

孤岛微电网能量管理系统研究综述

雷基林¹, 余林兴¹, 别玉^{1,2}, 徐稚博¹, 肖雨寒¹

(1. 云南省内燃机重点实验室(昆明理工大学), 云南省 昆明市 650500; 2. 昆明学院机电工程学院, 云南省 昆明市 650214)

Review of Energy Management Systems for Islanded Microgrids

LEI Jilin¹, YU Linxing¹, BIE Yu^{1,2}, XU Zhibo¹, XIAO Yuhan¹

(1. Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engines (Kunming University of Science and Technology), Kunming 650500, Yunnan Province, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University, Kunming 650214, Yunnan Province, China)

摘要:【目的】在能源资源紧缺与环保需求加剧的背景下, 分布式供能技术尤其是可再生能源技术因能效高、经济性好、安装灵活而备受关注。对于公共供电网无法覆盖的高原、边防、孤岛等偏远地区, 孤岛微电网已然成为解决用电难的关键技术。然而, 如何深入优化能量管理效能, 仍是当前面临的一大挑战。为此, 围绕孤岛微电网中电能的经济性和稳定性两大核心目标展开综述。【方法】首先分析了国内外孤岛微电网的发展现状及研究重点。然后探讨了孤岛微电网的基本功能和管理对象; 此外, 还介绍了微电网能量管理的技术路线和3种控制策略; 最后, 结合现有技术缺陷和新型技术的发展对孤岛微电网能量管理系统的研究方向进行了展望。【结论】研究结果能够有效应对可再生能源的波动性和不确定性, 保证系统的稳定运行; 可以有效降低储能成本, 提高能源利用效率, 从而实现更高的经济效益; 也可对未来孤岛微电网与新型技术的深度融合提供参考和启示。

关键词: 分布式供能; 孤岛运行; 微电网; 能量管理; 储能; 优化算法; 控制策略; 人工智能

ABSTRACT: [Objectives] Against the backdrop of energy resource scarcity and increasing environmental demands, distributed energy supply technologies, particularly renewable energy technologies, have attracted significant attention due to their high energy efficiency, cost-effectiveness and flexible installation. For remote areas such as plateaus, border regions and islands, which are beyond the coverage of public power grids, islanded microgrids have become the key technology to

address electricity access challenges. However, optimizing energy management efficiency remains a major challenge. This paper reviews the two core objectives—economic efficiency and stability—of electric energy in islanded microgrids. [Methods] The current development status and research priorities of islanded microgrids, both domestically and internationally, are analyzed. The basic functions and management objectives of islanded microgrids are discussed. Additionally, the technical approaches for microgrid energy management and three types of control strategies are introduced. Finally, the paper provides a discussion of future research directions for islanded microgrid energy management systems, based on existing technological limitations and the ongoing development of new technologies. [Conclusions] The research results can effectively deal with the volatility and uncertainty of renewable energy and ensure the stable operation of the system. It can effectively reduce the cost of energy storage, improve the efficiency of energy utilization, and achieve higher economic benefits. It can also provide references and insights for the future integration of islanded microgrids with new technologies.

KEY WORDS: distributed energy supply; islanded operation; microgrid; energy management; energy storage; optimization algorithms; control strategies; artificial intelligence

0 引言

近年来, 为积极响应国家能源可持续发展战略, 光伏发电和风力发电的装机容量持续攀升, 从而极大地推动了微电网(microgrid, MG)行业的迅猛发展。发展整合多种可再生能源和储能的微电网是助力构建以新能源为主体的新型电力系统

基金项目: 云南省重大科技专项计划(202402AE090009); 云南省省市一体化专项(202202AC080004)。

Project Supported by Major Science and Technology Special Program in Yunnan Province (202402AE090009); Specialized Provincial and Municipal Integration in Yunnan Province (202202AC080004).

的重要手段^[1-3]。微电网作为小型发配电系统的杰出代表,不仅是新型电力系统不可或缺的重要组成部分,而且具备灵活多变的运用方式,既可与大电网相连实现并网运行,也能作为孤立的自治系统进行离网运行,兼具自我控制和自我能量管理的特点^[4-5]。

孤岛微电网运行时,通过调节分布式电源的出力,满足负荷需求,从而保障系统内的供电可靠性^[6-7]。随着微电网工程的持续深化,以及光伏发电、风力发电、储能技术的不断革新,孤岛微电网不仅在海岛、边防等偏远地区得到了广泛运用,更在易受自然灾害影响或电网基础设施不可靠的地区逐步普及。其控制结构主要分为集中式控制和分布式控制2种形式^[8]。集中式控制依赖于中央控制器与多个从控制器的协调工作,从而实现微电网的能量管理;而分布式控制则无需中央控制器,各微电网单元独立进行能量管理,并通过个体间的协商达成能量的有效管理。为确保孤岛微电网系统的高效稳定运行,优质的能量管理和控制系统至关重要^[9-10]。

本文立足于国内外孤岛微电网能量管理系统发展与研究现状,介绍了各微源出力、负荷需求、功能结构、组成模块以及核心算法等内容,并结合当前的技术缺陷,对该领域未来的研究方向进行了展望。

1 孤岛微电网能量管理系统研究现状

1.1 孤岛微电网结构

孤岛微电网作为一种独立运行的电力系统,通过集成太阳能、风能等可再生能源发电技术,以及配套的储能设备和电力电子控制器,为本地用户提供稳定和高效的电力服务,常见的孤岛微电网结构如图1所示。

能量管理系统在孤岛微电网中扮演着核心角色,它通过实时监控和优化控制,确保电力供应与需求之间的平衡,同时采用功率平滑控制策略,有效应对可再生能源的波动性,进一步提升了电力系统的稳定性^[11]。随着可再生能源的集成,孤岛微电网的能量管理系统也在不断地优化提升,以适应不断变化的能源需求。国内外研究人员对

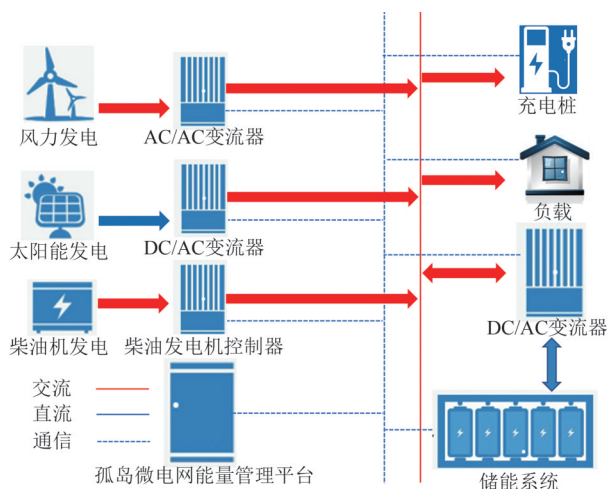


图1 孤岛微电网结构图

Fig. 1 Structure of islanded microgrid

孤岛微电网能量管理系统的研究不断深入,并建立微电网示范工程,探索多种管理策略和优化算法,以提高系统的运行效率和适应能力。

1.2 国外研究及应用现状

1999年美国可靠性技术解决方案协会(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS)对微电网的结构、控制、经济等方面进行了研究,并于2002年正式提出了相对完整的微电网概念^[12]。美国孤岛微电网能量管理系统的研究重点主要集中在提高分布式电源的可靠性、提升电能质量、降低成本和实现精确控制等方面。为此,美国能源部与通用电气合作,建立微电网示范工程,用于研发一套能够为微电网设备提供统一控制和保护的微电网能量管理系统^[13]。为了提高能量管理效益,美国麻省理工学院的研究人员提出了虚拟电厂技术,对分布式电源的深度整合带来了显著的经济和环境效益,是一种很有前景的大规模分布式发电管理解决方案^[14-15]。

欧洲孤岛微电网的发展呈现出技术水平高、应用场景多样化和政策支持强等特点,其研究重点集中在国际前沿科技和技术难点,包括微电网的控制策略以及能量管理方法^[16]。例如,文献[17]介绍了法国孤岛微电网能量管理系统的最新进展,探究了基于优化的能源管理策略,为未来的研究方向提供了参考;在人工智能(artificial intelligence, AI)^[18]快速发展的时代,其应用领域不断拓展,如文献

[19]提出智能电网是电网向碳中和过渡的关键，这也推动欧洲孤岛微电网能量管理系统向着与人工智能技术相融合的方向发展。总体来讲，欧美孤岛微电网在能量管理方面的研究呈现出多元化和智能化的趋势，为孤岛微电网的可持续发展提供了有力支持。

1.3 国内研究及应用现状

我国在微电网领域的研究起步较晚，但自2006年微电网技术被纳入“863计划”以来，各大高校及科研机构便积极投身于微电网相关研究之中。其中，清华大学、西安交通大学、天津大学等高校纷纷建立了微电网实验平台，并已取得了一定的研究成果^[20]。特别是清华大学的能量管理与调控研究团队搭建的直流微电网实验平台，针对基于可再生能源的直流微电网控制策略和能量管理等方面，进行了众多富有创新性的实践与研究，并成功应用于珠海唐家湾三端柔性直流配电网工程^[21]。别朝红等^[22]则聚焦于新能源接入系统安全性评估和弹性电力系统的研究，结合我国新能源转型的新特征，提出了综合能源系统弹性提升策略，为孤岛微电网能量管理系统开拓了新的研究方向。天津大学智能电网教育部重点实验室围绕智能微电网开展了系统深入的研究工作，为我国智能微电网的发展做出了重要贡献。在应用领域，我国也在沿海地区建设了一批孤岛微电网示范工程。例如，广东省珠海市担杆岛建成了国内首个孤岛微电网工程，并建立了能量管理系统，为后续孤岛微电网的建设与发展提供了宝贵

经验；山东省烟台市长岛微电网工程则采用群能量管理系统，实现微电网群系统的稳定运行，提升了供电可靠性和可再生能源消纳能力^[23]。此外，我国在军事领域也在不断推进孤岛微电网建设，未来将会应用在更多的领域。

2 孤岛微电网能量管理系统的基本功能和管理对象

2.1 基本功能

孤岛微电网能量管理系统(energy manage system, EMS)是一套集发电优化调度、负荷管理、实时监测与自动实现微电网同步等功能于一体的综合管理系统^[24]。其在预测可再生能源机组发电、优化燃料机组发电、控制储能充放电、调整可控负荷以及维持系统稳定等方面发挥重要作用。一套完整的EMS由控制系统、通信系统、数据库系统和人机交互系统四大模块构成^[25]，如图2所示，箭头所指方向即为数据和信息的流动方向。部分外部信息经数据接口传递至微电网能量管理系统，通过与数据库系统的数据进行对比分析后，向控制系统下达命令并执行相应操作，同时也通过接口与分布式电源交换信息，共同实现微电网的能量管理功能。

控制系统负责优化调度，通过多尺度协调控制策略，来维持孤岛微电网的正常运行。该系统需考虑调度周期、控制策略以及所需的各种信息，涵盖经济层面，如政策补贴、实时电价、用电成本等，微电网运行状态层面，如电能来源、设备

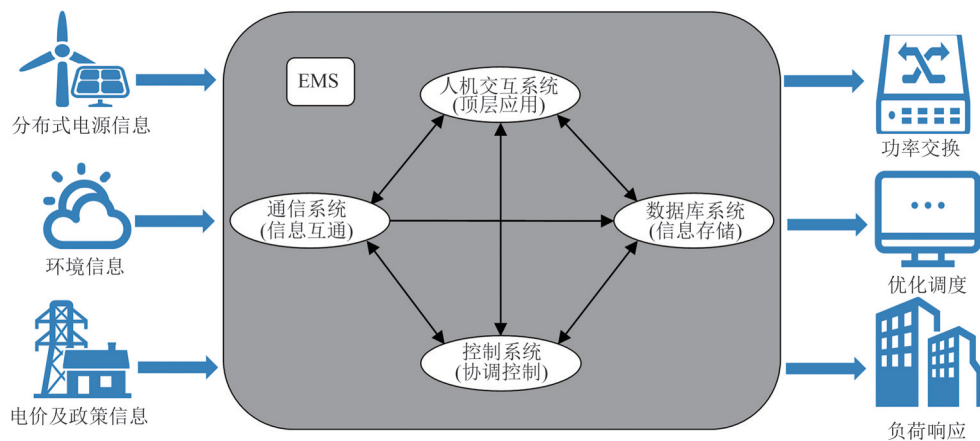


图2 EMS系统功能框图

Fig. 2 Functional block diagram of the EMS system

运行情况、储能容量和负荷信息等,以及环境层面,如天气、温度、风速等。控制系统中的预测模块基于这些信息做出相应预测,通过优化调度模块的调度策略,建立相应模型并进行状态估计和计算,以实现孤岛微电网的调度目标。

通信系统是确保微电网高效、可靠运行的关键,它主要负责信息的传递、采集孤岛微电网设备运行的数据并下达控制指令^[26]。在孤岛微电网能量管理系统中,它不仅负责实时收集和传输各个节点的发电量、负荷需求和储能状态等数据,以供中央控制系统进行监控和分析,还承担着将控制指令传达给相应设备的任务,以实现光伏逆变器、储能系统等精确控制。此外,通信系统还能促进孤岛微电网内部设备之间的协调,允许远程管理和紧急响应,以快速适应用户需求变化,进行需求侧管理。

数据库系统在EMS中主要负责整个系统的数据存储,包括实时信息及重要的历史信息,并且为EMS提供数据的查询功能^[27]。其根据历史数据,按照不同的存储周期和预设的存储策略,将实时的数据录入到数据库中,确保在系统需要时能够迅速查询和调用相关数据,从而提升系统的运行效率。

人机交互系统则主要承担管理人员与系统之间的交流任务,为管理人员提供可视化的监控与操作界面。通过人机交互系统可以随时了解孤岛微电网的运行情况和电气元件的接入情况,并能实时控制微电网的工作模式,使其工作在最佳状态。此外,人机交互系统除了显示微电网系统的基本信息以外,还可为用户提供手动控制的接口,以便更好地确保整个系统的稳定运行。

2.2 管理对象

2.2.1 分布式电源

分布式电源(distributed generation, DG)装置根据使用技术的不同,可分为热电联产发电、内燃机组发电、燃气轮机发电、小型水力发电、风力发电、太阳能光伏发电和燃料电池等^[28-29]。其中,热电联产系统^[30-31]是一种集发电与热能回收于一体的综合能源利用技术。基于热电联产的微电网凭借其高能效、低成本,在微电网领域具有广

阔的发展前景,已在天津中新生态城二号能源站和佛山冷热电联供等微电网项目中得到了实际应用^[32],但仍需关注能量的损耗问题。为此,文献^[33]利用热电联产机组和储能来缓解孤岛微电网风力发电削减的问题。对于分布式电源的管理主要是将原本分散的电源相互协调起来,通过不同的整流器和逆变器等电子电力设备将不同频率的电能平缓地转换为相同频率的电能^[34]。在这个过程中,逆变器的控制方式支撑着微电网系统的总体控制策略。对于分布式电源,其控制策略主要有恒功率控制、恒频控制和下垂控制3种基本形式^[35]。为进一步提升能量转化效率,文献^[36]针对孤岛微电网系统中感应发电机的间歇性问题,引入了一种新颖的电弹簧控制概念,并应用一阶滑模控制器,有效稳定了分布式电源的电压和频率输出。对于孤岛微电网,文献^[37]系统地阐述了如何利用强化学习来解决能量的调度问题,并提出了一种新的基于状态依赖动作集的Q学习算法,可合理分配DG产生的电能。

2.2.2 分布式储能系统

分布式储能(distributed energy storage, DES)是微电网中的能量存储与转换装置。根据充放电的外部特性,DES可分为功率型和能量型2种。功率型储能设备的功率密度大,适合提供快速的功率响应,如超级电容和超导储能等;而能量型储能设备的能量密度大,适合长时间的能量支撑,如蓄电池。随着孤岛微电网的发展,对储能系统提出了更高的要求,把功率型和能量型储能搭配使用逐步成为一种趋势。此外,日益普及的电动汽车同样具备储能功能,因此也是一种DES^[38]。储能系统在微电网中应用广泛,在并网时起到削峰填谷和能量调度的作用,孤岛运行时则常作为中心储能单元,也兼具平抑电压电流的作用^[39]。因此,合理配置并优化储能系统至关重要。文献^[40]提出一种新的能量管理策略,并引入氢基储能系统,相较于传统储能方式,有效降低了运营成本。文献^[41]则提出了一种偏远社区孤岛微电网共享储能优化策略。为解决孤岛微电网中混合储能系统的调度问题,文献^[42]构建了一个两阶段的多目标优化模型,从而确保储能系统在每个

调度时段具有充足的灵活性。优化孤岛微电网中的储能系统，是提升系统经济性与可靠性的关键所在。

2.2.3 负荷系统

孤岛微电网的负荷系统是指在微电网孤岛模式下运行时用户侧的用电设备和用电负载。对于孤岛微电网，由于未接入大电网，负荷侧主要通过需求侧响应(demand response, DR)灵活调节负荷，从而减轻负荷变化对系统稳定性的冲击。文献[43]以降低成本为重点，开创了一种集成微电网和需求侧管理来优化电力系统的新方法，借助可控单位费用较低的成本优势，构建了一种独特的微电网调峰能量管理系统。而文献[44]则通过整合储能和需求响应机制，提出了优化微电网运行的稳健解决方案。此外，智能微电网的发展为负荷侧响应提供了理想的平台。文献[45]利用智能微电网中的机器学习和深度学习模型，精确预测负荷侧需求，从而提升了负荷系统的响应速度。未来，孤岛微电网负荷系统在负荷管理、设备维护、网络安全和应急预案等方面还需进一步探索与突破。

3 孤岛微电网能量管理系统技术路线的构建

3.1 孤岛微电网能量管理系统框架

孤岛微电网的能量管理是一个复杂且多维的系统工程。其需要根据孤岛微电网特定的需求，来构建全面的能量管理系统框架，主要是通过建模、优化目标设定、优化方法选择和优化算法挑选等多个环节，来实现系统的高效、经济和可持续运行，其技术路线如图3所示。

3.2 模型搭建

搭建数学模型是实现孤岛微电网能量管理策略的前提。孤岛微电网能量管理的控制目标可以描述为多目标函数^[46]或者是考虑单方面的单目标函数^[47]。准确有效的数学模型可以保证优化方法提供符合实际运行的最优策略。

在孤岛微电网的建模过程中，由于可再生能源的发电成本低，故调度策略一般优先考虑绿色能源的利用。然而，可再生能源发电具有波动性

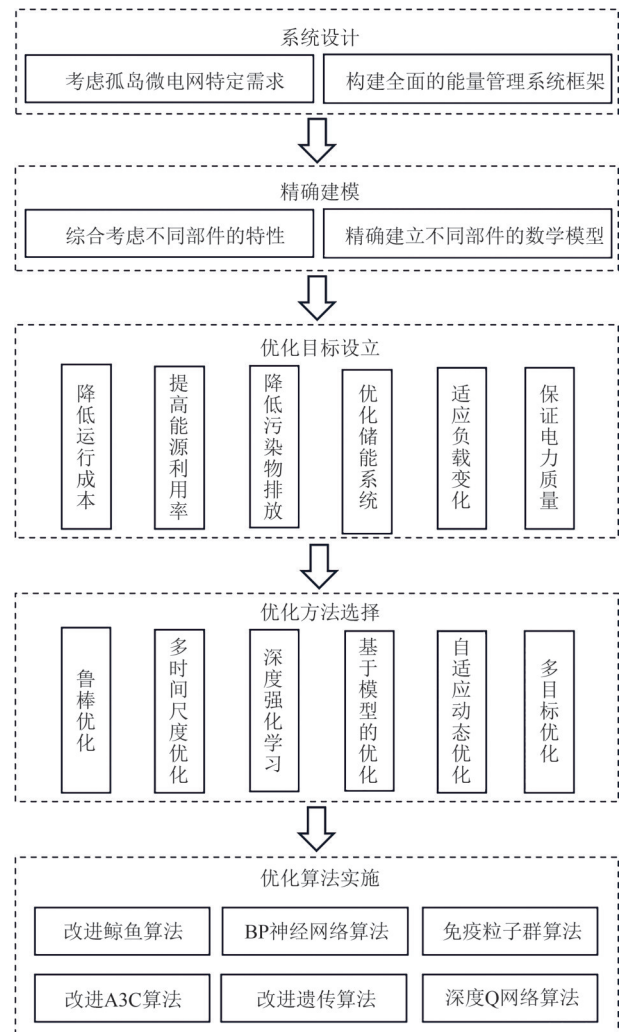


图3 能量管理系统构建的技术路线图

Fig. 3 Technology roadmap for building energy management system

和间接性，难以掌握其发电规律，故需要根据不同设备的特点，建立与之相对应的数学模型。针对分布式电源输出功率随机波动和负荷频繁投切等问题，文献[48]详细讨论了多种发电系统的建模与仿真，最后提出了一种间歇性发电资源供电的孤岛直流微电网建模与控制。对于分层控制策略的孤岛微电网，二次控制建模存在相当大的局限性，为此，文献[49]提出了一种模拟不平衡孤岛微电网二次控制的三相稳态建模方法。为改善微电网的惯性、阻尼和强度，文献[50]搭建了一种基于变流器和同步机的混合孤岛微电网模型，并开发了适用于同步电机、电网跟随和电网形成变流器的模型。此外，还研究了一种新的电网形成技术，并推导出了小信号分析的模型。然后，

又构建了9种场景的全阶段空间模型以及用于验证其有效性的仿真模型,为孤岛微电网的发展提供了一种新的研究方向。储能系统的建模通常采用电力库模型^[51]和动力电池模型(kinetic battery model, KiBaM)^[52],约束条件主要是考虑电力容量约束和荷电状态约束。其通过合理的建模和约束设置,可以确保在孤岛微电网中发挥平抑波动的作用。

3.3 优化目标设立

设定优化目标是实现孤岛微电网能量管理策略的关键。优化目标主要依据实际应用场景来设定,一般主要考虑运行成本、污染物的排放、储能设备的容量和负载需求变化等方面。为了确定最低的运行成本,文献[53]深入研究并对比了12种不同的资源组合,包括并网和离网2种类型,为孤岛微电网的经济运行提供了有力支持。在运行稳定性方面,文献[54]采用了一种灵活的加权模型预测控制技术来提高系统的稳定性。针对冷热电联供型微电网,文献[55]引入了地源热泵元件,统筹了冷热电各机组的出力,并进行优化调度,提高了系统的稳定性和经济性。孤岛微电网能量管理系统根据控制目标的不同,可分为单目标优化和多目标优化两大类。其中,多目标优化可以更全面地提高系统运行稳定性。因此,文献[56]构建了包含经济、低碳及可靠性在内的多目标驱动的云储能双层优化配置模型,并基于第二代非支配遗传算法来实现模型求解,通过算例分析验证了多目标优化的有效性。随着微电网技术的不断发展,将会考虑更多的影响因素,故多目标优化是未来能量管理系统发展的重要趋势。

3.4 优化方法选取

优化方法是实现孤岛微电网能量管理策略的核心。能量管理本质上是一个优化问题,即在给定的约束条件和优化目标下,当条件发生变化时应采用何种方式快速地对系统稳定运行。目前,研究较为成熟的优化方法有鲁棒优化^[57]、多时间尺度优化、深度强化学习和基于模型的优化等。鲁棒优化方法将不确定参数以集合的形式进行描述,在给定的集合范围内求解出满足所有不确定参数的可行解,从而有效应对不确定性因素对优

化方案的影响。文献[58]研究了基于储能和需求灵活性的主动配电网能量管理安全约束的鲁棒优化方法,将不确定性事件作为约束条件,降低了系统的运行成本,在面对严重事故时提高了安全性。多时间尺度优化方法则要求模型的预测精度高,以实现更好的优化效果。为此,文献[59]提出了一个不确定环境下含绿色制氢的混合微电网的多时段、多时间尺度的随机优化模型,并通过马尔可夫决策过程(Markov decision process, MDP)解决问题,显著提升了优化效果。模型预测控制是根据预测不确定性信息来调动优化命令的方法,通过反馈调节实现闭环控制。为有效控制孤岛微电网电压源逆变器的输出电压和频率,文献[60]提出了一种基于卡尔曼的在线自适应约束广义预测电压控制策略。这些优化方法的应用,不仅提升了孤岛微电网能量管理策略的效能,也为微电网的可持续发展提供了有力保障。

3.5 优化算法实施

选取先进算法是实现孤岛微电网能量管理策略的重要保障,结合优化方法,可以显著提升微电网能量管理系统的效率和稳定性。目前,改进鲸鱼优化算法、反向传播(back propagation, BP)神经网络算法以及粒子群算法等求解优化问题的有效算法,已在微电网的能量管理中得到了广泛应用。为实现分布式能源的合理优化配置,以达成更经济和环保的目标,文献[61]提出了一种基于阿基米德混沌精英鲸鱼优化算法。而文献[62]则通过整合全年风速、太阳辐照度和负荷等数据,并结合创新的强化学习神经网络算法,在降低系统运用成本的同时,还提高了系统可靠性,为孤岛微电网能量管理系统提供了有价值的见解。在微电网容量优化方面,文献[63]根据气象和负荷信息,运用改进的免疫粒子群算法对混合储能的容量进行了优化,从而提高了微电网运行的经济性和稳定性。由此可见,在孤岛微电网运行优化过程中,一旦确定了目标函数和约束条件,优化算法的优劣将直接决定最终的优化效果。

4 孤岛微电网能量管理系统的控制策略与应用

对于孤岛微电网能量管理系统控制策略, 根据不同应用场景, 可以分为主从控制、对等控制和分层控制3种^[64]。

4.1 主从控制策略

主从控制是基于能量管理系统中各DG的重要程度来确定的一种策略。其主要应用于孤岛模式下, 在微电网从孤岛模式向并网模式切换时, 保证整个系统平稳地切换。同时, 还用于解决可再生能源渗透率过高时主微电源与从微电源间的协调问题, 从而保持电压频率的稳定, 实现多种能源的优化调度。

在孤岛微电网中, 优先考虑一个稳定性最佳、容量最大的DG作为主电源, 然后通过恒频控制获取系统需要的电压和频率, 在这一过程中发挥着平抑波动和维持系统平衡的作用^[64]。而从微电源则根据主微电源提供的电压、频率和幅值等关键参数实时进行调整, 以维持微电网的整体平衡。此外, 在主从控制的框架下, 主电源还要保证能快速响应负荷变动, 并进行相应的调整, 而其他从属的微电源只需跟随主微电源的变化做出同步调整, 其结构如图4所示。对于孤岛微电网而言, 采用主从控制可以更好地维持系统的频率, 从而保持系统的电压和频率的稳定。然而, 也存在对微电源依赖程度过大的问题, 从而影响整个系统的稳定性。为解决这一问题, 文献[65]提出了一种微电网孤岛模式下的改

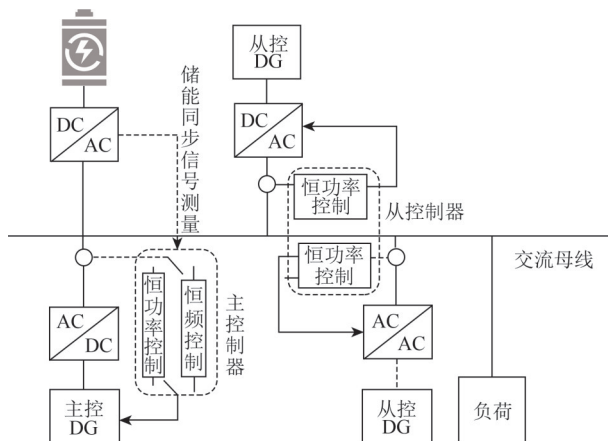


图4 主从控制结构

Fig. 4 Master-slave control structure

进型主从式协调控制策略。

4.2 对等控制策略

对等控制策略没有主从之分, 各个DG单元均以同等的地位参与孤岛微电网内电压和频率的构成。在这一策略中, 每个DG依据自身的参考量进行独立控制操作, 无需与其他控制单元通信, 从而减轻了通信压力, 并实现了“即插即用”的便捷性^[66]。在包含多个分布式电源的微电网中, 对等控制策略能实现各电源之间的协调运行, 并优化整体的能源输出和负荷分配。同时, 还减少了对中央控制器的依赖, 可以通过局部信息实现有限的能量管理, 故常用于高效和可持续运行的孤岛微电网, 其结构如图5所示。

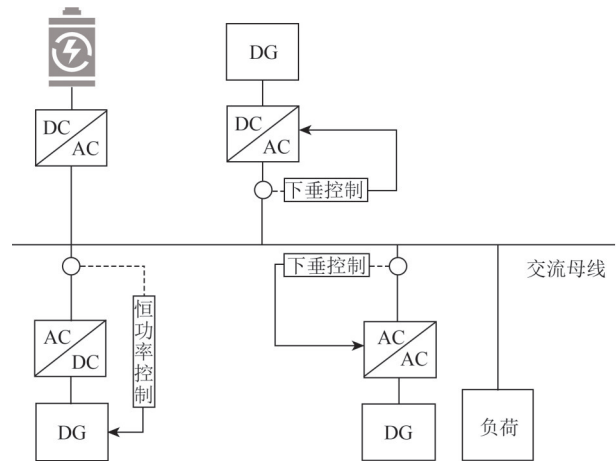


图5 对等控制结构

Fig. 5 Peer-to-peer control structure

在对等控制中, 下垂控制作为最常用的控制手段, 发挥着关键作用。当系统负荷发生变动时, 各分布式电源能够基于预设的相关参数, 独立地调整自身的电压和频率, 从而确保电能输出的稳定性, 保持整个系统的平衡与可靠运行。但是, 这种控制不可避免地会存在一定的误差, 从而导致系统难以保持稳定。为减小误差, 文献[67]提出一种改进虚拟同步发电机和下垂控制双驱动的稳定运行控制策略, 通过将逆变器等效为能够调节电压和频率的端口, 实现下垂控制的转化, 有效减小了实际结果与预期之间的误差。

4.3 分层控制策略

分层控制是指采用中央控制器来统一协调管理分布式电源和负荷, 保证微电网安全、可靠和

稳定运行^[68]，其结构如图6所示。目前最常用的分层控制将系统划分为3层结构：最底层是系统设备层，包含各类分布式电源以及负荷，主要执行配电网的管理和经济运行任务；中间层为微电网中央控制器(microgrid central control, MGCC)，承担统一控制系统运行、对底层的分布式电源和负荷进行控制的重任，扮演着中间枢纽的角色；最上层为EMS，通过统一的分配调节，实现人与系统的信息交流，方便系统管理^[64]。对于传统的孤岛微电网调度策略，其主要由MGCC集中管理，这引入了对单点故障的脆弱性。针对这一局限性，文献[69]提出了一种基于改进交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)和逆强化学习(inverse reinforcement learning, IRL)的双层能量管理策略，并验证了策略的有效性。

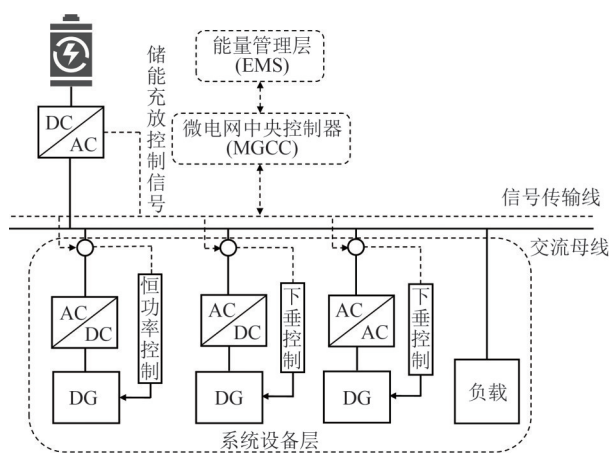


图6 分层控制结构

Fig. 6 Hierarchical control structure

分层控制策略通过将任务有效分散至不同层级，增强了微电网在面临局部故障时的稳定运行能力。这一策略在复杂环境，尤其是大规模微电网群的协调运作以及在极端条件下的微电网恢复中显示出巨大优势。以美国密歇根州的DTE Energy微电网项目为例，该工程专注于提升微电网的自适应能力，特别是在应对极端条件下。分层控制策略在此可以充分发挥自身优势，以确保微电网在多变环境下的持续稳定运行。由于孤岛微电网分布式电源具有随机性和波动性，加之分层控制未充分考虑储能单元的协调和孤岛系统容

量不足的情况。为此，文献[70]提出了一种基于电压分层控制的直流微电网及其储能扩容单元功率协调控制策略，旨在实现多储能单元充放电功率的自适应分配，确保微电网安全可靠运行。对于混合储能系统，文献[71]提出一种考虑平抑未来时刻风电功率波动的混合储能系统超前模糊控制策略，对未来孤岛微电网的混合储能控制系统研究提供了有益参考。此外，考虑到孤岛微电网中分布式电源与负荷的分散性，远距离的通信存在一定风险。因此，在分层控制中合理选择底层的控制策略，将是未来研究的一个重点方向。

5 孤岛微电网能量管理现有技术的不足与未来发展方向

5.1 现有技术的不足

根据本领域最新研究进展可以看出，尽管孤岛微电网能量管理领域已取得显著进展，但仍存在一些不足之处：

1) 预测准确性不高。可再生能源(如风能和太阳能)易受天气、地域的影响，而表现出显著的波动性和不确定性。目前，孤岛微电网能量管理系统在预测这些能源的发电量方面仍存在不足。

2) 控制策略单一。现有的孤岛微电网控制策略较为单一，难以适应不同运行条件下的能源优化需求。特别是在应对自然灾害或突发事件时的抗干扰性和自恢复能力较弱。

3) 模型泛化能力不足。搭建的仿真模型虽在特定的条件下表现良好，但在多变的环境中显示出泛化能力的不足。现有模型在实时响应外界条件变化方面存在局限性，尤其是在数据的即时更新方面能力不足，这影响了决策的时效性和准确性。

4) 数据处理能力有限。高效率的能量管理系统需要大量精确的数据来作为支撑。但目前的能量管理系统在数据的采集、整合、存储、传输以及安全性等方面仍面临诸多挑战。

5) 技术集成度低。不同能源系统之间的集成度不够，影响了能源的综合利用效率。

5.2 未来发展方向

5.2.1 人工智能在孤岛微电网能量管理中的应用

AI在孤岛微电网能量管理系统领域的应用,正逐步展现出巨大的潜力和价值,并实现了人工神经网络、模糊控制逻辑和强化学习等多方面技术的融合。孤岛微电网作为一个相对独立、自给自足的电力系统,通过融入AI技术,可以实现更高效、精确的能量管理。文献[72]借助神经网络算法和最优转矩管理,成功确定了光伏和风力源的最大功率点,从而提高了能源利用率。而文献[73]利用分布式在线模糊控制系统解决了孤岛微电网在风电不确定条件下的负荷波动问题,确保了电力供应的稳定性。提高孤岛微电网能量管理系统的性能,可以充分利用人工智能的非线性控制系统,特别是用于直流微电网的稳定和电流的双向流动。例如,文献[74]针对包含太阳能和风能等可再生能源的微电网,提出了基于混合储能系统的直流微电网非线性控制结构,显著提高了系统运行效率。此外,在微电网的能量管理系统中引入人工智能还可用于改善电能质量和探索电力共享。然而,人工智能在应用中也存在一些问题,如对数据严重依赖、算法复杂和易受外界影响等。因此,在未来研究中,需要针对这些问题进行深入研究。

5.2.2 区块链在孤岛微电网能量管理中的应用

区块链技术正逐步在孤岛微电网的能量管理中得到应用。区块链具有去中心化、不可篡改和公开透明等特点,会成为下一轮技术创新的新方向^[75]。孤岛微电网能量管理系统与区块链技术充分融合,能够实现协同化、智能化、数字化和低碳化等目标,同时确保交易过程的公开性、安全性和可靠性。文献[76]总结了区块链技术在能源领域的研究现状,并根据能源区块链的现实需求,提出了多层次跨链协同监管的能源区块链架构,为区块链技术在孤岛微电网中的应用提供了指引。在应用层面,文献[77]引入了一个基于区块链的综合能源管理平台,该平台将双边交易机制与微电网内优化的能源流相结合,解决了微电网内的物理约束,通过将最优潮流问题和双边交易机制转化为单一的优化问题,有效提升了微电网的电

能质量。然而,随着跨链技术的引入,微电网的隐私与安全问题愈发凸显。为此,文献[78]提出了一种融合区块链智能合约、共识机制和加密技术的微电网集群调度架构,有效解决了微电网集群中的数据信任、隐私保护和可靠性等问题。随着技术的成熟和应用案例的增多,区块链在孤岛微电网中的集成和应用将更加广泛。

5.2.3 数字孪生技术在孤岛微电网能量管理中的应用

数字孪生(digital twin, DT)是一项融合了智能传感、云平台、大数据分析和人工智能等先进技术的创新方法^[79]。随着电力企业的数字化转型和信息技术的进步,数字孪生技术已成为推动电网数字化转型的核心驱动力。

孤岛微电网的运行优化涉及大量数据信息的整合、复杂系统关联特征的提取以及复杂模型的构建。因此,将数字孪生技术应用于孤岛微电网能量管理系统,能进一步保证微电网的稳定运行。在建模层面,文献[80]针对传统建模方法的局限性,创新性地采用实景建模技术,为电网数字孪生系统的三维模型构建和成果展示提供了新的技术手段,也为孤岛微电网数字模型的构建提供了崭新的思路。此外,文献[81]还提出了一个包含云层、雾层和用户层的3层模型,用于可再生电网中的最优能量管理。在控制层面,文献[82]提出了一种基于数字孪生架构下的智慧微电网多智能体协调优化控制技术,该技术通过构建数字孪生架构来设计控制框架和构建目标函数,进而建立协调优化控制模型,并在约束条件下利用改进的粒子群算法实现模型求解,最后实现降低经济支出的目标。针对需求侧管理的智能孤岛微电网,文献[83]提出了一种基于学习的优化算法,在数字孪生模拟器中用于智能孤岛太阳能微电网的管理,从而辅助决策者平衡需求侧的稳定性。综上所述,数字孪生技术为孤岛微电网的数字化转型和智能化发展开辟了新道路。

5.2.4 其他新能源辅助发电的融合

基于燃料电池(fuel cell, FC)技术的孤岛微电网能量管理系统,通过集成光伏、风电等可再生能源与高效率、低污染的燃料电池,能够显著提

升微电网系统供电的可靠性与运行灵活性。

对于融合了燃料电池的孤岛微电网,文献[84]提出了一种基于组网型电源协调控制的混合运行模式,解决了孤岛微电网运行时难以同时实现频率稳定、供电可靠以及新能源高效消纳的问题。而文献[85]利用白鲸优化开发了一种适用于光伏、燃料电池、蓄电池和超级电容集成的直流微电网能量管理系统,通过与传统优化算法的比较,验证了其有效性。此外,在热电联产的孤岛微电网中,可以与固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)^[86-87]相融合。由于固体氧化物燃料电池属于高温燃料电池,其发电过程产生的热量较高,具有较高的利用价值。同时,其阴极一侧可通入氢气(H₂)、甲烷(CH₄)和煤气等作为燃料气,具有高度的可拓展性和广阔的应用前景。对于含固体氧化物燃料电池的微电网,文献[88]在系统多约束的基础上,研究了一种集太阳能光伏、风力发电机、SOFC和电池储能系统于一体的单居微电网,采用改进的遗传算法——粒子群优化算法(混合优化)探索最优配置,并验证了在离网和并网2种模式下,该配置均能提升经济效益。为进一步提高固体氧化物燃料电池混合微电网的频率控制性能,文献[89]提出了一种基于镜面反射学习和动态反向学习的新型饥饿博弈搜索算法,通过与一些经典优化算法的比较,验证了其有效性和优越性。SOFC取代柴油发电机作为微电网中的辅助发电能源是未来微电网的发展趋势^[90]。然而,SOFC与微电网的融合仍面临诸多挑战,包括技术兼容性、运行稳定性、能量管理和安全保护等问题,未来需要进一步攻克。

6 结论

随着可再生能源集成技术的日益完善、先进控制和优化算法的不断发展、储能解决方案的持续优化,以及人工智能、网络安全技术的不断进步,孤岛微电网的应用领域将更加广泛。针对孤岛微电网的能量管理问题,从稳定性和经济性的角度,对适用的能量管理策略进行了分析,得出如下结论:

1) 孤岛微电网通过优化控制策略和能量管理

技术,能够有效应对可再生能源的波动性和不确定性,保证系统的稳定运行。

2) 通过优化系统设计和运行策略,可以有效降低储能成本,提高能源利用效率,从而实现更高的经济效益。

3) 尽管孤岛微电网能量管理系统在理论上具有优势,但在实际应用中仍存在一些问题。未来,需要与人工智能、区块链和数字孪生等新兴技术相融合,以实现更优的能量管理。

参考文献

- [1] 颜勤,余国翔.光储充建一体站微电网研究综述[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):1-12.
YAN Q, YU G X. Research review on microgrid of integrated photovoltaic-energy storage-charging station[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 1-12.
- [2] 魏震波,张芷琪,李银江,等.多主体合作模式下微电网规划运行一体化模型[J].电力建设,2024,45(10):47-58.
WEI Z B, ZHANG Z Q, LI Y J, et al. An integrated model of microgrid planning and operation under A multi-subject cooperation model[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 47-58.
- [3] 黄堃,付明,梁加本.基于融合专家知识DDPG的孤岛微电网频率调节策略[J].中国电力,2024,57(2):194-201.
HUANG K, FU M, LIANG J B. Frequency regulation strategy of isolated island microgrid based on fusion expert knowledge DDPG[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 194-201.
- [4] 孙永辉,孟雲帆,葛磊蛟,等.人工智能赋能微电网运行优化的应用及展望[J].高电压技术,2023,49(6):2239-2252.
SUN Y H, MENG Y F, GE L J, et al. Application and prospect of microgrid operation optimization enabled by artificial intelligence[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2239-2252.
- [5] 李翔宇,黎东阳,张正江,等.孤岛微电网系统的混合控制策略及动态滤波技术研究[J].全球能源互联网,2024,7(3):336-347.
LI X Y, LI D Y, ZHANG Z J, et al. Research on hybrid control strategy and dynamic filtering technology for islanded microgrid system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(3): 336-347.

- [6] 于永进, 孙国强, 樊英杰. 基于动态事件触发机制的孤岛微电网频率控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 60-71.
YU Y J, SUN G Q, FAN Y J. A frequency control method for an islanded microgrid based on a dynamic event-triggered mechanism[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 60-71.
- [7] 孙佳航, 王小华, 黄景光, 等. 基于MPC-VSG的孤岛微电网频率和电压动态稳定控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 51-60.
SUN J H, WANG X H, HUANG J G, et al. MPC-VSG based control strategy for dynamic stability of frequency and voltage in islanded microgrid[J]. *Electric Power*, 2023, 56(6): 51-60.
- [8] 殷辉, 陆信辉, 周开乐. 分布式与集中式储能并存的微电网负荷优化调度[J]. 中国管理科学, 2023, 31(2): 118-128.
YIN H, LU X H, ZHOU K L. Optimal load dispatch for microgrid with distributed and centralized energy storage systems[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(2): 118-128.
- [9] 刘梦璇, 郭力, 王成山, 等. 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 19-24.
LIU M X, GUO L, WANG C S, et al. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power, photovoltaic system, diesel generator, and battery storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(15): 19-24.
- [10] 刘瑞平, 袁亮, 胡铭欣, 等. 含构网型新能源发电单元的孤立电网暂态稳定性提升策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 152-161.
LIU R P, YUAN L, HU M X, et al. A transient stability improvement strategy of isolated power grids with grid-forming-based renewable energy power generation units[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(6): 152-161.
- [11] 杨彦飞, 陈洁, 廖跃洪, 等. 基于递归模糊神经网络的风电平滑控制策略[J]. 现代电力, 2022, 39(2): 228-235.
YANG Y F, CHEN J, LIAO Y H, et al. Wind power smoothing control strategy based on recursive fuzzy neural network[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(2): 228-235.
- [12] 刘鑫. 风力发电接入微电网技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
LIU X. Research on wind power access to microgrid operation control[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [13] HOLDMANN G P, WIES R W, VANDERMEER J B. Renewable energy integration in Alaska's remote islanded microgrids: economic drivers, technical strategies, technological niche development, and policy implications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(9): 1820-1837.
- [14] RUAN G, QIU D, SIVARANJANI S, et al. Data-driven energy management of virtual power plants: a review[J]. *Advances in Applied Energy*, 2024, 14: 100170.
- [15] 王雅雯. 基于需求侧响应的风光储微电网经济优化研究[J]. 广东电力, 2023, 36(9): 10-16.
WANG Y W. Research on economic optimization of wind and solar energy storage microgrid based on demand response[J]. *Guangdong Electric Power*, 2023, 36(9): 10-16.
- [16] 王鑫. 微电网能量管理策略研究与系统开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
WANG X. Research on energy management strategy and system development of microgrid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [17] BASNET S, DESCHINKEL K, LE MOYNE L, et al. A review on recent standalone and grid integrated hybrid renewable energy systems: system optimization and energy management strategies[J]. *Renewable Energy Focus*, 2023, 46: 103-125.
- [18] 雷健华. 高效零碳排放智能家庭氢储能系统中试应用[J]. 电气时代, 2023, 44(S1): 8-12.
LEI J H. Pilot application of high-efficiency zero-carbon emission intelligent home hydrogen storage system[J]. *Electric Times*, 2023, 44(S1): 8-12.
- [19] WOLSINK M. Conceptualizations of smart grids-anomalous and contradictory expert paradigms in transitions of the electricity system[J]. *Energy Research & Social Science*, 2024, 109: 103392.
- [20] 张丹, 王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 451-458.
ZHANG D, WANG J. Research on construction and development trend of micro-grid in China[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 451-458.
- [21] 陈波. 直流微网运行控制及能量管理策略研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.
CHEN B. Research on the operation control and energy management strategy of DC microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023.
- [22] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020,

- 40(9): 2735-2745.
BIE Z H, LIN C F, LI G F, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [23] 詹政东. 海岛型微电网系统规划与运行控制研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
ZHAN Z D. Research on planning and operation control of island microgrid[D]. Beijing: North China University of Technology, 2023.
- [24] 陈小伟. 微电网分层分布式能量优化管理[J]. 农村电气化, 2019(8): 67-68.
CHEN X W. Optimized management related to layered and distributed energy in micro power network[J]. Rural Electrification, 2019(8): 67-68.
- [25] 徐婷婷. 离网型交流微电网能量管理系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
XU T T. Research on energy management system for off-grid AC micro-grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [26] 庞思颜, 饶欢, 梅傲琪, 等. 面向智能电网能源枢纽的需求响应策略研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(10): 141-146.
PANG S Y, RAO H, MEI A Q, et al. Research on demand response strategy for smart grid energy hub[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(10): 141-146.
- [27] 曹金声. 考虑源荷不确定性的微电网分布鲁棒运行优化方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
CAO J S. Research on distributionally robust optimal operation method of microgrid considering source-load uncertainty[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [28] 张瑞云. 风光储交直流混合微电网中的微电源优化配置研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
ZHANG R Y. Study on optimal configuration of hybrid AC/DC micro-grid based on solar-wind storage system[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [29] 李书勇, 蔡海青, 沈娜, 等. 不同类型新能源接入对微电网频率的影响[J]. 分布式能源, 2024, 9(2): 8-18.
LI S Y, CAI H Q, SHEN N, et al. Impact of different types of new energy access on microgrid frequency[J]. Distributed Energy, 2024, 9(2): 8-18.
- [30] 许伟欣, 杨明, 骆海琦, 等. 基于深度学习模型的光伏发电负荷预测[J]. 电气传动自动化, 2023, 45(4): 62-64.
XU W X, YANG M, LUO H Q, et al. Photovoltaic load forecasting based on deep learning model[J]. Electric Drive Automation, 2023, 45(4): 62-64.
- [31] CHADUVULA H, DAS D. Investigating effect of various time varying load models in grid connected microgrid system integrated with renewables and cogeneration units[J]. International Journal of Ambient Energy, 2023, 44(1): 2540-2552.
- [32] 苏南. 微电网发展路在何方[N]. 中国能源报, 2022-02-14(22).
SU N. Where is the development path of micro-grid[N]. China Energy News, 2022-02-14(22).
- [33] LUO H, GE W, SUN J, et al. Using thermal energy storage to relieve wind generation curtailment in an island microgrid[J]. Energies, 2021, 14(10): 2851.
- [34] TAHER S M, TAHER S A, DEGHANI A Z, et al. Precise current sharing and decentralized power management schemes based on virtual frequency droop method for LVDC microgrids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107708.
- [35] 徐韵, 颜湘武. 含可再生分布式电源参与调控的配电网无功电压优化控制研究综述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(4): 16-30.
XU Y, YAN X W. Review of the researches on the optimal control of reactive voltage in distribution network manipulated by renewable distributed generation[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(4): 16-30.
- [36] MOHANTY S, PATI S, KUMAR K S. Improved islanded microgrid performance with sliding mode controller based electric spring[J]. Renewable Energy Focus, 2024, 48: 100535.
- [37] JAYARAJ S, IMTHIAS AHAMED T P, ABRAHAM M P, et al. Reinforcement learning for energy management of an islanded microgrid: analysis of state, state space and reinforcement function[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024, 38: 101362.
- [38] XIANG Y, LU Y, LIU J. Deep reinforcement learning based topology-aware voltage regulation of distribution networks with distributed energy storage[J]. Applied Energy, 2023, 332: 120510.
- [39] 李俊双, 胡炎, 邰能灵. 计及通信负载与供电可靠性的5G基站储能与配电网协同优化调度[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 791-802.
LI J S, HU Y, TAI N L. Collaborative optimization scheduling of 5G base station energy storage and distribution network considering communication load

- and power supply reliability[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2023, 57(7): 791-802.
- [40] ABDELGHANY M B, MARIANI V, LIUZZA D, et al. Hierarchical model predictive control for islanded and grid-connected microgrids with wind generation and hydrogen energy storage systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 51: 595-610.
- [41] ASRI R, AKI H, KODAIRA D. Optimal operation of shared energy storage on islanded microgrid for remote communities[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2023, 35: 101104.
- [42] 李滨. 基于混合储能系统孤岛式微电网模型的实时优化调度策略的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- LI B. Research on real-time optimal dispatch strategy based on islanded microgrid model with hybrid energy storage system[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [43] SUN H, CUI X, LATIFI H. Optimal management of microgrid energy by considering demand side management plan and maintenance cost with developed particle swarm algorithm[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 231: 110312.
- [44] YAN Z, ZHU X, CHANG Y, et al. Retracted: renewable energy effects on energy management based on demand response in microgrids environment[J]. *Renewable Energy*, 2023, 213: 205-217.
- [45] ASLAM S, HERODOTOU H, MOHSIN S M, et al. A survey on deep learning methods for power load and renewable energy forecasting in smart microgrids[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 144: 110992.
- [46] 卢操, 徐长飞, 余洁文. 基于多目标的新能源微电网混合储能控制系统[J]. *能源与环保*, 2023, 45(1): 267-272.
- LU C, XU C F, YU J W. Hybrid energy storage control system of new energy microgrid based on multi-objective[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2023, 45(1): 267-272.
- [47] 王鑫. 基于主动负荷控制的用户侧微电网能量优化的研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2016.
- WANG X. Research on user-side microgrid optimal operation based on control for active loads[D]. Beijing: North China University of Technology, 2016.
- [48] KUMAR A, RATHORE A, SINGH S P, et al. Modeling and control of islanded DC microgrid fed by intermittent generating resources[J]. *Wind Engineering*, 2023, 47(3): 688-705.
- [49] POMPODAKIS E E, TINAJERO G D A, KARAPIDAKIS E S. Modelling the steady-state of secondary control in islanded AC microgrids[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 153: 109295.
- [50] LI C, HUANG Y, WANG Y, et al. Modelling and small signal stability for islanded microgrids with hybrid grid-forming sources based on converters and synchronous machines[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 157: 109831.
- [51] 刘星宇. 电网侧大容量电化学储能电站系统建模及仿真特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- LIU X Y. Research on modeling and simulation characteristics of large capacity electrochemical energy storage power stations on grid side[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [52] 杨小龙, 刘学桂, 陈涛, 等. 基于DTW-KiBaM模型的锂电池SOC估计[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(12): 203-212.
- YANG X L, LIU X G, CHEN T, et al. Lithium battery SOC estimation based on DTW-KiBaM model[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(12): 203-212.
- [53] DAVID T M, SILVA R R P M, GUERREIRO M M A, et al. Future research tendencies for solar energy management using a bibliometric analysis, 2000-2019 [J]. *Heliyon*, 2020, 6(7): e04452.
- [54] SHI M, WANG H, LÜ C, et al. A hybrid model of energy scheduling for integrated multi-energy microgrid with hydrogen and heat storage system[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 357-368.
- [55] 李坚, 吴亮红, 张红强, 等. 基于排序交叉优化算法的冷热电联供微电网经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(18): 137-145.
- LI J, WU L H, ZHANG H Q, et al. Microgrid economic dispatch of combined cooling, heating and power based on a rank pair learning crisscross optimization algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(18): 137-145.
- [56] 张世旭, 李姚旺, 刘伟生, 等. 面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(1): 21-30.
- ZHANG S X, LI Y W, LIU W S, et al. Economic, low-carbon and reliable multi-objective optimal configuration method of cloud energy storage for microgrid clusters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(1): 21-30.
- [57] 王大兴, 宁妍, 汪敬培, 等. 构建新型电力系统背景

- 下的微电网鲁棒简化建模[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 148-157.
- WANG D X, NING Y, WANG J P, et al. Robust simplified modeling of microgrid in the context of constructing new power systems[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 148-157.
- [58] AHRARI M, SHIRINI K, GHAREHVERAN S S, et al. A security-constrained robust optimization for energy management of active distribution networks with presence of energy storage and demand flexibility[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 84: 111024.
- [59] KIM S, CHOI Y, PARK J, et al. Multi-period, multi-timescale stochastic optimization model for simultaneous capacity investment and energy management decisions for hybrid micro-grids with green hydrogen production under uncertainty[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 190: 114049.
- [60] FELEGARI B, ASVADI-KERMANI O, OSHNOEI A, et al. Adaptive generalized predictive voltage control of islanded AC microgrid in presence of symmetric and asymmetric faults[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 226: 109964.
- [61] 王骏玮, 岳云涛, 李炳华. 基于阿基米德混沌精英鲸鱼算法的微电网优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12577-12584.
- WANG J W, YUE Y T, LI B H. Optimization of microgrid based on Archimedes chaotic elite whale algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(29): 12577-12584.
- [62] HUSSEIN F H. Neural network algorithm with reinforcement learning for microgrid techno-economic optimization[J]. Mathematics, 2024, 12(2): 280.
- [63] 李练兵, 王兰超, 景睿雄, 等. 基于改进免疫粒子群算法的混合储能容量优化[J]. 电源学报, 2024, 23(1): 1-14.
- LI L B, WANG L C, JING R X, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage based on improved immune particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Chinese Power Supply, 2024, 23(1): 1-14.
- [64] 杨泽勋. 源/荷扰动影响下的孤岛微网群协调控制策略与平台验证研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- YANG Z X. Research on security operation strategy and platform validation of islanded microgrid clusters under the influence of power supply/load disturbances[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [65] 汪亮, 彭勇刚, 吴韬, 等. 光储交流微电网孤岛模式下的改进型主从控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3530-3541.
- WANG L, PENG Y G, WU T, et al. Improved master-slave control for islanded AC microgrid with PV and energy storage systems[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3530-3541.
- [66] 马立亚. 交流微电网孤岛模式下稳定性分析研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- MA L Y. Study on stability analysis of ac microgrids in island mode[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [67] 赵辉, 王涛, 胡平, 等. 改进VSG和下垂控制双驱动的孤岛微电网稳定运行控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(10): 117-126.
- ZHAO H, WANG T, HU P, et al. Control strategy for stable operation of islanded microgrid with dual-drive of improved VSG and improved droop control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(10): 117-126.
- [68] CHAKRABORTY S, KAR S. Hierarchical control of networked microgrid with intelligent management of TCLs: a case study approach[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 224: 109787.
- [69] HUANG L, SUN W, LI Q, et al. A two-layer energy management for islanded microgrid based on inverse reinforcement learning and distributed ADMM[J]. Energy, 2024, 301: 131672.
- [70] 郭慧, 汪飞, 顾永文, 等. 基于电压分层控制的直流微电网及其储能扩容单元功率协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 3117-3131.
- GUO H, WANG F, GU Y W, et al. Coordinated power control strategy for DC microgrid and storage expansion unit based on voltage hierarchical control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3117-3131.
- [71] 周丹, 袁至, 李骥, 等. 考虑平抑未来时刻风电波动的混合储能系统超前模糊控制策略[J]. 发电技术, 2024, 45(3): 412-422.
- ZHOU D, YUAN Z, LI J, et al. An advanced fuzzy control strategy for hybrid energy storage systems considering smoothing of wind power fluctuations at future moments[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(3): 412-422.
- [72] BUI D M, LE P D, CAO T M, et al. Boost-converter reliability assessment for renewable-energy generation systems in a low-voltage DC microgrid[J]. Energy Reports, 2022, 8: 821-835.
- [73] SHAYEGHI H, MONFAREDI F, DEJAMKHOOY A,

- et al. Assessing hybrid supercapacitor-battery energy storage for active power management in a wind-diesel system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 125: 106391.
- [74] MEHDI H M, AZEEM M K, AHMAD I. Artificial intelligence based nonlinear control of hybrid DC microgrid for dynamic stability and bidirectional power flow[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106333.
- [75] 陈嘉莉, 马自强, 兰亚杰, 等. 基于区块链技术的医疗信息共享研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2024, 41(9): 2573-2584.
- CHEN J L, MA Z Q, LAN Y J, et al. Overview of medical information sharing based on blockchain technology[J]. *Application Research of Computers*, 2024, 41(9): 2573-2584.
- [76] 何云华, 罗明顺, 胡晴, 等. 能源区块链的跨链服务安全技术研究进展[J]. *计算机研究与发展*, 2024, 61(4): 1018-1037.
- HE Y H, LUO M S, HU Q, et al. Research progress on security technology for cross-chain service of energy blockchain[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2024, 61(4): 1018-1037.
- [77] TSAO Y C, THANH V V. Toward blockchain-based renewable energy microgrid design considering default risk and demand uncertainty[J]. *Renewable Energy*, 2021, 163: 870-881.
- [78] WANG G, YANG J, DI J, et al. Multimicrogrid collaborative economic scheduling method based on the FISCO BCOS blockchain[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023, 17(17): 3883-3895.
- [79] 李亚杰. 基于数字孪生的孤立微电网频率控制方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- LI Y J. Study on frequency control method of islanded microgrid based on digital twin[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [80] 王朔, 轩莹莹, 张骥, 等. 实景建模技术在电网数字孪生系统中的应用分析[J]. *电力勘测设计*, 2023(2): 78-82.
- WANG S, XUAN Y Y, ZHANG J, et al. The real scene modeling technology application in the power grid digital twinning system[J]. *Electric Power Survey & Design*, 2023(2): 78-82.
- [81] FAN X, LI Y. Energy management of renewable based power grids using artificial intelligence: digital twin of renewables[J]. *Solar Energy*, 2023, 262: 111867.
- [82] 向辉, 何安明. 数字孪生架构下的智慧微电网多智能体协调优化控制技术研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2024, 53(1): 100-104.
- XIANG H, HE A M. Research on multi-agent coordinated optimal control technology of smart microgrid under digital twin architecture[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2024, 53(1): 100-104.
- [83] CHENG T, ZHU X, YANG F, et al. Machine learning enabled learning based optimization algorithm in digital twin simulator for management of smart islanded solar-based microgrids[J]. *Solar Energy*, 2023, 250: 241-247.
- [84] 兰征, 刁伟业, 涂春鸣, 等. 含储能和氢燃料电池的孤岛微电网混合运行模式与功率协调策略研究[J]. *电网技术*, 2022, 46(1): 156-164.
- LAN Z, DIAO W Y, TU C M, et al. Research on hybrid operation mode and power coordination strategy of island microgrid with energy storage and hydrogen fuel cell[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(1): 156-164.
- [85] ALHARBI A G, OLABI A G, REZK H, et al. Optimized energy management and control strategy of photovoltaic/PEM fuel cell/batteries/supercapacitors DC microgrid system[J]. *Energy*, 2024, 290: 130121.
- [86] OUYANG C, ZOGHI M, HABIBI H. Exergy-economic and environmental assessments of a high-performance poly-generation layout based on the waste heat from a solid oxide fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 60: 1101-1120.
- [87] 罗浩文. 基于固体氧化物燃料电池的微电网能量管理与控制[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- LUO H W. Energy management and control of microgrid based on solid oxide fuel cells[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [88] JIANG J, ZHOU R, XU H, et al. Optimal sizing, operation strategy and case study of a grid-connected solid oxide fuel cell microgrid[J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118214.
- [89] EL-HAMEED M A, RIZK-ALLAH R M, EL-FERGANY A A. Frequency control of hybrid microgrid comprising solid oxide fuel cell using hunger games search[J]. *Neural Computing and Applications*, 2022, 34(23): 20671-20686.
- [90] AKINYELE D, OLABODE E, AMOLE A. Review of fuel cell technologies and applications for sustainable microgrid systems[J]. *Inventions*, 2020, 5(3): 42.

收稿日期: 2024-05-27。

修回日期: 2024-08-02。

作者简介:



雷基林

雷基林(1977), 男, 博士, 教授, 研究方向为发动机设计与优化、交能融合, lejilin@sina.com;



余林兴

余林兴(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网能量管理策略优化, 876277532@qq.com;



别玉

别玉(1984), 女, 博士, 副教授, 研究方向为太阳能利用及储能技术, bieyujuli@163.com;



徐稚博

徐稚博(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为太阳能利用及能量管理, xzbstudy@aliyun.com;



肖雨寒

肖雨寒(1992), 男, 博士研究生, 研究方向为混合供电系统互联变换器功率控制, 1284826419@qq.com。

(责任编辑 黄思瑶)