电力系统计算机分析计算中有关零序互感的分析研究

湖北省电力中心调度所　王广学　王珍珍

提　　要

本文主要对采用修改结点阻抗矩阵的方法进行电力系统分析计算时，对零序互感线路的断开、挂检及互感线中间故障的计算进行了详尽的分析。

本文所述的方法，已在计算机上编程进行电力系统短路电流、故障分析计算。实践证明，本方法计算结果完全正确，可以大大地节约计算机运行时间，是电力系统分析计算的可行途经。

一　问题的提出

随着电力系统规模的不断扩大及结构的日益复杂，用电子计算机进行电力系统分析计算是十分必要的。电力系统的运行方式总是在不断变化，且电力系统继电保护整定往往要对尽可能的系统方式及某些特殊的运行方式进行分析计算。可见计算工作量是十分大的。如何处理这种运行方式的变化进行电力系统计算呢？目前较多采用的方法是修改原始数据或结点导纳矩阵。采用这种方法要往往对修改后的结点导纳矩阵进行分解，故计算时间一般较长。根据电力系统的实际，采用修改结点阻抗矩阵的方法是可行的。此方法不需要再对结点导纳矩阵进行修改，而是直接在已形成结点阻抗矩阵的基础上进行支路追加，计算量显著减少，故可以大大地节约计算时间，提高计算速度。但也存在一些问题，即互感线路的断开及挂检的问题。本文采用较为适用、简捷的方法对此问题进行了详细讨论，有效地避开了直接对互感支路进行追加的难点。

二　双端共端互感线路

电力系统中的一组互感线路，若每条线路两侧结点都相同，这种互感线路我们称之为双端共端互感线路。如图1所示。

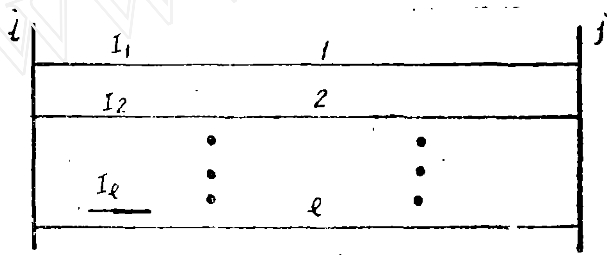

图　1

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1 一条线路断开

为了分析方便起见我们不妨假定第一条线路断开（如图 2 所示）。

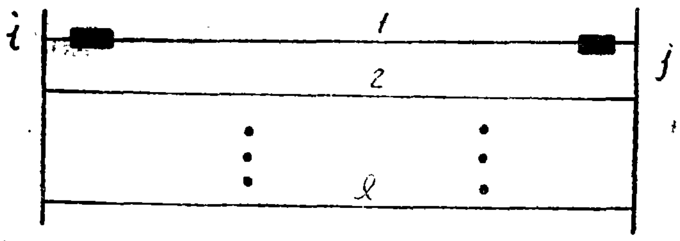

图 2

首先分析未断开前本组互感对网络的影响，然后分析断开后的影响，就能发现处理的办法。

（1）互感支路未断开前

由图 1 可知本组互感支路的电压电流方程为：

$$\begin{cases} u_{ij} = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 = \cdots\cdots + Z_{1l}I_l \\ u_{ij} = Z_{12}I_1 + Z_{22}I_2 + \cdots\cdots + Z_{2l}I_l \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ u_{ij} = Z_{1l}I_1 + Z_{2l}I_2 + \cdots\cdots + Z_{ll}I_l \end{cases} \qquad \cdots\cdots(1)$$

将（1）式写成矩阵形式：

$$\underline{U} = \underline{Z}\,\underline{I} \qquad \cdots\cdots(2)$$

式中：$\underline{U} = [u_{ij}, u_{ij}, \cdots\cdots u_{ij}]^T$

$\underline{I} = [I_1 I_2 \cdots\cdots I_l]^T$

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} Z_{12} \cdots\cdots Z_{1l} \\ Z_{12} Z_{22} \cdots\cdots Z_{2l} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ Z_{1l} Z_{2l} \cdots\cdots Z_{ll} \end{bmatrix}$$

由（2）式可得：

$$\underline{I} = \underline{Y}\,\underline{U} \qquad \cdots\cdots(3)$$

式中：

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} y_{12} \cdots\cdots y_{1l} \\ y_{12} y_{22} \cdots\cdots y_{2l} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_{1L} y_{2L} \cdots\cdots y_{LL} \end{bmatrix} = \underline{Z}^{-1} \qquad \cdots\cdots(4)$$

从（3）、（4）式不难求得 i－j 两结点间互感支路的等值导纳为矩阵 y 的各元素之和。

即：$y = \sum\limits_{\substack{m=1 \\ n=1}}^{l} y_{mn}$ ……（5）

www.cnki.net
© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（2） 互感支路断开后

当互感支路中断开一回后，这组互感支路的电压电流方程式为：

$$\begin{cases} u_{ij} = Z_{22}I_2 + Z_{23}I_3 + \cdots\cdots + Z_{2l}I_l \\ u_{ij} = Z_{23}I_2 + Z_{33}I_3 + \cdots\cdots + Z_{3l}I_l \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ u_{ij} = Z_{2l}I_2 + Z_{3l}I_3 + \cdots\cdots + Z_{ll}I_l \end{cases} \qquad \cdots\cdots(6)$$

也简写成矩阵形式：

$$\underline{U}' = Z'\underline{I}' \qquad \cdots\cdots(7)$$

式中：$\underline{U}' = [u_{ij}, u_{ij} \cdots\cdots u_{ij}]^T$

$\underline{I}' = [I_2 I_3 \cdots\cdots I_l]^T$

$$\underline{Z}' = \begin{bmatrix} Z_{22}Z_{23}\cdots\cdots Z_{2l} \\ Z_{23}Z_{33}\cdots\cdots Z_{2l} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ Z_{2l}Z_{3l}\cdots\cdots Z_{ll} \end{bmatrix}$$

由（7）式可得：

$$\underline{I}' = \underline{Y}'\underline{U}' \qquad \cdots\cdots(8)$$

其中：

$$\underline{Y}' = \underline{Z}'^{-1} = \begin{bmatrix} y_{22}'y_{23}'\cdots\cdots y_{2}'_{l} \\ y_{23}'y_{33}'\cdots\cdots y_{3}'_{l} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_{2l}'y_{3l}'\cdots\cdots y_{ll}' \end{bmatrix}$$

同样由（8）式可求得i－j两结点间互感支路的等值导纳为矩阵$\underline{Y}'$的各元素之和。

即 $$y' = \sum_{\substack{m=2\\n=2}}^{l} y'_{mn} \qquad \cdots\cdots(9)$$

从以上分析可知，断开一条两端共端互感线路，只需在i－j两结点间追加一条无互感链支，其参数为：

$$Z = 1/(y' - y) \qquad \cdots\cdots(10)$$

这样就解决了互感支路断开的问题，追加这条无互感支路后，网络中任意两结点之间的转移阻抗为：[3]

$$Z'_{kl} = Z_{kl} - \frac{(Z_{ik} - Z_{jk})(Z_{il} - Z_{jl})}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} + Z} \qquad \cdots\cdots(11)$$

2 一条线路挂地线检修

如图3所示。仍假定第1条互感线路挂地线检修。

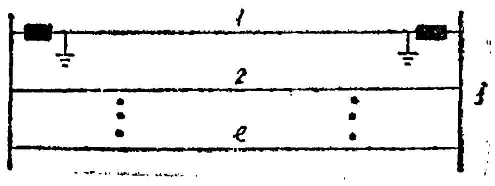

图3

（1） 未挂检前

未挂检前同样可有（1）～（5）式。

（2） 挂检后

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

挂检后互感支路的电压电流方程为：

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} y_{12} \cdots\cdots y_{1l} \\ y_{12} y_{22} \cdots\cdots y_{2l} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_{1l} y_{2l} \cdots\cdots y_{ll} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ u_{ij} \\ \vdots \\ u_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} y_{12} \cdots\cdots y_{1l} \\ y_{12} y_{22} \cdots\cdots y_{2l} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_{1l} y_{2l} \cdots\cdots y_{ll} \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} u_{ij} \\ u_{ij} \\ \vdots \\ u_{lj} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_{ij} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \right)$$

$$= \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_l \end{pmatrix} u_{ij} - \begin{pmatrix} y_{11} \\ y_{12} \\ \vdots \\ y_{1l} \end{pmatrix} u_{ij} = \begin{pmatrix} Y_1 - y_{11} \\ Y_2 - y_{12} \\ \vdots \\ Y_l - y_{1l} \end{pmatrix} u_{ij} \qquad \cdots\cdots(12)$$

其中： $$Y_m = \sum_{K=1}^{l} y_{mk} \qquad \cdots\cdots(13)$$

挂检后i－j两结点间的等值导纳为：

$$y'' = \sum_{K=2}^{l} (Y_K - y_{1K}) = \sum_{K=1}^{l} (Y_K - y_{1K}) - Y_1 + y_{11}$$
$$= y - Y_1 - Y_1 + y_{11} = y - 2Y_1 + y_{11} \qquad \cdots\cdots(14)$$

式中$y = \sum_{K=1}^{l} Y_K$ 同（6）式完全一样。

这样挂检后，等值于在i－j两结点间追求一条无互感支路，其参数为：

$$Z' = 1/(y'' - y) = 1/(y_{11} - 2Y_1) \qquad \cdots\cdots(15)$$

同样使用（11）式就可得到追加后的各阻抗元素，只是将Z换成Z′即可。

三 非双端共端的互感线路

电力系统中，除双端共端外的其它互感线路，我们称为非双端共端线路。如图4所示。

同样为了方便，我们仍假定第一条线路断开或挂检。

大家知道，零序互感支路的追加十分复杂，能否寻求一个办法避开呢？回答是肯定的，下面进行分析讨论。

我们采用的办法是在断开或挂检的线路的一侧增加两条无互感支路，参数分别为X和－X，如图5所示。

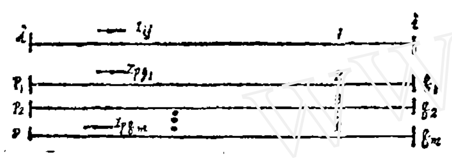

图4

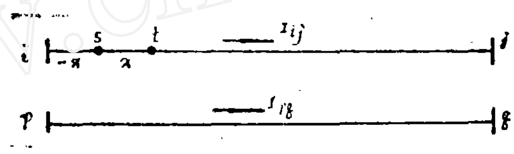

图5

图5中的p～q支路是图4中除i－j支路外的其它支路。

从图5可知，增加两支路和两结点s、t后，对整个网络无影响。现在的首要任务是分析新增两结点s、t与整个网络中其它结点的转移阻抗和两结点的本身自阻抗。

首先写出这组互感支路的电压电流方程：

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$
\begin{cases}
u_{ij} = Z_{ij}I_{ij} + Z_{ij-pq1}I_{pq1} + \cdots\cdots + Z_{ij-pqm}I_{pqm} \\
u_{pq1} = Z_{ij-pq1}I_{ij} + Z_{pq1-pq1}I_{pq1} + \cdots\cdots Z_{pq1-pqm}I_{pqm} \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
u_{pqm} = Z_{ij-pqm}I_{ij} + Z_{pq1-pqm}I_{pq1} + \cdots\cdots + Z_{pqm-pqm}I_{pqm}
\end{cases} \qquad (16)
$$

采用分块矩阵方程简写为：

$$
\begin{pmatrix} u_{ij} \\ \underline{V}_{pq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{ij} & \underline{Z}_{ij-pq} \\ \underline{Z}_{pq-ij} & \underline{Z}_{pq-pq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ij} \\ \underline{I}_{pq} \end{pmatrix} \qquad \cdots\cdots (17)
$$

注：全文中凡有横下线的字母、均表示矩阵或矩阵向量。

式中：

$$\underline{V}_{pq} = [u_{pq1}u_{pq2}u_{pq3}\cdots\cdots u_{pqm}]^T$$

$$\underline{I}_{pq} = [I_{pq1}I_{pq2}I_{pq3}\cdots\cdots I_{pqm}]^T$$

$$\underline{Z}_{ij-pq} = \underline{Z}^T_{pq-ij} = [Z_{ij-pq1}\ Z_{ij-pq2}\cdots\cdots Z_{ij-pqm}]$$

$$
\underline{Z}_{pq-pq} = \begin{pmatrix} Z_{pq1-pq1} & Z_{pq1-pq2}\cdots\cdots Z_{pq1-pqm} \\ Z_{pq1-pq2} & Z_{pq2-pq2}\cdots\cdots Z_{pq2-pqm} \\ \cdots\cdots\cdots & \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ Z_{pq1-pqm} & Z_{pq2-pqm}\cdots\cdots Z_{pqm-pqm} \end{pmatrix}
$$

从（17）式可得：

$$
\begin{pmatrix} I_{ij} \\ \underline{I}_{pq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{ij} & \underline{y}_{ij-pq} \\ \underline{y}_{pq-ij} & \underline{y}_{pq-pq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{ij} \\ \underline{v}_{pq} \end{pmatrix} \qquad \cdots\cdots (18)
$$

其中：
$$
\begin{pmatrix} y_{ij} & \underline{y}_{ij-pq} \\ y_{pq-ij} & \underline{y}_{pq-pq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{ij} & \underline{Z}_{ij-pq} \\ \underline{Z}_{pq-ij} & \underline{Z}_{pq-pq} \end{pmatrix}^{-1}
$$

从（18）式可求得：

$$I_{ij} = y_{ij}u_{ij} + \underline{y}_{ij-pq}\underline{v}_{pq} \qquad \cdots\cdots (19)$$

从图 4 分析知，网络中任一点m与新增结点t之间的互阻抗为：

$$Z_{mt} = Z_{mi} \qquad (m \neq s) \qquad \cdots\cdots (20)$$

如果在网络中任一点m注入单位电流则有：

$$\frac{Z_{mi} - Z_{mt}}{-x} = I_{ij} = y_{ij}u_{ij} + \underline{y}_{ij-pq}\underline{v}_{pq}$$

$$= y_{ij}(Z_{mi} - Z_{mj}) + \underline{y}_{ij-pq}(\underline{Z}_{mp} - \underline{Z}_{mq})$$

整理可得：

$$Z_{mt} = Z_{mi} + x\,[y_{ij}(Z_{mi} - Z_{mj})\underline{y} + {}_{ij-pq}(\underline{Z}_{mp} - \underline{Z}_{mq})] \qquad \cdots\cdots (21)$$

$$(m \neq s,\ t)$$

式中$\underline{Z}_{mp}$、$\underline{Z}_{mq}$为结点m与p、q两组结点的转移阻抗列向量。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如果在点s注入单位电流则有：$\frac{Z_{ts}-Z_{ss}}{x}+\frac{Z_{ss}-Z_{si}}{-x}=1$

可求得：$Z_{st}=Z_{si}-1$ ……（22）

同时：

$$\frac{Z_{ts}-Z_{st}}{x}=I_{ij}=y_{ij}(Z_{si}-Z_{sj})+y_{ij-pq}(\underline{Z}_{sp}-\underline{Z}_{sq})〕$$

整理有：$Z_{ss}=Z_{st}-x〔y_{ij}(Z_{si}-Z_{sj})+\underline{y}_{ij-pq}(\underline{Z}_{sp}-\underline{Z}_{sq})〕$ ……（23）

从图5也不难知：$Z_{tt}=Z_{ij}$ ……（24）

通过（20）～（24）式可求出新增结点s、t与网络各结点的转移阻抗及其本身的自阻抗。

1　互感线路断开

由图5知，新增结点和支路后，断开i－j支路，只要在s，t之间追加一多参数为－x的支路即可（如图6所示）。

其追加公式是：

$$Z_{kl}'=Z_{kl}-\frac{(Z_{sk}-Z_{tk})\times(Z_{sl}-Z_{tl})}{Z_{ss}+Z_{tt}-2Z_{st}-x}$$ ……（25）

其中，Z_{kl}、Z_{kl}'是网络中任意两点间在互感支路断开前后的转移阻抗。

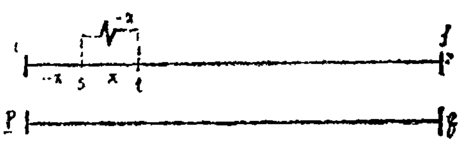

图6　互感支路断开等值图

2　挂地线检修

挂地线检修从分析知，只要将挂检线路的两侧结点强制等电位即可，故可在图5断开的基础上再在t—j之间追加一条参数为零的支路即可（如图7所示）。

其计算公式为：

$$Z''_{kl}=Z'_{kl}-\frac{(Z'_{kt}-Z'_{jk})(Z'_{lt}-Z'_{lj})}{Z'_{tt}+Z'_{jj}-2Z'_{tj}-0}$$ ……（26）

其中：双撇号的表示互感线路挂检后的转移阻抗

单撇号的表示只断开互感线路后的转移阻抗。

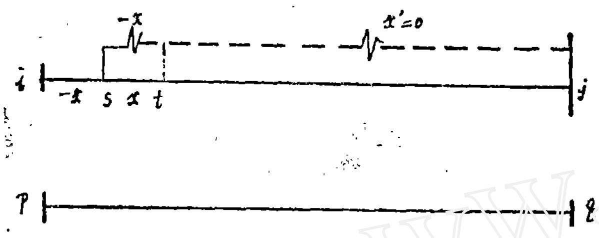

图7　互感线路挂检等值图

四　互感线路中间故障

如图8所示为一组互感线路，其i－j回中间发生故障，故障点k距i点的距离为r，r表示占全线长度的百分数值。

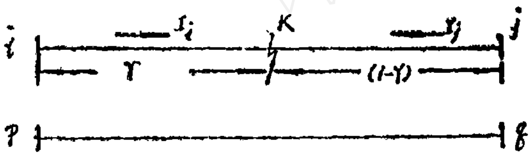

图8

假定在故障点注入单位电流，则可求得如下矩阵方程[1]。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\begin{pmatrix} v_{pp} \\ \underline{v}_{pq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{ij} & \underline{Z}_{ij-pq} \\ \underline{Z}_{pq-ij} & \underline{Z}_{pq-pq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (1-Y)+I_i \\ \underline{I}_{pq} \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots(27)$$

由（27式可得

$$\begin{pmatrix} 1-Y+I_i \\ \underline{I}_{pq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{ij} & \underline{y}_{ij-pq} \\ \underline{y}_{pq-ij} & \underline{y}_{pq-pq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ij} \\ \underline{v}_{pq} \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots(28)$$

$$= \begin{pmatrix} y_{ij} & \underline{y}_{ij-pq} \\ \underline{y}_{pq-ij} & \underline{y}_{pq-pq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{ki}-Z_{kj} \\ \underline{Z}_{kp}-\underline{Z}_{kq} \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots(28)$$

从（28）式就可求取I_i、$\underline{I}_{pq}$的电流值。同样也不难求出I_j及其它支路电流，这里不再论述。有兴趣的同志可参阅文献[2]。

五 结 论

本文对互感的断开、挂检进行了详尽的分析推导，有效地把追加互感支路问题转化成对一般支路的追加。本方法简单、新颖。

（本文经华中工学院言昭副教授审阅，在此致谢。）

参考文献

〔1〕电力系统接地故障点的分析计算方法　　王广学

〔2〕电力系统复故障的一般分析方法　　韩贞祥

〔3〕电力系统故障分析　　华北电力学院　刘万顺等编

（上接11页）

十、参考文献

1、H·W·Dowmel

《Digital computer Solution of electromagnatic transient in single and multiphase networks》

IEEE Trans Vol PAS—88 April 1969

2、朱声石：《高压电网继电保护原理与技术》　　电力工业出版社　1981·3

3、重庆大学、南京工学院合编　《高电压技术》　　电力工业出版社　1981·2

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net