

Optimal Energy Management Method for
Consumer Side Smart Microgrids

用户侧智能微电网的 优化能量管理方法

刘 念 张建华 著



科学出版社

用户侧智能微电网的 优化能量管理方法

刘 念 张建华 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

微电网技术是在用户侧实现可再生能源就地消纳利用、发挥分布式能源系统效能的最有效方式。由于运行目标的多向性、感知数据的不确定性、决策过程的实时性、用户互动的激励性等因素作用,传统电力系统的优化运行方法难以完全适用,需要发展更有针对性的理论和方法。本书旨在对用户侧微电网的优化能量管理方法进行系统性的总结。第1章介绍用户侧智能微电网的发展背景与特征;第2章介绍用户侧微电网优化能量管理的基本框架;第3章介绍基础理论模型及算法;第4章介绍用户侧微电网功率预测方法;第5~7章分别介绍家庭/社区型、商业楼宇型、工业园区型三大类用户侧微电网的优化能量管理模型及算法。

本书可为从事微电网、智能配用电研究的学者、技术人员和研究生提供帮助,并为工程设计与设备研发提供可借鉴的技术知识。

图书在版编目(CIP)数据

用户侧智能微电网的优化能量管理方法 / 刘念, 张建华著.

— 北京: 科学出版社, 2019.2

ISBN 978-7-03-060453-8

I. ①用… II. ①刘… ②张… III. ①智能控制—电网—能量管理系统—研究 IV. ①TM734

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 014146 号

责任编辑: 闫 悦 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 2 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2019 年 2 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 262 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

微电网是包含分布式能源和负荷的中、低压交/直流电力系统。根据微电网与大电网的连接关系，微电网可分为独立型和并网型两类。其中，独立型微电网与大电网之间没有电气连接，且仅运行于孤岛模式；并网型微电网作为一个可控单元与大电网连接并可工作于并网模式与孤岛模式。一般情况下，用户侧微电网是指以工业园区、家庭/社区、商业楼宇等对象为基本单元，接入分布式光伏、分散风电、微型燃气轮机、内燃机等分布式电源，综合利用可控负荷、储能、电动汽车等可调控资源，通过并网点接入 10kV 及以下电压等级配电网的并网型微电网。能量管理系统是实现用户侧微电网优化运行的核心环节。一般情况下，需根据可再生能源发电与用户负荷等预测结果，综合考虑外部能源市场信息、系统运行功率平衡、用户需求等约束条件，建立用户定制和优化运行模型并选择合理的优化调度策略，在保障安全稳定运行的前提下，实现对微电网内分布式电源、储能及负荷的有效调度。

根据技术特点，可以将微电网的优化能量管理方法的发展分为三个阶段。第一个阶段是在微电网的发展初期，此时研究重点在于与微电网控制运行相关的基础技术和设备研发，并通过示范工程对关键技术和设备进行功能的可行性验证。在这个阶段，研究时并未考虑用户侧可调控资源的作用，对可再生能源的随机波动特征也缺少深入研究，能量管理多采用集中式的架构，由集中能量管理系统对分布式电源进行调控，降低系统的运行成本并提升运行效率。随着微电网基础功能的完善，研究者逐渐发现：要提高微电网的运行效果，可再生能源及用户用电行为的随机性是必须面对的难点问题。随机性过大，导致通过确定性优化方法所获取的调度方案可执行性较差，影响最终的优化运行效果。因此，第二个阶段重点针对考虑随机性的优化能量管理方法展开研究，随机优化、鲁棒优化、在线优化等思想被广泛引入微电网优化建模及求解中，取得了较好的研究效果。近年来，随着《推进并网型微电网建设试行办法》《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》等国家政策的发布，推动个人、家庭、分布式能源等小、微用户灵活自主地参与能源市场，引出了微电网能量管理发展的第三个阶段。该阶段以产消者、多主体、市场化为典型特征，微电网的优化能量管理逐渐由单主体的集中优化模式转换为市场化的多主体分布优化模式。

面对微电网发展的重大需求，本书主要针对第二、第三阶段的微电网的优化能量管理方法进行论述，从功率预测、随机优化、博弈论等多个方面介绍相关的基础理论模型，并根据居民、商业、工业等多种类型的用户形态，提出具体的优化运行

方法。通过本书的论述,期望帮助读者了解并掌握微电网优化建模的基本理论和方法,为用户侧微电网能量管理系统和终端装置的研发提供基础理论和技术,为局域能源市场和需求响应机制的设计提供参考依据,为促进可再生能源的高效消纳利用和智能配用电系统的科学发展做出贡献。

本书所介绍的内容是作者所在课题组在微电网能量管理领域多年来研究工作的总结。课题组于2012年承担了国家自然科学基金面上项目“微电网环境下电动汽车与可再生能源的协同增效机理与优化方法”(编号:51277067),将电动汽车作为可调控资源,研究了用户侧微电网中电动汽车与分布式光伏的协同优化方法;从2014年开始,课题组得到国家高技术研究发展计划(863计划)课题“基于分布式能源的智能微电网关键技术与集成示范”(编号:2014AA052001)的资助,针对用户侧微电网的优化能量管理问题开展了系统且深入的研究,提出了针对家庭/社区、商业楼宇、工业园区的系列化能量管理方法,并应用于广东、云南等地的4个用户侧微电网示范工程。

在微电网和电动汽车研究领域,作者所在的课题组已经培养了数十名博士和硕士研究生,正是他们的努力工作,促进了用户侧微电网优化能量管理方法的理论和技术发展,本书的一些内容直接引自这些研究生的学位论文,在这里对为本书做出贡献的陈征、陈奇芳、马丽、汤庆峰、张清鑫、段帅、张颖达、段力铭、路欣怡、刘杰、王程、林心昊、樊玮、周楠、成敏杨、何力、石峻玮、王杰、郭斌、周琳洁、欧博文、盛超群等同学表示衷心的感谢。同时,特别感谢澳大利亚皇家墨尔本理工大学余星火教授、美国威斯康星大学密尔沃基分校王凌峰教授、南方电网科学研究院雷金勇高工、华南理工大学杨苹教授、华北电力大学肖湘宁教授和刘文霞教授,他们对本书相关工作提出了具有建设性的意见。

本书共分7章,第1、2章由张建华教授执笔,第3~7章由刘念副教授执笔,全书由刘念副教授统稿。

由于微电网技术仍处于不断发展进步的阶段,本书所述的理论模型及方法,部分已经用于用户侧微电网能量管理终端的研发,并通过示范工程验证,展示了较好的运行效果;部分研究成果受政策机制及发展水平的制约,仍处于实验室仿真验证的阶段,还需要未来实践的进一步检验。作者希望本书所做的大量探索性工作,能够为未来微电网乃至综合能源系统的能量管理方法的发展、实践提供可参考的基本素材。由于作者水平有限,可能存在疏漏和不足之处,期待专家和读者批评指正。

刘 念 张建华

2018年7月23日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 用户侧智能微电网的发展背景	1
1.2 用户侧智能微电网的特征	2
1.3 本书的主要内容	6
参考文献	7
第 2 章 用户侧微电网优化能量管理的基本框架	10
2.1 用户侧微电网的类型与组成对象	10
2.1.1 用户侧微电网的定义与类型	10
2.1.2 分布式电源	11
2.1.3 储能系统与电动汽车	12
2.1.4 可调控负荷	13
2.2 用户侧微电网优化能量管理框架	14
2.2.1 能量管理的基本功能	14
2.2.2 能量管理的典型架构	14
2.2.3 能量管理的调度策略	16
参考文献	17
第 3 章 基础理论模型及算法	19
3.1 功率预测基础	19
3.1.1 经验模态分解	19
3.1.2 核函数极限学习机	20
3.1.3 扩展卡尔曼滤波	22
3.1.4 粒子群优化	23
3.2 随机优化基础	23
3.2.1 随机优化	23
3.2.2 李雅普诺夫优化	26
3.3 博弈论基础	29
参考文献	32

第 4 章	用户侧微电网功率预测方法	35
4.1	用户侧微电网短期负荷预测方法	35
4.1.1	用户侧微电网负荷特征分析	36
4.1.2	负荷数据预处理与负荷属性	39
4.1.3	基于 EMD-KELM-EKF 的组合预测模型	39
4.1.4	基于 PSO 的参数优化模型	42
4.1.5	用户侧微电网负荷预测的实现模式	42
4.1.6	模型求解与仿真分析	43
4.2	用户侧分布式光伏超短期功率预测方法	50
4.2.1	分布式光伏预测系统需求分析与建模	51
4.2.2	光伏功率的样本构成	52
4.2.3	预测模型的离线参数寻优	53
4.2.4	在线光伏功率预测模型	55
4.2.5	实验与结果分析	55
4.3	小结	60
	参考文献	60
第 5 章	家庭/社区型微电网的能量管理	62
5.1	在线优化的家庭型微电网优化运行	62
5.1.1	用户侧微电网的基本模型	63
5.1.2	在线能量管理方法的基本定义	65
5.1.3	微电网的在线能量管理模型	67
5.1.4	仿真与结果分析	70
5.2	光伏电能在线共享的社区型微电网优化运行	77
5.2.1	社区型微电网的基本模型	78
5.2.2	在线能量共享方法的基本定义	79
5.2.3	社区型微电网的在线能量共享模型	83
5.2.4	仿真与结果分析	85
5.3	光伏电动态定价的社区型微电网优化运行	93
5.3.1	基本架构	94
5.3.2	计及动态光伏电价的优化运行模型	95
5.3.3	基于非合作博弈的分布式优化算法	101
5.3.4	算例分析	103
5.4	小结	109
	参考文献	110

第 6 章 商业楼宇型微电网的能量管理	113
6.1 含分布式光伏与电动汽车的楼宇微电网优化运行	113
6.1.1 商业楼宇型微电网典型结构	114
6.1.2 电动汽车充电负荷分类	114
6.1.3 微电网的实时运行策略	115
6.1.4 算例分析	122
6.2 智能楼宇群微电网的协同优化运行	125
6.2.1 智能楼宇微电网群的能量管理框架	126
6.2.2 分布式能量管理基础数学模型	127
6.2.3 博弈模型及求解方法	131
6.2.4 算例分析	135
6.3 含热电联供的智能楼宇集群微电网协同优化运行	142
6.3.1 热电联供智能楼宇集群系统结构	143
6.3.2 热电联供系统模型	144
6.3.3 用户基本负荷模型	148
6.3.4 基于 Stackelberg 博弈的 SBC 协同能量管理	151
6.3.5 博弈模型及求解方法	155
6.3.6 算例分析	162
6.4 小结	168
参考文献	169
第 7 章 工业园区型微电网的能量管理	173
7.1 含热电联供的工业园区型微电网多工况优化运行	173
7.1.1 工业园区型微电网供能基本框架	174
7.1.2 工业园区型微电网基础模型	175
7.1.3 优化调度算法	177
7.1.4 能效分析算法	180
7.1.5 算例分析	183
7.2 含共享储能的工业园区光伏微电网协同优化	187
7.2.1 基本框架	188
7.2.2 多主体收益及双阶段优化模型	191
7.2.3 算例分析	199
7.3 小结	206
参考文献	206

第 1 章 绪 论

1.1 用户侧智能微电网的发展背景

新型城镇化建设是我国社会经济发展的必然趋势,随着农村人口不断向城镇转移,第二、第三产业不断向城镇聚集,城镇规模将逐步扩大。一方面,城镇化建设将大大增加用户的用电需求,推动能源供应方式变革;另一方面,城镇化建设也为分布式能源的规模化接入提供了可实施的外部环境。在城镇化进程中,通过微电网的方式,按照自用为主、富余上网、因地制宜、有序推进的原则,在用户侧积极发展和规模化接入分布式可再生能源,是实现新能源就地消纳利用,发挥分布式可再生能源发电系统效能的最有效方式。

可再生能源接入电网已经成为发展低碳经济的重要手段^[1]。微电网技术是分布式可再生能源发电系统集成应用的核心之一,也是智能电网建设的重要内容^[2-7]。在微电网的发展初期,对微电网的研究大多关注于与微电网规划、控制与运行相关的技术和设备研发^[8-13],并通过示范工程对关键技术和设备进行功能的可行性验证。随着相关技术的发展与国家政策的推动,在电力用户侧逐渐出现以可再生分布式电源和储能为核心元件,综合利用可控负荷资源的用户侧微电网系统。传统电力系统通过集中式的大型发电机组向负荷侧供电,而在规模化接入分布式可再生能源的新一代电网中,微电网为可再生能源发电、储能系统及用户需求提供了一种分布式集合形式,是分散协调可再生能源与用户负荷的理想平台^[14]。在智能电网的背景下,微电网的显著特征包括双向互动的能量流以及实时互动的信息流,为供电商与用户实现实时的供需平衡提供了很大的方便,有效地提高了新能源利用效率与电网稳定性^[15]。在用户侧微电网的运行中,用户关心的效用函数主要包括用电成本、用电质量、舒适度等^[16]。而提高运行效用的重要途径就是能量管理系统(energy management system, EMS)^[17]。它根据用户的要求进行运行控制与能量优化,通过微电网中实时提供的信息流在线调控能量流,保障微电网运行的经济性与安全性,为用户提供舒适的用电环境,是用户侧微电网运行的核心环节^[18]。

在微电网的运行过程中,由于用户用电行为的随机性及可再生能源(光伏/风电)输出的波动性,未来的负荷数据、新能源发电数据、电价数据都难以准确地预测,这导致用户侧微电网中能量流与信息流的时变性增大,增加了保证实时能量供需平衡的难度^[19],对优化决策的实时性也提出更高的要求。因此,需要一种在可再生能

源发电、用户负荷与电网电价的波动下快速调控能量以提高用户用电效用的能量管理方法。

1.2 用户侧智能微电网的特征

用户侧微电网是集成先进电力电子技术的分散独立供能系统，容量相对较小，将分布式电源、负荷、储能元件及监控保护装置等有机融合，形成具有自治可控能力的集成单元；可采用静态开关在公共连接点与上级电网相连，实现孤岛与并网模式间的平滑转换；就近向用户供电，减少输电线路的损耗，增强抵御来自上级电网故障影响的能力。当上级电网发生故障或电能质量不能满足要求时，微电网可以切换到孤岛模式下运行，保证自身安全稳定运行^[20]。

有关微电网的特征，相关文献中已经作了较多分析^[21]。与一般意义上的微电网相比，用户侧微电网拥有个性化的特质，主要表现在以下几个方面。

(1) 电压等级较低。用户侧微电网更倾向于向家庭/社区、商业住宅、办公楼宇 (office building, OB)、工业厂区、园区等直接供电，其电压等级一般最高为 10 kV，最低为 220V。

(2) 侧重于就地利用分布式光伏发电 (photovoltaic) 系统。考虑到不同类型用户可提供的微电网建设施工条件和风光资源条件，分布式光伏发电更适合应用于用户侧的微电网。

(3) 直接利用用户资产，有效延伸客户服务，可满足用户差异化的可靠性、电能质量和节能需求。

(4) 源网荷的协调更高效。用户侧微电网更加接近用户，更加紧密耦合了发电、供配电和用电环节，各环节间的协调互动更为直接，效率更高。

(5) 多形态的群组结构。考虑用户类型和用户负荷的差异，用户侧微电网可分为单层结构和双层结构。单层结构的用户侧微电网将控制、能量管理与能效管理、新能源发电预测与负荷预测、双向计量以及人机界面等模块集成在同一层结构中；双层结构则将能效管理、人机界面以及双向计量等模块设置在第一层结构中，将中央控制器、能量管理、新能源发电预测与负荷预测以及微电网控制模块设置在第二层结构中。

(6) 可移植性强。用户侧微电网的概念更为清晰具体，用户类型多样化，运营模式建立在对政府、用户、投资方、设备供应商、电网企业等各方均有利的基礎上，易于得到各方认可，经济性好，具有很强的推广性。

图 1-1 所示为一种典型的用户侧微电网基本结构图。该微电网包括多种分布式电源和 3 条馈线，整体为辐射状结构，通过一个静态开关和配电网相连，控制系统根据实际情况控制该断路器实现微电网的孤岛运行或并网运行。图中展示的分

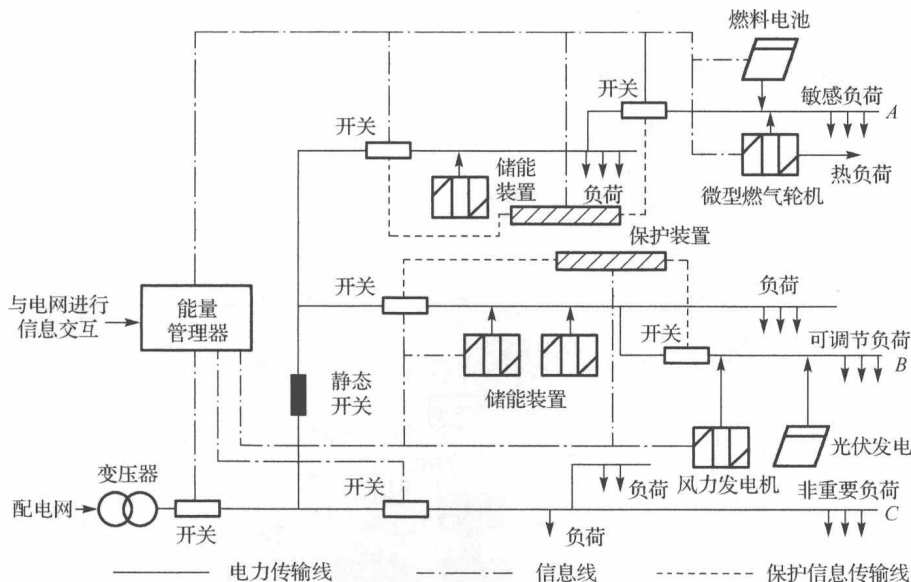


图 1-1 典型的用户侧微电网基本结构图

式电源包括光伏发电、微型燃气轮机和储能装置等，其中一些接在热力用户附近，为用户提供热能。该系统中馈线 *A* 是敏感负荷，馈线 *B* 是可调节负荷，馈线 *C* 为非重要负荷。馈线 *C* 可在孤岛运行时内部过负荷情况下切除。当负荷发生变化时，微电网中的潮流控制器会根据测量的频率和电压信息对潮流进行调节，相应增加或减少当地微电源的功率输出以维持功率平衡。此外，微电网采用了大量先进的现代电力电子技术，而传统配电系统不具有这样的技术水平。

图 1-2 为单层结构的用户侧微电网示意图。利用楼宇屋顶搭建光伏发电系统，并配备相应的分散式/集中式储能系统，与现有居民用电负荷或工商业用电负荷等组成小型微电网，并综合考虑太阳能光伏发电及其他分布式能源的接入与运行、家庭能效管理、楼宇自动化、用户分布式电源双向计量与控制等技术，建成具有自治优化能力的用户侧微电网系统。

图 1-3 为双层结构的用户侧微电网示意图。用户侧微电网配备光伏发电、并网逆变器、储能、一体化终端及中央控制器等设备。各个设备和负荷都与一体化终端进行通信，区域型微网中央控制器对所有的一体化终端进行统一管理与控制。

用户侧微电网可以按照用户类型分为多类：家庭/社区型微电网、商业楼宇型微电网、工业/园区型微电网。其中，家庭/社区型微电网的负荷规模较小，用户用电的随机性、波动性较大，具有较好的可调控性；商业楼宇型微电网的负荷功率比家庭/社区型微电网更高，具有一定的波动性，其负荷高峰期与家庭/社区型微电网不同，是由其商业特性决定的，且其负荷的可调控性不如家庭/社区型微电

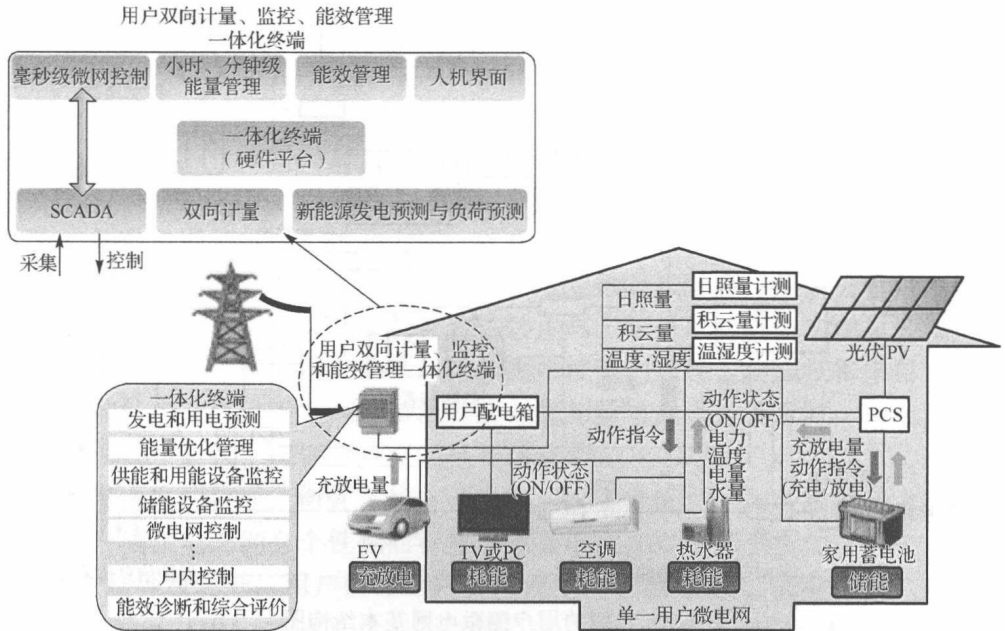


图 1-2 单层结构的用户侧微电网示意图

网灵活^[22]；相对于家庭/社区型微电网与商业楼宇型微电网，工业/园区型微电网的规模大得多，其负荷的波动性根据其企业性质而定。一般情况下，由于工业过程多班连续生产的特性，工业/园区型微电网负荷波动性较小，但某些具有冲击性负荷的工业/园区型微电网负荷波动性较大。用户侧微电网在保证用户用电质量的前提下，要尽可能提高运营效益，其运行特点体现在如下四个方面。

(1) 运行目标的多向性。在运行过程中，微电网需要根据电网侧、用户侧的信息，动态调整运行的决策方向。在电网侧供电电价变化时，要考虑如何调节用户侧负荷需求的大小^[23]；在考虑储能设备的情况下，要考虑如何调节储能的充放电功率大小及充电来源以降低用户的用电成本^[24]；在可再生能源充足时，要考虑如何提高可再生能源的利用率^[25]；在可再生能源输出随机性较大时，要考虑如何抑制微电网与常规配电网联络线间功率的波动^[26,27]；当涉及需求响应项目时，要考虑如何在提高经济性的同时保障用户的舒适度^[28]；当微电网中涉及高耗能器件时，要考虑如何提高能源的综合利用效率^[29]。

(2) 感知数据的不确定性。按常规的优化思路，在微电网 EMS 中需要对一些感知数据进行预测，以提前制订优化方案。这些数据大致可分为三类：一是微电网与用户互动相关的信息，如用户用电需求，可控负荷的可控程度参数^[30]，对空调、热水器 (electric water heater, EWH) 等大功率器件的舒适度要求^[31,32]等；二是微电网与电网互动相关的信息，如实时电价、辅助服务价格等；三是就地分布式可再生能源的输出功率等。第一、三类数据的可预测性不强，误差较大。而对于可再生能源而言，若能提供高精度的数值天气预报，可获得较好的预测效果，但会提升运营成本，经济性较差。

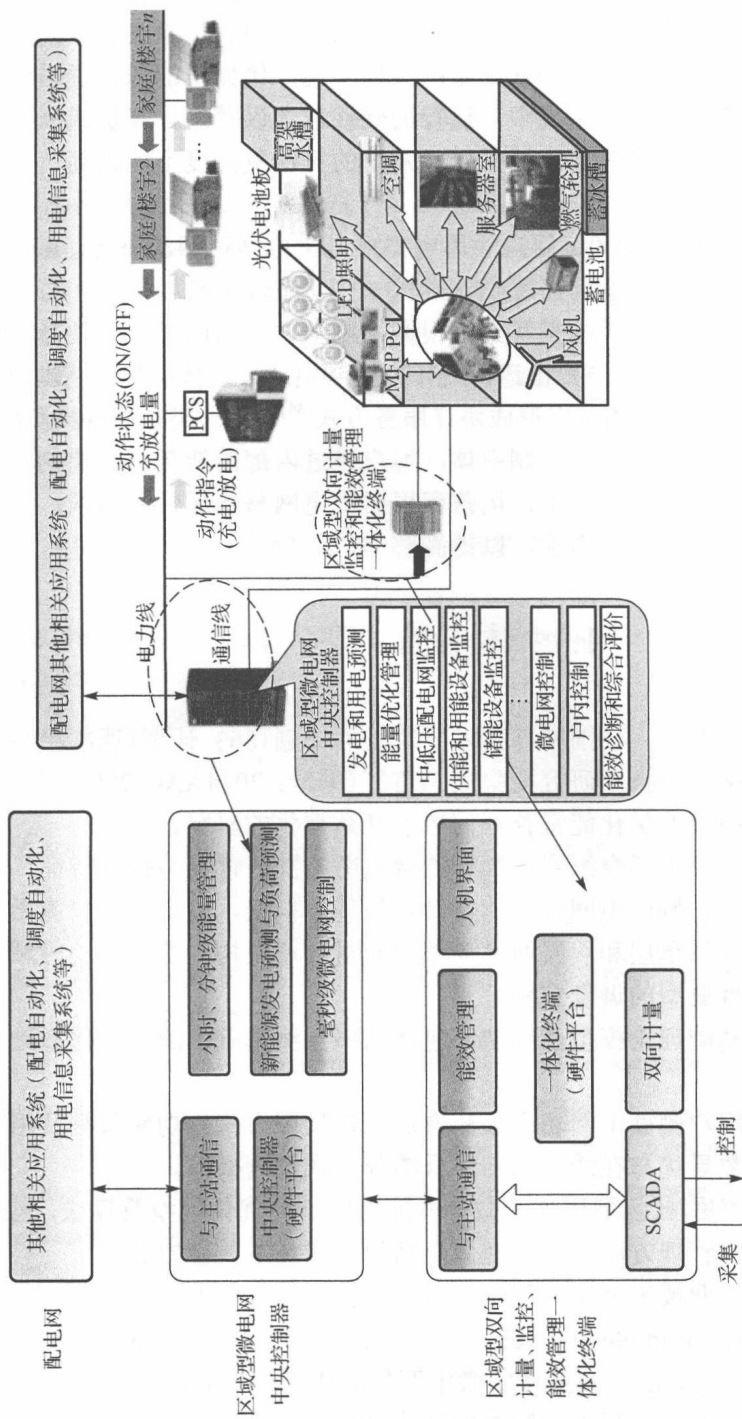


图 1-3 双层结构的用户侧微电网示意图

(3) 决策过程的实时性。智能电网环境下负荷侧能量管理系统的调度决策时间尺度通常从日前延续到分钟级^[16,33]。对于微电网的业主而言,除去必要的一次系统投资外,对二次系统总希望以一种低成本的架构实现。例如,能量管理系统以算法模块的形式集成在微电网监控系统中,运行的硬件载体以普通计算机或嵌入式终端为优。考虑到决策过程的实时性,能量管理系统的算法复杂度不能太高,需适应硬件资源约束和实时性的要求^[22]。

(4) 与用户互动的激励性。用户的用电需求是微电网可调动资源。在微电网运行过程中,根据运营情况,运营商可主动发出一些交互性的激励措施,与用户达到共同增效的目的。对负荷需求的交互方式根据控制主体分为两类:一类是直接负荷控制(direct load control, DLC),由运营商作为控制主体,可按用户的基本负荷消费量与削减负荷量与激励费率确定形成协议服务方式^[34];另一类是非直接负荷控制^[35],即价格激励方式,由用户作为控制主体,用户通过内部的能耗优化控制器,避开高电价时段用电,以减少用电成本,运营商根据微电网整体运营的需求,可通过调节电价间接引导用户调整用电需求,以提高整体运行效益。

1.3 本书的主要内容

本书基于以上背景,在国家高技术研究发展计划(863 计划)课题“基于分布式能源的智能微电网关键技术与集成示范”(编号:2014AA052001)的资助下,针对用户侧智能微电网的优化能量管理问题展开系列化的研究。

本书共 7 章,第 1 章介绍用户侧智能微电网的发展背景与技术特征。

第 2 章介绍用户侧微电网优化能量管理的基本框架,给出了用户侧微电网的类型与组成对象,介绍单层和双层两种典型的能量管理架构,给出滚动时域机制和事件触发机制等两种典型的调度策略。

第 3 章介绍基础理论模型及算法,包括功率预测基础、随机优化基础及博弈论基础。

第 4 章介绍用户侧微电网功率预测方法,包括分布式光功率预测及用户负荷预测,介绍离线参数寻优与在线预测相结合的分布式预测架构。

第 5 章介绍家庭/社区型用户侧微电网能量管理的优化模型及算法,包括家庭型微电网的在线能量管理方法、社区型微电网的在线能量共享方法。

第 6 章介绍商业楼宇型用户侧微电网能量管理的优化模型及算法,包括分布式光伏和电动汽车(plug-in electric vehicles, PEV)的商业楼宇(commercial buildings, CB)微电网实时优化方法、商业楼宇微电网群的协同优化方法。

第 7 章介绍工业园区型用户侧微电网能量管理的优化模型及算法,包括热电联

供的工业园区型微电网多工况优化运行方法、含共享储能的工业园区光伏微电网协同优化方法。

参 考 文 献

- [1] Narayanaswamy B, Garg V K, Jayram T S. Online optimization for the smart (micro) grid[C]// Third International Conference on Future Energy Systems: Where Energy. IEEE, 2012: 19.
- [2] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
- [3] 李振杰, 袁越. 智能微网——未来智能配电网新的组织形式[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 42-48.
- [4] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
- [5] 随新鲜, 王倩, 杨亚强. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电力学报, 2010, 25(1): 56-60.
- [6] Olken M. The future of microgrids: Coming to a neighborhood near you[J]. Power and Energy Magazine, IEEE, 2013, 11(4): 4-6.
- [7] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
- [8] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-238.
- [9] Zeng Z, Zhao R X, Yang H. Micro-sources design of an intelligent building integrated with micro-grid[J]. Energy and Buildings, 2013, 57: 261-267.
- [10] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
- [11] 张明锐, 杜志超, 黎娜, 等. 高压微网孤岛运行时频率稳定控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 20-26.
- [12] Zhong Q C, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [13] Zeng Z, Yang H, Zhao R X, et al. Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 24: 223-270.
- [14] 邢龙, 张沛超, 方陈, 等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12.
- [15] Huang Y, Mao S, Nelms R M, et al. Adaptive electricity scheduling in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 270-281.
- [16] 汤庆峰, 刘念, 张建华. 计及广义需求侧资源的用户侧自动响应机理与关键问题[J]. 电力系

- 统保护与控制, 2014, (24): 138-147.
- [17] 马宇辉, 刘念. 用户侧微电网的能量管理方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, (23): 158-168.
- [18] 孙宏斌, 张伯明, 吴文传, 等. 自律协同的智能电网能量管理系统家族概念、体系架构和示例[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 1-5.
- [19] Lasseter R H. Microgrids[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE, 2002: 305-308.
- [20] 李鹏, 郭晓斌, 许爱东, 等. 用户侧微电网的特征及关键技术[J]. 南方电网技术, 2015, (4): 1-6.
- [21] 葛志超, 方念, 杨凡凡, 等. 微网技术综述[J]. 电气开关, 2013, 51(3): 1-4.
- [22] Liu N, Chen Q, Liu J, et al. A heuristic operation strategy for commercial building microgrids containing EVs and PV system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2560-2570.
- [23] 王伟, 何光宇, 万钧力, 等. 用户侧能量管理系统初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 10-15.
- [24] Gudi N, Wang L, Devabhaktuni V. A demand side management based simulation platform incorporating heuristic optimization for management of household appliances[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 185-193.
- [25] Atzeni I, Ordóñez L G, Scutari G, et al. Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 866-876.
- [26] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
- [27] Byun J, Hong I, Park S. Intelligent cloud home energy management system using household appliance priority based scheduling based on prediction of renewable energy capability[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012, 58(4): 1194-1201.
- [28] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.
- [29] 王成山, 刘梦璇, 陆宁. 采用居民温控负荷控制的微网联络线功率波动平滑方法[J]. 中国电机工程学报, 2012(25): 36-43.
- [30] Tanaka K, Uchida K, Ogimi K, et al. Optimal operation by controllable loads based on smart grid topology considering insolation forecasted error[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 438-444.
- [31] Tsui K M, Chan S C. Demand response optimization for smart home scheduling under real-time pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1812-1821.
- [32] 李晖, 马瑞, 罗阳. 基于 Stackelberg 博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化[J]. 电力系

统保护与控制, 2017, 45(5): 88-95.

- [33] Hu B, Wang H, Yao S. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling devices[J]. Protection & Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 6.
- [34] Khatib T, Mohamed A, Sopian K. Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: Case study of Kuala Terengganu, Malaysia[J]. Energy and Buildings, 2012, 47: 321-331.
- [35] Chen Z, Wu L, Fu Y. Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1822-1831.