

基于ICEEMDAN的微电网混合储能容量配置

刘旭民¹, 张彦², 刘晓波¹

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵阳 550003)

摘要: 针对改进自适应噪声完备集合经验模态分解(improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, ICEEMDAN)的微电网混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)容量优化配置方法, 以解决并网型微电网中可再生能源出力 and 用电负荷波动导致的联络线功率波动问题。该方法通过对微电网中不平衡功率进行功率信号分解, 并分析确定高频分量和低频分量, 实现功率信号重构。针对不同储能系统技术特点, 采用钠硫电池平抑低频分量, 采用超级电容平抑高频分量。然后, 通过建立以储能初始投资和维护成本最小为目标的HESS容量优化配置模型, 利用商业求解器GUROBI求解混合储能配置方案。基于某并网型微电网进行算例分析, 结果表明配置HESS能有效平抑微电网联络线功率波动, 且该方法具有较好的经济性。算例分析结果验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词: 改进自适应噪声完备集合经验模态分解(ICEEMDAN); 微电网; 混合储能; 容量优化配置; GUROBI

Hybrid Energy Storage Capacity Configuration of Microgrid Based on ICEEMDAN

LIU Xumin¹, ZHANG Yan², LIU Xiaobo¹

(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Power Grid Planning and Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550003, China)

Abstract: Aiming at the capacity optimization configuration method for the hybrid energy storage system (HESS) in microgrid, based on an improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (ICEEMDAN), is proposed to address the issue of power fluctuation in the tie-line caused by the variability of renewable energy output and electricity load in grid-connected microgrids. The method decomposes the unbalanced power signals in the microgrid into high-frequency and low-frequency components, achieving power signal reconstruction. Considering the technical characteristics of different energy storage systems, sodium-sulfur batteries are used to suppress low-frequency components, and supercapacitors are used to suppress high-frequency components. Furthermore, by establishing a HESS capacity optimization configuration model aiming at minimizing initial investment and maintenance costs, the mixed energy storage configuration scheme is solved using the commercial solver GUROBI. A case study based on a certain grid-connected microgrid shows that the configured HESS can effectively smooth out the power fluctuation of the microgrid's tie-line, and the method demonstrates good economic performance. The effectiveness and feasibility of the proposed method are thus validated.

Key words: improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (ICEEMDAN); microgrid; hybrid energy storage; capacity optimization configuration; GUROBI

0 引言

由于可再生能源发电的间歇性和波动性, 电力

供应和负荷消耗不可能始终处于平衡状态, 这给微电网的稳定运行带来了很大的挑战^[1-3]。同时微电网内不平衡的功率状态会导致微电网与电网联络线的功率波动, 该波动可能导致电网频率升高或降低, 从而损害电网的稳定性, 并引起电压波动、谐波、暂态和闪烁等电压问题, 这些问题会影响电力设备的性能和寿命, 造成设备性能下降和额外的维

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51967004)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51967004).

护成本。采用储能系统可以一定程度上平抑联络线功率波动,使电力供需趋于平衡,促进可再生能源消纳,降低可再生能源的间歇性波动对大电网的影响^[4-5]。2023年5月,贵州省发布关于公开征求《贵州省新型储能项目管理暂行办法(征求意见稿)》^[6]意见的通知,其中指出鼓励微电网建设新型储能项目。不同的储能技术在应对不同场景时展现出各自的优势。能源存储设备按其工作特性可分为能量型和功率型。作为能量型储能设备,钠硫电池具有多项优势,包括高能量密度、长寿命、高效率等特性。与广泛使用的锂电池相比,钠硫电池在能量密度和稳定性方面表现更为出色,同时体积相对较小,寿命更长,因此成本较低^[7]。另一方面,作为功率型设备的超级电容则具备高功率密度、快速充放电速度和长循环寿命等优势,但其价格相对较高。在实现各级电网供需动态平衡方面,拥有高能量密度和功率密度的储能装置至关重要。由两者组成的混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)与其他HESS相比,钠硫电池、超级电容具有上述特点,两者组合的HESS能够实现更经济、高效、可靠的能量存储与释放,使其在电网调峰和储能系统等应用中更具竞争力。考虑到这两种储能技术的技术特性,合理配置HESS的容量对于微电网的稳定运行至关重要^[8-10]。

近年来,HESS的容量配置以及功率分配问题成为众多学者研究的热点和重点。文献[11-12]均采用锂电池与超级电容作为HESS,通过集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)对微电网中净负荷进行功率分解。文献[13-15]均采用蓄电池与超级电容作为HESS,其中文献[13]提出了微电网群储能联合优化方法,采用低通滤波方法对混合储能功率分配。然而,低通滤波器在滤波过程中容易产生一定的延时,从而导致储能系统的功率分配不合理。文献[14]提出了一种基于离散小波变换的方法对净负荷进行分解,确定HESS的配置容量,从而提高微电网运行的经济效益和联络线利用率,但离散小波变换的结果对基函数的选择有很强的依赖性。不能满足一般适应性的要求。文献[15]针对光伏出力的波动性,使光伏并网功率符合国家标准,采用变分模态分解的混合储能功率,再利用改进的粒子群算法对混合储能容量进行求解。文献[16]为有效弥补风能发电的间歇性

和不稳定性缺陷,提出将钠硫电池和锂离子电池相结合的混合储能系统,该系统根据临界超额发电量、二氧化碳排放量、使用energy PLAN软件在特定给定条件下计算的年度总成本对经济环境进行评估。文献[17]采用K均值聚类算法(K-means clustering algorithm, K-means),对风电出力、光伏出力与负荷间的时序数据进行典型日场景集抽取,并以年弃风成本、弃光成本与储能等效年投资成本三者之和最小建立数学模型,利用商业求解器GUROBI进行储能容量求解。文献[18]针对风光互补发电场出力特点,提出一种由重力势能储能、蓄电池和超级电容组成的混合储能系统,根据其不同性能特点利用自适应变分模态分解对混合储能2d的功率数据进行分配。文献[19]研究了光伏电站实际输出与预期输出之间的功率差异,采用改进自适应噪声完备集合经验模态分解(improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, ICEEMDAN)应用于差异功率的分解,通过计算标准累积模式的平均值来确定滤波阶数并分配高低频功率,从而配置HESS容量以平滑光伏电站并网时的波动。

综上所述,HESS容量配置研究大多直接应用于风光新能源场站,对并网型微电网场景下的HESS容量配置及含钠硫电池的HESS研究较少。本文以并网型微电网为应用场景,将钠硫电池与超级电容相结合组成HESS用于平抑联络线功率波动。首先将ICEEMDAN应用于微电网典型日数据中的不平衡功率分解,再通过对高低频分量的特征进行分析,运用t检验确定滤波阶数,重构获得高低频功率分量,其中钠硫电池用于补偿低频功率,超级电容用于补偿高频功率;然后,建立以HESS年综合成本最小化的目标函数模型,并设定HESS容量的约束条件。同时,引入并网型微电网的运行评价指标;最后,利用求解器GUROBI求解得到HESS配置结果。

1 并网型微电网功率分析

本文的研究对象为具有HESS的并网型微电网,微电网结构如图1所示^[20]。并网型微电网包括光伏风力发电系统、由钠硫电池和超级电容组成的HESS和用电负荷。

图1中 t 为时间变量, $P_{pv}(t)$ 、 $P_w(t)$ 分别为光

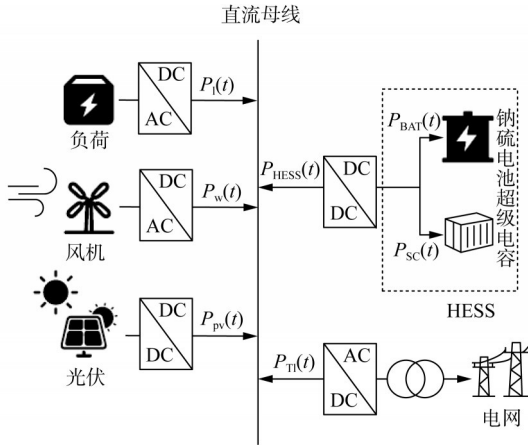


图 1 微电网结构

Fig. 1 Structure of microgrid

伏、风力输出功率； $P_l(t)$ 为本地用电负荷功率； $P_{\text{HESS}}(t)$ 为 HESS 的实际输出功率； $P_{\text{BAT}}(t)$ 、 $P_{\text{SC}}(t)$ 分别为钠硫电池、超级电容实际输出功率； $P_{\text{Ti}}(t)$ 为并联网络线协议功率，为调度预设值，一般取无储能时净负荷 $P_{\text{NW}}(t)$ 1 h 内的平均功率^[21]，并根据并网微电网标准进行调整。具体关系式如下。

$$P_{\text{NW}}(t) = P_l(t) - P_w(t) - P_{\text{pv}}(t) \quad (1)$$

$$P_{\text{HESS}}(t) = P_{\text{BAT}}(t) + P_{\text{SC}}(t) \quad (2)$$

风电光伏出力与用电负荷、并联网络线功率之间的功率不平衡将影响电力系统的可靠性和稳定性。为了保证微电网的稳定运行，不平衡功率需要通过 HESS 进行补偿，获得预设 HESS 功率 $P'_{\text{HESS}}(t)$ ，关系式如下。

$$P'_{\text{HESS}}(t) = P_{\text{NW}}(t) - P_{\text{Ti}}(t) \quad (3)$$

2 基于 ICEEMDAN 的 HESS 功率分配

2.1 ICEEMDAN 原理

改进的自适应噪声完备集合经验模态分解算法可有效地处理非线性和非平稳信号，改善信号分量中残留噪声和伪模态的问题。该算法将输入信号分解为一系列的固有模态分量 (intrinsic mode function, IMF) 和一个残差分量 (residuals, RES)^[22]。具体步骤如下。

1) 利用经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 分解高斯白噪声，获得高斯白噪声的 IMF 分量 $\xi_i (i=1, 2, \dots, N)$ ， N 为信号经过分解后的 IMF 分量数量。将原始信号 $x(t)$ 分别与 $\xi_i (i=1, 2, \dots, N)$ 处理后相加，得到扩展信号

$x_i(t)$ 。

$$x_i(t) = x(t) + a_0 \xi_i \quad (4)$$

式中： α_0 为初始白噪声标准差， $\alpha_0 = \beta \text{std}(x(t)) / \text{std}(\xi_i)$ ； β 为常数，建议为 0.02~0.2； $\text{std}(\cdot)$ 为标准差运算符。

2) 定义第一个残差分量 r_1 为：

$$r_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M[x_i(t)] \quad (5)$$

式中 $M[x_i(t)]$ 为 $x_i(t)$ 减去 EMD 分解 $x_i(t)$ 得到的第一个 IMF 分量 I_1 。在此步骤，原始信号 $x(t)$ 的第一个分量 I_1 如式 (6) 所示。

$$I_1 = x(t) - r_1 \quad (6)$$

3) 之后找到第二个残差分量 r_2 并导出下一个 IMF 分量 I_2 。

$$r_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(r_1 + a_1 \xi_2) \quad (7)$$

$$I_2 = r_1 - r_2 \quad (8)$$

式中 α_1 为白噪声标准差， $\alpha_1 = \beta \text{std}(r_1)$ 。

4) 以此类推，用同样的方法计算第 k 个残差分量， k 为滤波阶数， $0 \leq k \leq N$ 。

$$r_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(r_{k-1} + a_{k-1} \xi_k) \quad (9)$$

式中 $\alpha_{k-1} = \beta \text{std}(r_{k-1})$ ， $k > 1$ 。之后可推导出第 k 个 IMF 分量 I_k 。

$$I_k = r_{k-1} - r_k \quad (10)$$

5) 实现迭代，直到它满足预定义的停止准则，例如，允许的最大筛选迭代次数或残差分量为单调函数时。

2.2 HESS 功率分配

利用 ICEEMDAN 算法分解预设 HESS 功率信号，获得一系列频率由高到低的 IMF 分量和一个残差分量，如式 (11) 所示。

$$P'_{\text{HESS}}(t) = \sum_{i=1}^N w_i(t) + r(t) \quad (11)$$

式中： $w_i(t)$ 为 $P'_{\text{HESS}}(t)$ 的第 i 阶 IMF 分量； $r(t)$ 为 $P'_{\text{HESS}}(t)$ 的残差分量。

根据钠硫电池和超级电容自身特点，选择合适的 IMF 阶数进行高低频分量重构，分别采用钠硫电池和超级电容补偿低频和高频功率，具体表达如式 (12)~(13) 所示。

$$P_{\text{BAT}}(t) = \sum_{i=k+1}^N w_i(t) + r(t) \quad (12)$$

$$P'_{SC}(t) = \sum_{i=1}^k w_i(t) \quad (13)$$

式中 $P'_{BAT}(t)$ 、 $P'_{SC}(t)$ 分别为钠硫电池和超级电容的预设功率指令, 大于 0 为放电, 小于 0 为充电。

3 HESS 容量配置模型

3.1 目标函数

考虑到储能系统的高昂价格, 为了在微电网中实现混合储能容量配置, 需要在确保系统正常运行的前提下最大程度地优化经济性。所以本文以微电网配置 HESS 年综合成本 f 最小为目标进行混合储能容量配置, 目标函数如下。

$$\min f = C_{BAT} \mu_{BAT} + C_{SC} \mu_{SC} \quad (14)$$

式中: C_{BAT} 、 C_{SC} 分别为钠硫电池和超级电容总投资; μ_{BAT} 、 μ_{SC} 分别为钠硫电池和超级电容等额系列资金回收系数。

$$C_{BAT} = c_{bp} P_{BAT} + c_{be} E_{bat} + c_{bm} E_{bat} \quad (15)$$

$$C_{SC} = c_{sp} P_{SC} + c_{se} E_{sc} + c_{sm} E_{sc} \quad (16)$$

$$\mu_{BAT} = \frac{r(1+r)^{y_{BAT}}}{(1+r)^{y_{BAT}} - 1} \quad (17)$$

$$\mu_{SC} = \frac{r(1+r)^{y_{SC}}}{(1+r)^{y_{SC}} - 1} \quad (18)$$

式中: P_{BAT} 、 E_{bat} 分别为钠硫电池额定功率和容量; P_{SC} 、 E_{sc} 分别为超级电容额定功率和容量; c_{bp} 、 c_{be} 、 c_{bm} 分别为钠硫电池的单位功率投资成本、单位容量投资成本和单位容量维护成本(已折算为钠硫电池单位容量运行年限内总维护成本); c_{sp} 、 c_{se} 、 c_{sm} 分别为超级电容的单位功率投资成本、单位容量投资成本和单位容量维护成本(已折算为超级电容单位容量运行年限内总维护成本); r 为折现率; y_{BAT} 、 y_{SC} 分别为钠硫电池和超级电容的运行年限。

3.2 约束条件

3.2.1 HESS 荷电状态和容量约束

为了防止 HESS 过度充放电, 保证系统的稳定运行并延长系统寿命, 对其钠硫电池和超级电容荷电状态(state of charge, SOC)分别有如下约束^[23]。

$$\begin{cases} B_{SOC}(t + \Delta t) = B_{SOC}(t) - \frac{P_{BAT}(t + \Delta t) \Delta t \eta_{bc}}{E_{bat}} \\ B_{SOC}(t + \Delta t) = B_{SOC}(t) - \frac{P_{BAT}(t + \Delta t) \Delta t}{E_{bat} \eta_{bd}} \\ B_{SOC \min} \leq B_{SOC}(t) \leq B_{SOC \max} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} S_{SOC}(t + \Delta t) = S_{SOC}(t) - \frac{P_{SC}(t + \Delta t) \Delta t \eta_{sc}}{E_{sc}} \\ S_{SOC}(t + \Delta t) = S_{SOC}(t) - \frac{P_{SC}(t + \Delta t) \Delta t}{E_{sc} \eta_{sd}} \\ S_{SOC \min} \leq S_{SOC}(t) \leq S_{SOC \max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $B_{SOC}(t)$ 、 $S_{SOC}(t)$ 分别为 t 时刻钠硫电池和超级电容荷电状态; η_{bc} 、 η_{bd} 分别为钠硫电池充放电效率; $B_{SOC \min}$ 、 $B_{SOC \max}$ 分别为钠硫电池荷电状态最小值和最大值; η_{sc} 、 η_{sd} 分别为超级电容充放电效率, $S_{SOC \min}$ 、 $S_{SOC \max}$ 分别为超级电容荷电状态最小值和最大值; Δt 为时间间隔, 本文取 5 min; $P_{BAT}(t + \Delta t)$ 、 $P_{SC}(t + \Delta t)$ 分别为 $t + \Delta t$ 时刻的钠硫电池和超级电容的功率。

且由 SOC 可以推导出 HESS 不同时刻的钠硫电池和超级电容剩余容量以及容量约束, 如式(21)所示。

$$\begin{cases} E_{bat} B_{SOC \min} \leq E_{BAT}(t) = B_{SOC}(t) E_{bat} \leq E_{bat} B_{SOC \max} \\ E_{sc} S_{SOC \min} \leq E_{SC}(t) = S_{SOC}(t) E_{sc} \leq E_{sc} S_{SOC \max} \end{cases} \quad (21)$$

式中 $E_{BAT}(t)$ 、 $E_{SC}(t)$ 分别为 t 时刻钠硫电池和超级电容的容量。

3.2.2 HESS 充放电约束

为保证系统的稳定运行, 保证系统剩余容量满足下一时刻的充放电功率, 对功率进行修正约束^[24]。

3.2.2.1 钠硫电池充放电功率约束

$$\begin{cases} P_{BAT}(t + \Delta t) = \min \left\{ P'_{BAT}(t + \Delta t), \frac{E_{BAT}(t) - E_{bat} B_{SOC \max}}{\eta_{bc} \Delta t} \right\} \\ P_{BAT}(t + \Delta t) = \max \left\{ P'_{BAT}(t + \Delta t), \frac{E_{BAT}(t) - E_{bat} B_{SOC \min}}{\Delta t} \eta_{bd} \right\} \end{cases} \quad (22)$$

3.2.2.2 超级电容充放电功率约束

$$\begin{cases} P_{SC}(t + \Delta t) = \min \left\{ P'_{SC}(t + \Delta t), \frac{E_{SC}(t) - E_{sc} S_{SOC \max}}{\eta_{sc} \Delta t} \right\} \\ P_{SC}(t + \Delta t) = \max \left\{ P'_{SC}(t + \Delta t), \frac{E_{SC}(t) - E_{sc} S_{SOC \min}}{\Delta t} \eta_{sd} \right\} \end{cases} \quad (23)$$

3.2.2.3 充放电状态约束

$$\begin{cases} s_{bat}^{ch} + s_{bat}^{dis} \leq 1 \\ s_{sc}^{ch} + s_{sc}^{dis} \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

式中: s_{bat}^{ch} 、 s_{bat}^{dis} 分别为钠硫电池的充放电状态; s_{sc}^{ch} 、 s_{sc}^{dis} 分别为超级电容的充放电状态。状态均为离散型

0-1 变量, 限制同时充或放电状态。

3.2.3 HESS 额定功率

额定功率是确定储能系统容量和规模的重要参考指标^[25], 规定了储能系统在运营期间可持续提供的功率水平, 确保储能系统能够满足所需的功率输出, 有助于确保系统在正常运行和紧急情况下的安全性。HESS 额定功率公式如下。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{BAT}} = \max \left\{ \frac{\eta_{\text{bc}} \min [P_{\text{BAT}}(t), (P_{\text{BAT}}(t) \leq 0)]}{\eta_{\text{bd}}}, \frac{\max [P_{\text{BAT}}(t), (0 \leq P_{\text{BAT}}(t))] }{\eta_{\text{bd}}} \right\} \\ P_{\text{SC}} = \max \left\{ \frac{\eta_{\text{sc}} \min [P_{\text{SC}}(t), (P_{\text{SC}}(t) \leq 0)]}{\eta_{\text{sd}}}, \frac{\max [P_{\text{SC}}(t), (0 \leq P_{\text{SC}}(t))] }{\eta_{\text{sd}}} \right\} \end{array} \right. \quad (25)$$

3.3 评价指标

根据国家标准《并网型微电网运行特性评价技术规范 GB/T 41995—2022》^[26], 设功率控制评价按式(26)计算 t 时刻微电网并网联络线功率量测值和电网调度设定值的相对功率偏差 $\Delta P(t)$, 功率偏差应不大于 5%, 一次功率偏差大于 5% 则不合格。

$$\Delta P(t) = \frac{|P_{\text{sj}}(t) - P_{\text{Ti}}(t)|}{P_{\text{exch_max}}} \times 100\% \quad (26)$$

式中: $P_{\text{exch_max}}$ 为微电网交换功率的最大值; $P_{\text{sj}}(t)$ 为 HESS 平抑的联络线实际功率, 具体表达式如下。

$$P_{\text{sj}}(t) = P_{\text{NW}}(t) - P_{\text{HESS}}(t) \quad (27)$$

3.4 求解方法

HESS 容量配置模型的求解问题, 本质为非线性规划问题, 可采用商业优化求解器 GUROBI 求解。本文采用 Python3.7 建立 HESS 容量配置数学模型, 再通过调用 GUROBI 对数学模型进行求解, 最后获得 HESS 配置容量。

4 算例分析

4.1 获取典型日

贵州省因地理环境因素, 风力资源较为丰富, 而贵州省属于五类太阳能地区, 是我国太阳能资源相对贫乏的地区之一, 造成微电网风光互补效果较弱。本文采集贵州某地微电网一年实际风光输出功率数据, 采样间隔为 5 min, 如图 2 所示, 其中风力装机容量为 48 MW, 光伏装机容量为 25 MW。

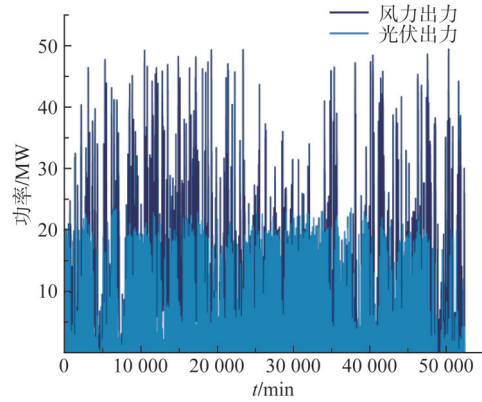


图2 风光出力曲线图

Fig. 2 Wind and solar outputs curve diagram

考虑到迭代自组织数据分析算法 (iterative selforganizing data analysis, ISODATA) 能够自动调整聚类过程中的类别数量和类别中心^[27], 从而使得聚类结果更接近于客观真实的聚类结果, 克服了 K-means 在事先难以确定待分类集合 (样本) 中类别数量的缺点, 选择采用 ISODATA 聚类算法对风光联合出力数据进行场景聚类。本文为了避免聚类簇内典型日数据因取均值导致波动量减小, 导致典型日数据失真, 选择将每个簇内中位数线条作为典型日曲线。聚类后得到 6 个风光联合出力场景, 具体如表 1 所示。

表 1 出力场景天数表

Tab. 1 Output scene days table

场景	天数/d	概率/%
1	32	8.77
2	101	27.67
3	70	19.18
4	61	16.71
5	73	20
6	28	7.67

4.2 HESS 容量优化配置

由于风光输出功率具有一定的随机性, 该年数据不具备完全普适性, 从出力天数中位数场景 3 和场景 4 中随机选择以场景 4 风光联合出力典型日和该典型日对应日期负荷为例进行 HESS 容量优化配置。该典型日数据如图 3 所示。

由典型日数据可获得典型日净负荷, 净负荷范围 -11~29 MW, 波动较大。微电网联络线功率取净负荷 1 h 内的平均功率, 且根据国家能源局发布的

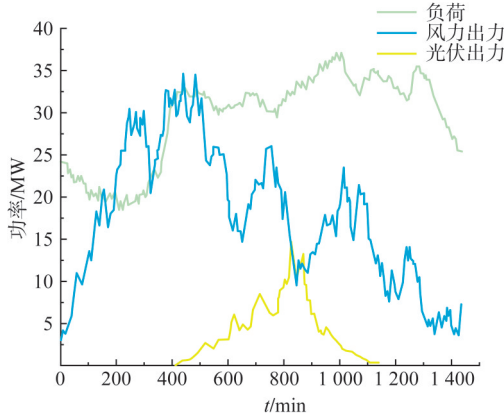


图3 典型日风光出力及负荷数据曲线

Fig. 3 Typical daily solar and wind power output and load data curves

《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》(国能新能[2015]265号)^[28]中指出微电网接入 110 kV 公共配电网, 并网点的交换功率 $P_{\text{exch_max}}$ 应小于等于 40 MW, 对微电网联络线协议功率进行实际调整。最后根据净负荷以及联络线协议功率计算出不平衡功率(预设 HESS 功率), 如图 4 所示。

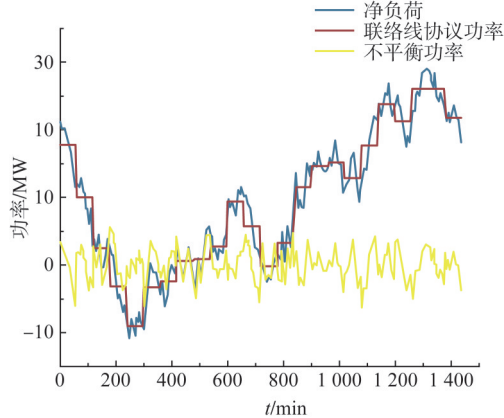


图4 典型日净负荷、联络线协议功率和不平衡功率曲线

Fig. 4 Curves of typical daily net load, tie-line protocol power, and unbalanced power

对该典型日不平衡功率信号采用本文方法经过式(4)—(11)分解, 获得分解结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 不平衡功率经过 ICEEMDAN 算法分解得到 IMF1 分量至 RES 残差分量的瞬时频率逐渐降。由于 IMF 分量的上、下包络线相对于时间轴局部对称, 对于高频的 IMF 分量包络线是由众多峰值点连接而成, 包络线的对称性意味着数据基本对称, 均值趋近于 0; 对于低频的 IMF 分量的包络线是由少量峰值点进行插值而成, 包络线的对称性并

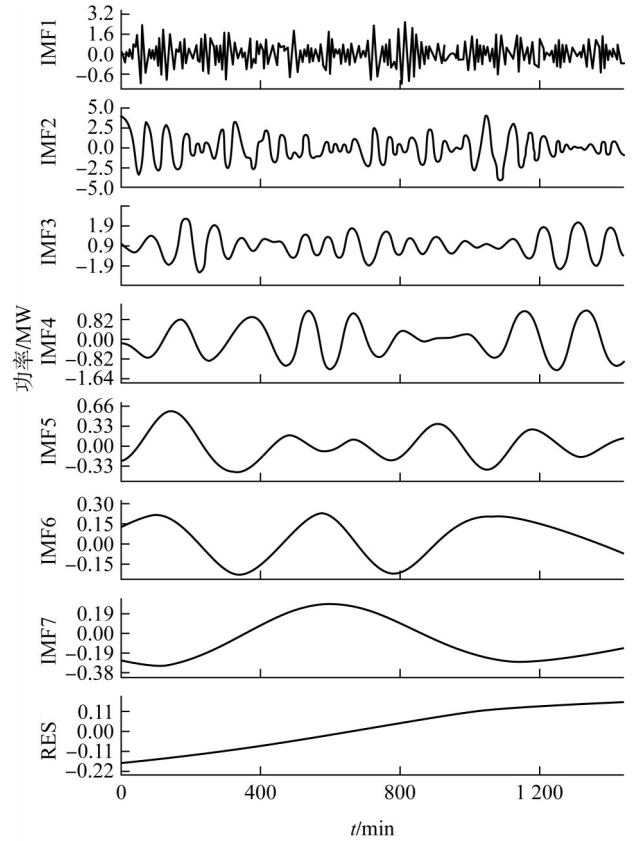


图5 ICEEMDAN 分解不平衡功率结果

Fig. 5 Decomposition results of unbalanced power by ICEEMDAN

不一定意味着数据对称, 均值也不一定为 0。本文根据该原理对分量进行高低频重构, 首先将 IMF1 记为指标 1, IMF2 记为指标 2, 以此类推, IMF*i* 记为指标 $i(i=1, 2, \dots, 7)$, RES 残差分量为趋势项不计入指标, 计算各指标均值, 并对均值是否显著区别于 0 进行 t 检验, 计算公式如式(28)所示, 所得结果详见表 2。

$$T = \frac{\bar{X} - 0}{S / \sqrt{N}} \quad (28)$$

式中: T 为统计量; $\bar{X}$ 为样本均值; 0 代表检验值, S 为样本标准差; N 为样本大小, 即信号经过分解后的 IMF 分量数量。

由表 2 可知, 指标 6 的显性(significance, Sig)值小于 0.05, 表示该指标均值与指定的检验值 0 之间存在显著性差异, 则滤波阶数 $k=5$, 将 IMF1 至 IMF5 定义为高频分量, 将 IMF6 至 IMF7 以及 RES 定义为低频分量。分别根据式(13)—(12)进行分量重构, 获得 HESS 预设功率指令 $P'_{\text{BAT}}(t)$ 、 $P'_{\text{SC}}(t)$ 。

表 2 检验结果表

Tab. 2 Examination results table

指标	检验值=0			
	统计量	自由度	Sig 值	平均值差值
1	0.141 234	287	0.887 784	0.007 380
2	0.081 098	287	0.935 420	0.007 407
3	0.377 998	287	0.705 712	0.022 547
4	0.377 998	287	0.445 079	-0.030 097
5	0.675 266	287	0.500 050	0.009 716
6	4.752 886	287	0.000 003	0.040 406
7	4.752 886	287	1.998×10^{-8}	-0.069 580

根据重构结果及系统参数采用 GUROBI 进行 HESS 容量求解。系统参数如表 3^[29-33]所示, 本文分解方法和 EEMD 分解方法配置结果如表 4 所示。

表 3 系统参数

Tab. 3 System parameters

储能类型	储能参数	数值
钠硫电池	单位功率投资成本 $c_{bp}/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$	600
	单位容量投资成本 $c_{bc}/(\text{万元} \cdot \text{MWh}^{-1})$	180
	单位容量维护成本 $c_{bm}/(\text{万元} \cdot \text{MWh}^{-1})$	0.005
	荷电状态上限 B_{SOCmax}	0.8
	荷电状态下限 B_{SOCmin}	0.2
	充放电效率 $\eta_{bc}、\eta_{bd}$	0.9
	运行年限 y_{BAT}/a	12
超级电容	单位功率投资成本 $c_{sp}/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$	170
	单位容量投资成本 $c_{sc}/(\text{万元} \cdot \text{MWh}^{-1})$	810
	单位容量维护成本 $c_{sm}/(\text{万元} \cdot \text{MWh}^{-1})$	0.005
	荷电状态上限 S_{SOCmax}	0.9
	荷电状态下限 S_{SOCmin}	0.1
	充放电效率 $\eta_{sc}、\eta_{sd}$	0.95
	运行年限 y_{SC}/a	20
其他	折现率 r	0.06
	微电网交换功率的最大值 $P_{\text{exch_max}}/\text{MW}$	40

表 4 不同方法 HESS 配置结果

Tab. 4 Different methods for HESS configuration results

储能类型	项目	ICEEMDAN	EEMD
钠硫电池	额定功率 P_{bat}/MW	0.548 812	2.140 51
	额定容量 $E_{\text{bat}}/(\text{MWh})$	3.797 89	3.875 36
超级电容	额定功率 P_{sc}/MW	6.162 77	6.008 36
	额定容量 $E_{\text{sc}}/(\text{MWh})$	4.728 49	6.634 64
综合成本/万元		546.085	793.984
功率偏差不合格次数/偏差最大值		0/0.001	0/0.306 6

根据表 4 配置结果可知, 相比 EEMD 配置的 HESS 容量, 本文采用的 ICEEMDAN 对于不同的储能类型, 整体来看额定功率和额定容量的配置都较小, 使 HESS 综合成本降低了 339.656 万元, 原因是 EEMD 的迭代过程中产生残余辅助噪声和伪模态, 导致重构高低频分量偏大, 从而造成获得的实际 HESS 功率与预设 HESS 功率存在偏差, 虽然功率偏差都在合格范围内, 但本文方法更具优势。

该配置下的 HESS 实际功率曲线和 SOC 变化曲线为图 6—7 所示。由图 6—7 可知由于该地区需要平抑的功率波动较大频率较高, 导致高频分量振幅较大, 低频分量振幅较小。其中 HESS 中钠硫电池 SOC 值的变化速率较慢, 研究周期前期主要以充电为主, 后期以放电为主, 反映了钠硫电池充放电过程的缓慢进行。这种平缓的 SOC 值变化有助于维持电池的稳定性并延长电池寿命^[34]。相比之下, 超级电容在 HESS 中用作功率型设备, 具有高功率密度和快速充放电能力。超级电容能够在短时间内提供高功率输出, 适合处理突发的高功率需求。所以超级电容的输出功率较高, 其 SOC 值变化频率相对较快。

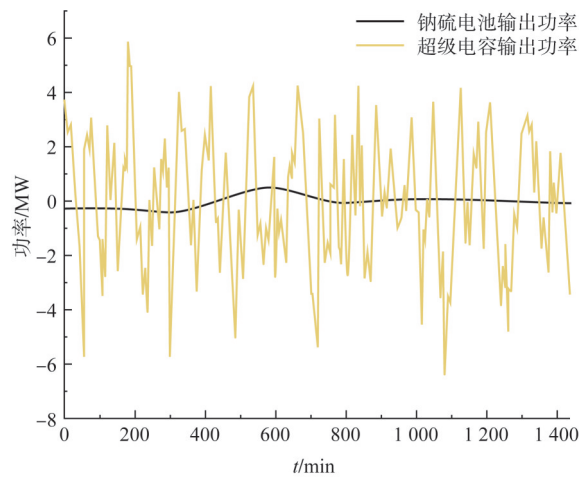


图 6 HESS 实际功率曲线

Fig. 6 Actual power curves of HESS

图 8 为联络线协议功率和两种方法配置的 HESS 加入后联络线功率曲线; 由表 4 可知本文方法下配置 HESS 后的联络线功率与调度预设联络线协议功率最大功率偏差为 0.001%, EEMD 方法下最大功率偏差为 0.306 6%, 两种方法都符合国家标准。但由图 8 可知, 本文方法更具优势, 具有良好的平抑效果, 相比 EEMD 方法较大程度减少了联

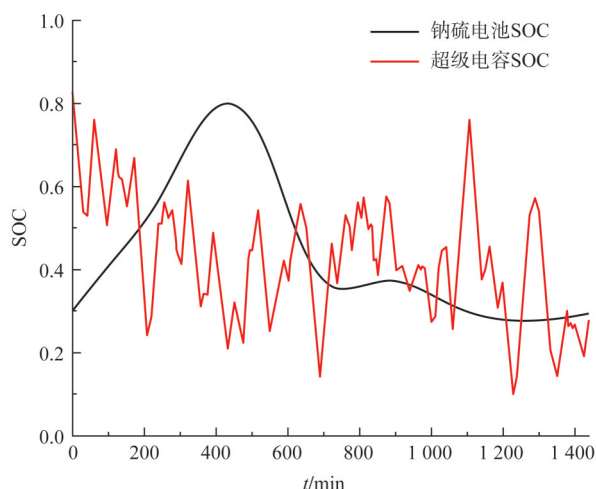


图7 HESS的SOC变化曲线

Fig. 7 SOC variation curves of HESS

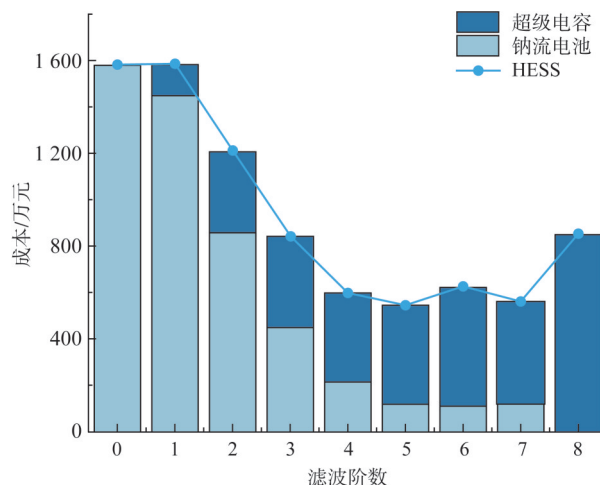


图9 HESS对应滤波阶数成本

Fig. 9 Costs of HESS corresponding to the filtering order

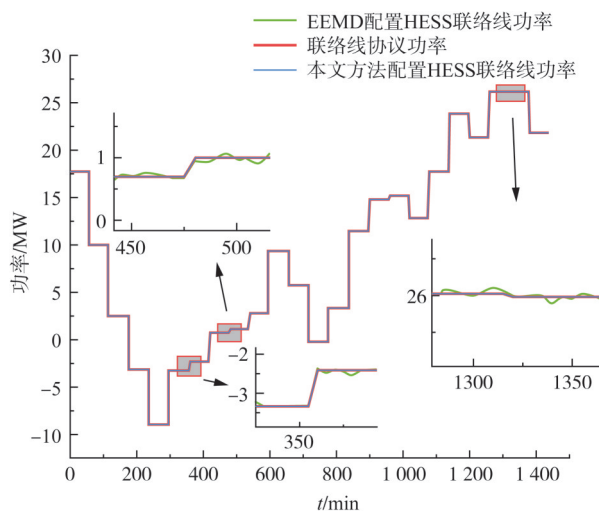


图8 联络线协议功率和加入HESS后联络线功率曲线

Fig. 8 Power curves of the interconnection line protocol and the tie-line after adding HESS

络线功率波动对电网的影响。

图9 HESS曲线为不同滤波阶数 k 选择下的HESS的综合成本;柱形图为不同类型储能设备所占成本。由图9可知,当 $k=0$ 时,仅配置钠硫电池时HESS综合成本最高,为1 577.972万元,随 k 的增大,成本逐渐下降,到 $k=5$ 时HESS综合成本最低,为546.085万元,之后综合成本整体呈现上升趋势,当 $k=8$ 时,仅配置超级电容时综合成本为850.552万元,可见HESS相较于单一储能系统能够充分利用各种储能介质的充放电特性以及经济特点,选择合适的滤波阶数配置HESS可实现综合成本最小化,具有良好的经济性。

5 结语

本文通过在HESS系统中组合钠硫电池和超级电容,利用ICEEMDAN的信号分解能力有效处理微电网中与大电网功率交换后产生的非线性和非平稳负荷。通过考虑高、低频率信号特性进行重构。硫电池提供稳定的能量输出,而超级电容则提供快速的功率响应能力,从而满足不同类型的能量需求。充分发挥不同储能介质的特点实现能量存储和释放的最佳效果。算例分析结果表明本文所用方法实现了能量和功率的平衡,抑制了可再生能源出力波动对联络线功率的影响。相较于仅配置钠硫电池和超级电容的方案,合理配置的HESS系统使综合成本分别下降了1 031.887万元和304.467万元。因此,HESS系统的合理配置不仅满足了微电网的功率平衡需求,有效减轻了可再生能源对大电网的影响,同时提高了系统的可靠性和经济效益。

参考文献

- [1] 孟明,陈世超,赵树军,等. 新能源微电网研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 1-7.
MENG Ming, CHEN Shichao, ZHAO Shujun, et al. Overview on research of renewable energy microgrid [J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 1-7.
- [2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 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.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.

- [3] 李相俊, 马会萌, 姜倩. 新能源侧储能配置技术研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 13–25.
LI Xiangjun, MA Huimeng, JIANG Qian. Review of energy storage configuration technology on renewable energy side[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 13–25.
- [4] 张丹, 王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 451–458.
ZHANG Dan, WANG Jie. Research on construction and development trend of micro-grid in China[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 451–458.
- [5] 徐晓宁, 周雪松. 微网脱/并网运行模式平滑切换控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2754–2760.
XU Xiaoning, ZHOU Xuesong. Control strategy for smooth transfer between grid-connected and island operation for micro-grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2754–2760.
- [6] 贵州省能源局. 关于公开征求《贵州省新型储能项目管理暂行办法(征求意见稿)》意见的通知[EB/OL]. (2023–05–23) [2024–07–04]. https://www.guizhou.gov.cn/zw/gk/zdlygk/jjgzlfz/nyzy/xnyhksnygl/202305/t20230523_79858551.html.
- [7] AL-HUMAIID Y M, KHAN K A, ABDULGALI IM A, et al. Two-stage stochastic optimization of sodium-sulfur energy storage technology in hybrid renewable power systems[J]. IEEE Access, 2021, 9(4): 162962–162972.
- [8] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158–169.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158–169.
- [9] GALLO A B, SIMÕES-MOREIR J R, COSTA H K M, et al. Energy storage in the energy transition context: a technology review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65(2): 800–822.
- [10] FATHIMA A H, PALANISAMY K. Optimization in microgrid with hybrid energy systems - a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45(1): 431–446.
- [11] 贾东卫, 任永峰, 李莉美, 等. 基于集合经验模态分解的微电网混合储能优化配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 239–246.
JIA Dongwei, REN Yongfeng, LI Limei, et al. Research on optimization of hybrid energy storage capacity using ensemble empirical mode decomposition and fuzzy control[J]. Journal of Solar Energy, 2023, 44(2): 239–246.
- [12] 郭玲娟, 魏斌, 韩肖清, 等. 基于集合经验模态分解的交直流混合微电网混合储能容量优化配置[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 527–537.
GUO Lingjuan, WEI Bin, HAN Xiaoqing, et al. Capacity optimal configuration of hybrid energy storage in hybrid AC/DC micro-grid based on ensemble empirical mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 527–537.
- [13] 阮绵晖, 郑建平, 刘尧, 等. 离网直流微电网群混合储能容量优化配置方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 99–105.
RUAN Mianhui, ZHENG Jianping, LIU Yao, et al. Optimization configuration method for hybrid energy storage capacity of independent DC microgrid cluster[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 99–105.
- [14] 孟明, 吴亚帆, 苏亚慧. 考虑微电网网络线利用率的混合储能容量优化[J]. 现代电力, 2018, 35(1): 39–44.
MENG Ming, WU Yafan, SU Yahui. The optimization of hybrid energy storage capacity considering utilization rate of tie lines in microgrid[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(1): 39–44.
- [15] 张梦田, 田书, 曾志辉. 基于变分模态分解的混合储能容量优化配置[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 170–177.
ZHANG Mengtian, TIAN Shu, ZENG Zhihui. Optimal allocation of hybrid energy storage capacity based on variational mode decomposition[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 170–177.
- [16] ZHANG X, ZHOU Z, CHEN X, et al. Technical and economic analysis on grid-connected wind farm based on hybrid energy storage system and distributed generators[J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1839(1): 20051–20054.
- [17] 田蓓, 王朝晖, 张爽, 等. 面向风光综合消纳的电力系统广域储能容量优化配置研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 67–72.
TIAN Bei, WANG Zhaohui, ZHANG Shuang, et al. Widearea optimized allocation of energy storage capacity considering wind/photovoltaic power accommodation in power systems[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 67–72.
- [18] 刘仲民, 齐国愿, 高敬更, 等. 基于自适应VMD的混合储能容量优化配置研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 75–81.
LIU Zhongmin, QI Guoyuan, GAO Jinggeng, et al. Research on optimal configuration of hybrid energy storage capacity based on adaptive VMD[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(4): 75–81.
- [19] HE W, WAN Y, DA Y. Energy storage capacity configuration method of photovoltaic power plants based on ICEEMDAN-FFT[C]// 41st Chinese Control Conference (CCC), July 25–27, 2022, Hefei, China. New York: IEEE, 2022: 5195–5199.
- [20] ZHONG Xianjing, SUN Xianbo, WU Yuhua. A capacity optimization method for a hybrid energy storage microgrid system based on an augmented ε -constraint method[J]. Energies, 2022, 15(20): 7593–7599.
- [21] 丁明, 徐宁舟, 毕锐. 负荷侧新型电池储能电站动态功能的研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 1–7.
DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui, et al. Dynamic model of new type battery energy storage system at demand side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 1–7.
- [22] COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, TORRES M E. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical signal processing[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014, 14(1): 19–20.
- [23] ZHANG T, MA Y, WU Y, et al. Optimization configuration and application value assessment modeling of hybrid energy storage in the new power system with multi-flexible resources coupling[J]. Journal of Energy Storage, 2023(62): 106876–16894.
- [24] 赵瑞峰, 王海柱, 郭文鑫, 等. 含风电接入的区域综合能源系统电/热储能配置[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 68–77.
ZHAO Ruifeng, WANG Haizhu, GUO Wenxin, et al. Power and heat storage configuration of regional integrated energy system with wind power integration[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 68–77.
- [25] 叶琳浩, 申展, 许峰, 等. 考虑光伏不确定性和时序相关性的分布鲁棒光储协同优化配置方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 132–143.
YE Linhao, SHEN Zhan, XU Feng, et al. Distributionally

- robust collaborative optimal allocation method of photovoltaic and energy storage considering photovoltaic uncertainty and temporal correlation [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 132 – 143.
- [26] 全国微电网与分布式电源并网标准化技术委员会. 并网型微电网运行特性评价技术规范: 第6部分 非书资料: GB/T 41995 – 2022[S]. 北京: 中国质量标准出版, 2022: 10.
- [27] 高雪倩, 刘文霞. 计及可靠性价值的综合能源系统设备优化配置[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 9 – 17.
GAO Xueqian, LIU Wenxia. Optimal configuration of integrated energy system equipment considering reliability value [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 9 – 17.
- [28] 国家能源局. 国家能源局关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见[EB/OL]. (2015 – 07 – 13)[2024 – 07 – 04]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201507/t20150722_1949.htm.
- [29] 杨瑞睿, 杨文, 林莉. 基于快速傅里叶变换的风电场混合储能系统研究[J]. 电气应用, 2018, 37(16): 29 – 33.
YANG Ruirui, YANG Wen, LIN Li. Research on wind farm hybrid energy storage system based on fast fourier transform [J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(16): 29 – 33.
- [30] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1 – 18.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1 – 18.
- [31] 罗鹏, 杨天蒙, 娄素华, 等. 基于频谱分析的微网混合储能容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 376 – 381.
LUO Peng, YANG Tianmeng, LOU Suhua, et al. Spectrum analysis based capacity configuration of hybrid energy storage in microgrid [J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 376 – 381.
- [32] 蒋棹骏, 向月, 谈竹奎, 等. 计及需求响应的高比例清洁能源园区储能容量优化配置[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 147 – 155.
JIANG Zhaojun, XIANG Yue, TAN Zhukui, et al. Optimal allocation of energy storage capacity in high proportion clean energy parks considering demand response [J]. Electric Power, 2023, 56(12): 147 – 155.
- [33] 欧阳森, 辛曦, 王凤学, 等. 考虑保供电需求的光储微电网优化配置及电能质量评估[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 106 – 119.
OUYANG Sen, XIN Xi, WANG Fengxue, et al. Optimal configuration of photovoltaic-storage microgrid considering power supply demand and power quality evaluation [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 106 – 119.

收稿日期: 2023-07-04; 网络首发日期: 2024-04-17

作者简介:

刘旭民(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网储能优化配置, 1415080655@qq.com;

张彦(1981), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网规划与节能、智能电网, 94645201@qq.com;

刘晓波(1964), 女, 通信作者, 副教授, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制, 799797284@qq.com。

(上接第139页 Continued from Page 139)

- [23] LIANG C, DING C, ZUO X, et al. Capacity configuration optimization of wind-solar combined power generation system based on improved grasshopper algorithm [J]. Electric Power Systems Research, 2023(225): 109770.
- [24] DING Y, YE X, GUO Y, et al. Probabilistic method for wind speed prediction and statistics distribution inference based on SHM data-driven [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2023(73): 103475.
- [25] 许福鹿, 周任军, 曹俊波, 等. 多种市场下虚拟电厂电-热-气协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 35 – 42.
XU Fulu, ZHOU Renjun, CAO Junbo, et al. Coordinated optimal dispatching of power-heat-gas for virtual power plant participating in multiple markets [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 35 – 42.
- [26] 周任军, 肖钧文, 唐夏菲, 等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 61 – 67.
ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 61 – 67.
- [27] 张炳康, 李云玉, 张欣, 等. 垃圾焚烧发电项目碳排放核算与减排效应研究[J]. 环境保护科学, 2023, 49(1): 75 – 81.
ZHANG Bingkang, LI Yunyu, ZHANG Xin, et al. Carbon emission calculation and reduction effects of municipal solid waste incineration power generation project [J]. Environmental Protection Science, 2023, 49(1): 75 – 81.
- [28] 国家发展和改革委员会. 中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2021.
- [29] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈颖光, 等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 48 – 55.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48 – 55.
- [30] 聂元弘, 葛成, 朱刘柱, 等. 电解水制氢参与调频辅助服务的经济效益分析[J]. 广东电力, 2024, 37(4): 62 – 70.
NIE Yuanhong, GE Cheng, ZHU Liuzhu, et al. Economic benefit analysis of hydrogen production from electrolysis participating in regulation service [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 62 – 70.

收稿日期: 2023-06-17; 网络首发日期: 2024-08-20

作者简介:

洪明志(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, hzm962655635@163.com;

吴杰康(1965), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制, wujiekang@163.com;

罗伟明(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, 893169775@qq.com。