

考虑无功资源价值的无功实时定价

丁 勇, 王秀丽

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出无功资源技术价值和无功资源经济价值的概念, 并从无功资源技术价值的角度提出基于潮流计算的无功资源价值评价方法, 该方法直接反映了无功出力与系统电压变化的关系. 考虑无功资源价值的影响, 以发电机有功无功成本最小为目标函数, 运用最优潮流方法进行了无功定价研究. 以 IEEE14 节点系统进行实例计算, 与不考虑无功资源价值情况比较, 这种定价在总成本、网路损耗、有功电价基本不变的情况下, 可以使系统无功电价升幅在 3811 % 以上, 促使无功在电力市场环境下达达到就地补偿, 让市场成员积极维护系统安全.

关键词: 电力市场; 无功资源价值; 无功定价

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)12 - 1296 - 05

Real2Time Pricing of Reactive Power Based on Reactive Power Value

Ding Yong, Wang Xiuli

(School of Electrical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: The problems of reactive power value and reactive power pricing are discussed. Technology value of reactive power and economy value of reactive power are presented. From the viewpoint of technology value of re2 active power, reactive power value evaluation based on power flow is proposed, which reflects the relation between output of reactive power of generator and the variation of system voltage directly. The model for price re2 active power is established, where the OPF method is adopted with the objective function to minimize the sum of reactive and active power cost, and the reactive power value is considered and the opportunity cost is used as reactive power cost. The method is tested by IEEE142bus system, and the results indicate that the proposed pricing mechanism can make the reactive power price increased 3811 % at least while the total cost of reactive power and active power, P loss and Q loss, and active power price are almost unchanged compared with the situation that the reactive power value unconsidered. It can be expected to urge the reactive power compensated locally and to encourage the market members to serve for system security actively.

Key words: power market; reactive power value; reactive power pricing

对无功定价问题的研究始于 20 世纪 80 年代末期, 其研究主流是以实时电价理论为基础进行推广和发展的. 传统的实时电价理论采用经济调度和直流潮流模型, 没有考虑无功功率和其他辅助服务. 1991 年, Baughman 在实时电价理论的基础上, 首先研究了无功实时电价问题^[1], 采用了以交流潮流为

基础的最优潮流 (OPF) 模型, 将有功实时电价的概念和计算过程推广到了无功实时电价, 并明确指出了在最优潮流收敛时分别对应于有功和无功潮流平衡方程的拉格朗日乘子 p_i 和 q_i 分别为节点 i 上的有功和无功实时电价, 从而说明 OPF 是计算实时电价的一个重要工具.

收稿日期: 2004 - 06 - 24. 作者简介: 丁 勇(1976 ~), 男, 硕士生; 王秀丽(联系人), 女, 教授, 博士生导师. 基金项目: 中华电力基金资助项目.

文献[2]引入了无功功率的发电成本和无功补偿器成本之后,运用最优潮流方法,分析了各种不同的优化目标及不同的约束条件对无功电价的影响。其无功功率的发电成本只考虑无功功率的机会成本。

当无功成为电力市场中的一种商品时,对于购买者和出售者来说,如何评价其价值就成为一个很重要的问题。文献[3]提出了等效无功补偿法并对动态无功源的价值进行评价。文献[4]归纳和比较了几种确定无功资源价值的方法,即电压灵敏度法、PV 曲线法、等效无功补偿法和备用发电机法,并且指出,电压灵敏度法和 PV 曲线法反映了发电机的无功出力随负荷变化的情况,而等效无功补偿法和备用发电机法则体现无功源在无功备用中的重要性。文献[5]在利用等效无功补偿法进行无功资源价值评价的基础上,设计了向发电机、调相机等动态无功源采购无功功率的算法。

本文首先提出无功资源技术价值和无功资源经济价值的概念,从无功资源技术价值的角度提出基于潮流计算的无功资源价值评价方法,然后在考虑无功发电的机会成本和无功源的资源价值基础上,使用最优潮流进行无功实时定价。通过这种方式确定的无功电价反映出更强的市场信息,可以促使无功在电力市场环境下达达到就地补偿,让市场成员积极地参与系统安全的维护。

1 无功服务的成本及定价原则

无功发电成本从经济学的角度可分为固定成本和可变成本。发电机组生产无功的固定成本主要包括励磁调节器、电压调节器、远距离电压调节器、自动电压监视系统的购买费用。由于发电机主要是用来生产有功功率,其与无功相关的固定投资成本可以全部以有功功率生产的形式来回收,因此无功发电成本主要是生产无功的可变成本。

发电机生产无功需要的可变成本包括设备维护的人工费用成本、有功损耗(由绕组功率损耗、定子旋转摩擦损耗等组成)以及机组提供无功而导致无法提供有功的机会成本。

在电力生产中,人工费用成本相对于其他变动来说很小。有功损耗大小因机组而异,然而由于在生产有功状态下也会产生这些损耗,因此部分损耗也可以看作有功成本。为提供无功而产生的有功损耗相对很小,因此也可以忽略^[6]。

一般认为无功的生产成本是由于发电机的无功出力而损失的有功发电出力所对应的利润,即机会

成本。

制定无功服务价格的目标可以归纳为^[7]:价格能正确反映并合理补偿辅助服务成本;能够激励供方保持并提高服务水平,使系统长期得到稳定和充足的服务;最小化终端用户承担的服务费用;运作定价机制所需的费用应该合理;成本中应该包括机会成本;要避免成本的重复计算;价格应该反映出服务的价值差异;要成立监管机构防止可能的买方垄断或者买方垄断等。

2 无功资源价值

目前,没有关于无功资源价值的明确定义。从无功对系统安全的影响和无功对网损大小的影响及无功源相互替代性两个方面,本文将无功资源价值分为无功资源技术价值和无功资源经济价值。其中,无功资源技术价值主要反映无功源对系统电压调节以及对系统安全的重要程度,无功资源经济价值主要反映无功源出力变化对系统网损的影响以及对其他无功源出力的影响。对于文献[4]中提及的 4 种无功资源价值评价方法,PV 曲线法可以认为是属于无功资源技术价值评价,而电压灵敏度法、等效无功补偿法和备用发电机法属于无功资源经济价值评价。本节将要提出的基于潮流计算的无功资源价值评价方法属于无功资源技术价值评价。

上述 3 种无功资源技术价值评价方法都没有直接从机组无功出力与系统电压变化的关系进行无功资源价值评价。本节在潮流计算的基础上,通过分析机组无功出力与系统电压变化量的关系,给出一种动态无功源的无功资源价值评价方法,该方法可以反映无功源调节系统电压的能力。以 IEEE14 节点系统为例,进行实例计算,结果表明该方法反映了无功服务的特点。

2.1 基于潮流计算的无功资源价值评价方法

假设系统有 N 个节点, M 台发电机(包括调相机),进行基本潮流计算后,每台发电机的有功、无功值分别为 $P_i, Q_i, i = 1, 2, \dots, M$,系统节点电压幅值为 $V_0 = (v_1, v_2, \dots, v_N)$ 。

本方法的思路是:除平衡节点外,所有节点均当作 PQ 节点, (P, Q 值为基本潮流解中的计算结果)。在系统负荷不变的条件下,改变第 i 台待测试发电机的无功出力(例如,分别取其基本潮流解中无功输出的 10% ~ 100%, $Q_i = (0.11 Q_i, 0.12 Q_i, \dots, Q_i)$)重新进行潮流计算,分别得到系统电压 $V_{ij} = (v_{ij1}, v_{ij2}, \dots, v_{ijN}), j = 1, 2, \dots, 10$,进而求得 V_{ij}

$= (V_{ij} - V_0)$, 对应于 $Q_i = (011 Q_i, 012 Q_i, \dots, Q_i)$ 可得 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{i10})$.

由 PQ 分解法进行潮流计算的修正方程式 $Q/V = B V$ 可知, 可以将 V_i 、 Q_i 拟合成一次曲线

$$V_i = k_i Q_i + b_i \quad (1)$$

式中: k_i 反映了无功价值, 为了分析其相对价值, 对于 $M - 1$ 个 k_i , 求其最小值 k_{\min} , 得

$$k_{\min} = \min(k_1, k_2, \dots, k_{M-1}) \quad (2)$$

设平衡机的无功资源价值为 1, 即 $k_M = 1$, 又设 $k_{\min} = 1$, 得到定量表示的 M 台机组的无功资源价值为

$$f = (k_1/k_{\min}, k_2/k_{\min}, \dots, k_{M-1}/k_{\min}, k_M) \quad (3)$$

2.12 实例计算

以 IEEE14 节点系统为例, 进行无功资源价值分析, 系统接线如图 1 所示. 按前述模型, 将机组无功出力与系统电压变化量拟合成曲线如图 2, 此时系统动态无功源的资源价值如表 1 所示.

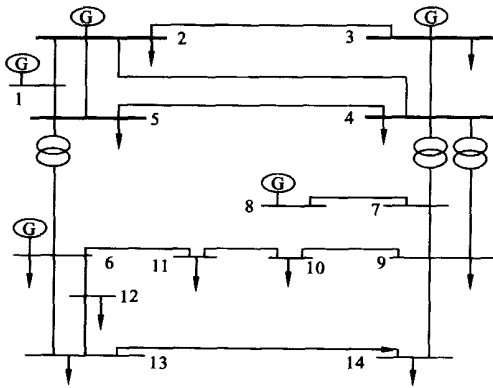


图 1 IEEE14 节点系统接线图

表 1 IEEE14 系统动态无功源的无功资源价值

节点号	无功资源价值
1	11000 0
2	11000 0
3	11779 4
6	31675 8
8	31503 9

图 2 中系统电压变化量是除待测发电机节点以外所有节点电压变化量之和, 并且发电机的无功出力较小时系统电压变化量较大.

此方法主要反映了系统实际运行状态下系统中动态无功源资源价值的相对大小, 故计算出的无功资源价值量纲为 1. 由表 1 可以看出, 6、8 节点无功源的资源价值比 2、3 节点的大, 而由图 1 知 6、8 节点正好位于系统的负荷中心.

由图 1、表 1 可以看出, 同一电压等级的节点无功资源价值比较相近, 从地域上来看, 相邻节点的无

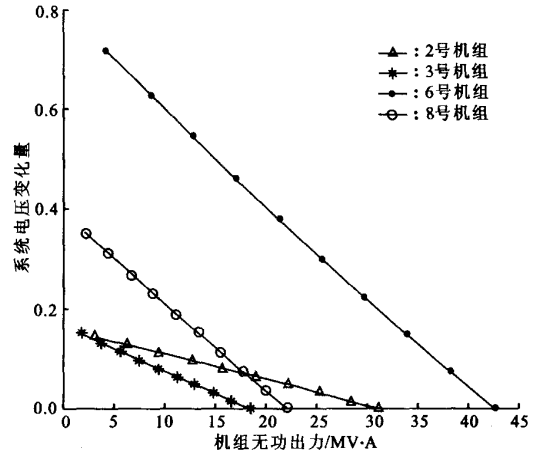


图 2 机组无功出力与系统电压变化的关系
无功资源价值比较相近, 这些反映了无功服务的地域性特点.

3 考虑无功资源价值的无功实时定价

首先作以下几个假设:

- (1) 各发电机的有功功率成本曲线已知;
- (2) 负荷已知, 且不随电价变动;
- (3) 发电机的无功生产成本是由于其无功出力而损失的有功发电出力所对应的利润, 即机会成本.

目标函数是系统有功无功发电总成本最小

$$\min C = \sum_{i \in NG} \{ C_{gp_i}(P_{g_i}) + Kf(i) [C_{gp_i}(S_{g_{imax}}) - C_{gp_i}(S_{g_{imax}}^2 - Q_{g_i}^2)^{1/2}] \} \quad (4)$$

式中: K 为发电厂的利润率; $f(i)$ 为发电机 i 的无功资源价值因子. 目标函数的第一部分 $C_{gp_i}(P_{g_i})$ 表示发电机的有功生产成本, 第二部分 $Kf(i) [C_{gp_i}(S_{g_{imax}}) - C_{gp_i}(S_{g_{imax}}^2 - Q_{g_i}^2)^{1/2}]$ 为发电机的无功生产成本, 即机会成本.

约束条件为

$$P_{g_i} - P_{L_i} - \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$Q_{g_i} - Q_{L_i} - \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (7)$$

$$P_{g_i}^{\min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{\max} \quad (8)$$

$$Q_{g_i}^{\min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{\max} \quad (9)$$

式(5)、式(6)表示有功无功平衡约束, 式(7)为系统电压约束, 式(8)、式(9)为发电机的有功无功出力约束.

本文采用序列二次规划的拟牛顿法求解 OPF 问题,对应于式(5)、式(6)的拉格朗日乘子即分别为有功、无功实时电价。

4 算例分析

以 IEEE14 节点系统为例,利用康奈尔大学 PSERC 最优潮流程序(采用序列二次规划的拟牛顿法),取 $K = 011, f = [1, 1, 11779.4, 31675.8, 31503.9]$ (由表 1 可知),分别在不考虑无功资源价值、考虑无功资源价值两种情况下进行最优潮流计算.计算得到如下结果。

4.1 两种情况下的电压(标么值)比较

由图 3 所示的系统各节点电压比较来看,由于在满足系统电压要求情况下,尽量少地从无功资源价值因子较大的发电机处购买无功.所以,考虑无功资源价值因子后系统电压从 3 节点以后都有所下降,但就是最低的 14 节点电压也在 0.196,满足系统要求。

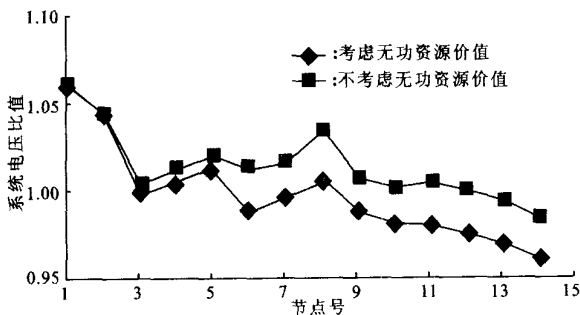


图 3 两种情况下各节点电压比较

4.2 两种情况下的有功电价比较

图 4 给出了两种情况下的有功电价,显然,在考虑无功资源价值因子后系统的部分节点的有功电价略有升高。

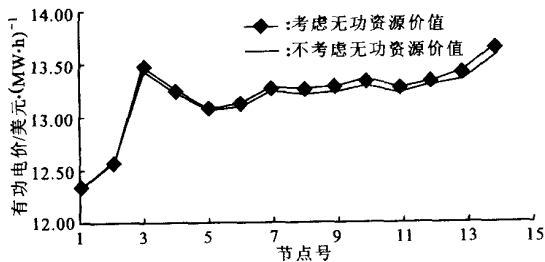


图 4 两种情况下各节点有功电价比较

4.3 两种情况下的无功电价比较

图 5 给出了两种情况下系统各节点的无功电价,可以看出,在考虑无功资源价值因子后,系统的

无功电价均有较大幅度的升高,可以给用户以更强的经济信息.对于发电机侧,由于购买其无功时是按其成本的无功资源价值因子倍数进行补偿的,而无功资源价值因子都是大于或等于 1 的,这样可以确保其收回成本。

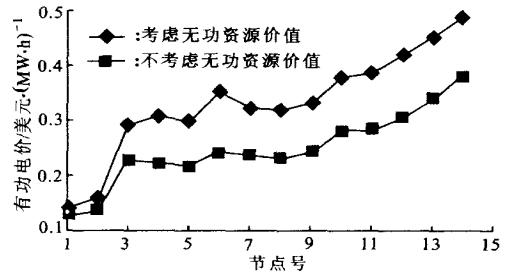


图 5 两种情况下各节点无功电价比较

4.4 两种情况下的总成本及网损比较

由表 2 可见,考虑无功资源价值后,采购无功的成本和系统的有功网损、无功网损也略有增大,但变化不大,这说明本文方法所给出的更强的经济信息没有以成本和网损增加为代价。

表 2 两种情况下总成本及网损比较

	总成本 /美元·h ⁻¹	有功网损 /MW	无功网损 /MV·A
未考虑无功资源价值	3 761138	81521	36151
考虑无功资源价值	3 766170	81758	37171

4.5 两种情况下发电机无功出力比较

由图 6 可知,未考虑无功资源价值时,5 台机组的无功出力差异较考虑无功资源价值后小.考虑无功资源价值后,无功资源价值因子较大的机组无功出力要减小,无功资源价值因子较小的机组无功出力将增大,并且无功资源价值因子越大其出力减小量越大。

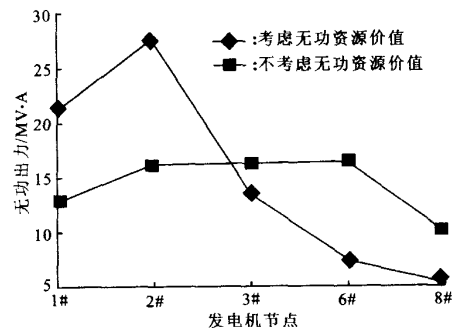


图 6 两种情况下各发电机无功出力比较

5 结论

本文在考虑无功发电的机会成本和无功源的资源价值基础上,使用最优潮流进行无功实时定价,并以 IEEE14 节点系统进行了实例计算,结果如下。

(1) 本文所提出的基于潮流计算的无功资源价值评价方法,直接反映了无功源的无功出力与系统电压变化的关系,这就可以直接从无功资源价值的大小判断其对系统电压变化的影响。

(2) 正常无功负荷下,考虑无功资源价值后,与不考虑无功资源价值相比,负荷节点无功电价升高,这将促使用户减少无功负荷需求,减轻系统无功供应压力;系统的有功电价变化较小;系统电压有所下降,但仍满足系统运行要求。

(3) 考虑无功资源价值后,系统的无功采购费用比不考虑无功资源价值时会增加,这主要是由于无功资源价值因子都是大于 1 的,即给予向系统提供无功的发电机以等于或超过其无功成本的补偿,这可以保证系统的无功供应。

总之,考虑无功资源价值后,可以给市场以更强的经济信息,在保证无功源充分供应的同时,促使无功在电力市场环境下达就地补偿。

为研究方便,本文只考虑单时段下的无功定价,如果研究多时段情况,则需考虑机组启停等因素。本文目标函数中没有考虑网损,这是因为同时要给出有功、无功电价的节点电价,那么目标函数的内容就

必须是反映经济因素的量,如果考虑网损,就要把网损乘以相应的有功无功电价,将其转化为经济量,这样可能给优化带来一些收敛性方面的问题。同时,具体将网损怎样转化为经济量,是用节点电价还是统一电价,还需要研究。

参考文献:

- [1] Baughman M L, Siddiqi S N. Real time pricing of reactive power: theory and case study results [J]. IEEE Trans on Power System, 1991, 6(1): 23 - 29.
- [2] 戴彦,倪以信,文福拴,等. 电力市场下的无功电价研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 16(5): 9 - 14.
- [3] Xu W, Zhang Y, da Silva L C P, et al. Valuation of dynamic reactive power support services for transmission access[J]. IEEE Trans on Power System, 2001, 16(4): 719 - 728.
- [4] Staniulis R. Reactive power valuation[R]. Lund: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, 2001.
- [5] 方军,张永平,陈寿孙,等. 计及无功功率成本及其资源价值的无功采购方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(20): 29 - 34.
- [6] Gross G, Tao S, Bompard E, et al. Unbundled reactive support service: key characteristics and dominant cost component[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 283 - 289.
- [7] 葛炬,张粒子,周小兵. 电力市场环境下辅助服务问题的研究[J]. 现代电力, 2003, 20(1): 80 - 85.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 1295 页)

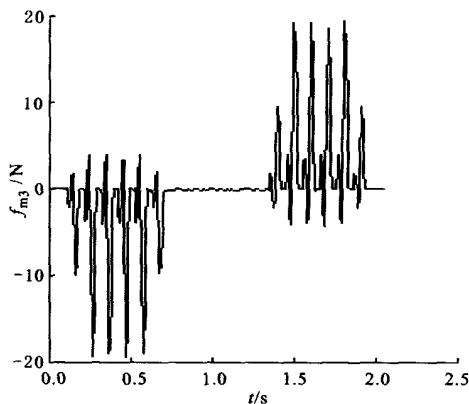


图 8 电磁推力 f_{m3} 特性

程中,电磁推力的稳定是非常重要的。分析结果表明:若相邻定子绕组间的距离为磁场基波波长的整数倍,磁子的有效长度为定子绕组长度与相邻定子绕组间隔距离之和的整数倍,且各定子对应相电流

大小相等、相位相同时,定子更替作用过程中的电磁推力较稳定。当相邻定子绕组间的距离不是磁场基波波长的整数倍时,可通过调节定子电流的相位来改善推力的稳定性。

参考文献:

- [1] Seki K, Watada M, Torii S, et al. Discontinuous arrangement of long stator linear synchronous motor for transportation system [A]. Power Electronics and Drive Systems Conference, Singapore, 1997.
- [2] 焦留成. 垂直运动永磁直线同步电动机电磁参数及特性计算[D]. 徐州:中国矿业大学电气工程系, 1998.
- [3] 夏永明. 永磁同步电动机机理分析及逆系统控制[D]. 焦作:焦作工学院电气工程系, 2003.
- [4] Bon2Gwan G, Kwanghee N. A vector control scheme for a PM linear synchronous motor in extended region[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1 280 - 1 286.

(编辑 杜秀杰)