

基于电压自动控制的智能电网自愈策略

卢锦玲, 白丽丽, 任惠

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003)

Self-Healing Strategy of Smart Grid Based on Voltage Automatic Control

LU Jinling, BAI Lili, REN Hui

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Self-healing ability is an important characteristics and sign of smart grid, and voltage and reactive power control is one of main self-healing function of smart grid. When operating condition of power grid changes, it is necessary to implement the security and self-healing of grid voltage by new voltage control strategy that is matching with current operation mode. Based on existing reactive power optimization algorithm, according to voltage sensitivity the voltage variations at nodes is obtained, and taking the minimum variance between nodal voltages and voltage expectation values as objective function the action sequence of control devices is solved by dynamic programming. Simulation results of IEEE 30-bus system show that the proposed method is correct and effective, by which not only the smooth transition of voltage during self-healing process can be implemented, but also a wider voltage stability margin can be ensured.

KEY WORDS: self-healing strategy; automatic voltage control; voltage sensitivity; dynamic programming

摘要: 自愈能力是智能电网的重要特征和标志, 而电压与无功控制是智能电网主要自愈功能之一。当电网运行工况发生变化时, 需要与当前运行方式相匹配的新的电压控制策略来实现电网电压的安全自愈。在已有的无功优化算法基础上, 根据电压灵敏度得到各节点电压变化量, 以各节点电压与电压期望值方差的最小值为目标函数, 采用动态规划法求解控制设备的动作顺序, 从而得到电压自动控制策略。IEEE-30节点系统算例分析结果表明, 所提方法正确有效, 不仅能够实现电压在电网自愈过程中的平稳过渡, 而且保证了较大的稳定裕度。

关键词: 自愈策略; 电压自动控制; 电压灵敏度; 动态规划法

基金项目: 国家自然科学基金项目(51107140); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(09QG06)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(51107140); Project Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (09QG06)。

0 引言

自愈能力是智能电网的重要特征和标志, 自愈是指电网在正常情况下能够进行实时评价和持续优化, 在异常情况下能够进行故障检测、隔离和恢复, 以尽量少的人工干预, 最大限度地减少故障或异常对系统的影响, 使系统持续处在最优状态^[1]。电网自愈策略研究的核心内容是预防控制、紧急控制、校正控制、恢复控制, 以及它们的自适应性和相互协调性^[2]。电压与无功控制作为智能电网自愈功能之一^[3], 其在电网自愈策略研究中是不可或缺的, 合理的电压控制策略不仅可以使无功优化结果顺利实施, 有效地防止控制过程中出现电压临时越限情况^[4], 而且有利于减少电压波动, 提高系统的安全性。

随着新能源的不断引入, 电网的运行工况变得日益复杂, 传统的依据运行经验确定电压控制方案的方法将受到严重挑战。当电网运行工况发生变化, 需要与当前运行方式相匹配的新的电压控制策略来实现电网电压的安全自愈^[5]。文献[6]根据电力系统操作规程, 将电压控制问题分解为电容器投切和变压器分接头调节2个子问题, 采取先投切电容器、后调节分接头的策略。文献[7]仍遵循先投电容器, 再调整变压器分接头的原则, 同时兼顾有功网损灵敏度或电压控制灵敏度, 各控制设备按灵敏度由大到小的顺序动作, 但是当控制变量方向不一致时, 在控制过程中很可能出现电压临时越限的情况。文献[8]建立了以控制过程中的相邻两阶段电压波动最小为目标的控制动作顺序优化模型, 该模型可以实现控制过程中电压的平稳过渡, 有效防止电压越限或系统振荡, 但该模型采用的深度优先搜索算法是不完备的, 不能保证解的收敛性。

已有的无功优化算法依据“分层分区、就地平衡”的无功补偿原则,通过合理配置补偿电容器、调整变压器分接头和改变发电机端电压,实现了电网损耗最小、电压合格率最高、主变分接开关调节次数最少和电容器投切最合理等1个或多个优化目标,但很少考虑实施无功优化结果时各电压控制设备动作顺序对电压的影响^[4,7-8],而不合理的控制设备的动作顺序往往会产生较大的电压波动,甚至出现电压临时越限。本文在已有的无功优化算法基础上,根据电压灵敏度得到各节点电压变化量,以各节点电压与电压期望值方差的最小值作为目标函数,采用动态规划法求解电压控制设备的最优动作顺序,从而得到电压自动控制策略。该策略使得电压在电网的自愈过程中能够平稳过渡,并能保证较大的电压稳定裕度,有效地避免了节点电压越限和系统振荡。

1 电压自动控制模型

1.1 电压灵敏度

电压灵敏度以潮流方程为基础,研究系统各变量与电压间的关系。灵敏度分析法计算简单,易于实现,只需在潮流方程的基础上做少量的额外计算即可,在静态电压稳定方面得到了广泛的应用^[9-11]。电压控制中各控制变量(如发电机端电压、电容器、变压器变比)的电压灵敏度方程可描述如下,具体推导见文献^[12]。

$$S_{lv} = \Delta v_l / \Delta v_g = -B_l^{-1} B_{lg} \quad (1)$$

$$S_{ls} = \Delta v_l / \Delta i_{ls} = B_l^{-1} \quad (2)$$

$$S_{lt} = \Delta v_l / (\Delta t)_p = B_l^{-1} \left(\frac{\partial i_{lt}}{\partial t} \right)_p \quad (3)$$

式中: S_{lv} 、 S_{ls} 、 S_{lt} 分别为节点电压对发电机端电压、电容器无功注入电流、变压器变比的灵敏度; Δv_l 为节点电压变化量; Δv_g 为发电机端电压变化量; Δi_{ls} 为电容器注入无功电流变化量; $(\Delta t)_p$ 为变压器 p 分接头改变量; B_l 为导纳矩阵的 $n_l \times n_l$ 维子矩阵, B_{lg} 为导纳矩阵的 $n_l \times n_g$ 维子矩阵, n_l 为 PQ 节点数, n_g 为发电机节点数; $\left(\frac{\partial i_{lt}}{\partial t} \right)_p$ 为当变压器 p 分接头改变时,其两端节点注入无功电流变化量。

1.2 电压自动控制策略

电压控制设备不同的动作顺序会产生不同的电压波动。为了衡量电压波动大小,把整个控制过程分为 m 个阶段(m 为电压控制变量个数),定义 i

阶段电压波动指标 c_i :

$$c_i = [(i-1)c_{i-1} + (V_i(1) - \bar{v})^2 + (V_i(2) - \bar{v})^2 + \dots + (V_i(j) - \bar{v})^2 + \dots + (V_i(n) - \bar{v})^2] / i$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中

$$c_1 = (V_1(1) - \bar{v})^2 + (V_1(2) - \bar{v})^2 + \dots + (V_1(n) - \bar{v})^2$$

式中: n 为系统节点数; $\bar{v}$ 为电压期望值; $V_i(j)$ 为节点 j 第 i 阶段的电压值。

按照上述方法定义的电压波动指标可以使各节点电压在控制过程中围绕电压期望值波动,达到了电压平稳过渡的效果,提高了系统的电压稳定裕度。

将电压波动指标最小作为目标函数,即

$$\min c_i \quad (5)$$

约束条件为

$$V^m(j) \leq V_i(j) \leq V^M(j) \quad (6)$$

式中 $V^m(j)$ 、 $V^M(j)$ 分别为节点 j 电压上、下限。

根据以上目标函数和约束条件,动态规划法求解最优控制策略的过程如表1所示。由于动态规划法采用逆序的递推方式,因此本文首先借助无功优化结果对当前系统进行优化,然后从优化后系统状态出发直到遍历所有电压控制变量,最后从中找出最优的控制顺序。由于动态规划法对重复出现的子问题只需计算1次,而寻找电压控制设备最优动作顺序的过程实质上是一个寻找最优排列组合的过程,期间存在着大量的重叠子问题,因此有利于动态规划法减少计算量、节省存储空间。

表1中: k 为控制变量编号, $k = 1, 2, \dots, m$; A_i 为 C_m^{i-1} 维向量,表示第 i 阶段已遍历的控制变量; s 表示优化后系统状态; $V_i^{(g,k)}$ 为 n 维向量,表示第 i 阶段控制顺序为“ $A_i(g) - k$ ”所对应的各节点电压;

表1 动态规划法求解最优策略过程

Tab. 1 Process of finding optimal control strategy for dynamic programming

控制 阶段	已遍历控 制变量	$k=1$		$k=2$		$k=3$	
A_1	{s}	$c_1^{(1,1)}$	$V_1^{(1,1)}$	$c_1^{(1,2)}$	$V_1^{(1,2)}$	$c_1^{(1,3)}$	$V_1^{(1,3)}$
	{1}			$c_2^{(1,2)}$	$V_2^{(1,2)}$	$c_2^{(1,3)}$	$V_2^{(1,3)}$
A_2	{2}	$c_2^{(2,1)}$	$V_2^{(2,1)}$			$c_2^{(2,3)}$	$V_2^{(2,3)}$
	{3}	$c_2^{(3,1)}$	$V_2^{(3,1)}$	$c_2^{(3,2)}$	$V_2^{(3,2)}$		
	{1,2}					$c_3^{(1,3)}$	$V_3^{(1,3)}$
A_3	{1,3}			$c_3^{(2,2)}$	$V_3^{(2,2)}$		
	{2,3}	$c_3^{(3,1)}$	$V_3^{(3,1)}$				

$c_i^{(g,k)}$ 表示第 i 阶段控制顺序为 “ $A_i(g)-k$ ” 所对应的电压波动值; $A_i(g)$ 表示向量 A_i 的第 g 个元素; $i=1,2,\dots,m$; $g=1,2,\dots,C_m^{i-1}$ 。

假设该补偿控制决策只有 3 个电压控制变量, 即 $m=3$, 其求解最优策略过程如下:

1) 利用已有无功优化结果, 根据灵敏度方程求出控制变量 k 在节点 j 产生的电压增量 $\Delta V_k(j)$, $j=1,2,\dots,n$, $k=1,2,3$ 。通过计算可知, 控制过程中电压增量导致的灵敏度微小变化对计算结果影响很小, 可以忽略不计, 因此, 本文只对灵敏度计算 1 次, 以提高计算速度。

2) 从优化后系统状态 s 出发, 即 $A_1=[\{s\}]$, 形成控制顺序 “ $A_1(g)-k$ ”, 计算节点 j 因电压增量 $\Delta V_k(j)$ 产生的新电压值 $V_1^{(g,k)}(j)$, 同时判断是否满足方程(6)的约束条件。当所有节点电压都满足时, 则按方程(4)计算方差 $c_1^{(g,k)}$ 。

3) 生成仅有 1 个控制变量的子集, 并存入矩阵 A_2 中, 即 $A_2=[\{1\},\{2\},\{3\}]$ 。令 k 与 A_2 中不包含 k 的子集组合, 形成控制顺序 “ $A_2(g)-k$ ”, 计算 $V_2^{(g,k)}(j)$, 然后按步骤 2) 的方法计算方差 $c_2^{(g,k)}$ 。

4) 生成仅有 2 个元素的子集, 并存入矩阵 A_3 中, 即 $A_3=[\{1,2\},\{1,3\},\{2,3\}]$, 令 k 与 A_3 中不包含 k 的子集组合, 形成控制顺序 “ $A_3(g)-k$ ”, 按步骤 2) 的方法求出使 $c_3^{(g,k)}$ 取值最小的控制顺序, 并将该控制顺序存入 $A_3(g)$ 中, 将新的电压值存入 $V_3^{(g,k)}$ 中, 现以 $c_3^{(3,1)}$ 为例说明:

从表 1 中可以看出, $c_3^{(3,1)}$ 对应的控制顺序为 “ $\{2,3\}-1$ ”, 则有 2 条路径 L_1 、 L_2 :

$$L_1: s-3-2-1$$

$$L_2: s-2-3-1$$

路径 L_1 、 L_2 对应的各节点电压 $V_{L1}(j)$ 、 $V_{L2}(j)$ 分别为

$$V_{L1}(j) = V_2^{(3,2)}(j) - \Delta V_1(j) \quad (7)$$

$$V_{L2}(j) = V_2^{(2,3)}(j) - \Delta V_1(j) \quad (8)$$

若 V_{L1} 、 V_{L2} 中的节点电压均不越限, 则计算电压波动值 c_{L1} 、 c_{L2} :

$$c_{L1} = [2 \cdot c_2^{(3,2)} + (V_{L1}(1) - \bar{v})^2 + (V_{L1}(2) - \bar{v})^2 + \dots + (V_{L1}(n) - \bar{v})^2] / 3 \quad (9)$$

$$c_{L2} = [2 \cdot c_2^{(2,3)} + (V_{L2}(1) - \bar{v})^2 + (V_{L2}(2) - \bar{v})^2 + \dots + (V_{L2}(n) - \bar{v})^2] / 3 \quad (10)$$

由于

$$c_3^{(3,1)} = \min(c_{L1}, c_{L2}) \quad (11)$$

若 $c_{L2} < c_{L1}$, 则有

$$c_3^{(3,1)} = c_{L2}, \quad V_3^{(3,1)} = V_{L2}, \quad A_3(3) = \{3, 2\}$$

5) 比较 c_3 中各元素的值, 最小值对应的控制顺序即为最优电压控制策略。

1.3 自愈策略中电压自动控制方案设计

应用上述理论, 编制电压自动控制程序, 将其嵌入到自愈控制软件中, 借助于已有的无功优化结果, 得到最优电压控制策略, 并自动发送到相应的控制设备, 协调完成电网自愈。电压自动控制方案流程见图 1。

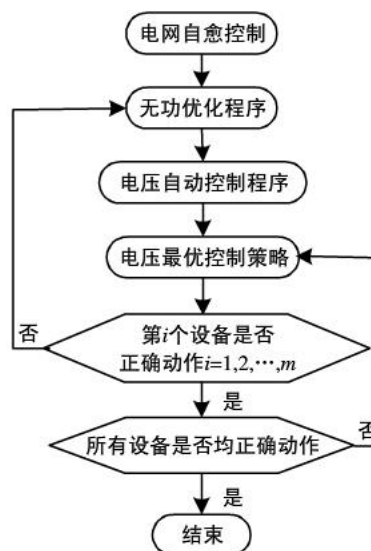


图 1 自愈策略中电压自动控制方案流程

Fig. 1 Flow chart of voltage automatic control scheme in self-healing strategy

2 算例和结果分析

应用上述电压自动控制策略模型对 IEEE-30 节点系统进行计算, 系统参数参照文献[13], 无功优化结果来自文献[14], 控制设备编号及优化后控制变量取值见表 2。

表 2 优化后的控制变量取值

Tab. 2 Control variables' value after optimization

编号	发电机节点	节点电压 (标么值)	编号	补偿节点	电容电纳 (标么值)
1	1	1.1	7	10	0.4
2	2	1.098 4	8	24	0.1
3	5	1.070 4	编号	变压器支路	变压器变比
4	8	1.082 4	9	6-9	1.025
5	11	1.027 6	10	6-10	1
6	13	1.1	11	4-12	0.975
			12	28-27	0.975

运行该程序可得到以电压波动最小为目标的最优控制策略, 现将电压波动指标最小的 3 个控制策略列于表 3, 电压期望值 $\bar{v}=1.05$ 。

采用传统控制策略(1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12),

表 3 控制策略与电压波动指标

Tab. 3 Control strategy and voltage fluctuation index	
控制策略	电压波动指标
4-3-8-10-9-7-11-12-5-1-2-6	0.007 1
3-4-8-10-9-7-11-12-5-1-2-6	0.008 7
7-4-9-3-10-12-8-11-5-1-2-6	0.008 8

注: 控制策略按表 2 的设备编号排序。

即先投切电容器、再调整变压器分接头, 控制过程中会出现节点电压越限, 但为了更好地说明问题, 本文采用随机顺序的控制策略(1-2-3-4-6-7-8-5-9-10-11-12)与最优控制策略(4-3-8-10-9-7-11-2-5-1-2-6)进行对比分析。图 2 显示了随机顺序的控制策略下各阶段电压变化情况, 由于篇幅限制, 只列举了第 6-10 阶段电压变化情况。从图 2 中可以看到, 控制过程中某些节点出现了电压临时越限。图 3 显示了采用最优控制策略的电压变化情况, 从图中可以看到, 控制过程中没有出现节点电压越限。两图对比可知, 在随机控制过程中电压临时越限的情况是存在的, 若按优化后的控制策略进行电压调节, 就可以避免这种情况的发生。

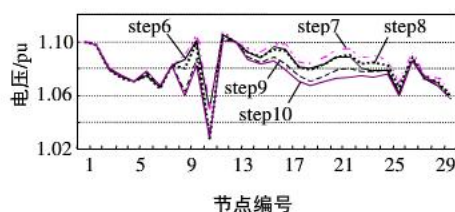


图 2 采用控制策略(1-2-3-4-6-7-8-5-9-10-11-12)时的电压变化情况

Fig. 2 Voltage fluctuation for control strategy(1-2-3-4-6-7-8-5-9-10-11-12)

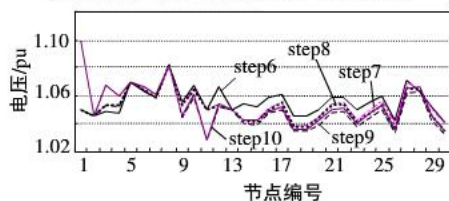


图 3 最优控制策略电压变化情况

Fig. 3 Voltage fluctuation for optimal control strategy

图 4 显示的是采用随机顺序的控制策略进行电压控制时各节点电压的变化情况, 因篇幅限制, 仅列举了 4 个节点。可以看到, 控制过程中节点电压幅值变化较大, 某些节点出现了电压临时越限, 即使没有越限的节点, 其电压幅值也很接近上限, 对系统安全不利。图 5 显示的是采用最优控制策略进行电压控制时各节点电压的变化情况, 由图可见, 各节点电压均实现了逐步平稳过渡, 不仅没出现电压越限, 而且电压稳定裕度较大。因此, 采用最优控制策略进行电压控制, 有利于提高系统的安全性。

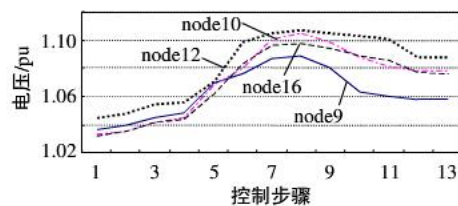


图 4 采用控制策略(1-2-3-4-6-7-8-5-9-10-11-12)时节点 9、10、12、16 电压变化情况

Fig. 4 Voltage fluctuation of node 9,10,12,16 for control strategy (1-2-3-4-6-7-8-5-9-10-11-12)

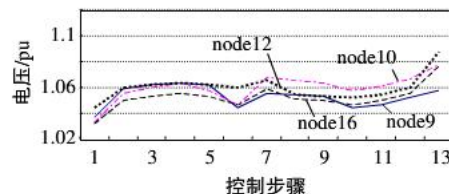


图 5 最优控制策略节点 9、10、12、16 电压变化情况

Fig. 5 Voltage fluctuation of node 9,10,12,16 for optimal control strategy

3 结论

本文在已有的无功优化算法基础上, 提出了电压自动控制策略, 作为自愈策略的一部分可以用于优化控制^[15]或校正控制^[16], 通过对 IEEE-30 节点系统仿真计算表明该方法可以得到较好的优化效果。

1) 本文提出的智能电网电压自动控制策略, 能够根据运行状态给出相应的控制设备动作顺序, 不需要人工干预即可得到当前运行工况下电压最优控制方案。

2) 将目标函数定义为各节点电压与电压期望值方差的最小值, 不仅实现了控制过程中电压平稳、逐步地过渡, 有效地防止了节点电压越限, 同时也提高了电压稳定裕度, 有利于系统的安全。

3) 该电压自动控制策略模型不仅可以给出最优控制策略, 也可以给出次优控制策略, 甚至更多的可行控制策略, 为实际操作提供了更多的选择。

在本文所提出的电压自动控制策略中, 灵敏度和大量的重叠子问题都只计算了 1 次, 且只存储前后 2 次计算结果, 一定程度上弥补了动态规划法在计算速度和存储空间上的缺陷, 对于大规模电网而言, 可以考虑采用分层分区的方法进一步提高其计算速度。在实际电压控制过程中, 除了考虑系统安全性外, 还应考虑其经济性, 如控制过程中造成的设备绝缘水平降低、使用寿命缩短及系统电能损耗等, 因此如何使电压自动控制策略兼顾安全性和经济性, 是后续研究有待完善的地方。

参考文献

- [1] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7(in Chinese).
- [2] 万秋兰. 大电网实现自愈的理论研究方向[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 29-32.
Wan Qiulan. Theory Study for self-healing of large power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 29-32(in Chinese).
- [3] 余贻鑫. 智能电网的技术组成和实现顺序[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 1-5.
Yu Yixin. Technical composition of smart grid and its implementation sequence[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(2): 1-5(in Chinese).
- [4] 张勇军, 任震, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56.
Zhang Yongjun, Ren Zhen, Li Bangfeng. Survey on optimal reactive power dispatch of power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 50-56(in Chinese).
- [5] 王明俊. 自愈电网与分布能源[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 1-7.
Wang Mingjun. Self-healing grid and distributed energy resource [J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 1-7(in Chinese).
- [6] 任晓娟, 邓佑满, 周立国, 等. 高中压配电网的无功优化算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 45-49.
Ren Xiaojuan, Deng Youman, Zhou Liguang, et al. Reactive power optimization for high-medium voltage distribution systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 45-49(in Chinese).
- [7] 潘蕾蕾, 刘俊勇. 考虑控制动作顺序影响的地区电网无功优化实时控制系统研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 110-118.
Pan Leilei, Liu Junyong. Investigation of regional real-time var optimization control system considering the impact of order of control actions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 110-118(in Chinese).
- [8] 黄伟, 邓勇, 丁晓群, 等. 考虑控制动作顺序的省网电压控制系统[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 79-83.
Huang Wei, Deng Yong, Ding Xiaoqun, et al. Research on automatic voltage control system of provincial power network considering impact of sequence of control actions[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 79-83(in Chinese).
- [9] 袁骏, 段献忠, 何仰赞, 等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 7-10.
Yuan Jun, Duan Xianzhong, He Yangzan, et al. Summarization of the sensitivity analysis method of voltage stability in power systems [J]. Power System Technology, 1997, 21(9): 7-10(in Chinese).
- [10] 江伟, 王成山, 余贻鑫, 等. 电压稳定裕度对参数灵敏度求解的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 13-18.
Jiang Wei, Wang Chengshan, Yu Yixin, et al. A new method to compute the sensitivity of loading margin to voltage collapse with respect to parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 13-18(in Chinese).
- [11] 吴杰康, 胡文霞, 秦砾寒, 等. 计及 TCSC 的电压稳定性灵敏度指标计算[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 12-16.
Wu Jiekang, Hu Wenxia, Qin Lihan, et al. Calculation of sensitivity index for voltage stability of power system with thyristor controlled series compensator[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 12-16(in Chinese).
- [12] Mota-Palomino R, Quintana V H. Sparse reactive power scheduling by a penalty function-linear programming technique[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(3): 31-39.
- [13] 吴际舜. 电力系统潮流计算的计算机方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 160-163.
- [14] 范宏, 韦化. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 6-9.
Fan Hong, Wei Hua. Application of improved genetic algorithm in reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(1): 6-9(in Chinese).
- [15] 河海大学. 城市电网运行的自愈控制方法: 中国, CN101594002[P]. 2009-12-02.
- [16] 国网电力科学研究院. 城市配电网自愈控制方法: 中国, CN101436780A[P]. 2008-10-24.



卢锦玲

收稿日期: 2011-09-20.

作者简介:

卢锦玲(1971), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, E-mail: hujinling@126.com;

白丽丽(1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制。

(责任编辑 李兰欣)