

DOI: 10.61369/NPS.2025030004

基于自适应小波包分解的混合储能 功率优化分配策略

戴聿雯¹, 李鑫², 陈薇², 邱亚²

(1. 中国电力科学研究院有限公司信息通信研究所, 北京 102200;

2. 合肥工业大学, 合肥 安徽 230009)

Hybrid energy storage power optimization allocation strategy based on adaptive wavelet packet decomposition

DAI Yuwen¹, LI Xin², CHEN Wei², QIU Ya²

(1. Information and Communication Institute, China Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing 102200;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230000)

摘要: 针对于现阶段光伏混合储能系统控制效果不佳等问题, 提出了基于自适应小波包分解的混合储能功率优化分配策略。首先, 分析了光伏电站的并网要求; 其次, 给出了基于自适应小波包分解的混合储能功率优化分配策略的基本原理; 最后, 与低通滤波的分配策略进行仿真对比分析, 验证了算法的有效性。

关键词: 混合储能; 功率分配; 自适应小波包分解

ABSTRACT: A hybrid energy storage power optimization allocation strategy based on adaptive wavelet packet decomposition is proposed to address issues such as poor control performance in current photovoltaic hybrid energy storage systems. Firstly, the grid connection requirements of photovoltaic power plants were analyzed; Secondly, the basic principle of the hybrid energy storage power optimization allocation strategy based on adaptive wavelet packet decomposition is presented; Finally, a simulation comparison analysis was conducted with the allocation strategy of low-pass filtering to verify the effectiveness of the algorithm.

KEY WORDS: Hybrid energy storage; Power allocation; Adaptive wavelet packet decomposition

0 引言

太阳能作为自然界中重要的可再生能源, 凭借其可持续性、环保性和低成本等优点, 正在全球范围内推动能源结构的转型与绿色革命。然而, 波动性和间歇性特征, 使得在与电力系统的融合中面临一定的困难, 导致了诸多能源消纳问题。为了

解决这些挑战, 储能技术的研发显得尤为关键, 并已成为各国在能源领域的重要研究方向^{[1][2]}。

全钒液流电池^{[3][4]}是电化学储能技术中的一项重要创新, 其独特的“体外循环”电解液设计使其在低温低压下运行, 能够更有效地散热。这种设计显著降低了锂离子电池所面临的热失控风险, 从而避免了火灾和爆炸等安全隐患。全钒液流电池不仅运行安全且环保, 还能够根据不同项目的需求灵活调整电池容量。这些特性使得全钒液流电池储能系统在电力供需失衡时能够迅速进行充放电, 确保系统的稳定与高效。

然而, 单一的储能系统往往难以满足各类电站在不同时间尺度上对功率波动的需求以及综合经济指标的要求。因此, 混合储能系统 (Hybrid Energy Storage System, HESS) 逐渐成为解决这一问题的有效方案。该系统将超级电容器、飞轮储能等功率型储能介质与全钒液流电池、锂电池等能量型储能介质相结合, 具备高功率密度、高能量密度和长循环寿命等优点。对混合储能系统的优化运行策略进行研究, 具有重要的实际意义。

在不同类型的储能系统之间进行功率优化分配, 是混合储能系统 (HESS) 在多种应用场景中成功实施的关键。其核心理念在于实时对 HESS 的输出功率进行频率分解和重组, 利用各储能介质的不同特性来承载相应的高频和低频分量, 从而满足实际应用的需求并优化 HESS 的整体性能。

针对 HESS 功率优化分配的研究，主要集中在功率信号的处理上，可以从时域和频域两个角度进行总结。

在时域方面，通常采用滑动平均法和并网标准来计算并网功率与 HESS 输出功率，并结合模态分解或储能单元 SOC 状态来分配不同储能介质的输出功率。文献^[5]采用变分模态分解方法处理 HESS 参考功率；文献^[6]则利用集合经验模态算法中的模态函数能量差异，决定功率信号分解的滤波阶数，并通过模糊优化控制避免储能单元的过充和过放。

然而，时域方法可能面临储能单元充放电保护和滑动窗口选择困难等问题。

在频域方面，滤波原理的应用已成为当前研究的热点，常见方法包括低通滤波、Kalman 滤波、其他滤波算法（傅里叶变换和小波分解）等。

针对于低通滤波算法，文献^{[7][8]}使用固定时间常数的一阶低通滤波方法进行功率分配；文献^{[9]-[11]}则提出了一种改进的一阶低通滤波算法，通过调整滤波时间常数以适应预设规则；文献^{[12][13]}采用二阶低通滤波来控制 HESS，克服了一阶算法在响应高频功率指令时的不足。

针对于 Kalman 滤波算法，文献^{[14][15]}通过离散傅里叶变换确定功率信号的分界频率，进而实现 HESS 的功率分配；文献^[16]结合不同储能组件的特性，提出了一种基于自适应滑动平均算法的能量管理策略；文献^[17]分析了 Kalman 滤波方程的各项系数对功率分配的影响，提出了一种自适应 R 参数的 Kalman 滤波算法

针对于其他滤波算法，文献^[18]介绍了一种基于小波分析的动态功率分配策略，功率分配参数根据风电功率的超短期预测和 HESS 各储能单元的状态进行调整；文献^[19]探讨了在光伏波动和电价套利两种模式下的 HESS 协调控制策略，前者利用小波包分解进行初步功率分配，后者根据电网电价和负荷需求实时优化；

频域方法原理简单，能够兼顾不同储能系统的动态特性，同时对电池进行适度保护，但存在滤波参数难以确定、功率信号频段分界频率界定困难等问题。本文针对于滤波参数难以确定问题，提出

了基于自适应小波包分解的混合储能功率优化分配策略。

1 光伏混合储能系统架构

本文所讨论的光伏混合储能系统架构如图 1 所示。该系统主要由光伏发电单元、混合储能系统（HESS）、交流电网以及各种电力电子设备构成。在这个系统中，光伏发电单元负责将太阳能转化为电能。原始的光伏输出功率通过 HESS 这一能量调节装置进行“削峰填谷”，以有效吸收和补偿具有显著周期性和波动性的电力输出，从而确保整个发电系统的电能能够平稳地输送至公共电网。

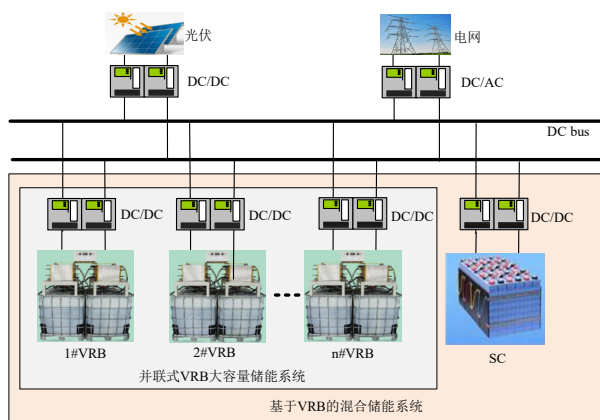


图 1 基于混合储能的光伏发电系统

Fig.1 Photovoltaic power generation system based on hybrid energy storage

对上一小节所示的光伏并网系统拓扑结构图进行简化分析，可以得到基于混合储能的光伏电场能量流动图，如图 2 所示。

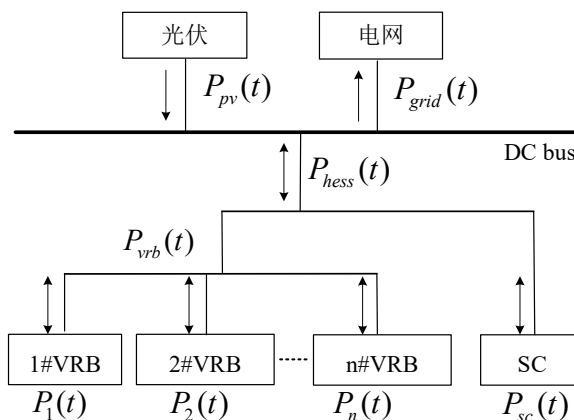


图 2 基于混合储能的光伏发电系统能量流动图

Fig.2 Energy flow diagram of photovoltaic power generation system based on hybrid energy storage

图中， $P_{pv}(t)$ 为光伏系统原始输出功率， $P_{grid}(t)$ 为

并网功率, $P_{hess}(t)$ 为混合储能系统功率, $P_{vrb}(t)$ 为全钒液流电池储能系统功率, $P_n(t)$ 为第 n 个 VRB 储能单元的充放电功率, $P_{sc}(t)$ 为超级电容系统功率。

在任一时间周期 t 内, 应保证直流微电网功率平衡, 混合储能系统功率 $P_{hess}(t)$ 等于光伏输出功率 $P_{pv}(t)$ 与并网功率 $P_{grid}(t)$ 的差值, 如 (1) 式所示。

$$P_{hess}(t) = P_{pv}(t) - P_{grid}(t) \quad (1)$$

当 $P_{hess}(t) > 0$ 时, 表示光伏输出功率有盈余, 储能系统需要吸收多余能量, 故处于充电状态; 同理可得放电状态。

混合储能系统功率分配如式 (2) 所示。

$$P_{hess}(t) = P_{vrb}(t) + P_{sc}(t) \quad (2)$$

全钒液流电池储能系统内部功率分配如式 (3) 所示。

$$P_{vrb}(t) = P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_n(t) \quad (3)$$

在光照强度剧烈变化时, 光伏系统的原始功率波动可能会超过国家标准, 因此必须依靠储能系统来处理多余的光伏输出。为了实现功率的有效分配, 电池能量管理系统根据不同储能介质的特点执行预设的优化策略。具体来说, 超级电容器负责处理小能量和高频率的多余功率, 而全钒液流电池储能系统则专注于较大能量和低频率的部分。接着, 全钒液流电池储能系统会根据既定策略对各个单元的功率 $P_{vrb}(t)$ 进行优化分配, 以确保光伏发电的输出功率保持稳定。

2 光伏混合储能系统功率波动分析

2.1 光伏并网波动指标

根据国家对光伏并网的相关技术标准, 确保并网功率的波动在不干扰电网正常运行的情况下, 必须满足特定的波动指标要求。光伏电站的有功功率变化主要有 1 分钟和 10 分钟两个时间尺度, 相关的最大波动值列于表 1。

光伏功率目标时间周期 Δt 内的波动率约束表达式如式 (4) 所示:

$$F_{\Delta t} = \frac{P_{\Delta t}^{\max} - P_{\Delta t}^{\min}}{P_N} \times 100\% \leq F_{\max} \quad (4)$$

式中, P_N 为光伏电站额定功率值, $P_{\Delta t}^{\max}$ 、 $P_{\Delta t}^{\min}$ 分别为 Δt 内光伏输出功率的最大、最小值, $F_{\max}$ 为表 1 中对应装机容量和 Δt 规定下的波动率上限值。

表 1 光伏电站功率波动要求

Tab.1 Requirements for power fluctuation of photovoltaic power station

电站规模	10min 内允许最大波动 /MW	1min 内允许最大波动 /MW
小型	额定容量	0.2
中型	额定容量	额定容量 /5
大型	额定容量 /3	额定容量 /10

2.2 光伏功率波动分析

本文以湖南地区的一座光伏电站为研究对象, 探讨其波动特性。随机选择了 20 台装机容量为 500KW 的光伏发电机组, 并收集了某个典型日内 12 小时 (从 6:00 到 18:00) 的实际运行数据, 采样间隔为 15 秒。这些机组的总额定功率为 10MW, 典型的光伏输出功率曲线展示在图 3 中。

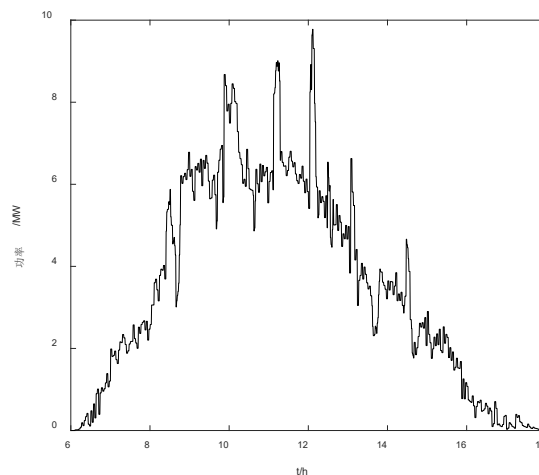


图 3 典型光伏电场输出功率曲线

Fig.3 Typical photovoltaic field output power curve

从上述功率曲线可以看出, 光照强度对光伏单元的功率产生了显著影响, 其变化呈现出先上升后下降的周期性特征。同时, 局部波动频繁且幅度差异较大, 可能超出功率波动的标准, 直接并入电网可能会对电网的稳定性和电能质量造成影响。此外, 该图只能反映输出功率在时间域内的变化, 无法提供更深层的波动信息。通过分析光伏功率的频谱特性, 我们能够更全面地理解光伏电源的波动成分及其与储能系统的相互作用。因此, 本文对光

伏输出曲线应用快速傅里叶变换（FFT），得到的光伏输出波动幅值和频率特性曲线如图 4 所示。

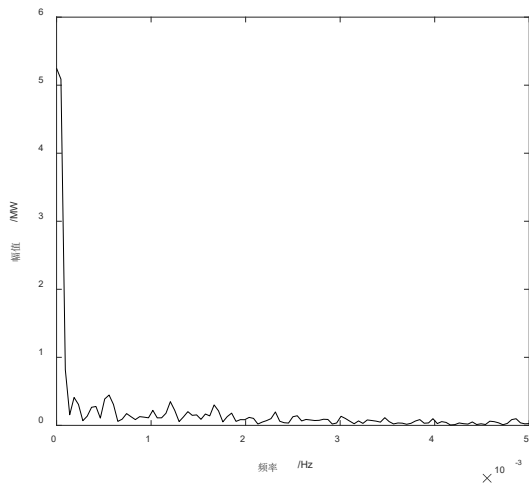


图 4 光伏出力波动幅频特性曲线
Fig.4 Amplitude frequency characteristic curve of photovoltaic output fluctuation

从图 4 的幅频特性曲线可以看出，光伏电场的输出功率主要集中在低频区域，尤其是低于 0.001Hz 的频段。在这一频率范围内，光伏输出功率的幅值较大且变化缓慢，对电力系统的并网影响几乎可以忽略不计。相对而言，中高频波动的幅值较小且变化频繁，因此需要采用混合储能系统来进行平抑，以满足并网的参数要求，实现光伏功率的平稳输出。

3 基于自适应小波包分解的混合储能系统功率优化分配策略

3.1 混合储能系统功率优化分配策略

混合储能系统的功率分配遵循的基本原则是，让能量密度较高的全钒液流电池负责处理幅值较大且变化缓慢的低频成分，同时尽量减少电池的频繁充放电。对于幅值较小且变化频繁的高频成分，则由循环次数较高的超级电容来承担。在光伏电场中，能够满足并网波动要求的最大幅值成分被称为并网成分，其他成分则由混合储能系统进行平抑。原始功率的并网成分、低频成分和高频成分的分段频谱示意图如图 5 所示。

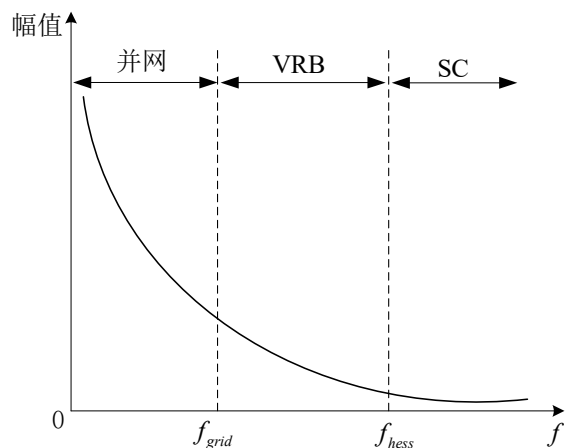


图 5 光伏出力分段频谱曲线
Fig.5 Segmented spectrum curve of photovoltaic output

从图 5 可以看出，划分不同功率分量的关键在于选择合适的分界频率。并网分量的分界频率 f_{grid} 是通过小波包分解自适应确定的，其值等于并网分量 $S_{j,0}(t)$ 所对应的最高频率。在选择混合储能的分界频率 f_{hess} 时，需要考虑不同电池的实际特性，储能介质的补偿对应时间频率详见表 2。

表 2 储能介质补偿对应时间频率

Tab.2 Corresponding time and frequency of energy storage medium compensation

储能介质	响应时间 /min	频率段
超级电容	0~1	$>1.67 \times 10^{-2}$
全钒液流电池	1~60	$2.78 \times 10^{-4} \sim 1.67 \times 10^{-2}$

根据表 2 的数据显示，1 分钟及以下时间范围内的功率波动成分主要由超级电容进行平抑，而全钒液流电池则负责抑制超过 1 分钟的功率波动。因此，混合储能系统的分界频率 f_{hess} 可以参考设定为 1.67×10^{-2} Hz。在确定了分界频率后，储能功率的大小和波动与光伏输出功率密切相关。为了确保电池的经济性和安全性，电站在配置时通常会考虑日常和极端情况，并留有足够的裕度，确保电池的状态（SOC）在日常运行中不会过高。即便如此，在 SOC 处于正常范围时，将电池的充放电参考功率控制在额定范围内依然是非常必要的。综合以上因素，并结合第三章中提出的钒电池功率分配策略，可以得出混合储能系统的整体优化分配策略，如图 6 所示。

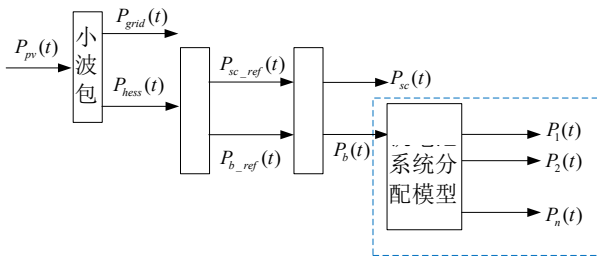


图 6 混合储能系统功率优化分配策略

Fig.6 Optimal power allocation strategy for hybrid energy storage system

假定自适应分解层数为 j 层，分解分量如式 (5) 所示：

$$P_{pv}(t) = S_{j,0}(t) + S_{j,1}(t) + \cdots + S_{j,2^j-1}(t) \quad (5)$$

则并网功率为

$$P_{grid}(t) = S_{j,0}(t) \quad (6)$$

结合式 (1) 可得，此时混合储能系统承担功率为

$$P_{hess}(t) = P_{pv}(t) - P_{grid}(t) = S_{j,1}(t) + S_{j,2}(t) + \cdots + S_{j,2^j-1}(t) \quad (7)$$

对比选择与混合储能分界参考频率 f_{hess} 最为接近的频段节点 (j, i) ，对应信号分量为 $S_{j,i}(t)$ ，则节点 $(j, 1) \sim (j, i-1)$ 对应 $P_{hess}(t)$ 的低频分量，节点 $(j, i) \sim (j, 2^j-1)$ 对应 $P_{hess}(t)$ 的高频分量。由此得到全钒液流电池和超级电容初次分配功率指令结果为

$$\begin{cases} P_{b_ref}(t) = S_{j,1}(t) + S_{j,2}(t) + \cdots + S_{j,i-1}(t) \\ P_{sc_ref}(t) = S_{j,i}(t) + S_{j,i+1}(t) + \cdots + S_{j,2^j-1}(t) \end{cases} \quad (8)$$

根据全钒液流电池储能系统实际情况设置其功率限值，记为 $P_{b_N}(t)$ ，超级电容则负责承担超出限值的部分功率。限值管理的具体方法如下：

(1) 正常工作区：若 $|P_{b_ref}(t)| \leq P_{b_N}(t)$ ，则 $\Delta P_b(t) = 0$ ；相应的 $\Delta P_{sc}(t) = 0$ ；

(2) 充电功率超限：若 $P_{b_ref}(t) \geq P_{b_N}(t)$ ，则 $\Delta P_b(t) = P_{b_ref}(t) - P_{b_N}(t)$ ；相应的 $\Delta P_{sc}(t) = \Delta P_b(t)$ ；

(3) 放电功率超限：若 $P_{b_ref}(t) < -P_{b_N}(t)$ ，则 $\Delta P_b(t) = P_{b_ref}(t) + P_{b_N}(t)$ ；相应的 $\Delta P_{sc}(t) = \Delta P_b(t)$ ；

经过以上功率限值修正方法后，全钒液流电池和超级电容的功率指令分配结果为

此时的 $P_b(t)$ 即作为 VRB 储能系统的总需求 P_{vrb} 的输入值，通过利用现有的 VRB 系统功率分配模型，对各个储能单元进行优化配置。最后，光伏电站中混

合储能的整体功率优化分配策略已圆满完成。

3.2 自适应分解层数选取

在小波包分解理论中，选择小波基函数并没有严格的规范，只需满足一定的条件即可。因此，不同的小波基函数在形式和对同一原始信号的分解结果上会有所不同。选择合适的小波基函数时，需考虑其自身特性以及原始信号的特点。通常，小波基函数应具备正交性、支撑区间长度、消失矩和正则性等特征，而这些特性之间存在一定的关联和限制。因此，常常需要在不同属性之间进行权衡，依据经验或实际应用的需求来选择特定的基函数。综合考虑光伏输出功率的特性、实际分解效果及计算复杂度，本文选用 db6 小波函数作为小波包分解的基函数。

小波包分解的目标是对原始光伏波动信号进行滤波和平滑，以满足并网要求。根据小波包基本原理的讨论，分解层数越高，得到的信号分量就越多，频带也越窄，趋势曲线则更为平滑。然而，若并网目标功率过于平滑，储能系统需承担的出力功率将增加，从而导致储能电站所需配置的容量增大，进而提升系统的运行和维护成本。因此，从经济性的角度出发，在确保光伏电站并网功率符合国家波动标准的前提下，建议将小波包分解的层数控制在较低水平。

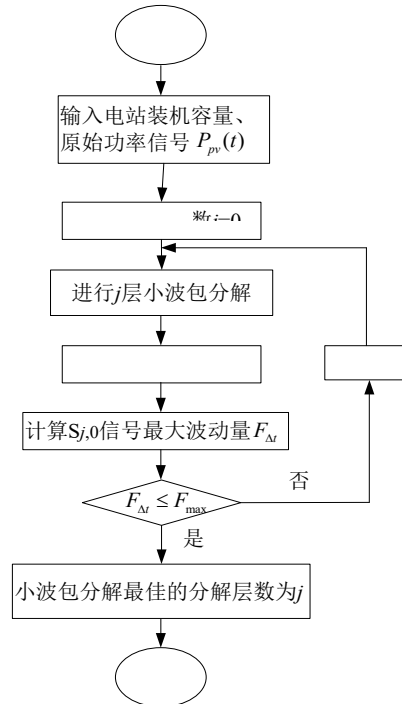


图 7 自适应小波包分解层数选取流程图

Fig.7 Flow chart of adaptive wavelet packet decomposition level selection

自适应小波包分解层数选取流程图如图 7 所示,光伏发电系统原始功率信号为 $P_{pv}(t)$,运用小波包对功率信号进行 j 层分解, j 初值取为 0。得出 2^j 个不同频段的功率分量,记 $S_{j,0}(t)$ 表示为第 j 层的第一个信号,此时该分量的频带最低,信号趋势最为平滑。应用公式 (4) 可以求取 $S_{j,0}(t)$ 信号的当前波动量,比较此时的波动量是否满足表 1 中光伏电站功率波动并网要求,如果不满足,则将分解层数加 1,直至信号 $S_{j,0}(t)$ 波动量首次满足要求为止,此时的分解层数 j 即为小波包最佳分解层数。

由此可知,我们所选择的分解层数是基于客观标准的,而非主观判断。小波包分解算法能够根据不同装机容量电站的原始功率信号及实际并网需求,自适应地确定分解层数,从而确保并网的稳定性和运行的经济性。

4 仿真分析

选取图 3 光伏输出功率曲线作为本文策略仿真中光伏发电系统原始输出功率信号 $P_{pv}(t)$,装机总容量为 10MW 电站。根据表 1 可知信号满足时间尺度为 1min 的波动指标即可,由式 (4) 计算最大波动指标 $F_{\max}$ 为 2%。光伏电场的输出功率主要分布在 0.001Hz 以下,因此将滤波时间常数 T_1 设置为 1000,并使用低通滤波策略来平抑光伏输出功率的波动。同时,对原始信号进行小波包分解,采用自适应方式选择分解层数为 5 层。此时,各种控制策略下的并网功率曲线对比见图 8,而不同控制策略的平抑效果比较则如图 9 所示。

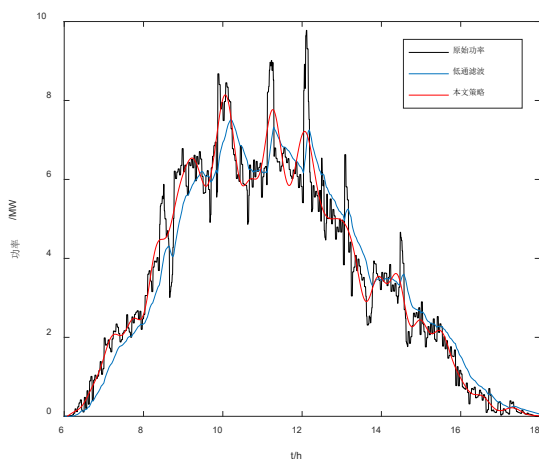


图 8 不同策略下的波动平抑曲线
Fig.8 Fluctuation smoothing curve under different strategies

由图 8 可以看出原始功率不同策略平抑之后,曲线变得十分光滑;由图 9 看出原始信号最大波动率的 29.9%,经低通滤波和小波包分解策略平抑后分别变为 1.825% 和 1.386%,均满足并网波动要求。但是相比于低通滤波策略,小波包分解策略的光伏并网利用率更高,波动平抑效果更好,具有一定的优越性。

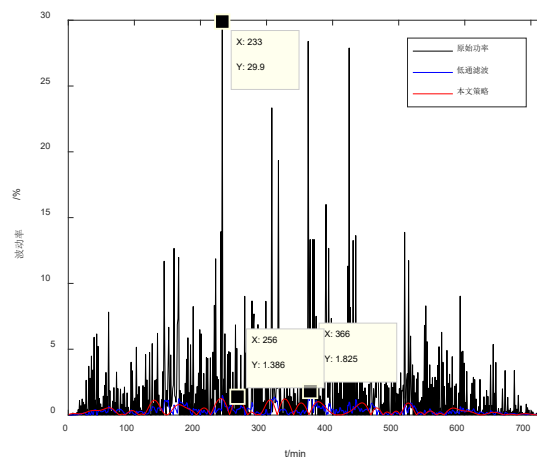


图 9 不同策略下的平抑效果对比

Fig.9 Comparison of stabilizing effects under different strategies

为了验证本文提出的小波包最佳分解层数确定方法的有效性和优越性,进行了对比分析,比较了相邻的最佳分解层数 6 层和 4 层在信号分解上的表现。此时的并网功率曲线见图 10,而波动率的对比结果则展示在图 11 中。

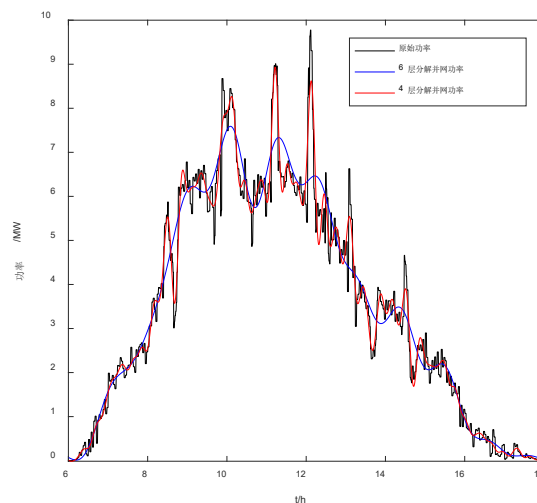


图 10 分解层数为 6 层和 4 层时的并网功率

Fig.10 Grid connected power when the number of decomposition layers is 6 and 4

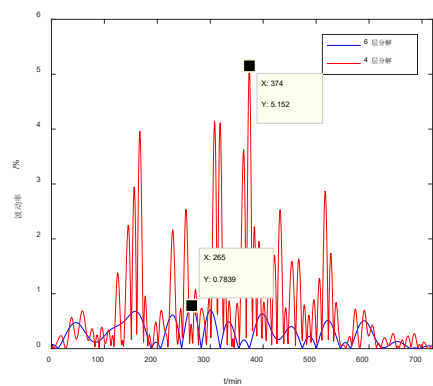


图 11 分解层数为 6 层和 4 层时的并网功率波动率
Fig.11 Fluctuation rate of grid connected power when the decomposition layers are 6 and 4

从图 10 和图 11 中可以观察到，与 5 层小波包分解后的并网曲线相比，6 层分解后的曲线显得更加平滑，1 分钟的功率波动率也有所降低，更加符合并网波动的标准。然而，过于平滑的并网曲线可能会导致并网功率的降低，从而增加混合储能系统所需承担的功率，对电站储能系统的配置容量提出了更高的要求。

不同分解层数的小波包指标对比见表 3。4 层小波包分解后的并网曲线波动率最大值为 5.152%，未能满足并网指标的要求。虽然 5 层小波包分解后的波动率符合并网标准，但光伏并网率（即周期内并网能量占光伏发电量的百分比）相对较低，这对系统的经济运行造成了影响。综上所述，可以得出结论，5 层分解时的效果是最优的。

表 3 小波包不同分解层数指标对比表

Tab.1 Performance comparison between DPMA and DFT algorithm

分解层数 / 层	波动率 / %	光伏并网率 / %
4	5.152%	89.65%
5	1.386%	85.53%
6	0.784%	81.36%

在原始功率信号去除并网分量，可得不同策略下的混合储能系统功率曲线如图 12 所示。

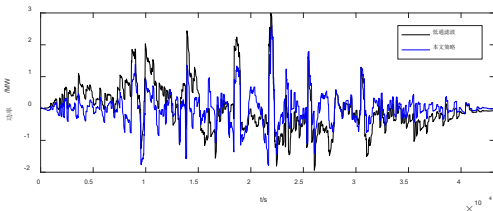


图 12 不同策略下的混合储能系统功率值
Fig.12 Power of hybrid energy storage system under different strategies

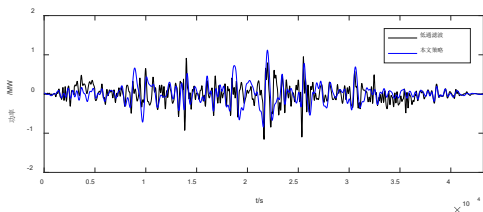


图 13 不同策略下的全钒液流电池储能系统功率曲线
Fig.13 Power curve of vanadium redox flow battery energy storage system under different strategies

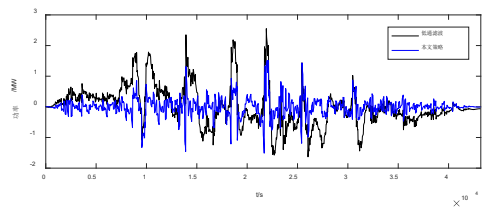


图 14 不同策略下的超级电容储能系统功率曲线
Fig.14 Power curve of super capacitor energy storage system under different strategies

原始信号经小波包 5 层分解后，每段频段长度为 1.042×10^{-3} ，由频段相近原则，对比选择与混合储能分界参考频率 f_{hess} 最为接近的频段节点 (5, 16)，对应信号分量为 $S_{5,15}(t)$ ，则节点 (5, 1) ~ (5, 15) 对应 $P_{hess}(t)$ 的低频分量，节点 (5, 16) ~ (5, 31) 对应 $P_{hess}(t)$ 的高频分量。同时，设定滤波时间常数 T_2 为 60，采用一阶低通滤波策略进行混合储能系统功率分配。此时，不同策略下的全钒液流电池储能系统和超级电容初次分配功率指令如图 13 和图 14 所示。

从图 13 和图 14 中可以看出，采用小波包分解策略后，混合储能功率能够更好地适应不同储能介质的特性。在整个调度周期内，全钒液流电池承担了更多的低频能量，其功率曲线变化更加平滑，充放电状态的切换次数从低通滤波策略下的 179 次减少到小波包分解后的 103 次，这有助于提升电池的性能。同时，超级电容的充放电状态切换次数则从低通滤波的 123 次增加到小波包分解的 245 次，更加有效地利用了超级电容频繁充放电的优势。综上所述，与传统的低通滤波策略相比，小波包分解策略在功率分配上展现出明显的优势。

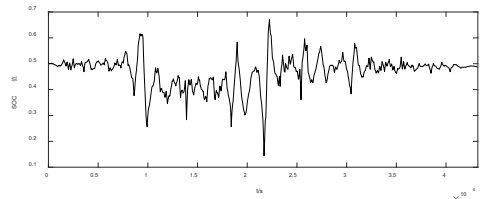


图 15 超级电容 SOC 曲线
Fig.15 Supercapacitor SOC curve

针对电站的实际配置情况,可以对初步分配的功率指令进行调整。例如,已明确全钒液流电池储能系统的额定功率后,可以根据功率限值修正方法进行二次调整,将多余的高频分量交由超级电容处理,以避免钒电池储能系统过载。此外,由于本文构建的混合模型相对新颖且规模较大,国内尚无相应的实际项目参数可供参考,因此限值部分无法准确体现。为了便于后续策略的仿真分析,本文根据混合储能功率分配的结果,以经济性为主要考虑因素配置电站的储能系统容量。计算光伏电场中储能系统的配置情况,其中全钒液流电池和超级电容的实际充放电效率分别设定为90%和95%。经过计算,超级电容和钒电池的额定功率分别为1.65MW和1.19MW,额定容量分别为0.56MWh和2.87MWh。基于这些结果,调用超级电容的充放电模型,将SOC初始值设为0.5,并输入图14的功率信号,此时超级电容的SOC变化如图15所示。

采用MW级全钒液流电池扩展结构,配置三组0.5MW/1MWh的钒电池储能单元,并进行直流母线侧并联,作为VRB储能系统总需求的输入值。设置VRB系统功率分配模型的相关参数,对三组储能单元进行功率优化分配。三组电池的SOC初始值分别设为0.2、0.5和0.8,此时全钒液流电池储能系统三组电池的功率分配结果及相应的SOC变化如图16和图17所示。

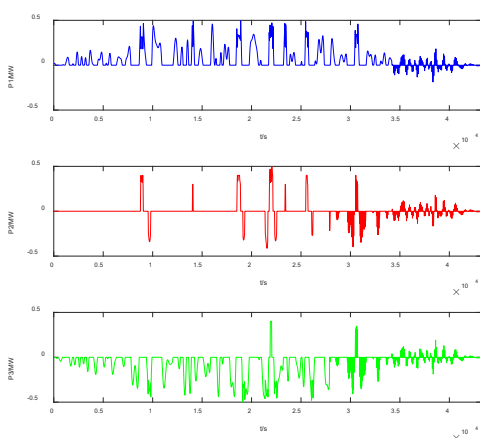


图 16 全钒液流电池储能单元功率曲线

Fig.16 Power curve of vanadium redox flow battery energy storage unit

从图16和图17中可以观察到,全钒液流电池储能单元根据预设的充放电优先级策略承担功率分

配,这有效降低了电池的启动频率和充放电状态的切换次数,从而有助于延长系统的使用寿命。此外,随着调度周期的延续,全钒液流电池储能单元的SOC值也逐渐趋于一致,长时间保持了良好的稳定性。

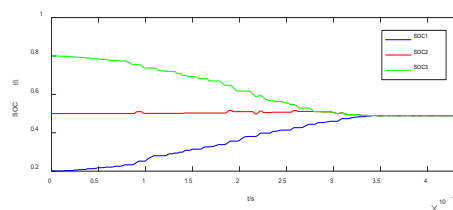


图 17 全钒液流电池储能单元 SOC 曲线

Fig.17 SOC curve of vanadium redox flow battery energy storage unit

5 结论

本文总结了光伏并网波动指标相关要求,同时对典型光伏曲线进行了频域分析;在此基础上给出一种基于自适应小波包分解的功率分配策略,根据并网要求和储能特性自适应的选择分解层数,实现各频段功率信号的合理分配;最后进行仿真验证,对比分析所提策略的优越性。

参考文献

- [1] 张晓虎,张熊,王凯,等.功率型储能技术与应用综述[J].电气工程学报,2024,19(03):385-398.
ZHANG Xiaohu, ZHANG Xiong, WANG Kai, et al. Review of Power-type Energy Storage Technology and Application[J]. Journal of Electrical Engineering,2024,19(03):385-398.
- [2] 居文平,王一帆,赵勇,等.新型电力系统长时储能技术综述[J].热力发电,2024,53(09):1-9.
JU Wenping, WANG Yifan, ZHAO Yong, et al. Overview of long-term energy storage technologies in new power systems[J]. Thermal Power Generation,2024,53(09):1-9.
- [3] 邵军康,李鑫,邱亚,等.全钒液流电池多场耦合建模研究[J].高电压技术,2021,47(05):1881-1891.
SHAO Junkang, LI Xin, QIU Ya, et al. Multi-field Coupling Modeling of Vanadium Redox Battery[J]. High Voltage Engineering,2021,47(05):1881-1891.
- [4] 邱亚,陈薇,李鑫.基于PCMAC-PID的全钒液流电池储能系统功率控制[J].高压电器,2023,59(07):117-124.
QIU Ya, CHEN Wei, LI Xin. Power Control of Vanadium Redox Battery Energy Storage System Based on PCMAC-PID[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(07):117-124.

- [5] 李亚楠, 王倩, 宋文峰, 王昕钰. 混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解-模糊控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(07): 58-65.
LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, WANG Xinyu. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(07): 58-65.
- [6] 谢超, 张建文, 李星. 基于EEMD与模糊控制的混合储能控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 124-129.
Xie Chao, Zhang Jianwen, Li Xing. Hybrid energy storage control strategy based on EEMD and fuzzy control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20): 124-129.
- [7] 程志江, 李永东, 谢永流, 邱麟, 董博, 樊小朝. 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2739-2745.
CHENG Zhijiang, LI Yongdong, XIE Yongliu, QIU Lin, DONG Bo, FAN Xiaochao. Control Strategy for Hybrid Energy Storage of Photovoltaic Generation Microgrid System With Super Capacitor[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2739-2745.
- [8] 余文山. 应用于光伏微电网的分布式混合储能系统功率分配策略研究[D]. 湖北工业大学, 2020.
YU Wenshan. Research on power distribution strategy of distributed hybrid energy storage system applied to photovoltaic microgrid[D]. Hubei University of Technology, 2020.
- [9] 吴铁洲, 许玉珊, 何淑婷, 王越洋, 张颂冀. Li-SC HESS功率协调分配的PCH强跟踪控制策略[J]. 可再生能源, 2016, 34(10): 1473-1480.
Wu Tiezhou, Xu Yushan, He Shuting, Wang Yueyang, Zhang Songji. A PCH strong tracking control strategy for power coordinated allocation of Li-SC HESS[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(10): 1473-1480.
- [10] 李军徽, 高天宇, 赵冰, 严干贵, 焦健. 抑制风电功率波动的电池储能系统自适应控制策略设计[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(3): 278-283.
LI Junhui, GAO Tianyu, ZHAO Bing, YAN Gangui, JIAO Jian. Inhibition of wind power fluctuations of battery energy storage system adaptive control strategy design[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(3): 278-283.
- [11] 张国驹, 陈瑶, 唐西胜, 于蓉蓉. 基于波动特征参数的多类型储能协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(06): 271-276.
Zhang Guoju, Chen Yao, Tang Xisheng, Yu Rongrong. Research on Coordinated Control Strategy of Multi-Type Energy Storage Based on Fluctuation Characteristic Parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(06): 271-276.
- [12] 谭兴国, 王辉, 张黎, 邹亮. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. 电力系统自动化, 2016, 38(8): 7-15.
TAN Xingguo, WANG Hui, ZHANG Li, ZOU Liang. Multi-objective Optimization of Hybrid Energy Storage and Assessment Indices in Microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 38(8): 7-15.
- [13] 李学斌, 刘建伟. 采用二阶滤波的混合储能系统实时功率分配方法[J]. 电网技术, 2019, 43(05): 1650-1657.
LI Xuebin, LIU Jianwei. Real-time Power Distribution Method Adopting Second-order Filtering for Hybrid Energy Storage System[J]. Power System Technology, 2019, 43(05): 1650-1657.
- [14] 王成山, 肖俊. 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, GUO Li. Sizing of Energy Storage Systems for Output Smoothing of Renewable Energy Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [15] 杨瑞睿, 杨文, 林莉. 基于快速傅里叶变换的风电场混合储能系统研究[J]. 电气应用, 2018, 37(16): 29-33.
YANG Ruirui, YANG Wen, LIN Li. Research on hybrid energy storage system for wind farm based on fast Fourier transform[J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(16): 29-33.
- [16] 庞云亭, 张国驹, 韦统振. 基于自适应滑动平均的混合储能能量管理及其在直流微电网中的应用研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(15): 69-74.
PANG Yunting, ZHANG Guoju, WEI Tongzhen. Research on Adaptive Sliding Average Control Based Hybrid Energy Storage for DC Micro-Grid[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(15): 69-74.
- [17] 彭嘉俊. 含混合储能独立型微电网系统协调控制研究[D]. 华南理工大学, 2019.
Peng Jiajun. Research on Coordinated Control of Stand-Alone Microgrid System With Hybrid Energy Storage[D]. South China University of Technology, 2019.
- [18] 朱雨薇, 吕林, 刘友波, 周春燕, 张永清. 基于动态小波分解的混合储能系统平滑控制策略[J]. 电力建

设, 2017, 38(09): 111–119.

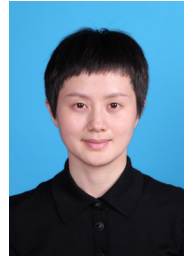
ZHU Yuwei, LYU Lin, LIU Youbo, ZHOU Chunyan, ZHANG Yongqing. A Hybrid Energy Storage Smoothing Control Strategy Based on Dynamic Wavelet Transform[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(09): 111–119.

[19] 杨子龙, 宋振浩, 潘静, 陈卓, 王一波. 分布式光伏 / 储能系统多运行模式协调控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(08): 2213–2220+4.

YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, CHEN Zhuo, WANG Yibo. Multi-mode Coordinated Control Strategy of Distributed PV and Energy Storage System[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(08): 2213–2220+4.

收稿日期: 2025 年 06 月 08 日

作者简介:



戴聿雯

戴聿雯 (1982–), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生, 中国电力科学研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、智能攻防。