

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201124

基于深度学习和改进 K-means 聚类算法的电网 无功电压快速分区研究

赵晶晶, 贾然, 陈凌汉, 朱天天

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 随着电网规模的不断扩大, 对整个大电网进行统一的电压调控变得越发困难。提出一种基于深度学习和改进 K-means 聚类算法的电网无功电压快速分区方法。首先建立电耦合强度矩阵反映系统节点间的电气耦合关系的强弱。然后采用深度学习中的稀疏自编码器, 通过训练实现对输入的高维矩阵进行特征提取和降维。最后基于改进的 K-means 聚类算法用以对降维后的特征序列进行聚类分析, 通过检验电气模块度值来确定最终的分区。以电气模块度、无功储备校验两个评价指标对电网分区质量进行评估。对 IEEE39 节点和 IEEE118 节点系统进行仿真分析, 验证了所提方法在保证连通性以及充足的无功储备的基础上, 具有较高的电气模块度。

关键词: 电耦合强度; 稀疏自编码器; 改进 K-means 聚类算法; 电网分区; 电气模块度

Research on fast partition of reactive power and voltage based on deep learning and an improved K-means clustering algorithm

ZHAO Jingjing, JIA Ran, CHEN Linghan, ZHU Tiantian

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the continuous expansion of the power grid, it has become more and more difficult to perform unified voltage regulation on the entire grid. This paper proposes a fast reactive power and voltage partition method based on deep learning and an improved K-means clustering algorithm. First, the electrical coupling strength matrix is established to reflect the strength of the electrical coupling relationship between the nodes of the system. Then the sparse autoencoder in deep learning is used to realize feature extraction and dimensionality reduction of the input high-dimensional matrix through training. Finally, the improved K-means clustering algorithm is used to perform cluster analysis on the feature sequence after dimensionality reduction, and the final partition is determined by checking the electrical modularity value. The quality of power grid divisions is evaluated with two evaluation indicators: electrical modularity and reactive power reserve verification. The simulation analysis of IEEE39 and IEEE118 bus systems verifies that the proposed method has high electrical modularity on the basis of ensuring connectivity and sufficient reactive power reserve.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905105).

Key words: electrical coupling strength; sparse autoencoder; improved K-means clustering algorithm; division of reactive power and voltage; electrical modularity

0 引言

近年来, 世界各地相继发生了严重的电网大停电事故, 造成了重大的经济损失, 影响了居民的生活。电压不稳定事件已被确定为最近几次全球大停

电的诱因^[1-2]。由此可见, 稳定的电压是电网安全运行的基础, 随着电网规模的不断扩大, 对大规模电力系统进行统一的电压调控变得越发困难, 分区电压控制的思想应运而生。由法国提出的分级电压控制模式在世界范围内得到了广泛的应用, 其关键是将整个电网划分为“区内耦合, 区间解耦”的小电网, 由小电网在各自区域内单独进行电压调节。由

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905105)

此可见,合理有效地电网分区是实现区域电压控制的关键^[3]。传统的电网分区主要依据地理位置、行政区域或者是以往的运行经验来确定分区方案,但是这种分区原则不能有效反映电网的运行状态^[4-5]。电网分区的目的是为了便于区域电网的运行、控制和管理^[6-8]。一般来说,电网的分区方案只与电网的网架结构参数有关,而与潮流分布无关。

随着电网规模的不断扩大,对表征电网拓扑结构的参数矩阵直接进行分析会受到计算时间及效率的制约,可利用降维算法对高维数据进行特征序列提取进而实现降维,对简化的电网模型进行分区可提高分区速度和分区效率,提高工程应用性。有些算法虽然能够降维,但是得到的低维矩阵不能完整地将原始信息表达出来。近年来,深度学习中的稀疏自编码器在数据降维处理以及特征提取等方面表现出优异的性能^[9],在自编码器的误差函数中加入稀疏惩罚项,强制性地对高维数据进行低维表达。

目前,常见的电网无功电压分区方法基本都是基于无功电压灵敏度得出电网电气距离后,采用聚类算法^[10-12]、社团发现算法^[13-14]或者是智能算法^[15]对电网进行分区设计。文献^[16]在得到基于无功电压灵敏度表征的电气距离后,将节点映射到几何空间中,然后对几何空间中的点进行聚类进而对整个电网进行分区;文献^[17]得到基于无功电压灵敏度的电气距离表征的电网架构之后,结合“分裂”和“凝聚”算法,以模块度最大值对应的分区数为最佳的分区个数;文献^[18]在得到基于无功电压灵敏度的基础上采用层次聚类算法得到最优的分区个数以及无功源所在的区域,依据映射分区算法确定最终的分区方案。采用基于无功电压灵敏度的电气距离来表征电网拓扑结构对电网进行分区,计算量大,计算效率低。

以上提出的表征电网的拓扑结构都是基于无功电压灵敏度矩阵,而本文采用电耦合强度矩阵来表征电网的拓扑结构。定义电耦合强度矩阵是为了更好地反映电网中任意两个节点之间的电气特性,模块度也被重新定义为基于电耦合强度(ECS)的电气模块度。在电网分区之前采用稀疏自编码器对电耦合强度矩阵进行降维和特征提取,采用改进 K-means 聚类算法对特征序列进行聚类。这样不仅可以提高分区速度,还能保证分区质量,具有很强的实用性。

1 电网无功电压分区

1.1 电耦合强度(ECS)

电力系统是一个典型的包括节点和输电线路的复杂网络系统。ECS 反映了电力系统网络输电过程

中的电气特性。两节点之间的 ECS 表示它们之间的传输能力, ECS 由功率传输容量^[19]和等效阻抗^[20-21]参数来共同定义。在电力系统中任意两个节点之间都具有电气耦合强度,节点 i 和 j 之间的 ECS 为

$$E_{ij} = \frac{C_{ij}}{Z_{ij}} \quad (1)$$

式中: C_{ij} 表示节点 i, j 之间的功率传输容量; Z_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的等效阻抗。

$$C_{ij} = \min_{l \in L} \left(\frac{P_l^{\max}}{|f_l^{ij}|} \right) \quad (2)$$

式中: f_l^{ij} 为线路 l 上的功率传输分布因子,简称 PTFDF,表示单位功率从节点 i 流入从节点 j 中流出时输电线路 l 上的功率变化量; P_l^{\max} 为输电线路 l 上的功率极限。

等效阻抗的定义式为

$$Z_{ij}^e = z_{ii} - 2z_{ij} + z_{jj} \quad (3)$$

式中, z_{ij} 表示阻抗矩阵中的第 i 行第 j 列的元素。

在式(1)中,功率传输容量和等效阻抗的数量级可能相差很大,造成 ECS 值可能对其中一个数值更敏感。为了解决这一问题,这两个量可以根据其平均值进行归一化。

$$\bar{C}_{ij} = \frac{C_{ij}}{\bar{C}} \quad (4)$$

$$\bar{Y}_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\bar{Y}} = \frac{1}{\bar{Z}_{ij}^e} \quad (5)$$

式中: Y_{ij} 为 Z_{ij}^e 的倒数; \bar{C} 和 \bar{Y} 分别为传输容量和等效导纳的平均值。

为了调整这两个组成部分的影响,可以通过改变它们的比例来进一步提高 ECS。

$$\bar{E}_{ij} = \left| \alpha \bar{Y}_{ij} + j\beta \bar{C}_{ij} \right| \quad (6)$$

式中, α 和 β 为加在一起等于 1 的比例系数^[22]。这两个参数的关系如图 1 所示。由于传输容量和导纳同样重要,所以在本文中采用 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ 。

1.2 电气模块度 Q_e

$$Q_e = \frac{1}{2M} \sum_{ij} \left[E_{ij} - \frac{E_i E_j}{2M} \right] \delta(C_i, C_j) \quad (7)$$

$$M = \frac{1}{2} \sum_{ij} E_{ij} \quad (8)$$

式中: E_{ij} 表示节点 i, j 之间的电耦合强度, $E_i = \sum_j E_{ij}$ 表示节点 i 和其余节点的电耦合强度之

和; $E_j = \sum_i E_{ij}$ 表示节点 j 和其余节点的电耦合强度之和。当节点 i 和节点 j 在同一集群内时 $\delta(C_i, C_j) = 1$, 否则 $\delta(C_i, C_j) = 0$ 。电气模块度的值越大, 说明区域具有“区内强耦合, 区间弱耦合”特性, 证明分区效果好。

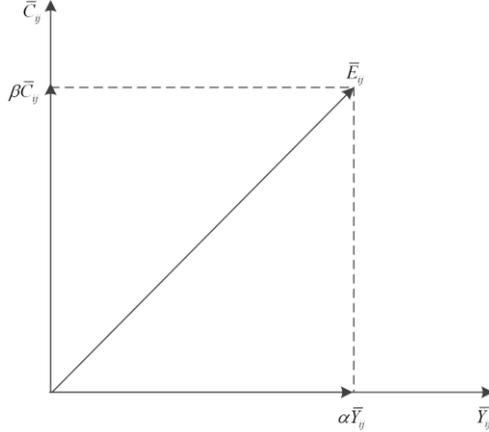


图 1 描述综合权重指数的不同值

Fig. 1 Different values describing composite weight index

1.3 稀疏自编码器

稀疏自编码器是一种无监督的特征学习算法^[23-24], 结构如图 2 所示。它是一种目标输出与输入相同的神经网络模型。每一个稀疏自编码器都有两个过程: 编码过程和解码过程。在编码过程中, 输入被转换成隐藏的特征; 在解码过程中, 隐藏的特征被重建为目标输出。它克服了自编码器不能有效提取特征的缺点^[25]。在自编码器的误差函数中引入稀疏约束项, 强制性对高维数据实施降维表达, 此方法具有非常广阔的应用前景^[26]。

根据图 2 所示的稀疏自编码器的结构, 稀疏自编码器的参数设置为 (W, b) , 其中 $W^{(l)}$ 表示 l 层与 $l+1$ 层之间的连接权重, $b^{(l+1)}$ 为 $l+1$ 层神经元的偏置。

对于给定的输入数据, 基于前向传播隐藏层的输出为

$$h_{W,b}(x) = \begin{bmatrix} a_1^{(2)} \\ a_2^{(2)} \\ \vdots \\ a_{S_2}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\left(\sum_{j=1}^{S_1} W_{1j}^{(1)} x_j + b_1^{(1)}\right) \\ f\left(\sum_{j=1}^{S_1} W_{2j}^{(1)} x_j + b_2^{(1)}\right) \\ \vdots \\ f\left(\sum_{j=1}^{S_1} W_{S_2j}^{(1)} x_j + b_{S_2}^{(1)}\right) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: S_1 为输入层神经元的个数; S_2 为隐藏层神经

元的个数; $f(\cdot)$ 为 sigmoid 定义的激活函数, 如式(10)所示。

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (10)$$

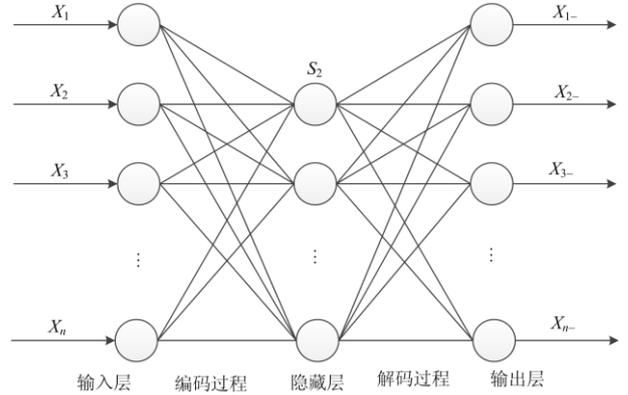


图 2 稀疏自编码器结构

Fig. 2 Structure of sparse self encoder

稀疏自编码器试图让输出向量 $h_{W,b}(x)$ 尽可能地接近输入向量 x 。为了获得更好的稀疏特征, 在误差表达式中加入稀疏惩罚项, 为

$$J_s(W, b; x) = \frac{1}{2} \|h_{W,b}(x^{(i)}) - x^{(i)}\|^2 + \beta \sum_{j=1}^{S_2} KL(\rho \| \rho_j) \quad (11)$$

第一项是平方和误差项, 它描述了整个训练数据之间的差异。第二项是加入了惩罚系数 β 的稀疏惩罚项。其中 ρ 为接近 0 的常数, ρ_j 为隐藏单元 j 的平均激活度, 其表达式为

$$\rho_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [a_j^{(2)}(x^{(i)})] \quad (12)$$

式中, m 为样本数。

稀疏约束可以理解为使隐藏层神经元的平均活跃度特别小^[27]。当 $\rho_j \approx \rho$ 时, 稀疏效果最好。引入 KL 散度来限制两者之间的差值, KL 散度的定义为

$$\sum_{j=1}^{S_2} KL(\rho \| \rho_j) = \sum_{j=1}^{S_2} \left[\rho \ln \frac{\rho}{\rho_j} + (1 - \rho) \ln \frac{1 - \rho}{1 - \rho_j} \right] \quad (13)$$

当 ρ 越接近 ρ_j 时, KL 散度值越小, 随着两者之间的差异变大, KL 散度值也会相应地增加^[28]。优化问题可以通过神经激活前向传递和误差反向传播来解决。

1.4 改进 K-means 聚类算法

本文采用改进的 K-means 聚类算法对降维之后得到的特征序列进行聚类分析。K-means 聚类算法虽然具有简单、计算速度快等优点, 但同时也表现

出一些缺点。例如：①分区个数 K 值的选取， K 值是在聚类之前人为给定的，具有不确定性；②初始聚类中心的选择具有随机性。

本文对于以上两个缺点的改进方法：

1) 电气模块度值最大时对应的分区个数为最佳的分区数。

2) 本文综合密度参数和欧氏距离作为确定初始聚类中心的依据。密度参数指半径为 r 的区域内节点的个数。分区步骤如下：

(1) 计算每个节点半径 r 内密度参数 ρ ，并按密度参数由大到小排列；

(2) 将密度参数最大的节点作为第一个聚类中心；

(3) 计算其余节点与第一个中心点的欧氏距离；

(4) 以欧氏距离最大、密度参数较大的节点为第二中心点；

(5) 重复；

(6) 直到有 K 个聚类中心点。

1.5 分区校验条件

1) 对电网分区之后要进行区域连通性检验，即每个区域中的节点至少有一个本区域节点和它相连，这样才能保证区域内不会存在孤立节点。

2) 为了保证分区后每个区域内都有足够的无功可以就地调节，需要对每个区域内的无功储备裕度进行校验，其校验公式为

$$\varphi_j = (1 - Q_{Lj} / Q_{Qj}) \times 100\% \quad (14)$$

式中： φ_j 为区域 j 内的无功储备指标； Q_{Lj} 为区域 j 内负荷所需要的总的无功； Q_{Qj} 为区域 j 内总的无功储备。当 $\varphi_j > 15\%$ 时，则认为区域内的无功储备充足；如果不满足，在保证连通性以及电气模块度的值减小较少的基础上可进行节点微调。

分区算法的整体流程如图 3 所示。

2 算例分析

2.1 IEEE39 节点测试系统

利用 Matlab 仿真软件，采用本文电网无功电压快速分区方法对 IEEE39 节点和 IEEE118 节点系统进行分区设计。

IEEE39 节点系统包含 10 个无功源节点和 29 个负荷节点，采用本文方法对其进行分区。由图 4 可知：随着迭代次数的不断变化，电气模块度值也在不断变化。当迭代次数为 6 时，电气模块度的值最大为 0.674。此时，对应的分区结果如表 1 所示。

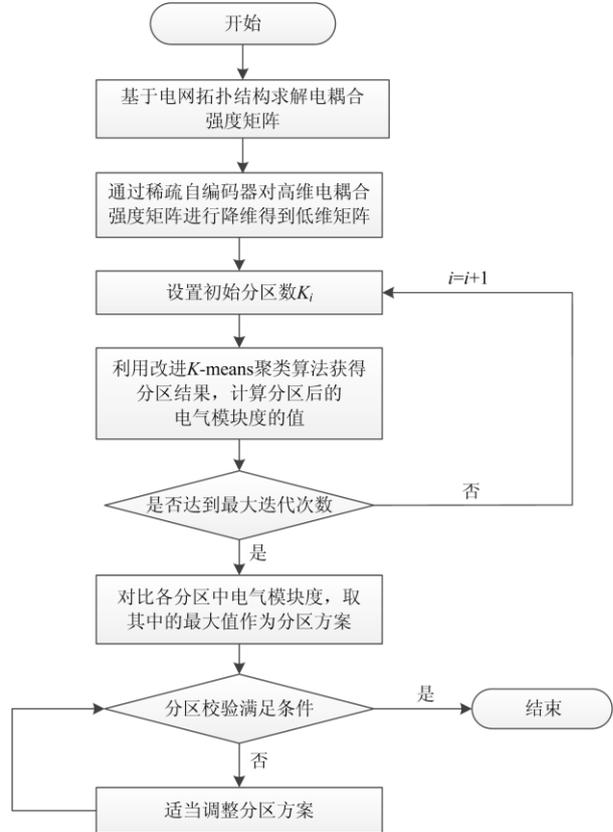


图 3 分区算法具体流程

Fig. 3 Specific flow chart of partitioning algorithm

表 1 IEEE39 节点系统的分区方法

Table 1 Partition method of IEEE39 bus system

区域号	区域内节点号
1	2,3,18,25,26,27,28,29,30,37,38
2	1,9,39
3	10,11,12,13,32
4	5,6,7,8,31
5	4,14,15,16,17,21,22,23,24,35,36
6	19,20,33,34

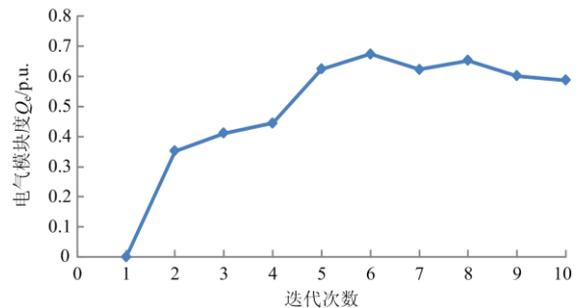


图 4 IEEE39 节点系统电气模块度迭代情况

Fig. 4 Iteration of electrical modularity of IEEE39 bus system

由表 2 可看出, 重新分区前区域 5 内的无功储备系数 φ_j 小于 15%, 即不满足无功储备校验, 需要在保证连通性以及模块度值减小不大时对节点所属区域进行微调。由于节点 4 的无功负荷为 184 Mvar 比较大, 可以把节点 4 归并到其他区域, 节点 4 和节点 3、5、14 连接。若把节点 4 归并到区域 4 中, 此时区域 4 的无功储备系数为 -28.2%, 不满足无功储备裕度的要求。由于区域 1 的无功储备裕度比较大(即区域 1 内的无功负荷之和比较小), 可以把节点 4 归并到区域 1。调整后区域 1 的无功储备为 56.78%, 区域 5 的无功储备为 45.8%, 均大于 15%, 满足无功储备校验条件。改进之后分区方法的电气模块度的值较初始分区结果的电气模块度的值下降 0.045, 电气模块度的值变化不大。综上可知: 重新分区后分区校验结果均满足要求。最终分区方案和重新分区前后无功储备校验结果如图 5 和表 2 所示。

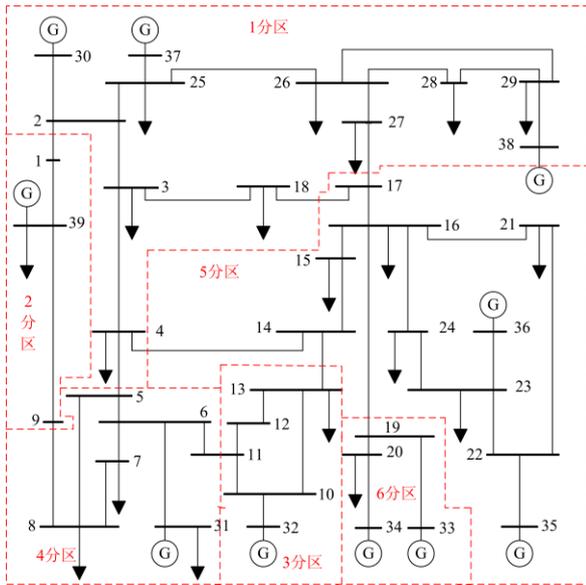


图 5 IEEE39 节点系统最终分区结果

Fig. 5 Final partition result of IEEE39 bus system

表 2 无功储备校验结果

Table 2 Verification result of reactive power reserve

区域号	1	2	3	4	5	6
重新分区前/%	76.15	16.7	70.67	24.4	11.72	75.3
重新分区后/%	56.78	16.7	70.76	24.4	45.8	75.3

2.2 IEEE118 节点测试系统

IEEE118 节点系统为美国中西部地区电网, 其中包括 54 个无功源节点和 64 个负荷节点。若认为最大迭代次数为 25, 由图 6 可知, 当迭代次数为 4 时, 电气模块度的值最大为 0.699, 对应的分区结果

如表 3 所示。由表 4 可知, 每个区域内都满足无功储备校验要求, 说明本文的分区方法具有可行性。

表 3 IEEE118 节点系统的分区方法

Table 3 Partition result of IEEE118 bus system

区域号	区域内节点号
1	1-7,11-19,27-29,31-33,113-115,117
2	8-10,20-26,30,70-76,118
3	34-69,116
4	77-112

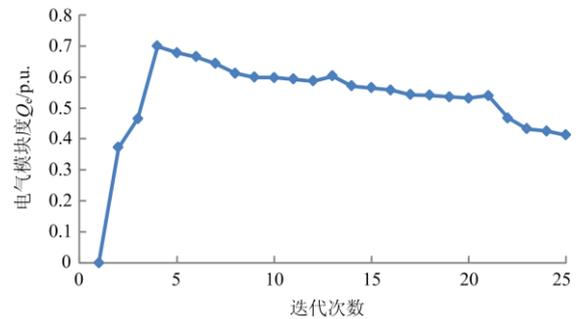


图 6 IEEE118 节点系统电气模块度迭代情况

Fig. 6 Iteration of electrical modularity of IEEE118 bus system

表 4 无功储备校验结果

Table 4 Verification result of reactive power reserve

区域号	1	2	3	4
区域内的无功储备裕度/%	76.59	77.3	86.61	88.1

2.3 与以往分区方法的比较

将本文所提的分区方法与文献[29]中的方法进行比较, 见表 5。文献[29]定义相似性为基于邻接矩阵 A_{ij} 测量不同节点的相似性。文中将 IEEE39 节点系统划分为五个区域, 相应的模块度值为 0.609 2, 小于本文中重新分区后的电气模块度的值 0.629。此外, 文献[29]将 IEEE118 测试系统分为了八个区域, 模块度的值为 0.688 9, 略小于本文电气模块度的值 0.699。因此, 本文所提方法在保证连通性的基础上, 电气模块度较大, 并且满足区域内的无功储备校验, 说明本文所提方法具有可行性。

表 5 本文方法与文献[29]模块度的对比

Table 5 Comparison of modularity between the method in this paper and reference [29]

	IEEE39 节点系统	IEEE118 节点系统
本文方法	0.629	0.699
文献[29]	0.609 2	0.688 9

3 结论

合理的电网分区是电力系统电压控制的基础和关键。本文提出的基于深度学习和改进 K-means 聚

类算法的电网无功电压快速分区方法如下:

1) 引入新的表征电网结构的功能矩阵即电耦合强度矩阵, 采用稀疏自编码器对高维数据进行降维获得低维的特征序列, 减少了分区的时间, 提高了分区的速度。

2) 对于 K-means 聚类算法的聚类个数的确定采用的是电气模块度最大时对应的分区个数; 采用基于密度参数和欧氏距离确定初始的聚类中心。

3) 引入电气模块度来表征电网“区内强耦合, 区间弱耦合”的特性。

4) 采用无功储备裕度的校验方法, 保证各自区域能够独立进行无功就地调节。

采用本文的方法对系统进行分区不仅能保证“区内强耦合, 区间弱耦合”, 还能保证分区后区域内有足够的无功用于就地调节和控制电压, 该分区方法具有较强的工程实用性。

参考文献

- [1] JIA Y, XU Z. A direct solution to biobjective partitioning problem in electric power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2481-2483.
- [2] 刘伟. 电网严重故障下的电压稳定应对措施分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 163-170.
LIU Wei. Analysis of voltage stability countermeasures under a severe fault in a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 163-170.
- [3] 魏震波, 刘俊勇, 程飞, 等. 利用社区挖掘的快速无功电压分区方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 166-172.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, CHENG Fei, et al. Fast power network partitioning method in Mvar control space based on community wining[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 166-172.
- [4] 李通, 薛峰. 基于 Dijkstra 算法的电网分区方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 159-165.
LI Tong, XUE Feng. Power network partitioning method based on Dijkstra algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 159-165.
- [5] GANGANATH N, WANG J V, XU X Z, et al. Agglomerative clustering-based network partitioning for parallel power system restoration[J]. IEEE Transactions on Industrial Information, 2018, 14(8): 3325-3333.
- [6] LI J, LIU C C, SCHNEIDER K P. Controlled partitioning of a power network considering real and reactive power balance[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 261-269.
- [7] 卞艺衡, 桂恒立, 别朝红. 考虑重构和微电网分区的分布式电源优化配置[J]. 智慧电力, 2020, 48(7): 8-15.
BIAN Yiheng, GUI Hengli, BIE Zhaohong. Optimal DG allocation considering reconfiguration and microgrid zoning[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 8-15.
- [8] 陆东生, 马龙鹏. 基于增广状态估计的混合不良数据诊断与参数辨识[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 99-104.
LU Dongsheng, MA Longpeng. Hybrid bad-data detection and parameter identification based on augmented state estimation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 99-104.
- [9] BOLOGNA G, HAYASHI Y. Characterization of symbolic rules embedded in deep DIMLP networks: a challenge to transparency of deep learning[J]. Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, 2017, 7(4): 265-286.
- [10] 鲍威, 朱涛, 赵川, 等. 基于聚类分析的三阶段二级电压控制分区方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 127-132.
BAO Wei, ZHU Tao, ZHAO Chuan, et al. A three-stage network partition method for secondary voltage control based on agglomerative analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 127-132.
- [11] 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 Hugang, CHENG Haozhong, 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.
- [12] 李健, 尚星宇, 王瑞. 基于聚类算法的双进双出磨煤机入炉煤量软测量方法[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 114-119.
LI Jian, SHANG Xingyu, WANG Rui. Soft measurement method of coal quantity for double-inlet and double-outlet mill based on clustering algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 114-119.
- [13] 潘高峰, 王星华, 彭显刚, 等. 复杂网络的社团发现方法在电网分区识别中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 116-121.
PAN Gaofeng, WANG Xinghua, PENG Xiangang, et al. Study of power grid partition identification method based on community structure detection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 116-121.
- [14] 黄蓝会. 复杂网络中社团发现算法的研究[J]. 微型电脑应用, 2017, 33(10): 11-12.
HUANG Lanhui. Research on community discovery algorithm in complex networks[J]. Microcomputer

- Application, 2017, 33(10): 11-12.
- [15] 李香龙, 付晓, 朱洁, 等. 含分布式电源的配电网分区和主导节点选取方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 24-29.
LI Xianglong, FU Xiao, ZHU Jie, et al. Research on partition method and selection of dominant nodes for distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 24-29.
- [16] 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): 18-22.
LIU Dapeng, TANG Guoqing, CHEN Heng. Tabu search based network partitioning for voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 18-22.
- [17] 倪向萍, 阮前途, 梅生伟, 等. 基于复杂网络理论的无功分区算法及其在上海电网中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 6-12.
NI Xiangping, RUAN Qiantu, MEI Shengwei, et al. A new network partitioning algorithm based on complex network theory and its application in Shanghai power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 6-12.
- [18] 赵晋泉, 刘傅成, 邓勇, 等. 基于映射分区的无功电压控制分区算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 36-39.
ZHAO Jinquan, LIU Fucheng, DENG Yong, et al. Network partitioning for reactive power/voltage control based on a mapping division algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 36-39.
- [19] BOMPARD E, WU D, XUE F. Structural vulnerability of power systems: a topological approach[J]. Electric Power System Research, 2011, 81(7): 1334-1340.
- [20] 邹鹏辉, 张治, 张显立. 高渗透率分布式光伏系统谐波与电压控制[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 40-45.
ZOU Penghui, ZHANG Zhi, ZHANG Xianli. Harmonic and voltage control of distributed photovoltaic system with high permeability[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 40-45.
- [21] ARIANOS S, BOMPARD E, CARBONE A, et al. Power grid vulnerability: a complex network approach[J]. Chaos, 2009, 19(1).
- [22] ZHAO C, ZHAO J, WU C, et al. Power grid partitioning based on functional community structure[J]. IEEE Access, 2019, 99: 152624-152634.
- [23] OLSHAUSEN B A. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images[J]. Nature, 1996, 381: 607-609.
- [24] 刘明军, 张涵, 熊浩, 等. 基于稀疏自编码的过电压特征提取与分类方法[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 70-75.
LIU Mingjun, ZHANG Han, XIONG Hao, et al. Overvoltage feature extraction and classification based on sparse automatic coding[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 70-75.
- [25] 郭裕祺, 朱大令, 何心. 基于自编码器的调压器在线故障诊断方法[J]. 煤气与热力, 2020, 40(1): 20-23, 45.
GUO Yuqi, ZHU Daling, HE Xin. On-line fault diagnosis method of regulator based on auto-encoder[J]. Gas and Heat, 2020, 40(1): 20-23, 45.
- [26] 刘宝君. 基于稀疏自编码器的空调制冷系统故障诊断技术初探[J]. 电子世界, 2020(3): 94-95.
LIU Baojun. Fault diagnosis technology of air conditioning refrigeration system based on sparse self encoder[J]. Electronic World, 2020(3): 94-95.
- [27] 王黎阳, 杜翀, 汪欣, 等. 一种基于稀疏自编码器的电机故障诊断方法[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(5): 197-202, 249.
WANG Liyang, DU Chong, WANG Xin, et al. A motor fault diagnosis method based on sparse autoencoders[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(5): 197-202, 249.
- [28] 丁石川, 厉雪衣, 杭俊, 等. 深度学习理论及其在电机故障诊断中的研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 172-187.
DING Shichuan, LI Xueyi, HANG Jun, et al. Deep learning theory and its application to fault diagnosis of an electric machine[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 172-187.
- [29] CHEN Z, XIE Z, ZHANG Q. Community detection based on local topological information and its application in power grid[J]. Neurocomputing, 2014, 170: 384-392.

收稿日期: 2020-09-13; 修回日期: 2020-12-24

作者简介:

赵晶晶(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事分布式发电与微电网技术、风力发电与无功电压控制、配网无功优化方面的研究工作; E-mail: jjzhao_sh@163.com

贾然(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事分布式发电与微电网技术、配网无功优化方面的研究工作。E-mail: 1710093347@qq.com

(编辑 周金梅)