

电力系统复杂故障的一种计算方法

余保东, 杨 勇, 杨先贵

(湖北省电力调度通信局, 湖北 武汉 430077)

摘要: 在纵向端口等值的基础上, 提出了大规模电力系统故障后分解协调计算的方法, 取消了对故障类型的限制, 能处理任意组合的复杂故障, 不需要形成全电力系统网络的节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵, 降低了计算矩阵的维数, 计算表明有较高的速度和精度。

关键词: 电力系统; 分解协调; 故障

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)05-0012-04

1 引言

故障计算对于继电保护定值的整定和事故后保护动作行为的定量分析有重要的意义。完全基于对称分量法和多口网络理论的常规复杂故障计算方法, 由于在三相电量和三相参数不对称的电力系统故障计算中, 各序网之间出现耦合关系, 不但序网连接复杂, 而且复合序网通用性差, 故障类型不同序网连接方式也随之改变, 且对于任意复杂故障(如跨大区域多个地理位置发生复杂故障, 同杆双回线路跨线故障等)毫无处理能力, 计算效率不高。实际上每一元件或线路都可以看作是一条特殊的支路, 支路两端的节点分别包括 *abc* 三相(或者 012 三序)小节点, 总是可以求得这一支路的支路相导纳矩阵(如发电机、线路)或支路的节点导纳矩阵(如原副边绕组不同接法的变压器), 这时 3×3 阶支路相导纳矩阵或 6×6 阶的支路的节点导纳矩阵可以看作是一个相互耦合的元素, 它作为一个整体参与电力系统网络节点导纳矩阵的追加, 这种序分量法, 可以灵活处理不对称电力系统的各种故障。文献^[1]提出的分块计算方法只适用于简单的金属性短路; 文献^[2]基于线性叠加原理求解, 把故障电路用故障导纳表示, 协调量有故障边界电流和联络线电流, 要分别计算。

本文在纵向端口的戴维南等值基础上, 尝试选取适当的故障电路子系统而用节点阻抗矩阵表示, 与正常网络同等对待, 把故障后的电力系统网络分块成多个子块电力网络, 充分利用分块子系统节点导纳矩阵形成的因子表, 公式简洁, 对于跨大区域多个地理位置发生的复杂故障以及同杆双回线路的跨线故障都能处理。

2 基于纵向端口理论求解电网络

电网络参数常用节点导纳矩阵 Y_n 和节点阻抗

矩阵 Z_n 来描述。节点导纳矩阵描述了网络的短路参数, 只包含了网络的局部信息; 节点阻抗矩阵描述了网络的开路参数, 其元素包含了全网的信息。从节点对 (i, j) 组成的端口注入单位电流时, 节点对 (i, j) 的电位差定义为自阻抗, 用 $Z_{ij, ij}$ 表示, 另一节点对 (p, q) 的电位差定义为互阻抗, 用 $Z_{ij, pq}$ 表示。设节点支路关联矩阵为 $A = [M_1 M_2 \dots M_l]$, M_l 为节点支路关联矩阵的列向量, 则

$$Z_{ij, ij} = M_{ij}^T Z_n M_{ij} \quad (1)$$

$$Z_{ij, pq} = M_{ij}^T Z_n M_{pq} \quad (2)$$

2.1 端口及纵向端口

在多端口戴维南等值时, 端口 (p, q) 是由一节点对 (p, q) 组成, 它必须满足 KCL 定理, 即端口从 p 点流入的电流和 q 点流出的电流相等。如果 p, q 是某一联络线支路的端点, 显然满足 KCL 定理, 我们称之为纵向端口, 这种等值亦称为面向支路的等值。从拓扑理论我们知道, 电网络任一闭合面的割集的电流代数和等于零, 而这一割集可能包含多条支路, 比如 3 条支路, 从 p 点和 m 点流入系统的电流之和完全由 n 点流出系统, 可以把 n 点电流分成两部分, 其中一部分流出系统的电流等于 p 点流入系统的电流, 另一部分流出系统的电流等于 m 点流入系统的电流, 则口 (p, n) 、口 (m, n) 满足 KCL 定理, 均能组成端口, 我们称为横向端口, 这种等值亦称之为面向节点的等值, 特殊情况是 n 点为接地参考点。

2.2 网络状态量的求解

电网络 s 如图 1 所示。沿联络线组成的割集切割, 形成多个子系统 A、B、C, 当端口开路时, 各个子系统的节点阻抗矩阵分别为 Z_{nA} 、 Z_{nB} 、 Z_{nC} , 节点电压矩阵分别为 $U_A^{(0)}$ 、 $U_B^{(0)}$ 、 $U_C^{(0)}$ 。把联络线支路抽取出来, 互相解耦的子系统组成新的网络 s 向所有联

络线组成的纵向端口收缩, s 系统网络模型为:

$$\begin{bmatrix} Z_{nA} \\ Z_{nB} \\ Z_{nC} \end{bmatrix} [I_n] = [U_n] \quad (3)$$

令节点电流矩阵 $[I_n]$ 中, 对应 p 节点的值为 1, q 节点值为 -1, 注意节点 p 和 q 、 m 和 n 分别位于不同的子系统, 得端口 (p, q) 的电压 $U_{pq} = U_p - U_q = Z_{pp} + Z_{qq}$, 得端口 (m, n) 的电压 $U_{mn} = U_m - U_n = Z_{pm} + Z_{qn}$, 所以各端口自阻抗及端口间互阻抗为:

$$Z = Z_{pq, pq} = Z_{pp} + Z_{qq} \quad (4)$$

$$Z = Z_{pq, mn} = Z_{pm} + Z_{qn} - Z_{pn} - Z_{qm} \quad (5)$$

.....

则网络 s 的等值电路如图 2 所示。其中 $U_{eq} = [U^{(0)} U^{(0)} \dots]^T$ 为等值戴维南电动势列向量,

$Z_{eq} = \begin{bmatrix} Z & Z & \dots \\ Z & Z & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$ 为等值戴维南阻抗矩阵, $I_l = [I_l I_l \dots]^T$ 为端口支路协调电流, Z_l 为联络线支路组成的支路阻抗矩阵。

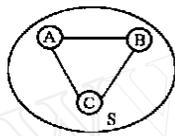


图 1 多个子系统组成一个电网络

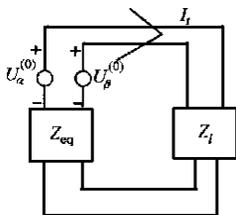


图 2 电网络的等值电路图

则联络线支路的协调电流为:

$$I_l = [Z_{eq} + Z_l]^{-1} \cdot U_{eq} \quad (6)$$

把协调电流作为电流源注入到各子系统相应的节点中, 则各子系统的节点电压状态量增量为:

$$U_{ni} = Z_{ni} \cdot I_i \quad (i = A, B, C) \quad (7)$$

I_i 为协调电流 I_l 在各子系统中形成的节点电流。

全电力系统网络的电压状态量为:

$$U_{ni} = U_{ni}^{(0)} + U_{ni} \quad (i = A, B, C) \quad (8)$$

2.3 端口的特殊处理

电网络分块后, 有的子系统可能没有接地参考点, 成为一个悬空的天网, 其导纳矩阵是奇异的不定

导纳矩阵, 不存在节点阻抗矩阵。解决的方法是在属于天网的子系统 A 的端口节点处挂上阻抗为 Z_s 及 $-Z_s$ 的两条接地支路, 这两条支路不影响原来的网络。把 $-Z_s$ 支路划归到天网子系统 A 中, 则子系统 A 有了接地参考点。如果两个子系统存在公共点 k , 可以把它向两个子系统掰开成为两个节点 k, k , 看成是支路阻抗等于零的端口 (k, k) 。这样的处理方法把节点分裂法和支路切割法揉合在一起, 最大优点是形成全电网络的节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵, 降低了计算矩阵的维数。

3 故障条件下电力系统网络的分块计算模型

电力系统中每一个元件是由三相元件组成, 在正常情况下三相元件在数学模型上具有某种对称性, 当三相平衡电流流过这些对称元件时, 三相的电流电压之间关系相同, 可以按单相电路来研究; 当三相不平衡电流流过这些对称元件时, 三相的电流电压之间关系不相同, 但我们可以将三相不平衡电流分解成三组三相对称的电流, 然后分别对每组三相对称的电流单独来研究, 即对称分量法。这说明对称元件在 012 坐标系统是解耦的, 而电力系统除故障支路外, 其余网络参数均具有对称的特点, 充分运用这一特点可以大大提高计算效率。如果三相不平衡电流流过的三相元件不对称的故障支路时, 三相的电流电压关系不相同, 我们无法寻找一种交换矩阵把不对称电流和不对称元件分解成单相计算, 只能用三相电路模型来研究, 在 012 坐标系统中, 故障支路的三序电路参数之间存在相互耦合。

3.1 故障网络的分块计算

对于一个跨区域多个地理位置发生复杂故障的电力系统网络, 选取联络线(或联络节点)作为分界面, 可以把它分解成多个正常的子网络和多个故障的子网络, 在 abc 坐标下如图 3 所示。电力系统网络分块成为 A、B、C 三个正常子系统及 E、F 两个故障子系统。abc 坐标下节点阻抗矩阵分别为 Z_A^{abc} 、 Z_B^{abc} 、 Z_C^{abc} 、 Z_E^{abc} 、 Z_F^{abc} 。

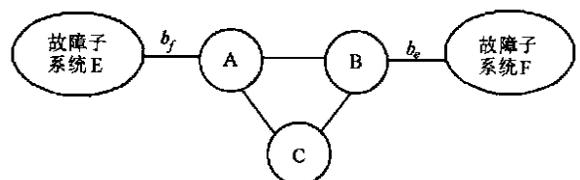


图 3 故障条件下的电力系统

选取联络线集合的端点组成纵向端口,则图3可以等值为:

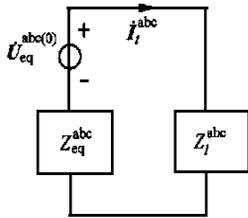


图4 计算协调电流的等值电路图

Z_{eq}^{abc} 为多端口的等值阻抗, $U_{eq}^{abc(0)}$ 为多端口等值电动势, Z_l^{abc} 为联络线支路阻抗矩阵, i_t^{abc} 为联络线协调电流,故

$$i_t^{abc} = [Z_{eq}^{abc} + Z_l^{abc}]^{-1} \cdot U_{eq}^{abc(0)} \quad (9)$$

在 012 坐标系统中描述,方程两边左乘 abc—012 坐标变换矩阵 S^{-1}

$$S^{-1} i_t^{abc} = S^{-1} [Z_{eq}^{abc} + Z_l^{abc}]^{-1} \cdot U_{eq}^{abc(0)} = S^{-1} [Z_{eq}^{abc} + Z_l^{abc}]^{-1} \cdot S \cdot S^{-1} \cdot U_{eq}^{abc(0)} = [S^{-1} Z_{eq}^{abc} S + S^{-1} Z_l^{abc} S]^{-1} \cdot (S^{-1} U_{eq}^{abc(0)})$$

$U_{eq}^{abc(0)}$

亦即

$$i_t^{012} = [Z_{eq}^{012} + Z_l^{012}]^{-1} \cdot U_{eq}^{012(0)} \quad (10)$$

求出协调电流序分量后,把它作为电流源注入到各子系统中,可以求出节点电压附加量,进而求出全电力系统网络节点电压各序分量,这里不再赘述。

3.2 故障子系统节点阻抗矩阵 Z_n^{012} 的求解

对于任何类型的故障,它的节点阻抗矩阵不一定存在,但它的节点导纳矩阵一定存在。运用纵向端口理论需要知道 E、F 两个子系统的节点阻抗矩阵,通过分析可以知道,接地故障只增加节点自导纳,不会导致故障系统节点导纳矩阵奇异,而以断相故障的端点为边界点,有可能导致故障系统节点导纳矩阵奇异,这时可在边界点(如 b_e 或 b_f) 并联两条接地的三相支路,一条支路的支路导纳矩阵为单位矩阵 E,划归到故障子系统,另一条支路的支路导纳矩阵为 -E,划归到正常电力系统中,这两条支路对原始网络没有任何影响,但却保证故障子系统节点导纳矩阵一定非奇异,即节点阻抗矩阵存在。根据故障后的不对称网络,写出相应的支路相阻抗矩阵 Z_b^{abc} ,进而形成节点相导纳矩阵 $Y_b^{abc} = AZ_b^{abc^{-1}}A^T$, A 为不对称网络节点支路关联矩阵,它对应于单相系统关联矩阵为 1 的位置是单位矩阵 E,相应地对应于单相系统关联矩阵为 -1 的位置是负单位矩阵 -E。作相序变换 $Y_b^{012} = S^{-1} Y_b^{abc} S, S^{-1}$

为 abc—012 坐标变换矩阵。当 Y_b^{012} 奇异时,在边界节点处追加一大小为单位矩阵 E 的自导纳,生成 Y_b^{012} ,则故障子系统节点阻抗矩阵 $Z_n^{012} = (Y_b^{012})^{-1}$,同时计算边界点开口电压 $U_{bf}^{012(0)}$ 。故障子系统的选取仅要求具有零序互感的同杆双回线路在一个子系统中,没有其它的任何限制。

4 算例

已知 012 三序网络参数如下:

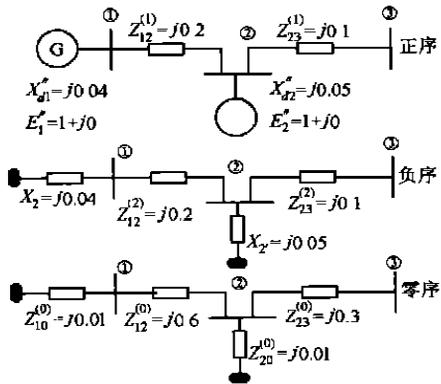


图5

假定忽略负荷效应,计算节点 A 相单接地同时节点 BC 两相短路接地时的短路电流。

选取支路() 电流作为协调电流,支路() 把系统切割成两部分 A、B,示意图如下:

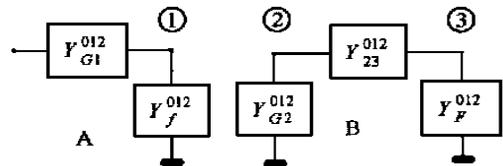


图6 分块后各子系统的导纳图

A 相接地的支路相导纳矩阵为 $Y_f^{012} =$

$$y_f \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, BC \text{ 两相短路接地的支路相导纳矩阵}$$

$$\text{为 } Y_F^{012} = y_f \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}。y_f \text{ 取一个足够大的}$$

数如 $j10^6$ 。分别计算子系统 A、B 的节点阻抗矩阵 $Z_{nA}^{012} = (Y_{G1}^{012} + Y_f^{012})^{-1}$ 和 $Z_{nB}^{012} = \begin{bmatrix} Y_{G2}^{012} + Y_{23}^{012} & -Y_{23}^{012} \\ -Y_{23}^{012} & Y_F^{012} + Y_{23}^{012} \end{bmatrix}^{-1}$ 。收缩到纵向端口

(,),最终可得计算结果为:

$$I_{A1} = j37.7892, \quad I_{B1} = 0, \quad I_{C1} = 0;$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A3} &= 0, & \dot{I}_{B3} &= 6.128979 - j1.636715, \\ \dot{I}_{C1} &= -6.128979 - j1.636715 \end{aligned}$$

5 结论

本文在纵向端口等值理论上,尝试着提出了一种计算故障电力系统网络的方法,它取消了对故障类型的限制,可计算电力系统跨大区域多个地理位置发生的复杂故障(包括同杆双回线路的跨线故障)。

参考文献:

[1] 丘昌涛,邓集祥,白桦.采用稀疏技术和分块法的电力

系统短路电流计算,电机工程学报,1983,4.

[2] 曹国臣,武晓梅,宋家骅.一种基于分解协调法的电力系统故障计算方法.中国电机工程学报,1999,19(1).

收稿日期: 1999-11-17

作者简介: 余保东(1970-),男,博士,工程师,主要研究方向为电力系统运行分析; 杨勇(1964-),男,大学本科,高级工程师,从事电力系统运行工作; 杨先贵(1963-),男,大学本科,高级工程师,从事电力系统运行工作。

The calculation method for a complex fault electric power system

YU Bao-dong, YANG Yong, YANG Xian-gui

(Hubei Electric Power Dispatching Center, Wuhan 430077, China)

Abstract: Based on the longitudinal port theory, a decomposition-coordinate method for calculating a fault electric power system is presented in this paper. No fault types can be limited. The full bus admittance matrix and full bus impedance matrix of the original network are not needed. The dimension of calculation matrix can be reduced greatly. By simulation, this method is fast and accurate.

Keywords: electric power system; decomposition-coordinate; fault

(上接第 11 页)

9 结论

重载潮流算法结合类结构和重载,开发了特有的单元结构,以单元为基础实现了三相和单相潮流的统一描述。重载潮流算法的应用解决了三相潮流较复杂的稀疏问题,简化了计算过程,具有运算速度快,存储量小、灵活和通用的特点。

参考文献:

- [1] 郭志忠. 电力网络解算的统一形式. 哈尔滨工业大学学术研究论文. 1994:2-8.
- [2] 牛辉. 广义特勒根潮流计算方法. 哈尔滨工业大学硕士论文. 1997:7-19.
- [3] Wasley R G and Shalash M A. Newton - Raphson Algorithm

for Three Phase Load Flow. IEE PRCEEDINGS, 1974, 121 (7):630-638.

- [4] 西安交通大学. 电力系统计算. 水利电力出版社, 1978:151.
- [5] Chen B K, Chen M S, Shoultz R R and Liang C C. Hybrid Three Phase Load Flow. IEE Proc - C, 1990, 137(3):177-185.

收稿日期: 1999-09-10

作者简介: 孙德胜(1975-),男,硕士,从事配电自动化和电力系统应用软件方面的研究; 郭志忠(1961-),男,教授,博导,从事电力系统分析与控制、计算机在电力系统中的应用及电力系统光学测量技术等方向的研究; 王永刚(1970-),男,博士,工程师,从事优化调度、电网调度自动化方面的研究。

Overloading load flow algorithm

SUN De-sheng¹, GUO Zhi-zhong¹, WANG Yong-gang²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

Abstract: A uniform data structure of single-phase and three-phase load flow, incorporating the class programming thought and overloading idea, is proposed in this paper. On the basis of this structure, overloading load flow algorithm is developed, which is the uniform algorithm of single-phase and three-phase load flow. A conclusion is drawn that overloading load flow simplifies the computation and has the characteristics of better astringency, agility, universality, faster computing speed and less memory size by the comparison with single-phase, three-phase and overloading load flow in convergency, computing speed and memory size.

Keywords: load flow; three-phase load flow; overloading load flow