

微电网系统优化运行

WEI DIANWANG XITONG YOUHUA YUNXING JI QI KONGZHI CELÜE

及其控制策略

王凌云 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

微电网系统优化运行 及其控制策略

王凌云 著

常州大学图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

随着智能电网的发展,微电网及其技术已成为各国关注的热点。

本书主要对微电网系统优化运行及其控制策略进行了研究,主要内容包括:微电网及其发电系统、微电网系统的运行与控制、微电网的调频优化控制、微电网的稳态与暂态分析、多智能体系统及其在微电网中的应用、微电网系统的多能优化调度、微电网的发展前景等。

本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,是一本值得学习研究的著作,可供从事微电网系统研究的科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

微电网系统优化运行及其控制策略 / 王凌云著. —
北京:中国水利水电出版社, 2018.2
ISBN 978-7-5170-6315-5

I. ①微… II. ①王… III. ①电网—电力系统运行
IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第031767号

书 名	微电网系统优化运行及其控制策略 WEI DIANWANG XITONG YOUHUA YUNXING JI QI KONGZHI CELÜE
作 者	王凌云 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京亚吉飞数码科技有限公司
印 刷	北京一鑫印务有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16开本 17.75印张 230千字
版 次	2018年5月第1版 2018年5月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	85.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着电力需求的不断增长,大电网(或称公用电网)在过去数十年里体现出来的优势使其得以快速地发展,成为主要的电力供应渠道。然而,集中式大电网也存在一些弊端:成本高,运行难度大,难以满足用户越来越高的安全性和可靠性要求。尤其是近几年来,世界范围内接连几次发生大面积停电事故,大电网的脆弱性充分地暴露出来,特别是在发生自然灾害、电网事故的紧急情况下,军工、医院、金融等系统突然断电造成的不仅是经济损失,还会危及社会的安全和稳定。因此,人们开始对电力系统的发展模式另辟蹊径。2003年北美大停电以后,国际上的专家们得出了一个结论——发展分布式电源比通过改造电网来加强安全更加简便、快捷。我国2008年1月南方雪灾的教训也说明在继续发展集中式大机组的同时,要注重在负荷中心建设足够的分布式电源,以便在出现非常规灾害或者战时攻击情况下,保证居民最小能源供应和最基本生活条件,并将这种电源作为保障电网安全的重要设施和手段,其成本应纳入整个电网运营成本当中。分布式发电具有污染少、能源利用率高、安装地点灵活等优点,并且与集中式发电相比,节省了输配电资源和运行费用,减少了集中输电的线路损耗。分布式发电可以减少电网总容量,改善电网峰谷性能,提高供电可靠性,是大电网的有力补充和有效支撑。近20年来,大部分国家已经把分布式发电提上了日程,人们开始对分布式发电系统的潜在效益展开认真研究。无疑,分布式发电是电力系统的发展趋势之一。

为使分布式发电得到充分利用,一些学者提出了微型电网

(Micro-Grid, 简称“微网”)的概念。现有研究和实践表明,将分布式发电供能系统以智能微电网的形式接入大电网并网运行,并与大电网互为支撑,是发挥分布式发电供能系统效能的最有效方式。智能微电网是指由分布式电源、储能装置、能量变换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统,是一个能够实现自我控制、自我保护和自我管理的自治系统,既可以与大电网并网运行,也可以孤立运行。多个智能微电网在现有的主、骨干电力网络的基础上,能构成一个相互对等的、能量相互流通的、即插即用的新能源互联网,美国未来学家杰里米·里夫金在其《第三次工业革命》一书中提到新能源互联网是第三次工业革命的重要支柱,是 21 世纪新的财富大金矿,众多的资深预测家预测下一轮世界首富将产生于新能源互联网中。

微电网因其发电形式多样、供电方式灵活而成为大电网的有益补充,但微电网的很多基础运行问题都与传统大电网有所不同,需要专门加以研究。

本书在国家自然科学基金(51407104)资助下,围绕微电网系统的优化运行及其控制策略为中心组织内容。本书共 8 章。第 1 章为引言,第 2 章为微电网及其发电系统,第 3 章为微电网系统的运行与控制,第 4 章为微电网的调频优化控制,第 5 章为微电网的稳态与暂态分析,第 6 章为多智能体系统及其在微电网中的应用,第 7 章为微电网系统的多能优化调度,第 8 章为微电网的发展前景。

本书在撰写过程中以作者在微电网系统方面的研究工作为基础,参考并引用了国内外专家学者的研究成果和论述,在此向相关内容的原作者表示诚挚的敬意和谢意。

由于作者水平有限,加之时间仓促,错误和遗漏在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2018 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 引 言	1
1.1 分布式发电	1
1.2 微电网的概念及特点	2
1.3 国内外微电网的发展状况	10
1.4 微电网中的关键技术研究	19
第 2 章 微电网及其发电系统	25
2.1 微电网的结构与分类	25
2.2 光伏发电系统	33
2.3 风力发电系统	34
2.4 微电网的储能	36
2.5 微电网的典型负荷模型	38
第 3 章 微电网系统的运行与控制	47
3.1 微电网的运行模式	47
3.2 独立微电网三态控制	49
3.3 微电网的逆变器控制	54
3.4 微电网的并离网控制	61
3.5 微电网的优化控制	67
第 4 章 微电网的调频优化控制	85
4.1 微电网的功频特性和频率特性	85
4.2 微电网无差调频控制	92
4.3 基于双项补偿环的微电网控制	103
4.4 微电网的电能质量以及经济运行优化	123

第 5 章 微电网的稳态与暂态分析	130
5.1 微电网稳态分析	130
5.2 微电网电磁暂态分析	143
5.3 微电网暂态稳定性分析	148
5.4 微电网小扰动稳定性分析	153
第 6 章 多智能体系统及其在微电网中的应用	164
6.1 多智能体系统概述	164
6.2 粒子群优化算法	175
6.3 多智能体结构的粒子群优化算法	183
6.4 基于混沌的多智能体粒子群算法	187
6.5 多智能体粒子群优化算法在微电网中的应用	190
第 7 章 微电网系统的多能优化调度	202
7.1 多能互补的微电网系统结构	202
7.2 微电源及储能单元的数学模型	211
7.3 多能互补微电网的电源优化配置	213
7.4 孤岛微电网的电能调控规划	217
7.5 基于改进粒子群算法的算例分析	231
第 8 章 微电网的发展前景	236
8.1 微电网的展望	236
8.2 微电网参与市场竞价	240
8.3 微电网的智能化	265
主要参考文献	271

第 1 章 引 言

电力作为重要的二次能源,具有清洁、高效、方便使用的优点,是能源利用最有效的形式之一。通过电能的形式加以传输和利用是可再生能源开发的主要形式之一。当前,作为集中式发电的有效补充,分布式发电及其系统集成技术正日趋成熟,随着成本不断下降以及政策层面的有力支持,分布式发电技术正得到越来越广泛的应用。

1.1 分布式发电

分布式发电(Distributed Generation, DG)是指满足终端用户的特殊需求、接在用户侧附近的小型发电系统,是存在于传统公共电网以外,能发电的任何系统。DG 包括内燃机、微型燃气轮机、燃料电池、小型水力发电系统、太阳能、风能、垃圾及生物能发电等的发电系统。

各种分布式电源的并网发电对电力系统的安全稳定运行提出了新的挑战,一些分散的小容量分布式电源对于系统运行人员而言往往是“不可见”的,而一些集中的大型分布式电源又通常是“不可控”或“不易控”的。正像大容量风电场或大容量光伏电站的接入会对输电网的安全稳定运行带来诸多影响一样,当中低压配电系统中的分布式电源容量达到较高的比例(即高渗透率)时,要实现配电系统的功率平衡与安全运行,并保证用户的供电可靠性和电能质量也会有一定困难。独自并网

的分布式电源易影响周边用户的供电质量,分布式发电技术的多样性增加了并网运行的难度,同时实现能源的综合优化面临挑战,这些问题都制约着分布式发电技术的发展。阻碍分布式发电获得广泛应用的难点不仅是分布式发电本身的技术壁垒,现有的电网技术也还不能完全适应高比例分布式发电系统的接入要求也是一大限制因素。

分布式发电有很多优点,但控制困难,由于分布式发电的不可控及随机波动性,增加分布式发电的接入容量,同时也增加了对电网的影响,即提高分布式发电的渗透率带来对电网稳定的负面影响。分布式发电对电网来说是不可控电源,目前对分布式发电多采用限制、隔离的方式以减少对电网的冲击,IEEE 1547《分布式电源与电力系统互联标准》(IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems)规定,当电力系统发生故障时,分布式电源必须退出运行。微电网把分布式发电、储能装置、负荷通过控制系统协调控制,形成单一可控电源,直接接在用户侧。

1.2 微电网的概念及特点

为了有效解决电网与分布式电源之间的问题和矛盾,充分发挥分布式电源的优势,进一步提升电力系统的运行性能,微电网应运而生。

1.2.1 微电网的概念

微电网(Micro-Grid, MG)是由分布式发电、负荷、储能装置及控制装置构成的一个单一可控的独立发电系统。微电网中DG和储能装置并在一起,直接接在用户侧。对大电网来说,微电网可视为大电网中的一个可控单元;对用户侧来说,微电网可满足用户侧的特定需求,如降低线损、增加本地供电可靠性。微电

网是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统,既可以与外部电网并网运行,也可以孤立运行。典型微电网示意如图 1-1 所示。

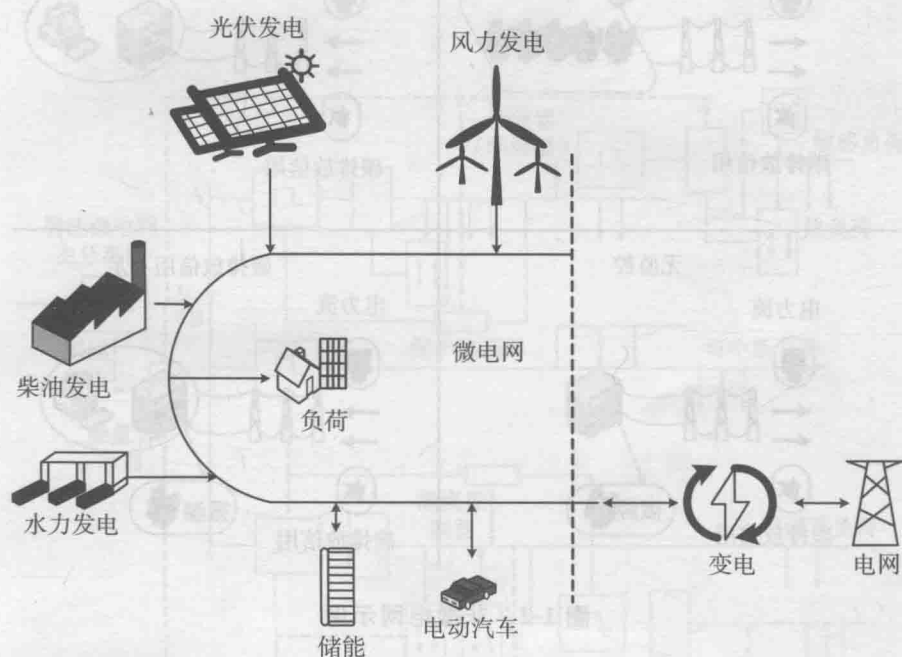


图 1-1 微电网示意图

在图 1-2 中,微电网的概念将通过示例进一步澄清,它明显包括 3 个基本特征,即就地负荷、就地微源和智能控制。许多国家还规定了应用可再生能源(RES)和小型的千瓦级的热电联产(CHP)技术的碳排放信用约束来激励环境保护,因此碳排放信用也应成为微电网的一个特征。如果缺乏一个或几个特征,那么不再是微电网的概念,而更适宜描述为分布式电网(DG)并网或者需求侧集成(DSI)。

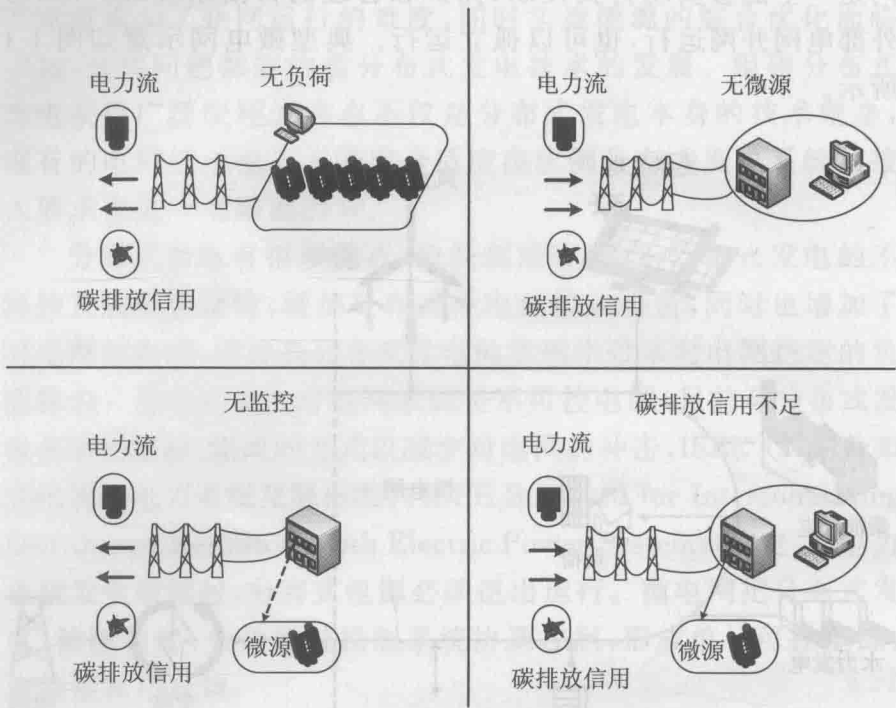


图 1-2 非微电网示例

美国电力可靠性技术解决方案协会(The Consortium for Electric Reliability Technology Solution, CERTS)认为微电网组成一定包含负荷和微电源,即使发生故障,微电网也能够依靠自身电能进行工作,可同时满足用户用电控制和用电安全两个方面的需求。

美国 CERTS 针对智能微电网的定义,给出了相应的智能微电网的结构,如图 1-3 所示。

从智能微电网的定义中可以看出,智能微电网与单纯的分布发电并网网络的主要区别在于智能微电网中拥有集中管理单元,使得各分布式电元、负荷与电网之间不仅存在电功率的交互,还存在通信信息、控制信息及其他信息的检测与交互,具体的区别如图 1-4 和图 1-5 所示。

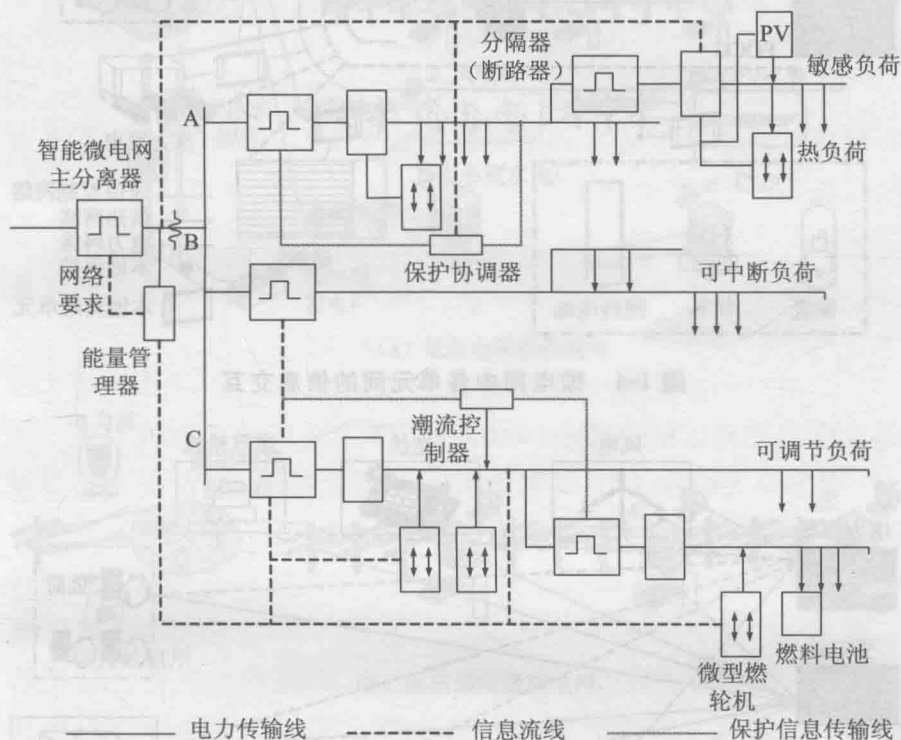


图 1-3 美国电力可靠性技术解决方案协会智能微电网结构

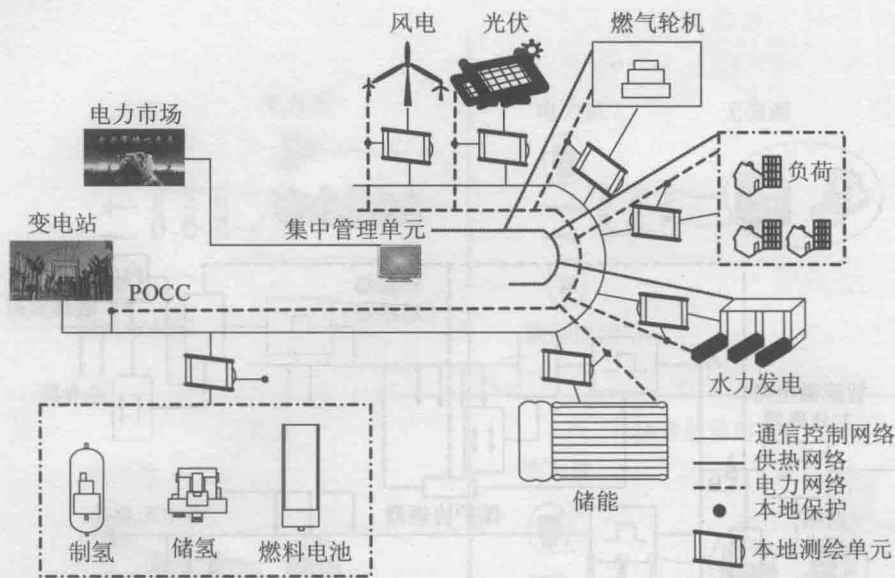


图 1-4 微电网中各单元间的信息交互

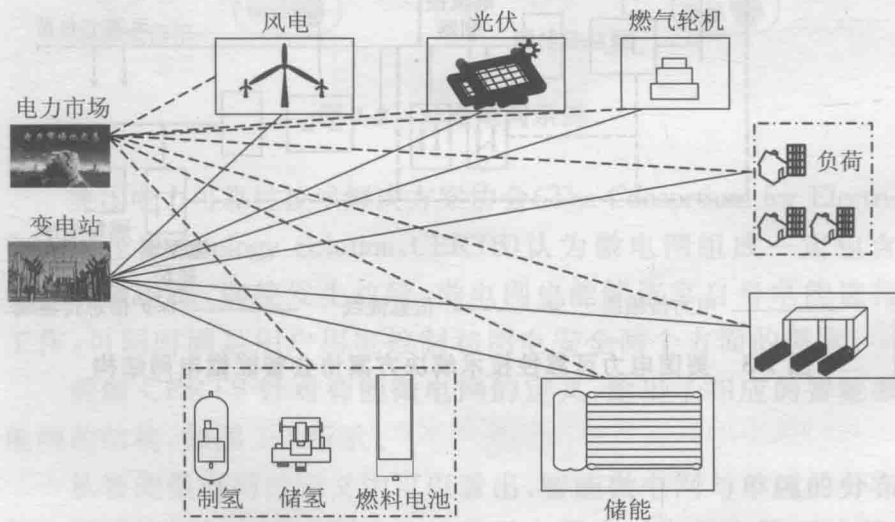
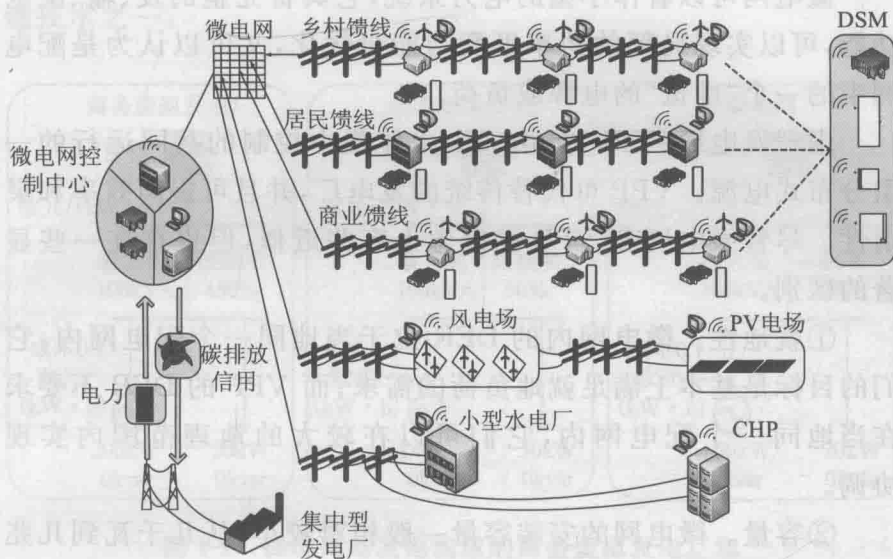
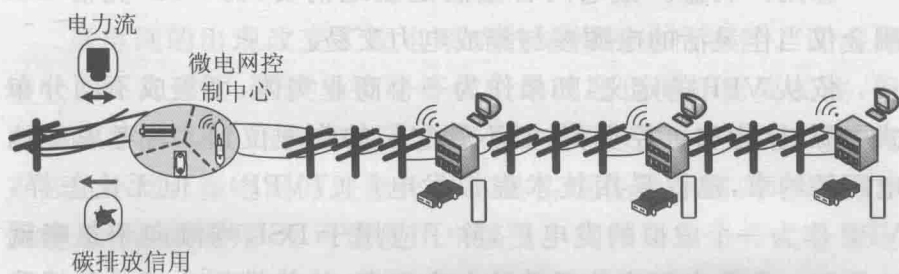


图 1-5 传统分布式发电网络中各单元间的信息交互

微电网可以存在不同的规模：可以定义为一个低压电网、一条低压馈线或者是一栋低压配电的房子，如图 1-6 所示。



(a) 低压电网级微电网



(b) 低压馈线级微电网



(c) 低压房屋级微电网

图 1-6 微电网示例

微电网可以看作小型的电力系统,它具备完整的发、输、配电功能,可以实现局部的功率平衡与能量优化,又可以认为是配电网中的一个“虚拟”的电源或负荷。

虚拟发电厂(VPP)是由一个主体集中控制的共同运行的一组分布式电源。VPP可代替传统的发电厂,并且可提高效率 and 灵活性。尽管微电网和VPP在概念上有些近似,但也存在一些显著的区别。

①就地性。微电网内的DER位于当地同一个配电网内,它们的目标是基本上满足就地负荷的需求;而VPP的DER不要求在当地同一个配电网内,它们可以在较大的地理范围内实现协调。

②容量。微电网的安装容量一般相对较小(从几千瓦到几兆瓦),而VPP的额定功率更大。

③用户利益。微电网着重满足就地消费,而VPP凭借DSI酬金仅当作灵活的电源参与集成电力交易。

依从VPP的定义,如果作为一个商业实体,可集成不同分布式电源、储能和可控负荷,而不管它们的物理位置。若考虑就地电网的约束,建议采用技术虚拟发电厂(TVPP)。但无论如何,VPP作为一个虚拟的发电厂,除了应用于DSI,均倾向于忽略就地消费。而微电网定位于就地电力消费,给终端用户提供就地购买或从上游电力市场购买电力的选择。这会将微电网导向更高的可控性,如图1-7所示,微电网内的发电与用电资源同时得到优化,使DG获得更高的收益率。

微电网技术的提出旨在中、低压层面上实现分布式发电技术的灵活、高效应用,解决数量庞大、形式多样的分布式电源并网运行时的主要问题,同时由于具备一定的能量管理功能,并尽可能维持功率的局部优化与平衡,可有效降低系统运行人员的调度难度。特别地,联网型微电网的独立运行模式可以在外部电网故障时继续向系统中的关键负荷供电,提高了用电的安全性和可靠性。在未来,微电网技术是实现分布式发电系统大规模应用的关键。

键技术之一。

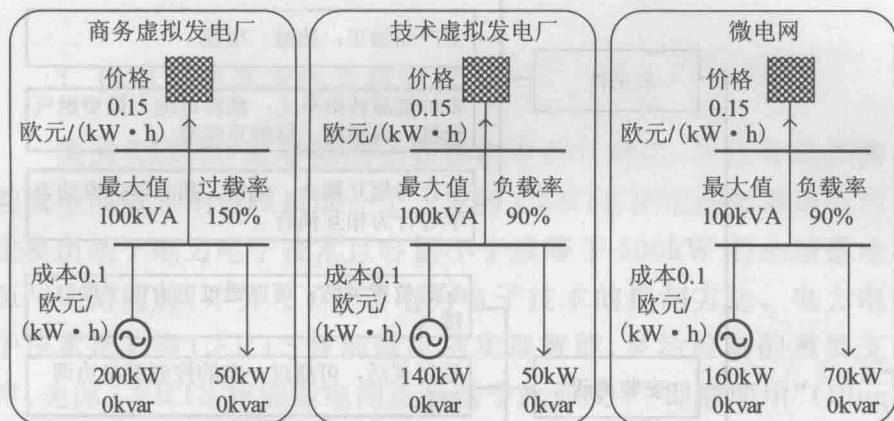


图 1-7 微电网与发电集成的商务虚拟发电厂和技术虚拟发电厂的优势对比

微电网的出现改变了配电系统的结构和运行特性。许多与输电系统安全性、保护与控制等类似的问题也同样需要关注,但由于两者在功能、结构和运行方式上的不同,关注的重点与研究方法也不同。微电网的理想化目标是实现各种分布式电源的方便接入和高效利用,尽可能使用户感受不到网络中分布式电源运行状态改变(并网或退出运行)及出力的变化而引起的波动,表现为用户侧的电能质量完全满足用户要求。实现这一目标需要解决微电网运行时的一系列复杂问题,包括:①微电网的规划设计;②微电网的保护与控制;③微电网能量优化管理;④微电网仿真分析等。这些技术问题目前大多处于研究示范阶段,也是当前能源领域的研究热点。

1.2.2 微电网的特点

通过微电网的定义可知,微电网是新型电力电子技术与分布式发电、可再生能源发电技术和储能技术的有机结合,其主要特点如图 1-8 所示。

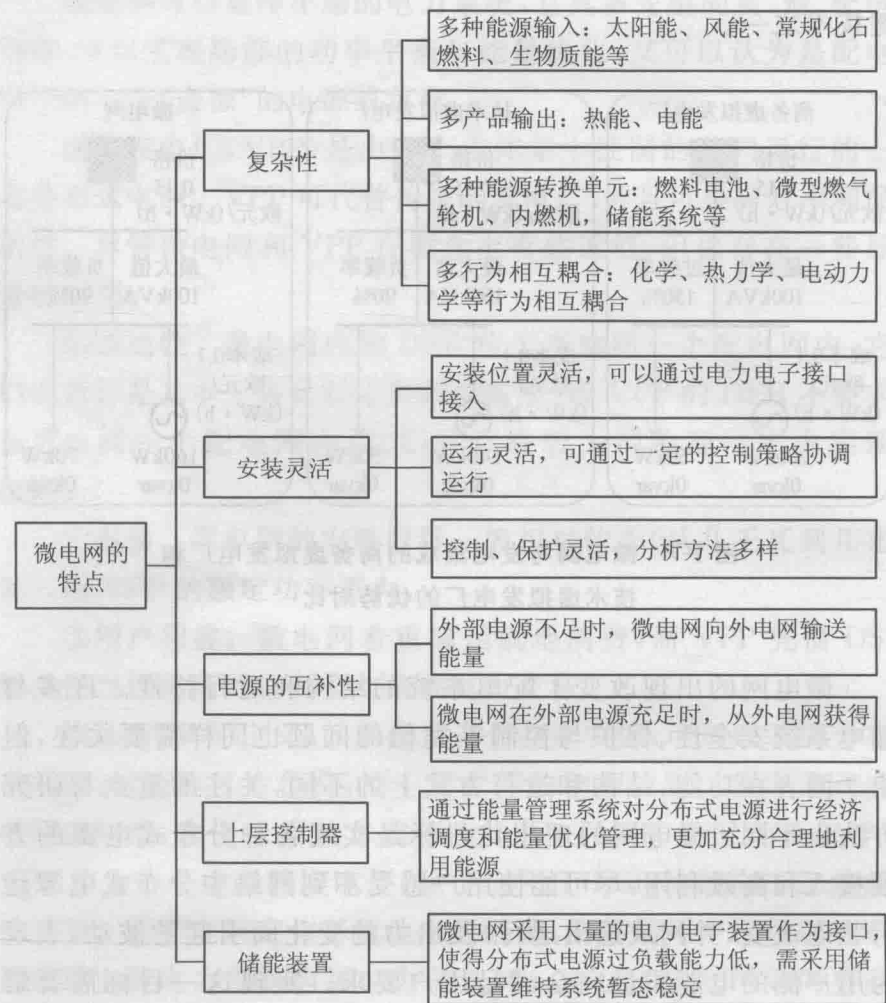


图 1-8 微电网的特点

1.3 国内外微电网的发展状况

目前，一些国家立足于本国电力系统的实际问题与国家的可持续发展能源目标，已纷纷开展了智能微电网方面的研究，提出了各自的智能微电网概念和发展目标。作为一个新的技术领域，智能微电网在各国的发展呈现不同特色。