

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

吴杰, 丁明

(安徽省新能源利用与节能重点实验室, 合肥工业大学, 安徽省合肥市 230009)

摘要: 采用蓄电池和超级电容构建混合储能系统以平抑风电场输出功率波动, 实现风电平滑并网。首先, 针对不同风电出力场景下风电功率的波动特性, 结合风电并网波动标准和混合储能系统性能特点, 实现风电功率的自适应小波包分解和储能初级功率分配, 得到风电并网功率和混合储能初级功率指令; 其次, 在混合储能系统内部, 根据超级电容的荷电状态, 利用模糊优化控制对蓄电池和超级电容的功率指令进行二次修正, 得到优化后的混合储能功率分配指令。算例分析表明, 所提策略能够自适应地实现风电功率的最优分解和合理分配, 确保混合储能荷电状态工作在合理区间, 有效改善风电输出功率波动平抑效果, 保证混合储能系统长期稳定运行。

关键词: 风力发电; 混合储能系统; 自适应小波包分解; 模糊控制

0 引言

由于受到气候和地理环境等因素影响, 风电出力呈现间歇性和波动性的特点。风电场输出功率直接并网给电力系统的稳定、电网频率和电能质量等方面带来了巨大挑战。如何有效平抑风电场输出功率波动, 提高风电并网运行能力, 对于风电的大规模发展具有重要的现实意义^[1-3]。

风电输出功率波动按其频率可分为3个部分: 1 Hz以上的高频区、0.01~1 Hz的中频区和0.01 Hz以下的低频区。高频区波动通常可以被发电机的转子惯量所吸收, 低频区波动在接入电网后可以被系统惯性所吸收, 而中频区波动对所连电网的影响最为严重, 需要通过配置储能系统来平抑^[4-5]。现有的储能介质可分为能量型和功率型两大类, 其中能量型储能以蓄电池储能、抽水蓄能为代表, 能量密度较大, 功率密度较小, 循环寿命较短, 不适于频繁的充放电转换; 功率型储能以超级电容、超导储能和飞轮储能为代表, 能量密度较小, 功率密度较大, 频繁充放电不会损害其性能。鉴于能量型储能和功率型储能在性能上的优良互补, 现有研究大多利用两者组成混合储能系统(HESS)来平抑风电输出功率波动, 其中以蓄电池-超级电容的混合储能组合模式最为典型^[6-10]。

学术界对蓄电池-超级电容混合储能系统平抑风电波动的控制方法已展开较多研究, 其中一阶低通滤波算法在处理风电功率波动中得到了广泛应用。文献[11]利用时间常数随储能荷电状态(SOC)变化的低通滤波器计算可再生能源波动的平抑目标, 进而通过混合储能的SOC模糊控制优化分配混合储能的功率指令。文献[12]根据储能SOC对风电功率平抑进行分层分级优化, 通过低通滤波、功率调节和限值管理最终实现风电波动平抑和储能合理工作。但一阶低通滤波算法对于风电功率波动特性较为敏感, 其普遍适用能力差, 滤波时间常数也难以准确控制。

相对传统一阶低通滤波算法, 小波分解在处理非平稳突变信号上具有良好的局部化和多分辨率特性, 更加适用于风电功率波动分析。文献[13]利用两级实时小波滤波算法处理风电功率, 一级滤波获得满足波动要求的功率输出, 二级滤波去除滤波窗口滚动所产生的噪声, 同时采用SOC反馈控制保持储能工作在合理范围。文献[14]利用实时小波算法处理风电功率得到高频信号和低频信号并分别进行SOC优化控制, 高频信号作为超级电容功率指令, 低频信号中满足功率波动约束部分作为并网功率, 余值作为蓄电池功率指令。小波包分解在小波分解的基础上进一步提高了信号分析的时频分辨率, 有助于获得信号高频部分的细节信息。文献[15-16]采用小波包分解理论处理可再生能源输出功率波动, 将其分解成反映并网功率信号的低频信号和接入储能系统的高频信号, 进而根据混合储能性能特

收稿日期: 2016-06-07; 修回日期: 2016-08-22。

上网日期: 2016-10-31。

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050104)。

点进一步分解高频信号。文献[17]建立以间歇性电源输出波动和微网供需平衡为基础的评价指标,提出基于小波包分解和模糊控制的混合储能充放电策略,有效改善微网内间歇性电源的波动性,减小了供需不平衡功率。目前的研究集中于如何在既定风电出力场景下实现基于小波包算法的风电功率波动平抑,而没有考虑平抑策略在不同风电出力场景下的普遍适用性,同时缺乏检验分解结果有效性的合理标准和确定最优分解层数的客观方法。

针对上述问题,本文根据不同风电出力场景下风电功率的波动特性,结合风电并网波动标准提出平抑风电功率波动的自适应小波包分解方法,实现分解算法的普遍适用性,同时根据混合储能性能特点确定储能系统内部初级功率分配算法,进而通过功率型储能 SOC 模糊优化控制二次修正能量型和功率型储能的功率指令,实现混合储能系统内部功率指令的合理分配,保持混合储能 SOC 工作在合理区间,保证混合储能系统长期稳定运行。

1 风电功率的自适应小波包分解与储能初级功率分配

1.1 小波包变换

小波包变换是基于小波变换的进一步发展,能够提供比小波变换更高的分辨率。它克服了小波变换在高频段频率分辨率较差、低频段时间分辨率较差的缺点,将频带进行多层次划分,并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高时频分辨率,有助于获得信号更细节的信息[18]。典型小波包分解树示意图如图 1 所示。

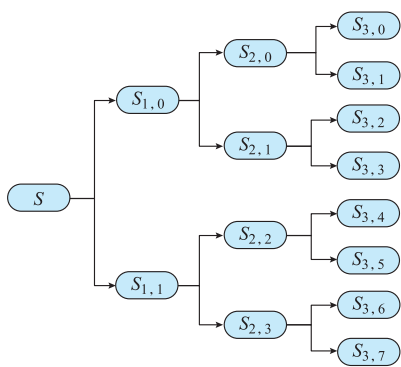


图 1 小波包分解示意图
Fig.1 Schematic diagram of wavelet packet decomposition

图 1 中从左至右分别代表对原始信号进行 1 层、2 层和 3 层分解所得信号分量, S 代表原始信号,对其进行 $n(n \geq 1)$ 层分解,得到相应的低频部分

$S_{n,0}$ 和 高频部分 $S_{n,i}(i=1,2,\cdots,2^n-1)$, 其中每个信号频段带宽 f_0 为:

$$f_0 = \frac{f_s}{2^{n+1}} \tag{1}$$

式中: f_s 为信号采样频率; n 为小波包分解层数。

1.2 风电功率自适应小波包分解方法

针对风电场接入电力系统的有功功率波动问题,现行国家标准规定了正常运行情况下风电场接入电网的多时间尺度有功功率变化的最大限值[19],主要包括 1 min 和 10 min 两个时间尺度,如表 1 所示。

表 1 风电场有功功率变化的最大限值 Table 1 Maximum change of wind farm active power		
风电场装机容量/MW	10 min 有功功率变化最大限值/MW	1 min 有功功率变化最大限值/MW
<30	10	3
30~150	装机容量的 1/3	装机容量的 1/10
>150	50	15

本文以某装机容量 P_w 为 50 MW 的风电场为例,根据上述标准建立风电场输出功率并网波动允许范围指标,设 t 时刻经混合储能平抑后的风电并网功率为 $P_o(t)$,计算时间窗口取 1 s,则其 1 min 波动允许区间 $[P_{ol,min}(t), P_{ol,max}(t)]$ 计算公式如下:

$$P_{ol,min}(t) = \max_{\Delta t=1,2,\cdots,59} P_o(t) - \frac{1}{10} P_w \tag{2}$$

$$P_{ol,max}(t) = \min_{\Delta t=1,2,\cdots,59} P_o(t) + \frac{1}{10} P_w \tag{3}$$

10 min 波动允许区间 $[P_{o10,min}(t), P_{o10,max}(t)]$ 计算公式如下:

$$P_{o10min}(t) = \max_{\Delta t=1,2,\cdots,599} P_o(t) - \frac{1}{3} P_w \tag{4}$$

$$P_{o10max}(t) = \min_{\Delta t=1,2,\cdots,599} P_o(t) + \frac{1}{3} P_w \tag{5}$$

若实际计算窗口时间的秒数取 k ,则式(2)和式(3)取点数变为 $60/k$ 个,式(4)和式(5)取点数变为 $600/k$ 个。

$P_o(t)$ 应满足并网波动允许,即保持在式(6)所示区间范围内:

$$P_o(t) \in [P_{o,min}(t), P_{o,max}(t)] = [P_{ol,min}(t), P_{ol,max}(t)] \cap [P_{o10,min}(t), P_{o10,max}(t)] \tag{6}$$

首先,利用风电并网波动标准对风电原始输出功率 $P_w(t)$ 进行判断;如果 $P_w(t)$ 满足标准则直接并网;如果不能满足则采用 db6 小波[20]对 $P_w(t)$ 进行 n 层小波包分解,并重构第 n 层 2^n 个频段的功率分量,得到低频分量 $S_{n,0}$ 和高频分量 $S_{n,i}$ 。循环加深分解层数 n ,利用所提并网波动允许范围指标对

低频分量 $S_{n,0}$ 进行判断。当 $S_{n,0}$ 的幅值波动第一次满足并网波动允许范围时,即可确定小波包分解的最优分解层数 n_o ,同时将 $S_{n,0}$ 作为并网功率 $P_o(t)$, $P_w(t)$ 与 $P_o(t)$ 的差值作为储能系统的功率指令,从而实现风电功率的自适应分解。

以本文所采用的 50 MW 风电场典型风电出力场景下风电出力 $P_{w1}(t)$ 为例,其经小波包分解确定的最优分解层数 n_o 为 6,所得到的并网功率 $P_o(t)$ 如图 2 所示。从图中可看出,并网功率幅值与原始功率信号相近,但功率波动大幅降低。针对风电场风电出力的不同场景,所提方法能够自适应地确定小波包分解最优分解层数,得到满足并网波动标准的风电并网功率,避免传统小波包分解方法通过主观设定分解层数所带来的局限性,增强了分解方法的普遍适用性。

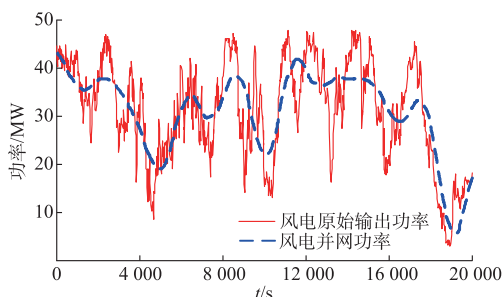


图 2 风电原始功率和并网功率

Fig.2 Original wind power and grid-connected power

1.3 混合储能系统内部初级功率分配

基于能量型储能和功率型储能的不同特性,如何在混合储能内部合理分配所需平抑的功率波动是整个控制策略的重要环节。小波包分解相对于小波分解的优势即在于分解信号的高频部分时更加精细,能够获得信号高频部分更细节的信息。因此,本文将风电功率小波包分解所得高频信号作为初步划分储能内部功率指令的依据。

考虑到蓄电池寿命受到其充放电改变次数的影响,适当减小蓄电池功率指令变化频率有利于延长蓄电池的寿命;同时,利用超级电容储能承担更高频的功率指令,可以充分发挥其响应速度快,适用于频繁充放电转换的特点。根据文献[21]可知,蓄电池充放电响应时间在数分钟到数小时,而超级电容充放电响应时间在数毫秒到几十分钟。因此,本文选择 1 min 作为蓄电池和超级电容充放电响应的分界时间,对应响应频率为 1.67×10^{-2} Hz,与 1.2 节中 6 层小波包分解所得 $S_{6,1}$ 至 $S_{6,2}$ 段次高频信号 $P_m(t)$ 频率相近,可将其分配由蓄电池储能平抑;剩余的 $S_{6,3}$ 至 $S_{6,63}$ 段高频信号 $P_h(t)$ 由超级电容储能

平抑^[15]。所得混合储能的初级功率指令分别为:

$$P_b(t) = -P_m(t) = -(P_{6,1}(t) + P_{6,2}(t)) \quad (7)$$

$$P_{sc}(t) = -P_h(t) = -(P_w(t) - P_o(t) - P_m(t)) \quad (8)$$

式中: $P_b(t)$ 表示蓄电池的初级功率指令; $P_{sc}(t)$ 表示超级电容的初级功率指令;以储能指令 $P_b(t) > 0$ 或 $P_{sc}(t) > 0$ 表示充电, $P_b(t) < 0$ 或 $P_{sc}(t) < 0$ 表示放电; $P_{6,1}(t)$ 和 $P_{6,2}(t)$ 分别对应 1.2 节中 6 层小波包分解所得 $S_{6,1}$ 和 $S_{6,2}$ 段信号分量。

图 3 为蓄电池和超级电容的初级功率指令,可以看出超级电容承担了波动频繁的高频功率指令,而蓄电池的功率指令变化频率较低且幅值较大,正负转换次数较少有利于延长使用寿命,分配结果符合蓄电池和超级电容的性能特点。

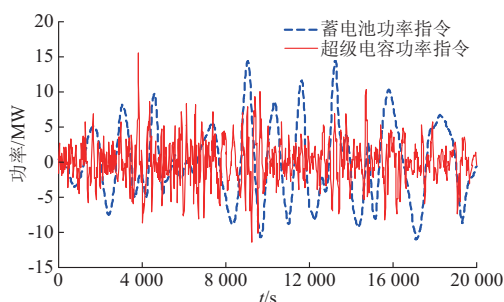


图 3 蓄电池和超级电容初级功率指令

Fig.3 Primary power instructions of battery and super capacitor

风电功率自适应小波包分解和储能初级功率分配的控制流程图见附录 A。

2 混合储能 SOC 模糊优化控制

1.3 节所提出的混合储能内部初始功率分配方法仅从控制蓄电池储能功率指令的充放电响应频率以延长蓄电池寿命的角度出发,并没有考虑到储能系统实际运行中可能出现的 SOC 越限和充放电响应能力不足的问题,尤其是功率型储能相对能量型储能能量密度较小,更容易出现过度充放电或充放电响应能力不足。因此,本文根据功率型储能 SOC 进一步优化混合储能内部输出功率分配,利用模糊控制理论按照以下规律二次修正能量型储能和功率型储能的输出功率指令。

1) 当 t 时段结束时超级电容的 SOC 值 $S_{OC,sc}(t)$ 适中时,按照初级功率指令 $P_b(t)$ 和 $P_{sc}(t)$ 进行充放电。

2) 当 $S_{OC,sc}(t)$ 较小时,表明超级电容剩余容量不足。若此时 $P_{sc}(t) < 0$,则需修正 $P_{sc}(t)$ 使其增大,并相应调整 $P_b(t)$;若 $P_{sc}(t) > 0$,则保持不变。

3)当 $S_{OC,sc}(t)$ 较大时,表明超级电容容量趋于饱和。若此时 $P_{sc}(t)>0$,则需修正 $P_{sc}(t)$ 使其减小,并相应调整 $P_b(t)$;若 $P_{sc}(t)<0$,则保持不变。

将 $t-1$ 时段结束时的超级电容 SOC 值 $S_{OC,sc}(t-1)$ 和 t 时段超级电容 SOC 变化量 $\Delta S_{OC,sc}(t)$ 作为模糊控制输入量,超级电容功率指令调节系数 $k_p(t)$ 作为模糊控制输出量。输入、输出隶属函数及模糊规则^[17] 见附录 B。

经模糊优化后的蓄电池功率指令 $P_b'(t)$ 和超级电容功率指令 $P_{sc}'(t)$ 的计算公式如下:

$$P_b'(t)=P_b(t)+(1-k_p(t))P_{sc}(t) \tag{9}$$

$$P_{sc}'(t)=k_p(t)P_{sc}(t) \tag{10}$$

3 算例分析

算例系统中的风电原始输出功率采用某装机容量 P_w 为 50 MW 的风电场输出实测数据获得,分别选取该风电场 3 个典型风电出力场景下的输出功率 $P_{w1}(t), P_{w2}(t), P_{w3}(t)$ 进行分析。仿真计算窗口时长 Δt 取 20 s。

3.1 不同场景自适应分解效果对比

为验证所提小波包自适应分解方法在不同风电出力场景下的普遍适用性,针对该风电场 3 个典型风电出力场景下的风电输出功率 $P_{w1}(t), P_{w2}(t), P_{w3}(t)$ 分别进行分析。利用所提小波包自适应分解方法处理得到的满足风电并网波动标准的并网功率 $P_{o1}(t), P_{o2}(t), P_{o3}(t)$ 分别如图 4 所示,其中场景 1 所得最优分解层数 n_{o1} 为 6;场景 2 风电功率变化相对平缓,所得最优分解层数 n_{o2} 为 5;场景 3 风电功率变化较为剧烈,所得最优分解层数 n_{o3} 为 7。根据不同场景下风电输出功率波动特性不同,小波包分解层数也相应改变,最终得到符合并网波动标准的并网功率。仿真结果证明了所提方法能够根据不同的风电出力场景功率特性选择最佳的小波包分解层数,克服了现有小波包分解算法缺乏场景自适应能力的缺点,实现了风电功率的自适应小波包分解。

3.2 小波包分解层数最优性验证

为验证所提自适应小波包分解最优层数确定方法的有效性,以典型场景 1 为例,对比分解层数为最优解 n_o 和分解层数为相邻值 n_o-1 和 n_o+1 的功率分解效果,结果如附录 C 图 C1 所示。

从附录 C 图 C1(a)中可以看出,当分解层数为 n_o-1 时所得低频信号幅值变化与原始功率信号相近,利用本文 1.2 节所提并网波动标准对其进行分析,其在 $t=4\ 380\text{ s}$ 时不能满足并网波动标准,即平抑效果不达标。

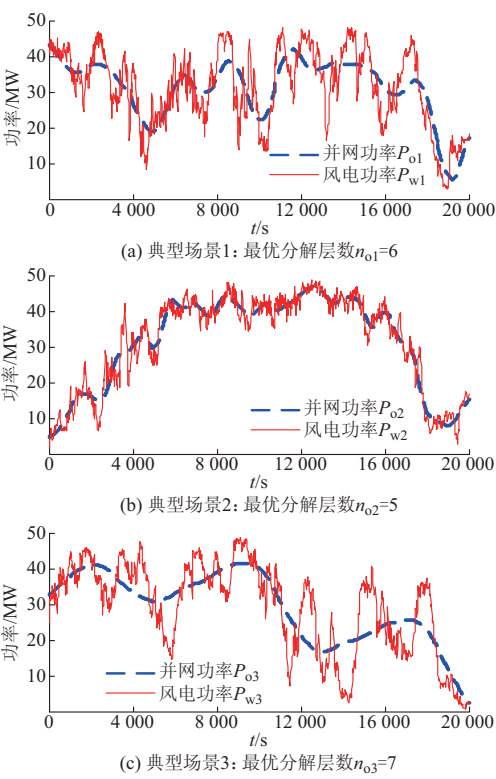


图 4 不同场景自适应分解效果对比
Fig.4 Comparison of self-adaptive decomposition effect between different scenarios

从附录 C 图 C1(b)可以看出,当分解层数为 n_o+1 时所得低频信号虽然相对平滑,但其幅值已经与原始功率信号产生较大的差异。统计分解层数为 n_o 时原始功率信号与低频功率信号之间的累计差值为 5.274×10^3 , n_o+1 时累计差值为 6.184×10^3 。原始功率信号和低频功率信号之间的差值功率需要储能系统输出来平抑,差值功率的增大即对储能系统的容量要求更高。在已经满足并网平滑需求的情况下继续增大储能系统的功率和容量等级,提高了对储能系统功率和容量的要求。

针对典型场景 2 和典型场景 3,分别对比所得最优分解层数 n_o 和分解层数为相邻值 n_o-1 和 n_o+1 的功率分解效果,同样能够得到分解层数为 n_o 时分解效果最佳的结论,具体分析结果见附录 C 图 C2 和图 C3。

综上所述,通过根据典型场景风电功率特性确定的最优分解层数所得到的低频信号,既能够满足并网波动标准,也能够最大程度降低对储能功率和容量等级的要求,相对相邻分解层数低频信号更具优势。现有小波包分解算法通过主观给定分解层数的方式不能保证分解层数一定是最优解,并且缺乏普遍适用性,而上述仿真结果显示任何偏离最优分解层数取得的分解效果都相对较差,体现了本文所

提最优分解层数确定方法的合理性和优越性。

3.3 风电平抑效果分析

为验证所提风电功率小波包分解方法的平抑效果,以典型场景 1 为例,给出了采用小波包分解算法平抑后的并网功率曲线见附录 C 图 C4,并给出同等条件下经滤波时间常数 $T=50$ 的普通低通滤波算法^[12]平抑后的并网功率曲线作为对比。附录 C 表 C1 为两种算法所得并网功率波动效果分析。

从附录 C 图 C4 可以看出,小波包分解算法所得并网功率较低通滤波算法并网功率更为平滑。通过附录 C 表 C1 中的数据分析,两种算法结果相对原始功率在最大功率变化和累积功率变化上都有大幅度降低,而小波包分解算法的下降幅度更大,平滑效果更好,具有一定的优越性。

3.4 SOC 模糊优化控制的影响

本文利用蓄电池和超级电容组成混合储能系统来平抑风电输出功率波动,蓄电池和超级电容的各项性能参数见附录 D。

经模糊优化后的储能功率指令和储能 SOC 如附录 D 图 D1 所示。从功率指令分配可以看出,蓄电池储能承担了功率指令中的低频部分,而超级电容储能承担了功率指令中的高频波动部分,符合各自的性能特点;从储能 SOC 可以看出,蓄电池和超级电容均运行于安全范围之内,未出现过充过放现象。同时,由于超级电容储能所承担功率指令变化频繁,其 SOC 也呈现在安全范围内快速波动变化的特征,充分发挥其适用于频繁充放电转换的特点,改善了蓄电池储能的输出,可以有效延长蓄电池寿命。

为进一步验证 SOC 模糊优化控制在储能 SOC 处于极端状态下的调节能力,本算例分别将超级电容 SOC 初始值设为极小值 30% 和极大值 90% 以观察其 SOC 变化趋势,并与无模糊优化控制下的超级电容 SOC 状态相对比,对比分析结果见附录 E。根据附录 E 的分析可以看出,SOC 模糊优化控制能够保证混合储能系统在极端状态下也能够恢复稳定运行,是满足风电平滑需求的可靠保障。

4 结语

本文针对不同风电出力场景下风电功率的波动特性和混合储能系统平抑风电输出功率波动的控制需求,结合风电并网波动标准和混合储能性能特点,提出平抑风电功率波动的自适应小波包分解和储能初级功率分配算法,并根据超级电容 SOC 模糊优化控制对混合储能内部的功率分配进行二次修正。通过算例分析可知,基于风电并网波动标准提出的小波包最优分解层数确定方法实现了风电功率的最优

分解,对不同风电出力场景的风电功率波动抑制具有自适应性,并网功率平滑效果优于低通滤波算法;通过控制蓄电池功率指令的响应频率的初级分配和超级电容 SOC 模糊控制二次修正实现了混合储能内部功率指令的合理分配,在保证储能系统本身安全性前提下提高了混合储能系统的调节特性和运行经济性。但本文是在风电功率曲线已知和储能系统参数给定的基础上探究风电平抑的控制方法,后续工作将针对风电平抑的实时在线控制和储能系统的优化配置展开进一步的研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] YUAN Xiaoming. Overview of problems in large scale wind integrations[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 22-25.
- [2] BASIT A, HANSEN A D, ALTIN M, et al. Compensating active power imbalances in power system with large-scale wind power penetration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 229-237.
- [3] GONZALEZ-LONGATT F M. Impact of emulated inertia from wind power on under-frequency protection schemes of future power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 211-218.
- [4] LI W, JOÓS G, ABBEY C. Wind power impact on system frequency deviation and an ESS based power filtering algorithm solution[C]// IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, October 29-November 1, 2006, Atlanta, GA, USA: 2077-2084.
- [5] 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. DOI: 10.7500/AEPS20140214008.
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. DOI: 10.7500/AEPS20140214008.
- [6] 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.
- [7] MOHAMED A, SALEHI V, MOHAMMED O. Real-time energy management algorithm for mitigation of pulse loads in hybrid microgrids[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 1911-1922.
- [8] 丁明,吴建锋,朱承治,等.具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J].中国电机工程学报,2013,33(1):22-29.
DING Ming, WU Jianfeng, ZHU Chengzhi, et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 22-29.
- [9] YANG Peng, NEHORAI A. Joint optimization of hybrid energy

storage and generation capacity with renewable energy[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2014, 5(4): 1566-1574.

[10] 吕超贤,李欣然,卢龙辉,等.基于小波分解与双层模糊控制的多类型储能系统平滑策略[J].电力系统自动化,2015,39(2): 21-29.DOI:10.7500/AEPS20131028004.

LYU Chaoxian, LI Xinran, HU Longhui, et al. A smoothing strategy for hybrid energy storage system based on wavelet frequency allocation and two-level fuzzy control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 21-29. DOI: 10.7500/AEPS20131028004.

[11] 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.

DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.

[12] 邹见效,戴碧蓉,彭超,等.基于荷电状态分级优化的混合储能风电功率平滑方法[J].电力系统自动化,2013,37(24):1-6.

ZOU Jianxiao, DAI Birong, PENG Chao, et al. Wind power smoothing method using hybrid energy storage based on SOC hierarchical optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 1-6.

[13] JIANG Quanyuan, HONG Haisheng. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.

[14] TRUNG T T, AHN S J, CHOI J H, et al. Real-time wavelet-based coordinated control of hybrid energy storage systems for denoising and flattening wind power output [J]. Energies, 2014, 7(10): 6620-6644.

[15] 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滑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.

[16] 吴振威,蒋小平,马会萌,等.用于混合储能平滑抑光伏波动的小波包—模糊控制[J].中国电机工程学报,2014,34(3):317-324.

WU Zhenwei, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage systems for PV power smoothing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 317-324.

[17] 熊雄,王江波,杨仁刚,等.微电网中混合储能模糊自适应控制策略[J].电网技术,2015,39(3):677-681.

XIONG Xiong, WANG Jiangbo, YANG Rengang, et al. A fuzzy adaptive control strategy for composite energy storage systems to cope with output power fluctuation of intermittent energy source in microgrid [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 677-681.

[18] 张德丰.MATLAB小波分析[M].北京:机械工业出版社,2012: 158-161.

[19] 风电场接入电力系统技术规定:GB/T 19963—2011[S].2011.

[20] 何正友,钱清泉.电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J].电力系统自动化,2003,27(10):45-48.

HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Mother wavelet option method in the transient signal analysis of electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 45-48.

[21] CHEN H, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.

吴 杰(1993—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:储能技术、新能源利用技术。E-mail: hf1993wj@163.com

丁 明(1956—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统规划及其可靠性、新能源及其利用、柔性输电系统的仿真控制。E-mail: mingding56@163.com

(编辑 蔡静雯)

Wind Power Fluctuation Smoothing Strategy of Hybrid Energy Storage System
Using Self-adaptive Wavelet Packet Decomposition

WU Jie, DING Ming

(Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A hybrid energy storage system (HESS) consisting of battery and super capacitor is developed to mitigate wind power fluctuation and realize smooth integration of wind power. According to the fluctuation characteristics of wind power in different output scenarios, and considering the grid regulations on wind power volatility and the performance characteristics of HESS, a novel self-adaptive wavelet packet decomposition and HESS primary power distribution method is proposed, which can yield wind power grid-connected values and HESS primary power instructions. Then the HESS primary power instruction will be given secondarymodification using fuzzy optimal control inside HESS according to the state of charge (SOC) of the super capacitor, and the final HESS power distribution instruction can be determined. Simulation results show that the proposed strategy is able to achieve optimal decomposition and rational distribution of wind power, ensure the SOC of HESS working within the reasonable range, effectively improve the smoothing effect of wind power output fluctuation, and guarantee long-term stable operation of the HESS.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2015AA050104).

Key words: wind power generation; hybrid energy storage system (HESS); adaptive wavelet packet decomposition; fuzzy control