

分类号_____

密级_____

UDC_____

编号_____

清 华 大 学

博 士 后 研 究 报 告

物联网技术在电力系统广域稳定监控中的应用研究

涂 国 煜

清 华 大 学 (北 京)

2013 年 9 月

1、智能电网的信息体系结构研究；
INFORMATION SYSTEM ARCHITECTURE FOR SMART GRID

2、电力物联网运行支撑平台和实证研究；
THE EXPERIMENTAL PLATFORM AND
EMPIRICAL RESEARCH OF
CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR POWER SYSTEM

3、通讯网络对广域控制的影响
(超高压直流输电系统广域控制器数值仿真实验)；
IMPACT OF COMMUNICATION NETWORK ON
WIDE-AREA CONTROL
(EXPERIMENTAL STUDY OF WIDE-AREA CONTROLLER
OF HVDC SYSTEM)

博 士 后 姓 名: 涂 国 煜
流动站（一级学科）名称: 计算机科学与技术
专 业（二级学科）名称: 计算机软件与理论
合 作 导 师 : 曹军威（教授）
邢春晓（教授）

研究工作起止日期 2010年9月—2013年9月

中文摘要

本研究工作的目的是通过搭建电力物联网的实证平台，测试和验证电力系统结合通讯网络开展的新应用的可行性、关键性能及潜在问题。电力物联网中通讯网络与电力系统的相互耦合，这使得传统的电力系统控制策略需要做出相应调整。然而通讯网络中的不确定性，与电力系统相互影响的复杂性，使得电力系统的最终性能难以得到保障。在关于分布式多通道信号时延的造成影响和处理方式的研究中，直接考察多通道、随机性的相关结果仍十分匮乏。

本实证平台现提供如下基本功能：（1）经实际电网系统对比矫正过的仿真平台；（2）采用实际故障历史数据的测试案例；（3）接口多种通讯网络的仿真环境；（4）采用超实时通讯仿真实现闭环控制；（5）支持不同控制、辨识算法的接泊，提供其仿真验证和比对结果。

目前在此平台上展开的研究主要基于广域监控系统（WAMCs）的案例，具体采用的研究方法如下：（1）选取分布的采样节点，（2）调取瞬态故障的历史数据，（3）设置多信号通道的相异网络环境，（4）仿真广域控制器的镇定效果，（5）增加控制模块对通讯网络异步信号的补偿环节，改变不同的补偿方式，仿真比较同等条件下的镇定效果。

取得的主要研究结果表明：广域控制器的镇定效果受到各通道信号异步延时的明显影响，通过对通讯网的简单补偿，即可大幅增加控制器的鲁棒性，提高同一组控制参数对不同网络环境的控制裕度。传统方式存在时延增加效果出现大幅波动，改善后的补偿方式效果存在差异，且与异步时延的组合有关系，其明确的理论界限仍有待进一步的研究。

关键词：电力物联网、智能电网、通讯补偿、异步信号时延、广域控制

Abstract

The purpose of this work is to establish a simulation platform of CPS for power systems and carry out experiments to verify the feasibility, evaluate the performance and identify potential problems of new applications that utilize communication network in power system controlling. One critical issue in CPS is the interaction between the communication network and the power system. With more applications are implemented with wide-area communication, the power system control strategies have to account for this interaction accordingly. However, the uncertainties in the communication network and the complicated interaction between the power system and the communication network is hard to characterize, which makes it difficult to guarantee the performance of the wide-area controlling of the power system. Research results are still limited on the impact of stochastic delays of distributed signals from multiple communication channels, and the handling methods of those delays.

Our empirical simulation platform has the following features: (1) simulation module which is verified by actual large scale power system; (2) historical fault data are available for testing cases; (3) interface to a variety of communication network simulation environment; (4) super real-time simulation of close-loop control; (5) interface to different control strategies and delay compensation methods to provide testing and comparison results.

Research with a wide-area control example has been carried out. This study takes the following steps: (a) distributed nodes are selected for sensing data, (2) historical data are used to generate the faults, (3) set up dissimilar network conditions for multiple signal channels, (4) evaluate the controller's stabilization performance by simulation, (5) add communication compensation to the controller, compare different ways of compensation by simulation under the same conditions in (4).

Results show that the stabilization performance of the controller is considerably influenced by the asynchronous delays of signal channels. Stabilization performance can be improved significantly by a simple compensation, but performance of it

fluctuates with the increase of delays. Sophisticated compensation methods are proposed and tested. They demonstrate diversified performance under different network conditions. Challenges remain in providing theoretical performance boundaries of different compensation methods under comprehensive network conditions.

Keywords: CPS for power system, smart grid, communication compensation, multi-channel signals, asynchronous delay, wide-area damping control

主要缩略词表

WAMCs	Wide-area monitoring and control system	广域监控系统
CPS	Cyber-physical system	信息物理系统（物联网）
IoT	Internet of things	物联网
CSG	China Southern Grid	中国南方电网
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	数据采集与监控系统
RTDS	Real-time digital simulators	实时数字仿真
PSS	Power System Stabilizers	电力系统镇定器
HVDC	High voltage direct circuit	高压直流
LFO	Low-frequency oscillations	低频震荡
HFCOA	High-frequency constant amplitude oscillations	高频常幅震荡
SMTDS	Stability margin of the time delay system	时滞系统稳定域
SISO	Single input single output	单输入单输出系统
MIMO	Multiple input multiple output	多输入多输出系统
Drop	Drop	丢弃置零补偿方式
SCH	Single channel history	单通道历史数据补偿方式
FH	Full history	全通道历史数据补偿方式
SCI	Single Channel Interpolation	单通道插值补偿方式
SCI-T	Single Channel Interpolation with Timestamp	带时标的单通道插值补偿方式

目录

目录	VIII
第一章 绪论	10
1.1 物联网技术研究综述	11
1.1.1. 物联网的特征	11
1.1.2. 相关研究前沿	12
1.2 电力物联网应用与研究进展	15
1.2.1. HVDC 与直流断路器	16
1.2.2. 电力系统的网络化控制	16
1.3 本报告内容及结构安排	17
第二章 智能电网的信息架构	18
2.1 本章导言	18
2.2 智能电网的定义	19
2.3 智能电网的架设目标	20
2.4 耦合的信息流与能量流	21
2.5 智能电网研究现状及挑战	21
2.5.1. 智能电网国内外研究现状	21
2.5.2. 智能电网应用现状及挑战	24
2.6 智能电网信息体系架构	24
2.6.1. 智能电网组成	24
2.6.2. 基础设施	25
2.6.3. 支撑平台	29
2.6.4. 应用体系	39
2.7 本章小结	53
第三章 实证平台搭建	55
3.1 实证平台概述	55
3.1.1. 功能概述	55
3.1.2. 测量	56
3.1.3. 辨识	59
3.1.4. 控制	60
3.2 平台组成	62

3.2.1. 三方通讯	62
3.2.2. 电网仿真端模块	63
3.2.3. 通讯模块	66
3.2.4. 控制器模块	68
3.3 应用案例	70
3.3.1. 案例构建总述	70
3.3.2. 基于线性功率-电压方程的快速潮流计算方法	72
3.3.3. 区域负荷参数测辨与建模	72
3.3.4. 广域阻尼控制	74
3.4 本章小结	76
3.4.1. 与国内外同类研究工作相比的创新性	76
3.4.2. 存在的问题和改进	77
第四章 网络通讯对广域控制的影响	78
4.1 本章导言	78
4.2 针对 WAMCs 中时延的研究现状	79
4.3 系统描述	80
4.3.1. 电力系统案例	80
4.3.2. 控制器	82
4.4 系统模型	82
4.4.1. 闭环控制系统模型	82
4.4.2. 通信时延与补偿	83
4.4.3. 补偿的编码器模型	84
4.4.4. 编码误差	85
4.5 实验设置	85
4.5.1. 电力系统参数	85
4.5.2. 通讯网络参数	88
4.6 结果与分析	90
4.6.1. 参考实验	90
4.6.2. 截断正态分布时延	91
4.6.3. 有界均匀分布时延	92
4.6.4. 存在背景噪声流量的混合网络	95
4.7 结论与展望	97
4.7.1. 针对广域低频震荡的结论	97
4.7.2. 针对时延补偿方式的结论	97
4.7.3. 研究展望	98
第五章 总结与展望	99
参考文献	100
简历及成果	118

第一章 绪论

物联网系统(Cyber-physical system, CPS), 也译为信息物理融合系统, 或直接称做 Internet of Things (IoT)。根据维基百科的定义, 物联网是通过互相协作的计算单元控制物理实体的整合系统。在生产生活的不少领域, 如航空、汽车、能源、制造、娱乐等等, 已经能看到物联网系统的雏形。这些雏形源于嵌入式系统的应用。嵌入式系统作为嵌入物理实体中的传感和控制单元, 是一类重要的计算单元。物联网的重要意义在于, 可以利用通讯网络整合各类计算单元, 以协调对分布式的物理实体的控制, 从而实现以往局部控制难以达到的系统整体性能的优化。以此为目标, 现有的应用距离高效、完备的物联网系统仍有较大差距。实际应用推动下发展起来的物联网逐渐引起了科学界的注意。美国的自然科学基金(National Science Foundation, NSF)将其列入了重要研究领域, NSF 及其他机构从 2006 年底开始赞助物联网相关的研究研讨[CPS]。

随着物联网在生产生活不同领域的迅速普及, 诸多行业迎来快速的变革和挑战, 从而推动了自动控制、通讯、电子等相关技术的发展, 也为自动化、计算机、数学、土木、电力等各个学科带来了新的研究课题。这些活跃的研究课题多以具体应用为背景形成具体的解决方案或平台, 因此物联网的研究尚难以形成坚实明确、统一完备的理论体系。本章第 1.1 节将粗览这些学科的成果和相关进展, 以期我们或同仁的课题研究能有所借鉴。

本研究以电力行业为应用背景。电力系统目前亟待解决的稳定性、经济性问题, 有望借助物联网的搭建得到大幅改善, 但同时会必然遇到新的问题。不仅物联网的实施和性能会受到各种条件的限制, 将电力系统纳入物联网本身就具有一定的风险, 特别是安全性和鲁棒性。2010 年震网病毒(Stuxnet)针对伊朗核电站的攻击, 就是通过系统的监控和数据采集(SCADA)系统, 入侵下位的控制系统, 严重破坏了离心机组, 给伊朗造成了巨大损失。这是工业系统与信息系统紧密结合后的必然代价。本研究仍关注物联网对电力产业带来的积极价值, 尚不涉及安全方面的内容。课题集中考察在如何充分利用信息系统的优势, 在通讯网络既有的局限下, 最大程度提升电网性能。我们结合南方电网的实际案例, 以仿真实证的方式考查物联网对提升电网稳定性、效率等关键指标能发挥的作用和影响因

素。本章第 1.2 节将略述对电力物联网的应用与研究进展。继而通过应用案例到抽象模型最终回归解决应用问题的方式，力图从电力系统和通讯网络这两方面刻画物联网发挥作用的关键因素。

本研究报告的后面三个章节将分别综述智能电网的信息架构，介绍课题搭建的实证平台，以及目前在平台上开展的研究题目——针对中国南方电网区间震荡的广域控制。

1.1 物联网技术研究综述

为了解释本课题对物联网研究的科学意义，这里首先对物联网的一些特性和相关研究简单介绍如下。

1.1.1. 物联网的特征

作为控制系统和计算机网络的融合，物联网同时具备这两种系统的特征，但绝非简单的两者叠加。物理控制单元结合计算单元后，形成分布式的数据采集、信息通讯、信息处理、反馈执行这四个环节，即构成了一个物联网系统。这四个环节组成的闭环过程，在系统架构中由感知层、通讯层、分析层、执行层所支持。在这样的系统构成中，**交互性**和**闭环控制**这两个特征既是物联网发挥作用的关键，也是研究的重点。

交互性 首先，物联网强调了计算过程和物理过程的交互性[Lee2008]。传统的控制系统中，物理系统作为受控对象，只是被动的过程。有别于此，物联网中计算机网络和被控的物理对象相互影响，通讯网络的行为在变化的物理对象面前并非一成不变。在网络相关的研究中有一个有趣而重要的研究方向：系统架构和网络行为随数据量、数据节点分布的变化而演变。

闭环控制 不同于以通讯为目的的计算机网络，亦非简单的通过网络通讯传递控制信号这样的开环系统，物联网依赖通讯网络实现对物理系统的闭环控制，因而计算单元及通讯网络被纳入了整个闭环控制系统内部。因此计算机通信网络对物理系统动态过程的影响相应成为一个重要的研究方向。

1.1.2. 相关研究前沿

物联网系统架构中感知层、通讯层、分析层、执行层这四个层次，正对应了推动物联网发展的四大技术门类，即：传感器及传感技术、通讯、数据分析与挖掘、自动控制。传感方式经过了 Wi-Fi、红外、蓝牙、RFID、NFC 等阶段，终端产品类型已相当广泛，在各行业中也已形成相应的通讯协议，如电力设备目前普遍采用的 IEC-61850。在通讯方面，下面主要列举两个较为重要的研究工作：一是 MIT 组的极速傅立叶变换 (FFT)，大大提高了数据采集环节的效率；二是通信局限对控制影响的研究，提供了结合通信与控制执行环节进行系统设计的重要理论成果。在数据分析处理方面，近来大数据 (Big Data) 的研究极为活跃，这也是由于物联网应用带来了充足甚至庞杂的各类行业应用数据。UIUC 的 Jiawei Han (韩家炜) 教授领导的数据挖掘研究团队，相应的数据理论和方法可以参看相关文献 [Han2001]，在此不做赘述。在自动控制领域，随着物联网大大提高了系统的耦合程度，大规模系统的组合和随机因素成为不可回避的重要研究课题，清华大学 CFINS 研究组在复杂系统理论建模、最优控制积累了众多成果。下面简单罗列结合通讯与控制研究的进展前沿。

1.1.2.1. 极速傅立叶变换与车联网

傅立叶变换 (Fourier Transformation, 简称 FT) 是用在信号编解码传输过程中最基本的工具。它将以前时间序列这种自然形式记录的数据流转化为一组频率信号的组合，使得医学影像、音频这类大数据流能够在损失很小的情况下以高传输速率通信。FT 的转换速率也成为影响多媒体播放，移动蜂窝网等数据通讯能力的关键。从频域角度看，由于自然数据流具有天然的稀疏性，快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transformation, 简称 FFT) 利用这一特性大大提高了 FT 速度，得以广泛应用。2011 年，MIT CSAIL 实验室的 Dina Katabi 和 Piotr Indyk 教授及其学生共同发明的极速（稀疏）傅立叶变换 (Sparse Fourier Transformation, 简称 SFT) [SODA2012]，以十至百倍的幅度提高了 FFT 的速度，2012 年 CSAIL 公开了新技术，借鉴 4G 蜂窝网处理信号的策略，进一步大幅提高了 SFT 的效率。

SFT 及其改进版本源于两个主要思想。一，将信号划分为足够小的频带切片，使得每个频带切片中只有一个主导频率。二，利用频率信号作为周期性震荡信号的特征，在同一个频带切片中不断采样，即可得到主导频率的周期。

鉴于 SFT 对数据通讯的重大意义，SFT 被列为 2012 年度十大突破技术。

[MIT_FFT] 应用 SFT 的研究也已从通信领域的无线通讯、数据交换机等传统课题延伸到了物联网行业应用中，如 SFT 在车联网中的应用 [SFT2012a, SFT2012b]。

1.1.2.2. 通讯局限下的控制

通讯信道是传递控制信号的通路，通信能力限制致使信息不充分而制约了系统的控制效果。考虑通信局限的控制系统分析与设计成为一个逐渐活跃起来的重要研究领域，其前身可以追溯到 1960-1970 年代控制论发展之初 [Andrievsky2010]。随着通信网络的普及，控制领域中网络化控制方向日益活跃，Hespanha 等的综述文章 [Hespanha 2007_NCS] 中，归纳和了 2007 年之前的网络化控制估算、分析和控制策略的研究成果。最近两篇综述文章 [Andrievsky2010] 和 [Goodwin2012] 给出了近十年来涌现的新方法。通信的约束主要体现在通信速率 (data rate 或 packet rates)、网络时延 (network delay)、网络丢包 (drop-out [Song2009, Wang2013]、信噪比 (signal-to-noise ratio) [Silva2008, Goodwin2008] 等方面。一个完整涵盖这些方面的系统模型尚未形成，但各自已有不少理论成果。

1. 通信速率

数据需经过编码后再传输，由于信道容量有限，数据的通信速率受编码速率的限制，并同时存在一定编码 (quantization) 误差，这对反馈控制系统引入了干扰从而影响了稳定控制的效果。单个系统的随机稳定 (stochastic stability) 通常需要由足够高的编码速率来保障。Nair 等人综述了 2007 年之前，在编码速率限制下，系统闭环控制稳定性的相关研究结果 [Nair2007]，其应用覆盖蜂窝网通信、无线传感器的能耗控制等实际问题。这之后的研究更加强调和控制论、信息论和计算机科学的统一框架。

考虑多于一个系统的研究还并不多见。[Fradkov2008] 中研究了两个系统的同步问题。并给出对具有 MHP (hyper-minimum phase) 属性系统使其随机稳定的方法。其同步误差的反馈控制率，随编码速率的增加而上升。

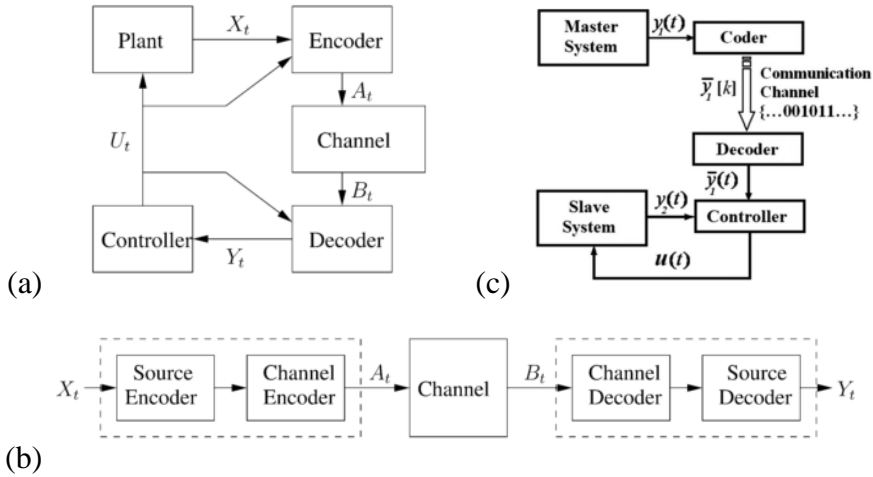


图 1.1 考虑时延的信源分离的编码系统 [Tatikonda2004b, Fradkov2008] (a) 反馈控制系统图示 [Tatikonda2004b] (b) 考虑采样信号的时延影响后，区分信号源编码和信道编码的图示。在大时延情况下，传统的信源分离理论(source-channel theory)失效。将信道编码器建模为随机核(stochastic kernel) (c) 同步控制系统的编码 [Fradkov2008]

2. 网络时延

时延与通信速率并不能简单的分开考虑，随着时延增加，低通讯速率对系统性能的破坏会更加严重 [Nair2007]。假设通信速率足够高情况下，对网络时延影响的研究是从对 SISO 系统的确定性时延开始的。

合并考虑采样信号时延 (sensor-to-controller delay) 与控制信号时延 (controller-to-actuator delay) 是一类通常的做法。此类单通道、确定性、单一时延的相关综述可参见 [Yan2006, Gao2008, Maurice2010]。如 [Wittenmark1995, Cloosterman2006] 指出的，即便在针对确定时延的稳定域内，当时延随时间变化时，系统的稳定性无法保障。

考虑随机时延的工作中大时延成为主要难点。由于控制系统的控制与反馈信号均基于数字通信网络进行传输，连续时间的系统也通过采样时间被离散化，因而时延的大小多以周期数衡量。在网络时延对系统稳定性的影响以及控制器设计方面的研究中，时延在 1~2 个采样周期的研究较为多见，而主要的挑战在于网络时延远大于采样周期的处理方法。文献 [Zhang2005] 中给出了多周期大时延的一种建模方法，同时指出系统中采样信号时延 (sensor-to-controller delay) 与控制信号时延 (controller-to-actuator delay) 合并考虑并不准确，并将两者分别建模为独立的 Markov 过程，并基于此给出了使系统随机稳定的反馈增益条件。针对时延为多个

采样间隔的研究结果还包括[Yang2005]和[Hua2007]等, 由于稳定性充分条件是采用随机参数的上界的推导得出, 系统保守度比较大, [Cloosterman2009]减少了随机参数, 并且给出了时延同时小于采样周期和多个周期的结果。由于这些结果多基于 LMI 得出, 除了保守度之外, 计算复杂度也是衡量算法的重要因素。否则对于实际系统, 即便线形化或大幅度简化, 其阶次也在计算上难以采用多数基于 LMI 的结果[Bauer2013]。

对大规模的系统, 基于全状态反馈控制过于理想化, [Hu2003]考虑了部分状态反馈控制中大时延的影响, 并证明了分离理论(separation theorem)依然成立。除了状态信息不完备, 对于分布式的系统结构中, 子系统间还存在不容忽视的通讯时延。在考虑多个耦合子系统的研究中, 仅有[Rotkowitz2005]中考虑了通讯时延。最近的[Bauer2013]给出了分布式系统的控制综合, 即包括了上述的因素, 并且具有较低的保守度。其局限在于复杂度随状态维数多项式增长, 对于中至大规模的系统仍需要进一步降低计算复杂度。

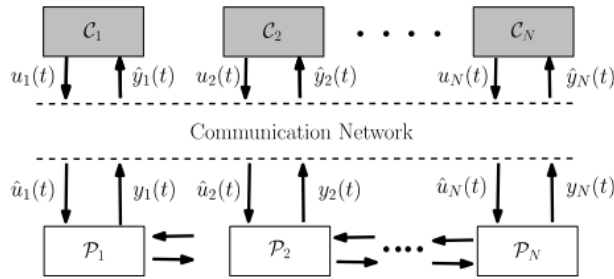


图 1.2 [Bauer2013] 共享非理想通讯网络的分布式系统。系统图来自文献 [Bauer2013], 对耦合的子系统 P_1, \dots, P_N , 其基于通讯网络局限的控制综合。

1.2 电力物联网应用与研究进展

大规模广域系统的网络化控制是一个非常活跃的研究领域, 特别对于风力发电、配电网、工业制造、水资源运输等等 [Bauer 2013, Murray2003]。电力设备技术手段的发展, 如 PMU、HVDC 与直流断路器的应用与进展推动了新型电力物联网的发展。清华大学电机系韩英铎院士领导的团队在南方电网率先开展了直流线路连接子区的广域控制和基于 PMU 量测的负荷辨识课题。在风电等新能源接入的系统中, 率先完成了多端交直流混合系统的控制工程。下面我们浅述相关的应用和研究现状, 其他具体内容在下一章将专门针对电力物联网信息构架进行

综述。

1.2.1. HVDC 与直流断路器

高压直流传输 (High-voltage Direct Circuit, 简称 HVDC) 尽管可以实现背靠背的交直流互联, 但目前仍只能实现端对端的连接, 尚无法解决多端系统的直流互联。这也是我们要研究的区间振荡仍限于双区域间模式的原因。

直流断路器在今年的 MIT Technology Review 中被评为 2013 年度十大技术突破之一。直流断路器的采纳使得多端直流互联成为可能。目前由于价格过于昂贵, 距离真正实施仍需不少时日。

1.2.2. 电力系统的网络化控制

应用方面, 近十年来电力系统最重要的进展便是广域监控系统(Wide-Area Measurement and Control System, 简称 WAMCs)的应用, 这通常也被认为是同步测量(Synchrophasor)技术带来的[Chakraborty2013]。精密的数字记录设备相位测量单元(Phasor Measurement Units, 简称 PMUs) 现在已广泛安装在电力系统的节点。PMU 的信号通过 GPS 同步授时, 并可以达到很高的采样率。利用这些量测信号可实现广域(wide-area)或者分布式(decentralized)的系统控制[Chaudhuri2010]。以由于电网互联而频发的区间振荡为例, 用于分散式控制的 PSS 已被大量安装, 但可监测到的区间震荡仍然多发。在南方电网, 已安装超过 370 台 PSS, 区间低频振荡仍是限制西电东送传输极限的关键因素。因而南方电网增加了额外的广域控制器以增加系统的阻尼。

研究方面, 网络化控制理论的进展可以参考综述[Hespanha2007]。网络化控制的理论结果多基于于线形或小规模的控制系統, 而电力系统是一个高维的复杂非线性系统难以直接应用。

在非线性系统的研究中, 文献[Fradkov2008]研究了两个系统的同步控制问题(synchronization of nonlinear system), 给出一种在有限信道容量下的编码方式, 可使得同步误差收敛。其结果应用于两个混沌系统(chaotic Chua systems), 如下图所示, 一主一从两个系统, 通过一个控制器以及一个容量有限的信道相互耦合。这一结果对我们的研究亦有参考价值。

我们关心的广域阻尼控制器主要用于抑制子区间的频差震荡, 亦可将其建模为带时延的同步系统。如下图所示, 可将系统两子区划分为为主、从两个系统。

不同之处在于，文献[Fradkov2008]中的两系统耦合仅限于通过控制器及其通讯信道，但广域控制所关心的区间震荡，其两个子区存在电器连接。

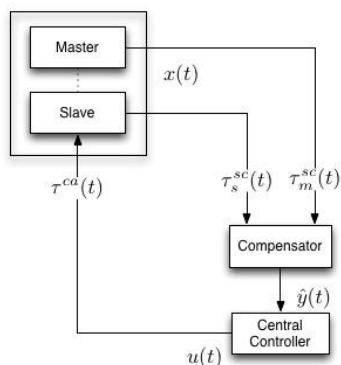


图 1.3 同步系统模型，主从系统间存在电气耦合

1.3 本报告内容及结构安排

本报告接下来分三部分介绍工作。第二章为电力物联网应用现状的调研，总结和综述了智能电网信息架构。第三章介绍我们搭建的电力物联网仿真实证平台的组成和所支持的案例。第四章以区间频差震荡为背景，介绍了在平台上开展的广域阻尼控制系统的实验工作和相关结果。

第二章 智能电网的信息架构

2.1 本章导言

随着现代通信、计算、网络和控制技术的发展，信息技术运用领域的不断开拓，信息与能源技术的结合已然成为一种发展的必然趋势，而这种结合也催生了一个新的概念：智慧能源[Hao2011]，即利用先进的信息技术，提升能源管理水平，实现能源进一步的精密化调控。

传统电网在能源利用效率、环保性等方面的问题比较突出。由文献[AER2008]可知，2008年北美电力系统的能源使用效率约为1/3，发电和输配电的能源损耗却占到2/3。同时，65%以上的电力均来自化石能源（煤、天然气），对于环境污染较大。为解决这些问题，未来智能电网将改进现有电网的运行结构，基于新能源构建的大量分布式发电设施将被引入电网系统，电力的供应将多元化；同时电力终端的用电模式也将更有弹性。未来智能电网将表现出与许多分布式计算网络系统的联系更加紧密。

传统电力系统目前面临着一系列问题，如峰值使用时的“电荒”、信息获取不及时造成的设备利用率低。在这种背景下智能电网技术应运而生。智能电网需要解决传统电网信息系统在信息采集、传输、处理和共享等多方面的瓶颈，而这些问题的解决则依赖于正在逐渐发展的物联网技术。物联网的核心技术涵盖从传感器网络至上层应用系统之间的物理状态感知，信息表示，信息传输和信息处理，在智能电网信息系统体系中的通讯、安全及上层应用等各个方面将起到重要作用[Ericsson2010]；传感器网络技术可用于智能电表等电网终端通讯设备的数据采集和信息获取[Gungor2010]；实时和安全通信技术[Kim2012]可用于电网运行参数的传输，实现电网运维数据和发电负荷数据的实时传递，数据存储和信息表示技术[Toma2009]可用于电网海量数据的存储、管理、查询和组织；数据分布式处理和任务调度技术[Kim2012]可用于电力系统安全性分析，新能源接入后的能量流实时调配。物联网技术的发展使得电力系统从一个相对封闭自给的控制系統融入计算机数字环境中，在提高电网稳定性的同时，使得风能、电能等新能源技术方便的融入智能电网的信息系统，统一的进行规划与调度。

借鉴物联网信息技术构架，本章从信息技术的角度提出智能电网的体系结

构。第2.2节总结了智能电网的定义；第2.3节总结了智能电网的架设目标；第2.4节对比传统电网与智能电网的体系结构，第2.5节介绍智能电网国内外发展现状、主要技术难点和挑战并提出了智能电网信息系统体系结构；第2.6节分别详细介绍智能电网信息系统的基础设施、支撑平台和应用系统。第2.7节总结并对智能电网未来研究方向做展望。

2.2 智能电网的定义

智能电网通常指将现代信息系统融入传统能源网络构成的新电网系统。从而使电网具有更好的可控性和可观性，解决传统电力系统能源利用率低、互动性差、安全稳定分析困难等问题；同时基于能量流的实时调控，便于分布式新能源发电、分布式储能系统的接入和使用。

智能电网的第一个显著特点是可观性强。即借助信息网络技术,实时监控电力系统各节点的信息。例如 IBM 定义智能电网三个层次的第一层次就是“实现对电网运行状态、资产设备状态和客户用电信息的实时、全面和详细监视，消除监测盲点”，清华大学上世纪 80 年代便提出“CCCP”（通信、计算机和控制技术在电力系统中的应用）概念，认为智能电网是传统电力系统网和电力信息网的两网融合及相互作用。同样的定义还包括[Yu2009]。

智能电网的另一个特点是发电用电双方动态交互。即利用实时获取的电网发电信息和用户信息进行优化调度。从终端用户的角度来讲，智能电网的目标在于统筹调度所有的电力资源，以更加便宜的方式提供给终端用户更加稳定的电力[Palmisano2010]。例如杜克能源公司(Duke Energy)提出在智能电网环境下，终端用户可以实时观测到自己的电力消耗情况并以此调整自己的用电习惯降低成本，而同时电力公司可以根据用户的需求调配电力资源的供应并通过价格手段引导用户的需求，使得总的能源消耗最低。欧洲智能电网战略发展规划[SDEENF2010]提出智能电网应将所有接入电网的用户，发电机，以及双向设备连接整合在一起，有效地提供可持续、经济及安全的电力供应。通过应用智能监控、控制、通信和自愈技术促进发电侧的连接和操作，提供给终端用户更多的信息和优化用电方案的途径，减少电力系统对于环境的影响，提高供电的可靠性和安全性。

智能电网的第三个特点是可靠性高。即可以从系统震荡中自动恢复，对于系统失稳趋势提前报警及调整。例如美国能源部定义智能电网应具有系统震荡自恢

复、鲁棒性高、安全稳定等特征[SGSR2009]。而IBM定义的智能电网三个层次的第三层次就是在信息集成的基础上进行高级分析，实现提高可靠性、降低成本、提高收益和效率的目标。

综合上述观点,我们给出智能电网的定义如下:智能电网是在传统电网的基础上构建起来的集传感、通信、计算、决策与控制为一体的综合数物复合系统,通过获取电网节点各层资源和设备的运行状态,进行分层次的控制管理和电力调配,实现能量流、信息流和业务流的高度一体化,提高电力系统的运行稳定性,以达到最大限度地提高设备利用率,提高安全可靠,节能减排,提高用户的供电质量,提高可再生能源的利用效率。智能电网最终目标是降低能源消耗成本,改善居民用电质量,降低电力运行成本,从而促进国民经济发展。

2.3 智能电网的架设目标

智能电网主要解决以下几个方面的问题:

(1) 间歇式可再生能源的接入。新能源主要是指风电和光伏发电,我国的风电发展整体呈现大规模开发、远距离传输、高电压等级集中接入为主,分散接入为辅的特点;光伏发电接入电网呈现出大规模集中接入与分布式接入并举的特点。风能和太阳能丰富的地区往往是我国电力充足的区域,因此风能的大规模开发必须通过电网在全国范围内优化配置。但风电和光伏发电都具有随机性、间歇性,显著增加了电网电压和功率控制的难度。另外,风电机组缺少支撑电力系统安全稳定运行的控制性能,容易导致大范围风电脱网并引发后续电网稳定问题,解决这一问题需要毫秒级控制。

(2) 实现发电与用电的互动。电网的基本特征是发电与用电的平衡。从终端用户的角度讲,用户可以通过智能电力终端获取到电网的运行参数(比如电力的成本,自己各种设备的用电量),从而对自己的电力使用情况进行调整。而对于电网系统来说,则可以根据用电设备的用电信息构建精确的负荷模型,有效地提高供电效率。传统电网的建设基于发一输一变一配一用的单向思维,大量冗余造成浪费,智能电网可以靠与负荷互动来削峰填谷和减少热备用。如果测量和通信问题(指令下行仅数十毫秒)得到解决,通过控制达到瞬间平衡,那么迄今靠“试探”来达到平衡的各种稳定措施都应该重新考虑。

(3) 保证电网安全、稳定和可靠性的同时提高设备利用率。由于电网系统高度耦合,调度控制不当,单一故障可引发连锁故障,甚至引起大面积停电事故

和设备损坏，从而导致不可估量的直接和间接损失，故电网系统对于可靠性的要求非常高。智能电网的智能调度是要在保证安全可靠的基础上解决广域信息的采集、传递、分析和处理问题，使过去只能靠加大保守性来换取可靠性的经典难题得到解决。

2.4 耦合的信息流与能量流

为了满足上述架设目标，需要电力物联网的计算模块和物理模块能够有效协同。电网中的信息流与能量流紧密相关，相应的数据信息网络与能量传输网络因此相互耦合。较之传统电网，智能电网由于新能源和储能单元的加入，一方面能量流更加多样化，另一方面信息流的密度更高。图 2.1 展示了电网的各个环节以及智能电网与传统电网之间的异同。

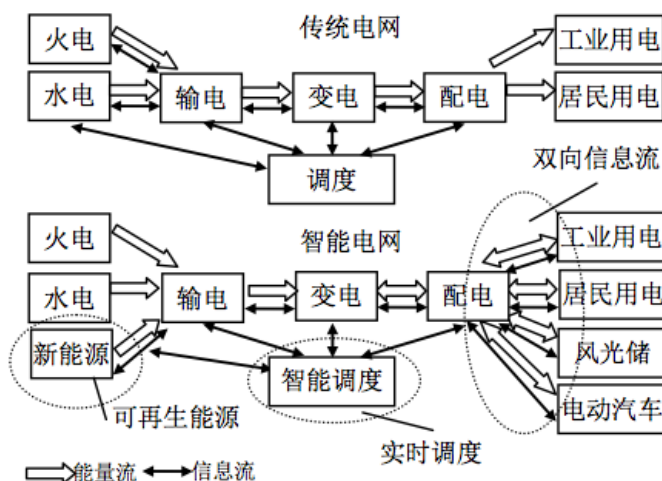


图 2.1 传统电网和智能电网区别示意图[Cao2013]。

2.5 智能电网研究现状及挑战

2.5.1. 智能电网国内外研究现状

美国电力研究院(EPRI)和国防部(DoD)于 2001 年启动了 CIN/SI 项目[Amin2005]，提出了为建立一个高鲁棒性，高适应性，控制可重构的网络化电力系统及基础设施而开发建模、仿真、分析及综合工具的目标，2001 年 6 月的《Wired》对其进行了介绍，这是较早提及构建智能能源网络设想的文献。在此之后，美国电

力研究院启动了 IntelliGrid 项目并于 2004 年发布了 IntelliGrid 体系架构 [WuJY2010], GE、思科、朗讯等多家公司参与到该项目的研发当中。该项目旨在集成电力系统中能源系统和控制信息系统,从电力信息系统和服务模型两个角度对如何构建智能电网给出实施步骤和技术引导。2003 年美国能源部发布了电网 2030 蓝图[GRID2030]并于同年牵头成立了 GridWise 联盟,该联盟旨在推动传统电力系统和信息技术的结合,构建新型智能电网。目前成员包括 IBM、斯科、西门子、GE、微软、三星等全世界 140 余家涉及能源和信息领域的公司企业。2008 年 3 月,美国 Xcel 能源公司宣布在科罗拉多州 Boulder 建立智能电网城市试点[NGR2009],目前 Xcel 公司在 Boulder 安装了 23000 台智能监控设备,为用户提供更加便利稳定的电力供应并帮助用户节约用电成本,但这一项目由于投资较大受到质疑。2011 年 5 月,美国在夏威夷毛伊岛(maui)建立了一个新的智能电网试点。总体来看,美国的智能电网技术发展侧重通信技术和控制技术与电力系统的融合,同时强调终端用户和电网系统的交互。美国能源部 2009 年智能电网报告指出构建智能电网系统应从输电系统、分布式能源、配电系统、信息网络、管理和金融环境六个方面开展[SGSR2009]。

欧洲智能电网的构建计划缘起于 2004 年,在第一届国际可再生能源和分布式能源一体化会议上,产业相关人士和研究界提出了建立欧洲未来电力网络技术平台的设想。2005 年在欧盟委员会的支持下欧洲成立了智能电网欧洲技术平台,为 2020 年及之后的欧洲电力网络发展提供规划。该组织于 2006 年发布了欧洲智能电网的设计蓝图[VS2007],提出了智能电网必须包含灵活性、可接入性、可靠性与经济性四个目标,其中可接入性部分特别提到可再生能源和高效低碳产能的接入。2008 年底该组织发布了欧洲智能电网战略发展规划并于 2010 年 4 月发布了最终版本[SDEENF2010],将欧洲智能电网的发展按优先级划分为六个等级,优先级最高的是优化电网的运营和使用,其次是优化电网的体系结构,第三级是整合分布的间断电力产能,再次是信息和通信技术,第五级是主动配电网,最后是新市场、用户及能源效益。所有六个等级的目标将在 2020 年前后完成,其中完成第一阶段目标(即优化电网运营和使用)在 2008-2012 年进行,解决分布式环境下电网的运营、安全和以市场为导向的能量流控制问题。

日本于 2009 年 4 月公布了“日本发展战略与经济增长计划”,其中包括了太阳能发电并网、未来日本智能电网实证试验、电动汽车快速充电装置等与智能电网密切相关的内容。日本电气事业联合会在 2009 年 7 月表示,将全面开发

“日本版智能电网”。韩国在 2008 年发布了“绿色能源工业策略”，推出了“韩国版智能电网”设想。

在我国，2009 年 5 月国家电网公司提出了我国智能电网的发展规划，分三个阶段推动我国智能电网的建设并计划于 2020 年建成统一的坚强智能电网。提出了“建成以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强电网为基础，以信息化、自动化、互动化为特征的自主创新、国际领先的现代电网”的总体目标 [NSGFR2010]。国网公司定义的我国未来智能电网将包含以下 8 个特征：具备强大的资源优化配置能力；具备良好的安全稳定运行水平；适应并促进清洁能源发展；实现高度智能化的电网调度；满足电动汽车等新型电力用户的电力服务要求；实现电网管理信息化和精益化；实现电力用户与电网之间的便捷互动；发挥电网基础设置的增值服务潜力。

华北电网公司于 2009 年 4 月公布了“华北电网 智能电网建设规划”，2010 年 9 月河北廊坊新奥高尔夫花园小区建成了我国第一个智能电网试点小区。南方电网公司 2008 年完成了广域阻尼控制系统，是世界首例已成功工程实施的广域闭环智能控制。该系统基于由 PMU 单元组成的广域监控系统 WAMS 实现了自适应的广域闭环控制。截至 2009 年我国在东北、华北、华中、江苏、华东、河南、云南、贵州、广东、南网各处投入了 1000 多处 PMU 节点，建立了 10 多个 WAMS 中心站，基本覆盖 500KV 变电站和主要发电厂，超过美国在该方面的进展。

高校方面也有多家单位正在开展智能电网相关领域研究工作，如清华大学韩英铎院士率领的团队在广域电网监控方面的研究方面取得了一定成果，帮助南网解决了广域阻尼控制工程中的关键技术问题，与四方集团合作提出了基于广域信息的电力系统安全预警、防御和控制系统构建方案。天津大学余贻鑫院士率领的团队在分布式发电功能系统方面的研究取得了一定的进展，提出了将太阳能、风能、小型水能等分布式发电功能系统以微网形式接入大电网的技术思路，用于提高能量传输效率及电力传输稳定性与可靠性，提高电能质量降低成本。

总体来看，目前国外智能电网研究侧重于分布式能源的接入和发电用电侧的互动，我国智能电网的研究工作侧重于大电网系统的信息获取与稳定控制，这与我国电力网络耦合性强的特点有关。

2.5.2. 智能电网应用现状及挑战

现有电网信息系统(电力二次系统)主要指电力调度自动化网络及其构成的能量管理系统 EMS、配电网管理系统 DMS 和广域监控系统 WAMS。能量管理系统主要包括数据采集监控系统 SCADA、自动发电控制系统 AGC 及电力状态估计系统等;配网管理系统主要包括配电自动化系统 DAS、地理信息系统 GIS 及需求侧管理系统 DSM 等;而广域监控系统则由同步相角测量单元 PMU 构成,实现对电网主要数据的实时采集。其中 EMS 和 DMS 系统均依赖于远程控制单元 RTU 及其构成的数据采集监控系统 SCADA,其主要问题是 SCADA 系统的数据采集时间过长,达到秒级,无法满足实时性要求高的应用如电网广域控制、能量调度等。WAMS 系统的响应时间虽在百毫秒量级,但 WAMS 系统依赖于电力专网构建,投入成本较高,目前国内 110KV 电压等级以下无 PMU 节点部署。此外,现有电网信息系统只增发配电场站、大功率用电设备进行数据采集和控制,无法获取负荷的实时信息,能量调配还基于离线预测。这样就造成了现有电力网络面临的四个主要问题:一是电力系统重要参数随机、时变、不可观,造成电力系统预测和调度困难;二是输电线路的真正输电极限未知,往往靠大的保守度换取可靠性,造成线路利用率低;三是对于远距离输电中的故障无法准确获知故障信息,如故障地点和严重程度,往往采取试探办法应对故障,造成设备大量冗余;四是电力系统有功无法存储,无功无法动态平衡,负荷无法互动,热备用造成浪费。

为了解决以上问题,需要增加大量的传感设备,如智能电表、PMU 单元等,而传感设备的增加意味着实时数据量的增大,解决大数据量下的电力系统数据实时传输和处理则需要利用先进的信息、通信、网络 and 计算技术,这正是智能电网信息系统需要解决的问题。

2.6 智能电网信息体系架构

2.6.1. 智能电网组成

智能电网信息系统的体系结构,如图 1.X 所示,主要包括智能电网信息系统基础设施、智能电网信息系统支撑平台与智能电网信息系统应用体系三个部分。

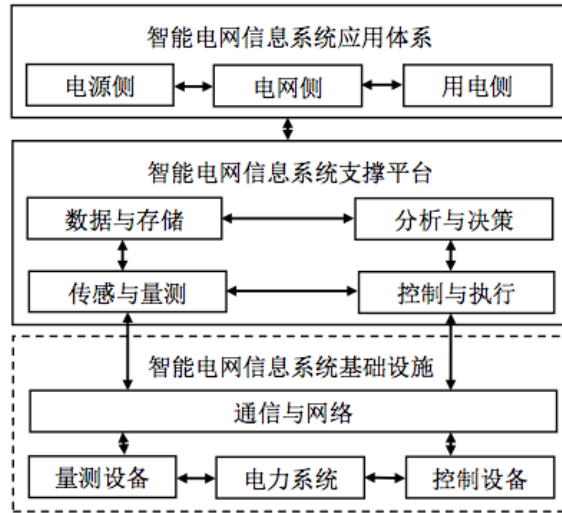


图 2.2 智能电网信息系统体系结构示意图[Cao2013]

智能电网信息系统基础设施主要指构建智能电网的硬件基础,而智能电网信息系统支撑平台主要指构建智能电网的软件基础架构,在此之上则是实现智能电网建设目标的各类应用。下面将以此分别对上述三个平台进行阐述。

2.6.2. 基础设施

智能电网信息系统基础设施是构建智能电网的硬件基础。包括:

- (1) 电力系统各主要环节控制和量测设备
- (2) 电力系统通信网络
- (3) 智能电网上层应用网络

2.6.2.1. 电力系统控制和量测设备

首先简单介绍电力系统的组成,电力系统主要由发电、输电、变电、配电、用电和调度 6 部分构成[NSGFR2010]。发电环节包括传统的水电、火电及新的核能、风能、太阳能发电,针对发电环节的控制主要有面向发电机的频率调节、电压幅值调节、同步相位及有功无功功率调节,发电机的输出电压一般在 11 至 35KV 范围内。输电环节将电网系统中的主要发电机和负荷中心连接在一起,构成电网系统的主干网络,通常运行在最高电压等级(如 220KV 以上)[KUNDUR94]。常用的输电技术有高压直流输电和柔性交流输电。变电环节完成电力的二次分配过程,连接变电站和配电站,一些大型工业负荷可能会直接接入变电系统。变电系统

的电压等级一般在 69KV 至 138KV 之间[KUNDUR94]。通过对于变电站的变压比和无功补偿设备, 电网系统可以对电网的无功功率和电压进行控制[GuoPY2001]。配电环节最终完成电能到个人用户之间的转换, 配电系统分为一次配电系统和二次配电系统, 一次配电系统主要供应小型工业用电, 电压等级在 4 至 34.5KV, 二次配电系统则用于居民和企业用电, 电压等级在 120V 至 240V 之间。

电力系统量测设备是构建智能电网的基础, 智能电网的实现依赖于传感器的应用和部署, 目前智能电网中的传感器包括电网运行维护量测系统和个人用户量测系统两类。其中电网运行维护量测系统主要用于采集电力系统单元如输配电线、电厂、电动机侧的电气信息, 常用的如 SCADA 系统的 RTU 单元和 WAMS 系统中的 PMU 单元。而个人用户量测系统主要用于测量个人电力使用情况, 如智能电表。智能电表(Smart Meter)的主要功能在于通过获取用户各项不同用电设备的用电数据, 并结合电网运行的情况进行分析, 给用户提出省电节能的建议, 信息流双向传递。智能电表应该具有如下功能[SAIC2006]: 双向通信; 自动数据采集; 断电管理; 动态计费管理; 需求响应用于负载控制。

2.6.2.2. 电力系统通信网络

1. 电力主干通信网

智能电网主干通信网组网方式可以分为两类[Shahraeini2011], 第一类是电力网络和信息网络结合的构架方式, 即通信载体本身是电力网络中的元素, 包括基于电力线的通信 PLC(power line communication), 宽频电力线传输 BPL(broadband over power line), 光纤架空地线复合缆 OPGW(optical power ground wire)及全介质自承式架空光缆 ADSS(All Dielectric Self Supporting)。第二类是智能电网信息网的构架与电力网络分离, 即采用额外的网络构架电力系统信息网。而这种模式下也存在不同的信息网构架方式,大致可以分为三种[Ghassemi2010], 即采用光纤, 无线信号及租用带宽。目前比较通用的做法是主干网络采用光纤搭建, 边缘网络利用无线方式进行传输。

采用电力网络元素构建信息网的模式有利于节约成本,但容易造成电力系统和信息系统互相耦合, 电力网络的故障将导致信息网络的故障。而分离模式则可以解决上述问题, 使智能电网信息网构架更加自由, 但分离模式下信息网必须另

外选择传输载体，需要在成本和传输性能上进行平衡。特别是电力设备分布范围广，一些偏远地区不具备构架光纤或无线网络的条件，需要额外传输方式，已有方案比如基于认知无线电 CR(Cognitive Radio)[Ghassemi2010]的传输构架模型，认知无线电的好处在于能从特定区域的频段中找出适合通信的空白频谱，在不影响已有通信系统的前提下利用传输带宽。IEEE802.22 协议定义了空白频谱搜寻方式。目前 802.22 协议已经在电视频谱中得到了部署以通过 CR 技术利于电视空白带宽，因此可用于在偏远地区构架信息网络。

已有的电力系统网络通信协议包括 IEC60870、IEC61850 及 IEC61970 协议组，由于上述协议组主要增对不同类型的数据网络而构建，因此本节不做描述，在第 2.6.4 节中再进行说明。

2. 智能电网通信网络主要指标

智能电网通信网构建最主要的两个指标是网络的稳定性和网络延时。不同的网络构建方式必然导致不同网络特性，如何选取智能电网通信网的构建方案是智能电网研究领域的一大重要问题。

探讨智能电网网络延时及稳定性问题有两个思路，一是从网络拓扑及协议本身的角度出发进行研究，如文献[Chenine2009, Chenine2010]研究了在分离信息网构架模式下采用专用带宽和共享带宽模式下的网络性能及其影响因素。二是从信息论的角度出发研究智能电网的传输性能，如针对智能电网无线通信所需的信道容量以保证安全通信的需求的分析[LiHSH2011]。此外，还有文献从控制系统角度入手分析了电力系统通信延时对控制性能的影响[HeFY2009]。

文献[Chenine2010]基于 TCP/IP 搭建了智能电网 WAMS 和 WAMC 模型，并分析了在共享带宽模式下加入背景噪声和 QoS 机制后的网络延时和丢包情况。同时还针对共享带宽模型下不同带宽的情况进行了比较。由于专用带宽部署的成本制约，专用带宽往往不能很大，而在这种情况下采用共享带宽模型往往能获得更大的信道容量，也即意味着更好的传输延时性能，但问题在于共享带宽模型下延时的稳定性受网络条件的较大影响，如果背景噪声比例高，则网络延时和丢包都会迅速上升。目前我国智能电网采用的是专网构建模式，但由于成本限制，仅限于 220 千伏及以上电压等级。如何在共享带宽网络情况下保证传输的实时性和稳定

性将是一个难点。

文献[LiHSH2010]针对个人用户量测系统提出了一种基于压缩传感技术的智能电表量测系统模型,采用无线接入的方法,讨论了不同信噪比和不同传感器数量下量测系统的时延特性。

文献[Wang2010]则针对电网运行维护量测系统提出了一种基于矩阵奇异值分解的量测系统模型。通过分析电网连接的耦合层度来判断哪些数据是需要区域之间进行传输的,以降低系统对于网络的压力。

智能电网通信传输研究与传统信息论研究主要的主要区别在于系统的动态性较强[LiHSH2011],而智能电网传输通信难点在于其对于网络延时大小及时延的稳定性要求较高,传统的电网通信控制系统如 SCADA 系统面临的主要问题就在于延时过大,如何根据物理条件的限制在成本和性能之间进行平衡,也是未来智能电网研究的主要难点。除此之外,如何保证智能电网数据信道的保密性和安全性也是问题。

2.6.2.3. 智能电网上层应用网络

随着分布式发电和储能技术的推广,从电能供应和使用的层面来看,电网的自组织特性会加强,在局域范围内电网表现出自产自销的特点。比如未来的用户使用的电能可能一部分来自大电网的供给,而另一部分来自其附近的新能源产生的电力。这种模式下传输和配电的损耗将降低,且有助于减轻大电网的负载。而这种自组织的电力供应网络,其网络模型与内容分发网络 CDN (Content Delivery Network)一致[Keshav2011],电网中也可能产生类似于互联网 cache 和 p2p 的电力供应模式,即通过混合动力汽车 PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)和电动汽车 EV 来充当 cache[Abe2011],该想法并不新颖,在 2004 年便有类似的想法被提出[Arulampalam2004]。所以我们认为智能电网上层应用网络可利用覆盖网技术及信息中心网络技术进行构建。

覆盖网(Overlay Network)[Clark2006]是解决当前 TCP/IP 架构互联网通信的一种虚拟网络的思想。通过在现有通信基础框架上部署实现一组节点的集合,有助于改善 TCP/IP 网络上的通信可靠性与服务质量 QoS。覆盖网可针对智能电网应用的多样性提供网络通讯基础支撑。例如微网系统中的发电负载平衡问

题便可利用 P2P 模型解决[Deconinck2010, Beitollahi2008]。借助 P2P 技术在分布式资源发现方面的算法,系统可以较快获取各节点用电和发电的数据,从而进行调配。如果在节点描述中加入地址等地域信息,则系统还可根据就近供给的原则,减少输电损耗。如文献[Deconinck2010]描绘了一种基于代理的微网输配电调配模型。除此之外,p2p 技术在电力计价系统,智能保护系统,智能卸负荷等多个方面均可得到应用[Beitollahi2008]。覆盖网技术还可用于提高智能电网的安全性能和时延性能。通过设置安全集线器(hub),数据集中器可以通过认证等方式选取安全数据转发节点[Budka2010]。且采用覆盖网技术有助于提高网络整体的可靠性,不宜产生单点失效问题[Andersen2003]。

信息中心网络(Information Centric Networking, ICN)是当前未来互联网体系架构研究的重要成果之一,基本思想是将信息对象与终端位置剥离,通过发布/订阅范式(Publish/Subscribe Paradigm)来提供信息多方通信和存储等服务。目前已有将 ICN 用于智能电网方面的探讨,如[Deconinck2009]中提出了基于信息中心网络的分布式电网的体系架构,给出了信息对象的详细定义与匹配,进行电力的配电与耗电的信息交互。文献[Kim2010]提出了一种基于适用于智能电网的 Push/Pull 的信息中心网络体系架构,并重点研究了该体系架构的安全性。而 LoCal 系统[Katz2011]也可以看成是信息中心网络进行智能电网创新的例子。LoCal 基于分层架构,通过传感来获得用电信息,通过执行以影响组件设施中的能耗,根据传感器的输入信息作出决策,并将结果输出到执行器,信息在多个传感/执行/决策制订实体间分发。总体来看,覆盖网的可靠性较好,网络可扩展性强且自组织特性明显,符合当前智能电网的发展需求,而信息中心网络 ICN 则是未来智能电网发展的一种趋势。

智能电网信息系统应用体系虽然大体上分为电源侧、电网侧和用电侧应用,但均构建在统一的支撑平台之上,同时之间存在较强的相互作用。以电网为核心实现发与用的互动主要是在应用层面上反映出来。

2.6.3. 支撑平台

智能电网信息系统支撑平台可被认为由四大环节相互作用组成。以下对智能电网信息系统支撑平台的四个部分进行具体阐述。

2.6.3.1. 传感量测系统

智能电网信息系统传感与量测的主要功能是在量测设备的基础上进行信息采集和汇聚，为上层的数据存储、计算、分析和决策奠定基础。智能电网中的量测系统包括电网运行维护量测系统和个人用户量测系统两类，如图 2.3 所示：

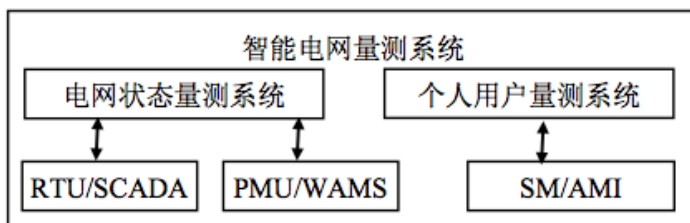


图 2.3 智能电网量测系统分类[Cao2013]

电力系统状态估计是 EMS 系统的基础，对维护电力系统稳定运行起关键作用，目前，实际电网存在两套用于电力数据量测的系统，一套是基于 RTU 单元 [Smith1993] 的 SCADA 系统 [Daneels1999]，一套是基于 PMU 单元 [Phadke1993] 的 WAMS 系统 [Song2011]。其中 SCADA 系统是于上世纪 90 年代逐渐推广使用的量测系统，RTU 单元具有量测、通信、控制等多种功能，该量测系统被广泛应用于能量管理系统(EMS)中，但其主要不足是数据采样频率较低，无法及时获取电网运行的动态信息；各 RTU 单元无同步时钟，获取到的数据不同步，因此 SCADA 系统无法准确及时反应电网系统运行状态。WAMS 是由同步相量测量单元 (Phasor Measurement Unit, PMU)、高速数字通信设备、电网动态过程分析设备共同组建而成的综合系统，能够为各种管理以及分析软件(如能量管理系统 EMS)提供实时数据 [LuC2008]。相对于 SCADA 系统，基于 PMU 的 WAMS 系统 [DingJC2010] 有三个特点：增加了相角测量；具备 GPS 授时单元，测量精度更高；测量频率更高，在几十毫秒量级。目前，各国已逐步开始推广 WAMS 系统用于取代传统的 SCADA 系统 [Phadke2008]。随着 WAMS 系统的推广，业界对 WAMS 的研究也越来越深入。如文献 [QiuMK2011] 中讨论了 WAMS 中的节点中的安全策略选择问题，能够使得节点既能有效工作，同时也能够使得节点耗能最少。而文献 [WangZF2007] 中提到了 WAMS 在各种突发事件中(如大规模断电等)重要作用，以及以其为基础的预警分析的应用以及在通讯以及安全上面对的挑战。此外，电网状态量测往往针对大型电网组件或负荷，局域范围内数量相对有限且量测单元的

性能较高,但系统往往采用集中式的管理模式,所以导致系统中心节点负荷过大,带宽制约因素明显。

自上世纪 90 年代起,智能抄表设备(AMR) 逐渐开始应用试点,但 AMR 仅仅完成了数据的远程获取和计费功能,并不具备对用户用电行为进行调控的功能,信息流单向传递。而由智能电表由 SM 构成的高级量测体系(AMI)则可实现信息流的双向传递,智能电表及 AMI 体系是构建智能电网的基础。相对于电网状态量测,个人量测系统表现为在小区域范围内数量大,可扩展性要求高;同时对于数据的实时性和安全性有要求。

智能电网量测系统是智能电网实现的基础,但智能电网量测系统作用的发挥依赖于数据分析处理系统。下面本文将对智能电网数据表示与存储构架进行综述。

2.6.3.2. 数据表示与存储系统

(1) 智能电网数据表示

由于电网系统设备是由多个不同的厂家共同生产的,如何描述电网系统本身并且统一管理这些异构设备产生的数据是实现智能电网信息网的基础,即电力系统数据表示的问题。电网系统的表示包括电力系统采集的数据的命名,数据的定义,设备的描述,设备间关联关系的表述,通信模型的表述等多方方面内容。同样,智能电网的数据表示可以划分为电力系统数据和个人用户数据两类,如图 2.4 所示:

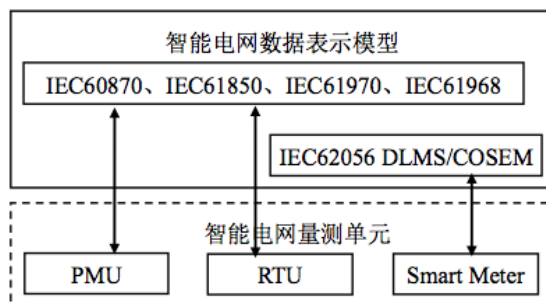


图 2.4 智能电网数据表示模型[Cao2013]

目前,电力系统数据描述已有的常用模型标准包括 IEC60870 协议组, IEC61850 协议组, IEC61970 协议组以及正在制定的 IEC61968 协议组。其中 IEC60870 协议组是较早期(1990-1995)制定的电力系统自动化协议组,其通信模型和数据模型适用于采用专用通信线路搭建的点对点通信网络[ZhaoZK2000, TanWS2001],目前正在逐步被替换。IEC61850 协议组是描述变电站内通信网络和系统标准体系的协议组,于 1999 年发布[IEC61850]。采用了面向对象的数据对象建模方法,实现了对数据的自我描述,传输的数据自己带有说明文件,使得数据传输时不需要再实现进行规约和转换,从而具备了面向服务的特点,而 IEC60870 协议组下数据传输时需要收发双方事先对数据库进行规约[TanWS2001, DouXB2006, ZhaoHY2006]。IEC61970 协议组及 IEC61968 协议组均针对电网调度管理系统,其中 IEC61970 协议组主要面向 EMS(能量管理系统)。而 IEC61968 主要面向 DMS(配电管理系统),上述两个协议组均采用了通用信息模型 CIM[ChenJ2010, Bi2007, ZhangR2011]。CIM 模型也是采用面向对象的方法描述电网模型及其数据,可用 UML 图来表示电力系统组件间的继承、连接关系及资源属性,同时 CIM 模型还定义了 CIM/XML 文件,使得 CIM 模型可通过 XML 进行传递,这样不同的应用系统直接就可以相互通信,因此 CIM 模型可用于电力系统的应用集成。同时, CIM 还具有元数据描述管理的功能,可用于电网数据数据仓库的建立。采用 CIM 模型对电力系统及其数据进行建模是构建智能电网信息网的趋势,文献[ChenJ2010, Bi2007, ZhangR2011, WangB2011]均提出了基于 CIM 模型的智能电网信息共享平台设计方案。

针对以智能电表为单元的个人用户数据,已有数据模型有 DLMS/COSEM 模型[Mahrssi2009],其对应的国际标准为 IEC62056 协议组 10。DLMS 对智能电表数据的读取、计费 and 负载控制进行了规约,而 COSEM 则涵盖了 DLMS 规约的传输与用户层规范。

(2) 智能电网数据存储模型

智能电网具有可靠性要求高和数据海量性的特点,而这这就要求智能电网数据的存储必须设置必要的冗余和备份机制;同时电网数据的存储模型必须满足较快的查找和处理时间的要求;而由于智能电网应用的多样性,不同应用实时性要求也不相同,由此智能电网的数据存储也可分为在线数据和实时数据两种模式。

目前主要存在的四种智能电网数据存储方案 [Martinez2010]。第一类方案为多个数据集中器,单一控制处理节点加上利用关系数据库的集中存储。其中每个数据集中器负责从一定数量的量测设备中获取数据。目前我国电网系统中的广域控制模型与之类似。第二类模型与第一类模型类似,但将集中式存储拆分为分布式数据库存储。第三类模型取消了利用关系型数据库的存储模式,提出了基于 XML 的<关键字,值>模型,并且采用类似于云计算中 MapReduce 的算法对数据库进行操作。第四类方案采用分布式文件系统与数据库结合的方式存储数据,即数据库中存储的不是原始的电网数据,而是数据的索引,原始数据以文件的形式存在于数据集中节点上,该方式类似于搜索引擎对网页的搜索。文献 [Martinez2010] 结合智能电网中家庭电力数据的存储和账单计算这一应用对上述四类模型的并发处理能力和处理时间进行了仿真并给出了结论。其中处理能力主要指控制节点能接入的集中器节点个数,而处理时间包括数据写入数据库的时间以及主要针对家庭月账。

文献 [LiuJS2011] 从数据管理的角度对智能电网中的数据模型进行了分析,将智能电网数据模式抽象为历史模式,实时模式和未来模式三种模式对电网数据进行建模。而不是按照应用类型对数据存储进行建模管理,因为应用类型数量不可预期,会造成数据统一管理的困难。其中实时数据管理主要针对实时数据分析的需求,利用内存数据库进行存储。历史模式主要针对历史数据的存储、查找,这部数据的特点的数据量大,因此可采用时序数据库进行存储。而未来模式主要用于存储未来的可能发生的设备的变化,例如增加发电机等。在此基础之上,文献 [LiuJS2011] 提出了一个基于数据模型子集的通用数据接入构架,使得上层应用可以按需获取和管理异构数据库。文献 [LiZ2010] 提出了一种在量测系统 AMI (Advanced Metering Infrastructure) 和数据管理系统 DMS (Data Management System) 之间的统一数据集成中间层 MDI (Meter Data Integration)。对已有 AMI 系统的数据格式和传输协议进行了分析并讨论了 MDI 系统的难点及设计构架。

数据存储模型的选取的不同将导致查找、获取和数据处理模式的不同,同时也会引起系统响应时间的区别,如何为智能电网选取合适的存储模型,将是未来智能电网研究中的一个重要方向。

(3) 云计算技术用于智能电网数据存储

从系统实现上来看, 物联网系统的搭建依赖于云计算平台[Hwang2011], 云计算平台为物联网应用提供了计算和存储资源。而作为物联网的一个典型实例, 云计算技术与智能电网的结合是必然趋势。如文献[Rusitschka2010]提出了基于云模型的数据管理和处理模型, 将智能电网数据分布式存储在电网的各个节点, 然后以服务的形式将数据提供出来供应用访问获取。云存储有助于解决智能电网数据存储的海量性和可靠性问题。

OpenPDC11 是目前已经投入运行的一个智能电网数据处理系统, 其实现基于开源平台 Hadoop, 而后者是云计算技术中分布式存储的一种典型实现。该系统主要针对时间序列数据流, 即数据源为经过 GPS 授时的数据流。应用背景即为智能电网中的 WAMS 系统, 由于 WAMS 系统的采样频率为每秒 30 次, 当 WAMS 系统的子单元 PMU 数量增加时, 会产生大量的数据。目前该项目管理了北美东部约 120 个 PMU 的数据信息, 平均数据量约为每小时 1.5GB。截至 2009 年我国仅在 220 千伏电压等级以上电力系统部署的 PMU 单元个数已经达到 1000 以上, 再考虑个人用户实时产生的数据, 可以预见未来智能电网的数据量是非常巨大的。在这种背景下, 集中的数据存储模式将对网络造成巨大的压力, 采用分布式存储成为一种必然。同时由于电网稳定性的要求, 数据本身存在冗余备份的需求。云计算平台的分布式文件系统可以为此提供解决方案, 且有助于提高电网系统的安全性。

如何将云存储应用于智能电网还存在不少问题尚待解决。首先, 虽然已有文献[LiuJS2011, LiZ2010, Rusitschka2010]提及未来电网的存储模型, 但尚无较成熟的方案, 数据采用数据库存储还是以文件形式存储仍有争议。其次, 由于电网系统存在多样性的特点, 不同量测系统的数据格式并不统一, 例如不同厂家的 RTU 数据格式都不相同, 如何构建一个统一的数据模型也是需要解决的问题。此外失去时效性的大量数据需要迁移备份, 并且这种迁移是频繁发生的, 这种情况下保证存储系统的运行效率成为难点。另一方面, 由于某些应用对于电网数据的获取有时间限制, 但分布式文件系统的查找效率本身就是问题。

总体来看, 云计算的分布式存储平台和并行处理模型适合于未来智能电网分散性、可靠性、安全性和数据海量性的需求, 但依然存在很多问题亟待解决。

2.6.3.3. 分析与决策系统

智能电网投入实际运行后,面临的另一个巨大挑战就是海量数据的处理能力。由于智能电网既要满足个人终端用户与电网系统的交互需求,也要满足电网控制系统对于电网稳定性的控制需求,未来智能电网中需要海量数据处理技术的支撑的应用同样可分为两大类。第一类是智能电网稳定运行监控系统,即根据量测系统获取到的数据进行动态安全评估(dynamic security assessment DSA),保证电网运行的稳定性,以及电网系统出现故障后如何恢复系统。第二类是智能销售和消费系统,即通过实时电价自动平衡电能的供应和消耗,如微软开发的 Hohm 系统即面向该类应用及 Google 的 PowerMeter 系统。该类应用多与微网系统相结合,即新能源如风能、太阳能接入后,如何充分利用分散的发电资源。此外,考虑智能电网数据的海量性,智能电网分析决策系统与云计算技术的结合是未来趋势,因此本文认为未来智能电网分析决策系统构建如图 2.4 所示:

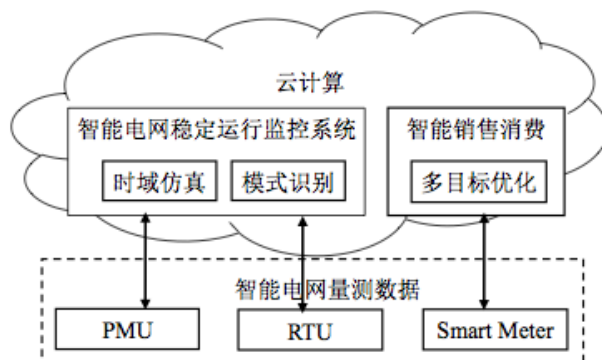


图 2.5 智能电网分析决策系统[Cao2013]

1. 智能电网分析决策需求

对于第一类应用,一是要解决电网稳定性的判定问题。电力系统的稳定性分为静态稳定和暂态稳定两类,其中暂态稳定描述的是电网出现大扰动后的鲁棒性,比如出现短路故障、短线以及发电机突然摔负荷等等,如 2003 年美加大停电事故。已有的电力系统暂态稳定评估方法(TSA)可以分为两大类[TongXY2009],一类是基于数学模型的方法,包括时域仿真法,即通过建立电力系统各元件的微分方程,再通过数值方法求解各状态量的时间特性;基于 Lyapunov 稳定判据的能量函数法;扩展等面积法以及动态安全域法。另一类是基于数据本身的模式识别方法,包括人工神经网络、支持向量机、遗传算法等多种方法。其中第一类方法面

临两个主要困难,一是实际电力系统规模很大,往往最后变成几千阶的微分方程求解,无法满足实时性要求;另一方面,由于电力负荷的模型本身就是不可知的,现有的分析方法往往采用估计和经验的方法给定负荷的参数[ZhangHB2003],不精确,如何对电网负荷参数进行在线辨识也是未来智能电网亟需解决的问题。而第二类方法的同样面临当系统规模较大时,数据集数量过大,如何进行特征选取和压缩目前尚无统一的模式。另一方面,在获取到电网故障信息后,如何迅速重新配置电网结构使得电网系统重归稳态是第二个需要解决的问题。已有的方法包括启发式算法、专家系统、数值计算、软件仿真及多级代理等[Nagata2002]。其中除多级代理之外的系统均基于集中式架构建立,当系统规模较大时会出现计算瓶颈。

通过智能电表获取到用户用电数据后,智能电网的另一项功能是对用户用电行为进行预测和建议,充分利用分布式能源发电能力并通过电力使用时间的迁移降低峰值使用时间段电力系统压力,进而提高电力系统运行效率。其核心思想是利用实时电价调节用户行为[Samadi2010]。该类应用通常分三步实现[Molderink2010, Bakker2010]:

(1) 根据用户数据构建行为模型并进行预测

(2) 中心处理单元获取用户数据进行全局优化,属于多目标优化问题,例如对于单个用户来说优化目标是最小费用,而对于电力系统来说优化目标是电力系统运行稳定性和效率。

(3) 实时控制系统控制电器开关已有的实现方案多基于多级代理(agent based),每级代理进行出价(需要/发出的总电力及价格),再逐级汇总由最高级代理进行优化,如文献[Samadi2010]给出的实时定价算法。文献[Bakker2010]结合电冰箱的用电控制实例进行了说明。据[Molderink2010],该类优化问题属于 NP 完全问题,因此多采用启发式算法求解 [Samadi2010, Molderink2010]。此外,如不考虑用户向电网中的送电的问题,则可以利用线性规划方法求解[Conejo2010]。

2. 云计算技术用于智能电网数据处理

由于电网系统规模大、节点多的特点,特别是针对智能电表得到的数据的实时规划和调度,将需要大量的计算资源进行分析处理,所以智能电网数据处理与

云计算技术的结合成为必然。

文献[Rusitschka2010]提出了基于云模型的数据管理和处理模型, 数据处理采用并行化处理的思路, 分别对数据子集进行并行处理再汇总处理结果, 文献[LiuJS2011]也提出了类似的想法, 上文提到的 Hohm 系统就是基于云计算平台 Azure 开发的。但采用云模型的不足之处在于其处理算法要求数据子集之间互不相关, 每个数据子集可以独立进行运算处理, 智能电网中的某些应用符合这种运算模式, 比如实时电价计算。但还存在一类应用, 需要跨区域的数据分析才能给出结果, 数据子集之间不能解耦, 如调度、发电负荷平衡、电网应急报警。这种情况下简单的云计算模型并不能进行处理。电网的物理特性是系统本身的关联性较强(电力系统之间存在电气连接), 也即意味着数据存在关联性, 是否可以改进并行算法, 降低传输和计算的资源消耗, 是未来智能电网研究的一个方向, 文献[Wang2010]提供了这一问题的思路。此外, 如何在松耦合系统模型下保证系统处理性能, 满足处理时限要求也是难点。

2.6.3.4. 控制与执行系统

智能电网包括电能的发、输、变、配、用等五个环节以及分布式新能源的接入和使用, 所以其控制系统在传统的厂站式控制系统上加入了额外的分布式能源发电(Distributed Power Generation Systems DPGS)控制系统, 总体构架如图 2.6 所示:

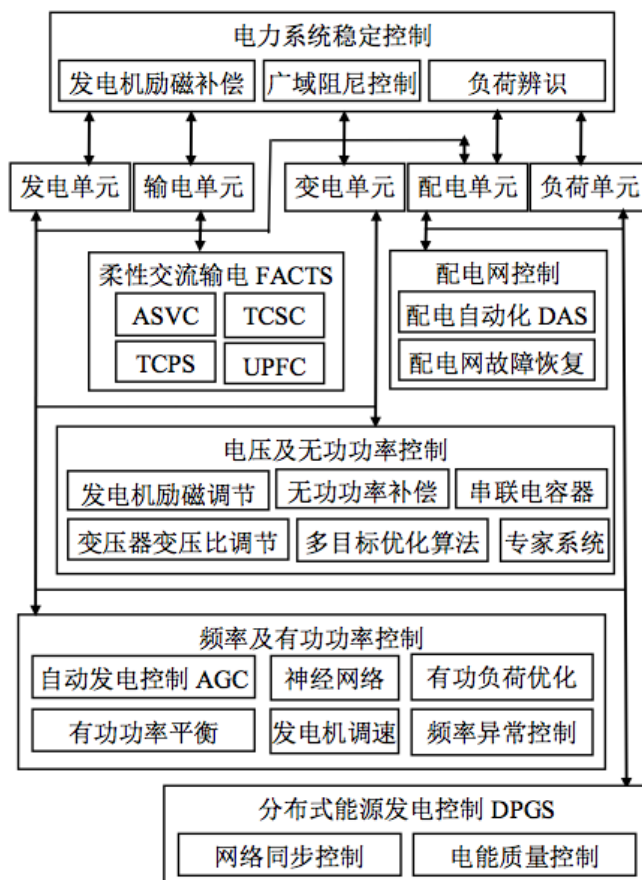


图 2.6 智能控制执行系统[Cao2013]

频率、功率、电压、相位、负荷是电力系统的主要参数, 电网系统频率下降、电压下降、发电机失步、过负荷都会造成电力系统事故甚至崩溃。传统的电力系统控制主要对以上参数进行调控, 具体包括稳定控制、电压及无功功率控制、频率及有功功率控制、配电网控制、柔性交流输电控制, 在新能源大量引入后, 分布式能源如何与传统电网结合是未来智能电网需要解决的重点问题, 因为新能源接入往往会给电网带来新的安全稳定问题[Blaabjerg2006]。在电压及无功功率控制方面, 已有算法包括。

优化问题求解的梯度类算法、牛顿法、二次规划法、线性规划法以及基于模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法及人工神经网络等多种方法。频率及功率控制方面, 已有算法包括经典的 PI 控制、鲁棒控制、神经网络、遗传算法及线性规划法等[LiuMX2007]。而配电网控制方面, 已有算法包括整数规划法、分支定界法、混合整数法、人工智能和启发式算法[LiuL2011]以及基于多代理系统的方法

[PangQL2011]。柔性交流输电控制主要基于静止无功补偿器 ASVC、可控串联电容器补偿 TCSC、可控移相器 TCPS 及综合潮流控制器 UPFC。

从系统构架上来看,传统电网的控制模式多采用集中式的构架[GuoPY2001, KUNDUR94]。所谓集中控制就是所有采集到的数据统一发送至数据中心进行集中处理并给出控制反馈,而分散策略指将大电网按区域划分,每个区域有自己的控制中心,控制中心之间通过共享数据实现对于整个系统的控制。从系统性能上来看,集中式控制往往会对主节点产生过大的处理压力和带宽压力,同时也容易造成单点失效问题,所以未来电网的控制结构会逐步向分散策略过渡;另一方面,随着新能源的引入,未来电网将是许多分散的微电网的集合,分布式控制的应用是一种必然[Chicco2010]。另外,分散式的控制模型下由于数据无需完全在广域范围内传递,对于减少网络延时和保证网络稳定性方面也可能产生积极作用,文献[Shahraeini2011]在信息网构架采用 OPGW 组网方法下研究了集中和分散控制策略下电网系统的延时和稳定性。从结果上看,分散控制的平均延时更小且方差更小,意味着网络的稳定性更好。

2.6.4. 应用体系

上一小节对实现智能电网的四个重要支撑平台进行了综述。为了实现智能电网的对于电力的稳定控制、能源的实时调配以及新能源的接入等目标,则需要构建于智能电网基础设施和支撑平台基础之上的应用体系。这里着重从发电侧、电网侧和用电侧三方面对智能电网信息系统应用体系进行介绍。

2.6.4.1. 发电侧应用

由于传统电网的发电控制问题已经在电力系统领域进行过多年的研究,这里暂不予涉及,而着重对新能源发电接入传统电网后的控制管理和能源调度问题进行综述。

1、新能源现状

由于传统化石能源的不可再生性及对环境造成的影响,绿色能源即新能源发电以及随之产生的微网系统正逐渐成为未来电网系统发展的趋势 [LiZC2010, Blaabjerg2011]。截至 2008 年,新能源占全球能源消耗的比例为 19%,而且这一比

例还在逐年上升[Singh2011]。自 2004 年至 2009 年间,全球新能源容量的增长速度在每年 10%~60%之间。文献[Singh2011]列出了至 2020 年世界各国新能源发电占电网发电容量的预期百分比,其中丹麦、瑞士的部分地区预计在 2030 年前用新能源发电完全取代传统能源发电。

2、新能源接入管理

广义上的新能源包括可分派能源(dispatchable energy)和不可分派能源(non dispatchable energy) [Smith2010],其中水电站、生物能和地热能均属于可分派能源,而风能、太阳能和潮汐能均属于不可分派能源。划分的依据在于可分派能源的能源供应基本是可控的,而不可分派能源的则相反,例如风力发电中的风的速度和时间是不可控的。可分派能源的接入管理与化石能源发电系统无明显不同,而不可分派能源由于能源供应的波动性,接入电网后会对电网系统的稳定性出现影响[Shafiullah2010]。因此,不可分派能源的接入管理问题将是未来智能电网发电系统的研究重点。目前,不可分派能源发电主要以风力发电、光伏发电和燃料电池为主。据 2009 年的统计数据[Singh2011],风力发电的容量增长比其余新能源发电系统容量之和还要多,全球风力发电装机总容量达到 160GW[Blaabjerg2010],而光伏发电则是增长速度最快的新能源发电系统。

光伏发电系统和风力发电系统的主要特点在于其能源供应的间歇性,因此会造成发电输出电压、频率的波动。而这种波动性在接入电网后会对电网系统的整体稳定性产生影响[Shafiullah2010]。这种发电电压和频率的波动性表现为两类问题:一类是正常发电期间由于能源供应波动造成的电能质量问题,如风速时大时小造成的电压不稳定;二是当能源输入不稳定造成的能量输出波动问题,如风力发电中风大风小时的风机的输出功率,极端情况下风力过小或风过大时为保护风力发电机会停止发电,即停止输出。为解决第一类问题,电力系统领域已进行了数十年的研究,目前已有的方法多基于电力电子器件的应用[Blaabjerg2010, Blaabjerg2011],通过在风力发电机和电网之间加入变流器(converter)、逆变器(inverter)及电容器组合等电力电子器件,以实现对于电压抖动、频率抖动、无功补偿和有功输出等发电系统关键参数的控制。例如风力发电机自上世纪 80 年代起已经经过了四五代的改进,早期的风力电机速度不可控,风机输出仅通过一个无功补偿环节就加入到大电网中,因此风力的波动直接会输入到电网系统中,而目前的可控变速恒频风力电机已可较好实现对风机输出的电能质量控制,详细信

息可参考文献 [Blaabjerg2010, Blaabjerg2011]。在电能质量控制方面已有技术包括机械开关电容 MSCs、基于可控晶闸管的静止无功补偿 SVCs 以及静止同步补偿 STATCOM [Jones2010, Blaabjerg2011]。在实现了对于不可分派能源控制的基础之上,对于不可分配能源接入的稳定控制运行监控则与上文论述的传统电力系统控制模型一致[88]。而对于不可分派能源发电间歇性造成的第二类问题,则更依赖于智能电网传感、量测、通信和数据处理环节的支撑。下图以风力发电为例描述了智能电网信息系统对于风力发电接入管理的作用:

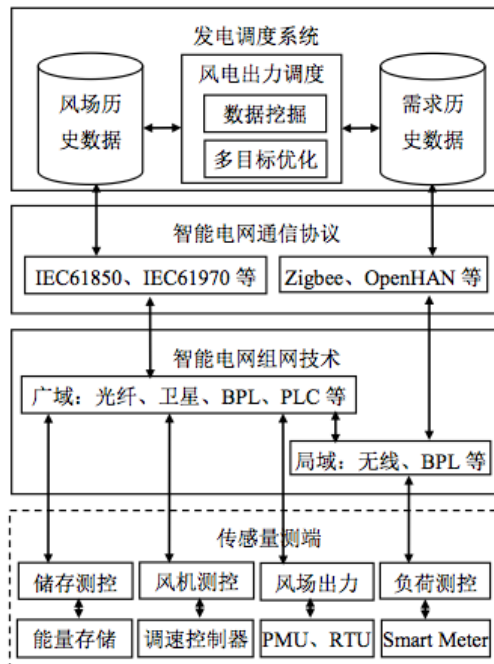


图 2.7 智能电网信息系统对风力发电的接入管理[Cao2013]

目前,为解决风力发电系统可能出现的输出不稳定问题主要有两条思路。一是通过预测风场所在地的风力输出信息,结合负载测的能源需求信息,通过与电能存储结合的混合新能源发电系统进行实时调度,以实现稳定的发电输出 [Shafiullah2010, Dagdougui2010, Spiecker2011]。但第一种思路需要大量的分布式存储设备与风电系统配套建设,成本较高。二是通过对于电网负荷的实时控制,平衡风力发电输出和负载功率需求之间的关系,在风机输出减少时减少负荷的使用 [Liyana2011],从而降低存储设备的规模,降低建设成本。以上两种思路的实现均依赖于是否能及时获取负荷和风场发电的实时数据,因此需要智能电网信息系统的支撑 [YuFR2011],如图 2.7 所示。用于分布式能源的数据获取的通信信息系统及

数据采集模型与传统能源系统保持一致[YuFR2011][Honeth2011]。而在数据存储方面,风力发电调度系统更依赖于从风场的历史数据和需求的历史数据中获取信息,进行预测[Shafiullah2010, Dagdougui2010, Spiecker2011],预测模型多基于统计学习和回归分析的方法及其他数据挖掘中的相关算法。目前分布式能源发电系统多与分布式存储系统结合建设[Smith2010, Barton2004, Shively2008],用于消除当风机出力过大或过小时对大电网造成的影响,即当风机输出功率不足时,从存储系统中进行功率输出;当风机出力过大时,将额外的能量通过存储系统进行平衡。从而保证风场始终处于高效运行状态。在获取到风场实时数据和负荷实时数据的基础上,结合历史预测信息,现有的调度系统可基于动态优化和随机模型对风场及其存储的出力进行调控,文献[Dagdougui2010, Spiecker2011]给出了这方面的示例。

3、储能系统管理

前节已经提到,储能系统与新能源发电系统通常协同建设以保证在新能源发电出力不能满足负荷需求时的电力供应。已有的储能系统包括电池储能系统 BESS(Battery Energy Storage System)、飞轮储能系统 FESS (Flywheel Energy Storage System)、超导磁储能系统 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)、抽水储能系统(Pumped Hydro Storage)、压缩空气储能系统 CAES (Compressed Air Energy Storage)、超级电容及电动汽车储能系统 V2G(Vehicles to Grid energy storage) [STYCZYNSKI2009, Smith2010, Coppez2010],例如文献[Dagdougui2010]就是采用抽水储能与新能源发电系统结合的实例。系统不同的存储系统能量转化效率、建设成本和适用模式都不相同,详细内容可以参考文献[STYCZYNSKI2009, Coppez2010]。储能技术及其接入控制系统本身就是智能电网的支撑技术,比如电池管理系统 BMS(Battery Management System)和功率变换系统 PCS(Power Converting System)都是目前电力系统研究的重点方向,该部分的内容和电力物理系统相关性较强,在此不做涉及。下面 V2G 系统为例讨论分布式储能系统系统架构。

V2G 是 Vehicles To Grid 的缩写,即通过电动汽车向电网供电,将电动汽车作为分布式微存储单元。当汽车运行时,电能从电网流向汽车;当汽车停止时,电能从汽车流向电网。同时结合电网能量的供需关系和价格调节手段,使得电动汽车在峰值使用时放电,在低谷使用时充电,起到削峰填谷的作用,提高电网运行效率[TuYY2011]。据统计,美国电力系统的峰值容量仅在 5%的时间内得到充分

利用[Shireen2010]。较之其余分布式存储系统，电动汽车储能有几个特点：一是由于电动汽车的移动性造成存储节点(停车厂)的存储容量可能发生变化；二是电动汽车需要完成汽车的功能，不能完全按照电网需求进行充放电，还需满足用户的使用需求[Soares2011],三是为了延长电池的使用寿命，需要根据电池状态进行充放电管理[Ota2012]。所以,V2G 调度的实现依赖于实时获取电动汽车电池容量信息，并根据用户的行为习惯进行预测,同时结合电网系统的需求实时调控电池的充放电[Soares2011]。其系统构架如图 2.8 所示:

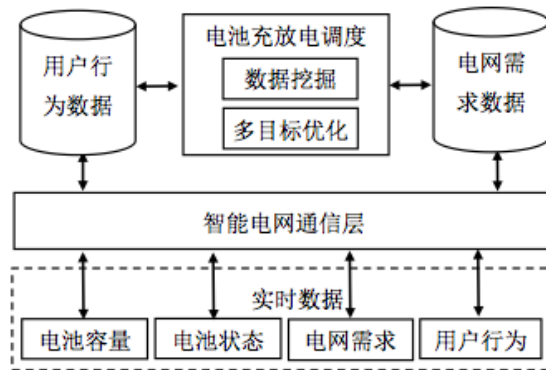


图 2.8 V2G 系统架构图[Cao2013]

目前，在 V2G 领域的研究主要从电力系统和用户的收益角度对电池的充放电控制进行优化建模，约束条件为电力系统的负荷需求、电池的使用限制(由汽车所有者制定)、充电站的电流容量限制(停车场)等[Saber2009]。已有求解方法包括粒子群算法 PSO(Particle swarm optimization)[Soares2011, Sortomme2012]、模拟退火算法 SA(simulated annealing)[Sousa2012]、动态规划法[Han2010]等。

2.6.4.2. 电网侧应用

电网侧应用包括：能源管理，即传统与可再生能源或其他新能源应用的并网融合等；在大电网的概念下对系统的实时动态系统进行监测、分析、控制与调度；保证电网侧隔离的安全等众多方面。其核心内容是大电网安全稳定分析问题及大电网智能规划调度问题，本节主要围绕上述两核心问题论述智能电网信息系统构架在电网侧的应用。

1、大电网安全稳定分析与广域监控

大电网系统的安全稳定性是限制交流远距离输电和输送能力的决定性因素之一，因此成为制约电网运行效率提升的瓶颈。中国发电资源与用电需求在总量和地域分布上的显著不匹配，使我国电网结构必然凸显出区域间互联、远距离大容量送电、交直流混合运行等特点，故而系统的安全稳定性更加受到了人们的重视。

目前我国电力系统的常用做法是按离线形成的稳定控制策略表实施控制 [Xia2005]，即当电力系统发生故障时，由稳定控制装置根据系统当前状态在策略表中近似匹配查找相应控制策略并实施。这种解决方案有维护不便，适应性差，计算量大以及匹配误差过大等明显缺点 [Zhou2000]。随着快速稳定分析方法的发展以及计算机与通信技术的水平快速提高，大电网在线稳定分析以及实时广域监控开始出现。未来的智能电网信息体系结构无疑可以提高电力系统状态数据获取的实时性，但在具体应用中遇到的问题依然很多，主要包括：提高交直流大电网在线仿真平台的计算速度和建模仿真准确度的问题；提高互联电网低频振荡和次同步振荡的监测能力和阻尼控制能力问题；协调直流系统与受端交流电网的保护与控制的配置，提高受端电网安全水平问题；依靠广域信息决策和协调多回直流的紧急功率提升和回降，改善大电网稳定裕度的问题；严重故障下大电网的智能解列控制和自愈恢复问题等。

解决以上各类电网稳定性以及实时控制问题需要智能电网信息支撑平台各部分间的有效配合。重点是电网信息数据的实时性、高密度及同步性 [Tan2010]。因此，通信和存储系统是智能电网安全稳定分析的基础。面向未来智能电网的广域监控系统体系构架图如下图 2.9 所示。

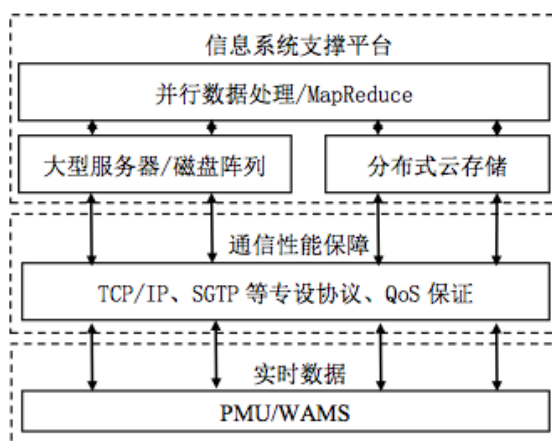


图 2.9 广域监控系统构架图[Cao2013]

一般的大电网广域监控系统通常是通过广域测量系统 WAMS(Wide Area Measurement System) 在同一时间参考系下获取大规模电力系统实时动态以及稳态信息。基于 PMU/WAMS 的新型广域阻尼控制是一个典型的网络化控制系统, 通信网络的传输延时、数据丢包、错序、不当采样率等会直接影响其控制性能, 甚至是系统的稳定性。前文已提及, 目前的研究主要面向针对智能电网特点的网络通信拓扑结构以及协议设计, 以及实时数据传输延时对智能电网广域监控效果的影响等。

智能电网基于由 PMU 等设备获取的大量实时数据满足广域控制等应用, 大多应用对数据的实时性要求很高, 若想达到很好的控制效果则需要将延时控制在 100 毫秒到 1 秒之内[NASPI2009], 而现在的网络通讯环境很难满足这一要求, 因此大电网的广域安全控制效果受延时影响较大。现有的方案是使用光纤作为网络通讯介质, 保证通信延时在可接受的范围之内, 此时影响控制效果的则是由该应用所需的数据处理, 安全性等策略操作造成的延时[Kansal2011]。但采用光纤通信的成本很高, 需要为电力系统架设专网, 不适于大面积推广, 随着 PMU 设备的大量推广, 获取的实时数据量也会大量增加, 如何利用现有互联网进行数据传输是智能电网需要解决的重要问题, 第 2.6.2 节已给出了一些现有的解决方案。

通过 PMU 单元获取到实时数据后, 智能电网通过广域测量系统 WAMS 传回控制中心进行分析处理。电网中装备的同步相量测量装置(PMUs)以 16 毫秒为周期返回电网当前各状态量, 其数据包平均大小不到 1KB, 但数量众多; 而智能电表等量测设备也都会以固定频率发送数据包至控制中心。智能电网数据有数据包小, 数量多, 连续性强及对安全、时延要求高等特点, 现有的 TPC 协议并不能很好地完成电网数据包的传输任务, 从而导致延时丢包。针对智能电网中实时数据包特点设计的改进协议 SGTP(Smart Grid Transport Protocol)则可解决这一问题[Kim2011]。通过 NS2 仿真结果可以看到, 在智能电网专用网络中, 使用 SGTP 协议作为 IP 协议时, 其端到端延时与使用通用的 TPC 时相比减小很多, 且基本不受数据发送频率影响。目前对此领域的研究仍然很多, 希望在能够减少端到端延时并保证数据可靠性的基础上, 使 IP 协议更加通用, 而不是只适用于电力专网。

另一方面,为了满足智能电网对全景状态信息监测的要求,需要建立统一的数据集成平台,支持智能电网中的各种应用[Bai2011]。现有的电网公司解决方案通常采用昂贵的大型服务器,存储硬盘使用磁盘阵列,数据库管理软件采用关系数据库系统,导致相应的数据处理系统扩展性较差且成本很高。智能电网对状态监测数据的可靠性和实时性要求很高且状态数据量大。面对这些海量分布的异构状态数据,常规的数据存储管理系统很难满足其要求。而云计算则为这一问题提供了解决办法,文献[Bai2011]中介绍了利用 Hadoop 开源系统搭建的状态监测数据处理平台。该平台利用 HDFS 以分布式存储方式存储数据,并依靠冗余存储保证了数据的可靠性。同时还基于 MapReduce 模型开发了状态数据并行处理系统,调用了第三方算法,如模糊诊断、小波分析等。虽然基于网络数据中心(IDC)的智能电网云计算状态数据监测平台的优势较大,但其自身的耗电量本身也是问题。数据表明,在美国 IDC 的用电量已占到全国用电总量的 2%,并持续增长 [Lang2008]。

2、大电网智能规划与调度

电网的规划调度包括两方面的内容,一是网架规划,即以现有电网结构、电规规划、负荷预测为基础,进而确定需要建设的电力线路,以满足规划年限内的负荷增长需求。电网网架规划问题实质上是一个动态的多阶段决策过程,常用优化算法包括模拟进化方法、群体智能方法、人工智能规划方法、不确定系统规划方法等。由于此类问题无需实时信息,本节不作为讨论重点。而电网规划调度的第二类问题是能量调度,即在电网运行过程中,根据能量的实时需求、负荷建模信息及实时产能信息进行能量的自动调配。其中重点问题是能量管理和负荷建模。智能电网规划调度系统体系构架如下图 2.10 所示。

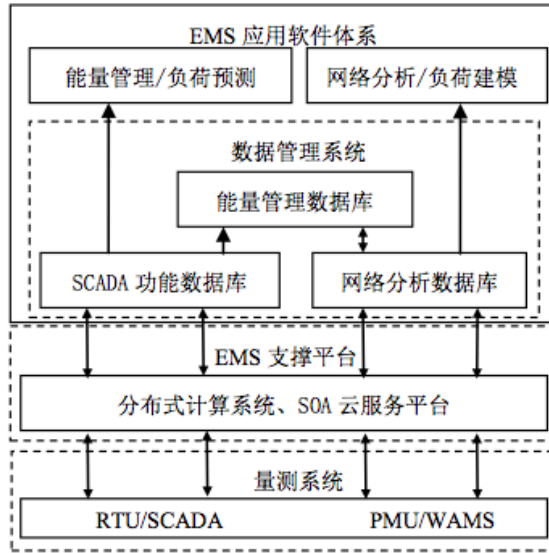


图 2.10 智能电网规划调度系统体系构架[Cao2013]

能量管理系统(Energy Management System) 是以计算机技术和电力系统应用软件技术为支撑的现代电力系统综合自动化系统，也是能量系统和信息系统的一体化集成。EMS 以调度自动化为核心内容，主要面向发电和输电系统即大区电网和省级电网的调度中心。但传统的 EMS 系统由于仅仅反映系统当前的真实值，故在系统发生故障时快速涌入的大量原始数据以及避免不了的误报警信息会增加调度人员的工作量，降低故障的处理速度。此外，传统 EMS 并不具有智能电网关注的在线稳定监视以及预测功能，其采集系统多基于 SCADA，实时性不高，造成 EMS 系统的能量调度不能及时进行。而基于 PMU 的 WAMS 系统则可较好解决这一问题，但由于成本及技术限制，短期内 SCADA 系统和 WAMS 系统会共同存在，因此 SCADA 数据与 WAMS 数据交互是一个问题，如文献 [Qin2011]介绍了以 CIM 为基础的 WAMS 信息架构模型，综合利用从 WAMS 与 SCADA 集成的数据。

在 EMS 网络分析中的潮流计算，建立高质量实时数据库等功能都依赖于精确的在线实时负荷建模。电力负荷作为能量消耗者，在电力系统的分析控制中发挥重要作用。利用数字模拟计算已成为电力系统规划控制中不可缺少的辅助手段 [JuP1990]，大量的计算实验结果已证明负荷模型对于电力系统动态行为的定量模拟结果影响极大 [CIGRE1986]。由于地区整体负荷模型具有时变性，随机性，分布性，复杂性以及不连续性等特点 [Ellis2006]，描述系统总体外部特征的负荷建模相

当困难, 负荷模型的粗略已成为制约电网调度管理的瓶颈。目前的负荷建模方法可归纳统计综合法和总体测辨法[Price1987]两类。其中统计综合法属于离线方法, 即事先通过试验和数学推导得到各种典型负荷元件的数学模型, 然后在一些负荷点上统计某些特殊时刻的各种负荷组成, 即每种典型负荷所占百分比以及配电线路和变压器的数据, 最后综合这些数据从而得出该负荷点的负荷模型。但该方法存在工作量大、精度差、无实时性等多种问题。而总体测辨法的基本思想是将综合负荷作为一个整体, 首先从现场采集测量数据, 然后根据这些数据辨识负荷模型结构和参数, 最后用大量的实测数据验证模型的外推及内插效果。基于实时测量数据的总体测辨法能够更精确地表现电力负荷的特点, 因此受到越来越多研究人员的关注[Choi2006]。总体测辨法建立负荷模型离不开现场实测数据, 如何快速取得大量准确数据是该方法的重点, 如利用广域测量系统(WAMS) 所提供的电网实时数据进行节点负荷建模。但是由于当前的 WAMS 系统并不能保证电网的完全可观性[CaoYJ2007], 即不能保证所有的负荷节点都被观测, 无法支持传统的基于负荷节点测量的负荷建模方法。因此有人提出广域电力系统综合负荷模型[Zhang2008], 即采用自顶向下的方法进行区域综合建模。根据文献[JuP2008]中的仿真结果可以看出, 相较于传统的节点负荷建模方法, 全系统负荷建模结合了统计综合法以及总体测辨法建模的优点, 并且可以根据实时数据建立同步广域系统负荷模型。

2.6.4.3. 用电侧应用

用电环境是电网系统的重要组成部分, 本节主要综述智能电网信息系统在电力需求侧管理及与新能源密切相关的微网中发挥的作用。

1、电力需求侧管理

电力需求侧管理(Demand Side Management, 简称 DSM), 指电力公司采取有效的激励和诱导措施与用户协力改变用电方式, 实现节电和资源综合利用。需求侧管理最为重要的工作是负荷管理 [Bellannine2000]。负荷管理的目标是抑制负荷增长、改善负荷曲线的形状(包括削峰、填谷、错峰战略性增加电力、战略性节点和柔性负荷)。传统负荷管理一般采取拉闸限电和强行中断负荷等措施, 虽然有一定管理效果, 却以牺牲用户利益为代价。

当前的需求侧管理,由电力部门单方面管理逐渐向供需双方配合管理的方向过渡。其与传统的负荷管理的主要区别在于是否有用户的直接参与。目前应用广泛的负荷管理技术有三种[Ng1998]:直接负荷控制(direct load control,简称为DLC),即电力部门单方面周期性切断负荷与电网的连接;间接负荷控制(indirect load control,简称为ILC),指用户根据电力公司提供的价格信号主动进行独立的负荷控制;负荷能量存储,指用电公司和用户在非高峰时期储存电能并在高峰时期消耗所储存的电能。美国 Baltimore Gas and Electric (BGE) 公司的 DLC 项目[Hamilton2010]即通过定期支付用户一定补偿,在用户空调、热水器等特殊电器上安装开关。在电能供应紧张时期,控制中心发送高频(VHF)信号到开关,使得电器周期性开、关,从而达到缓解用电压力的目的。国内近几年仍在对 DLC 控制策略进行研究和改进,文献[Yao2009]介绍了一种中央空调的双向直接控制技术,中央控制器监视可控负荷,通过线性优化算法计算负荷的脱落率并通过互联网发送控制指令,从而实现削减负荷的目的。

智能电网信息体系结构能够提供系统化的测量、通讯、数据存储、数据分析以及控制技术,从而推动需求侧管理的发展,使得搭建真正实用的需求侧管理系统成为可能。文献[WangP2010]介绍了如何在智能电网体系下构建用户与供方的交互系统,为当前需求侧管理实际可操作性差的问题提供了一条解决途径。除了实现供需双方的双向通讯,引入需求侧管理所增加系统复杂性也是将来智能电网所需要面对的问题。文献[Hamed2010]提出了一种基于博弈论的能耗调度自动控制系统,设计智能化算法代替人工调度,从而减轻供方系统工作人员的工作复杂性。

有效的实施 DSM 的各种技术方案需要智能电网信息支撑平台各部分间的有效配合,需求侧响应的系统结构图 2.11 示:

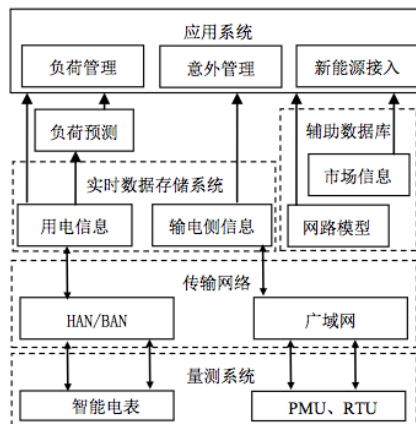


图 2.11 智能电网需求侧响应系统[Cao2013]

电力需求侧管理技术所采用的量测系统为个人用户量测系统,即由智能电表 (smart meter) 构成的高级量测体系(AMI)。AMI 的通信模式如前所述,AMI 在智能电网中的应用能为 DSM 带来深远的影响[Zhang2010]。除了提供量测数据的获取与储存服务;以及实现双向通讯之外,AMI 可以提供实时、诱导性电价;能效监测与诊断;智能功耗与负荷以及分布式电源接入等功能。

无论是进行负荷控制还是制定诱导性电价,电力部门都必须掌握一段时间后的系统负荷情况。因此需求侧管理的分析和决策基于电力部门对用户用电行的预测,应用智能电表的测量数据进行负荷预测对智能电网极为重要。类似于智能电表的研发,负荷预测也存在两种研究思路:一类是对于整栋建筑的负荷预测,另一类是对于单一用电装置的负荷预测。第一类预测方法如人工神经网络方法、物理信息建模方法[Neto2008],多元平稳时间序列(ARIMAX)模型[Newsham2010]等。第二类预测方法如住宅量测系统(Bright Energy Equipment Systems) [Barbato2011]。可以说,预测算法的具体实现模式和智能电表的研发路线息息相关。除了以上两种方法,还有一些与智能家居互相配合的预测方法,即研究住宅环境与用户用电行为之间的关联性,从而依照住宅环境的预测情况进行负荷预测。

需求侧管理的控制执行系统可以按负荷管理实施方案是否在传统的电价框架内进行分为两大类。一类是推行激励电价,间接进行负荷管理。另一类是针对特定用户设备直接控制,例如供电部门直接控制电力系统设备,降低电压,控制功率因数。峰谷分时电价和可中断负荷分别是上述两类方案的代表。峰谷分时电价是按照负荷曲线的高峰低谷划分成峰、平、谷三种时段,并与之对应着峰、平、谷三种电价,以达到削峰填谷、改善负荷曲线的目的,峰谷时段的划分必须和负荷曲线的实际情况相一致。可中断负荷是针对用户对峰谷电价的反应滞后,在用电紧急的态势下采用负荷裁减的办法来缓和用电压力[WangJX2004]。执行可中断负荷,关键的一点就是要合理计算可中断负荷成本,即停电给用户带来的损失,从而制定中断补偿策略。传统的停电损失的研究方法主要分为宏观经济方法和用户调查法。随着电力系统的市场化,可中断负荷技术也发生了显著改变,如基于高等级母线负荷信息的可中断负荷控制技术的功率流优化算法[Tuan2003],基于客户偏好进行负荷控制的,可中断负荷控制算法[Tang2011]。

此外,电力需求侧还需要进行意外管理。例如停电情况下的用户通知以及后备电源启动;故障负荷线路切除。除了需求侧本身的应用,需求侧管理系统还可

以与发电侧的应用相结合，共同改进电力系统的性能。如新能源并网的稳定性就可以通过需求侧管理解决。文献[Finn2009]提出通过采用实时计价系统与需求侧管理技术，从而提升风电接入率的可能性。目前，在特殊电力系统环境下的风电入网与 DSM 系统的协同研究已经取得了一定成果。文献[Dietrich2012]在一个孤立的电力系统中构建负荷切换模型，并研究在不同的风力发电容量和不同的需求响应策略下的系统运行和节能情况。文献[Behnke2011]则在微网及可再生能源接入的背景下，提出了基于天气预测和需求侧管理的电力管理系统，并给出系统的运行效果。

2、微网技术

如前所述，随着分布式发电系统(distributed generation system, 简称 DGS)日渐成为满足负荷增长需求、减少环境污染、提高能源综合利用效率和供电可靠性的一种有效途径[Huang2009]。然而，由于 DGS 本身难以控制也难以预测，不可避免地会给电网带来冲击和负面影响。为了减少 DGS 对主网的不利影响，同时发挥其固有优势，一个合理有效的解决方案是采用系统方法，将发电装置和相应的负荷看成一个子系统，即微网(microgrid)。目前，国际上对微网的定义没有统一的标准。美国电气可靠性技术措施解决方案联合会(CERTS)对微网的定义如下：微网是一种由负荷和微型电源共同组成的系统，它可同时提供电能和热量；微网内部的电源主要是由电力电子装置负责能量转换，并提供必须的控制；微网相对外部大电网表现为单一的可控单元，同时满足用户对电能质量和供电可靠性、安全性的要求,微网结构图如图 2.12 所示:

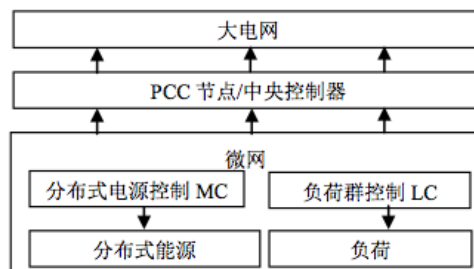


图 2.12 微网结构图[Cao2013]

分级控制模式[BiR2010]是当今微网技术中较为成熟的一种控制结构，整个微网作为主干电网的一个子系统,由位于主干网耦合点(PCC)的中央控制器控制，第

二级控制单元由负荷/负荷群控制器(LC) 以及分布式电源控制器(MC)组成。中央控制器协调 LC 和 MC 的控制效果, 同时与 DMS 和大电网的中央控制系统之间进行信息交换。

为了实现分布式能源的即插即用, 微网内部的网络构架需要具备很高的灵活性。关于微网的通信平台设计已经有了一定的研究成果如基于 IEC60870-5-104 协议的文献微网一般化通讯平台[BiR2010], 基于无线传感器网络代替有线网络搭建微网的通讯网络[SioW2009]。而微网的系统复杂性也对微网监测和数据处理系统提出了更高的要求。需要支持多种通讯协议, 能够被在线定义及修改, 支持远程监视与远程控制, 历史数据能够按需储存和调用[Ren2011]。针对微网数据处理特性, 文献[Ming2010]中设计了一种面向对象的实时数据库系统, 用于储存微网的监控信息。文献[ZhouL2010]以层次化的方式介绍了一种采用 I/O 端口作为 I/O 通讯机制的微网数据获取系统, 将整个微网数据系统分为装置层、网络层和监控层。

微网与大电网最为明显的不同之处是微网的管理。从大电网的角度看, 微网可以被认为是大电网的一个智能负荷单元。从微网内部来看, 微网内部也可以被认为是一个完整的电力系统, 需要进行分布式能源的调配。因此, 微网的管理涉及到非常复杂的过程。下面将微网的管理分为接入管理、微网控制以及微网保护三部分, 介绍相应的研究成果和技术手段。

从大电网的角度来说, 微网作为一个智能化单元, 其连网和断网技术备受关注。微网的特点之一就是根据系统情况的不同, 微网可以工作在不同的运行方式下。主要的运行方式包括三种[Shi2009]: GD (Grid Dependent Mode): 并入大电网并进行功率交换; GI (Grid Independent Mode): 又称为自主运行模式, 并入大电网, 但几乎不进行能量交换; IG (Isolated Grid Mode): 与大电网断开连接, 独立运行。微电网内可以集成各种分布式新电源, 从而能够提升供电效率, 缓解能源危机。同时, 在大电网发生故障时, 微网可以脱网独立运行, 大大提高了系统可靠性。尤其在电网发生严重故障时可向重要负荷独立供电, 体现智能电网坚强可靠、抵御攻击的特点。微网从并网模式切换到独立运行, 以及微网从独立运行模式重新切换回并网的过程称为微网的切换模式。微网的切换所期望达到的目标是无缝切换[Yang2011]。即在大电网故障时, 仍可以维持微网内重要负荷不受影响, 当大电网恢复时, 微网能够自动实现和大电网的同步和重新连接。

对于微网内部来说,为满足用户需求的电能,主要控制目标包括: 1) 调节微网内的馈线潮流,对有功和无功功率进行独立解耦控制; 2) 调节每个微型电源接口处的电压,保证电压的稳定性; 3) 固网运行时,确保每个微型电源能快速响应,并分担用户负荷。目前,微网的控制方法主要有:基于电力电子技术的即插即用控制(plug and play)和对等(point to point)控制;基于功率管理系统的控制,以及基于多代理技术的微网控制。其中,最后一种方法是一种智能方法。软件代理实质上就是在一定的环境下,独立的、具有一定的自主性和推断能力的软件模块,能够和系统中其他代理通信交互并能对周围的环境做出反应。一个多代理系统中各代理的功能、目标可以完全不同,但需要有一定的联系;它们通过信息交换和操作交互,完成各自或者共同的任务。多代理技术从 20 世纪 90 年代开始应用于电力系统。如今,国内外有很多关于多代理技术进行微网控制的研究,如文献[ZhengWD2010]分别对多代理控制技术进行了分析和改进。多代理控制技术的自治性、反应能力、自发行为等特点,正好满足微网分散控制的需要。因此,包括多代理控制技术在内的智能化微网综合控制是微网控制的发展方向之一。

微网系统承受扰动的能力相对较弱,尤其是在孤岛(自主)运行模式下,考虑到新能源风能、太阳能资源的随机性,系统的安全性可能面临更高的风险。由此,必须考虑微网在不同运行模式下的保护问题。微网的保护方式与传统保护方式存在着根本不同:1)潮流的双向流通; 2)过电流保护。在并网和孤网运行情况下的微网,由于其馈线分布着多个 DGS,短路电流的大小有很大不同。考虑微网过电流保护问题时,由于硅材料仪器的等级限制[Nikkhajoei2007],微网内换流器提供的故障电流的幅值不足以用于驱动传统的过电流保护装置。因此,必须有不需要高电流的故障检测技术以及微网的断并网保护技术,从而满足微网保护的需要。文献[Conti2009]分析了微网中的故障电流对于网络保护的冲击,同时提出了几种创新性的网络和微网保护策略。可以预见的是,未来的微网保护策略同时应当满足微网通讯网络和硬件设备的即插即用的特定。关于这方面的研究需要在将在得到更广泛的重视。

2.7 本章小结

这一章从智能电网信息流向的角度出发,分析总结了当前智能电网研究工作开展的情况,并结合新型计算技术和网络技术对智能电网未来的研究方向进行了

展望。从目前的研究来看，智能电网对网络传输性能、数据存储性能及数据分析处理性能都有较高的要求。特别是在分布式新能源发电和微网系统引入之后，电网的稳定运行控制将会更加复杂。综合来看，未来智能电网的研究工作从以下几方面展开：

1) 网络延时和网络稳定性。特别是在互联网环境下如何保证智能电网应用数据的实时性和可靠性。网络访问控制、延时分布建模和网络拓扑分析都将应用于未来智能电网的网络构建。

2) 数据建模和存储。解决电网应用数据的异构性、海量性和实时性问题, 提供按需所求的数据建模和存储方式，云存储技术和覆盖网技术将得到应用。

3) 稳定分析及智能调度。解决分布式发电、储能及微网环境下的能量调度问题以及大电网系统的鲁棒性问题。多目标优化、数据挖掘和传统的控制理论技术将应用于该问题的分析。

智能电网的研究工作涉及的领域众多，另有大量传统电力系统升级所带来的相关的课题，以及数据安全性和隐私性等课题值得重视与探讨，IEEE 新修订的《电力系统通信标准——分布式网络协议 (DNP3)》就主要针对网络数据安全问题进行了修正，篇幅所限，在此暂不赘述。

第三章 实证平台搭建

3.1 实证平台概述

物联网技术在电力系统的潜在应用众多，在通讯网络和控制网络交互的任意环节都有可能存在不容忽视的问题，需要通过不同的测试方法得以检验和改善。现有的研究和实际应用中，对多通道中异步信号的影响的考虑较为欠缺，需要考查随机因素和多种不同情境。本实证平台的搭建思路如下：从应用支撑的角度，遵循测、辨、控的思路构建应用案例；从对通讯网络和控制网络交互影响的性质研究的角度，主要考查网络拓扑的多样性、网络流量的随机性以及电力系统的不同应用对控制性能的不同要求几个方面。下面分别从平台功能和研究案例两个角度介绍实证平台。

3.1.1. 功能概述

我们遵循“测-辨-控”的思路搭建实证平台，以期支持电力物联网的基本应用与未来扩展应用的测试要求。这三部分既是平台功能构建的组成思路，亦是研究案例的组成思路，具体如下图所示：

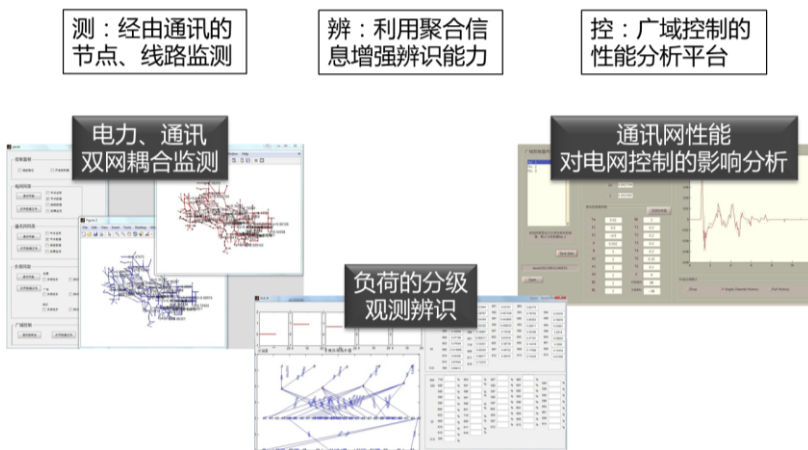


图 3.1 平台功能总览

其中主控面板的主要功能如下图 3.2 所示：

控件组	控件	功能
控制面板	连续接收	开启量测数据在界面的实时显示
	控制器开启	将控制器反馈信号接入电网
电网网架	显示网架	打开电网网架，包括节点名称、节点数据、线路数据、故障监测四个显示参数，支持随时更改
	打开数据文件	直接打开定义网架及其参数的文本格式数据文件，支持在线编辑
通讯网架	显示网架	打开通讯网架，包括四个显示参数同上，支持随时更改
	打开数据文件	同上
负荷网架	显示网架	打开已点选的网架拓扑，目前有东莞、广州、深圳，显示辨识结果。
	打开数据文件	直接打开网架定义数据文件。
广域控制	显示控制台	打开控制器面板，参见 2.1.3.3
	打开数据文件	直接打开网架定义数据文件。

图 3.2 接收量测数据的主控面板和相应功能。

3.1.2. 测量

测量单元主要作用为：经由通讯的节点、线路监测，以验证电力、通讯双网耦合监测，并满足不同电网应用对测量、传递数据的不同的实时性与展示方式要求。实证平台的对量测数据的管理功能，包括以下几个功能：

1. 网架数据的导入

网架数据由数据定义文件导入。数据定义文件为文本格式。电力网架的数据文件分别为定义节点的 node.txt 和定义连接线路的 link.txt。具体的字段定义如下所示：

node.txt		link.txt	
1	145 356 2 k 黑底	1	1 0 1 2 1 r
2	166 484 4 k 营盘	2	1 0 3 2 1 r
3	97 428 2 k 黄登	3	1 1 2 4 1 r
4	243 549 3 k 黄坪	4	1 1 5 4 1 r
5	240 464 4 k 丽江	5	1 0 6 5 1 r
6	241 371 3 k 香格里拉	6	1 1 7 5 1 r
7	320 449 5 r 茶树坪	7	1 1 6 7 1 r
8	358 347 2 k 梨园	8	1 1 9 7 1 r
9	381 391 2 k 阿海	9	1 2 7 11 1 r
.....		

在节点定义文件 node.txt 里, 每行定义一个节点; 各列字段依次代表: (1) 节点编号; (2) 经度坐标 (即横坐标); (3) 纬度坐标 (即纵坐标); (4) 节点图标类型 (电压等级编号); (5) 节点颜色代号; (6) 节点名称。

在线路定义文件 link.txt 里, 每行定义一条链路; 各列字段依次代表: (1) 链路编号; (2) 链路显示标记 (0 为隐藏, 1 为显示); (3) 链路线型 (链路类型); (4) 链路起点的节点编号; (5) 链路终点的节点编号; (6) 链路颜色代号 (RGB 表示法)。

节点中包括与主网直接相连的低电压等级节点。节点类型包括: 3-一般负荷节点、2-一般发电节点、1-松弛节点; 支路类型包括: 1-一般交流线路、2-一般变压器、3-调相变压器和直流线路。

通讯网架的数据文件为 comm_node.txt 和 comm_link.txt, 字段定义同上。

2. 网架数据绘制

根据 1 中的数据文件, 在主控面板中可控制显示电力网架、通讯网架和负荷网架。电力网架和通讯网架同步建设, 因而电力网架和通讯网架在主干网拓扑上完全一致。根据南方电网主干网数据文件绘制的电力和通讯网架拓扑如下图所示。

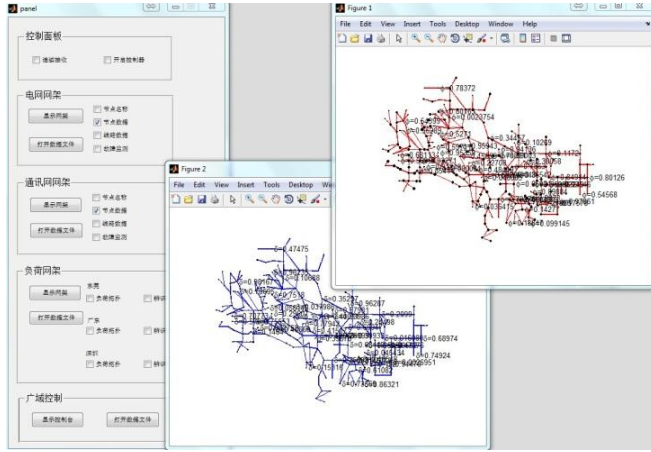


图 3.3 根据南网丰大 2008 数据导入的网架及实时显示。电力网架以红色标注，通讯网架为蓝色标注

3. 网架参数更新

在主控面板中，可改变网架显示参数。在开启*连续接收数据*模式后，改变点选项后，还须重新点击*显示网架*，网架显示将在下一个数据接收时间周期里更新为新的设置。

4. 实时数据库读写量测数据

由电网终端节点传感器得到的量测信号，或仿真平台生成的量测数据，首先同步到实时数据库中。目前采用 MySQL 数据库，实现在 google map 上的实时显示标注（图 3.4）。

5. 实时在网架上的标注量测数据

由数据库或仿真平台发送到的量测数据，在控制平台开启了*连续接收数据*模式后，量测数据以周期更新到控制平台的显示网架上。



图 3.4 图中 1 为从数据库中读到的电网节点和直流线路，选择一个电网节点，2 中显示该节点，3 中显示该节点属性。3 现在设置的是每 10 秒刷新一次，可以动态读取数据库中的值。电网直流线路功能与节点功能类似。

3.1.3. 辨识

该功能主要指，平台提供接口，将网架、参数及实时量测数据，提供给动态或静态参数识别算法的，可以支持算法的结果验证、比较、分析等。目前主要以区域综合负荷动态等值参数在线测辨为例，利用聚合信息增强辨识能力，以测试负荷的分级观测辨识。

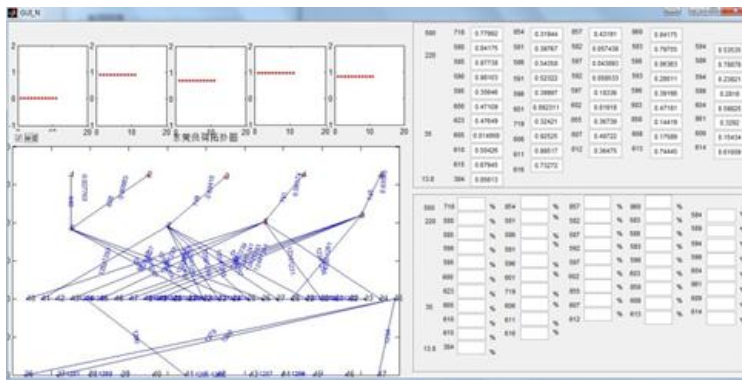


图 3.5 负荷辨识功能面板。包括(1)负荷网架(2)分区负荷(3)辨识参数对比

数据文件说明及平台功能。“无功堵转”是电机内部现象，现有的网络难以监测。现在需要从现有物联网可得的大量数据中快速判断出“无功堵转”的发生。相关数据需要从下列关联文件中得到：

1. [MotorOutput.txt] 电机动态参数

字段依次为：时间 滑差 负载编号 滑差 负载编号

2. [dynload.txt] 动负荷列表

dynload 每行代表一个动负荷，从 0 开始，从上到下依次编号。|| 为标志位，第二项（如 SHIPAION）为母线名

3. [负荷网.txt] 负荷网定义数据文件

母线名（如 SHIPAION）[起点编号 -]

4. [net debug.txt] 物联网数据文件

字段依次为：时间 节点编号 幅值 相位 频率 节点编号 幅值 相位 频率 ... 线路编号 有功功率 无功功率 线路编号 有功功率 无功功率

5. 关联关系

通过电机的“滑差”与物联网的节点数据一一对应来实现： [MotorOutput.txt] <-- 负载编号 --> [dynload.txt] <-- 母线名 --> [负荷网.txt] <-- 节点编号 --> [net debug.txt]

3.1.4. 控制

控制单元的主要作用为：广域控制的性能分析平台，以开展通讯网性能对电网控制的影响分析。要实现电网的闭环控制功能，要求实证平台不仅提供数据传递至通讯网，还需要提供接口，接收控制信号并实现电网行为的仿真控制。这一功能目前以广域测量的大规模交直流互联电网多类型自适应协调阻尼控制系统的原型系统为应用案例。如图 3.6，广域控制器模块实现的功能包括：

1. 多控制器选择
2. 参数调节
3. 节点匹配
4. 仿真运行结果显示
5. 参考曲线对照展示
6. 控制及补偿策略的甄选

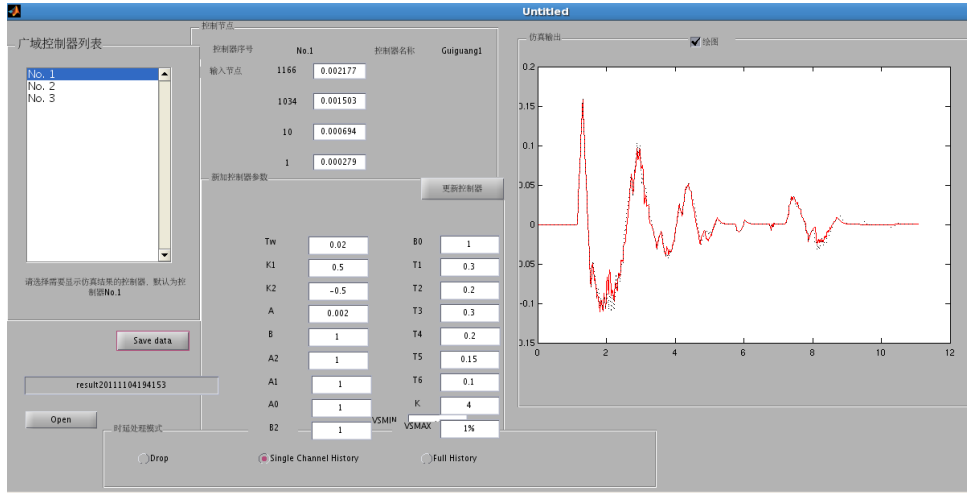


图 3.6 广域控制器的操作平台界面。(1)左上角列表中选中当前界面显示的控制器。允许多个广域控制器的接入、参数调节及输入输出曲线实时监测与绘制；(2)左侧保存按钮可实时保存当前运行数据；(3)左下角输入参考数据文件名称，可在实时绘制曲线框中虚线显示对照曲线；(4)中间上部参考节点信息，可实时显示当前控制器输入信号节点的量测数据；(5)中间下部为控制器参数调节功能块，可改变控制器的参数，但须在下次运行时起效；(6)最下面为时延补偿策略的方式选项，可在运行过程中实时起效。

特别的，在时延补偿策略的方式上，平台支持仿真过程中实时改变补偿策略，以支持混合策略的测试实验（图 3.6）。



图 3.7 分别以三种通讯时延补偿方式运行故障后平稳控制，记录下电力系统实现的不同动态过程。相应补偿方式从左至右依次为(a) Drop (b)SCH (c) FH

3.2 平台组成

现有的软硬件整体连接的仿真平台环境如图所示。下面分节介绍各自的组成及功能。



图 3.8 广域阻尼控制器抑制频率振荡实验所用仿真环境 (a) 硬件接口设备 (b) 电力系统 TH-STBLT 仿真平台 (c) 通讯网仿真平台

3.2.1. 三方通讯

电力物联网仿真验证平台是通过对实际电力系统以及通讯网络的建模，并对电力系统的典型案例进行广域闭环控制的仿真实验，以验证物联网系统在实际工程控制中的有效性问题。平台由三部分模块组成，电网仿真端、通讯及控制器（图 3.9）。下面简要介绍各模块及其相互通讯。

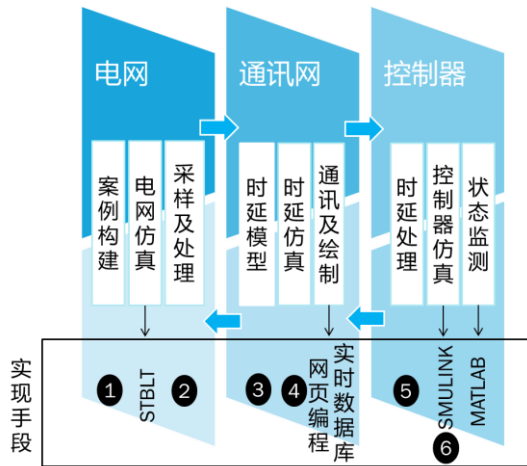


图 3.9 模块间通讯的组成部分及其实现手段。其中：(1) 电网端支持仿真运行和历史记录的案例；(2) 电网中信号发送模块对仿真平台中的数据进行采样；(3) 时延的模型；(4) 时延的仿真实现；(5) 时延的处理和补偿；(6) 控制器仿真的加速模块

其中电网端对实际电网系统进行典型案例的构建及仿真，通过信号采集以及相应的处理后将实时信号送至通信模块；通信模块对实际数据传输中可能遇到的时延等问题进行建模及仿真，将接收到的信号经过时延处理后送至控制器模块；控制器模块则会对输入信号做出一定处理后对其进行控制输出，并将得到的反馈信号以同样的步骤通过通信网传回电网端，以达到对电网系统进行广域闭环控制的目的。各模块的具体实现分节介绍如下。

3.2.2. 电网仿真端模块

3.2.2.1. 分层结构及算例系统

电网仿真部分基于清华大学自主开发的机电暂态仿真程序平台 TH-STBLT，可实现交直流混合电网机电暂态与电磁暂态的超实时数字仿真[WangD2007]，并通过通信函数周期性将电力系统采样数据发送至通信网。

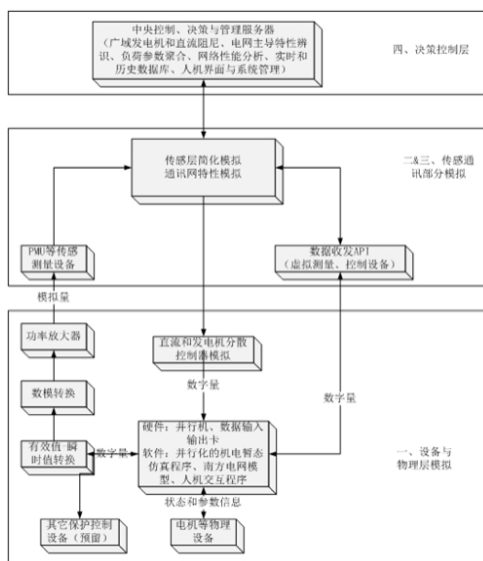


图 3.10 机电仿真平台的分层结构（此图来自张树卿博士汇报 ppt）

在实时计算模式下，平台首先调取系统运行模式，读取案例数据，包括故障历史数据和采样点的设置，然后进行潮流计算，收敛后开始进行超实时仿真再现故障发生后的系统运行状态，并周期性发送数据、绘制状态图形。案例系统采用南方电网 2008 年丰大方式算例系统:1393 节点、2371 支路、244 发电机、620 负荷。如下：

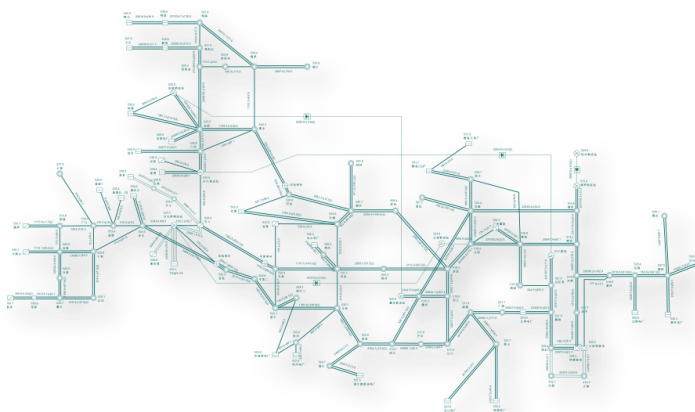


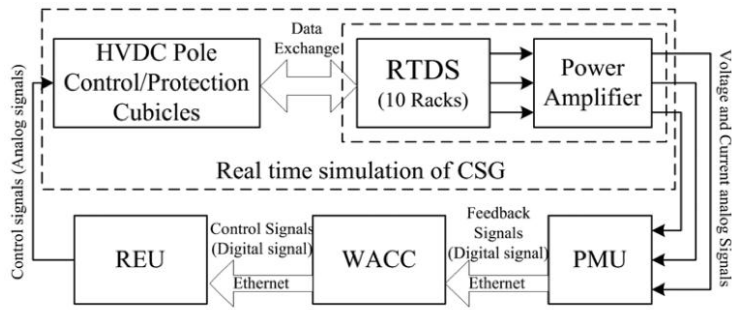
图 3.11 南方电网 2008 年丰大方式算例系统结构图

平台仿真端的案例、流程、计算及发送采样数据功能组成是这样的：程序首先调取南方电网丰大系统的节点，选定运行模式后，程序计算系统运行状态，并输出采样点频率值。程序中需要采集并后续需要与通讯接口交互的数据点包括采样点、广域控制节点和本地控制节点（图 3.11）。在仿真计算过程中，电网每周

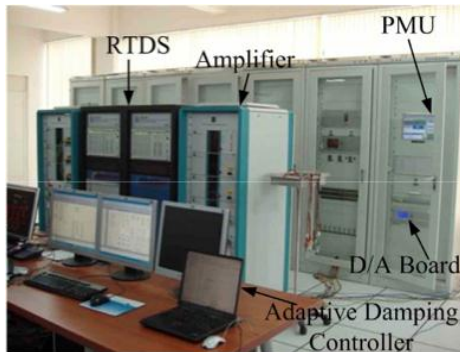
期发送采样点频率值后，接收广域阻尼控制器的控制指令，据此调整控制节点参数，并计算下一周期的潮流和各节点的电气参数。每周期计算完成后，系统对节点频率信号滤波并输出至通讯接口。

3.2.2.2. 仿真环境

电网仿真环境可分为三类，一是现场测量，二是物理模拟测试，三是软件仿真。为避免对电网实际运行产生负面影响，目前在现场测量中主要采用较为保守的方式。物理模拟测试环境如下图所示：



(a)



(b)

图 3.12 广域阻尼控制器抑制频率振荡实验所用仿真环境[He2009] (a) 硬件仿真系统结构图[He2009] (b) 系统测试环境[He2007]

3.2.2.3. 测试功能及界面流程

1. 开启超实时仿真。如下图所示，由“文件”菜单导入节点配置文件后，需由“暂稳计算”中开启“在线实时计算”。

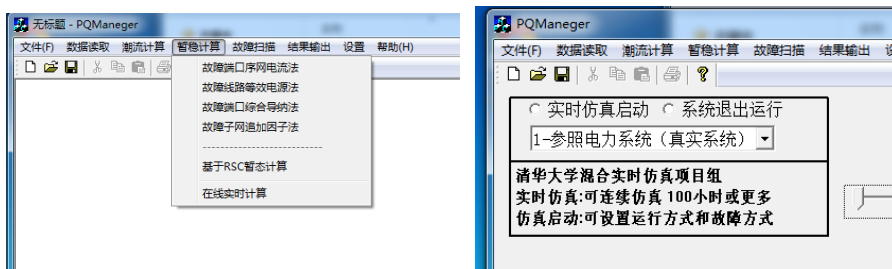


图 3.13 启动实时仿真计算

2. 读取运行数据并计算潮流。如下图所示，启动实时仿真后，后依次选择“实时运行方式”与“故障方式”，并等待约 1 秒后数据读取成功及潮流计算收敛。

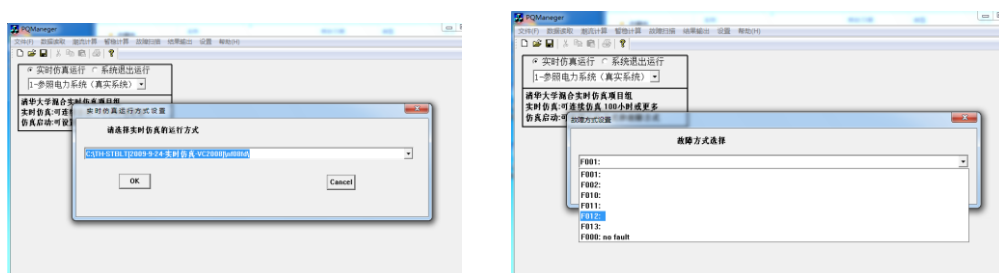


图 3.14 运行与故障方式选择

3. 仿真周期。通过“设置”可选择仿真周期长度。目前已实现连续重复仿真功能。即电网仿真端可连续多次运行，即：一次设定后，根据时钟周期与控制器重置信号重复多次仿真，提高了后续随机时延测试的效率。

3.2.3. 通讯模块

3.2.3.1. 通信网构成及实现方式

通信模块采用异步 socket 通信实现，结构为 C-S-C。即电力系统仿真端，通讯网传输模拟，控制器端。如下图示：电力系统仿真输出数据后，发送至网络模拟服务器；网络模拟服务器根据信息网网架模型模拟仿真数据至控制端的网络情况，主要进行延时的模拟，计算出延时后将仿真数据按计算结果延时后发送至控制器；控制器接收到仿真数据后进行控制输出，同样发送至网络模拟服务器，网络模拟服务器计算控制数据至电网系统的延时，计算出延时后再把控制数据反馈给电力系统。

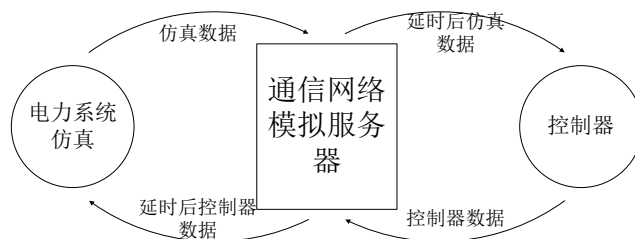


图 3.15 通讯模块在平台中的位置与作用

通信模块内部执行流程是一个循环的过程，如图 3.16 所示。

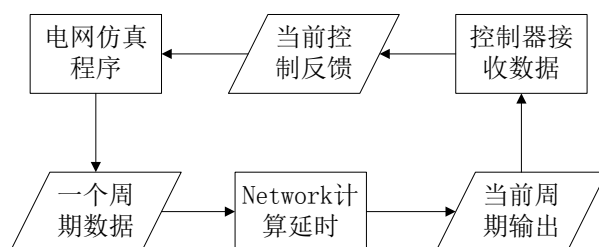


图 3.16 通讯模块执行流程

具体的执行解释如下：

- (1) 电网仿真程序计算一个周期的电力系统仿真输出数据后进入暂停状态
- (2) 电网仿真程序将仿真数据被发送至网络延时仿真程序 Network
- (3) Network 利用排队系统对不通信道的电力系统数据分别进行排队延时
- (4) Network 程序发送当前周期队头的的数据给控制器端
- (5) 控制器端根据接收到的电力仿真数据（此时是不同时标的）进行控制输出
- (6) 控制器将此控制反馈发送给电网仿真程序
- (7) 电网仿真程序进行下一个周期的仿真

3.2.3.2. 时延模型与时延仿真

通信网的时延模型在三端统一时标的前提下利用先进先出的队列进行实现，仿真数据包到达后，根据包的标记时间及网络模拟计算出的延时计算仿真数据包的队列位置，然后依次将队列中的数据发送给接收端。

在实现方式上，目前已搭建起基于基本理论模型自主开发的程序实现、基于商用仿真软件 NS2 的通讯模型、以及基于硬件的物理模型这三个层次的模块，并已实现了各部分的联通。

3.2.4. 控制器模块

3.2.4.1. 构成

广域控制器及监控平台由以下四部分构成：

- 1) Simulink 模块用于控制器参数调试
- 2) 解析函数可加速仿真未来用于大规模实验
- 3) 监控平台及其界面可实现实时显示电网及通讯网的实时信息
- 4) 控制器调试测试界面平台如下。可显示、并分别调节各控制器参数，并进行不同参数下的对照实验。

通过对实时系统的建模及仿真，我们发现通讯网中的时延以及由于时延所造成的信息缺失，信息堆叠以及信息错位等问题是导致该电力物联网系统稳定性不足的主要原因，因此根据时延特性的特点进行分析并对控制端的数据包进行处理是电力物联网能否进行有效控制的关键因素。

3.2.4.2. 时延处理和补偿机制

时延越长，丢包越多，控制平台得到的电网实测数据滞后越严重，给出的控制指令越滞后，从而使得时延影响进一步加剧，导致恶性循环（图 3.21）。控制器模块在接收端设置缓存器，在数据发送给控制器前，允许利用历史数据对输入进行预处理。这一简单的前馈环节可在一定程度上补偿电网实测数据滞后和不同通道造成的影响。

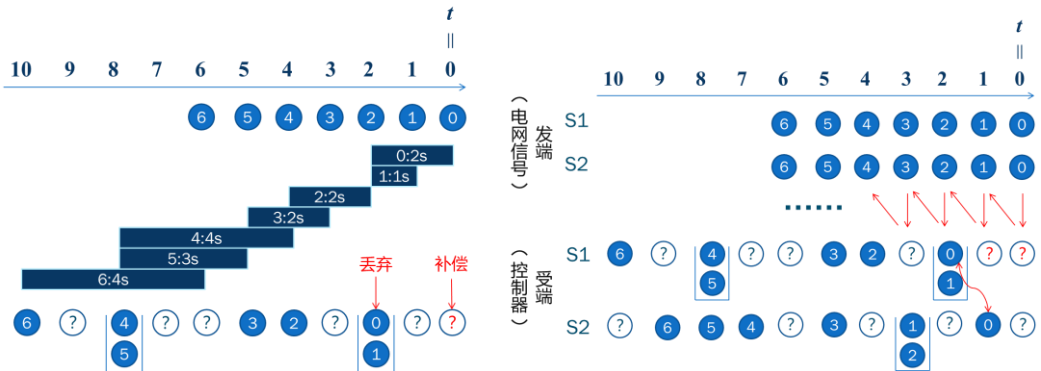


图 3.17 (a)通道时延造成的接收端信号序列扭曲 (b)受通讯网传输时延影响后，两组不同通道的信号序列在到达接收端被改变。

在接收端某通道最新数据包的时标落后于其它通道时可认为丢包。对丢包进行补偿的基本方法可如表 3.1 表示。

表 3.1 丢包补偿处理机制的基本设置组合

(缺包补偿, 排队长度, 丢包重发, 同步机制)			
(置零,	延续,	重新组合,)
(0,	≥1,	--)
(否,	有效时间,	重发次数,)
(无,	向前,	向后,)

零长队列下两个基本补偿方法如下图所示:

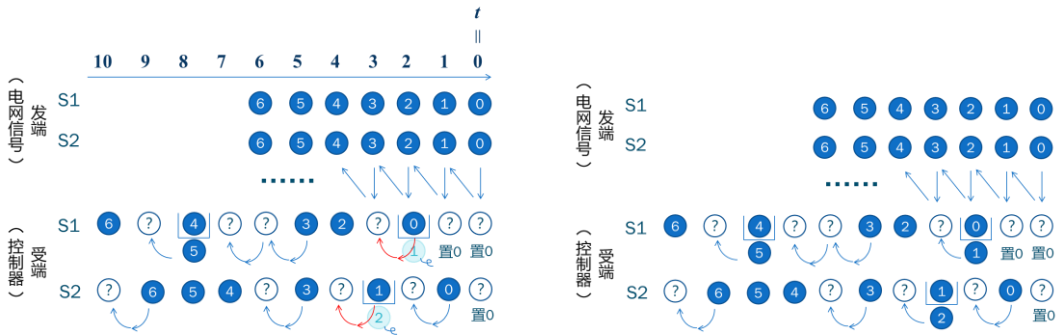


图3.22 (a) 零长队列, 丢包不重发。对时延影响后的信号序列, 在接收端不采用数据包缓存队列, 对于溢出缓存区的数据包直接丢弃不重发。(b) 零长队列, 丢包重发。对时延影响后的信号序列, 在接收端不采用数据包缓存队列, 对于溢出缓存区的数据包直接顺延置为下一时间周期的数据。

3.2.4.3. 控制器仿真

控制器遵循图示的系统模型及下述规律:

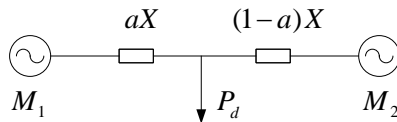


图 3.23 交直流混联系统

- 交直流混联结构, 通过直流输送功率动态调节, 抑制交流电网功率波动
- 控制规律: 直流功率调制量与区间振荡两等值系统频率差成正比

基于上述关系设计的控制器中只有比例, 不需移相, 需要通过参数优化控制效果、鲁棒性、可靠性等。

在控制器模块中，影响抑制低频振荡的广域控制效果的关键因素有两个：(1) 控制器参数 (2) 控制器对时延的预处理机制。为便于测试，控制器目前采用两套仿真模块：(1) 基于 simulink 的模块便于参数调试；(2) 基于解析函数的 C 程序其速度可用于大规模仿真。

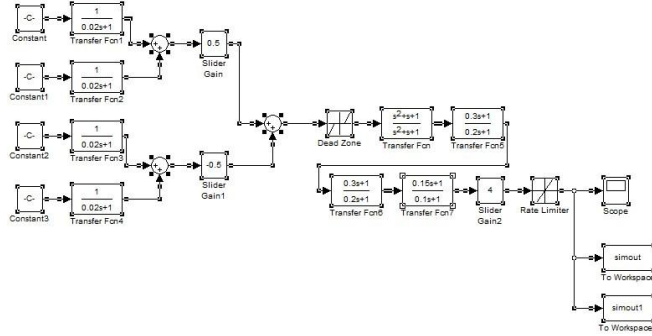


图 3.24 控制器 Smulink 模型

3.3 应用案例

3.3.1. 案例构建总述

电力物联网是一个通过双向的能量流和信息流网络有机结合在一起的现代电力网络，实现发电、输电、配电和用电的全方位监控、保护和优化运行。这对于大型电力系统的运行尤为重要。南方电网是世界上最大的交直流混合输电系统，并有多条世界领先的超高压直流输电线路在建。由于我国特殊的地理条件，东西部能源分布非常不平衡。能源资源主要集中在西部，而负荷中心主要集中在东部，这就使得远距离输电成为必然趋势。直流输电线路因其在远距离输电中的电气特性、经济性方面的优势而成为未来中国电力网络建设的重点工程。远距离输电工程的实施，使得电力系统在省市等大区域间的耦合度增强，这对电力系统的运行、调度和系统稳定控制等方面就提出了更高的要求。

本研究研究依托的项目内容是，基于分布式计算相关的理论成果，在一个统一的框架下，研究海量信息测量与通信管理、系统辨识和预警、实时闭环控制的协调与优化、事故后及时自愈等，为电力网络的升级改造提供理论和技术支撑，促进电网运行更加可靠、经济、环保。在满足测量、辨识等系统功能的基础上，具体项目课题以下述广域控制案例的关键应用场景作为实例进行验证(图 3.25)。

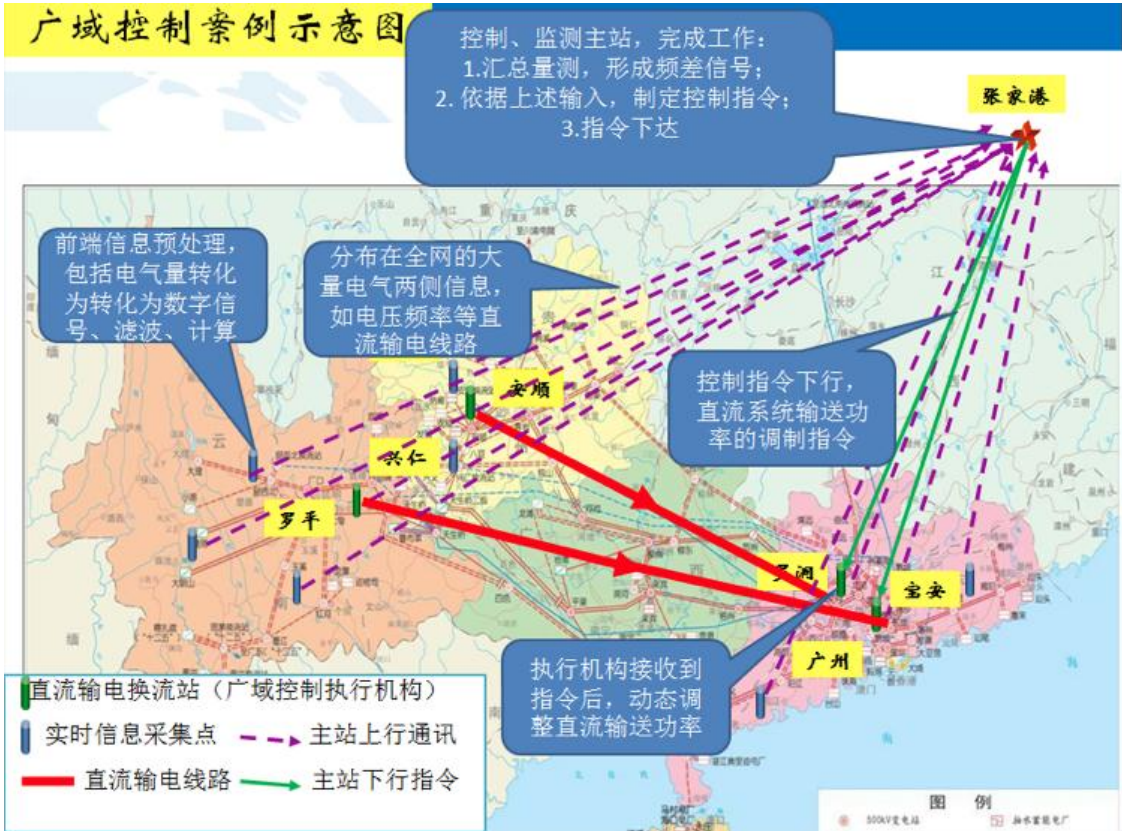


图 3.25 广域控制案例系统示意图

弱阻尼低频振荡已成为目前限制区域互联电网输电能力的主要瓶颈。针对这一问题，本课题将设计并实现一套基于广域测量的大规模交直流互联电网多类型自适应协调阻尼控制系统的原型系统，此系统由若干个（ ≥ 7 ）PMU 测量子站、若干个高压直流输电和大型发电机控制执行子站（ ≥ 5 ）、若干个中央及分布式控制主站（ ≥ 3 ）组成，并满足以下主要指标：

- 互联电网振荡阻尼比是否有提高；（提高 10%）
- 互联电网区间功率传输极限是否有提高；（提高 5%）
- 从广域电网的单层监控拓展到多层监控（输电层 500KV 和 220KV）
- 从现有平均通讯延迟大约 70ms，并正态随机分布，到延迟的可预测、可保证到 60ms 以下
- 降低保守性、提高数据可靠性、提高效率

通过利用本项目研发的自-协网络和感-执软件技术构建上述的应用原型，通过提高信息保真度和执行可信度和适应性并降低通讯延迟等指标显著提高区域

互联系统的传输能力，可以对电力物联网应用的可行性、有效性和可靠性进行验证并进行动态的改进和优化。

下面针对测量、辨识和基于上述应用的控制这三方面的案例工作总述如下。

3.3.2. 基于线性功率-电压方程的快速潮流计算方法

这一计算方法利用平台的量测信息，是为以测量支持建模的案例应用。目前大电网仿真对发电厂站和输配电网提出了进一步详细建模的要求，电网计算数据中出现大量电阻电抗比偏大的串联支路，对此这部分研究中推导了电力系统稳态潮流的线性功率-电压方程，基于该方程提出并实现了一种快速潮流解算方法。该方法电压修正方向直观明了，易于编程实现。通过算例小系统和南方电网实际系统计算数据对方法进行了实验测试，表明该方法具有较高的准确性和较好的适应性。

3.3.3. 区域负荷参数测辨与建模

对电网负荷参数进行在线辨识是智能电网亟需解决的问题。传统基于总体测辨的负荷建模工作，大多将某一定较低电压等级的负荷母线孤立来进行聚类与辨识建模。一方面，这样的负荷母线数量庞大，在真实的电力系统中难以对所有负荷母线进行测量（目前国内电网 PMU 量测仪覆盖了 500kV 主干网和部分 220kV 等级电网）；另一方面，小容量的负荷动态、暂态主导特性不突出，呈现较大的时变性和随机性，典型性和通用性待考量，且在不同故障、扰动情况下，辨识结果具有较大的分散性。而随着电力物联网为负荷信息量测提供了必要的技术支持和基础，为了将电力负荷辨识进一步推向实际应用，本案例结合电力 WAMS 系统建设、应用状况及电力物联网的发展，提出了与之适应的电力系统区域负荷整体信息测量采集和辨识建模方案。

本案例针对现有负荷测辨建模方法面向实际电网所面临的负荷节点众多、负荷群参数时变性和分散性强等难题、以及目前动态量测有限的现实问题，基于两阶段综合负荷主导参数在线辨识和建模方法而提出并研究了区域负荷整体在线测辨与建模方案，提出了负荷测辨与建模方案的关键技术。

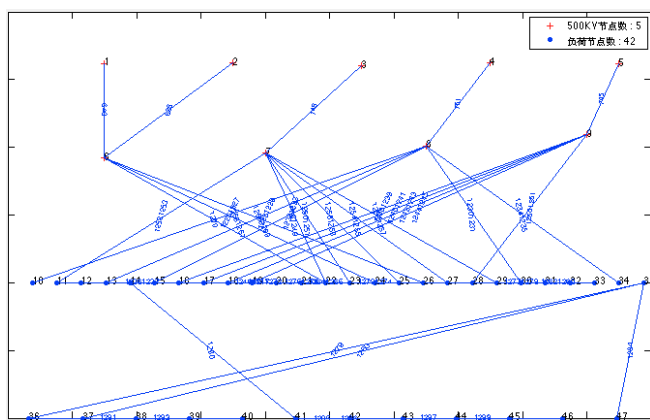


图 3.26 待辨识负荷的拓扑结构。以东莞区域负荷网为例，负荷节点按电压等级划分可分为三级。从 500kV 向下观察低电压等级的负荷变化。

区域负荷整体测辨方案的基本思路是将电气连接紧密的大块负荷区域划分并根据区域端口及内部动态量测进行整体辨识和建模；负荷区域整体在区域端口位置等值为综合负荷节点，负荷区域内部节点关联和特殊负荷节点做针对性处理；综合负荷节点参数辨识采用在线测辨、即辨即用的思路，避免负荷时变性和分散性所带来的参数准确性和模型有效性的问题。

下图 3.27 是实验案例结果，案例选用南方电网 08 丰大系统，对其中东莞区域负荷进行测辨建模。将测辨所得等值综合负荷整体替换预设东莞区域负荷，相同的故障扰动下系统暂态行为仿真结果图如下图示：

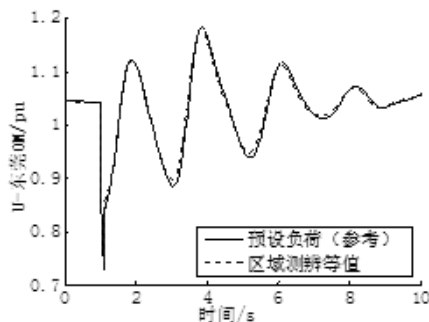


图 3.27 系统暂态行为仿真结果

我们可以得出以下结论：

- (a) 区域负荷整体测辨通过一定量的量测建立区域负荷等值综合负荷模型，能够合理准确地还原负荷动态/暂态特性
- (b) 区域负荷在一定情况下可以有效的进行整体测辨与等值建模

3.3.4. 广域阻尼控制

采用传统控制措施时，本地信号中的区间振荡成分比例较小，对区间模式的阻尼需要大量发电机的参与，较难协调。其局限性主要体现为以下三点：

1. 反馈变量的选择：都选择本地测量信息作为反馈，无法确切地反映电网区域间的相对振荡。
2. 控制器间相互影响：实际电网中 PSS 的参数多按单机模型整定，缺乏相互协调。
3. 控制方式单一化：对低频振荡的抑制过分依赖于闭环控制器，系统加装控制器之后仍可能发生低频振荡现象，缺乏相应的开环控制措施。

广域阻尼控制是直接针对区间震荡模式的一种集中式控制方式（参见 3.2.4.3），已被证明有极大潜力改善低频震荡问题，并相应的提高直流传输容量。

3.3.4.1. 案例背景

此案例以广域阻尼控制为背景，研究通讯网对电网控制性能的影响。案例背景如下图所示：



WAMC : Wide-area monitoring and control

图 3.28 广域阻尼控制系统中电网、通讯网与控制器的闭环

电网测量的 PMU 信号及控制器均通过通讯网传输。由于通讯网不确定的网络状态，经过网络传输后，电力系统的 PMU 采样数据会产生不同的延时和丢包率，而这直接影响电网稳定性的控制效果。另一方面，由于电力系统各节点的数据是通过不同的通信信道进入控制中心的，不同通信信道的数据达到控制中心的时间也会不同，因此造成控制输入数据的不同步（如图 3.12），需要进行数据预处理后才能输入控制器。因此通讯网络的特征及与之相对应的数据预处理策略成为以电网稳定性控制为应用背景的物联网课题中的基本问题。

3.3.4.2. 广域控制器性能测试

(1) 增加广域控制器前后的潮流变化

在故障激励后，在无广域控制器控制下，系统依靠自身阻尼的调节情况如图(a)所示。在理想的网络情况下，信号传输无时延，此时广域控制器的控制效果如下图(b)所示。

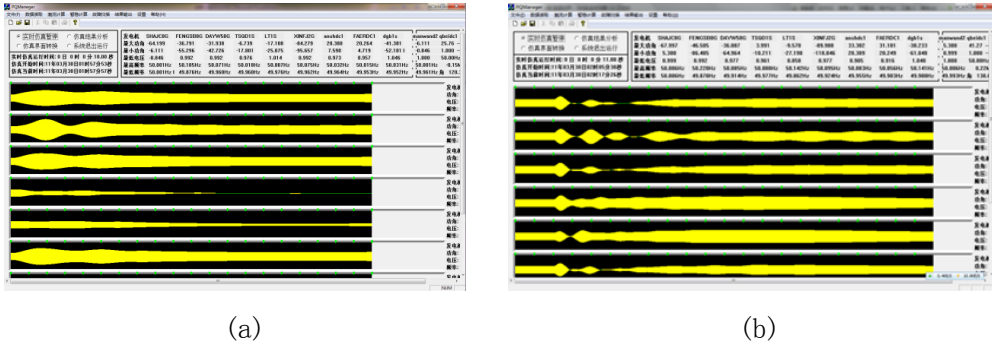


图3.29 (a)无广域控制器时系统对故障的潮流响应。(b)无时延的控制器性能：在10s之内，潮流稳定，且调节过程平稳无震荡。

(2)增加时延前后的过渡过程对比

在对各个通道加入同样大小的固定短网络时延的前后，广域控制器的控制效果分别如下图(a) (b)所示。

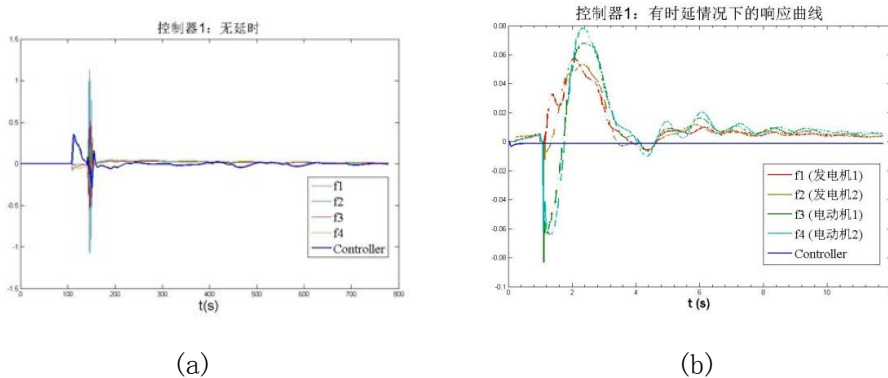


图3.30 (a)理想通讯网络条件下广域控制器输入输出曲线。可以看到在10s之内潮流即可稳定下来，且调节的震荡过程短暂。(b)小网络时延条件下广域控制器输入输出曲线。过渡过程较无时延情况下更长震荡更多，明显劣于无时延。

3.4 本章小结

3.4.1. 与国内外同类研究工作相比的创新性

本课题研究工作的创新性可在以下三方面得到体现：

1. 仿真验证平台

相对于目前已有电网通信网联合仿真系统，本仿真验证平台改进了联合仿真系统中由于网络仿真的离散性和电网仿真的连续性造成的误差及仿真时间消耗的矛盾。在现有联合仿真系统中，由于网络仿真器和电网仿真器是独立的进程，需要通过管道的方式建立关联。但由于网络仿真器是离散事件驱动的，事件发生的时刻不可测，使得联合仿真时的步长选取成为困难。若仿真步长小，则仿真时间慢；若仿真步长大，则易产生累计误差。在本仿真验证平台中，我们通过将异步通信回调函数写入电力系统仿真平台，从而实现对于电网仿真器的改造，将电网仿真器修改成适应于网络仿真离散事件驱动的模式，从而达到减少仿真误差并加快仿真时间的目的。

2. 网络延时和数据处理方式对广域控制的影响

目前虽已有分析网络环境对广域控制影响的文献，但已有研究工作主要从网络本身的带宽、负载及 QoS 保障等方面分析了网络环境对控制效果的影响。本案例研究工作的创新之处在于以延时的均值和方差为指标结合不同数据处理方式系统分析了网络延时对广域控制的影响。

另一方面，现有研究在针对时延对控制性能影响的改善方法，主要着眼于控制器设计。由于控制器设计与系统特性紧密相关，其研究结果的适用性受到一定影响。本案例研究工作的另一个创新之处在于不改变控制器设计参数的前提下，通过相对独立的信号预处理方法改善最终的控制效果。由于信号的预处理方法的特性与网络时延紧密相关，与系统本身关联较弱，因此可以相对独立于控制器的优化设计，适用性较强。

3. 电力物联网下的负荷测辨方法

已有的电力系统负荷测辨方法基于总体测辨的负荷建模工作，大多将某一定较低电压等级的负荷母线孤立来进行聚类与辨识建模。而本案例研究则针对电力物联网发展的特点，提出了电力系统区域负荷整体信息测量采集和辨识建模方案。

3.4.2. 存在的问题和改进

1. 实际模型及数据的整理

电力物联网的数据难以搜集，特别是验证数据为可信和准确的数据，通常的仿真模型中难以得到。因此我们由简至繁的改进了仿真、计算方法，以从程序中生成得到需要的各级数据。对于实际采集的数据，由于来源不一，制式繁杂，通过多方合作，进行细致认真整理，进行了大量整理工作才得以使平台联通。

2. 设备的接口匹配问题

由于系统基于自行开发的通讯协议，因此硬件设备（PMU 单元）与软件平台间的兼容性遇到了困难，经与厂方多次联系修改调试，最终实现了设备的联通和可靠通信。

3. 联合仿真的粒度与准确性

由于程序实现与实际系统的差异，进行了南方电网大系统的仿真结果的精度校核，与权威的 BPA、RTDS 相比较得到了可行可信的结果。此外，通过在电力仿真器中加入异步回调环节，修正了由于电力仿真和网络仿真兼容性造成的仿真误差。

4. 项目管理层面的总结

存在的建议是在课题实施过程中需要在一开始就对项目的整体进行全局大范围细致的计划，成功的整体的规划等于项目成功完成了一半。同时，因为项目在推进过程中的每个环节都可能出现大大小小的问题，对于局部计划必须有灵活调整的机制。局部的实施计划最好是以周为单位制定和落实。每周前五天的所有工作都要在最后两天进行总结，同时需要对下周任务进行一个部署，这样才能保证项目每周都有新进展和进步。

第四章 网络通讯对广域控制的影响

4.1 本章导言

超高压直流输电 (high voltage direct current, 简称 HVDC) 技术代表了电力电子技术在目前可以成功实施的成熟应用中的最高技术水平。由于 HVDC 在电气特性和经济性方面的诸多优势和我国的国情特点, HVDC 线路目前已是连接我国各大区域电网的纽带。首先, 对于距离 800km 以上的输电线路工程, HVDC 换流站与直流架空线路造价平摊于单位距离建设费用最为经济, 并且便于快速调整, 可分期建设、增容扩建。其次, 线路造价低、损耗小、容量大, 不存在功角稳定性问题, 且通过背靠背换流站可实现交流系统的非同步联网。

我国东西部经济发展不平衡, 西部能源资源丰富但负荷中心主要集中在东部沿海省份。因而“十一五”西电东送工程将重点建设北、中、南三大输电通道。南方电网 (China Southern Grid, 后简称 CSG) 在南部主通道建设中已建成天广 (贵州天生桥-广东广州)、贵广 I (贵州安顺—广东肇庆)、贵广 II (贵州兴仁-深圳宝安)、云广 (云南楚雄-广东穗东) 等几条超 (特) 高压直流线路, 未来将总建成 8 回直流, 建成后总容量达 2740 万 kW。这些线路承担了中国东南沿海省份的电力供应, 自建成后全年压极限运营。在南方电网西电东送电力中, 直流输送容量已超过了 3/4。

要进一步提高直流传输的容量, 区域间的低频振荡 (Low-frequency oscillation, 简称 LFO) 是一个主要瓶颈[Xiao2004]。低频振荡不仅限制传输容量的增加, 更可导致包括断电等严重的系统故障[CIGRE]。充分的阻尼是保障电力系统安全运行的先决条件[He2007]。HVDC 传输系统具有快速响应的能力, 因而有望极大改善 AC/DC 系统的瞬态和动态稳定性[He2007]。

在 HVDC 传输系统中增加辅助阻尼控制已被证明可以抑制低频振荡并增加电力传输容量[Smed1993]。在辅助控制器中实施广域阻尼控制(wide-area damping control, 简称 WADC)在解决低频振荡这一稳定性问题上具有极大潜力[LuC2008, LuC2009, He2009], 因而已在 CSG 的两条 HVDC 线路上展开了现场测试。与传

统的本地控制不同，广域阻尼控制器的输入输出信号均需要经过远距离的通信网络到达受控节点，因此信号的网络时延对最终控制效果的影响不容忽视，这也是在通信缺陷下对分布式系统进行广域控制的研究难点之一。

实际系统现有的多个通道中随机时延较大，导致系统保守度不足。针对此问题，本研究提出了针对多通道随机时延的三种补偿方式，并给出了信道时延及时延补偿的模型。通过以编码方式建模采样信号失真，量化信道时延及补偿的状态估计误差，给出了反馈控制其收敛的条件。以南网丰大 2008 系统及历史故障为案例背景，仿真测试了三种方法在抑制贵广区域震荡的实际效果。仿真实验给出了现有广域控制器的时延容忍程度及广域控制器和时延补偿的效果。实验结果表明了既有方式的潜在隐患，以及三种补偿方法相对既有方式的大幅改善，同时也表明三种方法的适用性与局限性。

本章在接下来的 4.2 节中对广域控制系统时延的主要文献综述，在 4.3 节中介绍本研究的 CSG WAMCs 系统，在 4.4 节给出待研究的时延系统与处理方式的模型，在 4.5 节中给出实验方案与设置参数，4.6 节给出实验结果及其分析，最后以 4.7 节的结论与展望收尾。

4.2 针对 WAMCs 中时延的研究现状

在广域控制的文献中，考虑时延对系统稳定性的影响一直是研究的热点之一。相关研究大体可分为两类：一是以设计反馈控制器的为目的，二是以研究通讯条件为目的。服从这两个目的，对时延的建模也相应分为两类。针对抑制频率振荡的研究中，多将时延转化为频域中的相移以便于设计反馈控制器。针对通讯网络的研究中，则多采用随机过程的模型。

在第一类研究中，文献[Chaudhuri2004, Wu2003, Wu2004]中给出了计算控制器对时延容忍临界值的计算方法，这里考虑的时延为单通道的固定时延或多通道中同样的时延。通过 H_∞ 控制策略[Chaudhuri2004]或动态增益调校[Wu2003]的方式来平衡时延容忍度与控制效果。在[He2009]中则通过在控制器前置带通滤波环节补偿时延造成的相移。在第二类研究中，文献[Stahlhut2003]将 WAMCs 中的通讯延迟本身建模为随机过程，给出了其对控制信号的影响。而[JiaH2008]中给出了电力系统对小信号时延的稳定域的一般性结论。针对线形或小规模的网络化控

制系统还有更多的理论结果，相关的综述可参见[Yang2006] [Cai2007] [Gao2008] [Maurice2010].

以上处理时延的文献主要以单输入单输出（Single input single output,简称 SISO）系统的控制策略的结果为基础。对于 WAMCs 这类分布式系统，信号采样来自多通道的情形，多通道系统中随机大时延的情形，往往难以直接套用前面的研究结果。在[Phadke2010]中总结了针对 WAMCs 应用的通讯对带宽、路由的一系列要求。而针对 WAMCs 通讯中的数据流量，Chenine 等人的研究则提供了一系列的理论或基于商业软件的仿真模型[Naduvathuparambi2002] [Chenine2007] 00.

CSG 的 WAMS 系统是第一个采用 PMU 信号作为输入进行连续反馈控制的系统[LiP2009]。该辅助广域阻尼控制器在用于增强系统的阻尼，以抑制区间低频震荡，减少系统故障模式下失稳的情况。针对 CSG WAMCs 的实验研究可参见 [He2007] [He2008] [He2009]。文献[He2008]中的测试结果指出，在广域阻尼控制闭环中的时延可能导致高频震荡，并给出了在不同反馈增益下的时延容忍阈值。

4.3 系统描述

考虑大电网两个子区间的低频震荡问题。两个由超高压直流线路相连的子区，其交流频率的差值会引起两子区间的低频震荡。在频差故障较大时，系统本身的阻尼不足以抑制震荡，可能导致故障的快速传播。在中央控制节点增加一个辅助的广域阻尼控制器有助于增加系统阻尼，抑制低频震荡。但计算区域间的频率差，需要在各区域不同采样点取频率的平均值，然后计算两区域频率均值的差值。由于各采样点的频率值需要汇集后才能计算差值，而量测信号到达中央控制节点的存在着不同且随机的时延，这就为控制器计算控制信号引入了随机误差。为刻画随机误差的影响，以进一步对控制器进行前馈补偿，我们将系统概况介绍如下。

4.3.1. 电力系统案例

考虑 CSG 的丰大 2008 系统，整个系统共有节点 1392 节点，母线 2371 条，贵广 I、贵广 II 两条 HVDC 线路。贵广 I、贵广 II 两回直流是南方电网 500KV 超

高压直流线路(图 4.X)。贵广 I 回直流起点贵州安顺换流站,落点为广东肇庆流站,直流输电线路全长 899 公里,额定输送容量为双极 300 万。贵广 II 回直流起点贵州兴仁换流站,落点为广东深圳宝安换流站,直流输电线路全长 1225 公里,额定输送容量为双极 300 万。

尽管现已安装超过 100 个 PSS(power system stabilizer), CSG 中跨区域的低频振荡近年仍发生过多次[He2009]。为了抑制低频区间振荡,已在广州的控制中心增加了辅助控制器测试实施广域阻尼控制(如图 4.1)。



图 4.1 抑制贵广两区频率震荡的广域阻尼控制系统示意图。两区域中分设频率采样点及本地控制节点。绿色为采样信号通路,紫色为反馈控制信号通路。采样点信号发送至位于广东的中心控制器后,若频差超出阈值,广域控制器计算出反馈控制指令,发送至本地节点。

通信线路与电力主干网线路同步建设,目前采用专用高速光纤通讯,带宽 2MBbps。本地 PMU 测量信号及广域控制器发出的控制信号均通过光纤传送。在现场测试中,PMU 信号的到达时延在 60~80ms 之间,接近截断正态(truncated normal distribution)分布(图 4.2)。

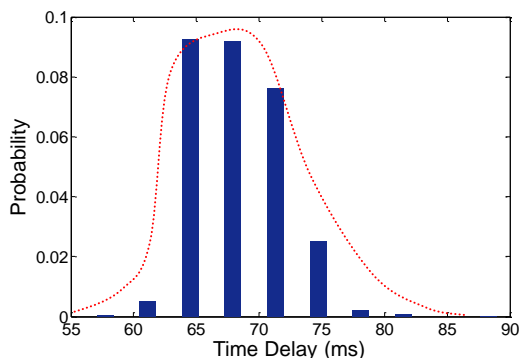


图 4.2 时延现场测试的分布

4.3.2. 控制器

采样信号为时间驱动(time driven)，以离散时间周期 T_s 采样，控制器为事件驱动(event driven)，即只有监测到超过阈值 D 的频差方才进行反馈控制。

由于对实际系统而言的最优控制器通常难以获得，测试中采用目前典型季节模式下次优控制器的组合。具体如图 4.3 所示的定增益（定参数）控制器。

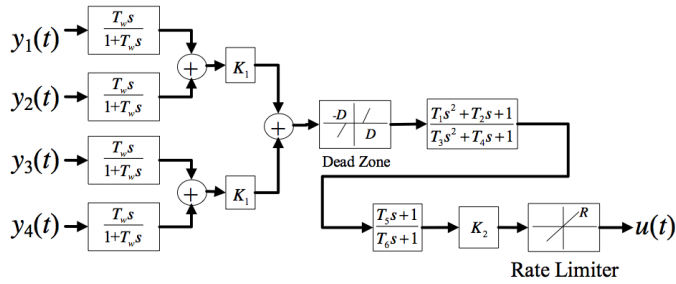


图 4.3 位于中央控制节点的广域阻尼控制器

该控制器接收 4 个输入，分别对应两个子区各两个的采样点。

4.4 系统模型

4.4.1. 闭环控制系统模型

CSG WAMCs 的系统模型如下图所示。考虑 N 个 PMU 子站，以时间间隔 T_s 采样得到 t 时刻的系统状态 $X_t = [X_{1,t} \dots X_{N,t}]^T$ 。PMU 主动发送系统状态 X_t ，经通讯网络至中央控制器。在 t 时刻中央控制器端接收到的状态信号的观测记为 \hat{x}_t 。观测量 \hat{x}_t 通常与 X_t 不同，有时无法作为控制器的有效输入。前置于控制器的补偿器利用缓存中的历史状态信息 $X^{t-1} = [X_{t-1} \dots X_0]^T$ 得到状态估计值 \bar{X}_t 。这里我们认为补偿器的缓存大小远大于实验窗口时间内的采样周期数，即 $M \gg T$ 。

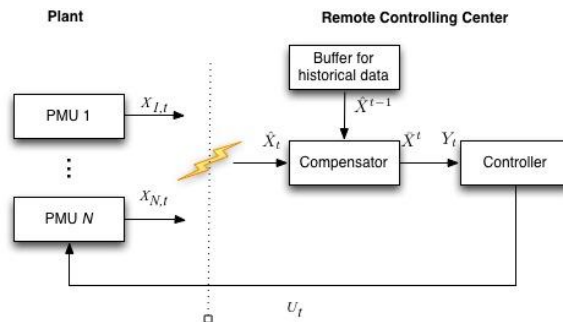


图 4.3 CSG WAMS 系统闭环控制模型示意图

原系统模型可写作：

$$X_{t+1} = f(X_t, U_t) \quad (4.1)$$

$$Y_t = CX_t \quad (4.2)$$

为了补偿器的性能，我们这里将系统作简化处理。记存在如下线性系统

$$X_{t+1} = AX_t + BU_t \quad (4.3)$$

$$Y_t = CX_t \quad (4.4)$$

可包络原系统，即有：

$$AX_t + BU_t - \epsilon \leq f(X_t, U_t) \leq AX_t + BU_t + \epsilon \quad (4.5)$$

并考虑最简单的静态线性反馈控制器，即：

$$U_t = -KY_t \quad (4.6)$$

我们以相对包络系统的估计误差 $e_t = \|\bar{X}_t - X_t\|_2^2$ 来刻画补偿器的性能。

4.4.2. 通信时延与补偿

为了统一刻画多路信号因为通讯时延而发生的变形以及进入控制器起前的补偿，类似[Fradkov2008]等文献中的做法，我们将信号在通道中的时延与对信号的前馈补偿均建模为编码器。如下所示， N 个通道分别记为编码器 $E_{1,t}, \dots, E_{N,t}$ ，前置补偿器记为补偿器 E_t 。

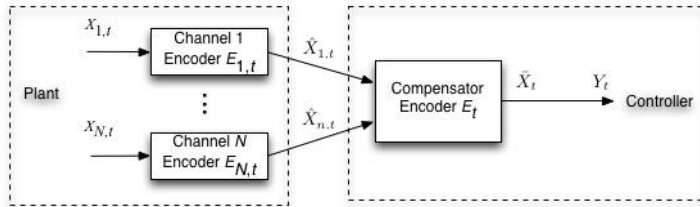


图 4.5 编码器模型

则有

$$\hat{X}_{n,t} = E_{n,t} X_{n,t} \quad (4.7)$$

可知各通道时延为随机时刻，因而编码器 $E_{n,t}$ 也为随机变量，设 t 时刻第 n 个通道的时延为 $d_{n,t}$ 。则此时编码矩阵为

$$E_{n,t} = \begin{pmatrix} 0 & I_{t-d_{n,t}} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_{t \times t} \quad (4.8)$$

通常各通道的时延相异，即当 $n' \neq n$ 时， $d_{n',t} \neq d_{n,t}$ ， $E_{n',t} \neq E_{n,t}$ ，故无法直接以观测

值 $\hat{X}_t = [\hat{X}_{1,t}, \dots, \hat{X}_{N,t}]^T$ 作为控制器输入。因此采用前置补偿器 $E_{n,t}$ 得到估计值

$$\bar{X}_t = E_t \hat{X}_t \quad (4.9)$$

4.4.3. 补偿的编码器模型

通常，一个具有 M 个缓存位置的前置补偿器可以利用这些历史数据，简记为 $X_F^T = [X_{M-1}^T, \dots, X_0^T]^T$ 进行前向预测，即

$$X_M^T = X_F^T W_F = [X_{M-1}^T, \dots, X_0^T] \begin{bmatrix} w_{M-1} \\ w_{M-2} \\ \vdots \\ w_0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

其中 W_F 为给定前向预测权值。这种做法适用于对已同步的观测值进行估计。

在本研究中，信号的同步本身就是要解决的问题，因此类似的做法可以用于对各通道信号分别进行前向估计，或先经过同步以后再进行预测。这里重点考虑对多通道中不同步的信号进行同步补偿的问题。

先给出三个基本的补偿器：Drop，FH (full history) 及 SCH (single channel history)。

Drop 是实际中采取的一种最保守的方式，当时刻 t 采样信号有某一通道未到达，则所有采样信号均不予采用，控制器输入置为零，这样以保证所有输入信号均为最新的同一时刻的采样值。相应的，其编码器模型为各通道时延矩阵的点积：

$$E_t^{Drop} = E_{1,t} \cdot E_{2,t} \cdots E_{n,t} \quad (4.11)$$

FH 即全通道历史数据补偿是时延较小时采取一种方式。当时刻 t 采样信号有某一通道未到达，则采用最近一次全部通道均到齐的信号作为控制器输入，而其他通道更新的采样信号均不予采用，置入缓存。FH 相应的编码器模型为各通道时延矩阵的积：

$$E_t^{FH} = \prod_n E_{n,t} \quad (4.12)$$

SCH 方式可以认为是线性前向补偿中最简单的一种。当时刻 t 采样信号有某一通道未到达，则采用该通道前次信号与其它通道的最新信号共同作为控制器输入。这是对信号利用率最及时的一种做法。SCH 相应的编码器模型不能表示为一个独立的矩阵，其估计可以写作：

$$\bar{X}_t = [E_{1,t} X_{1,t}, \dots, E_{n,t} X_{n,t}]^T \epsilon(1) \quad (4.13)$$

其中 $\epsilon(n)$ 为单位向量，其第 n 个元素为 1，其余的为 0。

4.4.4. 编码误差

基于上述编码器模型，我们可以推导其编码误差，即不同补偿器为该连续闭环控制系统带来的估计误差。我们采用 [Tatikonda2004b]等文献中的误差指标

$$e_M(X^t, \bar{X}^t) = \|\bar{X}^t - X^t\|_M^2 = (\bar{X}^t - X^t)^T M (\bar{X}^t - X^t) \quad (4.14)$$

取 $M=I$, 则有 $e(X^t, \bar{X}^t) = \|\bar{X}^t - X^t\|_2^2 = (\bar{X}^t - X^t)^T (\bar{X}^t - X^t)$ 。

以 FH 方式为例，其编码误差为：

$$\begin{aligned} e^{FH}(X^t, \bar{X}^t) &= [(E_t^{FH} - I)X^t]^T (E_t^{FH} - I)X^t \\ &= (X^t)^T \|(E_t^{FH} - I)\|^2 X^t \\ &= (X_{n,0} \cdots X_{n,t}) \begin{pmatrix} -1 & & & & 1 \\ & \ddots & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{n,t} \\ X_{n,t-1} \\ \vdots \\ X_{n,1} \\ X_{n,0} \end{pmatrix} + \sum_{\tau=0}^{d_{n,t}} X_{n,\tau}^2 \\ &= \sum_{\tau=d_{n,t}}^t X_{n,\tau} X_{n,\tau-d_{n,t}} - \sum_{\tau=d_{n,t}}^t X_{n,\tau}^2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

设 $\|X\|$ 存在上界 X_L , 则由(4.3)可知, $Ce^{FH}(X^t, \bar{X}^t) \leq T_s \|A - KBC\| X_L$; 而一旦存在 $\|X\| > X_L$, 则对所有 $t > t'$ 有误差 $e_n^{FH}(X^{t'}, \bar{X}^{t'})$ 递增, 广域控制器有 $C = [1/2 \ 1/2 \ -1/2 \ -1/2]$, 则控制器输出误差 $Ce^{FH}(X^{t'}, \bar{X}^{t'})$ 同时增长, 导致系统发散, 这与实验结果相吻合。因此我们在实验中, 采取其他同步补偿方式, 并与 Drop 做对比。

4.5 实验设置

4.5.1. 电力系统参数

4.5.1.1. 控制器参数

如图 4.3 所示的定增益广域阻尼控制器的主要参数如下表 4.1

表 4.1 阻尼控制器参数

T_w	K_1	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	K_2	R
0.02	0.5	0.3	0.2	0.3	0.2	0.15	0.1	4	0.1

4.5.1.2. 稳定性指标

在低频振荡的故障发生后，由于系统高度耦合，影响会迅速传播，若控制器不能在 T 时间周期内抑制住波动，系统通常会失稳。对于这一基于采样信号的非线性连续系统，我们采用如下的二次型指标 γ 衡量广域控制器对抑制系统低频振荡的稳定性控制效果：

$$g = \int_{t=0}^T s^2 dt \quad 4.7$$

其中, s 为两区域间平均频率的差值, T 为实验的窗口时间, $T \gg T_s$ 。本实验中采样时间 $T = 10\text{ms}$, 窗口时间 $T_s = 1\text{s}$ 即 1000 个采样周期。

4.5.1.3. 补偿方式

考虑到 Drop 模式对信号的利用率过低，这里我们对接收到的异步信号提出三种不同的补偿控制器输入的启发式方法以提高信号利用率，充分使能广域阻尼控制器的反馈控制。FH 的全补偿方式造成反馈控制时延过长。在实验中发现，采用 FH 的方式补偿控制器输入，即便没有超过确定性时延实验中得到的稳定阈值，由于同步后的系统时延为随机的，系统也出现了失稳。这一现象与文献 [Wittenmark1995], [Cloosterman2006] 所述的随机时延破坏系统稳定性结论相 6 致。

另外三种方式除 SCH (single channel history, 单通道历史信号) 之外，还有 SCI (single channel interpolation, 单通道插值) 以及 SCI-T (single channel interpolation with timestamp, 单通道带时标插值)。下面分别描述如下。

Drop 如前所述，若在 t 时刻有任一通道信号尚未到达，控制器输入 $x_n(t), n=1, \dots, N$ 全部置为 0。不能完整到达的信号将被抛弃。写作：

$$x_n(t) = s_n(t_1) \cdot I_{\left\{s_n(t_1) \in \mathbf{A}, t_1 = \max_n \{\tau | s_n(\tau) \in \mathbf{A}\}, n=1, \dots, N\right\}}, \quad \forall n \quad (4.17)$$

这里 $I_{\{\cdot\}}$ 为示性函数，当 $\{\cdot\}$ 为真时取 1 否则取 0。由于忽略了不能完整到达的量测信号，Drop 方式下控制器起作用的时间有限，这就阻碍了辅助控制器的及时起效，浪费了量测数据。下面三种方法通过补偿未到达数据来使得控制器及时起效。

SCH 如前所述，SCH 方法利用最近一次历史数据作为未到数据的估计，即：

$$x_n(t) = \begin{cases} s_n(t_1) & \exists t_1 = \max_{\tau \in [0, t]} \{\tau | s_n(\tau) \in \mathbf{A}\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall n \quad (4.18)$$

这一估计方法使得数据同步性难以保证，但较大程度的利用了历史数据使控制器得以及时反馈。

SCI 不同于 **SCH** 直接采用历史数据作为估计，**SCI** (Single Channel Interpolation) 利用同一信道内最近的两次数据进行一次线性插值以估计未到数据，即：

$$x_n(t) = \begin{cases} s_n(t_1) & s_n(t_1) \in \mathbf{A} \\ \frac{s_n(t_2)(t_1 - t_3) - s_n(t_3)(t_2 - t_3)}{t_2 - t_3} & s_n(t_1) \notin \mathbf{A} \text{ and } t_2, t_3 > 0, \quad \forall n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.19)$$

其中

$$t_1 = \max_n \{ \tau \mid s_n(\tau) \in \mathbf{A} \} \quad (4.20)$$

$$t_2 = \max_{\tau \in [0, t_1]} \{ \tau \mid s_n(\tau) \in \mathbf{A} \} \quad (4.21)$$

$$t_3 = \max_{\tau \in [0, t_2]} \{ \tau \mid s_n(\tau) \in \mathbf{A} \} \quad (4.22)$$

在采样周期足够小的情况下，这一线性插值有望较 **SCH** 更接近 t 时刻未到数据的真实值。

SCI-T 不同于 **SCI** 方法，**SCI-T** (Single Channel Interpolation with Timestamp) 在线性插值时考虑最近两次信号的真实时标，并考虑当前时刻的真实时标插值得出估计值，这相当于对系统动态过程做线性近似后得到未到数据的估计值。即：

$$x_n(t) = \begin{cases} s_n(t) & s_n(t) \in \mathbf{A} \\ \frac{s_n(t_2)(t - t_3) - s_n(t_3)(t - t_2)}{t_2 - t_3} & s_n(t) \notin \mathbf{A} \text{ and } t_2, t_3 > 0, \quad \forall n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.23)$$

其中

$$t_2 = \max_{\tau \in [0, t]} \{ \tau \mid s_n(\tau) \in \mathbf{A} \} \quad (4.24)$$

$$t_3 = \max_{\tau \in [0, t_2]} \{ \tau \mid s_n(\tau) \in \mathbf{A} \} \quad (4.25)$$

当信号时延为零或者小于采样周期时，**SCI-T** 等价于 **SCI**。

4.5.2. 通讯网络参数

4.5.2.1. 时延的模式

我们的实验分为四组，参考组及三个测试组的时延设置分别如下：

(1) 参考组

参考组主要提供系统及控制器的基准性能，作为后续比较的参考。首先，各通道的时延设置为 0，考察理想网络条件下广域控制器对抑制系统低频震荡的过渡过程，确定实验窗口。其次，各通道设为相同的确定性时延，并从 0 开始逐渐增加，考查系统可容忍时延的稳定阈值。

(2) 截断正态分布

根据目前现场实测的专线时延，我们采用服从截断正态分布的随机时延进行模拟，比较不同异步时延补偿方式下系统的稳定性能差异。各通道假定为独立同分布。

(3) 均匀分布

作为生成各类随机分布的基本分布，均匀分布时延作为我们进一步测试比较不同异步时延补偿方式的设置。

(4) 排队模型

为了考查复用专用带宽传送其他电网应用信号的情况，我们考察存在背景噪声数据包的情况。每个信道中，由于存在共享的背景噪声数据包，PMU 的量测信号数据包的时延由排队系统生成，详见下节。

4.5.2.2. 排队网模型

系统有 N 个通讯信道，即控制器有 N 个输入。时刻 t 信道 n 的信号记为 $S_n(t)$ 。所有 N 个信道中已经接收到的信号集记为可用集 \mathbf{A} 。可用集 \mathbf{A} 中的信号可以用作对未到信号的估计，在控制器接受输入信号前对输入信号的大时延进行补偿。

在每个信道中，由于存在共享的背景噪声数据包，PMU 的量测信号数据包的时延需要考虑前方排队的噪声数据包的排队时间。排队时间由对排队系统 $QM_n\{L_n, \mu_n\}$ 仿真生成。其中， L_n 为第 n 条信道中的最大允许队长，超出部分即被丢包； μ_n 为服务速率，即第 n 条信道中路由单位时间内处理数据包的字节数。 N 条通道的排队系统分别建模 $\{QM_n\}$ ，独立仿真得到时延。

• 背景噪声流量

在每个信道中，数据包的流量可以建模为图 4.5 所示的排队系统。PMU 信号以等时间间隔 Δ 发送，每个数据包大小为 1。其他共享此信道的背景噪声数据包建模为随机泊松流 $\{N_1, N_2, \dots\}$ ，背景噪声信号的数据包大小与应用相关，这里假设遵循负指数分布 $Ex(\lambda)$ [Park1996] [Crovella1997] [Willinger1997]。

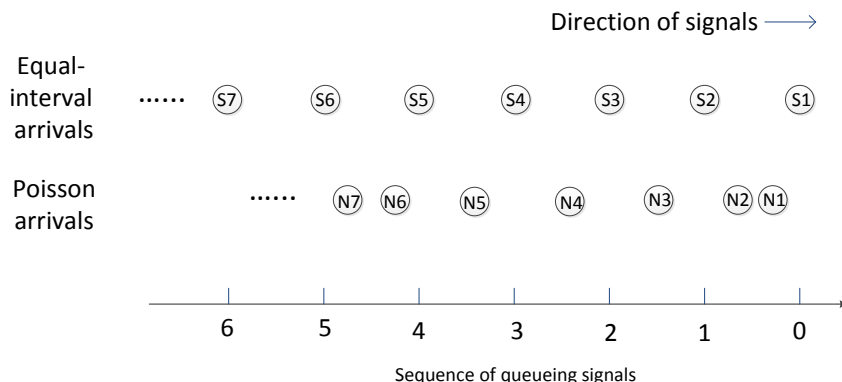


图 4.6 与 PMU 数据信号共享带宽的泊松到达的背景噪声信号的流量，噪声数据包 $\{N_1, N_2 \dots\}$ 大小服从指数分布。

举例来说，图 4.6 中的信号数据包 S_2 的时延取决于信号数据包 S_1 的，和背景噪声数据包 N_1, N_2 的时延与排队时间。第 n 个信号数据包的时延可以以下式计算

$$\begin{cases} \delta_0 = 0 \\ S_0 = 0 \\ \delta_n = \max \left\{ \delta_{n-1} + \sum_{\{i: S_{n-1} < N_i < S_n\}} q_{N_i} - \Delta, 0 \right\}, \quad n \geq 1 \end{cases} \quad 4.26$$

其中 S_n 表示第 n^{th} 个 PMU 信号的数据包，在不致混淆的情况下亦表示其信号发出的时刻。类似的， N_i 表示第 i^{th} 个背景噪声信号的数据包，及其信号发出的时刻。

4.6 结果与分析

4.6.1. 参考实验

4.6.1.1. 广域阻尼控制器性能

发生故障后，系统过渡过程的响应曲线如的图 4.7 所示。增加广域阻尼控制器后，其动态过程可在 1000 个采样周期即 1s 之内基本进入稳态。因此，在下面的比较实验中，我们将实验的时间窗口设为 $T=1s$ ，考察系统在不同时延补偿方法下在有限时间内的稳定特性。

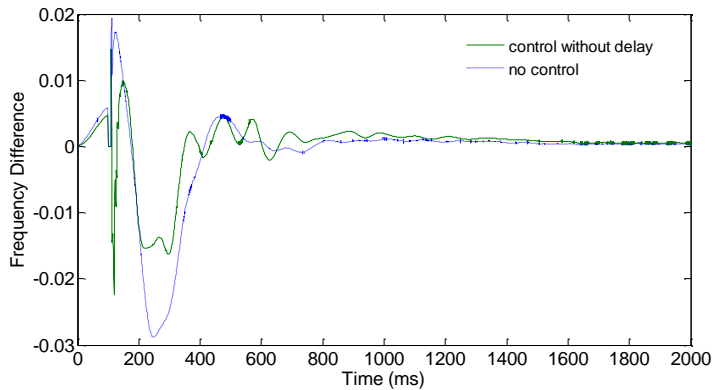


图 4.7 仿真比较无广域阻尼控制和理想网络条件下广域阻尼控制的系统过渡过程

4.6.1.2. 时延容忍阈值

将各通道时延统一设为确定性的相同时延后，系统过渡过程的二次稳定指标 γ 随时延增加的变化如下图 4.8 所示。在现有的广域阻尼控制器下，系统故障后过渡过程的二次稳定性能指标随着时延增加而增长。当时延超过 300ms 时整个系统发散，性能指标的大小不再有意义。当二次型性能指标 $\gamma > 0.1$ 时，控制效果被认为不可接受，因此现有系统的时延容忍阈值为 105ms.

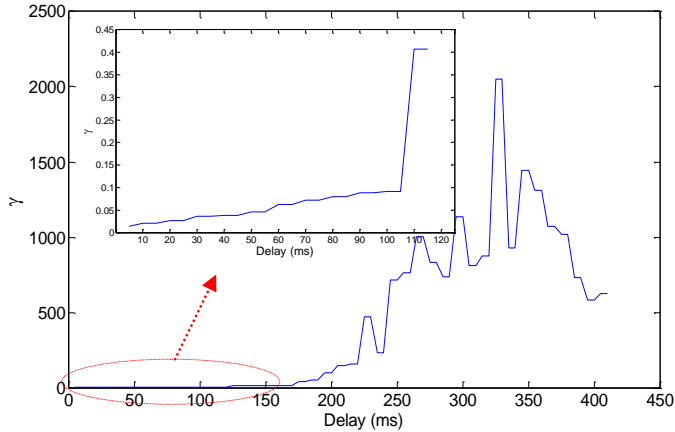


图 4.8 系统对同步、确定性时延的容忍阈值。随着时延从零开始逐渐增长，系统的稳定性二次型性能指标逐渐劣化。

4.6.2. 截断正态分布时延

基于现场实测的专用带宽下的信号时延，不加区分不同通道，其时延分布如图 4.2 所示，在这部分测试中我们用取值大于 0 的截断正态分布仿真专线通道的时延。设定相同标准差 $\sigma=3$ ，在均值分别为 $\mu=60, 65, 70, 75, 80$ 时，系统采用不同同步时延补偿方式后的过渡过程二次稳定指标 γ 变化如图 4.X。由图中可看出 Drop 方式下的 γ 的取值范围在 0.06 至 0.11 直接，而其他三种方式缩小了 γ 的取值范围，且不会达到 Drop 方式下出现的 γ 的较高取值。无论从 γ 的均值还是标准差的角度，SCH, SCI 和 SCI-T 三种同步补偿方式在现有的带宽条件下，都改善了系统故障后的稳定性。比较图 4.X 中相同的确定时延的参考实验结果，当 γ 增加到 0.1 时时延为 105ms。在本组实验中，用 Drop 方式处理随机的相异时延，当 γ 增加到 0.1 时时延仅为 70ms，系统对时延的容忍阈值降低了 35ms，用其他方式，时延容忍阈值的降低程度则可接受。在其他更一般的网络条件下的比较如下。

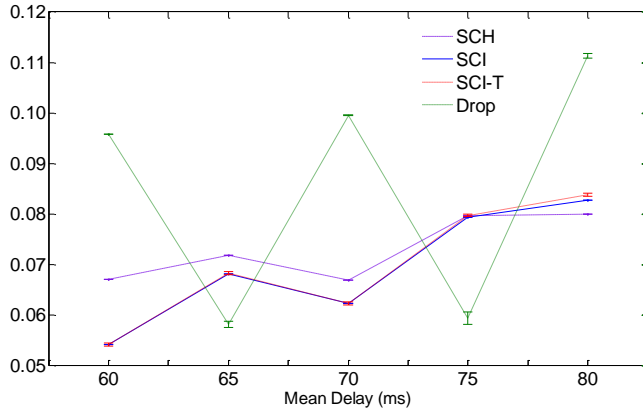
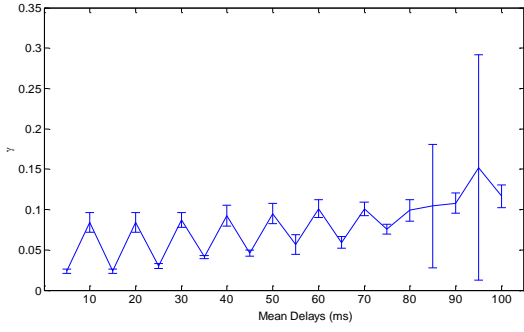


图 4.9 在截断正态分布方差相同的情况下，控制器稳定性能随时延均值增加的误差线比较。

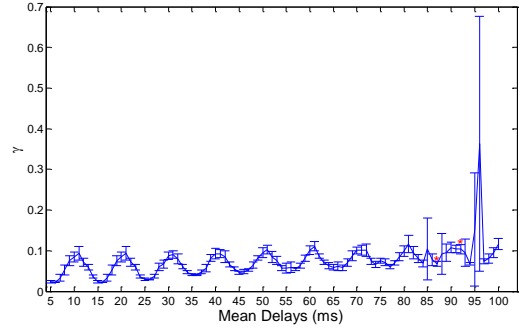
4.6.3. 有界均匀分布时延

均匀分布是构成其他随机分布的基本分布，为测试更多随机情况下同步补偿后控制器的效果，我们设定了不同均匀分布。首先，在相同的方差 $25/3$ 下，当随机时延均值逐渐增加时，不同方法下系统稳定性指标 γ 的误差线如图 4.10 所示。时延均值取值范围是 5ms 到 100ms ，增加步长为 5ms 。可以看出，随时延增加，系统稳定性在各个同步补偿方法下都逐步劣化，体现为二次稳定性指标 γ 逐步增加。

由参考实验已知现有系统对同步确定时延的容忍阈值为 105ms ，我们期望系统对随机的异步时延的容忍阈值亦不低于此。在这组测试中，SCH 和 SCI 方法下 γ 的误差线在 65ms 处有轻微的变化，而四种方法下的二次稳定指标 γ 的均值和方差均在 85ms 后有明显的增加。当时延均值接近 100ms 时，Drop 和 SCI-T 的方法在一些样本轨道上导致系统稳定失败。出现系统发散的这些样本轨道在生成误差线的数据里被排除，在相应的数据点上以红色标注。



(a)



(b)

图 4.10 Drop 方法下系统稳定性能指标 γ 的误差线图

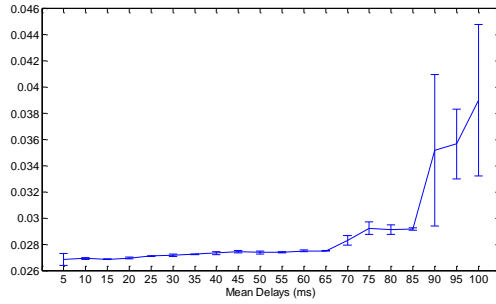


图 4.11 SCH 方法下系统稳定性能指标 γ 的误差线图

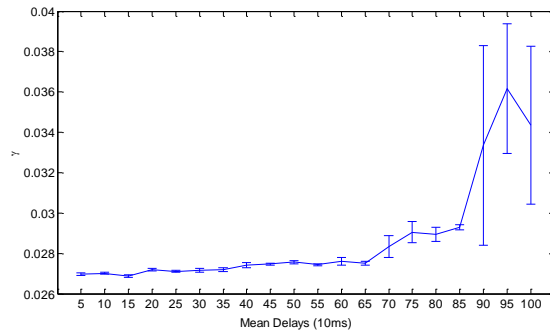


图 4.12 SCI 方法下系统稳定性能指标 γ 的误差线图

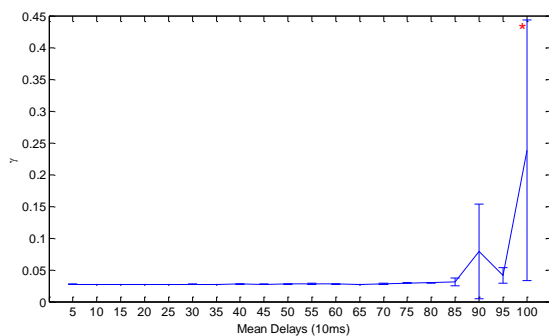


图 4.13 SCI-T 方法下系统稳定性能指标 γ 的误差线图

Drop 从图 4.10 中可以发现，随着时延均值增加，Drop 方法下系统的稳定性能不仅逐步劣化，还关于时延均值发生周期性震荡。为了更仔细的考察这种震荡，我们缩小均值增加步长为 1，如 4.10(b)中误差线图。可以发现，这一震荡是 Drop 方式特有的，其周期与系统的采样周期和随机时延的范围有关。在 Drop 方式下，未能在同一个采样周期内到达的信号将一同被忽略，这种情况下辅助的阻尼控制器不起作用。在 CSG 的 WAMS 中，PMU 量测信号的采样周期为 10ms，相应的控制器每 10ms 接收一次信号。若延时后的信号在同一个周期内到达，无论时延长短，这些信号都被认为是同时到达的，此时辅助控制器可以发挥作用。若信号的时延分布在多于一个采样周期内，多路信号在同一采样周期内到达的概率就大大降低，辅助控制器在整个时间窗口内将较少发挥作用，系统的稳定性指标也因此劣化。从图 4.10(b)可以看出，稳定性指标 γ 随时延均值增长的震荡周期为 10ms，恰好是采样周期的宽度。并且 γ 震荡的波峰，即一个震荡周期内性能最糟的点，发生在时延均值为采样周期整数倍的情况下。此时，均值正处于两个采样周期的临界点上，多路信号分散于不同采样周期内的可能性最多。相反的情况发生在均值位于一个采样周期正中时，此时多路信号在同一个采样周期内到达的概率最高，辅助控制器起作用的频率亦最多，因此 γ 相应成为震荡的波谷。所有波峰或波谷的变化都是随时延均值的增加变差的，但相比之下，在时延导致系统失稳之前，震荡的幅度远高于时延增加导致的劣化的幅度。因而，有效利用信号是改善系统性能的方向。

除了上述缺陷，Drop 方式相对其他方式性能也不够理想。在时延还不大的时候，稳定性指标已经过大，且时延均值超过 85ms 时即已出现系统失稳的情况。较 Drop 而言，下面几种方法对系统稳定性指标 γ 的改善都可以达到 10 倍左右。

SCH/SCI 从图 4.11,图 4.12 的纵坐标范围中可看出,较之 Drop, SCH, SCI 与 SCI-T 方法都对稳定指标 γ 的明显改善。SCH 与 SCI 的性能非常类似,系统的稳定性随时延均值增加而略有变差,时延超过 65ms 时 γ 有小幅增加,当时延超过 80ms 时, γ 的均值和方差均迅速增加,但仍然优于同等情况下 Drop 的性能指标。

SCI-T 如图 4.13, SCI-T 在时延较小时对 Drop 改善的程度与 SCH/SCI 类似。且在时延均值达到 85ms 之前,性能指标 γ 平稳。在时延均值超过 85ms 之后,性能指标 γ 大幅增长,出现接近 Drop 性能的较差指标;且在时延达到 100ms 后,同 Drop 方式下类似,出现个别系统失稳的样本轨道。出现这种特性的一个可能解释如下:由于 SCI-T 按时标进行了等比例的插值,相当于对系统进行了线性化的估计,由于系统本身的非线性特征,在时延较大的情况下这种线性化的近似与系统真实量测信号间误差较大,导致系统发散。

4.6.4. 存在背景噪声流量的混合网络

在这组测试中,背景噪声流量的到达率设为 10,数据包大小范围设为 1 至 10,系统的稳定性能指标 γ 随数据包大小增长的曲线如图 4.14 所示。

相比 Drop,整体上看, SCH 和 SCI 方法将二次稳定性指标 γ 缩小到了 1/10, SCI-T 的性能在数据包较小的情况下接近 SCI,在数据包大小仅为 1 或 2 时, SCI-T 略优于 SCH。四种方法下,系统稳定性能均随数据包大小的增加而降低, Drop 相对减低的较为均匀。当数据包大小增加到 5 之后,系统的稳定性变化较为明显,尤其是 γ 的方差快速增加,这也说明排队时间的随机性增加了。这种情况下, SCH 与 SCI 仍优于 Drop,但 SCI-T 下系统失稳的情况非常严重,劣于 Drop 的表现。这也说明线性化的估计误差的影响,远超过阻尼控制器的作用。

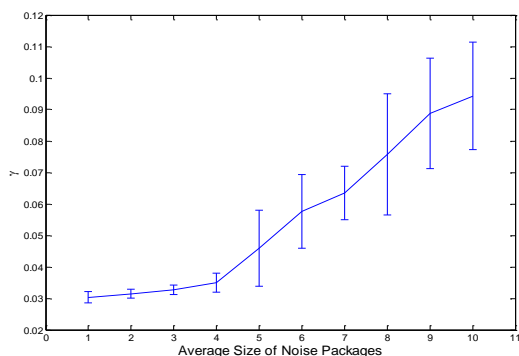


图 4.14 当背景噪声数据包大小增长时, Drop 方式下的误差线

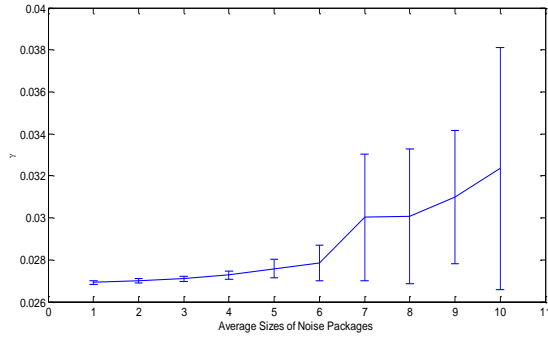


图 4.15 当背景噪声数据包大小增长时，SCH 方式下的误差线

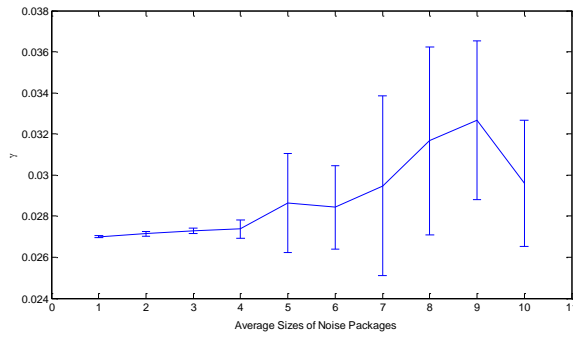


图 4.16 当背景噪声数据包大小增长时，SCI 方式下的误差线

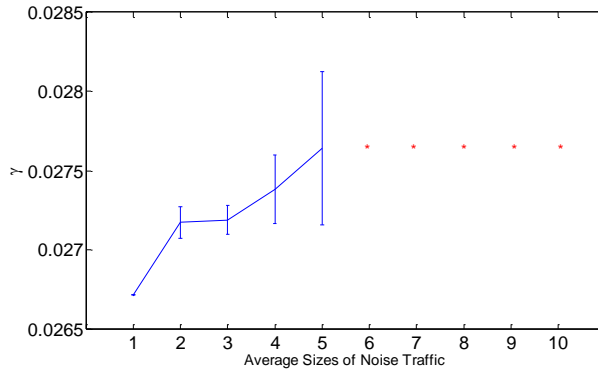


图 4.17 当背景噪声数据包大小增长时，SCI 方式下的误差线。红色星点表示多数样本路径下，在实验窗口时间内系统已失稳。当背景噪声数据包的大小 6 倍于 PMU 量测信号数据包时，控制器无法镇定系统。

4.7 结论与展望

4.7.1. 针对广域低频震荡的结论

针对此案例，目前我们得到的阶段性结果如下：

- a) 广域阻尼控制器对电网低频震荡的抑制效果明显
- b) 网络的延时和方差对控制效果的影响很大
- c) 不同数据处理策略对网络延时的响应不同

4.7.2. 针对时延补偿方式的结论

为了进一步量化不同的预处理数据方法的适用范围以及对控制效果的影响，我们针对四种方法进行了实验比较。这四种方法在预处理过程中，对所接收的不完整数据进行了不同的估算方法，通过损失一部分数据准确性提高控制器输出的控制信号的时效性。四种方法在权衡数据准确性和控制时效性的方面的差异如下图所示：

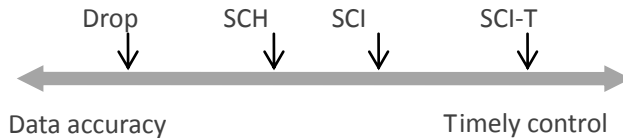


图 4.18 四种同步补偿方法示意

实验比较的结果显示，信号数据准确性最高而控制时效性最低的 Drop 方法其控制性能不佳且不够稳定。如下图所示，受到信号采样周期的影响，Drop 方法随系统延时大小的性能曲线振荡上升，振荡程度超出了时延增长本身对控制效果的影响。

而另三种方法 SCH、SCI、SCI-T 则较好的平滑了采样周期造成的影响，在评价控制性能的二次稳定性指标的意义下，对 Drop 方法改进效果在数倍至 10 倍之间。具体的控制效果的比较如下表所示：

方法	控制性能随时延增长的不同表现
Drop	随时延增大，控制性能快速恶化，恶化速度较其他方法更快。随时延增长的控制性能曲线上升中伴有大幅震荡，震荡周期与采样周期相关。当系统时延超过 85ms 时，一些随机样本下会出现控制器失效的情况。在均匀分布的时延下，系统采用 Drop 方法导致控制鲁棒性的最低。
SCH	在一般的时延下优于其他预处理方法，相比于 Drop 方法可以将二次稳定性指标缩减为十分之一。
SCI	具有与 SCH 方法相似的性能，在一般的时延大小下略逊于 SCH 方法，在大时延情况下，即时延接近 100ms 时优于 SCH 方法。
SCI-T	SCI-T 方法提供了时效性最高的信号估算方法，最终控制性能远优于 Drop 但劣于 SCH 和 SCI。在小时延情况下，对 Drop 方法的改善程度与 SCH 和 SCI 方法相似，但时延增大时出现较多控制器失效的情况。

总体来讲，对异步时延进行补偿可以改善系统的稳定性能，但对系统稳定极限的改善有限，无法达到确定性同步时延下的时延容忍阈值。仍需要依赖针对控制器的设计。

4.7.3. 研究展望

仿真数值实验的结果表明对这一实时控制系统及时反馈控制的重要性。在网络条件有限的情况下，前馈补偿环节的设计是提高系统性能经济有效的办法。就复杂度而言，亦优于设计控制器满足随机时变的网络时延。综合前向预测和多种补偿方式的复合方式，有望提高系统在现有网络时延条件下的性能。

第五章 总结与展望

对于既定的研究内容，我们已基本完成物联网共性软件支撑平台的调研和搭建、实例构建、实例验证的总体框架设计与搭建等研究内容。具体完成情况如下：

共性软件支撑平台

针对物联网中通信网络的重要共性特性，已完成通信模拟(simulation)软件、电力系统仿真(emulation)软件及其硬件支持的调研与架构设计。并完成了前期软硬件设备的连接与测试，软件平台现已投入使用。

实例构建

第一阶段在清华大学电机系与清华大学信息技术研究院的合作中，以电力物联网为背景，以广域测-辨-控为具体应用的案例的总体框架被构建出来，以用于由针对性的定性及定量的分析与测试物联网信息保真性和执行忠实性两大科学问题。目前已基于其中部分案例展开了具体的数值研究并取得阶段性成果。

实例验证

在前述所搭建的电力系统三网合一的数字试验平台上，已提出并完成了包括电力系统广域控制、电力负荷与系统电压稳定测辨观控、风电接入与电量控制等具体实证案例，通过初步研究，物联网实证和共性问题研究聚焦在通讯和数据两方面，分别围绕以下具体两个案例进行深入研究：

(1)基于电力系统广域阻尼控制系统的案例实验，研究了电力系统观测与控制实施信息通过物联网传递时，信息保真性与实时性等对电网运行行为和稳定性造成的影响，探索了电力系统中三网耦合效应的存在性与表现。

(2)负荷信息是电力系统典型的分层、时变、杂散、冗余信息，基于负荷实时在线测辨的案例实验，总结提炼了这类信息得挖掘、提取、处理与管理、应用各个环节的关键技术，并给出了提出了与电力物联网发展相适应的电力系统区域负荷整体信息测量采集和辨识建模方案。

参考文献

- [CPS] http://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-Physical_Systems
- [Lee2008] Lee, Edward A. "Cyber Physical Systems: Design Challenges." Working Report, EECS Department, University of California, Berkeley. January 2, 2008
- [Han 2001] J Han, M Kamber, J Pei. Data mining: concepts and techniques. Morgan Kaufmann. 2001
- [SODA2012] Haitham Hassanieh, Piotr Indyk, Dina Katabi, and Eric Price, "Simple and Practical Algorithm for Sparse Fourier Transform," SODA, 2012.
- [MIT_FFT] <http://web.mit.edu/newsoffice/2012/faster-fourier-transforms-0118.html>
- [SFT2012a] Swarun Kumar, Lixin Shu, Stephanie Gil, Nabeel Ahmed, Dina Katabi, and Daniela Rus, "CarSpeak: A Content-Centric Network for Autonomous Driving," ACM SIGCOMM, 2012
- [SFT2012b] Haitham Hassanieh, Fadel Adib, Dina Katabi, and Piotr Indyk, "Faster GPS Via the Sparse Fourier Transform," ACM Mobicom, 2012.
- [Hespanha2007] Hespanha, J.P.; Naghshtabrizi, P.; Yonggang Xu, "A Survey of Recent Results in Networked Control Systems," Proceedings of the IEEE , vol.95, no.1, pp.138,162, Jan. 2007
- [Chakraborty2013] Chakraborty, Aranya; Khargonekar, Pramod P., "Introduction to wide-area control of power systems," American Control Conference (ACC), 2013 , vol., no., pp.6758,6770, 17-19 June 2013
- [Chaudhuri2010] Chaudhuri, N.R.; Ray, S.; Majumder, R.; Chaudhuri, B., "A New Approach to Continuous Latency Compensation With Adaptive Phasor Power Oscillation Damping Controller (POD)," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.25, no.2, pp.939,946, May 2010
- [Bauer 2013] Bauer, N. W., Donkers, M. C. F., van de Wouw, N., & Heemels, W. P. M. H. (2013). Decentralized observer-based control via networked communication. Automatica, 49(7), 2074–2086. doi:10.1016/j.automatica.2013.04.019
- [Murray2003] Murray, R. M., Åström, K. J., Boyd, S. P., Brockett, R. W., & Stein, G. (2003). Future directions in control in an information-rich world. Control Systems Magazine, 20–33.
- [Andrievsky2010] Andrievsky, B. R.; Matveev, A. S.; Fradkov, A. L. "Control and estimation under information constraints: Toward a unified theory of control, computation and communications", Automation and Remote Control, Volume.71, Issue.4, pp.572, 2010, ISSN: 00051179.
- [Fradkov2008] Fradkov, Alexander L.; Andrievsky, Boris; Evans, Robin J. "Synchronization of

- nonlinear systems under information constraints", *Chaos An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, Volume.18, Issue.3, pp.037109, 2008, ISSN: 10541500,
- [Goodwin2012] G. C. Goodwin, K. Lau, and M. G. Cea, "Control with Communication Constraints," in *proc. 12th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision, 2012, Guangzhou, China. 5-7th December. 2012*
- [Zhang2005] L. Zhang, Y. Shi, T. Chen, and B. Huang, "A New Method for Stabilization of Networked Control Systems With Random Delays," *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, vol. 50, no. 8, pp. 1177–1181, 2005.
- [Cloosterman2006] M. Cloosterman, N. van de Wouw, M. Heemels, and H. Nijmeijer, "Robust stability of networked control systems with time-varying network-induced delays," in *Proc. 45th Conf. on Decision and Control, San Diego, CA, Dec. 2006*, pp. 4980–4985.
- [Nair2007] G. Nair, F. Fagnani, S. Zampieri, and R. Evans, "Feedback control under data rate constraints: An overview," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 108–137, jan. 2007
- [Wittenmark2005] B. Wittenmark, J. Nilsson, and M. Törngren, "Timing problems in real-time control systems," in *Proc. Amer. Control Conf., Seattle, WA, 1995*, pp. 2000–2004.
- [Cloosterman2006] M. Cloosterman, N. van de Wouw, M. Heemels, and H. Nijmeijer, "Robust stability of networked control systems with time-varying network-induced delays," in *Proc. 45th Conf. on Decision and Control, San Diego, CA, Dec. 2006*, pp. 4980–4985.
- [Hao2011] Huang Hao. Smart energy, another dimension of low carbon. *iCHINA*, 2011, 7(3): 72-73 (in Chinese)
- (黄浩. 智慧能源. 低碳的另一个维度. *中国信息化*, 2011, 7(3): 72-73)
- [AER2008] Annual energy review. USA: Energy Information Administration of the US Department of Energy, 2008
- [Ericsson2010] Ericsson, G.N., "Cyber Security and Power System Communication—Essential Parts of a Smart Grid Infrastructure", *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010, 25(3):1501-1507
- [Gungor2010] Gungor, V.C, Bin Lu, Hancke, G.P., "Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(10):3557-3564
- [Kim2012] Kyoung-Dae Kim, P. R. Kumar, "Cyber - Physical Systems: A Perspective at the Centennial", *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(Special Centennial Issue): 1287-1308
- [Toma2009] I. Toma, E. Simperl, Graham Hench, "A joint roadmap for semantic technologies and

- the internet of things” , In Proceedings of the Third STI Roadmapping Workshop, 2009
- [Yu2009] Yu Yi-xin, Luan Wen-peng, “Smart Grid”, POWER SYSTEM AND CLEAN ENERGY, 2009, 25(1):7-11 (in Chinese) (余贻鑫,栾文鹏,智能电网,电网与清洁能源,2009,(25)1: 7-11)
- [Palmisano2010] Samuel J. Palmisano, “Smarter Power for a Smarter Planet”, GridWise Global Forum 2010, Washington, DC, 2010.9
- [SDEENF2010] Strategic Deployment for Europe’s Electricity Networks of the Future, 2010.4
- [SGSR2009] “Smart Grid System Report”, U.S. Department of Energy, 2009.7
- [Cao2013] J. Cao, Y. Wan, G. Tu, S. Zhang, A. Xia, X. Liu, Z. Chen, “Information System Architecture for Smart Grids,” Chinese J. of Computers, vol. 36, no. 1, pp. 143–167, 2013. (In Chinese)
- [Amin2005] Amin S M, Wollenberg B F. Toward a smart grid: Power delivery for the 21st century. IEEE Power & Energy Magazine, 2005, 3(5): 34-41
- [WuJY2010] Wu Jun-yong, “Second lecture about smart grid: Smart grid development strategy at home and abroad”, Power Electronics, 2010, 2:61-64 吴俊勇, “智能电网综述技术讲座第二讲:国内外智能电网的发展战略”,电力电子,2010年,2:61-64
- [GRID 2030] “GRID 2030: A National Vision for Electricity’s second 100 years”, United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution, 2003.7
- [NGR2009] “smart grid research and application abroad”, National Grid Report, 2009.5.22 (“国外智能电网研究与应用” ,国家电网报,2009年5月22日第012版)
- [VS2007]. “Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future”, 2007
- [NSGFR2010]. “National smart grid final report”, National Grid, 2010.3 (in Chinese) (国家电网智能化规划总报告,国家电网公司, 2010.3)
- [KUNDUR94] P. KUNDUR, “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill Professional, 1994
- [GuoPY2001]. Guo Peiyuan, “New technology in Power system control”, Science Press, 2001 (in Chinese) (郭培源,《电力系统自动控制新技术》,科学出版社,2001)
- [Shahraeini2011] Shahraeini, M., Javidi, M.H., Ghazizadeh, M.S., “Comparison Between Communication Infrastructures of Centralized and Decentralized Wide Area Measurement Systems”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2011, 2(1): 206-211
- [Ghassemi2010] A. Ghassemi, S. Bavarian, L. Lampe, “Cognitive Radio for First IEEE International Conference on Smart Grid Communications”, First IEEE International Conference on

Smart Grid Communications, 2010:297-302

[Chenine2010] M.Chenine, I. Al Khatib, J. Ivanovski, V.Maden, L. Nordstr m, “PMU traffic shaping in IP-based Wide Area communication”, 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS), 2010: 1–6

[Chenine2009] M. Chenine, E. Karam, L. Nordstr m, “Modeling and Simulation of Wide Area Monitoring and Control Systems in IP-based Networks”, In the Proceeding of the IEEE PES General Meeting 2009, 1-8

[LiHSH2011] Husheng Li, Lifeng Lai, and Weiyi Zhang, “Communication Requirement for Reliable and Secure State Estimation and Control in Smart Grid”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2011, 2(3): 476-486

[HeFY2009] He Feiyue, “Key Problems in Networked Control of Power System”, Power System Technology, 2009, 33(1):80-86 (in Chinese) (何飞跃, “电力系统网络化控制中的关键问题”, 电网技术, 2009,33(1):80-86)

[LiHSH2010] Husheng Li, Rukun Mao, Lifeng Lai and Robert. C. Qiu, “Compressed Meter Reading for Delay-Sensitive and Secure Load Report in Smart Grid”, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010:114-119

[Wang2010] Zhifang Wang, Anna Scaglione, Robert J. Thomas, “Compressing Electrical Power Grids”, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010:13-18

[Keshav2011] Srinivasan Keshav, Catherine Rosenberg, “How Internet Concepts and Technologies Can Help Greenand Smarten the Electrical Grid” , ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(1):109-11422

[Abe2011] Rikiya Abe, Hisao Taoka, and David McQuilkin, “Digital Grid: Communicative Electrical Grids of the Future”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2011, 2(2):399-410

[Arulampalam2004]. A. Arulampalam, M.Barnes, etc, “Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrids”, International Journal of Electronics, 2004, 91(9):503–523

[Clark2006] D. Clark, B. Lehr, S. Bauer, P. Faratin, R. Sami, and J. Wroclawski, “Overlay networks and the future of the Internet,” Communication & Strategies, 2006, 6(3):109-129

[Deconinck2010] Geert Deconinck, Wouter Labeeuw et al, “Communication overlays and agents for dependable smart power grids”, 5th International Conference on Critical Infrastructure, 2010:1-7

[Beitollahi2008] H. Beitollahi, G. Deconinck, "Analyzing the Chord Peer-to-Peer Network for Power Grid Applications", 4th IEEE Young Researchers Symposium in Electrical Power

Engineering, 2008

[Budka2010] Budka, K. etc, "GERI - Bell Labs Smart Grid Research Focus: Economic Modeling, Networking, and Security & Privacy", First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010:208-213

[Andersen2003] D. G. Andersen, A. C. Snoeren, and H. Balakrishnan, "Best-path vs. multi-path overlay routing", In Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement, 2003

[Deconinck2009]. Geert Deconinck and Koen Vanthournout, "Agora: a semantic overlay network", International Journal of Critical Infrastructures, 2009, 5(1):175-195

[Kim2010]. Young-Jin Kim, Marina Thottan etc, "A Secure Decentralized Data-Centric Information Infrastructure for Smart Grid", IEEE Communications Magazine, 2010, 48(11):58-65

[Katz2011]. Randy H. Katz, David E. Culler et al, "An information-centric energy infrastructure: The Berkeley view", Sustainable Computing: Informatics and Systems, Elsevier, 2011

[Smith1993] Smith, H.L., Block W.R., "RTUs slave for supervisory systems [power systems]", Computer Applications in Power, 1993, 6(1): 27-32,

[Daneels1999] A. Daneels, W.Salter, "WHAT IS SCADA", International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control System, Trieste, Italy, 1999

[Phadke1993] Phadke, A.G., "Synchronized phasor measurements in power systems", Computer Applications in Power, 1993, 6(2):10-15

[Song2011] Han Song, He Li-quan, Qiu Guo-yue, "New Progress in the Research, Deployment and Application of WAMS", Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(544):1-8 (in Chinese) (韩松,何利铨,邱国跃, "WAMS 研究、建设与应用的新进展",电测与仪表,2011,48(544):1-8)

[LuC2008]. Cao Lu, Zhang Tao, Wang De-xin, Bi Xiao-liang, "Practice of WAMAP system in east China power grid", Automation of Electrical Power Systems, 32(21):97-100 (in Chinese) (曹路,张涛,汪德星,毕晓亮, "华东电网 WAMAP 系统的应用实践",电力系统自动化,2008,32(21):97-100)

[DingJC2010] Ding Jun-ce, Cai Ze-xiang, Wang Ke-ying, "Survey of state estimation based on wide area measurement system", Automation of Electric Power Systems, 2010, 30(12):98-103 (in Chinese) (丁军策,蔡泽祥,王克英, "基于广域测量系统的状态估计 研究综述",电力自动化设备,2010,30(12):98-103)

[Phadke2008] Phadke A.G., de Moraes R.M., "The Wide World of Wide-area Measurement",

Power and Energy Magazine, 2008, 6(5):52-65

[QiuMK2011] Meikang Qiu, Wenzhong Gao et al, “Energy efficient security algorithm for power grid wide area monitoring system”, IEEE Transaction on Smart Grid, 2011, 2(4):715-23

[WangZF2007] Wang Zheng-feng, Huang Tai-gui, WU Di et al, “Application of Wide Area Measurement System to power systems”, East China Electric Power, 35(5):32-36 (in Chinese) (王正风,黄太贵,吴迪等,“广域测量技术在电力系统中的应用”,华东电力,2007,35(5):32-36)

[ZhaoZK2000] Zhao Zu-kang, Xu Shi-ming, “A summary of information transmission protocol for power system”, AUTOMATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS, 2000, 24(22) : 65-71 (in Chinese) (赵祖康,徐石明,“电力系统信息传输协议综述”,电力系统自动化,2000,24(22):65-71)

[TanWS2001]. Tan Wen-shu, “Comparison of IEC61850 With IEC60870-6 (TASE.2)”, Power System Technology, 2001, 25(10):1-4 (in Chinese) (谭文恕,“IEC61850 和 IEC60870-6(TASE.2) 的比较”,电网技术,2001,25(10):1-4)

[IEC61850] IEC 61850: Communication networks and system in substations, part 1 to part 10 [S]. 1999

[DouXB2006]. DOU Xiao-bo, WU Zai-ju et al, “Information Model and Mapping Implementation of Merging Unit Based on IEC61850”, Power System Technology, 2006, 30(2):80-86 (in Chinese) (窦晓波,吴在军等,“IEC61850 标准下合并单元的信息模型与映射实现”,电网技术,2006,30(2):80-86)

[ZhaoHY2006]. Zhao Hai-ying, Zhang Jian-min, “Application of IEC 60870-5-101 Telecontrol Protocol in Data Communication of Distributed Automation System”, Power System Technology, 2006, 30(11): 87-90 (in Chinese) (赵海英,章坚民,“IEC60870-5-101 在配电自动化系统数据通信中的应用”,电网技术,2006,30(11):87-90)

[ChenJ2010] Chen Ji, GUO Chuang-xin et al, “Architectural Design of an Adaptive Unified Coding System Based on CIM”, Power System Technology, 2010, 34(2):52-56 (in Chinese) (陈济,郭创新等,“基于公共信息模型的自适应统一编码体系设计”,电网技术,2010,34(2):52-56)

[Bi2007] Bi Rui-hua, Wang Yu-zhong, Jia Yun-liang, “Research on CIM-based power system information integration”, Sichuan Electric Power Technology, 2007, 30(5):9-12 (in Chinese) (毕睿华,王玉忠,贾云浪,“基于 CIM 的电力系统信息集成的研究”,四川电力技术,2007,30(5):9-12)

[ZhangR2011] Zhang Reng, “The Research and design of grid enterprises unified information platform based on cim”, Shanghai Jiaotong University, 2011 (in Chinese) (张韧,“基于 CIM 模型的电网企业统一信息共享平台研究与设计”,上海交通大学,硕士论文,2011)

[WangB2011] Wang Bin, Guo Qing-lai et al, “Design of IEC 61970 Based Information Exchange

- Model for Coordinated Automatic Voltage Control Among Multi Control Centers” , Power System Technology, 2011, 35(3):205-210 (in Chinese) (王彬,郭庆来等, “基于 IEC 61970 标准的多控制中心无功电压协调控制信息交互模型设计” ,电网技术,2011,35(3): 205-210)
- [Mahrsi2009] El Mahrsi, M.K., Vignes, S. etc, “A data stream model for home device description”, Third International Conference on Research Challenges in Information Science, 2009
- [Martínez2010] M. Arenas-Martínez et al, “A Comparative Study of Data Storage and Processing Architectures for the Smart Grid”, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010: 285-290
- [LiuJS2011] Jinsong Liu, Xiaolu Li, Hesen Liu, and Peng Mao, “Study on Data Management of Fundamental Model in Control Center for Smart Grid Operation”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2011, 2(4): 573-579
- [LiZ2010]. Zhao Li, Zhenyuan Wang, Jean-Charles Tournier, William Peterson, Wenping Li, Yi Wang, “A Unified Solution for Advanced Metering Infrastructure Integration with a Distribution Management System”, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010:566-571
- [Hwang2011] Kai Hwang, Geoffrey C.Fox, and Jack J.Dongarra, “Distributed and Cloud Computing”, Morgan Kaufmann, 2011
- [Rusitschka2010] Rusitschka, S, Eger, K, Gerdes, C, “Smart Grid Data Cloud: A Model for Utilizing Cloud Computing in the Smart Grid Domain”, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010:483-488
- [TongXY2009] Tong Xiao-yang, YE Sheng-yong, “A Survey on Application of Data Mining in Transient Stability Assessment of Power System” , Power System Technology, 2009, 33(20):88-93 (童晓阳,叶圣永, “数据挖掘在电力系统暂态稳定评估中的应用综述” ,电网技术,2009,33(20):88-93)
- [ZhangHB2003]. Zhang Hong-bin, ” The study on identification of electric load model” , North China Electric Power University, 2003 (张红斌, “电力系统负荷模型结构与参数辨识的研究” , 博士论文,2003,华北电力大学)
- [Nagata2002] Nagata, T., Sasaki, H., “A multi-agent approach to power system restoration”, IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 457-462
- [Samadi2010] Samadi, P., Mohsenian-Rad, A., “Optimal Real-Time Pricing Algorithm Based on Utility Maximization for Smart Grid”, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010

- [Molderink2010] Albert Molderink, Vincent Bakker et al, "Management and Control of Domestic Smart Grid Technology", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2010, 1(2):109-119
- [Bakker2010] V. Bakker, M.G.C. Bosman et al, "Demand side load management using a three step optimization methodology", First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010
- [Conejo2010] Antonio J. Conejo, Juan M. Morales et al, "Real-Time Demand Response Model", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2010, 1(3):236-242
- [Blaabjerg2006] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu et al, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2006, 53(5):1398-1409
- [LiuMX2007]. Liu Mengxin, Wang Jie, Chen Chen, "Theory and Development of Power System Frequency Control", Transactions Of China Electro-technical Society, 2007, 22(11):135-145 (in Chinese) (刘梦欣,王杰,陈陈, "电力系统频率控制理论与发展", 电工技术学报,2007,22(11):135-145)
- [LiuL2011] Liu Li, Chen Xue-fen, Zhai Deng-hui, "Status and prospect of service restoration in smart distribution network", Power System Protection and Control, 2011, 39(13):148-154 (刘莉,陈学锋,翟登辉, "智能配电网故障恢复的现状与展望", 电力系统保护与控制,2011,39(13):148-154)
- [PangQL2011] Pang Qing-le, Gao Hou-lei etc, "Protection and control method for smart distribution grid", Power System Protection and Control, 2011, 39(13):28-38 (庞清乐,高厚磊等, "面向智能配电网的保护与控制方法", 电力系统保护与控制,2011,39(13):28-38)
- [Chicco2010]. Gianfranco Chicco, "Challenges for Smart Distribution Systems: Data Representation and Optimization Objectives", 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2010
- [LiZC2010] Li Zhongcheng, Yao Tong, "Renewable Energy Basing on Smart Grid" 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010
- [Blaabjerg2011] Frede Blaabjerg, Josep M. Guerrero, "Smart Grid and Renewable Energy Systems", International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011
- [Singh2011] D. Singh, N. K. Sharma et al, "Global status of renewable energy and market: Future prospectus and target", International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems, 2011

- [Smith2010] Steven C. Smith, P.K. Sen et al, “Renewable energy and energy storage systems in rural electrical power systems: Issues, challenges and application guidelines”, IEEE Rural Electric Power Conference (REPC), 2010
- [Shafiullah2010]. GM Shafiullah, Amanullah M.T. Oo et al, “Potential challenges: Integrating renewable energy with the smart grid”, 20th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010
- [Blaabjerg2010]. F. F. Iov, T. Kerekes, R. Teodorescu, “Trends in Power Electronics and Control of Renewable Energy Systems”, 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2010
- [Jones2010] Andrew Jones, “Grid connection of renewable energy”, IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2010
- [88]. Meik Ulrich, “Network quality and network dynamics in relation to renewable energy”, 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, 2011
- [Dagdougui2010]. Hanane Dagdougui, Riccardo Minciardi et al, “A Dynamic Decision Model for the Real-Time Control of Hybrid Renewable Energy Production Systems”, IEEE Systems Journal, 2010, 4(3): 323-333
- [Spiecker2011]. S. Spiecker, C. Weber, “Integration of fluctuating renewable energy - A German case study”, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011
- [Liyanage2011] Kithsiri M. Liyanage, M.A. Muhammed Manaz et al, “Impact of communication over a TCP/IP network on the performance of a coordinated control scheme to reduce power fluctuation due to distributed renewable energy generation”, 6th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems, 2011
- [YuFR2011] Yu, F.R., Peng Zhang et al, “Communication systems for grid integration of renewable energy resources”, IEEE Network, 2011, 25(5):22-29
- [Honeth2011] Nicholas Honeth, Wu Yiming et al, “Application of the IEC 61850-7-420 data model on a Hybrid Renewable Energy System”, IEEE Trondheim PowerTech, 2011
- [Barton2004]. John P. Barton, David G. Infield, “Energy Storage and Its Use With Intermittent Renewable Energy”, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2004, 19(2):441-448
- [Shively2008] Dustin Shively, John Gardner etc, “Energy Storage Methods for Renewable Energy Integration and Grid Support”, IEEE Energy 2030 Conference, 2008
- [STYCZYNSKI2009] Z. A. STYCZYNSKI, P. LOMBARDI et al, “Electric Energy Storage and its Tasks in the Integration of Wide-Scale Renewable Resources”, CIGRE/IEEE PES Joint Symposium

- Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, 2009
- [Coppez2010] Gabrielle Coppez, Sunetra Chowdhury, S.P. Chowdhury, “The importance of energy storage in Renewable Power Generation: A review”, 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010
- [TuYY2011]. Tu Yiyun, Li Can, “Research on Vehicle-to-Grid Technology”, International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2011
- [Shireen2010]. W. Shireen, S. Patel, “Plug-in Hybrid Electric vehicles in the smart grid environment”, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010
- [Soares2011] Soares, J. , Sousa, T. , “An optimal scheduling problem in distribution networks considering V2G”, IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid, 2011
- [Ota2012] Yutaka Ota, Haruhito Taniguchi et al, “Autonomous Distributed V2G (Vehicle-to-Grid) Satisfying Scheduled Charging”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2012, 3(1):559-564
- [Saber2009] Ahmed Yousuf Saber, Ganesh Kumar Venayagamoorthy, “Optimization of Vehicle-to-Grid Scheduling in Constrained Parking Lots”, IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009
- [Sortomme2012] Eric Sortomme, Mohamed A. El-Sharkawi, “Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2012, 3(1):351-359
- [Soares2011] João Soares, Tiago Sousa etc, “An Optimal Scheduling Problem in Distribution Networks Considering V2G”, IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid, 2011
- [Sousa2012] T. Sousa, H. Morais, “Intelligent Energy Resource Management Considering Vehicle-to-Grid: A Simulated Annealing Approach”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2012, 3(1):535-542
- [Han2010] Sekyung Han, Soohee Han, “Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2010, 1(1):65-72
- [Xia2005] Xia Cheng-jun, Ru Feng, Xu Yang, “Summary of the Online Transient Stability Analysis and Control System for Large Power Grid” , Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 23(4) : 1-5 (in Chinese) 夏成军,茹锋,许杨,“大电网在线暂稳定分析与控制系统研究综述”,江苏电机工程,2005,23(4):1-5

- [Zhou2000] Zhou Liang-song, Xia Cheng-jun, Peng Bo et al, "Study on application of list of control schemes in power system transient stability control", Power System Technology, 2000, 24(1):13-16 (in Chinese) 周良松,夏成军,彭波等,“电力系统暂稳定控制策略表的应用研究”,电网技术,2000,24(1):13-16
- [Tan2010] Tan Su-wei, "Analysis and research of real-time communication current situation in power dispatch automation for China south power grid", Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 109-114 (in Chinese) 谈苏伟,“中国南方电网调度自动化实时通信的现状分析和研究”,电力系统保护与控制,2010,38(22):109-114
- [NASPI2009] "Actual and potential Phasor data applications", Available at: <http://www.naspi.org/phasorappstable.pdf> NASPI, 2009
- [Kansal2011] Kansal P, Bose A, "Smart grid communication requirements for the high voltage power system", IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2011
- [Kim2011] Kim Young-Jin, Thottan Marina, "SGTP: Smart Grid Transport Protocol for secure reliable delivery of periodic real time data", BELL LABS TECHNICAL JOURNAL, 2011, 16(3):83-99
- [Bai2011] Bai Hong-wei, Ma Zhi-wei, Song Ya-qi, "Smart Grid state monitoring data analysis based on cloud computing", East China Electric Power, 2011, 39(9):1485-1488 (in Chinese) (白红伟,马志伟,宋亚奇,“基于云计算的智能电网状态监测数据的处理”,华东电力,2011,39(9):1485-1488)
- [Lang2008] Program. Lang, "Operating System", New York, 2008, 48-59
- [Qin2011] Qin Lijun, Guo Qing, Hao Cuijuan, Jin Huawei, "A new wide area measurement system model based on common information model", 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2011
- [JuP1990] Ju Ping, "Overview of power system load modeling study", Henan University Science and Technology Information, 1990, 10(3): 68-75 (in Chinese) 鞠平,“电力系统中负荷建模研究概观”,河南大学科技情报,1990,10(3):68-75
- [CIGRE1986] CIGRE SC38-WG02_TH05, Load Modelling and Dnamics, Supplementary Report for SC38. Meeting at Monteux, 1986
- [Ellis2006] Ellis A, Kosterev D, Meklin A. "Dynamic load models: where are we?" IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2006
- [Price1987] Price W W, Wirgau K A, Murdoch A, et al, "Load modeling for power flow and transient stability studies", EPRI, 1987

- [Choi2006] Choi BK, Chiang HD etc, "Measurement-based dynamic load models: derivation comparison and validation", IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3):1276-1283
- [CaoYJ2007] Cao Yi-jia, Li Da-hu, "Study on large-scale grid load modeling based on wide-area measurement system", Journal of electrical power science and technology, 2007, 22(2):1-7 (in Chinese) (曹一家,李大虎,“基于广域测量系统的大区域电网负荷建模的研究”,电力科学与技术学报,2007,22(2):1-7)
- [Zhang2008] Zhang J, Wen JY, Cheng SJ, Dong ZY. "Realization of the WAMS based power system aggregate load area model" IEEE power and energy society 2008 general meeting: conversion and delivery of electrical energy in the 21st century, 2008
- [JuP2008] Ping Ju, Chuan Qin, Feng Wu, Huiling Xie, Yan Ning, "Load modeling for wide area power system", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 33(4):909-917
- [Bellannine2000]. G. Thomas Bellannine, "Load management techniques", Proceedings of the IEEE Southeast conference 2000, 2000
- [Ng1998]. Ng, K.-H.; Sheble, G.B., "Direct load control-A profit-based load management using linear programming", IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2):688-694
- [Hamilton2010] Hamilton, K.; Gulhar, N., "Taking Demand Response to the Next Level", IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(3):60-65
- [Yao2009] Yao, L., Hau-Ren Lu, "A Two-Way Direct Control of Central Air-Conditioning Load Via the Internet", IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1):240-248
- [WangP2010] P. Wang, J. Y. Huang et al, "Demand Side Load Management of Smart Grids Using Intelligent Trading/Metering/ Billing System", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010:1-6
- [Hamed2010] Amir-Hamed, Mohsenian-Rad et al, "Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid", IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3):320-321
- [Zhang2010] Zhang Luhua, Yi Zhonglin et al, "Effects of Advanced Metering Infrastructure (AMI) on relations of Power Supply and Application in smart grid", China International Conference on Electricity Distribution, 2010
- [Neto2008]. A. Neto and F. Fiorelli, "Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption", Energy and Buildings, 2008, 40(12): 2169–2176
- [Newsham2010]. G. Newsham and B. Birt, "Building-level occupancy data to improve

ARIMA-based electricity use forecasts”, In Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building, 2010:13–18

[Barbato2011] A.Barbato, A.Capone etc, “Forecasting the Usage of Household Appliances Through Power Meter Sensors for Demand Management in the Smart Grid”, IEEE International Conference on Smart Grid Communication, 2011

[WangJX2004] Wang Jian-xue, Wang Xi-fan, Zhang Xian, Zhang Zhen-de, “Interruptible load management in power market and interim system Part 1 Cost-benefit analysis of interruptible load”, Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5):15-19 王建学,王锡凡,张显,张振德, “电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理(一)——可中断负荷成本效益分析”,电力自动化设备,2004,24(5):15-19

[Tuan2003] Le Anh Tuan, Kankar Bhattacharya, “Competitive Framework for Procurement of Interruptible Load Services”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2003, 18(2):889-897

[Tang2011] Tang Yongwei, Zhang Shaohua, Liu Yanyan, “Incentive Payment Design for Interruptible Load Management of Power Systems”, Proceedings of 2011 International Conference on System Science and Engineering, 2011

[Finn2009] Finn, P., Fitzpatrick, C., Leahy, M., “Increased Penetration of Wind Generated Electricity using Real time Pricing & Demand Side Management”, IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 2009

[Dietrich2012] Kristin Dietrich, Jesus M. Latorre, Luis Olmos, Andres Ramos, “Demand Response in an Isolated System With High Wind Integration”, IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 20-29

[Behnke2011]. R. Palma-Behnke, C. Benavides et al, “Energy Management System for a Renewable based Microgrid with a Demand Side Management Mechanism”, IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid, 2011

[Huang2009] Huang Wei, Sun Chang-hui, Wu Zi-ping, Zhang Jian-hua, “A Review on Microgrid Technology Containing Distributed Generation System”, Power System Technology, 2009, 33(9): 14-19 (in Chinese)

黄伟,孙昶辉,吴子平,张建华, “含分布式发电系统的微网技术研究综述”,电网技术,2009,33(9):14-19

[BiR2010]. Rui Bi, Ming Ding, and Ting Ting Xu, Design of Common Communication Platform of Microgrid, 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed

Generation Systems, 2010

[Siow2009] Siow, L.K., So, P.L. et al, “Wi-Fi Based Server in Microgrid Energy Management System”, TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference, 2009

[Ren2011]Ren Jingding, Che Yanbo, Zhao Lihua, “Discussion on Monitoring Scheme of Distributed Generation and Micro-Grid System”, 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2011

[Ming2010] Ming, Ding; Tian, Xie; Lei, Wang; “Research of Real-Time Database System for Microgrid”, 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010

[ZhouL2010] Liang Zhou, Ming Ding, Rui Bi, “Optimization of Design and Application of Micro-grid Energy Management System Data Acquisition System”, 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2010

[Shi2009] Shi, S.S.; Lu, Z.X.; Min, Y.; Qao, Y.; “Modeling and simulation of the microgrid prototype in China”, 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009), 2009

[Yang2011] M.J. Yang, F. Zhuo, X.W. Wang, H.P. Guo, Y.J. Zhou, “Research of Seamless Transfer Control Strategy of Microgrid System”, 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, 2011

[ZhengWD2010]. Wen-Di Zheng, Jin-Ding Cai, "A multi-agent system for distributed energy resources control in microgrid", 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS), 2010

[Nikkhajoei2007] Nikkhajoei, H.; Lasseter, R.H.; “Microgrid Protection”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007

[Conti2009] Conti S, Raffa L, Vagliasindi U, “Innovative Solutions for Protection Schemes in Autonomous MV Micro-grids”, IEEE Clean Electrical Power, International Conference on 2009, 2009: 647-654

[WangD2007]王栋， 硕士学位论文，《交直流混合电网机电暂态与电磁暂态实时数字仿真系统》，2007。

[Tatikonda2004b] S. Tatikonda, a. Sahai, and S. Mitter, “Stochastic Linear Control Over a Communication Channel,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, no. 9, pp. 1549–1561, Sep. 2004.

[Yang2005]Y. Yang and Y.-J. Wang, “Modeling and control for NCS with time- varying long

- delays,” in Proc. 4th Int. Conf. Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, China, Aug. 2005, pp. 1407–1411.
- [Hua2007] H. Cai, W. Fan, J. Mu, W. Hu. “Study of the networked control system with long delay,” 2007 IEEE International Conference on Control and Automation. Guangzhou, China. May 2007.
- [Wang2013] Y. Wang, H. R. Karimi, and Z. Xiang, “ ∞ Control for Networked Control Systems with Time Delays and Packet Dropouts,” vol. 2013, 2013.
- [Song2009] H. Song, L. Yu, and W.-A. Zhang, “Stabilization of networked control systems with communication constraints and packet dropouts,” Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference, no. 1, pp. 7936–7941, Dec. 2009.
- [Cloosterman2009] M. B. G. Cloosterman, N. van de Wouw, W. P. M. H. Heemels, and H. Nijmeijer, “Stability of Networked Control Systems With Uncertain Time-Varying Delays,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, no. 7, pp. 1575–1580, Jul. 2009.
- [Yan2006] T. C. Yang. “Networked control system: a brief survey,” IEE Proc.-Control Theory Appl., vol. 153, no. 4, July 2006.
- [Gao2008] H. Gao, X. Meng, and T. Chen. “Stabilization of networked control systems with a new delay characterization,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 53, no. 9, Oct 2008.
- [Maurice2010] W. P. Maurice, H. Heemels, R. T. Andrew, Nathan van de Wouw, and Dragan Netic, “Networked control systems with communication constraints: Tradeoffs between transmission intervals, delays and performance,” IEEE Transactions On Automatic Control, vol. 55, no. 8, Aug 2010.
- [Hu2003] S. Hu and Q. Zhu, “Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay,” Automatica, vol. 39, no. 11, pp. 1877–1884, Nov. 2003.
- [Rotkowitz2005] Rotkowitz, M., & Lall, S. (2005). A characterization of convex problems in decentral- ized control. IEEE Transactions on Automatic Control, 50(12), 1984–1996.
- [Xiao2004] Jinyu Xiao, Xiaorong Xie, Yingduo Han, and Jingtao Wu, “Dynamic tracking of low-frequency oscillations with improved Prony method in wide-area measurement system,” presented at 2004 IEEE PES General Meeting, Denver, Colorado, USA. 6-10 June 2004.
- [CIGRE] CIGRE Special Publication 38.01.07, Tech. Brochure 111, 1996.
- [Smed1993] Smed T, Andersson G, “Utilizing HVDC to Damp Power Oscillations,” IEEE Trans on Power Delivery, 8(2), pp. 620-627, 1993.

- [He2007] Jingbo He; Chao Lu; Xiaochen Wu; Jingtao Wu; Bi, T.S., "Design and experiment of heuristic adaptive HVDC supplementary damping controller based on online Prony analysis," *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, vol., no., pp.1,7, 24-28 June 2007
- [He2008] Jingbo He; Chao Lu; Xiaoming Jin; Peng Li, "Analysis of time delay effects on wide area damping control," *Circuits and Systems, 2008. APCCAS 2008. IEEE Asia Pacific Conference on*, vol., no., pp.758,761, Nov. 30 2008-Dec. 3 2008
- [He2009] He, J., Lu, C., Wu, X., Li, P., & Wu, J. (2009). Design and experiment of wide area HVDC supplementary damping controller considering time delay in China southern power grid. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 3(1), 17–25. doi:10.1049/iet-gtd:20080129
- [LuC2008] Chao Lu, J. Si, and X. Xie, "Direct heuristic dynamic programming for damping oscillations in a large power system," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*. vol 38, no 4, pp. 1008–1013, Aug. 2008.
- [LuC2009] Chao Lu, X. Xie, X. Wu, and J. Wu, "Power system stability control based on wide area measurement system," *Journal of Electric Power Science and Technology*.(In Chinese) vol 24, no 2, June 2009
- [He2009] J. He, C. Lu, X. Wu, P. Li, J. Wu, "Design and experiment of wide area HVDC supplementary damping controller considering time delay in China southern power grid." *Generation, Transmission & Distribution, IET*. vol 3, no 1, pp. 17 – 25, Jan 2009.
- [Chaudhuri2004] B. Chaudhuri, R. Majumder, and C. Pal. Bikash "Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1971-1979, Nov 2004.
- [Wu2003] H. Wu and G. T. Heydt, "Design of delayed-input wide area power system stabilizer using the gain scheduling method," in *Proc. IEEE PES General Meeting, Toronto, ON, Canada, 2003*.
- [Wu2004] H. Wu, K. S. Tsakalis, and G. T. Heydt. "Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, pp.1935-1941, 2004.
- [Stahlhut2007]J. W. Stahlhut, T. J. Browne, G. T. Heydt, and V. Vittal, "Latency viewed as a stochastic process and its impact on wide area power system control signals," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 1, pp.84–91, Feb. 2008.

- [JiaH2008] H. Jia, X. Yu, Y. Yu, C. Wang. "Power system small signal stability region with time delay," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 30, pp. 16–22, 2008.
- [Cai2007] H. Cai, W. Fan, J. Mu, W. Hu. "Study of the networked control system with long delay," 2007 IEEE International Conference on Control and Automation. Guangzhou, China. May 2007.
- [Yang2006] T. C. Yang. "Networked control system: a brief survey," *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, vol. 153, no. 4, July 2006.
- [Gao2008] H. Gao, X. Meng, and T. Chen. "Stabilization of networked control systems with a new delay characterization," *IEEE Transactions On Automatic Control*, vol. 53, no. 9, Oct 2008.
- [Maurice2010] W. P. Maurice, H. Heemels, R. T. Andrew, Nathan van de Wouw, and Dragan Netic, "Networked control systems with communication constraints: Tradeoffs between transmission intervals, delays and performance," *IEEE Transactions On Automatic Control*, vol. 55, no. 8, Aug 2010.
- [LiP2009] P. Li, X. Wu, C. Lu, J. Shi, J. Hu, J. He, Y. Zhao, A. Xu, "Implementation of CSG's Wide-Area Damping Control System: Overview and Experience," *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09*, pp. 1-9, March 2009.
- [Phadke2010] A. G. Phadke, J. S. Thorp, "Communication needs for wide area measurement applications," 2010 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS). pp. 20-22, Sept. 2010.
- [Chenine2010] M. Chenine, I. A. Khatib, J. Ivanovski, V. Maden, L. Nordstrom, "PMU traffic shaping in IP-based wide area communication," 2010 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS), pp. 1-6, Sept 2010.
- [Chenine2007] M. Chenine, L. Nordstrom, P. Johnson, "Factors in Assessing Performance of Wide Area Communication Networks for Distributed Control of Power Systems," in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, pp.1682-1687, Jul. 2007.
- [Chenine2009] M. Chenine, E. Karam, and L. Nordstrom, "Modeling and simulation of wide area monitoring and control systems in IP-based networks," In the *Proceeding of the IEEE PES General Meeting 2009*, Jul. 2009.
- [Naduvathuparambi2002] B. Naduvathuparambi, M. C. Valenti, and A. Feliachi, "Communication delays in wide area measurement systems," in *Proc. 34th Southeastern Symp. System Theory*, 2002, pp. 118–122.

- [CaoJ2002] J. Cao, W. S. Cleveland, D. Lin, and D. X. Sun, "Internet Traffic Tends Toward Poisson and Independent as the Load Increases," in *Nonlinear Estimation and Classification*, C. Holmes, D. Denison, M. Hansen, B. Yu, and B. Mallick, Eds. New York: Springer, 2002, pp. 83–109.
- [Karagiannis2004] M. F. T. Karagiannis, M. Molle and A. Broid, "A Nonstationary poisson view of internet traffic," In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Mar. 2004
- [Crovella1997] M. E. Crovella and A. Bestavros. "Self-similarity in world wide web traffic: evidence and possible causes," In *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no. 6, pp. 835 – 846, 1997.
- [Willinger1997] W. Willinger, M. S. Taqqu, R. Sherman, and D. V. Wilson. "Self-similarity through high-variability: statistical analysis of ethernet LAN traffic at the source level," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no.1, pp. 71–86, 1997.
- [Park1996] K. Park, G. Kim, and M.E.Crovella, "On the relationship between file sizes transport protocols, and self-similar network traffic," In *International Conference on Network Protocols*, pp. 171–180, Oct 1996.

简历及成果

个人简历

2002.9~2010.7 清华大学智能与网络化系统研究所 控制理论与工程
工学博士学位 导师：陆宝森教授；
1998.9~2002.7 清华大学 自动化系 控制理论与工程 工学学士学位

文章列表

- [1] 涂国煜, 陆宝森, 赵千川, 联合更换策略的机会性拉格朗日松弛方法. 《自动化学报》, 2013, 39(3), 263-271. (中英文)
- [2] 涂国煜, 宋士吉, 路灯维护总费用随机优化模型及其概率分布拉格朗日松弛方法, 《控制理论与应用》, 2011, 28(3):407-413.
- [3] **Guoyu Tu**, Peter B. Luh, Qianchuan Zhao, and R. N. Tomastik, An Optimization Method for Joint Replacement Decisions in Maintenance, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 2004, Vol 4: pp. 3674-3679.
- [4] **Guoyu Tu**, Qianchuan Zhao, Peter B. Luh, and Jihua Wang, Model Reduction for Fork/Join Overhaul & Repair Systems with Rotable Inventory, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003, Vol3, pp. 2309-2314.
- [5] **Guoyu Tu** and Shiji Song, Probabilistic Coordination for Nonseparable Decision Optimization with Application to Joint Replacement in Engine Maintenance, DCDIS Series A, Advances in Neural Networks, 2006, 14(S1): 395 - 399.
- [6] Kun Zhu, **Guoyu Tu**, Jiaben Yang, and Yueting Chai, A Method of Reducing Stock Risks in Supply Chain System, Proceedings of International Conference of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, 2003: 230-238.
- [7] 张树卿, 韩英铎, 于松泰, 涂国煜. 区域综合负荷动态等值参数在线测辨关键技术. 《电力系统自动化》 36(19), 114-121
- [8] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜等. 智能电网信息系统体系结构研究. 《计算机学报》, 2013:36(1), pp143-167

申请专利

[1] Junwei Cao, Guoyu Tu*. “Data Usage Forecast of Mobile Network,” 国际发明专利. 申请号: PCT/CN2011/076900, 申请日: 2011.7.6; 公开号: WO/2013/004013 US; 已进入美国国家流程, 美国专利申请号: US 13/814,938; 申请日: 2013.2.8.

*通讯作者

[2] Junwei Cao, Guoyu Tu*. “Content-based Desktop Sharing,” 国际发明专利, 申请号: PCT/CN2013/072228, 申请日: 2013.3.6. *通讯作者

博士后期间承担及参与科研课题

1. 2011.01.01–2013.8.31 973 项目 2011CB302805 物联网基础理论和设计方法研究之子课题《物联网运行支撑平台和实证研究》。
2. 2011.01.01 – 2015.8.31 973 项目 2011CB302505 高通量计算系统的构建原理、支撑技术及云服务应用之子课题《高通量计算系统的云计算服务环境》。

其他助教、教学活动:

1. 协助教授计算机系研究生课程系分布式与云计算 (Distributed and Cloud Computing)。
2. 辅导 SRT 学生 2 名, 协助指导硕士生 1 名, 博士生 1 名。

致谢

衷心感谢合作导师曹军威和邢春晓教授和我博士后研究工作的精心指导和帮助；同时感谢韩英铎教授、赵伟教授、陈彪教授、陆超教授、张树卿博士、蔡世霞工程师对我在相关项目实验方面的帮助和支持。尤其感谢清华大学信息技术研究院和张家港电力研究院的各位同事和同学在实验和生活上对我的帮助和支持，尤其要感谢万宇鑫、李俊伟、张欣然、于松泰、夏艾萱、刘小非、陈伟、蔡丹、林季风等协助我完成了本报告中所需的实验条件，这里对他们的热心帮助表示衷心感谢。感谢家人朋友给我的慰藉与支持。

涂国煜

2013.9.1