

研究成本及碳排放的微电网发电运行的优化模型

苏家鹏, 金安君*

宁波大学海运学院, 浙江 宁波

收稿日期: 2022年8月24日; 录用日期: 2022年9月23日; 发布日期: 2022年9月30日

摘 要

随着分布式能源的不断发展, 微电网优化调度技术的应用及交易技术也逐渐成为研究的热点。本文从用电质量、运行成本和碳排放入手, 研究了微网的数学构架, 提出了智能微电网的目标函数矩阵和输入参数模型。本模型考虑系统运行约束, 并利用粒子群算法进行求解, 利用仿真验证模型的有效性。结果表明, 所述模型应用于微网案例中可实现降低微网运行成本和减少碳排放的目的, 能够有效提升微网的运行管理效率。本文还研究了微网在参与能源区块链点对点交易的流程及模式。模型得到的配电方案能够取得较大的社会效益和经济效益, 保证最佳经济效益和低碳排放, 为微电网的规划建设和运行提供其设计的理论依据。

关键词

微电网, 能量优化调度, 碳排放, 经济效益, 能源区块链, 碳达峰碳中和

Studies of Microgrid Power Operation Optimization Model Considering Cost and Carbon Emission

Jiapeng Su, Anjun Jin*

The Maritime Faculty, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

Received: Aug. 24th, 2022; accepted: Sep. 23rd, 2022; published: Sep. 30th, 2022

Abstract

With the ongoing rapid development of distributed energy resource (DER), the DER becomes an

*通讯作者。

exciting research field, and many studies worldwide are dedicated to the smart DER and its transaction technology. In this article, a newly proposed DER model resolves a problem that is composed of its quality electricity, operating cost and carbon emission of a microgrid; the afore-mentioned model is constructed with its objective function matrix along with input variables. The model takes into account the system operation constraints thoroughly; the particle swarm optimization algorithm is employed to solve the above problems. The effectiveness of the model is tested and verified by simulation results. The results demonstrate that the proposed model can enable the microgrid to reduce its operating cost and carbon emission, and the model advances management efficacy of the microgrid operation. In addition, this article studies the procedure and mode of a smart microgrid participating in energy blockchain point-to-point transactions. The energy blockchain is expected to further reduce the operating cost of the system or to profit economically. The above model provides the theoretical basis of the smart microgrid with a design for optimized construction and operation.

Keywords

Microgrid, Energy Management System, Cost And Profit, Carbon Emission, Energy Blockchain, Carbon Peaking and Carbon Neutrality

Copyright © 2022 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

随着人类社会现代化进程的不断深入, 对于能源的需求也与日俱增。众所周知世界正面临的人口与资源、社会发展与环境保护等挑战。而支撑社会发展的传统资源储量却越来越少, 传统能源的碳排放问题引起气候变化。传统能源危机和气候变化严重影响人类的可持续发展[1] [2] [3], 上面这些问题使得能源危机迫在眉睫正待解决。能源的合理开发和利用将关系到国家和世界未来的发展。

智慧能源和低碳可再生能源的基础技术突破和应用框架对于可再生能源的可持续发展势在必行。因此, 联合国气候变化框架公约巴黎协定已获得 197 国家确认[2]。各国政府为确保能源安全都纷纷出台了一系列的国家能源政策[1] [2] [3] [4] [5]。

旨在应对全球气候变化, 解决面临的能源危机, 世界各国科学家们正在积极推动能源系统的低碳化、清洁化和可持续化转型[6] [7]。我国的重大对策为一方面进行技术更新和节约能源; 另一方面开发新型可替代能源[8], 实现可再生能源等清洁能源在一次能源生产和消费中占更大的比例, 建设清洁低碳安全高效的新一代电力系统[9] [10]。本文回顾了智能微电网, 能源优化配置, 相关可持续能源, 和大量的前沿研究及进展。

2020 年 9 月份, 中国在联合国大会上提出了“双碳”目标: 二氧化碳排放争取于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和[5]。我国坚定不移的推动能源革命, 其主要目标是, 充分开发新一代的电力系统, 是以可再生能源逐步替代传统化石能源, 保护生态环境, 应对能源危机的重大措施。

新一代电力系统譬如分布式发电具有高比例可再生能源、骨干电源与分布式电源相结合、主干电网与微网和局部电网相结合的特征。与传统集中式发电相比, 分布式发电可以因地制宜充分利用各地丰富的可再生能源。新一代电力系统将改善现有能源结构, 有助于减缓能源匮乏的局面。分布式发电具有如下的优点: 建设速度快, 且靠近用户侧, 可有效降低输电损耗和建设成本, 它具有良好的经济性; 利用

风能、太阳能[11][12][13][14]等清洁能源, 污染排放低, 它具有良好的环保性; 采用中小型发电设备, 便于维修和管理, 它具有运行控制灵活性好的优点。大力发展分布式发电能够有效减轻远距离输电的负担, 同时解决偏远地区的供电难题, 在很大程度上提高电力系统的经济性和可靠性。

大规模的可再生能源以分布式发电方式接入电网。分布式发电是大规模可再生能源并网消纳的重要方式, 同时也是大规模可再生能源集中式发电的重要补充。但是以风电、光伏为代表的分布式电源, 其属于间歇式电源, 所产生的电能具有显著的随机性和波动性[15], 使得分布式电源的大规模并网给配电系统运行的经济性、安全性和稳定性带来了很大的挑战。一些小容量的分散型分布式电源, 对于大电网调度人员通常是“不可见”的。而一些大容量的集中型分布式电源通常是“不可控”或者“不易控”的[16], 增加了电力系统调度运行的复杂性而造成了技术瓶颈。

为了突破目前阶段的技术瓶颈, 进一步发展分布式发电技术, 微网技术应运而生。微网技术将是实现分布式发电大规模应用的关键技术之一。现有研究和实践已经表明[17][18][19][20], 将分布式发电供电系统以微网的形式接入到大电网并网运行, 与大电网互为支撑, 可以成为发挥分布式发电系统效能的最有效方式。

微电网技术的最大优势在于可以将分布式电源整合接入同一个物理网络, 并利用储能系统和电力电子控制装置进行实时调节发电输出。微电网为分布式电源并网运行提供了接口, 可有效地发挥分布式电源的作用。微电网运行于并网模式时, 相对于大电网可作为灵活调度的负荷。它通过控制和能量管理根据大电网的需求做出响应, 满足电力系统安全性要求; 它在运行于孤网模式时, 通过控制和能量管理系统维持自身稳定运行[21]。微网技术可以突破由于分布式发电不确定性所带来的局限性。它通过配备在海岛和山区等偏远地区可解决当地供电难题, 配备在充换电站等负荷侧可降低负荷对于电网的冲击。

微网系统作为新型的电力系统, 其结构和运行要求都与传统电力系统均有不同。它的独特的要求发现了新型的运行方式和控制方法; 所述方式方法对微网运行方法和优化调度也很有必要。技术的发展是为了发挥微网的经济、环保和社会的最大化效益; 这样应该对微网的运行采取有效的运营和控制架构。

国内外研究人员进行了大量的研究工作。由于微电网的类型、组成元素和调控对象等差异较大的原因, 而且所考虑的目标函数和约束条件不同也会使得问题模型的复杂程度有较大差异, 从而造成模型及其优化算法的选取有较大差别。在微网能量管理和系统方面, 智能能源的优化调度已获得了国内业界的高度关注[22][23][24]。科研人员研究了大规模的可再生能源以分布式发电方式接入电网的优化设计, 旨在提高微电网运行时的运行经济性和优良电能的供给。

研究人员在文献[25]提出了一种基于模型预测控制的多时间尺度协调调度方法。譬如实践常用的一种包括日前计划, 日内计划, 和实时调整作为调度方法。其中日前计划以 24 小时为单位的计划加以预测; 日内计划通常以半个小时超短期负荷为根据而预测之后的负荷来调配分布式单元的运行; 而实时调整以系统的实时运行情况进行供电调度或竞价。在日前阶段, 以微网系统综合运行成本最低为目标进行优化调度, 日内阶段则以减小联络线功率波动为目标进行日内滚动优化, 同时根据实时状态反馈进行校正。

为了更大限度消除不确定因素的影响, 文献[26]以“等效供电成本”最小为目标, 提出一种实时调度能量遵循 SOC 日前计划的基于网流模型的实时能量优化调度方法。其结果可使得日供电成本降低达 30% 以上。文献[27]针对单个用户侧微电网, 它以降低用户的用电成本为目标, 基于李雅普诺夫优化理论, 通过构建可控负荷队列, 它把能量管理优化问题转化为各个时刻的线性规划问题。其结果只需获取在线信息即可对可控负荷进行实时调控, 并有效减少了执行频率和计算量。文献[28]模型以用户电价成本最小和用电不便度最小为目标, 运用改进的交叉熵优化算法对新能源分配方法进行研究; 文献[29]针对孤岛型微网的运行特点, 构建了局域网智慧能源的优化构架。该构架以总运行费用与停电损失之和最小为目标,

建立了孤岛型微电网能量管理的混合整数规划模型, 并使用 CPLEX 软件进行算例求解。其算例表明需求侧管理的引入可以增强微电网孤网运行能量管理的灵活性, 可提高可再生能源发电的利用率和降低运行成本。

从前沿技术竞争的角度看, 智能微电网技术有凸显的国际高科技的重要性。譬如, 参照文献[30] [31], 能源效率技术和电网集成技术进入了其中二条重要的前沿关键技术的国际赛道。

2. 考虑经济性和碳排放的能量优化调度模型

2.1. 微电网能量优化调度技术

微电网能量优化调度主要通过“源-网-荷-储”相互协调, 通过优化各主体出力功率, 从而实现综合效益的最大化。本文从经济运行成本和碳排放量两个方面入手, 构建满足能量平衡及机组运行约束条件下, 以运行成本和碳排放量最小化为目标的能量优化调度模型。微电网能量优化调度概念图如下图 1 所示:

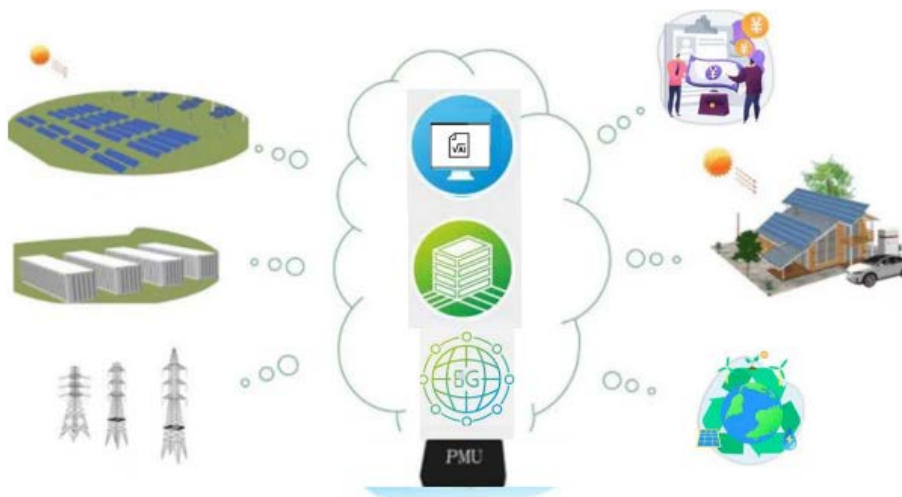


Figure 1. The schematic shows as follows: on the left a variety of power generation; with energy storage dispatch in middle; on the right showing economic benefits and low carbon energy for customers

图 1. 说明概念图如下: 1) 图示表明左侧为多种发电, 2) 之间配以储能调度, 3) 右侧为客户输出有关经济收益、低碳, 满足其用电需求

2.2. 目标函数

本文提出了包含用电质量、运行经济成本及其碳排放量的优化目标函数矩阵, 经济目标主要以微网并网运行的成本为主, 碳排放量以运行过程中的 CO_2 排放为主。所提优化目标函数矩阵如下式所示:

$$\begin{bmatrix} ec_{CP}(t) \\ c_{ECO}(t) \\ e_{CD}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ K_{C_PG} & K_{C_ES} & K_{C_GP} \\ K_{CD_PG} & K_{CD_ES} & K_{CD_GP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{PG}(t) \\ P_{ES}(t) \\ P_{GP}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2.1. 用电质量

目标函数矩阵第一行代表电力消费者的用电质量, 主要通过负荷用电需求满足程度体现。本文假设, 微网中负荷的电力需求需要被系统内的分布式发电部分、储能部分和外部大电网全满足。即负荷用电量:

$$ec_{CP}(t) = P_{PG}(t) + P_{ES}(t) + P_{GP}(t) \quad (2)$$

其中, ec_{CP}^t 为负荷电力需求用电量, $P_{PG}(t)$ 为发电机组出力功率, $P_{ES}(t)$ 为储能系统出力功率, $P_{GP}(t)$ 为并网联络线出力功率。发电机 PG 和负荷 CP 的功率都是单向的; 储能系统 ES 向微网内发电时为正, 否则为负; GP 向微网内发电时为正, 否则为负。

2.2.2. 微电网运行成本最小化

目标函数矩阵第二行代表微网运行净用电成本, 主要由售电收益和用电成本两部分组成。其中售电收益为微网向外部大电网售电所取得收益; 用电成本由分布式电源发电成本(燃料成本、运营成本、设备折损成本)、储能系统运行成本(运行维护、设备折损、能量损耗成本)和大电网购电成本组成。即:

1) 分布式电源发电成本:

$$c_{PG}(t) = K_{C_{PG}} \times P_{PG}(t) = (K_{PG_f} + K_{PG_{ll}} + K_{PG_{opm}}) \times P_{PG}(t) \quad (3)$$

式中 $K_{C_{PG}}$ 为分布式电源度电平均运行成本, K_{PG_f} 为度电平均燃料成本, $K_{PG_{ll}}$ 为度电平均设备折损成本, $K_{PG_{opm}}$ 为度电平均运营维护成本。

2) 储能系统运行成本:

$$c_{ES}(t) = K_{C_{ES}} \times P_{ES}^t = (K_{ES_{opm}} + K_{ES_{ll}} + K_{ES_{el}}) \times P_{ES}(t) \quad (4)$$

式中 $K_{C_{ES}}$ 为储能系统度电平均运行成本, $K_{ES_{opm}}$ 为储能系统度电平均运营维护成本, $K_{ES_{ll}}$ 为储能系统度电平均设备折损成本, $K_{ES_{el}}$ 为储能系统度电能量损耗成本。

3) 微网与外部电网交互所产生收益及其成本[32]:

$$c_{EX}(t) = K_{C_{GP}} \times P_{GP}(t) \quad (5)$$

其中:

$$K_{C_{GP}} = \begin{cases} P_p, & P_{GP}(t) < 0 \\ P_s, & P_{GP}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_s 和 P_p 分别为微网售电电价和购电电价。

综上所述可得微网实时产生的净用电成本为:

$$c_{ECO}(t) = c_{PG}(t) + c_{ES}(t) + c_{EX}(t) \quad (7)$$

则微网在 $0 \sim t_n$ 时段内累计净用电成本为:

$$C_{ECO} = \sum_{t=0}^{t_n} c_{ECO}(t_1) + c_{ECO}(t_2) + \dots + c_{ECO}(t_n) \quad (8)$$

2.2.3. 微电网碳排放量最小

目标函数矩阵第三行代表微电网用电环保性, 所造成碳排放主要由各部分机组的设备制造、大电网生产电能过程中产生。

1) 由于分布式发电机组在生产过程中有污染物的产生, 本文将其折算到运行生命周期内产生度电过程中[33][34]。分布式电源发电成本过程产生度电碳排放量为:

$$e_{CD_{PG}}(t) = K_{CD_{PV}} P_{PV}(t) + K_{CD_{WT}} P_{WT}(t) \quad (9)$$

2) 同理, 储能系统在充放度电碳排放量为:

$$e_{CD_{ES}}(t) = K_{CD_{ES}} \times P_{ES}(t) \quad (10)$$

3) 由于大电网电力来源的构成, 目前有很大一部分的电力是来源于火力发电厂等非清洁发电厂[35]。根据不同地方的电力构成, 可得并联网络点度电所造成碳排放量为:

$$e_{CD_GP}(t) = K_{CD_GP} \times P_{GP}(t) \quad (11)$$

式中, K_{CD_PV} 为光伏系统寿命周期内发出度电的平均造成碳排; K_{CD_WT} 为风力发电机寿命周期内发出度电的平均造成碳排放; K_{CD_ES} 为储能系统寿命周期内发出度电的平均造成碳排放; K_{CD_GP} 为大电网所产生度电造成的碳排放量。

综上所述可得微网实时消耗电力而造成碳排放量:

$$e_{CD}(t) = e_{CD_PG}(t) + e_{CD_ES}(t) + e_{CD_GP}(t) \quad (12)$$

在 $0 \sim t_n$ 时段内累计消耗碳排放量:

$$E_{CD} = \sum_0^{t_n} e_{CD}(t_1) + e_{CD}(t_2) + \dots + e_{CD}(t_n) \quad (13)$$

2.3. 约束条件

能量优化调度过程中, 各分布式电源要满足现实条件运行约束, 具体如下:

1) 微网内供需功率平衡约束

微网中负荷的电力需求需要被系统内的分布式发电部分、储能部分和外部大电网满足。为了保证负荷的用电质量, 每个时刻应该满足系统内功率平衡约束:

$$P_{PG}(t) + P_{GP}(t) + P_{ES}(t) = P_{CP}(t) \quad (14)$$

2) 各发电机组出力功率限制

联络线交互功率约束限制:

$$P_{GP}^{\min} \leq P_{GP}(t) \leq P_{GP}^{\max} \quad (15)$$

光伏发电机组功率约束限制:

$$P_{PV}^{\min} \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV}^{\max} \quad (16)$$

风电机组功率约束限制:

$$P_{WT}^{\min} \leq P_{WT}(t) \leq P_{WT}^{\max} \quad (17)$$

3) 储能系统功率及其容量上下限约束

剩余容量 SOC 约束限制:

$$SOC_{\min} \leq SOC_{ES} \leq SOC_{\max} \quad (18)$$

储能系统充放电功率约束限制:

$$P_{ES}^{\min} \leq P_{ES}(t) \leq P_{ES}^{\max} \quad (19)$$

3. 算例仿真

3.1. 基础数据及系统配置

为了验证所提优化调度模型的有效性, 本文以峰值负荷为 1 MW/h 的居民负荷群, 配备装机容量为 560 Kw 的风力发电机组, 装机容量为 480 Kw 的光伏发电机组, 储能系统容量为 1 MWh 的微网系统为案例进行仿真分析, 该微网的拓扑结构如图 2 所示。

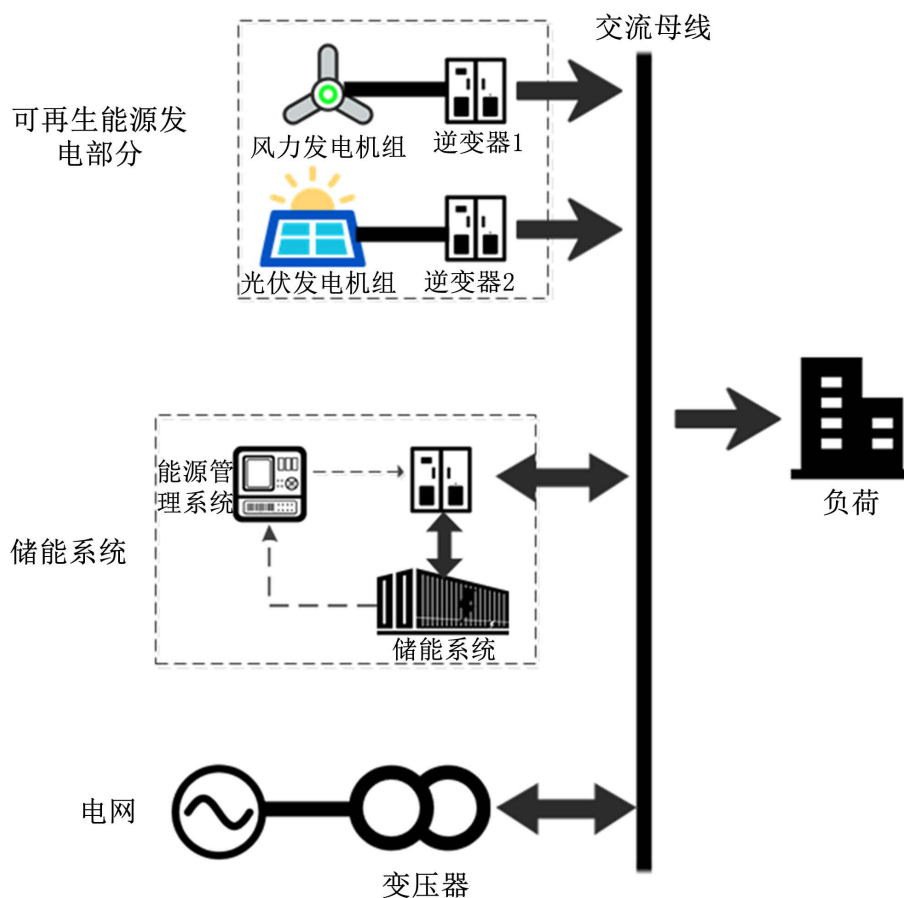


Figure 2. This figure shows the architecture of the microgrid, constructs the topology of power loads, energy storage, grid power

图 2. 本图表示微电网的结构, 构建发电、储能、和网电功率的拓扑架构

经典微网是应用风光互补进行供电。微网内某典型日风电、光伏和负荷按时间在 24 小时内有所变化。日前短期预测输入数据如图 3 所示。

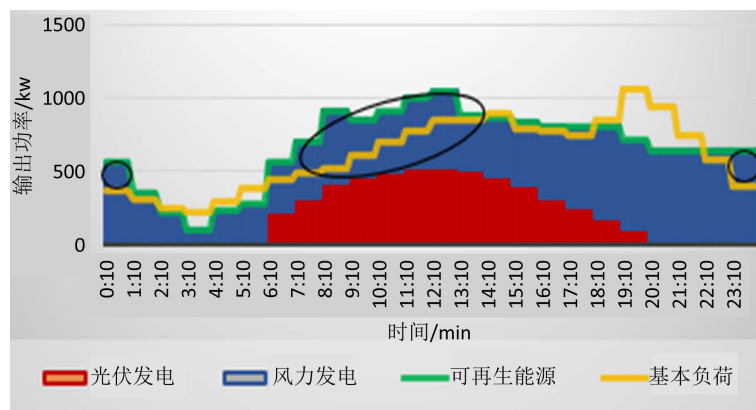


Figure 3. This chart provides short-term forecasts for a typical day of renewable sources and load

图 3. 本图提供某天典型的可再生能源及负荷日前短期预测数据

作为参考, 一日内购销电力按时间在 24 小时内有所变化。譬如, 某日典型购售电价数据如图 4 所示。

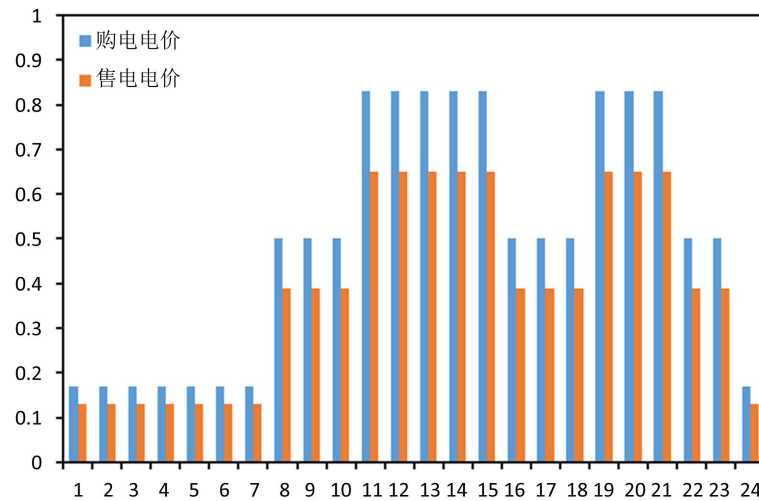


Figure 4. This chart shows values of domestic electricity market that includes the typical market in peak, valley and normal time prices

图 4. 本图提供国内典型的电力市场价格数据图, 包含峰谷平时的电价

各机组的约束条件见表 1, 各参数设置见表 2。

3.2. 仿真结果及分析

对于优化调度模型的求解方法, 这里采用粒子群算法进行优化求解。为了验证该策略的有效性, 另外设置两组对照仿真进行对比。

工作方法 1: 基本负荷并网煤电运行;

工作方法 2: 风光互补微网(无储能及无优化调度管理);

工作方法 3: 风光互补微网(有储能并应用优化调度)。

3.2.1. 运行经济成本最小

仿真以 $\min \{C_{ECO}\}$, 即运行经济成本最低为目标进行仿真, 结果如表 1 和图 5 所示。

应用多种方法得到的经济成本对比图。组合 3 结果最佳。用电时有上明显的优势, 风光 + 储能 + 调度优化有明显的经济成本优势。提高了效率, 获得了经济收益, 这个数字可以作为设计的依据。

Table 1. Comparison of the economic cost with various methods

表 1. 多种方法的经济指标对比

方法	成本(元)	峰期/平期/谷期负荷量(KWh)
方法 1	8803	6908/5252/2608
方法 2	1169	40/-948/-289
方法 3	542	-1544/-77/604

上述图表说明如下。

1、经过对比图 5(a)和图 5(b), 可得通过在负荷侧合理配备由可再生能源为主体构成的微网, 虽然前期需要一定的设备投资费用, 但是使得综合运行经济成本很大程度上的降低。

2、图 5(c)利用本文所提方法进行能量优化调度, 结果显示: 通过本文所提略方法对储能系统进行优化调度, 图 5(c2)所示在谷价期进行充电, 峰价期进行放电; 其相对于图 5(b), 图 5(c1)联络线功率发生了变化, 减少在峰价期从大电网的购电量, 并尽可能向大电网进行售电, 谷期则正好相反。经过计算, 其

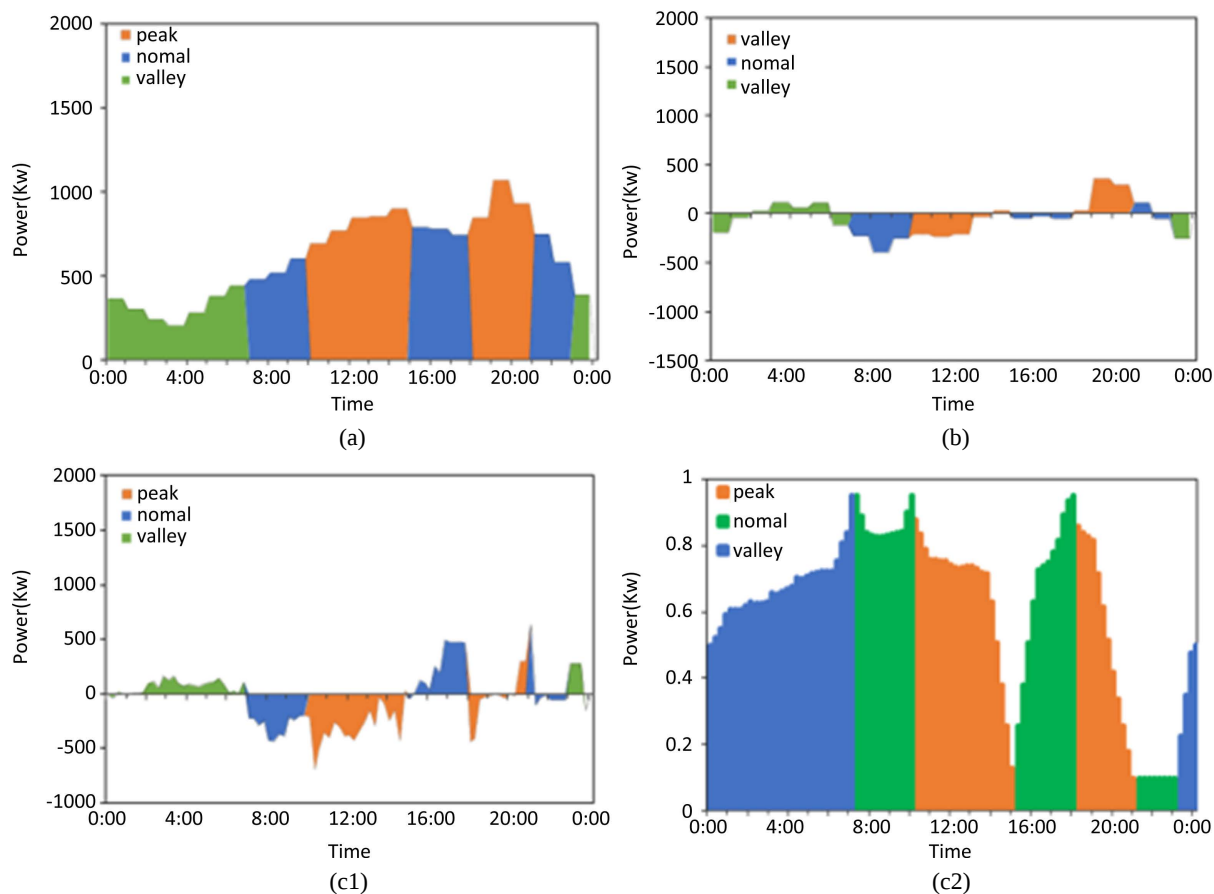


Figure 5. Comparison of financial benefits with various methods. (a) PCC of method 1; (b) PCC of method 2; (c1) PCC of method 3; (c2) State of charge variation of the ES system

图 5.应用多种方法的经济成本对比。(a) 方法 1 并网点功率; (b) 方法 2 并网点功率; (c1) 方法 3 并网点功率; (c2) 储能系统 SOC 变化

峰价期净负荷减少了 1584 kWh, 谷价期净负荷增加了 893 kWh, 起到了削峰填谷的功能, 运行费用约降低了 53.6%。

3.2.2. 碳排放量最小

仿真以 $\min\{E_{cd}\}$, 即碳排放量最小为目标进行仿真, 结果如表 2 和图 6 所示。

应用多种方法得到的碳排指标对比图。从这些关键指标比较来说, 组合 3 结果最佳。应用风光互补, 储能, 和调度优化方法有明显优势。这个结果可以作为设计的依据。从表中可以看部分关键指标; 组合 3 用电时有碳指标方面的优势, 风光 + 储能 + 调度优化有明显优势。

Table 2. Comparison of carbon emissions with various methods

表 2.不同方法用电碳排指标对比

方法	碳排放量(t)	可再生能源消纳比例
方法 1	8521	/
方法 2	1265	87%
方法 3	917	92%

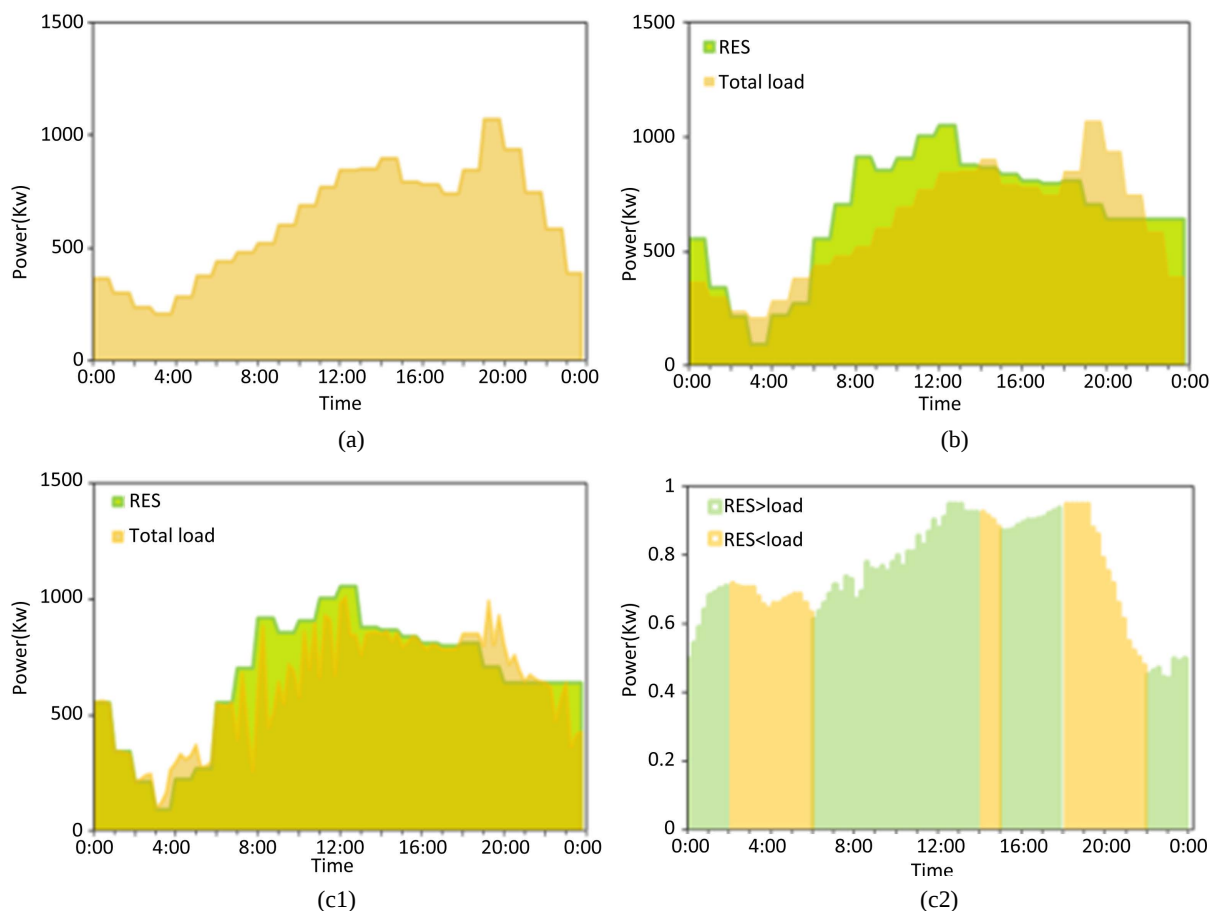


Figure 6. Comparison of carbon reduction with various methods. (a) PCC of method 1; (b) PCC of method 2; (c1) PCC of method 3; (c2) State of charge variation of the ES system

图 6. 应用多种方法的碳排案例对比。(a) 方法 1 并网点功率; (b) 方法 2 并网点功率; (c1) 方法 3 并网点功率; (c2) 储能系统 SOC 变化

1、经过对比图 6(a)和图 6(b), 在无可再生能源构成的微网系统中, 负荷的全部电力需求通过大电网来满足, 目前电网中仍有很大的电力比例来源高碳排放的火电厂, 所以在负荷侧电力消耗所造成发电侧碳排放仍然很高。而通过图 6(b)合理配置可再生能源, 可以使得碳排放量减少 85%。但是由于可再生能源和负荷的特性, 仍有部分时段可再生能源无法满足负荷需求, 需要从电网进行购电; 同时部分时段可再生能源过多, 需要售电至电网。

2、图 6(c)在图 6(b)的基础上, 利用本文所提方法进行能量优化调度, 结果显示: 相对于图 6(b), 通过对于电动公交车充电功率和时间的调控, 可以使得更多负荷转移到可再生能源富裕的时段, 即使得负荷更多消耗绿色能源, 其可再生能源消纳比例由 88%提升至 94%, 碳排放量较之图 b)减少 27.5%。

4. 区块链在微电网能源交易中的应用

新兴的区块链技术使得供需双方进行透明化的直接交易变成可能[36]。对于具有新能源波动性特征的微电网特别有用, 可以提高功率稳定和输出性能; 电力生产者和消费者将可能通过能源互联网的价值交易层交易过剩的能源。他们可以直接进行商业交易及盈利行为[37], 这交易将会使得微网调度的主体由大电网并网点拓展至更多外部分布式主体。这样交易将进一步降低用户的用电成本。下文将对能源区块链技术中微网调度的过程进行展开阐述。

电力交易属于物理性的交易, 而物理性的交易都需要进行实物的交割。不同于一般商品, 随用随发的性质决定了电力交易对随机性和实时性有很高的要求[38]。目前阶段, 配电网中有越来越多可独立决策的电能生产者或微电网参与电力市场竞争。配网内风、光、储及负荷等电能资源的优化配置需要更加灵活的交易机制[39]。传统电力的交易模式是以大电网作为第三方进行交易, 即电网公司将从发电厂商购买所得电能再出售给用户。随着我国电力市场进一步改革, 部分大用户可与发电厂直接协商购电, 但整体上仍是由大电网集中调度和分配电能。

采用中心机构管理有以下缺点: 1) 中心机构需要大量专业人员进行数据维护, 频繁核对账单, 导致成本增加; 2) 从信息安全角度上来说, 一旦第三方中心机构受到黑客攻击, 数据可能出现丢失或被篡改的风险, 进而造成严重的后果。此外, 过度中心化会导致信息不对称的问题, 使得用户隐私难以保障。这样可能有利用中心权力损害交易者利益的情况[40]。

在这种背景下, 分布式能源可采取配电网侧进行点对点的交易方式。配网的关键问题: 如何设计安全、高效率、透明的交易模式和方法。

关于配电网侧交易特性如下:

- 1、配网内电能生产消费者数量众多, 单笔交易规模较小;
- 2、各生产者对所拥有发电设备具有自主控制权, 在发电特性、报价方法上具有很强的不确定性与差异性;
- 3、生产者本身的自利性。

区块链[41]-[48]是一种分布式交易技术, 具有智能, 市场化, 去中心化和不可篡改的良好数据跟踪特性。区块链技术在分布式能源中的应用可以充分发挥其安全性, 可靠性和交易透明性的优势。同时, 它与分布式能源的分散网络结构是一致的。区块链技术被应用在分布式能源系统中, 在该系统中, 电力交易直接在用户之间进行, 交易由分布式且具有成本效益的而不是第三方中心进行管理。在分散的能源系统中, 能源供应合同可以在生产者和消费者之间进行沟通。分布式能源的出现使能源消费者将其身份改变为生产者和消费者。增加区块链将直接在生产者和消费者之间产生大量交易需求, 从而可以实现低边际成本的交易。基于区块链技术, 该技术将允许本地能源生产者和消费者的交易以直接交易方式参与本地能源交易, 而无需以电网公司为中心的第三方监控平台的参与。由于采用了加密过程和分布式存储, 交易几乎消除了篡改数据的可能性。通过将区块链技术与微电网相结合, 用户有权将多余的光伏发电返回电网。

文献[39]提出一种去中心化配网架构, 全部生产者在日前提前确定各自发电计划并参与日前电力市场交易, 在日内生产者间的偏差电量则通过 P2P、去中心化的多边交易完成, 而剩余未能通过多边交易消除的偏差电量则通过备用机组进行进一步消除。文献[40]考虑网络约束, 提出设立一个中心机构对交易进行阻塞管理, 此中心机构以交易的调整量最小为目标, 使线路潮流满足安全约束条件, 对交易进行相应的调整, 并将调整后可交易信息记录在区块链上。文章[46]设计了基于区块链的用户光伏多边交易平台, 并阐述了整个方案的实现过程及奖励机制, 最后经实验测试, 平台运行可达到预期效果, 具有良好的稳定性和兼容性。文献[47]出于电能非虚拟资产的特性, 其实际传输和交付需要电网进行保证。所有的交易者在交易前, 需要先向电网报备实体身份, 并且将交易周期分为交易与交割阶段。将其细分为: 自由报价阶段、预付费阶段、电力交割阶段、费用自动结算阶段。其中, 电网发挥兜底的作用, 对于其中的偏差进行补偿和兜底。同时对于分布式能源交易中的违约现象, 提出了对交易主体的信用管理机制进行管理。文章[48]针对大用户进行直购电交易, 展开了区块链在电力用户和发电厂商按照自愿参与、自主协商的原则直接进行点对点交易研究。文章[49]提出了基于区块链的能源互联网架构模型; 设计了去中心化的能源互联网交易模式及信任机制; 并探讨了响应的调度模式, 形成了基于区块链技术的智能交易与调度

模式,有利于实现电力系统能量流和信息流的高度融合控制与安全传输。文章[50]提出一种基于区块链的多微电网两阶段优化调度和交易方法。在日前阶段,以互联区域全局经济性最优制定日前预调度计划;在实时调控阶段,考虑新能源实时出力的不确定性因素,针对日前计划电量和实际交易电量调控偏差进行滚动优化控制;最后通过算例分析证明所提方法的有效性。国际上能源区块链 EBC 已形成了很热的研究课题;譬如,有关 EBC 是美国关键与新兴技术不可分割的一部分。最新文献[51] [52]讨论了有关的 EBC 应用及其前沿挑战。

目前研究阶段所提出关于区块链交易流程图包括图 7 所示基本过程:

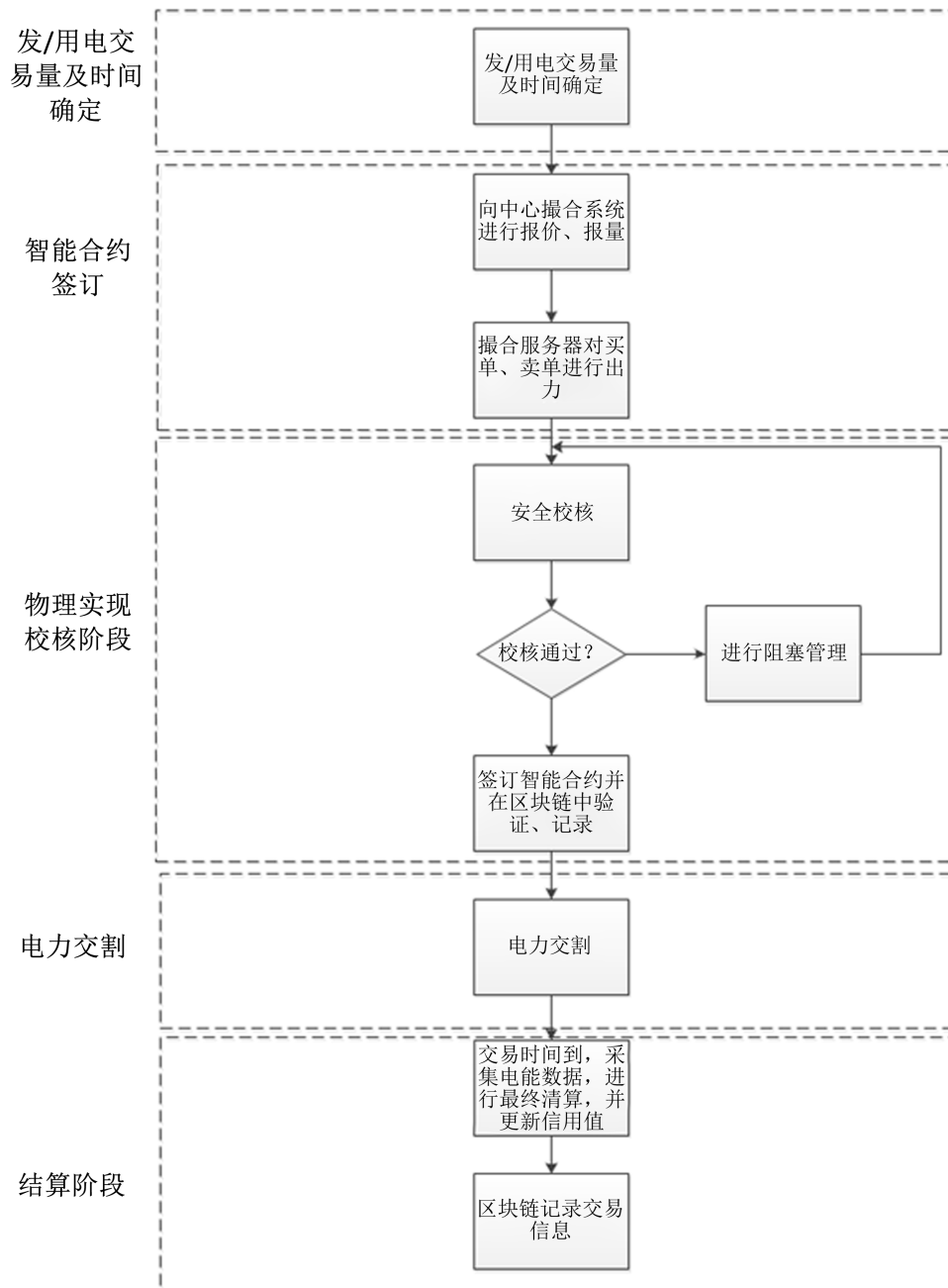


Figure 7. Flowchart of distributed energy transactions on blockchain

图 7. 区块链分布式能源交易流程图

5. 结论

分布式能源进行多能互补并且与储能系统或者可控机组结合而组成的微电网有着广泛应用。本文提出了一个比较普适的数学框架和算例并进行说明。考虑到储能单元充放电、微电网运行充足率和碳排放等约束的微电网功率优化分配模型, 通过对一个实际微电网系统的分析, 得出以下结论: 优秀的设计和优化的调度可有效降低其波动性, 使其能够更好地被就近的负荷进行消纳。为达到微电网实际应用中的目的, 需要对其进行合理的前期规划和运行能量管理。之前的工作存在一系列的瓶颈和挑战如下: 1) 微电网运行优化调度多数建立在对可再生能源输出功率预测的基础上, 预测的精度很大程度上影响了调度的结果; 2) 能量管理优化算法难以形成一致的评价机制。就上述二个挑战, 本文建立的数学设计框架会很有帮助。

微电网能源交易层面上, 基于区块链的点对点交易模式, 可实现有价值的低边际成本的交易。结合现有的相关实践, 基于区块链技术篡改和高透明性等特点, 能源区块链具有很大的应用前景。进一步通过碳交易经济竞价和已有的可再生能源, 能显著减少碳排放, 有助于快速实现碳达峰。与传统的基于最小总成本目标优化模型相比, 本文提出的模型可以得到基于最优经济投资的功率分配结果, 将为微电网的规划和建设提供很有价值的理论参考。

致 谢

感谢孟庆森教授、李昌利教授在工作中提供的讨论和支持。

参考文献

- [1] William, J., Wolf, R.C., Newsome, T.M., et al. (2021) The Climate Emergency: 2020 in Review. *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/the-climate-emergency-2020-in-review>
- [2] European Commission (2015) Over 190 Member States Have Signed onto the Paris Agreement. Climate Action. https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en
- [3] 张海龙. 中国新能源发展研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [4] 周凌云. 世界能源危机与我国的能源安全[J]. 中国能源, 2001(1): 12-13.
- [5] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm, 2021-02-03.
- [6] 伍德罗·克拉克, 格兰特·库克. 绿色工业革命[M]. 金安君, 译. 北京: 中国电力出版社, 2015: 136-141.
- [7] Jin, A.J. and Peng, W.B. (2018) Development Partnership of Renewable Energies Technology and Smart Grid in China. In: Clark, W., Ed., *Sustainable Cities and Communities Design Handbook*, Second Edition, Elsevier, Amsterdam, 111-128. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813964-6.00006-9>
- [8] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 李浩志, 康重庆. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- [9] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 黄彦浩, 马士聪, 赵强. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904+2205. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.180067>
- [10] Li, Z.H., Chee Kuan, W.A. and Jin, A.J. (2005) Review of an Emerging Solar Energy System: The Perovskite Solar Cells and Energy Storages. *Advanced Materials Letters*, **11**, Article ID: 20051505.
- [11] Arantegui, R.L. and Jäger-Waldau, A. (2017) Photovoltaics and Wind Status in the European Union after the Paris Agreement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **81**, 2460-2471. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.052>
- [12] Shivakumar, A., Dobbins, A., Fahl, U. and Singh, A. (2019) Drivers of Renewable Energy Deployment in the EU: An Analysis of Past Trends and Projections. *Energy Strategy Reviews*, **26**, Article ID: 100402. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100402>
- [13] Buttler, A., Dinkel, F., Franz, S., et al. (2016) Variability of Wind and Solar Power—An Assessment of the Current Situation in the European Union Based on the Year 2014. *Energy*, **106**, 147-161. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.041>

- [14] Couto, A. and Estanqueiro, A. (2020) Exploring Wind and Solar PV Generation Complementarity to Meet Electricity Demand. *Energies*, **13**, 4132. <https://doi.org/10.3390/en13164132>
- [15] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008(20): 1-4+31.
- [16] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14+23.
- [17] Huang, W., Zhang, N., Yang, J., et al. (2017) Optimal Configuration Planning of Multi-Energy Systems Considering Distributed Renewable Energy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 1452-1464. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2767860>
- [18] 黄汉奇, 毛承雄, 王丹, 陆继明, 张步涵. 可再生能源分布式发电系统建模综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(5): 1-18, 24.
- [19] Guelpa, E. and Verda, V. (2019) Thermal Energy Storage in District Heating and Cooling Systems: A Review. *Applied Energy*, **252**, Article ID: 113474. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113474>
- [20] 彭克, 李琰, 王成山. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报 2012, 24(2): 12-20.
- [21] 袁越, 李振杰, 冯宇, 左文霞. 中国发展微网的目的方向前景[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 59-63
- [22] 王守相, 孙智卿, 刘喆. 面向智能用电的家庭能量协同调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 108-113.
- [23] Li, H., Eseye, A.T., Zhang, J.H., et al. (2017) Optimal Energy Management for Industrial Microgrids with High-Penetration Renewables. *Protection and Control of Modern Power Systems*, **2**, 122-135. <https://doi.org/10.1186/s41601-017-0040-6>
- [24] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8, 16.
- [25] 肖浩, 裴玮, 孔力. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度协调优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 7-14+55.
- [26] 孟晓丽, 牛焕娜, 贾东梨, 张晓雪, 罗希, 杨明皓. 基于储能 Soc 日前计划的微电网实时能量优化调度方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 155-161.
- [27] 樊玮. 基于在线优化的用户侧微电网能量管理方法[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [28] 龙明溪. 考虑新能源并网的智能社区居民负荷优化调度研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [29] 张忠, 王建学, 曹晓宇. 基于负荷分类调度的孤岛型微网能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 17-23+109.
- [30] The White House (2020) National Strategy for Critical and Emerging Technology.
- [31] 刘新, 曾立, 肖湘江. 美国《关键和新兴技术国家战略》述评[J]. 情报杂志, 2021, 40(5): 8.
- [32] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 苏玲. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2010.11.026>
- [33] 何津津. 基于生命周期评价的光伏发电碳排放[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2017.
- [34] 于静慧. 风电场运行的碳排放和能耗研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [35] 中电联. 中国电力行业年度发展报告 2021[R/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210708/1162855.shtml>, 2021-07-08.
- [36] Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., et al. (2019) Blockchain Technology in the Energy Sector: A Systematic Review of Challenges and Opportunities. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **100**, 143-174.
- [37] Morstyn, T. and McCulloch, M. (2019) Multi-Class Energy Management for Peer-to-Peer Energy Trading Driven by Prosumer Preferences. *IEEE Transactions on Power Systems*, **34**, 4005-4014.
- [38] 李瞳, 周海鸣, 刘敦楠, 郭红珍, 韩笑, 李俊辉, 胡广, 刘江平. 全球能源互联网下电力市场交易模式研究[C]//中国电机工程学会电力市场专业委员会 2019 年学术年会暨全国电力交易机构联盟论坛论文集. 2019: 219-225.
- [39] 平健, 陈思捷, 张宁, 严正, 姚良忠. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3682-3690.
- [40] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638.
- [41] Nakamoto, S. (2009) Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <http://www.bitcoin.org>
- [42] Ali, M. (2017) Trust-to-Trust Design of a New Internet. Ph.D. Thesis, Princeton University, Princeton.
- [43] Waves. Review of Blockchain Consensus Mechanisms. Waves Tech Aspires to Make the Most of Blockchain, with a

Minimal Carbon Footprint.

- [44] Liang, G., *et al.* (2018) Distributed Blockchain-Based Data Protection Framework for Modern Power Systems against Cyber Attacks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 3162-3173.
- [45] Dahlquist, O. and Hagstrom, L. (2017) Scaling Blockchain for the Energy Sector. Master's Thesis, University of Uppsala, Uppsala. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1118117>
- [46] 薛文琦, 李培强, 王继飞, 穆亮, 高雅洁, 孟玲梅. 基于区块链的户用光伏多边交易平台设计与实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(4): 142-150. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000459>
- [47] 沈泽宇, 陈思捷, 严正, 平健, 罗博航, 爻国华. 基于区块链的分布式能源交易技术[J/OL]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3841-3850. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200060>
- [48] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 姚建刚. 区块链技术在大用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [49] 龚钢军, 张桐, 魏沛芳, 苏畅, 王慧娟, 吴秋新, 刘韧, 张帅. 基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度体系研究[J]. 中国电机工程学, 2019, 39(5): 1278-1290. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.172203>
- [50] 曹正斐, 张忠辉, 董治成, 张文睿, 丁晋晋. 基于区块链的多互联微电网分布式协调优化调度[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(9): 138-145. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000931>, 2022-03-08.
- [51] Albrecht, S., Strüker, J. and Reichert, S. (2018) Dynamics of Blockchain Implementation—A Case Study from the Energy Sector. *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*, Hilton Waikoloa Village, 3-6 January 2018, 3527-3536. <http://hdl.handle.net/10125/50334>
- [52] Mollah, M.B., Zhao, J., Niyato, D., *et al.* (2020) Blockchain for Future Smart Grid: A Comprehensive Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, **8**, 18-43.