

电力市场环境下的无功服务及其成本分析

吴国丙¹, 任震¹, 祁达才²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省电力集团公司, 广东 广州 510000)

摘要: 电力市场的兴起对传统的电力工业产生了巨大的冲击, 引起了许多亟待解决的问题。无功功率服务对电力系统的经济、安全和可靠运行具有重要的作用, 因此必须对无功成本进行分析, 以便科学合理地解决无功定价问题。分析了无功服务的特点, 强调在电力市场中必须考虑无功成本, 并从经济学角度对无功发电成本和无功输电成本进行详细的分析; 简单算例的计算结果也进一步说明对无功成本进行分析计算的科学合理性和重要性。

关键词: 电力市场; 无功服务; 无功成本

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4397(2002)08-0014-04

1 引言

当前, 电力工业引入竞争、实行商业化运行的浪潮席卷全球, 世界各国的电力工业都在进行不同程度的改革。电力市场的蓬勃发展不仅对电力工业的管理体制产生巨大的变革, 而且对电力系统运行的各个环节提出了许多亟待解决的、新的技术经济问题。

在开放的环境下, 需要有不同的电力服务来满足不同用户的需求以及电力市场竞争的需要。电力服务总的来说可以分为以下三类: 发电服务 (generation services)、输电服务 (transmission services) 和辅助服务 (ancillary services)。辅助服务是指那些为满足输电的可靠性和经济性要求而有关的服务, 包括调度、电压和无功功率控制、频率控制、各种系统备用、稳定控制等^[1]。无功功率服务作为辅助服务的一种, 对于有功功率的传输有着非常重要的支持作用; 特别是当利用输电系统交易数量增多和电压水平成为限制额外功率传输的“瓶颈”时, 无功功率的支持作用就更加重要^[2]。

可见, 为了促进电力市场的良性发展, 必须对无功功率进行成本分析和定价, 并确立一个科学合理的价格形成机制。然而, 以往的成本分析大都没有或很少考虑无功成本。FERC 在 NOPR 一文^[3]中建议用固定费率法 (fixed tariff) 来定价无功支持服务, 此方法不能有效地提供一个正确的价值信号。文献 [4] 中介绍了一种基于实时电价 (SP: spot price) 理论的节点边际成本定价方法, 利用发电成本对无功需

求的灵敏度来作为边际成本, 它只包含了一部分真实成本 (燃料成本)。由于无功发电的运行成本比较小, 一些学者建议忽略无功发电的运行成本而只考虑可利用的无功容量成本。可是, 如果忽略运行成本, 有时是很明显的, 并将引起相应信息的损失。在文献 [5] 中, 作者提出了描述无功总成本的线性或二次曲线, 但是此成本曲线如何获得却没有被提及到。

本文认真地分析了无功服务的特点, 强调在电力市场中必须考虑无功成本, 并从经济学和工程技术角度对无功发电成本和无功输电成本分别进行了研究分析。

2 无功服务的特点

无功服务对于电力系统的经济、安全和可靠运行有着非常重要的作用。在电力市场中, 对于每一个交易, 必须提供满足可靠性要求的一定数量的无功功率, 以维持输电电压在规定的范围内。与有功服务相比, 无功服务有如下特点^[1]:

(1) 供应的地域性: 由于远距离输送无功需要发电和接受点之间较大的电压差, 因此无功供应原则上应就地平衡。

(2) 控制的分散性: 与频率控制需要有功平衡类似, 电压控制需要无功平衡。但频率是全网统一的, 依赖于全网的有功平衡; 而电压是各节点不同的, 必须依赖于该节点的电压控制。

(3) 手段的多样性: 与有功只能由发电机提供不同, 无功除了发电机外, 还可以由调相机和静止无功补偿器甚至输电线路等无功源提供。

(4) 分析的复杂性: 有功的费用主要是发电费用, 而无功的运行费用很小但投资费用很大, 分析起

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (000397)

来比较复杂。

无功服务的特点决定了对无功的管理必须规范化、科学化,对无功成本要进行详细分析。同时,由于发电和输电的分离,无功成本也应对不同的服务进行具体的分析,区分各无功源的无功生产成本和输电系统的无功输电成本。因此,无功定价必须协调多种相互关联的甚至相互矛盾的目标函数,如维持系统可靠性,为系统扩建提供正确的经济信号,简化管理过程和保证用户间的平等^[6]。

本文从经济学和工程技术角度分别对无功生产成本和无功输电成本进行分析。从经济学角度来说,无功成本由显性成本(explicit cost)和隐性成本(implicit cost)组成。显性成本是指必须直接付费的成本,包括设备的资本成本和商品的运行成本。隐性成本主要是指机会成本(opportunity cost),即商品在其最佳利用时间时的价值。

3 无功生产成本分析

电力系统的无功功率电源,除了发电机外,还有同步调相机、静电电容器及静止补偿器,而后三种装置又称为无功补偿装置。至于线路充电电容和具有超前功率因数的负荷,也可以看作系统的无功源,但本文暂不考虑其无功功率生产成本,而只考虑发电机和无功补偿装置的无功生产成本。

3.1 发电机的无功生产成本

3.1.1 显性成本

同用燃料成本来代表有功功率的生产成本不同的是,发电机的无功功率生产成本很小,如维护费用。而用于代表发出无功的容量的资本成本构成了无功功率显性成本的一大部分。用 EC_s 、 EC_p 和 EC_q 来表示发电机的容量成本及其有功分量和无功分量,鉴于发电机的资本成本通常用有功分量的成本 EC_p 来表示,由 P 、 Q 和 S 之间的三角关系有以下等式:

$$EC_s = EC_p / \cos = EC_p / \beta f \quad (1)$$

$$EC_q = EC_s \cdot \sin = EC_s \cdot \sin(\cos^{-1} \beta f) \quad (2)$$

式中, βf 为发电机的额定功率因数。可以用 EC_q 来近似表示无功功率的显性成本,本文算例也说明进行如此分摊的合理性。

3.1.2 机会成本

发电机的典型出力特性如图 1 所示,其容量限制对于计算机会成本有着重要的意义。发电机运行的容量限制主要有:电枢(定子)电流限制,场(转子)电流限制和欠励限制。

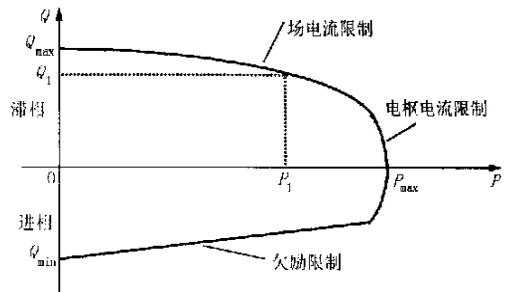


图 1 发电机出力特性图

假设发电机的容量只用来发出有功 P 和无功 Q ,且市场中有功和无功的交易总是变化的。由于发电机运行时要受到发电容量的限制,当发电机在发出无功功率时,其有功出力的极限比没有无功出力情况下的极限值要小,从而造成了发电机隐性的经济损失,此时即使该有功功率无需发出,也会影响这部分有功功率作为旋转备用的相应利润。由机会成本的定义可知,无功功率的机会成本就是发电机由于其无功出力而损失的有功发电能力所对应的最大利润,可用下式来表示^[2]:

$$OC_q(Q) = \max[0, p(P)] \quad (3)$$

式中: $OC_q(Q)$ 为无功功率 Q 的机会成本; $p(P)$ 为对应于有功功率 P 的利润。

3.2 无功补偿装置的无功生产成本

3.2.1 显性成本

同发电机一样,提供无功服务的输电设备的运行成本很小,甚至可以忽略。无功补偿设备的显性成本主要是指无功设备的资本成本。输电网络的无功补偿设备,如电容器组,多是一些可投切设备。由于机械投切的损伤,设备的投切次数总有一定的限制,因此无功补偿装置有一定的使用寿命。在设备的寿命期(按 15 年计算)内,可以近似用无功补偿装置的投资总额的折旧率来计算其单位容量的显性成本,即:

$$EC_c(Q) = \frac{I_c}{15 \times 365 \times 24 \times}$$

式中, $EC_c(Q)$ 为无功补偿装置单位容量的显性成本; I_c 为无功补偿装置的单位容量的投资成本; 为无功补偿装置的平均使用率。

3.2.2 机会成本

对于已经配置在系统中的无功补偿装置,它们要么投入运行,要么退出运行,没有可供选择的其它利用方案,因而此时其机会成本为零。

4 无功功率输电成本

考虑到输电线路的主要功能是输送有功功率,因此本文认为无功功率的输电成本不包括输电线路的固定投资和运行人工等成本,而只包含无功潮流引起的输电线路的有功和无功网损成本,即只考虑无功功率输电的显性成本,而不计及其机会成本。

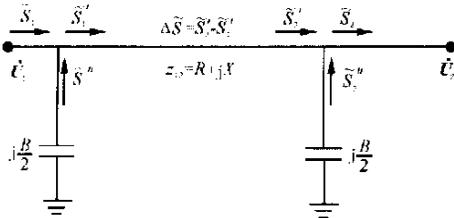


图2 线路网损图

对于图2所示的线路,线路中的阻抗支路复数网损为:

$$\tilde{S} = \frac{|\tilde{S}_2|^2}{u_2} z_{12} \quad (5)$$

式中: $\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$ 。

定义 P_p 、 P_q 、 Q_p 和 Q_q 分别是有功、无功网损的有功和无功分量,将式(5)分解如下:

$$P = P_p + P_q = \frac{P_2^2}{U_2^2} R + \frac{Q_2^2}{U_2^2} R \quad (6)$$

$$Q = Q_p + Q_q = \frac{P_2^2}{U_2^2} X + \frac{Q_2^2}{U_2^2} X \quad (7)$$

由式(6)和(7)可见,同有功功率输送一样,无功功率输送也构成了输电网损的一部分,而且有功和无功相互作用,构成了总的输电网损。因此,必须对输电网损成本进行合理地分摊,区分出网损成本的有功分量和无功分量,确定无功功率输送引起的网损成本,从而计算出无功功率输电成本。限于篇幅,本文未能将网损成本进行深入地分摊。在文献[7],作者利用潮流组成分析原理将输电成本进行了分摊,从而得到各输电线路上的无功输电成本,算例也表明了进行无功功率输电成本分析的合理性和可行性。

5 简单算例说明

本文仅以发电机和电容器为例,对无功功率生产成本进行了简单的计算分析,而对于无功功率输电成本,没有进行深入的成本分摊。

5.1 发电机的无功生产成本计算

5.1.1 显性成本计算

对于一个典型的350MW的发电机的铭牌参数^[2],如表1所示。

表1 一台350MW发电机的典型数据

额定有功功率 (P_{max})	安装成本 (I)	使用寿命 (y)	利用系数 (cf)	负载系数 (lf)	功率因数 (pf)
350MW	2,000,000 \$/MW	30年	85%	64%	0.9

由于无功服务由一定的负载方式决定,因此可以把发电机的安装成本分摊到每一个利用小时,即有下式:

$$EC_p = \frac{I \cdot P_{max}}{P_{max} \cdot cf \cdot lf \cdot y \cdot r \cdot 8760} \quad (8)$$

由上式及式(1)和(2),可以求出发电机有功功率的显性成本为 $EC_p = S 13.99/\text{MWh}$,视在功率的显性成本为 $EC_s = S 15.54/\text{MVAh}$,无功功率的显性成本为 $EC_q = S 6.77/\text{Mvarh}$ 。假设某单位时段固定地有1MVA的功率发出,则相应的分为0.9MW的有功功率和0.436Mvar的无功功率输出,该单位时段发电机的总成本计算为: $EC_s \times 1 = EC_p \times 0.9 + EC_q \times 0.44 = 13.99 \times 0.9 + 6.77 \times 0.436 = 15.44$ 。这既说明了计算无功成本的合理性,又表明了对成本进行有功和无功分摊的科学性。

5.1.2 机会成本计算

由于发电机的机会成本实际上受到市场中多种因素的影响,如买卖双方竞标价格及策略、发电机有功成本和无功成本等等,因此分析起来比较复杂。本文在此仅仅假设八种可能的情况进行简单的分析。如图1所示,假设发电机将发出 $Q = Q_1$,且发电机的容量只用于发出 P 或 Q ,那么 Q 的机会成本取决于 $P = P_{max} - P_1$ 的利润大小。表2给出了可能发生的八种不同的情况。

表2 八种情况下的机会成本

(S)	1	2	3	4	5	6	7	8
P 的成本 (C_p)	15	15	15	14	12	12	12	12
P 的价格 (pr_p)	14	14	14	14	14	14	14	14
P 的利润 (p)	-1	-1	-1	0	2	2	2	2
Q 的显性成本 (EC_q)	4	3	2	2	2	2	2	2
Q 的机会成本 (OC_q)	0	0	0	0	2	2	2	2
Q 的价格 (pr_q)	3	3	3	3	3	4	6	8
Q 的利润 (q)	-1	0	1	1	-1	0	2	4
发出 P ?	否	否	否	否	是	是/否	否	否
发出 Q ?	否	否	是	是	否	否/是	是	是

在表2中,有功功率的机会成本没有考虑,这是因为计算无功功率的机会成本时已经假定发电机保留的容量用于无功出力,即有功出力不再增加,故有

有功功率的机会成本不存在。

表 2 中的计算利用式 (3) 及以下两式:

$$p = pr_p - C_p \quad (9)$$

$$q = pr_q - (EC_q + OC_q) \quad (10)$$

比较表 2 中的八种情况可以看出,在有功功率的价格一定时,有功成本高的前四种情况下有功功率的利润为非正,无功功率的机会成本为零;而后四种有功成本低的情况下有功功率的利润为正,无功功率的机会成本大于零。同时,当考虑无功功率的机会成本时,对于相应的无功功率的显性成本和无功价格,无功功率的利润水平也是不同的,这样,不同的机会成本将会导致不同的有功和无功生产方式。

5.2 无功补偿设备的成本分析

由于无功补偿设备的运行特性,即要么投入运行,要么退出运行,所以其机会成本为零,本文在此仅对其显性成本进行简单的分析计算。

假设某一电容器组的安装成本为 \$11600/\text{Mvar}\$,使用寿命为 15 年,平均使用率为 0.90,利用式 (4) 进行计算可得:

$$EC_c(Q) = \frac{I_c}{15 \times 365 \times 24 \times 0.90} = \frac{11600}{15 \times 365 \times 24 \times 0.90} = 0.098 / (\text{Mvarh})$$

如果电容器的容量为 \$50\text{Mvar}\$,那么每小时的使用成本为 \$4.9\$。

6 总结

本文通过对电力市场中的无功服务与无功成本的研究分析得出以下结论:

(1) 无功功率服务对于电力系统的安全、可靠和经济运行具有非常重要的意义,并具有同有功功率服务不同的特点,这也决定了无功成本分析与定价的复杂性。

(2) 在市场经济条件下,鉴于无功服务的重要意义,本文强调必须对无功功率成本进行分类、分析和定价。

(3) 本文从经济学和工程技术角度出发,对电力

系统的不同无功源,即发电机和无功补偿设备的无功功率生产的显性成本和隐性成本进行了详细地分析;同时,也对无功功率输电成本进行分析说明。

(4) 本文引用简单的算例对无功功率生产的显性成本和机会成本进行计算分析,结果也表明了对无功成本进行科学的合理性和重要性。

参考文献:

- [1] 于尔铿,韩放,谢开,等. 电力市场[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [2] Lamont J W, Jian Fu. Cost Analysis of Reactive Power Support [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1999, 14(3): 890 ~ 898.
- [3] Federal Energy Regulatory Commission. Notice of Proposed Rulemaking: Docket No. RM95 8000 [R]. Congressional Record, March 29, 1995.
- [4] Baughman M L, Siddiqi S N. Real time Pricing of Reactive Power: Theory and Case Study Results [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1991, 6(1): 23 ~ 29.
- [5] Dandachi N H, Rawlins M J, et al. OPF for Reactive Pricing Studies on the NCG System [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1996, 11(1): 226 ~ 232.
- [6] Shangyou Hao, Alex Papalexopoulos. Reactive Power Pricing and Management [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1997, 12(1): 95 ~ 104.
- [7] 戴彦,倪以信,文福拴,等. 基于潮流组成分析及成本分摊的无功功率电价[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(18): 13 ~ 17.

收稿日期: 2001-12-21

作者简介:

吴国丙(1977 -),男,硕士研究生,主要研究方向为电力市场。

任震(1938 -),男,教授,博士生导师,国务院学位委员会电气工程学科组成员,主要研究方向为电力市场、小波分析及其在电力系统中的应用、高压直流输电、电力系统规划与可靠性。

祁达才(1963 -),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力市场。

The analysis of reactive power service and its cost under electricity market environment

WU Guo-bing¹, REN Zhen¹, QI Da-cai²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Electric Power Group Corporation of Guangdong Province, Guangzhou 510000, China)

(下转第 32 页)

I 变化范围为 $0 \sim 800\text{A}$ 时,测量值与实际值仿真结果见图 5。从仿真结果可以看出,按式(14)进行计量的无功功率测量值比实际值大,并且负载电流越大,两者差别越大。

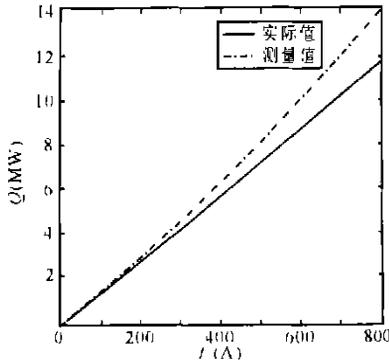


图 5 $n=0$ 的数字仿真结果

当 $n=1$, $\dot{U} = 27.5 \angle 0^\circ \text{kV}$, $\cos \varphi = \cos \varphi = 0.85$, I 与 I 的变化范围为 $0 \sim 800\text{A}$ 时, 低压侧无

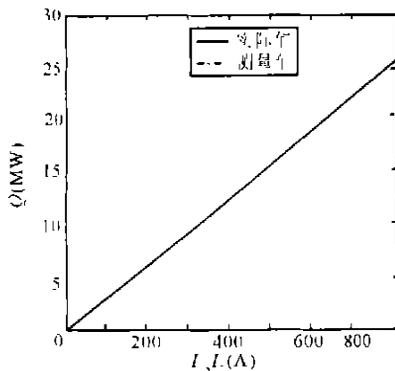


图 6 $n=1$ 的数字仿真结果

功率测量值与实际值仿真结果见图 6。从仿真结果可以看出,当两边负载相同时,按式(14)进行计量的无功功率测量值等于实际值。

5 结论

本文讨论了在牵引变电所低压侧用两块有功表计量无功的误差问题,通过上述讨论可以得到以下结论。

(1) 在低压侧用两块有功表计量无功的方法是在各种负荷情况下两相电压幅值相等的前提下导出的,由于牵引变电所两臂负载相同的几率很小,所以,这种计量方法的准确度值得商榷。

(2) 理论分析与数字仿真结果表明,当两臂负载不等时,这种方法计量的无功较实际无功要大,从而使功率因数较实际值偏低。

参考文献:

- [1] 刘福生,等. 阻抗匹配平衡变压器的等值电路及其应用[J]. 铁道学报, 1994, 16(3): 22~30.
- [2] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [3] 贺威俊,等. 电力牵引供电技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998.

收稿日期: 2001-11-14

作者简介:

韩正庆(1977-),男,硕士,主要从事牵引供电系统综合自动化的研究工作。

高仕斌(1963-),男,硕士,教授,主要从事牵引供电系统综合自动化的教学与研究工作。

Study on the measurement method of reactive power in traction substation

HAN Zheng-qing, GAO Shi-bin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The measurement method of reactive power in traction substation, which main transformer is impedance matching balance one, is discussed. Based on the theoretical analysis and digital simulation, the error of measuring reactive power with active meters at the secondary side of transformer is analyzed. And a conclusion is drawn that the dictated value is bigger than the real one. This paper has reference value for the design and operation of the measurement method of reactive power in traction substation.

Key words: traction substation; reactive power; active power; measurement; error

(上接第 17 页)

Abstract: The rise of electricity market has had great impact on the traditional electric power industry, and caused many urgent problems that need to be solved. Because reactive power service is very important for the economic, secure and reliable operation of the power system, the cost of reactive power service should be analyzed and the problem of reactive power pricing should be solved scientifically and rationally. The characteristics of reactive power service are analyzed, the reactive power cost is emphasized to be considered in electricity market, and at so, the reactive power generation costs and transmission costs are analyzed from the view of economy. The calculation results of simple examples also illustrate the scientific rationality and importance of the analysis and calculation of the reactive power cost.

Key words: electricity market; reactive power service; reactive power cost