

交直流并联大电网广域阻尼控制技术理论与实践^{*}

李鹏¹, 贺静波², 石景海³, 吴小辰¹, 陆超², 吴京涛³, 胡炯³

(1. 南方电网技术研究中心, 广州 510623; 2. 清华大学, 北京 100084;
3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

The Theory and Practice of Wide-area Damping Control for Bulk HVAC/HVDC Hybrid Power Systems

LI Peng¹, HE Jing-bo², SHI Jing-hai³, WU Xiao-chen¹, LU Chao², WU Jing-tao³, HU Jiong³

(1. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to deal with the threaten from inter-area oscillations in China Southern Power Grid (CSG) to security and stability of the grid, a project named Wide-area Adaptive Coordinated Control System for Multiple HVDC (MIDC) Links was sponsored by CSG in 2005. The goal of the project is to develop a wide-area damping control system to modulate multiple HVDC systems with input signals from PMUs. In the past three years, achievements have been made in aspects of both theory and implementation, such as theoretical studies and simulation, design and manufacture of the software & hardware, RTDS tests, installation and field tests, trial operation in open loop mode, closed loop tests with large disturbance. It will be the first time worldwide that a wide area damping control system to modulate multiple HVDC systems is soon to be put into practical operation in CSG. This paper reviews the process of the project and introduces some relative key technical issues.

Key words: low-frequency oscillation; modulation control; coordinated control; adaptive control; RTDS; closed loop test

摘要: 为应对长期以来威胁南方电网安全运行的区域间功率振荡问题, 南方电网公司 2005 年承担了国家重大产业技术专项“多回直流基于广域信息的自适应协调控制”。该项目力图构建一个以广域测量系统的信息为输入、以南方电网多回直流功率为输出的闭环阻尼控制系统。3 年来该项目完

成了项目理论分析、控制系统设计、样机研发、RTDS 测试、现场安装、联合调试、试运行评估、闭环扰动测试等一系列工作。世界上第一个调制多回直流的广域阻尼控制系统即将在南方电网投入正式运行。为此, 回顾了该项目所完成的各阶段工作, 介绍了交直流并联大电网广域阻尼控制技术从理论到工程实践的历程中所遇到并解决的一系列的 key 技术问题。

关键词: 低频振荡; 调制控制; 协调控制; 自适应控制; 实时数字仿真; 闭环试验

南方电网“西电东送”主通道目前由“八交四直”构成, 送电能力超过 18 GW, 送电距离超过 1 000 km, 是典型的远距离大容量输电电网。区域间的弱阻尼功率振荡问题一直是威胁南方电网安全运行的一个重要问题。南方电网通过加强对发电机电力系统稳定器 (power system stabilizer, PSS) 安装、设置以及投退管理, 在抑制此类振荡方面取得了一些成绩, 但区域间功率振荡仍然偶有发生。

南方电网是一个典型的交直流并联运行、强直弱交大电网, 直流送电能力占总通道送电能力的 60%以上, 且根据规划在“十二五”期间直流系统还将得到大力的加强。与交流系统比, 直流系统高度可控、调节速度快、调节容量大, 可以在很大程度上影响与之相连的交流系统的动态特性。长久以来通过调制直流功率改善交流系统的稳定性就是电力系统理论研究界以及工业界的热门话题之一。围

^{*}: 获国家重大产业技术专项资助。

绕直流调制抑制系统低频振荡的机理分析、调制控制器的输入信号选择、控制器参数整定等已经有众多研究成果^[1-5]，美国西部太平洋 AC/DC 系统在通过直流调制增强并联交流系统稳定性方面已经有多年的成功经验^[6-7]。

南方电网历来重视直流调制功能的研究，已投产的天广、高肇、兴安三回直流中都带有双侧频差调制功能。然而，这些调制功能在历次南方电网振荡事件中均未发挥应有的作用^[8]。究其原因，一方面是双侧频差调制以整流站和逆变站的就地频率信号为输入，这种信号对于某些振荡模式可观性较差从而影响了控制效果；另一方面是控制器的参数的设置不够理想。

近年来兴起的广域测量技术(wide area measurement system, WAMS)以及广域控制技术(wide area control systems, WACS)为发掘大容量直流调制在电网稳定中的作用提供了新的机遇。WAMS 对大范围的电网动态具有良好的可观性，WAMS 的应用研究已经有了丰富的成果，其建设在中国、美国、加拿大、欧洲都达到了相当的规模，技术已较为成熟。将 WAMS 的信号与发电机 PSS、可控串联补偿装置、直流调制等控制手段结合起来，就发展出了广域控制 WACS 技术。由于 WAMS 信号可以大大提升控制器影响大区域电网动态行为的能力，WACS 近年受到了电力系统理论界的广泛关注，在 WACS 的设计和整定方面已有大量研究成果^[9-11]，工业界也积极研发 WACS 的相关技术。

美国 BPA 电力公司是世界上探索将 WAMS 应用于电力系统控制、构建广域控制系统(WAMS)的先驱者^[12]，其所研发的 WACS 利用来自 WAMS/PMU 的信号控制发电机组的投入、无功电容器组的投切，该系统已完成设计以及样机开发，目前仍未正式投运。

加拿大 BC 水电局为了提升电压控制的水平，提出了研发广域电压控制系统自动操作并联电容器的投切，中心决策系统通过负荷中心关键母线和两个主要无功源的电压信息持续地评估整个系统的电压情况，当确定需要进行甩负荷时，控制中心将在 10~120 s 内按一定间隔顺序切除^[13]。加拿大魁北克水电局也有类似计划，利用 WAMS 的信息控制电容器组以及发电机 PSS^[14]。

日本的东京电力公司以及法国的 EDF 计划将

WAMS/PMU 信息用于失步解列控制中^[15-16]。上述项目或者在理论仿真研究阶段，或者还在实验室测试阶段，这些 WACS 技术距离大规模工业应用估计还需相当时日。

目前，南方电网已装设有 132 台 PMU，一个覆盖 500 kV 主网并延伸至 220 kV 网络的 WAMS 系统已经建成。为了发挥多回直流调制以及 WAMS 系统的强大能力，研发新的更有力的交直流并联大电网阻尼控制技术、加强应对区域间低频振荡的能力，南方电网 2005 年启动了“多回直流基于广域信息的自适应协调技术研究”项目。历时 3 年，世界上首个交直流大电网广域阻尼控制系统——“多直流协调控制系统”已经在南方电网投入试运行，并且成功经历了首次闭环扰动试验的考验。本文将概要介绍该项目从理论研发到工程实施的具体过程以及所解决的若干关键问题。

1 广域阻尼控制的若干关键技术

1.1 广域控制反馈信号的选择

如何选择反馈信号是阻尼控制器设计的一个重要问题。在传统的发电机 PSS 设计中，反馈信号仅局限于本地的转速及功率等信号，单纯的信号选择问题并不突出。广域测量系统逐渐成熟后，可供选择的信号范围扩展到全系统的各种电气量，基于广域信息的反馈信号的选择已发展成一个新的问题。

传统的 PSS 等设计一般采用留数方法选择信号，但其应用于广域信号选择时存在以下问题：

——使用留数作为信号选择指标的目标是使得阻尼控制器在相同的反馈增益下阻尼最大；对于不同的广域反馈信号，反馈增益的受限程度不一样，以增益的大小作为评价标准失去了比较的基础。

——实际工程中，最关心的是阻尼控制器单位控制输出量的阻尼效果，留数的指标并没有从这方面考虑。

近年来，国内外理论界在广域控制的选点和选信号也有了大量研究。模态的可控性、可观性、相对增益阵列(relative gain array, RGA)以及 Hankel 奇异值(hankel singular value, HSV)等理论都被用来作为选点和选信号的指标。上述方法有理论的严格性，但实际应用时却受限于精确的线性化的电力系统数学模型难以获得，尤其是南方电网这样的含有大量直流系统的电网模型更难以线性化。

本项目中,首次在工程中成功应用了主模比指标,该指标的物理意义可以解释为:在对弱阻尼低频振荡相同的抑制效果下,使得阻尼控制器用于抑制振荡而输出的控制量 Δu 的最大幅值 $\max|\Delta u|$ 最小,这种指标更适用于广域不同反馈信号的比较。主模比指标的另一优点是可以通过基于Prony的辨识方法求取,而不依赖于具体的系统模型与参数,特别适用于像南方电网这样有多回直流的复杂的大电网。

1.2 广域时延的影响以及处理技术

广域控制是一种网络控制,广域通信网络的通信延迟是广域控制系统设计中必须考虑的问题,研究表明,延时的引入会降低控制系统的阻尼效果,甚至引起系统的不稳定。

除了众多研究已经指出的广域通信时延造成的相位偏移,本项目中还发现了时延会在广域控制回路中引发高频振荡现象,如图1所示。该现象在已有的文献中都没有被报道过,可以通过相位裕度加以解释。

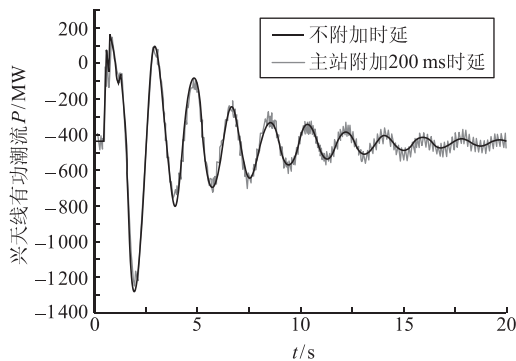


图1 广域时延引发的高频振荡现象

Fig.1 High Frequency Oscillations Caused by Time-delay

为解决广域控制系统的时延问题,理论界提出了很多方法,例如:LMI和增益调度相结合的广域阻尼控制器设计方法;利用Pade近似将时滞项转化为有理多项式去掉时滞项的方法;利用Smith预测补偿延时的影响的方法。上述方法由于对精确数学模型的依赖而很难直接应用于大电网之中。

在本项目中,提出了适用于大电网的实用化的广域时延综合治理技术。第一,提出了延时的在线测量和固定技术,通过在反馈信号以及输出指令中打入GPS时间标签获得实时的广域时延,并通过适当增加延时的方法保证通道延时不稳定时广域控制系统输出的连续指令的平滑性;第二,在控制器中

针对广域时延引发的相位偏移专门设置了相位补偿器;第三,发现了延时引起的高频振荡现象专门设计了滤波器,采用减小系统开环截止频率提高了系统的相位裕度,消除了高频自发振荡现象。

1.3 控制器参数的自适应调整

随着网络结构和系统运行点的变化,区间低频振荡的频率会发生改变,如果控制器不随之加以调整,则有可能导致控制效果的恶化。本项目首次在工程中开发并应用了控制器参数在线自适应调整技术:利用快速的在线Prony算法,在线辨识得到目标区间低频振荡的频率,结合实际控制回路延时大小 τ 就可以在线整定滤波器和补偿环节的参数。

1.4 广域控制的实时数据处理技术

广域控制系统在数据的存储以及处理方面有极高的要求:来自数个乃至数十个PMU的数据以高速上传至中央控制站,由于网络情况不同,这些数据达到的时间也不同;中央站需要实时处理这些数据、实时生成控制指令,并能够兼容较大的数据到达时间差。

本项目自主开发了实时数据处理技术。测量子站以及控制子站以每秒25个包的速率向控制中央站传输数据并存入实时数据库,数据库具有两个特点:容错性以及数据质量记录。当由于通信故障等原因导致控制中央站无法从测量子站获得数据时,控制中央站将把对应的测量子站标记为“故障”并在控制指令计算中排除该测量子站数据,直至测量子站的通信恢复正常并维持一段时间;从测量子站获得的所有数据,都将按照数据质量被打上特殊的标记并分类处理;所有数据在实时数据库中按照时标对齐。

1.5 广域集中式控制系统的可靠运行技术

为保证协调控制系统的可靠运行,本项目开发了一套系统的异常情况处理(failure safe)技术。

控制中央站包括了两层防误逻辑:第一层为冗余处理逻辑,当PMU所上传的广域反馈信号出现异常,如数据异常或者通信故障时,中央控制站将切换到备用信号源;第二层为控制器闭锁逻辑,当电网或控制器或广域通信网出现重大异常时,控制中央站将停止下发指令,原有输出信号按一定速率归零。中央站防误逻辑特别考虑了以下情况:

——PMU的CT/PT断线、PMU频率计算错误、三相短路造成频率计算数据异常;

- PMU 上传通道通信异常, 通信中断或延时超时;

- 中央站与控制子站通信异常;
- 云南电网与主网解列运行;
- 直流低功率运行。

控制子站输出给直流极控的控制信号为电压信号, 其有效输出电压范围为 2~8 V。由于子站工作异常或者电缆断开时一般输出 0 V 的电压, 因此 2~8 V 的信号电平设置可用于辅助防误。子站防误逻辑主要考虑了以下情况:

- 中央站死机、断电或其它异常导致不能出口控制数据; 中央站与协调控制子站通信异常;
- 协调控制子站出口 D/A 自检异常。

2 多直流协调控制系统的软硬件实现

在上述技术基础上, 所开发的多直流协调控制系统由控制中央站、控制子站以及 PMU 组成。

控制中央站负责控制的核心逻辑以及防误逻辑, 由一台控制计算专用服务器, 一台存储服务器, 一台图形显示工作站组成。控制计算专用服务器选用德国控创公司出产的 CompactPCI 总线工控机为硬件工作平台, 在此基础上为本项目开发了一套以实时数据库为核心的软件系统, 各 PMU 站点数据被分类放入实时数据库, 控制指令计算进程、在线自适应算法进程、延时计算进程等都从实时数据库中读取信息。

控制子站经由 2 Mbps 专线接收远方控制中央站命令, 并将其转为模拟量发往直流极控。装置各功能单元采用独立的高性能单片机 (MCU)。本控制系统的 PMU 硬件与 WAMS 所用 PMU 相同, 软件为实时控制而重新开发, 提高了计算效率。整套控制系统的结构如图 2 所示。

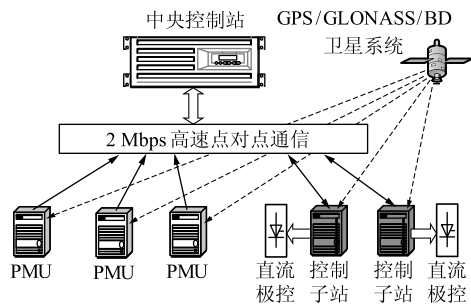


图 2 多直流协调控制系统结构图
Fig.2 Architecture of Wide-area Control System

3 多直流协调控制系统的 RTDS 测试

南方电网 RTDS 试验平台可以模拟交直流大电网的等值模型, 并接入实际直流控制保护屏柜。本项目所研发的多直流协调控制系统样机在该平台上做了详细测试, 测试时的南方电网等值系统为 20 台等值机、64 个节点、173 条线路。高肇直流控制由实际装置模拟、兴安直流控制在 RTDS 中软模拟。测试系统布局如图 3 所示。

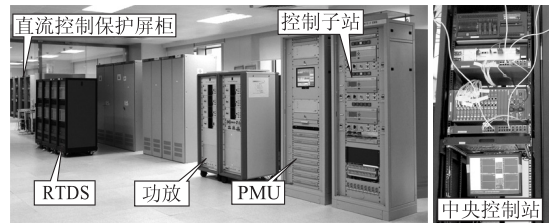


图 3 RTDS 测试平台布局图
Fig.3 Layout of RTDS Test

RTDS 测试共计完成了 8 个大组, 266 个小项测试, 测试内容涵盖多直流协调控制的基本原理验证, 中央控制站时延处理环节、自适应环节验证, 控制系统样机在交流故障下的动态响应测试, 控制系统样机与直流控制保护的交互影响测试等。

通过 RTDS 测试, 基本上明确了: 多直流协调控制系统可以为南方电网的低频振荡提供良好的阻尼作用; 所研发的时延处理技术、自适应技术有良好的应用效果; 该系统工作不会影响原有直流控制保护的正常功能。通过该测试, 也发现并完善了控制系统样机的许多技术细节。

4 多直流协调控制系统的联合调试

从 2007 年 10 月到 2007 年 12 月, 多直流协调控制系统样机陆续完成在安顺、高坡、兴仁、罗平、罗洞、宝安 6 个站点以及总调自动化机房的安装。

2008 年 3 月 21 日—3 月 24 日, 南方电网同步在上述 7 个站点展开“多直流广域协调控制系统”联合调试, 从硬件功能到系统防误, 从控制逻辑到直流感应, 对整套系统进行了完整的测试。北美曾经有类似的广域控制系统在投入闭环运行时诱发自激振荡而不得不永久退出, 本次调试中在世界上首次成功实现大电网广域阻尼控制系统的稳定闭环运行, 初步证实了大电网广域控制这一前沿技术在实践中的可行性。

5 多直流协调控制系统的开环试运行与闭环扰动试验

多直流协调控制系统在2008年4月投入开环试运行,此时直流极控不执行控制系统的指令,控制系统的其他功能与正常投入时一致。

试运行期间,多直流协调控制系统经历了“4·21”电网振荡事件,经历了数十次由于直流闭锁、交流跳闸引发的电网振荡,多直流控制系统均捕捉到了电网振荡信息并有控制指令送往高肇直流极控以及兴安直流极控。经事后分析,控制指令的相位可以为电网振荡提供较强的正向阻尼转矩。

作为世界上第一套交直流大电网广域阻尼控制系统,多直流协调控制系统没有任何经验可供借鉴,有必要通过实战检验对该系统在提升电网阻尼方面的显著作用做出最终评判。7月20日凌晨,南方电网进行了世界上首次广域阻尼控制系统闭环扰动试验,分别在多直流协调控制系统兴仁控制子站闭环运行和开环运行两种状态下,以闭锁天广直流单极作为激发系统振荡的扰动源,记录并比较协调控制系统投退下发生相同扰动时主网的动态特性曲线,试验的部分PMU录波曲线如图4所示。显然,多直流协调控制系统投入后系统阻尼有较大提升,这个世界上首次针对直流闭环阻尼控制系统的扰动试验取得了圆满成功。

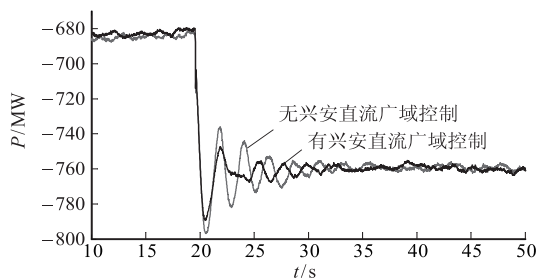


图4 多直流协调控制系统投入及退出的
梧罗线功率PMU记录

Fig.4 PMU Record of Wuzhou-Luoding line with/without WACS

6 结语

南方电网已经将大电网广域阻尼控制技术从前沿理论变为实用的控制系统,在此过程中相继解决了信号选择、时延处理、自适应算法等重大技术难题,并接受了实践的检验。多直流协调控制系统在开环试运行以及闭环扰动试验中的出色表现表明,利用WAMS信号构建电网广域控制系统是可行的,

基于WAMS的广域直流调制可以大大提升电网振荡阻尼。世界上第一套交直流电网广域闭环阻尼控制系统即将在南方电网投入正式运行。

参考文献:

- [1] SMED T, G Andersson. Utilising HVDC to damp power oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(2): 620-627.
- [2] LIU Hai-feng, XU Zheng. Parameters tuning of HVDC small signal modulation controllers based on test signal[J]. Proceeding of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003, 4: 2527-2531.
- [3] HUANG Ying, XU Zheng. HVDC supplementary controller based on synchronized phasor measurement units[J]. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004, 2: 668-672.
- [4] YuanYih Hsu, LI Wang. Damping of a parallel ac-dc power system using PID power system stabilizers and rectifier current regulators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1988, 3(3): 540-547.
- [5] YANG W D, XU Z, HAN Z X. Co-ordinated Hierarchical Control Strategy for Multi-infeed HVDC Systems[J]. IEE Proc.-Gener Trcnsm. Distrib., 2000, 149(2): 242-248.
- [6] CRESAP R L, SCOTT D N, MITTEISTADT W A. Small-signal modulation of the Pacific HVDC inter-tie[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(2): 536-541.
- [7] CRESAP R L, SCOTT D N, MITTEISTADT W A. Operating experience with modulation of the Pacific HVDC inter-tie [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(4): 1053-1059.
- [8] 王志勇, 陈亦平. 直流系统稳定控制功能在南方电网中的应用[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(2): 17-19.
- [9] ZIMA M, LARSSON M, KORBA P, et al. Design aspects for wide-area monitoring and control systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 980-996.
- [10] MILOSEVIC B, BEGOVIC M. Voltage Stability Protection and Control Using a Wide-area Network of Phasor Measurements[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2003, 18(1): 121-127.
- [11] REHTANZ C, BERTSCH J. Wide Area Measurement and Protection System for Emergency voltage Control[J]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, 2: 842-847.
- [12] TAYLOR C W, ERICKSON D C, MARTIN K E. WACS - Wide-area stability and voltage control system: R&D and online demonstration [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 892-906.
- [13] BEGOVIC M, NOVOSEL D, DANIE K, et al. Wide-Area Protection and Emergency control[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 876-891.
- [14] KAMWA I, BELAND J, TRUDEL G, R. Grondin, et al. Wide-Area Monitoring and Control at Hydro-Québec: Past, Present and Future[J]. IEEE PES General Meeting, Montréal, June 18-22, 2003.
- [15] ZIMA M, LARSSON M, KORBA P, et al. Design aspects for wide-area monitoring and control systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 980-996.
- [16] MEYER B, TROTIGNON M. Recommendations for the improvement of the Brazilian power system security following the 11th March 1999 outage based on EFD experience[R]. EDF report, 1999.

收稿日期: 2008-07-25

作者简介:

李鹏(1977-),男,博士,高级工程师,从事电网安全稳定分析与控制的相关生产与科研工作。

贺静波(1983-),男,博士研究生,研究领域包括电力系统广域控制、低频振荡分析、直流控制等。

石景海(1976-),男,博士,高级工程师,从事电力系统广域测量系统、安全稳定控制系统的研究与开发工作。

(本文责任编辑 张亚拉)