基于MAS的大规模风电接入电网无功电压控制策略

随着大规模风电并网容量的增加，其随机性和波动性使电网电压控制越加复杂，传统的电压控制模式和方法难以达到预期效果。利用Multi－Agent System（MAS）所具有的智能性、分布性及协调性特点，结合灵敏度法，提出基于MAS的电网无功电压协调控制模型。该模型综合考虑电压分层分区控制的特点，建立区域级、地区级Agent，区内各Agent间协调控制，达到对大规模风电接入电网电压的有效控制。以某大型风电基地电网为例，验证了所提控制方法的有效性。

徐　鹏[1]　惠建峰[2]　但扬清[1]　王　康[2]　刘文颖[1]／1.华北电力大学电气与电子工程学院　2.国网陕西省电力公司

徐　鹏／博士研究生

关键词／Keywords

多代理系统·
风电接入·
协调控制·
灵敏度·

0　引言

基于电力系统无功电压“分层分区控制，就地平衡”的控制特点。三级无功电压控制方法是目前普遍采用亦较实用的控制方法[1-4]。在系统中出现电压波动时，发电机的励磁调节器或变电站的无功补偿设备动作调节无功，称为一级控制；若一级控制措施不足以平抑电压波动，则发电厂和中枢点变电站无功电压自动控制装置动作，称为二级控制；若上述措施均失效，则采用AVC（Automatic Voltage Control）主站系统进行全系统无功电压控制，称为三级控制。这种多级电压控制方法已在国内外运行多年，并取得了良好的应用效果，但随着大规模风电接入电网使电压控制越加复杂，传统的AVC系统很难适应现行电网的电压控制，其主要问题如下。

1）区内无功电压控制不具有协调控制功能，由于风电场接入电网具有分散性，相互之间存在时空特性，很难做到将各点运行电压均控制在允许范围之内。

2）区级之间不具有智能性，使得各区内的无功源得不到优化利用。

自20世纪80年代以来，计算机通信和网络技术飞速发展，多Agent系统（Multi－Agent Systems，MAS）技术越来越多地应用于电力系统电压控制中[5]。早期有学者提出了基于MAS的二级无功协调控制策略，静止无功补偿器（SVC）、发电机自动电压调节器（AVR）和静止无功发生器（STATCOM）等电压控制装置作为独立的Agent单元，顶层设置顶层Agent，共同构成两级MAS系统。当独立的Agent单元无法完成电压控制目标时，则由顶层Agent协调各Agent实现电压控制。文献[6]利用MAS技术建立了电网电压调节设备的协调自动控制系统。文献[7-8]研究了紧急电压控制策略，用有限“状态机”概念描述MAS的协调通信语言，以达到改善紧急状态下电网电压的目的。综上所述，将MAS应用于电压控制方面已经取得了一定的成效，然而也存在一些不足，如Agent成员之间的通信信息和准则较简单和MAS生成的最终策略较单一等。同时，这些文献中的MAS都是分布式结构，各Agent成员控制的目标很局限，受自身和外界环境的影响，难以在时间维度和空间维度相互协调生成全局和局部控制策略，也不能实现各局部间的无功源的优化利用。随着大规模风电接入电网，使电网运行电压出现

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大幅度随机性波动，电压控制问题成为亟待研究和解决的问题，但目前基于MAS的无功电压协调控制应用大规模风电接入电网的研究还尚少。

在深入剖析MAS系统功能结构和协调机制的基础上，利用灵敏度参数反映节点无功电压耦合强度，建立基于MAS的电网无功电压协调控制模型。该模型综合考虑电压分层分区控制的特点，建立区域级和地区级Agent，实现区内各Agent间协调控制，区级之间智能控制，最终实现无功电压分区控制。实例仿真验证了该控制方法的有效性。

1　基于无功电压灵敏度的电压调整

在一个含有n个节点，其中包括n_{PV}个PV节点、n_{PQ}个PQ节点和一个平衡节点的电网中，潮流计算极坐标表达式[9]为

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

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

将式（1）在平衡点处线性化可以得到

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{p\theta} & J_{pv} \\ J_{q\theta} & J_{qv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中，ΔV、$\Delta\theta$分别为节点电压的幅值变化量和相角变化量；ΔP、ΔQ分别为注入节点的有功功率变化量和无功功率变化量。

由于电网中各元件的电抗值远远大于电阻值，即$X \gg R$，使电压幅值变化量ΔV主要与无功功率变化量ΔQ有关，而与有功功率的变化量ΔP关系不大，故在分析电压无功关系时，可令$\Delta P=0$，得到下面的关系式，即

$$\Delta Q = [J_{qv} - J_{q\theta}J_{p\theta}^{-1}J_{pv}]\Delta V = \boldsymbol{M}\Delta V \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{M}$为无功功率Q对电压幅值V的灵敏度矩阵。

令$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{M}^{-1}$，则有

$$\Delta V = \boldsymbol{M}^{-1}\Delta Q = \boldsymbol{S}\Delta Q \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{S}$为无功电压灵敏度矩阵；元素S_{ij}为节点j的注入无功功率增加单位功率时，节点i的电压幅值增量，反映了存在可调无功功率容量母线的无功功率变化量与负荷母线电压幅值变化量之间的关系。

利用SCADA实测数据计算大规模风电接入电网无功电压灵敏度矩阵$\boldsymbol{S}$，并通过无功电压灵敏度矩阵寻找最佳的风电场无功补偿节点，计算无功功率调整量，实现越限母线电压控制在合理范围内的目的。图1为基于无功电压灵敏度理论的母线电压调整流程图。

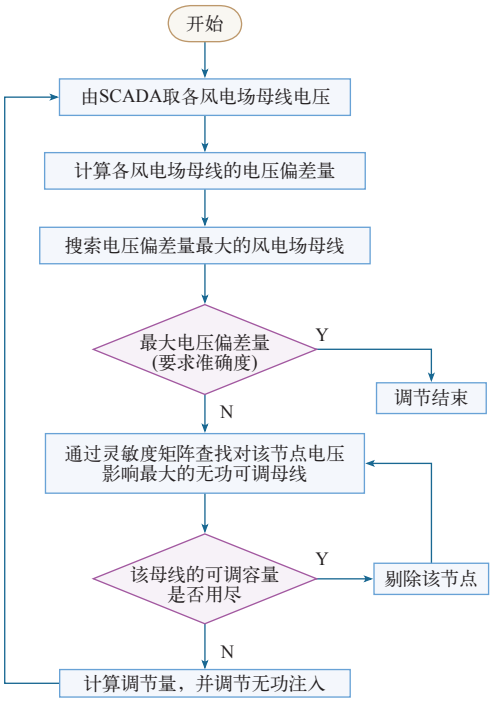

图1　基于无功电压灵敏度矩阵的电压调整方法

图1中，电压调整方法的基本思路为：从SCADA系统中获得各风电场母线电压，并计算其电压偏差，然后搜索电压偏差量最大的风电场母线节点，判断其是否达到了要求准确度值。如果电压偏差最大的母线电压偏差小于要求准确度值，则调节结束。否则，需要通过灵敏度矩阵找到对该母线影响最大的风电场无功功率可调母线，并判断该风电场是否有可调无功容量。若无

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可调无功容量，则剔除该节点，重新寻找可调节点；若存在可调容量，则计算可调量，取可调量与该节点实际可调量之间的最小值作为最终调节量。在无功容量充足的电网中，一般经过多轮调整后，各母线电压一般均能恢复至合理范围内。

2 基于MAS的风电集群接入电网无功协调控制方法

2.1 基于MAS的风电集群接入电网无功协调控制模型

根据电压分层、分区平衡和控制的特点[10-12]，以实现风电集群接入电网重要节点母线电压控制在合理范围为目标，基于MAS技术建立如图2所示的无功协调控制模型。

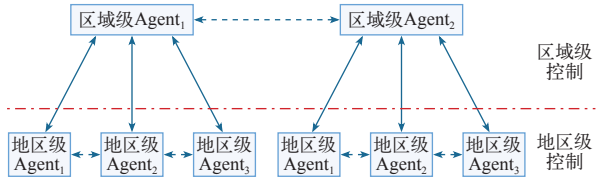

图2 分层分区电压无功智能控制

在该模型分为地区级Agent和区域级Agent两层结构。按照某种算法将含大规模风电集中接入的电网分成多个区域，每个区域分为多个地区。区域级Agent实现风电集群接入母线电压的控制与调整，地区级Agent实现风电场汇集母线电压的控制与调整。Agent间可利用无功电压灵敏度信息进行横向的协调控制，同时也可以向上级Agent申请无功援助，最终实现含大规模风电集群接入电网的电压无功协调控制。

该模型的关键在于分区的实现，在此采用节点间电气距离和物理距离共同约束的分区方法，将计算机网络中的路由选择算法－向量－距离法应用到Agent间协调通信中。

该方法具体步骤如下。

1）建立Agent知识库，将Agent间网络拓扑关系输入Agent知识库。

2）当电力设备参数或网络拓扑关系发生变化时，核心Agent将该信息张贴在公告板上。

3）邻近Agent从公告板上读取到电力设备参数或网络拓扑关系的改变信息后，将会更新其与核心Agent间的路径信息，更新准则为两者之间的跳数最小。

4）根据Agent知识库中设定的跳数阈值，确定核心Agent所属的Agent子集合。

5）Agent节点集合确定。根据网络拓扑关系遍历节点对该Agent的无功电压灵敏度，并根据阈值选择分区内节点。

2.2 区域级电压无功控制策略

区域级Agent控制目标是面向区域，完成控制区域内最高电压等级母线电压合格。区域级控制策略流程如图3所示。具体步骤如下。

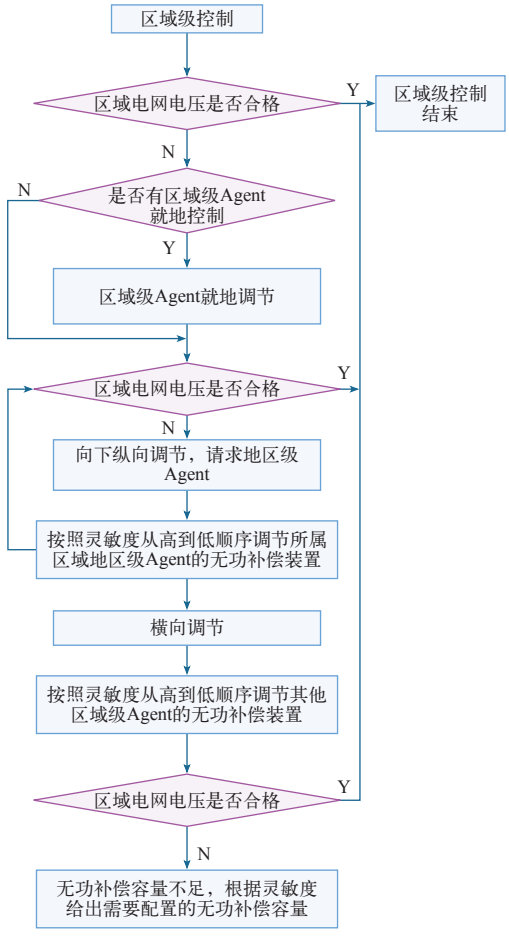

图3 区域级控制策略流程图

1）获取区域母线电压大小，与电压运行阈值比较，若电压越限，则执行步骤2）。

2）就地调节。计算区域内可控制无功补偿装

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

置可调量，若无无功可调容量则进入步骤3）；否则进行无功调整并判断越限电压是否合格，若不合格或无功可调容量用尽，则进入步骤3）。

3）向下纵向调节。向地区级Agent下达无功需求指令，各地区级Agent计算本区域无功补偿装置对电压越限节点的灵敏度，并由大到小顺序协调区域级Agent完成电压控制，若电压仍越限，则进行执行步骤4）。

4）横向调节。向相邻区域级Agent请求无功支撑，并计算无功补偿装置对本区域内电压越限节点的灵敏度，并由大到小顺序协调控制本区域电压，若电压仍越限，则给出区域电网的无功需求容量，否则，结束区域级电压控制。

2.3　地区级电压无功控制策略

地区级Agent控制目标是面向地区，完成各地区内各风电场母线电压控制。地区级控制流程图如图4所示。

1）获取地区内各风电场母线电压，与阈值比较，若电压越限，则执行步骤2）。

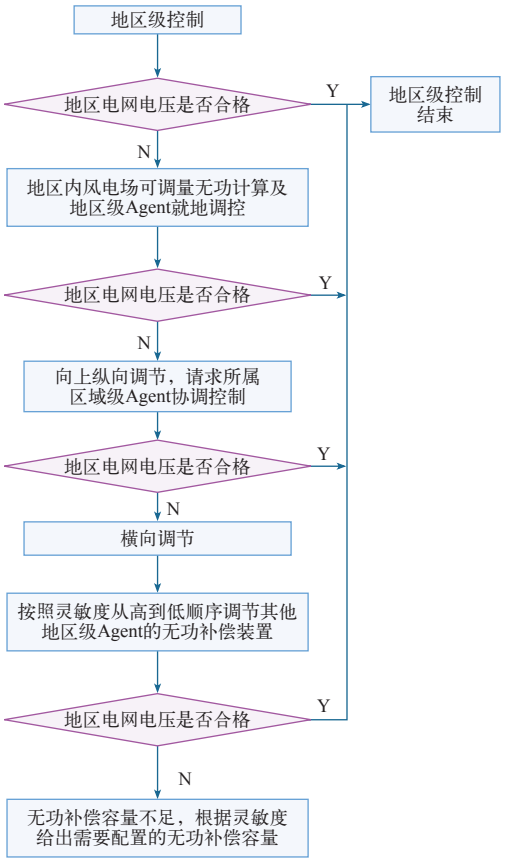

图4　地区级控制策略流程图

2）计算地区内风电场无功可调容量，若无可调容量则进入步骤3）；否则，利用无功装置调控后与电压阈值比较，若无越限则地区级控制结束，否则，则进入步骤3）。

3）向上纵向调节。向上级Agent请求无功支撑，计算无功源对地区级Agent的电压灵敏度，并进行纵向调节；若电压仍越限，则执行步骤4）。

4）横向协调调节。向相邻地区级Agent请求无功支援，相邻地区级Agent节点按照对本地区内电压越限节点的灵敏度由大到小顺序参与协调控制。经过多轮控制，若仍有母线电压越限，则给出该地区无功需求容量。否则，地区级Agent电压控制结束。

3　实例验证

图5为某大型风电基地的电网地理接线图，应用所提出的基于MAS的无功协调控制策略，分别对该地区风电小出力和大出力时引起电网重要节点的电压越限进行控制。验证基于MAS的大规模风电接入电网无功电压控制策略可将电压控制在合理范围内。

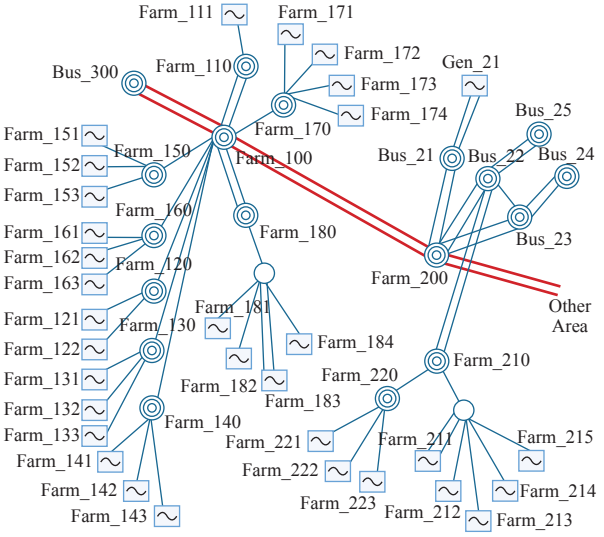

图5　某风电基地电网地理接线图

该地区电网750 kV变电站Farm_100和Farm_200变电站750 kV母线电压运行范围为750～785 kV；330 kV母线电压运行范围为

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

351～361 kV。

3.1 区域划分

如图5所示，该风电基地电网以750 kV变电站为中心，辐射接入若干个330 kV变电站；以330 kV变电站为中心，辐射接入若干个风电场。该风电基地电网的Agent分区结果如图6所示。

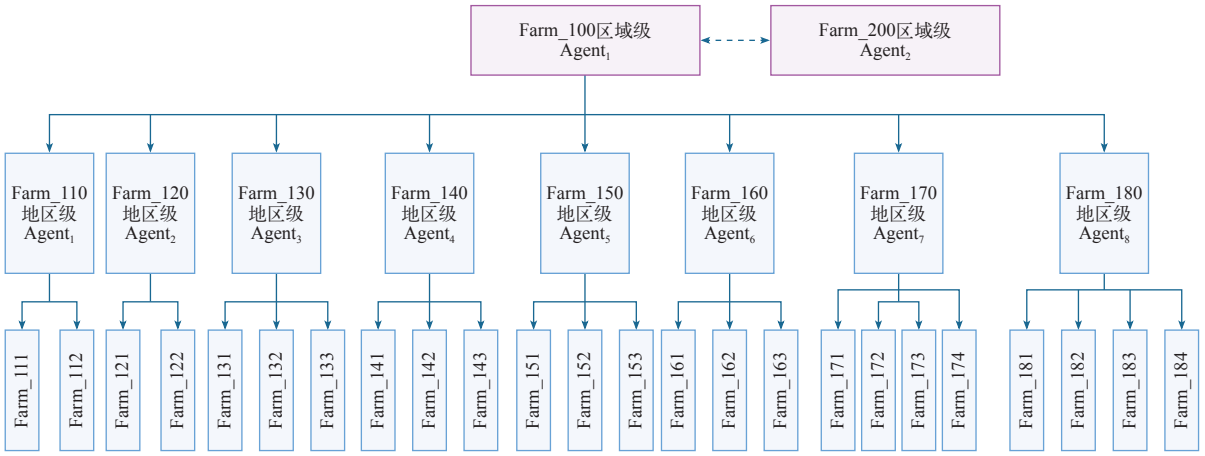

图6 地区无功电压Agent分区结果

根据风电接入方式和向量－距离法，该风电基地电网可分为两个区域，分别是Farm_100和Farm_200。每个区域由相对应的区域级Agent进行控制；区域内以330 kV变电站为中心可分为若干个地区级Agent。该风电基地电网区域级Agent和地区级Agent具体分区如下。

1）Farm_100区域级Agent包括Farm_110、Farm_120、Farm_130、Farm_140、Farm_150、Farm_160、Farm_170和Farm_180 8个地区级Agent。

2）Farm_200区域级Agent包括Farm_210和Farm_220两个地区级Agent。

3.2 风电小出力无功电压控制仿真

该风电基地电网风电出力为20%时，Farm_100和Farm_200母线电压越上限，未达到750～785 kV的电压合格范围。起动相对应的区域级Agent进行就地控制，退出Farm_200接入的电容器1×66 Mvar，越限母线电压如表1所示。

表1 越限母线电压控制前后对比表

越限母线名	控制前电压/kV	控制后电压/kV
Farm_100	790.53	782.07
Farm_200	786.32	780.18

由表1可知，在风电小出力的运行方式下，部分母线电压越上限，对应的区域级Agent执行就地控制后，越限母线电压趋于合理范围。因此，区域级Agent的就地控制策略能够明显改善电压运行水平。

3.3 风电大出力无功电压控制仿真

该风电基地电网风电出力为50%时，Farm_200区域内的Farm_210、Farm_220与Farm_100区域内的Farm_120、Farm_130和Farm_140 5条地区级母线的电压越下限。

表2 越限母线无功电压灵敏度系数

灵敏度系数/(kV/Mvar)	Farm_120	Farm_130	Farm_140
Farm_160	0.026 53	0.023 28	0.024 27
Farm_180	0.018 99	0.016 66	0.017 36
Farm_100	0.018 50	0.016 23	0.016 92
Farm_170	0.006 51	0.005 71	0.005 96
Farm_200	0.005 17	0.004 54	0.004 72
Farm_150	0.005 00	0.004 39	0.004 58
Farm_210	0.001 08	0.000 95	0.000 99

对应的区域级Agent和地区级Agent起动就地控制模块，退出Farm_210接入的电抗器1×60 Mvar，退出Farm_100接入的电抗器2×100 Mvar，全网各母线电压明显改善，但依然有Farm_120、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Farm_130、Farm_140 3条母线电压越下限。计算该3条越限母线电压对有无功调节裕度的风电场母线无功灵敏度系数，如表2所示。

对存在电压越限的母线，求取各存有无功调节容量的母线对其的电压灵敏度系数，从大到小依次调节越限母线电压。表2中Farm_120母线电压灵敏度由大到小的母线排序为Farm_160、Farm_180、Farm_100和Farm_170等。依次调节对应节点的无功补偿设备直至越限母线电压趋于合理范围。其余越限母线电压的协调控制方法类似。经过多轮协调控制后，越限母线电压如表3所示，其他母线电压均在合格范围内。

表3 越限母线电压控制前后对比表

越限母线名	控制前电压/kV	控制后电压/kV
Farm_120	361.19	360.80
Farm_130	361.58	360.54
Farm_140	361.41	360.78

由表3可知，当风电出力增大时，该地区电网5条330 kV母线电压越下限，相应的Agent执行就地控制后，仍有3条330 kV母线越限；相应的Agent执行协调控制策略，将越限母线电压控制至合理范围。验证了地区级Agent无功协调控制策略的有效性。

4 结束语

利用MAS所具有的智能性、分布性及协调性特点，建立了基于MAS的电网无功电压协调控制模型。该模型综合考虑电压分层分区控制的特点，依据风电场接入方式及向量－距离分区算法将电网分成多个区域和多个地区。区域级Agent生成区域级控制策略，对区域风电集群接入母线电压进行协调控制；地区级Agent生成地区级控制策略，对地区中的风电汇集接入母线电压进行协调控制。Agent间纵向和横向的相互协调，共同完成整个电网的无功电压控制。采用某风电基地电网实际数据进行仿真计算，验证了地区级Agent和区域级Agent控制策略的有效性。

参考文献

[1] Liang Cai-hao，Duan Xian-zhong．A clustering validation based method for zone number determination in network partitioning for voltage control [C]．IEEE CNF，UPEC 2004，1：727-731．

[2] 王颖，彭建春，何禹清，等．模糊聚类法在二级电压控制分区中的应用 [J]．继电器，2008，36 (11)：9-14．

[3] 郭庆来，孙宏斌，张伯明，等．协调二级电压控制的研究 [J]．电力系统自动化，2005，29 (23)：19-24．

[4] 杨银国，林舜江，欧阳逸风，等．三级电压控制体系下大电网暂态电压安全仿真及其控制策略 [J]．电网技术，2013，37 (4)：1045-1051．

[5] 明哲，李海强．MAS控制算法在二级电压控制中的应用 [J]．广东电力，2011：24 (2)：60-62．

[6] 李端超，叶礼广，关守仲，等．基于多智能体协调的电网自动电压控制系统研究及应用 [J]．华东电力，2009：37 (9)：1454-1458．

[7] 李琳．风电场集中并网地区的无功电压紧急控制研究 [D]．南京：国网电力科学研究院，2013．

[8] 陈中．电力系统电压稳定后紧急控制研究 [D]．南京：东南大学，2006．

[9] Hurley J D，Bize L N，Mummert C R．The adverse effects of excitation system var and power factor controllers [J]．IEEE Transactions on Energy Conversion，1999，14 (4)：1636-1645．

[10] 杨秀媛，董征，唐宝，等．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 (22)：6-10．

[11] 胡泽春，王锡凡，王秀丽．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．

[12] 颜伟，王芳，唐文左，等．基于电源分区与短路阻抗距离的电压无功分区方法 [J]．电力系统保护与控制，2013，41 (7)：109-115．

（收稿日期：2015－11－03）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net