

中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会 组编

抽水蓄能电站工程 建设文集 2014

CHOUSHUI XUNENG
DIANZHAN GONGCHENG
JIANSHE WENJI 2014



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会 组编

抽水蓄能电站工程 建设文集 2014

CHOUSHUI XUNENG
DIANZHAN GONGCHENG
JIANSHE WENJI 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

抽水蓄能电站工程建设文集. 2014/中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会组编. — 北京: 中国电力出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-5123-6656-5

I. ①抽… II. ①中… III. ①抽水蓄能水电站-建设-文集 IV. ①TV743-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 243429 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 11 月第一版 2014 年 11 月北京第一次印刷
880 毫米×1230 毫米 16 开本 35.25 印张 1096 千字
定价 140.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



序

2004年，国家发展改革委发布《关于抽水蓄能电站建设管理有关问题的通知》（业内称之为“71号文”）后，我国抽水蓄能电站建设步入新的发展阶段，转眼间，抽水蓄能产业发展又走过了十个春秋。

经过十年的发展，抽水蓄能发展环境和产业规模已今非昔比。2004年以前，全国电力总装机容量4.42亿kW，而且风电、核电等新能源电源发展刚刚起步，抽水蓄能运行机组容量仅500多万kW，占全国电力总装机比例不足1.3%，当时抽水蓄能发展处于摸索阶段。到2014年初，全国电力总装机容量12.47亿kW，其中风电、核电等新能源电源装机猛增至1.05亿kW。随着桐柏、泰安、宜兴、惠州等一批大型抽水蓄能电站建成投产，我国抽水蓄能电站投产装机容量已超过2100万kW，总装机容量仅次于日本和美国；我国在建及已核准筹备开工的项目超过2000万kW，已遥居世界领先的位置。

经过十年的努力，抽水蓄能已具备实现可持续健康发展的基础。针对我国抽水蓄能发展规划相对滞后的局面，2009年8月国家能源局泰安座谈会提出加快抽水蓄能选点规划工作，为此，水电水利规划设计总院会同电网公司、抽水蓄能建设单位、地方政府开展了全国抽水蓄能电站选点规划工作，到2014年上半年，国家能源局对22个省（市、自治区）抽水蓄能选点规划作出了批复。根据批复意见，2020年前全国推荐抽水蓄能开发站点59个，规划装机容量7485万kW，备选抽水蓄能站址14个，规划装机容量1660万kW，为我国抽水蓄能中长期发展提供充足的项目储备。同时，本轮抽水蓄能规划选点过程中，参与专家们还结合我国抽水蓄能发展实际，对抽水蓄能规划理论进行创新，规划方法进行完善，为实现抽水蓄能有序发展提供可靠的保障。

经过十年的探索，抽水蓄能电站建设和运营管理日益成熟，产业政策日趋完善。十年前，我国抽水蓄能投入商业运营的电站只有十三陵、天荒坪和广蓄等少数几家，加之当时以缺电为主的电力供需、以火电为主和新能源比例极低

的电源结构等环境的约束，电站功能基本上以调峰填谷为主，电站建设和运营管理经验比较缺欠。随着一批大容量机组投入运行，电站运营和调度理念与方法、管理经验日臻完善。几年间，发展改革委有关部门、发展改革委新能源研究所、中国国际工程咨询公司、水电水利规划设计总院、部分高等院校和抽水蓄能建设管理等单位（机构）对抽水蓄能建设管理、调度运行、运营管理、电价和税收等工作进行多维度和多层次的研究，特别是在抽水蓄能设计和施工工艺标准化、确立适应我国能源结构的抽水蓄能功能定位、合理构建抽水蓄能投资、价格和运行管理机制等方面研究逐渐深入，认识逐渐统一，涉及抽水蓄能建设和运营的国家、行业技术、管理标准相继出台。近期，国家发展改革委印发《关于完善抽水蓄能电站价格形成机制有关问题的通知》，对抽水蓄能电站价格、发展和运营管理等方面政策进行规范和完善，为今后抽水蓄能产业科学发展提供坚实的基础。

“一枝独秀不是春，万紫千红春满园”。抽水蓄能产业的发展同样需要广大从业者贡献集体的智慧，需要共同的参与。在多年抽水蓄能建设和管理实践中，电站建设者和运行管理人员积累了丰富的经验。这本《抽水蓄能电站工程建设文集》凝聚了广大抽水蓄能从业者对抽水蓄能领域各专业的经验总结和理论思考，具有一定的理论性和很强的实践性，对我国抽水蓄能建设和管理都具有极强的指导意义。

虽然我国抽水蓄能建设取得了长足的进步，但目前我国抽水蓄能电站占发电总装机比例还不到2%，远远低于发达国家普遍5%~10%的平均水平。同时，“十三五”期间，我国将大幅度提高可再生能源比重，到2020年，风电和光伏发电装机规划容量将分别达到2亿kW和1亿kW以上，核电运行装机容量将达到5800万kW、在建3000万kW，几大跨区输送通道将建成投产，抽水蓄能仍具有较广阔的市场空间。

回首过去的十年，作为抽水蓄能电站的建设者、抽水蓄能产业发展的亲历者，我们倍感欣慰，也期待在下一个十年、二十年乃至更长时间内，我国抽水蓄能产业能持续健康发展，更好服务于中华民族的伟大复兴。



2014年9月

编者的话

《抽水蓄能电站工程建设文集 2014》由中国水利发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会（以下简称专委会）组稿，是专委会出版的第 19 部抽水蓄能学术年会论文集，共收录 120 篇文章。

本文集分为抽水蓄能发展规划与建设管理、抽水蓄能电站工程设计、抽水蓄能电站机组装备试验与制造、抽水蓄能电站工程施工实践与其他五部分。内容包括抽水蓄能电站的发展方向与管理模式、新价格政策、抽水蓄能电站与风电及核电联营探讨、设计综述与设计优化、机电设备的国产化探讨、机组并网的安全性分析、文明施工与施工技术研究、抽水蓄能电站工程造价等。介绍了若干已建、在建抽水蓄能电站的土建工程及其机组的设计实践、设计优化、施工经验，以及采用的新工艺、新技术等。

本次征文共收到文章 200 余篇，限于篇幅，同时为使内容精炼，在编辑过程中，对一些介绍相同工程、内容相近的文章做了适当合并和删减，特在此向作者说明。

秘书处对各位委员支持论文集征稿工作，积极组稿、投稿表示感谢！希望今后能够收集到更多的、为抽水蓄能工程的健康发展提出真知灼见的优秀文章。

中国水力发电工程学会
电网调峰与抽水蓄能专业委员会 秘书处

2014 年 9 月于北京

目 录



序 编者的话

抽水蓄能发展规划与建设管理

科学定位, 加速抽水蓄能发展	吕少杰	陈同法	杜建刚	宋 伟 (3)			
从电力系统储能技术谈抽水蓄能电站的建设必要性			王婷婷	曹 飞 (6)			
我国抽水蓄能电站建设运行管理模式初探		张 娜	赵杰君	马登清 (11)			
对抽水蓄能新价格政策与产业发展的认识				余贤华 (15)			
关于抽水蓄能电站前期工作的思考		费万堂	刘殿海	王玉成 (19)			
抽水蓄能电站与风电联合运营可行性探讨				蔡飞翔 (23)			
浅谈抽水蓄能与风电、核电联合运行	林国庆	方品政	林礼清	罗国虎 (29)			
浅析增加风电消纳效益对抽水蓄能电站国民经济评价的影响				戴 莉 (33)			
论抽水蓄能电站的商业模式		胡亚益	张国良	索立军 (38)			
抽水蓄能电站加权效率因子浅析				唐修波 (42)			
白山梯级混合式抽水蓄能电站的优越性及效益分析	杨长富	李秀斌	刘学媛	庄小东	秦秀荣	李奕成	申家宁 (44)
辽宁省抽水蓄能电站建设空间和布局分析							杨霄霄 (49)
澳大利亚抽水蓄能项目开发环境研究				陈宏宇	陈同法 (54)		
丰宁抽水蓄能电站建设安全风险管控探索与实践				张学清	韩昊男	王兰普 (57)	

抽水蓄能电站工程设计

抽水蓄能电站井式进/出水口体形设计探讨		蒋远超	王建华	关李海 (63)			
冰冻对抽水蓄能电站的影响及解决措施	郭红永	韩宏韬	王培杰	杨 凯	胡云鹤 (68)		
典型抽水蓄能电站水库冰情原型监测	吕明治	赵海镜	靳亚东	耿贵彪	刘凤成 (71)		
文登抽水蓄能电站上水库库区防渗方案设计					王 珏 (77)		
蟠龙抽水蓄能电站下水库坝址比选				邱树先	汪 健 (82)		
浅谈金寨抽水蓄能电站工程总平面布置设计		胡代清	陈丽芬	钟金盛 (87)			
蒲石河抽水蓄能电站上水库防渗设计方案选择	徐智桓	景建伟	郑奕芳	刘 涛	郑德湘	温学军	许光远 (92)

绩溪抽水蓄能电站下水库竖井式溢洪道设计与研究

.....	符晓 徐文仙 赵琳 郎玲芳 刘晓宇 邵卿	(96)
敦化抽水蓄能电站水土保持措施设计	韩悦	(103)
仙游抽水蓄能电站上、下库库盆设计优化研究	严良平	(108)
抽水蓄能电站地下厂房围岩监测全变形的初步分析	刘凤成 王彦华 吴元辉 张利军	(111)
浅谈抽水蓄能电站厂用电负荷特点及控制措施	金根明	(114)
不同应力评估标准对水轮机部件设计的影响	赵江 张春 袁冰峰	(117)
浅析抽水蓄能电站蜗壳压力设计值控制标准	张春 赵江 邹中林 周俊杰 马飞	(121)
蟠龙抽水蓄能电站水轮机导叶关闭规律优化	赵路 邱树先	(126)
洪屏抽水蓄能电站机组发电工况甩负荷过渡过程计算分析	王康生	(130)
非同步导叶在仙游抽水蓄能电站的应用	权强 谭信	(136)
单级单吸混流式水泵水轮机几个设计问题的探讨	宫让勤 戴然	(141)
仙游抽水蓄能电站的消防设计	江琦文	(145)
敦化抽水蓄能电站上水库花岗岩全风化层研究与利用	刘永峰 陈丹	(150)
镇安抽水蓄能电站上水库库盆防渗型式比选研究	刘杨 李作舟 王伟	(156)
文登抽水蓄能电站面板堆石坝抗震稳定性研究	夏荣立	(161)
溧阳抽水蓄能电站上水库面板堆石坝变形控制技术研究	陈宁 向景山	(168)
泰山抽水蓄能电站上水库进/出水口渗漏分析	韩晓涛 张宁芮 李广凯	(174)

抽水蓄能电站机组装备试验与制造

抽水蓄能机组可靠性评价标准探讨	王吉康 宋绪国 张洋	(183)
抽水蓄能机组设备国产化总结	魏敏	(188)
抽水蓄能机组状态趋势预测技术的现状分析	孙慧芳	(192)
仙游抽水蓄能机组发电电动机特点	骆林 罗永刚	(196)
大型抽水蓄能机组继电保护国产化探析	瞿洁	(200)
大型电力变压器温度测量装置安装与运行	林礼清 庄坚菱	(205)
国产化计算机监控系统在蒲石河抽水蓄能电站的应用	王少华 宋立志 任伟 张楠 李承龙 左建 刘宏源	(209)
可逆式机组模型特性曲线对过渡过程的影响研究	游秋森	(213)
可变速抽水蓄能发电电动机的设计	刘健俊 郑小康 钱昌燕 骆林 杜芳勉	(218)
立式抽水蓄能机组轴线调整浅析	马金才	(224)
浅谈抽水蓄能电站换相对差动保护的影响与解决方案	刘哲 姜涛 龚剑超	(228)
发电电动机关键电磁参数的精确计算	肖翦 周光厚 李建富 刘传坤	(232)
天荒坪抽水蓄能电站空气冷却器技术改进	张书友	(239)
西龙池抽水蓄能电站3号发电电动机定子线棒表面异常原因分析及处理	张礼平	(244)
仙居抽水蓄能机组发电电动机特点	靳永卫 刘小松 黄智欣 邓斌	(247)
抽水蓄能机组转轮室内压缩空气对转速下降的影响	胡海棠	(252)
仙居抽水蓄能电站375MW机组水泵水轮机模型验收试验	罗成宗 赵志文 孟晓超	(256)
白山抽水蓄能电站变压器过电流保护定值分析计算	李光明 顾涛 侯丰满	(262)
宝泉抽水蓄能电站直流系统改造	郭玉春 张鑫 康晓义	(265)
宝泉抽水蓄能电站封闭母线防结露装置改造	师敬民 马亚楠 王俊超	(269)
仙游抽水蓄能电站机组并网安全性评价综述	林礼清 王伟	(272)

响水涧抽水蓄能电站励磁系统国产化的应用	姜涛	刘哲	(278)						
宜兴抽水蓄能电站 SFC 启动与背靠背启动的比较分析	李海波	仇岚	(285)						
溧阳抽水蓄能电站发电电动机设计	王艳武	王建刚	(289)						
蒲石河抽水蓄能电站双机甩负荷试验分析	温占营	宋立志	梁睿光	陈鹏	袁冰峰	程剑林	左建	(294)	
白山抽水蓄能电站机组压油装置电气控制系统设计							滕巍	(298)	
白山抽水蓄能电站发电机—变压器组继电保护应用与研究							王世海	鲍峰	(301)
琅琊山抽水蓄能电站机组变频启动中转子位置计算的运行分析									
.....	汪卫平	吴培枝	毕扬	张雷	王大强			(305)	
白莲河抽水蓄能电站空气压缩机振动原因分析与处理	冯钢声	胡志平			杨绍爱			(311)	
仙游抽水蓄能电站水环的控制					权强			(315)	
宜兴抽水蓄能发电机组保护闭锁方式优化	张冰冰				孟繁聪			(318)	
阳江抽水蓄能机组采用蒸发冷却的优势分析	郑小康	张天鹏	杜芳勉		邹应冬			(321)	
SF ₆ 断路器储能电机烧损原因分析及处理	蒋明君	徐伟			秦晓宇			(325)	
仙游抽水蓄能电站水泵水轮机设计技术	郑津生	常喜兵	王伦其		付之跃			(329)	
蒲石河抽水蓄能电站监控系统 BTB 流程设计及应用									
.....	张楠	郭阳	王少华	任伟	李承龙	左建	刘宏源	(335)	
大型发电电动机通风冷却系统研究	王超	廖毅刚			张海波			(340)	
超高水头抽水蓄能机组压力脉动特性研究					刘德民		赵永智	(346)	
蒲石河抽水蓄能电站油压装置控制逻辑与应用									
.....	李承龙	任伟	王少华	郭阳	张楠	左建		(350)	
印度尼西亚阿萨汉水电站引水系统钢结构制造和安装					张忠和			(356)	
白山抽水蓄能机组 6G/M 轴承甩油处理					周宏刚	卜继勋		(362)	
蒲石河抽水蓄能电站机组关闭规律与实测分析	陈建福	宫让勤			王威			(367)	
响水涧抽水蓄能电站进水阀自动化系统设计					王书枫			(372)	
白莲河抽水蓄能电站 1 号机组推导组合轴承甩油分析与改造					杨绍爱	郑庭华		(375)	
琅琊山抽水蓄能电站 4 号机组蝶阀枢轴漏水情况原因分析及处理	龙庆亮	胡栋			陈侠			(379)	
抽水蓄能机组工况转换关键流程		董超			谭叔楠			(384)	
进水球阀工作密封自动退出的故障分析及改进		权强			徐步超			(390)	
仙游抽水蓄能电站过速保护配置介绍		杨艳平			罗国虎			(394)	
仙游抽水蓄能电站 300MW 大型抽水蓄能机组制造技术		周文凯			杨悦伟			(398)	
惠州抽水蓄能机组水泵水轮机性能试验		林恺			谭叔楠			(403)	

抽水蓄能电站工程施工实践

高寒地区抽水蓄能电站 10kV 供电线路设计与施工	柳瑞	李言龙	(411)		
改善抽水蓄能电站地下厂房温湿度环境的研究		全风云	(416)		
地下洞室收敛监测在Ⅳ类花岗岩支护中的应用		殷康	(420)		
呼和浩特抽水蓄能电站新技术研究与应用	赵轶	陈建华	任少辉	(424)	
湿喷钢纤维混凝土在地下厂房施工中的应用		刘明	(430)		
仙居抽水蓄能电站下水库土石围堰防渗施工技术	卢文平	贾群超	陈金	(435)	
宝泉抽水蓄能电站隧洞顶部防渗技术应用	赵峰	陈照阳	朱建峰	王洋	(439)
回龙抽水蓄能电站高压渗透试验		张维国	(442)		

敦化抽水蓄能电站引水系统关键线路工期分析	王 勇 刘延科 温学军 谢永泽	(445)
溧阳抽水蓄能电站上水库库盆施工中采用的新技术和新工艺	潘福营	(449)
阿里马克爬罐在仙游抽水蓄能电站斜井反导井开挖施工中的应用与研究	仲启波	(451)
天荒坪抽水蓄能电站输水系统 6 号施工支洞动水头作用下高压固结灌浆施工	王亮春 焦修明 孔令华	(458)
仙居抽水蓄能电站上水库混凝土面板施工监理质量控制	王宏伟 吴建宏	(462)
仙居抽水蓄能电站地下厂房岩锚梁混凝土施工的温控措施	王 健	(467)
正交试验设计法在斜井反导井开挖中的应用与研究	叶惠军 王 波 刘佩琳	(469)
响水涧抽水蓄能电站上水库垫层料填筑施工	尹成福	(473)
蒲石河抽水蓄能电站上水库大坝填筑施工	王培杰 韩宏韬 郭红永 杨 凯	(476)
响水涧抽水蓄能电站工程安全文明施工与安全文化培育	汪业林	(483)
抽水蓄能电站工程施工通风系统可靠性的 GO 法分析应用	陈 丽 杨志义	(488)
抽水蓄能电站外部变形监测自动化研究	渠守尚	(493)

其 他

抽水蓄能电站项目前期阶段业主能力建设研究	陈同法 宋 伟 吴 铮	(501)
关于抽水蓄能电站项目投资超概分析	王 岩 应 欢	(505)
抽水蓄能工程招标控制价中一般项目费用计算方法探讨	乔天霞	(508)
水电定额在抽水蓄能电站建设过程中的适用性探究	翟海燕 齐寅昌 佟德宇	(512)
影响抽水蓄能电站工程造价的因素分析	李兆峰 杨小卉 许光远 郭春艳	(516)
关于建立抽水蓄能电站工程造价基础数据库的相关思考	张菊梅	(522)
抽水蓄能电站设计阶段工程造价控制管理	夏 武	(526)
抽水蓄能电站主体土建工程招标控制价编制探讨	周 堃 马 赫	(530)
浅谈 P3 软件在抽水蓄能电站项目管理中的应用	何 平	(533)
继电保护整定软件在桐柏抽水蓄能电站的应用	王 斌	(536)
金寨抽水蓄能电站项目前期工作的实践与成效	胡代清 王新宇	(540)
抽水蓄能标准信息筛选及体系研究	齐 文 顾 莹 彭烁君	(544)
电厂标识系统编码在抽水蓄能电厂的应用	张文生 柏 毓	(548)

抽水蓄能电站工程建设文集 2014



抽水蓄能发展规划 与建设管理

科学定位，加速抽水蓄能发展

吕少杰¹ 陈同法¹ 杜建刚² 宋 伟¹

(1. 国网新源控股有限公司, 北京市 100761; 2. 中国国际工程咨询公司, 北京市 100048)

【摘要】 笼统地以调峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动等自然属性对抽水蓄能进行定位, 并以“调峰填谷”作为理论核心制定的相关政策, 已落后于我国抽水蓄能发展的实践。本文对抽水蓄能进行更为科学的定位, 并对政策优化提出建议。

【关键词】 抽水蓄能 功能 定位 发展

1 引言

我国能源发展面临总量供应、资源配置、能源效率和生态环境等四个方面的重大问题, 实现我国能源安全、清洁、环保、友好发展, 十分需要抽水蓄能。

我国现行抽水蓄能政策和发展速度与系统需求还有很大差距。多年来, 我们一贯笼统地以调峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动等自然属性定位抽水蓄能, 并将全部理论一概归结为调峰填谷, 是产生问题的关键原因。

相反, 调峰填谷、紧急事件备用和定向服务, 是抽水蓄能更为深刻的本质功能。按本质功能定位抽水蓄能, 政策更合理, 发展更快。

2 发展智能电网、优化能源结构需要抽水蓄能快速发展

电力生产过程是连续进行的, 发电和负荷及损耗之间必须时刻保持基本平衡。然而, 电力系统不平衡、不稳定的因素非常多, 必须用相应规模的特殊电源予以应对。当前, 我国支撑这些特殊需求的油、气电源较少, 水电中径流式电站占有较大比例, 系统的调峰和紧急事故备用手段十分有限。这种情况下, 发展抽水蓄能成为一种必然选择。

此外, 大量接入风能、太阳能等可再生能源是我国智能电网建设的必要措施, 也是解决我国能源发展面临问题的重要方案。然而风能、太阳能等可再生能源发电出力随机性、间歇性强, 难于控制, 要求必须解决好储能问题。仅按风电技术可开发规模的 20% 计算, 即需储能规模 2 亿 kW 以上。目前电能存储方式有多种, 但其中大规模储能技术中只有抽水蓄能技术相对成熟, 大规模发展承担储能功能的抽水蓄能刻不容缓。

抽水蓄能电站的开发、建设周期很长, 从启动预可研至建成投产至少 12 年, 必须基于服务和支撑智能电网的战略思考, 超前研究。

3 单一的调峰填谷理论已落后于抽水蓄能发展实践

当前, 我国抽水蓄能发展主要基于以调峰填谷功能降低电力系统建设、运营成本的理论。一方面, 该理论一度指导我国抽水蓄能事业取得今天的辉煌成就, 功不可没; 另一方面, 随着时间推移和形势发展, 该理论已经落后于我国抽水蓄能发展的实践。

在指导抽水蓄能项目必要性论证方面, 调峰填谷理论不够全面、不能正确引导抽水蓄能服务于能源战略、电网安全稳定的发展方向, 也不能准确确定需求规模。

在指导项目经济评价方面, 目前的评价指标只考虑调峰填谷而忽略其他功能, 项目经济指标被大幅缩水。另外, 财务评价随意性大, 约束造价、引导投资者优选站点的作用发挥不充分。

该理论不能正确指导建立相关方分摊抽水蓄能电站运营成本的机制, 致使当前我国抽水蓄能电站运营

成本长期理论上纳入电网运行维护费用统一核算,但是迟迟不能明确成本核定和回收的具体方式,影响投资者对后续电站的开发建设热情。

该理论内容单一,不能正确引导电站在复杂情况下的合理运行;一方面,因为电力系统内厂、网利益不一致,特别是当前普遍实行的容量制电价机制没有正确对待“抽四发三”电量损失的问题,加剧了电网企业减少抽水蓄能电站调峰填谷运行的倾向;另一方面,社会舆论和有关方面倾向于以“利用小时数”作为电站功能发挥充分与否的判据,要求承担紧急事故备用任务的抽水蓄能电站频繁以调峰填谷方式运行,不利于电站发挥最大功能服务于电力系统安全稳定运行。

4 抽水蓄能在当前形势下的本质功能和科学定位

电力系统是抽水蓄能电站的服务对象。抽水蓄能的本质功能,需要通过电力系统对其需求来寻找、确定。一般来说,电力系统对抽水蓄能的需求集中表现为三种情况,分别是调峰填谷、紧急事故备用和定向服务。

(1) 调峰填谷。指抽水蓄能机组在用电低谷时耗电抽水、在用电高峰时利用蓄水发电。通过调峰填谷功能优化电源结构、节省电力系统的总成本,是我国建设抽水蓄能电站的主要理论基础。

峰谷差是电力系统的一项重要指标。它源于电力供需关系在时间分布上的不平衡,因而也是电力系统的固有特性。电网的峰谷差通常高达当日最大负荷的40%左右,该数值很大,不容轻视。

抽水蓄能电站替代常规火电机组解决所在系统的峰谷差,有经济和技术两方面的优势。一是在同等程度满足电力系统电力、电量和调峰需求的基础上,建设适当规模的抽水蓄能电站在经济上优于建设相应规模的常规火电。以河北省为例,建设一座1800MW的抽水蓄能电站,每年可节约标准煤24.03万t,节省燃料费14 418万元,并减少CO₂、SO₂等温室气体排放。二是常规机组在大幅调峰时常面临技术难题,不得不频繁关停、重启机组,抽水蓄能可以有效缓解这种情况。

(2) 紧急事故备用。指抽水蓄能机组处于停机或空转状态,能随时启动以应对电网中出现的紧急事故。

抽水蓄能在承担紧急事故备用功能方面有两项突出优势,一是可以以停机状态替代常规火电机组空转运行,减少系统内机组投运容量,优化发电机组运行区间,取得节煤效益。以重庆市为例,建设一座1200MW的抽水蓄能电站承担备用任务,每年可为系统节省标准煤19万t。二是抽水蓄能电站爬坡能力强。常规火电机组每分钟负荷增加率仅为机组容量的1%~2%,而抽水蓄能可以在2min内从静止升至满载。当电力系统出现紧急情况时,抽水蓄能的快速爬坡功能能及时填补事故过程中的电力缺口,有效防止事故扩大,是电网安全运行的有力保障。以华东电网为例,2013年,网内300~1000MW机组共352台,台均跳闸或紧急停机0.86次(上海市甚至高达1.31次),接近于平均每天1台机组跳闸或紧急停机。这种情况下,快速启动抽水蓄能,可以防止事故扩大,赢得处理故障的时间。

我国目前绝大多数抽水蓄能电站都以过半的精力承担着紧急事故备用功能,为电力系统的安全稳定经济运行发挥着重要作用。

(3) 定向服务。指抽水蓄能机组为配合特定的风电、太阳能或核电而建设、运行。在我国环保压力持续加大的情况下,风电、太阳能、核电成为重要的战略资源,但是由于安全等方面的原因,这些电站必须有适当比例的抽水蓄能机组为其提供调峰或储能保障,否则不能充分发挥设计功能。这种抽水蓄能电站是风电、太阳能或核电必要的附属品。

定向服务不同于常规的调峰填谷。常规调峰填谷失效不致影响主电源方案的成败,而定向服务到位与否则直接决定风电、太阳能或核电等主方案可行与否。2013年,我国能源消费接近38亿t标准煤,预计到2020年这一数值达到50亿t。即使这新增12亿t标准煤的能源全部使用清洁能源,也难以抵消化石能源消费对环境的破坏。从这一严峻形势以及风电和太阳能的发展趋势来看,定向服务型机组将在全部抽水蓄能容量中占有相当大的比重。

我国幅员辽阔,经济社会发展十分不平衡,电源构成、电网结构千差万别,即便是同一个电力系统,不同历史时期也可能呈现不同的特点。服务对象不同,抽水蓄能电站的主要功能优势必然不同。当前,我国抽水蓄能电站绝大多数是综合型的,即某时段电站的不同机组分担不同的功能,而就整座电站来讲具备

“调峰填谷+紧急事故备用”或“紧急事故备用+定向服务”的功能。

5 基于抽水蓄能本质功能的思考和建议

不同电力系统中抽水蓄能的功能不同，其相应的立项依据、经济评价指标、运行方式和电价机制应当有所区别。

首先，根据电力系统对本质功能的需求，开展抽水蓄能必要性论证，确定合理开发规模。各省级电网的第一座抽水蓄能电站，原则上应以紧急事故备用作为必要性论证的主要依据。根据业界共识，以火电为主的省份，承担紧急事故备用功能的抽水蓄能容量至少应占电网最高负荷的3%。以山东省为例，这一数值当前应为2000MW左右。在论证调峰填谷需求时，应扣除上述用于紧急事故备用的容量，以保证调峰填谷容量不缩水。

其次，以必要性论证确定的功能作为经济评价的基本依据。抽水蓄能电站的调峰填谷功能一般都是经济功能而不是战略功能。如果待配合的风电、核电或太阳能电站基于战略需要，那么抽水蓄能的定向服务功能将是战略功能。抽水蓄能的紧急事故备用功能是否是战略功能，视其所在电网而定。执行常规经济功能的电站，应严格开展经济评价、论证项目经济可行性。执行战略功能的抽水蓄能电站，则不应以经济评价结论作为电站建设可行与否的判据。对于综合型抽水蓄能电站，开展经济评价时应以机组为单位视功能侧重分别计算，而不应只计调峰填谷效益而忽略紧急事故备用等其余效益。

再次，以必要性论证确定的功能作为约束运行方式的基本依据。以本质功能为立项依据，加大了不同项目立项条件的差异，使得不同抽水蓄能电站（机组）的身份不再一致。为了维护抽水蓄能的开发秩序，抽水蓄能必要性论证应有足够的严肃性。原则上，承担紧急事故备用功能的机组，不应以赚取电价差额收益为目的频繁参与调峰填谷，调峰填谷机组也不应随意变换为停机备用。

第四，以机组本质功能定位为依据，确定电站建设和运营成本的补偿机制。不同本质功能的抽水蓄能电站，应采用不同的补偿机制。比如，调峰填谷型适用两部制，紧急事故备用和定向服务型更适用容量制。紧急事故备用及定向服务型抽水蓄能电站，应特别加强造价监督和管理，并在核定电费标准时严格控制利润水平，以合理控制建设热情，避免过度开发。

最后，应依据本质功能，确定电站建设运行成本的承担者。紧急事故备用型抽水蓄能电站很大程度上是电网的应有设施，能推动电网质量升级。根据我国销售电价核算模式，电网的所有投资和运营成本都会转化到销售电费中。因此，紧急事故备用型抽水蓄能电站的投资费用应当由电力客户承担（实际上，在我国目前电价机制下，抽水蓄能电站承担备用功能，有很大的容量效益，其受益者主要是发电企业）。调峰填谷型抽水蓄能电站建设运行费用应由受益的火电厂全额承担。如果该部分费用转化给电力客户，纳入电费统一核算，则有两点需要说明，一是在核定火电厂上网电价和销售电价时，应当对客户额外承担的这部分费用有所考虑；二是如果电网实行峰谷电价、电网自身有峰谷电费差额收益，则该部分收益应从电力客户的支付额度中减免。

核电、风电或太阳能电站通常是跨区域送、用电的。这些电站替代了受电客户所在省份的常规火电站，受电客户享受了环保成果。因此，定向服务型抽水蓄能机组的费用应由接受该机组所服务的核电、风电或太阳能电站电能的客户承担。

参考文献

- [1] 刘振亚. 智能电网知识问答. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 何光宇, 孙英云. 智能电网基础. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] 许晓慧. 智能电网导论. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 刘振亚. 智能电网技术. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [5] 刘振亚. 中国电力与能源. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [6] 陈同法. 正视抽水蓄能的紧急事故备用功能. 国网新源, 2014, 2.

从电力系统储能技术谈抽水蓄能电站的建设必要性

王婷婷 曹 飞

(中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京市 100024)

【摘要】 从电力系统储能技术的现状入手, 分析各种储能技术的特点及应用领域, 并结合抽水蓄能电站的储能原理和工作特性, 论述抽水蓄能电站的储能优势, 进而得出建设抽水蓄能电站是十分必要的结论。

【关键词】 电力系统 储能技术 抽水蓄能电站 建设

1 引言

“采—发—输—配—用—储”是电网运行六大环节。随着间歇性可再生能源比重的不断提高, 在需求侧和配电网加强储能系统的构筑, 必将提高供给侧和需求侧的融合度、配合度。因此, 储能技术的研究越来越受到重视, 储能技术的应用必将在传统的电力系统设计、规划、调度、控制等方面带来重大变革。

2 储能技术综述

2.1 储能技术分类及情况简介

从能量转换的角度来看, 电能可以转换为机械能、化学能、电磁能等形态存储, 因此可把储能系统分为机械能储能、电磁储能和电化学储能三大类型。其中, 机械能储能主要包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能; 电磁储能主要包括超导储能、电容器和超级电容; 电化学储能主要包括钠硫电池、液流电池、铅酸电池、锂电池。各种储能系统应用能力基本情况见表 1。

表 1 储能系统应用能力基本情况

储能类型	单位投资 (元/kW)	运行 寿命	典型 额定功率	额定能量	最大储能量 (MWh)	电能转化 效率	特 点	应用场合	
机械 储能	抽水 储能	3000~5000	50 年 以上	100~3600MW	4~10h	36 000	75%	适于大规模, 技术成熟。需要地理资源	负荷调节, 削峰填谷、可再生储能, 调频、调相、系统备用、黑启动
	压缩 空气			10~540MW	1~20h	6000		适于大规模。响应慢, 需要地理资源	调峰, 系统备用
	飞轮 储能			5kW~1.5 MW	15s~15min	0.375		比功率较大。成本高、噪声大	调峰、频率控制、UPS 和电能质量
电磁 储能	超导 储能			10kW~1MW	2s~5min	0.083	95%	响应快, 比功率高。成本高、维护困难	电能质量控制、输配电稳定, UPS
	电容器			1~100kW	1s~1min	0.002		响应快, 比功率高。比能量太低	输电系统稳定、电能质量控制
	超级 电容			10kW~1MW	1~30s	0.083		响应快, 比功率高。成本高、储能低	与 FACTS 结合

续表

储能类型	单位投资 (元/kW)	运行 寿命	典型 额定功率	额定能量	最大储能 (MWh)	电能转化 效率	特 点	应用场合	
电化学储能	钠硫 电池	25 000	15 年	100kW~12MW	数小时	—	80%~85%	比能量与比功率较高。高温条件、运行安全问题有待改进	电能质量、备用电源、调峰填谷、能量管理、可再生储能
	液流 电池	16 000	15 年 以上	1kW~1MW	1~20h	2000	65%~75%	寿命长,可深放,适于组合,效率高,环保性好,但储能密度低	电能质量、备用电源、调峰填谷、能量管理、可再生储能
	铅酸 电池			1kW~50MW	1min~3h	150		技术成熟,成本较小。寿命短,存在环保问题	电能质量、频率控制、电站备用、黑启动、可再生储能
	锂电池		10~ 15 年	千瓦级~ 兆瓦级	1~4h	—		比能量高。成组寿命、安全问题有待改进	电能质量、备用电源、UPS

从储能容量等级可分为分布式储能技术和大规模储能技术。其中,分布式储能技术,以分散形式应用,单台机功率一般在 1W~100MW 之间,储能容量在 1Wh~10MWh 之间,电磁、电化学储能均为分布式储能技术。大规模储能技术是指系统本身功率在 50MW 以上,储能容量也在 100MW 以上的储能系统,目前,仅抽水蓄能电站和大型压缩空气储能系统能够满足此要求。

2.2 储能技术的应用情况

分布式储能技术中,超导磁储能系主要用于输配电网电压支撑、功率补偿、频率调节,而超级电容器在电力系统中多用于短时间、大功率的负载平滑和电能质量高功率场合,即在电压跌落和瞬态干扰期间提高供电水平。能与风电、光伏相配套的储能系统主要为钠硫、液流电池,但应用案例仅为 100 余套,总容量 100MW 有余。电池储能不仅价格较为昂贵,而且在功率和储能容量等规模上,远不能满足大规模风电、光伏基地实现峰值转移或提高风电场、光伏电站调度能力的要求,加之电池储能循环寿命短,环保问题突出,因此,此类储能技术尚不具备构成较大储能规模的能力,难以满足电网需求。

大规模储能技术是指系统本身功率在 50MW 以上,储能容量也在 100MW 以上的储能系统,目前,仅抽水蓄能电站和大型压缩空气储能系统能够满足此要求。

压缩空气储能电站是一种调峰用燃气轮机发电厂,主要利用电网负荷低谷时的剩余电力压缩空气,并将其储藏在典型压力 7.5MPa 的高压密封设施内,再用电高峰释放出来驱动燃气轮机发电。在燃气轮机发电过程中,燃料的 2/3 用于空气压缩,其燃料消耗可以减少 1/3,所消耗的燃气要较常规燃气轮机少 40%,同时可以降低投资费用、减少排放。但是,大型压缩空气储能电站受自然条件的限制,必须找到合适的山洞或地下构造;同时要满足地质构造要求,以满足密封要求。因此,该技术在世界范围内的应用案例仅为 5 例,最大规模为美国的 Markham 电站,容量为 540MW。在国内,该项技术尚未实际应用。

储能技术应用示意图 1。

而抽水蓄能电站利用上、下水库进行电能与机械能(动能、势能)的转换,相比于其他储能装置,抽水蓄能电站投资较低,单位千瓦造价 3000~6000 元,使用寿命长,机组使用寿命 25 年,水工建筑物使用寿命达 60 年以上;储能规模大,可根据电网需要和站址地形地质等建设条件调节;能量转换效率稳定,达 75% 以上,不存在衰减问题。

由此可见,抽水蓄能的低吸高发功能,实现了电能的有效存储,有效调节了电力系统生产供应、使用,保持了三者之间的动态平衡。抽水蓄能是目前电力系统中当之无愧的最成熟、最实用的大规模的储能方式。