

基于六序分量法的跨电压等级的同塔四回线的故障计算

刘玲, 范春菊

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 同塔架设的各回线路之间存在线间互感, 对处于不同电压等级下的两个同杆双回线的输电线路进行了故障计算的研究。该故障计算方法基于同杆双回线的六序分量法, 首先画出六序分量序网图, 同时考虑线间互感的存在, 求解各序综合阻抗, 在已知各序综合阻抗的基础上, 按照六序分量法以及故障的边界条件求出各序故障电流, 进而求出各相电流, 解决了不同电压等级下, 同杆四回线的短路故障计算问题。EMTP 仿真值验证了这种故障分析方法的正确性, 仿真结果表明, 基于六序分量法的不同电压等级的同杆四回线的短路电流计算的误差不超过 1%。

关键词: 六序分量法; 短路故障计算; 线间互感影响; 不同电压等级; 同杆四回线

Fault calculation for joint four transmission lines of different voltage grades on the same tower based on six-sequence-component method

LIU Ling, FAN Chun-ju

(Electrical Engineer Department, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Inductance exists between multi-circuit lines. In this paper, six sequence components method is employed to calculate fault current with mutual inductance between lines being considered and per-unit value being used. Transmission lines with identical voltage grade are decoupled by six sequence components methods. Then, six sequence impedances are calculated and short-circuit fault calculation of four transmission lines is addressed. In particular, for this method, the algorithm to calculate sequence impedance will be different with lines in different voltage grade. The result of EMTP simulation indicates that this analysis method is correct and the calculating error is less than 1%.

Key words: six sequence components method; short circuit fault calculation; influence of inductance between lines; different voltage grades; four transmission lines

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0006-06

0 引言

基于出线走廊利用率的考虑及同杆并架多回线路的经济性, 目前我国电力系统中同杆并架多回线路的采用日益增多。同时, 不同电压等级下的同塔多回线路也同时出现。在广东深圳等地, 均出现了不同电压等级的同塔四回线路^[1-2]。但是, 由于平行多回线运行方式复杂, 存在线间互感和跨线故障, 因此, 为故障计算带来了新的难题。

对于同一电压等级下的同杆多回线路并架, 在进行故障分析时, 可以采用对线路进行完全解耦的方法。文献[3-4]中讲述了同电压等级下的同杆双回线的故障计算方法, 即采用六序分量法进行同杆双回线的故障分析。文献[5]从原理上推导出了 12 序分量法, 文献[6]中则讲述了如何用 12 序分量法对同电压等级下的同杆四回线进行故障计算。综上, 同塔架设下的任意多回线路的故障计算都可以采用

上述序分量法进一步推导解决。而在不同电压等级下, 对线路完全解耦变得不可能, 同时又由于线路同杆并架时, 零序互感数值较大, 若忽略零序互感, 将造成所计算的电流跟实际的故障电流有较大的差别, 从而影响线路保护的整定计算以及保护动作的准确性。本文对由不同电压等级的两个同杆双回线构成的四回线的短路电流的计算做了研究, 在同杆双回线发生各种类型的故障时, 对两个双回线分别采用六序分量法进行故障计算。在计算过程中, 考虑两个双回线路之间的零序互感, 画出六序故障分量序网图, 求解各序综合阻抗的矩阵, 从而求出故障电流, 解决了不同电压等级下的同杆四回线的故障计算问题。

1 不同电压等级同杆四回线系统

本文系统以深圳供电局 220 kV 鹏腾甲乙线 (500 kV 鹏站至腾电站) 与 110 kV 华昌 I、II 线 (110 kV

龙华站至宝昌升压站) 在部分地段的同杆四回架设的输电线路等值系统模型(图 1) 为参考^[2], 在此基础上, 画出本文所用的系统结构图如图 2 所示, 本文研究的是 220 kV 和 500 kV 两个电压等级下架设的同杆四回线。

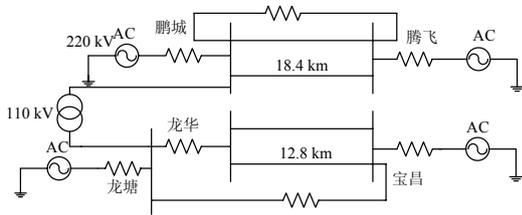


图 1 参考等值系统模型

Fig.1 Reference model of equivalent system structure

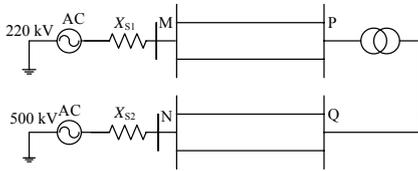


图 2 简化的等值系统结构图

Fig.2 Simplified diagram of equivalent system structure

在图 2 中, X_{S1} 、 X_{S2} 均为两侧电源的系统阻抗。其中, 变压器的变比为 220/500, 且是理想变压器, 线路 MP 为 220 kV 电压等级的同杆双回线, NQ 为 500 kV 电压等级的同杆双回线, 这两条同杆双回线在某一段内有耦合, 构成不同电压等级的同杆四回输电线路。一般来说, 电力系统的故障短路计算都忽略负荷电流的影响, 也就是说, 发生故障前, 线路都是空载的, 所以图 1 可简化成图 2 所示的系统结构图。

在图 2 中, 四回线的自阻抗为 Z_s , 线路的相间互阻抗相等均为 Z_M , 不同回线之间的互阻抗也相等记为 Z_X 。线路的阻抗矩阵可以记为:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_s & Z_M & Z_M & Z_X \\ Z_M & Z_s & Z_M & Z_X \\ Z_M & Z_M & Z_s & Z_X \\ Z_X & Z_X & Z_X & Z_s & Z_M & Z_M & Z_X \\ Z_X & Z_X & Z_X & Z_M & Z_s & Z_M & Z_X \\ Z_X & Z_X & Z_X & Z_M & Z_M & Z_s & Z_X \\ Z_X & Z_X & Z_X & Z_X & Z_X & Z_X & Z_s & Z_M & Z_M & Z_X & Z_X & Z_X & Z_X \\ Z_X & Z_X & Z_X & Z_X & Z_X & Z_X & Z_M & Z_s & Z_s & Z_X & Z_X & Z_X & Z_X \\ Z_X & Z_s & Z_M & Z_M & Z_X & Z_X \\ Z_X & Z_M & Z_s & Z_M & Z_X \\ Z_X & Z_M & Z_s & Z_M & Z_X \\ Z_X & Z_M & Z_s & Z_M & Z_X \end{bmatrix}$$

对于不同电压等级的电力系统的短路电流计

算, 通常采用标幺制的方法对系统的参数进行归算以简化短路电流计算。在没有耦合的情况下, 该方法是行之有效的。但是, 对于图 2 所示的系统, 由于不同电压等级的输电线路之间存在耦合, 那么, 互感的归算就是一个难题; 在基准电压不同的情况下, 各两回线的阻抗也是不相同的, 所以, 四回线的完全解耦变得困难, 对不同电压等级的同杆四回线的故障分析变得很复杂, 也很值得探讨。

2 短路计算方法

2.1 对称分量法

传统的对称分量法通过序网变换求解故障电流时, 需要将三相系统分解成完全独立的正序、负序和零序网络, 在故障点完成各序网的等值后, 通过对故障类型设定边界条件求解故障点的各序电流^[7]。对于不同电压等级的同杆四回线的故障计算, 正序、负序、零序综合阻抗的计算显得尤为重要, 因为各序综合阻抗值是对称分量法应用的基础, 有了综合阻抗值, 就可以进行各种故障类型的短路电流计算。

对称分量法对于四回线的单回线的故障计算是行之有效的方法, 但是对于多回线路的跨线故障, 利用对称分量法无法进行故障的计算。所以势必要用到六序分量法或是其他序分量法进行故障分析。

2.2 六序分量法

六序故障分量可以通过推广传统的对称分量法得到。在同杆双回线的条件下, 设满足对称条件, 即假定每回线的相间互阻抗相等, 均为 Z_m ; 两回线之间的线间互阻抗也相等, 均为 Z_x 。这时可以将六相电压和电流化为六序对称电压和电流构成的线性叠加形式。对双回线各相电压列相量与电流列相量分别左乘同一个矩阵得到电压和电流的六序分量, 分别为 $T_0, T_1, T_2, F_0, F_1, F_2$ 序。把序分量代入双回线各相电压与电流之间的矩阵关系中, 可以得到由电压、电流序分量向量表示的矩阵关系, 并且左乘的矩阵取得适当时可以使原阻抗矩阵变成对角矩阵, 从而达到消去互感的目的^[3-4]。

2.3 12 序故障分量法

12 序故障分量法是从六序故障分量法推广出来的, 适合于完全对称的同杆四回线的故障分析的方法^[5-6], 该方法可以将同杆四回线的相间互感和线间互感完全解耦, 得到完全独立的 12 个序分量。

3 六序分量法在不同电压等级的四回线的故障分析中的应用

本文所提出的短路计算方法就是基于同杆双回

线的六序分量法的短路电流计算方法，下面以图 2 所示的网络来介绍不同电压等级的同杆四回线路发生单回线路故障及其中的双回线上的跨线故障时的故障电流的求取方法。

3.1 参数的标幺值化

由于电压等级不同，所以在计算过程中，采用标幺制进行计算。在设定基准电压，基准容量后，有名值完全相同的自阻抗，在不同电压等级下的标幺值是不同的，见矩阵 $[Z_*]$ 中的 $[Z_s]$ 和 $[Z_{s2}]$ ，他们分别表示不同的标幺值；在不同电压等级下的互阻抗，同杆双回线 MP 相间的互阻抗和线路 NQ 的相间的互阻抗也有不同的标幺值，见矩阵 $[Z_*]$ 中的 $[Z_M]$ 和 $[Z_{M2}]$ ；线间阻抗的标幺值相等，在不同电压等级线路之间的互阻抗的标幺值的计算方法，可以引入两个不同的电压的乘积作为互阻抗的基准电压。阻抗矩阵采样以上方法计算标幺值后，变成如下矩阵：

$$[Z_*] = \begin{bmatrix} Z_s & Z_M & Z_M & Z_X & Z_X & Z_X & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} \\ Z_M & Z_s & Z_M & Z_X & Z_X & Z_X & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} \\ Z_M & Z_M & Z_s & Z_X & Z_X & Z_X & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} \\ Z_X & Z_X & Z_X & Z_s & Z_M & Z_M & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} \\ Z_X & Z_X & Z_X & Z_M & Z_s & Z_M & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} \\ Z_X & Z_X & Z_X & Z_M & Z_M & Z_s & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} \\ Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{s2} & Z_{M2} & Z_{M2} & Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{X2} \\ Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{M2} & Z_{s2} & Z_{M2} & Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{X2} \\ Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{M2} & Z_{M2} & Z_{s2} & Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{X2} \\ Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{s2} & Z_{M2} & Z_{M2} \\ Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{M2} & Z_{s2} & Z_{M2} \\ Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X3} & Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{M2} & Z_{M2} & Z_{s2} \end{bmatrix}$$

从矩阵中的参数可以看出，此时四回线路的参数不是完全对称的，不能采用 12 序故障分量法进行不同电压等级的同杆四回线的故障计算。

$$\begin{bmatrix} Z_s+2Z_M+3Z_X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6Z_{X3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_s+2Z_M-3Z_X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_s-Z_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_s-Z_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s-Z_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s-Z_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6Z_{X3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s+2Z_{M2}+3Z_{X2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s+2Z_{M2}-3Z_{X2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s-Z_{M2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s-Z_{M2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s-Z_{M2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s-Z_{M2} \end{bmatrix}$$

由 $[Z_{TF}]$ 矩阵的第七行第一列和第一行第七列

3.2 标幺制下的阻抗阵的变换

虽然矩阵 $[Z_*]$ 不是一个完全对称的矩阵，但是，也是一个有规律可循的矩阵。对于同一电压等级下的同杆双回线来说，由于基准电压是一样的，线路参数是完全对称的，所以，可以考虑分别对双回线路 MP 和 NQ 使用六序分量法进行同杆双回线的跨线故障计算。当线路 MP 发生跨线故障时，另一根同杆双回线 NQ 线路对 MP 线路有互感的影响，而该互感又无法直接消除，所以，考虑对矩阵 $[Z_*]$ 进行适当的变换，以求取互感的影响。此时，结合六序分量法和 12 序分量法，可以得到一个新的 12 序变换阵。即：

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \alpha & \alpha & \alpha^2 & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \alpha^2 & -\alpha^2 & \alpha & -\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \alpha & -\alpha & \alpha^2 & -\alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & \alpha^2 & -\alpha^2 & \alpha & -\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & \alpha^2 & -\alpha^2 & \alpha & -\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & \alpha & -\alpha & \alpha^2 & -\alpha^2 \end{bmatrix}$$

上述 M 阵可以看成是一个分块对角矩阵，对角线上的矩阵称为 M' 矩阵。 M' 矩阵即为从双回线的六相电量变换到它们的六序分量的变换矩阵，可以对同杆双回线进行完全解耦^[4]。而矩阵中的零元素，则表示没有考虑两个双回线之间的互感。将该矩阵 M 用来解耦完全耦合的同一电压等级的同杆四回线，如下式所示：

$$[Z_{TF}] = [M]^{-1}[Z][M]$$

此时得到 Z_{TF} 为：

的阻抗值可以看出，经过变换后，线路 MP 和线路

NQ 仅同序零序间存在互感。

3.3 六序分量法在故障分析中的应用

从以上的分析中可以看出, 当同杆双回线 MP 发生各种类型的故障时, 同杆双回线 NQ 对它有互感的影响, 但是, 由于原有参数的对称性, 阻抗阵标么化以后, 两条同杆双回线之间仅仅存在零序互感。相当于纯同杆双回线发生故障时, 采用传统的单回线的对称分量法时也只要考虑两回线的线间互阻抗, 即零序阻抗^[8-10]。显然, 六序故障分量法在不同电压等级的同杆四回线的短路计算中的作用非常重要, 该方法既体现了六序分量法的简约性, 又体现了六序分量法的实用性。只要进行零序互感的归算就可以了。下面以实际的参数进行故障分析的应用。为了计算短路电流, 首先要求取六序故障分量法下的各序综合阻抗。

4 各序综合阻抗的计算

对于图 2 所示的系统进行短路电流计算, 取基准容量为 $S_B = 100 \text{ MVA}$, 在 220 kV 侧, 取基准电压为 $U_{B1} = 220 \text{ kV}$; 在 500 kV 侧, 取基准电压为 $U_{B2} = 500 \text{ kV}$ 。

运用六序分量法进行故障计算时, 同使用传统对称分量法一样, 首先要计算出各序综合阻抗。此时需要对不同电压等级下的两个双回线分别使用六序分量法进行解耦计算, 解耦后, 线路 MP 与线路 NQ 之间仅同序零序间存在互感。以 500 kV 线路发生故障为例, 其六序故障序网图如图 3 所示。对于各序综合阻抗, 反序电气量只是存在于同杆双回线的内部, 所以, 各序综合阻抗即为故障点到线路两侧的各序阻抗的并联阻抗, 如图 3(c), 图 3(d)所示。对于同序网络, 两个双回线上的同向零序 (T_0 序) 间存在互感的影响, 如图 3(b)所示。

$$\begin{cases} (2X_{S1(0)*} + X_{0M*} + 3X_{X*})\dot{I}_{1(0)*} + 6kX_{X2*}\dot{I}'_{2(0)*} = \dot{U}_{KT0*} \\ (X_{0N*} + 3X_{X*} + X_{T0*} + 2X_{S2(0)*})\dot{I}'_{2(0)*} - 6(1-k)X_{X2*}\dot{I}'_{2(0)*} \times 2 + 6kX_{X2*}\dot{I}_{1(0)*} = \dot{U}_{KT0*} \end{cases} \quad (1)$$

其中: k 为故障点 F 到母线 N 的距离占 NQ 线路总长度的比例; $\dot{I}_{1(0)*}$ 、 $\dot{I}'_{2(0)*}$ 分别为流过各回线路的零序电流; X_{X*} 为计算线路参数时所用线间互感的标么值; X_{X2*} 为考虑零序互感影响时的线间互感的标么值, 取 $X_{X2*} = \frac{X_X S_B}{U_{B1} U_{B2}}$; $X_{S1(0)*}$ 、 $X_{S2(0)*}$ 分别

为 500 kV 系统及 220 kV 系统的零序阻抗标么值;

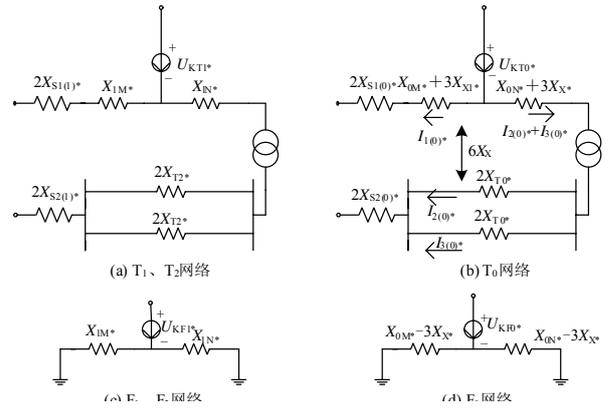


图 3 六序故障分量序网图

Fig.3 Six-sequence fault component network

图中, X_{T2*} 、 X_{T0*} 分别是指双回线路 MP 的同向负序 (T_2 序) 阻抗及同向零序阻抗 (T_0 序), 在上述网络中, 因为都属于双回线路 NQ 的外部网络, 所以当把线路 MP 归算到双回线路 NQ 的网络中时, 根据电路关系, 线路 MP 的阻抗值应取原来的两倍。对于同序零序阻抗, 因为考虑到零序互感的影响, 求法同六序分量法求取同序零序阻抗有所不同。具体求法如下: MP 两回线路完全对称, 同时又不存在互感, 可以直接并联, 且 MP 线路的阻抗取为线路的正序阻抗。此时, 线路 MP 与线路 NQ 之间的零序互感为 $6X_X$ (矩阵 $[Z_{TF}]$ 中的第七行第一列和第一行第七列阻抗值)。根据同向零序网络图, 可列出同向零序电压, 电流方程组, 即方程组 (1)。由于 MP 两回线路是完全对称的, 所以图 3(b)中, $\dot{I}_{2(0)*}$ 和 $\dot{I}'_{3(0)*}$ 相等, 列方程时, 可以将这两回线路直接并联起来, 并联后, 设流过线路的电流为 $\dot{I}'_{2(0)*}$ 。

X_{0M*} 、 X_{0N*} 分别为故障线路 N 侧的零序阻抗及 Q 侧的零序阻抗标么值。

方程(1)写成矩阵形式, 如式 (2) 所示。通过求解矩阵方程 (2) 即可求出 $\dot{I}_{1(0)*}$ 、 $\dot{I}'_{2(0)*}$, 而且 $\dot{I}_{1(0)*}$ 、 $\dot{I}'_{2(0)*}$ 的表达式中含有 \dot{U}_{KT0*} 因子。从而可以进一步求出同向零序综合阻抗, 如下所示:

$$X_{T0*} = \frac{\dot{U}_{KT0*}}{\dot{I}_{1(0)*} + \dot{I}'_{2(0)*}}$$

$$\begin{bmatrix} 2X_{S1(0)*} + X_{0M*} + 3X_{X*} & 6kX_{X2*} \\ 6kX_{X2*} & X_{0N*} + 3X_{X*} + X_{T0*} + 2X_{S2(0)*} - 12(1-k)X_{X2*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)*} \\ \dot{I}'_{2(0)*} \end{bmatrix} = \dot{U}_{KT0*} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

线路 MP 发生故障时，综合阻抗的求法同以上方法相似。

5 EMTP 仿真验证

5.1 仿真模型

仿真系统图如图 1 所示，220 kV 侧和 500 kV 侧的系统参数分别为：

$$E_1 = 220 \text{ kV}, \quad X_{s1(1)} = 90 \text{ } \Omega, \quad X_{s1(0)} = 133 \text{ } \Omega;$$

$$E_2 = 500 \text{ kV}, \quad X_{s2(1)} = 18 \text{ } \Omega, \quad X_{s2(0)} = 54.03 \text{ } \Omega$$

因为四回线同杆架设，所以文中假设各侧系统参数均是已知的。

同杆双回线的自阻抗为： $X_{s1} = 0.48466 \text{ } \Omega/\text{km}$ ，

互阻抗为： $X_{m1} = 0.16364 \text{ } \Omega/\text{km}$ ；两条同杆双回线之间的线间互阻抗为： $X_{x1} = 0.14422 \text{ } \Omega/\text{km}$ ；线路长度为 $L = 100 \text{ km}$ 。

5.2 短路电流仿真

当线路上发生短路故障时，我们用 ATP 仿真采样故障点处各相对地电流，经过全波傅氏算法得到各相电流幅值，并与故障点电流的计算值做比较。表 1、表 2 分别为 NQ 线路和 MP 线路故障时的计算结果与仿真结果比较。仿真结果包括考虑两个双回线间的互感的仿真结果和不考虑两个双回线间互感的仿真结果。

表 1 线路 NQ 发生故障时故障点各相电流计算值与仿真值
Tab.1 Fault current both by calculation and measurement of line NQ

故障类型/故障 相电流/A	NQ 第一回线路			NQ 第二回线路			误差 1(考 虑两双回 线间互 感)	误差 2(不 考虑两双 回线间互 感)
	计算值	仿真值 1 (考虑两 双回线间 互感)	仿真值 2 (不考虑 两双回线 间互感)	计算值	仿真值 1 (考虑两 双回线间 互感)	仿真值 2 (不考虑 两双回线 间互感)		
IAG A 相	5 925.3	5 924.1	5 305.5	0	0	0	0.02%	10.5%
IBCG B 相	8 910	8 990.5	8 353.9	0	0	0	0.89%	6.2%
C 相	8 910	8 990.5	8 133.1	0	0	0	0.89%	8.7%
IABCG A 相	9 997.4	10 065	9 203	0	0	0	0.67%	7.9%
B 相	9 997.4	10 065	9 283.3	0	0	0	0.67%	7.2%
C 相	9 997.4	10 065	9 149.2	0	0	0	0.67%	8.5%
IAIIAG IA 相	3 243.5	3 230.9	3 389.9	3 243.5	3 230.9	3 389.9	0.39%	4.5%
IBIICG IB 相	8 787.8	8 867.1	8 997.3	0	0	0	0.89%	2.4%
IIC 相	0	0	0	8 787.8	8 867.1	8 967.4	0.89%	2.0%

表 2 线路 MP 发生故障时故障点各相电流计算值与仿真值
Tab.2 Fault current both by calculation and measurement of line MP

故障类型/故障 相电流/A	MP 第一回线路			MP 第二回线路			误差 1(考 虑两双回 线间互 感)	误差 2(不 考虑两双 回线间互 感)
	计算值	仿真值 1 (考虑两 双回线间 互感)	仿真值 2 (不考虑 两双回线 间互感)	计算值	仿真值 1 (考虑两 双回线间 互感)	仿真值 2 (不考虑 两双回线 间互感)		
IAG A 相	5761.4	5 741.8	6 032.1	0	0	0	0.34%	4.7%
IBCG B 相	7 323.24	7 356.1	8 883.3	0	0	0	0.45%	21.3%
C 相	7 323.24	7 356.1	8 584.7	0	0	0	0.45%	17.3%
IABCG A 相	8 050.0	8 050.9	9 695.7	0	0	0	0.011%	20.44%
B 相	8 050.0	8 050.9	9 758.4	0	0	0	0.011%	21.22%
C 相	8 050.0	8 050.9	9 657.0	0	0	0	0.011%	20.0%
IAIIAG A 相	3 533.6	3 515	3 075.0	3 533.6	3 515	3 075.0	0.53%	13.0%
IBIICG B 相	7 132.5	7 179.3	6 891.0	0	0	0	0.65%	3.4%
C 相	0	0	0	7 132.5	7 179.3	7 184.7	0.65%	0.73%

由表 1 和表 2 可以看出，当线路发生故障时，

不仅要考虑同电压等级双回线路间的互感，还要考

考虑两个电压等级下的双回线间的互感。当考虑两个电压等级下的双回线间的互感耦合时,计算结果与仿真结果的误差不超过1%,否则,误差将很大。

6 结论

对于同塔并架的线路来说,线路间距离较小,线间和相间都存在互感,且线路平行走向距离较长,那么互感的影响就比较大。为了提高保护动作的准确性,就必须提高保护整定值的准确度,而提高准确度的关键是提高同杆多回线路的故障计算的准确性。

本文对不同电压等级下的两个同杆双回线所构成的同杆四回线的故障分析进行了详细的研究,提出了基于六序故障分量法的短路电流计算方法,从而解决了不同电压等级的同杆四回线短路故障时的故障电流计算问题。EMTP 仿真试验表明,该故障计算方法的计算精度很高,误差基本上不超过1%。

参考文献

- [1] 蓝信军, 庞方亮, 陈葛松. 不同电压等级输电线路同塔架设的仿真分析[J].长沙电力学院学报, 2006,21(1): 22-25.
LAN Xin-jun, PANG Fang-liang, CHEN Ge-song. Analyzing on the Multi-circuits Transmission Lines on Single Tower[J]. Journal of Changsha University of Electrical Power: Natural Science, 2006,21(1): 22-25.
- [2] 李汉明, 等. 同塔架设不同电压等级多回线路短路故障和防雷保护问题及其对策[A].中国国际供电会议, CICED[C].2006.
LI Han-ming, et al. Research on Line Fault and Lightning Performance of Quadruple Circuit Transmission Line of Different Voltage on the Same Tower[A]. in: CICED[C]. 2006.
- [3] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [4] 索南加乐.同杆双回线的故障分析及继电保护(博士学位论文)[D].西安: 西安交通大学, 1991.
SUONAN Jia-le. Fault Analysis and Relay Protection of Double Circuit Transmission Lines, Doctoral Dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1991.
- [5] 田羽, 范春菊, 龚振东. 同杆4回线12序分量法研究[J]. 电力系统自动化, 2007, 30(21): 39-43,109.
TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong. A Study on Twelve-sequence Component Method of Four-Parallel Lines on Same Towers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 30(21): 39-43,109.
- [6] 邓孟华, 范春菊, 等. 基于12序分量的同杆四回线短路故障计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 64-67.
DENG Meng-hua, FAN Chun-ju, et al. Short Circuit Fault Calculation of Four Transmission Lines on One Tower Based on Twelve Sequence Components Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 64-67.
- [7] 陈珩. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社.
CHEN Heng. Power System Transient Analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press.
- [8] 徐平, 盛名良.三回平行接近输电线的短路计算[J]. 浙江电力, 2003(4): 22-24.
XU Ping, SHENG Ming-liang. Short Circuit Calculations of Triple-circuit Transmission Lines in Close Parallel Proximity[J]. Zhejiang Electric Power, 2003(4): 22-24.
- [9] 米麟书, 刘芳宁, 陈刚. 电力系统故障计算中互感线路处理方法的研究[J].电网技术, 1992, 16(3): 50-56.
MI Lin-shu, LIU Fan-ning, CHEN Gang. Study on Method to Treat Mutual Coupling Lines for Analysis of Faulted Power System[J]. Power System Technology, 1992, 16(3): 50-56.
- [10] 张言苍, 杨洪平, 郭征. 电网故障计算中零序多重互感线路的处理[J].电力系统自动化, 2004, 28(21): 89-91.
ZHANG Yan-cang, YANG Hong-ping, GUO Zheng. Influence of Multiple Zero-sequence Mutual Inductance Coupled Transmission Lines on the Fault Calculation of Electric Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 89-91.

收稿日期: 2009-06-22; 修回日期: 2009-08-21

作者简介:

刘玲(1985-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护及综合自动化; E-mail: liu_ling@sjtu.edu.cn

范春菊(1967-),女,博士,副教授,主要研究方向为人工智能在继电保护及综合自动化中的应用。