

一种点对点阻塞电价计算方法

张瑞友¹, 韩 水², 张近朱³, 汪定伟¹

(1. 东北大学 信息科学工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 国家电力监管委员会东北监管局, 辽宁 沈阳 110006; 3. 东北电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 针对当前集中交易为主同时存在大用户直供试点的市场模式, 提出了一种点对点阻塞电价计算方法。给出了该算法的基本思想及详细描述, 根据集中交易中无约束经济调度和考虑单个阻塞线路传输容量经济调度购电成本的差值计算阻塞线路传输单位能量的阻塞费用, 进而基于功率传输分配系数矩阵计算点对点阻塞电价, 根据需要可以在协议双方之间分摊。该算法中, 加重阻塞的协议要支付阻塞费用, 而减轻阻塞的协议应得到阻塞补偿, 且阻塞费用(阻塞补偿)的大小取决于协议对阻塞线路潮流影响的程度。对 PJM 电力市场中的 5 节点算例进行了试算, 并与金融输电权进行了对比, 结果表明: 点对点阻塞电价计算方法能够提供有效管理阻塞的经济信号, 且简便易操作。

关键词: 双边交易; 阻塞管理; 点对点阻塞电价; 电力市场; 功率传输分布系数

中图分类号: F 123.9; TM 731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)06-0013-04

0 引言

电力体制改革后, 随着发电侧和负荷侧市场的逐步开放, 对电力系统的行政管制逐步转化为以价格为导向的市场机制。市场机制能很好地降低电力生产和传输成本, 提高社会效益, 但由于市场各方可自由地进行交易, 对电力系统的调度和管理提出了更高要求, 也大大增加了输电阻塞发生的可能性。当阻塞发生时, 首先考虑优化网络结构和控制器参数, 包括调整母线运行方式和拓扑结构等, 改变潮流分布以化解阻塞。当网络优化技术不能彻底消除阻塞时, 必须对各机组进行再调度, 并对因此造成的阻塞成本进行分摊, 出现了不同的阻塞调度与定价模式^[1-2]。

为了分摊阻塞成本, 首先出现了节点边际电价(LMP)机制^[3-4], 例如美国 PJM (Pennsylvania - New Jersey - Maryland) 电力市场就使用基于直流潮流方程的 LMP 机制配合金融输电权(FTR)管理阻塞。为了在电价中体现输电损失, 文献[5]将网损分布因子引入到 LMP 的计算中, 这样得到的 LMP 不依赖于松弛节点的选择, 但取决于网损分布因子的值。LMP 机制对网络条件和运行特性相当敏感, 易造成电价的过大波动, 因此, 研究人员提出用区域电价(ZMP)法代替 LMP, 包括基于直流潮流方程的 ZMP 机制^[6]和基于交流系统的区域阻塞管理模式^[7], 但问题是其中的区域边界难以确定^[8]。文献[9]从成本结构、响应延迟、市场力等角度分析了这种使用价格信号控制电力系统的问题。文献[10]认为可以根据一些关键母线划分区域, 进而可以简便地计算各节点

LMP, 文献[11]分析了以上电价计算方法中功率传输分布因子(PTDF)计算误差对结果的影响。在某种情况下, 统一边际电价(UMP)和 ZMP 不影响总社会剩余, 只是总社会剩余在发电商与负荷之间的分摊^[12]。此外, 在负荷侧可根据可中断负荷来缓解阻塞^[13]。

基于以上研究工作, 提出一种点对点阻塞电价计算方法, 可用于存在大量集中交易前提下大用户直供中阻塞电价的计算。我国当前电力市场以集中交易为主, 而且年合约所占比例较大, 年合约签订之后有些输电线路可能已经发生阻塞。根据考虑某线路传输容量经济调度下购电成本和不考虑线路传输容量经济调度下购电成本的差异, 可以计算出各阻塞线路传输单位能量的阻塞成本。根据直供协议对阻塞线路潮流的影响和该线路传输单位能量的阻塞成本计算阻塞电价, 加重阻塞的协议将收取阻塞费用, 减轻阻塞的协议将得到阻塞补偿, 这样可以为协议双方提供经济信号。根据需要, 阻塞费用(补偿)可以在协议双方之间分摊。最后的 5 节点算例以及和金融输电权的对比进一步说明了算法的有效性。

1 点对点阻塞电价

1.1 基本思想

大部分输电协议签订的时候, 已经签订了另外一些输电协议, 而且有些输电线路的潮流可能已经达到或接近其传输容量, 网络已经发生输电阻塞。相对于已经签订的输电协议而言, 如果待签订协议交易电量(或电力)较小, 一般不会改变发生阻塞线路潮流的方向。这种情况下, 可以根据已签订协议和已发生的阻塞为待签协议制定阻塞电价, 不但能提供经济信号, 而且简单易操作。

我国当前电力市场以发电侧集中交易模式为主, 而且长期输电合同(例如年合约)所占比例较大。

收稿日期: 2006-09-08; 修回日期: 2006-12-29
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(70431003); 国家自然科学基金创新团队项目(60521003); 国家支撑计划项目(2006BAH02A09)

因此,所讨论的已签订协议部分为集中交易模式,待签订协议部分为大用户直供(双边交易模式)。

某双边协议交易单位能量对各阻塞线路潮流的影响可以由功率传输分配系数矩阵得到,而阻塞线路传输单位能量的成本基于已签订协议计算,这里取考虑该线路传输容量经济调度下购电成本和不考虑线路传输容量经济调度下购电成本的差异。不同市场出清方案下平均购电成本不同,这里以 UMP 和按报价支付(PAB) 2 种应用较为广泛的出清方案为例,计算了点对点阻塞电价。根据需要,可以在协议双方之间分摊阻塞费用(补偿)。

1.2 算法描述

步骤 1 计算不考虑线路容量的总购电成本。

根据预测的负荷和机组报价,不考虑各线路的传输容量,以总购电成本最小为目标对各机组进行调度,即无约束经济调度,得到发生阻塞的线路集合 L 和总购电成本 C 。

步骤 2 计算考虑单个阻塞线路容量总购电成本。

在步骤 1 无约束经济调度的基础上,增加阻塞线路 $l \in L$ 的传输容量约束(仍然不考虑其他线路的传输容量),重新求解最优出力方案,得到相应的总购电成本 C_l ,计算公式如下:

$$\text{UMP 方法 } C_l = \max_{\substack{u_{gl}^* > 0 \\ u_{gl}^*}} p_g \sum u_{gl}^* \quad (1)$$

$$\text{PAB 方法 } C_l = \sum_{\substack{u_{gl}^* > 0 \\ u_{gl}^*}} p_g^* u_{gl}^* \quad (2)$$

式中 下标 g 表示机组, p_g 为机组 g 的报价; u_{gl}^* 为考虑线路 l 容量下机组 g 的最优出力。

步骤 3 计算阻塞线路传输单位能量阻塞成本。

总购电成本的改变量($C_l - C$)仅仅因为考虑了阻塞线路 l 的传输容量而引起,因此可以理解为阻塞线路 l 的阻塞成本。所以,阻塞线路 l 传输单位能量的阻塞成本 P_l 计算公式为

$$P_l = (C_l - C) / |f_l^*| \quad (3)$$

式中 f_l^* 为安全约束经济调度下线路 l 的有功潮流。

反复进行步骤 2 和步骤 3,直至把所有发生阻塞的线路 $l \in L$ 传输单位能量的阻塞成本 P_l 计算完毕。

步骤 4 计算点对点阻塞电价。

节点 n_1 向节点 n_2 输送单位能量对阻塞线路 l 有功潮流的影响可以用 $(T_{n1l} - T_{n2l})$ 表示,其中 T_{n1l} 和 T_{n2l} 分别为功率传输分配系数矩阵的第 n_1 行和第 n_2 行,第 l 列的元素。

考虑到参考状态(步骤 1 无约束经济调度对应的状态)下阻塞线路 l 有功潮流 f_l 的方向,以 s_l 表示:

$$s_l = \begin{cases} 1 & f_l > 0 \\ 0 & f_l = 0 \\ -1 & f_l < 0 \end{cases} \quad (4)$$

如果 $(T_{n1l} - T_{n2l})s_l > 0$,则节点 n_1 向 n_2 输送能量将增加阻塞线路 l 的有功潮流,即加重输电阻塞;如果

$(T_{n1l} - T_{n2l})s_l < 0$,则节点 n_1 向 n_2 输送能量将减小阻塞线路 l 的有功潮流,即减轻输电阻塞。

在 $(T_{n1l} - T_{n2l})s_l$ 基础上乘以阻塞线路 l 传输单位能量的阻塞成本 P_l , $(T_{n1l} - T_{n2l})s_l P_l$ 表示考虑节点 n_1 向 n_2 输送单位能量对阻塞线路 l 的影响收取的阻塞费用(或补偿)。对所有阻塞线路 $l \in L$ 求和,得到考虑所有阻塞线路的点对点阻塞电价 p_{n1n2} :

$$p_{n1n2} = \sum_{l \in L} (T_{n1l} - T_{n2l})s_l P_l \quad n_1, n_2 = 1, \dots, N \quad (5)$$

式中 N 为系统中节点个数。

关于点对点阻塞电价,容易得到如下 2 个特点:

$$p_{n1n1} = 0 \quad n_1 = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$p_{n1n2} = -p_{n2n1} \quad n_1, n_2 = 1, \dots, N \quad (7)$$

即,如果节点 n_1 向 n_2 输送能量的阻塞电价为 p_{n1n2} ,则 n_2 向 n_1 输送能量的阻塞电价一定为 $-p_{n1n2}$ 。所以只需循环计算式(5) $N(N-1)/2$ 次,而且只需一个上三角矩阵便可以表示点对点阻塞电价。任意双边协议要支付的阻塞费用可以从这个上三角矩阵中查到,因此称为面向协议的点对点阻塞电价。

步骤 5 协议双方的分摊。

给定分摊系数 λ ,协议双方按照该比例分摊点对点阻塞电价。对于一个从节点 n_1 输送能量到 n_2 的双边协议,能量的发送方和接收方要支付的阻塞电价分别为

$$p_{n1n2}^{n1} = \lambda p_{n1n2} \quad (8)$$

$$p_{n1n2}^{n2} = (1 - \lambda) p_{n1n2} \quad (9)$$

这种形式便于分析协议双方要支付的阻塞费用,称为面向协议双方的阻塞电价。

2 算例及分析

应用这种方法对大量算例进行了计算,现给出 PJM 电力市场中的一个 5 节点算例^[5]。

2.1 已知条件

如图 1 所示,系统中有 $A \sim E$ 共 5 个节点,其中 B, C, D 3 个节点各有负荷 300 MW; 6 条输电线路,电抗(标么值)标于图 1 中,其中线路 $D-E$ 传输容量 240 MW; 竞价机组有 $G_1 \sim G_5$,所处节点标于图 1 中,机组报价与容量如表 1 所示。

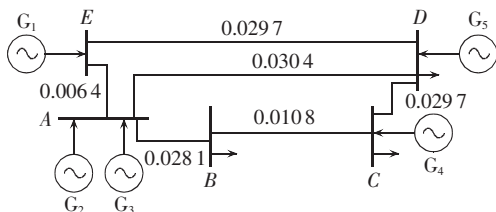


图 1 5 节点算例拓扑结构

Fig.1 Topology of a five-node system example

2.2 计算结果及有效性分析

无约束经济调度得到各机组出力和对应各线路潮流如图 2 所示。可见,线路 $D-E$ 的有功潮流为 260 MW,超过了其输电容量,发生了阻塞。进而计

表 1 机组报价及容量

Tab.1 Bids and capacities of generators

机组	容量/MW	报价/[$\$ \cdot (\text{MW})^{-1}$]
G ₁	600	87 600
G ₂	110	122 640
G ₃	100	131 400
G ₄	500	262 800
G ₅	200	306 600

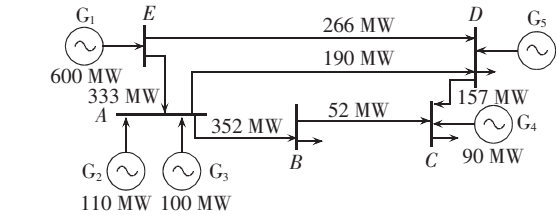


图 2 无约束经济调度对应机组出力 and 线路潮流
Fig.2 Outputs of generators and branch flows by economic dispatch without constraint

算出面向协议的点对点阻塞电价(单位:\$/MW)分别如表 2 和表 3 所示。

表 2、3 为上三角矩阵,表中,行、列标题分别为能量发送、接收节点;正值表示要交纳阻塞费用,负值表示能得到阻塞补偿。表 2 和表 3 中可以直接查到发送节点编号小于接收节点编号的协议要支付的阻塞电价,例如 UMP 方法中节点 A 向节点 B 输送能量的协议要支付阻塞电价 22 294 \$/MW。对于发送节点编号大于接收节点编号的协议,根据式(7)从表中取相反数得到,例如节点 B 向节点 A 输送能量的协议将得到阻塞补偿 22 294 \$/MW。

表 2 UMP 方法面向协议阻塞电价

Tab.2 Agreement-oriented congestion prices by UMP approach

节点	A	B	C	D	E
A	0	22 294	30 863	54 428	-16 536
B		0	8 568	32 133	-38 830
C			0	23 564	-47 399
D				0	-70 964
E					0

表 3 PAB 方法面向协议阻塞电价

Tab.3 Agreement-oriented congestion prices by PAB approach

节点	A	B	C	D	E
A	0	5 458	7 557	13 327	-4 049
B		0	2 098	7 868	-9 508
C			0	5 769	-11 606
D				0	-17 376
E					0

不论 UMP 方法还是 PAB 方法,都满足如下结论:越是加重阻塞的双边协议要支付越高的阻塞费用,越是减轻阻塞的双边协议能得到越高的阻塞补偿。例如,节点 E 向节点 D 输电的协议增加阻塞最重,所以要支付最高的阻塞费用 17 376 \$/MW(以 PAB 方法为例),而相反的双边协议会得到最高的阻塞补偿。这为以后签订的双边协议提供了适当的经济信号,

能有效地管理阻塞。分摊系数 λ 取 0.3,可以得到面向协议双方的点对点阻塞电价,以 UMP 方法为例,结果如表 4 所示(单位:\$/MW)。例如,节点 A 向节点 B 输电,A 和 B 要支付的阻塞费用分别为 6 688 \$/MW 和 15 606 \$/MW,其和为 22 294 \$/MW,这与表 2 是一致的。

表 4 UMP 方法面向协议双方阻塞电价

Tab.4 Agreement-oriented congestion prices by UMP approach

节点	A	B	C	D	E
A	0	6 688	9 258	16 328	-4 961
B	15 606	0	2 570	9 640	-11 649
C	21 604	5 998	0	7 068	-14 219
D	38 099	22 493	16 494	0	-21 289
E	-11 575	-27 181	-33 179	-49 674	0

2.3 与 LMP-FTR 机制对比分析

基于节点边际电价的金融输电权机制(LMP-FTR)能够很好地管理输电阻塞^[14],但是实现复杂,成本较高。以各点对之间 LMP 的差异作为 FTR,和点对点阻塞电价的结果一起列于图 3 中(图中 C 为阻塞费用,n 为节点对)。可见,对于这 3 种方法,支付阻塞费用的点对都要支付阻塞费用,得到补偿的点对都能得到阻塞补偿,而且阻塞费用(补偿)的大小成一定比例。如果将 3 组数据归一化,则 3 种方法基本一致,这从另一个角度说明这种方法可以有效地管理阻塞,而且方法简单易操作。

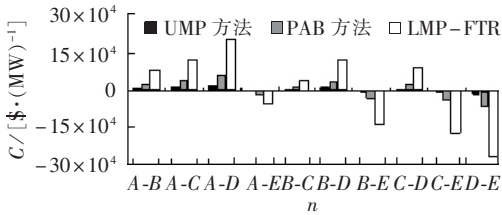


图 3 点对点阻塞电价及 LMP-FTR
Fig.3 Node-to-node congestion prices and LMP-FTR

3 结论

针对某协议待签订时已签订了其他一些协议的情况,提出了一种根据已签订协议为待签订协议制定阻塞电价的方法。该方法根据考虑某线路容量和不考虑线路容量经济调度下购电成本的差异计算阻塞线路传输单位能量的阻塞成本,利用功率传输分配系数矩阵计算点对点阻塞电价。加重阻塞的协议要支付阻塞费用,减轻阻塞的协议应得到阻塞补偿,且阻塞费用(阻塞补偿)的大小取决于协议对阻塞线路潮流影响程度。算例及与金融输电权的对比表明这种方法能有效地管理阻塞,而且简便易操作。

致 谢

此文承蒙国家电力监管委员会东北监管局市场处副处长张锐博士审阅并提出宝贵意见,特此致谢!

参考文献:

[1] 杨洪明,段献忠,何仰赞. 阻塞费用的计算和分摊方法[J]. 电力

自动化设备,2002,22(5):10-13.

YANG Hong-ming, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan. Calculation and allocation of congestion cost[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(5): 10-13.

- [2] BARAN M E, BANUNARAYANAN V, GARREN K E. Equitable allocation of congestion relief cost to transactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 579-585.
- [3] 张瑞友, 韩水, 张近朱, 等. PJM 节点边际电价计算方法及其应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(11): 1033-1035.
ZHANG Rui-you, HAN Shui, ZHANG Jin-zhu, et al. LMP calculation on PJM power market and its trial in China[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2005, 26(11): 1033-1035.
- [4] WU T, ALAYWAN Z, PAPAEXOPOULOS A D. Locational marginal price calculations using the distributed-slack power-flow formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1188-1190.
- [5] LITVINOV E, ZHENG T, ROSENWALD G, et al. Marginal loss modeling in LMP calculation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 880-888.
- [6] ZHANG Rui-you, SHU An-jie, HAN Shui, et al. NETA approach of power transmission pricing and its tryout in northeastern power grid of China[C/CD]//2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE, 2005.
- [7] KUMAR A, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. A zonal congestion management approach using ac transmission congestion distribution factors[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 72(1): 85-93.
- [8] WU Y. Comparison of pricing schemes of several deregulated electricity markets in the world[C/CD]//2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE, 2005.
- [9] ALVARADO F L. Controlling power systems with price signals

[J]. Decision Support Systems, 2005, 40(3/4): 495-504.

- [10] HAMOUD G, BRADLEY I. Assessment of transmission congestion cost and locational marginal pricing in a competitive electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 769-775.
- [11] LIU M, GROSS G. Role of distribution factors in congestion revenue rights applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 802-810.
- [12] DING F, FULLER J D. Nodal, uniform, or zonal pricing: distribution of economic surplus[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 875-882.
- [13] 刘昌, 姚建刚, 余虎, 等. 一种新型的电网输电阻塞管理模式[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 16-21.
LIU Chang, YAO Jian-gang, YU Hu, et al. Research of a new congestion management mode[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 16-21.
- [14] 袁智强, 侯志俭, 蒋传文, 等. 输电服务定价的研究进展[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 81-86.
YUAN Zhi-qiang, HOU Zhi-jian, JIANG Chuan-wen, et al. Introduction of transmission service pricing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 81-86.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

张瑞友(1979-), 男, 辽宁朝阳人, 讲师, 博士, 研究方向为电力市场中的建模与优化(E-mail: zhangruiyou@ise.neu.edu.cn);

韩水(1957-), 男, 辽宁大连人, 教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为电力市场理论、电力系统运行等;

张近朱(1953-), 男, 辽宁沈阳人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力经济等;

汪定伟(1948-), 男, 江西彭泽人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为系统工程、建模与优化等。

Calculation of node-to-node congestion price

ZHANG Rui-you¹, HAN Shui², ZHANG Jin-zhu³, WANG Ding-wei¹

(1. Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Northeast China Bureau of State Electricity Regulatory Commission of China, Shenyang 110006, China; 3. Northeastern Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China)

Abstract: To the current trial power market with primary centralized-agreements and a few bilateral-agreements, a calculation approach for node-to-node congestion price is introduced. Its basic concept and detailed formulation are given. The congestion cost of each congested line for unit energy transmission is calculated according to the difference of the total energy cost between the economic dispatch with the corresponding single line capacity constraint and without any line capacity constraint. The node-to-node congestion prices are then computed based on the power transmission distribution factors. If necessary, the congestion price can be allocated to both parties of an agreement. The agreements aggravating congestion are charged while the agreements alleviating congestion are compensated, and the amount (congestion charge or compensation) depends on the influence on the congested power flows. A five-node example from the PJM power market is tested and compared with the financial transmission rights mode. Results indicate that this approach is easy to operate, supplying the economic signals for effective congestion management.

This project is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China(70431003), the Innovative Research Team Project of National Natural Science Foundation of China(60521003) and the National Supporting Plan(2006BAH02A09).

Key words: bilateral agreement; congestion management; node-to-node congestion price; power market; power transmission distribution factor