

考虑邻域耦合程度的次区域主导节点优化辨识方法

郭小龙, 宋朋飞

(国网新疆电力有限公司, 乌鲁木齐 830063)

摘要: 电网结构的日益复杂和运行方式变化对系统的电压稳定性影响显著,传统的电压控制方法难以准确辨识电压主导节点,限制了局部电压的有效控制。针对这一问题,本文提出了一种考虑邻域耦合程度的次区域主导节点优化辨识方法。该方法基于对电网进行合理划分,获取反映局部电压控制特性的次区域,并通过构建主导节点优化辨识模型,准确定位各次区域的电压主导节点。首先,考虑无功源控制特性,构建电气距离全维扩展矩阵模型,采用层次聚类算法实现电网的次区域划分;其次,结合区域的连通性原则,分析次区域内可控节点与相邻区域的功率-电压耦合关系,构建考虑邻域耦合程度的综合灵敏度指标,根据指标计算结果辨识各次区域的主导节点;同时,研究电网在不同运行方式下主导节点的变化情况,验证所提辨识方法的灵活适应性。最后,采用IEEE 39节点系统进行仿真分析,结果表明,所提方法综合考虑了邻域节点的耦合程度,相较于传统主导节点选取方法更为可靠。此外,该方法不仅适应灵活多变的电网运行方式,还能对复杂网络的无功补偿容量规划提供有效支撑。

关键词: 电网分区;综合灵敏度;主导节点优化辨识;电压稳定性

Optimal Identification of Sub-regional Dominant Node Considering the Neighbourhood Coupling Degree

GUO Xiaolong, SONG Pengfei

(State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, China)

Abstract: The increasing complexity of the grid structure and the variation of the operation mode have a significant impact on the voltage stability of the system, and the traditional voltage control method is difficult to accurately identify the voltage dominant node, which restricts the effective control of the local voltage. In view of this issue, a sub-regional dominant node optimal identification method considering the neighbourhood coupling degree is proposed in this paper. The method is based on a reasonable division of the grid, the sub-regions reflecting the local voltage control characteristics is obtained, and the voltage dominant nodes in each sub-region is accurately located by constructing the dominant node optimal identification model. Firstly, the full-dimensional extension matrix model of electrical distance is constructed through considering the control characteristics of reactive power sources, and the hierarchical clustering algorithm is used to achieve the sub-regional classification of the grid; Then, combining the principle of connectivity of the region, the power-voltage coupling relationship between controllable nodes in the sub-region and adjacent regions is analyzed, and a comprehensive sensitivity index considering the neighbourhood coupling degree is constructed, and the dominant node in each sub-region is identified in accordance with the results of the index calculations. At the same time, the variation of dominant node under different operation modes of the grid is studied to verify the flexibility and adaptability of the proposed identification method. Finally, the IEEE 39 node system is used for simulation analysis. The results show that the proposed method takes the coupling degree of neighbouring nodes into account, and is more reliable than the traditional dominant node selection method. In addition, the method not only adapts to the flexible and variable grid operation

收稿日期:2024-04-28

基金项目:国网新疆电力有限公司科技项目(SGXJ0000TKJS2200415)。

mode, but also provides effective support for the reactive power compensation capacity planning of complex networks.

Keywords: grid partitioning; integrated sensitivity; dominant node optimal identification; voltage stability

0 引言

随着电力系统的发展,电网的复杂结构及运行方式的时变致使电压稳定性问题突出^[1-3]。在该背景下,制定合理的电压控制方案能够显著提升系统的灵活性调节能力,进而保证电网高效、稳定运行。面对电网复杂多变的新形势,将电网划分为不同的次区域,并准确选取各区域的电压主导节点,以实现电网的局部电压控制^[4-7],对于维持系统的高效、安全、稳定运行具有至关重要的研究意义。

电网的次区域划分在电压控制效果中发挥着关键作用。传统的划分方法通常是基于节点电压灵敏度,通过计算负荷节点的电气距离,并采用合适的分区算法将电网划分为区域内强耦合、区域之间弱耦合的控制次区域^[8]。电气距离能够表征负荷节点之间的电气联系程度,通常由牛顿拉夫逊法、PQ分解法计算得到,分区算法通常包括聚类法^[9-10]、启发式算法^[11-12]和复杂网络理论^[13-14]等,能够实现电网的合理划分。然而,在复杂的电力系统中,仅针对电网进行次区域划分仍存在一些控制局限性^[15-16]。

为了进一步提升系统的电压控制能力,强化次区域和电网之间的控制关联性,近年来,相关研究通过考虑电压的影响因素,提出了主导节点的选取方法。文献[17]提出考虑区域无功平衡的主导节点选择和无功分区的优化方法,基于目标相对占优的遗传算法求解实现了多负荷水平的无功优化。文献[18-19]考虑了系统电压和无功特性的薄弱性指标,为确定待补偿节点位置提供了条件。文献[20]考虑了风电出力的概率分布特性,在满足系统受随机扰动后能够通过控制消除所选主导节点的电压偏差,从而保证系统运行的电压稳定性。文献[21]考虑了源荷功率随机性和相关性,实现了主导节点的选取和无功分区的协调优化。文献[22]考虑了系统各节点的功率储备度计算了电气距离量度,通过GIN算法改进AP聚类算法实现了电网的次区域划分与主导节点的选取。文献[23]通过计算负荷节点的电压稳定指标,确定系统的电压稳定薄弱节点,作为电压稳定主导节点划分得到初始电压稳定关键注入区域,并提出相应的控制策略。上述研究中主导节点的选取方法主要是针对整个系统,通过计

算电压稳定性及薄弱性指标来确定主导节点,而对于次区域内的局部电压控制特性研究较少,并且未考虑相邻次区域之间的影响程度,在运行方式变化的条件下难以准确辨识主导节点。

为了克服上述问题,文章提出了一种考虑邻域耦合程度的次区域主导节点优化辨识方法。该方法基于无功源-负荷节点类型转换,构建了电气距离全维扩展矩阵模型,采用层次聚类算法得到电网的次区域划分结果。考虑相邻次区域之间节点电压的影响程度,提出了考虑邻域耦合程度的综合灵敏度指标,根据指标计算结果辨识各次区域的主导节点,通过算例分析验证了所提方法的有效性。

1 电网次区域划分

现有的分区通常是基于负荷节点之间的电气联系^[21-22],构建电气距离矩阵表征负荷节点之间的电压偏移实现负荷区域的划分,再通过人为归并无功源从而实现整个电网的次区域划分。本节结合无功源控制空间思想,考虑PV-PQ节点的动态转换,通过改变节点类型直接实现全网的次区域划分。

1.1 电气距离模型

电网的电气距离通常可以反映节点间电气联系的紧密度,一般由电压-功率的变化量来表述。

首先,采用牛顿-拉夫逊法潮流计算得到雅可比矩阵、各子矩阵以及电压变化量的关系,根据潮流线性方程得到矩阵公式为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \partial P_i / \partial \delta_j; N_{ij} = \partial P_i / \partial U_j \\ M_{ij} &= \partial Q_i / \partial \delta_j; L_{ij} = \partial Q_i / \partial U_j \end{aligned} \quad (2)$$

式中: J 为潮流雅可比矩阵;有功、无功功率的变化量 ΔP 、 ΔQ 分别由子矩阵 H 、 N 、 M 、 L 与电压相角差和幅值变化量 $\Delta \delta$ 、 $\Delta U/U$ 的乘积得出; i 、 j 分别为节点编号。

无功对电压幅差的控制性强,令 $\Delta P = 0$,根据式(1)推导电压幅差为

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial Q} \Delta Q = (L - MH^{-1}N)^{-1} \Delta Q \quad (3)$$

式中: $\partial U / \partial Q$ 反映了无功对电压的控制灵敏度,由雅可比子矩阵 $(L - MH^{-1}N)^{-1}$ 计算得到。

为了衡量节点之间的电压变化关系,结合式(3)推导过程,采用节点*i*、*j*之间的无功-电压控制灵敏度来表征电压变化量为

$$\alpha = (\partial U_i / \partial Q_j) / (\partial U_j / \partial Q_i) = \partial U_i / \partial U_j \quad (4)$$

式中: α 代表节点*i*、*j*之间的电压变化矩阵; $\partial U_i / \partial U_j$ 为节点*j*相对于节点*i*的电压偏移量。

为了反映节点之间的电气距离,采用对数函数将节点之间的电压灵敏度映射到多维空间,形成表征节点区分度的电气距离矩阵为

$$D = -\log_{10}(\alpha_{ij}^m \times \alpha_{ij}^m) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1m} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{m1} & D_{m2} & \cdots & D_{mm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:*m*为负荷节点个数; D 代表负荷节点之间的电气距离矩阵; α_{ij}^m 代表负荷区域内节点*i*与*j*之间的电压偏移量;其中 D 为对称矩阵,对角数值为0。

基于无功源控制空间思想,针对PV-PQ节点类型进行转换,通过逐次的计算每个无功源节点转换为负荷节点,并将平衡节点(VQ)类型也转为负荷节点,选取电压等级相近的节点作为平衡节点,使系统所有节点电气距离矩阵均扩展为增广矩阵,以此来构建全维度电气距离矩阵 D'_{ij} ,公式为

$$D'_{ij} = \begin{bmatrix} D_{11} & \cdots & D_{1m} & \cdots & D_{1(m+x)} & \cdots & D_{1(m+s)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ D_{m1} & \cdots & D_{mm} & \cdots & D_{m(m+x)} & \cdots & D_{m(m+s)} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ D_{(m+x)1} & \cdots & D_{(m+x)m} & \cdots & D_{(m+x)(m+x)} & \cdots & D_{(m+x)(m+s)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{(m+s)1} & \cdots & D_{(m+s)m} & \cdots & D_{(m+s)(m+x)} & \cdots & D_{(m+s)(m+s)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: D'_{ij} 为包含第*s*个无功源节点的全维度电气距离矩阵; $m+x$ 为平衡节点; $x, s \in m+1 \sim n$ 。

1.2 聚类划分

聚类算法被用于将数据集中的元素分组,以便识别具有相似特征的簇群。这种方法通过测量数据之间的相似性来进行分组,从而凸显不同簇间差异。基于此,聚类技术能够应用于电网分区的研究中,实现局部电压控制的目标。

本文采用凝聚的层次聚类算法,以1.1节构建的全维电气距离矩阵为数据集,设系统节点数为*n*,对无功源进行*n*-(*m*+1)次逐次合并,具体步骤如下:

1)将全维度电气距离矩阵 D'_{ij} 转化为上三角形矩阵 Y 并作为初始合并距离,减少计算量;

2)采用离差平方和(ward)距离作为簇之间的相似度度量,公式为

$$\begin{cases} \text{dist}_{(\text{in})ij} = \frac{1}{2} \sum_{i \in K_i} \sum_{j \in K_j} D'_{ij} \\ \text{dist}_{(\text{out})ij} = \sum_{i \in K_i} \sum_{j \in K_j} D'_{ij} \\ \text{dist}_{(\text{in})ij} + \text{dist}_{(\text{out})ij} = \text{dist}_{(\text{p})ij} \end{cases} \quad (7)$$

式中:*i*、*j*分别为簇 K_i 、 K_j 内部的节点; $\text{dist}_{(\text{in})ij}$ 为簇内ward距离; $\text{dist}_{(\text{out})ij}$ 为簇间距离; $\text{dist}_{(\text{p})ij}$ 代表簇之间通过离差平方合并为新的簇。

定义系统最大簇内距离为

$$d_{\max} = \max(\text{dist}_{(\text{in})ij}) \quad (8)$$

3)通过逐级聚类的凝聚过程形成数据集,并构建聚类谱系图;

4)根据聚类分区个数的取值区间为

$$K_{\max} \leq \sqrt{n}, K \in [2, \sqrt{n}] \quad (9)$$

式中: $K_{\max}$ 为最优聚类个数上限; K 为次区域数量,聚类数取值区间为 $[2, \sqrt{n}]$ 。

对比分区数量的聚类区间取值与聚类谱系中不同分支的区分度大小,通过分析区分度增长的一致性来确定次区域的个数,从而得到系统的次区域划分结果。

2 考虑邻域耦合的主导节点优化辨识

为了保证局部电压的就地控制,通过电网次区域内主导节点的辨识来控制各次区域内节点电压变化,是维持区域电压稳定性的重要手段。本文基于第1章节中的次区域划分结果,考虑无功-电压强耦合、有功-电压弱耦合特性构建了综合灵敏度指标,并考虑次区域内各节点与相邻区域连接节点的影响程度,提出了改进的主导节点优化辨识指标,从而准确辨识各次区域的主导节点。

2.1 综合灵敏度指标

传统的选取方法通常是分析次区域内的无功-电压灵敏度值,寻找电压波动性最大,最具有可控性的薄弱节点作为主导节点。随着系统结构愈发复杂,电网运行工况的变化使有功出力频繁调整,传统方法难以兼顾运行工况的复杂变化,致使次区域划分结果受到影响,影响主导节点的辨识。因此,文中综合考虑无功、有功功率对电压的耦合作用,构建了综合灵敏度指标为

$$\begin{aligned}
S_{\text{qp}} &= -(L + N_{m \times m}^{\text{r}})^{-1} \\
&= - \left[\begin{pmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial U_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial U_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial U_1} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial U_1} & \frac{\partial P_1}{\partial U_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial U_m} \\ \frac{\partial P_2}{\partial U_1} & \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial U_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_m}{\partial U_1} & \frac{\partial P_m}{\partial U_2} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} \end{pmatrix} \right] \\
&= - \begin{bmatrix} L_{11} + N_{11} & L_{12} + N_{12} & \cdots & L_{1m} + N_{1m} \\ L_{21} + N_{21} & L_{22} + N_{22} & \cdots & L_{2m} + N_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{m1} + N_{m1} & L_{m2} + N_{m2} & \cdots & L_{mm} + N_{mm} \end{bmatrix} \quad (10)
\end{aligned}$$

式中: $N_{m \times m}^{\text{r}}$ 为子矩阵 N 中代表负荷维度的有功-电压灵敏度值,由有功对电压的偏导 $\partial P_i / \partial U_j$ 求得; i, j 为负荷节点维度编号 ($i, j \in 1, 2, \dots, m$); S_{qp} 为综合灵敏度指标矩阵。

2.2 主导节点辨识方法

为准确优化选取变工况条件下的补偿位置,基于 2.1 节建立的综合灵敏度指标,计算次区域各节点的电压主导能力为

$$S_{\text{qp}}^{\text{in}}(Z_k) = \sum |S_{\text{qp}, K(Z_k, w)}|, w \in 1_k, \dots, Z_k \quad (11)$$

式中: Z_k 为次区域 K 内负荷节点编号; $S_{\text{qp}}^{\text{in}}(Z_k)$ 为在第 K 个次区域内的节点 Z_k 对该区域内所有节点的电压控制强度加权值之和; $S_{\text{qp}, K(Z_k, w)}$ 为节点 Z_k 相对于节点 w 的综合灵敏度值;其中 w 为次区域 K 的节点 $1_k - Z_k$ 。

传统方法是对比主导节点相对本区域和其他区域节点电压控制的影响程度,确定主导节点的合理性。然而,在大规模节点以及运行方式变化的系统中计算量过大,因此,本文考虑区域的连通性与拓扑结构,基于式(11)得到的 $S_{\text{qp}}^{\text{in}}(Z_k)$ 值,扩展计算该区域内各节点相对邻近次区域连接支路对应节点的影响程度为

$$S_{\text{qp}}^{\text{in} + \text{born}}(Z_k) = \sum |S_{\text{qp}, K(Z_k, w)} + S_{\text{qp}, K(Z_k, \hat{w})}|, \hat{w} \in 1, \dots, h \quad (12)$$

式中: $S_{\text{qp}}^{\text{in} + \text{born}}(Z_k)$ 代表次区域 K 内的节点 Z_k 对本区域和相邻次区域边界连接节点的综合电压控制强度加权值之和,记为节点 Z_k 的综合控制强度; $S_{\text{qp}, K(Z_k, \hat{w})}$ 为节点 Z_k 相对于相邻次区域边界连接节点 $\hat{w}$ 的综合灵敏度值; w 为次区域 K 连接其他区域的边界节点 $1 - h$ 。

在电源及负荷波动时,电网的运行方式会发生变化,当功率波动超过一定范围时会影响主导节点的辨识结果。通过选取功率间隔,以场景概率将不同载荷情况划分为不同的典型运行方式,公式为

$$\begin{cases} P_1, & \rho = \rho_1 \\ P_2 = P_1 + \Delta P_w, & \rho = \rho_2 \\ \vdots & \vdots \\ P_i = P_{i-1} + i\Delta P_w, & \rho = \rho_i \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_1 \cdots P_{i-1}$ 、 P_i 代表不同运行方式下的载荷等级; ρ_i 为不同典型运行场景发生的概率; ΔP_w 为功率间隔。

考虑主导节点对次区域内负荷节点电压的强控制作用,以及对邻域节点的耦合程度,构建不同运行方式下主导节点选取目标公式为

$$M_{Z'_k}^x = \max(S_{\text{qp}}^{\text{in} + \text{born}}(Z_k) \rho_i) \quad (14)$$

式中: $M_{Z'_k}^x$ 为运行方式 x 下节点 Z_k 综合灵敏度最大值; $S_{\text{qp}}^{\text{in} + \text{born}}(Z_k)$ 为运行方式 x 下节点 Z_k 的主导强度; Z'_k 为所提方法辨识得到的主导节点。

通过上述步骤构建了考虑邻域耦合程度的主导节点辨识指标,并且综合考虑了运行方式变化对主导节点选取结果的影响,从而增强了选取结果的可靠性,为系统分层分区控制提供了依据。

电网的电压主导节点能够反映电网的关键与薄弱环节,通常能够作为系统的无功补偿节点进行补偿,从而保证系统的电压稳定。为了校验所提辨识方法的优越性,针对所提方法和传统方法选取的主导节点采用内点法进行无功补偿,通过补偿容量和经济性分析验证所提方法的有效性。

2.3 求解流程

所提方法的求解原理首先是计算系统节点的电压偏移和全维扩展电气距离,采用层次聚类算法实现全网的次区域划分。其次,基于综合灵敏度指标和邻域耦合程度,构建了主导节点的优化辨识指标,并分析了不同运行方式对主导节点选取结果的影响,根据指标计算结果准确辨识了各次区域的主导节点,计算流程见图 1。

3 算例分析

文中以 IEEE 39 节点系统为算例进行仿真分析,该系统包含 10 个 PV 节点(1 个平衡节点)、29 个 PQ 节点和 46 条支路,其中 10 条发电机支路、36 条负荷支路,拓扑结构见图 2。

3.1 次区域划分

根据第 1 节所提次区域划分方法,采用牛拉法潮流计算得到雅可比矩阵,结合雅可比子矩阵以及功率-电压的关系,量化节点之间的电压偏移,并以此构建负荷节点的电气距离矩阵。基于无功源控制空间概念将无功源节点以及平衡节点 31 依次映射至负荷区域,构建 39 节点系统额定功率条件下的全维度电气距离矩阵部分结果见表 1。

表 1 39 节点系统全维度电气距离矩阵部分结果
Table 1 Partial result of the full dimensional electrical distance matrix of 39-node system

节点	1	2	29	...	31	...	39
1	0	0.08	0.09		0.13		0.12
2	0.08	0	0.01	...	0.05	...	0.04
29	0.09	0.01	0		0.04		0.04
⋮		⋮			⋮		⋮
31	0.13	0.05	0.04	...	0	...	0.07
⋮		⋮			⋮		⋮
39	0.12	0.04	0.04	...	0.07	...	0

采用凝聚的层次聚类算法对全维度电气距离矩阵进行聚类划分,得到全网次区域划分结果见图 3。

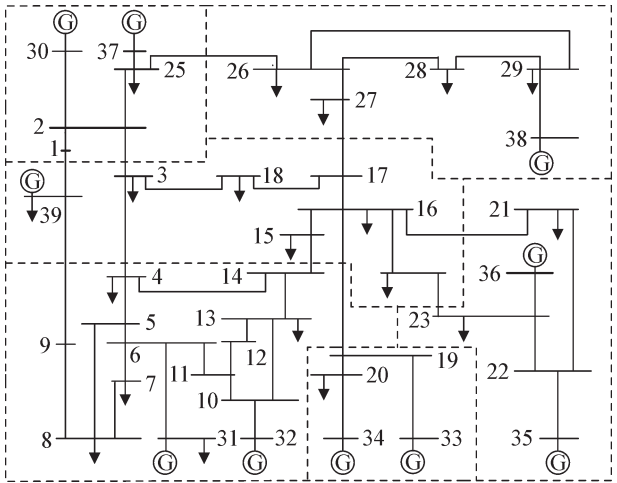


图 3 考虑全维度电气距离矩阵的次区域划分结果
Fig. 3 Sub-region classification result considering the full dimensional electrical distance matrix

随着电网结构的愈发复杂,机组与负荷的高随机性对电网运行影响较大,导致系统电压稳定性受到较大挑战。为体现电网运行工况的灵活多变,文中模拟不同过载情况的运行方式。

基于上述步骤计算得到不同运行方式下的全维电气距离矩阵,并通过聚类数量区间分析,计算并得到 39 节点系统的次区域数量为 6,从而得到不同运行方式下的次区域划分结果见表 2。

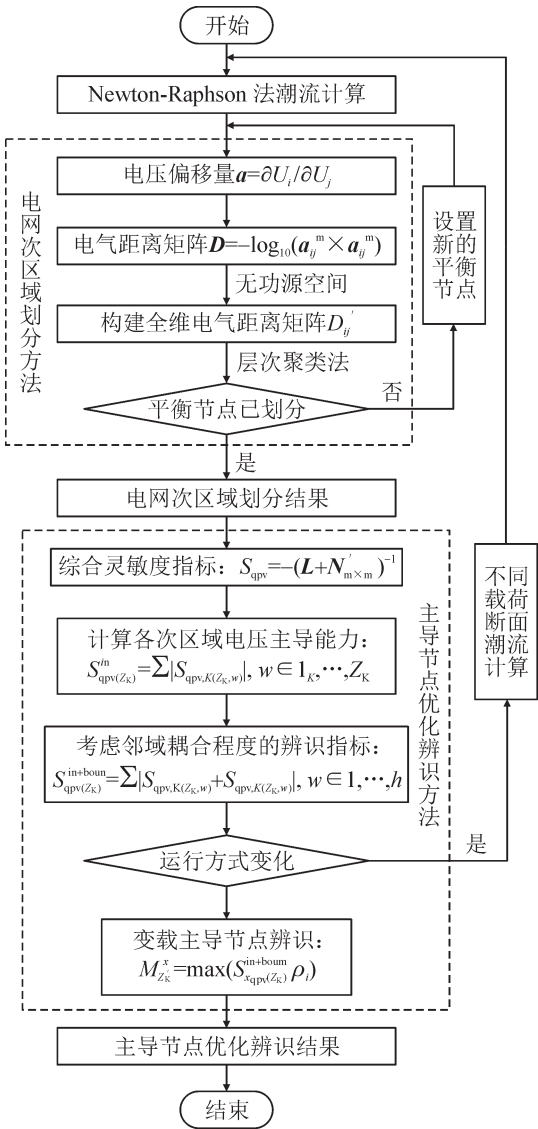


图 1 主导节点优化辨识方法流程
Fig. 1 Optimal identification method flow of dominant mode

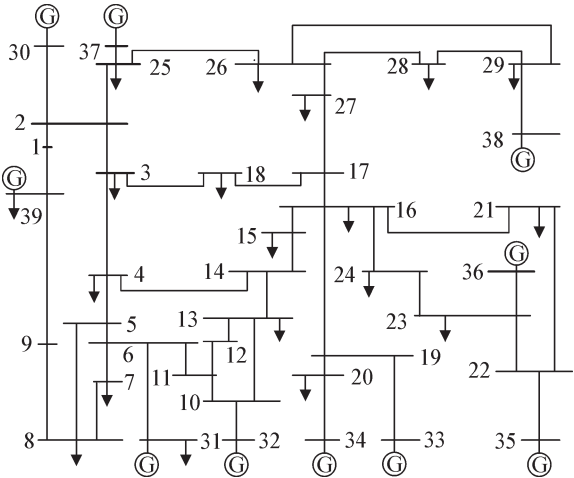


图 2 IEEE 39 节点系统拓扑结构
Fig. 2 Topological structure of IEEE 39-node system

表2 39节点系统不同运行方式下次区域划分结果
Table 2 Sub-regional classification result for different operation modes of 39-node system

运行方式	次区域编号	次区域内节点编号
$1-P=P_1=\text{额定功率}$ $\rho=\rho_1$	1	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 31, 32
	2	1, 2, 25, 30, 37
	3	26, 27, 28, 29, 38
	4	3, 15, 16, 17, 18, 24, 39
	5	19, 20, 33, 34
	6	21, 22, 23, 35, 36
$2-P=P_2=P_1+\Delta P_w$ $\rho=\rho_2$	1	5, 6, 7, 8, 9, 31
	2	1, 2, 25, 30, 37
	3	26, 27, 28, 29, 38
	4	3, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 35, 36, 39
	5	19, 20, 33, 34
	6	4, 10, 11, 12, 13, 14, 32
$3-P=P_3=P_2+\Delta P_w$ $\rho=\rho_3$	1	4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 31, 32
	2	1, 2, 25, 30, 37
	3	3, 17, 18, 26, 27, 28, 29, 38
	4	9, 39
	5	19, 20, 33, 34
	6	15, 16, 21, 22, 23, 24, 35, 36

所提方法通过对全维度电气距离矩阵的聚类,一次性直接得到全网所有节点的次区域划分结果,其中载荷功率增幅间隔为 $\Delta P_w=70\text{ kW}$,构建不同潮流断面下的3种典型运行方式,为变载条件下主导节点的精确辨识提供基础。

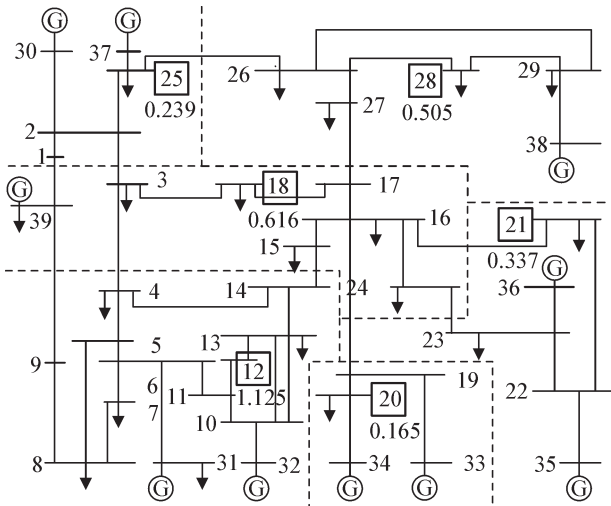
3.2 主导节点辨识
根据第2节中所提的主导节点优化辨识方法,计算上述3种运行方式下各次区域的综合灵敏度指标,得到的结果见表3。

表3 39节点系统不同运行方式次区域综合灵敏度指标
Table 3 Sub-regional -integrated sensitivity index for different operation modes of 39-node system

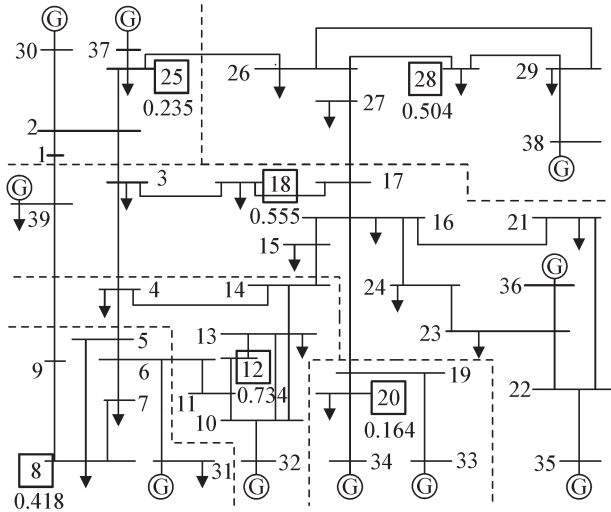
运行方式	次区域编号	各区域相对综合灵敏度指标
1	1	0.507, 0.838, 0.887, 0.861, 0.933, 0.921, 0.519, 0.822, 0.881, 1.125, 0.877, 0.845, 0.576
	2	0.237, 0.223, 0.237, 0.239, 0.215
	3	0.308, 0.247, 0.497, 0.490, 0.505, 0.358
	4	0.295, 0.523, 0.482, 0.486, 0.563, 0.495, 0.592, 0.616, 0.430, 0.562
	5	0.131, 0.156, 0.165
	6	0.280, 0.337, 0.255, 0.270, 0.328
2	1	0.308, 0.349, 0.320, 0.413, 0.418, 0.309, 0.304
	2	0.233, 0.218, 0.225, 0.235, 0.203
	3	0.301, 0.246, 0.495, 0.485, 0.504, 0.358
	4	0.251, 0.435, 0.363, 0.544, 0.525, 0.546, 0.555, 0.508, 0.344, 0.361, 0.547
	5	0.128, 0.155, 0.164
	6	0.435, 0.374, 0.352, 0.479, 0.478, 0.734, 0.53, 0.503, 0.363
3	1	0.012, 0.015, 0.016, 0.019, 0.019, 0.015, 0.027, 0.026, 0.052, 0.026, 0.013, 0.01
	2	0.583, 0.216, 0.053, 0.145, 0.276
	3	0.712, 0.274, 0.482, 1.404, 0.833, 1.159, 8.596, 4.845, 28.797, 14.692
	4	0.006, 0.015
	5	0.126, 0.575, 0.597
	6	0.015, 0.078, 0.237, 0.152, 0.593, 0.905, 0.899, 0.35

分析表2计算得到的辨识指标数值大小可知,在运行方式1条件下,次区域内的主导节点选择结果依次为(节点12、18、20、21、25、28);在运行方式2条件下次区域内主导节点选择结果依次为(节点8、12、18、20、21、25、28),在运行方式3条件下次区域

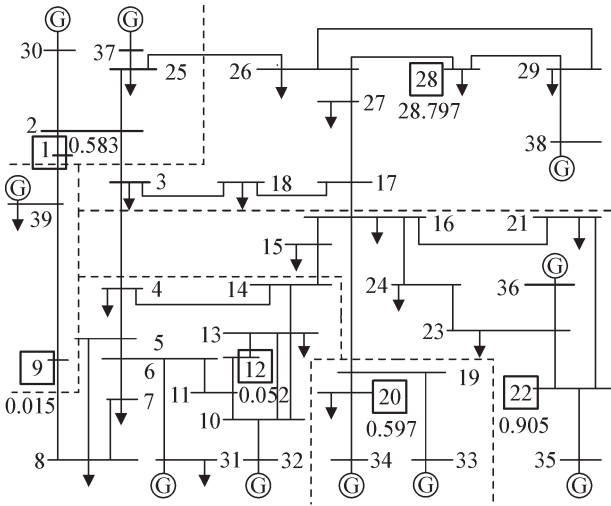
内主导节点选择结果依次为(节点1、9、12、18、20、28)。其中,3种典型运行方式下的4个主导节点节点12、18、20、28一致,说明所提方法受运行方式的影响较小且选取结果合理。不同运行方式下次区域划分拓扑图及主导节点选取结果见图4。



(a) 运行方式 1 主导节点选取示意图



(b) 运行方式 2 主导节点选取示意图



(c) 运行方式 3 主导节点选取示意图

图4 不同运行方式下39节点系统主导节点辨识结果
Fig. 4 Identification result of dominant node of 39-node system under different operation modes

根据上述主导节点选取结果可知,所提方法综

合考虑了邻域节点的耦合程度,减小辨识结果受运行方式变化的扰动影响,能够更准确地选取各次区域的主导节点。

为了验证所提辨识方法的优越性,以运行方式 1 为研究对象,针对不同过载情况进行无功容量的规划。选择静止同步补偿 (static synchronous compenstor, STATCOM) 作为补偿装置,并采用 WECC 提供的控制参数^[24]。其固定投资成本为 $C_{\text{fix-STATCOM}}=500$ 万美元/100 Mvar;可变投资成本为 $C_{\text{var-STATCOM}}=150$ 万美元/台。

本文运行方式 1 下的主导节点,采用 150%与 180% 两种过载方式,计算各电压主导节点的补偿容量与成本,各次区域的具体补偿容量以及投资成本见表 4。

表4 150%、180% 变载采用所提方法补偿结果 Table 4 Compensation result of 150%、180% variable load using proposed method				
载荷位置	150%过载		180%过载	
	容量/ Mvar	投资/ 百万美元	容量/ Mvar	投资/ 百万美元
节点 12	186.653	10.833	240.501 0	13.525
节点 18	54.886	4.244	70.325 0	5.016
节点 20	58.555	4.428	71.351 0	5.068
节点 21	50.835	4.042	65.003 0	4.750
节点 25	23.485	2.674	32.042 0	3.102
节点 28	6.522	1.826	19.778 0	2.489
总投资	380.935	28.047	499.000 1	33.950

由表 4 可知,在 150% 载荷工况下,将所提方法得到的主导节点作为补偿点,在 6 个次区域点的总补偿容量为 380.935 Mvar,综合投资为 28.047 百万美元,在 180% 载荷工况下,采用所提方法在 6 个次区域点的总补偿容量为 499.000 1 Mvar,综合投资为 33.950 百万美元。

为了验证本文选址方法的优越性,采用传统的全局灵敏度选址方法^[19]确定补偿位置,采用本文补偿方法进行容量补偿,结果见表 5。

表5 150%、180%变载采用传统方法补偿结果 Table 5 Compensation result of 150%、180% variable load using traditional method				
载荷位置	150%过载		180%过载	
	容量/ Mvar	投资/百万 美元	容量/ Mvar	投资/百万 美元
节点 12	454.140	24.207	602.213	31.611
节点 27	14.973	2.249	48.535	3.927
节点 28	93.732	6.187	131.102	8.055
总投资	562.845	32.642	781.850	43.593

根据表 5 可知,在 150% 过载的情况下,采用传统选址方法的总补偿容量为 562.845 Mvar,综合投资为 32.642 百万美元,在 180% 过载的情况下,采

用传统方法的总补偿容量为 781.850 Mvar, 综合投资为 43.593 百万美元。

分析表 4、5 可知, 传统通过全局灵敏度方法选取节点 12、28 与本文一致, 佐证了本文方法的合理性。但由图 3 可知, 节点 27、28 属于同一个次区域内的相邻节点, 忽略了电网无功需求的局部特性。相比于传统选址方法, 在不同的载荷下, 所提方法选取的主导节点补偿总容量小、成本低, 能够避免设备的冗余配置, 主导节点的选取结果更准确。

4 结语

文章提出了一种考虑邻域耦合程度的次区域主导节点优化辨识方法, 能够准确辨识电网的电压主导节点, 具体如下:

1) 全维度电气距离矩阵充分结合了节点功率-电压耦合特性, 基于无功源空间快速准确的实现了全网次区域划分, 为主导节点的分区辨识提供了便利;

2) 主导节点优化辨识指标综合考虑了相邻区域连接节点对本区域主导节点的影响程度, 辨识结果更可靠;

3) 所提方法适用于不同过载情况、次区域划分变化等场景, 辨识结果更可靠, 为解决复杂网络无功补偿准确选址问题提供了基础。

结果表明, 所提方法通过构建改进的主导节点辨识指标, 合理准确的选取了全网各次区域内的电压主导节点, 为复杂电网的安全稳定运行提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 赵乐, 许凌, 张梦瑶, 等. 考虑非完美通信的高比例光伏配电网模糊电压控制策略[J]. 广东电力, 2023, 36(12): 9-16.
ZHAO Le, XU Ling, ZHANG Mengyao, et al. Fuzzy voltage control strategy for high proportion photovoltaic distribution network considering non-perfect communication[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(12): 9-16.
- [2] 黄雨佳, 孙秋野, 王睿, 等. 面向综合能源系统的静态电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(z1): 44-53.
HUANG Yujia, SUN Qiuye, WANG Rui, et al. Static voltage stability analysis for integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(z1): 44-53.
- [3] 陈晓华, 吴杰康, 陈盛语, 等. 基于 EMD 和 IABC-SVM 算法的复合电压暂降源辨识方法[J]. 广东电力, 2022, 35(2): 11-18.
CHEN Xiaohua, WU Jiekang, CHEN Shengyu, et al. Compound voltage sag source identification method based on EMD and IABC-SVM algorithm[J]. Guangdong Electric

Power, 2022, 35(2): 11-18.

- [4] 潘舒扬, 李勇, 贺悝, 等. 考虑微电网参与的主动配电网分区自动电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(21): 4580-4589.
PAN Shuyang, LI Yong, HE Kui, et al. Automatic voltage control strategy based on zone-division for active distribution network with microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(21): 4580-4589.
- [5] 廖剑波, 陈波, 陈垣玮, 等. 计及不确定性的主动配电网电压越限风险评估及预控[J]. 电器与能效管理技术, 2022(2): 74-82.
LIAO Jianbo, CHEN Bo, CHEN Yuanwei, et al. Voltage violation risk assessment and pre-control in active distribution network considering uncertainty[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(2): 74-82.
- [6] SANCHAJ L, FERNANDEZ J L, CORTES A, et al. Secondary voltage control: analysis, solutions and simulation results for the spanish transmission system[C]//Proceedings of Power Industry Computer Applications Conference. [S.l.]: IEEE, 1995: 27-32.
- [7] 薛成, 曹戈, 王争冕, 等. 基于鲸鱼群算法的交直流混联系统无功电压控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 67-73.
XUE Cheng, CAO Ge, WANG Zhengmian, et al. Research on the reactive power and voltage control method for AC-DC hybrid systems based on the whale swarm algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 67-73.
- [8] 韦钢, 李明, 卢伟, 等. 充放储一体站并网的多级阶梯电压控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 2015(15): 3823-3831.
WEI Gang, LI Ming, LU Wei, et al. Multistage ladder voltage control partitioning method containing grid-connected charging-discharging-storage integrative station[J]. Proceedings of the CSEE, 2015(15): 3823-3831.
- [9] 管霖, 吴亮, 卓映君, 等. 面向暂态电压控制的大电网区域划分方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3753-3759.
GUAN Lin, WU Liang, ZHUO Yingjun, et al. Large power system partitioning method for transient voltage control[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3753-3759.
- [10] 周琼, 负志皓, 丰颖, 等. 风电接入下基于 AP 聚类的无功功率-电压控制分区方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 19-27.
ZHOU Qiong, YUAN Zhihao, FENG Ying, et al. Reactive power-voltage control partitioning of wind power integration system based on affinity propagation clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 19-27.
- [11] ELADL A A, BASHA M I, ELDESOUKY A A. Techno-economic multi-objective reactive power planning in integrated wind power system with improving voltage stability[J].

- Electric Power Systems Research, 2023, 214: 108917.
- [12] 顾洁, 孟璐, 朱瞳彤, 等. 数据驱动的无精确建模含源配电网无功运行优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 1-8.
- GU Jie, MENG Lu, ZHU Tongtong, et al. Data-driven optimization for reactive power operation in source distribution network without accurate modeling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 1-8.
- [13] KARMAKAR N, BHATTACHARYA B. Techno-economic strategy for reactive power planning using series-shunt compensation in power transmission network[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 49(2): 101677.
- [14] NGUYEN Q, KE Xinda, SAMAN N, et al. Transmission-distribution long-term volt-var planning considering reactive power support capability of distributed PV[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138(6): 107955.
- [15] KUANG Honghai, SU Fuqing, CHANG Yurui, et al. Reactive power optimization for distribution network system with wind power based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213(12): 108731.
- [16] 徐吉智, 张新燕, 常喜强, 等. 基于PV曲线和改进遗传算法储能选址定容研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1): 263-268.
- XU Jizhi, ZHANG Xinyan, CHANG Xiqiang, et al. Research on energy storage location and capacity determination based on PV curve and improved genetic algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(1): 263-268.
- [17] 崔惟, 颜伟. 考虑区域无功平衡的主导节点选择和无功分区的优化方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 164-170.
- CUI Wei, YAN Wei. Optimization methods for dominant node selection and reactive power partitioning considering regional reactive power balance[J]. Grid Technology, 2017, 41(1): 164-170.
- [18] 刘庆珍, 黄君莹, 王少芳. 复合电压薄弱性指标及以其为导向的无功优化策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 147-152.
- LIU Qingzhen, HUANG Junying, WANG Shaofang. Compounding voltage weakness indicator and reactive power optimization strategy oriented to it[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 147-152.
- [19] 刘承锡, 赖秋频, 姚良忠, 等. 基于全纯嵌入法的电力系统解耦模型: 薄弱节点辨识[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1736-1747.
- LIU Chengxi, LAI Qiupin, YAO Liangzhong, et al. Power system decoupling model based on holomorphic embedding method: weak bus identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1736-1747.
- [20] 胥志皓, 刘玉田, 梁军, 等. 考虑风电功率波动概率特性的主导节点选择方法[J]. 电力系统自动化, 2014(9): 20-25.
- YUAN Zhihao, LIU Yutian, LIANG Jun, et al. A pilot node selection method considering probability characteristic of wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(9): 20-25.
- [21] 于琳, 孙莹, 徐然, 等. 改进粒子群优化算法及其在电网无功分区中的应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 89-95.
- YU Lin, SUN Ying, XU Ran, et al. Improved particle swarm optimization algorithm and its application in reactive power partitioning of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 89-95.
- [22] 郝文清, 黄志光, 陆建宇, 等. 含光伏电网的电压-无功雅可比矩阵结构特征及电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1719-1730.
- HAO Wenqing, HUANG Zhiguang, LU Jianyu, et al. Structural characterization and voltage stability analysis of voltage-reactive jacobian matrix for photovoltaic-containing grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1719-1730.
- [23] 娄奇鹤, 王康, 袁铁江, 等. 基于断线扰动的电压控制区域边界节点修正方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 141-149.
- LOU Qihe, WANG Kang, YUAN Tiejia, et al. A method for correcting boundary nodes of a voltage control region based on disconnection disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 141-149.
- [24] POURBEIK P, SULLIVAN D J, BOSTROM A, et al. Generic model structures for simulating static var systems in power system studies — a WECC task force effort[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1618-1627.

作者简介:

郭小龙(1979—), 男, 正高级工程师, 主要从事电力系统分析及运行控制工作。E-mail: 951751666@qq.com。

宋朋飞(1980—), 男, 正高级工程师, 主要从事电力系统分析工作。