

# استخراج مدل وابسته به فرکانس سیستم زمین در حوزه زمان جهت تحلیل عمل کرد صاعقه در خطوط انتقال

جواد قلی‌نژاد<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری؛ رضا شریعتی‌نسب<sup>۲</sup>، دانشیار؛ کیهان شش‌یکانی<sup>۳</sup>، 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 منجر به 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 ( $VF^1$ ) صورت می‌گیرد. روش VF به‌کاررفته، منجر به برازش مجموعه‌ای از قطب‌ها برای همه‌ی المان‌های ماتریس امپدانس گردیده‌است. در مرحله آخر، با توجه به این‌که نرم‌افزارهای حالت گذرا بر مبنای 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 بر روی یک خط انتقال مرسوم ۱۳۲ کیلوولت پیاده شده و عمل‌کرد سیستم زمین با روش‌های قبلی شامل مدل‌سازی بر مبنای ماتریس ادمیتانس و حالت مرسوم استفاده از مقاومت خطی ساده مقایسه شده‌است.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم زمین چنددرگاهه، مدل‌سازی امپدانس، برازش برداری.

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

Javad Gholinezhad<sup>1</sup>, PhD student; Reza Shariatinasab<sup>2</sup>, Associate professor; Keyhan Sheshyekani<sup>3</sup>, Assistant professor.

<sup>1</sup>Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, gholinezhad.javad@birjand.ac.ir

<sup>2</sup>Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, shariatinasab@birjand.ac.ir

<sup>3</sup>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 در نظر گرفتن این دو پدیده باعث به دست آوردن پاسخ‌هایی محافظه کارانه می‌شود، معمولاً از آن صرف‌نظر می‌گردد. با این حال در نظر گرفتن آن‌ها می‌تواند منجر به افزایش دقت و در نتیجه کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی شبکه زمین گردد.

تحلیل گره‌های گذرای الکترومغناطیسی حوزه زمان به خاطر 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 روزه‌روز ادوات جدید به آن‌ها اضافه می‌گردد. باین حال تاکنون سیستم زمین به صورت دقیق در این ابزارها مدل نشده‌اند. به طوری که سیستم زمین در نرم‌افزارهای گذرای حوزه زمان مانند ATP-EMTP [۳]، PSCAD/EMTDC [۴] و EMT-REV [۵] به صورت 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، منجر به نتایج غیردقیق در فرکانس‌های بالا می‌گردد.

تاکنون مطالعات زیادی روی عمل‌کرد شبکه قدرت به منظور 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. اخیراً مراجع [۱۲-۹] با مدل‌سازی سیستم زمین در حوزه فرکانس و استفاده از روش‌هایی برای پیاده‌سازی آن در حوزه زمان، توانسته‌اند ماتریس ادیمیتانس سیستم زمین برای مدل‌سازی در حوزه زمان را به دست آورند. 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 مورد نظر به دست می‌آورد. اما از آنجایی که نرم‌افزارهای حالت گذرا بر مبنای ماتریس ادیمیتانس برنامه‌ریزی شده‌اند؛ در این مقالات ماتریس ادیمیتانس سیستم زمین با

معکوس کردن ماتریس امپدانس به دست آمده از روش ممان محاسبه می‌شود. در نهایت نیز مدل فضای حالت بر مبنای ماتریس ادیمیتانس که قابلیت پیاده‌سازی در نرم‌افزارهای حالت گذرا را دارد، به دست می‌آید.

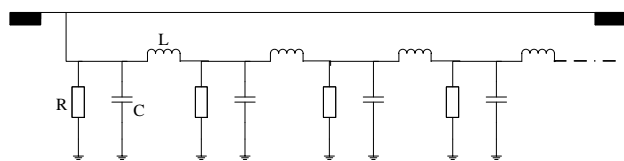
اما مشکلی که وجود دارد این است که ماتریس امپدانس در سیستم‌های زمین چنددرگاه در فرکانس‌های پایین دارای درایه‌های یکسان بوده و لذا در این فرکانس‌ها معکوس پذیر نمی‌باشد؛ در نتیجه به ناچار در روش‌های معرفی شده در [۱۲-۹]، در فرکانس‌های پایین، برای معکوس کردن ماتریس امپدانس از تقریب استفاده شده‌است. این تقریب‌ها باعث پایین آمدن دقت مدل‌سازی و کم شدن 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 مورد نیاز به دست می‌آید. سپس با اصلاحاتی که بر روی روش برازش برداری (VF) صورت گرفته، مستقیماً تقریب به توابع گویای ماتریس امپدانس سیستم زمین انجام گرفته‌است. در نهایت با استفاده از تغییرمغیرهای مناسب، مدل فضای حالت مبتنی بر ماتریس ادیمیتانس سیستم زمین، که قابلیت پیاده‌سازی در نرم‌افزار EMT-REV را داراست، به دست می‌آید. با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله به دلیل عدم نیاز به محاسبه ماتریس ادیمیتانس سیستم زمین، بدون هیچ‌گونه تقریبی، سیستم زمین مدل‌سازی شده در حوزه فرکانس برای تحلیل گذراهای حوزه زمان مهیا گشته‌است. 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 تحت تاثیر ضربه صاعقه، یکی از مهم‌ترین منابع اضافه‌ولتاژ در تاسیسات است. مطالعات تئوری و عملی زیادی نشان داده‌اند که امکان مدل‌کردن یک هادی تنها در زمین به وسیله مدار معادل سری-موازی شبیه به خط انتقال وجود دارد (شکل ۱) [۱۳].



شکل ۱: مدل تئوری مدار یک الکتروود زمین

۱-۲- مدل سازی با استفاده از روش ممان (MoM) سیستم زمین به صورت تعدادی از هادی های فلزی استوانه ای متصل به هم با رسانایی محدود، که به چندین قسمت کوچک تقسیم می شود، تعریف می گردد. در این مقاله از مدل الکترومغناطیسی به کاررفته در [۱۴] برای استخراج ماتریس امپدانس سیستم زمین تک درگاه و چند درگاه در رنج فرکانسی dc تا ۲ مگاهرتز استفاده شده است. در این روش با استفاده از روش تقریب سیم نازک، معادله انتگرالی میدان الکتریکی (EFIE) به منظور محاسبه ی جریان های جاری شده در طول بخش های مختلف هادی زمین به صورت زیر فرموله می شود:

$$z_{ij}(s) = \frac{V_i(s)}{I_j(s)} \Big|_{I_k=0} \quad (k=1,2,3,\dots,P, k \neq j) \quad (5)$$

که  $P$  تعداد درگاه های سیستم زمین است. بنابراین ماتریس امپدانس سیستم زمین به صورت زیر بیان می گردد.

$$Z_g(s) = \begin{pmatrix} z_{11}(s) & \dots & z_{1P}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{P1}(s) & \dots & z_{PP}(s) \end{pmatrix} \quad (6)$$

که  $Z_{ij}$  و  $Z_{ii}$  به ترتیب، امپدانس های خودی و متقابل بین درگاه های  $i$  و  $j$  سیستم زمین را نشان می دهند.

### ۳- ارتباط با نرم افزارهای حالت گذرا

ارتباط سیستم زمین با نرم افزارهای حالت گذرا در چهار مرحله خلاصه می شود: 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 غیرفعال بر مدل قطب-مانده حاصل از VF؛ ۴- استخراج مدل مناسب فضای حالت بر مبنای ماتریس ادمیتانس جهت به کارگیری در نرم افزار گذرا.

### ۱-۳- برازش برداری (Vector Fitting)

برای تقریب ماتریس امپدانس سیستم زمین به یک مدل قطب-مانده از روش VF [۱۶] استفاده شده است. هر بردار ماتریس امپدانس سیستم زمین به صورت زیر برازش می شود:

$$z_{ij}(s) \approx \{z_{ij}(s)\}_{fit} = \sum_{m=1}^M \frac{R_{m,ij}}{s - a_m} + d_{ij} + s e_{ij} \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, P; \quad j = 1, 2, \dots, P$

که  $R_m$  و  $a_m$  به ترتیب قطب ها و مانده های سیستم را نشان می دهند 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:

$$\sigma(s).z(s) = p(s) \quad (8)$$

که در آن:

که  $t$  بردار مماسی واحد در طول سیم  $(l)$ ،  $\mu$  نفوذپذیری مغناطیسی،  $E^i$  میدان الکتریکی ایجاد شده 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 می باشد. معادله EFIE با استفاده از روش ممان [۱۵] حل شده و در نتیجه توزیع جریان در طول قسمت های مختلف هادی به دست می آید. در این روش توزیع جریان روی هادی ها به صورت متناهی بسط می یابد:

$$t.E^i = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int I_i(r') G(r, r') dl \quad (1)$$

توزیع جریان در طول قسمت های مختلف هادی به دست می آید. در این روش توزیع جریان روی هادی ها به صورت متناهی بسط می یابد:

$$I(l) = \sum_{n=1}^N I_n F_n(l) \quad (2)$$

که  $N$  تعداد دوقطبی ها (هر جفت از قسمت های مجاور که جریان در آن جاری است، تشکیل یک دوقطبی می دهد)،  $I_n$  جریان مجهول که باید تعیین گردد،  $l$  طول هر قسمت و  $F_n(l)$  توزیع جریان در طول دوقطبی  $n$  ام می باشد. برای محاسبه جریان های مجهول، ابتدا بایستی میدان الکتریکی منتشر شده در یک نقطه دلخواه تعیین گردد. بدین منظور توزیع جریان در هر قسمت به صورت زیر فرض می شود:

$$I(z) = \frac{I_1 \sinh \gamma(z_2 - z) + I_2 \sinh \gamma(z - z_1)}{\sinh \gamma d} \quad (3)$$

که  $d = z_2 - z_1$  بوده و  $z_1$  و  $z_2$  به ترتیب نقاط ابتدایی و انتهایی دوقطبی هستند.  $I_1$  و  $I_2$  نیز جریان های نقاط انتهایی می باشند. پس از انجام محاسبات، اجزای مختلف میدان الکتریکی در سیستم زمین به صورت زیر به دست می آید:

$$E_\rho = \frac{\eta}{4\pi\rho \sinh \gamma d} \left[ (I_1 e^{-\gamma R_1} - I_2 e^{-\gamma R_2}) \sinh \gamma d + (I_1 \cosh \gamma d - I_2) e^{-\gamma R_1} \cos \theta_1 + (I_2 \cosh \gamma d - I_1) e^{-\gamma R_2} \cos \theta_2 \right] \quad (4)$$

$$E_z = \frac{\eta}{4\pi\rho \sinh \gamma d} \left[ (I_1 - I_2 \cosh \gamma d) \frac{e^{-\gamma R_2}}{R_2} + (I_2 - I_1 \cosh \gamma d) \frac{e^{-\gamma R_1}}{R_1} \right]$$

$$E_\phi = 0, \quad \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

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

$$X_{i,j}(s) = d + \operatorname{Re}\left\{\sum_{m=1}^N \frac{R_m}{s - a_m}\right\} = d + p(s) \quad (13)$$

ماتریس کل شامل اجزای حقیقی ماتریس امپدانس برابر است با:

$$X(s) = D + P(s) \quad (14)$$

با فرض قطری بودن ماتریس  $X$  و برای هر فرکانس دلخواه  $s$ :

$$T \Lambda T^{-1} = D + P \quad (15)$$

که در آن ماتریس  $\Lambda$  شامل مقادیر ویژه مثبت  $A_{pos}$  و منفی  $A_{neg}$  است. لذا معادله (۱۵) به صورت زیر قابل بازنویسی می‌باشد:

$$T(\Lambda_{pos} + \Lambda_{neg})T^{-1} = D + P \quad (16)$$

در نهایت با جابه‌جایی جمله‌ها، ماتریس  $X$  به صورت زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$X_{corr} = T \Lambda_{pos} T^{-1} = D - T \Lambda_{neg} T^{-1} + P \quad (17)$$

بنابراین با جای‌گزینی صفر به جای مقادیر ویژه منفی و افزودن اصلاحاتی در ماتریس  $D$ ، قسمت حقیقی ماتریس امپدانس (ماتریس  $X$ ) می‌تواند اصلاح گردد. این فرایند تا حصول معیار غیرفعال مد نظر در تمامی فرکانس‌ها تکرار می‌شود.

### ۳-۳- توسعه‌ی مدل فضای حالت

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

$$Z_g(s) = \mathbf{D} + \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + s\mathbf{E} \quad (18)$$

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

$$\mathbf{C}_m = \mathbf{R}_m, \mathbf{A}_m = \frac{1}{a_m} \mathbf{I}, \mathbf{B}_m = \mathbf{I} \quad (19)$$

$$\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{Q \times Q}, \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{Q \times P}, \mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n \times Q}, \mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n \times P}, \mathbf{E} \in \mathbb{R}^{n \times P}$$

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

$$\sigma(s) = \sum_{m=1}^M \frac{\tilde{R}_{m,ij}}{s - q_m} + 1 \quad (9)$$

$$p(s) = \sum_{m=1}^M \frac{R_{m,ij}}{s - q_m} + d_{ij} + s e_{ij} \quad (10)$$

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

$$\{a_m\} = \operatorname{eig}(A - b \cdot c^T) \quad (11)$$

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 معمولاً بعد از ۲ تا ۳ تکرار همگرا می‌شود. پس از تعیین قطب‌ها، مانده‌های معادله (۷) با حل مسئله حداقل مربعات متناظر با قطب‌های تعیین شده، محاسبه می‌گردند.

خروجی فضای حالت روش برازش برداری، اصولاً به صورت اکیداسره می‌باشد ( $D=0, E=0$ ). در حالی که در روش پیشنهادی مقاله چون نیاز به معکوس‌گیری از ماتریس  $D$  وجود دارد، بایستی ماتریس  $D \neq 0$  باشد. با توجه به این که روش VF این قابلیت را دارد که خروجی آن به صورت سره ( $D \neq 0, E = 0$ ) یا ناسره ( $D \neq 0, E \neq 0$ ) نیز درآید، در نتیجه با انتخاب حالتی که خروجی این روش به صورت سره باشد، خروجی مورد نظر ما (ماتریس  $D \neq 0$ ) حاصل می‌شود.

### ۳-۲- اعمال غیرفعال

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 به دست آمده از برازش طوری تغییر کنند که اولاً مدل جدید در حوزه فرکانس پایدار و دارای دقت کافی باشد؛ و ثانیاً مدل جدید در حوزه زمان پایدار بوده و به عبارتی غیرفعال باشد. با داشتن مدل قطب-مانده ماتریس امپدانس سیستم زمین، برای اطمینان از شبیه‌سازی حوزه زمان پایدار، بایستی شرط غیرفعال بر این مدل اعمال گردد [۱۷]. یعنی بایستی مقادیر ویژه قسمت حقیقی ماتریس امپدانس در تمامی فرکانس‌ها مثبت باشد.

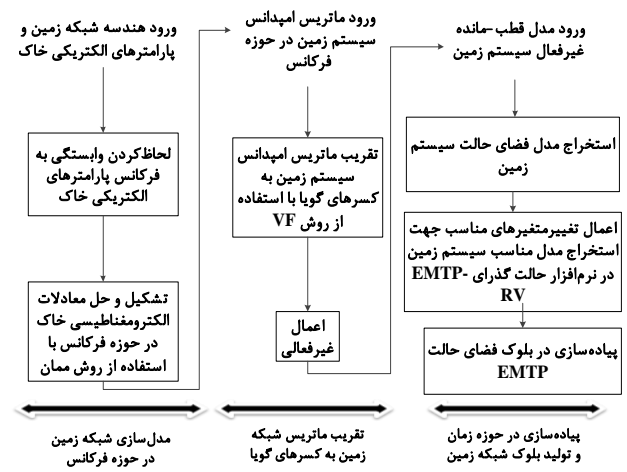
$$\operatorname{eig}(\operatorname{Re}\{z(j\omega)\}) > 0 \quad \forall \omega \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_{new} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_{new} \cdot \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{i}(t) &= \mathbf{C}_{new} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{new} \cdot \mathbf{v}(t) \end{aligned} \quad (25)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{new} &= \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C} & , & \quad \mathbf{B}_{new} = \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1} \\ \mathbf{C}_{new} &= -\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C} & , & \quad \mathbf{D}_{new} = \mathbf{D}^{-1} \end{aligned}$$

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 بر مبنای ماتریس امپدانس را نشان می‌دهد.



شکل ۲: فلوچارت مدل پیشنهادی

#### ۴- مدل‌سازی اجزای خط انتقال

##### ۴-۱- دکل انتقال

برای تحلیل سیستم زمین، دکل‌های یک خط ۱۳۲ kV مطابق شکل ۳ در EMTP-RV شبیه‌سازی شده‌است. هر پایه دکل با امپدانس موجی زیر مدل می‌شود [۲۰]:

$$Z_{T,n} = \sum_{i=1}^3 60 \cdot \left( \ln \frac{2\sqrt{2}h_i}{r_{ei}} - 2 \right) \quad (26)$$

$$r_{ei} = 2^{\frac{1}{8}} \left( r_{Ti}^{\frac{1}{3}} \cdot r_B^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( R_{Ti}^{\frac{1}{3}} \cdot R_B^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{4}}$$

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

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

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{i}(t) \\ \mathbf{v}(t) &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{i}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

که  $x(t)$  بردار حالت و  $v(t)$  و  $i(t)$  بردارهای ولتاژ و جریان است که نشان‌دهنده ولتاژ و جریان هر درگاه سیستم زمین می‌باشند. برای یک سیستم زمین  $P$  درگاه، با فرض این که ماتریس‌های  $B_r, A_r, C_r$  شامل قطب‌های حقیقی و مانده‌های متناظر با آن و ماتریس‌های  $B_c, A_c, C_c$  شامل قطب‌ها و مانده‌های مختلط باشند؛ پس از انجام محاسبات، نمایش نهایی معادلات فضای حالت به صورت زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1 \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_2 \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_3 \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_r & 0 & 0 \\ 0 & \text{Re}(\mathbf{A}_c) & \text{Im}(\mathbf{A}_c) \\ 0 & -\text{Im}(\mathbf{A}_c) & \text{Re}(\mathbf{A}_c) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_1 \\ \tilde{\mathbf{x}}_2 \\ \tilde{\mathbf{x}}_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_r \\ 2\text{Re}(\mathbf{B}_c) \\ 2\text{Im}(\mathbf{B}_c) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{i} \\ \mathbf{v} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_r & \text{Re}(\mathbf{C}_c) & \text{Im}(\mathbf{C}_c) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_1 \\ \tilde{\mathbf{x}}_2 \\ \tilde{\mathbf{x}}_3 \end{pmatrix} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{i} \end{aligned} \quad (21)$$

معادله فضای حالت فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_{old} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_{old} \cdot \mathbf{i}(t) \\ \mathbf{v}(t) &= \mathbf{C}_{old} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{old} \cdot \mathbf{i}(t) \end{aligned} \quad (22)$$

با توجه به این که این معادلات بر مبنای ماتریس امپدانس سیستم زمین هستند (جریان  $i$  به عنوان ورودی و ولتاژ  $v$  به عنوان خروجی معادله می‌باشند)، معادلات در این فرم قابلیت پیاده‌سازی در نرم‌افزارهای گذرا از قبیل EMTP-RV را ندارند. زیرا نرم‌افزارهای حالت گذرا بر مبنای ماتریس ادمیتانس برنامه‌نویسی شده‌اند. در نتیجه بایستی به گونه‌ای معادلات فضای حالت با فرض ورودی ولتاژ و خروجی جریان به دست آیند.

بدین منظور با استفاده از تغییرمتغیرهای زیر می‌توان معادلات فضای حالت بر مبنای ماتریس ادمیتانس سیستم زمین را به دست آورد تا بتوان آن را در نرم‌افزارهای تحلیل گر گذرا پیاده‌سازی نمود. در ابتدا ورودی بر حسب خروجی به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \Rightarrow \mathbf{D}\mathbf{u} = \mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{x} \Rightarrow \\ \mathbf{u} &= \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{x}) \Rightarrow \mathbf{u} = -\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{y} \end{aligned} \quad (23)$$

هم چنین می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \Rightarrow \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(-\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{y}) \\ \Rightarrow \dot{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C})\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{y} \end{aligned} \quad (24)$$

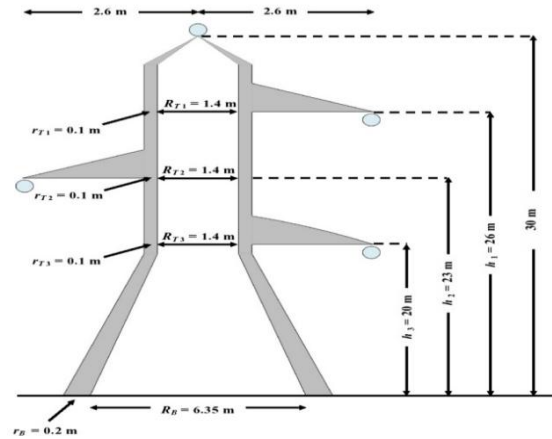
در نتیجه ماتریس‌های فضای حالت جدید بر مبنای ماتریس ادمیتانس به صورت زیر خواهد بود:

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

$$\rho(f) = (\rho_0)^{-1} +$$

$$2\pi\varepsilon_0 \sum_{n=1}^{14} \frac{a_n \left( (p/10)^{1.28} \cdot 10^{n-1} \right) \left( \frac{f}{(p/10)^{1.28} \cdot 10^{n-1}} \right)^2}{1 + \left( \frac{f}{(p/10)^{1.28} \cdot 10^{n-1}} \right)^2} \quad (28)$$

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



شکل ۳: هندسه دکل انتقال مورد مطالعه [۱۱]

لازم به ذکر است که در این مقاله از اثرات یونیزاسیون خاک صرف نظر شده است.

### ۵- نتایج عددی

برای مطالعه تاثیر مدل سازی باند وسیع سیستم زمین دکل برمبنای روش پیشنهادی (مدل سازی در حوزه زمان براساس ماتریس امیدانس سیستم زمین) بر روی عمل کرد صاعقه خط انتقال ۱۳۲ کیلوولت، از شبیه سازی EMTP-RV استفاده شده است. در شبیه سازی، برای مدل سازی شکل موج صاعقه از تابع هیدلر استفاده می شود [۲۳].

$$i(t) = \frac{I_p}{\eta} \frac{k^n}{1+k^n} e^{-t/\tau_2} \quad (29)$$

$I_p$  پیک جریان،  $\eta$  ضریب تصحیح پیک جریان،  $n$  فاکتور شیب جریان و  $k=t/\tau_1$  می باشد.  $\tau_1$  و  $\tau_2$  ثابت های زمانی اند که به ترتیب زمان های پیشانی و دنباله جریان را تعیین می کنند. برای بررسی اضافه ولتاژهای صاعقه، ضربه اولیه و ضربات متعاقب آن در نظر گرفته می شوند. توزیع آماری پارامترهای ضربه صاعقه به صورت یک تابع توزیع لگاریتمی نرمال در نظر گرفته شده که مقادیر متوسط پارامترهای آن برای ضربات اولیه و متعاقب صاعقه مطابق جدول ۱ می باشد.

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

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

خط انتقال با استفاده از مدل وابسته به فرکانس J.Marti [۲۴] مدل سازی شده که مشخصات آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: مشخصات هادی خط انتقال

نوع	قطر (cm)	مقاومت ( $\Omega$ /km)
CURLEW هادی های فاز	۳/۵۵۶	۰/۰۴۵
94S سیم گارد	۱/۲۶	۰/۶۴۲

### ۴-۲- مشخصه تخلیه الکتریکی زنجیره مقره

مشخصه تخلیه زنجیره مقره تابعی غیر خطی از ولتاژ ضربه است. زنجیره مقره را می توان به صورت یک خازن موازی با کلید مدل کرد تا اثر کوپلینگ بین هادی ها و دکل در نظر گرفته شود. قوس الکتریکی به صورت یک مقاومت ثابت مدل می شود که مقدار آن برای سطوح مختلف ولتاژ و ساختارهای مختلف مقره متفاوت است. در این مقاله از معیار ناحیه معادل یا روش انتگرالی برای مدل سازی مقره و بررسی اثر اضافه ولتاژهای ناشی از ضربات غیراستاندارد صاعقه استفاده شده است که مشخصه تخلیه زنجیره مقره در آن به صورت زیر است [۲۱]:

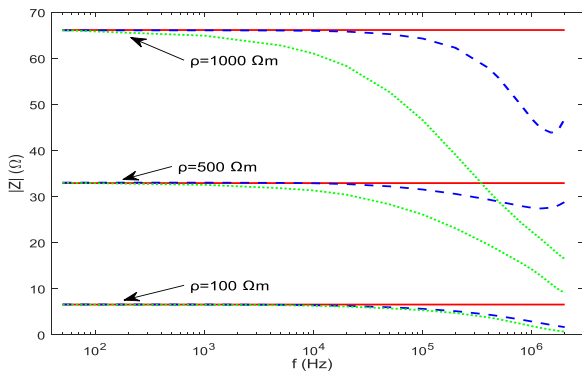
$$DE = \int_{t_0}^t (V(t) - V_0)^k dt \quad (27)$$

که  $V_0$  حداقل ولتاژ مورد نیاز شکست و  $t_0$  زمان شروع شکست یا لحظه ای است که ولتاژ لحظه ای  $V(t)$  از  $V_0$  تجاوز می کند.  $DE$  ( $kV^k \cdot \mu s$ ) ثابت اثر تخریب و  $k$  یک ضریب ثابت برای اعمال اثرات زمان پیشانی و اندازه اضافه ولتاژ می باشد. در این روش به محض این که مقدار  $DE$  از مقدار  $DE^*$  تجاوز کند، تخلیه در زنجیره مقره رخ می دهد. مقادیر  $DE^*$  و  $V_0$  برای خط انتقال ۱۳۲ کیلوولت برابر می باشد.  $DE^* = 0.524 kV \cdot \mu s$  و  $V_0 = 650 kV$  می باشد.

### ۴-۳- امیدانس پای دکل

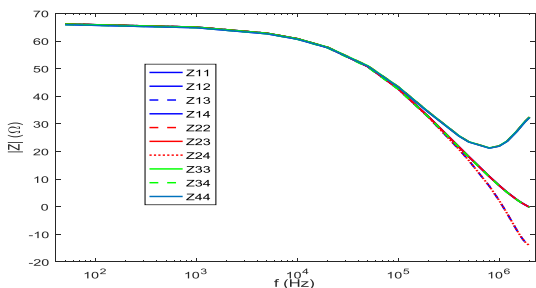
با توجه به وابستگی فرکانسی خود پارامترهای الکتریکی خاک، سیستم زمین در این مقاله به سه صورت مدل سازی شده است:

- مدل استاتیک (مرسوم): که برای مدل سازی از مقاومت ساده معادل با مقاومت  $dc$  سیستم زمین استفاده می شود.
- مدل باند وسیع با پارامترهای ثابت (CP<sup>+</sup> Wide-Band): با فرض این که پارامترهای الکتریکی خاک ثابت باشند.
- مدل باند وسیع با پارامترهای وابسته به فرکانس (FD<sup>+</sup> Wide-Band): با فرض وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک که به صورت زیر تعریف می شود [۲۲]:



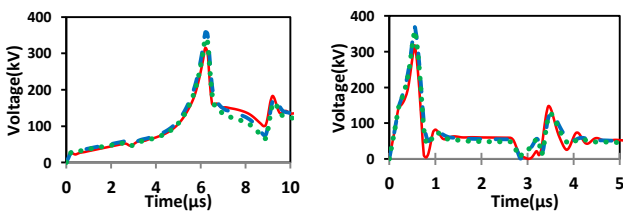
شکل ۷: امپدانس متقابل ( $Z_{13}$ ) برای شبکه مربعی. خط ممتد قرمز رنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط خط چین آبی رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه چین سبز رنگ: مدل FD Wide-Band.

اندازه امپدانس به دست آمده از روش های مرسوم [۹-۱۲] برای سیستم زمین مربعی در صورت مدل سازی وابسته به فرکانس پارامترهای الکتریکی خاک با  $\rho = 1000 \Omega m$  در شکل ۸ آمده است. نتایج نشان می دهد که اندازه مولفه های مختلف ماتریس امپدانس تا فرکانس حدود ۱۰۰ kHz با یکدیگر برابرند؛ لذا در این فرکانس ها دترمینان ماتریس امپدانس برابر صفر بوده و معکوس پذیر نمی باشد. به همین دلیل در روش های مرسوم قبلی، برای معکوس کردن ماتریس امپدانس و دست یابی به ماتریس ادمیتانس سیستم زمین به تقریب نیاز می باشد.

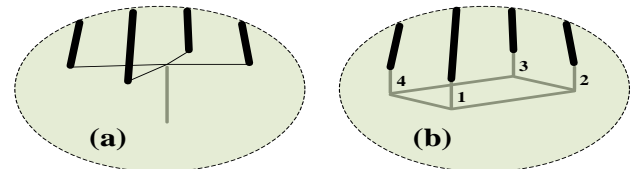


شکل ۸: امپدانس های خودی و متقابل برای شبکه زمین مربعی. در حالت FD Wide-Band و مقاومت ویژه  $\rho = 1000 \Omega m$ .

اضافه ولتاژهای زنجیره مفره ناشی از اصابت صاعقه های اولیه و متعاقب به سیم گارد در شکل ۹ نشان داده شده است. در این حالت هیچ تخلیه الکتریکی در زنجیره مفره رخ نداده است. در اینجا سیستم زمین به صورت الکتروود افقی بوده که به سه صورت استاتیک، CP Wide-Band و FD Wide-Band بر مبنای ماتریس امپدانس (روش پیشنهادی مقاله) مدل سازی شده است.

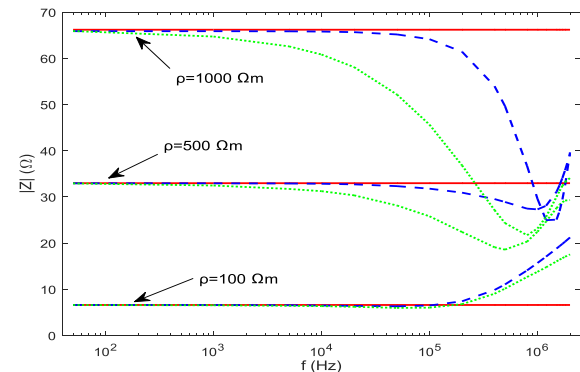


برای مدل سازی سیستم زمین در حوزه زمان، روش پیشنهادی مقاله برای مدل های مختلف زمین مطابق شکل ۴ پیاده سازی شده و نتایج حاصل از شبیه سازی مورد تحلیل قرار گرفته است. تحلیل سیستم زمین برای ۳ مقاومت ویژه مختلف خاک  $\rho = 100, 500, 1000 \Omega m$  انجام گرفته است. در همه ی حالات فرض شده است که گذردگی الکتریکی  $\epsilon_r = 20$  می باشد.

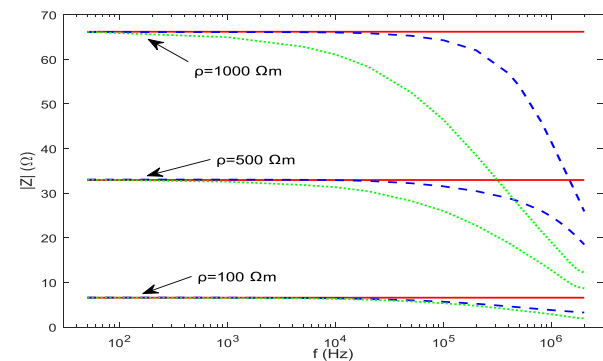


شکل ۴: شبکه زمین، (a) الکتروود عمودی تک درگاه با طول ۱۵ متر و شعاع ۱۲/۵ میلی متر، (b) شبکه زمین مربعی چهار درگاه  $6 \times 6$  متر مربع و شعاع ۱۲/۵ میلی متر.

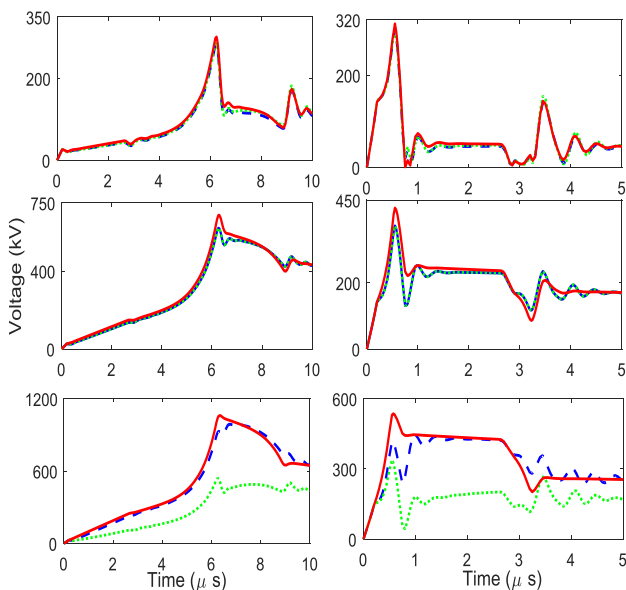
اندازه مولفه های فرکانسی ماتریس امپدانس شبکه زمین مربعی شکل، در شکل های ۵ تا ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵: امپدانس خودی ( $Z_{11}$ ) برای شبکه مربعی. خط ممتد قرمز رنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط خط چین آبی رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه چین سبز رنگ: مدل FD Wide-Band.

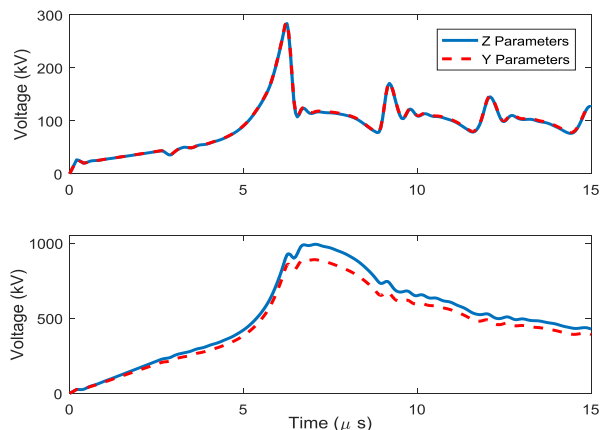


شکل ۶: امپدانس متقابل ( $Z_{12}$ ) برای شبکه مربعی. خط ممتد قرمز رنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط خط چین آبی رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه چین سبز رنگ: مدل FD Wide-Band.



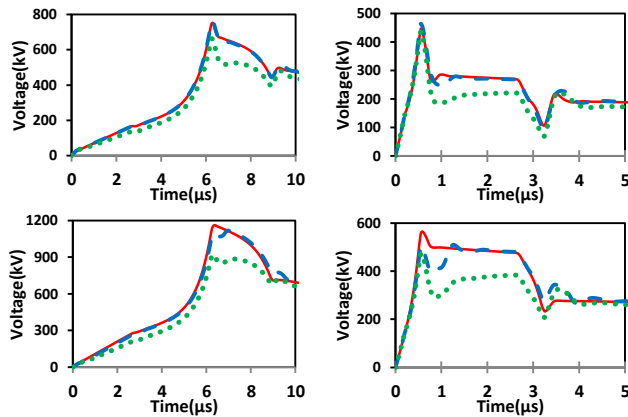
شکل ۹: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای الکتروود عمودی.  $\rho=100 \Omega m$  (a),  $\rho=500 \Omega m$  (b),  $\rho=1000 \Omega m$  (c). ستون چپ: ضربه اولیه، ستون راست: ضربه متعاقب. خط ممتد قرمز رنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط چین آبی رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه‌چین سبز رنگ: مدل FD Wide-Band.

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



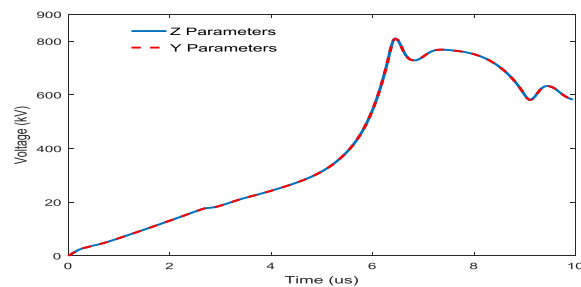
شکل ۱۰: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای الکتروود عمودی. به‌ازای صاعقه اولیه  $(3/83 \mu s / 75 \mu s, 27 kA)$  و مقاومت ویژه  $\rho=1000 \Omega m$  در حالت مدل‌سازی FD Wide-Band.

شکل ۱۱: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی. به‌ازای صاعقه اولیه  $(3/83 \mu s / 75 \mu s, 27 kA)$  و مقاومت ویژه  $\rho=100 \Omega m$  (a),  $\rho=1000 \Omega m$  (b). در حالت مدل‌سازی CP Wide-Band.



شکل ۱۱: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای الکتروود عمودی.  $\rho=100 \Omega m$  (a),  $\rho=500 \Omega m$  (b),  $\rho=1000 \Omega m$  (c). ستون چپ: ضربه اولیه، ستون راست: ضربه متعاقب. خط ممتد قرمز رنگ: مقاومت ساده معادل با مقاومت dc، خط چین آبی رنگ: مدل CP Wide-Band، خط نقطه‌چین سبز رنگ: مدل FD Wide-Band.

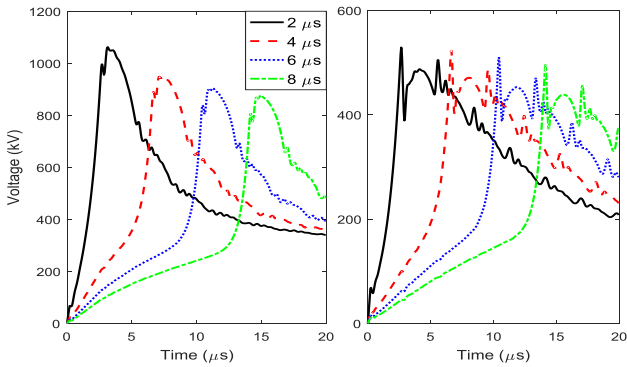
برای مقایسه‌ی روش پیشنهادی بر مبنای ماتریس امیدانس با روش‌های قبلی بر مبنای ماتریس ادمیتانس، اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای هر دو روش مدل‌سازی برای سیستم زمین با الکتروود عمودی در شکل ۱۰ آمده‌است. مشاهده می‌شود که برای الکتروود عمودی (سیستم زمین تک‌درگاه) مقادیر اضافه‌ولتاژها در هر دو روش مدل‌سازی یکسان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



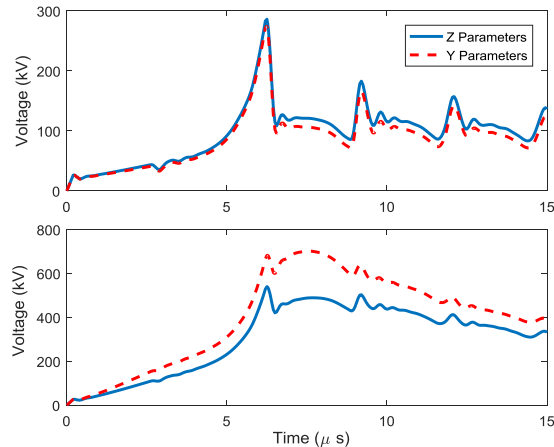
شکل ۱۱: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای الکتروود عمودی. به‌ازای صاعقه اولیه  $(3/83 \mu s / 75 \mu s, 27 kA)$  و مقاومت ویژه  $\rho=1000 \Omega m$  در حالت مدل‌سازی FD Wide-Band.

شکل ۱۲: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره را ناشی از اصابت صاعقه به سیم گارد برای مدل‌سازی سیستم زمین مربعی بر اساس ماتریس امیدانس نشان می‌دهد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که مشابه [۱۱]، با بزرگ‌شدن مقاومت ویژه خاک، اضافه‌ولتاژهای زنجیره‌مقره و اختلاف مابین اضافه‌ولتاژهای محاسبه‌شده در مدل‌سازی باندوسیع و مدل استاتیک بیشتر می‌شود. که این تفاوت مشابه روش مرجع [۱۱] با در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک، افزایش می‌یابد.

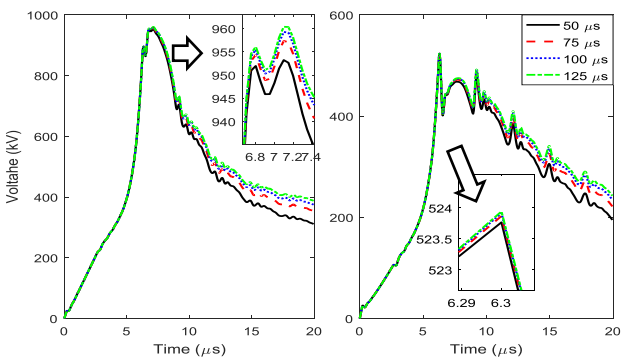




شکل ۱۵: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی، به‌ازای  $\Omega m$  در اثر تغییر زمان پیشانی موج جریان صاعقه اولیه ( $T_r/75\mu s$ )،  $\rho=1000$ . ستون چپ: مدل CP Wide-Band، ستون راست: مدل FD Wide-Band.

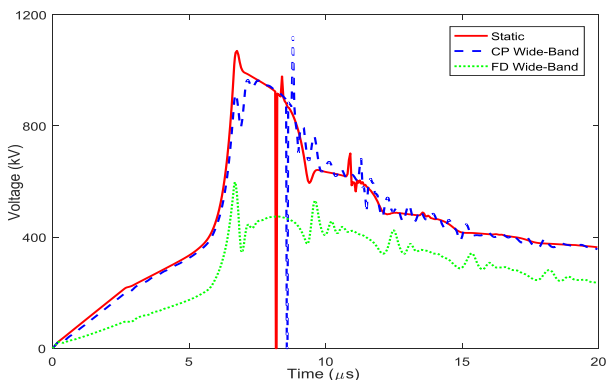


شکل ۱۳: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی. به‌ازای صاعقه اولیه  $\Omega m$  (b),  $\rho=100$  و مقاومت ویژه  $\Omega m$  (a),  $\rho=100$  در حالت مدل‌سازی FD Wide-Band،  $\rho=1000$ .



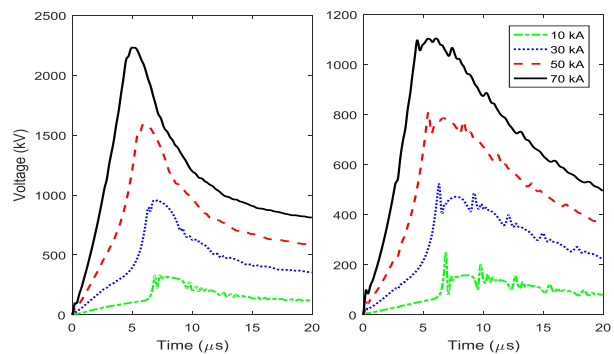
شکل ۱۶: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی، به‌ازای  $\Omega m$  در اثر تغییر زمان پشت موج جریان صاعقه اولیه ( $T_b/83\mu s$ )،  $\rho=1000$ . ستون چپ: مدل CP Wide-Band، ستون راست: مدل FD Wide-Band.

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



شکل ۱۷: اضافه‌ولتاژ زنجیره‌مقره برای شبکه زمین مربعی، به‌ازای صاعقه ( $30kA, 3/83\mu s/75\mu s$ ) و مقاومت ویژه  $\Omega m$ ،  $\rho=1000$ .

مشاهده می‌شود که تفاوت اضافه‌ولتاژ به‌دست‌آمده از مدل زمین بر مبنای ماتریس امیدانس (روش پیشنهادی) با مدل‌سازی بر مبنای ماتریس ادمیتانس [۱۱]، در هر دو نوع مدل‌سازی باندوسیع 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  $\rho=100 \Omega m$  در حدود ۲ kV (کمتر از ۱٪) و در  $\rho=1000 \Omega m$  در حدود ۱۰۰ kV (۱۰٪) است. در مدل FD Wide-Band و  $\rho=100 \Omega m$  تفاوت در حدود ۱۲ kV (۵٪) و در  $\rho=1000 \Omega m$  در حدود ۱۰۰ kV (۱۵٪) است. طبق نتایج مشخص است که اختلاف بیشینه اضافه‌ولتاژ محاسبه‌شده، با در نظر گرفتن 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  $\Omega m$  در اثر تغییر پیک جریان صاعقه اولیه ( $1kA, 3/83\mu s/75\mu s$ )،  $\rho=1000$ . ستون چپ: مدل CP Wide-Band، ستون راست: مدل FD Wide-Band.

FD ۱۰/۱ ۱۳/۹ ۱۰/۶ ۱۴/۲

با توجه به این که در سیستم زمین تک درگاه، مشکلی در معکوس پذیری ماتریس امپدانس وجود ندارد، و هم چنین مطابق شکل ۱۰، اضافه ولتاژ به دست آمده از مدل سازی حوزه زمان امپدانس و ادمیتانس بر هم منطبق می باشند؛ مقادیر تخلیه برگشتی در سیستم زمین تک درگاه (الکترو د زمین عمودی) با هم مقایسه نشده اند. مشاهده می شود که احتمال تخلیه برگشتی و نرخ قطعی ناشی از صاعقه در مدل سازی حوزه زمان سیستم زمین به روش پیشنهادی تغییر می کند. با توجه به جدول ۴ مشخص است که نرخ تخلیه برگشتی صاعقه با افزایش مقاومت ویژه افزایش می یابد. تعداد قطعی به ازای مدل سازی های مختلف متفاوت بوده و این تفاوت با در نظر گیری وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک نسبت به حالت استاتیک، افزایش می یابد.

با توجه به تغییر نرخ های خروجی خطوط انتقال، شاخص های قابلیت اطمینان خطوط نیز تغییر کرده و با توجه به این که روش پیشنهادی دارای ۱- دقت بالاتر (به دلیل عدم نیاز به تقریب زنی ماتریس ادمیتانس در فرکانس های پایین) و ۲- پیچیدگی کم تر (به دلیل عدم نیاز به معکوس گیری ماتریس امپدانس در بازه فرکانسی مورد مطالعه) می باشد، اهمیت و برتری روش پیشنهادی مشخص می گردد. از آنجاکه 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 تقریب زدن داراست؛ امکان افزودن بلوکی به نرم افزارهای گذرا مانند EMTP-RV برای مدل سازی سیستم زمین را فراهم می کند. این در حالی است که بر اساس روش مرجع [۱۱] که بر مبنای ماتریس ادمیتانس سیستم زمین است و با توجه به عدم امکان معکوس گرفتن در فرکانس های پایین، امکان استفاده از آن به صورت مستقیم در نرم افزارهای گذرا وجود ندارد.

۶- نتیجه

در این مقاله برای مدل سازی سیستم زمین در حوزه فرکانس، از یک روش جدید مبتنی بر ماتریس امپدانس سیستم زمین استفاده شده است. روش های ارائه شده قبلی برای مدل سازی سیستم زمین از ماتریس ادمیتانس سیستم زمین استفاده می کنند (به دلیل این که نرم افزارهای حالت گذرا بر مبنای ماتریس ادمیتانس برنامه نویسی شده اند). لذا در روش ها برای دستیابی به ماتریس ادمیتانس، ناگزیر به معکوس کردن ماتریس امپدانس سیستم زمین می باشند. اما مشکل این روش ها این است که در حالت مدل سازی دقیق سیستم های زمین چند درگاه، این ماتریس امپدانس در فرکانس های پایین دارای درایه های یکسان بوده و در نتیجه معکوس پذیر نمی باشد. در نتیجه در مقالات پیشین ماتریس ادمیتانس با تقریب محاسبه می شود.

در حالی که در این مقاله با ارائه روشی جدید، مدل سازی حوزه زمان سیستم زمین، مستقیماً بر مبنای ماتریس امپدانس سیستم زمین

به منظور مقایسه و اعتبار سنجی روش ارائه شده برای مدل سازی سیستم زمین در حوزه زمان، رفتار شبکه زمین مربعی، مطابق شکل ۴، مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج با مقاله [۱۱] مقایسه گردیده است. با توجه به توزیع تجمعی ضربات اولیه و متعاقب صاعقه [۲۵]، درصد جریان های بزرگتر از جریان بحرانی (جریانی که منجر به تخلیه برگشتی می شود) به دست آمده است. مقادیر احتمال تخلیه برگشتی برای خاک با مقاومت های ویژه مختلف و انواع مدل سازی سیستم زمین به ازای ضربات اولیه و متعاقب صاعقه، مشخص شده و نتایج با حالت مدل سازی ادمیتانس سیستم زمین در جدول ۳ مقایسه شده اند.

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 می شود که ۲۰ درصد صاعقه ها، از نوع صاعقه اولیه تنها و ۸۰ درصد از نوع صاعقه های چند مرتبه (ضربه اولیه به همراه سه ضربه متعاقب) می باشند؛ بنابراین احتمال تخلیه برگشتی کل از روش ارائه شده در [۲۷] به دست آمده است. در جدول ۴ نیز نرخ های خروجی ناشی از تخلیه برگشتی به ازای مدل سازی مختلف سیستم زمین آورده شده اند.

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

مدل سازی شبکه زمین مربعی

مقاومت ویژه (Ωm)	مدل سیستم زمین	روش مبتنی بر ماتریس ادمیتانس [۱۱]		روش مبتنی بر ماتریس امپدانس (روش پیشنهادی)	
		ضربه اولیه و متعاقب	ضربه اولیه و متعاقب	ضربه اولیه و متعاقب	ضربه اولیه و متعاقب
ρ=۱۰۰	ST	۰/۰۹	۴/۰۸	۰/۰۹	۴/۰۸
	CP	۰/۰۹	۳/۹۹	۰/۰۹	۴/۲۰
	FD	۰/۰۹	۳/۹۹	۰/۰۹	۴/۲۰
ρ=۵۰۰	ST	۵/۸	۱۰/۰	۵/۸	۱۰/۰
	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

- 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، پایان نامه 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

صورت گرفته است. در نتیجه در این روش، بدون هیچ گونه تقریبی سیستم زمین قابلیت مدل سازی در نرم افزارهای گذرا در حوزه زمان را داراست. با کمک روش پیشنهادی سیستم های زمین تک درگاه و چند درگاه مستقیماً در حوزه زمان پیاده سازی شده و در تحلیل گذراهای ناشی از صاعقه قابل استفاده است.

در مدل سازی بر مبنای ماتریس امیدانس، رفتار وابسته به فرکانس سیستم زمین در حوزه زمان بدون نیاز به معکوس گیری حاصل می شود. در نتیجه این روش پیچیدگی محاسباتی ناشی از معکوس گیری ماتریس های مرتبه بالا را ندارد. از طرف دیگر نیازی به تقریب در فرکانس های پایین برای معکوس گیری وجود نداشته و در نتیجه این روش دقیق تر از متدهای مرسوم می باشد.

## مراجع

- [۱] رضا شریعتی نسب، بهزاد کرمانی و حمیدرضا نجفی، «مدل سازی و تحلیل حالت گذرای ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه در سیستم های فتوولتائیک»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحات ۵۹۴-۵۸۳، تابستان ۱۳۹۶.
- [۲] رضا شریعتی نسب و علی اکبر سالاری، «بررسی تزریق لایه ریزدانه های اکسیدروی در پوشش عایقی برق گیر 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. Dennerie, 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. Hosseini, "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

- [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.
- [26] V. Rakov, and M. A. Uman, "Lightning: Physics and Effects," Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2003.
- review," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 1, pp. 346-358, Jan. 2005.

#### زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup> Vector Fitting
- <sup>2</sup> Electric Field Integral Equation
- <sup>3</sup> Constant Parameters
- <sup>4</sup> Frequency Dependent