

基于改进规范切与安全风险指标的关键输电断面 辨识方法

林继良¹, 刘敏¹, 刘晓欣²

(1. 暨南大学能源电力研究中心, 广东 珠海 519000; 2. 南方电网产业投资集团有限责任公司, 广州 511466)

摘要: 针对大规模新能源并网场景下电网关键输电断面频繁转移、难以快速准确辨识的问题, 提出了一种基于改进规范切与安全风险指标的关键输电断面辨识方法。基于谱图论构建了网络拓扑赋权图, 对支路赋权时考虑了节点电压和支路潮流因素的影响, 以综合反映节点之间的电气联系紧密程度; 采用改进规范切的谱聚类算法对电网进行分区, 对于分区之间形成的输电断面, 利用安全风险指标来筛选关键输电断面。IEEE 39 节点系统算例和广东电网算例的结果表明, 所提方法能准确有效地辨识系统的关键输电断面及其越限风险, 并且在实际电网的多场景应用中能够筛选出未识别的关键输电断面。

关键词: 新能源并网; 电网分区; 关键输电断面; 规范切; 安全风险指标

Key Transmission Section Identification Method Based on Improved Normalized Cut and Security Risk Index

LIN Jiliang¹, LIU Min¹, LIU Xiaoxin²

(1. Energy and Electricity Research Center, Jinan University, Zhuhai, Guangdong 519000, China; 2. Industry Investment Group Co., Ltd., CSG, Guangzhou 511466, China)

Abstract: Aiming at the problem that key transmission sections of the power grid are frequently transferred and difficult to identify quickly and accurately in large-scale renewable energy grid connection scenarios, a key transmission section identification method based on improved normalized cut and security risk index is proposed. A weighted graph of network topology is constructed based on spectral graph theory, considering the influences of node voltage and branch power flow factors when assigning weights to branches. This aims to comprehensively reflect the electrical connectivity between nodes. The network is partitioned using an improved spectral clustering algorithm based on normalized cut, and for the transmission section formed between partitions, key transmission sections are selected using security risk index. The results from case studies on the IEEE 39-bus system and Guangdong Power Grid indicate that the proposed method can accurately and effectively identify key transmission sections within the system and assess their risk of exceeding limits. Moreover, it can identify some unrecognized key transmission sections in multi-scenario applications in the actual power grid.

Key words: renewable energy integration; power grid partition; key transmission section; normalized cut; security risk index

0 引言

随着大规模新能源并网, 全球陆续发生了多起大规模停电事故, 对于现代经济社会造成巨大冲击^[1]。通过对大停电事故的深层次分析表明大停电

事故往往都是因为输电网络中存在薄弱环节, 一旦遇到极端天气, 导致输电线路跳闸, 电网潮流发生大规模转移, 输电断面越限, 从而引发系统连锁事故的发生^[2]。关键输电断面(key transmission section, KTS)是大电网的重要安全特征, 快速准确识别关键输电断面并对其监控, 可提高电力系统的稳定性和控制效率, 防止大规模停电事故的发生^[3-4]。

目前学者对关键输电断面进行了大量研究, 输

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2403500)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFB2403500)。

电断面通常定义为区域间线路的最小割集,其中线路潮流方向一致,彼此联系紧密且对电网安全运行至关重要的输电断面为关键输电断面^[5]。传统的关键输电断面一般由运行专家经验确定,但由于新能源的不确定性和电力市场化,使得关键输电断面不断增加且频繁转移,人工筛选方法可能导致关键输电断面的遗漏和误选,难以满足现代新型电力系统和智能电网的高要求^[6-7]。现有文献对关键输电断面的辨识方法研究主要从暂态安全风险和静态安全风险两个角度展开。

暂态安全评估通常是根据断面功率变化对系统暂态失稳风险大小来衡量断面的关键程度。文献[8]利用暂态仿真分析系统受到扰动或者故障情况下系统功角、线路功率等参数波动大小,通过比较断面稳定裕度是否小于设置阈值来筛选关键输电断面,但该方法涉及暂态仿真建模,计算过程复杂且耗时长。基于数据驱动的断面筛选方法在计算速度上具有一定的优势,文献[9]采用了决策树算法的暂态安全评估模型,但需要筛选准确率高的特征集合,虽然提高了模型的可解释性,但表达能力有待增强。文献[10]采用深度学习模型预测关键输电断面,表达能力强,但难以解析关键输电断面的功率波动与暂态稳定性的相互影响,无法发现新的关键输电断面。

基于静态安全风险的关键输电断面辨识方法可归纳为基于潮流转移关系的分析方法和基于电网分区的方法两大类。基于潮流转移关系的方法通过开断分布因子或聚类指标等特征因子,搜索与过载线路存在密切电气联系的线路割集。文献[11]建立了双支路断开的潮流转移虚拟模型,搜索开断线路前 K 条最短路径,利用线路的潮流越限风险指数对潮流转移区域中的线路进行筛选,得到组成输电断面的所有线路,但 K 值设定较为主观,全网内搜索最短路径的范围过大,造成搜索资源的浪费。基于电网分区的方法通过断开联络线将电网分成多个子区域,文献[12]基于 Girvan-Newman (GN) 分割算法通过断开输电介数较高的联络线对电网进行分区。节点聚类分区法将具有相同性质的节点或线路聚类为一组输电断面,文献[13]基于模糊 C 均值聚类算法搜索与断开线路具有相似功率构成的线路组成初始输电断面,并提出了复合因子判据来识别关键输电断面,但是聚类结果受初始聚类中心的影响较

大。文献[14]提出了一种基于蒙特卡罗优化谱聚类方法实现对电网分区,采用经济、实时的通信指标构建配电网分区数目标函数,得到最优分区数量。

基于规范切(normalized cut)的谱聚类算法在电网分区过程中具有计算速度快、求解难度低的优势。文献[15]根据线路有功潮流值对支路进行赋权,基于规范切判据搜索最优分区断面,但没有对子分区内部断面进行搜索,存在漏选断面的问题。文献[16]基于规范化谱聚类算法对电网进行分区,对支路的赋权可能未包含数据的多元特征,如线路参数、地理位置、系统运行状态等,权重矩阵经谱分解、聚类等操作后,特征缺乏或丢失引起的误差将会放大,最终影响到聚类效果^[17]。电网分区后形成较多的输电断面,文献[18]将安全裕度低于阈值值的断面作为热稳关键断面。文献[19]通过 $N-1$ 和 $N-2$ 故障校验,选择有越限风险的断面作为关键输电断面。文献[20]基于线路停电分布因子和线路负荷率指标来确定关键输电断面。以上关键输电断面的判断指标不能综合考虑断面潮流大小和越限风险等因素,辨识的关键输电断面准确性不足。

本文提出一种基于规范切和安全风险指标的关键输电断面辨识方法,该方法构建了考虑电压稳定和潮流特性的支路权值模型,综合反映节点之间的联系紧密程度;构建了电网拓扑图模型,采用基于改进规范切的谱聚类算法进行分区。针对分区过程形成大量的输电断面且关键程度难以判断的问题,构建了安全风险指标作为关键输电断面的筛选依据。所提方法把电网分区的过程转化为图的划分过程,将 NP 难题(Nondeterministic Polynomial problems, NP problems)简化为矩阵的特征值求解问题,大大降低了计算量,在发挥了谱聚类算法求解速度快的优势同时避免电网分区方法中存在漏选和准确性不足问题。

1 基于规范切的电网分区

1.1 基于规范切准则的谱聚类算法

谱聚类是一种基于谱图论的聚类方法,求解谱图划分问题往往是一个 NP 难度问题。该算法利用谱松弛的方法,将图划分问题转化为相似矩阵谱分解问题,最后得到数据集合的划分,非常适用于实际应用,如图像分割、电网分区等领域。

基于谱聚类的电网分区应用中,图切准则的好

坏直接影响分区的效果。为了衡量图划分的优劣,研究者为此设计了相关图切准则,典型的图切准则有最小切、平均切、规范切等^[17]。有学者发现最小切准则可能会出现切分不均匀,即偏向小系统,为了避免子图间的顶点集合大小差异悬殊,文献[21]提出了规范切准则。规范切不但可以评估子图内部节点数据之间的紧密度,还可以评估不同子图之间的节点连接松散度,且各子图规模相当,能够避免歪斜划分的产生。

规范切的目标是把节点或支路等数据集划分成不同的区,使得同一个分区的数据点尽可能相似,而不同的分区中的数据彼此不相似^[22]。基于规范切将图 G 划分成两个子图 A 和 B , 规范切的目标函数表达式如式(1)所示。

$$Ncut(A, B) = \frac{Cut(A, B)}{vol(A)} + \frac{Cut(A, B)}{vol(B)} \quad (1)$$

式中: $Ncut(\cdot)$ 为规范切函数; $Cut(\cdot)$ 为切函数, $Cut(A, B) = \sum_{u \in A, v \in B} w(u, v)$; $vol(\cdot)$ 为子图关联度函数, $vol(A) = \sum_{u \in A, t \in G} w(u, t)$, $vol(B) = \sum_{u \in B, t \in G} w(u, t)$; $w(\cdot)$ 为支路权值函数; u, v, t 分别为图 A, B, G 的节点。

最小化 $Ncut(A, B)$ 函数叫做规范切准则, 节点或支路等数据点的最优聚类等效于该目标函数最小化。用规范切准则对电网分区时不仅考虑了分区内的内部节点电气联系, 还考虑了分区之间的外部联系, 并且可以产生均衡的分区效果。

1.2 构建支路权值模型

基于规范切的谱聚类算法依赖于图的拉普拉斯矩阵的特征值和特征向量, 构建图的权值矩阵是最为关键的一步, 因此不同的支路权值模型直接决定了系统分区方法的优劣。在构建支路权值模型时, 通常是基于系统网络节点之间的相似特征来设置支路权值, 相关特征有电气距离、功率电压或能量敏感性等^[23]。文献[14]以电压-无功功率参数为支路赋权, 但该方法主要取决于线路参数和配电网拓扑结构, 未能反映分区之间的输电断面有功潮流较大这一特征, 难以保证分区的合理性和稳定性。本文在文献[14]的基础上提出了考虑节点电压-无功功率和支路潮流-有功功率的权值模型, 从而能综合反映节点之间的电气联系紧密程度。如图1所示为

简单的支路模型。

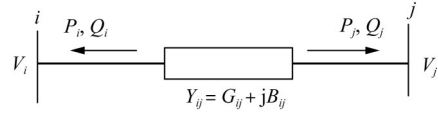


图1 简化支路模型

Fig. 1 Simplified branch model

图1中: $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ 为支路导纳, 支路两端电压分别为 $\dot{V}_i = V_i \angle \theta_i$, $\dot{V}_j = V_j \angle \theta_j$, 则支路中节点 i 侧的注入功率为:

$$\begin{cases} P_i = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + V_i^2 G_{ij} \\ Q_i = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - V_i^2 B_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i, Q_i 分别为支路中节点 i 侧的注入有功功率和无功功率; θ_i, θ_j 分别为支路 ij 两端电压的相角; θ_{ij} 为支路 ij 两端电压的相角差。

在支路 i 端的无功功率 Q_i 与 j 端的电压幅值 V_j 的偏导数为:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3)$$

在式(3)中, 由于高压输电线路电抗远远大于电阻, 线路两端电压相角差 θ_{ij} 通常较小, 因此 $G_{ij} \sin \theta_{ij}$ 可以忽略不计。支路的电抗参数 B_{ij} 能够直接反映两个节点间的电气距离, θ_{ij} 与线路的负载率相关。由此可知, 偏导数 $\partial Q_i / \partial V_j$ 与节点电压 V_i 、线路电抗 $|B_{ij}|$ 成正比, 与电压相角 $|\theta_{ij}|$ 成反比, 即当节点 i (受端) 电压越小、节点间电气距离越大和负载率越大, 则 $\partial Q_i / \partial V_j$ 越小。

在同一个线路两端可取得 $\partial Q_i / \partial V_j$ 和 $\partial Q_j / \partial V_i$ 这两个导数值, 在正常运行时两者偏差较少, 因此考虑电压因素的支路权值 w_v 取两者的均值, 如式(4)所示。

$$w_v = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \right| + \left| \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} \right| \right) \quad (4)$$

通常关键输电断面线路基态有功潮流比较大, 因此线路有功潮流值是支路权值的关键影响因素。在考虑线路网损的情况下, 对于任意的支路 $i-j$, 基于有功潮流因素的支路权值 w_p 为:

$$w_p = \frac{|P_i| + |P_j|}{2} \quad (5)$$

由上述讨论可知节点电压和支路潮流是影响支路赋权的重要因素, 本文对支路权值设定为:

$$w_{ij} = \frac{w_U}{w_P} = \left(\left| \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \right| + \left| \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} \right| \right) / (|P_i| + |P_j|) \quad (6)$$

由式(6)可知,当节点*i*、*j*电压越高,支路*ij*的潮流越小,则支路权值 w_{ij} 越大,说明两节点联系密切,应划分到同一个分区;反之支路潮流越大,支路权值越小,两节点联系越薄弱,该支路通常是两分区之间的输电线路,说明两节点属于不同分区。因此该支路权值模型能综合反映线路本身的电气特性、线路有功功率潮流值及荷载情况、节点电压幅值等多种因素,从而有利于谱聚类算法将具有相似特征的节点划分到同一个分区。

1.3 基于谱图论构建拉普拉斯矩阵

电力系统可以抽象为支路具有权值的图,基于谱图理论,由*n*个节点和*m*条边组成的网络拓扑有权图*G*可表示为:

$$G = (V, E, W) \quad (7)$$

式中:*V*为节点矩阵;*E*为支路矩阵;*W*为权值矩阵,矩阵元素 W_{ij} 为:

$$W_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & (i, j) \in E \\ 0, & (i, j) \notin E \end{cases} \quad (8)$$

式中 w_{ij} 为支路*ij*的权值。节点之间的连接关系可以用度矩阵*D*来表示,其对角元素 $d_i = \sum_{j=1}^n w_{ij}$ 表示为权值矩阵中第*i*行元素之和。根据权值矩阵*W*和度矩阵*D*构造图*G*的拉普拉斯矩阵*L*为:

$$L = D - W \quad (9)$$

1.4 基于规范切进行电网分区

对于实际的大规模电网,电力专家通常会将电网划分成多个相互独立的分区,这些分区断面中联系紧密的重要输电线路便构成了一个输电断面。本文结合电网分区的关键点,采用基于规范切的电网分区方法,求解过程如下。

设表征节点所属子图的分割指示向量为 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$,对 $\mathbf{x}$ 中的元素进行赋值为:

$$x_i = \begin{cases} 1, & i \in A \\ -1, & i \in B \end{cases} \quad (10)$$

根据式(1),基于规范切的电网分区目标函数*f*为:

$$f = \min \frac{\sum_{i \in A, j \in B} w_{ij} (x_i - x_j)^2}{\sum_{i \in A, z \in G} w_{iz} \sum_{i \in B, z \in G} w_{iz}} \quad (11)$$

根据文献[24]可推导式(11)目标函数的求解方法。

令:

$$k = \frac{\sum_{x_i > 0} d_i}{\sum_i d_i} \quad (12)$$

式中 d_i 为权值矩阵*W*的第*i*行元素之和。

设 $\mathbf{X}$ 为 $n \times 1$ 全1列向量,重新定义分割向量 $\mathbf{x}_i$ 为:

$$\mathbf{x}_i = \begin{cases} \frac{1 + \mathbf{X}}{2}, & i \in A \\ \frac{1 - \mathbf{X}}{2}, & i \in B \end{cases} \quad (13)$$

令:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{D}^{\frac{1}{2}} ((1 + \mathbf{X}) - \frac{k}{1 - k} (1 - \mathbf{X})) \quad (14)$$

式中 $\mathbf{Z}$ 为中间向量。

则式(11)可转化为:

$$f = \min \frac{\mathbf{Z}^T \mathbf{D}^{-\frac{1}{2}} (\mathbf{D} - \mathbf{W}) \mathbf{D}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{Z}}{\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}} \quad (15)$$

令 $\mathbf{L}' = \mathbf{D}^{-\frac{1}{2}} (\mathbf{D} - \mathbf{W}) \mathbf{D}^{-\frac{1}{2}}$,根据瑞利定理(Rayleigh Theorem),目标函数转为:

$$f = \min \frac{\mathbf{Z}^T \mathbf{L}' \mathbf{Z}}{\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}} = \min R(\mathbf{L}', \mathbf{Z}) \quad (16)$$

函数 $R(\mathbf{L}', \mathbf{Z})$ 的最大值等于矩阵 $\mathbf{L}'$ 最大的特征值 $\lambda_{\max}$,而最小值等于矩阵 $\mathbf{L}'$ 的最小的特征值 $\lambda_{\min}$,即:

$$\lambda_{\min} \leq R(\mathbf{L}', \mathbf{Z}) \leq \lambda_{\max} \quad (17)$$

求解目标函数*f*的数值可以转化为求函数 $R(\mathbf{L}', \mathbf{Z})$ 的最小值 $\lambda_{\min}$, $\mathbf{L}'$ 与 $\mathbf{L}$ 有相似的性质,其中 $\mathbf{Z} = \mathbf{D}^{1/2} \mathbf{y}$, $\lambda_{\min}$ 可以由式(18)求得。

$$\mathbf{L} \mathbf{y} = \lambda \mathbf{D} \mathbf{y} \quad (18)$$

式中 $\mathbf{y}$ 为特征向量。

由于 $\mathbf{L}$ 存在为0的特征根,其物理意义是把全部节点划分到同一个子图,得到的割集为空,显然这种分割不合理。针对以上问题引入Fiedler特征向量^[22],即是第二小特征根 $\lambda_{\min 2}$ 对应的特征向量为 $\mathbf{y}_F$,根据Fiedler特征向量 $\mathbf{y}_F$ 可以找到最优分割的线性方向,沿着这个方向搜索分割点把图划分成两个子系统。令:

$$\mathbf{K} = \mathbf{y}_F + \theta \quad (19)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为 $n \times 1$ 向量; $\mathbf{y}_F$ 为第二小特征向量; θ 为

为关键输电断面。因此,该安全风险指标可以作为关键输电断面和非关键输电断面的评价指标。

基于规范切对 n 节点系统进行双向分区(two-way partitioning)时,会产生 $n-1$ 个不同的分区断面,但该算法只取最优分区断面作为关键输电断面,忽略了对其余的分区断面进行关键程度判别。本文针对上述算法的不足进行改进,首先按照规范切目标值从小到大的顺序对 $n-1$ 个分区断面进行排序,按顺序对分区断面的线路进行 $N-1$ 安全校验,得到开断分布因子 α_{l-k} 并计算安全风险指标 β ,当 $\beta > 1$ 时,把该分区断面选定为关键输电断面。

2.4 关键输电断面识别流程

综上所述,本文提出了一种基于改进规范切与安全风险指标的关键输电断面辨识方法。该方法既可以对当前运行场景进行在线识别,又可以对大量历史运行场景离线识别,从而获得电网所有的关键输电断面。关键输电断面的识别流程如图3所示。

3 算例分析

3.1 IEEE 39节点系统算例

为了验证本文识别关键输电断面(识别断面)结果的合理性和准确性,首先以IEEE 39节点系统为例,与文献[26]的关键输电断面(参考断面)识别结果进行对比。文献[26]基于线路传输介数辨识脆弱线路,采用前 k 最短路径法和开断分布因子法,搜索与脆弱线路联系密切的线路割集组成关键输电断面。

本文采用以上标准算例的系统母线和支路等参数,通过调用MATPOWER计算节点电压和支路潮流,然后构建系统拓扑图的权值矩阵和拉普拉斯矩阵,采用改进规范切的分区方法进行分区,最后基于安全风险指标来筛选关键输电断面。采用本文方法得的识别断面与参考断面结果对比如表1所示。

从表1可以看出本文方法得到6个识别断面,而参考断面为5个,其中两种方法所得关键输电断面1(6-11, 13-14)、2(10-11, 10-13)、3(2-25, 26-27)完全相同。两种方法所得关键输电断面分布如图4所示,其中白点表示发电机节点,黑点表示负荷节点,红色虚线为相同的关键输电断面,黄色虚线、蓝色虚线分别其他识别断面和参考断面。

通过安全风险指标对比分析可知,本文方法所得识别断面的安全风险指标值均大于1,而参考断

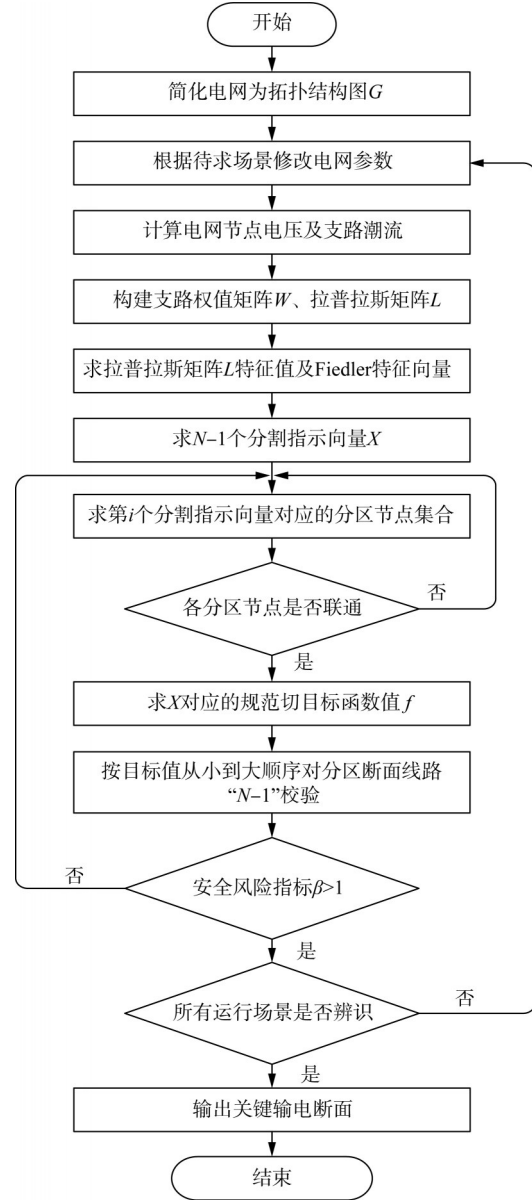


图3 关键输电断面的识别流程

Fig. 3 Identification process of KTS

面有2个未达到指标值1,其中参考断面5(16-21, 16-24)的安全风险指标仅为0.68,可以排除为关键输电断面。在 $N-1$ 故障情况下,识别断面均存在越限线路,而参考断面4虽然安全风险值(0.91)较高,但不存在断面越限线路,亦可排除。

识别断面4(16-21, 23-24)与参考断面5(16-24, 21-22)进行对比分析其关键程度。由图4可知,两个输电断面为连接节点16、21、22、23、24的4条支路组合,即是图的最优分割问题。4条支路有功潮流分别为 $P_{16-21}=330$ 、 $P_{23-24}=354$ 、 $P_{16-24}=43$ 、 $P_{21-22}=604$,显然识别断面4(16-21, 23-24)的有功

表 1 两种方法所得关键输电断面辨识结果比较

Tab. 1 Comparison of the KTS between the two methods

方法	序号	关键输电断面	安全风险指数	$N-1$ 越限线路
文献 [26]	1	6-11, 13-14	1.39	$l_{13-14}^{6-11}, l_{6-11}^{13-14}$
	2	10-11, 10-13	1.09	$l_{10-13}^{10-11}, l_{10-11}^{10-13}$
	3	2-25, 26-27	1.01	l_{2-25}^{26-27}
	4	5-6, 6-7, 13-14	0.91	无
	5	16-21, 16-24 或 16-24, 21-22	0.68/1.05	无/ l_{16-24}^{21-22}
本文 方法	1	6-11, 13-14	1.39	$l_{13-14}^{6-11}, l_{6-11}^{13-14}$
	2	10-11, 10-13	1.09	$l_{10-13}^{10-11}, l_{10-11}^{10-13}$
	3	2-25, 26-27	1.01	l_{2-25}^{26-27}
	4	16-21, 23-24	1.15	$l_{23-24}^{16-21}, l_{16-21}^{23-24}$
	5	6-11, 4-14, 16-17	1.06	$l_{4-14}^{6-11}, l_{6-11}^{4-14}$
	6	1-2, 2-3, 26-27	1.07	l_{2-3}^{26-27}

注：关键输电断面加粗部分为两种方法辨识相同的线路， l 的右上标表示断开线路，右下标表示功率越限线路。

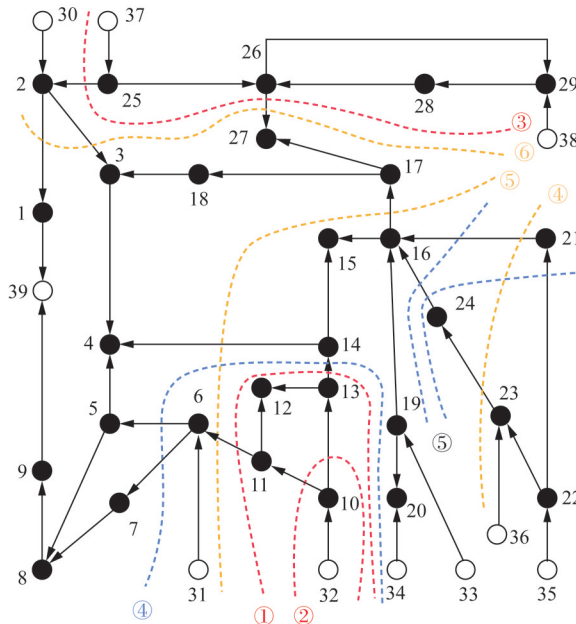


图 4 两种方法所得关键输电断面分布图

Fig. 4 Distribution of KTS obtained by the two methods

功率潮流更大，且安全风险值更高。虽然本文方法所得结果更优，但考虑到两个断面在 $N-1$ 故障情况下都存在越限风险，均可纳入重点监控。

通过以上方法比较分析可知，本文方法所辨识的关键输电断面潮流大、安全风险高，符合关键输电断面的定义。其次，本文方法在算法流程上加入了安全风险指标来筛选关键输电断面和非关键输电断面，确保了结果准确性，同时尽可能避免了误选和漏选问题。

3.2 广东电网算例

为了验证本文方法在实际电网中的有效性，本文选择了含有高比例新能源的广东沿海某市电网作为算例。电源构成包括 1 个抽水蓄能 (1 200 MW)、2 个火电机组 (2 520 MW)、3 个大规模海上风力发电场 (3 000 MW)、多个光伏电站和陆上风电场 (358 MW)，总装机容量约为 7 300 MW，新能源装机占比为 49 %。将该电网 220 kV 及 500 kV 的主要站点和线路简化为 23 个节点和 34 条支路，采用本文方法对该电网进行关键输电断面辨识。

3.2.1 典型运行方式下的关键输电断面

在实际电网运行中，专业人员通常选择夏季最高负荷 (夏大) 运行方式下进行 $N-1$ 校验来识别关键输电断面。因此，首先对夏大运行方式下的实际电网进行关键输电断面的识别。计算结果显示，采用本文的方法成功将该电网划分为 5 个区域，按照分区的顺序对节点重新排序，得到排序后的权值矩阵 W 。该权值矩阵的三维图及其俯视图如图 5 所示。

按分区结果排序的权值矩阵 W 的三维图及其俯视图清晰地展示了支路权值以及不同分区之间的连接关系。在图 5(a) 中横纵坐标为按照分区排序后的节点编号，垂直坐标表示两节点之间支路的权值，权值越高说明两个节点之间的联系越紧密，两个节点划分到同一个分区的可能性越大。图 5(b) 为俯视图，圆点表示两节点间的支路并对称分布在对角线附近，图中 5 个方框表示 5 个分区及包含的节点和支路，框内表示同一个分区节点之间的连接关系，框外的点表示不同分区之间的联络线；如分区 5 和分区 2 之间的联络线为输电线路为 5-6，且该输电线路权值很低，是连接两个分区之间的薄弱环节。显然区内节点数较多且垂直坐标数值较大，说明区内节点联系较紧密，而分区之外的节点数少且联系较为松散，因此该算法能根据节点之间的联系紧密程度来分区。

夏大运行方式下系统拓扑结构分区结果如图 6 所示，红色箭头表示分区之间输电断面线路潮流方向，支路数值表示有功潮流大小。通过分析节点所属行政区域可知，除了分区 2，其他分区节点都在同一个行政区域，说明了该算法能基于节点之间的电气距离进行分区。

基于上述分区结果得到夏大方式下的输电断面，即分区之间的输电线路集合，其中安全风险指标

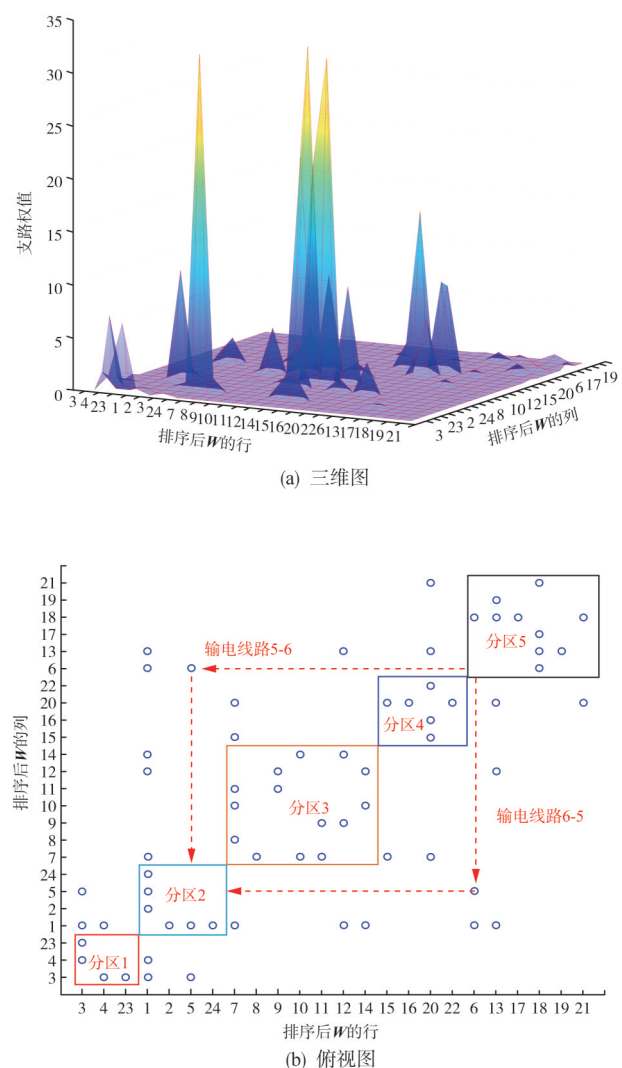


图5 权值矩阵的三维图及其俯视图

Fig. 5 Three-dimensional diagram and its top view of the weight matrix

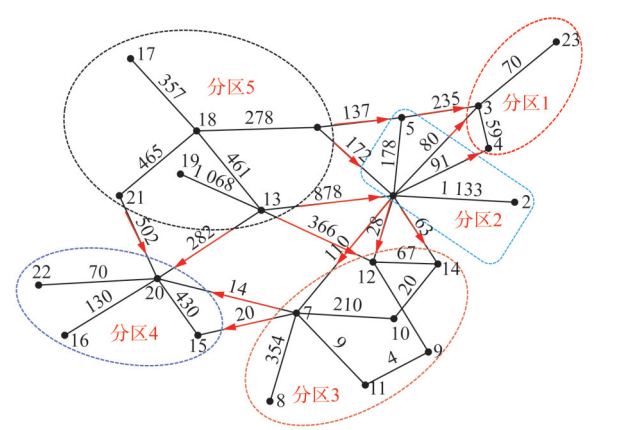


图6 夏大方式下的电网分区图

Fig. 6 Network partition diagram under the summer peak load operating mode

大于1的输电断面为关键输电断面。夏大方式下输电断面识别结果如表2所示。

表2 夏大方式下输电断面识别结果

Tab. 2 Identification results of transmission section under the summer peak load operation mode

序号	断面所在分区	输电断面	断面潮流/MW	线路负载率	安全风险指标
1	分区2,5	1-6,1-13,5-6	171,878,136	0.90,0.50,0.47	1.11
2	分区1,2	1-3,1-4,3-5	80,90,371	0.65,0.40,0.85	1.01
3	分区4,5	20-21,13-20	501,288	0.38,0.21	0.61
4	分区2,3,5	1-13,12-13	878,396	0.30,0.27	0.46
5	分区2,3	1-7,1-12,1-14	110,28,62	0.08,0.06,0.06	0.42
6	分区3,4	7-20,7-15	14,20	0.01,0.03	0.35

由表2可知,夏大典型运行方式下共识别出6个输电断面,其中输电断面1和2安全风险指标值大于1,即是属于关键输电断面。由断面潮流值可知,输电断面1、2、3、4潮流较大,而断面5和6断面潮流较小;由断面线路负载率可知,断面1和2的线路最大负载率分别为0.9和0.85,断面越限风险较高,而断面3、4、5、6的负载率较小,断面越限的风险较小。因此,输电断面1和2具有断面潮流大、负载率高和安全风险高的特点,可以辨识为关键输电断面,同时说明安全风险指标的有效性。

3.2.2 风电出力波动对关键输电断面的影响分析

大规模风电并网可能导致该市电网的关键输电断面频繁转移。海上风电出力具有间歇性和不确定性,该市曾出现海上风电集群在1h内由接近0到满发的出力情况。如图7所示,选取该市夏季最高负荷日96个时段风电场出力波动较大时段,分析关键输电断面变化情况。

图7中,红色方框为风电出力波动较大的1h中4个时段,标为时段场景42、43、44、45。分别对4个时段场景进行关键输电断面辨识,得到1h内关键输电断面变化情况,如表3所示。

由表3可知,4个时段场景共有3个识别断面,识别断面随着时段场景的变化发生转移。海上风电出力受极端天气影响较大,导致系统潮流快速变化,关键输电断面随之发生转移,给关键输电断

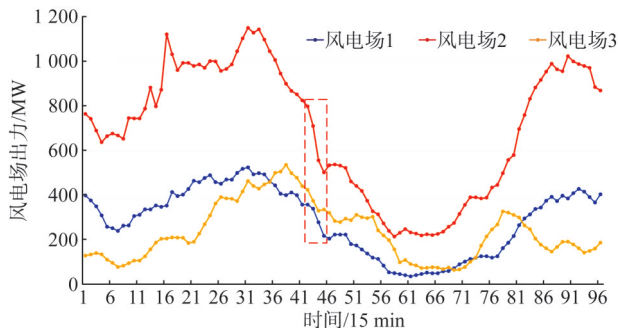


图7 96时段风电场出力折线

Fig. 7 Line chart of 96-hour wind farm power outputs

表3 1 h内关键输电断面变化情况

Tab. 3 Changes in the KTS over one hour

序号	时段场景 42	时段场景 43	时段场景 44	时段场景 45
1	1-6, 5-6, 13-18	1-6, 5-6, 13-18	1-3, 1-4, 3-5	1-6, 5-6, 13-18
2	1-3, 1-4, 3-5	1-5, 1-6, 1-13	1-5, 1-6, 1-13	1-5, 1-6, 1-13

面识别和控制带来了严峻挑战。

3.3.3 多场景下的关键输电断面筛选

该电网实际纳入监控的关键输电断面(监控断面)为8个,而在夏大典型场景采用本文方法所得的识别断面仅为3个,因此夏大典型场景所得识别断面不能覆盖所有场景下的监控断面。本文根据该电网的电源出力和负荷需求的历史数据,采用蒙特卡洛抽样的方式生成1 000个场景,所得场景集合包含了所有的极端场景^[27],筛选所有场景的关键输电断面并统计其出现的概率。监控断面与识别断面的辨识结果比较如表4所示。

由表4可知,在多场景下共筛选出5个识别断面,其中识别断面2(1-3, 1-4, 3-5)与监控断面4相同,识别断面5(1-5, 1-6, 1-13)为新识别断面。

表4 监控断面与识别断面辨识结果比较

Tab. 4 Comparison of monitoring section and identification section recognition results

序号	监控断面	识别断面	出现概率/%	结果对比
1	1-6, 13-18			
2	5-6, 13-18	1-6, 5-6, 13-18	15.3	覆盖
3	1-6, 5-6			
4	1-3, 1-4, 3-5	1-3, 1-4, 3-5	11.0	相同
5	1-6, 20-21			
6	5-6, 20-21	1-6, 5-6, 20-21	0.7	覆盖
7	1-6, 1-13			
8	5-6, 1-13	1-6, 1-13, 5-6	0.5	覆盖
9		1-5, 1-6, 1-13	9.1	新识别

识别断面1、3和4分别对多个监控断面进行合并监控,在减少监控断面数量的同时,具有更好的监控效果。如识别断面1(1-6, 5-6, 13-18)合并监控断面1、2和3后更加准确高效;对识别断面1的3条线路进行 $N-1$ 校验可知,3条线路之间的开断分布因子均大于0.2,当一条线路断路时潮流迅速转移到其他两条线路,由此说明识别断面1的3条线路之间联系密切,但监控断面1、2和3只是对其中两条线路进行监控,即监控断面存在漏选线路的情况。

通过对1 000个场景所得识别断面进行统计分析,识别断面1出现的概率最大为15.3%,识别断面4出现的概率最小为0.5%,其中新增识别断面5出现的概率为9.1%,即识别断面5存在较高的断面越限风险,应当纳入监控断面。

4 结论

本文针对电力系统关键输电断面辨识问题,提出了一种基于改进规范切与安全风险指标的关键输电断面辨识方法。该方法的优点包括:1)采用了改进规范切的谱聚类算法对电网进行分区,求解难度低。2)在构建支路权值时充分考虑了节点电压和支路有功潮流,能够充分反映节点之间的紧密联系,从而提高了模型的准确性。3)针对电网分区形成众多的输电断面,建立了关键输电断面的安全风险评价指标,能够快速筛选关键输电断面和非关键输电断面。4)在分区的过程对分区内部断面进行搜索,从而避免漏选关键输电断面。

本文方法在实际电网的关键输电断面识别的工程应用中得到了验证,不但能够准确高效地识别电网目前在运行监控的关键输电断面,而且能够筛选出运行人员未发现且存在较高风险的关键输电断面,从而帮助运行调度人员消除风险,提高监控效率。

参考文献

- [1] 雷微宇,周剑,梅勇,等.“3·3”中国台湾电网大停电事故分析及启示[J].南方电网技术,2022,16(9):90-97.
LEI Aoyu, ZHOU Jian, MEI Rong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Chinese Taiwan power grid on March 3, 2022 [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 90-97.
- [2] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等.美国得州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41

- (12): 4033 – 4043.
WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033 – 4043.
- [3] 邱建, 朱泽翔, 郭铸, 等. 背靠背柔性直流交流断面失电判别系统设计与验证[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 1 – 8.
QIU Jian, ZHU Zexiang, GUO Zhu, et al. Design and validation of ac section power loss discrimination system for back to back VSC HVDC project [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 1 – 8.
- [4] 周毓敏, 邓韦斯, 吴云亮, 等. 基于深度学习的断面约束概率快速预警方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(9): 45 – 52.
ZHOU Yumin, DENG Weisi, WU Yunliang, et al. Fast probabilistic pre-warning method for transmission capacity constraints based on deep learning [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(9): 45 – 52.
- [5] 赵光远, 吴旭东, 刘友波. 基于改进GN算法的电网关键输电断面辨识方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 70 – 76.
ZHAO Guangyuan, WU Xudong, LIU Youbo. Identification method of power grid key transmission sections based on improved GN algorithm [J]. Smart Power, 2021, 49(9): 70 – 76.
- [6] 王彬, 郭文鑫, 刘文涛, 等. 基于K-邻近法的电网关键断面在线分布式发现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 113 – 118.
WANG Bin, GUO Wenxin, LIU Wentao, et al. Power system distributed key section detection online based on K nearest neighbor algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 113 – 118.
- [7] YU M, ZHANG S, SHI F, et al. Key transmission section search based on graph theory and PMU data for vulnerable line identification in power system [J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2023(10): 20 – 33.
- [8] 鲍颜红, 张金龙, 任先成, 等. 基于EEAC的暂态稳定关键断面在线识别[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 33 – 38.
BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, REN Xiancheng, et al. Online key transmission section identification for transient stability based on EEAC [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8): 33 – 38.
- [9] 胡润滋, 马晓忱, 孙博, 等. 基于特征选择的暂态安全评估方法及其可解释性研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 755 – 763.
HU Runzi, MA Xiaochen, SUN Bo, et al. Transient safety assessment and its interpretability based on feature selection [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 755 – 763.
- [10] 刁晗, 肖谭南, 黄少伟, 等. 数据驱动的电力系统关键断面筛选[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4035 – 4046.
DIAO Han, XIAO Tannan, HUANG Shaowei, et al. Data-driven searching for power system key transmission sets [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4035 – 4046.
- [11] 程若发, 付鑫. 多支路同时断开潮流转移输电断面快速搜索[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(7): 62 – 71.
CHENG Ruofa, FU Xin. Fast search of transmission section in power flow transferring resulting from simultaneous multi-branch removal [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(7): 62 – 71.
- [12] GANG L, DONGYUAN S, JINFU C, et al. Automatic identification of transmission sections based on complex network theory [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(7): 1203 – 1210.
- [13] 王杰, 丁明, 孙磊, 等. 基于改进聚类算法的关键输电断面搜索方法[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 86 – 94.
WANG Jie, DING Ming, SUN Lei, et al. Key transmission section search strategy based on improved clustering algorithm [J]. Electric Power, 2022, 55(6): 86 – 94.
- [14] PAN L, HAN Z, SHANSHAN Z, et al. An optimal allocation method for power distribution network partitions based on improved spectral clustering algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023(123): 1064 – 1073.
- [15] 王振浩, 张明泽, 杜虹锦, 等. 考虑柔性直流落点约束的最优主动解列断面搜索算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 57 – 66.
WANG Zhenhao, ZHANG Mingze, DU Hongjin, et al. A searching algorithm for optimal controlled islanding surfaces considering VSC-HVDC terminal constraint [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 57 – 66.
- [16] 刘扬, 徐潇源, 马洪艳, 等. 基于谱聚类与功率传输分布因子的电网静态等值[J]. 现代电力, 2018, 35(3): 24 – 31.
LIU Yang, XU Xiaoyuan, MA Hongyan, et al. Power system static equivalence based on spectral clustering and power transfer distribution factors [J]. Modern Electric Power, 2018, 35(3): 24 – 31.
- [17] 白璐, 赵鑫, 孔钰婷, 等. 谱聚类算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(14): 15 – 26.
BAI Lu, ZHAO Xin, KONG Yuting, et al. Survey of spectral clustering algorithms [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(14): 15 – 26.
- [18] 周挺, 戴玉臣, 徐伟, 等. 考虑多重故障的热稳关键断面在线识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 45 – 53.
ZHOU Ting, DAI Yuchen, XU Wei, et al. Online identification method of a key transmission section considering multi-faults [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 45 – 53.
- [19] 梁海镇, 陈丽丹, 李峰, 等. 基于最大流最小割的电网静态安全关键断面辨识方法[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1084 – 1092.
LIANG Haizhen, CHEN Lidan, LI Feng, et al. Identification of key transmission sections for power system static security based on maximum flow and minimum cut [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1084 – 1092.
- [20] WU W, YANG D, YU Z, et al. Determination of key transmission section and strong correlation section based on matrix aggregation algorithm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(153): 109387.1 – 109387.9.
- [21] SHI J, MALIK J. Normalized cuts and image segmentation [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(8): 888 – 905.
- [22] JIA H, DING S, XU X, et al. The latest research progress on spectral clustering [J]. Neural Computing and Applications, 2014(24): 1477 – 1486.
- [23] SAMUDRALA A N, AMINI M H, KAR S, et al. Distributed outage detection in power distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5124 – 5137.
- [24] FABJAWSKA A. Normalized cuts and watersheds for image segmentation [C] // IET Conference on Image Processing, July 3 – 4, 2012, London, UK. London: IET Digital Library, 2012:

- 1-6.
- [25] 刘剑, 李兴源, 王成, 等. 融于层次分裂过程的多类型输电断面搜索方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 566-573.
LIU Jian, LI Xingyuan, WANG Cheng, et al. A method of searching multi-type transmission sections based on hierarchical split [J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 566-573.
- [26] 王红壮, 刘天琪, 何川, 等. 基于改进脆弱线路辨识的关键输电断面确定方法[J]. 现代电力, 2020, 37(3): 294-302.
WANG Hongzhuang, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Key transmission section determination method based on improved vulnerable line identification [J]. Modern Electric Power, 2020, 37(3): 294-302.
- [27] 鲍颜红, 张金龙, 徐泰山, 等. 考虑风电出力不确定性的在线暂态稳定风险评估方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11): 42-48.
BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, XU Taishan, et al. Online transient stability risk assessment method considering the uncertainty of wind power output [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11): 42-48.

收稿日期: 2024-01-16; 网络首发日期: 2024-07-15

作者简介:

林继良(1992), 男, 硕士研究生, 从事新能源发电并网可靠性研究, jilianglin@foxmail.com;

刘敏(1966), 男, 通信作者, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力市场、能源电力大数据、综合能源系统, liumin@jnu.edu.cn;

刘晓欣(1986), 男, 高级工程师, 博士, 从事电力系统分析与调控技术研究工作, 1149410854@qq.com。

(上接第 19 页 Continued from Page 19)

- [28] 李丹奇, 郑建勇, 史明明, 等. 电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 75-83.
LI Danqi, ZHENG Jianyong, SHI Mingming, et al. Prediction of time and space distribution of electric vehicle charging load [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 75-83.
- [29] 杜娟娟, 裴云庆, 王兆安. 电动车铅酸蓄电池的脉冲快速充电设计[J]. 电源技术应用, 2005(3): 28-31.
DU Juanjuan, PEI Yunqing, WANG Zhaoan. Design of pulse fast charging for lead-acid batteries of electric vehicles [J]. Application of Power Supply Technology, 2005(3): 28-31.
- [30] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [31] 张夏韦, 梁军, 王要强, 等. 电动汽车充电负荷时空分布预测研究综述[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 161-173.
ZHANG Xiawei, LIANG Jun, WANG Yaoqiang, et al. Overview of research on spatial-temporal distribution prediction of electric vehicle charging [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 161-173.
- [32] 齐彩娟, 张泽龙, 吕干云, 等. 计及用户行为决策的电动汽车负荷时空分布建模[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 170-177.
QI Caijuan, ZHANG Zelong, LÜ Ganyun, et al. Spatial-temporal modeling of EV load considering user behavior decision [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 170-177.

收稿日期: 2024-01-07; 网络首发日期: 2024-06-25

作者简介:

朱聆(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性, 2270319202@qq.com;

汪隆君(1982), 男, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统规划与可靠性, epwlj@scut.edu.cn;

陈志峰(1974), 男, 通信作者, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统保护与控制, chenzf@gcu.edu.cn。