

基于改进的LMD混合储能容量优化配置

林俊德^{1,2}, 朱希^{1,2}, 施翔宇^{1,2}, 林金阳^{1,2}

(1. 福建理工大学 微电子技术研究中心, 福建 福州 350118;

2. 智能电网仿真分析与综合控制福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350118)

摘要: 为解决混合储能系统的光伏输出功率波动性较大的问题, 提出一种改进的局部均值分解(improved local mean decomposition, ILMD)的功率分配方案。对光伏发电出力进行平滑处理, 可得到满足国家要求的光伏并网功率, 利用ILMD对混合储能功率进行分解, 确定其高频功率和低频功率并分别分配给超级电容和蓄电池, 建立具有目标函数的功率优化模型, 最大限度地降低整个系统全生命周期的投资成本, 使用改进鲸鱼优化算法求解获得符合优化模型要求的容量配置。通过算例分析, 对比不同的储能容量配置策略, 验证所提策略的可行性。

关键词: 波动率; 混合储能; 局部均值分解; 容量配置

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)01-0039-08

Optimized configuration of hybrid energy storage capacity based on improved LMD

LIN Junde^{1,2}, ZHU Xi^{1,2}, SHI Xiangyu^{1,2}, LIN Jinyang^{1,2}

(1. Research Center for Microelectronics Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial University Engineering Research Center for Simulation Analysis and Integrated Control of Smart Grid, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To overcome the problem of large fluctuations in photovoltaic output power, an improved local mean decomposition (ILMD) power allocation scheme was proposed for hybrid energy storage systems. By smoothing the output of photovoltaic power generation, the grid connected photovoltaic power that meets national requirements can be obtained. The hybrid energy storage power is decomposed using ILMD, and its high-frequency and low-frequency power are allocated to supercapacitors and batteries respectively. A power optimization model with a target function is established to minimize the investment cost of the whole system life cycle. The improved whale optimization algorithm is used to obtain the capacity configuration that meets the requirements of the optimization model. By analyzing numerical examples and comparing different energy storage capacity configuration strategies, it is verified that the proposed strategy has higher feasibility.

Keywords: volatility; hybrid energy storage; local mean decomposition; capacity configuration

近年来, 中国的光伏累计装机容量增长迅速, 新增装机容量屡创历史新高。然而光伏发电受环境因素的制约导致其出力不稳定, 会大大增加电网安全运行的调控难度^[1]。储能系统可以有效解决电网接入新能源发电的难点, 达到平滑光伏发电波

动、保障电能质量和提高系统稳定运行的效果^[2]。

对于单一储能, 其投资成本和使用寿命两者不可兼得, 配置大容量单一储能系统会降低经济效益, 同时过度充放电会影响储能的使用寿命^[3]。因此, 单一储能很难满足光伏发电并网要求, 混合储

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 福建省自然科学基金面上资助项目(2021J011082); 福州大学平板显示国家地方联合工程实验室开放基金资助项目(KF1802)

第一作者简介: 林俊德(1999—), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 研究方向: 混合储能配置。

通讯作者: 林金阳(1981—), 男, 福建莆田人, 副教授, 博士, 研究方向: 光伏故障诊断、光伏发电系统等。

能配置对电网的经济稳定运行至关重要^[4]。

目前,学术界对混合储能系统在光伏发电侧的配置已开展了很多研究。文献[5]采用低通滤波实现合理的能量调度,得到混合储能系统的容量配置,但在滤波过程中会产生信号延迟,从而导致储能容量出现偏差。文献[6]利用离散傅里叶变换对混合储能系统功率进行优化分解,确定频率分界点实现容量配置,但分解过程计算量大,不适合直接对功率进行分解。文献[7]基于自适应小波分解确定初次功率分配,再利用荷电状态(state of charge, SOC)模糊优化控制器对混合储能功率进行出力调整,保证混合储能 SOC 不会越限,然而不同的小波对初次功率分配有较大的影响。文献[8]采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)对风电功率进行分解,经 EMD 滤波后分为低频、中频和高频,重构后依次分别对应并网功率、蓄电池和超级电容器,但 EMD 存在模态混叠现象会使特征提取难度加大。文献[9]提出基于变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)的容量配置方法,光伏原始功率经过 VMD 分解为并网功率、高频和低频功率,高频和低频分量重构后分别由超级电容器和蓄电池出力,但 VMD 的模态分解个数不同对分解结果会造成较大的影响。

综上,本研究对混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)提出一种改进的局部均值分解(improved local mean decomposition, ILM D)的容量优化配置方案。对光伏原始功率平滑处理后,采用 ILM D 对混合储能功率分解,确定分解后高频功率与低频功率的分界点,将高频功率重构给超级电容、低频功率重构给蓄电池。最后通过考虑储能设备的充电状态和额定功率等约束,将全生命周期成本作为混合储能系统的目标函数,计算出 HESS 的额定功率和容量,对比不同储能方案下的经济性。

1 光伏混合储能系统模型

1.1 光伏储能系统

储能系统可以有效提高电网接入新能源发电的能力,由功率型和能量型构成的储能系统开始逐步应用于新能源发电。蓄电池储能的能量密度高,制造成本随着新能源应用规模扩大不断下降,但存在循环寿命较短的缺陷;超级电容虽然成本

昂贵,但具有功率密度高、可快速充放电的优点,两者结合可以实现优势互补。因此本研究采用蓄电池与超级电容的混合储能来抑制光伏发电的波动。光伏储能系统由光伏电站、蓄电池、超级电容、变换器及电网组成,功率关系满足式(1)(2)。

$$P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{hess}}(t) \quad (1)$$

$$P_{\text{hess}}(t) = P_{\text{ba}}(t) + P_{\text{sc}}(t) \quad (2)$$

式中, $P_{\text{pv}}(t)$ 代表光伏输出功率, $P_{\text{hess}}(t)$ 代表混合储能功率, $P_{\text{ba}}(t)$ 代表蓄电池额定功率, $P_{\text{sc}}(t)$ 代表超级电容额定功率, $P_{\text{grid}}(t)$ 代表光伏并网功率。

1.2 光伏波动率

光伏电站规模根据装机容量划分,小型对应的装机容量为 100 kW 以下,中型对应的装机容量范围为 100 kW ~ 1 MW,大型对应的装机容量在 1 MW 及以上。针对光伏电站输出功率并入电网会造成不稳定的问题,根据中国关于光伏并网的技术规定,光伏电站按照装机容量的大小来限定有功功率波动的最大值^[10],包括 10 min 时间尺度下的光伏有功功率变化和 1 min 时间尺度下的光伏有功功率变化,如表 1 所示。本研究以 1 min 内有功功率变化不超过装机容量的 10% 进行光伏波动平抑。

表 1 光伏电站有功功率波动要求

Tab.1 Requirements for active power fluctuation of photovoltaic power stations

电站类型	10 min 最大波动/MW	1 min 最大波动/MW
小型	装机容量	0.2
中型	装机容量	装机容量/5
大型	装机容量/3	装机容量/10

为评价混合储能系统平滑光伏输出功率的效果,将某个时间段内光伏输出功率的差值与光伏电站额定功率 P_N 的比值称为光伏波动率 $\eta(t)$,其计算方法如式(3)所示。

$$\eta(t) = \frac{P_{\text{pv}}(t) - P_{\text{pv}}(t - \Delta t)}{P_N} \times 100\% \quad (3)$$

根据表 1 可以计算出接入到电网时光伏输出功率的最大波动率,为确保光伏功率满足并网要求,波动率不得超过国家规定的最大功率波动,即:

$$\eta \leq \eta_{\text{max}} \quad (4)$$

式中, η_{max} 为光伏功率波动率最大值。

2 混合储能系统容量优化模型

2.1 储能系统寿命评估模型

混合储能系统中的蓄电池循环寿命会受到频繁而剧烈的充放电被大大缩短,从而增加了整个生命周期的更换频率,更换期间导致光伏并网受限也会提高成本。蓄电池寿命受温度和过度充放电等因素影响,主要考虑放电深度 DoD (depth of discharge) 和充放电次数这两方面来评估蓄电池寿命。在光伏功率平抑过程中,蓄电池放电深度由实时工况决定,而不是工作在特定的放电深度,因此可根据雨流计数法求得工作周期内蓄电池的循环寿命^[11]。

蓄电池的放电深度 D_{DoD} 与循环寿命 N_{cft} 之间的关系如式(5)所示。

$$N_{\text{cft}} = -3 \ 278 D_{\text{DoD}}^4 - 5 D_{\text{DoD}}^3 + 12 \ 823 D_{\text{DoD}}^2 - 14 \ 122 D_{\text{DoD}} + 5 \ 112 \quad (5)$$

蓄电池第 i 次循环周期的循环寿命 $N(D_{\text{DoDi}})$ 为:

$$N(D_{\text{DoDi}}) = \frac{N_{\text{cft}}(1)}{N_{\text{cft}}(D_{\text{DoDi}})} \quad (6)$$

式中, $N_{\text{cft}}(1)$ 为放电深度为 1 时的循环次数, $N_{\text{cft}}(D_{\text{DoDi}})$ 为放电深度为 D_{DoDi} 的循环次数。

蓄电池在 1 个工作周期内的等效循环寿命 N 为:

$$N = \sum_{D_{\text{DoDi}}=0.01}^1 \frac{N_{\text{cft}}(1)}{N_{\text{cft}}(D_{\text{DoDi}})} \quad (7)$$

式中, 0.01 至 1 的中间平均间隔是蓄电池放电深度,由其实际工作情况决定,只计算蓄电池工作周期放电深度超过 0.01 的循环次数。

蓄电池在一个工作周期内的寿命损耗 T 为:

$$T = \frac{N_{\text{cft}}(1)}{N} \quad (8)$$

当 $T=1$ 时,应该及时更换蓄电池,根据蓄电池的年利用系数折算到其寿命周期中,即蓄电池的寿命周期 T_{lifetime} 为:

$$T_{\text{lifetime}} = \frac{(T-1) \times \lambda}{365} \quad (9)$$

式中, λ 代表蓄电池的年利用系数,为 2。

由于充放电过程没有化学反应,超级电容器具有可逆的充放电过程,导致循环时间长,深度放电高达百万次,因此根据实际情况将超级电容使用寿命设置为固定值。

2.2 目标函数

对混合储能系统配置结果采用全寿命周期成本进行经济分析,并将储能设备的购买成本和储能系统在使用寿命内产生的所有成本之和作为目标成本的函数。目标成本函数主要由 4 部分组成。

(1) 储能设备采购成本

$$C_{\text{pur}} = (\lambda_p P_{\text{essr}} + \lambda_e E_{\text{essr}}) \delta(\rho, Y) \quad (10)$$

$$y(\rho, Y) = \frac{\rho(1+\rho)^Y}{(1+\rho)^Y - 1} \quad (11)$$

式中, C_{pur} 为采购成本, λ_p 为功率单价, λ_e 为容量单价, P_{essr} 为储能功率, E_{essr} 为储能容量, $y(\rho, Y)$ 为等年值折算系数(其中 ρ 为贴现率, Y 为储能设备的寿命)。

(2) 储能设备更换成本

$$C_{\text{rep}} = \sum_{u=1}^x (\lambda_{\text{prep}} P_{\text{essr}} + \lambda_{\text{erep}} E_{\text{essr}}) y(\rho, Y) \quad (12)$$

式中, C_{rep} 为更换成本, λ_{prep} 为单位功率更换成本, λ_{erep} 为单位容量更换成本, x 为全寿命周期内更换的次数。

(3) 储能设备运维成本

$$C_{\text{ma}} = (\lambda_{\text{pma}} P_{\text{essr}} + \lambda_{\text{ema}} E_{\text{essr}}) y(\rho, Y) \quad (13)$$

式中, C_{ma} 为运维成本, λ_{pma} 为单位功率运维成本, λ_{ema} 为单位容量运维成本。

(4) 储能设备回收成本

$$C_{\text{res}} = \alpha (C_{\text{pur}} + C_{\text{rep}}) \frac{1}{(1+\rho)^Y - 1} \quad (14)$$

式中, C_{res} 为回收成本, α 为回收残值率。

结合式(10)~(14),可得全寿命周期成本为

$$C_{\text{LCC}} = C_{\text{pur}} + C_{\text{rep}} + C_{\text{ma}} - C_{\text{res}} \quad (15)$$

2.3 约束条件

在配置混合储能容量过程中应考虑以下约束限制来保证混合储能系统可以稳定出力。

(1) 能量守恒约束

功率应满足能量守恒,光伏并网功率与光伏输出功率之差等于混合储能系统出力,混合储能系统出力是蓄电池和超级电容两者之和,即

$$\begin{cases} P_{\text{hess}} = P_{\text{grid}} - P_{\text{pv}} \\ P_{\text{hess}} = P_{\text{ba}} + P_{\text{sc}} \end{cases} \quad (16)$$

(2) 储能充放电功率约束

混合储能系统的实时充放电功率应均在额定功率范围内,即

$$\begin{cases} -P_{ba} \leq P_{ba}(t) \leq P_{ba} \\ -P_{sc} \leq P_{sc}(t) \leq P_{sc} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $P_{ba}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的输出功率, $P_{sc}(t)$ 为 t 时刻超级电容器的输出功率。

(3) 储能系统的 SOC 约束

储能系统的 SOC 应在规定的范围内运行, 否则会影响其使用年限, 即

$$\begin{cases} \text{SOC}_{\text{bamin}} \leq \text{SOC}_{\text{ba}}(t) \leq \text{SOC}_{\text{bamax}} \\ \text{SOC}_{\text{scmin}} \leq \text{SOC}_{\text{sc}}(t) \leq \text{SOC}_{\text{scmax}} \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{SCO}(t) = \text{SCO}(t-1) - \frac{\beta P(t) \Delta t}{E_{\text{essr}}} \quad (19)$$

式中, $\text{SOC}_{\text{ba}}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的荷电状态, $\text{SCO}_{\text{sc}}(t)$ 为 t 时刻超级电容的荷电状态, β 为充放电效率, $P(t)$ 为 t 时刻的功率。

3 混合储能系统的功率分配

3.1 LMD 基本原理

局部均值分解算法可以通过多次迭代将含有多分量的信号分解成一系列的乘积函数 (product function, PF) 和一个剩余分量, 从而确定混合储能系统的出力情况, 有效解决光伏并网的扰动问题, 具体实现步骤如下。

步骤 1: 寻找原始信号 $x(t)$ 中包含的每个极值点 n_i , 从而算出其局部均值 m_i 和包络值 a_i , 如式 (20) (21) 所示。

$$m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \quad (20)$$

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2} \quad (21)$$

步骤 2: 对局部均值 m_i 和包络值 a_i 进行平滑处理, 得到其对应的函数 $m_{11}(t)$ 和 $a_{11}(t)$ 。

步骤 3: 将 $m_{11}(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中分离出来, 得到一个新的序列 $h_{11}(t)$, 即

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \quad (22)$$

步骤 4: 用 $h_{11}(t)$ 除以包络估计函数 $a_{11}(t)$ 进行解调, 得到 $s_{11}(t)$ 。

$$s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} \quad (23)$$

式中, $s_{11}(t)$ 作为初始信号通过重复上述过程获得的包络函数 $a_{12}(t)$ 不为 1, 则意味着其不是纯调频函数, 因此需要重复迭代 n 次, 直到 $s_{1n}(t)$ 成为纯调频函数, 即

$$a_1(n+1)(t) = 1 \quad (24)$$

步骤 5: 将整个迭代过程中的包络值相乘得到包络信号 $a_1(t)$, 再与纯调频函数 $s_{1n}(t)$ 相乘就会得到第一个 PF 分量, 即

$$P_{\text{PF}_1}(t) = a_1(t) s_{1n}(t) \quad (25)$$

步骤 6: 将 PF_1 分量从原始信号中分离出来:

$$u_1(t) = x(t) - P_{\text{PF}_1}(t) \quad (26)$$

步骤 7: 将 $u_1(t)$ 经过 k 次循环迭代直到满足 $u_k(t)$ 为单调函数为止, 最后原始信号分解为 k 个 PF 函数和一个剩余分量, 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^k P_{\text{PF}_i}(t) + u_k(t) \quad (27)$$

3.2 基于改进 LMD 的 HESS 功率分配

在抑制端点效应与模态混叠方面, LMD 相较于 EMD 有所改善, 但仍然有改进的空间, 如果端点不是极值点, 就会出现端点效应。若对端点不加以处理, 随着迭代次数的增加, 端点上的分解将会出现失真现象, 从而难以达到循环结束条件。因此在 LMD 分解前对原始信号进行镜像延拓, 会使获得的纯调频函数与包络估计函数更加精确, 从而降低端点效应的影响。最后再将经过镜像延拓的分解信号还原就能获得原始信号的 PF 分量。

由 Smith 提出的迭代终止条件 $a_1(n+1)(t) = 1$ 是理想化的情况, 分解次数过多容易造成虚假分量, 并且会增加求解时间。故而在实际过程中通过设置停止判据及其能量比值的阈值来实现自适应分解。

定义 $\mu(i)$ 作为纯调频函数停止迭代的目标函数, 如式 (28) 所示。

$$\mu(i) = a_1(n+1)(i) - 1 \quad (28)$$

当 $a_{1(n+1)}(i) = 1, \mu(i)$ 等于 0。

采用均方根值 (R_{MS}) 来衡量纯调频函数是否满足停止迭代的条件, 如式 (29) 所示, 当 R_{MS} 趋于 0, 说明目标函数达到循环终止条件, 也接近 0, 由此得到纯调频函数。

$$R_{\text{MS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu^2(i)} \quad (29)$$

LMD 分解要满足剩余分量为单调函数才停止迭代, 因此设置 LMD 分解的外层循环停止条件至关重要, 最后的 PF 分量个数由外层循环决定, 如式 (30) 所示, 筛选停止标准是通过计算第 k 个 PF 分量与原始信号的能量比值来确定。经过仿真验证, 结果如图 1 所示, 如果最后一个 PF 分量与原始信号的能量比值小于 0.1 时继续迭代, 会过度分解导致产生虚假分量, 因此设置能量比值

小于 0.1 时再停止迭代的效果最佳。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n PF_i(k)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (30)$$

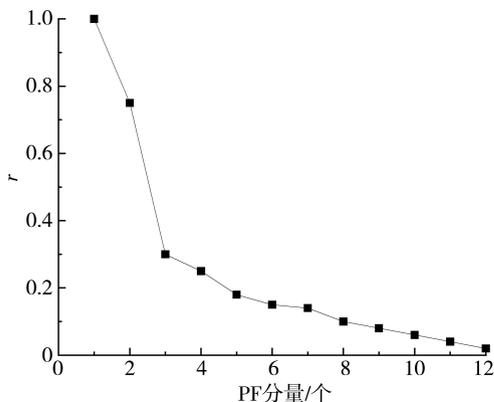


图 1 能量比值趋势图

Fig.1 Energy ratio trend chart

确定分解后 PF 分量的频率分界点,将高于分界点的 PF 分量重构为超级电容器功率,低于分界点的 PF 分量重构为蓄电池功率,即

$$\begin{cases} P_{sc}(t) = \sum_{k=1}^j PF_k(t) \\ P_{ba}(t) = \sum_{k=j+1}^K PF_k(t) \end{cases} \quad j \in (1, 2, \dots, n) \quad (31)$$

4 改进的鲸鱼优化算法

4.1 混沌序列初始化

目前,多数智能优化算法初始种群几乎都是随机生成,因而影响算法的求解效果。在鲸鱼优化算法(WOA)种群初始化时,初始种群是在限定的范围内随机生成,会导致分布不均匀,造成全局搜索能力受限。混沌的主要特点是不可预测性和非线性,尤其是在搜索空间中有许多局部解的情况下,有助于找到全局最优解,提高算法性能。其基本思想是利用混沌属性映射混沌空间值范围内的变量,并最终将生成随机的混沌序列。采用 Circle 混沌映射生成种群个体, Circle 映射定义如式(32):

$$x_{i+1} = \text{mod}\left(x_i + 0.2 - \left(\frac{0.5}{2\pi}\right) \sin(2\pi x_i), 1\right) \quad (32)$$

实验证明^[12],利用 Circle 映射代替随机生成的初始种群可获得更好的效果,尤其在搜索范围内有许多局部解时,混沌映射可以丰富种群多样

性,增强算法对于全局的寻优能力,从而提高算法优化的效率。

4.2 非线性收敛因子

与其他智能优化算法一样,鲸鱼优化算法在寻优过程中同样面临着全局搜索能力和局部开发能力不平衡的问题。在鲸鱼优化算法中,参数 $|A|$ 是用于确定算法是否接着搜索猎物,当 $|A| \geq 1$ 时,算法就会进行全局搜索,避免陷入局部最优;当 $|A| < 1$ 时,算法进行局部搜索得到最优解。由于收敛因子 a 在参数中 $|A|$ 是线性变化,全局搜索能力经过多次迭代会发生衰减,因此本研究提出了一个非线性收敛因子,即

$$a = 2 - 2\sin\left(\omega \frac{x}{\text{max_iter}} \pi\right) \quad (33)$$

式中, max_iter 表示最大迭代次数, x 为当前迭代次数, ω 参数取值为 0.7。

改进的鲸鱼优化算法流程如图 2 所示。

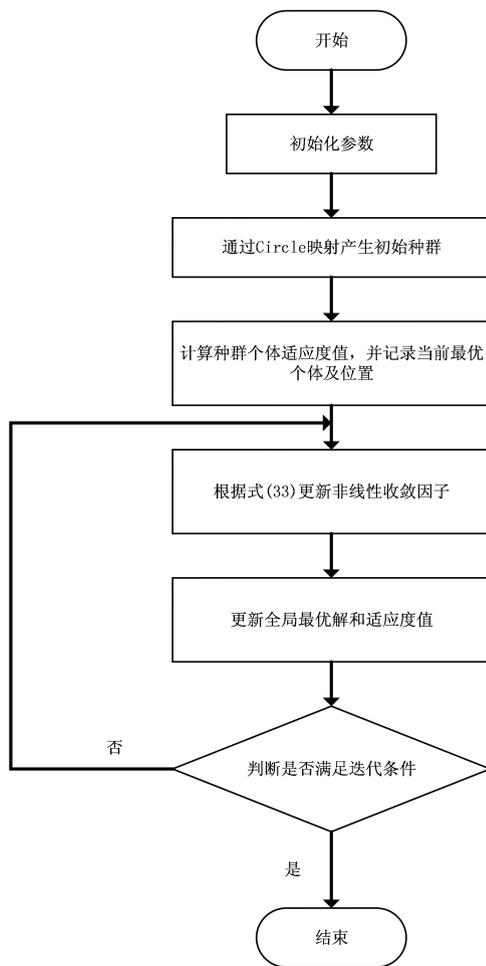


图 2 改进的鲸鱼优化算法流程图

Fig.2 Improved whale optimization algorithm flowchart

5 算例分析

某光伏电站的装机容量为 1 150 kW, 选取某天(6:30 a.m.~19:30 p.m.) 光伏实测采样数据为研究对象, 分析可知光伏原始功率 1 min 最大波动率为 39.65%, 1 min 最大波动率远远超过了国家规定的并网上限 10%, 导致供电安全性低, 因此未达到接入大电网的标准, 需要混合储能系统出力对光伏功率进行平抑。采用 Savitzky-Golay 滤波来平滑光伏出力, 将波动率降至满足条件, 滤波窗口设为 15, SG 滤波效果如图 3 所示。

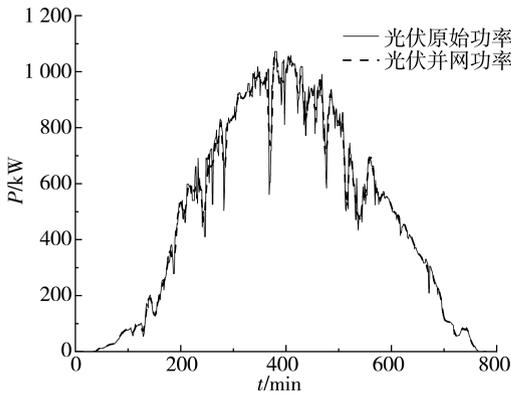


图 3 SG 滤波效果

Fig.3 SG filtering effect

从图 4 可看出, 光伏原始功率经 SG 滤波处理后得到的光伏并网功率波动率明显下降, 在第 374 分时 1 min 最大波动率为 7.56%, 对于平抑前的波动率降低了 80.94%, SG 滤波效果良好, 达到我国光伏并网要求。波动率较低的光伏并网参考功率需要混合储能系统出力才可以得到, 由式 (1) 可算出混合储能系统的输出功率, 得到工作周期内混合储能系统的出力状态如图 5 所示。

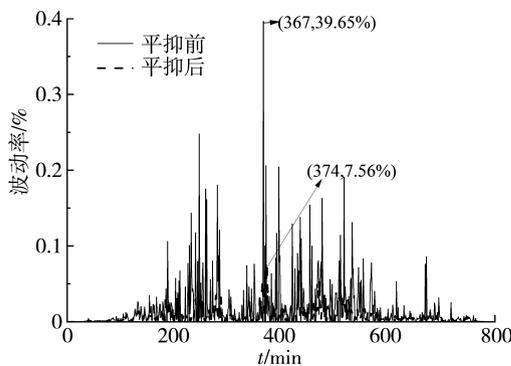


图 4 平抑前后的光伏波动率

Fig.4 Photovoltaic volatility before and after suppression

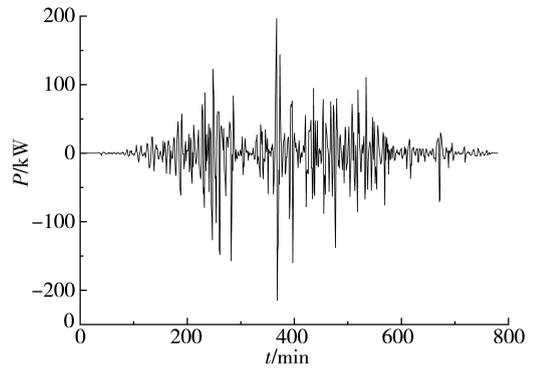


图 5 混合储能系统的出力状态

Fig.5 Output status of hybrid energy storage system

5.1 混合储能功率分配

为体现改进的 LMD 在混合储能功率分配方面的优势, 将其与 EMD 分解算法进行比较。采用 ILMD 与 EMD 分别对混合储能的输出功率进行分解, 将分解之后的分量通过希尔伯特变换 (HT) 获得各自的瞬时频率-时间曲线。从图 6 可以看出, EMD 在每个时刻都会出现模态混叠, 仅有 c4 模态分量与其他分量出现混叠的时刻较少但存仍在突变的高频分量, 剧烈的充放电需要由蓄电池来承担, 这将降低其寿命导致更换次数增多, 从而增加成本。

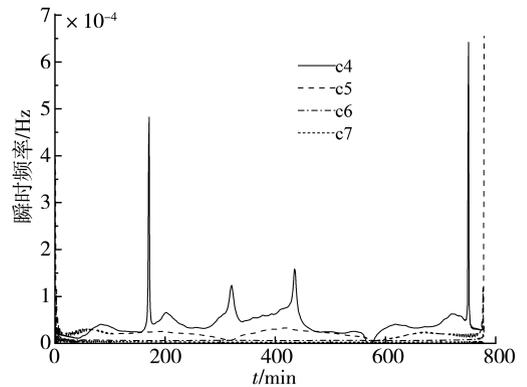


图 6 EMD 的瞬时频率-时间曲线

Fig.6 Instantaneous frequency time curve of EMD

ILMD 的分解结果包括高频到低频的 7 个 PF 分量和 1 个剩余分量, 如图 7 所示。将这 8 个分量通过 HT 后得到瞬时频率-时间曲线如图 8 所示。从图 8 可见, ILMD 除了开始时刻出现模态混叠 PF5 与 PF6 整个时间段几乎无重叠且不存在突变的高频分量, 因此, 将 PF1~PF5 分量重构为超级电容的功率, 将频率低于 PF5 的分量重构为蓄电池的功率。

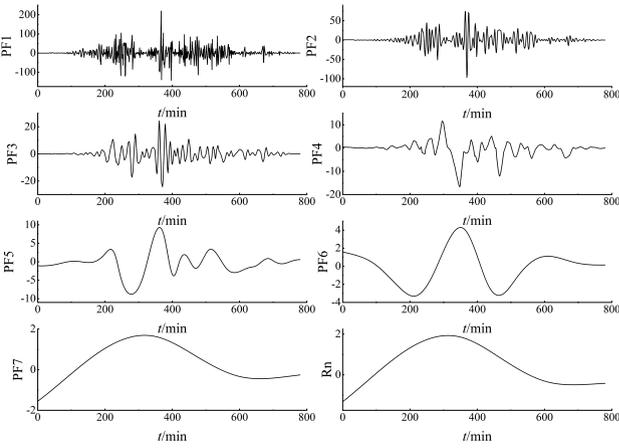


图 7 ILMD 分解结果

Fig.7 Decomposition results of ILMD

5.2 混合储能容量优化配置

为达到光伏并网的优化效果,依据其建立的

目标函数和约束条件,采用改进的算法得到最优的配置方案和全寿命周期成本,该混合储能系统相关参数见表 2。

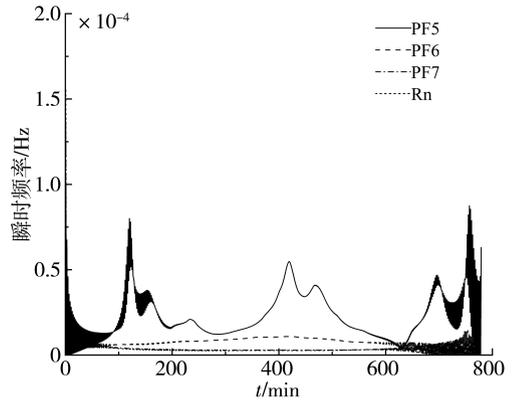


图 8 ILMD 的瞬时频率-时间曲线

Fig.8 Instantaneous frequency time curve of ILMD

表 2 混合储能系统相关参数

Tab.2 Related parameters of hybrid energy storage system

参数	SOC 阈值	使用寿命/a	单位功率成本/元·kW ⁻¹	单位功率维护成本/元·kW ⁻¹	单位容量成本/元·kWh ⁻¹	单位容量维护成本/元·kWh ⁻¹	回收残值率/%	贴现率/%
蓄电池	0.2~0.8	—	1 500	62.0	6 500	0.014	3	3
超级电容	0.1~0.9	15	11 500	80.6	450	0.013	4	10

为了证明所提方法具有更高的可行性,对比 4 种不同方案的优化配置结果。如表 3 所示方案 1 为单一蓄电池储能,方案 2~4 为混合储能,其中方案 2 是对储能参考功率进行经验模态分解(EMD),用改进鲸鱼优化算法求目标函数;方案 3 是对储能参考功率进行改进的 LMD 分解,用鲸鱼优化算法求目标函数;方案 4 是改进的 LMD 分解,用改进鲸鱼优化算法求目标函数。4 种方案的优化配置结果如表 3 所示,列出方案 1、方案 2 和方案 4 的储能设备在工作状态下 SOC 变化情况,不同配置方案的 SOC 实时状态如图 9 所示。

表 3 储能容量配置结果

Tab.3 Capacity configuration results of HESS

方案	$P_{ba}/$ kW	$E_{ba}/$ kWh	$P_{sc}/$ kW	$E_{sc}/$ kWh	使用 寿命/a	成本/ 百万元
1	219.74	103.37	—	—	0.32	3.69
2	16.55	345.37	219.46	337.71	6.99	1.71
3	25.27	153.76	232.45	116.44	4.71	1.44
4	22.40	167.05	230.23	114.56	5.05	1.19

根据表 3 的配置结果,方案 2 与方案 4 是不同分解算法的容量配置,可知改进的 LMD 相较于 EMD 分解过程中能彻底的分离高频和低频分量,不至于由蓄电池来承担未完全分离的高频功率,从而导致储能系统的额定容量翻倍。将方案 3 与方案 4 作比较,可知改进的鲸鱼优化算法加寻优能力增强,有利于跳出局部最优,避免了蓄电池超出在限定的范围内工作,投资成本下降了 17.4%。从图 9(a)可知,方案 1 的蓄电池不适合做单一储能,频繁又剧烈的充放电导致其使用寿命只有 0.32a,需要频繁更换,投资成本是方案 4 的 3 倍多。从图 9(b)、9(c)可以看出,蓄电池的 SOC 平稳变化,而超级电容的 SOC 快速变化,相较于单一储能,采用混合储能系统能发挥出各自的优点,相对于方案 1 其使用寿命分别提高了 21.8 倍、15.8 倍,成本对应下降了 53.6%、66.9%;但方案 2 蓄电池在工作时间持续充电,直到限值,长时间的充电会使蓄电池容量降低从而会影响其寿命,而超级电容一直处于放电状态,不利于抑制光伏功率波动。方案 4 蓄电池的使用寿命较于方案

2 降低了 1.94 a, 但混合储能的充放电状态更加合理, 投资成本比其下降 30.4%, 综上所述改进的

LMD 分解效果更佳。

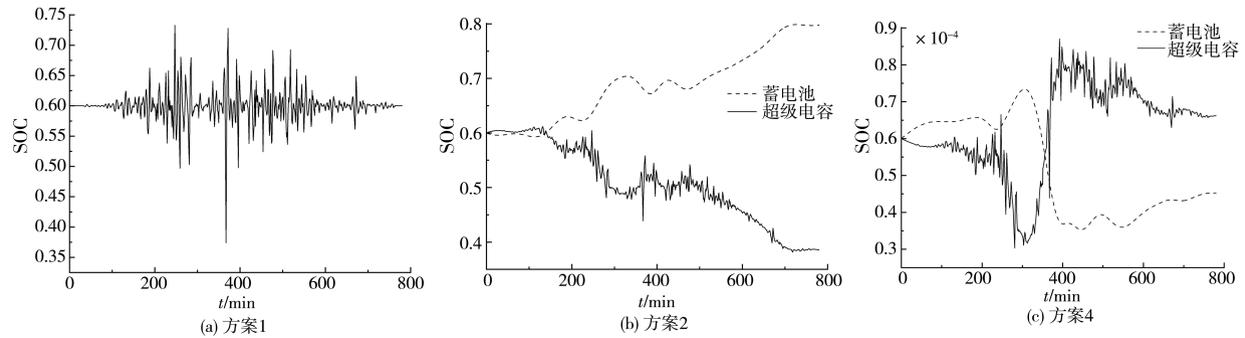


图 9 不同配置方案的实时 SOC

Fig.9 Real time SOC with different configuration schemes

6 结论

1) 与经验模态分解相比, 改进的局部均值分解算法可以更好地分解混合储能功率, 减少模态混合现象, 精度较高。

2) 采用改进的局部均值分解配置混合储能, 相较于经验模态分解, 降低了混合储能系统配置

成本, 提高了系统的经济性; 相较于单一储能, 能够降低容量配置和全寿命周期成本, 有效提高蓄电池的使用寿命。

3) 经过混沌映射, 初始种群的适应度值有一定程度的提高, 有利于改进的鲸鱼算法进行全局寻优, 对于目标函数有更好的求解效果。

参考文献:

- [1] 史恒逸, 王宝华. 考虑配网电压越限风险的光伏接入规划研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 40-46.
- [2] 李瑞民, 张新敬, 徐玉杰, 等. 风光互补系统中混合储能容量优化配置研究[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(3): 512-522.
- [3] 马伟, 王玮, 吴学智, 等. 平抑光伏并网功率波动的混合储能系统优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 58-66.
- [4] 张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177-187.
- [5] CHU H C, WANG X H, MU X C, et al. Research on optimal configuration of hybrid energy storage capacity based on improved particle swarm optimization algorithm[C] // 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Chengdu, 2019: 2030-2036.
- [6] 钟国彬, 吴涛, 曾杰, 等. 基于离散傅里叶变换的主动配电网混合储能容量优化配置[J]. 电力建设, 2018, 39(8): 85-93.
- [7] 吴杰, 丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7-12.
- [8] 韩晓娟, 田春光, 程成, 等. 基于经验模态分解的混合储能系统功率分配方法[J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 1889-1896.
- [9] 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.
- [10] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规定: Q/GDW 1617-2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [11] 何俊强, 师长立, 马明, 等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 157-167.
- [12] 张达敏, 徐航, 王依柔等. 嵌入 Circle 映射和逐维小孔成像反向学习的鲸鱼优化算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1173-1180.

(责任编辑: 方素华)