

适应高比例可再生能源的价区划分与功率转移权重近似计算研究

纪鹏¹, 黄成², 孙田^{1,3}, 赵天辉², 周前², 陈启鑫³

(1.北京电力交易中心有限公司,北京 100031;2.国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏南京 210036;
3.清华大学电机系新型电力系统运行与控制全国重点实验室,北京 100084)

摘要:在全国统一电力市场的建设背景下,省间市场的融合程度日益加深。在组织省间现货交易时,考虑到各省信息安全及有限算力,需要对节点网络进行较为准确的区域等值,并嵌入到省间现货的出清模型中。区域内部节点对等值区域的功率转移权重具有时变特性且对出清计算精度至关重要,传统方法通常在每日采用一个固定均值作为近似已经无法满足要求。可再生能源比例不断提升加剧系统运行的不确定性,具体体现在潮流转移变化频繁、阻塞多变场景增加,进一步影响传统固定化的区域等值方法的效果。为此,提出适应高比例可再生能源的价区划分与近似计算方法。首先,基于共识聚类的电力市场典型阻塞场景构建,提出电力市场区域等值的价区划分方法。然后,在此基础上提出节点对区域功率转移权重的改进计算方法,通过对节点特性分类计算功率转移权重矩阵,减缓其随注入功率时变导致计算精度降低的问题。最后,通过对 IEEE 118 节点算例进行验证所提模型的有效性。

关键词:电力市场;价区划分;转移分布因子;模型等值

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.002 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2023)06-0012-08

Study on price zone partition method and improved zonal power transfer distribution factor considering the uncertainty of electricity market

Ji Peng¹, Huang Cheng², Sun Tian^{1,3}, Zhao Tianhui², Zhou Qian², Chen Qixin³

(1.Beijing Power Exchange Center Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2.Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210036, China; 3.State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Under the background of constructing a unified national electricity market, the integration between provincial markets has been deepening. When organizing inter-provincial spot trading, it is necessary to accurately delineate the regional equivalent values of the node network, taking into account each province's information security and limited computing power. These equivalent values are then embedded into the clearance model of inter-provincial spot trading. use congestion power transfer weights of internal nodes towards the price zone have time-varying characteristics and are The transfer distribution factor that can meet the requirement of computing efficiency. In this paper, we first crucial for the accuracy of the clearance calculation. Traditional methods often use a daily fixed mean value as an approximation, which is

收稿日期:2023-09-01;修回日期:2023-10-10

基金项目:国家电网公司总部科技项目(1400-202218246A-1-1-ZN)

通信作者:陈启鑫(1982—),男,教授,博士,主要从事电力市场、低碳电力技术、电力系统调度方面的研究;E-mail:qxchen@tsinghua.edu.cn

no longer sufficient to meet the requirements. The increasing proportion of renewable energy exacerbates the uncertainty of system operation, manifested in frequent changes in power flow transfer and an increase in volatile congestion scenarios, which will further affect the effectiveness of traditional fixed regional equivalent methods. This paper proposes a price zone division and approximation calculation method adapted to a high proportion of renewable energy. Firstly, based on consensus clustering, typical congestion scenarios in the electricity market are constructed, and a price zone equivalent partition method is proposed. Secondly, an improved calculation method for power transfer weights of internal nodes towards the price zone is presented. The problem of reduced calculation accuracy due to time-varying power injections is avoided by classifying node characteristics and calculating the power transfer weight matrix accordingly. Finally, the effectiveness of the proposed model is verified through validation using the IEEE 118-node case.

Key words: electricity market; price zone partition; transfer distribution factor; model equivalence

在“碳达峰、碳中和”战略目标背景下,可再生能源发展是实现中国能源低碳转型的关键环节。受制于中国源荷在空间上的差异化分布,亟需通过构建全国统一电力市场实现更大范围内电力资源的共享互济和优化配置^[1],促进可再生能源的消纳。目前,省间电能量市场以中长期交易为主,随着省间市场由两级运作向联合出清逐步过渡以及可再生能源的快速发展^[2-6],省间现货市场的比重将逐渐升高。

在组织省间现货交易时,考虑到各省信息安全及有限算力,需要对节点网络进行较为准确的区域等值,并嵌入到省间现货的出清模型中。等值区域模型出清完毕后,还需要形成能够有效反映区域内节点对等值区域功率映射的功率转移权重,确保等值的计算精度。

精确反映价区间阻塞的价区分是统一电力市场建设的基础。在全国统一电力市场出清时,同一价区内往往默认无阻塞,然而随着省间现货交易量逐渐增加以及可再生能源比例快速提升,潮流不确定性也进一步上升,主要体现在潮流多变、临时性阻塞断面的场景概率增高等时变特征,导致交易结果和实际运行有所偏差。因此需要精细化考虑各个时段的阻塞信息,结合阻塞线路的变化对价区分模式进行重构,根据实际情况自适应地划分价区,提高分区的合理性及区域价格的有效性。

目前,国内并未详细考虑价区分,而是以省作为等值节点参与省间现货。这主要是借鉴了欧洲统一电力市场的建设思路,采用价区平衡的模式进行交易出清^[7]。一般模式下,以行政区域边界作为划分原则最为直观,方便市场参与者理解^[8-9]。考虑到行政区域内部的阻塞,也有研究提出通过阻塞

断面进行划分。

随着市场模型精细化程度不断上升,也有学者提出根据不同因素定义节点相似度,例如节点电价、灵敏度^[10]等,进一步根据不同节点间的相似程度进行聚类。常见的聚类算法有模糊聚类法^[11]、层次聚类法^[12]、基于向量相似度的节点聚类^[13]等。此外,也有相当一部分研究面向电网功率平衡和电压控制进行分区划分^[14-16]。然而,上述文献均未能很好地处理分区的时变性,不能够根据实际情况自适应地划分价区。

在价区分的基础上,需要进一步考虑确保等值出清的计算精度,即如何实现省间或价区间交易结果到节点功率的精确映射,这对出清计算的准确性至关重要。欧洲引入了功率转移权重(injection shift key, ISK),以反映节点功率到区域功率的映射关系。在出清之前,需要先设置ISK矩阵才能计算区域的分布因子矩阵。然而,在出清过程中,区域内的发电和负荷空间分布会随时间变化,相应的真实的ISK也会随之改变并与预设的ISK产生偏差。因此,ISK的时变特性是造成区域出清偏差的主要原因,需要构建时不变或弱时变特性的ISK矩阵,以提高市场出清的准确性。

目前,欧洲在日前出清之前,根据历史数据设置一个相对固定的ISK矩阵进行近似计算。然而,随着市场参与主体的多元化,节点功率的波动性加剧,将进一步降低功率转移权重和出清计算的精确性^[17]。国内外相关文献对该模型进行了广泛的讨论。文献[18]将发电量和负荷同时纳入考虑,并将ISK确定为相对于区域平衡的节点贡献。文献[19-20]提出了ISK不同定义和设定方法,并量化分析了实际效果。文献[21]论述了采用日平均ISK矩

阵对计算精度的影响,并提出了以电源和负荷特性分类的ISK计算方法。然而,目前的文献中价区等值方法并未对功率转移权重的时间变化特征提出有效的解决方案。

为了解决省间现货价区划分问题以及ISK时变特性导致出清偏差问题,本文提出一种新的解决方案。其中,一是通过共识聚类合理地划分价区,二是通过改进ISK的计算方法更好地适应其时变特征。具体来说,本文首先构建现货市场出清模型,并根据出清结果提出基于典型阻塞场景的共识聚类市场价区划分方法。然后针对传统方法使用固定ISK近似计算的不足,本文提出通过节点特性分类计算节点对区域功率转移权重的改进方法,以解决传统方法在注入功率时变时导致计算精度降低的问题。最后,以IEEE 118节点系统为例,验证了所提方法的有效性。通过这些方法,本文旨在提高省间现货交易价区划分的准确性以及对时变特性的适应能力,为电力市场出清的精确性提供新的解决途径。

1 基于共识聚类的电力市场分区方法

1.1 电力现货市场出清模型

为实现市场运行的准确模拟,本文采用安全约束经济调度(security constrained economic dispatch, SCED)模型模拟市场出清过程,根据风光历史数据设置其出力曲线,根据各类电源变动成本设置报价行为。

SCED以最小化发电成本为目标,确定满足负荷需求的机组实时出力计划,目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_{i,t}(P_{i,t}) \quad (1)$$

式中, N 为机组数目; T 为时段数; $P_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的有功功率; $C_{i,t}(P_{i,t})$ 为机组 i 在时段 t 的运行成本。

约束条件包括系统负荷平衡约束、机组出力上、下限约束、机组爬坡约束、线路潮流约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N P_{i,t} = D_t \\ P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \\ P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta P_i^U, P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta P_i^D \\ -P_i^{\max} \leq \sum_{i=1}^N (G_{li}P_{i,t} - G_{lk}D_{k,t}) \leq P_l^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的有功功率; D_t 为时段 t 的系统负荷; $P_{i,t}^{\min}$ 、 $P_{i,t}^{\max}$ 分别为机组 i 在时段 t 的允许的最小有功功率和最大有功功率; ΔP_i^U 、 ΔP_i^D 为机组 i 最大上爬坡、最大下爬坡速率; P_l^{\max} 为线路 l 的潮流传输极限; G_{li} 为机组 i 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子; G_{lk} 为节点 k 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子; $D_{k,t}$ 为节点 k 在时段 t 的母线负荷值。

1.2 电网阻塞场景构建

市场交易的不确定性以及大规模可再生能源的接入会对系统的潮流分布产生影响,导致输电线路的非常态化阻塞场景概率增加。线路阻塞的波动将进一步影响节点电价的阻塞分量,从而造成节点电价分布的差异。不同时间段的阻塞情况本质上反映了节点的划分结果。共识聚类方法可以将多个聚类划分结果进行再聚类^[22],得到系统的典型阻塞状态,并以此作为划分价区的结果。

电网由节点与线路构成,电网的分区划分本质为各节点的分区划分,即一个包含所有节点的集合 Q 划分为多个包含各个节点的子集, (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) ,且满足:

$$\begin{aligned} Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_n &= Q, \\ Q_i \cap Q_j &= \emptyset, i, j = 1, 2, \dots, k, i \neq j \end{aligned} \quad (3)$$

本文采用节点电价阻塞分量(marginal congestion cost, MCC)作为特征构建阻塞场景集 (S_1, S_2, \dots, S_N) 。MCC通过线路阻塞价格按照功率转移分布因子比例计算得到:

$$\lambda_{i,t} = \sigma_l M_{l,i}^{\text{PTDF}} \quad (4)$$

式中, $\lambda_{i,t}$ 为线路 l 阻塞引起的节点 i 的阻塞分量; σ_l 为线路 l 的阻塞价格; $M_{l,i}^{\text{PTDF}}$ 为功率转移分布因子的第 l 行、第 i 列的元素。当 $\lambda_{i,t} > 0$ 时,表示线路 l 对节点 i 的阻塞分量为正,使得节点 i 电价升高;当 $\lambda_{i,t} < 0$ 时,表示线路 l 对节点 i 的阻塞分量为负,使得节点 i 电价降低。

通过阻塞分量划分系统节点在各时段下的阻塞场景,构建场景集合 (S_1, S_2, \dots, S_N) ,共识聚类即找到一个最优的子集划分 S_t ,使得与其他子集划分之间综合相似度最大,即

$$S_t = \arg \max \sum_{i=1}^N f(S, S_i) \quad (5)$$

式中, $f(S, S_i)$ 为划分子集间相似度。

1.3 共识聚类求解方法

共识聚类对式(5)的划分求解方法如下。

首先,获取节点相似度矩阵^[24]。对于目标区域的 N 种子集划分方法 (S_1, S_2, \dots, S_N) , 定义对应的节点隶属矩阵, $[H^1, H^2, \dots, H^N]$, 用以描述每种划分方法中节点隶属的分区类别, 对于矩阵 H^i 中的元素 H_{mn}^i 有:

$$H_{mn}^i = \begin{cases} 1, & m \in Q_n \\ 0, & m \notin Q_n \end{cases} \quad (6)$$

为获得最大的子集划分相似度, 需构建两节点划分至同一子集的方法, 因而定义在所有的子集划分方法中, 两节点被划分到同一子集的比例为该节点对的节点相似度 S_{node} , 可通过下式求解:

$$S_{\text{node}} = HH^T / N \quad (7)$$

式中, $H = [H^1, H^2, \dots, H^N]$ 为目标区域所有节点隶属矩阵的级联矩阵。

其次, 构建拉普拉斯矩阵。定义度矩阵 D 为节点相似度矩阵的对角矩阵, 其中第 i 个对角元素为与节点 i 相似的其他节点个数, 拉普拉斯矩阵可通过下式求解:

$$L = D - S_{\text{node}} \quad (8)$$

然后, 进行特征值分解。拉普拉斯矩阵 L 为实对称矩阵, 可以进行对角化和特征值分解, 并基于特征向量构建特征矩阵 X 。

最后, 采用 K-means 聚类。使用 K-means 聚类算法将特征矩阵 X 进行聚类, 将每个样本划分到其所属的簇中, 得到最终的分区划分结构。

2 考虑节点特性分类的功率转移权重计算

2.1 ISK 计算方法

根据价区分结果, 将若干个节点等值成一个区域节点, 区域的分布因子矩阵 (power transfer distribution factor, PTDF) 与节点分布因子矩阵的映射关系即为 ISK 矩阵, ISK 矩阵体现了区域内节点发电和负荷空间分布信息, ISK 的计算方式为节点注入功率除以其所在区域发电功率, 即

$$\begin{cases} P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal}} = P_{\text{TDF}}^{\text{Node}} \cdot I_{\text{SK}} \\ I_{n,z,t} = \frac{P_{n,t}^N}{\sum_{n \in z} P_{n,t}^N}, \forall z, \forall n \in z, \forall t \\ F^{\text{Zonal}} = P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal}} \cdot P^{\text{Zonal}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal}}$ 、 $P_{\text{TDF}}^{\text{Node}}$ 分别为区域分布因子矩阵和节点分布因子矩阵; $I_{n,z,t}$ 为 t 时刻区域 z 内节点 n 的功率转移权重; $P_{n,t}^N$ 为区域 z 内节点 n 的注入功率, 其值既可以为正也可以为负; F^{Zonal} 为区域网络潮流矩阵; P^{Zonal} 为区域网络节点注入功率矩阵; I_{SK} 为 ISK 矩阵。需要说明的是, 若节点 n 不在区域 z 内, 则对 z 的 I_{SK} 为 0。ISK 矩阵每列之和恒为 1。

在日前电力市场出清过程中, 需要先知道 I_{SK} 矩阵才能得到区域的分布因子矩阵, 而出清之前, 未来运行日各时段的节点注入功率是未知的。因此, 传统方法通常根据前一天各时段节点有功功率, 计算 I_{SK} 矩阵的平均值用于日前出清计算。

2.2 ISK 改进计算方法

出清过程中, 区域内的发电和负荷空间分布会随时间变化, 相应的 ISK 也会随之改变, ISK 的时变特性是造成区域出清偏差的主要原因。在可再生能源比例的逐渐提高的背景下, 采用前一天各时段 ISK 矩阵平均值进行计算将越来越难以适应出清准确度的要求, 因此需要找到与时段无关或弱相关的 ISK 矩阵。

一般情况下, 同一类别发电或负荷的空间分布随时间的变化小于整个区域内发电和负荷组合的空间分布, 例如一个基荷电源在一天中发电功率相当恒定, 该类节点的 ISK 随时间变化很小, 因此, 对节点特性进行分类求取 ISK 并进行多时段的平均计算, 会损失较小的计算精度。本文提出的通过节点特性分类的 ISK 改进计算方法如下:

$$\begin{cases} P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal}, C} = P_{\text{TDF}}^{\text{Node}} \cdot I_{\text{SK}}^C \\ I_{n,z,t}^C = \frac{P_{n,t}^{N,C}}{\sum_{n \in z} P_{n,t}^{N,C}}, \forall z, \forall n \in z, \forall t \\ F^{\text{Zonal}} = \sum_C P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal}, C} \cdot P^{\text{Zonal}, C} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal}, C}$ 为节点类型 C 的区域分布因子矩阵; $I_{n,z,t}^C$ 为 t 时刻区域 z 内属于类型 C 节点 n 的功率转移权重; $P_{n,t}^{N,C}$ 为区域 z 内类型 C 节点 n 的注入功率; $P^{\text{Zonal}, C}$ 为节点类型 C 的注入功率矩阵; I_{SK}^C 为节点类

型C的ISK矩阵。与传统ISK计算方法一样,也需要预先估计节点注入功率。

设发电相关类别为正,负荷相关类别为负,每个类别的区域注入功率受到该类别发电或负荷限制,即

$$\begin{cases} 0 \leq P_{z,t}^{N,C} \leq \sum_{n \in z} P_{n,t}^{N,C}, \forall z, \forall c \in c_g, \forall t \\ 0 \geq P_{z,t}^{N,C} \geq \sum_{n \in z} P_{n,t}^{N,C}, \forall z, \forall c \in c_l, \forall t \\ P_{z,t}^Z = \sum_{c \in C} P_{z,t}^{Z,C}, \forall z, \forall t \end{cases} \quad (11)$$

3 算例分析

本文采用改进的IEEE 118节点系统验证本文所提方法的有效性,如图1所示,该系统包含186条输电线路,54个发电节点,91个负荷节点。本文修改了部分输电线路的传输容量,以体现阻塞情况。

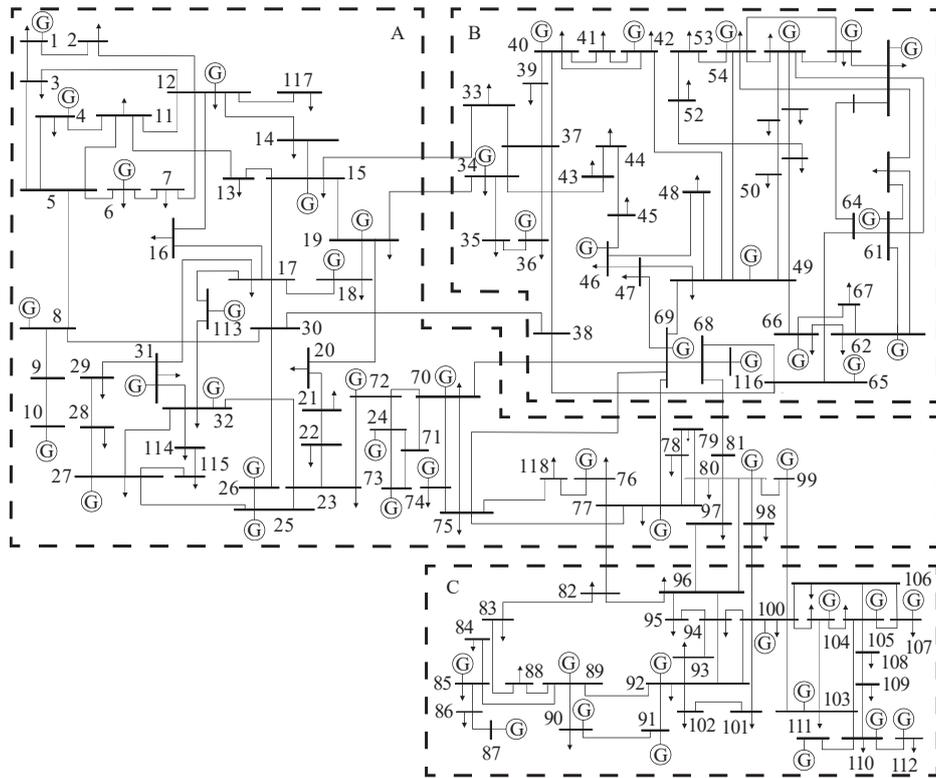


图1 IEEE 118节点拓扑图及价区分

Figure 1 IEEE 118 node topology diagram and price zone partition

3.1 基于共识聚类的价区分

IEEE 118节点系统的日出清阻塞线路潮流分布情况如表1所示,其中共有阻塞线路9条,总阻塞时长93 h,其中线路108、116、120、128、159为重载线路,阻塞时长为9~21 h,线路44、45、54、158为轻载线路,阻塞时长为1~5 h。图1虚线边框为按行政边界划分价区,即对应欧洲电力市场中的各国或中国统一电力市场平台的各省,A、B、C为利用共识聚类构建的典型阻塞分区,不同的阻塞分区反映了网络出现阻塞时各节点的电能稀缺度。由图1可知,按行政边界划分价区,人为地忽略了线路120的阻塞,而线路120为重阻塞线路,这将影响省间现货

市场出清的准确程度,进而增加省内市场的再调度成本。按共识聚类构建的分区,可以有效反映各个线路或断面的阻塞情况,进行更为准确地价区分。需要指出的是,共识聚类的价区分方法可以兼容行政边界,即在行政边界的基础之上再进行一次共识聚类划分,从而更好地指导各省在全国统一电力市场中价区和关键节点的等值建模。除此之外,聚类所考虑的出清信息时段范围和价区数量可以根据实际情况进行调整,例如在阻塞潮流季节性较强时,可以按季度或者按月调整划分价区;如果临时阻塞线路较多,可以酌情增加聚类价区数量,以反映价区划分的精确性。

表1 系统阻塞情况

Table 1 Power system congestion information			
输电线路	注入节点	流出节点	阻塞时段
44	15	33	5
45	19	34	1
54	30	38	4
108	69	70	9
116	69	75	18
120	75	77	16
128	77	82	17
158	98	100	2
159	99	100	21

3.2 ISK改进计算

本节首先用4节点系统展示ISK改进计算方法的详细步骤,再以IEEE 118节点系统验证所提优化方案的有效性。

1) 4节点系统。4节点系统及等值区域网络如图2所示。

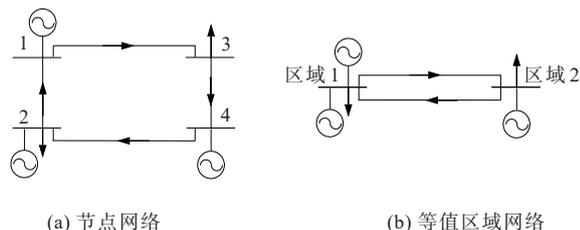


图2 4节点系统及等值区域网络

Figure 2 4 node system and equivalent area network

4节点系统如图2(a)所示,包括3个发电机节点和2个负荷节点,分别为 $P_1=150$ MW, $P_2=50$ MW, $P_4=20$ MW, $L_2=100$ MW, $L_3=120$ MW, 节点1为平衡节点,所有线路阻抗均相等。则节点网络的分布因子矩阵为

$$P_{\text{TDF}}^{\text{Node}} = \begin{bmatrix} 0 & -0.25 & -0.75 & -0.5 \\ 0 & -0.25 & 0.25 & -0.5 \\ 0 & -0.25 & 0.25 & 0.5 \\ 0 & 0.75 & 0.25 & 0.5 \end{bmatrix}$$

另外假设节点1、2和节点3、4分别可以等值成为一个区域节点,如图2(b)所示。则分布因子矩阵修正为

$$P_{\text{TDF}}^{\text{Node}^*} = \begin{bmatrix} 0 & -0.25 & -0.75 & -0.5 \\ 0 & -0.25 & 0.25 & 0.5 \end{bmatrix}$$

根据式(9)可得ISK矩阵和区域分布因子矩阵

$P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal}}$ 分别为

$$I_{\text{SK}} = \begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ -0.5 & 0 \\ 0 & 1.2 \\ 0 & -0.2 \end{bmatrix}, P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal}} = \begin{bmatrix} 0.125 & -0.8 \\ 0.125 & 0.2 \end{bmatrix}$$

区域直流潮流为

$$F^Z = P_{\text{TDF}}^{\text{Node}^*} \cdot I_{\text{SK}} \cdot P^Z = \begin{bmatrix} 92.5 \\ -7.5 \end{bmatrix}$$

改进的ISK计算方法考虑同一类别发电或负荷的空间分布,按最简单的发电节点和负荷节点分类,根据式(10)可得:

$$I_{\text{SK}}^{\text{Gen}} = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 \\ 0.25 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, I_{\text{SK}}^{\text{Load}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

则区域分布因子矩阵为

$$P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal, Gen}} = \begin{bmatrix} -0.625 & -0.5 \\ -0.625 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal, Load}} = \begin{bmatrix} -0.25 & -0.75 \\ -0.25 & 0.25 \end{bmatrix}$$

由此可得区域网络直流潮流为

$$\sum_c P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal, C}} \cdot P_{\text{TDF}}^{\text{Zonal, C}} = \begin{bmatrix} 92.5 \\ -7.5 \end{bmatrix}$$

该方法区域直流潮流计算结果与采用节点网络计算的结果一致。

2) IEEE 118节点系统。本文设置3个场景检验区域等值的计算精度。

场景1 不进行区域等值,直接采用节点细粒度的拓扑网络出清计算,得到各条输电线路的真实潮流。

场景2 进行区域等值,根据前一日已知的节点有功功率计算ISK矩阵平均值,以此平均值出清计算得到区域间联络线潮流。

场景3 进行区域等值,按发电节点和负荷节点分类对ISK进行改进计算,以改进后ISK矩阵出清计算得到区域间联络线潮流。

由图3所示,按ISK矩阵平均值计算得到的区域间联络线潮流与采用节点细粒度的拓扑网络计算值偏差较大,所有区域联络线与真实潮流平均误差为15.12%,对出清计算精度影响较大,给各省级电网带来较大的平衡压力。本文所提的改进ISK计算方法与采用节点细粒度的拓扑网络计算值更为接近,平均误差约为5.58%,有效减缓了ISK矩阵随注入功率时变导致计算精度降低的问题。

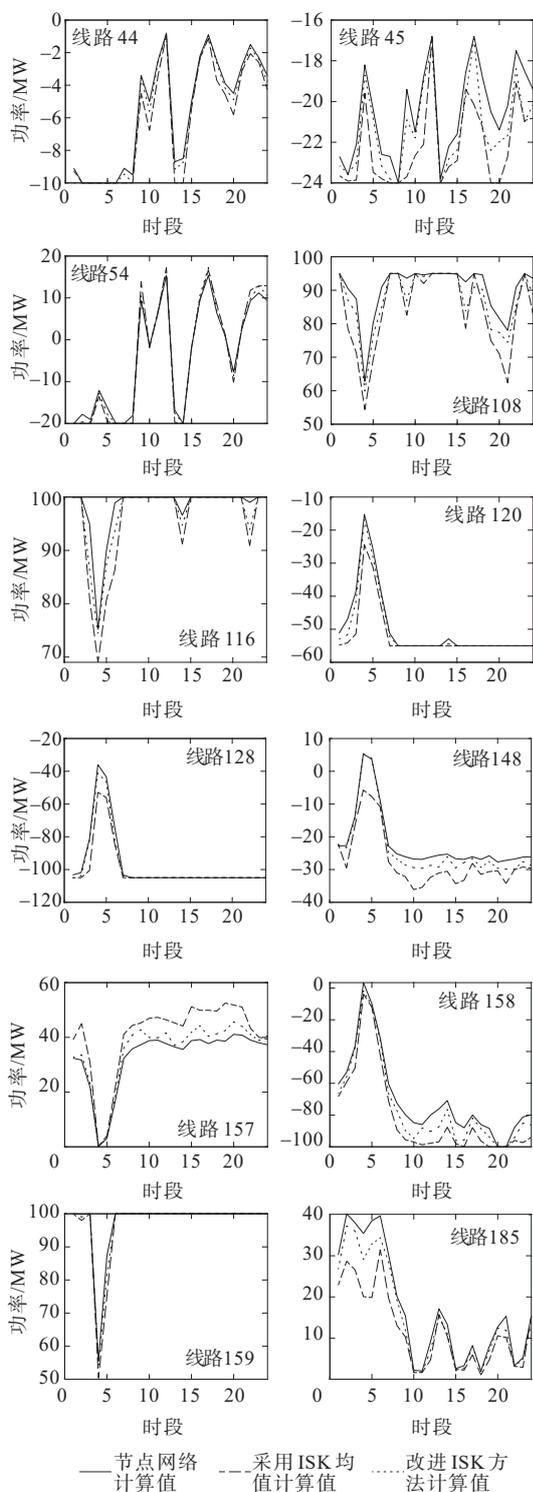


图3 等值区域电网联络线潮流

Figure 3 Power flow of inter-zonal tie line

4 结语

在全国统一电力市场建设中,省间市场的出清结果是省内市场运行的重要边界条件,其中区域的

有效等值以及区域内部节点对等值区域的功率转移权重是影响出清精度的关键。为此本文提出基于共识聚类的区域等值价区划分方法,充分考虑高比例可再生能源接入带来的阻塞场景多变的影响。进一步地提出节点对区域功率转移权重的改进计算方法,通过对节点特性分类计算功率转移权重矩阵,避免了其随注入功率时变导致计算精度降低的问题。未来的工作中,可以根据各个节点的电源特性和负荷用电范式,更加精细化地进行节点特性分类,提高计算精度。希望本文的研究成果,能够为电力市场的建设发展提供有益的借鉴。

参考文献:

- [1] 郑亚先,杨争林,冯树海,等.碳达峰目标场景下全国统一电力市场关键问题分析[J].电网技术,2022,46(1):1-20.
ZHENG Yaxian, YANG Zhenglin, FENG Shuhai, et al. Key issue analysis in national unified power market under target scenario of carbon emission peak[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 1-20.
- [2] 龙苏岩,宋瑜辉,刘宇明,等.从分区定价方法看电价机制中的“反直觉”问题:研究方法及其代理模拟分析[J/OL]. 电力科学与技术学报:1-14[2023-11-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1475.TM.20230329.0906.002.html>.
LONG Suyan, SONG Yuhui, LIU Yuming, et al. "Counter-intuitive" issues in electricity pricing mechanisms from the perspective of zonal pricing methods: research methodology and agent-based simulation studies[J/OL]. Journal of Electric Power Science and Technology: 1-14[2023-11-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1475.TM.20230329.0906.002.html>.
- [3] 郭鸿业,郑可迪,唐庆虎,等.数据驱动的电力市场研究:挑战与展望[J].电力系统自动化,2023,47(1):200-215.
GUO Hongye, ZHENG Kedi, TANG Qinghu, et al. Data-driven research on electricity markets: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 200-215.
- [4] 王怡,杨知方,余娟,等.从优化视角剖析电力市场的定价问题[J].电工技术学报,2023,38(17):4729-4745.
WANG Yi, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Analysis of pricing problems in power market from the perspective of optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4729-4745.
- [5] 夏清,陈启鑫,谢开,等.中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(2):我国跨区跨省电力交易市场的发展途径、交易品种与政策建议[J].电网技术,2020,44(8):2801-2808.
XIA Qing, CHEN Qixin, XIE Kai, et al. Key issues of

- national unified electricity market with Chinese characteristics(2): development path, trading varieties and policy recommendations for inter-regional and inter-provincial electricity markets[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 2801-2808.
- [6] 丁一, 谢开, 庞博, 等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(1): 国外市场启示、比对与建议[J]. *电网技术*, 2020, 44(7): 2401-2410.
DING Yi, XIE Kai, PANG Bo, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics(1): enlightenment, comparison and suggestions from foreign countries[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2401-2410.
- [7] 李竹, 庞博, 李国栋, 等. 欧洲统一电力市场建设及对中国电力市场模式的启示[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(24): 2-9.
LI Zhu, PANG Bo, LI Guodong, et al. Development of unified European electricity market and its implications for China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(24): 2-9.
- [8] 陈洪禹, 张冶, 关艳, 等. 考虑源网荷储效益提升的电力现货市场出清优化模型研究[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(5): 50-57.
CHEN Hongyu, ZHANG Ye, GUAN Yan, et al. Research on clearing optimization model of power spot market incorporating generation, network, load and storage benefit improvement[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(5): 50-57.
- [9] 王清, 李琮琮, 刘松, 等. 基于电力市场交易规则的最优用能策略研究[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(10): 1-7.
WANG Qing, LI Congcong, LIU Song, et al. Research on optimal energy consumption strategy based on transaction rules of electricity market[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(10): 1-7.
- [10] 付蓉, 邱永胜, 李扬. 基于节点电价灵敏度模糊聚类的电价分区方法[J]. *电力需求侧管理*, 2007(3): 19-22.
FU Rong, QIU Yongsheng, LI Yang. A fuzzy clustering method for price partition based on the sensitivity of node price[J]. *Power Demand Side Management*, 2007(3): 19-22.
- [11] 王辉, 沈怡迪, 徐浩成, 等. 基于电力用户细分市场的售电公司最优销售定价策略[J]. *智慧电力*, 2021, 49(7): 44-51.
WANG Hui, SHEN Yidi, XU Haocheng, et al. Optimal pricing strategy for power sale companies based on power consumer segment market[J]. *Smart Power*, 2021, 49(7): 44-51.
- [12] HYUNGSEON O. A new network reduction methodology for power system planning studies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(2): 677-684.
- [13] BART J B, ANDREWSKY M. Network modelling for congestion management: zonal representation versus nodal representation[C]//15th Power Systems Computation Conference, Clamart, France, 2005.
- [14] 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+128.
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, 128.
- [15] 赵晶晶, 贾然, 陈凌汉, 等. 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[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(14): 89-95.
ZHAO Jingjing, JIA Ran, CHEN Linghan, et al. Research on fast partition of reactive power and voltage based on deep learning and an improved K-means clustering algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(14): 89-95.
- [16] PAUL C, ANDREW K. Visualizing the electrical structure of power systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2015, 99: 1-12.
- [17] KLOS M, WAWRZYNIAK K, JAKUBEK M, et al. The scheme of a novel methodology for zonal division based on power transfer distribution factors[C]//IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, USA, 2014.
- [18] BISKAS P N, TSAKOU MIS A, BAKIRTZIS A G, et al. Transmission loss allocation through zonal aggregation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(10): 1973-1985.
- [19] 宋嗣博, 郭红霞, 杨苹, 等. 基于节点边际电价的电力市场分区策略研究[J]. *电力建设*, 2017, 38(9): 132-138.
SONG Sibao, GUO Hongxia, YANG Ping, et al. Electricity market partitioning strategy based on locational marginal price[J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(9): 132-138.
- [20] BJORN DAL M, JORNSTEN K. Zonal pricing in a deregulated electricity market[J]. *The Energy Journal*, 2001, 22(1): 51-73.
- [21] KENNETH V D B, DELARUE E. An improved method to calculate injection shift keys[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 134: 197-204.
- [22] NAM N, RICH C. Consensus clusterings[C]//Seventh IEEE international conference on data mining (ICDM 2007), Omaha, USA, 2007.