

发电侧无功成本与定价研究

孔飘红¹, 刘俊勇¹, 张新平²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 许继电气公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 无功功率服务是电力市场辅助服务的一个重要组成部分, 而发电厂的无功电价又是整个无功市场定价的基础。该文对发电厂的无功生产成本进行了探讨, 首次提出将发电厂无功电价划分为无功容量电价和电量电价, 概念清晰, 易于计算。研究表明发电厂的无功服务应得到一定的经济补偿, 使其自觉地维持电力系统的安全和稳定运行。

关键词: 电力市场; 无功辅助服务; 无功成本; 发电侧无功市场

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)05-0024-05

0 引言

我国电力工业正在逐步由传统的管制向市场化方向过渡, 无功功率服务作为电力市场辅助服务的一个重要组成部分, 是保证电力系统安全、稳定运行的前提, 因而也是保证电能交易顺利实施的一个重要条件; 同时也能提高电能质量、传输效率并降低电网损耗, 从而成为提高供电质量和电网运行的经济效益的有效手段。在放开发电侧市场, 实行厂网分开、竞价上网后, 由于输电和发电的分离, 无功费用原则上应涵盖所有不属于输电公司的无功生产费用。因此, 如何获得无功服务、如何制定无功服务的价格、建立无功服务市场是否可行等问题已经成为目前电力市场研究的几个热点问题。本文就发电侧市场的无功成本和定价问题进行了探讨。

1 电力市场中的无功功率服务

电力市场中无功功率服务可以分别在发电、输电和配电三个环节上提供。可提供无功服务的无功源有发电机、同步调相机、SVC 静止补偿器、并联电容器组、电抗器等, 它们分别归属于发电厂和电网公司。由于发电机和调相机具有动态无功补偿的能力, 因此在维持其出口电压水平和保证系统安全性方面起着十分重要的作用。对于有些效率低的发电厂虽然在有功功率发电市场缺乏竞争力, 但是他们可以转为同步调相机运行从而提供无功功率服务。输电网可以利用安装静止补偿器和并联电容器/电抗器等来提供无功功率服务, 目的是保证网络的输电能力并且在不同的负荷情况下保证系统的电压质量。配电网则一般通过在负荷节点上安装并联电容器/电抗器来改善用户的功率因数, 从而尽量减少系

统为传输无功功率而付出的代价。在传统一体化的电力公司中, 无功功率服务的成本并不单独结算; 在电力市场下, 由于无功功率服务作为辅助服务成为一项单独的业务, 必须制定合理的无功服务价格以保证服务提供商回收成本并获得一定的利润。鉴于此无功功率服务的定价至少应该包含 3 个层面的无功电价: 发电市场层面、输电市场层面和配电市场层面^[1]。

(1) 发电市场层面的发电无功电价是由电力市场交易管理部门或电网公司向无功服务提供者, 即发电厂支付的购买无功价格。发电机作为特殊的无功源既可以发出无功功率, 同时它也是系统仅有的有功功率电源, 因此除了要正确计算发电机的所有成本外, 还必须要解决如何在有功功率和无功功率生产之间分摊发电机的所有成本。本文认为无功可以采用两部制电价: 无功容量电价和无功电量电价。

(2) 输电市场层面的无功服务电价主要针对的是电网公司所属的无功源设备的定价。包括无功输电服务电价和无功补偿电价两类。并联电容器组、电抗器、SVC 等可向用户提供容性或感性无功, 这类无功服务在此称为无功补偿服务, 相应的电价称为无功补偿服务电价; 另一方面是对电网的输变电设备在输送有功电量过程中的(感性或容性)无功损耗进行补偿, 这类无功服务与有功输电密不可分, 在此称为无功输电服务, 其回报在有功输电服务费中综合考虑。

(3) 配电市场层面的无功销售电价, 是电网公司或供电公司向电力批发商或无功消费者收取的销售无功电价。

我国电力市场初期模式是以单一购买为主的发电侧开放市场, 在这种单一购买模式下, 发电市场层

面的发电无功电价是制定配电市场层面无功价格的主要依据,因此有必要对发电侧无功源即发电机的无功生产成本进行详细的分析。输电和配电层面的无功服务电价将在今后的工作中涉及。

2 无功服务对发电厂的影响

电力市场中无功交易的关键是电网公司和发电厂之间的无功结算问题。因此必须搞清楚无功生产对发电厂的影响^[2]。

(1) 投资增加

为满足电网规约所要求的无功容量,发电设备就必须更大、更重、更昂贵。设备的大小和费用与无功容量成正比。因此,发电厂有相当大一部分投资是用于无功容量的。

(2) 能量损耗

定子、转子的损耗均与 $I^2 R$ (I 为电流) 成正比。杂散损耗与 I^2 成正比。因此,随着无功负荷的增加,发电机的能量损耗也将增加。较大的氢冷发电机与负荷相关的损耗占总损耗的 75%,并且无功出力的微增损耗是非线性的。

(3) 维修和维护

由于发电机增发无功,转子定子电流增加,因此不但会增加能量损耗,还会增加作用于导体上的电磁力(以 I^2 变化),从而加大振动,对发电机造成一定的损害。电流也会导致温度升高,热胀冷缩加剧,造成较大的机械压力,导致绕组变形和绝缘老化。因此相当大一部分维修、维护费是由于无功发电引起的。对两台同样的发电机,以功率因数接近 1 运行的机组的定子事故发生率比发无功的定子事故率要小得多。

(4) 设备磨损

上述损害机理也会缩短发电机的主要设备的使用寿命。虽然,并非所有设备更换都与负荷和功率因数有关,但大部分问题与发电机和负载有关。

(5) 风险管理

无功出力的增加,也会使失去发电机组的概率增加,造成非常大的费用,即无功风险费用,但这部分费用比较难以评估,需要研究无功容量和无功出力对发电机可靠性的影响。

3 发电厂的无功生产成本

长期以来,发电机的无功功率生产成本一直都被认为近似等于零而忽略,其中一个主要的原因是电机的无功生产几乎不导致任何额外的燃料费用。

实际上,不管发电机是否发出无功功率都会引起无功生产/备用成本。发电机组无功电能生产成本主要有 3 部分组成:投资成本、机会成本、可变成本。

3.1 投资成本

实际上,发电机组的投资成本是以有功容量为依据计算的,以元/MW 为单位。然而,发电机组不仅生产有功电能 P ,而且也生产无功电能 Q 。因此,用视在功率容量 S 进行投资成本分析更加切合实际^[3]。当有功容量投资成本给定时,投资成本可用视在功率描述为:

$$\text{元/MVA} = \text{元/MW} \cdot pf \quad (1)$$

式中: pf 为发电机的额定功率因数。因此基于无功容量的投资成本可以被定义为:

$$\text{元/MVar} = \text{元/MVA} \cdot \frac{1}{\sin} = \text{元/MVA} \cdot \frac{1}{\sin(\arccos pf)} \quad (2)$$

当机组投资成本计入无功市场时,上式可用于无功投资成本分析。

3.2 机会成本

如图 1 所示,发电机的有功和无功输出要受发电机的励磁电流(a - b 段)、电枢电流(b - c 段)和欠励磁(c - d 段)约束。假设发电机当前的有功输出为 p^* ,则相应的无功输出必须在 $q_{\min}(p^*)$ 和 $q_{\max}(p^*)$ 之间。可见,发电机的无功支持容量是随着有功输出水平而变化的。

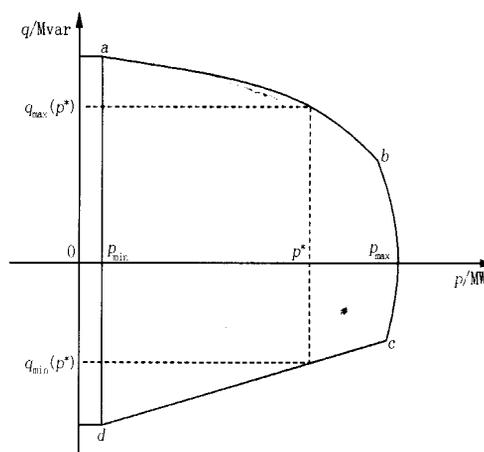


图 1 发电机运行极限图

Fig. 1 Loading capability diagram

在经济运行条件下,发电机组应工作在有功出力上限 p_{\max} ,当系统要求发电机组增加其无功容量时,有功出力应向调整,例如,下调到 p^* 。对于发电机的无功功率发电成本,可以认为是一种机会成本,也即无功功率的生产导致有功功率生产能

力的下降,从而影响了发电机通过生产有功功率来获取的利润额。从原理上看,发电机无功机会成本的计算比较复杂,要根据电力市场中实时的有功供需关系等信息得出。为了简化起见,提出了一个新的计算方法,即认为无功机会成本是该发电机因输出无功功率而损失的有功功率发电容量所对应的利润^[4]。如果忽略原动机的出力极限,并假设 $S_{Gi,max}^2 = P_{Gi}^2 + Q_{Gi}^2$,该机会成本可以近似表示如下:

$$C_{gqi}(Q_{Gi}) = k [C_{pgi}(S_{Gi,max}) - C_{pgi}(\sqrt{S_{Gi,max}^2 - Q_{Gi}^2})] \quad (3)$$

其中: $S_{Gi,max}$ 为发电机的额定视在功率; Q_{Gi} 为发电机的无功功率出力; k 为发电机有功功率生产的利润,一般在 5%~10%。从上式可以看到,不管发电机发出还是吸收无功功率都会有无功功率的机会成本。

3.3 可变成本

发电机组的可变成本指发电机和升压变压器中由无功电能引起的有功电能损耗。从系统角度看,升压变压器高压侧的有功电能、无功电能、电压决定了发电机组的特性。当机组有功输出、升压变压器高压侧电压、升压变压器档位一定时,无功电能与有功损耗具有图 2 所示的近似二次函数关系^[5]。对发电机组本身而言,不同的无功电能输出量在发电机内部引起的有功损耗也不同。在电力市场中,这些有功损耗应该计算在无功电能的生产成本中,有功损耗应按照发电机母线的边际价格计算。

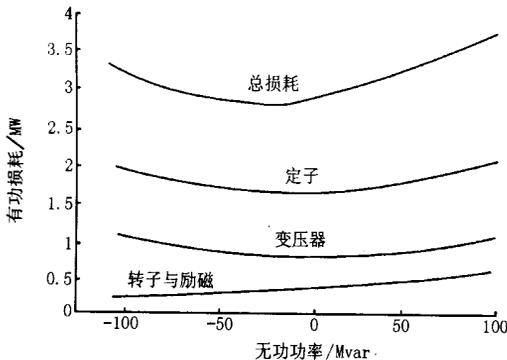


图 2 有功功率损耗曲线

Fig. 2 Curves of active power loss

4 发电侧无功定价

本文将发电侧的无功电价分为两部分:无功容量电价和无功电量电价。无功容量电价主要涉及的是发电机的固定投资成本分摊到无功出力部分;无功电量电价主要涉及的是发电机的无功机会成本和

有功损耗费用。为简化起见,本文在无功电量电费中只讨论无功的机会成本。

4.1 无功容量电价

无功容量电价应该涵盖提供无功支持的发电机的固定成本,以保证设备投资成本的回收。发电机的有功发电成本函数一般为二次函数^[6],即:

$$C_{gpi}(P_{Gi}) = a + bP_{Gi} + cP_{Gi}^2 \quad (4)$$

由于无功发电成本函数是从有功发电成本函数等效而来,用公式(2)可以计算出无功功率与无功发电成本之间的关系,同样可以得到无功发电成本函数,即:

$$C_{gqi}(Q_{Gi}) = d + eQ_{Gi} + fQ_{Gi}^2 \quad (5)$$

4.2 无功电量电价

无功电量电价应该涵盖提供无功支持的发电机的可变成本,以保证电厂运行成本的回收。无功电量电价应该主要考虑发电无功电量和无功备用容量的机会成本以及发电机进相运行时的补偿费用。无功电量定价的原则是以发电机的运行约束,即容量极限图为基础,用有功发电机会成本来折算无功电价,合理补偿无功服务提供者的经济损失。

4.2.1 迟相运行无功电量电价

以图 3 所示的 3 节点系统为例来说明无功电量电价的计算。

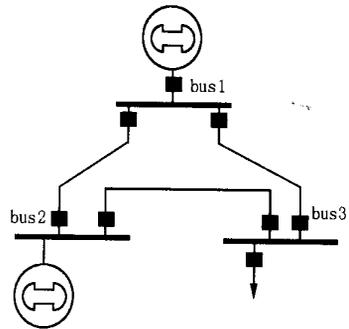


图 3 3 节点系统

Fig. 3 Three-bus system

(1) 实例 1:垂直管理体制下的发电费用

在统一调度运行方式下,所有的机组属于同一个部门,其电力调度的目的是在满足系统要求的前提下使总费用最小。假设母线 1 的发电机的边际发电成本恒为 \$0/MWh,最大发电容量为 500 MW。母线 2 的发电机的边际发电成本相对较高为 \$0/MWh。并假设机组 1 的容量受图 1 所示的曲线约束,发电机 2 的有功和无功容量为无穷大。

从经济角度出发,运行人员将首先考虑边际成本较低的发电机 1,在其满发运行(500 MW)后不足部

分(200 MW)由成本较高的发电机 2 提供。因此总的发电费用为 \$16000(500 × \$20 + 200 × \$30)。运行结果如表 1 所示。

表 1 约束越限的运行结果

编号	有功功率/MW	无功功率/Mvar	电压/p. u.
机组 1	500	0	0.93
机组 2	200	339	1.05
负荷 3	700	0	0.91

然而,在该调度方式下,系统电压将无法满足要求。因为一旦母线 1 的发电机满发运行,根据图 1 所示的容量曲线,机组将失去无功支持能力。而母线 1 的电压要维持在 1.0 p. u.,需要机组 1 提供 81 Mvar 的无功支持。由于母线 2 的发电机机端电压设置早已处于最高值,这就意味着在该运行方式下,为了维持母线 1 的电压,只有依靠母线 1 的机组提供无功支持,因此只有减少其有功出力。机组 1 减少的有功将由发电成本较高的 2 号机组来提供。运行结果如表 2 所示,此时总的发电费用为 \$17000(400 × \$20 + 300 × \$30)。

表 2 满足约束的运行结果

编号	有功功率/MW	无功功率/Mvar	电压/p. u.
机组 1	400	61.77	1.0
机组 2	300	208	1.05
负荷 3	700	0	0.96

两种运行方式的费用差值 \$1000 即为满足电压需求而提供无功支持的额外费用。在垂直管理体制下,机组 1 损失的发电费用将由机组 2 来弥补。

(2) 实例 2: 市场竞争下的发电费用

区别于实例 1,电力市场开放后,不同的机组分属于不同的经济实体。每台机组通过投标向系统运行人员提交包括有功功率的成本函数以及可用容量等信息。在这些信息的基础上,运行人员一般以总运行费用最小为目标,确定满足各种约束条件的系统运行方式,以及相应的系统边际价格。在该实例中,由于未考虑传输线路的容量约束,每台机组都是以系统边际价格付费。运行结果如表 2 所示,系统的边际价格为 \$0/MWh。为了满足电压要求,在实际运行中,运行人员将机组 1 的有功出力强制减少了 100 MW,从而使其利润损失了 \$1000,即机组 1 由于提供无功支持而导致的机会成本,如图 4 所示。

为了鼓励机组在系统无功紧缺时放弃有功而增发无功,运行人员应补偿机组的无功机会成本。因此,该实例中,机组 1 除了获得按系统边际价格

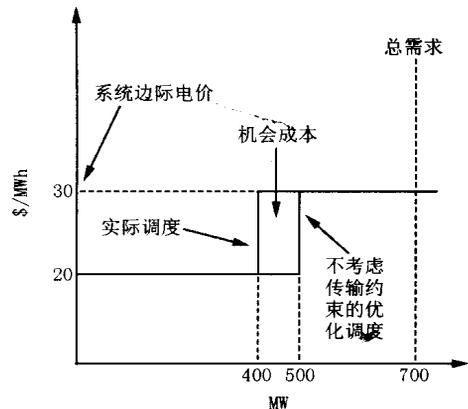


图 4 无功机会成本

Fig. 4 Opportunity costs with reactive support

\$0/MWh 支付的 400 MW 有功功率的费用外,还将获得由于运行需要而少发的 100 MW 有功损失的利润 \$1000。换句话说,由于机组 1 发 500 MW 和 0 Mvar 或者发 400 MW 和 62 Mvar 的总的利润都是 \$000,因此两种运行方式对机组 1 而言没有什么区别,这样系统的安全性得到了保证。

4.2.2 进相运行无功电量电价

在系统负荷低谷时,发电机进相运行吸收无功功率已成为高压电网保证运行电压合格率的重要手段。发电机在进相运行时,定子端部温度升高,静稳裕度减少,易失去静稳定,需要运行人员加大监视和管理力度。因此,进相运行时,除了无功的机会成本外还应该考虑无功辅助服务的管理费。

发电机进相运行曲线可以通过专门的进相试验得到,通过对发电机进相运行的典型运行点进相静稳分析得到的一些离散点进相曲线拟合,可以得到发电机有功和无功在进相运行时的隐函数关系:

$$P = f_1(Q) \quad (6)$$

再进行数据处理后,得到:

$$P = f_2(Q) \quad (7)$$

计算无功电量电价的方法与上述迟相运行时计算方法相同。

5 结语

由前面的讨论可知,由于无功功率的物理特点和成本特性,无功辅助服务中的独立发电厂的无功需求和定价问题显得十分复杂,但又是非常重要的。本文针对我国电力市场初期的特点,将发电厂无功生产成本作为发电市场侧的无功定价的核心内容。具体分析了发电厂无功生产中涵盖的各种成本,将无功电价划分为两部分:无功容量电价和无功电量

电价。对于发电侧无功市场定价结构的建立具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 张粒子,李亚男,李国辉,等(ZHANG Li-zi, LI Ya-nan, LI Guo-hui, et al). 发电侧电力市场无功定价方法探讨(Discussion on Reactive Power Pricing Method of Generation Power Market) [J]. 中国电力(Electric Power), 2002, 35(1):28-32.
- [2] 于尔铿,韩放,谢开,等(YU Er-keng, HAN Fang, XIE Kai, et al). 电力市场(Electric Power Market) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press), 1998.
- [3] Lamont J W, Fu J. Cost Analysis of Reactive Power Support [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 890-898.
- [4] Dai Y, Ni Y X, Shen C M, et al. A Study of Reactive Power Marginal Price in Electricity Market [J]. Electric Power Sys

tems Research, 2001, 57:41-48.

- [5] Barquin J, Soler D, Largo O, et al. On the Cost of the Reactive Power Generation and Voltage Support Service [A]. Bulk Power System Dynamics and Control IV-Restructuring. Greece. 24-28.
- [6] 温步赢,周峰,程浩忠,等(WEN Bu-ying, ZHOU Feng, CHENG Hao-zhong, et al). 电力市场条件下无功发电成本研究(Research on Reactive Power Cost in Power Market) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 2002, 22(2):26-29.

收稿日期: 2003-06-30; 修回日期: 2003-08-21

作者简介:

孔飘红(1978-),女,硕士研究生,从事电力市场无功辅助服务定价及无功优化研究;

刘俊勇(1963-),男,教授,博士生导师,长期从事电力市场等领域的研究。

Costing and pricing of reactive power generation

KONG Piao-hong¹, LIU Jun-yong¹, ZHANG Xir-ping²

(1. Department of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: Reactive power service is a key part of power market auxiliary service, and reactive power price in the generation side is the basis of the pricing of reactive power market. In this paper, reactive power generation costs are discussed, which are decomposed into two parts: reactive capacity price and reactive power production price. The conceptions are clear and the calculations are convenient. Research results show that with a reasonable economic compensation, power plants will act to maintain security and stability of the system on their own initiative.

Key words: power market; reactive power auxiliary service; reactive power costs; reactive power generation market

(上接第 10 页 continued from page 10)

收稿日期: 2003-06-03; 修回日期: 2003-08-11

作者简介:

袁智强(1969-),男,工程师,博士研究生,从事电力市

场、电力系统安全分析方向的研究;

邓超平(1971-),男,工程师,博士研究生,从事电力系统分析方向的研究;

蒋传文(1966-),男,副教授,博士后,主要从事电力市场、混沌理论及其应用、水库调度方向的研究。

Analysis of equilibrium in oligopolistic electricity market

YUAN Zhi-qiang, DENG Chao-ping, JIANG Chuan-wen, HOU Zhi-jian

(Electrical Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The real electricity market is an imperfect competition market. And to simulate the strategies of suppliers, some models such as Cournot and supply function equilibrium are employed. In this paper, a new oligopolistic game model is put forward to finish the above simulation. The formulae of Nash equilibrium are obtained based on complete information. The results of Nash equilibrium of the newly presented model are compared with that of other game models, and the impacts of demand elasticity and generation capacity constraints on Nash equilibrium are analyzed.

Key words: model; oligopolistic electricity market; Nash equilibrium; demand elasticity; generation capacity constraints