

大电网整定计算中缓冲网的自动生成

王晓波¹, 温靖华², 李崇瞻¹, 罗美玲², 宋玮¹, 龚仁敏³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 宁夏电力调度控制中心, 宁夏 银川 750001;
3. 北京中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100096)

摘要: 大电网局部区域整定计算时, 采用全网模型耗时过长, 如何快速缩小计算时的电网规模成为重要的研究课题。根据复杂网络理论, 形成带权电力网络。配合区域和约束区域构成了整定计算缓冲网。确定整定计算范围后, 根据一级远后备保护使用方法, 确定边界支路相邻支路及末端节点为配合区域。利用最短电气路径确定边界支路、配合支路的最小环网结构, 利用边界节点自阻抗变化率确定厂站范围。最小环网结构和厂站范围组成了约束区域。最后通过深度搜索/回溯技术实现了缓冲网的自动生成。

关键词: 整定计算; 缓冲网; 运行方式; 带权电力网络; 保护配合

Automatic generation of buffer subsystem for setting calculation in large power system

WANG Xiao-bo¹, WEN Jing-hua², LI Chong-zhan¹, LUO Mei-ling², SONG Wei¹, GONG Ren-min³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Ningxia Electric Power Dispatching and Control Centre, Yinchuan 750001, China; 3. Beijing Join Bright Digital Power Technology Limited Company, Beijing 100096, China)

Abstract: It is time consuming to use the entire network to conduct setting calculation for local area. The way to narrow down the grid size for setting calculation becomes an important subject. Based on the complex network theory, the weighted power network model is formed. The buffer subsystem for setting calculation consists of the coordination region and constraint region. After determining the scope of setting calculation, we include the adjacent branches of boundaries and its end nodes in the coordination region according to remote backup protection. Furthermore, the shortest electrical path is used to determine the minimum ring network of boundaries and coordination branches. Meanwhile the substation scope is determined by the self-impedance variation rate of boundary nodes. The constraint region consists of the smallest ring structures and substation scope. Under these, the depth first search and backtracking technique are applied to form the buffer subsystem automatically.

Key words: setting calculation; buffer subsystem; operation mode; weighted network; protection coordination

中图分类号: TM76; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0110-06

0 引言

国调提出统一整定校核的思路, 基于 IEC61970 标准的整定计算数据中心得到广泛关注。互联网规模不断扩大, 电网大数据的快速处理成为重要的研究课题。电网规模越大, 对节点阻抗阵的操作耗时越长^[1]。在全网模型下对局部区域整定计算时, 文献[2]提出对计算范围之外的电网自动等值化简, 从而大幅度缩小批量故障计算时的电网规模。距离整定元件越远的网络元件的变更对定值的影响越小。准确划分与研究区域定值相关的电网范围, 降低节点阻抗阵的阶数, 能够大幅度提高计算效率。

文献[3]提出缓冲网的概念。缓冲网指对内网性能起关键作用的外网元件集合。目前主要应用于电力系统稳定分析、潮流计算^[4-6]。整定计算时, 外网部分元件方式变化对内网定值影响较大, 这些元件所在厂站的集合称为整定计算缓冲网。因此指定整定区域后, 只需要对整定区域及缓冲网保留详细电网模型, 外部区域采用等值模型。

本文针对整定计算工作的特点, 提出了适于整定计算的缓冲网的生成方法。明确定义了整定计算缓冲网由配合区域和约束区域构成。首先根据边界支路确定配合区域。在带权电力网络中, 形成边权连接矩阵。利用最短电气路径查找线路最小环网结

构。利用边界节点自阻抗变化率确定厂站范围。最小环网结构和厂站范围组成了约束区域。计算机实现时利用深度搜索/回溯技术, 给出了搜索终止判据, 提高了搜索效率。最后, 给出了缓冲网自动生成流程。

1 整定计算缓冲网相关问题

1.1 带权电力网络

根据复杂网络理论^[7-8]及电力网络的实际特点, 形成带权电力网络时做如下假设:

1) 将厂站作为一个整体用对地阻抗等值表示。这样厂站视为网络节点, 厂站间输电线视为网络的边。

2) 将厂站间同杆双回线(或多回线)合并, 视为一条边, 此边的权值定义为等值过后的线路电抗值。

如无特殊说明, 本文涉及的节点阻抗矩阵、边权连接矩阵都是基于以上假设形成。不计厂站对地阻抗, n 个节点的网络边权连接矩阵 W 为

$$W = \begin{Bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中

$$w_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ X_{ij} & i \neq j, \text{ 且节点 } i, j \text{ 直接相连} \\ \infty & i \neq j, \text{ 且节点 } i, j \text{ 不直接相连} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 运行方式

保护的极端运行方式通常分别考虑线路方式和厂站方式。电力网络节点之间的联系越来越紧密, 构成了交错复杂的环网结构^[9-10]。考虑保护线路对侧、背侧以及环网解环线路的轮断, 能够满足环网整定的需求。快速判断保护线路及配合线路是否处于环网结构对于线路方式组合有重要的意义。基于 2 节点等值系统, 线路 l_{ij} 位于环网结构时满足公式(3)。

$$|Z_{ii}Z_{jj} / Z_{ij} - Z_{ji} - x_{ij}| \geq \varepsilon_1 \quad (3)$$

其中: Z_{ij} 为节点阻抗矩阵中节点 i 与 j 的互阻抗; Z_{ii} 、 Z_{jj} 分别为节点 i 、 j 的自阻抗; x_{ij} 为 l_{ij} 的电抗。若线路 l_{ij} 构成环网, 设边权连接矩阵中元素 $w_{ij} = \infty$, 利用 Floyd 算法^[11]查找节点 i 、 j 间最短电气距离, 并标识最短电气路径。则最短电气路径与 l_{ij} 构成了节点 i 、 j 间最小环网结构。

将厂站作为一个整体, 大/小方式变化转化为对地阻抗的变化^[12-14]。厂站方式变化时, 利用追加支路法, 如图 1。则

$$\Delta Z_G = Z_{Gs1}Z_{Gs2} / (Z_{Gs1} - Z_{Gs2}) \quad (4)$$

节点 i 自阻抗的相对变化量如式(5)。

$$\Delta Z_{ii} = \frac{Z_{is}^2}{Z_{ii}(Z_{ss} + \Delta Z_G)} \quad (5)$$

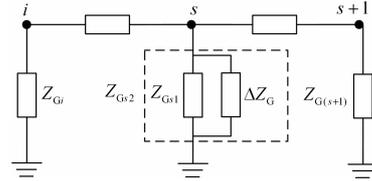


图 1 不同方式的厂站模型

Fig. 1 Model of substation in different modes

根据式(4)、式(5)得距离节点 i 越远的厂站运行方式变化对节点 i 自阻抗影响越小, 变化幅度越小的厂站运行方式变化对节点 i 自阻抗的影响越小。利用深度搜索沿网络拓扑搜索厂站组合范围, 能够减少计算量。各厂站由小方式向大方式切换, 即对地阻抗由较大值向较小值切换, 我们保留 $\Delta Z_{ii} \geq \varepsilon_2$ 的厂站, 由式(6)选择搜索终止判据为 $Z_{is} \leq \sqrt{\varepsilon_2 Z_{ii} Z_{G \min}}$ 。 $Z_{G \min}$ 为系统所有厂站对地阻抗的最小值。图 1 显示沿拓扑结构 $Z_{i(s+1)} < Z_{is}$, 显然 $Z_{i(s+1)} < Z_{is} < \sqrt{\varepsilon_2 Z_{ii} Z_{G \min}}$, 满足终止条件。

$$\Delta Z_{ii} = \frac{Z_{is}^2}{Z_{ii}(Z_{ss} + \Delta Z_G)} < \frac{Z_{is}^2}{Z_{ii}(Z_{ss} + Z_{G \min})} < \frac{Z_{is}^2}{Z_{ii}Z_{G \min}} \quad (6)$$

2 缓冲网的生成方法

2.1 缓冲网

图 2 为典型大系统的局部电网结构示意图, 利用此图来描述缓冲网生成过程中所用到的基本概念和算法术语。根据用户需求或数据中心定期更新后, 需要对选定的区域重新整定计算, 以保证定值可靠性。缓冲网思想即是确定外部电网中对整定区域元件定值影响较大的元件范围。

对缓冲网说明如下:

1) 如图 2 所示, 用户选定整定区域, 该区域元件参与整定计算、保护配合、运行方式组合功能。

2) 整定区域边界支路与外部相邻支路有保护配合关系。根据一级远后备保护典型的使用方法, 配合区域定义为围绕整定范围的外一层的所有支路及

所在厂站。需要注意的是，位于配合区域的元件不主动参与整定计算，而是与边界支路保护相互配合。

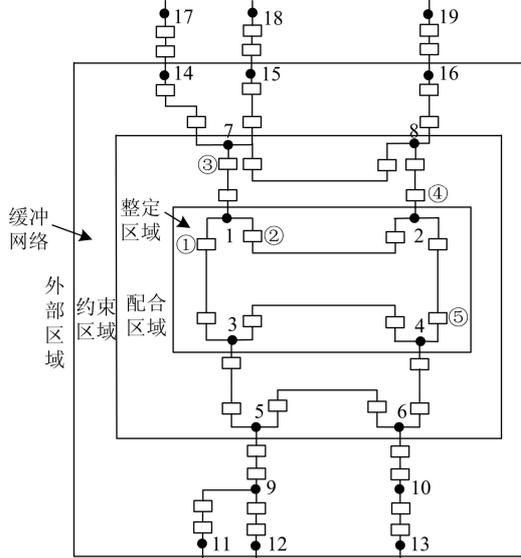


图2 典型大系统局部结构

Fig. 2 Local structure diagram of a large power grid

图中继电器③是①和②的后备保护，由于继电器③无需整定计算，因此在计算①②的一段、二段定值时需要分别与继电器③的保护二段、三段反配合。继电器②和⑤是④的后备保护，因此在计算②和⑤的二段、三段时需要分别与保护④的一段、二段配合。

3) 查找故障电流及分支系数的极值时，不可避免地要考虑保护的极端运行方式。一方面从线路方式考虑，考虑保护线路、配合线路的最小环网结构以满足环网整定需求。另一方面，从厂站方式考虑，保留对定值有较大影响的厂站，能够提高保护定值可靠性。线路环网结构与厂站范围共同组成了约束区域。该区域元件不参与整定计算，也不参与保护配合；其功能仅包括运行方式组合。具体形成过程详见下文。

4) 整定区域及缓冲网以外的电网称为外部区域，整定计算时外部区域不保留详细电网模型，仅采用等值参数模型。

2.2 生成流程

缓冲网及整定计算模型的生成流程如图3所示。

流程图中各个模块的步骤描述如下：

- 1) 读取全网参数，形成带权电力网络。从数据中心读取全网的电气参数，依据1.1节原则形成带权电力网络及节点阻抗矩阵、边权连接矩阵。
- 2) 根据用户需求，形成整定区域。根据用户提

出的整定需求或数据中心定期更新后，需要对特定区域定值重新整定计算。

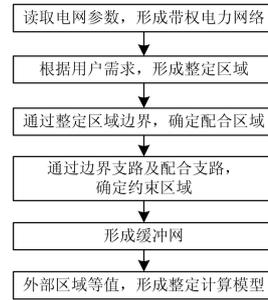


图3 缓冲网及整定计算模型生成流程

Fig. 3 Process of buffer subsystem and setting calculation model

3) 通过整定区域边界，确定配合区域。配合支路与边界支路有保护相互配合关系，以边界支路为研究对象，向外延伸一级支路，该支路及其末端节点构成配合区域。

4) 通过边界支路及配合支路，确定约束区域。考虑线路方式组合范围时，分别以边界支路、配合支路为研究对象，基于2节点等值系统判断是否构成环网，若为环网，则基于Floyd算法查找标识最短电气路径，流程如图4。

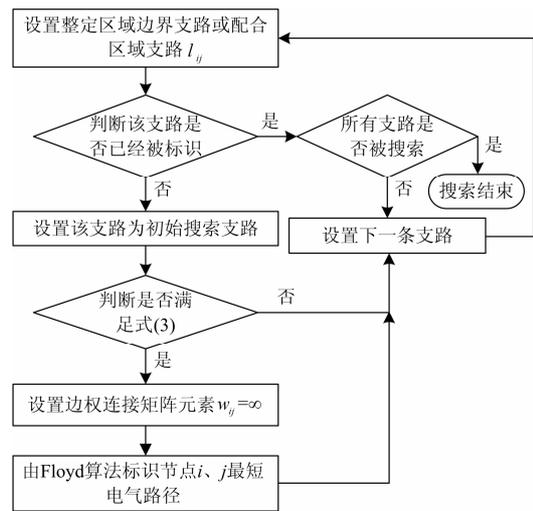


图4 线路环网标识流程

Fig. 4 Process of ring network identification

确定厂站范围时，利用深度搜索/回溯技术查找对边界节点自阻抗变化率影响大于阈值的厂站范围。图5所示流程图进一步详细描述了此过程。需要注意的是，当前节点可能不满足 $\Delta Z_{ii} \geq \epsilon_2$ ，但下一节点可能满足。因此搜索不能终止，若下一节点满足 $\Delta Z_{ii} \geq \epsilon_2$ ，判断是否标记前一节点在厂站组合范围

内; 若不在, 标识其在厂站组合范围。循环此过程至前一节点已经被标识。然后返回当前研究节点搜索下级支路, 直至满足终止判据。

5) 形成缓冲网。由配合区域和约束区域组成了缓冲网。

6) 外部区域等值, 形成整定计算模型。

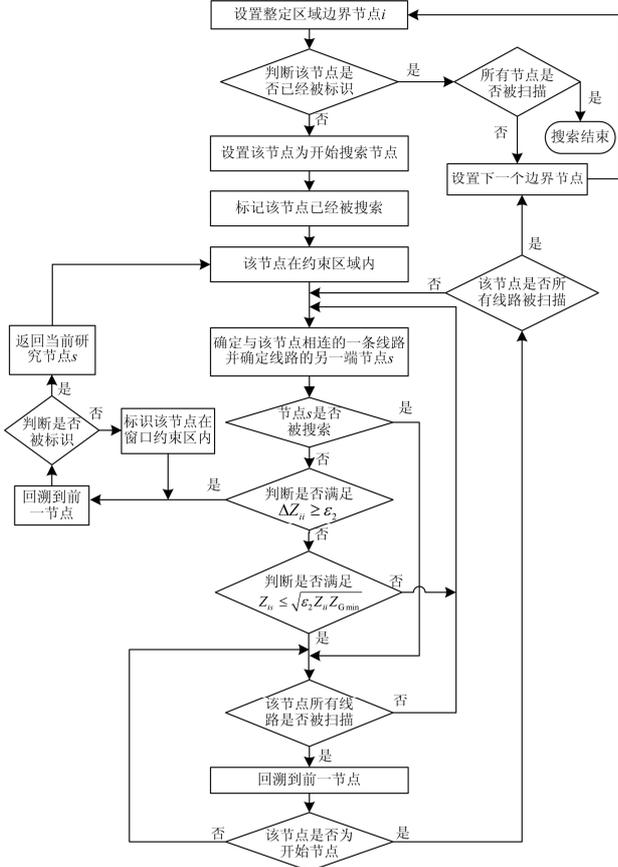


图 5 厂站组合范围标识流程

Fig. 5 Process of substation identification

3 算例分析

以图 6 所示系统为例说明缓冲网生成的步骤和过程。图中各元件参数均为正序网络标么值。厂站视作节点后, 图中标示了其地对支路小/大方式阻抗值。设置各厂站初始状态为小方式。

假定环网结构判定系数 $\varepsilon_1=0.005$, 当 $|Z_{ii}Z_{jj}/Z_{ij}-Z_{ii}-x_{ij}| \geq 0.005$ 时, 视为该支路构成了环网结构。节点自阻抗的变化率系数 $\varepsilon_2=0.05$, 当 $\Delta Z_{ii} \geq \varepsilon_2$ 时, 视为当前节点对节点 i 影响较大, 则该节点在整定计算缓冲网范围内。

指定的整定计算区域为厂站 5、6 及双回线 l_{5-6} 。根据一级远后备保护的使用方法, 选择节点 13、7 及线路 l_{5-13} 、 l_{6-7} 构成配合区域。对整定区域边界支

路及配合区域支路判断是否构成环网, 以支路 l_{5-13} 为例进行说明, 判断如下:

$$|Z_{55}Z_{1313}/Z_{513}-Z_{513}-x_{513}|=0.012>0.005$$

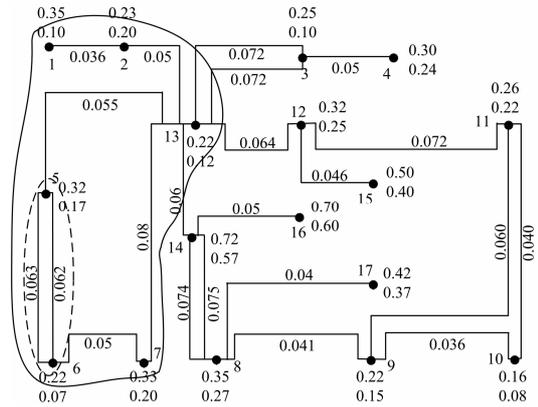


图 6 算例系统

Fig. 6 Example system

该线路构成环网结构, 在边权连接矩阵中, 置 $w_{513}=\infty$, 利用 Floyd 算法查找并标识节点 5 与 13 的最短电气路径 5-6-7-13。则最小环网结构为节点 5-6-7-13-5。

利用深度搜索/回溯技术搜索厂站范围时, 以整定区域的边界节点为研究对象, 终止判据为 $Z_{is} \leq \sqrt{\varepsilon_2 Z_{ii} Z_{Gsmin}}=0.013$ 。以节点 6 为例进行说明。设置整定区域边界节点 6, 节点 6 未被标识, 设置节点 6 为开始搜索节点, 标识节点 6 已经被搜索, 节点 6 在约束区域内, 确定与该节点相连的一条线路并确定线路的另一端节点 13。节点 13 未被搜索, 判断 $\Delta Z_{66}=0.03 < \varepsilon_2$, 判断 $Z_{613}=0.0202 \geq 0.013$ 。确定与节点 13 相连的一条线路并确定线路的另一端节点 2。节点 2 未被搜索, 判断 $\Delta Z_{66}=0.004 < \varepsilon_2$, 判断 $Z_{613}=0.015 \geq 0.013$ 。确定与节点 2 相连的一条线路并确定线路的另一端节点 1。判断 $\Delta Z_{66}=0.28 \geq \varepsilon_2$, 回溯到上一节点 2, 节点 2 未被标识, 标识节点 2 在约束区域内; 回溯到上一节点 13, 节点 13 未被标识, 标识节点 13 在约束区域内; 回溯到上一节点 6, 节点 6 已经被标识。返回当前研究节点 1, 标识节点 1 在约束区域内。节点 1 所有支路被搜索, 回溯到节点 2, 节点 2 所有支路被搜索, 回溯到节点 13。同上判断节点 12、14 不在组合范围内, 且满足终止条件。节点 6 为开始搜索节点, 设置下一个边界节点 5。最终缓冲网范围如图 6 所示。

大电网局部整定计算时, 利用最短电气路径确定边界支路、配合支路的最小环网结构, 利用边界节点自阻抗变化率确定厂站范围。缓冲网的自动生成缩小了大电网区域整定时的电网规模。

4 结论

本文提出了适于整定计算的缓冲网的生成方法。分别探讨了保护配合、线路环网结构、厂站组合范围等问题,给出了计算机自动实现缓冲网流程。大电网局部区域整定计算时,保留整定区域及缓冲网,能够大幅度降低节点阻抗矩阵阶数,提高计算效率,节约计算时间。对云计算模式下整定计算系统的开发有重要的借鉴意义。

参考文献

- [1] 李江华, 宋玮, 周庆捷, 等. 基于图模拼接的整定计算数据中心研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 9-13.
LI Jiang-hua, SONG Wei, ZHOU Qing-jie, et al. Research on setting calculation data center based on splicing of graph and model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 9-13.
- [2] 陈朝晖, 周红阳, 石东源, 等. 大型互联电网继电保护整定计算数据一体化管理系统[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 106-110.
CHEN Zhao-hui, ZHOU Hong-yang, SHI Dong-yuan, et al. Data integrated management system for relay protection setting calculation of interconnected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 106-110.
- [3] 王刚, 张伯明. 电力系统外网在线动态等值方案[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 21-26.
WANG Gang, ZHANG Bo-ming. External online dynamic equivalents of power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 21-26.
- [4] 米为民, 李立新, 尚学伟, 等. 互联电网系统分层分解时空协调建模[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 56-61.
MI Wei-min, LI Li-xin, SHANG Xue-wei, et al. An investigation on hierarchical and decomposition and space-time coordination modeling for interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 56-61.
- [5] 高伏英, 葛敏辉, 冯树海. 在线网络等值技术在华东电网的应用[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1714-1717.
GAO Fu-ying, GE Min-hui, FENG Shu-hai. Application of on-line network equivalence to East China Power Grid[J]. East China Electric Power, 2009, 37(10): 1714-1717.
- [6] 张海波, 蒋良敏, 陶文伟, 等. 实用化分布式动态潮流计算系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 68-71, 76.
ZHANG Hai-bo, JIANG Liang-min, TAO Wen-wei, et al. Design and implementation of practical distributed power flow calculation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 68-71, 76.
- [7] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 131-137.
WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.
- [8] 李刚, 王增平, 任建文, 等. 基于图论分区与改进 BFS 算法搜索安全约束集的防联锁过载控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 219-229.
LI Gang, WANG Zeng-ping, REN Jian-wen, et al. A control strategy to prevent cascading overload with security constraint set searched by graph theory partition and improved BFS algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 219-229.
- [9] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [10] 蒋科, 吕飞鹏, 郭亮, 等. 基于拓扑辨识的电力系统运行方式组合方法[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 76-80.
JIANG Ke, Lü Fei-peng, GUO Liang, et al. Combinatorial method for power system operation modes based on topology identification[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 76-80.

- [11] 肖位枢. 图论及其算法[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
XIAO Wei-shu. Graph theory and its algorithms[M]. Beijing: Press of Aeronautical Industry, 1993.
- [12] 刘敏, 石东源, 柳焕章, 等. 线路零序电流保护计算机整定中运行方式的选择[J]. 继电器, 2000, 28(3): 15-17, 25.
LIU Min, SHI Dong-yuan, LIU Huan-zhang, et al. The decision of operating mode in setting of zero sequence current relay of line aided by computer[J]. Relay, 2000, 28(3): 15-17, 25.
- [13] 周文越, 吕飞鹏, 李鹤. 基于遗传算法的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 51-55.
ZHOU Wen-yue, Lü Fei-peng, LI He. Method for the combination of power system operation mode based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 51-55.
- [14] 李运坤, 吕飞鹏, 蒋科, 等. 基于最短电气距离的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 24-27, 37.
LI Yun-kun, Lü Fei-peng, JIANG Ke, et al. Method for power system operation mode combination based on shortest electrical distance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 24-27, 37.

收稿日期: 2013-07-01; 修回日期: 2013-10-09

作者简介:

王晓菠(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与安全控制; E-mail: bobcrazy@163.com

温靖华(1968-), 女, 高级工程师, 从事继电保护整定计算与运行管理工作;

李崇瞻(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与安全控制。