

Investigation and Electromagnetic Modeling of Earth Grid Islanding and Its Effect on Touch and Step Voltage Profile Variation Using Finite Element Method

A. Shemshadi^{1*}, A. R. Nasiri², P. Khorampour³

* Faculty member of Arak University of Technology, Arak, Iran

(Received: 31/07/2020; Accepted: 30/12/2020)

Abstract

The earth grid at high voltage substations should provide safety for people and normal equipment operation, therefore design calculations should be considered accurately. Step and touch voltages are among the items that affect people's safety at high voltage substations. Grounding is suitable so that in addition to having low electrical resistance to the ground, it does not increase the step and touch voltages. Among the factors that lead to an increase in the electrical resistance of the earth's grid is the tearing of the earth's grid due to factors such as corrosion of conductors. In this article we provide a description of the appropriate design of high voltage substations grid to simulate the overhead substation grid and its effect on step and touch voltages in Comsol Multiphysics software based on the finite element method. After performing the simulation, it is noticed that the step and touch voltages in the two- and three-piece earth's grid are much higher than the healthy earth's grid and about 48 times comparing with the normal grid.

Keywords: Electromagnetic Modeling, High Voltage Substation, Earthgrid, Step and Touch Voltages

بررسی و شبیه‌سازی چند پاره شدن شبکه زمین و تأثیر آن بر تغییر ولتاژهای گام و تماس در پست‌های فشارقوی با استفاده از روش اجزای محدود

اسعد شمشادی^{۱*}، علیرضا نصیری^۲، پوریا خرم‌پور^۳

۱- استادیار، ۲- دانشجوی کارشناسی، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰)

چکیده

وقوع خطاهایی نظیر اتصال کوتاه و عبور جریان‌های خطای نسبتاً بزرگ در شبکه‌های قدرت، امری اجتناب‌ناپذیر است، لذا طراحی شبکه زمین جهت تخلیه هر چه مناسب‌تر این جریان‌ها، باید با دقت کامل صورت پذیرد، به طوری که علاوه بر تأمین مقاومت مناسب باعث افزایش بی‌رویه ولتاژ گام و تماس نگردد. شبکه زمین در پست‌های فشارقوی بایستی ایمنی افراد و تجهیزات را تأمین نماید، لذا محاسبات طراحی و عملکرد صحیح و سالم شبکه باید با دقت مورد توجه قرار گیرد. ولتاژهای گام و تماس در پست‌های فشارقوی به شدت در حفظ ایمنی افراد تأثیرگذار می‌باشند، یکی از بدترین شرایطی که منجر به افزایش مقاومت الکتریکی کلی شبکه زمین می‌شود، چندپاره شدن شبکه زمین در اثر عواملی همچون خوردگی هادی‌ها می‌باشد. در این مقاله ضمن ارائه توضیحاتی پیرامون طراحی مناسب شبکه زمین پست فشارقوی، به شبیه‌سازی شبکه زمین یک پست فوق توزیع و اثر چندپاره شدن شبکه زمین در آن بر ولتاژهای گام و تماس در نرم‌افزار اجزای محدود COMSOL Multiphysics پرداخته شده است. پس از انجام و بررسی شبیه‌سازی ملاحظه شد که ولتاژهای گام و تماس در شبکه‌های زمین دو تکه و سه تکه بسیار بیشتر و پرخطرتر نسبت به شبکه زمین سالم بوده و به طور خطرناکی تا بیش از ۴۸ مقدار اولیه برابر می‌توانند افزایش یابند.

کلید واژه‌ها: شبیه‌سازی الکترومغناطیسی، پست فشارقوی، شبکه زمین، ولتاژهای گام و تماس، روش اجزای محدود.

۱- مقدمه

مناسب نباشد، هنگام وقوع صاعقه باعث به وجود آمدن مشکلی به نام Back Flashover شده که در نهایت اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه به جای انتقال به زمین به دو سر مقره‌های فشارقوی اعمال شده و در نتیجه قدرت عایقی آن‌ها را از بین خواهد برد. [۱،۲]

۲- شبکه زمین در پست‌های فشارقوی

به منظور حفاظت افراد و دستگاه‌ها، اضافه ولتاژهای تولید شده در بدنه که باعث صدمه دیدن دستگاه‌ها و افراد می‌شود، همچنین ولتاژهای بسیار زیاد و خطرناک ناشی از برخورد صاعقه با دکل‌های رایانه‌ای و فشارقوی را باید در جایی خنثی کنیم. به همین منظور، استفاده از شبکه زمین و حفاظت از تجهیزات بسیار لازم و ضروری است به علاوه با افزایش استفاده از سامانه‌های دیجیتال و حساس، لزوم بازنگری در طراحی، نصب و نگهداری سامانه‌های حفاظتی وجود دارد. اهداف نصب شبکه زمین عبارتند از:

الف) اطمینان از قابلیت کار الکتریکی

ب) جلوگیری از ولتاژ تماسی^۱ و ولتاژگامی^۲

ج) جلوگیری از اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه

د) حفاظت و ایمنی وسایل و تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی.

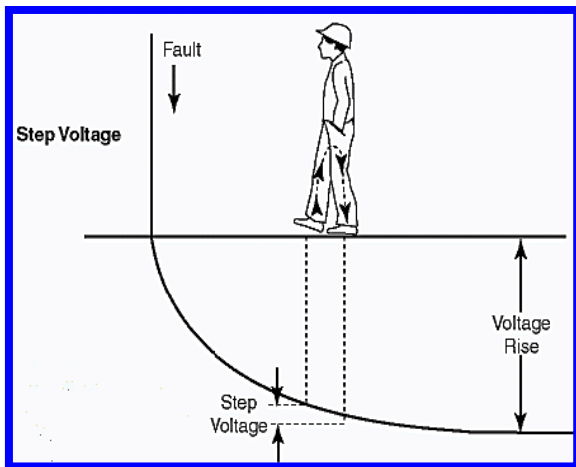
شبکه زمین یکی از قسمت‌های مهم در خطوط انتقال و پست‌های فشارقوی می‌باشد. هدف اصلی از اتصال زمین تجهیزات و ایجاد شبکه زمین، تأمین ایمنی کافی برای کسانی است که با این تجهیزات در تماس می‌باشند. همچنین تأمین حفاظت کافی برای تجهیزات الکتریکی، در برابر زوال یا خرابی آن‌ها از دیگر اهداف احداث شبکه زمین می‌باشد. لذا بخشی از طراحی‌ها و عملیات مهندسی پست‌های فشارقوی، طراحی شبکه زمین و اتصال بدنه تجهیزات و اسکلت‌های فلزی می‌باشد. به این ترتیب، کلیه تجهیزات نصب شده بر روی زمین، تحت ولتاژ یکسانی، معادل با ولتاژ زمین واقع می‌شوند. توجه نکردن به طراحی اصولی شبکه زمین و یا آسیب دیدن شبکه زمین در اثر خوردگی هادی‌های آن که منجر به باز شدن اتصالات هادی‌های شبکه از هم گردیده و در نتیجه افزایش مقاومت الکتریکی شبکه زمین، می‌تواند مشکلات زیادی را فراهم کند. همچنین که شبکه زمین نامناسب در پست‌های فشارقوی منجر به افزایش ولتاژ گام و تماس شده و ایمنی افراد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در خطوط انتقال نیز در صورتی که مقاومت الکتریکی پای دکل

* نویسنده مسئول: shemshadi@arakut.ac.ir

¹ Touch Voltage

² Step Voltage

به قسمتی از ولتاژ شبکه زمین در حالت عملکرد که توسط دوپا تقریباً یک متر برداشته می‌شود.



شکل (۱): ولتاژ گام.

$$E_{step50} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0/116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0/157}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

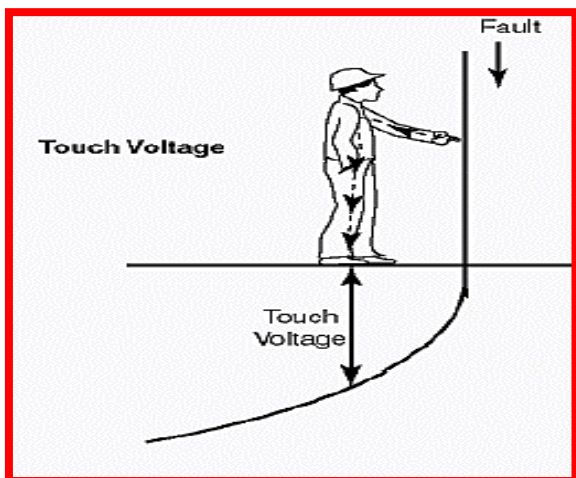
ρ_s : مقاومت مخصوص سنگریزه‌ها

C_s : ضریب کاهش حد مجاز لایه سطحی

t_s : زمان عملکرد رله های حفاظتی (s)

۴-۲-۲- IEEE80 ولتاژ تماس مناسب بر اساس استاندارد

عبارت است از قسمتی از ولتاژ شبکه زمین در حالت عملکرد که توسط انسان برداشته می‌شود.



شکل (۲): ولتاژ تماس.

۱-۲- زمین حفاظتی^۱

عبارت است از، زمین کردن کلیه قطعات فلزی تاسیسات فشارقوی که در ارتباط مستقیم با مدار الکتریکی قرار ندارند. به طوری که تماس بدن انسان با هر یک از این قطعات در هنگام بروز اتصالی جریان، با هیچ مشکلی مواجه نگردد.

۲-۲- زمین الکتریکی^۲

به‌عنوان بخشی از مدار الکتریکی شبکه قدرت، مسیری امن جهت تخلیه جریان‌های خطا یا جریان عدم تعادل عبوری از نول‌ساز را فراهم می‌کند. مانند زمین کردن مرکز ستاره سیم‌پیچی مبدل‌های قدرت و یا ژنراتورها.

شبکه زمین در پست‌های فشارقوی به لحاظ الکتریکی باید دارای مقاومت الکتریکی کمی بوده و همچنین ولتاژ گام و ولتاژ تماس مجاز را تأمین کند که در ادامه به توضیح مختصر این سه عامل پرداخته خواهد شد.

۱-۲-۲- مقاومت کلی شبکه (R_G)^۳

مقاومت شبکه زمین نسبت به زمین ایده‌آل باید در پست‌های فوق توزیع کمتر از 2Ω و در پست‌های انتقال کمتر از 1Ω باشد. مهمترین مرحله در طراحی شبکه زمین، محاسبه مقاومت الکتریکی شبکه زمین است. به کمک معادله سوراخ می‌توان مقاومت الکتریکی شبکه زمین را محاسبه نمود.

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20} A'} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A'}}} \right) \right] \quad (1)$$

مقاومت زمین پست ($R_G(\Omega)$):

A' : مساحت ناحیه اشغال شده توسط شبکه زمین (m^2)

L_T : طول کل هادی های دفن شده (m)

h : عمق شبکه زمین (m)

ρ : مقاومت خاک بر حسب ($\Omega.m$)

۲-۲-۲- حداکثر ولتاژ شبکه زمین (GPR)^۴

حداکثر مقدار پتانسیل الکتریکی که شبکه زمین یک پست فشارقوی می‌تواند نسبت به زمین دوردست اختیار کند.

$$GPR = I_{SC} \times R_G \quad (2)$$

که در آن:

I_{SC} : بیشترین جریان اتصال کوتاه (A)

R_G : مقاومت شبکه زمین (Ω)

۳-۲-۲- ولتاژ گامی مناسب بر اساس استاندارد IEEE80

¹ Protective earthing

² Electrical earthing

³ Resistor Ground

⁴ Grounding potential rise

به زمین، $(3I_0)$ به‌عنوان بیشترین جریان عبوری از شبکه زمین در نظر گرفته می‌شود. در اکثر موارد در نظر گرفتن ۷۰ درصد حداکثر جریان فاز به زمین، به‌عنوان جریان هادی‌های شبکه زمین مناسب می‌باشد $(I = 0/7 \times 3I_0)$.

۴- عوامل فرسودگی شبکه زمین

الف) خورده شدن هادی‌های مسی در اثر وجود یون‌های کلردار و سولفات در خاک
ب) عبور جریان‌های عدم تعادل از شبکه زمین.

اصولاً شبکه زمین در پست‌های فشارقوی برای عبور جریان‌های بزرگ اتصال کوتاه ولی به صورت گذرا طراحی می‌شوند. هر یک از موارد (الف و ب) در نهایت منجر به از بین رفتن هادی‌های شبکه زمین شده و در نتیجه باعث جدایی قسمتهایی از شبکه زمین از یکدیگر می‌شوند. با چندان پاره شدن شبکه زمین مقاومت الکتریکی آن افزایش یافته و عامل GPR نیز افزایش خواهد یافت.

۵- روش اجزای محدود (FEM)^۱

در سال‌های اخیر روش اجزای محدود در حل مسائل مربوط به میدان‌های ناهمگن ساکن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اساساً همه سامانه‌ها برای رسیدن به پایداری تمایل به کمینه کردن انرژی خود دارند. اساس این روش نیز بر این است که شکل میدان طوری باید باشد که انرژی آن حداقل شود. در حالیکه معمولاً در ریاضیات برای به‌دست آوردن کمیت‌های حدی به جستجوی مقادیری از X پرداخته می‌شود، که به ازای آن‌ها $f(x)$ مقدار حداکثر یا حداقل به خود بگیرد، در این روش تابعی دنبال می‌شود، که خود مستقیماً نشان‌دهنده مقدار حداقل یا حداکثر است $X=f(x)$.

بدیهی است که در هر دو صورت حل مسئله از راه مشتق‌گیری و برابر صفر قرار دادن تابع عملی می‌شود. از روابط الکتریسیته مبرهن است که انرژی ذخیره شده در میدان الکتریکی بین دو الکتروود خود تابعی از میدان است و همچنین بار الکتریکی موجود بر روی الکتروودها چنان تقسیم می‌گردد که انرژی ذخیره شده در میدان حداقل باشد. از طرفی انرژی ذخیره شده در یک جزء حجمی ΔV از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$W_{\Delta V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \int_{\Delta V} E^2(r) dv \quad (9)$$

که در آن، $W_{\Delta V}$ انرژی ذخیره شده در جزء حجمی، $E(r)$ شدت میدان الکتریکی در راستای بردار $I(x,y,z)$ و ϵ_r ضریب

$$E_{touch70} = (1000 + 1/5 \rho_s C_s) \frac{0/157}{\sqrt{t_s}} \quad (5)$$

$$E_{touch50} = (1000 + 1/5 \rho_s C_s) \frac{0/157}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

ρ_s : مقاومت مخصوص سنگریزه‌ها

C_s : ضریب کاهش حد مجاز لایه سطحی

t_s : زمان عملکرد رله‌های حفاظتی (s) [۴]

۳- محاسبه سطح مقطع هادی‌های شبکه زمین

با استفاده از رابطه زیر (IEEE80-2000)، با در نظر گرفتن محدودیت حرارتی هادی‌های زمین و حداکثر جریان مجاز هادی سطح مقطع مناسب هادی‌های زمین، محاسبه می‌گردد.

$$A = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{T_m + K_0}{T_a + K_0}\right)}} \quad (7)$$

و

$$TCAP[J/(cm^3 \cdot ^\circ C)] = 4.18(J/cal).SH[cal/(gr \cdot ^\circ C).SW(gr/cm^3)] \quad (8)$$

در رابطه (۸)، SH گرمای ویژه هادی و SW وزن مخصوص آن است. سایر شاخص‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

I : حداکثر جریان اتصال کوتاه موثر (kA)

A : سطح مقطع هادی (mm^2)

T_m : حداکثر درجه حرارت مجاز هادی ($^\circ C$)

T_a : دمای محیط ($^\circ C$)

T_r : درجه حرارت مرجع ($^\circ C$)

ρ_r : مقاومت ویژه هادی‌های زمین در درجه حرارت مرجع ($\mu\Omega.cm$)

K_0 : ضریب $\alpha_r / (^\circ C)$

α_r : ضریب حرارتی مقاومت هادی در درجه حرارت مرجع ($1/^\circ C$)

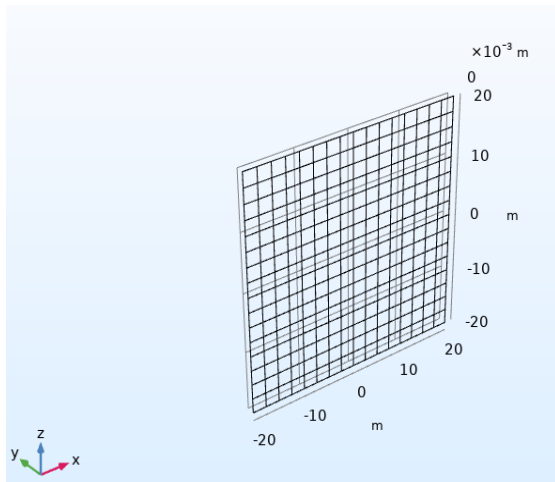
α_0 : ضریب حرارتی مقاومت هادی در درجه حرارت صفر درجه ($1/^\circ C$)

t_c : زمان تداوم جریان خطا در هادی شبکه زمین (sec)

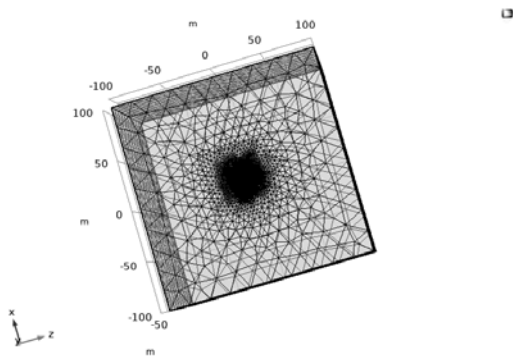
حداکثر درجه حرارت مجاز برای اتصالات با جوش احتراقی تقریباً ۱۰۸۳ درجه سانتی‌گراد (دمای ذوب مس) و برای اتصالات پیچ و مهره‌ای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد است. درجه حرارت مرجع برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود.

با توجه به اینکه جریان اتصال کوتاه در هنگام وارد شدن به شبکه زمین، به چند قسمت تقسیم می‌شود، کسری از جریان فاز

^۱ Finit Element Method

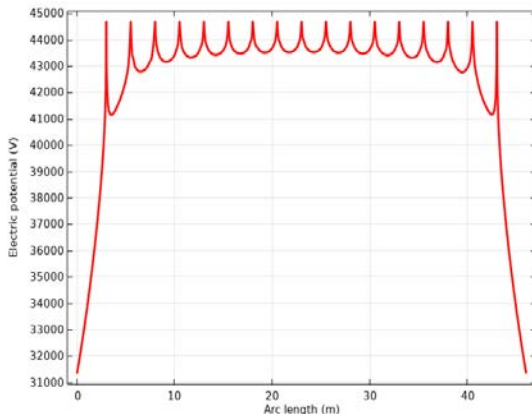


شکل (۳): شبکه زمین سالم (بدون پارگی).



شکل (۴): مش بندی شبکه زمین سالم.

شکل (۴) مش بندی شبکه زمین و اطراف آن را که اصول کار نرم افزار کامسول مبتنی بر آن است، نمایش می دهد.



شکل (۵): ولتاژ سطح زمین در شبکه زمین سالم.

همان طور که در قسمت ۶ گفته شد، مساحت شبکه زمین مطابق شکل (۳)، 1600 m^2 می باشد. از آنجا که سطح جریان اتصال کوتاه در پست های فوق توزیع $31/5 \text{ kA}$ می باشد، لذا این سطح جریان به نقطه ای از شبکه تزریق می گردد، که در نتیجه ولتاژ ایجاد شده در سطح زمین مطابق شکل (۵) خواهد شد.

گذردهی نسبی می باشد. با توجه به رابطه زیر که در آن $\varphi(r)$ پتانسیل در محل r می باشد،

$$E(r) = -grad \varphi(r) \quad (10)$$

و اگر متغیر در محور Z بدون تغییر بماند، می شود به میدانی دو بعدی اکتفا کرد و داریم:

$$W_{\Delta V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \Delta Z \int_{\Delta A} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] dA \quad (11)$$

اگر تقسیمات میدان به اندازه کافی کوچک انجام گیرد خواهیم داشت:

$$W_{\Delta V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \Delta Z \cdot \Delta A \cdot \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$\frac{W_{\Delta V}}{\Delta Z} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \Delta A \cdot \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (13)$$

کسر بالا به صورت زیر نامگذاری می گردد:

$$X_{\Delta A} = f(\varphi_{\Delta A}(x; y)) \quad (14)$$

بنابراین، مجموع تمامی X ها یعنی $\sum \frac{W_{\Delta V}}{\Delta Z}$ خود تابعی از کل محدوده میدان می باشد [۵].

۶- مدل سازی چند پارگی شبکه زمین

برای شبیه سازی در نرم افزار شبیه سازی کامسول، شبکه زمینی به مساحت 1600 m^2 ترسیم می شود.

جنس هادی های شبکه زمین از مس با سطح مقطع 95 mm^2 بوده و جنس مکعبی که ابعاد آن ۵ برابر ابعاد شبکه زمین است از خاک با مقاومت ویژه $150 \Omega \cdot \text{m}$ می باشد.

از آنجا که سطح جریان اتصال کوتاه در پست های فشارقوی $63/20 \text{ kV}$ ، 31500 A است، لذا به بخشی از شبکه زمین (قسمت کوچکی نزدیک به مرکز شبکه) جریان خطای $31/5 \text{ kA}$ را تزریق کرده و همچنین به سایر وجوه مکعب، به جز وجهی که شبکه زمین بر آن منطبق است، ولتاژ صفر اعمال می شود. سپس شبکه زمین مش بندی می گردد.

شبیه سازی در سه حالت سالم بودن دو تکه شدن و سه تکه شدن شبکه زمین انجام می پذیرد.

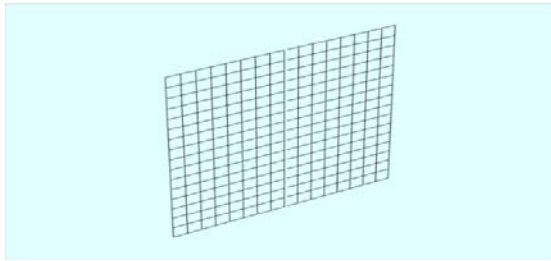
۶-۱- شبیه سازی شبکه زمین سالم

مطابق شکل (۳ و ۴) شبکه زمین سالم در محیط نرم افزار پیاده سازی و مش بندی شده است.

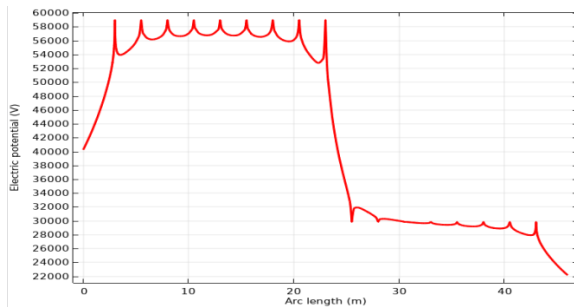
شویم پتانسیل افزایش چشمگیری خواهد داشت. همچنین پتانسیل به صورت موزون در تمام سطح شبکه پخش شده است.

۶-۲- شبیه‌سازی شبکه زمین دو تکه

مطابق شکل (۷) شبکه زمین دو تکه با محل پارگی در وسط شبکه را در محیط نرم‌افزار پیاده‌سازی می‌نماییم.



شکل (۷): شبکه زمین دو تکه.



شکل (۸): ولتاژ سطح زمین در شبکه زمین دو تکه.

از آنجا که قرار است تزریق جریان، در شبکه دو تکه، در همان نقطه که در شبکه سالم انجام پذیرفت، انجام شود، بالطبع در شبکه زمین شامل دو پارگی، که به دو بخش مجزا تقسیم شده، جریان تنها به یک بخش تزریق می‌شود و نه در هر دو بخش، لذا عملاً بخشی از مساحت شبکه زمین بی اثر بوده و در نتیجه، طبق رابطه (۱) مقاومت اهمی شبکه افزایش خواهد یافت، و طبق رابطه (۲) GPR نیز متأثر از این افزایش مقاومت اهمی، افزایش خواهد یافت، که این امر از نمودار شکل (۸) کاملاً مشهود است.

باتوجه به شکل (۸) و توضیحات فوق، ملاحظه می‌شود که در شبکه دو تکه شده، مقدار GPR نسبت به شبکه سالم افزایش یافته است.

$$\text{ولت} = 58560 = \text{شبکه دو تکه } GPR$$

ولتاژهای گام و تماس نیز در شبکه زمین دو تکه مطابق با آنچه که در نحوه یافتن آن‌ها در شبکه زمین سالم قید گردید، به دست می‌آیند که در جدول (۲) بخش ۸ ثبت شده‌اند.

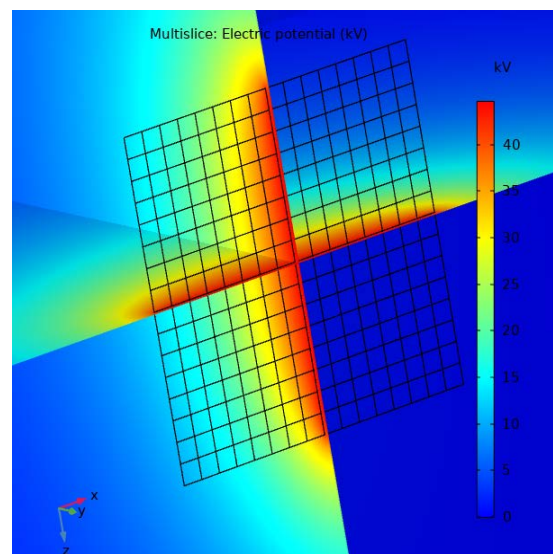
بخشی از منحنی ولتاژ که در آن به‌طور ناگهانی سطح ولتاژ شدیداً افت یافته است، دقیقاً همان محل پارگی شبکه است. واضح و مبرهن است قسمتی از شبکه که تحت تأثیر جریان

شکل (۵) ولتاژ سطح زمین در شبکه سالم بدون پارگی را نمایش می‌دهد. جهت به دست آوردن ولتاژ گام، با بزرگنمایی روی شکل (۵) اختلاف پتانسیل نقاطی به فاصله ۱ m از هم را در نقاط مشابه پارگی شبکه‌های دو و سه تکه به دست می‌آوریم. همچنین برای به دست آوردن ولتاژ تماس پتانسیل نقطه‌ای در سطح زمین را از نمودار فوق یافته و از پتانسیل نقطه‌ای که دقیقاً بر روی شبکه است کم می‌کنیم که در قسمت نتایج بحث می‌گردد.

$$\text{ولت} = 44700 = \text{شبکه سالم } GPR$$

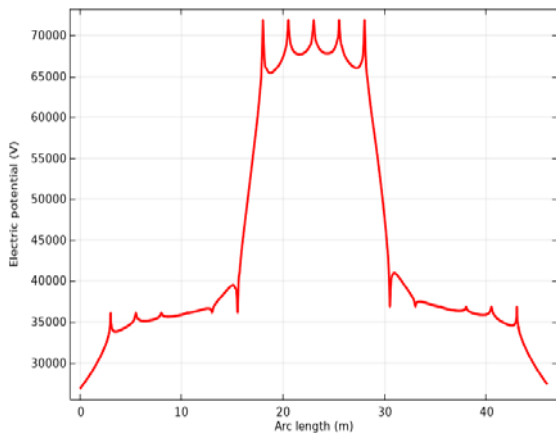
باتوجه به نمودار شکل (۵)، ملاحظه می‌شود که ولتاژ سطح زمین در نقاطی که دورتر از سطح منطبق بر شبکه زمین است کاهش می‌یابد. هر چه فاصله هادی‌های شبکه زمین به هم نزدیکتر باشند و به عبارتی اضلاع مربع‌های شبکه زمین کوچکتر باشند قسمت‌های U شکل منحنی ولتاژ باریک‌تر می‌شود. که در نتیجه ولتاژهای گام و تماس نیز به دلیل کمتر شدن اختلاف ولتاژ نقاط مختلف کاهش می‌یابد. اولین و آخرین بخش منحنی که دارای مقدار بیشینه ولتاژ است، خطرناک‌ترین نقاط به لحاظ ولتاژهای گام و تماس می‌باشند.

لازم به ذکر است این پروفیل ولتاژ در سطح زمین و خطی به طول ۴۶ m که تصویر این خط تقریباً از هر طرف شبکه زمین ۳ متر امتداد یافته و کل شبکه زمین را در راستای یک خط در بر می‌گیرد، حاصل شده است. این عمل عیناً برای شبکه‌های دو تکه و سه تکه نیز تکرار گردیده و پروفیل ولتاژ از نقاط پارگی در شبکه‌های دو تکه و سه تکه نیز عبور می‌کند.



شکل (۶): پتانسیل شبکه زمین سالم و اطراف آن.

با توجه به شکل (۶) و شاخص آن ملاحظه می‌گردد که پتانسیل در نقاط نزدیک به شبکه زمین بیشتر از نقاط دورتر از شبکه زمین است. به طوری که هر چه به شبکه زمین نزدیکتر



شکل (۱۱): ولتاژ سطح زمیندر شبکه زمین سه تکه.

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، از آنجا که قرار است تزریق جریان، در شبکه سه تکه، در همان نقطه که در شبکه سالم و شبکه دو تکه انجام پذیرفت، انجام شود، بالطبع در شبکه زمین دچار سه پارگی شده، که به سه بخش مجزا تقسیم شده، جریان تنها به یک بخش تزریق می‌شود و نه هر سه بخش، لذا عملاً بخش عمده‌ای از مساحت شبکه زمین بی‌اثر بوده و در نتیجه، طبق رابطه (۱) مقاومت اهمی شبکه افزایش خواهد یافت، و طبق رابطه (۲) GPR نیز متأثر از این افزایش مقاومت اهمی، افزایش خواهد یافت، که این امر از نمودار شکل (۱۱) کاملاً مشهود است.

باتوجه به شکل (۱۱) و توضیحات فوق، ملاحظه می‌شود که در شبکه سه تکه شده، مقدار GPR نسبت به شبکه سالم و شبکه دو تکه، افزایش یافته است.

$$\text{ولت شبکه سه تکه} = 73200 = GPR$$

به مانند شبکه دو تکه، ولتاژهای گام و تماس نیز در شبکه زمین سه تکه مطابق با آنچه که در نحوه یافتن آن‌ها در شبکه زمین سالم قید گردید، بدست می‌آیند که در جدول (۳) بخش ۸ ثبت شده‌اند.

باتوجه به نمودار شکل (۱۱) سطح ولتاژ در محل‌های پارگی شبکه زمین افت محسوسی داشته که به لحاظ ولتاژهای گام و تماس محل‌های خطرناکی است.

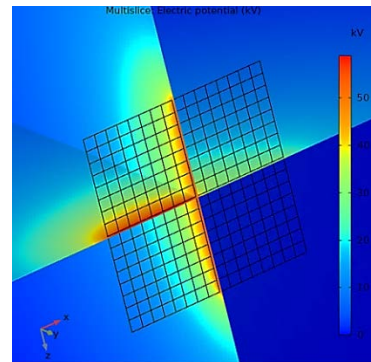
قسمت‌هایی از نمودار که ولتاژ در آن‌ها حالت U شکل دارد و مانند پروفیل ولتاژ شکل (۵) می‌باشد، همان محل یکپارچه از شبکه است که متأثر از جریان خطا بوده و در محل‌های پارگی و قسمت‌های جداشده از قسمت متأثر از جریان خطا، سطح ولتاژ دچار کاهش فاحشی می‌گردد. سطح ولتاژ در نقاط دورتر از محل تزریق جریان خطا در شبکه زمین، کاسته و کاسته‌تر می‌شود.

اتصال کوتاه نمی‌باشد، دارای سطح ولتاژ کمتری بوده و هر چه از سطح منطبق بر قسمت متأثر از جریان خطا دورتر می‌شویم، سطح ولتاژ کاسته می‌شود و در خارج از سطح منطبق بر شبکه زمین این ولتاژ ناچیز می‌شود.

علاوه بر نقاط ابتدا و انتهای شبکه زمین، محل پارگی شبکه نیز به علت تغییر بسیار زیاد ولتاژ نقطه خطرناکی به لحاظ ولتاژ گام و تماس می‌باشد.

رفتار پروفیل ولتاژ تا محل پارگی، مانند شبکه زمین سالم است

ولیکن در محل پارگی و بعد از آن شروع به کاهش یافتن می‌کند.

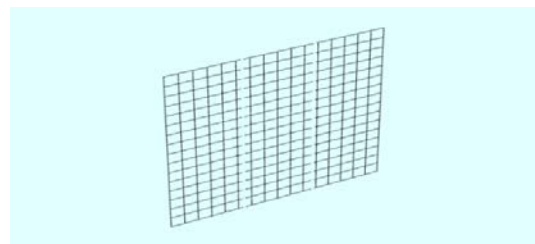


شکل (۹): پتانسیل شبکه زمین دوتکه و اطراف آن.

شکل (۹) پتانسیل شبکه زمین دو تکه را پس از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، که در نزدیکی شبکه زمین این پتانسیل بیشتر است. همچنین در سطح شبکه زمین پتانسیل در محل پارگی و بعد از آن که آن بخش از شبکه زمین جدا شده و متأثر از جریان خطا نمی‌باشد به شدت کاهش یافته است (سمت راست محور افقی). به عبارتی در قسمتی از شبکه که تزریق جریان در آنجا بوده تا محل رخداد پارگی پتانسیل قوی‌تر و بیشتر است (سمت چپ محور افقی).

۳-۶- شبیه‌سازی شبکه زمین سه تکه

مطابق شکل (۱۰) شبکه زمین سه تکه با پارگی به سه قسمت مساوی در محیط نرم‌افزار پیاده‌سازی می‌گردد.



شکل (۱۰): شبکه زمین سه تکه.

شکل (۱۱) ولتاژ سطح زمین در شبکه با سه تکه پارگی را نمایش می‌دهد.

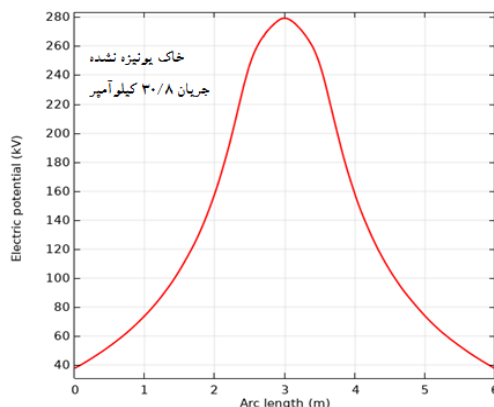
مقاله مرجع [۶] در شکل (۱۵) آورده شده است.

مقدار GPR در شکل (۱۳) که جریان خطا A ۳۰۸۰۰ است ، ۲۸۰ kV و در شکل شماره ۱۵ (منحنی الف) ۲۹۰ kV می‌باشد. که نتایج به میزان ۹۷٪ تطابق نشان می‌دهند.

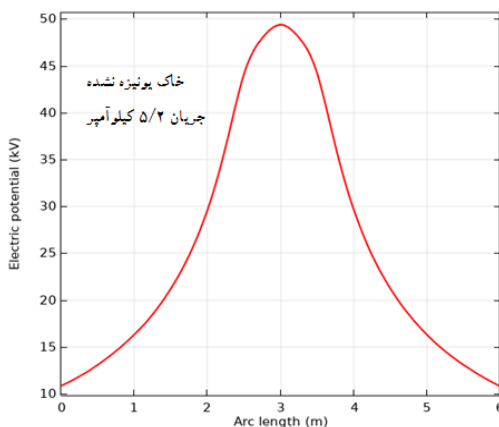
همچنین مقدار GPR در شکل (۱۴) که جریان خطای تزریقی ۵۲۰۰ آمپر است تقریباً ۵۰ kV و در شکل (۱۵) منحنی ب) تقریباً ۴۹ kV می‌باشد. که بیش از ۹۸٪ تطابق نشان می‌دهد.

از دیگر سو روند شیب نمودارها و شکل کلی آن‌ها نیز بسیار به یکدیگر شبیه می‌باشند. برای مثال در منحنی شکل (۱۳) و در فاصله (۳) متری از مرکز شبکه میزان پتانسیل ۳۹ kV به‌دستی‌آید که دقیقاً منطبق بر نتیجه ارائه شده در مرجع [۶] (شکل ۱۵-الف) می‌باشد. همین نتیجه از مقایسه دو شکل (۱۴) و شکل (۱۵) منحنی ب) نیز قابل استنباط است.

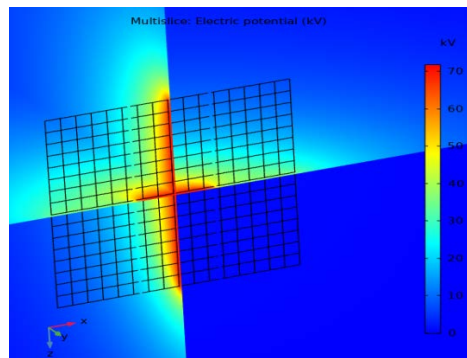
از مقایسه این نتایج و تشابه زیاد آن‌ها با مقاله مرجع [۶] می‌توان نتیجه گرفت که روش مورد استفاده در این مقاله صحیح بوده و نتایج ارائه شده از شبیه‌سازی‌ها قابل اطمینان می‌باشند.



شکل (۱۳): منحنی ولتاژ استخراج شده پس از شبیه‌سازی شبکه زمین در حالت خاک غیر یونیزه و جریان خطای ۳۰/۸ kA.



شکل (۱۴): منحنی ولتاژ استخراج شده پس از شبیه‌سازی شبکه زمین در حالت خاک غیر یونیزه و جریان خطای ۵/۲ kA.



شکل (۱۲): پتانسیل شبکه زمین سه تکه و اطراف آن.

شکل (۱۲) پتانسیل شبکه زمین سه تکه را پس از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. که پتانسیل در اطراف شبکه زمین بیشتر است.

ملاحظه می‌کنیم که آن قسمت از شبکه زمین که بین دو محل پارگی قرار دارد و تزریق جریان خطا در آنجا انجام شده است پتانسیل به شدت زیاد است. و در قسمت‌هایی از شبکه زمین که توسط ایجاد پارگی از محل تزریق جریان خطا جدا شده‌اند پتانسیل کاهش شدیدی داشته است. از هر سه شکل (۶، ۹ و ۱۲) مبرهن است که هر چه شبکه زمین دارای پارگی‌های بیشتری باشد پتانسیل الکتریکی در سطح شبکه زمین، در قسمتی از شبکه زمین که مستقیم به جریان خطا وصل است، متمرکزتر و بیشتر خواهد بود (با توجه به میله شاخص). چنانچه مقدار پتانسیل الکتریکی در مرکز شبکه زمین سالم تقریباً ۴۴ kV در مرکز شبکه زمین دو تکه ۵۸ kV و در مرکز شبکه زمین سه تکه ۷۳ kV می‌باشد. که این خود دال بر این است که با افزایش تعداد پارگی در شبکه زمین GPR نیز افزایش خواهد یافت.

۷- اعتبارسنجی و مقایسه

جهت انجام مقایسه و صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی‌های صورت گرفته، از مقاله مرجع [۶] و نتایج ارائه شده در شکل (۷) آن استفاده گردید و شبیه‌سازی شبکه زمین در نظر گرفته شده در مرجع [۶]، با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام پذیرفت. شبکه زمین مرجع [۶]، شبکه‌ای به مساحت ۱ مترمربع است، که به چهار خانه مساوی با ابعاد ۰/۵×۰/۵ متر تقسیم شده (اضلاع هر خانه ۰/۵ m می‌باشد) این شبکه در عمق ۵۰ cm سطح زمین مدفون گردیده و مقاومت ویژه خاک ۴۳/۵ Ω.m فرض شده است. مطابق مقادیر پارامترهای لحاظ شده در مرجع [۶]، به این شبکه یک بار جریان خطای ۳۰۸۰۰ آمپر و یک بار هم جریان خطای ۵۲۰۰ A تزریق شده است. پروفیل‌های ولتاژ برای هر جریان به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نمایش داده شده‌اند. جهت انجام مقایسه این منحنی‌ها با مقاله مرجع، شکل (۷) از

*در تمام نمودارهای بخش قبل مشاهده می‌شود، که پس از این که از سطح زمین منطبق بر شبکه زمین عبور می‌شود، ولتاژ به شدت افت پیدا می‌کند. یعنی انتهای شبکه زمین نقطه خطرناک تری به لحاظ ولتاژهای گام و تماس می‌باشد.

* علاوه بر نقاط ابتدا و انتهای شبکه زمین، نقاط پارگی شبکه زمین نیز از نظر ولتاژهای گام و تماس بسیار خطرناک می‌باشند.

* هرچه شبکه سالم‌تر باشد، یعنی مقاومت الکتریکی آن کمتر باشد، در هنگام بروز خطایی مانند اتصال کوتاه در شبکه قدرت و تخلیه جریان خطا در شبکه زمین، بیشینه ولتاژ شبکه زمین کمتر از حالتی خواهد بود که شبکه دچار چند پارگی شده باشد. یعنی GPR شبکه سالم کمتر از GPR شبکه چند پاره است.

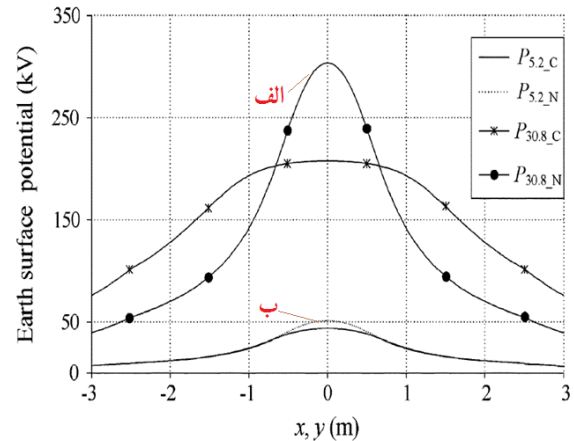
۹- نتیجه گیری

بر اساس مدل سازی‌های صورت گرفته در این مقاله، پدیده چندپارگی شبکه زمین در پست‌های فشارقوی با توجه به عدم امکان رویت شبکه زمین می‌تواند باعث رخداد پیامدهای بسیار خطرناک ولتاژهای گامی بالاتر از مقادیر قابل قبول توسط استانداردها گردد. هر چه میزان چندپارگی شبکه بیشتر باشد (مثلاً سه پاره شدن در مقایسه با دو پاره شدن)، شدت افزایش ولتاژهای خطرناک گامی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. با توجه به این قضیه، مسئله پایش دائم وضعیت شبکه زمین که می‌تواند با استفاده از تغییر مقاومت کلی شبکه محک زده شود، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد که در حال حاضر در شبکه برق کشور چندان مورد توجه قرار نمی‌گیرد. از دیگر سو تولید ولتاژهای بالای گذرا در زمان رخداد اتصال کوتاه می‌تواند به تجهیزات درون تابلوهای پست فشارقوی که بدنه آن‌ها زمین شده است، آسیب فراوانی وارد نماید.

۱۰- پیشنهادات

* در صورتی که بتوان عامل c_s را افزایش داد، حداکثر ولتاژ گام و تماس قابل تحمل افزایش می‌یابد. از آنجا که c_s ارتباط مستقیمی با ارتفاع سنگ‌ریزه‌ها در سطح پست دارد لذا می‌توان برای این کار ارتفاع سنگ‌ریزه‌های ریخته شده در سطح پست را افزایش داد.

* خطرناک‌ترین قسمت شبکه زمین به لحاظ ولتاژگام و تماس نقاط ابتدا و انتهای شبکه زمین و همچنین نقاطی که دچار پارگی شده‌اند، می‌باشد. جهت پیشگیری از هرگونه خطر احتمالی بهتر است در نقاط حاشیه شبکه زمین، علایم هشدار نصب گردد و یا حداقل امکان از عبور در این نقاط خودداری شود.



شکل (۱۵): شکل (۷) مربوط به مقاله مرجع شماره [۶] (منحنی‌های الف و ب) مربوط به حالت خاک غیر یونیزه و به ترتیب جهت جریان‌های ۳۰/۸ kA و ۵/۲ kA می‌باشند)

۸- بحث و بررسی

با استفاده از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، نتایج جهت مقایسه مقدار GPR و ولتاژهای گامی و تماسی در جدول‌های (۳-۱) تنظیم شده‌اند.

جدول (۱): مقایسه GPR برای سه نوع شبکه زمین.

نوع شبکه	سالم	دو تکه	سه تکه
GPR (V)	۴۴۷۰۰	۵۸۵۶۰	۷۳۲۰۰

جدول (۲): مقایسه ولتاژهای گام و تماس برای شبکه زمین سالم و دو تکه.

نوع ولتاژ / نوع شبکه	ولتاژ گام (ولت)	ولتاژ تماس (ولت)
شبکه سالم	۳۰۰	۸۴۳
شبکه دو تکه	۹۵۱۷	۱۶۰۰۵/۹
درصد افزایش	٪۳۰۷۲	٪۱۷۹۸

جدول (۳): مقایسه ولتاژهای گام و تماس برای شبکه زمین سالم و سه تکه.

نوع ولتاژ / نوع شبکه	ولتاژ گام (ولت)	ولتاژ تماس (ولت)
شبکه سالم	۲۴۴/۵	۷۰۷
شبکه سه تکه	۱۲۱۷۵/۵	۲۰۳۴۹/۸
درصد افزایش	٪۴۸۷۹	٪۲۷۷۸

* پستی که شبکه زمین آن سالم می‌باشد، با توجه به این که مقاومت الکتریکی کمتری را دارا بوده، در هنگام رخداد خطاهای بر روی شبکه، اعم از اتصال کوتاه و صاعقه و ... ولتاژ گام و تماس کمتری دارد. هنگامی که شبکه دچار چند پارگی می‌شود، ولتاژ گام و تماس افزایش می‌یابد.

۱۱- مراجع

- ❖ بهتر است مقاومت شبکه زمین و اتصالات آن، به صورت دوره‌ای بررسی گردد و در صورت امکان هادی‌های فرسوده تعویض گردند.
- ❖ در مرحله طراحی شبکه زمین پست روند توسعه پست را حتماً باید لحاظ کرد. چرا که در صورت توسعه یافتن پست و اضافه شدن تجهیزاتی که باید جریان خطای آن‌ها از شبکه زمین سابق عبور کند، هادی‌های شبکه زمین در اثر عبور جریان اضافی فرسوده شده و مقاومت الکتریکی شبکه زمین افزایش یابد در نتیجه، ادامه این روند باعث فرسودگی بیشتر آن‌ها می‌گردد.
- ❖ پیشنهاد می‌گردد از فاکتور افزایش ولتاژ گامی جهت آشکارسازی وجود عیب چندپاره شدن شبکه زمین استفاده شود. با استفاده از اندازه‌گیری میدانی و بررسی دقیق پروفیل سطحی ولتاژ پست و کنکاش در آن به منظور یافتن مناطقی که تغییرات شدید ولتاژ گامی سطحی در آن‌ها مشاهده می‌گردد می‌توان این بررسی را در ادامه کارهای انجام شده در این مقاله انجام داد.
- [1] R. Hooshmand, "Design of High Voltage Substations," Isfahan University Press, Isfahan, 2012.
- [2] H. Kalhor, "Electric Planting," Shiraz University Press, 2018.
- [3] S. A. Taher and A. Shemshadi, "Analysis and Design of a New Method for Reduction of Touch and Step Voltages for Earthing Systems Using FEM Approach," International Journal of Electrical and Power Engineering .vol. 2, Issue 6, pp. 409-414, 2008.
- [4] M. Nayel, J. Zhao, J. He, Z. Cai, and Q. Wang, "Study of Step and Touch Voltages in Resistive/Capacitive Ground due to Lightning Stroke," 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetic, Dalian, pp. 56-60, 2006.
- [5] U. Schumann, F. Barcikowski, M. Schreiber, and H. C. Kärner, "FEM Calculation and Measurement of the Electrical Field Distribution of HV Composite Insulator Arrangements," 39th cigre session, Paris, , pp. 404-408, 2002.
- [6] A. Habjanic and M. Trlep, "The Simulation of the Soil Ionization Phenomenon around the Grounding System by the "Finite Element Method," IEEE Transactions on Magnetic, vol. 42, no. 4, pp. 867-870, 2006.
- [7] N. Golihaghighi and M. Biguesh, "Node Selection in a Cooperating Position Finding Distributed System Concerning the Computational Complexity Reduction," Scientific Journal of Radar, vol. 7, Issue 2, pp. 15-23, 2020.

Investigation and Electromagnetic Modeling of Earth Grid Islanding and Its Effect on Touch and Step Voltage Profile Variation Using Finite Element Method

(Received:; Accepted:)(Times New Roman 8)

Abstract:

The earth grid at high voltage substations should provide safety for people and normal equipment operation, therefore design calculations should be considered accurately. Step and touch voltages are among the items that affect people's safety at high voltage substations. Grounding is suitable so that in addition to having low electrical resistance to the ground, it does not increase the step and touch voltages. Among the factors that led to an increase in the electrical resistance of the earth's grid is the tearing of the earth's grid due to factors such as corrosion of conductors. In this article we provide a description of the appropriate design of high voltage substations grid to simulate the overhead substation grid and its effect on step and touch voltages in Comsol Multiphysics software based on the finite element method. After performing the simulation, it is noticed that the step and touch voltages in the two- and three-piece earth's grid are much higher than the healthy earth's grid and about 48 times comparing with the normal grid.

Keywords: Electromagnetic modeling, high voltage substation, earth grid, step and touch voltages