第 50 卷 第 1 期：182-194 高电压技术 Vol.50, No.1: 182-194
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230068

计及多储能单元出力水平的风功率波动平抑控制方法

常樊睿[1]，李　勇[1]，彭衍建[1]，周年光[2]，高酉松[1]，张曦壬[1]
（1. 输变电新技术教育部工程研究中心(湖南大学)，长沙 410082;
2. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院，长沙 410004）

摘　要：在风电场侧配置电池储能是缓解风电功率波动、提高风电可调控性的有效途径。为满足风功率波动平抑要求，提出了一种计及多储能单元出力水平的风功率波动平抑控制方法，充分考虑多储能单元实时出力能力，在兼顾功率平抑目标的同时实现减小储能电池能量调用、各储能单元充放电切换次数、放电深度及荷电状态波动区间。首先分析了滤波时间常数对风功率平抑效果以及储能功率分配方法对各单元荷电状态变化的影响；其次引入超短期风功率预测，根据风功率预测数据建立滤波时间常数优化模型，得到滤波时间常数最优解以及最小储能功率指令；然后分析了各储能单元出力水平与功率平抑需求的影响，进一步提出了一种分层复合式储能单元功率分配方法，实现了多储能单元的功率指令分配，避免了各储能单元频繁与过度充放电，有利于延长使用寿命；最后以湖南省某实际风电场为例，通过实际算例验证了所提方法的有效性。

关键词：风功率波动；电池储能；多储能单元；滤波时间常数；功率分配；风功率预测

A Control Method for Smoothing Wind Power Fluctuation with Multiple Energy Storage Unit Output Levels

CHANG Fanrui[1], LI Yong[1], PENG Yanjian[1], ZHOU Nianguang[2], GAO Yousong[1], ZHANG Xiren[1]
(1. Engineering Research Center of Power Transmission and Transformation Technology, Ministry of Education, China, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co. Ltd, Changsha 410004, China)

Abstract: The installation of battery energy storage on a wind farm is an effective way to smooth the wind power fluctuation and improve the controllability of wind power. In this paper, we proposed a control method for smoothing wind power fluctuation with multiple energy storage unit output levels, in which the real-time output capacity of multiple storage units is fully taken into consideration. Besides, the utilization of energy, the switch number of charge/discharge, the range and difference of state of charge are decreased while ensuring the power smoothing target. Firstly, we analyzed the effect of the filtering time constant on the smoothing wind power and influence of power allocation method on the SOC change of each unit, respectively. Secondly, the short-term forecast is introduced. The optimal solution of filtering time constant and minimum power command are calculated by the filtering time constant optimization model. Moreover, the relationship between the output level of each storage unit and the power command is analyzed, and the power command is allocated according to the hierarchical composite power. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified in a case study by using actual wind power data from a wind farm in Hunan province.

Key words: wind power fluctuation; BESS; multi-storage units; filtering time constant; power allocation; wind power forecast

0　引言

构建以新能源为主体的电力系统是实现“双碳”目标的重要途径[1-3]。近年来，以风电为代表的新能源发展迅猛，根据国家能源局发布的数据显示，截至 2021 年 11 月，我国风电并网装机容量超 3 亿千瓦，占全国电源总装机比例约 13%[4-6]。然而风功率的随机性与间歇性强，并网后增加了电力系统的不确定性因素，极大的影响的电网安全稳定运行[7]。在风电场侧配置电池储能(battery energy storage

基金资助项目：国家自然科学基金(52207093)；湖南省科技重大专项(2020GK1011)；中国博士后科学基金资助项目(2021TQ0099，2022M721083)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207093), Major Science and Technology Project of Hunan Province of China (2020GK1011), China Postdoctoral Science Foundation (2021TQ0099, 2022M721083).

system, BESS)是缓解风电并网功率波动、提高风电可调控性的有效途径[8-10]。国家发改委、能源局于2021 年出台了《关于加快推动新型储能发展的指导意见》，明确指出：“大力推进电源侧储能建设，通过储能协同优化运行保障新能源高效消纳利用。”各地新建风电场陆续按照要求配置了相应比例的BESS[11]。

为实现 BESS 平抑风电场出力波动，需要预先得知风电场出力信息，并根据并网功率波动要求计算出 BESS 的充放电功率指令。根据风功率波动的频率特性，可减少其高频分量仅使低频分量汇入电网以降低功率波动，一阶低通滤波(first order low pass filter, FLF)，滑动平均滤波，卡尔曼滤波等滤波算法的风功率平抑方法都可以实现上述功能，其中 FLF 因为计算方便而被广泛应用于实际工程[12]。BESS 根据滤波算法计算的功率指令充放电以完成功率平抑。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；荷电状态(state of charge, SOC)波动范围与放电深度(depth of discharge, DOD)越大，对电池寿命损伤越大[13]。

为避免 BESS 的能量被过度调用，以 SOC 作为反馈信号用于调节 BESS 的功率指令的方法被提出。文献[14]提出了利用储能SOC反馈调节滤波时间常数的方法，减小了储能 SOC 的波动区间；文献[15]通过超短期风功率预测方法，超前计算控制周期内 SOC 波动的上下限裕量进而用于反馈修正 BESS 的功率指令，减少 BESS 进入死区的时间；文献[16]采用双储能单元的 SOC 交替反馈调整滤波时间常数的控制方法，避免 SOC 过充过放及频繁充放电。但此类基于 SOC 反馈的方法忽略了风功率骤变特性导致不同时刻对 BESS 出力需求的变化，仍会出现过度平抑现象，且主要聚焦于 SOC 波动区间的优化。

为有效解决风功率波动平抑目标最大和 BESS 出力最小这一矛盾，文献[17]将模型预测控制应用于储能系统，并通过希尔伯特黄变换得到截止频率，反求出滤波时间常数；文献[18]提出同时考虑 BESS 出力能力与功率平抑需求的模型预测控制(model predictive control，MPC)方法，根据风功率波动情况动态调整 BESS 的出力大小，减少 BESS 进入死区的时间。但在实际工程中，BESS 一般采用多储能单元并联形式，上述文献鲜有考虑多储能单元构成，只从上层控制减少 BESS 整体的功率输出，忽略了各储能单元出力水平的差异。文献[19]根据恒定滤波时间常数计算出 BESS 功率目标后，按照各储能单元 SOC 实时线性分配功率指令，有效减少了各单元的 SOC 波动区间，但仍存在充放电次数过多而影响 BESS 使用寿命的问题。

本文综合考虑并网功率对 BESS 与各储能单元的出力需求，提出了平抑风功率的多储能单元控制方法，实现以下目的：1）以并网功率波动率为约束获取 BESS 功率指令最小值，减少 BESS 被调用的能量；2）采用分层复合式功率分配方法避免各储能单元过充过放与频繁充放电，有利于延长 BESS 的使用寿命。

本文首先建立风储系统并网模型，分别分析了滤波时间常数选取以及功率分配方法对储能的影响；其次定义了能量优化利用率和循环寿命等效系数，用于评价不同方法对多储能单元出力的影响效果；然后介绍滤波时间常数优化模型与分层复合式功率分配方法；最后通过实际算例验证了所提方法的有效性。

1　BESS 平抑风功率波动分析

1.1　基于 FLF 的功率平抑模型

图 1 为风储并网系统示意图，风储系统的并网功率为：

$$P_{\mathrm{G}}(t)=P_{\mathrm{W}}(t)+P_{\mathrm{B}}(t) \tag{1}$$

式中：$P_{\mathrm{W}}(t)$是 t 时刻的风功率；$P_{\mathrm{B}}(t)$是 t 时刻 BESS 输出总功率。图 2 为基于 FLF 算法的风功率平抑原理图。利用 FLF 过滤掉风功率的高频分量，得到目标功率为：

$$P_{\mathrm{tag}}(s)=\frac{1}{1+T_{\mathrm{f}}s}P_{\mathrm{W}}(s) \tag{2}$$

式中：s 为拉普拉斯算子；T_{f} 为滤波时间常数。将

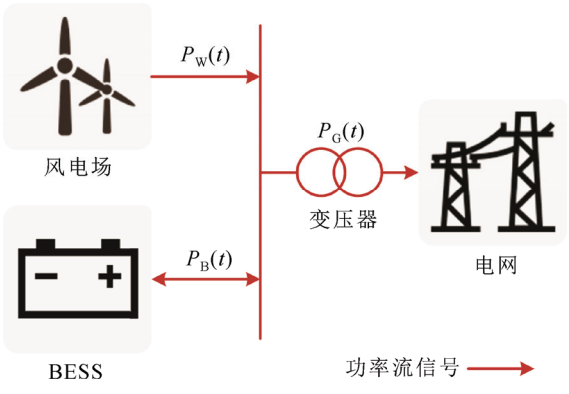


图 1　风储并网系统

Fig.1　WF-BESS grid-connection system

式(2)离散化可得 t 时刻目标功率[20]：

$$P_{\text{tag}}(t)=\frac{T_{\text{f}}}{T_{\text{f}}+\Delta t}P_{\text{tag}}(t-\Delta t)+\frac{\Delta t}{T_{\text{f}}+\Delta t}P_{\text{W}}(t) \tag{3}$$

式中：Δt 为采样步长；$P_{\text{tag}}(t–\Delta t)$为前一时刻的目标功率。将此刻的目标功率与风功率作差，可计算出此刻 BESS 的功率指令：

$$P_{\text{B,ref}}(t)=P_{\text{tag}}(t)-P_{\text{W}}(t) \tag{4}$$

BESS 根据功率指令进行充放电，可抵消风电功率的高频分量，仅使低频分量汇入网侧，实现对风功率波动的平抑，有效降低并网功率的波动率。

1.2 滤波时间常数对平抑效果影响的分析

若取计算时间区间为$(0,T)$，将区间分为 n 等分，计算步长取 Δt，即$(0, \Delta t, 2\Delta t, \cdots, i\Delta tT, \cdots, n\Delta t)$，在该区间内 FLF 可转化为：

$$\begin{cases}
P_{\text{tag}}(\Delta t)=\dfrac{T_{\text{f}}}{T_{\text{f}}+\Delta t}P_{\text{tag}}(0)+\dfrac{\Delta t}{T_{\text{f}}+\Delta t}P_{\text{W}}(\Delta t)\\
P_{\text{tag}}(2\Delta t)=\left(\dfrac{T_{\text{f}}}{T_{\text{f}}+\Delta t}\right)^2P_{\text{tag}}(0)+\dfrac{T_{\text{f}}\Delta t}{\left(T_{\text{f}}+\Delta t\right)^2}P_{\text{W}}(\Delta t)+\\
\qquad\dfrac{\Delta t}{T_{\text{f}}+\Delta t}P_{\text{W}}(2\Delta t)\\
P_{\text{tag}}(3\Delta t)=\left(\dfrac{T_{\text{f}}}{T_{\text{f}}+\Delta t}\right)^3P_{\text{tag}}(0)+\dfrac{T_{\text{f}}^2\Delta t}{\left(T_{\text{f}}+\Delta t\right)^3}P_{\text{W}}(\Delta t)+\\
\qquad\dfrac{T_{\text{f}}\Delta t}{\left(T_{\text{f}}+\Delta t\right)^2}P_{\text{W}}(2\Delta t)+\dfrac{\Delta t}{T_{\text{f}}+\Delta t}P_{\text{W}}(3\Delta t)\\
\vdots\\
P_{\text{tag}}(n\Delta t)=\left(\dfrac{T_{\text{f}}}{T_{\text{f}}+\Delta t}\right)^nP_{\text{tag}}(0)+\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{T_{\text{f}}^{n-i}\Delta t}{\left(T_{\text{f}}+\Delta t\right)^{n-i+1}}P_{\text{W}}(i\Delta t)
\end{cases} \tag{5}$$

式中：不同时刻的风功率为输入量，在不考虑 BESS 容量限制的情况下，功率平抑效果取决于目标功率的波动程度。由式(4)、(5)可知，滤波时间常数 T_{f} 与目标功率波动程度成反比，与 BESS 出力成正比，T_{f}越大，目标功率波动程度越小，但同时 BESS 出力更多。

实际风储系统中 BESS 的功率与容量是受限的，过大的滤波时间常数虽能获得理想的平抑效果，但极有可能频繁调用 BESS，导致过充过放的现象发生，降低储能使用寿命。过小的时间常数虽能减小 BESS 出力，但可能无法满足功率平抑需求。因此，有必要根据风功率平抑要求和 BESS 容量合理调整滤波时间常数。

1.3 多储能单元功率分配分析

由式(4)可知，$P_{\text{B,ref}}$大于/小于 0 分别代表 BESS 进入放/充电模式。考虑到 BESS 由多个储能单元组成，通常在功率分配中要考虑每个储能单元的实际充放电能力，避免各单元 SOC 的波动范围、DOD 过大以及充放电次数过多。根据每个单元的 SOC 来调整其功率指令，每台储能单元的功率指令可计算为：

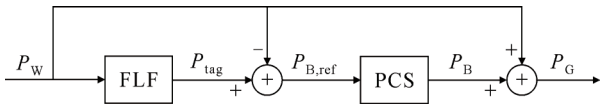


图 2 基于 FLF 的平抑原理图

Fig. 2 Diagram of smoothing method based on FLF

$$P_i(t)=\begin{cases}
\dfrac{f_{\text{dis}}(S_{\text{OC}i}(t))E_{\text{rate},i}}{\sum\limits_{i=1}^{n}f_{\text{dis}}(S_{\text{OC}i}(t))E_{\text{rate},i}}P_{\text{B,ref}}(t),\ P_{\text{B,ref}}(t)>0\\
\dfrac{f_{\text{ch}}(S_{\text{OC}i}(t))E_{\text{rate},i}}{\sum\limits_{i=1}^{n}f_{\text{ch}}(S_{\text{OC}i}(t))E_{\text{rate},i}}P_{\text{B,ref}}(t),\ P_{\text{B,ref}}(t)<0
\end{cases} \tag{6}$$

式中：$S_{\text{OC}i}$与 $E_{\text{rate},i}$分别是第 i 台储能单元的荷电状态与额定容量；$f_{\text{dis}}(S_{\text{OC}})$与$f_{\text{ch}}(S_{\text{OC}})$分别是对应放电和充电时刻的函数关系式，如果 BESS 处于放电模式，具有较高 SOC 值的储能单元将被分配较大的功率指令，功率指令应与 SOC 成正相关。相反，如果 BESS 处于充电模式，SOC 较低储能单元的充电指令将更大，此情况下功率指令应根据 SOC 单调递减。为实现上述目标，需保证：

$$\begin{cases}
\dfrac{\text{d}f_{\text{dis}}(S_{\text{OC}})}{\text{d}(S_{\text{OC}})}>0\\
\dfrac{\text{d}f_{\text{ch}}(S_{\text{OC}})}{\text{d}(S_{\text{OC}})}<0
\end{cases} \tag{7}$$

根据上述分析，在平抑过程中为延长各储能单元的使用寿命，应通过合理的功率分配方法减小各单元放电深度、SOC 波动区间和充放电切换次数。

2 相关指标定义

为评估各储能单元在平抑风功率波动过程的状态差异，定义了 2 个相关指标来衡量不同控制方法的优劣。

1）能量优化利用率：当 BESS 参与平抑风功率波动时，调用 BESS 的总能量会在一定程度上影响储能电池的使用寿命。为比较不同方法，定义能量优化利用率为：

$$\Delta\eta=\frac{\sum_{k=1}^{T_C/\Delta t}\left|P_B^1(k\Delta t)\right|\Delta t-\sum_{k=1}^{T_C/\Delta t}\left|P_B^2(k\Delta t)\right|\Delta t}{P_{B,rate}\cdot T_C}\times 100\% \quad (8)$$

式中：$P_B^1(k\Delta t)$与$P_B^2(k\Delta t)$分别是第 k 时刻方法 1 与方法 2 的有功功率；$P_{B,rate}$是 BESS 的额定功率；T_C是 BESS 总工作时间。其值越大，说明与方法 1 相比，方法 2 下 BESS 被调用的能量越少。

2）循环寿命等效系数：BESS 频繁的切换充放电状态与 DOD 过大也会减少其使用寿命。图 3 展示了锂电池 DOD 与最大循环次数的关系[21]。为比较各储能单元在参与风功率平抑过程中的循环寿命，可根据雨流计数法[17]计算循环寿命等效系数为：

$$F=1/\sum_{k=1}^{T_C/\Delta t}\frac{C_k}{N\left(D_{ODk}\right)} \quad (9)$$

式中：D_{ODk}为第 k 次放电深度；C_k表示此次放电是全循环或半循环，全循环时取 1，半循环时取 0.5；$N(D_{ODk})$代表此时放电深度对应的最大循环次数。系数 F 越大，代表该储能的循环寿命越大，使用寿命更长，反之亦然。

3　风功率波动平抑控制方法

本文提出计及多储能单元出力水平的风功率波动平抑控制方法，如图 4 所示。首先，根据超短期预测模型与功率误差分布获取未来的风功率预测值。接着，在不影响功率平抑效果的同时为尽量减少 BESS 的能量频繁调用，为此建立了以最小滤波时间常数为目标函数，以 BESS 功率限值与并网功率波动率为约束的优化模型。根据滤波时间常数最优解与风功率实时数据动态调整 BESS 的功率指令。最后，通过分层复合式功率分配方法实现多储能单元的功率优化分配，减少了放电深度与充放电切换次数，避免了各单元深度充放电，进而延长了循环寿命。

3.1　滤波时间常数优化模型

为满足平抑后并网功率波动率标准的要求，引入的风功率预测时间尺度需与功率平抑的时间尺度相匹配。

图 5 所示为风功率预测与平抑时间尺度匹配关系。在 t 时刻，按照 Δt 为采样步长对$(t, t+T)$时间内风功率进行采样，此时间段的功率波动率为

$$\gamma\%=\frac{\max\left(P_W\left(t+i\Delta t\right)\right)-\min\left(P_W\left(t+i\Delta t\right)\right)}{P_{W,rate}},i\in n \quad (10)$$

式中：$P_{W,rate}$为风电场额定功率；$n=T/\Delta t$ 为功率采样数。由于风电场并网标准中通常要求 T(10 min 或者 15 min)时间内风功率波动率低于规定的标准功率波动率限值，而对滤波时间常数优化的目的正是通过风功率预测值超前求解满足该要求的最小值。因此，将选取 T 为功率预测与误差生成时间尺度，Δt 为功率预测与误差生成点的步长，在每个 $t+iT(i=1,2,3\ldots n)$时间点计算未来$(t+iT,\ t+(i+1)T)$时间段内的功率预测值。

滤波时间常数优化流程如图 6 所示。由式(3)可知 Δt 是已知量，T_f的取值范围是$[0,+\infty)$，为方便计算，可取转换公式[15]：

$$x=\frac{T_f}{T_f+\Delta t} \quad (11)$$

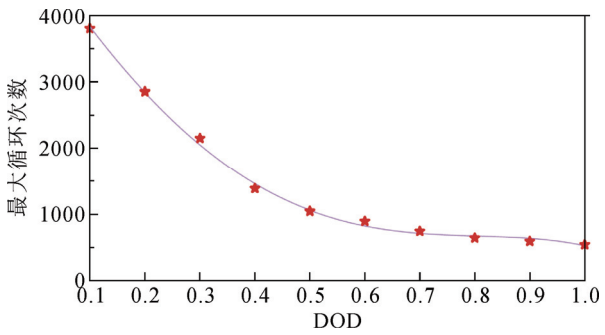


图 3　DOD 与最大循环次数的关系

Fig.3　The relation between DOD and the cycle life times

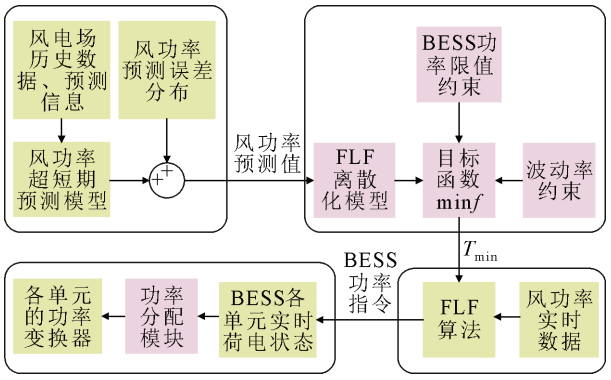


图 4　风功率波动平抑控制图

Fig.4　Control diagram of smoothing wind power fluctuations

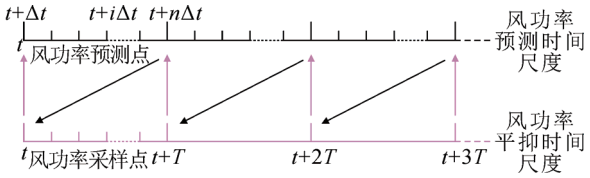


图 5　风功率预测与平抑时间尺度匹配关系图

Fig.5　Matching relationship of time scale between wind power prediction and smoothing

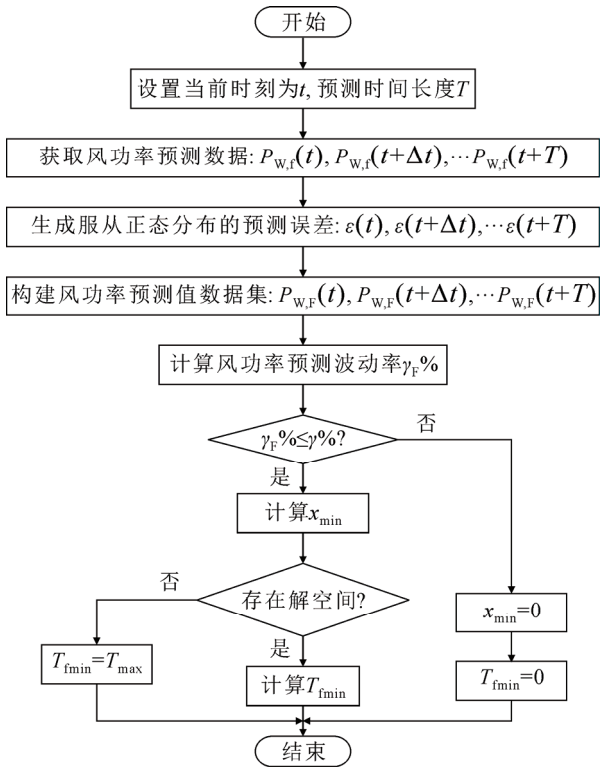


图 6 滤波时间常数优化流程图

Fig.6 Flow chart of filtering time constant optimization

式中：x 取值范围为[0,1)。将上式代入式(3)可得：

$$P_{tag}(t)=xP_{tag}(t-\Delta t)+(1-x)P_W(t) \tag{12}$$

假设在 t 时刻，未来 T 时间内风功率预测数据分别为 $P_{W,f}(t+i\Delta t)$。为进一步减小预测精确性对滤波时间常数取值的影响，假设风功率预测误差服从正态分布 $N(0,\sigma)$，随机生成服从正态分布的随机数矩阵 $E(j,n)$，则未来 T 时间内的预测误差为：

$$\varepsilon(t+i\Delta t)=\frac{-E(j,i)}{1+E(j,i)}P_{W,f}(t+i\Delta t) \tag{13}$$

由风功率预测数据与预测误差可得到风功率预测值为：

$$\begin{aligned}P_{W,F}(t+i\Delta t)&=P_{W,f}(t+i\Delta t)+\varepsilon(t+i\Delta t)\\&=P_{W,f}(t+i\Delta t)/(1+E(j,i))\end{aligned} \tag{14}$$

式中：j 为生成次数。未来 T 时间内风功率预测波动率可按照式(10)计算为：

$$\gamma_F\%=\frac{\max(P_{W,F}(t+i\Delta t))-\min(P_{W,F}(t+i\Delta t))}{P_{W,rate}},i\in n \tag{15}$$

当 γ_F%≤γ_R%时，γ_R%为规定的风电并网标准功率波动率限值，此时代表未来 T 时间内风功率波动较低，不需要 BESS 进行平抑，即 T_{fmin} 设置为 0。相反的，当 γ_F%>γ_R%时，代表风功率波动较大，需要调用 BESS 对功率波动进行平抑。

将式(11)、(14)代入式(5)，未来 T 时间内目标功率预测值可表示为：

$$\begin{cases}P_{tag,F}(t+\Delta t)=xP_{tag}(t)+\\\qquad(1-x)(P_{W,F}(t+\Delta t))\\P_{tag,F}(t+2\Delta t)=x^2P_{tag}(t)+\\\qquad x(1-x)(P_{W,F}(t+\Delta t))+\\\qquad(1-x)(P_{W,F}(t+2\Delta t))\\\qquad\vdots\\P_{tag,F}(t+T)=x^nP_{tag}(t)+\\\qquad\sum_{i=1}^{n}x^{n-i}(1-x)(P_{W,F}(t+i\Delta t))\end{cases} \tag{16}$$

为方便计算，在初始时刻 $P_{tag}(t)$设置为 $P_{W,F}(t)$。此期间 BESS 的功率指令预测值为：

$$\begin{cases}P_{Bref,F}(t+\Delta t)=xP_{tag}(t)-xP_{W,F}(t+\Delta t)\\P_{Bref,F}(t+2\Delta t)=x^2P_{tag}(t)+\\\qquad x(1-x)(P_{W,F}(t+\Delta t))-xP_{W,F}(t+2\Delta t)\\\qquad\vdots\\P_{Bref,F}(t+T)=x^nP_{tag}(t)+\\\qquad\sum_{i=1}^{n-1}x^{n-i}(1-x)(P_{W,F}(t+i\Delta t))-\\\qquad xP_{W,F}(t+T)\end{cases} \tag{17}$$

优化模型的最终目标是在未来时刻内保证风功率平抑效果的同时，尽可能地减少 BESS 的出力。目标函数可表示为：

$$J=\min x \tag{18}$$

相应的约束条件为：

$$\frac{\max(P_{tag,F}(t+i\Delta t))-\min(P_{tag,F}(t+i\Delta t))}{P_{W,rate}}\le\gamma\% \tag{19}$$

$$0\le|P_{Bref,F}(t+i\Delta t)|\le P_{B,rate} \tag{20}$$

其中，式(19)为并网功率波动率约束，式(20)为 BESS 功率约束。若存在解空间，则代表此时 BESS 的出力可保证功率平抑需求，在求解出 x_{min} 后，未来 T 时间内的滤波时间常数可计算为：

$$T_{fmin}=\frac{x_{min}\Delta t}{1-x_{min}} \tag{21}$$

若不存在解空间，则代表此时风功率波动程度较为剧烈，BESS 即使按照额定功率最大化出力，也无法满足此时间段的平抑要求。为尽可能的降低并网功率波动率，将设置 T_{fmin} 为 T_{max}。由于 FLF 的滤波特性，通常将 T_{max} 设置为采样步长 Δt 的数倍数量级时，即可获取波动率较低的目标功率，

BESS 将按照此时的功率指令出力。

3.2　多储能单元分层复合式功率分配

根据风功率预测值计算出滤波时间常数最小值后，将 T_{fmin} 与风功率实时数据代入式(3)、(4)，得到此时间段 BESS 的功率指令：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{B,ref}}(t+\Delta t)=x_{\min}P_{\mathrm{tag}}(t)-x_{\min}P_{\mathrm{W}}(t+\Delta t) \\ P_{\mathrm{B,ref}}(t+2\Delta t)=x_{\min}^{2}P_{\mathrm{tag}}(t)+ \\ \quad x_{\min}(1-x_{\min})\big(P_{\mathrm{W}}(t+\Delta t)\big)-x_{\min}P_{\mathrm{W}}(t+2\Delta t) \\ \quad \vdots \\ P_{\mathrm{B,ref}}(t+T)=x_{\min}^{n}P_{\mathrm{tag}}(t)+ \\ \quad \sum_{i=1}^{n-1}x_{\min}^{n-i}(1-x_{\min})\big(P_{\mathrm{W}}(t+i\Delta t)\big)- \\ \quad x_{\min}P_{\mathrm{W}}(t+T) \end{cases} \tag{22}$$

多储能单元分层复合式功率分配方法具体步骤如下：

步骤 1：首先，为有效利用 BESS 平抑风功率的同时，延长其使用寿命，本文将 SOC 进行分级，图 7 为 BESS 的 SOC 分级示意图。如图 7 所示，$(0,S_{\mathrm{OCmin}})$与$(S_{\mathrm{OCmax}},1)$分别为禁止放电区与禁止充电区；$(S_{\mathrm{OCmin}},S_{\mathrm{OClow}})$与$(S_{\mathrm{OChigh}},S_{\mathrm{OCmax}})$为多充少放区与多放少充区，前者区域内的储能单元充电优先级高于放电级，后者相反；$(S_{\mathrm{OClow}},S_{\mathrm{OChigh}})$为正常充放区，该部分储能单元在充放电情况下优先级相同，其中 S_{OCave} 为理想化均值。a、b、c、d、e 分别为 SOC 处于上述 5 个区间的储能单元个数。

步骤 2：如附表 A1 所示，当 $P_{\mathrm{B,ref}}>0$ 时，表示此刻 BESS 进入放电模式，可分为以下 4 种状态：

1）$P_{\mathrm{B,ref}}\le(a+b)P_{i,\mathrm{rate}}$：其中 $P_{i,\mathrm{rate}}$ 为第 i 台储能单元的额定功率；则表示 SOC 处于$(S_{\mathrm{OChigh}},1)$的储能单元可以完成此放电指令，则按照 SOC 的大小降序排列，此区间内储能单元按照额定功率依次分配放电指令，其余储能单元不需被调用。

2）$(a+b)P_{i,\mathrm{rate}}<P_{\mathrm{B,ref}}\le(a+b+c)P_{i,\mathrm{rate}}$：表示需调用 SOC 处于$(S_{\mathrm{OClow}},1)$储能单元可完成放电指令；此时该部分储能单元的功率指令为：

$$P_{i,\mathrm{dis}}=\begin{cases} P_{i,\mathrm{rate}},\quad S_{\mathrm{OC}}\in(S_{\mathrm{OChigh}},1) \\ \dfrac{1\Big/\left(1+\exp\left(5\cdot\dfrac{S_{\mathrm{OCave}}-S_{\mathrm{OC}i}}{S_{\mathrm{OCmax}}-S_{\mathrm{OCave}}}\right)\right)}{\displaystyle\sum_{i=1}^{c}1\Big/\left(1+\exp\left(5\cdot\dfrac{S_{\mathrm{OCave}}-S_{\mathrm{OC}i}}{S_{\mathrm{OCmax}}-S_{\mathrm{OCave}}}\right)\right)} \\ \cdot\big(P_{\mathrm{B,ref}}-(a+b)P_{i,\mathrm{rate}}\big), \\ \qquad\qquad S_{\mathrm{OC}}\in(S_{\mathrm{OClow}},S_{\mathrm{OChigh}}) \end{cases} \tag{23}$$

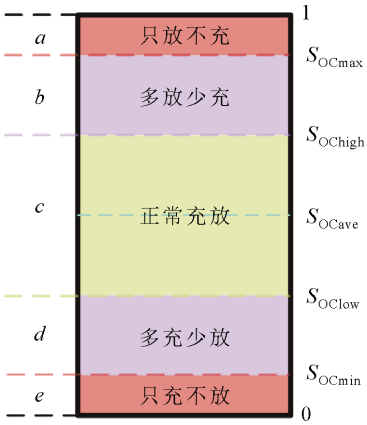


图 7　BESS 的荷电状态分级

Fig.7　SOC classification of BESS

3）$(a+b+c)P_{i,\mathrm{rate}}<P_{\mathrm{B,ref}}\le(a+b+c+d)P_{i,\mathrm{rate}}$：代表需要紧急调用 SOC 处于$(S_{\mathrm{OCmin}},S_{\mathrm{OClow}})$区间的储能单元，此时 SOC 高于 S_{OCmin} 的储能单元按照下式放电：

$$P_{i,\mathrm{dis}}=\begin{cases} P_{i,\mathrm{rate}},\quad S_{\mathrm{OC}}\in(S_{\mathrm{OClow}},1) \\ \dfrac{1\Big/\left(1+\exp\left(5\cdot\dfrac{S_{\mathrm{OC}i}-S_{\mathrm{OCave}}}{S_{\mathrm{OCmin}}-S_{\mathrm{OCave}}}\right)\right)}{\displaystyle\sum_{i=1}^{d}1\Big/\left(1+\exp\left(5\cdot\dfrac{S_{\mathrm{OC}i}-S_{\mathrm{OCave}}}{S_{\mathrm{OCmin}}-S_{\mathrm{OCave}}}\right)\right)} \\ \cdot\big(P_{\mathrm{B,ref}}-(a+b+c)P_{i,\mathrm{rate}}\big), \\ \qquad\qquad S_{\mathrm{OC}}\in(S_{\mathrm{OCmin}},S_{\mathrm{OClow}}) \end{cases} \tag{24}$$

4）$(a+b+c+d)P_{i,\mathrm{rate}}<P_{\mathrm{B,ref}}$：代表此时平抑风功率波动所需的 BESS 功率十分大，需要调用大部分储能单元，但为了避免处于$(0,S_{\mathrm{OCmin}})$的储能单元 SOC 继续跌落，仅选择处于$(S_{\mathrm{OCmin}},1)$区间的储能单元全部按照额定功率放电。

当 $P_{\mathrm{B,ref}}<0$ 时，表示此刻 BESS 进入充电模式，同理可分为以下 4 种情况：

5）$P_{\mathrm{B,ref}}>-(d+e)P_{i,\mathrm{rate}}$：表示 SOC 处于$(0,S_{\mathrm{OClow}})$的储能单元可以完成此充电指令，则按照 SOC 的大小升序排列，仅选取该部分储能单元按照额定功率依次以额定功率充电。

6）$-(d+e)P_{i,\mathrm{rate}}\ge P_{\mathrm{B,ref}}>-(c+d+e)P_{i,\mathrm{rate}}$：将调用 SOC 处于$(0,S_{\mathrm{OChigh}})$储能单元可完成充电指令；此时该部分储能单元的功率指令为：

$$P_{i,\mathrm{ch}}=\begin{cases} -P_{i,\mathrm{rate}},\quad S_{\mathrm{OC}}\in(0,S_{\mathrm{OClow}}) \\ \dfrac{1\Big/\left(1+\exp\left(5\cdot\dfrac{S_{\mathrm{OCave}}-S_{\mathrm{OC}i}}{S_{\mathrm{OCmin}}-S_{\mathrm{OCave}}}\right)\right)}{\displaystyle\sum_{i=1}^{c}1\Big/\left(1+\exp\left(5\cdot\dfrac{S_{\mathrm{OCave}}-S_{\mathrm{OC}i}}{S_{\mathrm{OCmin}}-S_{\mathrm{OCave}}}\right)\right)} \\ \cdot\big(P_{\mathrm{B,ref}}+(d+e)P_{i,\mathrm{rate}}\big), \\ \qquad\qquad S_{\mathrm{OC}}\in(S_{\mathrm{OClow}},S_{\mathrm{OChigh}}) \end{cases} \tag{25}$$

7）$-(c+d+e)P_{i,\mathrm{rate}}\geq P_{\mathrm{B,ref}}>-(b+c+d+e)P_{i,\mathrm{rate}}$：代表需要紧急调用 SOC 处于($S_{\mathrm{OChigh}}$，$S_{\mathrm{OCmax}}$)区间的储能单元，此时 SOC 低于 S_{OCmax} 的储能单元按照下式充电：

$$P_{i,\mathrm{ch}}=\begin{cases}-P_{i,\mathrm{rate}}, & S_{\mathrm{OC}}\in(0,S_{\mathrm{OChigh}})\\ \dfrac{1/\left(1+\exp\left(5\cdot\dfrac{S_{\mathrm{OC}i}-S_{\mathrm{OCave}}}{S_{\mathrm{OCmax}}-S_{\mathrm{OCave}}}\right)\right)}{\sum_{i=1}^{b}1/\left(1+\exp\left(5\cdot\dfrac{S_{\mathrm{OC}i}-S_{\mathrm{OCave}}}{S_{\mathrm{OCmax}}-S_{\mathrm{OCave}}}\right)\right)}\\ \cdot\left(P_{\mathrm{B,ref}}+(d+e+c)P_{i,\mathrm{rate}}\right), & S_{\mathrm{OC}}\in(S_{\mathrm{OChigh}},S_{\mathrm{OCmax}})\end{cases}\tag{26}$$

8）$-(b+c+d+e)P_{i,\mathrm{rate}}\geq P_{\mathrm{B,ref}}$：为了避免处于($S_{\mathrm{OCmax}}$,1)的储能单元 SOC 继续升高，仅选择处于(0,S_{OCmax})区间的储能单元全部按照额定功率充电。

步骤 3：在完成功率分配任务后，各储能单元将按照实际功率指令进行充放电，完成对风电功率的平抑。BESS 总功率计算如下：

$$P_{\mathrm{B}}(t)=\sum_{i=1}^{n}P_i(t)\tag{27}$$

4 实际算例验证

4.1 实际算例参数

为验证本文所提控制方法的有效性，选取如图 8 所示的湖南省某实际风电场为研究对象。该风电场由 23 台单机容量/额定电压为 2.2 MW/0.69 kV 的双馈型感应风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG)构成。该 DFIG 转轮直径为 115 m，切入风速为 3 m/s，切出风速为 20 m/s，额定风速为 9.5 m/s。共有两条集电线路，分别包含 11、12 台机组，每台机组通过一台变比为 0.69 kV/35 kV、容量为 2.35 MVA 的变压器连接至集电线路，总装机容量为 50.6 MW。

BESS 由单机容量为 0.625 MW/1.25 MWh 的 8 台储能单元组成。每 4 台储能单元为一组，每组通过一台变比为 10 kV/35 kV、容量为 2.5 MVA 的变压器连接至升压站低压侧，总规模为 5 MW/10 MWh。升压站采用三绕组变压器，电压等级分别为 110 kV/35 kV/35 kV，具体参数如表 1 所示，第 3 绕组侧接两组调谐装置，可有效治理谐波[22]。基于上述系统与参数，在 DIgSILENT/PowerFactory 仿真平台中搭建了相应模型。

该风电场某日实测的功率曲线如图 9 所示，本

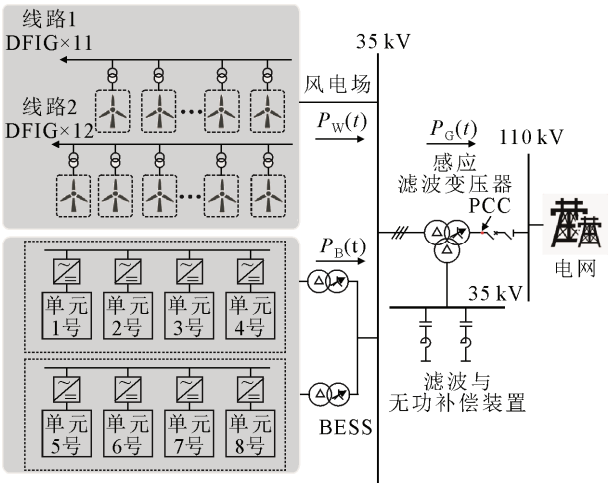


图 8 湖南某实际风储并网系统拓扑结构

Fig.8 Configuration of the actual WF-BESS grid-connection system in Hnan province

表 1 变压器额定参数

Table 1 Rated parameters of the transformers

参数	并网变压器	风机变压器	储能变压器
额定容量/MVA	50/50/15	2.35	2.5
额定电压/kV(高压侧)	110	35	35
额定电压/kV(滤波测)	36.75	-	-
额定电压/kV(低压侧)	35	0.69	0.4
接线组别	YNd11d11	Dyn11	Dy11
阻抗电压/%	10.5/6.5/4	6	6.5

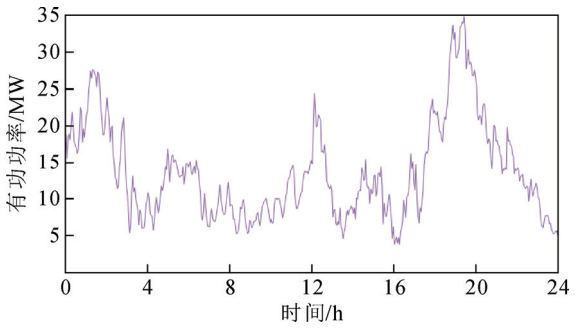


图 9 实测风功率

Fig.9 The measured wind power

文风功率采样与 BESS 功率指令计算步长 Δt 为 3 min。由国家风光储输示范工程要求[23]，需实现将 15 min 内风力发电波动率限制在 7%以下的平滑控制目标，本文选取该波动率限制作为约束，因此滤波时间常数优化模型中功率预测与误差生成时间尺度 T 为 15 min，步长为 3 min，风功率预测误差分布的方差 σ 设置为 0.5。该实际风电场中的 BESS 为

磷酸铁锂电池，如图 7 所示 BESS 荷电状态分级中的 S_{OCmin}、S_{OClow}、S_{OCave}、S_{OChigh}、S_{OCmax} 依次设置为 0.1，0.3，0.5，0.7，0.9。

4.2　工况 1：SOC 一致为 0.5

为测试本文方法中滤波时间常数优化模型的性能，暂不考虑多储能单元的功率分配，将 8 台储能单元的初始 SOC 均设置为 0.5。本文方法将根据波动率限制与风功率波动情况动态优化 T_f，获取不同时间段的最优解，在调用最少 BESS 能量的情况下完成对风功率的平抑。图 10 为优化模型计算出的 T_{fmin}，如图 10 所示，当预测波动率增大时，T_{fmin} 相应增加以达到 7%的平抑效果，反之亦然。考虑到 BESS 实际的功率限制，当某时段预测波动率超出 BESS 平抑能力时，由于采样步长 Δt 为 180 s，为尽量降低波动率，将 T_{max} 设置为 820 s。当预测波动率本身低于 7%时，BESS 退出工作状态，T_{fmin} 设置为 0，BESS 不参与功率波动抑制。

为进一步验证优化模型对功率波动平抑效果以及 BESS 能量调用的影响，选取文献[14-15]所提的计及平滑能力的 MPC 方法和实时控制方法与本文方法进行对比，实时控制方法中的 T_f 选取为 820 s。采用不同方法时，风功率曲线与波动率曲线如图 11、12 所示。

由图 11、12 可知，相较于两种传统方法，除去部分 BESS 功率限制的时刻，采用本文 T_f 优化方法时，绝大部分平抑后的并网功率波动率已降至 7%以下，平抑前风功率波动最大值高达 9.82 MW，波动率高达 19.41%，经过 BESS 平抑后，并网功率波动最大值降至 5.84 MW，波动率降至 11.54%，风能消纳率达到 98.9%，平抑效果良好，增强了风电场的并网稳定性。但从图 11(b)、(c)中选取的 4~8 h 与 12~16 h 的平抑曲线对应波动率来看，两种传统方法均存在对风功率的过度平抑，实时控制方法在功率波动较大的时刻能有效降低波动率，但在波动率较低时刻过度平抑较为严重，计及平滑能力的 MPC 方法虽能在一定程度上避免这种现象，但仍然无法保证最小化 BESS 的出力。

图 13、14 所示为采用不同方法时，BESS 的日功率曲线与 SOC 变化曲线。传统方法由于过度平抑风功率波动，会频繁调用 BESS 的能量，并导致 BESS 过度充放电以及 SOC 波动区间过大的现象。

由图 13 可知，实时控制方法下 BESS 在 24 h 内一直处于充放电状态，且充放电功率多次达到额定功率，计及平滑能力的 MPC 方法虽能避免某些时刻 BESS 过度充放电，但仍然存在频繁充放电的

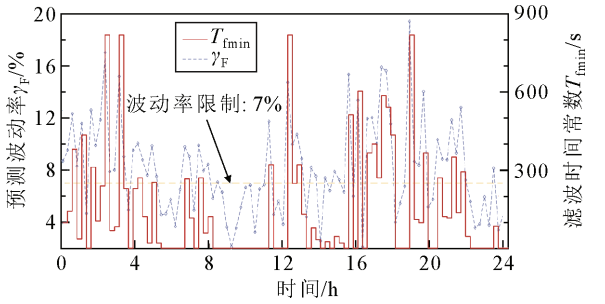


图 10　T_f 优化效果

Fig.10　Optimization effect of T_f

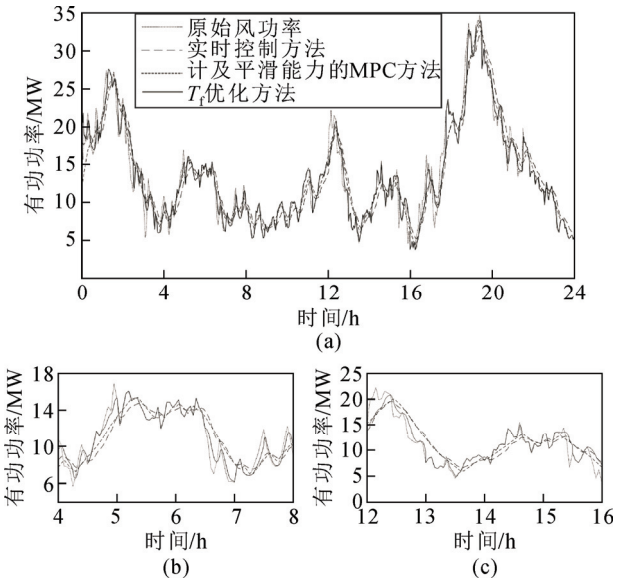


图 11　平抑前后风功率波动曲线

Fig.11　Wind power fluctuation curves before and after smoothing

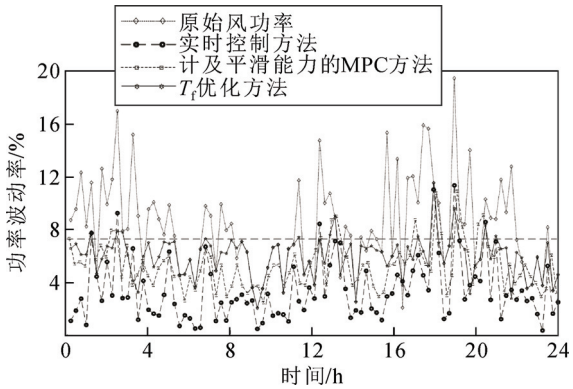


图 12　平抑前后日风功率波动率

Fig.12　Daily wind power fluctuation rates before and after smoothing

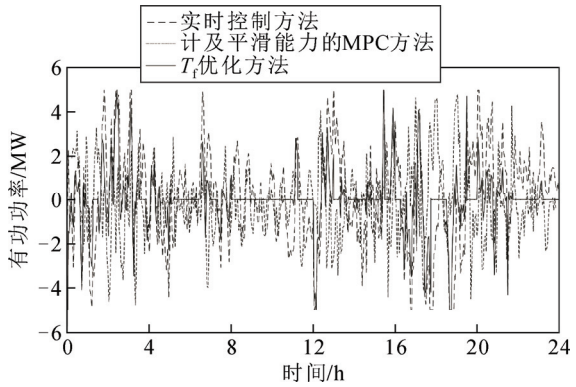


图 13 BESS 日功率曲线

Fig.13 Daily power curves of BESS

现象。而采用本文 T_f 优化方法时，BESS 的充放电功率与时间均大幅减少。经计算相较于实时控制方法与计及平滑能力的 MPC 方法，24 h 内本文方法的 $\Delta\eta$ 分别为 21.5%与 13.2%，减少能量调用 25.81 MWh 与 15.9 MWh，在不影响并网功率平抑效果的同时减少了 BESS 调用的总能量。由图 14 所示，SOC 的波动区间分别由(0.15,0.81)、(0.09,0.56)降至为(0.37,0.63)，波动范围减少 60.7%与 44.7%，且计及平滑能力的 MPC 方法会导致 BESS 跌落至禁止放电区，同时 F 分别由 64.54 与 99.11 增加至 161.71，相较之下增加 1.5 倍与 0.63 倍，极大的避免了 BESS 深度充放电并减少了放电深度与充放电次数，有利于延长 BESS 使用寿命。

4.3 工况 2：SOC 不同

由于计及平滑能力的 MPC 方法仅考虑 BESS 总功率指令，并未考虑多储能单元功率分配，因此为验证本文方法的整体有效性，选取实时控制方法进行对比。为体现多储能单元 SOC 的差异性，将 1 号—8 号储能单元的 SOC 依次设置为 0.95、0.9、0.6、0.55、0.5、0.4、0.1、0.05。T_f 按照 4.2 节中的设置。

图 15 所示为按照此时初始 SOC 设置的日风功率波动曲线。此情况下功率曲线与初始 SOC 为 0.5 时基本一致，本文所提功率分配方法并未影响功率平抑效果，平抑后每 15 min 并网功率波动率基本能降至 7%以下，满足并网标准。

图 16、17 所示为采用不同方法时，1 号、8 号储能单元的日功率曲线与各储能单元 SOC 的变化曲线。由图 16、17 可知，不同于实时控制方法中各储能单元在所有时刻均同充同放，采用本文方法时，将实时根据各储能单元 SOC 所在区间与 BESS 功率指令选取合适的储能单元分配功率。当 1 号储能单

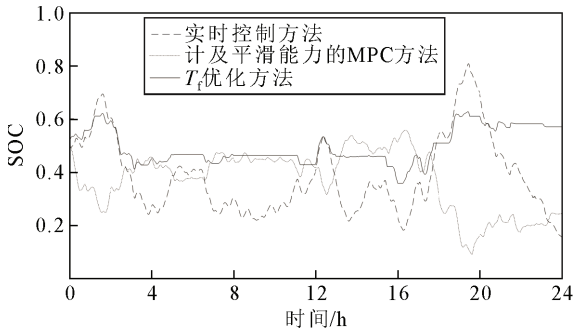


图 14 BESS 的 SOC 波动曲线

Fig.14 SOC fluctuation curves of BESS

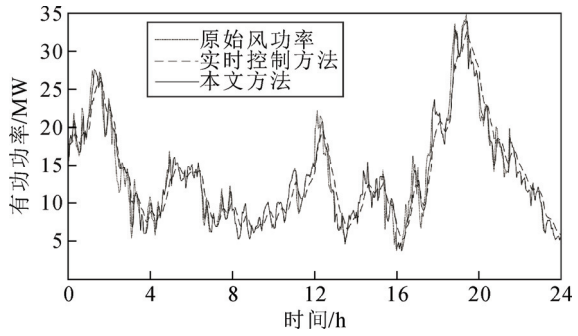


图 15 初始 SOC 不同时平抑前后的日风功率波动曲线

Fig.15 Daily wind power fluctuation curves with different initial SOC before and after smoothing

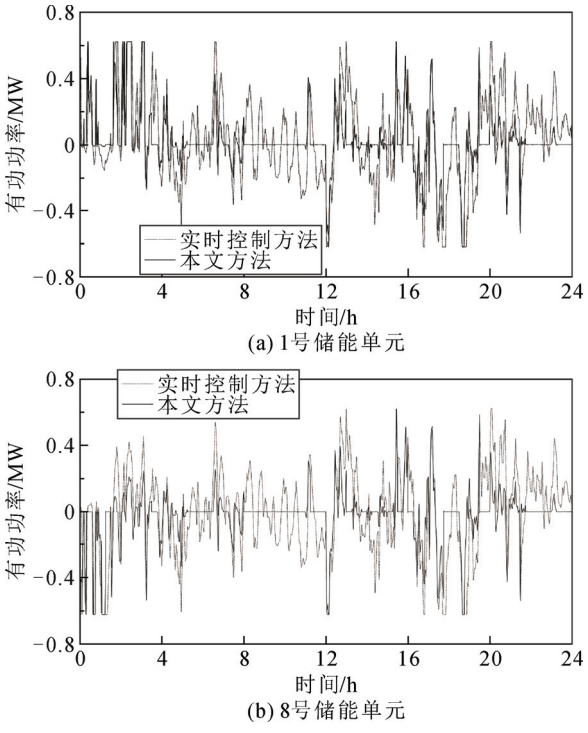


图 16 储能单元日功率曲线

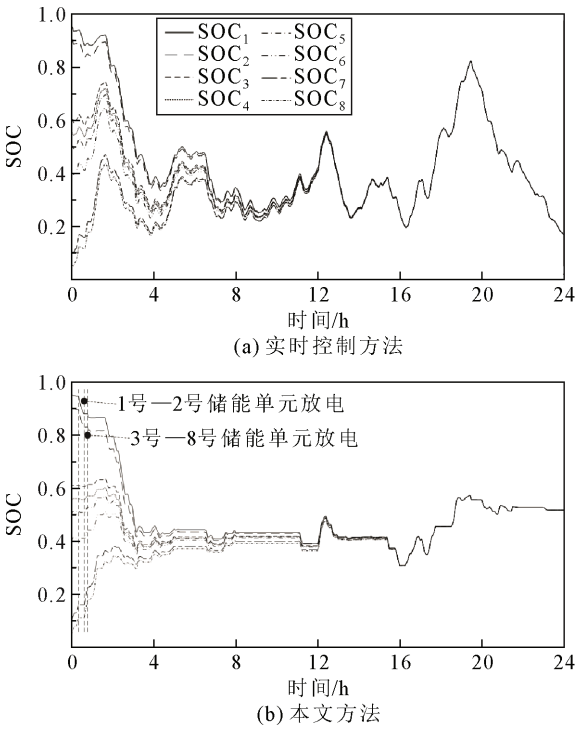
Fig.16 Daily power curves of BESS units

元 SOC 位于禁止充电区时，只放电不充电，同理，8 号储能单元的 SOC 在上升至 0.1 之前只充电不放电，确保各储能单元 SOC 迅速恢复至正常充放区。

如图 17 所示，在 30~60 min 时间内，所需的放电功率指令不高，仅调用 1 号与 2 号储能单元进行放电，确保其 SOC 迅速从禁止充电区降低，其余储能单元不工作，也避免了 7 号与 8 号储能单元的 SOC 继续跌落。在 60~75 min 内，仅选取 3 号—8 号储能单元完成充电指令，且 SOC 处于禁止放电区的 7 号与 8 号储能单元按照额定功率充电，SOC 快速上升以减小 SOC 波动区间。

实时控制方法下，各单元的 SOC 波动区间较大，仍会波动至如图 7 所示的多充少放区与多放少充区，无法避免 BESS 深度充放电。而采用本文方法时，由 T_f 优化模型与分层复合式功率分配方法的共同作用，各储能单元的 SOC 从其他区间迅速收敛于正常充放电区且波动区间一直保持在(0.3,0.7)。

表 2 所示为采用不同方法时，各储能单元充放电切换系数的对比结果，由表 2 可知，实时控制方法中各储能单元的 F 与 4.2 节中的 BESS 差距不大，均在 65 左右波动。采用本文方法后，在 24 h 的平抑过程中，各单元的 F 都大幅增加，8 台储能单元的 F 平均值由 66.6 增长到 156.8，平均增加 90.2，增长 1.35 倍。其中，7 号储能单元增长最多，由 64.39 增长到 160.89，增长近 1.5 倍。因此，本文所提方法延长了各储能单元使用寿命。



(a) 实时控制方法

(b) 本文方法

图 17　储能单元 SOC 变化曲线

Fig.17　SOC fluctuation curves of each BESS unit

表 2　各储能单元循环寿命等效系数 F

Table 2　F of each energy storage unit

储能单元	实时控制方法	本文方法	增长倍数
1 号	66.07	153.94	1.33
2 号	67.87	151.79	1.24
3 号	67.93	152.13	1.24
4 号	67.01	156.74	1.34
5 号	66.99	156.69	1.34
6 号	66.11	161.57	1.44
7 号	64.39	160.89	1.50
8 号	66.46	160.62	1.42
均值	66.60	156.80	1.35

5　结论

本文提出一种计及多储能单元出力水平的风功率平抑控制方法，该方法有效地兼顾了风功率的平抑效果与多储能单元的实时出力能力，在降低风电场并网点功率波动的同时减小了各储能单元 SOC 的波动区间、放电深度以及充放电切换次数，对于延长 BESS 的使用寿命有实际应用价值。主要结论如下：

1）分析了滤波时间常数与功率分配方法对 BESS 出力的影响，T_f 过大会过度平抑功率波动与调用 BESS 能量，T_f 过小会导致功率平抑效果无法达到并网要求；多储能单元的功率指令应根据充放电情况，分别按照 SOC 值的负相关与正相关函数分配功率指令；定义了能量优化利用率与循环寿命等效系数用于评价储能单元参与风功率平抑的性能。

2）引入风功率超短期预测，根据预测数据建立了滤波时间常数优化模型，以并网波动率为限制，获取未来 15 min 的最小滤波时间常数与 BESS 功率指令，与两种传统方法相比较，在 24 h 内可分别降低 BESS 能量调用 21.5%与 13.2%，减小 SOC 波动范围 60.7%与 44.7%，在满足风功率平抑要求的同时减小了 BESS 的能量调用。

3）根据 BESS 功率指令与各储能单元 SOC 的实时区间分布提出分层复合式功率分配方法，与上层滤波时间优化模型联合运行，避免各单元 SOC 过充过放效果显著，且循环寿命等效系数平均可增加 1.35 倍，最高可达 1.5 倍，极大的延长了各储能单元使用寿命，使多储能单元更可靠、合理地参与风

功率波动抑制。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 李庆民，于万水，赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3047-3060.
LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao. Key technologies for the safe operation of wind and solar power generation equipment in support of the “peak CO_2 emissions and carbon neutrality” policy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3047-3060.

[2] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[3] 刘 芳，刘 威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.

[4] 王渝红，廖逸犇，宋雨妍，等. 风电场内部分散式无功电压优化控制策略[J]. 高电压技术，2022，48(12)：5047-5056.
WANG Yuhong, LIAO Yiben, SONG Yuyan, et al. Distributed optimal control strategy of reactive power and voltage in wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5047-5056.

[5] 姚 伟，熊永新，姚雅涵，等. 海上风电柔直并网系统调频控制综述[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3397-3413.
YAO Wei, XIONG Yongxin, YAO Yahan, et al. Review of voltage source converter-based high voltage direct current integrated offshore wind farm on providing frequency support control[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3397-3413.

[6] 国家能源局. 我国风电并网装机突破 3 亿千瓦[EB/OL]. [2021-11-30]. http://www.nea.gov. cn/2021-11/30/c_1310343188. htm.
National Energy Administration. China’s wind power grid-connected installed capacity exceeds 300 million kilowatts[EB/OL].[2021-11-30]. http: //www. nea. gov. cn/2021-11/30/c_1310343188. htm.

[7] 张 靖，张志文，胡斯佳，等. 独立微电网风储协同调频的功率柔性分配策略[J]. 电工技术学报，2022，37(15)：3767-3780.
ZHANG Jing, ZHANG Zhiwen, HU Sijia, et al. A flexible power distribution strategy with wind turbine generator and energy storage for frequency regulation in isolated microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3767-3780.

[8] 袁小明，程时杰，文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化，2013，37(1)：14-18.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18.

[9] 李建林，郭兆东，马速良，等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4330-4341.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4341.

[10] 施啸寒，赵雅文，张恒旭，等. 基于准零相位滤波器的电池储能系统平滑风电波动控制方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(4)：45-53.
SHI Xiaohan, ZHAO Yawen, ZHANG Hengxu, et al. Control method of wind power fluctuation smoothing for battery energy storage system based on quasi-zero phase filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 45-53.

[11] 国家发展改革委，国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见[EB/OL]. [2021-07-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. National Development and Reform Commission, National Energy Administration guidance on accelerating the development of new types of energy storage.[EB/OL]. [2021-07-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html.

[12] 李 征，陈佳瑜，石 坤. 风电功率波动频率域分析及储能平滑功率算法优化[J]. 太阳能学报，2020，41(4)：184-193.
LI Zheng, CHEN Jiayu, SHI Kun. Frequency domain analysis of wind power fluctuation and control strategy optimization of power smoothing[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(4): 184-193.

[13] 李相俊，王上行，惠 东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术，2017，41(10)：3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.

[14] 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)：34-38，62.
ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hongjie, et al. An energy storage control method based on state of charge and variable filter time constant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 34-38, 62.

[15] ZHOU Y, YAN Z, LI N H. A novel state of charge feedback strategy in wind power smoothing based on short-term forecast and scenario analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 870-879.

[16] LIN L, JIA Y Q, MA M H, et al. Long-term stable operation control method of dual-battery energy storage system for smoothing wind power fluctuations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106878.

[17] 孙玉树，唐西胜，孙晓哲，等. 基于 MPC-HHT 的多类型储能协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(9)：2580-2588.
SUN Yushu, TANG Xisheng, SUN Xiaozhe, et al. Research on multi-type energy storage coordination control strategy based on MPC-HHT[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2580-2588.

[18] 刘颖明，王晓东，彭朝阳. 计及储能出力水平的平滑风电功率模型预测控制策略[J]. 电网技术，2020，44(5)：1723-1731.
LIU Yingming, WANG Xiaodong, PENG Chaoyang. Model predictive control strategy for smoothing wind power with energy storage output level[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1723-1731.

[19] LI X J, HUI D, LAI X K. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 464-473.

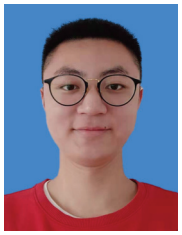
[20] JIANG Q Y, GONG Y Z, WANG H J. A battery energy storage system dual-layer control strategy for mitigating wind farm fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3263-3273.

[21] BINDNER H, CRONIN T, LUNDSAGER P, et al. Lifetime modelling

of lead acid batteries[R]. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 2005.

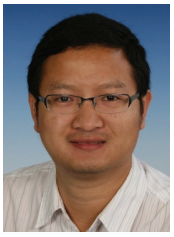
[22] 李　勇，罗隆福，张志文，等. 应用感应滤波原理构建的直流供电系统[J]. 中国电机工程学报，2010，30(22)：107-112.
LI Yong, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. A DC power supply system developed with inductive filtering method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 107-112.

[23] WU K H, ZHOU H, AN S C, et al. Optimal coordinate operation control for wind–photovoltaic–battery storage power-generation units[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 90: 466-475.



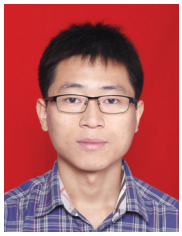
常樊睿
1999—，男，硕士生
主要从事新能源并网功率波动平抑、频率调节和稳定性控制方面的研究工作
E-mail: 980475885@qq.com

CHANG Fanrui



李　勇(通信作者)
1982—，男，博士，教授，博导
主要从事能源/电力系统优化运行与控制、电能变换系统与装备方面的研究工作
E-mail: yongli@hnu.edu.cn

LI Yong
Ph.D., Professor
Corresponding author



彭衍建
1988—，男，博士，助理研究员
主要从事新能源并网稳定性控制方面的研究工作
E-mail: yjpeng@hnu.edu.cn

PENG Yanjian
Ph.D.

收稿日期　2023-01-16　修回日期　2023-04-13　　编辑　陈　蔓

附录 A

附表 A1　分层复合式功率分配表

Table A1　Layered composite power distribution table

BESS 功率指令	不同区间储能单元功率指令				
	(S_{OCmax}, 1)	(S_{OChigh}, S_{OCmax})	(S_{OClow}, S_{OChigh})	(S_{OCmin}, S_{OClow})	(0, S_{OCmin})
0~$(a+b)P_{i,rate}$	依次满放	0	0	0	0
$(a+b)P_{i,rate}$~$(a+b+c)P_{i,rate}$	$P_{i,rate}$	$P_{i,rate}$	$P_{i,dis}$	0	0
$(a+b+c)P_{i,rate}$~$(a+b+c+d)P_{i,rate}$	$P_{i,rate}$	$P_{i,rate}$	$P_{i,rate}$	$P_{i,dis}$	0
>$(a+b+c+d)P_{i,rate}$	$P_{i,rate}$	$P_{i,rate}$	$P_{i,rate}$	$P_{i,rate}$	0
−$(d+e)P_{i,rate}$~0	0	0	0	0	依次满充
−$(d+e)P_{i,rate}$~ −$(d+e+c)P_{i,rate}$	0	0	$P_{i,ch}$	$-P_{i,rate}$	$-P_{i,rate}$
−$(d+e+c)P_{i,rate}$~ −$(d+e+c+b)P_{i,rate}$	0	$P_{i,ch}$	$-P_{i,rate}$	$-P_{i,rate}$	$-P_{i,rate}$
<−$(d+e+c+b)P_{i,rate}$	0	$-P_{i,rate}$	$-P_{i,rate}$	$-P_{i,rate}$	$-P_{i,rate}$