

基于线性规划灵敏度分析的 发电机组市场力实时监控方法

刘继春¹, 刘俊勇¹, 郑 华²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610021)

摘要: 衡量发电机组市场力的现有方法多不适用于实际系统的市场力实时定量计算, 具有很大的局限性。基于线性规划 LP(Linear Programming)方法求解最优潮流 OPF(Optimal Power Flow), 利用带上界变量的单纯形法推出反映机组投标变化对其收入影响的灵敏度矩阵, 可以用来实时判定发电机组是否拥有市场力, 并衡量其大小。相应矩阵元素为正值, 采取抬高投标价格策略时收入增加会多, 正值越大机组市场力越强; 相应矩阵元素为负值, 采取降低投标容量策略时其收入增加也多, 负值绝对值越大机组市场力越强。该方法可作为系统操作员实时监控市场势力的依据, 有较强的实用性。

关键词: 发电机组; 市场力; 电力市场; 电力系统

中图分类号: TM 73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)10-0031-04

0 引言

发电机组可能行使市场力的问题存在于电力市场设计、运行和控制等各个方面, 实际市场存在的价格高波动性也表明了某些电厂可能拥有操纵市场的能力^[1]。现有衡量机组市场力常见的指数型评判标准是 HHI 指数(Hirschman-Herfindall Index)^[2-3], 但它难于分析输电网络阻塞与机组行使市场力之间的定量关系。此外, 能同时计及输电阻塞影响的指标^[4-9]有同时交换容量 SIC(Simultaneous Interchange Capability)、必须运行率 MRR(Must Run Ratio)、供

给剩余系数 RSI(Residual Supply Index)、关键供应者指标 PSI(Pivotal Supplier Index)等, 它们和 HHI 指数一样, 存在着定量机组市场力大小不够直接的缺点。使用勒纳指数(Lerner Index)或 PCMI 指数(Price Cost Margin Index)可以直接量化市场力, 这需要知道系统的边际成本, 而在市场中边际成本是发电公司的商业秘密, 不会对外公开, 并且这些指数适用于市场出清之后, 不能实时应用, 属于研究市场运行历史数据的后验法。文献[10-14]提出的机组投标行为分析法运用市场均衡模型(如 Cournot 模型、Bertrand 模型、Supply Function 模型等)衡量市场力, 由于不能考虑到市场的所有因素, 故结果与实际情况往往不符, 甚至可能出现算法得不到市场均衡点的状况。而试验仿真法通过模拟市场参与者在市场中的可能行为来发现市场结构中的各种因素与市

收稿日期: 2005-12-28; 修回日期: 2006-03-27
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2004GB217905); 二滩公司电力营销系统规划设计资助项目

场力的关系,结果与仿真模型精度密切相关,该方法直观,但必须在已知市场参与者报价信息的前提下才能应用,且不适用于实时计算。

本文运用最优潮流 OPF (Optimal Power Flow) 灵敏度方法,研究机组收入与投标价格或容量之间的相互关系,考虑到机组实际的可能投标价格或容量的变化一般不会很大,因此可利用线性规划 LP (Linear Programming) 方法求解最优潮流问题,使计算过程、特别是市场力的判定过程得到简化。同时采用带上界变量的单纯形法得到发电机组收入灵敏度矩阵,该矩阵反映的是机组投标价格或容量变化对发电公司收入的影响,直观实用。该 LP OPF 敏感度分析方法由于仅需要能计算节点边际电价的 OPF 程序,故可实时应用,作为系统操作员 ISO (Independent System Operator) 实时监控发电公司市场势力的依据。

1 发电机组市场力实时监控方法

1.1 模型与算法

OPF 计算可以归结为如下一般问题^[1]:

$$\begin{aligned} \min f(u, x) \\ \text{s.t. } g(u, x) = 0 \\ h(u, x) \leq 0 \end{aligned}$$

式中 $f(u, x)$ 是目标函数;向量 u 是控制变量;向量 x 是状态变量;函数 $g(u, x)$ 是系统各种等式约束条件; $h(u, x)$ 是系统各种不等式约束条件。

当采用基于 LP 的方法求解最优潮流问题时,是通过求解潮流方程的外循环处理系统非线性,LP 的内循环调整控制变量,计算过程如图 1 所示。

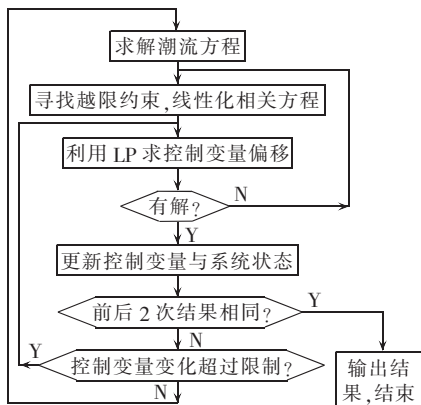


图 1 利用线性规划法求解最优潮流

Fig.1 Flowchart of OPF solution using LP method

上述 LP OPF 算法的核心是求解如下问题^[15]:

$$\begin{aligned} \min c^T u \\ \text{s.t. } Au = b \\ u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 u 、 $u_{\max}$ 、 $u_{\min}$ 分别为控制变量及其上下限; c 为实施 u 中各种控制的成本; A 为功率平衡及各种约束方程的系数矩阵; b 为各种约束限制量。式(1)的单纯形乘子设为 λ 。

采用带上界变量的单纯形法求解式(1),需要分

解 u 为基变量 u_B 、下界非基变量 u_{LNB} 、上界非基变量 u_{UNB} 等 3 个阵,即

$$\begin{aligned} u &= (u_B, u_{LNB}, u_{UNB}) \\ \text{s.t. } u_{B\min} &\leq u_B \leq u_{B\max} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $u_{B\max}$ 、 $u_{B\min}$ 分别为基变量的上下限。

与 u 相对应,向量 c 和矩阵 A 亦可分解为

$$\begin{aligned} c &= (c_B, c_{LNB}, c_{UNB}) \\ A &= (A_B, A_{LNB}, A_{UNB}) \end{aligned} \quad (3)$$

此时单纯形乘子 λ 为

$$\lambda = c_B A_B^{-1} \quad (4)$$

式(1)的初始单纯形表为

$$\begin{bmatrix} A_B & A_{LNB} & A_{UNB} & b \\ c_B^T & c_{LNB}^T & c_{UNB}^T & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

经迭代后的单纯形表为

$$\begin{bmatrix} I & A_B^{-1} A_{LNB} & A_B^{-1} A_{UNB} & A_B^{-1} b \\ 0 & c_{LNB}^T - c_B^T A_B^{-1} A_{LNB} & c_{UNB}^T - c_B^T A_B^{-1} A_{UNB} & -c_B^T A_B^{-1} b \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 I 为单位矩阵。

根据单纯形法中迭代选择进基变量的原则,当

$$\begin{aligned} c_{LNB}^T - c_B^T A_B^{-1} A_{LNB} &\geq 0 \\ c_{UNB}^T - c_B^T A_B^{-1} A_{UNB} &\leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

成立时,式(1)有最优解。

$$u_B = A_B^{-1} b - A_B^{-1} A_{UNB} u_{UNB} - A_B^{-1} A_{LNB} u_{LNB} \quad (8)$$

取最优解时,单纯形乘子的经济意义为影子价格,因此,联立式(4),可得到边际价格 SMP (System Marginal Price) 机制下的节点电价 λ_{SMP} 如下:

$$\lambda_{SMP}^T = \lambda^T S = c_B^T A_B^{-1} S \quad (9)$$

式中 S 为节点注入功率与约束限制量之间的灵敏度。

发电节点 i 的注入功率相对约束限制量的灵敏度与矩阵 A 相应元素值相等,因此式(7)可写为

$$r_i = c_i - c_B^T A_B^{-1} a_i = c_i - \lambda_{SMP i}, \quad i \in G \quad (10)$$

式中 r_i 为引入的变量; c_i 为向量 C 中元素; a_i 为矩阵 A 第 i 列向量; G 为发电机组集合。

而发电公司的收入 π 为

$$\pi = \lambda_{SMP G}^T u_G \quad (11)$$

式中 $\lambda_{SMP G}$ 、 u_G 分别为发电节点电价及出力。

1.2 收入灵敏度矩阵

在得到发电公司收入的解析表达式后,可进一步推出不同类型机组在采取提高投标价格或降低投标容量策略时对其收入的影响。

1.2.1 提高投标价格

a. 对于边际机组 k ,提高投标价格会增加实施相应基控制向量元素 u_{Bk} 的成本 Δc_{Bk} 。此时,变量 r_i ($i \in G$) 会减小 $\Delta c_{Bk} \bar{a}_{Bki}$,其中 $\bar{a}_{Bki} = (A_B^{-1} a_i)_{Bki}$ 。当发电公司提高投标价格幅度较小使此时的 r_i 满足式(7)时,由式(9)与(11)得:

$$\frac{\Delta \pi_i}{\Delta c_{G(B)}} = \frac{\Delta \pi_i}{\Delta \lambda_{SMP G}} \frac{\Delta \lambda_{SMP G}}{\Delta c_{G(B)}} = u_i (A_B^{-1} a_i)_G, \quad i \in G \quad (12)$$

式中 下标 $G(B)$ 表示边际机组集合。

b. 对于调度出力达到上限的机组,提高投标价

格 Δc_i , 此时变量 $r_i(i \in G)$ 会增大 Δc_i 。当发电公司提高投标价格幅度较小使此时的 r_i 满足式(7)时, 由于根据式(9)有 $\Delta \lambda_{\text{SMPG}} / \Delta c_{G(\text{UNB})} = 0$ 成立, 得:

$$\frac{\Delta \pi}{\Delta c_{G(\text{UNB})}} = \frac{\Delta \pi}{\Delta \lambda_{\text{SMPG}}} \frac{\Delta \lambda_{\text{SMPG}}}{\Delta c_{G(\text{UNB})}} = 0 \quad (13)$$

式中 下标 $G(\text{UNB})$ 表示出力达到上限的机组集合。

1.2.2 降低投标容量

a. 边际机组 k 将投标容量 $\bar{u}_{Bk}$ 持留 $\Delta \bar{u}_{Bk}$, 此时若式(7)满足, 根据式(9)可得:

$$\frac{\Delta \pi}{\Delta \bar{u}_{G(\text{B})}} = \frac{\Delta \pi}{\Delta \lambda_{\text{SMPG}}} \frac{\Delta \lambda_{\text{SMPG}}}{\Delta \bar{u}_{G(\text{B})}} = 0 \quad (14)$$

式中 向量 $\bar{u}$ 表示机组的投标容量。

b. 调度出力达到上限机组持留的投标容量 $\Delta \bar{u}_i$ 使式(7)满足时, 根据式(8)与(11)有

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \pi_{\text{LNB}}}{\Delta \bar{u}_{G(\text{UNB})}} &= \frac{\Delta \pi_{\text{LNB}}}{\Delta u_{G(\text{LNB})}} \frac{\Delta u_{G(\text{LNB})}}{\Delta \bar{u}_{G(\text{UNB})}} = 0 \\ \frac{\Delta \pi_{\text{UNB}}}{\Delta \bar{u}_{G(\text{UNB})}} &= \text{diag } \lambda_i \\ \frac{\Delta \pi_{Bk}}{\Delta \bar{u}_{G(\text{UNB})}} &= \frac{\Delta \pi_{Bk}}{\Delta u_{G(\text{B})}} \frac{\Delta u_{G(\text{B})}}{\Delta \bar{u}_{G(\text{UNB})}} = -\lambda_{Bk} (A_B^{-1} a_i)_k \end{aligned} \quad (15)$$

式中 下标 $G(\text{LNB})$ 表示出力在下限的机组集合。

根据式(12)~(15), 得到发电机组收入灵敏度矩阵 S_π , 有

$$\Delta \pi = S_\pi \Delta e \quad (16)$$

式中 Δe 为向量 e 的增量, 且 $e = (c_{G(\text{B})}, \bar{u}_{G(\text{UNB})})$ 。

当发电公司拥有不止 1 台机组时, 给定 $S_\pi^c = T S_\pi$, 其中矩阵 T 的元素

$$T_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{机组 } j \text{ 属于公司 } i \\ 0 & \text{机组 } j \text{ 不属于公司 } i \end{cases}$$

此时有

$$\Delta \pi_c = S_\pi^c \Delta e \quad (17)$$

矩阵 S_π^c 反映机组投标变化对发电公司收入的影响, $\Delta \pi_c / \Delta c_{G(\text{B})}$ 为正值时, 表示机组抬高其投标价格, 会引起收入增加, 且正值越大, 表征机组市场力越强; $\Delta \pi_c / \Delta \bar{u}_{G(\text{UNB})}$ 为负值时, 表示机组降低其投标容量, 会引起收入增加, 且负值的绝对值越大, 也表征机组市场力越强。ISO 可用它作为实时监控公司市场势力的依据。

2 算例分析

选取 IEEE 30 节点测试系统, 包括 6 个发电机节点, 41 条支路, 支路参数如表 1 所示, 表中 X 为电抗, 取标么值。某交易时段根据 LP OPF 计算得到的各发电机组出清出力与对应的节点电价如表 2 所示。

机组 1、2、13 的出清出力在其出力上限, 故着重研究它们投标容量的变化对收入的影响; 机组 5、11 的出清出力在其出力上下限之间, 故着重研究它们

表 1 支路参数
Tab.1 Branch parameters

支路	$X/\text{p.u.}$	支路	$X/\text{p.u.}$	支路	$X/\text{p.u.}$
1-2	0.058	8-28	0.200	10-21	0.075
1-3	0.185	6-28	0.600	10-22	0.145
2-4	0.173	9-10	0.110	21-22	0.024
3-4	0.038	12-13	0.140	15-23	0.202
2-5	0.198	12-14	0.256	22-24	0.179
2-6	0.176	12-15	0.130	23-24	0.270
4-6	0.041	12-16	0.199	24-25	0.330
5-7	0.116	14-15	0.200	25-26	0.380
6-7	0.082	16-17	0.192	25-27	0.209
6-8	0.042	15-18	0.219	27-29	0.415
6-9	0.208	18-19	0.129	27-30	0.603
6-10	0.556	19-20	0.068	28-27	0.396
9-11	0.208	10-20	0.209	29-30	0.453
4-12	0.256	10-17	0.085		

表 2 发电机组出清出力与节点价格
Tab.2 Dispatched power and price of generator nodes

节点	最小出力 /p.u.	最大出力 /p.u.	出清出力 /p.u.	节点价格 /[元·(MW·h) ⁻¹]
1	0.50	2.00	2.00	112
2	0.20	0.80	0.80	106
5	0.15	0.50	0.18	114
8	0.10	0.35	0.10	104
11	0.10	0.30	0.23	92
13	0.12	0.40	0.40	104

投标价格的变化对收入的影响; 而机组 8 的出清出力在其出力下限, 其投标容量或价格的变化影响 LP OPF 的计算结果小, 故对其不进行敏感度分析研究。

发电机组收入灵敏度矩阵 S_π 如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta \pi_1 \\ \Delta \pi_2 \\ \Delta \pi_5 \\ \Delta \pi_8 \\ \Delta \pi_{11} \\ \Delta \pi_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 63.1 & 12.9 & 0 \\ 0 & 4.0 & 29.8 & 6.2 & 0 \\ 0 & 0 & 13.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6.2 & 2.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 19.5 & 0 \\ 0 & 0 & 23.5 & 12.5 & 0.7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{u}_1 \\ \Delta \bar{u}_2 \\ \Delta c_5 \\ \Delta c_{11} \\ \Delta \bar{u}_{13} \end{bmatrix} \quad (18)$$

当机组 1、2 同属发电公司 A, 机组 5、8 同属发电公司 B, 机组 11、13 同属发电公司 C, 则发电公司收入灵敏度矩阵 S_π^c 如式(19)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \pi_A \\ \Delta \pi_B \\ \Delta \pi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 4.0 & 92.9 & 19.1 & 0 \\ 0 & 0 & 19.3 & 2.8 & 0 \\ 0 & 0 & 23.5 & 32 & 0.7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{u}_1 \\ \Delta \bar{u}_2 \\ \Delta c_5 \\ \Delta c_{11} \\ \Delta \bar{u}_{13} \end{bmatrix} \quad (19)$$

设定除自身外的其他发电公司的机组投标不发生变化, 则从式(19)可以看出, 公司 A 不能通过自身机组 1、2 降低投标容量来增加收入; 公司 B 可以通过自身机组 5 抬高投标价格来增加收入; 公司 C 可以通过自身机组 11 抬高投标价格来增加收入。因此, 可以判断, 公司 A 不具有潜在的市场势力, 公司 B、C 则具有, 它们是 ISO 重点监控的对象。此外, 式(19)

也表明,由于 $\Delta\pi_c/\Delta c_5=23.5$ 较大,如果公司 C 对属于公司 B 的机组 5 实施兼并,它在市场中将获得更多的市场势力,而 ISO 则应当全力避免这一结果的发生。

3 结论

本文利用 LP OPF 得到发电机组收入灵敏度矩阵,可以用来判定是否拥有市场力及衡量其大小,该方法实用性强,且适用于实时计算。通过典型 30 节点系统,证明了该方法能便捷有效地帮助 ISO 发现具有市场力的发电机组。

参考文献:

- [1] 刘继春. 电力市场运营系统[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] BIALEK J.W. Gaming the uniform-price spot market-quantitative analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(3):768-773.
- [3] 赵建国,韩学山,程时杰. 电力市场中考虑发电机组功率速度约束的市场力分析[J]. 电网技术,2003,27(11):43-47,74.
ZHAO Jian-guo,HAN Xue-shan,CHENG Shi-jie. Market power analysis considering ramp rate constraint in electricity market [J]. Power System Technology,2003,27(11):43-47,74.
- [4] GAN D Q,BOURCIER D V. A simple method for locational market power screening[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. New York,USA:IEEE,2002:434-439.
- [5] GAN D Q,BOURCIER D V. Locational market power screening and congestion management: experience and suggestions [J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(1):180-185.
- [6] RAHIMI A F,SHEFFRIN A Y. Effective market monitoring in deregulated electricity markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003,18(2):486-493.
- [7] 李晓刚,李玉平. 统一出清电价下发电厂商的特留容量行为及相关抑制措施[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):85-88.
LI Xiao-gang,LI Yu-ping. Withholding generation capacity and mitigation mechanism of market power under uniform clearing pricing method[J]. Electric Power Automation Equipment,2004, 24(7):85-88.
- [8] 丁军威,沈瑜,康重庆,等. 一种衡量发电商市场控制力的新指标 [J]. 电力系统自动化,2003,27(13):24-29,67.
DING Jun-wei,SHEN Yu,KANG Chong-qing,et al. A new index for evaluating generator's market power[J]. Automation of

- Electric Power Systems,2003,27(13):24-29,67.
- [9] 幸洁晴,言茂松. 电力相关市场及其集中度指标评定[J]. 电力系统自动化,2002,26(23):7-11.
XING Jie-qing,YAN Mao-song. Relevant market and concentration measures in electricity wholesale markets [J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(23):7-11.
- [10] 赵义术,余贻鑫,刘怀东. 使用 LSFE 分析及输电系统约束的市场力[J]. 电力系统自动化,2003,27(13):30-35.
ZHAO Yi-shu, YU Yi-xin,LIU Huai-dong. Transmission constrained market power analysis based on LSFE[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(13):30-35.
- [11] 王皖,李渝曾,张少华. 求解电力市场均衡模型的非线性互补方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(1):7-11.
WANG Xian,LI Yu-zeng,ZHANG Shao-hua. A nonlinear complementary approach to the solution of equilibrium models for electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(1):7-11.
- [12] 李渝曾,王皖,张少华. 计及输电约束的区域双边电力市场 LSFE 分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(2):8-12,49.
LI Yu-zeng,WANG Xian,ZHANG Shao-hua. LSFE analysis for regional bilateral electricity markets considering transmission constraints[J]. Automation of Electric Power Systems,2005, 29(2):8-12,49.
- [13] 任震,朱然,黄雯莹. 发电商之间的串通竞标分析及基于模糊理论判定[J]. 电力自动化设备,2004,24(10):7-10.
REN Zhen,ZHU Ran,HUANG Wen-ying. Collusion bidding of power suppliers and its judgment based on fuzzy theory [J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(10):7-10.
- [14] HE Y,SONG Y H. The study of the Impacts of potential coalitions on bidding strategies of GENCOs[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(3):1086-1093.
- [15] SUN Y,OVERBYE T J. Market power potential examination for electricity markets using perturbation analysis in linear programming OPF context[C]//Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Waikoloa, Hawaii, USA:IEEE,2005:67-70.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

刘继春(1975-),男,四川成都人,博士研究生,研究方向为电力市场(E-mail: jichunliu75@163.com);
刘俊勇(1964-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力市场。

Real time market power monitoring method based on linear programming OPF algorithm

LIU Ji-chun¹,LIU Jun-yong¹,ZHENG Hua²

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Ertan Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610021, China)

Abstract: Existing methods for weighing up market power of generators are not suitable for real time quantifying market power of real system, which have great limitation. The LP (Linear Programming) is used to solve OPF (Optimal Power Flow) and the upper variables simplex method is used to build the bidding perturbation-profit sensitivity matrix, which is used to real time identify the market power of generators and quantify it. When the corresponding element is positive, increase of bidding price will result in more profit; when the corresponding element is negative, decrease of bidding capacity will result in more profit. The bigger the sensitivity (absolute value) is, the stronger the market power is. The proposed method can be used by ISO (Independent System Operator) to real time monitor the market power.

This project is supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2004GB217905) and Design of Power Marketing System for Ertan.

Key words: generator unit; market power; electricity market; power system