

用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法

程 龙, 张方华

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106)

摘要:由锂电池和超级电容组成的混合储能系统(HESS)被广泛用于平抑电力系统中的功率波动,将低频功率分量分配给锂电池发挥其能量优势,将高频功率分量分配给超级电容发挥其功率优势。小波变换具有多尺度分解能力,能够根据储能介质特性更加合理地分配波动功率。基于储能介质的等效时间,提出了量化储能介质频率特性的方法。小波基的选取和分解层数的优化是小波变换的2个关键因素,直接影响波动功率的分解结果。采用互相关系数之和兼顾HESS的高、低频功率分量,选取合适的小波基。建立了储能介质频率特性与小波变换分解层数的关系,用于优化分解层数。仿真结果表明所提方法能够充分发挥储能介质的自身优势。

关键词:混合储能系统;功率波动;频率特性;小波变换;分解层数

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102005

0 引言

由锂电池和超级电容组成的混合储能系统(HESS)^[1-2]弥补了单一储能系统特性的不足,被广泛地用于平抑可再生能源发电系统^[3]、电动汽车电力系统^[4]、多电飞机电力系统^[5]的功率波动。锂电池具有高能量密度,被用于响应幅值低、波动慢的低频功率分量。超级电容具有高功率密度,被用于响应幅值高、波动快的高频功率分量。因此,只有根据储能介质自身的特性,才能更合理地分配波动功率。故本文提出量化储能介质频率特性的方法,将其作为负荷功率频率划分的参考。在HESS中,负荷功率分解后的高、低频分量要与所对应的储能介质特性相匹配,这样才能充分发挥储能介质自身的特性。因此,功率分配方法是平抑功率波动的关键因素之一^[6]。通常采用滤波的方法将负荷功率根据储能介质的频率特性进行高、低频分解。低通滤波方法因原理简单、易实现,在能量管理系统中被广泛应用^[7]。但低通滤波器存在相位延迟,容易引起高、低频功率分量的频率划分不清晰,且易造成容量配置冗余度过大等问题^[8]。

小波变换能够实现时域和频域的相互转换,同时具有局部化和多分辨率特性,适用于非平稳信号,因此得到广泛的关注^[9-10]。小波变换的关键在于小波基和分解层数的优化,优化结果直接影响负荷功率的频率分配结果。文献[7]将用于电能质量分析的db4小波基直接用于风电功率波动的分析,但是两者在时间尺度、波动幅值、能量等因素上存在较大

的差异。文献[11]通过计算风电功率与小波变换滤波器组的低通滤波器系数之间的互相关系数,选取db6为最优小波基。在小波变换中滤波系数长度与负荷功率信号的长度存在差异,且计算复杂。小波变换同时存在高、低频2组分量,仅用低通滤波器系数无法全面评价所选小波基的滤波器组系数。文献[12]以收敛性和正则性为依据选取meyer为最优小波基,但实际上具有这些特性的小波基有很多。文献[8,12]都是直接给出小波变换的分解层数,并未说明具体原因。文献[11]根据超级电容的响应频率确定小波变换的分解层数,但超级电容响应频率的划定缺乏客观理论依据。

为此,本文提出一种基于小波变换的负荷功率频域分配方法,主要用于解决小波变换中小波基的选取和分解层数的优化这2个关键问题。要求经小波变换后的高、低频分量与储能介质的特性更接近,以充分发挥储能介质的自身优势。通过算例分析了储能介质频率特性与小波变换分解层数的合理性,同时采用HESS的配置成本验证互相关系数之和的正确性。

1 储能介质频率特性

储能介质的等效时间 $T_{ET}^{[5]}$ 可表示储能介质单体的额定功率与所存储能量之间的关系,见式(1)。

$$T_{ET} = E_s / P_r \quad (1)$$

其中, E_s 为储能介质单体的额定能量; P_r 为储能介质单体的额定功率。

T_{ET} 表征了储能介质单体以额定功率充/放额定能量所需要的时间。在储能介质单体的一个完整充放电周期内,所需要的时间 T_T 为等效时间的2倍,即 $T_T = 2T_{ET}$ 。因此,定义储能介质的响应频率 f_T 为:

$$f_T = 1/T_T \quad (2)$$

收稿日期:2020-08-28;修回日期:2020-12-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777094)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777094)

根据储能介质的相关参数,其响应频率范围如图1所示。图中, f_{TD} 、 f_{TC} 分别为等效时间最大、最小时锂电池单体的响应频率; f_{TB} 、 f_{TA} 分别为等效时间最大、最小时超级电容单体的响应频率。由图1可见,锂电池的响应频率范围大于超级电容的响应频率范围,即锂电池能够响应超级电容所能响应的频率分量。但响应高频分量会增加锂电池的充放电次数,缩短其使用寿命^[4]。同时,超级电容的最低响应频率要大于锂电池的最高响应频率,超级电容无法响应低频分量。因此,本文利用锂电池响应低频分量,利用超级电容响应高频分量,这样可以发挥储能介质自身特性的优势。

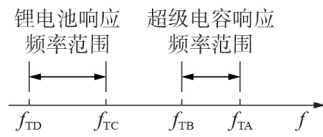


图1 储能介质的响应频率范围
Fig.1 Response frequency range of energy storage device

2 离散小波变换

2.1 基本原理

小波变换具有多分辨率分析能力,能够分辨信号中更多的细节信息,适用于非平稳信号。选用小波变换分析负荷功率信息,能够更好地分解负荷功率中的高、低频分量。

小波变换通常分为连续小波变换和离散小波变换^[13]。连续小波变换中的伸缩、平移相互独立,小波函数间有一定的相似性,且其计算量大,存在信息冗余,通常用于理论分析。将连续小波变换中的伸缩系数、平移系数进行离散化,可得离散小波变换形式为:

$$W(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_{i=0}^{N-1} x(t) \psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) \quad (3)$$

其中, $x(t)$ 为待处理信号; j 为伸缩系数; k 为平移系数; $\psi(t)$ 为母小波; N 为待处理信号的长度。

2.2 小波基的选取

小波基的选取直接影响负荷功率分解后的数据特征。通常选取与待处理信号波形相似的小波基进行小波变换分析^[14],这样能够更好地体现待测信号的特征。通常采用互相关系数进行小波基的选取^[15],其计算式为:

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\delta_x \delta_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

其中, $\rho_{x,y}$ 为互相关系数; x 为待测信号; y 为原始信号; $\text{cov}(x, y)$ 为2个信号的协方差; δ_x 、 δ_y 分别为信号

x 、 y 的标准差; x_i 、 y_i 分别为信号 x 、 y 第 i 个数据点的值; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为信号 x 、 y 的平均值; n 为待测信号数据点总数。

信号经小波变换分解后包含高、低频2组分量,故负荷功率信号的互相关系数同样需要考虑高、低频2组功率分量。为了能够同时体现高、低频功率分量的互相关系数与负荷功率的相关性,本文提出了互相关系数之和的概念,如式(5)所示。互相关系数之和越大,表明小波变换分解后高、低频功率整体与剩余功率更相似。因互相关系数的最大值为1,所以互相关系数之和的最大值为2。

$$\gamma_{\text{SCC}} = |\rho_{x,y}^{\text{lp}}| + |\rho_{x,y}^{\text{hp}}| \quad (5)$$

其中, γ_{SCC} 为互相关系数之和; $|\rho_{x,y}^{\text{lp}}|$ 、 $|\rho_{x,y}^{\text{hp}}|$ 分别为负荷功率的低频、高频信号与剩余功率的互相关系数。

2.3 分解层数优化

小波变换的分解层数直接影响负荷功率分解后的频率划分。对负荷功率进行频率划分的主要目的是发挥储能介质自身的特性。因此,本文基于超级电容的频率特性提出一种小波变换分解层数优化方法,负荷功率频率划分满足超级电容的频域特性。

Mallat快速算法的提出使离散小波变换的应用变得简单且易实现。Mallat快速算法主要包括分解、重构两部分,以3层小波变换为例,其示意图见附录中图A1。图A1(a)进行3层分解,其中, $x(n)$ 为待处理信号数据; $g(n)$ 为高通滤波器; $h(n)$ 为低通滤波器; $\downarrow 2$ 表示下2采样; D_1 为第1层分解的细节部分,位于小波空间; A_1 为第1层分解的平滑部分,位于尺度空间。第1层分解的小波空间、尺度空间将待处理信号的频域 $f_1 + f_2 + f_3 + f_4$ 进行对半划分,小波空间为高频部分 f_1 ,尺度空间为低频部分 $f_2 + f_3 + f_4$ 。第2层分解对第1层分解后的尺度空间进行进一步分解,得到细节部分 D_2 和平滑部分 A_2 。第3层分解对第2层分解后的尺度空间进行进一步分解,得到细节部分 D_3 和平滑部分 A_3 。3层分解后小波空间中的细节部分为 $D_1 + D_2 + D_3$,尺度空间中的平滑部分为 A_3 。小波空间、尺度空间满足直和关系。图A1(b)进行3层分解的重构, $\uparrow 2$ 表示上2采样。将每层的细节部分、平滑部分进行上2采样,并进行相应滤波可得到上一层的平滑部分,最终可得到原始信号。

Mallat快速算法中小波空间、尺度空间的频率划分范围主要由小波变换的分解层数决定。根据香农采样定理,定义负荷功率的采样频率为 f_s ,则负荷功率的频谱不能超过 $f_s/2$ 。离散小波变换的Mallat快速算法的分解层数与采样频率之间的关系见图2。第1层分解的尺度空间、小波空间的频率范围分别为 $[0, f_s/4]$ 、 $(f_s/4, f_s/2]$;第2层分解是对第1层的尺度空间频率进行划分,第2层的尺度空间、小波空间

的频率范围分别为 $[0, f_s/8]$ 、 $(f_s/8, f_s/4]$ 。每层分解都是对上一层尺度空间的频率范围进行平均划分。

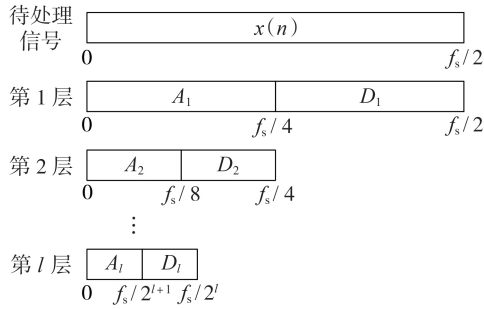


图2 分解层数与采样频率的关系

Fig.2 Relationship between decomposition level and sampling frequency

超级电容用于响应负荷功率的高频分量,根据图1可以确定超级电容响应负荷功率高频分量的最低频率。因此,以超级电容单体等效时间最大时的响应频率 f_{TB} 为基准,与图2中小波空间的频率进行匹配。第 l 层分解的小波空间频率范围为 $(f_s/2^{l+1}, f_s/2^l]$,实际分配的负荷功率频率不能小于超级电容的最低响应频率,即:

$$f_s/2^{l+1} \geq f_{TB} \quad (6)$$

3 算例分析

以某一段飞机负荷功率 P_{load} 数据为例^[5]进行算例仿真分析,具体相关参数见附录中表A1。发电机响应平均功率 P_{avg} ,HESS响应剩余功率 P_{re} 。采用小波变换方法对负荷的剩余功率进行高、低频功率分配。小波变换的2个关键参数的优化流程见图3,主要包括基于互相关系数的小波基选取和基于储能介质频率特性的分解层数优化。

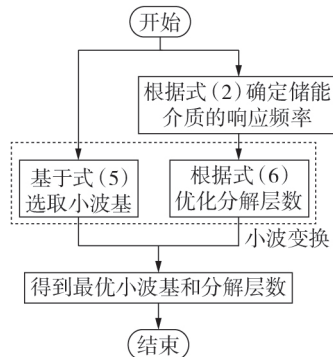


图3 小波变换关键参数的优化流程图

Fig.3 Optimization flowchart of key parameters for wavelet transform

3.1 小波基和分解层数验证

常见的典型小波基分解重构后低频分量与剩余功率信号的互相关系数 $|\rho_{x,y}^{bp}|$ 、高频分量与剩余功率信

号的互相关系数 $|\rho_{x,y}^{bp}|$ 及互相关系数之和 γ_{SCC} 见图4。图中,横轴1—18分别对应小波基 haar、db4、db6、db7、dmey、coif1、coif2、coif4、coif5、sym2、smy4、rbio1.3、rbio2.4、rbio3.1、bior1.3、bior2.2、bior3.1、bior4.4。由图4可见, $|\rho_{x,y}^{bp}|$ 的最大值、最小值对应的小波基分别为 dmey、rbio3.1, $|\rho_{x,y}^{bp}|$ 的最大值、最小值对应的小波基分别为 haar、rbio3.1。 γ_{SCC} 的最大值、最小值对应的小波基分别为 haar、rbio3.1。根据 γ_{SCC} 的最大值,选取最优小波基为 haar,同时兼顾了高、低频信号与剩余功率信号的相似性。

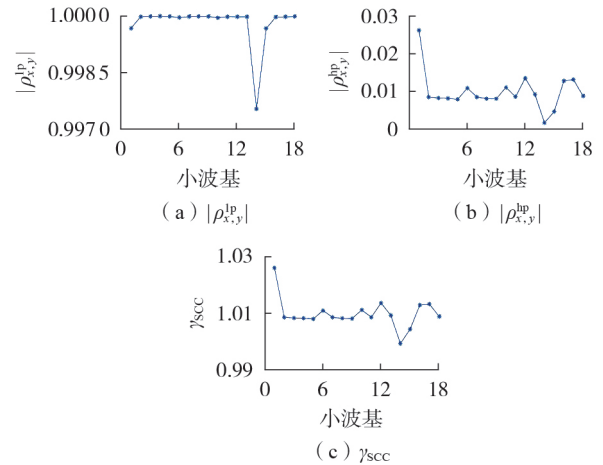


图4 典型小波基与负荷功率的互相关系数

Fig.4 Cross correlation coefficient between typical wavelet base and load power

负荷功率的采样频率 $f_s = 1$ kHz,超级电容的最低响应频率 $f_{TB} = 0.021$ Hz,最高响应频率 $f_{TA} = 0.045$ Hz;锂电池的最低响应频率 $f_{TD} = 1.37 \times 10^{-4}$ Hz,最高响应频率 $f_{TC} = 6.71 \times 10^{-4}$ Hz^[5]。根据式(6)可计算得到小波变换的分解层数 $l \leq 14.5$,故选取最优分解层数为14层。

3.2 仿真分析

3.2.1 频率特性

根据图1所示储能介质的响应频率范围,分析不同分解层数下高、低频功率分量的频率特性是否符合储能介质的频率特性。为了充分发挥储能介质的自身优势,高频功率分量的频率主要位于超级电容的最低响应频率 f_{TB} 以上,低频功率的频率要小于锂电池的最高响应频率 f_{TC} 。

分解层数 l 为12—16层时小波变换后低频功率的频谱见图5。由图可见,分解层数越少,低频功率的高频分量越多,分解层数为12、13层时低频功率中含有较多的高频分量。此时锂电池会响应较多的高频分量,不符合锂电池的频率特性。当分解层数越多时,低频功率分量的频率特性就越接近锂电池的频率特性。进行15、16层分解时,低频功率频率

特性更加符合锂电池的频率特性,可充分发挥锂电池的自身优势。

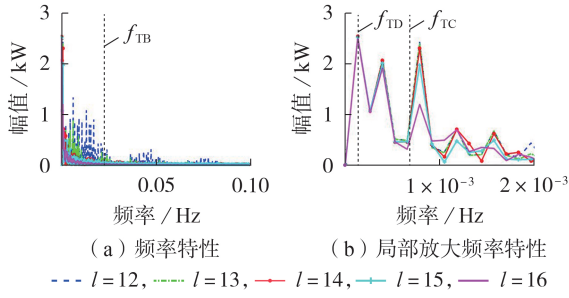


图5 不同分解层数的低功率频谱

Fig.5 Frequency spectrum of low frequency power with different decomposition levels

分解层数 l 为12—16层时小波变换后高频功率的频谱见图6。由图可知,分解层数越多,高频功率中含有较多的低频分量,分解层数为15、16层时分解的高频功率中含有较多的低频分量,而频率小于 f_{TB} 的分量越多,超级电容则需要响应更多的低频分量;分解层数为12、13层时高频功率中含有少量的低频分量,高频功率特性与超级电容的频率特性更加一致,能够更好地发挥超级电容的频率特性。

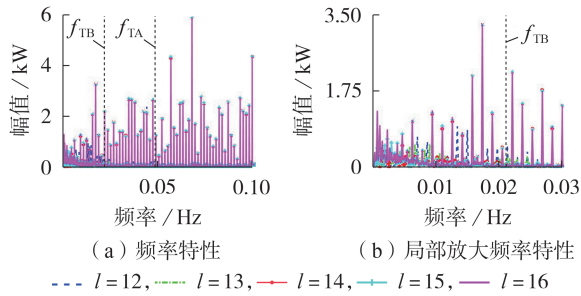


图6 不同分解层数的高功率频谱

Fig.6 Frequency spectrum of high frequency power with different decomposition levels

对比图5和图6可知,分解层数为12、13层时分解的高频功率中含有少量的低频分量,但在低频功率中含有较多的高频分量,这符合超级电容的频率特性,却不符合锂电池的频率特性;分解层数为15、16层时分解的低频功率中含有较少的高频分量,但在高频功率中含有较多的低频分量,这符合锂电池

的频率特性,却不符合超级电容的频率特性。综合上述分析,14层分解同时兼顾了高、低频功率分量与储能介质的频率特性,14层分解的低频功率与锂电池频率特性一致,高频功率与超级电容频率特性一致。

3.2.2 互相关系数

采用haar小波基、dmey小波基分解后的低频功率分量与剩余功率的对比分别见附录中图A2和图A3,其中低频功率曲线的变化趋势相似,难以直接观察它们之间的差异,因此放大时间尺度,对200 s内的低频功率分量与剩余功率进行对比。由图可见,haar小波基的低频分量基本保持恒定,且幅值大于0;而dmey小波基的低频分量有一定的变化趋势,初始幅值小于0,与剩余功率的起始位置更加接近。rbio3.1小波基分解后的低频功率分量与剩余功率的对比见附录中图A4。由图可见,rbio3.1小波基分解后的低频功率分量的幅值要远大于剩余功率。综上所述可知,dmey小波基的低频功率分量与剩余功率更为相似,验证了dmey小波基的 $|\rho_{x,y}^{hp}|$ 值最大,rbio3.1小波基的 $|\rho_{x,y}^{hp}|$ 值最小。

haar小波基和dmey小波基分解后的高频功率分量与剩余功率的时域对比分别见附录中图A5和图A6,其中高频功率曲线整体变化趋势相似,局部放大时域为1000 s内的高频功率。由图可见,haar小波基的高频分量与剩余功率基本保持一致,而dmey小波基的高频分量在初始阶段有一定的低频振荡。rbio3.1小波基分解后的高频功率分量与剩余功率对比见附录中图A7,可见rbio3.1小波基分解后的高频功率分量幅值远大于剩余功率。分解后的高、低频功率分量之和等于剩余功率,这是小波变换合理分解重构的结果。通过对比可知,haar小波基的高频功率分量与剩余功率更为相似,验证了haar小波基的 $|\rho_{x,y}^{hp}|$ 值最大,rbio3.1小波基的 $|\rho_{x,y}^{hp}|$ 值最小。

3.3 配置成本验证

小波变换分解后高、低频功率分量的峰值功率和平均能量如表1所示,其结果直接影响储能介质的配置容量。HESS需同时考虑高、低频分量所需要储能介质的配置容量,而容量配置需同时满足功率约束和能量约束,以确定储能介质最终配置的容量大小。

表1 HESS的配置结果

Table 1 Configuration results of HESS

小波基	功率分量	峰值功率 / W	平均能量 / (W·h)	配置功率 / W	配置能量 / (W·h)	锂电池成本 / \$	超级电容成本 / \$	总成本 / \$
haar	低频	7.4657×10^3	2.4335×10^3	7.6723×10^3	3.8362×10^3	1.0473×10^3	—	3.08363×10^4
	高频	9.5925×10^4	1.9135×10^2	9.9298×10^4	2.7807×10^2	—	2.9789×10^4	
dmey	低频	7.8464×10^3	2.4938×10^3	8.0275×10^3	4.0138×10^3	1.0958×10^3	—	3.22418×10^4
	高频	9.9759×10^4	2.1817×10^2	1.0382×10^5	2.8923×10^2	—	3.1146×10^4	
rbio3.1	低频	6.0321×10^8	3.8201×10^3	6.1437×10^8	3.0719×10^8	8.3863×10^7	—	2.71073×10^8
	高频	6.0319×10^8	1.8506×10^3	6.2404×10^8	1.7475×10^6	—	1.8721×10^8	

对比表1中不同小波基的小波变换功率和能量可发现,haar小波基的峰值功率和平均能量均小于dmey小波基的峰值功率和平均能量。因此,基于haar小波基的配置功率和能量也会小于基于dmey小波基的配置功率和能量。虽然rbio3.1小波基的高频需求能量最小,但由于需求功率非常大,在进行容量配置时,受功率约束限制,对应的超级电容配置能量也会随之增加。结合文献[1]中给出的锂电池单位能量成本为0.273 \$/(W·h),超级电容的单位功率成本为0.3 \$/W,可得表1所示储能的配置成本,可见haar小波基下HESS的配置总成本最小,rbio3.1小波基下HESS的配置总成本最高。上述结果验证了基于互相关系数之和选取小波基的有效性和正确性。

4 结论

(1)基于储能介质的等效时间,量化了储能介质的频率特性,解决了传统方法对储能介质频率特性主观判断不足的问题。

(2)根据Mallat快速算法,建立了储能介质频率与离散小波变换分解层数之间的关系,实现了对储能介质响应功率频率的合理划分。

(3)互相关系数之和同时考虑了小波变换后高频功率、低频功率与原始负荷功率的相关性,为负荷功率选取合适的小波基提供了依据;通过比较HESS的配置成本,验证了基于互相关系数之和选取小波基的正确性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 苏浩,张建成,冯冬涵,等. 模块化混合储能系统及其能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):127-133,140.
SU Hao, ZHANG Jiancheng, FENG Donghan, et al. Modular hybrid energy storage system and its energy management strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 127-133, 140.
- [3] 陈厚合,杜欢欢,张儒峰,等. 考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):174-182,188.
CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182, 188.
- [4] AKAR F, TAVLASOGLU Y, VURAL B. An energy management strategy for a concept battery/ultracapacitor electric vehicle with improved battery life[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1):191-200.
- [5] 程龙,张方华,谢敏,等. 基于等效时间的混合储能系统高功率

密度优化配置[J]. 航空学报,2018,39(10):197-207.

CHENG Long, ZHANG Fanghua, XIE Min, et al. High power density optimal configuration for hybrid energy storage system based on equivalent time[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(10): 197-207.

- [6] 汪海蛟,江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(19):126-135.
WANG Haijiao, JIANG Quanyuan. An overview of control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 126-135.
- [7] HAJIAGHASI S, SALEMNIA A, HAMZEH M. Hybrid energy storage system for microgrids applications: a review[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 21(2): 543-570.
- [8] CHRISTIAN S N, LIU K Z. Online wavelet based control of hybrid energy storage systems for smoothing wind farm output [C]//IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy: IEEE, 2016: 2089-2094.
- [9] 张江林,张亚超,洪居华,等. 基于离散小波变换和模糊K-modes的负荷聚类算法[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):100-106,122.
ZHANG Jianglin, ZHANG Yachao, HONG Juhua, et al. A load clustering algorithm based on discrete wavelet transform and fuzzy K-modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 100-106, 122.
- [10] 吴建章,梅飞,潘益,等. 基于改进经验小波变换的电能质量扰动检测新方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):142-151.
WU Jianzhang, MEI Fei, PAN Yi, et al. Novel detection method of power quality disturbance based on IEWT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 142-151.
- [11] JIANG Q Y, HONG H S. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.
- [12] KIM T, MOON H, KWON D, et al. A smoothing method for wind power fluctuation using hybrid energy storage[C]//IEEE Power and Energy Conference. Champaign, IL, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [13] MIX D F, OLEJNICZAK K J. Elements of wavelets for engineers and scientists[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003: 145-162.
- [14] 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.
- [15] RAY P, BASURAY A, MAITRA A K. Optimum wavelet bases selection for wavelet based de-noising in partial discharge measurement[C]//IEEE Information & Communication Technologies. Tamil Nadu, India: IEEE, 2013: 1110-1113.

作者简介:



程 龙

程 龙(1988—),男,安徽怀宁人,博士研究生,主要研究方向为混合储能系统优化配置和分布式协同控制(E-mail: cLong@nuaa.edu.cn);

张方华(1976—),男,山东济宁人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为航空电力系统稳定性分析与控制、航空电源变换器装置(E-mail: zhangfh@nuaa.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

(下转第128页 continued on page 128)

Voltage sag judgment method considering influence of phase angle on amplitude characteristics during sag

LIU Yufeng¹, WU Xuezh^{1,2}, LIU Jingdou¹, LI Xiaoliang³, ZHU Guitang³

(1. National Active Distribution Network Technology Research Center (NANTEC),

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100044, China;

3. Beijing Xinghang Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

Abstract: The key to realize voltage sag compensation is to judge the occurrence of sag events quickly and accurately. The problems of existing small angle delay detection method are analyzed, and an improved voltage sag judgment method is proposed. Based on the construction of $\alpha\beta$ coordinate system with small angle delay, the voltage characteristics of dq coordinate system at the time of sag are analyzed, and the expression of d axis component with amplitude information is derived. By predicting the change trend and magnitude of d axis component at the time of sag, the voltage sag can be quickly determined. The proposed method can overcome the influence of amplitude fluctuation in small angle delay detection method, improve the detection speed, and is conducive to the follow-up compensation effect. Simulative results verify that the proposed method can effectively improve the real-time performance and accuracy of detection.

Key words: voltage sag; detection; small angle delay; voltage characteristics; change trend prediction

(上接第104页 continued from page 104)

Wavelet transform method for hybrid energy storage system smoothing power fluctuation

CHENG Long, ZHANG Fanghua

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: HESS (Hybrid Energy Storage System) composed of lithium battery and supercapacitor is widely used to smooth the power fluctuation in power system. Low frequency power components are allocated to lithium batteries to give full play to their energy advantages, while high frequency power components are allocated to supercapacitors to give full play to their power advantages. Wavelet transform has the ability of multi-scale decomposition, which can allocate the fluctuating power more reasonably according to the characteristics of energy storage devices. Based on the equivalent time of energy storage device, a method to quantify the frequency characteristics of energy storage devices is proposed. The selection of wavelet basis and the optimization of decomposition level are two critical factors for wavelet transform, which directly affects the decomposition results of fluctuating power. The sum of correlation coefficients, which takes into account both the high and low frequency power components of HESS, is used to select the appropriate wavelet basis. Meanwhile, the relationship between the frequency characteristic of energy storage device and the decomposition level of wavelet transform is established to optimize the decomposition level. Simulative results show that the proposed method can take full advantages of energy storage devices.

Key words: hybrid energy storage system; power fluctuation; frequency characteristics; wavelet transform; decomposition level

附录

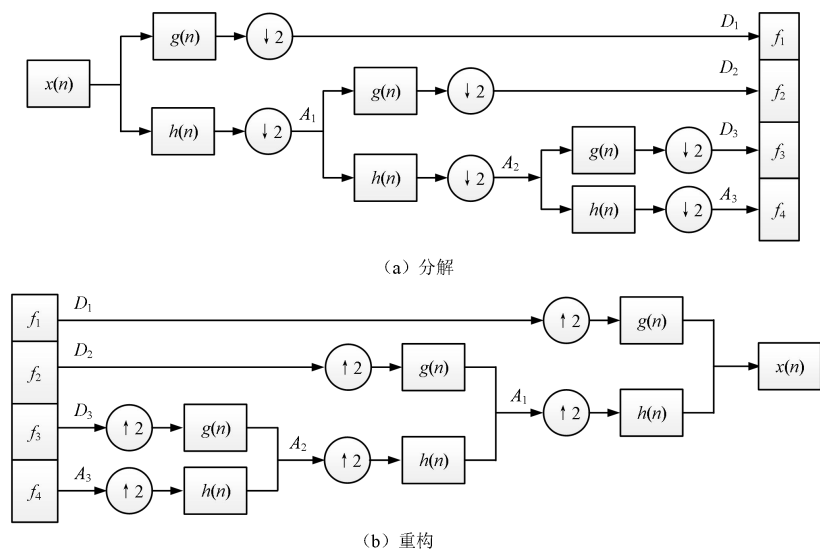


图 A1 3 层小波变换示意图
Fig.A1 Schematic diagram of three-level wavelet transform

表 A1 负荷功率参数

Table A1 Parameters of load power

参数	数值
P_{load} 的最大值/kW	157.32
P_{load} 的平均值/kW	68.2
P_{load} 的最小值/kW	29.8
P_{load} 的总能量/(kW·h)	79.5
采样频率 f_s /kHz	1
P_{re} 的最大值/kW	89.1
P_{load} 的最小值/kW	-38.4
P_{load} 的总能量/(kW·h)	1.3

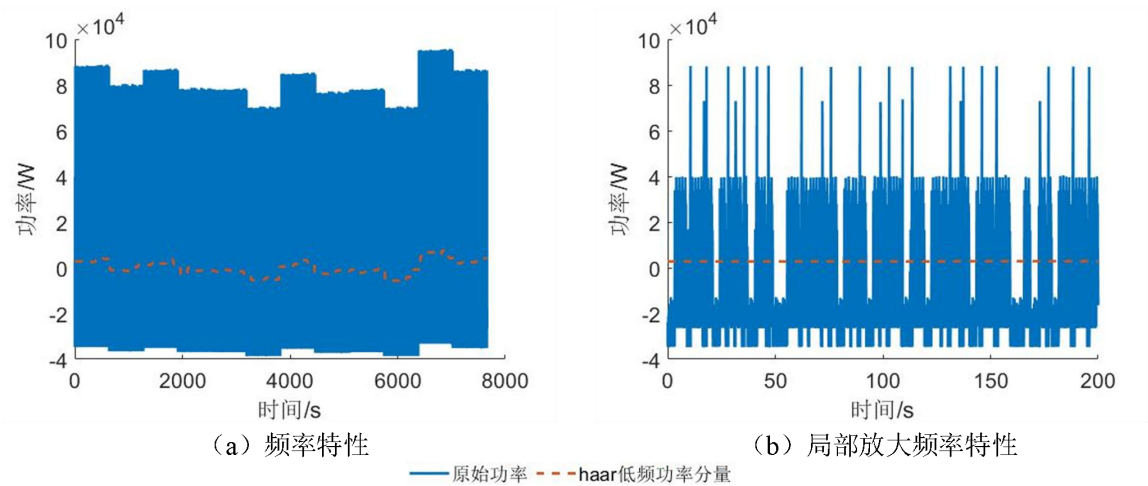


图 A2 haar 小波基的低频分量与剩余功率对比
Fig.A2 Comparison between low frequency component based on haar wavelet base with remaining power

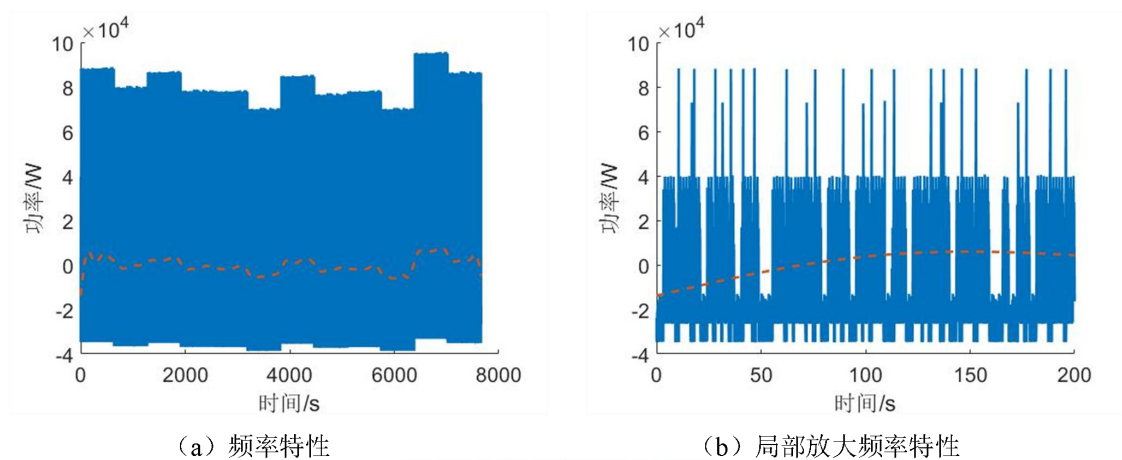


图 A3 dmey 小波基的低频分量与剩余功率对比

Fig.A3 Comparison between low frequency component based on dmey wavelet base with remaining power

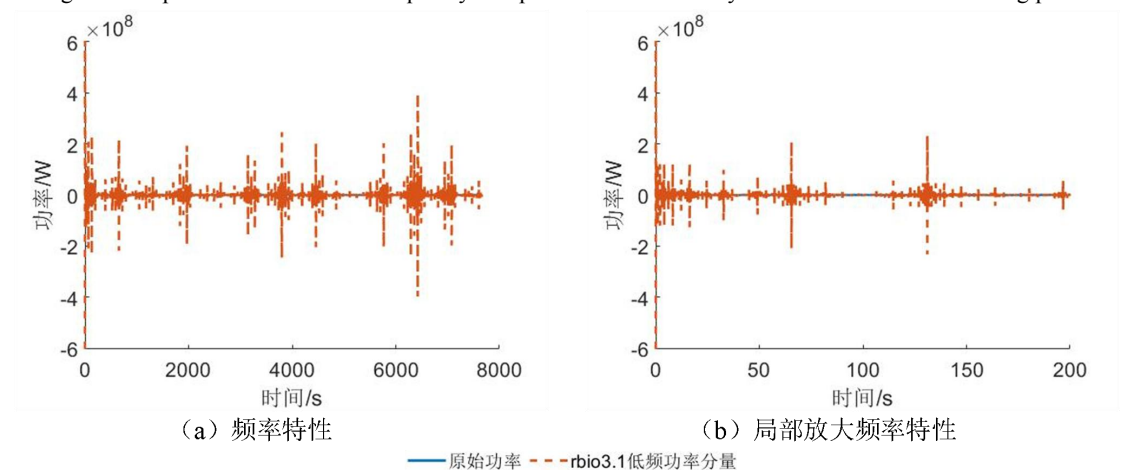


图 A4 rbio3.1 小波基的低频分量与剩余功率对比

Fig.A4 Comparison between low frequency component based on rbio3.1 wavelet base with remaining power

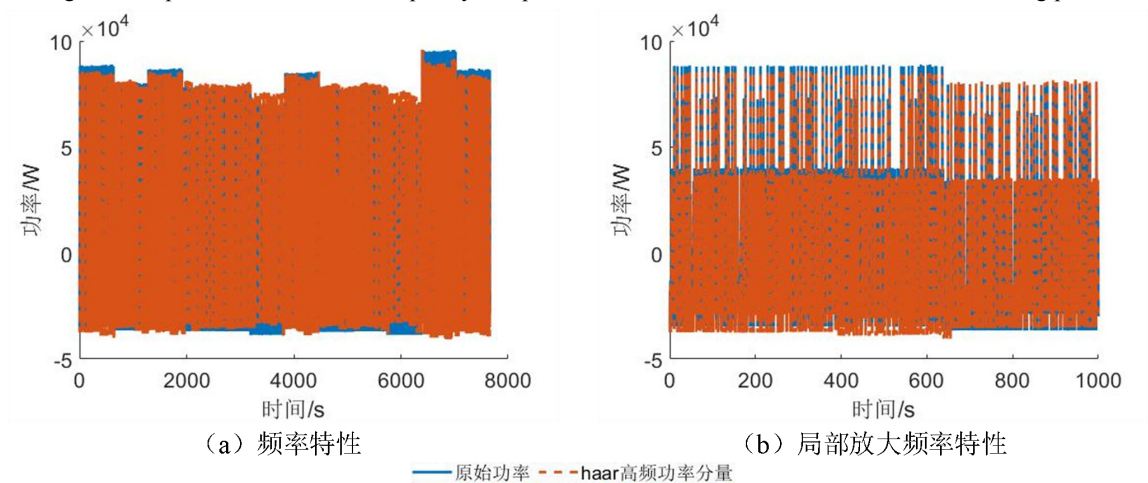


图 A5 haar 小波基的高频分量与剩余功率对比

Fig.A5 Comparison between high frequency component based on haar wavelet base with remaining power

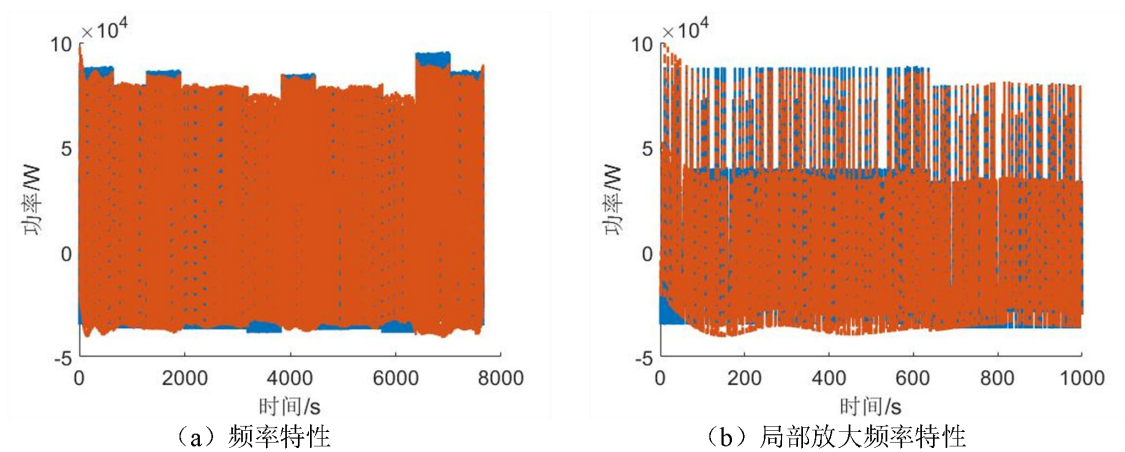


图 A6 dmey 小波基的高频分量与剩余功率对比

Fig.A6 Comparison between high frequency component based on dmey wavelet base with remaining power

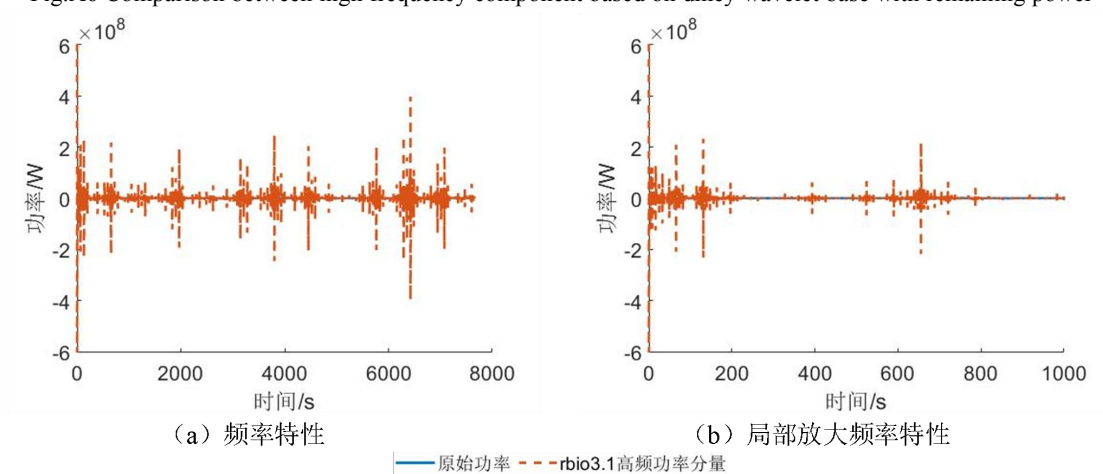


图 A7 rbio3.1 小波基的高频分量与剩余功率对比

Fig.A7 Comparison between high frequency component based on rbio3.1 wavelet base with remaining power