

محاسبات حالت گذرای جریان اتصال کوتاه به روش تبدیل لاپلاس در شبکه راه آهن برقی AC با سیستم تغذیه اتوترانسفورماتور

محمد علی صندیدزاده (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
علی اصغر سرآبادانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
سیامک فرشاد، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

E-mail: sandidzadeh@iust.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۱/۱۴ پذیرش: ۹۲/۰۸/۱۵

چکیده:

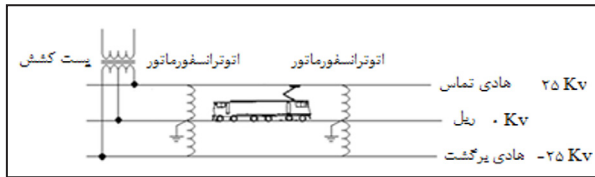
محاسبات اتصال کوتاه و حالت گذرای شبکه های الکتریکی از مهم ترین اجزای مراحل طراحی یک شبکه است. هادیهای یک شبکه علاوه بر تحمل جریان نامی شبکه و تأمین افت ولتاژ در محدوده قابل قبول، باید از نظر الکتریکی و مکانیکی تحمل جریانهای اتصال کوتاه را داشته باشند. علاوه بر این، باید محدوده تغییرات جریان اتصال کوتاه مشخص باشد تا ضمن انتخاب تجهیزات (سوئیچگیرها و ...) با قدرت قطع و تحمل جریان اتصال کوتاه، سیستم حفاظتی را سریع و بموقع قطع کند. در این راستا باید حداکثر جریان اتصال کوتاه شبکه محاسبه شود. در این مقاله، روش تبدیل لاپلاس به منظور محاسبه حالت گذرای جریان اتصال کوتاه در شبکه یک پارچه راه آهن برقی AC با روش تغذیه اتوترانسفورماتور (شامل پست کشش، خطوط بالاسری و اتوترانسفورماتور) به همراه شبکه سه فاز بالادستی (شامل شبکه سه فاز و خطوط انتقال) بکار گرفته شده است. تمامی اجزای سیستم راه آهن برقی AC در حوزه لاپلاس مدل سازی شده و حالت گذرای جریان اتصال کوتاه توسط برنامه نویسی در محیط نرم افزار MATLAB/m-file محاسبه شده است. علاوه بر روش تبدیل لاپلاس، روشهای حل عددی نیز قادر به محاسبه حالت گذرای جریان اتصال کوتاه هستند. در این مقاله به منظور تأیید نتایج محاسبه حالت گذرای اتصال کوتاه توسط روش تبدیل لاپلاس، نتایج به دست آمده با نتایج شبیه سازی در نرم افزار PSCAD (در این نرم افزار از روش حل عددی استفاده می شود) مقایسه شده است. این مقایسه نشان دهنده دقت مناسب روش مدل سازی و حل در حوزه لاپلاس، به منظور محاسبه حالت گذرای جریان اتصال کوتاه است.

واژه های کلیدی: راه آهن برقی AC، روش تغذیه اتوترانسفورماتوری، جریان اتصال کوتاه، حالت گذرا

۱. مقدمه

سیستم‌های راه آهن برقی AC از زمانی که برای قطارهای سریع‌السیر مورد استفاده قرار گرفته اند، در سراسر جهان در حال گسترش هستند (ایتالیا، کره، استرالیا، هند و زیمبابوه و ...). در میان ساختارهای متنوع ممکن برای سیستم راه آهن برقی AC، ساختار ۲۵×۲۵ Kv با روش تغذیه اتوترانسفورماتور به چندین دلیل، مانند کاهش تعداد پست کشش موردنیاز و افزایش بازدهی سیستم به سبب استفاده از ولتاژ انتقال بالا (ولتاژ ۵۰ KV بین فیدر و کنتری) و مهم تر از همه کاهش افت ولتاژ و تداخل الکترومغناطیسی بر روی تجهیزات مجاور خط، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [Tortia, 2006] [Hemmer et al, 2004 and]. شکل (۱) سیستم تغذیه اتوترانسفورماتور را نشان می‌دهد. بیشتر پژوهشها و تحقیقات در حوزه محاسبات جریان اتصال کوتاه مربوط به محاسبه بخش حالت مانای جریان اتصال کوتاه بوده است که به طور کلی می توان مطالعات انجام شده در این بخش را به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد. دسته اول مربوط به مطالعات و محاسبات اتصال کوتاه و در نتیجه ارایه مدلی مناسب از شبکه راه آهن برقی AC با سیستم تغذیه اتوترانسفورماتور برای مطالعات اتصال کوتاه است. مانند مراجع [Battistelli et al, 2011] و [Chen and Hsu, 1998] و [Battistelli et al, 2011]. دسته دوم با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی مانند: MAT-LAB، PSCAD و... به مطالعه اتصال کوتاه در شبکه راه آهن برقی پرداخته اند. مانند مراجع [Shenoy et al, 2004] و [Dolecek and Cerny, 2007]. دسته سوم نیز به مطالعه و محاسبه و شبیه سازی اتصال کوتاه در شبکه راه آهن برقی بعضی کشورها مثل کره و تایوان و... می پردازند، مانند مراجع [Lee, et al 2005] و [Huang et al, 2001]. اما آنچه در این مقاله ارایه می شود مدلسازی عناصر سیستم راه آهن برقی AC به همراه شبکه سه فاز بالادستی در حوزه لاپلاس و استفاده از تبدیل لاپلاس به منظور

محاسبه بخش حالت گذرای جریان اتصال کوتاه است.



۲. روشهای محاسبه حالت گذرا

۲-۱ مقدمه

محاسبه حالت گذرای رخ داده در یک سیستم قدرت به منظور حفاظت سریع و بموقع از سیستم، بخصوص برای سیستم‌های راه آهن برقی AC بسیار پر اهمیت است. هنگامی که یک اتصال کوتاه در سیستم راه آهن برقی AC رخ می دهد، جریان اتصال کوتاه را می توان به دو بخش، حالت مانا و حالت گذرا تقسیم بندی کرد. از محاسبه اندازه حالت مانای جریان اتصال کوتاه، برای تنظیم رله ها و تعیین قدرت کلیدها و ... استفاده می شود. ولی یکی از مهم ترین کاربردهای محاسبه حالت گذرای جریان اتصال کوتاه، استفاده از آن جهت تعیین شاخص برای تشخیص جریان راه اندازی قطار از جریانهای اتصال کوتاه در نقاط دور از پست کشش است، زیرا در نقاط دور از پست کشش جریان اتصال کوتاه، کاهش چشمگیری پیدا کرده و ممکن است جریان راه اندازی قطار در محدوده جریان اتصال کوتاه قرار گیرد. به طور کلی روشهای تحلیل حالت گذرا را می توان به دو دسته تبدیل لاپلاس و روش "دامل" تقسیم بندی کرد.

۲-۲ تبدیل لاپلاس

عملکرد یک سیستم قدرت در حالت گذرا می تواند توسط یک سری معادلات دیفرانسیل که بیانگر مدل فیزیکی تجهیزات است بیان شود، که می توان تبدیل لاپلاس را به این معادلات اعمال کرد. تبدیل لاپلاس یک تابع زمانی $f(t)$ ، توسط رابطه زیر بیان می شود:

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (۱)$$

۳- خازن: معادله بیانگر رفتار یک خازن متصل به دو گره **k** و **m** در زیر آمده است [Martinez-Velasco and Marti, 2009]:

$$I_{km}(s) = sCV_{km}(s) - Cv_{km}(0) \quad (۴)$$

که در این رابطه $v_{km}(0)$ ولتای خازن در $t=0$ است.

۲-۳ روشهای عددی

در این بخش اصول روش عددی که توسط "دامل" (Dom-mel, 1969) و [Dommel, 1996] که معروف ترین الگوریتم استفاده شده در برنامه های شبیه سازی برای حل حالت گذرای الکترومغناطیسی در سیستم قدرت است، بیان می شود. این الگوریتم بر اساس ترکیب انتگرال دوزنقه ای که برای به دست آوردن معادل همراه مقاومتی المانهای مداری پارامتر فشرده، استفاده گردید، بنا شده است. برای آشنایی با روش محاسباتی انتگرال دوزنقه ای می توان به مرجع [Martinez-Velasco and Marti, 2009] مراجعه کرد.

۲-۳-۱ معادل المانهای اساسی مدار در حوزه زمانی

معادل همراه مقاومتی المانهای اساسی مدار در زیر ارائه شده است [Martinez-Velasco and Marti, 2009]:

۱- مقاومت: از آنجایی که رفتار مقاومت توسط معادله جبری زیر قابل توصیف است، بکار گیری قانون دوزنقه ای لازم نیست. معادل همراه مقاومت خودش است.

$$v_k(t) - v_m(t) = v_{km}(t) = Ri_{km}(t) \quad (۵)$$

۲- سلف: رفتار یک سلف توسط معادله دیفرانسیل زیر قابل توصیف است.

$$v_k(t) - v_m(t) = v_{km}(t) = L \frac{di_{km}(t)}{dt} \quad (۶)$$

اگر قانون انتگرال دوزنقه ای را روی روابط بالا اجرا کنیم خواهیم داشت:

$$i_{km}(t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [v_{km}(t) + v_{km}(t - \Delta t)] \quad (۷)$$

این انتگرال $f(t)$ را به تابع دیگری با متغیر "s" تبدیل می کند که "s" یک متغیر مختلط است. برای توضیحات بیشتر در مورد تبدیل لاپلاس می توان به مراجع [Shenkman, 2005] و [Poularikas, 2000] مراجعه کرد.

۲-۱-۲ معادلهای المانهای اصلی مدار در حوزه لاپلاس

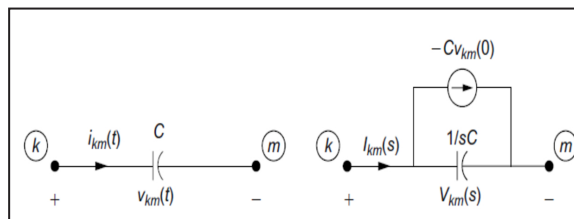
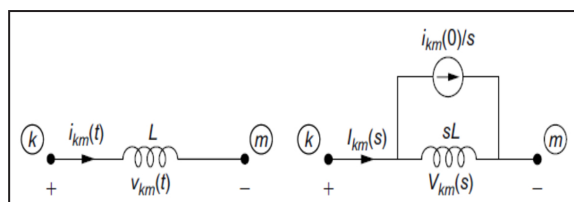
۱- مقاومت: رفتار یک مقاومت متصل به دو گره **k** و **m** در طی پدیده ی حالت گذرا توسط معادله زیر توصیف می شود. [Martinez-Velasco and Marti, 2009]:

$$V_{km}(s) = V_k(s) - V_m(s) = RI_{km}(s) \quad (۲)$$

۲- سلف: معادله زیر رفتار یک سلف متصل به دو گره **k** و **m** در طی پدیده حالت گذرا را توصیف می کند. [Martinez-Velasco and Marti, 2009]:

$$V_{km}(s) = V_k(s) - V_m(s) = sLI_{km}(s) - Li_{km}(0) \quad (۳)$$

که $i_{km}(0)$ جریان اولیه سلف در لحظه $t=0$ است.



اگر این معادله را برای جریان حل کنیم داریم:

(۱۳)

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} v_{km}(t) - \left[\frac{2C}{\Delta t} v_{km}(t - \Delta t) + i_{km}(t - \Delta t) \right]$$

از آنجایی که برای سلف، دومین ترم سمت راست به عنوان "بخش دارای حافظه" شناخته می شود، از نماد زیر استفاده می کنیم:

$$I_{km}(t) = - \left[\frac{2C}{\Delta t} v_{km}(t - \Delta t) + i_{km}(t - \Delta t) \right] \quad (۱۴)$$

معادله جریان را می توان به صورت زیر نوشته شود:

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} v_{km}(t) + I_{km}(t) \quad (۱۵)$$

شکل (۵)، معادل نورتین یک خازن به همراه "بخش دارای حافظه" را به صورت منبع جریان نمایش می دهد.

برای اطلاعات بیشتر در مورد مدل سازی دیگر تجهیزات سیستم قدرت می توان به مراجع [Dommel, 1996] و [Watson and Arrillaga 2007] مراجعه کرد.

از آنجایی که روش محاسباتی حالت گذرای جریان اتصال کوتاه در این مقاله، روش تبدیل لاپلاس است، بنابراین در ادامه به مدلسازی اجزای شبکه راه آهن برقی AC (شامل پست کشش، خطوط بالاسری، اتوترانسفورماتور) و همچنین شبکه بالادستی (شامل خطوط انتقال و پست انتقال) در حوزه لاپلاس پرداخته و با روش تبدیل لاپلاس حالت گذرای جریان اتصال کوتاه محاسبه و شبیه سازی شده است.

۳. مدل سازی سیستم راه آهن برقی

۳-۱ مدار معادل پست کشش با در نظر گرفتن مدار سه فاز

اولیه

بار راه آهن برقی به صورت تک فاز تغذیه می شود و این منجر به نامتقارنی در شبکه بالادستی (شبکه قدرت سه فاز متقارن) می شود،

که اگر این معادله را برای جریان حل کنیم، داریم:

(۸)

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} v_{km}(t) + \left[\frac{\Delta t}{2L} v_{km}(t - \Delta t) + i_{km}(t - \Delta t) \right]$$

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} v_{km}(t) + \left[\frac{\Delta t}{2L} v_{km}(t - \Delta t) + i_{km}(t - \Delta t) \right]$$

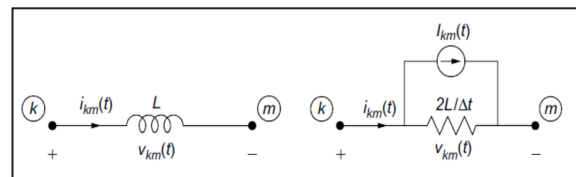
ترم دوم سمت راست به عنوان "بخش دارای حافظه" شناخته می شود که با نماد زیر نمایش داده می شود:

$$I_{km}(t) = \left[\frac{\Delta t}{2L} v_{km}(t - \Delta t) + i_{km}(t - \Delta t) \right] \quad (۹)$$

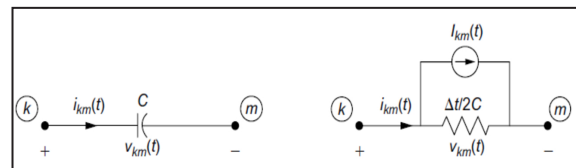
بنابراین معادله جریان به صورت زیر می تواند نوشته شود

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} v_{km}(t) + I_{km}(t) \quad (۱۰)$$

شکل (۴)، معادل همراه نورتین یک سلف که "بخش دارای حافظه" آن به صورت منبع جریان تعریف شده را نمایش می دهد.



شکل ۴. مدار معادل سلف



شکل ۵. مدار معادل خازن

۳. رفتار یک خازن با معادله دیفرانسیل زیر قابل توصیف است:

$$i_{km}(t) = C \frac{d}{dt} [v_k(t) - v_m(t)] = C \frac{dv_{km}(t)}{dt} \quad (۱۱)$$

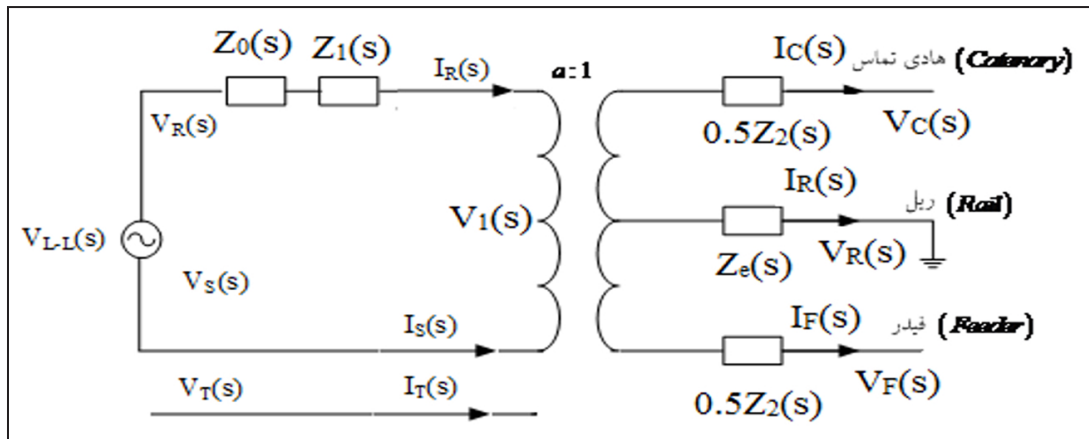
اگر قانون انتگرال دوزنقه ای را روی روابط بالا اجرا کنیم خواهیم داشت:

$$v_{km}(t) = v_{km}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2C} [i_{km}(t) + i_{km}(t - \Delta t)] \quad (۱۲)$$

محاسبات حالت گذرای جریان اتصال کوتاه به روش تبدیل لاپلاس در شبکه راه آهن برقی...

با در نظر گرفتن اثر مدار سه فاز اولیه به صورت دقیق مدل کرد. بنابراین در این مقاله برای پست کشش یک ماتریس 6×6 ، Y_{bus} در نظر گرفته شده است. این مدل بر اساس تغییرات در مدل مرجع [Kulworawanichpong, 2003] به دست آمده است.

بنابراین توان کشیده شده از سه فاز دیگر مشابه یکدیگر نیستند و به دنبال آن ولتاژهای سه فاز در باسهای مختلف متفاوت اند، پس دیگر نمی توان خطوط شبکه بالادستی را به صورت تک خطی مدل کرد و بایستی برای محاسبه پارامترهای الکتریکی هر یک از خطوط سه فاز، هر سه گره را در نظر گرفته و پست کشش را



شکل ۶. مدار معادل ترانسفورماتور تک فاز با سر وسط

$$\begin{bmatrix} I_R(s) \\ I_S(s) \\ I_T(s) \\ I_C(s) \\ I_{Rail}(s) \\ I_F(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2 Z_A(s)} & -\frac{1}{a^2 Z_A(s)} & \cdot & -\frac{1}{a Z_A(s)} & \cdot & \frac{1}{a Z_A(s)} \\ -\frac{1}{a^2 Z_A(s)} & \frac{1}{a^2 Z_A(s)} & \cdot & \frac{1}{a Z_A(s)} & \cdot & -\frac{1}{a Z_A(s)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\frac{1}{a Z_A(s)} & \frac{1}{a Z_A(s)} & \cdot & \frac{1}{Z_B(s)} + \frac{1}{Z_A(s)} & -\frac{1}{Z_B(s)} & \frac{1}{Z_B(s)} - \frac{1}{Z_A(s)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & -\frac{1}{Z_B(s)} & \frac{1}{Z_B(s)} & -\frac{1}{Z_B(s)} \\ \frac{1}{a Z_A(s)} & -\frac{1}{a Z_A(s)} & \cdot & \frac{1}{Z_B(s)} - \frac{1}{Z_A(s)} & -\frac{1}{Z_B(s)} & \frac{1}{Z_B(s)} + \frac{1}{Z_A(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R(s) \\ V_S(s) \\ V_T(s) \\ V_C(s) \\ V_R(s) \\ V_F(s) \end{bmatrix} \quad (16)$$

a : نسبت تبدیل ترانسفورماتور

$V_0(s)$: ولتاژ نامی اولیه پست کشش در حوزه لاپلاس

$$Z_A(s) = Z_r(s) + \frac{(Z_1(s) + Z_2(s))}{a^2}$$

$$Z_B(s) = Z_r(s) + \frac{2Z_e(s)}{a^2}$$

$Z_0(s)$: امپدانس اتصال کوتاه شبکه فشار قوی در حوزه لاپلاس

$Z_1(s)$ و $Z_2(s)$: امپدانس سیم پیچی سمت اولیه و ثانویه در

حوزه لاپلاس

$Z_e(s)$: امپدانس متصل شده بین تپ وسط از دو سیم پیچی و

ریل در حوزه لاپلاس

۲-۳ مدل خطوط شبکه بالاسری

سیم‌های هادی بالاسری، ریل‌ها و فیدر برگشت، سه نوع هادی اصلی در یک سیستم ریلی 2×25 Kv هستند که توان تراکشن در آن جاری می‌شود. سیم هادی بالاسری شامل هادی تماس و هادی حمال است که چون این هادی‌ها به یکدیگر متصل‌اند، دارای پتانسیل یکسانی هستند. نویسندگان برای ساده سازی مجموع هادی تماس و هادی حمال را با یک هادی مدل سازی کرده‌اند.

در اغلب مطالعاتی که در مورد سیستم راه آهن برقی AC انجام می‌شود، چون طول خطوط بالاسری کوتاه است (حدوداً ۱۰-۱۲ Km) از اثر خازنی خطوط چشم پوشی می‌کنند. از آنجایی که در حالت گذراها، خازن‌ها نقش اساسی را ایفا می‌کنند، در این مقاله ظرفیت خازنی خطوط بالاسری نیز محاسبه شده است.

۱-۲-۳ ماتریس ادمیتانس سلفی خطوط بالاسری

روش محاسبه ماتریس ادمیتانسی سلفی شش شینه برای خطوط بالاسری در حوزه ی فازور در مرجع [Kulworawanichpong, 2003] توضیح داده شده است که فقط کافی است آن روابط به حوزه لاپلاس انتقال داده شوند که در این صورت ماتریس ادمیتانس سلفی شش شینه برای خطوط بالاسری در حوزه لاپلاس به صورت رابطه (۱۷) خواهد بود.

(۱۷)

$$Y(s) = \begin{pmatrix} Y_{CC}(s) & Y_{CC}(s) & Y_{CF}(s) & -Y_{CC}(s) & -Y_{CF}(s) & -Y_{CF}(s) \\ Y_{CF}(s) & Y_{FF}(s) & Y_{FF}(s) & -Y_{CF}(s) & -Y_{FF}(s) & -Y_{FF}(s) \\ Y_{CF}(s) & Y_{FF}(s) & Y_{FF}(s) & -Y_{CF}(s) & -Y_{FF}(s) & -Y_{FF}(s) \\ -Y_{CC}(s) & -Y_{CF}(s) & -Y_{CF}(s) & Y_{CC}(s) & Y_{CF}(s) & Y_{CF}(s) \\ -Y_{CF}(s) & -Y_{FF}(s) & -Y_{FF}(s) & Y_{CF}(s) & Y_{FF}(s) & Y_{FF}(s) \\ -Y_{CF}(s) & -Y_{FF}(s) & -Y_{FF}(s) & Y_{CF}(s) & Y_{FF}(s) & Y_{FF}(s) \end{pmatrix}$$

که در این روابط:

$Y_{CC}(s)$: ادمیتانس هادی تماس در حوزه لاپلاس، $Y_{CF}(s)$:

ادمیتانس متقابل هادی تماس و ریل در حوزه لاپلاس،

$Y_{CF}(s)$: ادمیتانس متقابل هادی تماس و فیدر در حوزه لاپلاس،

$Y_{FF}(s)$: ادمیتانس ریل در حوزه لاپلاس،

$Y_{FF}(s)$: ادمیتانس متقابل ریل و فیدر در حوزه لاپلاس،

$Y_{FF}(s)$: ادمیتانس فیدر در حوزه لاپلاس

۲-۲-۳ ماتریس ادمیتانس خازنی خطوط بالاسری

با توجه به مرجع [Martinez-Velasco and Marti, 2009]

ارتباط بین ظرفیت خازنی بین سه هادی و ضرایب پتانسیل P

(ضرایب ماکسول) با رابطه زیر قابل بیان است:

$$C = P^{-1} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix}^{-1}$$

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i}$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2D_{ij}}{d_{ij}}$$

که در این رابطه:

r_i : شعاع هادی i ام، h_i : هادی i ام تا سطح زمین، D_{ij} : فاصله

بین هادی i ام تا هادی j ام، d_{ij} : فاصله بین هادی i ام تا تصویر

هادی j ام، است.

از طرفی می‌دانیم که ادمیتانس خازنی از رابطه $Y = C(s)$ قابل

محاسبه است. بنابراین ماتریس ادمیتانس خازنی در حوزه لاپلاس

از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Y(s) = C(s) \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix} = (s) \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix}$$

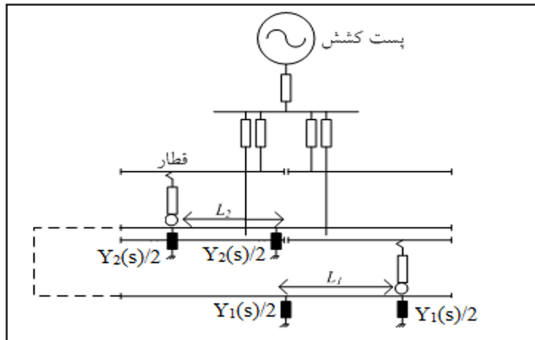
۳-۳ مدار معادل اتوترانسفورماتور

سیستم تغذیه اتوترانسفورماتور بسیار پیچیده است و روشهای

متفاوتی برای آنالیز آن وجود دارد [SHAO, 1988] و [Chan,]

محاسبات حالت گذرای جریان اتصال کوتاه به روش تبدیل لاپلاس در شبکه راه آهن برقی...

برقی در نقطه‌ی اتصال ریل قرار می‌گیرد. این ادmittانس در شکل (۸) نشان داده شده است [Kulworawanichpong, 2003].



شکل ۸. ادmittانس هدایت بین ریل و زمین در شبکه راه آهن برقی AC

به طوری که $Y_1(s)$ و $Y_2(s)$ ، طبق معادله (۲۱) محاسبه می‌شوند:

$$Y_1(s) = \frac{1}{Z_{rg}(s).L_1} \quad (21)$$

$$Y_2(s) = \frac{1}{Z_{rg}(s).L_2}$$

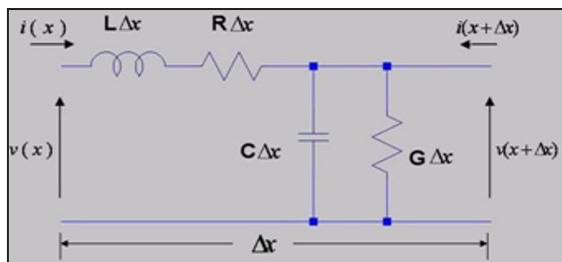
در این معادلات، $Z_{rg}(s)$ ادmittانس واحد طول هدایت ریل به زمین و L_1 ، L_2 فاصله قطار از شین مجاور خود است.

۳-۵ مدل سازی سیستم سه فاز بالادستی

۳-۵-۱ مدل سازی خط انتقال سه فاز در حوزه لاپلاس

۳-۵-۱-۱ مدل دو درگاهی خط انتقال در حوزه لاپلاس

شکل (۹)، بخشی از خط انتقال با طول $x\Delta$ را به منظور مدل سازی دو درگاهی خط انتقال در حوزه لاپلاس نمایش می‌دهد. پس از یک مطالعه تحلیلی در مورد خط انتقال، رابطه بین جریان و ولتاژ خط انتقال در حوزه لاپلاس به فرم رابطه به دست آورده شده است [Nano Dot Tek (N.D.T) 2007].



شکل ۹. بخشی از خط انتقال خطی با طول $x\Delta$

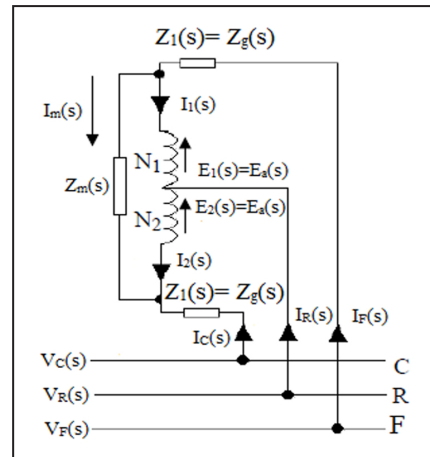
[1988] و [Hill, 1994] و [Bozkaya, 1987] و [His and]

[Chen, 1999]. در مدار اتوترانسفورماتورها بایستی براساس

مشخصه اتوترانسفورماتورها (شکل (۷)) مدل شود، به نحوی که

جریان اولیه اتوترانسفورماتور معادل نصف جریان ثانویه آن باشد

[Kulworawanichpong, 2003].



شکل ۷. مدار معادل اتوترانسفورماتور

$Z_g(s)$: ادmittانس نشتی سیم پیچی سمت اولیه و ثانویه

$Z_m(s)$: ادmittانس مغناطیس کنندگی

N_1 و N_2 : تعداد دورهای سیم پیچی اولیه و ثانویه

$E_1(s)$ و $E_2(s)$: ولتاژهای القایی در سیم پیچی اولیه و ثانوی

با نوشتن روابط برای جریان هادی تماس و فیدر و ریل، ماتریس

ادmittانس اتوترانسفورماتور در حوزه لاپلاس به صورت زیر به

دست خواهد آمد:

$$\begin{bmatrix} I_C(s) \\ I_R(s) \\ I_F(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2Z_g(s)} + \frac{1}{2Z_g(s)+Z_m(s)} & -\frac{1}{Z_g(s)} & \frac{1}{2Z_g(s)} - \frac{1}{2Z_g(s)+Z_m(s)} \\ -\frac{1}{Z_g(s)} & \frac{2}{Z_g(s)} & -\frac{1}{Z_g(s)} \\ \frac{1}{2Z_g(s)} + \frac{1}{2Z_g(s)+Z_m(s)} & -\frac{1}{Z_g(s)} & \frac{1}{2Z_g(s)} + \frac{1}{2Z_g(s)+Z_m(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_C(s) \\ V_R(s) \\ V_F(s) \end{bmatrix} \quad (20)$$

۳-۴ ادmittانس هدایت بین ریل و زمین

ادmittانس بین ریل و زمین، ادmittانس هدایت است، بنابراین در

ماتریس ادmittانس کلی سیستم در تمام شینه‌های شبکه AC راه آهن

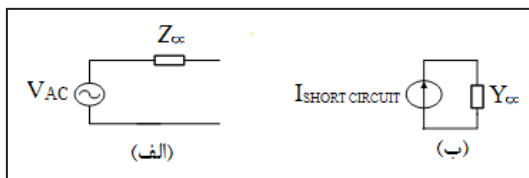
$$\begin{pmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \\ I_3(s) \\ I_4(s) \\ I_5(s) \\ I_6(s) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{A}{B} & 0 & 0 & -\frac{1}{B} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A}{B} & 0 & 0 & -\frac{1}{B} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{B} & 0 & 0 & -\frac{1}{B} \\ -\frac{1}{B} & 0 & 0 & \frac{A}{B} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{B} & 0 & 0 & \frac{A}{B} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{B} & 0 & 0 & \frac{A}{B} \end{pmatrix}}_{Y(s)} \begin{pmatrix} V_1(s) \\ V_2(s) \\ V_3(s) \\ V_4(s) \\ V_5(s) \\ V_6(s) \end{pmatrix} \quad (25)$$

۳-۵-۲ مدار معادل پست انتقال

پست انتقال به‌عنوان شبکه بی نهایت، مطابق با شکل (۱۱) بایستی با یک منبع ولتاژ و امپدانس سری (الف) یا با یک منبع جریان و ادیمیتانس موازی (ب) مدل شود. مدل ادیمیتانسی پست انتقال، به صورت معادله (۲۶) در ماتریس ادیمیتانس شبکه در نظر گرفته می‌شود [Kulworawanichpong, 2003].

$$Y_{\infty} = \frac{I_{short-circuit}}{V_{AC}} \quad (26)$$

در این رابطه، ولتاژ فاز شین فشارقوی پست انتقال و $I_{short-circuit}$ جریان اتصال کوتاه شبکه است.



الف) : مدار معادل تونن ب) : مدار معادل نورتون
شکل ۱۱. مدار معادل پست انتقال

۴. نحوه تشکیل ماتریس ادیمیتانس

شبکه AC راه آهن برقی شامل تعداد زیادی پست کشش و قطار است. همانطور که اشاره شد، تمامی اجزای شبکه به صورت ادیمیتانسی مدل شدند. بنابراین ماتریس ادیمیتانس سراسر شبکه، به ترتیب زیر محاسبه می‌شود. هر یک از اجزای سیستم می‌توانند به یکی از دو صورت ادیمیتانس سری متصل بین دو شین یا یک

(۲۲)

$$\begin{pmatrix} V_1(s) \\ I_1(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma(s)l) & Z(s)\sinh(\gamma(s)l) \\ Y(s)\sinh(\gamma(s)l) & \cosh(\gamma(s)l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2(s) \\ I_2(s) \end{pmatrix}$$

اگر یک سری محاسبات ریاضی بر روی رابطه (۲۲)، انجام شود و رابطه جریانها بر حسب ولتاژها نوشته شود، رابطه (۲۴) به دست خواهد آمد که در این رابطه $Y(s)$ ماتریس دو درگاهی خط انتقال است.

اگر فرض کنیم:

$$\cosh(\gamma(s)l) = A \quad (23)$$

$$Z(s)\sinh(\gamma(s)l) = B$$

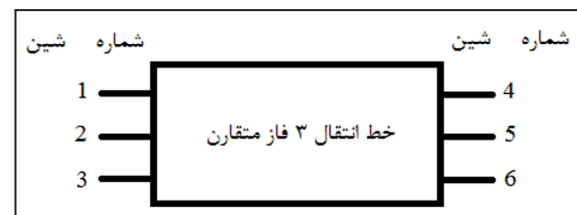
$$Y(s)\sinh(\gamma(s)l) = C$$

که در این صورت:

$$\begin{pmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{A}{B} & -\frac{1}{B} \\ -\frac{1}{B} & \frac{A}{B} \end{pmatrix}}_{Y(s)} \begin{pmatrix} V_1(s) \\ V_2(s) \end{pmatrix} \quad (24)$$

۳-۵-۱-۲ مدل شش درگاهی خط انتقال سه فاز متقارن

با فرض اینکه خط انتقال سه فاز، متقارن بوده و ترنسپوز نیز باشد، می‌توان از اثر سلفی و ظرفیت خازنی بین خطوط انتقال در طول خط چشم پوشی کرد. بنابراین مدل شش درگاهی خط انتقال سه فاز با توجه به شماره شین های نشان داده شده در شکل (۱۰) به صورت معادله ی (۲۵) است.



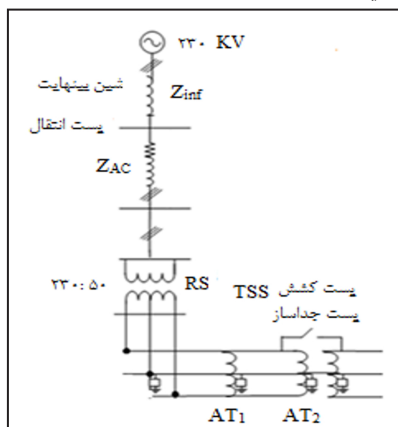
شکل ۱۰. بلوک دیاگرام خط انتقال سه فاز متقارن

محاسبات حالت گذرای جریان اتصال کوتاه به روش تبدیل لاپلاس در شبکه راه آهن برقی...

دو گره در ماتریس $[V]$ را برابر $(V_{\text{short circuit}})$ در نظر گرفته ایم و چون جریانی به دیگر گرهها وارد نمی شود در ماتریس $[I]$ ، جریان بقیه گره ها را مساوی صفر (با صرف نظر کردن از جریانهای بار) قرار داده و همچنین ولتاژ بقیه گره ها در ماتریس $[V]$ مجهول فرض شده اند. به این ترتیب در معادله ماتریسی (۲۸) برای هر اتصال کوتاه رخ داده بین دو گره در شبکه، دارای n معادله و n مجهول هستیم که با حل این n معادله و n مجهول در حوزه لاپلاس، می توانیم به معادله جریانهای اتصال کوتاه و همچنین ولتاژ گرههایی که دچار اتصال کوتاه شده اند دست یابیم. پس از به دست آوردن جواب معادلات (۲۸) در حوزه لاپلاس، از جریانها و ولتاژهای مورد نظر عکس تبدیل لاپلاس می گیریم تا معادله جریانها و ولتاژهای مورد نظر در حوزه زمانی مشخص شود.

۶. نتایج شبیه سازی

به منظور بررسی صحت نتایج شبیه سازی، برای یک شبکه راه آهن برقی AC با روش تغذیه اتوترانسفورماتور (شامل یک ترانسفورماتور سر وسط، دو اتوترانسفورماتور) متصل به شبکه بالادستی (شامل خط انتقال و شین ۲۳۰ KV کوچک مطالعاتی، نتایج شبیه سازی در حوزه لاپلاس با نتایج شبیه سازی در محیط PSCAD مقایسه شده است.



شکل ۱۲. شبکه راه آهن برقی نمونه ی مطالعاتی

ادمیتانس موازی به زمین باشند.

با فرض I, j به عنوان دو شین شبکه، عناصر قطری و غیرقطری ماتریس ادمیتانس شبکه از معادلات (۲۷) به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$[Y_{ij}] = -Y_{ij} \quad (27)$$

$$[Y_{ii}] = \sum_{h=1}^{NB} Y_{ih}$$

در اینجا NB تعداد کل شینهای شبکه است. بنابراین، ماتریس ادمیتانس به وسیله مجموعه ای از اجزای سری یا موازی متصل به سیستم ساخته می شود.

۵. روش تحلیل گره برای به دست آوردن حالت گذرای جریان اتصال کوتاه با استفاده از روش تبدیل لاپلاس

پس از مدل سازی تمامی اجزای سیستم راه آهن برقی AC در حوزه ی لاپلاس و تشکیل ماتریس Y_{bus} کل سیستم، می توان معادله ماتریسی زیر را نوشت:

$$[I] = [Y][V] \quad (28)$$

از سه ماتریس معادله (۲۸) تمامی عناصر ماتریس ادمیتانس گره شبکه در حوزه لاپلاس $[Y]$ ، کاملاً معلوم است. ابعاد ماتریسها به صورت $[I]_n$ و $[V]_n$ و $[Y]_{n \times n}$ است که n برابر مجموع تعداد گرههای (باس بار) کل شبکه است. ولتاژ گرههای متصل به پست انتقال شبکه بالادستی معلوم هستند (سه فاز متقارن با kv $V_{\text{rms L-L}} = 230$) و جریان این گرهها مجهول در نظر گرفته شده است و مطابق تحلیل گرهی مدار، چون در حالت اتصال کوتاه رخ داده در دو گره، مثلاً اتصال هادی تماس به ریل، جریان اتصال کوتاه از گره هادی تماس خارج شده و به گره ریل وارد می شود. بنابراین در ماتریس $[I]$ ، جریان مربوط به گره هادی تماس در باس بار مورد نظر $(I_{\text{short circuit}})$ و جریان مربوط به گره ریل در باس بار مورد نظر را $(-I_{\text{short circuit}})$ ، در نظر گرفته و ولتاژ این

جدول ۱. پارامترهای ورودی شبکه راه آهن برقی [Kulworawanichpong, 2003]

kV 230	ولتاژ شبکه انتقال
2	تعداد پستهای انتقال
$j \Omega / \text{Km} 1.3 + 3864$	امپدانس خطوط انتقال
$7.751 \times 10^{-9} \text{ F/Km}$	ظرفیت خازنی خط انتقال
Kv 27.5	شبکه راه آهن برقی AC
$\Omega 2j/3 + 0.23/0 = Z_A$ $\Omega Z_B = 0.12/0 + 21/1j$	امپدانس ترانسفورماتور پست کشش
MVA 5/8	ظرفیت ترانسفورماتور پست کشش
$1.0 \Omega / \text{Km}$	امپدانس هدایت به زمین
$\Omega j 5/3$	امپدانس شین بی نهایت
Km 20	طول مسیر
0 Km و 1	تعداد و موقعیت پست های کشش
$j. / 0.0997 + . / 1564$	امپدانس نشتی اتوترانسفورماتور
$k \Omega 4 / 101 + 1 / 297j$	امپدانس مغناطیس کنندگی اتوترانسفورماتور
2 Km و 10 و 20 Km	تعداد و موقعیت اتوترانسفورماتور

۶-۱ پارامترهای الکتریکی هادی های شبکه بالاسری

پارامترهای الکتریکی R و L و C برابر است با:

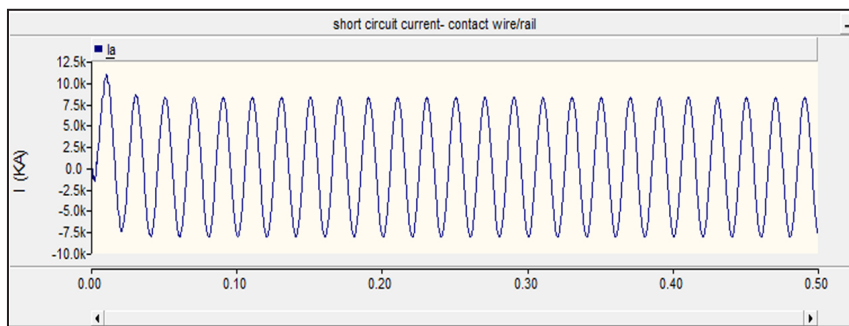
$$C = R \begin{bmatrix} C & R & F \\ 1/18 & 0.0271 & 0.212 \\ 0.0271 & 2/35 & 0.149 \\ 0.212 & 0.149 & 0.716 \end{bmatrix} \times e^{-\alpha}$$

جریان اتصال کوتاه را برای هر سه نوع اتصال کوتاه هادی تماس به ریل، فیدر به ریل و هادی تماس به ریل در فاصله 20 Km از پست کشش برای شبکه نمونه مطالعاتی شکل (۱۲)، در محیط PSCAD شبیه سازی شده و با نتایج شبیه سازی در حوزه لاپلاس مقایسه شده است.

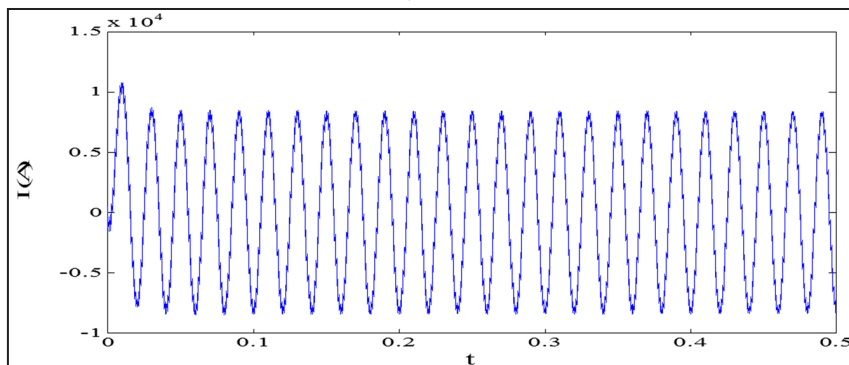
$$R = R \begin{bmatrix} C & R & F \\ 0.193545 & 0.049004 & 0.48561 \\ 0.049004 & 0.196677 & 0.48854 \\ 0.48561 & 0.48854 & 0.470282 \end{bmatrix}$$

$$L = R \begin{bmatrix} C & R & F \\ 0.001943 & 0.000937 & 0.01146 \\ 0.000937 & 0.001531 & 0.000901 \\ 0.01146 & 0.000901 & 0.02507 \end{bmatrix} \quad (29)$$

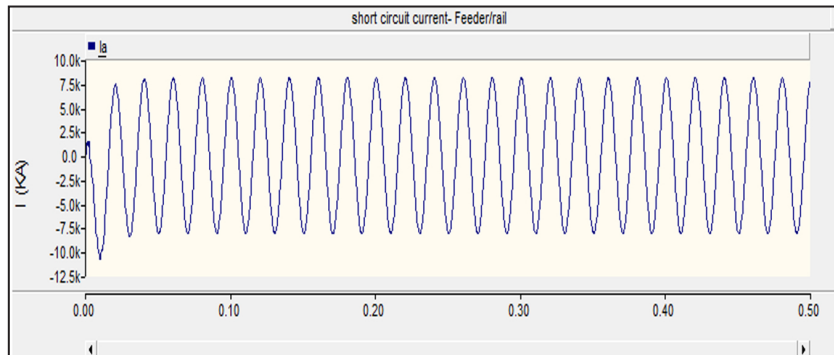
محاسبات حالت گذرای جریان اتصال کوتاه به روش تبدیل لاپلاس در شبکه راه آهن برقی...



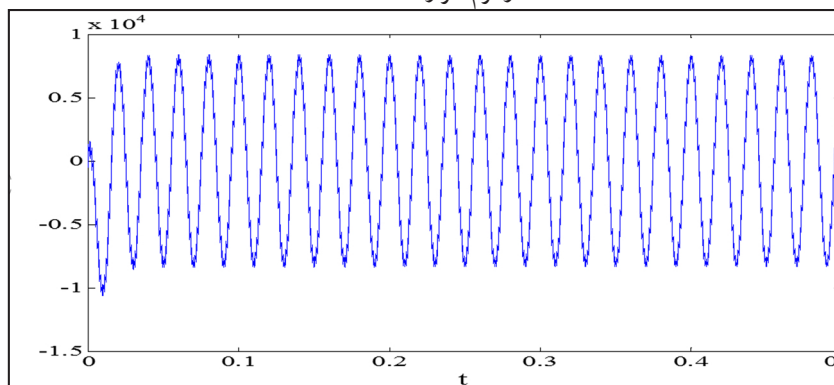
شکل ۱۳. بیشینه جریان اتصال کوتاه عبوری از هادی تماس در اتصال کوتاه بین هادی تماس و ریل در فاصله ۲۰ Km از پست کشش شبیه سازی شده در نرم افزار PSCAD



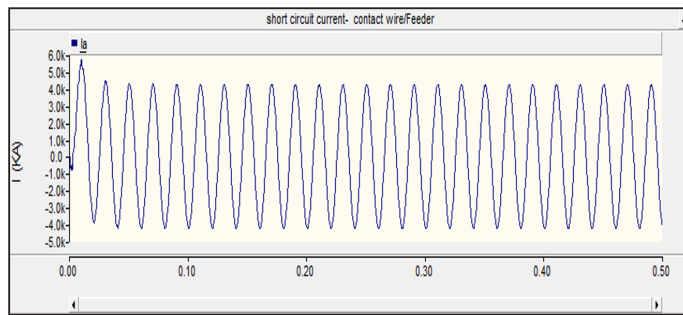
شکل ۱۴. بیشینه جریان اتصال کوتاه عبوری از هادی تماس در اتصال کوتاه بین هادی تماس و ریل در فاصله ۲۰ Km از پست کشش شبیه سازی شده توسط برنامه ی نوشته شده در محیط MATLAB/m-file بر اساس روش تبدیل لاپلاس



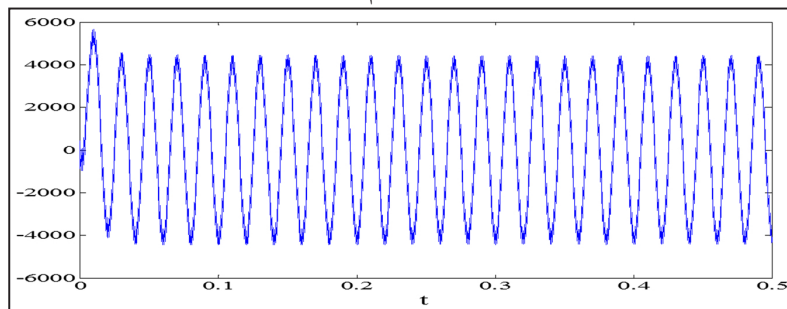
شکل ۱۵. بیشینه جریان اتصال کوتاه عبوری از فیدر در اتصال کوتاه بین فیدر و ریل در فاصله ی ۲۰ Km از پست کشش شبیه سازی شده در نرم افزار PSCAD



شکل ۱۶. بیشینه جریان اتصال کوتاه عبوری از فیدر در اتصال کوتاه بین فیدر و ریل در فاصله ۲۰ Km از پست کشش توسط برنامه نوشته شده در محیط MATLAB/m-file بر اساس تبدیل لاپلاس



شکل ۱۷. بیشینه جریان اتصال کوتاه عبوری از هادی تماس در اتصال کوتاه بین هادی تماس و فیدر در فاصله ۲۰ Km از پست کتش شبیه سازی شده در نرم افزار PSCAD



شکل ۱۸. بیشینه جریان اتصال کوتاه عبوری از هادی تماس در اتصال کوتاه بین هادی تماس و فیدر در فاصله ۲۰ Km از پست کتش توسط برنامه نوشته شده در محیط MATLAB/m-file بر اساس تبدیل لاپلاس

جدول ۲. نتایج شبیه سازی جریان اتصال کوتاه در فاصله ۲۰ Km از پست کتش در محیط PSCAD و برنامه نوشته شده در محیط MATLAB/m-file

نرم افزار	نوع اتصال کوتاه	ماکزیمم حالت مانا	ماکزیمم حالت گذرا
PSCAD	هادی تماس به ریل	8230 A	10693 A
		نتایج شبیه سازی در حوزه ی لاپلاس	10760 A
PSCAD	فیدر به ریل	8065 A	10520 A
		نتایج شبیه سازی در حوزه ی لاپلاس	10630 A
PSCAD	هادی تماس به فیدر	4300 A	5640 A
		نتایج شبیه سازی در حوزه ی لاپلاس	5700 A
		A4450	

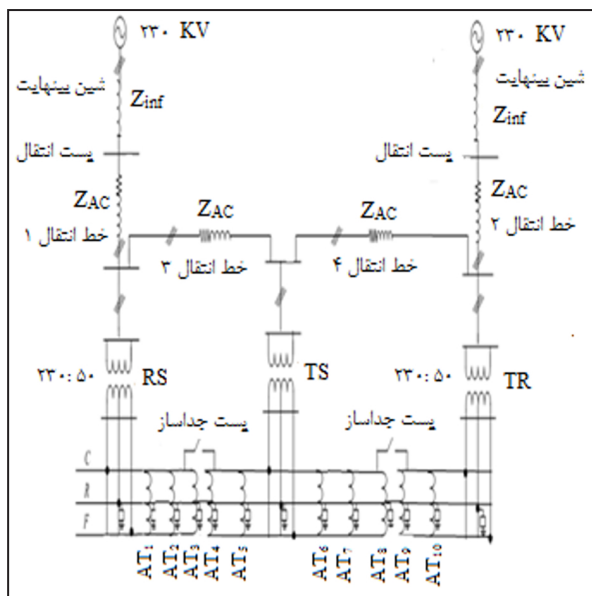
گذرا در اکثر نرم افزارها (مثل PSCAD) بر اساس روش حل عددی است، در صورتی که برنامه نوشته شده در MATLAB بر اساس مدل سازی و حل مدار در حوزه لاپلاس است. دلیل دوم می تواند بر اساس تفاوت کوچکی که میان مدل سازی اجزا وجود دارد، باشد، چرا که به طور مثال در مدل سازی ترانسفورماتور

با توجه به اطلاعات جدول (۲)، متوجه می شویم که اختلاف اندازه بیشینه جریان برای نتایج شبیه سازی در محیط PSCAD و شبیه سازی در حوزه لاپلاس حدود ۲ درصد و اختلاف بیشینه حالت گذرا کمتر از ۱ درصد است. این اختلاف اندازه جریانها، می تواند ناشی از دو علت باشد: اول اینکه روش حل حالت

محاسبات حالت گذرای جریان اتصال کوتاه به روش تبدیل لاپلاس در شبکه راه آهن برقی...

و فیدر نسبت به هادی تماس به ریل است.

برای مقایسه بهتر بین اندازه های جریانه های هر ۳ نوع اتصال کوتاه، در ادامه شبکه نمونه مطالعاتی گسترده تری (شکل ۱۹)، شامل دو شین 230 KV و سه پست کشش و ده اتوترانسفورماتور، در نظر گرفته شده است. هر سه نوع اتصال کوتاه برای هر ۴ مسیر (۱: پست کشش اول تا اولین پست جداساز، پست کشش دوم تا اولین پست جداساز، ۳: پست کشش دوم تا دومین پست جداساز، ۴: پست کشش سوم تا دومین پست جداساز) بر روی این شبکه انجام شده است و اندازه جریان اتصال کوتاه در حالت مانا و حالت گذرا محاسبه شده است که این اطلاعات در جدول (۳)، آورده شده است.



شکل ۱۹. شبکه راه آهن برقی نمونه ی مورد مطالعه

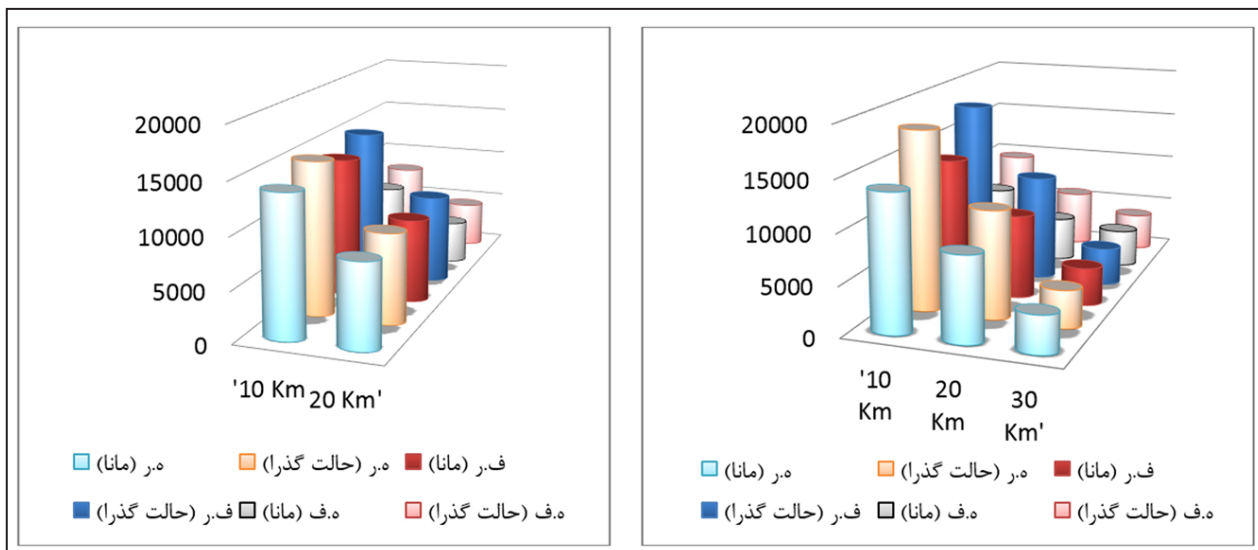
برای درک و آنالیز بهتر داده های جدول (۳)، نمودارهای میله ای برای اندازه های بیشینه حالت مانا و حالت گذرا برای هر سه نوع اتصال کوتاه برای هر ۴ مسیر بر حسب فاصله محل اتصال کوتاه از پست کشش در شکل های (۲۰) تا (۲۳)، رسم شده است. در این نمودارها "ه.ر" مخفف اتصال کوتاه هادی تماس به ریل و "ف.ر" مخفف اتصال کوتاه فیدر به ریل و "ه.ف" مخفف اتصال کوتاه هادی تماس به فیدر است.

سر وسط، مدلی که در این مقاله در نظر گرفته شده است دارای امپدانس مغناطیسی بی نهایت است، در صورتی که در نرم افزار PSCAD به این گونه نیست.

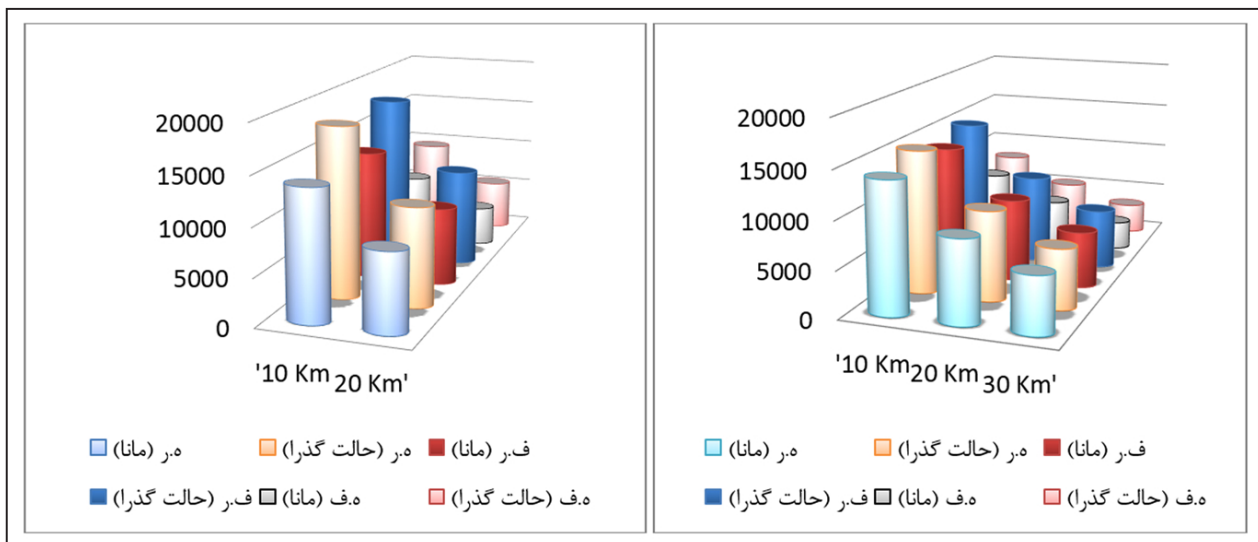
نمودار جریان عبوری از فیدر در اتصال کوتاه فیدر به ریل، تقریباً قرینه نمودار جریان عبوری هادی تماس در اتصال کوتاه هادی تماس به ریل است که دو دلیل برای این امر می توان ذکر کرد: اول آنکه اختلاف ولتاژ بین هادی تماس و ریل با فیدر و ریل برابر است، ولی ولتاژ فیدر نسبت به هادی تماس 180° درجه اختلاف فاز دارد. دوم آنکه اگر به ماتریسهای R و L و C خطوط بالاسری توجه کنیم متوجه می شویم که تا حدود بسیار زیادی، پارامترهای الکتریکی قرارگرفته در مسیر هادی تماس و ریل با فیدر و ریل مشابه هستند و همچنین بقیه اجزای الکتریکی شبکه نیز برای اتصال کوتاه هادی تماس به ریل و فیدر به ریل، دارای پارامترهای الکتریکی یکسان هستند.

نمودار جریان عبوری از فیدر در اتصال کوتاه فیدر به ریل، تقریباً قرینه نمودار جریان عبوری هادی تماس در اتصال کوتاه هادی تماس به ریل است که دو دلیل برای این امر می توان ذکر کرد، اول آنکه اختلاف ولتاژ بین هادی تماس و ریل با فیدر و ریل برابر است، ولی ولتاژ فیدر نسبت به هادی تماس 180° درجه اختلاف فاز دارد. دوم آنکه اگر به ماتریسهای R و L و C خطوط بالاسری توجه کنیم، متوجه می شویم که تا حدود بسیار زیادی پارامترهای الکتریکی قرارگرفته در مسیرهای تماس و ریل با فیدر و ریل مشابه اند و همچنین بقیه اجزای الکتریکی شبکه نیز برای اتصال کوتاه هادی تماس به ریل و فیدر به ریل، دارای پارامترهای الکتریکی یکسان هستند.

از دیگر نکاتی که با توجه به مقایسه دو شکل (۱۴) و (۱۸) متوجه می شویم این مطلب است که جریان اتصال کوتاه هادی تماس به فیدر تقریباً نصف جریان اتصال کوتاه هادی تماس به ریل است که این امر ناشی از دو برابر بودن اختلاف ولتاژ بین هادی تماس



شکل ۲۰. اندازه حالت مانا و گذرای جریانهای اتصال کوتاه برای مسیر ۱ شکل ۲۱. اندازه حالت مانا و گذرای جریانهای اتصال کوتاه برای مسیر ۲



شکل ۲۲. اندازه حالت مانا و گذرای جریان های اتصال کوتاه برای مسیر ۳ شکل ۲۳. اندازه حالت مانا و گذرای جریانهای اتصال کوتاه برای مسیر ۴

کوتاه هادی تماس به ریل برای ۴ مسیر می توان Z_q را محاسبه کرد (جدول (۴)).

شکل ۲۴. امپدانس اتصال کوتاه برای مسیرهای ۱ و ۳

شکل ۲۵. امپدانس اتصال کوتاه برای مسیرهای ۲ و ۴

Z_q برای دو مسیر ۱ و ۳ در شکل (۲۴) و برای دو مسیر ۲ و ۴ در شکل (۲۵)، رسم شده است. همان طور که از نمودارهای (۲۴) و (۲۵)، پیداست Z_q با افزایش فاصله ی محل اتصال کوتاه از پست کشش، افزایش می یابد.

۷. امپدانس اتصال کوتاه

در آخرین بخش از این مقاله، به محاسبه امپدانس اتصال کوتاه هادی تماس به ریل برای ۴ مسیر شکل (۱۹)، پرداخته می شود. همان طور که می دانیم امپدانس خطا از رابطه (۳۰)، به دست می آید:

$$Z_q = \frac{E}{I_{sh}} \quad (30)$$

که در این رابطه E ولتاژ مدار باز، I_{sh} جریان اتصال کوتاه است. بنابراین در اتصال کوتاه هادی تماس به ریل، $E = \sqrt{2} \times 27,5 \text{ Kv}$ است. با توجه به اندازه های جریان اتصال

محاسبات حالت گذرای جریان اتصال کوتاه به روش تبدیل لاپلاس در شبکه راه آهن برقی...

جدول ۳. اندازه جریانهای اتصال کوتاه در شبکه ی نمونه مطالعاتی

نوع اتصال کوتاه	موقعیت اتصال کوتاه	ماکزیمم حالت مانا	مینیمم حالت مانا	ماکزیمم حالت گذرا
جریان عبوری از هادی تماس در اتصال کوتاه هادی تماس به ریل	۱۰ Km از پست کشش اول	13710 A	13710-A	18050A
	۲۰ Km از پست کشش اول	8560A	8560-A	10850A
	۳۰ Km از پست کشش اول	6000A	6000-A	7450A
	۱۰ Km از سمت چپ پست کشش دوم	13855A	13855-A	15100A
	۲۰ Km از سمت چپ پست کشش دوم	8330A	8330-A	8900A
	۱۰ Km از سمت راست پست کشش دوم	13860A	13860-A	15100A
	۲۰ Km از سمت راست پست کشش دوم	8810A	8810-A	9520A
	۳۰ Km از سمت راست پست کشش دوم	6050A	6050-A	6400A
	۱۰ Km از پست کشش سوم	13710A	13710-A	18000A
	۲۰ Km از پست کشش سوم	8310A	8310-A	10460A
جریان عبوری از فیدر در اتصال کوتاه بین فیدر و ریل	۱۰ Km از پست کشش اول	13570A	13570-A	17850A
	۲۰ Km از پست کشش اول	8470A	8470-A	10720A
	۳۰ Km از پست کشش اول	5935A	5935-A	7370A
	۱۰ Km از سمت چپ پست کشش دوم	13710A	13710-A	14900A
	۲۰ Km از سمت چپ پست کشش دوم	8250A	8250-A	8770A
	۱۰ Km از سمت راست پست کشش دوم	13710A	13710-A	14900A
	۲۰ Km از سمت راست پست کشش دوم	8710A	8710-A	9400A
	۳۰ Km از سمت راست پست کشش دوم	5950A	5950-A	6300A
	۱۰ Km از پست کشش سوم	13570A	13570-A	17800A
	۲۰ Km از پست کشش سوم	8220A	8220-A	10350A
جریان عبوری از هادی تماس در اتصال کوتاه بین هادی تماس و فیدر	۱۰ Km از پست کشش اول	7205A	7205-A	9570A
	۲۰ Km از پست کشش اول	4520A	4520-A	5720A
	۳۰ Km از پست کشش اول	3035A	3035-A	3800A
	۱۰ Km از سمت چپ پست کشش دوم	7425A	7425-A	8070A
	۲۰ Km از سمت چپ پست کشش دوم	4230A	4230-A	4520A
	۱۰ Km از سمت راست پست کشش دوم	7425A	7425-A	8070A
	۲۰ Km از سمت راست پست کشش دوم	4795A	4795-A	5170A
	۳۰ Km از سمت راست پست کشش دوم	3050A	3050-A	3250A
	۱۰ Km از پست کشش سوم	7190A	7190-A	9530A
	۲۰ Km از پست کشش سوم	4225A	4225-A	5400A

با توجه به شکل های (۲۰) تا (۲۳)، متوجه می شویم که اندازه جریان اتصال کوتاه هادی تماس به ریل از دو نوع اتصال کوتاه دیگر بزرگ تر است و اندازه جریان اتصال کوتاه هادی تماس به فیدر دارای کوچک ترین دامنه است.

جدول ۴. امپدانس خطا برای مسیرهای ۱ تا ۴

نوع مسیر	فاصله از پست کشش	۰ Km	۵ Km	۱۰ Km	۱۵ Km	۲۰ Km	۲۵ Km	۳۰ Km
مسیر ۱	اندازه ی ماکزیمم جریان اتصال کوتاه	۲۹۰۰۰ A	۱۸۰۰۰ A	۱۳۷۰۰ A	۱۰۱۰۰ A	۸۵۶۰ A	۶۹۰۰ A	۶۰۰۰ A
	Z_g (اهم)	۱.۳۵	۲.۱۶	۲.۸۴	۳.۸۵	۴.۵۴	۵.۶۴	۶.۴۸
مسیر ۲	اندازه ی ماکزیمم جریان اتصال کوتاه	۲۹۰۰۰ A	۱۷۸۰۰ A	۱۳۸۵۵ A	۱۰۱۵۰ A	۸۳۳۰ A	-	-
	Z_g (اهم)	۱.۳۵	۲.۱۸۵	۲.۸۱	۳.۸۳	۴.۶۷	-	-
مسیر ۳	اندازه ی ماکزیمم جریان اتصال کوتاه	۲۹۰۰۰ A	۱۷۸۰۰ A	۱۳۸۶۰ A	۱۰۱۰۰ A	۸۸۱۰ A	۷۰۰۰ A	۶۰۵۰ A
	Z_g (اهم)	۱.۳۵	۲.۱۸۵	۲.۸۱	۳.۸۵	۴.۴۲	۵.۵۶	۶.۴۳
مسیر ۴	اندازه ی ماکزیمم جریان اتصال کوتاه	۲۹۰۰۰ A	۱۷۹۰۰ A	۱۳۷۱۰ A	۱۰۱۰۰ A	۸۳۱۰ A	۲۹۰۰۰ A	۱۷۹۰۰ A
	Z_g (اهم)	۱.۳۵	۲.۱۷	۲.۸۴	۳.۸۵	۴.۶۸	۱.۳۵	۲.۱۷

۸. نتیجه گیری

رخ داده در فواصل مختلف از پست کشش متوجه می شویم که با افزایش فاصله از پست کشش، امپدانس اتصال کوتاه افزایش یافته و جریان اتصال کوتاه کاهش می یابد.

۹. مراجع

- Battistelli, L., Proto, D. and Pagano, M. (2011) "2x25-Kv 50 Hz High-traction power system: Short-circuit modeling." IEEE Trans. Power Del., Vol. 26.
- Battistelli, L., Proto, D. and Pagano, M. (2008) "Short circuit modeling and simulation of 2x25-Kv high speed railways." IEEE Second Asia International Conference on Modeling and Simulation.
- Bozkaya, H. (1987) "A comparative assessment of 50 kV auto-transformer and 25 kV booster transformer railway electrification systems", MPHIL Thesis, University of Birmingham, UK.
- Cella, R., Giangaspero, G., Mariscotti, A., Montepagano, A., Pozzobon, I., Ruscilli, M. and Vanti, M. (2006) "Measurements of AT electric railway system currents at power supply frequency and validation of a multiconductor transmission line model," IEEE

در این مقاله، از روش تبدیل لاپلاس به منظور محاسبات حالت گذرای جریان اتصال کوتاه برای سیستم راه آهن برقی AC با روش تغذیه اتوترانسفورماتور استفاده شده است. سیستمی که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است، یک سیستم راه آهن برقی AC متصل به شبکه بالادستی سه فاز است، که تمامی عناصر این سیستم در حوزه لاپلاس مدل سازی شده و ماتریس Y_{bus} کل شبکه در حوزه لاپلاس به دست آمده است و با اعمال شرایط اتصال کوتاه برای معادله ماتریسی $[I]=[Y][V]$ نمودارهای جریان های اتصال کوتاه توسط برنامه نویسی در محیط نرم افزار MATLAB/m-file در نقاط مختلف شبکه مطالعاتی به دست آمده است. مقایسه جریانهای اتصال کوتاه از روش تبدیل لاپلاس با جریانهای اتصال کوتاه شبیه سازی شده در نرم افزار PSCAD دقت مناسب روش ارائه شده در این مقاله (تبدیل لاپلاس) را تایید می کند. از مطالعه و تحلیل جریان های اتصال کوتاه متوجه می شویم که جریان اتصال کوتاه هادی تماس به ریل دارای بزرگ ترین دامنه در بین دیگر جریان های اتصال کوتاه است، به طوری که اندازه این جریان تقریباً دو برابر جریان اتصال کوتاه هادی تماس به فیدر است. همچنین با مقایسه جریانهای اتصال کوتاه

- His, P. H., Chen, S. L. and Li, R. J.(1999) “Simulating on-line dynamic voltage of multiple trains under real operation conditions for AC railways”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 14 , No. 2.
- Huang, S., Kuo,Y., Chen, B., Lu, K.and Huang, M. (2001) “A short circuit current study for the power supply system of Taiwan railway.” IEEE Trans. On Power Del., Vol. 16, No. 4.
- Kulworawanichpong,T.(2003) “Optimizing AC electric railway power flows with power electronic control”, PhD dissertation, University of Birmingham.
- Lee, H., Kima, G., Oha, S., Jang, G. and Kwon, S. (2005) “ Fault analysis of Korean AC electric railway system”, Electric Power Systems Research.
- Martinez-Velasco, J. A. and Marti, J. R. (2009)“Electromagnetic transients analysis” ebook.
- Nano Dot Tek (N.D.T) Report (2007) “The Laplace transform approach to linear transmission line analysis”.
- Shenkman, A. L.(2005) “Transient analysis of electric power circuits handbook”.
- Shao, Z. (1988) “Auto-transformer power supply system for electric railways”, PhD disertation, University of Birmingham, UK,.
- Shenoy, U., Sheshadri, K., Parthasarathy, K., Khincha, H. and Thukaram, D.(2004) “Matlab/PSB based modeling and simulation of 25 Kv AC railway traction system- A particular reference to loading and Trans. Power Del.,vol. 21, no. 3, pp. 1721–1726.
- Chan, W.S. (1988) “Whole system simulator for AC traction”, PhD dissertation, University of Birmingham, UK.
- Chen,T. and Hsu ,Y.(1998) “Systematized short-circuit analysis of a 2×25-Kv electric TractionNetwork.” Electric Power System Research, Vol.47.
- Courtois,C.(1993) “Why the 2×25 kV alternative? [autotransformer tractionsupply],” Inst. Elect. Eng. Colloq. 50 kV Autotransformer Traction Supply Systems-the French Experience, pp. 1/1–1/4, Nov. 9.
- Dolecek, R., Cerny,O.(2007) “Short-Circuit Simulation at 25 Kv, 50 Hz Contact Line System.” Proceedings: ICREPQ 07.
- Dommel, H .W. (1969) “Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphasenetworks”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 88(2), pp.734–741.
- Dommel, H. W. (1996) “EMTP Theory Book”, 2nd Edition, Microtran Power System Analysis Corporation,Vancouver, BC, Canada.
- Hemmer, B., Mariscotti, A. and Wuerbler, D. (2004) “Recommendations for calculation of the total disturbing return current from electric traction vehicles,” IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 3, pp. 1190–1197.
- Hill, R. J.(1994) “Electric railway traction – Part 3 traction power supplies”, Power Engineering Journal, pp. 275-286.

fault conditions”, IEEE Region 10 Conference,.

- Tortia, A. M. L. (2006) “Turin-Milan high-speed railway-line, 2×25 kV 50 Hz AC electrified EMC problems in earthing of exposed conductive parts,” in Proc. SPEEDAM Int. Conf., Taormina, Italy, pp.1127–1132.

- Watson, N., Arrillaga J.(2007),“Power Systems Electromagnetic Transients Simulation ebook.” 2nd Edition.