

智能微网能源管理系统研究综述

冯宜伟, 毋智军, 王 鑫

兰州理工大学, 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州
Email: ywfeng@yeah.net, iszhijunwu@yeah.net, wangxin143512@163.com

收稿日期: 2020年11月24日; 录用日期: 2020年12月11日; 发布日期: 2020年12月18日

摘 要

随着智能微网技术的不断发展, 针对智能微网分布式能源的优化与调度逐渐成为研究热点。本文总结了国内外智能微网能源管理系统的研究现状, 从运行方式以及时间长短不同的角度出发, 阐述了当前能源管理基本模型和控制算法, 简要描述了关于智能微网能源管理系统的优化调度及建模方法。重点针对集中式和分散式两种控制方法的优劣性做出对比分析, 同时, 就分布式能源和可控负荷的不确定性、多种能源的储存和优化调度以及通信网络的设计和安全性问题进行了分析总结。最后, 探讨了智能微网能源管理系统的研究趋势并做出总结。

关键词

智能微网, 分布式能源, 能源管理系统, 优化调度, 控制策略

An Overview of Smart Grid Energy Management System Research

Yiwei Feng, Zhijun Wu, Xin Wang

College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu
Email: ywfeng@yeah.net, iszhijunwu@yeah.net, wangxin143512@163.com

Received: Nov. 24th, 2020; accepted: Dec. 11th, 2020; published: Dec. 18th, 2020

Abstract

With the continuous development of smart grid technology, the optimization and scheduling of distributed energy for smart grid has gradually become a research hotspot. This paper summarizes the research status of smart grid energy management system at home and abroad from the perspective of operation mode and time length, and expounds the basic model and control algo-

rithm of energy management and briefly describes the optimal scheduling and modeling methods of smart grid energy management system. Focus on the comparative analysis of the advantages and disadvantages of centralized and decentralized control methods, meanwhile, the uncertainty of distributed energy and controllable load, the storage and optimal scheduling of multiple energy sources, and the design and security of communication network are analyzed and summarized. Finally, the research trend of smart grid energy management system is discussed and summarized.

Keywords

Smart Grid, Distributed Energy, Energy Management System, Optimal Scheduling, Control Strategy

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,人们对智能微网的关注度越来越高,能源需求日益上升,分布式能源发电和负荷管理系统已成为现代微网(Microgrid, MG)的重要研究对象,对微网进行有效、持续的智能优化控制成为一项挑战[1]。为了提高发电和负荷分配性能,需要进行在线评估,在固有的间歇性可再生能源(Renewable Energy Sources, RES)以及将概率可控性负载集成到智能微网中,如何解决智能微网的能源管理问题是当前较为重要的研究之一[2]。另一方面,智能配电网的发展也持续推动着微网的建设,伴随着分布式发电(Distributed Generations, DGs)、电动汽车和智能家居的高度普及以及需求侧响应的全面实施使得智能微网结构日趋复杂管理难度不断加大。此外,由于分布式能源出力具有的不确定性和波动性促使在并网时会造成电力系统不可控制和缺乏管理的局面。这些因素都限制了分布式可再生能源在电力系统中的接入规模和运行效率。为此,在微网中配置了相应的储能装置,如超级电容、蓄电池等,它们能够实现快速启停转换且转换费用可以忽略不计。但考虑到其充放电对储能单元寿命的影响,微网系统运行时还需要设定有效的兼顾储能单元的充放电管理[3]。在如今微网多能源发展模式下,研究智能微网能源管理系统,合理安排分布式电源和储能单元的启停和出力,在保证并网或孤岛工作模式下安全可靠供电的前提下进行经济优化运行,对于提高电力系统抗灾减压能力以及经济利益最大化具有深远的意义。

智能微网能源管理系统(Smart Grid Energy Management System, SGEMS)的主要功能:对 RES 发电与负荷进行功率预测;为储能设备建立合理的充、放电管理策略;为微网系统内部每个分布式能源控制器提供功率和电压设定点;确保满足微网系统中的冷、热以及电负荷需求;尽可能的使排放量和系统损耗最小;最大限度地提高微电源的利用效率;对无功功率进行管理,维持微网较好的电压水平;提供微网系统故障情况下孤岛运行与重合闸的逻辑与控制方法,在满足系统约束的同时,兼顾供需双方管理,实现智能微网的经济、可持续、可靠运行[4]。SGEMS 提供了许多益处,例如从发电调度到节能,无功功率支持到频率调节,可靠性到降低损失成本,能源平衡到减少温室气体排放[5]。目前,国内外已有不少专家学者对 SGEMS 方面的问题进行了研究。针对多种能源的储存和优化调度问题,文献[6]介绍了一种先进实时能源管理系统(Real-Time Energy Management System, RT-EMS)用于研究微网发电机组、储能系统(Energy Storage Systems, ESS)和主电网之间的最优功率分配。利用遗传算法(Genetic Algorithms, GAs)求解 RT-EMS 的优化问题,可以最大限度的利用 RES 并降低发电成本。但是该方法未考虑负荷需求响应,不能避免在用电高峰期的能源消耗的问题。然而随着智能微网技术的进步,需求响应扩展了用户对电力

系统的参与,并导致电力系统从传统模式向交互式模式的转变。因此在考虑到发电、存储和负荷需求响应的经济调度,文献[7]采用一种多周期人工蜂群优化算法,将人工神经网络与马尔可夫链相结合,提出了一种考虑不确定性的非调度发电和负荷需求预测方法,用来降低发电成本提高微网运行效率。与传统的能源管理控制策略相比,文献[8]将基于深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)和无模型强化学习技术相结合设计一种智能多微网(Multi-Microgrids, MMG)能源管理方法,从配电网运营商(Distribution System Operator, DSO)的角度看,其目标是降低需求侧峰均比,实现能源销售利润的最大化;在该系统中 DSO 可以通过蒙特卡罗方法从强化学习中选择零售定价策略,并根据预测优化决策。相对与传统的控制方法而言,智能控制技术,如模糊逻辑、人工神经网络、神经模糊等算法与系统数学模型无关,对系统的动态响应和参数变化具有快速性和较强的鲁棒性,已成为现代 SGEMS 控制算法研究的重要方向。

随着对智能微网的深入研究,能源管理系统模型也日渐复杂。智能微网能源管理模型作为微网优化控制中枢,通过采集分析负荷需求、分布式电源特性、电能质量要求、电力价格以及用户请求等信息,分别为各个分布式发电单元的控制器设置功率和电压运行点。如何建立可靠稳定的 SGEMS 模型,对于微网的经济运行具有重要的意义[9]。当下有关 SGEMS 的研究多为针对微网日前调度计划进行建模,在满足网内设备自身约束和系统约束的基础上,以微网的运行经济效益、环境效益等综合效益最佳为目标,通过不同的优化算法计算网内分布式电源的出力。然而单一的日前调度并不能完全反映可再生能源发电和负荷的预测误差及非计划瞬时波动功率对实际微网能源管理系统控制的影响,若应用于短时调度环节,可能无法满足短时调度快速性的要求[10]。这种情况下使得人们在研究 SGEMS 建模的过程中往往会忽略一些不确定性的因素,导致在结合实际情况下可能会出现系统不稳定的情况。而模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)由于它能够处理动态系统中的硬约束、输入输出干扰和不确定性等问题而受到广泛关注。考虑到可再生能源和负荷需求的高度不确定性以及如何在降低微网对主电网潜在的影响的同时维持微网的经济运行这一问题,文献[11]结合鲁棒优化与 MPC 方法提出一种能源管理方案,该方案将能源管理分为两个阶段:在日前阶段,建立一种能源管理模型来获得主电网与微网的交互方案,并应用鲁棒优化方法来处理可再生能源和用户负荷的不确定性;在日内阶段,采用 MPC 方法对更新的预测信息进行处理,以保持微网的实时功率平衡,达到系统的经济运行目标。对于在停电期间灵活而有弹性的智能微网而言,建立具有自愈能力 SGEMS 模型也同样重要。因此文献[12]提出一种新颖的四层多代理架构,使微网 EMS 在停机期间具有自我修复能力。在提出的体系结构中,第一层是预测和估计层(Forecasting and Estimation Layer, FEL),它提供可再生能源、负载等的预测功率输出;第二层是负责控制动作和决策的控制和动作层(Control and Action Layer, CAL);第三层是实时监控层,提供 MG 的实时信息;第四层是故障检测和作用层(Fault Detection and Action Layer, FDAL),可促进所提出的 MG 的自愈能力。

智能微网能源管理本质为建立可靠模型来求解非线性、离散优化问题,采用传统的数学优化方法进行求解,例如基于线性和非线性规划、基于动态规划和基于规则的方法都受到算法复杂度的限制,而启发式算法又无法保证所求解的可行性和最优性。近年来,微分进化算法、蚁群算法、改进粒子群算法以及模型预测控制等因其高效性、收敛性和鲁棒性而受到了普遍的关注,适用于求解大规模组合优化问题。而随着科技的进步,人工智能的发展越来越受到学者们的关注,由于该领域算法能够模拟人脑智能化处理,实现多输入多输出的非线性映射,具有信息记忆、自主学习等功能,具有很强的自适应性及容错能力。因此基于模糊逻辑和神经网络以及多智能体系统等应用于 SGEMS 建模的方法也成为当下研究智能微网的热门[13] [14] [15]。

本文概述了智能微网能源管理系统,主要对其分类、建模以及控制策略进行了分析,探讨了智能微网能源管理系统的研究趋势并做出相应总结。

2. 智能微网能源管理系统的分类

在传统的大电网中 EMS 是现代电网调度自动化系统的统称,主要针对发配电系统对电网进行调度决策管理以及控制,提供电网的实时信息给调度管理人员,提高电能质量、保证电网安全运行以及提升电网运行经济性。而 SGEMS 是以计算机为基础结合高级计量基础设施(Advanced Metering Infrastructure, AMI)的综合自动化系统,主要用于微网的调度管理中心,它融合了先进的 IT 技术,对微网内部的分布式电源和储能装置进行优化管理[16]。SGEMS 相对与传统大电网的 EMS 具有更强的针对性,它能够针对某一个具体的微网,对其内部的众多资源进行有效地管理,提高微网的能源利用效率。

2.1. 按运行方式分类

智能微网可以与大电网联网运行,也可以与其脱离孤岛运行,因此能源管理可以按照运行方式划分为并网运行管理和孤岛运行管理。

2.1.1. 并网运行能源管理

并网运行时微网与大电网间的能量交换,会对微网经济运行造成影响,因此通过 SGEMS 调节微网内部的各微电源,合理利用可再生分布式能源,优化系统运行,提高微网的效能的同时又可响应大电网对微网的调度控制需求。这种情况下智能微网可看作是整个系统的一个可控负荷模型,必要的时候接受系统的合理调节来提高区域的供电稳定性和性能优化,还可适当地用于峰荷管理和负荷平移等[17]。微网的能源管理则可保持内网一定的独立性,可以对微网内部的分布式能源进行合理调度,提高能源利用率,其配置检测、保护和控制设备可提高电网供电可靠性加强与外网联系。另外并网运行时在满足内部供电或外网需要紧急支持的情况下,微网可以看作是系统的一个可调电源模型向外网传输功率,参与电力市场竞争上网,提高微网的综合效益。为了提高并网时的能源效益,在考虑光伏、风能和储能单元的同时还需添加热电联产,其中热负荷和电负荷需要同时考虑。针对分布式能源在并网运行下的热电联产机组及其调度问题,文献[18]提出一种发电应用程序包来解决调度问题,为了提高预测精度,文中采用基于 k -均值聚类的模式识别算法进行电力或热负荷预测以及光伏预测的方法,根据预测数据给出了微网两种运行模式下发电调度和分布式能源调度的公式和求解方法。提高了能源利用率的同时降低了运行成本。由于并网运行的 SGEMS 必须同时达到成本最小化、排放最小化、从主电网输入的净电量以及可再生能源最大化等诸多目标,文献[19]对风-光-储在内的并网微网 EMS 进行了优化设计,利用分支定界技术,通过调度分布式能源和从主电网输入的净功率,推导出最小运行成本。在此基础上,定义了电源与电源消耗之间的功率平衡且将各器件的仿真量作为优化问题的约束条件,既满足了优化电源调度的目的,又满足了主电网进出口功率的要求。

2.1.2. 孤岛运行能源管理

智能微网断开与外网的连接成为孤岛运行时不再与大电网进行功率交换,SGEMS 需要调节微网内部的资源分配,保证供电的可靠性。分布式电源、热电负荷等本身的随机性和波动性给电网的电能质量造成的影响在微网表现得更为明显,电压的波动和频率的偏差需要 SGEMS 进行调节控制,主要的措施可以改变可调电源例如燃料电池、柴油发电机的输出功率,调节储能设备的充放电容量,还有对负荷侧的控制等,保证整个网络功率输出和需求的平衡及电能质量[20]。

由于在接入电网受限或无法接入电网的偏远地区,孤岛混合系统更具有经济效益,因此文献[21]以一种简单的可再生混合动力系统为研究对象,以二进制遗传演算法取代混合整数线性规划,使系统的运行单位成本降至最低;该系统对光伏/风电可再生能源系统进行电力调度,以获得短期内最低的电力成本。但是,该方法在缺乏有效的能源管理策略时无法平衡供需关系从而导致频繁的停电,尤其是在夜晚,会

增加柴油发电的能源消耗。在上述基础上文献[22]分析了混合动力系统中电池的能量如何在夜间进行管理,对不同的减载策略进行了讨论和比较,提出一种基于优先级的用户分类方法,并利用智能电表(Smart Meter, SM)在能量短缺时进行了最优的负荷分配以管理电池中存储的能量进而消除了孤岛运行时对柴油发电机的需求,使系统更加环保。而文献[23]提出了一种用于孤岛 EMS 的热电模型。该系统被表述为一个单元承诺问题,其中热组件和电气组件被同时分配,以最小化系统运行成本;该模型已成功地应用于西班牙西北能源公司总部现有的孤岛系统,模拟了该系统在冬季一周内的运行情况。

2.2. 按时间分类

智能微网在能源管理优化时不仅要根据分布式发电单元的容量、控制技术条件和储能设备的状态,调节电源出力 and 负荷管理,还需在保证安全可靠供电的基础上考虑长期经济优化运行。因此,按照时间长短划分,SGEMS 可以分为短期功率平衡和长期能源管理。如图 1 表示了 SGEMS 控制功能的时序分类[24]。

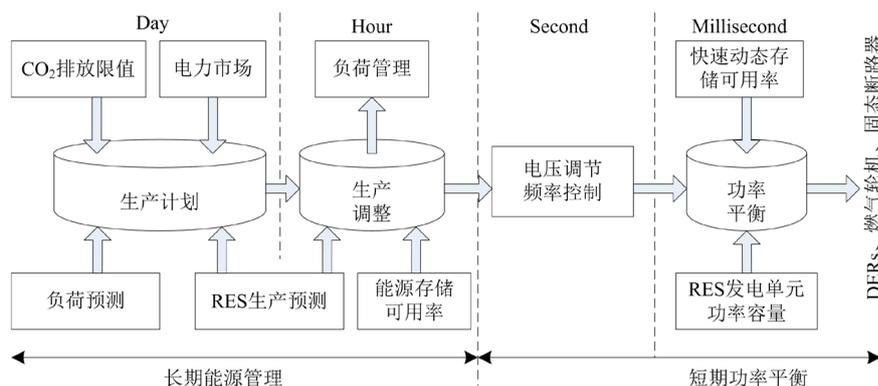


Figure 1. Timing classification of control functions for SGEMS

图 1. SGEMS 控制功能的时序分类

2.2.1. 短期功率平衡

SGEMS 的短期功率平衡包括: 1) 通过对系统的负荷变化的跟踪能力、电压调节和频率控制等措施,对分布式能源(Distributed Energy Resources, DERs)各单元之间进行实际功率共享以及减载协调,以减轻功率不匹配。2) 系统故障过后的动态响应,即电压和频率的恢复能力。3) 满足一些敏感负荷对电能质量的要求以及当主网故障时断开与主网连接,主网恢复后实现与主网的重新同步,协调控制好微网的功率平衡[25]。

SGEMS 可以提高负载功率分配的精度和整个系统的效率,虽然在已有的控制方法中下垂控制通常可以在分布式能源之间实现适当的有功功率共享,但是由于分布式能源之间的输电线路参数不匹配,导致无功功率无法准确共享。在这种情况下,文献[26]提出了一种改进的微网无功功率共享策略,该方法引入一个实时无功暂态耦合项用来识别无功功率共享的误差,然后利用慢积分项对分布式电源电压幅值控制的误差进行补偿;补偿策略还利用微网中央控制器发出的低带宽标志信号,同步激活所有 DGs 机组的补偿。因此,在 DGs 机组之间不需要任何物理通信的情况下,可以实现精确的功率分配。文献[27]提出了一种用于提高敏感负荷总线电能质量的集中控制器,该方法实现了对负序敏感负载母线基本电压($V^{+/-}$)和正、负序敏感负载母线电压谐波($V^{h+/-}$)的选择性补偿。但是该方法忽略了并网运行时与主电网交互的电能质量问题。此外,考虑到本地总线中的传输线差异和不同的功率质量限制,在文献[28]中提出并实现了一种优化方法,将 EMS 作为三次电能质量控制器,寻找最优补偿功的分配比例,将三次补偿增益作为调节变量发送给较低级别的控制器,以在考虑分布式能源的补偿能力和本地总线电能质量要求的情况下调整每个分布式能源的补偿功。在此基础上,文献[29]提出了一种补偿三相四线孤岛微网(Islanded Microgrids,

IMG)系统电压不平衡的二次电压不平衡控制方法,将信息通过低带宽通信链路发送到主控层,实现了敏感总线所需的不平衡因子,达到良好的序流共享和系统稳定性。

2.2.2. 长期能源管理

智能微网的长期能源管理的主要目的是保证安全可靠的供电基础上进行经济优化运行。它包括:1) 在保持适当的备用容量水平基础上,重新优化分布式能源机组的发电策略达到以下目标:a) 控制主电网的功率输入/输出;b) 功率损耗最小化;c) 燃料机组的能源生产成本最小化;d) 可再生能源机组出力最大化。2) 考虑每个 DGs 单元的限制因素,包括发电机类型、发电成本、可再生能源对时间的依赖性、维护间隔和环境影响。3) 满足需求响应管理(负荷分布控制)及恢复在微网故障时切除的负荷[25]。在文献[30]中在考虑随机功率输出的基础上提出了一种新型智能能源管理系统(Smart Energy Management System, SEMS),系统可以协调电力预测、储能和能量交换;并且根据不同天气条件下光伏发电系统的输出特性,建立了一种提前一天的光伏发电预测模型,在该模型下,储能系统管理模块确定最优的运行策略,优化模块实现了一种实时的负荷管理方法。尽管技术在进步,但是由于分布式发电单元的出力存在随机性以及短期预测电量存在误差,使得以风力发电为首的分布式发电单元参与市场受到限制,为此文献[31]提出了一种新的风力发电机组最优参与策略,该策略采用储能装置参与日前机组承诺过程,将多目标混合整数线性规划公式转化为一个模糊优化问题并求解,考虑预测的不确定性以及最佳预测,确保能量可以长期稳定的供给,尽量减低风险使市场回报最大化。此外,为了协调包括可再生能源和能源储存系统在内的微网短期调度和长期能源管理计划,文献[32]提出了一种两级随机微网 EMS,该系统通过长期管理确定不同技术的最优位置和规模,通过短期规划确定技术的最优运行策略,该系统能够通过随机规划处理负荷和可再生能源的不确定性,降低了成本并且提高了能源利用率。

3. 智能微网能源管理系统的建模

3.1. 能源管理系统的构架

SGEMS 的主要任务包括:根据实时监控系统和 AMI 组成的智能优化模块所采集的电网、分布式电源、负荷等数据信息来调度发电和传输系统,使配电基础设施更加智能化;实现主网、多种分布式电源、储能单元和负载之间的最优功率匹配;实现多种电源的灵活投切;实现微网在并网与孤岛两种运行模式间的无缝转换等。

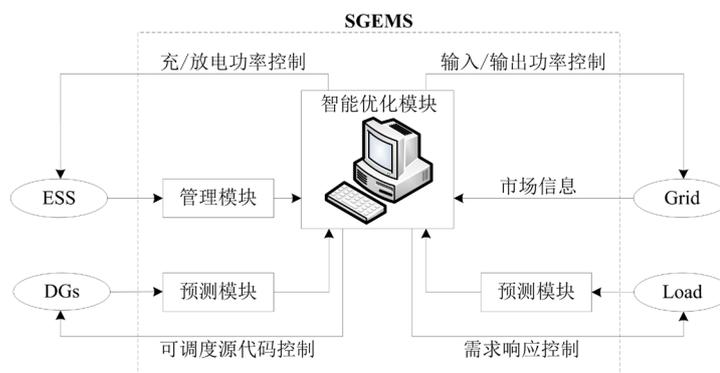


Figure 2. Composition and workflow of SGEMS

图 2. SGEMS 的构成及工作流程

通过管理微网内分布式微电源及负荷运行状态,结合电价、燃料费用等信息,并根据系统内潮流需求对分布式发电设备、可控负荷、储能设备实时监测并对其进行有效的有功、无功指令控制,不仅可实

现风能、太阳能等可再生能源的有效利用，而且能使微网更经济、可靠的运行[33]。SGEMS 构成及工作流程如图 2 所示。

3.2. 微网多能源模型

一般意义上，智能微网中的能源多为微源，即含有电力电子装置的小型机组，主要包括微型燃气机组、光伏电池、小型风力发电机等分布式发电单元和蓄电、蓄热的储能单元以及可控负载。

3.2.1. 分布式发电单元模型

1) 光伏模型(Photovoltaic Model)

基于典型单晶硅组件的光伏系统建模。光伏阵列产生的能量与三个元素成正比：太阳辐射数据、光伏系统效率和光伏板的面积。光伏功率输出与辐照度、效率和面积大小的关系模型如下[34]：

$$P_{PV} = G \xi_{PV} A_{PV} \eta_{PV} \quad (1)$$

式中 P_{PV} 为光伏的输出功率(kW)， G 为太阳辐照度(W/m^2)， ξ_{PV} 为局部遮阳因子(固定为 0.7)， A_{PV} 为太阳能电池板总面积(m^2)， η_{PV} 为效率因子(约 10%)。

2) 风电机组模型(Wind Turbine Model)

风力涡轮机模型根据与风速的线性关系生成电能。对简化的风力涡轮机进行建模，以使从风力涡轮机输出的功率随风速的立方变化。当风速具有标称值时，风力涡轮机将产生标称功率。但是，当风速超过最大风速值时，风力涡轮机将与电网断开连接，直到风速回到其标称值为止[34]。风力发电输出功率可以表示为：

$$P_{WT} = \begin{cases} V_{WT}^3 \frac{P_{nom}}{V_{nom}^3} & V_{WT} \leq V_{nom} \\ V_{nom}^3 \frac{P_{nom}}{V_{nom}^3} & V_{nom} \leq V_{WT} < V_{max} \\ 0 & V_{WT} \geq V_{max} \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_{WT} 是风力涡轮机的输出功率(kW)， P_{nom} 是标称功率(kW)。 V_{WT} 是实际风速(m/s)， V_{nom} 是标称风速(m/s)， V_{max} 是最大风速(m/s)。

3) 热电联合模型(Combined Heating and Power Model)

热电联合系统的核心部件是微型燃气轮机和燃气锅炉。利用高质量的热能驱动涡轮发电，收集余热用于生活取暖和热水。热电关系数学模型可以表示为[35]：

$$Q_{CHP} = P_{CHP} \cdot (1 - \eta_{CHP} - \eta_L) / \eta_{CHP} \quad (3)$$

$$Q_{CHP-h} = Q_{CHP} \cdot \eta_h \cdot C_{oph} \quad (4)$$

$$Cost_{CHP} = C_{gas} \cdot P_{CHP} / (\eta_{CHP} \cdot L_{gas}) \quad (5)$$

式中 Q_{CHP} 表示 CHP 的余热， Q_{CHP-h} 为 CHP 的输出热量， P_{CHP} 为 CHP 的输出功率， L_{gas} 为天然气热值($kW \cdot h/m^3$)， C_{oph} 表示加热系数， C_{gas} 为天然气单价(yuan/ m^3)， η_L 表示热损率， η_{CHP} 为发电效率， η_h 为烟回收率 $Cost_{CHP}$ 为 CHP 的运营成本。

3.2.2. 储能单元模型

微网对储能系统的需求主要是由于可再生能源的间歇性很强，而且这种能源取决于气候和天气条件

的不可预测性。例如，风力发电系统的不规律性会给系统带来谐波和电能质量问题。因此，为了解决这一问题，并在电源不匹配时提供辅助服务，需要一个储能系统。所开发的微网储能系统模型既能在可再生能源发电过剩时进行储能，又能在电力短缺时满足微网的负荷需求[34]。

1) 电池储能模型(Battery Energy Storage Model)

$$B_{SOC} = 100 \left[1 - \left(\frac{1}{Q_B} \right) \int_0^t i_B(t) dt \right] \quad (6)$$

$$B_{AH} = \frac{1}{3600} \int_0^t i_B(t) dt \quad (7)$$

式中， B_{SOC} 为电池荷电状态百分比； Q_B 为电池最大容量，单位 A； i_B 为电池电流，单位 A； B_{AH} 为电池 A·h 容量。

2) 蓄热罐模型(Heat Storage Tank Model)

蓄热罐是平衡可再生能源波动的重要设备之一。它可以由容量、输入/输出和热效率来表征，数学模型可以表示为[35]：

$$H_{t+1}^{HST} = H_t^{HST} + Q_t^{HST, in} \cdot \eta_{HST} - Q_t^{HST, out} \cdot \eta_{HST} \quad (8)$$

$$Q_t^{HST, in} \cdot Q_t^{HST, out} = 0 \quad (9)$$

$$0 \leq Q_t^{HST, in/out} \leq V_{HST, in/out} \cdot \Delta t \quad (10)$$

$$H_{min}^{HST} \leq H_t^{HST} \leq H_{max}^{HST} \quad (11)$$

式中 H_t^{HST} 表示 HST 的热储量， $Q_t^{HST, in}$ 、 $Q_t^{HST, out}$ 表示供热的输入输出， H_{min}^{HST} 、 H_{max}^{HST} 为 HST 的最小和最大极限， $V_{HST, in/out}$ 表示充放电速度， η_{HST} 为蓄热罐的效率。

3.2.3. 负荷单元模型

MG 中考虑了两种类型的负载：可移动负载和固定负载。可移动负载可以及时转移，但是在计划范围内必须消耗一定量的能量。另一方面，固定负载是关键负载，不允许移动或固定。 $P_{MG, t}^{L-}$ 是从时间 t 到其他时间的可移动负载量(以 kW 为单位)，由以下关系表示[36]：

$$\begin{aligned} P_{MG, t}^{L-} &= dr_{MG, t} \cdot P_{MG, t}^L \\ 0 &\leq dr_{MG, t} \leq dr'_{MG} \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $P_{MG, t}^L$ 为区间 t 的一次负荷，单位为 kW。 $dr_{MG, t}$ 和 dr'_{MG} 表示 t 小时负荷转移百分比因子及其最大值。

3.3. 能源管理系统的数学模型

能源管理系统用于运营商优化、监控和控制电力系统的性能。在智能微网中，EMS 自动协调以满足需求为目标的能源，考虑到电网的运行成本、可用能源以及发电和输电能力，进行协调工作。在此基础上，对能源的可用能量进行了预测，使运行成本降至最低，从而实现了微网的优化运行。通常情况下，优化过程在整个滚动时域(模型预测控制的方法)来执行，这种方法对微网的运行具有一定的鲁棒性，但非常规能源的高度可变性使得预测任务非常复杂从而使微网的可靠运行受到损害。文献[37]提出一种改进的 MPC 的算法来管理微网的 DERs，该方法解决了传统基于 MPC 的 EMS 在线优化慢、计算慢等问题，并且能够在预测不准确的情况下处理 ESS 和 DERs 的约束。由于传统的能源管理系统中，电池储能系统(Battery Energy Storage Systems, BESS)只考虑在单一的 MG 优化模型中，这就导致了存储设备利用率不高，造成资源浪费。文献[38]考虑到资源局部消耗的优势，提出一种通过多智能体系统(Multi-Agent Systems,

MAS)提高 MMG 系统可再生能源本地利用率的新策略。与传统的能源管理模型相比,该系统每个 MG 的盈余和短缺能力不仅通过电网内部的交易能力和共享的分布式能源进行补偿,而且还通过与其他 MG 交换电力进行调整,所有 BESS 的协作有效的最大化可再生能源本地消耗,而所有可控分布式发电机(Controllable Distributed Generator, CDG)的协作则有利于降低 MMG 系统的运营成本。为了解决现有的能源管理系统不能为其用户提供保证用户舒适度(User Comfort, UC)的选择,也不能提供减少碳排放的可持续解决方案这些问题,文献[39]提出一种启发式的可编程能源管理控制器来管理住宅建筑的能源消耗,以最小化电费、减少碳排放、最大化 UC 并降低峰均比为目标,采用混合遗传粒子群优化算法对智能设备进行优化调度,以达到预期目标实现经济最优。在文献[40]中作者将储能单元与分布式电源统一建模,将储能智能管理、经济负荷分配、运行效益优化等多目标优化问题转化成为单目标优化问题进行求解;设计了两种运行策略,实现了微网在孤岛和并网两种模式下的经济运行,用来满足该模型下 SGEMS 的基本目的:在给定周期内综合考虑分布式电源预测发电量、储能单元预测剩余容量、电网电价信息和本地负荷需求,合理安排分布式电源和储能单元的启停和出力,使微网系统的总发电成本最小(或者经济利益最大)。

3.3.1. 目标函数

1) 孤岛模型下:保证本地负载供电,并使智能微网总发电成本最小。

$$T_D = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^L [u_i(t)P_{Gi}(t)B_{Gi}(t) + S_{Gi}|u_i(t) - u_i(t-1)|] + \sum_{j=1}^M [u_j(t)P_{Sj}(t)B_{Sj}(t) + S_{Sj}|u_j(t) - u_j(t-1)|] \right\} \quad (13)$$

式中, $S_{Gi}(t)$ 为系统中第 i 个发电单元的启停成本; $S_{Sj}(t)$ 为第 j 个储能单元的启停成本; $B_{Gi}(t)$ 为第 i 个发电单元在时段 t 的报价; $B_{Sj}(t)$ 为第 j 个储能单元在时段 t 的报价; $u_i(t)$ 为发电单元的开关机变量, $u_i(t) = 1$ 表示发电单元开机, $u_i(t) = 0$ 表示发电单元关闭, $u_j(t) = 1$ 表示储能单元开机, $u_j(t) = 0$ 表示储能单元关闭。

2) 并网模型下:保证本地负载供电,并使智能微网经济效益最大。

$$T_C = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^L [u_i(t)P_{Gi}(t)B_{Gi}(t) + S_{Gi}|u_i(t) - u_i(t-1)|] + \sum_{j=1}^M [u_j(t)P_{Sj}(t)B_{Sj}(t) + S_{Sj}|u_j(t) - u_j(t-1)|] + P_{grid}(t)B_{grid}(t) \right\} \quad (14)$$

式中, $B_{grid}(t)$ 为电网实时电价。

3.3.2. 约束条件

1) 功率平衡约束(孤岛和并网)

$$\sum_{i=1}^L P_{Gi} + \sum_{j=1}^M P_{Sj} = \sum_{k=1}^N P_{Lk} \quad (15)$$

式中, P_{Gi} 为系统中第 i 个 DGs 单元发出的功率, L 为系统中发电单元的个数; P_{Sj} 为第 j 个储能单元吸收或发出的功率, M 为系统中储能单元的个数; P_{Lk} 为第 k 个负荷需求的功率, N 为系统中负荷的个数。

$$\sum_{i=1}^L P_{Gi} + \sum_{j=1}^M P_{Sj} + P_{grid} = \sum_{k=1}^N P_{Lk} \quad (16)$$

式中, P_{grid} 为电网吸收或发出的功率,当智能微网向大电网输出功率时, $P_{grid} \geq 0$;当微网从电网吸收功率时, $P_{grid} < 0$ 。

2) 热备用约束

$$\sum_{i=1}^N u(t) P_i^{\max}(t) \geq \sum_{k=1}^N P_{Lk}(t) + R(t) \quad (17)$$

式中, $u(t)$ 为发电单元的状态, $P_i^{\max}(t)$ 系统中第 i 个分布式电源发电单元的输出功率上限, $R(t)$ 为单元 i 的短期调度。

3) 发电能力约束

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi}(t) \leq P_{Gi}^{\max} \\ P_{Si}^{\min} \leq P_{Si}(t) \leq P_{Si}^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中, P_{Gi}^{\min} 、 P_{Si}^{\min} 、 P_{Gi}^{\max} 和 P_{Si}^{\max} 分别为系统中第 i 个分布式电源发电单元和第 j 个储能单元的输出功率下限和输出功率上限。

4) 光伏发电最大功率跟踪约束

$$\alpha P_{PV}^{MPP}(t) \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV}^{MPP}(t) \quad (19)$$

式中, $P_{PV}^{MPP}(t)$ 为光伏发电单元在时段 t 的预测最大功率输出。

5) 储能能量平衡约束

$$\left| \frac{1}{\eta_D} \sum_{P_{Sj}(t)>0, t=1, \dots, 24} P_{Sj}(t) + \eta_C \sum_{P_{Sj}(t)>0, t=1, \dots, 24} P_{Sj}(t) + \sum_{P_{Sj}(t)>0, t=1, \dots, 24} W_{hourly} \right| < e \quad (20)$$

式中, W_{hourly} 为储能单元的自放电; η_D 为储能单元的放电效率; η_C 为储能单元的充电效率。

6) 智能微网与主电网间能够允许交互的最大功率约束

$$P_{grid}^{\min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{\max} \quad (21)$$

式中, P_{grid}^{\min} 和 P_{grid}^{\max} 分别为智能微网系统与主电网能量交换的功率下限和功率上限。

4. 智能微网能源管理系统控制决策

4.1. 能源管理系统的控制方法

智能微网中存在着各种可控能源设备, 例如分布式电源、储能设备、可控负载和需求响应。因此如何以经济的方式在供需双方协同管理和控制这些设备也是 SGEMS 的主要挑战之一。

智能微网的能源管理需要通过不同的控制方案来实现能量的优化配置, 保证网络运行的安全稳定。按电源逆变器接口类型分为下垂控制(Droop control), 恒功率控制(PQ control), 恒压恒频控制(V/F control); 从网络整体控制策略分为集中控制和分散控制, 或是主从控制模式(Master-slave control)、对等控制模式(Peer-to-peer control)和分层控制模式(Hierarchical control) [41]。由于 SGEMS 的功能可以集中实现, 也可以分散实现。分散化的级别是由本地控制器的智能定义的, 它可以仅用于执行来自上层的命令或做出自己的决策。这两种方法各有优缺点, 这决定了其适用于特定微网类型(住宅、商业或军事)以及物理特征(位置、大小、拓扑结构等)的适用性。

4.1.1. 集中式控制模式

智能微网的集中式控制模式是确定一个分布式电源或是足够容量的储能装置作为主 DG, 采取 V/F 控制, 微网其他电源采用 PQ 控制, 以主 DG 的电压和频率为参考运行的主从控制; 也可以是确定一个中心控制器后再进行平行分层的控制[42]。集中控制的能源管理有利于根据负荷变化和主电网的联络要求,

统一对可调分布式电源进行规划调节、降低成本以及提高综合效益,但需要可靠的通信线路收集信号和及时发送控制信息。文献[43]基于分布式能源的稳态特性,提出了一种集中控制、目标函数为一体的微网优化调度模型,对不同的交互运行控制策略、优化对象和电价进行了计算,其运行或折旧成本最小化,环境效益或综合效益最大化。文献[44]提出了一种适用于插电式电动汽车(Plug-in Electric Vehicles, PEVs)的下垂控制 IMG 的多级集中控制方案。所采用的控制方案能最佳地协调 DG 机组的下垂特性、微网电力需求的下降(在不充足的发电时段)以及 PEVs 充放电决策,以支持 IMG 在较长时间内的运行。为此,文献中采用基于多级下垂的最优潮流算法用来最大限度地减小负荷损失,满足 PEVs 客户的需求以及最小化微网运行的成本。文献[45]结合一种协调大容量电力调节系统(Power Conditioning System, PCS)与微网 BESS 并行运行的集中控制方案;建立电力调节系统模块的并网模式和孤岛模式控制模型。在此基础上又提出一种控制电力调节系统在并网模式和孤岛模式之间无缝切换的新策略,在电流模式和电压模式转换过程中保证了电源电压的稳定。文献[46]采用了一种新型的四层集中式并网微网控制结构;该控制器的目标是根据可再生能源的可用性、负荷需求和各电网的电力容量,对多个电网进行综合控制,实现最优的电力共享。文献[47]结合新发布的微网标准,设计并实现了微网集中控制系统。在并网模式下,主电网将提供连接点的电压和频率参考,微网内的能源将遵循控制系统提供的指令进行调度;孤岛模式下,储能系统可为其他微源提供电压和频率参考,可以有效地解决并离网时能源调度优化问题。

集中控制和管理系统通常需要从微网组件和外部网络收集数据[48]。根据收集到的信息,可以执行调度和优化程序,实现经济高效的运行,集中式控制和能源管理模式如图 3 所示。显然,集中式 SGEMS 的优点包括整个系统的实时性和直观的实现。如果设计得当,它将对整个系统提供强大的监督和广泛的控制。此外,一些隐秘信息可以在中央控制单位内得到保护。然而,从另一个角度来看,这些特性也表明微网中央控制器功能需要非常强大,以便处理大量数据并作出正确的决策。为了及时交换信息,需要高带宽的通信。而且集中管理需要单点故障,集中单元故障会导致整个系统的崩溃。低灵活性和可扩展性是集中式管理的另一个关键限制。

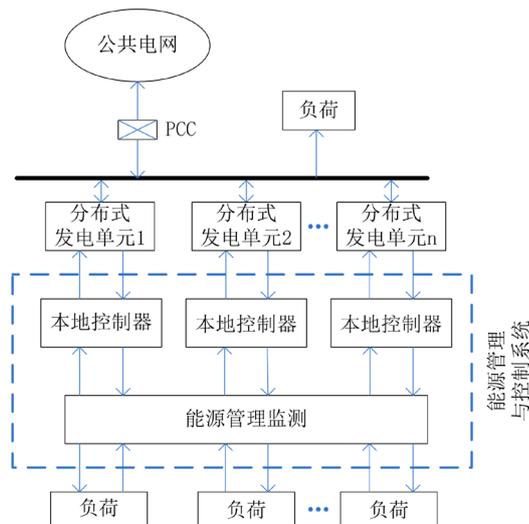


Figure 3. Centralized control and energy management pattern
图 3. 集中式控制与能源管理模式

综上所述,集中式控制下的 SGEMS 通常更适用于以下微网的情况[49]:

- 1) 可实现信息集中采集和决策的小型微网,通信和计算成本低;

- 2) 微网内部的所有性能都有一个共同的目标，使能源管理系统能够将微网作为一个整体运行；
- 3) 需要高度保密的军用微网；
- 4) 系统配置几乎是固定的，不需要很高的灵活性和可扩展性。

4.1.2. 分散式控制模式

智能微网的分散式控制是依据分布式电源的不同特点，要求各个分散的单元具有一定的智能性和调节裕量。逆变器接口的下垂控制由于具有不需要分布式电源之间的通信联系就能实现控制的特点而得到了较多的研究[50] [51]。在文献[50]中应用分布式电源的下垂特性，将发电功率大小转换成以输出电压的频率和幅值为指令的控制信号，在通过调整后的功率反馈作用于输出电压，达到自治调节，分配功率的目的，从而使得各个电源间的调节不会相互影响。文献[51]提出的单机下垂控制的 EMS，采用定性分析和小信号技术，在保证稳定约束的情况下实时 EMS 调整，具有优化输出功能，适用于分散式的能量控制模式。在多个分布式发电机和负载组成的直流微网中，稳定运行和控制是一个重要问题。由于集中控制方法通常需要精确的参数设置，当系统结构发生变化时，需要重新计算，因此在直流微网中最好采用分散式控制方法来实现发电机和负载自由连接或断开。文献[52]提出了一种新的稳定控制策略，该策略能够以自治分散的方式调整占空比；线路调节变换器(Line Regulating Converters, LRC)通过观察端电压波动的时间变化，自动调节控制增益，使整个电网保持稳定。文献[53]对分散式微网控制结构的可靠性进行了分析，利用马尔可夫链模型对比了集中式控制和分散式控制体系对于微网发生单点故障时的系统稳定性。虽然结果表明分散式控制相对消除了集中式控制体系结构中的单点故障，但是也存在一些优化和通信上的问题。

另一方面，为了实现更灵活的操作和避免单点故障，分散式控制系统已经进入了另一个阶段[54]。在替代通信技术(WiFi、Zigbee 等)和信息交换算法的最新进展使分散式控制和能源管理在实际应用中已成为可能。从这个意义上讲，传统的集中控制机制所提供的频率、电压调节、分布式能源协调、能源管理等功能也可以分散实现，而分散的程度可以从集中到完全分散的[55]。基于 MAS 的 EMS 为分散化管理功能的实现提供了可能，因此成为一个突出的研究方向。它可以具有与集中式系统相同的层次结构和功能，同时通过提高本地控制器的智能水平，将决策权限转移到本地。信息与通信技术再次发挥了决定性的作用，因为当地的决策是基于来自环境和邻近地区的必要信息做出的。

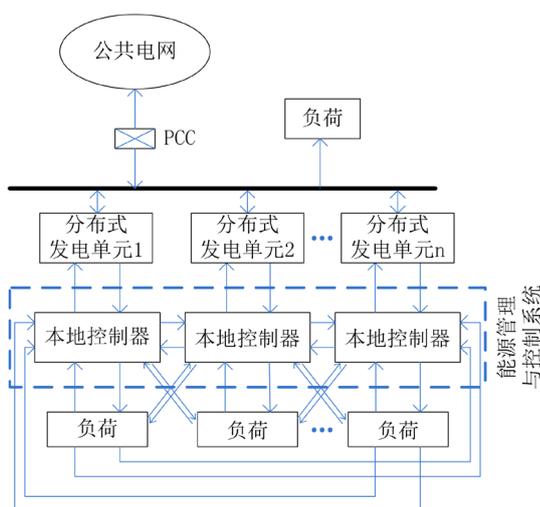


Figure 4. Decentralized control and energy management pattern

图 4. 分散式控制与能源管理模式

综上所述,分散控制和能源管理在一定程度上减少了冗余,提高了系统的模块化程度,分散式控制与能源管理模式如图4所示。在该模式中,所有控制器通过通信总线进行连接, DG 控制器之间的数据通过该总线进行交换。所有的负载也连接到所有的本地控制器。因为决策是在本地处理的而能源管理系统只需要执行信息共享或协调,故系统即使在失去其功能后仍能正常运行避免了单点故障。另一个优点是即插即用(Plug and Play, PnP)功能的实现要容易得多,这大大增强了微网的灵活性和可扩展性。然而分散式运行要求各单元之间良好的同步,通信系统开始对系统的安全稳定起着至关重要的作用,这需要广泛的研究和分析。

一般来说,分散式控制下的 SGEMS 在以下情况较常见[56]:

- 1) 微网体积大,或者产生、消耗、存储广泛分散,使得集中式数据采集困难或成本昂贵;
- 2) 资源由不同的实体拥有,这些实体有自己的经营目标,需要本地决策方案;
- 3) 需要定期快速地对系统进行重新配置,比如添加或删除现有的单元。

4.2. 能源管理系统的网络通信

分散的分布式能源出力和需求响应的主动集成需要通信基础设施彼此共享信息并在本地优化其操作[57]。因此,需要有效的数据通信系统,以在传感器、本地控制器和 SGEMS 中央控制器之间进行连续、快速、可靠和准确地传输信息,而不会有任何干扰和断开。然而,这种数据通信系统的投资成本可能非常高,这取决于在覆盖特定地理区域的同时改善传输信号质量所需的中继器的数量。因此,在保证可靠运行的同时,选择适合短距离和长距离应用的数据通信技术,降低安装成本是至关重要的[58] [59]。SGEMS 通信网络系统如图5所示。

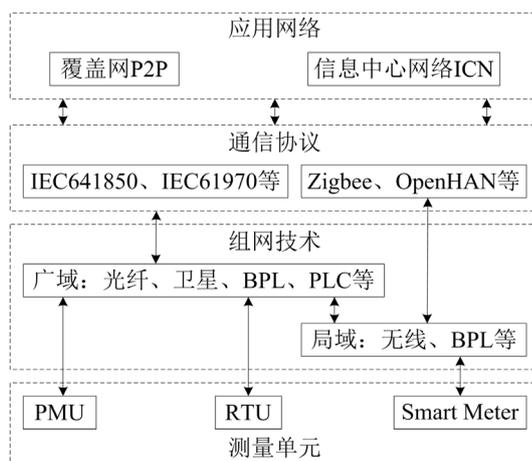


Figure 5. SGEMS communication network system

图5. SGEMS 通信网络系统

在上述文献中,已经提出了几种有线和无线通信技术用于不同微网组件之间的有效通信。这些通信技术的选择取决于数据传输速率、覆盖范围、服务质量、可靠性以及延迟和功耗。在已知现有的通信技术中有线技术(如 BPL、DSL、PLC 和光纤等)具有更高的数据传输速率和可靠性,但代价是安装成本高。相反,无线技术(如 Zigbee、Z-wave、GSM 和 WiFi 等)可以利用其较低的安装成本轻松部署,因此是偏远地区的更好选择。然而,它们存在数据传输速率低和信号干扰的问题。总之,随着微网安装的最新进展,需要定期集成、监控和控制更多传感器、智能电表(Smart Meters, SMs)和本地控制器。因此与有线技术相比,由于其低部署成本,无线技术是更好的选择。

5. 总结与展望

5.1. 总结

随着智能微网的发展,对于能源管理系统方面的研究也更加深入。通过已有文献我们了解到 SGEMS 结合分布式能源发电特点、协调分布式出力 and 储能设备的充放电控制、优化管理以及负荷需求等特性,对提高智能微网安全、可靠、高效运行和稳定、优质、经济的供电起着重大的作用。本文对 SGEMS 的发展进行了总结;对其分类进行了简述,并对并网与孤岛以及短期功率平衡与长期能源管理不同模式下的能源管理方法进行了对比分析;分析了能源管理系统的相关建模方法;针对当前 SGEMS 的控制策略,阐述了集中式控制和分散式控制的应用,并指出它们所适用的智能微网,对能源管理系统之间的通信方面进行了简述;最后对现阶段能源管理系统的研究发展进行了概括,并指出了进一步研究方向。

5.2. 展望

当前对 SGEMS 各方面的研究已经取得不错的成果,这也充分说明了对于分布式能源建立一个智能化的管理系统的重要性。在以往的微网 EMS 的研究中主要采取的是集中式,但是随着研究的深入,分散式控制也逐渐成为智能微网能源管理控制结构的重要发展方向,分散式控制使得分布式发电单元实现了 PnP,各种分布式能源或储能设备任何时间都可以连接到微网中,具有良好的灵活性,也满足大部分地区的用电需求。SGEMS 对微网的协调便利性、高效率性以及减小能源流失等方面起着巨大的作用。SGEMS 的发展趋势主要表现以下三个方面:

1) 分布式能源(如光伏、风电等)出力容易受到自然环境的影响,自身具有波动性、间歇性以及预测性较差等特性。SGEMS 在设计时需要考虑到这些不可控因素对系统的影响。另外,随着用户侧可控负荷的增多,它可以在任何时间连接到微网中,这也增加了微网负荷侧在空间和时间上的不确定性。SGEMS 在需求侧的管理中应该充分考虑到这些不确定性因素,以保证用户的可靠用电。

2) 优化调度模型的丰富和智能化。智能微网能源管理的目的就是保证电网安全、稳定、可靠、优质运行,确保用户安全可靠地用电,实现能源的优化配置,实现综合效益最大化。经济和环境效益的评估模型需要更加全面丰富来反映微网的整体效益;优化分配需要快速准确地进行就要求提高算法的计算速度和精度;加强微网的自治能力和智能化,提高负荷突变和事故发生后的应变能力也是之后研究的着重点之一。

3) 通信网络是 SGEMS 的基础,也是实现智能微网系统的必备条件之一。通信存在的丢包、延时以及超时失败等问题将影响 SGEMS 的执行。另一方面,微网的通信主要是通过无线网络传输,而无线网络的共享和易接近等特点,使得其存在安全隐患。因此,如何建立一种可靠且兼容的通信网络也是在 SGEMS 中一个值得探讨和研究的问题。

参考文献

- [1] Haidar, A., Fakhar, A. and Muttaqi, K. (2020) An Effective Power Dispatch Strategy for Clustered Micro-Grids While Implementing Optimal Energy Management and Power Sharing Control Using Power Line Communication. 2019 *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Baltimore, 29 September-3 October 2019, 4258-4271. <https://doi.org/10.1109/IAS.2019.8912426>
- [2] Mbungu, N.T., Naidoo, R.M., Bansal, R.C. and Vahidinasab, V. (2019) Overview of the Optimal Smart Energy Coordination for Microgrid Applications. *IEEE Access*, **7**, 163063-163084. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951459>
- [3] Byrne, R.H., Nguyen, T.A., Copp, D.A., et al. (2018) Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems. *IEEE Access*, **6**, 13231-13260. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2741578>
- [4] Hatzigiargyriou, N.D. (2014) *Microgrids: Architectures and Control*. Wiley-IEEE Press, Hoboken.
- [5] Zia, M.F., Elbouchikhi, E. and Benbouzid, M. (2018) *Microgrids Energy Management Systems: A Critical Review on*

- Methods, Solutions, and Prospects. *Applied Energy*, **222**, 1033-1055. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>
- [6] Elsied, M., Oukaour, A., Youssef, T., *et al.* (2016) An Advanced Real Time Energy Management System for Microgrids. *Energy*, **114**, 742-752. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.048>
- [7] Marzband, M., Azarinejadian, F., Savaghebi, M. and Guerrero, J.M. (2015) An Optimal Energy Management System for Islanded Microgrids Based on Multiperiod Artificial Bee Colony Combined With Markov Chain. *IEEE Systems Journal*, **11**, 1712-1722. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2422253>
- [8] Du, Y. and Li, F. (2020) Intelligent Multi-Microgrid Energy Management Based on Deep Neural Network and Model-Free Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **11**, 1066-1076. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2930299>
- [9] 王毅, 于明, 李永刚. 基于改进微分进化算法的风电直流微网能量管理[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2392-2397.
- [10] 窦晓波, 徐慧慈, 董建达, 等. 微电网改进多时间尺度能量管理模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 48-55.
- [11] Zhu, J., Liu, Y., Lei, H. and Zhang, T. (2018) A Robust and Model Predictive Control based Energy Management Scheme for Grid-Connected Microgrids. 2018 *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, 20-22 October 2018, 1-6. <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582556>
- [12] Sujil, A., Kumar, R. and Bansal, R.C. (2019) Multiagent-Based Autonomous Energy Management System With Self-Healing Capabilities for a Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **15**, 6280-6290. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2889692>
- [13] Meng, L., Sanseverino, E.R., Luna, A., *et al.* (2016) Microgrid Supervisory Controllers and Energy Management Systems: A Literature Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **60**, 1263-1273. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.003>
- [14] Çimen, H., Çetinkaya, N., Vasquez, J.C., *et al.* (2020) A Microgrid Energy Management System Based on Non-Intrusive Load Monitoring via Multitask Learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3027491>
- [15] Bayhan, S. and Abu-Rub, H. (2019) Smart Energy Management System for Distributed Generations in AC Microgrid. *IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Sonderborg, 23-25 April 2019, 1-5. <https://doi.org/10.1109/CPE.2019.8862356>
- [16] Manbachi, M. and Ordonez, M. (2019) AMI-Based Energy Management for Islanded AC/DC Microgrids Utilizing Energy Conservation and Optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 293-304. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2737946>
- [17] Jiang, Q., Xue, M. and Geng, G. (2013) Energy Management of Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 3380-3389. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2244104>
- [18] Sohn, J.-M. (2016) Generation Applications Package for Combined Heat Power in On-Grid and Off-Grid Microgrid Energy Management System. *IEEE Access*, **4**, 3444-3453. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2582200>
- [19] An, L.N., Dung, T.T.M. and Quoc-Tuan, T. (2018) Optimal Energy Management for an On-Grid Microgrid by Using Branch and Bound Method. 2018 *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Palermo, 12-15 June 2018, 1-5. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493753>
- [20] Wu, D., Tang, F., Dragicevic, T., *et al.* (2015) A Control Architecture to Coordinate Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems in Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **6**, 1156-1166. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2377018>
- [21] Tutkun, N. and San, E.S. (2013) Optimal Power Scheduling of an Off-Grid Renewable Hybrid System Used for Heating and Lighting in a Typical Residential House. 2013 *13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Wroclaw, 1-3 November 2013, 352-355. <https://doi.org/10.1109/EEEIC-2.2013.6737935>
- [22] Sridhar, J., Mouli, G.R.C. and Raaijen, E. (2015) Analysis of Load Shedding Strategies for Battery Management in PV-Based Rural Off-Grids. 2015 *IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, 29 June-2 July 2015, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232628>
- [23] Sigrist, L., Fernández, J.M., Lobato, E., *et al.* (2019) Modelling of a Thermo-Electric Energy Management System Including Heat Pumps for an Off-Grid System. *IET Renewable Power Generation*, **13**, 961-972. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5505>
- [24] Kanchev, H., Lu, D., Colas, F., *et al.* (2011) Energy Management and Operational Planning of a Microgrid with a pv-Based Active Generator for Smart Grid Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 4583-4592. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2119451>
- [25] Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N. and Dimeas, A. (2008) Microgrids Management. *IEEE Power and Energy Magazine*, **6**, 54-65. <https://doi.org/10.1109/MPE.2008.918702>

- [26] He, J. and Li, Y.W. (2012) An Enhanced Microgrid Load Demand Sharing Strategy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **27**, 3984-3995. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2190099>
- [27] Savaghebi, M., Jalilian, A., Vasquez, J.C. and Guerrero, J.M. (2012) Secondary Control for Voltage Quality Enhancement in Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 1893-1902. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2205281>
- [28] Meng, L., Tang, F., Savaghebi, M., et al. (2014) Tertiary Control of Voltage Unbalance Compensation for Optimal Power Quality in Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **29**, 802-815. <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2363687>
- [29] Tang, F., Zhou, X., Meng, L., et al. (2014) Secondary Voltage Unbalance Compensation for Three-Phase Four-Wire Islanded Microgrids. 2014 *IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14)*, Barcelona, 11-14 February 2014, 1-5.
- [30] Chen, C., Duan, S., Cai, T., et al. (2011) Smart Energy Management System for Optimal Microgrid Economic Operation. *IET Renewable Power Generation*, **5**, 258-267. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2010.0052>
- [31] Dukpa, A., Duggal, I., Venkatesh, B. and Chang, L. (2010) Optimal Participation and Risk Mitigation of Wind Generators in an Electricity Market. *IET Renewable Power Generation*, **4**, 165-175. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2009.0016>
- [32] Hemmati, R., Saboori, H. and Siano, P. (2017) Coordinated Short-Term Scheduling and Long-Term Expansion Planning in Microgrids Incorporating Renewable Energy Resources and Energy Storage Systems. *Energy*, **134**, 699-708. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.081>
- [33] 张建华, 苏玲, 陈勇, 等. 微网的能量管理及其控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 24-28.
- [34] A S, Kumar R. (2016) Smart Micro Grid Test System for Agent based Energy Management System. 2016 *7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Patiala, 17-19 November 2016, 1-6.
- [35] Li, C., Jia, X., Zhou, Y. and Li, X. (2020) A Microgrids Energy Management Model Based on Multi-Agent System Using Adaptive Weight and Chaotic Search Particle Swarm Optimization Considering Demand Response. *Journal of Cleaner Production*, **262**, 121247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121247>
- [36] Wei, J., Kxu, Y., Junjie, Y., et al. (2019) Energy Management Strategy for Maximization of Renewable Energy Consumption in Multi-Microgrids. 2019 *6th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, Shanghai, 2-4 November 2019, 325-329.
- [37] Novickij, I. and Jóos, G. (2019) Model Predictive Control Based Approach for Microgrid Energy Management. 2019 *IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Edmonton, 5-8 May 2019, 1-4. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2019.8861781>
- [38] Jiang, W., Yang, K., Yang, J., et al. (2019) A Multiagent-Based Hierarchical Energy Management Strategy for Maximization of Renewable Energy Consumption in Interconnected Multi-Microgrids. *IEEE Access*, **7**, 169931-169945. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2955552>
- [39] Imran, A., Hafeez, G., Khan, I., et al. (2020) Heuristic-Based Programmable Controller for Efficient Energy Management under Renewable Energy Sources and Energy Storage System in Smart Grid. *IEEE Access*, **8**, 139587-139608. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012735>
- [40] 陈昌松, 段善旭, 涛蔡, 等. 基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 196-201.
- [41] 王成山, 杨占刚, 王守相, 等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 99-105.
- [42] Bidram, A. and Davoudi, A. (2012) Hierarchical Structure of Microgrids Control System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 1963-1976. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2197425>
- [43] Ding, M., Zhang, Y.Y., Mao, M.Q., et al. (2010) Operation Optimization for Microgrids under Centralized Control. *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Hefei, 16-18 June 2010, 984-987. <https://doi.org/10.1109/PEDG.2010.5545793>
- [44] Abdelaziz, M.M.A., Shaaban, M.F., Farag, H.E., et al. (2014) A Multistage Centralized Control Scheme for Islanded Microgrids With PEVs. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **5**, 927-937. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2313765>
- [45] Cai, J.Q., Chen, C.S., Duan, S.X., et al. (2014) Centralized Control of Large Capacity Parallel Connected Power Conditioning System for Battery Energy Storage System in Microgrid. 2014 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, 14-18 September 2014, 409-413.
- [46] Prasanna, I.V., Srinivasan, D. and Panda, S.K. (2016) Design, Analysis and Implementation of a Four-Tier Centralized Control Architecture for Intelligent Operation of Grid-connected Microgrids. 2016 *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Trivandrum, 14-17 December 2016, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2016.7914530>
- [47] Sun, C., Joos, G., Ali, S.Q., et al. (2020) Design and Real-Time Implementation of a Centralized Microgrid Control

- System with Rule-Based Dispatch and Seamless Transition Function. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **56**, 3168-3177. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2979790>
- [48] Tan, K.T., Peng, X.Y., So, P.L., *et al.* (2012) Centralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters in Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 1977-1987. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2205952>
- [49] Tsikalakis, A.G. and Hatziargyriou, N.D. (2011) Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation. 2011 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, 24-28 July 2011, 1-8. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039737>
- [50] Senjyu, T., Omine, E., Tokudome, M., *et al.* (2009) Frequency Control Strategy for Parallel Operated Battery Systems based on Droop Characteristics by Applying H_{∞} Control Theory. 2009 *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Seoul, 26-30 October 2009, 1-4. <https://doi.org/10.1109/TD-ASIA.2009.5356949>
- [51] Barklund, E., Pogaku, N., Prodanovic, M., *et al.* (2007) Energy Management System with Stability Constraints for Stand-alone Autonomous Microgrid. 2007 *IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, San Antonio, 16-18 April 2007, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2007.4304233>
- [52] Hakuto, Y., Tsuji, T. and Qi, J. (2017) Autonomous Decentralized Stabilizing Control of DC Microgrid. 2017 *IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Nuremburg, 27-29 June 2017, 292-296.
- [53] Bani-Ahmed, A., Rashidi, M., Nasiri, A. and Hosseini, H. (2019) Reliability Analysis of a Decentralized Microgrid Control Architecture. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 3910-3918. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2843527>
- [54] McArthur, S.D.J., Davidson, E.M., Catterson, V.M., *et al.* (2007) Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-agent Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, **22**, 1753-1759. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.908472>
- [55] Dimeas, A.L. and Hatziargyriou, N.D. (2005) Operation of a Multiagent System for Microgrid Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, **20**, 1447-1455. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.852060>
- [56] Dou, C.-X. and Liu, B. (2013) Multi-Agent Based Hierarchical Hybrid Control for Smart Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **4**, 771-778. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2230197>
- [57] Wang, B., Sechilariu, M. and Locment, F. (2012) Intelligent DC Microgrid with Smart Grid Communications: Control Strategy Consideration and Design. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 2148-2156. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2217764>
- [58] Usman, A. and Shami, S.H. (2013) Evolution of Communication Technologies for Smart Grid Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **19**, 191-199. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.002>
- [59] Gomez-Cuba, F., Asorey-Cacheda, R. and Gonzalez-Castano, F.J. (2013) Smart Grid Last-Mile Communications Model and Its Application to the Study of Leased Broadband Wired-Access. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **4**, 5-12. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2223765>