

同塔四回输电线路故障选线新方案

于仲安¹, 毕俊强¹, 郭培育², 王先敏¹, 陈清²

(1. 江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000;

2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

摘要:从参数不对称同塔四回输电线路入手, 结合四回线内部存在的线间及相间电磁耦合的特点, 分析推导出适合的相模变换矩阵对各回线阻抗进行解耦处理, 并且通过仿真对比的方式论证了解耦方法的正确性。基于解耦出的独立模量间的关系, 定义4个参数 $K_1 \sim K_4$, 根据这4个参数在不同回路故障时的取值不同, 构造新的故障选线判据。大量的PSCAD/EMTDC仿真数据表明, 所提出的故障选线方案速度快、简单、可靠, 且不受故障距离、过渡电阻以及负荷电流和系统运行方式的影响。

关键词:同塔四回线; 参数不对称; 相模变换; 故障选线; 仿真

中图分类号: TM 77

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.201909026

0 引言

近年来, 随着国民经济的快速发展, 用电需求越来越大。同塔四回线独特的输电方式, 能够节约土地、降低成本。然而, 同塔四回线系统内部复杂的线间电磁耦合, 给故障分析和故障选线都带来了新的挑战。

目前, 国内外对同塔四回线开展了较多的理论研究, 如同塔四回线的故障分析^[1-2]、故障选线和选相^[3-4]、故障测距^[5]和继电保护^[6]等。同塔四回线故障选线主要依据相模变换后的电压幅值^[7]、环流分量之间的幅值与相位^[8-9]、电流负序分量^[10-11]之间的关系。文献[12]利用发生故障时独立的序分量幅值与相位之间存在的恒定关系得出选线判据。文献[13]利用矩阵束算法对发生故障后各条线路的暂态零模电流进行频率分析, 提取出各条线路暂态零模电流强制分量中的暂态特征^[14-15], 依据频率分量之间明显的区别实现选线。然而, 目前绝大多数研究对象为参数对称的线路模型, 针对贴近实际的多回线的故障回路判别有待进一步研究。

本文以参数不对称的同塔四回线为例, 通过相模变换矩阵, 对故障电流进行相模变换得到12个独立的模量, 并分析模量之间的关系, 提出新的故障选线判据。数学推导与模型仿真结果表明, 本文所提选线方案可推广至参数对称的同塔四回线。

1 参数不对称的同塔四回线相模变换推导

1.1 参数不对称的同塔四回线特点分析

实际上, 由于部分同塔四回线工程是由同塔双

回线改造而来, 且四回线中的电压等级、导线的排列方式、分裂导线的数量、导线型号、导线的空间位置均不同, 参数不对称的同塔四回线模型和参数不对称的同塔四回线阻抗模型分别如图1和图2所示。图1中, 从上到下依次为I、II、III、IV回线。假设单回线内均匀换位, I、II回线的自阻抗为 Z_{11} 、相间互阻抗为 Z_{m1} ; III、IV回线的自阻抗为 Z_{12} 、相间互阻抗为 Z_{m2} ; I、II回线线间互阻抗均为 Z_{p1} ; III、IV回线的线间互阻抗均为 Z_{p2} ; I、III回线和II、IV回线的线间互阻抗相等, 均为 Z_{q1} ; I、IV回线和II、III回线的线间互阻抗相等, 均为 Z_{q2} 。

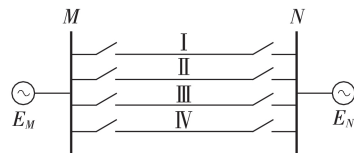


图1 参数不对称的同塔四回线路模型

Fig.1 Model of four-circuit lines on same tower with asymmetry parameters

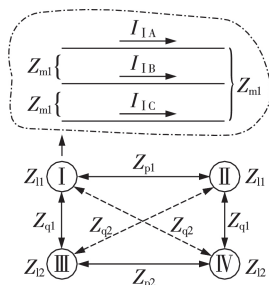


图2 参数不对称的同塔四回线阻抗模型

Fig.2 Impedance model of four-circuit lines on same tower with asymmetry parameters

1.2 相模变换矩阵推导

由图2可知, 各回线的自阻抗、线间互阻抗不完全相等, 则其电压、电流的关系如式(1)所示。

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-08-06

基金项目: 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室开放课题资助项目(2015AB03)

Project supported by the Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (2015-AB03)

$$\begin{bmatrix} U_{IA} \\ U_{IB} \\ U_{IC} \\ U_{IIA} \\ U_{IIB} \\ U_{IIC} \\ U_{IIIA} \\ U_{IIIB} \\ U_{IIIC} \\ U_{IIIA} \\ U_{IIIB} \\ U_{IIIC} \\ U_{IIIA} \\ U_{IIIB} \\ U_{IIIC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{m1} & Z_{m1} & Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} \\ Z_{m1} & Z_{11} & Z_{m1} & Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} \\ Z_{m1} & Z_{m1} & Z_{11} & Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} \\ Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{11} & Z_{m1} & Z_{m1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} \\ Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{m1} & Z_{11} & Z_{m1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} \\ Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{p1} & Z_{m1} & Z_{m1} & Z_{11} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} \\ Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{12} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{p2} & Z_{p2} & Z_{p2} \\ Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{m2} & Z_{12} & Z_{m2} & Z_{p2} & Z_{p2} & Z_{p2} \\ Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{12} & Z_{p2} & Z_{p2} & Z_{p2} \\ Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{p2} & Z_{p2} & Z_{p2} & Z_{12} & Z_{m2} & Z_{m2} \\ Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{p2} & Z_{p2} & Z_{p2} & Z_{m2} & Z_{12} & Z_{m2} \\ Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{p2} & Z_{p2} & Z_{p2} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{12} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{IA} \\ I_{IB} \\ I_{IC} \\ I_{IIA} \\ I_{IIB} \\ I_{IIC} \\ I_{IIIA} \\ I_{IIIB} \\ I_{IIIC} \\ I_{IIIA} \\ I_{IIIB} \\ I_{IIIC} \\ I_{IIIA} \\ I_{IIIB} \\ I_{IIIC} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, U_{IA} 、 U_{IB} 、 U_{IC} 和 I_{IA} 、 I_{IB} 、 I_{IC} ($i=I, II, III, IV$) 分别为 i 回线的三相电压和三相电流。将式(1)简记为:

$$U_{ABC} = Z I_{ABC} \quad (2)$$

先对阻抗矩阵 Z 进行相间解耦, 解耦矩阵 P_1 为:

$$P_1 = \begin{bmatrix} Q & & & \\ & Q & & \\ & & Q & \\ & & & Q \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ 5 & -1 & -4 \\ 5 & -4 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵变换如下:

$$Z_1 = P_1^{-1} Z P_1 \quad (4)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11}+2Z_{m1} & 3Z_{p1} & 3Z_{q1} & 3Z_{q2} \\ & a_1 & & \\ & 3Z_{p1} & Z_{11}+2Z_{m1} & 3Z_{q2} & 3Z_{q1} \\ & & a_1 & & \\ & 3Z_{q1} & 3Z_{q2} & Z_{12}+2Z_{m2} & 3Z_{p2} \\ & & & a_2 & \\ & 3Z_{q2} & 3Z_{q1} & 3Z_{p2} & Z_{12}+2Z_{m2} & a_2 \end{bmatrix}$$

其中, $a_1 = Z_{11} - Z_{m1}$; $a_2 = Z_{12} - Z_{m2}$ 。

从上式可见, 通过解耦矩阵 P_1 并未使阻抗矩阵 Z 完全对角化。为了使阻抗矩阵变换为对角矩阵, 引入不对称参数 $t_1 \sim t_4$ 。进一步对阻抗矩阵 Z_1 求特征向量, 根据得到的特征向量构成线间解耦矩阵 P_2 见式(5)。综合式(3)、(5)可得总的解耦矩阵 P 见式(6)。

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ t_1 & & -t_2 & t_3 & -t_4 \\ & & & & 1 \\ & & & & & 1 \\ t_1 & & -t_2 & -t_3 & t_4 & & 1 \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$t_1 = -\frac{Z_\alpha - \lambda_1}{3(Z_{q1} + Z_{q2})}, \quad t_2 = \frac{Z_\alpha - \lambda_2}{3(Z_{q1} + Z_{q2})}$$

$$t_3 = -\frac{Z_\mu - \lambda_3}{3(Z_{q1} - Z_{q2})}, \quad t_4 = -\frac{Z_\mu - \lambda_4}{3(Z_{q1} - Z_{q2})}$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left\{ Z_\alpha + Z_\beta - \sqrt{(Z_\alpha + Z_\beta)^2 - 4[Z_\alpha Z_\beta - 9(Z_{q1} + Z_{q2})^2]} \right\}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \left\{ Z_\alpha + Z_\beta - \sqrt{(Z_\alpha + Z_\beta)^2 - 4[Z_\alpha Z_\beta - 9(Z_{q1} + Z_{q2})^2]} \right\}$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{2} \left\{ Z_\mu + Z_\theta + \sqrt{(Z_\mu + Z_\theta)^2 - 4[Z_\mu Z_\theta - 9(Z_{q1} + Z_{q2})^2]} \right\}$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{2} \left\{ Z_\mu + Z_\theta - \sqrt{(Z_\mu + Z_\theta)^2 - 4[Z_\mu Z_\theta - 9(Z_{q1} + Z_{q2})^2]} \right\}$$

$$Z_\alpha = Z_{11} + 2Z_{m1} + 3Z_{p1}, \quad Z_\beta = Z_{12} + 2Z_{m2} + 3Z_{p2}$$

$$Z_\mu = Z_{11} + 2Z_{m1} - 3Z_{p1}, \quad Z_\theta = Z_{12} + 2Z_{m2} - 3Z_{p2}$$

$$P = P_1 P_2 = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 & 5 & & & & & & & & & & & & \\ 5 & -1 & -4 & 5 & & & & & & & & & & & & \\ 5 & -4 & -1 & 5 & & & & & & & & & & & & \\ 5 & & & 5 & 5 & 5 & -5 & & & & & & & & & \\ 5 & & & 5 & -1 & -4 & -5 & & & & & & & & & \\ 5 & & & 5 & -4 & -1 & -5 & & & & & & & & & \\ 5t_1 & & & -5t_2 & & & 5t_3 & 5 & 5 & -5t_4 & & & & & & \\ 5t_1 & & & -5t_2 & & & 5t_3 & -1 & -4 & -5t_4 & & & & & & \\ 5t_1 & & & -5t_2 & & & 5t_3 & -4 & -1 & -5t_4 & & & & & & \\ 5t_1 & & & -5t_2 & & & -5t_3 & & & 5t_4 & 5 & 5 & & & & \\ 5t_1 & & & -5t_2 & & & -5t_3 & & & 5t_4 & -1 & -4 & & & & \\ 5t_1 & & & -5t_2 & & & -5t_3 & & & 5t_4 & -4 & -1 & & & & \end{bmatrix} \quad (6)$$

对式(2)进行矩阵变换得:

$$U_{1-12} = P^{-1} Z P I_{1-12} \quad (7)$$

对式(7)展开得:

$$\begin{bmatrix} U_1 & U_2 & U_3 & U_4 & U_5 & U_6 & U_7 & U_8 & U_9 & U_{10} & U_{11} & U_{12} \end{bmatrix}^T = \text{diag}[a_1 \ a_1 \ a_1 \ a_1 \ a_2 \ a_2 \ a_2 \ a_2 \ \lambda_4 \ \lambda_3 \ \lambda_2 \ \lambda_1] \times \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 & I_4 & I_5 & I_6 & I_7 & I_8 & I_9 & I_{10} & I_{11} & I_{12} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$M = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & -1 & -4 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & -4 & -1 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & & & -5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & & & -5 & -1 & -4 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & & & -5 & -4 & -1 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & & & & & & -5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & & & & & & -5 & -1 & -4 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & & & & & & -5 & -4 & -1 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & & & & & & -5 & & & -5 & 5 & 5 \\ 5 & & & & & & -5 & & & -5 & -1 & -4 \\ 5 & & & & & & -5 & & & -5 & -4 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.3 故障短路电流计算

当电力系统发生故障时,根据故障类型,可以得到故障边界条件,边界条件结合解耦分析即可得到故障相的电流。限于篇幅,下文以参数不对称的同塔四回线的 I 回线发生 BC 相接地故障为例,计算发生故障时 I 回线的 BC 相的电流,此时边界条件如下:

$$\begin{cases} U_{IB} = U_{IC} = 0 \\ I_{IA} = 0 \\ I_{iA} = I_{iB} = I_{iC} = 0 \quad i = \text{II, III, IV} \end{cases} \quad (10)$$

边界条件结合上文中的电压电流的矩阵变换可以得到:

$$\begin{cases} I_2 = \frac{E}{Z_2} \\ I_3 = \frac{E}{Z_3} \\ I_1 = \frac{C_1 E}{\frac{Z_1}{C_1} + \frac{Z_4}{C_4} + \frac{Z_7}{C_7} + \frac{Z_{10}}{C_{10}}} \\ I_4 = \frac{C_4 E}{\frac{Z_1}{C_1} + \frac{Z_4}{C_4} + \frac{Z_7}{C_7} + \frac{Z_{10}}{C_{10}}} \\ I_7 = \frac{C_7 E}{\frac{Z_1}{C_1} + \frac{Z_4}{C_4} + \frac{Z_7}{C_7} + \frac{Z_{10}}{C_{10}}} \\ I_{10} = \frac{C_{10} E}{\frac{Z_1}{C_1} + \frac{Z_4}{C_4} + \frac{Z_7}{C_7} + \frac{Z_{10}}{C_{10}}} \end{cases} \quad (11)$$

由式(8)可以看出,经过相模变换后,阻抗 Z 变为对角矩阵,即实现了线间及相间的解耦。对于新建的同塔四回线,其线路阻抗参数对称,每回线的自阻抗、相间互阻抗和不同线路间的互阻抗都相等,其解耦方法和上述过程相同,所得解耦矩阵 M 如式(9)所示。

$$C_{10} = \frac{t_2}{t_1} + 2 \frac{t_4}{t_3} + 1, \quad C_7 = \frac{t_4}{t_3} \left(\frac{t_2}{t_1} + 1 \right) + 2$$

$$C_4 = \frac{t_3(t_1 + t_2)}{t_1(t_3 + t_4)} C_{10}, \quad C_1 = \frac{t_3(t_1 + t_2)}{t_2(t_3 + t_4)} C_{10}$$

其中, E 为电流模量 I_2 对应的等值电动势; Z_i ($i=1, 2, 3, 4, 7, 10$) 为相对应的电流模量 I_i 的等效阻抗。

根据矩阵 P 可以计算出 I 回线的 BC 相电流为:

$$\begin{cases} I_{IB} = 5I_1 - I_2 - 4I_3 + 5I_4 + 5I_7 + 5I_{10} \\ I_{IC} = 5I_1 - 4I_2 - I_3 + 5I_4 + 5I_7 + 5I_{10} \end{cases} \quad (12)$$

2 故障选线基本原理

由式(8)可知故障分量电流与模量之间的关系如附录 A 中的式(A1)所示。

由式(A1)可知,模量 I_2 和 I_3 仅与 I 回线的三相电流有关, I_5 和 I_6 仅与 II 回线的三相电流有关, I_8 和 I_9 仅与 III 回线的三相电流有关, I_{11} 和 I_{12} 仅与 IV 回线的三相电流有关。基于以上特点,定义参数 K_1 — K_4 分别如式(13)—(16)所示。

当 I 回线发生故障时:

$$K_1 = \max \{ |I_2|, |I_3| \} > \varepsilon \quad (13)$$

当 II 回线发生故障时:

$$K_2 = \max \{ |I_5|, |I_6| \} > \varepsilon \quad (14)$$

当 III 回线发生故障时:

$$K_3 = \max \{ |I_8|, |I_9| \} > \varepsilon \quad (15)$$

当 IV 回线发生故障时:

$$K_4 = \max \{ |I_{11}|, |I_{12}| \} > \varepsilon \quad (16)$$

综合考虑同塔四回线各回线之间的互感和最大不平衡电流等因素的影响,本文将故障选线的整定值 ε 设置为动态阈值。

$$\varepsilon = 20\% \times \max\{K_1, K_2, K_3, K_4\} \quad (17)$$

根据不同故障回路中 K_1 — K_4 的取值, 本文提出适用于同塔四回输电线路的故障选线判据如下:

(1) 若式(13)—(17)中任意一个公式不成立, 则同塔四回线系统处于正常运行状态;

(2) 当只有式(13)成立, 即 $K_1 > \varepsilon$ 时, 判定为 I 回线发生故障;

(3) 当只有式(14)成立, 即 $K_2 > \varepsilon$ 时, 判定为 II 回线发生故障;

(4) 当只有式(15)成立, 即 $K_3 > \varepsilon$ 时, 判定为 III 回线发生故障;

(5) 当只有式(16)成立, 即 $K_4 > \varepsilon$ 时, 判定为 IV 回线发生故障;

(6) 若式(13)—(16)中, 同时有 2 个或 2 个以上的公式成立时, 则判定为跨线故障。

3 PSCAD / EMTDC 仿真实验验证

通过 PSCAD / EMTDC 平台搭建如图 1 所示的同塔四回输电线路仿真模型, 对各种故障类型状态进行仿真分析。系统参数如下: 电压等级为 220 kV, 线路全长为 100 km; M 端电源的正序阻抗为 $j25 \Omega$, 零序阻抗为 $j40 \Omega$; N 端电源的正序阻抗为 $j25 \Omega$, 零序阻抗为 $j40 \Omega$ 。输电线路的换相方式为每一回线内换相, 不同回线之间不换相。PSCAD 杆塔结构和仿真模型分别如附录 B 中的图 B1 和图 B2 所示, 单位线路阻抗具体参数见附录 B 中的表 B1。

限于篇幅, 下面仅给出参数不对称同塔四回线的故障电流及选线情况仿真结果。

3.1 故障电流仿真结果分析

表 1 中给出了参数不对称的同塔四回线发生 I 回线 BC 相接地时在不同的故障距离下的仿真与理论计算结果的对比。

表 1 故障电流的仿真实验验证

Table 1 Simulative verification of fault current

故障距离 / km	故障电流 / kA	仿真结果 / kA	计算结果 / kA	误差 / %
20	I_B	6.369 9	6.252 4	1.84
	I_C	6.180 9	6.072 8	1.75
60	I_B	3.219 9	3.148 3	2.22
	I_C	3.125 7	3.058 9	2.14

从表 1 中可以看出故障计算与仿真结果的误差不超过 3%, 表明该解耦方法能够适用于参数不对称的同塔四回输电线路的解耦。

3.2 故障选线仿真结果与分析

为研究各种因素对该选线方案的影响, 表 2—4 为不同过渡电阻、故障位置及系统功角下, 参数不对称的同塔四回输电线路故障的部分仿真数据。

表 2 给出了在过渡电阻分别为 0 和 100 Ω 时, 各

种典型故障下的仿真结果。

表 2 不同过渡电阻下的故障仿真结果

Table 2 Simulative results of fault with different transition resistances

故障类型	过渡电阻 / Ω	K_1	K_2	K_3	K_4	ε
I AG	0	331.2	31.1	31.1	31.1	66.2
	100	76.3	5.6	5.6	5.6	15.3
I ABG	0	1 228.7	86.5	86.5	86.5	245.7
	100	234.3	17.2	17.2	17.2	46.8
I ABCG	0	0	0	0	0	0
	100	0	0	0	0	0
I A II AG	0	377.2	377.2	27.3	27.3	75.4
	100	124.2	124.2	7.9	7.9	24.8
I A II BCG	0	404.8	418.8	0	0	83.8
	100	141.1	143.2	0	0	28.2
I A II B III CG	0	406.8	809.4	800.8	0	161.9
	100	201.1	214.5	212.4	0	42.9

表 3 给出了故障位置与 M 端的距离分别为 20 km 和 80 km 时的仿真结果。

表 3 不同故障位置下的故障仿真结果

Table 3 Simulative results of fault with different location

故障类型	故障位置 / km	K_1	K_2	K_3	K_4	ε
I AG	20	331.2	31.1	31.1	31.1	66.2
	80	284.1	26.5	26.5	26.5	56.8
I ABG	20	1 228.7	86.5	86.5	86.5	245.7
	80	428.3	42.5	42.5	42.5	85.7
I ABCG	20	0	0	0	0	0
	80	0	0	0	0	0
I A II AG	20	377.2	377.2	27.3	27.3	75.4
	80	290.6	290.6	39.2	39.2	58.1
I A II BCG	20	404.8	418.8	0	0	83.8
	80	320.5	326.1	0	0	65.2
I A II B III CG	20	406.8	809.4	800.8	0	161.9
	80	122.8	362.2	356.7	0	72.4

表 4 给出了 I 回线发生 A 相接地故障时, 两端电源功角差为 5°、30° 和 60° 下的故障仿真结果。

表 4 功角差变化时故障仿真结果

Table 4 Simulative results of fault with different power angle difference

功角差 / (°)	K_1	K_2	K_3	K_4	ε
5	331.2	31.1	31.1	31.1	66.2
30	304.9	26.4	26.4	26.4	60.9
60	250.7	20.9	20.9	20.9	50.1

由上述结果可知, 本文所提的故障选线方案能够识别出发生除三相对称故障外的其他类型故障时的故障线路, 并且该方案不受过渡电阻、故障位置和系统的运行方式的影响。

4 结论

本文针对技改后的参数不对称的同塔四回输电

线路,介绍了各回线间电磁耦合的解耦过程,从理论及仿真的角度对比论证了解耦方法的正确性,在此基础上,提出一种新的故障选线方案。本文所提故障选线方案可识别出参数不对称的同塔四回线除三相对称故障以外的其他类型故障下的故障线路。此外,该选线方案对于参数对称的同塔四回线同样适用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王毅,于明,张丽荣. 环形直流微网短路故障分析及保护方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):7-14.
WANG Yi,YU Ming,ZHANG Lirong. Short circuit fault analysis and protection scheme for looped DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):7-14.
- [2] 郑涛,张嘉琴,吴丹,等. 混压部分同塔双回线跨电压故障短路计算[J]. 电工技术学报,2018,33(11):2496-2507.
ZHENG Tao,ZHANG Jiaqin,WU Dan,et al. Cross-voltage short-circuit calculation of mixed-voltage double-circuit lines partly on the same tower[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(11):2496-2507.
- [3] 朱珂,王怡轩,倪建. 主动干扰技术在消弧线圈接地系统故障选线中的应用[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):189-196.
ZHU Ke,WANG Yixuan,NI Jian. Application of active disturbance technology in faulty line selection of arc suppression coil grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):189-196.
- [4] 高杰,程启明,程尹曼,等. 基于量子遗传双稳态系统的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):164-170.
GAO Jie,CHENG Qiming,CHENG Yinman,et al. Faulty line selection method based on quantum genetic bistable system for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):164-170.
- [5] 王守鹏,赵冬梅,商立群,等. 基于线路分段参数的非全程同塔双回线故障定位算法[J]. 电工技术学报,2017,32(10):261-270.
WANG Shoupeng,ZHAO Dongmei,SHANG Liqun,et al. Fault location algorithm for incomplete double-circuit transmission lines based on line segment parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(10):261-270.
- [6] 刘剑,范春菊,邵能灵. 用于高压直流输电线路的新型横差保护方法[J]. 高电压技术,2016,42(7):2266-2274.
LIU Jian,FAN Chunju,TAI Nengling. Novel transverse differential protection method for HVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering,2016,42(7):2266-2274.
- [7] 于仲安,程明钊,郭培育,等. 4-2-1式T型线路故障选线新方法[J]. 水电能源科学,2014,32(8):165-168.
YU Zhongan,CHENG Mingzhao,GUO Peiyu,et al. A new method of fault line selection for teed circuits with 4-2-1 model[J]. Water Resources Power,2014,32(8):165-168.
- [8] 郭培育,邵能灵,于仲安,等. 基于环流分量的同塔四回输电线路单回线故障选线新方法[J]. 电工技术学报,2015,30(24):206-214.
GUO Peiyu,TAI Nengling,YU Zhongan,et al. New single-line faulted selecting method for four-parallel transmission lines on the same tower based on loop flow component[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(24):206-214.
- [9] 徐鹏,王钢,李海峰,等. 基于环流量的同杆四回输电线路故障选线[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(3):78-83.
XU Peng,WANG Gang,LI Haifeng,et al. Fault line selection for four-parallel lines on same tower based on circulation currents[J]. Power System Protection and Control,2011,39(3):78-83.
- [10] 任明珠,邵能灵. 基于负序电流的同杆多回线路故障选线研究[J]. 华东电力,2010,38(9):1370-1374.
REN Mingzhu,TAI Nengling. Study on line selection for multi-loop line fault at same tower based on negative-sequence current[J]. East China Electric Power,2010,38(9):1370-1374.
- [11] 张琦兵,邵能灵. 基于六序电流分量的同塔多回线横差保护选线元件[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):93-97.
ZHANG Qibing,TAI Nengling. Fault line selection component of transverse differential protection based on six-sequence current component for multi-circuit transmission line on same tower[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):93-97.
- [12] 邓孟华,范春菊,舒巧俊,等. 同杆4回线故障选线方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(15):57-60.
DENG Menghua,FAN Chunju,SHU Qiaojun,et al. Method for fault line selection of four jointed parallel lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(15):57-60.
- [13] 康小宁,刘鑫,索南加乐,等. 基于矩阵束算法的经消弧线圈接地系统故障选线新方法[J]. 电力系统自动化,2012,32(12):88-93.
KANG Xiaoning,LIU Xin,SUONAN Jiale,et al. New method for fault line selection in non-solidly ground system based on matrix pencil method[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,32(12):88-93.
- [14] 田书,刘芳芳,任晓明. 基于暂态量的同塔双回线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(1):50-54.
TIAN Shu,LIU Fangfang,REN Xiaoming. Research on transient-based faulty phase selection for double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control,2015,43(1):50-54.
- [15] 胥杰,张永健,曹旭,等. 基于小波变换提取暂态直流分量故障选相原理的研究[J]. 华东电力,2011,39(2):262-265.
XU Jie,ZHANG Yongjian,CAO Xu,et al. Research of fault phase selection based on transient DC component extraction by wavelet transformation[J]. East China Electric Power,2011,39(2):262-265.

作者简介:



于仲安

于仲安(1973—),男,甘肃临洮人,教授,硕士,主要研究方向为电力系统分析和继电保护(E-mail: yza119@126.com);

毕俊强(1994—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析和继电保护(E-mail: 1193477459@qq.com);

郭培育(1986—),男,安徽蚌埠人,工程师,硕士,研究方向为新能源发电技术设计与研究(E-mail: guopeiyu2011@163.com)。

New fault line selection scheme for four-circuit transmission lines on same tower

YU Zhongan¹, BI Junqiang¹, GUO Peiyu², WANG Xianmin¹, CHEN Qing²

(1. School of Electrical Engineering Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China)

Abstract: Starting with the four-circuit transmission lines on same tower with parameter asymmetry, combined with the characteristics of interline and interphase electromagnetic coupling in the four-circuit transmission lines, a suitable phase-mode transformation matrix is derived to decouple the impedance of each circuit line. The correctness of the decoupling method is proved by simulation and comparison. Based on the relationship between the decoupled independent modules, four parameters, i.e. K_1, K_2, K_3 and K_4 are defined. According to the different values of these four parameters in different circuit faults, a new fault line selection criterion is constructed. A large number of simulative data on PSCAD/EMTDC show that the proposed fault line selection scheme is fast, simple, reliable and unaffected by fault distance, transition resistance, load current and system operation mode.

Key words: four-circuit lines on same tower; parameter asymmetry; phase-mode transformation; fault line selection; simulation

(上接第119页 continued from page 119)

Commutation failure risk analysis of sound pole caused by DC monopole blocking

YIN Chunya¹, LI Fengting¹, CHEN Weiwei², ZHANG Zengqiang²

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Economic Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Corporation, Urumqi 830011, China)

Abstract: Based on the establishment of a mathematical CF (Commutation Failure) model, it is indicated that, the ratio of commutation bus voltage between send-terminal and receive-terminal is the main factor for CFs, and risk of sound pole CFs exists when a MPB (Mono-Pole Blocking) occurs. Influences leading to overvoltage when MPB occurs are analyzed, an expression for quantitative calculation of transient overvoltage after MPB is deduced, and a criterion of CFs after MPB considering bus overvoltage at send-and receive-terminals is proposed, and the relationship between send/receive terminal short-circuit capacity and CFs is obtained. Based on a simulation model of ± 800 kV HVDC (High Voltage Direct Current) system established on DIGSILENT, the validity of transient overvoltage calculation and risk of sound pole CFs existence are verified through simulations.

Key words: HVDC power transmission; electric power transmission; commutation failure; DC monopole blocking; transient overvoltage; extinction angle

附录 A

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \\ I_9 \\ I_{10} \\ I_{11} \\ I_{12} \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \times \begin{bmatrix} I_{\text{IA}} \\ I_{\text{IB}} \\ I_{\text{IC}} \\ I_{\text{IIA}} \\ I_{\text{IIB}} \\ I_{\text{IIC}} \\ I_{\text{IIIA}} \\ I_{\text{IIIB}} \\ I_{\text{IIIC}} \\ I_{\text{IV A}} \\ I_{\text{IV B}} \\ I_{\text{IV C}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{t_2}{b_1} I_{\text{IA}} + \frac{t_2}{b_1} I_{\text{IB}} + \frac{t_2}{b_1} I_{\text{IC}} + \frac{t_2}{b_1} I_{\text{IIA}} + \frac{t_2}{b_1} I_{\text{IIB}} + \frac{t_2}{b_1} I_{\text{IIC}} + \frac{1}{b_1} I_{\text{IIIA}} + \frac{1}{b_1} I_{\text{IIIB}} + \frac{1}{b_1} I_{\text{IIIC}} + \frac{1}{b_1} I_{\text{IV A}} + \frac{1}{b_1} I_{\text{IV B}} + \frac{1}{b_1} I_{\text{IV C}} \\ I_{\text{IA}} + 2I_{\text{IB}} - 3I_{\text{IC}} \\ I_{\text{IA}} - 3I_{\text{IB}} + 2I_{\text{IC}} \\ \frac{t_1}{b_1} I_{\text{IA}} + \frac{t_1}{b_1} I_{\text{IB}} + \frac{t_1}{b_1} I_{\text{IC}} + \frac{t_1}{b_1} I_{\text{IIA}} + \frac{t_1}{b_1} I_{\text{IIB}} + \frac{t_1}{b_1} I_{\text{IIC}} + \frac{1}{b_1} I_{\text{IIIC}} - \frac{1}{b_1} I_{\text{IIIA}} - \frac{1}{b_1} I_{\text{IIIB}} - \frac{1}{b_1} I_{\text{IIIC}} - \frac{1}{b_1} I_{\text{IV A}} - \frac{1}{b_1} I_{\text{IV B}} - \frac{1}{b_1} I_{\text{IV C}} \\ I_{\text{IIA}} + 2I_{\text{IIB}} - 3I_{\text{IIC}} \\ I_{\text{IIA}} - 3I_{\text{IIB}} + 2I_{\text{IIC}} \\ \frac{t_4}{b_2} I_{\text{IA}} + \frac{t_4}{b_2} I_{\text{IB}} + \frac{t_4}{b_2} I_{\text{IC}} - \frac{t_4}{b_2} I_{\text{IIA}} - \frac{t_4}{b_2} I_{\text{IIB}} - \frac{t_4}{b_2} I_{\text{IIC}} + \frac{1}{b_2} I_{\text{IIIA}} + \frac{1}{b_2} I_{\text{IIIB}} + \frac{1}{b_2} I_{\text{IIIC}} - \frac{1}{b_2} I_{\text{IV A}} - \frac{1}{b_2} I_{\text{IV B}} - \frac{1}{b_2} I_{\text{IV C}} \\ I_{\text{IIIA}} + 2I_{\text{IIIB}} - 3I_{\text{IIIC}} \\ I_{\text{IIIA}} - 3I_{\text{IIIB}} + 2I_{\text{IIIC}} \\ \frac{t_3}{b_2} I_{\text{IA}} + \frac{t_3}{b_2} I_{\text{IB}} + \frac{t_3}{b_2} I_{\text{IC}} - \frac{t_3}{b_2} I_{\text{IIA}} - \frac{t_3}{b_2} I_{\text{IIB}} - \frac{t_3}{b_2} I_{\text{IIC}} - \frac{1}{b_2} I_{\text{IIIA}} - \frac{1}{b_2} I_{\text{IIIB}} - \frac{1}{b_2} I_{\text{IIIC}} + \frac{1}{b_2} I_{\text{IV A}} + \frac{1}{b_2} I_{\text{IV B}} + \frac{1}{b_2} I_{\text{IV C}} \\ I_{\text{IV A}} + 2I_{\text{IV B}} - 3I_{\text{IV C}} \\ I_{\text{IV A}} - 3I_{\text{IV B}} + 2I_{\text{IV C}} \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

其中， $b_1=2 \ (t_1+t_2)$; $b_2=2 \ (t_3+t_4)$ 。

附录 B

PSCAD 的杆塔结构如图 B1 所示。其中 C₁—C₃ 为 I 回线；C₄—C₆ 为 II 回线；C₇—C₉ 为 III 回线；C₁₀—C₁₂ 为 IV 回线。杆塔的导线适用 PSCAD 自带的 Chukar 模型进行仿真。PSCAD 的同塔四回输电线路的仿真模型如附录中的图 B2 所示，电源的阻抗部分使用集中参数模型。

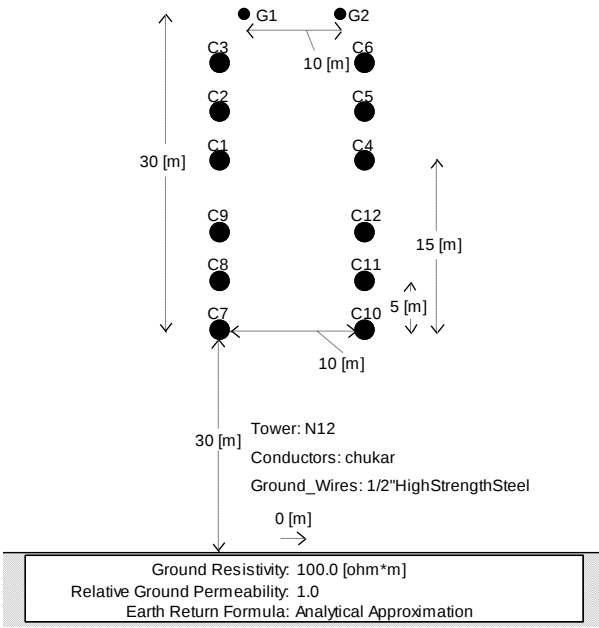


图 B1 输电线路杆塔的 PSCAD 模型

Fig.B1 PSCAD model of tower

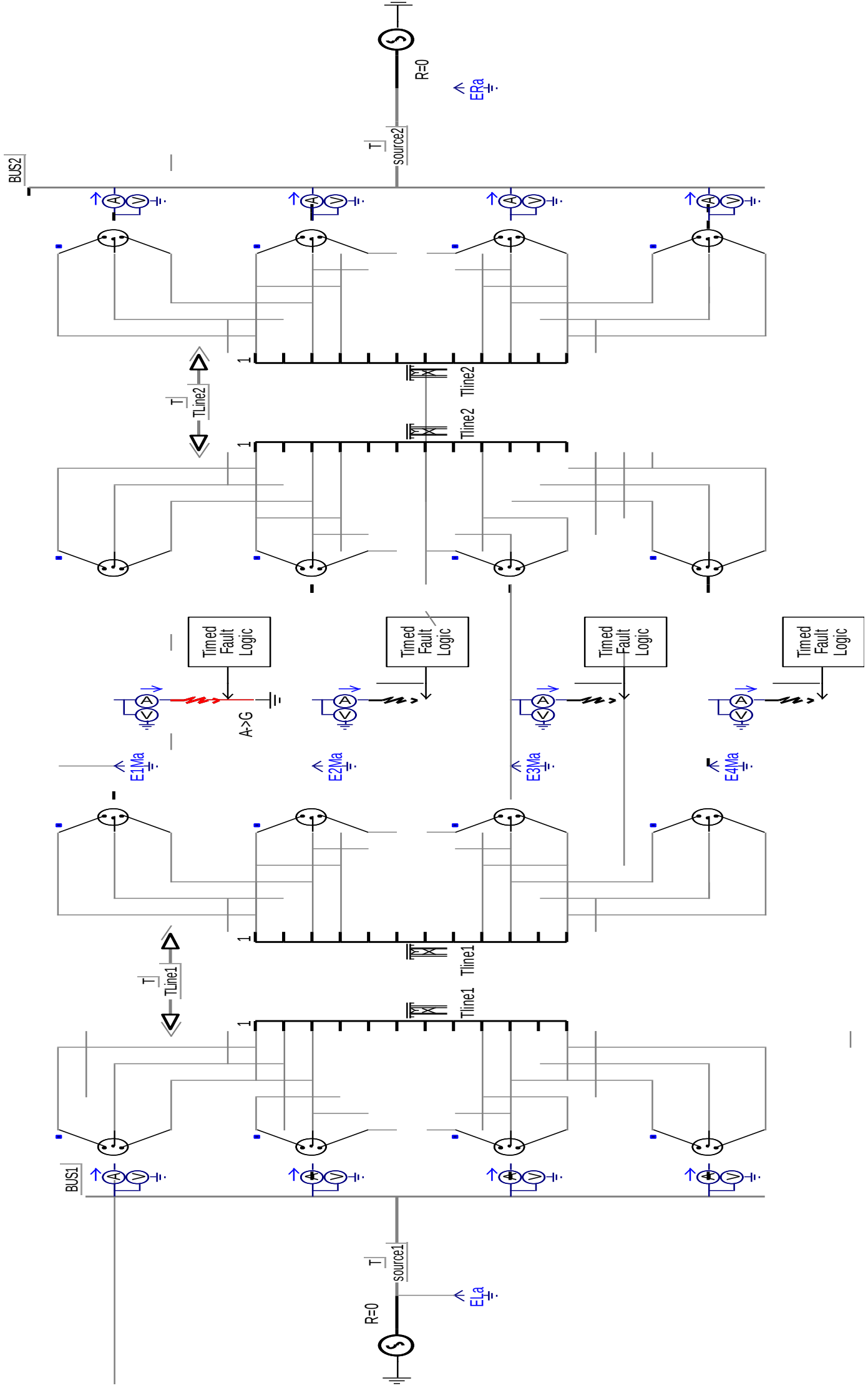


图 B2 同塔四回线的 PSCAD/EMTDC 仿真模型
Fig.B2 PSCAD/EMTDC simulation model of four-circuit transmission lines on same tower

表 B1 参数不对称的同塔四回线系统线路阻抗参数

TableB1 Line impedance parameters of four-circuit lines on same tower with asymmetry parameters							
自阻抗		相间阻抗		线间阻抗			
I、II回线	III、IV回线	I、II回线	III、IV回线	I、II回线	I、III回线	I、IV回线	III、IV回线
0.1079+j0.6	0.1223+j0.6	0.0737+j0.2	0.0878+j0.2	0.0738+j0.2	0.0799+j0.1	0.0799+j0.2	0.0878+j0.2
723	649	969	898	599	448	285	528

从表 B1 中可以看出I、II回线的自阻抗相同，III、IV回线的自阻抗相同，I、II和III、IV回线的相间阻抗不同，与图 2 所示的阻抗关系相对应。