

مدل‌سازی شبکه‌های چندترمیناله در سیستم‌های قدرت با استفاده از روش برازش برداری به منظور تحلیل حالات گذرای الکترومغناطیسی فرکانس بالا

مهرداد محمودیان^{۱*}، محسن گیتی‌زاده^۲

^{۱*} دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

m.mahmoudian@sutech.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

gitizadeh@sutech.ac.ir

چکیده: مدل‌سازی اجزای وابسته به فرکانس در سیستم‌های قدرت به منظور تحلیل حالات گذرای الکترومغناطیسی، معمولاً توسط یک ماتریس ادمیتانس وابسته به فرکانس صورت می‌پذیرد. اما اغلب، یکی از چالش‌های استخراج مدل فضای حالت در این موارد، بزرگ شدن خطای حاصل از مدل‌سازی در لحظه انتقال به حوزه زمان است. این افزایش غیرطبیعی خطای ناشی از کوچک بودن مقادیر ویژه ماتریس ادمیتانس یا به دلیل پایدار کردن قطب‌های ناپایدار، با انتقال اجباری آن‌ها به سمت چپ محور موهومی رخ می‌دهد. درباره مسائل چندترمیناله، پاسخ خروجی گاهی اوقات به شدت وابسته به توزیع ورودی اعمال شده به ترمینال‌هاست. چنین رفتاری اغلب در محدوده فرکانسی پایین، به دلیل تفاوت‌های چشمگیر در مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه در حالت مودال، به وقوع می‌پیوندد. اعمال مستقیم تکنیک‌های مدل‌سازی شبکه‌ها در چنین مواردی، مدلی با ویژگی‌های غیردقیق به دست می‌دهد. لذا این مقاله، رویکرد جدیدی را به منظور مدل‌سازی شبکه‌های چندترمیناله در سیستم قدرت با استفاده از روش برازش برداری ارائه می‌کند. در روش پیشنهادی خطای مدل‌سازی بسیار کوچک است و نتایج دقیق شبیه‌سازی، خروجی این روش را به طور کاملاً مناسبی روی داده‌ها اصلی منطبق می‌کند.

واژه‌های کلیدی: حالات گذرای الکترومغناطیسی، روش برازش برداری، شبکه وابسته به فرکانس.

۱. مقدمه

استاندارد در حل معادلات ماتریسی، ماتریس تبدیل ادمیتانس محاسبه می‌شود و در نهایت، مدل استخراج‌شده را از طریق تبدیل معکوس، به حوزه فیزیکی (اولیه) برگردانده خواهد شد. در این مقاله، روش پیشنهادی برای مدل‌سازی مدار معادل شبکه وابسته به فرکانس^{۱۱} و خطوط انتقال، با تمرکز بر دقت و بهره‌وری بالا در محاسبات و زمان انجام آن بررسی و خطای محاسبات محاسبه و تحلیل می‌شود.

۲. شرح مسئله

در سیستم‌های n ترمیناله، می‌توان برای یافتن ماتریس ادمیتانس^{۱۲} در حوزه فرکانس نوشت:

$$I(s) = Y(s)V(s) \quad (1)$$

که در آن، ماتریس جریان $I \in C^{n \times 1}$ ، ماتریس ولتاژ $V \in C^{n \times 1}$ و ماتریس ادمیتانس $Y \in C^{n \times n}$ می‌باشند. اما به‌منظور مدل‌سازی مقادیر ماتریس $Y(s)$ ، یک روش در مرجع [۱۰] ارائه شده است که رفتار ترمینال‌ها را توصیف می‌کند. در این روش، بالانویس‌های * و H به ترتیب، نشان‌دهنده مزدوج و هرمیتی بودن (مزدوج و ترانهاده) ماتریس می‌باشند و عملگر $\lambda(\cdot)$ مقادیر ویژه ماتریس را استخراج می‌کند. در این مدل، قطب‌ها متعلق به مجموعه $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ هستند. بنابراین، مدل‌سازی باید با روشی انجام شود که در بارهای امدانسی‌های بالا، از بزرگ شدن خطا جلوگیری کند. برای دستیابی به این مهم، مدل با مشخصات ادمیتانسی Y_{model} و پارامترهای x، باید دقت تمام مقادیر ویژه $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ از ماتریس ادمیتانس را در نمونه برداری با نمونه‌های K، به‌طور نسبتاً خوبی حفظ کند. لذا کل محاسبات ما به کمینه کردن تابع زیر محدود می‌شود:

$$\text{Minimize}_x \left\{ \text{Im} \left[\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K \left\| \frac{\lambda_{model,j}(s_k, x) - \lambda_j(s_k)}{\lambda_j(s_k)} \right\|^2 \right] \right\} \quad (2)$$

۳. روش برازش برداری^{۱۳}

اگر پاسخ فرکانسی قسمتی از مدار یا شبکه قدرت، به‌صورت مجموعه‌ای از داده‌ها یا به شکل رابطه (۳) در دسترس باشد،

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1s + \dots + a_Ns^N}{b_0 + b_1s + \dots + b_Ns^N} \quad (3)$$

می‌توان آن را به شکل تابع کسری زیر که تقریبی مناسب از پاسخ فرکانسی مدار است، در نظر گرفت [۱۱-۱۴]:

$$f(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \quad (4)$$

المان‌های وابسته به فرکانس در شبکه‌های قدرت، به‌راحتی می‌توانند با استفاده از توابع کسری، معمولاً در قالب مدل فضای حالت^۱ یا یک مدل قطب-مانده^۲، مدل‌سازی شوند. چنین مدل‌هایی می‌توانند به‌راحتی در برنامه‌های تحلیل حالات گذرای الکترومغناطیسی^۳ [۱]، مورد استفاده واقع شوند. در واقع، تجهیزاتی مانند خطوط انتقال، ترانسفورماتورها و زیرشبکه‌ها^۴، نمونه‌هایی از کاربرد روش فوق می‌باشند [۲-۶]. یک نوع از شبکه‌های چندترمیناله^۵، مدار معادلی از دید ترینال یک بلوک از مدار است که رفتار اصلی جزئی از سیستم را به‌صورت خلاصه‌شده در مجموعه‌ای از ترینال‌ها به‌خوبی تعریف می‌کند؛ برای مثال، انتهای یک خط انتقال نمونه‌ای از این سیستم است. بنابراین، این مدل‌سازی‌ها باید به‌صورتی اجرا شود که مدل استخراج‌شده به اندازه کافی دقیق باشد. لذا باید مجموعه‌ای از محدودیت‌های فیزیکی مربوط به پایداری^۶، غیر فعال بودن^۷، علیت^۸ و تقارن^۹ در حالت معادلات ماتریسی، به بهترین وجه ممکن ارضا شوند [۷].

در مورد مسائل چندترمیناله، پاسخ خروجی گاهی اوقات به‌شدت وابسته به توزیع ورودی اعمال‌شده به ترینال‌هاست. چنین رفتاری اغلب در محدوده فرکانسی پایین، به دلیل تفاوت‌های چشمگیر در مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه در حالت مودال، به وقوع می‌پیوندد. اعمال مستقیم تکنیک‌های مدل‌سازی شبکه‌ها در چنین مواردی، مدلی با ویژگی‌های غیردقیق به‌دست می‌دهد. این مشکل توسط روش شناخته‌شده‌ای با عنوان آشفنگی مودال^{۱۱} [۸] حل می‌شود، اما نیازمند زمان محاسباتی زیاد و حافظه اضافی است.

در این مقاله، یک تکنیک جدید برای مدل‌سازی سیستم‌های چندترمیناله سیستم‌های با اختلاف زیاد در مشخصات مودال معرفی می‌شود. منطق این تکنیک جدید بر پایه قرار دادن ماتریس پارامتر ترینال، در معرض ماتریس تبدیل تشابه، برای نشان دادن بهتر مقادیر ویژه کوچک پنهان‌شده در داده‌هاست [۹]. سپس چگونگی محاسبه یک ماتریس تبدیل مناسب با استفاده از داده‌های معین و چگونگی حفظ اطلاعات ضروری غیر فعال بودن و تقارن نشان داده می‌شود. پس از آن برای استخراج مدل و اجرای غیر فعال بودن، با استفاده از یک روش

1. State Space
2. Pole-Residue Model
3. ElectroMagnetic Transient Program (EMTP)
4. Subnetworks
5. Multi-Port
6. Stability
7. Passivity
8. Causality
9. Symmetry
10. Modal Perturbation (MP)

11. Frequency-Dependent Network Equivalent (FDNE)
12. Admittance Matrix
13. Vector Fitting (VF)

$$(w)_{fit}(s) = \frac{\prod_{n=1}^{N+1}(s-z_n')}{\prod_{n=1}^N(s-a_n')} \quad (10)$$

از معادلات (۹) و (۱۰) به دست می آید:

$$f(s) = \frac{(wf)_{fit}(s)}{w_{fit}(s)} = h \frac{\prod_{n=1}^{N+1}(s-z_n')}{\prod_{n=1}^N(s-a_n')} \quad (11)$$

رابطه (۱۱) نشان می دهد که قطب های $f(s)$ معادل با صفرهای $w_{fit}(s)$ است (زیرا قطب های آغازگر، در فرایند جداسازی و برازش اثر خود را از دست می دهند. همچنین قطب های آغازگر استفاده شده در $(wf)_{fit}(s)$ همان قطب های آغازگر استفاده شده در $w_{fit}(s)$ می باشند). بنابراین با محاسبه صفرهای $w_{fit}(s)$ یک دسته قطب های مناسب برای برازش تابع اولیه $f(s)$ به دست خواهد آمد. محاسبه صفرهای به دست آمده از توابع جزئی رابطه (۱۱) در مرجع [۱۲] نشان داده شده است.

در این هنگام، برخی از قطب های جدید ممکن است ناپایدار باشند. این مشکل را می توان با قرینه کردن علامت قسمت حقیقی آن ها برطرف کرد.

• گام دوم: تعیین مانده ها

در اصل می توان مانده های تابع $f(s)$ را به طور مستقیم از روی رابطه (۴) محاسبه کرد. اما در حالت کلی، با انجام محاسبات دقیق تری که بر روی رابطه (۳۱) صورت می پذیرد، می توان صفرهای تابع $w(s)$ را به عنوان قطب های a_n تابع $f(s)$ محاسبه کرد. این موضوع مشابه حالت قبل، دوباره معادلات را به فرم خطی $Ax = b$ تبدیل می کند که بردار مجهول x شامل مجهولات h و d و c_n است. حل این معادلات در [۱۱] موجود است.

موضوع مهم و قابل توجه بعدی در این زمینه، یکسان بودن درجه صورت و مخرج تابع $w_{fit}(s)$ در (۳) است. این موضوع نشان می دهد که برای مثال اگر قطب های آغازگر (صفرهای تابع $w_{fit}(s)$) صحیح باشند، قطب های جدید نیز برابر با قطب های آغازگرند $(w_{fit}(s) = 1)$.

• انتخاب قطب های آغازگر

کاربرد موفقیت آمیز روش برازش برداری نیازمند وجود معادلات خطی ای است که بتوان آن ها را با دقت کافی و مناسبی حل کرد. در تجربه های پیشین، مشکلات انتخاب قطب های آغازگر جدید می تواند به دو شکل افزایش یابد:

۱. اگر قطب های آغازگر حقیقی در نظر گرفته شوند، ممکن است

که در آن s عملگر لاپلاس است. c_n ها همان مانده ها و a_n ها نیز قطب های برازش یافته اند که می توانند حقیقی یا مزدوج مختلط باشند. در رابطه فوق h و d اعدادی حقیقی هستند. اکنون مسئله اصلی در این رابطه، تقریب زدن و محاسبه تمامی ضرایب است. این عمل می تواند با استفاده از روش حداقل مربعات در یک بازه فرکانسی معین صورت پذیرد. توجه کنید که یکی از مشکل اساسی در تقریب ضرایب، غیر خطی بودن معادلات و وجود ضرایب مجهول a_n ها در مخرج کسر است. روش برازش برداری مشکلات تقریب رابطه (۴) را به ترتیب در دو مرحله و به صورت خطی و با اعمال قطب های معین حل می کند.

• گام اول: تعیین قطب ها

یک دسته قطب معین به عنوان a'_n ها برای شروع انتخاب شده و تابع $f(s)$ در تابع مجهول $w(s)$ ضرب می شوند. به علاوه، یک تقریب کسری برای تابع مجهول $w(s)$ در نظر گرفته می شود. لذا:

$$\left(\frac{w(s)f(s)}{w(s)} \right) = \left(\frac{\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s-a_n} + d + sh}{\sum_{n=1}^N \frac{c'_n}{s-a'_n} + 1} \right) \quad (5)$$

توجه کنید که در رابطه (۵) تخمینی که برای تابع کسری $w(s)$ در نظر گرفته شده است، باید دارای قطب های مشابهی با تابع $w(s)f(s)$ داشته باشد. این مفهوم دقیقاً به این معناست که صورت تابع کسری $w(s)$ تمامی قطب های $f(s)$ را خنثی کند. همچنین باید ابهام های راه حل برای به دست آوردن تابع کسری $w(s)$ از بین بروند. بدین صورت که این تابع در فرکانس های بالا به صورت اجباری به سمت تابع واحد $\lim_{s \rightarrow \infty} w(s) = 1$ میل کند.

اکنون با ضرب ردیف دوم رابطه (۳۲) در $f(s)$ چنین به دست می آید:

$$\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s-a_n} + d + sh = \left(\sum_{n=1}^N \frac{c'_n}{s-a'_n} + 1 \right) f(s) \quad (6)$$

یا:

$$(wf)_{fit}(s) = w_{fit}(s)f(s) \quad (7)$$

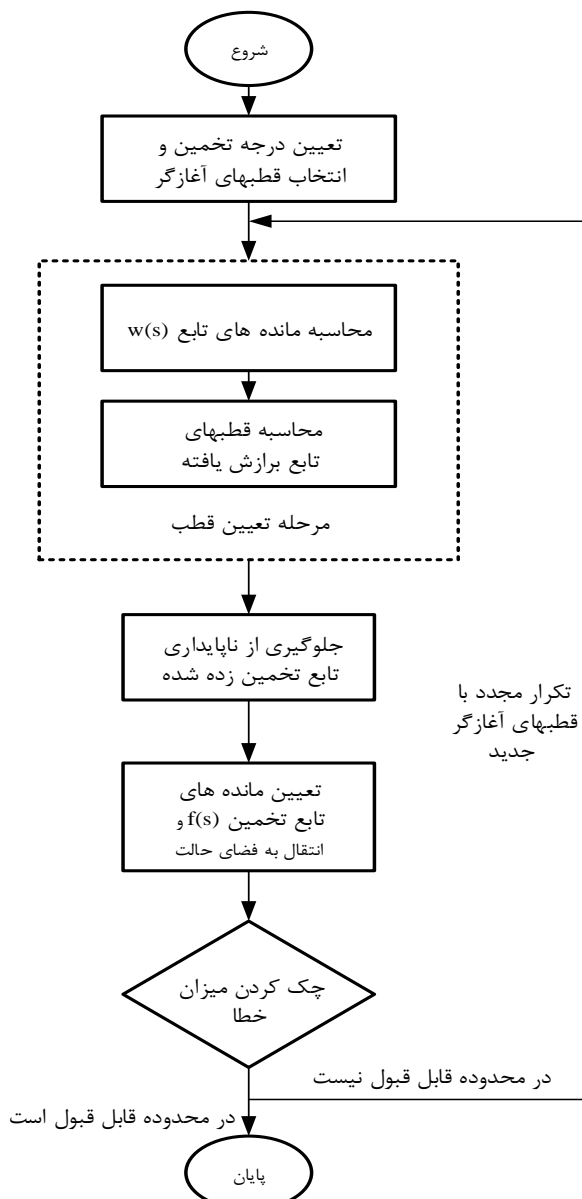
ملاحظه می شود که معادله (۶) خطی و با ضرایب مجهول h, c_n, d است. اگر رابطه (۷) در چند نقطه فرکانسی معین و مختلف نوشته شود، مسئله فوق به چند رابطه خطی به شکل:

$$Ax = b \quad (8)$$

تبدیل می شود که در آن مجهولات، همان بردار برازش یافته x هستند. رابطه (۸) را می توان با استفاده از روش حداقل مربعات حل کرد. توجه کنید که هر مجموع از توابع جزئی را می توان به صورت زیر نمایش داد:

$$(wf)_{fit}(s) = h \frac{\prod_{n=1}^{N+1}(s-z_n')}{\prod_{n=1}^N(s-a_n')} \quad (9)$$

دقیق تر نمایش داده شده اند. در انتها نیز ماتریس \tilde{Y} باید به حالت پایه Y برگردانده شود.



شکل (۱): طرحواره حل مسئله تخمین سیستم زمین توسط روش برازش برداری

۱.۴. تجزیه مقادیر ویژه

یک رویکرد معین برای تجزیه مقادیر ویژه در نمونه های فرکانسی که با استفاده از رابطه (۱۵) به دست آمده است، استفاده از ماتریس قطری Λ می باشد، زیرا این ماتریس دقیقاً مقادیر ویژه Y را استخراج می کند. با وجود این در حالت کلی با یک ماتریس T وابسته به فرکانس، برازش مقادیر ویژه توسط یک تابع کسری پایدار نیز امکان پذیر نیست.

$$Y(s) = T(s)\Lambda(s)T^{-1}(s) \quad (۱۵)$$

معادلات خطی در رابطه (۸) به صورت غیر دقیق حل شوند (قسمت های حقیقی و موهومی باید مساوی یکدیگر باشند).

۲. ممکن است اختلاف بزرگی در اندازه قسمت های حقیقی و موهومی قطب های آغازگر و قطب های صحیح روی دهد که این موضوع در نتیجه واریانس بزرگ اختلاف توابع $w(s)$ و $f(s)$ است. این موضوع به دلیل استفاده از روش حداقل مربعات در هنگام حل معادلات رابطه (۸) است که می تواند منجر به نتایج ضعیف برازش توابع بشود. این مسئله ممکن است زمانی که توابع کوچک باشند رخ دهد.

مشکل اول با انتخاب قطب های آغازگر مختلط مرتفع می شود. مشکل دوم نیز با انتخاب هوشمندانه مکان قطب های آغازگر و با استفاده از قطب های جدید به عنوان قطب های آغازگر در تکرارهای بعدی (مانند روش گوس- جردن) حل می شود.

قطب های آغازگر باید به صورت مزدوج مختلط با قسمت موهومی مطابق با رابطه (۵) که به صورت خطی در بازه فرکانسی مورد نظر توزیع شده اند، مد نظر قرار گیرند. هر جفت قطب به این صورت انتخاب می شوند:

$$a_n = -p + jq \quad (۱۲)$$

$$a_{n+1} = -p - jq$$

که در آن:

$$p = \frac{q}{100} \quad (۱۳)$$

اکنون با انتخاب چنین قطب هایی، قسمت های حقیقی کوچک فرض می شوند و مشکل مطرح شده در قسمت قبل مرتفع خواهد شد. دیگرام روش مذکور در شکل (۱) نمایش داده شده است.

۴. تبدیل مودال

ماتریس ادمیتانس Y را می توان توسط یک ماتریس غیر منفرد T ، با استفاده از تبدیل زیر، به حالت مودال تبدیل کرد. ماتریس T باید خواص مقادیر ویژه ماتریس Y را حفظ کند.

$$T^{-1}YT = \tilde{Y} \quad (۱۴)$$

اگر ماتریس T به خوبی انتخاب شود، می توان دستیابی به مقادیر

ویژه کوچک Y را نسبت به \tilde{Y} قابل مشاهده تر نمود. اکنون این تبدیل، یک تبدیل آشکارکننده مد نام گذاری می شود. با قرار دادن \tilde{Y} در الگوریتم VF و اعمال اجباری انتقال قطب ها به سمت چپ محور موهومی می توان به این نتیجه دست یافت که مقادیر ویژه کوچک،

برای غلبه بر این مشکل، T_0 با یک ماتریس متعامد و حقیقی Q تخمین زده می‌شود. از آنجایی که متعامد به معنی $Q^{-1} = Q^T$ است، برای معادله (۱۴) به دست می‌آید:

$$Q^T Y Q = \hat{Y} \quad (22)$$

با استفاده از قانون برای ترانزپوز ماتریس‌ها می‌توان نوشت:

$$\hat{Y}^T = (Q^T Y Q)^T = Q^T Y^T Q = Q^T Y Q = \hat{Y} \quad (23)$$

بنابراین رابطه فوق ثابت می‌کند که ماتریس تبدیل یافته \hat{Y} متقارن است. برای تأیید اینکه Q غیر فعال بودن Y را تضمین می‌کند، Y به بخش‌های حقیقی و موهومی تقسیم می‌شود؛ یعنی:

$$Q^{-1}(Y' + jY'')Q = Q^{-1}YQ + jQ^{-1}Y''Q = \hat{Y}' + j\hat{Y}'' \quad (24)$$

لذا روشن است که Q مقادیر ویژه \hat{Y}' و \hat{Y}'' را حفظ می‌کند، زیرا Q به‌عنوان یک تبدیل تشابه روی این ماتریس‌ها، به‌طور مجزا عمل می‌کند. از آنجایی که Y و \hat{Y} متقارن‌اند، معیار غیر فعال بودن طبق جدول (۱) شرط زیر است:

$$\lambda(Y + Y^H) > 0 \quad (25)$$

که می‌توان نوشت:

$$\lambda(Y) = \lambda(\hat{Y}') > 0 \quad (26)$$

و حل مسئله تمام می‌شود.

جدول (۱): رابطه بین خاصیت‌های ماتریس و روابط ریاضی حاکم بر آن	
خصوصیات ماتریس	رابطه ریاضی
شرط حقیقی بودن	$Y(s) = Y^*(-s)$
شرط پایداری و علی بودن	$Re\{a_m\} < 0; m = 1, \dots, N$
شرط غیر فعال بودن	$\lambda(Y + Y^H) > 0$
شرط تقارن	$Y = Y^T$

۵. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این قسمت، سه حالت مختلف به‌منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی ارائه می‌شود.

- مورد اول

یک شبکه دوترمیناله نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است. در این قسمت، ماتریس ادمیتانس با استفاده از روش پیشنهادی محاسبه و با داده‌های شبکه مقایسه می‌شود.

در حالت اول اگر داده‌های شبکه طبق جدول (۲) باشد، نمودار اندازه و فاز المان‌های ماتریس ادمیتانس (مدل فضای حالت) را می‌توان به‌ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده کرد.

در عوض، این روش ملزم به استفاده از یک ماتریس تبدیل ثابت و حقیقی و اعمال آن به تمام فرکانس‌ها خواهد بود.

برای یافتن یک ماتریس کاندیدای خوب، ابتدا فرکانس s_0 طوری شناسایی می‌شود که در آن نسبت $k(s)$ در رابطه (۱۶) بین بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقدار ویژه، ماکزیمم باشد. این عمل، یک ماتریس تجزیه مقدار ویژه T_x در فرکانس معین s_0 به دست می‌دهد. پس:

$$T_x = T(s_0) \quad (16)$$

$$k(s) = \frac{\text{Max}\{|\lambda_1(s)|, \dots, |\lambda_n(s)|\}}{\text{min}\{|\lambda_1(s)|, \dots, |\lambda_n(s)|\}} \quad (17)$$

۲.۴. حفظ واقعی بودن ماتریس تبدیل

در این مرحله نمی‌توان T_x به دست آمده را مستقیماً به ماتریس Y اعمال کرد، زیرا استفاده از یک T_x مختلط، مؤلفه‌هایی را در \hat{Y} تولید می‌کند که معیار واقعی بودن ماتریس تبدیل را طبق جدول (۱) را ارضا نمی‌کند. لذا برای دستیابی به یک ماتریس واقعی، از روش مرجع [۱۵] استفاده می‌شود. در این روش، هر بردار ویژه t_x با یک زاویه θ به‌منظور مینیمم کردن بخش موهومی آن چرخانده می‌شود. سپس با استفاده از روش حداقل مربعات، بهینه‌سازی انجام می‌پذیرد. اکنون برای هر بردار ویژه چرخش یافته می‌توان نوشت:

$$\hat{t} = e^{j\theta} t_x = (\cos\theta + j\sin\theta)(t'_x + jt''_x) \quad (18)$$

اکنون به‌منظور محاسبه نرَم قسمت موهومی می‌توان نوشت:

$$f(\theta) = ||\text{Im}\{\hat{t}\}||^2 = \sum_{i=1}^n (t'_{x,i} \sin\theta + jt''_{x,i} \cos\theta)^2 \quad (19)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۹) برحسب θ و حل $df/d\theta = 0$ به دست می‌آید:

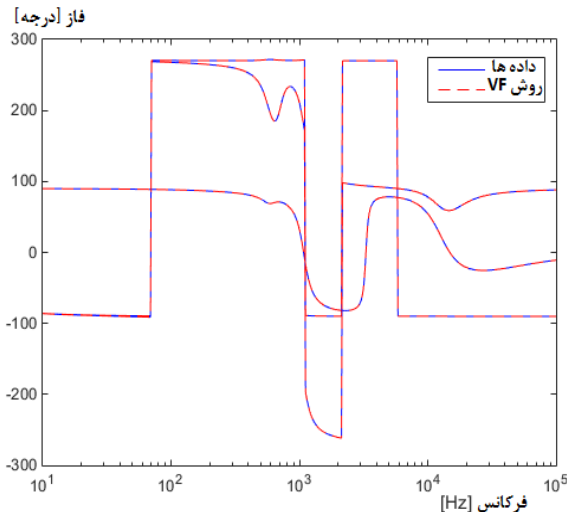
$$\tan(2\theta^*) = \frac{-2 \sum_{i=1}^n t'_{x,i} t''_{x,i}}{\sum_{i=1}^n [(t'_{x,i})^2 - (t''_{x,i})^2]} \quad (20)$$

از آنجایی که θ می‌تواند نشان‌دهنده یک مقدار ماکزیمم و مینیمم باشد، معادله (۷) در θ^* و $\theta^* + \frac{\pi}{2}$ ارزیابی می‌شود تا مقدار صحیح تعیین شود. در نهایت، از بخش موهومی صرف‌نظر خواهد شد. در نتیجه:

$$T_0 = \text{Re}\{\hat{T}\} \quad (21)$$

۳.۴. حفظ تقارن و غیر فعال بودن

تاکنون یکی از مشکلات روش پیشنهاد شده، این است که تبدیل T_0 تنها تقارن Y را حفظ نمی‌کند بلکه هیچ تضمینی بر غیر فعال بودن آن ارائه نمی‌دهد.

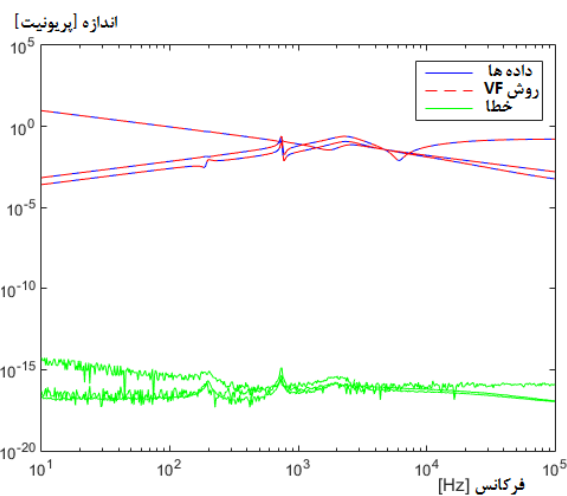


شکل (۴): نمودار فاز المان‌های ماتریس Y در حالت اول

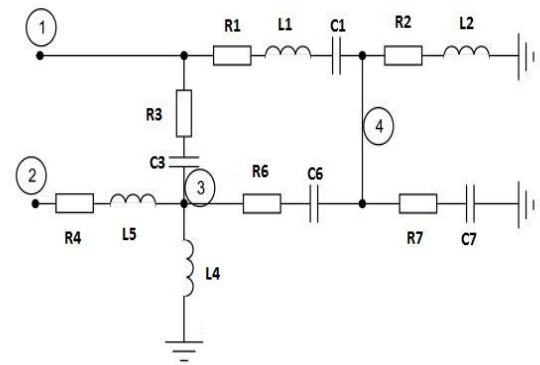
حال به منظور صحت هرچه بیشتر روش پیشنهادی، اگر داده‌های شکل (۲) به طور دلخواه مطابق جدول (۳) تغییر یابند، خروجی‌ها مطابق شکل (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند:

جدول (۳): مقادیر المان‌های شبکه شکل (۲) در حالت دوم

مقدار (در سیستم SI)	المان	مقدار (در سیستم SI)	المان
۰/۰۰۵	L_1	۱/۷	R_1
۰/۰۰۰۰۰۱	C_1	۳	R_2
۰/۰۵	L_2	۴	R_3
۰/۰۰۰۰۱	C_3	۰/۰۰۱	L_4
۰/۰۰۰۰۷	L_5	۰/۰۱	R_5
۰/۰۰۰۰۱	C_6	۲	R_6
۰/۰۰۰۰۰۲	C_7	۰	R_7



شکل (۵): نمودار اندازه المان‌های ماتریس Y در حالت دوم

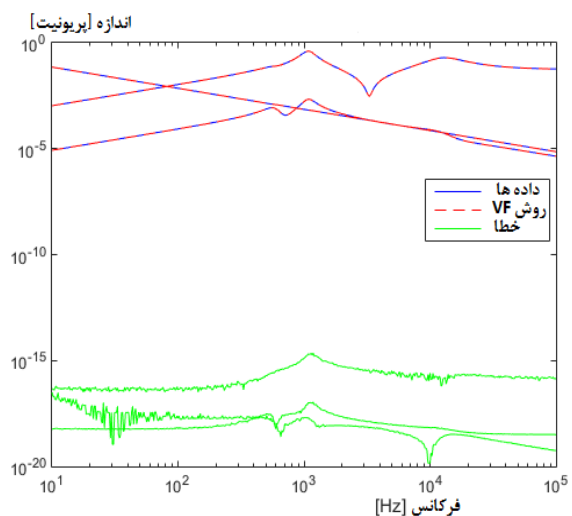


شکل (۲): یک شبکه دو ترمیناله نوعی

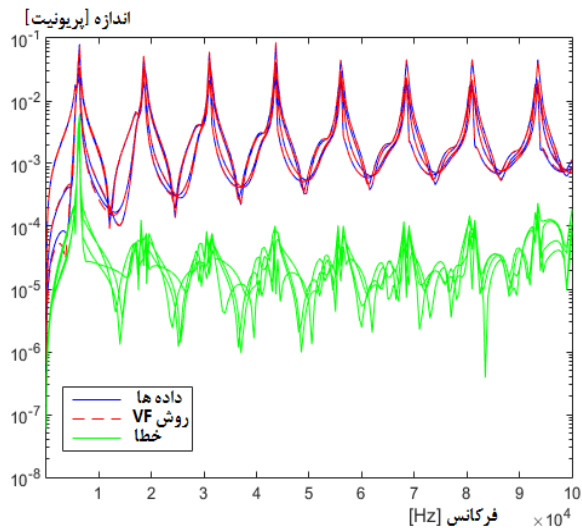
در هر دو شکل، نمودار آبی رنگ خروجی نرم افزار ATP است و نمودار قرمز رنگ، خروجی روش پیشنهادی است. نمودار سبز رنگ نیز خطای حاصل از مدل‌سازی و برازش است که تقریباً در این حالت، بین 10^{-15} و 10^{-20} می‌باشد. این میزان خطای حاکمی از برازش بسیار دقیق داده‌ها بر روش پیشنهادی است.

جدول (۲): مقادیر المان‌های شبکه شکل (۲) در حالت اول

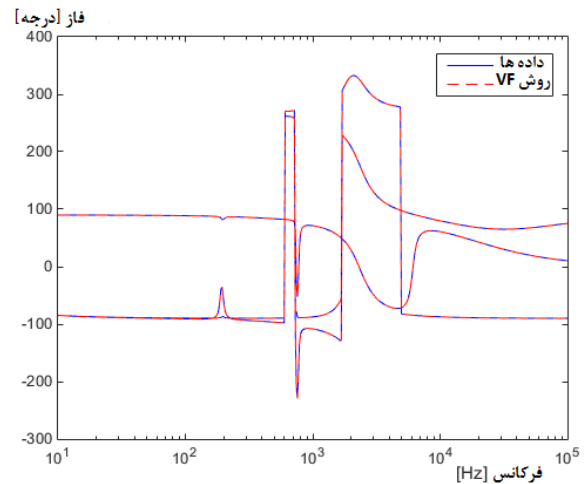
مقدار (در سیستم SI)	المان	مقدار (در سیستم SI)	المان
۰/۰۰۰۱	L_1	۲	R_1
۰/۰۰۰۰۰۷	C_1	۰	R_2
۰/۰۰۲	L_2	۷	R_3
۰/۰۰۰۰۱	C_3	۰/۲۲۰	L_4
۰/۰۰۳	L_5	۱	R_5
۰/۰۰۰۰۱	C_6	۱۰	R_6
۰/۰۰۰۰۰۲	C_7	۱	R_7



شکل (۳): نمودار اندازه المان‌های ماتریس Y در حالت اول



شکل (۸): نمودار اندازه‌های ماتریس Y

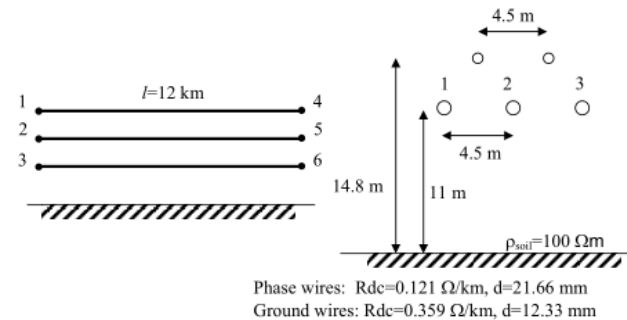


شکل (۶): نمودار فاز المانهای ماتریس Y در حالت دوم

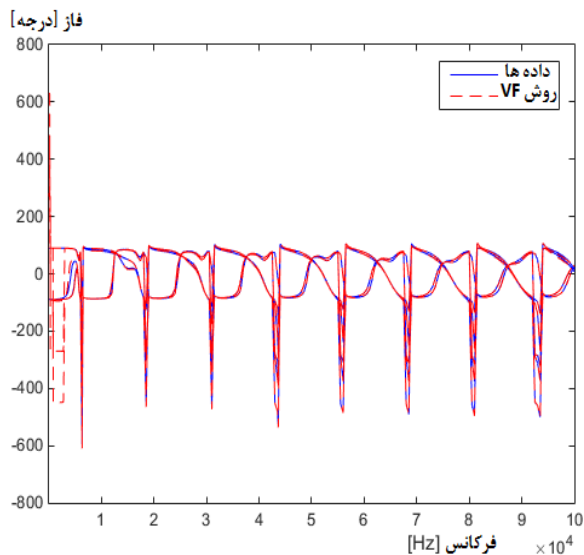
که مشاهده می‌شود باز هم نمودارهای حاصل از روش پیشنهادی و داده‌های اولیه، با دقت بسیار زیادی (خطای حدود 10^{-15}) بر هم منطبق شده‌اند.

• مورد دوم

فرض کنید که یک خط انتقال ۱۳۲ کیلوولت با سه هادی و طول ۱۲ کیلومتر، مطابق شکل (۷) در دسترس باشد.



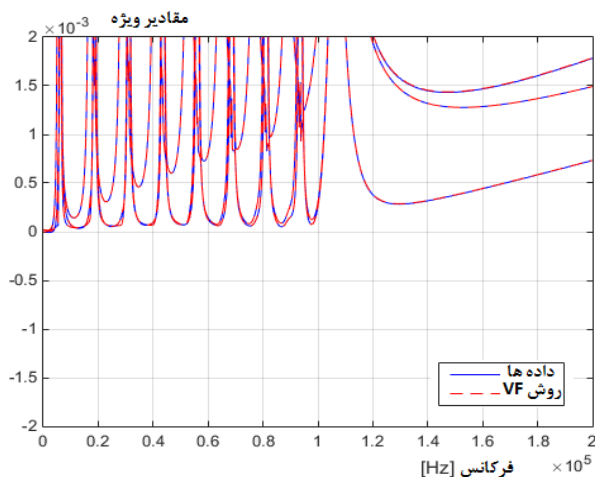
شکل (۷): خط انتقال مورد مطالعه



شکل (۹): نمودار فاز المانهای ماتریس Y

اکنون می‌توان نمودار اندازه و فاز المانهای ماتریس ادمیتانس را به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) مشاهده کرد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود خطایی در حدود 10^{-5} واحد، پس از برازش داده‌های اولیه و تطابق آن با روش پیشنهادی پدید می‌آید که بسیار مناسب و قابل قبول است.

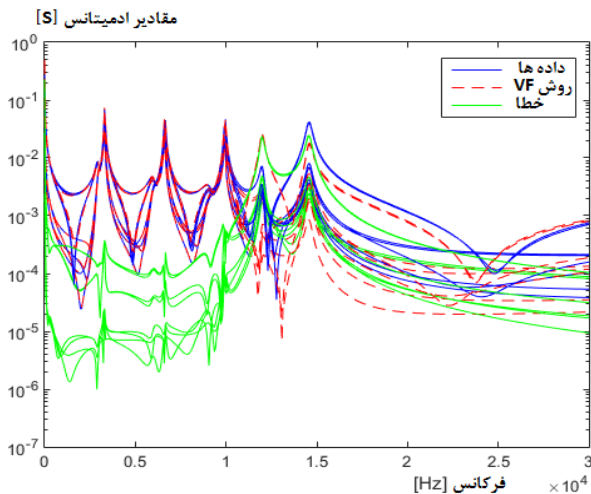
در شکل (۱۰) مقادیر ویژه ماتریس ادمیتانس وابسته به فرکانس رسم شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر ویژه بسیار کوچک هستند و در این هنگام، احتمال بزرگ شدن خطای ناشی از برازش ممکن است هر لحظه بزرگ و بزرگ‌تر شود. اما با انتخاب هوشمندانه ماتریس Q، به آسانی بر این مشکل فائق آمد. لذا با توجه به شکل (۱۰)، با وجود اینکه مقادیر ویژه بسیار کوچک‌اند، باز هم روش برازش برداری، با دقت بالایی، تطابق بین داده‌ها و منحنی برازش‌یافته را حاصل می‌کند.



شکل (۱۰): مقادیر ویژه ماتریس ادمیتانس Y

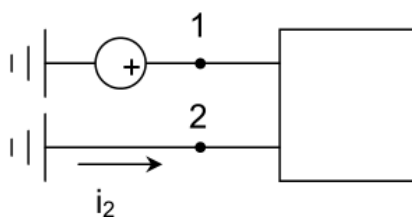
• مورد سوم

در این قسمت، یک مدار معادل ۶ ترمیناله از خط انتقال شکل (۲)



شکل (۱۲): نمودار المان‌های ماتریس ادیتمانس Y برای ترمینال خط انتقال

مزیت این روش این است که دیگر نرم‌افزار ATPDraw با خط انتقال یا شبکه‌های حجیم و غول‌پیکر مواجه نمی‌شود و فقط با المان‌های اهمی - سلفی - خازنی روبه‌رو خواهد شد. از آنجاکه گسسته‌سازی مدل جریان این المان‌ها در مرجع [۱] به‌طور کامل تشریح شده است، نرم‌افزار ATPDraw آن‌ها را در کسری از نانوثانیه مدل می‌کند و اطلاعات مورد نیاز را از مدار معادل شبکه استخراج می‌کند؛ برای نمونه در شکل (۱۳) یک شبکه دوترمیناله ساده در نرم‌افزار مدل شده است. مدار معادل شبکه مورد نظر در این مربع و با فراخوانی فایل مدل با پسوند .atp. گنجانده شده است. حال اگر برای مثال بخواهید پاسخ جریان ورودی به ترمینال ۲ را ناشی از یک منبع ولتاژ مشاهده کنید، کافی است مداری همانند شکل (۱۳) در نرم‌افزار رسم کنید.



شکل (۱۳): اصول مدل‌سازی روش پیشنهادی در نرم‌افزار

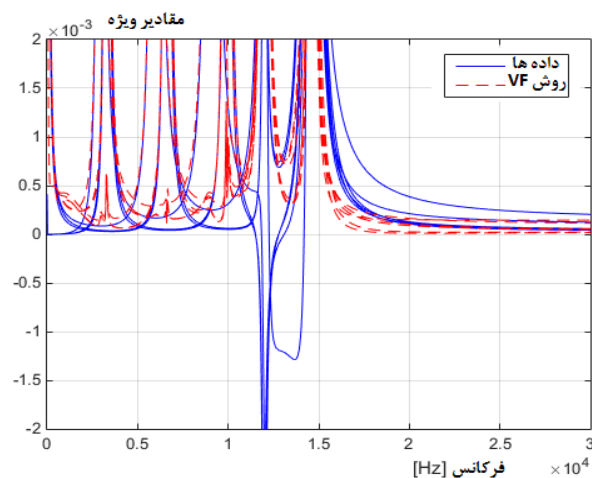
اکنون به‌آسانی تحلیل شبکه وابسته به فرکانس در تحلیل حالت گذرا صورت می‌پذیرد؛ برای یک مثال واقعی، می‌توان مطالعه موردی حالت دوم را نام برد. بنابراین استفاده از نرم‌افزار ATPDraw تنها به‌منظور بررسی اعتبار مدل ارائه شده و قابل استفاده بودن آن در پژوهش‌ها و پروژه‌هاست و هیچ‌گونه نسی و مخالفتی با مدل‌های ریاضیاتی موجود ایجاد نمی‌کند [۷، ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۵].

طبق روش پیشنهادی ارائه می‌شود. اما با این تفاوت که طول آن به ۴۵ کیلومتر افزایش داده شده است. همچنین بازه فرکانسی برای عملیات برآزش، از ۱۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. نمودارهای مقادیر ویژه و ادیتمانس حاصل شده از ترمینال مدار معادل را می‌توان در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده کرد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، خطای حاصل از شبیه‌سازی در حدود یک‌هزارم درصد می‌باشد و این نتایج، حاکی از آن است که برآزش با دقت بسیار بالایی صورت پذیرفته است.

اکنون ممکن است این سؤال در ذهن خوانندگان پیش بیاید که مزیت روش پیشنهادی نسبت به مدل‌های ارائه‌شده در نرم‌افزار ATPDraw چیست؟ در پاسخ به این سؤال باید ذکر کرد که هدف از ارائه مدل جدید، سادگی محاسبات و کنترل‌پذیری آن است؛ برای نمونه بهتر است مثال زیر شرح داده شود:

فرض کنید یک شبکه دلخواه در دسترس دارید که می‌خواهید آن را در حالات گذرا تجزیه و تحلیل کنید. همان‌گونه که مستحضرید در این‌گونه مسائل، باید داده‌های بسیاری از شبکه در میکروثانیه‌های تحت عمل در دسترس قرار گیرد. حال اگر این شبکه شامل خطوط انتقال یا ترانسفورماتور باشد، تحلیل شبکه زمان بسیاری را از کاربر سلب می‌کند که چندان خوشایند نیست.

لذا در این مقاله روشی ارائه شده است که کاربر می‌تواند هر شبکه دلخواهی را در نرم‌افزار متلب توسط mfile با Ybus مدل کند. سپس پاسخ فرکانسی شبکه از دید ترمینال‌های مورد نظر محاسبه نماید و شبکه دلخواه مذکور را تنها با مقادیر RLC و به سادگی در ATPDraw مدل کند. پس از آن کاربر می‌تواند با ساخت مدلی با پسوند .atp. آن مدل را در نرم‌افزار ATPDraw فراخوانی کند و تحلیل‌ها را انجام دهد.



شکل (۱۱): مقادیر ویژه ماتریس ادیتمانس Y برای مدار معادل خط انتقال

۶. نتیجه گیری

ماتریس مانده به طور مجزا، به حوزه فیزیکی برگردانده می شود و مدلی از Y را ارائه می کند.

ماتریس تبدیل آشکارکننده مد Q در فرکانس s_0 محاسبه شده و به Y در تمام فرکانس ها اعمال شد. بنابراین ممکن است این سؤال پیش بیاید که آیا مقادیر ویژه Y در فرکانس های دور از s_0 به خوبی قابل مشاهده خواهند بود یا خیر. به طور کلی، هیچ تضمینی برای صحت این مطلب وجود ندارد. با این حال، برای کاربردهای سیستم قدرت، نسبت مقادیر ویژه بزرگ به مقادیر ویژه کوچک، معمولاً فقط در فرکانس های پایین رخ خواهد داد. بنابراین، با محاسبه Q در یک نقطه فرکانسی در ناحیه ای که در آن $k(s)$ بزرگ (حداکثر) باشد، مقادیر ویژه Y در ماتریس تبدیل $\hat{Y}(s)$ نسبت به \hat{Y} به شکل قابل توجهی، قابل مشاهده تر خواهد بود.

مطالعات موردی صورت گرفته در این مقاله نیز، صحت سرعت و دقت نتایج را با استفاده از روش پیشنهادی برای اعمال به شبکه های چندترمیناله در سیستم های قدرت تأیید می کند.

در این مقاله، یک روش نوین برای مدل سازی سیستم های چندپورته معرفی شده است. این روش هنگامی که نسبت مقادیر ویژه بزرگ به مقادیر ویژه کوچک در ماتریس ادمیتانس ترمینال چشمگیر باشد، بسیار کاربرد دارد. روش پیشنهادی، بر مبنای اعمال ماتریس تبدیل تشابه Q به Y ، برای قابل مشاهده تر ساختن مقادیر ویژه کوچک ماتریس ادمیتانس است. این ماتریس تبدیل با تجزیه مقادیر ویژه، چرخش بردار ویژه و متعامدسازی محاسبه می شود. از خصوصیات روش پیشنهادی می توان به موارد زیر اشاره کرد: اول اینکه ماتریس تبدیل یافته \hat{Y} متقارن باقی می ماند و مقادیر ویژه و مشخصات غیر فعال بودن Y را حفظ می کند؛ دوم اینکه با اعمال روش برآزش برداری و اجرای اجباری غیر فعال بودن به \hat{Y} ، با وزن دهی مناسب در بهینه سازی حداقل مربعات، نسبت به زمانی که این تکنیک ها مستقیماً به Y اعمال شوند، نمایش بسیار بهتری از مقادیر ویژه Y ارائه می کند. و سوم اینکه مدل استخراج شده مانده قطب \hat{Y} ، با اعمال تبدیل معکوس به هر

مراجع

- [1] Dommel, H. W., "EMTP Theory Book", Bonneville Power Administration. Portland, OR, USA: EMTP, 1986.
- [۲] محمودیان مهرداد، غلامی احمد، گیتی زاده محسن. «بررسی جامع اضافه ولتاژهای صاعقه در مزارع بادی با پیکربندی های متفاوت به همراه تأثیر سیستم زمین». مهندسی و مدیریت انرژی. سال ۱۳۹۴، جلد ۵، شماره ۳، صفحات ۱۴-۲۹.
- [۳] مرتضایی نژاد سید مسعود، غلامی احمد. «مکان یابی برگیر در مزرعه بادی به کمک الگوریتم ژنتیک». مهندسی و مدیریت انرژی. سال ۱۳۹۴، جلد ۵، شماره ۲، صفحات ۱۴-۲۳.
- [4] Noda, T., Nagaoka, N., Ametani, A., "Phase Domain Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines by Means of an ARMA Model", IEEE Trans. Power Del., Vol. 11, No. 1, pp. 401-411, Jan. 1996.
- [5] Morched, A., Gustavsen, B., Tartibi, M., "A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables", IEEE Trans. Power Del., Vol. 14, No. 3, pp. 1032-1038, Jul. 1999.
- [۶] عرب مارکده غلامرضا، محمدرضایی مالک، صادقزاده محمدتقی. «کاهش ولتاژ وجه مشترک در مبادل ماتریسی با حذف بردار صفر». مهندسی و مدیریت انرژی. سال ۱۳۹۱، جلد ۲، شماره ۲، صفحات ۲-۱۲.
- [7] Gustavsen, B., "Wide Band Modeling of Power Transformers", IEEE Trans. Power Del., Vol. 19, No. 1, pp. 414-422, Jan. 2004.
- [8] Gustavsen, B., "Frequency-Dependent Modeling of Power Transformers with Ungrounded Windings", IEEE Trans. Power Del., Vol. 19, No. 3, pp. 1328-1334, Jul. 2004.
- [9] Borghetti, A., Morched, A., Napolitano, F., Nucci, C. A., "Lightning-Induced Overvoltages Transferred Through Distribution Power Transformers", IEEE Trans. Power Del., Vol. 24, No. 1, pp. 360-372, Jan. 2009.
- [10] Gustavsen, B., Semlyen, A., "Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 1052-1061, July 1999.
- [11] Gustavsen, B., "Improving the Pole Relocating Properties of Vector Fitting", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 21, No. 3, pp. 1587-1592, July 2006.
- [12] Deschrijver, D., Mrozowski, M., Dhaene, T., De Zutter, D., "Macromodeling of Multiport Systems Using a Fast Implementation of the Vector Fitting Method", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 18, No. 6, pp. 383-385, June 2008.
- [13] Annakkage, U. D., Nair, N. K. C., Liang, Y., Gole, A. M., Dinavahi, V., Gustavsen, B., Noda, T., Ghasemi, H., Monti, A., Matar, M., Iravani, R., Martinez, J. A., "Dynamic System Equivalents: a Survey of Available Techniques", IEEE Trans. Power Del., Vol. 27, No. 1, pp. 411-420, Jan. 2012.
- [14] Calafiore, G. C., Chinaea, A., Grivet-Talocia, S., "Subgradient Techniques for Passivity Enforcement of Linear Device and Interconnect Macromodels", IEEE

Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 60, No. 10, pp. 2990–3003, Oct. 2012

- [15] Gustavsen, B., "Passive Macromodeling via Mode-Revealing Transformation", in Proc. 16th IEEE Workshop Signal Propag. Interconnects, Sorrento, Italy, pp. 61–64, May. 2012,