

# 基于独立建模的分轴燃机参与电力现货市场机制

林孙奔, 唐琦雯, 徐立中, 赵一琰

(国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007)

**摘要:** 大规模新能源并网对电力系统调节能力提出更高的要求, 为充分发挥分轴燃气-蒸汽联合循环机组的调节作用, 亟需探索并建立安全、可靠、稳定的现货市场参与机制。首先分析对比了国内外分轴燃机参与市场不同机制的特点及适用性, 结合浙江电力市场建设经验, 详细介绍了基于独立建模的分轴燃机参与现货市场机制: 将分轴燃机按单机形式独立建模, 燃机出力决定汽机出力, 解决了机组建模方式中的依赖关系; 将燃机报价纳入目标函数, 燃机和汽机出力比例纳入约束条件, 解决了套机运行方式多变的问题。之后, 通过对浙江现货市场运行实测数据进行分析, 验证模型设计、控制和收益指标结果的合理性。最后总结经验并为现货市场的多样性发电主体参与机制设计提供支撑。

**关键词:** 分轴燃机; 联合循环; 电力现货市场; 市场模型; AGC

**DOI:** 10.19585/j.zjdl.202209003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A mechanism based on independent modeling for split-shaft gas turbines participating in power spot market

LIN Sunben, TANG Qiwen, XU Lizhong, ZHAO Yiyen

(State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Large-scale integration of new energy presents higher demands on power system regulation capacity. In order to give full play to the regulation function of split shaft gas-steam combined cycle units, it is urgent to explore and establish a safe, reliable, and stable power spot market participation mechanism. Firstly, the characteristics and applicability of different market mechanisms for split-shaft gas turbines at home and abroad are compared and analyzed. Secondly, a mechanism based on independent modeling for split-shaft gas turbines participating in power spot market according to the experience of power market construction in Zhejiang province is introduced in detail. The split-shaft gas turbines are modeled separately, and steam turbine output is determined by the gas turbine output, which puts an end to the dependence relationship between the gas turbines and steam turbines. The gas turbine bid is incorporated into the objective function, and the ratio of gas turbine and steam turbine output is incorporated into the constraint conditions, which solves the problem of the variable operation mode of split-shaft gas turbines. Then the measured data of Zhejiang spot market is analyzed to verify the rationality of the model design, control, and income index results. Finally, experience is summarized and provided for diversified generation entities to participate in mechanism design in the spot market.

**Keywords:** split-shaft gas turbine; combined cycle; power spot market; market model; AGC

## 0 引言

在“30·60”双碳目标背景下, 电力系统从以化石能源为主体向以新能源为主体的新型电力系统转变, 能源结构面临深度调整。燃气-蒸汽联合循环发电机组具有清洁环保、综合效率高、调节性能好、调峰响应快等特点, 在缓解以新能源为主体的新型电力系统的调节压力、促进可再生能源消纳等方面发挥着重要作用。同时, 受制于国内少油贫气的现状和国际不稳定环境的影响, 天然

气气价大幅波动, 亟需通过现货市场进行有效的成本疏导。建立有效的市场化气-电价联动机制, 首要关键是建立分轴燃气-蒸汽联合循环发电机组(以下简称“分轴燃机”)参与电力现货市场的可靠运行机制。

目前, 现货市场中建立的机组与电网调度D5000系统中SCADA(数据采集与监控)及状态估计中物理模型机组一一对应, 市场申报、市场出清及市场发布均以单机为最小单元。然而, 传统模式下, 分轴燃机的AGC(自动发电控制)控制单

元为全厂一个控制单元, 即按照套机的方式进行控制<sup>[1-4]</sup>。传统模式与现货环境下对分轴燃机控制方式的偏差, 限制了其参与现货市场的可行性, 具体体现在以下几个方面:

1) 以单机为最小单元的现货市场系统数据无法与以套机方式进行控制的AGC系统数据进行直接对接, 中间需要通过数据转化。

2) 分轴燃机中的燃气轮机(以下简称“燃机”)、蒸汽轮机(以下简称“汽机”)启停和出力均存在依赖关系, 传统的市场规则无法处理单机组建模方式中的依赖关系。

3) 套机运行方式多变, 若采用分轴燃机运行方式转移来建模, 即针对不同运行模式分别进行申报和出清, 规则、模型及优化算法十分复杂。而目前已有的简化算法是将套机的每一种运行方式视为独立事件, 即在每次优化计算时只能选定一种模式, 具有排他性, 无法做到不同模式间的状态转换, 也无法得到最优的出清结果。

在此背景下如何设计一种考虑分轴燃机参与的电力现货市场运行模型, 最小化出清模型变动, 保证系统的平稳过渡和稳定运行, 成为影响电力系统运行安全、电力用户经济效益的重要挑战。本文在对比分析国内外分轴燃机市场机制的基础上, 结合浙江省电力现货市场建设经验, 重点介绍基于独立建模的分轴燃机参与电力现货市场的机制。

## 1 国内外分轴燃机参与电力市场的机制

### 1.1 美国PJM市场分轴燃机参与机制

分轴燃机在物理上以高压蒸汽热管联结, 燃机和汽机分别带动各自独立的发电单元实现并网发电。国内外在分轴燃机参与电力现货市场上采用各具特色的差异性方案。

国外市场上, 以美国PJM(宾夕法尼亚-新泽西-马里兰)电力市场为例, 分轴燃机有两种报价方式可供选择。第一种是总负荷报价模式。该模式下燃机和汽机组合为一个发电单元参与市场, 允许在日前申报次日不同套机模式的报价。但由于“二拖一”的边际成本较“一拖一”要低, 意味着双拖总负荷的报价反而要比单拖负荷的低, 报价曲线会出现一个断崖式的下降, 如图1所示。因

此, 总负荷报价模式无法通过一次出清选出最优的套机运行模式。该方案下, 出清程序只能将套机的每一种运行方式视为独立的事件, 由市场运营人员手动切换套机模式, 无法做到不同模式间自动切换。

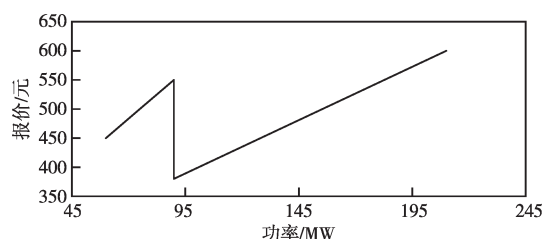


图1 总负荷报价模式

第二种是固定搭配模式。每台燃机均可选择固定比例的汽机容量联合组成独立的虚拟发电单元参与市场, 市场出清程序对每个发电单元独立出清计算。以一个有2台燃机和1台汽机的联合循环电厂为例, 将这3台机组分为两个发电单元, 1台燃机带1/2容量的汽机做为一个发电单元, 市场主体在日前申报时选择具体套机模式, 以单元为单位进行市场申报。每个单元的出清、结算、指令下发与普通机组相同。实际指令按单元下发, 由电厂自行分配给燃机和汽机。该方式亦无法实现不同模式间自动切换。

### 1.2 美国ERCOT市场分轴燃机参与机制

美国ERCOT电力市场中<sup>[5-6]</sup>, 分轴燃机针对不同的运行模式分别进行报价, 出清程序通过模式转换矩阵能够实现模式间的自动切换, 进而选择最优的运行方案。下面以“二拖一”分轴燃机为例介绍ERCOT套机模式切换思路。

分轴燃机分别申报“一拖一”和“一拖二”(如表1所示)等不同模式的三部式电能报价、辅助服务报价和物理参数(最小开关机时间、爬坡率、最大最小技术出力等)。

表1 套机模式类型

套机模式序号	模式类型
1	1台燃机+1台汽机(“一拖一”)
2	2台燃机+1台汽机(“二拖一”)

根据分轴燃机初始状态以及模式转换矩阵(如表2所示), 出清程序会开启可以直接开机的模式, 关停可以直接关停的模式, 每个模式的开机/关机

时间都满足其提交的最小开机/关机时间。从一个模式转换到另一个模式的成本，如果是上升转换，则认为是后一个模式的启动成本与前一个模式的启动成本之差；如果是下降转换，则认为是0。

表2 模式转换矩阵

模式转换矩阵		结束状态		
		停运	模式1	模式2
开始状态	停运	—	↑	↑
	模式1	↓	—	↑
	模式2	↓	↓	—

注：↑表示一个模式可以上升到另一个模式，↓表示一个状态可以下降到另一个模式，实现模式之间的切换。

在潮流计算时，将某一模式的出清电力按照模式内每个物理机组的最大可靠出力为比例分配到各物理机组，进行潮流计算和安全校核。在出清计算时，再按照每个物理机组的最大可靠出力为权重将物理机组的灵敏度系数整合到模式的灵敏度系数，进行机组组合和经济调度计算。

该方案的优点在于系统可以在考虑分轴燃机“一拖一”和“二拖一”不同工况下的报价成本，做到不同运行模式间的顺利切换。但该方案对程序开发要求高，开发耗时较长，且由于不同模式切换的复杂性，一旦电网含多组分轴燃机，出清总耗时将成倍增长。

综合对比美国PJM和ERCOT中分轴燃机参与方式可知，两者均考虑了分轴燃机多模式转化的问题，给予市场主体在日前申报中更多模式的选择。ERCOT采用联合循环机组运行方式转移来建模，能实现不同模式的自由切换，同时也极大增加了规则、模型及优化算法的复杂性；PJM算法较为简便，但难以实现不同模式间状态自由转换。

### 1.3 国内分轴燃机参与市场现状

当前，国内正在推动建设全国统一电力市场体系，引导省际、区域和省(市)各层次电力市场协同运行。不同层次现货市场之间相互耦合，对时序衔接提出了很高的要求，尤其是省级现货市场出清的高效性和及时性。因此，国内分轴燃机市场方案及出清算法应尽可能简化处理，同时要实现分轴燃机不同模式之间的自由切换。

广东现货市场中，由于分轴燃机仅“一拖一”

一种机型，其出清算法进行了简化处理，即燃机和汽机单独申报并出清，同时要求两者开停机状态保持一致，但该简化机制不适用于“一拖二”等复杂的运行工况。浙江现货市场在借鉴国外分轴燃机运营实践的基础上，结合国内实际情况，针对分轴燃机“一拖一”“二拖一”等不同工况，形成了独具创新性的分轴燃机参与市场模式<sup>[7]</sup>。本文结合浙江电力现货市场建设经验，重点介绍基于独立建模的分轴燃机参与电力现货市场的机制。

## 2 分轴燃机参与浙江电力现货市场机制设计

浙江电力现货市场将分轴燃机按照单机形式建模，解决了机组建模方式中的依赖关系；将燃机报价纳入目标函数，套机内燃机和汽机出力比例纳入约束条件，解决燃气-蒸汽联合循环机组套机运行方式多变的问题。通过创新机制设计，在保证套机参与市场的同时，实现系统的平稳过渡和稳定运行。

### 2.1 分轴燃机的独立建模

分轴燃机有“一拖一”“二拖一”等不同模式下的汽机驱动方式<sup>[8-12]</sup>，如图2、图3所示。

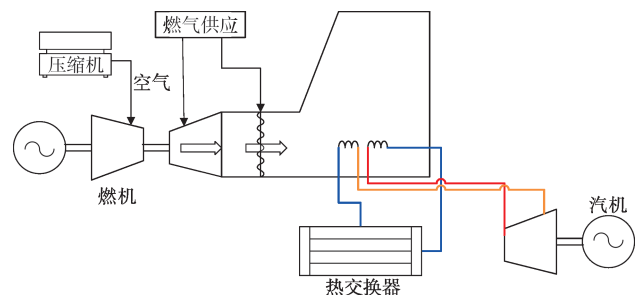


图2 分轴燃机“一拖一”驱动方式

无论分轴燃机以何种模式驱动运行，都可实现燃机和汽机分别独立驱动发电单元并网发电。目前成熟运行的电网调度D5000系统上已按实际运行方式构建了每个发电单位对应的机组模型。浙江电力现货市场出清系统在D5000物理模型基础上，快速建立市场出清和安全校核所需的分轴燃机独立发电单元模型。同时从图4曲线变化趋势可知，汽机以燃机的余热锅炉加热蒸汽驱动，在实际运行中存在相对稳定的比例关系，以此可抽象两者物理模型间的耦合关系，建立比例系数 $R$ ，

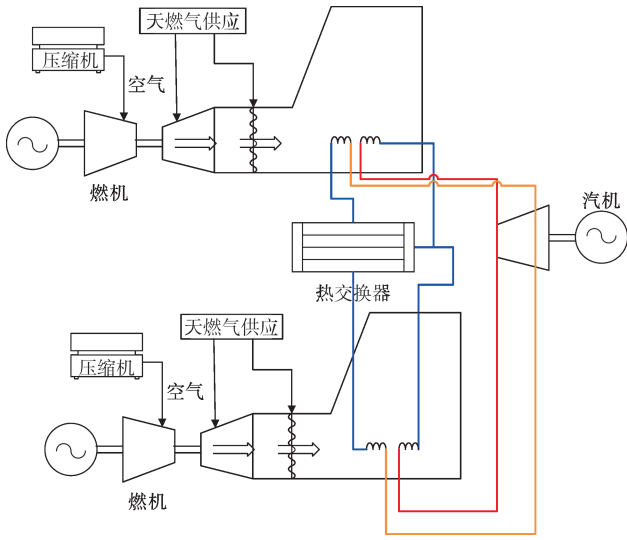


图 3 分轴燃机“二拖一”驱动方式

模型参数。

$$R_t = \frac{P_{s,t}}{P_{g,t}} \quad (1)$$

式中:  $R_t$  为分轴燃机在时段  $t$  汽机和燃机出力比例系数;  $P_{s,t}$  和  $P_{g,t}$  分别为时段  $t$  汽机和燃机的出力值。

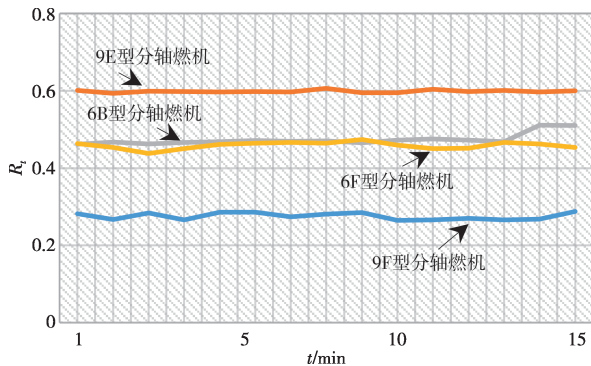


图 4 不同型号分轴燃机实际运行的比例系数  $R_t$

分轴燃机发电单元完成独立建模后, 市场主体在日前申报时, 可将联合循环套机整体发电成本折算至单独燃机发电单元报价中, 以此作为报价策略来决定套机启停和出力, 其中汽机发电单元不参与报价, 按固定比例系数  $R_t$  跟随燃机出力。在燃机申报过程中将汽机的发电成本折算在内, 同时汽机作为决策变量之一, 和燃机一起参与发用电平衡约束, 既保证了电网的发用电平衡, 又确保联合循环分轴燃机与同轴燃机能够同台竞价。

## 2.2 分轴燃机的市场出清模型

浙江电力现货市场出清系统中将分轴燃机按独立模型建模后, 机组约束中需增加以耦合比例参数  $R_t$  为基础的套机约束。通过套机约束解决机组独立建模方式中的依赖关系, 并将燃机报价纳入市场出清目标函数, 套机内的燃机和汽机出力比例纳入负荷平衡约束条件, 以解决分轴燃机套机运行方式多变的问题。

日前市场出清 SCUC (安全约束机组组合) 的目标函数调整为:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [C_{i,t} C_{i,t}^U + C_{i,t}^K] + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T M [L_{l,t}^+ + L_{l,t}^-] + \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T M [L_{s,t}^+ + L_{s,t}^-] \quad (2)$$

式中:  $N$  表示机组的总台数;  $T$  表示所考虑的总时段数, 假设一天考虑 96 时段, 则  $T$  为 96;  $P_{i,t}$  表示机组  $i$  在时段  $t$  的出力;  $C_{i,t}$ 、 $C_{i,t}^U$ 、 $C_{i,t}^K$  分别为机组  $i$  在时段  $t$  的运行费用、启动费用和空载费用, 其中机组运行费用  $C_{i,t}$  是与机组申报的各段出力区间和对应能量价格有关的多段线性函数, 套机仅燃机报价纳入目标函数;  $M$  为用于市场出清优化的网络潮流约束松弛罚因子, 目标函数 SCUC 中该值为  $1 \times 10^8$ ;  $L_{l,t}^+$  和  $L_{l,t}^-$  分别为线路  $l$  在时段  $t$  的正、反向潮流松弛变量;  $L$  为线路总数;  $L_{s,t}^+$  和  $L_{s,t}^-$  分别为断面  $s$  在时段  $t$  的正、反向潮流松弛变量;  $S$  为断面总数。

对于每个时段  $t$ , 系统负荷平衡约束调整为:

$$\sum_{i \in S_{\text{gas}}} P_{i,t} + \sum_{i \in S_{\text{steam}}} P_{i,t} + \sum_{i \in S_{\text{others}}} P_{i,t} + \sum_{n=1}^{N_{\text{tie}}} T_{n,t} = D_t \quad (3)$$

式中:  $S_{\text{gas}}$  表示燃机集合;  $S_{\text{steam}}$  表示汽机集合;  $S_{\text{others}}$  表示其他机组集合;  $\sum_{i \in S_{\text{gas}}} P_{i,t}$  表示燃机集合在时段  $t$  的总出力;  $\sum_{i \in S_{\text{steam}}} P_{i,t}$  表示汽机集合在时段  $t$  的总出力, 即汽机出力作为决策变量纳入系统发用电平衡约束;  $\sum_{i \in S_{\text{others}}} P_{i,t}$  表示所有其他机组在时段  $t$  的总出力;  $T_{n,t}$  表示联络线  $n$  在时段  $t$  的计划功率;  $N_{\text{tie}}$  为联络线总数;  $D_t$  为  $t$  时段的系统负荷。

分轴燃机中燃机和汽机出力比例关系可进一步表达为:

$$\frac{\sum_j^{S_{k,st}} P_{k,j,t}}{\sum_i^{S_{k,gs}} P_{k,i,t}} = \frac{R_{k,st,t}}{R_{k,gt,t}}, k \in S_{Kit} \quad (4)$$

式中： $S_{Kit}$ 表示套机集合； $S_{k,st}$ 表示套机 $k$ 内固定模式下的汽机机组集合； $S_{k,gs}$ 表示套机 $k$ 内固定模式下的燃机机组集合； $P_{k,i,t}$ 表示套机 $k$ 内燃机 $i$ 在时段 $t$ 的出力，是决策变量； $P_{k,j,t}$ 表示套机 $k$ 内汽机 $j$ 在时段 $t$ 的出力，是决策变量； $\frac{R_{k,st,t}}{R_{k,gt,t}}$ 表示套机 $k$ 内汽机与燃机的出力配比。

从调整后的现货市场出清模型函数可知，若分轴燃机作为边际机组，当系统增加 $\Delta n$ 的用电需求时，由燃机和汽机按照比例承担，虽然汽机不报价，但燃机申报过程中将汽机的发电成本折算在内，故系统边际价格相当于由燃机和汽机共同（已考虑折算汽机发电成本）决定；由于汽机出力同样为决策变量，在发用电平衡中体现，故汽机和燃机一起参与了发用电平衡约束，这样既保证了电网的发用电平衡，又确保了分轴燃机与同轴燃机能够同台竞价。同时，为满足分轴燃机不同运行工况需要，市场出清程序可根据市场主体对每台燃机价格的差异化申报，做到“一拖一”和“二拖一”模式的自由灵活切换。

### 2.3 分轴燃机的控制模式

为保证市场出清结果与实际运行结果一致，需建立现货市场申报发电单元与AGC系统厂级控制单元的一对一映射关系（如图5所示）。现货市场出清系统根据分轴燃机内发电机组映射关系进行相关数据的分解和整合，将燃机的出清结果下发到对应的AGC系统厂级控制单元进行机组发电控制，汽机发电单元根据实际管道蒸汽压力跟随发电。

从图6所示9F型分轴燃机的执行情况来看，机组在启机阶段存在明显的曲线偏离，主要因为机组启机过程中是以固定出力方式参与市场，出清系统读取当前值作为计算边界，造成实际曲线与出清曲线存在系统计算时间的偏移；进入稳定运行阶段后，机组出力按市场出清结果执行，市场出清曲线和实际执行曲线变动趋势吻合度很高，偶有偏差波动是因机组参与调频市场引起。

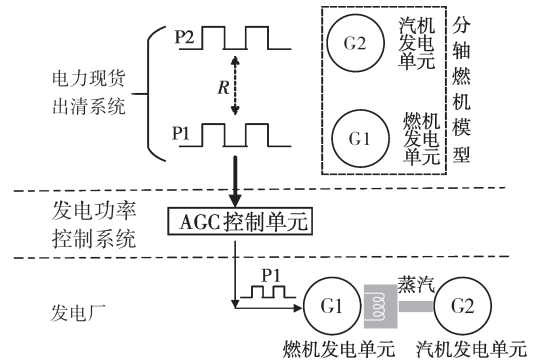


图5 分轴燃机的执行控制模式

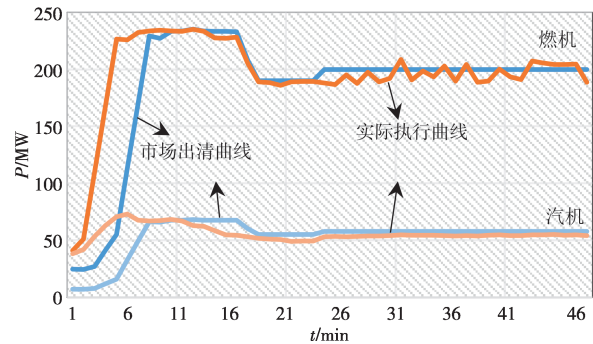


图6 9F型分轴燃机的市场出清和执行曲线

## 3 分轴燃机的收益合理性分析

浙江电力现货市场的机组收益结算遵循“日前基准，合约差价，实时差量”的原则。为简化收益测算模型，仅对分轴燃机在现货市场上的电能量收益部分开展测算，不涉及其合约收益部分。

选取6F型分轴燃机A为测算对象，机组结构为燃气-蒸汽“一拖一”分轴联合循环机组，燃机额定容量80 MW，汽机额定容量40 MW，总容量120 MW，燃机和汽机负荷配比1:0.5。算例中主要测算电能量收益，暂不考虑启动成本和空载成本等补偿。

分轴燃机A内燃机发电单元申报的价格已考虑对应汽机发电成本，汽机不报价不报量，具体申报如表3所示。

表3 分轴机组A的电-成本申报

单调递增申报曲线	燃机出力段/MW	电能报价(元·MWh <sup>-1</sup> )
	...	...
	60	600
	70	700
	80	800
	...	...

日前市场分轴燃机 A 电能量收益主要由出清电量收益和成本补偿收益两部分组成, 具体明细如表 4 所示。

$$F_{\text{日前市场电能收益}} = F_{\text{燃机日前市场电能收益}} + F_{\text{汽机日前市场电能收益}} \\ = 111\ 960 \text{ 元}$$

$$F_{\text{日前市场成本补偿}} = \text{MAX}((F_{\text{日前市场电能成本}} - F_{\text{日前市场电能收益}}), 0) = 36\ 360 \text{ 元}$$

实时市场分轴燃机 A 电能量收益主要由出清偏差电量收益和成本补偿收益两部分组成, 具体明细如表 5 所示。

$$F_{\text{实时市场电能收益}} = F_{\text{燃机实时市场电能收益}} + F_{\text{汽机实时市场电能收益}} \\ = 6\ 660 \text{ 元}$$

$$F_{\text{实时市场电能补偿}} = \text{MAX}((F_{\text{实时市场电能成本}} - F_{\text{实时市场电能收益}} - F_{\text{日前市场电能补偿}}), 0) \\ = 4\ 860 \text{ 元}$$

根据分轴燃机的运行收益情况可知, 通过计算燃机和汽机独立发电单元的电量收益来获得套机的整体电量收益, 当节点价格低于燃机申报价格时, 可由发电成本补偿来保证套机的运行利益。

因此, 调整燃机独立申报策略, 将汽机的发电成本折算至燃机发电成本内, 构建经济模型和物理模型中燃机和汽机相同的依赖关系, 可有效保障分轴燃机在电力现货市场的合理收益。

#### 4 结语

本文首先对比分析了国内外分轴燃机参与市场不同机制的特点及适用性, 进而从浙江电力现货市场实际探索经验出发, 对分轴燃机如何高效、稳定地参与现货市场运行开展了深入分析和研究。结合多次现货市场结算试运行实践数据, 进一步论证了基于独立建模的分轴燃机参与电力现货市场机制的合理性和可靠性。

1) 通过研究分轴燃机中燃机和汽机发电单元的内在联系, 在电力现货市场系统中对每个发电单元进行独立建模, 与调度体系中运行的 D5000 系统内物理模型保持一致, 高效实现了市场出清和安全校核过程中与 D5000 系统的实时数据交互, 避免了复杂的数据转化和特殊处理。

表 4 分轴机组 A 的日前市场电能量收益

时间	节点电价/(元·MWh <sup>-1</sup> )	燃机电量/MWh	燃机收益/元	汽机电量/MWh	汽机收益/元	电能报价/(元·MWh <sup>-1</sup> )	电能成本/元
13:30	285	28.8	8 208	14.4	4 104	600	17 280
14:00	285	28.8	8 208	14.4	4 104	600	17 280
14:30	290	28.8	8 352	14.4	4 176	600	17 280
15:00	295	33.6	9 912	16.8	4 956	700	20 640
15:30	305	33.6	10 248	16.8	5 124	700	20 640
16:00	310	33.6	10 416	16.8	5 208	700	20 640
16:30	320	28.8	9 216	14.4	4 608	600	17 280
17:00	350	28.8	10 080	14.4	5 040	600	17 280
合计	—	244.8	74 640	122.4	37 320	—	148 320

注: 日前市场结算电量为出清电量。

表 5 分轴机组 A 的实时市场电能量收益

时间	节点电价/(元·MWh <sup>-1</sup> )	燃机电量/MWh	燃机收益/元	汽机电量/MWh	汽机收益/元	电能报价/(元·MWh <sup>-1</sup> )	电能成本/元
13:30	290	28.8	0	14.4	0	600	17 280
14:00	290	28.8	0	14.4	0	600	17 280
14:30	295	28.8	0	14.4	0	600	17 280
15:00	300	38.4	1 440	19.2	720	800	24 480
15:30	310	38.4	1 488	19.2	744	800	24 480
16:00	315	38.4	1 512	19.2	756	800	24 480
16:30	325	28.8	0	14.4	0	600	17 280
17:00	355	28.8	0	14.4	0	600	17 280
合计	—	—	4 440	—	2 220	—	159 840

注: 实时市场结算电量为计量电量; 燃机收益和汽机收益均是和日前市场偏差电量的收益。

2)通过调整燃机独立申报策略,将汽机的发电成本折算至燃机发电成本内,以此来决定套机在电力现货市场内的启停和出力曲线,构建了经济模型和物理模型中燃机和汽机相同的依赖关系。同时,汽机作为决策变量和燃机一起参与发用电平衡约束,既保证了电网的发用电平衡,又确保了联合循环分轴燃机与同轴燃机能够同台竞价。

3)构建包含分轴燃机的电力市场出清模型,仅将燃机报价纳入目标函数,通过预置的燃机和汽机比例关系,将汽机作为决策变量体现在发用电平衡约束中,将套机多种运行模式之间复杂的转换模型简化为两台独立机组的优化算法,在满足平衡约束的基础上通过目标最优化自动筛选出最优的套机运行模式,既大幅简化了模型算法,又避免了传统优化算法一天只能选择一种运行模式的排他性,解决了燃气联合循环机组套机运行方式多变的问题。

## 参考文献

- [1] 赵春,王培红.燃气-蒸汽联合循环热经济学分析评价指标研究[J].中国电机工程学报,2013,33(23):44-50.
- [2] 王娟娟,吕泉,李卫东,等.电力市场环境下燃气轮机调峰交易模式研究[J].电力自动化设备,2014,34(1):48-54.
- [3] 张慧奇.电力市场环境下的燃气轮机综合供能模式研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [4] 李荣青,张蕤.英国电力市场下CCGT发展前景分析[J].能源与节能,2013(7):25-26.
- [5] HUI H L, YU C N, GAO F, et al. Combined cycle resource scheduling in ERCOT nodal market [C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [6] ERCOT White Paper: Combined-cycle unit modeling in the nodal design[EB/OL].[2017-06-24].http://www.ercot.com.
- [7] 浙江省发展和改革委员会,浙江省能源局,国家能源局浙江监管办公室.浙江电力现货市场第五次结算试运行工作方案[Z].杭州:浙江省发展和改革委员会,2021.
- [8] 何语平.大型天然气联合循环电厂机组的轴系配置[J].中国电力,2004,37(8):7-9.
- [9] 司派友,左川.“二拖一”燃气-蒸汽联合循环机组的并网与退汽[J].热力发电,2010,39(12):61-64.
- [10] 宋亚军,王维萌,吴昕,等.联合循环二拖一机组供热经济性关键技术研究[J].电站系统工程,2019,35(4):75-78.
- [11] 赵军锋,何改平.S209FA型燃机“二拖一”联合循环并网及解汽应用研究[J].中国电力,2015,48(6):156-160.
- [12] 司派友.当前国产化联合循环机组系统存在的风险辨析及对策[J].华北电力技术,2016(4):65-70.

收稿日期: 2022-05-15; 修回日期: 2022-07-07

作者简介:

林孙奔(1985),男,工学硕士,工程师,主要从事电力调度计划及电力市场设计、分析与运营工作。

唐琦雯(1989),女,工学硕士,高级工程师,主要从事电力调度计划及电力市场设计、分析与运营工作。

(本文编辑:方明霞)