

基于节点边际电价的实时运行阻塞管理研究

阻塞管理是电力系统调度运行中关键问题。传统模式下调度员依靠行政指令调整机组出力以消除阻塞，而市场模式下则需要引入价格机制消除阻塞。深入分析了节点边际电价的概念和算法，提出了基于节点边际电价的阻塞管理模式，依托节点边际电价计算阻塞成本，并通过灵敏度因子实现对阻塞成本的合理分摊，最后通过IEEE 30节点模型构造算例测试所提出方法的可行性。

张 健 张国强 袁 森 鲍冠南/山东电网有限责任公司电力调度控制中心
薛艳军/北京清大科越股份有限公司

0 引言

阻塞管理是电力现货市场中必须考虑的关键问题。随着我国电力市场改革由中长期逐步向现货发展，市场交易必须更多地考虑电能的物理属性。断面阻塞就是其中关键的要素之一。

所谓阻塞管理，是指在电网调度运行中监测辨识越限断面，采取调整发电机出力、调整电网运行方式以及负荷控制等手段，消除越限断面的方式^[1]。传统运行模式下，调度运行人员往往采用行政指令的方式调整机组出力消除阻塞。而市场环境下则更多地需要考虑价格引导调整机组出力。文献[2]将金融输电权理念引入阻塞管理，存在阻塞的区域电网机组和用户需要购买阻塞断面的输电权，基于上述模式消除阻塞。文献[3]在金融输电权模式下进一步提出了考虑负荷和机组出力调整的最优阻塞调控模型。针对由于断面限制导致发电厂不能按照计划出力发电的情况，文献[4]提出了发电权交易的模式，通过发电厂间电量计划的二次调整，满足断面控制要求。文献[5-8]基于节点边际电价体系，

提出了可中断负荷、需求侧响应等参与阻塞管理后的调控模式，然而上述文献中仅提出优化模型，没有进一步基于节点边际电价模式介绍发用双方如何实现阻塞成本的合理分摊。文献[9]提出了阻塞管理中的最优控制方法，用于解决含多种电源、可中断负荷的大电网阻塞管理问题。

节点边际电价是在考虑电力系统传输能力的基础上分析不同节点的供需情况，从而给出不同节点的电价水平，能够为消除阻塞提供可靠的价格信号。为此首先深入分析节点边际电价的概念和算法，基于直流潮流模型给出其数学表达式；接着基于节点边际电价给出的不同节点的价格水平，提出基于节点边际电价的阻塞管理方法，以消除实时运行过程中的断面阻塞问题；测算该调控方法的阻塞调控成本，基于参与调控的对象在不同位置的灵敏度，实现对该成本的分摊；最后基于IEEE 30节点系统构造算例，验证了所提出方法的可行性。

1 节点边际电价的内涵和算法

节点边际电价体系已广泛应用于世界范围内各主要的电力现货市场。节点边际电价可由考虑网络约束的最优潮流模型推导得到。本文中以直流模型为基础，对节点边际电价的内涵和算法作介绍。

考虑网络约束的最优潮流模型可表示为^[10-11]

$$\min p^T P_G \quad (1)$$

$$\text{s. t. } e^T (P_G - P_D) = 0 \quad (2)$$

$$T(P_G - P_D) \leq \bar{F} \quad (3)$$



张 健/研究员级高工

关键词/Keywords

阻塞管理 ·
节点边际电价 ·
电力市场 ·
调度运行 ·

$$\underline{P_G} \leq P_G \leq \overline{P_G} \quad (4)$$

式(1)~式(4)为用矩阵形式表示的最优潮流模型。其中, p 为各机组的报价向量; P_G 为机组的发电出力矩阵; e 为 $N_B \times 1$ 阶单位向量; P_D 为各节点负荷向量; T 为 $N_L \times N_B$ 阶转移分布因子矩阵; $\bar{F}$ 为各支路的传输容量限制向量; $\underline{P_G}$ 、 $\overline{P_G}$ 为机组出力上、下限向量; NB 为系统节点数; N_L 为系统支路数。

该模型中目标函数为全网购电成本最低, 所考虑的约束条件依次为电力平衡约束、网络传输容量约束及机组出力上、下限约束。

引入拉格朗日乘子 λ 、 μ 、 γ_1 和 γ_2 , 可得到上述优化问题的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} \Gamma = & p^T P_G + \lambda e^T (P_G - P_D) + \mu^T [T(P_G - P_D) + \bar{F}] + \\ & \gamma_1^T [\underline{P_G} - P_G] + \gamma_2^T [P_G - \overline{P_G}] \end{aligned} \quad (5)$$

据此可以得到上述问题的最优性条件为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Gamma}{\partial P_{Gi}} = & p_i + \lambda + \sum_k \mu_k T_{ki} + \gamma_{1i} - \gamma_{2i} = 0 \\ & i = 1, 2, 3, \dots, N_G \end{aligned} \quad (6)$$

节点电价定义为

$$\rho_i = -\lambda - \sum_k \mu_k T_{ki} \quad (7)$$

其向量形式可表示为

$$P = -\lambda e - T^T \mu \quad (8)$$

节点边际电价的物理含义为电力系统中各节点当其功率变化1 MW时其购电成本的增加量。如式(8)所示, 各节点的节点边际电价实际上包括两个部分, 第一部分 λe 表示在无网络约束的情况下电网统一边际成本; 第二部分 $T^T \mu$ 表示由于网络阻塞, 导致各个节点边际电价的变化量。当没有网路约束的情况, 则第二部分值为零。

节点边际电价的优势在于给出了由于网络阻塞导致的不同节点之间的供需关系差异。在没有阻塞的情况下各节点之间应具有相同的边际成本, 而受网络约束的影响, 各节点的供需关系发生变化导致其边际电价发生改变。

2 基于节点边际电价的阻塞管理模式

本文所研究的阻塞管理主要针对于实时运行

过程中的断面控制。尽管日前计划编制或日前市场校核中, 会基于负荷预测等信息考虑机组在各时段的出力水平, 以保证断面潮流在其控制范围内。然而在实时运行过程中, 由于负荷预测偏差等因素影响, 仍有可能出现断面越限的情况, 必须在规定时间内实施阻塞管理, 将其控制在合理范围内。

2.1 基于节点边际电价的阻塞调控模型

断面控制主要通过调整发电机组出力或可控负荷响应实现。断面潮流与其之间的关系可通过发电机输出功率转移分布因子来表示, 发电机输出功率转移分布因子可表示为

$$G_{k-i} = \frac{1}{x_k} M_k^T X_i \quad (9)$$

式中, G_{k-i} 为节点 i 对支路 k 的功率转移分布因子; x_k 为支路 k 的阻抗; M_k 为支路 k 的关联矢量, 其首尾两个节点所对应的元素分别为1、-1, 其余元素为0; X_i 为直流潮流逆矩阵 B_0 的第 i 个列矢量。

根据发电机组输出功率转移分布因子 G_{k-i} 可以计算节点 i 功率对断面 K 的转移分布因子 $G_{K-i}^{[12]}$ 。反映了节点功率对断面潮流的灵敏性, 在断面控制中不仅需要考虑该灵敏性, 还需要考虑该节点的发电机组或可控负荷的功率调控范围和调控响应速度。

规定节点的机组或可控负荷在当前功率水平下功率调控范围为 $[-\Delta P_i^{\text{down}}, \Delta P_i^{\text{up}}]$, 其调节速度为 γ_i 。当断面越限时, 要求在规定时间内 Δt (一般要求为10 min) 将断面潮流控制在合格范围内, 设断面潮流调控需求为 ΔP_k^{need} , 则所有节点的机组或可控负荷调控量应满足

$$\left| \sum_{i=1}^{N_B} G_{K-i} \Delta P_i \right| \geq |\Delta P_k^{\text{need}}| \quad (10)$$

$$\min(-\gamma_i \Delta t, -\Delta P_i^{\text{down}}) \leq \Delta P_i \leq \max(\gamma_i \Delta t, \Delta P_i^{\text{up}}) \quad (11)$$

式(10)保证了各节点功率调整所导致的断面潮流变化超过其调控需求, 考虑到调控需求可能存在正、负号不定, 故这里增加了绝对值。式(11)保证了各节点的功率调整同时满足其调控范围和调控速度的要求。

上述关系给出了电网实时运行过程中阻塞管理所需要考虑的安全边界。据此，可以构建基于节点边际电价的实时运行阻塞管理模型，以为调度运行人员提供经济成本最低的调控手段。

该模型可以表述如下

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^{N_B} p_i \Delta P_i \\ \text{s. t.} & \left| \sum_{i=1}^{N_B} G_{K-i} \Delta P_i \right| \geq \left| \Delta P_k^{\text{need}} \right| \\ \min & (-\gamma_i \Delta t, -\Delta P_i^{\text{down}}) \leq \Delta P_i \leq \max(\gamma_i \Delta t, \Delta P_i^{\text{up}}) \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中，目标函数为调控成本最低，其本质为各节点边际电价与其相应的调控电力的乘积。其约束项为实时断面控制中所必须考虑的调节容量约束和调节时效约束。

上述优化模型本质上为增量模型，其出发点在于实时调控过程中，机组往往按照其计划出力曲线运行，因此考虑的应该是其计划出力下的变化影响。

还必须注意的是调节费用的价格系数为各个节点的节点边际电价，该系数反映了调控过程中各节点的供需情况。而所得的优化目标就是所需要支付的调控成本。

2.2 基于阻塞贡献度追踪的阻塞成本分摊方法

在实时运行过程中，造成阻塞的原因较多，主要包括两大类：由于日前计划编制或日前市场校核偏差导致的阻塞；由于机组出力未执行日前计划或交易计划导致的阻塞。

第一种情况主要为负荷预测偏差等情况；第二种情况包括风电场预测偏差、机组跳闸等情况。第一种情况其根本原因可归结于电网企业，而第二种情况则应由各发电厂承担。这里未考虑由于设备跳闸、网络运行方式变化所导致的阻塞。

设定某阻塞断面日前计划或市场计划下其潮流为 $P_K^{L,DA}$ ，实时运行中则为 $P_K^{L,RT}$ 。当该断面实时运行过程中发生阻塞越限时，其调控成本可由式(12)所述的调控模型得到。

记发生阻塞越限时，各节点的负荷预测偏差为 ΔP_i^B ，各机组的出力偏差为 ΔP_i^G 。则各节点负荷

和机组出力对该越限断面的贡献率分别定义为

$$\varepsilon_i^B = G_{K-i} \Delta P_i^B \quad (13)$$

$$\varepsilon_i^G = G_{K-i} \Delta P_i^G \quad (14)$$

式中， ε_i^B 、 ε_i^G 分别为节点 i 的负荷偏差和节点 i 的机组出力偏差对越限断面的贡献度。

则电网应分摊的阻塞成本 Q_P 为

$$Q_P = \sum_{i=1}^{N_B} \varepsilon_i^B / \left(\sum_{i=1}^{N_B} \varepsilon_i^B + \sum_{i=1}^{N_G} \varepsilon_i^G \right) \quad (15)$$

机组 i 应分摊的阻塞成本 Q_i^G 为

$$Q_i^G = \varepsilon_i^G / \left(\sum_{i=1}^{N_B} \varepsilon_i^B + \sum_{i=1}^{N_G} \varepsilon_i^G \right) \quad (16)$$

3 算例

3.1 基础数据

将以IEEE 30节点系统为基础构造算例，验证所提出方法的有效性。IEEE 30节点系统的网络结构图如下图所示。

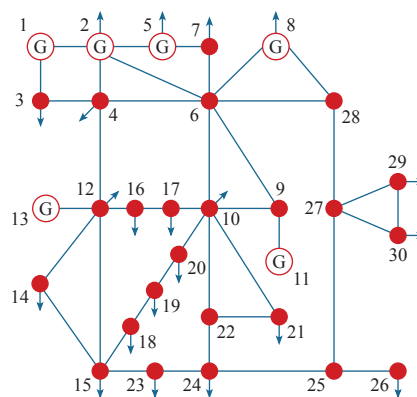


图 IEEE 30节点系统

为创造传输断面，在IEEE 30节点系统基础上设置线路6-9、线路27-28为检修状态，该运行方式下位于节点1、节点2、节点5和节点8的机组仅通过线路4-12、线路6-10与其他区域电网连接。

各节点的机组基本信息如表1所示。

表1 机组基本信息表

节点	最大技术出力 /MW	最小技术出力 /MW	电能价格 系数	升负荷速率 MW/10 min
1	100	0	2	3
2	100	0	2	3

(续)

节点	最大技术出力 /MW	最小技术出力 /MW	电能价格 系数	升负荷速率 MW/10 min
5	80	0	3	10
8	100	0	2	3
11	80	0	1	5
13	200	0	1	5

线路阻抗等其他参数参见文献[13]。

3.2 算例分析

(1) 节点边际电价测算

基于式(1)~式(4)的最优潮流模型,可以优化得到该系统的节点边际电价。其中节点1~节点28所在区域定义为北部区域,其余节点所在区域定义为南部区域,两个区域之间通过线路4-12和线路6-10相连。两个区域的节点边际电价和各机组的出力优化结果分别如表2、表3所示。

表2 节点边际电价

名称	节点边际电价
北部区域	2
南部区域	1

表3 机组出力优化结果

节点	出力优化结果/MW
1	40
2	0
5	0
8	0
11	80
13	150

可以发现,两个区域的节点边际电价并不相同。南部区域的边际机组为节点13的机组,其边际电价为1;北部区域的边际机组为节点1的机组,其边际电价为2。造成上述情况的原因在于线路4-12的潮流已达到其最大传输容量50 MW,造成南部区域的机组不能满足全网需求。

(2) 实时运行阻塞发生后的阻塞管理

设定如下运行场景:节点1~8的负荷预测偏差较大,每个节点实际负荷比预测负荷均高2 MW。

实际上由于线路4-12的潮流已达到其最大传输容量,因此南部区域节点13的机组尽管电价价格系数低,但不能传输到北部区域。而仅依靠节

点1、节点2和节点8的机组,其10 min升负荷速率合计仅有9 MW/10 min。调用式(12)的实时运行阻塞管理模型,为消除该阻塞各机组调用的容量如表4所示。

表4 实时运行阻塞优化结果

节点	阻塞调用容量/MW
1	3
2	7
5	3
8	3
11	0
13	0

该调控模式下阻塞成本为32。由于该成本为负荷预测偏差导致,故该成本由电网公司承担。

4 结束语

节点边际电价能够反映电力系统中各节点的供需关系,为各节点的定价提供依据。基于节点边际电价理论提出了一种实时运行阻塞管理方法,并基于阻塞贡献率将阻塞成本在电网和发电厂间进行分摊。算例表明,该模式有助于推动电网企业提升自身负荷预测、安全校核等业务水平,有助于提升发电企业的运行可靠性,特别是在当前风电等新能源快速发展的背景下,对风电的功率预测和出力控制提出了更高的要求。

参考文献

- [1] 张永平,焦连伟,陈寿孙,等.电力市场阻塞管理综述[J].电网技术,2003,27(8):1-9,32.
- [2] 郭金,谭忠富.金融输电权和输电期权在输电阻塞管理中应用[J].电力自动化设备,2004,24(6):61-64.
- [3] Reddy S S. Multi-objective based congestion management using generation rescheduling and load shedding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 852-863.
- [4] 肖健,文福拴.发电权交易的阻塞调度[J].电力系统自动化,2008,32(18):24-29.

(下转第86页)

- 力市场联动博弈分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1001-1008.
- [6] 方宇娟, 魏犇, 梅生伟, 等. 考虑节点边际价格的热电联产机组主从博弈竞价策略[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 682-687.
- [7] 吴诚, 高丙团, 汤奕, 等. 基于主从博弈的发电商与大用户双边合同交易模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 56-62.
- [8] 李俊, 刘俊勇, 谢连芳, 等. 发电侧与供电侧分时电价动态博弈联动研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 16-19.
- [9] 赵文会, 闫豪楠, 何威. 基于风火网非合作博弈的电力市场均衡模型[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 103-111.
- [10] 李清清, 周建中, 莫莉, 等. 基于通用博弈模型的电力市场均衡对比分析[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 14-19.
- [11] 张馨瑜, 陈启鑫, 葛睿, 等. 考虑灵活块交易的电力现货市场出清模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 35-41.
- [12] 郭鸿业, 陈启鑫, 钟海旺, 等. 基于标准化金融交割曲线的现货市场建设路径设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 1-8.
- (收稿日期: 2018-06-28) **EA**

(上接第81页)

- [5] 李才华, 杜松怀, 陈志文, 等. LMP机制下可中断负荷用于阻塞管理的最优调度方法[J]. 继电器, 2008, 36(4): 67-71.
- [6] 李海英, 李渝曾, 张少华, 等. 可中断负荷参与输电阻塞管理的模型与算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 17-21.
- [7] Ratra S, Singh P, Tiwari R. Soft computing techniques for congestion management in power systems[C]. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, Delhi, 2016: 1-5.
- [8] Moradi M H, Reisi A R, Hosseini S M. An optimal collaborative congestion management based on implementing DR[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5323-5334.
- [9] Nguyen D B, Scherpen J M A, Bliet F. Distributed optimal control of smart electricity grids with congestion management[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(2): 494-504.
- [10] 王秀丽, 甘志, 雷兵, 等. 输电阻塞管理的灵敏度分析模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 10-13, 22.
- [11] Dehnavi E, Abdi H. Determining optimal buses for implementing demand response as an effective congestion management method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1537-1544.
- [12] 沈瑜, 夏清, 康重庆, 等. 发电联合转移分布因子及快速静态安全校核算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 13-17.
- [13] CSL. IEEE-30 buses system[EB/OL]. (2010.10.01). <http://icseg.iti.illinois.edu/ieee-30-bus-system/>.
- (收稿日期: 2018-05-17) **EA**