

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

施啸寒¹, 赵雅文¹, 张恒旭¹, 王晓磊², 周博曦³

(1. 山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061; 2. 华能山东发电有限公司, 山东省济南市 250014;

3. 山东电力高等专科学校, 山东省济南市 250002)

摘要: 利用电池储能系统(BESS)平滑风电功率波动可以提高风电场输出稳定性,但基于一阶低通滤波器的控制方法易将风电功率趋势分量引入BESS充放电指令,增加BESS容量需求。针对该问题,提出一种基于准零相位滤波器的BESS控制方法。首先,分析滑动平均滤波器时频特性及滞后相位特性对BESS充放电控制的影响。然后,以中心滑动平均滤波算法为基础,融合风电功率趋势预测信息来构建一种相位延时近似为零的准零相位滤波器。最后,该滤波器提取风电功率波动分量,显著降低滤波延时,减小BESS充放电指令中的趋势分量。对典型风电功率波动情景的仿真结果表明:在获得与传统低通滤波方法近似平滑效果时,所提策略能够明显减小BESS最大能量波动和累积能量交换,进而降低容量配置要求,延长使用寿命。

关键词: 风电功率波动平滑; 零相位滤波器; 滑动平均滤波; 电池储能系统

0 引言

风电、光伏等可再生能源发电并网规模不断扩大,其波动性和随机性对电网安全稳定运行和电能质量影响日益显著^[1]。利用电池储能系统(battery energy storage system, BESS)平滑可再生能源电源出力波动,提高并网功率平稳性和可控性是应对上述影响的有效措施之一^[2-3],对于提高风光资源利用率,践行绿色可持续发展战略具有重要意义。

为实现风光电源出力波动平滑,一方面需要根据电源出力信息控制BESS充放电,保证联合功率满足并网要求^[4];另一方面需要控制电池处于合适状态,避免过充过放。信号分解和斜率控制是2种常用的充放电控制方法,前者使用滤波器(如一阶低通滤波器^[5-8]、滑动平均滤波器^[9](moving average filter, MAF)等)或小波分解^[10]等数字信号处理方法提取快速波动功率分量作为BESS对消对象,后者使用风光电源出力与设定变化率曲线的差值作为对消对象^[11]。

为降低BESS配置要求并延长电池寿命,在波

动分量提取的基础上增加荷电状态(state of charge, SOC)反馈是一种改进思路。如文献[7]研究了滤波时间常数与波动率之间的关系,进而综合波动率要求和SOC实时调整滤波时间常数;文献[8]将滤波时间常数控制方法用于微网储能管理,维持电池SOC处于设定范围;文献[9]基于模糊理论,提出一种根据电池SOC、充放电强度、风电功率波动程度决定项数和权重的滑动平均滤波算法。以并网功率及BESS参数为约束,从动态优化角度计算BESS充放电指令是另一条改进思路。例如,文献[12]提出一种BESS双时间尺度控制方法,通过双层协调和滤波时间实时优化从而以较小容量的BESS来满足并网功率双时间尺度波动率要求;文献[13]提出一种利用风电功率预测信息动态优化BESS充放电指令的方法,在满足并网功率变化率要求的前提下最小化能量交换;文献[14]基于凸优化理论设计了一种用于光伏波动平滑的双层滤波器,与传统滑动平均滤波方法相比,其容量要求降低了45%。文献[15-16]分别基于气象信息和动态模型将光伏出力预测信息引入BESS控制,降低了波动平滑所需要的BESS容量。

上述研究中,第1类改进可将SOC控制在设定区间,但会牺牲平滑效果或引入额外能量交换。第2类改进可显著改善优化指标,但计算量大且存在收敛性问题。本文提出一种基于滑动平均滤波算法

收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-04-08。

上网日期: 2020-06-24。

国家自然科学基金资助项目(51707108);山东省自然科学基金资助项目(ZR2017QEE015);山东省高等学校科学技术计划资助项目(J18KB146)。

融合风电功率预测信息的新型BESS控制方法。首先,通过时频特性分析阐述滤波器相位滞后特性是该类方法BESS容量利用率低的主要原因。随后,将风电功率预测信息融入滑动平均滤波算法构建一种相位滞后近似为零的准零相位滤波器(quasi-zero phase filter, QZPF)并用于BESS平滑控制,显著减小了BESS与电网间累积的能量交换和最大能量交换。最后,以典型日风电功率波动数据为例,通过仿真计算检验理论分析结果和所提控制方法的效果。

1 基于MAF的BESS控制方法

1.1 风储联合系统结构

不失一般性,本文以风储联合发电系统为例讨论BESS平滑控制。通常在风电场并网点附近配置BESS构成联合发电系统,通过协调BESS与风力发电系统实现联合系统总并网功率平滑,其典型结构如图1所示。图中, P_w, P_B, P_G 分别为风电场出力、BESS出力和联合系统总并网功率,显然可得:

$$P_G = P_w + P_B \quad (1)$$

式(1)表明:当控制BESS出力 P_B 与风电场出力 P_w 的波动分量反向变化时,即可通过BESS的充放电控制对消风电功率波动,实现联合系统总并网功率平滑。

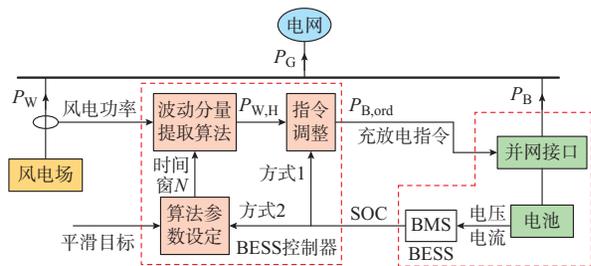


图1 风储联合系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind power and energy storage combined system

BESS控制器是波动平滑的神经中枢,它以风电功率、平滑目标及电池状态为输入,实时计算电池充放电指令。BESS在接口电路的控制下跟踪指令,同时电池管理系统(battery management system, BMS)实时监控电池组SOC等状态变量并上报给BESS控制器。BESS控制器可进一步分解为风电功率波动分量提取和电池能量管理2个方面。前者根据实时风电功率和提取算法参数计算需要对消的风电功率波动分量 $P_{w,H}$,构成指令充放电功率 $P_{B,ord}$ 的主要成分;后者对 $P_{w,H}$ 进行必要缩放、限幅等调整(方式1)或修改波动分量提取算法参数(方式2)

以调整SOC,保证电池运行于合理状态。

1.2 基于MAF的波动分量提取

MAF是一阶低通滤波器的一种数字实现,在学术研究与工程实践中被广泛采用。它基于数据窗概念滚动缓存设定长度的历史数据,计算缓存数据算术平均值作为当前值,通过采样点逐个更新缓存区及算数平均实现曲线平滑,故可用于风电功率波动分量提取。

基于MAF的风电功率波动分量提取过程如图2所示。其中,MAF的计算公式为:

$$P_{w,L}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{P_w(k-i)}{N} \quad (2)$$

式中: k 为采样时刻; N 为数据窗长度; $P_w(k)$ 和 $P_{w,L}(k)$ 分别为 k 时刻采样时的测量数据和计算数据。一般来说, N 越大, $P_{w,L}$ 越平滑,因此总并网功率的平滑目标可通过合理设置 N 实现。

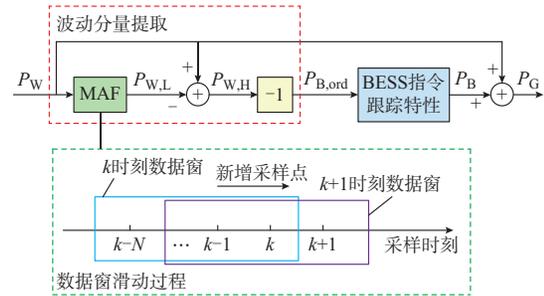


图2 基于MAF的波动分量提取

Fig. 2 Fluctuating component extraction based on MAF

MAF具有低通特性,因此 $P_{w,L}$ 可以看做是 P_w 的低频分量(后文称之为趋势分量),从原始风电功率 P_w 中减去 $P_{w,L}$ 即可得到波动分量 $P_{w,H}$ 。另外,考虑BESS指令跟踪速度(毫秒级)远小于风电功率波动周期(分钟级)而可忽略,因此可得:

$$P_G = P_w + P_{B,ord} = P_w - (P_w - P_{w,L}) = P_{w,L} \quad (3)$$

式(3)表明:若忽略SOC调整,则只有MAF平滑后的风电功率趋势分量 $P_{w,L}$ 流入电网,实现了联合发电系统总并网功率平滑。

2 基于QZPF的BESS控制

2.1 MAF滞后相位特性及其影响

由式(3)可知,MAF所提取的趋势分量 $P_{w,L}$ 即为联合发电系统总并网功率,而剩余变化频率较高的波动分量 $P_{w,H}$ 则为BESS需要对消的分量。对式(2)进行 z 变换,并以 $e^{j\omega}$ 代替 z 即可得到MAF的传递函数为:

$$H(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{\omega N}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)} e^{-j\frac{\omega(N-1)}{2}} \quad (4)$$

式中: ω 为信号频率。

式(4)表明:MAF是一种幅频特性与相频特性分别为sin函数与线性函数的有限脉冲响应滤波器。 N 取10和30时,其频率特性如图3所示。图中, $1/N_1$ 和 $1/N_2$ 表示接近截止频率处,下同。

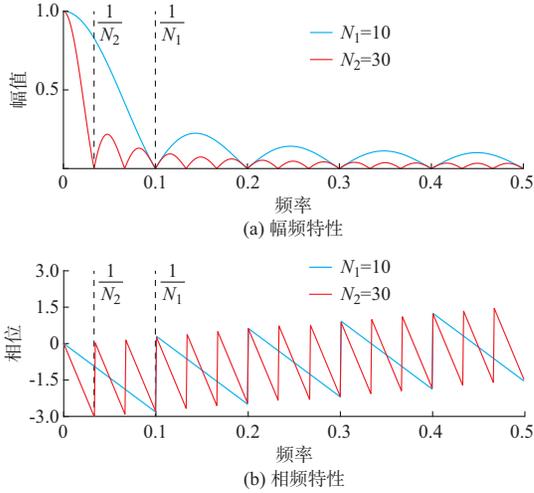


图3 MAF频率特性($N=10, 30$)
Fig. 3 Frequency characteristics of MAF ($N=10, 30$)

由图3可知:①MAF为截止频率与 N 成反比的低通滤波器,且对阻带信号的衰减能力随 N 的增加而增强;②MAF会引起与 N 及信号频率线性相关的滞后相位。

在实时控制中,相位滞后特性会将风电功率趋势分量引入BESS充放电指令中,增加电池与电网间的能量交换,降低BESS的单位容量利用率,并且该问题在时域中分析更加明显。为简化分析过程,假设风电功率可由高频和低频2种波动分量表示,即

$$P_w = P_L \sin(\omega_L t + \theta_L) + P_H \sin(\omega_H t + \theta_H) \quad (5)$$

式中: P_L, ω_L, θ_L 和 P_H, ω_H, θ_H 分别为高频分量和低频分量的幅值、角频率和初始相位。

由图2知,经过MAF滤波后的低频分量为:

$$P_{w,L} = \left| H(\omega_L) \right| \sin(\omega_L t + \theta_L + \angle H(\omega_L)) + \left| H(\omega_H) \right| \sin(\omega_H t + \theta_H + \angle H(\omega_H)) \approx P_L \sin(\omega_L t + \theta_L + \angle H(\omega_L)) \quad (6)$$

式中: $H(\omega_L)$ 和 $H(\omega_H)$ 分别为MAF频率特性在 ω_L 和 ω_H 处的取值,且假定 $H(\omega_H)$ 幅值足够小而 $H(\omega_L)$ 幅值近似为1。

假定SOC处于合理区,其反馈控制不发挥作用,则由图2可知BESS的充放电功率为:

$$P_B = -P_{w,H} = P_{w,L} - P_w \quad (7)$$

将式(5)和式(6)代入式(7),化简后可得:

$$P_B = -P_H \sin(\omega_H t + \theta_H) - 2P_L \sin\left(\frac{\angle H(\omega_L)}{2}\right) \cos\left(\omega_L t + \theta_L + \frac{\angle H(\omega_L)}{2}\right) \quad (8)$$

式(8)表明:采用MAF提取波动分量时,BESS除要抵消风电功率高频波动分量外,还需要抵消一部分风电功率趋势分量,其幅值与MAF在该频率下的滞后相位有关。由于MAF具有线性相频特性,因此 N 越大,同样趋势分量对应的滞后相位越大,进入BESS充放电功率的趋势分量越多。

2.2 零相位滤波器

由式(8)可知,消除滤波器滞后相位可消除BESS充放电功率中的趋势分量,进而减少电池与电网间的能量交换,提高BESS利用率。为此,将MAF输入修改为关于当前时刻对称的数据项,构成中心MAF(CMAF)实现零相位滤波。当 N 为奇数时,其CMAF计算公式如式(9)所示;当 N 为偶数时,计算公式可仿照推导。

$$\begin{cases} P_{w,L}(k) = \sum_{i=-n}^n \frac{P_w(k-i)}{N} \\ n = \frac{N-1}{2} \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)进行 z 变换及变量代换可得CMAF的频率特性为:

$$H(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{\omega N}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)} \quad (10)$$

对比式(5)与式(10)可知,CMAF与MAF幅频特性相同,但无相位滞后。若利用CMAF提取风电功率波动分量,则可避免风电功率趋势分量影响BESS充放电功率指令。

此外,为评估平滑前后风电功率不同频率波动分量占比,可采用傅里叶变换将时域曲线变换到频域,基于频谱曲线分析构成信号的不同频率成分,离散信号傅里叶变换公式可表示为:

$$X(k) = \sum_{k=0}^{L-1} x(k) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad k=1, 2, \dots, L-1 \quad (11)$$

式中: $X(k)$ 和 $x(k)$ 分别为分析对象时域和频域数

据; L 为数据总数。

2.3 QZPF 及其应用

CMAF 虽可实现无相位滞后低通滤波,但其输入包含了未来时刻数据,是一种仅可用于离线数据处理的非因果滤波器。利用 BESS 平滑风电功率波动属于实时控制,无法直接使用 CMAF。由于风速在短时间段内具有持续性,因此可利用预测数据代替未来数据而构建 QZPF,并进一步用于 BESS 控制。

QZPF 时域表达式同式(9),只是使用预测风电功率代替未来时刻的实际风电功率。当预测数据准确反映未来风电功率变化时,QZPF 与 CMAF 的时域计算式及频率特性均基本一致。因此,QZPF 具有低通特性且滤波延时近似为零,可实现风电功率趋势分量的近似无延时提取,显著减小 BESS 充放电功率中的趋势分量。为应用 QZPF,需要预测未来风电功率趋势信息,进而计算 BESS 充放电指令。

1) 风电功率趋势信息预测

通常,只有周期为数分钟及十几分钟的风电功率波动需要平滑,因此 QZPF 只须预测未来 1 h 左右的数据,这属于超短期风电功率预测范畴。此外,QZPF 主要利用变化趋势消除 MAF 相位滞后,而不关注风电功率局部波动细节,故本文采用较简单的回归分析完成风电功率趋势信息预测。

回归分析将风电功率时间序列看作时间坐标函数,通过历史数据集确定回归项系数,进而利用回归方程外推未来时刻的风电功率取值。结合风电功率序列特征与算法复杂度,采用的多项式回归方程为:

$$\hat{P}_w = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 k + \hat{\beta}_2 k^2 + \dots + \hat{\beta}_q k^q \quad (12)$$

式中: \hat{P}_w 为待估计风电功率; q 为回归项最大阶数; $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_q$ 为回归项系数,可采用最小二乘法计算。

为实现滚动预测,须在每个时刻更新预测模型,且回归模型仅反映风电功率短期局部变化规律,故回归项最大阶数 q 不用太大。特别地,当风电功率持续上坡或下坡时,线性回归精度基本满足要求;而当风电功率爬坡方向变化及阵风引起持续大幅波动时,二次拟合可较好地反映其变化过程。因此,本文中最大拟合阶数设为 2,并通过拟合优度自动选择二次拟合或线性拟合。

2) 基于 QZPF 的 BESS 控制

将 QZPF 应用于 BESS 平滑控制的流程如图 4 所示。它仍保持了波动分量提取和充放电指令调整

2 个部分,只是波动分量提取基于 QZPF 实现。控制流程共包括 3 步:①在每个当前时刻 k ,基于之前 M 个历史风电功率数据形成构建预测模型使用的时标列向量 T 和风电功率列向量 Y ,进而确定回归模型系数,并利用回归模型计算 m 个未来风电功率数据,通常 $m < M$;②历史风电功率数据与风电功率趋势预测值共同构成 CMAF 的输入,经过 CMAF 计算期望并网功率和 BESS 充放电指令;③根据当前 SOC 是否偏离设定运行范围来修改波动分量提取参数或叠加 SOC 调整功率,由于基于 QZPF 的波动分量提取算法消除了相位滞后,因此仅须应对充放电损耗等导致的 SOC 偏移,控制压力显著减小。最终,BESS 执行充放电功率指令,更新并上报 SOC 状态,开始下一个控制周期。

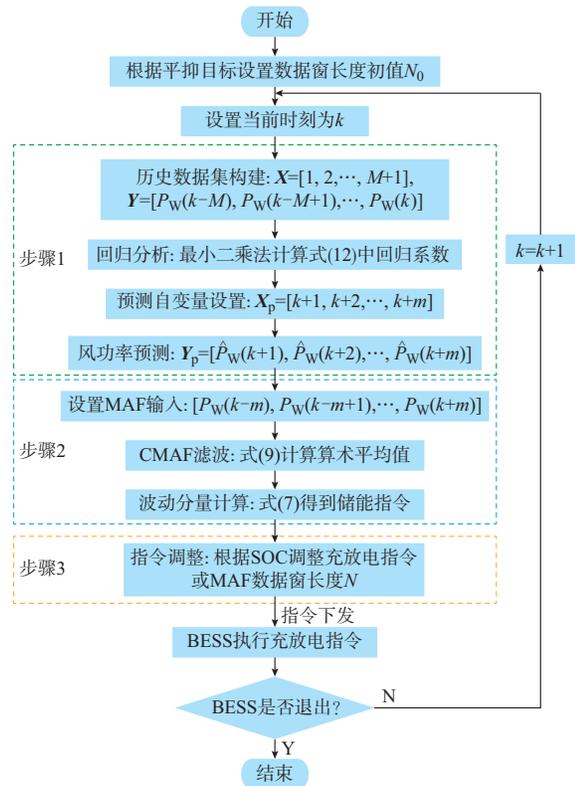


图 4 基于 QZPF 的 BESS 控制方法流程图
Fig. 4 Flow chart of QZPF-based BESS control method

3 平滑效果、BESS 配置及经济性

为评估平滑效果,本文使用波动率作为描述风电功率波动性的主要指标,其定义为:一定时间间隔内,风电功率最大值和最小值之差与风场额定功率的比值。离散形式下,功率波动率表达式为^[12-14]:

$$r_T = \frac{1}{P_r} (\max(P(t), P(t + \Delta T), \dots, P(t + T)) - \min(P(t), P(t + \Delta T), \dots, P(t + T))) \quad (13)$$

式中: $P(t)$ 和 P_r 分别为 t 时刻风电功率值和额定值; T 和 ΔT 分别为时间间隔和风电功率采样步长; r_T 为 T 时间间隔下的功率波动率。

通常,波动平滑目标是将功率波动率控制在给定上限之内,例如中国规定30~150 MW的风电场1 min和10 min的波动率上限分别为10%和33%^[4],日本东北电力公司规定风电场在20 min的波动率上限为10%^[17]。此外,本文还使用相邻采样点变化率方均根作为描述并网功率整体平滑度的指标,与波动率上限构成整体与局部描述搭配。平滑度定义式为:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{k=1}^{L-1} (P(k+1) - P(k))^2} \quad (14)$$

式中: γ 为平滑度,其值越小功率平滑度越高。

当平滑后并网功率满足要求时,可基于整个风电功率样本数据周期内BESS的充放电功率确定BESS的功率和容量要求。其中,BESS额定功率为考察周期内充放电功率绝对值的最大值,额定容量为考察周期内的BESS最大能量波动,即最大能量与最小能量之差。相关公式如下^[17]。

$$P_{\text{BESS}} = \max |P_B(k)| \quad k=1, 2, \dots, L \quad (15)$$

式中: P_{BESS} 为BESS额定功率。

$$E_{\text{BESS}} = \max E(k) - \min E(k) \quad k=1, 2, \dots, L \quad (16)$$

式中: E_{BESS} 和 $E(k)$ 分别为须配置BESS的额定容量和BESS在 t 时刻的剩余能量。

此外,由电池老化模型可知^[18]:电池可用容量衰减量与电池累积交换电量呈幂函数正相关,减小累积交换能量能够延长电池使用寿命。累积交换电量为:

$$E_{\text{acm}} = \sum_{k=1}^L |P_B(k)| \Delta T \quad (17)$$

为开展经济性分析,本文采用文献[19]提出的BESS成本模型计算BESS投资,且主要考虑初始投资、辅助设备投资和运维成本。

初始投资包括正比于BESS容量和功率的部分,分别对应电池组和功率调节系统成本,即

$$C_{\text{inv}} = C_{\text{pinv}} P_{\text{BESS}} + C_{\text{einv}} E_{\text{BESS}} \quad (18)$$

式中: C_{pinv} 为单位功率投资成本; C_{einv} 为单位容量投资成本。根据文献[20-21], C_{pinv} 和 C_{einv} 可分别取为102.7元/(kW·h)和300元/kW。

辅助设备主要包括BMS和EMS等系统,其成本通常正比于BESS容量,即

$$C_{\text{bop}} = C_{\text{ebop}} E_{\text{BESS}} \quad (19)$$

式中: C_{ebop} 为单位容量辅助成本,根据文献[21],可取为100元/(kW·h)。

运维成本包括人工成本和管理成本2个部分,可划分为与功率成正比的固定部分和与充放电电量成正比的变动部分,即

$$C_{\text{om}} = C_{\text{pom}} P_{\text{BESS}} + \sum_{k=1}^S C_{\text{com}} W_{\text{BESS}}(k) \quad (20)$$

式中: C_{pom} 为单位功率运维成本; C_{com} 为单位电量运维成本; $W_{\text{BESS}}(k)$ 为BESS的年充放电电量; S 为BESS可用总年数。本文沿用文献[19]中的数值, C_{pom} 取为62元/kW, C_{com} 取为0.014 07元/(kW·h)。

波动平滑收益方式与国家政策密切相关。本文以山东地区为例,基于文献[22]计算考核电量,即

$$W_{\text{ac}} = (P_{k,c} - P_{\text{lim}}) \times 10 \times 1 \quad (21)$$

式中: $P_{k,c}$ 为 k 时段内超限值的功率变化值; P_{lim} 为功率变化限值。此外,波动率超限考核电量以次为单位,按累加方式进行。考核电量乘以电费单价即为对风电场的经济考核,但每月考核上限为1%的月发电总收益。

4 算例验证

为检验理论分析结果和所提方法的性能,以典型日风电功率波动数据为例,先通过仿真计算分析MAF滞后相位特性的影响,随后,将所提方法与目前主流方法:变时间常数MAF控制方法^[8](方法1)和MPC优化控制方法^[13](方法2)进行对比。最后,分析3种情况下BESS的经济性。分析以中国山东东部沿海地区某风电场为例,该风电场安装50台2 MW双馈风电机组,总容量为100 MW,联合发电系统结构与图1相同。沿用文献[9]中储能比例而配置的BESS,其额定功率和额定容量分别为30 MW/30 MW·h。分析忽略了充放电损耗,风电功率数据采样和BESS指令计算步长为1 min。

4.1 MAF滞后相位特性影响分析

MAF及CMAF控制下系统并网功率时频曲线如图5所示,对应的BESS功率频谱($N=25$)如图6所示。

由图5(a)可知,BESS平滑后系统并网功率波动显著减小,高频波动基本消除。对应频谱表明:原始风电功率可分解为幅值约为53 MW的直流信号、幅值和周期分别从27 MW和1 440 min成倍减小的周期信号,且周期小于25 min的波动分量占比约为0.7%;平滑后,BESS吸收了风电功率高频波动分量,周期小于25 min的波动分量被削减至0.05%以下。

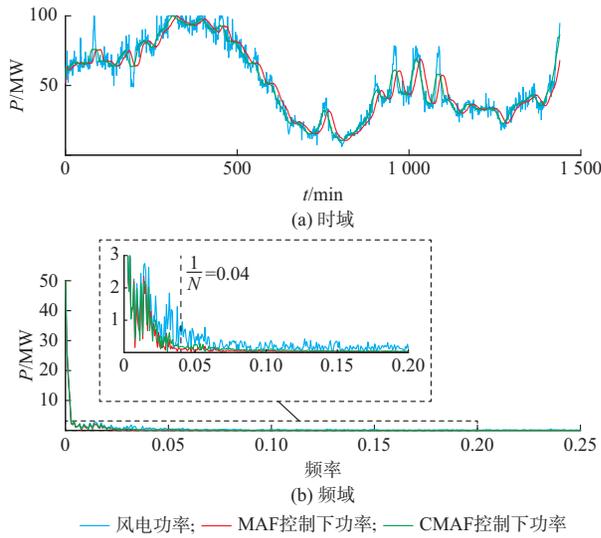


图5 风电功率及并网功率时频曲线
Fig. 5 Time and frequency curves of wind power and grid-connected power

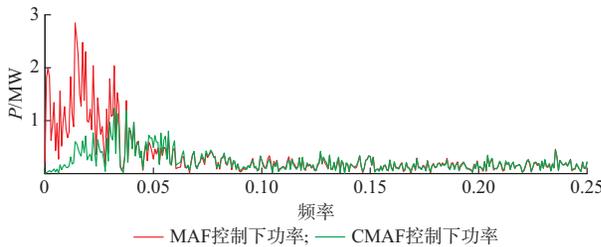


图6 BESS充放电功率频域曲线
Fig. 6 Frequency curve of charging and discharging power for BESS

由图6可知,BESS功率频谱基本与对消的风电功率高频分量对应,但MAF控制下风电功率低频分量会泄漏到BESS功率中。以频谱曲线第3点为例,其归一化频率为0.001 39,代入式(4)可得其相位滞后约为 6° ,代入式(8)得该频率进入BESS功率的比例约为0.105,与基于图6数据的计算结果(0.112)基本一致。频率分量泄漏使MAF控制下的BESS功率低频分量显著增加,截止频率以下的频谱分量占比由CMAF控制下的4%增加至46%。

对应上述过程的并网功率波动率及SOC曲线见附录A图A1和图A2。由图A1和图A2可知,2种控制方法下并网功率波动率显著降低,1 min和10 min的最大波动率由25%和29%降至4.4%和22.6%,平滑度指标由4.72降低至0.55。基于BESS功率还可计算2种控制方法下的最大充放电功率、最大能量波动和累积交换能量等指标分别为:29.1 MW和24.1 MW、18.1 MW·h和2.5 MW·h、136.0 MW·h和75.4 MW·h。上述指标差异说明:

①风电功率波动平滑对BESS功率要求较高,而对能量要求较低,属于典型功率型应用;②若系统实现采用基于MAF的控制方法,实际容量需求会剧增为理想值的7倍左右,且BESS使用寿命将减少为理想值的60%,与理论分析一致。

4.2 不同控制方法对比

首先,调整控制参数使各方法平滑效果相近,然后对比功率要求 P_{BESS} 、容量要求 E_{BESS} 、累积交换能量 E_{acm} 和计算时间 T_C 等指标。各方法设置为:方法1的初始数据窗长度为25,SOC运行和调节区间为 $[0.1, 0.9]$ 和 $[0.4, 0.6]$,数据窗长度调整步长为1;方法2的优化目标为BESS充放电能量最小,约束为并网功率变化率(1 min波动率和10 min波动率上限为3%和15%)与BESS参数,使用Yalmip软件包求解^[22],风电功率预测时建模用数据和预测长度分别为100和10;本文方法数据窗长度为25,预测建模数据长度为50,线性模型和二次模型下预测长度为25和8,使用二次模型的条件为其拟合误差小于线性拟合误差的80%。另外,方法1和本文方法叠加满足波动率要求的斜率控制。

3种方法下并网功率及BESS充放电功率曲线见附录A图A3,对应的功率波动率曲线和累积概率密度曲线见附录A图A4。由图A3和图A4可知,3种方法的平滑效果基本一致,1 min波动率和10 min波动率均小于3%和15%,且各波动率占比相近;方法2倾向于将1 min波动率控制在边界上,使并网功率存在“小毛刺”,整体平滑度略差,但10 min波动率控制较好。各方法下BESS要求、计算时间等指标见表1,该表同时给出了基于MAF和CMAF控制下的对应指标。

表1 不同方法的性能指标
Table 1 Performance indices of different methods

方法	$P_{\text{BESS}}/\text{MW}$	$E_{\text{BESS}}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	$E_{\text{acm}}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	T_C/s	γ
1	29.1	16.0	141.8	0.38	0.62
2	24.2	13.5	121.3	496.50	1.10
本文	25.2	8.3	118.7	0.77	0.76
MAF	29.1	18.1	136.0	0.37	0.55
CMAF	24.1	2.5	75.4	0.37	0.55

由表1可知,与基于MAF的控制相比,方法1对BESS的功率要求不变且减小了12%的容量要求,但增加了4.3%的累积能量交换且平滑度及计算时间略有增加;方法2降低了19%的功率要求和

25%的容量要求,同时降低了11%的累积能量交换,但计算时间显著增加且平滑度指标也稍微变差;本文方法降低了13%的功率要求和54%的容量要求,同时降低了13%的累积能量交换,计算复杂度和平滑度指标基本不变。上述对比说明:在平滑效果相近时,本文方法对BESS功率要求指标和累积能量交换指标的改善效果与方法2相近,均显著优于方法1;但本文方法计算复杂度远小于方法2,对BESS的容量要求也仅为其61%。

4.3 经济性分析

基于图5中原始风电功率和式(21)可计算当日罚金约为36万元,远超单日电费的1%。这说明按目前考核方法,典型大风日很容易达到考核上限。考虑到算例数据为出力和波动性较大的春季大风日典型数据,而在夏秋风力平稳时波动性较小,因此本文假定冬春两季罚金为考核上限,而夏秋罚金为冬春季一半,在风电场年利用小时数为2 200时,全年经济惩罚约为100.7万元。

假定BESS的SOC运行范围为0.9,寿命为20年,结合表1中BESS配置及运行数据和式(18)一式(20)可计算BESS固定投资和运行成本,结果见表2。

表2 不同控制方法下的BESS成本
Table 2 Cost of BESS with different control methods

方法	容量成本/ 万元	功率成本/ 万元	辅助设备 成本/万元	运行成本/ (万元·a ⁻¹)
1	1 826	873	178	18.4
2	1 541	726	150	15.8
本文	947	756	92	15.5

综合表2与波动平滑收益可计算3种控制方法下BESS的投资回收期分别为40年、28.5年和21年。这说明3种控制方法下的BESS成本回收期均大于使用寿命,但本文所提控制方法可降低约30%初始投资和约10%运行成本,从而显著缩短回收期。此外,根据文献[18-19]预测,未来4年电池及功率调节系统成本可进一步下降至700元/(kW·h)及150元/kW,此时本文控制方法下BESS的成本回收期将缩短至13年。另一方面,随着风光为代表的波动性电源占比继续扩大,电网灵活调节资源将日趋紧张,波动性电源考核经济规模也将增加。在这2个方面的综合作用下,利用BESS提高波动性电源调节灵活性和并网友好性的经济性拐点可能即将到来。

5 结语

为提升风电功率波动平滑用BESS的容量利用率及使用寿命,本文分析了MAF时频特性及其影响,并提出一种基于QZPF的BESS控制方法。理论分析和算例仿真表明:①MAF相位滞后特性是该类控制方法下BESS容量利用率低、累积交换能量大的主要原因;②在中心滑动平均滤波算法中融合风电功率预测信息可实现延时近似为零的低通滤波;③所提BESS控制方法可以显著减小BESS与电网间的持续交换能量和累积能量,进而降低容量配置要求,并延长使用寿命。如何综合考虑电池技术进步及电网对波动性电源考核政策的变化,更为准确地评估采用本文方法的BESS经济性进而推动其落地是下一步的研究重点。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 张丽英,叶延路,辛耀中,等.大规模风电接入电网的相关问题及措施[J].中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
ZHANG Liying, YE Yanlu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [2] 甘伟,郭剑波,艾小猛,等.应用于风电场出力平滑的多尺度多指标储能配置[J].电力系统自动化,2019,43(9):92-99.
GAN Wei, GUO Jianbo, AI Xiaomeng, et al. Multi-scale multi-index sizing of energy storage applied to fluctuation mitigation of wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 92-99.
- [3] 任永峰,薛宇,云平平,等.马尔可夫预测的多目标优化储能系统平抑风电场功率波动[J].电力系统自动化,2020,44(6):67-76.
REN Yongfeng, XUE Yu, YUN Pingping, et al. Multi-objective optimization of energy storage system with Markov prediction for power fluctuation suppression of wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 67-76.
- [4] 国家电网有限公司.风电场接入电网技术规定:Q/GDW 1392—2015[S].北京:中国电力出版社,2016.
State Grid Corporation of China. Technical requirements for wind farm access to power grid: Q/GDW 1392—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [5] CAO J, DU W, WANG H, et al. Optimal sizing and control strategies for hybrid storage system as limited by grid frequency deviations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5486-5495.

- [6] 李凯, 马倩, 徐红兵, 等. 储能系统的荷电状态管理策略及其影响评价[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 27-32.
LI Kai, MA Qian, XU Hongbing, et al. SOC management strategy of storage system and its impact assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 27-32.
- [7] NGUYEN C, LEE H. Power management approach to minimize battery capacity in wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 4843-4854.
- [8] WU T, YU W, GUO L. A study on use of hybrid energy storage system along with variable filter time constant to smooth DC power fluctuation in microgrid [J]. IEEE Access, 2019, 7(2): 175377-175385.
- [9] 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.
- [10] 吴杰, 丁明. 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[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7-12.
WU Jie, DING Ming. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using self-adaptive wavelet packet decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 7-12.
- [11] 李相俊, 张晶琼, 何宇婷, 等. 基于自适应动态规划的储能系统优化控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1355-1362.
LI Xiangjun, ZHANG Jingqiong, HE Yuting, et al. Optimal control method of energy storage system based on adaptive dynamic programming [J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1355-1362.
- [12] JIANG Q, WANG H. 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.
- [13] 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.
HONG Haisheng, JIANG Quanyuan, YAN Yuting. An optimization control method of battery energy storage system with wind power fluctuation smoothed in real time [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 103-109.
- [14] NAZARIPOUYA H, CHU C, POTA H, et al. Battery energy storage system control for intermittency smoothing using optimized two-stage filter [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 664-675.
- [15] SALEH M, MEEK L, MASOUM M, et al. Battery-less short-term smoothing of photovoltaic generation using sky camera [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2): 403-414.
- [16] LEI M, YANG Z, WANG Y, et al. A MPC based ESS control method for PV power smoothing applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(3): 2136-2144.
- [17] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [18] UNO M, KUKITA A. Cycle life evaluation based on accelerated aging testing for lithium-ion capacitors as alternative to rechargeable batteries [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1607-1617.
- [19] 张晴, 李欣然, 杨明, 等. 净效益最大的平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 40-48.
ZHANG Qing, LI Xinran, YANG Ming, et al. Capacity determination of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations with maximum net benefit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 40-48.
- [20] 全球新能源网. 锂电池价格四年后将降至100美元每千瓦时以下 [EB/OL]. [2020-03-20]. <http://www.xny365.com/news/article-179454.html>.
Global New Energy Network. Lithium battery price will fall to less than 100 dollar/(kW·h) after four years [EB/OL]. [2020-03-20]. <http://www.xny365.com/news/article-179454.html>.
- [21] 8家企业竞速上电国轩青海共享储能PCS采购 [EB/OL]. [2020-03-20]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20200226/1048016.shtml>.
Eight companies competing for Guoxuan Qinghai shared energy storage PCS procurement [EB/OL]. [2020-03-20]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20200226/1048016.shtml>.
- [22] 国家能源局华北监管局. 华北区域风电场并网运行管理实施细则 [EB/OL]. [2020-03-20]. <http://www.solarpwr.cn/bencandy-52-46013.html>.
North China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration. Implementing rules and regulations for the operation and management of grid-connected wind farms in north China [EB/OL]. [2020-03-20]. <http://www.solarpwr.cn/bencandy-52-46013.html>.

施啸寒(1986—), 男, 助理研究员, 硕士生导师, 主要研究方向: 电池储能系统构建方法及其在电力系统中的应用。E-mail: shixh@sdu.edu.cn

赵雅文(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 风-光-储联合发电系统中的储能控制。E-mail: zhaoyawenpss@foxmail.com

张恒旭(1975—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统监测、电力系统稳定分析与控制。E-mail: zhanghx@sdu.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

Control Method of Wind Power Fluctuation Smoothing for Battery Energy Storage System Based on Quasi-Zero Phase Filter

SHI Xiaohan¹, ZHAO Yawen¹, ZHANG Hengxu¹, WANG Xiaolei², ZHOU Boxi³

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Huaneng Shandong Power Generation Co., Ltd., Jinan 250014, China;

3. Shandong Electric Power College, Jinan 250002, China)

Abstract: The output stability of the wind farm can be improved by using the battery energy storage system (BESS) to smooth the wind power fluctuation, but the control method based on the first-order low-pass filter is prone to the introduction of the trend component of wind power into the charging/discharging order of the BESS, which increases the demand of energy storage capacity. Aiming at the problem, a control method of BESS based on the quasi-zero phase filter is proposed. Firstly, the impact of time-frequency domain and phase lag characteristics for the moving average filter (MAF) on the charging/discharging control of BESS is analyzed. Then, based on the central MAF algorithm, a quasi-zero phase filter with the approximate zero phase delay is established by integrating the prediction information of wind power trend. Finally, the fluctuation component of wind power is extracted by the proposed filter to significantly reduce the filter delay, and the trend component in the charging/discharging order of the BESS is decreased. The simulation results of typical wind power fluctuation scenarios show that when the obtained smoothing effect is similar to that of traditional low-pass filtering method, the proposed method can significantly reduce the maximum energy fluctuation and cumulative energy exchange of BESS, thus the capacity requirements is reduced and the service life of BESS is extended.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707108), Shandong Provincial National Natural Science Foundation of China (No. ZR2017QEE015) and Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program (No. J18KB146).

Key words: wind power fluctuation smoothing; zero phase filter; moving average filter; battery energy storage system (BESS)

