

电力市场中计及实时电价的电力系统运行风险管理新策略

赖佳栋¹, 杨秀苔¹, 王成亮², 熊小伏³

(1. 重庆大学 经济与工商管理学院, 重庆 400030; 2. 贵州电力调度通信局, 贵阳 550002;
3. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:针对电力市场中用户对实时电价的反应, 本文提出一种计及实时电价的电力系统运行风险管理新策略。该策略在评估电力系统运行风险的基础上, 对实时电价进行调节, 并以电价为信号, 刺激用户采取合理的用电结构和方式, 从而增强电力系统运行的可靠性。该方法只是弥补了传统方法无法考虑系统运行可靠性的不足, 而并非颠覆传统的电价管理方法, 所以二者具有很好的衔接性。最后, 通过对 IEEE-RTS 测试系统的可靠性进行计算分析, 验证了所提算法的有效性。

关键词:电价管理; 运行风险; 实时电价; 可靠性

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-980X(2008)10-0074-05

运行中的电力系统的可靠性水平与许多因素有关, 因此, 控制系统风险水平的措施也多种多样。电力市场中, 实时电价的引入为电力系统运行风险管理提供了一种新的手段。研究表明, 公平合理的电价能够提供正确的经济信号、调节经济运行、实现社会资源的最优化配置。

Hirst 等通过研究指出, 在电力市场中, 电价的变化必然会影响用户用电量, 进而影响系统的可靠性水平^[1]; 丁宁等从建立模型、削峰填谷、提高负荷率等方面对峰谷分时电价进行了研究^[2-6]。然而, 以上研究只考虑了系统资源和用户需求对电力定价的影响, 而没有考虑实时电价与系统风险水平之间的关系, 即这些研究所确定的实时电价不一定能有效控制系统的风险水平。李生虎等虽然考虑了实时电价与电力系统可靠性之间的协调控制, 但采用的运行风险指标实际上是传统规划可靠性评估中的指标^[7], 其反映的是系统长期内的可靠性水平, 而实时电价却是一个短期值, 显然, 用一个短期值来协调控制一个长期值是不合理的。

针对以上问题, 本文提出了一种计及实时电价

的电力系统运行风险管理新策略。该方法根据系统各个时段内的运行风险水平来调整实时电价, 当系统运行风险水平较高时, 提高价格可促使电力用户减少用电量或调整用电时间, 从而降低运行风险; 当系统运行风险水平较低时, 在可接受的风险水平内, 降低价格可刺激用户增加用电量, 以保证系统运行的经济性和稳定性。

1 电力系统运行风险评估

实时电价一般是提前若干时段(24 小时或 12 小时)给出下一天 24 个时段的电力报价, 因此量化系统下一天内各时段的运行风险水平是本方法的基础。

电力系统的各级电网调度机构根据负荷预测对管理范围内的发电厂安排日发电计划, 在日发电计划中, 有些机组需要在线长期运行, 有些机组却需要在不同时间段内改变运行状态。

为了更加精确地评估电力系统的运行可靠性水平, 王成亮等将系统中的元件分为两类^[8]: 一类是时变元件, 定义为运行状态随时间变化而需要改变的

收稿日期: 2008-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777068)

作者简介: 赖佳栋(1965—), 男, 广东梅县人, 重庆大学经济与工商管理学院博士, 研究方向: 技术经济; 杨秀苔(1933—), 男, 四川射洪人, 重庆大学经济与工商管理学院教授, 博士生导师, 研究方向: 技术经济、投资决策; 王成亮(1982—), 男, 重庆开县人, 贵州省电力调度通信局, 研究方向: 电力系统规划与可靠性; 熊小伏(1962—), 男, 重庆人, 重庆大学电气工程学院教授, 博士生导师, 研究方向: 电力系统微机保护及信息处理。

元件,如根据发电计划需要经常退出运行或投入运行的机组;另一类是非时变元件,定义为要求始终处于运行状态中的元件,如输电线路、需长期运行的基荷机组。

因为元件的修复时间一般大于运行风险概率评估的周期,所以可将元件看作是不可修复元件,即认为元件修复率 μ 等于 0。由 R·别林登的研究可知^[9],不可修复元件在 T 时刻的停运概率 $P(T)$ 为:

$$P(T) = 1 - e^{-\lambda t} P_{UP}(0) \quad (1)$$

式(1)中: $P_{UP}(0)$ 表示元件在评估初始时刻 T_0 时处于运行状态的概率; λ 为元件的故障率; t 为评估时刻 T 到初始时刻 T_0 的间隔小时数。

只要知道元件在初始时刻处于运行状态的概率 $P_{UP}(0)$ 以及元件的故障率 λ 就可以根据式(1)求得该元件在 T 时刻的停运概率。但对于不同类型的元件,其初始时刻及其在初始时刻处于运行状态的概率 $P_{UP}(0)$ 是不一样的。

对于时变元件,以实际投入运行的时刻为初始时刻,该元件在初始时刻处于运行状态的概率 $P_{UP}(0)$ 为元件的投运成功概率 P_C 。需要说明的是,某时刻的电网运行风险水平取决于该时刻的负荷水平和在线运行的所有元件,因此,如果依据调度计划,时变元件 i 在时刻 T 处于停运或备用状态,则该时刻的运行风险评估将不考虑此元件的影响。

对于非时变元件,以评估起点为初始时刻。如果能确定该元件在初始时刻处于运行状态,则其在初始时刻处于运行状态的概率 $P_{UP}(0)$ 为 1;如果不能确定该元件在初始时刻所处的状态,则其在初始时刻处于运行状态的概率用统计平均值“ $1 - V_{FOR}$ ”表示, V_{FOR} 为元件的强迫停运率。

求得元件在时刻 T 的停运概率后,就可以计算系统在该时刻遭遇某种故障状态的概率。不考虑各元件故障间的相关性,系统在 T 时刻遭遇故障状态 k 的概率 $P_k(T)$ 为:

$$P_k(T) = \prod_{i \in S} P_i(T) \prod_{j \notin S} [1 - P_j(T)] \quad (2)$$

式(2)中: S 表示故障元件的集合; $P_i(T)$ 表示元件 i 在时刻 T 的停运概率; $P_j(T)$ 表示元件 j 在时刻 T 的停运概率。

本文在对实时电价进行校正时所用的风险指标是失负荷期望 I_{EID} (expected interruption demand),它表示未来短时间内系统可能失去的负荷量,其计算公式为^[8]:

$$I_{EID} = \sum_k P_k \times C_k \quad (3)$$

式(3)中: M 表示评估时间内造成系统失负荷的状态集合; P_k 表示第 k 个状态发生的概率; C_k 表示在状态 k 的条件下系统失去的负荷。

与传统的可靠性指标不同,式(3)中的 C_k 不包括人为校正措施所切除的负荷,而仅仅是由于故障状态下系统形成电气孤岛或自动装置动作所失去的负荷。这是因为,电力系统运行风险评估的目的是从概率分析的角度客观、真实地揭示系统遭遇扰动后自然暴露在危险中的后果,因此评估时不能像传统规划可靠性评估那样考虑人为的校正措施(如线路过载时负荷的转移或削减、系统无功电源出力的调整、机组出力的调整等)。此观点在 Ni Ming、McCalley 等的研究中得到了充分体现^[11,12],而且也得到了不少学者的认同^[8,12]。故,本文在故障后果分析中不考虑人为校正措施。

2 计及实时电价的运行风险管理

评估出系统未来一天内的运行风险后,就可以根据各时段风险水平的高低确定实时电价,用电价来刺激用户多在系统低风险时期用电、减少在高风险时期的用电量,以达到增强系统运行可靠性的目的。

严格地说,电力需求量与实时电价之间存在非线性关系。当实时电价调整的范围较小、周期较短时,可以将其一阶线性化,即认为在每个计算周期内电价弹性系数是常数^[7]。本文基于运行风险概率评估结果制定未来一天各时段的实时电价,因此可用线性模型进行分析。

实际上,不同用户类型在不同时间段对电价变动的反应程度是不一样的,在计算电价变动对负荷变化的影响时,要分时分用户进行。设系统有 N 个用户类型,它们在时段 t 的负荷和电力价格弹性系数分别为 $PL_i(t)$ 和 $\varepsilon_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$),则当电价变化量为 $\Delta f(t)$ 时,负荷的变化量 $\Delta PL(t)$ 为:

$$\Delta PL(t) = - \sum_{i=1}^N PL_i(t) \times \varepsilon_i(t) \times \Delta f(t) \quad (4)$$

通过电价校正后,系统负荷变为:

$$PL'(t) = PL_0(t) + \Delta PL(t) \quad (5)$$

式(5)中: $PL_0(t)$ 是电价校正前的负荷; $PL'(t)$ 是电价校正后的负荷。

将校正后的负荷代入运行风险评估程序,计算 t 时段电价变动后系统的风险值 I'_{EID} 。如果 I'_{EID} 超过了可接受的水平,则逐步改变 $\Delta f(t)$ 以对负荷进行校正,一直到计算出的系统风险值 I'_{EID} 达到可接受

的水平为止。

通过上述步骤计算出电价最终变化量 $\Delta f(t)$ 后, 就可根据式(6)计算 t 时段的实时电价。

$$f'(t) = f_0(t) + \Delta f(t)。$$
 (6)

式(6)中: $f_0(t)$ 是用传统方法得到的常规电价; $f(t)$ 是计及系统运行风险后的实时电价。从式(6)可以看出, 本文所提方法只是弥补了传统方法不能考虑系统可靠性的不足, 而并非颠覆传统的电价管理方法, 二者之间具有很好的衔接性。

为了避免电价变化过于频繁, 可以在合理的技术经济条件下设定一个系统可接受的风险区间 $[I_{EID}, I_{EID}^+]$ 。系统风险值 $I'_{EID}(t)$ 在此区间内时, 电价不作变动; 系统风险值 $I'_{EID}(t)$ 越过此区间时, 才对电价进行修改。

由以上分析可知, 利用实时电价校正系统运行风险的过程, 实际上是一个如图 1 所示的“电价—负荷—运行风险”闭环控制过程。

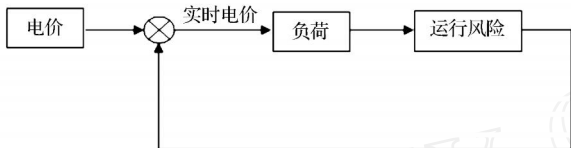


图 1 “电价 - 负荷 - 运行风险”控制系统

利用前文提出的方法计算实时电价的流程见图 2。

3 算例分析

根据上述算法, 笔者采用 Visual C++ 6.0 编写了计及实时电价的运行风险管理计算程序, 并以 IEEE-RTS79 系统为例, 分析了实时电价与电力系统运行风险之间的关系。

评估中, 负荷类型、电力价格弹性系数和常规电价计算方法取自文献[7], 负荷数据和日发电计划取自文献[8], 线路数据及负荷分布因子取自文献[13], 机组数据取自文献[14]和文献[15], 期望失负荷指标的可接受区间设定为 $[0.001, 0.1]$ (标么值)。

图 3 为对 IEEE-RTS79 系统进行运行风险评估所得到的系统下一天的风险 (I_{EID}) 曲线, 为便于分析, 图 3 还给出了可接受风险的上下限。由图 3 可知, 在 3 小时~6 小时和 9 小时~23 小时, 系统风险指标越过了可接受区间的上、下限, 需要调整电价、控制系统风险。

以第 21 小时为例, 该时段系统失负荷期望 I_{EID} 为 0.3308, 比可接受区间上限 I_{EID}^+ 高出 0.2308, 因此应该适当提高电价, 以刺激用户降低或转移负荷。

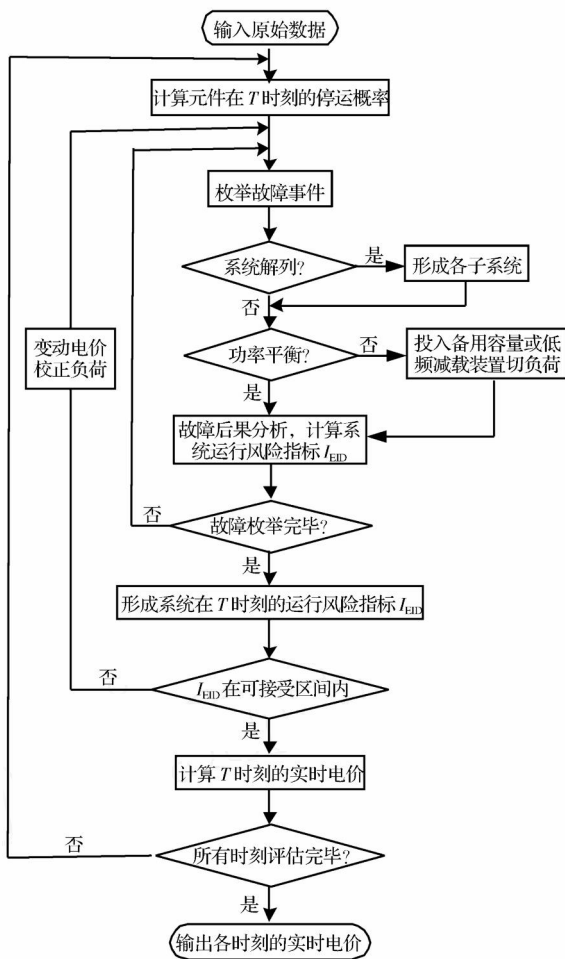


图 2 实时电价计算流程图

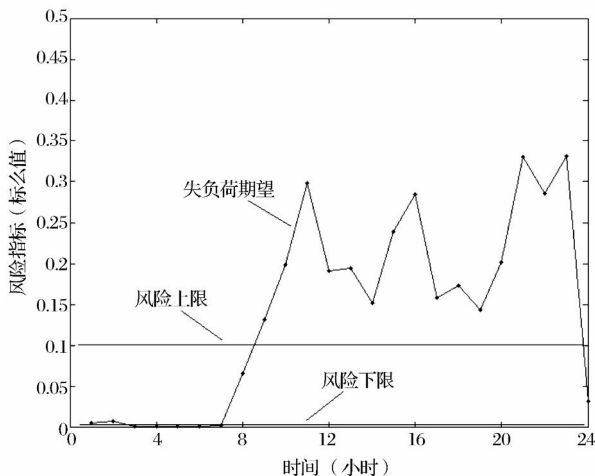


图 3 IEEE-RTS79 系统失负荷期望曲线

选取一个较小的电价变化量 Δf (本例为 0.01 元), 利用式(4)、式(5) 计算出用户对电价变动的反应程度, 求得第一次校正后的负荷 PL' ; 然后采用运行风险评估程序计算此负荷下系统的风险指标 I_{EID} , 比较 I_{EID} 与系统可接受风险区间的上限值 I_{EID}^+ 。如果

I_{EID} 超过了 I_{EID}^+ , 则增大电价变化量 $\Delta f(t)$ 。重复上述步骤, 对负荷继续进行校正, 一直到计算出的系统风险值 I'_{EID} 达到可接受的水平为止。当计算出电价最终变化量 $\Delta f(t)$ 后, 就可根据式(6)求得第 21 小时的实时电价, 为 0.55 元。本时段实时电价的计算结果见表 1。

表 1 第 21 小时电价的计算结果

实时电价 (元)	电价变化量 Δf (元)	负荷变化量 ΔPL (兆瓦)	失负荷期望 I_{EID}	是否 越限
0.51	0	0	0.3308	是
0.52	+0.01	-53.11	0.2186	是
0.53	+0.02	-106.21	0.1687	是
0.54	+0.03	-159.32	0.1207	是
0.55	+0.04	-212.42	0.0872	否

同理, 可计算出其他越限时段的实时电价。图 4 绘出了电价校正前后的电价变化曲线; 图 5 绘出了电价校正前后电力系统的运行风险曲线。由图 5 可知, 通过调节实时电价, 可以将电力系统的运行风险水平很好地控制在一个可接受的范围内。

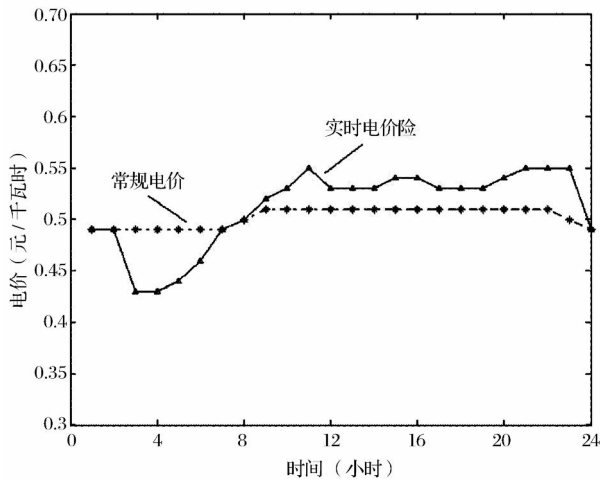


图 4 电价校正前后的变化曲线

4 结论

影响某一时刻电力系统运行风险的因素有很多, 如网络结构、负荷水平及分布、备用容量、调度策略等。从可操作性方面考虑, 实时电价是比较合适的调控对象。为了弥补传统电价管理方法的不足, 反映电价对系统可靠性水平的影响, 本文在电力系统运行风险管理中引入实时电价因素, 并指出不能用传统可靠性评估结果来校正实时电价, 而必须采用周期较短的运行风险评估值来校正电价。对 IEEE-RTS 测试系统的可靠性的计算分析结果表明, 在电力系统运行风险管理中引入实时电价因素, 通过调整电价可以有效地引导电力用户采取合理的

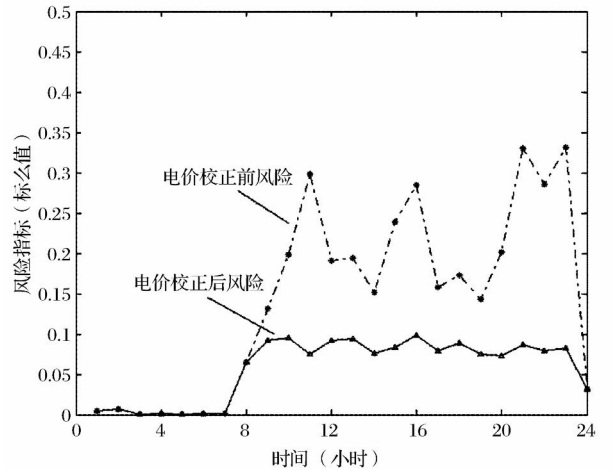


图 5 电价校正前后的电力系统运行风险曲线
用电结构和方式, 从而增强电力系统运行的可靠性。

参考文献

[1] HIRST E. Reliability benefits of price-responsive demand [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 11: 16-21.

[2] 汤玉东, 王明飞, 吴军基, 等. 基于 DSM 的分时电价研究 [J]. 电力需求侧管理, 2000, 2(3): 14-16.

[3] 丁宁, 吴军基, 邹云. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 9-12.

[4] 曾鸣, 孙昕, 赵庆波, 等. 上网侧与销售侧峰谷分时电价联动与整体优化的方法及实证分析 [J]. 电力需求侧管理, 2003, 5(4): 9-13.

[5] 刘严, 谭忠富, 乞建勋. 峰谷分时电价设计的优化模型 [J]. 中国管理科学, 2005, 13(5): 87-92.

[6] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 10-14.

[7] 李生虎, 丁明. 电力市场中基于电价弹性的电力系统运行可靠性的协调控制 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 34-40.

[8] 王成亮, 赵渊, 周家启, 等. 基于日发电计划的电力系统运行风险概率评估 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 6-10.

[9] R·别林登, R·N·阿伦. 工程系统可靠性评估原理和方法 [M]. 周家启, 任震, 译. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1988: 260-263.

[10] NI M, MCCALLEY J D, VITTAL V, et al. On-line risk-based security assessment [J]. IEEE Transaction On Power Systems, 2003, 18(1): 258-265.

[11] NI M, MCCALLEY J D, VITTAL V, et al. Software implementation of online risk-based security assessment [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2003, 18(3): 1165-1172.

[12] 冯永青, 吴文传, 孙宏斌, 等. 现代能量控制中心的运行风险评估研究初探 [J]. 电机工程学报, 2005, 25(13): 73-79.

[13] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test

- system[J]. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6):2047-2054.
- [14] WANG S J, SHAHIDEHPOUR S M, KIRSCHEN D S, et al. Short-term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3):1294-1301.
- [15] WANG C, SHAHIDEHPOUR S M. Effects of ramp-rate limits on unit commitment and economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3):1341-1349.

A New Strategy for Operation Risk Management of Power System Considering Spot Price in Electricity Market

Lai Jiadong¹, Yang Xiutai¹, Wang Chengliang², Xiong Xiaofu³

- (1. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. Guizhou Electric Power Dispatching and Communication Bureau, Guiyang 550002, China;
3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Considering the reaction of customers in electricity market to spot price, a new strategy of operation risk management of power system is proposed. On the basis of operation risk evaluation of power system, the spot price of electricity can be adjusted based on this strategy. Through taking electricity price as the signal, stimulating consumers to adopt rational consumption structure and mode and enhancing the reliability of system operation can be implemented. The proposed strategy remedies the deficiency in conventional electricity price management rather than overthrows it, and there exists the splicing between these two methods. Finally, the effectiveness of the proposed strategy is verified through testing the reliability of IEEE-RTS79 system.

Key words: electricity price management; operation risk; spot price; reliability

(上接第 55 页)

参考文献

- [1] MARKUSON J R, SVENSSON E O. Trade in goods and factor with international differences in technology[J]. International Economic Review, 1984, 26(1):175-192.
- [2] BHAGWATI J N, BRECHER R A, DINOPOULOS E, et al. Quid pro quo foreign investment and welfare: a political economy theoretical model[J]. Journal of Development Economics, 1987(27):127-138.
- [3] 王洪庆, 朱荣林. 外商直接投资对我国出口商品结构优化[J]. 世界经济研究, 2005(5):4-7.
- [4] 夏虹. 外商直接投资与我国出口商品结构的优化[J]. 银行家, 1999(11):45-46.
- [5] 刘舜佳. 外商直接投资与我国出口商品结构优化[J]. 财经科学, 2004(2):78-81.
- [6] 沈克华. 外商直接投资与我国出口总量及结构、基础设施投入的相关关系分析[J]. 国际贸易问题, 2003(7):38-42.
- [7] 龚艳萍, 周维. 我国出口贸易结构与外国直接投资的相关分析[J]. 国际贸易问题, 2005(9):5-9.

Analysis on FDI's Optimization Effect on Foreign Trade Structure of Zhejiang Province

Gu Guoda, Yu Kaijiang

(College of Economics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Through analyzing the changes of the proportion of primary products against manufactured goods, the proportion of general trade value against processing trade value, the inter-industry trade index, the market concentration index and the structure of foreign trade enterprise, this paper reveals how FDI affects the structure of foreign trade commodity, the structure of foreign trade manner, the structure of foreign trade mode, the structure of foreign trade market and the main body structure of foreign trade of Zhejiang province. Taking the structure of foreign trade commodity as the example, it analyzes the FDI's optimization effect on the foreign trade structure of Zhejiang by the section time series model. The empirical results indicates that FDI really optimizes the foreign trade structure of Zhejiang, but such optimization effects on different industries are different. Concretely speaking, the optimization effect on the electromechanical industry is the greatest, and those on the high-tech industry, the apparel industry and the textile industry is less, and that on the primary industry is the least.

Key words: FDI; foreign trade structure; optimization effect; section time series model