فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال قدرت با در نظر گرفتن اثر تغییرات متغیرهای خط انتقال با فرکانس

جواد ساده (استادیار)
گروه برق دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
علی‌محمد رنجبر (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار روشی جدید برای فاصله یابی خطا در خطوط طولانی انتقال قدرت با استفاده از اطلاعات یک طرف خط ارائه شده است. به‌منظور مدل‌سازی خط انتقال، مدل وابسته به فرکانس آن که از دقت بالایی در شبیه‌سازی پدیده‌های گذرا برخوردار است، در نظر گرفته شده است. برای تعیین محل خطا تنها نمونه‌های ولتاژ و جریان در یک طرف خط کافی است و نیازی به اطلاعات انتهای دیگر خط نیست. در روش پیشنهادی نیازی به حذف مؤلفه‌ی dc و فیلتر کردن هارمونیک‌های فرکانس بالا که اغلب در شکل موج‌های پس‌از وقوع خطا وجود دارند، نیست. در این نوشتار، نتایج حاصل از مقایسه‌ی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتمی که اثر وابستگی متغیرهای خط به فرکانس را درنظر نمی‌گیرد، ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های رایانه‌یی دقت روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

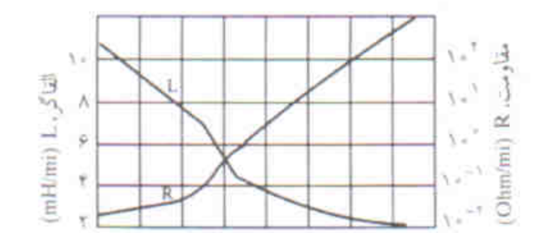
مقدمه

فاصله‌یابی خطا در سیستم انتقال توان الکتریکی به‌منظور تداوم سرویس‌دهی و عملکرد مطمئن سیستم امری ضروری به نظر می‌رسد. تعیین دقیق و سریع محل خطا بر روی خط انتقال به کاهش مدت زمان لازم برای بازگرداندن خط معیوب به سیستم منجر خواهد شد، که به‌نوبه‌ی خود افزایش قابلیت اطمینان سیستم را به دنبال دارد. برای دست‌یابی به دقت بالا در فاصله‌یابی خطا لازم است از مدل‌های دقیق خط انتقال استفاده شود. یکی از موضوعاتی که از دیرباز در مدل‌سازی خطوط انتقال در مطالعات گذراهای الکترومغناطیسی مورد توجه بوده است، وابستگی متغیرهای خط انتقال به فرکانس است. مدل‌هایی که متغیرهای آن ثابت است و با فرکانس تغییر نمی‌کند، قادر به شبیه‌سازی دقیق رفتار خط انتقال در محدوده‌ی فرکانسی وسیع موجود در سیگنال‌ها، در شرایط گذرا، نیستند. لذا ضروری است که مدل‌های وابسته به فرکانس در مدل‌سازی خطوط انتقال منظور شوند.

اگر از مدل خط با متغیرهای ثابت استفاده شود، نوسانات موجود در شکل موج ولتاژها و جریان‌ها ــ نسبت به حالتی که در آن از مدل وابسته به فرکانس استفاده شود ــ هارمونیک خیلی بیشتری دارند.[۱] محاسبه‌ی متغیرهای خطوط انتقال با کمک رابطه‌های کارلسون به‌ویژه برای خطوطی با مسیر برگشت زمین (مؤلفه‌ی صفر) نشانگر وابستگی زیاد این متغیرها به فرکانس است (شکل ۱).[۱]

با توجه به خطی بودن سیستم، قضیه‌ی جمع آثار صادق است و می‌توان از تبدیل فوریه برای رسیدن به پاسخ استفاده کرد. بنابراین ولتاژها و جریان‌های متغیر با زمان به حوزه‌ی فرکانس تبدیل شده و به کمک طیف آنها نمایش داده می‌شوند. سپس برای هر فرکانس خاص f با کمک شکل ۱ می‌توان متغیرهای متناظر را به دست آورده و برای آن محدوده‌ی فرکانسی خاص معادلات را حل کرد.

در نهایت تمام این پاسخ‌های جزئی را با یکدیگر تلفیق کرده، به‌کمک تبدیل معکوس فوریه به حوزه‌ی زمان برمی‌گردیم و پاسخ



شکل ۱. وابستگی R و L به فرکانس.

کامل را به دست می‌آوریم. در بسیاری از کاربردها، شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان ضروری است. بنابراین می‌توان از نظریه‌ی پیچش[1] (کانولوشن) در این مورد استفاده کرد.

مدل‌سازی خط انتقال با متغیرهای وابسته به فرکانس[1-3]

سنلسون نشان داد که اگر متغیرهای ولتاژ و جریان در حوزه‌ی زمان با متغیرهای وابسته‌ی دیگری جایگزین شوند، به مقدار معتنابهی در محاسبات ریاضی صرفه‌جویی می‌شود.[2] این متغیرها که موج‌های پیشرو و پسرو نام دارند، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$b_s = V_s - Z_1 i_s \qquad b_x = V_x - Z_1 i_x$$
$$f_s = V_s + Z_1 i_s \qquad f_x = V_x + Z_1 i_x$$
$$Z_1 = \lim_{\omega \to \infty} Z_0(\omega) \tag{1}$$

در این رابطه‌ها Z_1 مقدار حدی امپدانس مشخصه خوانده می‌شود.

زمانی که تبدیل حوزه‌ی فرکانسی رابطه‌های ۱ مورد نیاز است، به‌راحتی متغیر b_s با $B_s(\omega)$ جایگزین می‌شود. با به‌کار بردن این تبدیل، می‌توان معادلات شناخته شده‌ی خط انتقال در حوزه‌ی فرکانس را که به شکل زیرند:

$$\begin{cases} V_s(\omega) = \cosh(\gamma(\omega)x)\, V_x(\omega) - Z_0(\omega)\sinh(\gamma(\omega)x)\, I_x(\omega) \\ I_s(\omega) = \dfrac{1}{Z_0(\omega)}\sinh(\gamma(\omega)x)\, V_x(\omega) - \cosh(\gamma(\omega)x)\, I_x(\omega) \end{cases}$$

$$Z_0(\omega) = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \qquad \gamma(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \tag{2}$$

با تعاریف موج‌های پیشرو و پسرو به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} B_s(\omega) = A_2(\omega)\, F_s(\omega) + A_1(\omega) F_x(\omega) \\ B_x(\omega) = A_1(\omega)\, F_s(\omega) + A_2(\omega)\, F_x(\omega) \end{cases} \tag{3}$$

در این رابطه داریم:

$$A_1(\omega) = \frac{1}{\cosh(\gamma(\omega)x) + \frac{1}{2}\left[\frac{Z_1}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z_1}\right]\sinh(\gamma(\omega)x)}$$

$$A_2(\omega) = \frac{1}{2}\left[\frac{Z_0}{Z_1} - \frac{Z_1}{Z_0}\right]\sinh(\gamma(\omega)x)\, A_1(\omega) \tag{4}$$

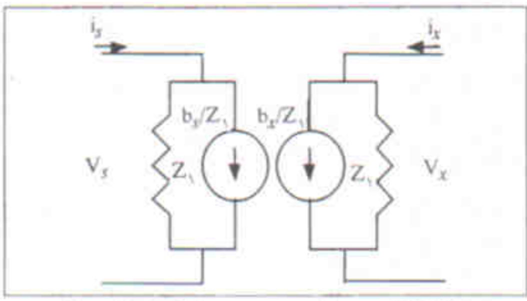
در این رابطه‌ها x فاصله از ابتدای خط انتقال است. با استفاده از مفهوم انتگرال پیچش می‌توان عبارت فوق را به حوزه‌ی زمان منتقل کرد:

$$b_s(t) = \int_0^\infty \{f_x(t-u)a_1(u) + f_s(t-u)a_2(u)\}\, du$$
$$b_x(t) = \int_0^\infty \{f_s(t-u)a_1(u) + f_x(t-u)\, a_2(u)\}\, du \tag{5}$$

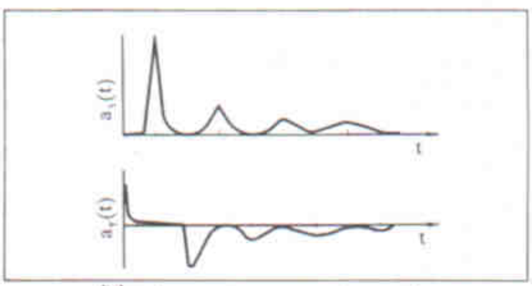
در این رابطه‌ها $a_1(t)$ و $a_2(t)$ تبدیل فوریه معکوس $A_1(\omega)$ و $A_2(\omega)$ هستند. مجموعه معادلات شماره ۱ به‌صورت مداری در شکل ۲ ترسیم شده‌اند و مقادیر b_s و b_x نیز از طریق رابطه‌های شماره‌ی ۵ قابل محاسبه‌اند. تابع‌های $a_1(t)$ و $a_2(t)$ که در این رابطه‌ها آمده‌اند، توابع وزنه[2] نام دارند و برای هر خط خاص مقادیر مشخصی دارند. بنابراین قبل از شروع شبیه‌سازی می‌توان این توابع را محاسبه و در حافظه‌ی رایانه ذخیره کرد (شکل ۳).

مشکل عمده در کاربرد رابطه‌های شماره‌ی ۵، کران بالای انتگرال‌گیری است زیرا برای رعایت دقت باید حتی‌الامکان کران بالای انتگرال را بزرگ انتخاب کرد که این امر به افزایش فوق‌العاده‌ی زمان محاسبات منجر می‌شود. با توجه به شکل ۳، اگرچه ممکن است توابع $a_1(t)$ و $a_2(t)$ از جنبه‌ی نظری در زمان‌های طولانی ادامه داشته باشند، معمولاً برای زمان‌های بزرگ‌تر از 3τ (τ زمان سیر موج در طول خط انتقال است)، این توابع را می‌توان با دقت مناسبی به‌صورت یک یا چند تابع نمایی نشان داد.

مدل ارائه شده توسط میر ـ دامل[3] به‌عنوان یکی از انتخاب‌های مدل خط انتقال، در نرم‌افزار EMTP وجود دارد. این مدل محدودیت‌هایی به شرح زیر دارد:



شکل ۲. ترسیم مداری مجموعه معادلات شماره‌ی ۱.



شکل ۳. توابع وزنه در مدل میر ـ دامل.[3]

۱. خطوط انتقال کاملاً جا به جا شده فرض می‌شوند؛
۲. وابستگی فرکانسی تنها در مؤلفه‌ی صفر منظور شده است؛
۳. برای تقریب توابع $a_1(t)$ و $a_2(t)$ در مورد زمان‌های بزرگ‌تر از 3τ از ساده‌ترین حالت که فقط یک تابع نمایی است استفاده شده است.
۴. فقط خطوط با هدایت موازی صفر ($G = 0$) بررسی شده‌اند.

مارتی برای سرعت بخشیدن به الگوریتم ارائه شده توسط میر-دامل، روش دیگری ارائه داده است.[1] یکی از مشکلات عمده‌ی روش میر-دامل محاسبه‌ی انتگرال‌های پیچش (روابط شماره‌ی ۵) است که در آنها توابع وزنه ($a_1(t)$ و $a_2(t)$) برای مدتی نسبتاً طولانی حضور دارند. نکته‌ی قابل توجه این که در هر گام از اجرای الگوریتم اصلی، این انتگرال‌ها باید محاسبه شوند ــ که امری است بسیار زمان‌بَر. به‌عنوان مثال، زمان اجرا در هر گام زمانی، نسبت به حالتی که خط انتقال با متغیرهای مستقل از فرکانس مدل شود حدود ۳برابر افزایش یافته است. این در حالی است که به‌ادعای مارتی روش پیشنهادی وی به افزایش حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد زمان اجرا منجر خواهد شد.[1]

یکی دیگر از مشکلات روش میر-دامل این است که نمی‌توان کران بالای انتگرال پیچش را به‌روشنی تعیین کرد، به گونه‌یی که نه از میزان دقت کاسته شود و نه محاسبات بیهوده انجام شود.

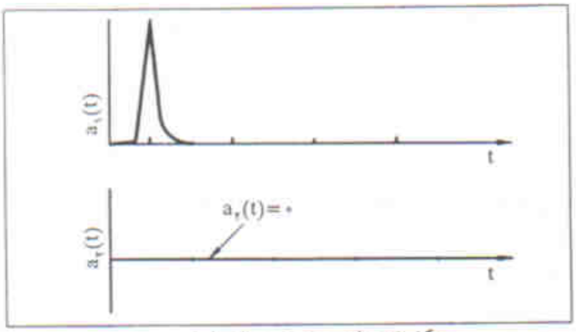
همانطور که میر-دامل اظهار می‌دارند، توابع وزنه ($a_1(t)$ و $a_2(t)$) را می‌توان به‌عنوان موج‌های رفت و برگشت در ابتدا و انتهای خط تعبیر کرد، به‌این ترتیب که خط با تابع ضربه‌یی تحریک، و انتهای خط نیز به امپدانس مشخصه‌ی حدی، Z_1، متصل است. از آنجا که امپدانس مشخصه‌ی حدی، Z_1، با امپدانس مشخصه‌ی واقعی، Z_c، متفاوت است، موج‌های رفت و برگشت وجود خواهند داشت (شکل ۳). در روش مارتی از این نکته‌ی مهم استفاده شده که اگر خط انتقالی به امپدانس مشخصه‌اش ختم شود، دیگر هیچ موج برگشتی وجود نخواهد داشت. در این صورت اگر رابطه‌ی ۱ به‌صورت زیر بازنویسی شود داریم:

$$\begin{cases} F_s(\omega) = V_s(\omega) + Z_{eq}(\omega)\, I_s(\omega) \\ F_x(\omega) = V_x(\omega) + Z_{eq}(\omega)\, I_x(\omega) \end{cases} \qquad (۶.الف)$$

$$\begin{cases} B_s(\omega) = V_s(\omega) - Z_{eq}(\omega)\, I_s(\omega) \\ B_x(\omega) = V_x(\omega) - Z_{eq}(\omega)\, I_x(\omega) \end{cases} \qquad (۶.ب)$$

در این رابطه‌ها $Z_{eq}(\omega)$ امپدانس معادل شبکه‌یی خطی است که تقریبی است از $Z_c(\omega)$. با کمک رابطه‌های ۶ و ۲ می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} B_s(\omega) = A_1(\omega)\, F_x(\omega) \\ B_x(\omega) = A_1(\omega)\, F_s(\omega) \end{cases} \qquad (۷)$$



شکل ۴. توابع وزنه در مدل مارتی.

در این رابطه داریم:

$$A_1(\omega) = e^{-\gamma(\omega)x} = \frac{1}{\cosh(\gamma(\omega)x) + \sinh(\gamma(\omega)x)} \qquad (۸)$$

حوزه‌ی زمانی $a_1(t)$ و $a_2(t)$ در شکل ۴ رسم شده است.[1] همچنین مدل حوزه‌ی زمانی معادلات ۷ به‌کمک انتگرال پیچش به‌صورت زیر است:

$$b_s(t) = \int_{\eta}^{\infty} f_x(t-u)\, a_1(u)du \qquad b_x(t) = \int_{\eta}^{\infty} f_s(t-u)\, a_1(u)du \qquad (۹)$$

کران پایین انتگرال‌های فوق از صفر به η تبدیل شده است، زیرا $a_1(t)$ برای زمان‌های قبل از η برابر صفر است. سادگی این رابطه‌ها نسبت به رابطه‌های مشابه در مدل میر-دامل (رابطه‌ی ۵) آشکار است. تنها مشکل موجود در این مورد تقریب $Z_{eq}(\omega)$ است که به محاسبات اضافی نیاز دارد. اما این محاسبات می‌تواند به صورت جداگانه و خارج از حلقه‌ی اصلی برنامه صورت بگیرد.

در ادامه با استفاده از مدل تشریح شده، به ارائه‌ی الگوریتم فاصله‌یابی خطا می‌پردازیم:

الگوریتم جدید فاصله‌یابی خطا

در این بخش روش جدیدی برای فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال طویل قدرت که متغیرهای آن تابع فرکانس فرض می‌شوند، ارائه می‌شود. برای یافتن محل خطا از معادلات تشریح شده در بخش پیشین استفاده می‌کنیم.

اتصال کوتاه سه‌فاز متقارن، بدون مقاومت خطا

ابتدا ساده‌ترین حالت را در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم اتصال کوتاه سه‌فاز متقارنی در فاصله‌ی x از ابتدای خط انتقال حادث شده است. اگر مقاومت خطا وجود نداشته باشد، یا در صورت وجود مقدار آن کم و قابل اغماض باشد، می‌توان نوشت:

$$V_x(\omega) = \frac{B_x(\omega) + F_x(\omega)}{2} = 0 \rightarrow B_x(\omega) = -F_x(\omega) \quad \forall\omega\in\Omega$$
(۱۰)

که در این رابطه Ω محدوده‌ی فرکانسی است که متغیرهای خط انتقال در این محدوده محاسبه شده‌اند. با کمک این رابطه و رابطه‌ی ۷ خواهیم داشت:

$$e^{-\gamma(\omega)x} F_s(\omega) + e^{\gamma(\omega)x} B_s(\omega) = 0 \qquad \forall\omega\in\Omega \tag{۱۱}$$

در این رابطه فقط یک مجهول وجود دارد. از طرف دیگر چون رابطه‌ی فوق به‌ازاء جمیع ωها صادق است، تعداد زیادی معادله خواهیم داشت. برای یافتن بهترین پاسخ ــ با در نظر گرفتن تمامی نمونه‌های فرکانسی ــ از روش ترکیبی نیوتن ـ رافسون و نیز روش تخمین کمترین مربعات خطا استفاده می‌کنیم. در حالت کلی معادله‌ی فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{F}(x) = 0 \tag{۱۲}$$

در این رابطه $\mathbf{F}$ برداری است که ابعاد آن تابع نمونه‌های فرکانسی موجود است. براساس روش نیوتن ـ رافسون می‌توان نوشت:

$$\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x}\right] \Delta x \cong -\mathbf{F}(x) \tag{۱۳}$$

و با کمک روش تخمین کمترین مربعات خطا خواهیم داشت:

$$\Delta x = -\left[\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x}\right]^T \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x}\right]\right]^{-1} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x}\right]^T \mathbf{F}(x) \tag{۱۴}$$

در این رابطه T عملگر جابه‌جایی بردار است. به این ترتیب ابتدا با انتخاب مقدار اولیه‌یی برای مکان خطا، محاسبات را شروع و در هر مرحله میزان تصحیح این تخمین را محاسبه می‌کنیم. این فرایند تکراری تا همگرایی کامل ادامه می‌یابد.

اتصال کوتاه تک‌فاز، بدون مقاومت خطا

برای بررسی اتصال کوتاه‌های نامتقارن از مؤلفه‌های مودال[۳] برای حذف اثرات فازهای مختلف بر یکدیگر استفاده می‌کنیم. فرض می‌کنیم در نقطه‌ی F به فاصله‌ی x از ابتدای خط انتقال، اتصال کوتاه تک‌فازی حادث شده باشد. در این صورت می‌توان نوشت:

$$V_x^a(\omega) = 0 \tag{۱۵}$$

و در شکل مؤلفه‌های مودال خواهیم داشت:

$$V_x^0(\omega) + V_x^1(\omega) + V_x^2(\omega) = 0 \tag{۱۶}$$

در اینجا $V_x^j(\omega)$ $(j = 0, 1, 2)$ مؤلفه‌های نمایی ولتاژ در محل اتصال کوتاه و در حوزه‌ی فرکانس است. با توجه به رابطه‌های موجود می‌توان نوشت:

$$\frac{F_x^0(\omega) + B_x^0(\omega)}{2} + \frac{F_x^1(\omega) + B_x^1(\omega)}{2} + \frac{F_x^2(\omega) + B_x^2(\omega)}{2} = 0 \tag{۱۷}$$

حال با کمک معادلاتی مشابه آنچه که در رابطه‌ی ۷ آمده است می‌توان برای هر $\omega\in\Omega$ نوشت:

$$\begin{aligned} &e^{-\gamma^0(\omega)x} F_s^0(\omega) + e^{\gamma^0(\omega)x} B_s^0(\omega) + e^{-\gamma^1(\omega)x} F_s^1(\omega) + \\ &e^{\gamma^1(\omega)x} B_s^1(\omega) + e^{-\gamma^2(\omega)x} F_s^2(\omega) + e^{\gamma^2(\omega)x} B_s^2(\omega) = 0 \end{aligned} \tag{۱۸}$$

مانند حالت قبل، در اینجا نیز فقط یک مجهول (x: فاصله تا محل خطا) وجود دارد در حالی که N معادله داریم (N تعداد نمونه‌های فرکانسی است). در این حالت نیز می‌توان به کمک روش تکراری نیوتن ـ رافسون محل خطا را تعیین کرد.

اتصال کوتاه سه‌فاز متقارن، با حضور مقاومت خطا

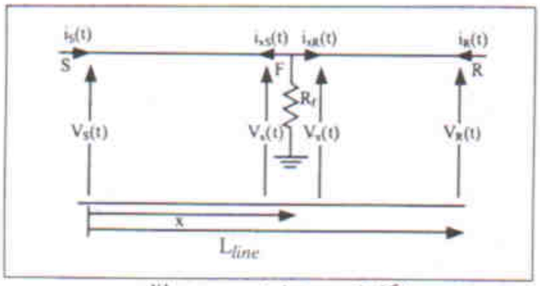
برای بررسی این حالت شکل ۵ را در نظر بگیرید. در مورد بخش اول خط (از ابتدا تا محل خطا) می‌توان رابطه‌های زیر را بیان کرد:

$$\begin{cases} V_s(\omega) = \cosh(\gamma(\omega)x)\, V_x(\omega) - Z_c(\omega)\sinh(\gamma(\omega)x)\, I_{xs}(\omega) \\ I_s(\omega) = \dfrac{1}{Z_c(\omega)}\sinh(\gamma(\omega)x)\, V_x(\omega) - \cosh(\gamma(\omega)x)\, I_{xs}(\omega) \end{cases} \tag{۱۹}$$

در این بخش از خط، مانند آنچه که برای تعریف توابع وزنی در حالت قبل انجام شد، امواج سیار پیشرو و پسرو را به صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$\begin{cases} F_s(\omega) = V_s(\omega) + Z_{eq}(\omega)\, I_s(\omega) \\ F_{xs}(\omega) = V_x(\omega) + Z_{eq}(\omega)\, I_{xs}(\omega) \end{cases} \tag{۲۰}$$

$$\begin{cases} B_s(\omega) = V_s(\omega) - Z_{eq}(\omega)\, I_s(\omega) \\ B_{xs}(\omega) = V_x(\omega) - Z_{eq}(\omega)\, I_{xs}(\omega) \end{cases} \tag{۲۱}$$



شکل ۵. سیستم فرضی مورد مطالعه.

از مقایسه‌ی روابط ۲۰ و ۲۱ با رابطه‌ی ۱۹ می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} B_s(\omega)=A_1(\omega)\ F_{xs}(\omega) \\ B_{xs}(\omega)=A_1(\omega)\,F_s(\omega) \end{cases} \qquad (۲۲)$$

در این رابطه داریم:

$$A_1(\omega)=e^{-\gamma(\omega)x}=\frac{1}{\cosh(\gamma(\omega)x)+\sinh(\gamma(\omega)x)} \qquad (۲۳)$$

به همین روش، برای نیمه‌ی دوم خط (از محل اتصال کوتاه تا انتها) می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} V_x(\omega)=\cosh\left[\gamma(\omega)(l-x)\right]V_R(\omega)-Z_c(\omega)\sinh\left[\gamma(\omega)(l-x)\right]I_R(\omega) \\ I_{xR}(\omega)=\frac{1}{Z_c(\omega)}\sinh\left[\gamma(\omega)(l-x)\right]V_R(\omega)-\cosh\left[\gamma(\omega)(l-x)\right]I_R(\omega) \end{cases} \qquad (۲۴)$$

l طول کل خط انتقال است. به همین ترتیب، تعاریف زیر را برای این قسمت انجام می‌دهیم:

$$\begin{cases} F_R(\omega)=V_R(\omega)+Z_{eq}(\omega)\ I_R(\omega) \\ F_{xR}(\omega)=V_x(\omega)+Z_{eq}(\omega)\ I_{xR}(\omega) \end{cases} \qquad (۲۵)$$

$$\begin{cases} B_R(\omega)=V_R(\omega)-Z_{eq}(\omega)\ I_R(\omega) \\ B_{xR}(\omega)=V_x(\omega)-Z_{eq}(\omega)\ I_{xR}(\omega) \end{cases} \qquad (۲۶)$$

از مقایسه‌ی روابط ۲۵ و ۲۶ با رابطه‌ی ۲۴ می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} B_R(\omega)=A_2(\omega)\ F_{xR}(\omega) \\ B_{xR}(\omega)=A_2(\omega)\,F_R(\omega) \end{cases} \qquad (۲۷)$$

در این رابطه داریم:

$$A_2(\omega)=e^{-\gamma(\omega)(l-x)}=\frac{1}{\cosh\left[\gamma(\omega)(l-x)\right]+\sinh\left[\gamma(\omega)(l-x)\right]} \qquad (۲۸)$$

در محل خطا می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت:

$$V_x(\omega)=-R_f\left[I_{xs}(\omega)+I_{xR}(\omega)\right] \qquad (۲۹)$$

با کمک روابطی که تاکنون به دست آمده است، می‌توان رابطه‌ی فوق را برحسب اندازه‌های ابتدا و انتهای خط انتقال به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\left[\frac{1}{A_1}\right]B_s+A_1F_s}{2}=\frac{-R_f}{Z_{eq}(\omega)}\left[\frac{\left[\frac{1}{A_1}\right]B_s+A_1F_s}{2}+\frac{\left[\frac{1}{A_2}\right]B_R-A_2F_R}{2}\right] \qquad (۳۰)$$

همچنین با توجه به پیوستگی ولتاژ در محل اتصال کوتاه، خواهیم داشت:

$$V_x(\omega)=\frac{\left[\frac{1}{A_1}\right]B_s+A_1F_s}{2}=\frac{\left[\frac{1}{A_2}\right]B_R+A_2F_R}{2}=V_x(\omega) \qquad (۳۱)$$

با استفاده از رابطه‌های ۳۰ و ۳۱ می‌توان نوشت:

$$F_R(\omega)=\frac{1}{2A_2}\left\{\left[2+\frac{Z_{eq}(\omega)}{R_f}\right]\frac{1}{A_1}B_s(\omega)+\frac{Z_{eq}(\omega)}{R_f}A_1F_s(\omega)\right\} \qquad (۳۲)$$

$$B_R(\omega)=\frac{A_2}{2}\left\{\frac{-Z_{eq}(\omega)}{R_f}\frac{1}{A_1}B_s(\omega)+\left[2-\frac{Z_{eq}(\omega)}{R_f}\right]A_1F_s(\omega)\right\} \qquad (۳۳)$$

چون معادلات ۳۲ و ۳۳ به‌ازاء هریک از نمونه‌های فرکانسی صادق‌اند، اگر N نمونه‌ی فرکانسی داشته باشیم، $2N$ معادله در اختیار خواهیم داشت. این در حالی است که تعداد مجهولات $2N+2$ است. این مجهولات عبارتند از: $R_f, x, V_R(\omega), I_R(\omega)$. لذا برای حل چنین سیستمی به فرض دیگری نیاز داریم. در طی چند دوره پس از وقوع خطا، شبکه‌ی انتهای خط را می‌توان با مدل تونن آن جایگزین کرد.[4] ولتاژ تونن در طی چند دوره‌ی اولیه پس از وقوع خطا ثابت فرض می‌شود. براین اساس می‌توان نوشت:

$$V_R(\omega)=E_R(\omega)-Z_R(\omega)I_R(\omega) \qquad (۳۴)$$

در این رابطه $E_R(\omega)$ ولتاژ مدارباز انتهای خطِ مورد مطالعه است. اکنون با کمک $3N$ رابطه‌ی ۳۲ تا ۳۴ می‌توان $2N+2$ مجهول به دست آورد. برای این کار می‌توان $2N$ مجهول $I_R(\omega)$ و $V_R(\omega)$ را بین این $3N$ معادله حذف کرد و رابطه‌ی زیر را به دست آورد:

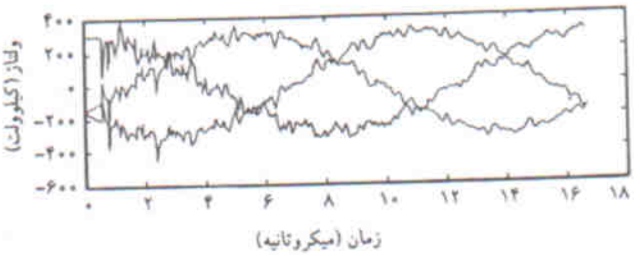
$$\mathrm{F}(x,R_f,\omega)=0 \qquad (۳۵)$$

برای حل این رابطه می‌توان از روش تخمین کمترین مربعات خطا استفاده کرد. لازم به یادآوری است که از چنین فرایندهایی می‌توان برای اتصال‌کوتاه‌های نامتقارن به همراه مقاومت نیز استفاده کرد.

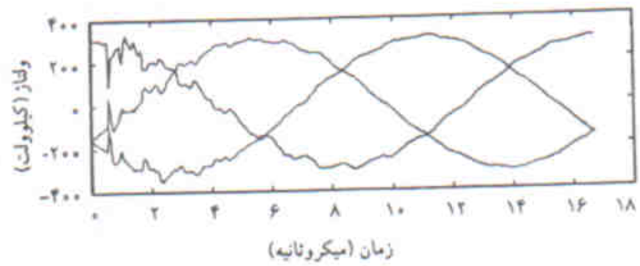
ارزیابی روش ارائه شده

برای ارزیابی روش پیشنهادی، یک خط انتقال $500kV$، ۱۳۸ مایل

توسط نرم‌افزار *EMTP* مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. به‌عنوان نمونه برای یک اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین در ۱۰۰ مایلی از ابتدای خط با مقاومت خطای ۵۰ اهم، ولتاژها و جریان‌های باس ابتدای خط در شکل‌های ۶ و ۷ ترسیم شده‌اند. برای انجام مقایسه، شبیه‌سازی در دو حالت ــ حالت اول، ثابت در نظر گرفتن متغیرهای خط انتقال و حالت دوم وابسته فرض کردن آنها به فرکانس ــ شکل گرفته است. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، شبیه‌سازی با فرض ثابت‌بودن

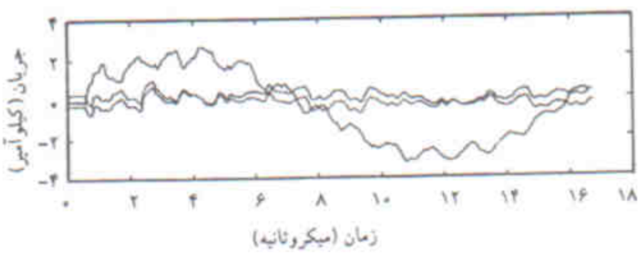


(الف)

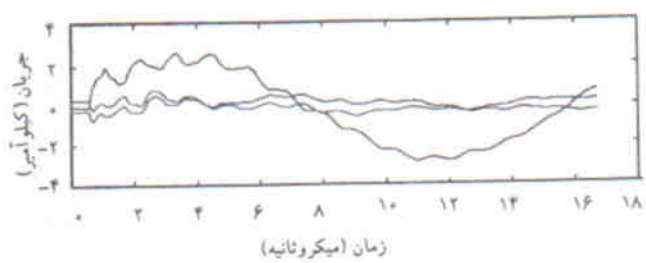


(ب)

شکل ۶. ولتاژهای ابتدای خط انتقال: الف) متغیرهای ثابت؛ ب) متغیرهای تابع فرکانس. (اتصال کوتاه در ۱۰۰ مایلی، زاویه‌ی شروع خطا ۹۰ درجه، مقاومت خطا ۵۰ اهم).

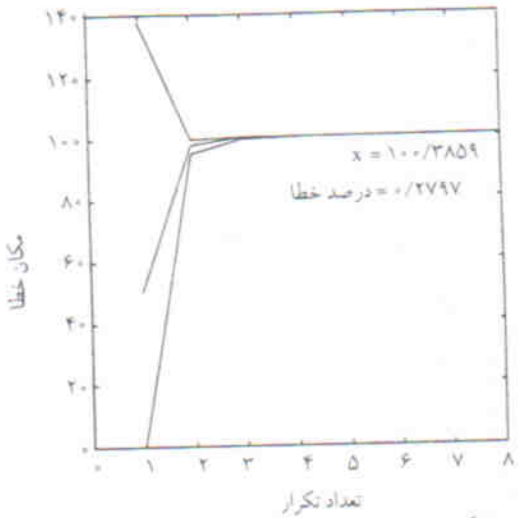


(الف)



(ب)

شکل ۷. جریان‌های ابتدای خط انتقال: الف) متغیرهای ثابت؛ ب) متغیرهای تابع فرکانس. (اتصال کوتاه در ۱۰۰ مایلی، زاویه‌ی شروع خطا ۹۰ درجه، مقاومت خطا ۵۰ اهم).



شکل ۸. همگرایی در روش نیوتن ـ رافسون (اتصال کوتاه در ۱۰۰ مایلی، زاویه‌ی شروع خطا ۹۰ درجه و مقاومت خطا ۵۰ اهم).

متغیرهای خط انتقال، به ایجاد هارمونیک‌های بسیار در شکل موج ولتاژها و جریان‌ها می‌انجامد (شکل‌های ۶ و ۷).

گفتیم که برای یافتن محل خطا از روش تکراری نیوتن ـ رافسون استفاده می‌کنیم. برای اتصال‌کوتاه تشریح شده در این بخش، نحوه‌ی دستیابی به جواب نهایی در مورد مقدارهای تخمینی اولیه‌ی متفاوت (صفر، ۵۰ و ۱۳۸ مایل) در شکل ۸ نشان داده شده است. می‌بینیم که جواب نهایی در هر سه حالت ــ با رعایت دقت ۰/۲۸ درصد ــ برابر ۱۰۰/۳۸ مایل است.

به‌منظور بررسی دقت روش در شرایط گوناگون از جمله زوایای شروع متفاوت، مکان‌های متفاوت خطا، و مقاومت‌های متفاوت خطا، شبیه‌سازی‌های متعددی صورت گرفته است. جدول ۱ برخی از این نتایج را نشان می‌دهد.

مقایسه‌ی الگوریتم‌های فاصله‌یابی خطا

در این بخش هدف مقایسه‌ی دو الگوریتم فاصله‌یابی خطا با فرض وابستگی یا عدم وابستگی متغیرهای خط انتقال به فرکانس است. برای انجام این مقایسه از الگوریتمی که نگارندگان این نوشتار برای فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال بدون در نظر گرفتن اثر فرکانس ارائه کرده‌اند استفاده شده است.[۵-۷] به همین منظور لازم است خط انتقالی را مد نظر قرار دهیم که اطلاعاتی از ساختار دکل‌ها و محل نصب هادی‌ها بر روی این دکل‌ها در اختیار باشد. بنابراین خط انتقال ۵۰۰ کیلو ولت و ۱۳۸ مایل ــ که از آن در پرونده‌های مثال برنامه‌ی *EMTP* برای شبیه‌سازی‌های مختلف استفاده شده است ــ انتخاب شد. مدل‌سازی وابسته به فرکانس این خط انتقال در نرم‌افزار *EMTP* صورت گرفته و به‌ازاء مکان‌های مختلف خطا، مقاومت‌های گوناگون

جدول ۱. برخی از نتایج تعیین محل خطا با فرض وابستگی متغیرها به فرکانس

محل خطا	۵۰ مایل		۸۰ مایل		۱۰۰ مایل	
زاویه‌ی شروع خطا	صفر درجه	۹۰ درجه	صفر درجه	۹۰ درجه	صفر درجه	۹۰ درجه
مقاومت خطای ۵ اهم	۵۰/۱۵۵۰ (۰/۱۱۲۳ درصد)	۵۰/۳۳۱۶ (۰/۲۴۰۳ درصد)	۸۰/۳۳۸۴ (۰/۲۴۵۲ درصد)	۸۰/۳۲۰۸ (۰/۲۳۲۵ درصد)	۱۰۰/۱۶۱۵ (۰/۱۱۷۱ درصد)	۱۰۰/۳۸۵۹ (۰/۲۷۹۷ درصد)
مقاومت خطای ۵۰ اهم	۵۰/۴۸۱۵ (۰/۳۴۸۹ درصد)	۵۰/۴۰۵۰ (۰/۲۹۳۵ درصد)	۸۰/۷۹۲۳ (۰/۵۷۴۲ درصد)	۸۰/۴۳۹۹ (۰/۳۱۸۷ درصد)	۱۰۱/۳۲۷۸ (۰/۹۶۲۲ درصد)	۱۰۰/۳۸۵۹ (۰/۲۷۹۷ درصد)

جدول ۲. نتایج تعیین محل خطا در مکان‌های مختلف اتصال‌کوتاه (بدون مقاومت خطا)

محل خطا	۵۰ مایل		۸۰ مایل		۱۰۰ مایل	
زاویه‌ی شروع خطا	صفر درجه	۹۰ درجه	صفر درجه	۹۰ درجه	صفر درجه	۹۰ درجه
متغیرهای وابسته به فرکانس	۵۰/۳۵۴۶ (۰/۲۵۷۰ درصد)	۵۰/۳۲۴۴ (۰/۲۳۵۰ درصد)	۸۰/۵۳۷۵ (۰/۳۸۹۵ درصد)	۸۰/۳۲۱۲ (۰/۲۳۳۴ درصد)	۱۰۰/۹۰۶۲ (۰/۶۵۶۷ درصد)	۱۰۰/۳۷۲۷ (۰/۲۷۰۱ درصد)
متغیرهای ثابت	۵۱/۷۰۷۴ (۱/۲۳۷۳ درصد)	۵۴/۷۴۹۰ (۳/۴۴۱۳ درصد)	۸۳/۶۴۴۴ (۲/۶۴۰۹ درصد)	۸۳/۶۴۴۴ (۲/۶۴۰۹ درصد)	۱۰۶/۴۵۶۵ (۴/۶۷۸۶ درصد)	۱۰۳/۴۱۴۹ (۲/۴۷۴۵ درصد)

جدول ۳. نتایج تعیین محل خطا در مکان‌های مختلف اتصال‌کوتاه (مقاومت خطا ۵۰اهم)

محل خطا	۵۰ مایل		۸۰ مایل		۱۰۰ مایل	
زاویه‌ی شروع خطا	صفر درجه	۹۰ درجه	صفر درجه	۹۰ درجه	صفر درجه	۹۰ درجه
متغیرهای وابسته به فرکانس	۵۰/۴۸۱۵ (۰/۳۴۸۹ درصد)	۵۰/۴۰۵۰ (۰/۲۹۳۵ درصد)	۸۰/۷۹۲۳ (۰/۵۷۴۲ درصد)	۸۰/۴۳۹۹ (۰/۳۱۸۷ درصد)	۱۰۱/۳۲۷۸ (۰/۹۶۲۲ درصد)	۱۰۰/۳۸۵۹ (۰/۲۷۹۷ درصد)
متغیرهای ثابت	۵۷/۷۹۰۷ (۵/۶۴۵۴ درصد)	۵۴/۷۴۹۰ (۳/۴۴۱۳ درصد)	۹۱/۲۴۸۴ (۸/۱۵۱۰ درصد)	۸۶/۶۸۶۰ (۴/۸۴۴۹ درصد)	۱۱۴/۶۶۰۵ (۱۰/۱۸۹ درصد)	۱۰۴/۹۳۵۷ (۳/۵۷۶۶ درصد)

خطا، و زوایای شروع خطای متفاوت شبیه‌سازی‌های متعددی صورت گرفته است. اطلاعات ولتاژ و جریان در باس ابتدای خط انتقال حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان اطلاعات ورودی الگوریتم‌ها برای انجام مقایسه مورد استفاده قرار گرفته است. دلیل این انتخاب، نزدیکی شکل موج‌های واقعی اندازه‌گیری شده به‌نتایجی است که از شبیه‌سازی‌های خط انتقال با فرض وابستگی متغیرهای آن به فرکانس به دست می‌آید. در جدول‌های ۲ و ۳ برخی از نتایج این مقایسه آورده شده است. در جدول ۲ فرض بر این است که $R_f = 0$ (مقاومت خطا وجود ندارد)، در حالی که در جدول ۳ نتایج حاصل از وجود مقاومت خطایی برابر ۵۰اهم ارائه شده است.

با مشاهده‌ی نتایج درج شده در این جدول‌ها واضح است که برای دستیابی به دقت مطلوب در فاصله‌یابی خطا، استفاده از الگوریتم مبتنی بر در نظر گرفتن اثر وابستگی متغیرهای خط انتقال به فرکانس مفید به نظر می‌رسد.

نتیجه گیری

در این نوشتار، روش نوین برای فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال قدرت ارائه شد. مدل وابسته به فرکانس جهت مدل‌سازی دقیق رفتار خط انتقال مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از اطلاعات یک طرف خط انتقال، عدم نیاز به حذف هارمونیک‌های مختلف از شکل موج‌های دریافتی، دقت بالا، حساسیت کم نسبت به تغییر زاویه‌ی شروع خطا، مقاومت خطا و محل خطا از جمله مزایای روش پیشنهادی است.

نتایج شبیه‌سازی‌های متعددی که بر روی یک شبکه‌ی نمونه انجام شده، مؤید کارائی الگوریتم ارائه شده است. نتایج حاصل از مقایسه‌ی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتمی که اثر وابستگی متغیرهای خط به فرکانس را در نظر نمی‌گیرد، نشانگر ضرورت مدل‌سازی دقیق خط انتقال به‌منظور دستیابی به دقت بالا در تعیین محل خطاست.

پانوشت‌ها

1. convolution
2. weighting functions
3. modal components

منابع

1. Marti, J.R. "Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-101**(1), pp. 147-157 (Jan, 1982).
2. Snelson, J.K. "Propagation of travelling waves on transmission lines-frequency dependent parameters," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-91**, pp. 85-91 (Jan/Feb., 1972).
3. Meyer, W.S. and Dommel, H.W., "Numerical modelling of frequency-dependent transmission line parameters in an electromagnetic transient program," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-93**, pp. 1401-1409 (Sept/Oct., 1974).
4. Westlin, S.E. and Bubenko, J.A., "Newton-Raphson technique applied to the fault location problem," Paper No.A76334-3, *IEEE PES Summer Meeting*, Portland, OR, (July, 1976).
5. Sadeh, J. and Ranjbar, A.M. "A new algorithm for fault location in power transmission lines," *Proceedings of the American Power Conference* (*APC*' 99), 61st. Annual Meeting, Chicago, Illinois, pp. 458-462.
6. Sadeh, J. and Ranjbar, A.M. "An accurate fault location algorithm for power transmission lines," European Transaction on Electrical Power (ETEP)", **10**(5), pp. 313-318 (Sept/Oct 2000).
7. Sadeh, J., Ranjbar, A.M., Hadjsaid, N. Feuillet, R. and T. Tran-Quoc, "New method for fault location in power transmission lines using one terminal data," *IEEE PowerTech' 99 Conference*, Budapest, Hungray, (1999).