

电力市场下实时阻塞管理研究

张涛¹, 王琪¹, 司春旺², 靳力¹

(1. 东北电力科学研究院系统所, 辽宁 沈阳 110006; 2. 山西长治供电分公司, 山西 长治 046011)

摘要: 提出了实时电力市场中基于调整报价的计及可中断负荷的阻塞管理模型, 该模型将电力市场下的实时阻塞管理问题描述为调整费用最小的非线性规划问题, 其特点是方法简单可靠。可中断负荷的引入, 增加了一种处理实时紧急情况的手段, 使实时阻塞管理更加灵活。采用该模型对 IEEE30 节点系统进行阻塞管理仿真计算, 并与未考虑可中断负荷阻塞管理模型的计算结果进行比较分析。结果表明所提出的模型在消除网络阻塞的同时可以大大减小调整费用并确保电力系统安全稳定运行。

关键词: 实时电力市场; 阻塞管理; 可中断负荷; 优化潮流

Study on real-time congestion management in power market

ZHANG Tao¹, WANG Qi¹, SI Chun-wang², JIN Li¹

(1. Northeast Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China;

2. Shanxi Changzhi Power Supply Branch, Changzhi 046011, China)

Abstract: A power pool transaction mode based on real-time congestion management model is proposed, in which the congestion management based on the market participants' adjusting biddings is described as an algebraic nonlinear programming. The feature of the proposed model is both simple and stable. The proposed model is applied to simulate congestion management by use of typical IEEE 30-node test system and the simulation results are compared with the calculation results from a static congestion management model. Comparison result proves that the proposed model can ensure the secure and stable operation of power system while the network congestion is eliminated and the cost minimized.

Key words: real-time power market; congestion management; interruptible loads; optimal power flow

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)08-0050-05

0 引言

随着输电网开放以及跨区电能交易的日益增多, 输电阻塞问题将日益严重。输电系统阻塞的原因有两个: 一是输电线的热容量限制, 二是系统的稳定性限制。系统输送容量的限制将带来两方面的影响: 首先它使系统的安全性和稳定性受到威胁; 同时它使电能交易计划无法实现, 影响资源的优化配置和利用, 还可能导致市场力的滥用, 引起电价

的扭曲。阻塞管理的目标是制定一系列规则, 有效地控制发电机和负荷, 使系统的短期运行具有一定的安全和可靠性裕度, 同时为系统的长期投资规划提供有效信息。从短期讲, 阻塞管理是一个交易计划调整策略的制定问题。通常的措施为发电量的转移, 其思想是在安全范围内寻找与原市场交易计划尽量

接近的工作点。因此需要制定公平的交易计划削减和调整准则, 从而实现电力系统的最优安全经济调度, 保证系统安全可靠运行; 从长期讲, 阻塞管理应该通过价格信号为系统的长期健康发展提供激励^[1,2]。

由于电力商品必须实时平衡的特点, 完全双边交易模式的电力市场通常都与其他交易模式相配合, 因此联营体和双边交易混合模式是目前几乎所有电力市场采用的交易模式。在这种混合模式下, 既存在发电商和用户之间的双边长期供电合同, 同时也设立日前(Day-Ahead)和时前(Hour-Ahead)联营体模式现货投标市场。为保证系统的安全、频率和负荷平衡, 还设立了实时平衡市场(Real-time Balancing Market)^[3]。

实时平衡市场的建立是由电力的生产和消费必须实时平衡这一特性决定的。世界各国电力市场

大多建立了实时平衡市场,并取得了成功的运营经验^[4]。对于我国的电力市场改革,建立实时市场也是必然的趋势。快速、有效的阻塞管理算法是实时平衡市场成功消除阻塞的关键。作为电力市场下的独立的经济实体,负荷参与阻塞管理已经受到国内外许多学者的重视。文献[5]提出了在阻塞管理中考虑负荷弹性的作用。电力市场下可中断负荷管理利用用户的用电灵活性,在系统负荷高峰时实时电价较高的情况下,中断部分负荷容量,并给予一定的补偿,避免了传统模式下盲目切负荷的弊端,文献[6]提出了一种优化潮流与可中断负荷相结合的阻塞管理模式的综合调度方法。本文在现有理论的基础上,提出了利用可中断负荷进行实时阻塞管理的方法,根据可中断负荷管理的特点,令参与可中断负荷的用户参与辅助备用市场^[7],并将可中断负荷应用于实时电力市场阻塞管理当中,提出基于调整报价和优化潮流的数学模型。在实时运行时,灵活地调度可中断负荷,使系统能够可靠、经济地运行。IEEE30节点算例分析表明,电力市场环境该模型解决实时阻塞是可行的,也是较优的。

1 辅助服务及可中断负荷管理

辅助服务 AS (Ancillary Service)是指为了完成输电的主要功能,即将电能从发电厂输送到用户并保证其安全和质量,所需采取的必要的辅助措施^[8,9]。换言之,在输电过程中,为保证电能安全和质量所采取的一切辅助措施都属于辅助服务范畴。

电力市场中的辅助服务可以分为基本辅助服务和有偿辅助服务两大类。由电力市场运营管理机构在并网协议和市场中明确各发电公司所拥有的发电机组必须具备的最低技术性能要求,即为基本辅助服务功能。基本辅助服务包括以下服务措施:

- (1)根据电网结构,保证无功要求在合理范围之内;
- (2)提供保持频率、电压和系统稳定的实时控制装置;
- (3)具有在低频时中断负荷的设备;
- (4)具有可从系统中断开故障发电机组的保护设备。

在实时运行中,由市场运营管理机构根据电力系统安全需要,必须购买的辅助服务,称为有偿辅助服务。不同国家(地区)电力市场有不同的辅助服务需求,辅助服务的分类取决于电力市场的结构和模式,目前尚不能对其进行统一和确定标准。发电辅助服务一般包括:有功频率控制(AGC),旋转

备用,非旋转备用,替代备用,无功及电压支持和黑启动。在许多国家电力市场运营中把可中断负荷引入到了二级备用辅助服务市场^[7]。

可中断负荷的研究主要集中在可中断负荷合同模型和市场运营方法上。为实施可中断负荷管理,用户需要和电力公司签订相应合同,就如何以及何时中断他们的负荷达成一致^[10]。

可中断负荷的运营方法主要有两种方法:一种是通过双边协商直接签订可中断负荷合同,在合同中明确规定了中断负荷的价格,ISO可以随时调用可中断负荷,并给以用户补偿。一种是参与报价的,即可中断负荷参与市场(备用辅助服务市场)的投标,结算价格可采用按投标价格结算或按统一的市场出清价格结算。

根据本文需要提出一种可中断负荷参与市场流程如图1。

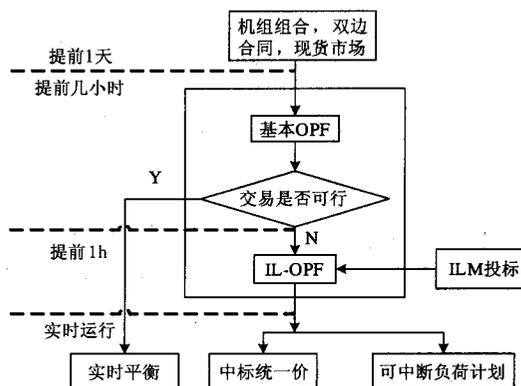


图1 IL市场运作流程

Fig.1 Flow chart of IL market operation

2 计及可中断负荷的实时阻塞管理

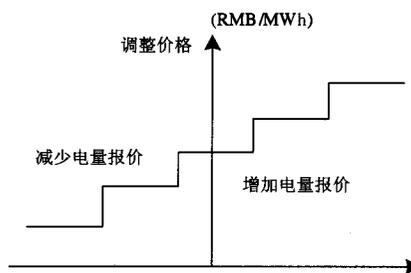


图2 机组调整报价曲线

Fig.2 Generator adjusting bidding curve

根据交易模式和交易时段的不同,电力市场可分为远期市场、现货市场和实时市场。实时市场交易的作用有:①作为长期合同和现货交易的补充,具有一定的电能交易功能;②提高市场竞争的程度,

活跃市场；③缩短响应功率不平衡的调度时间，提高电力系统运行的可靠性。在基于联营体交易的实时电力市场中，各电厂的运行机组需要向ISO提交调整报价曲线，该曲线包括申请增加出力和申请减少出力两部分，如图2所示。

参与备用辅助服务市场的可中断负荷报价函数与图2所示机组调整报价类似。

2.1 目标函数

在实时电力市场中，当ISO检测到线路发生阻塞或运行点越出系统安全域时，其在线计算机系统将计算输出发电机组出力的调整量以消除阻塞和保证系统的安全运行。这里引入可中断负荷参与实时调整，与发电机组的出力调整一起集中优化，建立实时电力市场下基于调整报价考虑可中断负荷的阻塞管理数学模型。实时阻塞管理的目标是以最小的成本消除阻塞，这里以调整费用最小为目标：

$$\min(\sum_{i=1}^N |\Delta p_{gi}| \cdot C_i(\Delta p_{gi}) + \sum_{j=1}^M |\Delta p_{dj}| \cdot D_j(\Delta p_{dj}))$$

式中： Δp_{gi} 为机组*i*的出力调整； $C_i(\Delta p_{gi})$ 为出力调整为 Δp_{gi} 时对应的调整报价；*N*为参与出力调整的机组总数； Δp_{dj} 为可中断负荷调整量； $D_j(\Delta p_{dj})$ 为对应的中断补偿；*M*为参与可中断负荷管理并在辅助服务市场竞标成功的用户个数。

2.2 约束条件

功率平衡约束

$$\begin{cases} \hat{p}_{gi} - \hat{p}_{di} - V_i \sum_{j \in Ni} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{gi} - Q_{di} - V_i \sum_{j \in Ni} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases}$$

发电机有功无功出力约束

$$\begin{cases} p_{gi \min} \leq \hat{p}_{gi} \leq p_{gi \max} \\ Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max} \end{cases}$$

负荷调节范围约束

$$\Delta p_{dj \min} \leq \Delta p_{dj} \leq \Delta p_{dj \max}$$

节点电压约束

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}$$

线路潮流约束

$$I_{k \min} \leq I_k \leq I_{k \max}$$

其中： $\hat{p}_{gi} = p_{gi} + \Delta p_{gi}$ 为节点*i*调整后的发电机组出力； $\hat{p}_{dj} = p_{dj} + \Delta p_{dj}$ 为节点*j*调整后的负荷需求； Q_{gi} 、 Q_{di} 分别为节点*i*的发电机无功出力和无功负荷； V_i 、 V_j 为节点*i*、*j*的电压幅值； θ_{ij} 为节点*i*、*j*的电压相角差； G_{ij} 、 B_{ij} 和是节点导纳矩阵的相应元素； I_k 为线路*k*的电流。

3 算例分析

IEEE30节点系统数据来自美国康奈尔大学MATPOWER软件^[14]。系统如图3所示：

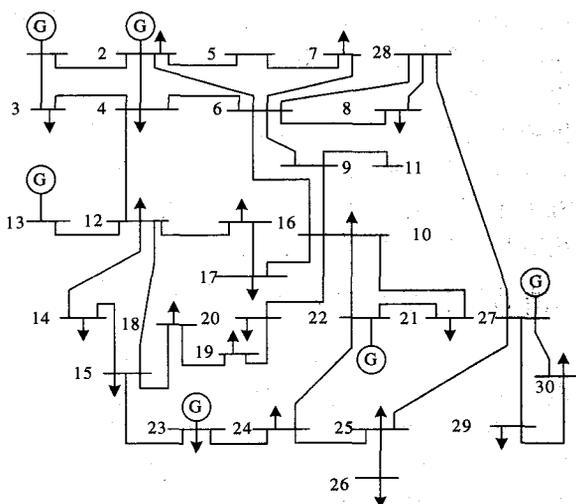


图3 IEEE30节点系统图

Fig.3 IEEE30-bus system

为进行算法验证做如下假设：实时平衡市场前一运行时段按照日前市场确定的交易计划运行，总有功负荷189.2 MW，在下一个时段中，由于发生某些情况导致系统发生输电阻塞。假设参与实时平衡市场的机组为5台，除1号参考节点。发电机组的报价形式为调整报价。各发电机组初始出力、调整报价（经简化）如表2。

表2 发电机有功输出和调整报价

Tab.2 Generator power outputs and adjusting bid

节点号	初始出力 /MW	上调出力价格 /元(MW·h) ⁻¹	下调出力价格 /元(MW·h) ⁻¹
1	25.97	330	258
2	60.97	330	258
22	21.59	300	278
27	26.91	330	270
23	19.2	300	258
13	37.00	330	278

按照市场规则,提供可中断负荷的用户参与备用辅助服务市场竞价,通过竞标得到满足系统备用容量的各负荷节点的削减量及其单位报价交易价格。因为进入市场的可中断负荷容量相当于系统的备用容量,并且参与备用辅助服务市场,其价格的确定与该市场备用辅助服务的价格有关,这里取略高于辅助服务或略高于实时平衡市场中容量的调整报价,中断补偿费用见表3。假设参与可中断负荷管理的用户通过报价取得二级备用辅助服务市场调节容量的用户为6个,可中断负荷备用总可调节容量为13 MW。由于负荷削减不能连续控制,这里假设采用以1 MW为最小削减步长进行计算,节点、可中断容量和相应报价见表3。

表3 可中断负荷及其调整报价

Tab.3 Interruptible load and adjusting bid

负荷节点号	可中断容量/MW	补偿费用/元(MW·h) ¹
2	2	340
4	3	360
7	1	356
8	2	300
10	3	369
17	2	400

电力市场下,发电机初始出力按日前市场确定的运行方式计算,超短期负荷预测确定下一时段负荷水平。进行潮流计算校验下一时段系统潮流情况,结果显示线路6-8潮流为:24.82 MW。而线路6-8潮流限值23 MW,越限量为1.82 MW,超过允许值的7.9%,运行优化潮流程序,结果见表4。

表4 发电机有功出力和调整成本比较

Tab.4 Comparison of the power output and adjusting cost

节点号	初始出力	发电机调整	可中断负荷参与
1	25.97	13.96	23.15
2	60.97	60.23	60.97
22	21.59	21.09	21.62
27	26.91	40.76	27.57
23	19.2	18.88	19.24
13	37.00	36.72	36.99
6-8潮流/MW	24.82	22.94	22.99
调整费用/元		5058.4	839.93

优化结果显示:当只有发电机组参与阻塞调度时,其调整费用为5058.4元。当可中断负荷参与阻塞调度时,调整发电机出力同时中断8号节点负荷2 MW,阻塞管理费用最小,其调整费用为:839.93元。

参与实时平衡市场的成员具有过强的市场力,会

形成过高的平衡电价,可中断负荷的引入可以大大减少市场成员的市场力,当可中断负荷补偿价格合理的情况下,此种模型能够大大的减少实时阻塞费用。

可中断负荷参与实时市场阻塞管理时,不仅可以大大减少调整费用,能够保证电力市场的经济运行。当系统发生某些特殊情况使交易计划不能执行并且调节发电机容量不够或备用辅助服务容量不足的情况下也可以通过调节可中断负荷来保证电力系统安全稳定运行。

可中断负荷参与阻塞管理具有一定的灵活性。本文提出的基于优化潮流的阻塞模型具有一定的优点,将调节手段集中优化,能够提高系统运行的可靠性和经济性。电力是国民经济发展的基础工业,它的宗旨就是要尽可能的满足用户的需求,调度员应用可中断负荷参与阻塞管理时应按照一定规则中断用户负荷。一般可以考虑以下几个方面:

(1) 实时市场调节容量不足的情况下,靠调整发电机已经不能满足系统阻塞管理的要求。

(2) 实时市场调节费用超过某个设定的允许值。

(3) 系统出现某紧急情况要求部分负荷中断。

4 结论

本文对应用可中断负荷管理进行电力系统实时阻塞管理的问题进行了研究,可中断负荷的引入使ISO有了一种解决实时阻塞的新手段,通过有针对性地削减部分节点的可中断负荷可以避免系统出现更大的问题。研究结果表明本文提出的计及可中断负荷的实时阻塞管理模型能够消除系统输电阻塞,并大大减小实时阻塞费用。在此基础上提出了可中断负荷参与实时阻塞管理的几个应该考虑的问题,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 张永平,焦连伟,陈寿孙,等. 电力市场阻塞管理综述[J]. 电网技术, 2003,27(8):1-9.
ZHANG Yong-ping, JIAO Lian-wei, CHEN Shou-sun, et al. A Survey of Transmission Congestion Management in Electricity Markets[J]. Power System Technology, 2003, 27(8):1-9.
- [2] 张永平,童小娇,倪以信,等. 实时电力市场阻塞管理算法的研究[J]. 电网技术, 2004,28(15):6-10.
ZHANG Yong-ping, TONG Xiao-jiao, NI Yi-xin, et al. A Novel Optimization Method for Real-time Congestion Management[J]. Power System Technology, 2004, 28(15):6-10.

- [3] 叶鹏, 宋家骅. 基于不同交易阶段的电力市场阻塞管理方法研究[J]. 中国电力, 2003,36(6): 27-30.
YE Peng, SONG Jia-hua. A Congestion Management Framework Based on Different Power Trade Stage[J]. Electric Power, 2003,36(6):27-30.
- [4] 王永福, 张伯明, 孙宏斌. 实时电力市场运营模式[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(11):1-4.
WANG Yong-fu, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. Spot Market Operation Modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26(11):1-4.
- [5] 鲁丽娟, 侯云鹤, 吴耀武, 等. 计及用户需求弹性影响的输电阻塞解决方案研究[J]. 电网技术, 2004,28(5): 46-49.
LU Li-juan, HOU Yun-he, WU Yao-wu, et al. A Research on Transmission Congestion Management Considering Influence of Consumers' Demand Elasticity[J]. Power System Technology, 2004,28(5):46-49.
- [6] 刘昌, 姚建刚, 余虎, 等. 一种新型的电网输电阻塞管理模式[J]. 电网技术, 2005,29(12):16-21.
LIU Chang, YAO Jian-gang, YU Hu, et al. Research of A New Congestion Management Mode[J]. Power System Technology, 2005,29(12):16-21.
- [7] 孙昕, 董明光, 赵庆波, 等. 二级备用辅助服务市场中可中断负荷管理模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):30-33.
SUN Xin, TONG Ming-guang, ZHAO Qing-bo, et al. A Study on Management Model of Secondary Reserve for Auxillary Services Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(3):30-33.
- [8] 曾鸣, 刘万福, 张毅, 等. 满足电网安全运营约束的辅助服务交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 82-87.
ZENG Ming, LIU Wan-fu, ZHANG Yi, et al. Study on Auxillary Service Trade Model with Grid Operation Constrained[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(5): 82-87.
- [9] 丁军威, 沈瑜, 康重庆, 等. 备用辅助服务市场的组织与交易决策[J]. 电力系统自动化. 2003,27(2):29-32.
DING Jun-wei, SHEN Yu, KANG Chong-qing, et al. Organization and Trading Decision of Reserve Service Market for Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(2):29-32.
- [10] 王建学, 王锡凡, 张显, 等. 电力市场和过度期电力系统可中断负荷管理(二)——可中断负荷运营[J]. 电力系统自动化设备, 2004,24(6):1-5.
WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, ZHANG Xian, et al. Interruptible Load Management in Power Market and Interim System—Part 2 Operation of Interruptible Load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(6):1-5.
- [11] Dounda H. Overview of California ISO summer 2000 demand response programs[A]. In: Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting[C]. Ohio (USA): 2001. 228-223.
- [12] New York Independent System Operator, NYISO Auxillary Services Manual, 1999 [EB/OL]. <http://www.nyiso.com>, 2002-09-15.
- [13] CHEN C S, LEU J T. Interruptible Load Control for Taiwan Power Company[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2):460-465.
- [14] Matpower. A Matlab Power System Simulation Package, Version 3.0b3[Z]. Power Systems Engineering Research Center, School of Electrical Engineering. NY: Cornell University.

收稿日期: 2007-09-24; 修回日期: 2007-12-06

作者简介:

张涛(1981-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析, 电力市场; E-mail: ztcolonel@hotmail.com

王琪(1955-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

司春旺(1980-), 男, 硕士, 研究方向为配电网自动化与小电流接地系统故障选线。

(上接第 49 页 continued from page 49)

- [10] Patel H S, Hoft R G. Generalized Technique of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverter: Part 1[J]. IEEE-IA, Harmonic Elimination, 1973, 9(3): 310-317.
- [11] LI Zhi-dian, ZHOU Qin-ying, LI Hong, et al. A Novel Algorithm for Real-time Solution of Nonlinear Surmount SHET Equations[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(1): 37-40.
- [12] 张文义, 杨乐民, 佟为明, 等. 特定消谐式变频器的研究[J]. 电力电子技术, 2002, 36(4): 53-56.
ZHANG Wen-yi, YANG Le-min, TONG Wei-ming, et al.

Study of Selective Harmonic Elimination Inverter[J]. Power Electronics, 2002,36(4):53-56.

收稿日期: 2007-08-28; 修回日期: 2007-11-26

作者简介:

王建元(1971-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: free1971@163.com

于洪洋(1982-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

孙澄宇(1974-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用。