

“微电网与智慧能源丛书”序

微电网是由分布式电源、储能系统、能量转换装置、监控和保护装置、负荷等汇集而成的小型发、配、用电系统,是具备自我控制和能量管理能力的自治系统,既可以与外部电网并网运行,也可以独立运行,可用于有效解决海岛、高原等偏远地区供电问题,也可以克服大规模分布式能源接入对电网运行造成的不利影响,是我国未来新型电力系统建设的重要组成部分。同时,随着人工智能时代的到来,互联网、信息技术将与能源系统高度融合,大幅提高能源系统智慧化水平,这将为能源转型发展带来新的契机。

在国家 973、863 和重点研发计划等项目支持下,近十年我国微电网和智慧能源技术迅猛发展。为推动技术落地,《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》和《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》等文件相继发布,通过相关支持政策的制订,推动了微电网和智慧能源技术的广泛应用,已成功建成一批适应各种场景需求的微电网和智慧能源系统实际工程。

在技术发展与工程实施过程中,一些大学、科研单位和企业取得了大量研究成果,部分技术已经走在了国际前列。为促进微电网和智慧能源领域技术研究和应用的持续发展,推动相关领域优秀科研成果与技术的广泛应用,我们策划并组织了“微电网与智慧能源丛书”。值得欣慰的是,这一丛书还入选了科学出版社 2021 年度的重大出版项目。

丛书围绕微电网与智慧能源的基础理论和关键技术,结合已经完成或正在实施的相关领域国家重大研究项目前沿课题,以一线科研人员的优秀成果为依托,分成微电网技术基础、规划设计、保护控制、能量管理、经济运行与智慧能源等部分,力求反映我国微电网与智慧能源领域最新的研究成果,突出科研工作的自主创新性,旨在为学科发展和人才培养贡献力量。

相信丛书的出版将为我国大规模分布式能源的智慧化应用发挥积极的推动作用,助力科研工作更好地为国家能源战略需求服务。



2022 年 4 月 12 日

前 言

在第七十五届联合国大会一般性辩论上,中国作为负责任的大国,宣布二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值(碳达峰),努力争取 2060 年前实现碳中和目标(碳中和)。

“十四五”时期是我国加快能源绿色低碳转型、落实应对气候变化国家自主贡献目标的攻坚期,当前,我国正在构建碳达峰碳中和“1+N”政策体系,作为降低碳排放的重要抓手,发展可再生能源是其中的重点。微电网作为整合风、光等分布式可再生能源的有效手段,近年来受到越来越多的关注,发展迅猛。

本书以微电网为研究对象,结合项目组自 2015 年以来所参与的新能源系统建设项目,介绍微电网多目标规划设计的相关研究成果,包括规划设计的流程和规范、规划设计的常用单元模型和系统模型、规划设计优化算法、典型的离网型和并网型微电网规划设计等内容。

衷心感谢国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(62122093)、国家自然科学基金面上项目(72071205)、国家自然科学基金青年科学基金项目(72301287)、湘江实验室项目(22XJ02003)、军队高层次人才自主科研计划等的支持。感谢本书所有作者的共同努力,感谢本领域相关同事和国内外同行专家、学者在本书撰写过程中给予的热心指导和宝贵建议。感谢国防科技大学多能源系统智慧互联技术湖南省重点实验室全体成员,其中李凯文、明梦君讲师,李文桦、宋元明博士研究生参与了本书部分章节的撰写工作,此外还要感谢硕士研究生张紫妍的校对工作。

非常希望本书能够成为一本聚焦微电网多目标优化设计理论方法及实际应用的好书,但由于作者水平有限,书中难免存在疏漏或不足之处,恳请各位专家、学者和广大读者批评、指正。

王 锐

2025 年 8 月于国防科技大学

目 录

“微电网与智慧能源丛书”序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 微电网	3
1.2.1 基本概念	3
1.2.2 发展状况	5
1.3 微电网规划设计	7
1.3.1 基本概念	7
1.3.2 研究现状	8
1.4 本书的主要内容	19
参考文献	20
第 2 章 微电网规划设计流程与规范	23
2.1 引言	23
2.2 微电网规划设计的评价指标	23
2.2.1 经济性指标	23
2.2.2 可靠性指标	24
2.2.3 环保性指标	25
2.3 微电网规划设计流程	26
2.4 微电网规划设计规范	29
2.4.1 一次系统设计	29
2.4.2 二次系统设计	30
参考文献	31
第 3 章 微电网多目标规划设计模型	32
3.1 引言	32
3.2 微电网典型结构	32
3.2.1 光-储系统	32
3.2.2 风-光-储系统	33
3.2.3 风-光-燃料电池系统	34

3.2.4	风-光-柴-储系统	35
3.2.5	风-光-柴-储-燃料电池系统	36
3.3	微电网发电设备模型	37
3.3.1	光伏发电	37
3.3.2	风机发电	39
3.3.3	蓄电池储能	41
3.3.4	柴油发电机	42
3.4	负荷模型	42
3.4.1	重要负荷	43
3.4.2	可中断负荷	43
3.4.3	可平移负荷	43
3.5	微电网优化指标计算模型	44
3.5.1	离网型微电网优化指标计算模型	44
3.5.2	并网型微电网优化指标计算模型	46
3.5.3	其他类型微电网优化指标计算模型	47
	参考文献	49
第 4 章	微电网多目标规划设计模型优化算法	50
4.1	引言	50
4.2	多目标优化基本概念	50
4.3	传统多目标优化算法	52
4.4	进化多目标优化算法	54
4.4.1	典型进化多目标优化算法	54
4.4.2	其他进化多目标优化算法	63
	参考文献	67
第 5 章	典型离网型和并网型微电网多目标规划设计	70
5.1	引言	70
5.2	离网型微电网多目标规划设计	70
5.2.1	系统结构	70
5.2.2	优化目标	71
5.2.3	运行策略	71
5.2.4	实验结果	73
5.3	并网型微电网多目标规划设计	80
5.3.1	系统结构	80
5.3.2	优化目标	81
5.3.3	运行策略	81

5.3.4 实验结果·····	82
5.4 结果分析·····	88
参考文献·····	89
第 6 章 微电网多目标规划设计案例·····	90
6.1 引言·····	90
6.2 考虑设备定型的微电网规划设计·····	90
6.2.1 系统单元建模·····	90
6.2.2 多目标优化模型·····	93
6.2.3 运行策略·····	95
6.2.4 规划设计算法: re-NSGA-II·····	96
6.2.5 实验结果·····	97
6.3 含可切负载的离网型微电网配置优化·····	99
6.3.1 系统单元建模·····	100
6.3.2 多目标优化模型·····	103
6.3.3 运行策略·····	104
6.3.4 规划设计算法: PICEA-ng·····	106
6.3.5 实验结果·····	108
6.4 考虑可靠性约束的微电网规划设计·····	111
6.4.1 系统单元建模·····	111
6.4.2 多目标优化模型·····	111
6.4.3 运行策略·····	113
6.4.4 规划设计算法: DD-CMOEA·····	113
6.4.5 实验结果·····	118
参考文献·····	121
第 7 章 结语·····	123
7.1 研究总结·····	123
7.2 研究展望·····	125

1.1 引 言

能源是人类生存和发展的重要基础。现阶段人们生产、生活中所需的能源主要来自煤炭、石油等传统化石能源，特别是在过去的几十年里，我国一直将煤炭视为能源结构中最重要的一部分，以期利用丰富的煤炭资源弥补我国缺油少气的资源困境。然而，随着化石能源的大量消耗，储量有限的煤炭、石油等资源价格持续上涨，能源短缺的问题日益凸显，并已经成为制约我国经济社会发展的重要因素。此外，传统化石燃料的大规模使用也会产生温室气体和有害物质(如二氧化碳、氮氧化物等)，从而加重环境污染，影响生态文明建设。

在能源安全 and 环境污染的双重压力下，我国能源结构亟待一场深刻变革以实现转型发展。为了加速生态文明建设，适应世界能源绿色低碳转型的发展趋势，“双碳”目标将大幅推动绿色节能技术的发展，同时促进非化石能源的发展，稳步减少化石能源的使用，进而构建以新能源为主体的新型能源体系。近年来，美国、欧洲、日本等国家和地区都相继出台相关政策、法规，将能源技术作为新一轮科技产业革命的突破口，而我国作为能源消费大国，亟须加快新能源特别是可再生能源技术的综合运用与发展。

可再生能源，如太阳能、风能、水能、生物质能、地热能和海洋能等，一般是指自然界中能够循环再生、不断恢复补充从而使能源的量维持在一定水平的一类资源，这类资源通常分布广泛，适宜就地开发、利用，具有“取之不尽、用之不竭”的特点。可再生能源清洁环保，其开发利用对环境无害或危害极小，是传统化石能源的有效替代。因此，加强利用可再生能源可有效缓解能源短缺和环境污染问题^[1]。根据国家能源局网站的数据，截至 2022 年 5 月底，我国可再生能源发电总装机容量达到 11 亿 kW，同比增长 15.1%。其中，常规水电装机容量达到 3.6 亿 kW，抽水蓄能装机容量达到 0.4 亿 kW；风电、光伏发电、生物质发电等新能源发电装机容量突破 7 亿 kW。近年来，我国可再生能源装

机容量逐年增长,如图 1.1 所示。特别是风电并网装机容量已连续 12 年稳居全球第一,光伏发电并网装机容量连续 7 年稳居全球第一,海上风电装机容量跃居世界第一。

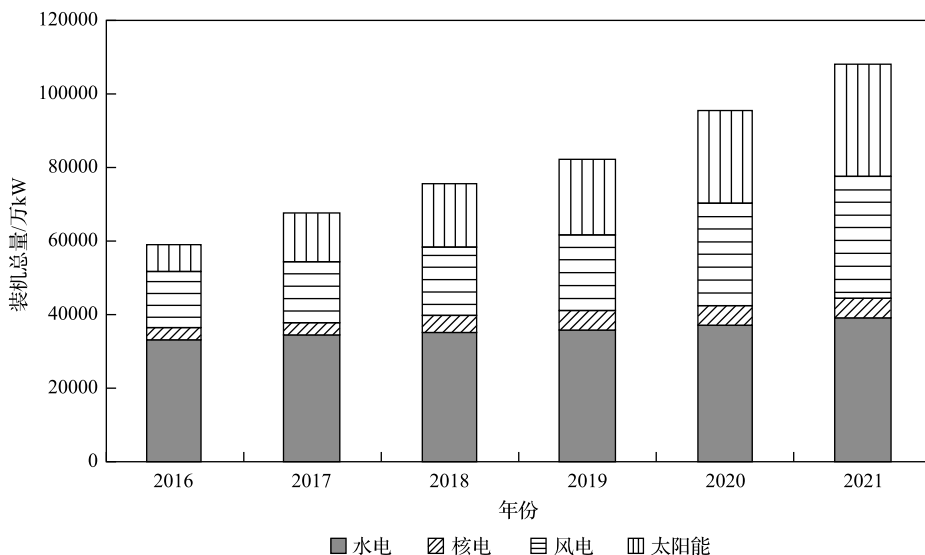


图 1.1 2016~2021 年可再生能源装机总量变化趋势

太阳能由太阳内部连续不断的核聚变反应产生,它是近乎零污染的清洁能源且储量无限。太阳能处处皆有,不受地域限制。广义上讲,太阳能是地球上许多其他能量的源泉,如风能、化学能等,也是人类生存的基础。太阳能资源的分布一般与纬度、海拔、地理状况和气候条件等有关,通常可以使用全年总辐射量和全年日照总时数来衡量太阳能资源。我国太阳能资源禀赋好,全国三分之二以上的地区均有丰富的太阳能资源,尤其是青藏高原和新疆、内蒙古等地区,特别适合开展太阳能资源的开发和利用。

太阳能发电主要包括太阳能光发电和太阳能热发电两大类。太阳能光发电是指利用光伏面板等相关装置将太阳能直接转化为电能,包括光伏发电、光化学发电、光感应发电等。太阳能热发电是指将太阳能先转化为热能,再将热能转化为电能的一种发电方式,这种发电方式既可以直接将太阳热能转化为电能,如利用半导体或金属材料的温差发电,也可以利用热机等带动发电机发电。近年来,我国太阳能发电量稳步增长,根据国家能源局的数据,2021 年全国光伏新增装机容量 5488 万 kW,全国光伏发电量 3259 万 kW·h,同比增长 25.1%。

除了太阳能,风能是另一种常见的可再生能源,它同样清洁无污染且资源丰富。风能是一种动能,由地球表面的大量空气流动产生,具体来说,在太阳辐照下由于各处空气的气温不同,从而形成气压差异,水平方向上高压空气向低压空气所在的地区流动即产生风能。风能资源取决于风能的密度和可利用的风能年累积小时数,并且风能资源受地形影响较大,通常在沿海和开阔大陆的收缩地带风能资源较为丰富。例如,我国的三北地区、东南沿海等区域风能资源集中。2021年,我国风电新增并网装机容量 4757 万 kW,其中陆上风电新增装机容量 3067 万 kW、海上风电新增装机容量 1690 万 kW;全国风电发电量 6526 亿 kW·h,同比增长 40.5%。

水能泛指水体的动能、势能和压力能等能量资源。广义的水能资源包括河流水能、潮汐水能、波浪能等能量资源,狭义的水能资源是指河流的水能资源。我国幅员辽阔,河流众多,降水量和河流径流量丰沛,并且地势西高东低,大江、大河从高原到盆地、丘陵、平原等地区形成极大的落差,从而产生了丰富的水能资源。我国的水能资源位居世界第一,主要分布在西南地区 and 长江、雅鲁藏布江等流域,尤其适合开展水力发电。

生物质能是指以生物质为载体的能量,是太阳能以化学能的形式储存在生物质中的能量形式。生物质包括所有动植物和微生物。生物质能是一种可再生能源,它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用,因此它的原始能量来源于太阳能,是太阳能的一种表现形式。地球上生物质能资源丰富,分布广泛,它蕴藏在植物、动物和微生物等可以生长的有机物中,有机物中除矿物燃料以外的所有来源于动植物的能源物质均属于生物质能。

地热能是从地壳抽取的天然热能,这种能量来自地球内部的熔岩,并以热力的形式存在。通过地下水的流动和熔岩,地热能可以涌至距离地面的地壳,并且能够传送到接近地面的地方。地热发电是利用地热能最重要的方式,其原理类似于火力发电,都是先将地热加热蒸汽的热能通过汽轮机转化为机械能,再带动发电机发电。地热能分布广泛,蕴藏量十分丰富,并且地热能发电厂的建造周期短,难度较低。

1.2 微 电 网

1.2.1 基本概念

随着可再生能源的开发与利用,分布式发电(distributed generation, DG)

受到越来越多的关注。分布式发电资源的位置分散、灵活,能够有效满足电力需求分散的特点,但是资源分散的问题会给分布式发电并网带来一定的困难。为了提升分布式可再生能源的利用效率,新型能源技术(如微电网)得到快速发展。微电网能够有效解决大电网与分布式发电之间的矛盾,充分发挥分布式发电资源的优势,进而提升电力系统的性能。

微电网具有独特的优势,近年来得到各个国家的广泛重视。美国能源部(Department of Energy, DOE)、国际大电网委员会等机构将微电网定义为包含负荷以及分布式能源的集合,是相对于主网的可控单元。美国电力可靠性技术解决方案协会(Consortium for Electric Reliability Technology Solution, CERTS)认为微电网是一种由负荷和微型电源共同组成的系统,可向用户同时提供电能和热能。欧盟微电网项目认为微电网是利用可再生能源,并使用微型电源、储能系统及电力电子变换装置等进行控制调节实现冷热电三联供的能源系统。日本东京大学学者认为微电网是一种由分布式电源组成的系统,与大电网联合运行或孤岛运行可以解决供电与需求之间不平衡的问题。

综合来看,虽然各组织机构对微电网的定义略有差异,但对微电网的组成、结构、功能等方面的认识基本相同。概括来看,微电网是集成了分布式发电装置、储能装置、能量转换装置、监控保护装置等,能够为相应负荷供能的小型发配电系统,是一个能够实现自我控制、保护和管理的独立自治系统。微电网的突出特点是能够实现分布式资源的就地收集、存储和利用,这也使其成为整合可再生能源发电的重要手段之一,微电网既可以离网运行,也可以并网运行。一个典型的微电网结构如图 1.2 所示,其中系统能量管理中心负责控制整个微电网的运行情况,电源装置包括光伏发电、风力发电、沼气发电及储能系统,并通过微源控制器(microsource controller, MC)并入微电网,负荷装置包括可中断负荷和不可中断负荷,通过负荷控制器(load controller, LC)并入微电网,DC/AC 表示把直流电转换为交流电的逆变器。从微观上看,微电网是一个小型的电力系统,具备发电、输电、配电等功能,能够实现区域范围内的功率平衡和能量优化调度。从宏观上看,微电网又可以看作配电网中的一个虚拟电源或负荷。

根据母线形式的不同,微电网系统可以分为纯交流母线系统、纯直流母线系统和交直流混合母线系统^[2]。在纯交流母线系统中,直流电源、直流负荷等通过电力电子转换装置接入交流母线;在纯直流母线系统中,交流电源、交流负荷等通过电力电子转换装置接入直流母线,相较于交流微电网,直流微电网

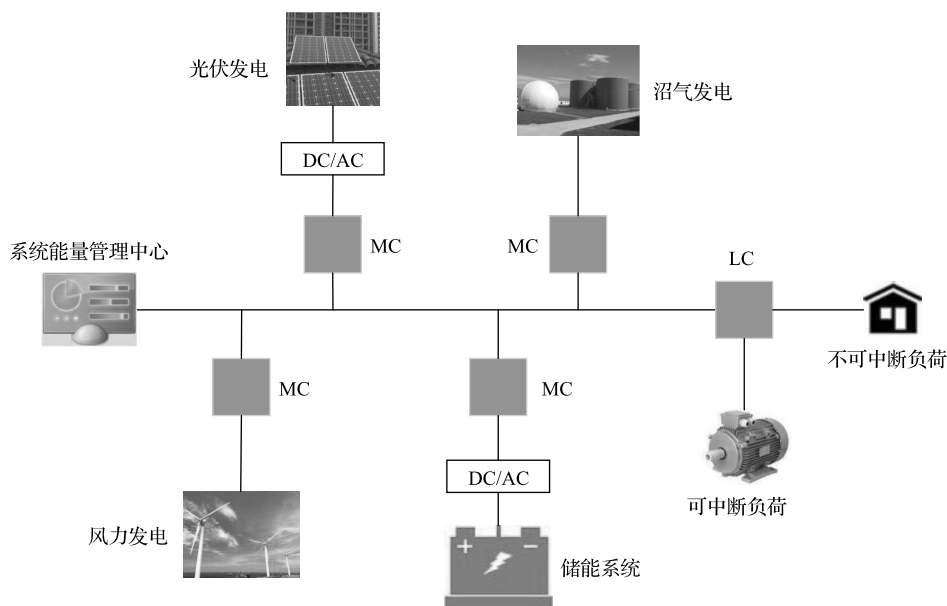


图 1.2 典型的微电网结构

成本低、易于控制，且负荷不受电压不平衡、三相不平衡及谐波等的影响，线路损耗低，效率较高；在交直流混合母线系统中，两种母线形式同时存在，在一定程度上可以弥补各自的劣势，但其运行控制也更加复杂。

按照是否与大电网连接，微电网可以分为并网型微电网和离网型微电网，相应地，其运行模式也可以分为并网运行模式和离网运行模式^[3]。在并网运行模式下，微电网与大电网相连，新能源系统可以在并网运行模式下发电，储能系统也可以进行充电和放电，外部电网会把微电网视为一个可控的负荷模型，同时在某些情况下，微电网也可以作为一个电源模型，把富余的电力通过大电网售卖。在离网运行模式下，微电网并非与大电网直接相连，而是主要由发电系统、储能系统和负荷等部分构成一个离网运行系统，实现微电网内部的发电与需求的实时功率平衡。

1.2.2 发展状况

经过多年的发展，微电网技术的研发和应用稳步增长，市场规模也不断扩大。尤其近年来，随着相关技术的成熟、设备成本的下降，微电网的相关研究及应用在世界主要国家和地区发展迅速，在理论研究的基础上，相关机构也积极投入到微电网实验平台与示范工程的建设中。

美国能源部把微电网视为未来智能电网的重要组成技术,积极推动微电网技术的发展,其研究和实践水平一直处于世界领先地位,拥有全球数量最多的微电网示范工程。这些示范工程分布广泛、投资主体多元、结构组成多样、应用场景丰富。美国电力可靠性技术解决方案协会,包括劳伦斯伯克利国家实验室、美国太平洋西北国家实验室等,是微电网技术的主要研究机构,开展了包括分布式能源整合技术、控制技术等相关研究。美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)也建立了包含光伏、风机、微型燃气轮机、蓄电池储能等在内的微电网实验室,并积极参与示范工程的建设。此外,在军用领域,美国国防部与美国能源部、美国国土安全部合作,从 2011 年开始分别在 3 个美军基地(珍珠港-希卡姆联合基地、卡森堡基地和史密斯训练营)建立了军用微电网示范工程。

欧洲各国也特别重视可再生能源的开发与利用,是较早开展微电网研究和示范工程的地区。2009 年,欧盟推出智能电网的概念,并提出建设以集中式电站和微电网为主导的智能电网形式。同时,欧盟在第五、第六和第七框架研究计划下支持了一系列关于发展分布式发电和微电网技术的项目,组织众多高校和企业,针对分布式能源集成、微电网接入配电网的协调控制策略、经济调度措施、能量管理方案、继电保护技术以及微电网对电网的影响等内容开展重点研究。目前已经形成包含分布式发电和微电网控制、运行、保护、安全及通信等基本理论体系,并相继建设了一批微电网示范工程,如希腊基斯诺斯岛微电网示范工程、德国曼海姆微电网示范工程等^[4]。与美国将微电网作为智能电网的关键组成部分不同,欧盟将微电网作为智能电网建设的基础,在技术研究和示范工程上,欧盟更加注重微电网对大电网的影响及可再生能源渗透率等方面的影响。

日本在国内能源持续紧缺、负荷日益增长的背景下,是建设微电网较早的亚洲国家,技术相对领先。日本新能源产业技术综合开发机构(The New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)自 2003 年开始就协调高校、科研机构和企业先后在八门市、爱知县、京都市和仙台市等地区建设了微电网示范工程,研究、验证了一系列微电网关键技术,主要集中在网架拓扑结构、微电网集成控制、冷热电综合利用、负荷跟踪能力、电能质量监控、电力供需平衡等方面。日本拥有全球最多的海岛独立电网,因此发展集成、可再生能源的海岛微电网替代成本高昂、污染严重的内燃机发电是日本微电网发展的重要方向,典型的项目包括东芝集团负责建设的宫古岛大型海岛微电网、

富士电机株式会社负责建设的多个中小型海岛微电网。此外,日本地震、台风、海啸等自然灾害频发,因此提升自然灾害下的电力供应可靠性是日本微电网发展的另一个重要方向。

随着经济的高速发展,我国能源需求迅猛增长,在资源和环境的双重压力下,我国十分重视可再生能源的利用和微电网技术的发展。近年来,国内高校、科研机构及部分企业对微电网相关技术也展开了深入的研究,在理论研究、实验室建设和示范工程建设等方面取得了一系列成果。2013年11月,天津大学完成了“分布式发电供能系统相关基础研究”项目,在分布式发电供能微电网系统接入大电网及其规划设计、建模仿真、运行控制与能量管理等方面取得了一定的技术突破。合肥工业大学采用光伏、模拟风能、模拟电源、交直流负荷等建设了国内较早的微电网实验平台。此外,国家电网浙江省电力有限公司电力科学研究院主持建设了多个微电网示范工程,如浙江舟山东福山岛独立型风-光-柴-储海水淡化系统、浙江温州南麂岛独立型风-光-柴-储系统等。中国兴业太阳能技术控股有限公司在广东珠海东澳岛也建立了兆瓦级独立型风-光-柴-储系统,以解决用电困难等问题。总体来看,我国微电网示范工程可以分为偏远地区微电网、海岛微电网和城市微电网等三大类。

1.3 微电网规划设计

1.3.1 基本概念

微电网系统研究中涉及很多关键技术,如微电网规划设计、经济运行控制、能量优化管理、故障检测与保护、通信技术、标准体系等。其中,微电网规划设计主要包括系统网络结构优化设计,分布式发电单元类型、容量、位置的选择与确定。微电网规划设计是一个典型的多目标优化问题,一般需要综合考虑成本、可靠性等多种因素,并且微电网规划设计与其运行优化策略具有高度的耦合性,规划时需要充分考虑运行优化策略的影响。具体地,根据微电网系统区域的负荷和可利用能源的情况,综合考虑设备的运行与响应特性、初期投资与运行维护费用、能源利用效率、环境友好程度及系统控制策略等因素,通过优化计算确定微电网系统的结构以及各分布式发电单元、储能单元的容量配置信息,最终提升整个微电网系统的可靠性、安全性、经济性、环境友好性等。

1.3.2 研究现状

近年来,随着新能源技术的快速发展和石油等资源价格的上涨,无论在国内还是国外,微电网都得到了越来越广泛的关注。尤其在一些偏远落后地区,利用公共电网供电成本较高,通过微电网系统则可以组合利用不同类型的可再生能源及其他常规的储能系统、发电系统,从而有效提高供电系统的可靠性,降低发电成本。因此,系统的规划设计是微电网技术研究的重要内容之一。

微电网系统按照组成部件的不同,可以分为光伏-电池系统、风机-光伏-电池系统、风-光-柴-储微电网系统及其他更复杂的混合系统。这些系统的规划设计一般考虑成本最小化、可靠性最大化、污染物排放最小化等目标。微电网规划设计是确定发电机容量的重要一步,没有合适的规划就很难有效评估系统的发电能力。总的来看,微电网规划设计可以分为两类,一类基于传统方法或经典方法,另一类基于规划软件^[5],其中传统方法既有简单的数学规划,也有元启发式的方法。

1. 基于传统方法的规划

传统的数学规划方法如线性规划、整数规划等很早就被用于微电网规划设计中。例如,Eke等^[6]考虑了一个包含太阳能光伏板和风力发电机的微电网系统,设计了一个线性数学模型以最小化系统的总成本,并通过图论方法求解该问题。Kuznia等^[7]利用随机混合整数规划方法,首先对由风机、储能系统、输电网络和热力发电机等组成的发电系统进行建模,然后结合本德尔(Bender)分解算法与最优割集方法对该规划模型进行求解。Akella等^[8]针对一个包含小功率水力发电机、太阳能板、风机和生物质能等部件的混合系统,建立了线性规划模型并对其进行优化求解。同样是基于数学规划模型,Dagdougui等^[9]研究了一个由风机、光伏、燃料电池等组成的微电网系统,该系统主要是为氢燃料供给站提供电能和氢气,在尽可能满足电能需求的情况下,最小化氢气的供需差。Cai等^[10]综合利用区间线性规划方法、两阶段规划方法和模糊随机规划方法,构建了一种基于区间数的两阶段规划模型,以优化可再生能源管理系统中设备的容量大小,进而最小化系统成本。

Garcia-Valverde等^[11]对位于西班牙东南某地一个4.2kW的单机光伏电池组系统进行了寿命循环评估。假设光伏电池的寿命为20年,通过对光伏生产、工作和退化等阶段的耗能成本情况进行分析,计算了光伏发电系统能源回馈的

时间和全寿命周期内二氧化碳的排放量。与柴油发电机和公共电网供能方式对比,在环境效益方面该光伏发电系统表现出了更好的性能。同样基于寿命循环评估方法, Khan 等^[12]研究了一个风机-燃料电池的混合微电网系统。该系统在工作过程中被考虑为零排放系统,但系统组件如风机、电解槽等在生产制造的全寿命过程中会产生温室气体,即使如此,通过实验验证可再生能源系统仍然比传统的柴油发电系统更环保。利用 MATLAB/Simulink 软件, Lagorse 等^[13]分别研究了三种包含燃料电池、太阳能光伏板及蓄电池的微电网系统,他们分别对不同配置的系统进行了一年时间的仿真运行,以寻求使系统总成本最小的配置方案。综合上述文献可以发现,传统的数学规划方法大多应用于单目标微电网系统规划,并且优化指标主要集中于系统成本相关的目标,较少涉及系统可靠性和燃料排放量等优化指标。

鉴于微电网规划设计的复杂性,传统数学规划方法很难有效求解这类规划设计问题^[14]。元启发式算法,如遗传算法(genetic algorithm, GA)等,则凭借其问题结构的鲁棒性及全局收敛性被越来越多地用来求解规划设计问题。目前,在微电网规划设计问题中应用比较多的启发式算法包括遗传算法、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法等。Koutroulis 等^[15]基于遗传算法提出了一种系统规划算法,针对使用寿命 20 年的孤岛型光伏-风机系统,该方法以满足负载需求为约束条件,以系统组件的类型和数量为决策变量,最小化系统总成本。以一个居民用发电系统的设计与规划为例, Koutroulis 等通过仿真实验验证了该方法的有效性。Dufo-López 等^[14]同样利用遗传算法对一个包含光伏板、风机、电池和氢气储能的混合系统进行了最优化设计,其目标是找到一个最优的控制策略。Masoum 等^[16]研究了风光能源系统的选址问题,首先对遗传算法进行了改进,然后利用改进遗传算法对系统的候选地址进行评价择优。Hakimi 等^[17]以伊朗东南部某地区的一个孤岛混合发电系统为研究对象,利用粒子群优化算法寻求系统总成本最小的配置方案。Kashefi Kaviani 等^[18]对粒子群优化算法进行了改进,在此基础上,以系统周期成本最小为目标对一个基于氢气储能的离网型风光系统进行了优化设计。针对包含可再生能源发电和氢储能的微电网系统, Giannakoudis 等^[19]建立了一个优化模型,该模型在一个由风光发电设备、氢燃料电池及柴油发电机等主要元件组成的实例系统中得到实现,进一步考虑天气变化带来的不确定性,并以净现值成本最小为目标,采用随机模拟退火算法对模型进行优化求解。在考虑可再生能源和负荷不确定性随机建模的情况下, Aliabadi 等^[20]以有功损失和电压偏差最小化为目标研究

了混合风-光-储系统的概率设计与配置问题,该问题的决策变量包括最优选址和混合系统各元件的配置规模,优化问题通过一个改进的乌鸦搜索算法进行求解,并且算法的性能通过比较实验进行了验证。Jahannoosh 等^[21]研究了一个包含风机、光伏、燃料电池的可再生能源系统的最优化设计模型,该模型以混合系统寿命周期成本最小化为目标,并且以最大负荷中断概率为可靠性约束条件,该系统元件最优配置问题通过一个新的混合元启发式算法,即灰狼优化-正弦余弦混合算法进行求解。在文献[22]中,灰狼优化算法也被用来求解以系统成本最小化为目标的微电网系统最优化配置问题,此外,禁忌搜索算法也被部分学者应用于微电网系统的规划设计,这些研究也大多以成本最小为优化目标^[23]。

遗传算法、粒子群优化算法等虽然被众多学者广泛应用,但这些应用多数是针对单目标优化问题。然而,如前文所述,微电网规划设计本质上是一个多目标优化问题,如既追求系统成本最小化,又希望系统具有较高的可靠性,且污染物排放要尽可能少。因此,随着研究问题的多样化、复杂化,单目标优化算法表现出一定的局限性。多目标进化算法(multi-objective evolutionary algorithm, MOEA)是用于求解多目标优化问题的一类算法,利用多目标进化算法进行微电网系统的规划设计可以有效克服单目标优化算法的局限,对多个目标同时进行优化。

Katsigiannis等^[24]首先构建了一个系统全寿命周期内总成本最小和温室气体排放最小的两目标规划设计模型,然后利用二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)对该模型进行优化求解,得到一组帕累托最优解集,进而从中选择一个作为微电网系统的最优配置方案。Yang等^[25]基于遗传算法对一个混合风光系统进行最优化配置,该系统采用蓄电池组作为储能装置,优化目标为功率供应缺失率最小和系统年化周期成本最小。Yang等不仅给出了这两个目标的具体计算方法,还分别建立了光伏、风机的发电模型和电池组储能模型,优化模型的自变量包含光伏板数量及安装倾角、风机数量及风机安装高度、电池组数量等。Trivedi^[26]利用多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA)解决非线性微电网多目标规划问题,即以燃料成本和二氧化硫排放、氮氧化物排放最小为目标,对风机和柴油发电机构成的混合可再生能源系统进行了优化配置。以全寿命周期内系统总成本、温室气体排放和未满足负载最小化为优化目标,Dufo-López等^[27]采用强度帕累托进化算法(strength Pareto evolutionary algorithm, SPEA)对三目标微电网系统规划设计问