

基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略

杜佳耘¹, 雷勇¹, 李永凯², 刘晖¹

(1. 四川大学电气工程学院, 四川省成都市 610065; 2. 国网山东省电力公司菏泽供电公司, 山东省菏泽市 274000)

Hybrid Energy Storage Strategy Based on Parameter Optimized Variational Mode Decomposition

DU Jiayun¹, LEI Yong¹, LI Yongkai², LIU Hui¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Heze Power Supply Company, Heze 274000, Shandong Province, China)

摘要: 为平滑风电输出功率, 通常将功率型储能元件和能量型储能元件结合成混合储能系统与风电系统相连。为了提高混合储能系统的灵活性和经济性, 对一种基于参数优化变分模态分解 (Variational Mode Decomposition, VMD) 的混合储能系统控制策略进行了研究。采用粒子群算法确定 VMD 算法中 K 值 (分解模态数) 和 α 值 (二次惩罚因子) 的最优组合, 预设 K 值和 α 值将不平衡功率信号经 VMD 分解后在蓄电池和超级电容之间进行合理分配, 最后采用模糊控制对混合储能系统的荷电状态进行优化。仿真结果表明, 所提方法既能实现储能元件间合理的功率分配, 有效平抑风电波动, 又能使荷电状态稳定在一定区间, 实现混合储能系统长期安全运行。

关键词: 变分模态分解; 混合储能; 粒子群算法; 模糊控制; 荷电状态

Abstract: To smooth the output of wind power generation the power-type energy storage elements and energy-type energy storage elements are usually combined into a hybrid energy storage system (HESS) and connected to the wind power system. To improve both flexibility and economy of HESS, the control strategy of HESS based on parameter optimized variational mode decomposition (VMD) was researched. Firstly, the particle swarm optimization (PSO) algorithm was utilized to determine the optimal combination of the values of decomposition mode number K and the secondary penalty factor α in the VMD algorithm. Secondly, the values of K and α were preset to reasonably distribute the unbalanced power signal between battery and super-capacitor by VMD. Finally, the fuzzy control was adopted to optimize the state of charge (SOC) of the hybrid energy storage system. Simulation results show that by use of the proposed control strategy the reasonable power distribution between energy storage elements can be realized, the fluctuation of wind power output can be effectively suppressed and

the SOC of the hybrid energy storage system can be stabilized in a certain interval to make the long-term secure operation of the hybrid energy storage system come true.

Keywords: variational modal decomposition; hybrid energy storage; particle swarm optimization; fuzzy control; state of charge

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0193

0 引言

风能作为一种可随用随取的绿色可再生能源正得到广泛应用, 但风力发电极易受天气和地理位置影响, 具有很强的随机性和波动性, 在风电场配置储能系统有利于电网稳定安全运行。由于功率型储能元件和能量型储能元件在使用特性上能够互补, 因此采用混合储能系统相互配合的方法, 能弥补单一储能技术的不足, 从而延长储能元件的寿命, 提高电力系统运行经济性。

为提高混合储能系统的经济性和快速响应能力, 早期采用低通滤波 (Low pass filtering, LPF) 对能量型储能元件和功率型储能元件进行功率分配^[1]。随后还出现了变时间常数的低通滤波算法^[2]、小波包分解^[3]和经验模态分解 (Empirical mode decomposition, EMD)^[4-6]等。文献^[3]利用小波包分解将风电功率信号分成不同频段, 蓄电池可得到更平滑的功率指令, 延长储能装置寿命, 但并未考虑优化荷电状态 (state of charge, SOC), 且该方法不能完全处理非平稳信号; 文献^[4-6]采用 EMD 将风电输出功率经过滤波后低频分量实现并网、次低频和中高频分量由蓄电池和超级

电容吸收平滑,但EMD算法存在模态混叠和端点效应的问题。为改善储能元件过充过放行为,通常将经初次功率分配所得的功率指令进行二次修正;文献[7]引入五输入三输出的模糊控制器改善SOC,但未对光伏发电提出功率分配策略;文献[8-10]分别提出相应的能量管理策略,将SOC划分为多个区域,使得储能系统充放电模式过多,可能会造成控制器误动作,影响功率平抑效果和储能元件寿命。2014年由Konstantin等提出变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)算法[11],该算法通过多次迭代寻优,确定各分量的中心频率及带宽,最后获取分解分量,实现信号的准确分离,运算效率更高。VMD算法早期用于轴承振动信号分析[12],在电力系统中最开始用于变压器放电信号的提取[13]、电能质量检测[14]、风速预测[15]和风机故障诊断[16]等。

综上,本文在风储并网的典型结构下,对风电的功率分配方法进行研究。相关研究表明VMD算法中 K 和 α 的取值,影响信号重构结果。因此采用粒子群算法优化VMD中的 K 和 α 值。获得最优 $[K, \alpha]$ 后,对风电功率进行初始功率分配,考虑不同储能装置的能量特性,充分发挥相应优势,完成初始功率分配。为验证VMD算法的优越性,将VMD与LPF、EMD等算法作比较。最后,考虑将蓄电池和超级电容的SOC稳定在一定区间,采用双输入单输出的模糊控制器对储能装置的初始功率二次修正。

1 参数优化的变分模态分解

1.1 变分模态分解

变分模态分解是一种通过寻找各种模态函数及其中心频率的集合从而分析信号的新型方法。预设模态分解数 K 和二次惩罚因子 α 将一个实值输入信号 f 分解为 K 个具有特殊稀疏性质的离散子信号(也称子模态函数IMF) $u_k(t)$,每个IMF都可定义为调频-调幅信号如式(1),分解信号的同时再输入信号。

$$u_k(t) = A_k(t) \cos[\varphi_k(t)] \quad (1)$$

式中:由于相位函数 $\varphi_k(t)$ 为非递减函数,因此 $w_k(t) = d\varphi_k(t)/dt \geq 0$ 。瞬时幅值 $A_k(t) \geq 0$,且频率 $w_k(t)$ 较相位 $\varphi_k(t)$ 变化缓慢。

VMD可分为构造变分问题和求解变分问题。

构造变分问题:对于每个模态函数 $u_k(t)$,采用希尔伯特变换(Hilbert transform)计算相关信号得到单侧频谱。为了让各模态函数的频谱都能调制到各自相对应的中心频率上,可给每个经过希尔伯特变换的IMF加上修正系数 $e^{-jw_k t}$,得到对应的解调信号。通过计算对应的解调信号梯度平方 L^2 范数,求得各个模态函数的带宽,构建出约束性变分问题:

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

式中: $*$ 是卷积符号; $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ 和 $\{w_k\} = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ 分别是所有模态函数及中心频率的简写。

求解变分问题:同时使用二次惩罚项 α 和拉格朗日乘数 λ 将约束性问题转化为非约束性问题,构造出的增广拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{w_k\}, \lambda) = & \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \\ & + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

采用交替方向乘法,在迭代过程中不断更新 u_k^{n+1} , w_k^{n+1} , λ_k^{n+1} 找到(2)式的“鞍点”。

$$\begin{aligned} u_k^{n+1} = & \arg \min_{u_k \in X} \left\{ \alpha \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \right. \\ & \left. + \left\| f(t) - \sum_i u_i(t) + \frac{\lambda(t)}{2} \right\|_2^2 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)进行Parseval/Plancherel变换到频域:

$$\begin{aligned} \hat{u}_k^{n+1} = & \arg \min_{u_k, w_k \in X} \left\{ \alpha \left\| jw \left[(1 + \operatorname{sgn}(w + w_k)) \hat{u}_k(w + w_k) \right] \right\|_2^2 \right. \\ & \left. + \left\| \hat{f}(w) - \sum_i \hat{u}_i(w) + \frac{\hat{\lambda}(w)}{2} \right\|_2^2 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)第一项中的 w 用 $w - w_k$ 来代替,利用重建实信号的厄米对称性,将(5)式改写为非负频率上的半空间积分,最终求得的模态函数和中心频率为:

$$\hat{u}_k^{n+1}(w) = \frac{\hat{f}(w) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(w) + \frac{\hat{\lambda}(w)}{2}}{1 + 2\alpha(w - w_k)^2} \quad (6)$$

$$w_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty w |\hat{u}_k(w)|^2 dw}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(w)|^2 dw} \quad (7)$$

式中： $\hat{u}_k^{n+1}(w)$ 是当前剩余量 $\hat{f}(w) - \sum_i^j u_i(w)$ 的维纳滤波 w_k^{n+1} 是模态函数的中心频率，对 $\{\hat{u}_k^{n+1}(w)\}$ 进行傅里叶逆变换，取实部能得相应的时域分量。

1.2 粒子群算法优化 VMD 参数

利用 VMD 对信号进行分解时需预设分解模态数 K 和二次惩罚因子 α 。而研究表明 K 和 α 的取值不当会出现经过 VMD 分解后重构的信号与原始信号出现偏差的问题，如图 1 所示。该偏差将会影响储能系统对波动功率的平抑效果。因此选择合适的 K 值和 α 值是正确采用 VMD 算法分解风电信号的关键。为解决这一问题，本文采用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 对参数进行优化。PSO 中主要的两个公式如下：

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(x_{ij}^p(t) - x_{ij}(t)) + c_2r_2(x_{ij}^g(t) - x_{ij}(t)) \quad (8)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (9)$$

式中： w 为惯性因子； c_1 、 c_2 为加速因子； r_1 、 r_2 为区间[0,1]的随机数； i 表示第 i 个粒子的数量； j 表示第 j 维； t 代表迭代次数；粒子群的个体表示为 $x_{ij}=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ ，其中 $i=(1,2, \dots, m)$ 。粒子更新速度为 $v_{ij}=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 。PSO 具体参数设置如表 1^[7]， $MaxDT$ 为最大迭代次数； Dim 为搜索空间维数。PSO 优化 VMD 参数步骤如图 2。

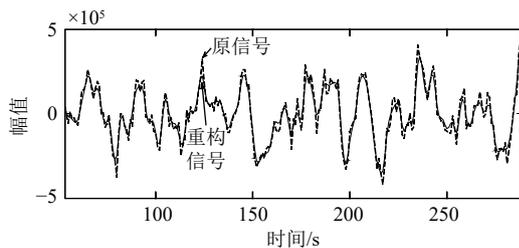


图 1 $K=5$, $\alpha=2000$ 时原信号与重构信号对比

Fig. 1 Contrasting original signal with reconstructed signal when $K=5$ and $\alpha=2000$

表 1 粒子群算法初始化参数

Table 1 The parameter initialization of PSO algorithm

c_1	c_2	w	$MaxDT$	Dim
2	2	0.9	500	2

采用 PSO 优化参数首先要确定适应度函数。皮尔逊相关系数法是描述两信号相关程度的方法，所得结果在区间[-1,1]，相关系数越大，两信号

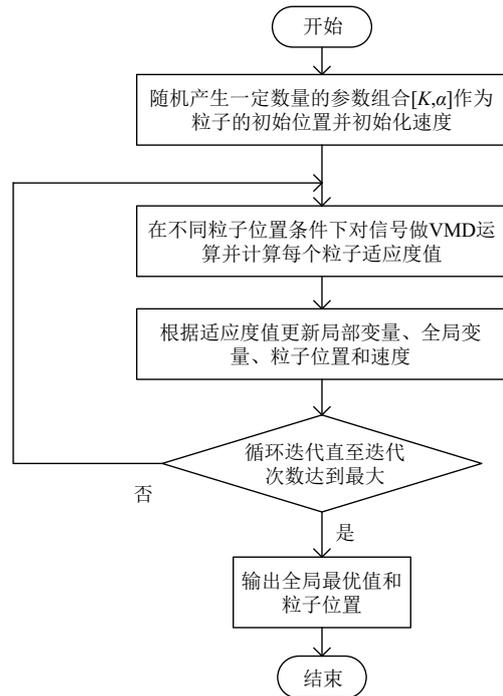


图 2 粒子群优化 VMD 参数流程

Fig. 2 The process of VMD parameters optimized by PSO

相关性越强，反之相关性越弱：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

式中： x_i 为原信号； y_i 为重构后的信号。其中， K 值应为整数， α 的取值范围应在 [2000,4000]^[7]。采用 PSO 对 VMD 的 K 值和 α 值优化所得结果如图 3。

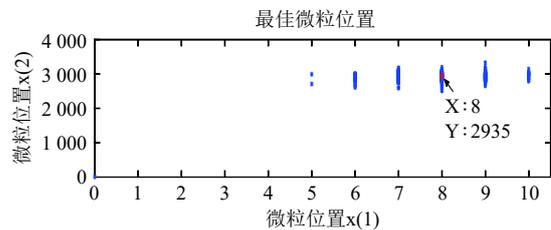


图 3 粒子群算法优化 VMD 参数

Fig. 3 VMD parameters optimized by PSO algorithm

2 混合储能系统功率分配方法

2.1 混合储能系统初级功率分配方法

为平滑风电功率，实现系统持续稳定提供电能，需加设混合储能系统。由风电、混合储能和负载等构成的并网型微电网结构如图 4 所示。蓄

电池充电时间长,可储容量大,但循环寿命短。超级电容可快速充放电,循环寿命长,但可储能量低。将两者进行组合取长补短,可大幅提高储能系统性能^[18]。混合储能系统需要平抑风电的功率为:

$$P_{\text{HESS}} = P_{\text{wind}} - P_{\text{grid}} \quad (11)$$

式中: P_{wind} 为风电输出功率; P_{grid} 为并网功率。设定当 $P_{\text{HESS}} > 0$ 时,混合储能系统充电;当 $P_{\text{HESS}} < 0$ 时,混合储能系统放电。

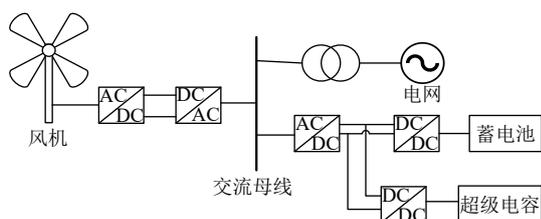


图4 风力发电微电网典型结构

Fig. 4 Typical structure of wind power microgrid

在VMD中预设优化后的 K 和 α , 可得到图5、图6和表2所示的结果。重构后的功率信号如式(12)。超级电容器的一次充放电循环时间一般小于50 min^[19], 因此超级电容的充放电频率应大于 3×10^{-4} Hz。由图5、表2可知, 虽然IMF2的中心频率最大值小于 3×10^{-4} Hz, 但IMF2的中心频率中的某些值已经超过 3×10^{-4} Hz。因此选择IMF1作为蓄电池需要平抑的分量, 剩下分配给超级电容, 即 $m=1$ 。

$$\begin{cases} P_{\text{bat}} = \sum_{k=1}^m u_k(t) \\ P_{\text{sc}} = \sum_{k=m+1}^K u_k(t) \end{cases} \quad (12)$$

为验证VMD算法的优势, 本文采用LPF和EMD对不平衡功率信号进行分解, 并对分解信号进行傅里叶变换, 得到相应频谱图如图7、图8。图7为不平衡功率经过LPF所得的超级电容功率指令频谱图, 从图中可以看出超级电容功率指令存在于全频段, 这说明LPF截止频率取值不当不仅会存在时滞现象, 还会造成超级电容长时间过充过放, 严重降低超级电容使用效率。图8为不平衡功率经EMD分解后各IMF的频谱图。就本文的不平衡功率而言, 经过EMD分解得到7个IMF, 这是因为EMD无法预设 K 值, IMF个数完全依赖于信号本身。由图6与图8对比可见,

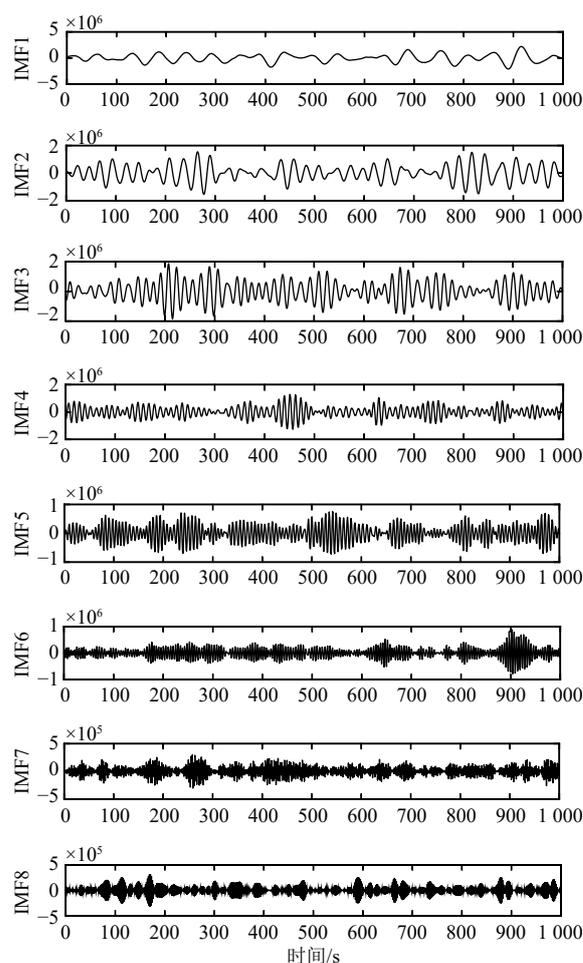


图5 VMD分解得到的IMF

Fig. 5 IMF obtained from VMD decomposition

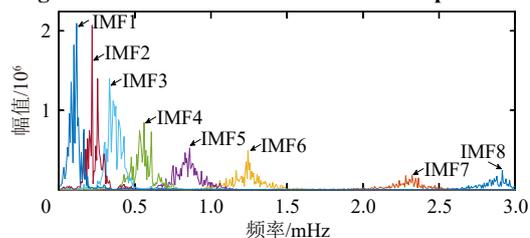


图6 VMD算法各IMF频谱

Fig. 6 IMF Spectrograms of VMD algorithm

表2 各IMF中心频率最大值

Table 2 Maximum values of IMF center frequencies

模态函数	频率/Hz	模态函数	频率/Hz
IMF1	0.12×10^{-3}	IMF5	0.86×10^{-3}
IMF2	0.24×10^{-3}	IMF6	1.24×10^{-3}
IMF3	0.33×10^{-3}	IMF7	2.32×10^{-3}
IMF4	0.56×10^{-3}	IMF8	2.92×10^{-3}

EMD算法存在模态混叠现象。且图8中的各模态函数有非常明显的端点效应。VMD算法与该两

种算法相比较而言，能够有效将不同频段的功率信号进行分解，有效避免模态混叠和端点效应现象，降低经功率分配后所得的初级功率指令相邻频段对储能装置充放电状态及寿命的影响。

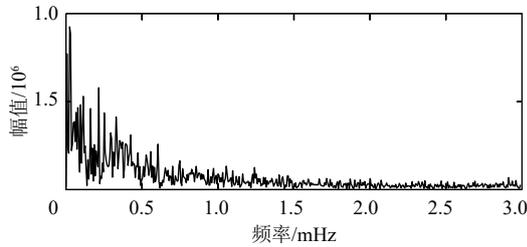


图 7 低通滤波后的超级电容频谱

Fig. 7 Spectrogram of super-capacitor power located behind low-pass filtering

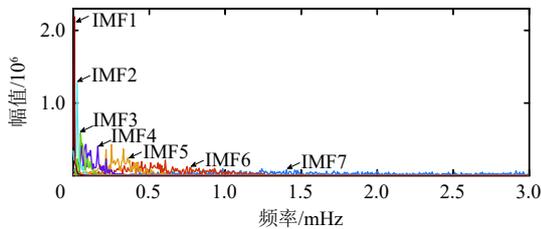


图 8 EMD 算法各 IMF 频谱

Fig. 8 IMD spectrograms of EMD algorithm

2.2 混合储能系统功率二次分配

为避免储能装置出现过充过放现象，在获得初级功率指令之后，实时考虑超级电容和蓄电池的 SOC，采用模糊控制对超级电容和蓄电池初始功率进行二次修正。图 9 为系统模糊控制结构。在模糊控制策略中，修正后的功率为：

$$P'_{sc} = P_{sc} + \Delta P^*_{sc} \quad (13)$$

$$P'_{bat} = P_{bat} + \Delta P^*_{bat} \quad (14)$$

式中： P'_{sc} 和 P'_{bat} 为二次分配后的超级电容和蓄电池的功率指令； ΔP^*_{sc} 和 ΔP^*_{bat} 为相应调节功率。模糊控制的输入输出隶属度函数选用常用的三角形和梯形隶属函数，反模糊化则采用重心法。控制器选用双输入单输出类型的模糊控制器。超级电容和蓄电池的隶属函数相同，只是模糊论域的取值有变化。且蓄电池模糊控制器所需遵守的规则与超级电容相同，隶属度函数论域范围改变，超级电容和蓄电的模糊控制规则如表 3、表 4 所示。输入输出对应隶属函数如图 10 所示。以超级电容器为例：

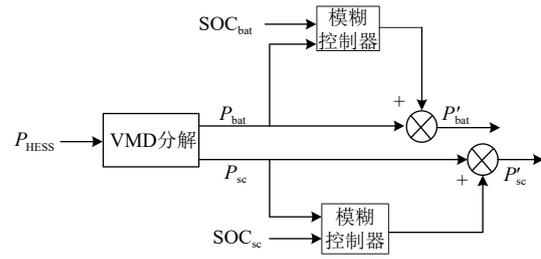


图 9 模糊控制结构

Fig. 9 The structure of fuzzy control

表 3 超级电容模糊控制规则

Table 3 Fuzzy control rule for super-capacitor

P_{sc}^*	SOC _{sc}						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
D	PB	PS	PS	ZO	ZO	ZO	ZO
C	ZO	ZO	ZO	ZO	NS	NS	NB

表 4 蓄电池模糊控制规则

Table 4 Fuzzy control rule for battery

P_{bat}^*	SOC _{bat}						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
D	PB	PB	PS	ZO	ZO	ZO	ZO
C	ZO	ZO	ZO	ZO	NS	NB	NB

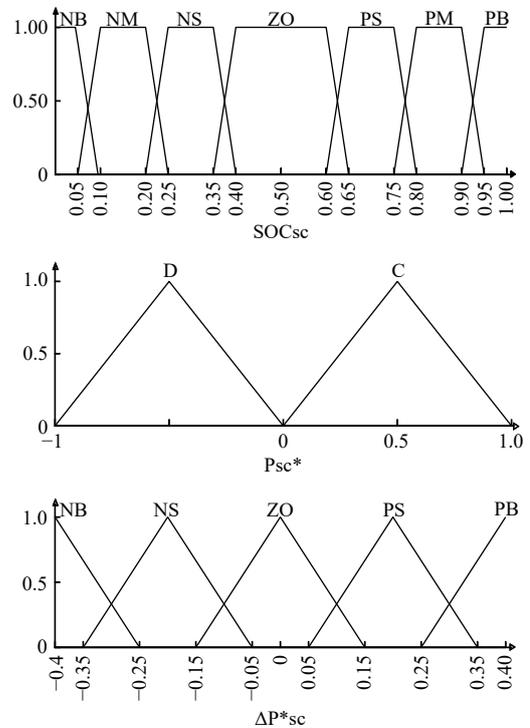


图 10 超级电容输入输出隶属函数

Fig. 10 Input-output membership function of super-capacitor

输入 1: SOC_{SC} , 模糊论域为 $[0,1]$, 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 表示超级电容器的 SOC {很低, 低, 较低, 适中, 较高, 高, 很高}。

输入 2: P_{sc}^* 为式 (13) 中 P_{sc} 归一化后的超级电容功率指令, 模糊论域为 $[-1,1]$, 模糊子集为 $\{D, C\}$, 分别表示超级电容放电和充电。

输出: 调节功率 ΔP_{sc}^* , 模糊论域为 $[-3 \text{ MW}, 3 \text{ MW}]$, 模糊子集为 $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$, 表示所需修正功率。在模糊控制器中, 选定 SOC_{SC} 和 P_{sc}^* 作为输入, 调节功率 ΔP_{sc}^* 为输出。当 SOC_{SC} 适中时, 超级电容按照初级功率指令进行充放电。当 SOC_{SC} 偏低时, 若此时超级电容为放电状态, 需要调整 ΔP_{sc}^* 让二次分配功率指令增大, 若为充电状态, 则不进行调整。当 SOC_{SC} 偏高时, 若此时超级电容为放电状态, 则不进行调整, 若为充电状态, 需要调整 ΔP_{sc}^* 让二次分配功率指令减小。下面选取一条模糊控制规则进行解释:

If SOC_{sc} is NB and P_{sc}^* is D, then ΔP_{sc}^* is PB.

该规则表示当 SOC_{SC} 很低 (NB) 且初级功率指令 P_{sc}^* 为放电 (D) 时, ΔP_{sc}^* 应当取得很大 (PB) 来增大功率指令 ($P_{sc} < 0$ 时, 超级电容放电)。从而优化荷电状态, 提高超级电容使用效率。

3 算例仿真

本文算例仿真采用 MATLAB/Simulink 软件进行编写程序和搭建模型。采集某地额定功率 30 MW 的风电场 (采样间隔 1 s), 总时间为 1000 s 的功率数据作为风电功率曲线。

根据我国风电并网标准: 30 MW 风电场限制 1 min 间隔最大功率波动不超过 3 MW, 10 min 间隔最大功率波动不超过 10 MW。因此本文首先风电功率进行滤波得到风电并网功率^[20]。所得风电功率和并网功率如图 11 所示。相关参数如表 5

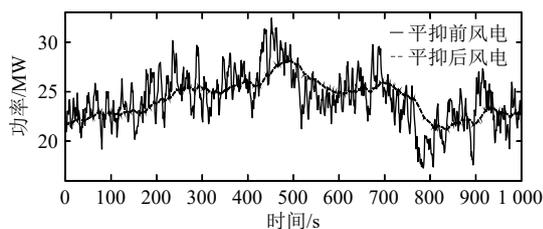


图 11 风电初始功率与并网功率

Fig. 11 Initial and grid-connected wind power

所示^[21-23]。仿真数据表明, 经过平抑后的风电功率 1 min 和 10 min 内波动最大值降低到 2.04 MW 和 9.96 MW, 满足风电并网标准。图 12 为不平衡功率即混合储能系统所需平抑功率。

图 13-14 中, 实线结果为不平衡功率经 VMD 分解后的功率信号, 虚线结果为经 LPF (由 2.1 节设定截止频率为 $3 \times 10^{-4} \text{ Hz}$) 后的功率信号。本文的 2.1 小节中已通过观察频谱图的方式验证 VMD 算法较 LPF 和 EMD 算法的优势。图 13-14 将分配功率也进行对比。图 13 中经 LPF 所得的功率指令表明蓄电池基本处于停运状态。图 14 中, LPF

表 5 相关参数

Table 5 Related parameters

参数	数值
风电功率	
平均值/MW	29.3
1 min波动最大值/MW	9.88
10 min波动最大值/MW	14.16
SOC范围	0.2~0.8
蓄电池	
额定电压/V	240
额定容量/MW·h	2.5
初始SOC	0.5
SOC范围	0.1~0.9
超级电容	
额定电压/V	260
额定容量/MW·h	0.5
初始SOC	0.45

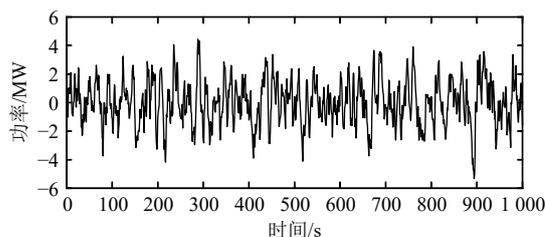


图 12 混合储能系统需要平抑功率

Fig. 12 The power to suppress the wind power fluctuation required by hybrid energy storage system

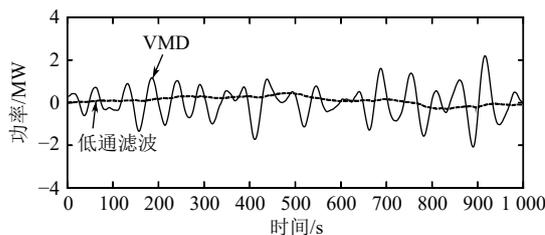


图 13 蓄电池初始功率指令

Fig. 13 Battery initial power instruction

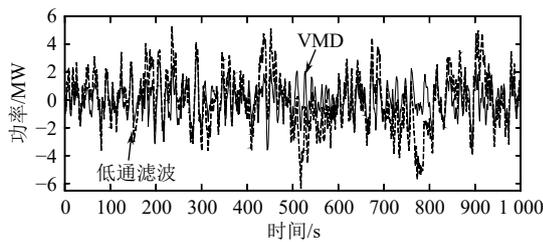


图 14 超级电容初始功率指令

Fig. 14 Super-capacitor initial power instruction

后所得的超级电容初始功率指令值远远超出经 VMD 分解的功率指令值。这将加大在功率二次修正阶段优化储能装置 SOC 的难度，造成储能装置工作状态分配不均，甚至会损坏储能系统，引起电网波动。

为了保证储能元件的循环使用寿命将 SOC 保持在一定范围内，可采用模糊控制对储能元件进行二次功率分配，经 VMD 初始功率分配和模糊控制二次优化后的储能元件的 SOC 如图 15-16 所示。表 6 为模糊控制前后蓄电池与超级电容荷电状态对比。结合图 15、图 16 和表 6 可以看出，蓄电池和超级电容的 SOC 变化范围分别从 80% 和 90% 降低到 52% 和 62%。这表明在采用模糊控制之后，储能元件的荷电状态得到提升，并使其保持在最优区间范围内，表明该方法能够为后续储能元件充放电预留更多的能量裕度。

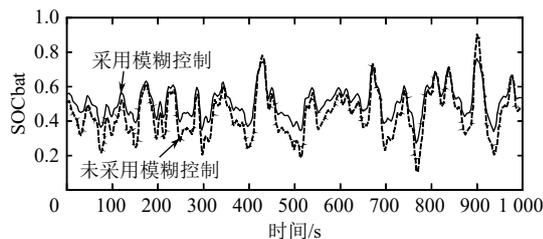


图 15 蓄电池荷电状态

Fig. 15 Battery SOC

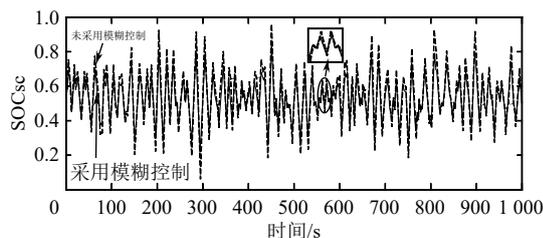


图 16 超级电容荷电状态

Fig. 16 Super-capacitor SOC

表 6 模糊控制优化荷电状态前后对比
Table 6 Comparison of SOC before and after fuzzy control optimization

	模糊控制前	模糊控制后
SOC _{bat} 最大值	0.91	0.75
SOC _{bat} 最小值	0.11	0.27
SOC _{sc} 最大值	0.96	0.84
SOC _{sc} 最小值	0.06	0.24

4 结论

为解决混合储能系统能够经济有效地平抑风电波动功率的问题，本文提出采用 VMD 算法对风电不平衡功率进行功率分配得出以下结论：

1) 采用 PSO 对 VMD 算法中 $[K, \alpha]$ 值进行寻优，能够实现信号的无误差重构。VMD 算法与 LPF 和 EMD 算法经过对比后，VMD 算法能够有效避免模态混叠和端点效应，确保储能装置间工作状态的合理分配，延长储能装置的循环寿命，提高储能装置平滑风电的灵活性，呈现一定的技术优势。采用模糊控制优化储能元件 SOC，系统地提高混合储能系统运行的可靠性和安全性，同时也能按照我国风电并网标准并网。

2) 通过在 MATLAB/Simulink 软件平台上编程和搭建模型仿真，对比验证了所提控制方法的有效性。

后续工作将进一步研究储能装置满足经济运行指标的容量配置问题。

参考文献

- [1] PAATERO J V, LUND P D. Effect of energy storage on variations in wind power [J]. *Wind Energy*, 2005, 8(4): 421–441.
- [2] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(7): 1–6, 184.
Ding Ming, Lin Gende, Chen Zinian, *et al.* A control strategy suitable for hybrid energy storage systems [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2012, 32(7): 1–6, 184(in Chinese).
- [3] 韩晓娟, 陈跃燕, 张浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(19): 8–13.
Han Xiaojuan, Chen Yueyan, Zhang Hao, *et al.* Application of hybrid energy storage technology based on

- wavelet packet decomposition to suppress wind farm power fluctuations [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2013, 33(19): 8 – 13(in Chinese).
- [4] 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.
Han Xiaojuan, TianChunguang, ChengCheng, *et al.* Power distribution method of hybrid energy storage system based on empirical mode decomposition [J]. *Journal of Solar Energy*, 2014, 35(10): 1889 – 1896(in Chinese).
- [5] 杨锡运, 曹超, 李相俊, 等. 基于模糊经验模态分解的电池储能系统平滑风电出力控制策略 [J]. *电力建设*, 2016, 37(8): 134 – 140.
Yang Xiyun, Cao Chao, Li Xiangjun, *et al.* Control strategy for smooth wind power output of battery energy storage system based on fuzzy empirical mode decomposition [J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(8): 134 – 140(in Chinese).
- [6] 雷勇, 林晓冬. 超导磁储能-蓄电池混合储能系统在平抑风电场功率波动中的应用 [J]. *高电压技术*, 2019, 45(03): 983 – 992.
Lei Yong, LinXiaodong. Application of superconducting magnetic energy storage-battery hybrid energy storage system in suppressing power fluctuation of wind farm [J]. *High Voltage Technology*, 2019, 45(03): 983 – 992(in Chinese).
- [7] D. Gamage, X. Zhang and A. Ukil, "Fuzzy Logic Controller for Efficient Energy Management of a PV System with HESS," *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, 2018, pp. 3556-3561.
- [8] 李培强, 李文英, 唐捷, 等. 基于SOC优化的混合储能平抑风电波动方法 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(03): 20 – 27.
Li Peiqiang, LiWenyong, TangJie, *et al.* Hybrid energy storage based on SOC optimization to suppress wind power fluctuations [J]. *Journal of Power Systems and Automation*, 2017, 29(03): 20 – 27(in Chinese).
- [9] 邵丽华, 章竹耀, 张春龙, 等. 储能电池荷电状态与平抑风电出力波动协调运行策略 [J]. *电力建设*, 2017, 38(1): 84 – 88.
Shao Lihua, Zhang Zhuyao, Zhang Chunlong, *et al.* Coordinated operation strategy of energy storage battery charge state and stabilization of wind power output fluctuations [J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(1): 84 – 88(in Chinese).
- [10] 李凯, 马倩, 徐红兵, 等. 储能系统的荷电状态管理策略及其影响评价 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(8): 27 – 32.
Li Kai, MaQian, XuHongbing, *et al.* State-of-charge management strategies and impact evaluation of energy storage systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(8): 27 – 32(in Chinese).
- [11] DRAGOMIRETSKIY K, ZOISSOD. Variational mode decomposition [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531 – 544.
- [12] 刘嘉敏, 彭玲, 刘军委, 等. 遗传算法VMD参数优化与小波阈值轴承振动信号去噪分析 [J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(11): 1695 – 1700.
Liu Jiamin, Peng Ling, Liu Junwei, *et al.* Genetic algorithm VMD parameter optimization and wavelet threshold bearing vibration signal denoising analysis [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2017, 36(11): 1695 – 1700(in Chinese).
- [13] 朱永利, 贾亚飞, 王刘旺, 等. 基于改进变分模态分解和Hilbert变换的变压器局部放电信号特征提取及分类 [J]. *电工技术学报*, 2017, 32(9): 221 – 235.
Zhu Yongli, JiaYafei, Wang Liuwang, *et al.* Feature extraction and classification of transformer partial discharge signals based on improved variational mode decomposition and hilbert transform [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2017, 32(9): 221 – 235(in Chinese).
- [14] P. D. Achlerkar, S. R.Samantaray and M. SabarimalaiManikandan, "Variational Mode Decomposition and Decision Tree Based Detection and Classification of Power Quality Disturbances in Grid-Connected Distributed Generation System," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3122-3132, July 2018.
- [15] Yagang Zhang, Yuan Zhao, Chunhui Kong, *et al.* A new prediction method based on VMD-PRBF-ARMA-E model considering wind speed characteristic [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020: 203.
- [16] He Ren, WenyiLiu, MengchenShan, *et al.* A new wind turbine health condition monitoring method based on VMD-MPE and feature-based transfer learning [J]. *Measurement*, 2019: 148.
- [17] 张丽平. 粒子群优化算法的理论及实践 [D]. 浙江大学, 2005.
Zhang Liping. Theory and practice of particle swarm optimization algorithm [D]. Zhejiang University, 2005(inChinese).
- [18] Z. Wang, *et al.* "Research on the active power coordina-

- tion control system for wind/photovoltaic/energy storage," 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, 2017, pp. 1-5
- [19] BARTON J P, INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, 19(2): 441 - 448.
- [20] 李霄, 胡长生, 刘昌金, 等. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制 [J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(09): 86 - 90.
- Li Xiao, Hu Changsheng, Liu Changjin, *et al.* Modeling and control of wind farm power regulation system based on supercapacitor energy storage [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(09): 86 - 90(in Chinese).
- [21] Kashem MA, Ledwich G. Energy requirement for distributed energy resources with battery energy storage for voltage support in three-phase distribution lines [J]. *ElectrPowSyst Res*, 2007, 77: 10 - 23.
- [22] 杨水丽, 惠东, 李建林, 等. 适用于风电场的最佳电池容量选取的方法 [J]. *电力建设*, 2010, 31(9): 1 - 4.
- Yang Shuili, Hui Dong, Li Jianlin, *et al.* The method of selecting the best battery capacity for wind farms [J]. *Electric Power Construction*, 2010, 31(9): 1 - 4(in Chinese).
- [23] XIE Q, WANG Y, KIM Y, *et al.* Charge allocation in hybrid electrical energy storage systems [J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2013, 32(7): 1003 - 1016.

收稿日期：2020-05-06

作者简介：

杜佳耘 (1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为混合储能功率分配研究, E-mail: 179201098@qq.com;

雷勇 (1966), 男, 通信作者, 博士, 从事现代电子技术、超导应用技术等方面的工作, E-mail: 420974017@qq.com;

李永凯 (1991), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向为储能变流器控制策略的研究, Email: 307961039@qq.com;

刘晖 (1994), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为混合储能系统、电力电子技术和超导应用等, E-mail: 837781416@qq.com。