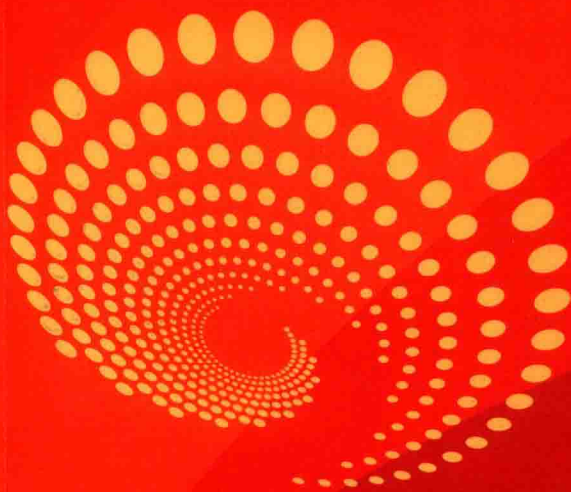


Mc
Graw
Hill
Education



智能电网 关键技术研究与应用丛书

智能电网的 基础设施与并网方案

Smart Grid
Infrastructure & Networking

[加] 克日什托夫·印纽斯基 (Krzysztof Iniewski) 等著
陈光宇 张仰飞 郝思鹏 何健 等译

非
外
借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



智能电网关键技术研究与应用丛书

智能电网的基础设施与并网方案

[加] 克日什托夫·印纽斯基 (Krzysztof Iniewski) 等著
陈光宇 张仰飞 郝思鹏 何健 等译

机械工业出版社

Krzysztof Iniewski
Smart Grid Infrastructure & Networking
978-0-07-178774-1

Copyright © 2013 by McGraw-Hill Education

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2019 by McGraw-Hill Education and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可，对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播，包括但不限于复印、录制、录音，或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司和机械工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内（不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾）销售。

版权 © 2019 由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司与机械工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2014-7074。

图书在版编目（CIP）数据

智能电网的基础设施与并网方案/(加)克日什托夫·印纽斯基(Krzysztof Iniewski)等著;陈光宇等译. —北京:机械工业出版社, 2019.2

(智能电网关键技术研究与应用丛书)

书名原文: Smart Grid Infrastructure & Networking

ISBN 978-7-111-61512-5

I. ①智… II. ①克… ②陈… III. ①智能控制-电网 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 268114 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:阎洪庆

责任校对:张征 封面设计:鞠杨

责任印制:孙炜

天津嘉恒印务有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 17.25 印张 · 350 千字

0 001—2 500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-61512-5

定价: 89.00 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

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书详细介绍了智能电网的基础设施、安全性与并网方案等。本书共分13章，内容包括需求侧能量管理、以智能 FDIR 与电压-无功功率优化为特征的配电自动化、高级资产管理、广域早期预警系统、可再生能源并入智能电网、电力系统改革中的微电网、智能电网环境下的电动汽车等。其中重点介绍了可再生能源、电动汽车与智能电网并网的概念，以简练的语言和代表性的实例向读者介绍智能电网的并网方案，为初识智能电网的读者提供指导。

本书内容先进、体系合理、讲解详尽、深入浅出、文字流畅、通俗易懂，是初学者了解智能电网的理想教材。本书既可以作为理工科院校相关专业的教材，也可供电力、电工领域的从业人员参考。

译者序

再一次感谢能够有机会翻译这本书，虽然之前译者也翻译过其他一些书籍，但都没有这一次有那么深的感触！这本书是我们花费时间和精力最多，同时也是我们觉得翻译得最不满意的一本，因为我们始终觉得，如果能够再多一点时间，我们会翻译得更好。

智能电网这一术语自2009年被国家电网正式提出后，最近10年期间在能源领域取得了巨大的成就。众所周知，每一次的工业革命实质上是能源的革命，而传统电网已渐渐不能满足我们的要求，目前急需研究智能电网，实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全的目标。智能电网的主要特征包括提供满足21世纪用户需求的电能质量、容许各种不同发电形式的接入、启动电力市场以及资产的优化高效运行。

本书共分13章，我们建议您全部阅读。这是一本涵盖智能电网技术细节的教科书，它告诉我们深入学习智能电网集技术、科学和艺术于一体，涉及可再生能源、电动汽车、微电网、配电自动化、储能等多个领域。书中同时也蕴含了作者对智能电网发展的理解和思考，处处闪耀着智慧的光芒。尤其第1章关于智能电网的思想、历史发展进程等论述尤为透彻和精辟。

作者在书中写到“为成功地引入智能电网，我们面临着许多技术挑战。智能电网所需的5项关键技术：①传感与测量技术；②综合通信技术；③高级组件；④改进的接口与决策支持；⑤先进控制技术。”作者分别对这些挑战展开了分析，并提出了详细的应对方法。由此可见，智能电网不是飘浮在我们头顶上的框架，而是立足于世界能源发展的基础，这种思想非常值得当今从事智能电网研究的工业界和学术界等深思。

此外，在翻译的过程中无论中文还是英文，我们都深感水平有限，因此，我们建议有条件的读者可以去阅读英文原著，如果书中存在一些失误与不妥之处，也非常期待大家能给我们反馈，以便之后进一步修订与完善。

本书主要由陈光宇博士（负责文前、第7~13章），张仰飞教授（负责第1、2章），郝思鹏教授（负责第3、4章），以及何健工程师（负责第5、6章）翻译。此外，纪思高级工程师，硕士研究生何光辉、董天雄、葛雨生、徐睿、任微道、王泽宇、许翔泰、洪杨、柏一凡、刘成、来勇、储欣、陈伟、叶宇成等也参加了部分内容的翻译，你们的努力使得本书的内容更加完善和细致。

感谢所有为本书出版做出贡献的人！

译者

原书前言

智能电网是继因特网诞生后的又一重大技术革新，并在未来社会中发挥着重要作用。世界各国政府都在智能电网的研发中投入了大量资金。各国政府的初衷各不相同。

智能电网通过分布式可再生能源、储能与插电式混合动力汽车的并网，在二氧化碳的减排中发挥着巨大的潜力。此外，智能电网通过对电网中的发输变电设备进行实时监控，可以提高供电可靠性，减少停电率。智能电网还可以提高变电站的利用率，使得电能传输更加高效，开展动态定价与需求响应策略。就现阶段而言，随着智能电网的快速发展，我们很难预测它的未来。尽管如此，我们仍相信，持续创新将会成为智能电网开发最具潜力的新引擎，创造出更多的工作岗位，这比自动化削减的工作岗位更多。

除了电力电子传感、监控技术的发展之外，在过去的10年里，智能电网在电信领域也取得了重要进展。智能电网的基础设施与并网方案是本书的核心。本书汇集了来自学术界、电力电子和电信行业的顶尖专家。

目前，电网是一个涵盖发电、输电和配电三个环节的系统。它由一些集中式发电厂和机电电力传输系统组成，并由调控中心统一进行调控。电能由集中式发电厂流向中低压电力用户。电网稳定的一个先决条件是电能消耗与发电之间的平衡。目前，发电量是随负荷而不断变化的。随着电网中越来越多的小规模可再生能源的并网，例如光伏与风电，系统中在某些场景下会出现反向潮流。在某些拥有可再生能源发电设施的用户侧，电能会从用户侧流向电网，这使得电网结构变得更加复杂多变。可再生能源发电揭示了供电间歇性和不可预测性的本质。这使得可再生能源发电并网极具挑战性，需要对传统的电力基础设施进行升级改造。

未来10年，预计世界能源基础设施将经历一场变革，其规模类似于目前电信与媒体行业发生的变化。智能电网不断发展，将电力基础设施与现代数字分布式计算设备和通信网络融为一体。智能电网是一个复杂、相互依赖的系统，其关键功能包括可靠、高效的电力输送。智能电网通过广域态势感知推动了能源革命向纵深发展，通过需求响应方案实现削峰填谷，通过实时控制和储能实现间歇性可再生能源的大规模并网，使化石燃料运输向电能运输的转变得以实现。

本书共有13章，涵盖了智能电网的基础设施、安全性与并网方案等内容，特别强调了可再生能源、电动汽车与智能电网并网的概念。本书作者在智能电网学术界和工业界都是公认的专家。



有了如此广泛的主题，我希望读者能在本书中找到令人兴奋的东西，并发现嵌入式系统领域在科学和日常生活中同样是令人兴奋并且是有用的。没有这些有创造力的人在轻松的氛围中交换思想和观点，本书是不可能完成的。我很高兴能邀请您来到加拿大美丽的不列颠哥伦比亚参加 CMOS 新兴技术会议，与众多专家学者一同讨论本书中的各种课题。更多之前会议的幻灯片和未来的会议公告，请登录 www.cmoset.com。

很高兴您能给本书提出各种建议，请发送邮件至 kris.iniewski@gmail.com。
让智能电网繁荣世界，造福人类！

Krzysztof (Kris) Iniewski 博士

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 需求侧能量管理	1	2.6 故障检测、隔离与恢复 (FDIR)	19
1.1 需求侧发展	2	2.6.1 故障检测	19
1.2 对用户的影响	3	2.6.2 重合闸	20
1.3 对输/配电网的影响	4	2.6.3 隔离故障	20
1.4 对发电厂的影响	4	2.6.4 恢复送电	20
1.5 优化潜力	4	2.7 FDIR 系统架构	20
1.6 技术挑战	5	2.8 电压-无功功率优化	24
1.7 需求侧管理的要求	6	2.9 小结	30
1.8 大规模控制遇到的难题	7	参考文献	31
1.9 控制方法	7	第 3 章 高级资产管理	32
1.10 目标与利益相关者	8	3.1 老化的和正在老化的基础设施	32
1.11 优化水平	9	3.2 企业优先发展的技术	33
1.11.1 本地范围	9	3.3 资产健康管理 (AHM)	34
1.11.2 微电网	9	3.4 AHM 红利	34
1.11.3 虚拟发电厂	9	3.5 AHM 技术	34
1.12 优化工具链方法	9	3.6 挑战	35
1.13 现有研究	10	3.7 最佳实践	36
1.14 小结	12	3.8 高级资产管理实践	36
参考文献	13	3.9 资产健康状态评估	37
第 2 章 以智能 FDIR 与电压-无功功率优化为特征的配电自动化	15	3.10 风险规划	37
2.1 配电自动化系统架构与通信	16	3.11 决策支持	38
2.2 2003 年 8 月 14 日, 配电自动化变化的契机	17	第 4 章 广域早期预警系统	39
2.3 智能配电网的产生	18	4.1 引言	39
2.4 什么是配电自动化	18	4.2 加强 PMU 隐患评估功能	42
2.5 信息技术与通信技术	18	4.2.1 魁北克水电研究所 PMU/C 要求和性能	42
		4.2.2 魁北克水电研究所 PMU/C	



的采样性能·····	45	第 5 章 可再生能源并入	
4.3 PMU 配置的脆弱性评估 ···	47	智能电网 ·····	84
4.3.1 背景·····	47	5.1 智能电网并网·····	85
4.3.2 网络分割的扰动		5.2 智能电网发展助力	
一致性·····	47	风电技术·····	86
4.3.3 PMU 配置的模糊		5.3 智能电网背景下的风能·····	87
c - Medoids 算法·····	48	5.4 涡轮机解决方案: 智能	
4.4 广域严重性指数·····	50	风电变流器·····	91
4.4.1 参考网络·····	50	5.5 塔内: 中压开关设备·····	94
4.4.2 时域 COI 引用的		5.6 电网互联解决方案·····	95
响应信号·····	51	5.6.1 交流: 交流风电互联	
4.4.3 频域 COI 引用的		解决方案·····	95
响应信号·····	51	5.6.2 直流: 用于海上的	
4.4.4 广域严重性指数的解释和		HVDC 输电互联·····	96
数据挖掘·····	52	5.7 支持电网运行: 风能 SVC	
4.4.5 瞬态能量对电压的		与储能·····	98
分类·····	58	5.8 风电总结·····	99
4.5 基于数据挖掘的		5.9 太阳能在智能电网中的	
事故预测·····	60	应用·····	99
4.5.1 背景·····	60	5.10 光伏电站的一般	
4.5.2 数据组织培训和		注意事项·····	100
测试·····	61	5.11 太阳能光伏发电·····	102
4.5.3 选择基于 PMU 的广域		5.12 并网电厂·····	102
严重性指数功能·····	62	5.13 电力生产与存储的	
4.5.4 黑盒子与可理解的		间歇性·····	103
预测模型训练·····	63	5.14 光伏组件的电压 - 电流	
4.6 系统振荡的早期检测与		特性·····	104
阻尼条件评估·····	68	5.15 预计每年能源产量·····	106
4.6.1 背景·····	68	5.16 面板的倾斜和方向·····	106
4.6.2 多频模态分析·····	69	5.17 光伏电站的电压和	
4.6.3 线性 SIMO 信号		电流·····	107
识别·····	70	5.18 连接电网和能量测量·····	107
4.6.4 输出信号的实时模态		5.19 小结·····	108
分析图解·····	75	参考文献·····	109
4.7 小结·····	80	第 6 章 电力系统改革中的	
参考文献·····	81	微电网 ·····	110



6.1	什么是微电网	110			
6.2	微电网的优势	112			
6.3	微电网的架构与设计	113			
6.4	微电网对电力系统有重要 意义吗	117			
6.5	小结	118			
	参考文献	118			
第7章 通过智能链接增强辐射型配电网中可再生能源的并网					
7.1	引言	119			
7.2	辐射型配电网中的 直流连接器	120			
7.3	背靠背 VSC 拓扑结构	122			
7.4	常规优化框架	126			
7.4.1	目标函数	127			
7.4.2	直流连接器模型	128			
7.4.3	网络约束	128			
7.5	结论	129			
7.5.1	使用直流连接器用于 降损	130			
7.5.2	使用直流连接器提高 负荷水平	132			
7.5.3	使用直流连接器提高 DG 渗透功率	133			
7.5.4	经济评估	134			
7.6	小结	136			
	致谢	137			
	参考文献	137			
第8章 智能微电网中基于电压控制的分布式发电机组及主动负荷					
8.1	引言	139			
8.2	分布式发电机组的控制 策略	141			
8.2.1	基于通信的分布式发 电机组控制	141			
8.2.2	不含通信的分布式发 电机组控制	141			
8.3	主动负荷的控制策略	144			
8.3.1	基于通信的主动负荷 控制	145			
8.3.2	不含通信的有效负荷 控制	146			
8.3.3	一次与二次主动负荷 控制	148			
8.4	智能微电网	150			
8.5	小结	151			
	致谢	152			
	参考文献	152			
第9章 智能电网环境下的电动汽车					
9.1	引言	154			
9.1.1	电动汽车用于 削峰填谷	154			
9.1.2	控制装置	156			
9.1.3	电池退化	159			
9.2	储能市场管理	159			
9.2.1	德国辅助服务市场 ..	160			
9.2.2	电动汽车的正调控 ..	161			
9.2.3	电动汽车的负调控 ..	161			
9.3	动态仿真方法	162			
9.3.1	动态方法的结果	163			
9.3.2	车辆池大小的影响 ..	163			
9.3.3	持续报价时间的 影响	163			
9.3.4	所需调度时间的 影响	164			
9.3.5	并网车辆功率调 度的意义	165			
9.4	电力市场	167			
9.4.1	出力波动性的影响 ..	167			



9.4.2 智能电网设备的 收益潜力	169	层控制	196
9.5 小论	170	11.3.1 内部控制回路	197
致谢	172	11.3.2 一次控制	198
参考文献	172	11.3.3 二次控制	200
第 10 章 绿色建筑中带有智能环境 温度传感器的低压直流 节能 LED 照明系统	174	11.3.4 三次控制	201
10.1 引言	174	11.3.5 结论	204
10.2 低压直流微电网	175	11.4 微电网的自供电智能 无线传感器	210
10.2.1 交流电网与直流 电网技术	175	11.4.1 无线传感器网络 概述	210
10.2.2 低压直流输电的 新标准	176	11.4.2 传感器节点的供电 问题	211
10.3 LED 固态照明系统	178	11.4.3 智能无线传感器网络的 风能采集	211
10.4 智能绿色建筑中的智能 无线传感器系统	179	11.4.4 智能无线传感器网络的 磁能采集	217
10.4.1 无线传感器系统与传感器 技术概述	180	11.5 小结	220
10.5 案例分析: 绿色建筑中带有智 能环境控制传感器的低压直流 节能 LED 照明系统	182	参考文献	221
10.6 LED 照明仿真	183	第 12 章 无线传感器网络在智能电网 用户侧的应用	225
10.7 低压直流电网供电的 LED 照明系统的应用案例	187	12.1 引言	225
10.8 绿色建筑中智能环境传感器的 节能控制方案	188	12.2 无线传感器网络的 通信标准	227
10.9 小结	190	12.2.1 Zigbee	227
参考文献	190	12.2.2 超低功耗 WiFi	229
第 11 章 含自主电能采集无线传感器 网络的多层分布式 智能微电网	192	12.2.3 Z-wave	231
11.1 引言	192	12.2.4 Wireless HART 技术	231
11.2 微电网的分层控制 方法	195	12.2.5 ISA-100.11a	232
11.3 交流微电网的分 层控制	196	12.3 无线传感器网络在智能 电网用户侧的应用	232
		12.3.1 住宅用户的无线传感器 网络需求管理	232
		12.3.2 PHEV 充放电周期的 协调	238
		12.4 无线传感器网络用户侧应用的	



安全与隐私	241	主干扰源	251
12.5 小结和展望	243	13.4 Zigbee 在 WiFi 下的	
参考文献	244	性能分析	252
第 13 章 基于 Zigbee 的智能电网		13.4.1 基于 WiFi 的 Zigbee	
无线监控系统	248	误码率分析	253
13.1 引言	248	13.4.2 WiFi 干扰下 Zigbee 的	
13.2 基于 Zigbee 的建筑能源		误包率分析	253
管理示范系统	249	13.5 基于频率捷变的	
13.3 Zigbee/ IEEE 802.15.4 和		干扰消除方案	254
WiFi/IEEE 802.11b		13.5.1 干扰检测	255
概述	250	13.5.2 干扰消除	256
13.3.1 Zigbee/ IEEE		13.6 仿真与实验结果	257
802.15.4	250	13.6.1 仿真结果	257
13.3.2 WiFi/IEEE		13.6.2 实验结果	259
802.11b	251	13.7 小结	263
13.3.3 IEEE 802.15.4 的		参考文献	263

第1章

需求侧能量管理

Albert Molderink, 荷兰恩斯赫德屯特大学

能源效率、供电与可持续性在当今社会的重要研究课题。能源的供应受到诸多因素影响，比如能源消费的日益增加、能源的稀缺性和环境问题。西方国家的能源消费成小幅度上升趋势，而诸如印度等发展中国家的能源消费的增长指数则达到了25%。由于化石能源的产量跟不上能源消费水平的增长率，这使得能源变得更加稀缺，能源价格一再攀升。这其中以原油最为突出，石油储备日益减少。此外，大部分化石能源来自于政治不稳定地区。这与日益增强的温室效应意识相结合，共同推动了对可再生能源的研究。

在电力供应链中可以看到之前提到的其他问题所带来的影响。电力供应链包括发电、输电、配电与用电环节。在电力供应链中，产生了很多变化，主要有以下4种特征：

- 1) 能源配送电力化：持续增长的能源消费以电力形式进行输送与消费。
- 2) 能源消费增长：能源消费尤其以电力消费的形式增长。
- 3) 更多动态电力负荷出现：电力消费不仅增长，而且更具波动性，有时甚至不可控。
- 4) 分布式发电的持续增长：现在有越来越多的较小规模的发电形式接入电网，而过去所有的电能都是由某几个大型发电厂发电，然后经由电网送至用户。

目前，电力供应链中最重要的变化是由集中式发电向分布式发电发展，经由电网给用户供电。这些发展趋势与变化给电力供应的可靠性与稳定性带来了挑战，同时也带来了机遇。采用广域信息与通信技术及其他相关技术使得电网变得更加高效并具有可持续性。

电力供应链示意图如图 1.1 所示。可持续发电的转变和小规模分布式发电的增加，起初看起来可能对电网并无伤害，但后来证实这对电力供应链产生了严重影响。

电网潮流不再是单向通信的问题，它已经经过多年的建模与设计。这彻底改变了电力管理决策过程。在此背景下，电力供应链管控的新概念应运而生。需求侧管理



(DSM) 在广义上可以看作是一种处理供应链管理问题的概念。

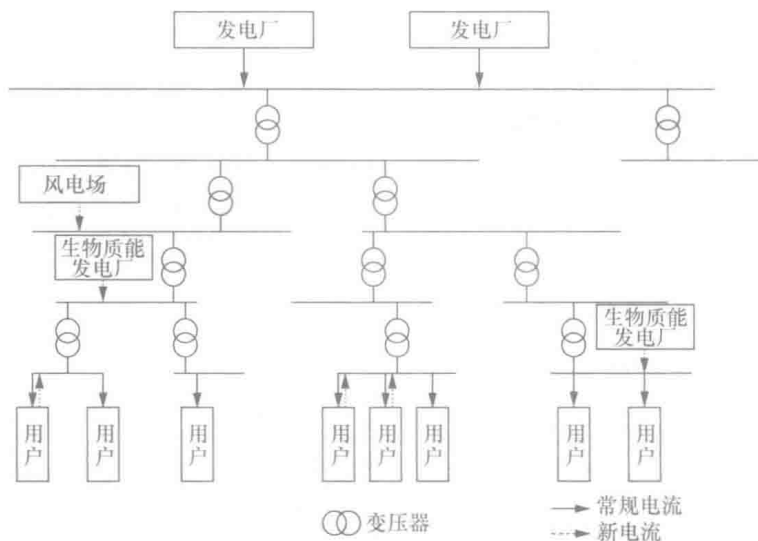


图 1.1 电网结构示意图

在本章中，我们对需求侧发展以及将这些新技术应用到智能电网概念中而随之出现的挑战进行了概述，并为 DSM 提出了控制方法。

1.1 需求侧发展

在过去的几十年里，电力供应和基础设施受到了越来越多的压力。如图 1.2 所示，能源需求仍在持续电气化。此外，电力需求的随机性决定了电力需求的波动性，人们根据自己的喜好随意地开关洗碗机或洗衣机等，使得电力需求大幅增加。电力供应链是几十年前设计的，是完全由需求驱动的。用户在打开电气设备时，发电侧必须及时处理这一难以预测的负荷波动。

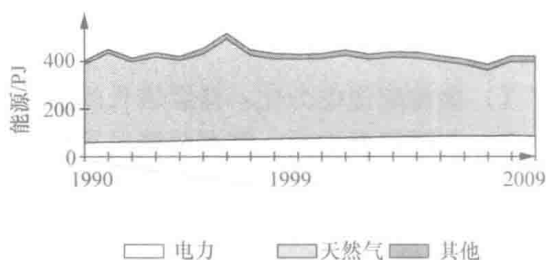


图 1.2 荷兰家庭用户的能源使用结构

在传统电力供应链中，整个系统的基本负荷是由大规模的、不灵活但效率很高的发电厂提供，而反应快速、相对低效的峰值容量则必须保留以满足峰值负荷。需求峰值引起发电与输电的峰值，它定义了供应链中的需求量。因此，需求量的波动使得电网负荷增加。当电力需求量上升并变得更加波动时，例如，随着大规模电动汽车并入电网而其充电时间并没有进行优化，此时常规发电厂的发电效率就会下降^[2]。需要在电网容量方面进行大量投资，以能够将发电厂的所有电力（峰值）输送给消费者。

另一方面，CO₂减排和可再生能源发电成为当今社会的重要议题。目前的自然资源消耗率将导致资源枯竭，故迫切需要能够提供所需能源需求的替代办法。然而，可



再生能源大多包含波动性以及不可控的太阳能、水能与风能等。为了保持电网稳定，发出的电能都必须被实时消耗掉。因此，可再生能源发电的峰值应低于用电量。结果，在当前的供需关系中，传统能源发电仅有一小部分可由可再生能源发电来替代。为了保持供需平衡，需要额外的峰值发电容量，这却使传统发电厂运行在更加波动的发电模式下。

因此，原始供应链的需求侧必须处理更加波动和不断增加的负荷，并且它面临着在需求侧或原始负荷侧与发电侧之间有可再生能源类型的小规模发电方式并网。

尽管目前正在进行大量研究以使可再生能源能够满足能源需求，但是，只要不是所有能源需求都可持续提供，例如，通过防止峰值发电厂的使用，现有电力系统的效率仍能取得很大提升。

因此，我们面临的挑战是：①提高现有发电厂的效率；②减少负荷高峰带来的电网压力，延迟电网扩容的投资；③促进大规模可再生能源发电并网，同时保持电网稳定与可靠供电。

接下来，1.2~1.4节将讨论当前的用电、输电与发电的发展趋势。最后，1.5节将介绍新技术的优化潜力。

1.2 对用户的影响

能源供应的当前趋势降低了发电侧的灵活性，促使电力供应链的用户侧有更大的灵活性。目前，特别是能源价格增长和对温室效应的意识，促使用户采用新的国产技术来节约资金和能源。

这些技术中的一个典型例子是微型发电机。千瓦级微型发电机一般安装在建筑物内部或附近进行发电，其传输电能损耗减少。微型发电机通常采用可再生能源技术，比传统发电厂的能效更高^[2,3]。

其他新技术为储能装置和智能设备。储能装置可以暂时存储能量。热缓冲器在目前的建筑物中已经很常见，越来越多的储能技术也在被引入。这些储能装置使得“削峰填谷”成为可能，例如提前将电能存储在储能装置中，到高峰负荷再将存储的电能释放出来。电力消耗得以及时改变，例如，通过储能装置并将存储的能量供给需求侧，使消耗于较早的时间进行。智能设备被定义为能够临时关闭设备或可以随时切换负荷的设备。智能电冰箱是一种可以及时转移负荷的设备，其冷却温度应保持在一定范围内，在此范围内可以自由地开始冷却，如图1.3所示。

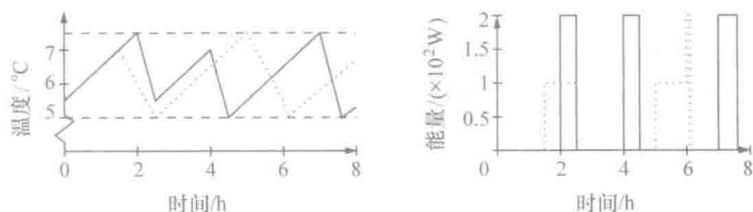


图 1.3 电冰箱及时转移负荷



不幸的是，其中一些技术可能会给电网引入更多的波动。例如，如果由于人为原因，所有的微型发电机同时开始发电，产生的电能必须就地消纳，而不是被电网消纳。但是，这些新的国内技术也盘活了电力消纳模式。通过对这些设备进行监控，管控它们的消纳状况，从而使用户更加灵活。

1.3 对输/配电网的影响

急剧增加的电力需求和峰值负荷要求电网扩容，这需要巨大的投资。然而，为了减少负荷波动并消纳更多的可再生资源，需要对发电侧和需求侧进行匹配。为了实现这一目的，需要对电网基础设施进行升级改造并使电网更加智能化。

发电与用电环节的可预见性变化会给电网增加压力，同时随着社会对电力的依赖性越来越大，电网的稳定性、可靠性和容错性也越来越重要。因此，应该对电网的潮流进行监视和管理。

需求侧管理在增大电网可再生能源发电方面起着关键作用。然而，这种发电方式与地理因素息息相关。大规模可持续发电通常只能在人口密度低的偏远地区进行，因此电力需求很低（例如，大型海上风电场或沙漠中的太阳电池板）。人们希望欧洲的可再生能源潜力足够大以至能满足自身的所有供电需求^[4]。但这部分电力需要输送给用户，输电走廊需要很大的传输容量。可再生能源发电的高潜力地区与用电消耗地区之间的超远距离给电网带来了巨大的压力。在欧洲，将可再生能源电力从发电侧运往客户，需要一个遍及欧洲的、互联的、高容量的电网以及一个遍及欧洲的电力市场。

1.4 对发电厂的影响

可持续能源供电的转变对发电产生了巨大的影响。目前，煤炭是发电的主要来源。没有煤电的未来是几乎不可想象的，这是因为煤炭是便宜的、丰富的，并且在很多国家都可以获取^[5]。不幸的是，煤是在 CO₂ 排放量方面污染最严重的化石燃料之一。更好的选择是使用可再生能源（太阳能、风能、潮汐能等）进行可持续发电。然而，这需要对电网和电力供应进行深刻的变革和改进。

大规模可持续发电与传统发电厂在发电容量与可控性上有很大区别。特别是，太阳能和风能具有很强的波动性；考虑云会遮挡太阳，这时就需要妥善处理以确保稳定的电力供应。总体来说，一致认为，管理这种新型发电方式具有可期待性与必要性，并使电网适当调整以促进这种可持续性、难以管理的发电方式。

因此，在远距离输电的高容量线路中，可持续的电力供应需要在不同电压级别的电网上对所有类型的发电方式进行监控。

1.5 优化潜力

目前电力供应链的发展趋势对电网的所有环节都会产生影响。此外，本节介绍



中提到的一些难题应得到解决,以维持可靠和可信赖的供应。解决这些难题的方案是将客户从静态消费者转变为发电/用电过程中的积极参与者。用户可以通过转移负荷和(或)发电量到最有利的时间来开发新技术的潜力,在这种情况下,受益取决于优化目标。当大量用户共同努力实现目标时,则更容易实现,但是这需要进行协调,并且要求用户失去他们对自家电器的全部(一部分)控制权。电力供应链发电侧的低灵活性是通过增加用电侧方面的灵活性来弥补的。然而,将用户变为积极的参与者也需要他们改变心态,即能够随时获取电能的用户应该使电网供电质量与可靠性保持高水平。仅这一意识就能使用电量降低20%^[6]。此外,这需要政治家和决策者做好筹备工作。

1.6 技术挑战

在本节中,我们将具有更好管控性的电网称为智能电网,它需要更深入的研究。首先,本节给出了智能电网的定义,并引出其技术难题。这其中包含的技术要求是未来电力供应链发展管理方法的必要因素。智能电网的技术挑战归结为需求侧管理的要求。

电网的升级版本通常称为智能电网。很难给智能电网下一个定义,不同的学派有着自己的定义。在参考文献[7]中,智能电网不是一种“事物”,而是一种“版本”:智能电网是现有电网的升级版,更加智能化,更便于分散管理,适应性和可控性更强,保护系统更加高级。参考文献[8]给出的定义则更为常见:

智能电网能够更高效、更经济、更安全和可持续地发电与配电。它集成了创新型工具和技术、产品和服务,从发电、输电、配电一直到用户设备和装置采用了先进的传感、通信和控制技术。它能够与用户进行双向交流,提供更多的信息和选择、电力输出能力、需求侧参与、更高的能效。

为成功地引入智能电网,我们面临着许多技术挑战。参考文献[9]列出了智能电网所需的5项关键技术:

- 1) 传感与测量技术;
- 2) 综合通信技术;
- 3) 高级组件;
- 4) 改进的接口与决策支持;
- 5) 先进控制技术。

因为只能对能测量的设备进行管理,所以传感和测量是智能电网的重要组成部分。对输电线路和变电站的健康运行参数进行监控以防止电网停电事故的发生。天气的监测和预报可用于预测负荷与可再生能源的潜在输出功率。这与输电线路容量相关。然后,需要对电网、发电侧、储能侧、用电侧及设备进行监控,以使发电与用电保持平衡,并受传输容量限制。

为传输所有信息,这就需要一个高速通信基础设施。这种集成的通信基础设施