

基于系统动力学的输电价格管制研究

王伟¹, 张粒子², 程瑜²

(1. 国网新源控股有限公司, 北京 100005; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 在输电价格管制方式的研究中涉及的变量众多、结构复杂, 是一个多时段非线性动态的问题, 首先分析了基于投资回报率、基于价格上限和基于收入上限的输电价格管制方式的异同, 然后, 分别建立起三种管制方式的因果关系图和系统动力学模型, 最后, 应用算例仿真了三种管制方式下输电价格的发展趋势, 直观的展示了不同管制方式的优缺点, 进行了全面而系统的分析。

关键词: 电力市场; 输电价格; 管制; 系统动力学

Research on regulation of transmission price based on system dynamics

WANG Wei¹, ZHANG Li-zi², CHENG Yu²

(1. State Grid Xin Yuan Company Limited, Beijing 100005, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Research of the regulation of transmission price involved a lot of variable and complicated structure. It is multi-period nonlinear dynamic problem. Firstly, three regulation modes of transmission price are compared based on rate of return, price cap and revenue cap. Secondly, three modes are all built relation figures and system dynamics models. Lastly, a demonstration simulate development and trend of three regulation modes of transmission price and comprehensively analyse the merit of these modes.

Key words: electricity market; transmission price; regulation; system dynamics

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0011-05

0 引言

输电价格是输电服务作为商品的价值体现, 输配电价格的形成要受到政府的监管。监管机构利用价格杠杆来管理电网建设和电网公司运营, 但不同的管制方式对电网投资和建设以及电网公司运营的影响不同。而且, 在不同的电力市场发展阶段, 要采取不同的监管方式。由于电网的天然垄断性, 人们为了达到合理优化资源配置的作用, 控制其利用垄断地位获取超额利润, 对其管制的研究在经济学界和电动力学界一直没有停止, 文献[1]~[6]分别对几种不同的管制方法进行了系统分析研究, 但是对于不同管制方式的比较均来自于不同国家不同电力市场模式下的实践经验, 对于同一市场模式, 针对几种监管方式的适用性缺乏必要的定量分析, 也缺少定量分析的方法和工具, 文献[5]~[8]也提出了一些新的管制模式使输电价格管制的研究更加符合我国的实际。系统动力学是处理复杂非线性动态反馈过程非常有力的数学工具。系统动力学最早应用于电力系统是在负荷预测领域的研究^[9], 近几年逐

渐推广到电价的研究, 文献[10]~[12]把系统动力学应用到峰谷电价、电网规划的研究中, 推进了系统动力学在电力系统中应用的发展。

输电价格的基本管制方式主要有三种: 基于投资回报率的管制、基于价格上限的管制和基于收入上限管制, 此外, 还有标尺竞争、特许投标等。本文应用系统动力学研究三种主要输电价格管制方式的动态行为, 建立了基于投资回报率、基于价格上限、基于收入上限的三种输电价格管制的因果关系图和系统动力学模型, 并通过算例的仿真分析充分对比了三种方式的利弊, 用算例验证了模型有效性。

1 基于投资回报率的输电价格管制

投资回报率管制是监管机构通过直接控制回报率从而间接对价格实现管制的方式, 《国家发展改革委关于印发电价改革实施办法的通知》(发改价格[2005]514号)确定的输电价格改革办法就是这种方式。基于投资回报率的管制方式不直接控制价格, 因此在管制力度上较为柔和; 在这种机制下管制机构和被管制企业所关心的重点是回报率的大小和成

本基数的计量方法, 这无疑增加了信息不对称的管制机构的监管难度; 回报率在一定管制期内保持不变, 对管制企业缺乏提高效率的激励; 输配电价的涨降直接传递给用户, 不利于市场风险分担和社会财富的公平分配。

输电价格管制的核心是价格调整幅度 $\Delta\lambda(t)$ 的制定方法, 基于投资回报率的管制机制中, 影响输电价格调整幅度的主要因素是用电量的增加、准许成本、准许收益和税金的变化。负荷的自然增长需要进行电网建设, 电网的投资建设带来有效资产、运行维护费和网损的变化, 而准许成本由有效资产和运行维护费和网损费构成, 准许收益受到有效资产的影响, 税金是由准许成本和准许收益共同决定的, 构成了围绕 $\Delta\lambda(t)$ 的因果关系环, 如图 1 所示, 基于投资回报率的输电价格管制的系统动力学的数学模型如下。

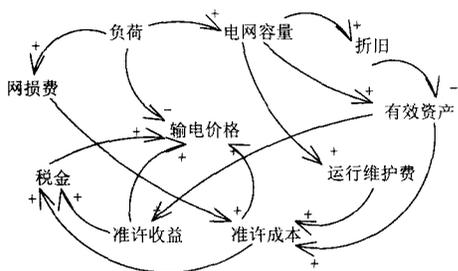


图 1 基于投资回报率的输电价格管制的因果关系图

Fig 1 Relation of regulation of transmission price based on rate of return

$$\lambda(t) = \lambda(t-1) + \Delta\lambda(t) \quad (1)$$

$$\Delta\lambda(t) = \frac{[\lambda_0(t) - \lambda(t-1)] \cdot \Delta D(t) \cdot h}{D(t) \cdot h} \quad (2)$$

$$\lambda_0(t) = \frac{F_{\cos}(t) + F_{\text{inc}}(t) + F_{\text{tax}}(t)}{\Delta D(t) \cdot h} \quad (3)$$

$$F_{\cos}(t) = \Delta S(t) \cdot Z_{\text{cap}}(t) \cdot (k_{\text{dep}} + k_{\text{ope}}) \quad (4)$$

$$F_{\text{inc}}(t) = F_{\text{ass}}(t) \cdot [1 - k_{\text{dep}} \cdot (A/W, r_2, n)] \cdot (1 + r_1) \quad (5)$$

$$F_{\text{tax}}(t) = \frac{[F_{\cos}(t) + F_{\text{inc}}(t)] \cdot K_{\text{tax}}}{1 + K_{\text{tax}}} \quad (6)$$

$$\Delta S(t) = f(\Delta D(t)) \quad (7)$$

$$S(t) = S(t-1) + \Delta S(t) \quad (8)$$

式中: t 为输电价格的调整周期, 一般取会计年; $D(t)$ 为第 t 年的最大负荷; $\Delta D(t)$ 为第 t 年的负荷增长量; $\lambda(t)$ 为第 t 年电网输电价格; $\Delta\lambda(t)$ 为第

t 年电网输电价格调整的幅度; $\lambda_0(t)$ 为第 t 年按增供电量和新增电网项目反算的电价。 $F_{\cos}(t)$ 为第 t 年电网新增项目准许成本; $F_{\text{inc}}(t)$ 为第 t 年电网新增项目准许收益; $F_{\text{tax}}(t)$ 为第 t 年电网新增项目税金及附加。 $Z_{\text{cap}}(t)$ 为第 t 年电网单位容量投资。

$F_{\text{ass}}(t)$ 为第 t 年电网新建项目的有效资产; h 为最大负荷利用小时数。 k_{dep} 为折旧率; k_{ope} 为运行管理费率; r_1 为电网的加权平均资金成本; r_2 为内部收益率; n 为经营期; $(A/W, r_2, n)$ 为均匀梯度系列年金化系数; K_{tax} 为综合税率; $S(t)$ 为第 t 年电网容量; $\Delta S(t)$ 为第 t 年电网容量的增长, 在这种管制模式中, 它只取决于负荷增长量的变化, 最简单的形式是式 (7) 是线性的, 并且 $\Delta S(t)$ 和 $\Delta D(t)$ 的比值就是规定的容载比。

2 基于价格上限的输电价格管制

在基于投资回报率管制方式下垄断企业往往通过扩大成本基数来提高利润, 柔和的价格政策使其无暇追求效率的提高, 因此人们期望利用一种较为严格的价格手段, 使价格和利润保持在一个既不失公平, 又可以激励企业提高效率的水平上, 而不至于出现在投资回报率定价下导致的盲目扩大投资基数的倾向, 基于价格上限的管制方式由此产生。实行价格上限的管制模型, 使得企业在任何一年中价格调整幅度取决于零售价格指数 RPI 和管制者制定的生产效率增长率 X 的相对值。它所管制的是价格的上涨幅度, 管制的结果会直接控制价格水平, 因而比较重视对企业的激励及管制的透明, 并且电网投资的风险由消费者部分地转移到电网企业。

基于价格上限的输电价格管制的机制中, 制约输电价格的调整 $\Delta\lambda(t)$ 的主要因素是零售价格指数和生产效率指数, 但价格的调整带来输电收入的增加和电网的投资建设, 构成了围绕 $\Delta\lambda(t)$ 的因果关系环, 如图 2, 零售价格指数和生产效率指数的变动带来输电价格的调整, 从而和电网建设、生产运行情况共同影响到输电成本, 而用电量的增长和输电价格共同决定了输电收入, 输电输入和输电成本影响到电网公司收益、利润, 又反过来影响到电网投资建设, 形成复杂的因果反馈关系。考虑同一电压等级共用网络的基于价格上限的输电价格管制的系统动力学模型如下。

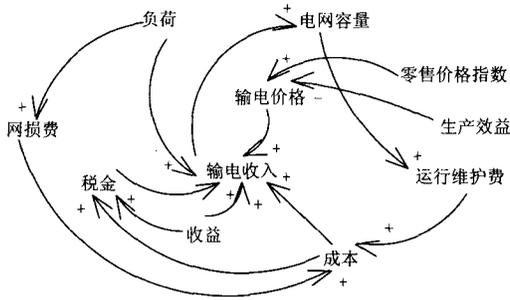


图 2 基于价格上限的输电价格管制的因果关系图

Fig.2 Relation of regulation of transmission price based on price cap

$$\lambda(t) = \lambda(t-1) + \Delta\lambda(t) \quad (9)$$

$$\Delta\lambda(t) = \lambda(t) \cdot [RPI(t) - X(t)] + \alpha(t) \quad (10)$$

$$\Delta S(t) = \frac{\lambda(t) \cdot \Delta D(t) \cdot h / Z_{cp}(t)}{k_{dep} + k_{ope} + [1 - k_{dep} \cdot (A/W, r_2, n)] \cdot (1+r_1)} \quad (11)$$

$$S(t) = S(t-1) + \Delta S(t) \quad (12)$$

式中： $RPI(t)$ 为第 t 年零售价格指数； $X(t)$ 为第 t 年生产效率增长率； $\alpha(t)$ 为第 t 年外生影响因子，考虑到电网行业的某些不可控成本增加不应只考虑零售价格指数。

3 基于收入上限的输电价格管制

这种管制方式通过直接控制输电收入从而间接控制价格，比基于价格上限的管制方式柔和，又比基于投资回报率的方式更灵活和更具激励性。基于收入上限的管制方式能够对输电成本进行有效的控制，并能够保证企业有合理的投资回报。价格管制部门只决定被监管者在管制期第一年的年总收入需求，被管制者可以自行设置一系列的价格来实现在满足最大收入限制的条件下，达到自身最大的经济利益；在随后的管制期限内，按照零售价格指数 RPI-X 形式对年最大允许收入进行逐年调整。为了进行监管，每年监管机构接受企业申报实际的收入状况并按最大允许收入的原则进行审批。

基于收入上限的输电价格管制的机制中，制约输电价格的调整 $\Delta\lambda(t)$ 的主要因素是输电收入的变化和用电量的增长，因此围绕 $\Delta\lambda(t)$ 的制定，其主要环节的因果关系如图 3，输电收入的增长由零售价格指数、生产效率指数和用电量的增加共同决定，同时输电收入和电网用电量决定了输电价格，每年输电收入的增加和电网运行情况决定了下一年的电网投资建设情况，反过来又影响到下一年输电收入的调整。其系统动力学模型为

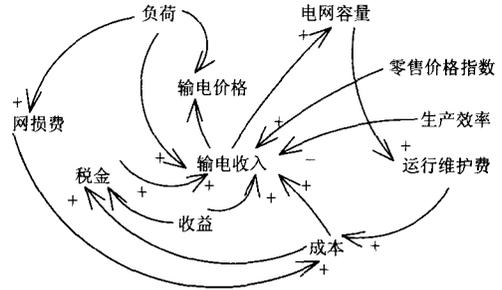


图 3 基于收入上限的输电价格管制的因果关系图

Fig.3 Relation of regulation of transmission price based on revenue cap

$$\lambda(t) = \lambda(t-1) + \Delta\lambda(t) \quad (13)$$

$$\Delta\lambda(t) = \frac{R'(t)}{D(t) \cdot h(t) \cdot (1 + K_{tax})} \quad (14)$$

$$R'(t) = [R'(t-1) + R_D \cdot \Delta D(t) \cdot h] \cdot [1 + RPI(t) - X(t)] + \alpha(t) \quad (15)$$

$$R'(t) - R(t-1) = F_{cos}(t) + F_{inc}(t) + F_{tax}(t) \quad (16)$$

$$\Delta S(t) = \frac{[R'(t) - R(t-1)] / Z_{cp}(t)}{k_{dep} + k_{ope} + [1 - k_{dep} \cdot (A/W, r_2, n)] \cdot (1+r_1)} \quad (17)$$

$$S(t) = S(t-1) + \Delta S(t) \quad (18)$$

式中： $R(t-1)$ 为第 $t-1$ 年电网公司实际的收入； $R'(t)$ 为第 t 年核定的收入上限； $R'(t-1)$ 为第 $t-1$ 年核定的收入上限； R_D 用电量增长的调节因子。

4 算例分析

采用某地区电网 2005 年的数据，地区主网由 220/110 kV 和 110 kV 线路构成，采用共用网络输配电价测算的分层分区邮票法，并忽略上级电网分摊费用，只针对 110 kV 电网进行规划和测算电价，并且三个模型采用的负荷和用电量及其逐年的增长率是相同的。由于采用单一制或两部制对分析管制方式不产生影响，因此，本文采用单一制定价模型计算算例，对比三种输电价格管制方式下，电网投资建设情况。

主要的参数取值如下： h 为最大负荷利用小时数，取 5500 h。 k_{dep} 为折旧率，按经营期 25 年直线折旧，取 4%； k_{ope} 为运行管理费率，取 5%。 r_1 为电网的加权平均资金成本，取 6%； r_2 为内部收益率，一般为 8%； n 为经营期，取 25 年； $(A/W, r_1, n)$ 均匀梯度系列年金化系数； $F_{ass}(t)$ 第 t 年新增电网资产。 K_{tax} 为综合税率，按增值税 17%，城市建设维护费率 7%，教育费及附加 3%，折算综合税率为

18.7%。

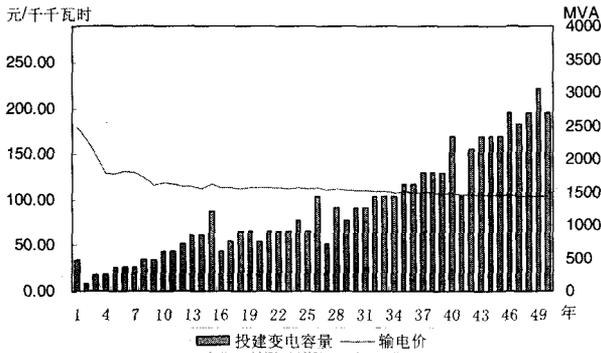


图 4 基于投资回报率的输电价格走势

Fig.4 Transmission price trend based on rate of return

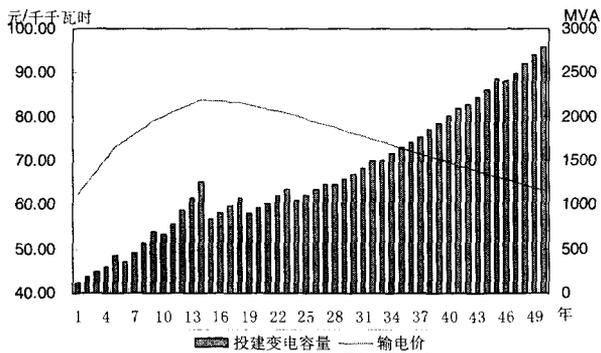


图 5 基于价格上限的输电价格走势

Fig.5 Transmission price trend based on price cap

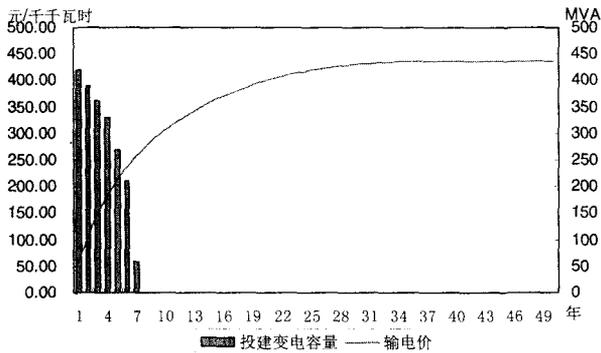


图 6 基于收入上限的输电价格走势

Fig.6 Transmission price trend based on revenue cap

从仿真结果图 4~6 可见，三种方式中每年投建电网规模最大的是图 4，由于监管机构通过对投资回报率的直接控制而间接控制输电价格，很明显，电网企业倾向于通过加大电网建设，增加准许成本来获得更多的利润，虽然在较高的初始价格水平下（初始价格为该地区实际输电价 170 元/千 kW·h，输电价格仍然有下降的可能，使其更加隐蔽地掩盖

了这种人为提高资本有机构成和投资建设的低效率。在基于投资回报率的管制方式下，由于企业的各种生产成本都能够得到回收，生产成本的上升或减少都由消费者承担或享有，因此缺乏对企业降低成本和提高效率的激励，企业没有动力去降低成本，即存在“X-无效率”。从系统机制来看，基于投资回报率的输电价格管制的关系模型中，如图 1，如果负荷和电网容量的增长相对于输电价格的变化是无弹性的，则这个因果关系环中没有形成反馈环结构，从动力学的角度系统不具有自我调节的能力，这个机制也是不稳定的，因此，必须由系统外力来控制输电价格和电网容量的增加。从某种意义上看，实行基于投资回报率的价格管制方式需要与电网建设项目审批制、价格审批制有效整合。

图 5 中基本上它的价格波动跟随通货膨胀率的波动，其实际的输电价格水平非常平稳，并且制定一个合理的初始价格后，不但能够激励电网企业进行电网建设，还能够促进其提高生产效率，但合理的初始价格水平非常难以确定，图 5 初始价格的设定按照第一部分的方法固定投资回报率 8%进行测算，并补偿沉没成本。经过反复试算和仿真，为 60 元/千 kW·h 较为合适。其不足之处是，该模式与投资回报率管制模式一样，采取几年调整一次价格的方式，如果企业通过努力获取了较高的利润，管制者据此对其价格进行调整，企业在新的管制期将面临较低的价格，这会削弱企业提高自身效率的努力。此外，价格上限管制模型中选取物价上涨指数 RPI 作为模型参数，而实际生活中导致物价上涨的因素很多，不会都导致企业成本的变化，在这种情况下，RPI 不能完全反映对企业成本变化的影响。

图 6 三种输电价格管制方式中，基于收入上限的价格管制的电价波动幅度最大，因为基于收入上限的定价方式监管机构没有控制最终的价格，电网企业有完全的定价灵活性。图 6 中该管制方式和基于价格上限的管制方式一样对合理初始价格依赖性较强，而且便于进行对比分析，采用图 5 中的初始价格，电网每年投建变电容量逐年减小，输电价格却逐年提高，模型为了放大这种效应，剔出了容载比约束，因此，电网投建规模甚至缩小到 0。图 6 可见，这种定价方式下，电网公司是通过减少电网建设、提高价格水平来达到迅速提高企业利润的。

可见，三种定价方式各有利弊，单纯应用某一种管制方式而不针对其弱点予以配套政策都会降低监管效率、抑制企业发展，应该看到各国在应用任何一种管制方式时，都不是机械的，算例为了比较分析，部分地放大了各自的优缺点，在应用中应该

力求取长补短、相互借鉴。

5 结语

本文提出用系统动力学方法研究输电价格管制方式,建立了各环节的数学模型,并通过算例分析了模型的有效性。同时,文章对输配电价的调整、预测进行探讨,综合考虑贯穿历史和未来,研究过程量,从而探索电价波动性,窥视电价的稳定性和发展趋势,对形成科学合理的输配电价监管形式具有重要意义。

参考文献

- [1] John P. Buechle. Transmission Planning in a Market-based Environment. //proceedings of 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005: vol. 3, 12-16 June 2005, San Francisco, CA, USA: 2796-2798.
- [2] David, A.K. Dispatch Methodologies for Open Access Transmission Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 1998,13(1):46-53.
- [3] Rudnick, H., Donoso, J.A. Integration of Price Cap and Yardstick Competition Schemes in Electrical Distribution Regulation. IEEE Transactions on Power Systems, 2000,15(4):1428-1433.
- [4] Lima J W M, Noronha J C C, Arango H, P. E. Steele dos Santos. Distribution Pricing Based on Yardstick Regulation. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1): 198- 204.
- [5] 赵会茹, 乞建勋, 曾鸣, 等. 输配电价格管制模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10):89-93.
ZHAO Hui-ru, QI Jian-xun, ZENG Ming, et al. A Study of Electricity Transmission Pricing Regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10):89-93.
- [6] 许诺, 颜汉荣, 文福拴, A.K.David. 基于绩效的管制模式及其应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 23(5):13-19, 30.
XU Nuo, Ngan H W, WEN Fu-shuan, et al. Performance-based Regulation and Its Applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 23(5):13-19, 30.
- [7] 郑风雷, 文福拴, 吴复立. 电力市场环境下的输电投资与扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9):95-104; 30(10):80-87.
ZHENG Feng-lei, WEN Fu-shuan, Felix Wu. Transmission Investment and Expansion Planning in Electricity Market Environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9):95-104; 30(10):80-87.
- [8] 陈德裕. 输电电价的计算[J]. 电力系统自动化, 2001,(7):44-47.
CHEN De-yu. Transmission Pricing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,(7):44-47.
- [9] 韦凌云, 吴捷, 刘永强. 基于系统动力学的电力系统中长期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2000,(16):44-47.
WEI Ling-yun, WU Jie, LIU Yong-qiang. Long-term Electric Load Forecasting Based on System Dynamics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,(16):44-47.
- [10] 黄健柏, 黄向宇, 邵留国, 等. 基于系统动力学的峰谷分时电价模型与仿真(一)模型的建立[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11):18-23.
HUANG Jian-bai, HUANG Xiang-yu, SHAO Liu-guo, et al. Peak and Valley Time Price Model and Simulation Based on System Dynamics: Part One Model Establishment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11):18-23.
- [11] 黄健柏, 黄向宇, 邵留国, 等. 基于系统动力学的峰谷分时电价模型与仿真(二)仿真结果及其分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12):23-26.
HUANG Jian-bai, HUANG Xiang-yu, SHAO Liu-guo, et al. Peak and Valley Time Price Model and Simulation Based on System Dynamics: Part Two Simulation Results and Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12):23-26.
- [12] 王伟, 张粒子, 舒隽, 等. 基于系统动力学的宏观层电网规划的仿真模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 88-93
WANG Wei, ZHANG Li-zi, SHU Jun, et al. Simulation Model of Transmission Network Macro-planning Based on System Dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4):88-93.

收稿日期: 2008-03-27

作者简介:

王伟(1980-), 男, 博士, 主要研究方向为电价、电力市场、电网规划; E-mail:wangwei_tl@sohu.com

张粒子(1963-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力市场、电力系统规划与运行优化等领域的研究;

程瑜(1978-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力市场。