

ارائه یک روش نوین به منظور مدل سازی جامع سیستم زمین دکل های فشار قوی و برج توربین های بادی با استفاده از روش برازش برداری

مهرداد محمودیان^{۱*}، محسن گیتی زاده^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: در گذشته، سیستم های زمین فقط به صورت یک مقاومت اهمی خالص مدل می شدند. این تخمین از سیستم زمین تنها برای فرکانس های پایین مناسب است، در حالی که در فرکانس های بالا، اندوکتانس سیستم زمین نقش اساسی را در تعیین اندازه و فاز امپدانس آن ایفا می کند و برای به دست آوردن پاسخ دقیق حالت گذرا، باید مقاومت و اندوکتانس و ظرفیت خازنی را تواما در نظر گرفت. برنامه های کامپیوتری دقیق مانند CDEGS بر اساس تئوری آنتن پاسخ حالت گذرای سیستم زمین را ارزیابی می کنند، اما اطلاعات به دست آمده را نمی توان به طور مستقیم در بسته های نرم افزاری شبیه سازی سیستم قدرت مانند DigSilent یا EMTP برای تحلیل اضافه ولتاژهای موقت استفاده کرد. لذا این مقاله به بررسی و مدل سازی این اطلاعات به منظور ارزیابی سیستم قدرت با استفاده از روش برازش برداری می پردازد. در این روش، اطلاعات پاسخ فرکانسی به صورت مدار معادلی در حوزه زمان، با دقت بسیار بالا و با مدارهای RLC در نرم افزار تخصصی EMTP مدل می شوند و اندازه و فاز امپدانس سیستم زمین به سادگی آنالیز می گردد. در این مقاله، در شبیه سازی سیستم زمین پدیده یونیزاسیون خاک، چند لایه بودن زمین محل نصب شبکه و رفتار فرکانس بالای الکترودهای آن مدنظر قرار گرفته است تا بتوان از آن به عنوان یک پتانسیل مرجع برای سنجش ولتاژ تمام نقاط استفاده کرد.

واژه های کلیدی: حالات گذرای الکترومغناطیسی، روش برازش برداری، سیستم زمین.

حوزه زمان از تبدیل فوریه معکوس ($IFFT^2$) استفاده شده است. به هر حال این روش (تبدیل فوریه معکوس) به دلیل وابستگی به انتخاب پنجره مناسب به منظور نمونه برداری متوالی از سیگنال (در حوزه فرکانس) از تقریب هایی برخوردار است. علاوه بر این، رعایت فاصله نمونه ها مطابق قانون نایکوئیست ضروری بوده و به حجم بالایی از نمونه ها در حوزه فرکانس برای تبدیل به حوزه زمان نیاز است [۱۰]. از دیگر مشکلات این روش این است که در فرکانس های نمونه برداری پایین، نیاز به اصلاح دارد و نمی توان از تبدیل فوریه معکوس معمولی استفاده کرد.

باتوجه به اینکه روش تئوری میدان الکترومغناطیسی مبتنی بر روش ممان و حل معادلات ماکسول بوده و دارای حداقل مفروضات است، دقت فراوانی دارد. ولی این مدل بسیار پیچیده بوده و در نتیجه برای شبکه های زمین بزرگ، زمان محاسبات افزایش چشمگیری خواهد داشت [۱۱]. روش دیگری نیز به منظور مدل سازی سیستم زمین مورد استفاده قرار می گیرد که به روش ترکیبی معروف است [۱۲]. روش های ترکیبی در واقع به صورت ترکیبی از تئوری میدان الکترومغناطیسی و تئوری مدار است. در این روش ها، جریان های اصلی و نشتی در محاسبات دخیل هستند. در برخی از این روش ها برای لحاظ کردن تأثیر حد واسط هوا-زمین از تقریب شبه استاتیک و ضریب انعکاسی برای حل مسئله استفاده می کنند [۱۳]. در روش ترکیبی کل شبکه زمین به n قسمت کوچک تقسیم شده و سپس میدان الکتریکی در هر نقطه با استفاده از معادلات ماکسول محاسبه می شود. هدف از ارائه روش ترکیبی، استفاده از تجزیه و تحلیل میدان الکترومغناطیسی برای محاسبه اجزای سلفی، خازنی و مقاومتی در چارچوب روش های تئوری مدار برای افزایش دقت محاسبات است [۱۴].

در این مقاله، روشی ارائه می گردد که براساس ترکیب امپدانس مدار مبتنی بر روش برازش برداری، بتوان هر مدل از سیستم زمین پیچیده را در محدوده فرکانسی بسیار وسیعی مدل نمود. پاسخ فرکانسی هر مدار دلخواه را می توان به صورت عددی با استفاده از روش های مستقیم یا با بهره گیری از ابزارهای شبیه سازی سه بعدی المان محدود برای تحلیل حالت گذرای الکترومغناطیسی به دست آورد [۱۵]. سپس زمانی که مشخصه های پاسخ فرکانسی مدار به شکل داده های اولیه در دسترس قرار گیرند، با استفاده از روش برازش برداری، سیستم زمین دلخواه را می توان در محدوده طیف فرکانسی گسترده ای و با استفاده از ترکیب امپدانس مدار شبیه سازی کرد. این

رفتار گذرای سیستم های زمین به طور مستقیم و به شکل قابل توجهی بر عملکرد سیستم الکتریکی تحت شرایط خطای اتصال کوتاه یا برخورد ضربه های صاعقه اثر می گذارند [۱]. با توجه به اینکه بیشتر مدل سازی های شبکه های قدرت برای تجزیه و تحلیل حالت گذرای الکترومغناطیسی در بسته های نرم افزاری مانند $EMTP^1$ و به شکل مدارهای مجتمع صورت می پذیرد، نبود روش مناسب با دقت قابل قبولی که بتواند این شرایط را مهیا سازد، باعث شده است که تا سال های اخیر نیز برای مدل سازی سیستم های زمین در این نرم افزارها از مدل های ارائه شده در مراجع [۲-۴] مانند روش خطوط انتقال توزیع شده و... استفاده شود. در سال های گذشته، پژوهشگران تلاش کرده اند تا همواره مدلی برای سیستم های زمین ارائه کنند که در شرایط وقوع حالت گذرای الکترومغناطیسی نیز، رفتار مناسبی از خود نشان دهد. اما معمولاً این مطالعات موفق به ارائه مدلی می شد که یا قابل استفاده در فرکانس های پایین بودند یا باید برای همه سیستم های زمین، یک نوع مدل در نظر گرفته می شد [۵].

در مجموع روش های مدل سازی مختلفی از گذشته تاکنون ارائه شده اند که براساس روش های عددی، اقدام به بررسی رفتار سیستم زمین در فرکانس های بالا می کنند. برای نمونه، برای مدل سازی سیستم زمین در $EMTP$ ، یک روش ساده مداری به وسیله رامامورتی و همکاران ارائه شده است [۶]. در این روش پس از تقسیم کردن زمین به n قطعه، هر کدام از قطعات با یک مدار معادل با عناصر فشرده شامل اندوکتانس های خودی و متقابل (M, L) و هدایت نشتی زمین (G) مدل می شوند [۷]. روش تحلیل سیستم زمین بر مبنای میدان های الکترومغناطیسی پیچیده ترین روش برای مدل سازی رفتار فرکانس بالای سیستم زمین هستند؛ زیرا در این روش ها حل معادلات ماکسول با کمترین فرضیات صورت می گیرد. در این روش با حل مستقیم معادلات ماکسول این امکان وجود دارد که میدان های الکترومغناطیسی در هر نقطه از سیستم زمین را محاسبه کرد و با شناخت میدان های الکترومغناطیسی، می توان همه مقادیر ولتاژ و جریان در هر نقطه از سیستم را بدون تقریب محاسبه کرد. گرسیو در مراجع [۸-۹]، نخستین بار چنین مدلی را ارائه کرد. در این مدل با محاسبه توزیع جریان تمامی قطعات شبکه زمین، میدان الکتریکی اطراف سیستم زمین محاسبه می شود. همچنین پتانسیل در نقاط مختلف، بر روی سطح هادی شبکه زمین قابل محاسبه خواهد بود. برای محاسبه پارامترها در

قابل اعتمادی به دست می‌دهد، بلکه سرعت رسیدن به پاسخ و قابلیت اطمینان شبکه نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین بهره‌بردار در مواقعی که با حالات گذرای الکترومغناطیسی روبه‌رو می‌شود، می‌تواند بدون دغدغه و با سرعت بالایی، عملیات پخش بار را مانند حالات نرمال انجام دهد. به طول انجامیدن عملیات پخش بار به‌خصوص در حالات خطا و حالات گذرا، می‌تواند باعث از دست رفتن شبکه، تأمین نشدن انرژی مشترکین یا خاموشی‌های سراسری گردد. لذا در این مقاله با استفاده از روش پیشنهادی، سرعت عملیات بهره‌برداری در تمامی حالات یکسان و بالا خواهد بود تا تأمین انرژی مصرف‌کننده‌ها به خطر نیفتد.

در مقاله پیش‌رو ابتدا روش برازش برداری شرح داده می‌شود، سپس ترکیب امپدانس مدار برای پیاده‌سازی سیستم زمین موردنظر در نرم‌افزار EMTP تحلیل می‌گردد. در انتها نیز شبیه‌سازی با روش پیشنهادی مقایسه و ارزیابی خواهند شد.

۲. روش برازش برداری^۴

اگر پاسخ فرکانسی قسمتی از مدار یا شبکه قدرت، به‌صورت مجموعه‌ای از داده‌ها یا به‌شکل رابطه^(۱) در دسترس باشد،

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1s + \dots + a_Ns^N}{b_0 + b_1s + \dots + b_Ns^N} \quad (1)$$

می‌توان آن را به‌شکل تابع کسری زیر که تقریبی مناسب از پاسخ فرکانسی مدار است، در نظر گرفت [۱۶-۱۵]:

$$f(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \quad (2)$$

که در آن s عملگر لاپلاس است. c_n ها همان مانده‌ها و a_n ها نیز قطب‌های برازش‌یافته هستند که می‌توانند 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 می‌تواند با استفاده از روش حداقل مربعات در یک بازه فرکانسی معین صورت پذیرد. توجه کنید که یکی از مشکل اساسی در تقریب ضرایب، غیرخطی بودن معادلات و وجود ضرایب مجهول a_n ها در منجر کسر است.

روش برازش برداری مشکلات تقریب رابطه^(۲) را به‌ترتیب در دو مرحله و به‌صورت خطی و با اعمال قطب‌های معین حل می‌کند.

• گام اول: تعیین قطب‌ها

یک دسته قطب معین به‌عنوان a'_n ها برای شروع انتخاب و تابع

مدل‌ها به‌صورت مدارهای RLC^1 ساده و ابتدایی، با درجه و مرتبه دلخواه قابل پیاده‌سازی در بسته‌های نرم‌افزاری تحلیل شبکه‌های قدرت می‌باشند. البته این نکته نیز قابل ذکر است که هرچه درجه تقریب بیشتر باشد، دقت مدل‌سازی بیشتر می‌شود.

نظر به اینکه مقوله «تأمین انرژی» در بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، شرکت‌های برق باید در این زمینه متعهد و مسئولیت‌پذیر باشند. باتوجه به این موضوع، بهره‌برداران شبکه باید در مدت‌زمان بسیار کمی، عملیات پخش بار و سویچینگ خطوط را (با هر نرم‌افزار دلخواهی شبیه DigSilent و...) انجام داده تا مسیرهای شارش توان تعیین گردد. از آنجایی که در شبکه‌های قدرت معمولی، تعداد شین‌ها و همچنین تنوع در بارها زیاد است، انجام عملیات پخش بار به‌منظور تأمین توان و انرژی درخواستی مصرف‌کنندگان، باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن صورت پذیرد. در این میان، با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و منابع تولید پراکنده در شبکه، ممکن است مدت‌زمان عملیات بهره‌برداری بیشتر از حالت عادی زمان ببرد. برای نمونه فرض کنید که بهره‌برداری در حالت نرمال برای یک شبکه نوعی، x ثانیه به طول بینجامد. حال اگر حالت گذرای در سیستم اتفاق بیفتد و صاعقه به دکل یا برج توربین بادی برخورد کند، ماتریس ادیتانس شبکه به‌سبب افزایش امپدانس سیستم زمین، دستخوش تغییر می‌شود. از آنجایی که مدل‌سازی دقیق سیستم‌های زمین با استفاده از نرم‌افزارهای زمان‌بر المان محدود مانند CDEGS^۲ یا CST^۳ ... صورت می‌پذیرد، اگر لازم باشد تا پاسخ امپدانس سیستم زمین در عملیات پخش بار مدل گردد، مدت‌زمان بهره‌برداری به $x+y$ ثانیه افزایش خواهد یافت که y ، مدت‌زمان تعیین پاسخ امپدانس سیستم زمین توسط نرم‌افزار المان محدود و انتقال آن به نرم‌افزار DigSilent است. بدین ترتیب باید راه‌حلی مناسب برای این مسئله پیدا نمود که از این اتلاف وقت جلوگیری کند. لذا در این مقاله یک روش بهینه ارائه شده است که در ذیل به آن پرداخته می‌شود.

فرض کنید پاسخ فرکانسی سیستم‌های زمین موجود در شبکه قبلاً با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود یا از طریق کاتالوگ آن‌ها به‌دست آمده‌اند. این پاسخ فرکانسی تحت روش برازش برداری به مقادیر مقاومتی، سلفی و خازنی تبدیل می‌شود که این عمل در مدت‌زمان کوتاهی صورت می‌پذیرد. اکنون اگر به‌جای امپدانس سیستم زمین از این مقادیر مداری استفاده شود، نه تنها پاسخ دقیق و

1. Resistive Inductive Capacitive
2. Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis
3. Computer Simulation Technology

$w_{fit}(s)$ می باشد (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 (۹) در مرجع [۱۶] 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 (۱) محاسبه کرد. اما در حالت کلی، با انجام محاسبات دقیق تری که روی رابطه (۲) 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 می باشد. حل این معادلات در مرجع [۱۶] موجود است.

موضوع مهم و قابل توجه بعدی در این زمینه، یکسان بودن درجه صورت و منخرج 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 معادلات خطی در رابطه (۶) 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 $w(s)f(s)$ است. این موضوع به دلیل استفاده از روش حداقل مربعات در هنگام حل معادلات رابطه (۶) است که می تواند منجر به نتایج ضعیف برازش توابع شود. این مسئله ممکن است زمانی

$f(s)$ را در تابع مجهول $w(s)$ ضرب می شوند. به علاوه، یک تقریب کسری برای تابع مجهول $w(s)$ در نظر می شود. لذا:

$$\left(\frac{w(s)f(s)}{w(s)} \right) = \left(\frac{\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s-a_n} + d + sh}{\sum_{n=1}^N \frac{c'_n}{s-a'_n} + 1} \right) \quad (3)$$

توجه کنید که در رابطه (۳) 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 (۲) در $f(s)$ چنین به دست می آید:

$$\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s-a'_n} + d + sh = \left(\sum_{n=1}^N \frac{c'_n}{s-a'_n} + 1 \right) f(s) \quad (4)$$

یا:

$$(wf)_{fit}(s) = w_{fit}(s)f(s) \quad (5)$$

ملاحظه می شود که معادله (۵) خطی و با ضرایب مجهول h ، c_n و d می باشد. اگر رابطه (۵) در چند نقطه فرکانسی معین و مختلف نوشته شود، مسئله فوق به چند رابطه خطی به شکل:

$$Ax = b \quad (6)$$

تبدیل می شود که در آن مجهولات، همان بردار برازش یافته x هستند. رابطه (۶) 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:

$$(wf)_{fit}(s) = h \frac{\prod_{n=1}^{N+1} (s-z_n)}{\prod_{n=1}^N (s-a'_n)} \quad (7)$$

$$w_{fit}(s) = \frac{\prod_{n=1}^{N+1} (s-z_n)}{\prod_{n=1}^N (s-a'_n)} \quad (8)$$

که از معادلات (۷) و (۸) به دست می آید:

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

رابطه (۹) نشان می دهد که قطب های $f(s)$ معادل با صفرهای

$$Z_j(s) = \frac{s \times R_2}{s + \frac{R_2}{L_1}} \quad (14)$$

$$Z_j(s) = R_2 + \frac{-\frac{R_2^2}{L_1}}{s + \frac{R_2}{L_1}} \quad (15)$$

$$L_1 = -\frac{C_j}{a_j^2} \text{ \& } R_2 = -\frac{C_j}{a_j} \quad (16)$$

که توابع کوچک باشند رخ دهد.

مشکل اول با انتخاب قطب‌های آغازگر مختلط مرتفع می‌شود. مشکل دوم نیز با انتخاب هوشمندانه مکان قطب‌های آغازگر و با استفاده از قطب‌های جدید به عنوان قطب‌های آغازگر در تکرارهای بعدی (مانند روش گوس-جردن) حل می‌شود. قطب‌های آغازگر باید به صورت مزدوج مختلط با قسمت موهومی مطابق با رابطه (۹) که به صورت خطی در بازه فرکانسی موردنظر توزیع شده‌اند، مدنظر قرار گیرند. هر جفت قطب به این صورت انتخاب می‌شوند:

$$a_n = -p + jq \quad (10)$$

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

که در آن:

$$p = \frac{q}{100} \quad (11)$$

اکنون با انتخاب چنین قطب‌هایی، قسمت‌های حقیقی کوچک فرض می‌شوند و مشکل مطرح‌شده در قسمت قبل مرتفع خواهد شد. طرح‌واره روش مذکور در شکل (۱) نمایش داده شده است.

۳. ترکیب امیدانسی مدار

اگر تابع تبدیل پاسخ فرکانسی مدار به صورت معادله (۱) در دسترس باشد، هر جمله از تابع پاسخ فرکانسی را می‌توان با شاخه‌ای از مدارهای RLC مدل نمود. سپس این شاخه‌ها را به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند و امیدانسی کل سیستم زمین دلخواه در محدوده فرکانسی وسیعی مدل‌سازی می‌گردد.

در معادله (۱) ضرایب a_n ها و C_n ها می‌توانند مقادیری حقیقی یا مختلط باشند، اما ضرایب d و h در صورت وجود حتماً حقیقی هستند. مقادیر شاخه‌های مدار در شکل (۲) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

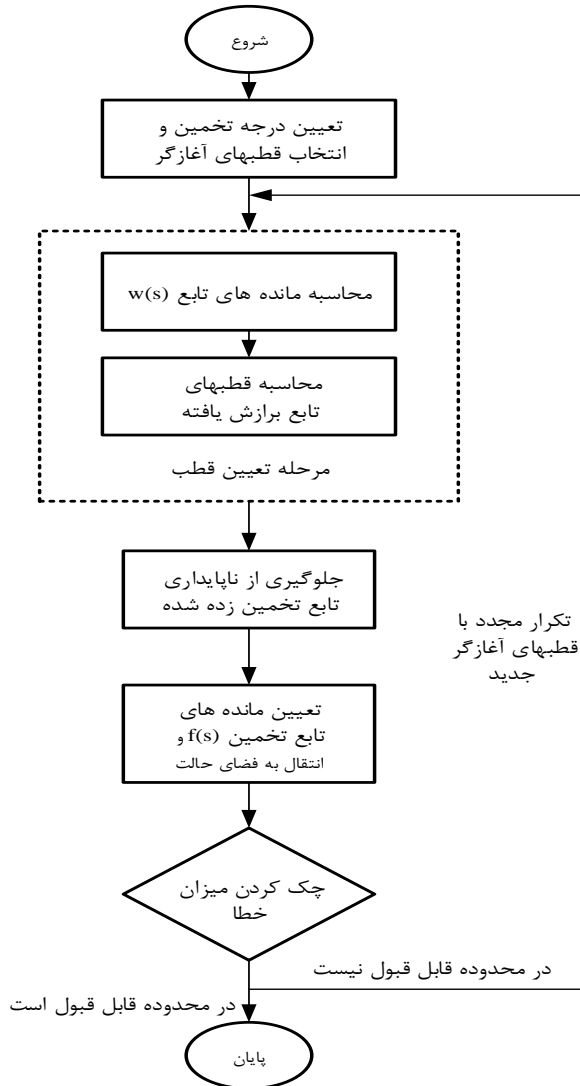
* ضرایب d و h به ترتیب اندازه مقاومت و اندوکتانس سیستم زمین را که همان R_0 و L_0 می‌باشند، مشخص می‌کند.

* اگر تابع تبدیل به شکل رابطه (۱۲) باشد، قطب‌ها حقیقی هستند و مقادیر شاخه‌ها این گونه محاسبه می‌شوند:

$$Z_i(s) = \frac{\frac{1}{C_i}}{s + \frac{1}{R_1 C_1}} \quad (12)$$

$$C_1 = \frac{1}{C_i} \text{ \& } R_1 = \frac{a_i}{C_i} \quad (13)$$

* اگر C_j در تابع تبدیل حقیقی و منفی باشد، آن را به شکل رابطه (۱۴) در نظر می‌گیرند. بنابراین در این قسمت نیز قطب‌ها حقیقی هستند. اما در این مورد باید کسر را ساده و به شکل رابطه (۱۵) تبدیل کرد. و سپس مقادیر مقاومت و اندوکتانس طبق رابطه (۱۶) قابل محاسبه‌اند.



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

لذا مقدار مقاومت ثابت سری جدید را باید از رابطه زیر محاسبه کرد:

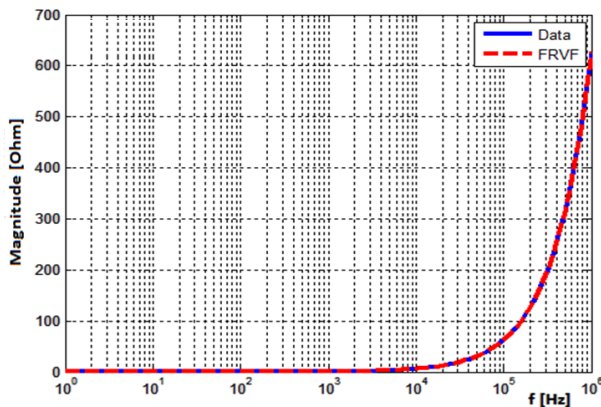
$$d^{new} = d^{old} - R_2 \quad (17)$$

* حال اگر قطب‌ها به صورت مزدوج مختلط باشند، به دست می‌آید:

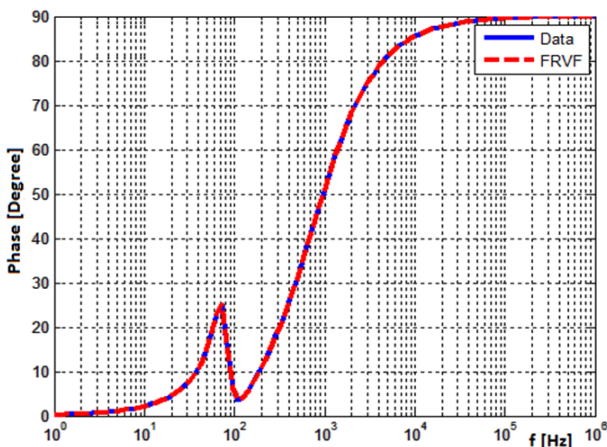
$$Z_k(s) = \frac{s \left(\frac{1}{C_2} \right) + \frac{R_3}{L_2 C_2}}{s^2 + s \left(\left(\frac{R_3}{L_2} \right) + \frac{1}{R_4 C_2} \right) + \frac{R_3 + R_4}{R_4 L_2 C_2}} \quad (18)$$

ارائه یک روش نوین به منظور مدل سازی جامع سیستم زمین دکل های فشار قوی ... ۳۷

در نرم افزار MATLAB^۱، خروجی ها با مقدار خطای $9/911 \times 10^{-9}$ به صورت درصد موثر به دست می آیند. در شکل های (۳) و (۴)، نمودار آبی رنگ همان داده های اولیه و نمودار قرمز رنگ خروجی تقریب روش برازش برداری با قطب های پایدار است. این دو نمودار کاملاً بر هم منطبق اند که این نشان دهنده درستی روش پیشنهادی است. در ضمن، شکل (۳) اندازه امپدانس و شکل (۴) فاز سیستم زمین مورد نظر را نشان می دهد. اکنون برای اعتبارسنجی عملی، خروجی های به دست آمده از روش برازش برداری آن سیستم زمین را می توان در نرم افزارهای تخصصی تحلیل سیستم قدرت پیاده سازی و ارزیابی کرد. شکل (۵) نمایی از مدار معادل سیستم زمین به دست آمده را نشان می دهد. ملاحظه می کنید که سیستم زمین پیچیده مرجع [۹]، تنها با چند مدار RLC ساده مدل شده است.



شکل (۳): اندازه امپدانس سیستم زمین؛ نمودار آبی رنگ اطلاعات مرجع [۱۷] و نمودار قرمز رنگ خروجی روش برازش برداری است.



شکل (۴): فاز سیستم زمین؛ نمودار آبی رنگ اطلاعات مرجع [۱۷] و نمودار قرمز رنگ خروجی روش برازش برداری است.

و این تابع تبدیل زمانی به دست می آید که قطب های مزدوج مختلط به شکل زیر باشند:

$$Z_k(s) = \frac{c_r + ja_r}{s + (a_r + ja_i)} + \frac{c_r - ja_r}{s + (a_r - ja_i)} \quad (19)$$

اکنون می توان نوشت:

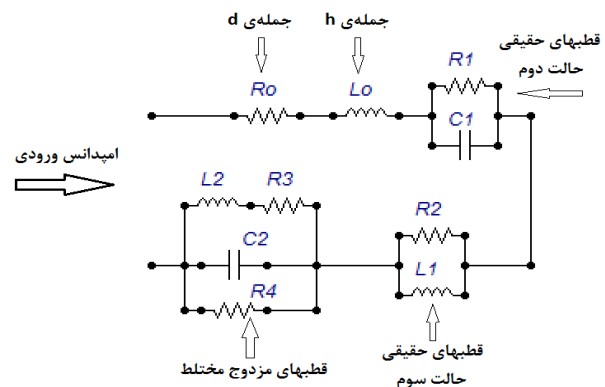
$$C_2 = \frac{1}{2c_r} \quad (20)$$

$$L_2 = \frac{2c_r^3}{a_i^2 \cdot c_i^2 + a_r^2 \cdot c_r^2} \quad (21)$$

$$R_3 = \frac{2c_r^2(a_i \cdot c_i + a_r \cdot c_r)}{a_i^2 \cdot c_i^2 + a_r^2 \cdot c_r^2} \quad (22)$$

$$R_4 = -\frac{2c_r^2}{a_i \cdot c_i - a_r \cdot c_r} \quad (23)$$

ترکیب امپدانس معادلات (۱۲) تا (۲۳) را می توان در شکل (۲) مشاهده کرد. این مدار به سادگی قابل پیاده سازی و تحلیل در نرم افزار EMTP است. لذا یک سیستم زمین پیچیده را می توان تنها با یک چندجمله ای با درجه مناسب و فقط با چند شاخه RLC ساده مدل و تحلیل کرد.



شکل (۲): مدار معادل سیستم زمین با شاخه های RLC سری

۴. شبیه سازی و مقایسه

روش پیشنهادی در قالب سه مثال، شبیه سازی، اعتبارسنجی و ارائه می شود.

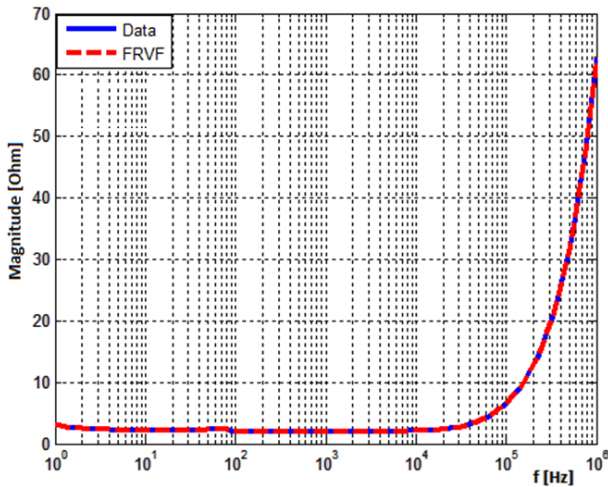
۴.۱. مثال اول

فرض کنید پاسخ فرکانسی امپدانس سیستم زمین معینی به صورت داده خام در دسترس باشد. برای تحقق این هدف از اطلاعات مرجع [۱۷] استفاده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، پس از ۱۰ تکرار و پس از حدود ۲/۹۷۱ ثانیه از آغاز اجرای کدهای روش برازش برداری

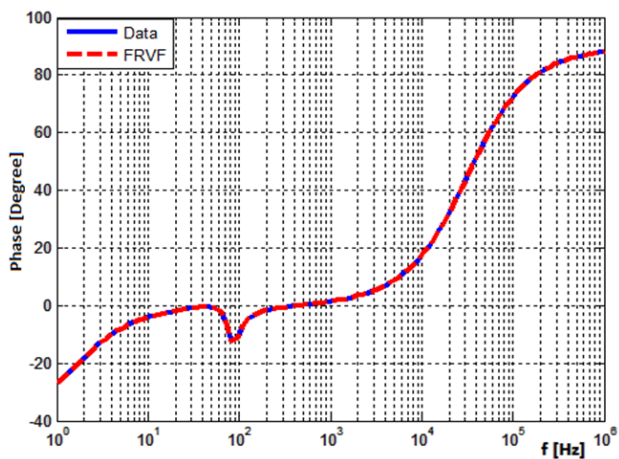
لذا مشاهده می‌شود که در هر دو نمودار اندازه و فاز سیستم زمین، با تقریب بسیار مناسبی بر هم منطبق‌اند. اما برای تحقق صحت این روش، مثال دیگری بررسی می‌شود.

۲.۴. مثال دوم

در این مثال نیز از داده‌های مرجع [۱۸] استفاده شده است. در این قسمت نیز همانند قسمت قبل، پس از ۱۰ تکرار و در حدود ۳,۱۰۲ ثانیه پس از اجرای برنامه، خروجی‌ها با مقدار خطای $10^{-8} \times 1/696$ درصد به دست می‌آیند. اندازه و فاز اطلاعات اولیه و خروجی روش پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) دیده می‌شود.

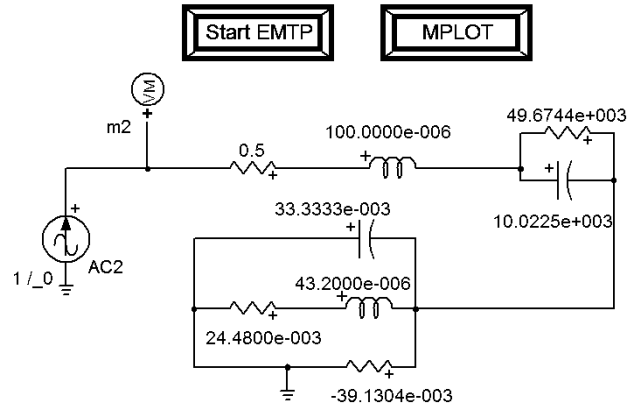


شکل (۸): اندازه امپدانس سیستم زمین؛ نمودار آبی رنگ اطلاعات مرجع [۱۸] و نمودار قرمز رنگ خروجی روش برازش برداری است.



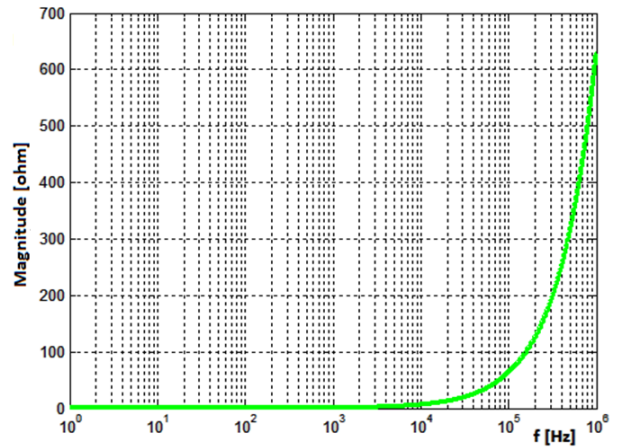
شکل (۹): فاز سیستم زمین؛ نمودار آبی رنگ اطلاعات مرجع [۱۸] و نمودار قرمز رنگ خروجی روش برازش برداری است.

همچنین مدار معادل خروجی‌های آن به صورت شکل (۱۰) در نرم‌افزار EMTP پیاده‌سازی شده است.

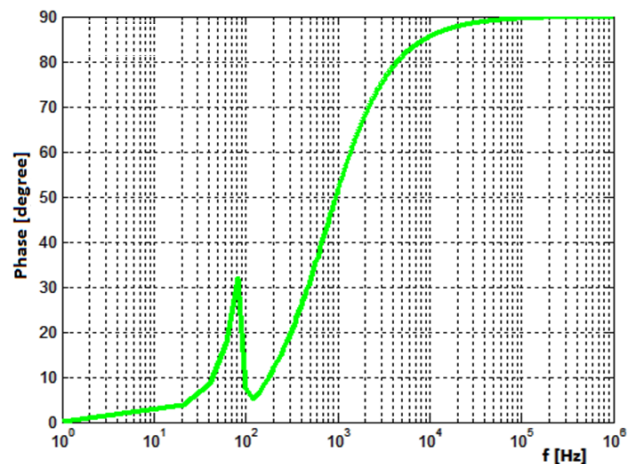


شکل (۱۰): مدار معادل سیستم زمین در نرم‌افزار EMTP

اکنون برای اثبات صحت کار، می‌توان اندازه و فاز مدار معادل پیاده‌سازی شده در EMTP را با نتایج اولیه مقایسه کرد. به این منظور، شکل (۶) اندازه امپدانس و شکل (۷) فاز سیستم زمین موردنظر را که با نرم‌افزار EMTP به دست آمده‌اند، نشان می‌دهند.



شکل (۶): اندازه امپدانس سیستم زمین، خروجی نرم‌افزار EMTP که با المان‌های RLC صورت گرفته است.



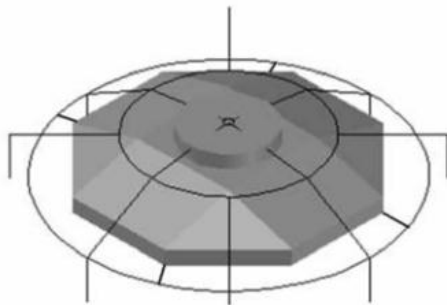
شکل (۷): فاز سیستم زمین، خروجی نرم‌افزار EMTP که با المان‌های RLC صورت گرفته است.

در این مثال نیز می توان با مقایسه این دو نمودار با نمودارهای آبی رنگ مرجع، به تطبیق بسیار خوبی رسید که این نشان دهنده کاربردی بودن روش پیشنهادی است.

۳.۴. مثال سوم: سیستم زمین واقعی در ایران

در این مقاله از مدل سیستم زمینی که برای بهره برداری از توربین های دو مگاواتی ملی در مزرعه بادی بیرجند در ایران طراحی شده اند، استفاده شده است.

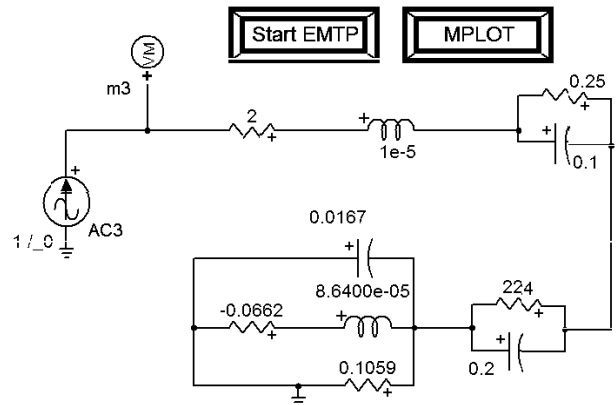
طرح کلی سیستم زمین به صورت ۲ حلقه متصل به یکدیگر و ۸ الکتروود عمودی است. شعاع حلقه ها ۷ و ۱۳ متر و عمق دفن آنها به ترتیب ۰/۷ و ۳/۵ متر است. ۴ الکتروود عمودی ۳ متری مستقیماً به حلقه زیرین و ۵ الکتروود عمودی دیگر به واسطه الکتروودهای افقی به طول ۷ متر، به حلقه بالایی متصل می شوند. حلقه های بالایی و پایینی نیز توسط الکتروودهای مناسب به یکدیگر متصل شده اند. الکتروودهای سیستم زمین از طریق گیره هایی به میله های فولادی شالوده برج توربین بادی متصل می شوند تا از آن نیز برای کمتر کردن مقاومت کلی سیستم زمین بهره گرفته شود. شکل کلی سیستم زمین به همراه سازه های فلزی در شکل (۱۳) به تصویر کشیده شده است.



شکل (۱۳): سیستم زمین واقعی

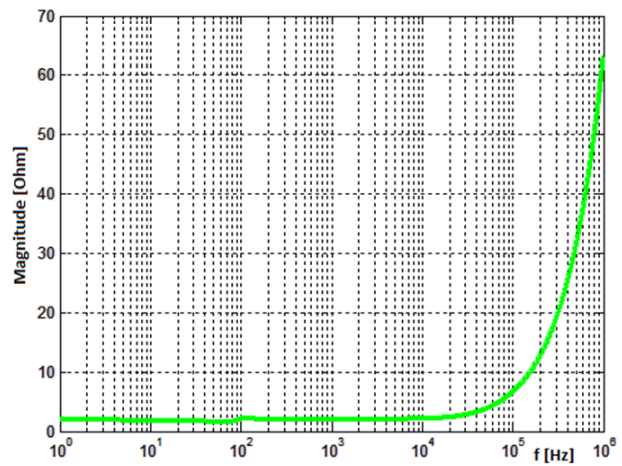
جنس خاک برای این سیستم زمین به صورت سه لایه در نظر گرفته شده است که لایه بالایی به ضخامت ۳۰ سانتی متر با مقاومت ۳۰۰۰ اهم متر است. این لایه را استاندارد IEC^۱ به منظور کاهش ولتاژ گام پیشنهاد کرده است [۱۹]. لایه زیرین به ضخامت ۱/۵ متر با مقاومت ویژه ۱۵۰۰ اهم متر و لایه انتهایی با مقاومت مخصوص ۱۰۰ اهم متر در نظر گرفته شده است. نحوه قرارگیری سیستم زمین در لایه های خاک در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

اکنون مطابق روش ارائه شده، پارامتر مدل سیستم زمین واقعی که در مزرعه بادی بیرجند نصب شده است، با چند جمله ای های درجه هفتم در نرم افزار MATLAB تقریب زده و محاسبه می شوند. در این

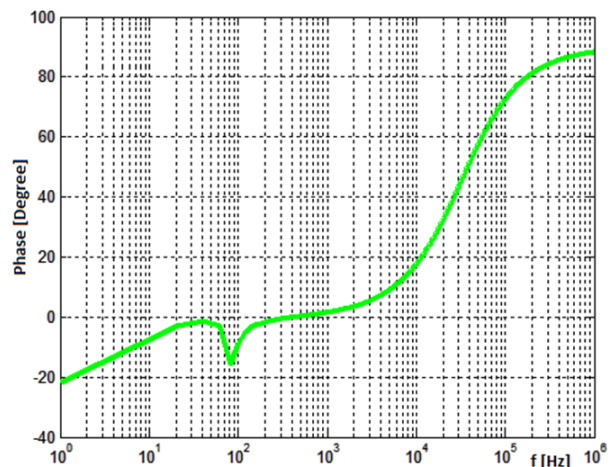


شکل (۱۰): مدار معادل سیستم زمین در نرم افزار EMTP

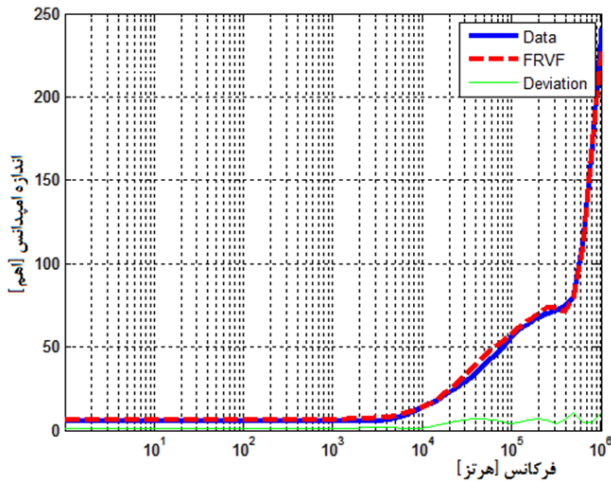
اکنون نمودار اندازه و فاز سیستم زمین فوق که از نرم افزار EMTP به دست می آیند، به ترتیب در شکل های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. این موضوع به منظور صحت کار صورت پذیرفته است.



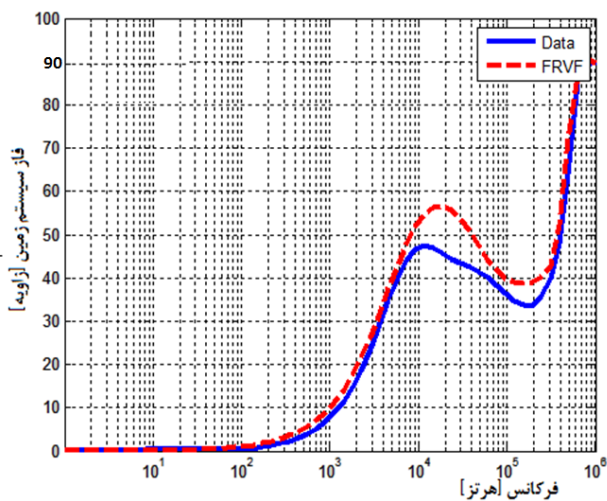
شکل (۱۱): اندازه امپدانس سیستم زمین، خروجی نرم افزار EMTP که با المان های RLC صورت گرفته است.



شکل (۱۲): فاز سیستم زمین، خروجی نرم افزار EMTP که با المان های RLC صورت گرفته است.



شکل (۱۵): نمودار اندازه امپدانس سیستم زمین با تقریب درجه هفتم

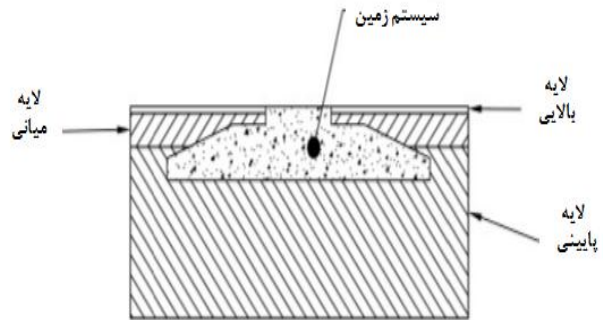


شکل (۱۶): نمودار فاز امپدانس سیستم زمین با تقریب درجه هفتم

منحنی سبزنگ که با نام $Deviation^3$ رسم شده است، اندازه اختلاف داده‌های اصلی و خروجی شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. نتایج خروجی‌های روش برازش برداری در پیوست موجود است. اکنون مطابق با روش ترکیب امپدانس مدار یا همان فیلتر مدار، خروجی‌های روش برازش برداری در نرم‌افزار EMTP مطابق شکل (۱۷) پیاده‌سازی می‌شوند.

حال می‌توان نمودارهای اندازه و فاز امپدانس زمین را که از نرم‌افزار EMTP به دست آمده‌اند، به ترتیب در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) مشاهده و مقایسه کرد. در نمودارهای شکل‌های (۱۸) و (۱۹) منحنی خط‌چین نتایج به دست آمده از EMTP است. همچنین، منحنی یکنواخت پررنگ، همان داده‌های اولیه از پاسخ فرکانسی مدار است که در شکل با $Data$ مشخص شده است. البته می‌توان به منظور بالا بردن دقت نتایج، درجه محاسبه و تخمین امپدانس سیستم زمین را افزایش

روش درجه مخرج همواره زوج خواهد بود. لذا اگر درجه تقریب عددی فرد قرار داده شود، این برنامه درجه مخرج یا همان معادله مشخصه را یکی کمتر از میزان تنظیم شده قرار می‌دهد. همچنین شایان ذکر است که این برازش با قطب‌های تماماً پایدار (سمت چپ محور موهومی) انجام شده است.



شکل (۱۴): نمایش قرار گیری سیستم زمین در لایه‌های مختلف خاک

معادله تابع تبدیل امپدانس درجه هفتم به دست آمده برای سیستم زمین واقعی از روش برازش برداری مطابق زیر است:

$$Z_{ground}(s) = 21.27 + 37.07 \times 10^{-6} s + \frac{188.06 \times 10^6}{s + 3.05 \times 10^6} + \frac{12.86 \times 10^6}{s + 293.30 \times 10^3} + \frac{137.34 \times 10^6 j + 2.97 \times 10^6}{s + 1.93 \times 10^6 + 2.52 \times 10^6 j} + \frac{744.41 \times 10^3 + 2.40 \times 10^6 j}{s + 482.80 \times 10^3 + 631.52 \times 10^3 j} + \frac{-137.34 \times 10^6 j + 2.97 \times 10^6}{s + 1.93 \times 10^6 - 2.52 \times 10^6 j} + \frac{744.41 \times 10^3 - 2.40 \times 10^6 j}{s + 482.80 \times 10^3 - 631.52 \times 10^3 j} \quad (24)$$

نمودارهای اندازه و فاز سیستم زمین با تقریب درجه هفتم را در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مشاهده کرد و با مقدار داده‌های اولیه مقایسه نمود. در این تبدیل، لاپلاس تمامی حالات گذرا قابل رؤیت است. خطای شبیه‌سازی در این حالت ۳/۶۸ درصد محاسبه شده است. در نمودارهای شکل‌های (۱۵) و (۱۶) منحنی خط‌چین نتایج به دست آمده از روش برازش برداری می‌باشد که در شکل با $FRVF^1$ نشان داده شده است.

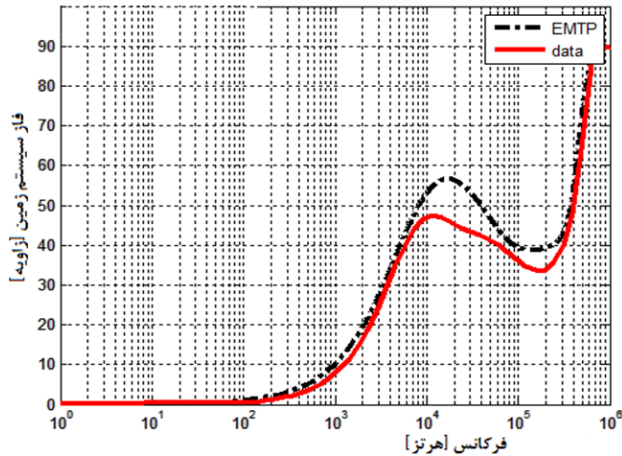
همچنین، منحنی یکنواخت پررنگ، همان داده‌های اولیه از پاسخ فرکانسی سیستم زمین است که در شکل با $Data$ مشخص شده است. البته این پاسخ فرکانسی از روش $FDTD^2$ با کمک نرم‌افزار CDEGS محاسبه شده است.

۳. خطای تقریب منحنی

1. Fast Relaxed Vector Fitting
2. Finite-Difference Time-Domain

ارائه یک روش نوین به منظور مدل سازی جامع سیستم زمین دکل های فشار قوی... ۴۱

ارائه شده تاکنون در هر دسته را می توان از لحاظ میزان پیچیدگی در روابط به کار گرفته شده، عوامل تعیین کننده در روش مانند نحوه گنجاندن یونیزاسیون خاک، میزان دقت و سرعت پاسخ دهی آنها مطابق جدول (۱) با یکدیگر مقایسه کرد.



شکل (۱۹): فاز سیستم زمین واقعی، خروجی نرم افزار EMTP که با المان های RLC صورت گرفته است.

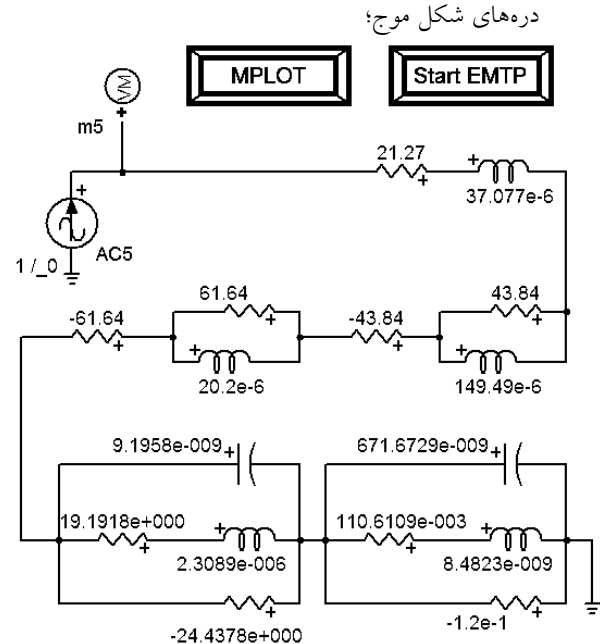
در نتیجه برحسب نیاز اعم از اینکه دقت پاسخ، پیچیدگی و یا سادگی حل مسئله به عنوان اولویت مطرح باشد، می توان از روش مربوطه استفاده کرد. برای مثال روش های تئوری میدان به لحاظ دقت حل مسئله بهترین هستند، ولی پیچیدگی حل مسئله (زمان بر بودن اجرای الگوریتم مربوط) و دشواری در گنجاندن پدیده یونیزاسیون خاک، این روش را دارای ضعف کرده است. اما اگر کاربر نیاز به به کارگیری روشی برای تحلیل گذرای سیستم های زمین پیچیده در زمان های پایین تری داشته باشد و همچنین دقت بالای پاسخ نیز مدنظر نباشد، می تواند از روش تئوری مدار استفاده کند. درحقیقت کاربر در قدم نخست باید خواسته ها و انتظارات خود را از حل مسئله و نتایج آن اولویت بندی کرده تا براساس آن، روش مناسب را انتخاب کند.

۵. نتیجه گیری

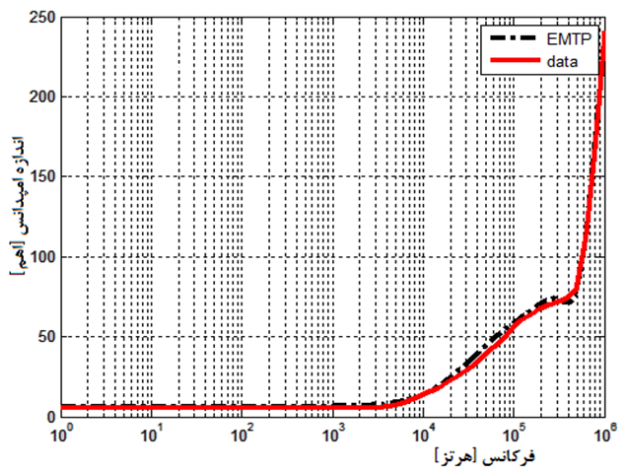
زمانی که صاعقه فرکانس بالا به صورت یک موج ضربه به زمین برخورد می کند و آن را تحریک می کند، مؤلفه های فرکانس بالایی از جریان در زمین پدید می آیند که باعث یونیزاسیون خاک می شوند. سپس سونیزاسیون خاک باعث غیرخطی شدن مشخصه حالت گذرای سیستم زمین مدفون در خاک می شوند. حال اگر سیستم زمین در خاک های چندلایه با مقاومت های ویژه متفاوت و با هندسه های مختلف مانند خاک های استوانه ای یا کره ای دفن شده باشد، مدل سازی الکترونیکی آن به منظور تحلیل شبکه های قدرت در بسته های نرم افزاری، عملاً امکان پذیر نیست.

داد. اما این افزایش چند مشکل اساسی پدید می آورد که عبارتند از:

- حجم محاسبات بیشتر؛
- محسوس نبودن میزان دقت در مرتبه های بالاتر در این تابع تبدیل؛
- تعدد و افزایش میزان جهش (Overshoot) در قله ها و



شکل (۱۷): مدار معادل سیستم زمین واقعی در نرم افزار EMTP



شکل (۱۸): اندازه امپدانس سیستم زمین واقعی، خروجی نرم افزار EMTP که با المان های RLC صورت گرفته است.

همان گونه که ملاحظه می شود، خطای حاصل از شبیه سازی بسیار اندک است و نتایج شبیه سازی ها با تطبیق بسیار مناسبی بر روی خروجی حاصل از داده های واقعی، برازش شده اند. در انتها لازم به ذکر است که هر کدام از روش های مدل سازی سیستم زمین مزایا و معایبی دارند. در یک نگاه کلی، روش های

بیشتر است و نسبت به سایر روش‌ها دقت مناسب‌تری دارد. از سوی دیگر با استفاده از این روش، می‌توان به وسیله هر پردازنده معمولی، پیچیده‌ترین سیستم‌های زمین را تحلیل کرد. این در حالی است که در بسیاری از روش‌های ارائه‌شده قبلی، به علت استفاده از منابع جریان و ولتاژ وابسته به لحظات گذشته، پردازنده‌های موازی با قدرت بسیار بالایی نیاز است.

در پایان نیز نتایج و نمودارهای خروجی به دست آمده از این روش با خروجی‌های روش پیچیده دیگر مراجع معتبر اعتبارسنجی شده است.

این مقاله یک روش نوین را برای مدل‌سازی تمامی این پدیده‌ها، به منظور تحلیل حالت گذرای الکترومغناطیسی ناشی از برخورد صاعقه ارائه کرده است. با استفاده از این روش می‌توان هر سیستم زمین دلخواه را تنها با چند مدار RLC ساده و با معادله مشخصه‌ای با درجه پایین و در محدوده فرکانسی بسیار وسیعی مدل و ارزیابی کرد. از دیگر ویژگی‌های این روش می‌توان به دقت بالای آن نسبت به روش‌های ارائه‌شده در مراجع مختلف اشاره کرد. برای مثال در بسیاری از روش‌ها، امکان مدل‌سازی یونیزاسون خاک و پیش‌بینی تأخیر انتشار موج وجود ندارد. همچنین سرعت محاسبات در این روش نسبت به روش تئوری امواج الکترومغناطیسی حدود ۴۰۰ مرتبه

جدول (۱): مقایسه روش‌های مدل‌سازی سیستم زمین برای پیاده‌سازی در EMTP

ویژگی‌ها روش‌ها	روابط استفاده شده	روش حل	پدیده یونیزاسیون خاک و تأخیر انتشار موج	قابل درک بودن	پردازنده مورد نیاز	پیاده‌سازی در EMTP	میزان دقت
تئوری میدان الکترومغناطیسی	پیچیده	پیچیده	مشکل برای گنجاندن پدیده یونیزاسیون، قادر به پیش‌بینی تأخیر انتشار موج با هادی تلفاتی	مشکل	کامپیوتر قوی، زمان محاسبات بالا	بسیار مشکل	بالاترین دقت
تئوری مدار	ساده	ساده	آسان برای گنجاندن یونیزاسیون خاک، ناتوان در پیش‌بینی تأخیر انتشار موج	آسان	کامپیوتر معمولی، زمان محاسبات پایین	آسان	خوب و قابل قبول
روش‌های ترکیبی	پیچیده	تقریباً پیچیده	قادر به گنجاندن یونیزاسیون خاک، قابلیت پیش‌بینی تأخیر انتشار امواج	تقریباً مشکل	کامپیوتر معمولی، زمان محاسبات پایین	تقریباً مشکل	عالی و قابل قبول
روش خط انتقال	ساده‌ترین روش	ساده	قادر به پیش‌بینی تأخیر انتشار امواج و آسان برای گنجاندن پدیده یونیزاسیون خاک	آسان	کامپیوتر معمولی، زمان محاسبات بسیار پایین	تقریباً آسان	خوب و قابل قبول

مراجع

[۱] محمودیان مهرداد، غلامی احمد، گیتی‌زاده محسن. «بررسی جامع اضافه‌ولتاژهای صاعقه در مزارع بادی با پیکربندی‌های متفاوت به همراه تأثیر سیستم زمین». مهندسی و مدیریت انرژی. ۱۳۹۴، شماره ۵، جلد ۳، صفحات ۱۴-۲۹.

[2] Jinliang, H., Gao, Y., Zeng, R., Zou, J., Liang, X., Zhang, B., Lee, J., Chang, S., "Effective Length of Counterpoise

Wire under Lightning Current", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1585-1591, 2005.

[3] Petar, S., Ranko, G., "An EMTP Model for Lightning Surge Analysis of Wind Farms", International Review on Modelling & Simulations, Vol. 3, No. 1, pp. 70-81, 2010.

[۴] مرتضایی‌نژاد سیدمسعود، غلامی احمد. «مکان‌یابی برقگیر در مزرعه بادی به کمک الگوریتم ژنتیک». مهندسی و مدیریت انرژی. ۱۳۹۴.

- [5] Kontargyri, V. T., Gonos, I. F., Stathopoulos, I. A., "Study on Wind Farm Grounding System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, No. 6, pp. 4969-4977, 2015.
- [6] Ramamoorthy, M., "Transient Performance of Grounding Grids", Power Delivery, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2053-2059, 1989.
- [7] Kingrey, L. J., Painter, R. D., Locker, A. S., "Applying High-Resistance Neutral Grounding in Medium-Voltage Systems", in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 3, pp. 1220-1231, 2011.
- [8] Leonid, G., "Time- and Frequency-Dependent Lightning Surge Characteristics of Grounding Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, pp. 2186-2196, 2009.
- [9] Trifunovic, J., Kostic, M., "An Algorithm for Estimating the Grounding Resistance of Complex Grounding Systems Including Contact Resistance", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, No. 6, pp. 5167-5174, 2015.
- [10] Yaqing, L., Theethayi, N., Thottappillil, R., "An Engineering Model for Transient Analysis of Grounding System under Lightning Strikes: Nonuniform Transmission-Line Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 722-730, 2005.
- [11] Cavka, D., Poljak, D., Dorich, V., Goic, R., "Transient Analysis of Grounding Systems for Wind Turbines", Renewable Energy, Elsevier, Vol. 43, pp. 284-291, 2012.
- [12] Yaqing, L., Zitnik M., Thottappillil, R., "An Improved Transmission-Line Model of Grounding System", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 43, No. 3, pp. 348-355, 2001.
- [13] Sheshyekani, K., Akbari, M., Tabei, B., Kazemi, R., "Wideband Modeling of Large Grounding Systems to Interface with Electromagnetic Transient Solvers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 4, pp. 1868-1876, 2014.
- [14] Bastian, M. B., Carman, W. D., Woodhouse, D. J., "Real-Time Monitoring of Substation Ground Potential Rise and Grounding System Impedance Using Power System Faults", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, No. 6, pp. 5298-5304, 2015.
- [15] Gustavsen, B., "Improving the Pole Relocating Properties of Vector Fitting", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 21, No. 3, pp. 1587-1592, 2006.
- [16] Gustavsen, B., Semlyen, A., "Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 1052-1061, 1999.
- [17] Tikhomirova, I., "Electromagnetic Transient Modelling of Grounding Structures", Norwegian University of Science and Technology, Phd Thesis, 2013.
- [18] Kazuo, Y., Yanagawa, S., Yamabuki, K., Sekioka, S., Yokoyama, S., "Analytical Surveys of Transient and Frequency-Dependent Grounding Characteristics of a Wind Turbine Generator System on the Basis of Field Tests", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, pp. 3035-3043, 2010.
- [19] "IEC International Standard: Lightning Protection", IEC 61400e61424. In: Wind Turbine Generation System, Vol. 24. Geneva, International Electro-Technical Commission, 2010.