



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

智能电网的控制 和优化方法

Control and Optimization Methods for
Electric Smart Grids

(印度) Aranya Chakraborty 等著
(美国) Marija D. Ilić 等译
朱永强 黄伟

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

智能电网的控制和 优化方法

(印度) Aranya Chakrabortty 等著
(美国) Marija D. Ilić
朱永强 黄 伟 等译



机械工业出版社

Translation from English language edition:

Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids

By Aranya Chakrabortty and Marija D. Ilić

Copyright© 2012, Springer US

Springer US is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社出版, 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。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2012-3719 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能电网的控制和优化方法 / (印) 亚兰 (Chakrabortty, A.) 等著; 朱永强等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 11

(国际电工技术先进译丛)

书名原文: Control and optimization methods for electric smart grids

ISBN 978-7-111-48430-1

I. ①智… II. ①亚…②朱… III. ①智能控制—电网—文集 IV. ①TM76-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 253096 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: 刘星宁 责任编辑: 翟天睿

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 征

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18.25 印张 · 382 千字

0 001—2 800 册

标准书号: ISBN 978-7-111-48430-1

定价: 88.00 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

网络服务

服务咨询热线: (010) 88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: (010) 68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

(010) 88379203

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

本书为读者呈现了国际智能电网控制和优化方法领域多位专家的最新研究成果。书中包括架构和并网、建模和分析、通信和控制三个系列，共精选了18篇论文，汇集了电力、控制和通信系统多位专家的研究成果，并且突出了一些近期在智能电网建模、控制和最优化方面最有前景的研究结论。

在保证准确性的前提下，对于某些难懂的概念，作者用阐述性的例子和实践案例分析帮助读者理解。

本书内容丰富，覆盖面宽，为希望了解和深入理解控制与优化方法在智能电网中应用的人员提供了理想的参考资料，可以从中获益的读者包括电力与控制领域的高校师生、研究人员、工程师、电力公司员工等。

译者序

我国正处于电力需求高速增长的阶段。国家电网公司将 2011~2015 年定义为智能电网的全面建设阶段，主要是加快特高压电网和城乡电网建设，初步形成智能电网运行控制和互动服务体系，在关键技术和设备上实现重大突破和广泛应用。

要更好地建设和运行坚强型智能电网，离不开对智能电网控制与优化方法的研究。这些年国际学术及工程界对于该领域的研究也更加活跃且深入。本书作者是分别来自北卡罗来纳州州立大学和卡内基梅隆大学的资深学者 Aranya Chakraborty 和 Marija D. Ilić。他们精选了智能电网控制与优化领域近年来影响力最大的 18 篇论文以飨读者。这些论文分别由电力、控制和通信系统领域杰出的研究人员撰写，从内容上分为三大部分，包括：架构和并网、建模和分析、通信和控制。本书内容丰富，覆盖面广，是高校教师、研究生以及广大从事智能电网工作的专家学者和工程技术人员理想读本。

本书由华北电力大学电气与电子工程学院的朱永强、黄伟主持翻译。华北电力大学电气与电子工程学院的郭文瑞、曹彬、王冠杰、路欣怡、王书瑶、王茜、毛代甲凡、张玉莹、刘颖、庞琳、梁倩园、王雯雯、朱丹丹、魏恺、张晓晴、张雯、符茜茜、王晓晨、蔡冰倩、谢文超、计杭辉、杜少飞等同学在本书初稿翻译和后校校对过程中也做出了不小的贡献，在此表示衷心的感谢。

由于译者水平有限，加之时间仓促，译文的不足和错漏之处在所难免，希望读者予以批评指正。

译者

原 书 前 言

进入 21 世纪, 电气工程领域正在朝着绿色与智能方向前进。这样的潮流趋势主要归因于近年来电力行业的几次重大事件。例如 2003 年发生在美国东北部的大规模停电事故、2005 年新奥尔良遭遇卡特里娜飓风袭击事件以及 2007 年出台的能源法案。而也就是从这时开始, 智能电网在世界范围内几乎成为一个无处不在的术语, 它已经不仅仅只是一个政治概念, 而更多地成为了一种需要大量跨学科实验来支持的全新技术。为了满足智能电网技术多样化的实验需求, 在美国的智能电网研究团体的创始组织, 到目前为止已经成功地将电气工程、信号处理、计算机科学、通信、商业、金融、化学、风能等领域的研究人员汇集到了一起。例如, 参与这项事业的电气工程师, 正在研究智能高效的能源分布策略和负荷管理方案; 计算机科学家正在致力于网络安全的问题研究, 来保证整个电网信息共享的可靠性; 负责信号处理的团队正在寻找最先进的监测设备来更精确地监测电网的运行; 风能工程师正在研究可再生能源并网; 而商业管理者正在进行电力市场政策改革, 以适应系统中的诸多新变化。

伴随这些进步, 研究人员也开始意识到拥有一套新的系统化的电力和能源的知识结构体系, 对于保证这个领域进步的紧迫性。而反过来, 这个也自然而然地引出了电力系统理论中智能电网实验的两条生命线——控制和最优化的需求。几乎一个电力系统的智能化和自动化的每方面都可以归结到使用某种形式的控制理论。相关的例子包括建模、识别、估算、稳定性、控制优化和基于网络的决策, 例如在过去两年中, 召开了各类实验研讨会、指导会以及全国性的会议, 这些会议讨论了控制和最优化在智能电网应用中的巨大潜能。小到居民的能源管理、智能测量和电力市场; 大到更加广泛的问题, 例如大区域的监测和控制。本书的作者参与了许多这类研讨会。而本书的几位特约作者也被邀请在这些会议中发表演讲, 其中最有名的三次作为以下 IEEE 会议中的特别讨论会: 决定和控制 (亚特兰大, 佐治亚州, 2010)、美国控制协会辅导会议 (旧金山, 加利福尼亚州, 2011) 以及信息物理在智能电网系统中的应用研讨会 (北卡罗来纳州州立大学, 罗利, 2011)。出版本书的初衷正是源于这些会议: 希望能巩固那些在智能电网控制领域最有前景的、有个性的实验成果, 从而为这个重要领域的未来发展打下基础。

本书包含 18 章, 分别由电力、控制和通信系统领域领先的研究者来撰写。本书总体上分为三部分, 即架构和并网、建模和分析以及通信和控制。从它们的标题就可以清楚地看出, 这些部分的主要观点围绕着制定一个未来电网需要的面向大规模复杂系统的完整解决方案, 来解决我们今天遇到的问题。可以说, 逝去的每一天中, 都会有新一代能源或技术整合进我们国家的电网, 其中包括以可再生能源为代表的新型发电技术、以智能汽车为代表的新型负荷以及智能测量仪和相位测量仪这类新型传感器, 还有由复杂电力市场动态为指导的新型决策机制。我们的目标是抓住这些迅猛转变的实质, 同时将

这些转变带来的开放性问题的疑难之处呈现给我们控制理论研究的同行。这些问题大部分听上去像控制和最优化的常规问题,但是它们总会将理论研究指引到一个充满挑战、生机盎然,并且最终回报丰厚的方向上去。据我们所知,本书是在这个领域的第一本综合性书籍。

本书由架构和并网部分开始,第1章在高变化率的可再生能源资源大量渗透的情境下,提出了关于电力系统运行与控制的可持续架构的远见卓识。紧接着在第2章中,讨论了电力市场的经济性和它们对于需求响应的影响。而在第3章中,为使随机能源顺利并网,作者更加深入探讨了需求响应的概念。第4章阐述了几个在智能电网检测和通信领域可能会使实时电力市场运行不稳定的实际约束,并且提出了新的可以克服这些问题的通信拓扑结构。第5章中,展现了一个新的控制观点:在居民和商业用户的需求方能量管理中运用凸优化模型预测控制。第6章主要强调为将插电式混合动力车整合进电网所面临的一些结构上的挑战,问题集中于实现这些智能汽车智能化特点所必需的需求响应和通信。

建模和分析部分给我们展示了一个即将涉及的研究方向,即在电力系统中的数学建模、数据分析和信息处理。第7章以一个建模框架开始,这个框架对于分析风电穿透功率对传统电网动态特性的影响有着非常大的作用。第8章深入研究了新型数据分析技术在大范围电力系统中广域振荡追踪的应用,并且强调了信号处理作为广域监测研究主要工具的重要地位。第9章模拟了一个地理上分散的电网遇到连锁故障时的动态机制。而第10章为读者展示了一个为未来相量一体化的电力系统打造的可靠的建模框架,这个框架主要采用实时故障分析系统和马尔科夫测量网络模型来构建。在第11章中,讨论转向了智能电网计算方面,描述了数据中心的模型和控制策略。如今数据中心已经成为电网运行必需的组成部分。这部分最后的第12章,讨论了不同几何特征的电力系统拓扑结构如何影响扰动在系统中的传播,也由此强调了组合学在智能电网研究中的重要性。

通信和控制部分结合了一些对于未来电网最关键的 control 设计挑战,主要集中研究通信和安全性在控制器执行过程中如何相互影响。在第13章中,展示了博弈最优化理论,来解决插电式电动汽车充电协调问题,并且因此涉及了电力系统现代化中两个新趋势的交叉问题,即汽车电气化以及负载灵活化问题。第14章解决了智能电网网络安全的重大问题,并且展示了一个用于量化针对电网设备的智能协同攻击风险的易损性评估框架。第15章讨论了广域相位测量技术在分布式电力系统中的应用,开启了一种新的监测和控制思路。第16章融合了不同的协作控制理论的观点,从而建立了一个经济调度的分布式算法,由此可以使未来电网摆脱中央命令式的决策方法。第17章和第18章着力解决在输电系统中振荡阻尼的广域控制问题。第17章给读者展现了一个新的适应性控制方法,来解决基于同步相量反馈的延迟补偿问题,而第18章主要是运用模型参考控制和聚类方法来增加阻尼,从而解决多区域系统振荡的问题。

可以看出,每一部分的各章之间都保持着各自主题的连贯性,与此同时也很好地和其他部分的章节相互照应。因此读者们可以从整体的角度来阅读本书,也可以把注意力

VI 智能电网的控制和优化方法

集中在某一单独的章节。由于本书涉及的范围比较广，因此是高年级研究生课程以及电力和控制系统这类专题的理想教材。本书也会吸引那些实用型工程师，帮助他们直观地理解在智能电网中出现的控制和最优化方法的应用问题。到目前为止，很少有文献涉及智能电网企业的综合控制问题，同时也很少面向整体解决方案方法论的不同模型和方法。本书中的内容给出了从事智能电网研究的相关组织处理这类问题的工作进展。

我们想要对所有为本书做出贡献的作者表示感谢，我们也要感谢我们的同事 Murat Arcak、John Wen、Tariq Samad、Ning Lu、Steven Elliot、M. A. Pai、Massoud Amin、Manu Parashar、Sumit Roy 和 Yufeng Xin。正是和他们有趣的讨论激发了我们出版本书的想法。真诚地感谢来自 Springer 出版社的 Merry Stuber 校对不同版本的手稿并且指导我们的编辑工作。

最后，本书献给即将迎来 60 岁生日的 Joe Chow。他是电力系统和控制方面著名的研究者和教育家。在他将近 40 年的研究生涯中有许多开创性的贡献，包括 20 世纪 70 年代末的单一性扰动理论、80 年代的多变量控制电力系统、90 年代的柔性交流输电系统（FACTS）控制器设计以及过去 20 年一直从事的广域相量测量技术的研究。他里程碑似的成就使他获得了全世界电力和控制研究领域同行的盛赞。我们非常荣幸地将本书作为一个象征性的 Joe 60 岁生日的小礼物。

美国北卡罗来纳州罗利市 Aranya Chakraborty

美国宾夕法尼亚州匹兹堡市 Marija D. Ilić

作者列表

Anuradha Annaswamy	美国麻省理工学院机械工程系
I. Safak Bayram	美国北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系
Subhashish Bhattacharya	美国北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系
Duncan Callaway	美国加州大学伯克利分校能源与资源中心
Aranya Chakraborty	美国北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系
Lijun Chen	美国加州理工学院工程与应用科学系
Joe H. Chow	美国伦斯勒理工学院电气、计算机与系统工程系
Mo-Yuen Chow	美国北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系
Michael Devetsikiotis	美国北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系
Alejandro D. Domínguez García	美国伊利诺伊大学电气工程系
S. Ghiocel	美国伦斯勒理工学院电气、计算机与系统工程系
Manimaran Govindarasu	美国爱荷华州立大学电气与计算机工程系
Fabrizio Granelli	意大利特伦托大学信息工程与计算机科学系
Daniel Greene	美国帕洛阿尔托研究中心
Daniel A. Haughton	美国亚利桑那州立大学电气、计算机与能源工程学院
Gerald Heydt	美国亚利桑那州立大学电气、计算机与能源工程学院
T. Hikiara	日本京都大学电气工程系
Haitham Hindi	美国帕洛阿尔托研究中心
Ian Hiskens	美国密歇根大学安娜堡分校电气工程与计算机科学系
Marija D. Ilić	美国卡内基梅隆大学电气与计算机工程系
Libin Jiang	美国加州理工学院工程与应用科学系
Arman Kiani	德国慕尼黑工业大学自动控制工程学院
Anupama Kowli	美国伊利诺伊大学香槟分校 CSL 与 ECE 系
Bruce Krogh	美国卡内基梅隆大学电气与计算机工程系
Caitlin Laventall	美国在线服务 (AOL) 公司
Na Li	美国加州理工学院工程与应用科学系
Chen-Ching Liu	爱尔兰都柏林大学电气、电子与机械工程学院
Qixing Liu	美国卡内基梅隆大学电气与计算机工程系
Stevén H. Low	美国加州理工学院工程与应用科学系
Zhongjing Ma	中国北京理工大学自动化学院、复杂系统智能控制与决策教育部重点试验室
Sean Meyn	美国伊利诺伊大学香槟分校 CSL 与 ECE 系

VIII 智能电网的控制和优化方法

I. Mezić	美国加州大学圣巴巴拉分校机械工程系
George Michailidis	美国密歇根大学安娜堡分校统计系
Matias Negrete-Pincetic	美国伊利诺伊大学香槟分校 CSL 与 ECE 系
Xueping Pan	中国河海大学能源与电气学院
Luca Parolini	美国卡内基梅隆大学电气与计算机工程系
Matthew C. Ruschmann	美国宾汉姆顿大学电气与计算机工程系
Anna Scaglione	美国加州大学戴维斯分校
Ehsan Shafieepoorford	美国伊利诺伊大学香槟分校 CSL 与 ECE 系
Uday V. Shanbhag	美国伊利诺伊大学香槟分校工业与企业系统工程系
Bruno Sinopoli	美国卡内基梅隆大学电气与计算机工程系
Siddharth Sridhar	美国爱荷华州立大学电气与计算机工程系
Y. Susuki	日本京都大学电气工程系
Robert J. Thomas	美国康奈尔大学
Vaithianathan “Mani”	美国华盛顿州立大学电气工程与计算机科学系
Venkatasubramanian	
Gui Wang	美国伊利诺伊大学香槟分校 CSL 与 ECE 系
Zhifang Wang	美国加州大学戴维斯分校
N. Eva Wu	美国宾汉姆顿大学电气与计算机工程系
Ziang Zhang	美国北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系

目 录

译者序

原书前言

作者列表

第 1 部分 架构和并网

第 1 章 关于针对含高变电源的系统中频率调整的检测、通信和控制结构	1
1.1 简介	1
1.2 持续扰动下电力系统动态模型	4
1.2.1 发电机模块的动态建模	4
1.2.2 可变负荷模型	5
1.2.3 传输网络约束条件模型	5
1.2.4 互连系统的动态模型	6
1.3 大规模互连电能系统中频率调整的新型交互可变动态模型	6
1.3.1 使用标准的奇异摄动形式进行系统模型的时间简化	7
1.3.2 使用非标准的奇异摄动形式进行系统模型的空间简化	8
1.3.3 控制区层次上交互动量的动态	8
1.4 基于交互变量的频率调整动态模型：4 个不同性质算例模型的复杂度比较	10
1.4.1 算例 1、算例 2	11
1.4.2 算例 3、算例 4	11
1.5 基于相关性的频率调整动态模型：4 个不同性质算例的模型复杂度比较	13
1.6 基于交互变量和基于相关性的频率调整动态模型的比较	14
1.7 使用基于变量相互作用模型的不同网络结构的频率调节	15
1.7.1 弱互动系统特点	15
1.7.2 强相互作用的特征系统	16
1.8 缓慢的基于相干性的频率调节网络架构和对比仿真	17
1.8.1 网络架构设计	17
1.8.2 通过数值模拟进行比较学习	17
1.9 E-AGC 和今天的 AGC 的比较	23
1.10 开放问题和未来工作	24

参考文献	24
第2章 电力市场的动态竞争性均衡	25
2.1 简介	25
2.2 电力市场模型	28
2.2.1 参与者	28
2.2.2 测试用例	29
2.3 竞争性均衡和效率	31
2.3.1 介绍	31
2.3.2 分析	33
2.4 均衡价格的测试用例	36
2.4.1 单母线模型	36
2.4.2 网络模型	37
2.4.3 德克萨斯模型：价格区间	39
2.4.4 辅助服务电价	41
2.5 小结	42
参考文献	43
第3章 最优需求响应：供电确定情况下的数学分析	45
3.1 简介	45
3.1.1 目的	45
3.1.2 结论	46
3.1.3 其他相关工作	47
3.1.4 符号	48
3.2 模型和问题的设想	48
3.2.1 用户模型	48
3.2.2 供电模型	50
3.2.3 问题规划：效益最大化	51
3.2.4 样例	53
3.3 无供应侧不确定性下的最优计划	55
3.3.1 最优购电与用电	55
3.3.2 离线分布式调度算法	57
3.4 小结	58
附录 A 详细的设备模型	59
附录 B 引理 6 的证明	60
参考文献	61

第4章 智能电网下的能源批发市场——离散时间模型和延迟的影响	63
4.1 简介	63
4.2 预备知识	65
4.2.1 双重分解	65
4.2.2 次梯度算法	66
4.2.3 博弈论与纳什均衡	67
4.3 能源市场结构	68
4.3.1 发电公司模型	68
4.3.2 消费公司模型	69
4.3.3 独立系统运营市场结算模型	69
4.3.4 批发电力市场的动态模型	71
4.3.5 市场中纳什均衡的概念	73
4.4 批发市场稳定性时滞的影响	74
4.4.1 实时市场时间延迟动态模型的含义	75
4.5 时间延迟和通信拓扑对批发市场稳定性的影响	76
4.5.1 仿真结果	77
4.5.2 基于分层树结构的通信拓扑	77
4.6 小结	78
参考文献	79
第5章 协调电力系统中的功率调节和需求响应——使用多速率经济模型 预测控制技术进行直接的和基于价格的追踪	81
5.1 简介	81
5.2 问题描述	82
5.3 模型和规格的定性描述	83
5.3.1 需求响应约束条件	83
5.3.2 调节服务的约束条件	84
5.4 定量分析模型和规格	84
5.4.1 考虑约束条件的系统模型	84
5.4.2 性能指标	85
5.5 追踪基准信号的多速率 MPC	86
5.6 基于市场价格的多重速率 MPC 模型	87
5.7 启发式控制	90
5.8 数值实例	90
5.8.1 多重速率的 MPC 与启发式控制器	90
5.8.2 帕累托最优性能曲线	92

XII 智能电网的控制和优化方法

5.8.3 功率调节与需求响应	93
5.8.4 通过经济 MPC 进行基于价格的追踪	94
5.9 小结	95
参考文献	96
第 6 章 智能电网中的智能汽车——挑战、趋势以及充电站设计的应用	98
6.1 智能电网时代的智能汽车	98
6.1.1 需求响应支持	99
6.1.2 通信技术	99
6.1.3 定价	100
6.2 智能汽车：目前趋势及其发展方向	100
6.3 EV/PHEV 充电站存储模型的应用	102
6.4 小结	106
参考文献	107

第 2 部分 建模和分析

第 7 章 风力发电频率控制的影响评估模型	109
7.1 简介	109
7.2 模型的构建模块	111
7.2.1 传统同步发电单元	111
7.2.2 风力发电资源	111
7.2.3 电力网络	112
7.2.4 自动发电控制系统	112
7.3 系统模型	113
7.3.1 非线性微分代数模型	113
7.3.2 线性化模型	114
7.4 举例	116
7.4.1 传统（同步）电动机动态	117
7.4.2 风电厂动态	117
7.4.3 网络	117
7.4.4 自动发电控制	118
7.5 小结	120
参考文献	120

第 8 章 基于频域优化的大电网周边数据多空间模态分析	122
8.1 简介	122
8.2 线性系统的频域特性	123
8.2.1 频域模型的简化	123
8.3 频域最优化模态评估	126
8.3.1 傅里叶变换	126
8.3.2 振荡频域和阻尼评估	126
8.3.3 振型的辨别	128
8.4 线性系统测试	129
8.4.1 模式评估	129
8.4.2 振型评估	130
8.5 两区域系统测试结果	131
8.6 实例研究	133
8.7 小结	135
参考文献	135
第 9 章 相干摇摆互联电网的不稳定和连锁故障机制	136
9.1 简介	136
9.2 相干摇摆不稳定性的介绍	137
9.2.1 非线性摇摆方程	138
9.2.2 数值仿真	139
9.3 连锁故障的动态机制	142
9.3.1 非线性波动方程	143
9.3.2 数字仿真	143
9.4 小结与探讨	146
参考文献	148
第 10 章 迈入高可用性的现代化电网	150
10.1 简介	150
10.2 基于故障覆盖率的动态系统中的冗余管理	152
10.2.1 冗余管理中高覆盖率的优点	152
10.2.2 双区域振荡模型的故障覆盖率计算	154
10.2.3 快速恢复支持结构的需要	157
10.3 PMU 网络的冗余结构设计	158
10.3.1 母线上同步相角的可用性	158
10.3.2 在可用性限制条件下的冗余结构设计	159

XIV 智能电网的控制和优化方法

10.3.3 3-母线/3-PMU 案例	160
10.4 小结和未来的研究	163
参考文献	163
第 11 章 关于智能电网数据中心的模型和控制策略	165
11.1 简介	165
11.2 数据中心的热量—计算模型	166
11.2.1 计算模型	167
11.2.2 热量模型	167
11.3 控制策略	169
11.4 仿真结果	171
11.5 讨论	174
参考文献	175
第 12 章 电网的中心措施	177
12.1 简介	177
12.2 系统模型	178
12.3 中心性的定义和扩展	179
12.3.1 度中心性	180
12.3.2 特征向量中心性	180
12.3.3 紧密中心性	180
12.3.4 介数中心性	181
12.4 参考文献 [11] 关于中心性的一些讨论	182
12.5 实验结果	183
12.6 小结	188
参考文献	189

第 3 部分 通信和控制

第 13 章 插电式电动汽车的最优充电控制	190
13.1 简介	190
13.2 PEV 充电和电力市场模型	191
13.2.1 PEV 充电模型与市场控制	191
13.2.2 分布式充电控制	193
13.3 有限系统的应用	194
13.4 延伸 (拓展)	196

13.4.1 普遍价格函数及用户偏好	196
13.4.2 终端成本	196
13.4.3 广播错误校正	196
13.5 计算实例	197
13.5.1 相同 PEV 总数情况下的研究	198
13.5.2 非相同 PEV 总数情况下的研究	198
13.6 小结以及未来研究前景展望	200
参考文献	200
第 14 章 对电网网络协同攻击的风险分析	202
14.1 简介	202
14.2 相关工作	204
14.3 协同攻击情况	206
14.4 协同攻击风险评估	206
14.4.1 电子网络建模与分析	207
14.4.2 电力系统仿真	211
14.4.3 风险评估	213
14.5 小结	214
附录	215
参考文献	217
第 15 章 电力系统配电网的同步测量技术	219
15.1 电力系统基础设施现状和智能电网的初创	219
15.2 未来短时间内出现的技术和电力系统配电网的设施	221
15.3 配电网同步测量	223
15.4 状态估计	225
15.5 例证	227
15.6 终端的替代应用	231
15.7 小结	232
参考文献	232
第 16 章 使用成本增量一致算法分析时间延迟对分散经济调度的影响	234
16.1 简介	234
16.2 一致算法基本知识	236
16.2.1 图论原理解析	236
16.2.2 考虑延时的一致性	236
16.2.3 平均一致算法	237