

智能微网能源管理及其控制策略研究综述

刘 斌, 冯宜伟

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

收稿日期: 2021年5月16日; 录用日期: 2021年5月30日; 发布日期: 2021年6月15日

摘 要

随着智能微网的快速发展, 对于多种能源的智能、安全、可靠和协调地优化利用变得至关重要。为此, 概述了智能微网能源管理系统的研究现状, 分析了智能微网中分布式电源和储能系统存在的问题: 如不确定性、多种能源的优化调度、经济可持续安全性, 同时对智能微网能源管理系统的决策策略及其求解方法进行了分类比较, 分析了各类优化算法的特点、性能和适用范围。最后, 对智能微网能源管理系统未来的发展趋势和应用前景进行了展望。

关键词

智能微网, 能源管理系统, 可再生能源, 优化调度

A Review of Smart Microgrid Energy Management and Control Strategy

Bin Liu, Yiwei Feng

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

Received: May 16th, 2021; accepted: May 30th, 2021; published: Jun. 15th, 2021

Abstract

With the rapid development of smart microgrid, it is very important for the intelligent, safe, reliable and coordinated optimal utilization of various energy sources. To this end, this paper summarizes the research status quo of smart microgrid energy management system, and analyzes the problems of distributed power supply and energy storage system in smart microgrid, such as uncertainty, a variety of energy optimization scheduling, sustainable economic security. At the same time, decision strategy of smart microgrid energy management system and its solving methods are

compared, and the characteristics, performance and application range of various optimization algorithms are analyzed. Finally, the future development trend and application prospect of smart microgrid energy management system are prospected.

Keywords

Smart Microgrid, Energy Management System, Renewable Energy, Optimal Operation

Copyright © 2021 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

在全球能源危机加剧的今天, 人类赖以生存和发展的化石能源正在逐步枯竭。另一方面, 过度使用传统能源会产生大量的温室气体排放, 加剧全球变暖, 威胁到整个生态系统的平衡。相对于传统能源, 可再生能源具有分布广泛、安全无污染等特点, 能源系统已纳入不同规模的可再生能源, 例如太阳能、风能和生物质能, 以缓解上述全球问题[1]。分布式发电随着可再生能源的开发利用应运而生, 它具有灵活、分散的特点, 极大地满足了电力需求。然而, 分布式电源也存在诸如引起电网安全性和电能质量等相关问题。为解决电网与分布式电源之间的矛盾, 智能微网作为一种集分布式电源、储能系统、可控负荷和监控装置于一体的发配电系统被设计开发, 这种综合集成技术正受到人们广泛的关注[2]。

随着智能微网的迅速发展, 必然要依赖于相关理论和技术的支持, 而对能源管理系统进行科学的运用, 可以极大地提高智能微网的电能质量、稳定性以及供电可靠性[3], 因此, 做好多种能源管理已成为现代智能微网系统的关键难点之一。国内外学者一直致力于能源管理系统的开发与优化, 使之既能满足系统约束, 又能兼顾供需双方的管理, 有效发挥智能微网的各种优势。文献[4]介绍了加拿大魁北克水电公司的计划孤岛系统, 该系统仅在计划的系统维护期间作为一个孤岛运行, 因此不使用任何存储或通信系统。文献[5]介绍了美国的 CERTS 智能微网试验台, 该试验台设有蓄电池储能装置, 并采用基于以太网的中央通信系统, 将能源管理系统和发电机组连接起来, 进行分布式发电机组的布点调度。然而, 这种通信网络并没有用于智能微网的动态控制。因此, 电源具有即插即用的自主控制能力。文献[6]介绍了荷兰的布朗斯伯格假日公园智能微网。该系统配备由两个在公共耦合点连接的电池组组成的中央储能装置, 并使用中央控制方法, 中央控制器通过 GSM 通信与调度中心的计算机交换数据。文献[7]介绍了德国的 DeMoTec 测试智能微网, 该系统有多个具有不同优先级的负载, 并且有多个自动开关, 用于将智能微网划分为最多 3 个低压孤岛电网。其能源管理系统用于控制发电机, 并能够监控系统的运行状态。通信通过单独的以太网通信线路完成, 并使用 XML-RPC 通信协议。文献[8]介绍了雅典大学(NTUA)——希腊国家技术学院实验室规模的智能微网系统, 该系统包括两个光伏发电机、一个风力涡轮机、电池储能、可控负载与当地低压电网受控互连。该系统采用分散控制, 使用一个多代理系统(MAS)完成运行计划。文献[9]介绍了日本的京都生态能源项目, 智能微网由燃气发动机、铅酸电池、两个光伏系统和小型风力发电机连接在偏远的地方组成。能源管理系统利用远程监控技术, 通过中央控制器发送控制决策, 合理利用的分布式发电单元来满足用户侧需求。文献[10]介绍了中国合肥工业大学的智能微网试验台, 该系统控制结构分为两层: 本地控制器和中央控制器。本地控制器负责控制馈电总线的功率、电压和频率, 自动无缝控制。中央控制器用于启动和关闭智能微网的运行, 并根据有关能源波动的预测结果, 为每个 DG

制定最佳计划,并实时做出控制决策和经济调度策略。该系统由符合 IEC61970 标准的能源管理系统进行管理,包括监督管理和数据采集系统,自动发电控制和电力系统应用软件。文献[11]介绍了中国东福山岛独立型智能微网,该系统采用改进型阀控铅酸蓄电池,以蓄电池组端电压为标准进行模式控制、模式切换和储能保护,并通过实际运行分析,证明了该研究方法的实用性和有效性。

分析研究世界各地的智能微网,其实验条件、用途和目标都有很大的不同。北美主要研究可再生能源发电,通过整合能源管理技术保持发电源的可靠性,侧重于使用分散控制调节分布式发电的电压和频率。欧盟的环保意识水平处于世界前列,智能微网使用储能系统和不可再生发电单元维持电能质量,通过提高能源效率来压缩能源消耗。日本致力于以最佳效率利用可再生能源,其主流的控制技术是使用储能系统的集中控制。中国的智能微网主要用于远程应用,专注于为电力系统提供可靠的可再生能源,主要的控制技术是集中控制和基于代理的控制。

本文将针对智能微网系统中的能源管理建模及其控制策略尝试进行全面而系统的分析。首先从主体架构、主要组成单元以及典型配置等方面介绍能源管理系统的建模;而后介绍了常见的能源管理系统的控制结构及其特征,并对能源管理系统的各种控制策略也加以分析;最后对能源管理系统进行了总结和展望。

2. 能源管理系统建模

能源管理系统的模型构建是能源优化调度的基础工作,主要包括发电模型、储能模型、负荷模型和经济模型,需要研究分布式发电源工作特性、负荷特性、经济特性及其模型建立方法等。国内外学者在能源优化调度研究过程中,已建立了相关模型,为进行能源管理的研究奠定了一定的基础。

能源管理系统在国际电工委员会 IEC61970 标准中定义为:一种计算机系统,包括提供基本支持服务和应用程序的软件平台和提供有效运行所需的功能发电和输电设施,确保以最低成本提供足够的能源安全[12]。能源管理系统通过负荷预测、远程监控界面和数据采集等模块向每个发电、存储和负荷单元发送最优决策,确保决策策略的有效实施[13]。能源管理系统的主要任务包括:采集电网信息,分布式发电源信息、负荷信息等;实现大电网、多种分布式发电单元、储能单元和负载之间的最优功率匹配;实现智能微网在并网与孤岛两种运行模式间的无缝转换等。能源管理系统的主体架构如图 1 所示。

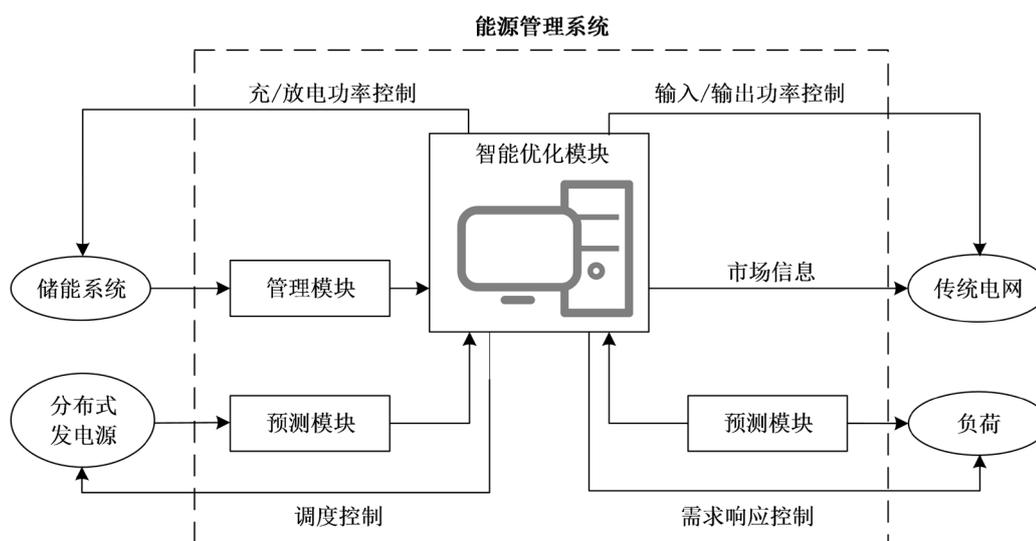


Figure 1. Main structure of smart micro-grid energy management system
图 1. 智能微网能源管理系统的主体架构

能源管理系统从控制结构来看, 可以分为分散式控制和集中式控制, 或是主从控制、对等控制和分层控制。目前能源管理主要采用集中式控制, 随着技术的成熟, 分散式控制将逐渐成为能源管理控制结构的发展方向。接下来主要介绍分散式和集中式控制模式。

分散式控制模式旨在实现智能微网的经济运行, 同时为不同的指令和负载提供尽可能高的自主权。主要由中央控制器实时地向局部控制器发送和接收所有信息, 每个局部控制器向中央控制器提出当前和未来的需求或发电请求。中央控制器确定最优调度并将其发送回局部控制器。分散式控制的优点在于: 中央控制器的计算量大大减少; 局部控制器有很大的自主权, 保证了分布式发电单元即插即用的功能。它的不足之处是: 不利于对智能微网的全局性监控, 对于安全隐患难以及时发现和维护; 不同的局部控制器采用不同的通信方式, 通信系统设计难度较大。分散式能源管理模式如图 2 所示, 图中的 PCC 表示智能微网和主电网的连接点, 也称为公共耦合点。

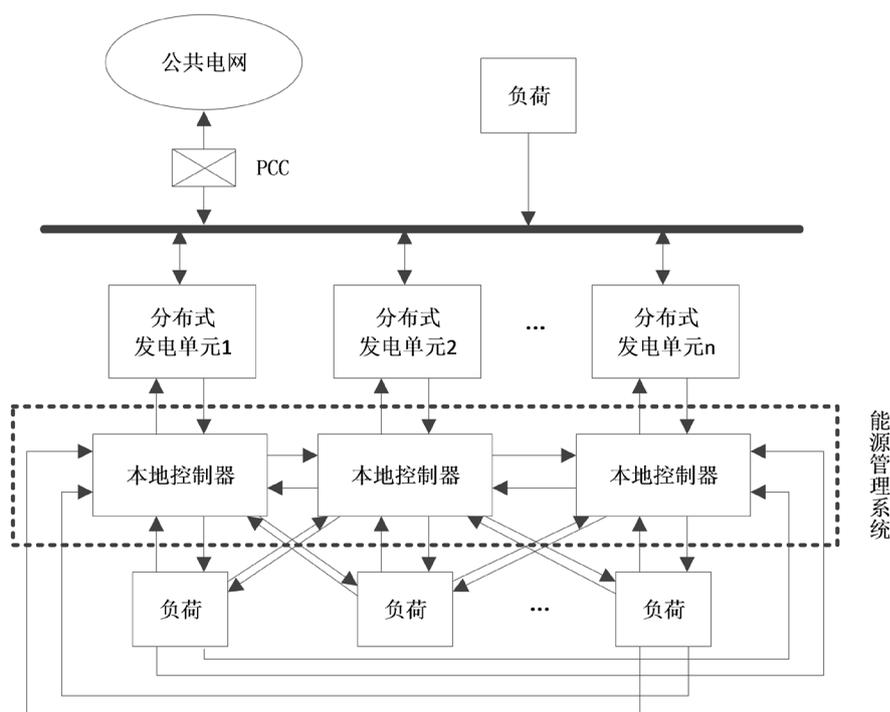


Figure 2. Decentralized energy management model

图 2. 分散式能源管理模式

集中式控制模式的特点是, 中央控制器将分布电源的发电量、成本函数、各用户的能耗模式等信息集中起来, 然后由集中式能量管理系统确定分布式电源的最优能量调度, 并将这些决策发送给各局部控制器。集中式控制的优点是: 每层控制器的控制目标明确清晰, 便于实施管理维护; 可以自上而下的实现对智能微网的整体控制。其缺点是: 中央控制器的计算量巨大; 对于新增的分布式发电单元需要改动整体控制设计, 不利于智能微网的扩展; 极度依赖通信, 通信系统瘫痪将面临整个系统失控的风险。集中式能源管理模式如图 3 所示。

智能微网的能源管理系统决定了分布式发电单元的最佳调度和运行, 提供必要的电能质量控制、运行优化和经济分析等功能, 确保对负载的不间断供电。文献[14]给出了一种能源管理系统的典型配置, 如图 4 所示。在并网模式下, 智能微网通过公共耦合点连接到主电网, 通常连接到低压或中压水平的配电系统。储能系统在放电模式下充当电源, 在充电模式下作为负载, 能够将电压和频率波动保持在可接受

的范围内, 以确保智能微网的可持续性。在孤岛模式下, 智能微网与主电网分离, 并根据分布式发电单元的出力向用户提供可靠的电力供应。图 4 中: PCC 表示公共耦合点; LC 表示本地控制器; 实心圆表示本地保护装置; 虚连接线表示通信控制网络; 实连接线表示电气网络。

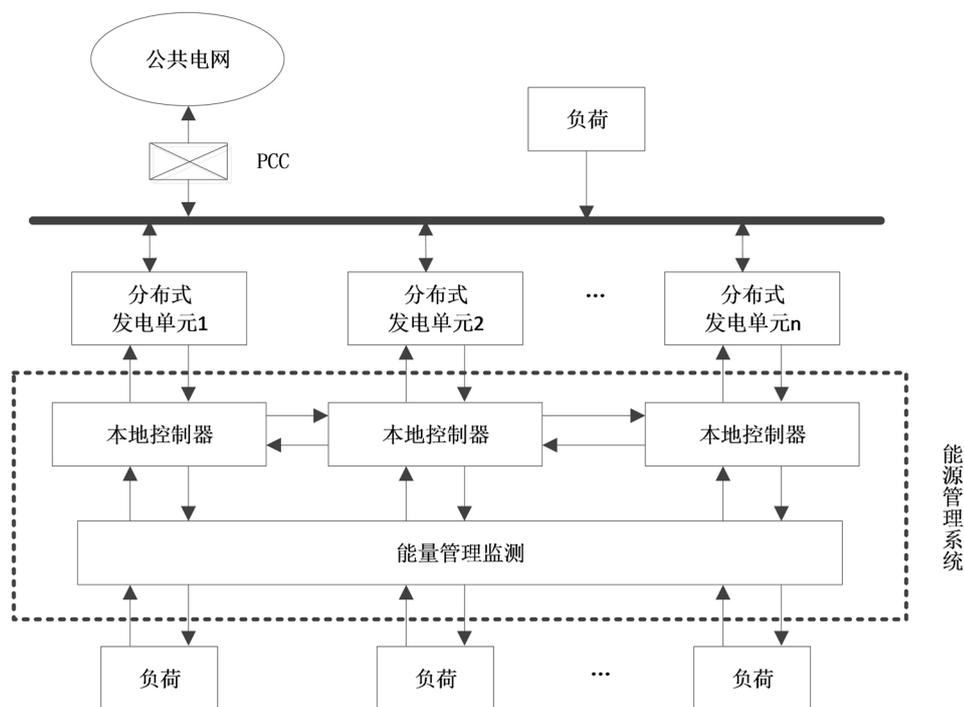


Figure 3. Centralized energy management model

图 3. 集中式能源管理模式

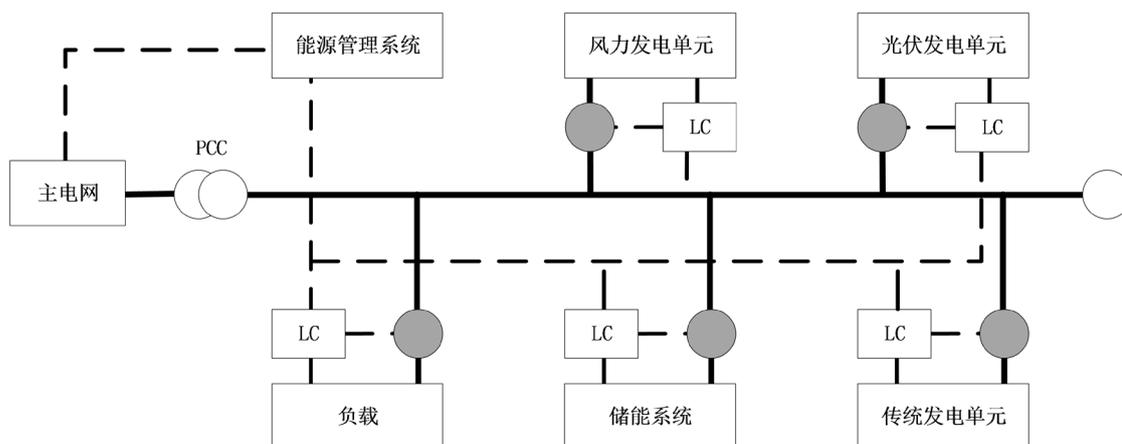


Figure 4. Typical configuration of energy management system

图 4. 能源管理系统的典型配置

储能模块在智能微网中具有重要作用。智能微网孤岛运行的稳定性, 并网运行的经济性和应对大电网的计划性, 都需要储能模块的配合。目前储能模块种类繁多, 主要包括蓄电池、超导磁、飞轮、超级电容等。按照储能方式分为物理、电磁、电化学三种类型; 按照储能形式可以分为能量型和功率型两大类型。表 1 列出了不同分类方式下的储能模块。

Table 1. Classification of energy storage systems
表 1. 储能系统分类

储能方式	储能模块	储能形式
电化学	蓄电池	能量型
	液流电池	
	压缩空气	
物理	抽水蓄能	功率型
	飞轮技术	
电磁	超级电容	功率型
	超导磁	

虽然储能模块形式丰富,但单一的储能技术由于自身条件限制,不能完全适应智能微网各种使用环境及要求。不同的储能模块配合则能很好满足需求,这就是混合储能技术。比如铅酸蓄电池成本低,但是在使用寿命和功率密度方面表现一般;对于铅酸蓄电池的这两方面的缺点,超级电容器表现不俗[15],其缺点是容量密度较低、端电压波动较大[16],但在这两方面铅酸蓄电池的表现却令人满意。文献[17]将这一思想应用于智能微网中,采用不同的储能模块配合,大大提高智能微网与主电网之间交换功率的稳定性,并且可以延长储能装置的循环寿命,具有更好的经济性。文献[18]在智能微网中采用超级电容配合蓄电池的混合储能技术,结果表明智能微网的快速性、稳定性等方面获得很大的提升。所以,将多种储能形式结合起来,正好弥补各自的不足,发挥各自的优势,满足智能微网的需求。

由于光伏发电模块的出力受太阳辐射强度、环境温度影响[19],故光伏发电单元的功率输出一般以标准测试条件(STC)下的系统出力为标准进行修正,其稳定功率输出可表示[20]为:

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_r)] \quad (1)$$

式(1)中, P_{PV} 为光伏发电单元的实际输出功率; P_{STC} 为光伏发电单元在 STC 下的最大输出功率; G_{ING} 为实际的太阳辐射强度; G_{STC} 为 STC 下的辐照强度, $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$; k 为功率温度系数; T_c 为电池板的实际工作温度; T_r 为参考温度, $T_r = 25^\circ\text{C}$ 。

不同的风力发电机会有不同的功率输出特性曲线,文献[21]考虑了风速分布、风力发电机参数、负荷分布等因素,给出了一种功率输出模型来计算风电机的功率输出:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{cr}, v \geq v_{co} \\ \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{cr}^3} P_r & v_{ci} \leq v \leq v_{ro} \\ 0 & v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, P_{WT} 为风力发电机的输出功率; P_r 为风力发电机的额定功率; v 为风力发电机组的实际风速; v_{ci} , v_{co} 和 v_r 分别为风力发电机的切入风速、切出风速和额定风速。

柴油发电机运行时的燃料消耗成本主要与其有功功率输出相关,文献[22]给出了一种计算模型来表示柴油发电机的能耗 - 功率输出特性:

$$C_{DE} [P_i(t)] = a_i P_i^2(t) + b_i P_i(t) + c_i \quad (3)$$

式(3)中, $C_{DE} [P_i(t)]$ 为系统柴油发电机的能耗成本; $P_i(t)$ 为柴油发电机在 t 时段内的净输出功率; a_i , b_i 和 c_i 分别为柴油发电机的燃料费用系数。

燃气发电机的运行效率受机组出力影响较大, 在不考虑发电机频繁启停所造成的损耗下, 文献[23]给出了一种三阶模型表示燃气发电机的发电效率:

$$\begin{aligned} F_{Gt,i,t} &= E_{Gt,i,t} / \eta_{Gt,i,t} \\ E_{Gt,i,t} &= P_{Gt,i,t} \Delta t \\ \eta_{Gt,i,t} &= a_i + b_i P_{Gt,i,t}^* + c_i (P_{Gt,i,t}^*)^2 + d_i (P_{Gt,i,t}^*)^3 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中, $F_{Gt,i,t}$ 为第 i 台燃气发电机在 t 时段的天然气耗量; $E_{Gt,i,t}$ 为第 i 台燃气发电机在 t 时段提供的电能。 $\eta_{Gt,i,t}$ 为第 i 台燃气发电机在 t 时段的发电效率; a_i 、 b_i 、 c_i 和 d_i 为第 i 台燃气发电机的效率系数; $P_{Gt,i,t}$ 和 $P_{Gt,i,t}^*$ 为第 i 台燃气发电机在 t 时段的电功率和标么值。

在实际应用中, 能源管理系统需要考虑设备投资, 购售电以及停电损失等经济因素, 通过环境治理成本计算污染气体的排放影响, 并考虑需求响应成本、通货膨胀等因素。模型建立的准确与否将直接影响能源管理方案的合理性。文献[24]为我们提供了一种参考模型, 在假定智能电网所有的点电压水平相同, 忽略功率损耗和无功率流的情况下, 以降低发电成本, 提高系统效率为优化目标, 目标函数定义如下:

$$F = \sum_{t=1}^m (C_t^g + C_t'^g + C_t^{ES-} - C_T^L - C_t^{ES+} + \Omega_t) \times \Delta t \quad (5)$$

式(5)中, C_t^g 和 $C_t'^g$ 分别是可再生和不可再生能源发电的能源成本; C_t^{ES-} 和 C_t^{ES+} 代表储能单元的充放电成本; C_T^L 和 Ω_t 分别是响应负荷需求消耗的能量成本以及未供应能量的惩罚。

总发电成本在功率平衡限制条件下达到最小化:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{n^g} P_t^{k,g} + \sum_{k=1}^{n'^g} P_t'^{k,g} + \sum_{k=1}^{n^{ES}} (1 - X_t^{ES}) \cdot P_t^{k,ES-} + P_t^{UP} \\ & = P_t^{NRL} + \sum_{k=1}^{n^l} P_t^{k,l} + \sum_{k=1}^{n^{ES}} X_t^{ES} \cdot P_t^{k,ES+} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, $P_t^{k,g}$ 和 $P_t'^{k,g}$ 分别是第 k 个可再生和不可再生发电源在 t 期间的输出功率; n^g 和 n'^g 表示系统中安装的可再生和不可再生发电源的数量; X_t^{ES} 是一个二进制变量; $P_t^{k,ES-}$ 和 $P_t^{k,ES+}$ 是第 k 个储能单元在 t 期间的充放电功率; n^{ES} 表示智能微网系统中安装的可再生和不可再生发电源的数量; P_t^{UP} 是系统在 t 期间未提供的功率量; P_t^{NRL} 是系统在 t 期间未响应负载的功率; $P_t^{k,l}$ 是系统在 t 期间第 k 次响应负荷需求的消耗功率; n^l 表示系统响应负荷需求的次数。

文献[25]为我们提供了一种参考模型, 优化目标是在满足负荷需求的情况下, 使运营成本和污染物排放最小化, 以覆盖风能和光能带来的不确定性。目标函数设定为运营成本和排放成本:

$$\begin{aligned} F &= \text{Cost}^O + \text{Cost}^E \\ \text{Cost}^O &= \sum_{t=1}^T (\text{cost}_{DG}(t) + ST_{DG}(t) + \text{cost}_S(t) + \text{cost}_{Grid}(t) + \text{cost}_{DR}(t)) \\ \text{Cost}^E &= \sum_{t=1}^T \{E_{DG}(t) + E_S(t) + E_{Grid}(t)\} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中, Cost^O 和 Cost^E 分别表示运营成本和排放; $\text{cost}_{DG}(t)$ 、 $ST_{DG}(t)$ 、 $\text{cost}_S(t)$ 、 $\text{cost}_{Grid}(t)$ 和 $\text{cost}_{DR}(t)$ 分别表示分布式发电源发电成本、启动和关闭成本、储能成本以及与电网交换电力的成本; $E_{DG}(t)$ 、 $E_S(t)$ 和 $E_{Grid}(t)$ 分别表示分布式发电源、储能单元和电网的排放成本。

实际发电量限制描述如下:

$$\begin{aligned}
 P_{DGi,\min}(t) &\leq P_{DGi}(t) \leq P_{DGi,\max}(t) \\
 P_{Sj,\min}(t) &\leq P_{Sj}(t) \leq P_{Sj,\max}(t) \\
 P_{Grid,\min}(t) &\leq P_{Grid}(t) \leq P_{Grid,\max}(t)
 \end{aligned} \tag{8}$$

式(8)中, $P_{DGi,\min}(t)$ 、 $P_{Sj,\min}(t)$ 和 $P_{Grid,\min}(t)$ 分别是第 i 个分布式发电源、第 j 个储能单元和电网在 t 期间的最小有功功率。 $P_{DGi,\max}(t)$ 、 $P_{Sj,\max}(t)$ 和 $P_{Grid,\max}(t)$ 是 t 期间的最大有功功率。

文献[26]为我们提供了一种参考模型,考虑了在不同场景下智能微网与主电网的交易成本以及提供网络安全的预期成本,以优化调度精度和减小运营成本为优化目标。目标函数设定如下:

$$F = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{n=1}^N (P_{n,t} B_{n,t} + SU_n \times y_{n,t} + SD_n \times z_{n,t} + c\pi_{n,t}^U SR_{n,t}^U + c\pi_{n,t}^D SR_{n,t}^D) + \sum_{d=1}^{ND} CDR_{d,t} + \sum_{s=1}^S Pr_{t,s} SC_{t,s} \right\} \tag{9}$$

式(9)中, $P_{n,t} B_{n,t}$ 为分布式发电源发电成本; $c\pi_{n,t}^U SR_{n,t}^U$ 和 $c\pi_{n,t}^D SR_{n,t}^D$ 分别表示系统启动和关闭成本; $CDR_{d,t}$ 表示采购成本; $Pr_{t,s} SC_{t,s}$ 表示网络安全预期成本; 总成本 F 还包括系统与主电网的交易成本。

智能微网的内部功率平衡以及与主电网电力交易约束如下:

$$\sum_n P_{n,t} + P_{dist,t} - P_{ch,t} + P_{PV,t} + P_{WT,t} = P_{load,t} \tag{10}$$

式(10)中, $P_{n,t}$ 同时决定分布式发电与主电网的计划发电量; $P_{dist,t}$ 和 $P_{ch,t}$ 分别表示系统与主电网的进出口电量; $P_{PV,t}$ 表示风力发电量; $P_{WT,t}$ 表示光伏发电量; $P_{load,t}$ 表示负荷需求电量。

3. 能源管理系统的控制策略分析

随着智能微网的结构日趋复杂多样化,能源管理系统的优化策略也从经济调度和发电源组合方面多样化。另一种策略是调度用户和负荷,减少能耗和停电损失,控制用户的间歇性和波动性,结合不同环境、不同需求的情况,实现智能微网的经济、高效和安全运行。表 2 总结了几种常用于智能微网能源管理系统的控制策略。

Table 2. Control strategy of energy management system

表 2. 能源管理系统控制策略

文献	控制策略	贡献	局限
[27]	混合线性规划法	提出了一种适用于住宅型智能微网的能源交易收益模型。	电池更换成本高,难以融入市场。
[28]	无差拍控制方法	提出了一种可以延长电池寿命,降低系统成本的控制方法。	没有考虑智能微网的需求侧响应。
[34]	粒子群优化算法	通过消除智能微网需求侧的消耗高峰,保证电池的循环寿命。	不能适用与高能耗智能微网系统。
[38]	模糊逻辑方法	通过调节智能微网的潮流,提高负荷管理性能,降低功率波动。	没有考虑环境污染排放问题。
[39]	神经网络方法	适用于交直流混合智能微网,提高了系统的经济性能。	没有考虑通信传输的稳定性问题。
[43]	模糊控制方法	提高可再生能源利用率的情况下保证需求侧的经济高效响应。	具有较高的模型依赖性。
[45]	势博弈方法	提高系统需求侧响应速度的同时保证通信的稳定性。	具有较高的计算成本。

3.1. 基于经典方法的控制策略

经典的能源管理控制方法可以分为线性规划方法、非线性规划方法以及混合线性规划方法。以线性和非线性规划方法为基础的能源管理均采用集中式控制结构,并着重于智能微网的多种能源优化管理。文献[27]提出了一个基于混合整数线性规划的能源交易收益模型,适用于住宅型智能微网的能源管理,可实现蓄热系统的集成,通过热负荷管理显著降低系统能耗,但由于电池的投资大,更换成本高,该模型

难以融入住宅市场。为了实现住宅型智能微网的能源优化管理,文献[28]提出了一种应用于直流智能微网中的无差拍控制方法,在一个控制周期内,该策略产生了最优占空比,比各种基于PI的控制方法对干扰都有更快的响应。根据蓄电池和超级电容器的特性,该方法不仅能够维持良好的直流母线电压的调节,而且能够补偿直流微电网中的瞬态和稳态功率的不匹配。该方法可以减少电池的负担,延长电池寿命,降低系统成本,但该方法没有考虑智能微网在需求侧响应方面的相关问题。文献[29]提出了一种基于混合整数线性能源管理的能源管理模型,适用于住宅型智能微网的能源优化管理,在此模型中考虑了可再生能源、电力需求和电价的不确定性,并以智能微网建设的总利润最大化为目标,该方案可减少高峰时段的电力需求,降低智能微网的运行成本,但该模型没有考虑计算时间方面的问题。文献[30]提出了一种适用于并网式智能微网的混合整数线性能源管理方法,该方法考虑了当前和预测电价、负荷预测和可再生能源的可用性,以优化分布式发电组合和经济调度为目标,与常见的模型预测控制方法相比,此方法在计算时间和扩展性方面有更好的表现,但是该方法未考虑传统发电源的环境污染物排放成本。

本小节讨论的方法主要通过传统控制方法对智能微网中的能源管理系统进行分析。这些方法在降低系统运营成本方面有很好的效果,而在负荷需求和市场价格的不确定性、网络传输稳定性以及系统安全性等方面未能深入研究,需要结合更多的新兴控制技术对智能微网进行更好的优化管理。

3.2. 基于元启发式方法的控制策略

元启发式算法是独立于问题的技术,它不利用问题的特殊性质,可以作为黑箱操作,包括遗传算法,粒子群算法,分布估计算法等等。基于元启发式算法的控制方法模型依赖性低,计算量小,在降低智能微网系统损耗、运营成本、环境污染物排放等方面效果显著。文献[31]使用基于紫峰协议(Zigbee)的可靠通信基础设施开发了多目标能源管理系统,该系统以运营成本最小化,温室气体排放成本最小化以及能源贸易利润最大化为目标,可以减少传统发电机组的使用,最大限度地利用可再生能源,但该模型没有考虑储能电池的放电深度和寿命。文献[32]提出了一种基于记忆的优化遗传算法,应用于并网智能微网的能源管理,以智能微网的发电成本最小化和发电量最佳分配为优化目标,该方法以最小的成本提供分布式发电单元请求的功率,同时满足平衡方程,与遗传算法和两种粒子群优化算法相比,该方法的性能更好。文献[33]提出了一种适用于并网式智能微网的粒子群优化算法,该算法使用点估计法,并考虑了分布式发电单元,负荷需求和电价的不确定性等因素进行建模,以最小化智能微网的运行成本,该算法比遗传算法以及多种粒子群算法更能有效地求解问题的最优解,该模型没有考虑需求侧响应。文献[34]提出了一种基于粒子群优化算法的能源管理方法,适用于低能耗住宅型智能微网的用电调度和储能控制,该方法通过在合适的时间内移动可控负荷、调整电能潮流和储能系统电流,在线地寻找最佳运行条件,消除了用户能源需求的消耗高峰,保证了储能系统的循环寿命,提高了智能微网的运行效率和稳定性,但没有考虑通信安全和稳定性。文献[35]提出了一种基于粒子群算法的能源优化管理方法,通过经济负荷调度来实现孤岛式智能微网的能源管理,与经典控制方法相比,该算法分配电力需求到各发电源成本更低、损耗更小,但该方法没有考虑通信安全和稳定性问题。文献[36]提出了一种针对孤岛式智能微网的能源管理系统,以最大程度地降低智能微网的运营成本,基于混合神经网络和马尔可夫链的预测方法用于预测可再生能源的发电量和负荷需求,就计算时间和最优解而言,该算法比粒子群算法更有效,但其在需求侧响应、传统机组发电的排放成本上没有做出考虑。

本小节讨论的方法主要通过元启发式方法对智能微网中的能源管理系统进行重点分析。这些方法在智能微网较小的优化情况下具有较低的模型依赖性和计算成本,在降低智能微网系统损耗、运营成本、环境污染物排放方面做出了贡献。但这些方法在可再生能源发电和负荷需求的预测性、网络传输稳定性等问题上未能深入研究,因此在整合需求响应以及提高系统可靠性等方面需要进一步深入研究。

3.3. 基于人工智能方法的控制策略

基于人工智能的控制方法能够对已知和未知系统进行控制, 不仅能抑制外界干扰、环境变化、参数变化的影响, 而且能有效地消除模型化误差的影响。该类控制策略均采用集中式控制结构, 使用预测值来解决智能微网中的不确定性问题, 所采用的理论方法有模糊逻辑控制、神经网络控制等等。文献[37]提出了一种基于模糊逻辑的能源管理策略, 实现了基于模糊逻辑的并网住宅式智能微网的平滑功率分布, 该方法将智能微网与主电网能量交换中的波动和功率峰值最小化, 并使用发电和需求预测来减少预测误差对电网功率分布的负面影响, 但没有考虑智能微网的系统频率调节。文献[38]提出了一种基于模糊逻辑控制的能源管理策略, 适用于住宅并网型智能微网, 该策略通过调整智能微网的潮流, 提高负荷管理的性能, 降低了电网功率波动, 提高了电池寿命, 具有较好的鲁棒性, 但该策略没有考虑环境污染物排放的问题。文献[39]提出了一种基于神经网络的能源管理策略, 旨在考虑预测误差的同时提高智能微网的经济性能, 适用于交直流混合智能微网, 该策略通过预调度、日内预调度、日内调度三个阶段的能源管理调度, 提高了智能微网的经济性能和运行可靠性, 但没有考虑通信传输成本和传输稳定性。文献[40]提出了一种基于领导-跟随博弈论的并网式智能微网能源管理系统, 其中智能微网和用户分别被认为是领导和跟随者, 该系统的优化目标是智能微网和用户的利润最大化, 并确保利润在它们之间的公平分配, 引入计费机制来处理太阳能发电的不确定性, 但是忽略了负荷需求, 可能导致智能微网在孤岛运行时大幅削减负荷。文献[41]提出了一种基于分层多智能体的能源管理策略, 以可再生能源利用率最大化为目标建立模型, 每个分布式发电源的过剩和短缺功率不仅通过电网内部的交易功率和共享的分布式能源进行补偿, 而且通过与其他分布式发电源的功率交换进行调节, 该策略有效提高了资源利用率, 降低了智能微网的运行成本, 但没有在通信传输稳定性方面深入研究。

本小节讨论了基于人工智能技术的智能微网能源管理方法的优势和局限性。这些方法在在智能微网运营成本最小化、减少环境污染、系统可靠性和持续性等方面有很大的贡献, 而在计算复杂度、网络传输稳定性等方面尚未进行深入的研究。

3.4. 基于其他方法的控制策略

基于其他方法的智能微网中能源管理模型在系统运营成本最小化、功率损耗、通信稳定性以及可靠运行方面效果显著, 而在计算复杂度、简化问题描述、减少环境污染等问题上还需要深入研究。文献[42]提出了一个用于智能微网在孤岛模式下最优运行的随机能源管理系统, 该系统基于正态分布函数, 对由主电网干扰或故障引起的每个孤岛事件, 估计其孤岛持续时间及其发生概率, 情景分析与简化方法用于考虑在这些估计的孤岛间隔期间风力发电和负荷需求的不确定性, 目标是最大程度地降低智能微网的预期运营成本, 该方法有效地处理了智能微网在非计划孤岛模式下运行的不确定性。文献[43]提出了一种适用于住宅型智能微网的能源管理方案, 该方案根据用户日负荷曲线初步确定用电费用, 引入模糊控制的转移负荷需求响应管理算法, 用以降低各用电高峰、低谷时段的能耗, 而且在不影响用户舒适度的情况下提高可再生能源的使用量, 该方案实现了智能微网需求侧的经济高效响应。文献[44]提出了一种具有无缝热插拔能力的无通信能源管理策略, 适用于孤岛式直流智能微网, 该策略将下垂控制思想、动态优化控制和各种移相调制方法相结合, 以实现电力系统的维护和扩展, 该策略可以保证在负载条件、储能单元发生变化时, 智能微网的直流侧电压无影响, 并具有良好的动态性能。文献[45]提出了一种基于势博弈的能源优化管理方法, 以可发电能源、储能系统和负荷构建模型, 引入最优响应迭代算法求解分布式博弈的纳什均衡问题, 适用于全分布式智能微网, 该优化方法可以提高智能微网的可再生能源利用率和需求响应速度, 并保证系统在运行过程中不受通信延迟和丢包的影响。

本小节总结了基于其他方法对智能微网中能源管理模型进行的比较分析。这些方法在在最小化智能微网运营成本和功率损耗、减少环境污染、保证孤岛模式下的智能微网可靠运行等方面有很大的贡献,而在计算复杂度、简化问题描述、网络传输稳定性等问题上还需大量深入的研究。

综上,大部分能源管理优化系统主要集中于对智能微网的资源进行优化,而在多个微网之间的能源调度和优化、远程监控的应用、通信系统成本管理、网络传输稳定性以及网络安全预期等方面未能深入研究,仍需要做大量的研究工作。

4. 总结

随着可再生能源的快速发展,其在智能微网中的应用将为能源管理系统提供广阔的市场空间。该系统的主要目的是保证孤岛、并网智能微网的正常运行,优化能源调度,提高系统的可靠性,以实现可持续发展。本文根据智能微网能源管理系统的特点和关键能源的分析,介绍了各种能源管理优化算法,包括经典控制算法、元启发式控制算法和人工智能控制算法等,并对其在智能微网或类似系统能源管理中的应用进行了综述,分析了优化算法的特点、性能、可靠性和适用性。简而言之,智能微网中的能源管理应用研究和实用化研究才刚刚开始,相关的算法也不局限于本文所提到的几类,还有许多值得深入研究的应用问题。

由于智能微网的结构日趋复杂和多元化,灵活运用能源管理系统对提高能源利用效率、推动能源改革具有重要意义。能源管理系统能否大规模应用于智能微网,有赖于对新出现的能源管理技术的突破,继续研究和开发性能优良、适用性强的能源管理技术是能源管理系统的发展方向。在实现智能微网安全稳定运行方面,未来能源管理系统可从如下几个关键问题着手研究:

1) 能源管理系统可以有效解决智能微网系统中能源需求与预测之间存在的失配问题和可再生能源出力的不确定性问题,同时为协调多种能源出力互补提供了必要的技术手段,所以能源管理优化算法是智能微网优势最大化的一个重要研究方向。

2) 目前智能微网仍处于研发示范阶段,能源管理系统在智能微网项目中的应用覆盖率尚未达到100%,能源管理在智能微网内部和多个智能微网之间的调度策略还具有很大的提升空间,与此同时,能源管理系统在推动智能微网向商业化、成熟化阶段转变方面发挥着重要作用。

3) 现有的能源管理研究工作主要针对居民用户,对于工商业用户和其他智能微网而言,尚缺乏具有普遍适用的综合效用模型,如何提高能源管理优化算法的普适性,还需要进行深入的探索研究。

参考文献

- [1] Torbaghan, S.S, Blaauwbroek, N., Kuiken, D., Gibescu, M., Hajighasemi, M., Nguyen, P., *et al.* (2018) A Market-Based Framework for Demand Side Flexibility Scheduling and Dispatching. *Sustainable Energy Grids & Networks*, **14**, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.03.003>
- [2] Farid, K., Reza, I., Nikos, H. and Dimeas, A. (2008) Microgrids Management. *IEEE Power and Energy Magazine*, **6**, 54-65. <https://doi.org/10.1109/MPE.2008.918702>
- [3] 吴雄, 王秀丽, 刘世民, 祝振鹏, 刘春阳, 段杰, 等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 7-14.
- [4] Katiraei, F., Abbey, C., Tang, S. and Gauthie, M. (2008) Planned Islanding on Rural Feeders-Utility Perspective. 2008 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, 20-24 July 2008, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596774>
- [5] Lasseter, R.H., Eto, J.H., Schenkman, B., Stevens, J., Vollkommer, H., Klapp, D., Linton, E., Hurtado, H. and Roy, J. (2011) CERTS Microgrid Laboratory Test Bed. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **26**, 325-332. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2051819>
- [6] Loix, T. and Leuven, K.U. (2009) The First Micro Grid in the Netherlands. Bronsbergen, Netherlands.

- [7] Bossi, C., Degner, T. and Tselepis, S. (2006) Distributed Generation with High Penetration of Renewable Energy Sources. Dispower, Germany.
- [8] Barnes, M., Dimeas, A., Engler, A., Fitzer, C., Hatziargyriou, N., Jones, C., *et al.* (2005) Microgrid Laboratory Facilities. 2005 *IEEE International Conference on Future Power Systems*, Amsterdam, 18 November 2005, 1-6. <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204229>
- [9] Morozumi, S., Nakama, H. and Inoue, N. (2008) Demonstration Projects for Grid-Connection Issues in Japan. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, **125**, 426-431. <https://doi.org/10.1007/s00502-008-0594-0>
- [10] Meiqin, M., Ming, D., Su, J., Chang, L., Min, S. and Zhang, G. (2008) Test Bed for Micro Grid with Multi-Energy Generators. 2008 *CCECE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls, 4-7 May 2008, 637-640. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2008.4564613>
- [11] 赵波, 张雪松, 李鹏, 汪科, 陈健, 李逢兵. 储能系统在东福山岛独立型微电网中的优化设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 161-167.
- [12] IEC (International Electrotechnical Commission) (2005) IEC 61970. Energy Management System Application Program Interface (EMS-API). International Electrotechnical Commission, Geneva.
- [13] Chen, C., Duan, S., Cai, T., Liu, B. and Hu, G. (2011) Smart Energy Management System for Optimalmicrogrid Economic Operation. *IET Renewable Power Generation*, **5**, 258-267. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2010.0052>
- [14] Roslan, M.F., Hannan, M.A., Ker, P.J. and Uddin, M.N. (2019) Microgrid Control Methods toward Achieving Sustainable Energy Management. *Applied Energy*, **240**, 583-607. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.070>
- [15] 唐西胜, 齐智平. 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(3), 37-41+67.
- [16] Spyker, R.L. and Nelms, R.M. (1996) Double Layer Capacitor/DC-DCconverter System Applied to Constant Power Loads. *Proceedings of the 1996 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Washington DC, 11-16 August 1996, 255-259.
- [17] Wang, J., Wang, M., Li, H., Qin, W. and Wang, L. (2018) Energy Management Strategy for Microgrid Including Hybrid Energy Storage. 2018 *Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification*, Singapore, 30 October-2 November 2018, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ACEPT.2018.8610715>
- [18] Vechiu, I., Etxeberria, A., Camblong, H. and Tabart, Q. (2014) Control of a Microgrid-Connected Hybrid Energy Storage System. 2014 *International Conference on Renewable Energy Research and Application*, Milwaukee, 19-22 October 2014, 412-417. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2014.7016419>
- [19] 徐奉友, 李朝锋, 陶学军, 邓清闯, 秦天. 一种基于自适应控制算法的光伏发电站自动发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14), 128-131.
- [20] 张曦, 康重庆, 张宁, 黄越辉, 刘纯, 徐健飞. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 6-13.
- [21] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 张建华. 考虑负荷和风电出力不确定性的输电系统机会约束规划[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 20-24.
- [22] 马喜平, 谢永涛, 董开松, 贾嵘. 多能互补微电网的能量管理研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 108-114.
- [23] 熊焰, 吴杰康, 王强, 毛晓明. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3616-3625.
- [24] Marzband, M., Ghadimi, M., Sumper, A. and Domínguez-García, J.L. (2014) Experimental Validation of a Real-Timeenergy Management System Using Multi-Period Gravitational Search Algorithm for Microgrids in Islandedmode. *Applied Energy*, **128**, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.056>
- [25] Aghajani, G.R., Shayanfar, H.A. and Shayeghi, H. (2015) Presenting a Multi-Objective Generation Scheduling Model For Pricing Demand Response Rate in Micro-Grid Energy Management. *Energy Conversion and Management*, **106**, 308-321. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.059>
- [26] Talari, S., Yazdaniejad, M. and Haghifam, M.R. (2015) Stochastic-Based Scheduling of the Microgrid Operation Including Wind Turbines, Photovoltaic Cells, Energy Storages and Responsive Loads. *IET Generation Transmission & Distribution*, **9**, 1498-1509. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0040>
- [27] Comodi, G., Giantomassi, A., Severini, M., Squartini, S., Ferracuti, F., Fonti, A., *et al.* (2015) Multi-Apartment Residential Microgrid with Electrical and Thermal Storage Devices: Experimental Analysis and Simulation of Energy Management Strategies. *Applied Energy*, **137**, 854-566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.068>
- [28] Wang, B., Manandhar, U., Zhang, X., Gooi, H.B. and Ukil, A. (2019) Deadbeat Control for Hybridenergy Storage Systems in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **10**, 1867-1877. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2873801>

- [29] Eseye, A.T., Lehtonen, M., Tukia, T., Uimonen, S. and John Millar, R. (2019) Optimal Energy Trading for Renewable Energy Integrated Building Microgrids Containing Electric Vehicles and Energy Storage Batteries. *IEEE Access*, **7**, 106092-106101. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932461>
- [30] Novickij, I. and Joós, G. (2019) Model Predictive Control Based Approach for Microgrid Energy Management. 2019 *IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering*, Edmonton, 5-8 May 2019, 1-4. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2019.8861781>
- [31] Elsied, M., Oukaour, A., Youssef, T., Gualous, H. and Mohammed, O. (2016) An Advanced Real Time Energy Management System for Microgrids. *Energy*, **114**, 742-752. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.048>
- [32] Askarzadeh, A. (2017) A Memory-Based Genetic Algorithm for Optimization of Power Generation in a Microgrid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **9**, 1081-1089. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2765483>
- [33] Radosavljević, J., Jevtić, M. and Klimenta, D. (2016) Energy and Operation Management of a Microgrid Using Particle Swarm Optimization. *Engineering Optimization*, **48**, 811-830. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2015.1057135>
- [34] Tsioumas, E., Jabbour, N., Koseoglou, M., Sfetkos, I. and Mademlis, C. (2018) Enhanced Effectiveness in the Appliance Scheduling and Energy Storage Control by utilizing the Particle Swarm Technique for a Nearly Zero Energy Building. 2018 *IEEE 4th Southern Power Electronics Conference, Singapore*, 10-13 December 2018, 1-7. <https://doi.org/10.1109/SPEC.2018.8635964>
- [35] Pooja, R.A. and Tanuja, N.D. (2018) Energy Management in Microgrid by Using Classical Method and Particle Swarm Optimization Method. 2018 *International Conference on Advances in Communication and Computing Technology*, Sangamner, 8-9 February 2018, 528-533.
- [36] Marzband, M., Azarinejadian, F., Savaghebi, M. and Guerrero, J.M. (2017) An Optimal Energy Management System for Islanded Microgrids Based on Multiperiod Artificial Beecolony Combined with Markov Chain. *IEEE Systems Journal*, **11**, 1712-1722. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2422253>
- [37] Arcos-Aviles, D., Pascual, J., Guinjoan, F., Marroyo, L., Sanchis, P. and Marietta, M.P. (2017) Lowcomplexity Energy Management Strategy for Grid Profile Smoothing of a Residential Grid-Connected Microgrid Using Generation and Demand Forecasting. *Applied Energy*, **205**, 69-84. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.123>
- [38] Ahmed, A., Mostafa, S., Zhen, G., Suh, S. and Perera, V.D. (2018) An Online Smart Microgrid Energy Monitoring and Management System. 2018 *IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering*, Oshawa, 12-15 August 2018, 58-61. <https://doi.org/10.1109/SEGE.2018.8499484>
- [39] Sun, C., Lei, M., Xu, X., Wang, Y. and Dou, W. (2020) A Hybrid AC/DC Microgrid Energy Management Strategy Based on Neural Network. 2020 *15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Kristiansand, 9-13 November 2020, 1955-1961. <https://doi.org/10.1109/ICIEA48937.2020.9248228>
- [40] Ma, L., Liu, N., Zhang, J., Tushar, W. and Yuen, C. (2016) Energy Management for Joint Operation of CHP and PV Prosumers Inside a Grid-Connected Microgrid: A Game Theoretic Approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **12**, 1930-1942. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2578184>
- [41] Jiang, W., Yang, K., Yang, J., Mao, R., Xue, N. and Zhuo, Z. (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>
- [42] Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M. and Moeini-Aghtaie, M. (2017) Stochastic Energy Management of Microgrids during Unscheduled Islanding Period. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **13**, 1079-1087. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2646721>
- [43] Syamasree, B.R. and Debasish, B. (2020) Fuzzy Controlled Demand Response Energy Management for Economic Microgrid Planning. 2020 *IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy*, Cochin, 2-4 January 2020, 1-6.
- [44] Hou, N., Li, Y.W. and Ding, L. (2020) Communicationless Power Management Strategy for the Multiple DAB-Based Energy Storage System in Islanded DC Microgrid. 2020 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Detroit, 11-15 October 2020, 4656-4661. <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9236420>
- [45] Zeng, J., Wang, Q., Liu, J., Chen, J. and Chen, H. (2019) A Potential Game Approach to Distributed Operational Optimization for Microgrid Energy Management With Renewable Energy and Demand Response. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **66**, 4479-4489. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2864714>