



二十一世纪输配电技术的
创新与发展

第六届 输配电技术国际会议

论文集

本书编委会 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



二十一世纪输配电技术的

创新与发展

第六届输配电技术国际会议

论文集

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

二十一世纪输配电技术的创新与发展: 第六届输配电技术国际会议论文集/《二十一世纪输配电技术的创新与发展: 第六届输配电技术国际会议论文集》编委会编. 北京: 中国电力出版社, 2007

ISBN 978-7-5083-6089-8

I. 二… II. 二… III. 输配电线路-国际学术会议-文集 IV. TM726-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 150936 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))

北京盛通印刷股份有限公司印刷

*

2007 年 10 月第一版 2007 年 10 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 16 开本 80 印张 2502 千字 1 彩页

定价 400.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

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

前 言

随着中国经济的持续快速发展,中国电力工业的发展取得了举世瞩目的成就。截止到 2006 年底,我国发电装机总容量已达到 6.22 亿 kW,全国 220kV 及以上输电线路 28.15 万 km,220kV 及以上变电设备容量 9.81 亿 kVA。2006 年全国累计发电量达到 28344 亿 kWh,全社会用电量 28248 亿 kWh,我国电力供应紧张的局面进一步得到了缓和。

中国电力工业已进入大电网、大机组、西电东送、南北互济、全国联网和高自动化新的发展阶段,电网优化资源配置能力不断增强,一批特高压交直流输电示范工程相继开工,标志着中国输配电技术正向高效、环保、安全、经济的更高目标迈进。

为使国内外电力行业的工程技术人员更好地了解第六届输配电技术国际会议的内容,掌握国内外电力输配电领域新技术的发展趋势,组委会委托中国电力出版社编辑出版了《二十一世纪输配电技术的创新与发展——第六届输配电技术国际会议论文集》。论文集共收录技术论文 228 篇,内容涉及输配电建设、改造、运行、管理、维护、设备制造、电力市场交易、数字化技术和网络通信技术等,以飨读者。

在此,谨向撰写论文的所有专家学者表示衷心的感谢!

编 者

二〇〇七年十一月

目 录

前言

广域测量系统及其在电力系统稳定控制中的应用	韩英铎 李立涅 吴超 陆超 (1)
数字化变电站发展综述	范建忠 郑国文 (9)
大规模电力系统主动解列研究新进展	乔颖 沈沉 (14)
云南—广东 800kV 特高压直流输电工程基本	
设计概念	Simon Balbierer Marcus Haeusler Velpanur Ramaswami 饶宏 尚春 尚涛 (18)
输电线路系统的集成位置保护继电器	薄志谦 安德鲁·克莱门克 董新洲 张保会 (24)
基于差异进化和 Beowulf 集群的并行最优潮流	蔡华嵘 钟志勇 黄杰波 刘庆利 (33)
±800kV 直流输电工程关键设备绝缘水平的研究	吕金壮 (41)
做好电力标准化工作为中国电网发展提供技术支撑	许松林 (45)
真空有载分接开关在移相变压器中的应用	沈大中 Axel Kraemer Dieter Dohnal (48)
配电自动化实用化研究	王鹏 苏剑 韦涛 (54)
Is 快速限流器提高电能质量的应用	吴巍 (58)
智能电网中的虚拟电厂	Thomas G. Werner 高佳 (63)
基于行波和小波的中性点非有效接地系统选线	
技术	董新洲 施慎行 王宾 毕见广 薄志谦 (70)
基于电流互感器 TA 取电的馈线保护控制器	郭上华 陈瑞民 刘浩菊 陈勇 杨绍军 (78)
中国特高压输电线路杆塔基础关键技术	
研究	程永锋 鲁先龙 丁士君 (83)
交流 1000kV 特高压输电线路继电保护特殊问题	
研究	柴济民 郑玉平 张哲 李园园 吴通华 赵青春 刘革明 (90)
IEC 61850-9-2 协议下的电子式互感器在数字化变电站中的应用	Uwe Brand (96)
电网事故处理计算机辅助决策支持系统的关键	
技术探讨	姜宏成 戴宏伟 刘延乐 刘仲尧 (102)
数字化变电站的现实与未来	孙志杰 徐大可 汤汉松 (107)
高压电力电缆的状态监测和早期故障诊断	苏铮 (112)
通过现场试验评估串补投运后系统的次同步谐振问题	吴涛 苏为民 鲍喜 徐清 (118)
变压器超声带电局部放电诊断技术在现场的	
大规模应用	王勇 陆国俊 林志明 李建强 黄炎光 万官泉 (123)
在线诊断技术的发展现状	Robert Brusetti (131)
配电网规划综合管理决策系统的设计	张健 (139)
电力系统通信技术发展与挑战	林宇锋 钟金 (142)
对1000kV 单回交流线路绕击防雷保护的	
思考与研究	王茂成 张治取 滕杰 程学启 宋继中 吕凤文 (146)
实现特高压输电线路巡检现代化的新技术系统	陈勇 丁一正 (152)
输配电系统中降低低压断路器能耗的研究与应用	胡廷东 戴水东 段艳艳 (159)
一种关于 GIS 设备包扎检测漏气工作的新方法在工程实际中的应用	张艳妍 蒙海军 姚翔 (162)
绝缘配合统计法及带电作业绝缘损坏危险率的简易计算方法	董瑞 (169)

关于输电线路检修、维护工作的几点建议	杨仑 (172)
雷电定位系统在送电专业中的应用	张英 于敏 (175)
老旧线路改造及安全运行分析	刘明慧 张孝强 (181)
高压架空送电线路接地及防雷保护新技术——无避雷线杆塔安装独立 避雷针	梁国军 (185)
一种基于 μ 设计方法的 SVC 次同步振荡阻尼控制器	刘飞 刘燕 卢志良 徐政 (189)
解决电气触头过热故障安全问题的专用导电螺栓棒	任雪莲 任义 (198)
变电站二次防雷研究	杨先义 黄文龙 陈立 (204)
山区线路避雷器的应用和接地装置模型	王茂成 陈高波 赵鑫 (213)
中压配电网评估及目标网架建设初探	潘锋 张敏华 (216)
基于数学形态学融合多神经网络的电力变压器故障诊断新 方法	刘峻 周喜超 杨梅 (220)
紫外检测在电力系统内的应用	丁一正 陈勇 (225)
HVDC 用交流电容器击穿损坏问题研究	左强林 黄桂发 (230)
750kV 沿线多组避雷器限制操作过电压研究	杨鹏程 陈水明 周宗川 张爽 黄永宁 (236)
复合绝缘子硅橡胶伞裙材料性能试验研究	陈绍英 韩芳 刘洋 王建国 (242)
750kV 输电线路电磁污染仿真与环保评估	王聪 杨萍 (247)
探讨 GIS 的现场安装及试验	霍山舞 吴振伟 王建强 (251)
SF ₆ 气体湿度与温度之间的关系及校正方法的研究	徐康健 吴瑾 (255)
电力电缆护层电压分析及补偿装置研究	姜宁 王春宁 马宏忠 (260)
TCSC 技术在陕西电网应用可行性研究	焦莉 彭书涛 (263)
受保护灵敏性影响限制局部电网输电能力问题分析及解决 方案	何晓英 焦莉 赵海鸣 刘健 袁峰源 (271)
10kV 架空绝缘导线防雷击断线保护装置应用与比较研究	徐立 黄庆华 章玮 何川 (276)
重庆地区雷电参数选取的探讨	印华 吴高林 王勇 唐世宇 王海涛 (283)
基于 Google earth 平台的输电线路可视化管理研究	杨帆 刘刚 (287)
特高压输电杆塔风振动力荷载计算方法研究	杨靖波 (292)
成像技术在电力设备带电检测中的应用	王勇 印华 吴高林 (299)
隔离式断路器应用范例	Carl E Sölver Magnus N Olofsson (302)
静止同步补偿器 (STATCOM) 的应用: 现状和趋势	袁志昌 刘文华 宋强 (308)
供电设备状态检修管理系统开发与应用	李满元 蔡忠林 李有利 (317)
深井阳极阴极保护技术在变电站接地网防腐中的应用	傅坚 金之俭 王丰华 (324)
从建设特高压变电站、换流站角度解读超高压电网一次主接线、 接地极的运作优劣	王润华 (329)
超声波技术在支柱瓷绝缘子探伤中的应用	王立新 王彦良 肖云东 阎运安 山东海 (337)
ABB STATCOM 技术	Staffan Rudin Roger Gustafsson 黄华欧 支正轩 (341)
变压器三侧同时满负荷时的温升分析	郑万长 (347)
电缆附件的安装技术和连接方法	Magnus Pettersson (351)
铁路系统中的雷击过压和触压保护新概念	伯纳德·史蒂芬·亚历山大 克里特·伯纳德 (356)
利用统计法进行 (特) 高压直流输电线路绝缘耐污闪水平设计的可靠性 研究	龙英 肖燕 宿志一 吴冬 Urban Astrom (363)
输电线路增容改造中铁塔结构安全评定研究	夏开全 王景珽 郝兰荣 (369)
特高压直流试验基地试验线段监测监视系统研制	冯庆东 齐伟夫 (373)

供电局红外图库管理分析系统构建与应用	伍小娟 蔡志芳 (378)
500kV 变电站对输电线路的无功补偿容量的计算	付启明 林武汉 邝东海 (383)
高压试验培训与技能鉴定仿真系统的研制和开发	王勇 王邦志 林昌年 周健真 (387)
变电站高压支柱绝缘子有限元分析及安全性评定	周松 张宏雁 (393)
大同电网电气化铁路牵引负荷的影响及对策	罗文杰 张力强 吕利军 (399)
环网开闭所故障处理系统的设计	杨凤民 吕利敏 刘春阳 (403)
10kV 配电线路防雷探讨	陈伟锋 (408)
频率响应分析法 (FRA) 检测变压器绕组变形的中频段灵敏度 分析研究	李彦明 刘刚 林志明 (411)
浅谈高压电网规划及设计	崔海 王秀贞 侯茜 孙萍 李向奎 (416)
在实施首都标准后架空输电线路防雷问题研究	张文军 (424)
耐张线夹钢锚拉出故障分析与处理对策	周炳凌 郭更 (430)
主变压器绝缘油在线监测系统的应用	安宗贵 (434)
变耦电抗式可控串补基本应用研究	李民族 王世蓉 朱国荣 王明慧 王武 (438)
利用带电测试延长停电预试周期的可行性研究	王勇 张泽华 陈宇强 刘志一 (445)
避雷器早期故障在线监测装置在苏州供电公司的应用	王建刚 (451)
变压器带电局部放电诊断系统仿真测试分析	万官泉 陆国俊 黄炎光 袁强 (455)
一种实用的高压断路器状态监测方法	刘正谊 车红卫 (462)
光声光谱技术在变压器油气分析中的现场应用	陈小黎 吴沃生 黄松波 赵卫民 (468)
四回路紧凑型输电线路工程设计及其电磁环境评估	刘智勇 苏伟 崔鼎新 (472)
广东省首条 500kV 线路的运行分析	曾伟灵 陈福才 梁沃池 (478)
变压器超声波局部放电检测和定位技术应用	林志明 王勇 黄炎光 李健 (481)
浅析中国输变电工程地基基础研究的关键问题	鲁先龙 乾增珍 (493)
清远市地区配电网络结构分析及优化建设方案	冼勇彬 (498)
广州供电局变电站主地网现状分析	余冬青 毛为民 林其雄 (506)
变电站二次设备过电压下损坏原因与防护方法	周文俊 柴雅静 (519)
北京电网输变电工程设计新理念	夏泉 (523)
朝阳 500kV 变电站布置的全户内化	吴江 刘卫国 黄伟 吴培红 (526)
2006 年国家电网公司高压直流输电系统运行及主要 情况研究	刘云 李凤祁 王明新 曾南超 王晶芳 李新年 谢国平 (531)
变电站环境噪声评价分析	陈泽萍 吴华成 李强 周卫青 (537)
变电站接地网腐蚀及断点诊断系统的应用	陆国俊 (540)
变压器中运用超声法检测局部放电的研究	陆国俊 刘刚 (544)
真空断路器真空度的在线监测装置	王圉 周海 (549)
新型高压直流输电系统驱动永磁同步电动机的研究	孙栩 孔力 (553)
全钒液流电池在电力系统中的应用	李蓓 郭剑波 惠东 胡娟 (558)
1000kV 输电线路防护金具关键技术研究	侯继勇 周立宪 王景朝 樊宝珍 (563)
中国特高压交流变电构架试验研究	李清华 耿景都 巢琼 林小兵 (570)
从中外规范的可靠度设置水平探讨特高压杆塔的可靠性	李茂华 陈海波 李正 (574)
1000kV 特高压输电线路防振研究	刘胜春 朱宽军 王洪 刘超群 (580)
紧凑型中压开关柜因“非电气”因素引起的故障简析	陈仕姜 张李岚 岑旭 严丹昭 (587)
第一个 800kV 特高压直流设备长期试验回路 的运行经验	Abhay Kumar Dong Wu Ralf Hartings Björn Engström (591)

- 中国特高压输电线路的舞动防治技术研究 朱宽军 刘超群 任西春 董玉明 (596)
- 输电线路外力破坏分析及对策 李远景 张安喆 (604)
- 提高直流系统可靠性的标准直流换流阀的设计
和试验 盛宝良 汉斯-乌拉·毕尔莫 汉斯·优汉嵩 (607)
- 大气环境对高压空气绝缘设备的影响与对策 蚁泽沛 (612)
- 首个带自压缩灭弧系统和弹簧储能机构适用于 50/60Hz 的双频
550kV/63kA 断路器 H. Dienemann K. Schuler (617)
- 气体绝缘输电线——大功率传输的现状和远景 Dirk Kunze Volker Knierim (621)
- 提高中国四川电网长距离输电的
稳定性 Gerhard H. Thumm K Uecker 周彦 方文弟 朱康 甄威 陈宝喜 (626)
- 电力变压器短路可靠性 魏思博 杨春平 刘军 都基丰 兰志建 艾尔摩 (632)
- 云广 800kV 特高压直流输电工程孤岛运行
的分析 Marcus Haeusler 张东辉 刘维建 金小明 蔡汉生 (637)
- 架空输电线路增容导线的比较研究 尤传永 (647)
- 主变压器套管内引线接头发热的检查与处理 唐海军 朱悌峰 燕子飞 万志国 (657)
- 模拟电荷法分析±800kV 直流输电线路的
雷电绕击 Mohamed Nayel 赵杰 何金良 蔡宗远 王琦 (660)
- 接地网腐蚀状态电化学检测系统的研究 张秀丽 莫逆 王应高 李永立 (665)
- 基于 GIS 分区和开闭所布点的城市 10kV 配网规划方法 张鹰 周敬嵩 徐惠强 (670)
- 地区电网谐波监测分析及综合治理 杜永平 袁桂东 (675)
- 信息电源系统薄弱点分析和改进方案 祝春捷 (682)
- 基于主导特征值可辨识度和改进遗传算法的 PMU 配置方法 常勇 徐政 (686)
- 10kV 真空环网柜在城市配电网中的应用 钱远驰 祝付伟 杨晓霞 (695)
- 基于 GIS 的智能化配电管理平台 武兴强 别志铭 杨飞勇 (698)
- 基于 GPS/GPRS/GIS 的电力抢修实时调度在配电自动化系统中的
构建 邓嵩 王彦垒 苏宏勋 (702)
- 基于数据仓库的电力营销决策系统应用研究 崔静安 黄莹 徐斌 (708)
- 一体化设计的配电自动化系统的开发与运行管理 宋元峰 (715)
- 应用于配电网合环分析决策的网络重构 李苏苏 胡彬 (719)
- 电力供需矛盾缓和形势下的电力需求侧管理 徐文红 (723)
- 一种用于配网线路中无功功率与谐波电流综合治理的方案 司渭滨 查贝妮 (727)
- 新型并联混合型有源滤波器及其分频控制方法 范瑞祥 马亮 孙旻 罗安 帅智康 (732)
- 基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统技术特点及应用分析 刘卉 (741)
- 配电网现场终端及电能表一体化检测装置的研制 刘水 龚雪丽 (745)
- 石家庄供电公司配电管理地理信息 M/S 体系的建立与应用 刘平 张颖 顾登生 (751)
- 基于瞬变量启动的配网故障线路指示器的研发 叶丹 (754)
- 广义配电网全网无功优化思想 李惠玲 孟晓丽 盛万兴 (759)
- 基于 Multi-Agent 的电力负荷预测支持系统 赵飞 陆明明 周渝慧 (766)
- 最小甩负荷配电网重构的实现与应用 石晓军 刘健 宋元峰 何林泰 刘玖权 (773)
- 省级电力市场条件下输配电定价问题研究 徐兵 曹芳 (779)
- 配电网 GIS 综合管理系统建设探讨 王成文 王忠杰 钟毅成 张贺林 (785)
- 世界电力体制改革概况及对我国电力市场化建设的启示 汪扬 彭海跃 (793)
- 地理式配电系统在厦门城市电网的应用 李伟新 涂国梁 (798)

基于混合遗传—退火算法的多目标配电网络重构	林笃蔚 林丽娜 郑应文 (803)
无线 DTU 在网络管理中的应用	梁万龙 (810)
基于 RPR 的 MSTP 体系结构和 MPLS VPN 技术在电力城域网中的应用	梁万龙 (815)
一种基于马尔可夫链的无线 Ad Hoc 配电通信网异常入侵检测算法	姜海 王翰康 (821)
广州地区电力负荷特性分析	曹芳 陈健 (825)
新形势下的广州需求侧管理问题研究	曹芳 (829)
基于 AHP 的中长期电力负荷预测组合模型研究	田全全 杜欣慧 田丰 李静 (834)
供电企业客户关系管理系统中客户评估的研究与设计	申晓留 冯璐 王成文 谭忠富 (840)
GIS 技术在低压配电管理中的应用研究	刘树德 陶士利 郑琰 吕利敏 杨凤民 (845)
参数不确定性的配电系统可靠性联系数评估算法	汪穗峰 任震 万官泉 (849)
数据存储方式的比较及 SAN 技术的应用	杨雪丽 (857)
谈谈电网系统对电力载波通信的影响	周为民 (861)
基于禁忌搜索算法的区域电网无功优化的应用与实现	摄伟 刘健 倪建立 (865)
基于导纳矩阵的电力系统有功经济调度算法	吉兴全 刘志鹏 (871)
基于灵敏度分析和暂态能量函数法的 FACTS 装置最佳接入点	钱峰 汤广福 贺之渊 (877)
单相接地故障检测保护开关在配网中的研制和应用	刘志清 韩智海 施冬明 杨凯 李昊 (883)
基于鸟类生态学研究及配电线路鸟害防治探讨	杨凯 施冬明 赛道建 (888)
WiMAX 技术在电力通信网应用的研究	苏永智 孙磊 (893)
调度自动化系统综合网络管理系统设计	管萇 林祺蓉 (897)
基于移动 FFT 和 DSP 的电力系统谐波在线分析方法	白建社 王成多 徐政 (900)
西安配电网供电能力评估	毕鹏翔 宋元峰 张明 李依凡 李涛 (904)
基于 IEC 61850 和 OPC 的异构电能质量监测设备集成方法	辛建波 黄瑶 (908)
从国内外建设经验探讨广州配电网自动化建设模式	何毅思 王毅 王海燕 刘刚 (913)
配电自动化技术发展综述	王毅 何毅思 刘刚 (920)
数学形态学在电力系统中的应用综述	郭鹏 贾清泉 (926)
基于电流安全裕度状态空间截断的电力系统	
可靠性算法	万官泉 汪穗峰 张尧 戴保明 吴国沛 (935)
AM/FM 与 GIS 在 DMS 中的综合应用	陆小磊 吴元华 (943)
基于动态建模的一体化配电管理系统	陆巍巍 彭宇翔 林庆农 李华 (948)
线损理论计算系统与 GIS 信息系统应用集成的研究	伍国萍 李剑峰 (952)
主、副线环网结构——城市配电网络的优化升级方案选择	秦勇 (956)
IEC 61850 标准和变电站程序化操作技术及其应用	吴国沛 罗真海 毛为民 傅纲林 (959)
基于 PCA-LSSVM 的电力系统负荷预测方法	刘宝英 杨仁刚 (963)
电力企业全生命周期物料管理探讨	王连忠 王永泉 杨艳文 浣慧莺 (968)
电力行业信息安全系统建设的探讨	胡浩瀚 杨立杰 王连忠 崔峰 何联初 夏宜 (972)
第三方测试在国网信息化建设中的应用——谈国家电网公司“SG186”招投标	
管理系统的第三方测试	于春玲 崔峰 王连忠 杨立杰 佟雪松 (983)
基于 NTP 的高精度时钟同步系统实现	黄沛芳 (986)
基于策略证书的访问控制模型及其在电力系统中的应用	翟遂初 殷昱煜 来瑾颖 (992)
三维配电网地理信息系统体系结构的研究	王颖 宋杨 (999)
福建自愈电网可主动解裂战略探讨	李虎军 王大光 张丹耀 (1006)
配电系统电压质量问题简述	汪宇怀 (1011)
浅谈城镇中压配电网规划及应用	张健 顾赵明 蒋传文 (1018)

低压配电网谐波分析及治理研究·····	徐立 钮伟梁 章玮 (1024)
考虑机组协调控制的汽轮机调节系统模型·····	刘辉 田云峰 吴涛 (1031)
基于 SSTS 和 DVR 的电压跌落减缓 ·····	王松岑 于坤山 汤广福 来小康 (1038)
基于 IEC 61970 标准的新一代电网调度自动化 系统·····	朱玉锦 王会诚 于红 郭艳 韩蓬 (1046)
GPRS 网络传输在配网自动化系统中的应用 ·····	王会诚 徐胜朋 郭艳 朱玉锦 (1049)
阜阳供电公司依托综合在线监测实现变电设备状态检修·····	朱世中 (1052)
地区电网电压及无功优化控制·····	张利生 (1059)
面向对象技术在配电自动化仿真系统中的应用·····	白延丽 张小木 李双虎 刘强 (1068)
如何开展输变电设备的状态检修·····	楼凤丹 吴忠 (1073)
“十一五”期间天津地区电磁环网解环问题研究 ·····	刘树勇 顾强 李晓辉 张来 刘丽霞 (1080)
一种新的回归建模方法及其在谐波源分析中的应用·····	李国栋 黄舜 顾强 徐永海 (1085)
直流缺额下广州电网风险评估及其对策的研究·····	高颖 (1091)
住宅小区环网供电设计探讨与设备选型·····	张健 张保民 (1094)
配电网合环操作的研究·····	龙妮莉 刘文伟 李义民 (1099)
可视化技术在电力自动化系统的应用·····	王传起 邹全喜 (1103)
区域电力市场电力公司月度报价决策系统的 设计与实现·····	李胜利 刘仲尧 王传起 任军 许建龙 (1111)
设备点检定修制管理在供电企业应用的探索与思考·····	俞育良 范兵 (1115)
RCAM®——以可靠性为中心的资产管理 ·····	Nobert Kaiser (1120)
配电系统的无功补偿·····	肖惕 (1129)
现代城市的配网自动化系统—— ABB 杭州、宁波配网自动化 系统介绍 ·····	柳岩 陈颂平 Binh Lam (1137)
继电保护测控系统 DeviceNet 通信性能分析 ·····	李中伟 佟为明 程丽 (1146)
农网架空线路电压电流型馈线自动化策略·····	张迎秋 (1152)
数字式光纤电流差动保护在提高电力线路稳定性方面的 应用·····	曹亚旭 邵鹏 张学众 李晓方 (1155)
特高压变压器的动态模拟与继 电保护试验·····	杜丁香 李仲青 周泽昕 周春霞 王绍武 刘洪涛 (1161)
浅析数字化变电站建设中的关键技术问题·····	沈宇 刘平 孟超 钱锋 (1167)
基于嵌入式系统的电网时钟同步装置研究·····	冯斌 张恩军 孙洁 隗娜 (1172)
试论超高压变电站二、三次系统设备的防雷接地与技术规范·····	王润华 (1176)
改进能量方向保护及其在特高压输电线路上的应用·····	刘浩芳 王增平 陈树勇 刘俊岭 (1183)
500kV 线路保护通道改造 ·····	林金洪 刘浩明 (1190)
保护设备定值的远方修改·····	林祺蓉 管蓁 (1194)
数字化变电站给变电运行工作带来的新挑战·····	郭征 (1197)
分布式母线保护的新型通信方案·····	冯振宇 周强强 (1201)
小电流接地选线装置的实际应用·····	常学武 (1205)
交直流混合输电及背靠背输电系统快速状态估计·····	顾全 陈根军 唐国庆 于尔铿 (1208)
数字化变电站技术及其在广州电网的应用·····	龚建平 吴国沛 罗真海 毛为民 (1214)
行波故障测距中雷电干扰问题的对策·····	郭宁明 覃剑 陈祥训 (1217)
零序电抗继电器在特高压交流输电线路上的适用性 分析 ·····	王宾 董新洲 Zhiqian Bo Andrew Klimek (1223)

基于单相电流行波的故障选线方案仿真研究.....	施慎行 董新洲 (1230)
电子式互感器在数字化变电站的应用.....	赵树华 陈剑锋 欧阳永坚 刘骥 丁富春 段鸿 (1235)
用于建设数字化变电站的远程网络综合监控系统.....	卜宪德 王松 高芸 洪功义 (1241)
特高压变压器差动保护研究.....	文继锋 陈松林 (1247)
使用复杂通信基础设施的线路差动继电器现场 经验总结	Tevfik Sezi 张先国 Oliver Lippert Arnd Struecker (1252)
ABB（中国）有限公司简介	(1260)
西门子（中国）有限公司简介	(1261)
阿海珐输配电 AREVA T&D 简介	(1262)
施耐德电气（中国）投资有限公司简介	(1263)

广域测量系统及其在电力系统稳定控制中的应用^①

韩英铎¹ 李立涅² 吴 超¹ 陆 超¹

(1 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2 南方电网公司, 广州 510623)

【摘 要】 近年随着电网规模扩大、区域系统互联等, 导致传统的电力系统稳定问题表现为新的形式, 例如, 如何持久有效地抑制区间低频振荡等。现有方法难以解决新的问题, 而同步相量测量技术的发展及广域测量系统(WAMS)的建设为此提供了新的手段。本文重点结合实际系统应用说明了 WAMS 发展现状及其在电力系统保护与稳定控制中的应用实例。首先, 介绍了 PMU 及 WAMS 的基本原理与历史发展过程; 其次, 在详细说明美国与中国 WAMS 发展现状的基础上, 概述了各主要 WAMS 的规模和 PMU 的性能水平等; 再进一步, 根据 WAMS 在电力系统稳定控制中的应用的不同类型, 分别从非连续控制及连续反馈控制两个方面介绍了相关的实际方案。

【关键词】 相量测量单元 广域测量系统 电力系统稳定控制

1 引言

近年我国电网建设在“西电东送、南北互供, 全国联网”原则的指导下, 逐渐形成了东北—华北—华中—川渝、南方等区域互联系统, 各主要送电通道中大容量、远距离传输特点明显, 电力系统的主要安全稳定问题也表现为新的形式:

(1) 由于多个近似规模的区域系统的相互连接, 导致振荡频率降低, 而系统内大量的高增益快速励磁装置在增加区域系统内部阻尼的同时, 对低频率的区间振荡模式阻尼恶化明显, 使得区间低频振荡成为目前限制电网输电能力提高的主要因素。由于区间振荡表现为全局性质, 对其监测和控制也需要在系统级开展工作。

(2) 当前的中国互联电网中, 区域系统之间多为弱联系结构, 在严重故障后的暂态过程中经常成为影响系统暂态稳定性的薄弱环节, 使得区域系统之间的解列作为第三道防线作用十分重要。在失步保护中, 如果能得到两个或多个区域系统内主要发电机之间的相对功角摆开程度, 则不仅有利于测量联络线两端的电压电流值, 还将有利于更加准确地进行保护动作判断。

(3) 电压稳定问题一般由无功不平衡引起, 在静态无功配置中一般表现为局部地区的问题, 但在我国逐渐形成京津唐、长江三角洲、珠江三角洲三个主要的负荷中心, 并由中、西部地区交直流远距离送电的情况下, 故障引起的多个送电通道间的潮流大转移是引起受端电压失稳的重要原因^[1]。因此, 对于电压稳定的监测、预警等也需要从输电通道和受端地区两个方面同时着手。

以上对当前中国电网的动态稳定、暂态稳定、电压稳定问题的分析说明, 由于区域系统互联, 导致各种稳定问题均表现为广域性质, 其解决方案也因此应该从系统级的广域角度提出。

另一方面, 电力系统中的用户负荷多变, 易受天气等多种因素影响, 而结构也存在一定的不确定性, 电网中包含的设备及控制装置数量日益庞大、种类日益丰富, 运行特性各异, 因此难以对电力系统的各种实际运行方式提前进行充分的安全稳定性分析。此外, 电力系统越来越开放, 市场化的运营机制在提高现有设备和技术利用率的同时, 也会导致系统的运行点更加靠近稳定极限, 使安全裕度降低, 因此必须对电网进行实时监测、分析和控制, 才能有效保证其长期安全稳定运行。2003 年 8 月 14 日美加发生大停电后, 在事故联合调查组的最终报告中, 针对此次严重事故教训提出的改进措施中就包括: 应该评估并采用更好的实时调度工具、要求采用时间同步的数据记录装置等^[2], 也说明了电力系统实时监测与分析的重要性。

① 基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50595413)。

目前的电力系统数据测量装置与系统主要有以下三类：①数字故障录波仪（Digital Fault Recorder, DFR）；②基于远动终端（Remote Terminal Unit, RTU）的集中控制与数据采集/能量管理系统（Supervisory Control and Data Acquisition/Energy Management System, SCADA/EMS）；③基于相量测量单元（Phasor Measurement Unit, PMU）的广域测量系统（Wide Area Measurement System, WAMS）。DFR 在加入全球定位系统（Global Positioning System, GPS）时标后可以不同地点记录数据的统一对时，但其记录的电磁暂态过程瞬时值主要用于故障和保护，难以反映系统扰动后的整个动态过程。SCADA/EMS 测量电力系统的有效值可以用于进行状态估计、优化潮流计算等，但是由于其主站数据刷新时间一般为 2~5s，只能记录稳态或准稳态过程。WAMS 则可以弥补上述两类装置和系统的不足，以每秒数十个采样数据的频率准确测量系统扰动后的动态全过程，并可以为进一步的在线与离线分析提供可靠的数据平台。

本文首先介绍 PMU 及 WAMS 基本原理，并结合实际的 WAMS 系统说明其发展现状和主要的技术水平。其次，分别介绍基于 PMU/WAMS 的非连续控制及连续反馈控制两种 WAMS 在电力系统稳定控制中的应用类型。最后，对实际的应用方案及进展情况进行了说明。

2 PMU/WAMS 基本原理

20 世纪七八十年代，在微机保护的初期发展阶段，对称分量距离保护基于高压输电线路两端电压电流的正、负、零序分量进行计算，确定故障位置时只需要求解一个方程，很好地适应了当时有限的计算机处理能力的情况。这一算法的另一贡献是其中的对称分量离散傅里叶变换方法可用于精确地测量正序电压电流。例如，正序电压瞬时值通常可表示为 $u = U \cos(\omega t + \varphi)$ ，对此交流信号在一个周期内采样 N 点，通过离散傅里叶变换

$$\dot{u} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k e^{-j\frac{2\pi k}{N}} = U_R + jU_I = U \angle \varphi \quad (1)$$

可以得到信号的相量值，即其幅值和初相位。这也就是 PMU 的基本相量测量算法^[3]。

PMU 中的另一个重要组成部分是精确的时间标记及同步时钟脉冲，由 GPS 提供，这样可以保证信号的采样是同步完成的，用于进行相位比较的不同地点的信号也是在同一时刻测量得到的。在完成上述两部分主要工作的基础上，1988 年 Virginia Tech 首次制造出了 PMU 的原型装置，Macrodyne 公司据此又进一步开发了 PMU 的商业装置并进行了现场试验，从而开始了在电力系统中的实际应用^[4]。图 1 所示为 PMU 的基本结构。

针对 PMU 的相量测量，1995 年 IEEE 公布了电力系统同步相量的第一个标准 IEEE 1344^[5]，2001 年进行了修改，2005 年又公布了新的版本 IEEE C37.118^[6]，对相关定义、测量要求、测试方法、误差标准、报文格式等进行了说明和规定。

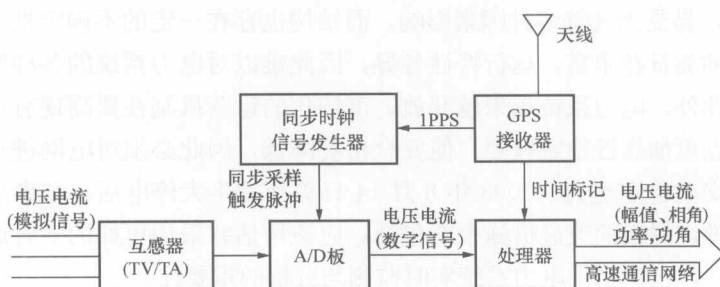


图 1 PMU 的基本结构

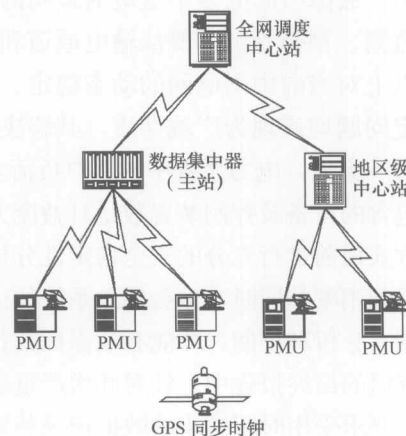


图 2 WAMS 简单结构示意图

WAMS 是指一种基于同步相量测量及现代通信技术,对地域广阔的电网运行状态进行监测和分析,为电网实时控制和运行服务的综合应用系统。图 2 为 WAMS 的简单结构示意图^[7],包括以下主要部分:以 PMU 为核心的子站系统、广域通信网、由数据集中器(Phasor Data Concentrator, PDC)组成的主站数据平台系统、由一系列在线、离线数据分析软件包组成的分析中心站系统。其中子站软件主要包括相量处理算法、综合的误差估计与补偿算法及发电机内电动势的电气量推算算法^[8]。数据平台软件主要完成在线实时相量数据的对时、存储、转发与管理等,分析中心站根据不同需要实现各种监测、预警等高级功能,也可以作为进一步控制的基础^[9]。

3 PMU/WAMS 应用现状

PMU/WAMS 技术从 20 世纪 90 年代初开始应用于实际电力系统后,在十几年间取得了迅速的发展,本节将在介绍美国和中国 PMU/WAMS 发展情况的基础上,对目前世界范围内的应用现状进行简要的说明和比较。

3.1 美国 PMU/WAMS 发展现状

美国电网中 WAMS 的发展在东、西部有明显的不同。在西部地区,主要由西部电力协调委员会(West Electricity Coordinated Council, WECC)组织相关的各独立系统运营商(Independent System Operator, ISO)进行。在由 WECC 与加州 ISO(California ISO, CAISO)组成的同步相量测量网络(如图 3 所示)中,总共已安装 87 个 PMU,可以同时测量 560 个相量数据;已建成 7 个 PDC 中心及主站,其中 4 个已经互联(图 3 中实线所示),其余 3 个的互联也在规划中^[10]。西部的 WAMS 在多年的运行过程中,开发了大量的硬件和应用软件,在多次电网事故中发挥了重要的作用,如 1996 年美国西部的两次停电事故中,WAMS 记录数据对于故障分析、仿真用模型校核等至关重要^[11]。



图 3 美国西部地区 PDC 配置示意图 (WECC-CAISO)

在东部地区,虽然较早开始进行相关研究,但并未大规模展开,直到 2003 年美加大停电事故后,作为解决措施之一,由美国能源部及电力可靠性技术联盟(Consortium for Electric Reliability Technology Solution, CERTS)联合推进“东部互联相量计划”(Eastern Interconnect Phasor Project, EIPP)的实施,才开始取得明显进展。EIPP 划分为 6 个主要的技术部门,分别负责设备选点、数据管理、实时应用、离线应用、性能要求和商业管理等方面的工作^[12]。

图 4 所示为美国东部地区 PMU 配置示意图,显示了 EIPP 所包括的东部 32 个电力公司的覆盖范围,到 2006 年 5 月为止,已有 21 个 PMU 投入运行,17 个 PMU 安装好但尚未投运,规划中的 PMU 有 49 个,PMU 的布点主要用于监测潮流拥堵地区、主要发电机节点及振荡易发区域。此外,还在 TVA(Tennessee Valley Authority)建成一个超级 PDC(Super PDC)^[13]。美国能源部已在 EIPP 上投入 300 万美元,制造商投入 1500 万美元,而从 2006 年开始的 5 年内,计划由能源部每年再投入 500 万美元用于相关的系统建设及研究开发^[14]。

3.2 中国 PMU/WAMS 发展情况

中国电网 PMU 的应用始于 1995 年,随着系统互联工作的进行,广域监测与分析需求日益增加,国家电力调度通信中心于 2003 年颁布了《电力系统实时动态监测系统技术规范(试行)》^[15],规定了电力系统同步相量数据的格式、系统的通信规约,提出了对 PMU、数据集中器、主站及同步时钟的通用技术要求。我国的 WAMS 建设也取得了迅速的发展,到 2006 年 3 月,已完成国调、东北、华北、河南、山东、华东、江苏、四川、西北、南方、广东 11 个主站的建设,在上述地区内已安装运行的 PMU 数量超过 100



图 4 美国东部地区 PMU 配置示意图 (EIPP)



图 5 中国电网 WAMS 配置示意图 (2005)

● PMU—变电站；■ PMU—电厂；⊙ WAMS—中心站

个；2006 年增加新的主站 10 个，包括华中、云南、贵州、黑龙江、新疆、陕西等，新增的 PMU 数量超过 60 个。图 5 所示为 2005 年部分 WAMS 中心站以及位于电厂、变电站的 PMU 配置图。

3.3 PMU/WAMS 应用现状及其性能

近十几年，除了上述的美国和中国外，世界上很多国家电力系统中的 WAMS 建设均得到了快速发展，包括意大利、加拿大、法国、日本等，具体情况如表 1 所示^[16]。

表 1 各国电力系统 PMU/WAMS 规模										
国家和地区	中国	美国	意大利	Hydro-Quebec	瑞士	日本	法国	瑞典	丹麦	澳大利亚
主站数量	11	8	1	1	1	0	1	0	0	0
PMU 数量	100+	125	21	8	4	10	12+	3	4	7

在同步相量测量技术的发展与应用过程中，已形成一些主要的 PMU 制造商，国外的有 Macrodyne (Model 1690)、ABB (RES 521×1.0)、Schweitzer (SEL-421) 等，国内的有四方 (CSS-200/1A)、电科院 (PAC-2000) 和南瑞 (SMU)。装置主要性能差别不大，如均能输出 U 、 I 、 φ 、 P 、 Q 、 f 等信息，其中电压电流精度 0.1%~0.2%，稳态相角精度 0.1°~0.2°，频率精度 0.001~0.005Hz，时间同步精度大部分为 1μs，相量输出频率可在 50Hz 及以上，数据可连续记录 2 周等。

由于各个电网的实际问题不同，主站的高级应用功能在不同的系统内也有所不同，大致可分为三类：①在线的功角、电压、振荡等信息的监测和预警^[17]，实时的系统主要参数辨识^[18]等；②系统扰动后的离线数据分析，主要用于事故原因与过程分析、仿真模型与参数校核^[11]等；③基于实时测量信息的电力系统保护与控制，本文将针对第三部分结合实际系统应用重点介绍。

4 基于 PMU/WAMS 的电力系统保护与控制

基于 PMU/WAMS 的广域控制不同于一般的本地控制，其信号的测量与传输等需要消耗额外的时间，但对于电力系统内的大部分稳定问题，现代的计算机及通信技术保证了保护或控制系统具有足够的处理时间。对于暂态稳定，保护或控制装置必须在第一摆的峰值到达前动作，并且越快越好。假设一个区域互联系统，其主导振荡频率为 1/3Hz，其阶跃响应峰值时间约为 1.5s，脉冲响应峰值时间约为 0.75s（电力系统内的大部分故障可以认为是阶跃性质，只有较为罕见的三相短路等近似脉冲扰动）。对于典型的 WAMS，其中相量测量、光纤通信、PDC 内的数据处理等需要约 8 周的时间^[19]，切机、断线、投切电容/电抗等动作时间在 100ms 以内，加上控制器内的 100ms 左右的延时^[20]，即使对于脉冲响应，仍然有将近 0.4s 的时间可以由电网对故障进行充分的响应，作为判断决策的基础。对于动态稳定，由于其多摆过程持续时间长，更是留给了广域控制足够的时间。

4.1 基于 PMU/WAMS 的电力系统非连续控制

电力系统的非连续控制是指类似保护开关的动作、电抗/电容器的投切等的控制方式，由于控制器的输出并不与输入一一对应，因此不严格要求输入的持续性，通过 WAMS 得到的测量信息相对容易满足要求。

法国电力公司 (Electricité de France, EDF) 的 Syclopes 是目前已经投入实际运行、最为典型的广域保护系统，在 20 世纪 70 年代开始的 EDF 第一代失步保护防御计划基础上发展而成。Syclopes 第一阶段是在法国东南部两个同调区的应用，区内发电机的相位信息传送至控制中心，用于进行失步监测。在发生失步的情况下，每个同调区边界上的所有线路均被跳开。由于相关地区电源集中，解列后为了功率平衡，

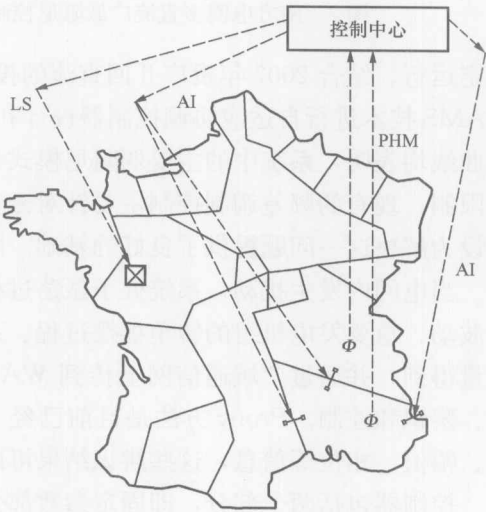


图 6 法国 EDF Syclopes 系统控制过程示意图
PHM—相量测量；AI—解列；LS—一切负荷

在必要的情况下中心站还会控制高压和中压变电站进行切负荷,从而维持频率稳定。图6所示为 Syclopes 控制过程的示意图,新的防御系统在解列操作的协调性和完整性方面有了较大的改善^[21]。

Syclopes 系统在解列或者切负荷后,不会再进行其他的后续操作,而美国 BPA (Bonneville Power Administration) 开发的广域稳定和电压控制系统 (Wide Area Stability and Voltage Control System, WACS) 则实现了一种基于 WAMS 的反馈控制^[22],其切机和无功补偿装置投切的动作依据电力系统的实时响应持续进行。WACS 的输入信息为 7 个 500kV 变电站的 12 个电压幅值,以及 5 个电厂的 15 个发电机无功功率。VmagQ 算法采用模糊逻辑的方法对这 27 个输入量进行加权计算,并进一步与阈值进行比较及积分,从而控制不同的电容/电抗器组的投切操作,在极端情况下,也可以同时进行发电机的切机控制。WACS 从 2003 年 3 月开始在实验室中对不同输入信息的情况进行了测试,包括输入仿真结果数据、输入 2003 年 6 月的电网实际事故数据等,另外,输入端又连接到实际系统内的一个 PDC 运行了 2 年之久。在此研究基础上, BPA 正考虑将这一系统投入商业运行^[20]。

4.2 基于 PMU/WAMS 的电力系统连续控制

连续控制是指类似于发电机励磁或调速器的控制形式。与传统的就地控制不同,借助于 WAMS 平台,广域控制器的输入信号不再限于本地范围,因此对于区间低频振荡模式具有更好的可观性,可以集中主要的控制能量抑制最危险的主导振荡模式。另外,由于广域信号能在一定程度上反映系统结构和运行方式的变化,广域控制器本身就具有一定的适应能力。因此,从 PMU/WAMS 技术兴起的初期,广域阻尼

控制器的研究就被提出,而近几年随着 WAMS 平台建设日益完备,这一领域也成为一研究热点,从理论与仿真角度,在输入信号与控制器布点选择^[23]、广域控制器设计^[24,25]、时滞对控制稳定性的影响^[26]等方面进行了大量的工作。文献 [16] 针对 Hydro-Quebec 系统提出了采用多频带发电机广域附加阻尼控制设计方案,文献 [27] 通过 2002 年在冰岛进行的相量测量测试说明了实施广域阻尼控制的可行性,但目前在世界范围内尚无实际应用的报道。

在国内,由于系统互联,近两年南方电网虽然安装了大量的本地 PSS,但仍然多次发生低频振荡事件,严重威胁了系统的安全

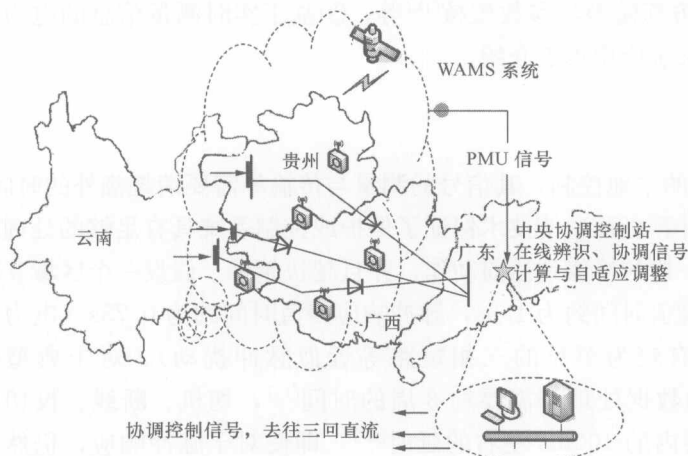


图7 南方电网多直流广域阻尼控制示意图

稳定运行。结合 2007 年贵广 II 回直流的投运建设,目前针对天广和贵广 III 回直流的功率调制控制,利用 WAMS 技术进行自适应协调控制器设计和工程实施的工作正在进行中。对南方电网的模式分析及实际振荡曲线均表明,系统中的主要弱阻尼模式为云南与贵州间模式,而天广、贵广等直流由于换流站地理位置的限制,现有的频差调制控制主要针对云贵与广东之间的振荡模式发挥作用,而南方电网 WAMS 平台的建设为解决这一问题提供了良好的基础。图7所示为南方电网多直流广域调制控制的示意图。

当电网内发生扰动,系统处于振荡过程中时,一些关键的电力系统动态信息,比如主要联络线上的功率波动、重要发电机组的转角摇摆过程、系统的频率变化、重要母线的电压幅值与相位等,可以由 PMU 测量得到,并通过广域通信网上传到 WAMS 控制主站进行预处理,预处理后的实时数据,可以用于监测、辨识和控制。Prony 方法是目前已经工程实用的一种在线辨识算法,可以得到系统振荡的频率、阻尼、幅值、相位等信息,这些辨识结果可以用于低频振荡的报警和在线自适应控制的参数调整依据。

控制器包括两个部分,即固定参数部分与自适应部分。如图8所示,前者由比例、隔直和两个移相环节构成,移相环节的参数通过离线的多输入多输出低阶模型辨识、最优协调控制计算与仿真确定,保持不变;后者由比例和一个移相环节构成,其参数根据系统扰动后的响应及 Prony 的实时辨识结果进行在线更