



“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源电能变换与控制技术丛书

微电网

分层运行控制技术及应用

Hierarchical Operation Control Technology
of Microgrid and Its Application

◆ 鲁宗相 闵勇 乔颖 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源电能变换与控制技术丛书

微电网分层运行控制技术及应用

鲁宗相 闵勇 乔颖 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

微电网的概念自提出以来,迅速得到了学者和工程师的关注。《微电网分层运行控制技术及应用》聚焦于微电网的运行控制技术的理论分析。全书共7章:第1章阐述微电网的概念及其运行控制多层构架系统;第2章概要介绍微电源模型与控制,包括光伏发电、风力发电机、微型燃气轮机、柴油发电机和储能装置等微电源的模型,以及恒功率控制和下垂控制等两种逆变器的主流控制策略;第3章介绍微电网的频率特性及无差调频控制;第4章分析微电源VF控制及其电压质量分析与优化;第5章介绍基于可扩展模型的微电网小干扰稳定性分析,包括分析方法、模型和算例仿真等;第6章介绍含双VF源的高供电质量微电网切换控制策略;第7章介绍基于用户侧互动的微电网优化调度策略。

本书适合微电网理论研究、工程建设和运行管理等相关领域的科技工作者阅读,也可供高等院校分布式能源与微电网相关专业的教师、研究生和高年级本科生参考。

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

微电网分层运行控制技术及应用/鲁宗相, 闵勇, 乔颖编著. —北京: 电子工业出版社, 2017. 1
(新能源电能变换与控制技术丛书)

ISBN 978-7-121-30586-3

I. ①微… II. ①鲁… ②闵… ③乔… III. ①电网-电力系统运行 IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第297890号

策划编辑: 曲 昕

责任编辑: 谭丽莎

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订: 北京京科印刷有限公司

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: 787×1092 1/16 印张: 9.75 字数: 250千字

版 次: 2017年1月第1版

印 次: 2017年1月第1次印刷

印 数: 2000册 定价: 48.00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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: quxin@phei.com.cn。

前 言

在化石能源枯竭和气候变化的现实威胁下，电力清洁化成为智能电网的重要发展方向，而清洁的可再生能源发电，如风电、光伏等，都属于能量密度较低的发电方式，集中与分布并重的模式被行业公认为未来最可能的发展模式。因此，系统地研究分布式发电和微电网成为电力技术近年来关注的新热点。目前，欧美等发达国家已开始广泛地研究能源多样化、高效、经济的分布式发电系统，并取得了突破性的进展。中国也积极开展了相关领域的研究，与发达国家齐头并进。

从系统的观点来看，微电网将发电机、负荷、储能装置及控制装置等相结合，形成了一个单一可控的单元，同时向用户供给电和热。微电网既可与大电网联网运行，也可在电网故障或需要时与主网断开单独运行，它具有双重角色：对于公用电力企业，微电网可视为电力系统可控的细胞，例如，这个细胞可以被控制为一个简单的可调度的负荷，这些负荷可以在数秒内作出响应以满足传输系统的需要；对于用户，微电网可以作为一个可定制的电源，满足用户多样化的需求，例如，增强局部可靠性、降低馈电损耗、支持当地电压，通过利用废热提高效率，提供电压下陷的校正或不可中断电源。其灵活的“可调度性”、可适时向大电网提供有力支撑、对用户高可靠性的供电保障，都成为微电网的关键技术优势。但这些优势的发挥，依赖于微电网控制技术的完善设计和应用。

本书聚焦于微电网运行控制技术方面的理论分析，共7章。

第1章是微电网的概念及其运行控制多层构架系统，首先介绍了从分布式电源到微电网的理念变迁，给出了微电网的基本结构及定义，然后从设计需求、四层构架模型的详细结构和功能描述方面详细阐述了微电网运行控制多层构架系统，最后介绍了国内外微电网技术研究动态和示范工程建设情况。

第2章是微电源模型与控制，介绍了光伏发电、风力发电机、微型燃气轮机、柴油发电机和储能装置等微电源的模型和技术特性，并对恒功率控制和下垂控制两种逆变器的主流控制策略进行了介绍和分析。

第3章是微电网的频率特性及无差调频控制，首先介绍了逆变器接口、同步发电机接口和异步发电机接口三种接口的微电源的功率特性，并进行了仿真验证；然后扩展到微电网，介绍其频率特性，并针对VF和PQ控制型逆变器组成的微电网、VF逆变器和有差型微型燃气轮机组成的微电网、多微电源-多负荷组成的复杂微电网三种不同类型进行了微电网频率特性仿真验证。在微电网的无差调频控制策略方面，分别介绍了基于VF控制的微电网无差调频控制策略和基于PQ控制的微电网无差调频控制策略，最后对其控制参数特性进行了全面分析。

第4章是微电源VF控制及其电压质量分析与优化，首先介绍了VSC型微电源的数学模型、控制策略和控制器参数设计，然后进行了微电网孤网运行的电能质量分析，并从无功补

偿装置对微电网孤网运行电压谐波的影响、非线性负载对微电网孤网运行电压谐波的影响及抑制两个角度进行了电能质量的优化分析。

第5章是基于可扩展模型的微电网小干扰稳定性分析,从小干扰稳定性分析方法、分析模型和算例仿真三方面进行了全面阐述。

第6章是含双VF源的高供电质量微电网切换控制策略,重点介绍了并网/孤网/并网切换控制策略,并分别从控制策略设计原则、实现基础、策略设计及分析等方面进行了介绍,最后给出了仿真算例。

第7章是基于用户侧互动的微电网优化调度策略,介绍了用户侧参与互动的时段平移、移峰填谷和负荷削减三个需求侧响应措施对微电网运行优化的积极作用,并从经济性、环保性、自治性及其综合四个层级对优化调度策略建立了评价模型和评价指标,最终基于一个微电网算例进行了实效评估分析。

本书希望通过上述内容勾勒出微电网分层运行控制系统的总体框架,一方面梳理微电网内部设施的主要因素及其作用机理,另一方面探讨微电网与大电网的交互影响。

本书集成了作者所在的清华大学电机系在微电网领域多年积累的大量研究成果,王彩霞、时珊珊、王阳、陈慧粉等博士深度参与了相关研究工作。本书还引述了国内外众多微电网专家、学者的部分观点,可作为从事分布式电源和微电网研究与管理的研究人员和工程技术人员的参考书。

由于作者水平有限,难免有疏漏之处,请广大读者批评指正,多多提出宝贵的意见。

作者

2016年9月

目 录

第 1 章 微电网的概念及其运行控制多层构架系统	1
1.1 从分布式电源到微电网的理念变迁	1
1.2 微电网的基本结构及定义	2
1.3 微电网运行控制多层构架系统	3
1.3.1 微电网运行控制系统的设计需求.....	3
1.3.2 运行控制系统的四层架构模型设计.....	4
1.3.3 四层架构模型各层的功能	7
1.4 国内外微电网研究动态.....	10
1.4.1 国内外的微电网示范工程.....	10
1.4.2 微电网运行控制相关技术研究现状	17
参考文献	23
第 2 章 微电源模型与控制	27
2.1 微电源模型.....	27
2.1.1 光伏发电	27
2.1.2 风力发电机	28
2.1.3 微型燃气轮机	30
2.1.4 柴油发电机	31
2.1.5 储能装置.....	31
2.2 逆变器控制.....	33
2.2.1 恒功率控制	34
2.2.2 下垂控制.....	37
参考文献	39
第 3 章 微电网的频率特性及无差调频控制	41
3.1 微电源的功频特性及其仿真验证.....	42
3.1.1 微电源的功频特性	42
3.1.2 微电源功频特性仿真验证	48
3.2 微电网的频率特性及其仿真验证.....	51
3.2.1 微电网的频率特性	51
3.2.2 微电网频率特性仿真验证	52
3.3 基于 VF 控制的微电网无差调频控制策略	56
3.3.1 基本原理.....	56
3.3.2 理论分析.....	56

3.3.3	仿真验证	60
3.4	基于 PQ 控制的微电网无差调频控制策略	62
3.4.1	基本原理	62
3.4.2	理论分析	62
3.4.3	仿真验证	64
3.5	微电网无差调频控制系统参数特性分析	66
3.5.1	无差调频控制器参数	66
3.5.2	逆变器的 PQ 控制参数	69
3.5.3	逆变器的 VF 控制参数	71
	参考文献	73
第 4 章	微电源 VF 控制及其电压质量分析与优化	74
4.1	VSC 型微电源的模型及其 VF 控制策略	74
4.1.1	物理层的主要组成部分	74
4.1.2	VSC 型微电源及其数学模型	75
4.1.3	VSC 型微电源的控制策略分析	76
4.1.4	VSC 型微电源 VF 控制策略分析及控制器参数设计	81
4.2	微电网孤网运行的电能质量分析与优化	85
4.2.1	微电网孤网运行的电能质量分析	85
4.2.2	无功补偿装置对微电网孤网运行电压谐波的影响	86
4.2.3	非线性负载对微电网孤网运行电压谐波的影响及抑制	89
	参考文献	95
第 5 章	基于可扩展模型的微电网小干扰稳定性分析	97
5.1	小干扰稳定性分析方法	97
5.2	小干扰稳定性分析模型	98
5.2.1	微电网结构	98
5.2.2	微电源坐标变换	98
5.2.3	同步发电机小干扰稳定性分析模型	99
5.2.4	异步发电机小干扰稳定性分析模型	103
5.2.5	VSC 小干扰稳定性分析模型	105
5.2.6	微电网小干扰稳定性分析模型	108
5.2.7	模型可扩展性分析	109
5.3	小干扰稳定性仿真分析	111
5.3.1	小干扰稳定性特征值分析	112
5.3.2	PQ 控制小干扰稳定性灵敏度分析	113
5.3.3	PV 控制小干扰稳定性灵敏度分析	114
	参考文献	116
第 6 章	含双 VF 源的高供电质量微电网切换控制策略	117
6.1	并网/孤网/并网切换控制策略设计原则	117
6.2	并网/孤网/并网切换过程高质量供电的实现基础	118

6.2.1 并网开关	118
6.2.2 负荷分级	119
6.2.3 孤网运行的 VF 源	119
6.2.4 两种 VF 源控制特性比较	119
6.3 并网/孤网/并网切换控制策略设计及分析	122
6.3.1 电网运行层控制流程图	122
6.3.2 VSC 切换控制策略设计	122
6.3.3 VSC 同期过程的控制策略设计	122
6.4 仿真分析	124
参考文献	129
第 7 章 基于用户侧互动的微电网优化调度策略	130
7.1 微电网优化调度功能模块	130
7.2 用户侧参与互动的需求侧响应措施	131
7.2.1 时段平移	131
7.2.2 移峰填谷	132
7.2.3 负荷削减	132
7.3 优化调度策略模型	132
7.3.1 目标 A——经济性	133
7.3.2 目标 B——环保性	136
7.3.3 目标 C——自治性	137
7.3.4 目标 D——综合	137
7.4 微电网调度性能综合评价指标	138
7.4.1 经济性指标	138
7.4.2 环保性指标	139
7.4.3 自治性指标	139
7.4.4 综合指标	139
7.4.5 用户满意度指标	139
7.5 微电网优化调度算例分析	140
7.5.1 优化调度算例结构及参数	140
7.5.2 算例结果分析	141
参考文献	146

第 1 章

微电网的概念及其运行控制多层构架系统

1.1 从分布式电源到微电网的理念变迁

为了在获得联网互济优势的同时给予用户充足的自由发展空间，智能电网的发展逐步走向了集中与分布并重的模式，分布式发电（Distributed Generation, DG）被提上了日程。分布式发电具有污染少、可靠性高、能源利用效率高、安装地点灵活等多方面优点，有效解决了大型集中电网的许多潜在问题。

目前，欧美等发达国家已开始广泛地研究能源多样化、高效、经济的分布式发电系统，并取得了突破性的进展。无疑，分布式发电将成为未来大型电网的有力补充和有效支撑，是未来电力系统的发展趋势之一。

实际上，小电源分散发电并非新概念，早期的电力系统都是规模较小的分散独立系统。随着交流高压远距离输送技术的发展，联网的规模效益日趋显著，人们开始将各分散系统连接起来并网运行。20 世纪 60 年代的几次大停电后，开始有人对集中供电提出质疑^[1,2]，但其后并未开展深入研究。20 世纪 90 年代，人们才开始对分布式系统的潜在效益展开认真的研究，并发表了大量研究成果^[3,4]。

分布式发电也称分散式发电或分布式供能，一般指将相对小型的发电装置（一般 50MW 以下）分散布置在用户（负荷）现场或用户附近的发电/供能方式。分布式电源位置灵活与分散的特点极好地适应了分散的电力需求与资源分布，延缓了输、配电网升级换代所需的巨额投资。同时，它与大电网互为备用使供电可靠性也得以改善。

尽管优点突出，但分布式电源本身存在诸多问题，例如，分布式电源单机接入成本高、控制困难等。另外，分布式电源相对大电网来说是一个不可控源，因此大系统往往采取限制、隔离的方式来处置分布式电源，以期减小其对大电网的冲击。IEEE P1547 对分布式能源的入网标准做了规定：当电力系统发生故障时，分布式电源必须马上退出运行。这就大大限制了分布式能源效能的充分发挥。为协调大电网和分布式电源的矛盾，充分挖掘分布式能源为电网和用户带来的价值与效益，在 21 世纪初，学者们提出了微电网的概念^[5-8]。

从系统的观点来看，微电网将发电机、负荷、储能装置及控制装置等相结合，形成了一个单一可控的单元，同时向用户供给电和热。微电网中的电源多为微电源，即含有电力电子界面的小型（< 100kW）机组，包括微燃气轮机、燃料电池、光伏电池，以及超级电容、飞轮、蓄电池等储能装置。它们接在用户侧，具有成本低、电压低、低污染等特点。微电网

既可与大电网联网运行，也可在电网故障或需要时与主网断开单独运行。它还具有双重角色：对于公用电力企业，微电网可视为电力系统可控的细胞，例如，这个细胞可以被控制为一个简单的可调度的负荷，这些负荷可以在数秒内做出响应以满足传输系统的需要；对于用户，微电网可以作为一个可定制电源，满足用户多样化的需求，例如，增强局部可靠性、降低馈电损耗、支持当地电压，通过利用废热提高效率，提供电压下陷的校正或不可中断电源。由于微电网灵活的“可调度性”且可适时向大电网提供有力支撑，学者形象地称之为电力系统的“好市民 (good citizen)”与“模范市民 (model citizen)”。此外，紧紧围绕全系统能量需求的设计理念与向用户提供多样化电能质量的供电理念^[9]是微电网的两个重要特征。在接入问题上，微电网的入网标准只是针对微电网与大电网的公共连接点 (Point of Common Coupling, PCC)，而不针对各个具体的微电源。微电网不仅解决了分布式电源的大规模接入问题，充分发挥了分布式电源的各项优势，还为其用户带来了其他多方面的效益。

1.2 微电网的基本结构及定义

图 1.1 是美国电力可靠性解决方案协会 (The Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS) 提出的描述微电网基本结构的示例网络，其中包括 3 条馈线 A、B 和 C 及 1 条负荷母线，整体呈辐射状结构。馈线通过主分隔装置 (通常是一个静态开关) 与配电系统相连，可实现孤岛及并网运行模式的平滑切换。PCC 所在的位置，一般选择为配电变压器的原边侧或主网与微电网的分离点。美国 IEEE P1547 标准草案规定，在 PCC 处，微电网的各项技术指标必须满足预定的规范。负荷端的馈线电压通常是 480V 或更低。

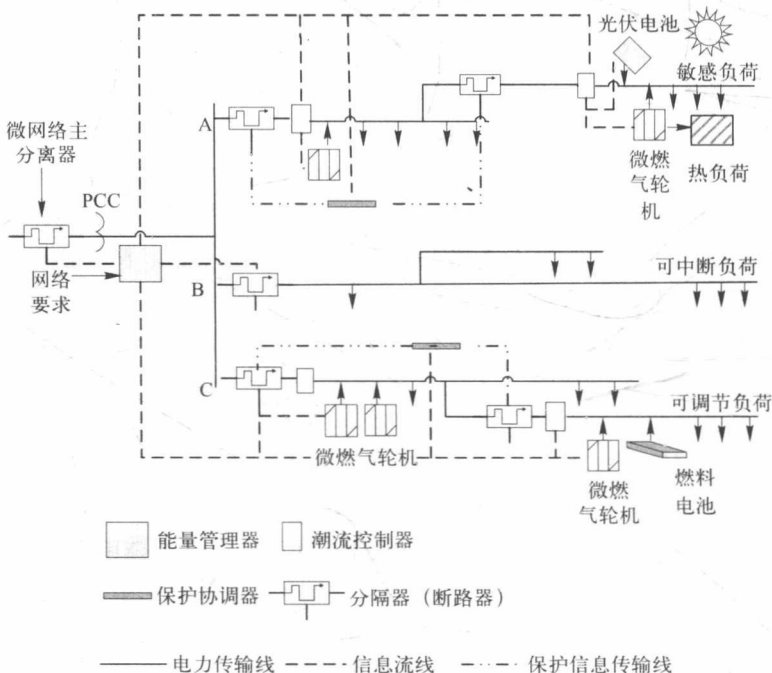


图 1.1 CERTS 微电网结构图

图 1.1 中展示了光伏发电、微燃气轮机和燃料电池等微电源形式,其中一些接在热力用户附近,为当地提供热源。微电网中配置有能量管理器和潮流控制器,前者实现对整个微电网的综合分析控制,而后者实现对微电源的就地控制。当负荷变化时,潮流控制器根据本地的频率和电压信息进行潮流调节,当地的微电源就增加或减少其功率输出以保持功率平衡。

图 1.1 还示范了对三类不同供电质量要求的负荷的个性化微电源供电方案。连接在馈线 A 上的敏感负荷采用光伏电池供电,连接在馈线 C 上的可调节负荷采用燃料电池和微燃气轮机混合供电,而连接在馈线 B 上的可中断负荷没有设置专门的微电源,直接由配电网供电。这样,对于敏感负荷和可调节负荷都是双源供电模式,当外部配电网故障时,馈线 A、C 上的静止开关会快速动作使重要负荷与故障隔离且不间断正常供电,而对于馈线 B 上的可中断负荷,系统则会根据网络功率平衡的需求,在必要的时候切除。

该结构初步体现了微电网的基本特征,也揭示出微电网中的关键单元:(1) 每个微电源的接口、控制;(2) 整个微电网的能量管理器,解决电压控制、潮流控制、解列时的负荷分配、稳定及所有运行问题;(3) 继电保护,包括各个微电源及整个微电网的保护控制。

微电网虽然也是分散的供电形式,但它绝不是对电力系统发展初期的孤立系统的简单回归。微电网采用了大量现代先进电力技术,如快速的电力电子开关与先进的变流技术、高效的新型电源及多样的储能装置等,而原始的孤立系统根本不具有这样的技术水平。此外,微电网与大电网是有机的整体,可以灵活地连接与断开,其智能性与灵活性远在原始孤立系统之上。

1.3 微电网运行控制多层构架系统

由于地理环境、电网结构和用户需求的差异,微电网的网络拓扑和电源配置各不相同。如何设计一种具有通用性的运行控制系统,以协调微电网内各类微电源之间的运行,提高微电网的统筹调度能力,提高终端用户的供电质量及突发事件下对用户的持续供电能力,响应用户侧需求并改善微电网的经济效益和节能减排效益,是本节着重解决的问题。

本节以微电网提出时所期望具有的特性为切入点,通过深入分析微电网与大电网的差异,对不同时间尺度的微电网运行控制问题进行分解,并按实现功能将微电网运行控制系统分为物理层、电网运行层、分析决策层和用户应用层。所提出的运行控制系统通过对数据信息进行分层筛选,能适应微电网的多工况需求。

1.3.1 微电网运行控制系统的设计需求

2002 年美国电力可靠性解决方案协会 (CERTS) 提出的微电网概念中指出,微电网应具有双重角色:对于大电网而言,希望将微电网视为一个“单一可控单元”,以便在数秒内做出响应以满足对大电网辅助服务的需要;对于用户而言,希望微电网是一个“优良的电能供给者”,并且可作为一个可定制电源,以满足用户多样化的用电需求。

微电网运行控制系统 (Operation & Control System) 相当于微电网的指挥中心,对微电网运行过程进行实时监控、调度和管理,其目标是使微电网真正具有双重角色,对内能够协调微电源和负荷,对外能够为大电网提供辅助服务。

虽然大电网的运行控制已经积累了大量的经验,但由于微电网和大电网存在较大差异,

使得大电网运行控制的方法和经验很难直接应用在微电网中。通过对大量相关文献和国内外微电网实验室系统、示范系统的调研,编者总结出除了“微”这个字面特点外,目前微电网的和电网的差异还包括以下几方面。

(1) 微电网内微电源种类较多,且特性差异较大^[10]。微电源接口既有同步发电机,也可能有异步发电机和大量电力电子装置。相对于主要以同步发电机作为电源的大电网,微电源的多样性使得微电网的分析要复杂很多。

(2) 微电网具有多种运行模式。微电网既可与大电网并网运行,也可在大电网故障或其他特殊需求时脱离大电网独立运行,因此存在并网、孤网及两者之间的切换多种运行模式。

(3) 微电源控制策略丰富,控制灵活度高。微电网中的大部分微电源都是通过电力电子装置并网的。电力电子变换器的控制策略比较灵活,不仅具有基本的有功和无功功率控制功能,同时在孤网运行模式下,能够根据自身容量,按比例承担负荷,并参与微电网的电压和频率调节。

(4) 微电网的电能质量问题突出。由于电网容量(特别是孤网运行情况下)相对较小,并且非线性负载数量很大,使得微电网中的电能质量问题非常突出。

微电网发展的时间比较短,实践经验相对比较缺乏,目前还没有一套成熟的运行控制系统。根据大电网对微电网双重角色的期望及微电网自身的特点,微电网运行控制系统的设计需求主要包括以下几点。

(1) 将微电网变成一个“单一可控单元”。对于大电网来说,希望微电网作为一个可控单元,而不用通过大电网对每个微电源发布指令,使得微电网能快速响应大电网的需求。

(2) 覆盖微电网运行的各个方面。在微电网运行过程中,涉及的问题很多,如微电源控制、电能质量、微电网不同运行模式之间的平滑过渡、微电网的并网控制和孤网控制、能量管理、运行方式优化、保护等。

(3) 实现微电网安全、经济运行。提高供电可靠性和用电经济性是微电网提出的初衷,将更利于公众更好地接纳微电网,使其具有实际应用价值。

(4) 实现用户互动。在当前智能电网发展背景下,将用户侧需求考虑在内进行需求侧响应,将有利于提高微电网的智能化程度,成为用户与供电公司间实现能量流互动的智能化桥梁。

基于以上四点设计需求,本节提出了一种具有通用性的微电网运行控制系统结构,能够将这些需求融入一个大的框架中,使其覆盖的范围更加广泛,适用于网络拓扑不同、电源配置不同的各种微电网。

1.3.2 运行控制系统的四层架构模型设计

由于微电网的被控对象数量大、特性复杂,时间尺度也各不相同,如果将所有的功能平行展开,整个系统的效率将会大大降低。而分层控制将管理组织分为不同的层级,各个层级在服从整体目标的基础上,相对独立地开展控制活动,使得控制系统的功能更明确,效率更高。

1. 四层架构模型的分层方法

微电网运行控制系统有多种分层方法，本节提出的四层架构模型主要依据时间尺度和实现功能将微电网运行控制系统分成四层：物理层、电网运行层、分析决策层和用户应用层，如图 1.2 所示。

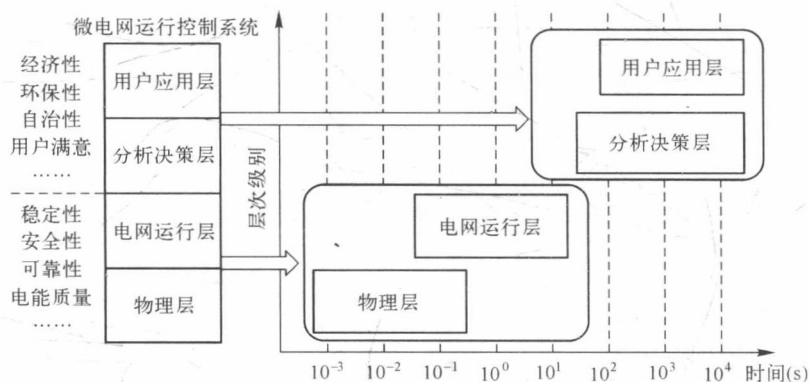


图 1.2 四层架构模型的总体框图和时间尺度

四层架构模型中，物理层负责各个微电源和负荷的实时运行；电网运行层负责维持微电网的安全稳定运行；分析决策层负责微电网的优化运行，让微电网实现效益最大化；用户应用层将用户需求考虑在内，方便实现用户侧互动。每层的大概时间尺度范围可从图 1.2 中看出。

每层的功能相对独立，下层对上层隐藏细节，但提供相应的接口供上一层使用。各层利用下层的上传信息和上层的下发指令在层内进行独立分析计算，并完成信息指令的转发。从大的框架上来看，四层架构可以分成两个功能组：下面两层使微电网成为单一可控单元，重点在微电网的稳定、安全和电能质量等方面；上面两层实现微电网智能化，重点在微电网的经济性、用户互动等方面。

2. 四层架构模型的实现方法

在微电网中信息是双向交互的，且电力电子设备对通信的实时性要求非常高，因此运行控制系统各层之间的通信要能满足双向性和实时性的要求。图 1.3 给出了运行控制系统四层架构模型实现方法的结构框图。

图 1.3 中，物理层和电网运行层进行元件级控制，分析决策层和用户应用层进行系统级控制，与配电网的通信是通过分析决策层实现的，用户则通过用户应用层参与微电网的管理。

3. 四层架构模型的优势

相比其他分层方法，四层架构模型的优势如下。

(1) 将微电网变为单一可控单元。采用四层控制系统后，配电网仅需通过分析决策层对电网运行层下发决策指令，将微电网看作一个整体而无须对每个微电源或负荷进行管理，使得微电网从真正意义上变为了一个单一可控单元。

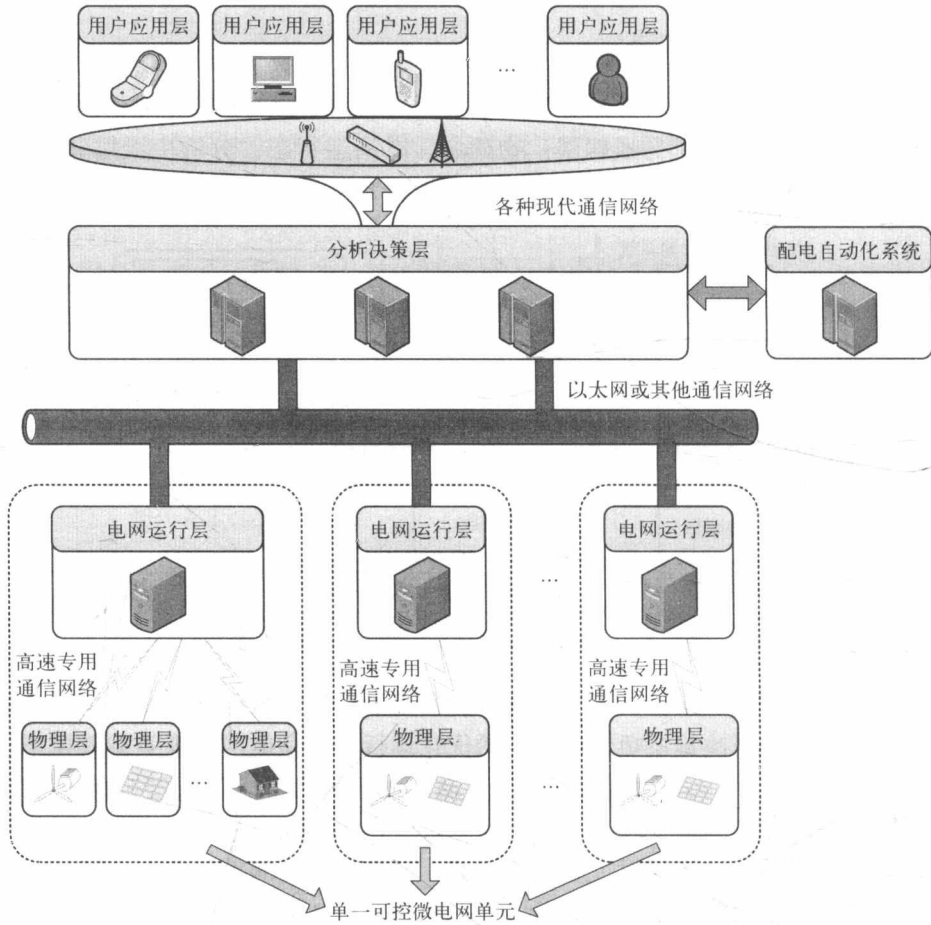


图 1.3 运行控制系统四层架构模型的实现方法

(2) 提高重要用户的供电可靠性。四层控制系统将电网运行层和分析决策层分开控制，电网运行层和物理层通过高速实时通信保证微电网的安全可靠运行，即使分析决策层和电网运行层的通信线路出现故障，仅使微电网无法以最优方式运行，但靠电网运行层仍能保证对重要用户的可靠供电。

(3) 提高微电网的经济性。由于搭载电网运行层的硬件设备一般安装在微电源和负荷侧附近，加装高速通信线路长度较短，成本较低；而分析决策层和电网运行层之间的通信线路虽然很长，但对速度要求较低，如此不用对每个微电源加装较长的高速实时通信线路，使得微电网的经济性大大提高。

(4) 考虑用户需求。在所提出的四层控制系统中新增了用户应用层，为用户提供了管理接口，方便用户了解微电网运行状态，并能实现自身需求。

(5) 实现信息双向互动，数据分类和剥离。通过用户参与、微电网与配电网协调，可实现信息在用户、微电网和配电网之间的双向互动。微电网中控制变量丰富、电源特性不一致及负荷参与的特点，使其数据信息极为庞大，采用分层控制后，通过对数据信息分类可让不同层级提取本层有效信息，剥离冗余信息。

(6) 可移植性强。当多个微电网存在于配电网或微电网中有多个单元同时存在时，仅

需通过分析决策层协调各个微电网。

1.3.3 四层架构模型各层的功能

微电网运行控制系统四层架构模型中的各层功能如图 1.4 所示。



图 1.4 四层架构模型各层功能详图

1. 物理层

物理层包括各类微电源（Micro Sources）、储能装置（Storage）、各类负荷、并网开关、微电源控制器、保护装置和各类传感器。物理层实现的功能如下。

(1) 微电源控制。微电源控制器接收电网运行层发出的指令来设定微电源的控制模式和控制策略。并网运行的微电源一般工作在恒定功率控制模式下。而孤网运行时，系统内可控电源将根据电网运行层下发的指令切换到孤网电压频率控制模式，控制对象转变为输出端电压和频率。孤网控制一般采用基于本地信息的分散控制模式，这种控制方式能主动抑制外界的扰动，有效保证微电源的安全稳定运行。

(2) 并网开关控制。并网开关控制器检测大电网的运行状态, 将大电网的运行状态传送到电网运行层, 接收并识别由电网运行层发来的并网或孤网指令, 进而控制微电网并网或孤网运行。

(3) 负荷控制。在物理层, 微电网的控制系统根据用户的要求、负荷的等级、供电系统的电能质量和可靠性来制定负荷控制策略。在物理层内, 重要负荷需要保证不间断供电, 不重要负荷可以装上负荷控制器, 接收电网运行层的控制指令从而控制负荷的投切。若负荷对电能质量要求较高, 则需要加装相应的补偿装置以提高供电可靠性。各个负荷均需要安装智能电表, 实时将负荷信息传送到电网运行层。

(4) 保护。微电网的各条线路都装有继电保护装置, 并配有元件保护装置以形成微电网的保护系统。在并网、孤网运行方式下, 微电网的保护有所不同, 但都需保证保护的选择性、快速性、灵敏性与可靠性。

(5) 电能质量监控和分析。电能质量监控和分析模块监控微电网中的谐波、电压波动等电能质量问题, 并对其进行分析, 找出影响电能质量的原因。

(6) 信息交互。物理层负责向电网运行层提供微电网各元件的运行状态, 并接收电网运行层发送给可控单元的指令。运行状态包括微电网电压、频率、微电源发出的功率和负荷用电量等信息。

物理层经过封装之后, 对上一层而言, 微电网中硬件的具体信息将被透明化, 方便上一层进行调度操作及信息交换。

本书分析了微电网物理层的两方面问题: VSC 型微电源的 VF 控制策略和微电网孤网并采用 VSC 作为 VF 源时电压谐波的来源及其抑制方法。

2. 电网运行层

物理层的上一层是电网运行层, 电网运行层根据物理层的状态信息, 结合分析决策层下发的运行目标, 对整个微电网的运行状态进行控制, 其实现的功能主要包括以下几项。

(1) 小干扰稳定性分析。利用小干扰稳定性分析模块优化微电源的控制器参数, 计算各微电源输出功率的稳定裕度和下垂线斜率的稳定范围。

(2) 控制策略和运行点设定。根据物理层上传的信息判断微电网的运行模式, 调整各可控微电源控制策略及运行点, 设定各微电源的控制参数, 保证微电网在不同模式下运行的稳定性。

(3) 切换控制策略制定。制定微电网从并网到孤网和孤网到并网的切换控制流程, 保证切换过程的平滑和平稳。

(4) 短路电流计算。计算各种运行方式下的短路电流, 用于校核开关切断容量和调整继电保护定值, 调整各元件和线路保护的配合方式。

(5) 潮流计算。潮流计算用于联合调整微电网中各微电源的有功功率、无功功率, 并向短路电流计算、安全约束调度等模块提供预想运行方式。

(6) 安全约束调度。孤网运行时, 当潮流计算检查出支路过负荷时, 将启动安全约束调度模块调整各电源和储能的发电功率以解除过负荷状态, 过载严重时考虑切除部分负荷。

(7) 信息交互。将微电网的运行方式、负荷用电量和微电源出力稳定裕度等信息上传

至分析决策层；将并网开关控制信号、微电源运行模式及控制参数设定值、下垂线斜率、投切负荷量等指令下发到物理层。

电网运行层采用集中控制的方式，通过高速专用通信网络对物理层各部分进行实时控制，并检测整个微电网的运行状态。对分析决策层而言，电网运行层仅提供微电网的运行信息。

本书分析了电网运行层的两方面问题：构建可扩展模型对微电网进行小干扰稳定性分析；设计双VF源的微电网并网/孤网/并网的切换控制流程以实现微电网切换过程的高质量供电。

3. 分析决策层

分析决策层在电网运行层之上，是微电网实现自身优化控制并与大电网进行智能协调控制的核心部分，在微电网内、各微电网之间及微电网和大电网互联的范围内对全网的运行目标进行分析、优化和决策。

当配电网中有多个微电网时，或微电网有多个分散单元时，可以将它们的分析决策层合并，以对多个微电网或微电网中的多个单元进行协调控制；也可以将分析决策层置于配电网调度自动化系统中。分析决策层实现的具体功能包括以下几项。

(1) 制订日发电计划。根据配电自动化系统下发的决策目标，结合微电网内部的控制要求、微电网的运行模式、电源和负荷预测结果，并考虑用户侧的需求侧响应，确定各电源和储能协调发电计划。

(2) 机组经济组合。确定1天内各时刻的电源和储能启停计划，在满足负荷、备用和电源限制的条件下，使控制周期内实现所定决策最优。

(3) 微电网性能评估。通过评估指标对不同优化目标下的指标进行量化，可用来评估微电网的性能，主要包括经济性、环保性、用户满意度等。

(4) 需求侧响应。微电网的需求侧响应包括两个方面，一方面是响应用户需求，另一方面是微电网自身作为一个整体响应配电网需求。当配电网中包含多个微电网时，每个微电网的分析决策层应能响应配电自动化系统的指令，实现对配电网的需求侧响应。

(5) 信息交互。分析决策层将分离出的用电信息、重要用户的用电建议等上传至用户应用层；将发电计划、机组组合等下发到电网运行层；将微电网的运行模式、决策目标、评估结果等上传至配电自动化系统。

本书在分析决策层制定了一套综合评价指标，在考虑用户侧需求和间歇性电源特性的基础上建立了微电网优化调度策略，并评估了各种策略下微电网的性能。

4. 用户应用层

用户应用层位于微电网运行控制系统的最顶层，是用户参与微电网管理的接口。在分布式发电系统中，大部分微电源都隶属于各独立的用户，如分布式屋顶太阳能发电装置、储能装置等。对负荷的调度也需要根据用户的要求进行，以提高用户的满意程度。因此，当微电网需要控制各个微电源及负荷时，必须得到用户的许可，并按照用户的要求进行控制。

用户可根据分析决策层提供的用电信息、实时电价信息、用电建议并结合个人需求来自主选择可控范围的微电源和负荷的控制模式。用户的指令将传送到分析决策层。信息技术的