

# 配电网高低压综合电压/无功优化方法

焦明明, 杨仁刚, 牛焕娜

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 在10 kV线路上装设无功补偿装置可以有效地改善电压、提高运行经济性的前提下, 提出了10 kV配电网高低压综合电压无功优化模型, 该模型在传统的低压侧补偿、首端电压以及配变分接头调整控制的基础上融入了10 kV线路补偿控制, 并提出了遗传算法应用于配电网电压无功优化时的初始群体产生两步法, 介绍了采用该改进的遗传算法求解该综合优化模型的处理方法和主要步骤。采用门头沟一条实际的10 kV配电线路进行优化说明了将10 kV侧无功补偿纳入电压无功补偿模型进行综合考虑的必要性与可行性。

**关键词:** 配电网; 经济运行; 电压/无功综合优化; 降损; 10 kV线路补偿

## Voltage and reactive power integrated optimization algorithm in distribution systems

JIAO Ming-ming, YANG Ren-gang, NIU Huan-na

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The installation of the 10 kV line reactive power compensation device can effectively improve the voltage and increase the operating economy. Voltage and reactive power integrated optimization algorithm in 10 kV distribution systems is proposed on this premise. The model adds 10 kV line compensation control to the traditional voltage and reactive power optimization considering low-voltage side compensations, the first terminal voltage and distribution transformer tap. This paper presents an improved genetic algorithm and introduces the approach and main steps of using this algorithm to solve the integrated optimization. Finally, a real 10 kV distribution line of Mentougou has been optimized, which shows that it is very necessary and feasible to add 10 kV line side compensation into voltage and reactive power compensation.

**Key words:** distribution system; economic operation; voltage/reactive power comprehensive optimization; reducing loss; 10 kV line compensation

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0137-05

## 0 引言

配电网是电力产销关系的最终环节, 其面广线长, 通常都是线损大户, 而随着配电网负荷日益增长, 无功需求相应增加, 损耗也随之增加, 而配电网无功合理的补偿可以很好地降低电能的损耗, 几十年来国内外对此进行了大量研究<sup>[1-6]</sup>。目前我国配电网无功补偿主要有三种形式, 第一种是专用和公用变压器低压侧(0.4 kV侧)进行补偿; 第二种是在无功负荷终端进行就地补偿; 第三种是在10 kV杆上进行集中补偿。由于前两种都存在安装分散、不便于管理和维护的缺点, 及其造成的线路损耗居高不下和用户电压质量低等问题, 10 kV侧线路补

偿因其补偿装置集中、设备利用率高又便于维护等优点越来越被重视<sup>[7-12]</sup>。因此, 将10 kV侧无功补偿纳入配电网电压/无功优化模型进行综合考虑十分必要。本文是在文献[13]基础上提出了采用10 kV侧线路补偿、配电变压器低压侧补偿、首端电压调整以及配电变压器分接头调整综合控制的高低压综合电压/无功优化方法。

## 1 数学模型

该数学模型是在现有的配电网电压无功优化模型的基础上改进并提出的, 为了简化该数学模型, 本文首先采用了文献[13]中提到的模糊聚类方法对负荷进行分阶段处理。

### 1.1 状态变量与控制变量

配电网电压无功优化的状态变量是指除了首节

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ04B06)

点以外的其他所有节点的电压与相角，而目前研究考虑最全面的控制变量包括首端电压、配变低压侧电容器无功补偿装置以及无载调压配电变压器分接头的位置<sup>[13]</sup>，本文中提出的配电网高低压综合电压无功优化模型在三个控制变量的基础上增加了 10 kV 线路侧电容器无功补偿控制量。

设 10 kV 线路侧有  $P$  个节点装有电容器补偿装置，那么  $s$  个时段形成的无功补偿容量矩阵为：

$$Q_{LC} = \begin{pmatrix} Q_{LC11} & \cdots & Q_{LC1p} \\ \vdots & Q_{LCij} & \vdots \\ Q_{LCs1} & \cdots & Q_{LCsp} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中， $Q_{LCij}$  为第  $i$  时段第  $j$  个补偿点无功补偿容量。

### 1.2 目标函数

考虑配电变压器分接头位置、线路首端电压、配变低压侧无功补偿以及 10 kV 线路侧无功补偿的综合控制，本文的目标函数为网络损耗最小：

$$\min W = \sum_{i=1}^s [P_{\text{loss}(i)}(U_{li}, Q_{ci}, Q_{lci}, K) \times T_i] \quad (2)$$

式中： $S$  为负荷分段时段数； $T_i$  为第  $i$  个时段持续的时间； $P_{\text{loss}(i)}$  为第  $i$  时段网络总的损耗，它是配变分接头位置向量  $K$ ，第  $i$  时段首端电压、第  $i$  时段配变低压侧补偿无功容量向量  $Q_{ci}$  以及第  $i$  时段 10 kV 线路无功补偿容量向量  $Q_{lci}$  为控制变量的函数。

### 1.3 约束条件

该数学模型的约束条件包括线路潮流平衡方程、电压不等式约束、配变低压侧电容器补偿容量约束、配电变压器分接头档位约束以及本文新提出了 10 kV 线路补偿电容器补偿容量约束，前面四种约束条件在诸多文献中已有介绍，式 (3) 是 10 kV 线路补偿电容器补偿容量约束不等式：

$$Q_{lci \min} \leq Q_{lc(i,j)} \leq Q_{lci \max} \quad (3)$$

式中： $Q_{lc(i,j)}$  为第  $i$  时段第  $j$  个线路补偿节点无功补偿容量，单位为 kvar； $Q_{lci \min}$  和  $Q_{lci \max}$  为分别是第  $j$  个节点线路补偿电容器补偿容量的下限和上限。

## 2 优化算法及改进研究

10 kV 配电网高低压综合电压/无功优化模型是一个非常复杂的非线性规划问题，在本文中采用改进的遗传算法进行优化计算。遗传算法应用于电压无功优化中应包含以下五大要素：(1) 适应度函数的计算；(2) 控制变量的编码；(3) 初始群体的产生；(4) 选择、交叉、遗传；(5) 算法终止条件。本文中运用的改进遗传算法主要是针对初始群体产

生过程进行的改进。

### 2.1 改进遗传算法

(1) 适应度函数  $F$  的计算

为满足电压要求，把电压以罚函数的形式加入到目标函数中以形成增广目标函数如式 (6)：

$$f_i = W_i + \beta \sum_{l=1}^s \sum_{j=1}^n (\Delta U_{lj}) \quad (4)$$

其中： $f_i$ ， $W_i$  分别表示第  $i$  个个体的增广目标函数和有功电能损耗； $\beta$  为罚系数； $s$  为负荷分段个数； $n$  为节点数。

$$\Delta U_{lj} = \begin{cases} U_{lj} - U_{\max} & U_{lj} > U_{\max} \\ 0 & U_{\min} \leq U_{lj} \leq U_{\max} \\ U_{\min} - U_{lj} & U_{lj} \leq U_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

其中： $U_{lj}$  为第 1 时段第  $j$  节点的电压； $U_{\max}$ ， $U_{\min}$  为分别为节点电压的上下限。

本文中目标函数值越小表示网损越小，该个体应当有越大的适应度，因此本文中以增广目标函数的倒数作为适应度函数。

(2) 控制变量的编码

本文采用十进制整数编码建立解空间与染色体之间的一一对应关系<sup>[13]</sup>。

1) 首端电压编码：电压范围为  $[U_b - \Delta U, U_b + \Delta U]$ ，可以根据实际需要确定  $\Delta U$  来控制电压取值范围， $U_b$  为基准电压值，确定一个电压的变化间隔  $\delta_U$ ，则电压编码

$$U_{Mi} \in \left\{ 0, 1, \dots, \frac{2\Delta U}{\delta_U} \right\} \quad (6)$$

实际首端电压值与电压整数编码之间的转换关系为：

$$U_{li} = (U_b - \Delta U) + \delta_U U_{Mi} \quad (7)$$

2) 配变低压侧电容器无功补偿编码

对于逐级投切的低压电容器组，电容实际补偿容量与整数编码之间的编码关系为：

$$Q_{ci} = C_i \delta_{ci} \quad C_i \in \{0, 1, \dots, N_{ci}\} \quad (8)$$

式中： $N_{ci}$  为第  $i$  个配变装设的电容器组数； $\delta_{ci}$  为电容器组单组容量。

3) 10 kV 线路补偿电容器编码

同理，对于逐级投切的 10 kV 侧高压电容器组电容器实际补偿容量与其整数编码之间的译码关系为：

$$Q_{Lci} = C_{Li} \delta_{Lci} \quad C_{Li} \in \{0, 1, \dots, N_{Lci}\} \quad (9)$$

式中： $N_{Lci}$  表示节点  $i$  带有电容器的组数； $\delta_{Lci}$  表示节点  $i$  所带电容器的单组容量。

4) 配变变压器分接头编码: 根据分接头档位与配变变比之间的关系直接取档位表示。

$$K_{Ti} [K_i] = \left[ \left( 1 + \frac{N_{Ti} - 1}{2} \delta_{Ti} \right) - (K_i - 1) \delta_{Ti} \right] \times \frac{U_{1b}}{U_{2b}} \quad (10)$$

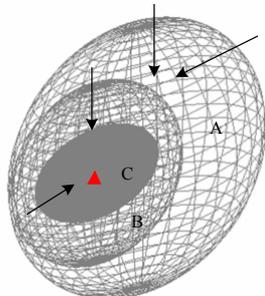
式中:  $\delta_{Ti}$ 、 $N_{Ti}$  表示配变  $i$  的抽头级差与总档位数;  $U_{1b}$ 、 $U_{2b}$  分别表示配电变压器高低压侧电压基准值。

### (3) 初始群体的产生

通常遗传算法要求产生的初始群体个体的控制变量在其取值范围内尽可能均匀分布, 而这样产生的初始群体通常会存在大量的不可行个体, 如果这些不可行个体不进行修正而直接进入后续的选择、交叉、变异等操作会直接影响算法的收敛性能和计算速度。鉴于上述问题, 本文提出了初始群体产生两步法对算法进行了改进。

#### 1) 初始群体产生两步法

第一步: 在控制变量取值范围内随机产生原始个体形成较大规模 (规模为  $V$ ) 的原始群体, 如图 1 中 A; 第二步: 利用不可行个体修正方法对第一步中产生的不可行个体进行修正, 从而将大多数的不可行个体变为可行个体, 然后去除那些不可修正的个体 (如图 1 中 B 区), 最终由所有的可行个体 (规模为  $M$ ) 形成初始群体 (如图 1 C 区)。



A 为原始群体; B 为修正后仍然不可行的个体集合;

C 为初始群体; ▲ 为最优解

图 1 初始群体的两步产生法原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-step generation method of initial group

#### 2) 不可行个体修正方法

本文中采用的不可行个体的修正方法分为两个步骤。

第一步: 鉴于 10 kV 线路无功补偿采用减小从首节点流向末节点的无功功率从而减少损耗的原理, 对于安装有 10 kV 侧线路电容器补偿装置的节点, 本文采用节点注入无功功率大小作为线路补偿电容器组投切的依据进行修正。

当  $0 < Q_i < \delta_{Lci}$  时, 电容器组编码数保持不变;

当  $(N_{Lci} - 1) \delta_{Lci} < Q_i < N_{Lci} \delta_{Lci}$  时, 电容器组编码数在原基础上投入  $N_{Lci} - 1$  组; 其中  $i$  表示节点号。

投入电容器组后应保证不发生无功倒送, 即该节点的无功功率不能为负值。同理, 如果该节点的注入无功功率为负值, 那么按照同样的原则逐次切除电容器组。

第二步: 以配变高压侧与低压侧电压越限情况为依据对无载调压变压器分接头以及配变低压侧设置的无功补偿电容器组进行调整<sup>[13]</sup>。

#### (4) 选择、交叉、遗传

把所有个体按照适应度大小排序, 选择适应度较高的个体 (群体规模的一半个体) 进行简单的交叉变异操作。

#### (5) 算法终止条件

达到预定的最优个体保持代数或者最大进化代数时停止优化, 并输出最优个体。

## 3 计算过程

本文中考虑 10 kV 线路补偿的高低压综合无功优化算法的主要计算步骤如下:

1) 读取原始网络的参数以及配变负荷信息, 使用该原始负荷进行负荷预测。

2) 对预测得来的负荷数据进行负荷分类处理<sup>[13]</sup>。

3) 采用 2.1 (3) 节介绍的初始群体两步法产生初始群体。

4) 计算群体中每个个体的适应度, 并从大到小进行排序后, 选出最优个体并保存下来。

5) 根据进化终止判据进行判断, 如果满足条件则停止优化并保存最优个体, 否则进行第 (6) 步。

6) 进行选择、交叉以及变异该操作产生的个体。

7) 经过上述提出的不可行个体修正两步走修正方法修正形成了新一代群体, 然后转入步骤 (4)。

## 4 实例分析

### 4.1 系统原始资料相关说明

本文选择了北京市门头沟的某条 10 kV 线路进行了高低压综合电压无功优化计算分析。该线路的拓扑结构如图 2 所示; 该条 10 kV 线路共有 48 个节点, 75 个配电变压器, 在拓扑接线图中除了第 32 节点和第 38 节点是传输节点外, 其他节点均为配变节点, 其中第 22 节点装有 10 kV 线路补偿电容器组。首端电压范围设置为 [9.5 kV, 10.5 kV], 配电变压器低压侧电压范围设置为 [220 V, 245 V], 该线路

上所有配变的分接头调整档位均为三个档位：  
①10.5/0.4；②10/0.4；③9.5/0.4，本实例中设配变分接头原始位置均为②档。该 10 kV 线路补偿电容

器装在第 22 节点，共装有四组，单组容量均为 100 kvar。配变低压侧补偿电容器组数及容量如表 1。

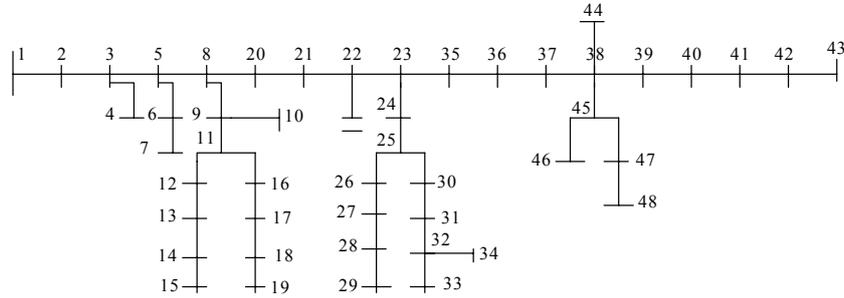


图 2 系统拓扑图

Fig.2 Topology of distribution system

表 1 配变低压侧电容器配置表

Tab.1 Capacitor data of transformer low-voltage side

节点号	安装组数	补偿总容量 / kvar
4	20	200
6	10	100
8	10	100
9	10	100
12	10	100
13	10	100
15	10	100
17	10	100
21	10	100
24	10	100
30	20	200
36	10	150
37	10	100

本文采用模糊聚类方法对预测得到的负荷进行分段处理<sup>[13]</sup>，处理后的负荷为分为了六个阶段。

#### 4.2 优化计算结果

采用本文改进的遗传算法对上述 10 kV 配电网进行高低压综合电压无功优化结果如下。

1) 10 kV 侧线路补偿容量优化决策向量  $Q_{lc}$

10 kV 侧线路无功补偿点在各负荷时段的补偿容量如表 2。

表 2 10 kV 侧电容器补偿优化结果

Tab.2 Result of optimal 10 kV line capacitor

第 22 节点	负荷阶段					
	1	2	3	4	5	6
补偿组数	0	1	3	0	0	0
补偿容量 / kvar	0	100	300	0	0	0

2) 配变低压侧补偿容量优化决策向量  $Q_c$

各补偿点在各个负荷时段电容器无功补偿优化决策值见表 3。

表 3 配电变压器低压侧电容器补偿优化结果

Tab.3 Result of optimal the capacitor of low-voltage side of transformer

节点号	kvar					
	负荷阶段					
	1	2	3	4	5	6
4	70	120	30	70	120	140
6	90		100	70	90	80
8	100	100	30	100	100	80
9	90	20	70	30	70	100
13	80	60	60	50	60	60
15	100	100	100	90	100	100
17	100	100	100		100	100
21	70	70	20		20	80
24	80	60	40	20	40	20
30	160	20	120		60	140
36	90	15	30		120	135
37	60	80	10		50	40

3) 分接头优化位置决策向量  $K$

原始网络中的配电变压器的分接头均是位于②档，将优化后分接头位置发生变化的节点列于表 4，未被列出的保持不变。

4) 线路首端电压的优化决策向量  $U$

线路首端电压的优化决策结果如表 5 所示。

5) 网络损耗对比

表 6 分别列出了原始网络下的网络损耗，没有 10 kV 线路补偿时的优化网络损耗，以及使用本文高低压综合优化后的网络损耗进行了对比，单位为 kW。

表4 配变档位优化结果

节点	优化前档位	优化后档位
5	②	③
10	②	③
14	②	③
25	②	③
28	②	③
29	②	③
34	②	③
39	②	③
47	②	③

表5 运行电压优化结果

	负荷阶段					
	1	2	3	4	5	6
首端电压/kV	9.6	9.6	9.7	10	9.6	9.6

表6 网络损耗对比分析表

阶段号	原始网络	没有 10 kV 线路补偿时的	本文中 10 kV 线路高低压综合电压无功优化结果
		优化网络	化结果
1	405.387	371.650	365.671
2	257.821	238.444	240.518
3	78.528	75.802	75.147
4	321.908	317.611	296.972
5	285.718	262.652	254.670
6	65.758	60.862	60.787
总损耗 / kW	42 453.601	39 810.646	38 812.939

从表中可以得出: 没有 10 kV 线路补偿时的电压无功优化相比原始网络损耗降低了 6.2%, 而本文提出的配电网高低压综合电压无功优化方案相比原始网络损耗降低了 8.6%, 比只考虑低压不考虑高压的优化方案损耗降低了 2.4%, 由此可见, 本文提出的配电网高低压综合优化方法降损效果明显, 由于本文采用的实例负荷较轻, 所以电压质量上的改善不是十分明显, 如果在重负荷下运行, 本文的综合优化算法不仅可以降低损耗, 而且可以明显地改善电压质量。总之, 本文的优化模型在保证电压质量的前提下, 可以明显地降低配电网的损耗。

## 5 结论

10 kV 馈线上无功优化补偿对配电网网损的进

一步降低有着显著的作用, 同时也可以很好地提高电压水平, 提高配电网的功率因数。本文提出的配电网高低压综合电压/优化算法模型简单易行, 容易理解, 并且通过实例计算可知, 采用本文提出的方法对配电网损耗的降低有明显的的作用, 不仅证明了该算法的可行性与有效性, 同时也说明了进行 10 kV 线路补偿的必要性。

## 参考文献

- [1] Kaplan M. Optimization of number, location, size, control type and control setting of shunt capacitors on radial distribution feeders[J]. IEEE Trans on PAS, 1984, 103: 2659-2668.
- [2] 任江波, 郭志忠, 段俊东. 配电网潮流的数字特征及其应用研究[J]. 继电器, 2003, 31(12): 26-28. REN Jiang-bo, GUO Zhi-zhong, DUAN Jun-dong. Research on numerical characteristics and the applications of power flow of distribution networks[J]. Relay, 2003, 31(12): 26-28.
- [3] 胡海燕, 刘健, 武晓滕. 配电网低压侧自动无功补偿装置安装位置的优化规划[J]. 继电器, 2004, 32(19): 21-25. HU Hai-yan, LIU Jian, WU Xiao-meng. Optimal placement of automatic reactive compensation equipment on the low voltage side of distribution transformers[J]. Relay, 2004, 32(19): 21-25.
- [4] 节能技术[M]. 七期. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1985. Energy-saving technology[M]. Seventh. Chongqing: Science and Technology Literature Press, Chongqing Branch, 1985.
- [5] 王主丁, 杨秀台, 徐国禹, 等. 配电网并联电容器的优化补偿——补偿容量、组数及位置的优化[J]. 电力技术, 1987, 11: 26-30.
- [6] 吴启富, 王主丁. 配电网无功高低压综合优化补偿模型[J]. 四川电力技术, 1994, 1: 13-16. WU Qi-fu, WANG Zhu-ding. Integrated optimization model for high and low voltage distribution network reactive power compensation[J]. Sichuan Electric Power Technology, 1994, 1: 13-16.
- [7] 杨素琴. 基于配电网经济运行的馈线无功优化补偿[J]. 南京工程学院学报:自然科学版, 2004, 2(4): 36-40. YANG Su-qin. A method of optimizing shunt capacitors on feeders in the economic operation of distribution system[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology: Natural Science Edition, 2004, 2(4): 36-40.
- [8] 李涛. 配电网经济运行决策措施的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

(下转第 177 页 continued on page 177)

- wireless-recording system[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 2007, 35 (12): 53-55.
- [7] 郭飞, 陈根永, 张德玲. 基于 RS-485 接口的电能计量数据采集[J]. 微计算机信息, 2007, 23 (8): 99-101. GUO Fei, CHEN Gen-young, ZHANG De-ling. Data collecting technology of the electric power metering based on RS-485[J]. Microcomputer Information, 2007, 23 (8): 99-101.
- [8] 闫宝瑞. 基于 RS-485 的 PLC 与多功能电能表通信的实现[J]. 电气应用, 2006, 25 (7): 71-73. YAN Bao-ru. The realization of PLC communication with multi-faction watt-hour meter based on RS-485[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25 (7): 71-73.
- [9] 樊建学, 盛新富. 低压电力线载波集中抄表系统的研究[J]. 继电器, 2005, 33 (17): 49-52. FAN Jian-xue, SHENG Xin-fu. Research on automatic meter reading system for low-voltage customers[J]. Relay, 2005, 33 (17): 49-52.
- [10] 王琼, 刘正琼, 陈雁翔, 等. 红外遥控技术在智能抄表系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (6): 1901-1902, 1912. WANG Qiong, LIU Zheng-qiong, CHEN Yan-xiang, et al. Method of infrared communication in the application of intellectualized meter checking system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (6): 1901-1902, 1912.
- [11] 电力工业部电测量标准化技术委员会. DL/T 645-1997 多功能电能表通信规约[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998. Electrical Measurement of Electric Power Industry Standardization Technical Committee. DL/T 645-1997 multi-function watt-hour meter communication protocol[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [12] 曾庆喜, 王强, 杨英杰. nRF2401 与 SPI 接口的软硬件解决方案[J]. 东北电力大学学报: 自然科学版, 2006, 26 (1): 45-47. ZENG Qing-xi, WANG Qiang, YANG Ying-jie. A software and hardware solution of the interface between nRF2401 and SPI of MCU[J]. Journal of Northeast Dianli University: Natural Science Edition, 2006, 26 (1): 45-47.
- [13] 谭浩强. C 程序设计[M]. 二版. 北京: 清华大学出版社, 2004. TAN Hao-qiang. C program design[M]. Second edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

收稿日期: 2010-01-05; 修回日期: 2010-03-13

作者简介:

黄建业 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网自动化; E-mail: 305235659@qq.com

李双洋 (1978-), 男, 工程师, 主要从事配电、营销管理相关的技术工作;

郭谋发 (1973-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统自动化。

(上接第 141 页 continued from page 141)

- LI Tao. Study on decision making for economic operation in distribution system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [9] 王道普, 杨天顺. 10 kV 高压配电线路无功补偿的优化计算[J]. 节能, 2006(11): 29-31. WANG Dao-pu, YANG Tian-shun. Optimize the calculation of reactive power compensation of 10 kV high voltage distribution lines[J]. Energy Conservation, 2006(11):29-31.
- [10] 李泳泉, 金华芳. 10 kV 配电线路无功补偿的选择[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(2): 1-5. LI Yong-quan, JIN Hua-fang. Selection of the reactive power compensation for 10 kV distribution line[J]. Power Capacitor & Reactive Power Copmensation, 2008, 29(2): 1-5.
- [11] 李惠玲, 高振江, 庞占星, 等. 基于全网无功优化的配电网无功优化系统的设计[J]. 继电器, 2008, 36(10): 31-35. LI Hui-ling, GAO Zhen-jiang, PANG Zhan-xing, et al. Design of reactive power management system for distribution network based on reactive power optimization of the whole diatribution network[J]. Relay, 2008, 36(10): 31-35.
- [12] 王新年. 配电网电压无功优化控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2006. WANG Xin-nian. Reactive power optimization and voltage control in distribution networks[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [13] 夏继红, 牛焕娜. 计及配变无载调压分接头位置的电压/无功优化方法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 118-112. XIA Ji-hong, NIU Huan-na. Voltage and reactive power optimization algorithm incorporating off-load tap changer transformer in distribution systems[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 118-112.

收稿日期: 2010-01-11; 修回日期: 2010-04-04

作者简介:

焦明明 (1986-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: jiaomm0306@126.com

杨仁刚 (1953-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: yrg@cau.edu.cn

牛焕娜 (1976-), 女, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化。