电力市场环境下燃气轮机调峰交易模式研究

王娟娟[1],吕　泉[2],李卫东[2],赵闻蕾[1]

(1. 大连交通大学 电气信息学院,辽宁 大连 116028;2. 大连理工大学 电气工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:基于燃气轮机启停迅速、出力便于调节且启停成本较低的特性,针对电网急需调峰容量的状况,提出了电力市场环境下燃气轮机与系统调度中心签订障碍期权合约参与启停调峰、签订普通中长期双边合约参与深度调峰的思路。首先确定了参与调峰的交易主体、交易方式等内容,然后据此制定了可行的交易机制,接着分析了调峰合约的实施过程,最后确定了调峰交易的相关价格。分析表明,该交易模式既可使系统以经济的方式调度启停调峰容量,关键时刻增加系统的深度调峰能力;又避免了交易者的反复竞价,提升了交易的执行效率。算例分析表明了该市场交易机制的有效性和可行性。

关键词:电力市场;燃气轮机;调峰;交易;障碍期权;中长期双边合约

中图分类号:TM 73　　**文献标识码**:A　　DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.009

0　引言

受风电大规模并网等多重因素的影响,我国电力系统峰谷差逐年增大已成为不争的事实[1-2]。世界范围内常用的调峰电源之一为先进燃气轮机,其不仅启停迅速,且具有体积小、成本低、效率高等特性,故已成为目前最成熟、最有商业竞争力的发电设备之一[3]。然而,与之形成明显反差的是,我国早期建设的燃气轮机却多处于运行困难、经营艰难的境地[4],急需技术改造以发展成为先进燃气轮机,但机组的改造需要一定的时间和合适的时机。

然而,在被改造之前,上述机组仍具有启停快速、出力易于调节、启停成本较低的特性。若采取合理方式使其参与系统调峰,则既可增加电网的调峰容量,维持电网的安全运行,又可合理利用电网现有资源,优化能源结构;且可使上述燃气轮机凭借其调峰优势获得一定收益,长期生存,最终实现系统、用户及燃气轮机企业的共赢。

目前,为了调动电源参与调峰的积极性,我国部分省网试行了峰谷分时电价制度[5],但峰谷电价间差额力度不足,故削峰填谷的效果并不理想。而实时电价可以体现电量在不同时段的不同价值[6],对调峰电源有较好的激励作用,故常被英美等国采用。

据此,本文研究了电力市场环境下燃气轮机基于障碍期权合约参与启停调峰、基于中长期双边合约参与深度调峰的交易模式。在该模式下,以实现交易公平为目标,利用市场机制发现调峰服务的价值,既有效提高了系统运行的安全性和可靠性,又降低了交易双方的交易风险。

收稿日期:2013-02-01;**修回日期**:2013-11-21

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51107007);大连市科学技术基金资助项目(2011J21dw007)

Project supported by the National Natural Science Foundation for Young Scholars of China(51107007) and Science Foundation of Dalian Science and Technology Bureau(2011J21dw007)

1　燃气轮机参与调峰交易的交易特性

1.1　电力市场的交易模式及交易内容

在实时电价机制下,以市场交易的形式进行调峰服务的买卖是激励调峰电源积极提供调峰容量最有效的手段之一。但调峰交易会影响系统调度计划的制定,即启停调峰交易将影响机组的启停计划,而深度调峰交易将影响经济调度计划。为了减小上述影响,约定在调度部门实施主能量交易之前组织调峰服务的交易,设交易采用联营体模式,则电力调度机构将代表用户进行调峰容量的交易。

我国现行的《并网发电厂辅助服务管理暂行办法》中将机组提供的调峰服务划分为基本调峰、启停调峰与深度调峰 3 种,其中对基本调峰不单独进行补偿,认为其应得的报酬已包含在相应机组的上网电量中,故调峰交易中可交易的调峰服务为启停调峰与深度调峰。本文所研究的燃气轮机均可提供这 2 种调峰服务,不过与我国最常用的调峰电源——火电机组相比,燃气轮机运行成本较高,并不适合长时间运行;但其启停迅速,且启停费用较低[7],故更适宜参与启停调峰交易。燃气轮机提供启停服务则可避免火电机组的频繁启停,提高其运行效率且有利于电网的经济运行。当然,在火电机组突然停运等极端情况下,燃气轮机也可提供调峰容量,基于鼓励燃气轮机发展的考虑,可设此时其参与的为深度调峰交易。

1.2　燃气轮机参与调峰的交易方式

调峰容量的交易方式可以有多种。理想情况下基于自由竞价的交易可使市场的运行效率更高,但为了保障调峰容量的充足可靠供应,调峰服务通常具有一定的计划性[8],故部分调峰容量参与自由竞

价,其余调峰容量以中长期合约的形式获取更为可行。

期权交易也是中长期交易的一种,这种交易方式既可保障交易商品的可靠供应,又可维持交易价格的稳定。目前已有众多学者将期权交易引入电力市场,如以期权交易形式进行的可中断负荷合约的签订[9],针对辅助服务和实时平衡市场中存在的市场运行效率低、发电企业市场力大等问题而进行发电容量期权交易[10],以及研究价格型需求响应期权及风电型需求响应期权以量化智能电网中需求响应产生的效益[11]等。

但就上述燃气轮机而言,其参与系统启停调峰交易具有一定的特殊性,即调度中心与之交易的目的是为了在满足系统调峰需求的同时节约调度费用。故为了兼顾此目的,本文制定了基于障碍期权的燃气轮机的启停调峰参与模式。

障碍期权的实质与普通期权相同,即买方预先支付期权价格费用,以获得在指定时段以固定的期权执行价格购买某种商品的权利,因此这种交易方式具有规避风险这一普通期权合约所具有的主要优点。但障碍期权又具有一定特殊性,即其在生效过程中受到一定的限制,此限制即期权障碍,依据期权障碍可设定合约的执行条件,即合约在满足一定条件时才会被执行,否则无效。执行条件的设定使得签约调度中心在调度调峰容量时可兼顾调度的经济性,且为签约双方成交价格的确定提供了很好的依据,避免了协商定价的随意性。

另一方面,因上述燃气轮机提供深度调峰的几率很小,故本文中燃气轮机与系统调度中心以签订普通中长期合约的形式在极端情况下提供深度调峰服务,以避免调度中心支付过多的定金。

2　调峰交易机制

根据以上分析,本文制定调峰交易机制如下。

a. 拟参与启停调峰期权交易的燃气轮机提前较长时间向调度中心提交未来一段时间内(如 1 个月或 1 个季度)的期权执行价格、调峰性能等数据。在系统电价模型确定的前提下,可求得各机组在不同时段的期权价格。调度中心以各时段符合系统调峰要求的各机组的期权执行价格与期权价格之和由低到高的原则将机组排序。

同时,在上述拟签约机组中,拟参与深度调峰交易的燃气轮机提交其可提供的深度调峰容量、相应的容量单价及可提供的时段等信息。调度中心根据机组报价高低、系统可能的调峰缺额等因素确定签约机组。

b. 在各交易日系统启停调峰需求已知的前提下,调度中心以满足系统需求为目的,按上述排序与相应机组签订期权合约,确定各燃气轮机可提供的启停调峰容量及提供容量的时段,签约机组随即获得以期权价格形式体现的定金。在各实时交易时段,满足期权障碍约束时,调度者通过执行调峰期权,即对机组进行实时调度,获得调峰电量,此时机组相应获得期权执行价格费用。

c. 某些极端情况下,系统需燃气轮机提供深度调峰时,可直接调用已签约机组,此时向燃气轮机支付的费用为其申报费用。但需注意机组参与深度调峰的时段不得与机组参与启停调峰的时段相重合。

d. 若调度中心实时调度调峰服务时机组不能按时提供服务,则机组需向调度中心支付一定的赔偿费用。此赔偿费用大于上述支付费用,以规范约束燃气轮机的行为。

3　调峰合约的实施

假设前述某燃气轮机 i 与调度中心签订了未来第 T 时段的单位启停调容量峰障碍期权合约及第 t 时段的单位深度调峰电量双边合约,则机组获得以期权价格形式体现的定金 $\mathrm{OP}_{i,T}$。该机组申报的单位启停调峰容量期权执行价格为 $\mathrm{SP}_{i,T}$,提供单位深度调峰电量的报价为 $\mathrm{DP}_{i,t}$。对应于启停调峰和深度调峰,调度中心支付的实际费用分别为 G_T 和 G_t,而燃气轮机获得的总报酬分别为 $O_{i,T}$ 及 $O_{i,t}$。假设相应时段调度中心直接调用市场中的火电机组单位启停调峰容量所需的费用为 ρ_T。

3.1　燃气轮机参与系统启停调峰

电力市场环境下市场电价为实时变化的量,故系统有启停调峰需求而调度中心在执行与机组 i 的合约之前,将比较调用机组 i 与调用市场中火电机组提供相应调峰容量所需的费用。

若 $\mathrm{SP}_{i,T}>\rho_T$,则调度中心可选择不执行与机组 i 签订的合约,而直接调用火电机组,此时 $G_T=\rho_T+\mathrm{OP}_{i,T}$,而 $O_{i,T}=\mathrm{OP}_{i,T}$,即使调度中心不执行合约,签约机组 i 仍可获得期权价格费用,规避了其签订合约而无盈利的风险。若 $\mathrm{SP}_{i,T}<\rho_T$,则调度中心执行该合约,此时 $G_T=\mathrm{OP}_{i,T}+\mathrm{SP}_{i,T}$,$O_{i,T}=\mathrm{OP}_{i,T}+\mathrm{SP}_{i,T}$。

由此可见,只有当支付给燃气轮机的期权执行价格费用低于 ρ_T 时该期权合约才真正发挥作用,否则调度中心并未通过执行合约获利,合约无效。因此在任一时段 T 直接调用火电机组提供的单位启停调峰容量所需的费用 ρ_T 为该期权的障碍,该障碍使得调度中心具有了执行合约与否的灵活选择权,且其在该时段所需支付的调度单位启停调峰电量价格始终为 $\min[(\rho_T+\mathrm{OP}_{i,T}),(\mathrm{SP}_{i,T}+\mathrm{OP}_{i,T})]$,避免了支付高额调度费用的风险,即调度中心可在保

障调峰电量充足供应的同时节约调度费用。

3.2 燃气轮机参与系统深度调峰

当系统出现深度调峰缺额时，为了缓解系统的供需不平衡，调度中心可直接调用签约燃气轮机，此时 G_t 与 $O_{i,t}$ 均为 $\mathrm{DP}_{i,t}$ 与被调用深度调峰电量的乘积，即借助双边合约可以用固定价格弥补系统的调峰缺额，规避燃气轮机随意报价的风险。

综上所述，基于启停调峰障碍期权合约与深度调峰双边合约，调度中心在系统需要启停调峰容量时具有灵活选择性，可以用较低费用调度所需容量；而系统深度调峰电量缺乏时则可以用固定费用填补调峰容量缺额，规避支付不合理费用的风险；燃气轮机则可凭借其调峰优势获利。

4 调峰合约相关价格的确定

对调峰机组调峰性能要求的不同会对机组的安全性和经济性产生不同程度的影响[12]。市场机制下发电企业为独立的经营实体，必须对其提供的调峰服务进行遵循市场规律的补偿才可调动其参与调峰交易的积极性。

4.1 启停调峰期权合约相关价格的确定

在启停调峰期权交易模式下，期权执行价格、期权价格及期权障碍是决定期权交易双方支出和收益的主要因素，也是该交易机制得以顺利进行的基本保障。

4.1.1 期权价格的确定

期权价格反映的是合约所赋予期权执行者执行期权的权利，常由期权的价值决定。参与期权交易的第 i 台燃气轮机在第 T 时段提供启停调峰容量的价值为：

$$V_{i,T}=P\rho_T-(P\cdot\mathrm{SP}_{i,T}+P\cdot\mathrm{OP}_{i,T}) \tag{1}$$

其中，P 为该时段该机组提供的启停调峰容量。

若直接依据式(1)确定期权价格，即：

$$P\rho_T-(P\cdot\mathrm{SP}_{i,T}+P\cdot\mathrm{OP}_{i,T})=P\cdot\mathrm{OP}_{i,T} \tag{2}$$

则机组 i 单位启停调峰期权的期权价格为：

$$\mathrm{OP}_{i,T}=(\rho_T-\mathrm{SP}_{i,T})/2 \tag{3}$$

若 ρ_T 与 $\mathrm{SP}_{i,T}$ 相差较小，则电网调度者支付较少的定金即可获得在约定时段内对燃气轮机的实时调度权，且机组的期权执行价格越高，其期权价格越低。

此外，还需保证 $\mathrm{OP}_{i,T}$ 为正，否则势必挫伤燃气轮机企业参与调峰的积极性，影响期权合约的顺利实施，即需满足以下约束：

$$\mathrm{SP}_{i,T}<\rho_T \tag{4}$$

若式(4)成立，则不仅 $\mathrm{OP}_{i,T}$ 为正，合约的期权障碍约束也一定被满足，此时合约一定有效，在系统需要时即可被执行。

鉴于 ρ_T 是随机波动的，故可应用 Monte Carlo 随机模拟法[13]，将式(3)修正为：

$$\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\mathrm{OP}_{i,T}(j)=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}[\rho_T(j)-\mathrm{SP}_{i,T}]/2=\frac{1}{2M}\sum_{j=1}^{M}\rho_T(j)-\frac{1}{2}\mathrm{SP}_{i,T} \tag{5}$$

其中，$\mathrm{OP}_{i,T}(j)$ 为第 T 时段第 j 次 Monte Carlo 模拟时的调峰期权价格；$\rho_T(j)$ 为第 T 时段第 j 次 Monte Carlo 模拟时的市场电价；M 为模拟次数。

ρ_T 的确定方法有多种，如基于复合电价模型确定调峰电价[13]、按购电平均成本定价[14]等。设本文所研究的调峰电价模型具有与文献[11]的电价模型类似的变化特性，即其表达式为：

$$\rho_T=\bar{\rho}_T+\Delta\rho_T+\tan\{\max[0,56(\alpha(t)-0.884)]\}\times N(295,100) \tag{6}$$

其中，ρ_T 为第 T 时段的调峰电价；$\bar{\rho}_T$ 为电价的平均值；$\Delta\rho_T$ 为第 T 时段电价的微小随机变化；等式右边第3项为电价波动的跳跃模型，$\alpha(t)$ 为负荷率，$N(295,100)$ 表示均值为295、方差为100的正态分布。

4.1.2 期权执行价格的确定

期权执行价格是指期权所有者执行期权时支付的使用期权的费用，该价格通常由期权合约规定，也即由供需双方自主协商确定。本文将该价格规定为燃气轮机在参与启停调峰时段的报价，则不同机组签订的同一时段的启停调峰期权合约的期权执行价格各异，这可充分体现燃气轮机所有者的价格意愿，也可充分调动燃气轮机参与期权交易的主动性和积极性。

机组的报价常由成本与利润两部分组成。因本文所研究的燃气轮机在参与调峰交易前常处于停机状态，且虽然理论上可实现快速频繁启停，但实际中1 d之内最多启停1次，故在系统需要启停调峰的开始时段即进行机组的开停，则其等效启停成本的计算公式为[7]：

$$C_{\mathrm{off,eq}}=(c_{\mathrm{off}}+n_{\mathrm{g}}\Delta c_{\mathrm{off}})/n_{\mathrm{tv}} \tag{7}$$

其中，c_{off} 为燃气轮机的单位启停成本；n_{g} 为燃气轮机在关停前的等效发电时间；Δc_{off} 为燃气轮机与火电机组单位电量发电成本的差值；n_{tv} 为需投入有偿调峰的时段总数。

因期权执行价格需满足式(4)所示的不等式约束，则此时机组报价中的利润一定小于期权障碍与其相应等效启停成本之差，故式(4)为燃气轮机的报价提供了参考依据，而期权障碍规范了燃气轮机的报价行为。

4.2 燃气轮机深度调峰服务的报价

市场机制下，商品的价格一般为成本与利润之和，故当燃气轮机提供深度调峰服务时，其申报费用也规定为其成本与利润之和。其中成本主要包含固定成本和可变成本两大类，前者包括机组的投资成

本,后者包括燃料成本、启停成本、运行维护成本和环境保护成本等。投资成本即 ISO 工况下典型标准配置的造价,在工程采购中燃气轮机通常是按固定组成整机出售,所以一般基于整机投资成本模型确定燃气轮机的投资成本[15]。燃料成本是指燃气轮机消耗的天然气的成本,燃机类电厂的成本核算中燃料成本所占比例较大。机组的启动和停机过程比平稳运行时需要更多的物力和人力,此即启停成本。运行维护成本与燃气轮机消耗的水费、材料费、大修基金等费用有关。

燃料价格较高使得燃气轮机发电成本偏高,不利于其参与市场竞争。实际上,使用天然气为燃料发电可降低污染气体的排放量,有利于保护环境。有资料显示,与燃煤机组相比,除了碳氧化合物,燃气轮机的其余污染气体排放量均较低。因此,在分析燃气轮机的成本时应计及这部分成本,即环境保护成本。这里将此成本定义为生产单位电能时燃气轮机与燃煤机组相比减少的污染气体排放量所节约的环境污染费用,根据文献[16],其表达式为:

$$C_e=\sum_{k=1}^{K}V_{ek}\Delta Q_k \tag{8}$$

其中,V_{ek} 为第 k 类污染物的环境价值;ΔQ_k 为燃气轮机与燃煤机组生产单位电能时该类污染物的排放量之差;K 为发电排放污染物的种类数量。

燃气轮机的总发电成本应为上述成本之和。

虽然理论上各燃气轮机的利润可由其自行确定,但为了规范调峰服务市场,规定此利润与机组参与启停调峰交易时可获得的利润一致。

5　算例分析

设某地区有 3 台燃气轮机拟与系统签订未来某日始于第 T 时段的启停调峰障碍期权合约和第 t 时段的深度调峰双边合约。由上文分析可知,机组成本在确定合约价格中发挥了关键作用,因此需先确定相关机组的运行成本和等效启停成本。

5.1　燃气轮机单位成本的计算

5.1.1　单位运行成本的计算

为便于分析比较,设所研究时段各燃气轮机的单位运行成本相同。与该成本相关的各成本分量的已知数据[3,7,16-17]如下:投资成本为 2500 元/kW,天然气价格为1.3 元/m³,单位启停成本为 520 元/MW,年运行维护成本为年设备成本的 6%(单位为元/a),气耗率为 0.22 m³/(kW·h);服务年限为 10 a,年运行小时为 1 000 h。

依据上述数据,已知机组容量,即可求得各机组的年固定成本、燃料成本、维护成本和启停成本,本文采用等额支付折算法计算其中的固定成本。

而燃气轮机的成本还应计及如式(8)所示的环境保护成本,涉及的相关数据[16]如表 1 所示。

表 1　燃煤/燃气机组的相关污染物排放数据

Tab.1 Emission data of coal-fired/gas unit

污染物	V_{ek}/(元·kg⁻¹)	ΔQ_k/[g·(kW·h)⁻¹]	C_e/[元·(kW·h)⁻¹]
SO_2	7.50000	−2.0255220	-1.5191415×10^{-2}
NO_x	10.00000	−1.0056465	-1.0056465×10^{-2}
CO_2	0.02875	97.6104000	0.2806299×10^{-2}
CO	1.25000	0.1702000	0.0212570×10^{-2}

注:燃煤机组的污染物排放量数值为其对应污染物排放范围的平均值。

综上所述,各燃气轮机的容量及相关成本的计算结果如表 2 所示。

由计算结果可见,由于各机组的年运行小时和服务年限相对较短,故单位运行成本较高。

5.1.2　单位等效启停成本的计算

上述燃气轮机在参与交易之前常处于停机状态,故各机组容量即为其参与交易的容量。设各机组在关停前的等效发电时间均为 3 h,而该日需投入有偿调峰的时段为 6 h,燃气轮机与火电机组单位电量发电成本的差值为 0.267 元/(kW·h),由式(7)可得等效启停调峰成本为 0.249 元/kW。

5.2　合约价格的确定

5.2.1　期权执行价格的确定

因规定启停调峰期权合约的期权执行价格为各机组的报价,若第 T 时段机组 1—3 的申报价分别为其等效启停成本的 110%、115% 和 120%,则期权执行价格分别为 0.274 元/kW、0.286 元/kW、0.299 元/kW。

要使期权合约可行且有效,则应使各机组申报的期权执行价格满足式(4)所示的约束。由此则需确定该时段火电机组提供启停调峰容量所需的费用。调峰实时电价的计算公式如式(6)所示。而本算例假设系统在第 T 时段开始的一段时间内需要启停调峰服务,故 α 较小,若 $\bar{\rho}_T$ 及 $\Delta\rho_T$ 的变化规律已知,则基于上述模型即可求得 ρ_T,这里设该时刻火电机

表 2　各机组的竞价容量及相关成本

Tab.2 Bidding capacity and related cost of units

机组	容量/MW	年设备费用/万元	年燃料费用/万元	年维护成本/万元	年环境费用/万元	启停成本/万元	单位运行成本/[元·(kW·h)⁻¹]
1	100	4.0675×10^3	2.860×10^3	0.2440×10^3	-0.2220×10^3	5.20	0.695
2	120	4.8810×10^3	3.432×10^3	0.2929×10^3	-0.2664×10^3	6.24	0.695
3	80	3.2540×10^3	2.288×10^3	0.1952×10^3	-0.1776×10^3	4.16	0.695

组提供启停调峰容量的价格的 Monte Carlo 模拟结果为 0.310 元/kW,则期权障碍为 0.310 元/kW。可知 3 台机组的报价均满足式(4)所示的约束,则上述报价即这 3 台燃气轮机参与启停调峰期权交易的期权执行价格。

5.2.2 期权价格的确定

若期权执行价格已确定,由式(5)即可求得该时段 3 台机组的期权价格分别为 0.018 元/kW、0.012 元/kW 和 0.0055 元/kW。

由此可见:不同机组的期权价格各不相同,反映了不同机组在同一时段提供启停调峰期权所产生的价值之间的差异;本例中 3 台机组的期权价格均为正,表明燃气轮机提供启停调峰所需的成本较低;期权价格的实质为定金,本例中该金额较小,故调度中心签约之后即使不执行合约,也不会有太大的经济损失。

综合上述计算结果,可知 3 台机组若被实时调度,调度中心向其单位启停调峰容量支付的总费用分别为 0.292 元/kW、0.298 元/kW、0.3045 元/kW,因此上述机组被调度的顺序依次为机组 1、机组 2、机组 3。

5.2.3 深度调峰费用的确定

根据上文的计算结果,可知机组 1、2、3 被实时调度后,其利润率分别为 17.27%,19.68%和 22.29%。依据前述规则,则各机组参与深度调峰交易的报价应分别为其运行成本的 117.27%、119.68%和 122.29%,则机组的报价及相关数据如表 3 所示。

表 3 各机组的相关申报数据

Tab.3 Bidding data of units

机组	申报容量/MW	报价金额/[元·(kW·h)$^{-1}$]
1	100	0.815
2	120	0.832
3	80	0.850

机组参与深度调峰可获利,故设本例中的 3 台机组均愿意在一天的任何时段提供调峰容量。依据报价的高低,机组被实时调度的顺序依次为机组 1、机组 2、机组 3。

5.3 调峰合约执行情况分析

5.3.1 启停调峰障碍期权合约执行情况分析

a. 第 T 时段系统的启停调峰需求为 500 MW。

根据前述分析结果,机组 1—3 的期权执行价格均小于期权障碍,且其可提供的启停调峰容量之和小于系统需求,故调度中心与 3 台机组均签订期权合约,且合约均有效,机组的申报容量均被实时调度,此时各机组的收益等如表 4 所示,其中机组盈利率定义为机组盈利与其成本之比。

此时,3 台机组均可获得定金与被调度费用两部分收益。与直接调用火电机组相比,节约费用 0.368 万元,且 ρ_T 越大,合约可节约的费用越多。

由计算结果还可知,机组的期权价格与期权执行价格相比较小,这是因为期权价格仅起定金的作用;而机组是否获得较高利润取决于其是否被调度,且机组的期权执行价格中申报的利润越大,机组的盈利率越高,但机组不被调度的风险也越大;机组的期权执行费用越高,被调度容量越多,其盈利越多。由于 3 台机组的成本相同,且均低于期权障碍,故机组被实时调度的容量越多,与调度火电机组容量相比,为调度中心节约的费用越多。

b. 第 T 时段系统的启停调峰需求为 200 MW。

此时,仅机组 1、2 与系统签订启停调峰合约,且机组 1 的全部竞价容量与机组 2 的部分竞价容量被实时调用,此时各机组的收益等如表 5 所示。

由上述结果可知,对于签订了期权合约而合约只有部分被执行的机组,系统虽然对未被实时调度容量多支付了定金,但一般情况下,机组所提供的调峰容量所产生的价值将大于此定金。而在被调度容量相同的情况下,被调度优先级越高的机组为调度中心节约的费用越多。

c. 第 T 时段系统的启停调峰需求为 200 MW,且期权障碍为 0.280 元/(kW·h)。

此时调度中心虽与机组 1 和 2 签订了调峰期权,但 2 台机组均不会被实时调用,则各机组的收益等信息如表 6 所示。

由计算结果可见,虽然对机组支付了定金,但调度中心并未因此而获利。这主要是因为上述燃气轮机签订启停调峰障碍期权合约的原因在于其启停调峰性能好且价格存在优势。若在某些情况下这些优势不再存在,则调度中心无执行合约的必要。由此也表明了电网调度中心签订调峰期权合约具有决定是否执行合约的灵活选择性。此时,燃气轮机虽然仍获得一定的利润,但数额较低,因此燃气轮机为了

表 4 交易双方的相关交易信息

Tab.4 Transaction information of both sides

机组	P_d/MW	$OP_{i,T}$/万元	$SP_{i,T}$/万元	盈利率/%	G_T/万元	ρ_T/万元	调度中心节约的费用/万元
1	100	0.180	2.740	17.27	2.920	3.10	0.180
2	120	0.144	3.432	19.68	3.576	3.72	0.144
3	80	0.044	2.392	22.29	2.436	2.48	0.044

注:P_d 为机组实际被调度容量。

表 5 交易双方的相关交易信息

Tab.5 Transaction information of both sides

机组	P_d/MW	$OP_{i,T}$/万元	$SP_{i,T}$/万元	盈利率/%	G_T/万元	ρ_T/万元	调度中心节约的费用/万元
1	100	0.180	2.74	17.27	2.920	3.1	0.180
2	100	0.144	2.86	20.64	3.004	3.1	0.096
3	0	0	0	—	0	0	0

表 6 交易双方的相关交易信息

Tab.6 Transaction information of both sides

机组	P_d/MW	$OP_{i,T}$/万元	$SP_{i,T}$/万元	盈利率/%	G_T/万元	ρ_T/万元	调度中心节约的费用/万元
1	0	0.180	0	—	0.180	0	-0.180
2	0	0.144	0	—	0.144	0	-0.144
3	0	0	0	—	0	0	0

其长远发展,受制于期权障碍约束,很少会随意高利润报价。

综合上述 3 种典型情况,可知在电价实时变化的调峰市场中,启停调峰的交易方式体现了期权交易规避风险的重要作用,即调度中心总可以以较低的调度费用获得所需要的启停调峰容量,而燃气轮机可避免签订合约而无报酬的风险。期权执行价格不同的机组被调用的几率各异,这同样体现了将障碍期权应用于调峰交易的优势:一方面限制了机组参与调峰交易时报价的随意性和不合理性,避免交易双方的反复竞价,提升了交易的执行效率;另一方面,充分保障了买方的利益,即只有当某期权所产生的价值足够大,该期权才会被执行;同时,也使得报价合理的机组可获得合理收益。

5.3.2 深度调峰双边合约执行情况分析

设第 t 时段系统出现深度调峰缺额 200 MW 且该时段签约机组不参与启停调峰。为了避免系统的不稳定运行,调度中心选择执行深度调峰双边合约。设经 Monte Carlo 模拟,火电机组在该时段提供深度调峰电量的价格为 0.55 元/(kW·h),则各机组的收益等结果如表 7 所示。

表 7 各机组的竞价容量及相关成本

Tab.7 Bidding capacity and related cost of units

机组	P_d/MW	机组盈利/万元	G_T/万元	ρ_T/万元	调度中心节约的费用/万元
1	100	1.20	8.15	5.5	-2.65
2	100	1.37	8.32	5.5	-2.82
3	0	0	0	0	0

由结果可见,即使燃气轮机提供深度调峰的费用高于火电机组的相应费用,此双边合约仍有可能被执行,以在短时内弥补系统调峰缺额,维持系统的安全运行,即调度中心在必要时可以牺牲经济性以确保系统的安全运行。

6 结语

电力市场环境下,可使常处于停机停运状态的小型燃气轮机通过与调度中心签订障碍期权合约为系统提供启停调峰容量,签订普通中长期双边合约为系统提供深度调峰电量,以节约系统的调度费用及缓解系统调峰容量紧缺的状况。

基于障碍期权风险规避及可选择性的特点,本文所设计的启停调峰交易模式既可使调度中心在满足电网启停调峰需求的同时实现调峰容量的经济调度,有效规避实时调峰市场的电价波动,也可使燃气轮机积极发挥其启停调峰优势,持续发展。而基于中长期双边合约的深度调峰交易简单易行,在某些极端情况下可有效利用系统现有资源减少调峰缺额;合约的定价方法简单,定价依据明确,可操作性强。文中以算例证明了合约的有效性和可行性。

参考文献:

[1] 宋云亭,张瑞华. 电力市场环境下蓄能电站的运行效益评估[J]. 电力自动化设备,2002,22(9):27-30.
SONG Yunting,ZHANG Ruihua. Operational benefit evaluation of storage plant in power market[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(9):27-30.

[2] 李丰,张粒子. 大规模风电跨省消纳与交易机制的研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):119-124.
LI Feng,ZHANG Lizi. Accommodation and transaction mechanism of transprovincial large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):119-124.

[3] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化,2001,25(12):53-56.
LIANG Caihao,DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(12):53-56.

[4] 徐润涛. 我国燃气轮机发电站的发展概况及其展望[J]. 燃气轮机技术,1998,11(3):5-10,17.
XU Runtao. The general situation and prospect of gas turbine stations in our country[J]. Gas Turbine Technology,1998,11(3):5-10,17.

[5] 王治华,李扬,卢毅,等. 负荷管理在南京市的应用[J]. 电力自动化设备,2001,21(7):43-45.
WANG Zhihua,LI Yang,LU Yi,et al. Application of load management in Nanjing[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(7):43-45.

[6] 王萍,崔和瑞. 基于资金利润法的上网电价定价方案[J]. 电力自

动化设备,2008,28(6):70-73.
WANG Ping,CUI Herui. Pricing based on capital profit method for onto-grid power[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(6):70-73.
[7] 陈启鑫,康重庆,夏清. 碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(7):22-28.
CHEN Qixin,KANG Chongqing,XIA Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(7):22-28.
[8] 张志锋,徐箭,闫秉科,等. 考虑特高压送风电的湖北电网调峰方案[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):6-11.
ZHANG Zhifen,XU Jian,YAN Bingke,et al. Hubei Power Grid peak load regulation considering wind power transmitted by UHV network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):6-11.
[9] 王建学,王锡凡,张显,等. 电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理(二)——可中断负荷运营[J]. 电力自动化设备,2004,24(6):1-5.
WANG Jianxue,WANG Xifan,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.
[10] 黄永皓,江健健,孟远景,等. 电能平衡与辅助服务的辅助手段——期权[J]. 电力系统自动化,2004,28(5):11-15.
HUANG Yonghao,JIANG Jianjian,MENG Yuanjing,et al. Options: a complementary mechanism for energy balance and ancillary services[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(5):11-15.
[11] 张钦,王锡凡,王建学. 智能电网下需求响应期权分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(6):6-13,50.
ZHANG Qin,WANG Xifan,WANG Jianxue. Analysis of demand response options in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(6):6-13,50.
[12] 王鹏,张灵凌,梁琳,等. 火电机组有偿调峰与无偿调峰划分方法探讨[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):87-90.
WANG Peng,ZHANG Lingling,LIANG Lin,et al. A method for division of paid peak-regulation and free peak-regulation for thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(9):87-90.
[13] 张显,王锡凡,王建学,等. 可中断电力合同中新型期权的定价[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):18-23.
ZHANG Xian,WANG Xifan,WANG Jianxue,et al. Pricing for exotic option of interruptible electricity contracts[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(12):18-23.
[14] 姚尧,姚建刚. 电力市场上网电价与火电系统经济负荷分配的算法研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(2):30-33.
YAO Yao,YAO Jiangang. Algorithm study on economic dispatch in electricity market[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(2):30-33.
[15] 黄粲然,张士杰,王波,等. 燃气轮机发电机组投资成本模型[J]. 燃气轮机技术,2010,23(2):17-23.
HUANG Canran,ZHANG Shijie,WANG Bo,et al. Investment cost model of gas turbine generating unit[J]. Gas Turbine Technology,2010,23(2):17-23.
[16] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan,et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):11-15.
[17] 徐二树,宋之平. 分散能源的研究与应用[J]. 动力工程,2004,24(2):291-297.
XU Ershu,SONG Zhiping. Research and application of distributed power resource[J]. Power Engineering,2004,24(2):291-297.

作者简介:

王娟娟

王娟娟(1978-),女,山西大同人,讲师,博士,研究方向为电力市场中有功辅助服务的成本及成本分摊策略(**E-mail**:wjj_21257@sina.com);

吕 泉(1980-),男,山西吕梁人,讲师,博士,研究方向为大规模风电并网后的风电消纳策略等;

李卫东(1964-),男,辽宁铁岭人,教授,博士研究生导师,研究方向为互联电力系统运行控制与考核标准、电力市场理论与应用、电力系统运行状态可视化和人工智能在电力系统中的应用等。

Peak load regulation transaction mode for gas turbine in electricity market

WANG Juanjuan[1],LÜ Quan[2],LI Weidong[2],ZHAO Wenlei[1]
(1. Dalian Jiaotong University,Dalian 116028,China;2. Dalian University of Technology,Dalian 116024,China)

Abstract: Since the startup and shutdown of gas turbine is quick and inexpensive,while its power output can be easily regulated,it is proposed to carry out the startup/shutdown peak load regulation by the barrier option contract and the deep peak load regulation by the mid- and long-term bilateral contract,between power plant with gas turbine units and power dispatch center in electricity market. The participants and transaction terms should be determined first,the feasible transaction schemes then established,the implement procedures analyzed,and the related prices of peak load regulation transaction finally decided. Analysis shows that,the proposed transaction mode can economically dispatch the startup/shutdown capacity for peak load regulation and increase the peak regulation capacity in crucial time;the repeated biddings are avoided and the execution efficiency of transaction is enhanced. Results of case calculation illustrate its effectiveness and feasibility.

Key words: electricity market; gas turbine; peak load regulation; transaction; barrier option; mid- and long-term bilateral contract