

高阶统计量与小波包分解在风氢混合储能系统中的应用

陈 洁, 詹仲强

(新疆大学电气学院, 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 以平抑风电场有功功率波动为目标, 利用小波包分解风功率信号得到功率波动超限分量, 使用高阶统计量分析各个分量获取特征值, 采用支持向量机对各个分量进行分类, 得到风氢混合储能系统中需被超级电容吸收的高频波动部分和被制氢发电系统消纳的低频波动部分, 构建风氢混合储能系统功率平滑控制策略。最后在仿真中通过与常规混合储能系统进行比较, 得到该方法能够有效平抑风电场有功功率波动, 平滑风功率曲线, 研究结果可为电转气这一新型储能技术提供一定的参考。

关键词: 高阶统计量; 小波包; 支持向量机; 功率波动; 风氢混合储能; 风电场

中图分类号: TN911; TM89 **文献标识码:** A

0 引 言

中国风电装机容量, 截至 2017 年数据统计, 已达 1.95 GW, 伴随风电占电网比例提高, 因其出力随机, 弃风限电成为风电在中国发展的最大障碍^[1]。为解决这一问题, 国内外学者提出在风电场并网母线出口侧建设储能系统, 用于平滑风电场有功出力曲线, 平抑有功功率波动, 进而提高电网对风电的吸纳能力, 减少弃风限电现象^[2-5]。

储能系统的风电有功功率波动平抑算法主要有: 1) 1 阶滤波算法, 它让风功率历史曲线经过 2 个由时间常数控制的 1 阶低通滤波环节, 分别得到低频和高频储能装置的有功功率平抑指令^[4,6], 时间常数越大, 平滑效果越好^[7]; 2) 卡尔曼滤波与小波滤波算法, 这 2 种属于自适应滤波算法, 对风功率这种非平稳信号的处理具有优势^[8], 文献[9]提出基于模糊逻辑控制的卡尔曼滤波算法对风功率进行平抑, 文献[10]采用小波滤波将风功率超出并网部分的低频和高频波动分量提取出来, 分别应用电池与超级电容进行平抑; 3) 模型预测控制, 文献[11]建立预测控制模型, 构造功率惩罚因子, 在双时间尺度上对风功率进行抑制, 文献[12]提出双层控制模

型, 并建立专家库, 利用风功率和储能元件的电荷量检索专家库, 控制储能元件充放电, 平抑风功率波动。风氢混合储能是一种电转气储能技术, 它具有储能容量配置灵活等特点, 是解决可再生能源大规模存储利用的技术之一^[13]。

本文提出一种基于高阶统计量与小波包分解的风功率平抑算法。通过小波包分解风电场风功率信号, 得到并网有功功率分量和有功功率波动超限分量; 使用高阶统计量分析各个波动分量时域和频域特征; 利用支持向量机算法对波动分量聚类, 得到双时间尺度风功率波动超限分量; 采用风氢混合储能系统对风功率进行平抑; 最后验证本文提出的新型风功率平抑算法的有效性, 为电转气这种新型储能方式提供一定的技术支持。

1 风氢混合储能系统

目前, 主流储能技术分为以抽水蓄能电站、压缩空气和飞轮储能为主的物理储能方式; 以超级电容和蓄电池为主的化学储能方式^[14]。抽水蓄能电站需要建在河流附近, 压缩空气储能电站需要稳固的地下洞穴, 飞轮储能造价昂贵, 蓄电池储能技术虽然成熟, 但其平均循环寿命仅为 8 a^[14,15]。

收稿日期: 2016-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(51467020)

通信作者: 陈 洁(1975—), 女, 博士、教授, 主要从事新能源储能并网方面的研究。xj_cj@163.com

本文所提出的风氢混合储能系统是一种以氢为重要储能介质的化学储能方式,它将风电场不满足国标并网要求的有功功率波动部分,即 1 min 波动超过风电场额定功率 10% 部分和 10 min 波动超过风电场额定功率 1/3 部分,通过高频储能元件和制氢-储氢-发电系统进行消纳。系统由超级电容、质子交换膜水电解槽(proton exchange membrane water electrolysis, PEMWE)、储氢罐(hydrogen container)和质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)组成,详见图 1。

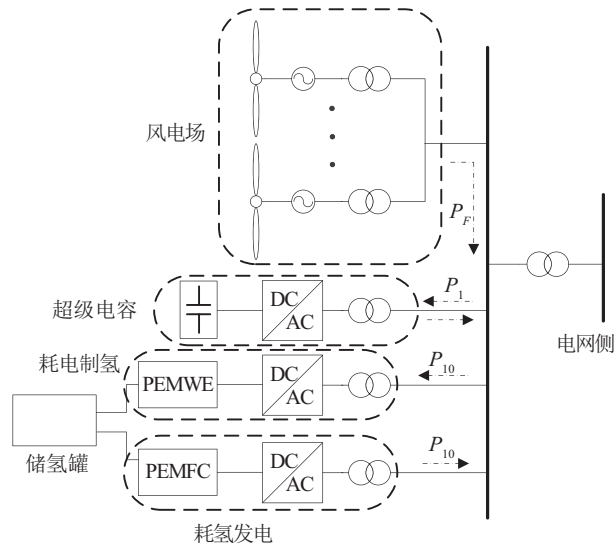


图1 风氢混合储能系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind hydrogen hybrid energy storage system

与常规储能系统相比,风氢混合储能系统的特点是:1)储能电站的建设不依赖特殊地形;2)储能介质的能量密度高,氢气的能量达到 39 kWh/kg,而主流蓄电池的平均能量密度为 37 kWh/kg^[16];3)使用 PEMFC 作为气转电媒介,其能量转化效率不低于 60%^[15];4)制氢与发电设备中质子交换膜的寿命比蓄电池中的电解液长久^[17]。

图 1 中风电场的波动超限部分 P_F 被分为双时间尺度的波动分量, $P_F = P_1 + P_{10}$, 其中 P_1 代表 1 min 波动超限分量, P_{10} 代表 10 min 波动超限分量; P_1 被超级电容平抑, $P_{10} > 0$ 部分被 PEMWE 用于耗电制氢,随后氢气被存储在储氢罐中, $P_{10} < 0$ 部分被 PEMFC 通过消耗氢气发电进行平抑;由于 P_{10} 不会既大于 0 又小于 0,所以 PEMME 与 PEMFC 不会同时工作。

2 基于高阶统计量与小波包分解的风功率平抑算法

2.1 风功率的小波包分解

小波包分解是在离散小波变换基础上发展而来。小波包分解能同时解析信号的低频与高频部分,通过合理选择小母波与分解层数,小波包分解能展现信号的细节特征,提高对信号的时频分辨率,因此广泛应用于对非平稳信号的分解。图 2 为 3 层小波包分解示意图。图 2 中原始风功率信号为 S , 数字下的首数字代表分解层数,逗号后的数字代表该层的节点回构信号。

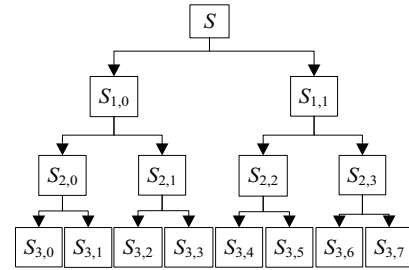


图2 3层小波包分解示意图

Fig. 2 Three schematic diagram of three layer wavelet packet decomposition

从图 2 可看出,小波包分解是 2 叉树结构,第 n 层分解得到的信号个数为 2^n 个,每一层皆对上层信号的节点进行低频和高频分解,得到下一层节点。小波包分解和回构信号的算法见式(1)和式(2):

$$d_{L-1}^{n,2m} = \sum_k h_{k-2L} d_k^{n-1,m} \quad (1)$$

$$d_{L-1}^{n,2m+1} = \sum_k g_{k-2L} d_k^{n-1,m}$$

$$d_L^{n-1,m} = \sum_k (\tilde{h}_{L-2k} d_k^{n,2m} + \tilde{g}_{L-2k} d_k^{n,2m+1}) \quad (2)$$

式中, $d_L^{n,2m}$ 、 $d_L^{n,2m+1}$ ——小波包分解系数; h_{k-2L} 、 g_{k-2L} ——小波包分解的低通、高通滤波器; \tilde{h}_{L-2k} 、 \tilde{g}_{L-2k} ——小波包回构的低通、高通滤波器; k ——分解层数; m ——信号标号。

本文对新疆某风电场 1 d 的有功功率进行小波包分解,原始风功率信号见图 3。风电场额定有功功率出力为 49.5 MW,采样时间 $T_s = 5$ s。

小母波 j 与风功率信号分解层数 n 的选择是一个求解最优问题,其函数如式(3)所示:

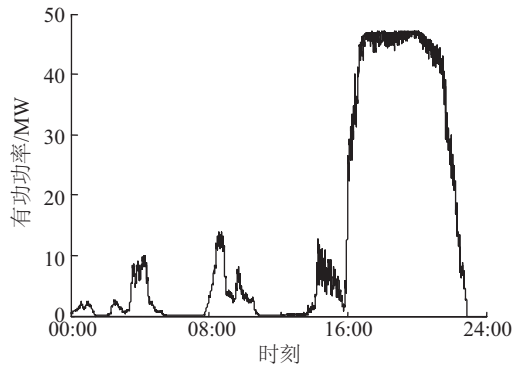


图3 风电场1 d内有功功率曲线

Fig. 3 Active power curve of wind farm in one day

$$\begin{aligned}
 & \min \quad n \\
 & \max \quad \xi = \frac{C(S, S_{n,0})}{\sqrt{C(S, S)C(S_{n,0}, S_{n,0})}} \\
 & \text{s.t.} \quad d_{n,0} = D(S, \phi) \\
 & \quad \quad S_{n,0} = R(d_{n,0}, \phi) \\
 & \quad \quad f_{1 \min} = \text{sgn}(F_1(S_{n,0})) = 0 \\
 & \quad \quad f_{10 \min} = \text{sgn}(F_{10}(S_{n,0})) = 0
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, x ——相干系数; 函数 C ——方差; $d_{n,0}$ ——小波包分解第 n 层的第一个节点的小波包分解系数; D ——小波分解函数, 见式(1); $S_{n,0}$ ——第 n 层第一个节点的回构信号; R ——信号回构函数, 见式(2); $f_{1 \min}$ 、 $f_{10 \min}$ ——信号 $S_{n,0}$ 在 1 min 或 10 min 内波动超限, 反之则无波动超限; 波动超限函数 F_1 与 F_{10} 根据文献[4]而来。

本文小母波从 Matlab 的 18 个正交小母波中选择, 利用式(3)计算每个小母波的最优分解层数及相干系数 x , 计算结果见表 1。

表1 不同小母波分解风功率信号的结果

Table 1 Results of decomposed wind power signal

小母波组	分解层数 n	相干系数 x
db2	7	0.9994
db3	8	0.9989
db4	8	0.9992
db5	7	0.9995
db6	6	0.9995
...
coif5	8	0.9991

从表 1 中可得到 db6 的分解层数 $n=6$, 为 18 个正交小母波中分解层数最少, 相干系数 x 达到最大 0.9995, 故本文选择 db6 小母波对风功率信号进行

6 层分解, 详见图 4。考虑到第 6 层分解的节点回构信号(下文简称节点信号)总共有 $2^6=64$ 个, 无法全部在本文中贴出, 所以图 4 中只给出第 0、1、62、63 这 4 个节点信号图。其中 $S_{6,0}$ 为剔除双时间尺度波动后的风功率并网信号; $S_{6,1}$ 为低频波动超限信号; $S_{6,62}$ 与 $S_{6,63}$ 为高频波动超限信号。

从图 4 中可看出并网风功率信号是原始风功率信号(图 3)的主体。低频信号的波动幅值和能量高于高频信号; 低频与高频信号的波动区间相近, 即双时间尺度波动总是相互伴随; 所有节点均为非平稳信号。为计算超级电容的容量、PEMWE 和 PEMFC 的数量, 必须找出节点信号 $S_{6,1}$ 至 $S_{6,63}$ 的特征, 将其按双时间尺度波动分为 2 类, 找到 2 类波动信号的功率峰值。

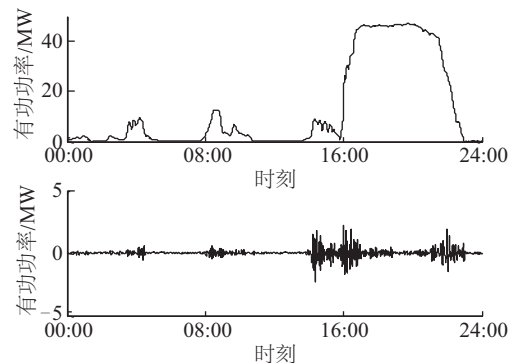
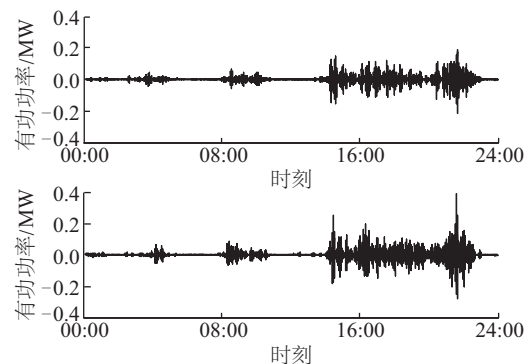
a. $S_{6,0}$ 并网信号与 $S_{6,1}$ 低频信号b. 高频信号 $S_{6,62}$ 与 $S_{6,63}$

图4 经小波包分解后的风功率曲线

Fig. 4 Wind power curve after wavelet packet decomposition

2.2 高阶统计量进行信号特征提取

节点信号 $S_{6,1}$ 至 $S_{6,63}$ 作为非平稳随机信号, 其特征无法用常规统计量(1 阶和 2 阶量)表征, 如均值和方差。现代信号处理领域提出利用高阶统计量来提取这种非平稳随机信号中的统计特征, 即计

算信号中的高阶矩和高阶累积量。

本文采用高阶统计量对 63 个节点进行特征提取。在高阶统计量中,3 阶累积量与双谱应用范围最广,主要用于提取信号中的特征频率,同时对噪声信号具有抑制作用。

设 0 均值随机变量 $x(t)$, 其 3 阶累积量为:

$$C_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)\} \quad (4)$$

式中, τ_1, τ_2 ——时间滞后常量; $E\{x(t)\}$ ——信号 $x(t)$ 的均值; 随机变量 $x(t)$ 的双谱为 3 阶累积量的傅立叶变换, 定义如式(5)所示:

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (5)$$

式中, B_x ——双谱; ω_1, ω_2 ——滞后时间常量对应的频率。

如果令 3 阶累积量中的滞后时间常量 $t_1 = t_2 = t$, 则对应的双谱公式可改写为式(6):

$$B(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{3x}(\tau) e^{-2j\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

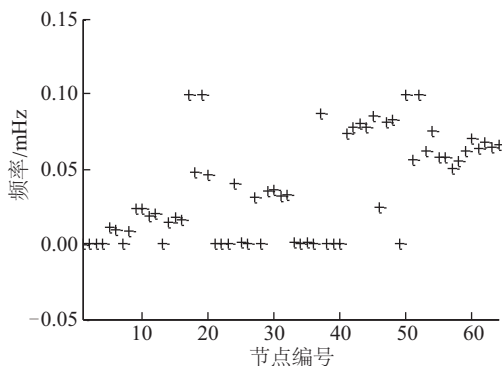
式中, $B(\omega)$ ——双谱, ω ——滞后时间常量对应的频率。

式(6)为双谱的对角线切片, 又称为 1 维谱, 它有效减少了双谱的计算量, 同时加强信号中的低频基频成分, 因此非常适用于处理如风功率这种低频信号, 其信号能量集中在 0.0~0.1 mHz。

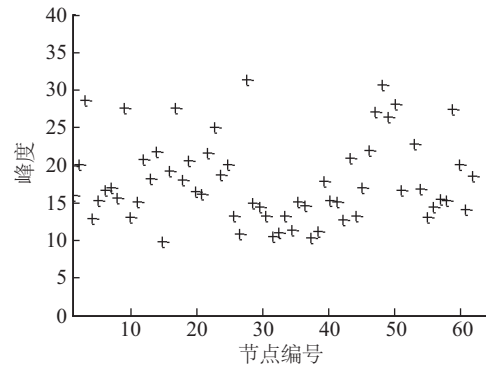
除了基频外, 信号峰度 K 可作为度量信号的幅值特征。峰度代表信号偏离高斯分布的程度, $K=0$, 代表高斯信号; $K>0$, 代表超高斯信号; $K<0$, 代表亚高斯信号。其峰度越大表示信号越容易出现极端幅值, 即幅值巨大波动。其计算公式见式(7):

$$K = E\{x^4(t)\} - 3E^2\{x^2(t)\} \quad (7)$$

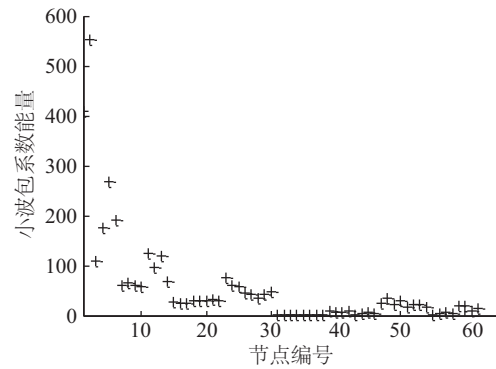
本文最后将小波包系数能量作为第 3 个特征, 以上 3 种信号特征见图 5, 其中横坐标代表 1~63 个节点编号。



a. 节点信号的 1 维谱分析



b. 节点信号的峰度



c. 节点信号的小波包系数能量

图 5 3 种特征信号的分布图

Fig. 5 Distribution of three kinds of characteristic signals

从图 5a 中可得到, 所有基频信号都在 0.0~0.1 mHz 之间, 集中分布在 0.00、0.02、0.06 和 0.07 mHz 附近, 这与风速高频变化小, 低频变化的特性非常吻合, 相比 1 阶和 2 阶统计量, 通过高阶统计量处理后的节点基频区别明显。对节点信号 $S_{6,1}$ 到 $S_{6,63}$ 的峰度 K 统计如图 5b 所示, 可得经小波包分解后的风功率重构信号的峰度分布全部属于超高斯分布, 这与风功率的非平稳性质非常一致, 其值分布区间在 10~35, 无明显分布规律。从第 20 到第 47 节点信号的出现极端幅值的概率相比其他信号较小, 说明其幅值波动较低。从图 5c 能够得出 63 个节点的主要能量集中在前 30 个, 其能量趋势随节点编号增加而减少。

2.3 使用支持向量机对信号进行分类

支持向量机(SVM)是建立在统计学习理论和结构风险最小化原理上的一种机器学习算法, 它能够有效解决小样本的分类和回归问题。文献[18]提出首先给定训练样本 $T = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, 其中 $x_i \in \mathbb{R}^n, y_i \in \{1, -1\}$, n 为样本总数, 通过求解以下优化

问题,式(8)得到最优超平面:

$$\begin{aligned} \min \{ & \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + D \sum_{i=1}^n \zeta_i \} \\ \text{s.t. } & \begin{cases} y_i(\omega \cdot x_i) + b \geq 1 - \zeta_i \\ \zeta_i \geq 0, i = 1, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, w ——线性权值向量; D ——惩罚参数; ζ_i ——松弛因子; y_i ——样本分类标签; x_i ——样本特征值; b ——阈值; 下标: i ——样本编号。

最终求得分类函数,见式(9):

$$f(x) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \text{Knel}(x_i, x) + b \right\} \quad (9)$$

式中, α_i ——拉格朗日乘子; Knel ——核函数。

本文以 1 维谱基频、峰度和小波包系数能量作为特征,对 $S_{6,1}$ 至 $S_{6,63}$ 节点信号通过 SVM 进行分类,其分类结果如图 6 所示,图中分类结果,纵轴上的数字 1 代表 10 min 功率波动超限部分,2 代表 1 min 功率波动超限部分。

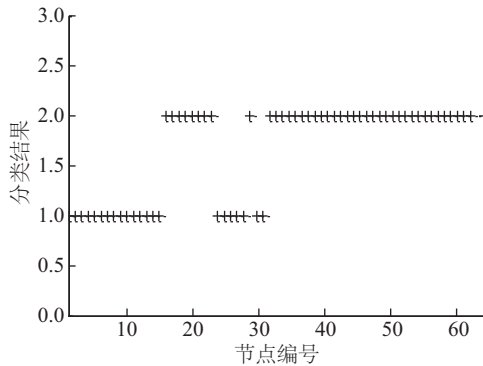
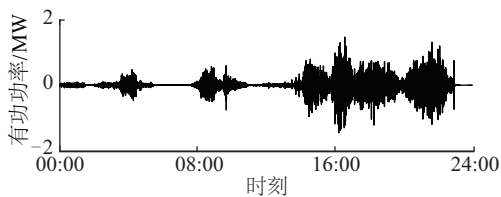


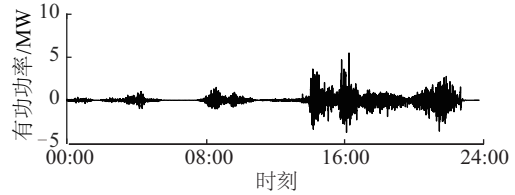
图6 SVM对节点信号分类的结果

Fig. 6 Results of SVM on node signals classification

通过对各自分类信号的叠加, P_1 与 P_{10} 见图 7, 从图 7 中可得到 1 min 波动频率比 10 min 波动大,但其波动幅值低于 10 min 部分。这与以超级电容、PEMWE 和 PEMFC 为储能元件的特性非常相似。超级电容充放电功率低,但时间响应短,即充放电频率高;PEMWE 和 PEMFC 充放电组成的制氢发电系统,功率吞吐能力大,时间响应比超级电容低。



a. 1 min有功功率波动



b. 10 min有功功率波动

图7 1 min与10 min的风功率波动超限部分

Fig. 7 Wind power fluctuation in 1 min and 10 min

2.4 风氢储能系统有功功率输出的平滑控制策略

风氢混合储能系统功率平滑控制策略见图 8。当风功率 S 信号大于小波包分解重构后的并网信号 G (节点 $S_{6,0}$) 时,首先给超级电容发送充电指令,令其吸收 1 min 有功功率 P_1 波动信号,然后对 PEMWE 发送制氢命令,令其平抑 10 min 有功功率 P_{10} 波动部分;当风功率 S 信号小于并网信号 $S_{6,0}$ 时,给超级电容发送放电命令,对 PEMFC 发送耗氢发电命令,从而完成风氢混合储能系统平滑并网风功率波动的作用。

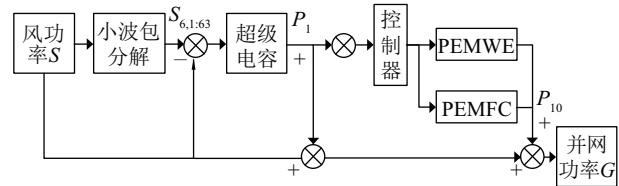


图8 风功率并网控制框图

Fig. 8 Block diagram of wind power grid connected control

3 算例仿真

3.1 风氢混合储能与单类型电池储能对风电场功率波动平抑效果对比

利用图 3 提供的风电场有功出力数据,本文采用风氢混合储能系统对高阶统计量-小波包分解后的风功率波动信号进行平抑,同时以常规混合储能系统,即以超级电容和蓄电池作为储能元件,通过一阶低通功率平滑算法进行对比,其效果如图 9 所示,其中主图为风氢混合储能系统与常规储能系统风功率平滑效果对比图,子图 9a 是主图中虚线方框的放大部分,由于风氢混合储能系统的功率平滑曲线与目标曲线相差极小,故在子图 b 中放大将其显示。

从图 9 可得到,风氢混合储能系统比常规混合储能系统更加平滑地抑制了风功率波动,其曲线基本与目标曲线一致,即对目标功率的跟踪性能好于

常规混合储能系统。而常规混合储能系统平滑功率波动效果差于风氢混合储能系统,特别在波峰位置曲线毛刺较多,详见图9。

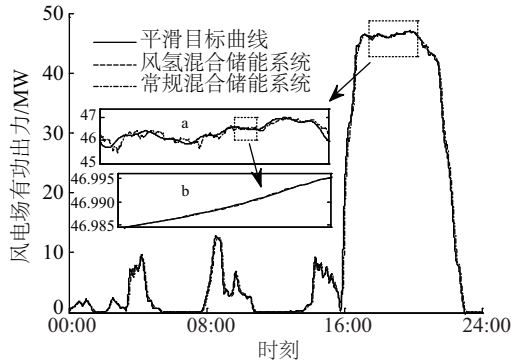


图9 风氢混合储能与常规混合储能平滑风电场有功功率波动效果图

Fig. 9 Wind hydrogen hybrid energy storage and conventional hybrid energy storage to stabilize the wind power fluctuation effect diagram

图10为2种储能方式输出有功功率于目标功率曲线之间的误差。由此可以得出本文所提出的功率平滑算法优于一阶低通功率平滑算法。由图10可得到,当2种储能方式在并网目标功率曲线一致下,风氢混合储能的误差在 ± 35 kW之间变化,最大值为 -33.648 kW;而常规混合储能的误差在 ± 2 MW之间波动,最大值为 -1.732 MW,常规混合储能系统的最大功率误差是风氢混合储能系统最大功率误差的53倍。

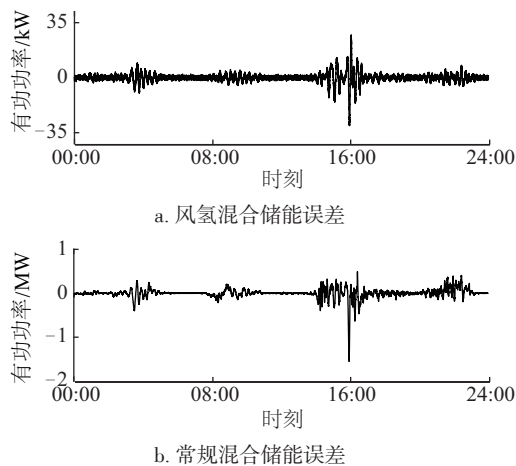


图10 2种储能方式有功功率平滑误差曲线
Fig. 10 Two kinds of storage modes of active power control error curve

3.2 风氢混合储能与常规混合储能的容量

本文根据文献[19]所提供的质子膜面积计算

方法,为平抑 P_{10} 波动,得出在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、1个标准大气压下,单位面积(cm^2)上最大承载电流 2 A 、两极间电压为 2.4 V 时,PEMWE质子膜面积总共需要 4500 m^2 ;储氢系统是一个材料学、物理学和化学交织的综合学科,本文对此不作探讨并假定储氢系统的容量能够全部存储由PEMWE制造出的氢气;根据Simulink中提供的PEMFC模型信息,在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、1.5个标准大气压下,额定输出功率为 50 kW 的PEMFC需要102台。通过文献[20]给出的超级电容容量计算方法,同时按照2.2节所提供的小波包能量系数及2.3节提供的分类结果,得到超级电容的容量为 2.88 MWh 。根据文献[21]给出的电池容量计算方法,同时考虑到电池需要20%的裕度,本文得到在常规混合储能方式下,超级电容的容量与风氢混合储能系统一致,蓄电池最大容量为 22 MWh 。

3.3 风氢混合储能系统的运行状态

风氢混合储能系统中制氢速度、耗氢速度和超级电容的电荷状态(state of charge, SOC)是风氢混合储能系统功率平滑控制的关键参数。根据文献[19]可得到在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、一个标准大气压,单位面积(cm^2)下制氢速度与功率之间是一种近似线性的关系。虽然制氢速度近似 0.738 mol/W ,但考虑到风功率波动是MW级别,即制氢速度能够达到 $7.38 \times 10^5\text{ mol/MW}$,即 $1.476 \times 10^3\text{ kg/MW}$,通过图9中给出的10 min有功功率波动可以得到,1 d中制氢速度的波动见图11。

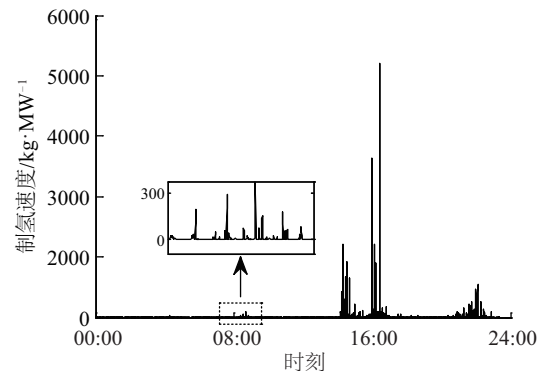


图11 风氢混合储能系统1 d的制氢速度
Fig. 11 Hydrogen production rate in one day of wind hydrogen hybrid energy storage system

对Simulink中提供的PEMFC模型仿真可以得到一天中风氢混合储能系统耗氢的波动速度见图12。

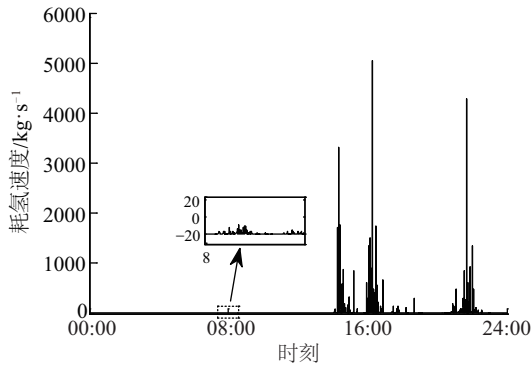


图 12 风氢混合储能系统的耗氢速度

Fig. 12 Hydrogen consumption rate of wind hydrogen hybrid energy storage system

从图 11 与图 12 可看出,制氢速度与耗氢速度同图 10 中 P_{10} 的波动趋势一致,储氢系统的频率响应很好,能够及时对波动超限部分进行平抑,超级电容的 SOC 状态计算见下式 10,式中 E_c^0 为超级电容初始容量,其值设置为 0.5; η_c 、 η_d 为充放电效率; P_c 、 P_d 为充放电功率; E_c^{\max} 为超级电容额定容量。仿真得到超级电容 SOC 状态见图 13。从图 13 可得出超级电容的电荷量在 20%~80%,满足安全运行区间,同时波动幅值在 ± 0.1 之内且波动频繁,与 1 min 尺度风功率波动特征相同。在风氢混合储能系统中添加超级电容用于平抑 1 min 级超限功率波动与 PEMWE、PEMFC 组成的储氢系统能够有效平滑风电场功率曲线。

$$SOC = \frac{E_c^0 + \int_0^t (\eta_c P_c - \eta_d P_d) dt}{E_c^{\max}} \quad (10)$$

式中, E_c^0 、 E_c^{\max} ——超级电容的初始容量和额定容量。

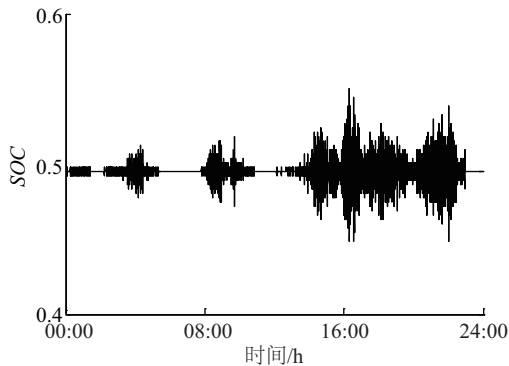


图 13 超级电容荷电状态

Fig. 13 SOC of supercapacitor

4 结 论

由本文提出使用小波包分解风功率曲线得到的高频信号,通过高阶统计量分析各个信号的特征值,利用支持向量机根据信号特征进行分类,准确得到双时间尺度功率波动超限部分。将 2 种功率波动通过以质子交换膜电解槽、质子交换膜燃料电池和超级电容组成的风氢混合储能系统进行吸收,最后使用风电场一天的风功率数据进行验证,同时通过常规混合储能系统进对比,得到本文所提出的平滑风功率方法的有效性。本文可为国内在电转气这一新型储能领域的功率平滑控制策略上提供一定借鉴,在工程上具有一定参考价值。

[参考文献]

- [1] 周 强, 杨仕友. 中国西北地区新能源发展总结与展望[J]. 研究与探讨, 2018, 40(10): 25—32.
- [1] Zhou Qiang, Yang Shiyu. Summary and prospect of new energy development in Northwest China[J]. Research and Approach, 2018, 40(10): 25—32.
- [2] Han Xiaojuan, Chen Fang, Cui Xiwang, et al. A power smoothing control strategy and optimized allocation of battery capacity based on hybrid storage energy technology[J]. Energies, 2012, (5): 593—1612.
- [3] Wee K W, Choi S S, Vilathgamuwa D M. Design of a least-cost battery-supercapacitor energy storage system for realizing dispatchable wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4 (3) : 768—796.
- [4] 张 坤, 毛承熊, 谢俊文, 等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79—87.
- [4] Zhang Kun, Mao Chengxiong, Xie Junwen, et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 (25): 79—87.
- [5] 王一波, 曹 睿, 王昊轶, 等. 基于平滑功率变化的大型并网光/储电站容量配比研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(4): 1010—1017.
- [5] Wang Yibo, Cao Rui, Wang Haoyi, et al. Research on capacity ratio of large-scale on-grid PV/battery station based on mitigating PV power change[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2015, 36(4): 1010—1017.
- [6] Jiang Quanyuan, Wang Haijiao. Two-time-scale

- coordination control for a battery energy storage system to mitigate wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 52—61.
- [7] Paatero J V, Lund P D. Effect of energy storage on variations in wind power [J]. Wind Energy, 2005, 8(4): 421—441.
- [8] 冯志鹏, 朱萍玉, 褚福磊. 基于自适应多尺度线性调频小波分解的水轮机非平稳振动信号分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 105—110.
- [8] Feng Zhipeng, Zhu Pingyu, Chu Fulei. Time-frequency analysis of hydroturbine nonstationary vibration signal based on adaptive multi-scale chirplet decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 105—110.
- [9] Li X. Fuzzy adaptive Kalman filter for wind power output smoothing with battery energy storage system[J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(5): 340—347.
- [10] Jiang Quanyuan, Hong Haisheng. Wavelet- based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363—1372.
- [11] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 103—109.
- [11] Hong Haisheng, Jiang Quanyuan, Yan yuting. An optimization control method of battery energy storage system with wind power fluctuations smoothed in real time[J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(1): 103—109.
- [12] 于 芑, 周 玮, 孙 辉, 等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 127—133.
- [12] Yu Peng, Zhou Wei, Sun Hui, et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 127—133.
- [13] 王一家, 董朝阳, 徐 岩, 等. 利用电转气技术实现可再生能源的大规模存储与传输[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3586—3595.
- [13] Wang Yijia, Dong Zhaoyang, Xu Yan, et al. Enabling large- scale energy storage and renewable energy grid connectivity: A power-to-gas approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3586—3595.
- [14] 周 林, 黄 勇, 郭 珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147—152.
- [14] Zhou Lin, Huang Yong, Guo Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147—152.
- [15] Schainker R B. Executive overview: Energy storage options for a sustainable energy future[A]. IEEE Power Engineering Society General Meeting[C], Denver, CO, USA, 2004.
- [16] 王一家, 董朝阳, 徐 岩, 等. 利用电转气技术实现可再生能源的大规模存储与传输[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3586—3595.
- [16] Wang Yijia, Dong Zhaoyang, Xu Yan, et al. Enabling large- scale energy storage and renewable energy grid connectivity: A power-to-gas approach [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3586—3595.
- [17] 王保国. 新能源领域的质子交换膜研究与应用进展[J]. 膜科学与技术, 2010, 30(1): 1—8.
- [17] Wang Baoguo. Research and application progress of proton exchange membrane in the new energy field [J]. Membrane Science And Technology, 2010, 30(1): 1—8.
- [18] 詹仲强, 陈 洁, 黄 净, 等. 基于运行数据和支持向量机的风电场动态建模[J]. 可再生能源, 2015, 33(11): 1640—1645.
- [18] Zhan Zhongqiang, Chen Jie, Huang Jing, et al. Wind farm modeling based on running data and SVM algorithm [J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(11): 1640—1645.
- [19] Carmo M, Fritz D L, Mergel J, et al. A comprehensive review on PEM water electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(12): 4901—4934.
- [20] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [21] Yang Shuli, Hui Dong, Li Jianlin, et al. Selection of the optimal battery capacity for wind farm [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(9): 1—4.

APPLICATION OF HIGHER ORDER STATISTICS AND WAVELET PACKET DECOMPOSITION IN WIND HYDROGEN HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM

Chen Jie, Zhan Zhongqiang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830002, China)

Abstract: In order to stabilize the wind power fluctuation, this paper proposed a method that using the wavelet packet to decompose the wind power signal to obtain the overrun component of power fluctuation, applying higher order statistics analysis to acquire the characteristic value of each component, classifying each the component by using support vector machine algorithm, obtaining the high and low frequency fluctuation component which needed to absorb respectively by using supercapacitor and hydrogen production and generation system in the wind hydrogen hybrid energy storage system, the power smoothing control strategy of wind hydrogen hybrid energy storage system is built. At last, The proposed method can stabilize the wind power fluctuation and smooth the wind power curve effectively, by comparing with the conventional hybrid energy storage system in the simulation, it provides a reference for the new energy storage technology of the Power to Gas.

Keywords: higher order statistics; wavelet packet; support vector machine; power fluctuation; wind hydrogen hybrid energy storage system; wind farm