

## 多目标配电网综合节能潜力评估

曾建敏<sup>1</sup>, 白先红<sup>2</sup>, 张勇军<sup>1</sup>, 杨向宇<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广西电网公司计划发展部, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 由于某些配电网改造措施既能使网损下降亦能使线路电压质量得到改善, 因此创新地提出了结合节能及电压质量改善的综合节能潜力评估方法。根据实际情况对某地区线路进行分类, 抽取典型线路进行六项改造措施的综合节能潜力计算。根据各措施的综合节能潜力排名值, 得到适合各线路的改造方案。以南方某市配电线路为例, 进行综合节能潜力评估, 提出适宜的改造方案。

**关键词:** 节能评估; 规划; 电压质量; 多目标; 配电网

### Multi-objective comprehensive energy saving potential evaluation of distribution networks

ZENG Jian-min<sup>1</sup>, BAI Xian-hong<sup>2</sup>, ZHANG Yong-jun<sup>1</sup>, YANG Xiang-yu<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Dept of Plan & Development, Guangxi Power Grid Company, Nanning 530023, China)

**Abstract:** Because some remaking measures can reduce the line-loss of the distribution network further and improve the voltage quality, this paper puts forward an assessment method including the energy saving and the voltage quality improving. Firstly, the lines should be classified according to the actual situation of a certain area. Then it picks up several typical lines to the comprehensive energy saving potential in six different remaking measures. At last, it can get the retrofit scheme for each type of the lines according to the ranking value of different measures. It uses the distribution line as an example to assess the comprehensive energy saving potential and puts forward the feasible retrofit scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377060).

**Key words:** evaluation of energy saving; planning; voltage quality; multi-objective; distribution network

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)13-0100-06

## 0 引言

线损率和电压合格率是电网的主要考核指标, 降低线损率实现节能降耗对供电企业提高经济效益起到举足轻重的作用; 而电压合格率对电力系统的正常运行有着重要影响, 电压过高或过低都严重影响着用户设备的安全运行。

因此对于线损和电压质量问题严重的线路都需通过一些措施进行改造。而对线路进行节能潜力和电压质量改善的评估体现了采取改造措施后的节能效果及电压改善效果, 因此这两项评估内容对配电网改造和规划有着重要指导意义。

以往的相关研究较多是针对单一指标进行评

估。如文献[1]对配电网运行的经济性评价进行研究, 找出电网运行中高损耗环节, 为降损提供技术支撑; 文献[2]针对电力供应侧的改善措施, 定性地评价出措施的节能潜力大小; 文献[3]对国外使用新型节能配电变压器的节能空间作出评估; 文献[4]是通过基于熵权的多级模糊评价方法, 根据电网一些现状数据, 得出电网节能潜力得分; 文献[5]则针对多项节能改造措施, 建立了完整的配电网节能潜力评估体系。根据电网现状数据作出节能潜力的评估。

而对于电压质量方面, 更多研究是针对如何对电压质量的优劣作出评价, 而较少是对其改善空间进行评估。文献[6]则是提出了利用概率统计分析法对电网电压质量进行评估的方法; 文献[7]系统化地定义和分析了各种评估方式, 提出了电能质量评估体系架构。

本文考虑到改善线损和电压质量两个方面的多

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51377060); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2013ZM0013)

数措施是相通的,所以在文献[5]提及的配电网节能评估体系基础上,提出一种计及节能潜力评估和电压质量改善潜力评估的综合节能潜力评估方法体系。根据综合节能潜力的分析结果,可得出节能降耗与电压质量改善效果均良好的改造方案。

## 1 综合节能潜力评估方法

综合节能潜力评估体系的总体思路框图如图 1 所示。对某地区配电网进行综合节能潜力评估,首先将其全网抽象成若干类不同负荷特点和拓扑特点的配电线路,对其进行分类;然后选择若干条具有代表性的典型配电线路,再基于配电网节能降耗改造优化计算与分析软件(PSAS),逐一对典型线路进行节能潜力及电压质量改善率评估计算;根据计算结果,利用综合节能评估分析方法进行分析;最终总结得出各类线路的综合节能潜力以及提出合适的改造建议。

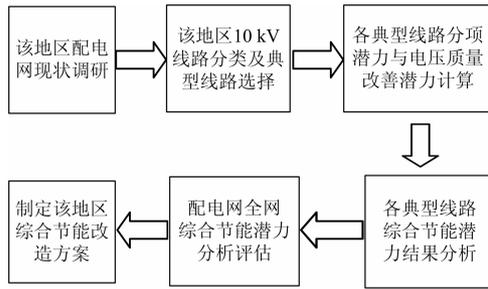


图 1 配电网综合节能潜力评估体系

Fig. 1 Comprehensive energy saving potential evaluation system for distribution network

### 1.1 综合节能改造措施

经研究得知,影响配电网线路损耗和电压损耗的主要因素是系统运行电压,线路运行功率因数,电力设备上的有功负荷、无功负荷、电阻和电抗<sup>[8-13]</sup>。因此我们可以知道,当采用某种和某些组合措施改变上述影响因素来实现配电网节能降耗的同时,配电网的电压质量也会同时得到相当程度的改善。所以本文将根据以下措施,对线路进行改造后的综合节能潜力评估<sup>[14]</sup>。

#### 1.1.1 措施 I——改变无功控制策略

##### (1) 对降损及电压的影响

电网元件的有功损耗可以按式(1)、式(2)计算。

$$\Delta P_0 = \frac{P_0^2 + Q_0^2}{U_0^2} R \quad (1)$$

$$\Delta P_1 = \frac{P_0^2 + (Q_0 - Q_C)^2}{U_0^2} R \quad (2)$$

式中:  $\Delta P_0$  为初始有功损耗;  $\Delta P_1$  为投切电容器后有功损耗;  $P_0$ 、 $Q_0$  为线路首段有功及无功功率;  $Q_C$  为电容的无功功率;  $U_0$  为负荷电压;  $R$  为线路等效电阻。由式(1)、式(2)可知,当投入一定无功补偿后,线路有功损耗减少。而电压损耗可以近似用式(3)、式(4)计算。

$$\Delta U_0 \approx \frac{P_0 R + Q_0 X}{U_0} \quad (3)$$

$$\Delta U_1 = \frac{P_0 R + (Q_0 - Q_C) X}{U_0} \quad (4)$$

式中:  $\Delta U_0$  为初始电压损耗;  $\Delta U_1$  为投切电容器后电压损耗;  $X$  为线路等效电抗。可知,投入适当的无功补偿可减少线路首段无功输送,电压损耗减少,电压质量得到改善。

##### (2) 措施综合节能评估方法

该措施是假设各 100 kVA 及以上容量的配变台区均配置足够的低压动态无功补偿设备,通过无功补偿控制使负荷功率因数全部达到 1.0,以此计算出与现状相比较的节能空间及电压质量改善空间。

#### 1.1.2 措施 II——调整母线运行电压

##### (1) 对降损及电压的影响

对于线路可变损耗(包括线损和配变铜损)比较大的线路,则由式(1)、式(3)可知,用逆调压方式抬升母线电压可以减少有功损耗和电压损耗,取得一定的节能和电压质量改善效果。

##### (2) 措施综合节能评估方法

对于供电半径较大、负荷较重,可变损耗占线损主要部分的线路,适当提高母线电压至 10.6 kV;反之,对于轻载、以固定损耗为主的线路,适当降低母线电压至 10.1 kV。通过电压调整前后线路的潮流分析及电压、损耗对比,计算出该措施对线路降损及电压改善的潜力。

#### 1.1.3 措施 III——增加导线截面

##### (1) 对降损及电压的影响

$$R = \rho l / s \quad (5)$$

式中,  $\rho$ 、 $l$ 、 $s$  分别为导线的电阻率、长度和截面大小。而由式(5)可知,增大  $s$  后线路等效电阻值  $R$  减少;结合式(1)和式(3),当线路电阻值减小时,线路有功损耗和电压损耗都会减小。

##### (2) 措施综合节能评估方法

该措施是考虑地区负荷增长 10%,按照经济电流截面选取导线,选取相应线径的导线替换原来主干线导线,铺设方式不变。对比改造前后的全线总损耗以及其电压质量情况,得其节能降耗及电压质

量改善潜力。

#### 1.1.4 措施 IV——缩小供电半径

##### (1) 对降损及电压的影响

缩小供电半径,即导线长度  $l$  减小,根据式(5)可知,线路等效电阻值  $R$  会减小。分别结合式(1)和式(3)可知,缩小供电半径可使线路有功损耗下降并减小线路电压损耗。

##### (2) 措施综合节能评估方法

对于供电半径偏大的线路,假定主干线中点上增加一个电源点,进行潮流计算,即可得到供电半径降低一半后的节能潜力以及电压质量改善潜力。

#### 1.1.5 措施 V——更换高能耗配变

##### (1) 对降损及电压的影响

高能耗配变与节能变压器相比,空载损耗大,对其进行更换,可以直接减小配电网中变压器的有功损耗和无功损耗,进而达到节能和改善电压质量的效果。

##### (2) 措施综合节能评估方法

该措施是在计及负荷增长 10%的前提下,假定将全线 S9 及其以下系列的配变(高损变)全部更换为同容量的 S13 或 SH15 系列配变。对比更换前后全线损耗和节点电压的变化,分别求取其节能降耗及电压质量改善潜力。

#### 1.1.6 措施 VI——削峰填谷,减少日负荷波动

##### (1) 对降损及电压的影响

假设两负荷曲线的用电量相同,一为直线,理想负荷恒定不变,其值为  $P$ ;另一为波动曲线,其值为  $f(t)$ ;负荷的功率因数和电压不变,则时间  $T$  内二者的线路有功电量损耗之差  $\Delta A_w$  为<sup>[15]</sup>

$$\Delta A_w = \frac{\int_0^T f^2(t)dt}{\cos^2 \varphi U^2} R - \frac{P^2 T}{\cos^2 \varphi U^2} R = \frac{\int_0^T f^2(t)dt - P^2 T}{\cos^2 \varphi U^2} R \quad (6)$$

式中:  $\cos \varphi$  为负荷功率因数;  $U$  为负荷点电压。

连续函数  $f(t)$  在  $[0, T]$  内变差(大小用偏差平方和表示)  $S^2$  可定义为

$$S^2 = \int_0^T \left[ f(t) - \int_0^T \frac{f(t)dt}{T} \right]^2 dt = \int_0^T f^2(t)dt - P^2 T \quad (7)$$

将式(8)代入到式(7)中,得

$$\Delta A_w = \frac{S^2 R}{\cos^2 \varphi U^2} \quad (8)$$

由变差概念<sup>[16]</sup>可知,当  $S^2$  越小,负荷曲线越平缓,越趋近直线,式(8)中线路损耗越小。所以,通过不同措施进行削峰填谷,对降损有重要的意义。

根据式(3),负荷重时电压降大,电压偏低;负荷轻时电压降小,电压偏高。削峰填谷可减缓负荷波动,使电压曲线趋于平缓,减少电压越限情况。

##### (2) 措施综合节能评估方法

该措施是假定通过峰谷电价等 DSM 措施能有效实现线路负荷削峰填谷,而总供电量保持不变。在现状线路参数、负荷及其波动情况下,考虑减少日负荷波动 30% 的调整模式来评估减小负荷波动的节能潜力,同时比较得出调整前及调整后用电高峰期的电压质量改善情况。

#### 1.1.7 措施 VII——采用馈线自动调压器

##### (1) 对降损及电压的影响

当线路电压较低时安装馈线自动调压器,安装点后的电压都有所提升<sup>[17]</sup>。而根据式(1)可知,电压升高,安装点后线路有功损耗将减少。

##### (2) 措施综合节能评估方法

假设线路 1/3 或 1/2 处(如线路负荷分布不均,则视其实际情况适当调整)安装自动调压器,容量选为安装点后配变总容量 1.2 倍。计算得出该措施的节能降耗及电压质量改善潜力。

## 1.2 潜力评估指标

为了直观地体现上述措施单独作用时的节能潜力及电压质量改善潜力大小,下面分别提出了节能潜力以及电压质量改善率两项指标。

##### (1) 节能潜力指标

10 kV 配电网分项降损潜力指标  $P_1\%$  的定义为:以 10 kV 母线的网损率作为比较对象,以某项技术措施(或多种措施)实施后对网损率的变化量的百分数。

$$P_1\% = \frac{\Delta P_0 - \Delta P_1}{\Delta P_0} \times 100\% = \frac{(P_0 - P_L) - (P_1 - P_L)}{\Delta P_0} \times 100\% = \frac{P_0 - P_1}{\Delta P_0} \times 100\% \quad (9)$$

其中:  $P_0$ 、 $P_1$  为采用某措施前后的馈线送电量;  $P_L$  为配电网负荷用电量。

##### (2) 电压质量改善率指标

定义: 10 kV 配电网电压质量改善率  $V_1\%$ , 以主干线末端电压作为比较对象,以某项技术措施(或多种措施)实施后对主干线末端电压提升量与初始状态电压值之比的百分数。

对于接有小水电或其他分布式电源且主干线末端电压越上限的馈线,有

$$V_1\% = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% \quad (10)$$

其中:  $V_0$  是初始状态的馈线主干线末端电压;  $V_1$  是实行各分项改善措施之后的馈线末端电压。作为有改善的空间,  $V_0$  应满足  $V_0 \geq 10.7$  kV 且  $V_1$  应满足  $V_1 \geq 10.0$  kV, 否则均视电压质量无改善。

对于无小水电或其他分布式电源接入的馈线:

$$V_1\% = \frac{V_1 - V_0}{V_1} \times 100\% \quad (11)$$

作为有改善的空间,  $V_0$  应满足  $V_0 \leq 10.0$  kV 且  $V_1$  应满足  $V_1 \leq 10.7$  kV, 否则均视作电压质量无改善。

### 1.3 综合节能评估分析方法

根据上述提出的综合节能改造措施, 计算出各分项措施的节能潜力以及电压质量改善率, 再以某项措施的  $|P_i\%|$  和  $|V_i\%|$  作为基准值, 如以措施 I 为基准, 按式(13)、式(14)分别计算其他措施的节能效果与该项措施效果的比值。

$$\left\{ \begin{array}{l} \{\text{措施1}\} \xrightarrow{\text{综合潜力评估}} \left\{ \frac{P_{11}\%}{|P_{11}\%|}, \frac{V_{11}\%}{|V_{11}\%|} \right\} \\ \{\text{措施2}\} \xrightarrow{\text{综合潜力评估}} \left\{ \frac{P_{21}\%}{|P_{11}\%|}, \frac{V_{21}\%}{|V_{11}\%|} \right\} \\ \{\text{措施3}\} \xrightarrow{\text{综合潜力评估}} \left\{ \frac{P_{31}\%}{|P_{11}\%|}, \frac{V_{31}\%}{|V_{11}\%|} \right\} \\ \dots \dots \end{array} \right. \quad (12)$$

$\beta_i$  计算如式(13)所示, 其中  $i$  表示措施的编号。

$$\beta_i = \frac{P_{i1}\%}{|P_{11}\%|} + \frac{V_{i1}\%}{|V_{11}\%|} \quad (13)$$

按照  $\beta$  的大小可以得到各措施基于两项指标的综合节能潜力排序, 最后根据上述结果结合成本效益及措施实施难易程度, 可得出适合改线路的最优、次优及再次之的改造措施建议。

## 2 南方某市综合节能潜力评估算例

作为研究对象的南方某市 10 kV 配电线路共计 516 条, 根据线路主干线长度、电缆化程度、线路负荷轻重、是否含有小水电等情况将线路分为城区电缆线路、城镇架空线路、农村无源线路及山区含源线路四种类型。归纳各类线路的电气参数特征值, 根据特征值, 每类线路各抽取 2 条作为典型线路进行综合节能潜力计算, 并根据典型线路的综合节能潜力分析结果提出适合该类型线路的改造建议。

经 8 条典型线路的计算分析, 得出各类线路的综合节能潜力, 如表 1 所示。

表 1 南方某市配电网综合潜力评估结果

Table 1 Comprehensive energy saving potential evaluation result of Guilin distribution network

指标/%	城区电缆	城镇架空	农村无源	山区含源
节能潜力均值	4.2	25.5	41.0	67.4
电压改善均值	—	6.23	5.67	10.26

注: “—” 表示该类线路的典型线路的原始电压质量情况良好在 10 kV 以上, 因此视其电压质量改善率为 0。

从上面的评估结果可以看到, 山区含源线路及农村无源线路的综合节能潜力最大, 所以该市配电网的综合节能改造主要针对这两类线路。

利用各措施下的节能潜力及电压质量改善率结果, 再以某项措施为基准, 得出各措施的综合节能潜力排序值, 如表 2 所示。

表 2 各线路分项措施综合节能潜力排序  $\beta$  值

Table 2 Ranking value of different measures comprehensive energy saving potential

线路	措施 I	措施 II	措施 III	措施 IV	措施 V	措施 VI	措施 VII
城区 1	1.03	0	—	—	0.39	1.5	—
城区 2	1	0.04	—	—	0.42	1.4	—
城镇 1	2	1.91	—	7.3	0.086	0.72	1.89
城镇 2	2	2	1.88	9.1	0.11	0.67	1.92
农村 1	7.46	2	2.9	15.23	2.9	2.2	4.1
农村 2	6.1	2	2.56	14.4	2.2	1.57	3.3
山区 1	2	1.54	3.92	2.98	2.9	0.66	1.84
山区 2	2	1.54	3.56	3.32	0.68	0.54	1.76

注: “—” 表示线路无需进行该措施改造。每类线路所选基准不一样。

由表 2 的排序值可得知各类线路改造措施的排序, 从而结合成本效益及措施实施难易程度得出针对不同线路的改造措施建议, 如表 3 所示。

表 3 南方某市配电网综合节能措施建议

Table 3 Suggestion for comprehensive energy saving of Guilin distribution network

排序	城区电缆	城镇架空	农村无源	山区含源
1	措施 I	措施 I	措施 I	措施 III
2	措施 VI	措施 II	措施 VII	措施 V
3	措施 V	措施 III	措施 III	措施 I

而根据各类线路的措施潜力排名, 以及表 3 给出相应的改造措施优先次序建议, 该市的配电网改造主要以措施 I 改变无功控制策略以及措施 III 改变导线型号为主。

## 3 结论

通过本文提出的方法对南方某市 10 kV 配电线路进行综合节能潜力评估, 得到以下结论:

1) 该市以山区含源线路和农村无源线路的综合节能潜力最大, 而城区电缆线路最小。南方某市可重点针对山区含源线路以及农村无源线路进行配电网的改造。

2) 对各分项措施综合节能潜力排序后, 经分

析可得出该市不同类型线路的改造方案。城区电缆线路、城镇架空线路和农村无源线路以改变无功控制策略为主；山区含源线路则宜以更换导线为主。另外农村无源及山区含源线路存在部分高能耗配变，应适时进行更换。

3) 本文提出的结合节能及电压质量改善的综合节能潜力评估方法对配电网改造及规划有一定的指导意义。

### 参考文献

- [1] 马丽叶, 卢志刚, 胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.
- MA Li-ye, LU Zhi-gang, HU Hua-wei. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171.
- [2] 刘文胜, 叶永松, 胡献忠, 等. 华中电网电力节能潜力分析[J]. 华中电力, 2004, 17(5): 47-49.
- LIU Wen-sheng, YE Yong-song, HU Xian-zhong, et al. Analysis on potential of economization on energy in Central China Grid[J]. Central China Electric Power, 2004, 17(5): 47-49.
- [3] DE KEULENAER H, CHAPMAN D, FASSBINDER S. The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers[C] // Proceedings of the 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Part 1: Contributions, Amsterdam, Netherlands, June 18-21, 2001: 4-5.
- [4] 吴耀武, 陈瑞, 娄素华, 等. 基于熵权的电网节能减排潜力多级模糊评价[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(11): 115-118.
- WU Yao-wu, CHEN Rui, LOU Su-hua, et al. Fuzzy comprehension evaluation of potential energy saving and emission reduction on regional power grid using entropy weight[J]. Huazhong Univ of Sci & Tech: Natural Science Edition, 2010, 38(11): 115-118.
- [5] 张勇军, 石辉, 许亮. 配电网节能潜力评估系统开发方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 51-55.
- ZHANG Yong-jun, SHI Hui, XU Liang. Systematic developing program of distribution network energy saving potential evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 51-55.
- [6] 郑建辉, 陈钰, 孟昭勇. 电网电压质量评估的概率统计分析方法引用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 58-82.
- ZHENG Jian-hui, CHEN Yu, MENG Zhao-yong. Research on probability and statistics analysis application of power network voltage quality[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 58-82.
- [7] 陶顺, 肖湘宁. 电力系统电能质量评估体系架构[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 171-175.
- TAO Shun, XIAO Xiang-ning. Infrastructure of the power quality assessment system of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 171-175.
- [8] 卢志刚, 秦四娟, 李海涛, 等. 配电网技术线损分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 177-180.
- LU Zhi-gang, QIN Si-juan, LI Hai-tao, et al. Analysis on technical line loss of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 177-180.
- [9] 刘健, 段璟靓. 配电网极限线损分析及降损措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 27-35.
- LIU Jian, DUAN Jing-jing. Line loss limitation analysis and optimal planning of loss reduction for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 27-35.
- [10] 张刘杰, 王葳. 浅析供电线路中的电压损失[J]. 机电信息, 2011(24): 42-43.
- ZHANG Liu-jie, WANG Wei. Analysis on the voltage loss of power lines[J]. Mechanical and Electrical Information, 2011(24): 42-43.
- [11] 李庚银, 杨晓东, 周明. 复杂配电网的电压暂降随机预估方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 135-141.
- LI Geng-yin, YANG Xiao-dong, ZHOU Ming. Stochastic estimation method of voltage sags in complex distribution systems[J]. Transactions of China

- Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 135-141.
- [12] 孙中权. 电力节能技术的研究和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 227-231.
- SUN Zhong-quan. Research and application of power saving technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 227-231.
- [13] 余卫国, 熊幼京, 周新风, 等. 电网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 54-63.
- YU Wei-guo, XIONG You-jing, ZHOU Xin-feng, et al. Analysis on technical line losses of power grids and countermeasures to reduce line losses[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 54-63.
- [14] 张勇军, 钟清, 陈旭, 等. 配电网节能规划与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- ZHANG Yong-jun, ZHONG Qing, CHEN Xu, et al. The energy saving planning and operation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [15] 汪卫华, 张慧敏, 陈方. 用雪峰填谷方法提高供电企业效益得分析[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 79-81.
- WANG Wei-hua, ZHANG Hui-min, CHEN Fang. Analysis of improving profit of power supply enterprises by peak load shifting[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 79-81.
- [16] 徐杰. 应用变差模型对广西电网月负荷预测的研究[J]. 广西电力, 2003(1): 12-17.
- XU Jie. Study on monthly load forecast for Guangxi power grid with variable differential model[J]. Guangxi Electric Power, 2003(1): 12-17.
- [17] 卢秋艳, 金黎, 李庆宇. 电压自动调节技术[J]. 电工技术, 2003(8): 6-8.
- LU Qiu-yan, JIN Li, LI Qing-yu. Automatic voltage regulation technology[J]. Electric Engineering, 2003(8): 6-8.

---

收稿日期: 2013-09-13; 修回日期: 2013-11-27

作者简介:

曾建敏(1989-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统运行研究; E-mail: 435689426@qq.com

白先红(1978-), 女, 工程师, 从事电网规划工作;

张勇军(1973-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统无功优化和电压控制、电力系统可靠性与规划研究。