

# 基于改进粒子群算法的变电站两阶段优化选址

严司玮<sup>1</sup>, 姚建刚<sup>1</sup>, 李丰涛<sup>1</sup>, 王雪晋<sup>1,2</sup>, 刘娟<sup>1</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 云南电网公司昆明供电局, 云南 昆明 650011)

**摘要:** 提出了一种基于带极值扰动改进粒子群优化算法的变电站选址两阶段优化规划方法。首先利用改进粒子群优化算法在规划区域大范围搜索寻优, 获得一次候选站址; 其次考虑地理因素, 避开地理不可行区域, 在需调整站址周边选取二次候选站址, 利用模糊层次分析法量化评估地理要素对目标函数的影响。本方法改进了目标函数, 综合考虑了变电站进线和出线的投资运行费用, 使规划结果更客观合理。算例分析表明所提出的方法能很好地满足规划要求。

**关键词:** 变电站选址; 粒子群优化; 极值扰动因子; 地理因素; 模糊层次分析法

## Two-phase optimal planning of substation locating based on refined PSO algorithm

YAN Si-wei<sup>1</sup>, YAO Jian-gang<sup>1</sup>, LI Feng-tao<sup>1</sup>, WANG Xue-jin<sup>1,2</sup>, LIU Juan<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Kunming Power Supply Bureau, YEPG, Kunming 650011, China)

**Abstract:** This paper proposes a two-phase optimal planning of substation locating based on refined particle swarm optimization (PSO) which introduces extremum disturbed operator. Firstly, the first-phase substation combination is obtained with refined PSO searching in the planning area; secondly, the surrounding geographical factors are considered in detail during which the invalid addresses are sorted out and the nearby districts are pitched on to form the second-phase substation combination. The efforts of geographical factors against target function are analyzed by means of fuzzy analysis hierarchy process. Thus the target function is amended, considering the investing and operating costs of incoming circuitries as well as out-coming ones to perfect planning results. An actual example certifies that the method raised in this paper could better satisfy the planning requirements.

**Key words:** substation locating; particle swarm optimization; extremum disturbed operator; geographical factor; fuzzy analysis hierarchy process

中图分类号: TM727; TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0034-05

## 0 引言

变电站选址是配电网优化规划<sup>[1]</sup>的重要环节, 在选址过程中基于计算机技术的现代智能算法和启发式方法逐渐取代了数学优化算法, 如粒子群算法<sup>[2-3]</sup>, 神经网络算法, 遗传算法<sup>[4]</sup>等。规划过程中多数算法未充分考虑待选站址地理信息因素, 往往存在数学模型与地理信息因素结合不紧密的问题。文献[5]加权考虑了目标函数的经济合理性和地理合理性, 提出一种两阶段优化规划方法, 在这个问题上有所突破, 不过其确定待选站址时选用的仍然是试探组合及迭代算法, 未能充分利用现代智能优化算法的研究成果。本文从工程应用的角度出发, 提出一种基于带极值扰动改进粒子群算法的变电站选址两阶段优化分析法, 算例分析表明该方法科学可行, 有效提高了变电站选址的计算速度和准确度。

## 1 变电站选址目标函数

总的来说, 对变电站选址进行优化的目的是在满足电网安全可靠运行的约束下, 在适合建站的各地段中选出最佳地址, 使变电站建设运行费用和进出该变电站的线路建设运行费用之和最低。据此构造目标函数模型如下:

$$\min C_{\text{total}} = C_{\text{station}} + C_{\text{high}} + C_{\text{low}} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{s.t. } \sum_{j \in J_i} W_j \leq S_i e(S_i) \cos \varphi \\ K_{ij} I_{ij} I_{ij} \leq \Delta U_{i \max} \\ \sum_{i=1}^N g_{ij} = 1 \\ l_{ij} \leq R_i \quad g_{ij} \in \{0, 1\} \\ i = 1, 2, \dots, N, \quad \forall j \in J_i \\ J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_N = J \end{array} \right. \quad (2)$$

$$C_{\text{station}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i f(S_i) \cdot \frac{r_0(1+r_0)^{t_s}}{(1+r_0)^{t_s} - 1} + u(S_i) \quad (3)$$

$$C_{\text{high}} = \alpha_h \left[ \frac{r_0(1+r_0)^{t_h}}{(1+r_0)^{t_h} - 1} \right] \sum_{i=1}^n n_{hi} l_{hi} + \beta_h \sum_{i=1}^n W_i^2 n_{hi} l_{hi} \quad (4)$$

$$C_{\text{low}} = \alpha_l \left[ \frac{r_0(1+r_0)^{t_l}}{(1+r_0)^{t_l} - 1} \right] \sum_{i=1}^N \sum_{j \in J_i} l_{ij} + \beta_l \sum_{i=1}^N \sum_{j \in J_i} W_j^2 l_{ij} \quad (5)$$

$$\beta_h = \frac{\beta_{h1} \beta_{h2} \beta_{h3}}{U_h^2 \cos^2 \varphi} \quad \beta_l = \frac{\beta_{l1} \beta_{l2} \beta_{l3}}{U_l^2 \cos^2 \varphi} \quad (6)$$

$$l_{hi} = \sqrt{(x_{i1} - h_1)^2 + (x_{i2} - h_2)^2} \quad (7)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{i1} - l_{j1})^2 + (x_{i2} - l_{j2})^2} \quad (8)$$

式中:  $C_{\text{station}}$  为折算到每年的变电站投资运行费用;  $C_{\text{high}}$  为折算到每年的变电站高压进线投资费用及年网损;  $C_{\text{low}}$  为折算到每年的变电站中压出线投资费用及年网损。  $N$  为已有和待建变电站总数,  $W_i$  为负荷点  $j$  的有功负荷,  $e(S_i)$  为第  $i$  个待建变电站的负载率,  $K_{ij}$  为第  $i$  个待建站到  $j$  负荷点线路常量系数,  $I_{ij}$  为该线路额定电流,  $l_{ij}$  为该线路长度,  $\Delta U_{i\text{max}}$  为该线路最大允许电压降;  $g_{ij}$  为  $j$  负荷点是否由  $i$  变电站供电判别因子,  $g_{ij}=0$  表示“否”,  $g_{ij}=1$  表示“是”,  $R_i$  为供电半径约束。  $\lambda_i$  为地理影响因子,  $f(S_i)$  为第  $i$  座变电站建设费用,  $u(S_i)$  为第  $i$  座变电站年运行费用,  $r_0$  为贴现率,  $t_s$  为变电站的折旧年限,  $t_h$  为变电站高压侧线路的折旧年限;  $t_l$  为变电站中压出线的折旧年限。  $\alpha_h$  为变电站进线单位长度建设投资费用,  $\alpha_l$  为变电站出线单位长度建设投资费用。  $n_{hi}$  为第  $i$  个变电站进线回路数,  $\beta_{h1} = \beta_{h1}$  为当前电价,  $\beta_{h2}$  为变电站进线每公里电阻,  $\beta_{h3}$  为变电站高压出线每公里电阻,  $\beta_{l1} = \beta_{l1}$  为线路年损耗小时数,  $U_h$  和  $U_l$  分别为变电站进线和出线的线电压;  $(x_{i1}, x_{i2})$  是第  $i$  个变电站的地理坐标,  $(h_1, h_2)$  是上级电源地理坐标,  $(l_{j1}, l_{j2})$  是第  $j$  个负荷地理坐标。

## 2 添加极值扰动的粒子群优化算法

粒子群优化算法(PSO)起源于对简单社会系统的模拟。 PSO中, 每个优化问题的解对应于搜索空

间中的一个“粒子”。 所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值(fitness value), 每个粒子还有一个速度决定他们飞翔的方向和距离。 然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜索。 经典算法公式如下:

$$v_{id}^{t+1} = w \cdot v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (9)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + \alpha \cdot v_{id}^{t+1} \quad (10)$$

式中:  $m$  为种群数目;  $x_{id}^t$  为第  $t$  次迭代时第  $i$  个粒子在第  $d$  维的位置;  $v_{id}^t$  为其对应的飞行速度;  $p_{id}$  为其个体最优位置;  $p_{gd}$  为当前整个粒子群最优位置;  $w$  为动量惯性系数;  $\alpha$  为控制速度的约束因子。

经典算法容易陷入局部最优解, 存在进化后期收敛速度慢, 收敛精度不高的问题。 许多学者在应用时借鉴其它算法思想对其做了不同程度的改进, 如通过变异操作和克隆粒子更新来跳出局部极值区间<sup>[3,6]</sup>。 本文认为经典 PSO 进化方程中的粒子速度概念不是必需的<sup>[7]</sup>, 精简了速度方程, 并通过对个体最优值和全局最优值设计极值扰动算子使算法能快速摆脱局部极值。 在搜索第一阶段候选站址时运用本方法获得了较好的结果。 改进的粒子群算法公式如下:

$$r_3^{t_i > T_i} = \begin{cases} 1 & t_i > T_i \\ U(0,1) & t_0 > T_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$r_4^{t_g > T_g} = \begin{cases} 1 & t_g > T_g \\ U(0,1) & t_g > T_g \end{cases} \quad (12)$$

$$x_{id}^{t+1} = w \cdot x_{id}^t + c_1 r_1 (r_3^{t_i > T_i} p_{id} - x_{id}^t) + c_2 r_2 (r_4^{t_g > T_g} p_{gd} - x_{id}^t) \quad (13)$$

式中:  $t_i, t_g$  分别表示个体最优点和全局最优点进化停滞步数;  $T_i, T_g$  分别表示个体最优点和全局最优点需要扰动的停滞步数阈值。 其中  $T_i, T_g$  的取值大小决定了极值扰动算子生效的延迟长短, 一般取值范围为 3~8。

可以看出公式(13)对个体最优值  $p_i$  和全局最优值  $p_g$  设置了随机扰动, 将其分别调整为  $r_3^{t_i > T_i} p_i$  和  $r_4^{t_g > T_g} p_g$ , 扩展了粒子群的搜索路径和领域, 避免在搜索后期陷入停滞状态, 因而发现更优解的概率较大。

### 3 基于带极值扰动简化粒子群算法的变电站两阶段优化选址

本算法综合考虑了变电站选址的经济因素和地理因素。在第一阶段运用带极值扰动的简化粒子群算法在全区域大范围搜索，获得经济最优目标；第二阶段避开地理不可行区域，采用模糊层次评判法对二次候选站址分别量化评估；最后在此基础上综合确定最优解。

#### 3.1 基于模糊层次分析法的地理要素分析

在第一阶段的成果上，需要进一步考虑变电站候选站址的地理因素，针对每一个不适宜建站的站址，依托负荷统计区域社会单位（社区、村落），在其周边区域给出二次候选站址。选取原则是既节约用地，又有利于变电站布局。

地理因素相对来说更适于定性描述，而选址工作必须将其量化计算，此阶段本文引入文献[8]介绍的模糊层次分析法。将二次候选站址复杂的地理信息分解为各个组成因素，对其两两比较来确定层次中诸因素的相对重要性，通过模糊判断矩阵保证选址的一致性。

#### 3.2 总的投资运行费用

与文献[5]有所不同的是，本文引入地理因子 $\lambda_i$ 以确定地理因素对总的费用的影响，并不另外给经济适应度和地理适应度设定权重比例。

#### 3.3 算法流程

本文改进的变电站两阶段优化规划算法步骤如下：

步骤1：采用添加极值扰动的粒子群优化算法在全区域大范围搜索寻优，以经济性为目标获得一次候选站址，此阶段不考虑地理因素，令 $\lambda=1$ 。对于现有变电站，视 $(x_{i1}, x_{i2})$ 为已知变量，见公式(7)、(8)。

步骤2：考察优选站址是否地理可行，若候选站址落在湖泊、街道等不可建站区域，则需在其周围以负荷统计区域基层单位（小区）为基准选定若干二次候选站址，并采用模糊层次评判法对其分别量化评估。

步骤3：将二次候选站址代入目标函数，考虑不同地理因子对变电站投资运行费用的影响和站址变动带来的网架费用变化，从各组合方案中选出使目标函数最优的解。如图1示。

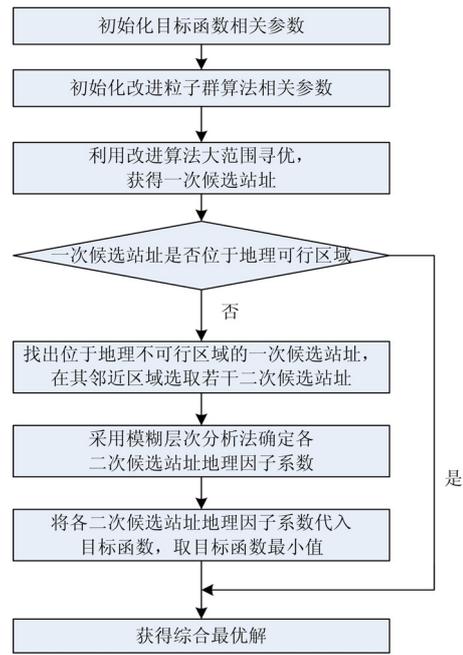


图1 两阶段优化规划流程

Fig.1 Two-phase optimal planning flow

### 4 算例

某经济开发区总占地 322.812 5 平方公里，规划水平年负荷预测结果为 204.9 MW（已考虑负荷同时率），拟建变电站规模为 2×50 MVA，110 kV 变电站负荷容载比要求为 1.8~2.2，则需新建 4 座变电站。目标函数相关参数设定如下：

单位变电站建设投资费用  $f(S_i)=3\ 500$  万元/座，年运行费用  $u(S_i)=60$  万元，110 kV 进线单位长度建设费用  $\alpha_n=72$  万元/km，10 kV 出线单位长度建设费用  $\alpha_1=60$  万元/km（电缆）。 $\beta_{h1} = \beta_{l1}=0.50$  元/kWh， $\beta_{h2} =210 \Omega /km$ ， $\beta_{l2} =450 \Omega /km$ ， $\beta_{h3} = \beta_{l3}=4800$  h， $\lambda_i$  均默认为 1；变电站的进线采用双回路供电，取  $n_{hr}=2$ 。

#### 4.1 利用改进的 PSO 算法确定一次候选站址

采用本文的添加极值扰动的改进粒子群优化算法在规划区域寻优，参数初始化如下：种群规模  $n=50$ ，学习因子  $c_1=c_2=2.0$ ，惯性因子  $w$  取 0.5~1.0，最大迭代次数  $N_{max}=300$ ， $T_i = T_g=8$ 。各小区负荷中心节点地理坐标均已给出，即  $l_{j1}$  和  $l_{j2}$  均为已知量；同时为简化计算， $(h_1, h_2)$  取为 (0,0)，如图 2 示。优化结果如表 1。

程序编写中已考虑了容载比的约束，故所得结果各变电站均未越限，同比之下，改进 PSO 算法收

敛速度大大加快, 搜索精度也有所提高, 同比节约资金 46.3 万元。改进 PSO 算法所得变电站候选站址地理分布图如图 2。

表 1 第一阶段优化结果表  
Tab.1 First-phase optimal result

| 优化算法   | 变电站最优位置 (x, y)       | 分区负荷 /MW | 对应容载比 | 目标费用 /万元  |
|--------|----------------------|----------|-------|-----------|
| 改进 PSO | (5.685 2, 7.649 8)   | 53.2     | 1.886 | 3 738.161 |
|        | (12.290 3, 4.738 9)  | 47.9     | 2.088 |           |
|        | (12.916 6, 11.235 7) | 50.5     | 1.980 |           |
|        | (23.109 4, 10.816 3) | 53.3     | 1.876 |           |
|        | (6.244 7, 6.700 3)   | 47.0     | 2.128 |           |
| 基本 PSO | (12.209 9, 5.534 7)  | 52.3     | 1.192 | 3 784.461 |
|        | (13.245 4, 11.353 2) | 53.6     | 1.866 |           |
|        | (23.315 0, 10.709 3) | 50.2     | 1.992 |           |

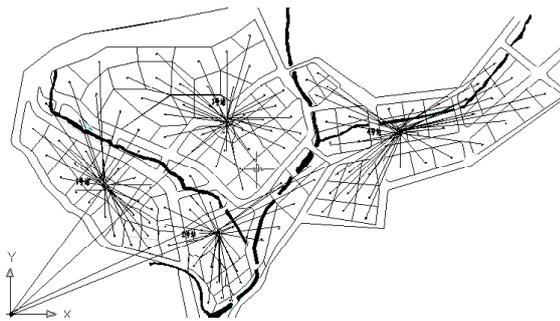


图 2 变电站候选站址地理分布图

Fig.2 Geographical map of substation combination

#### 4.2 考虑地理因素, 评价二次候选站址

由于 3 号变电站位于街道上, 需要对其进行调整。在其周边选定最邻近的如下四个候选区域: A70, A73, A77, A78。

针对 3 号变电站的候选区域定性描述如下:

表 2 方案属性决策表 (3 号站)

Tab.2 Decision table of alternatives(No.3 substation)

| 区号  | 用地性质 | 交通状况 | 施工条件 | 防洪排水 | 对通信干 | 地质地形 |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| A70 | 工业   | 较好   | 一般   | 一般   | 一般   | 较好   |
| A73 | 第三产业 | 较好   | 较好   | 一般   | 一般   | 较好   |
| A77 | 第三产业 | 较好   | 较好   | 好    | 较强   | 好    |
| A78 | 第三产业 | 好    | 一般   | 好    | 较强   | 较好   |

对上述各项地理因素设定权重如下<sup>[7]</sup>: 用地性质 0.350, 交通状况 0.200, 施工条件 0.150, 防洪排水 0.100, 对通信干扰 0.110, 地址地形 0.090。 $\lambda_j$  是

变电站投资费用的系数, 系数越小越有利于建站。由于这四个区域地理邻近, 故地理因素系数差别并不大, 计算结果如下:  $\lambda_3^{70}=1.013$ ,  $\lambda_3^{73}=1.03$ ,  $\lambda_3^{77}=1.005$ ,  $\lambda_3^{78}=1.017$ 。

#### 4.3 针对二次候选站址组合候选方案, 在地理可行区域取得目标函数经济最优值

选取 A70, A73, A77, A78 区为第 3 号站址, 得到 4 种组合方案, 计算不同的  $(x_{31}, x_{32})$  带来的网架费用变动, 计算  $\lambda_3^{70}$ ,  $\lambda_3^{73}$ ,  $\lambda_3^{77}$ ,  $\lambda_3^{78}$  对建站费用的影响, 得到相关费用 (均为年度折算费用) 统计数据如表 3。

表 3 考虑不同地理因子的目标费用

Tab.3 Target expense considering different geographical operators

| 区号  | $\lambda$ | 考虑地理因子的 3 号站投资单项费用/万元 | 区域变电站总的投资运行费用/万元 |
|-----|-----------|-----------------------|------------------|
| A70 | 1.013     | 353.942               | 3 770.463        |
| A73 | 1.030     | 359.882               | 3 762.576        |
| A77 | 1.005     | 351.147               | 3 742.359        |
| A78 | 1.017     | 355.339               | 3 753.824        |

由表 3 中数据可知考虑地理因素的影响后, 在 A77 区建站不仅单项投资费用最低, 规划区域变电站总的投资运行费用也最低, 故为最优。

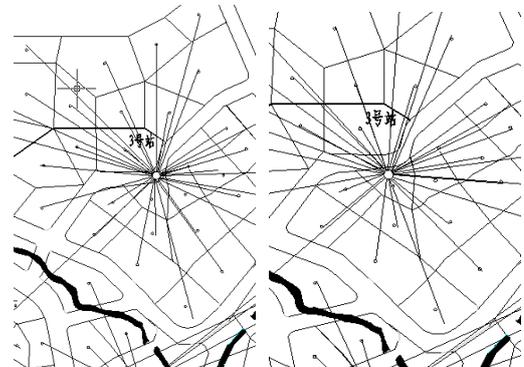


图 3 3 号站调整前后的局部放大图

Fig.3 Partial map of No.3 substation before-and-after adjustment

## 5 结论

本文所做的改进工作:

- 1) 优化了目标函数, 考虑了变电站进线投资运行费用, 使优化工作更加全面客观。
- 2) 将带极值扰动算子的简化粒子群算法引入第一阶段大范围优化寻址, 获得了较好的选址效果。
- 3) 考虑到地理因子主要对变电站建设费用产

生影响, 将地理因子直接引入目标函数, 并不另外给经济适应度和地理适应度设定权重比例, 使之更为合理。

需要说明的是本文考虑地理因子的影响更多的是基于城市配网的角度来分析, 所取地理因子比较接近。对于可能具有复杂地形的农村配网, 不同地理因子的选取对总的费用的影响差别将很大。且在将地理因子各因素由定性描述转化为定量计算的过程中具有较大的可塑空间, 如何提高计算精确度有待进一步研究。

参考文献

[1] 姚建刚, 曹一家, 江全元. 电力系统工程学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.  
YAO Jian-gang, CAO Yi-jia, JIANG Quan-yuan. Power System and Its Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.

[2] 董永峰, 杨彦卿, 宋洁, 等. 基于改进粒子群算法的变电站选址规划[J]. 继电器, 2008, 36(5): 32-35.  
DONG Yong-feng, YANG Yan-qing, SONG Jie, et al. Optimal Planning of Substation Locating Based on Improved PSO Algorithm[J]. Relay, 2008, 36(5): 32-35.

[3] 刘自发, 张建华. 基于改进多组织粒子群体优化算法的配电网变电站选址定容[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 105-111.  
LIU Zi-fa, ZHANG Jian-hua. Optimal Planning of Substation Locating and Sizing Based on Refined Multi-team PSO Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 105-111.

[4] Miguez E, Diaz-dorado E, Cidras J. An Application of An Evolution Strategy in Power Distribution System Planning[A]. in: Evolutionary Computation Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence[C]. Anchorage(AK,USA): 1998. 241-246.

[5] 王成山, 魏海洋. 变电站选址定容两阶段优化规划方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 62-66.  
WANG Cheng-shan, WEI Hai-yang. Two-phase Optimization Planning Approach to Substation Locating and Sizing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 62-66.

[6] 陈颖, 徐晓辉, 李志全. 基于免疫克隆原理的改进粒子群优化算法的研究[J]. 系统仿真报, 2008, 20(6): 1471-1474.  
CHEN Ying, XU Xiao-hui, LI Zhi-quan. Study of Modified Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Immune Clone Principle[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6): 1471-1474.

[7] 胡旺, 李志蜀. 一种更简化而高效的粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2007, 18(4): 861-868.  
HU Wang, LI Zhi-shu. A Simpler and More Effective Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Software, 2007, 18(4): 861-868.

[8] 闫丽梅, 许爱华, 任爽, 等. 一种变电站选址的新方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 75-79.  
YAN Li-mei, XU Ai-hua, REN Shuang, et al. New Model of Selecting Location of Transformer Substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 75-79.

收稿日期: 2009-03-26; 修回日期: 2009-05-04

作者简介:

严司玮(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场相关软件开发、电网规划及电力系统稳定性; E-mail: enosfrank@yahoo.com.cn

姚建刚(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事负荷预测、电力市场、配电系统自动化、高压外绝缘等方面的研究与教学工作;

李丰涛(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网规划与电力市场。

(上接第 28 页 continued from page 28)

[6] 康重庆, 夏清, 张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 1-11.  
KANG Chong-qing, XIA Qing, ZHANG Bo-ming. The Study of Power Load Forecasting Overview and Development Direction[J]. Automation of Electric Power

Systems, 2004, 28(17): 1-11.

收稿日期: 2009-03-10; 修回日期: 2009-04-09

作者简介:

刘学琴(1973-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电力系统自动化教学与研究。E-mail: liu2291292@126.com