

DOI: 10.7667/PSPC180478

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

李亚楠, 王倩, 宋文峰, 王昕钰

(西南交通大学, 四川 成都 600031)

摘要: 在风电机组并网处安装储能装置可以有效平滑功率波动, 提出了变分模态分解-模糊控制策略平滑风电功率波动。首先通过滑动平均滤波获得储能系统参考功率, 采用变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)将储能系统参考功率分解后, 分别将高频信号和低频信号分配给超级电容器和锂电池。结合超级电容器和锂电池当前荷电状态与其参考值偏差, 经模糊控制规则修正储能系统设备的充放电功率。最后利用 Matlab/Simulink 仿真, 结果表明该控制策略不仅能够满足风电场最大输出功率变化率限制要求, 还可以保持荷电状态(SOC)维持在合理范围, 避免过充和过放的发生。

关键词: 风电场; 混合储能系统; 变分模态分解; 模糊控制; 荷电状态

Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs

LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, WANG Xinyu
(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Equipping suitable energy storage devices in wind farm can smooth the output power fluctuation. A novel control strategy based on the variational mode decomposition and fuzzy controller is put forward in this paper. First, VMD is used to decompose the HESS reference power which is derived by moving average and then the high and low frequency components are distributed to super capacitor and lithium battery, respectively. Taking deviation between the current State Of Charge (SOC) of capacitor/ lithium battery and its reference value as constraints, the power of hybrid energy storage devices could be adaptively adjusted by fuzzy control method. Finally, the results of simulation from Matlab/Simulink show that the control strategy in this paper not only can meet the maximum output rate requirement of wind farms but also can remain the SOC in a reasonable range, which could avoid occurrence of over charge or over discharge of energy storage system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1134104).

Key words: wind farm; hybrid energy storage system; variational mode decomposition; fuzzy control; state of charge (SOC)

0 引言

风力发电作为目前的一种广泛利用的可再生能源, 与传统能源不同, 风能受自然条件变化影响剧烈, 风速的随机性所带来的波动性和间歇性在超出电网调节能力范围时, 会降低电力系统的稳定性, 影响电能质量, 这在很大程度上制约了风电的发展, 因此解决风电并网波动具有很重要的现实意义^[1-3]。

储能系统能够实现能量的双向流动, 并且具有

快速动态响应, 高可靠性等特点, 越来越受到关注。超级电容器具有功率密度大、循环次数高的特点, 常用于平滑高频率、小幅度波动, 但是单位容量成本过高; 锂电池具有能量密度高、严格循环次数限制的特点, 常用于平滑低频率、大幅度波动, 最大程度延长其使用寿命^[4]。目前结合两种储能介质的物理特性提出了多种混合储能平滑控制策略^[5]。文献[6-7]提出了基于电池储能的 PCS 拓扑结构, 通过比较得出 DC/DC、DC/AC 结构对充放电管理更加可靠, 适用于新能源系统接入, 详细介绍了锂电池储能系统的控制流程以及仿真在电压跌落、离网运

行时(U 、 I 、 P 、 Q)各分量变化情况。文献[8]以 SOC、有功功率波动 P 作为输入量, 自适应地调整储能设备有功功率参考值, 但其控制对于超级电容器和蓄电池不具备同时性。文献[9]提出考虑用户侧的需求, 依据实时电价调整储能系统 SOC, 避免过充过放的问题。文献[10-12]提出了基于母线电压分级的下垂控制策略, 根据母线电压波动幅值和储能系统荷电状态确定充放电模式。文献[13-15]分别提出小波包分解与 SOC 控制、广义预测控制(GPC)、模型算法控制(MAC)相结合, 将实际风电输出功率与预测风电功率进行比较, 对预测量进行修正。文献[16]提出一种基于模糊算法控制的储能系统控制策略, 输入为 SOC 与参考量的差值和超级电容器组的充放电状态, 通过输出一阶低通滤波器时间常数 T 来动态调整充放电功率使其既满足风电场最大输出功率变化率限制要求又能使储能系统的荷电状态保持在限值范围内。文献[17]提出采用模糊变阶的经验模态分解平滑控制策略, 即将平滑后波动率和储能系统荷电状态作为输入, 滤波阶数 K 作为输出同单纯 SOC 变阶约束相比, 结果表现出明显的优势。

本文以双馈风力发电机和混合储能装置组成的风储联合系统为研究对象, 将风电输出功率滤波后, 高频和低频分量分配给超级电容器和锂电池, 通过实时检测混合储能系统荷电状态 SOC, 将其值和参考值作差得到的偏差量作为模糊控制器的输入, 通过制定的模糊规则对储能系统功率分配进行修正, 使其避免锂电池和超级电容器组成的混合储能系统过充过放, 延长使用寿命, 充分利用混合储能系统的物理特性, 保证在满足并网功率波动限制的同时使超级电容器和锂电池的荷电状态在合理范围内。

1 基于双馈发电机的风储联合发电系统

1.1 系统结构

图 1 是由双馈风力发电系统、超级电容器和锂电池组成的混合储能系统、能量转换系统(Power Conversion System, PCS)以及电网组成。双馈风力发电机由背靠背变流器同交流母线实现能量交换。混合储能系统经由 DC/DC、DC/AC 变换器组成的 PCS 实现锂电池和超级电容器侧直流到交流母线的交互^[18]。

图 1 中, P_w 为风电场输出功率, P_{out} 为期望并网功率, P_{hess} 为储能系统参考输出功率, 当风电输出功率大于期望并网功率时, $P_{hess}(t) > 0$, 多余的功率由混合储能系统充电吸收, 当风电输出功率小于

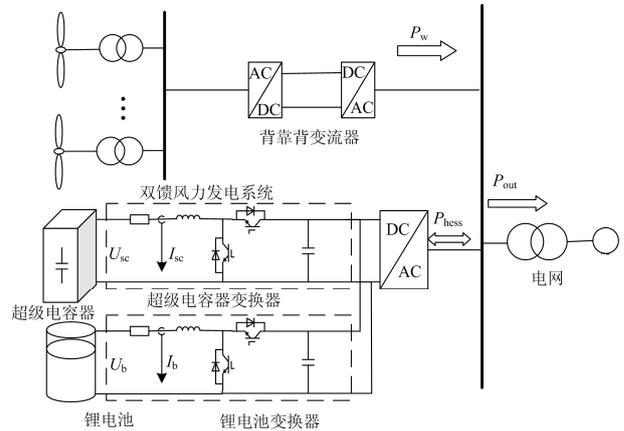


图 1 风储系统结构图

Fig. 1 Structure of wind-HESS power system

期望并网功率时, $P_{hess}(t) < 0$, 功率缺额由混合储能系统放电补充。

1.2 混合储能系统控制策略结构

控制系统结构如图 2 所示。首先, 将 t 时刻风电输出功率 $P_w(t)$ 经滑动平均滤波后的并网功率 $P_{out}(t)$ 输出电网, 混合储能系统参考功率 $P_{hess}(t)$ 通过 VMD 分解和 Hilbert 变换获得相应高频、低频分量, 进而确定超级电容器和锂电池的初始功率设定值 $P_{sc0}(t)$ 、 $P_{b0}(t)$, 由于在功率分配环节并没有考虑到储能系统的荷电状态, 然而过度充放会导致储能设备寿命缩短, 为了尽量保证储能设备的 SOC 在合理范围之内, 本文加入了 SOC 反馈模糊控制。超级电容器修正功率 $\Delta P_{sc}(t)$ 由超级电容器和锂电池荷电状态 SOC 与参考值偏差经模糊控制器得到, 将锂电池原始设定功率 $P_{b0}(t)$ 与修正功率 $\Delta P_{sc}(t)$ 作差, 经限幅控制器, 确保满足锂电池功率输出要求, 再将 $P_{b1}(t)$ 与 $P_{hess-ref}(t)$ 作差经限幅环节得到超级电容器输出功率 $P_{sc}(t)$, 同理可得锂电池输出功率 $P_{bat}(t)$ 。参考值 $I_{scref}(t)$ 、 $I_{bref}(t)$ 与反馈值 $I_{sc}(t)$ 、 $I_b(t)$ 比较后经过电流调节器得到占空比 d_{sc} 、 d_b , 分别控制 DC/DC 变流器, 实现锂电池和超级电容器合理充放电的目的。

1.3 混合储能系统功率分配方法

本文采用的混合储能系统功率分配方法是依据风电场最大输出功率变化率限制的要求, 利用滑动平均算法选取合适窗口长度, 获得的并网功率与原始风电输出功率做差后得到 HESS 参考功率信号。分析信号功率谱确定 VMD 分解模态数 K , 进一步对 HESS 参考功率信号进行分解, 得到若干模态分量; 然后对各模态分量进行 Hilbert 变换构造解析信号得到原信号的 Hilbert 时频谱, 最后计算各模态分量的边际谱, 确定分频点, 按照储能设备各自的物理、经济特性分配功率。

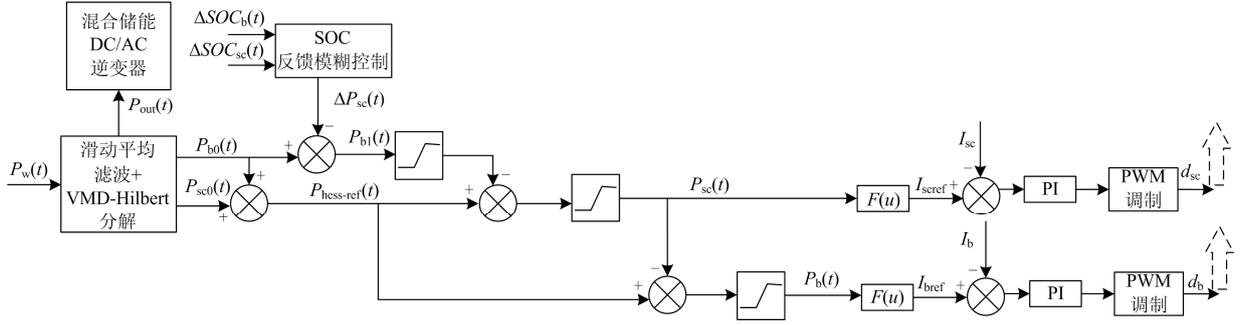


图2 控制系统结构图

Fig. 2 Structure of wind-HESS control system

1.3.1 变分模态分解

VMD 是将非平稳信号非递归变分模态分解的方法，它是由 Konstantin Dragomirskiy 在 2014 年提出的新型信号预处理方法，各模态同时提取，可将由多种频率组成的信号利用交替乘子方法优化成数个有限带宽的固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)，算法分解的本质是维纳滤波降噪，这些模态分量大部分都有其对应的中心频率^[19]。

假设原始信号 f 可以分解为 K 个有一定稀疏性的有限带宽固有模态函数分量 (IMF)，且各 IMF 都有一个中心脉动频率 ω_k ，由 VMD 建立的约束变分数学模型表达式为

$$\begin{cases} \min \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_k u_k = f \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\{u_k\} = \{u_1, \dots, u_k\}$ 表示相应分量集合； $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_k\}$ 表示中心频率集合； $\sigma(t)$ 为脉冲函数。

引入扩展拉格朗日乘子函数求解上述问题的全局最优解，即

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \{\lambda\}) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \quad (2)$$

$$\left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle$$

式中： α 为二次惩罚因子； λ 为 Lagrange 算子。

利用交替乘子算法 ADMM 求解式(2)，不断更新各模态分量 u_k 、中心频率 ω_k 和 Lagrange 算子 λ 求得扩展拉格朗日乘子函数最优解。而所有的分量可从频域中通过式(3)获得：

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \hat{\lambda}(\omega)/2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (3)$$

式中， ω 为频率，其中带角标的分别为其对应的傅

里叶变换。算法中根据各模态功率谱的重心更新中心频率，如式(4)所示。

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^{\infty} \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^{\infty} |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (4)$$

1.3.2 基于 VMD-Hilbert 的功率分配方法

在对 HESS 参考功率进行 VMD 分解前，首先根据双阈值筛选法^[20]确定分解模态数 K 并得到相应的固有模态分量 $u_k(t)$ ，对每个模态分量 $u_k(t)$ 进行 Hilbert 变换，得到瞬时幅值、频率相位的信息，最终根据所得瞬时频谱得到各模态分量的 Hilbert 谱^[21]为

$$H(u_k(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u_k(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

构造各模态分量的解析信号，即

$$z_k(t) = u_k(t) + jH(u_k(t)) = a_k(t)e^{j\phi_k(t)} \quad (6)$$

$$a_k(t) = \sqrt{u_k^2(t) + H^2(u_k(t))} \quad (7)$$

$$\phi_k(t) = \arctan \frac{H(u_k(t))}{u_k(t)} \quad (8)$$

$$\omega_k(t) = \frac{d\phi_k(t)}{dt} \quad (9)$$

式中： $a_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的瞬时幅值； $\phi_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的瞬时相位。 $a_k(t)$ 、 $\phi_k(t)$ 如式(7)、式(8)所示，各模态分量的瞬时频率为式(9)，最终得到极坐标形式的解析信号实部，构成 Hilbert 幅值谱，如式(10)所示。

$$H(\omega, t) = \text{Re} \left[\sum_{k=1}^K a_k(t) \exp(j\omega_k(t) dt) \right] \quad (10)$$

对式(10)在时间上积分得到 Hilbert 边际谱，如式(11)所示，从统计学来讲，边际谱能够表明整组数据在每个频率点的累计幅值分布，与傅里叶谱相比，具有更高的频率分辨率。

$$h(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega, t) dt \quad (11)$$

利用边际谱来判断并选定高低频率分界点 ω_i , 将高于 ω_i 的各模态分量重构, 分配给超级电容器, 低于 ω_i 各模态分量重构, 分配给锂电池, 即

$$\begin{cases} P_{\text{BAT}}(t) = \sum_{k=1}^i u_k(t) \\ P_{\text{CAP}}(t) = \sum_{k=i+1}^K u_k(t) \end{cases} \quad (12)$$

2 模糊控制器设计

2.1 模糊控制器结构

根据风储联合发电系统运行特性, 本文采用双输入-单输出的二维模糊控制器, 具体结构如图 3 所示。

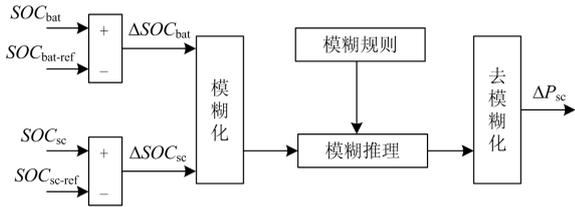


图 3 模糊控制器结构图

Fig. 3 Structure of fuzzy logic controller

模糊控制器是将输入的 SOC 偏差模糊化, 即用一个模糊集来表示实值信号, 根据建立的模糊规则进行推理, 选择简便、高效的隶属函数可以加快推理的计算过程, 推理输出的模糊单集反模糊化得到最终单值信号。

2.2 控制器设计

从图 3 可以看到, 在模糊控制器中, 分别将超级电容器和锂电池当前反馈 SOC 与参考值做差作为输入决定修正功率大小。在一个控制周期中, 若两者偏差值有一个过大, 系统会根据设定的模糊规则调整混合储能系统功率设定值, 保证下一时刻 SOC 在合理范围内。例如, 在混合储能系统放电阶段: 当超级电容器荷电状态距上限较近时, 为了快速将多余电量释放, 使其 SOC 向参考设定值靠拢, 令 $\Delta P_{\text{sc}} < 0$, 适当减少锂电池的放电量; 当超级电容器荷电状态距下限较近时, 为了减缓电量的释放, 令 $\Delta P_{\text{sc}} > 0$, 适当增加锂电池的放电量。在混合储能系统充电阶段: 当超级电容器荷电状态距上限较近时, 为避免 SOC 到达上限速度过快, 使其 SOC 向参考设定值靠拢, 令 $\Delta P_{\text{sc}} < 0$, 适当增加锂电池的充电量; 当超级电容器荷电状态距下限较近时, 为了

加快其充电速度, 令 $\Delta P_{\text{sc}} > 0$, 适当减少锂电池的充电量, 锂电池调节方式同理可得。

加入模糊控制器后超级电容器和锂电池的功率设定值如下:

$$P_{\text{b1}}(t) = P_{\text{b0}}(t) - \Delta P_{\text{sc}}(t) \quad (13)$$

$$P_{\text{sc1}}(t) = P_{\text{sc0}}(t) + \Delta P_{\text{sc}}(t) \quad (14)$$

控制器的输入和输出要通过相应的隶属度函数转换成模糊集, 本文选用精确度较高的高斯型隶属函数如式(15), 反模糊化则采用重心法, 即取输出模糊集隶属度函数曲线与坐标轴围成面积对应重心元素值。

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (15)$$

式中, σ 、 c 分别为表征 Gauss 分布的中心和宽度。

输入 1: 超级电容器 SOC 偏差值 ΔSOC_{sc} , 语言变量为 B , 输入范围为 $[-40\%, 40\%]$, 模糊论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 模糊子集为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$, 分别表示超级电容器当前 SOC 为 $\{\text{非常低, 很低, 较低, 适中, 较高, 很高, 非常高}\}$ 。

输入 2: 锂电池 SOC 偏差值 ΔSOC_{b} , 语言变量为 A , 输入范围为 $[-30\%, 30\%]$, 模糊论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 模糊子集为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ 分别表示锂电池当前 SOC 为 $\{\text{非常低, 很低, 较低, 适中, 较高, 很高, 非常高}\}$ 。

输出: 修正功率 ΔP_{sc} , 语言变量为 U , 输出范围为 $[-0.06 \text{ MW}, 0.06 \text{ MW}]$, 模糊论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 模糊子集为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$, 分别表示超级电容器功率修正量为 $\{\text{非常低, 很低, 较低, 适中, 较高, 很高, 非常高}\}$ 。

输入输出量对应的隶属度函数如图 4 所示。

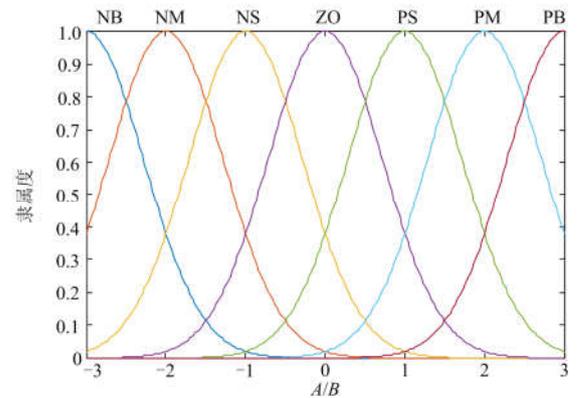


图 4 输入输出隶属度函数

Fig. 4 Membership functions of input/output

由上述超级电容器及锂电池的偏差值与修正功率的关系值, 制定模糊规则如表 1 所示, 先从表中

选出两条规则加以解释。

1) If A is NB and B is ZO, then U is NM.

2) If A is PB and B is NM, then U is PB.

规则 1 表示, 当锂电池当前荷电状态与参考值偏差非常低(NB), 且超级电容器当前荷电状态与参考值偏差值适中(ZO), 表明当前锂电池荷电状态非常低, 通过模糊规则设定修正功率 ΔP_{sc} 输出很低(NM), 从而达到减少锂电池放电功率或增加充电功率的目的。

规则 2 表示, 当锂电池当前荷电状态与参考值偏差非常高(PB), 且超级电容器当前荷电状态与参考值偏差值很低(NM), 表明当前锂电池荷电状态非常高且超级电容器荷电状态很低, 通过模糊规则设定修正功率 ΔP_{sc} 输出非常高(PB), 从而达到减少锂电池充电功率或减少超级电容器放电功率的目的。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Rules of fuzzy control

U	A							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	NS	PS	PM	PB	PB	PB	PB	
NM	NS	NS	PS	PM	PM	PM	PB	
NS	NM	NM	ZO	PS	PS	PM	PB	
B	ZO	NM	NS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PS	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PM	
PM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS	
PB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	

3 仿真分析

本文建立图 1 所示的 30 MW 双馈风储发电系统 (采样时间为 1 s), 其中超级电容器额定容量为 0.42 MWh, 额定功率为 10.4 MW, SOC 上下限为 0.2~0.8, 锂电池额定容量为 2 MWh, 额定功率为 3.35 MW, SOC 上下限为 0.1~0.9。在 Matlab/Simulink 中进行仿真分析, 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。采用滑动平均算法确定符合波动限制的窗口长度 21。通过滑动平均算法得到平抑后的并网功率如图 5 中曲线所示, 统计得出平抑后并网功率各项参数指标明显下降, 1 min、10 min 最大波动量由原来的 4.22 MW 和 5 MW 分别下降至 2.94 MW 和 3.75 MW, 可以看出本文方法得到的风电并网功率曲线平缓且满足并网要求。

采用 VMD-Hilbert 方法对 HESS 参考功率进行分解, 首先依据前文提及的双阈值筛选法确定模态分解数 K , 由 HESS 参考信号功率谱, 可以确定该信号是以六种不同频率为中心, 令 $K=6$ 进行 VMD

分解得到相应模态分量, 经希尔伯特变换对时间积分得到边际谱如图 6, 通过观察可知低频波动主要集中在 0~0.008 Hz, 高频波动主要集中在 0.008~0.016 Hz, 且频率点在 0.008 Hz 处不同频率混叠部分最少, 故分离以 0.008 Hz 为分界点的本征模态函数, 大于该频率点信号赋予超级电容器, 小于此频率赋予锂电池。

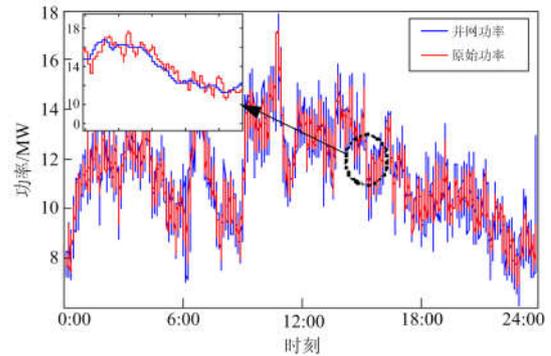


图 5 储能系统平抑风电功率波动效果

Fig. 5 Smooth curve of energy storage system

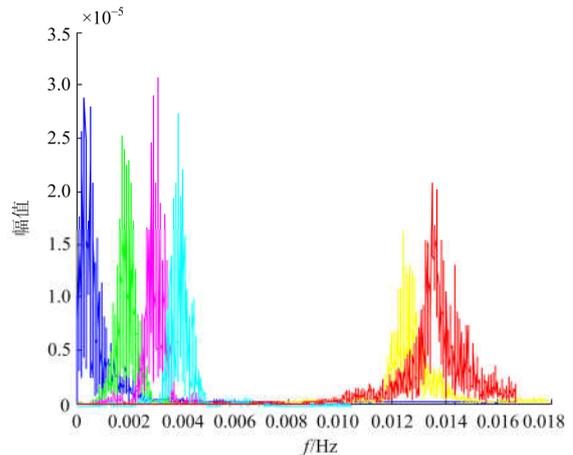


图 6 基于 VMD-Hilbert 得到的边际谱

Fig. 6 Marginal spectrum obtained by VMD-Hilbert

根据前文提到的储能系统荷电状态上下限约束, 得到的控制系统输出曲面如图 7, 分别假设超级电容器和锂电池的 SOC 为参考值时得到的储能设备荷电状态偏差与功率修正值的关系如图 8 所示, 从图中可以看出, 当超级电容器 SOC 适中时且锂电池 SOC 偏低, 控制器通过减少锂电池放电或增加充电量来使其荷电状态向适中转变, 当锂电池 SOC 偏高, 控制器通过增加锂电池放电或减少充电量来使其荷电状态向适中转变, 其中转移功率均由超级电容器承担, 当锂电池 SOC 处于适中状态时, 对超级电容器充放电的控制方式类似, 在此不做更多说明。

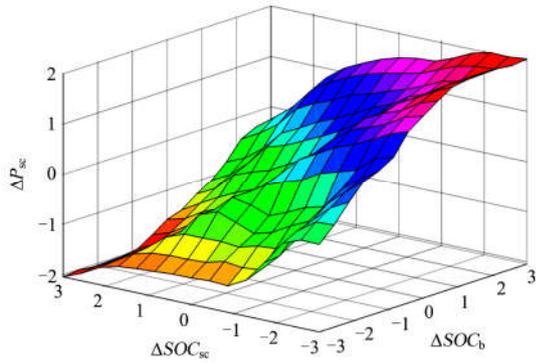


图 7 模糊控制系统输出曲面

Fig. 7 Output surface of fuzzy control system

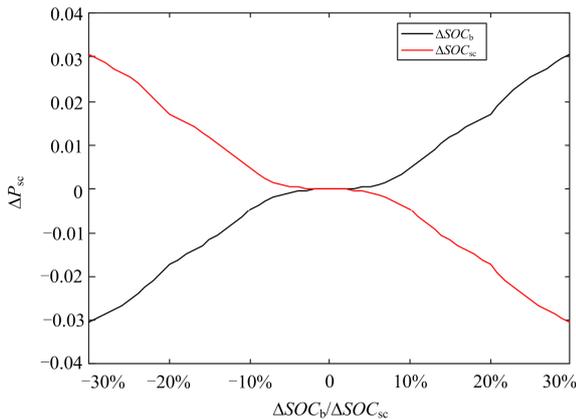


图 8 储能设备偏差与功率修正值的关系

Fig. 8 Relationship between ΔSOC and ΔP_{sc}

仿真选取一天中 18:00—19:00 时间段对比有无模糊控制对混合储能系统中锂电池及超级电容器 SOC 的影响和评价结果如图 9、图 10 与表 2 所示, 总结得出以下结论。

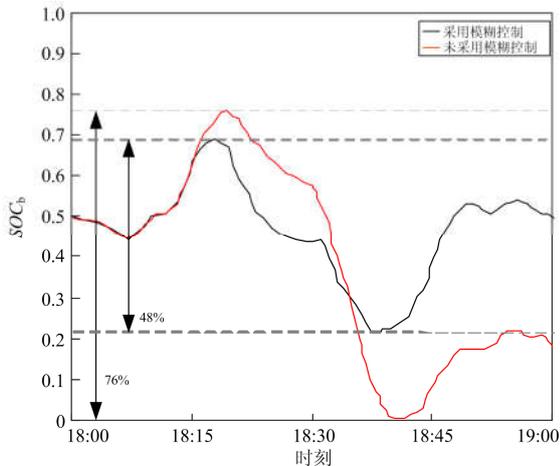


图 9 是否采用模糊控制锂电池 SOC 变化

Fig. 9 SOC changes of lithium battery with/without fuzzy logic control

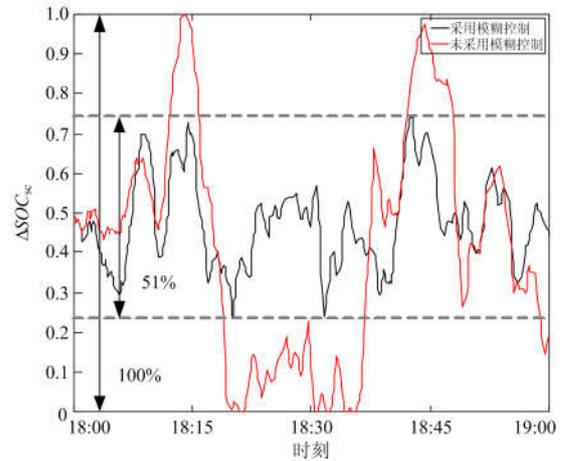


图 10 是否采用模糊控制超级电容器 SOC 变化

Fig. 10 SOC changes of supercapacitor with/without fuzzy logic control

表 2 模糊控制规则表

Table 2 Rules of fuzzy control

	采用模糊控制	未采用模糊控制
SOC_b 变化范围/%	48	76
SOC_b 最大值	0.69	0.78
SOC_b 最小值	0.21	0
SOC_{sc} 变化范围/%	51	100
SOC_{sc} 最大值	0.74	1
SOC_{sc} 最小值	0.23	0

(1) 采用模糊控制策略时, 锂电池和超级电容器 SOC 变化范围分别为 48%和 51%, 对比未采用控制策略时的 76%和 100%, 表明本文提出的控制方法能够为储能系统之后的充放电过程提供更多的能量裕度。

(2) 当储能系统未采用模糊控制时, 锂电池在 18:39—18:42 时段之间超过荷电状态下限, 超级电容器更是多次出现荷电状态越限的情况, 过度充放电不仅会导致储能设备寿命降低, 还会降低设备利用率, 不具备良好的经济效应。

4 结论

本文研究了混合储能系统用于平抑风电功率波动的控制方法, 对电力系统运行可靠性具有重要意义。首先利用滑动平均滤波获得满足风电场最大输出功率变化率限制的参考功率, 通过变分模态分解将波动功率合理分配到超级电容器和锂电池, 考虑到混合储能系统在充放电过程中荷电状态对未来系统平抑能力及使用寿命的关系, 本文提出模糊控制结合两者实时荷电状态偏差值二次分配混合储能装

置的输出功率,算例证明了本文所提策略的有效性,能够很好地平抑风电并网功率波动。

下一阶段的研究将在混合储能控制策略的基础上考虑风电场混合储能设备的运行成本和收益,分析混合储能装置容量配置与经济成本之间的关系。

参考文献

- [1] 汪海蛟, 江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 126-135.
WANG Haijiao, JIANG Quanyuan. An overview of control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 126-135.
- [2] 孙玉树, 唐西胜, 孙晓哲, 等. 风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊): 88-97.
SUN Yushu, TANG Xisheng, SUN Xiaozhe, et al. Research on energy storage capacity allocation method for smoothing wind power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S): 88-97.
- [3] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [4] 宁阳天, 李相俊, 董德华, 等. 储能系统平抑风光发电出力波动的研究方法综述[J]. 供用电, 2017, 34(1): 2-11.
NING Yangtian, LI Xiangjun, DONG Dehua, et al. A review of the research methods of smoothing wind/PV power output with energy storage systems[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(1): 2-11.
- [5] 董蓓蓓, 熊飞, 李骞, 等. 分布式光伏发电消纳方式的选择策略研究[J]. 供用电, 2017, 34(2): 79-83.
DONG Beibei, XIONG Fei, LI Qian, et al. Research on selection strategy of distributed PV consumption mode[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(2): 79-83.
- [6] 李战鹰, 胡玉峰, 吴俊阳. 大容量电池储能系统 PCS 拓扑结构研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(5): 39-42.
LI Zhanying, HU Yufeng, WU Junyang. Study of topology structure of large scale battery energy storage systems[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(5): 39-42.
- [7] 童欣, 郝剑波, 张坤. 锂电池储能在风力发电系统中的应用[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(2): 5-10.
TONG Xin, HAO Jianbo, ZHANG Kun. Application of lithium battery energy storage in the wind power system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2013, 29(2): 5-10.
- [8] 谢石晓. 混合储能系统控制系统策略与容量配置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
XIE Shixiao. Research of control strategy and capacity configuration method about hybrid energy storage system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [9] 李保恩, 李献伟, 吴炳鑫. 基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 108-114.
LI Baoen, LI Xianwei, WU Bingxin. Research on energy optimal dispatching strategy for microgrid based on battery SOC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 108-114.
- [10] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
ZHANG Guojun, TANG Xisheng, QI Zhiping. Design of a hybrid energy storage system on leveling off fluctuating power outputs of intermittent sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 24-28.
- [11] 孟润泉, 刘家赢, 文波, 等. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2186-2193.
MENG Runquan, LIU Jiaying, WEN Bo, et al. Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control strategy for DC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2186-2193.
- [12] 范其丽, 郑晓茜, 王璞, 等. 基于混合储能动态调节的独立混合微电网分布式协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 36(7): 105-113.
FAN Qili, ZHENG Xiaoxi, WANG Pu, et al. Decentralized control for autonomous hybrid microgrid with hybrid storage system dynamical regulating[J]. Power System Protection and Control, 2018, 36(7): 105-113.
- [13] 韩晓娟, 陈跃燕, 张浩, 等. 基于小波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 in smoothing the fluctuations of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 8-13.

- [14] 贾成真, 王灵梅, 孟恩隆, 等. 基于风电场集中储能的风储柔性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 30-37.
JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Research on flexible control strategy based on the centralized storage joint with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 30-37.
- [15] HAN X J, CHEN J X, LI J L, et al. Application of wavelet analysis theory in storage energy system of lithium battery[C] // Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22-24, 2011, Yantai, China: 5175-5177.
- [16] LI X J, LI Y, HAN X J, et al. Application of fuzzy wavelet transform to smooth wind/PV hybrid power system output with battery energy storage system[C] // Proceedings of International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technology, Energy Procedia, 2011, 12: 994-1001.
- [17] 张坤, 吴建东, 毛承熊, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 235-240.
ZHANG Kun, WU Jiandong, MAO Chengxiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 235-240.
- [18] 叶鹏, 李山, 何淼, 等. 风储孤网系统运行与控制研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 163-170.
YE Peng, LI Shan, HE Miao, et al. Review of operation and control of the wind storage isolated network system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 163-170.
- [19] 刘长良, 武英杰, 甄成刚. 基于变分模态分解和模糊 C 均值聚类的滚动轴承故障诊断[J]. 电机工程学报, 2015, 35(13): 3358-3365.
LIU Changliang, WU Yingjie, ZHEN Chenggang. Rolling bearing fault diagnosis based on variational mode decomposition and fuzzy C means clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3358-3365.
- [20] 朱永利, 贾亚飞, 王刘旺. 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, JIA Yafei, WANG Liuwang. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformers based on improved variational mode decomposition and Hilbert transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 221-235.
- [21] YANG J N, LEI Ying, PAN Shuwen, et al. System identification of linear structures based on Hilbert-Huang spectral analysis[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32(9): 1443-1467.

收稿日期: 2018-04-25; 修回日期: 2018-06-12

作者简介:

李亚楠(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源接入电力系统的储能系统规划、运行; E-mail: annabella1993@sina.cn

王倩(1962—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统综合调度自动化。

(编辑 葛艳娜)