

# 电力市场下的无功定价研究

郝思鹏<sup>1</sup>,王正风<sup>2</sup>

(1. 南京工程学院, 江苏 南京 210013; 2. 安徽省电力调度通信中心, 安徽 合肥 230061)

摘要: 无功定价研究是电力市场研究的一个重要方向, 基于微观经济学的理论, 提出了考虑暂态电压安全下的无功定价方法, 将暂态电压安全作为约束条件去修正最优潮流, 用来反映用户消耗无功功率对系统暂态电压安全性的影响。通过算例分析了考虑系统暂态电压安全对无功定价的影响, 表明考虑了暂态电压安全的无功定价能反映用户消耗无功功率对系统暂态电压安全性的影响, 从而全面反映了系统的运行情况, 为系统的稳定运行提供了有益的信息, 有利于系统稳定运行。

关键词: 无功定价; 暂态电压安全; 最优潮流

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)19-0051-04

## 0 引言

电力市场的开放使无功定价研究成为人们关注的热点。首先, 合理的无功定价可以促使电力市场的进一步开放, 提高输电路径的效率。其二, 通过合理的无功定价, 保证了无功供应者的利益, 提高了系统供电的可靠性和稳定性。其三, 合理的无功定价可以提高电压质量和供电质量。最后, 从电力需求侧管理来看, 无功定价是实施需求侧管理的重要内容, 电力公司通过合适的无功的管理和定价, 迫使用户响应, 与电力公司一道提高用电效率。

电力系统早期只把无功作为发电厂商应尽的一部分责任, 对无功发电商不支付费用; 而对无功用户费用的收取则是按用户的功率因数来进行。但用功率因数的奖罚作为无功费用的收取无法为用户提供灵敏的价格信息, 用户不能根据实际运行情况响应, 调节各自的运行方式, 从而无法提高系统运行的经济性<sup>[1]</sup>。

由 F. C. Schweppe 等人提出的实时电价理论受到了人们的广泛关注<sup>[2]</sup>, 并用它来确定有功实时电价, 基于同样的原理, 不少学者提出了以有功费用最小为目标函数来进行无功定价研究<sup>[3-8]</sup>。上述文献均没有考虑电压安全因素。

由于电力市场的形成, 可能使电压不安全性增加。究其原因可能是发电商为了降低投资, 购买功率因素高的发电机 (因为发出有功功率收益大); 由于 FACTS 的使用, 使输电线路的输送能力提高, 但限制了线路无功的输送能力; 由于功率传输的增加, 使无功功率损耗增大<sup>[9]</sup>。鉴于此, 不少学者提出了考虑静态电压稳定的最优潮流来进行无功电价研

究<sup>[10-15]</sup>。

上述均没有考虑系统暂态电压安全性的要求。本文考虑了系统暂态电压安全因素, 利用 EEAC 理论和最优潮流来研究无功定价。

## 1 最优潮流数学模型

### 1.1 经典最优潮流数学模型

运用最优潮流来求解实时无功电价的缘由是: 在求解最优潮流方程的拉格朗日乘子  $\lambda_p, \lambda_q$  与有功、无功负荷的实时电价具有相同的经济含义。

经典的最优潮流数学模型可用下式表达:

$$\text{Min} F(x) = \sum_{i=1}^{n_g} (f_{Gi}(P_{Gi})) \quad (1)$$

满足的等式约束 (潮流约束) 有:

$$P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j=1}^n U_i U_j |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j=1}^n U_i U_j |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

满足的不等式约束有:

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (4)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad (5)$$

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (6)$$

$$L_{i \min} \leq L_i \leq L_{i \max} \quad (7)$$

式中:  $\delta_i, \delta_j$  为节点  $i, j$  的相角;  $Y_{ij}$  为节点导纳矩阵;  $\theta_{ij}$  为导纳  $Y_{ij}$  的相角;  $P_{Gi \max}, P_{Gi \min}$  为发电机有功功率上下限;  $Q_{Gi \max}, Q_{Gi \min}$  为发电机无功上下限;  $U_{i \max}, U_{i \min}$  为节点电压上下限;  $L_{i \max}, L_{i \min}$  为线路的传输功率极限。

上述的发电机无功功率和有功功率不等式约束均是将发电机本身的约束作为约束条件,当考虑了系统暂态电压安全的影响,将对式(5)进行修正。

$$Q_{gi \min} + RQ_{i1} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max} - RQ_{i2} \quad (8)$$

式中:  $RQ_{i1}$ ,  $RQ_{i2}$  为修正的无功,即满足暂态电压安全所需要增发和少发的无功功率。

### 1.2 暂态电压安全裕度

对于暂态电压安全,包括两个方面,即动态负荷的电压稳定性和电力系统暂态电压跌落的可接受性。

感应电动机在电力系统负荷中占有很大份额,因此用感应电动机模型作为负荷动态模型具有代表性。对于用感应电动机表示的动态负荷模型,用

$-\frac{dS}{dt}$  来判断其是否失稳,其稳定裕度可用下式表达<sup>[16]</sup>:

$$v_s = -\frac{H}{M_m} \frac{dS}{dt} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $H$ ,  $S$  分别为感应电动机的惯性时间常数和转差,  $M_m$  为感应电动机的机械功率,当  $v_s$  为正表示感应电动机暂态电压稳定。

暂态电压跌落可接受裕度可用下式表示<sup>[16]</sup>:

$$v_d = [V_{ext} - (V_{cr} - k_v T_{cr,v})] \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $V_{cr}$  为母线的电压偏移门槛值,  $T_{cr,v}$  是母线允许的持续时间,  $V_{ext}$  为暂态过程中母线电压的极限值,  $k_v$  是把临界电压偏移持续时间换算成电压的折算因子。  $v_d$  为正表示电压偏移可接受。

电力系统的暂态电压安全裕度取二者较小的值,即

$$v = \min(v_s, v_d) \quad (11)$$

基于 EEAC 不仅能够给出量化的分析指标,而且能够求出在保证临界暂态电压安全的情况下发电机的临界功率。当系统满足暂态安全时,式(6)的修正量为 0;当系统暂态电压不安全时,式(6)左右两边表示为保证暂态电压安全情况下的发电机临界无功出力。

对于保证系统暂态电压安全的控制,我们可以根据各暂态电压不安全点的安全裕度对各发电机无功出力的灵敏度按优先次序进行调节,即按  $\frac{d}{dQ}$  的大小顺序来进行。由于无功功率自身的特性,无功功率不能远距离传输以及无功的区域平衡原则,远端的发电机发出的无功功率对本区域内的电压安全裕度影响很小,在工程上可以忽略,因此实际上对于求

取满足系统暂态电压安全下的无功发电极限问题可以归结到区域内部进行优化求解,这样可以简化无功功率极限的求取难度。本区域按灵敏度因子  $\frac{d}{dQ}$  和无功报价的乘积大小依次优化调节各机组的无功出力。

整个计算过程如下:

1) 计算系统暂态电压安全,判断是否存在暂态电压不安全。如系统暂态电压安全,则根据最优潮流计算节点无功边际电价;如果发生系统暂态电压不安全,转 2)。

2) 针对预想事故发生电压不安全,计算出电压安全裕度,并计算暂态电压安全裕度对各发电机节点的灵敏度,对灵敏度大的发电机进行优化调节,求出无功功率极限。

3) 将发电机的无功功率出力极限代入式(5)进行修正,再根据最优潮流计算出满足暂态电压安全约束的实时无功边际定价。

## 2 算例分析与研究

本文以 IEEE14 节点为算例,其接线图如图 1 所示:

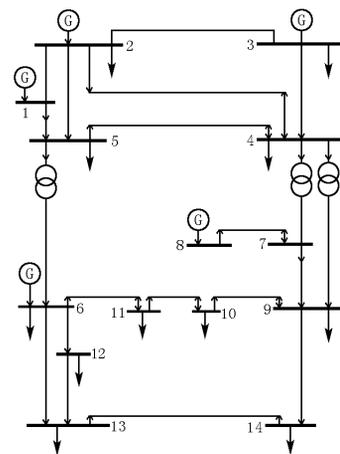


图 1 IEEE14 节点图

Fig 1 Diagram of IEEE14 nodes

各机组的无功报价如下:

$Q_{G1} = 0.5$  Mvar/h,  $Q_{G2} = 0.5$  Mvar/h,  $Q_{G3} = 0.6$  Mvar/h,  $Q_{G6} = 0.7$  Mvar/h,  $Q_{G8} = 0.8$  Mvar/h

发电机的功率约束为:

$15 \text{ MW} \leq P_{G1,2} \leq 200 \text{ MW}$ ,  $15 \text{ MW} \leq P_{G3,4,5} \leq 60 \text{ MW}$

$-60 \text{ Mvar} \leq Q_{G1,2} \leq 200 \text{ Mvar}$ ,  $-50 \text{ Mvar} \leq Q_{G3,4,5} \leq 50 \text{ Mvar}$

各节点的电压约束满足为:  $0.95 U_i \leq 1.05$

考虑暂态电压安全的各节点无功电价和有功电价如图 2和图 3所示。

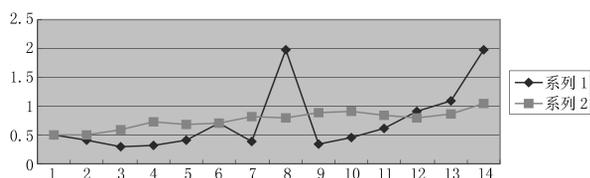


图 2 考虑暂态电压安全约束后的无功价格

Fig 2 Spot reactive pricing taking account of transient voltage security

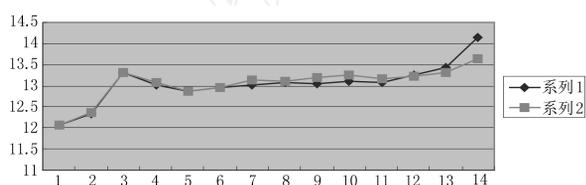


图 3 加入暂态电压安全约束后的有功价格

Fig 3 Spot active pricing taking account of transient voltage security

说明:图 2和图 3中的蓝色线条表示考虑了暂态电压安全约束后的无功和有功定价。红色为没有考虑暂态电压安全约束的有功和无功定价。

由图 2可见,考虑暂态电压安全后的无功价格在节点 8, 12, 13, 14比没有考虑暂态电压安全的无功电价高。其原因是在这些点的无功功率易引起系统暂态电压不安全。其中节点 8的无功电价较高,这主要是该节点的发电机无功调节效应对系统的暂态电压安全影响大,即该台发电机少发少量无功可能造成系统的暂态电压不安全。而对于负荷节点 14,则主要是由于该节点处于负荷的末端,容易引起系统的暂态电压不安全。

由图 3可见,考虑暂态电压安全的无功定价对有功电价影响较小,影响最大的在负荷 14节点。这是由于 14节点在系统的末端,在系统发生故障时,由于传输有功功率和无功功率造成的电压跌落而引起系统的电压不安全。

由图 2和图 3可见,考虑了系统暂态电压安全的无功定价,反映了用户消耗无功功率对系统暂态电压安全的影响。若某节点消耗的无功功率对系统的暂态电压安全影响大,相应的对其无功电价的收取高,如图 2的节点 8和节点 14。因此考虑系统暂态电压安全的无功定价能全面反映系统的运行特性。

### 3 结语

本文的无功功率定价方法考虑了暂态电压安全因素的影响。研究表明,考虑了系统的暂态电压安全的无功定价,可从无功实时电价反映系统的暂态电压安全性问题,方便地找出引起系统存在暂态电压不安全的“隐患”点,同时通过合理的对“隐患”点的无功定价,可以迫使用户去响应,从而全面地提高系统的安全经济运行能力。

### 参考文献:

- [1] Berg S V, Adams J, Niekum B. Power Factors and the Efficient Pricing and Production of Reactive Power[J] he Energy Journal 93-102
- [2] Schweppe F C, Caramanis M C, Bohn R E. Spot Pricing of Electricity[M]. Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [3] Baughman M L, Siddiqi S N. Real-Time Pricing of Reactive Power: Theory and Case Study Results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 23-29.
- [4] Baughman M L, Siddiqi S N, Zamikau J W. Advanced Pricing in Electrical System, Part I Theory[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 489-.
- [5] Baughman M L, Siddiqi S N, J. W. Zamikau Advanced Pricing in Electrical System, Part II Implications[J]. IEEE Trans on Power System s, 1997, 12(1): 496-502
- [6] Xie K, Song Y H. Real Time Reactive Power Pricing of Electricity in an Integrated Pricing Framework: Decomposition Model and Interior Point Method Implementation [A]. Prov of 13th PSCC Trondheim (Norway): 1999. 361-367.
- [7] Li Y Z, David A K. Wheeling Rates of Reactive Power Flow under Marginal Cost Pricing[J]. IEEE Trans on Power System s, 1994, 9(4): 1263-1269.
- [8] Oliveira E J D, Lima J W M, Pereira J L R. Flexible AC Transmission Devices: Allocation and Transmission Pricing[J]. Electrical Power and Energy Systems, 1999, (21): 111-118
- [9] Efthymiadis A E, Guo Y H. Generator Reactive Power Limits and Voltage Stability[A]. Conference Publication Power System Control and Management 1996 196-199.
- [10] Chattopadhyay D, Chakrabarti B B, Read E G. Pricing for Voltage Stability. Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market[A]. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Power Industry Computer Applications PICA. 2001: 235 -240.
- [11] Xu W, Zhang Y, Silva L C P, et al. Competitive Procurement of Dynamic Reactive Power Support Service for

- Transmission Access[A]. IEEE/PES Summer Meeting Seattle(USA): 2000.
- [12] Rosehart W, Canizares C, Quintana V. Costs of Voltage Security in Electricity Markets[A]. IEEE/PES Summer Meeting Seattle(USA): 2000.
- [13] Chattopadhyay D, Chakrabarti B B, Read E G Pricing for Voltage Stability. Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market[A]. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Power Industry Computer Applications, PICA. 2001. 235 -240.
- [14] Gil J B, Roman Tomas G S, Roman J J A, et al Reactive Power Pricing: a Conceptual Framework for Remuneration and Charging Procedures[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 483-489.
- [15] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Multiobjective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(5): 578-586.
- [16] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论 [M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1999.
- XUE Yu-sheng Quantitative Study of General Motion Stability and an Example on Power System Stability [M]. Nanjin: Jiansu Science Technology Press, 1999.

收稿日期: 2006-03-09; 修回日期: 2006-05-15

作者简介:

郝思鹏 (1971 - ),男,博士,讲师,研究方向为电力系统稳定与电力市场; E-mail: hspnj@sohu.com

王正风 (1976 - ),男,博士,研究方向为电力系统稳定和电力市场。

### Studies on reactive pricing in electricity market

HAO Si-peng<sup>1</sup>, WANG Zheng-feng<sup>2</sup>

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China;

2. Anhui Electrical Power Dispatching & Communication Center, Hefei 230061, China)

**Abstract:** This paper studies the incorporation of transient voltage security into an optimal power flow to determine reactive price based on microeconomics. The influence of transient voltage security is analyzed for reactive pricing. It can reflect reactive power user for transient voltage security. It is deduced that the consideration of transient voltage security could give better guidance for power system operation state by simulation example. It is in favor of power system stability operation.

**Key words:** reactive pricing; transient voltage stability; optimal power flow

(上接第 6 页 continued from page 6)

作者简介:

郭开荣 (1980 - ),男,硕士研究生,研究方向电力系统

自动化; E-mail: sjgkr@163.com

温渤婴 (1958 - ),男,教授,从事电力系统自动监控与继电保护研究。

### The application of FreeRTOS in experimental device for microprocessor-based relay protection

GUO Kai-rong, WEN Bo-ying

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** microprocessor-based relay protection devices have been widely applied in power system. There are few microprocessor-based relay protection devices for experiments available in domestic colleges. A new experimental device for microprocessor-based relay protection has been designed and developed in order to satisfy the requirements for experimental teaching. This paper brings forward an experimental device based on a free and open source RTOS: FreeRTOS. The functions of the device are divided into function modules according to the tasks of relay protection experiment. The device applies RTOS as its software runtime platform, which makes the software structure highly modularized, simple and flexible. Also the device is more convenient for operating. The application in colleges proves its efficiency for relay experiment.

**Key words:** relay protection; real-time operation system; FreeRTOS