

基于 FIR 滤波器降幅平抑波动的混合储能优化调度

李培强¹, 刘抒睿¹, 郭榕²

(1. 福建理工大学电子电气与物理学院, 福州 350118; 2. 国网永春县供电公司, 福建 南安 362300)

摘要: 针对风功率波动平抑场景, 以风储联合发电系统作为研究对象, 提出一种 FIR 滤波器结合降幅环节的风电波动平抑策略, 同时通过对被滤除波动分量进行基于 EMD 的自适应重构, 从而实现对混合储能的优化调度。该策略选取了一种可以动态调节滤波阶数以及截止频率组合的 FIR 滤波器进行滤波, 并加入 FRA 降幅环节处理 FIR 滤波器无法很好平滑的高幅值数据点, 从而对风电波动进行平抑; 将平抑后滤除的风电波动的作为混合储能功率进行 EMD 分解, 得到的 IMF 分量通过算法自适应重构为高-低频两组功率分别配给超级电容器-蓄电池, 进而得到最优调度参数。通过算例验证分析, 加入 FRA 环节的 FIR 滤波能够适应不同频率、幅值的功率特性, 同时能有效降低 1 min、10 min 尺度的功率波动, 避免了平滑过度导致储能负担加重问题; EMD 分解后对 IMF 分量的自适应重构, 能够得到用于补偿不同充电特性的蓄电池、超级电容器功率, 显著降低了储能出力负担同时提高调度经济性。

关键词: 风电波动; 混合储能; 优化调度; 经验模态分解; 滤波器

Optimization Dispatching of Hybrid Energy Storage Based on FIR Filter for Reducing Amplitude and Smoothing Fluctuations

LI Peiqiang¹, LIU Shurui¹, GUO Rong²

(1. School of Electric, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, FuZhou 350118, China; 2. State Grid Yongchun County Power Supply Company, Nan'an, Fujian 362300, China)

Abstract: For the scenario of wind power fluctuation smoothing, taking the wind and energy storage combined power-generation system as the research object, a FIR filter combined with smooth strategy of wind power fluctuation of amplitude reduction link is proposed, and then the optimization dispatching of hybrid energy storage is realized through adaptive reconstruction based on EMD of filtered fluctuation components. In this strategy, a FIR filter that can dynamically adjust the combination of filtering order and cut-off frequency is selected for filtering, and FRA amplitude reduction link is introduced to address high-amplitude data points that FIR filters cannot smooth well, so as to smooth wind power fluctuations. The smoothed and filtered wind power fluctuations are used as hybrid energy storage power for EMD decomposition, and the IMF component is adaptively reconstructed into two groups of high-low frequency power allocated to super capacitors-batteries respectively by an algorithm, so as to obtain the optimal energy storage optimal dispatching parameters. Through the numerical example verification analysis, the FIR filtering added with FRA can adapt to the power characteristics of different frequencies and amplitude, effectively reduce the power fluctuations of 1 min and 10 min scales, and avoid the problem of increasing the energy storage burden caused by excessive smoothing. The adaptive reconstruction of IMF components after EMD decomposition can obtain the power of batteries and super capacitors to compensate for different charge and discharge characteristics, significantly reducing the energy storage output burden and improve dispatching economy.

Key words: wind power fluctuation; hybrid energy storage; optimization dispatching; empirical mode decomposition; filter

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2601504); 国家自然科学基金资助项目(52377097)。

Foundation item: Supported by the National key Research and Development Program of China (2021YFB2601504); the National Natural Science Foundation of China (52377097).

0 引言

随着全球对可再生能源需求的增长,风能作为一种清洁、可持续的能源形式逐渐成为能源转型的关键组成部分^[1-3]。然而,在大规模风电并网中,风电的输出功率受风速等因素影响,具有不确定性和周期性波动性^[4-6],会对电网造成冲击,影响电力系统安全可靠运行。因此,风电场配备一定容量的储能系统(hybrid energy storage system, HESS)来平抑风电功率波动^[7-8]成为了减少弃风限电以及提高风电并网性能的有效手段。

在传统储能介质中,以蓄电池为代表的能量型储能介质具有能量密度大响应时间长特点,主要用于长时间储存大量电能、补偿低频风电波动;而以超级电容器为代表的功率型储能介质具有功率密度大、响应时间短、充放电迅速的特点,一般用于快速响应短时间内的风电波动^[9-10]。本文结合两种储能介质的互补作用配置混合储能系统,使其具备高效、灵活、稳定的功率调节能力,从而在发电侧有效地平抑风电功率波动。

针对平抑波动的混合储能的优化调度策略,近年来国内外研究进展迅速。传统的滤波方法对于波动平抑运用广泛,文献[11-12]采用传统的低通滤波得到平抑风电波动后的并网功率,由于低通滤波存在截止频率无法准确确定的缺陷,无法度量最优平抑程度。文献[13]运用高通滤波进行储能功率分配,对于截止频率的确定提出了一种基于储能 SOC 状态的自适应算法。但上述一阶高/低通滤波方法对风电波动的平抑存在相位滞后问题,无法避免趋势项的出现,可能会加大储能负担。文献[14]提出运用滑动平均滤波来平抑风电波动,但由于滑动窗口不具有自适应性,导致在平稳时段出现过度平抑的现象,且难以克服窗口化滤波的相位时延现象。除此之外,不少学者利用信号分解方法来得作为抑波动的优化调度策略。文献[15]将风电功率通过经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)后的 res 余量作为并网功率输出,其余本征模态分量(intrinsic mode function, IMF)作为混合储能功率进行分配, res 作为趋势项,保留了原信号曲线趋势,由于其低频、低电压变化量,容易对电力系统带来稳定性考验,同时加重储能的调度成本。文献[16]提出一种 EMD 分解结合频谱分析的混合储能

优化调度方法,通过将风电功率经 EMD 分解归类为低、中、高 3 个频段,低频功率作为并网功率输出,中、高频功率分别作为蓄电池/超级电容器功率进行波动补偿。但由于人为进行频谱分析对频段的划分具有主观性,和实际最优调度差异较大。文献[17-18]采用小波包分解对混合储能进行优化调度,但人为选取的基函数不具有自适应性,难以得到最优的分解方案。

其他类似利用预测算法、模型优化的储能优化调度策略也取得不错成效。文献[19-20]基于风电模型预测设计了平滑风电出力控制器,考虑系统约束,优化风机爬坡率以对储能进行调度。文献[21]建立能量损失率、能量缺失率等一系列约束指标得到储能最佳出力,并建立经济模型进行评估。但上述文献没有给出表达式参数以及相关参数的确定方式。

上述基于平抑波动的混合储能的优化调度策略的研究都能较好的平滑风电波动,得到满足国家要求的并网功率。但是仍然无法通过更好的调节平抑程度从而与减少储能出力负担相协调。由于风电波动的随机性,不同时刻下的功率波动幅度参差不齐,对于高幅值波动往往需要更大的平抑程度,导致在其他时段的功率过度平滑,使得储能元件的配置成本以及出力负担显著增大。本文在综合考虑传统配置策略对不同频率的功率数据波动平抑的局限性,提出一种有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)滤波器结合波动降幅(fluctuation reduced amplitude, FRA)环节对风电波动的双层平抑策略,并对滤除后的波动量进行 EMD 分解,将得到的 IMF 分量自适应重构,进而实现混合储能的优化调度。在平抑波动层面,对风电功率运用滤波阶数与截止频率参数自适应优化的 FIR 滤波器进行滤波,在滤波后满足 1 min 国家并网要求的情况下加入 FRA 环节,处理少部分的高频波动越限数据点,最终得到满足 1 min、10 min 尺度国家波动要求的并网功率,很好的克服了单一滤波器处理高幅值信号的局限性;同时由于 FIR 滤波器自身的线性时延特性,以及加入的自适应调节初始化参数寻优,文献[13-14]的时延以及平抑过度问题得到了改善。在调度的优化层面,将风电功率与并网功率作差得到的混合储能功率进行 EMD 分解,将得到的不同频率 IMF 分量进行

基于能量密度与平均周期的自适应分配,重构得到最优高低频功率分配给蓄电池与超级电容器;自适应分配避免了文献[15]的人为主观性,且分配机制结合了信号自身固有特征,在减少文献[15-18]分析误差的前提下,得到的调度经济性更为优良。最后,以福建某地区典型日的风电数据作为算例展开分析,进一步验证了该策略的优越性。

1 基于平抑风电波动的混合储能优化调度

1.1 风储联合系统

在大型风电场中,由于风能的波动性质,风电场的输出功率会随风速的变化而发生波动。为了确保电力系统的稳定运行,风电出力应该严格满足国家规定的风电波动要求^[22]。引入混合储能系统与风电场组成风储联合系统如图1所示。混合储能系统由多种互补类型的储能设备组成,使其能够在高风速时存储过剩电能,低风速时释放储能以补充不足的风电出力,从而实现对风电波动的抑制和调节保证风电出力通过平滑输出为并网参考功率,实现有功平衡,提升电力系统运行稳定性和供电可靠性。

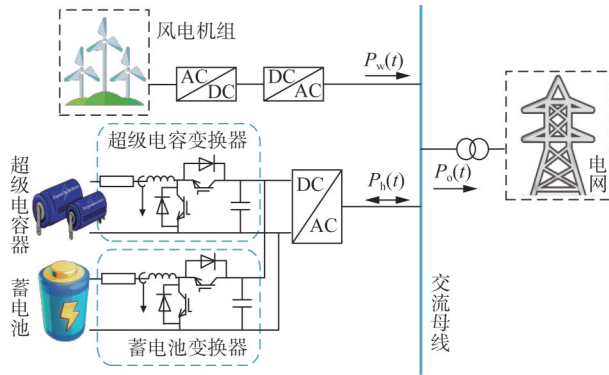


图1 风储联合系统

Fig. 1 Wind and energy storage joint system

图1中, P_w 为原始风电出力, P_o 为并网参考功率, P_h 为混合储能的参考功率。基于图1可得:

$$P_w = P_o + P_h \quad (1)$$

$$P_h = P_{bat} + P_{sc} \quad (2)$$

式中 P_{bat} 、 P_{sc} 分别为蓄电池、超级电容参考功率。

1.2 国家风电波动要求

根据《GB/T19963.1—2021 风电场接入电力系统技术规定》^[22],风储联合系统经过交流母线输送给电网的并网功率 P_o 应能保证电力系统稳定性要

求,通过混合储能系统对风电功率波动的平抑作用,其 P_o 应波动限值满足表1。

表1 国家风电波动要求

Tab. 1 National wind power fluctuation requirements

装机容量/MW	1 min 最大波动量/MW	10 min 最大波动量/MW
<30	3	10
30~50	装机容量/10	装机容量/3
>50	15	50

1.3 混合储能优化调度策略

在实际工程中,因储能元件成本高昂,且应考虑寿命损耗、维护费用,配置混合储能的有功调度应在满足波动要求的前提下,尽可能地提高经济性。结合蓄电池/超级电容器自身的互补特性,本文提出的混合储能优化调度策略如图2所示。

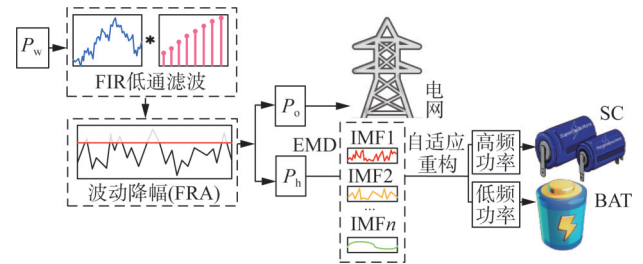


图2 混合储能优化调度策略示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hybrid energy storage capacity optimization dispatching strategy

风电功率 P_w 经最优截止频率及滤波阶数组合的FIR一层滤波后,进行FRA降幅环节的高频波动二次平抑,得到满足国家波动标准的并网功率 P_o 输送给电网。由式(1)得混合储能功率 P_h 可由风电功率与并网功率作差得到,进行波动补偿;对 P_h 进行经验模态分解(EMD),得到一系列频率不同的IMF分信号,并提出一种基于分信号能量密度与平均周期的自适应重构方法,对高低频信号进行重构,由蓄电池补偿低频功率,超级电容器补偿高频功率,具体重构公式见式(3)。此策略能够保证电力系统在削减风功率波动的前提下降低优化调度成本,提高经济效益。

$$\begin{cases} P_{bat}(t) = \sum_{n=1}^{i-1} I_n(t) \\ P_{sc}(t) = \sum_{n=i}^K I_n(t) \end{cases}, i \in 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

式中: $I_n(t)$ 为第 n 个IMF分量; K 为分解层数。

2 FIR 滤波器结合波动降幅(FRA)双层波动平抑策略

FIR 作为一种数字滤波器,具有稳定性好、精度高的优势,且能在保证不同信号频幅线性的情况下有严格的线性相频相位特性,在工业中被广泛应用^[23]。FIR 滤波器为非递归的线性时不变因果系统,其差分方程可以表示为:

$$y(n) = h(n) \times x(n) = \sum_{i=0}^N h(i)x(n-i) \quad (4)$$

式中: $y(n)$ 为滤波器输出; $h(n)$ 为 FIR 滤波器的冲击响应; $x(n)$ 为输入信号; i 为采样时刻; N 为滤波器阶数,决定了冲击响应的长度; $h(i)$ 为滤波器第 i 级冲击响应。

FIR 滤波器的冲击响应 $h(n)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} h(n) &= \sum_{i=0}^{N-1} a_i \delta(n-i) \\ &= a_0 \delta(n) + a_1 \delta(n-1) + \cdots + \\ &\quad a_{N-1} \delta[n-(N-1)] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: a_i 为第 i 级冲击响应系数; $\delta(\cdot)$ 为冲击响应。显然,滤波器冲击响应 $h(n)$ 实质上是由不同采样点冲击响应的某个倍数加成得到。

为了更好滤除风电波动的高频波动分量,选取较为适配低通滤波的 1 类 FIR 滤波器,1 类 FIR 滤波器对应的滤波器阶数 N 为偶数,结合 FIR 滤波器的线性相位^[24-25]特性,其应满足偶对称条件:

$$h(n) = h(N-n-1) \quad (6)$$

对 1 类 FIR 低通滤波器的频率响应进行分析:

$$H(j\omega) = e^{-j\omega(\frac{N}{2})} \left[\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} 2h(n) \cos \omega(\frac{N}{2}-n) \right] = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (7)$$

式中: $A(\omega)$ 为幅值函数; $\varphi(\omega)$ 为相位函数。由式 (7) 可知, $\varphi(\omega) = -N/2\omega$, 由于 N 为偶数,故 ω 对于 $\varphi(\omega)$ 的参数变量为常数,即线性相位特性。

综上所述,在满足偶对称情况下,1 类 FIR 滤波器存在 $\sigma=N/2$ 的相位时延。在运用 FIR 滤波时,需要对线性相位时延进行补偿,将在下文展开分析。

2.1 FIR 滤波器对风电功率的一层平抑

对于风电功率这类数据量大、复杂时变特性的非平稳信号,为得到满足国家要求的并网功率信号,滤波器的选择至关重要。考虑到 FIR 滤波器在其配置时可以灵活的设置初始化参数,以动态调节

滤波程度,故设置其作为本文主要的波动滤除方法。

FIR 的初始化参数分别为滤波器阶数 N 、截止频率 f_c 以及采样频率 f 。其中,改变采样频率 f 对平抑波动的效果影响可忽略不计,故设置其为定值(一般为信号带宽的两倍以上)。本文提出一种自适应算法,以国家波动要求作为约束动态调节 N 、 f_c 得到最优的一层平抑信号。

FIR 滤波器本质为设定一个与滤波器阶数 N 正相关长度的冲激响应截断预设截止频率 f_c 以上的高频功率,保留低频功率,更大的 N 值意味着更高的信号平滑程度。实质上,限于自身特性, FIR 滤波器对信号的高幅值区段滤波处理需要较大的滤波器阶数以及较小截止频率,这往往会牺牲整体信号的原有特征,导致 P_0 数据平滑过度。考虑到上述缺陷,本文设定算法使 FIR 输出要求仅为满足 1 min 尺度的国家波动标准,使其滤波重心集中于低幅值区段;同时加入 FRA 降幅环节对幅度较大的 10 min 尺度波动进行二层平抑,对这部分 FIR 滤波局限性较大的高幅值分量进行再处理,不仅能避免滤波器的参数迭代次数过大,同时能够更精确得到理想平滑程度。

2.2 波动降幅(FRA)环节对波动的二层平抑

针对 FIR 滤波器对平抑 10 min 尺度波动容易造成过度平滑的缺陷,本文提出波动降幅环节对 10 min 尺度的波动进行二次平抑,具体公式如下:

$$P_{w,MAX}^{(c)*} = \begin{cases} P_{w,MIN}^{(c)} + K^{(c)}, P_{w,MAX}^{(c)} - P_{w,MIN}^{(c)} \geq K^{(c)} \\ P_{w,MAX}^{(c)}, P_{w,MAX}^{(c)} - P_{w,MIN}^{(c)} < K^{(c)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{w,MAX}^{(c)*}$ 为二次平抑的风电功率最大值; $P_{w,MAX}^{(c)}$ 、 $P_{w,MIN}^{(c)}$ 为当前尺度下的风电功率最大值、最小值; $K^{(c)}$ 为当前尺度下的 FRA 降幅限值;考虑到波动量较并网要求应留有一定裕度,令 $K^{(c)} = 0.9k_{lim}^{(c)}$, 其中 $k_{lim}^{(c)}$ 为当前尺度下的并网要求。

双层平抑波动策略算法流程图如图 3 所示。

总体平抑波动步骤如下。

1) 设置滤波器初始参数,其中 $N=0$, $f_c=35$ (取适当值),定值 $f=500$ 。

2) 输入风电功率 P_w ;

3) 对风电功率进行滤波,得到 P_0 ;

4) 判断 FIR 滤波后的 P_0 是否满足 1 min 尺度并网要求,若满足则进行下一步骤(一层平抑);若不满足则将滤波阶数加 2(1 类 FIR 滤波器 N 取偶数),

之后能够自适应选取高低功率区间的 IMF 并重构, 得到最优蓄电池、超级电容功率。

定义信号的能量密度与平均周期的乘积 $\gamma(i)$ 如式(13)所示。

$$\gamma(i) = E_{p,i} \cdot \bar{T}_i \quad (13)$$

式中: $E_{p,i}$ 为第 i 个 IMF 分量的能量密度; $\bar{T}_i$ 为第 i 个 IMF 分量平均周期。两参数可由式(14)——(15)得到。

$$E_{p,i} = \frac{\sum_{j=0}^N A_i^2(j)}{N} \quad (14)$$

$$\bar{T}_i = \frac{2N}{\Omega_i} \quad (15)$$

式中: $A_i(j)$ 为第 i 个 IMF 分量在 j 时刻的振幅; Ω_i 为第 i 个 IMF 分量的极值点总和。

计算各 IMF 分量的 $R_{\gamma i}$ 系数如式(16)所示。

$$R_{\gamma i} = \left| \frac{\gamma_i - \frac{1}{i-1} \sum_{n=1}^{i-1} \gamma_n}{\frac{1}{i-1} \sum_{n=1}^{i-1} \gamma_n} \right| \quad (16)$$

事实上, $R_{\gamma i}$ 表征当前 IMF 分量的 γ_i 值与前 $i-1$ 个 IMF 分量的 γ_i 平均值关联。当 $R_{\gamma i} \geq 1$ 时, 可认为当前分量的 γ_i 值为前 $i-1$ 个分量的 γ_i 平均值的数倍。对于高频噪声序列经过 EMD 分解后, 每个 IMF 都是瞬时频率单调变化的带通过程, 它们的周期取决于信号的局部特征, 而其频谱特性决定了各频率成分的能量密度相等, 且其平均周期与其对应的局部频率成反比。可以认为, 在 $R_{\gamma i} \geq 1$ 的情况下, 第 i 个分量 γ_i 值与前几个 IMF 分量 γ 值显著增加, 频率以此分量(包括此分量)作为分界点被划分为了高、低两个频率区段。故将第 $i \sim k$ 个 IMF 分量重构作为低频功率分配给蓄电池, 前 $i-1$ 个分量重构作为高频功率分配给超级电容器。

依照本文方法对 IMF 分量进行分析重构得到的高低功率避免了传统人为选取的主观性, 且从信号本身固有的能量密度、周期性等多角度特征考虑功率分配, 能够更好的结合储能元件的互补特性进行功率补偿, 实现并网的有功平衡调度。

4 基于经验模态分解自适应重构的混合储能优化调度模型

式(2)——(3)描述了混合储能功率 P_h 进行 EMD

分解后, 其 IMF 分量的重构与蓄电池、超级电容器的功率 P_{bat} 、 P_{sc} 之间的数学关系。在自适应选取分界点 i 之后, 由这些 IMF 分量构成的 P_{bat} 、 P_{sc} 作为储能元件补偿功率, 共同完成混合储能系统的优化调度, 从而达到电力系统有功功率平衡。

4.1 储能元件的额定参数

考虑变流器与充放电效率, 储能元件的额定功率 $P_{x,N}$ 可以由各自部分的补偿功率得到:

$$P_{x,N} = \max \left\{ \left| \max_{t \in (t_0, t_0 + T)} P_x^+(t) \right| \eta_{DC-DC} \eta_{DC-AC} \eta_{x,C}, \left| \min_{t \in (t_0, t_0 + T)} P_x^-(t) \right| \eta_{DC-DC} \eta_{DC-AC} \eta_{x,D} \right\} \quad (17)$$

式中: x 为储能元件符号, 取 bat 时为蓄电池, 取 sc 时为超级电容器; t_0 为初始时刻; $P_x^+(t)$ 、 $P_x^-(t)$ 分别为功率; T 为一个充放电周期; η_{DC-DC} 、 η_{DC-AC} 分别为 DC-DC、DC-AC 变流器的能量转换效率; $\eta_{x,C}$ 、 $\eta_{x,D}$ 为储能元件充放电效率。

由 $P_{x,N}$ 可得到储能元件的实际充放电功率 $P_{x,r}$ 。

$$P_{x,r} = \begin{cases} P_x(t) \eta_{DC-DC} \eta_{DC-AC} \eta_{x,C}, & P_x(t) < 0 \\ \frac{P_x(t)}{\eta_{DC-DC} \eta_{DC-AC} \eta_{x,D}}, & P_x(t) \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

进一步求得储能在 k 时刻能量积累量 $E_x(k)$:

$$E_x(k) = E_0 + \int_0^k P_{x,r}(t) \Delta T \quad (19)$$

式中: $E_x(k)$ 为储能元件在第 k 时刻的能量积累; ΔT 为充放电时间间隔; E_0 为初始时刻能量。

储能元件应满足荷电状态约束, 以避免出现过充过放现象。在初始荷电状态为 0.5 的情况下, 储能元件的最优容量为:

$$E_{x,N} = \frac{\max[E_x(k)] - \min[E_x(k)]}{S_{MAX} - S_{MIN}} \quad (20)$$

式中: $E_{x,N}$ 为混合储能系统的额定容量; S_{MAX} 为荷电状态的最大值; S_{MIN} 为荷电状态最小值。

4.2 目标函数

为验证本文策略在经济角度的优越性, 将储能的年综合周期成本 C_{sum} 作为目标函数, 并整合为年购置成本 C_{ph} 、年运行维护成本 C_{onm} 、年报废处理成本 C_{sd} , 如式(21)所示。

$$C_{\text{sum}} = C_{\text{ph}} + C_{\text{onm}} + C_{\text{sd}} \quad (21)$$

1)年购置成本 C_{ph} :

$$C_{\text{ph}} = C_{\text{ph_bat}} + C_{\text{ph_sc}} \quad (22)$$

其中:

$$\begin{cases} C_{\text{ph_bat}} = (C_{\text{bat_P}} P_{\text{bat_N}} + C_{\text{bat_E}} E_{\text{bat_N}}) \frac{\lambda(1+\lambda)^S}{S[(1+\lambda)^S - 1]} \\ C_{\text{ph_sc}} = (C_{\text{sc_P}} P_{\text{sc_N}} + C_{\text{sc_E}} E_{\text{sc_N}}) \frac{\lambda(1+\lambda)^L}{L[(1+\lambda)^L - 1]} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $C_{\text{bat_P}}$ 、 $C_{\text{sc_P}}$ 分别为蓄电池、超级电容器的单位功率成本; $C_{\text{bat_E}}$ 、 $C_{\text{sc_E}}$ 分别为蓄电池、超级电容器的单位容量成本; $E_{\text{bat_N}}$ 、 $E_{\text{sc_N}}$ 分别为蓄电池、超级电容的额定容量; S 为蓄电池的循环寿命; L 为风电工程寿命; λ 为折现率。

2)年运行与维护成本

$$C_{\text{onm}} = C_{\text{onm_bat}} E_{\text{bat_N}} + C_{\text{onm_sc}} E_{\text{sc_N}} \quad (24)$$

式中 $C_{\text{onm_bat}}$ 、 $C_{\text{onm_sc}}$ 分别为蓄电池、超级电容器的年运行维护成本。

3)年报废处理成本

$$C_{\text{sd}} = C_{\text{sd_bat}} E_{\text{bat_N}} + C_{\text{sd_sc}} E_{\text{sc_N}} \quad (25)$$

式中 $C_{\text{sd_bat}}$ 、 $C_{\text{sd_sc}}$ 分别为蓄电池、超级电容器的年报废处理成本。

4.3 约束条件

1)充放电功率约束

$$\begin{cases} P_{\text{bat}} \leq |P_{\text{bat_N}}| \\ P_{\text{sc}} \leq |P_{\text{sc_N}}| \end{cases} \quad (26)$$

式中 $P_{\text{bat_N}}$ 、 $P_{\text{sc_N}}$ 分别为蓄电池/超级电容额定功率。

2)容量约束

$$\begin{cases} E_{\text{bat}} \leq |E_{\text{bat_N}}| \\ E_{\text{sc}} \leq |E_{\text{sc_N}}| \end{cases} \quad (27)$$

式中 $E_{\text{bat_N}}$ 、 $E_{\text{sc_N}}$ 分别为蓄电池/超级电容额定容量。

3)储能SOC约束

$$\begin{cases} S_{\text{bat_MIN}} \leq S_{\text{bat}} \leq S_{\text{bat_MAX}} \\ S_{\text{sc_MIN}} \leq S_{\text{sc}} \leq S_{\text{sc_MAX}} \end{cases} \quad (28)$$

式中: S_{bat} 、 S_{sc} 分别为蓄电池/超级电容的能量利用率; $S_{\text{bat_MAX}}$ / $S_{\text{sc_MAX}}$ 、 $S_{\text{bat_MIN}}$ / $S_{\text{sc_MIN}}$ 分别为蓄电池/超级电容能量利用率上下限约束。

5 算例分析

以福建某地区风电工程作为研究背景,选取2022年某典型日风电出力数据进行分析。该风电场

装机容量为90 MW,风电出力 P_w 如图4所示。

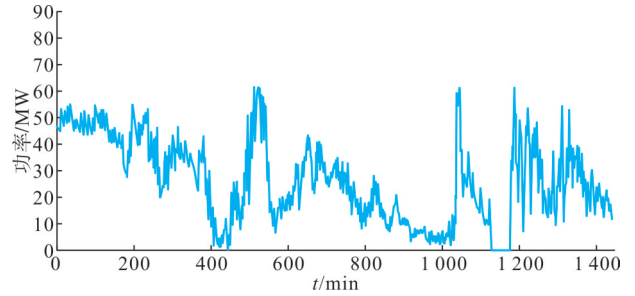


图4 风电出力

Fig. 4 Wind power output

依照表1,以该出力数据输出的并网功率 P_o 应满足的波动要求为1 min尺度9 MW、10 min尺度33.3 MW。

5.1 自适应调整FIR滤波器参数

对FIR的滤波器阶数 N 、截止频率 f 进行基于 P_w 信号特征平滑程度的自适应调整,经过5次迭代后,得到最优滤波器参数组合 $N=10$ 、 $f=30$ 。

经2.2节以及图3的算法运行流程可知,对滤波器参数进行自适应调整的迭代终止条件为对应风电功率 P_w 的1 min尺度波动下降到国家要求以下,而10 min尺度则由FRA降幅环节进行限制,这是由于FIR对高幅值区段的滤波存在局限性。下面对此局限性展开分析。

图5为FIR滤波器不同参数下的幅度响应,响应量单位为dB,代表信号不同频率下的增益。

在信号学中,FIR的幅度响应由单个幅值较大的主瓣和若干个幅值较小的副瓣组成^[29-30],主瓣对

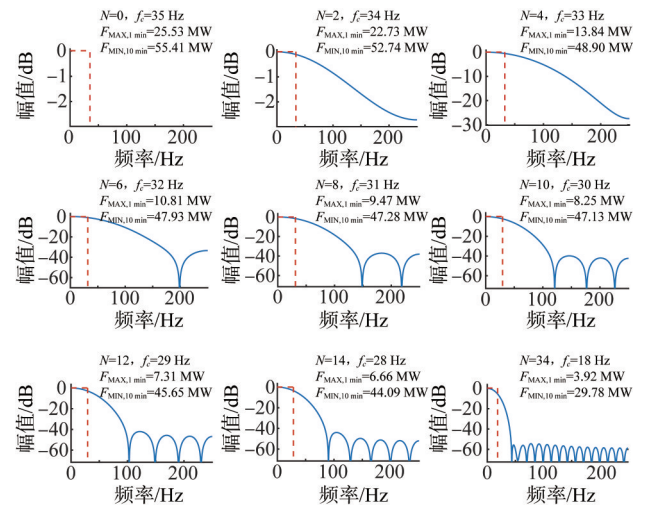


图5 不同参数下的滤波器幅度响应

Fig. 5 Filter amplitude response under different parameters

应小于截止频率的通带,副瓣对应大于截止频率的阻带。一般来说,理想的FIR滤波器应具有尽可能窄的主瓣以及尽可能低的副瓣,此条件下主瓣与旁瓣幅度差形成的滚降将越陡,滤波器对于大于截止频率的频率分量滤除效果更明显,同时主瓣增益损失更小,副瓣的负增益越大。

如图5所示,随着滤波阶数的增加以及截止频率的减少,幅度响应的主瓣宽度越窄、副瓣高度越低,从而造成形成滚降的切线斜率在依次增大,滤波性能逐步提升。分析不同参数对应的波动量可知,在找到最优参数 $N=10$ 、 $f=30$ 组合时, P_w 的1 min尺度波动量为8.25 MW,第一次下降到了国家波动要求以下,此时迭代停止。为进一步分析FIR滤波器的特性,对第6、第7以及直到1 min以及10 min尺度波动第一次同时满足要求的第17次迭代进行分析,得到结论:随着迭代次数的不断增大,滤波器滚降仍处于不断增长趋势,而由于滤波器对10 min尺度的波动削减的斜率远小于1 min尺度波动,因此在经过5次迭代即达到1 min尺度波动要求的情况下,再经过了12次迭代才使得其达到10 min尺度的波动要求,即此时滤波器具有较为显著的滤波性能,但由于截止频率较小,滤波阶数较大,造成了数据平滑过度。容易看到,在第17次迭代时,1 min尺度波动量已被削减到了3.92 MW,这将会对储能系统的配置形成较大负担,同时还会造成FIR滤波器运行复杂度增加以及过长的相位时延。

针对上述FIR滤波器的局限性,故在滤波刚好满足1 min波动要求的情况下停止滤波,并使FRA降幅环节开始运行,这将能使得 P_w 可以在平滑程度适当的情况下得到较为理想的并网功率。

5.2 对风电功率进行FIR滤波-FRA双层平抑

对 P_w 进行加入了FRA环节的FIR滤波-FRA双层平抑处理后,得到平滑输出后满足国家要求的并网曲线如图6所示。

为验证本文策略的有效性,加入传统的滑动平均滤波、传统低通滤波平抑风电波动后的曲线进行分析比较。

由于传统低通滤波只能人为选取截止频率对数据进行滤波处理,为使信号达到国家要求的波动限值以下,低通滤波器在高幅值数据段以较小的截止频率进行平滑,导致高幅值数据得到相应平滑水平

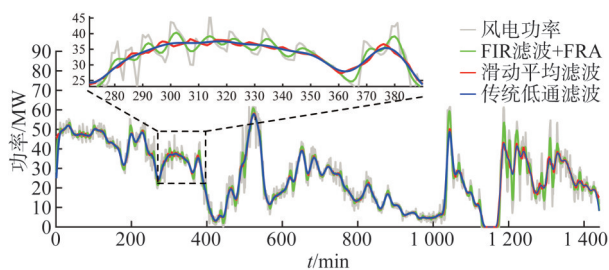


图6 各滤波方法平抑曲线

Fig. 6 Smoothing curves of each filtering method

的前提下,受制于滤波的整体性,其他较低幅值的数据段将会平滑过度;而传统的滑动平均法通过调整滑动窗口长度,即增加数据点作平均值的个数进行滤波,对同样的高幅值数据往往需要较大的窗口进行均值处理,但仍然牺牲了滤波数据的整体性,造成了大部分数据的平滑过度;同时,窗口较大的滑动平均滤波还会造成相位延迟的现象。如图6所示,容易看到滑动平均滤波以及传统低通滤波均出现了平滑过度的情况,与原风电出力特征差异过大,造成了弃风现象;而本文方法平抑风电波动后的并网功率在满足国家风电波动要求的前提下,保留了与原始风电功率的大部分曲线特征,减少了弃风现象的发生,同时降低了储能的负荷。

上文及式(7)详细介绍了由于FIR滤波器相位函数 $\varphi(\omega)$ 的参数为一与滤波阶数正相关的常数,也称为线性相位。因此,FIR滤波器的相位时延实际上可以由平移补偿,如图7所示。

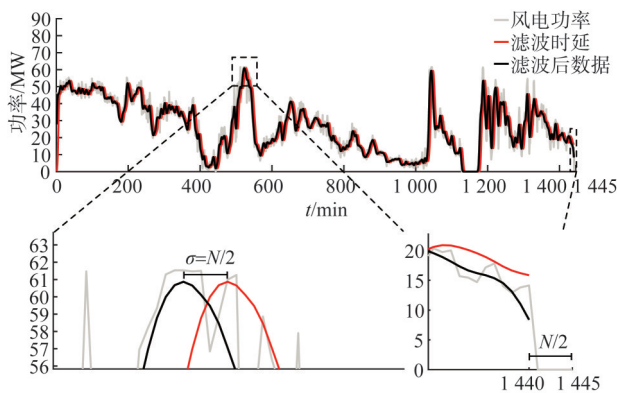


图7 FIR滤波器的相位补偿

Fig. 7 Phase compensation of FIR filters

分析可知,FIR的线性时延 $\sigma=N/2$,即滤波阶数的一半。本文滤波器阶数 $N=10$,理论上取平移量为5,向左平移5个数据点即可得到滤波后数据。值得注意的是,若直接平移会导致最后 $N/2$ 个数据

因补偿线性时延 σ 而缺失, 故在做滤波处理之前, 对原始数据的数据段末尾补齐 $N/2$ 即 5 个随机值(本文取 0), 进行滤波之后, 即可得到滤波后消除时延的功率数据。

图 8—9 为各平抑方法针对 1 min、10 min 尺度的风电波动量图示。

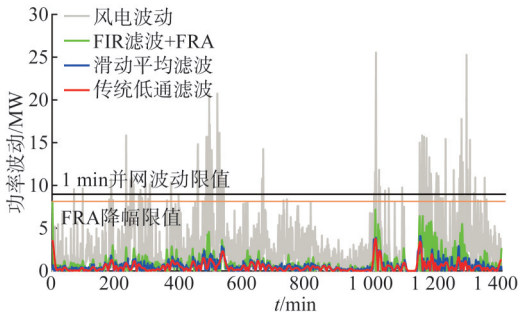


图 8 1 min 尺度波动量比较

Fig. 8 Comparison of 1-minute scale fluctuations

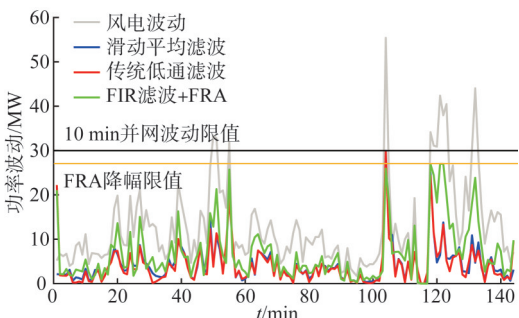


图 9 10 min 尺度波动量比较

Fig. 9 Comparison of 10-minute scale fluctuations

图 8 中, 滑动平均滤波与传统低通滤波的对两尺度的风电波动抑制效果明显。在 1 min 尺度, 两者的波动量最大值为 4.09 MW 以及 3.75 MW, 仅为并网波动限值的 45.44%、41.67%; 10 min 尺度的波动量最大值则为 29.93 MW 以及 29.67 MW, 为并网波动限值的 99.77%、98.9%, 这说明了滑动平均滤波以及传统低通滤波能够很好处理 1 min 尺度的低幅值数据, 对 10 min 尺度的高幅值数据处理性能有限, 容易造成对高幅值波动平抑不足, 低幅值波动平抑过度的缺陷。而加入 FRA 降幅环节 FIR 低通滤波在 1 min、10 min 波动尺度的波动量分别为 9 MW、27 MW, 为并网两尺度波动限值的 90%, 值得注意的是, 此两项数据均为在 FRA 降幅环节式(8)中, 预设裕度的并网功率限值。分析可知, FIR 滤波-FRA 双层平抑能够很好的将不同尺度

的波动量下降到预先设定的限值以下。在实际工程运用中, 灵活调节式(8)中的降幅限值可以在综合考虑储能负荷与平抑性能的条件下寻求更适合当前电力系统需求的滤波程度。其次, FIR 滤波-FRA 很好避免了平抑过度的问题, 为储能系统减少了出力负担。

5.3 对混合储能功率进行基于 EMD 分解自适应重构的功率分配

风电功率经过 FIR 滤波-FRA 平抑波动后得到并网功率 P_o 。如式(1)所示, 将风电功率 P_w 与其作差, 对其得到的混合储能功率 P_h 进行 EMD 分解, 得到 7 个不同频率 IMF 分量如图 10 所示。其中, IMF7 为残差 res, 即趋势项。

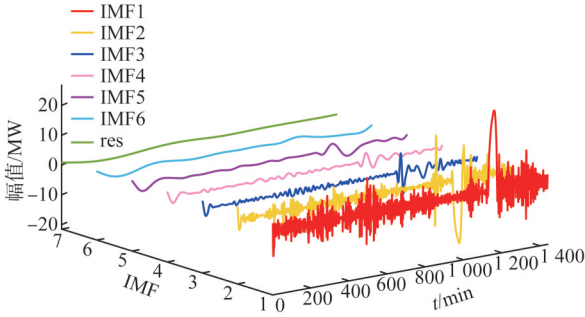


图 10 各 IMF 分量三维图

Fig. 10 3D maps of each IMF component

对各 IMF 分量进行式(18)求解 $R_{\gamma i}$ 系数, 如表 2 所示。

表 2 各 IMF 分量 $R_{\gamma i}$ 系数

Tab. 2 Each IMF component $R_{\gamma i}$ coefficient

IMF 分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	res 值
$R_{\gamma i}$ 系数	0.18	0.23	1.2	1.86	2.27	5.34	7.07

由表 2 可得, IMF3 的 $R_{\gamma i}$ 系数为 1.2 ≥ 1 , 即可认为 IMF3 的 γ 值显著大于前几个 IMF, 故自适应重构 IMF1 和 IMF2 作为高频功率 P_{sc} 分配给超级电容, IMF3~IMF6 及趋势项 res 值重构作为低频功率 P_{bat} 分配给蓄电池。重构后的蓄电池/超级电容器功率曲线如图 11 所示。

容易看到, 经自适应重构之后的超级电容器功率曲线具有高频率高幅值特性。工程运用上, 超级电容器的高频响应以及高充放电速度使其能很好的补偿这部分功率; 而蓄电池功率曲线频率与幅值较低, 这与其高能量密度以及长时间放电能力相适

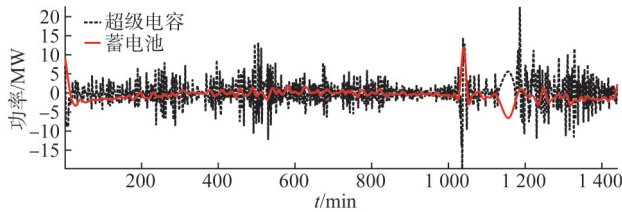


图 11 蓄电池/超级电容器功率

Fig. 11 Battery/supercapacitor power

配。由此可见，本文的自适应重构方法能合理的分配储能元件的功率，结合两者的互补特性最大化储能元件的运行效益。

下面对不同优化调度功率分配策略与本文策略结果对比，并进行经济性分析。混合储能经济模型各项参数如表 3 所示，分析结果见表 4。

表 3 混合储能经济模型各项参数

Tab. 3 Various parameters of the hybrid energy storage economic model

储能类型	参数	数值
蓄电池(BAT)	单位功率成本/(元·kW ⁻¹)	1 500
	单位容量成本/(元·kWh ⁻¹)	1 000
	年运行维护成本/(元·kWh ⁻¹)	50
	年报废处理成本/(元·kWh ⁻¹)	10
	充电效率/%	75
	放电效率/%	85
	SOC 上下限	(0.2, 0.8)
	蓄电池循环寿命/a	10
超级电容器(SC)	单位功率成本/(元·kW ⁻¹)	600
	单位容量成本/(元·kWh ⁻¹)	13 000
	年运行维护成本/(元·kWh ⁻¹)	13.5
	年报废处理成本/(元·kWh ⁻¹)	5
	充电效率/%	95
	放电效率/%	95
其他	SOC 值上下限	(0.1, 0.9)
	风电工程寿命/a	20
	基准折现率/%	0.06

如表 4 所示，本文的 FIR 滤波-FRA 结合自适应 EMD 重构策略的功率分配方法有效的降低了储能最优调度参数。相较于滑动平均滤波、传统低通滤波，蓄电池与超级电容器的最优出力分别减少了 53.9%、33.24% 和 62.92%、45.39%，最优容量分别减少了 50.8%、73.48% 和 54.19%、80.13%，综合成本降低了 57.22% 和 59.98%，下降程度显著。这是由于滑动平均滤波、传统低通滤波均存在

波动平抑过度的情况，导致储能出力负担加重。

表 4 不同优化调度策略的最优出力以及经济性分析

Tab. 4 Optimal output and economic analysis of different optimization Improve dispatching strategies

策略	储能类型	最优出力/ MW	最优容量/ MWh	年综合周期 成本/万元
滑动平均滤波-自适应 EMD	BAT	27.68	3.11	49 472.69
	SC	29.54	2.3	
传统低通滤波-自适应 EMD	BAT	32.79	3.34	52 894.68
	SC	28.67	3.07	
FIR 滤波- 自适应 EMD	BAT	20.32	1.4	35 286.39
	SC	26.41	1.97	
FIR 滤波-FRA	BAT	27.84	1.88	42 953.12
	SC	22.36	2.71	
本文方法	BAT	12.16	1.53	21 166.6
	SC	19.72	0.61	

与未加入 FRA 环节的 FIR 滤波平抑策略对比，蓄电池与超级电容器的最优出力分别减少了 40.16%、33.92%；而蓄电池的最优容量虽然增加了 9.29%，但相对于超级电容器，其最优出力则有着 69.03% 的降幅，综合成本下降了 40.01%。事实上，FRA 环节作为 FIR 滤波后的补充环节，其不对整体数据集做滤波处理，而是只对少数波动量越限的数据点作降幅处理，这使得可以在避免过度平抑的情况下将波动量控制于限值以下，在使并网功率的波动量满足国家要求的前提下，减少储能的调度成本。

将是否加入 EMD 自适应重构的 FIR 滤波-FRA 分配策略进行对比，可以看到：加入自适应重构的蓄电池和超级电容的最优出力相较于未加入自适应重构分别降低了 56.32%、11.81%，最优容量分别降低了 22.88%、77.49%，综合成本下降了 50.72%。这是因为对混合储能功率经 EMD 分解后得到的 IMF 分量进行的自适应重构策略能够根据信号频率特性分配出最适配不同充放电特性的储能元件高低频功率，从而得到混合储能最优调度策略，提高经济效益。

6 结论

经过自适应动态调节滤波器阶数以及截止频率的 FIR 滤波器可以更灵活的根据需求调整滤波程度，平滑低幅值区段的功率信号；由于其线性相位

特性,相位时延可以通过平移补偿,克服了时延造成的数据误差。

最优参数组合下的FIR滤波器结合FRA环节的平抑策略,能够有效平抑全幅值的风电功率波动,同时很好的避免了平滑过度导致的储能负担加重问题。工业上可以灵活调整FRA环节的降幅限值动态调节平抑程度。

基于EMD分解的混合储能IMF分量自适应重构策略能够结合储能元件特性得到最优调度的蓄电池/超级电容功率,显著降低了混合储能系统此调度策略下的最优出力功率、最优容量以及年综合成本,进一步提高了电力系统的稳定性以及经济效益。

参考文献

- [1] 何洁,刘强,赵雯,等. “双碳”目标下考虑可再生能源的市场化交易体系[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15476 – 15484.
HE Jie, LIU Qiang, ZHAO Wen, et al. Considering the market-based trading system of renewable energy under the goal of “double carbon” [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15476 – 15484.
- [2] 魏伟,叶利,方毅,等. 考虑碳排放配额和碳交易的新能源电力系统日前优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 130 – 136.
WEI Wei, YE Li, FANG Yi, et al. Optimal scheduling of new energy power systems considering carbon emission quotas and carbon trading [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 130 – 136.
- [3] 李成,张捷,石珂,等. 面向风电场的主动支撑电网型分散式储能控制策略与优化配置[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 238 – 247.
LI Cheng, ZHANG Jie, SHI Ke, et al. Active support grid type decentralized energy storage control strategy and optimization configuration for wind farms [J]. Electric Power, 2023, 56(12): 238 – 247.
- [4] YUN Zhihao, LIU Yutian, LIANG Jun, et al. A pilot node selection method considering probability characteristic of wind power fluctuation [J]. Automation of Electric Systems, 2014, 38(9): 20 – 25.
- [5] 王睿琪,薛熙臻,黄阮明,等. 面向新能源波动平抑的储能多参数等价折算配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1498 – 1510.
WANG Ruiqi, XUE Xizhen, HUANG Ruanming, et al. A multi parameter equivalent conversion configuration method for energy storage aimed at smoothing fluctuations in new energy [J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1498 – 1510.
- [6] 刘仲民,齐国愿,高敬更,等. 混合储能系统平抑风光发电功率波动策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(11): 64-67.
LIU Zhongmin, QI Guoyuan, GAO Jinggeng, et al. Strategies for hybrid energy storage systems to suppress power fluctuations in wind and solar power generation [J]. Power Electronics Technology, 2021, 55(11): 64 – 67.
- [7] 贺鸿杰,张宁,杜尔顺,等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 193 – 207.
HE Hongjie, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 193 – 207.
- [8] 李建林,袁晓冬,郁正纲,等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 15 – 25.
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15 – 25.
- [9] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1 – 18, 369.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1 – 18, 369.
- [10] 郭佩乾,郝峰杰,袁志昌,等. 混合多类型储能的分布式能源系统运行优化方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(8): 29 – 38.
GUO Peiqian, HAO Fengjie, YUAN Zhichang, et al. Optimization method for operation of distributed energy systems with hybrid multi type energy storage [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(8): 29 – 38.
- [11] 谢丽蓉,郑浩,魏成伟,等. 兼顾补偿预测误差和平抑波动的光伏混合储能协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 130 – 138.
XIE Lirong, ZHENG Hao, WEI Chengwei, et al. A coordinated control strategy for photovoltaic hybrid energy storage that balances compensating prediction errors and smoothing fluctuations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 130 – 138.
- [12] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1 – 6.
DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A control strategy suitable for hybrid energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1 – 6.
- [13] SUN Y, PEI W, JIA D, et al. Application of integrated energy storage system in wind power fluctuation mitigation [J]. Journal of Energy Storage, 2020(32): 101835.
- [14] 王桂松,肖碧涛,赖晓路,等. 计及风功率波动和电池荷电状态的储能系统平滑控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 280 – 286.
WANG Guisong, XIAO Bitao, LAI Xiaolu, et al. Smoothing control strategy of energy storage system considering wind power fluctuations and battery soc [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(11): 280 – 286.
- [15] 孙承晨,袁越,CHOI San Shing,等. 基于经验模式分解和神经网络的微网混合储能容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 19 – 26.
SUN Chengchen, YUAN Yue, CHOI San Shing, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems in microgrid using empirical mode decomposition and neural network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 19 – 26.
- [16] 孙玉树,唐西胜,田春笋,等. 基于HHT的风电波动平抑策

- 略研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(1): 78-83.
- SUN Yushu, TANG Xisheng, TIAN Chunzheng, et al. Research on wind power fluctuation suppression strategy based on HHT [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(1): 78-83.
- [17] 程龙, 张方华. 用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 100-104, 128.
- CHENG Long, ZHANG Fanghua. Wavelet transform method for suppressing power fluctuations in hybrid energy storage systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 100-104, 128.
- [18] 杨珺, 张建成, 桂勋. 并网风光发电中混合储能系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1209-1216.
- YANG Jun, ZHANG Jiancheng, GUI Xun. Capacity optimization of hybrid energy storage system in gridconnected wind and PV power generation system [J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1209-1216.
- [19] KHALID M, SAVKIN A V. A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage [J]. Renewable Energy, 2010, 35(7): 1520-1526.
- [20] KHALID M, SAVKIN A V. Model predictive control for wind power generation smoothing with controlled battery storage [C]// 2009 Held Jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference, 2009: 7849-7853.
- [21] 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, 24.
- HAN Xiaojuan, CHEN Yueyan, ZHANG Hao, et al. The application of hybrid energy storage technology based on wavelet packet decomposition in smoothing power fluctuations in wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 8-13, 24.
- [22] 中国电力企业联合会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T19963.1—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [23] CAPIZZI G, SCIUTO G L. A novel 2-D FIR filter design methodology based on a Gaussian-Based Approximation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(2): 362-366.
- [24] 曾敬枫. FIR滤波器线性相位特性的研究[J]. 智能计算机与应用, 2016, 6(1): 41-43.
- ZENG Jingfeng. Research on linear phase characteristics of FIR filters [J]. Intelligent Computers and Applications, 2016, 6(1): 41-43.
- [25] ZHAO R. Least formula omitted-norm design of complex exponential structure variable fractional delay FIR filters [J]. Signal Processing, 2024(218): 109387.
- [26] NE H, SR L, MLC W, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society: Mathematical, physical and Engineering Sciences, 1998(1971): 454.
- [27] 刘克天, 胡新宇, 李想, 等. 基于EMD和TLS-Prony的次同步振荡模态辨识方法及电压反馈抑制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 294-302.
- LIU Ketian, HU Xinyu, LI Xiang, et al. Subsynchronous oscillation mode identification method and voltage feedback suppression strategy based on EMD and TLS Prony [J]. Journal of Solar Energy, 2023, 44(11): 294-302.
- [28] VAN JAARSVELDT C, PETERS G W, AMES M, et al. Tutorial on empirical mode decomposition: basis decomposition and frequency adaptive graduation in non-stationary time series [J]. IEEE Access, 2023(11): 94442-94478.
- [29] 曾兆权, 旭阳欣, 马丁·马林森, 等. 一种基于有限脉冲响应滤波器的时钟倍频器设计[J]. 电子学报, 2023, 51(10): 2791-2800.
- ZENG Zhaoquan, XU Yangxin, MALINSON Martin, et al. Design of a clock multiplier based on finite pulse response filter [J]. Journal of Electronics, 2023, 51(10): 2791-2800.
- [30] 李宏民, 王杨东, 曾雄. FIR滤波器设计: 基于PSO优化算法的频率采样法[J]. 电子技术, 2015, 44(7): 53-55.
- LI Hongmin, WANG Yangdong, ZENG Xiong. FIR filter design: frequency sampling method based on PSO optimization algorithm [J]. Electronic Technology, 2015, 44(7): 53-55.

收稿日期: 2024-01-31; 网络首发日期: 2024-07-24

作者简介:

李培强(1975), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统运行分析与控制及智能电网与分布式发电、负荷建模等, lpqcs@hnu.edu.cn;

刘抒睿(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气工程, 1036717324@qq.com;

郭榕(2000), 男, 学士, 研究方向为电气工程。