



中国电力  
*Electric Power*  
ISSN 1004-9649, CN 11-3265/TM

## 《中国电力》网络首发论文

题目：基于 NGO-VMD 的混合储能功率分配策略  
作者：王海燕，钱林宇  
网络首发日期：2024-03-19  
引用格式：王海燕，钱林宇. 基于 NGO-VMD 的混合储能功率分配策略[J/OL]. 中国电力. <https://link.cnki.net/urlid/11.3265.TM.20240318.1321.004>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于 NGO-VMD 的混合储能功率分配策略

王海燕，钱林宇

(上海电力大学 自动化工程学院，上海 200090)

**摘要：**为解决风电场并网时的功率波动影响电网稳定性的问题，提出了一种基于北方苍鹰(northern goshawk optimization, NGO)算法优化变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)参数的混合储能功率分配策略。首先，按照风电场并网技术规范采用自适应平均滤波法对风力发电功率滤波，并由滤波后的并网功率计算出波动功率。然后采用北方苍鹰优化 VMD 算法中 K 值(分解模态数)和  $\alpha$  值(二次惩罚因子)的最优值组合，将波动功率信号经 VMD 分解后实现在锂电池和超级电容器的功率分配，最后采用双重模糊控制对混合储能系统(Hybrid energy storage system, HESS)的荷电状态进行优化，完成混合储能功率的二次分配。仿真结果表明，该控制策略不仅能够满足风电并网最大功率波动要求，还可以保持荷电状态(state of charge, SOC)维持在合理范围，实现 HESS 长期安全运行。

**关键词：**风电并网；北方苍鹰算法；变分模态分解；混合储能；模糊控制

DOI:10.11930/j.issn.1004-9649.202308010

## Hybrid energy storage power allocation strategy based on NGO-VMD

WANG Haiyan, QIAN Linyu

(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To address the issue of power fluctuations during wind power grid connection affecting the stability of the power grid, a hybrid energy storage power allocation strategy based on the Northern Goshawk Optimization (NGO) algorithm was proposed to optimize the parameters of Variational Mode Decomposition (VMD). Firstly, the wind power generation power is filtered in accordance with the regulations of wind power grid connection technology using the adaptive averaging filtering method, and the fluctuation power is calculated from the filtered power. Then, the optimal combination of K value (number of decomposition modes) and  $\alpha$  value (quadratic penalty factor) in the Northern Goshawk optimized VMD algorithm is used to realize power allocation between lithium batteries and supercapacitors after the fluctuation power signal is decomposed by VMD. Finally, the state of charge (SOC) of the Hybrid energy storage system (HESS) is optimized using dual fuzzy control to achieve the secondary power allocation of the hybrid energy storage power. Simulation outcomes demonstrate that employing this control strategy achieves not only compliance with the wind power grid connection's maximum power fluctuation requirements but also the maintenance of SOC within a reasonable range, ensuring the long-term secure operation of HESS.

**Keywords:** wind power grid connection; northern goshawk optimization; Variational Mode Decomposition; Hybrid energy storage; fuzzy control

## 0 引言

风力发电系统因其清洁、高效的特点在全世界得到了广泛应用，但是与传统能源相比，风力发电易受天气影响具有波动性和随机性，导致风力发电不稳定产生功率波动<sup>[1-2]</sup>。因此，为提高并网稳定性采取在风电场配置混合储能系统的方式确保电网可靠运行<sup>[3-4]</sup>。利用高效的混合储能系统功率分配策略解决风电并网时的功率波动具有重要意义<sup>[5]</sup>。

混合储能系统能有效平抑风力发电所引起的功率波动，同时使用功率型储能元件和能量型储能

元件在特性上进行优势互补<sup>[6-7]</sup>。混合储能系统将需补偿的波动功率按照频率的高低分解成高频波动分量和低频波动分量两种类型，低频波动分量的波动幅度小，但维持时间长，需平抑的能量大，因此适合锂电池这类能量型储能器件平抑；高频波动分量的瞬时波动幅度大，但维持时间短，往往是毫秒级，因而适合超级电容器这类功率型储能器件进行平抑<sup>[8-9]</sup>。

混合储能系统发挥其优势的关键是合理的功

率分配,国内外学者已经对 HESS 功率分配方法进行了广泛深入的研究,积累了丰富的实践经验和理论成果<sup>[10-11]</sup>。常用的储能功率分配策略有低通滤波算法、经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD)、小波包分解等。文献[12]使用一阶低通滤波器分解不平衡功率,分配给蓄电池和超级电容进行功率补偿,但由于一阶滤波算法的滤波时间常数固定,导致其截止特性差,并滤波过程的延迟会造成功率分配的不合理。文献[13]提出互补集合经验模态分解 (CEEMD) 的方法来平抑风力发电不稳定性而引起的功率波动。但 CEEMD 的不足之处在于进行 EMD 分解时产生的本征模态函数 (IMF) 之间相互影响、混叠,导致分解结果不够准确和可靠。文献[14]提出小波包算法与模糊控制结合的混合储能功率分配方法,解决了混合储能分配不佳导致母线电压频繁波动的问题。变分模态分解是一种自适应、完全非递归的信号处理方法,最初由 Konstantin 等人在 2014 年提出<sup>[15]</sup>。相较 EMD 算法, VMD 具有更好的噪声抑制和分解精度,可以更好地处理信号中的噪声和模态混叠,具有坚实的数学理论基础及良好的鲁棒性<sup>[16]</sup>。文献[17-18]采用变分模态分解 VMD 获得 HESS 的初始功率分配,结合超级电容和蓄电池的荷电状态 SOC 与其变化趋势并使用模糊控制规则修正储能系统的充放电功率。但是 VMD 模态个数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$  采用经验选取具有主观性,容易出现过分解或欠分解的问题。文献[19]采用遗传算法对变分模态分解算法的模态个数  $K$  及惩罚因子  $\alpha$  两个参数进行优化选取,提高分解效果,但存在全局搜索能力不足易陷入局部最优解,从而导致分解精度不高和收敛速度较慢等问题。

能量管理系统(Energy Management System, EMS) 是储能系统的上层控制系统,主要功能包括对储能系统进行数据采集、运行监控、有功无功控制、执行控制策略,例如削峰填谷、计划跟踪、平滑功率、电池保护策略等,并实现功率智能自动分配功能。本文主要针对平抑风电功率波动问题进行研究,现有的能量管理系统常用的就是低通滤波法通过改变时间常数对储能元件 SOC 进行管理从而实现混合储能功率分配。文献[20]依据超级电容 SOC 确定系统的工作模式,针对各工作模式下的协调控制方法,在临界极限充放电状态改变蓄电池的输出功率,影响超级电容的输出功率,从而达到功率再分配的目的。这一控制策略可提高储能装置的

可靠性,实现荷电状态的自恢复,同时降低超级电容的容量配置。然而,采用改变滤波常数的低通滤波法只能确保超级电容器满足 SOC 要求,可能导致另一个储能元件的过充过放。

综上所述,本文提出了一种新型混合储能功率分配策略,以解决风电有功功率波动问题。首先,依据我国风电场的并网规定<sup>[21]</sup>,采用自适应平均滤波法对风电功率进行平滑,获得符合并网标准的并网功率,并计算出储能系统需平抑的波动功率。然后结合混合储能功率和 NGO 算法选择适应度函数,本文采用 NGO-VMD 优化参数值  $[K, \alpha]$ ,并将优化后的参数值带入 VMD 算法进行功率信号分解。基于 HESS 的锂电池和超级电容器工作特性,采用希尔伯特(Hilbert)变换得到的边际谱确定混合储能功率的低频分量与高频分量,实现 HESS 功率的初次分配。最后,采用双输入单输出的双重模糊控制器对储能元件的荷电状态进行管理优化,从而实现 HESS 功率二次分配。

## 1 基于 NGO-VMD 优化策略

### 1.1 VMD 原理

变分模态分解采用预设模态分解数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$  的方式从而自适应分解非平稳信号,可将一个实值输入信号  $f$  分解为  $K$  个具有特定的稀疏特性的离散子信号 (intrinsic mode function, IMF),所有分解的 IMF 可再现输入信号。

VMD 变分问题: 使用 Hilbert 变换得到模态函数  $u_k(t)$  的单侧频谱,为使每个 IMF 都调制到其估计的中心脉动频率  $\omega_k$  上,解调信号由单侧频谱加上修正系数  $e^{-j\omega_k t}$  得到。带宽是通过解调信号梯度的平方范数  $L^2$  估计,因此建立约束变分的数学模型表达式为

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ s.t. \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $*$  是卷积符号;  $\{u_k\}$  表示所有模态函数之和,  $\{\omega_k\}$  表示其中心频率集合。

为将约束性问题转化为非约束性问题从而求全局最优解,引入拉格朗日(Lagrange)乘子算子  $\lambda$ 。计算“鞍点”采用交替乘法 ADMM 迭代更新  $u_k^{n+1}$ ,  $\omega_k^{n+1}$ ,  $\lambda^{n+1}$ , 根据重构实信号的厄米特对称性,用  $\omega - \omega_k$  来代替第一项中的  $\omega$ , 求得模态函数及其中心频率。

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2a(\omega - \omega_k)^2} \quad (2)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (3)$$

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \hat{u}_k^n(\omega) + \tau \left[ \hat{f}(\omega) - \sum_{k=1}^K \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right] \quad (4)$$

式中： $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$  是余量的维纳滤波； $\omega_k^{n+1}$  是模态函数的中心频率， $\tau$  为步长， $\tau > 0$ 。

## 1.2 NGO 优化 VMD 参数

使用 VMD 分解波动功率信号需设定合适的参数值 $[K, \alpha]$ 。当  $K$  值过大时，会导致过分解，反之则会欠分解；当  $\alpha$  取值过大时，会造成频带信息丢失，反之会出现信息冗余。因此，使用北方苍鹰优化算法优化 VMD 的参数组合 $[K, \alpha]$ ，可根据信号变化特征和复杂程度优化出最优 VMD 参数组合。

北方苍鹰优化算法是由 Mohammad Dehghani 等人在 2021 年提出的一种新颖的群体优化算法<sup>[22]</sup>。该算法对北方苍鹰的狩猎行为进行模拟，具体分为猎物识别攻击和追逐逃跑两个阶段。在第一阶段，北方苍鹰识别出猎物后，向猎物移动攻击；在第二阶段，北方苍鹰高速追逐并猎取猎物。

### 1.2.1 第一阶段：猎物识别攻击（探索阶段）

首先，北方苍鹰进行全局搜索，在搜索空间中随机选择一个猎物并迅速攻击，从而提高了 NGO 算法对搜索空间的全局探索能力。第一阶段用如下公式描述：

$$P_i = X_k, i = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N \quad (5)$$

$$X_{i,j}^{new,P1} = \begin{cases} X_{i,j} + r(P_{i,j} - I_{X_{i,j}}), F_{Pi} < F_i \\ X_{i,j} + r(X_{i,j} - P_{i,j}), F_{Pi} \geq F_i \end{cases} \quad (6)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{new,P1}, F_i^{new,P1} < F_i \\ X_i, F_i^{new,P1} \geq F_i \end{cases} \quad (7)$$

式中： $P_i$  为第  $i$  只北方苍鹰的猎物位置； $F_{Pi}$  为其目标函数值； $k$  是 $[1, N]$ 范围内不等于  $i$  的随机整数； $X_{i,j}^{new,P1}$  为第一阶段第  $i$  只北方苍鹰第  $j$  维的新位置； $X_i^{new,P1}$  为第  $i$  只北方苍鹰的新位置； $F_i^{new,P1}$  为基于第一阶段更新后第  $i$  只北方苍鹰的目标函数值； $r$  和  $I$  是 $[1, N]$ 范围内的随机数。

### 1.2.2 第二阶段：追逐及逃跑（开发阶段）

猎物受到攻击逃跑时，北方苍鹰能迅速反映并进行快速追击，从而提高了 NGO 算法对搜索空间的局部探索能力。 $R$  表示北方苍鹰的攻击半径。第二阶段用如下公式描述：

$$X_{i,j}^{new,P2} = X_{i,j} + R(2r-1)X_{i,j} \quad (8)$$

$$R = 0.02 \left( 1 - \frac{t}{T} \right) \quad (9)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{new,P2}, F_i^{new,P2} < F_i \\ X_i, F_i^{new,P2} \geq F_i \end{cases} \quad (10)$$

式中： $t$  和  $T$  为当前迭代次数和最大迭代次数； $X_i^{new,P2}$  为第  $i$  只北方苍鹰的新位置； $X_{i,j}^{new,P2}$  为第二阶段第  $i$  只北方苍鹰的新位置； $F_i^{new,P2}$  为基于第二阶段更新后第  $i$  只北方苍鹰的目标函数值。

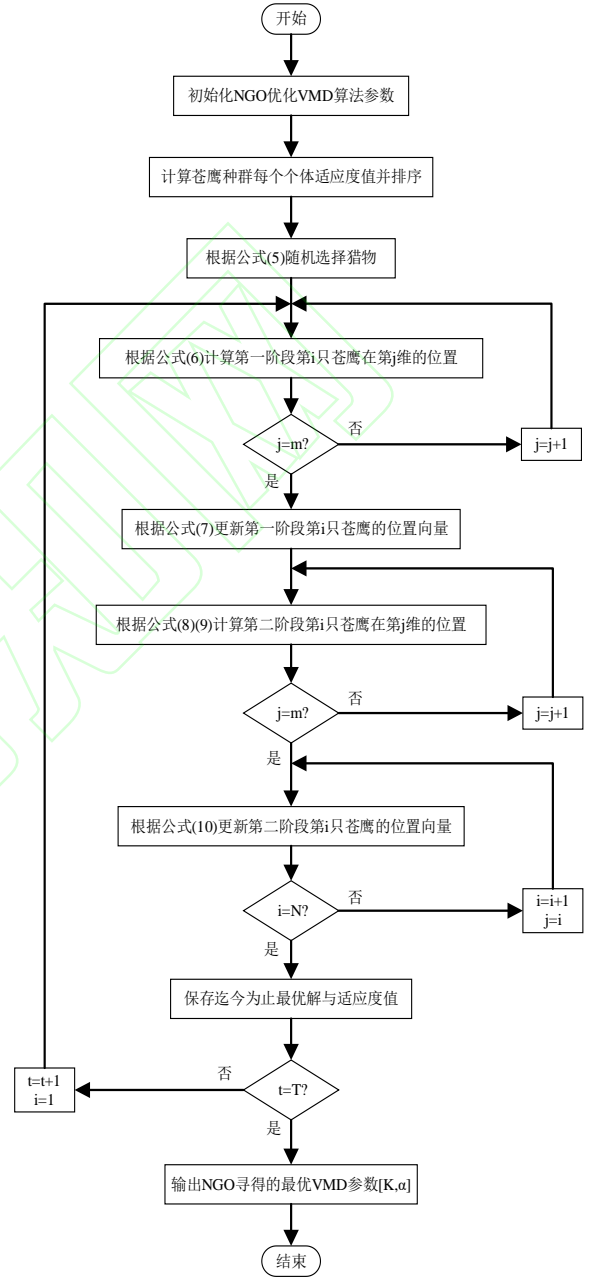


图 1 NGO 优化 VMD 流程图

Fig. 1 NGO optimization VMD flowchart

使用 NGO 对 VMD 参数进行寻优时，考虑到混合储能功率信号具有随机性，选择能量熵作为适应度函数。熵值可以描述系统的不确定性和混乱程度，在信号分解领域有着广泛的应用。能量熵是一种用于衡量信号复杂度的度量，可以较好地描述信号的平滑度和变化程度。通过最小化能量熵，可以



去除噪声和不必要的信息，同时保留信号的主要特征。当 IMF 分量在信号中的能量占比越低，特征信息越少时，则能量熵越大，反之，则能量熵越小。

信号的能量熵  $H_p$  用以下公式计算，式中  $u_i$  是由 VMD 分解的  $k$  个模态分量， $E_i$  是每个分量的能量值， $E$  为总能量， $P_i$  为每个分量占总能量的比例，计算概率分布序列  $P_i$  的熵值即为能量熵  $H_p$ 。

$$\begin{cases} E_i = \sum_{i=1}^k u_i(t)^2 \\ P_i = \frac{E_i}{E} \\ H_p = -\sum_{i=1}^k P_i \log_2 P_i \end{cases} \quad (11)$$

采用 NGO 优化 VMD 参数流程如图 1 所示。通过模拟北方苍鹰捕猎过程，以能量熵作为适应度函数，计算每只苍鹰适应度，通过迭代更新，直到满足终止条件，最小的目标函数  $F_{i,j}^{new,P2}$  所对应的  $X_{i,j}^{new,P2}$  则代表着最优的 VMD 参数  $[K, \alpha]$ ，最后进行 VMD 分解，从而实现 NGO 优化 VMD 的目的。

## 2 NGO-VMD 的 HESS 功率分配策略

### 2.1 风储发电系统

功率分配策略以含 HESS 的风储发电系统为研究对象，由风电系统、锂电池和超级电容组成的 HESS、电网和控制器四个部分构成，并网结构如图 2 所示，其中的控制器根据 HESS 的功率分配策略控制电力电子变换器的启动、停止及运行。风电功率经过混合储能功率分配策略平抑后给电网供电，从而维持风储发电系统的稳定运行。

图 2 中， $P_w(t)$  为风力发电系统输出功率， $P_b(t)$  和  $P_{sc}(t)$  为锂电池和超级电容的输出功率，而  $P_{grid}(t)$  为并网功率。 $P_{hess}(t)$  为储能系统参考输出功率，对风电功率进行滤波后得到并网功率  $P_{grid}(t)$ ，储能系统需平抑功率  $P_{hess}(t)$  等于风电输出功率  $P_w(t)$  与并网功率  $P_{grid}(t)$  之差，也为锂电池功率  $P_b(t)$  和超级电容功率  $P_{sc}(t)$  之和，表达式为：

$$P_{hess}(t) = P_w(t) - P_{grid}(t) = P_b(t) + P_{sc}(t) \quad (12)$$

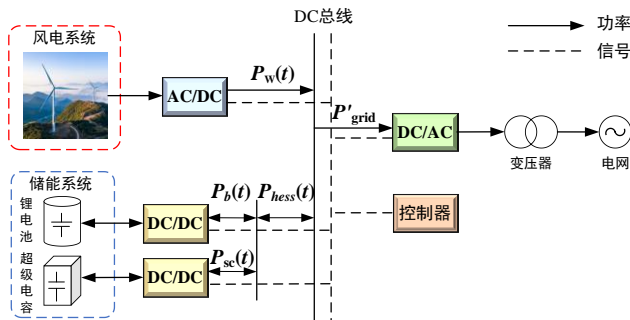


图 2 风储发电系统

Fig. 2 Wind storage power generation system

我国风电场并网技术标准如表 1 所示，要求装机容量 30 MW 以下风电场 1 min 内有功率变化最大限值小于 3 MW，10 min 内有功率变化最大限值小于 10MW。采用自适应平均滤波法能自适应对风力发电功率  $P_w(t)$  进行平滑得到并网功率  $P_{grid}(t)$ ，根据式(12) 计算出储能系统需平抑的波动功率  $P_{hess}(t)$ 。平滑过程如图 3 所示。

表 1 风电场有功功率变化最大限值

Table 1 Maximum value of wind farm active power variation

风电场装机容量 (MW)	10min 功率变化最大 限值 (MW)	1min 功率变化最大 限值 (MW)
<30	10	3
30~150	装机容量/3	装机容量/10
>150	50	15

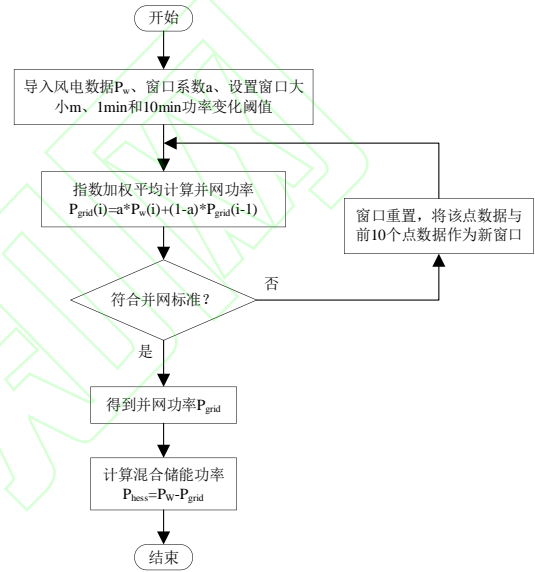


图 3 自适应平均滤波流程图

Fig.3 Flow chart of adaptive average filtering

### 2.2 混合储能功率的初级分配

根据 NGO 优化 VMD 得出的参数组合可以将  $P_{hess}(t)$  按频率由低到高分解出 IMF，对分解的 IMF 进行 Hilbert 变换生成边际谱图，通过观察边际谱图判断高低频界限，结合储能元件特性，将低频功率分量作为锂电池需平抑的分量其余功率分量分配给超级电容器，具体计算如下，其中  $K_b$  作为高低频界限。

$$P_b(t) = \sum_{k=1}^{K_b} u_k(t) \quad (13)$$

$$P_{sc}(t) = \sum_{k=K_b+1}^K u_k(t) \quad (14)$$

### 2.3 混合储能功率的二次分配

由于风力发电随机性较强，将所需平抑的波动功率分配给储能系统进行平抑，优化了对时间和功率尺度的波动效应。然而，仅基于 NGO-VMD 分解得到的储能功率没有考虑储能元件的容量问题，可

能在实际运行中导致储能 SOC 充放电后超过极限，不仅缩短储能装置的寿命，而且影响最终的平滑性能。在此基础上，采用储能双重模糊控制，对充电过程进行精确管理，修正混合储能的充放电功率，使超级电容器和电池的 SOC 保持在合理范围内，确保储能元件不出现功率越限，以延长使用寿命，整体的控制策略如图 4 所示。

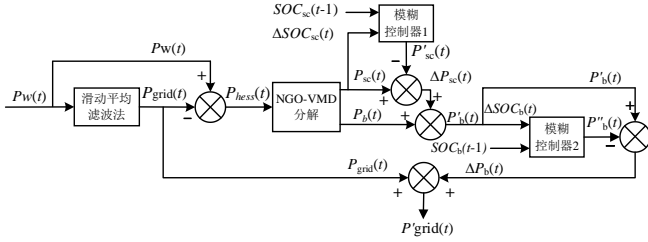


图 4 混合储能控制策略图

Fig. 4 Hybrid energy storage control strategy diagram

从图 4 中，首先通过 NGO-VMD 分解将  $t$  时刻的混合储能的原始功率  $P_{hess}(t)$  分解，根据各储能器的特点，锂电池获得低频功率分量，超级电容器获得高频功率。得到锂电池功率指令  $P_b(t)$  和超级电容功率指令  $P_{sc}(t)$ 。添加双模糊控制可以优化混合储能 SOC，并对分配的储能功率进行二次修正。模糊控制器 1 获得修正的超级电容器充放电功率  $P'_{sc}(t)$ ；模糊控制器 2 获得修正的锂电池充放电功率后是  $P'_b(t)$ ；最终经过双模糊控制后的并网功率为  $P'_{grid}(t)$ 。以控制超级电容器的模糊控制器 1 举例。

以  $t$  时刻的超级电容器的  $\Delta SOC_{sc}(t)$  作为输入一， $\Delta SOC_{sc}(t)$  为超级电容器在  $t$  时刻变化量，由于变化有正有负且可根据  $\Delta SOC_{sc}(t)$  的正负判断当前时刻超级电容器处于充电还是放电状态，故设置输入范围为  $[-1, 1]$ ，结合变化量以 0.1 为间隔设置模糊域为  $\{-1, -0.9, -0.8, -0.7, -0.6, -0.5, -0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$ ，其模糊子集设置为  $\{NB, NM, NS, PS, PM, PB\}$  表示超级电容器的荷电偏差为  $\{负高、负中、负小、正小、正中、正高\}$ 。

以  $t-1$  时刻的超级电容器的  $SOC_{sc}(t-1)$  作为的输入二， $SOC_{sc}(t-1)$  表示电容器  $t-1$  时刻存储电荷的百分比，即已存储电荷与最大可存储电荷之比。通常是 0% 到 100%，其中 0% 表示电容器完全放电，而 100% 表示电容器完全充电。故输入范围为  $[0, 1]$ ，将输入范围划分成不同的模糊子集，结合荷电状态 SOC 以 0.1 为间隔设置模糊域为  $\{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$ ，模糊子集为  $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ ，表示  $t-1$  时刻超级电容器 SOC  $\{非常低、较低、适中、较高、非常高\}$ 。

以超级电容器的功率校正系数  $k_1$  作为输出。由于超级电容器容量较小，易过充过放，故设置输入

范围为  $[0, 1]$ ，将输出范围划分成不同的模糊子集，结合功率校正系数以 0.1 为间隔设置模糊域为  $\{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$ ，模糊子集为  $\{NB, NM, NS, PS, PM, PB\}$ 。表示校正系数  $k_1$   $\{非常低、很低、较低、较高、很高、非常高\}$ 。制定模糊控制器 1 的模糊控制规则和隶属度函数如表 2 和图 5 所示。

表 2 超级电容器模糊控制规则

Table 2 Fuzzy Control Rules for Supercapacitors

$SOC_{sc}(t-1)$	$\Delta SOC_{sc}(t)$					
	NB	NM	NS	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NS	PB	PB	PM
NS	NM	NS	NS	PB	PM	PS
ZO	NS	PS	PM	PM	PS	NS
PS	PS	PM	PB	NS	NS	NM
PB	PM	PB	PS	NS	NM	NB

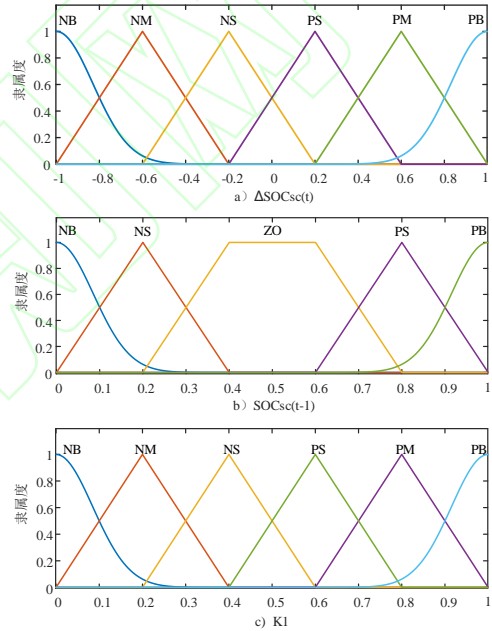


图 5 模糊控制器 1 隶属度函数

Fig. 5 Fuzzy controller 1 membership function

采用双重模糊控制的超级电容需平抑功率  $P'_{sc}(t)$ 、锂电池需平抑功率  $P'_b(t)$  和并网功率  $P'_{grid}$  的计算公式为

$$P'_{sc}(t) = k_1 * P_{sc}(t) \quad (15)$$

$$P'_b(t) = k_2 * [P_b(t) + (1 - k_1) * P_{sc}(t)] \quad (16)$$

$$P'_{grid} = P_{grid} + (1 - k_2) * [P_b(t) + (1 - k_1) * P_{sc}(t)] \quad (17)$$

模糊规则的设计遵循以下原则：当  $SOC_{sc}(t)$  较小，需要在下一个时刻放电，或当  $SOC_{sc}(t)$  较大，需要在下一个时刻充电，然后减少对超级电容器的充放电，并分配一部分电力给锂电池。下面选择一条模糊控制规则加以解释：

IF  $\Delta SOC_{sc}$  is NB and  $SOC_{sc}(t-1)$  is PB, then  $k_1$  is PM.

该规则表示当变化的  $SOC_{SC}$  负高(NM)且  $t-1$  时刻  $SOC_{SC}$  非常高(PB), 根据模糊控制规则, 设定功率调节系数  $k_1$  为比较高(PB), 表示超级电容荷电状态很高, 加速放电速度从而提高超级电容使用效率, 并由锂电池补偿功率修正部分。

### 3 实验分析

本文采用某地 25MW 风电场实测功率数据, 采用“一机一变”的单元接线方式, 由 7 台 3.3MW 和 1 台 1.9MW 容量的机组组成, 采样周期为 1 分钟, 共采样 1000 个数据, 锂电池的额定容量为 1.88MW h, 额定功率为 2.72MW, 锂电池 SOC 上下限为 0.1-0.9; 超级电容额定容量为 1.06MW · h, 额定功率为 1.27MW, 超级电容 SOC 上下限为 0.2-0.8。在 Matlab 中进行仿真分析, 结合风电场并网技术规定, 确定满足有功功率变化最大限值的自适应平均滤波法的窗口长度为 5。经过平滑后的并网功率和平滑前风电功率的对比图 6 如下, 1min 功率变化最大值从 4.72 MW 下降至 2.63 MW, 10min 功率变化最大值从 11.45 MW 下降至 9.23 MW。经过对比可得, 平滑前 1min 和 10min 的有功功率变化值均超过最大限制, 而经过平滑后的风电功率既能满足并网要求的有功功率变化最大限值, 还能跟踪风电功率, 从而减轻 HESS 的负担。

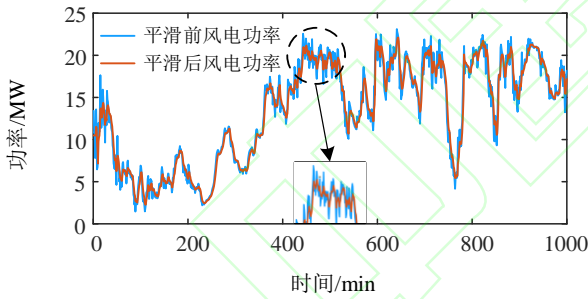


图 6 平滑前后风电功率对比

Fig. 6 Comparison of wind power before and after smoothing

为验证 NGO-VMD 的优越性, 采用 NGO 和遗传算法对 VMD 参数进行优化, 对比试验得到图 7。NGO 算法优化在第 6 次寻得最小适应度值为 1613.82, 而遗传算法则在第 13 次迭代时才寻得最小适应度值 1613.88; 采用 NGO 优化 VMD 参数得  $[K, \alpha]=[5,1779]$ , 遗传算法优化 VMD 参数得  $[K, \alpha]=[9,1279]$ , 将分解的 IMF 进行 Hilbert 变换得到边际谱图如图 7 所示, 可得遗传算法优化所得边际谱图 a 中出现了过分解, 具有一定模态混叠且较难判断高低频分量的分界。仿真结果表明 NGO 算法较遗传算法更易于跳出局部最优, 在求解速度和计

算精度方面均优于遗传算法。

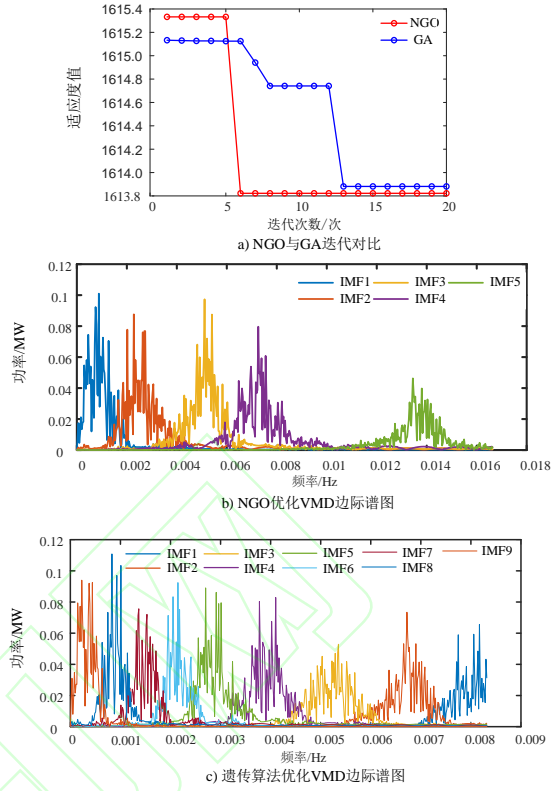


图 7 NGO 和遗传算法迭代计算对比

Fig. 7 Comparison of NGO and GA iterative calculations

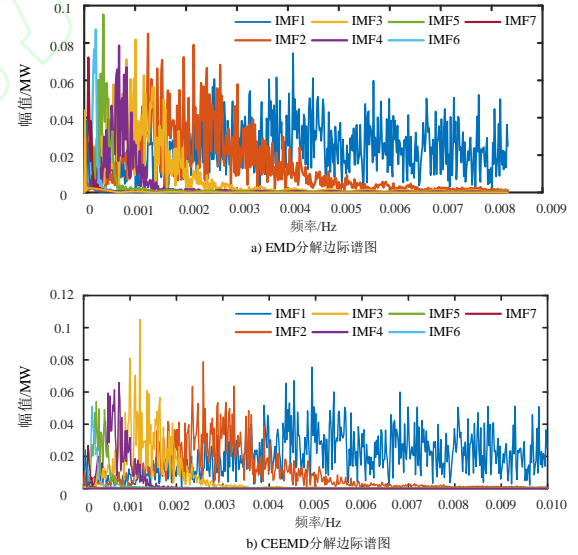


图 8 EMD 和 CEEMD 分解的边际谱图

Fig. 8 Spectral Analysis of EMD and CEEMD Decomposition

为验证 VMD 的优势, 采用 EMD 和 CEEMD 与 VMD 进行对比试验得到图 8, EMD 和 CEEMD 分解无需事先设定参数, VMD 采用  $[K, \alpha]=[5,1779]$  参数分解出的 IMF 进行 Hilbert 变换得到边际谱图, 从图 8 中可以看出 EMD 分解出现过分解以及严重模态混叠现象, CEEMD 使模态混叠现象得到一定缓解但仍较难直观体现高低频分界。而 VMD 分解



模态区分显著,分布均匀规律,图中在 0.01Hz 频率点处不同频率混叠部分最少,因此以 0.01 Hz 为高低频分量的分界,小于此频率的功率分量由锂电池平抑,剩余的高频分量由超级电容器进行平抑,完成 HESS 功率初次分配。从而验证了 VMD 算法的优势,保证了混合储能初级分配的合理性前提。

为验证双重模糊控制策略的有效性,对比未进行模糊控制情况和采用改变滤波时间常数的低通滤波法。图 9 所示,以锂电池为例,在未进行模糊控制时 SOC 变化范围为 (0.31~0.96)。在采用低通滤波法后的 SOC 变化范围 (0.37~0.91),均超过了锂电池设定的 SOC 正常工作区间 (0.1~0.9) 导致锂电池过充,使锂电池加速老化影响寿命。在采用模糊控制后锂电池 SOC 的范围为 (0.38~0.87),储能元件的荷电状态得到优化,如表 3 所示,双重模糊控制使储能元件均保持在合理荷电状态区间范围内,功率型储能元件和能量型储能元件在特性上进行优势互补的同时,对储能元件的 SOC 均得到优化管理,延长了储能元件的使用寿命,验证了双重模糊控制二次功率分配的优势和必要性。

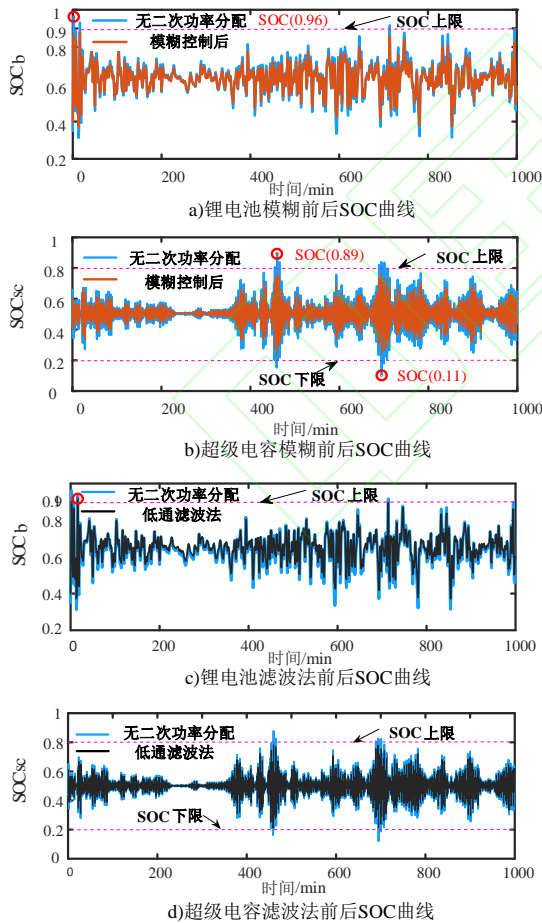


图 9 储能元件控制对比图  
Fig. 9 Comparison diagram of energy storage element control

最后图 10 为经过模糊控制后并网功率的有功功率变化值,结合混合储能控制策略图以及公式 (17),采用双重模糊控制的储能元件由于容量限制不能平抑的小部分波动功率,交由电网消纳,得出实际并网修正功率  $P'_{grid}$ ,最后校验并网修正功率 1min 和 10min 功率变化最大限制为 2.89MW 和 9.71MW,满足我国风电场并网技术标准。最终验证了本文控制策略既发挥了混合储能系统优势,同时也满足并网标准,确保风电并网的稳定性。

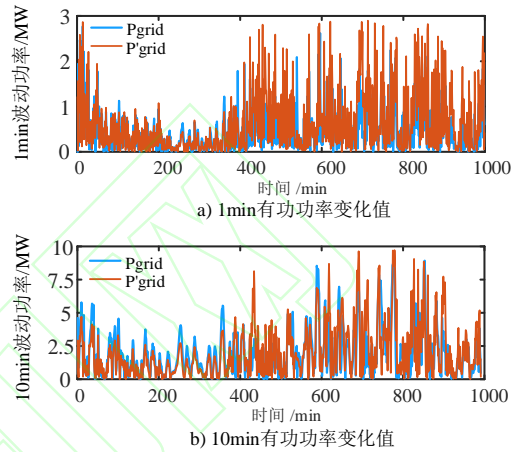


图 10 模糊控制后并网功率 1min 和 10min 有功功率变化值  
Fig. 10 Changes in active power after 1 minute and 10 minutes of grid connection power after fuzzy control

表 3 模糊控制后荷电状态

储能类型	无二次功率分配	低通滤波法	二次模糊控制
锂电池	0.31~0.96	0.37~0.91	0.38~0.87
超级电容器	0.11~0.89	0.21~0.80	0.24~0.75

## 4 结论

为平抑波动功率提高风电并网稳定性,提出 NGO 优化 VMD 算法结合双重模糊控制实现 HESS 功率分配。经过多次仿真算例分析,得到以下结论。

(1) 采用自适应滑动平均滤波法对风力发电功率滤波,得到符合并网标准的风电功率。

(2) 采用 NGO 算法优化 VMD 参数,结合混合储能功率数据特点,选择能量熵作为适应度函数,经过仿真试验对比,NGO 算法相较于遗传算法收敛速度提升了约 53.85%,并且提高了计算精度,有效避免陷入局部最优解。迭代优化得到最优参数组合[5, 1779]。利用 VMD 分解  $P_{hess}(t)$  有效改善了 EMD 和 CEEMD 分解产生的模态混叠现象。

(3) 采用双重模糊控制维持锂电池 SOC 在 (0.38~0.87), 超级电容器 SOC 在 (0.24~0.75),



保证了 HESS 系统工作在合理 SOC 区间,经过功率分配后最终 1min 和 10min 波动功率为 2.89MW 和 9.71MW,满足并网标准。

本方法在平抑风电功率波动和电池保护方面取得较好效果满足并网要求,但没有从经济角度考虑储能的成本以及负荷侧的影响,后续工作将进一步研究增加光伏并网配置储能装置,并考虑负荷侧同时满足我国新能源并网标准和经济性要求的容量配置问题,与能量管理系统中的其它功能相辅相成,高效管理微电网与配网间的能量交换,实现分布式能源的最大利用。

### 参考文献:

- [1] 帅挽澜,朱自伟,李雪萌,等.考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J].电力系统保护与控制,2021, 49(19):18-26.
- SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, *et al.* “Source-Network-Load-Storage” coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 18-26.
- [2] 孙伟卿,罗静,张婕.高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(15): 9-18.
- SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie. Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 9-18.
- [3] 徐衍会,徐宜佳.平抑风电波动的混合储能容量配置及控制策略[J].中国电力,2022,55(06):186-193.
- XU Yanhui, XU Yijia. Capacity Configuration and Control Strategy of Hybrid Energy Storage to Smooth Wind Power Fluctuations[J]. Electric Power, 2022, 55(06): 186-193.
- [4] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(01):57-70.
- YANG Xinfa, SU Jian, LÜ Zhipeng, *et al.* Overview on Micro-Grid Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(01): 57-70.
- [5] 贾伟青,任永峰,薛宇,等.基于小波包-模糊控制的混合储能平抑大型风电场功率波动[J].太阳能学报,2021,42(09):357-363.
- JIA Weiqing, REN Yongfeng, XUE Yu, *et al.* Wavelet-Fuzzy control of hybrid energy storage for power fluctuation smoothing of large wind farm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(09): 357-363.
- [6] 于芃,赵瑜,周玮,等.基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(24):35-40.
- YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, *et al.* Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [7] 徐聪,高强,王羔则,等.平抑风电波动的混合储能系统控制方法[J].电源技术,2020,44(10):1534-1537.
- XU Cong, GAO Qiang, WANG Gaoze, *et al.* Control method of hybrid energy storage system to suppress wind power fluctuation[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(10): 1534-1537.
- [8] 王腾,张新燕,王亚东,等.基于二阶滤波的混合储能系统能量管理控制策略[J].太阳能学报,2022,43(11):399-405.
- WANG Teng, ZHANG Xinya, WANG Yadong, *et al.* Energy management control strategy of hybrid energy storage system based on second-order filtering[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(11): 399-405.
- [9] 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(03):177-187.
- ZHANG Yuhuan, DU Guiping, LEI Yanxiong, *et al.* Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(03):177-187.
- [10] 高晓芝,王磊,田晋,等.基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略[J].储能科学与技术,2022,11(01):147-155.
- GAO Xiaozhi, WANG Lei, TIAN Jin, *et al.* Research on hybrid energy storage power distribution strategy based on parameter optimization variational mode decomposition[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(01): 147-155.
- [11] 李亚楠,王倩,宋文峰,等.混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解-模糊控制策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(07):58-65.
- LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, *et al.* Variational mode decomposition and fuzzy control

strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(07): 58-65.

[12] KOLLIMALLA SK, MISHRA MK, NARASAMMA NL. Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5(4): 1137-1144.

[13] 李艳波,杨凯,陈俊硕,等.一种适用于风储微电网的混合储能系统的功率分配策略[J/OL]. *电测与仪表*:1-10[2023-05-09]. <http://h-p.kns.cnki.net.shiep.vpn358.com/kcms/detail/23.1202.th.20220920.1342.002.html>.

LI Yanbo, YANG Kai, CHEN Junshuo, YAO Bobin, *et al.* Power distribution strategy for a hybrid energy storage system suitable for Wind-Storage microgrid[J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation*: 1-10[2023-05-09]. <http://h-p.kns.cnki.net.shiep.vpn358.com/kcms/detail/23.1202.th.20220920.1342.002.html>.

[14] 陈景文,周婧,张文倩.基于小波包-模糊算法的混合储能功率分配策略[J]. *智慧电力*, 2023, 51(01): 61-68.

CHEN Jingwen, ZHOU Jing, ZHANG Wenqian. Hybrid Energy Storage Power Allocation Strategy Based on Wavelet Packet-Fuzzy Algorithm[J]. *Smart Power*, 2023, 51(01): 61-68.

[15] DRAGOMIRETSKIY K, DOMINIQUE Z. Variational Mode Decomposition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531-544.

[16] 杜佳耘,雷勇,李永凯,等.基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略[J]. *现代电力*, 2021, 38(01): 51-59.

DU Jiayun, LEI Yong, LI Yongkai, LIU Hui. Hybrid Energy Storage Strategy Based on Parameter Optimized Variational Mode Decomposition[J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(01): 51-59.

[17] 刘仲民,齐国愿,高敬更,等.混合储能系统平抑风光发电功率波动策略[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(11): 64-67.

LIU Zhongmin, QI Guoyuan, GAO Jinggeng, *et al.* Strategy of smoothing Wind-PV power generation

power fluctuation in hybrid energy storage system[J]. *Power Electronics*, 2021, 55(11): 64-67.

[18] 张晓宇,张建成,王宁,等.基于变分模态分解的混合储能系统协调控制[J]. *中国电力*, 2018, 51(09): 165-173.

ZHANG Xiaoyu, ZHANG Jiancheng, WANG Ning, *et al.* Coordinated Control of Hybrid Energy Storage System Based on Variational Mode Decomposition[J]. *Electric Power*, 2018, 51(09): 165-173.

[19] YA Gangzhang, GUI Fangpan, ING Chen, *et al.* Short-term wind speed prediction model based on GA-ANN improved by VMD[J]. *Renewable Energy*, 2020, 156: 1373-1388.

[20] 李泓青,周建萍,茅大钧等.混合储能系统二次功率分配及交互控制策略在直流微网中的应用[J]. *电力建设*, 2019, 40(05): 13-19.

LI Hongqing, ZHOU Jianping, MAO Dajun, *et al.* Secondary Assignment and Interactive Control Strategy of Hybrid Energy Storage Applied in DC Microgrid[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(05): 13-19.

[21] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.风电场接入电力系统技术规定 第1部分:陆上风电:GB/T 19963.1-2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.

[22] DEGHANI M, HUBALOVSKY S, TROJOVSKY P. Northern Goshawk Optimization: a new Swarm-Based algorithm for solving optimization problems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 162059-16208.

## 作者简介:

王海燕(1976-),女,硕士,副教授,从事嵌入式系统及微电网电站自动化研究, E-mail: wanghaiyan@shiep.edu.cn;

钱林宇(1996-),男,通信作者,硕士研究生,从事微电网混合储能研究, E-mail: 1223100435@qq.com。

## 基金项目及重大科研攻关项目

上海市电站自动化技术重点实验室开放课题(13DZ2273800)。

This work is supported by Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology (No. 13DZ2273800).