

基于 PI 控制的电力市场短期均衡模型

陈旭, 张平, 宋正强

(扬州市职业大学汽车与电气工程系, 江苏 扬州 225011)

摘要: 利用电力市场价格与发电量之间互相影响的循环特性, 将控制理论知识引入到短期电力市场模型中, 建立了基于 PI 控制的短期电力市场古诺均衡模型, 并将微分方程转变成传递函数形式, 从而得到整个电力市场古诺模型的传递函数, 判断出系统均衡解稳定的充分条件。最后, 本文利用 Matlab 工具, 以 IEEE 30 节点 6 发电机作为测试系统求解电力市场短期均衡解, 结果表明电力市场引入 PI 控制器后, 即使市场均衡条件发生变化, 系统依然能够快速获得新的均衡解。

关键词: PI 控制器; 均衡模型; 电力市场; 古诺模型

Power market short-term equilibrium model based on PI controlling

CHEN Xu, ZHANG Ping, SONG Zheng-qiang

(Motor and Electronic Engineering Department, Yangzhou Vocational College, Yangzhou 215011, China)

Abstract: In this paper, a short-term equilibrium model based on PI controller is set up. With the application of control theory, sufficient conditions are presented. With MATLAB, the IEEE 6-generator 30-bus system is used to demonstrate the proposed method. Results show that after introducing PI controller into the proposed equilibrium model, power market equilibrium can be got easily and stably even when power demand is changed suddenly.

Key words: PI controller; equilibrium model; power market; Curnuo model

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)18-0015-04

0 引言

近年来, 国内外电力市场文献大量涌出, 理论不断创新, 电力市场建设得到了发展。而加州电力市场的失败同样也说明电力市场稳定性问题至关重要。然而, 大多数文献是针对电力市场下的电价问题、上网竞价问题、辅助服务的定价进行研究, 文献[1]在国际上第一个提出电力市场稳定性概念, 并建立微分方程, 利用特征值法分析电力市场稳定性。指出电力市场稳定性与微分方程的系数如供应函数参数等有密切关系, 但竞价策略对电力市场稳定性的影响却没有被考虑。薛禹胜院士是在国内率先对电力市场稳定性问题展开深入详细的研究, 但其研究成果主要集中在对长期电力市场稳定性方面的研究^[2~5]。文献[6]认为电力市场竞价过程是一个闭环反馈系统, 并将过去的价格信息作为反馈信息, 但该文给定的竞价策略过于简单, 不具有一般性。文献[7]利用传递函数的形式将市场电量与电价的动态关系来表达, 并分别讨论了自由竞争模式, 寡头垄断模式下, 电力市场动态模型的传递函数形式。

但该文的工作都是基于不考虑需求变化情况下对均衡点稳定性的探讨, 而对需求电量发生突变时市场的动态特性没有说明。文献[8]研究了电力市场在自由竞争模式下的动态行为和机制, 并将系统模型和目标函数解释为经典控制问题。通过引入 PI 控制, 使得电力市场电量需求在发生变化时, 系统依然能够重新收敛到一个新的均衡点, 达到帕雷托最优。然而, 该模型假设发电商仅有一家, 没有对多发电商和竞价情况下进行深入研究。为了更好地将控制理论运用到实际的电力市场中, 并利用传递函数分析短期电力市场稳定性, 本文首先建立了寡头垄断模式下古诺均衡模型, 并将电力价格和电量同时作为系统反馈量, 采用 PI 控制器, 利用 IEEE30 节点 6 发电商模式进行仿真计算, 动态观察电量需求在突变时电力市场价格以及各发电商发电量的变化。

1 基于 PI 控制的电力市场均衡模型理论

图 1 为电力市场中发电量与价格的动态过程示意图。虚线框内的供电商实际上并不是一家, 而是多家。首先供电商根据期望的电力市场价格 \bar{p} , 并依据市场效益最大化原则确定自己的最优发电量;

基金项目: 扬州职业大学教研项目 (07T02)

电量的市场价格 p 根据统一出清原则确定, 并反馈给供电商; 同时将发电商们根据已知信息和效益最大化原则所确定的发电量总和 D 也作为反馈信息, 与用户总需求 \bar{D} 的差值 E 经过控制器形成控制信号 v , 与反馈信号 p 叠加得到下一次电力市场预期价格。最终, 整个系统将自动收敛到均衡点, 同时供电商的效益也得到最大化, 各供电商的发电量和电力市场价格在用户需求不变时也保持不变。

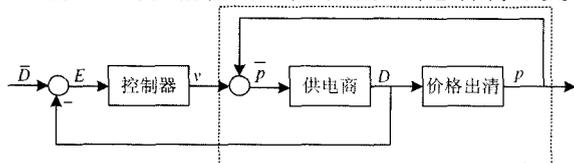


图 1 基于 PI 控制的电力市场均衡模型
Fig. 1 Equilibrium model of electricity market based PI controller

2 电力市场均衡数学模型

假设发电商的成本函数为二次函数,

$$C_i(q_i) = a_i + b_i q_i + \frac{1}{2} c_i q_i^2 \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

这里 q_i 为发电商 i 提供的发电量; a_i, b_i, c_i 为发电商 i 的发电成本函数。

相应的发电商边际成本函数为

$$C'_i(q_i) = b_i + c_i q_i \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

假设电力需求函数为线性的, 由此相应的逆需求函数为:

$$p = F(\bar{D}) = e - f\bar{D} = e - fD = e - f \sum_{i=1}^n q_i \quad (3)$$

这里 \bar{D} 为电力总需求; e, f 为需求函数系数, 可由公开获得的历史数据回归分析得到, 且 $e > 0, f > 0$; 并满足实时均衡条件

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^n q_i = D$$

因此对于某一特定的电力总供应 D , 市场出清价格 p 可由公式 (3) 确定。

设发电商收益函数定义为:

$$\pi_i = p q_i - C_i(q_i) \quad (4)$$

在电力市场中, 每一个发电商根据市场信息做出发电量的最优选择以获得最大利润。假设发电商对利润变化的动态响应为:

$$\frac{dq_i}{dt} = \lambda_i \frac{\partial \pi_i}{\partial q_i}, \quad \lambda_i > 0 \quad (5)$$

其中: λ_i 为调整因子。公式 (5) 表示发电商将会按照利润增长的方向调整发电量。

2.1 自由竞争动态模型

首先假设电力市场是完美竞争的, 价格 p 不受单个发电商 q_i 的影响, 因此完美竞争市场的稳定性很容易分析出来。然而实际的电力市场通常是一个寡头垄断市场, 市场价格 p 也与各个发电商的发电量 $q_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 有关。众所周知, 在电力市场中 q_i 是私人信息, 每个发电商都有自己的报价策略。因此, 电力市场稳定性问题的分析在寡头垄断市场中并不简单, 值得研究。本文首先给出了完美竞争情况下的市场动态模型, 通过修改该模型得到寡头垄断市场环境下的古诺动态模型。

在完美市场中, 任何一方都无法控制市场价格,

即 $\frac{\partial p}{\partial q_i} = 0$ 。由公式 (1)~(4) 得:

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = p - (b_i + c_i q_i) = (p - b_i) - c_i q_i \quad (6)$$

其利润最大化由一阶导数条件给出:

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = 0 \quad (7)$$

定义 p_i 为偏移价格, 则

$$p_i = p - b_i \quad (8)$$

将式 (6) 代入式 (5) 中, 得供电商 i 的动态调整规则为:

$$\frac{dq_i}{dt} = \lambda_i [p_i - c_i q_i], \quad \lambda_i > 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

经过拉式变换, 得公式 (9) 的传递函数为:

$$G_i(S) = \frac{q_i(S)}{p_i(S)} = \frac{1/c_i}{1 + \frac{1}{\lambda_i c_i} S} = \frac{k_i}{1 + T_i S} \quad (10)$$

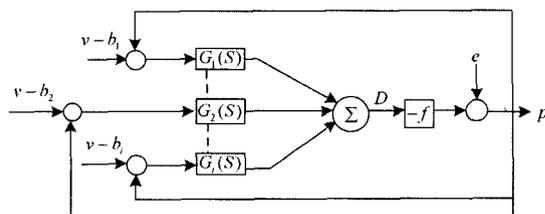


图 2 自由竞争模式下电力市场价格反馈传函

Fig.2 The frame of power price feedback in competition market

公式 (9)、(10) 表明, 在完美市场模式下, 发电商采用的利润最大化为目标的竞价策略相当于一

个惯性环节, 其比例系数和时间常数分别为:

$$k_i = \frac{1}{c_i}; T_i = \frac{1}{\lambda_i c_i}$$

减小, 系统控制速度加快; 当 c_i 增大时, 随着发电量增加, 电力成本增加的速度加快。图 2 为自由竞争模式下电力市场控制模型中虚线部分的详细传函, 是价格反馈环, 属于内环。

该模式下电力市场稳定均衡解为:

$$p^* = \frac{e + f \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{c_i}}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{f}{c_i}}, q_i^* = \frac{p^* - b_i}{c_i} \quad (11)$$

图 2 和公式 (11) 表明, 尽管发电商 i 并不知道其对手的发成成本系数 (b_j, c_j), 但是该发电商在完美竞争市场模式下是根据公式 (5) 进行决策, 因此整个市场将稳定收敛于均衡点 (p^*, q^*), 其中 $q^* = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_n^*)^T$, p^* 为市场电力均衡价格, q^* 为发电商在均衡点的发电量。

2.2 古诺动态模型

实际的电力市场通常是一个寡头市场而不是完美市场, 即少数市场供电商占有市场绝大部分份额。因此, 寡头们常常采用策略报价来最大化他们的利润, 其中古诺竞争模型应用最为广泛。在古诺模型中, 每一个发电商都认为其他所有对手的发电量是固定的 ($\frac{\partial q_j}{\partial q_i} = 0 \quad j \neq i$), 从而选择自身最优发电量。

由于 $p = e - f \sum_{i=1}^n q_i$ 且 $\partial p / \partial q_i = -f$, 可知:

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = \frac{\partial}{\partial q_i} [p q_i - (a_i + b_i q_i + \frac{1}{2} c_i q_i^2)] = \quad (12)$$

$$(p - b_i) - (f + c_i) q_i, \quad i = 1, \dots, n$$

由公式 (2-5) 可知, 发电商发电量的动态调整规则为:

$$\frac{dq_i}{dt} = \lambda_i [p_i - (f + c_i) q_i], \quad \lambda_i > 0 \quad (13)$$

根据公式 (15), 可以得到古诺竞争模式下电力市场的传递函数:

$$G_i(S) = \frac{q_i(S)}{p_i(S)} = \frac{\lambda_i}{S + \lambda_i (f + c_i)} =$$

$$\frac{1}{(f + c_i) S} = \frac{k_i^c}{1 + T_i^c S} \quad (14)$$

与完美竞争市场相比, 公式 (10) 中的 c_i 被公式 (14) 中的 $(f + c_i)$ 代替, 反映了在寡头垄断市场中, 发电量 q_i 对电力价格 p 以及收益 π_i 的影响。

则古诺市场下各发电商均衡解为:

$$p^* = \frac{e + f \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{c_i + f}}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{f}{c_i + f}}, q_i^* = \frac{p^* - b_i}{c_i + f} \quad (15)$$

3 仿真分析

本算例采用 IEEE 6 机 30 节点系统验证本文所提的方法。其中发电商参数采用文献 [6] 提供的数据, 如表 1。另外, 网络约束问题在本文中暂不考虑。假设电力市场的逆需求函数为已知:

$$p = 50 - 0.02D = 50 - 0.02 \sum_{i=1}^6 q_i \quad (16)$$

本算例利用 Matlab 工具进行仿真, 动态观察电力市场中价格与发电量的变化情况。其中控制器的参数设定为 $P = 10, I = 0.2, D = 0$, 这里控制器参数仅影响系统响应时间或超调量等, 而不会影响系统的稳态值。首先, 将市场电量总需求设定为 2000 MW, 并保持不变。图 3 为 6 个发电商为了获得最大利润, 其发电量动态变化曲线, 并最终达到稳态, 即均衡点。可以看到发电商 3、4 由于其成本系数相同, 因此他们的最优发电量也相同, 即 308.74 MW。

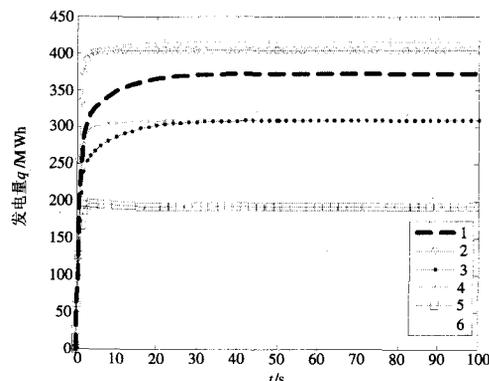


图 3 古诺模式下各发电商电量变化曲线
Fig. 3 Response curves of power in Curnuo situation

表 1 各发电商成本函数系数和发电量动态调整系数

Tab.1 Cost function and dynamic adjustment coefficients

发电商	λ_i	a_i	b_i	c_i
1	3	0	2	0.02
2	4	0	1.75	0.0175
3	2.5	0	3	0.025
4	3	0	3	0.025
5	2	0	1	0.0625
6	4	0	3.25	0.00834

4 结论

本文利用电力市场的循环特性,将控制理论引入到短期电力市场中,并利用博弈论建立了不同寡头模式下的数学模型,并求出系统传递函数,得到基于 PI 控制的短期电力市场仿真模型。最后利用 Matlab 工具对短期电力市场的变化过程进行仿真。

参考文献

- [1] Alvarado F L. The Stability of Power System Markets[J]. IEEE Trans on PAS, 1999,14(2):505-511.
- [2] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18):23-27.
XUE Yu-sheng. The Way from a Simple Contingency to System-Wide Disaster—Lessons from the Eastern Interconnection Blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(18):23-27.
- [3] 赖业宁, 薛禹胜, 王海风. 电力市场稳定性及风险管理[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 21-27.
LAI Ye-ning, XUE Yu-sheng, WANG Hai-feng. Electricity Market Stability and Its Risk Management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 21-27.
- [4] 徐群, 薛禹胜, 辛耀中. 竞争充分性对电力市场稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 24-29.
XU Qun, XUE Yu-sheng, XIN Yao-zhong. The Influences of Competition Sufficiency on Power Market Stability[J]. Automation of Electric Power Systems,2003, 27(8): 24-29.
- [5] 薛禹胜, 徐群, 辛耀中, 等. 加州电力危机的动态仿真和防御对策分析(一)模型的建立和定性分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 29-34.
XUE Yu-sheng, XU Qun, XIN Yao-zhong, et al. Dynamic Simulation and Countermeasure Analysis of California Power Crisis, Part One Models and Qualitative Analyses[J]. Automation of Electric Power Systems,2004, 28(7):29-34.
- [6] Duy Huu Manh Nguyen, Kit Po Wong. A General Stability Metric for Competitive Power Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 19(2):320-325.
- [7] LIU You-fei, Ni Y X. Control Theory Application in Power Market Stability Analysis[A].In: 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004)[C]. 2004. 562-569.
- [8] Stothert A, Macleod I. Competitive Bidding As a Control Problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 88-92.

收稿日期: 2007-12-26; 修回日期: 2008-04-07

作者简介:

陈旭(1967-), 女, 讲师, 研究方向为电力电子;

张平(1959-)男, 副教授, 主要研究方向为自动控制;

宋正强(1974-), 男, 博士, 主要研究方向为电力市场。E-mail:zhengqiangsong@yahoo.com.cn

Technology,2002,26(2):54-58.

收稿日期: 2007-12-27

作者简介:

卢志刚(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行及分析研究; E-mail:xiansun@ysu.edu.cn

韩彦玲(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事电网经济运行及评价的研究;

常磊(1964-), 女, 高级经济师, 主要从事电网经济管理工作。

(上接第 5 页 continued from page 5)

YANG Ping, LIU Wei-dong. Study on Group Decision Making in the Hierarchical Evaluation Process Based on Evidential Reasoning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002,24(2):41-44.

- [16] 卢志刚,张炜,王新华,等.多目标多层次模糊综合评价在电力企业运营状况评价中的应用[J].电网技术,2002,26(2):54-58.

LU Zhi-gang, ZHANG Wei, WANG Xin-hua, et al. Application of Multi-object Multi-layer Fuzzy Comprehensive Evaluation of Economic Operation Situation of Electric Power Enterprise[J]. Power System