

# 辐射型配电网可靠性中节点编号优化算法的研究

王辉, 黄丽华, 陈俊红, 赵秋霞

(河北农业大学机电工程学院, 河北 保定 071001)

**摘要:** 充分考虑 10 kV 配电网辐射型的结构特点, 优化节点编号方案, 采用树结构的改进遍历算法, 运用面向对象语言, 对辐射型配电网进行可靠性评估。在形成的树型拓扑结构中, 以故障处为分界点, 按靠近电源和远离电源将树分为向前和向后两部分, 利用树的逆向遍历技术在向前部分仅搜索父节点即可确定故障的影响区域; 在向后部分正向搜索判断故障区域内节点的故障类型。该方法表示简单, 便于编程实现, 大大提高了搜索效率; 可准确地表示各种拓扑结构的辐射型网络, 尤其适用于含有多分支馈线的复杂结构。求出的配电网可靠性指标, 为系统损失电量的计算及电网的规划等提供理论依据。

**关键词:** 辐射网; 可靠性; 树结构; 遍历搜索; 节点编号

## A study of reliability assessment node number optimization algorithm for radial distribution system

WANG Hui, HUANG Li-hua, CHEN Jun-hong, ZHAO Qiu-xia  
(Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

**Abstract:** Taking the radial construction feature of mid-voltage distribution network into consideration, this paper optimizes the node number method, adopts the storage structure of tree, and uses the traversal algorithm to evaluate the reliability of distribution network with object-oriented programming language. In the topological structure based tree model, according to the fault location, the tree is divided into two parts, namely, the forward one and the backward one. Traversal algorithm of tree is used to determine the fault influence area by only finding the father node in the forward part and judge the nodes' fault type in the backward one. The representation of the algorithm is simple and specially suitable for programming. The searching efficiency is greatly improved. It can accurately express various topological structure of radial network, especially the system with many branch feeders, to provide a designing basis for the calculation of the loss of energy of system and network planning, etc.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Hebei Province(No. E2008000357).

**Key words:** radial distribution network; reliability; tree structure; traversal algorithm; node number

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0005-05

## 0 引言

评估电力系统的可靠性有利于对电力系统进行优化规划, 提高电网运行的经济效益, 具有深远的现实意义。我国配电网可靠性的研究起步晚, 发展还不够成熟, 随着社会的进步, 各行各业对可靠性提出了更高的要求, 因此, 配电网可靠性评估愈加引起人们的重视。据统计, 停电故障中有 80% 来源于配电网故障<sup>[1-2]</sup>。可见研究配电网可靠性势在必行。

目前用于配电网可靠性评估的算法<sup>[3-5]</sup>有许多, 但主要是解析法<sup>[6]</sup>。解析法又分为状态空间法

(马尔柯夫法)和网络法, 它利用数学模型描述系统, 借助数学方法进行针对性分析, 求解所需可靠性指标结果准确。但是这两种方法又各有利弊, 其中状态空间法便于计算机计算, 但较复杂。网络法分析的前提是系统的元件只有两种状态: 即正常和故障, 其方法简单, 但不易建立逻辑框图。故障模式后果分析法<sup>[7]</sup>(FMEA)是其中比较典型的方法, 它以每个馈线元件为对象, 分析各个基本故障事件及其后果, 然后加以综合, 只适合于单辐射型主馈线系统。随着现代电力需求的不断扩大和负荷的迅速增长, FMEA 法已逐渐失去它的优势。本文是对 FMEA 方法的改进, 采用树结构来表示配电网架架的信息, 用改进遍历技术进行搜索, 不用建立复杂的逻辑框图, 能表示各种拓扑结构的辐射型网架, 尤其适用于含有多分支馈线的复杂结构, 结果准确。

**基金项目:** 河北省自然科学基金(E2008000357); 河北省教育厅(2005328)

### 1 配电网模型

中压配电系统网架主接线的基本形式不同于电力系统的其它子系统，它主要采用有汇流母线的接线形式且呈辐射状。辐射型中压配电网主接线的基本环节有：电源（变压器）、母线、主馈线和负荷。此外为了保证可靠性和便于切换操作，在配电网架上还装有开关电器（断路器、隔离开关、分段器、重合器、熔断器和切换开关等）。如图 1 所示。其中 QF 为断路器，FU 为熔断器，QS 为隔离开关，N\O 为联络开关，AS 为备用电源，LP 为负荷。

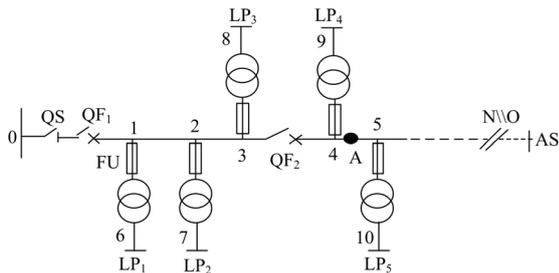


图 1 简单主馈线基本接线形式

Fig.1 Basic structure form of simple main feeder

当某一故障事件发生后，断路器、熔断器等装置决定故障在网络中的扩散情况，而隔离开关等装置影响负荷点的故障类型及停运时间，联络开关是实现配电网闭环设计开环运行的重要元件，所以我们在判断负荷点类型的时候主要分两步：确定故障影响范围和故障区内的负荷类型。我们假定开关电器都可靠动作，即可靠断开的概率都为 1。

图 2 为图 1 的简化树型模型图。

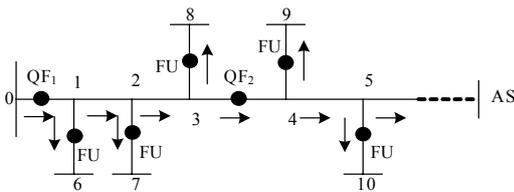


图 2 图 1 的简化树型模型图

Fig.2 The simplified model of Fig.1

当网架接线不是图 1 所示的简单形式，而是存在许多分支馈线时，这就构成了复杂的中压配电网接线。分支馈线除不带联络线和联络开关外，其他与简单辐射网的结构相同。

### 2 评估指标

配电系统可靠性主要评估充裕度<sup>[7]</sup>，它是通过可靠性指标来体现的。关于评估可靠性的所有指标又都集中反映在停电次数和停电时间这两个方面。

电力系统一般作为可修复系统，对于中压配电网来说，其运行时多呈辐射状，而且所有元件（将负荷支路和分支馈线分别看作一个元件）均是串联在主馈线上。设  $\lambda_i$  为故障率， $r_i$  为故障时的停电时间，所以在计算可靠性指标时，对  $n$  个串联可修复元件采用以下计算公式<sup>[7]</sup>：

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \tag{1}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \tag{2}$$

$$U = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \tag{3}$$

其中： $\lambda$ （次/a）为负荷点故障率； $r$ （h/a）为负荷点每次故障平均停电持续时间； $U$ （h/a）为负荷点的年平均停电时间。

#### 2.1 系统可靠性指标

设  $N_i$  为用户数； $U_i$  为用户停电时间。

$$SAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_i} \tag{4}$$

$$SAIDI = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i N_i} \tag{5}$$

$$ASAI = \frac{8760 \sum_i N_i - \sum_i U_i N_i}{8760 \sum_i N_i} \tag{6}$$

$$ASUI = 1 - ASAI \tag{7}$$

其中： $SAIFI$  为系统平均停电频率指标； $SAIDI$  为系统平均停电持续时间指标； $ASAI$  为平均供电可用率指标； $ASUI$  为平均供电不可用率指标。

#### 2.2 与电量有关的指标

系统电量不足指标

$$EENS = \sum_i [U_i] P_{a,i} \tag{8}$$

平均电量不足指标

$$AENS = \frac{\sum_i [U_i] [P_{a,i}]}{\sum_i N_i} \tag{9}$$

其中： $P_{a,i}$  为接入负荷点  $i$  的平均负荷。

### 3 基于树结构的改进遍历算法

#### 3.1 节点编号的优化

节点优化编号方案对配电网十分重要<sup>[8]</sup>。对本文中用到的节点采用如下规定方法:

①凡是有线路交叉的地方定义为一个节点。

②主馈线节点编号:规定电源节点为0号节点,离电源点最近的主馈线上的节点为1号节点,按离电源点的远近依次规定主馈线上的节点的编号直至主馈线末端,记为1,2, ..., i, ..., m。

③分支节点编号:设主馈线节点1~m分别带的子节点数为 $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_m$ ;则第i号节点的子节点编号为 $m + \sum_{k=1}^{i-1} n_k + 1, \dots, m + \sum_{k=1}^i n_k$ 。

④特殊节点标记:对与1号节点相连的第一个分支节点进行特殊标记,记为 $n_{\min} = m + 1$ 。

#### 3.2 负荷节点类型的划分及判断

根据开关类型、位置、动作模式的不同,故障影响区域及负荷节点分为如下四类<sup>[5]</sup>。a类:故障事件发生后,开关正确动作而不受故障影响的区域,相应的负荷节点称为a类节点;b类:故障时间为故障修复时间的区域,相应的负荷节点称为b类节点;c类:故障时间为操作隔离时间的区域,相应的负荷节点称为c类节点;d类:故障时间为隔离操作时间与切换时间之和的区域,相应的负荷节点称为d类节点。

本文从故障节点处将树分为两部分。在靠近电源侧逆潮流方向的部分称为向前部分;远离电源即顺潮流方向的部分称为向后部分。

(1) 如果故障元件所在的结点为分支节点,且分支首端开关为熔断器,则该分支节点和与其相连的负荷点属于b类故障区域,其它区域属于a类故障区域。

(2) 当网络中故障所在的节点为主馈线节点时

①在向前部分,利用树的逆向搜索,只需找到主馈线上断路器所在线路的首端节点 $n_i$

( $1 \leq i \leq m$ )即可,然后对 $n_i$ 节点所接的分支线或分支馈线进行深度遍历,确定分支线或分支馈线的最末端节点编号,记为 $n_{\max}$ ,如果 $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$ ,或 $n \leq n_i$ ,则节点n为正常节点即a类节点,所属区域为正常区域。该断路器所在支路之后的区域为故障区域,所属的节点为b、c或d类节点。当 $n_i = 0$

时,所有节点,即 $\left[1, m + \sum_{k=1}^m n_k\right]$ 都是b、c或d类

节点。

在向前部分的故障区域内,如果有隔离开关,则隔离开关之前的区域为c类故障区域,之后的区域为b类;如果该区域有联络开关直接与电源相连,则为d类故障区域;

②在向后部分,利用树的正向遍历依次访问每个节点,如果搜索到隔离开关,则访问到的结点为b类结点,继续向后搜索,其他区域属于c类或d类故障区域,判断方法同①。

(3) 当故障元件所在的节点为某条分支馈线时,利用树的逆向遍历搜索父节点,直到找到断路器为止;如果断路器位于分支馈线节点

$\left[ m + \sum_{k=1}^{i-1} n_k + n_s, m + \sum_{k=1}^{i-1} n_k + n_e \right]$ 之间,则节点

$\left[ m + \sum_{k=1}^{i-1} n_k + n_e, m + \sum_{k=1}^i n_k \right]$ 均为故障节点;如果

分支馈线上未找到断路器,继续向前搜索主馈线上的父节点,判断方法同上。

在图1中主馈线被断路器分为两段,当A处发生故障时,因为主馈线34段上有断路器,QF<sub>2</sub>可靠动作,所以线路节点3之前的负荷LP<sub>1</sub>~LP<sub>3</sub>不受故障影响,均为a类节点,QF<sub>2</sub>(或隔离开关)之后的负荷LP<sub>4</sub>的停电时间为故障元件修复时间,为b类负荷节点;A点之后的负荷LP<sub>5</sub>通过联络开关与备用电源相联,故障发生后,它为d类负荷节点。

#### 3.3 树结构的表示

根据配电网的辐射型的特点,采用本文的节点编号优化方案,将图1所示的配电网表示成树结构模型如下图3所示。

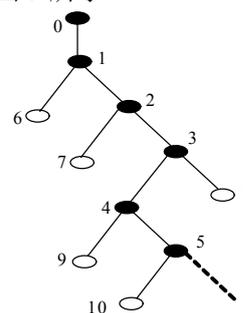


图3 图1的树结构表示

Fig.3 Tree structure of Fig.1

图中,黑圈代表主馈线节点;空圈代表分支线或分支馈线节点。

各节点的信息有(节点功率、节点属性、节点坐标);线路的信息有(开关信息、开关位置、可靠

性参数、线路参数)；

其中节点属性为主馈线节点或分支馈线节点；开关信息为线路所具有开关电器的类型；线路参数为线路的长度；可靠性参数为故障率等。

采用优化的节点编号方案后，在形成的树结构图中，主干线上的节点和分支线上的节点分别按照规定的顺序排列，具有严格的大小关系，这为搜索节省了大量的时间。

### 3.4 树的存储结构

本文采用树的存储结构为表存储<sup>[9]</sup>，令每个树结点对应一个链结点，链结点除存放与树结点有关的信息外，还要设置指示父亲和儿子的指针。节点存储结构如表 1~3，线路号以线段末端节点号表示。

表 1 节点信息表

Tab.1 Node information form

父节点	节点属性	子节点 1	子节点 2...
-----	------	-------	----------

表 2 线路信息表

Tab.2 Line information form

线路号	开关信息	开关属性	线路参数
-----	------	------	------

表 3 负荷信息表

Tab.3 Load information form

负荷号	负荷的功率	负荷位置	负荷属性
-----	-------	------	------

### 3.5 算法流程图

算法流程如图 4 所示。

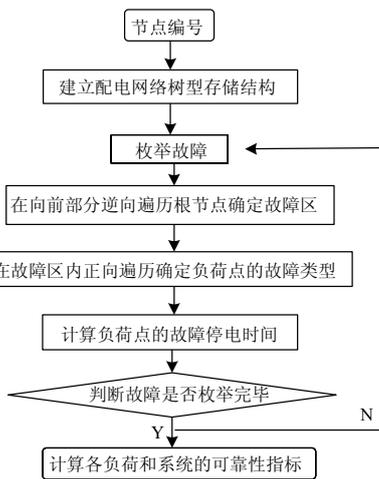


图 4 算法流程图

Fig.4 Algorithm flow

(1) 节点编号 (原则: 先对主馈线节点进行编号, 再对分支线或分支馈线节点进行编号)。

(2) 树模型的建立 (顺序: 先添加主馈线节点, 再添加分支馈线节点)。

(3) 故障枚举。

(4) 利用改进遍历搜索方法, 确定节点的故障类型。

(5) 计算节点的故障停电时间。

(6) 判断故障是否枚举完全。若否, 重新进行(3); 若是, 则转到下一步。

(7) 按照公式 (1) ~ (9) 计算所有负荷点和系统的可靠性指标。

## 4 算例

本文采用 VC++6.0 结合 GIS 技术将网架结构显示于屏幕上, 根据各节点的坐标信息对节点进行编号、存储, 利用树的遍历算法对 IEEE RBTS-Bus6 系统<sup>[10]</sup>进行了可靠性评估。此系统中包括 33 kV 变电站 1 个, 主馈线 4 条, 其中馈线 F<sub>4</sub> 有 3 条子馈线, 负荷点 40 个, 用户 2938 户, 总平均负荷为 10.715 MW。不考虑母线和变电站故障, 系统接线如图 5 所示。设线路的故障率为 0.046 次/年/公里, 故障平均修复时间为 8 h; 开关的操作时间为 0.5 h; 联络开关的倒闸操作时间为 1 h; 熔断器可靠断开的概

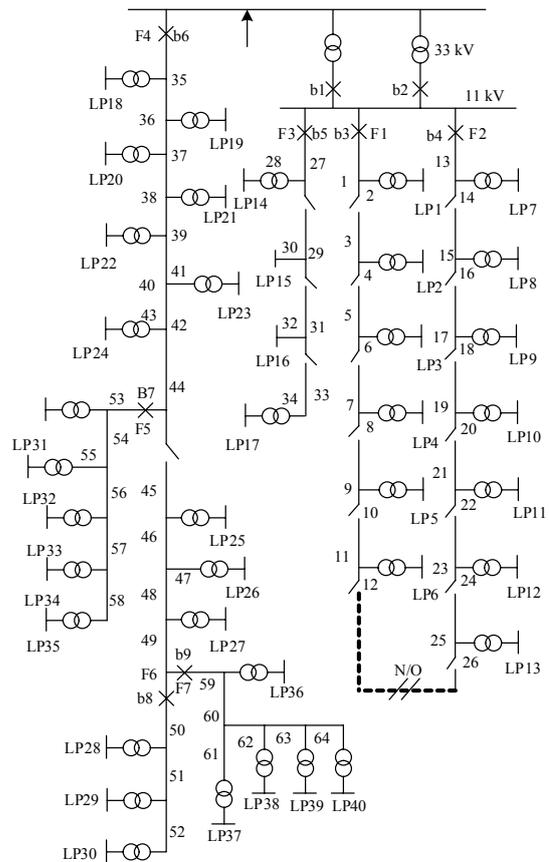


图 5 RBTS-BUS6 配电系统接线图

Fig.5 Distribution system for RBTS-BUS6

率为 1; 断路器的故障率为 0.002 次/年, 修复时间为 4 h。将可靠性评估结果与测试系统进行比较, 如表 4。

表 4 图 5 系统的可靠性指标  
Tab.4 Reliability indices of Fig.5

SAIFI/ 次/户·a	SAIDI/ (h/ 户·a)	CAIDI/ (h/ 户·a)	ASAI	ASUI	AENS/ (kW·h/a)	ENS/ (kW·h/ 户·a)
(a)0.967	6.428	6.663	0.999	0.001	23.755	69 792.375
(b)1.007	6.669	6.625	0.999	0.001	24.784	72815.31

注: (a) 为计算结果; (b) 为参考结果

限于篇幅, 仅列出馈线 F4 的节点编号方案, 见图 6, 及部分线路的存储信息表, 如表 5 所示。

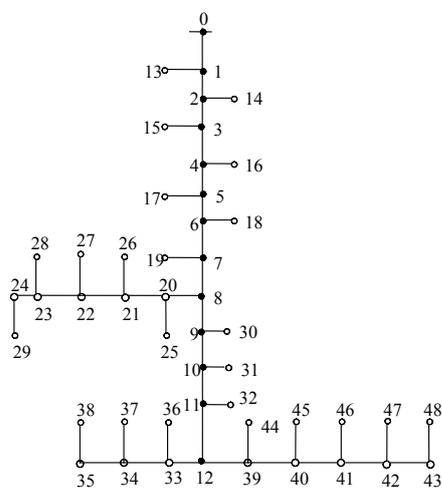


图 6 F4 馈线的节点编号  
Fig.6 Node number of feeder F4

表 5 部分线路信息表

Tab.5 Some lines information form

线路号	开关信息	开关属性				线路长度/km
		QF	QS	FU	N//O	
20	1	1	0	0	0	3.2
21	0	0	0	0	0	1.6
22	0	0	0	0	0	2.8
23	0	0	0	0	0	2.5
24	0	0	0	0	0	3.2
25	0	0	0	0	0	0
26	1	0	0	1	0	0.8
27	1	1	0	1	0	0
28	1	1	0	1	0	0
29	1	1	0	1	0	0

注: 0 代表没有开关; 1 代表有开关。

经比较结果准确。由于本系统中即含有主馈线,

又带有分支馈线, 已属于复杂的中压配电网, 因此用此系统对算法进行验证具有代表性。

## 5 结论

配电网的可靠性评估是配电网进行优化规划的前提。本文提出一种普遍适合于辐射型配电网可靠性评估的树结构改进遍历算法, 改进了适合于配电网的节点编号方案, 算法过程中紧密围绕节点编号进行, 并利用链表形式来表示系统拓扑信息, 它便于快速搜索, 节约搜索时间, 考虑了断路器、熔断器、隔离开关和备用电源等的影响, 适合于各种复杂的网络拓扑结构, 且避免了大量的近似计算, 经验证结果准确。

## 参考文献

- [1] Reliability Test System for Education Purposes: Basic Distribution System Date and Results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (2): 813-820.
- [2] Billinton R, Wang P. Reliability-Network-Equivalent Approach to Distribution-System-Reliability Evaluation[J]. IEEE Proceedings-Gener, Transm and Distrib, 1998, 145 (2): 149-153.
- [3] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (5): 48-52.  
WAN Guo-cheng, REN Zhen, TIAN Xiang. Study on Model of Reliability-network-equivalent of Distribution System Reliability Evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (5): 48-52.
- [4] 李卫星, 李志民, 刘迎春. 复杂辐射状配电系统的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (3): 69-73.  
LI Wei-xing, LI Zhi-min, LIU Ying-chun. Evaluation of Complex Radial Distribution System Reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (3): 69-73.
- [5] 刘柏松, 谢开贵, 马春雷, 等. 复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 40-44.  
LIU Bo-si, XIE Kai-gui, MA Chun-lei, et al. Section Algorithm of Reliability Evaluation for Complex Medium Voltage Electrical Distribution Networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 40-44.
- [6] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版, 1986.  
GUO Yong-ji. The Reliability Principle and Application of Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986.
- [7] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(下转第 15 页 continued on page 15)

文中还对不同过渡电阻故障时对该故障选相元件进行了仿真(限于篇幅这里就不再列出)。仿真结果也表明,该故障选相元件同样不受过渡电阻的影响,具有很好的选相性能。

## 5 结论

本文提出的基于分层模糊推理的快速综合故障选相元件具有以下特点:

1) 能够准确识别出故障的类型和综合评判出故障的相别。由于各特征参数均采用了归一化能量,因此选相性能不受故障位置和过渡电阻的影响,受故障初始角的影响较小。

2) 在少数情况下,两相接地短路会误判为相间短路,但经过校正,仍能可靠识别且选出故障相别。

3) 在计算各特征参数时,选取故障分量在 1 ms 内的小波变换低频尺度能量,计算量小,满足快速故障选相的要求,具有实用性。

## 参考文献

- [1] Jiang Joe-Air, Chen ching-shan, Liu Chi-wen. A New Protection Scheme for Fault Detection, Direction Discrimination, Classification and Location in Transmission Lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18 (1): 34-42.
- [2] DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu. A Novel Approach to Faulted-phase Selection Using Current Traveling Waves and Wavelet Analysis[A]. in: IEEE Power Con[C]. Kunming(China): 2002.1146-1150.
- [3] 段建东,张保会,周艺.利用电流行波进行超高压输电线路故障类型识别的研究[J].中国电机工程学报, 2005, 25 (7): 58-62.

- DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Study of Fault-type Identification Using Current Traveling-waves in Exrea-high-voltage Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (7): 58-62.
- [4] Omar A S. New Algorithm to Phase Selection Based on Wavelet Transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (4): 908-914.
- [5] 段建东,张保会,周艺,等.基于暂态量的超高压输电线路故障选相[J].中国电机工程学报,2006,26(3): 1-6.
- DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi, et al. Transient-based Faulty Phase Selection in EHV Transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (3): 1-6.
- [6] 姜惠兰,梁昭君,杨维,等.基于模糊逻辑的高压输电线路故障类型识别新方法[J].电工电能新技术,2004,23(1): 60-63.
- JIANG Hui-lan, LIANG Zhao-jun, YANG Wei, et al. Fuzzy Logic Based High Voltage Transmission Line Fault Type Recognition[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23 (1): 60-63.
- [7] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术(第二版)[M].西安:西安交通大学出版社,2007.

收稿日期:2009-03-18; 修回日期:2009-06-26

作者简介:

叶朝辉(1970-),男,本科,工程师,从事电力系统及自动化方面的技术管理工作;

孔凡坊(1984-),男,硕士,从事继电保护及电力系统自动化方面的工作。E-mail: kongfanfang2002@126.com

(上接第9页 continued from page 9)

- GUO Yong-ji. The Reliability Analysis of Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [8] 李丽,华栋.配电网拓扑节点编号方案及其潮流计算[J].华东电力,2005,33(4): 17-20.
- LI Li, HUA Dong. Node Numbering Plan for Distribution Network Topology and its Flow Calculation[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (4): 17-20.
- [9] 齐德昱.数据结构与算法[M].北京:清华大学出版社,2003.
- QI De-yu. Data Structure and Algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

- [10] Billinton R, Jonavithula S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (4): 1670-1676.

收稿日期:2009-03-01; 修回日期:2009-09-01

作者简介:

王辉(1983-)女,硕士研究生,主要研究电力系统分析与控制;

黄丽华(1963-),女,硕士,教授,硕士生导师,主要从事配电网及其自动化及信息处理方面的教学与科研工作。E-mail: bdhllh@yahoo.com.cn