

基于交流灵敏度的电能交易 与输电权的统一拍卖

华 科¹, 谢 开², 郭志忠^{1,3}

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 华北电力调度局, 北京 100053; 3. 许继电力科学研究院, 北京 100086)

摘要: 最优潮流程序便于实现线路有功功率和有功网损的交流灵敏度的计算和分析, 且基于交流灵敏度信息的输电权计算可以更好地匹配实际潮流, 故采用交流灵敏度信息作为市场交易的依据。同时, 简化的市场结构可以降低电力市场交易成本和提高市场交易效率, 由于电能交易同输电权交易具有相同的市场拍卖形式, 因此以交流灵敏度信息为基础, 建立了点对点输电权、基于潮流的输电权和电能交易的统一拍卖市场。提出的拍卖模型在数学上是一个线性规划问题, 可以利用成熟的线性规划方法进行解算。这种统一市场实现了电能交易与输电权交易的全面优化, 也为市场参与者在同一市场下提供了更多的选择。IEEE 9 节点算例证明了该方法的有效性。

关键词: 输电权; 交流灵敏度; 最优潮流; 电力市场

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)10-0047-04

0 引言

在欧美电力市场成功运营和三峡水利工程并网发电的背景下, 我国必将加快中国电力市场改革的步伐。国家电力监管委员会公布了最新的《电力市场运营基本规则》^[1], 自 2005 年 12 月 1 日起施行。其中明确指出了我国电力市场交易类型中包括输电权交易, 因规避输电阻塞风险的需要, 满足规定条件时将组织开展输电权交易。因此, 有必要对输电权交易进行深入分析与研究, 避免其实施过程中出现问题给国民经济造成损失。

目前, 输电权主要分为 2 种形式: 一种是点对点的输电权(PTP-FTR)^[2-3], 另一种是基于潮流的输电权(FGR)^[4-5]。鉴于交流模型比较复杂, 因此目前研究大多是基于直流潮流模型^[6-8], 而对于交流模型下输电权交易的实施研究较少^[9-10]。然而, 对于存在耦合的互联大型电力系统而言, 虽然直流模型具有计算简化并且快速的优点, 但是其结果也必将是粗略的, 在计算准确度直接影响经济利益的电力市场背景下, 进行交流模型下的交易研究显然是必不可少的。

通过研究发现, 电能交易与输电权交易具有相同的市场拍卖模型, 把二者进行统一拍卖可以降低电力交易的交易成本、简化电力市场的结构, 国内外很多学者也都对此进行了大量的研究^[11-14]。这里将在以往研究基础上, 提出一种基于交流灵敏度分析计算的电能交易与输电权的统一拍卖模型, 为输电权交易在交流模型下的实现进行有益的尝试。另外, 在同一

市场下采用了 2 种输电权并存的方式。这是因为目前对 2 种输电权的优劣仍有争议, 参照美国能源管制委员会专家成员的构想^[11], 目前最好的解决办法就是让自由市场成员根据自身需要来决定购买哪种形式的输电权。

1 基于最优潮流的交流灵敏度计算

最优潮流实现了经济与安全、有功与无功的全面优化, 是电力市场中的重要计算工具。利用最优潮流解算过程中形成的雅可比矩阵元素可以较容易地进行交流灵敏度的计算。

所谓灵敏度是指能够反映一个或多个控制变量变化时状态变量的变化情况。在直流和交流网络模型下都可以进行灵敏度的计算。直流灵敏度计算具有计算简单、快速的优点, 缺点是计算精度较低。相比之下, 交流灵敏度在系统运行点处具有较高的精度, 依托最优潮流程序可以更容易地得到相关变量的交流灵敏度。

1.1 交流潮流有功功率传输分布因子计算

设某电力网络中从节点 m 到节点 n 具有电能交易, 该交易引起了线路 ij 上的功率变化, 用 $S_{ij,m}$ 和 $S_{ij,mn}$ 分别表示线路 ij 对节点 m 注入功率和节点 m 与 n 间功率传输的交流灵敏度, 计算公式分别如下:

$$S_{ij,mn}|_*=S_{ij,m}|_*-S_{ij,n}|_* \quad (1)$$

$$S_{ij,m}|_*=\frac{\partial P_{ij}}{\partial U_i} \frac{\partial U_i}{\partial P_m} \Big|_*+\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_m} \Big|_*+ \frac{\partial P_{ij}}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{\partial P_m} \Big|_*+\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_m} \Big|_* \quad (2)$$

式中 $*$ 表示系统运行点; ∂ 表示微分计算; P 、 U 和 θ 分别表示有功功率、节点电压和相角; P_{ij} 表示线

路 ij 上的有功功率; P_m 表示节点 m 的有功注入量。

式(2)中的所有变量都可以从牛顿法最优潮流的全灵敏度分析程序中方便地得到^[15], 此处不再赘述。

从计算公式可以看出, 交流潮流的灵敏度计算不仅与网络结构有关, 而且与系统运行工况有关, 是在系统运行点处进行线性化计算得到的。

1.2 交流潮流有功网损灵敏度计算

全网有功功率损耗对节点注入功率的灵敏度 $\partial P_L / \partial P_i$ (记为 S_{Li}) 可以通过下式计算得到:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \partial P_s / \partial \theta_i \\ U_i \partial P_s / \partial U_i \\ \vdots \end{bmatrix} = \mathbf{J}^T \begin{bmatrix} \vdots \\ 1 - S_{Li} \\ -\partial P_L / \partial Q_i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (i=1, \dots, n; i \neq s) \quad (3)$$

式中 s 表示松弛节点; P_L 表示网络有功损耗; $\mathbf{J}$ 为雅可比矩阵; 上标 T 表示矩阵的转置运算^[15]。

1.3 用交流灵敏度确定线路有功功率及网络有功损耗

在直流模型下进行基于潮流的输电权交易需要独立系统调度员(ISO)发布直流的功率传输分布因子(PTDF), 通过 PTDF 可以确定电能交易对关键线路的贡献量, 因此, 市场参与者使用 PTDF 进行测算决定投标价格及数量, PTDF 也是输电权市场结算依据。

与直流环境相类似, 基于交流模型进行电能交易与输电权统一拍卖时, 要求 ISO 发布有功功率传输及有功网损的灵敏度, 则线路有功功率和有功网损可通过发布的灵敏度计算得到, 计算公式分别如下:

$$P_{ij} = S_{ij, mn} P_{mn} \quad (4)$$

$$P_{ij} = S_{ij, m} P_m \quad (5)$$

$$P_L = \sum_{i=1, i \neq s}^n S_{Li} P_i \quad (6)$$

式中 P_{mn} 表示节点 m 与 n 间的交易有功功率。

2 电能交易与输电权的统一拍卖

2.1 电能交易与输电权的统一市场

采用电力联营体(Pool)模式的市场交易模式, 发电商和大用户同时向 Pool 提交电能交易和输电权的报价和数量, 由 Pool 进行计算。统一市场运行的目标是实现电能交易和输电权拍卖的总收益最大化。

点对点的输电权关注的是节点间的电价差。在此采用平衡形式的 FTR, 即流入与流出的权量值相同, 记流入为负、流出为正。若定义:

$$\mathbf{X} = [0 \quad \dots \quad -1 \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 0]^T \quad (7)$$

则两节点间的输电权 $\mathbf{R}$ 可以用 $\mathbf{RX}$ 表示。当某输电权的报价高于相应节点边际电价差时将被采纳, 否则将被拒绝。

基于潮流的输电权关注的是约束的影子价格。

这种输电权是针对 ISO 发布的输电关口(flowgate)及交流灵敏度表进行投标, 高于相应约束的影子价格的投标被采纳, 否则被拒绝。

电能交易关注的是节点的电价。这里点对点输电权采用的是平衡形式的, 因此电能交易既可以看到是单纯的能量交易, 又可以看成是一种不平衡的点对点的输电权。

综上, 统一的拍卖市场为市场参与者提供了全面的金融工具, 市场参与者可以根据自身需要, 决定自己的投标方式及数量。

2.2 拍卖模型

结合交流灵敏度信息, 构造的电能交易与输电权的统一拍卖模型为

$$\text{Max } \mathbf{C}_1(\mathbf{R}_1) + \mathbf{C}_2(\mathbf{R}_2) + \mathbf{C}_g(\mathbf{P}_g) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n P_{gi} + \mathbf{S}_L^T(\mathbf{P}_g + \mathbf{R}_2 \mathbf{X}) = 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{S}_1 \mathbf{R}_1 + \mathbf{S}_2 \mathbf{R}_2 + \mathbf{S}_g^T \mathbf{P}_g \leq \mathbf{F} \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_{1, \min} \leq \mathbf{R}_1 \leq \mathbf{R}_{1, \max} \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{2, \min} \leq \mathbf{R}_2 \leq \mathbf{R}_{2, \max} \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_{g, \min} \leq \mathbf{P}_g \leq \mathbf{P}_{g, \max} \quad (13)$$

式中 $\mathbf{R}_1$ 为基于潮流的输电权组成的列向量; $\mathbf{R}_2$ 为点对点输电权组成的列向量; $\mathbf{P}_g$ 为节点静注入功率列向量(流出为正, 流入为负); $\mathbf{S}_i$ ($i=1, 2, g, L$) 分别为基于潮流的输电权、点对点输电权、节点静注入功率和有功网损对应的灵敏度组成的矩阵或向量; $\mathbf{C}_1$ 、 $\mathbf{C}_2$ 和 $\mathbf{C}_g$ 分别为基于潮流输电权、点对点输电权和电能合约交易的报价函数; $\mathbf{F}$ 为用于拍卖的最大容量组成的列向量, 对于线路而言, 可以是线路的热稳定极限或暂态稳定极限等。

式(8)表示优化的目标为 2 种输电权及电能交易的拍卖收益最大, 式(9)为系统总的功率平衡, 式(10)为系统容量约束, 式(11)~(13)为申购数量的约束。

2.3 解算方法及交流灵敏度使用的相关说明

如果拍卖模型中竞价函数是线性的, 则整个拍卖问题就是一个线性规划问题。目前对线性规划问题的解法比较成熟, 比如单纯形法、线性内点法等, 都具有计算速度快、收敛性好的优点。

所采用的基于交流灵敏度的输电权拍卖是对基于直流灵敏度的输电权拍卖的一种改进与提高。在对历史数据进行有效分析的背景下, 可以对系统进行有效预测, 进而得到系统灵敏度矩阵, 并应用于一次拍卖与结算的整个过程, 这与以往直流灵敏度方法的输电权拍卖是一致的。

至于灵敏度矩阵必须出清前给定的原因是要保障市场参与者的利益。如果在出清前后改变系统灵敏度参数值, 则参与者将不能对自身收益作出准确预测, 即市场参与者依据出清前灵敏度信息作出的投标决策和预计收益会因为出清后灵敏度信息的改变而变化, 从而失去了对自身收益的掌控能力。因此,

4 结论

在最优潮流基础上,可以较容易地进行交流灵敏度的计算。因此,把交流灵敏度与输电权交易相结合,建立了电能交易与输电权的统一拍卖市场,经案例验证取得了良好的经济效果。统一的拍卖市场机制,为市场参与者同时选择多种交易方式提供了机会,更为我国电力市场即将开展的输电权交易进行了有益的探索。

参考文献:

- [1] 国家电力监督委员会. 电力市场运营基本规则[EB/OL]. [2005-11-07]. <http://www.serc.gov.cn/opencms/export/serc/bulletin/tongzhi/news/tongzhi000017.html>.
- [2] HOGAN W. Contract networks for electric power transmission[J]. *Journal of Regulatory Economics*, 1992, 4(3): 211-242.
- [3] HOGAN W W. Financial transmission right formulations[EB/OL]. (2002-03-31). [http://www.ksg.harvard.edu/hepg/Standard_Mkt_dsgn/Hogan % 20 paper % 20 FTR_formulations_033102.pdf](http://www.ksg.harvard.edu/hepg/Standard_Mkt_dsgn/Hogan%20paper%20FTR_formulations_033102.pdf).
- [4] CHAO H P, PECK S. A market mechanism for electric power transmission[J]. *J Regul Econ*, 1996, 10(1): 25-59.
- [5] CHAO H P, PECK S, OREN S, et al. Flow-based transmission rights and congestion management[J]. *The Electricity Journal*, 2000, 13(8): 38-58.
- [6] MA X, SUN D I, ROSENWALD G W, et al. Advanced financial transmission rights in the PJM market[C]// *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Toronto, Canada: [s.n.], 2003: 1031-1038.
- [7] MA X, SUN D, OTT A. Implementation of the PJM financial transmission rights auction market system[C]// *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*. Chicago, USA: [s.n.], 2002: 1360-1365.
- [8] 周启亮, 王罡, 李伟, 等. 新型输电权期权交易及其模式研究[J]. *电力自动化设备*, 2006, 26(12): 48-51.

transmission right trade and its mode[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(12): 48-51.

- [9] HOGAN W W. A concurrent auction model for transmission congestion contracts[EB/OL]. (1997-01). <http://ksghome.harvard.edu/~whogan/tccaut.pdf>.
- [10] ALSAC O, BRIGHT J M, BRIGNONE S, et al. The rights to fight price volatility[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2004, 2(4): 47-57.
- [11] O'NEILL R P, HELMAN U, HOBBS B F, et al. A joint energy and transmission rights auction: proposal and properties[J]. *IEEE Trans Power Systems*, 2002, 17(4): 1058-1067.
- [12] O'NEILL R P, HELMAN U, BALDICK R, et al. Contingent transmission rights in the standard market design[J]. *IEEE Trans Power Systems*, 2003, 18(4): 1331-1337.
- [13] O'NEILL R P, BALDICK R, HELMAN U, et al. Dispatchable transmission in RTO markets[J]. *IEEE Trans Power Systems*, 2005, 20(1): 171-179.
- [14] 祁达才, 夏清, 卢强. 电能交易与输电权统一的拍卖模型[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(12): 7-11.
- QI Da-cai, XIA Qing, LU Qiang. Auction models of electricity trade considering transmission rights[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(12): 7-11.
- [15] XIE K. Nonlinear interior point methods for optimal power flow and their applications to spot pricing of electricity[D]. London, Britain: Brunel University, 1999.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

华 科(1978-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 主要从事电力市场和电力系统最优化方面的研究(E-mail: huake@mail@yahoo.com.cn);

谢 开(1971-), 男, 辽宁朝阳人, 副总工程师, 博士, 主要从事电力系统调度运行和电力市场方面的管理和研究工作;

郭志忠(1961-), 男, 河北张家口人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统光学测量技术、电力系统的自动化与信息化。

A joint auction of energy and transmission rights based on AC sensitivity

HUA Ke¹, XIE Kai², GUO Zhi-zhong^{1,3}

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. North China Electric Power Dispatch Bureau, Beijing 100053, China; 3. EPRI of Xu Ji, Beijing 100086, China)

Abstract: Optimal power flow program is suitable for the sensitivity calculation of active power of transmission lines and active power loss of network. Because the AC sensitivity based transmission rights calculation matches the actual power flow better, it is applied to the market trade. The simplified market structure can reduce market trade cost and improve the efficiency of market transactions. As energy trade and transmission right trade have same market transaction form, a model based on AC sensitivity is proposed for the joint auction of energy, point-to-point transmission rights and flow-based transmission rights, which is a linear programming problem in mathematics and can be solved by mature linear programming approaches. An integrated optimization of energy and transmission rights transactions is achieved, which provides more choices for market participants in one auction market. IEEE 9-bus system is employed to demonstrate its efficiency.

This project is supported by the Research Foundation for Doctoral Speciality of Higher Education of China (20060213042).

Key words: transmission rights; AC sensitivity; optimal power flow; power market