



بررسی اثر پارامترهای شبکه برق بر ولتاژ بحرانی وقوع قوس در مقره های آلوده

کازم یاقوتی^۱ مریم عظیمی^۲ احمد غلامی^۱
۱- دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲- دانشگاه سمنان، ۳- شرکت مهندسی طرح و پالایش

واژه های کلیدی: مقره، آلودگی، سیستم قدرت، مدل دینامیکی، قوس الکتریکی

چکیده

طبق آمارهای موجود ۸۰ تا ۸۵ درصد عیوب ایجاد شده در خطوط انتقال و توزیع که منجر به قطع برق شده است مربوط به مشکلات مقره ها می باشد. سطح خارجی مقره های بیرونی تحت بهره برداری، می تواند در معرض نشست مواد مختلف معلق در هوا باشد. مدل سازی نظری این فرآیند به صورت گسترده ای از سوی محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. روش های مدل سازی فرآیند وقوع قوس با فرض منبع ولتاژ دارای امپدانس داخلی ناچیز و سطح جریان اتصال کوتاه بالا صورت گرفته است. در میان مقالات ارائه شده، هیچ مدلی به بررسی اثر پارامترهای شبکه انتقال و توزیع نپرداخته است. در این مقاله سعی شده است تا به منظور ارتقای مدل های ارائه شده و بررسی دقیق تر مکانیزم وقوع قوس، مدل واقعی تری با در نظر گرفتن پارامترهای شبکه ارائه گردد.

۱- مقدمه

طبق آمارهای موجود ۸۰ تا ۸۵ درصد عیوب ایجاد شده در خطوط انتقال که منجر به قطع برق شده است مربوط به

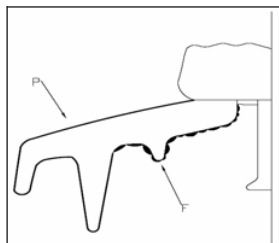
مسائل و مشکلات مقره ها می باشد [۱]. وجود همزمان آلودگی و نم حاصل از باران یا شبنم، باعث تشکیل لایه الکترولیت نازکی بر روی سطح مقره شده و منجر به کاهش مقاومت سطحی آن می شود و عبور جریان های ناشی آغاز خواهد شد. جاری شدن جریان، باعث تلفات اهمی و تشکیل نوارهای خشک می شود. با تشکیل تخلیه های جزئی، در صورتی که شرایط بحرانی فراهم گردد، پدیده وقوع قوس الکتریکی قابل مشاهده خواهد بود [۲، ۱].

روش های مدل سازی فرآیند وقوع قوس و جنبه های متنوع مسأله که در مقالات متعدد مورد بررسی قرار گرفته است با فرض منبع ولتاژ دارای امپدانس داخلی ناچیز و سطح جریان اتصال کوتاه بالا می باشد. در این خصوص، در میان تحقیقات و مقالات ارائه شده، هیچ مدلی به بررسی اثر پارامترهای شبکه (شبکه بالا دست به عنوان منبع ولتاژ) نپرداخته است.

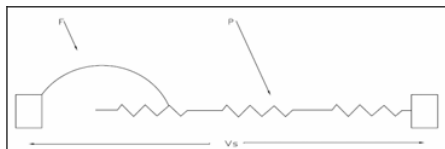
در خلال انجام آزمایشات مشاهده شده است که پارامترهای منبع ولتاژ در آزمایشگاه، بر مقادیر ولتاژ بحرانی وقوع قوس در مقره های آلوده تأثیر گذار است که از آن با عنوان تقابل عایق و منبع ولتاژ یاد می شود [۳، ۴]. با این وجود، مکانیزم تقابل مقره

نوع مدل استاتیکی و مدل دینامیکی به کار گرفته شده است. مروری بر مدل‌های نظری نشان می‌دهد که اغلب مدل‌های موجود استاتیکی می‌باشند. از میان این دو روش، مدل‌های دینامیکی که اخیراً توسعه داده شده‌اند، امکان پیش‌بینی بهتر فعالیت تخلیه الکتریکی که منجر به وقوع قوس در مقره‌های آلوده می‌شود را فراهم می‌کنند [۹-۱۱] و از آنجا که فرآیند وقوع قوس، یک پدیده سریع است انتظار می‌رود مدل‌های دینامیکی که تغییرات لحظه‌ای پارامترهای جرعه را نیز در نظر می‌گیرند نسبت به مدل‌های استاتیکی، کامل‌تر و گویاتر باشند. به علاوه یک مدل دینامیکی که بتواند تمام پارامترهای متغیر با زمان جرعه را در نظر بگیرد، درک بهتری از فرآیند وقوع قوس بدست می‌دهد.

در این مقاله جهت بررسی اثر شبکه قدرت بر ولتاژ بحرانی وقوع قوس، از مدل دینامیکی ارائه شده توسط مؤلفین [۸] استفاده شده است. مدل مذکور در مرجع [۸] به تفصیل بررسی شده است و در اینجا تنها به اختصار به فرمولاسیون به کار گرفته شده و مفاهیم مربوطه اشاره می‌شود. در شبیه‌سازی دینامیکی حاضر، شکل واقعی مقره، مدل‌سازی شده و در شکل ۱ برای یک مقره بشقابی نمایش داده شده است. مدار معادل الکتریکی شکل ۱ به صورت نمایش داده شده در شکل ۲ خواهد بود که با استفاده از مدل مداری اولیه ابن‌هاوس که توسط نئومارکر ارتقا داده شده است بیان می‌شود [۱۲].



شکل ۱: مقره بشقابی آلوده با جرعه‌های جزئی، F: ناحیه تخلیه جزئی سطح مقره، P: لایه آلودگی نمناک



شکل ۲: مدار معادل مقره با جرعه جزئی

و منبع ولتاژ، تنها از اواسط دهه ۸۰ میلادی مورد تحقیق جدی برخی پژوهشگران قرار گرفته است [۴]. علی‌رغم این امر، مطالب ارائه شده بسیار محدود بوده و صرفاً با هدف تعیین استاندارد لازم جهت منابع تغذیه به کار رفته در آزمایشگاهها و مشخص نمودن حداقل مقادیر پارامترهای مورد نیاز به منظور مینیمم‌سازی خطای حاصل از آزمایشات می‌باشند [۵،۴]. فارست دریافت که منابع ولتاژ با سطح اتصال کوتاه محدود، خطای قابل توجهی در مقدار ولتاژ استقامت مقره‌ها تحت شرایط آلودگی سنگین ایجاد می‌کند [۳]. علی‌رغم استانداردهای ملی و بین‌المللی و پیشنهادات ارائه شده در متون علمی مختلف در خصوص ظرفیت منبع ولتاژ برای آزمایش مقره‌ها تحت شرایط آلوده، توافق عمومی در زمینه پارامترهای منبع وجود ندارد [۶]. به عنوان مثال تحقیقات صورت گرفته توسط ورما و پتروش [۷] مخالف پیشنهادات IEC می‌باشد [۶]. از جمله محققینی که در این زمینه تلاش‌های ارزشمندی انجام داده‌اند می‌توان به ریزک و گوین اشاره نمود [۴]. در این تحقیقات، نسبت جریان اتصال کوتاه منبع ولتاژ به ماکزیمم جریان نشتی منبع به عنوان مهمترین عامل تأثیرگذار بر مقادیر ولتاژ بحرانی، بیان گردیده است و دغدغه مشترک محققین، محدودیت سطح اتصال کوتاه منابع ولتاژ در آزمایشگاه می‌باشد.

افزایش نسبت راکتانس منبع به مقاومت آن، که باعث افت سطح اتصال کوتاه می‌گردد، در آزمایشگاهها قابل توجه می‌باشد. اما در شبکه‌های برق واقعی، سطح اتصال کوتاه به مراتب بالاتر از مقادیر محدود قابل تأمین از سوی منابع آزمایشگاهی است. حتی در نقاطی از شبکه که نسبت راکتانس شبکه بالا دست به مقاومت آن دارای مقادیر بالایی می‌باشد، نسبت جریان اتصال کوتاه به مقادیر جریان نشتی بسیار بالاتر از مقادیر قابل دستیابی در آزمایشگاهها خواهد بود.

در این مقاله سعی شده است تا به منظور ارتقای مدل‌های ارائه شده و گامی نو در بررسی دقیق‌تر مکانیزم وقوع قوس، مدل واقعی تری با در نظر گرفتن پارامترهای شبکه ارائه گردد. مدل شبکه به عنوان قابلیت‌ی جدید به مدل دینامیکی ارائه شده توسط مؤلفین [۸] اضافه شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل دینامیکی

به منظور شبیه‌سازی مکانیزم از نقطه نظر مدلی ریاضی که بتواند مراحل وقوع قوس و پارامترهای مهم آن را مدل کند، دو

با توجه به مدار معادل ارائه شده در شکل ۲ و بر اساس معادله ولتاژ کیرشهف، رابطه (۱) را برای ولتاژ تغذیه V_s می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$V_s = r_{arc} x I + I(R_p + R_s) \quad (1)$$

$$R_p = r_p (L - x) \quad (2)$$

که در این رابطه V_s ولتاژ اعمالی بر حسب ولت، r_{arc} مقاومت جرقه در واحد طول بر حسب Ω/cm ، L فاصله خزشی مقرر و x طول جرقه بر حسب cm ، I جریان عبوری از لایه آلوده بر حسب آمپر، R_p مقاومت لایه آلوده بر حسب اهم، r_p مقاومت در واحد طول لایه آلوده بر حسب Ω/cm و R_s مقاومت داخلی منبع تغذیه بر حسب Ω می‌باشند. می‌توان R_p را با هدایت الکتریکی سطحی σ_s جایگزین نمود [۵] که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_p = \frac{1}{\sigma_s} FF \quad (3)$$

گرادبان ولتاژ جرقه، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{arc} = A I_{arc}^{-n} \quad (4)$$

که در این رابطه E_{arc} و I_{arc} به ترتیب شدت میدان الکتریکی و جریان جرقه بوده و A و n مقادیر ثابت آن می‌باشند. در شرایط بحرانی گرادبان لایه آلوده E_p ، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_p = A^{1/n+1} r_p^{n+1} \quad (5)$$

$$r_p = \frac{R_p}{L - L_{arc}} \quad (6)$$

تفاوت میان گرادبان جرقه و گرادبان آلودگی در پای قوس، مهم‌ترین عامل کنترل پیشروی قوس است [۶]، که در اینجا از این معیار استفاده شده است. اگر $E_p > E_{arc}$ باشد، آنگاه جرقه توسعه خواهد یافت.

در نهایت اگر طول جرقه در حال پیشروی، برابر ۶۵٪ طول فاصله خزشی مقرر باشد، قوس الکتریکی روی خواهد داد [۴]. اگر طول جرقه کمتر از این حد بوده و شرط توسعه برآورده

شده باشد، حرکت دینامیکی جرقه و مقدار افزایش طول آن محاسبه می‌شود.

سرعت لحظه‌ای حرکت جرقه با ضریبی به عنوان ضریب جابجایی μ ، به میزان گرادبان میدان جرقه مرتبط می‌شود:

$$v(t) = \mu E_{arc} \quad (7)$$

طبق معادله مایر، مقاومت کانال جرقه در واحد طول به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_{arc} = \alpha e^{-Q/Q_0} \quad (8)$$

که در این رابطه Q محتوای انرژی در واحد طول کانال جرقه و α و Q_0 مقادیر ثابت هستند. با مشتق‌گیری از رابطه (۸) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} \left(1 - \frac{R_{arc} I_{arc}^2}{N_0}\right) \quad (9)$$

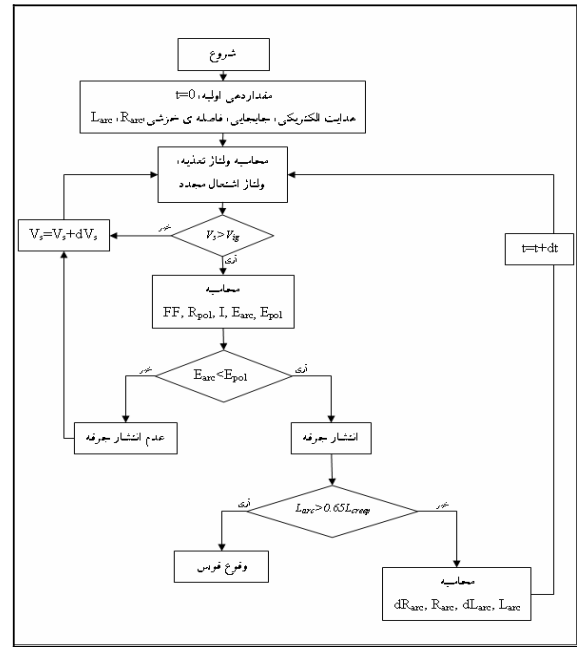
$$\tau = \frac{Q_0}{N_0} \quad (10)$$

در این رابطه N تلفات انتقال حرارت می‌باشد. با دانستن ضریب شکل جدید، می‌توان جریان، مقاومت و دیگر پارامترها را به صورت دینامیکی محاسبه نمود. شرط توسعه برای این مقادیر مجدداً بررسی می‌شود و سپس ولتاژ متناظر با وقوع قوس به عنوان ولتاژ بحرانی مقرر و تحت آلودگی معین در نظر گرفته می‌شود. این مراحل برای هر شدت آلودگی دیگر نیز تکرار می‌گردد. در شکل ۳ فلوجارت مربوطه نمایش داده شده است.

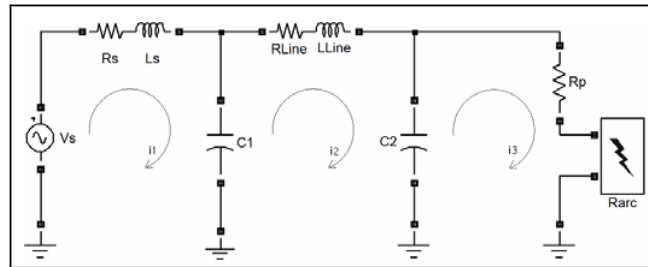
۳- مدل دینامیکی با در نظر گرفتن شبکه قدرت

به منظور بررسی دقیق‌تر مسأله، در مدل دینامیکی جدید، منبع ولتاژ ایده‌آل در نظر گرفته شده با مدار معادل تونن شبکه بالا دست به صورت یک منبع ولتاژ V_s به همراه اندوکتانس L_s و مقاومت سری R_s مدل می‌شود.

همچنین خط ارتباطی میان منبع ولتاژ و مقره با مدل پی در معادلات شبیه‌سازی وارد شده است. جهت بررسی اثر پارامترهای خط، مدل مذکور با خازن‌های موازی C_1 و C_2 و مقاومت و سلف سری R_{Line} و L_{Line} بیان گردیده است. مدار الکتریکی جهت بررسی تأثیر متقابل منبع ولتاژ و مدل دینامیکی وقوع قوس به صورت نمودار نشان داده شده در شکل ۴ می‌باشد. با استفاده از تحلیل مش بر روی مدار شکل ۴، معادلات دیفرانسیل به صورت رابطه (۱۱) که دستگاه معادلات همزمان می‌باشد بیان می‌گردد و با مشتق‌گیری از این رابطه، دستگاه معادلات دیفرانسیل-انتگرال به صورت رابطه (۱۲) حاصل می‌شود. با اضافه نمودن دو معادله دیفرانسیل بیان شده در روابط (۷) و (۹) به رابطه (۱۲)، مجموعه معادلاتی حاصل می‌شود که می‌تواند ضمن شبیه‌سازی دینامیکی مکانیزم وقوع قوس بر روی مقره‌های آلوده، پارامترهای خط انتقال و شبکه بالادست را به عنوان منبع ولتاژ، مدل‌سازی نماید.



شکل ۳: فلوچارت مدل دینامیکی پیشنهادی



شکل ۴: مدار الکتریکی مقره آلوده به همراه مدل تونن شبکه و مدل خط

$$\begin{cases} V_s = L_s \frac{di_1}{dt} + R_s i_1 + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_1 dt - \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_2 dt \\ \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_2 dt - \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_1 dt + R_{Line} i_2 + L_{Line} \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_2 dt - \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_3 dt = 0 \\ \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_3 dt - \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_2 dt + (R_p + R_{arc}) i_3 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} dV_s/dt = L_s d^2 i_1/dt^2 + R_s di_1/dt + \frac{1}{C} i_1 - \frac{1}{C} i_2 \\ \frac{1}{C} i_2 - \frac{1}{C} i_1 + R_{Line} di_2/dt + L_{Line} d^2 i_2/dt^2 + \frac{1}{C} i_2 - \frac{1}{C} i_3 = 0 \\ \frac{1}{C} i_3 - \frac{1}{C} i_2 + (R_p + R_{arc}) di_3/dt = 0 \end{cases} \quad (12)$$

برای حل این دستگاه معادلات دیفرانسیل درجه دوم، از روش متغیر کمکی به صورت روابط زیر استفاده شده است.

$$di_1/dt = i_4 \Rightarrow d^2 i_1 / dt^2 = di_4 / dt$$

$$di_2/dt = i_5 \Rightarrow d^2 i_2 / dt^2 = di_5 / dt$$

بدین منظور به کمک متغیرهای مناسب، دستگاه معادلات دیفرانسیل فوق تبدیل به یک دستگاه معادلات دیفرانسیل درجه اول خواهد شد که پس از مرتب‌سازی به صورت رابطه (۱۳) بیان می‌گردد. با حل همزمان دستگاه معادلات دیفرانسیل فوق بر اساس الگوریتم پیشنهادی ۳، مدل دینامیکی ارائه شده قادر خواهد بود اثر امپدانس شبکه را نیز در مکانیزم پیش‌بینی ولتاژ بحرانی، شبیه‌سازی نماید.

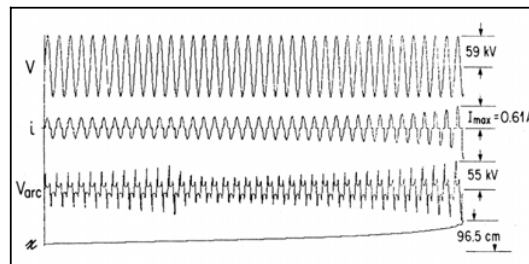
$$\begin{cases} di_1/dt = i_4 \\ di_2/dt = i_5 \\ dV_s/dt = L_s di_4/dt + R_s di_1/dt + \frac{1}{C} i_1 - \frac{1}{C} i_2 \\ \frac{1}{C} i_2 - \frac{1}{C} i_1 + R_{Line} di_2/dt + L_{Line} di_5/dt + \frac{1}{C} i_2 - \frac{1}{C} i_3 = 0 \\ \frac{1}{C} i_3 - \frac{1}{C} i_2 + (R_p + R_{arc}) di_3/dt = 0 \\ \frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} \left(1 - \frac{R_{arc} I_{arc}^2}{N_0}\right) \\ dL_{arc}(t) = v(t).dt \end{cases} \quad (13)$$

۵/۶۹ و سطح آلودگی ۱۸۰۰ اهم بر سانتی‌متر استفاده نموده است [۴].

این شدت آلودگی معادل هدایت الکتریکی ۲۳/۵ میکروزیمنس می‌باشد. وی در شبیه‌سازی منبع ولتاژ آزمایشگاه، از مدل تونن استفاده کرده است و از منبع با مشخصات نسبت جریان اتصال کوتاه به حداکثر جریان نشتی برابر ۳۱۰ و نسبت راکتانس به مقاومت برابر ۱ به عنوان منبع ولتاژ با حداقل تأثیر ممکن بر نتایج آزمایش یاد می‌نماید که نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی

همان‌گونه که گفته شد، تمامی تحقیقات اندک صورت گرفته در زمینه بررسی تقابل منبع ولتاژ و مقره آلوده، محدود به تحلیل اثر پارامترهای منبع به کار رفته در آزمایشگاه بر روی دقت ولتاژ بحرانی بدست آمده از آزمایش می‌باشد. ریزک در مقاله خود جهت بررسی اثر پارامترهای منبع ولتاژ، از مقره استوانه‌ای با فاصله خزشی ۱۳۴ سانتی‌متر و ضریب شکل



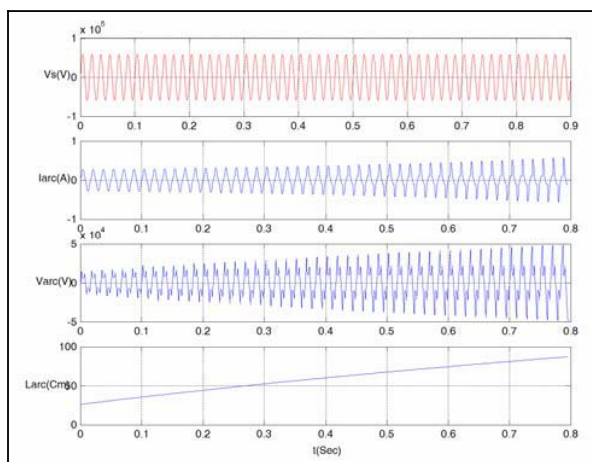
شکل ۵: نتایج مدل ریزک جهت شبیه‌سازی آزمایش وقوع قوس با در نظر گرفتن اثر منبع ولتاژ

جرقه و نمودار چهارم نشانگر سیر صعودی طول جرقه تا ۰٫۶۵ درصد فاصله خزشی می‌باشد. در شبکه واقعی، نسبت سطح

در این شکل، نمودار اول نمایشگر ولتاژ منبع، نمودار دوم مربوط به جریان نشتی، نمودار سوم شکل موج ولتاژ دو سر

منبع ولتاژ مشخص می‌شود که در گستره مقادیر مقاومت منبع در شبکه واقعی، می‌توان بدون از دست دادن دقت مدل از مقاومت منبع در مقابل مقاومت لایه آلوده چشم‌پوشی نمود. به علاوه نظر به محدوده تغییرات جریان ناشی در خلال پیشروی جرقه تا وقوع قوس، اثر افت ولتاژ مقاومت نیز تأثیری بر ولتاژ بحرانی وقوع قوس نخواهد داشت. همچنین با تغییر اندوکتانس منبع نیز در گستره مقادیر واقعی شبکه، در مقدار ولتاژ بحرانی تغییری حاصل نشده و تنها اثر آن، محدود نمودن جریان اتصال کوتاه پس از وقوع قوس خواهد بود.

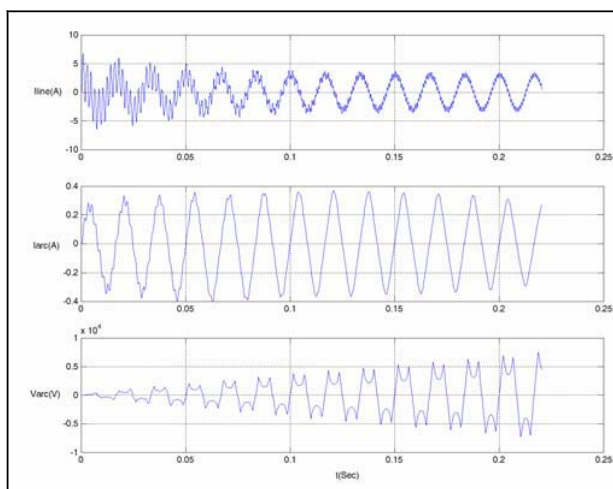
اتصال کوتاه به جریان ناشی بسیار بالاتر از مقادیر آزمایشگاهی خواهد بود. با این حال در اینجا برای بررسی مجدد عملکرد مدل دینامیکی، نتایج مشابه در شکل ۶ تحت ولتاژ مشابه نمایش داده شده است. با صرف‌نظر از مدل خط، مقادیر پارامترهای مدل تونن منبع ولتاژ به صورت R_s برابر ۱۷ اهم، L_s برابر ۰/۴۵۵ هانری در فرکانس ۶۰ هرتز انتخاب شده‌اند. مشاهده می‌شود که نتایج مدل دینامیکی پیشنهادی، همخوانی مناسبی با نتایج ارئه شده توسط ریزک [۴] دارد. براساس بررسی‌های به عمل آمده بر روی اثر تغییر پارامترهای



شکل ۶: نتایج مدل دینامیکی جهت شبیه‌سازی مکانیزم وقوع قوس با مدل تونن شبکه

اینکه تنها بار متصل به این شبکه، مفره آلوده می‌باشد، انتظار می‌رود جریان عبوری از خط شامل مجموع جریان ناشی مفره به اضافه جریان شارژ باشد که نتایج شکل ۷ مؤید این مطلب است. با تحلیلی مشابه، تغییر پارامترهای خط و منبع ولتاژ در گستره مقادیر واقعی شبکه، تأثیری بر مقدار ولتاژ بحرانی وقوع قوس نخواهد داشت. نتایج مربوط به شبکه فوق‌الذکر در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل، نمودار اول نمایشگر جریان شارژ خط بوده و نمودار دوم و سوم به ترتیب نشان دهنده جریان و ولتاژ جرقه تا زمان وقوع قوس می‌باشند

به منظور بررسی کامل‌تر پارامترهای شبکه، مطابق شکل ۴، از مدار معادل تونن شبکه بالادست به همراه مدل پی خط انتقال استفاده شده است. برای انجام شبیه‌سازی، مقادیر نمونه اندوکتانس ۰/۳۵ اهم بر کیلومتر و سوسپتانس ۴/۲ میکروزیمنس بر کیلومتر انتخاب شده است و طول خط ۱۰۰ کیلومتر می‌باشد. مدار معادل تونن شبکه بالادست با مقاومت ۱۷ اهم و سلف ۰/۴۵۵ هانری در فرکانس ۶۰ هرتز می‌باشد. برای مفره مورد نظر، پروفیل استاندارد IEEE با شدت آلودگی ۱۵ میکروزیمنس در نظر گرفته شده است. با توجه به



شکل ۷: نتایج مدل دینامیکی جهت شبیه‌سازی مکانیزم وقوع قوس با مدل تونن شبکه و مدل پی خط

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با ترکیب یک مدل دینامیکی و توسعه مدل شبکه سیستم قدرت به عنوان منبع ولتاژ، ابزاری ارائه شده است که ضمن دارا بودن دقت کافی در شبیه‌سازی مکانیزم وقوع قوس در مقره‌های آلوده و پیش‌بینی ولتاژ بحرانی، مدل کاملی از مقره آلوده به همراه سیستم قدرت به دست می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در خصوص بررسی تأثیر پارامترهای شبکه بالادست به عنوان منبع ولتاژ، دیده می‌شود که در یک شبکه واقعی و در تحلیل و مدل‌سازی مکانیزم وقوع قوس در مقره‌های آلوده، بدون از دست دادن دقت شبیه‌سازی، می‌توان از اثر پارامترهای منبع چشم‌پوشی نمود که این نتیجه با آنچه ریزک در تلاش‌های آزمایشگاهی خود گزارش نموده است، همخوانی دارد [۴-۵].

۶- مراجع

- [۴] Rizk, F. A. M., and Nguyen, D. H., "AC SOURCE-INSULATOR INTERACTION IN HV POLLUTION TESTS", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-۱۰۳, No. ۴, pp. ۷۲۳-۷۳۲, April ۱۹۸۴
- [۵] Rizk, F. A. M., Bourdages, M., "INFLUENCE OF AC SOURCE PARAMETERS ON FLASHOVER CHARACTERISTICS OF POLLUTED INSULATORS", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-۱۰۴, No. ۴, pp. ۹۴۶-۹۵۸, April ۱۹۸۵
- [۶] IEC Publication ۵۰۷, ۱۹۷۵, "Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be Used on AC Systems"
- [۷] Verma, M. P., Petrush, W., "Results of Pollution Tests on Insulators in the ۱۱۰۰۰-kV Range and Necessity of Testing in the Future", IEEE Trans. EI-۱۶, ۳, pp. ۱۹۹-۲۰۸, June ۱۹۸۱
- [۸] کاظم یاقوتی، "شبیه‌سازی دینامیکی وقوع قوس AC و DC در مقره‌های آلوده به منظور پیش‌بینی ولتاژ بحرانی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، خرداد ۱۳۸۶
- [۹] Topalis, F.V., Gonos, I.F. and Stathopoulos, I.A., "Dielectric Behavior of Polluted Porcelain Insulators" IEE Proc. On Generation, Transmission and
- [۱] مسعود کیا، حسن آبروش، و محسن پور رفیع عربانی، "عملکرد مقره چینی و شیشه‌ای در منطقه مازندران"، مجموعه مقالات سومین کنفرانس تخصصی مقره‌ها، تهران، اسفند ۱۳۸۴، ص ۱۶۹-۱۷۳
- [۲] کاظم یاقوتی، "بررسی و مقایسه عملکرد انواع مقره‌ها از دیدگاه آلودگی و راهکارهای مقابله با آن"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، آبان ۱۳۸۴
- [۳] Forrest, J.S., Lambeth, P.J., Colombo, A., Kucera, J., Hurley, J.J., Limbourn, G.J., and Nakajama, Y., "International Studies of Insulator Pollution Problems", CIGRE, Paper No. ۳۳-۱۲, ۱۹۷۰

Distribution, Vol.148, No.4, July 2001,
p.p.269-274

- [10] Aydogmus, Z. and Cebeci, M. "A New Flashover Dynamic Model of Polluted HV Insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.11, No.4, August 2004, p.p.577-584
- [11] Sundararajan, R. and Gorur, R.S., "Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.28, No.2, April 1993, pp. 209-218
- [12] Rizk, F.A.M., "Mathematical Models for Pollution Flashover", Electra, Vol.78, 1981, pp.71-103