

嵌入式发电和储能系统 在配电网中的应用

任田磊¹ 王浩国¹ 全飞¹ 倪威中¹ 卞玉² 吴倩²

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州市钱塘区供电公司 2. 天地电研(北京)科技有限公司)

摘要：嵌入式发电是指在消费点或消费点附近分散发电，而储能系统可以存储和释放电能。本文比较了太阳能光伏、风力发电、热电联产和燃料电池等几种主流嵌入式发电技术的关键参数的优缺点和应用适应性。另外，对电池、飞轮、压缩空气储能和泵送储能等几种主流储能方式进行了比较。在此基础上对嵌入式发电与储能一体化的系统集成和控制系统进行了进一步探索，并总结了未来的发展方向。

关键词：嵌入式发电；储能系统；功率调节；控制保护；协调运行

0 引言

电力需求的增加、可再生能源的整合以及对电网弹性的需求导致了嵌入式发电和储能技术的出现。嵌入式发电是指在消费点或消费点附近分散发电，而储能系统能够存储和随后释放电能。嵌入式发电和储能具有重要意义。

通过分散发电，可以缓解集中电网的中断，特别是在自然灾害或电网故障期间可确保可靠的电力供应。嵌入式发电有助于减少输电损失，并支持清洁、可持续的能源系统的接入。通过在接近负荷的地方发电，嵌入式发电可减少电能损失。

1 嵌入式发电系统

1.1 嵌入式发电技术

目前主流的嵌入式发电技术包括太阳能光伏、风力涡轮机发电、热电联产和燃料电池。

太阳能光伏发电是嵌入式发电中的一项重要技术，使用由半导体材料组成的太阳能电池板将阳光直

接转化为电能；太阳能光伏系统可以各种规模安装，从住宅楼的小型屋顶安装到大型太阳能发电场^[1]。

风力涡轮机利用风的动能并将其转化为电能，可以各种规模部署，从住宅或社区的小型涡轮机到商业发电的大型公用事业规模涡轮机。风力涡轮机可以与其他能源集成，如太阳能光伏或柴油发电机以创建混合动力系统，提高可靠性并根据资源可用性优化发电^[2]。

热电联产涉及从单一能源同时生产电力和有用热量；其提供了一种高效和可持续的方法来满足电能和热能需求^[3]。

燃料电池提供了一种清洁高效的方式，可以将化学能直接转化为电能。燃料电池利用电化学反应发电，可以利用各种燃料，例如氢气、天然气、甲醇和其他可再生燃料^[4]。

1.2 嵌入式发电系统与配电网的集成

将嵌入式发电系统集成到配电网中涉及各种组件、技术和控制机制，如图1所示。

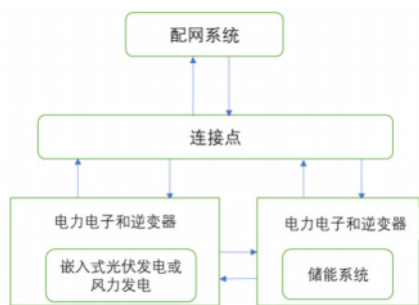


图1 嵌入式发电系统集成配电网示意图

嵌入式发电的集成涉及连接点选择、功率调节、保护和控制以及电网互联。

1.2.1 连接点选择

嵌入式发电系统在特定的连接点处连接到配电网，连接点的选择取决于嵌入式发电源的容量和特性。评估嵌入式发电机的容量和特性需要考虑额定功率输出、电压水平和发电机性质等因素（如太阳能光伏、风力涡轮机、热电联产机组），以确定发电机与配电网的兼容性。

一般情况下，连接点的选择需要借助可行性研究

实现。可行性研究需要评估负载需求、电压水平、故障水平、电能质量和网络稳定性等因素，以确定最合适的连接点。

另外还需要考虑接入点电压等级的选择，例如低压（LV）和中压（MV）。低压连接通常用于较小容量的发电机，中压连接用于较大容量的发电机并提供更高的电压水平，从而实现更长距离的更高效电力传输。主要目的是确定网络是否有足够的容量来容纳嵌入式发电机的额外功率注入。通过评估电压水平以确保连接点与网络的电压调节能力一致。

1.2.2 电力电子设备和逆变器

功率逆变器是嵌入式发电系统中的重要组成部分，用于将太阳能光伏系统、风力涡轮机和其他来源的能源输出转换为与电网同步的交流电。嵌入式发电系统中的电力电子设备大多采用了先进的控制算法，以优化电力转换效率、管理电力流并确保电网稳定性。主要控制算法和计算步骤如图2所示。

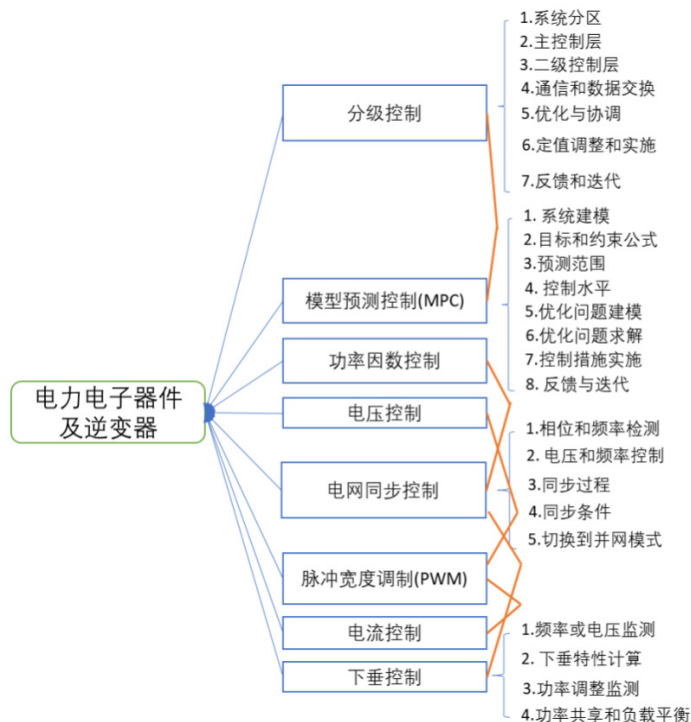


图2 电力电子逆变器的主要控制算法和计算步骤

在嵌入式发电系统中，不同的控制方法可以相互配合，实现高效可靠地运行。主要有 PWM 控制和电流控制组合方式、PWM 控制与电压控制组合方式、电网同步控制和功率因数控制组合控制、电网同步控制和下垂控制方式、模型预测控制（MPC）和分层控制。

1) PWM 控制与电流控制经常协同工作，以调节电力电子设备和逆变器的输出电流。PWM 控制调整开关信号的占空比性以控制施加到负载的电压，而电流控制技术，例如磁滞控制或电流反馈控制，确保实际电流与期望的参考电流匹配。

2) PWM 控制和电压控制可以协同调节电力电子设备和逆变器的输出电压。PWM 控制调整开关信号的占空比信号以控制电压幅度，而电压控制技术，例如电压反馈控制或下降控制，将实际电压与期望的参考电压进行比较以精确地保持期望的电压电平。

3) 电网同步控制与功率因数控制相互配合，可确保嵌入式发电系统与电网的合理集成。电网同步控制技术，如锁相环（PLL），可将嵌入式系统的频

率、相位和电压与电网对齐。功率因数控制技术能够调整电流的相位角或幅度以提高功率因数并降低无功功率消耗。

4) 电网同步控制与下垂控制可在多个发电机组并联运行的系统中协同工作。电网同步控制可确保发电机组与电网同步，下垂控制能根据与参考值的频率或电压偏差调整每个机组的输出功率。

5) 模型预测控制和分层控制在嵌入式发电系统中可以相互补充。MPC 用在更高级别的控制层以优化系统性能，预测未来行为，并可基于系统模型做出控制决策。另一方面，分级控制可以提供不同级别的协调和优化，包括单元级的局部控制和系统级的协同控制。

虽然大多数控制方法可以相互配合和补充，但在某些情况下，某些控制方法可能是互斥的。

1.2.3 功率调节

嵌入式发电源的输出功率需要在与配电网同步之前进行调节，以确保与现有电网基础的兼容性。其主要功率调节方法和实现步骤如图 3 所示。

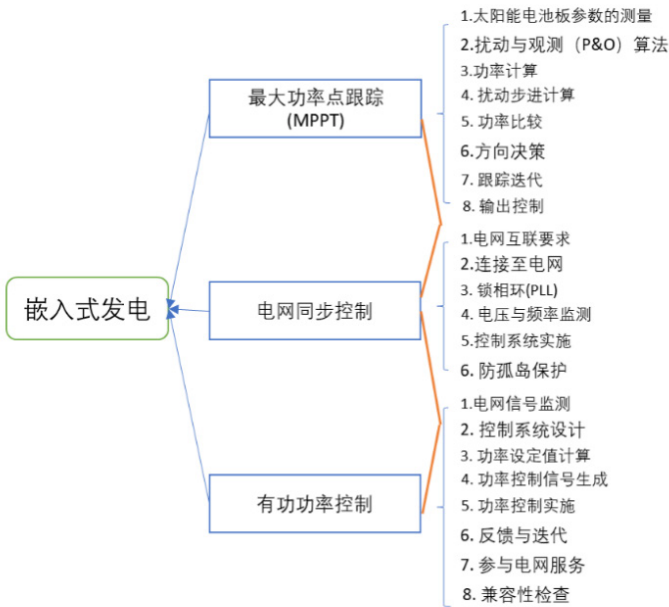


图 3 嵌入式发电系统的功率调节

嵌入式发电系统需要同步并连接到电网，以确保系统稳定性。控制技术用于使发电的频率、电压和相位与电网同步，从而实现嵌入式发电和电网之间的无缝电力交换。

其中，有源功率控制机制用于根据电网要求和负载条件调节嵌入式发电系统的功率输出。控制算法持续监测电网参数并调整发电量，以保持电网稳定，避免频率偏差，并支持电网电压调节。

1.2.4 保护和控制

嵌入式发电系统需要保护系统和控制机制来预防故障并确保可靠运行。保护和控制系统通过监测电压、频率和功率流等参数，以保护嵌入式电源和配电网。主流的保护有过电流保护、电压保护、频率保护、反向功率保护、失电保护损失及同步控制。

过电流继电器监测嵌入式发电系统及其相关电路中的电流，可以检测和隔离由过电流引起的故障，如短路或过载；可确保嵌入式发电系统免受损坏。电压继电器监测嵌入式发电系统内的电压水平，可检测异常电压条件，如过电压或欠电压。电压保护机制确保嵌入式发电系统在规定的电压范围内运行。频率继电器监测电气系统的频率，并检测与标称频率的偏差。频率保护机制有助于保持电网稳定性，并保护嵌入式发电系统免受潜在损坏。反向功率继电器用于监测嵌入式发电系统在并网模式和孤岛模式下运行的情况。这些继电器可监测功率流，并防止功率在孤岛运行期间流回至电网。在并网系统中，失电保护用于确保嵌入式发电系统在电网故障或停电期间与电网断开连接，防止反送电。

同步控制确保嵌入式系统在连接至电网前与电网电压、频率和相角保持同步，能够防止连接过程中可能发生的瞬态干扰。

2 储能系统

2.1 主流储能技术

电池储能、飞轮储能、压缩空气储能、抽水蓄能等技术在嵌入式发电和储能中发挥着重要作用。

电池储能系统能够实现能源生产和消耗的时移。在为嵌入式发电和存储选择电池储能时，应考虑容量和额定功率、循环和放电深度、电池系统效率、响应时间和功率输送等因素^[5]。

飞轮储能具有很多优势，例如高功率密度、快速响应时间、长运行寿命和几乎无限的循环能力。然而，与电池等其他技术相比，其储能能力有限^[6]。

压缩空气储能是一种利用压缩空气储存和释放能量的技术。虽然其支持大规模的储能容量并具有较长的使用寿命，但与其他储存技术相比，能源效率相对较低，需要合适的地质构造进行地下储存，以及需要更高的建设和维护成本^[7]。

抽水蓄能是一种广泛应用于嵌入式发电和储能的技术，在电力低需求时期使用多余的电力将水从较低的水库运送到较高的水库。然后，在电力高峰需求期，通过涡轮机将高水位中储存的势能用于发电^[8]。

2.2 嵌入式储能系统与配电网的集成

将嵌入式储能系统集成到配电网中涉及各种组件、技术和控制机制。如图 1 所示，与配电网的集成包括以下步骤。

2.2.1 连接点选择

用于能量存储系统的接入点的选择，与嵌入式发电系统的接入点选择非常相似，不再叙述。

2.2.2 电力电子设备和逆变器

电力电子设备和逆变器在控制嵌入式储能系统的运行中起着至关重要的作用。多种控制方法常结合使用以实现能量的有效转换及能量存储系统的有效管理。关键控制方法和实施步骤如图 4 所示。

常用的控制包括电压和电流控制、充电状态（SoC）控制、频率和电压调节、电网同步控制、电

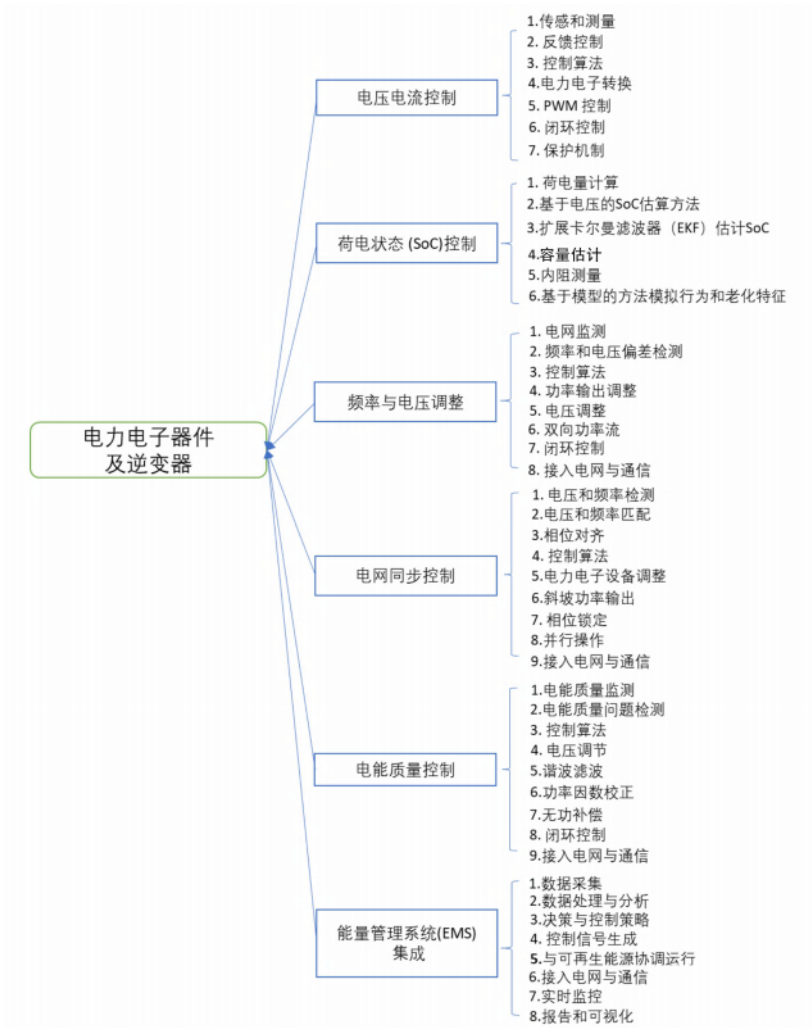


图 4 储能系统中电力电子和逆变器的关键控制方法和步骤

能质量控制、能源管理系统（EMS）集成。

1) 电力电子转换器和逆变器调节流入和流出储能系统的电压和电流。该控制方法可确保电压和电流水平保持在安全和最佳范围内，防止能量存储系统的过充电或过放电。

2) SoC 控制监测和维持储能系统中的适当充电水平，以确保最佳性能和寿命。电力电子设备和逆变器通过基于负载需求、电网条件和其他操作因素动态调整充电和放电速率来实现 SoC 控制。

3) 电力电子设备和逆变器实现双向功率流，允许储能系统根据需要注入或吸收功率，以稳定电网频

率和电压。

4) 电力电子设备和逆变器采用同步控制方法，使储能系统的电压、频率和相位角与电网的电气参数相匹配。能够在并网模式和孤岛模式之间平稳过渡，在并网或断开事件期间保持稳定。

5) 通过控制算法和滤波技术，电力电子设备监测电网的电能质量参数并补偿偏差，确保为连接的负载提供稳定、高质量的电力供应。

6) EMS 确定电力调度策略、负荷优先级和系统对电网条件的响应，而电力电子设备执行控制命令以调节能量流并保持系统性能。

2.2.3 储能控制

储能系统本身的控制主要包括电池管理系统（BMS）和充电状态（SoC）以及健康状态（SoH）估计。值得注意的是，能源管理系统（EMS）、电网集成和辅助服务、孤岛检测和反孤岛保护、需求响应和负载管理可以位于电力电子和逆变器以及储能系统本身。储能系统的关键控制方法和步骤如图 5 所示。

2.2.4 保护和控制

储能系统的保护和控制系统配置包括保护设备和控制设备的组合，以确保储能系统的安全可靠运行。主要有过电流保护、电压保护、频率保护、超温保护、短路保护、接地故障保护等。

过电流保护常安装在重要位置，如储能系统的输

入和输出连接，以监测电流水平。电压保护用于监测系统内关键点的电压水平。频率保护持续监测电网频率，并在频率超过预定义限值时触发保护动作。超温保护在温度上升超过安全阈值时，会激活冷却系统，减少功率输出，或启动停机程序以防止过热。短路保护可以快速识别短路并启动保护动作。接地故障保护通过监测电流，可识别指示接地故障的任何不平衡。

嵌入式储能系统的具体保护系统配置应根据系统的大小、储能技术的类型、系统配置以及适用的电网规范和标准等因素而变化。

3 储能系统与可再生能源的协调运行

3.1 协调运行

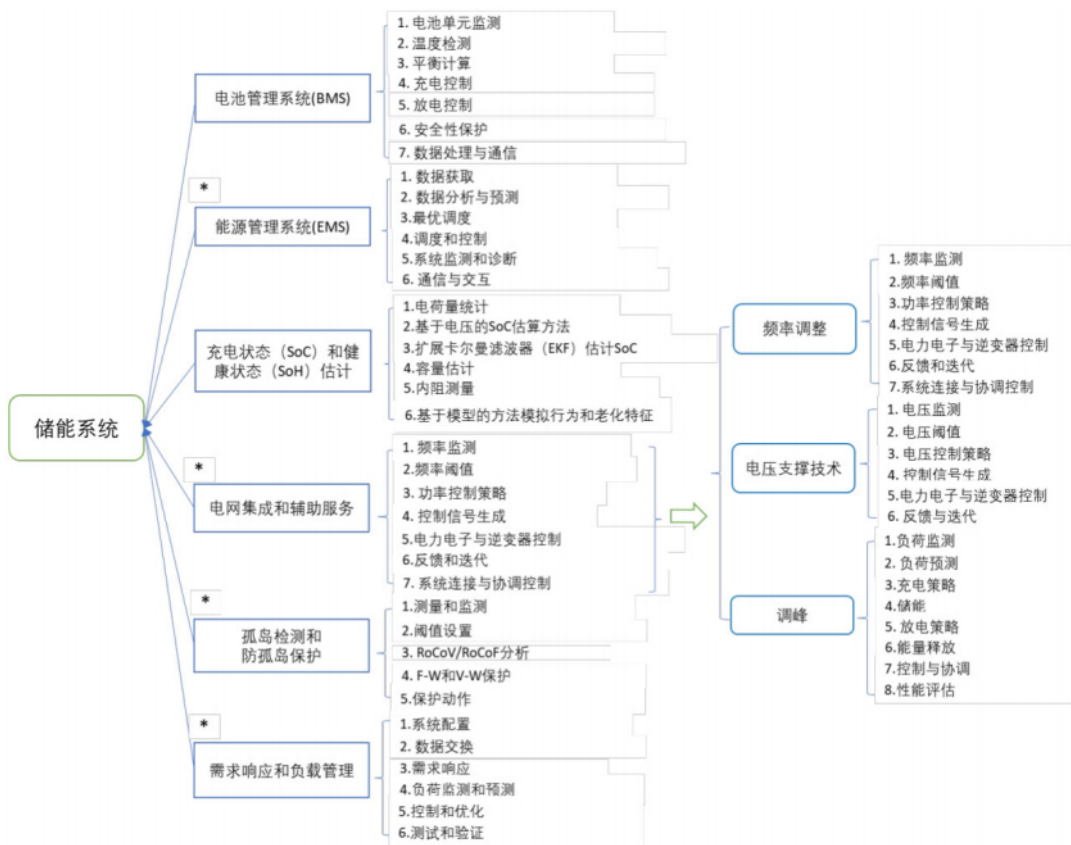


图 5 储能系统的关键控制方法和步骤

为了与可再生能源协同工作，嵌入式储能系统在平衡发电和消费、优化可再生能源利用和提高电网稳定性方面发挥着至关重要的作用。以下是嵌入式储能与可再生能源协同工作的具体步骤：

1) 资源评估：对将部署嵌入式储能系统与可再生能源资源进行全面评估。

2) 储能系统规模：根据可再生能源发电概况、能源需求和系统要求，确定储能系统的规模和容量。

3) 控制策略制定：控制策略决定储能系统将如何与可再生能源相互作用，例如何时根据可再生能源的可用性和波动情况对储能系统进行充电或放电。

4) 预测和预测分析：通过调整充电和放电时间表来优化储能系统的运行，以应对可再生能源的变化。

5) 功率平滑：储能系统通过在高发电期吸收多余功率，在低发电期释放储存的能量，以平滑可再生能源的间歇性功率输出。

6) 调峰：储能系统在高能耗时期通过释放储存的能量来减少电力峰值需求，以优化可再生能源的使用。

7) 电压和频率调节：当可再生能源输出波动时，储能系统可为电网提供电压和频率支撑。也可通过注入或吸收无功功率来调整功率输出。

具体的配置和实施将取决于可再生能源的具体特性、储能技术和系统要求。

3.2 面临挑战

虽然集成嵌入式发电和储能系统带来了巨大的好处，但也存在需要解决的挑战和障碍。

混合动力系统基础方面，混合动力系统需要结合多种发电技术和储能系统以发挥其互补优势，其集成与控制技术非常复杂^[9-10]。例如，将太阳能光伏与风力涡轮机相结合，或将电池与燃料电池相结合。

系统运行和控制方面，协调发电和储能系统，优化能源调度，维护电网稳定，需要复杂的控制策略和先进的监控系统。另外，开发智能控制算法和实时

通信基础设施对于确保系统高效可靠运行也是至关重要的。

4 结束语

在技术进步和对清洁能源系统日益增长的需求的推动下，嵌入式发电和储能正在迅速发展。

将各种发电技术和储能系统集成到电力系统中需要仔细的系统设计、可靠的协调和控制系统，这在技术上十分具有挑战性。

各类新兴趋势和先进技术正在塑造嵌入式发电和储能的未来，并推动电力系统向更清洁、更有弹性的能源系统过渡。

参考文献

- [1] 邹玉炜，苗风东，高相铭. 分布式光伏变负荷工况发电功率预测系统设计[J]. 电源技术，2020，44（2）：239-242.
- [2] 艾延宝，刘睿，董翠莲，等. 基于嵌入式的风光互补发电系统设计[J]. 煤炭技术，2012，31（6）36-38.
- [3] 韦昊函，温智炜，苏世良，等. 改良式生物质气化炉发电系统设计及性能分析[J]. 动力工程学报，2020，40（10）：859-864.
- [4] 游志宇，刘涛，史青，等. 空冷自增湿质子交换膜燃料电池发电控制器设计[J]. 电工技术学报，2018，33（2）：442-450.
- [5] 邹佩. 基于光伏发电模式的电池储能管理系统研究与设计[D]. 成都：电子科技大学，2020.
- [6] 李忠瑞，聂子玲，艾胜，等. 一种基于非线性扰动观测器的飞轮储能系统优化充电控制策略[J]. 电工技术学报，2023，38（6）：1506-1518.

（下转第 82 页）

(上接第 77 页)

- [7] 李文慧, 焦勇涵, 郭歌, 等. 压缩空气储能系统供冷性能提升 [J]. 储能科学与技术, 2023, 12 (9) : 2833-2841.
- [8] 李鲁, 张彪, 岳良. 大型抽水蓄能电站 AGC 控制策略及试验分析 [J]. 水电与新能源, 2023, 37 (5) 31-34, 38.
- [9] 陈艺帆. 基于嵌入式 Z 源逆变器的光伏并网系统研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023.
- [10] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 面向能源互联网的多能流综合能量管理系统: 设计与应用 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (12) 122-128, 171.
- (收稿日期: 2023-12-25)**