基于快速傅里叶变换的风电场混合储能系统研究

针对钠硫电池、锂电池和超级电容器三种储能装置共同组成的多设备混合储能系统，综合考虑储能荷电状态、市场实际参数和循环寿命等工程因素，提出了一种基于傅里叶变换的配置和配比方法。通过计算系统在各储能分频点下的总成本，得到经济性最优混合储能系统组合。和传统单储能设备以及高、低两储能设备系统相比，所提出的高－中－低三频段混合储能系统具有更好的经济性。

杨瑞睿／上海勘测设计研究院有限公司　杨　文／中国长江电力股份有限公司
林　莉／重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室

杨瑞睿／助理工程师

关键词／Keywords
风力发电·
混合储能系统·
傅里叶变换·
储能配置·
容量优化·

0　引言

风电输出功率具有很强的随机性，可能影响电能质量和电力系统的稳定性。储能系统凭借其可充放的运行特性，可以灵活、快速地调节系统电能平衡，平抑风电场输出功率波动。相比单一储能，由功率型储能器件和能量型储能器件组成的混合储能系统（Energy Storage System，ESS）有效提升了储能性能。由于储能设备的容量配置将直接影响储能系统的经济性，因此储能容量配置研究对风电场输出功率的平抑效果和运行经济性具有重要意义。

迄今为止，国际上已经出现了一些对混合储能系统应用于风力发电系统的理论研究。文献[1]讨论了采用蓄电池组进行风力发电系统功率平抑的可行性，同时分析了蓄电池接口电路的控制原理。文献[2]提出采用蓄电池组和超级电容器的混合储能系统平抑风电输出功率的控制策略。文献[3]中采用低通滤波器平滑风电场功率波动，但由于低通滤波器在滤波过程中的延迟特性，会导致储能容量设计偏高；针对该问题，文献[4]提出了采用傅里叶滤波的方法实现储能装置补偿不同频段的功率波动，但该方法配置时未考虑系统经济成本。文献[5]提出了一种基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法，再通过高斯逼近法拟合波动功率的概率密度函数，但同样未考虑储能系统的经济成本。上述文献均只考虑了高频、低频两种储能设备的组合，对于中间频段功率波动，将其划分在高频或低频中，容易导致储能容量过大，从而增加系统成本。

本文利用混合储能设备对风电场输出功率进行平抑，以减小其功率波动对电网造成的影响。通过快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform，FFT）从频域对风电输出差额功率进行频谱分析和频段分离，提出高、中和低三频段混合储能系统，结合各频段储能装置响应频率对拟平抑功率频谱分段，并针对各频段进行储能设备的选型和配比，使储能配置更加合理经济。综合考虑储能设备循环寿命和荷电容量（State of Charge，SOC）等因素，以经济总成本最低为优化目标，结合储能设备实际参数，对配比结果进行修订。

1　风力发电系统差额功率的频谱分析

1.1　傅里叶变换频谱分析

风力发电系统差额功率主要由风机输出功率和电网可接纳输入功率决定。

将风电机组输出功率与经混合储能系统平抑后的电网输入功率的差值称为差额功率[6]。不计电网损耗的理想情况下，风力发电系统差额功率可表示为

$$P_b = P_o - P_a \tag{1}$$

式中，P_o为风电场输出有功功率；P_a为电网输入功率；$P_b>0$时，储能系统需吸收风电输出的过多有功，储能设备充电；$P_b<0$时，储能系统发出有功补充风电输出的缺额，储能设备放电。

1.2 功率波动率

为量化混合储能系统平抑有功功率波动的效果，将某时间段t内最大与最小输出功率$P_{t\max}$、$P_{t\min}$的差值与风电场额定功率P_N的比值称为功率波动率F_t[7]

$$F_t = \frac{P_{t\max} - P_{t\min}}{P_N} \tag{2}$$

功率波动率越低，则平抑效果越好。判断目标输出功率是否满足要求，需保证波动率不超过功率波动率上限标准。

1.3 基于FFT的频谱分析

频谱分析通过在频域中提取信号特征，直观地与时域对应，更合理地配置储能设备，达到平抑功率的目的。对于本文所研究的风电场，通过频谱分析可以更好地将功率波动频段与储能设备有效响应频段对应配置。

FFT及其逆变换IFFT可有效实现信号的时、频域相互转换，通过过滤、分离和截取等方法，达到信号分解的目的[8]。对于N个采样点的时域信号$x[t]$对应的FFT算法为

$$X[f] = \sum_{t=0}^{N-1} x[t] e^{-j(2\pi/N)tf} \quad f = 0,1,\cdots,N-1 \tag{3}$$

式中，f为频率的序列数，$f=0$即直流分量；t为样本编号。

对N个点离散序列的IFFT算法为

$$x[t] = \frac{1}{N}\sum_{f=0}^{N-1} X[f] W_N^{-tf} \quad f = 0,\cdots,N-1 \tag{4}$$

根据Nyquist采样定理可知，经过FFT变换后的信号$X[f]$关于其1/2采样频率对称，且两侧对称复序列互为共轭[9]。故分析FFT变换后信号的幅频特性时，只需考虑对称的前半部分即可。

2 基于频谱分析的混合储能系统配置

2.1 频率分割及储能设备选型

传统的混合储能系统只采用高、低频两种储能设备，对于能量密度和功率密度都相对均衡的中频波动信号而言，无论采用高频还是低频储能设备进行平抑，都需要增加相对更多的设备容量，导致系统经济性下降。

为此，提出将所需平抑功率波动细分为高、中和低三个频段，分别采用风电系统中常用的钠硫电池、锂电池和超级电容器组成三设备混合储能系统。其中，钠硫电池动态响应时间为min－hr级，单位能量成本最低，适用于平抑能量密度较大的低频波动；锂电池响应时间一般为min级，成本相对折中，适用于平抑中频波动；超级电容器响应时间可达1 min以内，最高达到毫秒级别，循环寿命长、功率成本低，适用于平抑功率密度较大的高频波动，本文采用混合储能系统代替电池对功率进行平抑。根据文献[4]，综合市场上三种储能设备性能数据，确定混合储能系统中各储能设备一般响应时间及最高响应频段，如表1所示。由于风力发电输出功率数据通常以1～10 min采集，故将超级电容器波动响应频段定为全频段。

表1 储能设备种类和响应时间

储能设备	响应频段	一般响应时间/min	最高响应频率/Hz
钠硫电池	低频	30	0.000 55
锂电池	中频	5	0.003 33
超级电容器	高频	1以内	0.016 67

由表1可见，三设备混合储能系统中按照低－中频和中－高频存在两个频段分离点。其中，低－中分频点用于分离钠硫电池和锂电池的响应频率范围，在0～0.000 55 Hz之间取值；中－高频用于分离锂电池和超级电容器，在0～0.003 33 Hz之间取值。由于三种储能设备响应频段均有所重合，考虑实际情况，中－高频分频点频率不得低于低－中频分频点频率。

2.2 储能设备容量计算

储能设备容量的计算包括功率容量和能量容量两个部分，为保证各储能设备均可有效平抑对应频段内的全部波动，各混合储能装置的最小功率容量P_{ES}取决于经FFT重构后对应信号曲线中的正、负峰值$P_{positive}$、$P_{negative}$的绝对值最大值，即储能所需充电或放电的最大功率为

$$P_{ES}=\max\left(P_{positive},|P_{negative}|\right) \tag{5}$$

对重构后各频段差额功率进行积分可得到对应频段的平衡能量信号曲线，各混合储能装置能量容量取决于该曲线正负峰值$E_{positive}$、$E_{negative}$，即对应频段下各储能装置所需补偿或消纳的能量波动最大值，故储能设备的能量容量E_{ES_c}为对应积分曲线峰值的最大绝对值，即

$$E_{ES_c}=\max\left(E_{positive},|E_{negative}|\right) \tag{6}$$

3 混合储能容量修订及成本计算

3.1 考虑SOC的容量修订

所研究的三种电池的单位功率成本c_P、单位能量成本c_E、循环寿命N以及荷电容量SOC限额等相关参数[10]如表2所示。储能设备最大充放电百分比m由其SOC上限与下限差值决定。由表2可知，钠硫电池最大充放电电量百分比为70%，锂电池为80%，超级电容器为90%。

表2 储能设备参数

设备	单位容量成本		循环寿命/次	SOC限额
	c_P/(元/kW)	c_E/(元/kW·h)		
钠硫电池	6 300	1 260	5 000	0.15～0.85
锂电池	3 780	2 520	5 000	0.10～0.90
超级电容	945	25 200	100 000	0.05～0.95

为保证储能设备在循环寿命内的正常使用，每次充放电最大SOC不应超出对应限额，故储能对应能量容量E_{ES_m}需根据对应SOC限额进行修订，即

$$E_{ES_m}=\frac{E_{ES_c}}{m} \tag{7}$$

由于储能设备的充、放电具有随机性，为确保储能系统平抑风电波动的可靠性，本文假设储能装置在任意时间的充、放电具有相同可能性，取储能装置初始SOC为0.5，即初始状态电量为50%，则此时储能实际能量容量可修订为

$$E_{ES}=2E_{ES_m} \tag{8}$$

3.2 考虑实际设备参数的容量修订

对于市场实际储能设备而言，总存在

$$c_E E_{rated}=c_P P_{rated} \tag{9}$$

式中，E_{rated}、P_{rated}分别为储能额定功率容量和额定能量容量。

根据表2可知，对任意储能设备，其额定能量容量与额定功率容量之比k恒为定值，即

$$k=\frac{E_{rated}}{P_{rated}}=\frac{c_P}{c_E} \tag{10}$$

根据式（10），按照k值较大的容量修订相对k值较小的容量，对前一节计算所得的储能设备计算容量进行修订，使设备能量容量和功率容量的比值满足恒定。

若

$$c_E E_{rated}>c_P P_{rated}$$

取储能计算能量容量为选型标准，储能计算功率容量需要被修订扩容

$$P'_{ES}=\frac{E_{ES}}{k} \tag{11}$$

若

$$c_E E_{rated}<c_P P_{rated}$$

取储能计算功率容量为选型标准，储能计算能量容量需要被修订扩容

$$E'_{ES}=\frac{P_{ES}}{k} \tag{12}$$

3.3 考虑循环寿命的容量修订

本文所研究风电试验站的设计运行期限为20年，综合考虑表2中的储能设备循环寿命，该电站20年内各储能设备所需更换次数n可由电站运行年限内需要该储能平抑的能量总和除以单位储能设备循环寿命内所能持续消纳或补偿的最大能量计算得到

$$n=\mathrm{ceil}\left(\frac{E_{wind_20}}{E_{ES_life}}\right) \tag{13}$$

式中，ceil表示计算结果向上取整；E_{ES_life}为考虑

SOC和实际参数进行容量修订后，对应频段的储能设备在循环寿命内可消纳或发出的最大能量

$$E_{\mathrm{ES_life}}=E'_{\mathrm{ES}}N \tag{14}$$

式中，N对应表2所给的循环寿命。

$E_{\mathrm{wind_20}}$表示风电场运行期限20年内所需补偿或消纳某频段波动的最大能量，可通过单日内该电站所需补偿或消纳某频段总能量$E_{\mathrm{wind_1}}$计算

$$E_{\mathrm{wind_20}}=20\times365E_{\mathrm{wind_1}} \tag{15}$$

$$E_{\mathrm{wind_1}}=\max\left(\int P_{\mathrm{b+}},\left|\int P_{\mathrm{b-}}\right|\right) \tag{16}$$

式中，$P_{\mathrm{b+}}$为对应频段内计算差额功率中正功率值；$P_{\mathrm{b-}}$为计算差额功率中负功率值。分别积分后得到单日内所需最大充电或放电能量，取较大者作为该日储能设备所需持续充、放电的最大能量。

3.4 混合储能系统成本计算

各配比组合下混合储能系统的总成本可根据考虑SOC、设备参数和循环寿命修订后的储能设备功率容量或能量容量计算求得，本文以能量容量为例进行计算，混合储能系统总成本s可表示为

$$s=\sum_{i=1}^{3}E'_{\mathrm{ES}_i}c_{\mathrm{E}_i}n_i \tag{17}$$

式中，i为各频段储能设备；E'_{ES_i}为经容量修订后的储能额定能量容量；c_{E_i}为该储能对应的单位能量成本；n_i为该储能对应更换次数。

4 算例分析

4.1 混合储能系统设计

为验证所提出的混合储能系统设计方法的有效性，本文针对实际工程算例进行研究，风机输出功率数据采样自美国威斯康辛州某风电试验站，已投入单台风机额定功率为200 kW，取2016年某典型日24 h数据，采样周期为1 min，合计1 440个采样数据。参考《日本东北电力公司风电场接入电网20 min有功功率波动规范》，要求20 min内经混合储能系统平抑后系统目标输出功率波动保持在额定功率的10%内，即20 kW。风机输出功率和计算所得预测电网输入功率如图1所示。

图1中，风机原始输出功率P_{o}如红色实线所

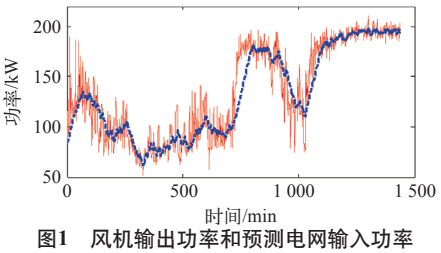

图1 风机输出功率和预测电网输入功率

示，最大功率波动达到78%，含有大量电网无法直接消纳的功率分量。预测电网输入曲线P_{a}如蓝色虚线所示，两者波动趋势大致相同，但P_{a}波动相对平缓，其最大功率波动率仅为10%。

根据风电试验站采样数据，利用FFT将差额功率进行时频变换，如图2所示。从频域对信号的特征进行分析可知，频域下的差额功率具有明显频谱特性，其中低频部分变化缓慢但幅值较大，最大接近8 kW；中频部分变化速度折中，波动功率幅值较低；高频部分波动较快但波动幅值很低，仅为1 kW左右。

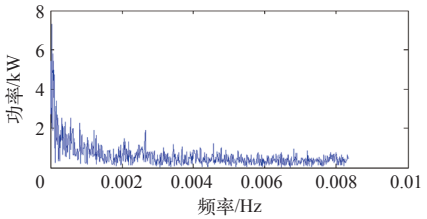

图2 频域差额功率

综合考虑前文提出的储能系统容量修订指标，结合各储能响应频段，计算不同高、低分频点下系统总成本，当两分频点重合且不为零时，或低频分频点等于零时，系统仅含有两种储能设备，当两分频点在0 Hz重合时，系统仅含有一种储能设备。对于相同平抑目标，从全部分频点组合中选取具有代表性的单储能系统、两储能系统和三储能系统，分别对其总成本进行对比，如表3所示。由于三种储能装置中，仅超级电容具有全频段波动响应速度，故仅超级电容器可作为单储能系统储能设备。

由表3可见，所研究的典型的单储能、两储能和三储能系统中，当系统仅含超级电容器单一储能时，成本最高；在低频分频点取0.031 Hz（约32 min）、高频分频点取0.159 Hz（约6 min）时，系统总成本达全部分频点组合中的最低值106.89万元，

此时系统对应的最优高、低分频点互不重合，故对于相同平抑目标，满足系统成本最低的最优混合储能系统中同时含有钠硫电池、锂电池和超级电容器三种储能设备。表3说明了三频段分离配比的系统相对传统的单储能或高、低分频系统具有更好的经济型。在最优组合下，各储能设备所平抑对应频段差额功率Matlab曲线图如图3所示。

表3 储能系统成本对比

个数	储能组合	分割频率(1/60)/Hz	成本/万元
1	超级电容器	0，0	146.39
2	钠硫电池＋超级电容	0.033，0.033	118.28
	锂电池＋超级电容	0，0.2	129.28
3	钠硫电池＋锂电池＋超级电容	0.031，0.159	106.89

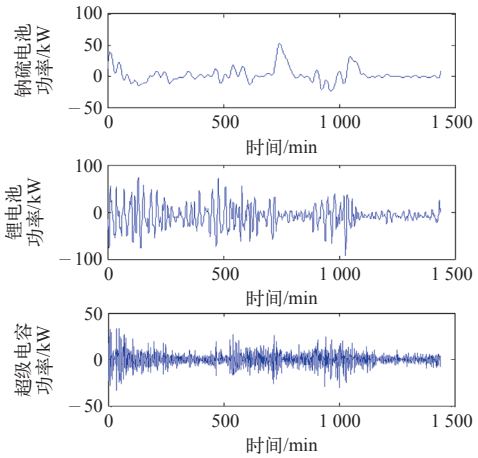

图3 各储能设备所平抑频段差额功率

根据SOC值、实际设备参数对各储能设备计算功率容量和计算能量容量进行修订，修订结果如表4所示。其中，首次建成后的使用期限内，锂电池需更换一次，钠硫电池和超级电容器均无须更换，系统总成本为106.89万元。

表4 混合储能系统容量配比

设备	钠硫电池		锂电池		超级电容	
	P/kW	*E*/kW·h	*P*/kW	*E*/kW·h	*P*/kW	*E*/kW·h
容量	53.24	266.20	92.89	139.34	33.17	1.24

5 结束语

为平抑风电场输出功率波动，提出了一种针对钠硫电池、锂电池和超级电容器三种储能装置共同组成的混合储能系统的配置和配比方法。基于FFT方法对差额功率在频域进行滤波，分别对高频、中频和低频功率的波动特性进行相应的储能配置。综合考虑储能SOC限额、市场实际参数和循环寿命等工程因素，确定满足系统总成本最低的分频点及对应最优混合储能系统中储能设备的数目及容量，与传统单储能或两储能系统进行对比，所提出的高、中和低三储能系统具有更优的经济性。

参考文献

[1] Abedini A，Nikkhajoei H．Dynamic model and control of a wind-turbine generator with energy storage [J]．Renewable Power Generation，2011，5 (1)：67-78．

[2] 蒋平，熊华川．混合储能系统平抑风力发电输出功率波动控制方法设计 [J]．电力系统自动化，2013，37 (1)：122-127．

[3] 刘霞，江全元．风光储混合系统的协调优化控制 [J]．电力系统自动化，2012，36 (14)：96-100．

[4] Makarov Y V，Du P，Kintner-Meyer M C W，et al．Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources [J]．IEEE Transaction on Sustainable Energy，2012，3 (1)：34-40．

[5] 熊雄，王江波，杨仁刚，等．微电网中混合储能模糊自适应控制策略 [J]．电网技术，2015，39 (3)：677-681．

[6] 李龙云．基于功率频率分解的孤立微电网储能容量优化配置 [D]．重庆：重庆大学，2015．

[7] 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．

[8] 李滨，陈姝，韦化．风电场储能容量优化的频谱分析方法 [J]．中国电机工程学报，2015，35 (9)：2128-2134．

[9] Abhishek Pandey，Nicolas H．Younan．傅里叶变换用于地下电缆故障检测 (英文) [J]．高电压技术，2011 (11)：2686-2692．

[10] 张国驹，唐西胜，齐智平．平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计 [J]．电力系统自动化，2011，35 (20)：24-28．

（收稿日期：2017－12－18）EA