

基于节点传输贡献量的省间联络线潮流近似计算

王洪涛^{1,2}, 邹斌¹, 张亮¹

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444; 2. 宁德师范学院 信息与机电工程学院, 福建 宁德 352100)

摘要:提出以节点传输贡献量为量化指标的节点分类方法,提高了日前电力市场中省间联络线上有功功率的计算精度。以3机5节点的简单电网为例,详细说明了省级电网简化前后功率传输分布因子和注入转换系数的计算过程和步骤。以电网有向图为基础,搜索电源节点与负荷节点之间的可行路径,计算节点的传输贡献量,进而估计节点的注入转换系数,获得联络线潮流的近似值,并分析了以节点传输贡献量的均值为阈值对节点分类的优势。最后在IEEE 118节点系统中将所提方法、均值法和节点定性分类法分别应用于日前电力市场的省间联络线潮流计算,仿真和比较结果表明所提方法减小了注入转换系数均值的波动,与真实值相比,省间联络线潮流的平均绝对误差为0.49%,验证了所提方法的有效性。

关键词:功率传输分布因子;注入转换系数;节点传输贡献量;日前电力市场;联络线潮流

中图分类号:TM 744

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005034

0 引言

国家电网公司于2018年7月发布了统一电力市场深化建设的方案,其中省间和省内两级电力市场框架是其重要的特色^[1]。南方电网公司也是以省间和省内两级市场框架来建立统一的电力市场^[1-2]。2015年中西欧电力市场实施了基于潮流的联合市场FBMC(Flow Based Market Coupling)方案^[3-4],该方案采用输电容量隐形拍卖机制。在FBMC方案的跨国交易机制中融合日前市场,这与我国正在建设的两级市场有类似之处,其运行和实践经验可以为我国电力市场的建设提供借鉴和参考。

FBMC方案采用各国市场的净出口曲线作为跨国市场报价,并以基于区域功率传输分布因子ZPTDF(Zone Power Transfer Distribution Factor)的跨国市场潮流计算为基础,完成跨国市场的前出清。FBMC方案无需在跨国市场与国内之间协调,一次性完成跨国市场出清和国内市场出清即可达到市场最优,且跨国市场出清的计算量相对较小,该方案被认为是联合市场运行的重要基础^[5]。在原理上为了确定ZPTDF,需要优先获得发电机组的出力,然而在日前市场出清前,各发电机组的出力是不确定的,因此需要预先估计发电机组的出力。

FBMC方法中ZPTDF由基于节点功率传输分布因子NPTDF(Node Power Transfer Distribution Factor)和注入转换系数ISK(Injection Shift Key)共同决定,其中ISK由国内市场中各个节点的净注入有功确定^[6]。ISK和ZPTDF是省间电力市场交易中的2

个关键参数,是计算省间联络线上交换功率的前提。在中西欧电力市场的运行和实践中,尚没有形成统一的、明确的ISK计算方法^[4],各国根据具体情况以及运行和实践经验采取了不同的计算方法。

国内外学者关于两级电力市场的建设开展了新的探索。文献[2]提出了两级电力市场环境下的省间交易商最优购电模型;文献[3]梳理了欧盟电力市场建设的经验和对我国电力市场建设的启示;文献[7]提出了一种分区输电定价方法。目前国内学者们对ISK和ZPTDF的研究相对较少。文献[8]提出了基于电流分布的电网功率分布因子的计算方法;文献[9]将功率传输分布因子(PTDF)与谱聚类方法相结合,用于电网的静态等值;文献[10]研究了区域电网的边际定价机制,以实现PTDF识别节点对阻塞线路的贡献。在国外学者对ISK和ZPTDF的相关研究中,文献[4]研究了ISK对FBMC的影响;文献[11]提出以发电机和负荷节点分类的ISK计算方法,阐述了以前一日24h的PTDF均值作为日前电力市场基本信息的合理性,但24h内平均ISK的标准差较大,会影响到联络线PTDF的计算精度;文献[12]采用回归系数法分两步计算ISK;文献[13]研究了ISK对中东欧国家发电机组调度的影响。

由以上文献的分析可知,省间联络线上的交换功率为电力市场参与者提供交易信息,是决策和结算的依据^[14],同时也为输电权交易、阻塞管理和可输电能力等研究提供基础数据^[15]。为此,本文提出以节点传输贡献量为指标,对节点进行分类,计算电网简化后节点ISK和联络线的PTDF,进而获得省间联络线上的潮流,搭建IEEE 118节点系统的算例模型,以直流最优潮流模拟日前电力市场,将本文方法与文献[11]中的方法和均值法相比较,验证所提方法的有效性。

收稿日期:2019-04-09;修回日期:2020-04-01

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2019J01845)

Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province(2019J01845)

1 PTDF和ISK计算

1.1 支路PTDF

交流系统中支路的有功潮流如式(1)所示。

$$P_{ij} = U_i^2(G_{i0} + G_{ij}) - U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

其中, i, j 分别为任意支路首、末端节点; U_i, U_j 分别为首、末端节点电压幅值; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 为首、末端节点电压的相角差; G_{i0} 为支路节点 i 的对地电导; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为支路电导和电纳。

忽略支路电阻和节点对地导纳, 假设以节点电压幅值为基准值、线路节点电压的相角差较小^[16], 则式(1)可简化为:

$$P_{ij} = -B_{ij} \theta_{ij} = (\theta_i - \theta_j) / x_{ij} \quad (2)$$

其中, x_{ij} 为支路电抗。将式(2)以矩阵形式表示, 即:

$$\mathbf{P}_{\text{flow}} = \text{diag}(1/x_{ij}) \mathbf{C} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{B}_{\text{branch}} \boldsymbol{\theta} \quad (3)$$

其中, \mathbf{P}_{flow} 为 L 维支路有功功率列向量, L 为支路总数; $\text{diag}(1/x_{ij})$ 为 $L \times L$ 维的对角阵; \mathbf{C} 为 $L \times N$ 维支路-节点关联矩阵, N 为节点总数; $\boldsymbol{\theta}$ 为 N 维节点电压相角列向量; $\mathbf{B}_{\text{branch}}$ 为 $L \times N$ 维支路-节点电纳矩阵。节点 i 的净注入有功功率 P_i 为:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^N P_{ij} = -\sum_{j=1}^N B_{ij} (\theta_i - \theta_j) = -\sum_{j=1}^N B_{ij} \theta_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N B_{ij} \theta_j = B_{ii} \theta_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N B_{ij} \theta_j \quad (4)$$

其中, P_{Gi}, P_{Li} 分别为节点 i 注入、流出的有功功率; B_{ii} 为节点 i 的自导纳, 其值为与节点 i 相连所有支路的自导纳之和。将式(4)以矩阵形式表示, 即:

$$\mathbf{P}_{\text{ini}} = \mathbf{B}_{\text{bus}} \boldsymbol{\theta} \quad (5)$$

其中, \mathbf{P}_{ini} 为 N 维注入节点 i 的有功功率列向量; \mathbf{B}_{bus} 为 $N \times N$ 维节点电纳矩阵。将式(3)、式(5)联立后消去 $\boldsymbol{\theta}$, 当平衡节点为任意节点时, 支路有功功率为:

$$\mathbf{P}_{\text{flow}} = \mathbf{B}_{\text{branch}} \mathbf{B}_{\text{bus}}^{-1} \mathbf{P}_{\text{ini}} = \mathbf{F} \mathbf{P}_{\text{ini}} \quad (6)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}_{\text{branch}} \mathbf{B}_{\text{bus}}^{-1} \quad (7)$$

其中, \mathbf{F} 为 $L \times N$ 维 PTDF 矩阵, 与网络的拓扑结构和参数有关。当不考虑平衡节点时, 矩阵 \mathbf{F}^* 见式(8)。

$$\mathbf{F}^* = \mathbf{B}_{\text{branch}}^* (\mathbf{B}_{\text{bus}}^*)^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{F} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{F}^*] \quad (9)$$

其中, $\mathbf{B}_{\text{branch}}^*$ 为去除矩阵 $\mathbf{B}_{\text{branch}}$ 中平衡节点所在列后得到的 $L \times (N-1)$ 维支路-节点电纳矩阵; $\mathbf{B}_{\text{bus}}^*$ 为去除矩阵 \mathbf{B}_{bus} 中平衡节点所在行与列后得到的 $(N-1) \times (N-1)$ 维节点电纳矩阵。

以3机5节点6支路的简单系统为例, 设系统中所有支路的电抗均为0.2 p.u., 节点1为平衡节点。系统接线图见附录A中图A1, PTDF矩阵的详细计算结果见附录A中式(A1)~(A4)。

1.2 节点的ISK和省间联络线的PTDF

分析省内电网简化后省间联络线上的有功功率的计算步骤。若将图A1所示的系统视为2个省级

电网, 并将每个省级电网等价于1个节点, 简化后的系统如图1所示。图中, Z_r 为省级电网 $r, r=1, 2$; L_2, L_3, L_5 分别为负荷2、3、5; B_A, B_D, B_E 分别为支路A、D、E; $N_1 \sim N_5$ 为节点编号。

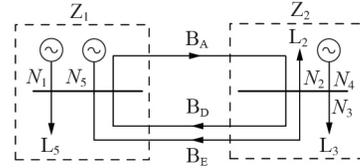


图1 简化后省级电网示意图

Fig.1 Schematic diagram of simplified provincial power network

抽取式(A4)所示矩阵 \mathbf{F} 中 B_A, B_D, B_E 所对应的行向量, 则可获得省间联络线的 PTDF 矩阵 \mathbf{F}^f :

$$\mathbf{F}^f = \begin{bmatrix} 0 & -0.27 & -0.73 & -0.45 & -0.36 \\ 0 & -0.09 & 0.09 & 0.18 & 0.55 \\ 0 & -0.18 & 0.18 & 0.36 & 0.09 \end{bmatrix} \quad (10)$$

设 t 时刻注入节点 k 的有功功率为 $P_{k,t}^N$, 则节点 k 的注入转换系数 $I_{k,t}$:

$$I_{k,t} = \begin{cases} P_{k,t}^N / \sum_{k \in K_r} P_{k,t}^N & k \in K_r \\ 0 & k \notin K_r \end{cases} \quad (11)$$

其中, K_r 为省级电网 Z_r 中所有节点的集合。根据 \mathbf{F}^f 和 $I_{k,t}$, 可得联络线上有功潮流矩阵 \mathbf{F}^z :

$$\mathbf{F}^z = \mathbf{F}^f \mathbf{I} \quad (12)$$

其中, \mathbf{I} 为 $N \times Z$ 维的 ISK 矩阵, 矩阵中的元素为 $I_{k,t}$, Z 为省级电网总数。由矩阵 \mathbf{F}^z 和 2 个省级电网注入区域电网的有功功率列向量 \mathbf{P}^z , 可得省间联络线潮流矩阵 $\mathbf{P}_{\text{flow}}^z$ 为:

$$\mathbf{P}_{\text{flow}}^z = \mathbf{F}^z \mathbf{P}^z \quad (13)$$

假设 $P_{k,t}^N$ 已知, 2 个省级电网的基本数据见表1。表1中给出了各节点注入的有功功率 $P_{k,t}^N$, 由式(11)计算 $I_{k,t}$ 和各省级电网注入的有功功率 P^r , 根据式(11)~(13)求得 2 个省级电网间 3 条联络线 B_A, B_D, B_E 流过的有功功率 $\mathbf{P}_{\text{flow}}^z$, 如式(14)所示。

$$\mathbf{P}_{\text{flow}}^z = \mathbf{F}^f \mathbf{I} \mathbf{P}^z = \mathbf{F}^z \mathbf{P}^z = [85.4 \quad 12.2 \quad -26.1]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1.5 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.7 & -0.5 \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{P}^z = \begin{bmatrix} 100 \\ -100 \end{bmatrix}$$

表1 2个省级电网的基本数据

Table 1 Basic data of two provincial power networks

省级电网	节点编号	P_{Gi}/MW	P_{Li}/MW	$P_{k,t}^N/\text{MW}$	P^r/MW	$I_{k,t}$
1	N_1	150	0	150	100	1.5
	N_5	40	-90	-50	100	-0.5
	N_2	0	-80	-80	-100	0.8
2	N_3	0	-70	-70	-100	0.7
	N_4	50	0	50	-100	-0.5

需要说明的是, 式(14)中 3 条联络线上由 Z_1 流

向 Z_2 的总功率之和为99.3 MW,近似等于100 MW,这是由计算PTDF矩阵 F^f 时的舍入误差导致的。

在日前电力市场运行中,虽然24 h各节点的 $P_{k,t}^N$ 是未知的,但80%以上的电量交易已由中长期电力合同确定,剩余的10%~20%的电量采用竞价交易模式完成(如华东电力市场)。

为了在日前市场运行中提供省间联络线潮流信息 P_{flow}^Z ,均值法计算 $I_{k,t}^Z$ 的基本思路为:根据前一天已知的24 h节点有功功率,由式(15)计算出省级电网注入转换系数平均值;以式(16)计算后24 h联络线上的交换功率,如此滚动,为电力市场运行提供联络线的潮流数据。

$$\bar{I}_k^Z = \text{mean}(I_{k,t}^Z) \quad (15)$$

$$P_{\text{flow}}^Z = F^f \bar{I}_k^Z P^Z \quad (16)$$

其中, \bar{I}_k^Z 为前24 h省级电网内部节点 k 的ISK均值矩阵; $I_{k,t}^Z$ 为各省级电网内部节点 k 的ISK列向量。

文献[11]提出了将节点分为发电机和负荷节点的方法,提高 P_{flow}^Z 的计算精度。但文献[11]的不足之处在于:实际电网中部分节点既不是发电机节点又不是负荷节点,属于联络节点;还有部分节点既是发电机节点又是负荷节点,而净注入的有功功率是节点上发电机注入功率(为正)与负荷消耗功率(为负)的代数和,对这部分节点进行归类存在一定的主观性。本文以有向图拓扑分析为基础,提出以节点传输贡献量为量化分类指标,改进 $I_{k,t}^Z$ 的计算精度,进而提高 P_{flow}^Z 的计算精度。

1.3 中西欧六国的ISK计算

中西欧实施FBMC方案后,各国在电力市场的运行和实践中没有给出统一的ISK计算方法。本文以中西欧国家中奥地利、法国和比利时等6个国家为例,说明ISK计算方法^[4],主要分为以下3种方法。

(1)平面分割法。

假设电力市场分为 Z 个省级电网,则每个省级电网内节点的ISK均相等,且 $\text{ISK} = 1/Z$,目前奥地利、卢森堡和德国采用该方法。

(2)最大装机容量权重法。

按区域内节点的最大装机容量占区域内最大装机容量之和的比例进行计算,目前比利时和荷兰采用该方法。

(3)发电量权重法。

在市场交易之前,先进行基本状态下的模拟,得到线路潮流,再计算出节点 k 的发电量 $G_{\text{BC},k}$ 占区域总发电量 $\sum_{k \in K} G_{\text{BC},k}$ 的比例作为节点的ISK,下标BC表示基本状态下的线路潮流,目前法国采用该方法。

2 基于节点传输贡献量的ISK计算

节点传输贡献量能够量化电网中各个节点对支

路潮流变化的贡献,其大小反映了节点承载和传输能力的大小。

2.1 电网有向图拓扑模型

采用类比法,将图论中有向图的概念和方法用于电网拓扑结构的分析^[17-18]。将电网中的母线视为有向图中的节点,将电网中的线路看作是有向图的边,边的方向由基本潮流确定,边的权重相当于支路的功率传输贡献值。

在电力市场的研究中,PTDF矩阵 F 量化了各节点对注入(或流出)单位功率时引起的各支路功率的变化^[19-20],节点之间功率的变化可表示为:

$$\Delta P_{ij}^{fh} = F_{ij \in (f,h)} \Delta P_{fh} = (F_{ij}^f - F_{ij}^h) \Delta P_{fh} \quad (17)$$

其中, (f,h) 为节点对; ΔP_{ij}^{fh} 为节点对 (f,h) 功率变化在支路 ij 上引起的有功功率的变化量;向量 $F_{ij \in (f,h)}$ 中的元素为支路 ij 上节点对 (f,h) 的功率传输因子,其在数值上等于矩阵 F 中支路 ij 上节点 f 与节点 h 对应的系数之差; ΔP_{fh} 为节点对 (f,h) 之间的功率变化量。

定义有向图中边的权重系数向量为:

$$w_{ij \in (f,h)} = V_{ij} / |F_{ij \in (f,h)}| \quad (18)$$

其中,向量 V_{ij} 中的元素为支路 ij 长期运行的传输容量标么值,基准容量 $S_B = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

由电网的节点、支路、潮流方向和支路的权重系数,根据图论中有向图的定义,建立电网有向图拓扑模型。

2.2 电源-负荷节点对的可行路径和传输贡献量

根据已建立的电网有向图拓扑模型,设 m 个电源节点组成的集合为 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$, n 个负荷节点组成的集合为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$,搜索单电源节点与负荷节点集合中所有元素 $l_h (h=1, 2, \dots, n)$ 之间的可行路径,再遍历电源节点集合 G 中的所有元素,获得所有电源节点与所有负荷节点之间的可行路径。

定义单一电源-负荷节点对之间的支路传输贡献量为:

$$C_{ij \in (f,h)} = \sum_{q=1}^{N_q} w_{\min,q} \quad (19)$$

其中, q 为源-荷节点对 (f,h) 之间的第 q 条可行路径; N_q 为节点对 (f,h) 之间可行路径的总数; $w_{\min,q}$ 为第 q 条可行路径所经过的支路中最小的权重系数。

对于多电源、多负荷节点的电网而言,全网的支路传输贡献量为:

$$C_{ij} = \sum_{f \in G} \sum_{h \in L} C_{ij \in (f,h)} \quad (20)$$

节点 i 的传输贡献量 d_i 为:

$$d_i = \sum_{j \in \Phi} C_{ij} \quad (21)$$

其中, Φ 为与节点 i 直接相连的节点集合。

2.3 基于节点传输贡献量的ISK

由式(10)–(13)可得省间联络线潮流的计算方法,根据节点传输贡献量的大小,将节点分为 Y 类,则 Y_x 类节点的ISK为:

$$I_{k,t}^{Z,Y_x} = \begin{cases} \frac{P_{k,t}^{N,Y_x}}{\sum_{k \in K_r} P_{k,t}^{N,Y_x}} & \forall k \in K_r, \forall t \\ 0 & \forall k \notin K_r, \forall t \end{cases} \quad (22)$$

其中, $P_{k,t}^{N,Y_x}$ 为 Y_x 类节点中节点 k 的注入有功功率。

省间电网联络线的矩阵 F^{Z,Y_x} 为:

$$F^{Z,Y_x} = F^f I^{Y_x} \quad (23)$$

其中, I^{Y_x} 为属于 Y_x 类节点的 $N \times Z$ 维矩阵,矩阵中的元素为 $I_{k,t}^{Z,Y_x}$ 。

此时省间联络线上的潮流为:

$$P_{\text{flow}}^Z = \sum_{Y_x=1}^Y F^{Z,Y_x} P^{Z,Y_x} \quad (24)$$

其中, P^{Z,Y_x} 为 Z 维列向量,表示 Z 个省级电网中 Y_x 类节点的总注入功率。

图1中,假设依据节点传输贡献量将节点分为2类, $Y_1 = \{2, 5\}$ 代表全网中 $d_i \geq \text{mean}(d_i)$ 的节点集合, $\text{mean}(d_i)$ 表示 d_i 的均值; $Y_2 = \{1, 3, 4\}$ 代表全网中 $d_i < \text{mean}(d_i)$ 的节点集合,则:

$$P_{\text{flow}}^Z = F^f I^{Y_1} P^{Z,Y_1} + F^f I^{Y_2} P^{Z,Y_2} = F^f (I^{Y_1} P^{Z,Y_1} + I^{Y_2} P^{Z,Y_2}) = [85.4 \ 12.2 \ -26.1]^T \quad (25)$$

其中, $P^{Z,Y_1} + P^{Z,Y_2} = P^Z$, $I^{Y_1} + I^{Y_2} \neq I$,各矩阵的详细表示见附录B。由式(14)、式(25)可得:

$$IP^Z = I^{Y_1} P^{Z,Y_1} + I^{Y_2} P^{Z,Y_2} \quad (26)$$

其中, IP^Z 、 $I^{Y_1} P^{Z,Y_1}$ 、 $I^{Y_2} P^{Z,Y_2}$ 分别为网络中所有节点的注入功率、传输贡献量大的节点的注入功率、传输贡献量小的节点的注入功率。

由式(20)和式(21)可知,节点传输贡献量仅与网络拓扑结构和支路传输容量有关,而与时间 t 无关,以 I^{Y_1} 和 I^{Y_2} 计算 P_{flow}^Z ,具有如下优点:①网络拓扑不变,则各节点前、后24 h的 d_i 保持不变,即权矩阵 I^{Y_1} 、 I^{Y_2} 中各个元素的大小保持不变,注入功率 $I^{Y_1} P^{Z,Y_1}$ 与 $I^{Y_2} P^{Z,Y_2}$ 对联络线潮流的贡献取决于 P^{Z,Y_1} 、 P^{Z,Y_2} ,按节点贡献量的大小进行分类,能够平抑各节点功率波动对联络线潮流的影响;②以 I^{Y_1} 和 I^{Y_2} 考虑了各个节点对功率传输的贡献,增强了节点ISK的适应性,能够提高省间联络线交换功率的精度。

基于节点传输贡献量的ISK计算步骤:①按省级电网管辖范围,将电网分区,获取电网结构和节点、发电机和支路信息;②由基本运行状态下的直流潮流计算结果和式(18)计算出的支路权重系数,建立电网有向图模型;③搜索有向图模型中所有电源–负荷节点对的可行路径,按式(19)–(21)计算节点

传输贡献量 d_i ,以 $\text{mean}(d_i)$ 为阈值,将节点分为 Y_1 和 Y_2 2个集合;④按式(8)和式(9)计算矩阵 F 和 F^* ,抽取与联络线支路对应的 F^f ,以式(22)–(24)计算省间联络线上的交换功率 P_{flow}^Z 。

3 算例研究

3.1 节点传输贡献量的计算与分析

以IEEE 118节点输电网为例,该网络有186条线路、54个发电机节点,将整个电网视为由4个省级电网组成,4个省间联络线为:15–33、19–34、30–38、23–24、69–70、69–75、69–77、68–81、82–83、89–92、91–92,共11条,分区示意图见附录C。

以IEEE 118节点系统的数据进行一次直流潮流计算,获得各支路的潮流方向,将电网中同杆架设的输电线路合并。按文献[21]的假设,即电压等级为138 kV的支路,长期运行的允许容量为300 MW;电压等级为345 kV的支路,长期运行的允许容量为800 MW,按照式(18)得到边(支路)的权重系数向量 $w_{ij \in (f,h)}$ 。根据IEEE 118节点系统节点、支路、潮流方向和支路的权重系数,建立有向图拓扑模型。

图2给出了IEEE 118系统中4号电源节点与部分负荷节点之间的可行路径。图中路径上的数值为支路权重。当计算源–荷节点对(4,16)之间的传输功率时,支路12–16的传输贡献量 $C_{12,16 \in (4,16)} = \min(7.89, 3.72, 3.96) = 3.72$ 。

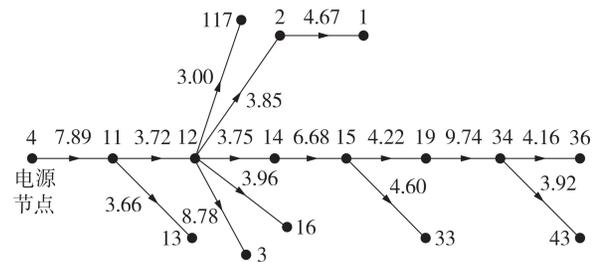


图2 4号电源节点与负荷节点之间的可行路径

Fig.2 Feasible path between No.4 power node and load node

图3为各节点的传输贡献量。图中,节点传输贡献量均值为 $\text{mean}(d_i) = 0.0068$; $Y_1 = \{d_i \geq \text{mean}(d_i)\}$ 中包含51个节点; $Y_2 = \{d_i < \text{mean}(d_i)\}$ 中包含67个节点。

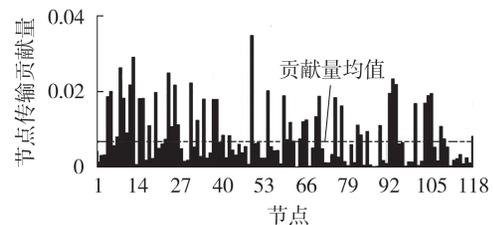


图3 节点传输贡献量

Fig.3 Node transmission contribution

本文采用节点传输贡献量与文献[18]采用节点贡献度的区别在于:①节点贡献度是将节点传输贡献量除以节点度数获得的,节点度数是节点连接的支路数,节点贡献度是节点传输贡献量平均的概念,反映了节点对相连线路的平均贡献;②节点传输贡献量反映的是有向图中源-流可行路径中节点传输功率的累积效应,强调的是节点贡献的大小,在日前市场联络线潮流近似计算中,以节点传输贡献量作为量化指标对节点分类是较为合适的。

3.2 ISK 和联络线潮流的计算与分析

目前从电力市场运行的角度来看,大量的交易已经通过远期合同、年度拍卖、月度拍卖等市场完成了电力交易,日前市场的功能主要是对次日负荷与中远期预测偏差的部分进行交易,因此其交易量不大,按照一般测算,日前市场大约占总交易电量的 20%,即 $P_{k,t}^Z$ 中 80% 以上的电量已经确定,另 10%~20% 的电量由日前市场的交易决定。本算例是以直流最优模型模拟日前电力市场的出清,以检验所提方法对联络线潮流估计的精度。

从 IEEE-RTS 79 系统的负荷数据^[22]中取第一周周一 24 h(前 24 h)的各节点负荷作为前 24 h 负荷数据,周二 24 h(后 24 h)的各节点负荷为周一 24 h(前 24 h)各节点负荷的 90%。当省级电网后 24 h 的 $F^{Z,Y}$ 和 $P^{Z,Y}$ 已知时,可根据式(25)得到省间联络线上的潮流真值 P_{flow}^Z ,以此检验所提方法的有效性。

比较以下 4 种情况的 ISK 和联络线潮流。

(1)真值:以周二 24 h 的各节点负荷逐点进行直流最优潮流计算,得到 ISK 均值和省间联络线上每小时的有功功率。

(2)均值法:以周一 24 h 的各节点负荷逐点进行直流最优潮流计算,先按式(15)计算 \bar{I}_k^Z ,再按式(16)计算周二 24 h 的 $P_{flow}^{Z,t}$ 。

(3)本文方法:以周一 24 h 的各节点负荷为基础,按发电机节点和负荷节点分类法,将其归为 H_1 和 H_2 2 类,按照式(23)~(25)计算,再运行直流最优潮流,计算周二 24 h 的 $P_{flow}^{Z,t}$ 。

(4)文献[11]方法:以周一 24 h 的各节点负荷进行直流潮流计算,建立有向图模型,以节点传输贡献量将节点分类为 Y_1 和 Y_2 这 2 个集合,按式(23)~(25)计算,再运行直流最优潮流,计算周二 24 h 的 $P_{flow}^{Z,t}$ 。

为节约篇幅,仅给出 IV 区的各节点 ISK 均值曲线,如图 4 所示。文献[11]方法和本文方法分别将 IV 区的节点分为以下 4 个集合: $Y_{1,IV}=\{83, 85, 89\}$, $Y_{2,IV}=\{84, 86, 87, 88, 90, 91\}$, $H_{1,IV}=\{85, 87, 89, 90, 91\}$, $H_{2,IV}=\{83, 84, 86, 88\}$ 。

由图 4 上图可见,前、后 24 h 的 ISK 均值在节点贡献率较大的节点 89 和节点 90 处偏差较大;由图 4

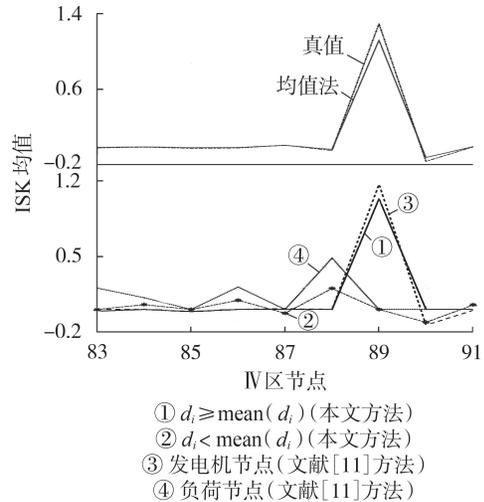


图 4 IV 区各节点的 ISK 均值

Fig.4 ISK mean value for each node in Area IV

下图可见,本文方法 2 条 ISK 均值曲线的波动幅度小于文献[11]方法的 ISK 均值曲线。这说明本文所提方法获得的 ISK 均值的波动性小于文献[11]的节点定性分类获得的 ISK 均值。

图 5 为 4 条联络线 24 h 的有功功率曲线。由图可知,均值法、文献[11]方法和本文方法这 3 种方法计算得到的 P_{flow}^Z 曲线与情况(1)真值曲线的变化趋势一致,但情况(4)所得曲线与情况(1)最为贴近。

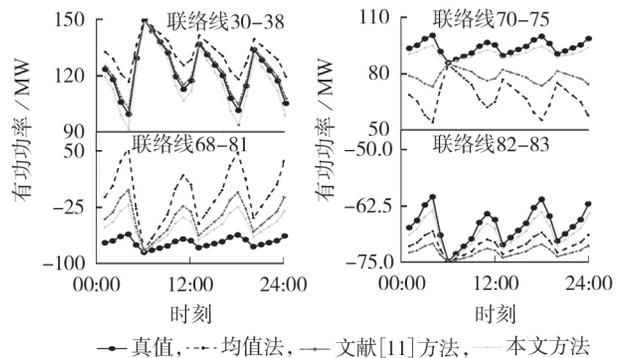


图 5 省间联络线 24 h 有功潮流

Fig.5 24-hour active power flow of inter-provincial tie line

图 6 为 11 条联络线有功功率 24 h 的均值和标准差。由图 6 可见,相较于文献[11]方法,本文方法得到的联络线有功功率均值与真值的吻合度较高;由 3 种方法获得的联络线有功功率标准差可知,均值法和文献[11]方法的标准差波动较大,本文方法的标准差波动小,且与真值最为接近。

表 2 列出了 11 条联络线有功功率 24 h 的均值,计算了 3 种方法与真值的平均绝对误差,均值法、文献[11]方法、本文方法的平均绝对误差分别为 1.09%、0.51%、0.49%,可见本文方法的平均绝对误差最小,说明本文方法的平均计算精度最高。

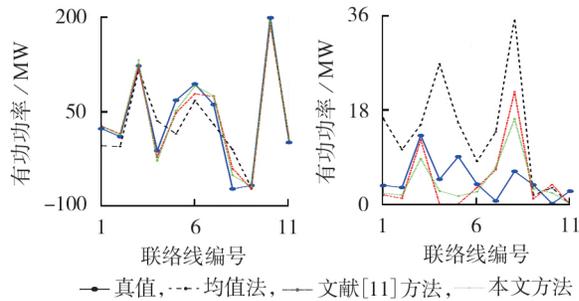


图6 省间联络线24 h有功潮流的均值和标准差

Fig.6 Average and standard deviation of 24-hour active power flow in inter-provincial tie line

表2 联络线有功功率的均值

Table 2 Mean of active power of tie line

联络线 编号	联络线有功功率均值 / MW			
	真值	均值法	文献[11]方法	本文方法
1	23.94	-3.33	27.86	27.31
2	11.11	-4.34	15.60	14.20
3	122.41	117.96	124.16	131.89
4	-11.27	35.91	-21.43	-27.21
5	68.28	15.36	48.47	52.17
6	93.84	67.87	78.50	90.76
7	61.56	30.32	74.34	75.31
8	-72.18	-9.24	-39.65	-50.79
9	-66.84	-71.05	-72.54	-68.46
10	198.01	190.72	189.39	192.80
11	1.97	7.37	7.63	7.21

4 结论

在两级电力市场的运行中,PTDF和ISK是计算省间联络线潮流的2个关键参数,为了提高二者的计算精度,本文提出一种基于节点贡献量的改进方法,通过与均值法、文献[11]方法的比较得到以下结论:

(1)以节点贡献量为量化指标,按各节点对支路(含联络线)潮流的贡献进行分类具有一定的普适性,避免了定性分类方法(发电机节点、负荷节点)的主观性;

(2)本文方法与均值法、文献[11]方法相比,降低了ISK均值的波动,提高了省间联络线有功功率的估计精度,其平均绝对误差为0.49%,平均计算精度最高;

(3)分析、讨论了日前电力市场中PTDF和节点ISK这2个关键参数的计算步骤,为省级电网简化后的联络线有功功率的计算提供参考,具有良好的工程应用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 沈运帷,李扬,焦系泽,等. 新电改背景下需求响应成本效益分析及其融资渠道[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):124-130,138. SHEN Yunwei, LI Yang, JIAO Xize, et al. Cost-benefit analysis and financing channels for demand response under electric reform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 124-130, 138.

[2] 索瑞鸿,陈杏,宋依群,等. 计及源荷双边性能指标的市场交易模型[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):173-180. SUO Ruihong, CHEN Xing, SONG Yiqun, et al. Trading model considering bilateral performance indexes of generation and load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 173-180.

[3] 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.

[4] DIERSTEIN C. Impact of generation shift key determination on flow based market coupling[C]//Proceedings of the 2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). Dresden, Germany: IEEE, 2017: 1-5.

[5] BERGH K V D, BOURY J, DELARUE E. The flow-based market coupling in Central Western Europe: concepts and definitions [J]. Electricity Journal, 2016, 29(1): 24-29.

[6] BACZYNSKA A, WIERZBOWSKI M. Market coupling and the impact of cross border flows on the balancing of power demand[C]//Proceedings of the 2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). Dresden, Germany: IEEE, 2017: 1-5.

[7] 陈政,肖江,荆朝霞,等. 一种适用于我国电力市场的分区输电定价方法[J]. 电网技术,2017,41(7):2124-2130. CHEN Zheng, XIAO Jiang, JING Zhaoxia, et al. A zonal transmission pricing approach for electricity market in China[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2124-2130.

[8] 颜丽,鲍海. 基于电流分布的电网功率分布因子的计算[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):80-85. YAN Li, BAO Hai. Algorithm of power distribution factor based on current distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 80-85.

[9] 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.

[10] KANG C Q, CHEN Q X, LIN W M, et al. Zonal marginal pricing approach based on sequential network partition and congestion contribution identification[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 51: 321-328.

[11] KENNETH V D B, DELARUE E. An improved method to calculate injection shift keys[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 134: 197-204.

[12] SCHÖNHEIT D, SIKORA R. A statistical approach to generation shift keys[C]//Proceedings of the 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM). Łódź, Poland: IEEE, 2018: 1-6.

[13] FINCK R, ARDONE A, FICHTNER W. Impact of flow-based market coupling on generator dispatch in CEE region[C]//Proceedings of the 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM). Łódź, Poland: IEEE, 2018: 1-5.

[14] 付慧颖,周渝慧,金鑫. 基于关口金融输电权的双边拍卖模型[J]. 电网技术,2008,32(5):93-96,100. FU Huiying, ZHOU Yuhui, JIN Xin. A bilateral auction model based on flowgate right[J]. Power System Technology, 2008, 32

- (5):93-96,100.
- [15] 华科,谢开,郭志忠. 基于交流灵敏度的电能交易与输电权的统一拍卖[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):47-50.
HUA Ke, XIE Kai, GUO Zhizhong. A joint auction of energy and transmission rights based on AC sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(10):47-50.
- [16] 卫志农,张清松,赵静波,等. 电力系统线性化模型研究综述与改进[J]. 电网技术,2017,41(9):2919-2927.
WEI Zhinong, ZHANG Qingsong, ZHAO Jingbo, et al. Review and improvement of power system linearization models[J]. Power System Technology, 2017, 41(9):2919-2927.
- [17] 张富超,谢成荣,沈立新,等. 基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(21):7-12.
ZHANG Fuchao, XIE Chengrong, SHEN Lixin, et al. Identification of power grid critical lines based on path chains and transmission betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21):7-12.
- [18] 刘利民,刘俊勇,魏震波,等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):30-37.
LIU Limin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Transmission line vulnerability assessment based on synergetic effect analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5):30-37.
- [19] 鞠文云,李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):6-12.
JU Wenyun, LI Yinhong. Identification of critical lines and nodes in power grid based on maximum flow transmission contribute on degree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9):6-12.
- [20] 苏慧玲,李扬. 基于准稳态功率转移分布因子的电力系统复杂网络特性分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):47-53.

SU Huiling, LI Yang. Analysis of complex network characteristics based on quasi-steady PTDF for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9):47-53.

- [21] 孙国强,任宾,卫志农,等. 基于改进多中心-校正内点法的可用输电能力计算[J]. 电力系统自动化,2014,38(16):47-52.
SUN Guoqiang, REN Bin, WEI Zhinong, et al. Calculation of available transfer capability based on improved multiple centrality-correction interior point algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16):47-52.
- [22] 葛少云,王浩鸣,王源山,等. 含分布式风光蓄的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):16-23.
GE Shaoyun, WANG Haoming, WANG Yuanshan, et al. Reliability evaluation of distribution system including distributed wind turbines, photovoltaic arrays and batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5):16-23.

作者简介:



王洪涛

王洪涛(1978—),男,宁夏石嘴山人,副教授,博士研究生,研究方向为电力系统规划、电力系统风险评估与电力市场等(E-mail: taiyuanwang0801@126.com);

邹斌(1965—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为电力系统规划与电力市场等(E-mail: zoubin@shu.edu.cn);

张亮(1995—),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要研究方向为数据挖掘、深度学习在电力市场中的应用(E-mail: zhang0810liang@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Approximate calculation of inter-provincial tie-line power flow based on node transmission contribution

WANG Hongtao^{1,2}, ZOU Bin¹, ZHANG Liang¹

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. College of Information Mechanical and Electrical Engineering, Ningde Normal University, Ningde 352100, China)

Abstract: The node classification method with node transmission contribution as the quantitative index is proposed to improve the calculation accuracy of the inter-provincial tie-line active power in day-ahead electricity market. A simple grid with 3-machine 5-bus is taken as an example to explain in detail the calculation process and steps of power transfer distribution factor and injection conversion coefficient of injection shift key before and after the provincial power grid simplification. Based on the directed graph of grid, the feasible path between the power node and the load node is searched, the node transmission contribution is calculated, and then the injection shift key of node is estimated to obtain the approximate value of tie-line power flow, and the advantage of node classification by taking the mean value of node transmission contribution as the threshold value is analyzed. Finally, the proposed method, mean method and node qualitative classification method are applied to the inter-provincial tie-line power flow calculation separately in day-ahead electricity market with IEEE 118-bus system. Simulative and comparison results show that the fluctuation of the mean value of injection shift key is reduced by the proposed method. Compared with the true value, the average absolute error of the inter-provincial tie-line power flow is 0.49%, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: power transfer distribution factor; injection shift key; node transmission contribution; day-ahead electricity market; tie-line power flow

附录 A

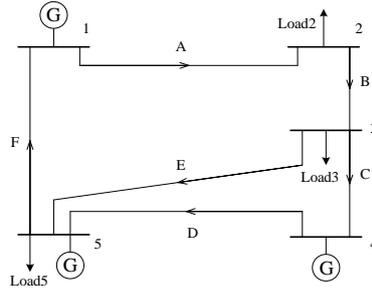


图 A1 3机5节点6支路系统接线图

Fig.A1 Wiring diagram of system with 5 nodes, 3 machines and 6 branches

$$\mathbf{B}_{\text{branch}}^* = \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & -5 \\ 0 & 5 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

$$\mathbf{B}_{\text{bus}}^* = \begin{bmatrix} 10 & -5 & 0 & 0 \\ -5 & 15 & -5 & -5 \\ 0 & -5 & 10 & -5 \\ 0 & -5 & -5 & 15 \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

$$\mathbf{F}^* = \mathbf{B}_{\text{branch}}^* (\mathbf{B}_{\text{bus}}^*)^{-1} = \begin{bmatrix} -0.73 & -0.45 & -0.36 & -0.27 \\ 0.27 & -0.45 & -0.36 & -0.27 \\ 0.09 & 0.18 & -0.45 & -0.09 \\ 0.09 & 0.18 & 0.55 & -0.09 \\ 0.18 & 0.36 & 0.09 & -0.18 \\ 0.27 & 0.55 & 0.64 & 0.73 \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & -0.73 & -0.45 & -0.36 & -0.27 \\ 0 & 0.27 & -0.45 & -0.36 & -0.27 \\ 0 & 0.09 & 0.18 & -0.45 & -0.09 \\ 0 & 0.09 & 0.18 & 0.55 & -0.09 \\ 0 & 0.18 & 0.36 & 0.09 & -0.18 \\ 0 & 0.27 & 0.55 & 0.64 & 0.73 \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

附录 B

$$\mathbf{I}^{Y_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{I}^{Y_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{7}{2} \\ 0 & -\frac{5}{2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}^{Z,1Y} = \begin{bmatrix} -0.27 & 0 \\ -0.09 & 0 \\ -0.18 & 0.1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}^{Z,1Y} = \begin{bmatrix} -50 \\ -80 \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}^{Z,2Y} = \begin{bmatrix} 0 & -0.67 \\ 0 & -0.74 \\ 0 & 1.03 \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}^{Z,2Y} = \begin{bmatrix} 150 \\ -20 \end{bmatrix}$$

附录 C

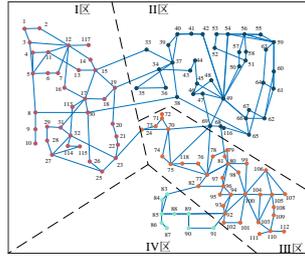


图 C1 IEEE 118 节点分区示意图

Fig.C1 Schematic diagram of IEEE-118 partition power network