محاسبه حالت گذرا در شبکه برق

دکتر حسین محسنی ـ دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده

روش زیربه‌منظور محاسبه حالت گذار در شبکه انتقال نیروی برق تهیه شده است . این شبکه می‌تواند شامل‌ظرفیت ،خود القاءکنایی والقاءکنایی متقابل ومقاومت متوالی با خود القاء کنایی یا موازی با آن باشد . خطوط انتقال با توجه به خواص امواج سیار در محاسبه منظور می‌شوند . مقدارخود القاء کناییها یا مقدار مقاومتها می‌توانند در طول محاسبه با توجه به کمیاتی مانند ولتاژیاجریان یا عوامل دیگر تغییر کنند . در نظر گرفتن روشن وخاموش شدن قوس الکتریکی در شبکه یا در کلیدها امکان پذیر است .

در صورتی که خط انتقال با توجه به خواص امواج سیار در نظر گرفته شود می‌توان اثر میرایی موج سیار در طول خط را نیز به حساب آورد . محاسبه از طریق انتگرال گیری قدم به‌قدم انجام می‌شود . حجم برنامه کامپیوتری نسبتا " کم است و نظریه مبنای نسبتا " ساده ای دارد .

انگیزه‌تهیهٔ این روش : محاسبهٔ اضافه ولتاژ در سیم‌پیچ ترانسفورماتوروژنراتوربراثر ولتاژهای کلید زنی د رترکیب خط انتقال ، ترانسفور ماتوروژانراتور / ۱ تا ۱۰/ و برای یافتن دلیل صدمه دیدن سیم‌پیچ ترانسفورماتوریک واحد آبی بوده و برنامه کامپیوتری با استفاده از این روش تهیه شده است . این روش اگر نقاطی با پتانسیل آزاد وجود داشته باشند که به آنها هیچ ظرفیت وصل نباشد سادگی‌خود را از دست می‌دهد . البته این امر بعید است زیرا برای محاسبه حالت گذرا باید ظرفیت باسبار یا سیم پیچها وغیره را در نظر گرفت معادلات دیفرانسیل با توجه به وجود خازن و پیچک ازدرجهٔ دوم‌اند . در این روش ، معادلات دیفرانسیل درجه‌دو ،به‌دوسیستم‌معادلات دیفرانسیل درجه یک تجزیه می‌شوند . معادلات دیفرانسیل‌درجه یک‌می‌تواند مستقیما " به کمک خواص فیزیکی اجزاء مدار به دست آید .

سیم‌پیچی ترانسفور ماتور وژانراتور در صورت لزوم به چند قسمت تقسیم می‌شوند . هر قسمت دارای خودالقاء کنایی و القاءکنایی متقابل‌با دیگر قسمتهاست .همچنین مقاومت متوالی با هر قسمت در نظر گرفته می‌شود . ظرفیت هر قسمت به دو سرآن وصل می‌شود .

شرح مقاله :

در این روش ، مدار الکتریکی به‌چهار قسمت تقسیم می‌شود :

قسمت اول: شامل کلیهٔ خازنهای مدار است . این خازنها بین گرههای مدار وصل اند . پتانسیل تعدادی از گرهها معلوم (منابع‌ولتاژ) وپتانسیل بقیه گرهها مجهول است . به هر گره یکیا چند خازن وصل است . مجموع بارهای الکتریکی برروی جوشن خازنهای متصل به هرگره محاسبه ورابطهٔ بین این بارها وپتانسیل گرهها نوشته می‌شود .

قسمت دوم: شامل مقاومتهایی است که بین گرهها وصل‌اند . به فرض دانستن‌پتانسیل‌گرهها جریان در هر شاخه ازمقاومتها محاسبه می‌شود ویا به کمک یک رابطه‌ماتریسی ، مجموع جریانهای خارج شده از هرگره به دست می‌آید . ممکن است به بعضی گرهها مقاومت وصل نباشد .

قسمت‌سوم : شامل‌کلیه‌پیچکها با خود القاء کنایی والقاءکنایی متقابل‌با دیگرپیچکهاست این پیچکها می‌توانند دارای‌مقاومت اهمی متوالی باشند . یک سیستم معادلهٔ دیفرانسیل درجه یک ، مشتق جریان هرشاخه از این قسمت را برحسب زمان به دست می‌دهد . مشتق جریان هرشاخه با توجه به پتانسیل معلوم گرهها وجریان شاخه های این قسمت از مدار محاسبه می‌شود .

قسمت‌چهارم : شامل خطهای انتقال است که به کمک خواص امواج سیار بررسی می‌شود .

برای انتگرال گیری قدم‌به قدم به ترتیب زیر عمل می‌کنیم :

به عنوان شرط ابتدایی ، پتانسیل گرهها و جریان شاخه‌های شامل پیچ ، داده شده اند .

در مرحله اول باداشتن پتانسیل گرهها ،مجموع بارالکتریکی برروی جوشنهای خازنهای متصل به هر گره در زمان صفر محاسبه می‌شود . در صورتی که به عنوان شرط ابتدایی مجموع بار الکتریکی برروی جوشنهای خازنهای‌متصل به هرگره داده شده باشد (این‌بار معمولا" صفر است) ابتدا به‌کمک این‌بارها پتانسیل‌گرهها درزمان صفر محاسبه می‌شود .

در مرحله دوم با انتگرال گیری عددی با استفاده‌از مشتق جریان برحسب زمان وبا داشتن جریان در لحظه $t=0$ جریان شاخه‌های‌شامل پیچک برای لحظه $t=\Delta t$ تعیین می‌شود .

در مرحله سوم مجموع جریانهای وارد به هر گره از طریق‌مقاومتها‌وپیچکها‌محاسبه‌می‌شودوباانتگرال‌گیری‌عددی‌در زمان $t=\Delta t$ مجموع بار الکتریکی جوشنهای خازنهای متصل به هرگره به دست می‌آید .

در مرحله چهارم باداشتن‌بارگرهها ،پتانسیل‌گرهها مطابق مرحله اول‌ذکرشده دربالا محاسبه می‌شود واین‌مراحل برای‌زمانهای $2\Delta t$ و $3\Delta t$ و ..... تکرارمی‌شود .

هر خط انتقال متصل به مدار ، به صورت یک منبع ولتاژ با مقاومت داخلی zظاهر می‌شود . ولتاژ این منبع از موج سیار خط به دست می‌آید .

در صورت‌موجودبودن منابع جریان ، مقدار جریان آنها در مرحله سوم‌منظور می‌شود .

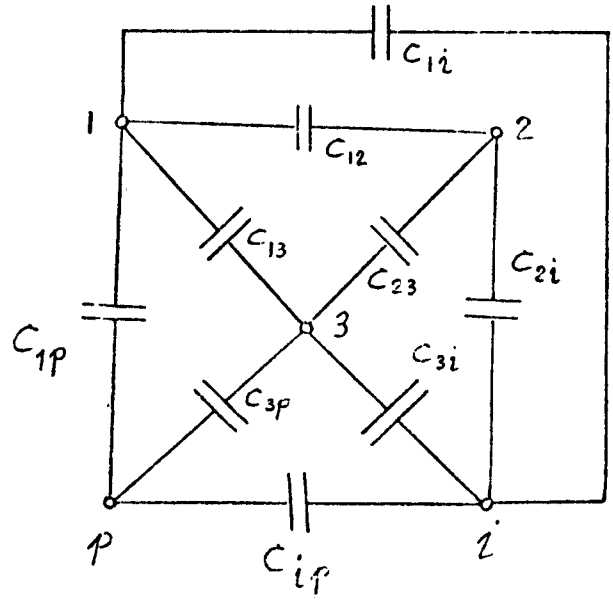
در صورتی که‌در طول انتگرال گیری ، کمیاتی مانند مقاومت (برقگیرها)یاخود القاء کنایی پیچکها (اشباع هسته) تغییر کند این مقادیر را در طول محاسبه می‌توان تغییر داد .

۱ ــ روابط شبکه

۱،۱ ــ در نظر گرفتن ظرفیتها

ابتدا تنها ظرفیت های موجود در شبکه در نظر گرفته می‌شود . شبکه ، Pگره دارد که پتانسیل n گره‌آن آزاد (مجهول) است و پتانسیل بقیه گرهها که تعدادی دلخواه دارند داده‌شده است . مناسب است پتانسیل یک گره از شبکه (مثلا" زمین) معلوم وبرابر صفر فرض شود .

در شکل ۱ ، تنها ظرفیتهای شبکه رسم شده‌اند .



شکل ۱ : ظرفیتهای شبکه

مجموع بارهای روی جوشنهای خازنهای متصل به‌گرههای ۱ تا p ، باتوجه به $C_{ij} = C_{ji}$ برابر است با :

$$
\begin{aligned}
&(U_1-U_2)C_{12}+(U_1-U_3)C_{13}+\ldots+(U_1-U_p)C_{1p}=Q_1\\
&(U_2-U_1)C_{12}+(U_2-U_3)C_{23}+\ldots+(U_2-U_p)C_{2p}=Q_2\\
&\text{- - - - - - - - - - - - - - - - - - - -}\\
&\text{- - - - - - - - - - - - - - - - - - - -}\\
&(U_p-U_1)C_{1p}+(U_p-U_2)C_{2p}+\ldots+(U_p-U_{p-1})C_{p_1p-1}=Q_p
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

پتانسیل گرههای ۱ تا p $U_1 \quad U_p$

بارگرههای ۱ تا p $Q_1 \quad Q_p$

بار هرگره، مساوی مجموع بارهای جوشنهای متصل به آن گره است. ظرفیت بین دو گره $C_{ij}:j,i$

روابط بالا را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$
\begin{aligned}
&U_1(C_{12}+C_{13}+\ldots+C_{1p})-U_2C_{12}-U_3C_{13}-\ldots- U_pC_{1p}=Q_1\\
&-U_1C_{12}+U_2(C_{12}+C_{23}+\ldots+C_{2p})-U_3C_{23}-\ldots-U_pC_{2p}=Q_2\\
&-U_1C_{13}-U_2C_{23}+U_3(C_{13}+C_{23}+\ldots+C_{3p})-\ldots-U_pC_{3p}=Q_3\\
&\text{- - - - - - - - - - - - - - - - - - - -}\\
&\text{- - - - - - - - - - - - - - - - - - - -}\\
&-U_1C_{1p}-U_2C_{2p}-U_3C_{3p}-\ldots+U_p(C_{1p}+C_{2p}+C_{3p}+\ldots+C_{p-1,p})=Q_p
\end{aligned}
$$

ویا به صورت ماتریسی $Q = CU$

که در آن C، ماتریس متقارن معین مثبت (۱) است کـــه مجموع عناصر هر سطر یا هر ستون آن صفر است. U و Q ماتریسهای ستونی‌اند.

$$
C=\begin{array}{|c|c|c|c|c|}
\hline
\sum_{j=2}^{p} C_{1j} & -C_{12} & -C_{13} & \ldots & -C_{1p}\\
\hline
-C_{12} & \sum_{j=1}^{p} C_{2j} & -C_{23} & \ldots & -C_{2p}\\
\hline
-C_{13} & -C_{23} & \sum_{j=1}^{p} C_{3j} & \ldots & -C_{3p}\\
\hline
\ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots\\
\hline
-C_{1p} & -C_{2p} & -C_{3p} & \ldots & \sum_{j=1}^{p=1} C_{pj}\\
\hline
\end{array}
\qquad
U=\begin{array}{|c|}\hline U_1\\ \hline U_2\\ \hline U_3\\ \hline \ldots\\ \hline U_p\\ \hline\end{array}
\qquad
Q=\begin{array}{|c|}\hline Q_1\\ \hline Q_2\\ \hline Q_3\\ \hline \ldots\\ \hline Q_p\\ \hline\end{array}
$$

1) Positiv Definit

گرههای شبکه طوری شماره گذاری شده‌اند که پتانسیل گرههای ۱ تا n مجهول و پتانسیل‌گرههای n+1 تا p معلوم است . دراین صورت ، رابطه ۱ بهتر است بدین صورت نوشته شود .

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}$$

که درآن

$$C_{11} = \begin{bmatrix} \sum_{j=2}^{p} C_{1j} & -C_{12} & \cdots & -C_{1n} \\ -C_{12} & \sum_{j=1}^{p} C_{2j} & \cdots & C_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -C_{1n} & -C_{2n} & \cdots & \sum_{j=1}^{p} C_{nj} \end{bmatrix}$$

$$C_{12} = \begin{bmatrix} -C_{1,n+1} & \cdots & \cdots & -C_{1p} \\ -C_{2,n+1} & \cdots & \cdots & -C_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -C_{n,n+1} & \cdots & \cdots & -C_{np} \end{bmatrix}$$

و با توجه به متقارن بودن ماتریس C ، می‌توان نوشت $C_{21} = C_{12}^T$ رابطه ۱، به صورت زیر در می‌آید :

$$C_{11}U_1 = Q_1 - C_{12}U_2 \qquad (۲)$$

$$C_{21}U_1 + C_{22}U_2 = Q_2 \qquad (۳)$$

۱،۲ ــ مقاومتهای شبکه

مقاومتهای شبکه بجز آن دسته از مقاومتها کــه پا پیچکهامتوالی‌اند نیزبین گرههای‌مختلف شبکه قرارگرفته‌اند . مقدار بعضی از این مقاومتها می‌توانند بینهایت باشد . در اینجا عکس مقاومتها در نظر گرفته می‌شود . G_{ij} عکــس مقاومت R_{ij} است که بین دو گره i وز قرار دارد .
کاملا " مشابه آنچه برای خازنها گفته شد می‌توان نوشت :

$$GU = I \qquad (۴)$$

که درآن G ، ماتریس متقارن معین مثبت کاملا " مشابه C است . U همچنان پتانسیل‌گرههای‌شبکه است‌و اجزاء ماتریس

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_p \end{bmatrix}$$

یعنی I_i ، مجموع جریانهایی است که توسط مقاومتهای مختلف از گره i خارج می‌شود .

۱،۳ ــ خودالقاء کناییها و القاء کناییهای متقابل

در اینجا روابط زیر برقرارند :

$$L_1 \dot{I}_{Z1} + M_{12}\dot{I}_{Z2} + \ldots + M_{1i}\dot{I}_{Zi} + \ldots + M_{1k}\dot{I}_{Zk} + R_i I_{Z1} = U_{Z1}$$

$$L_{12}\dot{I}_{Z1} + L_2\dot{I}_{Z2} + \ldots + M_{2i}\dot{I}_{Zi} + \ldots + M_{2k}\dot{I}_{Zk} + R_2 I_{Z2} = U_{Z2}$$

$$- -$$

$$M_{1i}\dot{I}_{Z1} + M_{2i}\dot{I}_{Z2} + \ldots + L_i\dot{I}_{Zi} + \ldots + M_{ik}\dot{I}_{Zk} + R_i I_{Zi} = U_{Zi}$$

$$- -$$

$$M_{1k}\dot{I}_{Z1} + M_{2k}\dot{I}_{Z2} + \ldots + M_{ik}\dot{I}_{Zi} + \ldots + L_k\dot{I}_{Zk} + R_k I_{Zk} = U_{Zk}$$

k = تعداد شاخه‌ها

I_{Zi} = جریان شاخه i

U_{Zi} = ولتاژ شاخه i

R_i = مقاومت متوالی با پیچ در شاخه i

M_{ij} = القاء کنایی متقابل پیک‌چه‌های i و j

روابط بالا را می‌توان به‌صورت ماتریسی زیر نوشت :

$$M\dot{I}_z + RI_z = U_z \qquad (۵)$$

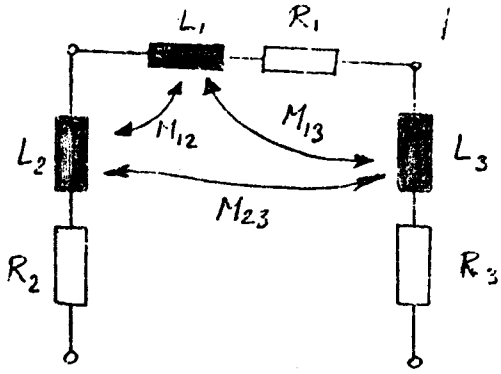
M ، ماتریس اندوکتانس (القاء کنایی) است که k سطر و k ستون دارد و متقارن فرض می‌شود . ماتریس R، یک ماتریس مربعی با k سطر و k ستون است که بجز اجزاء قطر ، دیگر اجزاء آن صفرند . بعضی اجزاء قطر یا همه آنها نیز می‌توانند صفر باشند .

رابطه بین جریان شاخه ها و مجموع جریانهای وارد به گرهها را ماتریس تلاقی [1] به دست می‌دهد/11/ .

$$I = T\, I_z \qquad (۶)$$

همچنین رابطه‌بین‌ولتاژ شاخه وپتانسیل گرهها را این‌ماتریس مشخص می‌کند .

$$U_z = T^T U \qquad (۷)$$



شکل ۲ : شاخه های شامل پیچک که القاء کنایی متقابـــل و مقاومت متوالی دارند

۲ ــ انتگرال‌گیری‌قدم به قدم

برای حل معادله‌های دیفرانسیل از روابط (۵) و (۷) نتیجه می‌شود :

$$\dot{I}_z = M^{-1}(T^T U - RI_z) \qquad (۸)$$

در زمان $t=t_o$ به عنوان شرایط ابتدایی بایدجریان کلیـه شاخه های شامل پیچکها یعنی $I_z(t=t_o)$مشخص باشد . همچنین پتانسیل گرهـهای آزاد (والبته گرهـهای با پتانسیل مشخص) برای‌زمان $t=t_o$ مشخص‌اند . از رابطه (۸) ، مقدار $\dot{I}_z$ در زمان $t=t_o$ به دست می‌آید . در زمان $t=t_o+\Delta t$ مقدارجریان‌طبق روش‌انتگرال گیری اویلر [2] برابر می‌شود

1) Incidence Matrix 2) Euler

با :

$$I_z(t_o+\Delta t)=I_z(t_o) + \dot{I}_z\,\Delta t \qquad (۹)$$

و مطابق رابطه (۶) ، داریم

$$I_L = T\,I_z \qquad (۱۰)$$

در اینجا زیر نویسه L ، معرف جریان مربوط به شبکه‌شامل پیچکهاست . از طرف دیگر تغییرات بارگرههای‌شبکه‌برحسب زمان برابر است با :

$$Q = -I_L - I_G \qquad (۱۱)$$

I_G ، همان I رابطه (۴) یعنی جریان شاخه های مربوط به شبکه مقاومتهاست . در زمان $t=t_o$ باید یا Q_1 یا U_1 مشخص باشد .به‌هرحال می‌توان با داشتن یکی ، دیگری را از رابطه (۲) به دست آورد .

در زمان $t=t_o + \Delta t$ ، مقدار Q_1 باتوجه به رابطه (۱۱) برابر می‌شود با :

$$Q_1(t_o+\Delta t)=Q_1(t)-(I_L+I_G)\,\Delta t \qquad (۱۲)$$

و پتانسیل گرههای شبکه از رابطه (۲) به صورت زیر به‌دست می‌آید :

$$U_1 = C_{11}^{-1}\,(Q_1 - C_{12}U_2) \qquad (۱۳)$$

با توجه به‌سادگی محاسبه می‌توان Δtرا کوچک گرفت و دقت را بالا برد .

دراینجا می‌توان‌ازروش‌رونکه‌کوتا [1] استفاده‌کرد .ولی ازآنجاکه محاسبه برای هر قدم انتگرال گیری چند برابر می‌شود ، برای زمان محاسبه ثابت ، دقت محاسبه چندان افزایش نمی‌یابد .وانگهی برنامه نویسی دشوارتر وآزادی‌عمل کمتر می‌شود .

دررابطه (۱۳) عکس ماتریس C_{11}به‌کار می‌رود . پس ماتریس C_{11}باید قابل معکوس‌کردن باشد .

درصورتی‌که به تمام گرههای آزاد شبکه ، خازن‌وصل باشد ، یعنی اگر اجزاء قطر ماتریس C_{11} صفر نباشند این ماتریس را می‌توان معکوس کرد . البته اگر به یک نقطه، خازن بسیار کوچکی وصل باشد فرکانس نوسان طبیعی این گره زیاد خواهدبودوبایدقدم انتگرال گیری یعنی Δt کوچک انتخاب شود .

در رابطه (۸) نیز باید بتوان معکوس ماتریس M را پیدار کرد . از آنجا که برخلاف ماتریس C_{11} ، تعداد سطر وستون ماتریس M ، ارتباطی با تعداد نقاط‌آزاد شبکه ندارد و برابر تعداد القاء کناییهاست ، معکوس کردن ماتریس M ، اشکالی مشابه معکوس کردن ماتریس Mندارد اشکال دیگری که در ترانسفور ماتورها پیش می‌آید این است که ماتریس M یا قابل‌محاسبه‌نیست یا معکوس کردن آن ازنظر عددی مشکل‌تولید می‌کند در این حالت با استفاده از معانی فیزیکی‌اجزاء ماتریسهای‌مثلثی که از تجزیه ماتریس M به‌دست می‌آیند ،می‌توان اجزاء ماتریسهای مثلثی را از طریق اندازه‌گیری یا محاسبه به دست آورد وبدون مشکل عددی M^{-1} را محاسبه کرد /۱۲/ .

۳ ـ تغییر مشخصه اجزاء مدار

در طول محاسبه می‌توان مشخصات اجزاء مدار را که بستگی به‌زمان‌یا ولتاژیا جریان داشته باشد تغییر داد .مثلا" اگر مقدار مقاومت به صورت تابع ولتاژ تغییر کند (برقگیر) می‌توان آن را به حساب آورد همچنین اشباع هسته را بر اثر شارمی‌توان‌با تغییر L منظور کرد .البته بایددانست که‌مقدار شار پیچک از انتگرال

$$\phi(t)=\frac{1}{N}\int_{t_o}^{t} v(\tau)\,d\tau + \phi(t_o)$$

به دست می‌آید والقاء کناییهای متقابل نیز همراه با خود القاء کناییها تغییر می‌کنند . همچنین خاموش شدن قوس الکتریکی‌دراثرصفر شدن جریان‌ویا روشن شدن قوس الکتریکی

1) Runge-Kutta

بین دونقطه به دلیل رسیدن ولتاژ بین آندونقطه به مقداری معین ، می‌تواند منظور شود .

۴ ــ در نظر گرفتن خط انتقال

خط انتقال دارای ظرفیت و خود القاء کنایی گسترده را می‌توان به‌صورت اجزاء متمرکز در نظر گرفت . البته تعداد این اجزاء باید محدود باشد تا زمان لازم برای محاسبه درحد معقولی بماند .در این صورت بعضی فرکانسها حذف می‌شوند . درعوض ،این راه ، مزایایی نیز دارد . از جمله می‌توان وجود چند خط موازی را در نظر گرفت .

درزیر روشی برای در نظرگرفتن خط انتقال تکفـــاز با توجه به‌خواص امواج سیار ارائه می‌شود . در دو طرف هر خط ، شبکه‌ای با اجزاء متمرکز قرار دارند .این شبکه ها می‌توانند فعال یا نافعال باشند . از هر شبکه می‌تواند یک یا چند خط خارج شود و چندشبکه وچند خط می‌توانند به صورت دلخواه به یکدیگر ارتباط داشته باشند .

ایرادهای این روش ،یکی حافظه لازم برای نگهداری ولتاژ نقاط مختلف خط درهر لحظه وانتقال آن از یک حافظه به حافظه دیگر یاانتقال آدرس حافظه در طول محاسبه است . اشکال دیگر این است که خط به‌صورت تکفاز در نظر گرفتـــه می‌شود . در نظر گرفتن چند خط موازی مثلا " سه فاز ، اضافه برپیچیدگی مسئله ، احتیاج به حافظه خیلی بیشتر دارد .زیرا در چند خط موازی ، امواج سیار مختلفی به وجود می‌آیند که با سرعت‌های مختلف سیرمی‌کنند و برای هر خط و هر سرعت باید حافظه‌ای جداگانه منظور کرد .

درمورد خط تکفاز ،مسئله ساده است . برای یادآوری ، روابط امواج سیار بدون اثبات ذکر می‌شوند .

معادله موج یک بعدی :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = L'C' \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \qquad (۱۵)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial X^2} = L'C' \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \qquad (۱۶)$$

سرعت سیر موج:

$$v = \pm \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \qquad (۱۷)$$

مقاومت موج یا مقاومت مشخصه :

$$Z = \pm \sqrt{L'/C'} \qquad (۱۸)$$

برای موج پیشرو

$$U_v = f(x - vt) = Zi_v \qquad (۱۹)$$

برای موج برگشت

$$U_r = g(X+vt) = - Zi_r \qquad (۲۰)$$

ولتاژ در هر نقطه

$$U = U_v + U_r \qquad (۲۱)$$

جریان در هر نقطه

$$i = i_v + i_r \qquad (۲۲)$$

مدت سیر موج در خط به طول l

$$t = \frac{v}{l} \qquad (۲۳)$$

۴،۱ ــ انتقال ولتاژدرطول خط ومنظور کردن آن درمحاسبه.

خط انتقال به N قسمت مساوی تقسیم می‌شـــودو

---

۲ ــ در مواردی که به یک گره آزاد ، هیچ خازنی وصل نباشد می‌توان یا این گره را با روش تعمیم تبدیل ستاره به مثلث حذف کرد یا ولتاژ این گره را به روش دیگری به دست آورد . در صورت دوم ، برنامه نویس و استفاده از برنامه کامپیوتری قدری پیچیده می‌شود .

بنابر فرض، ولتاژ در طول هر قسمت ، مقداری ثابت است . با گذشت زمان

$$\Delta t = \frac{1}{N}\,\frac{1}{v}$$

ولتاژ هر قسمت از خط به مقدار $\frac{1}{N}$ طول خط به طرف جلو (یا برای موج برگشت به طرف عقب) حرکت می‌کند .

برای موج رفت ، N حافظه وبرای موج برگشت نیزN حافظه در محاسبه منظور می‌شود . پس از گذشت زمان Δt ، مقادیرضبطشده در هر حافظه به مقدار یک خانه به طرف جلو انتقال می‌یابد .این‌عمل‌ازانتها شروع می‌شود . و ابتدا مقدار ولتاژ ضبط شده در آخرین حافظه به یک حافظه کمکی انتقال می‌یابد و ولتاژ ضبط شده در حافظه قبلی به محل آن منتقل می‌شود . این عمل تا اولین حافظه ادامه می‌یابد (شکل ۳) . اولین حافظه آزاد می‌شود . در این حافظه ، ولتاژی که مقدار آن راشبکه تعیین می‌کند ضبط می‌شود این عمل برای موج‌رفت و برای موج برگشت جداگانه انجام می‌گیرد .

۲ و ۴ ــ ارتباط خط و شبکه

دو طرف رابطه (۲۲) در Z ضرب می‌شود :

$$Zi = Zi_v + Zi_r \qquad (۲۴)$$

با توجه به روابط (۱۹) و (۲۰)و(۲۴) می‌توان نوشت :

$$Zi = U_v - U_r \qquad (۲۵)$$

از طرف دیگر رابطه (۲۱) چنین است .

$$U = U_v + U_r$$

از جمع دو رابطه اخیر حاصل می‌شود

$$U + Zi = 2U_v \qquad (۲۶)$$

موج پیش رو U_v از طریق خط انتقال به شبکه می‌رسد ــ برای منظور کردن رابطه (۲۶) در محل ورودی خط به شبکه ، مقاومت Z مطابق شکل ۴ قرارداده می‌شود .

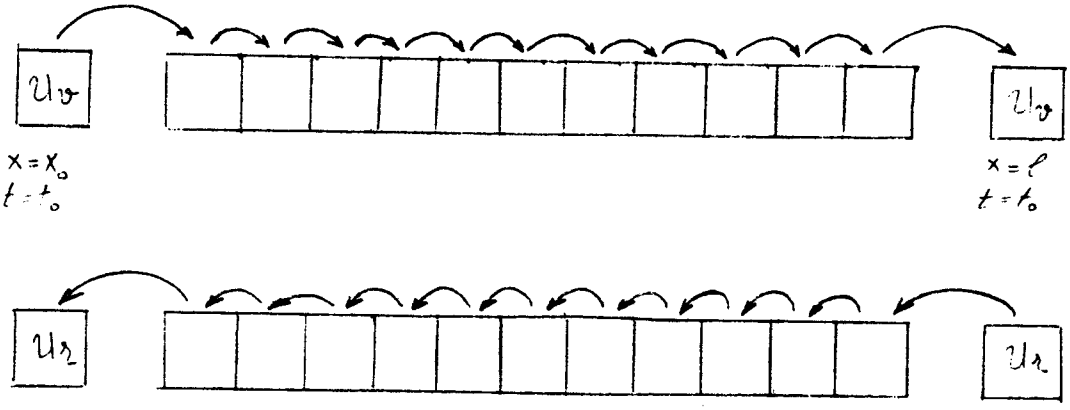
ولتاژ U_v که از طریق خط به شبکه رسیده‌ودرحافظه کمکی ضبط شده است‌درعدد ۲ ضرب می‌شود ، به عنوان‌ولتاژ داده شده‌درسرمقاومت Z اعمال می‌شود .برای‌شکل ۴ ،رابطه (۲۶) صادق است .یعنی اگرجریان i ازطریق خط وارد شبکه شود ولتاژ محل ورود خط به شبکه

$$U = 2U_v - iZ$$

که‌همان‌رابطه (۲۶)است .ولتاژ U_v پس ازطی‌زمان $t = \frac{1}{v}$ به انتهای خط می‌رسد سپس در عدد ۲ ضرب شده در یک حافظه کمکی ضبط می‌شود . در حقیقت خط ، به عنوان یک منبع باولتاژ داده شده $2U_v$ که برحسب زمان تغییرمی‌کندهمراه با مقاومت داخلی Z منظور می‌شود (شکل ۴) .

موج برگشت با توجه‌به رابطه (۲۱) مساوی است‌با :

$$U_r = U - U_v$$



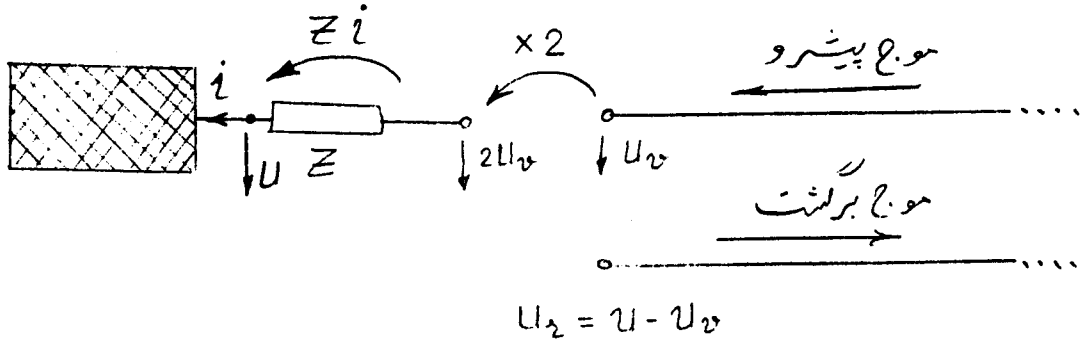
شکل ۳ ــ انتقال ولتاژ در حافظه کامپیوتر

لذا این مقدار در هر زمان به عنوان مقدار ولتاژ موج برگشت به حساب می‌آید و در حافظه کمکی به این منظور ضبط می‌شود .

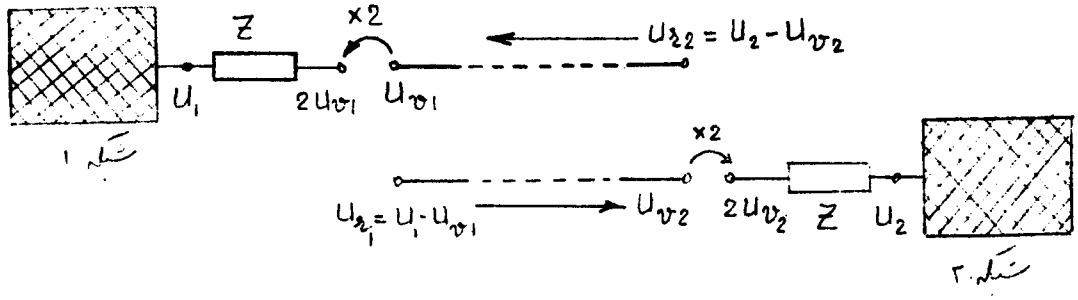
باتوجه به اینکه دردوطرف خط ، شبکه قرار دارد ، مدارکامل ، مطابق شکل ۵ است .

در حالت کلی چند خط بین چند شبکه وصل شده است وهرشبکه دارای اجزاء متمرکز خطی یا غیر خطی است .

برای در نظر گرفتن اثر میرایی موج در طول خط با این روش می‌توان متناسب با طول خط و احتمالا " مقدار ولتاژ (با توجه به اثر هاله) یک ضریب میرایی پس از رسیدن موج به انتهای خط یا در هر قدم انتقال ولتاژ در طول خط منظور کرد .



شکل ۴ : ارتباط شبکه با خط انتقال



شکل ۵ : ارتباط دو شبکه به وسیلهٔ یک خط

فهرست منابع

1- Musil R.J., Preininger G. et. al: Voltage Stress produced by aperiodic and oscillating system overvoltages in transformer windings IEEE PAS Vol. 100 No.1 1981.

2- Schei A. et. al.: Resonant overvoltages in power station transformers initiated by switching transients in the connected cabel network CIGRE 1984 group 12.

3- Resonance behavior of high voltage transformers CIGRE Working group 12. 07 1984.

4- Pretrius R.E., Goosen P.V.:Practical investigation into repeated failures of 400/220 kV transformers in the escom network CIGRE 1984 group 12.

5- D'Heure H., Even A.: Contribution to studies on an unusual overvoltage phenomen in the tapchanger on the HV side of a 400 kV station transformer CIGRE 1984 group 12.

6- Musil R.J. et. al.: Resonance of transformers to various types of overvoltages and related problems of dielectric testing CIGRE 1982 group 12.

7- Musil R.J. et. al.: The resonance effect of oscillating system overvoltages on transformer winding IEEE PAS Vol. 101 1982 No. 10.

8- Schopper E. et. al.: Beanspruchung von Transformatoren durch periodische und oszillierende Uberspannungen E & M 1980/2 Wien.

9- Mohseni H.: Bericht uber die Messungen im Kraftwerk S.M. Interner Firmenbericht Elin Union Weiz 1972.

10-Mohseni H.: Untersuchung zum Schadensfall des Transformators im Kraftwerk S.M. Interner Firmenbericht Elin Union Weiz 1973.

11-Desoer Ch. A., Kuh E.S.: Basic Circuit Theory.

تشکر وقدردانی:

این مقاله باکمک مالی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه تهران تهیه گردیده است. از دفتر طرحهای تحقیقاتی دانشگاه تهران صمیمانه تشکر مینماید.