

风电场混合储能的小波包-SOC 分区功率控制*

陈科彬,邱晓燕,刘 波

(四川大学电气信息学院 智能电网四川省重点实验室 成都 610065)

摘要:大规模可再生能源并网引起的一系列问题使得储能技术成为未来能源转型的重要依托与突破方向。为减小系统调节压力,采用蓄电池和超级电容组成混合储能以补偿风功率预测误差。利用小波包分解可获取信号更多细节信息的优势,根据混合储能的性能特点和响应速度,确定分解层次并实现混合储能充放电功率的初始分配。考虑实际应用中容量约束,提出荷电状态(SOC)分区功率控制策略对储能的功率指令进行修正,实现充放电功率的优化分配,提高补偿效果。应用结果表明,所提策略能够充分利用混合储能互补的性能优势有效补偿风功率预测误差,同时保证储能的长期稳定运行。

关键词:风力发电;预测误差;混合储能;小波包分解;功率控制

中图分类号: TM72 TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.40

Wavelet packet-SOC partitioned power control of hybrid energy storage for wind farm

Chen Kebin, Qiu Xiaoyan, Liu Bo

(Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The large-scale integration of renewable energy resources makes the energy storage technology the vital support and breakthrough direction of future energy transitions. In order to reduce the pressure of system adjustment, hybrid energy storage (HES) based on battery and super-capacitor is developed to compensate wind power forecast errors. According to the performance characteristics and the response speed of HES, the decomposition level is determined and the initial allocation for charging/discharging power of HES is realized, utilizing the advantage of obtaining more detailed information by wavelet packet decomposition. Considering capacity constraints of HES in practical applications, a SOC partitioned power control strategy is proposed to modify the power instructions of energy storage devices and an optimized power distribution is achieved, improving compensation effect simultaneously. Application results show that the proposed strategy can compensate wind power forecast errors effectively by taking full advantages of complementary superiorities of HES, ensuring the long-term safe and stable operation of energy storage devices.

Keywords: wind power generation; forecast error; hybrid energy storage (HES); wavelet packet decomposition; power control

0 引 言

近年来,全球性的能源危机和环境污染促进了以风电为代表的可再生能源的大力发展,风电装机容量不断提升的同时,其本身所具有的高不确定性和强波动性对电力系统的安全稳定和供电充裕性造成了巨大的冲击和影响^[1-3]。

面对大规模风电并网,电网调度部门普遍采取粗放型、保守型的发电计划制定方法,如:1)受制于调峰难题,被迫削减风电出力,导致大量弃风;2)为应对风电的高不确定性,预留大量常规机组作为备用,其成本高昂效率低下。储能装置由于具有对功率和能量的时间迁移能力,其响应迅速、控制灵活,能实现对不平衡功率的双向调节^[4-5],因此利用储能装置与风电场协调运行已成为解决风电并网难题的重要途径^[6-8]。目前,储能装置造价仍然

较高,如何合理选择储能容量,从而有效平抑风电出力的波动性和预测误差,以实现系统供需平衡是提高风能利用率的关键问题。

目前,国内外在储能装置辅助风电并网控制方面已取得了一些重要的研究成果。文献[9]在风电场配置蓄电池和超级电容器构成的混合储能,同时提出一种双层控制模型,实现风功率波动平抑的目标;文献[10-11]均采用低通滤波算法来确定平抑目标,根据储能荷电状态(state of charge, SOC)即时调整时间常数,改善了平抑效果;文献[12]提出了应用于风电场跟踪短期计划出力的储能运行控制策略;文献[13]构建了储能系统应对风功率预测误差的经济评估模型,结果证明储能系统的经济效益较优;文献[14]提出一种基于频谱分析的储能容量优化方法,根据时效性划分备用需求,但未考虑储能相互间的协调作用;文献[15]采用混合储能将风功率爬坡速率控制与基于滑动平均滤波的波动平抑控制相结合得到了平稳的输出曲线。但是,目前提出的预测误差补偿方法或波动平抑策略较少从功率信号的细节信息和混合储能的具体特性出发。

针对以上方法的不足,本文提出采用小波包方法分解风功率预测误差信号,根据不同类型储能的性能特点确定分解层次和储能内部初始功率分配,从而实现功率信号的自适应分解;同时提出混合储能的SOC分区功率控制策略,以二次修正储能的功率指令,实时调整储能的充放电过程,保证混合储能在SOC安全范围内长期稳定运行。

1 风功率预测误差

风功率预测根据风速、风向等因素的当前信息与历史数据,推测未来的功率变化过程。预测误差的来源主要有气象数据的缺失、天气条件的骤变、数值天气预报的精度较低、采集与处理设施的缺陷、预测模型的不精确等^[16]。尽管业界一直致力于提高风功率预测精度,但现阶段预测误差依然较大,可信度提升困难。风电“全额上网”已成为我国电网运行调度的重要原则,随着风电并网容量的迅速增长,风电场预测功率与实际功率之间的偏差将会对电力系统的安全、稳定运行及电能质量带来严峻挑战。

国家能源局2013年发布的《风电功率预测系统功能规范》^[17]规定风电场的风功率预测系统需向电力调度部门上报预测信息,用于电力系统实时调度,且风功率短期预测的均方根误差(root mean square error, RMSE)应小于20%,超短期预测第4h预测的均方根误差应小于15%,

其中RMSE定义为:

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_{\text{fci}} - P_{\text{windi}}}{C} \right)^2} \quad (1)$$

式中: P_{fci} 为 i 时段的预测功率, P_{windi} 为 i 时段的实际功率, C 为风电开机总容量, N 为样本总数。

2 预测误差的小波包分解与储能功率分配

2.1 储能装置与系统备用频率特性分析

储能装置与系统备用的根本特性在于其响应速度与容量。功率型储能装置如超级电容响应速度快、寿命长但容量小,适用于补偿功率偏差中周期小于1min(频率高于 1.67×10^{-2} Hz)的高频波动。能量型储能装置如蓄电池容量较大但循环寿命短,适用于承担周期在1~60min(频率介于 $2.78 \times 10^{-4} \sim 1.67 \times 10^{-2}$ Hz)的中频分量^[18]。由超级电容和蓄电池构成混合储能可充分利用其互补的性能特点,同时减少蓄电池充放电次数,延长使用寿命。对于周期大于60min(频率低于 2.78×10^{-4} Hz)的低频分量,既可由蓄电池承担,也可由电网中的系统备用容量承担。考虑现有技术条件下,储能装置较为昂贵,要求其完全补偿风功率偏差将导致容量过大,经济性较差。较为合理的方法是采用系统备用吸收周期大于60min的低频分量。补偿设备类型及其响应时间、频率范围如表1所示。当风电场输出功率出现偏差时,应根据其时效性,采用相应频率特性的控制容量,以维持系统供需平衡。

表1 补偿设备类型划分

Table 1 Classification of compensation devices

设备类型	响应时间/min	频率范围/ Hz	备注
超级电容	<1	$> 1.67 \times 10^{-2}$	—
蓄电池	1~60	$2.78 \times 10^{-4} \sim 1.67 \times 10^{-2}$	—
系统备用	>60	$< 2.78 \times 10^{-4}$	可由蓄电池代替

2.2 预测误差的自适应小波包分解

小波包分解是基于小波分析的进一步发展,具有更高的时频分辨率,其克服了小波分析在低频部分时间分辨率低、高频部分频率分辨率低的缺点,将小波分析未细分的高频部分进一步按层分解,得到完整的二叉树结构,并能自适应地选择与被分析信号相匹配的频带,从而获取信号更细节的信息。典型的3层小波包分解树如图1所示。

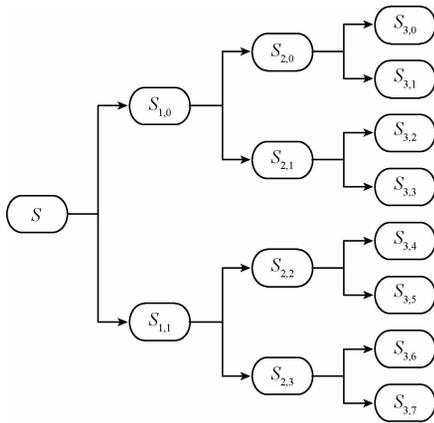


图1 小波包分解树

Fig.1 Wavelet packet decomposition tree

图1中从第2列开始自左向右分别表示对原始信号 S 进行1层、2层、3层分解后得到的子分量。一般地,对原始信号进行 $n(n \geq 1)$ 层小波包分解后,得到低频分量 $S_{n,0}$ 和 $2^n - 1$ 个高频分量 $S_{n,i}(i = 1, 2, 3, \dots, 2^n - 1)$,每个分量的频段带宽如式(2)。

$$f_0 = \frac{f_N}{2^n} = \frac{f_s}{2^{n+1}} \quad (2)$$

式中: f_N 为Nyquist频率, f_s 为采样频率。第1个频段 $S_{n,0}$ 频率范围为 $0 \sim f_0$,第2个频段 $S_{n,1}$ 频率范围为 $f_0 \sim 2f_0$,以此类推。

为了补偿风电场功率预测误差,本文提出一种自适应小波包分解方法。以历史监测数据或典型日采样数据为样本数据,将风电场预测功率和实际功率的偏差作为控制功率需求,进而对其进行小波包分解,根据所选用的储能装置补偿频段,自适应地确定小波包分解层次,基于重构结果可以得到响应风电场功率波动所需的储能容量。如果功率需求超出了储能补偿限额,则超出部分由系统中其他机组提供的备用容量进行补偿。

样本数据的采样频率 f_s 、采样周期 T_s 和采样点数 N 等应根据所研究的实际问题确定。根据采样定理,小波包分解的采样频率必须大于或等于信号最高频率的2倍,即 $f_s \geq 2f_{\max}$ 。且采样周期 T_s 越小,小波包分解的范围越宽,分析结果越精确。本文以国内某48 MW风电场典型日输出功率曲线为样本数据,样本总时长24 h,采样点数 N 为4 320,采样周期 T_s 为20 s,采样频率 f_s 为 5×10^{-2} Hz,满足采样要求。

以风电场的预测功率 P_{fc} 作为调度计划,将其与实际功率 P_{wind} 的偏差作为储能与系统备用的控制功率需求 P_d ,即:

$$P_d = P_{fc} - P_{wind} \quad (3)$$

根据小波基的选择原则^[19],采用db8小波对 P_d 进行 n 层的小波包分解,并重构第 n 层 2^n 个频段的功率分量,得低频分量 $S_{n,0}$ 和 $2^n - 1$ 个高频分量。不断加深分解层数 n ,直到 $S_{n,0}$ 的频率范围上限 f_0 第一次满足设定的系统备用频率范围即 $f_0 < 2.78 \times 10^{-4}$ Hz时停止,即可确定分解层数 n_0 ,同时将 $2^n - 1$ 个高频分量的总和作为混合储能的功率指令,从而实现预测误差的自适应小波包分解。

以本文选取的48 MW风电场预测数据与实际数据为例,其偏差 P_d 经过自适应小波包分解确定的分解层数 $n_0 = 7$,所得系统备用和混合储能功率如图2所示。根据预先设定的系统备用频率范围,所提方法能自适应确定分解层数,当混合储能可补偿的频率范围增大时,系统备用的频率范围将被压缩到更小,分解层数增加,所需系统备用容量将减少。

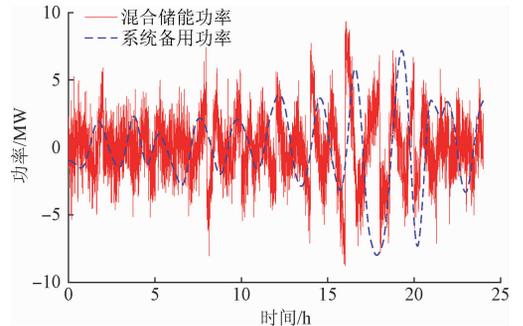


图2 混合储能功率和系统备用功率

Fig.2 Hybrid energy storage power and reserve power

2.3 混合储能内部功率的初始分配

根据能量型和功率型储能互补的性能特点,如何在混合储能内对控制功率需求进行合理分配是整个控制策略的关键所在。相对于小波分析,小波包分解的优势在于对信号的高频部分处理得更加精细,尤其适用于需要提取高频信号的情况。因此本文将功率偏差经小波包分解所得 $2^n - 1$ 个高频分量作为初次分配混合储能内部功率的依据。

根据2.1节,蓄电池和超级电容的组合能充分发挥互补的性能优势,以预先设定的1 min作为两者响应的分界时间,则分界频率为 1.67×10^{-2} Hz,与2.2节中7层小波包分解结果中的 $S_{7,1} \sim S_{7,84}$ 段的次高频分量频率相近,因此可将该部分次高频分量分配给蓄电池作为其功率指令;剩余 $S_{7,85} \sim S_{7,127}$ 段高频分量则分配给超级电容承担。由此得到蓄电池和超级电容功率的初次分配结果为:

$$P_{bat}(t) = P_{7,1}(t) + P_{7,2}(t) + \dots + P_{7,84}(t) \quad (4)$$

$$P_{sc}(t) = P_{7,85}(t) + P_{7,86}(t) + \dots + P_{7,127}(t) \quad (5)$$

式中: $P_{bat}(t)$ 为蓄电池 t 时段功率值, $P_{sc}(t)$ 为超级电容 t 时段功率值; 功率值为正表示放电, 负表示充电, $P_{7,1}(t), P_{7,2}(t), \dots, P_{7,127}(t)$ 等分别对应第 7 层小波包分解所得 $S_{7,1}, S_{7,2}, \dots, S_{7,127}$ 频段信号分量。

图 3 所示为蓄电池和超级电容功率初次分配情况, 可以看出, 由于超级电容有效地吸收了小幅度、短周期的功率波动, 蓄电池则只需承担大幅度、长周期的趋势分量, 从而减少了蓄电池充放电切换次数, 有助于延长循环寿命, 分配结果符合两者的性能特点。此外, 还可根据蓄电池的具体技术参数, 调整蓄电池和超级电容之间的分界时间, 如允许蓄电池有更多的充放电切换次数, 可下调分界时间, 使蓄电池承担更多频段的功率分量; 若要求蓄电池功率曲线更加平滑, 则可上调分界时间, 减少蓄电池平抑的高频段功率分量。

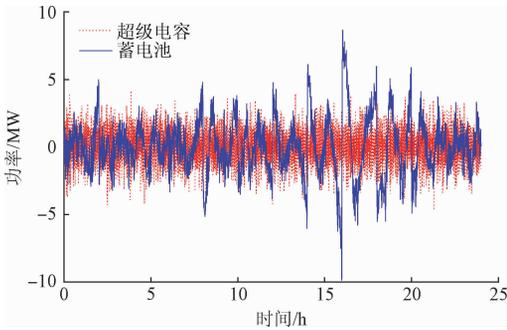


图 3 蓄电池和超级电容功率初始分配

Fig. 3 Primary power of battery and super-capacitor

3 混合储能 SOC 分区功率控制

在第 2 节中, 混合储能功率初始分配仅以蓄电池和超级电容响应速度为依据, 虽然分配结果符合储能装置各自的性能特点, 但要求储能能在所有情况下均能完全平抑功率波动将导致储能容量配置过大, 利用率低, 经济性较差, 如图 3 中 16:00 时刻所出现的超大幅度波动, 若以该曲线指导储能运行则既不经济也不现实。因此在实际应用中, 储能装置配置的容量是有限的。

为了保护储能装置, 防止其过度充、放电, 本文提出 SOC 分区功率控制对储能充放电功率进行修正, 即储能能在接近满充或满放前的一定区间范围内, 对最大充、放电功率阈值进行线性削减, 防止功率突变导致过充、过放现象, 同时减轻储能变流器 (power conversion system, PCS) 的负担。该策略示意图如图 4 所示, 在储能处于低电量区时限制其放电功率, 直到达到 SOC 下限时停止放电; 在储能处于高电量区时限制其充电功率, 直到达到 SOC

上限时停止充电, 从而保护了储能装置和 PCS。另外, 在实际应用当中, 储能电量区间大小的设置可根据具体情况灵活调整。

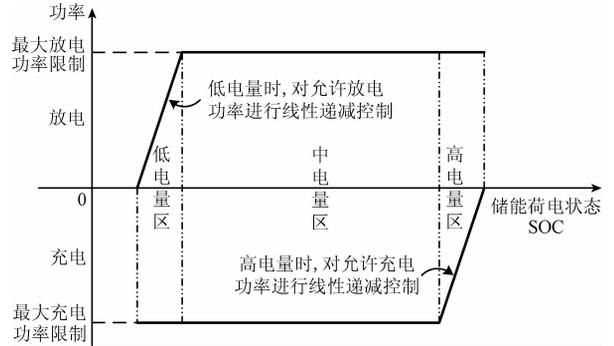


图 4 储能装置 SOC 分区功率控制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of SOC partitioned power control for energy storage device

在加入上述 SOC 分区功率控制后, 可得到完整的控制框图, 如图 5 所示。当实际功率小于预测功率时, 经小波包-SOC 分区功率控制后, 对蓄电池和超级电容下达放电指令; 当实际功率大于预测功率时, 则下达充电指令。

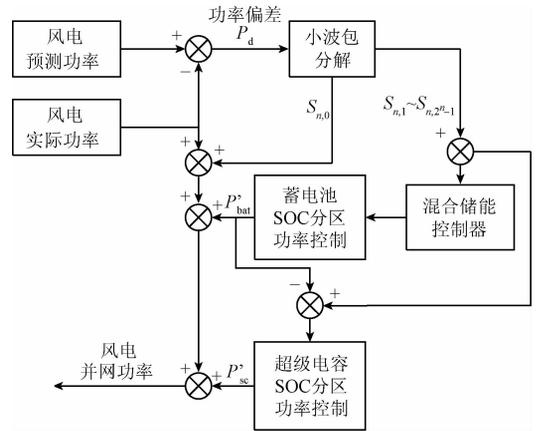


图 5 采用混合储能补偿风功率预测误差的控制框图

Fig. 5 Block diagram of compensating wind power forecast errors using hybrid energy storage

4 应用分析

为验证所提方法的合理性, 本文以国内某风电场 (总装机容量 48 MW) 某个典型日历史数据为例, 研究其储能控制策略。将 1 d 划分成 12 个时段进行日前风功率预测, 并将其作为调度计划值, 风电场的预测功率和实际功率如图 6 所示, 其 RMSE 为 10.893%, 采样周期为 20 s, 采样点数为 4 320。

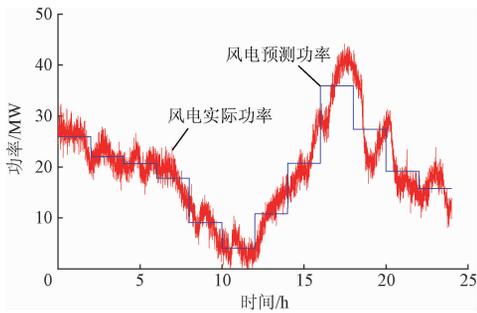


图6 风电场预测功率和实际功率

Fig.6 Wind farm forecasted power and measured power

4.1 储能容量配置

根据图6的预测功率和实际功率数据,得到控制功率需求曲线,如图7所示。利用所提自适应小波包分解方法对其进行循环加深分解,当最低频段频率满足系统备用设定频率时,得到分解层数为7。经重构后得到混合储能与系统备用功率曲线,如2.2节中图2所示。以1 min作为蓄电池和超级电容响应的分界时间,分别承担分解结果中的次高频和低频功率分量,得到蓄电池和超级电容功率的初始分配结果,如2.3节中图3所示。

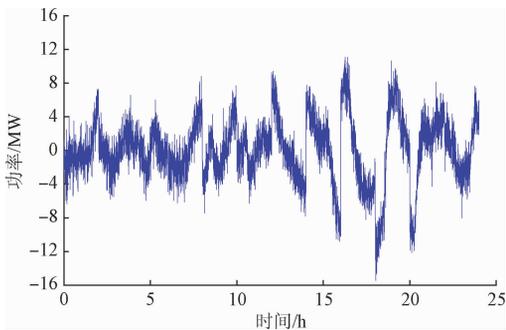


图7 风电场控制功率需求曲线

Fig.7 Wind farm control power required curve

基于以上分析结果,以经济性为原则,根据文献[20]中的储能容量计算公式可确定风电场混合储能容量配置情况,结果如表2所示,表2中还列出了混合储能的相关运行参数。

表2 混合储能容量配置和运行参数

Table 2 Capacity and parameters of hybrid energy storage

参数类型	蓄电池	超级电容
额定功率/MW	8	5
额定容量/(MW·h)	4	0.2
SOC 允许范围/%	30~90	25~95
初始 SOC/%	60	60
自放电率/(%·min ⁻¹)	0.01	0
充放电效率/%	90	95

4.2 混合储能 SOC 分区功率控制的影响

采用 SOC 分区功率控制对混合储能充放电进行 2 次修正,其中储能电量区间设置如表 3 所示,修正得到的混合储能功率指令和 SOC 变化曲线分别如图 8 和 9 所示。图 8 中,功率取正值时表示放电;功率取负值时表示充电。

表3 混合储能电量区间设置

Table 3 Capacity partition settings of hybrid energy storage (%)

储能类型	低电量区	中电量区	高电量区
蓄电池	30~40	40~80	80~90
超级电容	25~40	40~80	80~95

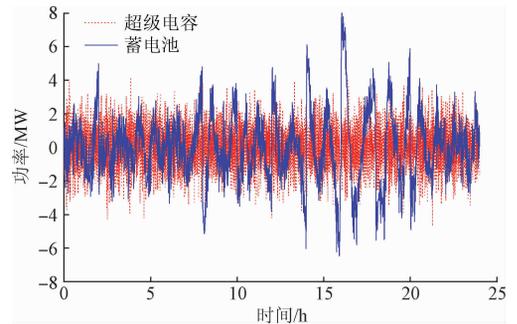


图8 优化后混合储能功率指令

Fig.8 Hybrid energy storage power instructions after optimization

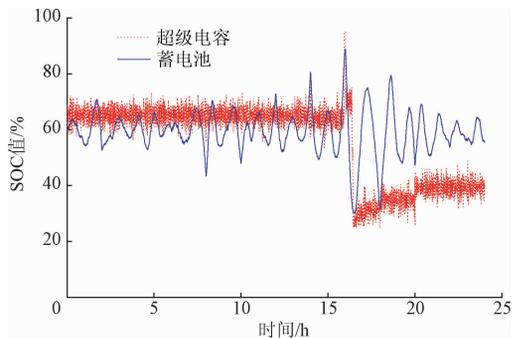


图9 优化后混合储能 SOC 变化曲线

Fig.9 Hybrid energy storage SOC curves after optimization

从图8的功率指令可以看出,蓄电池承担了功率需求中的低频分量,而超级电容承担了高频波动分量,充分发挥了其快速充放电切换能力,改善了蓄电池输出,有利于延长蓄电池循环寿命。从图9的储能 SOC 变化曲线可以看出,由于采用了 SOC 分区功率控制,蓄电池和超级电容的剩余电量均被有效控制在安全范围内,没有出现过充或过放现象。此外,由于蓄电池容量有限,部分时刻蓄电池已达到满充,此时若有充电需求,该控制策略会将充电需求转移到超级电容上;同样,当蓄电池已达到满

放时,则将放电需求转移到超级电容,充分利用超级电容快速功率吞吐能力,提高储能利用率。

4.3 风功率预测误差补偿效果评估

图 10 所示为经过补偿后的风电并网功率,可以看出,经过补偿后,风电并网功率与日前预测功率基本吻合,除了少数几个时刻由于储能容量有限而未能较好补偿外,几乎实现了风电场完全按照预测功率输出, RMSE 仅为 0.652%,从而减小了风电场输出的不可预知性,使风电场也能像常规电源一样接受调度安排,提高了风电的利用率。

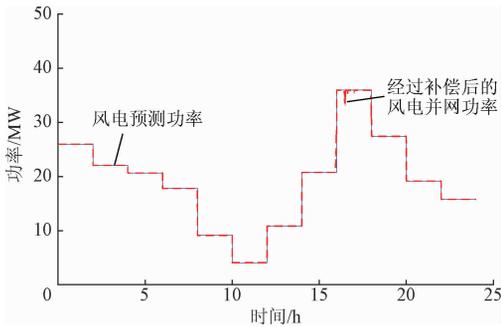


图 10 经过补偿后的风电并网功率

Fig. 10 Grid-connected wind power after compensation

4.4 不同控制策略的补偿效果对比

图 11 对比了在混合储能功率分配当中,采用小波包分解或低通滤波分解,以及是否采用 SOC 分区功率控制对预测误差补偿效果的影响。每种方法所配置的储能容量均相同,如 4.1 节中表 2 所示,其中低通滤波采用 $T = 60$ 的普通低通滤波算法^[11]分解功率分量给蓄电池和超级电容。由图 11 可知,未补偿时, RMSE 较大,风功率难以直接利用;无 SOC 分区功率控制时,经低通滤波和小波包分解方法补偿后,误差有了一定改善,但仍有较大波动,主要原因是储能装置突然达到满充或满放时,无有效应对容量;对储能装置采用 SOC 分区功率控制后,两种分解方法的补偿效果均得到进一步改善,尤其是采用小波包-SOC 分区功率控制,补偿效果最佳, RMSE 只有 0.652%。

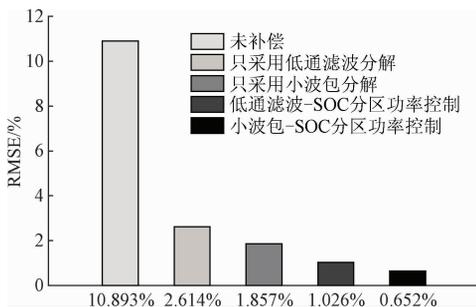


图 11 不同控制方法的补偿效果

Fig. 11 Compensation results of different control methods

4.5 补偿频段改变对容量配置的影响

以上讨论均是以混合储能预先设定的补偿频段为依据,如需进一步提高可靠性,可将系统备用承担的频段加入到蓄电池中,此时蓄电池承担周期在 1 min 及以上(频率低于或等于 1.67×10^{-2} Hz)的功率波动,超级电容仍然用于平抑周期在 1 min 以下(频率高于 1.67×10^{-2} Hz)的高频波动。该场景下经计算,蓄电池额定功率增至 13 MW,额定容量增至 17 MW · h;超级电容配置不变,额定功率为 5 MW,额定容量为 0.2 MW · h。由此可见,蓄电池所需配置容量较大,但减小了系统备用的负担,进一步提高了电网对风电的消纳能力。

5 结 论

综合分析风功率预测误差和不同类型储能装置的特性,采用小波包分解方法,自适应地确定分解层次和混合储能功率指令,并根据蓄电池和超级电容的分界频率确定储能初始功率分配,以延长蓄电池循环寿命。

通过对蓄电池和超级电容的剩余电量进行高、中、低电量分区,采用 SOC 分区功率控制对混合储能功率分配进行二次修正。以有限的储能容量最大化地补偿风功率预测误差,同时避免储能装置发生过充、过放现象。

应用分析表明,本文控制策略对风功率预测误差的补偿效果较为明显, RMSE 由补偿前的 10.893% 降为补偿后的 0.652%,效果优于低通滤波方法,从而有效地减小了风电场输出的不可预知性,提高了电网对风电的接纳能力,具有一定的实际意义和工程应用前景。

参考文献

[1] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的评述 [J].中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.
XUE Y SH, LEI X, XUE F, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.

[2] 曲正伟,张坤,王云静,等.基于小波-原子分解的超短期风电出力预测模型 [J].仪器仪表学报,2016,37(10):2251-2258.
QU ZH W, ZHANG K, WANG Y J, et al. Ultra short-term wind power output forecast model based on wavelet decomposition and atomic decomposition [J]. China Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10): 2251-2258.

- [3] 邱晓燕,夏莉丽,李兴源. 智能电网建设中分布式电源的规划 [J]. 电网技术,2010,34(4):7-10.
 QIU X Y, XIA L L, LI X Y. Planning of distributed generation in construction of smart grid [J]. Power System Technology,2010,34(4):7-10.
- [4] 刘波,邱晓燕. 主动配电网储能优化规划 [J]. 仪器仪表学报,2016,37(5):1180-1186.
 LIU B, QIU X Y. Optimized energy storage planning of active distribution network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2016,37(5):1180-1186.
- [5] 余岳,粟梅,孙尧,等. 计及电动汽车的微电网储能单元容量优化 [J]. 仪器仪表学报,2014,35(6):1261-1268.
 YU Y, SU M, SUN Y, et al. Capacity optimization of energy storage unit in microgrid considering electric vehicle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2014,35(6):1261-1268.
- [6] KANG CH Q, CH X Y, YU Q Y, et al. Balance of power: toward a more environmentally friendly, efficient, and effective integration of energy systems in China [J]. IEEE Power & Energy Magazine,2013,11(5):56-64.
- [7] TED K A, BREKKEN A Y, ANNETTE V J, et al. Optimal energy storage sizing and control for wind power applications [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2011,2(1):69-77.
- [8] 袁小明,程时杰,文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析 [J]. 电力系统自动化,2013,37(1):14-18.
 YUAN X M, CH SH J, WEN J Y. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):14-18.
- [9] 于芃,周玮,孙辉,等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计 [J]. 中国电机工程学报,2011,31(17):127-133.
 YU P, ZHOU W, SUN H, et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(17):127-133.
- [10] 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 M, LIN G D, CHEN Z N, et al. A control strategy for hybrid energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(7):1-6.
- [11] 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.
- [12] LI Q, CHOI S S, YUAN Y, et al. On the determination of battery energy storage capacity and short-term power dispatch of a wind farm [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2011,2(2):148-158.
- [13] 严干贵,刘嘉,崔杨,等. 利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):45-52.
 YAN G G, LIU J, CUI Y, et al. Economic evaluation of improving the wind power scheduling scale by energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):45-52.
- [14] 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.
 LI B, CHEN SH, WEI H. Optimization of energy storage capacity based on spectral analysis for wind farm [J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(9):2128-2134.
- [15] ESMAILI A, NOVAKOVIC B, NASIRI A, et al. A hybrid system of li-ion capacitors and flow battery for dynamic wind energy support [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2013,49(4):1649-1657.
- [16] 薛禹胜,郁琛,赵俊华,等. 关于短期及超短期风电功率预测的评述 [J]. 电力系统自动化,2015,39(6):141-151.
 XUE Y SH, YU CH, ZHAO J H, et al. A review on short-term and ultra-short-term wind power prediction [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(6):141-151.
- [17] 国家能源局. NB/T 31046-2013 风电功率预测系统功能规范 [S]. 北京:中国电力出版社,2013.
 National Energy Administration. NB/T 31046-2013 Function specification of wind power forecasting system [S]. Beijing:China Electric Power Press,2013.
- [18] 田崇翼,张承慧,李珂,等. 含压缩空气储能的微网复合储能技术及其成本分析 [J]. 电力系统自动化,2015,39(10):36-41.
 TIAN CH Y, ZHANG CH H, LI K, et al. Composite energy storage technology with compressed air energy storage in microgrid and its cost analysis [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(10):36-41.
- [19] 何正友,钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则 [J]. 电力系统自动化,2003,27(10):45-48.

HE ZH Y, QIAN Q Q. Mother wavelet option method in the transient signal analysis of electric power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10):45-48.

- [20] 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 CH SH, YU B, XIAO J, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):1-8.

作者简介



陈科彬 (通讯作者), 2013 年于四川大学获得学士学位, 现为四川大学硕士研究生, 主要研究方向为新能源并网技术、储能技术在电力系统中的应用。

E-mail: ckbwise@163.com

Chen Kebin (Corresponding author) received

his B. Sc. degree from Sichuan University in 2013. Now he is a M. Sc. candidate in Sichuan University. His main research interests include new energy grid-connection technology and energy storage technology in power systems.



邱晓燕, 分别在 1986 年、1989 年和 2008 年于四川大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为四川大学教授, 主要研究方向为电力系统分析计算及稳定控制、新能源并网技术、分布式电源及微电网技术等。

E-mail: cd_qxy@sina.com

Qiu Xiaoyan received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Sichuan University in 1986, 1989 and 2008, respectively. Now she is a professor in Sichuan University. Her main research interests include power system analysis & calculation and stability control, new energy grid-connection technology, distributed power generator and micro-grid technology, and etc.