

## 基于无功 / 电压控制的电网优化分区方法

李磊, 黄彦全, 董家读, 高风华, 王斌晓

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 电网合适的区域划分有利于无功功率的就地平衡和控制节点电压, 因此需对电网进行分区。基于区域无功与电压关系, 以无功电源节点为初始节点, 应用最大-最小电气距离法合并相邻节点形成初始分区。根据得到的初始分区, 再次应用最大-最小电气距离法合并或解裂各初始分区以致最终得到合理分区。应用所提分区方法进行分区, 可保证各区域内无功电源节点对负荷节点有较强的电压控制能力, 以及无功电源节点与由其进行补偿的负荷节点之间均有较强的电气耦合性, 这符合无功功率宜就地平衡的原则。通过 IEEE 30 节点系统验证了本方法的可行性、合理性和正确性。

**关键词:** 电网分区; 电气距离; 无功控制; 电压控制

### Optimization method of power network partitioning based on voltage/var control

LI Lei, HUANG Yan-quan, DONG Jia-du, GAO Feng-hua, WANG Bin-xiao

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A fit partitioning of network is good to balance the reactive power on the spot and control the node's voltage, so it needs to partition the network. Considering the relationship of the area's reactive power and voltage, the max-min electrical distance is used to form initial areas by merging the adjacency nodes, while reactive power supply nodes act as start nodes. On the basis of the initial division's merging and splitting, reasonable partition can be gotten by use of the max-min electrical distance method again. The method proposed can ensure that the reactive power supply to the load nodes have high voltage control capability, and there are more strong electrical coupling between the reactive power supply and the load nodes which is compensated by it, all of these conform with the principle that reactive power should be balanced on the spot. The result of simulation of IEEE 30 system verifies that the method proposed is practicable, reasonable and correctable.

**Key words:** power network partition; electrical distance; reactive power control; voltage control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0088-05

## 0 引言

最简单的电力网络分区是根据地域或电网所属电力公司进行划分, 但是仅仅考虑电网的自然属性而不考虑电网的电气特性所得到的分区是不合理的。文献[1]提出了基于慢相关技术的分区方法, 但此方法需要计算电力系统机电模型的慢特征矩阵, 其分区过程的复杂度大。文献[2-4]是基于图论的分区。图论的方法将系统以图的形式表示出来, 比较形象地解决了系统的结构模型, 但阈值值的选取是个难点, 阈值选取的不同会导致分区结果不同。文献[5]提出两层搜索分区方法。两层搜索方法采用分步分层进行分区, 降低了搜索空间, 但是本方法

却要预先确定分区个数。文献[6]提出基于电气距离的向上分级归类方法。向上分级归类方法保证了每个子区域都有足够的无功控制源, 并且此方法和专家知识结合应用, 可使系统分区更加合理, 但此方法需要预先人为地给定分区个数, 而分区个数的确定是个难点。文献[7]应用基于电气距离的信息理论进行分区。文献[8]提出基于 KOHONEN 神经网络的自动分区算法。此方法利用了神经网络对样本的记忆和联系能力, 可以实现信号的分类。本方法中样本特征量的选取是关键, 样本特征量选取的不同直接影响到分类结果。文献[9-10]是将 Tabu 搜索、免疫等启发式智能方法应用到电网分区, 为电压无功控制分区提供了新的方法和思路。文献[10-13]是应用聚类的概念对电网分区。聚类的方法就是把没有类别标记的样本根据选取的特征量分成若干子

**基金项目:** 四川省应用基础研究项目 (07J13-071)

类, 可使具有相似特征量的样本归为一类。此方法得到的分区结果容易出现孤立节点。

上述方法都没有考虑各分区中无功容量是否满足区域内节点电压控制的需要的问题。鉴于此, 本文提出一种优化分区方法: 即以无功电源节点为初始节点, 依据最大-最小电气距离法<sup>[6]</sup>得到初始分区。然后根据最大-最小电气距离法合并或解裂各分区直至形成合适的分区。各分区均有足够的无功容量用以满足本子区域内节点无功负荷的需要。用 IEEE 30 节点系统验证本方法的可行性、合理性和正确性。

## 1 电气距离

$N$  节点系统潮流方程的极坐标形式为:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad i=1, \dots, N \quad (1)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点注入有功、无功功率;  $V_i$  为节点  $i$  的电压幅值;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的相角差;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为节点导纳矩阵元素  $Y_{ij}$  的实部、虚部;  $j \in i$  表示节点  $j$  和节点  $i$  直接相连。

对方程 (1) 再进行转化可得:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - \\ \quad V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - \\ \quad V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad i=1, \dots, N \quad (2)$$

在本文, 将两点间电气距离<sup>[7]</sup>用某一节点处电压幅值变化量  $\Delta V$  对另一节点处无功功率变化量  $\Delta Q$  的灵敏度  $S_{vq}$  来表示。

在文献[9, 14]中, 灵敏度矩阵由潮流计算的雅克比矩阵得到。其原理如下: 令矩阵中有功功率变化量  $\Delta P \equiv 0$ , 消去公式中的  $\Delta \theta$ , 得到  $\Delta Q$  和  $\Delta V$  的关系式, 即:

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}] \Delta V = S_{QV} \Delta V \quad (3)$$

$$\Delta V = S_{QV}^{-1} \Delta Q = S_{VQ} \Delta Q \quad (4)$$

式中:  $S_{VQ}$  即为所求的灵敏度矩阵;  $J_{P\theta}$ 、 $J_{PV}$ 、 $J_{Q\theta}$  和  $J_{QV}$  为雅克比矩阵的子块。

在实际电力系统运行时, 有功功率变化对节点电压的影响比较小, 因此本文不考虑有功功率变化量对节点电压的影响。根据潮流方程式 (2) 中无功功率方程式, 直接对  $\Delta Q$  关于  $\Delta V$  求导数。如式 (5) 所示:

$$(S_{qv})_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \Delta V_j} \quad i, j=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$S_{vq} = [S_{qv}]^{-1} \quad (6)$$

其中:  $S_{vq}$  即为节点电压幅值变化量  $\Delta V$  对节点无功功率变化量  $\Delta Q$  的灵敏度矩阵。

一般地当  $i \neq j$  时, 灵敏度矩阵  $S_{vq}$  中元素  $(S_{vq})_{ij} \neq (S_{vq})_{ji}$ , 但二者相差不大, 且考虑到电气距离矩阵中两节点之间电气距离的对称性, 定义:

$$D_{ij} = D_{ji} = \frac{(S_{vq})_{ij} + (S_{vq})_{ji}}{2} \quad (7)$$

为两节点  $i, j$  之间的电气距离。  $D$  为电气距离矩阵。

## 2 目标函数

无功电源节点与负荷节点间的电气耦合性强, 就表示无功电源节点对负荷节点无功需求的补偿能力强、无功电源节点对负荷节点电压的调节能力强; 反之亦然。节点间电气耦合性强弱可用节点间电气距离的大小来表示, 电气耦合性强则电气距离小, 电气耦合性弱则电气距离大。无功功率的就地平衡原则可表现为无功电源节点与负荷节点间电气距离小。

电网优化分区的目的是使区域内部节点间电气耦合性强、区域间临界节点间电气耦合性弱。区域内部节点间电气耦合性强表现为区域半径小 (本文以区域内两两节点间电气距离的平均值为区域半径), 区域临界节点间电气耦合性弱表现为区域临界节点间的电气距离大。建立电网优化分区的目标函数, 如式 (8):

$$\min f(x) = \sum D_i(x) + \frac{1}{M} \quad (8)$$

$D_i(x)$  表示区域内各节点间的电气耦合性, 即区域内两两节点间电气距离的平均值;  $M$  表示各区域临界节点间的电气距离的平均值。

分区中每个电网分区的大小适应度。分区过大不易实现无功就地平衡、节点电压控制, 且线路中无功功率传输过多, 会增加电网中有功功率的损耗。分区过小则无实际意义, 且会影响系统整体性能。

设置约束条件为:

$$n_i^{\min} \leq n_i \leq n_i^{\max}$$

其中:  $n_i$  为区域  $qi$  所包含节点数;  $n_i^{\min}$ 、 $n_i^{\max}$  分别为  $n_i$  的上下限值。  $n_i^{\min}$  和  $n_i^{\max}$  的大小与系统的节点数、系统的拓扑结构图等都有关系。因此对于具体系统, 可依据经验确定  $n_i^{\min}$  和  $n_i^{\max}$  的数值。

把约束条件加入到目标函数式 (8), 目标函数变为:

$$\min f(x) = \sum (D_i(x) + \phi(n_i)) + \frac{1}{M} \quad (9)$$

其中,  $\phi$  为约束条件  $n_i$  的函数。其取值如下:

$$\phi(n_i) = \begin{cases} (n_i^{\min} - n_i)^2 & n_i \leq n_i^{\min} \\ 0 & n_i^{\min} \leq n_i \leq n_i^{\max} \\ (n_i - n_i^{\max})^2 & n_i \geq n_i^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

当分区节点数  $n_i$  在约束条件内时, 约束条件函数  $\phi$  赋值为零, 其对目标函数值没有影响; 当分区节点数  $n_i$  不在约束条件内时, 约束条件函数  $\phi$  赋值为越限节点个数开平方, 使目标函数值增大。

### 3 算法流程

电网优化分区的过程可以认为是以无功电源节点为初始节点进行膨胀或收缩的过程。膨胀或收缩过程中以系统中有无孤立节点为终止条件、以最大-最小电气距离为参考量, 把孤立节点归并到已有区域。

#### 3.1 具体流程 (图 1)

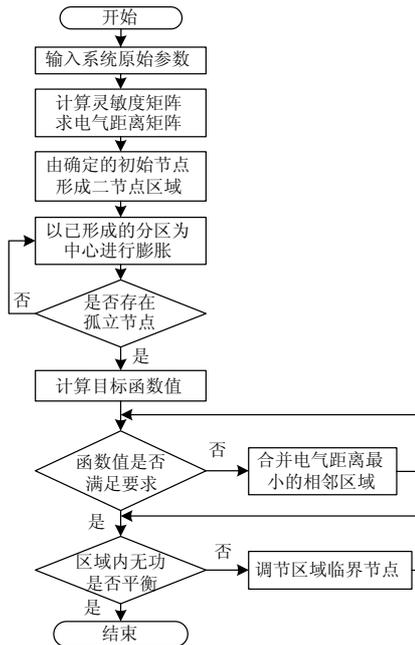


图 1 分区算法流程图

Fig.1 Flow chart of the proposed partitioning method

#### 3.2 需要注意的问题

1) 一个节点与多个区域直接相连接。应计算节点与相邻各区域中节点最大电气距离, 节点归并到最大电气距离最小者所对应区域。

2) 区域不包含某节点时无功过多, 但包含同一节点时无功不足。此时应将节点分裂为等价的两个

或多个节点, 各等价节点归并到不同区域, 其无功需求由相应的区域提供支持。

3) 变压器支路不能分属于不同的区域。变压器支路两端节点不属于同一区域时, 应分别计算变压器支路两端节点到对方区域各节点的最大电气距离, 所得电气距离较小者归并到对方区域。

### 4 算例

笔者利用 Matlab 软件编写程序, 通过 IEEE 30 节点标准系统验证本文所提出方法的可行性和正确性。

IEEE-30 系统有 6 个发电机节点、24 个负荷节点、2 个无功补偿节点、41 条支路、4 条变压器支路。具体数据参考文献[15]。

首先, 利用式 (6) 求出灵敏度矩阵  $S_{vq}$ 。由于矩阵  $S_{vq}$  阶数大, 这里只列出其前五五行五列, 如表 1 所示。

表 1 灵敏度矩阵部分元素

Tab.1 Part elements of sensitivity matrix

13.114 6	13.535 7	14.282 2	14.628 2	14.601 8
12.541 1	12.993 9	13.687 9	14.026 7	14.011 2
12.672 7	13.108 5	13.894 2	14.210 8	14.157 8
12.591 8	13.031 6	13.786 2	14.137 8	14.078 8
12.009 8	12.438 0	13.123 5	13.452 1	13.534 9

由灵敏度矩阵  $S_{vq}$ , 通过式 (7) 求得电气距离矩阵  $D$ 。同样, 对于电气距离矩阵  $D$  此处仅列出其前五五行五列。如表 2 所示。

表 2 电气距离矩阵部分元素

Tab.2 Part elements of electrical distance matrix

13.114 6	13.038 4	13.477 4	13.61	13.305 8
13.038 4	12.993 9	13.398 2	13.529 2	13.224 6
13.477 4	13.398 2	13.894 2	13.998 5	13.640 7
13.61	13.529 2	13.998 5	14.137 8	13.765 4
13.305 8	13.224 6	13.640 7	13.765 4	13.534 9

由步骤 3~5 可得到 30 节点系统的初始分区。下面简要叙述其具体操作步骤。

首先, 选取无功电源节点 1、2、5、8、11、13、10、24 为初始节点, 然后分别计算与各初始节点直接相连的节点中电气距离最小的节点, 形成二节点区域。对于上述八个初始节点, 二节点区域分别为: (1, 3), (2, 4), (5, 7), (8, 6), (11, 9), (13, 12), (10, 17), (24, 25)。

下一步, 以形成的二节点区域为中心进行膨胀。对于二节点区域 (1, 3), 由于与其直接相连的负荷

节点已没有孤立节点,因此二节点区域(1,3)停止膨胀。二节点区域(2,4)、(5,7)和(11,9)因为同样原因停止膨胀。二节点区域(10,17),与其直接相连的孤立负荷节点有16、20、21、22,分别计算这四个节点与节点10、17的电气距离,记录其较大值。比较16,20,21,22所对应的较大值可知,节点21对应的最大电气距离数值最小,故把节点21归并到区域(10,17),形成区域(10,17,21)。对于二节点区域(13,12),有孤立负荷节点14,15,16与其直接相连。计算负荷节点与区域节点的电气距离,记录并比较其较大值。负荷节点16对应的最大电气距离数值最小,故把节点16归并到区域(13,12)形成区域(13,12,16)。应用同样的方法,可知区域(24,25)应添加负荷节点23形成区域(24,25,23);区域(8,6)应添加负荷节点28形成区域(8,6,28)。

经检查可知系统中仍然存在孤立节点,故对已形成区域继续膨胀。对区域(24,25,23),与其直接相连的孤立节点为15,22,26,27。计算电气距离后,可知节点27符合条件。对区域(8,6,28),与其直接相连的节点仅节点27,可知节点27符合条件。区域(24,25,23)和区域(8,6,28)两个区域同时膨胀到同一个节点27,这时就要对节点27分别与两个区域应用最大-最小电气距离法,节点27归并到较小电气距离所对应的区域。此处,节点27归并到区域(24,25,23)形成区域(24,25,23,27),区域(8,6,28)停止膨胀。区域(10,17,21)添加节点22形成区域(10,17,21,22);区域(13,12,16)添加节点15形成区域(13,12,16,15)。

按上述方法继续操作,可得初始分区。得到的初始分区根据节点添加顺序可写为:初始分区1:(1,3);初始分区2:(2,4);初始分区3:(5,7);初始分区4:(8,6,28);初始分区5:(11,9);初始分区6:(13,12,16,15,14);初始分区7:(10,17,21,22,20,19,18);初始分区8:(24,25,23,27,29,30,26)。

节点26与初始节点24之间仅有一个节点25,节点29、节点30与初始节点24之间有两个节点25和节点27。由于节点26与初始节点24之间电气距离大于节点29、节点30与初始节点24之间的电气距离,因此节点26较节点29、节点30更晚归并到初始节点24所属分区。

目标函数的约束条件参数设置为:

$$10 \leq n_i \leq 20$$

根据步骤(6)、(7)确定各分区的合并与解裂,

计算目标函数的值。从所得初始分区开始,共进行7次计算,其结果如表3。

表3 目标函数值

Tab.3 Objective function values

分区数	8	7	6	5
目标函数值	469.66	364.16	268.11	161.62
分区数	4	3	2	
目标函数值	110.62	86.14	23.75	

由此可知,所得分区结果为:初始分区1、2、4、6、8合并为1区域;初始分区3、5、7合并为2区域。1区域中节点6与2区域中节点9和节点10之间所连支路为变压器支路。由于变压器支路两端节点不能分属于不同区域,因此计算节点6与区域2中各节点电气距离,记录所得最大值d6;计算区域2中节点9、节点10与区域1中各节点电气距离,记录所得最大值d9、d10。由于比较得d6小于d9和d10,因此把节点6归并入2区域。

对所得两分区进行区域内无功功率平衡校验,可知2区域电源无功功率不足。应用最大-最小电气距离法计算2区域中临界节点到1区域的电气距离值,可知负荷节点18所对应电气距离值最小,故把负荷节点18归并到1区域。

所得最终分区结果为:1区:(1,2,3,4,8,12,13,14,15,16,18,23,24,25,26,27,28,29,30);2区:(5,6,7,9,10,11,17,19,20,21,22)。

具体分区结果如图2所示。

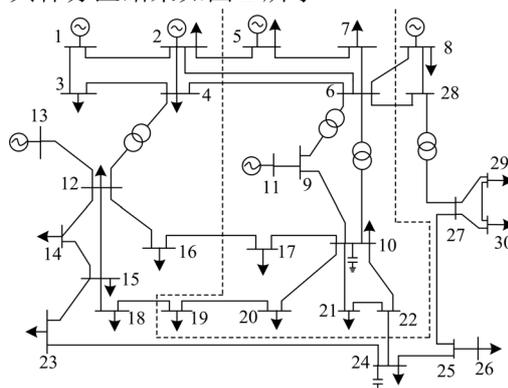


图2 30节点系统分区结果

Fig.2 Partition result of the IEEE 30 system

本文所得分区结果与文献[16]所得结果相比较,只有无功电源节点5和负荷节点18的归属区域不同。本文中节点5归属于2区域,节点18归属于1区域,而文献[16]中节点5和节点18所归属区域正好与本文相反。本文所得分区结果使无功电源节

点的分布与无功负荷节点的分布相适应,提高了电源节点对区域内负荷节点电压的调节能力;本文所得分区结果,使各区域内电源无功功率均满足负荷无功功率。本文所得分区结果与文献[16]相比较之结果亦可证明本文所提分区方法的可行性和正确性。

## 5 结论

本文所提出的由初始节点依据最大-最小电气距离法形成初始分区的方法,保证了各区域内电源节点对负荷节点电压的控制能力。最大-最小电气距离法的应用保证了由无功电源节点进行无功补偿的负荷节点都是与无功电源节点联系紧密的节点,这符合无功功率宜就地平衡的原则,并且说明无功电源节点对负荷节点电压的控制作用比较强。通过应用于 IEEE 30 节点系统验证了本文所提方法的可行性、合理性和正确性。

## 参考文献

- [1] Yusof S B, Rogers G J, Alden R T H. Slow coherency based network partitioning including load buses[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8 (3): 1375-1382.
- [2] 范磊, 陈珩. 二级电压控制研究(一)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (12): 20-24.  
FAN Lei, CHEN Heng. Study of secondary voltage control part one structural model and nested clustering algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (12): 20-24.
- [3] Yao X M, Yamada, Lin C L. Embedding planar graphs in four pages[J]. Compute System Science, 38 (1989): 36-67.
- [4] 黄伟. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法(硕士学位论文)[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [5] 胡泽春, 王锡凡, 王秀丽, 等. 用于无功优化控制分区的两层搜索方法[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 37-41.  
HU Ze-chun, WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, et al. A two-layered network partitioning approach for optimal reactive power dispatching[J]. Power System Technology, 2005, 29 (24): 37-41.
- [6] 王耀瑜, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (3): 221-224.  
WANG Yao-yu, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. An expert knowledge based subarea division method for hierarchical and distributed electric power system voltage/var optimization and control[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (3): 221-224.
- [7] Lagonotte P, Sabonnad iere J C, Leost J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in france[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4 (2): 479-486.
- [8] 刘小波. 基于电网分区的二次电压控制研究(硕士学位论文)[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [9] 刘大鹏, 唐国庆, 陈珩. 基于 Tabu 搜索的电压控制分区[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (6): 18-21.  
LIU Da-peng, TANG Guo-qing, CHEN Heng. Tabu search based network partitioning for voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (6): 18-22.
- [10] 熊虎岗, 程浩忠, 孔涛. 基于免疫-中心点聚类算法的无功电压控制分区[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 22-26.  
XIONG Hu-gang, CHENG Hao-zhong, KONG Tao. Network partitioning for reactive power/voltage control based on immune-central point clustering algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (2): 22-26.
- [11] 杨秀媛, 董征, 唐宝. 基于模糊聚类分析的无功电压控制分区[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 6-10.  
YANG Xiu-yuan, DONG Zheng, TANG Bao. Power network partitioning based on fuzzy clustering analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (22): 6-10.
- [12] 王颖, 彭建春, 何禹清, 等. 模糊聚类发在二级电压控制分区中的应用[J]. 继电器, 2008, 36 (11): 28-32.  
WANG Ying, PENG Jian-chun, HE Yu-qing, et al. Application of fuzzy clustering in secondary voltage control partitioning[J]. Relay, 2008, 36 (11): 28-32.
- [13] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (10): 36-40.  
GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in MVAR control Space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (10): 36-40.
- [14] 胡彩娥, 杨仁刚. 用电力系统分区方法确定无功源最佳配置地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004(3): 46-49.  
HU Cai-e, YANG Ren-gang. Optimal allocation of reactive power sources using network partitioning[J]. Proceedings of the EPSA, 2004(3): 46-49.
- [15] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [16] Mori H, Takeda K. Parallel simulated annealing for Power system decomposition[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (2): 789-795.

收稿日期: 2009-08-17; 修回日期: 2009-11-12

作者简介:

李磊(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统无功优化方面的研究; E-mail: mmlili66@163.com

黄彦全(1961-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统状态估计、微机保护和变电站综合自动化方面的研究和教学工作; E-mail: yquang@nec.swjtu.edu.cn

董家读(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网自动化方面的研究。