

Research on the Economic Operation Decision Model of Coal-fired Power Units under Deep Peak-shaving

Yong He¹ Xiaojun Zhao² Jingdong Xu² Yongchao Pang²

1. China Resources Power Holdings Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

2. Rundian Energy Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

With the continuous advancement of the “dual carbon” goals, the demand for new energy consumption has risen, and the peak-shaving limit of coal-fired power units has been lowered year by year. To scientifically participate in deep peak shaving and balance the relationship between peak-shaving auxiliary services and the index of coal consumption for power supply, this study takes a 600MW supercritical unit as an example, and conducts research on the coal consumption calculation model of the unit under deep peak-shaving conditions by using on-site operation data and the results of on-site high-precision performance tests based on ASME standards. Through verification, this model can accurately calculate the increase in coal consumption at various load sections under deep peak-shaving conditions. Based on the dynamic relationship between the increase in fuel costs and peak-shaving subsidies, and with the goal of maximizing the overall economic benefits of the power plant, a deep peak-shaving operation plan is formulated. The research results can provide a reference for the energy-saving management of deep peak shaving of coal-fired power units in the industry.

Keywords

deep peak shaving; coal consumption for power supply; operation decision model

煤电机组深度调峰工况经济运行决策模型研究

和勇¹ 赵晓军² 徐靖东² 庞永超²

1. 华润电力控股有限公司, 中国·广东深圳 518000

2. 润电能源科学技术有限公司, 中国·河南郑州 450000

摘要

随着“双碳”目标持续推进, 新能源消纳需求升高, 煤电机组调峰极限逐年下探。为了科学参与深度调峰, 平衡调峰辅助服务和供电煤耗指标的关系, 以某600MW超临界机组为例, 借助现场运行数据及基于ASME标准的现场高精度性能试验结果, 开展机组深度调峰工况下煤耗测算模型研究。通过验证, 该模型可精确测算深度调峰工况下各负荷段煤耗升高情况。基于燃料成本增加与调峰补贴的动态关系, 以全厂经济效益最大化为目标, 制定深度调峰运行方案。研究成果可为业内煤电机组深度调峰节能管理工作提供参考。

关键词

深度调峰; 供电煤耗; 运行决策

1 引言

在碳达峰、碳中和背景下, 为加快构建以可再生能源发展为主体的新型电力系统, 保障电力系统稳定、高效、安全运行, 煤电机组将逐步向兜底保障性和系统调节性电源转型, 深度调峰将成为机组运行常态^[1,2]。

目前多个省份相继出台调峰补贴政策, 引导煤电机组参与深度调峰。由于深度调峰下机组严重偏离设计工况, 一方面导致运行煤耗升高, 增加运营成本; 另一方面深度调峰使机组运行工况恶化, 降低了设备安全稳定性。因此开展深

度调峰经济运行研究, 指导煤电机组科学参与调峰辅助服务市场, 平衡调峰服务收益与供电成本、设备维护成本的关系, 对煤电企业具有重要意义^[3]。

本文将以其600MW超临界机组为例, 通过高精度现场性能试验, 测定机组各负荷工况能耗数据, 在此基础上建立深度调峰影响机组供电煤耗的核算模型。结合当地调峰补贴政策, 制定机组在深度调峰市场下最佳运行方式。

2 深度调峰能耗测算方法简介

2.1 性能试验方法说明

试验按照美国机械工程师协会《汽轮机性能试验规程》(ASME PTC6-2004)和《电站锅炉性能试验规程》(GB/T10184-2015)要求进行, 选取16.7%~100%负荷工况进行

【作者简介】和勇(1982-), 男, 中国甘肃会宁人, 本科, 工程师, 从事电力运行与节能管理研究。

能耗测试，通过试验测得汽轮机热耗率、锅炉效率和厂用电率，并计算机组供电煤耗。

试验时，原则上杜绝与其他机组的汽水联系，对机组汽水系统严密性进行监测，采取必要的隔离措施。通过对运行参数的分析，选取可靠的基准流量和符合要求的试验参数，由此确保各负荷工况之间能耗相对差异的准确性^[4]。

为使试验结果尽可能反映机组日常运行的能耗状况，试验时汽机侧将主汽压、主汽温、再热汽温和循环水流量等主要可控运行参数按日常方式控制，试验结果计算时不进行修正^[5]。锅炉效率试验时，同样保持日常的运行参数控制方式和辅机运行方式，针对40%以下负荷工况可能存在的2种磨煤机运行方式分别进行试验，试验结果取2次试验平均值，并以50%负荷工况的煤质参数和环境温度为基准进行偏差修正，以确保不同负荷工况间锅炉效率相对差异的准确性。

2.2 深度调峰影响煤耗测算模型

深度调峰对供电煤耗的影响应采用分段测算，将运行工况分为40%~50%负荷段，30%~40%负荷段，30%以下三个负荷段，按月度划分运行数据，统计机组在各负荷段运行的时间和深度。通过分析各负荷段时长、电量统计数据，得出该负荷段的平均负荷率。根据能耗特性，计算出该负荷率下的汽机热耗率、锅炉效率及厂用电率，进而计算该负荷段下的平均供电煤耗。

$$b_n = \frac{HR_e}{29.307 \times \eta_b (1 - r_a) \eta_p}$$

式中： b_n ——机组供电煤耗，g/(kW·h)；

HR_e ——汽轮机热耗率，kJ/(kW·h)；

η_b ——锅炉热效率，%；

η_p ——管道效率，取设计值99%；

r_a ——厂用电率，%。

根据GB2589规定，标准煤低位热值为29.307kJ/g。

通过加权计算，得出深度调峰对月度、年度供电煤耗的影响，具体计算方法如下：

$$\Delta B_b = (B_{40-50\%} - B_{50\%}) \eta_{40-50\%} + (B_{30-40\%} - B_{50\%}) \times \eta_{30-40\%} + (B_{<30\%} - B_{50\%}) \eta_{<30\%}$$

式中： ΔB_b ——调峰影响供电煤耗值，g/kWh；

$B_{50\%}$ ——50%负荷率对应煤耗，g/kWh，根据深度调峰基准负荷确定；

$B_{40-50\%}$ ——40%-50%负荷段对应供电煤耗，g/kWh；

$B_{30-40\%}$ ——30%-40%负荷段对应供电煤耗，g/kWh；

$B_{<30\%}$ ——30%以下负荷段对应供电煤耗，g/kWh；

$\eta_{40-50\%}$ ——40%-50%负荷段电量占比，%；

$\eta_{30-40\%}$ ——30%-40%负荷段电量占比，%；

$\eta_{<30\%}$ ——30%以下负荷段电量占比，%。

3 深度调峰决策模型

发电企业采用“阶梯式”报价方式和价格机制，分档报价。从第一档至深度调峰最小维持出力档必须连续递增报价，深度调峰最小维持出力档以下可单独进行停机调峰报价。发电机组可根据自身技术能力申报最低调峰下限，调峰下限不得高于机组额定容量的45%。

表1 深度调峰报价原则

报价档位	机组负荷率	报价下限 (元/kWh)	报价上限 (元/kWh)
第一档	40%≤负荷率<45%	0	0.2
第二档	30%≤负荷率<40%	0.3	0.5
第三档	负荷率<30%	0.5	0.7

根据深度调峰报价原则，结合企业实际深度调峰深度及时长，预计调峰辅助服务收益，作为机组决策模型的输入数据。

深度调峰决策模型主要分析调峰成本、调峰时长及调峰深度，对调峰收益及成本进行综合核算，用于指导制定发电策略及复盘分析，具体需填报的数据及方法如下：

表2 主要数据获取方式

指标	单位	填报方式	注意事项
调峰辅助服务收益 (不含税)	万元	手动填写	按月度暂估值进行填报，结算后更新结算值。
入炉标煤单价(不含税)	元/吨	手动填写	以财务口径为准
发电量	万kWh	手动填写	全厂发电量
50%负荷工况下供电煤耗	g/kWh	手动填写	以性能试验数据为准
机组额定容量	MW	手动填写	铭牌额定容量
实时功率数据	MW	手动填写	每10分钟取一点，按月填至相应月份
锅炉效率	%	拟合公式	以性能试验数据为基准
汽机热耗	kJ/kWh	拟合公式	以性能试验数据为基准
发电厂用电率	%	拟合公式	以性能试验数据和近期机组运行数据为基准

4 案例分析

4.1 机组简介

以某600MW等级机组为研究对象，汽轮机为东方汽轮机厂制造的630MW超临界、一次中间再热、单轴、三缸四排汽、双背压、凝汽式汽轮机，型号为：N630-24.2/566/566。

锅炉为哈尔滨锅炉厂生产的超临界参数、单炉膛、一次再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊II型锅炉，型号为：HG-1970/25.4-PM18。燃烧设备采用前后墙对冲燃烧方式的旋流煤粉燃烧器，总共32只LNASB型燃烧器。采用双进双出钢球磨直吹式制粉系统，每台炉配动叶可调轴流式一次风机2台、动叶可调轴流式送

风机2台、动叶可调轴流式引风机2台、容克式三分仓回转式空气预热器2台。

4.2 试验结果

试验采用符合 ASME PTC6-2004 标准的高精度低 β

值喉部取压长颈喷嘴测量主凝结水流量，在 620MW、475MW、315MW、240MW、165MW 负荷工况下，测定汽轮发电机组的主要经济指标：汽轮机缸效率、热耗率、锅炉效率、厂用电率，计算发、供电煤耗。

表 3 主要试验结果汇总表

参数名称	单位	630MW	475MW	300MW	240MW	180MW	140MW	105MW
试验热耗率	kJ/kWh	8066.42	8103.37	8537.73	8748.99	9034.08	9016.2	9427.12
修正后热耗	kJ/kWh	7840.32	8056.23	8409.82	8655.68	8912.71	9063.43	9340.24
发电机输出功率	kW	627194	478084	300234	238715	179260	140519	105032
励磁功率	kW	1239	742	538	355	297	275	256
高厂变功率	kW	32992	22128	15239	14695	13524	12593	12839
厂用电率	%	5.26	4.63	5.08	6.16	7.54	8.96	12.22
锅炉效率	%	92.161	92.817	92.435	92.985	91.92	90.891	90.053
修正后锅炉效率	%	92.671	93.583	92.837	92.788	91.777	90.716	89.608
试验机组发电煤耗率	g/kWh	301.66	300.90	318.34	324.29	338.73	341.89	360.80
试验机组供电煤耗率	g/kWh	318.41	315.50	335.36	345.56	366.37	375.55	411.04
修正后机组发电煤耗率	g/kWh	291.59	296.70	312.21	321.51	334.70	344.34	359.25
修正后机组供电煤耗率	g/kWh	307.78	311.10	328.91	342.60	362.02	378.24	409.28

表 4 机组深度调峰综合效益计算表

调峰负荷	MW	260	240	210	180	140	105
负荷率	%	41.3	38.1	33.3	28.6	22.2	16.7
调峰负荷煤耗	g/kWh	336.81	341.06	349.27	360.44	381.59	407.88
调峰煤耗增加	g/kWh	4.08	8.33	16.54	27.71	48.86	75.15
标煤单价(税后)	元/吨	550	550	550	550	550	550
煤耗增加造成费用增加	万元/小时	0.06	0.11	0.19	0.27	0.38	0.43
助燃油用量	吨/小时	0	0	0.3	0.6	1.2	1.8
助燃油费用	万元/小时	0	0	0.14	0.29	0.58	0.86
除盐水耗量	吨/小时	0	0	50	100	100	100
消耗除盐水费用	万元/小时	0	0	0.06	0.11	0.11	0.11
增加费用合计	万元/小时	0.06	0.11	0.39	0.67	1.06	1.41
调峰服务收入(报价系数 1.0)	万元/小时	0.4700	1.2300	2.7300	4.4100	7.2100	9.6600
调峰服务收入(报价系数 0.5)	万元/小时	0.2350	0.7950	1.9950	3.3750	5.7750	7.8750
调峰服务收入(报价系数 0.3)	万元/小时	0.1410	0.6210	1.7010	2.9610	5.2010	7.1610
综合收益(报价系数 1.0)	万元/小时	0.4117	1.1200	2.3399	3.7377	6.1478	8.2520
综合收益(报价系数 0.5)	万元/小时	0.1767	0.6850	1.6049	2.7027	4.7128	6.4670
综合收益(报价系数 0.3)	万元/小时	0.0827	0.5110	1.3109	2.2887	4.1388	5.7530

4.3 深度调峰综合收益分析

根据调峰辅助服务规则，深度调峰补偿方式参照表 1，有偿调峰的基准为 45% 额定负荷，该工况下机组供电煤耗为 332.73g/kWh。深度调峰计费周期为 15 分钟。根据以上标准，分析机组在不同调峰区间内 1h 的调峰收益情况，结果详见表 4。对比分析在不同调峰工况下的收益情况，深度调峰负荷越低，调峰综合收益越高。在各负荷段的深调报价越高，收益也越高，需要结合往期出清情况确定最佳报价，如图 1 所示。标煤单价对深调收益具有较大的影响，在不同

深调负荷下，收益随着煤价的升高而逐渐降低，如图 2 所示。

5 结论

以某 600MW 等级机组为研究对象，通过现场运行数据及高精度性能试验结果，建立机组深度调峰工况下煤耗测算模型，测算深度调峰工况下机组煤耗升高情况。根据运行成本增加与调峰补贴的深调收益计算模型得出：深度调峰综合收益受到深调负荷、报价策略、标煤单价等因素的影响。发电企业应根据实际边界条件，制定最佳的深度调峰运行方式，以期获得最大收益。

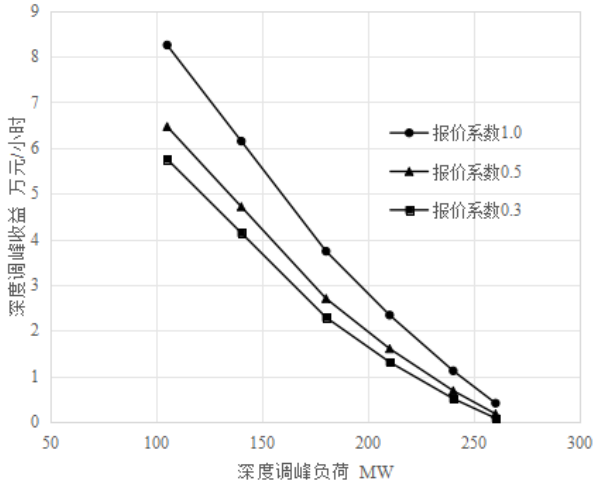


图 1 深度调峰综合效益变化趋势图

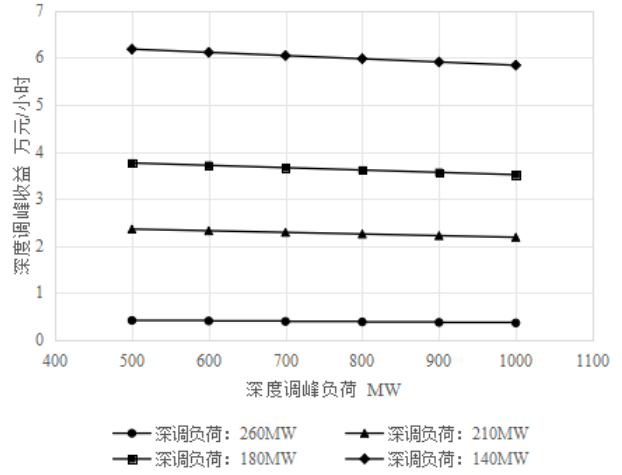


图 2 标煤单价对对深度调峰综合效益的影响情况

参考文献

[1] 孙海峰, 王兆辉, 王建峰, 等. 600 MW超临界机组深度调峰安全可靠运行解析[J]. 华电技术, 2020, 42(12): 94-100.
 [2] 朱法华, 王玉山, 徐振, 等. 中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(03): 9-16.
 [3] 刘文胜, 吕洪坤, 蔡洁聪, 等. 600MW亚临界锅炉30%额定负荷深

度调峰试验研究[J]. 锅炉技术, 2019, 50(4): 59-65.
 [4] 刘文胜, 吕洪坤, 蔡洁聪, 等. 600MW亚临界锅炉30%额定负荷深度调峰试验研究[J]. 锅炉技术, 2019, 50(4): 59-65.
 [5] 黄庆华, 严卫春, 阳虹, 等. 降低大功率煤电汽轮机宽低负荷调峰运行热耗的关键技术[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1161-1166.