استخراج مدل وابسته به فرکانس سیستم زمین در حوزه زمان جهت تحلیل عمل‌کرد صاعقه در خطوط انتقال

جواد قلی‌نژاد[۱]، دانشجوی دکتری؛ رضا شریعتی‌نسب[۲]، دانشیار؛ کیهان شش‌یکانی[۳]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - gholinezhad.javad@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند – ایران - Shariatinasab@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق – دانشگاه پلی‌تکنیک مونترآل – مونترآل – کانادا - Keyhan.sheshyekani@polymtl.ca

چکیده: این مقاله یک روش جدید برای استخراج مدل مناسب حوزه زمان سیستم‌های زمین چنددرگاهه، که قابلیت پیاده‌سازی در نرم‌افزارهای تحلیل حالت گذرا را داشته‌باشند، ارائه می‌دهد. این روش کمک می‌کند تا با کم‌ترین تقریب، بتوان رفتار دقیق و وابسته به فرکانس سیستم زمین را در تحلیل گذرای سیستم‌های قدرت در نظر گرفت. راهکار ارائه‌شده در سه مرحله تقسیم‌بندی می‌شود: اول، به‌کارگیری روش الکترومغناطیسی ممان جهت حل معادلات ماکسول که منجربه استخراج ماتریس امپدانس سیستم زمین در رنج فرکانسی مطلوب می‌گردد. در مرحله بعد یک تقریب منطقی از ماتریس امپدانس سیستم زمین با استفاده از روش برازش برداری (VF[۱]) صورت می‌گیرد. روش VF به‌کاررفته، منجربه برازش مجموعه‌ای از قطب‌ها برای همه‌ی المان‌های ماتریس امپدانس گردیده‌است. در مرحله آخر، با توجه به این‌که نرم‌افزارهای حالت گذرا برمبنای ماتریس ادمیتانس به تحلیل سیستم‌های قدرت می‌پردازند؛ با تغییر متغیرهای مناسب، مدل مناسب سیستم زمین چنددرگاه در حوزه زمان که قابلیت پیاده‌سازی در نرم‌افزارهای حالت گذرا را داشته‌باشد، به‌صورت معادلات فضای حالت استخراج گردیده‌است. مدل‌سازی پیشنهادی برروی یک خط انتقال مرسوم ۱۳۲ کیلوولت پیاده شده و عمل‌کرد سیسستم زمین با روش‌های قبلی شامل مدل‌سازی برمبنای ماتریس ادمیتانس و حالت مرسوم استفاده از مقاومت خطی ساده مقایسه شده‌است.

واژه‌های کلیدی: سیستم زمین چنددرگاهه، مدل‌سازی امپدانسی، برازش برداری.

Time Domain Frequency Dependence Modeling of Grounding System in order to Study the Lightning Performance of Transmission Lines

Javad Gholinezhad[1], PhD student; Reza Shariatinasab[2], Associate professor; Keyhan Sheshyekani[3], Assistant professor.

[1]Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, gholinezhad.javad@birjand.ac.ir
[2]Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, shariatinasab@birjand.ac.ir
[3]Faculty of Electrical Engineering, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada, keyhan.sheshyekani@polymtl.ca

Abstract: This paper presents a new method for proper modeling of time domain multi-ports grounding systems that can be implemented in transient state-of-the-art analysis software. The presented method aims in minimizing the approximation in the frequency modeling of grounding systems in the transient analysis of power systems. The proposed solution is divided into three stages: First, the use of an electromagnetic method for solving the Maxwell equations, which leads to the extraction of the impedance matrix of the grounding system in a desired frequency range. In the next step, a logical approximation of the impedance matrix was made using the Vector Fitting (VF) method. The used VF method has led to the fitting of a set of poles for all impedance matrix arrays. In the final stage, considering that all the transient soft wares analyze power systems based on the admittance matrix, the proper model of the time domain multi-ports grounding system is executed by state space equations. The proposed modeling is performed on a typical 132 kV transmission line, and performance of implemented grounding system is compared with the previous methods including admittance matrix modeling and conventional model based on simple linear resistances.

Keywords: multiport grounding system, impedance modeling, vector fitting.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۰
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰
نام نویسنده مسئول: رضا شریعتی‌نسب
نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

بررسی رفتار تجهیزات قدرت در برابر گذراهای ناشی از صاعقه به مدلی از تجهیزات نیاز دارد که در دامنه فرکانسی وسیعی معتبر باشد. نیازمندی به چنین مدلی به این خاطر است که پدیده‌های گذرا بسته به شکل موج‌شان شامل طیف وسیعی از فرکانس‌ها می‌باشند. با توجه به این مهم، برای انجام دقیق مطالعات حالت گذرا باید مدل وابسته به فرکانس تجهیزات موجود باشد [۱، ۲].

یکی از عوامل تاثیرگذار در رفتار خطوط انتقال در برابر جریان‌های صاعقه، امپدانس پای دکل‌ها می‌باشد. چون دامنه تخلیه برگشتی در خطوط به امپدانس پای دکل وابسته است. لذا اجرای صحیح و بررسی دقیق رفتار سیستم زمین در پای دکل، می‌تواند به حفاظت موثرتر خطوط و شبکه قدرت در برابر برخوردهای صاعقه کمک کند.

در بررسی رفتار سیستم زمین، دو عامل یونیزاسیون خاک و وابستگی به فرکانس پارامترهای الکترومغناطیسی خاک باعث پیچیدگی تحلیل‌ها می‌گردد. اما چون درنظرنگرفتن این دو پدیده باعث به‌دست‌آوردن پاسخ‌هایی محافظه‌کارانه می‌شود، معمولا از آن صرف‌نظر می‌گردد. با این حال درنظرگرفتن آن‌ها می‌تواند منجربه افزایش دقت و درنتیجه کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی شبکه زمین گردد.

تحلیل‌گرهای گذرای الکترومغناطیسی حوزه زمان به‌خاطر قابلیت پیاده‌سازی شبکه‌های پیچیده و مدل‌سازی پدیده‌های غیرخطی مانند کرونا و ادواتی مانند برق‌گیرها از اقبال خوبی برخوردار می‌باشند. این تحلیل‌گرها در شبیه‌سازی‌های مختلف، با دقت بالا و سرعت کافی محاسبات را انجام داده و روزبه‌روز ادوات جدید به آن‌ها اضافه می‌گردد. بااین‌حال تاکنون سیستم زمین به‌صورت دقیق در این ابزارها مدل نشده‌اند. به‌طوری‌که سیستم زمین در نرم‌افزارهای گذرای حوزه زمان مانند ATP-EMTP [۳]، PSCAD/EMTDC [۴] و EMTP-RV [۵] به‌صورت یک مقاومت خطی یا غیرخطی ساده مدل می‌شود. این در حالی است که این مدل‌سازی مرسوم برای سیستم زمین، به‌ویژه هنگام محاسبه اضافه‌ولتاژهای ناشی از اصابت صاعقه به خطوط، منجربه نتایج غیردقیق در فرکانس‌های بالا می‌گردد.

تاکنون مطالعات زیادی روی عمل‌کرد شبکه قدرت به‌منظور بهبود حفاظت آن انجام شده‌است [۸-۶]. اما در این مطالعات مدل وابسته به فرکانس سیستم زمین پای دکل در نظر گرفته نشده و مدل‌سازی با استفاده از یک مقاومت خطی ساده یا غیرخطی وابسته به جریان انجام شده‌است. اخیرا مراجع [۱۲-۹] با مدل‌سازی سیستم زمین در حوزه فرکانس و استفاده از روش‌هایی برای پیاده‌سازی آن در حوزه زمان، توانسته‌اند ماتریس ادمیتانس سیستم زمین برای مدل‌سازی در حوزه زمان را به‌دست‌آورند. در این مقالات برای مدل‌سازی سیستم زمین در حوزه فرکانس از روش ممان (MoM) استفاده شده که اساساً ماتریس امپدانس سیستم زمین را در رنج فرکانسی موردنظر به‌دست می‌آورد. اما ازآن‌جایی‌که نرم‌افزارهای حالت گذرا برمبنای ماتریس ادمیتانس برنامه‌ریزی شده‌اند؛ در این مقالات ماتریس ادمیتانس سیستم زمین با معکوس‌کردن ماتریس امپدانس به‌دست‌آمده از روش ممان محاسبه می‌شود. درنهایت نیز مدل فضای حالت برمبنای ماتریس ادمیتانس که قابلیت پیاده‌سازی در نرم‌افزارهای حالت گذرا را دارد، به‌دست می‌آید.

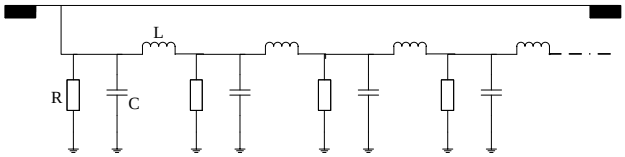
اما مشکلی که وجود دارد این است که ماتریس امپدانس در سیستم‌های زمین چنددرگاهه در فرکانس‌های پایین دارای درایه‌های یکسان بوده و لذا در این فرکانس‌ها معکوس‌پذیر نمی‌باشد؛ درنتیجه به ناچار در روش‌های معرفی‌شده در [۱۲-۹]، در فرکانس‌های پایین، برای معکوس‌کردن ماتریس امپدانس از تقریب استفاده شده‌است. این تقریب‌ها باعث پایین‌آمدن دقت مدل‌سازی و کم‌شدن دقت محاسبه تنش‌های صاعقه در این حالات می‌شود.

در این مقاله، ابتدا ماتریس امپدانس سیستم زمین در حوزه فرکانس با استفاده از روش ممان در بازه فرکانسی موردنیاز به‌دست می‌آید. سپس با اصلاحاتی که برروی روش برازش برداری (VF) صورت گرفته، مستقیما تقریب به توابع گویای ماتریس امپدانس سیستم زمین انجام گرفته‌است. درنهایت با استفاده از تغییرمتغیرهای مناسب، مدل فضای حالت مبتنی‌بر ماتریس ادمیتانس سیستم زمین، که قابلیت پیاده‌سازی در نرم‌افزار EMTP-RV را داراست، به‌دست می‌آید. با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله به‌دلیل عدم‌نیاز به محاسبه ماتریس ادمیتانس سیستم زمین، بدون هیچ‌گونه تقریبی، سیستم زمین مدل‌سازی‌شده در حوزه فرکانس برای تحلیل گذراهای حوزه زمان مهیا گشته است. در این مقاله برای بررسی رفتار صاعقه، سیستم زمین پای دکل به سه صورت مدل شده‌است: ۱- مدل استاتیک، ۲- مدل باندوسیع با فرض پارامترهای الکتریکی ثابت خاک و ۳- مدل باندوسیع با فرض پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس خاک.

ساختار مقاله به این صورت است: در بخش ۲ نحوه مدل‌سازی سیستم زمین بیان شده‌است. نحوه ارتباط ماتریس امپدانس سیستم زمین با نرم‌افزارهای حالت گذرا در بخش ۳ آمده‌است. در بخش ۴ نحوه مدل‌سازی اجزای مختلف خط آورده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش‌های مرسوم و روش پیشنهادی در بخش ۵ و نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۶ ارائه شده‌است.

۲- مدل‌سازی سیستم زمین

افزایش پتانسیل شبکه‌های زمین، ترانسفورماتورها و یا تجهیزات حفاظتی تحت‌تاثیر ضربه صاعقه، یکی از مهم‌ترین منابع اضافه‌ولتاژ در تاسیسات است. مطالعات تئوری و عملی زیادی نشان داده‌اند که امکان مدل‌کردن یک هادیِ تنها در زمین به‌وسیله مدار معادل سری-موازی شبیه به خط انتقال وجود دارد (شکل ۱) [۱۳].



شکل ۱: مدل تئوری مدار یک الکترود زمین

۲-۱- مدل‌سازی با استفاده از روش ممان (MoM)

سیستم زمین به‌صورت تعدادی از هادی‌های فلزی استوانه‌ای متصل به هم با رسانایی محدود، که به چندین قسمت کوچک تقسیم می‌شود، تعریف می‌گردد. در این مقاله از مدل الکترومغناطیسی به‌کاررفته در [۱۴] برای استخراج ماتریس امپدانس سیستم زمین تک‌درگاهه و چنددرگاهه در رنج فرکانسی dc تا ۲ مگاهرتز استفاده شده‌است. در این روش با استفاده از روش تقریب سیم نازک، معادله انتگرالی میدان الکتریکی (EFIE[۲]) به‌منظور محاسبه‌ی جریان‌های جاری‌شده در طول بخش‌های مختلف هادی زمین به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$t.E^{i} = \frac{j\omega\mu}{4\pi}\int_{i} I_i(r')G(r,r')dl \qquad (۱)$$

که t بردار مماسی واحد در طول سیم (l)، μ نفوذپذیری مغناطیسی، E^i میدان الکتریکی ایجادشده توسط منبع خارجی، $G(r,r')$ تابع گرین دوتایی برای میدان الکتریکی در مختصات r ناشی از جریان در مختصات r' است؛ $I_i(r')$ نیز جریان در طول سیم می‌باشد.

معادله EFIE با استفاده از روش ممان [۱۵] حل شده و درنتیجه توزیع جریان در طول قسمت‌های مختلف هادی به‌دست می‌آید. در این روش توزیع جریان روی هادی‌ها به‌صورت متناهی بسط می‌یابد:

$$I(l) = \sum_{n=1}^{N} I_n F_n(l) \qquad (۲)$$

که N تعداد دوقطبی‌ها (هر جفت از قسمت‌های مجاور که جریان در آن جاری است، تشکیل یک دوقطبی می‌دهد)، I_n جریان مجهول که باید تعیین گردد، l طول هر قسمت و $F_n(l)$ توزیع جریان در طول دوقطبی n ام می‌باشد. برای محاسبه جریان‌های مجهول، ابتدا بایستی میدان الکتریکی منتشرشده در یک نقطه دلخواه تعیین گردد. بدین‌منظور توزیع جریان در هر قسمت به‌صورت زیر فرض می‌شود:

$$I(z) = \frac{I_1 \sinh\gamma(z_2 - z) + I_2 \sinh\gamma(z - z_1)}{\sinh\gamma d} \qquad (۳)$$

که $d=z_2-z_1$ بوده و z_1 و z_2 به‌ترتیب نقاط ابتدایی و انتهایی دوقطبی هستند. I_1 و I_2 نیز جریان‌های نقاط انتهایی می‌باشند. پس از انجام محاسبات، اجزای مختلف میدان‌الکتریکی در سیستم زمین به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} E_\rho &= \frac{\eta}{4\pi\rho\sinh\gamma d}[\left(I_1 e^{-\gamma R_1} - I_2 e^{-\gamma R_2}\right)\sinh\gamma d \\ &\quad + (I_1\cosh\gamma d - I_2)e^{-\gamma R_1}\cos\theta_1 \\ &\quad + (I_2\cosh\gamma d - I_1)e^{-\gamma R_2}\cos\theta_2] \\ E_z &= \frac{\eta}{4\pi\rho\sinh\gamma d}[(I_1 - I_2\cosh\gamma d)\frac{e^{-\gamma R_2}}{R_2} \\ &\quad + (I_2 - I_1\cosh\gamma d)\frac{e^{-\gamma R_1}}{R_1}] \\ E_\varphi &= 0 \ , \ \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ . \end{aligned} \qquad (۴)$$

E_ρ، E_z و E_φ مولفه‌های میدان‌الکتریکی در مختصات استوانه‌ای، η امپدانس ذاتی محیط، و $\gamma=-\omega^2\mu\varepsilon_1$ می‌باشند. میدان الکتریکی کل در هر نقطه‌ی موردنظر، از مجموع قسمت‌های مختلف منابع جریان سینوسی حاصل می‌شود (اطلاعات بیشتر در [۱۱] موجود می‌باشد).

پس از انجام محاسبات، ماتریس امپدانس $z_{ij}(s)$ (که برابر با نسبت ولتاژ در درگاه i به جریان تزریق‌شده در درگاه j با فرض مداربازبودن بقیه درگاه‌ها می‌باشد) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$z_{ij}(s) = \left.\frac{V_i(s)}{I_j(s)}\right|_{I_k=0 \ \ (k=1,2,3,..,P,\, k\neq j)} \qquad (۵)$$

که P تعداد درگاه‌های سیستم زمین است. بنابراین ماتریس امپدانس سیستم زمین به‌صورت زیر بیان می‌گردد.

$$Z_g(s) = \begin{pmatrix} z_{11}(s) & \cdots & z_{1P}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{P1}(s) & \cdots & z_{PP}(s) \end{pmatrix} \qquad (۶)$$

که Z_{ii} و Z_{ij} به‌ترتیب، امپدانس‌های خودی و متقابل بین درگاه‌های i و j سیستم زمین را نشان می‌دهند.

۳- ارتباط با نرم‌افزارهای حالت گذرا

ارتباط سیستم زمین با نرم‌افزارهای حالت گذرا در چهار مرحله خلاصه می‌شود: ۱- استخراج ماتریس امپدانس سیستم زمین در حوزه فرکانس با استفاده از روش ممان؛ ۲- برازش ماتریس امپدانس سیستم زمین به توابع گویا با استفاده از روش VF؛ ۳- انجام اعمال غیرفعالی بر مدل قطب-مانده حاصل از VF؛ ۴- استخراج مدل مناسب فضای حالت برمبنای ماتریس ادمیتانس جهت به‌کارگیری در نرم‌افزار گذرا.

۳-۱- برازش برداری (Vector Fitting)

برای تقریب ماتریس امپدانس سیستم زمین به یک مدل قطب-مانده از روش VF [۱۶] استفاده شده‌است. هر بردار ماتریس امپدانس سیستم زمین به‌صورت زیر برازش می‌شود:

$$\begin{aligned} z_{ij}(s) &\approx \{z_{ij}(s)_{fit}\} = \sum_{m=1}^{M}\frac{R_{m,ij}}{s-a_m} + d_{ij} + s\,e_{ij} \\ i &= 1,2,...,P; \quad j = 1,2,...,P \end{aligned} \qquad (۷)$$

که a_m و R_m به‌ترتیب قطب‌ها و مانده‌های سیستم را نشان می‌دهند؛ و d و e نیز مقادیر ثابت هستند.

در روش VF برای دستیابی به قطب های $z(s)$ ، ابتدا باید با استفاده از روش حداقل مربعات معادله خطی زیر را حل نمود:

$$\sigma(s).z(s) = p(s) \qquad (۸)$$

که در آن:

$$\sigma(s)=\sum_{m=1}^{M}\frac{\tilde{R}_{m,ij}}{s-q_m}+1 \qquad (۹)$$

$$p(s)=\sum_{m=1}^{M}\frac{R_{m,ij}}{s-q_m}+d_{ij}+s\,e_{ij} \qquad (۱۰)$$

که $\sigma(s)$ یک اسکالر بوده و $p(s)$ عموما یک بردار می‌باشد. q_m نیز یک دسته از قطب‌های اولیه است. همه‌ی قطب‌ها و مانده‌ها در (۹) و (۱۰) به‌صورت حقیقی یا زوج‌های مزدوج مختلط هستند، درحالی‌که d و e مقادیر حقیقی می‌باشند. می‌توان نشان داد که قطب‌های $z(s)$ باید برابر با صفرهای $\sigma(s)$ باشند که به‌صورت مقادیر ویژه یک ماتریس قابل محاسبه است [۱۶]:

$$\{a_m\}=eig(A-b.\,c^T) \qquad (۱۱)$$

که A یک ماتریس قطری حاوی قطب‌های اولیه q_m ، b بردار ستونی برابر یک و c^T بردار سطری حاوی مانده‌های $\tilde{R}_m$ است.

معادلات (۶) تا (۹) می‌تواند به روش تکرار با جایگزینی قطب‌های قبلی q_m با قطب‌های جدید a_m حل شود. فرایند جابه‌جایی قطب‌ها معمولا بعد از ۲ تا ۳ تکرار همگرا می‌شود. پس از تعیین قطب‌ها، مانده‌های معادله (۷) با حل مسئله حداقل مربعات متناظر با قطب‌های تعیین‌شده، محاسبه می‌گردند.

خروجی فضای حالت روش برازش برداری، اصولا به‌صورت اکیداسره می‌باشد ($D=0,E=0$). درحالی‌که در روش پیشنهادی مقاله چون نیاز به معکوس‌گیری از ماتریس D وجود دارد، بایستی ماتریس $D\neq0$ باشد. باتوجه به این‌که روش VF این قابلیت را دارد که خروجی آن به‌صورت سره ($D\neq0,E=0$) یا ناسره ($D\neq0,E\neq0$) نیز درآید، درنتیجه با انتخاب حالتی‌که خروجی این روش به‌صورت سره باشد، خروجی موردنظر ما (ماتریس $D\neq0$) حاصل می‌شود.

۳-۲- اعمال غیرفعالی

ممکن است برازش ماتریس امپدانس سیستم زمین با قطب‌های پایدار (مقدار حقیقی منفی) و مانده‌های مناسب در حوزه فرکانس دارای دقت کافی بوده اما در حوزه زمان ناپایدار باشد. در این حالت باید ضرایب به‌دست‌آمده از برازش طوری تغییر کنند که اولا مدل جدید در حوزه فرکانس پایدار و دارای دقت کافی باشد؛ و ثانیا مدل جدید در حوزه زمان پایدار بوده و به‌عبارتی غیرفعال باشد. با داشتن مدل قطب-مانده ماتریس امپدانس سیستم زمین، برای اطمینان از شبیه‌سازی حوزه زمان پایدار، بایستی شرط غیرفعالی بر این مدل اعمال گردد [۱۷]. یعنی بایستی مقادیر ویژه قسمت حقیقی ماتریس امپدانس در همه‌ی فرکانس‌ها مثبت باشد.

$$eig(\mathrm{Re}\{z(j\omega)\})>0 \qquad \forall\omega \qquad (۱۲)$$

در یکی از روش‌های اعمال غیرفعالی، با فرض $Re(z)=X$ ، قسمت حقیقی ماتریس امپدانس را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۱۸]:

$$X_{i,j}(s)=d+\mathrm{Re}\{\sum_{m=1}^{N}\frac{R_m}{s-a_m}\}=d+p(s) \qquad (۱۳)$$

ماتریس کل شامل اجزای حقیقی ماتریس امپدانس برابر است با:

$$X(s)=D+P(s) \qquad (۱۴)$$

با فرض قطری‌بودن ماتریس X و برای هر فرکانس دلخواه s :

$$T\Lambda T^{-1}=D+P \qquad (۱۵)$$

که در آن ماتریس Λ شامل مقادیر ویژه مثبت Λ_{pos} و منفی Λ_{neg} است. لذا معادله (۱۵) به‌صورت زیر قابل بازنویسی می‌باشد:

$$T(\Lambda_{pos}+\Lambda_{neg})T^{-1}=D+P \qquad (۱۶)$$

درنهایت با جابه‌جایی جمله‌ها، ماتریس X به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۱۸]:

$$X_{corr}=T\,\Lambda_{pos}T^{-1}=D-T\,\Lambda_{neg}T^{-1}+P \qquad (۱۷)$$

بنابراین با جای‌گزینی صفر به‌جای مقادیر ویژه منفی و افزودن اصلاحاتی در ماتریس D، قسمت حقیقی ماتریس امپدانس (ماتریس X) می‌تواند اصلاح گردد. این فرایند تا حصول معیار غیرفعالی مدنظر در همه‌ی فرکانس‌ها تکرار می‌شود.

۳-۳- توسعه‌ی مدل فضای حالت

پس از به‌دست‌آوردن مدل قطب-مانده غیرفعال ماتریس امپدانس سیستم زمین، می‌توان آن را به شکل معادلات فضای حالت فرمول‌بندی کرد. مدل قطب-مانده ماتریس امپدانس (۵) به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$Z_g(s)=\mathbf{D}+\mathbf{C}(s\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}+s\mathbf{E} \qquad (۱۸)$$

با توجه به مدل قطب-مانده، نمایش فضای حالت برای یک مدل P ورودی، n خروجی و M مدل قطب-مانده، به‌صورت زیر قابل‌بیان است [۱۹]:

$$\mathbf{C}_m=\mathbf{R}_m\ ,\ \mathbf{A}_m=\frac{1}{a_m}\mathbf{I}\ ,\ \mathbf{B}_m=\mathbf{I}$$
$$\mathbf{A}\in\mathrm{R}^{Q\times Q},\mathbf{B}\in\mathrm{R}^{Q\times P},\mathbf{C}\in\mathrm{R}^{n\times Q},\mathbf{D}\in\mathrm{R}^{n\times P},\mathbf{E}\in\mathrm{R}^{n\times P} \qquad (۱۹)$$

که در آن P تعداد درگاه‌های سیستم و Q تعداد کل متغیرهای حالت است که برابر با حاصل‌ضرب تعداد کل قطب‌ها در تعداد کل درگاه‌ها

می‌باشد ($Q=M\times P$). به هرحال معادله فضای حالت ماتریس امپدانس $Z_g(s)$ درحوزه زمان برابر خواهدبود با:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\cdot\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}\cdot i(t)\\ v(t) &= \mathbf{C}\cdot\mathbf{x}(t)+\mathbf{D}\cdot i(t)\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

که $x(t)$ بردار حالت و $v(t)$ و $i(t)$ بردارهای ولتاژ و جریان است که نشان‌دهنده‌ی ولتاژ و جریان هر درگاه سیستم زمین می‌باشند.

برای یک سیستم زمین P درگاهه، با فرض این‌که ماتریس‌های A_r، B_r و C_r شامل قطب‌های حقیقی و مانده‌های متناظر با آن و ماتریس‌های A_c، B_c و C_c شامل قطب‌ها و مانده‌های مختلط باشند؛ پس از انجام محاسبات، نمایش نهایی معادلات فضای حالت به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۱۹]:

$$\begin{pmatrix}\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1\\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_2\\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_3\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{A}_r & 0 & 0\\ 0 & \mathrm{Re}(\mathbf{A}_c) & \mathrm{Im}(\mathbf{A}_c)\\ 0 & -\mathrm{Im}(\mathbf{A}_c) & \mathrm{Re}(\mathbf{A}_c)\end{bmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\tilde{\mathbf{x}}_1\\ \tilde{\mathbf{x}}_2\\ \tilde{\mathbf{x}}_3\end{pmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{B}_r\\ 2\,\mathrm{Re}(\mathbf{B}_c)\\ 2\,\mathrm{Im}(\mathbf{B}_c)\end{bmatrix}\cdot i$$
$$v=\begin{bmatrix}\mathbf{C}_r & \mathrm{Re}(\mathbf{C}_c) & \mathrm{Im}(\mathbf{C}_c)\end{bmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\tilde{\mathbf{x}}_1\\ \tilde{\mathbf{x}}_2\\ \tilde{\mathbf{x}}_3\end{pmatrix}+\mathbf{D}.i\ . \qquad (۲۱)$$

معادله فضای حالت فوق را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_{old}\cdot\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}_{old}\cdot i(t)\\ v(t) &= \mathbf{C}_{old}\cdot\mathbf{x}(t)+\mathbf{D}_{old}\cdot i(t)\end{aligned} \qquad (۲۲)$$

با توجه به این‌که این معادلات برمبنای ماتریس امپدانس سیستم زمین هستند (جریان i به‌عنوان ورودی و ولتاژ v به‌عنوان خروجی معادله می‌باشند)، معادلات در این فرم قابلیت پیاده‌سازی در نرم‌افزارهای گذرا از قبیل EMTP-RV را ندارند. زیرا نرم‌افزارهای حالت گذرا برمبنای ماتریس ادمیتانس برنامه‌نویسی شده‌اند. درنتیجه بایستی به‌گونه‌ای معادلات فضای حالت با فرض ورودی ولتاژ و خروجی جریان به‌دست آیند.

بدین‌منظور با استفاده از تغییرمتغیرهای زیر می‌توان معادلات فضای حالت برمبنای ماتریس ادمیتانس سیستم زمین را به‌دست آورد تا بتوان آن‌را در نرم‌افزارهای تحلیل‌گر گذرا پیاده‌سازی نمود. در ابتدا ورودی برحسب خروجی به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned}&y=Cx+Du\Rightarrow Du=y-Cx \qquad \Rightarrow\\ &u=D^{-1}(y-Cx)\Rightarrow u=-D^{-1}Cx+D^{-1}y\end{aligned} \qquad (۲۳)$$

هم‌چنین می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}&\dot{x}=Ax+Bu\Rightarrow\dot{x}=Ax+B(D^{-1}y-D^{-1}Cx)\\ &\Rightarrow\dot{x}=(A-BD^{-1}C)x+BD^{-1}y\end{aligned} \qquad (۲۴)$$

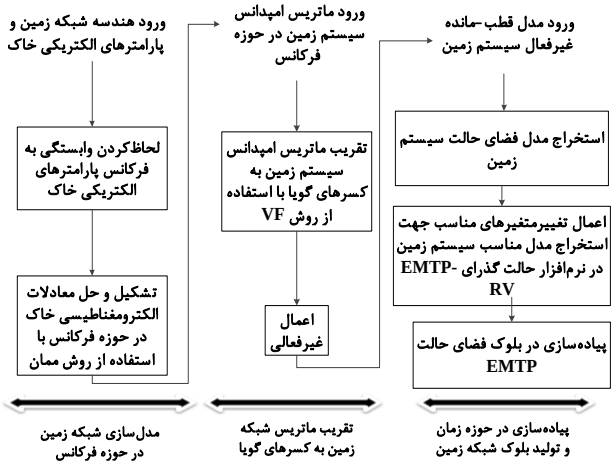
درنتیجه ماتریس‌های فضای حالت جدید برمبنای ماتریس ادمیتانس به‌صورت زیر خواهدبود:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_{new}\cdot\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}_{new}\cdot v(t)\\ i(t) &= \mathbf{C}_{new}\cdot\mathbf{x}(t)+\mathbf{D}_{new}\cdot v(t)\end{aligned} \qquad (۲۵)$$

که در آن:

$$A_{new}=A-BD^{-1}C \quad , \quad B_{new}=BD^{-1}$$
$$C_{new}=-D^{-1}C \quad , \quad D_{new}=D^{-1}$$

این معادلات با استفاده از بلوک فضای حالت، قابلیت پیاده‌سازی مستقیم در نرم‌افزار EMTP-RV را دارند [۹]. لازم به ذکر است که روش پیشنهادی هیچ‌گونه محدودیتی در تعداد درگاه‌های سیستم زمین و هم‌چنین حداکثر فرکانس کار موردنیاز ندارد. شکل ۲ فلوچارت مدل پیشنهادی برمبنای ماتریس امپدانس را نشان می دهد.



شکل ۲: فلوچارت مدل پیشنهادی

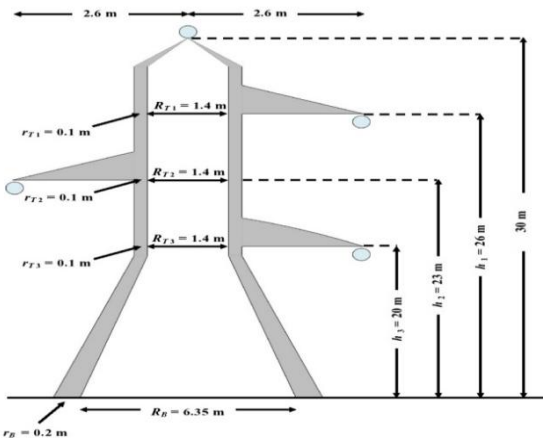
۴- مدل‌سازی اجزای خط انتقال

۴-۱- دکل انتقال

برای تحلیل سیستم زمین، دکل‌های یک خط 132 kV مطابق شکل ۳ در EMTP-RV شبیه‌سازی شده‌است. هر پایه دکل با امپدانس موجی زیر مدل می شود [۲۰]:

$$Z_{T,n}=\sum_{i=1}^{3}60.\left(\ln\frac{2\sqrt{2}h_i}{r_{ei}}-2\right) \qquad (۲۶)$$
$$r_{ei}=2^{\frac{1}{8}}(r_{Ti}^{\frac{1}{3}}\cdot r_B^{\frac{2}{3}})^{\frac{1}{4}}\cdot(R_{Ti}^{\frac{1}{3}}\cdot R_B^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{4}}$$

که h_i، r_{Ti} ، R_{Ti} و r_B طول‌های متناظر با قسمت‌های مختلف در شکل ۳ می‌باشند.



شکل ۳: هندسه دکل انتقال موردمطالعه [۱۱]

۴-۲- مشخصه تخلیه‌الکتریکی زنجیره مقره

مشخصه تخلیه زنجیره مقره تابعی غیرخطی از ولتاژ ضربه است. زنجیره مقره را می‌توان به‌صورت یک خازن موازی با کلید مدل کرد تا اثر کوپلینگ بین هادی‌ها و دکل در نظر گرفته شود. قوس الکتریکی به‌صورت یک مقاومت ثابت مدل می‌شود که مقدار آن برای سطوح مختلف ولتاژ و ساختارهای مختلف مقره متفاوت است. در این مقاله از معیار ناحیه معادل یا روش انتگرالی برای مدل‌سازی مقره و بررسی اثر اضافه‌ولتاژهای ناشی از ضربات غیراستاندارد صاعقه استفاده شده‌است که مشخصه تخلیه زنجیره مقره در آن به‌صورت زیر است [۲۱]:

$$DE = \int_{t_0}^{t} (V(t) - V_0)^k \, dt \qquad (۲۷)$$

که V_0 (kV) حداقل ولتاژ موردنیاز شکست و $t_0(\mu s)$ زمان شروع شکست یا لحظه‌ای است که ولتاژ لحظه‌ای $V(t)$ از V_0 تجاوز می‌کند. $DE(kv^k.\mu s)$ ثابت اثر تخریب و k یک ضریب ثابت برای اعمال اثرات زمان پیشانی و اندازه اضافه‌ولتاژ می‌باشد. در این روش به محض این‌که مقدار DE از مقدار DE^* تجاوز کند، تخلیه در زنجیره مقره رخ می‌دهد. مقادیر DE^* و V_0 برای خط انتقال ۱۳۲ کیلوولت برابر $DE^*=0.524\ kV.\mu s$ و $V_0=650\ kV$ می‌باشد.

۴-۳- امپدانس پای دکل

با توجه به وابستگی فرکانسی خود پارامترهای الکتریکی خاک، سیستم زمین در این مقاله به سه صورت مدل‌سازی شده‌است:

- مدل استاتیک (مرسوم): که برای مدل‌سازی از مقاومت ساده معادل با مقاومت dc سیستم زمین استفاده می‌شود.
- مدل باند وسیع با پارامترهای ثابت (CP [۳] Wide-Band): با فرض این‌که پارامترهای الکتریکی خاک ثابت باشند.
- مدل باند وسیع با پارامترهای وابسته به فرکانس (FD[۴] Wide-Band): با فرض وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک که به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$\rho_0 = 125 \cdot (p/10)^{-0.54} (\Omega m) \ , \ \varepsilon_\infty = 5$$

$$\rho(f) = \left(\rho_0^{-1} + 2\pi\varepsilon_0 \sum_{n=1}^{14} \frac{a_n \left((p/10)^{1.28} . 10^{n-1} \right) \left(\frac{f}{(p/10)^{1.28} . 10^{n-1}} \right)^2}{1 + \left(\frac{f}{(p/10)^{1.28} . 10^{n-1}} \right)^2} \right)^{-1} \qquad (۲۸)$$

$$\varepsilon_r(f) = \varepsilon_\infty + \sum_{n=1}^{14} \frac{a_n}{1 + \left(\frac{f}{(p/10)^{1.28} . 10^{n-1}} \right)^2}$$

لازم به ذکر است که در این مقاله از اثرات یونیزاسیون خاک صرف‌نظر شده‌است.

۵- نتایج عددی

برای مطالعه تاثیر مدل‌سازی باند وسیع سیستم زمین دکل برمبنای روش پیشنهادی (مدل‌سازی در حوزه زمان براساس ماتریس امپدانس سیستم زمین) برروی عمل‌کرد صاعقه خط انتقال ۱۳۲ کیلوولت، از شبیه‌سازی EMTP-RV استفاده شده‌است. در شبیه‌سازی، برای مدل‌سازی شکل موج صاعقه از تابع هیدلر استفاده می‌شود [۲۳].

$$i(t) = \frac{I_P}{\eta} \frac{k^n}{1+k^n} e^{-t/\tau_2} \qquad (۲۹)$$

I_p پیک جریان، η ضریب تصحیح پیک جریان، n فاکتور شیب جریان و $k=t/\tau_1$ می باشد. τ_1 و τ_2 ثابت‌های زمانی‌اند که به‌ترتیب زمان‌های پیشانی و دنباله جریان را تعیین می‌کنند. برای بررسی اضافه‌ولتاژهای صاعقه، ضربه اولیه و ضربات متعاقب آن درنظر گرفته می‌شوند. توزیع آماری پارامترهای ضربه صاعقه به‌صورت یک تابع توزیع لگاریتمی نرمال درنظرگرفته‌شده که مقادیر متوسط پارامترهای آن برای ضربات اولیه و متعاقب صاعقه مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱: پارامترهای آماری ضربات اولیه و متعاقب صاعقه با پلاریته منفی

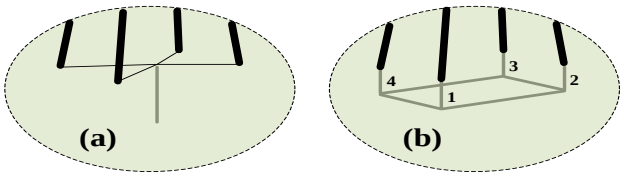
پارامترها	ضربه اولیه	ضربه متعاقب
I_p (kA)	۳۱/۱	۱۱/۸
$O_{Ln\,I}$ (kA)	۰/۴۸	۰/۵۲۹۶
t_f (µs)	۳/۸۳	۰/۴۳
S_m (kA/µs)	۲۴/۳	۳۹/۹
t_h (µs)	۷۵	۳۲

خط انتقال با استفاده از مدل وابسته به فرکانس J.Marti [۲۴] مدل‌سازی‌شده که مشخصات آن در جدول ۲ آمده‌است.

جدول ۲: مشخصات هادی خط انتقال

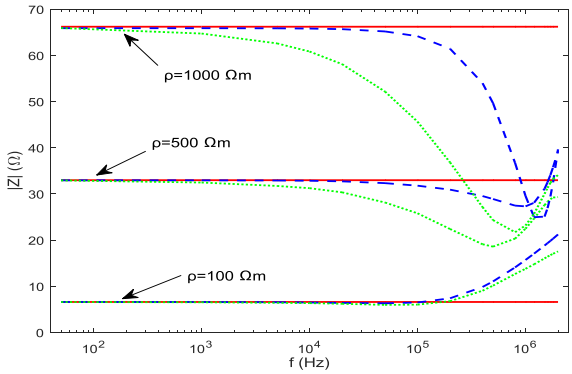
	نوع	قطر (cm)	مقاومت (Ω/km)
هادی‌های فاز	CURLEW	۳/۵۵۶	۰/۰۴۵
سیم گارد	94S	۱/۲۶	۰/۶۴۲

برای مدل‌سازی سیستم زمین در حوزه زمان، روش پیشنهادی مقاله برای مدل‌های مختلف زمین مطابق شکل ۴ پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی موردتحلیل قرار گرفته‌است. تحلیل سیستم زمین برای ۳ مقاومت ویژه مختلف خاک ρ=100 , 500 , 1000 Ωm انجام گرفته‌است. در همه‌ی حالات فرض شده‌است که گذردهی الکتریکی ε_r= ۲۰ می‌باشد.

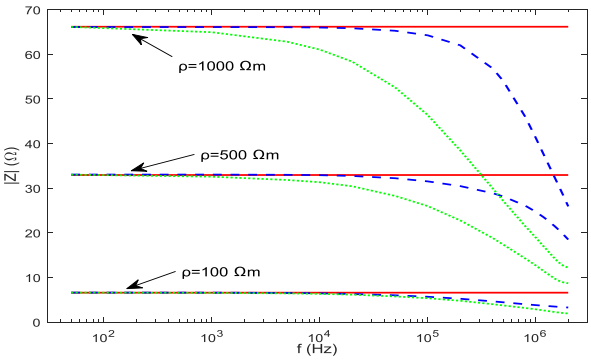


شکل ۴: شبکه زمین، (a) الکترود عمودی تک‌درگاهه با طول ۱۵ متر و شعاع ۱۲/۵ میلی‌متر، (b) شبکه زمین مربعی چهاردرگاهه ۶*۶ مترمربع و شعاع ۱۲/۵ میلی‌متر.

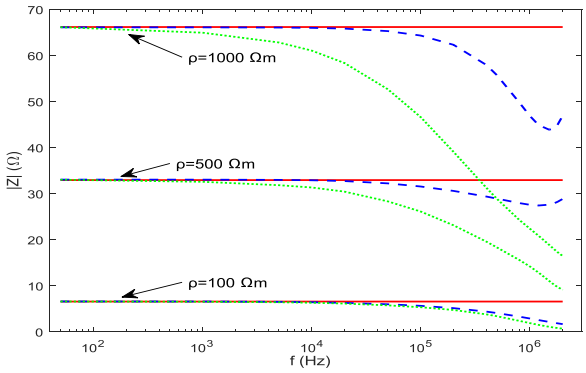
اندازه مولفه‌های فرکانسی ماتریس امپدانس شبکه زمین مربعی‌شکل، در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده‌است.



شکل ۵: امپدانس خودی (Z_{11}) برای شبکه مربعی. خط ممتد قرمزرنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط خط‌چین آبی‌رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه‌چین سبزرنگ: مدل FD Wide-Band.

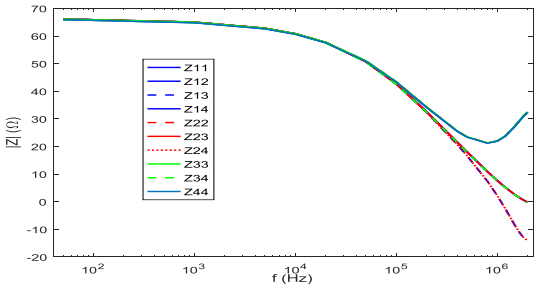


شکل ۶: امپدانس متقابل (Z_{12}) برای شبکه مربعی. خط ممتد قرمزرنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط خط‌چین آبی‌رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه‌چین سبزرنگ: مدلFD Wide-Band.



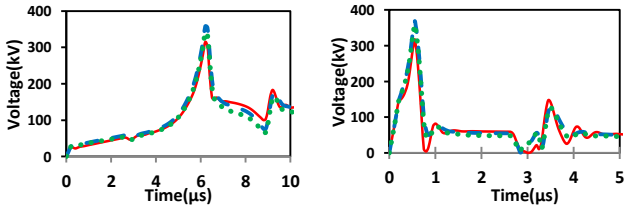
شکل ۷: امپدانس متقابل (Z_{13}) برای شبکه مربعی. خط ممتد قرمزرنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط خط‌چین آبی‌رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه‌چین سبزرنگ: مدل FD Wide-Band.

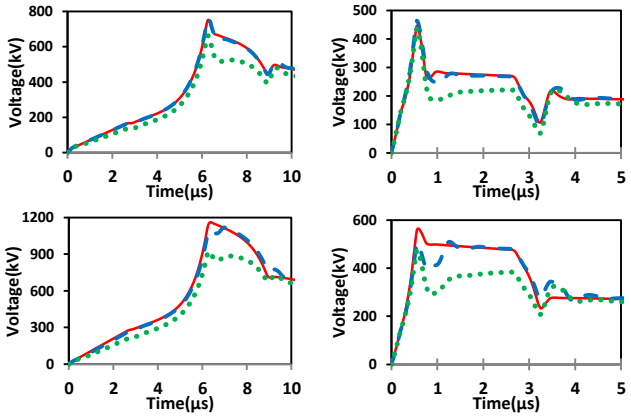
اندازه امپدانس به‌دست‌آمده از روش‌های مرسوم [۱۲-۹] برای سیستم زمین مربعی درصورت مدل‌سازی وابسته به فرکانس پارامترهای الکتریکی خاک با ρ=۱۰۰۰ Ωm در شکل ۸ آمده‌است. نتایج نشان می‌دهد که اندازه مولفه‌های مختلف ماتریس امپدانس تا فرکانس حدود ۱۰۰ kHz با یکدیگر برابرند؛ لذا در این فرکانس‌ها درمینان ماتریس امپدانس برابر صفر بوده و معکوس‌پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل در روش‌های مرسوم قبلی، برای معکوس‌کردن ماتریس امپدانس و دست‌یابی به ماتریس ادمیتانس سیستم زمین به تقریب نیاز می‌باشد.



شکل ۸: امپدانس‌های خودی و متقابل برای شبکه زمین مربعی. در حالت FD Wide-Band و مقاومت ویژه ρ=۱۰۰۰ Ωm.

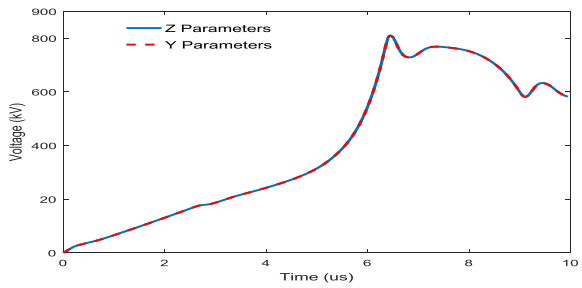
اضافه ولتاژهای زنجیره‌مقره ناشی از اصابت صاعقه‌های اولیه و متعاقب به سیم گارد در شکل ۹ نشان داده شده‌است. در این حالت هیچ تخلیه‌الکتریکی در زنجیره‌مقره‌ها رخ نداده‌است. در اینجا سیستم زمین به‌صورت الکترود افقی بوده که به سه صورت استاتیک، CP Wide-Band و FD Wide-Band برمبنای ماتریس امپدانس (روش پیشنهادی مقاله) مدل‌سازی شده‌است.





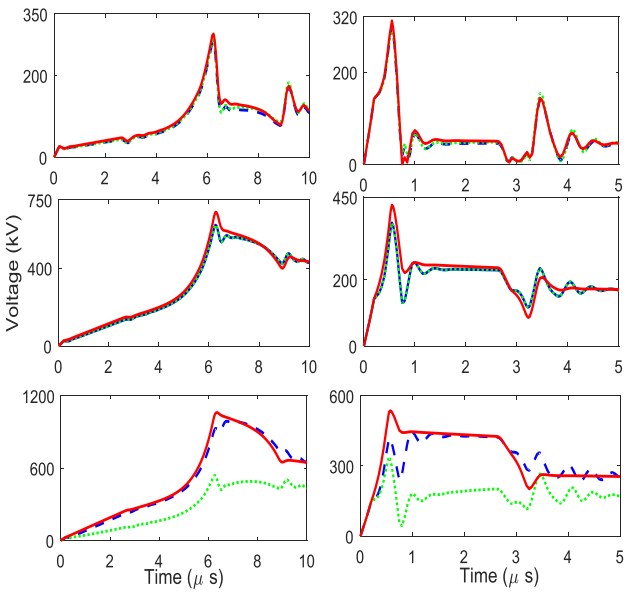
شکل ۹: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای الکترود زمین عمودی. (a) Ωm ρ=۱۰۰، (b) Ωm ۵۰۰=ρ ، (c) Ωm ۱۰۰۰=ρ. ستون چپ: ضربه اولیه، ستون راست: ضربه متعاقب. خط ممتد قرمزرنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط خط‌چین آبی‌رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه‌چین سبزرنگ: مدل FD Wide-Band.

برای مقایسه‌ی روش پیشنهادی برمبنای ماتریس امپدانس با روش‌های قبلی برمبنای ماتریس ادمیتانس، اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره بازای هر دو روش مدل‌سازی برای سیستم زمین با الکترود عمودی در شکل ۱۰ آمده‌است. مشاهده می‌شود که برای الکترود عمودی (سیستم زمین تک‌درگاهه) مقادیر اضافه‌ولتاژها در هر دو روش مدل‌سازی یکسان است. زیرا معکوس‌گیری ماتریس امپدانس سیستم زمین تک‌درگاهه بدون هیچ تقریبی صورت گرفته و درنتیجه ماتریس‌های فضای حالت به‌دست‌آمده از هر دو نوع مدل‌سازی دارای رفتار مشابهی می‌باشند.



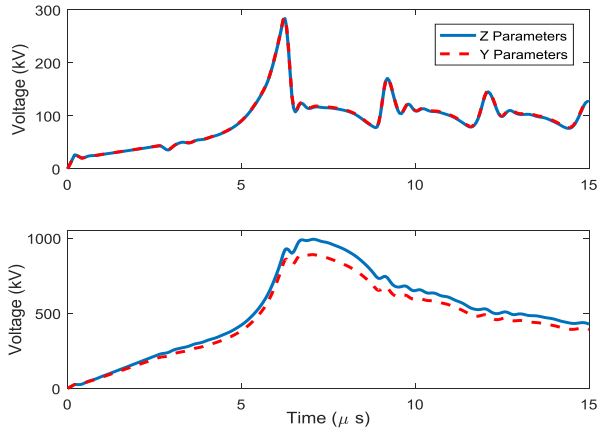
شکل ۱۰: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای الکترود زمین عمودی. به‌ازای صاعقه اولیه (۳/۸۳μs/۷۵μs، ۲۷kA) و مقاومت ویژه Ωm ۱۰۰۰=ρ در حالت مدل‌سازی FD Wide-Band.

شکل ۱۱ اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره را ناشی از اصابت صاعقه به سیم گارد برای مدل‌سازی سیستم زمین مربعی براساس ماتریس امپدانس نشان می‌دهد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که مشابه [۱۱]، با بزرگ‌شدن مقاومت ویژه خاک، اضافه‌ولتاژهای زنجیره مقره و اختلاف مابین اضافه‌ولتاژهای محاسبه‌شده در مدل‌سازی باندوسیع و مدل استاتیک بیشتر می‌شود. که این تفاوت مشابه روش مرجع [۱۱] با درنظرگرفتن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک، افزایش می‌یابد.

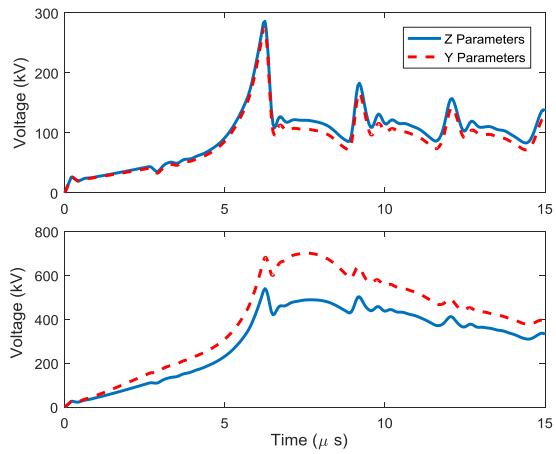


شکل ۱۱: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی. (a) Ωm ۱۰۰=ρ، (b) Ωm ۵۰۰=ρ ، (c) Ωm ۱۰۰۰=ρ. ستون چپ: ضربه اولیه، ستون راست: ضربه متعاقب. خط ممتد قرمزرنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط‌چین آبی‌رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه‌چین سبزرنگ: مدل FD Wide-Band.

برای نشان‌دادن تفاوت نتایج حاصل از مدل‌سازی به روش پیشنهادی و روش مرجع [۱۱]، اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره ناشی از مدل‌سازی سیستم زمین در حوزه زمان برمبنای ماتریس‌های امپدانس و ادمیتانس [۱۱] در شبکه زمین مربعی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آمده‌است.



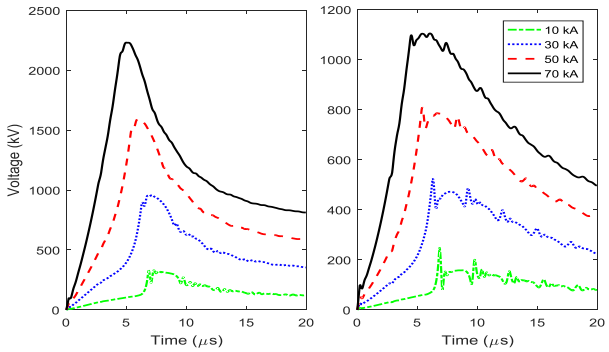
شکل ۱۲: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی. به‌ازای صاعقه اولیه (۳/۸۳μs/۷۵μs، ۳۱/۱kA) و مقاومت ویژه Ωm ۱۰۰=ρ، (a) (b) Ωm ۱۰۰۰=ρ، در حالت مدل‌سازی CP Wide-Band.



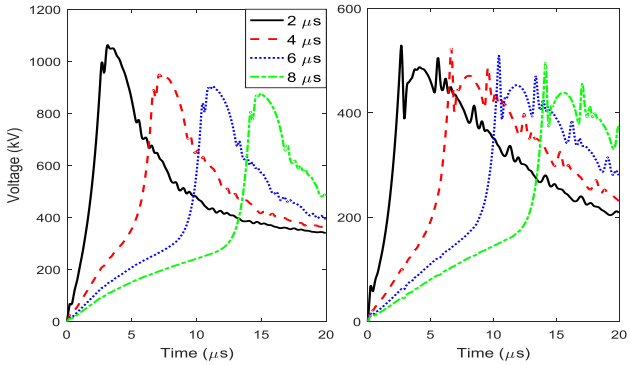
شکل ۱۳: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی. به‌ازای صاعقه اولیه (۳/۸۳μs/۷۵μs، ۳۱/۱kA) و مقاومت ویژه (a) Ωm ۱۰۰=ρ، (b) Ωm ۱۰۰۰=ρ ، در حالت مدل‌سازی FD Wide-Band.

مشاهده می‌شود که تفاوت اضافه‌ولتاژ به‌دست‌آمده از مدل زمین برمبنای ماتریس امپدانس (روش پیشنهادی) با مدل‌سازی برمبنای ماتریس ادمیتانس [۱۱]، در هر دو نوع مدل‌سازی باندوسیع با پارامترهای الکتریکی ثابت و وابسته به فرکانس، در مقاومت‌های ویژه بالاتر بیشتر می‌شود. این تفاوت در بیشینه تنش اضافه‌ولتاژ در مدل CP Wide-Band و ۱۰۰ Ωm=ρ در حدود ۲ kV (کمتر از ۱٪) و در ۱۰۰۰ Ωm=ρ در حدود ۱۰۰ kV (۱۰٪) است. در مدل FD Wide-Band و ۱۰۰ Ωm=ρ تفاوت در حدود ۱۲ kV (۵٪) و در ۱۰۰۰ Ωm=ρ در حدود ۱۰۰ kV (۱۵٪) است. طبق نتایج مشخص است که اختلاف بیشینه اضافه‌ولتاژ محاسبه‌شده، با درنظرگرفتن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک افزایش می‌یابد.

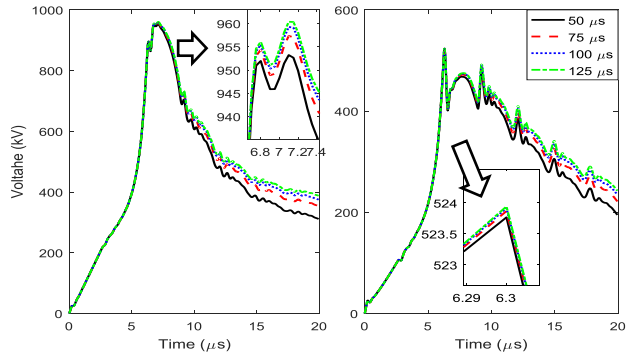
شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره را به‌ازای تغییرات اندازه جریان، زمان پیشانی و زمان پشت موج جریان برای مدل‌های مختلف سیستم زمین نشان می‌دهند.



شکل ۱۴: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی، به‌ازای Ωm ۱۰۰۰=ρ در اثر تغییر پیک جریان صاعقه اولیه (۳/۸۳μs/۷۵μs، I kA) ستون چپ: مدل CP Wide-Band، ستون راست: مدل FD Wide-Band.

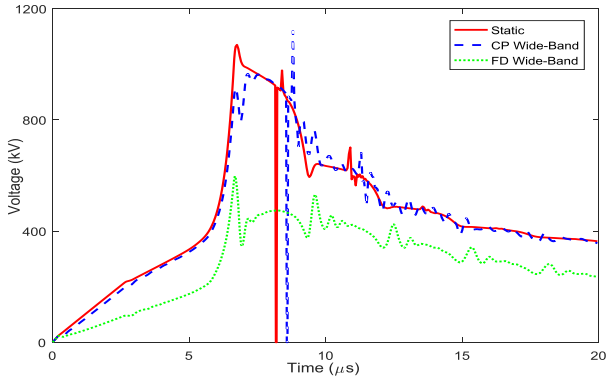


شکل ۱۵: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی، به‌ازای Ωm ۱۰۰۰=ρ در اثر تغییر زمان پیشانی موج جریان صاعقه اولیه (Tf μs/۷۵μs، ۳۰kA). ستون چپ: مدل CP Wide-Band، ستون راست: مدل FD Wide-Band.



شکل ۱۶: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی، به‌ازای Ωm ۱۰۰۰=ρ در اثر تغییر زمان پشت موج جریان صاعقه اولیه (Th μs/۳/۸۳μs، ۳۰kA). ستون چپ: مدل CP Wide-Band، ستون راست: مدل FD Wide-Band.

تاثیر مدل‌سازی سیستم زمین بر اضافه‌ولتاژهای ناشی از اصابت صاعقه به سیم گارد در شکل ۱۷ نشان داده شده‌است. طبق نتایج، درصورت مدل‌سازی استاتیکی و CP Wide-Band سیستم زمین، تخلیه برگشتی اتفاق می‌افتد؛ درحالی‌که درصورت استفاده از مدل FD Wide-Band برای سیستم زمین، اتصال کوتاهی رخ نمی‌دهد. درنتیجه تاثیر نوع مدل‌سازی سیستم زمین بر تخمین اضافه‌ولتاژها و عملکرد صاعقه خطوط انتقال مشخص می‌گردد.



شکل ۱۷: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی، به‌ازای صاعقه (۳/۸۳μs/۷۵μs، ۳۰kA) ومقاومت ویژه Ωm ۱۰۰۰=ρ.

به‌منظور مقایسه و اعتبارسنجی روش ارائه‌شده برای مدل‌سازی سیستم زمین در حوزه زمان، رفتار شبکه زمین مربعی، مطابق شکل ۴، موردتحلیل قرار گرفته و نتایج با مقاله [۱۱] مقایسه گردیده‌است. با توجه به توزیع تجمعی ضربات اولیه و متعاقب صاعقه [۲۵]، درصد جریان‌های بزرگتر از جریان بحرانی (جریانی که منجر به تخلیه برگشتی می‌شود) به‌دست آمده‌است. مقادیر احتمال تخلیه برگشتی برای خاک با مقاومت‌های ویژه مختلف و انواع مدل‌سازی سیستم زمین به‌ازای ضربات اولیه و متعاقب صاعقه، مشخص شده و نتایج با حالت مدل‌سازی ادمیتانسی سیستم زمین در جدول ۳ مقایسه شده‌اند.

جدول ۳: احتمال تخلیه برگشتی برای شبکه زمین مربعی (٪)

مقاومت ویژه (Ωm)	مدل سیستم زمین	روش مبتنی بر ماتریس ادمیتانس [۱۱]			روش مبتنی بر ماتریس امپدانس (روش پیشنهادی)		
		اولیه	متعاقب	کل	اولیه	متعاقب	کل
ρ=۱۰۰	ST	۰/۳	۵/۹	۱۳/۶	۰/۳	۵/۹	۱۳/۶
	CP	۰/۳	۵/۷	۱۳/۳	۰/۳	۶/۱	۱۴/۰
	FD	۰/۳	۵/۷	۱۳/۳	۰/۳	۶/۱	۱۴/۰
ρ=۵۰۰	ST	۱۹/۵	۷/۸	۳۳/۴	۱۹/۵	۷/۸	۳۳/۴
	CP	۱۷/۲	۷/۳	۳۰/۶	۱۸/۷	۶/۲	۳۰/۰
	FD	۱۱/۰	۶/۷	۲۴/۴	۱۵/۱	۶/۲	۲۷/۰
ρ=۱۰۰۰	ST	۵۸/۷	۱۱/۵	۶۸/۸	۵۸/۷	۱۱/۵	۶۸/۸
	CP	۴۷/۶	۱۰/۱	۵۹/۱	۵۴/۰	۸/۲	۶۲/۳
	FD	۳۳/۸	۸/۶	۴۶/۴	۳۵/۵	۷/۱	۴۷/۶

لازم به ذکر است که با توجه به [۲۶] فرض می‌شود که ۲۰ درصد صاعقه‌ها، از نوع صاعقه اولیه تنها و ۸۰ درصد از نوع صاعقه‌های چندمرتبه (ضربه اولیه به‌همراه سه ضربه متعاقب) می‌باشند؛ بنابراین احتمال تخلیه برگشتی کل از روش ارائه‌شده در [۲۷] به‌دست‌آمده است. در جدول ۴ نیز نرخ‌های خروجی ناشی از تخلیه برگشتی به‌ازای مدل‌سازی مختلف سیستم زمین آورده شده‌اند.

جدول ۴: نرخ تخلیه برگشتی (flashes/100km/year) خط انتقال برای انواع مدل‌سازی شبکه زمین مربعی

مقاومت ویژه (Ωm)	مدل سیستم زمین	روش مبتنی بر ماتریس ادمیتانس [۱۱]		روش مبتنی بر ماتریس امپدانس (روش پیشنهادی)		
		ضربه اولیه	ضربه اولیه و متعاقب	ضربه اولیه	ضربه اولیه و متعاقب	FD
ρ=۱۰۰	ST	۰/۰۹	۴/۰۸	۰/۰۹	۴/۰۸	۱۰/۱
	CP	۰/۰۹	۳/۹۹	۰/۰۹	۴/۲۰	۱۳/۹
	FD	۰/۰۹	۳/۹۹	۰/۰۹	۴/۲۰	۱۰/۶
ρ=۵۰۰	ST	۵/۸	۱۰/۰	۵/۸	۱۰/۰	۱۴/۲
	CP	۵/۱	۹/۱	۵/۶	۹	
	FD	۳/۳	۷/۳	۴/۵	۸/۱	
ρ=۱۰۰۰	ST	۱۷/۶	۲۰/۶	۱۷/۶	۲۰/۶	
	CP	۱۴/۲	۱۷/۷	۱۶/۲	۱۸/۶	

با توجه به این‌که در سیستم زمین تک‌درگاهه، مشکلی در معکوس‌پذیری ماتریس امپدانس وجود ندارد، و هم‌چنین مطابق شکل ۱۰، اضافه‌ولتاژ به‌دست‌آمده از مدل‌سازی حوزه زمان امپدانسی و ادمیتانسی بر هم منطبق می‌باشند؛ مقادیر تخلیه برگشتی در سیستم زمین تک‌درگاهه (الکترود زمین عمودی) باهم مقایسه نشده‌اند.

مشاهده می‌شود که احتمال تخلیه برگشتی و نرخ قطعی ناشی از صاعقه در مدل‌سازی حوزه‌ی زمان سیستم زمین به روش پیشنهادی تغییر می‌کند. با توجه به جدول ۴ مشخص است که نرخ تخلیه برگشتی صاعقه با افزایش مقاومت ویژه افزایش می‌یابد. تعداد قطعی به‌ازای مدل‌سازی‌های مختلف متفاوت بوده و این تفاوت با درنظرگیری وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک نسبت به حالت استاتیک، افزایش می‌یابد.

با توجه به تغییر نرخ‌های خروجی خطوط انتقال، شاخص‌های قابلیت اطمینان خطوط نیز تغییر کرده و با توجه به این‌که روش پیشنهادی دارای ۱- دقت بالاتر (به‌دلیل عدم‌نیاز به تقریب‌زنی ماتریس ادمیتانس در فرکانس‌های پایین) و ۲- پیچیدگی کم‌تر (به‌دلیل عدم‌نیاز به معکوس‌گیری ماتریس امپدانس در بازه فرکانسی موردمطالعه) می‌باشد، اهمیت و برتری روش پیشنهادی مشخص می‌گردد. ازآنجاکه روش پیشنهادی قابلیت انتقال ماتریس امپدانس سیستم زمین در حوزه فرکانس به حوزه زمان را برای کل بازه فرکانسی صاعقه (۰ تا ۲ مگاهرتز)، بدون نیاز به تقریب‌زدن داراست؛ امکان افزودن بلوکی به نرم‌افزارهای گذرا مانند EMTP-RV برای مدل-سازی سیستم زمین را فراهم می‌کند. این در حالی است که براساس روش مرجع [۱۱] که برمبنای ماتریس ادمیتانس سیستم زمین است و با توجه به عدم‌امکان معکوس‌گرفتن در فرکانس‌های پایین، امکان استفاده از آن به‌صورت مستقیم در نرم‌افزارهای گذرا وجود ندارد.

۶- نتیجه

در این مقاله برای مدل‌سازی سیستم زمین در حوزه فرکانس، از یک روش جدید مبتنی‌بر ماتریس امپدانس سیستم زمین استفاده شده‌است. روش‌های ارائه‌شده قبلی برای مدل‌سازی سیستم زمین از ماتریس ادمیتانس سیستم زمین استفاده می‌کنند (به‌دلیل این‌که نرم‌افزارهای حالت گذرا برمبنای ماتریس ادمیتانس برنامه‌نویسی شده‌اند). لذا در روش‌ها برای دستیابی به ماتریس ادمیتانس، ناگزیر به معکوس‌کردن ماتریس امپدانس سیستم زمین می‌باشند. اما مشکل این روش‌ها این است که در حالت مدل‌سازی دقیق سیستم‌های زمین چنددرگاهه، این ماتریس امپدانس در فرکانس‌های پایین دارای درایه‌های یکسان بوده و درنتیجه معکوس‌پذیر نمی‌باشد. درنتیجه در مقالات پیشین ماتریس ادمیتانس با تقریب محاسبه می‌شود.

درحالی‌که در این مقاله با ارائه روشی جدید، مدل‌سازی حوزه زمان سیستم زمین، مستقیما برمبنای ماتریس امپدانس سیستم زمین

صورت گرفته‌است. درنتیجه در این روش، بدون هیچ‌گونه تقریبی سیستم زمین قابلیت مدل‌سازی در نرم‌افزارهای گذرا در حوزه زمان را داراست. با کمک روش پیشنهادی سیستم‌های زمین تک‌درگاهه و چنددرگاهه مستقیما در حوزه زمان پیاده‌سازی‌شده و در تحلیل گذراهای ناشی از صاعقه قابل‌استفاده است.

در مدل‌سازی برمبنای ماتریس امپدانس، رفتار وابسته به فرکانس سیستم زمین در حوزه زمان بدون نیاز به معکوس‌گیری حاصل می‌شود. درنتیجه این روش پیچیدگی محاسباتی ناشی از معکوس‌گیری ماتریس‌های مرتبه بالا را ندارد. ازطرف‌دیگر نیازی به تقریب در فرکانس‌های پایین برای معکوس‌گیری وجود نداشته و درنتیجه این روش دقیق‌تر از متدهای مرسوم می‌باشد.

مراجع

[۱] رضا شریعتی‌نسب، بهزاد کرمانی و حمیدرضا نجفی، «مدل‌سازی و تحلیل حالت گذرای ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه در سیستم‌های فتوولتائیک»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحات ۵۹۴-۵۸۳، تابستان ۱۳۹۶.

[۲] رضا شریعتی‌نسب و علی‌اکبر سالاری، «بررسی تزریق لایه ریزدانه‌های اکسیدروی در پوشش عایقی برق‌گیر و طراحی بهینه ابعاد آن با هدف توزیع یکنواخت میدان»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۳، صفحات ۵۴-۴۷، پاییز ۱۳۹۴.

[3] Leuven EMTP Center, *Alternative Transients Program (ATP) Rule Book*, Can/Am EMTP User Group, Belgium, 1987.

[4] Manitoba HVDC Research Centre, *PSCAD/EMTDC User's Manual: Ver.4.2*, Manitoba, Canada, 2005.

[5] J. Mahseredjian, S. Dennetiere, L. Dube, B. Khodabakhchian, and L. Gerin-Lajoie, "On a new approach for the simulation of transients in power systems," Elect. Power Syst. Res., vol. 77, no. 11, pp. 1514–1514, Sep. 2007.

[6] R. Shariatinasab, J. G. Safar, and M.A. Mobarakeh, "Development of an adaptive neural-fuzzy inference system based meta-model for estimating lightning related failures in polluted environments," Science, Measurement & Technology, IET, vol. 8, no. 4, pp.187-195, 2014.

[7] M. A. Araújo, and et al, "Practical methodology for modeling and simulation of a lightning protection system using metal-oxide surge arresters for distribution lines," Electric Power Systems Research, vol. 118, pp. 47-54, 2015.

[8] R. Shariatinasab, B. Vahidi, and S. H. Hosseinian, "Statistical evaluation of lightning-related failures for the optimal location of surge arresters on the power networks," IET generation, transmission & distribution, vol. 3, no. 2, pp. 129-144, 2009.

[9] K. Sheshyekani, M. Akbari, B. Tabei, and R. Kazemi, "Wideband modeling of large grounding systems to interface with electromagnetic transient solvers," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 29, no. 4, pp.1868-1876, 2014.

[10] K. Sheshyekani, B. Tabei, "Multiport frequency-dependent network equivalent using a modified matrix pencil method," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 29, no. 5, pp.2340-2348, Oct. 2014.

[11] M. R. Alemi, and K. Sheshyekani, "Wide-Band Modeling of Tower-Footing Grounding Systems for the Evaluation of Lightning Performance of Transmission Lines," IEEE Trans. Electromagn. Compat, vol. 57, no. 6, pp. 1627-1636, July 2015.

[12] R. Shariatinasab, J. Gholinezhad, K. Sheshyekani, and M. R. Alemi, "The effect of wide band modeling of tower-footing grounding system on the lightning performance of transmission lines: A probabilistic evaluation." Electr. Power Syst. Res., vol. 141, pp. 1-10, Dec. 2016.

[۱۳] محمدرضا عالمی, *تحلیل رفتار گذرای شبکه های زمین به روش ممان*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد برق، دانشگاه شهید بهشتی, تهران، ۱۳۹۲.

[14] L. Grcev, and F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems," IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 4, pp. 1773-1781, Nov. 1990.

[15] M. Heimbach and L. Grcev, "Grounding system analysis in transients programs applying electromagnetic field approach," IEEE Trans. Power Del., vol. 12, no. 1, pp. 186–193, Jan. 1997.

[16] B. Gustavsen, A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting," IEEE Trans. Power Delivery., vol. 14, no. 3, pp. 1052-1061, Jul. 1999.

[17] B. Gustavsen, "Fast passivity enforcement for pole-residue models by perturbation of residue matrix eigenvalues," IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 4, pp. 2278-2285, Oct. 2008.

[18] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, vol. 15, Studies Appl. Math, Singapore: SIAM, 1994.

[19] B. Gustavsen, and H. M. J. De Silva, "Inclusion of rational models in an electromagnetic transients program: Y-parameters, Z-parameters, S-parameters, transfer functions", IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 2, pp. 1164-1174, April 2013.

[20] T. Hara, and O. Yamamoto, "Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis," IEE P. Gener. Transm. D., vol. 143, no. 3, pp. 283-289, May 1996.

[21] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, "Estimation of the minimum shielding failure flashover current for first and subsequent lightning strokes to overhead transmission lines," Electric Power Systems Research, vol. 113, pp. 141-150, 2014.

[22] C. L. Longmire, and K. S. Smith, "A universal impedance for soils," Mission Research Corp., Santa Barbara, CA, Rep. DNA3788T, Oct. 1975.

[23] F. Heidler, J. M. Cvetic, and B. V. Stanic, "Calculation of lightning current parameters," IEEE Trans. Power Del., vol. 14, no. 2, pp. 399–404, Apr. 1999.

[24] J. R. Marti, "Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations," IEEE Trans. Power Appl. Syst., vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157, 1982.

[25] P. Chowdhuri, J. G. Anderson, W. A. Chisholm, T. E. Field, M. Ishii, J. A. Martinez, M. B. Marz, J. McDaniel, T. R. McDermott, A. M. Mousa, T. Narita, D. K. Nichols, and T. A. Short, "Parameters of lightning strokes: a

review," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 1, pp. 346-358, Jan. 2005.

[26] V. Rakov, and M. A. Uman, "Lightning: Physics and Effects," Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2003.

[27] F. H. Silveira, S. Visacro, A. De Conti, and C. R. de Mesquita, "Backflashovers of transmission lines due to subsequent lightning strokes," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 54, no. 2, pp. 316-322, April 2012.

زیرنویس‌ها

[1] Vector Fitting

[2] Electric Field Integral Equation

[3] Constant Parameters

[4] Frequency Dependent