

改进蚁群算法在配电网规划中的应用

赵书强, 王磊

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为了克服蚁群算法解决配电网规划问题时存在容易陷入局部最优解的缺点, 在蚁群算法和云模型基础上, 提出了一种改进蚁群算法。该算法利用云模型对蚁群算法的信息素强度参数和信息素挥发系数进行调整, 提高配电网规划过程中的收敛速度和全局搜索能力, 并利用分层前推回代算法进行潮流计算。通过算例分析, 证明了该方法的可行性和有效性。

关键词: 云模型理论; 蚁群算法; 配电网规划; 前推回代; 最小年费用

Application of improved ant colony algorithm in distribution network planning

ZHAO Shu-qiang, WANG Lei

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

Abstract: Ant colony algorithm is an effective tool to solve the problems of distribution network planning, but it is easy to fall into local optimal solution. To solve this problem, the paper presents an improved ant colony algorithm based on ant colony algorithm and cloud model. The pheromone intensity parameter and pheromone decay parameter are adjusted by cloud models theory, which increases the constringency speed and ability of global searching in the process of network planning. The paper uses layer-by-layer back/forward sweep method to compute power flow. The feasibility and efficiency of the algorithm are verified by result of sample analysis.

Key words: cloud models theory; ant colony algorithm; distribution network planning; backward/forward; minimum annual cost

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0061-05

0 引言

配电网规划的任务是寻求一种规划方案, 使配电网建设的投资和运行费用最小, 同时满足相关约束条件和可靠性要求。配电网规划是复杂的组合优化问题, 具有非线性、离散性、多峰及目标函数不可微等特点, 常规数学规划方法很难有效解决问题。过去几十年内, 许多学者将多种算法运用到配电网规划中, 如模拟退火算法^[1]、遗传算法^[2]、粒子群算法^[3]等。但这些方法在处理规模比较大的系统时, 往往无法完成对整个解空间的充分搜索, 从而难以求得全局最优解, 且收敛速度较慢。意大利学者Dorigo等人提出的蚁群算法^[4]是求解组合问题的启发式算法, 该算法不需初始可行解, 优点明显。但是, 基本蚁群算法收敛性受参数设置影响较大, 且容易陷入局部最优解。通过云模型理论调整蚁群算法的参数, 可提高算法收敛性, 找到全局最优解或

次优解。

1 配电网规划数学模型

配电网规划目标函数采用线路建设投资费用和网损费用的最小年费用法:

$$Z = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \cdot L + \Delta P \cdot T \cdot C \quad (1)$$

式中: L 表示方案总的线路建设投资费用; ΔP 表示支路有功功率损耗; T 表示系统等效运行时间; C 表示单位电价; i 表示贴现率; n 表示设备的经济使用年限; Z 表示等年值总费用。

约束条件:

①节点电压约束: $U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}$, 式中: U_i 为节点电压; $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为 U_i 的上下限。

②支路电流约束: $I_{hi} > I_i$, 式中: I_i 为支路电流; I_{hi} 为支路 i 导线的载流量。

③辐射型约束: 配电网必须是一个辐射型的网络。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2008BAA14B05)

④连通性约束：必须满足对供电区域内的所有负荷点提供电力。

2 云模型理论

2.1 定义

定义：设 U 是用精确数值表示的定量论域， C 是 U 上的定性概念，若定量值 $x \in U$ ，且 x 是定性概念 C 的一次随机实现， x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0,1]$ 是有稳定倾向的随机数。

$$\mu: U \rightarrow [0,1] \quad \forall x \in U \quad x \rightarrow \mu(x)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为云 (Cloud)，每个 x 称为一个云滴。云是语言值表示的某个定性概念与定量表示之间不确定性的转换模型，用以反映自然语言中概念的不确定性^[5]。

概念的整体性可以用云的数字特征来反映，即：云的期望 (Expected value, Ex)、熵 (Entropy, En) 和超熵 (Hyper entropy, He)。 Ex 是云滴在论域空间分布的期望，是最能代表定性概念的点，即这个概念量化的最典型样本。 En 是定性概念的不确定性度量，由概念的随机性和模糊性共同决定。 En 是定性概念随机性的度量，反映了能够代表这个定性概念的云滴的离散程度；又是定性概念亦此亦彼的度量，反映了论域空间中可被概念接受的云滴的取值范围。 He 是熵的不确定性度量，即熵的熵。由熵的随机性和模糊性共同决定。反映了每个数值隶属这个语言值程度的凝聚性，其大小间接反映了云的厚度^[5]。

2.2 云发生器

按云的产生机理和计算方向，有正向云和逆向云^[6]，根据本文需要，只介绍正向云发生器。

正向正态云发生器是从定性到定量的映射，它根据云的数字特征 (Ex , En , He) 产生云滴。正向正态云的定义如下。

定义：设 U 是一个用精确数值表示的定量论域， C 是 U 上的定性概念，若定量值 $x \in U$ ，且 x 是定性概念 C 的一次随机实现，若 x 满足： $x \sim N(Ex, En^2)$ ，其中 $En' \sim N(En, He^2)$ ，且 x 对 C 的确定度满足

$$\mu = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En')^2}} \quad (2)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为正态云。

算法1 正向正态云发生器 $CG(Ex, En, He, n)$

输入：数字特征 (Ex , En , He)，生成云滴的个数 n 。

输出： n 个云滴 x 及其确定度 μ 。

算法步骤：

(1) 生成以 En 为期望值， He^2 为方差的一个正态随机数 $En'_i = NORM(En, He^2)$ ；

(2) 生成以 Ex 为期望值， En'_i 为方差的一个正态随机数 $x_i = NORM(Ex, En'^2_i)$ ；

(3) 计算 $\mu_i = e^{-\frac{(x_i-Ex)^2}{2(En'_i)^2}}$

(4) 具有确定度 μ_i 的 x_i 成为数域中的一个云滴；

(5) 重复步骤 (1) ~ (4)，直至产生要求的 n 个云滴为止。

2.3 定性关联规则

通常单条定性关联规则的形式化描述为：

$$\text{if } A \text{ then } B \quad (3)$$

其中， A 和 B 为语言值表示的对象。

多条定性关联规则的形式化描述为：

$$\begin{cases} \text{if } A_1 \text{ then } B_1 \\ \text{if } A_2 \text{ then } B_2 \\ \vdots \\ \text{if } A_n \text{ then } B_n \end{cases} \quad (4)$$

其中， A_i 、 B_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为语言值表示的对象^[5]。

3 改进蚁群算法

3.1 基本蚁群算法

蚁群寻找食物时，总能找到食物到巢穴间的最优路径。这是因为蚂蚁在寻找路径时会在路径上释放信息素。当它们碰到一个还未走过的路口时，随机挑选一条路径，同时释放与路径长度有关的信息素。路径越长，释放的信息素浓度越低，后来的蚂蚁再次碰到该路口时，选择信息素浓度高的路径的概率较大。因而最优路径上的信息素浓度越来越大，其他路径上信息素浓度会随时间流逝而消减。最终整个蚁群会找出最优路径^[7]。

假设蚂蚁 k 处于站点 i ，根据式 (5)、式 (6) 选择下一个访问站点 j 。

$$j = \begin{cases} \arg \max \{ [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta \}, q \leq q_0 \\ J, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}]^\beta} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\tau_{ij}(t)$ 表示边弧 (i, j) 上信息素； η_{ij} 表示站点间距离因子； $q \in [0,1]$ 是一随机数； α 、 β 、 q 是自

定参数, α 、 β 分别表示蚁群在运动过程中积累信息和启发信息在选择概率上的作用; $q_0(0 \leq q_0 \leq 1)$ 决定了利用先验信息与探索新路径之间的相对重要性。当 $q \leq q_0$ 时, 按照先验信息选择路径, 否则按照 J 采用随机比例选择方式来选择路径, 选择概率由式 (6) 确定^[8]。 allowed_k 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的站点。其中

$$\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij} \quad (7)$$

式中: d_{ij} 表示路径 ij 长度。对蚂蚁 k 而言, d_{ij} 越小, $\eta_{ij}(t)$ 越大, $P_{ij}^k(t)$ 也就越大。显然, 该启发函数表示蚂蚁从站点 i 转移到站点 j 的期望程度。

随着时间的推移, 以前留下的信息逐渐消逝, 经过几个时刻, 两个站点状态之间的局部信息素数量要根据式 (8)、式 (9) 作调整:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (8)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} Q/L, & \text{若第}k\text{只蚂蚁在本} \\ & \text{次循环中经过}ij \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ρ 表示信息素挥发系数, $\rho \in [0,1]$; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 表示本次循环中路径 ij 上的信息素数量的增量; Q 是信息素强度; L 为第 k 只蚂蚁在本次循环中所走路程的总长度, 结合本文, 用公式 (1) 中的 Z 代替 L 。初始时刻 $\Delta\tau_{ij}(0) = 0$ 。

3.2 改进蚁群算法

基本蚁群算法易出现停滞和扩散问题, 将各条路径上残留的信息素数量限制在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 。 τ_{\min} 可以有效避免算法停滞; τ_{\max} 可以避免某条路径上的信息素量远大于其他路径, 使所有蚂蚁都集中到同一条路径上, 从而限制了算法的扩散。每次循环结束后, 保留最优路径, 一次循环中只有路径最短的蚂蚁才有权修改 $\tau_{ij}(t)$ 。修改策略在式 (8) 的基础上, 再加上式 (10) 进行阈值判断:

$$\tau_{ij}(t+n) = \begin{cases} \tau_{\min} & \text{若 } \tau_{ij}(t) < \tau_{\min} \\ \tau_{ij}(t) & \text{若 } \tau_{\min} < \tau_{ij}(t) < \tau_{\max} \\ \tau_{\max} & \text{若 } \tau_{ij}(t) > \tau_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

Q 的取值决定 $\Delta\tau_{ij}$, 进而影响信息素的更新, 最终影响蚁群的选路操作。 $\Delta\tau_{ij}$ 是蚂蚁循环一周后对释放在所经过路径上的信息素总量的更新, 由 Q 与所在路径长度的比值确定。 Q 影响算法的全局收敛速度, 其值过大, 会使算法收敛于局部最优解; 过小, 会使算法收敛速度减慢。 ρ 的取值直接关系到蚁群算法的全局搜索能力及其收敛速度。如果 ρ

过大, 由式 (8) 可看出, 路径上残留信息素消散速度过快, 不利于信息素的积累, 虽然可以提高算法的随机性能和全局搜索能力, 但会使算法的收敛速度降低; 当 ρ 过小时, 以前搜索过的路径被再次选择的可能性增大, 很容易陷入局部最优解从而影响解的质量。

当蚁群算法经过若干代进化后没有得到比当前最优解更加优的解时, 算法可能陷入了局部最优解, 此时应加强算法搜索的随机性和全局搜索能力, 在全局范围内寻找可能的新的更优解。当出现了新的更优解时, 算法可能找到了新的极值邻域, 此时应加强局部搜索能力。通过连续若干进化代数, 算法可以判断出当前的进化情况, 进而调整 ρ 和 Q 的取值。

信息素挥发系数 ρ 和信息素强度 Q 的取值具有随机性和模糊性。云理论能同时考虑此双重不确定性问题, 利用云模型对 ρ 和 Q 进行适时的调整, 可以保证算法的收敛速度和全局搜索能力。

信息素挥发系数 ρ 和信息素强度 Q 用云模型理论调整的定性关联规则为:

- 1) If 连续 T 代没有找到更优的解, then 选取较大的 ρ 和较小的 Q ;
- 2) If 出现新的更优解, then 选取较小的 ρ 和较大的 Q 。

用公式 (1) 中的配电网规划目标函数 Z 评价每次循环结果的好坏, 进行潮流计算时采用颜伟等

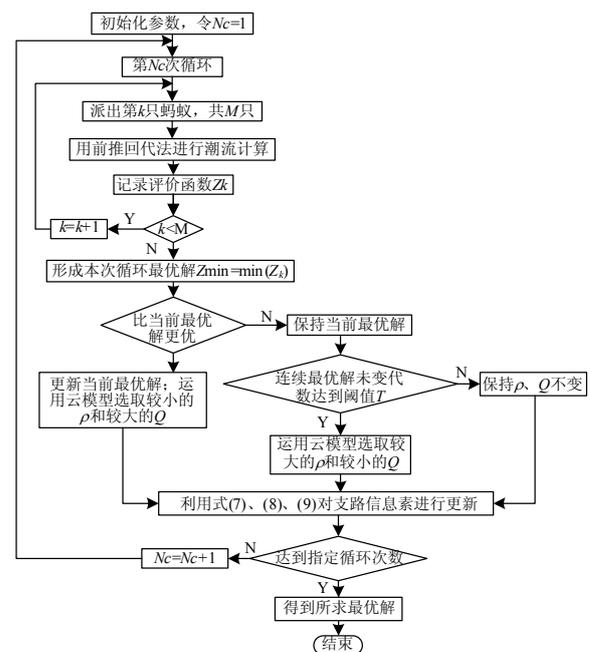


图1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart

人提出的分层前推回代算法^[9]。所以改进蚁群算法流程图1所示。

4 算例分析

算例采用文献[10]中的算例，该配电网初始网架是一个具有3个节点、2条支路的10 kV配电网，要扩展成为10个节点、16条支路的辐射性网络。系统等效运行时间为3 000 h，贴现率为7%，单位电价0.5元，设备经济使用年限为30年。用Matlab编写程序，设置算法参数：迭代次数 $N_{c_{max}} = 100$ ，蚁群 $M = 8$ ， $\delta = 0.3$ ， $\beta = 0.6$ ， $\Delta\tau_{ij}(0) = 0$ ， $\tau_{max} = \tau_{ij}(0)$ ， $\tau_{min} = \tau_{max}/1024$ 。对路径寻优采用正态云规则控制，云滴数为100， ρ 、 Q 分别设置 $E_{xp} = 0.5$ ， $E_{np} = 0.2$ ， $H_{ep} = 0.05$ ； $E_{xQ} = 4$ ， $E_{nQ} = 1$ ， $H_{eQ} = 0.05$ ，连续最优解未变代数阈值 $T = 3$ 。用本文提出的改进蚁群算法和基本蚁群算法分别对算例进行分析计算，得到网架规划结果如图2和图3所示。规划结果比较如图4和表1所示。图4的评价函数曲线表示每次循环中配电网规划目标函数的最优解随迭代次数的变化规律。

由图4可以看出改进蚁群算法大概在第12次时已经收敛，而基本蚁群算法大概在第18次时才收敛，说明改进蚁群算法比基本蚁群算法的收敛速度快。从等年值总费用来看，改进蚁群算法小于基本蚁群算法，说明利用云模型和阈值判断对基本蚁群算法参数进行调整之后增强了全局搜索能力，得到了更优解。从表1中可以看出，改进蚁群算法的各项指标都要好于基本蚁群算法。综上，证明了本文提出方法的可行性和有效性。

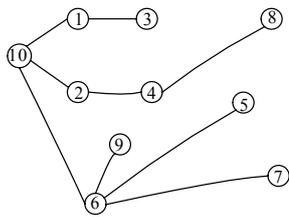


图2 改进蚁群算法结果

Fig.2 Result of improved ant colony algorithm

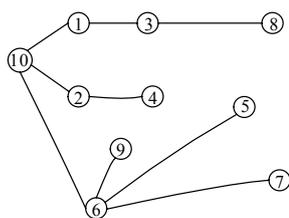


图3 基本蚁群算法结果

Fig.3 Result of basic ant colony algorithm

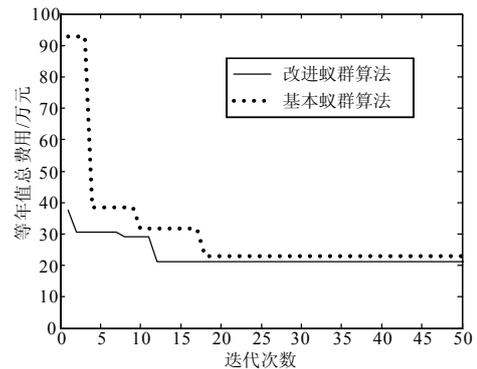


图4 评价函数曲线

Fig.4 Curves of evaluation function

表1 优化结果比较

Tab.1 Comparison of optimization results

	基本蚁群算法	改进蚁群算法
总投资/万元	113.6	110.5
有功功率损耗/kW	91.36	82.25
有功功率损耗费用/万元	13.70	12.34
等年值总费用/万元	22.86	21.24
节点电压最小值/kV	9.642 4	9.773 2

5 结论

本文提出的改进蚁群算法利用云模型和阈值判断调整基本蚁群算法的参数，克服了基本蚁群算法易陷入局部最优解的缺点。该改进算法能够跳出局部最优解，增强全局搜索能力，改善解的质量，并能够提高收敛速度。通过算例分析，证明了该方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 倪秋龙, 黄民翔. 基于支路交换的模拟退火算法在配电网规划中的应用[J]. 电力系统自动化学报, 2000, 12 (4): 31-35.
NI Qiu-long, HUANG Min-xiang. Power distribution system planning using branch exchange based simulative annealing algorithm[J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2000, 12 (4): 31-35.
- [2] 王秀丽, 李淑慧, 陈皓勇, 等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (12): 11-15.
WANG Xiu-li, LI Shu-hui, CHEN Hao-yong, et al. Multi-objective and multi-district transmission planning based on NSGA-II and cooperative co-evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (12): 11-15.
- [3] 张宪, 苑津莎. 基于粒子群算法的配电网规划[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33 (3): 14-18.
ZHANG Xian, YUAN Jin-sha. Distribution network

- planning based on particle swarm optimization[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33 (3) : 14-18.
- [4] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part-B, 1996, 26 (1) : 1-13.
- [5] 李德毅, 杜鹤. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
LI De-yi, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [6] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32 (6) : 15-20.
LI De-yi, MENG Hai-jun, SHI Xue-mei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Computer R&D, 1995, 32 (6) : 15-20.
- [7] 孙薇, 商伟, 牛东晓. 改进蚁群优化算法在配电网网架规划中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30 (15) : 85-89.
SUN Wei, SHANG Wei, NIU Dong-xiao. Application of improved ant colony optimization algorithm in distribution network planning[J]. Power System Technology, 2006, 30 (15) : 85-89.
- [8] 黄训诚, 庄奕琪, 耿阿因. 基于改进蚁群算法的配电网优化规划[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (6) : 727-731.
HUANG Xun-cheng, ZHUANG Yi-qi, GENG A-nan. Power distribution network optimization planning based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41 (6) : 727-731.
- [9] 颜伟, 刘方, 王官洁, 等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8) : 76-80.
YAN Wei, LIU Fang, WANG Guan-jie, et al. Layer-by-layer back/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (8) : 76-80.
- [10] DONG Yong-feng, GU Jun-hua, LI Na-na, et al. Combination of genetic algorithm and ant colony algorithm for distribution network planning[C].// Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2007: 999-1002.

收稿日期: 2009-12-11; 修回日期: 2010-03-31

作者简介:

赵书强 (1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统稳定分析与控制研究;

王磊 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统稳定分析与控制研究. E-mail: wl_313100@126.com

(上接第 37 页 continued from page 37)

- XUE Yu-sheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster — lessons from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (18) : 1-5.
- [2] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28 (9) : 13-16.
HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28 (9) : 13-16.
- [3] 徐慧明. 可识别潮流转移到广域后备保护及其控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
XU Hui-ming. Wide area backup protection and control strategy to prevent cascading trips[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [4] 胡益胜, 张明. 广域测量系统在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (5) : 19-21.
HU Yi-sheng, ZHANG Ming. Application of wide area measurement system in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (5) : 19-21.
- [5] Phake A G. Synchroniz-phasor measurements in power systems[J]. IEEE Trans Oil Computer Applications in Power, 1993, 6 (2) : 10-15.
- [6] 王艳. 贝叶斯网络及其在电网故障诊断中的应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.
WANG Yan. Research on Bayesian network and its application in power system fault diagnosis[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006.
- [7] Young Moon Park, Gwang Won Kim, Jin Man Sohn. A logic based expert system (LBES) for fault diagnosis of power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1) : 363-369.
- [8] 陈玉林, 陈允平, 孙金莉, 等. 电网故障诊断方法综述[J]. 中国电力, 2006, 39 (5) : 27-32.
CHEN Yu-lin, CHEN Yun-ping, SUN Jin-li, et al. A survey of power system fault diagnoses[J]. Electric Power, 2006, 39 (5) : 27-32.
- [9] Jiang Joe-Air, Lin Ying-Hong, Yang Jun-Zhe, et al. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines part II: PMU Implementation and performance evaluation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (4) : 1136-1146.
- [10] 高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
GAO Hui-xuan. Applied multivariate for data analysis[M]. Beijing: Beijing University Press, 2005.

收稿日期: 2009-12-28; 修回日期: 2010-09-20

作者简介:

徐岩 (1976-), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事电力系统继电保护, 变电站综合自动化方面的教学和研究; E-mail: wujin33221100@126.com

吴丹 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事电网规划方面的工作;

张亚刚 (1978-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护和非线性复杂系统理论。