

بررسی تطبیقی روش‌های محاسبه ضریب تقسیم جریان اتصال کوتاه در پست‌های فشارقوی

سید محمد شهرتاش
shahrtash@iust.ac.ir

نبی اله رضانی
n_ramezani@iust.ac.ir

جواد صائبی
j.saebi@ece.ut.ac.ir

قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت

دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده - به منظور طراحی یک سیستم زمین مطمئن و ایمن در پست‌های فشارقوی، محاسبه دقیق جریان خطای زمین پست و ضریب تقسیم جریان اتصال زمین (نسبت جریان اتصال زمین عبوری از سیستم زمین پست به جریان اتصال زمین کل) ضروری است. از آنجاییکه بهنگام وقوع اتصال زمین مسیره‌های متعدد موازی برای عبور جریان وجود دارد مدل سازی کلیه مسیره‌های مذکور و در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موثر در روش ارائه شده منجر به محاسبه مقدار دقیقتر جریان اتصال زمین عبوری از بخشهای مختلف سیستم قدرت مورد نظر می‌گردد. در این مقاله سه روش ارائه شده در استاندارد و مراجع معتبر در این زمینه پیاده‌سازی و نتایج حاصل از آنها در شرایط مختلف مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته، مزایا و معایب هر روش ارائه گردیده است. کلید واژه - ضریب تقسیم جریان اتصال زمین، ولتاژ گام و تماس، شبکه زمین، پست‌های فشارقوی

خطوط، مشخصات متفاوت خاک در محل دکل‌ها، تعدد سیم‌های محافظ و شبکه زمین پست‌های مجاور را در روش‌های مختلف شناسایی و مقایسه نمود. در این مقاله دو روش تحلیلی دقیق و تقریبی محاسبه ضریب تقسیم [۱ و ۲] و روش تقریبی استاندارد *IEEE-80* در این زمینه [۳] به طور اجمالی معرفی و تشریح شده و مقایسه نتایج و پیاده‌سازی آنها در مقاله ارائه شده است.

۲- معرفی روش‌ها

در این قسمت، سه روش فوق‌الذکر به طور اجمالی معرفی شده و شیوه محاسباتی هر روش مختصراً تشریح گردیده است. به منظور فهم بهتر، نمایش شبکه قدرت متشکل از پست فشارقوی مورد نظر با تعدادی خط انتقال متصل به آن در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد با وقوع خطا در محل پست، جریان خطا برای بازگشت به منبع دو مسیر پیش رو دارد: یا از طریق سیم‌های زمین و یا از شبکه زمین پست.

۱- مقدمه

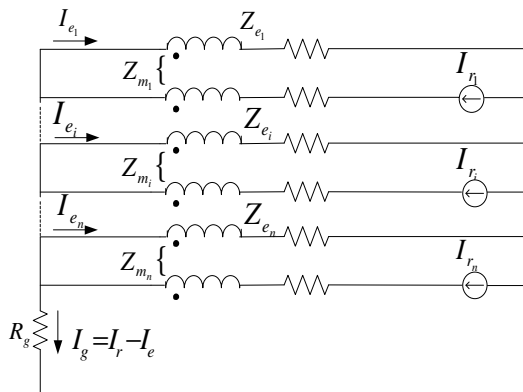
هنگامی که خطای زمین در داخل یک پست فشارقوی و یا در مجاورت آن و بر روی خطوط انتقال رخ می‌دهد، بخشی از جریان اتصال زمین که از طریق سیستم زمین پست مورد نظر و زمین اطراف آن جریان می‌یابد به جریان خطای زمین آن پست^۱ معروف است. عبور این جریان از شبکه زمین پست، باعث ایجاد ولتاژهای خطرناک تماس و گام، داخل و یا پیرامون پست می‌گردد. مسأله تعیین ضریب تقسیم جریان اتصال زمین در پست‌های فشارقوی، به منظور تنظیم دقیق رله‌های حفاظتی و طراحی یک سیستم زمین ایمن، همواره مورد توجه محققین بوده است و تاکنون فعالیتهای تحقیقاتی متعددی برای محاسبه ضریب تقسیم جریان اتصال زمین عبوری از سیستم زمین پست‌ها ارائه گردیده و در نتیجه مقالات زیادی در زمینه محاسبه دقیق این پارامتر موجود می‌باشد. برای ارزیابی نقاط قوت و مقایسه دقت روشهای ارائه شده باید امکان پذیری و سهولت در نظرگرفتن اندوکتانس متقابل هادی‌های فاز و سیم‌های محافظ، اسپن‌های نامساوی

¹ Grid Current

محاسبات اتصال کوتاه در دسترس است. بنابر این هادی‌های فاز در هر خط انتقال به همراه یک منبع جریان برابر با جریان تزریق شده به محل خطا توسط هر خط، I_{fi} ، جایگزین شده است. امپدانس متقابل بین هادی‌های فاز و سیم زمین از رابطه زیر بدست می آید:

$$Z_m = Z_{gm} \times \frac{Z_e}{Z_g} \quad (3)$$

Z_g : امپدانس خودی واحد طول سیم زمین بر حسب اهم بر متر
 Z_{gm} : امپدانس متقابل واحد طول بین سیم زمین و هادی فاز بر حسب اهم بر متر
بنابر این شبکه شکل (۱) را می توان به صورت شکل (۳) نشان داد.



شکل ۳- مدار معادل کلی با n خط انتقال متصل به پست مورد نظر

با توجه به شکل فوق برای محاسبه جریان عبوری از شبکه زمین پست، I_g ، کفایت جریان‌های برگشتی توسط سیم‌های زمین، I_{fi} ، محاسبه گردند. با استفاده از روابط ولتاژ و جریان کیرشهف، روابط کلی به صورت زیر بدست می آید.

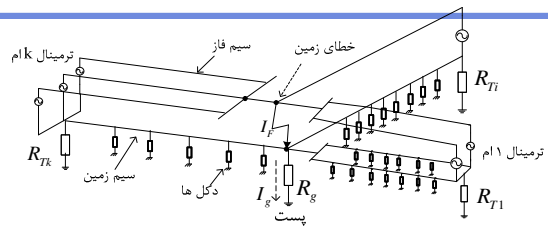
$$AI_e = B \quad (4)$$

که در آن

A : ماتریس مربعی $n \times n$ (تعداد خطوط متصل به پست) با آرایه‌های زیر است:

$$\begin{cases} a_{ij} = R_g & ; i \neq j \\ a_{ij} = R_g + Z_{e_i} & ; i = j \end{cases} \quad (5)$$

B : ماتریس ستونی $n \times 1$ با آرایه‌های زیر است:



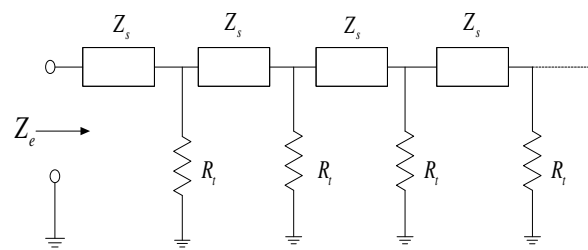
شکل ۱- نمایش شبکه قدرت نمونه

در این شبکه ضریب تقسیم جریان برابر است با:

$$S_f = \left| \frac{I_g}{I_F} \right| \quad (1)$$

۱-۲ روش تقریبی [۱]

روش ارائه شده در [۱] روشی ساده ولی تقریبی برای محاسبه ضریب تقسیم جریان اتصال زمین پست‌های فشارقوی می باشد. در این روش اسپن‌های خطوط انتقال متصل به پست یکسان فرض شده و تعداد اسپن‌ها بیشتر از ۲۰ اسپن در هر خط انتقال فرض شده است. سیم زمین در هر خط انتقال به صورت یک شبکه نردبانی متشکل از اسپن‌های خط انتقال در نظر گرفته شده است (شکل ۲) و امپدانس ورودی این شبکه نردبانی جایگزین سیم زمین شده است.



شکل ۲- شبکه نردبانی جایگزین سیم زمین و دکل‌ها

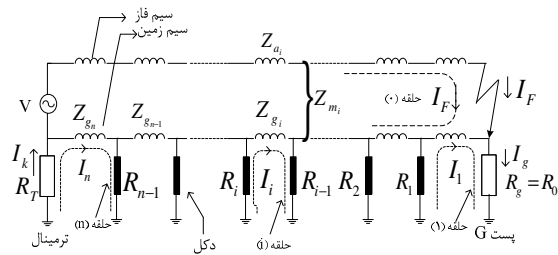
امپدانس ورودی شبکه نردبانی شکل (۲) از رابطه زیر بدست می آید:

$$Z_e = \frac{Z_s}{2} + \sqrt{Z_s \times R_t} \quad (2)$$

Z_s : میانگین امپدانس خودی اسپن‌های سیم زمین

R_t : میانگین مقاومت پای دکل‌ها

در این روش فرض شده است که مقدار جریان خطای تزریق شده به محل خطا توسط هر خط انتقال از



شکل ۴- مدار معادل خط زام بین ترمینال k ام و پست مورد نظر
 با توجه به روابط فوق، جریان حلقه i ام را به صورت زیر می
 توان نشان داد :

$$I_i = A_i I_{i-1} + B_i I_{iH} + C_i I_F ; \quad i=2, \dots, n-1 \quad (9)$$

که در آن

$$A_i = \frac{R_{i-1}}{T_i} \quad B_i = \frac{R_i}{T_i} \quad C_i = \frac{S_i}{T_i}$$

بکمک استقرا می توان ثابت کرد که I_i به صورت‌های زیر
 قابل نمایش است :

$$I_i = \delta_i I_{i-1} + \gamma_i I_k + \alpha_i I_F \quad i = 2, \dots, n ; \quad (10)$$

که در آن

$$\delta_i = \frac{A_i}{1 - B_i \delta_{i+1}} ; \quad \delta_{n+1} = 0 , \quad \delta_n = A_n$$

$$\gamma_i = \frac{B_i \gamma_{i+1}}{1 - B_i \delta_{i+1}} ; \quad \gamma_{n+1} = 1 , \quad \gamma_n = B_n$$

$$\alpha_{n+1} = 0 , \quad \alpha_n = C_n$$

$$\delta_i = \frac{C_i + B_i \alpha_{i+1}}{1 - B_i \delta_{i+1}}$$

و I_k جریان برگشتی به ترمینال k ام است.

و

$$(11)$$

$$I_i = \xi_i I_{i+1} + \theta_i I_g + \eta_i I_F ; \quad i=1, \dots, n-1$$

که در رابطه فوق

$$\xi_i = \frac{B_i}{1 - A_i \xi_{i-1}} ; \quad \xi_0 = 0 , \quad \xi_1 = B_1$$

$$b_i = R_g I_r + Z_{m_i} I_{r_i} \quad (6)$$

و I_e ماتریس ستونی متشکل از جریان-
 های $I_{e_1}, I_{e_2}, \dots, I_{e_n}$ و R_g مقاومت سیستم زمین
 پست مورد نظر هستند.
 از حل معادله (۴) جریان برگشتی توسط سیم‌های زمین
 بدست می آید و جریان عبوری از شبکه زمین پست به
 صورت زیر بدست می‌آید:

(۷)

$$I_g = \sum_{k=1}^n I_{r_k} - \sum_{k=1}^n I_{e_k}$$

۲-۲- روش تحلیلی [۲]

روش ارائه شده در [۲] روش دقیق محاسبه ضریب
 تقسیم است که در آن هیچگونه فرض و ساده‌سازی
 صورت نگرفته است و صرفاً از قوانین ولتاژ و جریان
 کیرشهف استفاده شده است.

برای خط زام بین ترمینال k ام و پست موردنظر با
 توجه به مدار معادل شکل (۴) روابط ولتاژ حلقه‌های
 موجود به صورت زیر است :

حلقه (۰) :

$$H_F I_F - \sum_{i=1}^n (S_i I_i) = V_k$$

حلقه (i) :

$$-S_i I_F - R_{i-1} I_{i-1} + T_i I_i - R_i I_{iH} = 0$$

که H_F, S_i, T_i به صورت زیر تعریف می گردند :

$$H_F = \sum_{i=1}^n (Z_{di} + Z_{gi} - 2Z_{mi})$$

$$S_i = Z_{gi} - Z_{mi} \quad (8)$$

$$T_i = R_{i-1} + Z_{gi} + R_i$$

پارامتر		خط انتقال ورودی	خط انتقال خروجی
سیم	اندازه	7#10	۳۳۶
زمین	نوع	Alumoweld	ACSR
هادی	اندازه	۳۳۶	1/0
فاز	نوع	ACSR	ACSR
تعداد سیم زمین در هر خط		۱	۱
مقاومت مخصوص خاک		100 Ω - m	100 Ω - m
طول اسپن ها		۱۵۴/۴ m	۱۲۸/۹۲ m

$$\sum_{k=1}^p [\sum_{j=1}^{M_k} (u_i I_F)_{kj}] + \sum_{k=1}^p [\sum_{j=1}^{M_k} (v_i)_{kj}] I_k + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^{M_k} (w_i)_{kj} - 1] I_g = 0 \quad (16)$$

که در آنها :

p : تعداد کل ترمینال های مولد می باشد.

M_k : تعداد خطوط خط انتقال ز بین ترمینال k ام و پست G می باشد .

عبارت $(\cdot)_{kj}$ به این معنی است که همه متغیرهای داخل پرانتز مربوط به ترمینال k ام و خط j ام می باشند.

از حل دستگاه معادلات فوق (تعداد متغیرها :

$\sum_{k=1}^p M_k + p + 1 = t$) جریان خطای عبوری از پست بدست می آید.

۲-۳- روش گرافیکی [۳]

استاندارد *IEEE-80* در زمینه طراحی شبکه زمین پست، نمودارهایی برای تخمین سریع ضریب تقسیم جریان اتصال زمین پست ارائه داده است. این نمودارها تغییرات ضریب تقسیم نسبت به مقاومت شبکه زمین پست را به ازای تغییر پارامترهای زیر، نشان می دهد:

- تعداد خطوط انتقال متصل به پست
- تعداد فیدهای توزیع متصل به پست
- مقاومت پای دکل ها
- سهم جریان خطای منبع محلی^۱ در برابر منبع دور^۲

$$\theta_i = \frac{A_i \theta_{i-1} - 1}{1 - A_i \xi_{i-1}} \quad ; \quad \theta_0 = 1 \quad , \quad \theta_1 = A_1$$

$$\eta_i = \frac{C_i + A_i \eta_{i-1}}{1 - A_i \xi_{i-1}} \quad ; \quad \eta_0 = 0 \quad , \quad \eta_1 = C_1$$

با ترکیب روابط (۹) و (۱۰) و حذف I_{i-1} و I_{i+1} روابط زیر حاصل می گردد :

$$I_i = U_i I_F + V_i I_k + W_i I_g \quad ; \quad i = 2, \dots, n$$

که در آن

$$V_i = \frac{\gamma_i}{1 - \delta_i \xi_{i-1}} \quad W_i = \frac{\delta_i \theta_{i-1}}{1 - \delta_i \xi_{i-1}}$$

$$U_i = \frac{\alpha_i + \delta_i \eta_{i-1}}{1 - \delta_i \xi_{i-1}}$$

و

$$(13)$$

$$I_i = u_i I_F + v_i I_k + w_i I_g \quad ; \quad i = 1, \dots, n-1$$

که در آن

$$v_i = \frac{\xi_i \gamma_{i+1}}{1 - \xi_i \delta_{i+1}} \quad w_i = \frac{\theta_i}{1 - \xi_i \delta_{i+1}}$$

$$u_i = \frac{\xi_i \alpha_{i+1} + \eta_i}{1 - \xi_i \delta_{i+1}}$$

در نهایت با جایگزینی روابط (۱۲) و (۱۳) در معادلات حلقه های (۰)، (۱) و (n)، معادلات نهایی به صورت زیر بدست می آیند :

$$[H_F - S_1 u_1 - \sum_{i=2}^n S_i U_i] I_F - [S_1 v_1 + \sum_{i=2}^n S_i V_i] I_k - [S_1 w_1 + \sum_{i=2}^n S_i W_i] I_g = V_k^j$$

برای

$$(14)$$

$$k = 1, \dots, p \quad , \quad j = 1, \dots, M_k$$

$$\sum_{j=1}^{M_k} (U_i I_F)_{kj} + [\sum_{j=1}^{M_k} (V_i)_{kj}] I_k + [\sum_{j=1}^{M_k} (W_i)_{kj}] I_g = 0$$

برای

$$(15)$$

$$k = 1, \dots, p$$

و

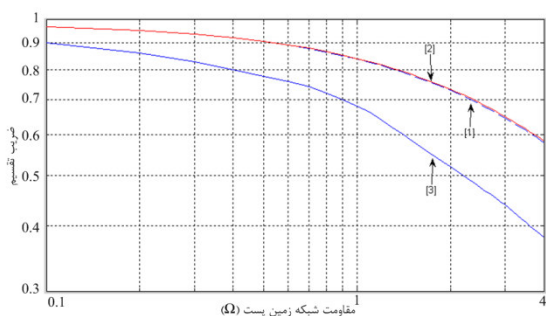
¹ Local source

² Remote source

تدوین گردیده است. جهت انجام مقایسه، پارامترهای مختلف شبکه قدرت مورد بررسی واقع شده‌اند که تعدادی از نتایج در ادامه آورده شده است.

۳-۱- مقاومت شبکه زمین پست

از آنجایی که این پارامتر بیشترین تاثیر را روی میزان جریان خطای پست می‌گذارد، سه روش برای شبکه نمونه پیوست با در نظر گرفتن ۳۰ اسپن برای خط انتقال خروجی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

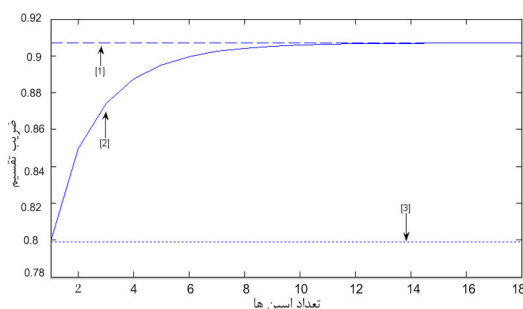


شکل ۶- نمودار ضریب تقسیم نسبت به مقاومت شبکه زمین پست

همانگونه که در نمودار شکل (۶) مشاهده می‌گردد، اختلاف موجود بین نمودار روش [۳] و روش‌های [۱] و [۲] نشان‌دهنده تقریبی بودن این روش است که این با توجه به فرض‌های صورت گرفته در این روش قابل توجیه است.

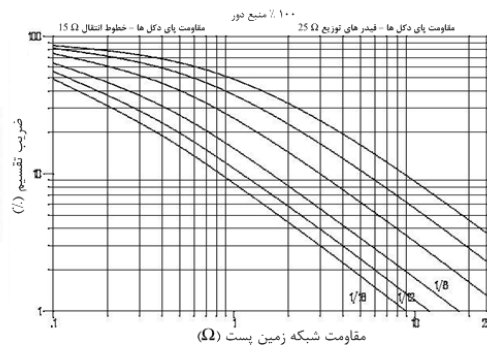
۳-۲- تعداد اسپن‌ها

همانطور که در بخش ۲-۱ بیان گردید، روش [۱] امکان بررسی تغییرات تعداد اسپن‌ها را فراهم نمی‌کند و برای هر تعداد اسپن از تقریب خط بلند (اسپن‌های زیاد) استفاده می‌کند. اما در روش [۲] این امکان وجود دارد و برای هر تعداد اسپن پاسخ صحیحی می‌دهد. نتایج مقایسه برای دو حالت وقوع خطا داخل پست و در مجاورت پست در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روش [۱] برای خطوط کوتاه (با تعداد اسپن‌های کم) پاسخ درستی نمی‌دهد.

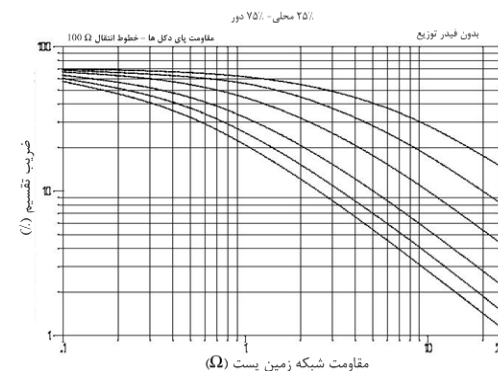


برای محدود شدن تعداد نمودارها، تعدادی از پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. جدول (۱) این پارامترها و مقادیر فرض شده برای آنها را نشان می‌دهد [۴]. دو نمونه از این نمودارها در شکل (۵) قابل مشاهده است. البته برای استفاده ساده‌تر از نمودارهای فوق‌الذکر در این تحقیق از یک برنامه کامپیوتری محاسبه ضریب تقسیم، با لحاظ کردن فرض‌های فوق، استفاده شده است.

جدول ۱- پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده در تحلیل گرافیکی



الف) سهم جریان منبع محلی صفر - دور ۱۰۰٪



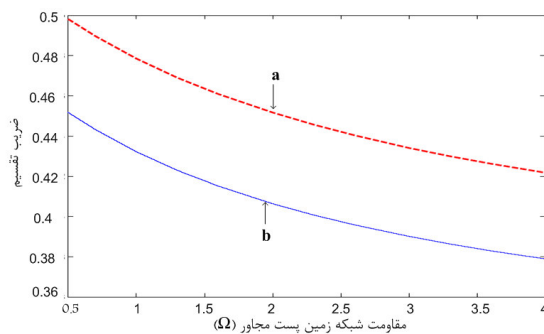
ب) سهم جریان منبع محلی ۲۵٪ - دور ۷۵٪

شکل ۵- دو نمونه از نمودارهای استاندارد IEEE 80

۳- مقایسه روش‌ها

برای بررسی و مقایسه این سه روش، نرم افزاری حاوی الگوریتم‌های سه روش ذکر شده در مقاله طراحی و

برای بررسی تاثیر این مورد روی ضریب تقسیم، خروجی روش [۲] در دو حالت اسپن‌های یکسان و اسپن‌های غیریکسان مورد مقایسه واقع شده است. نتیجه مقایسه در شکل (۹) قابل مشاهده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد یکسان فرض کردن طول همه اسپن‌ها، ضریب تقسیم متفاوت (نتیجه می‌دهد. در واقع فرض یکسان بودن اسپن‌ها (که از ملزومات روش [۱] و [۳] است) ضریب تقسیم کوچکتری را نتیجه می‌دهد و باعث طراحی غیرایمن از روش‌های [۱] و [۳] می‌گردند.

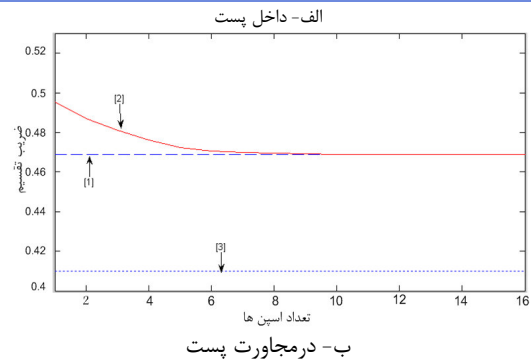


شکل ۹- نمودار تغییرات ضریب تقسیم نسبت به مقاومت زمین پست مجاور- اسپن‌های غیر یکسان (a)، اسپن‌های یکسان (b)

نتایج مقایسه، مزایا و معایب هر روش در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج مقایسه سه روش مطرح شده

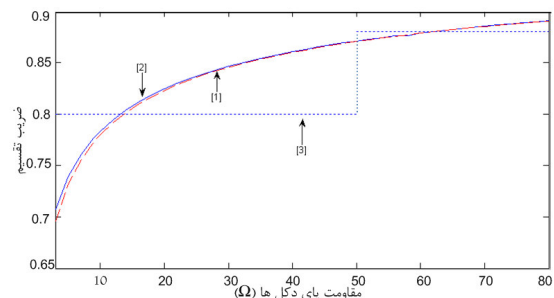
روش	مزایا	معایب	نتیجه
تقریبی	۱-سادگی روابط ۲-کم بودن اطلاعات مورد نیاز	۱-فرض خط بینهایت ۲-فرض اسپن‌های یکسان ۳-فرض مقاومت پای دکل‌های یکسان	در شرایط خطوط با اسپن‌های غیریکسان خروجی کمتر از مقدار واقعی که می‌تواند منجر به عدم ایمنی شود.
تحلیلی	۱-امکان بررسی برای خطوط کوتاه ۲-امکان بررسی برای اسپن‌های غیر یکسان ۳-عدم نیاز به جریان خطای تکفاز به زمین به عنوان ورودی	۱-پیچیدگی روابط برای خطوط با اسپن‌های زیاد ۲-نیاز به اطلاعات ورودی زیاد	مقدار دقیق
گرافیکی	۱-استفاده از نمودارهای از پیش تعیین شده ۲-کم بودن اطلاعات مورد نیاز	۱-ثابت فرض کردن تعدادی از پارامترهای مؤثر	عموماً کمتر از مقدار واقعی که می‌تواند منجر به عدم ایمنی شود



شکل ۷- نمودار ضریب تقسیم نسبت به تعداد اسپن‌ها همانطور که مشاهده می‌شود در روش [۳] نیز مانند روش [۱] تغییرات اسپن‌ها قابل بررسی نمی‌باشد.

۳-۳- مقاومت پای دکل‌ها

امکان بررسی تغییرات پیوسته مقاومت پای دکل‌ها در روش‌های [۱] و [۲] وجود دارد اما در روش [۳] تنها دو حالت برای تغییر این پارامتر لحاظ شده است [۴]. در این روش محدوده مقاومت پای دکل‌های ۱۵ اهم به عنوان نماینده یک خط انتقال خوب زمین شده و محدوده مقاومت پای دکل‌های ۱۰۰ اهم به عنوان نماینده یک خط انتقال زمین شده ضعیف لحاظ گردیده است. نتایج مقایسه این سه روش در شکل (۸) قابل مشاهده است.



شکل ۸- نمودار تغییرات ضریب تقسیم نسبت به مقاومت پای دکل‌ها

البته در روش [۲] امکان بررسی شبکه با در نظر گرفتن مقاومت پای دکل‌های غیریکسان نیز وجود دارد که در شکل (۸) برای امکان مقایسه روش‌ها، اسپن‌ها یکسان فرض شده‌اند.

۳-۴- اسپن‌های غیریکسان

در روش‌های [۱] و [۳] همه اسپن‌های خط یکسان در نظر می‌شود و طول آنها برابر با میانگین طول اسپن‌های خط لحاظ می‌گردد. اما در روش [۲] امکان بررسی در حالت اسپن‌های با طول‌های متفاوت وجود دارد.

فرکانس	۵۰ (Hz)
امپدانس سیم زمین	$7+j1/3 (\Omega/km)$
امپدانس متقابل سیم زمین و فاز	$0.05+j0.38 (\Omega/km)$
طول اسپن‌ها	۳۰۰ (m)
مقاومت پای دکل‌ها	۱۰ (Ω)
مقاومت زمین پست موردنظر	۰/۵ (Ω)
مقاومت زمین پست مجاور	۰/۵ (Ω)

جدول ۳- پارامترهای شبکه مورد مطالعه

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله سه روش ارائه شده در زمینه محاسبه پارامتر ضریب تقسیم جریان اتصال زمین پست‌های فشارقوی معرفی و از نظر کاربرد و دقت مقایسه شده‌اند. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که روش تقریبی در خطوط کوتاه و با اسپن‌های غیریکسان و روش گرافیکی در اغلب موارد پاسخ مطمئنی ارائه نمی‌دهند. روش تحلیلی در همه شرایط پاسخ دقیقی ارائه می‌کند ولی برای خطوط با اسپن‌های خیلی زیاد و همچنین برای خطوط متعدد متصل به پست مورد مطالعه، روابط مربوط به محاسبه ضریب تقسیم جریان اتصال زمین پیچیده می‌شوند.

مراجع

- [1]. Hans R. Seedher, J. K. Arora and S. K. Soni, " A Practical Approach for Computation of Grid Current", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol, 14, No. 3, July 1999.
- [2]. F. Dawalibi, "Ground fault current distribution between soil and neutral conductors", *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-99, No. 2 March/April 1980.
- [3]. *ANSI / IEEE Standard 80 – 1986*, IEEE, Guide for safety in AC Substation Grounding, IEEE, New York, 1986.
- [4]. D.L. Garrett, J. G. Myers and S. G. Patel, " Determination of maximum substation grounding system fault current using graphical method", *IEEE transaction on power delivery*, Vol. PWRD-2, No. 3, July 1987.
- [5]. B. Thapar and S. K.Madan, "Current for Design of Grounding System," *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-103, Sept. 1984, pp. 2633-2637.
- [6]. Analysis Technique for Power Substation Grounding Systems *EPRI Final Report EL-2682, volumes1 and 2, Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA, October 1982.*

پیوست

شبکه نمونه مورد مطالعه عبارت است از دو پست که توسط یک خط انتقال به یکدیگر متصل شده‌اند. پارامترهای این شبکه به قرار زیر است.