

电力市场输电阻塞管理

汤振飞¹, 于尔铿², 唐国庆¹

(1. 东南大学电气工程系, 南京 210096; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100085)

摘要: 输电阻塞是电力系统运行中常见的问题, 文中讨论了电力市场环境下输电线路的阻塞管理及阻塞价格因子的确定方法。由于在电力市场环境下各成员之间的关系是经济利益的关系, 所以用基于行政命令方式的发电再调度来消除阻塞行不通, 而必须通过激活输电线路的阻塞价格因子来抬高输电价格, 使得供求均衡点维持在线路容量极限之内, 从而消除阻塞。由于在市场中无法得到线路两端市场准确的需求与供给的变化规律, 所以必须通过多次交互试探的方法来确定输电线路的阻塞价格因子, 文中给出了有关的实用算法。

关键词: 电力市场; 阻塞; 定价

中图分类号: TM 73; F 123.9

0 引言

输电线路是将电能从发电机送往用户的通道, 由于输电线路总有其输送容量的极限, 当某条输电线路的潮流量达到或超过其输送容量极限时, 就发生了输电阻塞现象。

线路可用传输容量 (available transmission capacity, 缩写为 ATC) 反映了在当前运行状态下线路的容量极限与其当前潮流的差值^[1]。显然, 线路发生阻塞现象就是 ATC 为 0 的情况。

随着电力市场改革的深入, 出现了许多新的问题。电力市场中网络潮流的分布主要取决于电力交易的分布, 而电力交易以利润最大化为导向, 于是不可避免地出现系统中某些输电价格较低的线路或某些电能价格较低的发电机周围的线路往往承载着较重的负荷, 增加了发生阻塞的机会。同时, 电力市场中系统各成员之间的关系是纯粹的经济利益关系, 传统的以行政命令方式通过发电再调度来消除输电阻塞的方法在电力市场中已不再奏效, 必须利用电价这一杠杆来对市场各成员进行协调。本文拟就电力市场中输电阻塞管理的原理与阻塞定价的实用算法进行讨论。

1 输电阻塞管理的经济学原理

1.1 输电阻塞管理的经济学模型

由于输电的天然垄断性, 输电市场是管制运行的, 输电价格的制定、输电阻塞的管理, 以及输电线路的扩建规划与管理都由一个独立的机构负责。

如图 1 所示的输电线路 i , 其输送容量极限为 $Q_{i,c}$, 其潮流起止点分别为节点 j 和节点 k , 它们分别构成一个局部市场 (节点市场), 市场价格分别为 ρ_j 和 ρ_k 。 $g_j(Q_j)$ 为供应方 (节点 j) 的供应成本函数, $f_k(Q_k)$ 为需求方 (节点 k) 的需求效用函数。一个 (局部) 市场达到均衡状态是指市场的供求双方在价格和数量上同时达到相等, 是市场达到相对稳定的状态。当节点 j 和节点 k 市场分别达到供求均衡时, 存在 $\rho_j = g_j(Q_j)$ 和 $\rho_k = f_k(Q_k)$ 的关系。

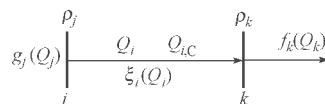


图 1 输电线路 i 示意图

Fig. 1 Scheme of transmission line i

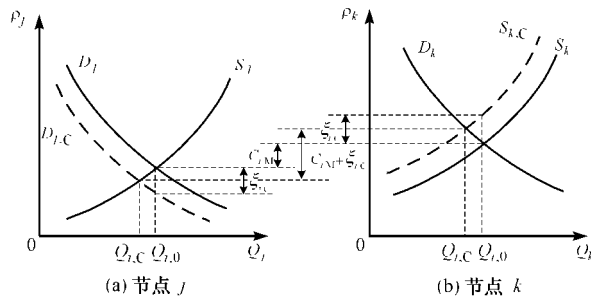
线路 i 的输电价格 $\xi_i(Q_i)$ 和线路 i 的阻塞价格因子 $\xi_{c,i}(Q_i)$ 为^[2]:

$$\begin{aligned} \xi_i(Q_i) &= \xi_{L,i}(Q_i) + \xi_{M,i}(Q_i) + \xi_{c,i}(Q_i) = \\ &C_{i,M}(Q_i) + \xi_{c,i}(Q_i) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \xi_{c,i}(Q_i) > 0 & Q_i \geq Q_{i,c} \\ \xi_{c,i}(Q_i) = 0 & Q_i < Q_{i,c} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\xi_{L,i}(Q_i)$ 是输电线路 i 的损耗价格成分; $\xi_{M,i}(Q_i)$ 是输电线路 i 的运行维护价格成分; $C_{i,M}(Q_i) = \xi_{L,i}(Q_i) + \xi_{M,i}(Q_i)$ 是输电线路 i 的输电边际成本; 输电线路 i 的收支通过周转基金方法进行平衡, 故收支平衡项不出现在输电价格中。

节点 j 市场的供求曲线如图 2(a) 的 S_j 和 D_j 所示, 节点 k 市场的供求曲线如图 2(b) 的 S_k 和 D_k 所示。

图2 线路*i*输电阻塞管理示意图Fig. 2 Schematic diagram of line *i* transmission congestion management

由这两个市场的关系可得 S_k 的价格为:

$$R_k(Q_k) = g_j(Q_j) + \xi(Q_i) \quad (3)$$

同样可得 D_j 的价格为:

$$R_j(Q_j) = f_k(Q_k) - \xi(Q_i) \quad (4)$$

若忽略输电线路的损耗,则 $Q_j = Q_k = Q_i$, 节点 j 市场达到均衡的条件为^[3]:

$$g_j(Q_j) = R_j(Q_j)$$

$$\text{即 } g_j(Q_i) = f_k(Q_i) - \xi(Q_i) \quad (5)$$

节点 k 市场达到均衡的条件为:

$$R_k(Q_k) = f_k(Q_k)$$

$$\text{即 } g_j(Q_i) + \xi(Q_i) = f_k(Q_i) \quad (6)$$

式(5)和式(6)是等价的,即线路两端的节点 j 和 k 市场的均衡条件是一致的。

如果将 $\xi_c(Q_i)$ 设置为 0 而出现线路潮流越界 ($Q_i \geq Q_{i,c}$) 的情况,该线路就发生了输电阻塞现象,如图 2 的 $Q_{i,0}$ 点所示。在电力市场中,需要激活阻塞价格因子 $\xi_c(Q_i)$ 以抬高输电价格,使节点 k 市场的供应价格升高(节点 k 市场的曲线 S_k 移动到 $S_{k,c}$,相应地节点 j 市场的曲线 D_j 移动到 $D_{j,c}$),使市场均衡点从 $Q_{i,0}$ 移动到 $Q_{i,c}$,从而消除阻塞(过程如图 2 所示)。根据式(5)或式(6),此时有如下关系:

$$g_j(Q_{i,c}) + C_{i,M}(Q_{i,c}) + \xi_c(Q_{i,c}) = f_k(Q_{i,c})$$

即

$$\xi_c(Q_{i,c}) = f_k(Q_{i,c}) - g_j(Q_{i,c}) - C_{i,M}(Q_{i,c}) \quad (7)$$

由式(7)可以确定合适的阻塞价格因子数值。

对于如图 3 所示的节点 k 市场存在多条供电线路的情况,需要考虑在线路 i 抬高输电价格后其他供电线路的反应。节点 k 市场的均衡条件为:

$$g_j(Q_i) + C_{i,M}(Q_i) + \xi_c(Q_i) = f_k(Q_i + Q_n) \quad (8)$$

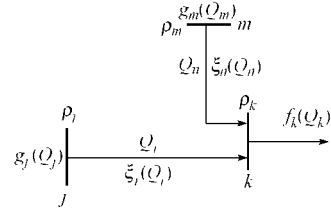
$$g_m(Q_n) + \xi(Q_n) = f_k(Q_i + Q_n) \quad (9)$$

当线路 i 发生阻塞并通过激活阻塞价格因子来消除阻塞时有如下关系:

$$g_j(Q_{i,c}) + C_{i,M}(Q_{i,c}) + \xi_c(Q_{i,c}) = f_k(Q_{i,c} + Q_n) \quad (10)$$

$$g_m(Q_n) + \xi(Q_n) = f_k(Q_{i,c} + Q_n) \quad (11)$$

求解式(10)、式(11),可得 $\xi_c(Q_{i,c})$ 及 Q_n 。

图3 节点 k 市场存在多条供电线路的情况Fig. 3 Scheme of multiple-suppliers in bus market k

1.2 输电阻塞价格因子的经济信号作用

输电阻塞价格因子具有丰富的经济学信号。从短期看,阻塞价格因子向受阻塞地区提供了正确的促使阻塞缓解的经济信号。由式(8)和式(9)可得:

$$Q_i = f_k^{-1}(g_j + C_{i,M} + \xi_c) - g_m^{-1}(g_j + C_{i,M} + \xi_c - \xi) \quad (12)$$

式(12)右边的第1项 $f_k^{-1}(g_j + C_{i,M} + \xi_c)$ 代表节点 k 市场的用电量,由于其是单调递减函数,因而 ξ_c 的上升使 $f_k^{-1}(g_j + C_{i,M} + \xi_c)$ 下降,说明输电费用升高致使受阻塞地区市场电价上升,促使其减少用电量,以缓解阻塞。

式(12)右边第2项 $g_m^{-1}(g_j + C_{i,M} + \xi_c - \xi)$ 代表节点 k 市场从线路 n 的购电量,由于其是单调递增函数,因而 ξ_c 的上升使 $g_m^{-1}(g_j + C_{i,M} + \xi_c - \xi)$ 上升,说明阻塞价格因子的作用不但促使受阻地区减少用电量,而且通过其他线路增加了向邻近区域(如节点 m)的购电量,即通过转移购电方向来加速消除阻塞。

从长期看,阻塞价格因子给输电线路的扩建也提供了正确的经济信号。由于采取周转基金法进行收益平衡调节,当某输电线路发生经常性的阻塞后将使得该线路的收入明显增多,周转基金充裕,为其扩建提供了经济信号,同时也做好了资金准备,通过线路扩建从根本上消除阻塞。

总之,电力市场具有消除阻塞的内在机理。

2 输电阻塞价格因子的实用算法

虽然理论上由式(7)或式(10)、式(11)可以方便地确定阻塞价格因子的数值,但是在电力市场中,市场成员往往不愿透露自己的成本信息,所以 $g_j(Q_j)$ 和 $f_k(Q_k)$ 难以从市场中直接得到,可以通过供求弹性的方法来加以确定。

供求弹性反映了市场供应方(需求方)市场价格的变化与所造成的供应量(需求量)的变化量的关系,可以通过市场观察与统计而近似得到。

市场供应弹性为:

$$E_s = \frac{\Delta Q_s}{\Delta P_s} \quad (13)$$

市场需求弹性为:

$$E_D = \frac{\Delta Q_D}{\Delta P_D} \quad (14)$$

供应(需求)弹性反映了供应(需求)的内在规律,是一个相对稳定的量。但供应(需求)情况的改变往往导致其曲线的移动,因此在利用式(13)和式(14)分析供求弹性时必须排除因曲线移动造成的影响。

如图4所示,不妨假设供应曲线 S 没有变化,需求曲线由于用电情况的变化从 D_0 向上移动到 D_1 ,造成线路 i 的潮流 $Q_{i,1} > Q_{i,c}$,即发生了输电阻塞现象。此时必须要激活阻塞价格因子以将线路潮流拉回到线路容量极限之内。

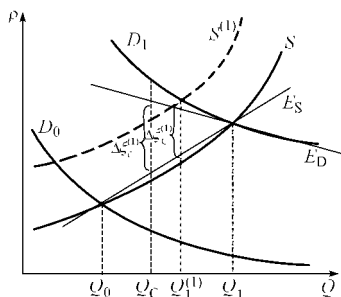


图4 输电阻塞价格因子计算示意图

Fig. 4 Scheme of congestion factor determination

根据式(10)并运用供求弹性概念可得:

$$\begin{aligned} \xi_{c,i}(Q_{i,c}) &= f_k(Q_{k,1}) + \frac{Q_{i,c} - Q_{i,1}}{E_{D,k} - \sum_{\substack{n \in k \\ n \neq i}} E_{S,n}} - \\ &g_j(Q_{j,1}) - \frac{Q_{i,c} - Q_{i,1}}{E_{S,j}} - C_{i,M}(Q_{i,c}) = \\ &(Q_{i,c} - Q_{i,1}) \left[\frac{1}{E_{D,k} - \sum_{\substack{n \in k \\ n \neq i}} E_{S,n}} - \right. \\ &\left. \frac{1}{E_{S,j}} \right] + C_{i,M}(Q_{i,1}) - C_{i,M}(Q_{i,c}) \quad (15) \end{aligned}$$

若忽略线路边际成本在此过程中的变化,式(15)可简化为:

$$\xi_{c,i}(Q_{i,c}) = (Q_{i,c} - Q_{i,1}) \left[\frac{1}{E_{D,k} - \sum_{\substack{n \in k \\ n \neq i}} E_{S,n}} - \frac{1}{E_{S,j}} \right] \quad (16)$$

由于通过市场观察与统计不可能得到准确的 E_D 和 E_S ,同时市场供求规律也在不断的变化之中, E_D 和 E_S 需要不断地进行修正,所以需要多次试探、迭代才能最终确定阻塞价格因子。式(16)的迭代形式为:

$$\begin{aligned} \Delta \xi_{c,i}^t &= (Q_{i,c} - Q_{i,c}^{(t-1)}) \left[\frac{1}{E_{D,k} - \sum_{\substack{n \in k \\ n \neq i}} E_{S,n}} - \frac{1}{E_{S,j}} \right] \\ g_i(Q_j^{(t)}) + C_{i,M}(Q_{i,c}^{(t)}) + \sum_t \Delta \xi_{c,i}^t &= f_k(Q_k^{(t)}) \quad (18) \end{aligned}$$

其中 t 为迭代次数; $Q_{i,c}^{(0)} = Q_{i,1}$ 。

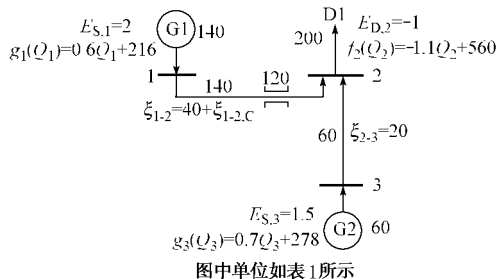
在具体操作中,式(17)由输电管理机构计算得出并及时向市场发布,式(18)代表实际市场的均衡过程,从中可得到 $Q_{i,c}^{(t)}$ 、 $Q_j^{(t)}$ 和 $Q_k^{(t)}$ 。逐次进行这样的交互迭代,直到 $Q_{i,c}^{(t)} \approx Q_{i,c}$ 为止,其示意过程如图4所示。阻塞价格因子为:

$$\xi_{c,i}(Q_{i,c}) = \sum_t \Delta \xi_{c,i}^t \quad (19)$$

迭代过程需满足 $|Q_{i,c}^{(t)} - Q_{i,c}| < |Q_{i,c}^{(t-1)} - Q_{i,c}|$ 以确保迭代收敛。若连续多步出现 $|Q_{i,c}^{(t)} - Q_{i,c}| \geq |Q_{i,c}^{(t-1)} - Q_{i,c}|$,则在排除供求曲线移动影响的情况下,需要对 E_D 和 E_S 做适当修正以确保迭代收敛。

3 算例分析

图5所示为3节点系统,线路1-2的容量极限为120 MW。图中列出了各节点市场的供求弹性、发电(用电)规律、初始潮流及线路1-2和2-3的输电费用。输电阻塞管理过程的数据如表1所示。



图中单位如表1所示

图5 3节点系统图

Fig. 5 An example of three-bus system

表1 输电阻塞管理过程的数据

Table 1 Data of transmission congestion management

t	$\xi_{2,c}^t /$ 元	$\Delta \xi_{2,c}^t /$ 元	$g_1^{(t)} /$ 元	$f_2^{(t)} /$ 元	$g_3^{(t)} /$ 元
0	0.0	0.0	300.0	340.0	320.0
1	18.0	18.0	289.5	347.5	327.5
2	20.2	2.2	288.2	348.4	328.4
t	$Q_1^{(t)} /$ MW	$Q_2^{(t)} /$ MW	$Q_3^{(t)} /$ MW	$Q_{1-2,c}^{(t)} /$ MW	$Q_{2-3,c}^{(t)} /$ MW
0	140.0	200.0	60.0	140.0	60.0
1	122.5	193.2	70.7	122.5	70.7
2	120.3	194.0	72.0	120.3	72.0

从算例可见, $t=1$ 时 $Q_{2,c}^{(1)}$ 减少了 17.5 MW, 其中 6.8 MW 是由于节点 2 市场自身用电量的减少, 另外减少的 10.7 MW 是由于节点 2 市场转向节点 3 市场增加的购电量。

4 结论

本文分析了输电阻塞价格因子消除输电阻塞的经济学原理及阻塞价格因子的经济信号作用, 指出阻塞价格因子为通过市场手段消除阻塞提供了正确而丰富的经济信号, 从短期看阻塞价格因子促使受阻地区减少用电量并通过转移购电方向来缓解阻塞, 从长期看阻塞价格因子为输电线路的扩建提供了正确的经济信号并做了资金准备。电力市场具有消除输电阻塞的内在机理。

由于在电力市场中难以得到阻塞线路两端市场准确的供求规律, 因而难以用解析的方法直接确定阻塞价格因子数值, 本文提出利用供求弹性的概念

通过市场中多次试探迭代来确定阻塞价格因子。

参考文献

- 1 Sauer P W, Grijalva Santiago. Error Analysis in Electric Power System Available Transfer Capability Computation. Decision Support System, 1999 (24) : 321~330
- 2 Schweppe F C, Caramanis M C, Tabor R D, et al. Spot Pricing of Electricity. Kluwer (Boston) : Kluwer, 1988
- 3 高鸿业(Gao Hongye). 西方经济学(上册: 微观部分) (Western Economics: Microeconomics). 北京: 中国经济出版社(Beijing: China Economic Press), 1995

汤振飞, 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场。

于尔铿, 男, 教授, 国家突出贡献专家, 研究方向为 EMS、电力市场等。

唐国庆, 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统运行与控制、电力电子在电力系统中的应用、电力市场等。

TRANSMISSION CONGESTION MANAGEMENT IN POWER MARKET

Tang Zhenfei¹(12)Yu Erkeng²(12)Tang Guoqing¹

²¹ · South East Univeristy ¹⁸Nanjing 210096 ¹⁸China ¹⁴.

²² · Electrical Power Research Institute of China ¹⁸Beijing 100085 ¹⁸China ¹⁴.

Abstract⁽³⁾Transmission congestion is a popular phenomenon of power system operation. The management of transmission congestion and the determination of congestion price factor in power market are analyzed. Due to the economic relationships among power market members¹⁸the congestion release based on administrative generation dispatch is on longer available. It must be replaced by the method of exciting the congestion factor to raise up the transmission price so as to make the market supply-demand equilibrium point within the transmission capacity limit. However¹⁸the demand and supply laws of the transmission line two-side markets can not be gotten exactly through markets¹⁸the congestion factor must be determined by iteration. Its practical algorithm is also provided in this paper.

Keywords⁽³⁾power market²⁰congestion²⁰pricing

(上接第 12 页 continued from page 12)

RESEARCH OF PEAK AND VALLEY TIME PERIOD PARTITION APPROACH AND TOU PRICE ON DSM

Ding Ning⁽¹²⁾Wu Junji⁽¹²⁾Zou Yun

²Nanjing University of Science and Technology ¹⁸Nanjing 210094 ¹⁸China ¹⁴.

Abstract⁽³⁾Time-of-use ²TOU ¹⁴tariff is one of the most efficient measures for modern demand side management ²DSM ¹⁴. It is beneficial to flat the load curve if the peak and valley time periods are partitioned appropriately. Based on the analysis of the possible point-wise peak-valley distributions of load curves via fuzzy semi-gradient subordinate degree function method¹⁸a TOU price model is proposed in this paper in consideration of the response-model of various users on demand side. A new approach of peak-valley time-period partitioning and TOU tariff setting is thus presented by optimizing the TOU price model as above of the performance function in DSM. The numerical simulation results show that the new method is feasible and reasonable.

This projects is supported by National Science Foundation of China ²No. 60074007 ¹⁴Excellent Young Teachers Program of MDE of China and Foundation for University Key Teacher by the Ministry of Education.

Keywords⁽³⁾power market²⁰time-of-use ²TOU ¹⁴price²⁰demand side management ²DSM ¹⁴customer demand response²⁰peak and valley time periods partition approach