

Electric Energy Supply Chain Dynamic Model and its Robust H_∞ Control for the Electric Power Supply Security

Yang YANG, Lizi ZHANG

Department of Electrical and Electronic Engineering,
North China Electric Power University, Beijing, China
Yy19842000@sina.com

Abstract: Analysis the problems of electric power supply security and electric energy supply chain uncertainty, and establish the electric energy supply chain dynamic model for the uncertainties of electric energy demand in the external and delay in the internal which are existing in the electric energy supply chain, then, use robust H_∞ control and linear matrix inequality (LMI) algorithm to process the robust operation of electric energy supply chain, and gain the method of calculating the electric energy supply chain robustness and the control laws. It may open up a new way for the research of problems of electric power supply security.

Key words: Dynamic model; electric energy supply chain; electric power supply security; linear matrix inequality (LMI); robust H_∞ control; stability; uncertainty

基于电能供应链动态模型及其鲁棒 H_∞ 控制的 电力供应安全问题研究

杨阳, 张粒子

电气与电子工程学院, 华北电力大学, 北京, 中国, 102206
Yy19842000@sina.com

摘要: 分析了电力供应安全问题以及电能供应链的不确定性问题, 针对电能供应链中存在的外部电能需求以及内部时滞的不确定性, 建立了电能供应链动态模型, 采用鲁棒 H_∞ 控制和线性矩阵不等式 (LMI) 算法处理电能供应链系统的鲁棒运作问题, 得到电能供应链的鲁棒性以及反馈控制律的计算方法, 为电力供应安全问题的研究开辟了一条新的途径。

关键字: 电能供应链; 电力供应安全; 动态模型; 鲁棒 H_∞ 控制; 线性矩阵不等式 (LMI)

1. 引言

2008年, 受到国家经济政策、气候变化以及煤炭价格大幅上涨的影响, 我国华北、华中和华东等广大地区的电力供应受到了严重影响, 出现了大范围的电力供应紧张局面。随着我国经济的迅猛发展, 市场化的快速变革, 以及近几年来气候的异常, 作为社会发展最主要动力的电力显得越来越重要, 电力供应安全问题的研究刻不容缓。电力行业有其重要的特点, 其一是其产品电能关系到国计民生的方方面面, 其二是电能无法储存。因此从供应链管理和控制的角度出发, 需要通过对煤炭、电能的生产和销售控制, 使得整个电能供应链的物流、资金流和信息流达到理想的运行

状态。

供应链系统中的不确定性直接影响系统的运作和绩效, 国内外学者已经注意到供应链中不确定性问题, 并且进行了研究^[1-6]。还有一些学者应用控制理论和鲁棒优化等方法对供应链不确定问题进行研究, 取得了一定成果^[7-11]。如 Lin 2004 年研究了边界不确定的供应链生产调度问题的鲁棒优化方法^[9]; 黄小原 2005 年应用 H_∞ 控制方法研究了供应链时滞系统及其牛鞭效应的控制问题^[10]; Boukas 于 2006 年应用基于线性矩阵不等式 (LMI) 的 H_∞ 控制方法研究了一类制造系统的生产计划问题^[11]。当前对电力供应安全问题的电能供应链研究主要局限于电煤供应链, 研究主要是从

煤电联合的方式、效率评价以及激励等方面展开的，研究对象是电煤供应链中的供应方与需求方^[12]。文献[13]从整合的角度探讨电煤供应链，并考虑了在电煤增值过程中起决定性作用的运输方的因素，讨论了电煤供应链整合的必要性。

本文针对电力供应安全问题，从电能供应链和鲁棒 H_∞ 控制的角度出发，考虑电能供应链中的外部需求和内部时滞的不确定扰动的问题，建立电能供应链动态模型，并对其鲁棒 H_∞ 控制进行研究，用以提高电力供应安全性。相信本文的研究思路和方法对电力供应安全研究有一定的借鉴作用。

2. 电能供应链的不确定性

供应链是围绕核心企业，通过对物流，资金流，信息流的控制，从采购原材料开始，制成中间产品以及最终产品，最后由销售网络把产品送到消费者手中的将供应商，制造商，分销商，零售商，直到最终用户连成一个整体的功能网链结构^[14]。供应链的定义分为狭义与广义。狭义的供应链即指供应商、生产商和销售商，或只指其中某几项的；广义的供应链不仅包括狭义中的供应商、生产商和销售商，还包括消费者。

供应链的不确定性来自两个方面：（1）外部联接和突发事件的不确定性，主要表现在合作性上。为了消除联接不确定性，需要增加企业之间或部门之间的合作与协调。（2）内部运作不确定性，系统运行不稳定是组织内部缺乏有效的控制机制所致，控制失效是组织管理不稳定和不确定性的根源。供应链外部突发事件的不确定性所造成的损失要比内部运作不确定性造成的损失大很多。

根据经济管理中的供应链概念，结合电力行业的特点，本文总结出电能供应链的概念：电能供应链是围绕着发电企业，通过对煤炭、电能、资金和信息流的控制，从采购煤炭开始，发出电能，输配电能，到最后销售和使用电能，将煤炭供应企业、发电企业、电网企业和电力用户连成一个整体的电能生产、传输、销售和使用的网链结构。

由于受到国家经济政策和自然气候的影响，电能供应链存在两个不确定性的影响：（1）电能供应链外部需求的不确定性：消费市场中的电力用户电能需求量存在波动（2）电能供应链内部时滞的不确定性：煤炭企业的煤炭生产和运输存在时滞，从而影响煤炭的价格以及最终电能的连续供应。

3. 不确定情况下的电能供应链动态模型

电能供应链动态模型采用系统变量偏差量，即用实际系统变量与标称系统变量之差来描述。为统一单位，方便计算，电能供应链中的各个成员企业的库存全部转换成煤炭的库存，其中根据电能供应链本身的特点，电网企业的库存为 0。根据文献 [15]，通过公式推导，建立电能供应链动态模型如下。

建立由煤炭企业、发电企业和电网企业组成的三级电能供应链的煤炭库存状态方程：

煤炭企业的库存方程

$$x_{1,k+1} = x_{1,k} + u_{1,k-\tau} - u_{2,k} \quad (1)$$

发电企业的库存方程

$$x_{2,k+1} = x_{2,k} + u_{2,k} - Kd_k \quad (2)$$

电网企业的库存方程

$$0 \quad (3)$$

其中， $x_{1,k}$ 是煤炭企业 k 时刻的煤炭库存，为状态变量，单位：吨； $x_{2,k}$ 是发电企业 k 时刻的煤炭库存，为状态变量，单位：吨；电网企业 k 时刻的煤炭库存为 0； $u_{1,k}$ 是具有时滞的煤炭企业产煤量，为控制变量，单位：吨； $u_{2,k}$ 是煤炭企业 k 时刻售出的煤炭量，也是发电企业 k 时刻购买的煤炭量，为控制变量，单位：吨； τ 是生产时滞参数， $0 \leq \tau < \infty$ ， τ 是时滞独立的，即在时滞 $0 \leq \tau < \infty$ 中系统的控制是稳定的； d_k 是全部电力用户 k 时刻需求的电能，是不确定性外生扰动变量，单位：千瓦时； K 是电煤转换系数，单位：吨/千瓦时。

建立由煤炭企业、发电企业和电网企业组成的三级电能供应链的利润方程：

煤炭企业的利润方程

$$z_{1,k} = p_{1-2}u_{2,k} - c_{h1}x_{1,k} - c_1u_{1,k} \quad (4)$$

发电企业的利润方程

$$z_{2,k} = p_{2-3}d_k - c_{h2}x_{2,k} - p_{1-2}u_{2,k} - c_2d_k \quad (5)$$

电网企业的利润方程

$$z_{3,k} = p_{3-4}d_k - (p_{2-3} + c_3)d_k \quad (6)$$

其中， $z_{1,k}$ 是煤炭企业 k 时刻的利润，单位：元； $z_{2,k}$ 是发电企业 k 时刻的利润，单位：元； $z_{3,k}$ 是电网企业 k 时刻的利润，单位：元； c_{h1} 是煤炭企业的煤炭单位库存成本，单位：元/吨； c_{h2} 是发电企业的煤炭单位库存成本，单位：元/吨； c_1 是煤炭企业的单位产煤成本，单位：元/吨； c_2 是发电企业的单位发电成本，单位：元/千瓦时； c_3 是电网企业的单位输

配电成本, 单位: 元/千瓦时; p_{1-2} 是煤炭企业与发电企业成交的单位煤炭价格, 单位: 元/吨; p_{2-3} 是发电企业与电网企业成交的单位上网电价, 单位: 元/千瓦时; p_{3-4} 是电网企业与普通电力用户成交的单位销售电价, 单位: 元/千瓦时。

综合 (1) 至 (3) 式, 三级电能供应链的库存状态方程的矩阵形式为:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{B}_\tau\mathbf{u}_{k-\tau} + \mathbf{E}\mathbf{d}_k \quad (7)$$

$$\text{其中, } \mathbf{x}_k^T = (x_{1,k}, x_{2,k}, x_{3,k}), \quad \mathbf{u}_k^T = (u_{1,k}, u_{2,k}, u_{3,k}),$$

$$\mathbf{u}_{k-\tau}^T = (u_{1,k-\tau}, u_{2,k-\tau}, u_{3,k-\tau}), \quad \mathbf{d}_k = d_k,$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_\tau = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ -K \\ 0 \end{pmatrix}.$$

综合 (4) 至 (6) 式, 四级电能供应链的输出利润方程的矩阵形式为:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + \mathbf{P}\mathbf{d}_k \quad (8)$$

$$\text{其中, } \mathbf{z}_k^T = (z_{1,k}, z_{2,k}, z_{3,k}),$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -c_{m1} & 0 & 0 \\ 0 & -c_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} -c_1 & p_{1-2} & 0 \\ 0 & -p_{1-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ p_{2-3} - c_2 \\ p_{3-4} - (p_{2-3} + c_3) \end{pmatrix}.$$

式 (7) 和式 (8) 描述了具有外部需求和内部时滞不确定的三级电能供应链动态系统模型。

4. 电能供应链的鲁棒 H_∞ 控制

鲁棒性是一个系统面临内部结构和外部环境变化时, 能保持其系统功能的能力。鲁棒性是系统的一个基本属性, 是伴随不确定性问题普遍存在的现象^[16-18]。

鲁棒 H_∞ 控制理论是在 H_∞ 空间通过某些性能指标的无穷范数优化而获得具有鲁棒性能的控制器的控制理论。 H_∞ 范数的物理意义是它代表系统获得的最大能量增益^[19]。鲁棒 H_∞ 控制理论的实质是为内部参数不确定、外部环境扰动亦不确定的系统提供了一种鲁棒控制器的设计方法。供应链鲁棒 H_∞ 控制的运作管理含义是对运作管理中的不确定性因素产生一个控制手段, 抑制不确定性因素的扰动。衡量所采取的控制手段对这种不确定扰动的抑制程度, 通常用系统增益指标, 增益越小, 说明系统的性能越好。

供应链是连接企业供应、制造、销售、分销直到

顾客的物流、资金流、信息流运作的网络系统。在供应链系统中, 不确定性的存在会直接影响到系统的正常运行。在这些不确定因素作用下, 鲁棒性成为能否确保供应链的收益和持续性运行的重要因素^[20-22]。供应链的鲁棒 H_∞ 控制是通过库存 x_k 产生生产和销售控制 u_k , 抑制供应链成本参数、时滞和外部输入的不确定性扰动, 使供应链的运作成本或利润偏差量 z_k 达到较为理想的水平。供应链中的生产和销售控制变量 u_k 对于上述扰动的抑制程度, 可以采用 γ 描述, 即 $\|z_k\|_2 / \|d_k\|_2 \leq \gamma$, γ 越小, 系统的性能越好。其中 $\|\cdot\|_2$ 是函数的 L_2 范数, 它度量了供应链运作过程中利润和需求的波动。 $\|z_k\|_2 / \|d_k\|_2$ 则描述了供应链系统输出能量与外部输入能量之比的增益^[23]。

针对电能供应链存在的外部电能需求以及内部时滞不确定性问题, 本文采取基于线性矩阵不等式算法 (LMI) 的鲁棒 H_∞ 控制, 求解出电能供应链系统的鲁棒抑制率以及最优反馈控制律, 即得到系统在不确定情况下的生产控制和销售控制变量 u_k , 使得电能供应链从扰动需求 d_k 到输出利润 z_k 产生的系统增益, 即 $\|z_k\|_2 / \|d_k\|_2$ 达到最小, 并且使电能供应链的运作达到一个较为理想的水平。

如式 (7) 和式 (8) 所示的电能供应链动态模型是外部需求和内部时滞均为不确定的线性离散时间系统。根据文献^[24] 推导出此种不确定情况下的线性离散时间系统的鲁棒 H_∞ 控制策略。

定理 对于线性离散时间系统 (7) 和 (8), 给定正常数 γ , 如果存在正定矩阵 \mathbf{Q} 、 \mathbf{S}_1 、 \mathbf{S}_2 和矩阵 \mathbf{M} 使得下面的线性矩阵不等式 LMI 成立, 即

$$\begin{pmatrix} -\mathbf{Q} + \mathbf{B}_\tau \mathbf{S}_2 \mathbf{B}_\tau^T & \mathbf{A}\mathbf{Q} + \mathbf{B}\mathbf{M} & \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}\mathbf{A}^T + \mathbf{M}^T \mathbf{B}^T & -\mathbf{Q} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}\mathbf{C}^T + \mathbf{M}^T \mathbf{D}^T & \mathbf{M}^T & \mathbf{Q} \\ \mathbf{E}^T & \mathbf{0} & -\gamma^2 \mathbf{I} & \mathbf{P}^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}\mathbf{Q} + \mathbf{D}\mathbf{M} & \mathbf{P} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{S}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{S}_1 \end{pmatrix} < \mathbf{0}$$

则系统 (7) 和 (8) 具有 H_∞ 范数界 γ 可镇定的, 相应的状态反馈控制律为 $\mathbf{u}_k = \mathbf{K}\mathbf{x}_k$, 其中 $\mathbf{K} = \mathbf{M}\mathbf{Q}^{-1}$ 。

结合国内煤炭企业、发电企业、电网企业和电力用户的历史资料, 对电能供应链动态模型中的参数进行设定, 运用 Matlab 软件中的 LMI 工具箱的 mincx 求解器, 可以求解出电能供应链系统对外部电能需求

和内部时滞扰动的最优抑制率 γ 及其相应的反馈控制率。接着,可以针对不同的外部市场需求以及内部时滞扰动,对最优控制率下的电能供应链系统进行仿真,仿真结果可以显示出最优控制率对于电能供应链外部需求扰动的抑制效果,进一步观察电能供应链的运行状态。

5. 结束语

本文从供应链和鲁棒 H_∞ 控制的角度,提出了一种研究电力供应安全问题的新方法。首先分析了电力供应安全问题以及电能供应链中的不确定性问题,接着针对电能供应链外部电能需求以及内部时滞扰动的不确定性,建立了电能供应链动态系统模型,最后利用基于LMI算法的鲁棒 H_∞ 控制推到了电能供应链的最优鲁棒抑制率以及反馈控制律的求解方法。利用求得的鲁棒反馈控制律,能抑制不确定扰动,保证电能供应链的正常运行。本文的研究方法为电力供应安全问题提供了新的研究思路。

References (参考文献)

- [1] Escudero L F, Galindo E, Garcia G ,et al. Schumann, a modeling framework for supply chain management under uncertainty [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 119(1):14-34.
- [2] Zimmer K. Supply chain coordination with uncertain just-in-time delivery [J].International Journal of Production Economics, 2002, 77(1):1-15.
- [3] Fynes B, Burcade S, Marshall D. Environmental uncertainty, supply chain relationship quality and performance[J].Journal of Purchasing & Supply Management,2004,10(1):179-190.
- [4] Blackhurst J, Wu T,O' grady P. Network-based approach to modeling uncertainty in a supply chain [J].International Journal of Production Research, 2004, 42 (8):1639-1658.
- [5] Yang B, Burns N D, Backhouse C J, et al. Management of uncertainty through postponement[J].International Journal of Production Research,2004,42(6):1049-1064.
- [6] Ho C F, Chi Y P, Tai Y M.A structural approach to measuring uncertainty in supply chain [J]. International Journal of Electronic Commerce, 2005, 9 (3):91-114.
- [7] Riddalls C E, Bennett S. Production-inventory system controller design and supply chain dynamics [J].International Journal of System Science,2002,33(3):181-195.
- [8] Bertsimas D, Thiele A.A robust optimization approach to supply chain management[A].Proceedings of the 10th International Integer Programming and Combinatorial Optimization Conference (Lecture Notes in Computer Science)[C].Berlin,Germany:Springer-Verlag,2004.
- [9] Lin X X, Janak S J, Floudas C A. A new robust optimization approach for scheduling under uncertainty: I.Bounded uncertainty [J].Computers and Chemical Engineering,2004,28(6):1069-1085.
- [10] Huang Xiao yuan, Guo Haifeng, Lu Zhen. H_∞ control of supply chain time delay system model and its bullwhip effect[J].Journal of Systems Engineering, 2005, 20(6):585-590.
- [11] Boukas E K. Manufacturing systems:LMI approach [J].IEEE Transaction on Automatic Control,2006,51(6):1014-1018.
- [12] Zhao Xiao Li. mechanism of cooperation and conflict of coal supply chain [D].Haerbin: Harbin Technology Institute, 2008.
- [13] Zhu Hong Yi, Ru Yi Hong, Wang Rui Jiang. Analysis of coal supply chain integration [J]. Logistics Technology, 2009,28(5):99~102.
- [14] Ma Shi Hua, Lin Yong. Supply Chain Management [M] Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [15] QIU Ruo-zhen, HUANG Xiao-yua. Two-stage Supply Chain Dynamic Model and Robust H_∞ Control [J]. Control Engineering of China, 2008, 15(1):9-11.
- [16] Jie Jing. International academic research on the robustness [J].Systems Engineering,2005,20(2):153-159.
- [17] Block H N. Uncertain science and uncertain world [M].Li Ping Ping, translation. Shanghai: Shanghai Science and Education Press, 2005.
- [18] Huang Lin. The basic theory of stability and robustness [M].Beijing: Science Press,2001.
- [19] Zhang Xian Ku, Jia Xin Le, Wang Xing Cheng, Yang Cheng En. The ten years' review of Robust H_∞ Control [J]. Control and Decision, 1999, 14 (4) :279~296
- [20] TANG C S. Perspectives in Supply Chain Risk Management [J].International Journal of Production Economics, 2006,103 (2):451-488.
- [21] BERTSIMAS D, THIELE A.A Robust Optimization Approach to Inventory Theory [J].Operations Research, 2006, 54(1):150-168.
- [22] YANG B,BURNS N D,BACKHOUSE C J. Management of Uncertainty Through Postponement [J].International Journal of Production Research,2004,42(6):1 049-1 064.
- [23] HUANG X Y, YAN N N, GUO H F. A control method of the bullwhip effect for a class of supply chain systems [J].International Journal of Production Research, 2007, 45(1):207-226.
- [24] KIM J H, PARK H B. H_∞ state feedback control for generalized continuous/discrete time-delay system [J]. Automatica, 1999, 35(5):1443-1451.