

大电网继电保护并行整定计算中故障电气量的计算

刘畅¹, 曹国臣²

(1. 哈尔滨电业局, 黑龙江 哈尔滨 150006; 2. 东北电力学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 选择大电网中各大区电网之间的互联线路作为联络线, 以联络线为边界将大电网分解成相互间无电磁联系的子系统群, 采用分解协调法来计及各子系统之间的相互影响, 采用补偿法来模拟各子系统内的网络操作, 在不修改原网各子系统数学模型的前提下, 提出了一种大电网继电保护整定计算中故障电气量的并行计算方法。该方法既适用于大电网继电保护离线并行整定计算又适用于在线并行整定计算。

关键词: 分解协调法; 补偿法; 大电网; 继电保护; 并行整定计算

Fault calculation for relay parallel setting and coordination in a large-scale power system

LIU Chang¹, CAO Guo-chen²

(1. Harbin Electric Power Co., Ltd, Harbin 150006, China;

2. Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

Abstract: By taking the tie lines among electric networks as boundary lines, a large-scale power system is decomposed into some sub-systems. The decomposition-coordination method is employed to deal with the effects among sub-systems, and the compensation method is used to simulate network operations in a sub-system. Under the condition of not modifying the mathematical model of sub-systems, a parallel method to calculate fault electric parameters for relay setting and coordination in a large-scale power system is presented. The proposed method can be used both on-line and off-line in the relay parallel setting and coordination of a large-scale power system.

Key words: decomposition-coordination method; compensation method; large-scale power system; relay protective; parallel setting and coordination

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)03-0015-05

0 引言

目前, 我国电力工业基本上步入了大电网、大电厂、大机组、超高压输电、高度自动化的新时代, 原各独立运行的大区电网正逐步实现互联, 全国统一的大电网已见雏形。统一大电网的出现给原本独立运行的各大区电网继电保护整定计算工作带来了新的问题, 即: 在本大区电网继电保护整定计算过程中如何计及互联后其它大区电网对本大区电网继电保护的影响。因此, 开展大电网继电保护并行整定计算方法的研究, 对如何利用各大区电网现有的计算机资源来提高互联后各大区电网继电保护整定计算的正确性和效率具有理论意义和实用价值。继电保护整定计算主要分为两大步^[1]: 第一步按照继电保护整定计算要求计算故障电气量; 第

第二步根据继电保护整定计算原则利用求得的故障电气量计算继电保护的整定值。因此, 继电保护整定计算的关键在于如何获得继电保护整定计算所需的故障电气量。继电保护整定计算中故障电气量的常规计算方法仅适合于串行计算^[2], 显然满足不了大电网继电保护并行整定计算的要求。尽管文献[3,4]采用分块法来计算继电保护整定计算中所需的故障电气量, 但这些方法是针对扩大解题规模而提出的, 仍然满足不了大电网继电保护并行整定计算的需要。电力系统故障电气量的并行计算方法^[5], 因未计及继电保护整定计算的特点, 如未计及发电机出力变化、变压器接地点数量变化、线路投入与切除等改变电力系统运行方式的网络操作, 同样满足不了大电网继电保护并行整定计算的要求。针对这种情况, 本文基于分解协调法和补偿法, 在不修

改各子系统原网数学模型的前提下,开展了大电网继电保护并行整定计算中故障电气量的计算研究工作。

1 故障计算原理

在独立节点数为 n 的大型电力系统中,以各大区电网之间的联络线为边界将大电网分解成 1, 2, ..., R 个相互间无电磁联系的子系统群,采用文献 [6] 所介绍的方法模拟各子系统内的网络操作,并设各子系统故障点注入电流为 $I_{d(r)}^k (k=1,2,\dots,R)$,便建立起图 1 所示大电网继电保护并行整定计算中 r ($r=0,1,2$) 序故障电气量的计算模型。图中, $Z_{c(r)}^k (k=1,2,\dots,R; r=0,1,2)$ 为第 k 个子系统模拟网络操作所需的 r 序支路阻抗矩阵; $U_{c(r)}^k$ 、 $I_{c(r)}^k (k=1,2,\dots,R; r=0,1,2)$ 为第 k 个子系统模拟网络操作端口 r 序电压和电流列阵; $Z_{(r)}^k (k=1,2,\dots,R; r=0,1,2)$ 为第 k 个子系统 r 序节点阻抗矩阵; $I_{b(r)}^{1k}$ 、 $I_{b(r)}^{kR}$ 、 $I_{b(r)}^{R1}$ 为各子系统之间联络线 r 序协调电流列阵。

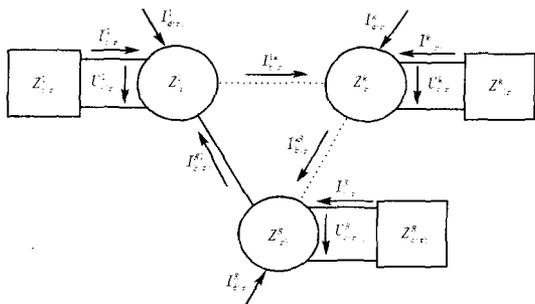


图 1 大电网继电保护并行整定计算中故障计算模型
Fig.1 Fault calculation model for relay parallel setting and coordination in a large-scale power system

由图 1 可见,各子系统故障电气量的计算方法完全相同。根据迭加原理,第 $k (k=1,2,\dots,R)$ 个子系统任意节点电压的故障分量应等于模拟网络操作所需的补偿电流、联络线协调电流和故障点注入电流所产生的节点电压之和。在并行计算出各子系统内整定某套保护所需的节点电压之后,不难并行求出整定计算所需的支路电流,进而可并行求得整定计算所需的其它电气量。

2 各子系统故障电流的注入方法

在继电保护整定计算及其动作行为分析过程中,需要处理的故障类型可分为:非对称断相、节

点短路、非节点短路、非节点短路加相继动作。故障可能在各子系统中引入新节点,为避免修改原网各子系统数学模型,应对各子系统故障点注入电流进行恒等变形处理。

2.1 非对称断相故障

设支路 $i-j$ 上 i 节点侧发生非对称断相,断相口为 i, t , 见图 2a。由于断相口端点 t 为新增节点,无法直接向断相口注入故障电流。可采用图 2b 所示的方法将其恒等变形成向原网子系统节点 i 和 j 注入相应的故障电流加切除支路 $i-j$ 的网络操作。根据图 2b, 图 1 中第 k 个子系统故障点注入电流为:

$$I_d^k = [0, \dots, 0, I_{it}^k, 0, \dots, 0, -I_{it}^k, 0, \dots, 0]^T$$

($k=1, 2, \dots, R$)

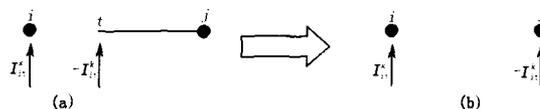


图 2 非对称断相故障

Fig.2 Method to inject current for asymmetrical open conductors

2.2 短路故障

设支路 $i-j$ 上距 i 节点 α 百分点处发生短路故障(对节点短路,只需令 $\alpha=0$), 见图 3a。由于故障点为新增节点,无法直接向原网子系统故障点注入电流。可采用图 3b 所示的方法将其恒等变形成向原网子系统节点 i 和 j 注入相应的故障电流。根据图 3b, 图 1 中第 k 个子系统故障点注入电流为:

$$I_d^k = [0, \dots, (1-\alpha)I_d^k, 0, \dots, \alpha I_d^k, \dots, 0]^T$$

($k=1, 2, \dots, R$)

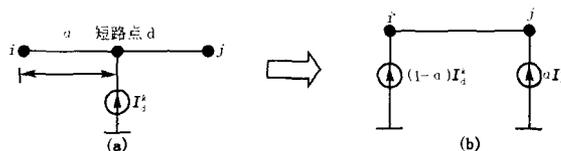


图 3 短路故障

Fig.3 Method to inject current for fault

2.3 非节点短路加相继动作

设支路 $i-j$ 上 i 节点侧发生非节点短路且对侧节点 j 处的断路器先跳开, 见图 4。由图 4 可见, 发生相继动作时在故障点 d 注入故障电流等价于先切除相继动作支路 $i-j$ 后在节点 i 注入故障电流。因此, 非节点短路加相继动作可采用向原网子系统节点 i 注入故障电流加切除支路 $i-j$ 的网络操作来模拟。根

据图4, 图1中第 k 个子系统故障点注入电流为

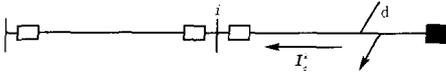
$$\mathbf{I}_d^k = [0, \dots, \mathbf{I}_d^k, \dots, 0]^T \quad (k=1, 2, \dots, R)$$


图4 非节点短路加相继动作

Fig.4 Interline fault with one-side open

3 各子系统节点电压故障分量的计算

3.1 仅在第 k 个子系统故障点注入单位电流时第 k 个子系统任意节点电压的计算

根据叠加原理, 第 k 个子系统任意节点 m 的 r 序电压为:

$$\mathbf{U}_{m(r)}^k = \mathbf{Z}_{m(r)}^k (\mathbf{I}_{d(r)}^k + \mathbf{A}_c^k \mathbf{I}_{c(r)}^k + \mathbf{A}_b^k (\mathbf{I}_{b(r)}^{1k} - \mathbf{I}_{b(r)}^{kR}))$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{c(r)}^k \\ \mathbf{U}_{b(r)}^{1k} \\ \mathbf{U}_{b(r)}^{kR} \\ \mathbf{U}_{c(r)}^1 \\ \mathbf{U}_{c(r)}^R \\ \mathbf{U}_{b(r)}^{R1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{c(r)}^k[0] \\ \mathbf{U}_{b(r)}^{1k}[0] \\ \mathbf{U}_{b(r)}^{kR}[0] \\ \mathbf{U}_{c(r)}^1[0] \\ \mathbf{U}_{c(r)}^R[0] \\ \mathbf{U}_{b(r)}^{R1}[0] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{cc(r)}^{k,k} & -\mathbf{Z}_{cb(r)}^{k,1k} & \mathbf{Z}_{cb(r)}^{k,kR} & \mathbf{Z}_{cc(r)}^{k,1} & \mathbf{Z}_{cc(r)}^{k,R} & \mathbf{Z}_{cb(r)}^{k,R1} \\ \mathbf{Z}_{bc(r)}^{1k,k} & \mathbf{Z}_{bb(r)}^{1k,1k} & -\mathbf{Z}_{bb(r)}^{1k,kR} & \mathbf{Z}_{bc(r)}^{1k,1} & \mathbf{Z}_{bc(r)}^{1k,R} & \mathbf{Z}_{bb(r)}^{1k,R1} \\ \mathbf{Z}_{bc(r)}^{kR,k} & \mathbf{Z}_{bb(r)}^{kR,1k} & \mathbf{Z}_{bb(r)}^{kR,kR} & \mathbf{Z}_{bc(r)}^{kR,1} & \mathbf{Z}_{bc(r)}^{kR,R} & -\mathbf{Z}_{bb(r)}^{kR,R1} \\ \mathbf{Z}_{cc(r)}^{1,k} & \mathbf{Z}_{cb(r)}^{1,1k} & -\mathbf{Z}_{cb(r)}^{1,kR} & \mathbf{Z}_{cc(r)}^{1,1} & \mathbf{Z}_{cc(r)}^{1,R} & \mathbf{Z}_{cb(r)}^{1,R1} \\ \mathbf{Z}_{cc(r)}^{R,k} & \mathbf{Z}_{cb(r)}^{R,1k} & \mathbf{Z}_{cb(r)}^{R,kR} & \mathbf{Z}_{cc(r)}^{R,1} & \mathbf{Z}_{cc(r)}^{R,R} & -\mathbf{Z}_{cb(r)}^{R,R1} \\ \mathbf{Z}_{bc(r)}^{R1,k} & -\mathbf{Z}_{bb(r)}^{R1,1k} & \mathbf{Z}_{bb(r)}^{R1,kR} & \mathbf{Z}_{bc(r)}^{R1,1} & \mathbf{Z}_{bc(r)}^{R1,R} & \mathbf{Z}_{bb(r)}^{R1,R1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{c(r)}^k \\ \mathbf{I}_{b(r)}^{1k} \\ \mathbf{I}_{b(r)}^{kR} \\ \mathbf{I}_{c(r)}^1 \\ \mathbf{I}_{c(r)}^R \\ \mathbf{I}_{b(r)}^{R1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{c(r)}^k \\ \mathbf{U}_{b(r)}^{1k} \\ \mathbf{U}_{b(r)}^{kR} \\ \mathbf{U}_{c(r)}^1 \\ \mathbf{U}_{c(r)}^R \\ \mathbf{U}_{b(r)}^{R1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{Z}_{c(r)}^k & & & & & \\ & \mathbf{Z}_{b(r)}^{1k} & & & & \\ & & \mathbf{Z}_{b(r)}^{kR} & & & \\ & & & -\mathbf{Z}_{c(r)}^1 & & \\ & & & & -\mathbf{Z}_{c(r)}^R & \\ & & & & & \mathbf{Z}_{b(r)}^{R1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{c(r)}^k \\ \mathbf{I}_{b(r)}^{1k} \\ \mathbf{I}_{b(r)}^{kR} \\ \mathbf{I}_{c(r)}^1 \\ \mathbf{I}_{c(r)}^R \\ \mathbf{I}_{b(r)}^{R1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)分别简记为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{x(r)} \\ \mathbf{U}_{y(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{x[0](r)} \\ \mathbf{U}_{y[0](r)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{xx(r)} & \mathbf{Z}_{xy(r)} \\ \mathbf{Z}_{yx(r)} & \mathbf{Z}_{yy(r)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{x(r)} \\ \mathbf{I}_{y(r)} \end{bmatrix} \quad (r=0,1,2) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{x(r)} \\ \mathbf{U}_{y(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}'_{xx(r)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}'_{yy(r)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{x(r)} \\ \mathbf{I}_{y(r)} \end{bmatrix} \quad (r=0,1,2) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{U}_{x(r)}$ 、 $\mathbf{U}_{y(r)}$ 分别为第 k 个子系统或其它子系统网络操作端口和联络线端口 r 序电压矩阵; $\mathbf{U}_{x[0](r)}$ 、 $\mathbf{U}_{y[0](r)}$ 分别为第 k 个子系统或其它子系统网络操作端口和联络线端口 r 序开路电压矩阵;

$$(r=0, 1, 2) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Z}_{m(r)}^k$ 为第 k 个子系统 r 序节点阻抗阵 $\mathbf{Z}_{(r)}^k$ 中第 m 行元素; $\mathbf{I}_{d(r)}^k$ 为第 k 个子系统故障点 r 序单位注入电流; \mathbf{A}_c^k 为第 k 个子系统模拟网络操作所需支路的关联矩阵; $\mathbf{I}_{c(r)}^k$ 为第 k 个子系统模拟网络操作所需的 r 序补偿电流; \mathbf{A}_b^k 为第 k 个子系统联络线支路的关联矩阵; $\mathbf{I}_{b(r)}^{1k}$ 、 $\mathbf{I}_{b(r)}^{kR}$ 为与第 k 个子系统相连接的联络线 r 序协调电流。

在式(1)中, 只有模拟网络操作所需的补偿电流 $\mathbf{I}_{c(r)}^k$ 和联络线协调电流 $\mathbf{I}_{b(r)}^{1k}$ 、 $\mathbf{I}_{b(r)}^{kR}$ 为待求量。以图1中网络操作端口和联络线端口为边界, 根据多端口网络理论, 可列出故障计算模型的边界端口分块方程为:

$\mathbf{Z}_{xx(r)}$ 为第 k 个子系统网络操作端口、联络线端口 r 序自阻抗矩阵和相互间的 r 序互阻抗矩阵; $\mathbf{Z}_{yy(r)}$ 为其它子系统网络操作端口、联络线端口 r 序自阻抗矩阵和相互间的 r 序互阻抗矩阵; $\mathbf{Z}_{xy(r)}$ 为第 k 个子系统与其它子系统网络操作端口之间、联络线端口之间、网络操作端口与联络线端口之间的 r 序互阻抗矩阵; $\mathbf{Z}_{yx(r)}$ 为其它子系统与第 k 个子系统网络操作端口之间、联络线端口之间、网络操作端口与联络线端口之间的 r 序互阻抗矩阵; $\mathbf{I}_{x(r)}$ 、 $\mathbf{I}_{y(r)}$ 分别为第 k 个子系统或其它子系统模拟网络操作所需的 r 序补偿电流矩阵和联络线 r 序协调电

流矩阵; $Z'_{xx(r)}$ 、 $Z'_{yy(r)}$ 分别为模拟第 k 个子系统或其它子系统网络操作所需的 r 序支路阻抗矩阵和联络线 r 序支路阻抗矩阵。

在式(4)和式(5)中, $U_{x(0)(r)}$ 和 $U_{y(0)(r)}$ 可根据开路电压的物理意义由各子系统 r 序节点阻抗矩阵中相应元素求得^[5]; $Z'_{xx(r)}$ 、 $Z'_{yy(r)}$ 、 $Z'_{xy(r)}$ 和 $Z'_{yx(r)}$ 可根据阻抗参数的物理意义由各子系统 r 序节点阻抗矩阵中相应元素求得^[5]; $Z'_{xx(r)}$ 、 $Z'_{yy(r)}$ 可根据网络操作信息和大电网分解信息形成^[6]。

将式(4)和式(5)联立, 消去与第 k 个子系统无关的 r 序电流, 求得第 k 个子系统模拟网络操作所需的 r 序补偿电流和联络线 r 序协调电流为:

$$I_{x(r)} = \left[(Z'_{xx(r)} - Z_{xx(r)}) - Z_{xy(r)} (Z'_{yy(r)} - Z_{yy(r)})^{-1} Z_{yx(r)} \right]^{-1} \cdot \left[U_{x(0)(r)} + Z_{xy(r)} (Z'_{yy(r)} - Z_{yy(r)})^{-1} U_{y(0)(r)} \right] \quad (6)$$

3.2 第 k 个子系统故障点实际电流的计算

故障点实际电流与故障点开路电压、故障端口入端阻抗及故障类型有关。

3.2.1 短路故障的计算 (包括相继动作)

3.2.1.1 短路前故障点开路电压的计算

短路前故障点的开路电压等于电网正常运行时故障点的电压, 可通过潮流计算求得。在继电保护整定计算中, 一般认为短路前故障点的开路电压等于 1.0。

3.2.1.2 故障点各序入端阻抗的计算

根据入端阻抗的物理意义, 第 k 个子系统故障点 r 序入端阻抗为:

$$Z_{d(r)}^k = \frac{U_{d(r)}^{k(d)}}{I_{d(r)}^k} \quad (r=0,1,2) \quad (7)$$

由式(7)可见, 如果不计量纲关系, $Z_{d(r)}^k$ 的大小和相位与仅在故障点 d 注入单位电流时故障点的电压相同, 即

$$Z_{d(r)}^k = \alpha U_{j(r)}^k + (1-\alpha) U_{i(r)}^k \quad (r=0,1,2) \quad (8)$$

式中 $U_{i(r)}^k$ 、 $U_{j(r)}^k$ 为故障支路两侧节点电压, 可由式(1)求得。

3.2.1.3 故障点短路电流的计算

第 k 个子系统故障点短路电流可根据短路类型利用对称分量法求得, 例如单相接地短路时:

$$I_{d(1)}^k = I_{d(2)}^k = I_{d(0)}^k = \frac{-1}{Z_{d(1)}^k + Z_{d(2)}^k + Z_{d(0)}^k} \quad (9)$$

3.2.2 非对称断相故障的计算

3.2.2.1 断相口开路电压的计算

在继电保护整定计算时通常假设非对称断相引起电力系统振荡过程中系统内的发电机分成两个振荡群参与振荡, 两振荡群等值发电机电势幅值相等均为 E 、相角差为 δ 。在这种假设条件下, 以正序网断相口 i 、 t 和两群振荡机组等效电势端点为端口, 根据双口网络 H 参数的物理意义, 可导出一种计及网络结构影响时正序网断相口开路电压的计算方法^[7], 即

$$E_{it}^k = \left(\sum_{p=1}^s \left| U \frac{U_{p(1)}^{(it)}}{Z_{p(1)}} \right| \right) E \sin(\delta/2) \angle(90 + \frac{\delta}{2}) \quad (10)$$

式中: $U_{p(1)}^{(it)}$ 为在正序网断相口 i 、 t 注入单位电流时第 p 号发电机的节点电压, 可由式(1)求得; $Z_{p(1)}$ 为第 p 号发电机的支路正序阻抗。

3.2.2.2 断相口各序入端阻抗的计算

采用式(8)的分析结论, 如果不计量纲关系, 第 k 个子系统断相口入端阻抗 $Z_{it(r)}^k$ 与仅在断相口 i 、 t 注入单位电流时断相口两端的电压相同, 即:

$$Z_{it(r)}^k = U_{i(r)}^k - U_{j(r)}^k + Z_{i-j(r)}^k \quad (r=0,1,2) \quad (11)$$

式中: $U_{i(r)}^k$ 、 $U_{j(r)}^k$ 为非全相支路两侧节点电压, 可由式(1)求得; $Z_{i-j(r)}^k$ 为非全相支路 $i-j$ 的 r 序支路阻抗。

3.2.2.3 断相口故障电流的计算

第 k 个子系统非全相断相口故障电流可根据非全相故障类型利用对称分量法求得, 例如两相断线时:

$$I_{it(1)}^k = I_{it(2)}^k = I_{it(0)}^k = \frac{-E_{it}^k}{Z_{it(0)}^k + Z_{it(1)}^k + Z_{it(2)}^k} \quad (12)$$

3.3 第 k 个子系统节点电压故障分量的计算

根据线性电路的特性, 可求得第 k 个子系统任意节点 m 的电压故障分量。

对于短路故障:

$$U_{m(r)}^{k'} = U_{m(r)}^k I_{d(r)}^k \quad (r=0,1,2) \quad (13)$$

对于非对称断相故障:

$$U_{m(r)}^{k'} = U_{m(r)}^k I_{it(r)}^k \quad (r=0,1,2) \quad (14)$$

在式(1)~式(14)中, 令 $k=1, 2, \dots, R$ 即可并行求得各子系统节点电压的故障分量。

4 各子系统任意节点实际电压的计算

根据叠加原理,第 k 个子系统任意节点 m 的实际电压为:

$$U_{m(r)}^k = U_{m[0](r)}^k + U_{m(r)}^k \quad (k=1,2,\dots,R; r=0,1,2) \quad (15)$$

式中: $U_{m[0](r)}^k$ 为故障前第 k 个子系统任意节点 m 的 r 序电压。

并行计算出各子系统相应节点电压之后,可并行计算各子系统继电保护整定计算所需的电气量。

5 算例

系统如图 5,图中参数均为基准容量等于 100 MVA 下的标么值,分子为正、负序电抗,分母为零序电抗。试计算当切除双回线 2-3 中的 I 号线路之后,II 线路距节点 2 的 40% 处 d 点发生 A 相接地短路时的各节点电压。

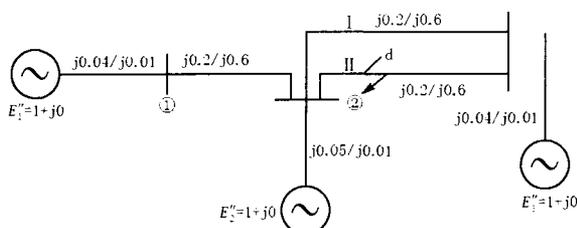


图 5 算例系统

Fig.5 Network sample

选择线路 1-2 作为联络线,将算例系统分解成 2 个子系统,相应的故障计算结果如表 1 所示。

表 1 故障计算结果

Tab.1 Calculation results of power system sample

| 节点编号 | 正序电压 | 负序电压 | 零序电压 |
|------|----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.986 35 | -0.013 65 | -0.000 11 |
| 2 | 0.918 16 | -0.081 84 | -0.020 26 |
| 3 | 0.939 96 | -0.060 04 | -0.013 89 |

6 结论

基于大系统分解协调理论和补偿法,可以在不修改原网各子系统数学模型的前提下实现大电网继电保护整定计算中故障电气量的并行计算。

本文方法既适用于大电网继电保护离线并行整定计算又适用于在线并行整定计算。

参考文献

- [1] DL/T559-94, 220~500 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
- [2] 曹国臣. 继电保护整定计算中故障计算的通用方法[J]. 电网技术, 2002, 26(12):24-29.
CAO Guo-chen. A Versatile Method to Calculate Faults for Protective Relaying Setting[J]. Power System Technology, 2002, 26(12):24-29.
- [3] 曹国臣, 刘亚齐. 继电保护整定计算中短路故障的分块算法[J]. 继电器, 1995, 23(4):7-12.
CAO Guo-chen, LIU Ya-qi. The Piecewise Method for Short Circuit Faults in Relay Setting Calculation[J]. Relay, 1995, 23(4):7-12.
- [4] 米麟书, 刘芳宁. 变结构电力系统非对称断相状态分块算法的研究[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(6):7-12.
MI Lin-shu, LIU Fang-ning. Study on Calculation of Piecewise Method for Unsymmetrical Open Conductor States in Power Systems with Variable Structures[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(6):7-12.
- [5] 曹国臣, 武晓梅, 宋家骅, 等. 一种基于分解协调法的电力系统故障计算方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(1):14-18.
CAO Guo-chen, WU Xiao-mei, SONG Jia-hua, et al. A New Method for Fault Calculation in Power System Based on the Decomposition-coordination Method[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(1):14-18.
- [6] 李秀卿, 曹国臣. 电力系统故障计算中网络操作的统一模拟方法[J]. 继电器, 1998, 26(4):12-17.
LI Xiu-qing, CAO Guo-chen. Unified Methods to Simulate Network Changes in Topology for System Fault Analysis[J]. Relay, 1998, 26(4):12-17.
- [7] 曹国臣, 蔡国伟, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10):51-56.
CAO Guo-chen, CAI Guo-wei, WANG Hai-jun. Problems and Solutions in Relay Setting and Coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10):51-56.

收稿日期: 2006-08-31

作者简介:

刘畅(1979-),女,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护与安全监控方面的研究工作; E-mail:zhflc@126.com

曹国臣(1954-2005),男,博士,教授,主要从事电力系统继电保护与安全监控方面的教学和研究工作。