

基于交流潮流的双边交易模式下阻塞费用分摊

苏健, 彭建春, 江辉, 廖菁

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南, 长沙 410082)

摘要: 在电力市场环境下, 输电网开放增加了系统阻塞的可能性, 现有的阻塞管理方法基本都使用直流潮流模型。提出了考虑 P-Q 交叉耦合的双边交易对线路使用份额的定义, 利用该定义来分摊交流潮流下的阻塞成本。方法是先将总的阻塞费用分给相应的线路, 然后利用各线路的使用份额来分摊到各双边交易。该方法不产生销售盈余, 通过网损来综合考虑有功和无功对阻塞成本分摊的影响, 给市场各参与方提供了准确的经济信息。最后用一个 5 节点的仿真算例结果证明本文方法的有效性。

关键词: 输电损耗; 使用份额; 双边交易; 输电阻塞; 成本分摊

A new method for congestion cost allocation considering AC power flow under bilateral transaction

SU Jian, PENG Jian-chun, JIANG Hui, LIAO Jing

(College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The usage of bilateral transaction considering the inter-action between P-Q is defined in this paper. To improve the accuracy and equity of the existing methods, a new congestion cost allocation method for bilateral is proposed. The system congestion cost is allocated to relative lines firstly, and then to individual bilateral according to its contribution to system congestion. The proposed method eliminates the merchandising surplus, makes losses and congestion cost which are the main aspects of the transmission cost unific. It provides correct economic signals to all the partners of power system. At last, the method is testified with a five-bus system.

Key words: transmission loss; usage; bilateral transmission; congestion; cost allocation

中图分类号: TM731

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)05-0041-04

0 引言

输电阻塞是由于输电容量的短缺, 电网以正常效率运行在满载状态, 不能满足市场中所有等待用户的服务要求的现象。表现为: 线路运行超出其热极限或稳定极限; 母线电压运行在其上下限之外。

输电网开放的电力市场环境下, 由于供需双方可以自由地确定双边合同, 自由竞价, 使功率流的随意性增大, 输电网因其输送能力不足而发生阻塞的可能性也增大。阻塞问题成为电力市场运行中的重要日常工作。

目前, 国内外对双边交易模式下的阻塞成本分摊方法进行了深入的研究。文献[1]根据影子价格实现网络阻塞成本在阻塞线路间的分摊, 其结果反映了在线路传输容量附近单位传输功率引起的系统阻塞成本。文献[2]将线路的边际阻塞成本与增

量阻塞成本的平均值作为线路的阻塞成本。它在一定程度上克服了消除阻塞线路的顺序对分摊结果的影响, 但它需要经过多次潮流计算才能确定线路的阻塞成本, 计算速度与阻塞线路的数量有关。文献[3]利用 Auman-Shapley 值获得线路的平均阻塞成本。它在很大程度上克服了消除阻塞线路的顺序对分摊结果的影响。对于第二步的实现, 文献[4]根据对阻塞线路的贡献程度进行阻塞成本分摊, 每个双边交易所分摊的阻塞成本与其在阻塞成本中引起的潮流成正比。而文献[5]根据双边交易对阻塞线路的影响程度进行阻塞成本分摊, 双边交易所分摊的阻塞成本与阻塞消除前后该交易在阻塞线路中引起的潮流变化量成正比。这两种方法均需要通过多次潮流计算来确定, 双边交易对在阻塞线路中的潮流份额, 其计算速度与双边交易数量相关。

综上所述, 阻塞成本分摊方法通常分两个步骤

进行,即:全网→阻塞线路→双边交易。以往的研究一般是基于直流潮流进行研究,没有考虑P-Q之间的耦合,忽略网损和无功功率的影响。本文提出了一种在双边交易模式下基于交流潮流并计及网损的阻塞成本分摊的新方法,使阻塞成本的分摊更趋于合理。

1 双边交易模式下基于交流潮流的阻塞成本

在双边交易模式下发电商与用户自行安排交易,并向系统独立运行员(ISO)提交交易时段、合同功率及发电机再调度报价曲线等信息。ISO结合这些信息进行系统安全检查,如果出现输电阻塞,则采用最优潮流或经济调度进行发电再调度计算,调整发电机出力以消除阻塞。必要时也可以考虑削减合同功率。由于阻塞管理主要在实时平衡市场中进行,本文暂不考虑削减合同功率的情况,只通过调节发电机的增减出力来缓解双边交易产生的阻塞情况。

例如,以阻塞成本最小为目标函数进行阻塞缓解的模型为:

$$\min F = \sum_i \Delta C_{G,i}^+ \Delta P_{G,i}^+ - \sum_j \Delta C_{G,j}^- \Delta P_{G,j}^- \quad (1)$$

$$\text{S. t. } G(x) = 0 : \lambda \quad (2)$$

$$|z| \leq z_{\max} : \mu \quad (3)$$

$$0 \leq P \leq P_{\max} : \gamma_p \quad (4)$$

$$0 \leq Q \leq Q_{\max} : \gamma_q \quad (5)$$

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{G,i}^+$ 、 $\Delta C_{G,i}^+$ 分别为发电机增发出力及报价; $\Delta P_{G,j}^-$ 、 $\Delta C_{G,j}^-$ 分别为发电机减发出力及报价; P_{\max} 、 Q_{\max} 为发电机有功、无功出力上限向量; z_{\max} 为线路极限传输功率向量; V 表示节点电压向量; V_{\min} 和 V_{\max} 分别为其上下限。式(2)为交流潮流方程。式(3)为线路容量约束, λ 、 μ 、 γ_p 、 γ_q 分别为对应上述优化问题中交流潮流方程、线路功率极限和发电机出力极限约束的拉格朗日乘子向量,其中 λ 也称有约束时的节点电价。 F 为阻塞成本。

2 发电机对元件的使用份额

现有的方法为了简便,通常按照发电机对传输线路的有功潮流的贡献来确定相应的使用份额。当

电网传输功率因数高时,电网中流过的无功潮流小,这种方法比较合理。而实际上,这种方法忽略了电网中无功潮流的影响,当无功潮流流过设备时会产生损耗而发热,这将直接影响到设备的寿命及运行的安全性,特别是在功率因数较低时更是如此。为此,文献[6]提出了一种同时考虑有功和无功影响的使用份额的定义如下:

发电机对元件的使用份额等于该发电机在该元件上引起的有功损耗分量占该元件上总有功损耗的比例。

设发电机 m 对元件 l 的使用份额为 U_{ml}^g , 则

$$U_{ml}^g = L_{ml}^p / \sum_{h=1}^n L_{hl}^p \quad (7)$$

式中: L_{ml}^p 是指复功率电源 m 在线路 l 上引起的有功损耗分量,由文献[7]中的复功率电源功率分量理论有:

$$L_{ml}^p = r_l \left(a_{ml} \sum_{h=1}^n a_{hl} + b_{ml} \sum_{h=1}^n b_{hl} \right)$$

$$m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

其中: a_{ml} 和 b_{ml} 为复功率电源 m 在线路 l 首端的有功电流和无功电流分量; n 为网络中复功率电源的个数。

和以往的利用份额相比,该定义具有以下优点:首先,它反映了用户对设备输送容量的占用量。因为有功损耗是有功、无功电流的函数,所以可以综合考虑用户引起的复功率和复电流对系统的影响。其次,该定义具有明确的物理意义。因为设备能否长期安全运行的决定因素主要在于有功损耗的热效应,采用上述定义,相当于考虑了各发电机对设备安全运行性的占用量,因此更接近实际。再者,该方法同时考虑了有功和无功潮流的作用,避免了以往方法存在的同一用户对设备首、末两端利用份额不一致的矛盾。它准确地计及了P-Q之间的非线性耦合,从根本上保证了阻塞费用分摊的准确性。

下面基于文[6]定义提出双边交易对线路的使用份额。

3 双边交易对阻塞线路的使用份额

由于双边交易的实施是复功率通过在线路中的传输来完成的,所以跟发电机对元件的使用份额类似,我们可以同样定义双边交易对线路的使用份额。

定义：双边交易对线路的使用份额等于它在该条线路上引起的有功损耗分量占该线路上总有功损耗的比例。

设从 M 点到 N 点的双边交易 T_k (k 是该交易的编号) 对线路 l 的使用份额为 $U_l^{T_k}$ ，则

$$U_l^{T_k} = L_{T_k,l}^p / \sum_{h=1}^n L_{h,l}^p \quad (9)$$

式中： $L_{T_k,l}^p$ 是指双边交易在阻塞线路 l 上的有功损耗，上式中的分母项是该阻塞线路的总有功损耗。

显然，该定义综合考虑了有功和无功的因素，并利用网损把两者结合起来，使基于交流潮流的双边交易模式下的阻塞成本分摊成为可能。

4 计及网损的阻塞成本分摊

为实现阻塞成本在双边交易里的合理分摊，本文基于复功率电源功率分量理论提出了一种新的阻塞成本分摊方法。首先基于线路使用度将电网总阻塞成本分摊到各阻塞线路。然后利用上述的双边交易对线路使用份额定义，求出各双边交易对阻塞线路的使用份额，基于使用份额，将阻塞费用分摊到各双边交易，最后把双边交易在所有阻塞线路上的阻塞成本求和，就是该双边交易所分摊得到的总阻塞成本。该方法最大的特色是采用交流潮流，计及 P-Q 的交叉耦合，考虑网损和无功率对阻塞的影响，显然它更符合电网的实际运行情况。

4.1 阻塞成本在各阻塞线路的分摊

解阻塞成本模型 (1) ~ (6)，即得不等式 (3) 的拉格朗日乘子 μ ，它表示线路在传输容量附近单位传输功率增量所引起的成本变化增量。由于 μ 是一个边际量，据此计算的线路阻塞总成本之和可能与实际的全网阻塞成本不相等，存在一个不平衡项。对此，可以利用加权平均数的概念来进行收支平衡处理，它的本质其实是按照线路阻塞成本的比例来分摊不平衡项。

定义：对应线路 l 的功率极限约束条件的分摊因子 α_l 为：

$$\alpha_l = \frac{\mu_l z_l}{\sum \mu_l z_l} \quad (10)$$

则线路 l 上应分得的阻塞费用 F_l 为：

$$F_l = F \times \alpha_l \quad (11)$$

上述式中： z_l 为有约束时的线路传输功率； μ 为对应式 (3) 的拉格朗日乘子。显然，对于整个电

网有 $\sum_{i=1}^b \alpha_i = 1$ ，其中 b 为整个电网的线路总数。拉

格朗日乘子 μ 完全基于 (1) ~ (6) 根据最优潮流计算获得，无须额外计算。显然对于不发生阻塞的线路，其拉格朗日乘子为零。

4.2 双边交易对阻塞成本的分摊

按照第四节的利用份额的定义，阻塞费用的分摊与损耗直接相关，对电网的一条阻塞线路 l ，设其总阻塞费用为 F_l 。

按照双边交易对线路的使用份额的定义，从 M 点到 N 点的双边交易在线路 l 上所承担的阻塞费用为：

$$F_{k,l} = U_l^{T_k} F_l \quad (12)$$

对电网所有线路求和，得到从 M 点到 N 点的双边交易所承担的总的阻塞费用 F_k 为：

$$F_k = \sum_{l=1}^b U_l^{T_k} F_l \quad (13)$$

其中： b 为整个电网的线路总数。

5 仿真算例

为验证本文算法的有效性，现以一个 5 节点系统为例进行计算分析。如图 1 所示，系统由 5 条母线、5 条支路组成。在某时段系统中存在三个双边交易 T_{13} 、 T_{23} 和 T_{54} 。发电商 1 与用户 3 之间的交易额为 45 MW，发电商 2 与用户 3 之间的交易额为 45 MW，发电商 5 与 4 之间的交易额为 90 MW。双边交易均未提出削减报价，四台发电机 G_1 、 G_2 、 G_4 和 G_5 的增减投标报价分别如表 1 所示。

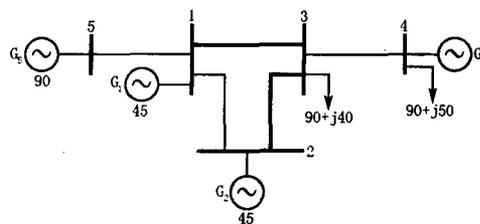


图 1 5 节点系统图

Fig.1 A five-bus system

表 1 发电机增减投标报价

Tab.1 Increasing and decreasing biddings for generations

发电机 G_i	增加的投标报价 $b^+ / (\text{USD} \cdot (\text{MWh})^{-1})$	减少的投标报价 $b^- / (\text{USD} \cdot (\text{MWh})^{-1})$
G_1	50	20
G_2	40	30
G_3	70	60
G_4	20	40

在计算中,系统的基准容量为 100 MW,基准电压为 220 kV。线路的对地电纳都为 7.232×10^{-5} s,其它参数如表 2 所示,阻抗已用标幺值表示。

不考虑输电约束,各交易能顺利实现。由于电网约束的存在,线路 1-3 和 2-3 发生阻塞(图 1 中已用粗线标出)。为消除阻塞,以阻塞成本最小为目标函数进行阻塞缓解计算。

表 2 线路参数及极限潮流

线路首末节点	阻抗	极限功率/MW
1-2	0.01+j0.03	50
1-3	0.01+j0.03	90
1-5	0.01+j0.03	100
2-3	0.01+j0.03	60
3-4	0.01+j0.03	100

通过最优潮流计算可得到系统阻塞成本为 1275 \$/h,阻塞线路的影子价格分别为 20 \$/MWh 和 50 \$/MWh。

采用式(10)~(13)进行阻塞成本分摊的计算,其结果如表 3 所示(影子价格法和边际类方法都是在直流潮流下出的结果)。从表中可以看出,本文方法和影子价格法^[1]和边际类方法^[2,4]的分摊结果差别不大,并且趋势也是相同的。出现差异的原因就是因为本文的方法是在交流潮流下并考虑了网损的结果,本文的方法更趋于实际。

表 3 阻塞成本在双边交易间的分摊

分析方法 (USD/h)	T_{13}	T_{23}	T_{34}
本文方法	286.231	416.339	572.430
影子价格法	240.132	349.399	480.386
边际类方法	250.301	319.152	500.544

6 结束语

在阻塞费用分摊乃至整个电力市场分析中,P-Q 之间的非线性耦合的影响是显著的,对低功率因数网络和线路功率因数相差较大的网络更是如此。本文通过拉格朗日乘子将阻塞费用向线路分摊,电网的阻塞成本由对阻塞有贡献的双边交易共同承担。与现有的各种阻塞定价方法相比,本文方法具有直观的经济意义和实际意义。采用直接交流潮流追踪求线路中各双边交易功率的组成分量,综合考虑了有功、无功的耦合作用,并计及了网损的影响,提高了潮流追踪的精度。本文的方法物理意义明确,易于实现。对短期网络运行来说,提供了良好的经济信号,有利于 ISO 和市场成员了解系统

的运行状况,实现系统资源的优化配置。

参考文献

- [1] Harry S,Hao S Y,Alex P. Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 672-680.
- [2] Baran M E, Banunaryanan V, Garren K E. Equitable Allocation of Congestion Relief Cost to Transaction[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 579-585.
- [3] 杨洪明,段献忠.双边交易模式下基于 Aumann-Shapley 值的阻塞成本分摊方法研究[J]. 中国电机工程学报,2002, 22(11): 59-63.
YANG Hong-ming,DUAN Xian-zhong.A Study of the Aumann-S- Hapley Value Based Allocation Method for Congestion Cost in Bilateral Transaction Environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11) : 59-63.
- [4] Baran M E, Banunaryanan V, Garren K E. A Transaction Assessment Method for Allocation of Transmission Services[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 920-928.
- [5] 肖宏飞,李卫东,魏立明.基于阻塞支路潮流变化量的阻塞成本分摊[J].中国电机工程学报, 2004, 14(3): 83-87.
XIAO Hong-fei, LI Wei-dong, WEI Li-ming. Allocation of Congestion Relief Cost Based on Flow Change on the Congested Facilities[J].Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 83-87.
- [6] 彭建春,丁剑,黄良刚,等.电力市场中电力元件使用份额的研究[J].湖南电力, 2002, 22(6):1-4.
PENG Jian-chun,DING Jian,HUANG Liang-gang,et al. The Usage Research of Electrical Power or Gans in Power Market[J].Hunan Electrical Power,2002,22(6): 1-4.
- [7] 彭建春,江辉,成连生.复功率电源的支路功率分量理论[J].中国电机工程学报, 2001, 21(1):1-4.
PENG Jian-chun,JIANG Hui,CHENG Lian-sheng. Theory of Branch Complex Power Components Induced by Individual Generator[J].Proceedings of the CSEE, 2001,21(1):1-4.

收稿日期: 2006-11-01; 修回日期: 2006-12-18

作者简介:

苏健(1982-),男,硕士,从事电力系统优化和电力市场理论与应用研究工作;E-mail: sujian200051@yahoo.com.cn

彭建春(1964-),男,教授,博士生导师,从事电力系统优化运行及其应用软件开发等方面的研究工作;

江辉(1968-),女,博士,副教授。从事电力系统优化运行和计算机应用等研究工作。