



انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران
شاخه ي تهران



دانشگاه صنعتي اميركبير
قطب علمي قدرت

محاسبه جریان اتصال کوتاه در شبکه‌های نامتعادل توزیع همراه با تولید پراکنده

رضا ابراهیمی صادق جمالی احمد غلامی عبدل... بابایی

abdollah_babaee@ee.iust.ac.ir gholami@iust.ac.ir siamali@iust.ac.ir reza_ebrahimi@ee.iust.ac.ir

دانشگاه علم و صنعت

واژه‌های کلیدی: خطاهای نامتقارن، شبکه‌های نامتعادل توزیع، ژنراتورهای پراکنده، ماشین سنکرون، جریان اتصال کوتاه.

چکیده:

جریان‌های خطا و مشارکت ژنراتور و ولتاژهای ناشی از آن‌ها تهیه شده است. در پایان با در نظر گرفتن شبکه‌ای فرضی، منطبق بر شبکه‌های فشار متوسط توزیع کشور (عدم حضور سیم نول، جنس هادی و آرایش خطوط)، نتایج برنامه مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

۱- مقدمه

اتوماسیون در سیستم‌های توزیع یکی از مهم‌ترین ابزارها جهت ارتقاء قابلیت اطمینان و کارآرایی سیستم در شرایط بهره‌برداری می‌باشد. مسائلی همچون بهینه‌سازی شبکه، طراحی توان راکتیو، نحوه بازآرایی، تخمین حالت در سیستم و محاسبه اتصال کوتاه در میزان توانایی اتوماسیون بسیار مؤثر می‌باشند. در این میان، به‌دلیل اهمیت جریان اتصال کوتاه در طراحی سیستم زمین، محل و تنظیمات تجهیزات حفاظتی و بسیاری از موارد دیگر، برآورد و محاسبه آن مسئله‌ای بسیار مهم می‌باشد.

بارگذاری شبکه‌های توزیع واقعی، به‌دلیل وجود بارهای تک‌فاز، دوفاز و همچنین عدم تقارن خطوط، به‌صورت نامتعادل می‌باشد. با توجه به این مسئله، محاسبات پارامترهای شبکه از جمله محاسبه جریان اتصال کوتاه با

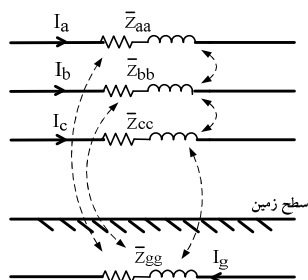
با پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌های میکروتوربین‌ها، پیل‌های سوختی و تجهیزات ذخیره‌کننده انرژی، فرصتی برای استفاده از ژنراتورهای پراکنده در شبکه‌های توزیع ایجاد شده است. حضور DGها، سبب ایجاد تغییراتی در شبکه از جمله پروفیل ولتاژ، افزایش سطح اتصال کوتاه، کاهش تلفات و غیره گردیده که این مسئله، به‌کار بردن تکنیک‌هایی جدید جهت در نظر گرفتن این تولیدات پراکنده را ضروری ساخته است.

در این مقاله، با در نظر گرفتن مدل‌های سه‌فاز برای خطوط هوایی و تولیدات پراکنده از نوع ماشین‌های سنکرون، روشی جهت برآورد جریان اتصال کوتاه و مشارکت DGها در جریان خطا ارائه شده است. ابتدا بر اساس توپولوژی شبکه، دو ماتریس وابسته به هم جهت نشان دادن تغییرات در جریان شاخه‌ها و ولتاژ شین‌ها تشکیل می‌شوند. سپس با در نظر گرفتن مدل‌های یاد شده و ترکیب دو ماتریس فوق، نحوه محاسبه جریان‌های خطا و مشارکت DG محاسبه می‌گردد. بر این اساس، با استفاده از نرم‌افزار Matlab، برنامه‌ای جهت محاسبه

موارد فوق و ترکیب ماتریس‌های وابسته، محاسبه جریان خطا و مشارکت DG در آن، به ازای انواع خطاهای نامتقارن بیان شده است. در پایان با در نظر گرفتن شبکه‌ای فرضی، جریان انواع خطاهای نامتقارن و مشارکت DG، در نقاط مختلف شبکه مورد محاسبه و بررسی قرار گرفته شده است.

۲- مدل‌سازی خطوط در شبکه‌های توزیع

تعیین و محاسبه امپدانس سری در خطوط هوایی، به عنوان گامی مهم پیش از بررسی سیستم‌های توزیع در نظر گرفته می‌شود. به دلیل وجود خطوط تک‌فاز و دوفاز در سیستم‌های توزیع و همچنین خطوط سه‌فاز بدون جایگشت با بارهای نامتعادل، لازم است که جهت بررسی امپدانس این خطوط، زمین به عنوان مسیر برگشت برای بارهای نامتعادل در نظر گرفته شود. شکل ۱ نمونه‌ای از خطی سه فاز در سیستم‌های توزیع را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مدل خط سه فاز در شبکه‌های توزیع.

در سال ۱۹۲۶، آقای کارسون تکنیکی برای محاسبه دقیق امپدانس‌های خودی و متقابل در تعداد دلخواهی از سیم‌های هوایی، ارائه کرد. در این مقاله، جهت محاسبه امپدانس خطوط از این روابط استفاده شده است [۸].
برای امپدانس‌های خودی داریم:

$$Z_{ii} = r_i + 9.869 \times 10^{-4} \cdot f + j 1.256 \times 10^{-3} \cdot f \cdot \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 6.4905 + \frac{1}{2} \ln \frac{r}{f} \right) \quad (1)$$

همچنین برای امپدانس‌های متقابل:

$$Z_{ij} = 9.86963 \times 10^{-4} \cdot f + j 1.25664 \times 10^{-3} \cdot f \cdot \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 6.4905 + \frac{1}{2} \ln \frac{r}{f} \right) \quad (2)$$

که در روابط فوق، f فرکانس شبکه و r مقاومت

فرض متعادل بودن شبکه، سبب ایجاد خطا در نتایج آن خواهد شد. بنابراین با تعریف یک مدل مناسب از سیستم می‌توان به نتایجی نزدیک‌تر به حالت واقعی دست یافت. در سال‌های اخیر، اثر تولید پراکنده بر مسائلی همچون کاهش تلفات شبکه، بهبود پروفیل ولتاژ و غیره، حضور آن‌ها را در شبکه‌های توزیع، پررنگ‌تر نموده است. حضور تولیدات پراکنده، سبب مشارکت آن‌ها در جریان خطا شده و در نتیجه سطح اتصال کوتاه شبکه را افزایش می‌دهند. چشم‌پوشی از این مسئله، سبب اختلال در عملکرد تجهیزات حفاظتی شبکه شده که در نتیجه، قابلیت اطمینان شبکه کاهش خواهد یافت.

خطاهای نامتقارن در گذشته توسط روش مؤلفه‌های متقارن مورد بررسی قرار می‌گرفتند [۱-۳]. به دلیل سادگی این روش، برای چند دهه از آن در محاسبه جریان اتصال کوتاه شبکه‌های متعادل استفاده شده اما امروزه به دلیل نامتعادل بودن شبکه، استفاده از این روش نتایج مفیدی به همراه نخواهد داشت. در مرجع [۴] محاسبات اتصال کوتاه بر اساس تعریف ماتریس امپدانس سه فاز انجام شده است. در مرجع [۵]، ضمن مدل‌سازی سیستم بر اساس ماتریس ادیتانس سه فاز، روشی دیگر جهت محاسبه جریان اتصال کوتاه ارائه گردیده است. در [۶]، نیز از روش پیشرو-پسرو جهت محاسبه جریان اتصال کوتاه استفاده شده است که این روش، ضمن استفاده از تمامی پارامترهای شبکه و در نتیجه وجود روابط ریاضی پیچیده، کاربرد آن در عمل بسیار مشکل است. آقای Teng، با ارائه دو ماتریس جدید وابسته به نام‌های BIBC^۱ و BCBV^۲ از آن‌ها در محاسبه اتصال کوتاه استفاده کرده که پایه و اساس روش استفاده شده در این مقاله نیز می‌باشد [۷].

در این مقاله، پس از بیان امپدانس خطوط سه‌فاز، الگوریتمی جدید جهت تشکیل ماتریس‌های فوق، در شبکه‌های سه‌فاز بیان شده است. سپس جهت بررسی DG، از مدل و روابط ژنراتور سنکرون با بارگذاری نامتقارن استفاده شده است. پس از آن، با در نظر گرفتن

^۱ . Bus Current Injection to Branch Current.

^۲ . Branch Current to Bus Voltage.

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (4)$$

که ماتریس‌های B و ΔV به ترتیب ماتریس‌های جریان شاخه‌ها و تغییرات ولتاژ شین‌ها می‌باشند. برای تشکیل ماتریس $BCBV$ نیز در شبکه‌های سه فاز می‌توان از الگوریتم زیر استفاده کرد:

گام ۱) ماتریسی مربعی با اندازه تعداد شین‌های سه فاز در نظر گرفته می‌شود.

گام ۲) امپدانس دیده شده از سر پست، در سه سطر نخست ماتریس، به صورت قطری قرار می‌گیرد.

گام ۳) در صورت وجود ارتباط بین شین‌های i و j ، ستون m ام در ستون n ام ماتریس تکرار می‌شود.

گام ۴) امپدانس سه فاز موجود (غیر صفر) بین شین‌های i و j در سطر n ام، پس از امپدانس‌های قبلی قرار می‌گیرد.

گام ۵) گام‌های سوم و چهارم، تا تشکیل کامل ماتریس $BCBV$ تکرار می‌شوند.

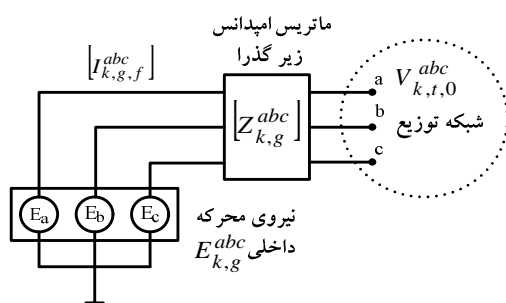
حال با تشکیل دو ماتریس فوق، می‌توان در تحلیل جریان اتصال کوتاه و تغییرات ولتاژ شین‌ها در زمان اتصالی از آن‌ها استفاده نمود.

۴- عملکرد DG در هنگام خطا

در این مقاله، DG های متصل به شبکه از نوع ژنراتور سنکرون در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین مدل ژنراتورهای سنکرون و رفتار آن‌ها در اتصال کوتاه مورد بررسی قرار گرفته می‌شود [۱۰].

۴-۱- مدل سازی DG

شکل ۲ مدار معادل تونن یک DG را در هنگام اتصال کوتاه کوتاه نشان می‌دهد.



شکل ۲- مدار معادل تونن DG در حین اتصال کوتاه

ویژه زمین (به طور معمول ۱۰۰ اهم متر) می‌باشند.

۳- ماتریس‌های وابسته BIBC و BCBV

روش‌های مرسوم، از ماتریس‌های ادمیتانس و امپدانس جهت بررسی و مدل‌سازی شبکه و محاسبات پارامترهای آن استفاده می‌کنند. در این مقاله از دو ماتریس وابسته به هم جهت مدل‌سازی و بررسی شبکه استفاده شده است. این دو ماتریس ساده اما مفید، ماتریس تزریق جریان شین به جریان شاخه BIBC و ماتریس جریان شاخه به ولتاژ باس BCBV می‌باشند. معرفی و جزئیات این ماتریس‌ها، در [۹] بیان شده است. در این مقاله تنها نحوه تشکیل این دو ماتریس در یک شبکه سه فاز و کاربرد آن‌ها در محاسبه جریان خطا بررسی شده است.

در یک شبکه، رابطه بین جریان تزریقی به باس‌ها و جریان شاخه‌ها به صورت زیر بیان می‌شود:

$$[B] = [BIBC][I] \quad (3)$$

که در این رابطه، ماتریس‌های I و B به ترتیب بیانگر جریان‌های تزریقی به شین‌ها و جریان شاخه‌ها بوده و ماتریس BIBC نیز به عنوان یک ماتریس ثابت بالا مثلثی، جریان تزریقی به شین‌ها را تابعی از جریان شاخه‌ها می‌سازد. برای تشکیل ماتریس BIBC در شبکه‌های سه فاز می‌توان به صورت زیر عمل کرد:

گام ۱) ماتریسی همبانی به اندازه مجموع تعداد شین‌های سه فاز، در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب باس مبنا نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

گام ۲) شین‌های سیستم به صورت ترتیبی از شین مبنا (پست) شماره‌گذاری شده و سپس با توجه به شماره باس‌ها، خطوط بین فازها نیز شماره‌گذاری می‌گردد.

گام ۳) در صورت وجود ارتباط بین شین‌های i و j ، ستون m ام در ستون n ام ماتریس تکرار شده، که m شماره خط ورودی به شین i و n شماره خط بین شین‌ها می‌باشد.

گام ۴) گام قبل را به صورت مجزا برای هر سه فاز شبکه انجام داده تا ماتریس BIBC کامل گردد.

همچنین ماتریس BCBV با توجه به شبکه، به صورت زیر تعریف می‌شود:

بارگذاری نامتقارن رسید [۱۱]. بنابراین ماتریس امپدانس ژنراتور در حالت بارگذاری نامتقارن برحسب امپدانس‌های توالی آن به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_+ \\ Z_- \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

حال با داشتن مقادیر توالی‌ها می‌توان ماتریس سنکرون را تشکیل داد. برای حالت دائمی مقادیر X^0, X^-, X^+ مشخص بوده و در حالت گذرا نیز مقدار X_d'' به عنوان راکتانس ژنراتور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اکنون، پس از بررسی و کامل شدن مدل در نظر گرفته شده، به بررسی روابط و معادلات جریان‌های خطا در DG می‌پردازیم.

۴-۲- جریان‌های خطا در پایانه‌های DG

با فرض وجود DG در شین k ام و با توجه به شکل ۲، پس از رخداد خطا بر پایانه‌های DG خواهیم داشت:

$$I_k^a = I_{k,g,f}^a, \quad I_k^b = I_{k,g,f}^b, \quad I_k^c = I_{k,g,f}^c \quad (9)$$

در روابط فوق جریان‌های $I_{k,g,f}^{abc}$ بیانگر جریان‌های خطای جاری شده در شین‌های ژنراتور می‌باشد.

همان‌طور که می‌دانیم، نیروی الکتروموتوری ($E_{k,g}^{abc}$) یک ژنراتور زیر بار، به علت وجود افت ولتاژ داخلی (افت ولتاژ راکتانس ژنراتور) همیشه بزرگتر از اختلاف سطح ترمینال‌های ژنراتور $V_{k,t}^{abc}$ می‌باشد. این نیروی الکتروموتوری در موقع اتصال کوتاه به علت لختی یا اینرسی حوزه مغناطیسی نمی‌تواند بلافاصله تغییر کند [۱۲]. بنابراین برای ولتاژهای داخلی ژنراتور خواهیم داشت:

$$E_{k,g,f}^a = E_{k,g,0}^a, \quad E_{k,g,f}^b = E_{k,g,0}^b, \quad E_{k,g,f}^c = E_{k,g,0}^c \quad (10)$$

همچنین رابطه بین ولتاژها و جریان‌های پس از خطا به صورت زیر می‌باشد:

$$[E_{k,g,f}^{abc}] - [V_{k,t,f}^{abc}] = -[Z_{k,g}^{abc}] [I_{k,g,f}^{abc}] \quad (11)$$

در این رابطه علامت منفی به علت جهت جریان در نظر گرفته شده می‌باشد. برای تغییر ولتاژها نیز داریم:

با توجه به شکل، ولتاژ داخلی ژنراتور به صورت منبع ولتاژی ثابت، پس از امپدانس زیرگذرای داخلی ماشین در نظر گرفته شده است. در صورتی که بارگذاری ژنراتور سنکرون متقارن باشد، با چشم پوشی از اثر برجستگی قطب، رابطه بین نیروی محرکه استاتور (E)، جریان استاتور (I) ولتاژ پایانه (V) برای سه فاز به صورت زیر می‌باشد:

$$V^{abc} = E^{abc} - Z_p I^{abc} \quad (5)$$

که ماتریس امپدانس ژنراتور (Z_p)، ماتریسی قطری بوده و به صورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$Z_p = \begin{bmatrix} Z_s & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در این رابطه Z_s «امپدانس سنکرون» نام دارد. وجود عناصر غیر قطری، نشانگر آنست که بین فازها تزویجی وجود ندارد. با توجه به اینکه اعضای قطر اصلی همگی با هم برابرند، در این حالت می‌توان از تحلیل تک فاز نیز استفاده کرد.

اما به دلیل نامتعادل بودن جریان خطوط سه فاز در شبکه‌های توزیع، DG‌های موجود در شبکه نیز به صورت نامتقارن بارگذاری می‌شوند. در این حالت دیگر نمی‌توان از تزویج بین فازها در ماشین صرف نظر کرده، بنابراین تمامی اعضای آن غیر صفر می‌باشند. با توجه به این مسئله، ماتریس امپدانس با در نظر گرفتن تزویج بین فازها به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Z_p = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_3 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_3 & Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

مسئله‌ای که در این جا حائز اهمیت بوده، رسیدن به پارامترهای ماتریس Z_p با توجه به اطلاعات موجود ژنراتور می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم به طور معمول، اطلاعات مربوط به امپدانس‌های توالی مثبت، منفی و صفر ژنراتور معلوم بوده و بنابراین تنها با استفاده از این پارامترها می‌توان ماتریس امپدانس ژنراتور را تشکیل داد. با استفاده از تکنیک مؤلفه‌های متقارن، می‌توان با داشتن امپدانس‌های توالی ژنراتور به ماتریس امپدانس حالت

$$I_{k,g,f}^{abc} = \left([BCBV_k^{abc}] [BIBC_k^{abc}] + Z_{k,g}^{abc} \right)^{-1} \times [V_{k,f,0}^{abc} - E_{k,g,0}^{abc}] \quad (22)$$

در روابط فوق، جهت محاسبه $E_{k,g,0}^{abc}$ ، ابتدا در حالت ماندگار، توان و ولتاژ ترمینالهای ژنراتور را از نتایج پخش بار گرفته و سپس جریانهای جاری شده از DG به سیستم را از رابطه (۲۳) به دست می آوریم:

$$I_s^{abc} = \left[\frac{S^{abc}}{V_t^{abc}} \right]^* \quad (23)$$

سپس برای ولتاژ داخلی ژنراتور با توجه امپدانس حالت ماندگار، داریم:

$$E^{abc} = [Z_s^{abc}] [I_s^{abc}] \quad (24)$$

باید توجه داشت که راکتانس ژنراتور در رابطه فوق به علت بررسی حالت پیش از خطا، X_d می باشد.

۵- جریان خطا و ترمینالهای ژنراتور در هنگام اتصال کوتاه شبکه

حضور DGها در شبکه، به جریان اتصال کوتاه کمک کرده و در واقع سطح آنرا افزایش می دهند. این افزایش جریان به عواملی همچون بار، ساختار ماشین، فاصله DG از محل خطا، نوع خطا و غیره بستگی دارد. بنابراین در نظر گرفتن DG در محاسبات جریان اتصال کوتاه شبکه امری ضروری می باشد. همچنین برای حفاظت DGها در شبکه، محاسبه جریان ترمینالهای ژنراتور در حین خطا بسیار با اهمیت می باشد. در این بخش، جریان اتصال کوتاه و جریان خروجی از پایانههای ژنراتور در هنگام خطا به ازاء همه خطاهای نامتقارن محاسبه شده است. این روشها را می توان برای هر تعداد DG موجود در شبکه به کار برد.

۵-۱- اتصال کوتاه سه فاز به زمین

جهت بررسی جریان خطا در حضور DG و جریان ترمینالهای DG در هنگام خطا، فرض می شود که در شین k اتصال کوتاهی سه فاز به زمین با امپدانس Z_f رخ داده و DG نیز در شین i شبکه قرار گرفته است. شکل ۳، خطای صورت گرفته در شین k را نشان می دهد.

$$\Delta E_{k,g,f}^{abc} = E_{k,g,0}^{abc} - E_{k,g,f}^{abc} \quad (12)$$

$$\Delta V_{k,t,f}^{abc} = V_{k,t,0}^{abc} - V_{k,t,f}^{abc} \quad (13)$$

با وارد کردن تغییرات ولتاژ، رابطه فوق به صورت زیر در می آید:

$$\begin{bmatrix} E_{k,g,0}^{abc} - \Delta E_{k,g,f}^{abc} \\ V_{k,t,0}^{abc} - \Delta V_{k,t,f}^{abc} \end{bmatrix} = - [Z_{k,g}^{abc}] [I_{k,g,f}^{abc}] \quad (14)$$

با توجه به رابطه (۱۰) و ثابت بودن ولتاژ داخلی ژنراتور در لحظه خطا، تغییرات ولتاژ ترمینال داخلی برابر صفر است:

$$\Delta E_{k,g,f}^a = \Delta E_{k,g,f}^b = \Delta E_{k,g,f}^c = 0 \quad (15)$$

با در نظر داشتن این مطلب، رابطه (۱۴) به صورت زیر بازنویس می شود:

$$[\Delta V_{k,t,f}^{abc}] = - ([E_{k,g,0}^{abc}] - [V_{k,t,0}^{abc}]) - [Z_{k,g}^{abc}] [I_{k,g,f}^{abc}] \quad (16)$$

اکنون با داشتن تغییرات ولتاژ و جریان در شین متصل به DG، این تغییرات را با توجه به ماتریسهای BIBC و BCBV بیان می کنیم. با در نظر گرفتن جریانهای خطا در رابطه (۹) و جایگذاری آن در رابطه (۳) داریم:

$$[B_f] = [BIBC] \begin{bmatrix} 0 & \dots & I_{k,f}^a & I_{k,f}^b & I_{k,f}^c & 0 \dots \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

رابطه (۱۷) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$[B_f] = [BIBC_k^a \ BIBC_k^b \ BIBC_k^c]^T \quad (18)$$

سپس برای محاسبه تغییرات ولتاژ شینها با توجه به رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$[\Delta V_{k,t,f}^{abc}] = [BCBV_k^a \ BCBV_k^b \ BCBV_k^c] \begin{bmatrix} BIBC_k^a \\ BIBC_k^b \\ BIBC_k^c \end{bmatrix} \quad (19)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۱۶) داریم:

$$[BCBV_k^{abc}] [BIBC_k^{abc}] I_{k,g,f}^{abc} = - ([E_{k,g,0}^{abc}] - [V_{k,f,0}^{abc}]) - [Z_{k,g}^{abc}] [I_{k,g,f}^{abc}] \quad (20)$$

و سپس با ساده کردن رابطه فوق خواهیم داشت:

$$([BCBV_k^{abc}] [BIBC_k^{abc}] + Z_{k,g}^{abc}) I_{k,g,f}^{abc} = V_{k,f,0}^{abc} - E_{k,g,0}^{abc} \quad (21)$$

و در پایان، برای جریانهای خطا در پایانههای DG داریم:

میزان جریان خروجی DG در هنگام خطا می‌باشند.
همچنین ماتریس $[Z_{sc}]$ که بیانگر امپدانس خطا بوده، به صورت زیر می‌باشد:

$$[Z_{sc}] = \begin{bmatrix} BCBV_k^a \\ BCBV_k^b \\ BCBV_k^c \\ BCBV_i^a \\ BCBV_i^b \\ BCBV_i^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} BIBC_k^a \\ BIBC_k^b \\ BIBC_k^c \\ BIBC_i^a \\ BIBC_i^b \\ BIBC_i^c \end{bmatrix} + [Z] \quad (32)$$

که در آن، ماتریس $[Z]$ نیز ترکیبی از Z_f و امپدانس زیرگذرای DG بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_f & Z_f & Z_f & 0 & 0 & 0 \\ Z_f & Z_f & Z_f & 0 & 0 & 0 \\ Z_f & Z_f & Z_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{i,g}^{aa} & Z_{i,g}^{ab} & Z_{i,g}^{ac} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{i,g}^{ba} & Z_{i,g}^{bb} & Z_{i,g}^{bc} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{i,g}^{ca} & Z_{i,g}^{cb} & Z_{i,g}^{cc} \end{bmatrix} \quad (33)$$

همان‌طور که از روابط مشخص است، ماتریس‌های $[Z]$ و $[Z_{sc}]$ 6×6 بوده که بیانگر تعداد فازهای تحت تأثیر قرار گرفته در اثر خطا می‌باشند.

در رابطه (۳۰)، ماتریس $[V_{sc}]$ به عنوان ماتریس تغییر ولتاژ شین‌ها، از ترکیب زیر تشکیل شده است:

$$[V_{sc}] = \begin{bmatrix} V_{k,0}^a & V_{k,0}^b & V_{k,0}^c & -E_{i,g,0}^a + V_{i,t,0}^a \\ -E_{i,g,0}^b + V_{i,t,0}^b & -E_{i,g,0}^c + V_{i,t,0}^c \end{bmatrix} \quad (34)$$

برای دیگر خطاها اعم از تک‌فاز و دو فاز به زمین نیز، اندازه ماتریس‌ها متناسب با تعداد فازهایی بوده که در خطا حضور داشته‌اند. برای مثال، در حالت خطای تک‌فاز، بر فاز a در شین k ام، با امپدانس Z_f و حضور DG در شین i ام، داریم:

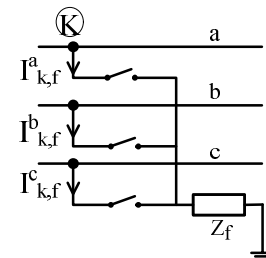
$$Z_{sc} = \begin{bmatrix} BCBV_k^a \\ BCBV_i^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} BIBC_k^a \\ BIBC_i^a \end{bmatrix} + [Z] \quad (35)$$

که در آن $[Z]$ برابر است با:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_f & 0 \\ 0 & Z_{i,g}^{aa} \end{bmatrix} \quad (36)$$

متناسب با روابط فوق، تغییر ولتاژ شین‌ها، جریان‌های خطا و DG، با روابط (۳۷) و (۳۸) بیان می‌شوند:

$$[V_{sc}] = \begin{bmatrix} V_{k,0}^a & -E_{i,g,0}^a + V_{i,t,0}^a \end{bmatrix} \quad (37)$$



شکل ۳- اتصال کوتاه سه فاز به زمین در شین k ام

در این حالت با توجه به مطالب گفته شده در بخش قبل، فرض می‌کنیم که در دو شین شبکه i و k اتصال کوتاه سه فاز به زمین رخ داده است. برای شین k، با توجه به شکل می‌توان نوشت:

$$I_k^a = I_{k,f}^a, \quad I_k^b = I_{k,f}^b, \quad I_k^c = I_{k,f}^c \quad (25)$$

و برای ولتاژ فازهای شین k ام نیز خواهیم داشت:

$$n_{k,f}^a = n_{k,f}^b = n_{k,f}^c = Z_f (I_{k,f}^a + I_{k,f}^b + I_{k,f}^c) \quad (26)$$

همچنین تغییر ولتاژها در شین k ام برابر است با:

$$\Delta V_{f,k}^{abc} = V_{k,0}^{abc} - Z_f (I_{k,f}^a + I_{k,f}^b + I_{k,f}^c) \quad (27)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۲۵) برای نقطه k و رابطه (۹) برای DG در شین i، برای تغییرات جریان شاخه‌ها داریم:

$$[B_f] = [BIBC] \begin{bmatrix} 0 & \dots & I_{k,f}^a & I_{k,f}^b & I_{k,f}^c & 0 \dots \\ 0 & \dots & I_{i,f}^a & I_{i,f}^b & I_{i,f}^c & 0 \dots \end{bmatrix}^T \quad (28)$$

همچنین برای تغییر ولتاژ شین‌ها با در نظر گرفتن رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{k,f}^a \\ \Delta V_{k,f}^b \\ \Delta V_{k,f}^c \\ \Delta V_{i,f}^a \\ \Delta V_{i,f}^b \\ \Delta V_{i,f}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BCBV_k^a \\ BCBV_k^b \\ BCBV_k^c \\ BCBV_i^a \\ BCBV_i^b \\ BCBV_i^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} BIBC_k^a \\ BIBC_k^b \\ BIBC_k^c \\ BIBC_i^a \\ BIBC_i^b \\ BIBC_i^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k,f}^a \\ I_{k,f}^b \\ I_{k,f}^c \\ I_{i,f}^a \\ I_{i,f}^b \\ I_{i,f}^c \end{bmatrix} \quad (29)$$

سپس با جایگذاری تغییر ولتاژها در رابطه (۲۹)،

می‌توان جریان‌ها را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$[I_{sc}] = ([Z_{sc}])^{-1} [V_{sc}] \quad (30)$$

که در این رابطه $[I_{sc}]$ برابر است با:

$$[I_{sc}] = \begin{bmatrix} I_{k,f}^a & I_{k,f}^b & I_{k,f}^c & I_{i,g,f}^a & I_{i,g,f}^b & I_{i,g,f}^c \end{bmatrix} \quad (31)$$

در ماتریس فوق I_k^{abc} ، جریان‌های خطا و I_i^{abc} بیانگر

که در این رابطه، جریان‌ها عبارتند از:

$$[I_{sc}] = [I_i^a \quad I_{i,g,f}^a \quad I_{i,g,f}^b] \quad (11)$$

همچنین، ماتریس $[Z_{sc}]$ ، به صورت زیر خواهد بود:

$$[Z_{sc}] = \begin{bmatrix} L_{11} - 2L_{12} + L_{22} & L_{13} - L_{23} & L_{14} - L_{24} \\ L_{31} - L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} - L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{bmatrix} + [Z] \quad (46)$$

که در آن، ماتریس $[Z]$ برابر است با:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_{i,g}^{aa} & Z_{i,g}^{ab} \\ 0 & Z_{i,g}^{ba} & Z_{i,g}^{bb} \end{bmatrix}$$

۶- نتایج شبیه‌سازی

با استفاده از نرم‌افزار Matlab، برنامه‌ای جهت محاسبه جریان اتصال کوتاه در شبکه‌های نامتقارن توزیع با تولید پراکنده تهیه شده است. این برنامه در ابتدا با استفاده از مدل امپدانس خطوط سه‌فاز و با توجه به الگوریتم‌های ارائه شده، ماتریس‌های BIBC و BCBV شبکه را تشکیل می‌دهد. سپس با در نظر گرفتن مدل ژنراتورهای سنکرون در بارگذاری نامتقارن و استفاده از ماتریس‌های فوق، مطابق بر روابط بیان شده در بخش قبل، جریان خطاهای نامتقارن و مشارکت DG (خروجی ترمینال‌های ژنراتور) را محاسبه می‌نماید.

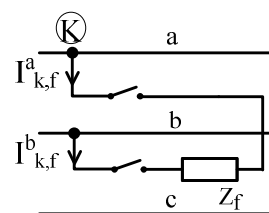
جهت انجام محاسبات خطا، شبکه‌ای ۲۰ کیلوولت مطابق شکل ۵ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، ژنراتوری در شین ۱۱ قرار گرفته که قدرت آن، ۱/۲ مگاوات آمپر در نظر گرفته شده است. با توجه به شبکه مورد نظر، جهت بررسی جریان‌های خطا و مشارکت DG در خطا، چهار حالت زیر مورد ارزیابی قرار گرفته شده است:

الف- افزایش سطح خطای شبکه ناشی از حضور DG: در این حالت، اثر DG بر جریان خطای تک‌فاز در شین ۷ و بر فاز a مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل ۶ مقایسه این دو جریان را نشان می‌دهد. در این شکل همان‌طور که انتظار می‌رفت، با قرار گرفتن DG در شبکه، سطح اتصال کوتاه به‌طور محسوسی افزایش یافته

$$[I_{sc}] = ([Z_{sc}]^{-1})[V_{sc}] \quad (38)$$

در اتصال کوتاه دو فاز به هم، نحوه محاسب جریان اتصال کوتاه متفاوت بوده و به همین دلیل، این خطا به طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲ اتصال کوتاه دو فاز:



شکل ۴- خطاهای دوفاز و سه فاز.

مطابق شکل ۴- الف، فرض بر آنست که اتصال کوتاه در فازهای a و b در شین k ام با امپدانس Z_f رخ داده و DG نیز در فاز i ام قرار گرفته است. در این حالت شرایط خطا در شین k ام به صورت زیر می‌باشد:

$$I_k^a = I_{k,f}^a, \quad I_k^b = -I_{k,f}^b, \quad I_k^c = 0 \quad (39)$$

$$n_{k,f}^a - n_{k,f}^b = Z_f I_{k,f}^a \quad (40)$$

با توجه به رابطه فوق، تغییرات ولتاژ شین‌ها پس از خطا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta n_{k,f}^a - \Delta n_{k,f}^b = (n_{k,0}^a - n_{k,0}^b) - Z_f I_{k,f}^a \quad (41)$$

بنابراین تغییر ولتاژها با توجه به جریان فازهای a و b در شین‌های k و i شبکه، به صورت زیر نوشته می‌شوند:

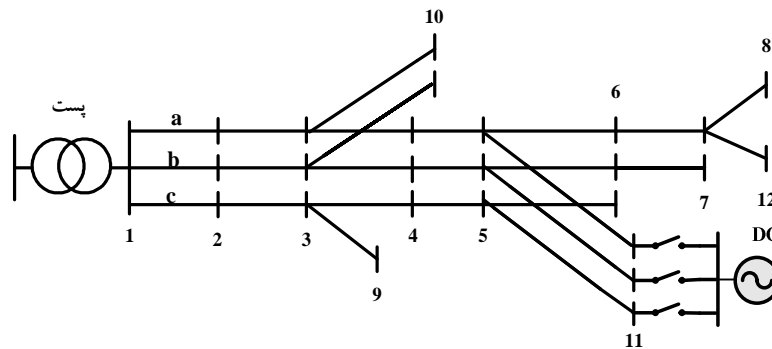
$$\begin{bmatrix} \Delta V_{k,f}^a \\ \Delta V_{k,f}^b \\ \Delta V_{i,t,f} \\ \Delta V_{i,t,f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BCBV_k^a \\ BCBV_k^b \\ BCBV_i^a \\ BCBV_i^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} BIBC_k^a \\ BIBC_k^b \\ BIBC_i^a \\ BIBC_i^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k^a \\ -I_k^b \\ I_{i,g,f}^a \\ I_{i,g,f}^b \end{bmatrix} \quad (42)$$

با ساده کردن رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{k,f}^a \\ \Delta V_{k,f}^b \\ \Delta V_{i,t,f} \\ \Delta V_{i,t,f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k^a \\ -I_k^b \\ I_{i,g,f}^a \\ I_{i,g,f}^b \end{bmatrix} \quad (43)$$

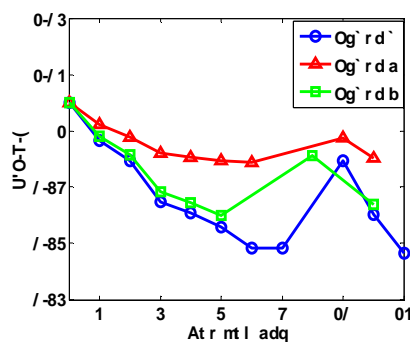
سپس با اعمال تغییر ولتاژها در رابطه فوق، جریان‌های خطا و DG، به دست می‌آیند:

$$[I_{sc}] = ([Z_{sc}]^{-1})[V_{sc}] \quad (44)$$



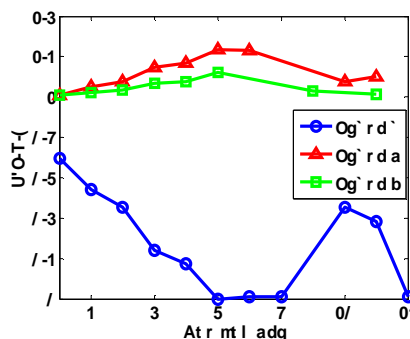
شکل ۵- شبکه فرضی بررسی شده.

است. بنابراین نمی توان از اثر DG در محاسبات اتصال کوتاه شبکه صرفه نظر شود. شکل ۷ پروفیل ولتاژ شبکه در حالت پیش از خطا را نشان می دهد. نامتعادلی شبکه در شکل مشخص می باشد.

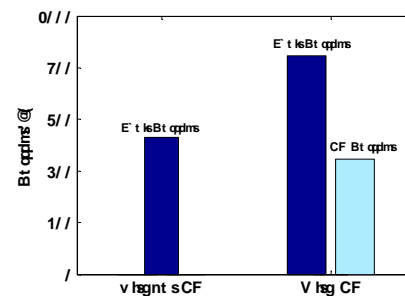


شکل ۷- پروفیل ولتاژ شبکه در حالت پیش از خطا.

در صورتی که در شین ششم و بر فاز a، اتصال کوتاه تک فاز به زمین رخ دهد، نتیجه آن بر پروفیل ولتاژ شبکه، در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- پروفیل ولتاژ، پس از خطای شین ۶ و فاز a.



شکل ۶- تاثیر DG بر جریان خطا.

ب- بررسی جریان های خطا و مشارکت DG در انواع مختلف خطاها:

جهت بررسی این حالت، با در نظر گرفتن نمونه ای از انواع خطاها در شین ۳، جریان خطاها و مشارکت DG به دست آمده، در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به نتایج حاصله، می توان دریافت که بیشترین جریان خطا مربوط به خطاهای سه فاز به زمین (مجموع سه فاز) می باشد.

ج- بررسی تاثیر جریان خطا بر پروفیل ولتاژ شبکه:

در این حالت، پروفیل ولتاژ شبکه در حالت پیش و پس از رخداد خطایی بر فاز a در شین ۶ مورد بررسی قرار گرفته شده است.

جدول ۱- جریان های ناشی از خطاهای مختلف بر شین ۳.

نوع خطا	فاز خطا	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)	I_{ga} (A)	I_{gb} (A)	I_{gc} (A)
تک فاز	فاز a	۱۶۰۴/۹	-	-	۵۵۱/۲	-	-
دو فاز به زمین	فاز bc	-	۱۷۹۰	۱۸۱۰	-	۵۷۷/۳	۵۴۹/۵
دو فاز به هم	فاز bc	-	۱۶۵۵/۹	-۱۶۵۵/۹	-	۴۹۵/۸	۴۹۰/۹
سه فاز به زمین	فاز abc	۱۸۸۴/۲	۱۹۱۸/۱	۱۸۹۷/۹	۵۶۵/۹	۵۷۴	۵۶۷/۳

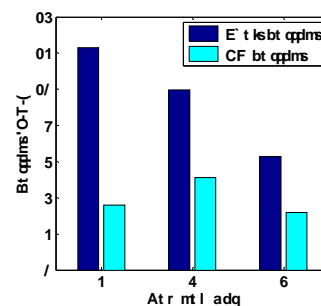
اتصال کوتاه شبکه می‌گردد. بنابراین چشم‌پوشی از آن در محاسبات جریان‌های خطا، نتایج غیر قابل قبولی به‌همراه خواهد داشت. رخداد اتصالی در شبکه علاوه بر مشکل جریان‌های خطا، تغییرات نامطلوب ولتاژ (کاهش در فاز خطا و افزایش در فاز سالم) را به‌دنبال داشته که در حفاظت شبکه باید مورد توجه قرار گرفته شود. همچنین میزان جریان خطا و مشارکت تولید پراکنده، تابعی از فاصله نقطه خطا از ابتدای فیدر و ژنراتور بوده و با تغییر آن به‌شدت تغییر می‌کند.

منابع

- [1] Grainger, J.J., and Stevenson, W.D., "Power system analysis," (McGraw-Hill International Editions, 1994).
- [2] Brandwajn, V., and Tinney, W.F., "Generalized method of fault analysis", IEEE Trans., 1985, PAS-104, (6), pp. 1301-1306.
- [3] Roy, L., "Generalized polyphase fault-analysis program: calculation of cross-country fault," Proc. IEE Vol. 126, No. 10, Oct. 1979.
- [4] W. H. Keresting and W.H. Philips, "Distribution System short circuit analysis," Proc. 25 th Intersociety Conf., IECEC-90, Vol. 1, pp. 310-315 1990.
- [5] T.H. Chen, M. S. Chen, W.J. Lee, P. Kotas, "Distribution system short circuit analysis-A rigid approach," IEEE Trans. Power System., Vol. 7, no. 1, pp. 1671-1681, 1992.
- [6] X. Zhang, F. Soudi, shirmohamdi. D and C. Cheng, "A distribution short circuit analysis approach using hybrid compensation method," IEEE Trans. Power System., Vol. 10, no. 4, pp. 2053-2059, Nov 1995.
- [7] J. Teng, "systematic short-circuit-analysis method for unbalanced distribution systems," IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 152, no. 4, pp. 549-555. July 2005.
- [8] W. H. Kersting, "Distribution system modeling and analysis," CRC Press, New York, 2002.
- [9] Teng, J.H., "A direct approach for distribution system load flow solutions," IEEE Trans., PWRD-18, (3), pp. 882-887, 2003.
- [10] Chen, T. H., Chen, M. S., Inoue, T., "Three-phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis," IEEE Trans., PWRD-6, (4), pp. 1671-1681, 1991.
- [11] O.I. Elgerd, "Electric Energy Systems Theory, An Introduction," MC Graw-Hill, 1983.

۱۲- مسعود سلطانی، محاسبات اتصال کوتاه در شبکه، انتشارات دانشگاه تهران، سال ۱۳۵۹.

با توجه به شکل ۸، اتصال کوتاه در فاز a سبب افزایش ولتاژ فازهای b و c شده و همچنین وجود DG در شین ۱۱، دلیل افزایش ولتاژ این نقطه در فاز a می‌باشد. در بررسی اثر فاصله نقطه خطا از شین مبنا و DG، در جریان اتصال کوتاه و مشارکت خطای ژنراتور: در این بررسی، سه نقطه از شبکه با فاصله‌های مختلف از شین مبنا و DG انتخاب شده و سپس جریان خطا و مشارکت ژنراتور در اثر خطای تک‌فاز به‌زمین (فاز b) در این نقاط، محاسبه و در شکل ۹ مقایسه شده‌اند:



شکل ۹- جریان خطا و مشارکت ژنراتور.

با در نظر گرفتن شکل فوق می‌توان دریافت که با افزایش فاصله نقطه خطا از شین مبنا و DG، به‌دلیل وجود امپدانس خطوط، از مقدار جریان اتصالی و مشارکت ژنراتور به مقدار زیاد کاسته خواهد شد. شین ۲ به‌دلیل داشتن کمترین فاصله از شین مبنا، بیشترین جریان خطا و شین 5 با حداقل فاصله از DG، بیشترین مشارکت خطای ژنراتور را داراست.

۷- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، استفاده از DG ها در شبکه‌های توزیع به دلیل فوایدی همچون بهبود پروفیل ولتاژ شبکه، کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان سیستم و غیره، بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله، برنامه‌ای جهت محاسبه جریان اتصال کوتاه و همچنین در نظر گرفتن تأثیر DG بر آن، به ازای انواع خطاهای نامتقارن شبکه تهیه و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

با توجه به نتایج حاصله می‌توان دریافت که حضور DG در شبکه‌های توزیع، سبب افزایش سطح جریان