

 中国南方电网

POWER GRID

科技创新系列丛书◆

火电

机组调峰、调频运行控制技术

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社
Guizhou University Press

贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◇

火电机组调峰、调频 运行控制技术

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社
Guizhou University Press

图书在版编目 (C I P) 数据

火电机组调峰、调频运行控制技术 / 贵州电网有限
责任公司组编. -- 贵阳: 贵州大学出版社, 2017.12
(贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书)
ISBN 978-7-5691-0084-6

I. ①火… II. ①贵… III. ①火力发电-发电机组-
发电机运行-控制系统 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第006143号

火电机组调峰、调频运行控制技术

组 编: 贵州电网有限责任公司

出版人: 闵 军

责任编辑: 滕 芸 张 萌

装帧设计: 陈 艺

出版发行: 贵州大学出版社有限责任公司

地址: 贵阳市花溪区贵州大学北校区出版大楼

邮编: 550025 电话: 0851-88291180

印 刷: 贵阳精彩数字印刷有限公司

成品尺寸: 170毫米×240毫米

印 张: 13

字 数: 230千

版 次: 2017年12月 第1版

印 次: 2017年12月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5691-0084-6

定 价: 60.00元

版权所有 侵权必究

本书若出现印装质量问题, 请与出版社联系调换
电话: 0851-88291180

编
委
会



主 编 | 王家胜

参编人员 | 邓彤天 钟晶亮 张世海 王锁斌
徐章福

主
编
简
介



王家胜, 1974年12月出生, 安徽巢湖人, 2004年毕业于重庆大学, 高级工程师, 现就职于贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 主要从事动力设备调试、运行优化和故障诊断及建模工作。目前累计以一作兼通讯作者发表文章30余篇, 涉及SCI、EI和国内核心等检索, 并担任IEEE Transactions on Power Systems, Journal of Electrical Engineering & Technology 和国内核心期刊《热力发电》等审稿人。

前 言

由于科技进步和经济发展,我国电力系统正在发生巨大的变化。大电网框架已经形成,火电机组也向大容量、高参数过渡,大批新能源机组的接入和西电东送的电量大幅增加,我国的电网面临巨大的调频和调峰的压力,火电机组作为电网的主力支撑机组,在调峰和调频中占据着极其重要的角色。

本书正是基于当前形势下编写的一本关于火电机组集控运行的书籍,主要围绕火电机组在电网中角色变化,从传统意义上的带基本负荷或者小的调峰、调频形势下,逐步进入火电机组深度调频、调峰的状况。如何在这种变化中更好适应新的角色,如何确保火电机组能够长期安全、稳定和经济运行,对电力工业和国家经济发展都具有至关重要的作用。该书主要从汽轮机、锅炉和控制几个方面入手,分析在深度调峰和调频中的经济性和安全性相关内容,并在此基础上提出了相应的运行控制方式和技术。

本书从汽轮机、锅炉、热控等方面,在理论分析的基础上,提出了机组调峰、调频运行中附加的安全性和经济性问题,突出面向生产、面向实际、提高机组运行控制技术。作者均是来自生产一线的生产、研究人员,具有多年的生产经验,有较好的理论基础。本书既可供从事火力发电厂运行、维护、检修工作的技术人员使用,也可供火电厂管理人员、电网调度人员、高等院校相关专业师生作为有价值的技术参考书。

目 录

第一章 概述

- 第一节 电力系统能源结构和发展趋势/001
- 第二节 新能源机组在电网中存在的问题/004
- 第三节 大电网的优点和缺点/005

第二章 火电机组构成及原理简述

- 第一节 火力发电厂生产过程及热力系统/009
- 第二节 汽轮机部分/011
- 第三节 锅炉部分/023
- 第四节 控制系统介绍和控制策略/043

第三章 机组调峰、调频特点及控制策略分析

- 第一节 火电机组目前调峰调频特点/063
- 第二节 火电机组普遍控制策略/065

第四章 调峰、调频对机组和电网的影响

- 第一节 机组调频调峰会存在的问题/069
- 第二节 机组经济性的影响/088
- 第三节 机组主要启动方式及要求/090

第五章 机组调峰运行技术

- 第一节 典型锅炉燃料扰动测试及策略分析/109
- 第二节 机组调峰安全性分析和控制策略/113
- 第三节 机组经济性分析和控制策略/122

第六章 机组调频控制技术

第一节 不同锅炉型式调频幅度试验/129

第二节 同一机组不同负荷的扰动试验比较/130

第三节 同一负荷下不同转速扰动试验比较/133

第四节 调频参数设置及阀门流量特性测试的重要性/135

第七章 机组安全性和经济性分析

第一节 孤网运行方式/136

第二节 低负荷运行振荡事件/146

第三节 阀门流量特性优化控制效果/155

第八章 火电机组常用保护、故障和处理

第一节 汽轮机故障、异常与处理/163

第二节 锅炉典型故障、异常与处理/170

第三节 机组试验/179

参考文献/181

附录 常用专用术语/184

附图 典型机组启动曲线/193

第一章 概述

第一节 电力系统能源结构和发展趋势

根据中国电力企业联合会发表的《2016—2017 年度全国电力供需形势分析预测报告》,截至 2016 年 12 月 31 日,我国全口径火电机组装机 $10.5 \times 10^8 \text{ kW}$ 、同比增长 5.3%,全口径火电发电量同比增长 2.4%,自 2013 年以来首次实现正增长。但是机组设备利用小时为 4165 小时、比上年降低 199 小时,创造了 1964 年以来年度新低。2016 年底,全国全口径水电装机 $3.3 \times 10^8 \text{ kW}$ 、同比增长 3.9%。全国全口径水电发电量同比增长 6.2%,受来水形势变化等因素影响,全年水电生产呈现前高后低的特征。设备利用小时 3621 小时,比上年提高 31 小时,为近 20 年来的年度第三高水平。2016 年底全国并网风电装机 $1.5 \times 10^8 \text{ kW}$ 、同比增长 13.2%,占总装机容量比重为 9.0%;并网风电发电量同比增长 30.1%,设备利用小时为 1742 小时、同比提高 18 小时,但西北、东北等地区弃风情况仍然突出。并网太阳能发电装机容量及发电量高速增长,并网太阳能发电装机容量 $7742 \times 10^6 \text{ kW}$ (绝大部分为光伏发电)、同比增长 81.6%;并网太阳能发电量 $662 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 、同比增长 72.0%;并网太阳能发电设备利用小时为 1125 小时,同比下降 99 小时,降幅比上年扩大 88 小时,西北地区部分省份弃光情况较为突出,设备利用小时比上年下降。受光伏发电上网电价限期下调等政策影响,全年净增并网太阳能发电装机 $3479 \times 10^6 \text{ kW}$ 、同比增加一倍。2016 年底全国核电装机 $3364 \times 10^6 \text{ kW}$ 、同比增长 23.8%,发电量同比增长 24.4%;但是由于新投产机组增加其设备利用小时为 7042 小时、同比下降 361 小时,已连续 3 年下降,其中,辽宁核电设备利用小时为 4982 小时,核电投资同比下降 10.5%。

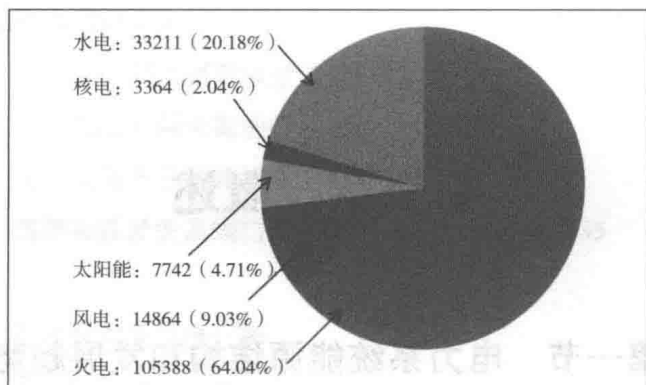


图 1-1 全国装机容量图(单位: 千瓦时)

注: 截至 2016 年年底。

随着“西电东送,南北互供,全国联网”电力发展战略的实施,我国火电机组已经进入高参数、大容量机组时代,而电网方面也进入了超高压、超大规模、远距离、交直流混合输电时代。电网结构和运行方式的日益复杂将使电力系统的稳定性问题变得越来越突出,同时电力系统故障产生的破坏性将会进一步加大。2016 年跨区送电量增长 6.9%,比上年提高 4.1 个百分点,跨区送电量的增长主要是电网公司积极通过特高压外送消纳西北新能源以及西南水电。跨省输出电量增长 4.8%,较上年提高 5.9 个百分点,南方电网区域西电东送电量同比增长 3.3%。南方电网实现西电东送电量 $1952 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

根据中电联统计结果,2014 年全国电力供需形势总体宽松,运行安全稳定,电力消费需求增速创 1998 年以来的新低;2015 年全国电力供需总体平衡有余,较多地区发电能力阶段性过剩,个别省级电网在高峰时段出现少量错避峰。2014 年全国水电发电量 $1.07 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$,首次超过 $1 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 、同比增长 19.7%。2015 年全国全口径发电量 $57399 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,比上年增长 1.05%。其中,水电 $11127 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,比上年增长 4.96%;火电 $42307 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,比上年下降 1.68%,是自改革开放以来首次年度负增长;核电 $1714 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,比上年增长 28.64%;并网风电 $1856 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,比上年增长 16.17%;并网太阳能发电 $395 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,比上年增长 67.92%。2015 年水电、核电、并网风电和并网太阳能发电等非化石能源发电量合计增长 10.24%,非化石能源发电量占全口径发电量的比重为 27.23%,比上年提高 2.18 个百分点。

图 1-2 给出了 2001—2015 年全国电力设备平均利用小时数、火电机组和水电机组利用小时数,数据取自中电联官网。2014 年电力工业持续健康发展,装机总量及发电量进一步增长,全国全口径发电量 $5.55 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$,同比增长 3.6%,其中非化石能源发电量 $1.42 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$,同比增长 19.6%,非化石能源发电量比重首次超 25%,达到 25.6%,同比提高 3.4%。

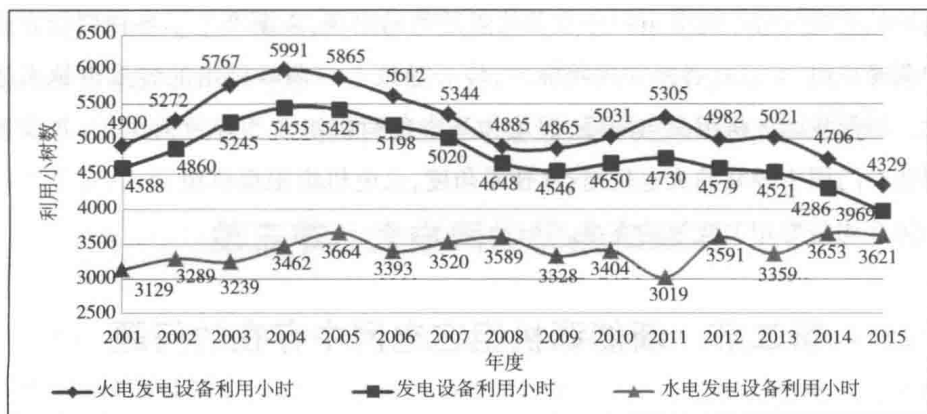


图 1-2 2001—2015 年发电设备利用小时情况

全国“西电东送”和区域送电线路等线路相继投产,如辽宁绥中电厂改接华北电网 500 千伏工程投运,使东北电网向华北电网的跨区送电能力达到 $500 \times 10^6 \text{ kW}$,国家电网公司跨区输电能力合计超过 $6900 \times 10^6 \text{ kW}$;糯扎渡水电站送广东 $\pm 800 \text{ kV}$ 高压直流工程全部建成投运,中国南方电网有限责任公司“西电东送”形成“八交八直”输电大通道,特高压交流工程——榆横—潍坊 1000 kV 高压交流输变电工程等等,在西部省份建立的电网配套支撑电源点建设相继投产后,主要集中在中西部的新能源机组(风、水、太阳能等)将陆续发电送到发达省份,新能源发电机组发电份额将持续走强,而相应的火电将会更多的承担调频、调峰和电源支撑作用。

新能源机组的发电量势必会增加,且增速会越来越快。水电季节性强,且区域性明显,在调峰和调频受限较多,因受政策性照顾,其本身参与电网调频调峰空间受限也较多。目前由于用电需求增量低于新增装机容量,造成我国发电机组产能过剩严重,一方面国家严格控制煤电的新开工规模,但是对于西北新

能源装机容量较大的省份又需要电源支撑来进行长距离输电。

从全国范围看,煤电装机速度与电力需求速度不匹配是造成火电设备利用小时下滑的主要原因。其次是经济结构调整带来用电负荷峰谷差加大,非化石能源发电比重快速上升,电力系统调峰能力明显不足,煤电调峰也使得其利用小时持续下降。我国各电网均存在火电机组调峰能力不足问题,当然调峰运行还与各种因素有关系,例如火电机组调峰的管理办法和经济政策,煤质的变化,锅炉的适应性等。随着电网中负荷峰谷差值的出现,逐渐产生了各种调峰方式和调峰机组,而且峰谷差的逐年加大,势必导致参与调峰机组的容量也越来越大。尽管我国大机组参与调峰,但均为基本负荷机组改为降负荷运行,并没有制造专门用于调峰的火电机组;从技术角度,火电机组根据机组型式、安全性和经济性均需要相关政策的支撑。

第二节 新能源机组在电网中存在的问题

目前我国新能源机组主要集中在西南、西北和内蒙古区域。由于输出线路容量有限和区域内部用电量有限,同时西南部分省份水电比例占装机容量比例较高,导致部分省份在水量充足的情况下出现不得已而弃水现象;随着该地区输往广东的线路畅通,配合政策上调整,该问题将得到有效解决。“西电东送”电量一方面受容量限制,同时水电机组的季节性强特点,送、接地电网负荷峰谷差大,火电厂必然出现调峰、调频突出现象。相比于我国西南电网,西北电网的新能源发电机组占用比例较高,但是风电等新能源机组的随机性很强,由于当地的电源支撑点不够,为了电网安全,很多区域出现弃风现象。目前在西北地区一方面加快了大型火电机组的建设,同时加强外送线路搭建,这样能够保证该区域电网的容量和支撑力度,新能源发电机组在电力供应方面将起到重要作用。同时在东部发达省份,为了消除电网峰谷差大的问题,一方面在进行核电等发电机组参与调频和调峰的可行性研究^[1,2];另一方面也在建设相应的抽水蓄能电站,方便电网调峰、调频^[3]。仅2015年新投产的抽水蓄能电站包括内蒙古呼和浩特、江苏溧阳和广东清远7台机组合计1920MW。对于抽水蓄能电站的建设和投运,实际上也是能源的巨大浪费,但是为了安全,电网也需要这样的配套设施。

基于以上分析,在未来电网中,火电机组将会尽最大能力去支撑电网,承担调频、调峰功能。在电网装机容量不断扩大,局部电网变得复杂并且通过高压线路连接成大电网,跨区域、跨省长距离输电增大和常态化情况下,电网本身也需要各个电厂的精度化建模,结合电力需求更好地进行电力系统精度调度。目前全世界已经发生多起电网振荡甚至电网崩溃的事件^[4,5,6]。也出现过因为供电电压和频率问题而导致用电设备损坏的情况。调峰、调频控制策略,不仅有利于电网精细化调度,实现电网的安全稳定运行,而且通过灵活性运行分析,提高机组本身的安全性、经济性。不仅实现调频和调峰的精度执行,还能有效发挥各个火电机组的长处,保持机组经济、环保,而且对机组本身也是安全的^[7]。

第三节 大电网的优点和缺点

电网的形成和发展主要是基于国家经济发展和外部环境相结合的基础。经济发展的用电需要,一次能源和动力资源的开发情况,以及发供电设备的技术和供应条件等等。我国电网经历了由省级电网、省网互联到区域电网互联并逐步形成全国互联电网的三个发展阶段。伴随着中国经济和电力系统本身的发展,中国电网和发电机组的技术和规模也得到迅速提升和壮大。全国已经形成了东北电网、华北电网、华中电网、华东电网、西北电网和南方电网6个跨省的大型区域电网,并基本形成了各区域电网的长距离输电电网网架。为了合理利用能源,降低发电成本,实现绿色、经济和环保,大量水电、风电、光电等可再生新能源机组接入了电网,区域间电力输送变得非常频繁且输送量增大,这也造成电网的控制和运行越来越显得复杂,调峰、调频力度进一步增大。一方面不发达地区可再生能源装机容量大、随机性强,本地电力消耗能力有限,必须依靠大量外送以保持电网的平衡。由于新能源机组本身的控制和发电情况随机性强和受季节影响大,电网必须有技术相对成熟的火力发电机组进行支撑,以达到电网的安全稳定运行,并保证供电品质的同步提高。在火电机组不能支撑电网的情况下,必须相应地调整新能源的发电量。

根据中电联统计,2016年西北五省(区)新增风电并网容量 $681.3 \times 10^6 \text{ kW}$,截至2016年年底,累计并网容量 $4329 \times 10^6 \text{ kW}$,占全网总装机的19.6%。2016年,风电发电量 $524.64 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,占全网总发电量的8.4%;利用小时数1424

小时,弃风电量 $262.25 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,弃风率 33.34%。西北五省(区)中,甘肃、新疆、宁夏风电运行形势最为严峻,弃风率依次为 43.11%、38.37% 和 13.05%。此外,陕西弃风率为 6.61%,青海未发生弃风限电现象。2016 年西北五省(区)新增光伏发电并网容量 $1011 \times 10^6 \text{ kW}$,截至 2016 年年底,累计并网容量 $3037 \times 10^6 \text{ kW}$,占全网总装机的 13.8%。2016 年光伏发电量 $287.17 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,占全网总发电量的 4.57%;利用小时数 1151 小时,弃光电量 $70.42 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,弃光率 19.81%。西北五省(区)中,新疆、甘肃光伏发电运行较为困难,弃光率为 32.23% 和 30.45%。此外,宁夏弃光率 7.15%,青海弃光率 8.33%,陕西首次发生弃光限电情况,弃光率为 6.89%。

从并网运行角度来看,新能源发电受限原因主要包括:新能源分布较为集中,电网调峰能力不足;外送通道建设与电源建设不匹配,电网送出能力有限;电网存在薄弱环节,部分区域受网架约束影响消纳等三个方面。国家能源局西北监管局日前发布的《西北区域新能源发展规划及运行监管报告》显示,通过模拟评估,2020 年西北各省(区)依然会存在较为严重的弃风弃光。其中,甘肃和新疆即使考虑了新建直流工程,以利于新能源外送消纳,弃风弃光率预计仍将超过 20%,消纳压力较大。若不考虑新建直流工程,2020 年甘肃的弃风和弃光率将攀升至 41.9% 和 49.1%。

表 1-1 2016 年度西北区域新能源并网运行情况(单位:MW, $\times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)

省区	并网容量		发电量		利用小时数		弃风/光电量		弃风/弃光率	
	风电	光伏	风电	光伏	风电	光伏	风电	光伏	风电	光伏
陕西	267.9	278.4	28.26	19.65	1900	1459	1.99	1.40	6.61%	6.89%
甘肃	1277.3	680.1	137.62	59.30	1124	1043	103.79	25.78	43.11%	30.45%
青海	66.6	680.9	10.23	59.48	1727	1428	- -	8.13	0	8.33%
宁夏	837.1	500.4	128.69	52.38	1594	1338	19.32	4.03	13.05%	7.15%
新疆	1879.8	597.6	219.84	66.35	1558	974	137.15	31.08	38.37%	32.23%
合计	4328.7	3037.4	524.64	287.17	1424	1151	262.25	70.42	33.34%	19.81%

表 1-2 西部五省区新能源发电弃风、光比例统计(单位: %)

省区	2015 年		2020 年			
	弃风率	弃光率	不考虑新建直流		考虑新建直流	
			弃风率	弃光率	弃风率	弃光率
陕西	0.00	0.00	5.36	5.94	2.97	2.79
甘肃	34.60	38.20	41.90	49.10	26.60	29.60
宁夏	13.21	8.15	18.22	11.24	15.41	10.47
青海	2.50	3.20	5.57	11.37	--	--
新疆	32.50	24.80	38.69	32.60	25.84	22.38

2015 年的弃风电量合计约 $350 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 直接经济损失约 180 亿元, 这意味着全年的弃风损失几乎抵消了 2015 年全年风电新增装机的社会经济效益。

表 1-3 西部五省区发电弃风、弃光原因统计

省区	弃风原因				弃光原因			
	调峰能力不足		传输容量受限		调峰能力不足		传输容量受限	
	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年
陕西		95.70%		4.3%		89.60%		10.40%
甘肃	52.10%	74.20%	47.90%	4.80%	89.50%	96.60%	10.50%	3.40%
宁夏	85.80%	94.20%	14.20%	4.80%	89.50%	96.60%	10.50%	3.40%
青海	--	96.50%		3.50%	69.80%	93.20%	30.10%	6.70%
新疆	74.10%	92.30%	25.80%	7.70%	73.00%	90.10%	27.00%	9.80%

随着电力体制改革的深入推进, 能源结构转型步伐加快, 特别是近几年我国可再生能源发展取得了显著成绩, 水电、风电和太阳能发电的装机规模截至 2016 年末分别达到 $3.2 \times 10^8 \text{ kW}$ 、 $1.3 \times 10^8 \text{ kW}$ 和 $4300 \times 10^6 \text{ kW}$, 均居世界第一位, 可再生能源总发电量也位居世界第一。但是, 由于我国东西部发展不平衡, 电网结构上存在不合理的部分, 导致我国电网在可再生能源持续发展的同时,

第二章 火电机组构成及原理简述

第一节 火力发电厂生产过程及热力系统

火力发电一般是指利用石油、煤炭和天然气等燃料燃烧时产生的热能来加热水,使水变成高温、高压水蒸气,然后再由水蒸气推动发电机来发电的方式的总称,以煤、石油或天然气作为燃料的发电厂统称为火电厂。

火力发电系统主要由燃烧系统、风烟系统(以锅炉为核心)、汽水系统(主要由锅炉、汽轮机、凝汽器、给水泵等各类泵、给水加热器、管道、水冷壁等组成)、电气系统(以汽轮发电机、主变压器等为主)、控制系统等组成。前二者产生高温高压蒸汽;电气系统实现由热能、机械能到电能的转变;控制系统保证各系统安全、合理、经济运行。还有其他一些辅助处理系统,包括汽水循环、化学水处理、输煤系统和冷却系统等。

火力发电的重要问题是提高热效率,办法是提高锅炉的参数(蒸汽的压力和温度)。90年代,世界最好的火电厂能把40%左右的热能转换为电能;大型供热电厂的热能利用率也只能达到60%~70%。此外,火力发电大量燃煤、燃油造成环境污染,也成为日益引人关注的问题。

一、按燃料分类

燃煤发电厂:以煤为燃料的发电厂。

燃油发电厂:以石油(实际是提取汽油、煤油、柴油后的油渣)为燃料的发电厂。

燃气发电厂:以天然气、煤气等可燃气体为燃料的发电厂。

余热发电厂:用工业企业的各种余热进行发电的发电厂。

此外,还有利用垃圾及工业废料作为燃料的发电厂。