

一种配电网故障恢复快速拓扑和潮流计算方法

范瑞娟¹, 王倩¹, 罗强²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 针对配电网故障恢复的特点, 提出了一种快速拓扑分析和潮流计算方法。首先利用 SQL 关系数据库存储配网的连接关系和节点、支路信息, 方便数据维护, 提高拓扑重构的灵活性, 在故障分析时, 将数据库中的配网信息加载到内存中形成面向对象的实时数据库。然后运用广度优先搜索法进行拓扑分析, 并结合前推回代法进行潮流计算。最后采用基于 QT 的 C++ 实现用 GUI 界面显示拓扑和潮流计算结果。结果表明: 该算法能快速正确检测配网的连通性、判断是否存在环路或孤岛; 同时具有良好的数据维护性, 计算速度快。

关键词: 配电网故障恢复; 面向对象数据库; 广度优先搜索法; 前推回代法; GUI

A fast topology analysis and power flow calculation algorithm for distribution network service restoration

FAN Rui-juan¹, WANG Qian¹, LUO Qiang²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming to the distribution network service restoration, this paper proposes a fast topology analysis and power flow calculation method. Firstly, the distribution network structure is stored by SQL relational database. The data maintenance can be convenient and the topology reconstruction can be highly flexible. Both of the node list and branch list store the data loaded from a relational database, which forms the object-oriented real-time database. Then the topology based on the breadth first search method is analyzed, and the power flow combined with the forward and backward substitution method is calculated. Finally, based on C++ programme on QT, the results of topology analysis and power flow on GUI are provided. Results show that the algorithm can quickly detect the distribution network connectivity, judge whether there are loops or isolations, and calculate fast on the premise of the convenient data maintenance.

Key words: distribution network service restoration; object-oriented real-time database; breadth first search method; forward and backward substitution method; GUI

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0023-06

0 引言

配电网故障恢复是发生故障时, 搜索开关操作策略, 恢复对非故障停电区的供电^[1], 而开关状态改变使网络结构和潮流方向发生变化。因此, 拓扑分析和潮流计算在故障恢复中不断被调用判断网络能否正常运行, 是实现故障恢复的基础^[2]。

配电网拓扑分析不仅要反映网络的连接关系还要得出潮流方向和层次关系, 为潮流计算提供数据。常用配电网拓扑分析方法分为矩阵法和搜索法^[3], 文献[4-5]采用了矩阵表示配电网分层的问题, 虽结构简单, 分析过程清晰, 但是随着配网规模增大, 计算量成倍增长, 内存占用量大, 计算缓慢, 而且现

有矩阵法不能直接反映配网潮流方向和层次结构。

文献[6]利用图状结构进行配电网建模, 采用邻接矩阵存储和深度优先遍历算法动态监测配网拓扑, 并编程用图形用户界面(GUI)显示拓扑结果。但采用邻接矩阵重用性较差^[7]; 实际上, 故障恢复中配网是辐射型结构, 利用树状结构建模更适合, 文献[8]将配网等效为树建模, 并采用关系数据库存储, 方便数据重用和维护但访问速率比较慢, 影响计算效率; 文献[9]利用孩子-兄弟的链表将配电网拓扑数据存储在内存中, 访问速度较快, 但是数据维护不方便。本文针对以上问题, 用数据库存储配网的基础结构数据, 然后将节点、支路信息加载到内存形成面向对象的实时数据库, 再运用广度优先搜

索法拓扑分析, 结合前推回代法进行潮流计算, 从而在方便数据重用和维护的同时, 提高计算速度。

1 配电网简化建模

配电网拓扑分析首先要将配网简化为数学模型方便分析。配电网故障恢复中的拓扑分析都是指站外的拓扑分析, 即对站外配网简化, 站外配网的主要元件是馈线, 根据 IEC61968 对馈线的定义^[10], 将变电站或者开闭所看成馈线的电源点, 将负荷、分布式电源、与另一条馈线相联的联络开关看成终点, 而馈线本身包括将馈线分成馈线段的分段开关、馈线段、联络开关等, 配网模型如图 1 所示, 其中, $S_1 \sim S_9$ 是馈线变压器供出的负荷, T 节点为无功功率损耗节点。将图 1 中的电源点 A、T 节点、配电变压器和负荷等效为节点, 电源节点供出的功率、流过 T 节点的功率和配电变压器供出的负荷表示为节点的权, 配电线路、分段开关和联络开关等效为边, 开关的开合用边的连接与否表示, 边上所有线路损耗表示为边的权。等效图如图 2, 其中: T 节点的等效用节点融合法, 将图 1 中负荷 3~9 等效为节点 345、67 和 89 后, 将图中 T 节点和 345、67、89 节点融合为新的 T0 节点, 此时, 新的 T0 节点的损耗就是负荷 3~9 之和, 即为 T0 节点的权; S_A 为电源供出的功率; $S_{12} = S_1 + S_2$; $S_{67} = S_6 + S_7$; $S_{89} = S_8 + S_9$; $S_{345} = S_3 + S_4 + S_5$; $S_{T0} = S_{345} + S_{67} + S_{89}$; 实线表示开关闭合; 虚线表示开关断开。

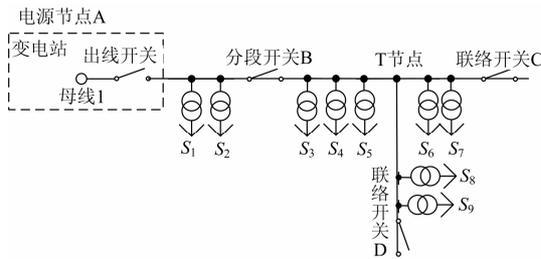


图 1 配网模型

Fig. 1 Distribution network model

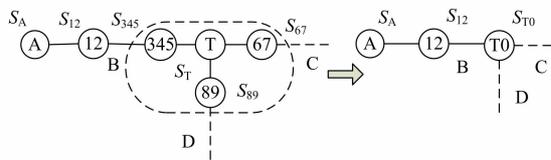


图 2 配网拓扑分析等效模型

Fig. 2 Simplified distribution network topology analysis model

2 配电网拓扑数据录入与存储

配电网简化后, 将配网的拓扑信息通过友好的

人机界面录入并采用 SQL 关系数据库存储, 方便拓扑分析和潮流计算。本文涉及的主要数据库表分别是节点表和支路表, 表单设计如表 1 和表 2。

表 1 节点数据库表单

Table 1 Node database table

名称	字段	数据类型	主键	非空
节点编号	node_id	int	√	√
节点电流实部	current_real	real		
节点电流虚部	current_imag	real		
节点电压实部	voltage_real	real		
节点电压虚部	voltage_imag	real		√
节点有功功率	power_real	real		
节点无功功率	power_imag	real		
是否为电源	is_source	bool		√
节点类型	node_type	int		√
节点 x 位置	px	int		√
节点 y 位置	py	int		√

表 2 支路数据库表单

Table 2 Branch database table

名称	字段	数据类型	主键	非空
支路编号	brand_id	int	√	√
支路状态	status	bool		√
支路电阻	impedance_real	real		
支路电抗	impedance_imag	real		√
支路首端节点号	front_id	int		√
支路末端节点号	rear_id	int		√

然后在 Qt 上编程建立 GUI 窗口, 分别建立“节点”和“支路”菜单, 下拉列表包括“新建节点(或支路)”、“编辑节点(或支路)”, “删除节点(或支路)”菜单命令, 并对应各自的对话框, 用来新建、编辑和删除节点(或支路), 对话框分别包含要输入、编辑和删除的节点(或支路)信息, 如图 3 所示为新建节点对话框。通过将保存、删除或者其他按钮与数据库相应的操作函数对应, 实现直接通过对话

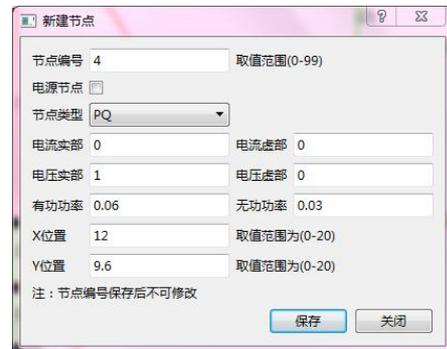


图 3 新建节点对话框

Fig. 3 New node dialog box

框改变数据库中的数据。当配网的结构包括节点和支路信息改变时, 只需通过对话框改变数据, 与矩阵法要重新生成矩阵相比, 数据维护简单, 重用性高。

在拓扑分析和潮流计算前, 为了提高计算速度, 将 SQL 数据库中的配网信息加载到内存中形成面向对象的实时数据库, 提高数据的访问速度。其主要的对象类为节点类和支路类分别如下:

```
class Node //节点类
{
    int nodeId; //节点编号
    Complex current; //节点电流
    Complex voltage; //节点电压
    Complex power; //节点功率
    double px,py; //节点位置
    bool isSource; //是否是电源节点
    int sourceId; //节点电源编号
    NodeType nodeType; //节点类型
    int flag; //节点标志
    Brand *brands[BRAND_COUNT]; //与节点相连支路};

class Branch //支路类
{
    int branchId; //支路编号
    bool status; //支路状态
    Complex impedance; //支路阻抗
    Complex current; //支路功率
    Complex fPower; //支路首端功率
    Complex rPower; //支路末端功率
    int frontId; //支路首端节点编号
    int rearId; //支路末端节点编号
    bool flag; //支路标志
    void exchangeNode(); //支路首末节点调换函数};
```

然后定义节点列表类和支路列表类存放多个节点和支路地址, 运用数据库操作函数将节点、支路信息加载到相应列表中, 并且按节点和支路编号存放相应节点和支路信息, 即节点(或支路)编号就是节点(或支路)在列表中的位置, 这样可以便于实时内存对象的快速检索。

3 配电网拓扑分析

配电网故障恢复中的拓扑分析包括连通性分析、环路和孤岛的判断, 同时反映层次结构和潮流方向。配网闭环设计、开环运行^[11], 在故障恢复中拓扑分析检测出环路时, 不进行潮流计算, 只需要重新搜索无环路恢复路径, 即故障恢复中配网是辐射型网络结构, 与计算机技术数据存储结构中的树

结构相似, 另外, 树能反映配网的层次结构和潮流方向, 因此, 将配网看成根节点是电源节点的树。当配网是多电源网络, 将配网等效为多棵树。

本文运用广度优先搜索算法进行配网拓扑分析, 节点类中的“flag”标志节点是正常、环路和孤岛, “sourceId”标志节点所属树, 支路类中的“exchangeNode()”函数改变支路的潮流方向, 将拓扑分析结果的树结构(包括层次关系和潮流方向)存入节点队列 NodeQueue 和支路队列 BranchQueue。基于广度优先搜索算法的配网拓扑分析流程如图 4。

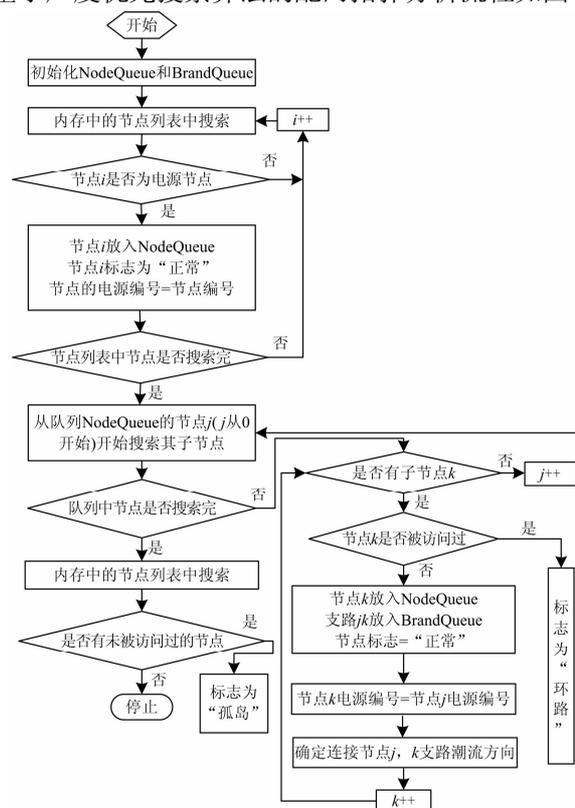


图 4 配网拓扑分析流程图

Fig. 4 Topology analysis process of distribution network

4 配电网潮流迭代计算

本文采用前推回代法进行潮流计算, 基本原理^[6]是: 已知配网的层次结构, 末端负荷和根节点的电压, 以馈线为计算基本单位, 设全网电压为额定电压, 根据负荷功率由最后一层向上一层逐层推导支路电流; 再根据给定的始端电压和求得的支路电流, 由第一层向下一层逐段计算各段的电压降, 求得各点电压, 如此反复, 直至各个节点的电压率偏差满足容许条件为止。下面根据拓扑分析结果队列 NodeQueue 和 BranchQueue, 进行潮流计算的具体步骤如下。

第一步：各节点电压初始值 $\dot{U}_i(0)$ 为 1， $i=1,2,3,\dots,n$ ， n 为配网总节点数。

第二步：如果配网存在多个电源，根据节点电源编号和层次关系，提取每棵树；否则跳过此步；

第三步：分别对每棵树进行前推计算。利用式 (1)，从树的最底层末梢节点开始向上一层推算支路的电流；

$$\dot{I}_j(0) = \frac{S_j^*}{U_j^*(0)} + \sum \dot{I}_j(0) \quad (1)$$

其中： $\dot{I}_j(0)$ 为支路 j 的电流； $\sum \dot{I}_j(0)$ 为本次推算节点 j 的所有下一层支路的电流总和，末梢节点这项为 0； S_j^* 为节点 j 负荷功率的共轭。

第四步：回代计算。利用式 (2) 从树的根节点开始向下一层回代计算各节点电压；

$$\dot{U}_j(1) = \dot{U}_i(0) - \dot{Z}_j \dot{I}_j(0) \quad (2)$$

其中： $\dot{U}_j(1)$ 为第一次回代节点 j 的电压； $\dot{U}_i(0)$ 为上次迭代节点 j 对应的上一层节点 i 的电压； \dot{Z}_j 和 \dot{I}_j 分别表示支路 j 的电流和阻抗。

第五步：判断两次迭代的电压差是否满足 $\Delta U = |\dot{U}_j(1) - \dot{U}_i(0)| < \varepsilon$ ，如果不满足则跳到第二步进行下一次迭代，直到满足条件；如果满足则输出最后一次迭代结果。

5 算例

5.1 拓扑分析仿真

在 Qt 上用 C++ 编程实现用 GUI 界面显示拓扑分析结果，窗口的右侧用图形显示配网的连接关系，并标志节点和支路类型，左侧显示拓扑分析结果。分别对单电源的 IEEE33 节点和多个电源的 IEEE16 节点配网系统进行拓扑分析，这两个系统参数见文献[12]。正常情况下 33 节点和 16 节点系统如图 5 和图 6，图 5 中节点 0 和图 6 中节点 1、2、3 为电源节点。将正常 33 节点系统中的节点 17 设为电源节点，支路 34 闭合，支路 21 断开，进行拓扑分析，分析结果如图 7，存在孤岛和环路；将正常 16 节点系统中的支路 11 断开，支路 14 闭合，进行拓扑分析，分析结果如图 8，存在孤岛和环路。

5.2 潮流计算仿真

分别用本文方法，文献[8-9]的方法在同一台计算机上对正常的 33 节点和 16 节点系统运用前推回代法进行潮流计算，收敛精度为 10^{-5} ，计算结果相近，表 3、表 4 所示为本文方法计算的部分结果，但是运行时间有所不同，如表 5 所示。

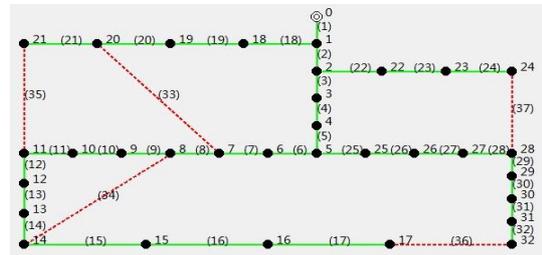


图 5 IEEE33 节点系统

Fig. 5 The 33 nodes distribution network

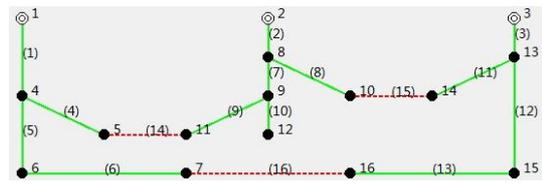


图 6 IEEE16 节点系统

Fig. 6 The 16 nodes distribution network

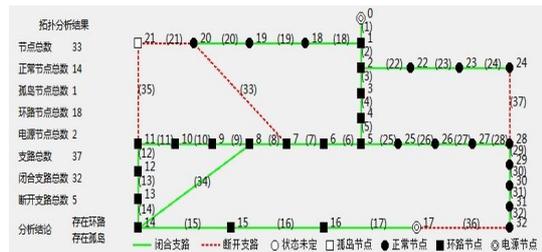


图 7 33 节点系统拓扑分析结果

Fig. 7 The 33 nodes distribution network topology results

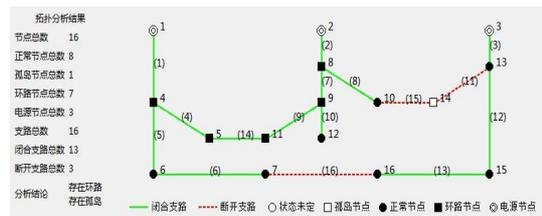


图 8 16 节点系统拓扑分析结果

Fig. 8 The 16 nodes distribution network topology results

表 3 16 节点系统潮流计算支路电流结果

Table 3 Branch current of the 16 nodes system

支路编号	支路电流 幅值/p.u	支路编号	支路电流 幅值/p.u
1	0.084 762 2	8	0.013 862 00
2	0.181 333 0	9	0.006 352 58
3	0.062 683 2	10	0.051 714 50
4	0.034 027 0	11	0.012 346 70
5	0.026 680 8	12	0.036 915 40
6	0.019 531 3	13	0.002 362 54
7	0.118 410 0	--	--

表 4 33 节点系统潮流计算节点电压结果

Table 4 Node voltage of the 33 nodes system

节点 编号	节点电压 幅值/p.u	节点 编号	节点电压 幅值/p.u	节点 编号	节点电压 幅值/p.u
0	1	10	0.928 000	20	0.992 212
1	0.997 022	11	0.926 477	21	0.991 58
2	0.982 898	12	0.920 308	22	0.979 313
3	0.975 387	13	0.918 041	23	0.972 638
4	0.967 962	14	0.916 627	24	0.969 313
5	0.949 500	15	0.915 261	25	0.947 567
6	0.946 000	16	0.913 231	26	0.945 008
7	0.941 105	17	0.912 622	27	0.933 562
8	0.934 763	18	0.996 501	28	0.925 348
9	0.928 878	19	0.992 923	--	--

表 5 三种不同方法的潮流计算时间

Table 5 Running time of three power flow algorithms

配电系统	运行时间/s		
	文献[8] 方法	文献[9] 方法	本文 方法
16 节点系统	0.011 2	0.010 8	0.010 9
33 节点系统	0.031 4	0.026 5	0.026 8

从表 5 可以得出, 本文算法和文献[9]由于直接访问内存中的数据, 运行时间比文献[8]快, 随着配电网规模变大, 计算速度的差别明显; 而本文算法克服了文献[9]的数据维护和重用性较差的弱点。可见本文算法, 在方便数据的维护和重用的前提下, 提高了配电网拓扑分析和潮流计算速度, 且随着配电网规模的增加, 优势明显。

6 结论

本文针对配电网故障恢复中的拓扑分析和潮流计算, 利用关系数据库 SQL 存储配网的连接关系和节点、支路信息, 提高了数据维护性和拓扑分析的灵活性; 通过将数据库中的配网结构信息加载到内存中形成面向对象的实时数据库后, 再进行拓扑分析和潮流计算, 同时采用广度优先的搜索法不仅可以直接得出配网潮流方向和层次结构, 为潮流计算提供依据, 而且不需要形成导纳矩阵, 避免了形成因子表所花费的时间, 计算速度快; 基于 QT 的 C++ 实现用 GUI 界面显示拓扑和潮流计算结果表明: 该算法能正确通过友好的人机界面检测配网的连通性、判断是否存在环路或孤岛; 且在保证数据维护性的同时, 提高了计算速度, 特别对规模较大配网进行故障分析优势更为显著, 为快速恢复故障奠定了基础。

参考文献

- [1] NAGATA T, SASAKI H, YOKOYAMA R. Power system restoration by joint usage of expert system and mathematical programming approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1473-1479.
- [2] 顾秀芳, 关长余. 配电网潮流计算的拓扑分析研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, 33(2): 47-50.
GU Xiu-fang, GUAN Chang-yu. Analysis and study on topology for power flow of distribution network[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 33(2): 47-50.
- [3] 刘莉, 赵璇, 姜新丽. 基于层次矩阵的配电网拓扑分析与潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 91-94.
LIU Li, ZHAO Xuan, JIANG Xin-li. Distribution network topology analysis and flow calculation based on layer matrix[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 91-94.
- [4] 李如琦, 谢林峰, 王宗耀, 等. 基于节点分层的配网潮流前推回代方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 63-66.
LI Ru-qi, XIE Lin-feng, WANG Zong-yao, et al. Back / forward substitution method for radial distribution load flow based on node-layer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 63-66.
- [5] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.
ZHANG Li-mei, TANG Wei. Back/forward sweep power calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [6] 胡荣, 未召弟, 符杨. 基于深度优先遍历算法的配电网拓扑动态检测[J]. 上海电力学院学报, 2010, 26(2): 110-112.
HU Rong, WEI Zhao-di, FU Yang. Distribution network topology dynamic detection based on depth-first search algorithm[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2010, 26(2): 110-112.
- [7] 张烨, 周苏荃. 基于节点连通岛合并法网络动态拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 72-76.
ZHANG Ye, ZHOU Su-quan. Network dynamic topology

- analysis based on node connective island combined method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 72-76.
- [8] 徐华月, 章坚民, 王跃强. 基于 CIM 和配电自动化系统的配网快速潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 30(7): 45-48.
XU Hua-yue, ZHANG Jian-min, WANG Yue-qiang. A fast algorithm of load flow calculation in distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 30(7): 45-48.
- [9] 陈学峰. 配电网分析及网络重构的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2011.
CHEN Xue-feng, Studies on topology analysis and network reconfiguration for distribution network[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [10] IEC 61970 CIM14v08 & IEC 61968 CIM10v23 combined [EB/OL]. [2008-12-26]. <http://cimug.ucaiug.org/CIM%20Releases/Forms/AllItems.aspx>.
- [11] 韩学军, 陈鹏, 国新风, 等. 基于潮流计算的配电网重构方法[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 60-63.
HAN Xue-jun, CHEN Peng, GUO Xin-feng, et al. A power flow based reconfiguration method of distribution networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 60-63.
- [12] 刘健. 变结构耗散网络——配电自动化新算法[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2000.
LIU Jian. The variable structure dissipated network—new algorithm of distribution automation[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000.
-
- 收稿日期: 2014-01-25; 修回日期: 2014-04-21
- 作者简介:
- 范瑞娟 (1988-), 女, 硕士研究生, 从事智能配电网故障恢复研究; E-mail: fanruijuan88@126.com
- 王倩 (1962-), 女, 教授, 硕士研究生导师, 从事电力调度综合自动化系统、分布式 SCADA 系统、嵌入式保护/测控系统研究;
- 罗强 (1987-), 男, 硕士研究生, 从事发输电系统研究。