

# 考虑风电接入的电压控制区域修正方法研究

李英量, 王康, 高兆迪, 王德明, 宋楠, 朱琦

(西安石油大学电子工程学院, 西安 710065)

**摘要:** 传统的电压控制区域(VCA)划分会随风电出力的波动而发生变化,为了获得能够适应各种风电出力的稳定分区,提出一种考虑风电接入下电压控制区域的修正方法。首先,为了研究风电出力的波动性对分区的影响,将风电出力概率分布离散化为多个场景,研究每个出力场景下的潮流、分区。其次,利用雅可比子矩阵建立含有功因素的灵敏度矩阵与电气距离矩阵,采用凝聚的层次聚类法对风电出力不同断面条件下的PQ节点分区。通过Q-V曲线的极小值将与PQ节点无功限值一致的发电机组也归为一组,再利用灵敏度法将剩余的PV节点逐次划分获得全网分区。最后,通过识别VCA边界,利用断线分析法将电压波动不一致的边界节点重新划分,从而提升区域之间的电压解耦程度,实现区域的拓扑优化。将IEEE39节点系统处理为多个风电出力场景,并对每个场景的出力断面进行仿真分析。结果表明,所提方法能合理体现由于风电出力波动导致的分区变化,并可修正不同出力场景下的分区变化,可为系统各区域的电压稳定控制提供条件。

**关键词:** 风力发电; 电压控制; 电压稳定; 灵敏度分析; 层次聚类; 拓扑优化

**中图分类号:** TM743

**文献标志码:** A

## 0 引言

随着电力系统的不断升级,电网结构日趋复杂,局部电压失稳可能会影响整个电网<sup>[1]</sup>,因此电压稳定监控成为值得关注的问题<sup>[2]</sup>。法国电力公司提出的分级电压控制是各种方案中最具有代表性的<sup>[3]</sup>。近年来风力发电在中国迅猛发展,电压控制课题逐渐集中在风电接入的场景<sup>[2]</sup>。风电自身的波动性会影响节点的电压稳定性<sup>[4]</sup>,改变节点的灵敏度,使分区结果发生变化。因此,研究如何获得风电接入下的电压控制区域(voltage control area, VCA)对电压稳定控制具有重要意义。

为获得具有电压稳定特征的VCA,国内外学者进行了广泛研究。分区模型方面,文献[5]提出一种等效阻抗距离,更符合节点间的电气联系。分区方法方面,广泛采用聚类法<sup>[6-7]</sup>、图论法<sup>[7-9]</sup>、主导节点法<sup>[10]</sup>、启发式算法<sup>[11-12]</sup>等方法,为得到准确的VCA提供了诸多思路。随着大规模新能源的接入,考虑风电场的电压稳定控制问题研究逐渐深入<sup>[13]</sup>。文献[14]通过研究风电场并网地区电压稳定的电压无功协调控制方法,提出了包含综合灵敏度信息的风电场的电压修正方程;文献[2]在无功分区过程中引入负荷被控空间的概念进行电网分区,解决了风电场接入下的分区连通性与无功平衡问题;文献[15]定义了涵盖波动特征的电气距离,为解决波动性问题提供了新思路;文献[16]考虑概率特征的

方法,将风电场出力纳入分区方法中,为在线实时电网分区提供了条件。上述文献考虑了无功容量及无功输出对分区的影响,采用一次性求取有功期望来消除风电出力波动,但难以体现风电波动对电气距离以及每个出力断面的影响。因此,如何更全面地考虑风电接入对系统分区结果的影响还需深入研究。

目前,考虑风电接入的电网分区主要集中在研究分区模型、连通性、无功平衡等,而风电波动对分区影响的相关研究较少。分区频繁变化会使电压控制方案不断调整,降低控制策略的经济性和稳定性。因此,为了获得不同风电出力断面下具有电压稳定特征的VCA,本文提出一种考虑风电接入的电压分区修正方法。该方法基于出力特性将风电出力概率分布离散化为多个场景,每个场景作为一个出力断面。采用含有功因素的灵敏度法得到负荷分区,基于无功限值和灵敏度法实现PV节点的归并。针对风电波动引起的分区变化问题,采用断线分析法对不同出力断面下区域电压变化量较大的边界节点修正划分,提升区域内电压变化的稳定性。

## 1 风电场出力模型

### 1.1 风速模型及出力情况

风电场的风速分布通常采用Weibull分布概率模型来描述,其概率密度为:

收稿日期: 2021-01-27

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JM-542); 陕西省科技计划基础研究项目(2021JM-404); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目(U20B2029); 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(YCS20211034)

通信作者: 李英量(1979—), 男, 博士、教授, 主要从事无功电压控制方面的研究。Yingliang.li@hotmail.com

$$f(v) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  与  $\beta$  ——Weibull 的形状参数与尺度参数;  $v$  ——风速;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $v$  由风电场当地气象资料参数估计而来。

图 1 为风速分布和风电机组出力曲线。  $v_{ci}$ 、 $v_r$ 、 $v_{co}$  分别为切入风速、额定风速以及切出风速;  $n$  为积分区间分割总数,  $k$  为区间数序列;  $P_w$  为风力发电实际有功出力,  $P_{ci}$  为单台风力发电机的装机容量,  $P_r$  为风电机组额定输出功率。

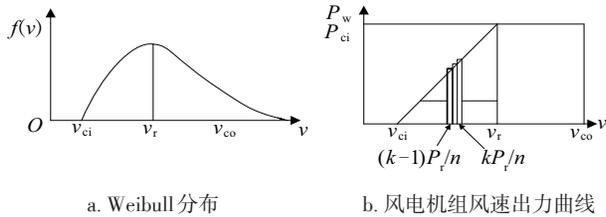


图 1 风速分布和风电机组出力曲线

Fig. 1 Wind speed distribution and fan output curve

## 1.2 风力发电机模型及概率分布

风力发电机模型通常采用异步发电机,其发出无功功率的同时要吸收大量的无功功率,其等效电路如图 2 所示,其中  $P$  为有功功率,  $X_m$  为励磁电抗,  $X_1$  为定子电抗,  $X_2$  为转子电抗。

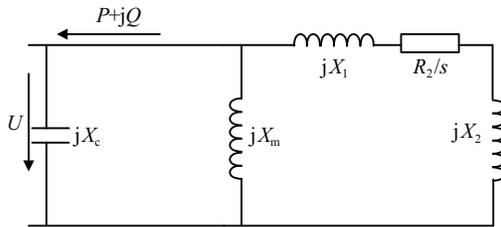


图 2 风力发电机简化等效电路

Fig. 2 Simplified equivalent circuit of wind turbine

由等效电路可推导风力发电机的无功功率与机端电压的数学描述:

$$Q = -\left[ \frac{U^2(X_c - X_m)}{X_c X_m} - \frac{PX}{R_2 s} \right] \quad (2)$$

$$U = \sqrt{\frac{-P(s^2 X^2 + R_2^2)}{R_2 s}} \quad (3)$$

式中:  $Q$  ——无功功率;  $U$  ——风力发电机的机端电压;  $X_c$  ——机端补偿电容电抗;  $X$  ——定、转子电抗之和;  $R_2$  ——转子电阻;  $s$  ——转差率。

为了研究风电的波动性对电压分区的影响,本文根据风电出力与风速关系曲线将风电机组出力分为零出力、欠出力、额定出力 3 种情况,如式(4)所示:

$$P_w = \begin{cases} 0, & 0 < v \leq v_{ci} \cup v > v_{co} \\ 0 < P_w < P_r, & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_w = P_r, & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (4)$$

分别求取零出力、欠出力、额定出力概率表达式:

情况 1(零出力概率):

$$P = \int_{v_{ci}}^{v_r} f(v)dv + \int_{v_{co}}^{\infty} f(v)dv \quad (5)$$

将式(1)代入式(5)得零出力概率场景:

$$P = 1 - \exp[-(v_{ci}/\beta)^\alpha] + \exp[-(v_{co}/\beta)^\alpha] \quad (6)$$

情况 2(第  $k$  段概率):

$$P\left(\frac{(k-1)P_r}{n} < P_w < \frac{kP_r}{n}\right) = \int_{\frac{(k-1)P_r/n}{P_w}}^{\frac{kP_r/n}{P_w}} f(P_w) dP_w \quad (7)$$

根据式(7)得到概率密度函数:

$$f(P_w) = \frac{\alpha}{k_1 \beta} \left(\frac{P_w - k_2}{k_1 \beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{P_w - k_2}{k_1 \beta}\right)^\alpha\right] \quad (8)$$

式中:  $k_1 = P_r/(v_r - v_{ci})$ ;  $k_2 = -k_1 v_{ci}$ ; 潮流计算中欠出力时段较长,将其离散段风电机组出力  $P_k$  采用该段有功出力的中间值表示。

情况 3(额定出力概率):

$$P = \int_{v_r}^{v_{co}} f(v)dv = \exp\left[-\left(\frac{v_r}{\beta}\right)^\alpha\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_{co}}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (9)$$

## 1.3 分区中风电因素处理

传统的风电并网分区课题为了解决风电并网后的电压稳定控制问题,通过一次性求取有功功率期望值来消除风电出力波动性,这种方法难以体现因风电波动造成电气距离的波动性而对分区造成的影响。因此,本文根据风电场当地风速的典型分布得到风电出力的各个场景,并采用概率分布模型,分别计算出每个场景的概率情况。根据每个出力场景对分区的影响以及分区结果的变化来判断哪些场景需要进行分区修正,该措施能够准确地体现因风电波动造成电气距离的波动性而对分区造成的影响。

风力发电机的有功出力  $P$  与风速有关,在某一潮流断面下可认为  $P$  为给定量,根据式(2)、式(3)即可得到潮流断面下风电出力无功和电压的关系:

$$Q = \frac{U^2}{X_c} - \frac{U^2}{X_m} - \frac{U^2 - \sqrt{U^4 - 4P^2 X^2}}{2X} \quad (10)$$

关于风电在潮流计算中的处理方式,一般来说对于机组电压相对稳定,且对系统的无功需求较小的节点在潮流计算中可将其视为一个 PV 节点。本文主要目的是研究风电出力的波动对分区的影响,因此需对所有出力场景进行潮流计算,得到每个概率场景下的灵敏度以及电气距离矩阵,这样才能够更准确地体现风电出力的波动对分区模型的影响。

## 2 考虑风电场的电网分区方法

### 2.1 考虑有功因素的 PQ 节点电气距离

传统电压控制分区的灵敏度矩阵由雅可比矩阵中无功功率对电压幅差的偏导数决定,而随着风电场的接入,风速会影响系统有功输出的变化。因此,基于风电场出力变化的

条件需在传统的灵敏度矩阵构建中考虑有功因素,使节点之间的电气联系更接近实际情况。

由 1.2、1.3 节计算得到所有需要修正的风电出力场景断面,采用极坐标下的牛顿-拉夫逊法潮流计算每个风电出力场景断面的潮流结果,通过节点非线性功率方程求解网络功率的不平衡量  $\Delta P_i$ 、 $\Delta Q_i$ ,得到线性方程组为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  ——在节点  $i$  注入的有功、无功功率;  $U_i$ 、 $U_j$  ——节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  ——节点导纳矩阵中节点  $i$  和  $j$  之间的互电导和互电纳;  $\delta_{ij}$  ——节点  $i$  和  $j$  之间的节点电压相角差。

将式(11)按 Taylor 级数展开后略去其高次项,可得到矩阵表达式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H_{(n-1) \times (n-1)} & N_{(n-1) \times m} \\ M_{m \times (n-1)} & L_{m \times m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{cases} H_{ij} = \partial \Delta P_i / \partial \delta_j; N_{ij} = \partial \Delta P_i / \partial V_j \\ M_{ij} = \partial \Delta Q_i / \partial \delta_j; L_{ij} = \partial \Delta Q_i / \partial V_j \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\Delta P$  ——有功功率变化量;  $\Delta Q$  ——无功功率变化量;  $J$  ——雅可比矩阵;  $\Delta \delta$  ——节点电压相角变化量;  $\Delta V$  ——节点电压幅值变化量;  $H_{(n-1) \times (n-1)}$ 、 $N_{(n-1) \times m}$ 、 $M_{m \times (n-1)}$ 、 $L_{m \times m}$  ——雅可比子矩阵;  $H_{ij}$ 、 $N_{ij}$ 、 $M_{ij}$ 、 $L_{ij}$  ——对应矩阵元素;  $\partial \Delta P_i / \partial \delta_j$  ——节点  $i$  有功变量对节点  $j$  的电压相角求偏导;  $\partial \Delta P_i / \partial V_j$  ——节点  $i$  有功变量对节点  $j$  的电压幅值求偏导;  $\partial \Delta Q_i / \partial \delta_j$  ——节点  $i$  无功变量对节点  $j$  的电压相角求偏导;  $\partial \Delta Q_i / \partial V_j$  ——节点  $i$  无功变量对节点  $j$  的电压幅值求偏导。

利用雅可比子矩阵  $L$ 、 $N$  构建包含有功因素的灵敏度矩阵:  $L$  矩阵为  $m \times m$  阶矩阵,其仅含有负荷节点无功功率对电压相角的偏导元素;  $N$  矩阵为  $(n-1) \times m$  阶矩阵,同时包含负荷节点与无功源节点的有功功率的偏导元素;为了保证负荷节点分区的准确性,不考虑无功源节点维度,仅考虑  $N$  矩阵中含有 PQ 节点维度的  $m \times m$  阶矩阵  $N_{m \times m}'$ 。

$$N_{m \times m}' = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \cdots & N_{1m} \\ N_{21} & N_{22} & \cdots & N_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{m1} & N_{m2} & \cdots & N_{mm} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $N_{m \times m}'$  ——仅含有 PQ 节点的有功功率对电压幅值的偏导矩阵。

$$\begin{aligned} S_{m \times m} &= -(L_{m \times m} + N_{m \times m}')^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} L_{11} + N_{11} & L_{12} + N_{12} & \cdots & L_{1m} + N_{1m} \\ L_{21} + N_{21} & L_{22} + N_{22} & \cdots & L_{2m} + N_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{m1} + N_{m1} & L_{m2} + N_{m2} & \cdots & L_{mm} + N_{mm} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

式中:  $S_{m \times m}$  ——同时考虑无功和有功对电压幅值的负荷节点灵敏度矩阵。

无功功率对电压幅值的控制能力更强,且雅可比子矩阵中  $L$  矩阵元素数值远大于  $N_{m \times m}'$  对应元素。因此,考虑有功因素的灵敏度矩阵不仅以无功为主导因素,而且能真实反映有功出力的变化,更符合风电场景下系统的实际运行情况。

在电压分区中,电气距离作为衡量节点之间电气联系的度量指标,能够得到分区结果,决定分区质量。由考虑有功因素的灵敏度计算方法得到的灵敏度矩阵计算电压变化量,从而得到节点的电气距离矩阵:

$$\begin{aligned} D &= -\lg((S_{ij}/S_{jj}) \times (S_{ji}/S_{ii})) \\ &= -\lg \left\{ \left[ \left( \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \Delta V_j} + \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \Delta V_j} \right) / \left( \frac{\partial \Delta Q_j}{\partial \Delta V_j} + \frac{\partial \Delta P_j}{\partial \Delta V_j} \right) \right] \times \right. \\ &\quad \left. \left[ \left( \frac{\partial \Delta Q_j}{\partial \Delta V_i} + \frac{\partial \Delta P_j}{\partial \Delta V_i} \right) / \left( \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \Delta V_i} + \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \Delta V_i} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $D$  ——由灵敏度矩阵经过映射函数得到考虑有功因素的负荷节点电气距离矩阵。

## 2.2 PQ 节点聚类分区

聚类方法是在数据具有一定相似度的基础上对数据进行分类划分,可用于电网 VCA 的划分研究。本文采用凝聚的层次聚类算法进行负荷节点分区,并采用离差平方和(Ward)距离聚类,能够得到合并距离较均匀准确性较高的分区结果,具体步骤为:

- 1) 将负荷节点的电气距离矩阵  $D$  转换为上三角形矩阵  $Y$ ,减少对称矩阵计算量;
- 2) 选择合并相对距离较小的离差平方和(Ward)距离作为簇间距离;
- 3) 通过逐级聚类形成数据集合,自底向上形成凝聚的聚类树;
- 4) 分析合并距离,由区分度大小确定分区阈值与分区数目,从而得到系统 PQ 节点的分区结果。

## 2.3 全网分区

考虑风电场的接入,系统的有功出力会波动。为了保证分区结果的准确性,首先由 2.2 节中的灵敏度矩阵得到考虑有功因素的负荷节点分区,在 PQ 节点准确分区的基础上再考虑 PV 节点的归并。传统的分区方法中先进行负荷节点的分区,再人为按照拓扑结构就近归并 PV 节点的过程不够准确。为了保证区域的无功平衡,电压控制区域的划分需考虑各 VCA 的无功补偿能力。因此,本文的研究在无功源节点的归并过程中考虑了负荷节点的无功需求,采用两步归并方法:

第 1 步:基于文献[17]采用的  $Q-V$  曲线法,以曲线极小值点( $V_{\min}$ ,  $Q_{\min}$ )的近似性来确定电压变化一致性的负荷区域,并将在该点达到无功限值的发电机组也划分进此区域,对比 2.2 节得到的 PQ 分区,实现 PV 节点的合理归并。

第2步:由于Q-V曲线法的局限性,第1步的分区结果存在若干独立的PQ节点以及部分未归并的PV节点。因此,基于无功源控制空间的思想,将剩余PV节点利用2.1节所述的灵敏度法进行归并,实现系统全网分区。

文献[18]基于无功源控制空间的思想,考虑了重负荷条

$$S_z = -(L_{(m+z) \times (m+z)} + N_{(m+z) \times (m+z)})^{-1} = - \begin{bmatrix} L_{11} + N_{11} & L_{12} + N_{12} & \cdots & L_{1m} + N_{1m} & L_{1(m+z)} + N_{1(m+z)} \\ L_{21} + N_{21} & L_{22} + N_{22} & \cdots & L_{2m} + N_{2m} & L_{2(m+z)} + N_{2(m+z)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{m1} + N_{m1} & L_{m2} + N_{m2} & \cdots & L_{mm} + N_{mm} & L_{m(m+z)} + N_{m(m+z)} \\ L_{(m+z)1} + N_{(m+z)1} & L_{(m+z)2} + N_{(m+z)2} & \cdots & L_{(m+z)m} + N_{(m+z)m} & L_{(m+z)(m+z)} + N_{(m+z)(m+z)} \end{bmatrix}^{-1} \quad (17)$$

式中:  $S_z(z \in \alpha)$  ——包含第  $z$  个 PV 节点的灵敏度矩阵,其中  $\alpha$  为通过 Q-V 曲线归并后剩余未归并的 PV 节点数量。

通过此灵敏度矩阵得到包含第  $z$  个 PV 节点转换后的电气距离矩阵,如式(18)所示,之后采用2.2节所述凝聚的层次聚类算法进行  $\alpha$  次的逐级计算,得到系统的全网分区结果。

$$D_z = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1m} & D_{1(m+z)} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2m} & D_{2(m+z)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ D_{m1} & D_{m2} & \cdots & D_{mm} & D_{m(m+z)} \\ D_{(m+z)m} & D_{(m+z)m} & \cdots & D_{(m+z)m} & D_{(m+z)(m+z)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中:  $D_z(z \in \alpha)$  ——包含第  $z$  个 PV 节点转换后的电气距离矩阵。

需要注意的是,平衡节点也是发电机节点,如果第1步归并过程已实现系统平衡节点的划分,那么第2步直接进行剩余PV归并。若第1步未划分,当第2步进行到平衡节点类型转换时,需重新设定系统平衡节点,满足系统的功率平衡。

采用本文所提方法构建的灵敏度矩阵与电气距离矩阵不仅反映了无功对电压相差的强控制能力,同时还考虑了有功因素,能较全面地体现风电出力变化对分区的影响。Q-V曲线法能通过无功限值确定部分负荷区域划分以及对应的无功源节点,基于无功源控制空间的节点转换法能根据无功源对负荷区域的灵敏度大小实现剩余PV节点的归并,归并结果能在一定程度上满足各VCA的无功需求。

### 3 考虑风电接入的电压控制区域修正方法

电网的电压控制分区主要是为了实现二级电压控制,进而得到能稳定控制电压的VCA,分区的目的是为了得到区域内部耦合性强、区域之间解耦性高的VCA,分区结果满足系统拓扑邻接关系以及各VCA内无功对电压控制的要求。因此,增强区域内耦合性,提高区域之间的电压解耦程度,可改善分区质量,提高区内的电压控制能力。

由于风电场出力的波动性,系统的电压灵敏度以及电气

条件下各无功源节点的无功变化对电压的影响,体现了系统的准稳态灵敏度概念。本文在借鉴上述文献思想的基础上,构建考虑有功因素的灵敏度模型。通过节点类型的转换,将PV节点依次设置为PQ节点,逐次计算加入PV节点后的灵敏度矩阵:

距离矩阵元素会受到影响,合并过程出现变化,从而导致分区结果出现变化。本文中考虑有功因素的分区模型得到的全网分区中风电出力的波动会影响各VCA之间的耦合度与区域内的电压稳定控制,(图3为本文所提VCA划分流程)因此,本文提出一种考虑风电接入的电网分区边界修正方法,具体操作步骤为:

1)首先,以第1节所述模型和方法得到的基于风电接入下的全网VCA划分结果,记为  $Q_k = \{Q_1, Q_2, \dots\}$  ( $k$  为分区数目),记录分区  $Q_k$  的边界支路  $L_k = (l_{k,a,b}, l_{k,c,d}, \dots)$  ( $l_{k,a,b}$  为区域  $Q_k$  与其相邻区域的一条连接支路,以线路  $a-b$  表示),其对应的边界节点  $b_k = (n_a, n_b, n_c, n_d, \dots)$ ,其中  $n_a, n_b$  分别为边界支路  $l_{k,a,b}$  的2个节点。

2)分别对  $L_k$  逐一进行断线并进行牛拉法潮流计算,记录断线前后系统所有负荷节点的电压值,并由断线前后的电压差值计算各负荷节点电压的变化量(无功源节点  $\Delta U_i = 0$ )。

$$\Delta U_i = U_i - U_i' \quad (19)$$

式中:  $\Delta U_i$  ——同一个负荷节点断线前后的电压变化量;  $U_i$  ——断线前节点电压,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $U_i'$  ——断线后节点电压。

3)以各VCA划分结果  $Q_k = \{Q_1, Q_2, \dots\}$  为基础,将步骤2)中得到的所有负荷节点的电压变化量  $\Delta U_i$  进行合并,依次可得到各VCA内不同边界支路断线下电压变化量的范围。

$$\Delta U_{k,i-j\min} \leq \Delta U_{k,i-j} \leq \Delta U_{k,i-j\max} \quad (20)$$

式中:  $\Delta U_{k,i-j\min}$ 、 $\Delta U_{k,i-j\max}$  ——分区  $k$  中断线  $i-j$  的节点电压变化量最小值和最大值;  $\Delta U_{k,i-j}$  ——分区  $k$  中断线  $i-j$  的节点电压变化量。

4)若电压变化相似度(电压变化的相近程度采用文献[19]提出的  $\pm 1\%$ ) 小于修正标准,则不进行修正,该节点仍划分为原VCA。

$$\Delta U_{k,b_k} - \Delta U_{k,n} \leq \pm 1\% \quad (21)$$

式中:  $\Delta U_{k,b_k}$  ——分区  $k$  中某一个边界节点  $b_k$  的电压变化量;  $\Delta U_{k,n}$  ——分区  $k$  中与边界节点  $b_k$  直接相连的内部节点。

5)若  $\Delta U_{k,b_k}$  满足式(21),则将此边界节点修正划分至与该节点支路连接的邻接VCA内。

$$\Delta U_{k,b_k} \in \{\Delta U_{k,b_k} - \Delta U_{k,n} > \pm 1\% \} \cap \{\Delta U_{k,b_k} - \Delta U_{l,i} \leq \pm 1\% \} \quad (22)$$

式中： $\Delta U_{l,i}$ ——与该边界节点相邻的 VCA 中与该边界节点连接节点的电压变化量。

6)若  $\Delta U_{k,b_k} > \pm 5\%$  ,边界节点  $b_k$  视为电压脱稳的节点,不考虑此节点的修正,按照其他边界支路断线结果对其进行修正。

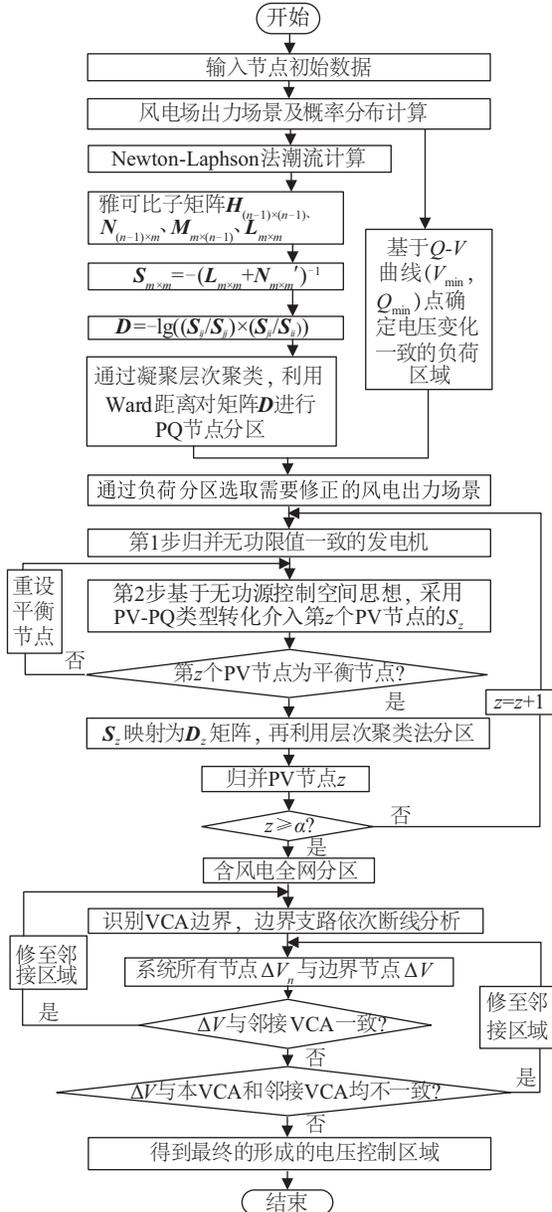


图3 VCA划分流程图

Fig. 3 Flow chart of VCA division

7)若  $\Delta U_{k,b_k}$  满足式(14),则将此边界节点归并至两者中与其电压变化量相差较低的 VCA。由于分区必须满足区域的连通性和拓扑邻近性,因此本步骤中参与电压变化量比较的 2 个区域必须与此需要修正的边界节点直接相连。

$$\Delta U_{k,b_k} \in \{\Delta U_{k,b_k} - \Delta U_{k,n} > \pm 1\% \} \cap \{\Delta U_{k,b_k} - \Delta U_{l,i} < \pm 5\% \} \quad (23)$$

经过上述的分区修正计算,可得在考虑风电出力变化的情况下电压解耦程度较高的 VCA。修正前的分区由考虑有功因素的电气距离矩阵得到,因此区域内部节点是由包含有功因素的分区模型和系统拓扑连接的约束而固化的。因此,仅考虑区域边界节点来修正分区是合理有效的。

## 4 算例分析

为了验证本文所提考虑风电接入的电网分区边界修正方法,IEEE 39 节点作为典型风电并网算例适用于本文需要验证的修正方法。采用改进的 IEEE 39 节点系统作为算例,系统拓扑结构如图 4 所示。在改进的 IEEE 39 节点系统中,风电场接入 37 节点,节点类型为 PV 节点,平衡节点 31 不参与灵敏度分析,但需要参与分区。系统各无功负荷和线路拓扑均按国际标准的 IEEE 39 节点系统进行设置,所采用的风电场数据参考文献[16]中中国东南沿海某地风力资源统计数据的机组参数,其 Weibull 分布的形状参数  $\alpha$  为 1.965,尺度参数  $\beta$  为 10.82,风电场为多台风电机组并网。

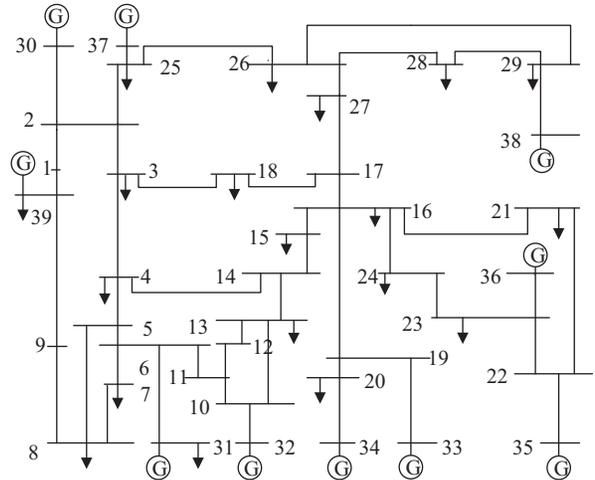


图4 IEEE 39节点系统拓扑

Fig. 4 IEEE 39 node system topology

本文提出的方法是修正由于风电波动导致的分区变化,因此选取的出力场景需能体现分区结果的变化。文献[20]的研究结果表明该算例分区结果在风电出力超过 40 MW 时才会出现改变,且在该算例中风电预测出力最低为 90 MW。因此,各场景的出力跨度需尽可能的大,且能体现出风电波动对分区的影响。

为了验证风电出力的波动性对分区的影响以及本文所提分区修正方法的优越性,本文借鉴文献[16]的思想,将欠出力分为 3 段,根据式(4)~式(9)分别计算各出力场景下的概率。表 1 为风电场各场景出力及概率情况,根据上述描述可知,风电场零出力情况不会导致分区变化,而  $P_w = 450$  MW 时的分区结果与  $P_w = P_r = 540$  MW 时的一致,故进行重复修正的必要。因此,只需针对出力场景为 90、270、540 MW 时分

区的变化情况,利用 Matlab 进行仿真分析,得到考虑风电接入的修正分区。

表1 风电场各场景出力及概率情况

场景	场景情况	有功出力 $P_w$ /MW	概率 $P$
1	$P_w=0$	0	0.1377
2	$0 < P_w < 1/3P_r$	90	0.2689
3	$1/3P_r < P_w < 2/3P_r$	270	0.2690
4	$2/3P_r < P_w < P_r$	450	0.1800
5	$P_w=P_r$	540	0.1444

### 4.1 PQ节点分区

利用牛顿-拉夫逊潮流法得到 IEEE39 节点系统不同出力场景下的雅可比矩阵及子矩阵,通过 2.1 节方法构建的考虑有功因素的负荷节点灵敏度矩阵  $S_{29 \times 29}$  以及电气距离矩阵  $D_{29 \times 29}$ 。通过 2.2 节所述凝聚的层次聚类法,以 Ward 距离为簇间距离进行凝聚分区,得到考虑有功因素的含风电波动的 IEEE39 节点系统 PQ 节点分区。

表 2 所示分别代表 3 个不同概率出力断面下风电场有功出力波动分别为 90、270、540 MW 时 IEEE 39 节点系统的负荷节点分区,分区结果比较稳定,第 1、3、4 个 VCA 的边界节点归属随系统有功出力的不同而改变。结果表明,考虑有功因素的灵敏度矩阵可反映风电波动对负荷节点分区的影响,得到的分区结果更准确。

表2 不同时段下考虑有功因素的 PQ 分区

Table 2 PQ partition considering active factors in different periods

分区	区域内节点编号		
	断面1	断面2	断面3
1	(2, 17, 18, 25~27)	(2~4, 15~18, 25~27)	(2, 3, 17, 18, 25~27)
2	(1, 9)	(1, 9)	(1, 9)
3	(16, 21~24)	(21~24)	(15, 16, 21~24)
4	(3~8, 10~15)	(5~8, 10~14)	(4~8, 10~14)
5	(28, 29)	(28, 29)	(28, 29)
6	(19, 20)	(19, 20)	(19, 20)

### 4.2 全网 VCA 划分

以额定出力  $P_w = P_r$  出力场景为基础,采用考虑有功因素的灵敏度矩阵计算方法得到含风电出力波动的负荷分区,并通过  $Q-V$  曲线得到系统 PV 节点的第一步归并。分析表 3 可知,第一步归并可得到基于  $Q-V$  极小值一致的负荷区域,对比表 2 中考虑有功因素的负荷分区,将无功限值一致

源节点归并至表 2 的分区 4、2、3 中。

表3  $Q-V$ 曲线下发电机第一步归并

Table 3 First step of generator merging under  $Q-V$  curve

PV 节点	$(V_{min}, Q_{min})/pu$	PQ 初步分区
31, 32	(0.556~0.602, 15.371~20.190)	4, 5, 6, 7, 8, 11, 13, 14
39	(0.607~0.614, 11.229~12.061)	1, 9
35, 36	(0.714~0.726, 17.181~18.021)	22, 23
—	—	独立节点

通过无功源控制空间节点类型转化方法实现 PV 节点的第二步归并,将剩余的 30、33、34、37、38 节点按前文所提电压灵敏度模型进行逐次归并。表 4 为基于无功源控制空间的剩余 PV 节点归并结果。可得  $P_w = P_r$  场景下全网分区结果,通过上述方法能够推导  $0 < P_w < 1/3P_r$ 、 $1/3P_r < P_w < 2/3P_r$  出力场景下的全网分区结果,归并结果如表 5 所示。

表4 基于无功源控制空间的剩余 PV 节点归并

Table 4 Remaining PV node merging based on reactive power control space

剩余 PV 节点	对应 PQ 节点
33, 34	19, 20
38	26, 27, 28, 29
30, 37	1, 2, 25
39	3, 15, 16, 17, 18, 24

表5 不同断面下考虑有功因素的全网分区

Table 5 Whole network partition considering active factors in different periods

分区	区域内节点编号			
	断面1	断面2	断面3	PV 节点
1	(2, 17, 18, 25~27)	(2~4, 15~18, 25~27)	(2, 3, 17, 18, 25~27)	30, 37
2	(1, 9)	(1, 9)	(1, 9)	39
3	(16, 21~24)	(21~24)	(15, 16, 21~24)	35, 36
4	(3~8, 10~15)	(5~8, 10~14)	(4~8, 10~14)	31, 32
5	(28, 29)	(28, 29)	(28, 29)	38
6	(19, 20)	(19, 20)	(19, 20)	33, 34

分析表 5 可知,采用先负荷分区再进行 PV 切点归并的方法得到的全网分区,在考虑风电出力波动的条件下能快速得到稳定的 PV 节点归并结果。其中, PV 节点数量  $z = n - m = 39 - 29 = 10$  个,分别对 10 个 PV 节点进行逐次分区,在固化负荷节点分区的基础上快速得到改进的 IEEE39 节点系统 VCA。

### 4.3 VCA 边界修正

分析 4.2 节得到的含风电波动的全网分区可知,虽然考虑有功因素,明确反映了出力变化对分区的影响,但分区结果变化仍会影响 VCA 的电压稳定控制。为了改善 VCA 的电压稳定性,利用 3.1 节所述边界修正方法对上述 VCA 进行修正。该方法不仅能提升各 VCA 电压变化的一致性,增强区域电压的稳定控制,还可将 VCA 中的边界依照电压变化量重新划分,获得解耦程度较高的 VCA。表 6 为 3 个断面下 VCA 边界断线数据,本文提出的 VCA 边界修正方法需要识别各 VCA 的边界,结合图 4 系统结构和表 2 的分区结果可得需要断线分析的边界支路,并利用 PSASP 对 IEEE 39 节点系统 3 个断面下的 VCA 边界进行断线分析。

通过 PSASP 软件对 3 个风电出力断面下 VCA 的边界支路逐次的进行断线分析,通过运行潮流得到系统所有节点断线前后的电压变化量。分析 3 个不同断面下边界支路断线后系统的电压变化量以及各 VCA 的电压变化范围,可以明确各边界节点相对于所在 VCA 电压变化一致性。

表 7 不同断面下各区域边界支路断线前后电压变化范围

Table 7 Variation range of voltage before and after disconnection of boundary branches in different sections

VCA 编号	各 VCA 内母线电压幅值的变化范围/pu								
	断面 1			断面 2			断面 3		
	断开 2-3	断开 8-9	断开 15-16	断开 26-28	断开 26-29	断开 16-19	断开 26-28	断开 26-29	断开 26-29
1	-0.024~	-0.005~	-0.002~	-0.013~	-0.017~	-0.019~	-0.012~	-0.016~	-0.016~
	0.014	-0.002	0.007	-0.002	-0.003	-0.005	-0.002	-0.002	-0.003
2	-0.004~	-0.002~	-0.006~	-0.001~0	-0.001~0	-0.009~	-0.001~0	-0.001	-0.001
	0.005	0.022	-0.001			-0.001			
3	-0.011~	-0.004~	0.005~	-0.003~	-0.003~	-0.017~	-0.002~	-0.003~	-0.003~
	-0.004	-0.001	0.014	-0.001	-0.001	-0.007	-0.001	-0.001	-0.001
4	-0.036~	-0.024~	-0.036~	-0.003~	-0.004~	-0.021~	-0.002~	-0.002~	-0.002~
	-0.009	-0.006	-0.006	-0.001	-0.001	-0.016	-0.001	-0.001	-0.001
5	-0.003~	-0.001~0	0.001	-0.014~	-0.019~	-0.004~	-0.015~	-0.019~	-0.019~
	-0.002			-0.009	-0.014	-0.003	-0.009	-0.014	-0.015
6	-0.003~	-0.001~0	0.003~	-0.001	-0.001~0	0.006~	-0.001~0	-0.001	-0.001
	-0.002		0.005			0.012			

由 3.1 节所述修正方法可知,需将断面 1 中的 3、15、26 节点,断面 2 中的 4、16、26 节点和断面 3 中的 26 节点重新划分至新的 VCA 中,修正结果如表 8 所示。由表 8 可知,通过本文所提边界修正方法得到的不同断面分区结果基本一致,仅断面 2 中的 15 节点归并结果与其他 2 个断面不同,增强了区域电压的稳定控制。

风电波动导致的电压分区的变化会引起区域无功优化模型不断调整,降低了无功优化的经济性与电压控制的便捷性,对比修正前的分区结果表 5,本文所提修正方法得到的分区较稳定,修正了由于风电波动导致的分区动态变化,提升

表 6 不同断面下断线的边界支路及节点

Table 6 Boundary branches and nodes of broken lines under different sections

断面号	断面 1	断面 2	断面 3
VCA 边界断线支路	1-2,2-3,3-18, 8-9,15-16, 16-17,16-19, 26-28,26-29	1-2,4-5,8-9, 14-15,16-19, 16-21,16-24, 26-28,26-29	1-2,3-4,8-9, 14-15,16-17, 16-19,26-28, 26-29
VCA 边界节点	1,2,3,8,9, 15,16,17,18, 19,26,28,29	1,2,4,5,8,9, 14,15,16,19, 21,24,26,28,29	1,2,3,4,8,9, 14,15,16,17, 19,26,28,29

表 7 为不同断面下各区域的边界支路断线前后电压变化量,由于数值较多且篇幅所限,仅列出断线后边界节点中需要进行节点修正的区域电压变化范围。分析表 7 可知,风电场有功出力的波动会影响区域的电压稳定性,电压变化量会随有功出力的大小而变化。

了区域电压的稳定控制。相比于修正之前,修正的分区结果提升了电压变化的一致性,修正区域薄弱的边界节点并获得解耦程度较高的 VCA。因此,采用本文所提方法能保证分区的合理性与稳定性。

工程中的实际扰动具有随机性,不一定按边界支路产生断线故障。为了证明本文修正方法的合理性,在每个 VCA 内部随机选取一条支路进行断线,并采用本文所提修正方法进行分析。结果证明,对随机选取的支路进行断线,需要修正的节点仍处于 VCA 的边界,而非边界节点电压变化量达不到本文需要进行修正的标准,因此可进一步证明本文方法的合理性。

表8 不同断面下边界节点修正分区结果

Table 8 Modified partition results of boundary nodes under different sections

分区	区域内节点编号			PV节点
	断面1	断面2	断面3	
1	(2,3,17,18,25,27)	(2,3,15,17,18,25,27)	(2,3,17,18,25,27)	30,37
2	(1,9)	(1,9)	(1,9)	39
3	(15,16,21~24)	(16,21~24)	(15,16,21~24)	35,36
4	(4~8,10~14)	(5~8,10~14)	(4~8,10~14)	31,32
5	(26,28,29)	(26,28,29)	(26,28,29)	38
6	(19,20)	(19,20)	(19,20)	33,34

## 5 结论

针对风电场出力波动影响电网分区结果变化的问题,本文提出一种考虑风电接入的电压控制区域修正方法,所得主要结论为:

1)将风电出力概率分布离散化为多个场景,构建每个出力场景下含有有功因素的灵敏度矩阵与电气距离矩阵并进行潮流、分区,该措施能更准确地反映分区过程中风电出力的波动性。

2)通过凝聚的层次聚类法得到准确的PQ节点分区,利用Q-V曲线法实现了部分发电机归并,再基于无功源控制空间实现了剩余PV节点的归并,快速准确地得到全网分区。

3)所提电压控制区域边界修正方法以电压变化的一致性为基础,通过边界支路的断线分析将边界节点重新修正,实现了区域拓扑优化修正。该方法不仅能减小各VCA的电压变化范围,增强区域电压稳定控制,还能通过边界节点的重新归并获得解耦程度较高的VCA。

算例分析结果表明,本文所提方法得到的VCA可以提高风电并网分区的稳定程度,VCA结果满足地理邻近性,可为电压控制的经济性和准确性提供条件。

### [参考文献]

[1] 董海鹰,黄阿敏,李帅兵,等. 计及风速波动和励磁调节的前端调速式风电机组并网电压稳定性分岔分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(10): 2719-2726.  
DONG H Y, HUANG A M, LI S B, et al. Bifurcation analysis of grid-connected voltage stability of front-end speed-regulating wind turbines considering wind speed fluctuation and excitation regulation[J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(10): 2719-2726.

[2] 韩平平,张海天,张炎,等. 考虑风电场无功调节能力的无功电压控制分区方法研究[J]. 太阳能学报, 2019,

40(2): 363-369.

HAN P P, ZHANG H T, ZHANG Y, et al. Research on reactive power and voltage control zoning method considering the reactive power regulation ability of wind farm[J]. Acta energiae solaris sinica, 2019, 40(2): 363-369.

- [3] CONEJO A J. Secondary voltage control: analysis, solutions and simulation results for the Spanish transmission system-Discussion [J]. IEEE transactions on power systems, 1996, 11(2): 630-638.
- [4] 周红婷,宋玮. 动态无功控制方式对风电汇集地区电压稳定性影响分析[J]. 可再生能源, 2015, 33(8): 1130-1134.  
ZHOU H T, SONG W. Analysis of the influence of dynamic reactive power control methods on the voltage stability of wind power collection areas[J]. Renewable energy, 2015, 33(8): 1130-1134.
- [5] 鲍海,房国俊. 一种采用等效传输阻抗法的新型电气距离计算方法及其应用[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 244-250.  
BAO H, FANG G J. A new electrical distance calculation method using equivalent transmission impedance method and its application[J]. Power system technology, 2019, 43(1): 244-250.
- [6] MEHRJERDI H, GHAREMANI E, LEFEBVRE S, et al. Authenticated voltage control of partitioned power networks with optimal allocation of STATCOM using heuristic algorithm [J]. IET generation transmission & distribution, 2013, 7(9): 1037-1045.
- [7] JAY D. Isoperimetric clustering-based network partitioning algorithm for voltage-apparent power coupled areas[J]. IET generation transmission & distribution, 2019, 13(22): 5109-5116.
- [8] MEHRJERDI H, LEFEBVRE S, SAAD M, et al. A decentralized control of partitioned power networks for voltage regulation and prevention against disturbance propagation [J]. IEEE transactions on power systems, 2013, 28(2): 1461-1469.
- [9] FALLAHZADEH-ABARGHOUEI H, NAYERIPOUR M, WAFFENSCHMIDT E, et al. A new decentralized voltage control method of smart grid via distributed generations [C]//Proceedings of the Energy & Sustainability Conference, Cologne, Germany, 2016.
- [10] 李建芳,张璐,宋晓辉,等. 含高渗透率分布式电源的配电网多目标无功分区及主导节点选择方法[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1664-1671.  
LI J F, ZHANG L, SONG X H, et al. Multi-objective reactive power zoning and dominant node selection method for distribution network with high-penetration distributed power generation[J]. Renewable energy, 2017, 35(11): 1664-1671.
- [11] MUHAMMAD N. Kohonen neural network clustering for voltage control in power systems[J]. Indonesian journal of

- electrical engineering, 2010, 8(2): 115-122.
- [12] DING J J, ZHANG Q, WANG Q J, et al. Clusters partition and zonal voltage regulation for distribution networks with high penetration of PVs[J]. IET generation transmission & distribution, 2018, 12(22): 6041-6051.
- [13] 聂永辉, 王中杰, 李江, 等. 大规模风电并网电力系统优化潮流[J]. 太阳能学报, 2017, 38(11): 3180-3187.  
NIE Y H, WANG Z J, LI J, et al. Optimal power flow of large-scale wind power grid-connected power system[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(11): 3180-3187.
- [14] 王振浩, 葛津铭, 李国庆, 等. 改善风电场群并网地区电压稳定的无功协调控制的研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 983-990.  
WANG Z H, GE J M, LI G Q, et al. Research on reactive power coordinated control for improving voltage stability in grid-connected areas of wind farm group[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(4): 983-990.
- [15] GE H C, GUO Q L, SUN H B, et al. A load fluctuation characteristic index and its application to pilot node selection[J]. Energies, 2014, 7(1): 115-129.
- [16] 乔梁, 卢继平, 黄蕙, 等. 含风电场的电力系统电压控制分区方法[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 163-168.  
QIAO L, LU J P, HUANG H, et al. Voltage control zoning method of power system with wind farms[J]. Power system technology, 2010, 34(10): 163-168.
- [17] HANG L, BOSE A, VENKATASUBRAMANIAN V, et al. A fast voltage security assessment method using adaptive bounding[J]. IEEE transactions on power systems, 2000, 15(8): 1137-1141.
- [18] 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 Q L, SUN H B, ZHANG B M, et al. Reactive power and voltage division based on spatial cluster analysis of reactive power control[J]. Automation of electric power systems, 2005, 29(10): 36-40.
- [19] VERMA M K, SRIVASTAVA S C. Approach to determine voltage control areas considering impact of contingencies[J]. IEE proceedings- generation, transmission and distribution, 2005, 152(3): 342-350.
- [20] ZHANG X, CHEN Y L, WANG Y X, et al. Reactive voltage partitioning method for the power grid with comprehensive consideration of wind power fluctuation and uncertainty[J]. IEEE access, 2020, 8: 124514-124525.

## RESEARCH ON MODIFICATION METHOD OF VOLTAGE CONTROL AREA CONSIDERING WIND POWER CONNECTION

Li Yingliang, Wang Kang, Gao Zhaodi, Wang Deming, Song Nan, Zhu Qi  
(School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The traditional Voltage Control Area (VCA) division will change with the fluctuation of wind power output. To obtain a stable partition to adapt the various wind power output, this article proposed a method of voltage control area correction considering the impact of wind power. Firstly, in order to study the impact of the fluctuation of wind power output on the partition, the probability distribution of wind power output is discretized into multiple scenarios, and the power flow and partition of each scenario are studied. Secondly, the Jacobian submatrix is used to establish the sensitivity matrix and electrical distance matrix with power factor, and the condensed hierarchical clustering method is used to partition PQ nodes under different cross-section conditions of wind power output. According to the minimum value of  $Q-V$  curve, the generators which are consistent with the reactive power limit of PQ node are also classified into a group, and then the remaining PV nodes are divided into the whole network by sensitivity method. Finally, by identifying the boundary of VCA, the broken line analysis method is used to re divide the boundary nodes with inconsistent voltage fluctuations, so as to improve the voltage decoupling degree identifying the boundary of VCA. In this paper, the IEEE 39 bus system is used for wind power processing in multiple scenarios, and the simulation analysis of each output scenario is carried out. The results show that the proposed method can reasonably reflect the partition changes caused by the fluctuation of wind power output, and correct the partition changes under different output scenarios, which provides conditions for the voltage stability control of each region of the system.

**Keywords:** wind power; voltage control; stabilizing circuits; sensitivity analysis; hierarchical clustering; topology