

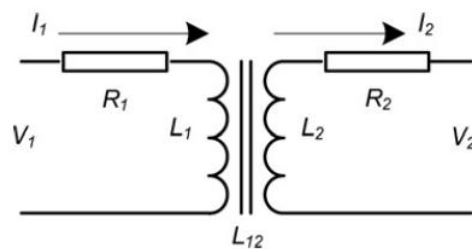
مدل‌سازی خطای سیم پیچ به زمین ترانسفورماتورهای قدرت

مراحل کار به طور خلاصه به ترتیب زیر می باشد:

1. شبیه سازی ترانسفورماتور سالم و محاسبه‌ی ماتریس امپدانس آن
2. اصلاح ماتریس امپدانس با توجه به نوع و مکان خطا با استفاده از فرمولاسیون
3. شبیه سازی ترانسفورماتور تحت خطا با ماتریس امپدانس اصلاح شده

شبیه سازی ترانسفورماتور سالم و محاسبه‌ی ماتریس امپدانس آن

برای ترانسفورماتور تک فاز دو سیم پیچه مطابق با شکل 1 معادلات فازوری زیر برقرار است.



شکل 1 ترانسفورماتور تک فاز دو سیم پیچ

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

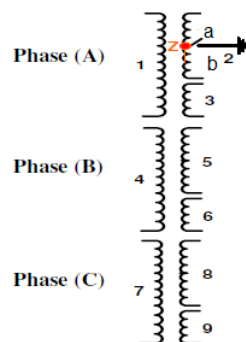
که در تحلیل گذرای الکترومغناطیسی این معادله به صورت زیر در می آید.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

این معادله را می توان برای ترانسفورماتور سه فاز سه سیم پیچه تعمیم داد. ترانسفورماتور سه فاز سه سیم پیچه 9 سیم پیچی دارد در نتیجه ماتریس R و L آن 9*9 به صورت زیر است.

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_9 \end{bmatrix} \quad [L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} & L_{16} & L_{17} & L_{18} & L_{19} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} & L_{26} & L_{27} & L_{28} & L_{29} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} & L_{37} & L_{38} & L_{39} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & L_{45} & L_{46} & L_{47} & L_{48} & L_{49} \\ L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{54} & L_{55} & L_{56} & L_{57} & L_{58} & L_{59} \\ L_{61} & L_{62} & L_{63} & L_{64} & L_{65} & L_{66} & L_{67} & L_{68} & L_{69} \\ L_{71} & L_{72} & L_{73} & L_{74} & L_{75} & L_{76} & L_{77} & L_{78} & L_{79} \\ L_{81} & L_{82} & L_{83} & L_{84} & L_{85} & L_{86} & L_{87} & L_{88} & L_{89} \\ L_{91} & L_{92} & L_{93} & L_{94} & L_{95} & L_{96} & L_{97} & L_{98} & L_{99} \end{bmatrix}$$

اگر مطابق با شکل 2 خطای حلقه به زمین در نقطه z در سیم پیچی ثانویه ی فاز A ترانسفورماتور رخ داده باشد. سیم پیچی تحت خطا به دو سیم پیچی فرعی a و b تقسیم می شود.



شکل 2. ترانسفورماتور سه فاز سه سیم پیچه تحت خطای حلقه به زمین

با تقسیم سیم پیچی ثانویه ی فاز A ماتریس R و L به صورت زیر در می آیند.

$$[R'] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_9 \end{bmatrix} \quad [L'] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{1a} & L_{1b} & L_{13} & L_{14} & L_{15} & L_{16} & L_{17} & L_{18} & L_{19} \\ L_{a1} & L_{aa} & L_{ab} & L_{a3} & L_{a4} & L_{a5} & L_{a6} & L_{a7} & L_{a8} & L_{a9} \\ L_{b1} & L_{ba} & L_{bb} & L_{b3} & L_{b4} & L_{b5} & L_{b6} & L_{b7} & L_{b8} & L_{b9} \\ L_{31} & L_{3a} & L_{3b} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} & L_{37} & L_{38} & L_{39} \\ L_{41} & L_{4a} & L_{4b} & L_{43} & L_{44} & L_{45} & L_{46} & L_{47} & L_{48} & L_{49} \\ L_{51} & L_{5a} & L_{5b} & L_{53} & L_{54} & L_{55} & L_{56} & L_{57} & L_{58} & L_{59} \\ L_{61} & L_{6a} & L_{6b} & L_{63} & L_{64} & L_{65} & L_{66} & L_{67} & L_{68} & L_{69} \\ L_{71} & L_{7a} & L_{7b} & L_{73} & L_{74} & L_{75} & L_{76} & L_{77} & L_{78} & L_{79} \\ L_{81} & L_{8a} & L_{8b} & L_{83} & L_{84} & L_{85} & L_{86} & L_{87} & L_{88} & L_{89} \\ L_{91} & L_{9a} & L_{9b} & L_{93} & L_{94} & L_{95} & L_{96} & L_{97} & L_{98} & L_{99} \end{bmatrix}$$

برای محاسبه ی ماتریس نمایش ترانسفورماتور از ماژول BCTRAN موجود در برنامه ATP/EMTP که مولد امپدانس ترانسفورماتور می باشد استفاده می شود. اطلاعات ورودی BCTRAN شامل مقادیر نامی، آزمایش های مدار باز و اتصال کوتاه کارخانه و غیره می باشد. این اطلاعات به آسانی در دسترس قرار می گیرند به این ترتیب عناصر ماتریس امپدانس سالم به دست می آیند. برای محاسبه ی عناصر تغییر یافته بر اثر خطا از سه اصل سازگاری و نشتی و تناسب استفاده می شود.

اصل سازگاری. اگر به طور سری با جریان I بدون جریان خطای بین آنها تغذیه شوند، نتایج باید با استفاده از ماتریس 10*10 همانند نتایج به دست آمده از ماتریس 9*9 باشد.

$$\varphi_a = (L_a + L_{ab})I$$

$$\varphi_b = (L_b + L_{ab})I$$

$$\varphi_a + \varphi_b = (L_a + 2L_{ab} + L_b)I$$

$$\varphi_2 = L_{22}I$$

اصل نشتی. از آن جایی که جریان خطا بیشتر به نشتی وابسته است، عامل نشتی بین کلاف های a و b در نظر گرفته شود. عامل نشتی به صورت کلاف های a و b زیر است.

$$\sigma_{ab} = 1 - \frac{L_{ab}^2}{L_a L_b}$$

اصل تناسب. تناسب بین اندوکتانس های سیم کلاف های a و b را نشان می دهد.

$$\frac{L_a}{L_b} = \left(\frac{n_a}{n_b}\right)^2 \quad k = \frac{n_a}{n_b}$$

با استفاده از این اصول درایه های تغییر یافته در ماتریس 10*10 به دست می آیند. باقی درایه های همان مقادیر مربوط به ماتریس 9*9 هستند.

$$R_a = aR_2$$

$$R_b = bR_2$$

$$L_{ab} = \frac{L_{22}\sqrt{1 - \sigma_{ab}}}{(k + (1/k)) + 2\sqrt{1 - \sigma_{ab}}}$$

$$L_b = \frac{L_{22}}{k^2 + 2k\sqrt{1 - \sigma_{ab}} + 1}$$

$$L_a = \frac{L_{22}}{(1/k^2) + (2\sqrt{1 - \sigma_{ab}}/k) + 1}$$

اگر کلاف i در همان ستون a و b پیچانده شده باشد، و اگر a > b باشد:

$$L_{ai} = L_{2i}\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\frac{L_a}{L_{22}}\sqrt{1 + \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}\right)\left(\frac{L_{22}L_{ii}}{L_{2i}^2}\right)}}$$

$$L_{bi} = L_{2i} - L_{ai}$$

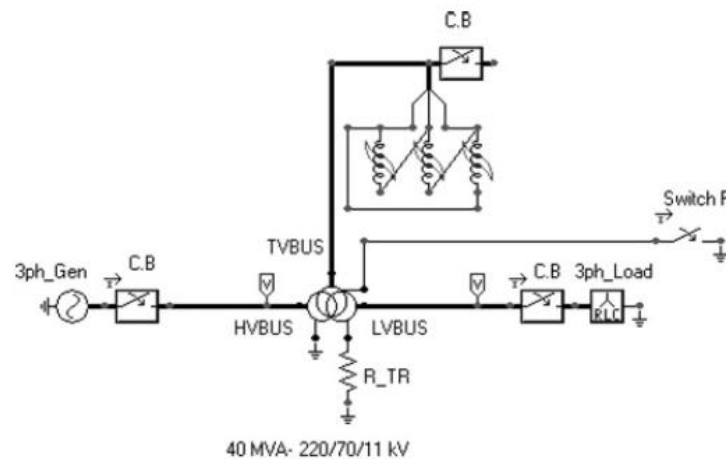
اگر کلاف i در ستون متفاوت با a و b پیچانده شده باشد:

$$L_{ai} = \frac{k}{1+k} L_{2i}$$

$$L_{bi} = \frac{1}{1+k} L_{2i}$$

شبیه سازی ترانسفورماتور با EMTP/ATP

تحت شرایط خطای زمین شده ی داخلی در درصدهای مختلف سیم پیچ، ماتریس امپدانس 10×10 ترانسفورماتور با استفاده از سه اصل ذکر شده محاسبه می شود که به عنوان source data در کتابخانه نوشته شده است. این کتابخانه هنگامی که BCTRAN برای ترانسفورماتور معیوب است عمل خواهد کرد. ترانسفورماتور تحت خطا در برنامه EMTP/ATP مطابق با شکل 3 شبیه سازی می شود.



شکل 3. نمایش شبیه سازی ترانسفورماتور تحت خطا