



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

智能电网技术与应用

Smart Grid: Technology and Applications

[斯里兰卡] 阍那迦·挨家纳雅克(Janaka Ekanayake)

[斯里兰卡] 凯斯赛锐·利亚纳杰(Kithsiri Liyanage)

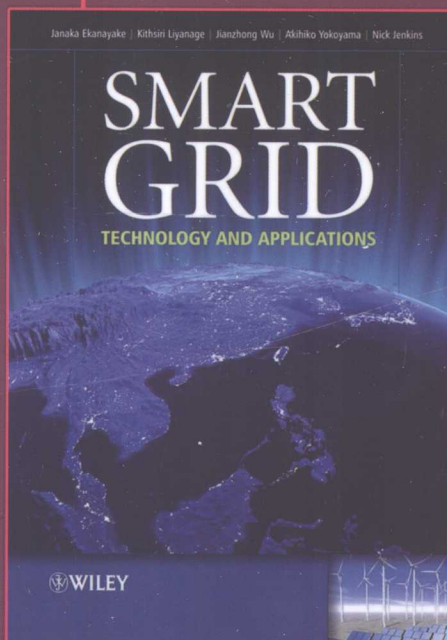
吴建中(Jianzhong Wu)

著

[日本] 明彦横山(Akihiko Yokoyama)

[英国] 尼克·詹金斯(Nick Jenkins)

师瑞峰 张丽 焦润海 关志涛 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

智能电网技术与应用

[斯里兰卡] 阁那迦·挨家纳雅克 (Janaka Ekanayake)

[斯里兰卡] 凯斯赛锐·利亚纳杰 (Kithsiri Liyanage)

吴建中 (Jianzhong Wu) 著

[日本] 明彦横山 (Akihiko Yokoyama)

[英国] 尼克·詹金斯 (Nick Jenkins)

师瑞峰 张丽 焦润海 关志涛 等译



机械工业出版社

本书全面论述了智能电网的技术与应用,讨论了支撑智能电网系统运行的信息与通信技术(ICT), 传感、测量、控制及自动化技术,以及新能源并网与需求侧管理所需的电力电子及储能技术。本书通过大量的例题对智能电网分析的方法应用进行了示例分析,使读者可以全面掌握智能电网相关的基础理论与方法应用要点。

本书可作为高等院校电气工程、通信、自动化、能源动力工程等高级本科专业选修教材或低年级研究生的参考教材,同时也可供智能电网相关领域研究和工程技术人员参考。

Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled Smart Grid: Technology and Applications, ISBN: 978-0-470-97409-4, by Janaka Ekanayake, Kithsiri Liyanage, Jianzhong Wu, Akihiko Yokoyama and Nick Jenkins, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2012-5201 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能电网技术与应用 / (斯里) 阁那迦·挨家纳雅克 (Janaka Ekanayake) 等著; 师瑞峰等译. —北京: 机械工业出版社, 2016. 11

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Smart Grid Technology and Applications

ISBN 978-7-111-55038-9

I. ①智… II. ①阁…②师… III. ①智能控制-电网-研究
IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 239223 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

责任校对: 潘 蕊 封面设计: 马精明

责任印制: 李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 16.25 印张 · 294 千字

0 001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-55038-9

定价: 79.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

译者序

智能电网是以物理电网为基础，将先进的现代传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成的新型电网。它以充分满足用户对电力的需求和优化资源配置，确保电力供应的安全性、可靠性、经济性，满足环保约束，保证电能质量、适应电力市场化发展为目的，实现对用户可靠、经济、清洁、互动的电力供应和增值服务。在节能减排、产业结构调整及新能源发电快速增长的新的能源发展形势下，如何提升新能源消纳能力、增强电网供电质量与可靠性，发展基于多能互补的低成本、高可靠度的智能电网技术是当前的研究与应用热点。

本书不仅全面、系统地介绍了智能电网涉及的信息与通信技术（ICT），传感、测量、控制及自动化技术，新能源并网及需求侧管理的电力电子与储能技术，并且通过大量的例题展示了如何运用这些方法对智能电网进行分析，使读者可以全面掌握智能电网相关的基础理论与方法应用要点。此外，几位作者在智能电网理论研究和实际应用领域都有十分深厚的造诣，本书在理论和应用两方面都分别做了深入讨论与分析，适合各个层次的读者，使其有所受益。

本书的主要内容包括：智能电网概述，面向智能电网的数据通信技术、信息安全技术，智能测量与需求侧整合，配电自动化设备，配电管理系统，输电系统运行，电力电子变换装置与应用，以及储能系统等。另外，书中在各个章节穿插大量方法应用例题，增强了方法应用的易懂、易用性。因此，本书无论对于课程学习、基础研究还是实际应用都具有宝贵价值，非常值得一读。

本书由师瑞峰组织翻译并完成最后的修订和统稿。师瑞峰负责第1、5、6、7、8章的翻译，张丽负责第9、10、11、12章的翻译，焦润海负责第2、3章的翻译，关志涛负责第4章的翻译。参与翻译、录入、校对工作的还有王薇薇、崔灿、吴玥、张宁、张慧、郑士尧、史永锋、廖振宏、胡宇宸、孙常浩、马源、梁子航、杨阳等研究生。本书的翻译工作得到国家自然科学基金（61203100）与中央高校基本科研业务费（2016MS42）的资助，在此表示感谢。最后，感谢机械工业出版社电工电子分社顾谦老师在本书翻译过程中给予的持续关注和支持，促使本书最终得以完成出版。

由于译者水平有限，难免会出现一些错误之处，敬请广大读者批评指正。

师瑞峰

2016年8月 华北电力大学

作者简介

Janaka Ekanayake

Janaka Ekanayake 于 1990 年获得斯里兰卡佩拉德尼亚 (Peradeniya) 大学的电气与电子工程学士学位, 并于 1995 年在英国曼彻斯特大学的科学与技术学院获得电气工程博士学位。他目前是英国卡迪夫 (Cardiff) 大学的一名高级讲师, 在此之前曾是佩拉德尼亚大学电气与电子工程系的教授。他的主要研究方向包括电力电子应用、可再生能源发电与并网。他是一名注册工程师、IET (英国工程技术学会) 会士、IEEE [电气与电子工程师协会 (美)] 高级会员, IESL (斯里兰卡工程师学会) 会员。他先后发表了 30 余篇相关的期刊论文, 并合著 3 本专著。

Kithsiri Liyanage

Kithsiri Liyanage 是斯里兰卡佩拉德尼亚大学电气与电子工程系教授。他于 1983 年获得佩拉德尼亚大学的工学学士学位, 并于 1991 年获得东京大学工学博士学位。他在 1993 ~ 1994 年间曾在华盛顿大学电气工程系从事访问研究, 并于 2008 ~ 2010 年间在东京大学电力与环境技术研究中心担任访问学者。他发表了 30 余篇关于智能电网应用与控制方面的论文, 其研究方向主要为智能电网下的 ICT (信息与通信技术) 应用。

Jianzhong Wu

Jianzhong Wu 分别于 1999 年、2001 年和 2004 年在中国天津大学获得学士、硕士和博士学位。他曾担任天津大学副教授, 于 2006 年加入曼彻斯特大学。自 2008 年开始担任卡迪夫大学工程学院讲师。他的主要研究方向包括电力基础设施和智能电网。他承担着数项欧盟持续项目和其他基金项目。作为 IET、IEEE 和 ACM [计算机协会 (美)] 会员, 他发表了 30 余篇论文, 并合著 1 本专著。

Akihiko Yokoyama

Akihiko Yokoyama 分别于 1979 年、1981 年和 1984 年在日本东京大学获得学士、硕士和博士学位。自 2000 年起担任东京大学电气工程系教授。他曾作为访问学者在德州大学阿灵顿分校、加州大学伯克利分校从事过研究。他的主要研究方向包括电力系统分析与控制、智能电网。他是日本电气工程学会 (IEEJ) 的

高级会员，日本工业与应用数学学会（JSIAM）、IEEE 及 CIGRE（国际大电网协会）会员。

Nick Jenkins

Nick Jenkins 于 1992 ~ 2008 年在曼彻斯特大学工作，其后担任卡迪夫大学的可再生能源专业教授。他具有 14 年的工业界从业经历，其中 5 年在发展中国家。在卡迪夫大学，他开创了关于电力能源工程和可再生能源的教学及科研工作。他目前是 IET、IEEE 及皇家工程院的会士。他是 CIGRE 的杰出会员，2009 ~ 2011 年期间担任美国斯坦福大学大气与能源项目的 Shimizu 访问教授。

原书前言

全球电力正在经历着由无碳电力供给带来的深刻变革：在更换现有老化设备的同时，更多地将新近发展的信息与通信技术（ICT）引入到电力系统。所有这些需求都可以通过智能电网方案获得解决。智能电网技术采用先进的 ICT 控制新能源系统可靠、高效地发电。尽管现有高压输电系统中已经建立了一些 ICT 基础设施，但实时通信在用户或分布式系统（回路）中尚不多见。

智能电网的设想是给低压电网提供更大的可视化，并使用户能够通过智能电表和智能家庭方案参与到电力系统的运行中。智能电网可以提供更好的能源效率，且在更大程度上支撑可再生能源的利用。当前，关于智能电网的研究与发展在美国、英国、中国、日本和欧洲等国家和地区得到了大力支持。它是国际上重要的研究主题和潜在的商业利润增长方向。

本书写作初衷是提供一些对智能电网基本概念的讨论与见解，并对实现这些技术的细节展开部分描述。尽管当前智能电网的定义并不完备，但本书无疑对关键的可行技术进行了前瞻性的探讨，这对读者了解电力系统的发展现状和参与未来智能电网的讨论大有裨益。

本书是作者们在中国、日本、斯里兰卡、英国和美国的本科生与研究生教学过程中的经验总结，也是作者们相关研究工作的展示。本书内容主要分为三大技术主题：

- 1) 第 1 部分为 ICT（第 2~4 章）；
- 2) 第 2 部分为传感、测量、控制及自动化技术（第 5~8 章）；
- 3) 第 3 部分为电力电子与储能技术（第 9~12 章）。

本书展示的三大类技术主题彼此相对独立。对电力系统或能源专业的工学或理学硕士生课程而言，第 2~4 章、第 5~7 章以及第 9~11 章之间的相关性更强一些；但对通用性更强的智能电网课程而言，选择第 2~5 章、第 9 章、第 12 章等内容则更为恰当。

本书技术内容包括了不同的专题，可以拓展不同学科工程技术人员的知识体系，以帮助他们更好地投入到智能电网的建设中。

原书致谢

我们非常感谢那些为本书作出积极贡献的同事和朋友，没有他们的付出，本书难以如此顺利完成。尤其要感谢东芝公司、S&C 电气欧洲有限责任公司、东京电力公司、日本风电公司和天大求实电力新技术有限责任公司等企业为本书提供的大量图片。非常感谢 John Lacari 为本书数值算例所做的校验工作；Jun Liang、Lee Thomas、Alasdair Burchill、Panagiotis Papadopoulos、Carlos Ugalde-Loo 和 Iñaki Grau 等人为第 5 章、第 11 章和第 12 章提供的信息；Mahesh Sooriyabandara 对某些章节的校对；以及 Luke Livermore、Kamal Samarakoon、Yan He、Sugath Jayasinghe 及 Bieshoj Awad 等人给予的帮助。

缩略语对照表

2-D	2-dimensional	二维
3-D	3-dimensional	三维
3G	3rd Generation mobile systems	第三代移动通信系统
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作项目
ACL	Asynchronous Connectionless Link	异步无连接链路
ADC	Analogue to Digital Conversion or Converter	模-数转换器
ADMD	After Diversity Maximum Demand	后多样性最大需求
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	非对称数字用户线路
ADSS	All-Dielectric Self-Supporting	全介质自承式
AES	Advanced Encryption Standard	高级加密标准
AGC	Automatic Generation Control	自动发电控制
AM	Automated Mapping	自动映射
AMM	Automatic Meter Management	测量管理自动化
AMR	Automatic Meter Reading	自动抄表
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average	自回归整合平均移动
ARIMAX	Autoregressive Integrated Moving Average with exogenous variables	含外生变量的自回归整合平均移动
ARMA	Autoregressive Moving Average	自回归平均移动
ARMAX	Autoregressive Moving Average with exogenous variables	含外生变量的自回归平均移动
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Network	高级研究计划机构网络
ASD	Adjustable Speed Drives	可调速驱动器
ASK	Amplitude Shift Keying	幅移键控
AVC	Automatic Voltage Control	自动电压控制

BES	Bartery Energy Storage	电池储能
BEV	Battery Electric Vehicles	纯电动汽车
BPL	Broadband over Power Line	电力线宽带
CB	Circuit Breaker	断路器
CC	Constant Current	恒定电流
CI	Customer Interruptions	用户中断
CIM	Common Information Model	公共信息模型
CIS	Customer Information System	用户信息系统
CML	Customer Minutes Lost	用户平均断电分钟数
COSEM	Companion Specification for Ehergy Me- tering	电能计量配套规范
CSC	Current Source Converter	电流源变换器
CSC- HVDC	Current Source Converter High Voltage DC 变换器	电流源型高压直流电流 变换器
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision De- tect	载波侦听多址访问/碰撞 检测
CT	Current Transformer	电流互感器
CTI	Computer Telephony Integration	计算机语音集成
CV	Constant Voltage	恒定电压
CVT	Capacitor Voltage Transformers	电容式电压互感器
DAC	Digital to Analogue Converter	数-模转换器
DARPA	Defense Advanced Research Project Agency	美国国防部先进研究项 目局
DB	Demand Bidding	需求竞标
DCC	Diode-Clamped Converter	二极管钳位变换器
DER	Distributed Energy Resources	分布式能源
DES	Data Encryption Standard	数据加密标准
DFIG	Doubly Fed Induction Generators	双馈感应发电机
DG	Distributed Generation	分布式发电
DLC	Direct Load Control	直接负载控制

DMS	Distribution Management System	配电管理系统
DMSC	Distribution Management System Controller	配电管理系统控制器
DNO	Distribution Network Operators	配电网运行
DNS	Domain Name Server	域名服务器
DR	Demand Response	需求响应
DSB	Demand-Side Bidding	需求侧竞标
DSI	Demand-Side Integration	需求侧集成
DSL	Digital Subscriber Lines	数字用户线路
DSM	Demand-Side Management	需求侧管理
DSP	Digital Signal Processor	数字信号处理器
DSR	Demand-Side Response	需求侧响应
DVR	Dynamic Voltage Restorer	动态电压恢复器
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution	增强型数据速率 GSM 演 进技术
EMI	Electromagnetic Interference	电磁干扰
EMS	Energy Management System	电能管理系统
ESS	Extended Service Set	扩展服务集
EU	European Union	欧洲联盟
EV	Electric Vehicles	电动汽车
FACTS	Flexible AC Transmission Systems	柔性交流输电系统
FCL	Fault Current Limiters	故障限流器
FCS	Frame Check Sequence	帧校验序列
FFD	Full Function Device	完整功能设备
FM	Facilities Management	设备管理
FPC	Full Power Converter	全功率变换器
FSIG	Fixed Speed Induction Generator	定速感应发电机
FSK	Frequency Shift Keying	频移键控
FTP	File Transfer Protocol	文件传输协议
GEO	Geostationary Orbit	地球同步轨道
GGSN	Gateway GPRS Support Node	网关 GPRS 支持节点

GIS	Gas Insulated Substations	气体绝缘变电站
GIS	Geographic Information System	地理信息系统
GPRS	General Packet Radio Service	通用分组无线服务
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
GSM	Global System for Mobile Commu- nications	全球移动通信系统
GTO	Gate Turn-off (Thyristor)	门极关断 (晶闸管)
HAN	Home-Area Network	家庭区域网络
HDLC	High-Level Data Link Control	高级数据链路控制
HMI	Human Machine Interface	人机接口
HTTP	Hypertext Transfer Protocol	超文本传输协议
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning	供热通风与空气调节
HVDC	High Voltage DC	高压直流
ICT	Information and Communication Technol- ogy	信息与通信技术
IED	Intelligent Electronic Device	智能电子设备
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristor	集成门极换流晶闸管
IP	Internet Protocol	网络协议
IPFC	Interline Power Flow Controller	线间潮流控制器
IPng	IP Next Generation	下一代 IP
IPsec	Internet Protocol Security	网络协议安全性
ITE	Information Technology Equipment	信息技术设备
KDC	Key Distribution Centre	密钥分配中心
LAN	Local Area Network	局域网
LCD	Liquid Crystal Displays	液晶显示器
LED	Light Emitting Diodes	发光二极管
LLC	Logical Link Control	逻辑链路控制
LMU	Line Matching Unit	线路匹配单元
LOLP	Loss of Load Probability	缺电概率
M2C	Multi-Modular Converter	多模块变换器

XII 智能电网技术与应用

MAS	Multi Agent System	多智能体系统
MD	Message Digest	信息摘要
MDM	Metre Data Management system	电能表数据管理
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry	经济贸易和工业部门
MGCC	Micro Grid Central Controllers	微网中央控制器
MMS	Manufacturing Message Specification	制造消息规范
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	金属-氧化层半导体场效应晶体管
MPLS	Multi Protocol Label Switching	多协议标签交换
MPPT	Maximum Power Point Tracking	最大功率点跟踪
MSB	Most Significant Bit	最高有效位
MTSO	Mobile Telephone Switching Office	移动电话交换局
NAN	Neighbourhood Area Network	邻域网
NERC CIP	North America Electric Reliability Corporation-Critical Infrastructure Protection	北美电力可靠性公司-重要基础设施保护
NOP	Normally Open Point	常开触点
NPC	Neutral-Point-Clamped	结构中点钳位型
OCGT	Open Cycle Gas Turbines	开式循环燃气轮机
OFDM	Orthogonal Frequency Multiplexing	正交频分复用
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	正交频分多址
OLTC	On-Load Tap Changers	有载调压变压器
OMS	Outage Management System	停电管理系统
OPGW	OPTical Ground Wires	光纤复合架空地线
PCM	Pulse Code Modulation	脉冲编码调制
PDC	Phasor Data Concentrator	相位数据集中器
PET	Polyethylene Terephthalate	聚对苯二甲酸乙二醇酯
PGA	Programmable Gain Amplifier	可程序增益放大器
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicles	插电式混合动力电动汽车
PLC	Power Line Carrier	电力线载波

PLL	Phase Locked Loop	锁相环
PMU	Phasor Measurement Units	相量检测单元
PSK	Phase Shift Keying	相移键控
PSS	Power System Stabilisers	电力系统稳定器
PSTN	Public Switched Telephone Network	公共电话交换网
PV	Photovoltaic	光伏
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制
RFD	Reduced Function Device	精简功能设备
RMU	Ring Main Unit	环网单元
RTU	Remote Terminal Unit	远程终端单元
SAP	Session Announcement Protocol	会话通告协议
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	数据采集与监控
SCE	Southern California Edison	南加州爱迪生(公司)
SCO	Synchronous Connection Orientated	同步连接导向
SGCC	State Grid Corporation of China	中国国家电网公司
SGSN	Serving GPRS Support Node	服务 GPRS 支持节点
SHA	Secure Hash Algorithm	安全哈希算法
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	超导磁储能系统
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol	简单邮件传输协议
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
SOC	State Of Charge	充电状态
SVC	Static Var Compensator	静态无功补偿器
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议
TCR	Thyristor Controlled Reactor	晶闸管控制电抗器
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor	晶闸管控制串联电容器 补偿
THD	Total Harmonic Distortion	总谐波失真
TSC	Thyristor Switched Capacitor	晶闸管开关电容器
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor	晶闸管开关串联电容器
UHV	Ultra High Voltage	超高压
UML	Unified Modelling Language	标准建模语言

XIV 智能电网技术与应用

UPFC	Unified Power Flow Controller	统一潮流控制器
UPS	Uninterruptable Power Supplies	不间断电源
URL	Uniform Resource Locator	统一资源定位符
UTP	Unshielded Twisted Pair	非屏蔽双绞线
VPN	Virtual Private Network	虚拟专用网络
VPP	Virtual Power Plant	虚拟电厂
VSC	Voltage Source Converter	电压源变换器
VSC-ES	Voltage Source Converters with Energy Storage	储能电压源变换器
VSC-HVDC	Voltage Source Converter HVDC	电压源型高压直流变换器
VT	Voltage Transformer	电压互感器
WAMPAC	Wide Area Monitoring, Protection and Control	广域监测、保护和控制
WAMS	Wide-Area Measurement Systems	广域监测系统
WAN	Wide Area Network	广域网
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access	全球微波互连接入
WLAN	Wireless LAN	无线局域网
WLAV	Weighted Least Absolute Value	加权最小绝对值
WLS	Weighted Least Square	加权最小二次方
WPAN	Wireless Public Area Networks	公共区域无线网
XOR	Exclusive OR	异或

目 录

译者序

作者简介

原书前言

原书致谢

缩略语对照表

第1章 智能电网	1
1.1 简介	1
1.2 为何选择智能电网?	2
1.2.1 资产老化且传输能力不足	2
1.2.2 热约束	2
1.2.3 操作约束	2
1.2.4 供给安全	3
1.2.5 各国政策	3
1.3 什么是智能电网?	5
1.4 早期智能电网尝试	6
1.4.1 主动配电网	6
1.4.2 虚拟电厂	8
1.4.3 其他尝试和验证	9
1.5 智能电网领域技术文献综述	11
参考文献	13

第1部分 ICT

第2章 数据通信	16
2.1 简介	16
2.2 专用、共享的通信通道	17
2.3 交换技术	20
2.3.1 线路交换	20
2.3.2 信息交换	21
2.3.3 包交换技术	21
2.4 通信通道	22

2.4.1 有线通信	24
2.4.2 光纤	26
2.4.3 无线电通信	29
2.4.4 移动通信	30
2.4.5 卫星通信	31
2.5 分层结构与协议	31
2.5.1 ISO/OSI 模型	31
2.5.2 TCP/IP	35
参考文献	38
第3章 面向智能电网的通信技术	39
3.1 简介	39
3.2 通信技术	40
3.2.1 IEEE 802 系列	40
3.2.2 移动通信	51
3.2.3 多协议标签交换	52
3.2.4 电力线路通信	53
3.3 信息交换标准	54
3.3.1 智能电表标准	54
3.3.2 Modbus	54
3.3.3 DPN3	55
3.3.4 IEC 61850	56
参考文献	57
第4章 智能电网信息安全	59
4.1 简介	59
4.2 加密与解密	60
4.2.1 对称密钥加密	61
4.2.2 公钥密码加密	65
4.3 认证	65
4.3.1 基于共享密钥的身份认证	66
4.3.2 基于密钥分发中心的认证	66
4.4 数字签名	66
4.4.1 私钥签名	67
4.4.2 公钥签名	67
4.4.3 消息摘要	68
4.5 电网安全标准	68
4.5.1 IEEE 1686: IEEE 推出的 IED 电网安全能力标准	68