

(2015年)

发电厂继电保护及自动控制 技术应用研究

中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会
中国水力发电工程学会继电保护专业委员会

编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

(2015年)

发电厂继电保护及自动控制 技术应用研究

中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会
中国水力发电工程学会继电保护专业委员会

编

内 容 提 要

本书是2015年“发电厂继电保护及自动控制技术应用研究”交流会暨电力系统自动化专委会年会论文集，共收录138篇论文。这些论文汇聚了广大设计人员和工程技术人员大量的研究和实践成果，内容涉及继电保护、励磁、电站自动化以及厂用电与新能源等四个部分。论文集内容丰富，实用性强，对继电保护及自动控制技术从业者有较高参考价值和借鉴意义，可供相关学者、专家以及工程技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

发电厂继电保护及自动控制技术应用研究. 2015年 / 中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会, 中国水力发电工程学会继电保护专业委员会编. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-5170-3732-3

I. ①发… II. ①中… ②中… III. ①发电厂—电力系统—继电保护—研究②发电厂—电力系统—自动控制—研究 IV. ①TM621.3②TM77

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第248459号

书 名	发电厂继电保护及自动控制技术应用研究 (2015 年)
作 者	中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会 编
出版发行	中国水力发电工程学会继电保护专业委员会 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@ waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 47.25 印张 1270 千字
版 次	2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷
定 价	188.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

《发电厂继电保护及自动控制技术应用研究（2015 年）》

编 委 会

主 任 毕亚雄

副 主 任 李平诗 许可达 晋兆安

主 编 文伯瑜

副 主 编 陈小明 陈 俊 殷海军

参编人员 陈邦强 汤何美子 王 媛 王 月

参编单位 中国长江三峡集团公司

三峡水力发电厂

溪洛渡水力发电厂

上海利乾电力科技有限公司

前 言

2015 年“发电厂继电保护及自动控制技术应用研究”交流会暨电力系统自动化专委会年会在内蒙古呼和浩特市顺利召开，会议由中国水力发电工程学会电力系统自动化专委会、中国水力发电工程学会继电保护专委会主办，三峡集团内蒙古呼和浩特抽水蓄能电站、内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司、内蒙古电力科学研究院、上海利乾电力科技有限公司（继保专委会网站单位）协办。

电源是电力系统的核心部分，更是智能电网不可或缺的一个重要组成部分。大型核电、水电以及新能源电站的大量建设，给发电厂继电保护及自动控制技术提出了新的要求。如何保证发电厂继电保护更加安全可靠、发电厂自动控制装置如何与智能电网配合协调，是继电保护和自动控制设备所面临的一个重大挑战。为此，中国水力发电工程学会电力系统自动化专委会、中国水力发电工程学会继电保护专委会决定举办本次学术研讨会，研讨电厂继电保护、自动控制、励磁等专业在设计、运维、开发中存在的问题，分享并总结经验，交流各种保护和自动控制技术的解决方案，探讨新技术、新挑战及发展趋势等。

本次大会得到了电力各界人士的热烈响应，电力系统自动化及继电保护的前辈和多位专家学者给予了细致的关怀和指导。会议共征集到专业论文 138 篇，论文观点明确，主题突出，论证有力，密切联系本职工作，是生产管理工作的真切感受、实践经验的理性反思、技术方法的提炼总结，能够紧扣继电保护、自动化、励磁技术领域的实际问题，特别是抓住当前热点和难点问题寻求解决的方法，具有一定的针对性和实用价值。

在论文编辑出版过程中，我们得到了有关单位和人员的大力支持和帮助。借此机会，对积极组织、推荐论文的各发电公司、设计院、电科院、设备制造厂等单位的领导、工作人员和所有提交论文的作者表示衷心的感谢。

本次会议是在中国水力发电工程学会电力系统自动化专委会、中国水力发电工程学会继电保护专委会的直接领导下召开的，协办单位为本次会议的召开开展了大量的工作，文伯瑜、晋兆安、陈小明、陈俊等为本次会议的召开付出了艰辛的努力，中国水利水电出版社对本论文集的出版给予了热情的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

编者

2015 年 9 月

目 录

前言

抽水蓄能电站发展趋势及呼和浩特抽水蓄能电站建设运行管理	毛三军	郭海辉	(1)
-----------------------------------	-----	-----	-----

继 电 保 护 篇

中外发电机保护配置要求的异同	裴善鹏	于 青	(15)								
大型抽水蓄能机组保护设计方案探讨	何海波	杨 健	牛元超	孙彦武	(22)						
一起典型发电机定子接地故障排查和定位分析	姬生飞	房 康	陈佳胜	王 光	(26)						
一起主变差动保护动作原因分析及启示	王 翔	李华忠	徐 金	曹孝国	王 光	陈 俊	(32)				
电厂主变压器低压侧接地保护的改进	程 骁	陈佳胜	郭自刚	陈 俊	王 光	(37)					
线路光纤纵差保测一体装置的频率测量及同步策略 ...	徐 舒	徐光福	余群兵	丁 力	(42)						
有小电源接入情况下简易母线保护方案探讨	余群兵	金 震	张晓宇	宋忠鹏	王彦国	(47)					
电弧光保护通道自检技术研究	王 杰	高飞飞	侯 炜	陈 俊	(53)						
适应频率大范围快速变化的脉冲发电机保护	陈佳胜	郭自刚	王 光	张琦雪	陈 俊	(58)					
300MW 级大型抽水蓄能机组主保护优化研究	王 光	许 峰	陈 俊	王 凯	姬生飞	何海波	(64)				
基于 $U\cos\varphi$ 的失步解列装置定值计算	王碧锋	赵建华	魏 磊	沙海源	(70)						
电压切换回路设计方案剖析和建议	洪丽强	刘果培	高宇膺	周清源	(76)						
距离 I 段保护用于短线路和弱馈线路时的研究	赵志宏	伍叶凯	张月品	曹 飞	(83)						
注入式转子接地保护在三峡电厂的应用与改进	罗红俊	吴礼贵	(87)								
对一起线路差动保护误动的分析及解决方案	丁 威	(93)									
某大型水电站机组逆功率保护误动分析及解决方案	邹士总	吴宝增	金建波	(97)							
一起水轮发电机裂相横差保护动作原因分析及技术措施	李光耀	刘忠惠	封孝松	朱梅生	(103)						
大型水电机组定子接地保护方案与试验	刘忠惠	朱梅生	闫海峰	(108)							
大型水轮发电机组励磁变压器保护配置分析及改进建议	洪 心	侯小虎	(113)								
关于 500kV 3/2 接线方式下断路器非全相保护的探讨	侯小虎	洪 心	李能昌	(117)							
大型水轮发电机组大轴绝缘监测装置异常分析及对策	易亚文	王 林	韩军饷	(121)							
主变冷却器动力电源监视继电器误动分析及反措改进	张晓玲	徐 亮	(124)								
供电薄弱 220kV 变电站区域备自投的研究	杨 欣	刘孝旭	廖清阳	董凯达	金 震	余群兵	江开伦	徐 平	冷贵峰	王 荣	(127)
SIEMENS 7UT6X 型数字保护继电器的应用	陈 俊	(132)									

浅析发电厂继电保护等电位接地网的设计	陈 剑	(139)
托克托发电厂静态阻塞滤波器保护	管林盛 付俊杰 孟为群 张琦雪	(143)
大型水轮发电机组逆功率保护配置探讨	李文友 韩 伟 席光庆	(148)
和应涌流对差动保护的影响及对策研究	李 玮	(152)
一起零功率切机保护动作原因分析与改进	李 玮	(159)
枕头坝一级水电站继电保护配置	颜 佳 熊 奎 吴文杰 丁立川	(164)
龚嘴电站 DGT801 机组保护存在问题和解决办法分析	王建平	(168)
一起 110kV 线路跨线故障的分析	赵志宏 伍叶凯 曹 飞	(175)
燃气—蒸汽联合循环发电机组 GCB 的应用分析	常月琴	(179)
一起由 TV “虚幻接地”引起基波定子接地保护动作分析	陈海龙 李建强	(184)
线路并联电抗器作为保护调试负荷的技术应用	陈 剑 蔡红军	(189)

励 磁 篇

台山核电站 1760MW 汽轮发电机组励磁系统的性能特征	李基成	(197)
发电机励磁系统远程监测诊断应用研究	李福龙 张凌俊 李 松	(202)
关于发电机组灭磁方式的优化分析	胡鹏飞	(209)
关于碳化硅灭磁电阻长期使用后的安全检测	胡鹏飞 滕忠文	(212)
电力系统稳定器创新技术研究综述	吴 龙 吴跨宇 苏为民 卢岑岑	(217)
发电机励磁系统辅环模型及方法研究	施一峰 张 堃 牟 伟 吴跨宇 吴 龙	(225)
PSS4B 控制技术自并励励磁系统应用研究	任晓骏 沈汉铭 吴跨宇 施一峰 吴 龙	(232)
多机型通用移动式备励装置的设计研究	周兴华 吴 龙	(237)
三峡右岸机组电气制动失败原因分析及改进	杨 鹏 江传宾	(247)
分布式智能励磁系统在葛洲坝水电站的应用	徐 峰 施一峰	(252)
溪洛渡左岸励磁系统技术改进与创新	谢燕军 陈小明 刘喜泉	(258)
无刷励磁多相旋转整流器故障检测的工程化应用	牟 伟 任百群 吴 龙 刘为群	(262)
自动电压调节器 TV 多相断线分析	余 翔 乐绪鑫	(268)
励磁系统动态智能均流技术的应用	苏家财 谢 俊	(272)
励磁系统转子温度测量方法优化	安 宁 时学基 袁亚洲	(278)
基于 STM32 的励磁系统模拟量校准应用设计	蓝 婧 辛文军 李海燕	(284)
发电机励磁系统保护和控制一体化研究	陈 晶 吴水军 段侯峰 杨 杨 万雄彪	(290)
UNITROL 6800 励磁过励限制与励磁绕组过负荷保护整定配合	刘喜泉 陈小明 胡 晓	(295)
发电机定子过流保护与过流限制的配合分析	杨宏宇 都 晨 李辰龙 叶渊灵	(300)
UNITROL 5000 励磁系统国产化改造及应用	嵇兴康 任晓骏	(307)
基于反措的 UNITROL 5000 励磁调节器优化改造	于文涛 杨玉柱 王 洋	(311)
EX2100 励磁系统冷却风机电源回路优化探讨	赵 攀 赵丽杰 韩 涌	(317)
励磁系统整流柜停风封脉冲回路改造	王晓峰	(320)
EX2100 励磁系统脉冲放大板故障原因分析	刘 炆 王继伟 刘 朕 李 俊	(326)

THYRIPOL 励磁系统 PSS 试验导致无功波动原因分析	杨绍春	杨 强	(330)				
ALSTOM 励磁系统大阶跃灭磁跳机问题处理		张安庆	(335)				
GE Rapid 断路器在绥中 880MW 机组上的应用	古建明	黄大元	李恩向	李勇泉	(340)		
发电机励磁系统强励作用的探讨		张宛旭	(345)				
UNITROL 5000 强励动作案例分析		秦会会	白永福	(349)			
发电厂励磁系统保护补充方案简析	王 媛	王 喆	张 治	(353)			
电力系统稳定器 PSS 的发展及应用		吴春锐	(356)				
UNITROL 6080 励磁系统在凌津滩水电站中的应用	张育宾	史绪龙	董 青	(362)			
大型发电机组励磁系统限制器与发变组保护定值的整定配合分析		徐兴国	(367)				
PSS4B 控制技术三机励磁系统应用研究							
	杨宝新	张淑敏	杨云龙	王 超	谢 欢	施一峰	(375)
适用于巨型机组的 GEC-6800 励磁系统创新性设计							
	张凌俊	李福龙	袁占辉	王文翠	李 坤	陆红斌	(380)
葛洲坝电站励磁系统智能化、网络化设计与应用	高劲松	杜 波	桑希涛	杨京广	(387)		
水电厂 AGC 与一次调频配合策略优化刍议						余崇山	(393)

电 站 自 动 化 篇

厂级负荷优化控制系统关键技术研究	李 兵	陈 俊	牛洪海	蔡 丹	臧 峰	蔡金华	(401)
基于 IEC 61850 的电厂综合自动化方案	艾冬梅	高 华	孙 进				(405)
发电厂升压站监控方案探讨		王 伟	刘振国				(414)
火力发电企业发电控制系统技术应用	李瑞桂	程惠刚	赵开文				(422)
溪洛渡右岸电站 AGC 功能与策略设计	瞿卫华	程 建	刘绍新	李 辉	何宏江		(428)
溪洛渡电站计算机监控系统功能优化与提高	李 辉	刘绍新	瞿卫华	吴美琪			(433)
葛洲坝电站两厂 AGC 相互托管的冗余设计		陈 鹏	冯加辉				(440)
IEC 61850 在葛洲坝电站计算机监控系统的应用			张 微				(444)
基于施耐德 SOE 模块远距离对时的实现		叶 青	李金生				(449)
广蓄 B 厂上位机系统改造关键技术	单鹏珠	陈 龙	张 柏				(453)
黑水河集控 EDC 控制策略研究及应用			李蓬路				(459)
基于 SOA 的水电厂计算机监控系统历史数据服务应用		黄志刚	蔡 杰				(463)
楚穗直流孤岛运行方式下 AGC、AVC 控制与实现		陈映喜	宋亚东				(467)
AGC 和一次调频在龙开口电厂的应用		李文金	刘德磊				(472)
论计算机监控预警系统开发及应用	王 荔	罗玉祥	冯建伟				(479)
基于 MB 通信协议实现控制系统间的数据传输		唐 辉	熊世川				(487)
提高水电站监控系统 LCU 通信稳定性的方法分析	何宏江	李园园	刘 莹				(493)
浅析拉西瓦水电厂一次调频与 AGC 的实现方式及协调关系		彭维新	秦会会				(497)
级联 PLC ModBus 通信优化策略在水电站消防水系统中的应用			吴 凯				(501)
铜街子电站开关站 LCU 改造方案探讨	宋定航	陈 驰	万 欣				(505)
龚嘴、铜街子电站 AGC 运行策略			万 欣				(509)

基于南瑞 PLC 的调速器设计及 IEC 61850 通信开发 ...	蔡卫江	李雪峰	冯启文	张 雷	(513)
调速器主接跟随故障诊断及处理方法应用	涂 勇	陆劲松	陈自然		(522)
水轮机调速器频率测量及防误动优化策略	陈自然	李初辉	陆劲松		(527)
基于均方差算法和线性回归分析的监测信号特征分析系统设计	丁其琦		张 辉		(533)
数字式同期装置原理及应用分析	常占锋	邓 勇	张其俊		(538)
水电站机组有功功率调节超调原因分析及解决	唐 辉		吕晓东		(543)
DKST 全可编程调速器在三门峡水电厂的应用研究			赵 伟		(548)
官地水电站调速技术的应用与维护	于文杰	赵 辉	罗登玲		(555)
大型水轮发电机组轴瓦测温解决方案探讨	于 欢		童绪林		(560)
混流式水轮机组振摆在线监测装置改造与应用	陈俊中	张小东	王 伟		(564)
水电站直流电源远程监控及维护系统的设计	何长平	马建辉	王浩彬		(570)
通信电源蓄电池在线节能充放电技术的开发与应用	段绪伟	摆文志	王浩彬		(575)
浅析电厂输煤皮带机变频器运用的可行性分析			陈 俊		(578)
龙开口电厂调速器系统特点及故障探讨	刘德磊		李文金		(582)
1030MW 机组配套柴油发电机带载起动的解决方案	沈珏玮	程 军	周 梅		(586)
发电机功率变送器对机组自动协调控制的影响	张 波		葛拥军		(594)
抽水蓄能电站计算机监控系统联合开发	高 熹		何 涛		(598)

厂用电与新能源篇

厂用电快切装置并联切换电流判据探讨	牛洪海	倪群辉	陈 俊		(605)
基于备自投技术的过负荷措施研究	金 震	董凯达	余群兵	安振华	冯宝成 (610)
兼容分布式电源的备自投技术研究	董凯达		金 震	余群兵	(615)
数字化自适应过流保护在新能源发电中的应用	王栋涛	侯 炜	倪群辉		(620)
光伏发电保测控信一体化装置研制与应用	王淑超	朱中华	侯 炜	王文龙	陈 俊 (625)
智能变电站光缆回路设计方案研究	王 凯	陆 伟	何学东		(630)
一种实用化的含微网配电网保护方案	贺 敏	朱皓斌	徐光福		(638)
大型火力发电厂高压厂用电源切换研究		杨月红	隋 骁		(646)
影响 380V 系统短路电流计算值的因素	沈 坚	刘世友	杨 柳		(652)
高压变频电动机的保护配置		张欢畅	孙 进		(660)
发电厂电气二次新设备在设计层面的探讨	周 彤		周志强		(663)
两台机组高压厂用电互相联络时的切换设计	姚 雯	付胜明	李 玲		(668)
永新三期无启备变 11kV 厂用段断路器切换方式设计			于 帅		(673)
Profibus - DP 总线在发电厂厂用电系统中的应用			马建英		(677)
枕头坝水电站厂用电继电保护整定的探讨	周 正	刘立春	韩 康		(681)
浅谈智能电动机保护控制器在电厂中的应用			陈 俊		(687)
机组间厂用电源的互为备用可行性分析	程惠刚	赵开文	李瑞桂		(693)
龙羊峡 850MW 超大型光伏电站监控系统	乐成贵	周 杨	张 运		(698)
火电厂低电压穿越造成变频器停运问题探讨	张慧新		姚 雯		(703)

大型水电厂直流系统绝缘监测装置原理及应用	赵锦美	刘君升	马作甫	(707)
一起 400V 备用电源自投装置误动作分析	陈亨思	高 琴		(711)
发电厂低压厂用电系统接地保护越级跳闸分析探讨	赵 攀	董小磊	赵丽杰	(715)
恒压供水系统变频器过流故障分析及对策		陈 莹		(721)
西开 220kV SF ₆ 开关跳闸闭锁回路缺陷改造	高 琳	王 舰		(725)
全球能源互联网的五防策略探讨	胡东波	胡凌波		(729)
抽水蓄能机组 10kV 厂用电备自投功能的设计	樊 颐	何 涛	徐 智	(733)
凝结水泵节能改造可行性分析	赵开文	程惠刚	李瑞桂	(736)
2015 年“发电厂继电保护及自动控制技术应用研究”会议纪要				(741)

抽水蓄能电站发展趋势及呼和浩特 抽水蓄能电站建设运行管理

毛三军，郭海辉

(内蒙古呼和浩特抽水蓄能发电有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010050)

【摘 要】 本文主要研究分析了抽水蓄能电站的特殊功能、产业政策和发展趋势，分析总结了呼和浩特抽水蓄能电站的建设运行管理经验，以期对抽水蓄能电站产业发展和建设管理模式起到借鉴作用。

【关键词】 抽水蓄能电站；发展趋势；建设运行

1 引言

抽水蓄能电站运行灵活、反应快速，是电力系统中具有调峰、填谷、调频、调相、备用和黑启动等多种功能的特殊电源，是目前最具经济性的大规模储能设施。从我国电网运行的实际情况来看，一方面电网需要建设相应比例的抽水蓄能电站用于调峰、填谷、调频、调相、安全备用等；同时新能源的发展、大电网建设、智能电网和储能产业的发展都需要建设相适应的抽水蓄能电站。另一方面，现行抽水蓄能电站的产业政策 and 电价机制又制约了其发展，使抽水蓄能电站的建设跟不上电网发展的需要。

本文旨在分析当前抽水蓄能电站的特殊功能及发展趋势，总结归纳呼蓄电站的建设、运行和管理经验，期望对后续抽水蓄能电站决策、建设和运行具有参考借鉴意义。

2 抽水蓄能电站的特殊功能定位

抽水蓄能电站作为一个特殊电源，相比其他电站，有其自身的特殊性。这种特殊性主要表现在技术特性和经济特性两个方面。

2.1 抽水蓄能电站的技术特性

抽水蓄能电站具有两大主要技术特性。

(1) 既是负荷，又是电源。抽水蓄能电站一方面作为用户，是负荷；一方面作为发电厂，是电源。作为负荷，在电力系统负荷低谷时段，用电抽水，吸收系统过剩的电能，转化为水的势能储存起来；作为电源，在电力系统用电高峰时段，利用机组作为发电方式运行，放水发电，将水的势能转化为电能，弥补系统负荷高峰时的电力不足。这是其他任何类型电站所不具备的。

(2) 启动迅速，运行灵活。抽水蓄能电站启停和工况转换迅速灵活。可根据电网调度需要立即启动，2~3min 内由静止到满负荷运行；可根据系统需要在抽水工况、发电工况、调相工况之间灵活、快速转换，其中从抽水工况转发电工况需要 6min，其他工况转换需要 1~2min。

2.2 抽水蓄能电站的经济特性

抽水蓄能电站具有三大主要经济特性。

(1) 受益对象的综合性。抽水蓄能电站有利于调节电网结构，提高电网质量，抽水蓄能电站直接受益对象为电力系统的各个方面，包括发电企业、电网和用户。

(2) 经济效益的模糊性。抽水蓄能电站的经济效益难以精确量化，它所产生的效益在某些情况下是明确的，如调峰填谷方面，若实行峰谷电价，抽水蓄能电站进行调峰填谷所产生的直接经济效益是明确的；但在大多数情况下是模糊的，调峰填谷、调频、调相，安全备用保障电网安全稳定运行所产生的辅助功能效益是客观存在的，但难以准确计算。

(3) 销售对象的不确定性。抽水蓄能电站产品不是一对一的销售，一种是调峰填谷它使电能的时间上有个转换，若实行峰谷电价它的产品销售对象是明确的，反之则不明确；一种是调频、调相、安全备用时提供的产品就是服务，它使电网能够高质量、稳定地和不间断地供电，产品的销售对象体现在电力系统的各个方面。

从抽水蓄能电站经济特性看，电价机制问题是抽水蓄能电站建设的核心问题。国家发展和改革委员会《关于完善抽水蓄能电站价格形成机制有关问题的通知》（发改价格〔2014〕1763号）明确，在电力市场化前抽水蓄能电站实施两部制电价，但主要体现了固定成本加准许收益的原则，并且对抽水蓄能电站费用回收方式的规定较为笼统、结合区域电网实际情况落实存在一定困难，一定程度上影响着抽水蓄能电站建设和调度运行积极性，随着电力体制进一步深化改革，下一步抽水蓄能体制机制还需进一步改革发展。

2.3 抽水蓄能电站的功能

抽水蓄能电站的两个技术特性决定了在电力系统中具有调峰填谷、调频、调相、事故备用和黑启动等多种功能。

(1) 抽水蓄能电站是最优的调峰工具。抽水蓄能电站调峰填谷与其他电站功能不同，最大调峰能力是额定容量的两倍，常规水电站和火电站最大调峰能力是额定容量，同时核电调节性能较差，风电具有“逆调峰”性能，抽水蓄能电站不受季节性、时段影响，随着新能源在电力系统中比重加大，抽水蓄能电站调峰填谷的作用将在电力系统中日益凸显。可参与电网调峰的发电机组调峰填谷性能对见表 1。

表 1 5 种发电机组调峰填谷性能对比				
发电机组	低谷时	高峰时	负荷上升的每分钟反应率	启动时间/min
蒸汽轮机	可深度下调	可发电调峰	1% ~ 3%	时间较长
燃气轮机	可停机	可发电调峰	5%	8 ~ 14
联合循环	可停机	可发电调峰	2% ~ 6%	14 ~ 60
水轮发电机	可停机	100% 发电调峰	50%	3 ~ 5
抽水蓄能	吸纳谷电	200% 发电调峰	50%	2 ~ 3

从表中可以看出，在所有发电方式中，抽水蓄能的调峰能力最大，启动升负荷速度最快，是唯一具有填谷功能的电源，抽水蓄能是各种电源中运行方式最灵活的发电方式。

(2) 抽水蓄能电站是最好的蓄能工具。抽水蓄能具有储能功能，解决了电能发供用同时进行、不易存储的矛盾，有效调节了电力系统发供用的动态平衡。目前储能装置主要有机械储能、

电磁储能和化学电池储能。抽水蓄能电站储能属于机械储能，与其他储能装置相比，抽水蓄能电站投资较低、使用寿命长、储能规模大、能量转换效率稳定、技术成熟、运行方便，是目前电力系统中最成熟、最实用的大规模储能方式。

(3) 抽水蓄能电站是最特殊的备用工具。抽水蓄能电站可承担事故备用及负荷备用，不仅为系统安全运行提供支持，还能有效减少火电机组承担的旋转备用容量，起到改善火电机组运行方式、减少燃料消耗、稳定系统频率和缓解事故等作用。在核电发达地区（如南方电网），抽水蓄能电站的备用可以保障核电机组的满负荷安全运行。在随机性和间歇性特征明显的风电、光伏发电等新能源快速发展地区（如蒙西电网），抽水蓄能电站的备用可以使部分风电由峰荷变成基荷，对调整电网结构起到重要作用，促进新能源消纳，增加风电发电量，同时对电网安全运行起到保障作用，通过抽水蓄能电站处于待命备用状态，系统可以安全调度运行风电。

所以综合抽水蓄能电站的技术特殊性以及在电力系统中的功能来看，抽水蓄能电站不是一个简单的电源，而是电网的综合运行工具。

3 抽水蓄能电站的产业发展

3.1 抽水蓄能电站产业政策发展

我国抽水蓄能电站产业政策发展主要分为四个阶段：

第一阶段（2004 年以前）：电网独资建设、产业政策不完善。本阶段基本没有抽水蓄能电站产业政策，采取电网独资建设为主的模式，没有系统的选点规划，对每一个电站单独核定电价，价格机制主要以单一电价模式和租赁制为主，纳入电网统一核算。

第二阶段（2004—2011 年）：由电网全资投资运营，不核电价。本阶段以国家发改委《关于抽水蓄能电站建设管理有关问题的通知》（发改能源〔2004〕71 号）文件和《国家发展改革委关于桐柏、泰安抽水蓄能电站电价问题的通知》（发改价格〔2007〕1517 号）文件作为典型标志。文件强调抽水蓄能电站建设实行区域统一规划，认真做好抽水蓄能电站的选点工作，抽水蓄能电站主要由电网经营企业进行建设和管理；文件下发后审批的抽水蓄能电站，由电网经营企业全资建设，不再核定电价，其成本纳入当地电网运行费用统一核定。

第三阶段（2011—2014 年）：厂网分开，不动销价。本阶段以《国家能源局关于进一步做好抽水蓄能电站建设的通知》（国能新能〔2011〕242 号）为标志，本文件强调是坚持“厂网分开”的原则，原则上由电网经营企业有序开发、全资建设抽水蓄能电站，杜绝电网企业与发电企业合资建设抽水蓄能电站项目；在现行销售电价水平下，不得因建设抽水蓄能电站给电力消费者增加经济负担或推动全社会电价上涨。

第四阶段（2014 年以后）：投资主体多元化，电价机制逐步市场化。本阶段以国家发改委《关于促进抽水蓄能电站健康有序发展有关问题的意见》（发改能源〔2014〕2482 号）为标志。主要强调完善建设管理体制，将目前以电网经营企业全资建设和管理为主的体制，逐步建立引入社会资本的多元市场化投资体制机制；不断调整完善电价机制，最终形成以市场起决定性作用的抽水蓄能电站运营机制；加快抽蓄电站建设步伐，明确了发展目标。

从我国抽水蓄能电站产业发展状态看，抽水蓄能电站产业政策经历了从不健全到逐步调整和完善的过程：

(1) 进一步提高了对抽水蓄能电站的功能定位认识。从“调峰填谷、调频、调相、事故备

用和黑启动”等技术特性功能的认识，到“调峰、储能、备用”三大功能，再发展到目前的“对保障我国电力系统安全稳定经济运行、缓解电网调峰矛盾、增加新能源电力消纳、促进清洁能源开发利用和能源结构调整、实现可持续发展意义重大”的功能定位认识。

(2) 进一步规范和落实抽水蓄能电站建设管理体制。抽水蓄能电站原来以电网经营企业全资建设和管理为主，之后核准部分发电企业投资开发，下一步还将逐步建立引入社会资本的多元市场化投资体制机制。

(3) 进一步调整和完善电站运营机制。从统筹为电力系统服务和统一核算原则，统一调度运行抽水蓄能电站，过渡到实行两部制电价政策，最终形成以市场起决定性作用的抽水蓄能电站运营机制。

(4) 进一步明确抽水蓄能电站发展规划。明确了下一个十年发展目标，即到 2025 年全国抽水蓄能电站装机规模达到 1 亿 kW，这样抽水蓄能电站基本上每 5 年要新增装机 600 万 kW。

(5) 进一步简政放权。将抽水蓄能电站核准权限下放至省级人民政府。

(6) 强化监督管理。加强规划指导、监督政策落实、规范行政审批、加强市场监管。

(7) 开展体制机制改革指点。深入开展抽水蓄能建管体制和运营机制创新改革研究，体现电力系统多方受益的电站价值，落实“谁受益、谁承担”的市场经济规则，并适时开展试点工作。

应该说，这两年抽水蓄能电站的产业政策和体制机制相关文件以及建设进程，标志着我国抽水蓄能电站的开发建设进入了加快发展的轨道，见表 2。

表 2 抽水蓄能产业政策主要文件				
序号	名 称	文号	发布时间	发文机构
1	关于进一步深化电力体制改革的若干意见	中发〔2015〕9 号	2015 年 3 月 15 日	中共中央
2	国务院关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见	国发〔2014〕60 号	2014 年 11 月 16 日	国务院
3	国务院关于取消和调整一批行政审批项目等事项的决定	国发〔2014〕50 号	2014 年 10 月 23 日	国务院
4	关于促进抽水蓄能电站健康有序发展有关问题的意见	发改能源〔2014〕2482 号	2014 年 11 月 1 日	国家发改委
5	关于完善抽水蓄能电站价格形成机制有关问题的通知	发改价格〔2014〕1763 号	2014 年 7 月 31 日	国家发改委
6	国家能源局关于加强抽水蓄能电站运行管理工作的通知	国能新能〔2013〕243 号	2013 年 6 月 18 日	国家能源局
7	国家能源局关于进一步做好抽水蓄能电站建设的通知	国能新能〔2011〕242 号	2011 年 7 月 31 日	国家能源局
8	国家发展改革委关于桐柏、泰安抽水蓄能电站电价问题的通知	发改价格〔2007〕1517 号	2007 年 7 月 4 日	国家发改委
9	关于抽水蓄能电站建设管理有关问题的通知	发改能源〔2004〕71 号	2004 年 1 月 12 日	国家发改委

3.2 抽水蓄能电站投资运营管理模式

我国抽水蓄能电站投资运营主要有三种管理模式，见表 3。

表 3 我国抽水蓄能电站投资运营管理模式

序号	模式	典型代表	特 征
1	电网企业全资建设，统一经营	十三陵抽水蓄能电站	抽水蓄能电站不是独立企业法人，在运行方面由电网公司直接调度，在技术方面由电网公司对电站主要指标进行考核，在财务方面由电网公司统一核算
2	电网企业控股建设，独立经营	浙江天荒坪、山东泰安、山西西龙池、广蓄电站等	抽水蓄能电站与其他电站一起参与发电计划安排，接受电网调度，为电网提供服务，并计量和结算
3	多方投资，独立经营	呼和浩特抽水蓄能电站和江苏溧阳抽水蓄能电站	接受电网调度，为电网提供服务，接受电网考核，并与电网公司签订购售电协议进行结算

结合我国的产业发展状况，目前抽水蓄能电站投资运营模式主要由电网公司投资建设，下一步将逐步建立引入社会资本的多元市场化投资体制机制，并鼓励通过招标、竞价等方式确定投资主体。呼和浩特抽水蓄能电站是目前第一个由电网公司以外的投资方投资开发并已建成、独立运营的大型抽水蓄能电站，为抽水蓄能电站建设管理体制机制多元化提供了借鉴。

3.3 抽水蓄能电站电价机制

我国抽水蓄能电站目前主要有三种电价机制，见表 4。

表 4 我国抽水蓄能电站电价机制

序号	机制	特征	优点	缺 点
1	单一制电量电价	以电站设计参数为基础，确定上网抽、发电价，电站按照电网调度要求运行，电站经营收益通过电费差价实现	简单、便于结算	一是不利于抽水蓄能电站综合效益发挥，不利于调峰填谷、调频调相和备用等综合效益发挥；二是增加了不必要的能源浪费和购电成本增加；三是上网电量不确定性存在较大经营风险
2	租赁制	实际是单一容量电价机制	一是体现“谁收益、谁负担”原则；二是有利于发挥电站综合效益；三是经营风险较低	一是发电侧电费难以落实；二是电网企业投资建设和调度运行积极性不高；三是电站收入固定，不利于提高内部经济运行水平。目前实行租赁制的电站，年平均发电利用小时数在 500h 左右
3	两部制电价	两部制电价包括容量电费和电量电费。电价按照合理成本加准许收益的原则核定，两部制电价是在电力市场化前的一种过渡性电价机制		

为推动抽水蓄能电站电价市场化，国家鼓励在具备条件的地区采用招标、市场竞价等方式确定抽水蓄能电站项目业主、电量、容量电价、抽水电价和上网电价。电力市场化后，抽水蓄能电站经营收益将主要通过尖峰电价和辅助服务市场交易实现。

3.4 我国抽水蓄能电站发展前景

从 1882 年瑞士建设第一座抽水蓄能电站开始，抽水蓄能电站发展历史已历经一百多年。我国从 20 世纪 60 年代开始研究开发抽水蓄能电站，截至 2015 年 6 月，已建成抽水蓄能电站

共计 30 座，总装机容量 2355.3 万 kW，占全国电力总装机的比重为 1.8% 左右，基本情况详见表 5；在建抽水蓄能电站共计 16 座，在建规模 2024 万 kW，基本情况详见表 6；规划建设抽水蓄能电站 59 座，装机容量 7585 万 kW，基本情况详见表 7。按照《能源发展“十二五”规划》，2015 年底抽水蓄能电站装机规模 3000 万 kW，2020 年年底达到 7000 万 kW。按照《国家发展改革委关于促进抽水蓄能电站健康有序发展有关问题的意见》（发改能源〔2014〕2482 号）文件精神，到 2025 年，全国抽水蓄能电站总装机容量达到约 1 亿 kW，占全国电力总装机的比重达到 4% 左右。

我国抽水蓄能电站经历了不断改革、完善的发展历史，目前已进入了加快发展的阶段。

表 5 截至 2015 年 6 月已建成抽水蓄能电站基本情况

序号	电站名称	地区	装机/ (台×万 kW)	总容量/ 万 kW	投资/ 亿元	投产时间	地区	总数量	总容量/ 万 kW
1	白山	吉林桦甸	2×15	30	7.99	2006 年 7 月	东北	2	150
2	蒲石河	辽宁宽甸	4×30	120	45.16	2012 年 9 月			
3	岗南	河北平山	1×1.1	1.1	1.08	1968 年 5 月	华北	8	550.3
4	密云	北京密云	2×1.1	2.2		1973 年 11 月			
5	潘家口	河北迁西	3×9	27		1991 年 9 月			
6	十三陵	北京昌平	4×20	80	37.32	1997 年 7 月			
7	泰安	山东泰安	4×25	100	43.26	2007 年 3 月			
8	张河湾	河北井陉	4×25	100	41.20	2008 年 12 月			
9	呼和浩特	内蒙古呼和浩特	4×30	120	56.00	2015 年 6 月			
10	西龙池	山西忻州	4×30	120	56.00	2008 年 12 月			
11	寸塘口	四川彭溪	2×1	2	0.05	1992 年 11 月	西北	2	11
12	羊卓雍湖	西藏贡嘎	4×2.25	9	7.50	1997 年 5 月			
13	溪口	浙江奉化	2×4	8	3.20	1998 年 6 月 8 日	华东	10	722
14	天荒坪	浙江安吉	6×30	180	73.77	2000 年 12 月 25 日			
15	响洪甸	安徽金寨	2×4	8	4.56	2000 年 3 月			
16	沙河	江苏溧阳	2×5	10	6.03	2002 年 7 月			
17	桐柏	浙江天台	4×30	120	41.93	2006 年 12 月			
18	琅琊山	安徽滁州	4×15	60	23.00	2007 年 11 月 1 日			
19	宜兴	江苏宜兴	4×25	100	47.63	2008 年 12 月			
20	佛磨	安徽霍山	2×8	16	5.05	2014 年			
21	响水涧	安徽芜湖	4×25	100	38.00	2012 年 11 月 17 日			
22	仙游	福建仙游	4×30	120	44.59	2013 年 12 月 19 日			
23	天堂	湖北罗田	2×35	70	3.40	2001 年 2 月	华中	5	442
24	回龙	河南南阳	2×6	12	4.51	2005 年 12 月			
25	宝泉	河南辉县	4×30	120	43.27	2011 年 9 月 7 日			
26	白莲河	湖北罗田	4×30	120	35.33	2009 年 12 月			
27	黑麋峰	湖南望城	4×30	120	34.08	2010 年 10 月			
28	广州一期	广州从化	4×30	120	65.00	1994 年 3 月	南方	3	480
29	广州二期	广州从化	4×30	120		2000 年 3 月			
30	惠州	广东惠州	8×30	240	81.34	2011 年 6 月 15 日			
	总计			2355.3	850.25			30	2355.3

表 6 截至 2015 年 6 月在建抽水蓄能电站基本情况

序号	电站名称	省份	装机/ (台×万 kW)	总容量/ 万 kW	投资/ 亿元	计划 完工时间	地区	总数量	总容量/ 万 kW
1	荒沟	黑龙江	4×30	120	58.03	2020 年	东北	2	260
2	敦化	吉林	4×35	140	77.89	2021 年			
3	丰宁一期	河北	6×30	180	99.47	2020 年	华北	3	480
4	文登	山东	6×30	180	85.67	2021 年			
5	沂蒙	山东	4×30	120	74.11	2022 年 12 月	华东	5	616
6	溧阳	江苏	6×25	150	76.35	2017 年			
7	佛子岭	安徽	2×8	16	11.00	2017 年			
8	仙居	浙江	4×37.5	150	58.51	2016 年 10 月			
9	绩溪	安徽	6×30	180	98.88	2020 年			
10	金寨	安徽	4×30	120	75.00	2020 年	华中	3	360
11	洪屏	江西	4×30	120	51.88	2016 年			
12	天池	河南	4×30	120	67.51	2021 年			
13	蟠龙	重庆	4×30	120	56.76		南方	3	308
14	清远	广东	4×32	128	48.70	2015 年年底			
15	深圳	广东	4×30	120	59.79	2017 年 9 月			
16	琼中	海南	3×20	60	39.89	2018 年 11 月			
	总计			2024	999.55			16	2024

表 7 规划建设抽水蓄能电站基本情况

序号	电站名称	省份	地区	装机/（台×万 kW）	总容量/万 kW	总数量	总容量/万 kW
1	尚志	黑龙江	东北	4×25	100	8	960
2	五常			4×30	120		
3	清原	辽宁		6×30	180		
4	庄河			4×20	80		
5	兴城			4×30	120		
6	蛟河	吉林		4×30	120		
7	桦甸			4×30	120		
8	芝瑞	内蒙古		4×30	120		
9	丰宁	河北	华北	6×30	180	13	1680
10	易县			4×30	120		
11	抚宁			4×30	120		
12	美岱	内蒙古		4×30	120		
13	乌海			4×30	120		
14	文登	山东		6×30	180		
15	泰安二期			6×30	180		
16	沂蒙			4×30	120		
17	莱芜			4×25	100		
18	海阳			4×25	100		
19	潍坊			4×25	100		
20	垣曲	山西		4×30	120		
21	浑源			4×30	120		