

电力系统复杂故障算法的研究

龚仁敏,禹成七,张永浩,车立志

(华北电力大学电力工程系,河北 保定 071003)

摘要: 本文从故障口边界的一般形式出发,综合应用相序参数变换技术和广义戴维南定理,详细推导出一种计算电力系统复杂故障中故障端口电流的方法。文中算法采用故障类型导纳参数模型,不但解决了任意过渡电阻的故障计算问题,还省去了程序实现中根据故障类型存储、检索故障类型导纳参数的步骤;相较于阻抗参数模型,算法更通用、简便。较好地解决了电力系统中具有任意不对称过渡电阻的简单故障及复杂故障计算的通用性问题。算例表明,该方法正确有效。

关键词: 复杂故障; 故障端口电流; 过渡电阻

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)03-0029-04

1 引言

随着电力系统的发展,网络规模越来越大,网络结构变得更加复杂,加之串补电容和单相重合闸的广泛采用,发生复杂故障的几率越来越高,人们开始了复杂故障计算方法的研究^[1~7]。

传统方法基于对称分量法和口网络理论计算复杂故障。但是,这种方法由于完全基于对称分量法,随故障类型、故障相别不同,需要考虑序网的串并联及多重故障中理想变压器的转角问题,组合繁多,不但计算速度和计算效率不理想,而且对于继电保护整定中需要考虑的一些特殊问题,如遇到经不对称过渡电阻短路、串补电容不对称击穿等情况时,计算模型变得复杂,甚至不宜使用。

针对以上问题,文献[1~2]提出了非常优秀的复杂故障计算模型,但是由于采用故障类型阻抗参数模型,为了避免过渡阻抗或接地阻抗为无穷大时阻抗参数出现无穷大元素:文献[1]需要用有限值去模拟无穷大元素,引入了计算误差,而且,对于非接地横向故障,故障口边界条件的阻抗参数无定义,未能彻底解决故障计算模型的通用性问题;文献[2]采用并联一对正、负阻抗模拟无穷大过渡阻抗,提高了计算精度,但是由于采用并联虚拟阻抗方式,故障口电流的计算不直接,需要进一步归算,而且,需要将接地阻抗归入对称系统,增加了对称系统序网处理的复杂性。

为了解决上述问题,本文从故障口边界条件导纳参数的一般形式出发,综合应用相序参数变换技术和广义戴维南定理,详细推导了电力系统复杂故障中故障端口电流的一种直接、简便计算方法。该

方法对过渡电阻的处理简便,程序实现容易,计算精度高,通用性强,提供了计算复杂故障的新途径。

2 计算故障口电流的公式推导

电力系统的简单故障可分为横向故障和纵向故障两大类。而多重故障一般由这两类故障组合而成。以图1所示典型系统为例,为避免因过渡电阻为零时,边界节点导纳矩阵中出现无穷大元素,引入附加阻抗 Z_s 。本节通过分析故障边界条件对系统的影响,得到适合于求解复杂故障的计算方法。

2.1 故障边界条件

图1中, U_a 、 U_b 、 U_c 为故障端口电压, I_a 、 I_b 、 I_c 为端口电流,方向如图1所示。

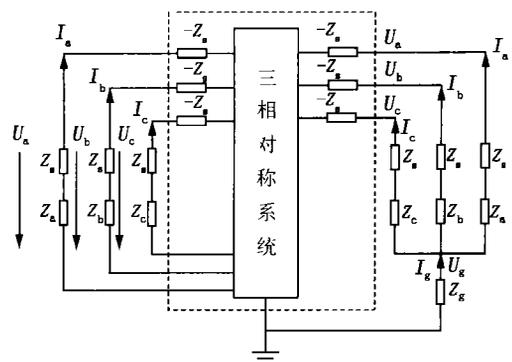


图1 典型故障系统

Fig. 1 The model of typical power system in fault

2.1.1 单个故障的边界条件方程

下面按接地电阻 Z_g 的取值以及故障类型分析故障边界条件。

$Z_g = 0$ (包括 Z_g 为无穷大)的横向故障
对于 $Z_g \neq 0$ 的横向故障,由相节点导纳矩阵方

程可得

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_g \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_s + Z_a} & 0 & 0 & -\frac{1}{Z_s + Z_a} \\ 0 & \frac{1}{Z_s + Z_b} & 0 & -\frac{1}{Z_s + Z_b} \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_s + Z_c} & -\frac{1}{Z_s + Z_c} \\ -\frac{1}{Z_s + Z_a} & -\frac{1}{Z_s + Z_b} & -\frac{1}{Z_s + Z_c} & \frac{1}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_g \end{bmatrix}$$

式中:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_g} + \frac{1}{Z_s + Z_a} + \frac{1}{Z_s + Z_b} + \frac{1}{Z_s + Z_c}$$

消去无源节点 G , 得

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} Z$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_s + Z_a} \left(\frac{1}{Z} - \frac{1}{Z_s + Z_a} \right) & -\frac{1}{Z_s + Z_a} \times \frac{1}{Z_s + Z_b} & -\frac{1}{Z_s + Z_a} \times \frac{1}{Z_s + Z_c} \\ -\frac{1}{Z_s + Z_b} \times \frac{1}{Z_s + Z_a} & \frac{1}{Z_s + Z_b} \left(\frac{1}{Z} - \frac{1}{Z_s + Z_b} \right) & -\frac{1}{Z_s + Z_b} \times \frac{1}{Z_s + Z_c} \\ -\frac{1}{Z_s + Z_c} \times \frac{1}{Z_s + Z_a} & -\frac{1}{Z_s + Z_c} \times \frac{1}{Z_s + Z_b} & \frac{1}{Z_s + Z_c} \left(\frac{1}{Z} - \frac{1}{Z_s + Z_c} \right) \end{bmatrix}$$

纵向故障和 $Z_g = 0$ 的横向故障

对于纵向故障以及 $Z_g = 0$ 的横向故障, 同样由相节点导纳方程求得

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_s + Z_a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_s + Z_b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_s + Z_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$

将、两种情形的相节点导纳方程记为:

$$I_{abc} = - Y_{abc} U_{abc} \quad (1)$$

式中: Y_{abc} 的取值根据情况、决定。

例如对于过渡电阻相等的三相不接地故障, 此时 $Z_g =$, 设 $Z_a = Z_b = Z_c = Z_F$, 有 $Y_{abc} =$

$$\frac{1}{3(Z_s + Z_F)} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

这是一个奇异矩阵;

对于非接地故障, 故障三相和地之间无电流通路, 节点电压不定, 故障类型阻抗矩阵 $Z_{abc} = (Y_{abc})^{-1}$ 无定义, 但导纳 Y_{abc} 可以写出。因此为使电路参数有定义, 同时为了保持电路模型的通用性, 故障电路模型采用导纳参数矩阵表示。

$$\text{令 } T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \end{bmatrix}, T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \end{bmatrix},$$

对式(1)作如下变化:

$$\begin{aligned} \Pi_{abc} T^{-1} &= - T Y_{abc} U_{abc} T^{-1} = \\ &= - T Y_{abc} (T^{-1} T) U_{abc} T^{-1} = \\ &= - (T Y_{abc} T^{-1}) (T U_{abc} T^{-1}) \end{aligned}$$

即转换为序分量:

$$I_{(3)012} = - Y_{(3 \times 3)012} U_{(3)012} \quad (2)$$

式中: $Y_{(3 \times 3)012} = T Y_{abc} T^{-1}$, 表示故障类型序导纳矩阵; $I_{(3)012}$ 表示故障口序电流, $U_{(3)012}$ 表示故障口序电压。

可见, 只要简单地将故障分为上述两类, 即可根据各个故障过渡电阻 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 及 Z_g 的值, 简便求解故障类型序导纳矩阵 Y_{abc} , 进而求得其序分量

$Y_{(3 \times 3)012}$, 不但解决了任意过渡电阻的故障计算问题, 拓宽了故障计算的范围, 还省去了程序实现中根据故障类型存储、检索故障类型序导纳矩阵^[3]的步骤, 简化了编程; 而且由于引入附加阻抗 Z_s , 即使出现过过渡电阻为零的情况, Y_{abc} 中也不会出现无穷大元素。

例如: 当 $Z_a = 0$ 时, $\frac{1}{Z_s + Z_a}$; 当 $Z_a =$ 时,

$$\frac{1}{Z_s + Z_a} = 0。$$

2.1.2 多重故障的边界条件方程

当系统发生多重故障时, 如 h 重故障, 则由式(2)可知多重故障的边界条件方程:

$$\begin{bmatrix} I_{(h)0} \\ \dots \\ I_{(h)0} \\ I_{(h)1} \\ \dots \\ I_{(h)1} \\ I_{(h)2} \\ \dots \\ I_{(h)2} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{11(h)0} & Y_{12(h)0} & Y_{13(h)0} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{21(h)0} & Y_{22(h)0} & Y_{23(h)0} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{31(h)0} & Y_{32(h)0} & Y_{33(h)0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{(h)0} \\ \dots \\ U_{(h)0} \\ U_{(h)1} \\ \dots \\ U_{(h)1} \\ U_{(h)2} \\ \dots \\ U_{(h)2} \end{bmatrix}$$

简记为:

$$I_{(3h)012} = - Y_{(3h \times 3h)012} U_{(3h)012} \quad (3)$$

2.2 多端口序网方程

将图1虚线框里三相对称网络分解为三序网络, 设系统发生 h 重故障, 根据广义戴维南定理, 将其简化为图2所示模型。图中 $U_{(i)r}$ 、 $I_{(i)r}$ ($i = 1, 2, \dots, h, r = 0, 1, 2$) 分别为第 i 口的 r 序电压和 r 序电

流; $U_{(i)1}^0 (i = 1, 2, \dots, h)$ 为第 i 口的正序开路电压。

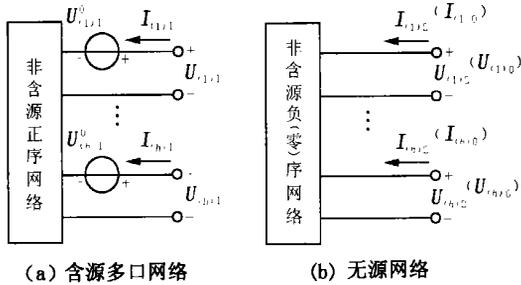


图 2 广义戴维南等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit with Thevenin's theorem

将图 2(a) 的含源多口网络用 Z 参数方程描述:

$$U_{(h)1} = Z_{(h \times h)1}^0 I_{(h)1} + U_{(h)1}^0 \quad (4)$$

同理, 图 2(b) 的无源网络可描述为:

$$U_{(h)2} = Z_{(h \times h)2}^0 I_{(h)2} \quad (5)$$

$$U_{(h)0} = Z_{(h \times h)0}^0 I_{(h)0} \quad (6)$$

式中: $Z_{(h \times h)1}^0$ 、 $Z_{(h \times h)2}^0$ 、 $Z_{(h \times h)0}^0$ 为计及 $-Z_s$ 后对称网络的序端口阻抗矩阵;

$U_{(h)1}^0$ 为计及 $-Z_s$ 后对称网络的正序开路电压矩阵。

将式 (4)、(5)、(6) 合并为一个方程组:

$$\begin{bmatrix} U_{(h)0} \\ U_{(h)1} \\ U_{(h)2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{(h \times h)0}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{(h \times h)1}^0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{(h \times h)2}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(h)0} \\ I_{(h)1} \\ I_{(h)2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ U_{(h)1}^0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

简记为:

$$U_{(3h)012} = Z_{(3h \times 3h)012}^0 I_{(3h)012} + U_{(3h)012}^0 \quad (7)$$

2.3 方程的求解

将故障边界条件方程 (3) 代入序网口网络方程

(7), 即可求出故障口电流, 结果如下:

$$I_{(3h)012} = - [e + Y_{(3h \times 3h)012} Z_{(3h \times 3h)012}^0]^{-1} \cdot Y_{(3h \times 3h)012} U_{(3h)012}^0 \quad (8)$$

式中: e 为单位矩阵。

式 (8) 表明: 利用该式即可直接计算出正、负、零序故障口电流, 与文献 [2] 相比, 省去了归算故障口电流的步骤, 进而得到各序节点注入电流; 再利用原网节点阻抗方程和支路导纳方程可求出原网络内各序节点电压与支路电流。

可以看出, 该方法关键是形成矩阵 $Y_{(3h \times 3h)012}$ 、 $U_{(3h)012}^0$ 及 $Z_{(3h \times 3h)012}^0$ 。 $Y_{(3h \times 3h)012}$ 的形成方法已在 2.1 条中详细介绍, 而 $Z_{(h \times h)r}^0 (r = 0, 1, 2)$ 的各元素由故障前各序节点阻抗矩阵及故障类型所决定, $U_{(h)1}^0$ 的各元素为故障前端口的开路电压, 具体过程

可参见文献 [3]、[4] 和 [6]。

可见, 为避免边界节点导纳矩阵中出现无穷大元素, 采用串联一对虚拟阻抗的方式, 该方式不改变原网对称系统, 又不影响故障口电流, 仅需要在计算端口阻抗时计及虚拟阻抗的影响, 所以该方法既提高了计算精度, 又直接、简单; 根据故障类型、故障电阻 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 和 Z_g 的值, 直接得到故障类型导纳矩阵的相、序分量, 解决了任意故障电阻的故障计算问题, 一方面拓宽了故障计算的范围, 另一方面省去了程序实现中根据故障类型存储、检索故障类型的步骤, 简化了编程, 提高了运算速度, 而且, 由于采用导纳参数模型, 电路模型通用、简单。

3 算例

本文以文献 [2] 的算例为例, 系统如图 3 所示, 假设系统正、负序参数相同。(取 $Z_s = j1.0$)

(1) 当在 F_1 点发生 A、B 两相断相故障, F_2 点发生 B 相接地故障, 且均为金属性故障, 计算结果见表 1、表 2;

(2) 当在 F_1 点发生 B 相断相故障, F_2 点发生 B、C 两相相间短路, 此时 $Z_{2a} =$, $Z_{2b} = 20$, $Z_{2c} = 10$, 基准阻抗 $Z_B = 132.25$, 计算结果见表 3。

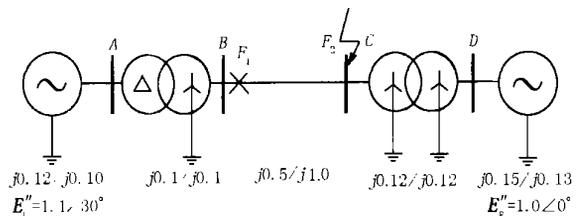


图 3 算例系统接线图

Fig. 3 Power system example

表 1 故障情况 (1) 的故障口序电流及全电流

Tab. 1 Sequence and full port - currents in fault 1

	正序	负序	零序	A 相	B 相	C 相
端口 1	0.1590	0.1590	0.1590	0	0	0.4769
	183.76°	63.76°	-56.24°	63.76°	3.76°	-56.24°
端口 2	1.2622	1.2622	1.2622	0	3.7866	0
	90.08°	210.08°	-29.92°	90.08°	-29.92°	30.08°

表 2 故障情况(1)的故障口、母线序电压及全电压

Tab.2 Sequence and full port - voltages or modal voltages in fault 1

	正序	负序	零序	A相	B相	C相
端口 1	0.4971	0.4797	0.1557	0.6038	1.0676	0
	52.33°	130.56°	-82.25°	88.79°	-87.30°	105.43°
端口 2	0.6578	0.3773	0.2805	0.9903	0	0.9901
	3.69°	-56.30°	63.68°	-1.16°	-29.52°	128.55°
节点 B	1.0850	0.0350	0.0159	1.0810	1.1107	1.0648
	28.34°	153.76°	33.76°	29.93°	-90.82°	145.85°
节点 D	0.8094	0.2096	0.1459	0.9903	0.4544	0.9870
	1.67°	-56.30°	63.68°	-1.16°	240.08°	125.23°

表 3 故障情况(2)的故障口序电流及全电流

Tab.3 Sequence and full port - currents in fault 2

	正序	负序	零序	A相	B相	C相
端口 1	0.4045	0.1380	0.3614	0.4619	0	0.8523
	143.60°	21.40°	-136.33°	174.74°	-52.67°	247.33°
端口 2	1.8069	1.8069	0	0	3.1297	3.1297
	119.44°	-60.56°	93.40°	-90.38°	29.44°	209.44°

由表 1、表 2 及表 3 可知:用该算法计算出故障口电气量满足故障边界特征。由于篇幅所限,其他电气量计算结果从略。(口电流参考方向与图 1 所示方向一致)

4 结论

本文从故障边界条件导纳参数矩阵的一般形式出发,导出了一种直接、简便计算故障端口电流的方法,使求解由具有任意不对称过渡电阻的横向故障

或纵向故障组合而成的复杂故障过程变得简便。该方法对过渡电阻处理简单,程序实现容易,通用性强。应用算例和程序运行验证了这一方法的合理性与有效性。

参考文献:

- [1] 陈青,江世芳.一种求解电力系统复杂故障的新算法.中国电机工程学报,2000,20(9):41-43.
- [2] 柳焕章.用多端口方法求解电力系统复杂故障.电力系统自动化,1990,14(1):20-25.
- [3] 王春,陈允平,谈顺涛.电力系统复杂故障通用算法的研究.中国电机工程学报,1995,15(6):417-422.
- [4] 曹国臣.变结构电力系统任意复杂故障的快速计算.中国电机工程学报,1995,15(5):354-360.
- [5] 王乡,陈永琳.利用口网络理论计算电力系统复杂故障的计算机算法.继电器,1994,(2):11-14.
- [6] 王春,柳焕章.电力系统不对称状态计算.中国电机工程学报,1993,13(6):33-39.
- [7] 王春,柳焕章.用补偿法进行跨线故障计算.武汉电力大学学报,1993,26(3):324-329.

收稿日期:2002-07-06 改回日期:2002-08-19

作者简介:

龚仁敏(1977-),女,在读硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护;

禹成七(1943-),男,教授,主要从事电力系统继电保护的教学和科研工作;

张永浩(1964-),男,硕士研究生、讲师,主要从事电力系统继电保护的科研工作。

The study of calculation for complex fault in power system

GONG Ren-min, YU Cheng-qi, ZHANG Yong-hao, CHE Li-zhi

(Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, 071003, China)

Abstract: Based on the phase-sequence parameter transformation technique and the multi-dimensional Thevenin theorem, a new method for calculating port-current in complex fault of electric power system is presented in detail in this paper. This method adopts the fault admittance matrix, which not only solves the fault calculation with different transition resistance but also releases the works searching and storing the fault admittance matrix; Comparing with the fault impedance matrix, it is more generalized and simpler. The method is suited to all kinds of simple fault and complex fault, and also suited to various faults with different fault transition resistance. It has been proved to be accurate by a numerical example.

Key words: complex fault; port-current in fault; transition resistance