

# 智能电网信息系统体系结构研究

曹军威<sup>1,2)</sup> 万宇鑫<sup>3)</sup> 涂国煜<sup>1)</sup> 张树卿<sup>4)</sup> 夏艾萱<sup>3)</sup>  
刘小非<sup>3)</sup> 陈震<sup>1,2)</sup> 陆超<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(清华大学信息技术研究院 北京 100084)

<sup>2)</sup>(清华信息科学与技术国家实验室 北京 100084)

<sup>3)</sup>(清华大学自动化系 北京 100084)

<sup>4)</sup>(清华大学电机工程与应用电子技术系 北京 100084)

**摘 要** 智能电网在传统电网基础上,通过先进的信息技术手段实现能源和电力的进一步精密化调控.文中在总结智能电网的概念定义、国内外发展现状、主要技术难点和挑战的基础上,着重从信息技术的角度提出适合于智能电网发展的信息系统体系结构.该结构分为3个层次:基础设施层,包括电力系统基础设备及通信网络;支撑平台层,包括传感量测、数据存储、分析决策和控制执行4个支撑平台;应用体系层,包括电源侧、电网侧和用电侧3类应用;真正实现物理、信息与应用系统的融合互动,信息、能量与业务流的高度一体化.该文详细总结了该体系结构涉及到的各方面技术的发展现状,同时指出了未来可能带来突破的研究方向.

**关键词** 智能电网;信息系统体系结构;传感网络;高级量测系统;信息中心网络;数据存储;广域监控

**中图法分类号** TP301 **DOI号** 10.3724/SP.J.1016.2013.00143

## Information System Architecture for Smart Grids

CAO Jun-Wei<sup>1,2)</sup> WAN Yu-Xin<sup>3)</sup> TU Guo-Yu<sup>1)</sup> ZHANG Shu-Qing<sup>4)</sup> XIA Ai-Xuan<sup>3)</sup>  
LIU Xiao-Fei<sup>3)</sup> CHEN Zhen<sup>1,2)</sup> LU Chao<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>2)</sup>(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084)

<sup>3)</sup>(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>4)</sup>(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Smart grid is built on top of traditional power grid. With supports of the advanced information technology, fine-grained power scheduling and control can be better achieved in smart grid. In this survey, the concepts of smart grid are summarized, with detailed introduction to the state of the art technologies. Information system architecture of smart grid is proposed on basis of major difficulties and challenges in smart grid development. The architecture is composed of three layers; infrastructure layer, including power grid devices and communication network; supporting platform layer, including sensing & measurement, data & storage, analytics & decision, control & execution; application layer, including generation-side, grid-side and demand-side three types of application. The architecture interacts with physical, cyber, and application systems with highly integrated information, energy, and business flows. Related techniques are summarized in details. Future research directions on information technology for smart grid are also proposed.

收稿日期:2012-04-05;最终修改稿收到日期:2012-12-10. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2011CB302805, 2013CB228206)、国家自然科学基金(61233016)资助. 曹军威,男,1973年生,博士,研究员,主要研究领域为先进计算技术与应用. E-mail: jcao@tsinghua.edu.cn. 万宇鑫,男,1987年生,博士研究生,主要研究方向为物联网技术与智能电网应用. 涂国煜,女,1981年生,博士,主要研究方向为信息技术在智能电网中的应用. 张树卿,男,1983年生,博士,讲师,主要研究方向为电力系统次同步振荡、电磁/机电暂态混合仿真和电力物联网. 夏艾萱,女,1990年生,本科生,研究方向为智能电网网络性能分析及设计. 刘小非,女,1990年生,本科生,研究方向为电力系统负荷辨识算法. 陈震,男,1975年生,博士,副研究员,主要研究方向为信息中心网络技术及其应用. 陆超,男,1975年生,博士,副教授,主要研究方向为柔性输配电技术和储能系统.

**Keywords** Smart Grid; information system architecture; sensor networks; advanced measurement infrastructure; information-centric networking; data storage; wide-area monitoring and control

## 1 引言

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<sup>[1]</sup>,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<sup>[2]</sup>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%以上的电力均来自于化石能源(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型也将变得更加弹性。未来智能电网将表现出与许多分布式计算系统相类似的特性,智能电网的研究将与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”、信息获取不及时及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,智能电网和传统电力系统之间的区别如图1所示。

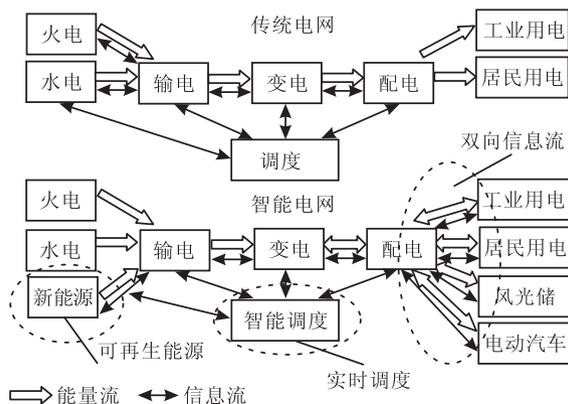


图1 传统电网和智能电网区别示意图

智能电网主要解决以下几个方面的问题:

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就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。

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-输-变-配-用的单向思维,大量冗余造成浪费,智能电网基于实时性较高(几十毫秒级)的测量通信系统,可以通过实时控制来达到发电负荷平衡,从而可以减少热备用,并且提高系统的稳定性。

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,我国的风电资源主要集中在西北部地区,同样这些地区也是太阳能资源较丰富的地区。而我国电力需求较大的地区则集中在中东部,因此造成我国的新能源电力必然经过远距离传输才能到达负荷区。这就要求电网必须在全国范围内对新能源发电进行优化配置。同时,由于新能源发电本身具有随机性和间歇性的特点,如果直接并入电网,则可能影响电网系统整体的稳定性。如风力发电可能由于客观气象原因大范围脱网,就会造成电力系统瞬时的不平衡,继而影响整体的稳定性。

由此可见,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信、安全及上层应用等各个方面将起到重要作用<sup>[3]</sup>;传感器网络技术可用于智能电表等电网终端通信设备的数据采集和信息获取<sup>[4]</sup>;实时和安全通信技术<sup>[5]</sup>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<sup>[6]</sup>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<sup>[5]</sup>可用于电力系统安全稳定分析、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、电能等新能源方便地融入智能电网信息系统,统一进行规划与调度。

借鉴物联网信息技术构架,本文从信息的角度提出智能电网的体系结构。第2节总结智能电网定义;第3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智能电网信息系统体系结构;第4节~第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7节进行总结并对智能电网未来研究方向做展望。

## 2 智能电网定义

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1个显著特点是可观性强。即借助信息技术,实时监控电力系统各节点的信息。例如IBM定义智能电网3个层次的第1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20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。同样的定义还包括文献[7]中的相关概念。

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<sup>[8]</sup>。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,同时电力公司可以根据用户的需求调配=能源供应并通过价格手段引导用户的需求,使总的能源消耗降低。欧洲智能电网战略发展规划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,通过智能监控、通信和自愈技术加强对发电侧的控制,提供给用户更多信息和用电优化方案,减少电力系统对环境的影响,提高供电的可靠性和安全性。

智能电网的第3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<sup>[9]</sup>。而IBM定义的智能电网3个层次的第3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,通过获取电网各层节点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,提高电力系统运行稳定性,以达到最大限度地提高设备利用效率,提高安全可靠,节能减排,提高用户供电质量,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。

## 3 智能电网发展现状及挑战

### 3.1 智能电网国内外发展现状

美国电力研究院(EPRI)和国防部(DoD)于2001年启动了CIN/SI项目<sup>[10]</sup>,提出开发一个建模、仿真、分析及综合工具用于作为建立高鲁棒性、高适应性、控制可重构的网络化电力系统及基础设施,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<sup>®</sup>体系架构<sup>[11]</sup>,GE、思科、朗讯等多家公司参与到该项目的研发中。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<sup>[12]</sup>并于同年牵头成立了GridWise<sup>®</sup>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企业。2008年3月,美国Xcel能源公司宣布在科罗拉多州波尔多(Boulder)建立智

① <http://www.epri-intelligrid.com/intelligrid/home.jsp>

② <http://www.gridwise.org/>

能电网城市试点,目前已安装 23 000 台智能监控设备<sup>①</sup>,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. 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、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、管理和金融环境的 6 个方面开展<sup>[9]</sup>.

欧洲智能电网的构建计划起缘于 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,产业界和研究界相关人士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设计蓝图,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,将欧洲智能电网的发展按优先级划分为 6 个等级,涵盖电网优化、分布式能源、信息通信技术到市场运营等方面. 所有目标将在 2020 年前后完成,其中第一阶段目标(优化电网运营和使用)在 2008~2012 年完成,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,将分 3 个阶段推动我国智能电网的建设并计划于 2020 年建成统一的智能电网<sup>[13]</sup>;从电网本身安全稳定、能源调度、用户交互性、新型电力应用等 8 个方面给出了我国未来智能电网的特征. 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系统. 该系统基于由同步相量测量单元

PMU(Phasor Measurement Unit)组成广域量测系统 WAMS(Wide Area Measurement System),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 500 kV 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的研究,如清华大学韩英铎院士率领的团队在广域电网监控方面取得了一定成果,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.

### 3.2 电网信息系统现状及主要问题

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(Energy Management System)、配电网管理系统 DMS(Distribution Management System)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(Supervisory Control And Data Acquisition)、自动发电控制系统 AGC(Automatic Gain Control)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(Distribution Automation System)、地理信息系统 GIS(Geographic Information System)及需求侧管理系统 DSM(Demand Side Management)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(Remote Terminal Unit)及其构成的数据采集监控系统 SCADA,其主要问题是数据采集时间过长,达到分秒级,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

① <http://smartgridcity.xcelenergy.com/>

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 110 kV 电压等级以下无 PMU 节点部署.此外,现有电网信息系统只针对发配电场站、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 4 个主要问题:(1) 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;(2) 输电线路的真正输电极限未知,往往靠大保守度换取可靠性,造成线路利用率低;(3) 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;(4) 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、网络和计算技术,这正是智能电网信息系统需要解决的问题.基于此,我们提出智能电网信息系统体系结构如下.

### 3.3 智能电网信息系统体系结构

我们提出的智能电网信息系统体系结构如图 2 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.

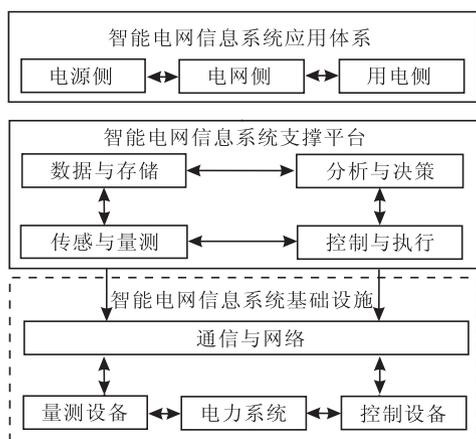


图 2 智能电网信息系统体系结构示意图

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.下面将分别对上述三个平台进行阐述.

## 4 智能电网信息系统基础设施

智能电网信息系统基础设施是构建智能电网的硬件基础,包括电力系统的各主要环节及控制、量测设备以及通信网络.

### 4.1 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 个部分构成<sup>[13]</sup>.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 11~35 kV 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 220 kV 以上)<sup>[14]</sup>.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 69~138 kV 之间<sup>[14]</sup>.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<sup>[15]</sup>.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 4~34.5 kV,二次配电系统则用于居民和企业用电,电压等级在 120~240V 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 系统的远程终端装置 RTU<sup>[16]</sup>和 WAMS 系统中的 PMU<sup>[17]</sup>.RTU 单元具有量测、通信、控制等多种功能,该量测单元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.相对于 RTU 单元,PMU 增加了相角测量;具备 GPS 授时单元,测量精度更高;同时测量频率更高,在几十毫秒量级.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: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.

目前,在智能电表研制领域,存在两种主要思路<sup>[18]</sup>:(1)采用多个采集设备直接对用电器的数据进行采集;(2)采用一个采集设备采集数据,再用分类算法对数据进行辨识.其中第1种思路的缺陷在于每个电器都需要安装传感设备,费用较高,部分用电器安装困难且需要额外的通信协议及设备对数据采集进行支持.相对而言,第2种思路的成本较低,主要基于模式识别算法对用电器的用电特征进行分类,从而分析得出不同用电器的用电情况.对于第2种方法,利用传感器获取哪类数据变得至关重要,因为特征的选取对于模式识别算法的效率的影响很大.目前,已有的设计如表1所示<sup>[18]</sup>.

表 1 智能电表设计方案

测量方案	优点	缺点
有功功率及无功功率	大功率电器特征相差较大,利于区分	(1) 不适于小功率电器 (2) 相似电器无法区分 (3) 实现复杂,需同时测用功和无功功率
电流大小及启动特征	设计简单;容易区分相似电器	(1) 对大电流电器测量不准确 (2) 需要专业人员安装
瞬时电压噪声特征	(1) 安装便利,任意插座都可用于安装	(1) 每一个用户需要重新训练 (2) 需要高采用率(MHz 以上)
测量连续高频电压特征	(2) 可以用于区分同类电器	需要较高的采样频率(50~500 kHz)

电力控制设备是实现智能电网目标的载体,电网系统的主要工作参数是频率、电压、相位、有功功率、无功功率.为实现对以上参数的控制,电网系统的控制对象包括各级发电单元、输变电系统、配电系统.主要控制设备有 RTU 单元及各种智能电子设备(Intelligent Electronic Device, IED).

## 4.2 电力系统通信网络

通信网络是智能电网的重要基础设施.智能电网中的广域量测系统 WAMS、广域保护系统 WAPS(Wide Area Protection System)、广域控制系统 WACS(Wide Area Control System)等都依赖于通信构架.由于电网系统存在多样性和分散性的特点,目前电网系统尚无统一的体系构架.综合考虑智能电网目前的组网方式及未来的应用需求,我们认为智能电网通信网络体系自底向上的构架图如图3所示.

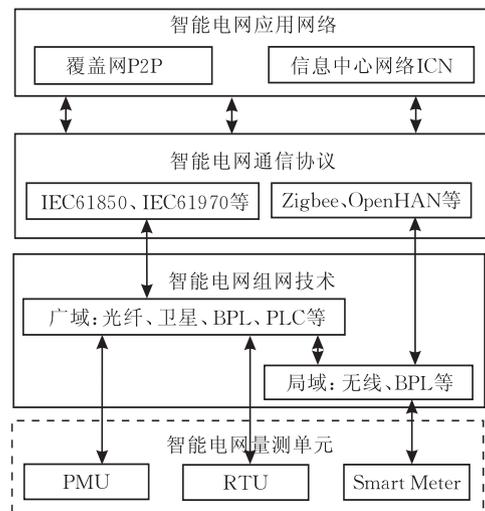


图 3 智能电网通信网络系统

按照智能电网底层量测单元的不同,智能电网通信组网也可以看成两部分:(1)由电网状态量测单元 PMU、RTU 构成的电力状态监测网络,该网络特点为局域范围内节点数量较少。(2)由个人用户量测单元构成的信息网络,该网络的特点是节点数量大,可扩展性要求高.

### 4.2.1 个人用户网络

个人用户量测单元往往先通过局域网进行连接,再接入广域网<sup>[19]</sup>.由智能电表连接组成的局域网包括家庭局域网 HAN(Home Area Network)和邻域局域网 NAN(Neighborhood Area Network),可用的组网方式有无线网络<sup>[19]</sup>和宽频电力线传输 BPL(Broadband over Power Line)网络<sup>[20]</sup>.其中利用无线网络构建智能电网个人用户局域网已有成型的协议,已有标准包括 Zigbee<sup>①</sup>协议和 OpenHAN<sup>②</sup>协议.上述两种协议均运行于 IEEE802.15.4 无线网络标准基础之上.Zigbee 协议是无线传感器网络中的一种常用组网技术,多用于低速短距离无线网络构建,文献<sup>[21]</sup>给出了一种基于 Zigbee 构建个人用户局域网的方案.OpenHAN 则是针对家庭电力系统专门设计的一种无线网络组网协议,2008 年由开放智能电网用户组 OSGUG(Open Smart Grid Users Group)发布了第 1 版组网需求说明文档并于 2010 年进行了修订.构建个人用户局域网的组网结构有星型网络和网状(mesh)网络两种<sup>[19]</sup>.其中星型网络的主要缺点是中央节点负担重,存在单点失效问题;而网状网络多见于无线传感器网络的构架,由于其较好的自愈特性,实际也多采用网状网络构建

① <http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee>

② <http://en.wikipedia.org/wiki/OpenHAN>

个人用户电力信息网,但临近集中节点(Access Point)的节点是网状网络的瓶颈。

#### 4.2.2 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<sup>[22]</sup>,第1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2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3种<sup>[23]</sup>,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。特别是电力系统设备分布范围广,一些偏远地区不具备构架光纤或无线网络的条件,需要额外的传输方式,已有方案比如基于认知无线电 CR(Cognitive Radio)<sup>[23]</sup>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,通过 CR 技术利用电视空白带宽,因此可用于在偏远地区构架信息网。

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针对不同类型的数据网络而构建,因此本节不做描述,在第6节中再进行说明。

#### 4.2.3 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:(1)从网络拓扑及协议本身的角度出发进行研究,如文献<sup>[24-25]</sup>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的网络性能及其影响因

素;(2)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<sup>[26]</sup>。在网络性能分析的基础上,考虑电力系统通信延时对控制性能的影响则是网络化控制系统需要解决的问题<sup>[27]</sup>,但目前的网络化控制系统通常针对单一网络进行分析,不具有推广性。

前文提到,目前电力信息网络通常采用专网搭建,但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影响较大,如果背景噪声比例高,则网络延时和丢包都会迅速上升。文献<sup>[24]</sup>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。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 220kV 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。

而对于个人用户量测网络来说,其特点是网络节点数量大,但单个节点的数据量有限,此外网络多采用无线方式构建,如何收集这些数据并保证数据的实时性是智能电网需要解决的问题。文献<sup>[28]</sup>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。

另一方面,随着广域监控节点的逐渐增多,已有的电力信息网络逐渐无法满足系统需求,同时大数据量对带宽造成的压力还容易造成时延的增加。如果能对电力系统原始数据本身作压缩,则可以降低系统对带宽的需求。文献<sup>[29]</sup>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程度来判断哪些数据是需要区域之间进行传输的,从而降低了需要传输数据的大小。

智能电网通信传输与传统信息传输的主要区别在于系统的动态性较强<sup>[26]</sup>,智能电网通信难点在于其对网络延时大小及时延的稳定性要求较高。传统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一个待解决问题.

#### 4.2.4 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<sup>[30]</sup>, 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<sup>[31]</sup>, 在 2004 年便有类似的想法被提出<sup>[32]</sup>. 本文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)<sup>[33]</sup>是基于当前 TCP/IP 架构互联网通信的一种虚拟网络. 它通过在现有通信基础框架上部署一组节点, 改善 TCP/IP 网络上的通信可靠性与服务质量. 覆盖网可针对智能电网应用的多样性提供网络通信基础支撑. 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<sup>[34-35]</sup>. 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, 系统还可根据就近供给的原则, 减少输电损耗. 文献<sup>[34]</sup>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<sup>[35]</sup>. 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<sup>[36]</sup>. 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<sup>[37]</sup>.

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 Agora<sup>[38]</sup>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模型, 以此进行电力

配电与耗电的信息交互. 文献<sup>[39]</sup>提出了一种适用于智能电网的 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. LoCal 系统<sup>[40]</sup>也可以被看成是利用信息中心网络进行智能电网创新的例子. LoCal 基于分层架构, 通过传感器来获得用电信息, 通过执行器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.

本节分析了构建智能电网的基础设施及其发展现状. 在系统控制量测单元方面, 针对电力系统安全稳定运行的量测单元如 RTU 和 PMU 目前已经发展成熟, 而针对个人用户信息的智能电表设计是目前热点. 无论 RTU、PMU 或是智能电表都依赖于通信网络传递数据, 目前电网通信网络的构建多基于独立的专用网络, 其网络容量和成本限制均无法满足未来智能电网的发展, 因此采用共享带宽网络是未来智能电网的理想方案, 同时智能电网面临多种异构网络之间的数据通信问题. 如何在以上两种需求下保证系统对网络稳定性和数据实时性的要求是智能电网必须解决的问题.

智能电网基础设施层为智能电网信息系统应用体系提供支撑平台. 我们认为, 智能电网信息系统支撑平台由四大环节组成. 下面对智能电网信息系统支撑平台的四个部分进行具体阐述.

## 5 智能电网信息系统支撑平台

### 5.1 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 4 所示.

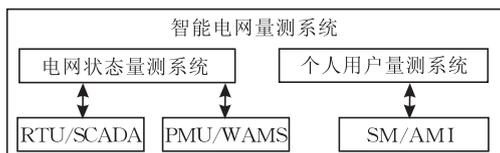


图 4 智能电网量测系统分类

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。前文已提及,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 单元的 SCADA 系统<sup>[41]</sup>,一套是基于 PMU 单元的 WAMS 系统<sup>[42]</sup>。其中 SCADA 系统是于 20 世纪 90 年代逐渐推广使用的量测系统,由于前文所述的 RTU 单元的固有问题,SCADA 系统无法准确及时反应电网系统运行状态。WAMS 是由 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<sup>[43]</sup>。相对于 SCADA 系统,基于 PMU 的 WAMS 系统实时测量性能更好<sup>[44]</sup>。目前,各国已逐步开始推广 WAMS 系统用于取代传统的 SCADA 系统<sup>[45]</sup>。随着 WAMS 系统的推广,业界对 WAMS 的研究也越来越深入。如文献[46]中讨论了 WAMS 中的节点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[47]中提到了 WAMS 在各种突发事件中的(如大规模断电等)重要作用,以其为基础的预警分析的应用、在通信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 20 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 SM(Smart Meter)构成的高级量测体系 AMI(Advanced Metering Infrastructure)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,实现电力数据的采集功能。现有的量测系统包括 SCADA 系统、WAMS 系统和 AMI 系统三类。其中 SCADA 系统和 WAMS 系统完成对电力状态数据的采集而 AMI 完成对个人用户数据的采集。SCADA 系统实时性不强,正逐步被 WAMS 系统替代,而 AMI 目前还处在发展中,尚未形成成形方案。另一方面,智能电网量测系统作用的发挥依赖于数据分析处理系统。下面将对智能电网数据表示与存储构架进行分析。

## 5.2 数据表示与存储系统

### 5.2.1 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关键之一。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表示和个人用户数据表示两类,如图 5 所示(图中与 PMU、RTU 相连模型为电力系统数据表示模型;与 Smart Meter 相连模型为个人用户数据表示模型)。

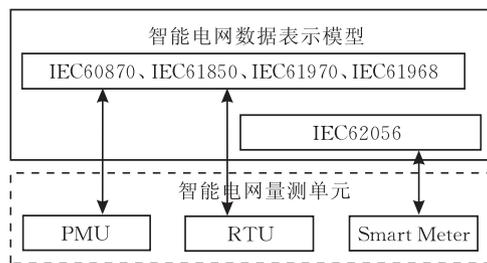


图 5 智能电网数据表示模型

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<sup>①</sup>、IEC61850 协议组<sup>②</sup>、IEC61970 协议组<sup>③</sup>以及正在制定的 IEC61968 协议组<sup>④</sup>。其中 IEC60870 协议组是较早(1990~1995 年)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<sup>[48-49]</sup>,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。协议采用了面向对象的数据建模方法,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<sup>[49-51]</sup>。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<sup>[52-54]</sup>。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

① [http://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_60870](http://en.wikipedia.org/wiki/IEC_60870)

② [http://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61850](http://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61850)

③ [http://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61970](http://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61970)

④ [http://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61968](http://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61968)

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就可以直接相互通信,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[52-55]均提出了基于 CIM 模型的智能电网信息共享平台设计方案.

就以智能电表为单元的个人用户数据而言,已有数据模型有 DLMS/COSEM 模型<sup>[56]</sup>,其对应的国际标准为 IEC62056 协议组<sup>①</sup>.DLMS 对智能电表数据的读取、计费 and 负载控制进行了规约,COSEM 涵盖了 DLMS 规约的传输与用户层规范.

### 5.2.2 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的特点,这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快速查找和处理要求;而由于智能电网应用多样,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.

目前主要有 4 种智能电网数据存储方案<sup>[57]</sup>:第 1 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 2 类方案与第 1 类方案类似,但将集中式存储拆分为分布式数据库存储.第 3 类方案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 MapReduce 的算法对数据库进行操作;第 4 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[57]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 4 类方案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针对家庭月账单的计算时间.结果表明方案 3 的可扩展性较差而方案 4 的处理时间较长,方案 1 和方案 2 类似.

另一方面,由于智能电网数据应用类型数量不可预期,容易造成数据统一管理的困难.文献[58]将智能电网数据抽象为历史模式、实时模式和未来模式进行建模,而不是按照应用类型对数据存储进行

建模管理.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,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.在此基础上,上层应用可以按需获取和管理异构数据库,从而解决异构数据模型的管理问题.此外,还有文献探讨在量测系统 AMI 和数据管理系统 DMS(Data Management System)之间构建统一数据集成中间层 MDI(Meter Data Integration)<sup>[59]</sup>.从而使得 AMI 系统和 DMS 系统之间得到解耦,用于解决由于数据模型和通信协议的异构性造成数据存储和管理的困难.

数据存储模型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.

### 5.2.3 基于云计算的智能电网数据存储

从系统实现上来看,物联网系统的搭建依赖于云计算平台<sup>[60]</sup>,云计算平台为物联网应用提供了计算和存储资源.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[61]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.

OpenPDC<sup>②</sup>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.该系统应用对象为时间序列数据流,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 1.5 GB.截至 2009 年我国仅在 220kV 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.

① [http://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_62056](http://en.wikipedia.org/wiki/IEC_62056)

② <http://openpdc.codeplex.com/>

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[58-61]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,如何构建统一数据模型的问题也需要解决。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。此外某些应用对于电网数据的获取有时间限制,分布式文件系统的查找效率无法满足其需求。

总体来看,尽管云计算的分布式存储平台和并行处理模型适合未来智能电网分散性、可靠性、安全性和数据海量性的需求,但依然存在应用障碍。

### 5.3 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电网稳定性的控制需求,未来智能电网中有两大类应用需要海量数据处理技术的支撑。第一类是智能电网稳定运行监控系统,它根据量测系统获取到的数据进行动态安全评估 DSA (Dynamic Security Assessment),保证电网运行稳定,以及电网系统出现故障后恢复系统。第二类是智能销售和消费系统,它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<sup>①</sup>及 Google 的 PowerMeter 系统<sup>②</sup>。该类应用多与微网系统相结合,考虑新能源如风能、太阳能接入后分散发电资源的利用问题。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结构如图 6 所示。

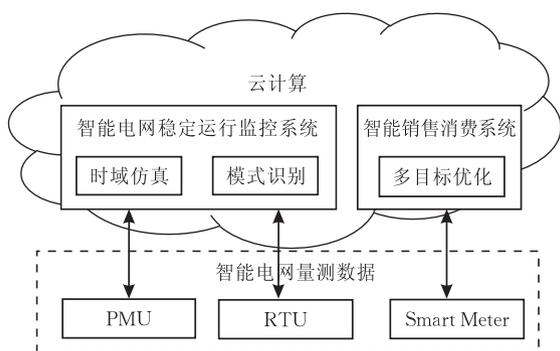


图 6 智能电网分析决策系统

#### 5.3.1 智能电网分析决策需求

对于第一类应用,第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<sup>[62]</sup>,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,由于电力负荷模型本身就是不可知的,现有分析方法往往采用估计和经验的方法给定负荷的参数<sup>[63]</sup>,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。而第二类方法同样面临当系统规模较大时,数据集数量过大的问题,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<sup>[64]</sup>。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<sup>[65]</sup>。该类应用通常分三步实现<sup>[66-67]</sup>:

(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),

① <http://www.microsoft-hohm.com/>

② <http://www.google.com/powermeter/about/>

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[65]给出的实时定价算法就是这样一种方法.文献[67]结合电冰箱的用电控制实例进行了说明.据文献[66],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<sup>[65-67]</sup>.此外,如不考虑用户向电网中送电的问题,则可以利用线性规划方法求解<sup>[68]</sup>.

### 5.3.2 基于云计算的智能电网数据处理

由于电网系统规模大、节点多,特别是智能电表得到的数据需要实时规划和调度,这需要大量的计算资源进行分析处理,智能电网数据处理与云计算技术的结合成为必然.

已有研究工作探讨智能电网与云计算技术的结合,如将云计算的分布式数据存储模型和并行处理模型用于存储电网数据,对数据子集进行并行处理再汇总处理结果<sup>[58,61]</sup>.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,如前文提到的通过分析电网连接的耦合层度来降低数据传输量<sup>[29]</sup>.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.

### 5.4 控制与执行系统

智能电网包括电能的发、输、变、配、用等 5 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 7 所示.

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、发电机失效、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针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

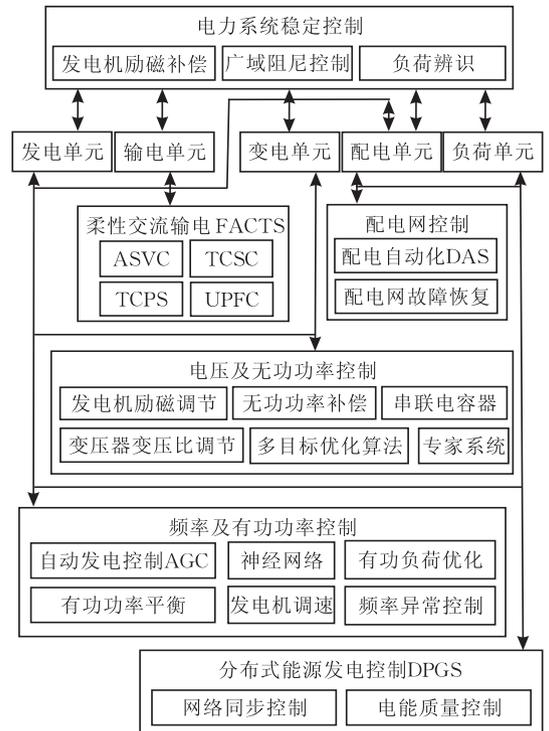


图 7 智能控制执行系统

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<sup>[69]</sup>.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 IP 控制、鲁棒控制、神经网络、遗传算法及线性规划法等<sup>[70]</sup>.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<sup>[71]</sup>以及基于多代理系统的方法<sup>[72]</sup>.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.电力系统稳定控制和分布式能源发电控制的方法将在 6.2 节及 6.3 节进行详细论述,在此不做讨论.

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.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,所以未来电网的控制结构会逐步向分散结构过渡;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<sup>[73]</sup>。此外,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也可能产生积极作用,如文献[22]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。

本节对实现智能电网的 4 个重要支撑平台进行了分析。为了实现智能电网对电力的稳定控制、能源的实时调配以及新能源的接入等目标,需要构建基于智能电网基础设施和支撑平台的应用体系。下面着重从发电侧、电网侧和用电侧这 3 方面对智能电网信息系统应用体系进行介绍。

## 6 智能电网信息系统应用体系

### 6.1 发电侧应用

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<sup>[74-75]</sup>。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<sup>[76]</sup>。2004~2009 年间,全球新能源容量的增长速度在每年 10%~60% 之间。文献[76]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 年前可用新能源发电完全取代传统能源发电。

本节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分析,对于传统电网的发电控制问题不予涉及,因为该类问题已经在电力系统领域进行过多年的研究。

#### 6.1.1 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)<sup>[77]</sup>,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,而不可分派能源则相反,例如风力发电中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<sup>[78]</sup>。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<sup>[76]</sup>,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 160 GW<sup>[79]</sup>,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<sup>[78]</sup>。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,如风力发电中风机输出功率的波动,极端情况下风力过小或过大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,目前已有方法多基于电力电子器件的应用<sup>[75,79]</sup>,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 20 世纪 80 年代起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[75,79]。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<sup>[75,80]</sup>。在实现了在不可分派能源控制基础上,不可分配能源接入的稳定控制运行监控与上文论述传统电力系统控制模型的一致<sup>[81]</sup>。而对于不可分派能源发电间歇性造成的第 2 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。图 8 以风力发电为例描述了智能电网信息系统对风力发电接入的管理。

目前,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<sup>[78,82,83]</sup>。但第 1 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<sup>[84]</sup>,从而降低存储设备的规

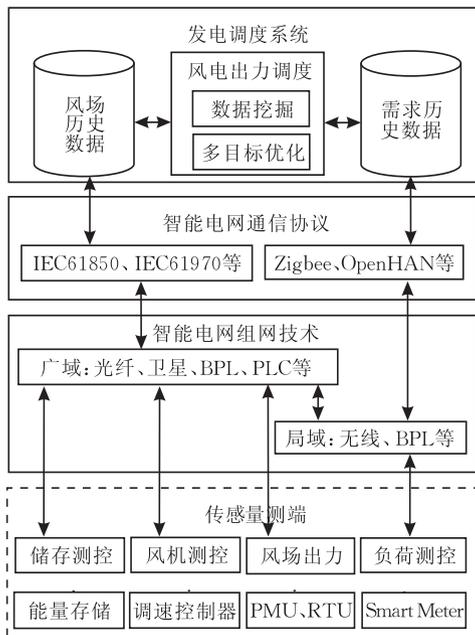


图 8 智能电网分析决策系统

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<sup>[85]</sup>,如图 8 所示.

用于分布式能源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<sup>[85-86]</sup>.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<sup>[78,82-83]</sup>,预测模型多基于统计学习和回归分析的方法及其它数据挖掘算法.目前分布式能源发电系统多与分布式存储系统结合建设<sup>[77,87-88]</sup>,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<sup>[82-83]</sup>给出了这方面的示例.

### 6.1.2 新能源接入管理

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)<sup>[77,89-90]</sup>,例如文献<sup>[82]</sup>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<sup>[89-90]</sup>.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,下面以 V2G 系统为例讨论分布式储能系统架构.

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<sup>[91]</sup>.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<sup>[92]</sup>.较之其余分布式存储系统,电动汽车储能有几个特点:(1)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;(2)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<sup>[93]</sup>;(3)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<sup>[94]</sup>.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<sup>[93]</sup>.其系统构架如图 9 所示.

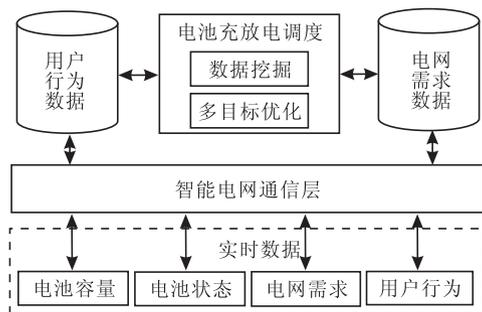


图 9 V2G 系统构架图

目前,在 V2G 领域的研究主要从电力系统和用户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<sup>[95]</sup>. 已有的求解方法包括粒子群算法 PSO (Particle Swarm Optimization)<sup>[96-97]</sup>、模拟退火算法 SA(Simulated Annealing)<sup>[98]</sup>、动态规划法<sup>[99]</sup>等.

## 6.2 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它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; 保证电网侧的隔离安全等众多方面. 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.

### 6.2.1 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限制交流远距离输电, 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<sup>[100]</sup>, 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<sup>[101]</sup>. 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: 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; 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配置, 提高受端电网安全水平; 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; 严重故障下大电网的智能解列控制和自愈恢复等.

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<sup>[102]</sup>. 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如图 10 所示.

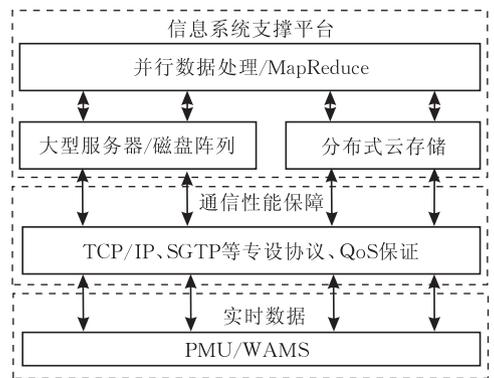


图 10 广域监控系统构架

一般的大电网广域监控系统通常是通过广域测量系统 WAMS 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, 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及系统的稳定性. 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  $100\text{ ms} \sim 1\text{ s}$  之内<sup>①</sup>, 而现在的网络通信环境很难满足这一要求, 因此大电网的广域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信介质, 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<sup>[103]</sup>. 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, 文章第 4 节已给出了一些解决方案.

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. PMU 以几十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 1 KB, 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 TCP/IP 协议并不能很好地完成电网数据包的传输任务,

① <http://www.naspi.org/phasorappstable.pdf>

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<sup>[104]</sup>. 通过 NS2 仿真可以看到, 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 TCP/IP 时相比减小很多, 且基本不受数据发送频率影响. 目前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, 智能电网作为电力系统的一体化信息平台, 需要建立统一的数据存储和访问模型, 以支持智能电网的各类应用<sup>[105]</sup>. 现有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<sup>[105]</sup>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 (Internet Data Center) 的智能电网云计算状态数据监测平台的优势较大, 但其自身的耗电量也是问题.

### 6.2.2 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, 即规划需要建设的电力线路. 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图 11 所示.

能量管理系统 EMS 是将计算机技术应用于传统电力系统的典型系统, 其核心是调度自动化, 主要面向发电和输电系统即大区级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

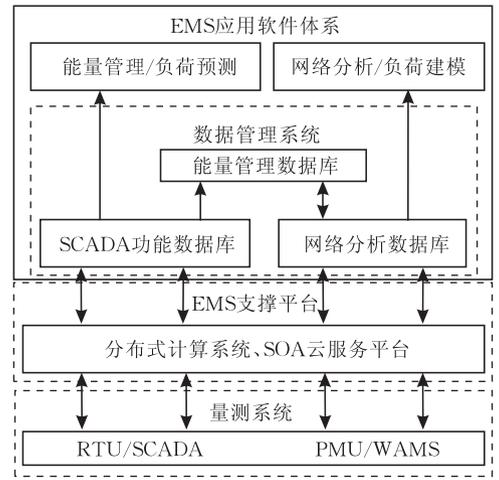


图 11 智能电网规划调度系统体系构架

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<sup>[106]</sup>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.

EMS 系统中的网络潮流计算、高质量负荷实时数据库建立均依赖于精确的在线负荷建模. 负荷是电力系统中的能量消耗环节, 电力系统的分析控制必然不能缺少对负荷信息的获取和掌握. 目前, 利用数字模拟仿真已是电力系统控制中的重要手段<sup>[107]</sup>, 而负荷模型的不同则直接会导致系统动态行为模拟结果的不同. 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<sup>[108]</sup>, 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为统计综合法和总体测辨法<sup>[109]</sup>两类. 统计综合法的基本思路是对电力系统中的典型负荷进行数学建模, 之后通过统计不同个类典型负荷所占的百分比, 进而得到总体负荷模型, 这是一种离线方法. 而总体测辨法的思路则是将所有负荷看成一个整体, 通过对系统在不同输入下响应结果的量测, 从而估计负荷模型的参数, 这是一种实时建模方法. 总体来看, 统计综合法的模型较为粗糙, 且实时性差, 并且需要大量的统计工作, 而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<sup>[110]</sup>. 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 WAMS 所提供的电网实时数据进行节点负荷建模. 但是由于 PMU 节点量较少, 当前的 WAMS 系统并不能保证电网的完全可观性<sup>[111]</sup>, 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<sup>[112]</sup>, 即采用自顶向下的方法进行区域综合建模. 根据文献<sup>[113]</sup>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.

### 6.3 用电侧应用

用电环境是电网系统的重要组成部分, 本节主要分析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.

#### 6.3.1 电力需求侧管理

电力需求侧管理(Demand Side Management, DSM), 指电力公司通过一定的激励措施影响用户的用电行为, 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<sup>[114]</sup>. 负荷管理的目标是抑制负荷增长、改善负荷曲线的形状. 传统的负荷管理主要是拉闸限电和切负荷两种方式, 都没有用户的主动参与. 因此对用户的利益造成一定影响.

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 3 种<sup>[115]</sup>: 直接负荷控制 DLC (Direct Load Control), 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 ILC (Indirect Load Control), 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<sup>[116]</sup>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<sup>[117]</sup>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、通信、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<sup>[118]</sup>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信, 引入需求侧管理所增加的系统复杂性也是将来智能电网需要面对的问题. 文献<sup>[119]</sup>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 12 所示.

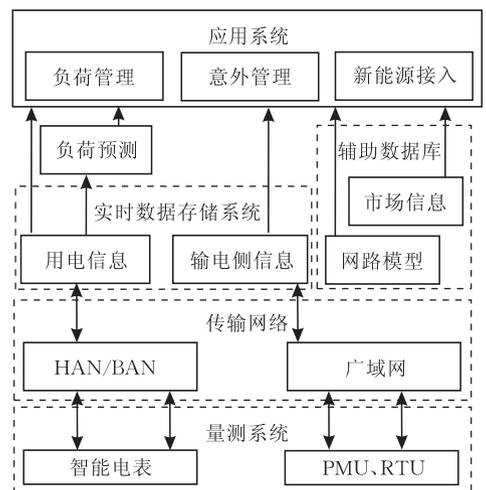


图 12 智能电网需求侧响应系统

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 4.1 节所述, AMI 在智能电网中的应用能为 DSM 带来深远的影响<sup>[120]</sup>. 除了提供量测数据的获取与储存服务, 以及实现双向通信之外, 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为的预测, 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. 类似于第 4 节中智能电表的研发, 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<sup>[121]</sup>, 多元平稳时间序列 ARIMAX 模型<sup>[122]</sup>等. 第二类预测方法如住宅量测系统 BEES(Bright Energy Equipment Systems)<sup>[123]</sup>. 可以说, 预测算法的具体实现模式和智能电表的研究路线息息相关. 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电价框架内分为两大类. 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. 在实施峰谷分时电价中, 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<sup>[124]</sup>. 执行可中断负荷, 关键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<sup>[125]</sup>, 基于客户偏好进行负荷控制的可中断负荷控制算法<sup>[126]</sup>.

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[127]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[128]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[129]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.

### 6.3.2 微网技术

如前所述, 随着新能源发电的广泛接入, 分布式发电系统 DGS(Distributed Generation System)可

以更好实现能源需求和环境保护之间的平衡, 提高能源利用的效率和能源供应的可靠性<sup>[130]</sup>. 然而, 由于 DGS 本身难以控制和预测, 如何减少其对主电网造成的影响是一个必须解决的问题. 目前的主流方案是将 DGS 系统和相应的负荷看成一个可独立运行的子系统, 即微网(microgrid). 我们综合已有定义给出微网结构如图 13 所示.

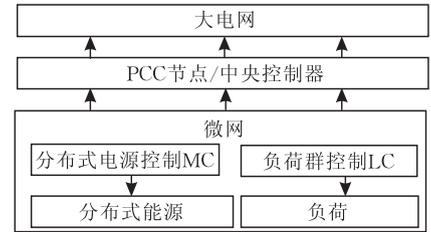


图 13 微网结构

分级控制模式<sup>[131]</sup>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很高的灵活性. 目前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 协议的微网一般化通信平台<sup>[131]</sup>, 基于无线传感器网络代替有线网络搭建微网通信网络<sup>[132]</sup>. 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. 需要支持多种通信协议, 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<sup>[133]</sup>. 针对微网数据处理特性, 文献[134]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[135]介绍了一种采用 I/O 端口作为 I/O 通信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个部分, 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<sup>[136]</sup>: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,体现智能电网可靠、能抵御攻击的特点.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<sup>[137]</sup>.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.

微网控制的目的是为实现微网内的系统稳定运行并且保证用户使用的电能质量.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.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<sup>[138]</sup>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.

由于微网系统主要依赖分布式新能源发电构建,因此系统承受扰动的能力较弱,为保证系统的稳定运行,必须考虑微网在不同模式下的保护问题.目前的研究主要集中在微网并网和孤网(独立)运行模式下的过电流保护问题上,考虑微网过电流保护问题时,由于硅材料仪器的等级限制<sup>[139]</sup>,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<sup>[140]</sup>分析了微网中的故障电流对网络保护的冲击,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信网络和硬件设备即插即用

的特点.这将是未来研究的重点.

## 7 小结及未来研究方向展望

本文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、数据储能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将从以下几方面展开:

(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,提供按需服务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.

智能电网研究涉及领域众多,另有大量传统电力系统升级所带来的相关问题,以及数据安全性和隐私性等问题值得重视与探讨,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.

## 参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] Annual energy review. USA: Energy Information Administration of the US Department of Energy, 2008
- [3] 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
- [4] 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

- [5] Kim Kyoung-Dae, Kumar P R. Cyber—physical systems: A perspective at the centennial. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(Special Centennial Issue): 1287-1308
- [6] Toma I, Simperl E, Hench G. A joint roadmap for semantic technologies and the internet of things//*Proceedings of the 3rd STI Roadmapping Workshop*. Crete, Greece, 2009: 1-4
- [7] 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)
- [8] Palmisano S J. Smarter power for a smarter planet//*Proceedings of the GridWise Global Forum 2010*. Washington, 2010: 1-9
- [9] Smart Grid System Report. USA: US Department of Energy, 2009
- [10] 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
- [11] Wu Jun-Yong. Second lecture about smart grid: Smart grid development strategy at home and abroad. *Power Electronics*, 2010, 8(2): 61-64(in Chinese)  
(吴俊勇. 智能电网综述技术讲座第 2 讲: 国内外智能电网的发展战略. 电力电子, 2010, 8(2): 61-64)
- [12] GRID 2030: A National Vision for Electricity's second 100 years. USA: United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution, 2003
- [13] National Smart Grid Final Report. Beijing: National Grid, 2010(in Chinese)  
(国家电网智能化规划总报告. 北京: 国家电网公司, 2010)
- [14] Kundur P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill Professional, 1994
- [15] Guo Pei-Yuan. *New Technology in Power System Control*. Beijing: Science Press, 2001(in Chinese)  
(郭培源. 电力系统自动控制新技术. 北京: 科学出版社, 2001)
- [16] Smith H L, Block W R. RTUs slave for supervisory systems. *Computer Applications in Power*, 1993, 6(1): 27-32
- [17] Phadke A G. Synchronized phasor measurements in power systems. *Computer Applications in Power*, 1993, 6(2): 10-15
- [18] Jon Froehlich, Eric Larson et al. Disaggregated end-use energy sensing for the smart grid. *Pervasive Computing*, 2011, 10(1): 28-39
- [19] Coalton Bennett, Darren Highfill. Networking AMI Smart Meters//*Proceedings of the IEEE Energy 2030 Conference*. Atlanta, GA, USA, 2008: 1-8
- [20] Zou Qiao-Ming, Qin Li-Jun. Integrated communications in smart distribution grid//*Proceedings of the International Conference on Power System Technology*. Hangzhou, China, 2010: 1-6
- [21] Shang Wen Luan, Jen Hao Teng et al. Development of a smart power meter for AMI based on ZigBee communication//*Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Taipei, China, 2009: 661-665
- [22] 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
- [23] Ghassemi A, Bavarian S, Lampe L. Cognitive radio for smart grid communications//*Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. Gaithersburg, MD, 2010: 297-302
- [24] Chenine M, Al Khatib I, Ivanovski J, Maden V, Nordström L. PMU traffic shaping in IP-based wide area communication//*Proceedings of the 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS)*. Beijing, China, 2010: 1-6
- [25] Chenine M, Karam E, Nordström L. Modeling and simulation of wide area monitoring and control systems in IP-based Networks//*Proceedings of the IEEE PES General Meeting*. Calgary, AB, 2009: 1-8
- [26] Li Hu-Sheng, Lai Li-Feng, Zhang Wei-Yi. Communication requirement for reliable and secure state estimation and control in smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 2(3): 476-486
- [27] He Fei-Yue. 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)
- [28] Li Hu-Sheng, Mao Ru-Kun, Lai Li-Feng, Qiu R C. Compressed meter reading for delay-sensitive and secure load report in smart grid//*Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. Gaithersburg, MD, 2010: 114-119
- [29] Wang Zhi-Fang, Scaglione A, Thomas R J. Compressing electrical power grids//*Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. Gaithersburg, MD, 2010: 13-18
- [30] Srinivasan Keshav, Catherine Rosenberg. How internet concepts and technologies can help green and smarten the electrical grid. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, 41(1): 109-114
- [31] Rikiya Abe, Hisao Taoka, David McQuilkin. Digital grid: Communicative electrical grids of the future. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 2(2): 399-410
- [32] Arulampalam A, Barnes M et al. Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrids. *International Journal of Electronics*, 2004, 91(9): 503-523
- [33] Clark D, Lehr B, Bauer S, Faratin P, Sami R, Wroclawski J. Overlay networks and the future of the Internet. *Communication & Strategies*, 2006, 6(3): 109-129
- [34] Geert Deconinck, Wouter Labeeuw et al. Communication overlays and agents for dependable smart power grids//*Proceedings of the 5th International Conference on Critical Infrastructure*. Beijing, China, 2010: 1-7
- [35] Beitollahi H, Deconinck G. Analyzing the Chord peer-to-peer network for power grid applications//*Proceedings of the 4th IEEE Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering*, 2008

- [36] Budka K et al. GERI - Bell labs smart grid research focus; Economic modeling, networking and security & privacy// Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, MD, 2010: 208-213
- [37] Andersen D G, Snoeren A C, Balakrishnan H. Best-path vs. multi-path overlay routing//Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York, USA, 2003: 234-247
- [38] Geert Deconinck, Koen Vanthournout. Agora: A semantic overlay network. International Journal of Critical Infrastructures, 2009, 5(1): 175-195
- [39] Kim Young-Jin, Thottan Marina et al. A secure decentralized data-centric information infrastructure for smart grid. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(11): 58-65
- [40] Katz R H, Culler D E et al. An information-centric energy infrastructure; The Berkeley view. Sustainable Computing; Informatics and Systems, 2011, 1(1): 7-22
- [41] Daneels A, Salter W. What is SCADA//Proceedings of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control System. Trieste, Italy, 1999: 339-343
- [42] 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)
- [43] Cao Lu, Zhang Tao, Wang De-Xin, Bi Xiao-Liang. Practice of WAMAP system in east China power grid. Automation of Electrical Power Systems, 2008, 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)
- [44] 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)
- [45] Phadke A G, de Moraes R M. The wide world of wide-area measurement. Power and Energy Magazine, 2008, 6(5): 52-65
- [46] 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
- [47] Wang Zheng-Feng, Huang Tai-Gui, Wu Di et al. Application of wide area measurement system to power systems. East China Electric Power, 2007, 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)
- [48] 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)
- [49] 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)
- [50] 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)
- [51] 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)
- [52] 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)
- [53] 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)
- [54] Zhang Reng. The research and design of grid enterprises unified information platform based on CIM. Shanghai: 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: 上海交通大学, 2011)
- [55] Wang Bin, Guo Qing-Lai et al. Design of IEC61970 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 IEC61970 标准的多控制中心间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)
- [56] El Mahrsi M K, Vignes S et al. A data stream model for home device description//Proceedings of the 3rd International Conference on Research Challenges in Information Science. Fez, 2009: 395-402
- [57] Arenas-Martinez M et al. A comparative study of data storage and processing architectures for the smart grid//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, MD, 2010: 285-290
- [58] Liu Jin-Song, Li Xiao-Lu, Liu He-Sen, Mao Peng. Study on data management of fundamental model in control center for smart grid operation. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(4): 573-579
- [59] Li Zhao, Wang Zhen-Yuan, Tournier Jean-Charles, Peterson William, Li Wen-Ping, Wang Yi. A unified solution for advanced metering infrastructure integration with a distribution management system//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, MD, 2010: 566-571
- [60] Hwang Kai, Fox G C, Dongarra J J. Distributed and Cloud Computing. Morgan Kaufmann, 2011

- [61] Rusitschka S, Eger K, Gerdes C. Smart grid data cloud: A model for utilizing cloud computing in the smart grid domain//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, MD, 2010; 483-488
- [62] 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(in Chinese)  
(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)
- [63] Zhang Hong-Bin. The study on identification of electric load model. Beijing: North China Electric Power University, 2003(in Chinese)  
(张红斌. 电力系统负荷模型结构与参数辨识的研究. 北京: 华北电力大学, 2003)
- [64] Nagata T, Sasaki H. A multi-agent approach to power system restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, 17(2): 457-462
- [65] Samadi P, Mohsenian-Rad A. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, MD, 2010; 415-420
- [66] Albert Molderink, Vincent Bakker et al. Management and control of domestic smart grid technology. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(2): 109-119
- [67] Bakker V, Bosman M G C et al. Demand side load management using a three step optimization methodology//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, MD, 2010; 431-436
- [68] Conejo Antonio J, Morales Juan M et al. Real-time demand response model. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(3): 236-242
- [69] 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
- [70] Liu Meng-Xin, 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)
- [71] Liu Li, Chen Xue-Feng, Zhai Deng-Hui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(13): 148-154(in Chinese)  
(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)
- [72] Pang Qing-Le, Gao Hou-Lei et al. Protection and control method for smart distribution grid. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(13): 28-38(in Chinese)  
(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)
- [73] Gianfranco Chicco. Challenges for smart distribution systems; Data representation and optimization objectives//Proceedings of the 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Basov, Russia, 2010; 1236-1244
- [74] Li Zhong-Cheng, Yao Tong. Renewable energy basing on smart grid//Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM). Chengdu, China, 2010; 1-4
- [75] Blaabjerg F, Guerrero J M. Smart grid and renewable energy systems//Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Beijing, China, 2011; 1-10
- [76] Singh D, Sharma N K et al. Global status of renewable energy and market: Future prospectus and target//Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems. Chennai, India, 2011; 171-176
- [77] Smith S C, Sen P K et al. Renewable energy and energy storage systems in rural electrical power systems: Issues, challenges and application guidelines//Proceedings of the IEEE Rural Electric Power Conference (REPC). Orlando, USA, 2010; B4-B47
- [78] Shafiullah G M, Amanullah M T O et al. Potential challenges; Integrating renewable energy with the smart grid//Proceedings of the 20th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Christchurch, New Zealand, 2010; 1-6
- [79] Blaabjerg F, Iov F, Kerekes T, Teodorescu R. Trends in power electronics and control of renewable energy systems//Proceedings of the 14th International Power Electronics and Motion Control Conference. Ohrid, Macedonia, 2010; k1-k17
- [80] Andrew Jones. Grid connection of renewable energy//Proceedings of the IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Gothenburg, Sweden, 2010; 1-4
- [81] Meik Ulrich. Network quality and network dynamics in relation to renewable energy//Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization. Lisbon, Portugal, 2011; 1-4
- [82] 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
- [83] Spiecker S, Weber C. Integration of fluctuating renewable energy—A German case study//Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, 2011; 1-10
- [84] Liyanage K M, Muhammed Manaz M A 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//Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems. Kandy, Sri Lanka, 2011; 198-203
- [85] Yu F R, Zhang Peng et al. Communication systems for grid integration of renewable energy resources. *IEEE Network*, 2011, 25(5): 22-29
- [86] Nicholas Honeth, Wu Yi-Ming et al. Application of the IEC61850-7-420 data model on a hybrid renewable energy

system//Proceedings of the IEEE Trondheim PowerTech. Trondheim, Norway, 2011: 1-6

- [87] Barton J P, Infield D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, 19(2): 441-448
- [88] Dustin Shively, John Gardner et al. Energy storage methods for renewable energy integration and grid Support//Proceedings of the IEEE Energy 2030 Conference. Atlanta, GA, 2008: 1-6
- [89] Styczynski Z A, Lombardi P et al. Electric energy storage and its tasks in the integration of wide-scale renewable resources//Proceedings of the CIGRE/IEEE PES Joint Symposium Integration of Wide-Scale Renewable Resources into the Power Delivery System. Calgary, AB, 2009: 1-11
- [90] Coppez G, Chowdhury S, Chowdhury S P. The importance of energy storage in renewable power generation: A review//Proceedings of the 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Cardiff, Wales, GB, 2010: 1-5
- [91] Tu Yi-Yun, Li Can. Research on vehicle-to-grid technology//Proceedings of the International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM). Changsha, China, 2011: 1013-1016
- [92] Shireen W, Patel S. Plug-in hybrid electric vehicles in the smart grid environment//Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans, LA, USA, 2010: 1-4
- [93] Soares J, Sousa T. An optimal scheduling problem in distribution networks considering V2G//Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid. Paris, France, 2011: 1-8
- [94] 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
- [95] Ahmed Yousuf Saber, Ganesh Kumar Venayagamoorthy. Optimization of vehicle-to-grid scheduling in constrained parking lots//Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada, 2009: 1-8
- [96] Sortomme E, El-Sharkawi M A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(1): 351-359
- [97] João Soares, Tiago Sousa et al. An optimal scheduling problem in distribution networks considering V2G//Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid. Paris, France, 2011: 1-8
- [98] Sousa T, Morais H. Intelligent energy resource management considering vehicle-to-grid; A simulated annealing approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(1): 535-542
- [99] Han Sekyung, Han Soohee. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(1): 65-72
- [100] 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. 大电网在线暂稳分析与控制系统的研究综述. *江苏电机工程*, 2005, 23(4): 1-5)
- [101] 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. 电力系统暂稳控制策略表的应用研究. *电网技术*, 2000, 24(1): 13-16)
- [102] 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)
- [103] Kansal P, Bose A. Smart grid communication requirements for the high voltage power system//Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA, 2011: 1-6
- [104] 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
- [105] 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)
- [106] Qin Li-Jun, Guo Qing, Hao Cui-Juan, Jin Hua-Wei. A new wide area measurement system model based on common information model//Proceedings of the 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Weihai, Shandong, China, 2011: 1061-1066
- [107] 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)
- [108] Ellis A, Kosterev D, Meklin A. Dynamic load models: Where are we//Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Dallas, USA, 2006: 1320-1324
- [109] Price W W, Wirgau K A, Murdoch A et al. Load modeling for power flow and transient stability computer studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1988, 3(1): 180-187
- [110] Choi B K, Chiang H D et al. Measurement-based dynamic load models: Derivation comparison and validation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(3): 1276-1283
- [111] 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)
- [112] Zhang J, Wen J Y, Cheng S J, Dong Z Y. Realization of the WAMS based power system aggregate load area model//Proceedings of the IEEE Power and Energy Society 2008

- General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA, 2008; 1-6
- [113] Ju Ping, Qin Chuan, Wu Feng, Xie Huiling, Ning Yan. Load modeling for wide area power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2008, 33(4): 909-917
- [114] Bellannine G T. Load management techniques//Proceedings of the IEEE Southeast Conference 2000. Nashville, TN, USA, 2000; 139-145
- [115] 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
- [116] Hamilton K, Gulhar N. Taking demand response to the next level. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2010, 8(3): 60-65
- [117] Yao L, Lu Hau-Ren. A two-way direct control of central air-conditioning load via the internet. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(1): 240-248
- [118] Wang P, Huang J Y et al. Demand side load management of smart grids using intelligent trading/metering/billing system//Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN, USA, 2010; 1-6
- [119] 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
- [120] Zhang Lu-Hua, Yi Zhong-Lin et al. Effects of advanced metering infrastructure (AMI) on relations of power supply and application in smart grid//Proceedings of the China International Conference on Electricity Distribution. Nanjing, China, 2010; 1-5
- [121] Neto A, Fiorelli F. Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption. *Energy and Buildings*, 2008, 40(12): 2169-2176
- [122] Newsham G, Birt B. Building-level occupancy data to improve ARIMA-based electricity use forecasts//Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building. Zurich, Switzerland, 2010; 13-18
- [123] Barbato A, Capone A et al. Forecasting the usage of household appliances through power meter sensors for demand management in the smart grid//Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Grid Communication. Brussels, Belgium, 2011; 404-409
- [124] 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(in Chinese)  
(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)
- [125] Le Anh Tuan, Kankar Bhattacharya. Competitive framework for procurement of interruptible load services. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 889-897
- [126] Tang Yong-Wei, Zhang Shao-Hua, Liu Yan-Yan. Incentive payment design for interruptible load management of power systems//Proceedings of the 2011 International Conference on System Science and Engineering. Macao, China, 2011; 357-360
- [127] Finn P, Fitzpatrick C, Leahy M. Increased penetration of wind generated electricity using real time pricing & demand Side management//Proceedings of the IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology. Phoenix, AZ, USA, 2009; 1-6
- [128] Dietrich K, Latorre J M, Olmos L, Ramos A. Demand response in an isolated system with high wind integration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(1): 20-29
- [129] Palma-Behnke R, Benavides C et al. Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management Mechanism//Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid. Paris, France, 2011; 1-8
- [130] 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电网技术研究综述. *电网技术*, 2009, 33(9): 14-19)
- [131] Bi Rui, Ding Ming, Xu Ting-Ting. Design of common communication platform of microgrid//Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China, 2010; 735-738
- [132] Siow L K, So P L et al. Wi-Fi based server in microgrid energy management system//Proceedings of the IEEE Region 10 Conference TENCON 2009. Singapore, 2009; 1-5
- [133] Ren Jing-Ding, Che Yan-Bo, Zhao Li-Hua. Discussion on monitoring scheme of distributed generation and micro-grid system//Proceedings of the 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications(PESA). Hong Kong, China, 2011; 1-6
- [134] Ding Ming, Xie Tian, Wang Lei. Research of real-time database system for microgrid//Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Hefei, China, 2010; 708-712
- [135] Zhou Liang, Ding Ming, Bi Rui. Optimization of design and application of micro-grid energy management system data acquisition system//Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China, 2010; 765-768
- [136] Shi S S, Lu Z X, Min Y, Qao Y. Modeling and simulation of the microgrid prototype in China//Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009). Hong Kong, China, 2009; 1-6
- [137] Yang M J, Zhuo F, Wang X W, Guo H P, Zhou Y J. Research of seamless transfer control strategy of microgrid system//Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Jeju, China, 2011; 2059-2066

- [138] Zheng Wen-Di, Cai Jin-Ding. A multi-agent system for distributed energy resources control in microgrid//Proceedings of the 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS). Beijing, China, 2010: 1-5
- [139] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Microgrid protection//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General

Meeting. Tampa, FL, USA, 2007: 1-6

- [140] Conti S, Raffa L, Vagliasindi U. Innovative solutions for protection schemes in autonomous MV micro-grids//Proceedings of the IEEE Clean Electrical Power, International Conference on 2009. Capri, Italy, 2009: 647-654



**CAO Jun-Wei**, born in 1973, Ph. D., professor. His research is focused on advanced computing technologies and applications.

**WAN Yu-Xin**, born in 1987, Ph. D. candidate. His research interests include Internet of Things and smart grid applications.

**TU Guo-Yu**, born in 1981, Ph. D.. Her research interests include information techniques applied in smart grid.

**ZHANG Shu-Qing**, born in 1983, Ph. D.. His research interests include sub-synchronous resonance in power system,

electro-magnetic/electrical-mechanical hybrid real-time simulation, and IoT applied in power system.

**XIA Ai-Xuan**, born in 1990, undergraduate student. Her research interests include network analysis and topology design for smart grid.

**LIU Xiao-Fei**, born in 1990, undergraduate student. Her research interests include load identification for power system.

**CHEN Zhen**, born in 1975, Ph. D., associate professor. His research is focused on ICN and its applications.

**LU Chao**, born in 1975, Ph. D., associate professor. His research interests include FACTS technologies and energy storage.

## Background

Smart grid is a cross-disciplinary challenge that has to be addressed by energy and power, electrical engineering and information technology. While the existing review paper always provides a general introduction to all aspects of the smart grid, this work is focused on the information system architecture of smart grid.

In this paper a three layer information framework is proposed for smart grid. This framework covers from the underlay information infrastructure to supporting software and applications. The authors point out the possible research areas and difficulties based on the review of previous work.

This work is partially supported by the Ministry of Science and Technology under National 973 Basic Research

Program (2011CB302805), "An Operation Support Platform and Prototype System Implementation for Internet of Things", National 973 Basic Research Program (2013CB228206), "EMS Development and Sample Application for a Source-Grid-Load Collaborative Smart Grid", and National Natural Science Foundation of China (61233016), "Smart Grid Information System Architecture and Verification Environment". A cyber physical bi-simulation platform for smart grid is implemented and the interaction between electric grid and information network is deeply investigated. The work included in this work is based on the experience of both electrical grid and information technology.