

2014年贵州电网公司 电力调度控制中心论文集

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◆

2014年贵州电网公司 电力调度控制中心论文集

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 (CIP) 数据

2014 年贵州电网公司电力调度控制中心论文集/ 贵州
电网有限责任公司组编. — 贵阳: 贵州大学出版社, 2015.12

(贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书)

ISBN 978-7-81126-838-6

I. ①2… II. ①贵… III. ①电力系统调度—文集IV.
①TM73-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 321611 号

编 者: 贵州电网有限责任公司

责任编辑: 但明天

出版发行: 贵州大学出版社

印 刷: 贵阳精彩数字印刷有限公司

开 本: 720 毫米×1000 毫米 1/16

印 张: 31.5

字 数: 628 千字

版 次: 2015 年 12 月 第 1 版

印 次: 2016 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81126-838-6

定 价: 129.00 元

版权所有 违权必究

本书若出现印装质量问题, 请与本社联系调换。

电话: 0851-85981027

编 委 会

主 编

戴席伟

副主编

苏尔萍

陈晓谨

邓 莉

参 编

陈 健

许良玉

黄 露

任 燕

前言

2014 年，调度中心以科技创新文化建设为切入点，以“科技创新促发展，点亮智慧增实力”为主题积极开展科技创新文化建设，通过开展三大活动、深化三大载体、健全三大机制，打造文化软实力，增强科技推动力，提升发展硬实力，取得了一系列突出的成果：“节能发电调度科技创新团队”获得贵州电网首届“科技创新之星”称号；“李颖杰工作室”，成为职工科技文化创新之家，圆满完成六项职工创新项目，荣获“职工技术创新优秀工作室”等一系列荣誉表彰；成功举办中心首届专业技术运行管理论文竞赛，评选出三个团队奖项及六篇优秀论文；获得南方电网公司技术改造贡献奖二等奖二项、南方电网公司科技进步三等奖一项、贵州电网公司科技进步一等奖两项等奖项若干；出版专著两本、获得授权专利 8 项。更可喜的是调度中心正逐步形成积极进取、勇攀高峰的科技文化氛围！

在调度中心科技创新文化的推动下，2014 年调度中心广大员工围绕中心工作开展积极研究探索，提炼形成论文共 50 余篇，现给予出版，谨以此奉献给大家。

由于编者水平有限，虽经多次校阅，错误、疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第一部分 专业技术类

广域电力系统稳定器闭环控制通信实现技术	3
风电场 220kV 送出线路投单相重合闸的可行性分析	16
基于输电线路脆弱性评估的连锁故障预防控制	28
广域电力系统稳定器研发及应用	39
广域电力系统稳定器闭环控制关键技术及实现	49
Outage Analysis of Device-to-Device Relay Underlying Dedicated Cellular Networks for Smart Grid	63
基于广域信息的保护预防及控制系统研究与应用	75
贵州电网电磁环网研究	81
中兴 SDH 设备 10G 光接口板总线过度修复问题解析	87
中长期水火电联合补偿调度系统设计与开发	93
采用广域反馈信号的电力系统稳定器投运条件	101
CT 饱和引起母线保护误动事故分析	116
含风电电力系统的多场景鲁棒调度方法	132
库群长期优化调度的正交逐步优化算法	154
Measurement and Modeling of Delays in Wide-Area Closed-Loop Control Systems	171

基于 BirdEye 组件的网络拓扑管理系统	195
施工导致的 500 千伏变电站一段母线失压事件分析	199
智能配电通信网综合管理平台研究	203
Application of a Real-Time Data Compression and Adapted Protocol Technique for WAMS	212
论检修状态下再次发生 N-1 故障时的通信系统保障方案	241
贵州电网 2014 年高频切机方案及适应性分析	247
一体化智能通信运行管控系统在贵州电网的应用研究	270
精密空调技术及其在自动化调度机房的应用	282
论述电力通信在智能电网中的作用	289
500kV 金州变区域电网运行风险及防控措施研究	294
贵州电网融冰能力研究	300
一起发电厂主变压器无保护跳闸事件分析	308
基于 Prony 算法的 PSS 参数在线整定方法及论证	313
贵州电网融冰检修智能决策系统的开发与应用	325
贵州铝厂运行特性及系统运行分析	331
利用电力应急卫星系统为调度数据网提供灾备链路的研究	338
220kV 设备调度关系转移研究	345
贵州电网调度操作票及指令下发系统研究及开发应用	355
电力通信年度运行方式编制途径浅析	361
交流不间断电源系统蓄电池测试结果统计分析	367
基于云计算的通信综合网管系统的研究及应用	375
贵州电网负荷预测分析	383
从美国大停电分析市场下电力系统安全稳定问题	392
基于增量表达式的滚动发电计划模型与其求解算法研究	402
省地自动电压协调控制及存在问题解决措施	415
多时序协调的一体化发电调度系统开发与应用	422

第二部分 综合管理类

贵州电网调度业务规范化建设探索研究及实践	435
师带徒，造精兵，强企业	442
新时期女职工现状分析及工作创新的研究与思考	451
激发科技人员创新意愿的对策及思考	459
浅论内部审计信息化建设与思考	469
落实“两个责任”，形成“不想腐、不能腐、不敢腐”的有效机制	474
浅议内部审计和企业财务管理的相关性	481
关于调度中心职工技术创新工作的实践及思考	485
浅议工程会计如何做好工程核算和成本控制	490

第一部分

专业技术类

广域电力系统稳定器闭环控制通信实现技术

赵维兴 林成 孙斌 康鹏 孙元章 张放

摘要: 本文从如何减小通信网络的影响角度, 提出了实现电力系统广域 PSS 闭环控制架构: 具有与数据上行通道结合的控制下行通道, 控制终端可同步授时以实现同步控制及闭环时延补偿, 实现远方信号反馈及广域协调控制。在此基础上结合应用环境, 实现了贵州电网的广域电力系统稳定器 PSS 闭环控制系统, 阐述了广域阻尼闭环控制系统的关键技术, 设计了控制下行通道的通信规约。本文最后对该架构进行了 RTDS 硬件闭环测试, 测试结果表明该架构可有效实现广域 PSS 闭环控制。

关键词: 闭环控制; 广域电力系统稳定器; 通信; 架构; 工程应用

引言

从 1984 年 7 月至今, 国家电网和南方电网发生 10 多起电网低频振荡事件。贵州电网近年来也出现多次低频振荡和强迫振荡事件, 目前抑制低频振荡问题不仅仅是理论研究热点, 也成为实际电网面对的热点问题。目前, 抑制电力系统低频振荡的最经济、最有效的措施仍然是加装电力系统稳定器。随着相量测量单元 (Phasor Measurement Unit, PMU) 和广域测量系统 (Wide Area Measurement System, WAMS) 的发展, 基于 PMU/WAMS 的广域阻尼控制器的研究成为热点, 特别是一些学者提出的广域 PSS (Power System Stabilizer), 通过引入远方信号, 能够有效地抑制区间低频振荡。

PMU 以测量数据更新间隔短且带同步时标, 能提供大量实时同步数据的

优势，大量用于电力系统广域动态监测。目前已有广域附加励磁控制及直流输电调制控制器理论设计的相关成果，但在此基础上，实现基于 WAMS 的实时广域闭环控制依然存在困难。广域闭环控制中的测量与控制信息，经由高速通信网络在调度控制中心与各观测及控制节点间双向传输，实现网络闭环控制。网络通信系统对控制性能将产生重要影响，其中考虑通信网络影响的广域闭环控制架构是待解决的首要问题。

本文基于网络控制系统的思想阐述了电力系统广域 PSS 闭环控制架构，结合实际情况设计并实现了应用于贵州电网的广域 PSS 闭环控制系统，阐明了该系统的关键技术,包括系统中各设备的功能、通信协议的选择、闭环时延测试与估计。设计了一种适用于闭环控制下行通道的通信量稳定的通信规约，最后搭建了 RTDS（Real Time Digital Simulator）硬件测试平台，并对贵州电网的广域 PSS 闭环控制系统进行了测试，验证了其有效性。

广域 PSS 闭环控制设计

网络控制系统

网络控制系统（Networked Control System, NCS）起源于工业控制，是使用实时网络实现控制回路闭环的反馈控制系统，其本质特征在于控制系统元件间的信息通过网络传递，是集计算、通信、控制于一体的现代工业及通信系统的主要发展方向。典型的 NCS 及其信息流如图 1 所示。

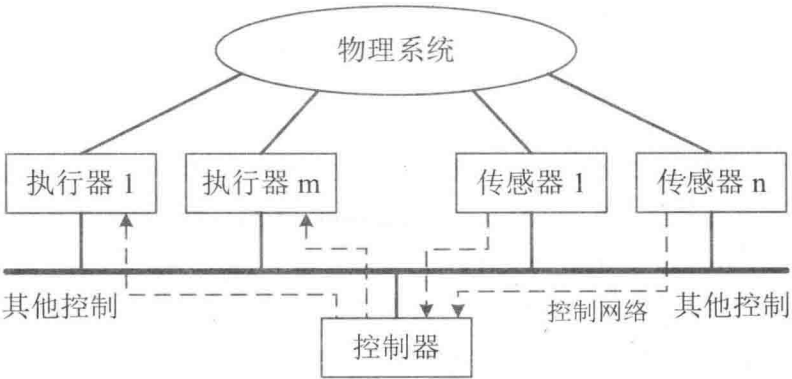


图 1 典型网络控制系统及信息流

传感器及执行器通过网络接口成为实时并控制网络的节点，传感器的上行测量数据及控制器的下行控制指令均由控制网络传输，实现网络闭环控制，其他控制则共享整个控制网络并采用同样方式实现其功能。NCS 重点关注网络通信对控制的影响，可概括为三大主要影响因素：网络闭环时延、信道可靠性及数据包传输，三方面均会引起网络控制特性的变化。NCS 解决网络对控制的影响问题主要有两种途径：一种是在已知网络特性的条件下，通过设计相应控制策略以减小影响；另一种是不改变控制策略，通过更合理设计网络控制系统（包括架构及通信规约等）减少数据延迟或丢失的发生。

从以上对 NCS 特点的分析可见，电力系统集中式广域控制系统属于网络控制系统，可将 NCS 的思想引入广域控制系统的设计中。目前广域闭环控制设计中通常将通信网络的影响简化为闭环时延，其补偿方法多以上述第一种途径为主，具体包括利用线性矩阵不等式（Linear Matrix Inequality, LMI）理论方法，采用 Padé 逼近法近似时延的设计方法，使用相位超前/滞后环节补偿时延实现时延鲁棒性的设计方法等，而对第二种途径研究较少。考虑第二种途径，即通过合理设计控制架构以减小通信系统的影响，广域闭环控制架构应注重设备的选择、接口的设计，以及通信量稳定的数据传输规约等。

除此以外，广域闭环控制架构还应满足：功能方面，首先需要广域信号反馈及广域协调控制，其次需要同步授时以实现同步控制及闭环时延补偿；实现方面，应有效减小通信数据丢失，增加信道可靠性以及减小闭环时延的分布性。

广域 PSS 闭环控制设计

考虑实际系统时延特性及目前电网运行控制信息构成形式，本文所阐述电力系统广域 PSS 闭环控制架构为集中式的网络控制系统，其中主要设备有 PMU、广域网络控制服务器（Wide-area Network Control Server，广域网络控制服务器）和网络控制单元，分别对应 NCS 中的传感器、控制器和执行器，除此以外还有高速通信网络。

（1）相量测量单元

WAMS 的相量测量单元（PMU）安装于电力系统各节点并通过卫星对时同步测量其电气量，测量间隔通常为 10 或 20ms。PMU 测量数据包括母线三

相电压、电流相量，以及由此计算得到的零序、正序、负序电压、电流相量，各单相及三相有功功率、无功功率以及频率和频率变化率。发电机的 PMU 除了上述量测外，还有发电机的机械功角（由转子间相脉冲计算得到），利用发电机的参数及机端电压、电流相量计算的电气功角。

（2）广域网络控制服务器

广域网络控制服务器安装于调度控制中心，经数据上行通道获取观测点和控制点的 PMU 测量数据并根据控制策略进行分析计算，得到控制输出量，最后经控制下行通道发送至控制电厂 NCU。广域 PSS 闭环控制架构同样适用于广域电压稳定控制等其他广域控制策略的实现。由于数据交换均经由通信网络，故广域网络控制服务器仅需要普通以太网的 RJ45 接口，标准工业服务器即满足需求。

（3）网络控制单元

网络控制单元（NCU）首先接收来自广域网络控制服务器的网络控制数据包并根据控制下行的通信规约解析得到控制指令，然后根据授时信息选取控制指令，将其转换为与控制器对应的接口信号（模拟信号或串口信号），实现网络化闭环控制。NCU 对应的电力系统控制器通常为发电机调速器、发电机励磁器、FACTS 设备、负荷调节器等。为提高抗干扰能力，NCU 需要就近与控制器安装在同一屏柜中，故其硬件平台需要便于安装且具备 RJ45 以太网接口和一路 D/A 输出，其 D/A 输出线性度应可准确还原控制信号。

高速通信网络及卫星授时

PMU 到达广域网络控制服务器的数据上行通道和广域网络控制服务器经 NCU 至电力系统控制器的控制下行通道均使用电力调度数据通信网，数据上行通道即为已有的 WAMS，控制下行通道则需要通信网络将其作为新的任务开通相应服务。PMU 及 NCU 由卫星定位系统授时，以保证广域网络闭环控制同步，且可根据时标信息对闭环时延进行补偿。

贵州电网广域 PSS 闭环控制实例

贵州电网的广域 PSS 闭环控制系统如图 2 所示。利用模式能观性能控性理论对贵州电网 BPA 模型进行仿真分析，选择乌江新厂#1 机组作为广域 PSS 闭环控制的观测点，思林电厂作为控制点，以乌江新厂#1 机组与思林电厂#1

机组的功角差为反馈输入信号。广域 PSS 输出与本地 PSS 输出叠加后，作为附加励磁控制实现了贵州电网的广域闭环控制。

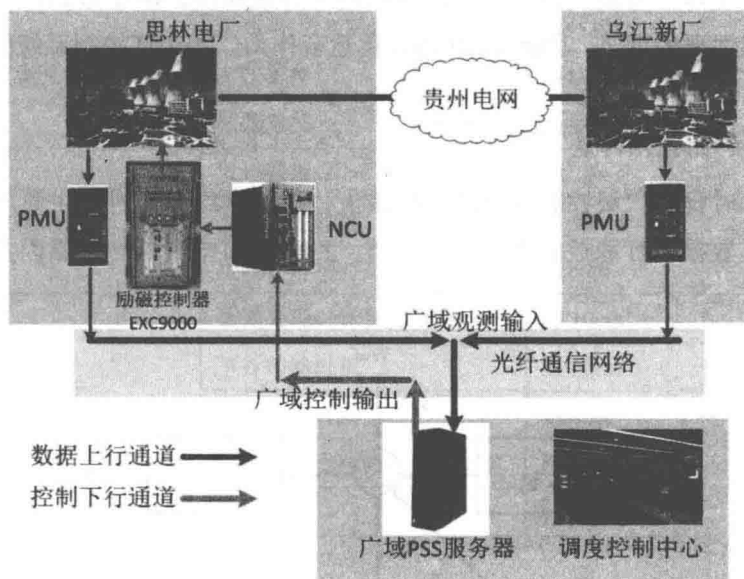


图2 贵州电网的广域 PSS 闭环控制

广域 PSS 闭环控制实现的关键技术

电力系统广域 PSS 闭环控制对实时性要求极高，控制架构设计需要从多方面综合考虑以减小闭环时延的分布性。首先广域网络控制服务器及 NCU 需要采用实时操作系统，其次通信网络需要采用 UDP (User Datagram Protocol) 协议通信，同时还需要具体估测整个闭环时延的分布特性。另外，NCU 与控制器的接口设计也是关键技术之一。

通信协议的选择

目前电力系统中的 PMU 及 WAMS 主要以 TCP (Transfer Control Protocol) 协议进行通信。基于连接的 TCP 协议为保证通信可靠性而牺牲了快速性，无连接方式的 UDP 协议不会为保证通信可靠性而产生额外时延，但对网络的性能要求更高。电力系统通信由于使用专用信道而没有带宽竞争，因此 TCP 协

议的数据重传等保证通信可靠性的措施并非十分必要。对电力系统广域闭环控制系统而言，个别数据的错序或丢失可以通过上层应用协议（如绝对时标、累加和校验等）检出，然后以预测或插值等方法解决。由于数据传输的快速性和连续性更为重要，因此 UDP 协议更适合作为广域闭环控制系统的通信协议。

广域网络闭环时延

闭环时延对广域控制性能的影响很大。广域网络闭环时延主要产生在数据采集、数据上行和控制下行三个环节，三个环节中时延产生原因及大小如图 3 所示。

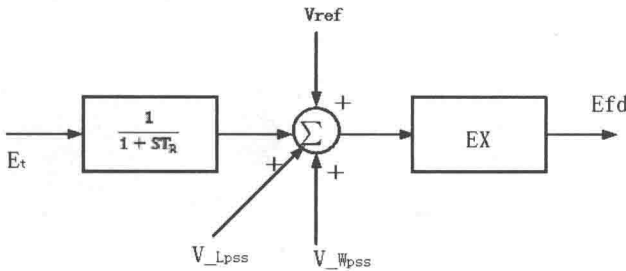


图 3 励磁器传递函数框图及输入信号叠加点

其中时延大小为贵州电网广域 PSS 闭环控制系统在 RTDS 硬件测试平台及贵州电网中的实测值。闭环时延主要产生于网络通信环节，其中 PMU 在发送数据时需要协调发送任务以致时延很大，且不同型号 PMU 的发送数据时延分布性差别很大。

实测中（表 1 所示）采用 2Mbit/s 专用通信信道时，从 PMU 数据发送，上行通道延时及数据解析时间为 30ms，WPSS 装置进行数据处理及策略计算需 10ms，策略指令下发及下行通道延时需 10ms，控制器转换及励磁响应时延约 5ms，整个闭环控制时延分布在 60ms 而不会出现突变的情况。

广域网络闭环控制算法需要对时延进行补偿处理，时延的分布性越大则越难达到很好的补偿效果。为此在硬件架构层面，除使用同步控制方法外，还应选择时延分布性小的设备，同时在条件允许的情况下，尽可能使用专用信道。

表 1 广域网络闭环时延

时延产生原因		时延
数据采集	电流/电压互感器	微秒级
	A/D 采样	微秒级
	数据封装	毫秒级
数据上行	发送数据	约 20ms
	上行传输时延	约 10ms
	接收、解析时延	毫秒级
控制下行	数据处理、计算控制量	约 10ms
	下行传输时延	约 10ms
	D/A 输出时延	毫秒级
	控制器（励磁器）响应时延	约 5ms
总计		约 60ms

执行器与控制器的接口

广域控制系统需要将控制信号传送至电力系统节点的控制器。对于没有网络接口的电力系统控制器（如励磁控制器等），需要 NCU 将网络信号转换为接口信号。

以贵州电网广域 PSS 为例，广域 PSS 的输出与本地 PSS 输出叠加后作为附加励磁控制信号。控制点思林电厂使用的 EXC9000 型励磁控制器具有白噪声测试输入端口，且该测试端口的信号叠加点与广域 PSS 相同，输入信号为 $-5\sim+5\text{V}$ 的弱电模拟信号，故可作为 NCU 输出至励磁控制器的控制信号。其传递函数框图及输入信号叠加点如图 3 所示，图中 LPSS 及 WPSS 分别代表本地和广域 PSS。

思林电厂 NCU 安装方案如图 4 所示。思林电厂共有 4 台机组，广域 PSS 安装于 1 号和 2 号机组。因 PMU 和 NCU 及电力系统通信网络的交换机相距较远并经过电厂的强电桥架，故选择使用光纤实现网络数据传输。另外，由于现场条件限制，NCU 使用接收 PMU 授时信息的对时方法，因此 NCU 和 PMU 之间也需要光纤网络连接。