

基于广义节点的配电网区域控制划分

张新昌, 张项安, 刘星

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 由于配电网节点和线路数多, 所以为了更好地实现配电网集中式差动保护, 有必要将电网进行分区控制, 以适应集控中心对信息采集和处理的要求。将配电网转化成带权的广义节点的网络, 然后从图论的角度对配电网进行抽象, 根据各广义节点间的拓扑结构来进行分区。通过利用“吸收法”对电网抽象图模型进行不断的简化和解环处理, 最终将复杂电网分割成若干个广义节点的集合, 即分割成若干个控制区域。

关键词: 智能配电网; 网络保护; 电网分区

Partition operation on distribution network based on theory of generalized node

ZHANG Xin-chang, ZHANG Xiang-an, LIU Xing

(XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to make the centralized differential protection methods being better applied, it is necessary to control the distribution network partition to adapt the request of data acquisition and processing, since the number of buses and branches are large in the distribution network. This paper transforms the distribution network into a weighted network of generalized nodes, and then abstracts it in the view of graph theory. The network is partitioned according to the topological structure of each node. A new theory called Absorbing Method is put forward to simplify the abstract model of distribution network and deal with it by looped network continuously, through which a complex network is partitioned into some generalized node regions.

Key words: intelligent distribution network; network protection; distribution network partition

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0122-06

0 引言

近几年来, 随着分布式电源在配电系统中的大量接入, 配电网的结构和潮流分布发生了很大变化, 使得传统的继电保护常常不能及时、准确地发生动作。随着光纤技术的发展, 保护技术有了显著发展^[1-3]。文献[4]提出了一种基于 Multi-Agent 的面向智能配电网的保护和控制方法。文献[5]提出了一种适用于配网的基于电流差动原理的集中式保护控制概念与系统架构, 广域集中式保护得以实现, 也为解决上述问题带来了契机。为了实现配电网集中式差动保护, 需要将电网进行分区控制, 以适应集控中心对信息采集和处理的要求。

长期以来, 电力系统分区域控制的方法主要针对潮流计算维度、短路电流限制、电压无功优化等目标来进行, 针对于保护控制的分区研究较少。文献[6-10]均提出了电网保护控制分区概念和方法, 在一定程度上提高了保护效率, 适应了现代电网的发

展趋势。然而, 基于上述文献的分区方法, 还存在诸如此类的问题: 各分区节点的连通性无法得到保障; 各区域间的重叠较大, 分区数较多等。

因此, 在上述研究现状的基础上, 本文针对广义节点法建立了配电网抽象模型, 将配电网转化成带权的广义节点网络, 然后从图论的角度对配电网进行抽象, 根据各广义节点间的拓扑结构来进行分区。通过利用“吸收法”对电网抽象图模型进行不断的简化和解环处理, 最终将复杂电网分割成若干个广义节点的集合, 进而实现配电网的分区域保护控制。

1 控制区域划分原则

为了使各个控制中心处理数据相对独立, 并且保护可靠, 保护分区应该有如下三个基本原则:

第一, 应该使连接两个区的连接支路最少, 并且连接支路两端应该都有测点。为了使跨区的连接支路的保护可靠, 该支路两端所有测点的测量信息

要同时发往两个区。为减少通信, 跨区的连接支路应该尽量少。

第二, 使每个区的节点数相差不多。这样可以使每个区处理的数据量相近, 通信量分配较均衡。

第三, 各个分区之间交界处的广义节点同时归属于这些分区。即跨区连接支路的广义节点作为其相邻节点的后备保护, 要求它归属于相邻广义节点所在的区。这是由于信息传递存在中断、干扰等问题, 会存在误差或出现错误信号的情况。因此, 边界节点同时归属于相邻的分区, 可以增加控制的可靠性。

如图 1 所示, 跨区连接的广义节点 GN2 是 GN1 和 GN3 的后备保护。为增加可靠性, 要求 GN2 既归属于 GN1 所在的 1 区, 也归属于 GN3 所在的 2 区。此时如果 GN1 故障时, 可以只由 1 区控制 GN2 动作; GN3 故障时亦然。

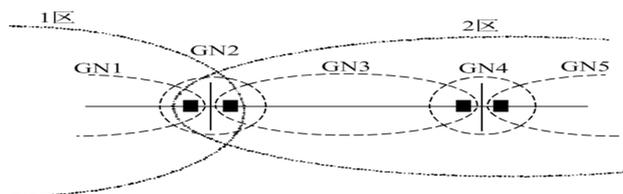


图 1 电网分区图示

Fig. 1 Schematic diagram of network partition

2 基于广义节点的配电网抽象模型

广义节点法按照保护区域将网络划分成多个基本单元, 相邻广义节点可互相作为后备保护, 文献[8]的基本思路为: 假设在任意一个地方发生故障, 包围故障的最小测点集合组成一个保护动作的广义节点。

由于保护是以广义节点为基本单元, 一个广义节点不应该被分割在两个分区。为保证这一点, 建立基于广义节点的配电网抽象模型, 即将每个广义节点的集合都抽象成一个点, 放弃原来网络中节点之间的连接长度, 而是根据广义节点的拓扑结构进行抽象。相邻的两个广义节点之间用一条线路进行连接, 称为广义支路, 表示连接支路的两端互为备用保护。如此抽象之后的网络图保留了原网络的结构, 简化了保护和保护之间的关系。将图 1 转化成配电网抽象模型如图 2 所示。

通过对广义节点的区域划分, 最后将在广义节点上产生断点。被断点包围以及断点上的所有广义节点归属于同一个区, 断点上的广义节点同时归属于断点相邻的所有区域。如图 2 所示, 断点左侧和断点上的节点 GN1、GN2 为一个区 (1 区), 断点

右侧和断点上的节点 GN2、GN3、GN4、GN5 为一个区 (2 区); 断点上的广义节点 GN2 的所有测点同时归属于两个区域, 称为跨区连接的广义节点。

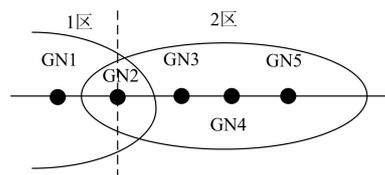


图 2 配电网抽象模型

Fig. 2 An abstract model of distribution network

3 用“吸收法”对网络化简

在对抽象模型分区前, 首先需要进行网络化简以达到如下两个目标: 1、将网络化简成无环网; 2、所有度为 1 的广义节点不与度为 2 的广义节点相连。

3.1 辐射支路的吸收

一个广义节点吸收另一个广义节点, 就是将自身覆盖在另一个广义节点的位置, 而保持度不变, 权值为两个广义节点权值和的过程。如图 3 所示, 广义节点 GN2 被 GN1 吸收之后, 其位置被 GN1 占用, GN1 的度不变, 权的增加量为 GN2 的权值 W_2 , 新权值为 $W_1 + W_2$ 。

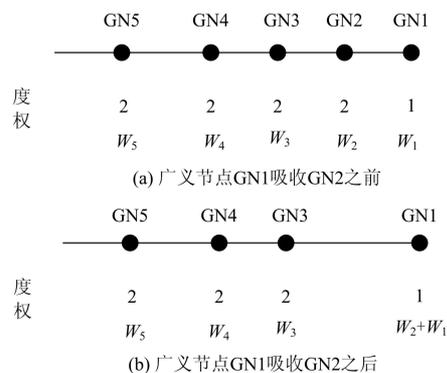


图 3 辐射支路的吸收示例

Fig. 3 An example of absorbing method in radiation branches

3.2 环网的处理

对环的处理思想为: 对于小环网, 将其整体视为一个被吸收了广义节点; 对于大环网, 将其解环。当网络中有环时, 若一个环所包含的所有节点和支路的任意真子集不能构成环, 则称这个环为网络的眼。下面讨论的环都针对眼来进行。若由 n 个节点构成的网络, 所有节点的度的和为 n_t , 则网络包含眼的个数 n_0 满足式(1)的关系。

$$n_0 = \frac{n_t}{2} - n + 1 \quad (1)$$

式(1)说明, 对一个含环的网络, 若逐个环进行处理, 需要循环 n_0 次。寻找一个眼的方法是, 在网络图中随机生成树, 则图中的每个连支都能与树支构成环; 选取最小环, 则这个环就是图的一个眼。设第 i 个环上节点度数不为 2 的节点有 n_{n2} 个, 环上所有节点权的和为 W_i 。凝聚判别式可以用式 (2) 表示。

$$W_i \leq \frac{W_\Sigma}{N} \quad (2)$$

式中: W_Σ 为权值的和; N 为拟分区的个数。若 W_i 满足式 (2), 则将此环化为一个“凝聚节点”, 其权为 W_i 。建立“凝聚节点-支路表”来保存该凝聚节点对外连接的支路, 建立“凝聚节点表”来保存此凝聚节点。若 W_i 不满足式 (2), 则可以在环上寻找位于地理上的行政管辖区交界处或在稳态计算时的潮流值较小的特定位置标记断点, 并保留断点及权值。如图 4 所示, 若图 4 (a) 中的环上节点权值和满足式 (2), 则凝聚成新的节点 GN6; 若不满足式 (2), 则选择一个广义节点处断开, 如图 4 (b) 所示。

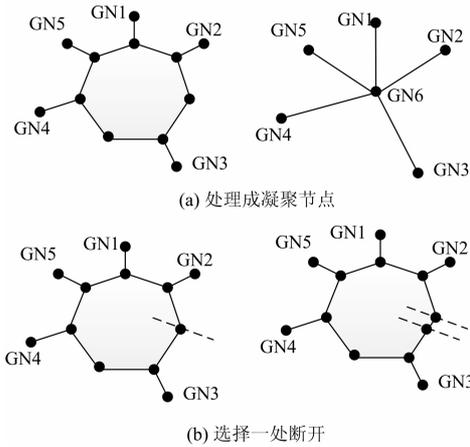


图 4 对环网的处理方式示例

Fig. 4 Schematic diagram of method to treat looped network

3.3 网络化简流程

对于由 n 个节点, m 条支路构成的网络, “吸收法”网络化简步骤如下。

(1) 输入数据, 形成广义节点和广义支路的查询表, 并对各节点的权重初始化。初始化方法很多, 原则是: 令度较大或包含测点数量多的广义节点权偏小, 并综合考虑线路长度、节点重要程度等; 对需要保证控制可靠性的节点, 赋予较大的权值。当数据资料不详时, 可按式(3)设置, 其中 du 表示各个节点的度。

$$W_i = \frac{\sum du}{du_i} \quad (3)$$

(2) 末端节点吸收。从末端节点开始, 若其相邻节点为度为 2 的节点, 则取消该节点, 并将该节点的权叠加到末端节点上, 即末端节点“吸收”了该节点。直到与末端节点相邻的是度大于 2 的节点为止。按此方法依次处理所有末端节点。

(3) 对环的处理。利用式 (1) 来判断当前的网络中是否有环。若无环, 化简过程结束; 若有环, 进行适当的环处理, 然后返回到步骤 (2) 中。

4 网络的分区方法

当原始网络经过化简之后, 将得到一个无环网, 且所有度为 1 的节点只与度大于 2 的节点相连。通过这种化简, 可以使后续的分区工作从网络的边缘开始, 逐渐向拓扑中心吸收, 直到某一时刻, 某节点吸收后的权值大于某个阈值时, 就将这个节点从网络中断开, 成为一个分区。

假设简化图有 n_{jh} 个节点, m_{jh} 个支路构成, 所有节点的权的和为 W_Σ , 需要分 N 个区。分区的方法是, 考察每个末端节点, 如果权值大于某个阈值 W_A , 则将其从网络中断开, 划为一个区; 否则考察其与相邻次末端节点的权值和, 若小于某阈值 W_B , 则吸收该次末端节点; 将 W_A 适当减小, W_B 适当放大, 重复上述判断, 直到分区数达到拟定分区数为止。最后, 被断点包围及在断点上的广义节点被认定为属于同一个区域。

分区的步骤如下:

(1) 令 $i = 0$;

(2) 考查每个末端节点, 若其权值 W_i 满足 $W_i \geq W_A$, 则立刻将此末端节点断开, 标记此节点连接的支路为断点, 将此节点从图中移走, 即它对外的连接支路数为 0。如果图上现有的每个节点的对外连接支路数都为 0, 则分区结束; 否则进行步骤 (3)。 W_A 的计算公式如式 (4) 所示。

$$W_A = (1.15 - 0.1i) \times \frac{W_\Sigma}{N} \quad (4)$$

(3) 考察每个次末端节点, 若它与它连接的权值最小的次末端节点的权值和 W_i 满足 $W_i < W_B$, 则令该末端节点吸收它连接的次末端节点。处理完所有次末端节点后, 令 $i = i + 1$ 并返回步骤 (2)。 W_B 的计算公式如式 (5) 所示。

$$W_B = (0.7 + 0.2i) \frac{W_\Sigma}{N} \quad (5)$$

经过上述步骤, 可将无环网划分为 N 个区。

5 电网分区的算例分析

假设电网结构如图 5 所示, 要求划分为三个控制区域。图中黑色实心方框表示有测量和保护装置。

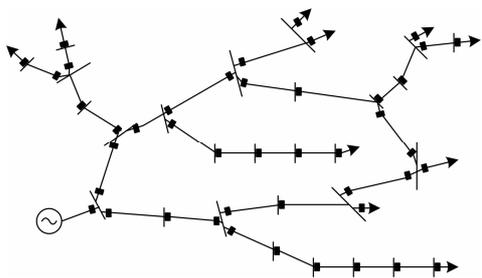


图 5 一个虚拟的配电网网络图

Fig. 5 A virtual power system

根据文献[8]对广义节点的划分, 得到该电网各个广义节点的划分结果, 如图 6 所示。

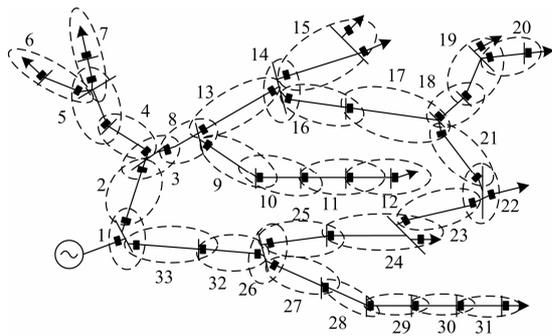


图 6 对原网络划分广义节点的结果

Fig. 6 Result of partition generalized nodes

首先, 建立基于广义节点的电网抽象图模型。这里将广义节点用空心的黑色圆点表示, 节点半径的大小近似代表该节点的权值, 空心内的数字代表节点权值的大小, 初始权值不用数字表示。原始网络的抽象图模型如图 7 所示。

对各个节点进行权重初始化, 这里令第 i 个节点的初始权值 W_{i0} 满足式 (6)。

$$W_{i0} = \frac{6}{du_{i0}} \quad (6)$$

利用“吸收法”进行网络化简。首先进行末端节点吸收过程。此过程中, 末端节点 12、20、31 分别依循所在的支路向前吸收, 并且自身的权值不

断增大。吸收完毕后的结果如图 8 所示。

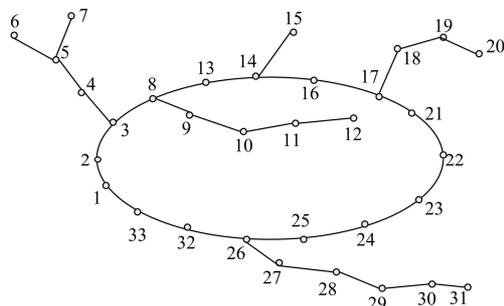


图 7 基于广义节点的电网抽象图模型

Fig. 7 Abstract model of distribution network based on generalized nodes

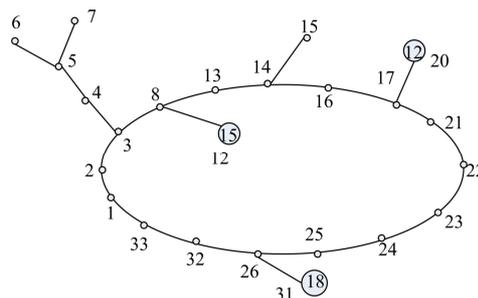


图 8 末端节点吸收结果

Fig. 8 Result of absorbing end nodes

然后执行对环的处理。由于该网络的环上权值和较大, 所以需要解环。在某一广义节点上标记断点, 将其断开, 如图 9 所示。

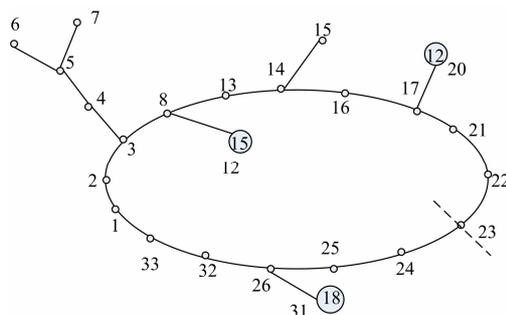


图 9 环处理后的结果

Fig. 9 Result of the treatment on looped network

再次进行末端节点吸收, 将断点处的末端节点 23 分别沿着两个支路向前吸收, 吸收结果如图 10 所示。

网络化简后, 进行分区操作。在分区步骤 (2) 中依次判断各个末端节点是否满足分割条件, 此时发现均不满足条件, 执行分区步骤 (3)。分别考察

次末端节点 26、5、8、14、17，发现它们满足对末端节点的吸收条件，吸收结果如图 11 所示。

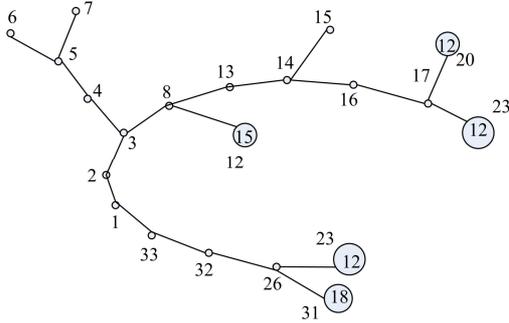


图 10 末端节点吸收结果

Fig. 10 Result of absorbing end nodes

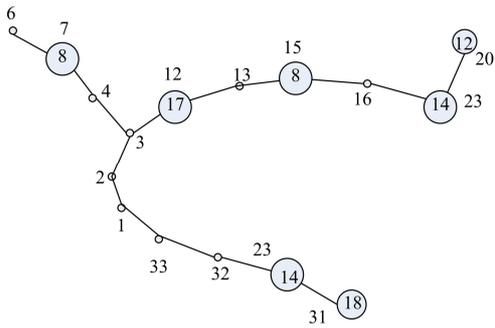


图 11 次末端节点吸收结果 1

Fig. 11 First result of absorbing penultimate nodes

再次执行分区操作 (2)，此时仍不能满足分区条件，继续执行分区步骤 (3)，结果如图 12 所示。

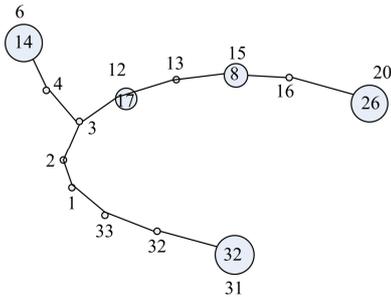


图 12 次末端节点吸收结果 2

Fig. 12 Second result of absorbing penultimate nodes

反复进行分区操作的循环过程，将使得广义节点 6、20、31 不断向内吸收，直到如图 13 情况下时，末端节点 20、31 满足分区的条件，在对应的次末端节点 1、13 上标记断点，将 20、31 分离出去，成为两个独立的分区。此时节点 20、31 对外连接的支路数为 0。

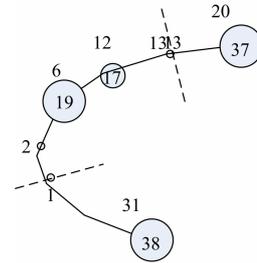


图 13 分区操作

Fig. 13 Operation of partition

此时由于网络中还存在支路，需要继续执行分区操作 (3)，最终将网络中所有支路全部吸收进去，使网络变成 3 个独立的节点，各节点的权值分别为 43、44、51，如图 14 所示。

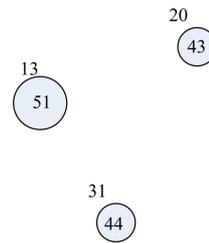


图 14 循环执行分区操作

Fig. 14 Loop execution of the partition operation

此时断点已被全部标记并保存下来。根据分区历史，可以发现断点分别标记在广义节点 1、13、23 上，如图 15 所示。

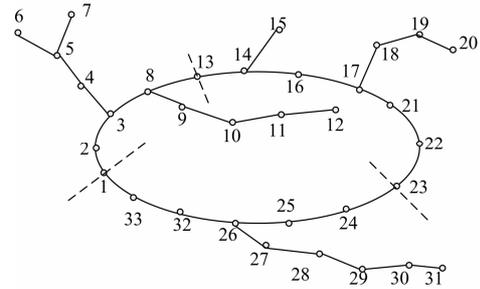


图 15 断点的标记结果

Fig. 15 Results of selecting disconnections

因此广义节点 1、13、23 为跨区连接的广义节点，同时归属于它们所邻接的分区。将结果还原到原网络图中，最终的分区结果如图 16 所示。图中红色方框表示这些分区之间邻接处的保护，其测量和控制信息将同时与相邻的两个分区通信。

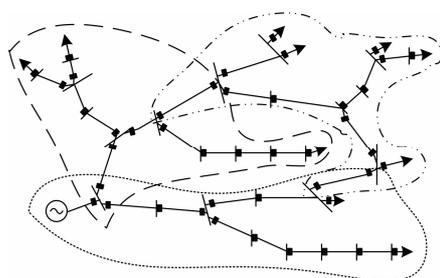


图 16 最终的分区结果

Fig. 16 Final result of the partition operation

6 结论

基于广义节点的集中式差动保护能够实现全线速动, 但对于大规模网络需要分区域进行控制。本文提出了网络分区的主要原则, 并从图论的角度, 将配电网简化为带权的广义节点网络, 并通过利用“吸收法”对电网抽象模型进行不断的简化和解环处理, 最终将复杂电网分割成为若干个控制区域。

参考文献

- [1] 朱林, 段献忠, 苏盛. 基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 154-161.
ZHU Lin, DUAN Xian-zhong, SU Sheng. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 154-161.
- [2] 李振兴, 尹项根. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [3] 汪旸, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 174-179.
WANG Yang, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 174-179.
- [4] 庞清乐, 高厚磊, 杜强, 等. 面向智能配电网的保护与控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 28-32.
PANG Qing-le, GAO Hou-lei, DU Qiang, et al. Protection and control method for smart distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 28-32.
- [5] 张项安, 张新昌, 李卫星, 等. 基于差动保护的配电网

闭环运行方式探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 102-106.

ZHANG Xiang-an, ZHANG Xin-chang, LI Wei-xing, et al. On the closed-loop operation mode for differential protection-based distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 102-106.

- [6] 徐贤, 丁涛, 万秋兰. 限制短路电流的 220 kV 电网分区优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 98-101.
XU Xian, DING Tao, WAN Qiu-lan. 220 kV power grid district-dividing optimization for limiting fault current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 98-101.
- [7] 尹雁和, 陈少华. 含分布式电源的配电网分区保护[J]. 电工电气, 2011(3): 34-37.
YIN Yan-he, CHEN Shao-hua. Division protection of distribution network with distributed generation[J]. Electrical Apparatus, 2011(3): 34-37.
- [8] 蒋屹. 基于电网图论理论的广域电流差动保护区划分的分析[J]. 岳阳职业技术学院学报, 2008(4): 89-91.
JIANG Yi. Analysis on extensive electricity balance protection on basis of graph theory[J]. Journal of Yueyang Vocational Technical College, 2008(4): 89-91.
- [9] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 有限广域继电保护系统的分区原则与实现方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 48-52.
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Zone division and implementation on limited wide area protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 48-52.
- [10] 张项安, 谭骞, 刘星, 等. 基于广义节点的配电网集中式差动保护方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 111-116.
ZHANG Xiang-an, TAN Qian, LIU Xing, et al. Research on the distribution networks centralized differential protection method based on generalized nodes[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 111-116.

收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2014-02-26

作者简介:

张新昌 (1962-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化、分布式发电与微电网技术、电动汽车充换电技术; E-mail: xinchangzh@xigc.com

张项安 (1968-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化;

刘星 (1972-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化。