

ارزیابی فرکانس بالای پارامترهای خاک در تحلیل گذرای سیستم زمین شبکه قدرت

لطف اله مرادی^۱، نبی اله رضانی^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد برق دانشگاه علم و فناوری مازندران و شرکت توزیع برق مازندران ، lotf.moradi62@gmail.com

^۲استادیار دانشگاه علم و فناوری مازندران ، ramezani@ mazust.ac.ir

چکیده

اجرای سیستم زمین مناسب موجب کاهش پتانسیل سطحی و بهبود سطح حفاظتی در سیستم‌های قدرت خواهد شد. ارزیابی و بررسی هماهنگی عایقی و سازگاری الکترومغناطیسی تجهیزات در سیستم قدرت بسیار مهم می‌باشد که جهت دستیابی به این موضوع محاسبه دقیق اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. جهت بررسی اثرات اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه لازم است به مدل جامع و مناسبی از رفتار سیستم زمین در حالت گذرای الکترومغناطیسی دست یابیم. با توجه به وابستگی به فرکانس پارامترهای خاک در تجزیه و تحلیل فرکانس بالا، لازم است وابستگی به فرکانس بالای کلیه المان‌ها در شبکه قدرت از جمله پارامترهای خاک در مدل‌سازی گذرای سیستم زمین در محاسبات مربوط گنجانده شود. در این مقاله تاثیر پارامترهایی از قبیل رطوبت خاک، ثابت گذردهی خاک، مقاومت ویژه خاک وابسته به فرکانس بر رفتار گذرای سیستم زمین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی

ثابت گذردهی، مقاومت ویژه، فرکانس بالا، سیستم زمین

۱- مقدمه

ارائه شده است که در آن اثر وابسته به فرکانس پارامترهای خاک لحاظ نشده است [۱۰-۲]. در مرجع [۱۱]، روشی برای تجزیه و تحلیل فرکانس بالای یک سیستم زمین ارائه شده است که در آن تاثیر پارامترهایی مثل شکل موج و بزرگی صاعقه، پارامترهای مستقل از فرکانس خاک و همچنین ساختار لایه‌های خاک است.

پرواضح است سیستم زمین به عنوان یک جزء مهم برای حفاظت و ایمنی، مسیر اصلی عبور جریان ناشی از صاعقه به شمار می‌آید که علاوه بر وابستگی فرکانس پارامترهای خاک، یونیزاسیون خاک به عنوان یک اصل مهم باید در مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مربوط به آن مورد توجه قرار گیرد [۱۲]. همچنین مدل‌سازی دقیق سیستم زمین پای دکل و به تبع آن محاسبه امپدانس موجی (که وابسته به ضریب دی الکتریک و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی وابسته به فرکانس آن می‌باشد) تأثیر قابل توجهی بر محاسبه اضافه ولتاژ ناشی از برخورد مستقیم و غیر مستقیم صاعقه دارد [۱۳-۱۴].

ارزیابی دقیق رفتار فرکانس بالای سیستم زمین ناشی از صاعقه جهت طراحی و بهره برداری هر سیستم قدرت از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در تجزیه و تحلیل‌های انجام شده توسط محققین در گذشته زمین به عنوان یک رسانای خوب در نظر گرفته می‌شد و صرفاً توجه اندکی به تغییر فصول بر آن و عدم قطعیت در مورد اندازه گیری واقعی پارامترهای زمین می‌شد. با این حال، با توجه به افزایش پیچیدگی در توپولوژی شبکه‌های قدرت نیاز به مدل‌سازی بهبود یافته برای ارزیابی مناسب شبکه جهت پیش‌بینی دقیق تر پارامترها احساس شده است. بنابراین، نیاز به ارائه مدل‌های بهتر و دقیق تر خاک در تجزیه و تحلیل دقیق تر یکی از اجزای مهم شبکه قدرت موسوم به سیستم زمین وجود دارد [۱]. تاکنون روش‌های متعددی به منظور تجزیه و تحلیل فرکانس بالای یک سیستم زمین از قبیل روش مداری، روش مبتنی بر خط انتقال، روش ثنوری میدان الکترومغناطیسی و روش هیبرید

نزدیک‌تر شویم این شعاع بیشتر خواهد بود. برای در نظر گرفتن پدیده‌ی یونیزاسیون خاک لازم است مقادیر مقاومت و رسانایی الکتروود زمین به صورت متغیر با زمان در نظر گرفته شوند. برای دستیابی به این هدف، از روابط (۱)، (۲) و (۳) برای محاسبه‌ی مقاومت الکتروود عمودی استفاده می‌شود [۱۲].

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_g}}} \quad (1)$$

$$I_g = \frac{E_{cr} \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi \cdot R_T^2} \quad (2)$$

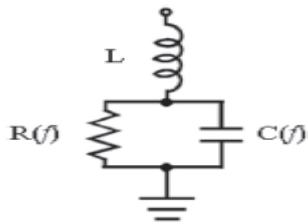
$$R_T = \frac{\rho_s \cdot \Delta x}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \delta} \quad (3)$$

$$G(t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta x}{\rho_s \cdot \ln\left(\frac{2L}{a}\right)} \cdot \sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_g}} \quad (4)$$

$R(t)$ و $G(t)$ به ترتیب مقدار مقاومت و رسانایی غیرخطی الکتروود زمین برحسب Ω و Ω است. $I(t)$ جریان الکتروود است که از صاعقه ناشی می‌شود و I_g مقدار حد جریانی است که یونیزاسیون خاک از آن آغاز می‌شود (هر دو برحسب آمپر). E_{cr} مقدار شدت میدان الکتریکی بحرانی است که اغلب $300-400$ kV/m در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

۲-۲- مدل پلیسکیچ

در این مدل برای مدل‌سازی سیستم زمین از مدل وابسته به فرکانس پارامترهای خاک مطابق شکل (۱) و روابط زیر استفاده می‌گردد.



شکل (۱): سیستم زمین دکل‌ها در مدل پلیسکیچ

$$R = \frac{\rho(f)}{\pi \cdot d} \times A_2 \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \times d \quad (6)$$

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon(f) \cdot d}{A_2} \quad (7)$$

در این مقاله، به منظور مدل‌سازی دقیق شبکه قدرت در حالت گذرای فرکانس بالا، وابستگی به فرکانس پارامترهای مختلفی چون ثابت گذردهی خاک، مقاومت ویژه خاک و همچنین پدیده یونیزاسیون خاک در مدل مبتنی بر خط انتقال سیستم زمین گنجانده شده و آنالیز حساسیت نسبت به این پارامترها در یک شبکه واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی‌ها، با شبیه‌سازی یک شبکه نمونه‌ی که در یکی از مقالات معتبر ارائه شده است مقایسه و همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج مقاله مقایسه شده و نتایج قابل قبولی حاصل شده است. به منظور هرچه دقیق‌تر شدن مدل‌سازی و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی‌ها، در مرحله‌ی بعدی، پدیده‌ی یونیزاسیون خاک که اغلب به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی آن، از آن صرف‌نظر می‌شود مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با نتایج پیشین مقایسه شده است.

در بخش ۲ مقاله به انواع روش‌های وابسته به فرکانس پارامترهای خاک، در بخش ۳ آن به مدل‌سازی اجزای سیستم قدرت و فلوچارت پیشنهادی پرداخته می‌شود. همچنین در بخش ۴ مقاله به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اعتبار سنجی روش‌ها پرداخته شده و در نهایت در بخش ۵ این مقاله نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- انواع روش‌های وابسته به فرکانس پارامترهای خاک

در اغلب پژوهش‌هایی که درباره‌ی رفتار گذرای سیستم زمین در برابر صاعقه انجام شده است، به منظور سهولت، امیداندس زمین به شکل یک مقاومت ساده با مقدار فرضی (مثلاً ۱۰ اهم) در نظر گرفته شده است. اگرچه این روش برای شناسایی شکل مشخصه‌های ولتاژ و جریان در طول خط می‌تواند مفید باشد اما به دلیل صرف نظر کردن از اثرات خازنی، القاکنندگی و رسانایی، نمی‌تواند برای اندازه‌گیری‌های دقیق مشخصات رفتار سیستم، مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه به روش‌های مختلف وابسته به فرکانس پارامترهای خاک می‌پردازیم:

۲-۱- روش گازانا

یکی از اساسی‌ترین مواردی که لازم است در مدل‌سازی سیستم زمین تحت فرکانس‌های بالا در نظر گرفته شود پدیده‌ی یونیزاسیون خاک است که رفتار بسیار پیچیده‌ای دارد و گنجاندن شرایط آن در روابط، قدری مشکل است و به همین دلیل اغلب از آن چشم‌پوشی می‌شود. در حقیقت وقوع این پدیده سبب می‌شود خاک اطراف الکتروود تا شعاع مشخصی دارای خاصیت رسانایی شود و هر چه در طول الکتروود به نقطه‌ی تزریق جریان

با نفوذپذیری خلاء ($\mu 0$) است. برای گذرهای سریع مانند کلیدزنی (۱۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز) و صاعقه (۲ تا ۱۰ مگاهرتز)، رفتار خاک به عوامل مختلفی بستگی دارد [۱۶]. در مرجع [۱۶] برای رفتار فرکانس بالای پارامترهای خاک از روابط زیر استفاده کرده است:

$$\varepsilon_r(f) = 10^D \quad (16)$$

$$D = 5.491 + 0.946 \log_{10}(\sigma_{100\text{HZ}}) - 1.097 \log_{10}(f) + 0.069 \log_{10}^2(\sigma_{100\text{HZ}}) - 0.114 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_{100\text{HZ}}) + 0.067 \log_{10}^2(f)$$

$$\sigma(f) = 10^K (mS/m) \quad (17)$$

$$K = 0.028 + 1.098 \log_{10}(\sigma_{100\text{HZ}}) - 0.068 \log_{10}(f) + 0.036 \log_{10}^2(\sigma_{100\text{HZ}}) - 0.046 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_{100\text{HZ}}) + 0.018 \log_{10}^2(f)$$

۳- مدل سازی اجزای سیستم قدرت و

فلوجارت پیشنهادی

اولین گام برای ارائه روشی جهت تعیین اثر پارامترهای خاک بر مدل فرکانس بالای سیستم زمین، مدل سازی این اثرات و به دست آوردن روابط حاکم بر آنها است. بدین منظور استفاده از مدل های گذرای دقیق برای مدل سازی دقیق و حصول نتایج قابل اطمینان ضروری است.

۳-۱- مدل سازی مقره

مشخصه تخلیه زنجیره مقره تابعی غیرخطی 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 برای مدل سازی زنجیره مقره های با طول بزرگتر از یک متر مطابق رابطه زیر می گردد:

$$v = \frac{dl}{dt} = k_1 U(t) \left[\frac{U(t)}{g-1} - E_{10} \right] \quad (18)$$

که در آن v ، سرعت قوس، l طول قوس، g طول فاصله هوایی، E_{10} ولتاژ گرادپان بحرانی قوس، k_1 عدد ثابت قوس و $U(t)$ مقدار ولتاژ اعمال شده بر روی مقره می باشد. شکست زمان رخ می دهد که طول قوس و فاصله هوایی برابر گردند [۱۷].

$$A_2 = \frac{1}{8} \left[\ln \left(\frac{2.d}{a} \right) + \ln \left(\frac{2.d}{s} \right) + 2.912 - 1.071 \times \frac{s}{a} + 0.645 \times \frac{s^2}{d^2} - 0.145 \times \frac{s^4}{d^4} \right] \quad (8)$$

$$\rho(f) = \frac{\rho_0}{1 + 4.7 \times 10^{-6} \times \rho_0^{0.73} \times f^{0.54}} \quad (9)$$

$$\varepsilon(f) = 9.5 \times 10^4 \times \rho_0^{-0.27} \times f^{-0.46} + 12 \quad (10)$$

که f فرکانس، $\rho(f)$ مقاومت ویژه خاک وابسته به فرکانس، $\varepsilon(f)$ گذردهی خاک وابسته به فرکانس، d طول الکتروود اتصال زمین (۲۵ متر)، a قطر معادل الکتروود (۵۰ میلی متر مربع) و s دو برابر عمق سیستم زمین (۱.۴ متر) است. همچنین ρ_0 مقاومت ویژه خاک در فرکانس پایه در نظر گرفته شده است [۱۳].

۳-۲- مدل ویسکارو

مرجع [۱۴] نیز با توجه به مشخصات ساختاری خاک، مدل جامعی را برای مدل سازی فرکانس بالای خاک یک سیستم زمین ارائه کرده است:

(۱۱)

$$\rho = \rho_0 \{ 1 + [1.2 \times 10^{-6} \times \rho_0^{0.73}] \times [(f - 100)]^{0.65} \}^{-1} \\ \varepsilon_r = 7.6 \times 10^3 \times f^{-0.4} + 1.3 \quad (12)$$

این معادلات، قابل اعمال در محدوده ۱۰۰ هرتز تا ۴ مگاهرتز می باشند. ρ و ε_r مقاومت خاک و گذردهی نسبی خاک در فرکانس f (بر حسب هرتز) هستند. همچنین ρ_0 مقدار مقاومت خاک در فرکانس ۱۰۰ هرتز است.

۳-۳- مدل اسشرودر

مرجع [۱۵] نیز به محاسبه وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک بر اساس نتایج تجربی که به اثبات رسیده است پرداخته است:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \times h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1 \text{ MHz}} \right)^\gamma \quad (13)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\tan(\pi\gamma/2) \times 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0 (1\text{MHz})^\gamma} \sigma_0 \times h(\sigma_0) f^{\gamma-1} \quad (14)$$

که در روابط فوق σ رسانایی خاک بر حسب mS/m ، σ_0 رسانایی خاک در فرکانس پایین (۱۰۰ Hz) بر حسب mS/m ، ε_r مقدار گذردهی خاک، $\varepsilon_{r\infty}$ گذردهی خاک در فرکانس بالا، ε_0 گذردهی خلا می باشد. لذا داریم:

$$h(\sigma_0) = 1.26 \times \sigma_0^{-0.73} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{r\infty} = 12 \quad \text{و} \quad \gamma = 0.54$$

۳-۴- مدل کاوکا

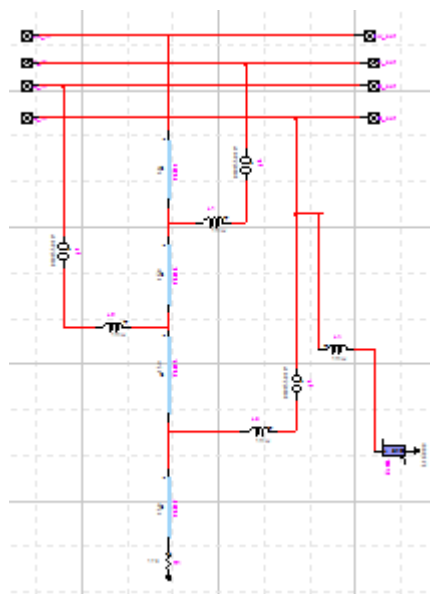
به جز میدان الکتریکی بالا، که بر یونیزاسیون خاک بطور قابل توجهی تاثیر می گذارد، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خاک اساساً خطی است، اما هدایت الکتریکی (σ) و گذردهی الکتریکی آن (ε) به شدت وابسته به فرکانس هستند. نفوذپذیری مغناطیسی خاک (μ) به طور کلی تقریباً برابر

۲-۳- مدل سازی دکل

برای مدل سازی دکل از مدل TLM استفاده شده است و امپدانس موجی دکل از رابطه زیر به دست می آید:

$$Z = 60 \left[\ln \left(\frac{H}{R} \right) - 1 \right] \quad (19)$$

که H ارتفاع دکل و R شعاع معادل پایه دکل می باشد. به منظور محاسبه رفتار الکترومغناطیسی دکل، مدل دکل همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است به چهار بخش تقسیم شده که هر بخش با یک خط انتقال بدون تلفات و با امپدانس موجی به صورت (۱۹) جایگزین می شود و بازوهای دکل نیز با یک اندوکتانس به مقدار $\mu H/m$ مدل سازی می شوند [۱۳].



شکل (۲): شبیه سازی در نرم افزار EMT_P_RV

۲-۳- مدل سازی خطوط هوایی و کابل XLPE

برای کابل XLPE نوع Pipe از مدل جی-مارتی که مشخصه‌ی ادمیتانس و ثابت انتشار را با توابع مستدل و مناسب تقریب می زند، استفاده شده است. برای مدل سازی خط نیز از مدل FD در نرم افزار EMT_P_RV استفاده شده است. این مدل بر مبنای روش‌های تجزیه‌ی مُدال می باشد و نسبت به دیگر مدل‌های موجود در نرم افزار، اگرچه در محاسبات کندتر عمل می کند، اما دقیق تر است. این مدل، امپدانس وابسته به فرکانس را در نظر می گیرد و وابستگی فرکانسی را با تقریب زدن توسط توابع معقول، در هر حالت معرفی می کند [۱۸].

۳-۳- مدل سازی برقگیر

برای مطالعات کلیدزنی، می توان برقگیر را توسط یک مقاومت غیرخطی مدل کرد. اما برای مطالعات صاعقه و امواج با پیشانی سریع به علت رفتارهای دینامیکی برقگیر نمی توان از مدل مقاومت غیرخطی استفاده کرد. زیرا ولتاژ پسماند برقگیر برای موج‌های با پیشانی سریع (8 - 1 μs) بین ۶ تا ۱۰ درصد بیشتر از موج‌های با پیشانی بیشتر از ۸ میکرو ثانیه است. همچنین برای امواج با زمان پیشانی بین ۴۵ میکرو ثانیه تا ۶۰ میکرو ثانیه ولتاژ پسماند ۲ تا ۴ درصد کمتر از ۸ میکرو ثانیه است. در این مقاله از روش IEEE در شبیه سازی استفاده شده است [۱۸].

۳-۴- موج صاعقه

تحقیقات نشان می دهد در شبکه‌های توزیع شهری با توجه به عوامل محیطی مانند حضور درختان و ساختمان‌های بلند در نزدیکی خطوط توزیع، تعداد کمی از ضربات صاعقه حدود ۲ الی ۱۶ درصد مستقیماً به شبکه توزیع برخورد می کنند، که دامنه متوسط جریان تخلیه این ضربات بین ۱۲kA تا ۲۳kA است. برای ارزیابی اثر برخورد مستقیم صاعقه از یک منبع جریان CIGRE موازی با یک مقاومت به عنوان مقاومت پایه کانال صاعقه استفاده می شود [۱۹].

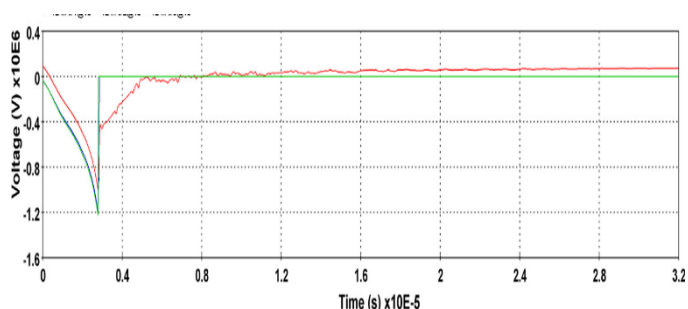
۳-۵- مراحل ارزیابی حالت گذرای سیستم زمین در

سیستم قدرت

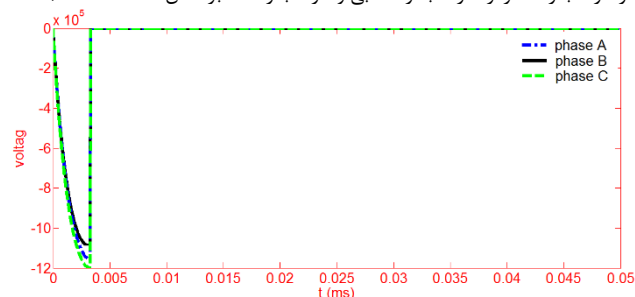
به منظور تجزیه و تحلیل و ارزیابی دقیق تر فرکانس بالای سیستم زمین در یک شبکه قدرت نمونه، مراحل زیر باید در پیاده سازی در محیط نرم افزار EMT_P_RV در نظر گرفته شود:

- استخراج اطلاعات شبکه مورد مطالعه
- پیاده سازی مدل‌های فرکانس بالای اجزای سیستم قدرت شامل خط انتقال، موج صاعقه، برقگیر، دکل و ...
- پیاده سازی مدل خط انتقال سیستم زمین در حالت گذرا با لحاظ کردن عوامل زیر:
 - پدیده یونیزاسیون خاک
 - وابستگی فرکانس بالای پارامترهای خاک
- تاثیر سایر پارامترهای تاثیرگذار مانند مقاومت ویژه خاک مختلف در فرکانس پایه و عمق دفن و ...
- ارزیابی نتایج حاصله در حالات مختلف و دستیابی به سیستم زمین مطلوب

شده را می توان در شکل (۶) مشاهده نمود. در این حالت قوس برگشتی در دو فاز از سه فاز (فاز میانی (B) و فاز پایین (C)) رخ می‌دهد [۱۳].



شکل (۵): اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل در مرجع [۱۳] با مقاومت زمین ۱۷۵ اهمی (ولتاژ فاز a با رنگ قرمز، فاز b به رنگ آبی و فاز c با رنگ سبز نشان داده شده است)



شکل (۶): اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل با نرم افزار EMTP-RV با مقاومت زمین ۱۷۵ اهمی (ولتاژ فاز a با رنگ آبی، فاز b به رنگ سیاه و فاز c با رنگ سبز نشان داده شده است)

جدول (۱): مقایسه حداکثر اضافه‌ولتاژهای القایی صاعقه در مرجع [۱۳] و شبیه‌سازی‌ها در حالت اول

نقطه مشاهده	فاز A	فاز B	فاز C
مقدار پیک	۱۱۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰
دامنه ولتاژ (کیلوولت)	۱۰۹۰	۱۱۸۵	۱۱۹۵
مقادیر محاسبه‌شده			
درصد موثر خطا	۱	۱.۲۵	۰.۴

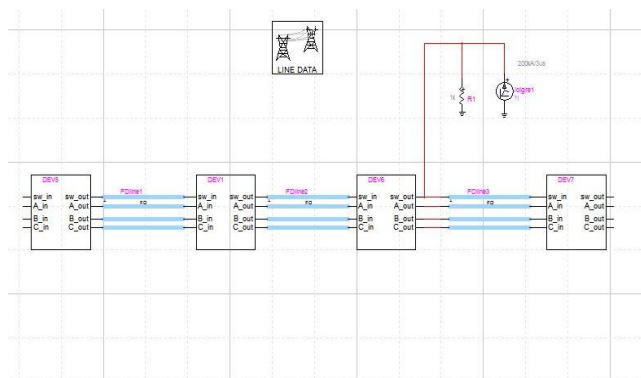
۴-۱-۲- حالت دوم: سیستم زمین دکل با وابستگی به فرکانس

پارامترهای خاک

در این حالت شبکه مدل شده در حالت فرکانس بالا و با در نظر گرفتن مقادیر ρ و ϵT مورد مطالعه قرار گرفته است. در اثر برخورد صاعقه و ایجاد

۴- شبیه‌سازی و اعتبارسنجی

در این بخش مدل‌سازی حالت گذرای سیستم قدرت و عوامل مؤثر بر مدل‌سازی رفتار گذرا مانند رسانایی خاک، ثابت گذردهی خاک، مقاومت ویژه خاک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مقاومت ویژه خاک در فرکانس پایین (ρ_0) برای دکل مورد مطالعه در مرجع [۱۳] (مدل پیلایسکیچ) برابر با ۵۷۲۴ اهم متر در نظر گرفته شده است. طول الکتروود برابر با ۲۵ متر و قطر خارجی آن ۵۰ میلی متر مربع لحاظ شده است. موج صاعقه ارائه شده دارای مقدار پیک ۲۲/۷ kA و بیشترین شیب موج ۲۱/۷۲ kA/ μ s می باشد. سرعت انتشار موج صاعقه برگشتی برابر با 108×3/1 m/s و ارتفاع کانال صاعقه برابر با 2000 m خواهد بود. شبیه‌سازی شبکه نمونه‌ی موردنظر با نرم افزار EMTP-RV (با زمان نمونه گیری ۰/۰۹ میکروثانیه و زمان کل شبیه‌سازی ۳۲ میکروثانیه) انجام شده است. شکل (۴) سیستم مدل شده در نرم‌افزار EMTP-RV را نشان می‌دهد.



شکل (۴): مدل‌سازی سیستم در نرم‌افزار EMTP-RV

برای شبیه‌سازی در سیستم مورد مطالعه در شکل (۵) دو گام در نظر می‌گیریم. در گام اول براساس روابط اشاره شده تاثیرات مقاومت ویژه ρ و ضریب گذردهی ϵ_r در ۳ حالت مورد بررسی قرار داده و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی را با مقاله مرجع [۱۳] مقایسه خواهیم کرد. در گام دوم به بررسی و مقایسه روش‌های مختلف وابسته به فرکانس پارامترهای خاک پرداخته و بهترین مدل را انتخاب خواهیم کرد.

۴-۱- گام اول

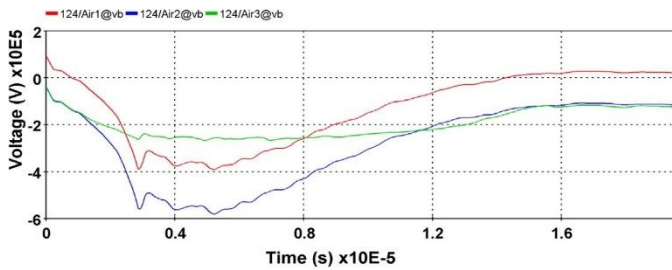
براساس روابط بالا تاثیر مقاومت ویژه و ضریب گذردهی را می توان برای ۳ حالت بر میرایی اضافه ولتاژ اعمال شده ناشی از صاعقه بر سیستم قدرت در نظر گرفته شده مورد بررسی قرار داد.

۴-۱-۱- حالت اول: مقاومت زمین ثابت باشد

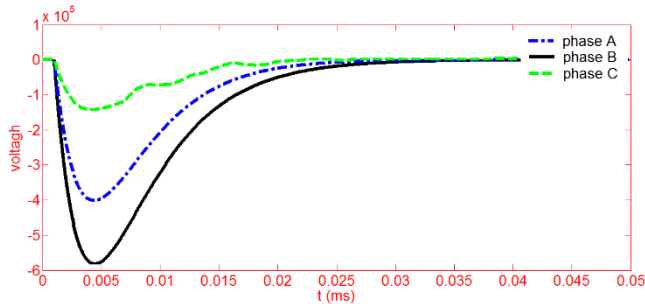
در این حالت مقدار مقاومت زمین را عددی ثابت فرض می کنیم. این عدد ۱۷۵ اهم در نظر گرفته شده است. تاثیر صاعقه بر روی مقره‌های دکل مدل

۴-۱-۳- مدل فرکانس بالا با حضور برقیگیر

در این حالت سیستم قدرت مورد مطالعه مانند حالت دوم بوده ولی برقیگیر بر روی فاز C نصب شده است. نتایج شبیه سازی طبق شکل (۱۰) نشان می‌دهد که با استفاده از برقیگیر در حالت مدل فرکانس بالا و با در نظر گرفتن مقاومت ویژه و ضریب گذردهی خاک، هیچ‌گونه شکست و خطایی در زمان برخورد صاعقه و ایجاد اضافه ولتاژ در شبکه اتفاق نمی‌افتد. در هر ۳ فاز اضافه ولتاژ بوجود آمده بحالت گذرا و میرایی در آمده و سیستم دارای قابلیت اطمینان مناسبی است.



شکل (۹): اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل در مرجع [۱۳] با مدل فرکانس بالای زمین با حضور برقیگیر (ولتاژ فاز a با رنگ قرمز، فاز b به رنگ آبی و فاز c با رنگ سبز نشان داده شده است)

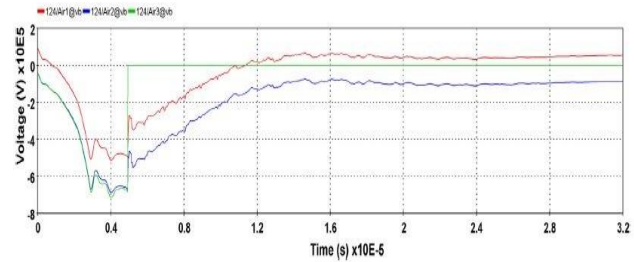


شکل (۱۰): اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل با نرم افزار EMT-P-RV با مدل فرکانس بالای زمین با حضور برقیگیر (ولتاژ فاز a با رنگ سیاه، فاز b به رنگ آبی و فاز c با رنگ سبز نشان داده شده است)

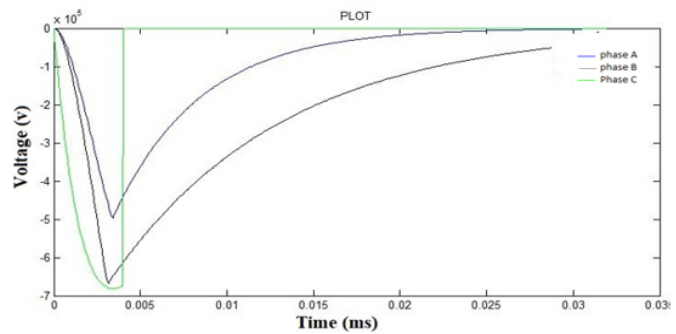
جدول (۳): مقایسه حداکثر اضافه‌ولتاژهای القایی صاعقه در مرجع [۱۳] و شبیه‌سازی‌ها در حالت سوم

نقطه مشاهده	فاز A	فاز B	فاز C
مقدار پیک	۴۰۰	۵۹۰	۲۴۵
دامنه ولتاژ (کیلوولت)	مقادیر مقاله مرجع		

ولتاژ بالا در سیستم قدرت شکل (۸) نتایج آن را نشان می‌دهد. در این حالت طبق شکل موج خروجی فقط بر روی یک مقره (فاز C) شکست رخ می‌دهد و نسبت به حالت اول شرایط خطای اندکی در شکست شبکه بهبود یافته است اما هم چنان قابلیت اطمینان شبکه تهدید می‌گردد.



شکل (۷): اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل در مرجع [۱۳] با مدل فرکانس بالای زمین (ولتاژ فاز a با رنگ قرمز، فاز b به رنگ آبی و فاز c با رنگ سبز نشان داده شده است)



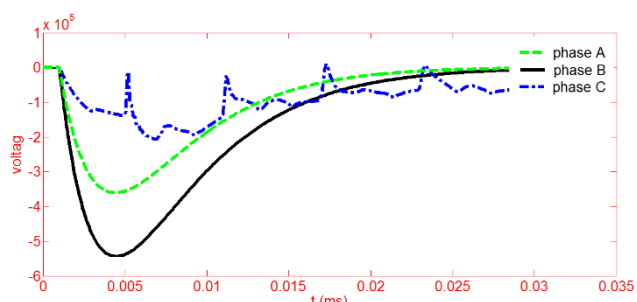
شکل (۸): اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل با نرم افزار EMT-P-RV با مدل فرکانس بالای زمین (ولتاژ فاز a با رنگ آبی، فاز b به رنگ سیاه و فاز c با رنگ سبز نشان داده شده است)

جدول (۲): مقایسه حداکثر اضافه‌ولتاژهای القایی صاعقه در مرجع [۱۳] و شبیه‌سازی‌ها در حالت دوم

نقطه مشاهده	فاز A	فاز B	فاز C
مقدار پیک	۴۸۵	۶۹۰	۷۰۱
دامنه ولتاژ (کیلوولت)	مقادیر مقاله مرجع		
	مقادیر محاسبه‌شده		
درصد موثر خطا	۱/۴	۰/۷	۱/۵

۴-۲-۲- مدل اسشرودر

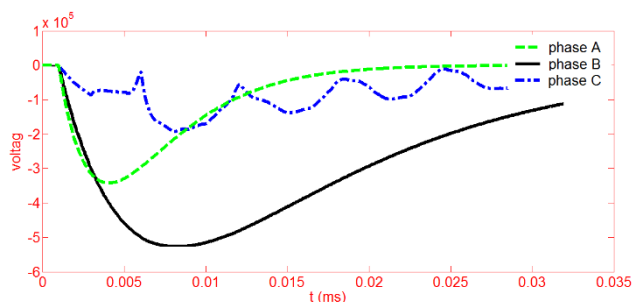
در این حالت براساس روابط حاکم و بیان شده در (۱۳)، (۱۴) نتایج شبیه سازی برای میرایی اضافه ولتاژ را بررسی می‌نماییم. شکل (۱۲) نتایج این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. براساس نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که مانند حالت قبل فاز ۲ A, B در مدت زمان مناسبی به میرایی رسیده اما فاز C همچنان دارای اعوجاج در شکل موج میرایی خود است. هر چند شبکه دچار خطا و شکست در اثر این ولتاژ نمی‌گردد و قابلیت اطمینان همچنان حفظ شده است.



شکل (۱۲): اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل با مدل فرکانس بالای زمین (مدل اسشرودر) با حضور برقگیر

۴-۲-۳- مدل کاوگا

در این حالت طبق روابط بیان شده در (۱۶)، (۱۷) نتایج شبیه‌سازی برای میرایی اضافه ولتاژ را بررسی می‌نماییم. شکل (۱۳) نتایج این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل با مدل فرکانس بالای زمین (مدل کاوگا) با حضور برقگیر

مقدار پیک دامنه ولتاژ (کیلوولت)	مقادیر محاسبه شده	۲۳۱	۵۸۵	۳۹۵
درصد موثر خطا		۵	۰/۸۴	۱/۲۵

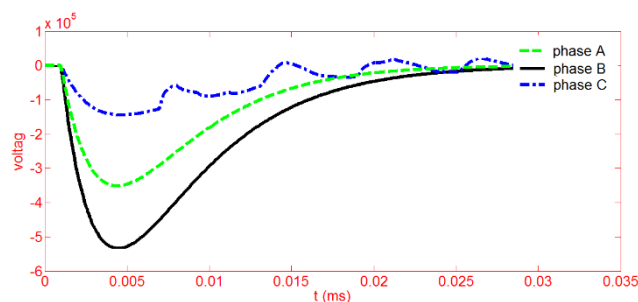
با مقایسه کردن حالت‌های مختلفی که در سیستم قدرت مورد مطالعه بدست آمده است، نشان می‌دهد که حالت سوم بهترین شرایط را برای میرا نمودن اضافه ولتاژ بوجود آمده در شبکه بخصوص در زمان اثبات صاعقه از خود نشان می‌دهد.

۴-۲-۴- گام دوم

در این گام، روشهای مختلف وابسته به فرکانس پارامترهای خاک در میرایی اضافه ولتاژ اعمال شده ناشی از صاعقه در حالت مدل فرکانس بالا و با حضور برقگیر مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲-۱- مدل ویسکارو

در این حالت پارامترهای موثر خاک وابسته به فرکانس بالای زمین را براساس روابط بیان شده در (۱۱) و (۱۲) مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. شکل (۱۱) اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل با مدل فرکانس بالای زمین با حضور برقگیر را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): اضافه ولتاژ روی مقره‌های دکل با مدل فرکانس بالای زمین (روش ویسکارو) با حضور برقگیر

همانگونه که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است در فاز ۲ بعد از مدت زمان کوتاهی به میرایی رسیده و قابلیت اطمینان شبکه دچار مشکل نمی‌شود و خطای در شبکه رخ نمی‌دهد اما در فاز C دارای اعوجاجی جهت میرایی هستیم.

- نتایج شبیه سازی نشان می دهد با در نظر گرفتن اثر مدل فرکانسی مقاومت خاک میزان اضافه ولتاژهای اندازه گیری شده ۱۱ درصد افزایش می یابد که برای محاسبه استقامت عایقی بسیار حائز اهمیت می باشد.

- همچنین نتایج شبیه سازی نشان می دهد در نظر گرفتن مدل فرکانس بالای گذردهی خاک میزان دامنه اضافه ولتاژها تا ۵ درصد افزایش می یابد که باید این موضوع در هماهنگی عایقی لحاظ گردد.

مراجع

- [1] J. P. L. Salvador, A. C. S. Lima, R. Alipio, and M. T. C. Barros, "Sensitivity analysis of frequency-dependent soil models based on rational approximation", *Electric Power Systems Research*, vol.196, no.3, pp. 503-600. 2021.
- [2] R. Andolfato, L. Bernardi, and L. Fellin, "Aerial and grounding systems analysis by the shifting complex images method". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.15, no.3, pp. 1001-1009.2000.
- [3] V. A. Toseva, L. Grcev, "Electromagnetic analysis of horizontal wire in two-layered soil". *Journal Of Computational and Applied Mathematics*, vol.168, no.1-2, pp. 21-29. 2004.
- [4] J. Cidras, A. F. Otero, and C. Garrido, "Nodal frequency analysis of grounding systems considering the soil ionization effect". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.15, no.1, pp. 103-107. 2000.
- [5] V. Doric, D. Poljak, and V. Roje, "Transient analysis of the grounding electrode based on the wire antenna theory". *Engineering Analysis With Boundary Elements*, vol.28, no.7, pp. 801-807. 2044.
- [6] Y. Gao, H. Jinliang, Z. Rong, and L. Xidong, "Impulse Transient Characteristic of Grounding Grid". *3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2002, pp. 276-280.
- [7] A. C. S. D. Lima, and C. Portela, "Inclusion of Frequency-Dependent Soil Parameters in Transmission - Line Modeling". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.22, no.1, pp. 492-499. 2007.
- [8] A. Geri, G. M. Veca, E. Garbagnati, and G. Sartorio, "Non-linear behavior of ground electrodes under lightning surge currents: computer modeling and comparison with experimental results". *IEEE Transaction on Magnetics*, vol.28, no.2, pp. 1442-1445. 1992.
- [9] Harrington, R.F., 2001. *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*. Wiley-IEEE Press. Heimbach, M., Grcev, L.D., 1997. Grounding system analysis in transients programs applying electromagnetic field approach. *IEEE Trans. Power Del.*, **12**(1):186-193. [doi:10.1109/61.568240].
- [10] A. K. Ghraivi, N. Ramezani, and K. Rashedi, "High Frequency Numerical Solution to Evaluate the Impedance of the Vertical Grounding Electrode Using an Accurate Mathematical Approach", *AUT Journal of Electrical Engineering*, vol.53, no.1, pp. 87-98. 2021.
- [11] O. E. Gouda, T. E. Saied, W. A. A. Salem, and A. M. A. Khater, "Evaluations of the apparent soil resistivity and the reflection factor effects on the grounding grid performance in three- layer

جدول (۴): مقایسه حداکثر اضافه ولتاژهای القایی صاعقه با مدلسازی سیستم زمین با گنجاندن وابستگی فرکانس بالای خاک در روش های مختلف

نقطه مشاهده	شکل ۱۰	فاز A	فاز B	فاز C
مقدار پیک	۳۹۵	۵۸۵	۲۳۱	
دامنه ولتاژ	۳۹۰	۵۸۰	۱۹۵	
(کیلوولت)	۳۹۰	۵۸۲	۲۲۵	
	۳۸۵	۵۷۷	۲۲۸	

با توجه به جدول (۴) و مقایسه بین آن ها بهترین روش مدل پیلیسکج بعلت دامنه ولتاژ بالا نسبت به بقیه روشها، انتخاب شده است.

۵- نتیجه

در این مقاله تأثیر عوامل موثر بر مدل های فرکانس بالای خاک در سیستم زمین در برابر اضافه ولتاژها صاعقه در نرم افزار EMTP-RV مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعات را می توان بشرح زیر بیان نمود

- مدل فرکانس بالای کلیه اجزای شبکه قدرت به همراه مدل های مختلف پارامترهای خاک برای یک شبکه نمونه در نرم افزار EMTP_RV پیاده سازی شده است و نتایج شبیه سازی نشان می دهد رفتار سیستم زمین به شدت وابسته به خصوصیات خاک مانند گذردهی خاک و مقاومت ویژه خاک (همراه با وابستگی به فرکانس آن ها) می باشد.

- نتایج شبیه سازی نشان می دهد در حالت (اول) وقتی که مقاومت زمین پای دکل ثابت در نظر گرفته شده است، مطابق آن قوس برگشتی در دو فاز از سه فاز (فاز میانی (B) و فاز پایینی (C)) رخ می دهد. همچنین در حالت (دوم) زمانی که مقاومت زمین پای دکل وابسته به فرکانس لحاظ شده است، نتایج نشان می دهد که قوس برگشتی تنها در فاز پایینی (فاز C) رخ می دهد و هیچ قوس برگشتی در فاز میانی (فاز B) رخ نمی دهد زیرا در این حالت ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیر مفره از ولتاژ بحرانی شکست مفره فراتر نرفته است. همچنین در حالت (سوم) که مقاومت زمین پای دکل وابسته به فرکانس لحاظ شده و یک برقیگر در پایین ترین فاز (فاز C) نصب شده است، نتایج نشان می دهد با نصب برقیگر مشکل این فاز هم حل شده و هیچ قوس برگشتی رخ نخواهد داد. نتیجه اینکه با بکارگیری روش وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک در مثال خاص، نیاز به یک برقیگر کمتر خواهد بود و در مقیاس شبکه بزرگ قدرت صرفه اقتصادی خوبی را به همراه خواهد داشت.

- soils". IET Science, Measurement & Technology, vol.13, no.4, pp. 572-581. 2019.
- [12] D. S. Gazzana, A. S. Bretas, G. A.D. Dias, M. Telló, D. W. Thomas, and C. Christopoulos, "The transmission line modeling method to represent the soil ionization phenomenon in grounding systems". IEEE Transactions on Magnetics, vol.50, no.2, pp. 701-704. 2014.
- [13] S. Piliškić, I. Uglešić, and B. Jurišić, "Evaluating the overvoltage performance of an overhead line taking into account the frequency-dependence of its tower's grounding electrodes with high soil resistivity". International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.116, no.4, pp. 105547-105552. 2020.
- [14] S. Visacro, and F. H. Silveira, "The impact of the frequency dependence of soil parameters on the lightning performance of transmission lines". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.57, no.3, pp. 434-441. 2015.
- [15] M. A. O. Schroeder, M. T. C. de Barros, A. C. S. Lima, M. M. Afonso, and R. A R. Moura, "Evaluation of the impact of different frequency dependent soil models on lightning overvoltages" و Electric Power Systems Research, vol.159, pp. 40-49. 2018.
- [16] D. Cavka, N. Mora, and F. Rachidi, "A comparison of frequency-dependent soil models: Application to the analysis of grounding systems". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.56, no.1, pp. 177-187. 2014.
- [17] X. S. Zhang, L. Dong, G. Q. Zeng, S. P. Huang, L. Wu, R. Xiong, and H. Wang, "Optimal Location of Surge Arresters on an Overhead Distribution Network by Using Binary Particle Swarm Optimization." 2018 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2018.
- [18] P. Unahalekhaka, "Simplified Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", Energy Procedia, Vol. 56, pp. 92 – 101, 2014.
- [19] W. Bassi, " High frequency input impedance modeling of low-voltage residential installations - influence on lightning overvoltage simulations results ", Springer Plus Journal, Vol. 3, no. 1, pp. 690 – 701, 2014