

继电保护整定计算中故障计算模型的选择与比较分析

杨雄平, 石东源, 杨增力, 段献忠

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 计及运行方式变化的故障计算的快速实现是提高继电保护整定计算工作效率的关键。根据整定计算中故障计算的特点, 基于节点阻抗矩阵, 提出了计及运行方式变化的大批量故障快速计算的实现方法, 通过涉及节点集的合理选取和阻抗矩阵的分级存贮, 实现阻抗矩阵的最小修改, 从而达到故障计算的快速及实用性要求。并从时间复杂度的角度分析和比较了基于节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵的故障计算在整定计算中应用的差异。

关键词: 整定计算; 故障计算; 方式变化; 导纳矩阵; 阻抗矩阵

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)21-0017-04

0 引言

在电力系统继电保护的整定计算中, 对于一个保护的整定计算, 往往需要针对不同的故障位置及故障类型进行多次故障计算。同时, 为了保证继电保护装置在电力系统各种常见及预想运行方式下都能够满足灵敏度和选择性的要求, 整定计算过程, 必须考虑系统运行方式的变化, 其原则通常如下:

(1) 以电力系统常见的若干运行方式作为整定计算以及故障计算的系统基本方式。

(2) 在系统基本方式的基础上, 考虑保护对侧或背侧母线上元件的轮断组合, 作为计算该保护定值时的系统预想运行方式。当系统中大型厂站数目较多、环网结构复杂时, 还必须考虑保护临近范围内厂站方式的适当组合以及环网中某些线路的投切操作。

因此, 在继电保护整定计算过程中, 为了使各种保护达到最佳的配合状态, 必须对电网的各种运行方式以及故障情况进行大量反复的故障计算^[1~3]。

随着全国联网的迅速发展, 电网规模不断扩大, 电网结构以及运行方式日趋复杂, 对继电保护整定计算软件的规模和速度要求越来越高。合理选择故障计算模型及算法, 设计高效的程序结构及流程成为提高整定计算软件效率和速度的关键。

1 故障计算的数学模型和基本算法

电力系统的故障计算在数学上归结为对故障状态下网络方程的求解。网络方程通常有两种形式, 即阻抗型网络方程 $ZI = V$ 和导纳型网络方程 $YV = I$, 其中 V 为节点电压列向量, I 为节点注入电流列

向量, Z 为节点阻抗矩阵, Y 为节点导纳矩阵, Z 与 Y 互为逆矩阵。

1.1 基于节点导纳矩阵的故障计算模型

电网在系统基本运行方式下正常运行时的导纳型网络方程可以表示为:

$$Y^{(120)} V^{(120)} = I^{(120)} \quad (1)$$

式中, $V^{(120)}$ 为网络节点三序列向量, $I^{(120)}$ 为网络节点三序注入电流列向量, $Y^{(120)}$ 为网络节点三序导纳矩阵。设网络节点数为 n , 则 $V^{(120)}$ 和 $I^{(120)}$ 为 $3n$ 维向量, $Y^{(120)}$ 为 $3n \times 3n$ 维矩阵。

将式(1)简化为:

$$Y^{(0)} V^{(0)} = I^{(0)} \quad (2)$$

电网在某个预想方式下发生故障瞬间, 设其网络方程为:

$$Y^{(f)} V^{(f)} = I^{(f)} \quad (3)$$

其中 $Y^{(f)}$ 为预想方式下故障时的网络节点三序导纳矩阵。

由于故障瞬间电流不能突变, $I^{(f)}$ 与预想方式下正常运行时发电机(包括等值发电机)的三序注入电流向量相同。而导纳矩阵具有可迭加性, 预想方式下故障时的网络节点三序导纳矩阵 $Y^{(f)}$ 可由基本方式下正常三序导纳矩阵 $Y^{(0)}$ 和故障修改导纳矩阵 $Y^{(f)}$ 以及方式变更修改导纳矩阵 $Y^{(m)}$ 迭加而成, 设故障重数为 n_f , 方式变更元件的数目为 n_m , 则有:

$$Y^{(f)} = Y^{(0)} + \sum_{k=1}^{n_f} Y_k^{(f)} + \sum_{k=1}^{n_m} Y_k^{(m)} \quad (4)$$

解线性方程组(3)可以求得网络节点三序电压列向量 $V^{(f)}$, 由 $V^{(f)}$ 和各网络元件的阻抗参数即可求得待求元件的三序电流分布, 进而组合得到故障瞬间其三相电压及三相电流。

1.2 基于节点阻抗矩阵的故障计算模型

由对称短路分析的方法,发生短路故障时,相当于在故障节点增加了一个注入电流,因此发生故障时,网络中任一节点 i 的三序电压为:

$$\begin{cases} V_{i(1)} = V_{i(1)}^{(0)} - Z_{iF(1)} I_{F(1)} \\ V_{i(2)} = - Z_{iF(2)} I_{F(2)} \\ V_{i(0)} = - Z_{iF(0)} I_{F(0)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $I_{F(1)}, I_{F(2)}, I_{F(0)}$ 为故障口的各序电流,其中 $Z_{iF(q)} = Z_{if(q)} - Z_{ik(q)}$, 横向故障时, f 代表故障点, k 代表零电位点,故 $Z_{iF(q)} = Z_{if(q)}$ 即节点 i 和故障点 f 间的互阻抗。纵向故障时, k 代表故障点 f , 便有 $Z_{iF(q)} = Z_{if(q)} - Z_{if(q)}$ 。

发生简单不对称故障时,故障口的正、负、零序电流计算的通式为:

$$\begin{cases} I_{F(1)} = V_F^{(0)} / Z_{FF(1)} + Z \\ I_{F(2)} = K_2 I_{F(1)} \\ I_{F(0)} = K_0 I_{F(1)} \end{cases} \quad (6)$$

其中: Z, K_2, K_0 取决于具体的故障形式,反映了故障时三序网间的串/并联关系^[1]。将故障口各序电流代入公式(5)即可求得待求点电压及电流。

2 整定计算中故障计算模型的选择

基于节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵的故障计算模型在数学上是等价的,但在计算机中的算法则截然不同。

1) 采用基于导纳矩阵的故障计算模型时,设 A 为 $N \times b$ 阶节点支路关联矩阵(其中 N 为节点数、 b 为支路数), M_l 为 A 的第 l 个列矢量,则节点导纳矩阵可表示如下:

$$Y = \sum_{l=1}^b M_l Y_l M_l^T \quad (7)$$

其中 Y_l 为支路 l 的支路导纳。由式(7)可知节点导纳矩阵稀疏、易于形成,且具有可迭加性。利用稀疏算法求解方程,零元素无须存储,且不必参加运算,从而可以大量节省计算机内存,且其存储规模及计算量一般与电网规模的增大呈线性关系。根据运行方式变化、故障信息以及式(4)修改形成新的节点导纳矩阵的速度很快,但是每次计算都需要求解方程(3),在大批量故障处理时计算速度难以提高。

2) 采用基于阻抗矩阵的故障计算模型时,计算量主要集中于阻抗矩阵的形成,对一个特定的网络,可以根据公式(7)预先形成导纳矩阵并求逆形成其阻抗矩阵,运行方式变化以及计算故障时,只需对计

算相关涉及节点对应的阻抗矩阵元素进行很少量的修改,计算相关涉及节点形成的局部小阻抗矩阵可表示如下:

$$\begin{bmatrix} Z_O & & \\ Z_{OM} & Z_M & \\ Z_{OF} & Z_{MF} & Z_F \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 Z_O 为待求点对应的阻抗矩阵, Z_M 为方式变化节点对应的阻抗矩阵, Z_F 为故障点对应的阻抗矩阵。根据修改相关节点的阻抗元素即可进行相应的故障计算,或者直接在预先形成的阻抗矩阵的基础上进行故障计算^[2,4]。网络规模一般仅影响阻抗矩阵形成时的计算量。

本文根据整定计算需求的实际特点,采用基于节点阻抗矩阵的故障计算模型,并根据阻抗矩阵元素的局部修改原理对计算相关节点作了进一步的细分,从而提高整定计算的速度及效率。

3 涉及节点集及分级阻抗矩阵

定义涉及节点集为整定计算中故障计算需要的相关阻抗元素的节点集合。根据整定计算中故障计算的特点,故障计算在系统预想运行方式的基础上进行,并且一个系统预想方式下需要进行多次故障计算,为了尽可能地减少获得故障计算需要的阻抗元素而进行的修改,涉及节点集可以分为以下两种:

1) 方式故障涉及节点集 N_{CMF} : 指为获取预想运行方式下各故障计算相关阻抗元素,因元件方式变化必须对阻抗矩阵进行修改所需要的若干节点的集合。 N_{CMF} 可以用如下集形成:

$$N_C = N_F \cup N_U \cup N_S \cup N_A$$

其中: N_F 为故障涉及节点集,包含预想方式下所有需要计算的故障元件的节点; N_U 为输出需求涉及节点集,包含拟输出电压的节点及输出电流支路的节点; N_S 为方式变化涉及节点集,包含预想方式相对于其基本方式,方式发生变化的元件节点; N_A 为增设节点集,包括为方便元件方式变化而增设的节点。

2) 计算故障涉及节点集 N_{CF} : 指一次故障计算中,为获取故障计算相关元素,因故障类型或故障位置必须对阻抗矩阵进行修改所需要的若干节点的集合。 N_{CF} 可以用如下集形成:

$$N_{CF} = N_F \cup N_U \cup N_A$$

其中: N_F 为故障涉及节点集,包含一次故障计算中故障元件的节点; N_U 为输出需求涉及节点集,包含

拟输出电压的节点及输出电流支路的节点; N_A 为增设节点集, 包含为方便故障计算而增设的节点。

根据上述涉及节点集的定义以及分类, 在整定计算提交的故障计算过程中, 阻抗矩阵以下三角的形式, 分级存贮, 从而减少矩阵修改时的计算量以及存储量。

图 1 表示了三级阻抗矩阵的派生关系。第一级阻抗矩阵 Z_{B_i} 由第 i 个基本方式下的导纳矩阵求逆获得, 由 Z_{B_i} 及从 Z_{B_i} 中提取并修改形成的第二级阻抗矩阵 Z_{MF} 、第三级阻抗矩阵 Z_F 构成了一个以 Z_{B_i} 为单一根节点的树。与之对应的是涉及节点集的派生关系图, 其中 N_A 为全网所有的节点集合。

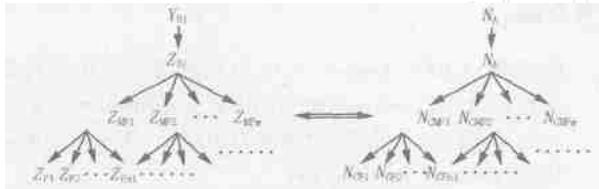


图 1 分级阻抗矩阵及涉及节点集的派生关系

Fig. 1 Deriving relationship of classified impedance matrices and involved node musters

4 计算时间分析及比较

在物理意义上, 节点导纳矩阵突出了网络节点之间的拓扑关系, 而节点阻抗矩阵更能表征网络节点之间的电磁联系。因此一个元件的方式变化会涉及所有相关节点阻抗元素的修改, 方式变化的元件数目越多, 修改阻抗矩阵的计算量就越大。

假设 N_{CMF} 个数为 n , N_F 和 N_U 相同节点数为 2, 方式变化的元件均为互不相连的非互感线路, 则方式发生变化的线路约为 $(n-2)/2$, 线路 l 方式变化时阻抗矩阵的修改公式如下:

$$Z_{ij} = Z_{ij} - \frac{(Z_{ik} - Z_{im})(Z_{kj} - Z_{mj})}{Z_{kk} + Z_{mm} - 2Z_{km} + (\pm z_{km})} \quad (9)$$

其中: k, m 为线路 l 的首末节点, z_{km} 为线路 l 的阻抗, “+”表示投入线路, “-”表示切除线路。

忽略系统电阻, 修改一个阻抗元素需要的乘除法运算次数为 3, Z_{MF} (下三角矩阵) 中阻抗元素的个数为 $n \times (n+1)/2$, 由于 $(n-2)/2$ 条线路发生方式变化修改形成 Z_{MF} 所需要的乘除法次数为 $[n \times (n+1)/2] \times [(n-2)/2] \times 3 = 3n(n+1)(n-2)/4$, 则仅考虑乘除法运算, 形成 Z_{MF} 的时间复杂度大约为:

$$T(n) = O(3n^3/4) \quad (10)$$

导纳矩阵进行 LU 分解所需要的乘除法的次数为 $r_i(r_i+3)/4$, 利用 LU 分解结果进行求解一次方

程所需要的乘除法次数为 $m/2 + r_i$, 其中 r_i 为第 i 行中非对角元中的非零元素数目^[5], m 为三序综合导纳矩阵的维数。一般 Y 阵中每一行 (或列) 的非零元素不超过 5 个, 取 r_i 平均为 3, 则仅考虑乘除法运算, 求解一次方程 (3) 的时间复杂度为:

$$T(m) = O(8m) \quad (11)$$

运行方式变化时仅需对基本方式下的节点导纳矩阵进行很少量迭加修改, 根据公式 (4) 求取 $Y^{(f)}$ 的时间相对于求解方程 (3) 的时间很小, 因此方式变化元件的范围对整定计算的时间效率影响很小。

根据时间复杂度式 (10) 和式 (11) 可知:

1) 当整定计算原则中预想方式组合考虑的元件变化范围的规模的增大时, 基于节点阻抗矩阵模型故障计算所需时间随呈指数增加, 但是对基于节点导纳矩阵模型的故障计算所需时间基本没有影响。当预想方式考虑的元件变化范围较小时, 基于节点阻抗的故障计算的速度同基于节点导纳矩阵相比具有较大的速度优势, 当考虑厂站方式组合, 方式变化元件的范围扩大到一定程度, 这种优势将不复存在。

2) 由修改阻抗矩阵的时间复杂度可知, 尽量减小修改阻抗矩阵的维数, 对于提高计算效率至关重要。采取本文提出的涉及节点集的合理选取和阻抗矩阵的分级修改存贮, 能够逐级减小计算相关阻抗矩阵的维数, 减少阻抗矩阵修改耗费的时间。

3) 由于基本方式下的阻抗矩阵可以预先形成, 忽略求逆获取阻抗矩阵的时间, 电网规模的大小不会影响基于节点阻抗矩阵故障计算模型的整定计算效率。基于节点导纳矩阵的故障计算模型的整定计算效率则随电网规模的增大呈线性减小。

5 算例

本文以湖南电网整定计算为例, 采用基于导纳矩阵和阻抗矩阵两种不同的故障计算模型, 比较了两者的计算时间, 并分析了方式故障涉及节点集 N_{CMF} 对故障计算速度的影响。

算例系统共有 430 个节点, 182 条线路, 79 个厂站。算例测试的硬件配置为 Duron 1.2 GHz/512 M SDRAM。

1) 表 1 是采用两种故障计算模型, 湖南全网 220 kV 线路 (172 条) 两端保护零序 I 段、II 段、III 段整定计算的时间对比。表中的计算采用的是计及电阻的复数运算, 预想方式组合原则考虑保护两侧母线上轮检一个元件。

表 1 整定计算时间对比

Tab. 1 Time differences of setting calculation

基本 方式 数目	零序 段			零序 段			零序 段		
	Y/ min	Z/ s	故障计 算次数/ 次	Y/ min	Z/ s	故障计 算次数/ 次	Y/ min	Z/ s	故障计 算次数/ 次
1	21.4	5.3	26772	25.9	6.5	50332	3.3	1.4	3108
4	81	25	105200	112	19	201386	12	5	11709

从表 1 可以看出当预想方式组合考虑较小范围内元件方式的变化时,采用基于节点阻抗矩阵的故障计算模型的整定计算具有明显的速度优势。

2) 图 2 是在湖南云树线零序 I 段整定计算中,当预想方式组合时考虑变化方式元件的范围不断扩大时(方式变化的元件均为互不相连的非互感线路),由 N_{CMF} 及 Z_B 提取并修改形成第二级阻抗矩阵 Z_{MF} 的时间与 N_{CMF} 节点数的关系曲线如图 2 所示。图中的计算为不考虑电阻的实数运算。

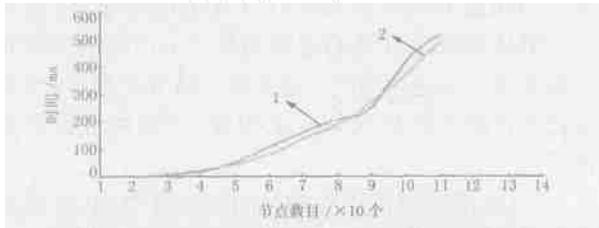
图 2 形成 Z_{MF} 的时间同 N_{CMF} 节点数的关系曲线Fig. 2 Relationship curve between time to form Z_{MF} and node number of N_{CMF}

图 2 中曲线 1 表示形成 Z_{MF} 的时间 t 同 N_{CMF} 个数 n 的关系;其中 $n < 30$ 时 t 一般很小, $n = 30$ 时, $t = 10$ ms;曲线 2 表示曲线 $t = 10 \times (n/30)^3$ 。从图中可以看出形成 Z_{MF} 的时间复杂度大约为 $T(n) = O(n^3)$,加上加减法运算的复杂度以及误差,与理论推出阻抗矩阵修改时间复杂度式(10)基本一致。

当方式故障涉及节点集 N_{CMF} 的个数较大时,即预想方式组合考虑较多元件的方式变化时(例如预先方式组合考虑保护临近多级母线所在厂站方式),同基于导纳矩阵的故障计算故障程序比较,基于阻抗矩阵的故障计算程序将不具有快速计算的优势。在实际湖南电网全网整定计算中,当预想方式考虑保护临近 4 级母线所在厂站方式的组合时,两者耗费时间相当。

6 结论

1) 从程序时间复杂度的角度定量分析了基于节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵故障计算模型在计及方式变化的故障计算时影响其计算时间的关键因素。

2) 基于节点阻抗矩阵,通过涉及节点集的合理

选取以及三级阻抗矩阵的分级存贮方式,大大提高了整定计算中大量故障计算的速度。但是当预想方式组合考虑较大范围的元件方式变化时,整定计算应该采用基于节点导纳矩阵的故障计算模型。

参考文献:

- [1] 陈永琳(CHEN Yong-lin). 电力系统继电保护的计算机整定计算(Computer-aided Relay Coordination of Power System) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1994.
- [2] 米麟书,吕飞鹏,姜可薰(MI Lin-shu, LÜ Fei-peng, JIANG Ke-xun). 变结构电力系统短路故障的一种新算法(A New Algorithm for Short Circuit Fault Studies) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1994, 14(1): 67-72.
- [3] 曹国臣(CAO Guo-chen). 变结构电力系统任意复杂故障的快速计算(Fast Calculation of Any Complex Fault in Power System with Variable Structures) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1995, 15(5): 354-360.
- [4] CHEN Jerr-hung. Industrial Power System Analysis with Database Access [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2000, 36(5): 1198-1205.
- [5] 刘长学(LIU Chang-xue). 超大规模稀疏矩阵计算方法(Computer Methods of Super-dimension Sparseness Matrix) [M]. 上海:上海科技出版社(Shanghai: Shanghai Science Press), 1991.

收稿日期: 2004-03-01; 修回日期: 2004-05-11

作者简介:

杨雄平(1978-),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护及故障管理系统及相关软件技术的研究; E-mail: yang-xing@sina.com.cn

石东源(1974-),男,博士,从事信息化电力系统相关理论及支撑软件技术的研究;

杨增力(1982-),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护整定计算理论及相关软件技术研究;

段献忠(1966-),男,教授,博士生导师,从事电压稳定、FACTS、整定计算、信息化电力系统和电力市场等领域的研究。

电力系统信息需求分类及其对通信网络的要求研究

辛建波, 段献忠

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着电力市场的开放, 电力系统信息需求的不断提高, 信息量急剧增长。为了最大限度地发挥光纤通信的优势, 必须对电力系统的信息需求进行深入研究。针对电力企业不同应用领域对电力系统信息需求进行分类, 并且分别详细分析了变电站和控制中心的信息类型及其传输时间需求, 最后对通信网络提出了要求。

关键词: 信息需求分类; 传输时间需求; 通信网络

中图分类号: TM769 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)21-0021-05

0 引言

电力系统通信已成为并将继续在更大范围内成为电力系统运行及管理的必需工具, 不断发展强大的通信功能促使电力系统和相关行业以更有效的方式运行。随着光纤通信系统的引进, 窄带(100 bit/s 级)技术已在很大程度上被高速宽带(100 Mbit/s 级)通信技术所代替, 带宽比以往增加了 106 倍。但是这些增加的网络带宽资源, 应该被有效利用。如果电力系统的各类信息不是按“所需”, 而是按“好用”的标准, 一味地追求更好的性能, 那么这些现在闲置的网络资源不久将会被耗尽。因此, 现在电力系统通信领域的研究重点应该放在信息需求的分析上, 不仅可以为电力系统通信设计、规划提供一个参考标准, 而且能够为电力信息系统的网络性能管理提供依据。本文主要针对电力企业的不同应用领域, 将电力系统信息需求分为变电站的信息需求和电网控制中心的信息需求 2 大类; 并且分别详细分析了变电站和控制中心内的信息类型及其传输时间需求; 最后对通信网络提出了要求。类似的工作尚未见到文章发表, 文献 [1] 提出了一些电力系统通信分类模型, 文献 [2, 3] 则是根据控制中心的业

务类型分类, 而本文提出的新方法是综合企业应用领域的信息流和电力网络应用需求等因素考虑电力系统信息需求。

1 变电站的信息需求

1.1 信息流和传输时间需求

正在制订的变电站通信网络和系统国际标准 IEC 61850 按照变电站自动化系统所要完成的测量、控制和保护三大功能从逻辑上将系统分为 3 层, 即变电站层、间隔层和过程层, 并定义了 9 种逻辑接口模型^[4]。该模型主要的组件和逻辑接口组成如图 1 所示。

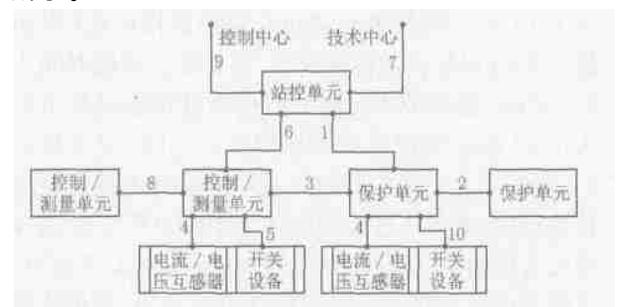


图 1 基于 IEC 61850 的逻辑接口模型

Fig. 1 Logical interface model based on IEC 61850

Research and realization of fast fault calculation method in relay setting

YANG Xiong-ping, SHI Dong-yuan, YANG Zeng-li, DUAN Xiar-zhong
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to enhance the efficiency of relay coordination, fast calculation of faults in various operating modes of power network is a pivotal factor. This paper analyses the characteristics of relay coordination, presents a method based on impedance matrix to calculate a mass of faults considering the changes of operating modes of power network. By means of the rational selection of involved node muster and classified stockpile impedance matrix, the least modification impedance matrix and fast fault calculation are achieved. From the view of time-consuming, this paper analyses and compares the advantages and shortcomings of fault calculation method based on conductance matrix with that based on impedance matrix.

Key words: setting calculation; fault calculation; change of operating modes; conductance matrix; impedance matrix