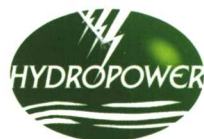


DIYIJIE



SHUILI FADIAN JISHU GUOJIHUIYI LUNWENJI

第一届

水力发电技术国际会议

(第一卷)

论文集

本书编委会 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

第一届

水力发电技术国际会议

论文集

(第一卷)

本书编委会 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

第一届水力发电技术国际会议论文集. 第 1 卷/《第一届水力发电技术国际会议论文集》编委会编. —北京: 中国电力出版社, 2006

ISBN 7-5083-4873-7

I. 第... II. 第... III. 水力发电 - 国际学术会议 - 文集 IV. TM612-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 123374 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 [http: //www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn))

北京盛通彩色印刷有限公司印刷

*

2006 年 10 月第一版 2006 年 10 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 16 开本 80.5 印张 2530 千字

印数 001—800 册 定价 400.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

第一届水力发电技术国际会议论文集

编 委 会

- 主 任： 毕亚雄
- 副 主 任： 秦中一 李菊根 贾金生 陈洪斌 刘建明 李 东
毛亚杰 刘广峰 李定中 周尚洁 李 新
- 常务副主任： 邴凤山
- 论文集出版： 中国电力出版社
- 主 编： 文伯瑜 白立江
- 副 主 编： 赵 伟 傅 伟 杨伟国
- 审 稿 专 家： 文伯瑜 李定中 赵 琨 朱耀泉 王德宽 唐 澍
刘利人 秦锡翔 饶道群 程永权
- 责 任 编 辑：
- 英文版： 潘宏娟 曹 荣 潘 琳 刁晶华 谭学奇 张 敏
梁 卉 王卫华 韩世韬
- 中文版： 李慧芳 郭丽然 穆智勇 王冬虎 潘 琳 曹 荣
马 琳 李文娟 梁 卉 王卫华 刁晶华 杨 易
- 论 文 编 辑： 赵媛媛 王 玉 舒波平 金玉琪 古 巍 刘惠荣
王幼春 胡丹蓉 冯密峡 王连富
- 翻 译： 国电信息中心北京中电求真科技开发有限公司
- 监 制： 国电信息中心北京中电求真科技开发有限公司

前 言

以全新技术装备起来的人类，已跨入了 21 世纪。中国电力工业已步入大电站、大机组、高电压、大电网、自动化和信息化的时代。自 20 世纪下半叶，中国的水电建设掀起了新的高潮，一大批世界顶级的工程、一大批世界顶尖的技术在中国兴起。世界水电在中国，中国水电冠全球。据不完全统计，中国已投产的大中型各类水力发电机组：混流型机组 301 台，轴流机组 55 台，抽水蓄能机组 25 台，贯流机组 83 台。

在建和拟建的众多巨型电站和单机容量在 70 万~80 万 kW 的特大机组共计 120 台。国家有关规划数字显示，在 2020 年前中国将投产的单机容量 70 万~80 万 kW 的混流机组约 150 台，单机容量 30 万~40 万 kW 的抽水蓄能机组约 150 台；单机容量 3 万~6 万 kW 的大型贯流机组约 150 台。由此可见，中国水电建设和发展已进入“黄金时代”。不久的将来，中国水电装机容量就会突破 2 亿 kW，还有 3 亿 kW 的水电装机容量将纳入国家的规划、设计和建设项目中。广阔的中国水电装备市场，众多特大机组的设计、制造和生产运行技术，需要借鉴国际先进技术和先进经验，需要国际同行的合作，携手发展中国的水电装备制造业和创新电站经济运行新理论和新模式，以最大限度地发挥水电可再生、清洁、灵活的绿色环保的本土化能源的作用，为保护全球人类绿色家园作贡献。

在国际间的技术合作上，三峡工程有成功的经验。充分发挥国家重大工程对技术创新的带动作用，走出了一条引进技术，联合开发，合作制造，独立自主再创新的成功路子。众所周知，三峡水轮发电机组因国际招标成为世界水电装备技术最高水平的展示和较量，被誉为“全球水电奥运”，达到了世界最先进技术和装备比选的目的。通过三峡右岸电站 12 台机组的合作，哈尔滨电机厂有限责任公司，东方电机股份有限公司凭借自主创新形成的核心竞争力，通过 7 年的时间，使中国大型水电机组在水电大装备的设计、制造、安装水平等方面，实现了 30 年的大跨越。

发展水电和确保大机组的安全稳定运行不仅是电站的经济效益所在，更是电网安全、经济运行的重要保证，也是中国能源结构优化和能源安全的期盼。20 世纪七八十年代末，美国的大古力 III 水电站、巴西的伊泰普水电站建成投产，积累了丰富的制造和生产运行经验。交流特大型水电站、特大型水电机组的设计、制造和生产技术经验，促进全球水电装备制造业的发展和创新，成为我们举办“第一届水力发电技术国际会议”的主旨。水电站建设、水电装备技术的创新、水电站群的优化运行，是人们开发水能资源的基本要求。

水电站群梯级水库调度自动化、网络化、信息化，控制设备的智能化，机组运行状态远程诊断技术的实现，也是会议的主要内容之一。据统计，采用状态诊断技术可减少故障停机时间 75%，每年可减少维修费用 25%~50%。如果电站运行系统中的状态监测与故障诊断的获利与投资比达 36:1，如果系统中是以可靠性分析技术为基础、以状态监测诊断系统技术为工具，可使发电系统日常维护工作量减少 40%~70%。在电站状态维修系统中，专家知识的集成、监测系统的集成、软硬件的功能集成是核心技术，又是状态检修决策和维护管理的基础。这也是本次会议议题之一。本届会议的主要交流内容涵盖以下七个方面：

1. 大型水轮机设计、制造和运行关键技术；
2. 大型水轮发电机及高压设备技术；
3. 大型水电站设备保护和控制技术；
4. 大型水电站在线监测及故障诊断技术；
5. 大型水电站群梯级调度及水情测报技术；

6. 大型水电站机电设备安装及运行管理技术；

7. 大型水电站的金属结构、船闸设计和机电安装技术。

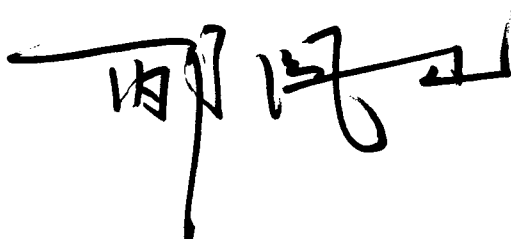
本论文集共收录论文 409 篇，其中国外论文 36 篇。共计 500 余万字，分别用中文和英文出版。论文编审工作是在秦中一、毕亚雄、邴凤山等主持下进行的。参加论文审稿的专家有文伯瑜、李定中、赵琨、朱耀泉、王德宽、唐澍、刘利人、秦锡翔、饶道群、程永权、杨伟国等人。

会议组委会委托中国电力出版社正式出版发行，以飨读者。

鸣谢！

中国水力发电工程学会秘书长

第一届水力发电技术国际会议执行副主席（常务）

A large, stylized handwritten signature in black ink, which appears to be '邴凤山' (Bing Fengshan), the name of the official mentioned in the text above.

2006 年 10 月

目 录

前言

三峡电站送出系统的区域稳定控制 ... 戴永荣 周 济 方勇杰 姬长安 李雪明 薛禹胜 张长银	(1)
中国水电工程机电技术的发展概况	李定中 (7)
大型混流式水轮机远景与挑战	
..... M. Couston J. Bremond J.P. Vialle D. Markiewicz P.Y. Lowys 刘 杰	(13)
大型混流式水轮机设计经验	Michael Wüst 林延忠 (19)
中国大型水电机组的技术进步	梁维燕 (26)
发挥优势 迎接挑战 为中国水力发电事业的发展作出新贡献	吴伟章 (29)
加快技术创新步伐 迎接中国水电建设新高潮	韩志桥 (36)
用遗传基因法进行混流式水轮机转轮的最优化设计	榎本保之 黑泽贞男 (39)
流域梯级电站统一调度符合科学发展观——大渡河梯级电站统一调度初步研究	刘金焕 (47)
定子绕组局部放电活动与绝缘状况关系的分析	格雷格·斯通 姜 辉 (55)
龙滩水电站水轮机转轮的设计和制造评述	戴 波 孙鸿秉 杨振先 (61)
三峡水轮机活动导叶表面损伤分析	李胜才 (68)
清江梯级电站联合调度的探索与实践	梁福林 (82)
GE Energy 高水头水轮机技术在中国	李永耀 (86)
大型水电站机电安装技术发展和研究	杨继学 (93)
以三峡为实例的水力发电计划与管理决策支持系统	
..... 阿瑞斯-乔加卡可斯 姚华明 肖 舸 王玉华	(100)
中国水电机电安装 50 年发展与技术进步	付元初 (108)
水电站状态监测技术的实施及其应用	E. Egusquiza 梁权伟 X. Escaler Carme Valero (116)
做好电力标准化工作为中国水电发展提供技术支撑	许松林 (122)
法国电力公司与中国的水电	Laurent Bellet Frederic Louis (125)
三峡左岸电站 700MW 水轮发电机组运行分析与稳定措施	陈国庆 (131)
水轮发电机组定子和转子的灵敏接地保护技术	Dr. Hans-Joachim Herrmann 高迪军 (136)
基于 MB80 的大型抽水蓄能电站计算机监控系统	
研究	王善永 汪 军 陈思宁 刘成俊 任志武 樊玉林 (144)
基于便携式计算机的同步电机实时仿真器	José Taborda (149)
在线溶解气体分析技术在充油设备上的应用 ... 张官松 谢 俊 杨 艳 张霄元 Steve Jennings	(154)
三峡电站大型水轮发电机组保护配置实现	赵 斌 郭宝甫 唐云龙 (160)
关于混流式水轮机水力稳定性的几点建议	陶星明 刘光宁 (165)
可调双级水泵水轮机从 38MW 样机到 4×270MW 抽水蓄能电站的应用	L.Bellet P.Huvet (172)
特殊压力脉动的研究与三峡模型水轮机稳定性	
测试	严 肃 胡江艺 邓祥平 税 彪 许巍巍 石清华 (181)
水轮机尾水管涡带的模拟	Thomas Aschenbrenner (186)
哈电水轮机产品设计先进技术	王泉龙 (192)
桐柏抽水蓄能电站抽水蓄能电站 4×306MW 水泵水轮机设计特点和运行	
情况	Perter Nowicki Manfred Sallaberger Peter Bachmann (200)

高比速混流式水轮机的水力稳定性问题	刘光宁 陶星明 (208)
阿尔斯通公司灯泡贯流式机组经验介绍	J.P.Vialle T. Kunz 高峰 L. Tomas (212)
基于支持向量机的尾水管压力脉动分析方法	赵林明 王海燕 (225)
水口电站轴流式水轮机压力脉动预测分析	吴埏锋 吴玉林 刘树红 (230)
新世纪的抽水蓄能技术	Laurent Bellet Jean-François Balmitgere Frederic Louis (235)
小浪底水电厂转轮叶片裂纹产生原因分析及处理措施	胡宝玉 张利新 (241)
混流式水轮机尾水管压力脉动测试研究	彭文季 罗兴铸 郭鹏程 陈伟 刘玉刚 (246)
利用 CFD 技术优化水口水电站轴流转桨式水轮机间隙空化特性	林琳 王正伟 周凌九 (252)
大型水轮发电机组关键核心技术新发展	陶星明 (257)
可逆式水泵水轮机/发电电动机设计及大型 抽水蓄能电站业绩	J.B. Houdeline T. Kunz J. Bremond S. Lavigne, P. Mora Ph. Pepin M. Couston M. François G. Vuillerod 刘杰 (261)
应用空间导叶的混流式水轮机三维湍流计算	张宇宁 刘树红 吴玉林 杨建明 (273)
垂直轴潮流水轮机水力性能的数值模拟研究	史威 罗先武 刘树红 许洪元 (276)
大型混流式水轮机转轮振动固有模态分析	廖翠林 王福军 (283)
水轮机补气条件下压力脉动的数值分析	钱忠东 杨建东 (286)
轴流式水轮机顶盖非定常应力的数值模拟	夏朋辉 吴埏峰 吴玉林 (292)
水介质对水轮机转轮动力特性的影响	梁权伟 X. Escaler E. Egusquiza (297)
关于有汛限水位大型水电站额定水头的选择问题	郭翔鹏 (303)
关于水轮发电机组振动的全过程、全方位预防	李启章 崔燕 (309)
论“加权因子”的权重分布对转轮水力开发的导向作用	宋立人 徐军 (313)
我国抽水蓄能电站建设经营现状分析	彭天波 刘晓亭 (319)
可能影响三峡左岸机组运行可靠性的水力因素及对策	端润生 (325)
黑麋峰抽水蓄能电站水泵水轮机比转速与同步转速选择分析	郑建兴 喻忻 (331)
龙盘水电站水轮机参数初步选择	周跃武 张俊芝 (340)
水轮机转轮叶片的卡门涡共振	李启章 李志民 (348)
向家坝水电站水轮机主要结构研究	吴滨 伍志军 黄梅 (355)
龙滩水电站水轮机参数选择评述	孙鸿秉 何帆 (362)
提高混流式水轮机稳定性的对策	初曰亭 (367)
混流式水轮机中非稳定流的数值模拟	郑清贵 吴彬 龙元林 梁柱 刘小兵 曾永忠 (371)
水轮发电机技术	刘平安 (377)
拉西瓦水电站水轮机模型试验验收	朱耀泉 (390)
混流式水轮机水力自激振动分析	徐珍懋 刘春林 (397)
天荒坪抽水蓄能电站水泵水轮机特点	游光华 (403)
水轮机转轮叶片模压成型技术	王地召 王贞凯 (407)
龙羊峡水电厂机组稳定性研究及分析	黄中华 张天锁 (412)
大型水轮发电机组制造技术	杜金程 (418)
基于轴心轨迹的水轮机转子—轴承动负荷特性分析计算	韩亮 张伟 陈斌 (424)
减轻定子线圈绝缘对环境负荷的技术 (高热传导绝缘和新加热 —加压媒介)	幡野浩 岩田宪之 泽史雄 向井一马 阿曾俊幸 (431)
蒸发冷却技术在李家峡水电站 400MW 水轮 发电机组上的应用	王兴玉 乔吉庆 孙天虎 田新东 袁佳毅 (437)
绝缘系统开发准则	Robert Draper (442)

龙滩水电站水轮发电机组结构特点与性能参数	徐立佳 何银芝 (448)
用于抽水蓄能电站的新一代发电机出口 断路器	Dieter Braun Giosafat Cavaliere Kurt Dahinden (453)
800kV GIS 中 VFTO 的研究	阮全荣 施 围 贾 磊 靖 峰 (457)
水轮发电机中噪声和振动的诊断与分析	Arexki Merkhoulf (465)
三峡发电机定子绕组绝缘材料、结构及 工艺研究	梁智明 皮如贵 漆临生 徐文建 张小俊 何海洋 (469)
HGI-2 (S) 型断路器在陈村水电厂机组上的应用与运行分析	周二保 (480)
大型水轮发电机电磁及通风设计所面临的挑战——巴斯康蒂抽水蓄能电站 技术改造经验	托马斯·希丁格 依基久·法利亚 安东尼·梅耶 (485)
水轮发电机用高可靠性推力轴承技术	南波聪 三上诚 THan Trong Long 新井秀忠 (493)
二滩水电站机电设计	刘彦红 (503)
大型水轮发电机汇流排的损耗研究	刘长红 姚若萍 饶芳权 (510)
三峡左岸水轮发电机通风系统研究	廖毅刚 侯小全 (516)
构皮滩水电站发电机设计	Thomas Kunz 杨忠国 (523)
高能 PTC 非线性电阻在发电机灭磁中的应用研究	朱仲彦 吴华峰 夏勇强 (530)
水电机组盘车新技术——自动盘车装置	庞子敬 (536)
黄河上游梯调中心电调自动化系统的 实现及意义	王德宽 张俊才 曹光明 王桂平 史邦文 郭鹏慧 (538)
川电东送工程安全稳定控制系统	李 雷 方勇杰 李天华 戴永荣 薛禹胜 陈苑文 庞晓艳 张晓明 赵 理 黄 林 覃昌荣 (543)
基于电站数据仓库体系的三峡水力发电厂机组状态 监测趋势分析系统	全新建 朱 辰 施 冲 (551)
梯级水电站集控中心计算机监控系统软件研究	朱 辰 施 冲 王 伟 (554)
ABB 公司在国内大型抽水蓄能电站计算机监控系统中的最新应用	杨继德 (560)
用电力系统实时数字仿真技术进行自动励磁调节器性能检测实验	吴 涛 苏为民 姚 谦 路 洁 史 扬 邓 炜 (567)
发电机保护与 TA 饱和问题及解决方案	Bogdan Kasztenny Dale Finney (573)
黄河小浪底郑州集中控制系统网络设计	杨叶平 袁 宏 董泽亮 张玉平 (580)
三峡左岸电站计算机监控系统网关工作站开发与实现	张 毅 周 民 (585)
黄河公伯峡水电站计算机监控系统	李建辉 张 毅 谢银花 王香玲 (590)
基于导纳测量方法的发电机失磁保护——极为贴近发电机的 运行极限图	Dr. Hans-Joachim Herrmann 高迪军 (596)
黄河上游集控中心电力调度自动化系统设计及实现	王峰瀛 王桂平 周 民 冯 迅 (606)
白山梯级水电厂计算机监控系统升级改造	刘晓波 文正国 邓小刚 刘 泽 刘贵仁 姜相东 郭善成 耿瑞杰 (613)
大型水电厂计算机监控系统发展方向初探	邓诗军 (619)
NEPTUNE 控制系统在桐柏抽水蓄能电站中的应用	马向锋 (623)
桐柏抽水蓄能电站机组状态监测与故障诊断系统	万静英 (630)
三峡左岸电站计算机监控系统及其项目实施	张润时 (634)
数字逻辑插装式水轮机调速器及其应用	张建明 张治宇 刘同安 赵 维 (639)
大型水轮机新型调速器的应用研究	刘安平 陈杏君 胡庆超 (644)
一种用于巨型机组的智能步进式水轮机调速器	刘昌玉 周志军 顾宏进 (654)

水电机组失磁保护阻抗新判据	沈全荣	郭自刚	(658)
三峡梯级调度中心计算机监控系统	王桂平 袁 宏 张玉平	张新军	(661)
水轮机调速器综合测试及仿真装置的开发研制	李 越 侯 锐 张建明	孔昭年	(666)
基于 B/S 模式电厂监测数据综合分析系统的应用	李 宁 施 冲	朱 辰	(672)
大型发电机变压器组保护的新原理	严 伟 沈全荣 陈 俊 郑玉平	沈国荣	(680)
桐柏抽水蓄能电厂监控系统	杨文道	郑 重	(686)
长江三峡工程左岸电站计算机监控系统	毛 江	朱 辰	(694)
抽水蓄能机组变频启动过程的谐波研究	梁见诚	姜树德	(701)
龙滩水电站发电机保护设计研究	张维力	李正茂	(707)
水电站安全与经济运行应用软件系统	徐擎天	常 黎	(711)
为我国水电工程继电保护学科的发展作出新的贡献		许可达	(717)
隔河岩水电厂计算机监控系统(主站)改造综述	李 钢 邓诗军 甘魁元	王靖欧	(719)
广州抽水蓄能电站引进机组机电设计比较与技术进步	陈湘匀	肖 健	(723)
用于大型同步发电机出口及厂用变压器和励磁变压器分支的大容量 快速开断装置	李延军	王 川	(727)
长寿、节油、免维护力反馈集成式电液主配压阀	张晓英	雷践仁	(733)
变压器中性点接地方式对和应涌流产生的影响分析 ...	毕大强 孙 叶 李德佳 王祥珩	王维俭	(739)
三峡梯级水库调度自动化系统	肖 舸 李晓斌 李永红	周保红	(745)
水电厂设计和优化控制升级工程工具	安东尼·李堡科斯 派特莱斯·霍泽特		(753)
梯级水利枢纽的水电联合调度模式探析	袁 杰 肖 舸	葛文波	(765)
科学利用沅水水能资源 充分发挥防洪发电效益		吴作平	(772)
三峡发电计划与管理决策支持系统软件功能与 特点	姚华明 阿瑞斯-乔加卡可斯 肖 舸	王玉华	(776)
乌江流域梯级水电站的经济运行研究	吴正义 施 冲 芮 钧		(782)
EDF 法国发电公司发电计划和 水的优化	Jean-François Balmitgere Aude Boyer Anne-Marie Santaella		(787)
黄河上游梯级水电站的集中控制管理	曹光明	杨春霞	(802)
基于 WebGIS 的防汛信息服务支持平台的应用研究	齐林海 酆颂东	马素霞	(808)
基于日典型负荷的三峡梯级调峰运行方式研究	李 晖 何 莉	余 波	(814)
三峡水情自动测报系统中的多信道传输	熊光亚	赵转社	(820)
机电设备质量监造	JM. Dubois		(825)
梯级流域遥测系统管理模式的探索	袁 杰 肖 舸	葛文波	(827)
水情自动测报系统在龙滩水电工程的应用		晏忠林	(834)
大化、百龙滩水电站梯级联合调度运行方式探讨及应用	谢金记 蒙永硕	黄存宇	(841)
清江梯调监控系统规划与应用		黄 帆	(845)
水调自动化系统综述	高 英	王 壬	(850)
三峡梯级水利枢纽实时防洪调度决策系统	王玉华 陈忠贤 左振鲁	李厚俊	(855)
宝兴河流域梯级电站综合自动化与生产运行管理		杨友均	(860)
中国水库调度的成就与展望		裴哲义	(866)
中型梯级水电站实现“无人值班”集中监控模式的技术探讨	林 峰	李 伶	(870)
自动水务计算在乌江梯级水库调度中的应用		肖 燕	(878)
大型梯级水电站群的远程集中控制		李泽宏	(884)
五强溪水电厂 1 号机组水涡轮裂纹原因分析及处理		袁 蕊	(890)

三峡左岸 6 号机组轴向水推力真机

试验研究	刘 洁 刘志辉 王光信 姜德正 张克危 郑莉媛	(894)
振动诊断—水泵水轮机和混流式水轮机上的		
应用经验	Gilbert Grosse Ulrich Seidel Michael Rieg	(899)
三峡左岸电站 6 号机组极小开度异常振动原因分析 ...	符建平 熊 浩 刘 洁 张克危 郑莉媛	(912)
从设备运营到能量管理	F. Fouque	(920)
水电厂电力设备的状态监测与诊断	李明华 严 璋	(927)
大型水轮发电机组局部放电监测与分析	王 宏 万 元 李朝晖	(932)
一种水轮机状态在线监测系统的现场试验与运行	史会轩 李朝晖 毕亚雄	(940)
三峡左岸电站 VGS 机组稳定性研究	丁万钦 熊 浩	(948)
局部放电监测技术在大型水轮发电机上的应用	徐东海 曾德华	(959)
TN8000 状态监测系统在三峡左岸电站的应用	冉毅川 丁万钦 陈泽阳	(964)
基于水电机组运行工况监测的故障诊断	刘晓亭 冯辅周	(971)
基于 Web 技术的水电机组远程状态监测研究	桂中华 潘罗平 唐 澍	(976)
基于选择性油气分离膜的燃料电池氢气传感器及其在线监测系统	秦仁炎	(981)
泵串并联输送系统在黄河现场的试验	耿福明 许洪元 李永顺 罗先武 冉红娟	(984)
三峡左岸电站 ALSTOM 机组稳定性分析	朱玉良 熊 浩 徐东海	(989)
水轮发电机组状态监测的实践和发展模式的探讨	杨春明 廖安辉	(997)
高压断路器在线监测系统研究	李平诗 徐 澄	(1001)
设备状态监测技术应用及状态检修管理体制研究	冯文贵 黄定奎	(1006)
基于 Internet 的水电机组远程诊断中心的开发与应用	郑松远 徐宏俊 吴建辉	(1011)
彭水水电站机组状态监测系统设计与规划	杨小松 郑松远	(1016)
左岸电站主设备状态趋势分析系统的开发与应用	杨廷勇 吴信伟 瞿卫华 张 凯	(1022)
水电厂状态监测及故障诊断专家系统	李香华 董 显 杨大贵	(1027)
水电厂“诊断运行”与应用	李志祥	(1031)
变压器油色谱在线监测系统运行分析	张鹏翔 刘笑梅 周方洁	(1035)
二滩水电站机组尾水压力脉动分析	马德民 冯正翔 孙建平 敖建平 郑莉媛	(1041)
三峡左岸电站机组现场试验研究	关杰琳 冉毅川 段开林 万 鹏 孙建平 郑莉媛	(1045)
水电机组在线监测系统中数据传输存储		
策略研究	陈国庆 李志祥 熊 浩 陈喜阳 张克危 郑莉媛	(1055)
三峡左岸电站水轮机过速关机过程中异常振动现象及改善		
措施探讨	田子勤 邵建雄 覃大清 郑莉媛 郑涛平	(1061)
大型电站机组动应力试验研究	万 鹏 张克危 刘伦洪 郑莉媛 曹剑绵 李启章	(1068)
三峡左岸电站 700MW 水轮发电机组主要安装技术	王启茂	(1075)
三峡电站压力钢管凑合节合拢焊缝的焊接及监测	唐文富	(1081)
三峡水轮机拐臂磨损原因分析与修复工艺的研究	幸绍凯 艾友忠	(1090)
W— Ω 型双重水封的垂直升船机对接系统的试验	林宗霖	(1095)
水口水电站升船机安全锁锭装置现场试验	郑冬梅 汪云祥	(1100)
水口水电站 6 号机组活塞杆断裂情况及原因浅析	林家洋	(1105)
水口水库动态汛限水位设计与运用研究	林家辉 蒋昌兴 林 崇	(1108)
水轮机调速器参数仿真寻优方法研究	陈启卷 姜 胜 蔡维由	(1113)
$\phi 550$ 接力器缸体拉伤的局部修复	毛志浩 王 雷	(1119)
东风发电厂 1~3 号机组改造增容的实现	毛志浩 邓红卫	(1122)

二滩电站水轮机转轮裂纹情况及原因分析	汤津茂	(1127)
伺服控制在大型灯泡贯流式水轮机调速系统中的应用	叶 波	(1132)
南京市外秦淮河三汊河口闸护镜门设计特点	张政伟	(1142)
瀑布沟水电站机组安装工期的研究	李 林	(1147)
广州蓄能水电厂安健环管理经验	黄国祯	(1152)
龚嘴水电站水轮发电机组改造增容	任开福 刘福坤 喻永松	(1156)
水电站机组安全稳定运行的改造实践	杨 斌 李福刚	(1162)
CO ₂ 气体保护焊在水工金属结构制造中的推广应用	邓大宏 吴 辉 丁 维 周 鑫	(1166)
小浪底电厂水轮发电机组运行分析	马新红 刘定友 罗 斌	(1171)
岩滩水电厂 3 号水轮机转轮应力和机组稳定性试验	韦 坤 陈湘宁 潘罗平	(1180)
乌江渡发电厂 210MW 发电机的增容改造	侯 伟	(1189)
大化水电厂机组增容改造及设备技术改造	林柏雄 陈开评 梁安志 黄国明	(1194)
蒸发冷却技术在大型水轮发电机上的应用	袁达夫 王树清	(1201)
三峡左岸电站 VGS 机组尾水管压力脉动分析	李志祥 熊 浩 张良颖 孙建平 郑莉媛	(1208)
呈正弦状态分布工程数据的处理及在大型机组安装中的应用	江小兵 乔新义	(1213)
基于 PC104 和嵌入式 Linux 的水电机组振摆装置的研究	李友平 朱 浩 施 冲 夏 洲	(1224)
影响并列运行晶闸管励磁整流桥均流的因素	王 伟 石 磊 马 齐 朱晓东	(1228)
基于数据库的励磁故障智能诊断系统的研究	卢 强 王 伟 石 磊	(1236)
抽水蓄能机组调速器液压系统的设计	曾继伦 蒋克文 蔡晓峰 蔡卫江 李建华 陈东民	(1239)
非线性鲁棒控制在大型微机水轮机调速器上的 应用研究	蔡卫江 陈登山 余纪伟 朱 祥 陈晓勇 张太祥	(1245)
巨型水轮机调速器液控系统研究	李建华 朱 军 陈登山 朱 祥 张太祥 陈晓勇	(1250)
水轮机调速器液压系统仿真研究	蒋克文 余纪伟 朱 军 朱 锋 蔡晓峰 曾继伦	(1254)
龙滩水电站计算机监控系统	王惠民 芮 钧	(1259)
大型水轮机调速器国产化中的新技术	向家安 胡乙进 李 红	(1269)

三峡电站送出系统的区域稳定控制

戴永荣¹ 周 济² 方勇杰¹ 姬长安¹ 李雪明¹ 薛禹胜¹ 张长银¹

(1 国电自动化研究院, 南京 210003; 2 国家电力调度通信中心, 北京 100031)

【摘 要】三峡电站是全国联网的枢纽电站, 其安全稳定控制系统对三峡电力送出系统的暂态稳定、热稳定、频率稳定控制起到了重要作用。本文总结了三峡送出系统需要解决各类稳定问题, 以及发生系统事故可能导致的严重后果。在此基础上, 阐述了三峡安全稳定控制系统的功能、结构、特点和关键技术, 并指出该系统的应用为保证三峡电力的送出和三峡电网的安全稳定运行发挥了重大作用。

【关键词】送出系统 安全稳定控制系统 全国联网 精确切除机组

1 引言

我国的电力需求在经济持续多年的强劲发展带动下日益增长, 装机容量和电网规模迅速扩大。为此, 国家电网公司结合我国一次能源的分布特点和电力负荷的实际分布情况, 及时地提出了西电东送、全国联网的电力发展战略, 并正在逐步付诸实施。长距离大容量输电, 以及大区电网之间的电力互供, 将是我国电力系统的长期特征和发展方向。

三峡送出电网在全国联网战略中起着举足轻重的作用, 三峡电站是世界上发电量最大的电站, 同时又是全国联网的中心和枢纽电站之一。三峡通过华中电网, 向东西南北四个方向辐射, 这四个方向的联网规模和输电线路容量将逐步扩大。目前阶段, 川渝电网通过三万线和万龙线与湖北电网联网, 华中电网向北通过 500kV 辛嘉线与华北电网联网, 向南通过三广直流与南方电网联网, 向东通过龙政直流和葛南直流与华东电网联网, 向西通过灵宝直流背靠背工程与西北电网联网。这些联网工程, 与三峡电力送出系统之间已经形成了紧密相关的联系, 因三峡电站具有的巨大容量, 三峡送出系统的安全稳定运行, 必须建立在这些联网点上区域互供的良好协调控制基础上。

三峡安全稳定控制系统自 2004 年投入运行后, 三峡电站的投产机组从 4 台增加到了现在的 14 台, 稳定运行的任务更加艰巨。鉴于三峡所具有的特殊的的重要性, 需要更多地研究新的运行条件下可能存在的稳定问题并加以防范。为防止可能出现的严重停电事故, 在能够预料的运行情况故障范围内, 对于三峡送出电网的运行和控制应该提出更高的要求。

2 三峡安全稳定控制系统所解决的稳定问题

三峡安全稳定控制系统需要解决的问题涉及到暂态稳定、热稳定、频率稳定等方面。三峡近区电网的 500kV 系统如图 1 所示。此系统中, 原三万线即将改接入龙泉站, 形成万龙双线。

四川的水电资源丰富, 二滩水电厂大量的水电需要通过三万线和万龙线送出。当川渝电网发生 $N-1$ 或 $N-2$ 故障时, 需要根据发生故障的相关断面的潮流情况, 按事先设定的控制策略切除二滩电厂机组。该功能已在川电东送安全稳定控制系统中实现, 因此在本系统未设计切二滩机组功能。万龙线全长 300 多公里, 在川渝送出断面重潮流情况下, 如果龙泉附近发生较严重的故障, 需要解列三万线和万龙线以防止系统暂态失稳。

龙政直流和江城直流在满载情况下各自输送 300 万 kW, 一旦重载情况下发生单极或双极闭锁, 均可能使得华中电网频率上升, 此时需通过安全稳定控制系统快速切除三峡机组。同时三峡电站的安全稳定控制装置也具有高周切机功能。

在三峡电站左一、左二电站间母联断路器开断情况下, 即分母运行情况下, 三龙线、龙斗线或三江

线如果发生 $N-2$ 故障或检修情况下的 $N-1$ 故障，将导致 500kV 线路过载，此时需要切除左一或左二电厂一定数量的机组。切机后因潮流重新分布，又可能引起斗江线和其他线路过载，同时因三峡机组的切除，会使得华中电网频率下降，此时需要借助于对直流系统进行功率调制来消除线路过载并平衡华中网的有功。为了在线路故障情况下尽量减少切机量，此时可考虑通过合母联断路器来缓解送出断面的过载情况。

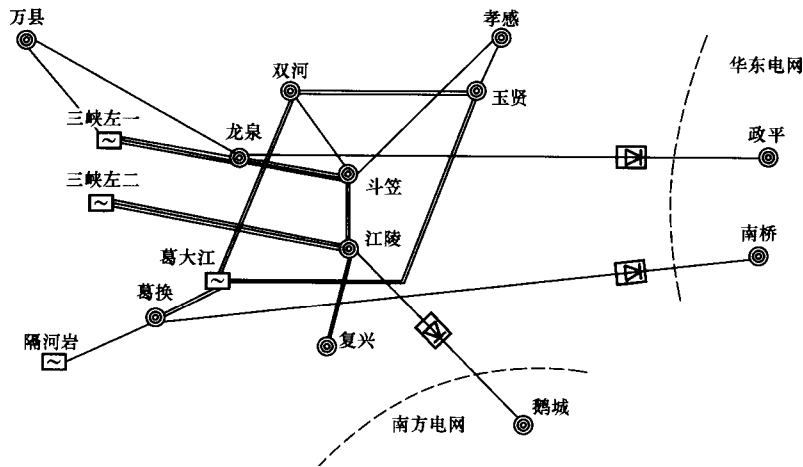


图 1 三峡送出 500kV 电网示意图

3 三峡左岸安全稳定控制系统的配置与功能

3.1 安全稳定控制系统的组成

如图 2 所示，安全稳定控制系统由六个 500kV 控制站组成，分别安装于三峡左一电站、三峡左二电站、龙泉换流站、斗笠变电站、荆州换流站和葛洲坝换流站，每个厂站都是按双机配置，以一主一备方式或双机独立方式运行。在国调中心、三峡电站和三峡梯调分别安装集中管理系统 SCMS，可对这些装置进行监视。图中所示各站间通道均为 64K 数字通信口，用以传递正常运行信息和控制命令。为适应联网系统的不断发展，安全稳定控制系统预留有到万县、政平、右岸、孝感、双合、潜江、益阳、葛洲坝电站等厂站安全稳定控制装置的通信接口，图中未示出。当安全稳定控制系统需要与上述厂站的安全稳定控制装置进行通信时，即可通过预留的通信口实现通信功能。安全稳定控制装置采用的是南瑞集团公司稳定技术分公司研制的 FWK-300 分布式稳定控制装置。此外，在龙泉、左一电站配置了 UFV-2F 型失步解列装置，用于在川渝电网与湖北电网发生失步振荡时解列三万和万龙线。

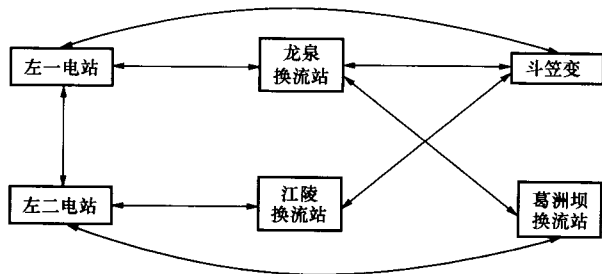


图 2 三峡左岸安全稳定控制系统图

3.2 安全稳定控制系统的功能

国调中心对三峡送出电网进行了各种运行方式下的潮流计算分析和稳定分析，对各种运行方式下进行了 $N-1$ 和 $N-2$ 故障校核，并根据计算结果，提出了相应的稳定措施，据此确定了各站 FWK-300 装置的控制策略。

对于复杂故障下系统可能出现的失步振荡情况，通过设置 UFV-2F 失步解列装置，监视川渝—华中断

面运行情况，失步情况下与万县失步解列装置配合动作，将川渝电网从华中电网解列，作为第三道安全稳定防线的措施。

控制策略表中既考虑了线路、主变压器、机组、直流极等单元件故障措施，也考虑了同杆双回线路故障、同一串的两个元件组合故障以及双极闭锁故障。对于任一 $N-2$ 故障，在其每个 $N-1$ 故障基础上追加更重的措施；对于经过计算校核确定的故障情况下的暂态稳定问题，采用切三峡左一电站机组，切左二电站机组，对龙政直流、江城直流进行快速调制，解列三万、万龙线等措施，保证电网的稳定运行。

安全稳定控制系统实现控制需要监视的潮流断面包括川渝—华中断面，三龙、三江、龙斗、斗双、斗白、斗孝、江复、江潜断面，以及龙政直流输送断面，江城直流输送断面，各站联络变压器断面等。为了保证运行的灵活性，各断面均考虑正反潮流方向下的不同控制逻辑。执行切机时考虑两种切机方案，按容量切机和按台数切机，并且同时考虑直流系统可调制和不可调制两种情况执行控制策略。

对于线路和主变压器的热稳定问题，由每个元件的过载策略定义了相应的过载策略表，采用了直流调制、解列、切机、切 220kV 系统负荷和切 220kV 系统机组等措施。

该系统有两种控制措施：一种是有主辅运之分的切机、直流调制，这类措施只能由一套装置出口，通常是处于主运位置的装置出口后闭锁另一套装置的该类出口。如果主运装置因故未动，辅运装置经一定延时后出口；另一种措施是双套都可以出口，不存在主辅运之分，如切负荷、解列、合母联断路器。

左一电站检测三龙、三万线运行工况及过载、故障情况，根据故障前线路输送功率的大小、运行方式和发电机运行状态及功率，通过查找控制策略表采取切本站机组、解列三万线的措施，并能够将直流调制命令和解列万龙线命令发送到龙泉站。能接收并执行龙泉、斗笠发来的切机、解列三万线命令，以及左二发来的切机命令。该站同时具有高周切机功能。若左一电站的装置在执行切本地机组命令时发现本地机组不够切，可根据欠切的机组数量发送命令到左二电站执行追加切机。

左二电站根据三江线运行工况及过载、故障情况，通过查找控制策略表切除本站机组，并能够将直流调制命令发送到江陵站。能接收并执行江陵、左一发来的切机命令。该站同时具有高周切机功能。若左二电站的装置在执行切本地机组命令时发现本地机组不够切，可根据欠切的机组数量发送命令到左一电站执行追加切机。

龙泉站能根据各 500kV 线路、主变压器、直流系统的运行工况及过载、故障情况，通过查找控制策略表解列万龙线、切 220kV 系统机组或负荷，并能向左一电站发出解列三万线和切机的命令。能接收并执行左一、斗笠发来的解列、直流调制命令，并且留有接收和执行葛洲坝换流站发来的直流调制命令的功能。

斗笠站除监测本站 500kV 元件运行工况及过载、故障情况外，还能够根据策略表向左一发送切机和解列命令，以及向龙泉发送直流调制和解列命令，同时能够接收江陵站发来的切机命令并向左一转发。

江陵换流站的控制功能包括本站的直流调制和切负荷、向左二发送切机命令、通过斗笠向左一发送切机命令等。江陵换流站 FWK-300 稳定控制装置预留切葛洲坝电厂机组、转发左二电站稳定装置切葛洲坝电厂机组、转发葛洲坝电厂稳定装置切左一电站和左二电站机组命令的功能。

葛洲坝换流站装置检测本站交流和直流系统运行工况和故障情况。当到葛洲坝电厂的断面跳开时，隔河岩电厂单独带直流运行是不稳定的，而且容易导致设备过电压。因此，需要解列清换线。本站控制策略表措施包括闭锁葛南直流、解列清换线、对龙政直流进行调制和切葛洲坝电厂机组。

对于直流闭锁及其他故障情况下可能导致华中系统高周的问题，通过在左一电站和左二电站设置高周切机功能来解决。

4 系统的设计和实现

整个安全稳定控制系统采用全系统统一的运行方式，采用分层分布式设计，按功能分为两个层次，一是整个安全稳定控制系统的切机、解列、直流调制的全面协调，二是各控制站按照整体设计要求实现本站的控制策略和处理逻辑。

三峡安全稳定控制的特点之一是其影响、责任和意义特别重大。三峡电站目前运行 14 台机组，每台容量为 700MW，已投运机组容量达到 980 万 kW。右岸投产后，装机容量将达 1820 万 kW。到 2009 年地下电站建成投产后，将使三峡工程的总装机增加到 32 台，容量达 2240 万 kW。而目前华中电网的总装机容量为 8200 万 kW，其中包括川渝电网的 1600 万 kW。川渝送出断面潮流水平受到暂态、动态稳定和热稳定的限制，且两侧发生故障后很可能解列运行，因此扣除川渝电网的装机后三峡电站目前已占华中网近 15% 的总装机，且因为长江水量充裕，在系统低谷运行时这一比例更大。右岸电站和地下电站投产后也将进一步增加这一比例。同时，华北送华中受很大限制，而灵宝换流站设计水平仅 36 万 kW。由此可见，三峡如果发生多台机组同时跳闸，将使得华中网频率快速下降，甚至发生频率崩溃，造成大面积停电事故，并很可能进一步影响到西北电网、华北电网、南方电网和华东电网。三峡电站的运行情况将对大电网牵一发而动全身。这种情况的特殊性，对安全稳定控制系统提出了极高的要求。安全稳定控制系统责任重大，在任何系统扰动情况下，必须迅速、准确无误地执行控制，各站安全稳定控制装置必须在控制时间配合和控制量上精确配合、协调一致。安全稳定控制系统的可靠和安全运行，对于保障三峡电力的送出，保障大电网的安全，具有重大的意义。

三峡安全稳定控制策略、逻辑和算法复杂。三峡左一电站是世界上唯一能够对 8 台机组根据切机量的要求，在切机台数最小的基础上，按最佳匹配原则精确切除机组的稳控站。此外，安全稳定控制系统需要监视的元件数量多，单装置集成度高，出口类型和数量多，通信联系也很复杂，并且对紧急控制出口的时间、装置的安全性和可靠性等方面的要求非常高。这些就要求安全稳定控制装置必须具有大的存储空间和快速运算能力，软件编程上要有灵活而复杂的逻辑判断和处理能力，以及快速的控制策略查找算法，要有各种防误动和拒动措施。

选用的 FWK-300 分布式稳定控制装置^[2]，采用 32 位 CPU 及 DSP 处理器技术，速度快，内存空间和策略表容量大，A/D 采样精度高，同时在硬件设计上采用了多种抗干扰和防误动、拒动技术，在软件实现上继承了多年的安全稳定控制系统工程中的编程经验，并融入了新的算法和技术，从而满足了三峡安全稳定控制的高要求。

4.1 单站典型配置

单套 FWK-300 稳控装置的硬件配置如图 3 所示。

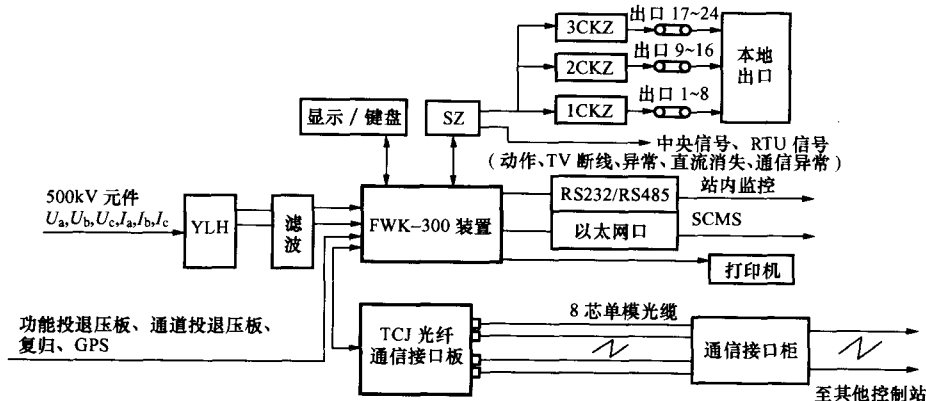


图 3 三峡安全稳定控制系统 FWK-300 装置单机硬件

4.2 通信

FWK-300 装置根据特定系统的通道条件可以采用多种通信接口，如 RS232/RS422/RS485、电流环、

MODEM、E1 接口（2M）、64K 数字同向口（G.703）、以太网接口、专用光纤通信接口或拨号通信方式。

三峡安全稳定控制中全部采用 64K G.703 数字同向口，站间通信由通信处理机（TCJ）完成，每块 TCJ 提供多路 64K 数字通信接口，经内部集成的光电转换器直接复用为 1 路光信号，送至通信机房，由安装在通信机房的光电转换器（采用 48V 直流电源）将 1 路光信号分解还原为多路电信号后，接 PCM 机的 64K 数字通信口。

4.3 与直流系统接口

稳定控制装置从极控系统输入的信号包括：极 1 对稳控装置可调（Pole1 available for SSC），极 2 对稳控装置可调（Pole2 available for SSC）以及直流闭锁信号。

稳定控制装置对极控系统输出的信号共有两种：一种是调制类型信号，包括快升、快降、慢升、慢降；另一种是调制编码信号。这两种信号共同作用，产生 20 种调制命令。

发生直流单极闭锁故障后，需要计算直流断面在故障前后的变化情况，此时需参考另一极功率的变化情况进行计算，其逻辑流程如图 4 所示。图中 $P_{\max}$ 为单极最大超载功率， K 为直流降压运行修正系数。

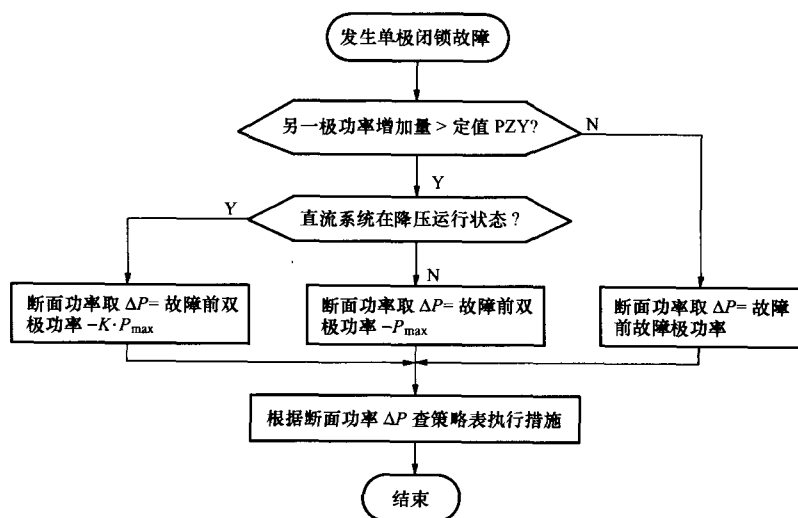


图 4 直流单极闭锁后计算断面功率变化逻辑图

5 关键技术

5.1 切机逻辑

切三峡机组是整个安全稳定控制系统中最重要的措施。三峡左一电站的稳控装置能够对 8 台机组根据切机量的要求，在切机台数最小的基础上，按最佳匹配的原则实现精确切除机组。三峡左一电站有 8 台 700MW 机组，最多可以切除 5 台机组，最少保留 2 台机组，则可能的组合种类数为^[1]：

正常情况下切机的组合种类数

$$N_{gt} = \sum_{i=1}^5 C_8^i = 218$$

考虑机组停运和不允许切机时

$$N_{gt}' = N_{gt} + \sum_{n=1}^5 (C_8^n \sum_{i=1}^{8-n-2} C_{8-n}^i)$$

由于有按台数和容量两种切机方式，所以在每种方式下必须尽快遍历各种组合，找到最佳适应。尤其是在容量方式下，必须按切机容量和当前机组工况给出最佳匹配。为保证装置切机的快速性，这一寻找时间必须控制在 1ms 以内。显然，这样的问题如果借助于简单的逻辑判断组合是无法解决问题的，所以要求软件必须采用快速高效的算法；另外，机组存在着停运和不允许切机两种特殊情况，还有追加切