

## 计及动作安全裕度的节点电压脆弱性评估

李杨<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 朱国俊<sup>2</sup>, 杨可<sup>2</sup>, 魏震波<sup>1</sup>, 方涛<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司, 四川 成都 610061)

**摘要:** 针对电力系统安全问题, 定义了节点动作安全裕度指标, 结合传统节点电压脆弱性评估指标, 对预想事故下的节点电压脆弱性进行分析, 建立了计及动作安全裕度的节点电压脆弱性评估指标。通过对IEEE14、IEEE30母线系统的仿真, 结果表明节点事故动作安全裕度的引入部分改变了传统节点电压脆弱度的排序, 与传统节点电压脆弱性评估结果相比, 更全面考虑了事故发生概率以及事故保护作用和故障操作对节点脆弱性的影响, 提高了不同事故下节点电压脆弱性的评估精度, 验证了该方法的合理性与有效性。

**关键词:** 电压裕度; 动作安全裕度; 节点电压脆弱性; 脆弱性评估; 脆弱性评估指标

### Nodes vulnerability assessment to power grid based on action security margin

LI Yang<sup>1</sup>, LIU Jun-yong<sup>1</sup>, ZHU Guo-jun<sup>2</sup>, YANG Ke<sup>2</sup>, WEI Zhen-bo<sup>1</sup>, FANG Tao<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610061, China)

**Abstract:** On the basis of the existing research of vulnerability, an index of nodes contingency action security margin is defined for the security assessment of the power system. By combining the index of nodes contingency action security margin with the assessment of the nodes vulnerability, a new index of the nodes vulnerability assessment to power grid based on action security margin is proposed, to assess the nodes voltage vulnerability result of expected contingency. Simulation results on IEEE 14 and IEEE 30 testing systems indicate the effectiveness of the proposed vulnerability assessment method, considering more comprehensive the relay protection, by comparing with the index of nodes voltage vulnerability only considering nodes voltage margin.

**Key words:** voltage margin; action security margin; nodes voltage vulnerability; vulnerability assessment; vulnerability assessment index

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2010)08-0010-05

## 0 引言

在大电网互联程度同步提高以及电力市场进程逐步推进的形势下, 电网规模日益扩大, 结构愈加复杂, 未知因素增多, 系统的安全维护也更加重要和困难<sup>[1]</sup>。电网的脆弱性问题, 作为电网安全问题的扩展和深入, 具有重大的研究价值。

当前的脆弱性研究采用的分析方法主要有复杂网络理论<sup>[2-3]</sup>、能量函数法<sup>[4-5]</sup>以及概率分析<sup>[6]</sup>等。节点脆弱性的研究一般针对节点的电压脆弱性进行研究。国内外的学者对电压脆弱性的研究, 所用方法主要是基于能量函数和基于概率两类: 如文献[4]在势能函数基础上定义安全因子来分析随着发电机无

功出力极限变化时电压的脆弱性; 文献[5]用基于安全因子的势能函数以及安全因子对不同控制行为的灵敏性作为指标来评估电压安全性。文献[4-5]从系统的物理特性出发, 从确定性的角度研究了系统的电压脆弱性, 为进一步研究系统多种无功成分影响下的电压脆弱性提供了借鉴; 文献[6]用基于概率的电压风险指标从系统不确定性角度来评价了电压脆弱性。

传统的节点脆弱性评估基本都是通过比较各种裕度来确定节点的脆弱性排序。节点的电压裕度是自身稳定状态与临界状态电压的差值, 同一节点在不同系统运行环境下电压裕度值的比较以及相同运行环境下单独比较不同节点的电压裕度值对分析系统的安全性还存在一定程度的不足。电力系统的脆弱性分析应该从整体和全局的角度系统地把握可能存在的脆弱环节<sup>[7]</sup>。另外, 当前常用的评估电压脆

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2004CB217905)

弱性的基于普通潮流计算的电压裕度指标, 由于其潮流模型自身存在的局限导致该指标不能计及保护作用 and 故障操作, 无法讨论不同事故下节点电压脆弱性的变化, 其应用也存在局限。

基于上述思想, 本文考虑各种事故下的事故临界清除时间对节点脆弱性的影响, 定义了事故动作安全裕度概念, 对传统节点电压脆弱性评估进行改进。通常电力系统的节点电压都留有一定的裕度, 并通过设置相应的继电保护整定值来防止事故发生。其中部分节点也允许短时间的不满足电压约束运行<sup>[8]</sup>。系统中某些节点电压裕度相对较高, 但一旦发生事故, 由于事故清除时间等因素的影响, 这些节点仍有较大可能威胁整个电网的安全运行, 因此仅以节点的电压裕度为节点电压脆弱性的评估标准是不够全面的。基于上述问题本文通过引入优化乘子的保留非线性潮流法计算得到的系统各负荷节点临界电压来求取其节点电压裕度指标, 然后结合作安全裕度构建节点电压脆弱性评估指标, 达到对预想事故下节点电压脆弱性评估的目的。

## 1 节点电压裕度指标

### 1.1 改进的保留非线性潮流法 (PNFA) 算法求取节点临界电压值

传统的脆弱性评估一般通过计算节点电压裕度从确定性方面评估系统节点的脆弱性, 而其中关键步骤便是对临界电压值的求取。计算临界电压值<sup>[9-11]</sup>的速度和精度将对电压裕度的求取速度和精度具有决定性的影响, 因此计算临界电压需要寻求相对快速和准确的算法。传统的 PNFA 算法较之牛顿法等, 计算速度有很大提高, 文献[12]在传统 PNFA 算法展开式的基础上, 引入了优化乘子 $\mu$ , 提高了计算速度和精度。本文应用文献[12]的算法对临界电压值 $V_{cr}^k$ 进行求取。

### 1.2 节点电压裕度指标

应用上述方法求得的节点临界电压计算节点  $k$  的电压裕度指标:

$$V^k = \left| \frac{V_{cr}^k - V_t^k}{V_{cr}^k - V_s^k} \right| \quad (1)$$

式中:  $V_{cr}^k$  为节点  $k$  的临界电压值;  $V_s^k$  为通过潮流计算出的节点  $k$  稳态电压;  $V_t^k$  为节点  $k$  在  $t$  时刻的电压值。式(1)为当前电压裕度与初始安全电压裕度的比值, 能较好地反映某一节点现阶段的安全程度。

## 2 节点事故的动作安全裕度指标

上述节点电压裕度虽然能较好地反映单个节点的安全程度, 但在应用该裕度进行脆弱性排序的时

候却相当于把各节点割裂开来单独分析后进行比较, 没有将各节点放在整个系统运行状态下进行分析, 进而对各种因素影响下节点脆弱性进行综合评估。一般地, 由于雷击或电力系统中的操作、事故等原因, 会使某些电气设备和线路上承受的电压大大偏离正常运行电压, 当逼近或超出其临界电压时, 系统将出现不稳定, 因此对系统脆弱性的评估应充分考虑系统事故的概率以及保护动作的时间。本文从不确定性角度出发, 考虑节点事故的各种动作, 定义了节点事故的动作安全裕度指标。

对某一个具体预想事故来说, 事故的临界清除时间是衡量该事故对系统稳定影响的一个重要指标。假设发生在某节点上和连接该节点的所有支路上的同一类型事故的临界清除时间、整定清除时间都分别相同, 把节点上和节点支路上的事故统一认作节点事故。当发生某一预想事故(设此事故编号为  $i$ )时, 定义该预想事故中节点  $k$  的动作安全裕度指标为:

$$C_i^k = e^{T_{critical}^{ik}} / p_{ik}(1 + e^{T_{clear}^{ik}}) \quad (2)$$

式中:  $p_{ik}$  为节点  $k$  发生事故  $i$  的概率, 由以往运行经验得出;  $T_{critical}^{ik}$  为发生事故  $i$  时节点  $k$  的临界清除时间;  $T_{clear}^{ik}$  为实际系统中节点  $k$  对事故  $i$  的整定清除时间。当系统发生某一事故时, 不同节点的事故临界清除时间和事故的整定清除时间是各不相同的。由式(2)可知,  $p_{ik}$  与动作安全裕度成反比关系; 其他值不变的情况下,  $T_{clear}^{ik}$  相对  $T_{critical}^{ik}$  越小, 事故  $i$  下节点  $k$  的动作安全裕度指标越大,  $T_{clear}^{ik}$  相对  $T_{critical}^{ik}$  越大, 事故  $i$  下节点  $k$  的动作安全裕度指标越小。这种关系与实际系统相符合, 即预想事故的节点临界清除时间越接近其节点事故的实际清除时间, 则对事故清除操作的时间紧迫性要求越强烈, 节点所面临的危险程度越高。

单独考虑节点动作安全裕度时, 节点动作安全裕度小的事故在被清除时若受不确定因素的影响而稍有延迟, 就会造成系统不稳定, 而节点动作安全裕度大的事故在被清除时则可从容得多; 此外节点动作安全裕度越小, 说明此节点越接近临界失稳状态, 节点越脆弱。

## 3 节点电压脆弱性评估综合指标

节点的电压裕度指标  $V^k$  的倒数即为不考虑节点动作安全裕度而仅考虑节点电压裕度的节点电压脆弱度指标  $\rho_k^v$ , 该指标为传统节点电压脆弱性评估的常用指标:

$$\rho_k^i = \frac{1}{V^k} = \left| \frac{V_{cr}^k - V_s^k}{V_{cr}^k - V_i^k} \right| \quad (3)$$

定义预想事故  $i$  中节点  $k$  的动作安全裕度指标的倒数为节点动作安全裕度对节点电压脆弱性的影响指标  $\rho_{ik}^n$  :

$$\rho_{ik}^n = \frac{1}{C_i^k} = p_{ik} (1 + e^{T_{clear}^{ik}}) / e^{T_{critical}^{ik}} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)得到评估发生事故  $i$  时节点电压脆弱性的综合指标  $\rho_{vu}^{ik}$  为:

$$\rho_{vu}^{ik} = \rho_k^i + \lambda \rho_{ik}^n \quad (5)$$

其中: 以脆弱性评估指标  $\rho_k^i$  作为综合指标的基础量, 从电压裕度考虑节点的脆弱强度; 增加考虑事故动作对脆弱性指标的影响度  $\lambda \rho_{ik}^n$  一项作为进一步细化指标、提高脆弱性强度差异的参考量;  $\lambda$  为调节系数, 对综合指标的第二项在评估中的参量强度进行控制, 根据当前评估对事故动作时间的要求来适当选取  $\lambda$  值。应用式(5)可计算及事故状态下系统由稳定向临界失稳过渡阶段各种保护动作的节点电压脆弱度, 并根据所得脆弱度对系统内各负荷节点的脆弱性进行排序。这种排序相对于传统节点电压脆弱度的排序会因为节点在不同事故下的不同动作安全裕度影响而发生一定的改变。

### 4 算例分析

由于节点动作安全裕度指标考虑了事故动作时间以及事故发生概率两方面影响脆弱度排序的因素, 为了更好地验证新的指标能有效地针对上述两方面因素对传统节点电压脆弱度排序进行改进, 本文应用 IEEE-14 节点系统算例和 IEEE-30 节点系统算例分别对事故动作时间以及事故发生概率两方面影响因素进行节点脆弱度排序验证。

#### 4.1 IEEE-14 算例

以 IEEE-14 节点系统为例 (图 1)。其中, 节点 1 为平衡节点, 节点 2、3、6、8 为发电机节点, 上述节点为 PV 节点。本算例主要考虑事故动作时间的影响, 因此将  $p_{ik}$  均取为 0.1。  $\lambda$  取为 1。

首先, 根据表 1 数据, 利用公式(1)计算出不计节点动作安全裕度影响而单纯依靠节点电压裕度的节点电压脆弱度指标  $\rho_k^i$ , 如表 2。

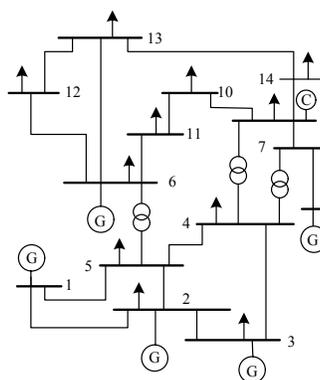


图 1 IEEE 5 机 14 节点系统

Fig.1 IEEE 14 bus system with 5 generators

表 1 节点电压值

Tab.1 Voltage of nodes p.u

电压	4	5	7	9	10	11	12	13	14
$V_s^k$	0.995	0.996	1.028	1.011	1.009	1.020	1.016	1.015	0.989
$V_t^k$	0.987	0.989	1.019	1.002	1.000	1.012	1.009	1.007	0.981
$V_{cr}^k$	0.748 3	0.748 7	0.744 2	0.708 6	0.697 6	0.710 7	0.705 3	0.694 5	0.660 3

表 2 不计动作安全裕度的节点电压脆弱度指标

Tab.2 Voltage vulnerability of nodes without action security margin p.u

指标	4	5	7	9	10	11	12	13	14
$\rho_k^i$	1.033 5	1.029 1	1.032 8	1.030 7	1.029 8	1.026 6	1.023 0	1.025 6	1.025 0

假定发生事故  $i$ , 靠近发电机的母线 5、7、11 对事故  $i$  的整定清除时间为 0.10 s, 而相对远离发电机的母线 4、9、10、12、13、14 对事故  $i$  的整定清除时间为 0.15s, 各节点的临界清除时间均为 0.20 s。由式(4)可以得到节点动作安全裕度对节点电压脆弱性的影响指标  $\rho_{ik}^n$ , 再由表 2 的结果和式(5)得到发生事故  $i$  时节点电压脆弱性的脆弱指标  $\rho_{vu}^{ik}$ , 如表 3 所示。

表 3 计及动作安全裕度的节点电压脆弱度指标

Tab.3 Voltage vulnerability of nodes with action security margin p.u

指标	4	5	7	9	10	11	12	13	14
$\rho_{vu}^{ik}$	1.210 5	1.185 1	1.188 7	1.207 7	1.206 8	1.182 5	1.200 0	1.202 6	1.201 9

分别根据表 2 与表 3 中的节点脆弱度数据对各负荷节点进行脆弱度排序, 排序结果如表 4 所示:

表 4 排序结果对比

Tab.4 Indices comparison taxis

指标	节点排序 (脆弱度由低至高)								
$\rho'_k$	12	14	13	11	5	10	9	7	4
$\rho_{vu}^{ik}$	11	5	7	12	14	13	10	9	4

对表 4 中排序对比分析:根据  $\rho_{vu}^{ik}$  进行排序的结果相对于根据  $\rho'_k$  进行排序的结果有一定的变化。在根据  $\rho_{vu}^{ik}$  的排序中靠近发电机的负荷节点 5、7、11 的顺序相对于其在根据  $\rho'_k$  的排序中的顺序明显提前,两种裕度指标具有一定的互补性。从动作时间方面的安全裕度出发,对于节点事故动作安全裕度相对较大的节点,其综合脆弱度相应降低,导致其排序结果的靠前,这些节点的动作安全裕度越大,则其在所有节点中的排序将越靠前。这也与事实系统相符,即靠近发电机的节点能够更好地得到 PV 节点的无功备用,保障其电压的稳定。上述分析验证了本文观点,即单纯考虑节点电压裕度的节点脆弱性指标不足以充分反映系统节点在各种事故下的脆弱性。当计及事故保护动作时间后,脆弱性排序更能体现系统的真实安全状态。

#### 4.2 IEEE-30 算例

以 IEEE-30 节点系统为例。其中,节点 1 为平衡节点,节点 2、5、8、11、13 为发电机节点,上述节点为 PV 节点;节点 6、9、11、13、22、27、28 均未带负荷。本算例主要考虑事故发生概率的影响,因此将所有母线对事故  $i$  的整定清除时间取为 0.10 s,临界清除时间均取为 0.20 s。 $\lambda$  取为 1。

假定节点 7、17、19、21 发生事故  $i$  的概率为 0.2,而其它负荷节点发生事故  $i$  的概率为 0.1。由式(3)和式(5)分别得到 IEEE-30 节点系统的负荷节点脆弱性指标,根据两种指标分别对系统各负荷节点进行排序,如表 5 所示。

表 5 排序结果对比

Tab.5 Indices comparison taxis

指标	节点排序 (脆弱度由低至高)
$\rho'_k$	12, 14, 15, 16, 18, 23, 19, 20, 17, 26, 24, 25, 7, 22, 21, 10, 28, 9, 30, 29, 27, 6, 3, 4
$\rho_{vu}^{ik}$	12, 14, 15, 16, 18, 23, 20, 26, 24, 25, 22, 10, 28, 9, 30, 29, 27, 6, 3, 4, 19, 17, 7, 21

对表 5 中排序对比分析:在根据  $\rho_{vu}^{ik}$  的排序中负荷节点 7、17、19、21 的顺序相对于其在根据  $\rho'_k$  的排序中的顺序大幅的下降,两种指标的互补性得到体现。从事故发生概率方面的安全裕度出发,由于

节点 7、17、19、21 相对于其它负荷节点发生事故  $i$  的概率均提高一倍,即风险提高一倍,进而使上述节点的事故动作安全裕度相对较小,其综合脆弱度相应提高,导致其排序结果的下降,这些节点的动作安全裕度越小,则其在所有节点中的排序将越靠后。

上述两个算例在取值方面略有放大,目的在于凸显事故动作安全裕度对于传统指标改善方面的作用。综合 IEEE-14 节点系统算例和 IEEE-30 节点系统算例的排序结果,我们可以看出计及节点动作安全裕度的节点电压脆弱性评估指标能够考虑事故发生概率和保护动作对系统节点电压稳定方面的影响,相比传统节点电压脆弱性评估指标更全面地反映了系统节点的脆弱性。

## 5 结语

定义了节点事故动作安全裕度指标,将该指标引入节点电压脆弱性评估,以评估在预想事故下节点的电压脆弱性。算例结果表明:与仅考虑节点电压裕度的节点电压脆弱性评估结果相比,本文提出的基于节点动作安全裕度的节点电压脆弱性指标更全面考虑了事故保护作用和故障操作以及事故发生概率对脆弱性评估的影响,提高了不同事故下节点电压脆弱性的评估精度,进一步完善了单纯基于电压裕度的节点电压脆弱性指标理论,对电力系统各预想事故的节点电压脆弱性评估有一定的理论价值和现实指导意义。

## 参考文献

- [1] 邱家驹, 韩祯祥, 薛禹胜. 2000 年国际大电网会议系列报道—电力系统的运行和控制[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 1-4.  
QIU Jia-ju, HAN Zhen-xiang, XUE Yu-sheng. A Review of CIHRE 2000 on Power System Operation and Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(7): 1-4.
- [2] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24.  
MENG Zhong-wei, LU Zong-xiang, SONG Jing-yan. Comparison Analysis of the Small-world Topological Model of Chinese and American Power Grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.
- [3] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 7-11.  
DING Ming, HAN Ping-ping. Small-world Topological Model Based Vulnerability Assessment Algorithm for Large-scale Power Grid[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2006, 30 (8) :7-11.
- [4] Demarco C L, Overbye T J. An Energy Based Security Measure for Assessing Vulnerability to Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 419-427.
- [5] Overbye T J, Demarco C L. Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivities[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 1196-1202.
- [6] 陈为化, 江全元, 曹一家. 基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 20-25.  
CHEN Wei-hua, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia. Voltage Vulnerability Assessment Based on Risk Theory and Fuzzy Reasoning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 20-25.
- [7] 卢锦玲, 姬群星, 朱永利. 基于能量函数法的电网脆弱性评估[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 30-33.  
LU Jin-ling, JI Qun-xing, ZHU Yong-li. Power Grid Vulnerability Assessment Based on Energy Function[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 30-33.
- [8] 万官泉, 任震, 汪穗峰, 等. 基于支路断开安全裕度状态空间截断的电力系统可靠性算法[J]. 电网技术, 2007, 31(16): 60-66.  
WAN Guan-quan, REN Zhen, WANG Sui-feng, et al. Evaluation Algorithm of Power System Reliability Using State Space Pruning of Security Margin Based on Branch Switched-off[J]. Power System Technology, 2007, 31(16): 60-66.
- [9] WAN Hua, Mc Calley J D, Vittal V. Risk based Voltage Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1247-1254
- [10] Kim Tae-Kyun, Choo Jin-Bu, Lee Seung-Hyuk, et al. Security Assessment for Bus Voltages Using Probabilistic Load Flow[A]. in: International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems[C]. 2004. 888-893.
- [11] 李华强, 刘亚梅, Yorino N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60.  
LI Hua-qiang, LIU Ya-mei, Yorino N. Voltage Stability Assessment for Saddle Node Bifurcation and Limit Induced Bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 56-60.
- [12] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 运用启发式能量函数观点的无功裕度估算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 29-36.  
LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang. Reactive Power Margin Estimation by the View of the Heuristic Energy Function[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 29-36.

收稿日期: 2009-05-24; 修回日期: 2009-07-03

作者简介:

李 杨 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: lyyb2003@126.com  
刘俊勇 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定性分析及电力市场;  
朱国俊 (1982-), 男, 硕士, 从事特高压输电工程的建设管理和研究工作。

(上接第 9 页 continued from page 9)

- SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, SONG Guo-bing, et al. Adaptive Carth Fault Distance Relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 54-58.
- [9] 吴萍, 张尧. 基于单端电气量的故障测距算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 5-7.  
WU Ping, ZHANG Yao. Location Using One-terminal Data for Transmission Line[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(4): 5-7.
- [10] 黄小波, 林湘宁, 马晓飞, 等. 适用于集中参数单端测距模型的距离修正方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 44-48.  
HUANG Xiao-bo, LIN Xiang-ning, MA Xiao-fei, et al. Improved Algorithm for the Lump Parameter Based Single-ended Fault Location Models [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 44-48.
- [11] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.  
FANG Chong-zhi, XIAO De-yun. Process Identification[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.
- [12] Gopalakrishnan A, Kezunovic M, McKenna S M, et al. Fault Location Using the Distributed Parameter Transmission Line Model[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4): 1169 - 1174.
- [13] 洪佩孙, 李九虎. 输电线路距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.  
HONG Pei-sun, LI Jiu-hu. Transmission Line Distance Protection[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008.
- [14] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
ZHU Sheng-shi. Relay Protection Principle and Technology of High Voltage Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

收稿日期: 2010-02-04; 修回日期: 2010-03-30

作者简介:

罗显通 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: luoxiantong6@163.com  
罗 建 (1960-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。