

基于 MAS 的调峰权交易模型

李安均 陈 川

(国网南充供电公司 四川 南充 637000)

摘 要: 根据调峰权的特点,提出了基于多代理系统(multi-agent system, MAS)的调峰权交易模型。该模型以所有发电公司的效益最优为优化目标,分别提出了发电公司 Agent 社会效益最大的交易模型和发电公司内部调峰成本最小的优化模型,并介绍了各级调峰 Agent 的功能和作用。通过算例分析表明,所提出的基于 MAS 调峰权交易模型是可行的、有效的。

关键词: 调峰权; 多代理系统; 交易

Abstract: A transaction model of peak regulation right based on multi-agent system (MAS) is proposed according to the property of peak regulation right. In this model, the benefit optimization of all power generation companies is taken as the best goal, and the transaction model of largest social benefit of power generation company agent and the optimization model of minimum peak regulation cost inside power generation company are put forward respectively. And the function and roles of peaking agent in each level are introduced. Example analysis shows the feasibility and validity of the proposed transaction model of peak regulation right based on MAS.

Key words: peak regulation right; multi-agent system; transaction

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0086-05

0 引 言

近年来,随着社会经济的高速发展、人民生活水平的不断提高,同时节能调度实施方案要求高耗能、低效率火电机组停机发电,使电力系统失去了相当部分的停机调峰能力,然而电网负荷峰谷差逐年增长,日益增大的负荷峰谷差严重影响电力系统的安全稳定运行^[1-3]。目前电网的调峰手段主要从负荷侧和发电侧这两方面着手。负荷侧调峰主要采取“先错峰、后避峰、再负控限荷、最后拉路”的调峰管理方法。虽然负荷侧调峰管理减小电网负荷峰谷差,但给停电给电力用户的生产生活带来极大的不便。发电侧调峰主要是控制调峰机组的启停状态,但在电网负荷低谷时期,部分向下调峰调解能力弱的调峰机组被迫停运,调峰机组的被迫停运会造成电网在负荷高峰时期系统的发电容量不能满足电力负荷的需要。由于各发电企业参与上网电价的竞价是相互独立的,使得各发电企业之间缺乏有效的沟通,从而使得部分调峰机组的调峰性能不能有效充分发挥。

为解决上述调峰机组调峰能力得不到充分利用的问题,在调峰电力市场中,建立一种有效的调峰交易模式。此模型是在尽可能满足电力用户用电需求的基础之上,针对不同调峰机组的调峰性能,建立一个合理的竞价平台,即,调峰机组通过相互购买调峰权,使调峰机组的调峰性能得到最大的发挥,有效避免不合理的深度调峰或被迫停机调峰,在鼓励发电企业发电的同时,还能鼓励调峰机组积极参与电网调峰,缓解电网调峰的压力。提高电网运行的效率^[4,5]。调峰权是指在电力负荷低谷时期,调节能力大的发电机组在满足自身调峰任务的基础之上,通过向调节能力不足的机组出售多余的调峰容量,不但获得额外的收益,还能避免调节能力不足的机组频繁启停,提高机组的寿命周期^[6]。

随着调峰权概念的引入,电网调峰也会发生一些新的改变,例如:电网调峰的分层化和分布化,这使得传统的调峰手段很难适应新的变化,由于多代理系统(multi-agent system, MAS)具有分布、快速、高效、解决复杂问题的特征,将使其能够更好地适应电网调峰的变化。MAS是由多个 Agent 通过共同合作来构成的一个体系。MAS的基本单元是 Agent,

各 Agent 可以在调峰市场中相互服务、相互协同,并共同完成各自的任务,各 Agent 具有自主性、高效性、交互性的特点^[7-8]。

所提出的基于 MAS 的调峰权交易机制,讨论了基于 MAS 的调峰权在电力市场中的竞价结构。同时针对上级 Agent 调峰竞价与下级 Agent 调峰竞价,分别提出了发电机组 Agent 与同级 Agent 的调峰竞价策略以及发电机组 Agent 自身的调峰量优化策略。通过算例表明基于 MAS 的调峰权交易机制,不但符合电网运行发展的特征,还能够在电力市场环境 下,推动电网调峰的发展。

1 基于 MAS 的调峰权交易机制结构

文献[6]提出的调峰权虽然为调峰机组购售调峰容量提供了一种有效的交易方式,但文献中并没有提出调峰权交易具体的流程和结构,为此,设计了一种基于 MAS 的调峰权交易模型^[9]。其具体流程如下。

基于 MAS 的调峰权交易模型结构原理如图 1 所示,包括上级电力调峰市场 Agent、发电公司调峰 Agent、发电机组调峰 Agent 等 3 层。

1) 电力调峰市场 Agent。根据各高级调峰 Agent 反馈的调峰数据,制定调峰权交易计划,确定各发电公司的调峰权交易价格及交易调峰容量。同时将结果反馈给各高级调峰 Agent,为其下一步决策交易提供参考依据。

2) 发电公司调峰 Agent。根据上级调峰 Agent 反馈的数据结合旗下发电机组 Agent 提供的数据来调整调峰权交易计划,并及时把调整后的交易计划上报上级调峰 Agent。在调峰权交易成功后,发电公司调峰 Agent 以调峰成本最小化优化策略对发电机组 Agent 进行调度。

3) 发电机组 Agent 根据自身状态向发电公司调峰 Agent 提供的数据,根据上级 Agent 的调度计划参与电网的调峰。

针对电力市场的上层调峰 Agent 竞价和下层调峰 Agent 竞价体系,分别提出发电公司调峰 Agent 与同级调峰 Agent 的经济效益最大化、发电公司调峰 Agent 与机组 Agent 的调峰成本最小化的调峰权交易模型,使发电公司的效益最大化。



图 1 基于 MAS 的调峰权交易模型体系

2 调峰权交易模式

2.1 调峰权交易模型

根据电力系统运行的实际情况对参与调峰权交易的发电企业进行配对,配对目的是使调峰权交易产生的社会效益最大化^[4,5]。

假设调峰权交易市场中有 n 个调峰权买方和 m 个调峰权卖方。第 i 个买方申报的调峰权电量购买量和报价分别为 Q_{B-i} 和 P_{B-i} ,第 j 个卖方申报的调峰权电量出售量和报价分别为 Q_{S-j} 和 P_{S-j} 。假设调峰权买家 i 和调峰权卖家 j 的调峰权交易量为 Q_{ij} ,对应的调峰权交易价格为 P_{ij} ,则消费者剩余为 $(P_{B-i} - P_{ij}) Q_{ij}$,生产者剩余为 $(P_{ij} - P_{S-j}) Q_{ij}$ 。

调峰权交易不能忽略交易成本,甚至某些调峰权交易由于不能通过安全校核而使交易成本无限增大,因此,应考虑每个发电成员相互之间的交易成本。设调峰权买家 i 和调峰权卖家 j 之间的交易成本为 C_{ij} ,由此构成 $n \times m$ 的交易成本矩阵 C 。其中,交易成本 C_{ij} 的数学表达式为

$$C_{ij} = m_{ij} \rho_t \quad (1)$$

式中 m_{ij} 为边际网损系数; ρ_t 为单位时间段 t 内的调峰电价。 ρ_t 的数学表达式为

$$\rho_t = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \rho_n \quad (2)$$

式中 ρ_n 表示过去 m 个时间段中第 n 时间段的调峰电价。

所以调峰权交易的社会效益为

$$E_{ij} = (P_{B-i} - P_{ij}) Q_{ij} + (P_{ij} - P_{S-j}) Q_{ij} - C_{ij} Q_{ij}$$

$$= (P_{B-i} - P_{S-i} - C_{ij}) Q_{ij} \quad (3)$$

由式(3)可知,在调峰权交易当中所产生的社会效益与其成交价格无关,为了保证调峰权交易的公平公正性,使调峰权买家和调峰权卖家的效益值相等,其成交价格 P_{ij} 应为双方报价的平均值,其数学表达式为

$$P_{ij} = \frac{P_{B-i} + P_{S-i}}{2} \quad (4)$$

调峰权交易的目标是使所有发电成员的社会总效益最大,因此,调峰权交易的目标函数为

$$\text{Max} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (5)$$

约束条件为

$$E_{ij} = (P_{B-i} - P_{S-i} - C_{ij}) Q_{ij} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_{ij} \leq Q_{B-i} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n Q_{ij} \leq Q_{S-i} \quad (8)$$

式(6)为卖方 j 与买方 i 之间调峰权交易产生的期望社会效益;式(7)为第 j 个卖方申报的调峰权电量出售量约束;式(8)为第 i 个买方申报的调峰权电量购买量约束。

由于电力行业的特殊性,各发电公司提供的出力是实时变化的。同时为了保证电力系统安全可靠的运行,在进行调峰权交易时还需要满足以下几个约束。

$$\sum_{k=1}^{m+n} P_k = P_{load} \quad (9)$$

$$V_{k-min} \leq V_k \leq V_{k-max} \quad (10)$$

$$F_{l-min} \leq F_l \leq F_{l-max} \quad (11)$$

式(9)为功率平衡约束,其中 P_k 为第 k 个发电公司在调峰权交易结束后的出力; P_{load} 为电网的需求量;式(10)为节点电压约束,其中 V_k 为节点 k 的电压, V_{k-min} 和 V_{k-max} 分别为节点 k 的最小电压值和最大电压值;式(11)为线路潮流约束,其中 F_l 为调峰权交易后线路 l 的输送功率, F_{l-min} 和 F_{l-max} 分别为线路 l 的最小输送功率和最大输送功率。

2.2 各上级调峰 Agent 的具体功能

上级电力调峰市场 Agent 具体功能如下。

1) 接收参加调峰权交易的各发电公司 Agent 申报交易类型(买方或卖方)、调峰权报价和交易容量。

2) 根据获得的数据,估算交易成本,进行配对。

3) 对交易结果的安全性、可靠性进行分析。

4) 将交易结果反馈给各发电公司调峰 Agent。

各发电公司调峰 Agent 具体功能如下。

1) 接收电力调峰市场 Agent 的询问并提供调峰权报价和交易容量。

2) 向上级电力调峰市场 Agent 提供的调峰权交易的相关数据。

3) 根据上级电力调峰市场 Agent 反馈获得的交易计划,结合各机组 Agent 实际情况,预测发电公司可能提供或需要购买的调峰容量、调峰电价等。

3 发电成本优化策略

3.1 发电成本模型

假设调峰市场上有 N 家发电公司参与调峰权竞价。发电公司可以降低常规机组出力,使机组进入深度调峰(深度调峰是指发电机组超过基本调峰范围进行的调峰)运行方式来获取更多的调峰容量。从经济性方面,来考虑发电公司参与电网调峰问题,可将优化目标定义为发电公司机组深度调峰费用最小^[10-12]。发电公司机组的深度调峰费用可从机组煤耗特性、机组寿命损耗和机组单位发电容量补偿费用等多方面来考虑。这里取其中某个发电公司的第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 台机组的发电成本为

$$C_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_{etpi} \quad (12)$$

式中, C_i 表示第 i 台机组的深度调峰费用; a_i 、 b_i 、 c_i 分别表示第 i 台机组的成本函数系数; d_i 表示第 i 台机组在深度调峰时的经济补偿系数; P_{etpi} 表示第 i 台常规机组有偿调峰容量。

考虑到调峰市场的不确定性,发电公司作为一个自负盈亏的企业,发电公司为了自身利润的最大化,在调峰权竞价时一般都会在自身成本函数费用的基础上加上一定的比例因子 λ ,则该台机组的成本函数为

$$C_i = (1 + \lambda_i) (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_{etpi}) \quad (13)$$

因此,在满足约束条件下,发电公司 Agent 成本最小化目标为

$$\min \sum_{i=1}^N C_i \quad (14)$$

其约束条件仍需满足式(9)~式(11)。

3.2 发电公司中各 Agent 的具体功能

发电公司协调级 Agent 具体功能如下。

1) 接收发电公司 Agent 的调峰指令,并反馈给

各发电机组 Agent。

2) 接收各发电机组 Agent 发电预测数据、运行成本、发电机组的报价和各种运行约束参数上报给发电公司 Agent。

发电机组 Agent 具体功能如下。

1) 预测本机组 Agent 每生产单位电能所需发电成本,并上报上级 Agent。

2) 预测本机组 Agent 现阶段可以提供的最大、最小电能,并上报上级 Agent。

3) 时刻对发电机组的运行状态进行监视,及时上报上级 Agent,对发电机组进行实时控制。

4) 保证发电机组安全稳定的运行。

5) 接受上级 Agent 的调峰交易指令后,发出相应的电能。

4 算例分析

4.1 发电公司 Agent 与同级 Agent 最优化调峰权竞价策略分析

假设有 8 家发电公司参与电网调峰权竞价,其中有 3 家公司出售调峰权,5 家公司需要购买调峰权。各发电公司的竞标报价如表 1 所示。

表 1 各发电公司调峰权交易申报情况

公司名称	买卖方向	调峰权容量 /MW	调峰权报价/(元·MW ⁻¹)
公司 1	买	100	375
公司 2	买	150	374
公司 3	卖	100	380
公司 4	买	50	378
公司 5	卖	200	376
公司 6	卖	200	378
公司 7	买	150	379
公司 8	买	50	375

按照效益最优模型进行交易时,调峰权交易配对的结果如表 2 所示。

表 2 调峰权交易配对情况

卖方	买方	调峰权成交容量 /MW	调峰权成家价格/(元·MW ⁻¹)	社会效益 /元
公司 3	公司 1	100	380	12 000
公司 5	公司 2	150	378	15 000
公司 5	公司 8	50	377	6 600
公司 6	公司 4	50	378	7 000
公司 6	公司 7	150	379	16 500

从表 2 可以看出,公司 1 从公司 3 处购得 100 MW 调峰权,公司 3 从公司 1 处获得 38 000 元的调峰补偿,产生的社会效益为 12 000 元;公司 2 和公司 8 分别从公司 5 购得 150 MW 和 50 MW 的调峰权,公司 5 分别从公司 2 和公司 8 处获得 56 700 元、18 850 元的调峰补偿,产生的社会效益分别为 15 000 元、6 600 元;公司 4 和公司 7 分别从公司 6 购得 50 MW 和 150 MW 的调峰权,公司 6 分别从公司 4 和公司 7 处获得 1 890 元、56 850 元的调峰补偿,产生的社会效益分别为 7 000 元、16 500 元。

4.2 发电公司成本优化分析

以发电公司 3 为例,公司通过报价策略获得的调峰权出售容量为 50 MW,电网的负荷需求和公司的内部电力需求之和 85 MW。发电公司中有 30 MW 和 60 MW 机组各两台,其参数分别如表 3 所示。

表 3 发电公司各机组经济参数和出力限制

	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4
a	0.20	0.25	0.28	0.30
b	35.20	33.40	36.10	37.60
c	0	0	0	0
最大出力 /MW	30	30	60	60

按照各机组参数,根据发电成本优化策略可以求得各机组的最优出力,如表 4 所示。

表 4 发电公司各机组最优出力

	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4
出力 /MW	20	22	45	48
成本/(美元·MW ⁻¹)	1 546	1 543	1 634	1 638

从表 4 可以看出所有的机组都处于开机的状态,所有的机组都按照成本和实际需求进行供电,达到降低发电公司成本的目的。

5 结 论

所提出的基于 MAS 的调峰权交易模型,充分体现了 MAS 在新的调峰环境中的优势。虽然各发电公司调峰 Agent 所获得的信息和决策是相互独立的,但通过上级调峰 Agent 社会效益最大化和发电公司内部调峰成本最小化的调峰权交易模型,在满足各 Agent 在不同的调峰需求充分考虑电网特性的

同时,保证了电网安全可靠经济运行,使发电公司社会效益最大化,充分体现了这种分布式调峰手段更适应未来电力市场下的发展。

参考文献

[1] 赵岩. 机组调峰在电力市场交易中问题探讨[J]. 华东电力, 2001(10): 29-32.

[2] 彭显刚, 张聪慧, 王星华, 等. LNG 调峰电厂负荷优化分配的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 84-87.

[3] 张宇波, 罗先觉, 邹晓松, 等. 发电市场势力研究与交易方式对发电市场势力影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 18-23.

[4] 刘扬洋, 蒋传文, 李磊, 等. 考虑需求侧管理的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 38-43.

[5] 耿静, 严正, 蒋传文, 等. 考虑环境成本的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 111-114.

[6] 高志华, 任震, 黄雯莹. 电力市场中调峰权及其交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 88-92.

[7] 程瑜, 张粒子, 郑华. 基于多 Agent 协同技术的用电需求预测系统的设计[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 50-54.

[8] 王成山, 余旭阳. 基于 Multi-Agent 系统的分布式协调紧急控制[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 1-5.

[9] 艾芊, 章健. 基于多代理系统的微电网竞价优化策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 46-50.

[10] 高鑫, 王秀丽, 雷兵, 等. 独立发电商的策略报价研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 40-46.

[11] 丁淑英. 电力生产成本计算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[12] 方韬, 李才华, 张粒子. 发电企业环境成本研究[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 16-20.

作者简介:

李安均(1987), 研究生, 主要从事变电站运行与维护工作。

(收稿日期: 2014-05-20)

(上接第 85 页)

他杂质, 可能会引起电场畸变, 随导线所加电压的增加, 孔底的电场强度会随之增加, 在电压较低时, 孔隙电场强度不大, 将不会有局部放电现象, 当增加电缆负载电压时, 孔底电场强度也会变大, 当比空气击穿场强时, 就造成了局部放电的发生。

将平头铜丝插入孔洞中, 电场畸变的程度比只存在孔的电缆大, 但由于铜作为良导体, 改善了孔中的电场, 使电场趋于均匀, 增加其产生局部放电的可能性。

尖头铜丝插入孔洞时, 电场畸变最强烈, 铜丝尖头处模拟计算中电场达到了 20 000 V/mm 以上, 是因为尖头周围存在空气, 会产生强烈的局部放电。

5 结 论

根据仿真计算结果, 进行缺陷模拟试验。在试验中制作相同缺陷, 对缺陷电缆施加工作电压, 通过局部放电检测设备和红外成像温度检测设备对电缆的运行情况进行检测。通过试验来验证仿真计算结果, 并能掌握其故障过程中的检测数据, 可作为今后电缆检测中的参考数据, 对缺陷及早发现, 及时预防; 获取不同缺陷导致故障的放电痕迹, 寻找其差异, 为今后电缆线路故障分析提供参考依据。

参考文献

[1] 史传卿. 电力电缆讲座第三讲[J]. 供用电, 2001, 18(5): 53-56.

[2] 陈成伟. 10 kV XLPE 电缆振荡波试验电压研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[3] 吴倩, 刘毅刚. 高压交联聚乙烯电缆绝缘老化及其诊断技术述评[J]. 广东电网, 2003, 16(4): 1-6.

[4] 罗俊华, 邱毓昌, 杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14-16.

[5] 陈秋, 孙正凯, 王伟. 10 kV 配网电缆故障分析及防范措施[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 16(12): 76-78.

[6] 韩轩, 马永其. 高压交联电缆终端预制橡胶应力锥的研究进展[J]. 绝缘材料, 2007, 40(4): 12-17.

[7] 马自伟, 贾江波, 查玮, 等. 10 kV XLPE 电缆终端电场分布与调整[J]. 高压电器, 2007, 8(43): 304-306.

[8] 解广润. 高压静电场[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.

[9] 金天雄, 金石男, 江平开, 等. 有限元法与田口方法相结合模拟研究交联聚乙烯电缆绝缘中的水树现象[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 45-48.

[10] 李晓伟. 35 kV 电缆终端应力锥硅橡胶注射模具计算机辅助设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.

作者简介:

张 轩(1986), 主要研究方向为电网运行及维护。

(收稿日期: 2014-05-15)