

LMP 机制下可中断负荷用于阻塞管理的最优调度方法

李才华¹, 杜松怀², 陈志文³, 苏娟², 黄振伟², 叶华¹(1. 济宁高新区管委会, 山东 济宁 272023; 2. 中国农业大学信电学院, 北京 100083;
3. 南宁供电局调度所, 广西 南宁 530031)

摘要: 节点边际价格 LMP (Locational Marginal Price) 在解决交易的公平性和电网阻塞方面具有很大的优势, 它从时间和空间两个层面反映电力系统的运行成本。可中断负荷作为需求侧管理的重要手段, 可以有效地缓解阻塞。文中对发电出力再调度和可中断负荷量进行了均衡分析, 提出了 LMP 机制下可中断负荷用于阻塞管理的最优调度原则。验证了可中断负荷在降低节点电价、增加社会效益以及解决阻塞方面的优势。文中采用 IEEE30 节点系统进行仿真, 证明了该理论的正确性和合理性。

关键词: 节点边际价格; 可中断负荷; 阻塞管理; 最优潮流; 需求侧管理; 社会效益

The optimal interruptible load dispatching principle based on LMP in congestion management

LI Cai-hua¹, DU Song-huai², CHEN Zhi-wen³, SU Juan², HUANG Zhen-wei², YE Hua²

(1. Jining New Hi-tech Industrial Park, Jining 272023, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Nanning Power Supply Bureau Control Center, Nanning 530031, China)

Abstract: LMP has many advantages in settlement of fair trade and transmission congestion management, it can reflect the actual electricity supply cost in space and time scale. Interruptible load is an important tool in demand side management, it also can be employed for congestion management. The paper makes the equilibrium analysis between the redispatching and the interruptible amount of the load. The optimal interruptible load dispatching principle based on LMP in congestion management is put forward. It also proves that the interruptible load has advantages in reducing LMP, increasing social benefit and settling transmission congestion. The IEEE 30-bus system is used to illustrate the validity and rationality of the theory.

Key words: locational marginal price; interruptible load; congestion managements; optimal power flow; demand side management; social benefit

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)04-0067-05

0 引言

电力市场环境下, 输电网络的阻塞问题正变得越来越严重, 输电网和发电厂是独立的各具经济利益的实体, 负责系统运行的运营商必须平等对待各个市场成员, 在社会效益最大化或购电成本最小化等目标下寻求合理的阻塞管理方法, 并准确计算阻塞成本, 为网络规划提供经济信号, 促进系统在长期内稳定、健康地发展, 同时应将阻塞成本分摊至引起阻塞的市场参与者, 为系统短期运行提供激励^[1]。

LMP 机制在解决交易的公平性和电网阻塞方面具有很大的优势。用户面对较高的实时电价, 会理智消费从而减轻网络的阻塞。节点边际价格的基

础是安全约束经济调度, 安全约束经济调度能够综合考虑系统的经济性和安全性, 节点边际价格机制则从时间和空间两个层面反映电力系统的运行成本^[2]。节点边际价格中隐含了阻塞相关的费用, 可以为阻塞费用的分配提供依据。

阻塞发生时, 最直接的方法就是进行发电机出力的重新调度, 阻塞严重时该方法会造成节点边际价格的飞升。当然也可以采用修建新的线路或建设新的电厂^[3], 但是这些方法显然受到时间和空间等诸多方面的限制。需求侧管理中的可中断负荷也可以作为阻塞管理的一种有效手段^[4], 而且采用可中断负荷管理以后系统的总运行成本有着明显的降低, 无疑对于阻塞管理提供了新的思路。文献[5]建

立了优化潮流框架下可中断负荷的调度模型。文献[6]对系统边际成本和可中断电价进行了理论上的均衡分析,给出了一些思路,但没做实际应用的拓展,没体现可中断负荷的实际价值。

本文将从 LMP 的基本原理出发,把可中断负荷的应用拓展到阻塞管理领域。算例中采用 pool 模式,选用需求侧管理中的可中断负荷作为阻塞管理的工具,和传统的发电出力再调度的方法进行比较,站在 ISO 的角度上给出可中断负荷用于阻塞管理的最优调度方法。IEEE30 节点系统的仿真分析证明了该理论和应用方法的合理性。

1 节点边际价格的经济意义

在 PJM 电力市场中,节点边际价格的基础是安全约束经济调度^[7]。在日前现货市场中,交易中心基于市场成员的报价以及系统的安全和输电容量等约束条件,利用安全约束经济调度程序出清系统次日每个时段的调度计划,并计算出各时段不同母线的 LMP^[7]。LMP 是在某个特定节点提供单位电能的增量引起的边际成本,可以被视为节点注入对总的生产费用的微增,它考虑了发电边际成本和输电的网络约束^[6]。

节点边际价格尽量精确地反应系统运行的边际成本,可以作为发电机付费和对用户收费的实时价格。节点边际价格中隐含的包括了阻塞费用,当阻塞发生时,造成节点边际价格的上升,用户将面临一定的价格风险,此时,用户有可能放弃部分负荷,从而可以减轻线路阻塞。边际价格中隐含的阻塞费用促使发电厂自觉调整自己的报价,一定程度也起到缓解阻塞的作用。节点边际价格也可以用来指导电力系统的长期资源优化,发电容量短缺,会造成出清价格的上涨,从而投资电源建设可以获取利润。由于阻塞线路可用传输容量的不足造成的节点边际电价偏高,可以促使新建新的线路。

当然,节点边际价格也不是万能的,必须制定与之相配套的运营规则才能更好的服务于电力系统的长期和短期的优化。

2 可中断负荷用于阻塞管理的模式

本文不考虑可中断负荷的定价问题,所有的探讨基于中断补偿电价确定的情况。由系统运营商和用户签订合同,合同约定最大可中断容量和中断补偿电价。

2.1 可中断负荷用于阻塞管理的数学模型

交易的目标函数应该是社会效益的最大化:

$$\max f = B(P_D) - G(P_G)$$

式中: f 为目标函数, P_D 为节点有功负荷矢量; P_G 为节点有功发电矢量; B 为用户的总收益函数; G 为电厂的总报价函数。

目前大多数电力市场仅开放了发电竞争,即前面单一购买模式,即发电商通过竞价发电,而负荷侧不参与竞价,认为其没有弹性,用户的收益可以看作一个常量,此时社会效益最大化可以表现为购电成本最小或发电成本最小^[8]:

$$\min f = G(P_G)$$

优化问题还要考虑等式约束和不等式约束,等式约束为计及网损的母线注入功率平衡约束:

$$P_G - P_D + P(U, \theta) = 0$$

$$Q_G - Q_D + Q(U, \theta) = 0$$

不等式约束:

$$P_{G\min} \leq P_G \leq P_{G\max}$$

$$Q_{G\min} \leq Q_G \leq Q_{G\max}$$

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$$

$$|L| \leq L_{\max}$$

其中: Q_D 为节点无功负荷矢量; Q_G 为节点无功发电矢量; U 为节点电压矢量; $P_{G\min}$, $P_{G\max}$ 分别为有功发电上下限值矢量; $Q_{G\min}$, $Q_{G\max}$ 分别为无功发电上下限值矢量, U_{\min} , U_{\max} 分别为电压上下限值矢量; L 为支路潮流矢量; L_{\max} 为支路潮流限值矢量。 $P(U, \theta)$, $Q(U, \theta)$ 表示同母线相连线路的有功潮流、无功潮流方程;

对于本文中的模型,求解上述非线性规划,构造考虑等式和不等式的拉格朗日函数,由库恩-塔克(Kuhn-Tucker)条件知^[9]:

$$\partial f / \partial P = \lambda_p, \quad \partial f / \partial Q = \lambda_q$$

其中: P 为节点有功功率矢量, Q 为节点无功功率矢量, λ_p 为节点有功边际价格矢量, λ_q 为节点无功边际价格矢量。

上述 OPF 模型中 λ_p 、 λ_q 对应于节点注入功率的影子价格,与节点有功、无功边际价格有相同的经济学含义^[10],可以作为对发电机付费和对用户收费的依据,其包含电力系统运行中所有的经济信息,可以被分为两项:一项对应于系统边际成本和网损;另一项对应于阻塞约束的灵敏度和约束影子价格的乘积。

考虑可中断负荷时, 交易的目标函数变为:

$$\min f = G(P_G) + \rho \Delta p_d$$

增加约束条件:

$$\Delta p_d \leq \Delta p_{dmax}$$

其中: $G(P_G)$ 对应于中断后系统运营成本, ρ 对应于可中断电价矢量, Δp_d 对应于中断容量矢量, Δp_{dmax} 对应于最大可中断容量矢量。

2.2 可中断负荷用于阻塞管理的基本框架^[4]

(1) 系统运营商根据潮流程序结合发电厂报价给出预调度计划, 确定可能发生阻塞的线路。

(2) 根据可中断负荷合同的签订情况, 进行发电出力再调度和可中断负荷的均衡分析, 确定哪条支路适合采用中断负荷的方法消除阻塞, 哪条支路可以用调整发电出力、调用高价电能的方法消除阻塞, 哪条支路可以利用两者的结合, 给出社会效益最大化的调度模式。

2.3 可中断负荷用于阻塞管理的最优调度方法

线路出现阻塞的情路下, 如果采用发电出力再调度, 高价机组逆序开机, 势必造成节点边际价格的急剧上升, 设 i 节点的边际价格为 λ_{pi} , 由节点边际价格的经济意义知: λ_{pi} 为节点注入对总的生产成本的微增, 也就是对负荷供应单位电量, 系统总的运行成本要相应的增加 λ_{pi} 。此时, 如果选用可中断负荷, 系统运行总成本的增加量等于中断补偿费用 ρ_i 。

基于以上理论分析, 给出可中断负荷用于阻塞管理最优调度原则: 当 $\rho_i > \lambda_{pi}$, 选择继续供电比中断负荷, 系统总运行成本的增加量要小, 用户如果不能忍受较高的电价, 他只需要自觉放弃部分负荷, 这正体现了节点边际价格的作用, 此时 ISO 不必补偿给用户任何费用。用户自觉放弃部分负荷后, 用户电价得到降低, 而且阻塞得到一定程度的缓解。当 $\rho_i < \lambda_{pi}$, 中断用户的部分负荷引起的系统总运行成本的增加量显然小于继续供电, ISO 应选择中断用户的部分负荷并付给他们相应的补偿费用。随着中断容量的增加, 用户的电价也在不断的降低。当 $\rho_i = \lambda_{pi}$, ISO 选择继续供电和中断用户负荷的效果一样, 此时的负荷中断量即为最优的负荷中断量, 此时用户的电价得到降低, 系统的运行总成本小于中断前的总成本, 创造了一定的社会效益。

不同的可中断节点的选取, 可以通过比较 λ_{pi} 和 ρ_i 的差值来实现, 在每次迭代计算中比较一次。差值大者为优先中断的负荷节点, 因为中断相同数

量的此节点负荷, 取得的社会效益较大。

3 仿真与分析

采用 IEEE30 标准节点系统, IEEE 标准系统的接线图如图 1 所示, 系统参数取至 MATPOWER。表 1 中参数 a, b 为机组的经济参数; P_{Gmin} 、 P_{Gmax} 为机组出力上、下限。

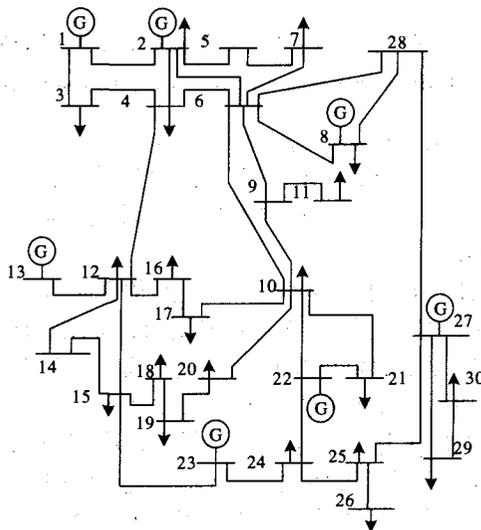


图 1 IEEE30 节点系统图

Fig.1 IEEE30 node system connection

表 1 机组报价参数

Tab.1 Bidding process data

机组	a	b	P_{Gmin}/MW	P_{Gmax}/MW
1	1.66	166	0	80
2	1.4525	145.25	0	80
13	3.652	269.75	0	40
23	51.875	83	0	50
22	7.49	249	0	30
27	7.1875	290.5	0	55

3.1 仿真步骤

(1) 根据发电厂报价情况进行 OPF 计算, 给出预调度计划和节点边际价格 λ_p , 确定可能发生阻塞的线路。

(2) 根据可中断合同的签订情况, 选择中断的节点。对选择的节点负荷进行中断, 设此节点 i 的负荷中断量为 $\Delta p_{di} = 0 + \Delta p_d$;

(3) 进行最优潮流计算, 得出各节点边际电价和系统运行总成本;

(4) 设 $\Delta p_{di} = \Delta p_{di} + \Delta p_d$ 如 $\Delta p_{di} \leq \Delta p_{di,max}$, 则重复 (3) 和 (4), 否则计算结束。

3.2 仿真分析

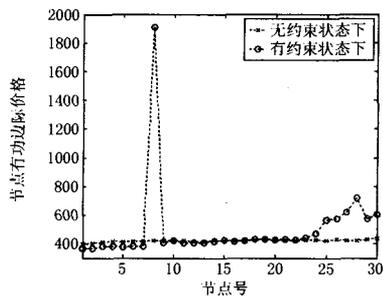


图2 约束、无约束状态下各节点的有功边际价格

Fig.2 LMP of each node with and without constraints

无约束状态下进行 OPF 计算, 节点有功边际价格集中在 400 元/MW 左右, 此时的节点价格差异仅反映发电边际成本和网损分量, 系统的总成本为 55214.64 元/h。

线路存在约束的情况下, 按照仿真步骤 (1) 进行 OPF 计算, 对比各支路潮流限值, 可以发现支路 6-8, 21-22 支路潮流出现越限的情况, 重新进行机组调度以后, 节点边际价格如图 2 所示。由于线路阻塞, 造成 8 号节点电价急剧攀升, 达到 1907.107 元/MW, 出现了价格尖峰。此时的电价高于正常电价数倍, 反映了该节点电能资源的稀缺性。

如果此时仅进行发电出力再调度, 系统的总运行成本为 57250.43 元/h, 同无约束情况下的系统总成本相比增加了 2035.79 元/h, 此数值即为阻塞造成的社会效益损失。下面我们将探讨如何利用可中断负荷将这种效益损失降低到最小。

假设 8 号节点和 26 号节点签有可中断合同, 可中断电价均为 1200 元/MW。由于此时 26 号节点电价低于中断补偿电价, 因此系统运营商不会选择中断 26 号节点的负荷。

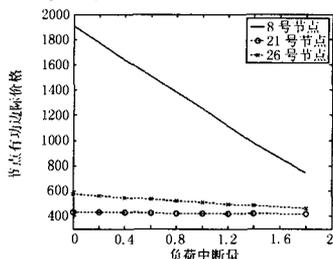


图3 节点边际价格与负荷中断量关系

Fig.3 Relationship of LMP and load shedding

重点考查 8 号节点负荷中断量对节点边际价格和阻塞调度的影响。部分代表性节点的边际价格与负荷中断量之间的关系如图 3 所示。图中可以看出随着负荷中断量的增加, 节点边际价格逐渐降低, 正体现了可中断负荷对边际电价的削减作用。随着负荷中断量的增加, 8 号节点的电价下降最快, 这

是因为 8 号节点为中断选取点, 其对价格削减的影响也最大。当然也可能存在价格反常^[2]的情况, 即中断负荷后, 部分节点电价不降反升。

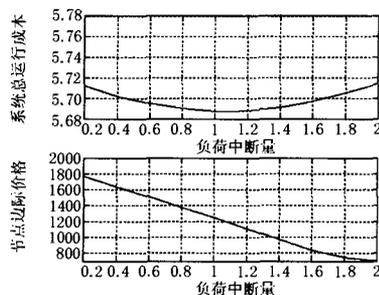


图4 系统总运行成本, 节点边际价格与负荷中断量曲线

Fig.4 Curve of total system cost and LMP with load shedding

从图形 3、4 可以看出线路发生阻塞时, 选用可中断负荷可以有效地降低节点边际价格, 系统总的运行成本随着中断容量的增大, 并不是一直在减小, 而是存在着一个最小值, 即中断量为 1.072 MW 时, 系统总运行成本最小, 此时 8 号节点的边际价格恰好等于中断补偿电价, 此中断量为最优负荷中断量。此时系统的总运行成本为 56872.61 元/h, 而如果仅仅采用发电出力再调度, 系统总的运行成本为 57250.43 元/h。可见, 可中断负荷用于阻塞管理可以创造一定的社会效益。

重点关注中断的过程, 阻塞发生时, 8 号节点有功边际价格达到 1907.107 元/MW, 此时节点有功边际电价大于中断补偿电价, 应选择中断负荷。随着中断容量的增加, 节点电价不断的降低, 系统运行成本也成下降的趋势。随着 8 号节点的价格的下降, 当 8 号节点的电价等于中断补偿电价即 1200 元/MW 时, 继续增加中断容量, 8 号节点的电价还会不断的降低, 但是此时系统的总运行成本不降反升, 由此得到最优的负荷中断量 1.072 MW, 和前面提出的可中断负荷用于阻塞管理的最优调度方法的理论分析完全一致。

3.3 可中断负荷和发电出力调度的均衡分析

为了方便细致分析可中断量和发电再调度选择的过程, 我们给出了预调度后半程的系统运行总成本和电价曲线。

当 8 号节点的负荷中断量达到最优即 1.072 MW 时, 6-8 支路、21-22 支路仍然处于阻塞的状态, 如果此时不选用发电出力调整、调用高价电能的方法而选择继续增大负荷中断量, 8 号节点的电价还会继续降低。中断过程中, 当 8 号节点负荷中断量达到 1.752 MW 时, 21-22 支路阻塞现象得到消除; 当中断量达到 4.451 MW 时, 6-8 支路阻塞也得到消

除, 系统转为无阻塞状态, 但是在此过程中, 系统的总运行成本持续攀升, 如图 5 所示 (假设此过程中 8 号节点负荷中断量没有达到最大限值), 显然选择的调度模式是不经济的。此时最经济的调度模式是按照前面给出的可中断负荷用于阻塞管理的最优调度方法进行电网的调度。

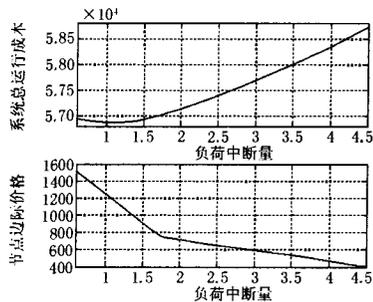


图 5 系统总运行成本, 节点边际价格与负荷中断量曲线

Fig.5 Curve of total system cost and LMP with load shedding

ISO 在选择调度模式的过程中, 应该根据预调度的情况和运行的经验, 确定可能发生阻塞的线路, 选择签订可中断合同的对象, 同时根据预调度结果和可中断负荷的最优调度原则, 在遵守最优阻塞调度原则^[11]的基础上, 确定哪条支路适合采用中断负荷的方法消除阻塞, 哪条支路可以采用调整发电出力的方法消除阻塞, 哪条支路可以利用两者的结合, 给出可以实现社会效益的最大化的调度模式。

4 结论

本文将可中断负荷引入到阻塞管理当中, 拓展了可中断负荷的应用范围。在系统总运行成本最小为目标函数的可中断负荷模型下, 对发电出力再调度和可中断负荷进行了均衡分析, 得出了可中断补偿电价与节点边际价格的均衡结果, 即当可中断电价与节点有功边际价格相等时系统获取最优负荷中断量, 提出了 LMP 机制下可中断负荷用于阻塞管理的最优调度方法, 理论分析和 IEEE30 仿真表明, 依据该原则进行可中断负荷的调度, 用户电价可以得到降低并且可以创造一定的社会效益, 值得推广和使用。

参考文献

- [1] 汤振飞, 于尔铿, 唐国庆. 电力市场输电阻塞管理[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 13-16.
TANG Zhen-fei, YU Er-keng, TANG Guo-qing. Transmission Congestion Management in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 13-16
- [2] 潘劲东, 谢开. 节点边际定价的优化原理[J]. 电力系统自

动化, 2006, 30(22):38-42.

PAN Jin-dong, XIE Kai. The Optimization Principle of Locational Marginal Pricing [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22):38-42.

- [3] Glatvitsch H, Alvarado F. Management of Multiple Congested Conditions in Unbundled Operation of a Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998,13(3): 1013-1019.
- [4] 刘昌, 姚建刚, 等. 基于可中断负荷的新型输电阻塞调度研究[J]. 中国电力, 2006, 38(9):51-55.
LIU Chang, YAO Jian-gang, et al. Research of New Congestion Dispatching Based on Interruptible Load[J]. Electric Power, 2006, 38(9):51-55.
- [5] Majumdar S, Chattopadhyay D, Parikh J. Interruptible Load Management using Optimal Power Flow Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2):715-720.
- [6] 陈志文, 杜松怀. 基于影子价格的可中断负荷经济性分析[J]. 华东电力, 2006, 34(9):50-53.
CHEN Zhi-wen, DU Song-huai. Analysis of Economy of Interruptible Loads Based on Shadow Price[J]. East China Electric Power, 2006, 34(9):50-53.
- [7] Ma X, Sun D, Ott A. Implementation of the PJM Financial Transmission Rights Auction Market System[A]. In: IEEEUPES 2002 Summer Meeting Conference Proceedings[C]. Chicago:2002.21-24.
- [8] Kirschen D, Strbac D. Fundamentals of Power System Economics[M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [9] Schweppe F C, Caramanis M C, Tabors R D, et al. Spot Pricing of Electricity[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [10] 谢开, 宋永华, 于尔铿, 等. 基于最优潮流的实时电价分解模型及其内点法实现[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(2): 5-10.
XIE Kai, SONG Yong-Hua, YU Er-Keng, et al. Power Flow Based Spot Pricing Algorithm via Interior Point Methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(2):5-10.
- [11] 任震, 吴杰康, 吴重民, 等. 在竞争的电力市场下的传输阻塞管理与定价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 19-22.
REN Zhen, WU Jie-kang, WU Chong-min et al. Congestion Management and Pricing in Competitive Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2):19-22.

收稿日期: 2007-02-28; 修回日期: 2007-06-22

作者简介:

李才华 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制 and 电力市场; E-mail: licaihua83923@163.com

杜松怀 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化和电力市场。