

电子信息前沿技术丛书

全面介绍海域/强不确定性
微电网电力集成方法

Optimization of Distributed Generation
and Scheduling in Maritime Microgrids

海域微电网 优化配置与调度

◎刘宏达 著

清华大学出版社



 电子信息前沿技术丛书

Optimization of Distributed Generation
and Scheduling in Maritime Microgrids

海域微电网 优化配置与调度

◎刘宏达 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

全书主要介绍海域微电网,尤其是远离内陆的海域微电网的优化配置和调度方法。首先,介绍波浪能、潮流能、海上风能和海上光伏、海水淡化等多种海域可再生能源/特有电力负荷的电力特性及数学模型。然后,针对海域微电网的可再生能源高渗透、可再生能源发电装置出力的强随机性的特点,介绍多种可计及并处理这种随机性的潮流算法和优化技术。最后,通过不同需求场景下的案例,介绍海域微电网多能源集成的优化配置问题或优化调度问题的数学模型、解决思路和优化流程。

本书适合关注海洋能源开发的读者使用;同时可供从事微电网和可再生发电集成的电气工程师或教育工作者,以及电气类高年级本科生和研究生使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

海域微电网优化配置与调度/刘宏达著. —北京:清华大学出版社,2019

(电子信息前沿技术丛书)

ISBN 978-7-302-53118-0

I. ①海… II. ①刘… III. ①电网—电气工程—优化配置 ②电网—电力系统调度 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 104628 号

责任编辑:文 怡

封面设计:台禹微

责任校对:时翠兰

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市国英印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:12

字 数:275千字

版 次:2019年9月第1版

印 次:2019年9月第1次印刷

定 价:79.00元

产品编号:073225-01

海岛及其周围海域蕴藏着丰富的渔业、石油、旅游、港口和矿产资源,海岛开发具有非常重要的经济和战略意义。因此,近年来海岛的生态保护与可持续发展成为关注的热点。在海岛或海上平台运用日臻完善的风能、太阳能、潮流能、波浪能等可再生能源发电技术,可以有效降低对常规能源和柴油发电的依赖。在此背景下,以新能源为主的海岛微电网系统应运而生。有关国家都在积极研究和建设海岛微电网,其技术装备水平、装机规模均不断提升。

我国海岛众多,岛、礁、滩、沙总量超过 1 万座。我国已经建设了多个不同规模和不同类型的海岛微电网示范工程。作为一种含多种可再生能源的集成技术,海岛微电网有着广泛的应用前景。部分海岛电网已初具智能电网甚至智能社区的雏形。寻找基于可再生能源利用的海岛能源供给方案,充分利用海洋可再生能源是解决海岛可持续发展、建设生态海岛的关键。有效利用海岛清洁能源,并将其转换为电力、储能、淡水、交通动力等复合资源,建立能独立平稳运行的海岛综合能量供给系统,将对维护国家主权领土完整及最大限度开发利用远洋海岛群的自然资源提供有力的能源保障,并有效促进当地经济发展,推进国家远洋海岛海洋战略的实施。

因为海域可再生能源的发电特性异于陆地,所以海岛微电网在规划设计上有其自身特点。在海域可再生能源方面,例如,海面上光照充足并且无遮挡物,可以最大限度地利用太阳能;此外,由于水的蒸发冷却作用,安装在水面上的光伏系统受益于明显较低的环境温度,与地面安装相比,其实际性能具有一定的优势。这种优势虽然似乎因许多变量而异,但研究普遍认为,海上光伏的产出会多于陆地 10%~20%;海上的风力变化也相对较小;波浪能和潮流能更有其特殊性和伴随着周期的随机性。此外,因受陆地大电网的连接成本、燃油运输成本等因素的制约,海岛微电网的可再生能源渗透率会明显高于陆地。

本书结合作者近年来在海域可再生能源利用、海岛微电网规划等方面的研究工作,描述海域可再生能源和海域微电网的特性,介绍相关的设计流程和方法、相关优化技术等内容。本书目的是抛砖引玉,呈现海洋可再生能源特性,为读者提供可借鉴的多种海域微电网在规划和调度方面的建模和优化技术。同时,为进行可再生能源高渗透研究的工作人员提供一定的参考。

全书共分 11 章。第 1 章主要概述海岛微电网规划与调度的背景与现状。第 2 章主要介绍海域微电网可再生能源的发电特性和模型。第 3 章主要介绍海域微电网电源与调

度优化中要用到的一些方法的基础知识。第4章介绍海岛微电网的二元储能装置的容量优化配置。第5章主要探讨基于概率潮流算法的海岛微电网电源的优化定容与选址。第6~9章主要介绍电力优化调度,其中,第6章重点介绍主动重构技术在改变微电网运行方面的可能性;第7章介绍计及安全约束的电力调度技术;第8、9章主要利用场景法和不确定理论探讨海域微电网的不确定性调度问题。第10、11章分别从双层优化和融入可靠性指标两个方面介绍相关处理方法。

作 者

2019年5月

第 1 章 绪论	1
1.1 海域电网概述	1
1.2 微电网规划与调度研究的研究意义	3
1.3 海岛微电网的研究现状	4
1.4 海岛微电网规划的研究现状	4
1.5 海岛微电网电力调度的研究现状	6
1.6 本书主要内容	7
参考文献.....	7
第 2 章 海域可再生能源的发电特性和模型	10
2.1 波浪能发电.....	10
2.2 海域光伏发电.....	11
2.2.1 光伏电池的分类	11
2.2.2 光伏电池的工作原理	12
2.2.3 光伏电池的主要特性	12
2.2.4 光伏发电功率模型	13
2.3 海域风力发电.....	14
2.3.1 风力发电机分类及结构	14
2.3.2 风力发电机的工作原理	15
2.3.3 风力发电机的输出特性	16
2.3.4 风机的发电功率模型	16
2.4 储能单元.....	17
2.4.1 蓄电池	17
2.4.2 超级电容器	23
2.4.3 抽水蓄能技术	28
2.4.4 飞轮储能技术	28

2.4.5	超导磁储能技术	29
2.4.6	压缩空气储能技术	29
	参考文献	30
第3章	海域微电网电源优化配置与调度中的理论基础	31
3.1	海域建设微电网的特殊性和模型的修正	31
3.1.1	光照强度的修正模型	31
3.1.2	风速的修正模型	34
3.2	基于BP神经网络的预测算法	35
3.2.1	BP神经网络原理	35
3.2.2	BP神经网络在短期风电输出功率预测中的应用	35
3.2.3	BP神经网络短期负荷和风电功率预测实例研究	36
3.3	概率性潮流算法	38
3.3.1	$2m+1$ 法简介	38
3.3.2	计算方法及实现	39
3.4	基于Pareto的多目标粒子群算法	40
3.4.1	Pareto多目标决策的简介	40
3.4.2	Pareto多目标决策的基本定义	40
3.4.3	基于Pareto的多目标粒子群算法	41
3.4.4	测试函数	42
3.5	时序准稳态仿真法	44
3.6	基于小生境技术的多目标粒子群(MOPSO)算法	45
3.7	基于模糊理论的推荐折中解的求取方法	46
	参考文献	46
第4章	基于二元混合储能的海岛微电网的优化配置	48
4.1	任务背景概述	48
4.1.1	微电网结构	48
4.1.2	二元混合储能的评价指标和目标函数	49
4.1.3	容量配置中的约束条件	49
4.2	优化配置的基础模型	50
4.2.1	充电情况	50
4.2.2	放电情况	54
4.3	容量优化的评价指标	58
4.3.1	系统可靠性指标	58
4.3.2	能量利用率指标	58
4.3.3	系统经济性指标	59

4.3.4	容量配置中的约束条件	60
4.4	算例分析	61
4.4.1	设计对象和计算环境介绍	61
4.4.2	系统组件参数	61
4.4.3	海岛自然资源及负荷的概况	61
4.4.4	设计计算与结果分析	62
	参考文献	63
第 5 章	基于概率潮流算法(点估法)的海岛微电网电源的优化配置	64
5.1	任务背景概述	64
5.2	风/柴/储独立微电网的 DG(分布式电源)的优化	64
5.2.1	待优化变量及编码方式	64
5.2.2	目标函数的建立	65
5.2.3	约束条件	66
5.3	点估法在 DG 优化选址与定容中的使用	67
5.3.1	微电网中 DG 最优接入的电源规划流程	67
5.3.2	优化案例	69
5.4	算例结果与分析	73
	参考文献	75
第 6 章	主动重构思想在海岛微电网优化调度中的运用	76
6.1	微电网的调度手段浅析	76
6.2	主动重构思想在微电网调度中的可用方向	77
6.2.1	可丰富传统调度手段的广义重构思想概述	77
6.2.2	功能性重构思想的介绍	78
6.2.3	结构性重构思想的介绍	78
6.3	应用案例介绍	79
6.3.1	标准测试馈线系统	79
6.3.2	修改后的测试馈线系统	79
6.3.3	海岛微电网的配置	82
6.4	主动重构思想的应用验证	83
6.4.1	多功能并网逆变器的运行原理和控制策略	83
6.4.2	海岛功能重构-多功能并网逆变器的应用	87
	参考文献	90
第 7 章	计及可再生能源融入的电力系统安全约束经济调度	91
7.1	电力系统经济调度的发展	91

7.2	日前调度和超短期调度	93
7.3	电力系统安全约束经济调度求解	93
7.3.1	电力系统调度的求解方法	93
7.3.2	电力系统调度的数学模型	95
7.3.3	调度模型的简化	98
7.4	灵敏度因子在电力系统经济调度中的应用	99
7.4.1	灵敏度因子理论	99
7.4.2	求解灵敏度因子	100
7.5	电力系统日前调度和超短期调度研究	102
7.5.1	预测调度的总体方案研究	102
7.5.2	基于粒子群算法的日前预测调度研究	105
7.6	超短期安全约束经济调度研究	109
7.6.1	超短期调度介绍	109
7.6.2	Yalmip 工具包简介	110
7.7	双层滚动预测调度方法	112
	参考文献	113
第 8 章	考虑分布式电源随机性的海岛微电网优化调度研究	115
8.1	可再生能源随机性问题的处理方法	115
8.2	可再生能源随机性分析	116
8.3	考虑预测误差的可再生能源场景生成与缩减	117
8.3.1	可再生能源发电功率场景集的生成	117
8.3.2	可再生能源发电功率场景集的削减	118
8.4	海岛微电网的优化调度模型	120
8.4.1	目标函数	121
8.4.2	约束条件	122
8.4.3	模型求解流程	123
8.5	仿真结果及分析	124
8.5.1	算例介绍	124
8.5.2	不同场景集的生成与削减	124
8.5.3	考虑分布式电源随机性的海岛微电网优化调度	127
	参考文献	130
第 9 章	基于机会约束模型(CCPM)的海岛微电网优化调度研究	131
9.1	不确定规划理论	131
9.2	基于 CCPM 的优化调度建模	132
9.2.1	不确定性变量的选择	132

9.2.2	优化调度问题中不确定性因素模型分析	133
9.2.3	规划模型的选择	133
9.2.4	离网模式的日前调度模型	134
9.2.5	并网模式的日前调度模型	136
9.3	机会约束条件转换确定性条件	137
9.4	算例优化结果及分析	138
9.4.1	算例场景及数据	138
9.4.2	优化结果及分析	140
	参考文献	143
第 10 章	基于双层多目标算法的 DG 最优接入研究	144
10.1	基于点估法的五点法离散风速分布	144
10.2	基于功率敏感节点辨识的 DG 优化配置	147
10.2.1	功率敏感节点的介绍及对配电网的影响	148
10.2.2	基于小世界理论的功率敏感节点辨识方法	149
10.2.3	基于功率敏感节点辨识的 DG 优化实例研究	150
10.3	基于五点法的 30 节点电网 DG 优化接入	151
10.3.1	优化变量的选取及其编码方式	151
10.3.2	优化目标函数的建立	152
10.3.3	优化问题中的约束条件	154
10.4	双层 MOPSO(多目标粒子群算法)优化算法	155
10.5	优化结果及分析	157
10.5.1	基于五点法的优化结果	157
10.5.2	基于模糊理论确定推荐折中解	158
	参考文献	160
第 11 章	基于经济性与可靠性分析的 DG 优化研究	162
11.1	基于经济性与可靠性分析的 DG 优化问题概述	163
11.1.1	优化变量及目标函数	163
11.1.2	优化过程中的约束条件	164
11.2	基于经济性与可靠性分析的 DG 选址与定容优化算法	165
11.3	基于优化结果的序贯蒙特卡洛法确定推荐折中解	168
11.4	优化结果及分析	171
11.4.1	基于可靠性分析确定推荐的折中解	172
11.4.2	应用模糊理论及可靠性分析确定推荐折中解	173
11.4.3	仿真时段内传统机组出力及储能装置充放电情况	174
	参考文献	176
附录 A		177

绪 论

1.1 海域电网概述

随着社会的发展,人类对能源的需求日益增大。化石燃料的大量使用,不但造成了传统能源趋于衰减,还造成了严重的环境污染。在此背景下,可再生分布式电源因其持续、环境友好、安装灵活等优点备受关注。近年来,海岛的保护、开发成为海洋事业的热点,海岛及其周围海域蕴藏着丰富的渔业、石油、旅游、港口、矿产资源,海岛开发具有非常重要的经济和战略意义。日臻完善的风能、太阳能、潮汐能等可再生能源发电,可以有效降低对常规能源和柴油发电的依赖。随着微电网的出现,以新能源为主的海岛微电网系统应运而生。有关国家都在积极研究和建设海岛微电网,其技术装备水平、装机规模均不断提升。

我国海岛众多,岛、礁、滩、沙总数量超过一万座。我国也建设了多个不同规模的海岛微电网工程。海岛微电网从大类上可以分为并网型和离网型,主要构成基本相同。作为一项多种可再生能源的集成技术,海岛微电网有着广泛的应用前景。随着可再生能源、电力储能等技术的发展,特别是微型电网显现出在单点接入、多种模式灵活切换等方面的优势,各国的海岛电网已从单纯依靠柴油发电机等旋转发电设备供电,转向多种清洁能源相结合的混合供电系统,部分海岛电网已初具智能电网甚至是智能社区的雏形。

然而,形式多样、性能各异的分布式电源简单并联在一起并不能构成一个稳定的供电网络,系统电能质量、保护和运行等方面较差。因此,寻找基于可再生能源利用的海岛能源供给方案,是解决海岛可持续发展、建设生态海岛的关键。

随着电网结构和功能不断复杂化,对电力系统经济、环保、可靠的要求越来越高。如何提高电力系统能源利用率、改善能源结构,缓解能源需求与能源短缺、能源利用与环境保护之间的矛盾,使电网走向清洁、安全、高效、可靠的发展道路已成为电网优化运行的难

题与关键。为实现这一既定目标,一方面,电力调度需综合考虑机组燃料类型、能耗、机组启停费用、网损、污染物排放、电网安全等因素,满足电网节能、环保、安全等方面的要求;另一方面,分布式电源(Distributed Generation, DG)以微电网形式并入大电网中,在一定程度上可以满足电网供电质量、供电可靠性以及供电安全性的要求,但由于可再生能源固有的随机性和间歇性使得微电网优化调度模式变得复杂化,因而对研究微电网调度方法和控制策略提出了新的挑战。

2010年3月起施行的《中华人民共和国海岛保护法》明确指出:“有居民海岛的开发、建设应当优先采用风能、海洋能、太阳能等可再生能源和雨水集蓄、海水淡化、污水再生利用等技术”。海岛周边蕴含了丰富的、可用于直接发电的风能、光伏、波浪能、海流能等可再生能源。有效利用海岛清洁能源,并将其转化为电力、储能、淡水、交通动力等复合资源,建立能独立平稳运行的海岛综合能量供给系统,将对维护国家主权领土完整、最大限度开发利用远洋海岛群的自然资源提供有力的能源保障,并有效促进当地经济社会发展,推进国家远洋海岛海洋战略的实施。

对于大型近海群岛,其电能需求与可靠性要求较高,往往通过海底电缆与大陆联网,但由于海岛特殊的地域条件,供电可靠性仍难以保证。对远洋海岛而言,受限于技术与经济条件,与大陆通过海底电缆互联并不现实,其电力供应主要来自柴油发电。随着可再生能源发电和电力储能等技术的发展,海岛电网已从单纯依赖柴油发电向综合利用多种清洁能源发展。海岛环境相对于在大陆偏远地区的独立微电网往往还存在以下特点:①海底电缆投资巨大,离大陆较近的海岛可通过海底电缆与大陆联网,远离大陆的海岛通过海底电缆与大陆电网联网困难较大。②海岛风力资源与光照资源往往比较丰富。③海上交通受天气影响大,燃料供给不稳定,同时海岛生态系统脆弱,柴油发电机等对其生态影响较严重。④电网建设相对落后,供电可靠性差,严重影响海岛经济的发展。⑤远离大陆的海岛通常在军事上具有重大的意义,对供电可靠性要求较高。同时,在海岛建设微电网时,由于上述客观条件的限制,微电网本身安全运行要面临以下的挑战:①电网暂态过程中主要表现在多电源供电系统,潮流分布复杂,传统故障保护配置复杂,甚至不可行;对故障扰动承受能力弱,对故障隔离的快速性要求高;运行环境恶劣,电网故障发生频率高,对保护的可靠性要求高。②电网动态过程中主要表现在独立电网运行中,不适宜建设大中型常规化石能源类旋转发电设备,以小型发电设备为主,系统抗扰动性较差;电网备用容量不足,系统稳定性差,负荷投切造成的电网扰动对其稳定性的威胁大;影响海域可再生能源波动性的因素更多,对电网带来的扰动更频繁。③电网稳态过程中主要表现在化石能源发电设备退出系统运行时,存在主控发电设备切换控制的需求;大量不可调度的可再生能源发电接入,渗透率高,可调度性差;海岛生态环境极其脆弱,在兼顾系统经济运行的同时追求发电设备的低排放、低污染。

有效利用海岛丰富的风能、太阳能、波浪能、海流能等可再生能源不仅能为海岛提供长期稳定的能量供给,有利于生态环境保护,而且可与海水制淡、海水制氢及旅游等产业结合,对开发与管理海岛,保持海岛经济社会环境的持续协调发展,促进海洋经济发展具有重大意义。

海水淡化技术是解决海岛用水的主要方式之一,由于海水淡化具有高耗能、可调控的

特点,对平抑可再生能源的波动性,提高清洁能源利用率具有一定的辅助作用,因此,在海岛微电网中考虑海水淡化负荷的可控性,具有重要的现实意义。在未来海岛微电网的规划设计中,综合考虑生产建设及居民需求、环境与经济效益,可再生能源发电、可控电源(柴油发电机或微型燃气轮机)、可控的海水淡化负荷将有可能成为海岛微电网的典型组合形式。

随着电网结构和功能不断复杂化,对电力系统经济、环保和可靠的要求越来越高。如何提高电力系统能源利用率,改善能源结构,缓解能源需求与能源短缺、能源利用与环境保护之间的矛盾,使电网走向清洁、安全、高效、可靠的发展道路已成为电网优化运行的难题与关键。为实现这一既定目标,一方面,电力调度需综合考虑机组燃料类型、能耗、机组启停费用、网损、污染物排放、电网安全等因素,满足电网节能、环保、安全等方面的要求;另一方面,分布式电源以微电网形式并入大电网中,在一定程度上可以满足电网供电质量、供电可靠性以及供电安全性的要求,但由于可再生能源固有的随机性和间歇性使得微电网优化调度模式变得复杂化,因而对研究微电网调度方法和控制策略提出了新的挑战。

1.2 微电网规划与调度研究的研究意义

海域微电网技术的开发和利用具有很大的现实意义。首先,微电网能够充分利用当地的可再生能源,降低大电网的供电压力和输配线路上的能量损耗,降低电力系统的运行成本;其次,微电网作为大电网的补充能源,提高了电力系统的安全性和稳定性,提高了电力系统应对突发灾害的能力;此外,微电网技术为解决环境保护和经济发展之间的矛盾,发展智能电网等问题提供了可行方向。从我国的情况来说,目前我国国民经济发展迅速,对电力的需求迅速上升。微电网技术可以有效改善我国的能源结构,同时还可以提高我国电力系统的稳定性。

我国的基本国情具有以下特点:①我国的光照充足。我国国土面积居世界第三位,大部分地区位于温带和亚热带,尤其在夏季光照充足,适合发展光伏产业。在我国的西北地区,高原和沙漠地貌普遍,人口稀少。但是这些地区光照资源丰富,尤其是在高原地区,光照会随着海拔的升高而增强,适合发展以光伏为主的微电网项目。②我国的风力资源丰富。一般来说,风速达到 4m/s 就可以带动风轮进行风力发电。我国是一个季风气候显著的国家,全国大部分地区适合建立风电场进行风力发电。③我国的海岸线很长,沿海岸线分布有众多的岛屿。这些岛屿一般人口稀少、淡水稀缺。传统的柴油发电机无法给岛上居民提供高品质的供电,还会造成严重的环境污染,破坏海岛周围的生态环境。发展以海域可再生能源为主的微电网可以有效缓解这一现状。④我国的电力系统至今仍以火电为主,但是大型的发电厂距离煤炭等化石能源的产地较远,化石能源的输运需要耗费大量的人力、物力、财力,化石能源的燃烧还会造成严重的环境污染。

1.3 海岛微电网的研究现状

当微电网(Micro Grid, MG)并网运行时,与其相连的主网可以依据不同的供电策略为其提供源源不断的电能而维持很高的可靠性;而当MG离网运行时,系统的运行则变得更为复杂。目前世界上大部分小岛都依靠化石燃料发电,其中大部分依赖于柴油发电机。在大多数情况下,与大陆电网连接的成本过高,因此所需电能会通过柴油发电机等设备供应。但其又存在一些缺点,由于在偏远地区柴油发电机的供应成本通常较高,并且柴油发电机通常全年被迫部分负荷运行,所以平均化的电力成本大大高于0.3~0.6美元/千瓦时^[1]。此外,还存在外部依赖性强、价格波动和供应不确定性有关等缺点,这与柴油机排放所产生的环境问题也相关。

在淡水稀缺的情况下,与柴油发电相关的问题更应引起重视,因为这种情况在众多岛屿都可能会发生。由于远运输淡水往往是较为昂贵的选择,故往往采用海水淡化的方式获取淡水,这样便需要大量的电力供应^[2]。Canary岛将部分电力份额用于海水淡化,根据季节的不同,5%~30%的电力被用来为反渗透(Reverse Osmosis, RO)海水淡化装置供电。所有这些因素导致了化石燃料远运输的费用高昂,这部分电能占海岛电网GDP比例通常为8%~20%,高于大陆电网的平均值(4.5%)^[3]。

国外已经有许多研究和示范工程将可再生能源系统(Renewable Energy System, RES)引入海岛电网中,并且已经有几个成功的例子^[4]。实际情况表明,在柴油发电机的基础上将PV或风机引入现有MG,可在项目寿命期间节省大量的燃料和资金^[5]。然而PV等可再生能源发电存在间歇性、不连续和随机性等问题,对于发电来说是很严重的技术问题,在受局限的电网中更难以管理。宣称成为第一个100%可再生能源岛的El Hierro应用风能资源发电比例突破了30%,这个目标是通过利用海岛独特地形的水力抽水蓄能系统来实现的^[6]。这一趋势在许多海岛都得到了证实,即使在储能系统存在的情况下,超过一半的电能由RES产生也是非常罕见的^[5]。

1.4 海岛微电网规划的研究现状

随着全球能源、环境问题日益突出,分布式发电受到各个国家专家学者的青睐,而微电网技术以其对分布式发电灵活高效的整合能力成为智能电网的重要组成。微电网有并网运行和孤岛运行两种运行方式。并网运行时,大电网可以作为微电网可靠性供电的重要支撑;而孤岛运行时,微电网存在的不确定因素使运行环境更加复杂。

微电网是集成了大量负载和分布式能源(如光伏、风能、存储系统、可控分布式发电机和可控负载)的微型电力系统。通过连接和断开电网,MG可以以并网或孤岛模式运行。将间歇性可再生能源(RES)以灵活和分散的方式整合的潜力使得MG的概念更具吸引力。由于发电容量、负荷需求和电价的随机性,除了储能装置缓冲效应引起的MG能源

管理整个时间段的状态转换外, MG 的最佳运行是极具挑战性的复杂工作。

光伏发电和风力发电是目前最为成熟的新能源发电,但是,太阳能和风能受自然条件的影响,存在很大的不确定性。由于不同季节气流变化的影响,风能受季节变化的影响很大,而且由于风速的实时变化,风力发电具有很大的波动性和间歇性,会对电网的稳定性产生不利影响。全年的不同天气下,受阴晴变化的影响,以及一天内的昼夜变化,太阳的光照强度也有所不同,尤其在夜间太阳能发电不能得到利用。所以单独的太阳能发电或者风力发电都具有很大的波动性,并网后不利于电力系统的稳定运行。为了改善可再生能源发电的波动性,稳定其输出功率,往往需要为其配备大容量的储能来平衡其功率输出。储能的成本相对较高,大容量的配备储能系统必然导致总发电成本的提高,不利于可再生能源发电的推广和发展。而太阳能和风能,本身就具有天然的互补性。从季节上看,秋季、冬季、春季太阳光照相对较弱,但是此时的风力较为强劲,而在夏季太阳光照较强,风力相对较弱;从一天的昼夜变化上看,白天太阳光照充足,风力相对较弱,而夜间太阳光照消失,但是风力相对强劲。因此,相对于单独的风力发电系统或单独的太阳能发电系统来说,采用风光互补的新能源电网系统可以充分地利用风光能源的互补特性,不但提高了能源利用的效率,而且降低了对储能系统的要求。所以,风光互补发电系统是一种比单一光伏或风力发电更经济、可靠的选择。

解决离网型海岛电力供应的根本途径在于:根据海岛自身丰富的可再生能源优势,适度合理选择,综合利用多种可再生能源,并配以相应的储能系统,结合完善的控制策略及优化调度方法,组成分布式可再生能源供电体系,构成独立运行的微电网。海岛微电网的优势在于,不仅能够充分利用海岛丰富的可再生能源,发挥经济及环境优势,还可以为岛上的海水淡化系统提供充足的能源供给,解决岛上居民生产生活的用水问题。相关的研究及示范工程建设已经在国内外广泛开展。

国内外目前针对 MG 的分布式电源容量配置已经有了一些研究成果。在早期的研究中,学者主要针对的分布式电源优化配置目标函数包含 MG 系统经济成本、系统供电的可靠性、电压偏差以及环保性等;所采用的优化算法主要包括 NSGA-II、遗传算法、微分进化算法等^[7-9]。近年来,针对微电网中储能系统的容量配置也较为成熟,系统的经济性和可靠性是最常见的优化目标,采用不同类型的 MG,会获得不同储能系统的配置结果^[10-12]。针对考虑居民用水负荷的 MG,文献[13]以经济性、环保性等几个目标进行了多目标容量配置。针对含有海水淡化负荷的海岛,文献[14]以产水成本最小为目标,并通过遗传算法进行了优化模型的建立与求解;文献[15]提出了可再生能源互补的电源容量配置方法,采用海水淡化单元、可再生能源、储能系统、PV 板倾斜角度、风机安装高度为优化变量,并以经济性为目标函数进行了计算。

MG 中可再生能源的容量配置是一个复杂的问题,其结果会直接影响 MG 运行的各项性能。由于配置问题包含大量的目标函数和约束条件,使得求解变得十分困难,目前主要采用专业软件和智能优化算法来解决。使用较为普遍的软件有 HOMER^[16] 和 Hybrid2,但在实际问题中上述软件的应用都具有局限性。当前解决该问题使用较为广泛的算法是多目标粒子群算法^[17,18] (hybrid Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO), MOPSO 被广泛应用于解决非线性、不可微的多维优化问题中^[19,20]。

1.5 海岛微电网电力调度的研究现状

对于含可再生能源(RES)分布式发电的微电网系统,其内部各微电源之间的协调配置极为复杂。由于可再生能源具有的间歇性和波动性,在微电网环境下,如何合理地协调优化它们之间的运行调度问题极为重要。对此,国内外学者进行了广泛而深入的研究。

风电在不同类型的 RES 中是快速发展的能源技术之一^[21]。作为化石燃料电厂的竞争替代品,2012 年风力发电占全球可再生能源发电量的 39%,而水电和太阳能发电则占 26% 的份额^[22]。目前,主要采用发电技术已成熟的风光发电,因为两者的互补特性可以提高微电网系统的可靠性,同时可以减少对储能系统的损伤。在此基础上,波浪能发电受时段影响较少,发电较为稳定,采用三者结合的方式有望进一步提高电力的可靠性和稳定性。部分地区还可以考虑潮流能融入,但本书未探讨潮流能等其他海洋能。对于海岛 MG 系统,国内外学者针对其运行调度问题进行了广泛研究。

目前,已经提出了多种方法来考虑各种目标函数、约束条件和建模不确定性从而优化 MG 的调度计划。文献[23]详细介绍了基于 MG 多时间尺度的调度方案,将日前调度和日内调度进行双层研究,不同层面通过不同的目标函数进行优化,最后得到发电单元的计划出力结果。文献[24]介绍了为确定不同类型 RES 运行模式和目标的运行计划而提出的优化方法,并将 AGENT 思想和混沌思想混合对粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)进行了改进。文献[25]对微电网的可中断负荷进行了更深层次的研究,建立了考虑联络线的多目标函数模型。海岛 MG 多尺度调度的示意图如图 1.1 所示。

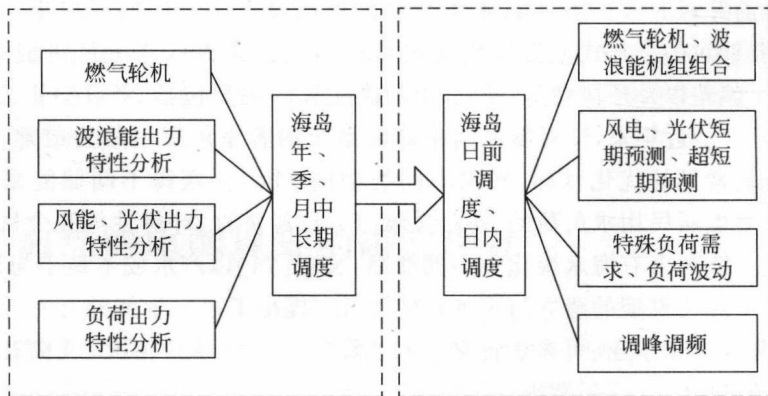


图 1.1 海岛微电网多尺度调度示意图

目前采用数学规划和启发式技术对 MG 的运行建模与规划进行了许多研究。文献[26]提出了一个 MG 的控制框架,旨在最大限度地降低运营成本,并在并网运行模式下实现收益的最大化。在孤岛模式下,调度模型以可调度和不可调度 REG 提供负载的电量最大化为目标。文献[27]通过遗传算法解决了联合优化孤岛微电网的容量方案和运行

策略的问题。在类似的研究中,文献[28]建立了以最小总燃料和运营成本为目标函数的混合整数线性数学规划模型,确定了混合电网的最优配置和运行计划。且该模型被应用于偏远地区的案例研究中,证明了提出的方法降低了成本,同时提高了能源供应的可靠性。

上述研究的经济调度都归为动态经济调度。动态经济调度模型的特点主要体现在调度模型约束条件的特殊性上,其中,有关 RE 的随机波动特性则为其重点研究内容之一。许多学者对处理微电网运行中的不确定性的方法进行了研究。文献[29]针对热电联供调度模型,考虑了随机变量的影响,建立了基于机会约束的规划模型,模型目标函数为制热的总收益最高。文献[30]也使用随机规划处理微电网能量调度问题,提出的模型旨在最小化成本和功率损耗,同时考虑了 RES 功率输出的不确定性。

目前关于微电网动态经济调度模型的研究首先是通过加强时间关联性的约束条件来体现其动态特性的;其次,有关 REG 发电功率随机性也是体现动态特性的重要方面,故合理有效地处理 RE 出力随机性对海岛微电网调度研究有着重要意义。

1.6 本书主要内容

目前,在海岛上无论是采用架空线还是通过架设海底电缆与陆上大电网进行互联供电,都需要前期投入大量的财力和物力,且后期的运行维护比较困难。太阳能、风能等自然资源具有间歇性、随机性的特点,如果不采取措施直接发电,发电功率不可控,在一些时段容易造成发电量与负荷需求量的严重不平衡等问题。组建微电网并在其中配置储能系统和辅助柴油发电机是有效解决这个问题的途径之一,本书首先从微电网的容量优化方面进行研究;在海岛 MG 的日前经济调度研究中,本书结合了相关理论,围绕海岛 MG 展开了多层次的探索性研究工作。本书共分 11 章,具体内容安排如下:第 1 章概述海岛微电网规划与调度的背景与现状;第 2 章介绍海域微电网可再生能源的发电特性和模型;第 3 章介绍海域微电网电源与调度优化中使用的一些方法的基础知识;第 4 章介绍海岛微电网的二元储能装置的容量优化配置;第 5 章探讨基于概率潮流算法的海岛微电网电源的优化定容与选址。第 6~9 章介绍电力优化调度。其中,第 6 章介绍主动重构技术在改变微电网运行方面的可能性;第 7 章介绍计及安全约束的电力调度技术;第 8、9 章利用场景法和不确定理论探讨海域微电网的不确定性调度问题。第 10、11 章分别从双层优化和融入可靠性指标两方面介绍相关处理方法。

参考文献

- [1] IRENA. Renewable Desalination: Technology Options for Islands [R], 2015.
- [2] Astolfi M, Mazzola S, Silva P, et al. A synergic integration of desalination and solar energy systems in standalone microgrids [J]. Desalination, 2017, 419: 169-180.