

# 中国煤电机组调峰运行现状分析

王伟<sup>1</sup>, 徐婧<sup>2</sup>, 赵翔<sup>1</sup>, 袁晓江<sup>1</sup>, 李振新<sup>1</sup>

(1. 国网山西省电力公司检修公司, 太原 030002; 2. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 随着国家电网提出的“全球能源互联网”的加快构建, 风电、太阳能等新能源发电的大规模并网, 但其出力不稳定的特定使得电力负荷的峰谷差日趋增大, 电网调峰压力增加。而我国目前的能源形势和电力装机结构决定了煤电机组将承担主要调峰任务。分析了煤电机组在参与调峰过程中, 长期处于变工况运行时引起的各类问题, 从煤电机组调峰的需求、调峰方式、调峰引起的新问题及煤电机组参与调峰相关政策支持等角度出发进行分析。结果表明机组调峰运行时, 各主、辅设备偏离最佳运行工况, 对设备安全、能源利用率、环境污染物排放等造成一定的影响。在此基础上, 从政策制定和电网调度侧出发, 提出了应对调峰问题的相关建议, 以实现社会资源的优化配置。

**关键词:** 煤电机组; 调峰; 现状

中图分类号: TM727

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0018-07

## Analysis on Peak Load Regulation Status Quo for Coal-fired Power Plants in China

WANG Wei<sup>1</sup>, XU Jing<sup>2</sup>, ZHAO Xiang<sup>1</sup>, YUAN Xiaojiang<sup>1</sup>, LI Zhenxin<sup>1</sup>

(1. State Grid Shanxi Electric Power Maintenance Company, Taiyuan 030002, China;

2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** With the development of “Global Energy Internet”, wind power, the installation of solar power and other new energy power generation increases a lot. One of the most urgent problems facing power grids in China is the growing peak-valley difference. Coal-fired power plants, the main power supply, have to play an important role in peak load regulation in the future. Peak shaving demand, operation modes and new problems threaten the safety of units and relevant support policies were summarized and analyzed in this paper. Results showed that the main and auxiliary equipment deviates from the best operation condition when they take participate in the peak regulation, which would cause high safety barriers, energy-consuming problems, and environmental pollutants and some other issues. Finally, this work provides some guidance for policy-making and power grid dispatching with some recommendations to deal with the peak load regulation problem.

**Key words:** coal-fired power plant; peak load regulation; status quo

近年来, 我国能源电力消费不断增长, 装机容量也跃居世界首位, 面对“加快全球能源互联网构建”的能源发展战略, 绿色发电的装机比重大幅上升, 但风能、太阳能等大规模并网发电对电力系统调峰带来的挑战成为亟需妥善解决的问题。我国的

资源禀赋决定了煤电机组成为各电网电源结构的中流砥柱, 因此, 煤电机组承担主要调峰任务将是今后一段时间的必然趋势。然而, 煤电机组参与调峰运行时, 机组所处运行工况频繁变化, 各主辅设备频繁启停, 阀门等反复开关, 对机组运行的可靠性造成一定的影响。同时, “雾霾”等环境问题的日益严峻, 迫使电力企业节能减排力度不断增大, 煤电机组调峰运行面临着安全与节能环保的双重压力。本文对我国当前的调峰需求进行深入分析, 阐述了煤电机组几种调峰方式, 分析了煤电机组调峰所面

收稿日期: 2016-08-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XS88)

作者简介: 王伟(1990), 男, 山西朔州人, 高级工程师, 学士, 主要从事超(特)高压输电线路运维工作(e-mail)857175908@qq.com。

临的新问题, 总结了煤电机组参与调峰相关政策, 并提出了应对调峰问题的相关建议。

## 1 调峰需求分析

随着我国经济发展进入“新常态”, 国内经济增速放缓的同时电力需求增长也同步放缓。2015 年全社会用电量为  $5\,550\text{TWh}$ , 增幅仅为  $0.5\%$ , 全口径发电量同比下降  $2.3\%$ , 其中火电机组出现负增长, 全国  $6\text{ MW}$  及以上电厂发电设备的平均利用小时数仅为  $4\,329\text{ h}$ , 达到 1978 年以来的最低水平<sup>[1]</sup>。据电力行业一般规则, 若全年设备利用小时数低于  $4\,500\text{ h}$ , 则表明该地区电力产能过剩。

然而, 近年来, 节能减排、电源结构调整等政策使水电、风电、太阳能发电等可再生能源呈快速发展势头。如图 2 所示, 我国并网风电和太阳能发电的装机容量分别达到  $128.3\text{ GW}$  和  $41.58\text{ GW}$ , 二者总装机比例已经达到  $11.3\%$ 。但风能发电出力随机性强, 波动性大, 基本无法与负荷匹配, 削峰填谷能力弱; 太阳能间歇性、波动性特点决定了其出力稳定性难以保证<sup>[2]</sup>, 随着风电、太阳能等清洁能源的大规模集中并网, 电网调峰需求和调峰难度进一步增大。如图 1 所示, 京津冀地区的电网典型日负荷曲线图, 其峰谷差已经达到  $30.6\%$ 。

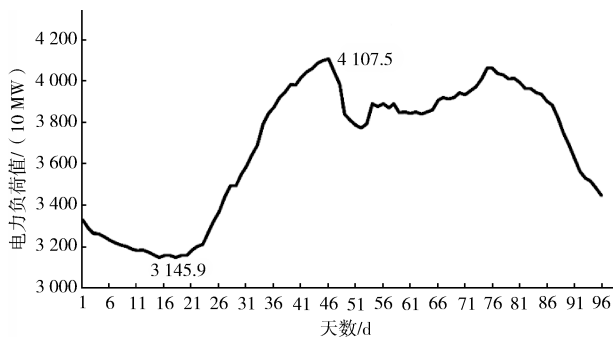


图 1 京津唐电网冬季典型日负荷曲线 96 点图

Fig. 1 A daily load curve with 96 points of Jing-Jin-Tang power grid

国内各电网装机电源中, 水电机组、抽水蓄能电站和燃气机组等灵活电源都可以有效解决调峰问题, 但其装机占比严重偏低。近年来我国大力兴建和扩建水电机组, 在我国水电机组装机容量快速增长的情况下, 水电的利用水平却由于生态、移民、环保以及季节因素等的影响一直处于较低水平<sup>[3]</sup>, 现今水电机组的发电量占比只有  $16\%$  左右, 远不能

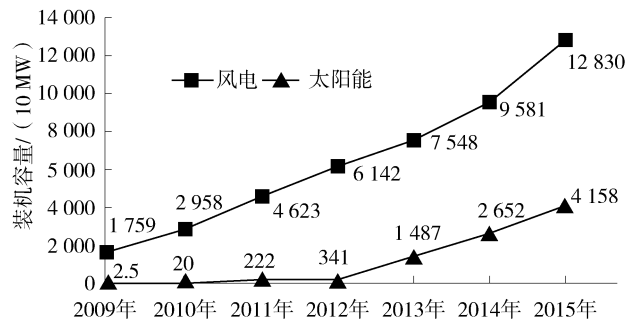


图 2 2009—2015 年我国风电、太阳能装机容量  
(数据来源: 国家能源局)

Fig. 2 2009—2015 Wind power installation and solar power installation (Source: National Energy Administrator)

满足电网  $30\%$  乃至更高的峰谷差的调整要求。

抽水蓄能电站兼有调峰和填谷的双重功能, 同时具有调频、调相、黑启动、事故备用的功能特点, 调峰幅度大, 启动速度快<sup>[4]</sup>。尽管近年来抽水蓄能电站的装机逐年增加, 但由于抽水蓄能电站的建设受地理条件的限制, 截止到 2013 年底, 其装机比例也仅为  $1.73\%$ , 比重严重偏低。

燃气机组也是解决调峰问题的有效手段之一, 它启停迅速、操作灵活、负荷升降速率较快、运行过程的性能稳定可靠, 但其运行成本较高<sup>[5]</sup>。以国华余姚燃气电站为例, 工程实际造价为  $2\,836\text{ 元/kW}$ , 统计的全口径发电成本为  $0.731\text{ 元/kWh}$ , 高于一般煤电机组。同时, 我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋也在一定程度上限制了燃气机组大规模发展。

随着核电机组的大规模建设发展, 我国已经成为核电在建规模最大的国家。然而, 随着核电在电网中的比重逐渐增长, 是否需要核电参与调峰已经成为一个需要关注的问题。在核电装机容量占比较大的国家, 如法国、韩国、日本和美国等, 大部分核电机组需要承担一定的调峰任务, 功率调节速率每分钟约为额定容量的  $0.25\% \sim 5\%$ 。然而, 核电机组的调峰运行对机组运行的安全性和经济性造成一定的影响, 考虑到抽水蓄能电站具有良好的调峰特性, 因此, 许多专家学者建议将两者联合运行以满足电力系统的调峰需求。

可见, 电网调峰电源匮乏与电力负荷调峰需求增加之间的矛盾日渐突出。由图 3 所示的“2009—2014 年中国火力发电装机容量构成及所占比例”可以看出, 虽然近年来新能源发展迅猛, 我国火电机

组装机容量占电力总装机的比例开始有所下降,但火力发电仍然是电网的主要组成结构,且火电机组装机容量占优这一状况在未来一段时间内基本不会发生变化<sup>[6]</sup>。因此,在今后的一段时期内,煤电机组仍将是参与电网调峰的主力电源。

## 2 煤电机组调峰运行主要方式

一般来说,煤电机组调峰运行的主要方式有:低负荷运行、两班制运行、少蒸汽无功运行和轮停调峰<sup>[7]</sup>。

20世纪60年代,我国主要由容量小、启停迅速的煤电机组两班制调峰运行,基本可以满足电网调峰需求。两班制运行方式是指小容量煤电机组在白天时正常运行,到夜间负荷低谷时停机,次日清晨再热态启动,以次循环<sup>[8]</sup>。两班制运行机组其可调出力大,调峰效果显著,但频繁启停对机组寿命及设备安全状况造成一定的影响。但随着“以大代小”、“以煤代油”政策的实施,原两班制运行调峰的煤电机组逐年关停<sup>[9]</sup>,据统计200 MW等级其以下的煤电机组占整个火电装机比例仅为5%,远不能满足日益增大的调峰需求。

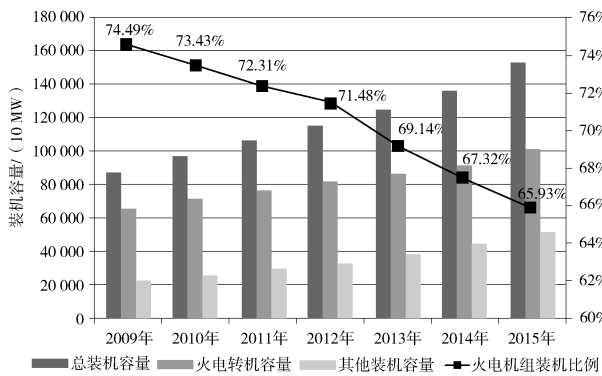


图3 2009—2015年火电机组装机容量及所占比例  
(数据来源:国家能源局)

Fig. 3 2009—2015 Thermal power installation (MW) and its proportion (Source: National Energy Administrator)

汽无功运行方式是20世纪80年代以前电网调整频率和电压的主要手段之一,其在夜间电网负荷低谷时将机组负荷减至零,但不与电网解列,吸收少量电网功率,使机组仍处于额定转速旋转热备用的无功状态<sup>[10]</sup>。但相对两班制调峰,少汽无功运行需要消耗更多能源,随着技术地不断进步,这种方法已经很少被采用。

低负荷运行方式是通过改变机组负荷来满足系

统调峰需要的运行方式,我国大部分并网煤电机组都是受电网调度,即自动发电控制 AGC (Automatic Generation Control),机组通过改变自身的参数来跟随电网负荷指令的变化。一般地,机组调峰变负荷范围为机组额定出力的50%~100%。现役300 MW及其以上容量等级的煤电机组大都采用低负荷运行方式参与调峰。

轮停调峰是在新的能源形势提出的一种有效解决调峰矛盾的一种运行方式。轮停调峰一般指由省级电网或区域电网统一调度,安排网内各机组定期、有序、轮流运行,以减少由于大量煤电机组处于低负荷运行带来的资源浪费与环境污染。煤电机组轮停调峰在电力需求放缓的今天已经是一种必然趋势。国家能源局2014年9月发布的《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》也明确提出:“合理确定燃煤发电机组调峰顺序和深度,积极推行轮停调峰,探索应用启停调峰方式,提高高效环保燃煤发电机组负荷率”<sup>[11]</sup>。四川电网是典型的推行煤电机组轮停调峰的电网,四川省水资源丰富,截止2014年底全省水电装机62.417 GW,火电装机仅有12.4502 GW,为支持发展清洁电力,同时避免煤电机组长期在低负荷率下运行,四川电网安排在丰水期煤电机组轮流发电,以保证水电消纳。

## 3 煤电机组调峰运行面临的新问题

20世纪80年代,我国开始对调峰问题有较多的关注,机组调峰运行,频繁地出现过渡工况,各部件的热工况发生较大变化,汽轮机、锅炉等主、辅部件承受由于频繁的温度变化所引起的热应力,产生一定的疲劳损伤<sup>[12]</sup>。对此许多专家学者已经做了相应的研究,电力部热工研究院<sup>[13]</sup>通过实验分析了机组在调峰时蠕变疲劳交互作用下对主蒸汽管道寿命损耗的影响;文献[14-15]建立了汽轮机组调峰运行时的汽轮机转子寿命分析的模型,对调峰过程中转子的温度、热应力分布情况以及疲劳寿命损耗进行了分析;文献[16]分析了调峰运行对给水泵、除氧器、高压加热器的影响;文献[17-18]等就火电机组调峰时锅炉燃烧稳定性及水动力的稳定性进行了详细地分析。

上述研究主要针对小容量机组在调峰运行时,电站锅炉、汽轮机等主辅设备的运行安全进行分

析, 但随着现今的电源结构及调峰需求日益增大, 大型燃煤机组被迫参与低负荷调峰运行乃至深度调峰运行, 同时对机组变负荷速率有一定要求。以南方区域网为例, 300 MW、600 MW、1 000 MW 燃煤机组的实际变负荷速率要求分别达到 2.5% THA、2% THA 和 1.5% THA。随着参与调峰任务机组的容量日趋增大, 设备需要频繁突破基本调峰下限, 不可避免地会带来新的问题。通过对现役机组大量试验及现场运行情况统计分析可知, 目前大型燃煤机组参与低负荷调峰运行出现以下新的需要关注的问题。

### 3.1 氧化皮问题

氧化皮问题是超临界、超超临界机组参与调峰不能忽视的问题。随着锅炉蒸汽参数的提高和选择粗晶、不加表面处理的奥氏体不锈钢, 机组部分材料氧化性能较低, 在运行中高温过热器、高温再热器管内不可避免会产生氧化层, 在运行控制不精确的情况下出现管材超温, 由此会产生多相超厚氧化层(容易脱落的氧化皮)。当氧化层达到一定的厚度, 就会在运行条件变化(如快速变负荷或机组快速启停过程, 导致管壁温度突然大幅变化)时剥落, 成为脱落氧化皮, 进而堵塞受热面管道引起超温爆管事故<sup>[19]</sup>。如定州二期超临界机组投产运行后面临比较严重的氧化皮问题, 引发多起机组爆管停机事故。因此, 从防控氧化皮剥落, 减少锅炉爆管故障角度出发, 一方面要合理控制炉内燃烧, 避免受热面超温形成氧化皮, 另一方面要优化机组运行方式, 必须要合理控制某些氧化皮问题突出的超(超)临界机组的调峰速率和调峰深度, 避免管内温度大幅度波动, 引起氧化皮大量剥落。

### 3.2 由脱硝系统引起的硫酸氢铵问题

由于日近严格的环保排放要求, 现役煤电机组均加装脱硝装置, 以减少烟气中  $\text{NO}_x$  排放带来的环境污染。电站锅炉大都采用 SCR 脱硝工艺, 硫酸氢铵的形成与  $\text{NH}_3$  浓度(氨逃逸量)、 $\text{NH}_3/\text{SO}_3$  摩尔比和烟气温度有直接关系。前两项与机组运行控制水平和催化剂性能有关, 而烟气温度与机组运行负荷直接对应, 并影响硫酸氢铵的形成以及转化。在机组参与调峰运行时, 随着负荷的降低氨的逃逸量增大, 同时脱硝反应器入口烟温降低, 促进了硫酸氢铵的形成。硫酸氢铵粘性较大, 不仅会附着于催化剂表面时会影响催化剂活性, 还可能粘附于空预器表面, 增加烟气阻力, 吸附烟气灰尘影响锅炉的传热效率<sup>[20]</sup>。近年来, 由硫酸氢铵堵塞空预器的问题时有发生, 甚至可能造成锅炉被迫停运的严重后果。

因此, 各催化剂产品都对脱硝系统投运有着严格的最低烟气温度限值及相应的低负荷运行时间的要求。煤电机组参与深度调峰时, 在负荷低于一定工况条件下需退出脱硝系统, 脱硝系统一旦退出运行, 烟气中  $\text{NO}_x$  未经处理直接排放, 排放浓度定将超标, 给环境造成一定的污染。

### 3.3 燃煤机组调峰引起煤耗增加问题

机组调峰的问题不仅涉及到设备的安全可靠运行问题, 在能源形势日益严峻的今天, 燃煤机组低负荷运行时的煤耗问题是需要关注的另一个问题。机组参与调峰运行主要是在低负荷运行时, 主辅机逐渐偏离设计的最佳运行状态, 节流、漏汽、湿汽等损失增加, 循环热效率下降, 最终不可避免地引起及供电煤耗的增加<sup>[21]</sup>。分别选取 300 MW、600

表 1 典型机组不同负荷率下供电煤耗

Tab. 1 Power supply coal consumption rate with different load factor of seven typical units g / kWh

负荷率	超临界 660 MW 湿冷	超超临界 1 000 MW 湿冷	亚临界 600 MW 湿冷	超超临界 660 MW 湿冷	超临界 660 MW 空冷	亚临界 600 MW 空冷	亚临界 300 MW 湿冷
100%	297.7	286.6	315.8	286.2	326.8	329.7	328.1
90%	302.5	291	318.2	289.3	331.2	331.8	329.9
80%	304.4	295.9	319.9	293.4	337.1	336.1	330.9
70%	309.8	303.9	328.4	298.1	344.7	342	335.4
60%	315.2	314.4	333.5	304.8	353.4	349.9	338.7
50%	318.3	327.8	339.5	316.4	363.2	358.2	346.7
40%	340.7	354.9	353.2	332.9	373.3	369	362.1

MW、1 GW 等级的空冷与湿冷机组进行变工况计算,得到不同类型的典型机组在不同负荷率下机组的供电煤耗,如表1所示。由表1可知,随着负荷的降低供电煤耗逐渐升高,特别是当负荷率由50%降低至40%时,机组的供电煤耗骤升。同时,也可以看出在深度调峰时,超超临界百万湿冷机组的煤耗增幅最大,300 MW、600 MW 亚临界湿冷机组的煤耗增幅相对较小。

#### 4 煤电机组参与调峰相关政策支持

为支持电网调峰,保证电力安全,我国能源部早在1990年就已颁布《加强电网调峰工作若干规定》和《发电厂调峰技术和安全导则》等相关文件,要求“新建火力发电厂,除燃用劣质煤外,其调峰能力不应低于额定电负荷的35%~40%”<sup>[22-23]</sup>。上述文件作为近30年来我国电力系统机组调峰的政策性文件,起到了指导、规范的作用。

随着我国电源结构以及能源形势的不断变化,2006年11月,国家电力监管委员会颁布《并网发电厂辅助服务管理暂行办法》,2008年华北电监局率先出台《华北区域发电厂并网运行管理实施细则》和《华北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》。随后,华中、华东、南方、东北和西北电监局及各省

电监办陆续出台本区域的相关交易细则。

电监会43号文件规定并网发电厂的调峰分为基本调峰和有偿调峰,各电网公司与发电厂签订并网调度协议,确定发电机组调峰能力。基本调峰是指发电机组在规定的处理范围内,为了跟踪负荷的峰谷变化而有计划地、按照一定速度进行的发电机组出力调整所提供的服务,一般调峰幅度为机组额定容量的50%。有偿调峰则是指发电机组超过规定的调峰深度进行调峰及火力发电机组按电力调度交易机构要求在规定的时间内完成启停机调峰所提供的服务。有偿调峰分为深度调峰和启停调峰,深度调峰是指发电机组超过基本调峰范围进行的调峰,启停调峰是指发电机组按照调度指令要求在24 h内完成启停机(炉)进行调峰所提供的服务<sup>[24]</sup>。现行的各主要区域电网调峰补偿情况统计如表2所示。

由表2可知,各区域的细则在总的条款大项上基本一致,但具体内容和执行上还存在区域特点,各个区域的补偿细则的补偿范围和最终补偿标准还存在较大的差异。现有的深度调峰补偿机制还存在一定的问题:各区域电网对煤电机组有偿调峰与无偿调峰划分没有统一的标准<sup>[29]</sup>;区域电网辅助服务补偿方案差异较大,存在一定程度的局部不公;同时对煤电机组有偿调峰力度即更深度调峰所增加

表2 各主要区域电网煤电机组调峰补偿情况一览<sup>[25-28]</sup>

Tab. 2 Major regional power grids peak regulation compensation statistics

区域电网	基本调峰范围	深度调峰补偿 (比基本调峰少发的电量)	启停调峰补偿
华北区域网	50%	按50元/MWh给予补偿	单机容量在100 MW以上的机组启停调峰一次,按机组容量补偿1 000元/MW
华东区域网	上海市 47% 江苏省 59% 浙江省 59% 安徽省 57% 福建省 65%	机组出力必须小于40%和各调度区域规定的基本调峰范围,才能得到深度调峰补偿。按照节能发电调度的地区,按50元/MWh给予补偿;按照年度发电计划调度的地区,按10元/MWh给予补偿	常规燃煤发电机组按电力调度指令要求在24 h内完成启停机(炉)进行调峰,每台次按启停间隔时间和机组容量给予补偿
华中区域网	50%	按照节能发电调度的地区,发按照100元/MWh给予补偿;按照年度发电计划调度的地区,按10元/MWh给予补偿	单机容量在100 MW以上的燃煤机组启停调峰一次,按机组容量补偿1 000元/MW
南方电网	广东省 50% 广西省 50% 云南省 50% 贵州省 50% 海南省 50%	按10.59元/MWh给予补偿 按7.62元/MWh给予补偿 按55.2元/MWh给予补偿 按5.958元/MWh给予补偿 按8.412元/MWh给予补偿	燃煤发电机组每启停调峰一次1 040元/MW装机容量的标准补偿 燃煤发电机组每启停调峰一次710元/MW装机容量的标准补偿 燃煤发电机组每启停调峰一次930元/MW装机容量的标准补偿 燃煤发电机组每启停调峰一次560元/MW装机容量的标准补偿 燃煤发电机组每启停调峰一次790元/MW装机容量的标准补偿

注:基本调峰范围为相对额定容量。低负荷运行调峰作为当今煤电机组主要调峰方式,不可避免地引起机组疲劳损耗及寿命损伤,炉膛燃烧稳定,水动力循环安全性等问题,但随着机组装机的大型化以及环保排放日益严格的要求,煤电机组调峰还会引发氧化皮脱落,硫酸氢铵堵塞空气预热器等换热原件表面的新的安全隐患。因此,可考虑研究制定合理奖励政策,鼓励机组进行脱硝全负荷投入和锅炉低负荷稳燃技术升级改造,进一步提升改造机组调峰深度。

的发电成本以及所承担的运行风险补偿激励有限,不能充分地调动煤电机组担任更多调峰任务的积极性。

## 5 结论

随着我国电力需求放缓,用电结构发生变化,致峰谷差逐步扩大;同时风电、太阳能等可再生能源装机快速发展,进一步加大电网调峰压力。我国各电网抽水蓄能电站、燃气机组等灵活调峰电源占比偏低,今后一段时期煤电机组调峰仍将是调峰主力电源。

电力是政策导向性强的企业,建议相关部门进一步促进有关调峰相关政策的制定与实施,如完善煤电机组调峰服务补偿机制,加大深度调峰及轮停调峰机组补偿力度,提高煤电机组参与调峰的积极性,促进电网调峰能力释放。同时,需要合理规划电源建设,促进调峰电源多元化建设,根据各电网电源装机结构加大抽水蓄能电站、燃气电站的建设。

煤电机组低负荷运行,主辅机运行性能均下降,引起机组发电耗能增加。但随负荷变化,不同容量等级供电煤耗的增加程度不尽相同。可展开不同容量等级(300 MW、600 MW、1 000 MW)、不同冷却形式(空冷、湿冷)机组调峰能力的综合评价,确保能效水平高、污染少的机组承担更多发电任务;结合各地区特点,首先考虑安排能耗水平较高的机组进行轮停调峰,能更好兼顾电网调峰需求与实现全社会资源的优化配置。

核电机组是否需要参与调峰运行,是由电力系统电源结构等多种因素决定的。随着我国核电装机容量的增加,建议充分重视其对电力系统调峰的影响,借鉴国外核电运行经验,尽早作出核电运行方式的规划,并合理配置调峰电源,保证电网安全稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 电力工业数据统计分析 [EB/OL]. (2015-10-19). <http://www.chinabgao.com/stat/stats/45782.html>.
- [2] 韩小琪,孙寿广,戚庆茹. 从系统调峰角度评估电网接纳风电能力 [J]. 中国电力, 2010, 43(6): 16-19.  
HAN X Q, SUN S G, QI Q R. Evaluation of wind power penetration limit from peak regulation [J]. Electric Power, 2010, 43(6): 16-19.
- [3] 黎永华. 结合储能的并网光伏发电对电网的调峰作用分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
LI Y H. Analysis on peak regulating of the grid-connected photovoltaic power generation with energy storage [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [4] DEANE J P, GALLACHOIR B P O, MCKEOGH E J. Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant [J]. Renewable and Sustainable Energy Review 2010, 14(4): 1293-1302.
- [5] 杨高强. 抽水蓄能机组与火电机组启停调峰过程的比较分析 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.  
YANG G Q. The comparative analysis of peak modulation by pumped storage units and thermal power units [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013.
- [6] 王海宁. 大型燃煤机组深度调峰运行经济性安全性分析及负荷优化分配 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
WANG H N. Analysis of economy and safety for large coal-fired generating unit on peak-load operation mode and load optimal distribution [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [7] 杨丽君,王金. 大容量火电机组调峰及经济性研究 [J]. 黑龙江电力, 2002, 24(1): 35-37.  
YANG L J, WANG J. Peak adjustment by large capacity thermal generating set and its economy [J]. Heilongjiang Electric Power, 2002, 24(1): 35-37.
- [8] 董东华,王树群. 火电大机组调峰运行方式简析 [J]. 沈阳电力高等专科学校学报, 2004, 6(3): 12-15.  
DONG D H, WANG S Q. Brief analysis on cycling-load for units in thermal power plant [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering, 2004, 6(3): 12-15.
- [9] 解春林. 火力发电机组深度调峰下汽轮机系统特性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
XIE C L. The turbine system characteristics research of thermal power units in deep regulating load [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [10] 张桂燕. 300 MW 火电调峰机组运行问题的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.  
ZHANG G Y. The research on the peak regulating modes of 300 MW fossil-fired unit [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [11] 国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年) [EB/OL]. (2014-09-12). [http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfc/201409/t20140919\\_626242.html](http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfc/201409/t20140919_626242.html).
- [12] 申哲巍. 火电机组调峰负荷分配研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
SHEN Z W. Research on peak-regulating load distribution of thermal power units [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [13] 吴非文,栗淑华,康豫军,等. 调峰机组主蒸汽管道蠕变疲

劳交互作用寿命研究 [J]. 热力发电, 1995(1): 26-37.

WU F W, SU Y H, KANG Y J, et al. Study on the creep fatigue life of the main steam pipeline of peaking units [J]. Thermal Power Generation, 1995(1): 26-37.

[14] 黄述真. 大型汽轮机组调峰运行的分析与优化系统 [D]. 北京: 华北电力大学, 2001.

HUANG S Z. The analysis and optimization system for large steam turbine unit on peak-load operation mode [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.

[15] 韩彦广, 黄来. 600 MW 超临界汽轮机调峰运行过程中高中压转子疲劳寿命分析 [J]. 汽轮机技术, 2012, 54(1): 59-63.

HAN Y G, HUANG L. Fatigue life analysis of 600 MW supercritical steam turbine HIP rotor under peak load operation [J]. Turbine Technology, 2012, 54(1): 59-63.

[16] 卜宪雍, 梁学斌, 王树伟. 调峰运行对汽轮机主要辅助设备的影响 [J]. 华北电力技术, 2007(S1): 157-160.

BU X Y, LIANG X B, WANG S W. Influence of peak-load shaving operation on main auxiliary equipment of steam turbine [J]. North China Electric Power, 2007(S1): 157-160.

[17] 焦庆丰, 王赤夫. 国产 300 MW 火电机组调峰运行安全性分析 [J]. 华中电力, 1999, 12(5): 1-3.

JIAO Q F, WANG C F. The safeness analysis of load-peaking operation of domestic 300 MW thermal power generator units [J]. Central China Electric Power, 1999, 12(5): 1-3.

[18] 王凯, 黄葆华, 司派友. 火电机组调峰裕度的影响因素研究 [J]. 节能技术, 2012, 30(1): 52-54.

WANG K, HUANG B H, SI P Y. Research on influencing factors of peak-regulation margin in power plant units [J]. Energy Conservation Technology, 2012, 30(1): 52-54.

[19] 曾令大, 张开利, 陈启卷, 等. 超临界锅炉蒸汽侧氧化皮生成原因与对策 [J]. 中国电力, 2010, 43(12): 46-50.

ZENG L D, ZHANG K L, CHEN Q J, et al. Formation mechanism and preventive measures for steam side oxide scale in superheater of supercritical boilers [J]. Electric Power, 2010, 43(12): 46-50.

[20] 马双忱, 金鑫, 孙云雪, 等. SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵的生成机理与控制 [J]. 热力发电, 2010, 39(8): 12-17.

MA S C, JIN X, SUN Y X, et al. The formation mechanism of ammonium bisulfate in SCR flue gas denitrification process and control thereof [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 12-17.

[21] 李蒙, 王静, 胡兆光. 用电负荷率同供电煤耗关系的定量分析 [J]. 中国电力, 2005, 38(11): 40-42.

LI M, WANG J, HU Z G. Quantitative analysis between load factor and coal consumption of electricity supply [J]. Electric Power, 2005, 38(11): 40-42.

[22] 国家能源局. 加强电网调峰工作若干规定 [EB/OL]. (2011-11-22). [http://www.nea.gov.cn/2011-11/22/c\\_131262775.htm](http://www.nea.gov.cn/2011-11/22/c_131262775.htm).

[23] 国家能源局. 发电厂调峰技术和安全导则 [EB/OL]. (2011-11-22). [http://www.nea.gov.cn/2011-11/22/c\\_131262775.htm](http://www.nea.gov.cn/2011-11/22/c_131262775.htm).

[24] 王玫. 促进风电利用的调峰辅助服务补偿及交易机制研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

WANG M. Research on peak-regulation ancillary service compensation and trade mechanism for promoting wind power utilization [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[25] 国家电监会. 关于同意印发实施华北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则的通知 [EB/OL]. (2008-11-19). <http://www.cec.org.cn/zhengcefagui/2010-11-27/12692.html>.

[26] 国家电监会. 关于同意印发实施华东区域并网发电厂辅助服务管理实施细则的通知 [EB/OL]. (2008-11-19). <http://www.cec.org.cn/zhengcefagui/2010-11-27/12692.html>.

[27] 国家电监会. 关于同意印发实施华中区域并网发电厂辅助服务管理实施细则的通知 [EB/OL]. (2008-11-19). <http://www.cec.org.cn/zhengcefagui/2010-11-27/12692.html>.

[28] 国家电监会. 关于同意印发实施南方区域并网发电厂辅助服务管理实施细则的通知 [EB/OL]. (2008-11-19). <http://www.cec.org.cn/zhengcefagui/2010-11-27/12692.html>.

[29] 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 P, ZHANG L L, LINAG L, 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.

(责任编辑 郑文棠)

# 广 告

- 《南方能源建设》期刊 ..... 封二
- 《南方能源建设》征稿启事 ..... 封三
- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 ..... 封四