخرج	ضریب صورت
1	22.288
106900	3.2506e8
9.7893e12	1.3194e14
4.8382e17	1.4873e21
1.4889e25	9.0388e25
8.2132e28	1.1213e32
8.8263e34	0

Overvoltage(V)



شکل (۵): پاسخ مدل کاهش یافته درجه ۶ ترانسفورماتور با استفاده از تکنیک کاهش مرتبه تحقق متعادل

۶- نتیجه

روش‌های مدل‌سازی ترانسفورماتورها؛ با توجه به هدفی که دنبال می‌کنند، عمدتاً به دو دیدگاه مدل‌های فیزیکی و ترمینالی تقسیم‌بندی می‌شود. در مواردی که هدف، بررسی رفتار داخلی ترانسفورماتور است (دیدگاه مهندس طراح ترانسفورماتور)، از مدل‌های فیزیکی استفاده می‌شود و در مواردی که به بررسی رفتار شبکه‌ای نیاز است (دیدگاه مهندس طراح سیستم قدرت)، بایستی از مدل‌های ترمینالی سود جست. در این راستا چه در مرحله طراحی و چه در مرحله بهره‌برداری، رسیدن از مدل مشروح ترانسفورماتور؛ که بر مبنای روش‌های مدل‌سازی فیزیکی به دست آمده و در حوزه فرکانسی وسیعی نیز معتبر است؛ به مدل ترمینالی که بتواند پاسخ نزدیک به مدل فیزیکی را برای بررسی‌های حالت گذرا ارائه دهد، حائز اهمیت است.

یک روش کاهش مرتبه مناسب که بتواند رفتار حالت گذرای سیستم را حفظ کند، می‌تواند به این هدف کمک کند. در این مقاله، روش جدیدی مبتنی بر استفاده از تئوری سیستم‌های سینگولار برای کاهش مرتبه منظور گردیده که برای حالت‌هایی که پاسخ سیستم شامل ضربه یا مشتقات ورودی می‌باشد مفیدتر می‌باشد. البته به مواردی که این حالات پیش نمی‌آیند و جواب این روش با روش‌های قبلی یکسان می‌شود نیز اشاره شده است. مساله مورد بررسی این مقاله نیز در پاسخ خود شامل ضربه و مشتق نبوده که در نتیجه پس از بررسی‌های انجام شده در روش‌های کاهش مرتبه، دو روش دیگر موسوم به سیستم سینگولار و تحقق بالانس شناسایی شد. البته لازم به ذکر می‌باشد که ممکن است برای برخی سیستم‌ها پاسخ سیستم شامل ضربه یا مشتقات ورودی باشد که در این حالت روش مبتنی بر استفاده از تئوری سیستم‌های سینگولار مفیدتر

- pp.1052-1059.
- [8] Electromagnetic Transient Program (EMTP), Revised Rule Book Version 2.0 Vol. 1, June 1989
- [9] M.H. Nazemi, G.B. Gharehpetian, M. Shafiee, A.R.Allami, "Transformation of Detailed Model Transformer Winding to its Terminal Model", XIII-th International Symposium on High Voltage Engineering, "ISH 2003", Delft, Netherlands, August 2003.
- [10] M.H. Nazemi, A.R.Allami, G.B. Gharehpetian, M. Shafiee, "A New Approach for Derivation of Reduced Order Model from Transformer Detailed Model", 18-th International Power System Conference, Tehran, Iran, October 2003.
- [11] G.B. Gharehpetian, H. Mohseni, K. Moeller, "Hybrid Modeling of Inhomogeneous Transformer Windings for Very Fast Transient Overvoltages Studies", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.13 No.1, Jan 1998 pp 157-163.
- [12] K.O.C. Fregene, D.C. Kennedy, "Balanced Transformations: their Computation and some Applications", IEEE Trans 1998, pp. 333-336.
- [13] P. N. Paraskevopoulos, F. N. Koumboulis, A. S. Tsirikos, "State Space Analysis of Singular Systems via Orthogonal Series", Proc. 30-th. Conf. on Decision and Control, 1991, pp 1970-1971.
- [14] A. Rachid, G. Hashim, "Model Reduction Via Schur Decomposition", IEEE Trans. Automat. Cont., 1992 Vol. 37 No. 5, pp 666-668.
- [15] A.J., Laub, M.T. Heath, C.C. Paige, and R.C. Ward, "Computation of System Balancing Transformations and Other Applications of Simultaneous Diagonalization Algorithms", IEEE Trans. Automatic Control, AC-32 (1987), pp 115-122.
- [16] S.L. Campbell, "Singular Systems of Differential Equations", Pitman, San Francisco, 1980.
- [17] A. Varga, "Balancing Free Square-Root Algorithm for Computing Singular Perturbation Approximations", IEEE proceeding of the 3th conference on Decision and Control, Brighton, England, 1991 pp.1062-1065
- [18] S.M. Shahruz, S. Behtash, "Balanced Realization of Singular Perturbed Systems", IEEE proceeding of the 27-th conference on Decision and Control, Austin, Texas, 1988, pp 1174-1172

می باشد و بهتر است تعیین مسلط یا غیر مسلط بودن حالتها از روش Realization Balanced انجام گیرد و از آنجا فرم ماتریسها بدست آید.

روش تحقق بالانس نیز یکی از روشهای موفق است که با استفاده از تکنیک خاص خود، سیستم مورد مطالعه را به فضایی انتقال می دهد که بتوان مرتبه آنها را گونه ای کاهش داد که رفتار گذرای سیستم محفوظ بماند و مودهایی از سیستم حذف شوند که کمترین اثر را از ورودی گرفته و کمترین اثر را در خروجی می گذارند. شبیه سازی انجام شده نشان داد که در مقایسه با مدل مرجع؛ که یک مدل مشروح ترانسفورماتور است، روش تحقق بالانس از دقت مناسبی برخوردار است و حتی محدودیت های خاص نرم افزارهایی مانند EMTP را نیز پاسخگو است.

۷- تقدیر و تشکر

مولفین این مقاله کمال تشکر و قدردانی خود را از پیشنهادات اصلاحی مدیران نشریه به ویژه ویراستار علمی ادبی نشریه و همچنین از آقای مهندس علی رضا علامی که در پیاده سازی و اعمال اصلاحات کمک های شایان توجه نموده اند، اعلام می دارند.

۸- مراجع

- [1] G.B. Gharehpetian, "Modellierung von Transformatorenwicklungen Zur Untersuchung Schnellveraenderlicher Transiente Vorgaenge", Dissertation 1996 RWTH Aachen, Germany.
- [2] L.F. Blume, A. Boyajian, "Abnormal Voltage within Transformers", AIEE, vol. 38, 1919 pp. 577-614.
- [3] R.C. Degeneff, P.J. Mc Kenny and M. Gutierrez, "A Method for Constructing Reduced Order Transformer Models for System Studies from Detailed Lumped Parameter Models", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No.2, Apr.1992, pp 649-655.
- [4] A.O. Soysal, A. Semlyen, "Practical Transfer Function Estimation and its Application to Wide Frequency Range Representation of Transformers", AIEE, vol. 8, No. 3, July 1993, pp 1627-1637.
- [5] R.C. Degeneff, M.R. Gutierrez, M. Vakilian, "Nonlinear, Lumped Parameter Transformer Model Reduction Technique", IEEE. Trans on Power Delivery, vol. 10, No.2, April 1995 pp. 862-868.
- [6] F. de Leon and A. Semlyon, "Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No.1, Jan 1994 pp. 231-239.
- [7] R.J. Galarza, J.H. Chow and R. C. Degeneff, "Transformer Model Reduction using Time and Frequency Domain Sensitivity Techniques", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.10, No.2, Apr 1995,