

风电功率波动频率域分析及储能平滑功率算法优化

李 征, 陈佳瑜, 石 坤

(东华大学信息与科学技术学院电气电子工程系, 上海 201620)

摘 要: 从风电机组的小信号分析模型出发, 推导出机组的滤波特性; 再从国家风电并网标准角度出发, 通过对比分析常用的低通滤波算法、滑动平均法和小波包分析的特点, 提出小波包低通滤波算法的平滑控制策略, 在满足并网标准的同时减少电池荷电状态 SOC 的变化幅值和充放电次数, 延长电池使用寿命。用实际风电场出力数据进行仿真, 结果表明所提控制策略可以在满足风功率波动指标的基础上取得良好的 SOC 控制效果。

关键词: 风力发电; 低通滤波; 荷电量控制; 平抑算法; 储能; 小波包分析

中图分类号: TM743

文献标志码: A

0 引 言

随着对新能源开发利用的日益重视, 中国风力发电在整个电力系统中的比重不断增加。风电固有的波动性和间歇性给电力系统安全稳定及电能质量带来的风险也越来越大, 风电并网国家技术标准对风电场的出力波动、故障穿越、有功无功调节等方面都做出了明确规定^[1]。其中, 从 1 min 和 10 min 的最大变化量角度提出的对风电场出力波动的限制, 为平抑风电场出力波动提供了依据。平抑风电场出力波动除了可从改进风电机组和风电场的控制着手外, 利用储能系统补偿风功率波动也是一条重要的途径, 可弥补风场控制的局限, 减少风电并网对电网的冲击。

目前, 储能系统在新能源并网方面的应用日益广泛, 可用于平滑风功率的出力波动、提高风电的可调性、改善电能质量^[2]、提高风电的暂态支撑能力参与电力系统调频调峰等。采用储能系统平滑风电功率波动是减少风电波动对电网稳定性和电能质量影响的研究和示范应用热点, 然而如何确定需要滤波的频段及择优选择滤波算法却是尚需讨论的问题。在平抑风功率波动方面, 文献[3-5]采用低通滤波控制策略实现风电场输出功率波动的平滑。此算法滤波时间常数越大波形越平滑, 但同时储能的容量也会增大, 导致成本增加, 且在控制策略中没有考虑电池的荷电状态 SOC , 缺乏对电池

的保护。文献[6-7]在低通滤波控制策略中加入了对电池 SOC 的控制, 从只能限定 SOC 的边界, 发展到能够在 SOC 达到临界值时进行功率调节, 补充使 SOC 水平。文献[8]研究滑动平均法的应用, 滑动平均窗口的长度越大, 平滑效果越好, 但是需要的储能电池容量也越大。文献[9]通过不断调整滑动平均算法的窗口宽度和补偿程度, 对蓄电池和超级电容的储能状态进行控制, 避免过充过放, 然而却无法使窗口宽度随功率波动进行调整。文献[10]利用小波包原理将风功率在频域进行分解, 计算出高低频的出力数据, 将高频数据作为储能系统的参考值, 达到平滑波动的目的。文献[11]提出一种基于离散小波变换的多类型储能系统容量配置算法, 首先采用基于熵权法的小波函数优化选择算法得到优化小波, 然后对风功率曲线进行离散小波变换, 再经统计分析, 发挥超级电容动态适应性强和锂电池能量密度高的特点, 形成经济、有效的容量配置方案。然而基于小波算法的滤波虽然可滤去一定的频率成分, 但对并网标准要求的 1 min 和 10 min 内的最大变化量的减小却不明显。总的来说, 现有研究对目前常用的低通滤波、滑动平均、小波变换 3 种平抑风电波动的算法仍缺少分析比较, 不利于指导实际应用。

掌握风电出力波动的频段对于合理选择滤波储能控制回路结构、参数及容量配置具有指导意义。本文在推导风电机组小信号模型基础上分析风电机组输

收稿日期: 2017-10-17

基金项目: 上海市自然科学基金(14ZR1400700)

通信作者: 李 征(1961—), 女, 博士、教授, 主要从事能源发电系统控制及并网、储能系统应用等方面的研究。lizheng@dhu.edu.cn

出功率的波动频率特性,给出采用电池储能装置需要考虑的滤波范围。对比目前常用的3种风电滤波算法对平抑风电功率波动的特性,以SOC波动范围及储能系统转换次数为指标,分析相同容量下的储能系统平抑风电功率的效果。结合不同类方法的优点,提出小波包低通滤波风电平抑算法,并采用实际风电场出力数据对算法进行了仿真验证。研究结论可为工程应用提供参考。

1 风电机组的滤波特性的小扰动分析

自然界的风速变化具有多样性,有渐变风、阵风、湍流风等,包含的变化频率成分也是多样的。风轮由于自身的惯性,对风频中的高频成分具有一定的滤波作用,其中变桨动作以及轴系在功率传递过程中也同样具有滤波作用。在此,采用小信号分析方法进行全面的分析,为风场选配储能能提供参考。

1.1 风力机气动转矩的风能传递小扰动模型

风轮捕获的气动功率可表示为:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \quad (1)$$

式中, ρ ——空气密度, kg/m^3 ; λ ——叶尖速比, $\lambda = \omega R / V_w$, 其中 R 为风轮半径, m , V_w 为平均风速, m/s , ω 为风轮转速, r/min ; β ——桨距角, $(^\circ)$; C_p ——功率系数; A ——风轮扫掠面积, m^2 。

气动转矩 T_w (Nm) 为:

$$\begin{aligned} T_w &= \frac{1}{2} \rho A R \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} V_w^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho A R C_t(\lambda, \beta) V_w^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, C_t ——转矩系数, $C_t(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}$ 。

则可推导出气动转矩的小扰动方程,并以稳态工作点 $T_{w0} = \frac{1}{2} \rho A R C_{t0} V_{w0}^2$ 为基准标么化,其中 T_{w0} 、 C_{t0} 、 V_{w0} 分别代表风力机在稳态工作点时对应的物理量值,则有:

$$\Delta \bar{T}_w = \left(\frac{\lambda_0 C_{t1}'}{C_{t0}} \Delta \bar{\lambda} + \frac{C_{t2}'}{C_{t0}} \Delta \bar{\beta} \right) + 2 \Delta \bar{V}_w \quad (3)$$

式中, $C_{t1}' = \frac{\partial C_t}{\partial \lambda}$, $C_{t2}' = \frac{\partial C_t}{\partial \beta}$; λ_0 ——稳态工作点时的叶尖速比。

变桨控制器外环为转速环,设桨距角调节时间常数为 τ ,并且小扰动下不用考虑变桨速率限制,则变桨系统动态方程可用一节惯性环节表示,为:

$$(\tau s + 1) \Delta \bar{\beta} = k_\beta \Delta \omega \quad (4)$$

式中, k_β ——放大倍数; s ——频域变量。

将式(4)代入到转矩扰动方程式(3)得:

$$\Delta \bar{T}_w = \left(\frac{\lambda_0 C_{t1}'}{C_{t0}} + \frac{C_{t2}'}{C_{t0}} \frac{k_\beta \omega_0}{\tau s + 1} \right) \Delta \bar{\omega}_t + \left(2 - \frac{\lambda_0 C_{t1}'}{C_{t0}} \right) \Delta \bar{V}_w \quad (5)$$

式(5)可简写为:

$$\Delta \bar{T}_w = k_{wt} \Delta \bar{\omega}_t + k_{vw} \Delta \bar{V}_w \quad (6)$$

式中,令 $k_{wt} = \frac{\lambda_0 C_{t1}'}{C_{t0}} + \frac{C_{t2}'}{C_{t0}} \frac{k_\beta \omega_0}{\tau s + 1}$; $k_{vw} = 2 - \frac{\lambda_0 C_{t1}'}{C_{t0}}$; ω_t 、 ω_0 ——风轮转速和稳态工作点时的风轮转速, rad/s 。

将 $S = j\omega$ 代入式(6)即可得到包含桨距角动态特性的转矩频率特性。需要注意的是 k_{wt} 为复数,但当认为风频扰动远小于变桨时间时,则为实数。由此可得到包含桨距角动态特性的转矩频率特性。

1.2 轴系传动小扰动模型

风电机组的功率控制形式主要有最大功率跟踪控制、恒功率控制和一定斜率控制,本质上这3种控制都可描述为按照一定斜率的转速控制,因而电磁转矩可表示为:

$$\Delta \bar{T}_e = k_{te} \Delta \bar{\omega}_g \quad (7)$$

式中, k_{te} ——电磁转矩控制系数, $k_{te} = \frac{\omega_0}{T} k$; $\bar{\omega}_g$ 、 ω_{g0} ——发电机转速和稳态工作点时的发电机转速, rad/s , k ——设定的控制斜率;气动转矩 T_w 采用式(6)简略形式。

轴系采用双质量块模型进行建模,可推导出状态方程:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{\omega}_t \\ \Delta \dot{\omega}_g \\ \Delta \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{k_{wt} - D}{2H_{t0}} & \frac{D}{2H_{t0}} & -\frac{k_s}{2H_{t0}} \\ \frac{D}{2H_{g0}} & -\frac{D + k_{te}}{2H_{g0}} & \frac{k_s}{2H_{g0}} \\ \omega_0 & -\omega_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \omega_t \\ \Delta \omega_g \\ \Delta \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{vw} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta \bar{V}_w \quad (8)$$

式中, H_{t0} ——等效风轮惯量, s ; H_{g0} ——等效电机惯量, s ; D ——轴系阻尼系数, $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})/\text{rad}$; k_s ——等效刚度, $(\text{N} \cdot \text{m})/\text{rad}$; θ ——轴的扭转角, rad 。

状态方程表示的输入输出传递函数为:

$$G(s) = \frac{\Delta x}{u} = (sI - A)^{-1} B \quad (9)$$

式中, Δx ——状态变量; u ——输入变量; I ——单位矩阵; s ——频域变量。

$$A = \begin{pmatrix} \frac{k_{\omega l} - D}{2H_{i0}} & \frac{D}{2H_{i0}} & -\frac{k_s}{2H_{i0}} \\ \frac{D}{2H_{g0}} & \frac{D + k_{lc}}{2H_{g0}} & \frac{k_s}{2H_{g0}} \\ \omega_0 & -\omega_0 & 0 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} k_{vw} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2}J\omega_{i0} = T_{w0}H_{i0} \\ \frac{1}{2}J\omega_{g0} = T_{w0}H_{g0} \\ \omega_0 = (1-s)\omega_b \end{cases} \quad (10)$$

式中, ω_b ——同步角频率, rad/s; J ——转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

则风速-发电机转速的传递函数为:

$$\frac{\Delta\bar{\omega}_g}{\Delta\bar{V}_w} = G_2(s) = \frac{a_2s^2 + a_1s + a_0}{s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0} \quad (11)$$

式中, 分子多项式的系数 a_0 、 a_1 、 a_2 分别为:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{k_s\omega_b}{2H_{g0}}k_{vw} \\ a_1 = \frac{D}{2H_{g0}}k_{vw} \\ a_2 = 0 \end{cases}$$

且分母多项式系数 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 分别为:

$$\begin{cases} b_0 = \frac{k_s\omega_b}{4H_{i0}H_{g0}}(k_{lc} - k_{\omega l}) \\ b_1 = \frac{k_s\omega_b}{2H_{i0}} + \frac{k_s\omega_b}{2H_{g0}} - \frac{(k_{lc} + D)(k_{\omega l} - D)}{4H_{i0}H_{g0}} - \frac{D^2}{4H_{i0}H_{g0}} \\ b_2 = \frac{k_{lc} + D}{2H_{g0}} - \frac{k_{\omega l} - D}{2H_{i0}} \\ b_3 = 1 \end{cases}$$

根据式(7)和式(11)得:

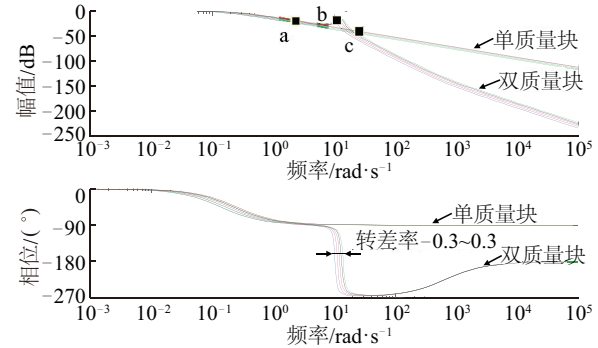
$$\frac{\Delta\bar{T}_c}{\Delta\bar{V}_w} = \frac{a_2s^2 + a_1s + a_0}{s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0}k_{lc} \quad (12)$$

从式(12)可看出, 电磁转矩变化的斜率决定了滤波效果。斜率越小, 风速扰动对电磁转矩的影响越小, 当斜率为零时, 转矩波动为零, 此时对应恒功率控制输出的情况。

1.3 机组的滤波频率特性

根据典型 2 MW 机组的参数可计算并绘制出不同转差频率(-0.3~0.3)下, 轴系等值为双质量块时的频率特性(单质量块时轴系频率特性作为比较), 见图 1。从图 1 可见, 不同转差率下风力机的滤波特性相差不大, 曲线规律相同且接近。风轮转速低, 滤波效果较好, 这是因为等效时间常数大; 机组传动系等值为集总质量块或双质量块的低频滤波效果基本重合, 但高频滤波效果差异大; 从图 1 中还可看出, -20 dB 时, 二者对应频率约为 0.34 Hz (2.16 rad/s), 可认为此段风速波动基本被

衰减; -40 dB 时, 约为 3.7 Hz (23.3 rad/s), 可认为风速波动几乎完全被机组自身衰减。轴系频率特性存在约为 1.7 Hz (10.6 rad/s) 的谐振。



注: a. 幅度: -20.7 dB, 频率: 2.16 rad/s; b. 幅度: -16.9 dB,

频率: 10 rad/s; c. 幅度: -40.4 dB, 频率: 23.3 rad/s

图 1 不同转差率下风电机组的频率特性

Fig. 1 Bode curve of wind turbine with different slip ratio

变桨伺服系统时间常数约为 0.25 s, 如果以 4 倍时间常数作为 2 个动态特性的分离时间常数, 根据伺服系统时间常数可知, 当风速波动时间常数大于 $4 \times 0.25 = 1$ s 时(对应频率 0.159 Hz 的频段), 属慢过程, 可忽略桨距角调节的作用, 这时由桨距角引入的系数从复数变为实数。由此可见, 采用变桨控制可对 0.159~0.700 Hz 的风速波动产生滤波作用。

在电力系统中, 同步机担负着系统的调节任务, 由于同步机自身转子惯量和调速系统的时间常数决定了其对于 0.01~0.10 Hz 内的功率波动无法进行补偿^[8], 而风功率中却包含了这部分波动频率, 因而对系统的影响是最大的。采用储能电池补偿该部分的波动是可行的方法。由于储能电池售价较高, 不宜配置过多, 对于只需要覆盖上述波动频段的滤波时间常数不需要太大, 即不需要使用容量过大的储能电池。对于采样周期 Δt 的选取, 根据采用定理知采样频率至少应大于 0.340 Hz 的 2 倍, 则 Δt 应取为小于 1.47 s。另一方面, 同步机的功率调节存在速度制约, 因而最大功率变化量也是一项需要储能来控制的指标。

2 用于平抑波动的储能系统总体控制策略

用于平抑风功率波动的储能系统一般接在风电场并网口低压母线, 通过控制储能系统的输出功率 P_b , 补偿风电场输出功率 P_w 的波动, 使风电并网功率 P_g 波动减小并符合并网标准要求。接线如图 2 所示, 其功率关系式为:

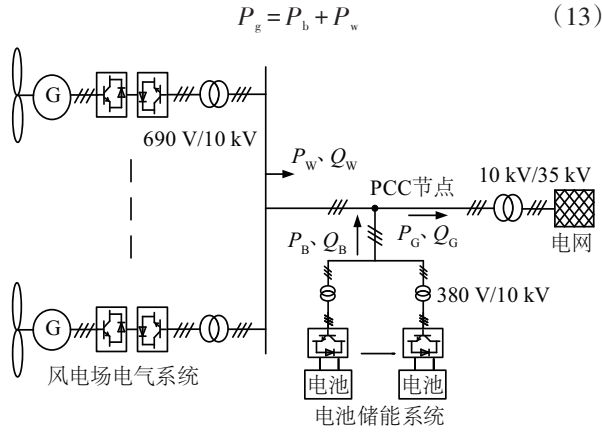


图2 含储能风电场的结构示意图

Fig. 2 Structure of wind farm with energy storage system

执行滤波任务过程中,为避免储能电池过充过放而损伤寿命,一般将 SOC 设定在 $[25\%, 75\%]$ 之间,即设 $SOC_{\max}=75, SOC_{\min}=25, SOC_{\text{ref}}$ 为介于上限和下限之间的荷电状态。

荷电状态 SOC 可通过式(14)计算:

$$S_{\text{soc}}(i) = S_{\text{soc}}(i-1) + \frac{\int_{i-1}^{i+\Delta t} P_b dt}{E_b} \quad (14)$$

式中, $S_{\text{soc}}(i)$ ——第 i 时刻电池的荷电状态; E_b ——电池的额定电能, kWh。

储能系统的工作控制流程见图3所示。

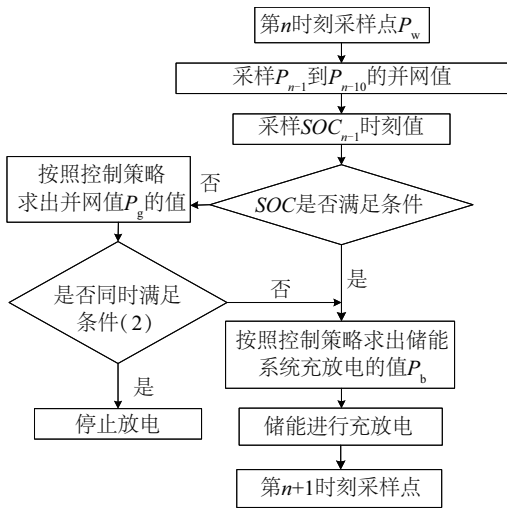


图3 储能系统的工作流程图

Fig. 3 Work flow chart of energy storage system

当 SOC 在 SOC_{ref} 范围内时,按照平滑控制策略进行充放电;当 SOC 达到临界值 SOC_{\max} 时,若 P_g 波动范围在并网标准之内则停止充电,可以放电;若 P_g 波动范围超出并网标准则继续充电,通过在满足功率波动要求内

的自主放电达到不过充电的目的;当 SOC 低于临界值 SOC_{\min} 时,若 P_g 波动范围在并网标准之内则停止放电;若 P_g 波动范围超出并网标准则继续放电,并同样通过在满足功率波动要求内的自主充电达到不过放电的目的。功率波动的允许范围可按照上文提到国家电网并网标准。

3 常用风功率滤波方法对比

为展现低通滤波、滑动平均滤波、小波包滤波3种算法在相同储能容量下平滑风功率波动的效果,采用某装机容量为13台 $\times 1.5$ MW的实际风电场数据,该风场配有2 MW/2 MWh的磷酸铁锂电池。取风电场连续5日内的有功出力数据为样本序列作为仿真分析的基础,风电场数据的最大出力为18.295 MW。

对锂电池而言,充放电次数越少,对电池的寿命损伤相对越少且因电能变换而损耗的能量也越小;同时 SOC 波动范围越大,对电池寿命损伤越大^[12]。因而,对于滤波算法性能的比较,除考虑对并网风功率波动的抑制效果外,还要考虑对电池使用寿命的影响。本文设定的比较量包括:滤波后风电功率一定时间间隔的最大波动量在一定功率区间的频度(或概率分布)、总的最大波动量、荷电状态 SOC 的波动范围、充放电次数以及一次充电或放电中的容量变化大小(一次充放电深度)。

功率波动的最大变化量计算中,风电功率在每1 min或每10 min内的最大功率变化量即为1 min或10 min内的峰谷差。

若 l 为在上述时间内的采样数量, k 代表第 k 次采样,则功率变化的离散化可表示为:

$$\Delta P_{\max} = \max\{P_k - P_{k-1}, P_k - P_{k-2}, \dots, P_k - P_{k-l}\} \quad (15)$$

此时的总最大波动量是指每10 min(或每1 min)最大波动量中的最大值。储能电池荷电量的观察可采用以30 min为时间间隔,用30 min内最大的 SOC 减去最小的 SOC 值计算其最大波动量。

3.1 低通滤波(LPF)算法

1阶低通滤波是最常用的滤波方法,其离散化表示为:

$$Y(n) = \frac{T}{T + \Delta t} Y(n-1) + \frac{\Delta t}{T + \Delta t} X(n) \quad (16)$$

式中, $Y(n)$ ——第 n 时刻的输出信号; $X(n)$ ——第 n 时刻的输入信号; T ——采样周期, s; Δt ——计算时间间隔, s。

低通滤波器的截止频率即为 $f=1/(2\pi T)$ 。 T 越大,截止频率越小,滤波带宽越窄,平滑效果越好;同时需要的储能越多,因此时间常数 T 的取值直接决定了平滑效果和储能系统容量。根据 1.3 节的讨论,要抑

制 0.01 Hz 以上的波动,则 T 可取大于 15.9 的值。

仿真风电场有功出力数据滤波前后 1 min 和 10 min 内的最大功率变化量 MPF(maximum power fluctuation)及总的最大功率变化量 TMPF(total MPF)计算结果如表 1 所示。

表 1 “低通滤波”平滑前后 1 min 和 10 min 内 MPF 概率分布以及 TMPF

Table 1 Probability distribution of MPF in 1 min and 10 min of the TMPF before and after smoothing for by LPF

							MW
平滑前后 1 min	输入功率 x	<0.5	(0.5, 1.5)	(1.5, 3.0)	>3	功率最大波动	
	前	92.75	6.86	0.39	0	2.586	
	后	99.48	0.05	0.002	0	2.024	
平滑前后 10 min	输入功率 x	<1	(1, 2)	(2, 4)	(4, 8)	>8	功率最大波动
	前	91.68	6.74	1.49	0.09	0	7.05
	后	96.53	2.6	0.78	0.00	0	5.42

并网功率及 SOC 曲线如图 4 所示。功率曲线中的局部放大取的是 2100~2350 min 时段;表 1 中数据显示平滑后绝大部分的功率波动都限制在了较小的功率区间内,最大功率变化量降低显著。对储能电池充放电功率数据的分析可知,储能系统转换的次数为 881 次,一次充电或者放电的最大能量为 0.2548 MWh。

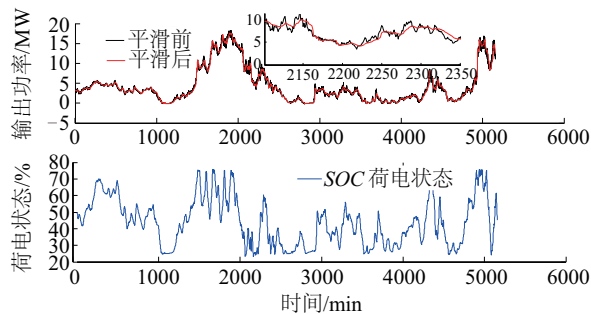


图 4 低通滤波平滑前后并网功率以及 SOC 曲线图

Fig. 4 Wind power before and after filtering by LPF and SOC curve

每相隔 30 min 的 SOC 的波动情况 MFD(maximum fluctuation distribution)如表 2 所示,大于 10%的波动概率分布占 0.2146,小于 5%的波动占 0.5051。

表 2 30 min 内 SOC 最大波动量分布

Table 2 MFD of SOC in 30 min

波动范围	>10%	5%~10%	<5%
概率分布	0.2146	0.2803	0.5051

3.2 滑动平均法分析

滑动平均法是另一种常用的滤波算法,其平滑原理

是将选定的固定长度窗口内的所有数值做算术平均,将平均值作为窗口中心点的数值输出,可表达为:

$$\begin{cases} P_{\text{fi}} = (P_{t-(N/2-1)} + P_{t-(N/2-2)} + \dots + P_{t+N/2})/N \\ P_{\text{mi}} = P_t - P_{\text{fi}} \end{cases} \quad (17)$$

式中, N ——窗口长度,为包含输入序列的数量; P_t ——实测第 t 时刻的风功率; P_{fi} ——功率的上网分量; P_{mi} ——功率的波动分量。

窗口长度 N 是滑动平均算法的一项重要参数,如果窗口长度太大,并网分量平滑但需要储能系统容量过大;而窗口较小会导致并网分量不能满足风电有功功率并网标准,对电网造成影响。

样本风电场有功出力在滤波前后 1 min 和 10 min 内最大功率波动量的分布情况见表 3,功率和 SOC 变化曲线见图 5。从表 3 和图 5 可见同样可以取得明显的平滑效果。但最大波动率分布指标略逊于低通滤波算法。

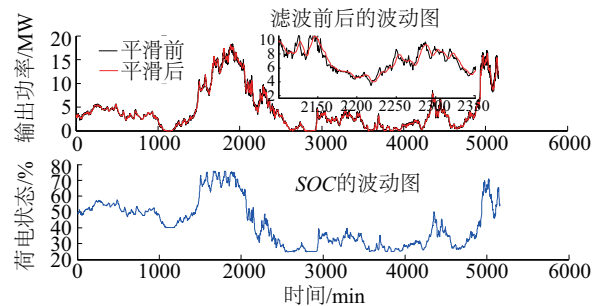


图 5 滑动平均平滑前后功率以及 SOC 曲线图

Fig. 5 Wind power before and after sliding average algorithm and battery SOC curve

表3 “滑动平均”平滑前后 1 min 和 10 min MPF 概率分布以及 TMPF

Table 3 MPF probability distribution in 1 min and 10 min of TMPF amount before and after smoothing by moving average filtering method

	输入功率 x	<0.5	(0.5, 1.5)	(1.5, 3.0)	>3	功率最大波动
平滑前后						
1 min 内	前	92.75	6.86	0.39	0	2.586
	后	98.66	1.34	0.00	0	1.29
平滑前后						
10 min 内	前	91.68	6.74	1.49	0.09	7.05
	后	93.07	5.74	1.03	0.16	5.95

对储能系统充放电功率 P_b 数据进行分析可以得知储能系统充放电转换的次数为 1495 次, 一次充电或放电的最大能量为 0.3775 MWh。这 2 项数据明显高于低通滤波算法。每 30 min SOC 的波动情况(见表 4)也大于低通滤波。

表4 30 min 内 SOC 最大波动量分布

Table 4 MFD of SOC in 30 min

波动范围	>10%	5%~10%	<5%
概率分布	0.3294	0.2433	0.4273

3.3 小波包分析法

通常, 一个信号的低频段部分为其主体部分, 可体现该信号的整体变化趋势; 高频段部分可认为是信号的噪声和干扰等。在风电平滑中可将风力机出力低频信号作为并网功率, 高频信号作为波动量来处理。

小波包分解法由小波变换法演变而来, 可同时对信号的高频分量(HP)和低频分量(LP)进行分解, 以利于分析信号的某些细节特征。其分解形式为二叉树形式, 小波包分解(3 层)的示意图如图 6 所示。

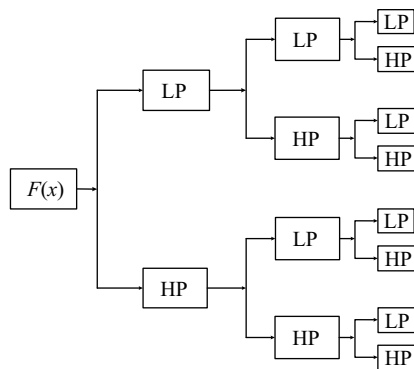


图6 小波包分解

Fig. 6 Wavelet packet decomposition

根据香农采样定理, 采样频率的一半必须大于信号

频率。若信号为 1 min 时间间隔的序列, 则信号频率为 1/60 Hz, 所以小波包分解假定采样频率为 1/120 Hz。用 db1 小波对 5 日功率信号进行 5 层小波包分解, 并重构第 5 层 32 个频段的功率分量。每个频段带宽度 $f_0 = (1/120)/32 = 2.6 \times 10^{-4}$ Hz。

第 1 个频段频率范围为 $0 \sim f_0$, 第 2 个频段频率范围为 $f_0 \sim 2f_0$, 依次类推。 $0 \sim f_0$ 为低频段, 中间频段为次高频, 最后为高频段。进行分层越多, 则低频段的截止频率越小, 波动范围越小。本文采用 5 层小波包分解, 由于锂电池的作用时间为数分钟到 1 小时, 取 30 min 为作用时间, 则作用频率为 $f = (1/60)/30 = 5.6 \times 10^{-4}$ Hz, 在第 2 个频段范围内, 属于次高频。其分解图如图 7 所示。

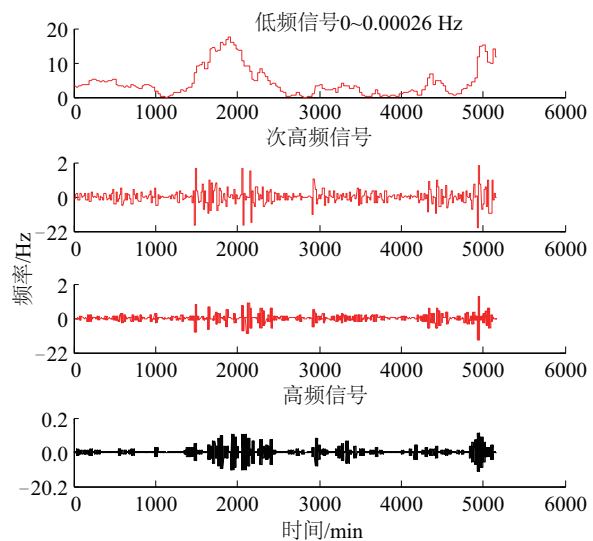


图7 风电场原始功率分解不同频次图

Fig. 7 Original wind power decomposition frequency map

储能功率平滑控制框图如图 8 所示。由图 8 可知风电场出力 P_w 即为 $X(s)$, 经过小波包分析后, 预期并网

功率为 $Y_0(s)$,则储能系统需要出力大小为 $X(s)-Y_0(s)$,
所以并网功率为 $P_g = X(s)-Y_1(s)$ 。

仿真计算结果如图 9 所示,对应分析结果见表 5。

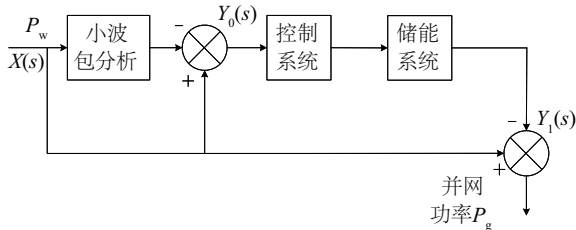


图 8 小波包控制框图

Fig. 8 Wavelet packet control block diagram

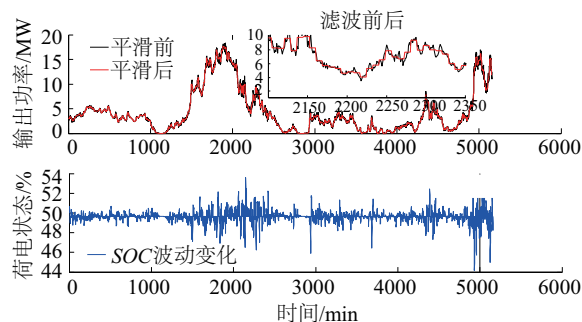


图 9 小波包平滑前后以及 SOC 曲线图

Fig. 9 Wind power before and after wavelet packet filter and battery SOC curve

表 5 “小波包”平滑前后 1 min 内和 10 min 内的 MPF 概率分布以及 TMPF

Table 5 Analysis of simulation results for MPF probability distribution in 1 min and in 10 min of TMPF amount before and after smoothing by wavelet packe filter

							MW
平滑前后 1 min 内	输入功率 x	<0.5	(0.5,1.5)	(1.5,3.0)	>3	功率最大波动	
	前	92.75	6.86	0.39	0.00	2.586	
	后	98.22	1.33	0.29	0.16	6.17	
平滑前后 10 min 内	输入功率 x	<1	(1,2)	(2,4)	(4,8)	>8	功率最大波动
	前	91.6	6.74	1.49	0.09	0.00	7.05
	后	94.9	3.38	1.62	0.09	0.00	6.34

对储能系统充放电功率 P_b 的数据分析可看出:储能系统转换的次数为 836 次,一次充电或者放电的最大能量为 0.1255 MWh。从 SOC 的波动情况(如表 6 所示)可见大于 10% 的容量波动范围占 0.1470。

表 6 30 min 内 SOC 最大波动量分布

Table 6 MFD of SOC in 30 min

波动范围	>10%	5%~10%	<5%
概率分布	0.1470	0.2051	0.6480

比较 3 种控制策略(低通滤波、滑动平均滤波、小波包滤波),在储能均为 2 MW 的前提下都能取得一定的平滑效果,其中小波的频率过滤作用最显著但最大波动量降低有限。平滑后的各项指标结果见表 7。

表 7 3 种滤波算法比较

Table 7 Contrast of three algorithms

算法名称	出力最大 波动量降低	储能系统 转换次数	SOC 波动
低通滤波	大	较少	较大
小波包	小	较少	小
滑动平均	较大	较高	大

3 种平滑滤波方法都各有优缺点,为得到更好的平滑效果且增加对储能系统的友好程度,综合算法优势,提出小波包低通滤波控制策略。

4 小波包低通滤波控制策略及仿真

由上述频域分解可知,小波包能够很好的将风功率信号在不同频段进行分解,将低频信号作为并网期望功率值,使得功率波动整体降低,减少对电网冲击。然而,小波包算法虽总体上降低了并网风电功率的波动频度,但局部功率波动量有时不仅未降低反而还会增大,这是其在功率波动平滑中存在的一项的缺陷。控制策略如图 10 所示。对此,1 阶低通滤波算法却有优势。将两者结合可形成小波包低通滤波算法,先利用小波包分

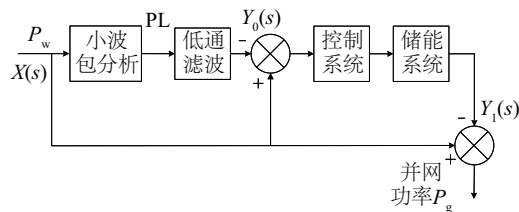


图 10 小波包低通滤波控制框图

Fig. 10 Wavelet packet LPF control block diagram

解,得到不同频域的数据,滤去高频后,将低频数据再经过低通滤波算法降低出力最大波动量,既满足了出力波动量的标准,又可使电池 SOC 波动较少,达到减少充放电次数的效果。

经过仿真,结果如图 11、表 8 所示。从表 8 可见功率的波动量和波动频率都得到了显著减小。分析储能输出功率 P_b 数据可知:储能系统充放电转换的次数为 833 次,一次充电或者放电的最大能量为 0.055 MWh。相比低通滤波、小波包、滑动平均这 3 种算法,平滑的效果有了较大提升。从 30 min SOC 的波动情况(表 9)可看到, SOC 波动量小于 5% 的概率为 0.6402,大于 10% 的概率为 0.1456,相比前 3 种算法储能电池的充放电幅

度有了显著降低,有利于保护电池的使用寿命。

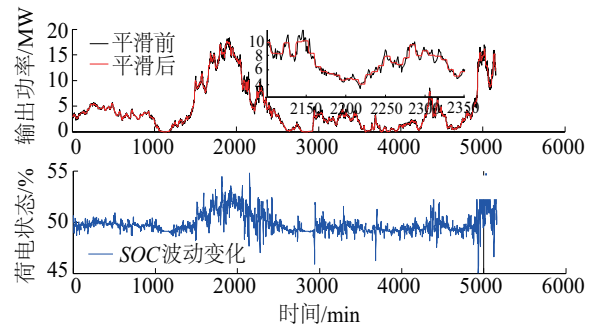


图 11 小波包低通滤波平抑前后功率以及 SOC 曲线图

Fig. 11 Wind power before and after wavelet packet LPF and battery SOC curve

表 8 “小波包低通滤波”平滑前后 1 min 内和 10 min 内的 MPF 概率分布以及 TMPF

Table 8 MPF probability distribution in 1 min and 10 min of the TMPF amount before and after smoothing by wavelet packet LPF

MW						
平滑前后 1 min 内	输入功率 x	<0.5	(0.5, 1.5)	(1.5, 3.0)	>3	功率最大波动
	前	92.75	6.86	0.39	0	2.586
	后	99.01	0.91	0.08	0	2.47
平滑前后 10 min 内	输入功率 x	<1	(1, 2)	(2, 4)	(4, 8)	功率最大波动
	前	>8	91.6	6.74	1.49	7.05
	后	0.09	0	96.3	2.70	5.84

表 9 30 min 内 SOC 波动情况

Table 9 MFD of SOC in 30 min

波动范围	>10%	5%~10%	<5%
概率分布	0.1456	0.2142	0.6402

5 结 论

采用小信号分析法,可得出考虑变桨动作以及轴系 2 阶传递特性时风电机组的风速-功率传递频率特性,从而得到风电机组滤波的截止频率,可为应用储能系统进行功率平滑的控制系统设计及控制算法参数选择提供依据。分析得出:机组惯量对 0.340 Hz 以上频段的风速波动有一定的衰减作用;采用变桨控制可以对 0.159~0.700 Hz 的风速波动进行滤波,但满足并网标准和同步机调节特性的需求则需要用储能。反映风功率波动的采样周期则应取为小于 1.47 s。

小波包低通滤波平抑风电波动控制策略结合了 2 种常见控制策略的优点,在取得有效过滤高频分量的

同时,降低功率最大变化率。通过实际风电场的数据仿真分析表明,该方法将 30 min SOC 波动小于 5% 的概率从滑动平均算法的 0.4273 提高到了 0.6402;将 10 min 最大功率波动从 6.42 MW 降至 5.84 MW,下降了 10%,将充放电次数从 1495 次降至 833 次,减少了 79.5%。因而采用该算法 1 方面能够在储能设备的 SOC 范围内较好地平抑可再生能源功率波动量和波动频率,减少新能源并网对电网波动调节能力的要求,另一方面可以有效降低充放电的频度和幅度,提高储能电池的使用寿命,增加储能应用的经济性。

[参考文献]

- [1] GB/T 19963—2011. 风电场接入电力系统技术规定[S].
GB/T 19963—2011. Regulation of wind farm connected to power system[S].
- [2] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
ZHANG W L, QIU M, LAI X K. Application of energy

- storage technologies in power grids [J]. Power system technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [3] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 34-39.
- ZHANG Y, GUO L, JIA H J, et al. An energy storage control method based on stste of charge and variable filter time constant [J]. Automation of electric power systems, 2012, 36(6): 34-39.
- [4] 黄亚峰, 穆刚, 刘嘉, 等. 基于带阻滤波原理的风电场功率波动平抑策略的研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(7): 1073-1078.
- HUANG Y F, MU G, LIU J, et al. Study on the strategy for smoothing power fluctuations of wind farms based on the principle of band-stop filter[J]. Acta energiae solaris sinica, 2012, 33(7): 1073-1078.
- [5] LI W. An embedded energy storage system for attenuation of wind power fluctuations [D]. Montreal: McGill University, 2010.
- [6] 雷珽, 欧阳曾恺, 李征, 等. 平抑风能波动的储能电池 SOC 与滤波协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 126-131.
- LEI T, OUYANG Z K, LI Z, et al. Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing[J]. Electric power automation equipment, 2015, 35(7): 126-131.
- [7] 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 H J, JIANG Q Y. 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.
- [8] 马速良, 蒋小平, 马会萌, 等. 平抑风电波动的混合储能系统的容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 108-113.
- MA S L, JIANG X P, MA H M, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Power systems protection and control, 2014, 42(8): 108-113.
- [9] 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 G J, TANG X S, QI Z P. 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.
- [10] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制[J]. 电机工程学报, 2014, 34(3): 317-325.
- WU Z W, JIANG X P, MA H M, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy for PV power smoothing [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 317-325.
- [11] 洪海生. 应用于平抑风电功率波动的多类型储能系统容量配置与协调控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- HONG H S. Research on capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [12] 时玮. 动力锂离子电池组寿命影响因素及测试方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- SHI W. Research on lifespan factors and test methods of traction lithium-ion batteries [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

FREQUENCY DOMAIN ANALYSIS OF WIND POWER FLUCTUATION AND CONTROL STRATEGY OPTIMIZATION OF POWER SMOOTHING

Li Zheng, Chen Jiayu, Shi Kun

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The filtering characteristic of wind turbine is deduced at first through small signal analysis method. And then by comparing and analyzing the characteristics of common low-pass filtering algorithm, moving average method and wavelet packet analysis method, the smoothing control strategy of the wavelet packet low pass filtering algorithm is proposed according to the demands of national grid code for wind power integration. This control strategy can not only meet the requirements of the national wind power integration standards but also reduce the *SOC* volatility of battery and charging and discharging numbers so as to extend the battery's life time. Finally, practical wind power data is used in Matlab simulation. The results show that proposed control strategy can meet the wind power fluctuation index meanwhile get good *SOC* control effect.

Keywords: wind power; low pass filtering; *SOC*; smooth algorithms; stored energy; wavelet analysis