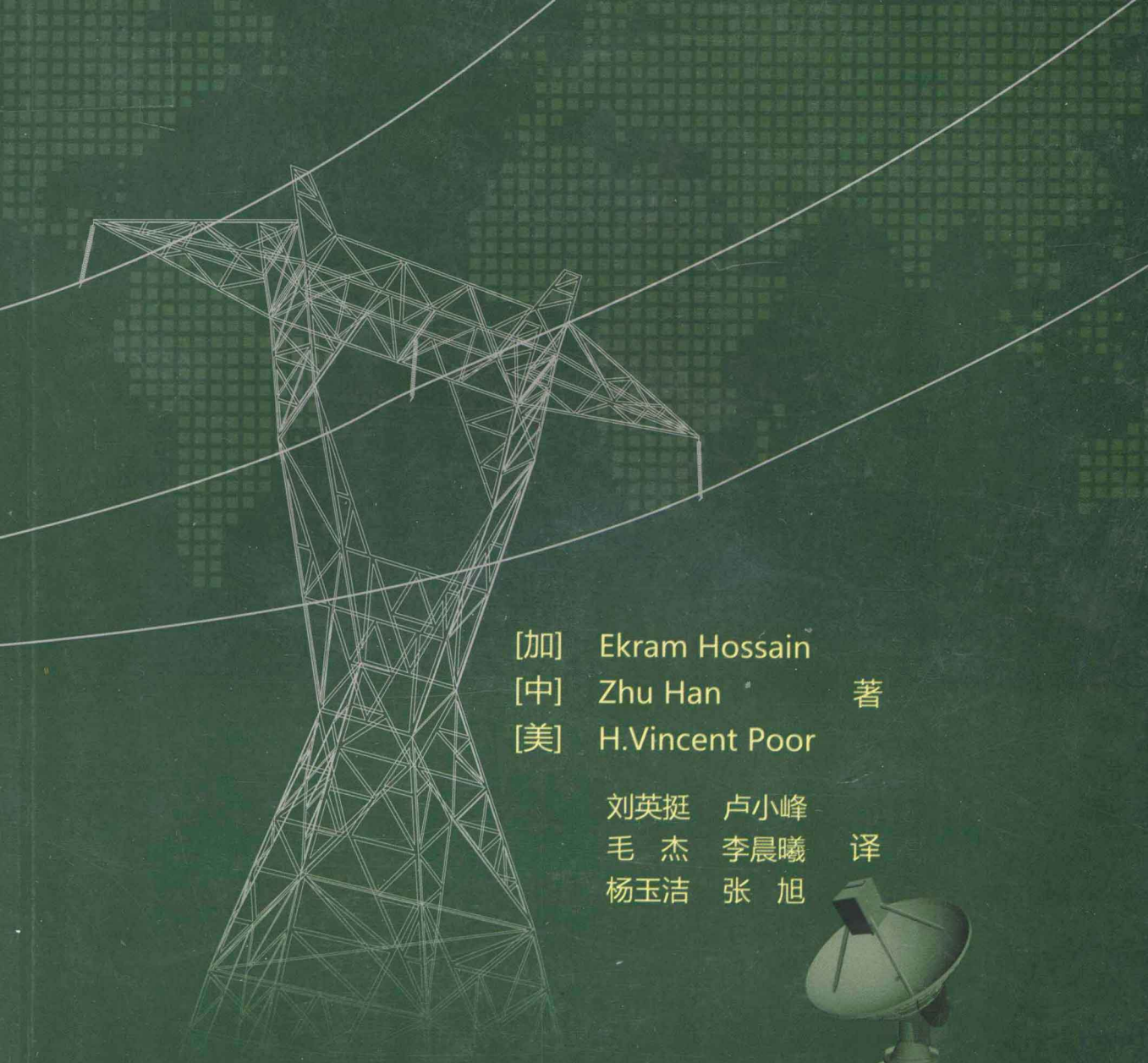


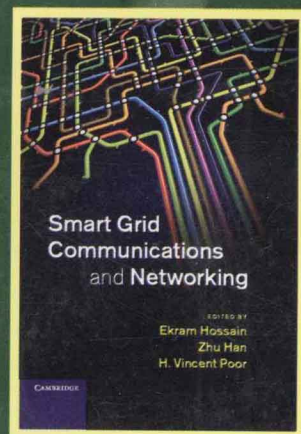


[加] Ekram Hossain
[中] Zhu Han 著
[美] H.Vincent Poor

刘英挺 卢小峰
毛 杰 李晨曦 译
杨玉洁 张 旭



智能电网 通信及组网技术



CAMBRIDGE



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

智能电网通信及组网技术

Smart Grid Communications and Networking

[加] Ekram Hossain

[中] Zhu Han

[美] H. Vincent Poor

著

刘英挺 卢小峰 毛 杰
李晨曦 杨玉洁 张 旭

译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书详细介绍了智能电网中的通信技术及组网技术, 主要包括模型及其通信架构, 物理层数据通信、接入、检测和估计技术, 广域网, 传感器和执行器网络, 以及智能电网通信和组网的安全、现场测试和配置等内容。本书内容全面, 覆盖了智能电网中通信和网络技术的最新理论、关键策略、协议、应用和实验研究, 为读者深入了解智能电网以及电力系统工程优化通信系统提供基本信息和技术参考。

本书适合电力行业广大科研和工程技术人员阅读参考, 也可作为政府部门、科研机构、规划设计、电力用户、设备供应商以及高等院校电力电子、通信等相关专业师生的参考用书。

Smart Grid Communications and Networking, 978-1-107-01413-8 by Ekram Hossain, Zhu Han, H. Vincent Poor
first published by Cambridge University Press [2012]

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Publishing House of Electronics Industry [2013]

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Publishing House of Electronics Industry.

This edition is authorized for sale in China Mainland.

本书原版由 Cambridge University Press 出版。

本书中文简体翻译版由© Cambridge University Press 和电子工业出版社[2013]。

未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2013-1790

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网通信及组网技术 / (加) 侯赛因 (Hossain, E.), 韩竹, (美) 珀尔 (Poor, H. Y.) 著; 刘英挺等译.
—北京: 电子工业出版社, 2013.9

书名原文: Smart grid communications and networking

ISBN 978-7-121-21325-0

I. ①智… II. ①侯… ②韩… ③珀… ④刘… III. ①智能控制—电力通信网 IV. ①TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 198759 号

责任编辑: 董亚峰 特约编辑: 王 纲

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 24.25 字数: 688 千字

印 次: 2013 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

译者序

人类很早就开始了对电这种现象的研究。早在公元前 585 年，古希腊哲学家塞利斯就发现了摩擦过的琥珀能吸引碎草等轻盈小物体。19 世纪以来，法拉第电磁感应现象的发现、尼古拉·特斯拉交流发电机的发明直接将人类文明推进到了电气时代。时至今日，人类的衣食住行已经越来越依赖于电，可以说，现代社会离开了电，一刻也不能正常运转！

与早期的传统电网主要依赖于人工控制不同，现代化电网的调度运行主要靠先进的通信技术支撑，通信技术早已经渗透进电网运行的发、输、变、配、用、调等各个环节。随着全球对环境保护问题的持续关注，特别是太阳能发电、风力发电等清洁能源和各种分布式电源的出现，现代社会对电力工业提出了新的要求：人类希望能够更加安全、可靠、经济、环保地用电。智能电网的概念就在这种背景下应运而生。

美国电力科学研究院于 2001 年首次提出智能电网的概念。2009 年，美国总统奥巴马将发展智能电网作为其经济复兴计划的重要组成部分之后，智能电网的研究得到了世界各国的高度重视。一些国家将发展代表未来趋势的智能电网作为抢占未来产业制高点、创造新的经济增长点与就业岗位的重要举措。世界各国依据其经济发展水平、电力工业实际状况，给出了智能电网的不同定义。但是不论哪种定义，都突出强调了现代先进的通信技术在智能电网中的核心作用。可以说，离开了先进的通信技术，就没有智能电网。

本书的三位作者均是国际通信领域的著名专家，具有深厚的学术造诣和广泛的国际影响。他们组织了相关领域的专家编写了这本书。本书共 20 章，全面论述了通信技术在未来智能电网中的应用，以及为了满足智能电网的需求，通信技术面临的挑战和所要解决的难题。本书可以作为科研院校从事智能电网研究工作的科研人员的参考用书，也可供电力系统的员工学习使用。通过阅读本书，相信读者会有所收获。

本书的中文译本由国家电网甘肃省电力公司信息通信公司的刘英挺博士、毛杰高级工程师、李晨曦高级工程师、张旭硕士和西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室的卢小峰副教授、杨玉洁硕士生翻译。西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室的鲁莎莎、谢珍、张艳敏、郭松等硕士生在本书的翻译过程中也做了大量工作，在此一并致谢。

由于译者水平有限，缺点和错误在所难免，欢迎广大读者批评指正！意见请发送到：dyf@phei.com.cn。

本书受到国家电网公司科技项目资助（52272313039Q，52272313039L）。

译者

2013 年 6 月于金城兰州

前言

电力网由以下两个主要部分组成：输电系统和配电系统。输电系统指的是连接发电设备与各种分布点的高电压网络基础设施。在输、配系统的连接处，由于存在能互连所有消费者的分布系统，高电压被转化成中、低电压。智能电力网（简称智能电网）指的是下一代电力网，其中引入了现代信息、通信和电子技术，旨在提供可靠的、有效的、安全的、高质量的电力生产、分配和消耗。智能电网引进一种分布式和以用户为中心的系统，它能把终端用户并入它的决策处理系统，因而便于为用户提供低花费和可靠的能量供给。现代的通信基础设施将在管理、控制和优化智能电网的不同设备和系统中起重要作用。信息和通信技术在智能电网中起到了核心作用，因为它们使智能电网具备了以下功能：双向的能量与信息流动，隔离并快速地修复故障，便于可再生的能源融入智能电网中并授权给用户，并使用户能够可用工具来优化自己的能源消耗量。

从架构的角度来看，智能电网由3个高层组成：物理电力层（传输与分配）、数据传输与控制层（通信和控制）及应用层（应用与设备）。每个高层又分成3个子层和更详细的市场区分。与之前（现存的电力网）不同的是，智能电网会应用双向的数据通信技术把电力公司控制系统、终端用户及消费者整合在一起，这样就能做到智能化的电力生产、控制和消耗。更重要的是，智能电网提供与用户相关的需求和故障报告，从而使用户能够活跃地参与其中。很多全球的标准制定机构与组织都在朝此方向努力。其中，电力研究所（Electrical Power Research Institute, EPRI）、国家标准和技术研究所（National Institute of Standards and Technology, NIST）、欧洲研究委员会（European Commission Research, ECR）等研究机构如今都在为智能电网努力研发最全面的构架、通信标准和发展路线。然而很多问题如开销、非互操作性、互联网和物理安全、缺少通信与框架的标准等问题都亟待解决。研发智能电网已经成为全球紧迫的优先事宜，而我们的后代将享受到这项工程带来的经济的、环境的以及社会的益处。

本书的目的在于为先进的数据通信和网络机制提供一个有用的背景，为网络化的控制提供模型并为智能电网提供安全机制。本书涉及设计智能电网时数据通信与组网的不同方面，包括以下几个部分：智能电网高级测量体系（Advanced Metering Infrastructure, AMI）的通信架构和模型，网络化控制，需求侧管理（Demand-side Management, DSM），分布式能源（Distributed Energy Resource, DER）管理，物理通信、检测、估计和接入设计；智能电网和区域网络，如家庭局域网（Home-area Network, HAN）、邻域网（Neighborhood-area Network, NAN）、广域网（Wide-area Network, WAN）、广域测量系统（Wide-area Measurement Systems, WAMS）；传感器与执行器网络（Sensor and Actuator Network, SANET）和相关的协议设计问题；通信架构的安全性以及在智能电网上正在进行的测试项目。

本书共20章，分为6部分。以下是各章的简要介绍。

第1部分：智能电网模型及其通信架构。

人们所设想的智能电网是以用户为中心的系统，它可以将传统的电力系统改进为合作式、

响应式和节约式的系统。除了已实现的将电能从供应方输送给消费者的功能以外，智能电网也为电力网提供信息化与智能化功能，这使得网络拥有自动化的功能，能积极地运作和有效地响应需求。可靠和有效的通信和组网基础设施能把功能性的元件连入智能电网中。

在第1章中，Kayastha等人描述了NIST采用的智能电网概念模型和其中不同域之间的交互（如生产、传输、分配、用户、服务供应商、操作、市场等）。作者强调了智能电网通信和组网基础设施的角色与重要性，并给出了跨越不同域的层级通信设施的概况。这种设施也称AMI，包括许多如HAN、SANET、NAN和WAN这样的系统与子系统。作者同样给出了集成的智能电网的GWAC（GridWise Atchitecture Council）互操作性框架，并回顾了网络设施的安全性 with 用户信息的隐私保护。

在第2章中，Scaglione Wang和Alizadeh简要综述了网络控制的经典问题，以及它们与在智能电网中为管理能源分配而创建新的框架模型这一挑战之间的关系，这种能源分配的管理依赖于实时的、可靠的信息收集和决策。作者同样讨论了在网络核心与边缘部分加强网络化控制时存在的问题，以及为什么它们是智能电网中自由创新的关键。

他们还探讨了通过新颖的传感器网络模式与相量测量单元（Phasor Measurement Unit, PMU）连接起来的广域测量系统是如何帮助智能电网提高它的态势感知能力的。作者也回顾了如今用于网络监测与控制的数据采集与监视控制系统模型（Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA）。在边缘部分，新兴的智能测量基础设施只给出了拥有大量用户群所具有的一部分优势。也有可能通过实时的负载调度强化需求控制。作者也提及对于需求与响应系统（也称DSM系统）什么才是合理的模型，它能主动地控制智能负载。DSM系统是应用于电动车辆的具体实例，并且是致力于研究负载调度的有力实证。

在第3章中，Samadi等人提出了很多基于智能计价的DSM系统的算法，用以提高传统电网的效率。这种算法的两个目的的不同在于：一个是为了减少电力消耗和转移（或调度）电力消耗。耗能调度能同时降低电力耗损的峰值与平均值比值（Peak-to-average Ratio, PAR）和系统的整体能量耗损。对于用户而言，另一个目标在于能同时减少能量损耗与等待时间。为了解决DSM的问题，作者考虑到它的设计目的，提出了优化与博弈论模型。使用效用函数的概念可以建模用户的不同目的需求。

在第4章中，Wu、Mohsenian-Rad和Huang介绍了汽车到电网（Vehicle-to-Grid, V2G）系统，并强调了未来智能电网中，在这样的系统中保障可靠性与安全性的通信和组网基础设施的重要作用。当插电式电动汽车需要放电时，V2G系统能将电力注入网络当中，也能通过协调的充电与放电机制提高PAR。同样，V2G电力存储机制便于将可再生能源融入智能电网。另外，此系统规范了电力网的频率和电压。以上这些服务，也称辅助服务，能由高级的通信和组网设施有效地提供给电网。作者简要介绍了V2G系统通信的一些技术，其中包括宽带电力线通信（Power-Line Communicaton, PLC）、ZigBee、Z-Wave、认知无线电和蜂窝无线技术。这些技术的具体细节在本书第2部分进行介绍。

第2部分：智能电网的物理层数据通信、接入、检测和估计技术。

智能电网的不同物理层数据通信技术能使传统电力网支持双向的能量与信息流。这些技术便于可再生能源融入智能电网，并能使顾客用工具优化能量消耗量。智能电网依赖于当前和未来的有线和无线通信技术（如PLC、蜂窝网、IP网、ZigBee、Wi-Fi、WiMAX等），同样也需要有先进的技术去支持电力系统状态估计和数据处理（如不良数据检测）。

在第5章中，Bavarian和Lampe介绍了智能电网通信中不同的通信和接入技术以及它们的

应用。不同的有线通信技术包括电力线、光纤技术,无线技术包括蜂窝网、卫星、无线网状网和无线个人局域网技术。作者探讨了宽带与窄带电力线通信技术及其相关标准(如 IEEE 1901、ITU-T G.9960/61、家庭插电联盟)。在所有这些无线技术中,作者主要讨论了 ZigBee、Wi-Fi、WiMAX、3GPP LTE 和 IEEE 802.22 标准。最后给出了一些智能电网的网络解决方案,如基于互联网和基于 IP 的网络、专用网、无线传感器和机器到机器的(Machine-to-machine, M2M)通信网络。

在第 6 章中,Alonso-Zarate 等人介绍了一些新兴的 M2M 通信范例,包括它的定义、历史发展、设计驱动程序和为使它达到标准化所做的努力。作者详细讨论了 M2M 通信在智能电网中的应用,以及这两种技术共同发展所面临的开放性挑战;也提及了不同的 M2M 有线通信技术(如 PLC 和以太网),低功率无线通信技术如 ZigBee、Wi-Fi、6LoWPAN(微 M2M 技术),以及混合 M2M 技术。作者给出了这样一种观点:蜂窝 M2M 通信技术适用于智能电网的应用,如广域态势感知、分布式能源的交互以及在传输与分布网络中的分配自动化。同样,蜂窝 M2M 技术能建立 AMI 并实现直接寄存控制(Direct Load Control, DLC)的概念,即智能化设备能自动调度它们的电力负载。

在第 7 章中,Xie 等人把注意力主要放到智能电网广域监控、控制和保护应用的快速、强健状态估计技术问题上。状态估计的基本功能是检测、识别并排除管理错误,这些错误均是由计量偏差、大的测量偏离和错误链接造成的。这种功能也称“不良数据处理”,它包含两步:不良数据检测与识别。通常,不良数据检测采用的是卡方检验,而不良数据识别采用标准化的残差检验。作者回顾了最新的不良数据处理技术并为不良数据检测提出一种分布式方法。这一方法的性能在 IEEE 14-bus 系统的仿真下可以观测出来。作者也介绍了这些方法的信息交换和通信要求。

在第 8 章中,Tajar、Kar 和 Poor 考虑到基本的物理与传感模型和系统快速变化的动态性,解决了分布式电力系统状态估计的问题。作者为自适应和分布式的电力状态估计定义了一种基于学习机制的框架。他们把智能电网建模成覆盖全网的多个重叠分布式子网(集群)的集合,这些子网通过骨干网以一个中央决策者实体(中央估计器)来共享它们对网络状态的估计,中央决策者将所有本地状态估计结合起来以获得全局网络的状态。中央估计器的估计性能和每个集群的评估质量可以用成本函数来分析建模。

第 3 部分:智能电网和广域网。

先进的数据通信和组网技术在新兴的智能电网系统的成功发展中起着至关重要的作用。智能电网的通信网络必须支持电力的生产、传输、分配和用户与电力服务供应商的需求。数据通信网也要承担起传感(通过 WAMS 收集电力网不同位置的实时管理信息)、通信(智能仪表和控制中心的双向数据交换)和控制(为了保证网络与子系统最优的、可靠的和灵活的操作而传送的控制信息)的责任。

在第 9 章中,Deng 等人主要讲述了智能电网 WAMS 应用的网络架构和协议的性能评估,他们回顾了 WAMS 架构(软件和硬件)和 WAMS 不同的组成部分,也就是 PMU、区域相量数据集中器(Phasor Data Concentrator, PDC)、集中化的超级相量数据集中器(Super-phasor Data Concentrator, SPDC)和分层组建的通信网。一个 WAMS 使用可靠的、能实时响应的、可扩展的多层通信网,以便将所有组件集成在一起。作者详细叙述了电力系统检测、防护、控制的 WAMS 应用,设计出一个基于 OPNET 的仿真软件包的仿真平台来实现 WAMS 通信系统,即可获得各种控制、检测以及混合 WAMS 应用的仿真结果。

在第 10 章中, Griffith、Souryal 和 Golmie 集中讨论了为满足通信服务质量 (Quality-of-Service, QoS) 和不同智能电网应用的流量需求而配置的无线网络。这些应用包括固件/程序更新 (Firmware/Program Update, FPU) 和现场配电自动化维护集中式控制 (Field Distribution Automation Maintenance-centralized Control, FDAMC), 用于分配管理系统和各种现场设备之间的通信、PHEV 信息传送、客户信息/消息传送 (Customer Informaton/Messaging, CMSG) 和仪表读取。作者给出了这些应用的 QoS 需求 (如时延和可靠性) 与流量特性、应用之间不同部分的信息流动以及产生的网络拓扑结构。作者也提出无线频谱的选择、无线信道的传输特点、无线链路覆盖范围和网络的容量、弹性和安全性, 这些在部署无线网时均要考虑进去。在本章中, 作者还列出了用于评估选择不同无线网络性能的度量指标, 如覆盖范围、容量、可靠性和时延。

第 4 部分: 智能电网的传感器和执行器网络。

在智能电网中, 无线 SANET 将应用在发电系统、传输和分配系统以及用户前端来检测和控制网络的功能。SANET 在智能电网中已经投入使用的和将来可能用到的应用有: 高级计量体系、差错诊断、需求响应、动态定价和能量管理等。SANET 在未来的智能电网发电系统中是一个重要的组成部分。然而, 考虑到智能电网的应用要求, 研究人员需要对现有的 SANET 通信协议进行改进或优化。

在第 11 章中, Sahin 等人提出了无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 的潜在应用和相关的技术挑战, 重点介绍了用于电力生产系统、传输与分配网络 and 用户设施的基于 WSN 的应用。对于基于 WSN 的智能电网应用, 有很多研究上的挑战, 包括电力、数据、传感器上的资源管理, WSN 协议之间的互操作性、QoS 条款和系统集成。

在第 12 章中, Zheng 和 Hua 把注意力放在了智能电网中传感器网络的传感技术和通信协议上。作者介绍了传感器的几种主要类型, 并把它们分为计量和电能质量传感器、电力系统状态和健康监测传感器。这一章也提及了把物理参数转化为电信号的不同传感准则。作者讨论了智能电网 WSN 中与设计媒介接入控制 (Medium Access Contro, MAC)、路由和传输协议相关的问题。作者简述了一般 WSN 的现有协议与不同协议之间的定性比较, 并且指出在智能电网上设计传感组网协议的困难是由该系统的独特特性造成的。例如, 环境的复杂和异构特性、系统的动态性、可靠性和可用性以及不同的 QoS 要求, 能量和开销效率以及延展性和安全性问题。

在第 13 章中, Li 和 Yang 致力于解决上文提到的 SANET 系统中的主要设计挑战。作者提出了普遍的面向服务的组网技术、态势感知智能控制、压缩传感和先进的设备技术 (如低功率、模块化的和简洁的设计以及采集电力机制) 来解决以上问题。最后, 家庭能量管理系统 (Home Energy-Management System, HEMS) 的案例研究证明了上述机制的有效性。

在第 14 章中, Bui 等人给出了在现有的无线传感器建立的测试平台上智能电网应用程序的 WSN 协议的性能评估和实现。特别地, 作者提出了网络在物理层和媒体接入层使用基于 IEEE 802.15.4 的物联网协议栈, 在路由层应用 IPv6 基于电功率的无线个域网协议 (IPV6 over Low-power Wireless Personal-Area Networks, 6LoWPAN), 在应用层或会话层利用约束应用协议 (Constrained Application Protocol, CoAP)。作者还讨论了用于网络和软件实现的不同优化技术和试验台的实现, 并给出了协议栈的不同层上的试验结果。最后作者做出总结: 基于物联网协议栈的 WSN 解决方法是可以集成到智能电网中的。

第 5 部分: 智能电网通信和组网的安全问题。

尽管通信设施能大幅提高电力系统的有效性, 但是它却带来了严重的脆弱性问题, 因为黑客能攻击通信系统, 进而导致对智能电网的各种破坏甚至大面积的停电。因此, 安全性是智能电网所要解决的首要任务, 而且得到了学术界和商界的广泛关注。本部分有 5 章分别从不同的

角度讨论了智能电网的安全问题。

在第 15 章中, Kundu 等人给出了智能电网中分析网络攻击的影响的框架结构。首先, 作者提供了一个背景来引入对网络攻击影响分析的基本研究及其发展问题。其次, 为了建模网络和电力网之间的交互, 作者提出了一种图解的动态系统方法。最后, 作者给出了一个测试案例研究来证实此建模方法的潜力。

在第 16 章中, Li 介绍了一种基于干扰的攻击机制来控制智能电网的电力市场。通过干扰无线通信而智能化地阻止与发布电力市场的信息, 恶意干扰者或攻击者能控制电价来谋取利益并破坏电网。为了遏制这种攻击, 通信中可以采用随机跳频和随机补偿方法来调节负载, 以此避免由干扰引起的对电价和电力负载的巨大冲击。

在第 17 章中, Dan、Sou 和 Sandberg 研究了智能电网中应用 SCADA 系统时, 注入不良数据对状态评估的影响。状态评估用来评估电力系统的整个物理层状态, 而不良数据监测用于识别出错的设备与损坏的测量数据。现在有一种针对不良数据监测的隐秘攻击, 为了避免此种攻击人们采用了许多的算法, 也在 SCADA 系统的通信上增加了一种实际可行的模型。作者同时提到了一些新的保护机制。

在第 18 章中, Zhu 和 Basar 描述了一种跨层框架用以解决安全性问题。由不同层的 3 个安全性问题引出了信息安全和物理层系统性能之间的折中: 物理层电厂的弹性控制问题、网络和通信层的数据路由问题和应用层的信息安全管理问题。这种层级式的模型扩展了 OSI (Open System Interconnection) 和参考体系模型以使它们集成到智能电网中。

在第 19 章中, Berthier 等人讨论了建立大型网络安全工具集的一种应用驱动型设计方法。这种方法的关键点是详细枚举每个系统中控制系统的特定方面, 并对这些方面进行深入研究, 明确网络安全特性和解决方案。特别地, 作者详细介绍了以下问题: 高级仪表设施的入侵检测、SCADA 系统上的网络融合和 SCADA 协议认证的设计准则。

第 6 部分: 现场测试和配置。

智能电网的受关注度可以从越来越多的国内和国际上在此议题上的项目以及标准化机构与组织的创新举动就能看出来。这些组织有 NIST、EPRI、ECR 和 IEEE。在过去几年中已经有很多智能电网的现场测试。

在第 20 章中, Hu 和 Qian 介绍了许多智能电网的现场测试, 它们一般可分为三类: 智能电网、智能电力系统和智能用户。第一类包括韩国济州岛智能电网测试平台、加拿大安大略省的先进分布式系统 (ADS) 程序和欧洲的智能家庭项目。第二类包含智能电网的智能保护继电器系统。第三类包括一些动态收费机制。作者从以上试点项目中总结出了自己的观点。

智能电网通信及组网技术

智能电网将会改变电力的传送、消耗以及人们利用电能的方式。人们使电力网络变得更加智能化,提高了网络的可靠性和电能质量、应答性和效率,并为新研发的应用提供了一个平台。本书涵盖了当前最先进的智能电网通信和组网技术的理论、关键策略、协议、应用、配置以及实验研究。这本由专业的作家团队撰写的本书共有 20 章内容,分别讲述了电网的框架、模型以及插电式混合动力电动车的融合与安全性等主题。本书能为研究人员提供基本的信息,希望这些内容能够帮助他们在此领域中对当前的技术进行改进,同时也能辅助电力系统的工程师们优化智能电网的通信系统。

Ekram Hossain 是加拿大曼尼托巴大学电子计算机工程学院教授,其最新的研究方向是无线/移动通信网络、智能电网通信以及认知系统和绿色无线电系统。他在 2010 年、2011 年分别获得过曼尼托巴大学优秀奖(专为研究和学术活动而设立的奖项)、IEEE 通信学会 Fred W. Ellersick 论文奖等多种奖项。

Zhu Han 是得州休斯敦大学电子与计算机工程学院副教授,他于 2003 年在马里兰大学帕克分校获得了电子工程专业的博士学位,在 JDSD 担任研发工程师并任职两年,并于 2010 年荣获美国国家科学基金会奖(NSF CAREER Award)和 IEEE 通信学会 Fred W. Ellersick 论文奖。

H.Vincent Poor 是 Michael Henry Srater 大学的教授,同时也是新泽西普林斯顿大学工程技术与应用科学学院的院长。他不仅是 IEEE 会员与美国国家工程院、科学院院士,同时也是美国艺术与科学院、英国皇家工程院院士,以前也曾是古根海姆研究员。最近他所获得的奖项包括 2009 年的 IEEE 通信学会埃德温霍华德的阿姆斯壮奖、2010 年的 IET ambrose fleming 奖章、2011 年的 IEEE Eric E. Sumner 奖以及英国爱丁堡大学的荣誉博士。

“凡是参与设计智能电网工作的研究人员,均会视本书为珍宝。这本书将会成为智能电网与智能设施领域里一本不可或缺的参考资料。”

Alberto Leon-Garcia
多伦多大学

仅以此书献给我们的家人

参与本书的编著者

Mahnoosh Alizadeh

美国加州大学戴维斯分校

Jesus Alonso-Zarate

西班牙巴塞罗那 CTTC

Tamer Basar

美国伊利诺伊大学香槟分校

Sara Bavarian

加拿大英属哥伦比亚大学

Robin Berthier

美国伊利诺伊大学香槟分校

Rakesh B. Bobba

美国伊利诺伊大学香槟分校

Nicola Bui

意大利帕多瓦大学

Karen Butler-Purry

得克萨斯 A&M 大学

Paolo Casari

意大利帕多瓦大学

Angelo P. Castellani

意大利帕多瓦大学

Dae-Hyun Choi

得克萨斯 A&M 大学

Göyrgy Dón

瑞典皇家理工学院

Yi Deng

美国弗吉尼亚理工大学

Mischa Dohler

西班牙巴塞罗那 CTTC

Nada Golmie

美国国家标准与技术研究院

David Gregotatti

西班牙巴塞罗那 CTTC

David Griffith

美国国家标准与技术研究院

Vehbi Gagri Gungor

土耳其花园城市大学

Gerhard P. Hancke Jr

英国伦敦大学皇家霍洛威学院

Gerhard P. Hancke

南非比陀利亚大学

Erich Heine

美国伊利诺伊大学香槟分校

Ekram Hossain

加拿大曼尼托巴大学

Rose Qingyang Hu

美国犹他州立大学

Cunqing Hua

中国浙江大学

Jianwei Huang

中国香港大学

Soummya Kar

美国卡内基梅隆大学

Nipendra Kayastha

新加坡南洋理工大学

Himanshu Khurana
霍尼韦尔研究实验室
Deepa Kundur
得克萨斯 A&M 大学
Lutz Lampe
加拿大英属哥伦比亚大学
Husheng Li
美国田纳西大学
Victor O.K.Li
中国香港大学
Hua Lin
美国弗吉尼亚理工大学
Salman Mashayekh
得克萨斯 A&M 大学
Javier Matamoros
西班牙巴塞罗那 CTTC
Amir-Hamed Mohsenian-Rad
美国得州理工大学
Dusit Niyato
新加坡南洋理工大学
Arun G.Phadke
美国弗吉尼亚理工大学
H.Vincent Poor
美国普林斯顿大学
Michele Rossi
意大利帕多瓦大学
Dilan Sahin
土耳其花园城市大学
Pedram Samadi
加拿大英属哥伦比亚大学
Henrik Sandberg
瑞典皇家理工学院
William H.Sanders
美国伊利诺伊大学香槟分校
Anna Scaglione
美国加州大戴维斯分校
Robert Schober
加拿大英属哥伦比亚大学

Sandeep Shukla
美国弗吉尼亚理工大学
Kin Cheong Sou
瑞典皇家理工学院
Michael Souryal
美国国家标准与技术研究院
Ali Tajer
美国普林斯顿大学
James S.Thorp
美国弗吉尼亚理工大学
Yi Qian
美国内布拉斯加林肯大学
Lorenzo Vangelista
意大利帕多瓦大学
Ping Wang
新加坡南洋理工大学
Zhifang Wang
美国加州戴维斯分校
Vincent W.S.Wong
加拿大英属哥伦比亚大学
Chenye Wu
中国清华大学
Le Xie
得克萨斯 A&M 大学
Guang-Hua Yang
中国香港大学
Tim Yardley
美国伊利诺伊大学香槟分校
Rong Zheng
美国休斯敦大学
Quanyan Zhu
美国伊利诺伊大学香槟分校
Michele Zorzi
意大利帕多瓦大学
Takis Zourntos
得克萨斯 A&M 大学

目 录

第 1 部分 智能电网模型及其通信架构

第 1 章 智能电网的通信网络：以架构的角度来看	3
1.1 引言	3
1.2 智能电网的概念模型	4
1.3 智能电网的通信基础设施	5
1.3.1 家庭局域网	7
1.3.2 邻域网	7
1.3.3 广域网	7
1.3.4 企业网	7
1.3.5 外部网	8
1.4 互操作性问题	8
1.5 通信基础设施在智能电网中的作用	10
1.5.1 用户前端	10
1.5.2 核心通信网	11
1.5.3 最后一英里连接	14
1.5.4 控制中心	15
1.5.5 传感器与执行器网络	16
1.6 智能电网中通信基础设施的安全性与隐私性	17
1.6.1 组件安全	17
1.6.2 协议安全	18
1.6.3 网络安全	18
1.7 开放性问题及未来研究方向	19
1.7.1 开销可感知的通信和网络基础设施	19
1.7.2 服务质量框架	19
1.7.3 最佳网络设计	19
1.8 总结	20
参考文献	20
第 2 章 智能电网网络化控制新模型	27
2.1 引言	27

2.2	当前电力系统管理操作情况	27
2.2.1	当前电力系统管理操作	28
2.2.2	数据采集与监视控制系统	29
2.2.3	电力系统控制的基本模型	30
2.2.4	现有的电网控制技术	32
2.2.5	网络化控制的固有困难	33
2.3	增强型智能电网的测量功能	34
2.3.1	状态估计	34
2.3.2	广域测量系统和 GridStat	35
2.4	需求侧管理和需求响应：经济、绿色配电的关键	38
2.4.1	中央电力市场	39
2.4.2	实时定价	41
2.4.3	直接负载控制	43
2.4.4	网络边缘设计的可能性和挑战	44
2.5	总结	45
	参考文献	45

第 3 章 智能电网需求侧管理中的机遇和挑战

3.1	引言	52
3.2	系统模型	53
3.3	能耗调度模型	53
3.3.1	住宅负载调度模型	54
3.3.2	能耗调度问题阐述	54
3.3.3	能耗调度算法	56
3.3.4	性能估计	57
3.4	采用效用函数的能耗控制模型	58
3.4.1	用户喜好和效用函数	58
3.4.2	能耗控制问题阐述	59
3.4.3	用户之间的稳态问题	60
3.4.4	VCG 方法	63
3.4.5	电力级选择算法的性能评估	64
3.5	总结	65
	参考文献	66

第 4 章 车辆到电网系统：辅助服务与通信

4.1	引言	69
4.2	V2G 系统中的辅助服务	70
4.3	V2G 系统架构	72
4.3.1	聚合场景	74

4.3.2 充电场景	74
4.4 V2G 系统通信	75
4.4.1 电力线通信与家庭插电联盟	75
4.4.2 无线个人局域网和 ZigBee	75
4.4.3 Z-Wave	76
4.4.4 蜂窝网络	76
4.4.5 干扰管理与认知无线电	76
4.5 面临的挑战与开放性研究问题	77
4.5.1 满足通信需求	77
4.5.2 协调充电与放电	77
4.6 总结	78
参考文献	78

第 2 部分 智能电网的物理层数据通信、接入、检测和估计技术

第 5 章 智能电网的通信和接入技术	87
5.1 引言	87
5.1.1 传统电网通信	87
5.1.2 智能电网的目标	88
5.1.3 数据分类	90
5.2 通信媒质	91
5.2.1 有线方案	92
5.2.2 无线方案	94
5.3 电力线通信标准	97
5.3.1 宽带电力线通信	98
5.3.2 窄带电力线通信	99
5.3.3 电力线通信技术共存	100
5.4 无线标准	101
5.4.1 近距离无线方案	101
5.4.2 远距离解决方案	102
5.5 网络解决方案	104
5.5.1 混合组网解决方案	105
5.5.2 公用还是专用组网	105
5.5.3 互联网和基于 IP 的网络	105
5.5.4 无线传感器网络	106
5.5.5 机对机通信	107
5.6 总结	109
参考文献	109

第 6 章 智能电网中的机对机通信 113

6.1 引言 113

6.2 机对机通信技术 115

6.2.1 有线还是无线 115

6.2.2 微型机对机通信网 116

6.2.3 蜂窝机对机通信网 118

6.3 机对机通信的应用 119

6.4 机对机通信架构标准组织 120

6.4.1 欧洲电信标准协会机对机通信标准 120

6.4.2 第三代合作伙伴计划物联网标准 122

6.5 机对机通信在智能电网中的应用 124

6.5.1 机对机通信标准架构 124

6.5.2 输配电网 125

6.5.3 用户终端应用 127

6.6 总结 129

参考文献 129

第 7 章 智能电网中不良数据的检测：分布式方法 133

7.1 引言 133

7.2 目前分布式状态估计与不良数据处理的发展水平 134

7.2.1 广域状态估计模型 134

7.2.2 状态估计中的不良数据处理 134

7.2.3 相关研究 135

7.3 全分布式不良数据检测 136

7.3.1 引文 136

7.3.2 分布式不良数据的推荐算法 137

7.4 案例分析 139

7.4.1 案例一 140

7.4.2 案例二 141

7.5 总结 143

致谢 144

参考文献 144

第 8 章 分布式状态估计：一个基于学习的框架 146

8.1 引言 146

8.2 背景 147

8.3 状态估计模型 147

8.4 基于学习的状态估计方法 148

8.4.1 地理多样性	148
8.4.2 边信息	149
8.4.3 加权平均估计	149
8.4.4 评估性能	150
8.5 总结	151
参考文献	151

第 3 部分 智能电网和广域网

第 9 章 适用于广域测量应用的网络技术	157
----------------------------	-----

9.1 引言	157
9.2 广域测量系统的组成	158
9.2.1 PMU 和 PDC	158
9.2.2 硬件构架	159
9.2.3 软件设施	160
9.3 WAMS 的通信网络	161
9.3.1 通信需求	162
9.3.2 传输媒介	162
9.3.3 通信协议	163
9.4 WAMS 应用	164
9.4.1 电力系统监测	164
9.4.2 电力系统保护	166
9.4.3 电力系统控制	169
9.5 WAMS 建模与网络仿真	171
9.5.1 软件介绍	171
9.5.2 系统基础设施建模	171
9.5.3 应用分类	173
9.5.4 监测仿真	173
9.5.5 保护仿真	174
9.5.6 控制仿真	175
9.5.7 混合仿真	176
9.6 总结	176
参考文献	177

第 10 章 无线网络在智能电网中的应用	179
----------------------------	-----

10.1 引言	179
10.2 智能电网应用需求	179
10.2.1 应用类型	179
10.2.2 服务质量要求	180