

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.2.224

中图分类号: TM71

文献标志码: A

基于自适应小波变换与 HHT 的 混合储能容量配置

唐 杰, 姜有华

(邵阳学院多电源地区电网运行与控制湖南省重点实验室, 邵阳 422000)

摘要: 混合储能系统能有效缓解风电输出功率强波动性与随机性造成电网频率不稳定问题。本文以蓄电池和超级电容组成的混合储能系统为研究对象, 提出了一种混合储能容量配置方法。该方法首先采用自适应小波变换对风电输出功率进行功率一次分配, 得到满足条件的并网功率和储能功率。然后采用 HHT 变换对储能功率进行分解, 得到一系列波动功率分量以及各分量的瞬时频率。再根据瞬时频率确定分界频率, 将高于分界频率的功率分量分配给超级电容, 剩余的功率分量分配给蓄电池。最后根据蓄电池与超级电容各自的储能功率, 对储能系统的额定容量与额定功率进行配置。该仿真结果表明, 本文采用自适应小波变换与 HHT 变换能够有效地将风电输出功率进行分解, 实现风电输出功率的平抑与混合储能系统的容量与功率配置。

关键词: 混合储能; 自适应小波变换; HHT 变换; 容量配置

Hybrid Energy Storage Capacity Allocation Based on Adaptive Wavelet Transform and HHT

TANG Jie, JIANG Youhua

(Key Laboratory of Hunan Province for Power Grid Operation and Control in Multi-source Areas, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China)

Abstract: The hybrid energy storage system can effectively alleviate the frequency instability caused by the strong fluctuation and randomness of wind power output. In this paper, a hybrid energy storage system composed of batteries and super capacitors is taken as the research object, and a hybrid energy storage capacity allocation method is proposed. First, adaptive wavelet transform is adopted to perform a primary distribution of the wind power output, and the grid-connected power and energy storage power satisfying the requirements are obtained. Second, HHT transform is used to decompose the energy storage power, and a series of fluctuating power components and the instantaneous frequency of each component are obtained. Third, the cutoff frequency is determined according to the instantaneous frequency, the power components with a frequency higher than the cutoff frequency are allocated to super capacitors, and the rest are allocated to batteries. Finally, the rated capacity and rated power of the energy storage system are configured according to the energy storage power of batteries and super capacitors, respectively. Simulation results show that adaptive wavelet transform and HHT transform can effectively decompose the wind power output, thus realizing the stabilization of wind power output, as well as the capacity and power allocation of hybrid energy storage system.

Keywords: Hybrid energy storage; adaptive wavelet transform; HHT transform; capacity configuration

为应对能源危机与环境污染, 新能源发电得到了世界各国的重视。风能以其储量大、分布广的优

点在能源结构中占有及其重要的位置^[1]。由于风电出力具有强波动性和随机性的特点, 大规模风电直接并网, 会对电网频率的稳定性造成极大的影响^[2-3]。目前, 采用蓄电池/超级电容组成的混合储能系统是解决这一问题的有效措施之一, 合理配置蓄电池与超级电容的容量与功率是保证其使用寿命、效率

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-07-19; 录用日期: 2021-08-02; 网络首发日期: 2022-02-15

基金项目: 湖南省教育厅重点资助项目(19A447)

This work is supported by Key Funded Project of Hunan Provincial Department of Education under the grant 19A447

以及电力系统安全运行的重要依据^[4-6]。

国内外研究学者针对蓄电池与超级电容组成的混合储能系统的容量配置问题的研究已取得了大量的成果。文献[7]基于滑动平均和小波包分解进行混合储能的优化配置,但是不能确定经小波分解后各子信号的频率成分,不能准确地将分解的功率分配给储能设备;文献[8-9]采用一阶低通滤波器对风电波动功率进行分解,但是在滤波过程中存在延迟,降低了容量配置的准确性;文献[10-11]采用离散傅里叶变换对风电输出功率进行分解,但是分解过程计算量巨大,不适合直接对风电输出功率进行分解。

针对上述问题,本文提出了基于自适应小波变换与 HHT 结合的混合储能容量配置方法。该方法首先采用自适应小波变换对风电输出功率进行一次分配,得到满足条件的并网功率和储能功率;然后采用 HHT 变换对储能功率进行分解,得到一系列波动功率分量以及各分量的瞬时频率;再根据瞬时频率确定分界频率,将高于分界频率的功率分量分配给超级电容,剩余的功率分量分配给蓄电池;最后根据蓄电池与超级电容各自的储能功率,得到混合储能的容量配置与功率配置。

1 风力发电系统组成及能量流动

风力发电系统结构图如图 1 所示,由风电场、蓄电池、超级电容、DC/DC 与 DC/AC 变换器组成。风电场采用双馈异步发电机组,机组出力直接接入交流母线。超级电容和蓄电池组成的储能系统先经过 DC/DC 变换器与直流母线相连,再经过 DC/AC 变换器与交流母线相连。

图 1 中, $P_w(t)$ 为风电原始输出功率; $P_{Grid}(t)$ 为满足并网条件的并网功率; $P_{Hess}(t)$ 为平抑风电波动功率时储能系统吸收或者补偿的总功率; $P_{Sc}(t)$ 为超级电容吸收或者补偿的功率; $P_b(t)$ 为超级电容吸收或者补偿的功率。

根据图 1 的能量流动,可以得出关系

$$P_w(t) = P_{Grid}(t) + P_{Hess}(t) \quad (1)$$

$$P_{Hess}(t) = P_b(t) + P_{Sc}(t) \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,利用蓄电池与超级电容组成的混合储能系统可以实现风电输出功率平抑的目的。

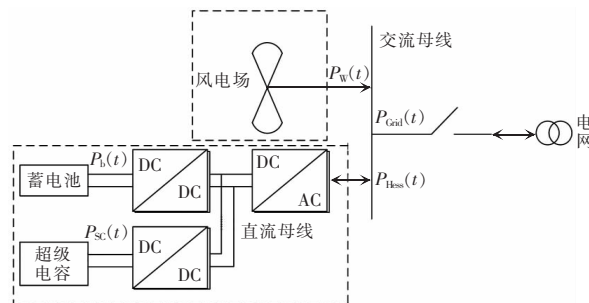


图 1 风力发电系统结构

Fig. 1 Structure of wind power generation system

2 基于自适应小波变换与 HHT 变换的风电输出功率分配

2.1 自适应小波变换对风电输出功率一次分配

针对风电场输出功率直接并入电网存在的功率波动问题,国家标准规定了在风电场正常运行的情况下,风电输出功率变化在不同时间尺度下的最大限值,主要包括 1 min 时间尺度下的风电输出功率的最大限值和 10 min 时间尺度下的风电输出功率最大限值,如表 1 所示。

表 1 风电场有功功率变化的最大限值

Tab. 1 Maximum limit of active power variation of wind farm

风电场装机容量/ MW	10 min 有功功率 变化的最大限值/ MW	1 min 有功功率 变化的最大限值/ MW
<30	10	3
30~150	装机容量的 1/3	装机容量的 1/10
>150	50	15

本文以某风电场为研究对象,该风电场装机容量 P_w 为 40 MW,通过调节参数,得到采样时间 Δt 为 5 s,采样的总时间为 500 min 的风电输出功率曲线。根据表 1 建立风电输出功率接入电网时允许功率变动的范围指标,设时刻经过混合储能系统平抑后接入电网功率为 $P(t)$,则在时间尺度为 1 min 时,风电

并网功率允许波动的范围是 $[P_{1,\min}(t), P_{1,\max}(t)]$, 计算公式为

$$P_{1,\min}(t) = \max_{i=1,2,\dots,12} P[t-(i-1)\Delta t] - \frac{1}{10} P_W \quad (3)$$

$$P_{1,\max}(t) = \min_{i=1,2,\dots,12} P[t-(i-1)\Delta t] + \frac{1}{10} P_W \quad (4)$$

在时间尺度为 10 min 时, 风电并网功率允许波动的范围为 $[P_{10,\min}(t), P_{10,\max}(t)]$, 计算公式为

$$P_{10,\min}(t) = \max_{i=1,2,\dots,120} P[t-(i-1)\Delta t] - \frac{1}{3} P_W \quad (5)$$

$$P_{10,\max}(t) = \min_{i=1,2,\dots,120} P[t-(i-1)\Delta t] + \frac{1}{3} P_W \quad (6)$$

将 1 min 时间尺度下与 10 min 时间尺度下的风电并网功率允许波动的范围进行合并, 得到在任意时刻 t 风电并网功率 $P(t)$ 区间范围为

$$P(t) \in [P_{1,\min}(t), P_{1,\max}(t)] \cap [P_{10,\min}(t), P_{10,\max}(t)] \quad (7)$$

首先, 利用并网条件对风电输出功率 $P_W(t)$ 进行判断; 如果任意时刻的功率满足并网条件, 则将风电输出功率 $P_W(t)$ 直接并网; 如果存在某些时刻的功率不满足并网条件, 则对风电输出功率 $P_W(t)$ 采用 db5 小波进行 $n \in (1, 2, \dots)$ 层小波分解。对分解后的低频部分再次进行判断, 当所得到的低频部分功率任意时刻满足并网条件, 就停止分解, 得到并网功率 P_{Grid} ; 如果得到低频部分存在某些时刻的功率不满足并网条件, 则重复上述操作, 直到得到满足并网条件的并网功率。

风电输出功率自适应小波分解的控制流程图如图 2 所示。

通过计算得到混合储能吸收或者补偿的总功率 $P_{\text{Hess}}(t)$ 为

$$P_{\text{Hess}}(t) = P_W(t) - P_{\text{Grid}}(t) \quad (8)$$

经过上述计算, 实现了风电输出功率的自适应小波分解。

2.2 HHT 变换对风电输出功率二次分配

论文采用 HHT 变换中的经验模态分解与希尔伯特(Hilbert)变换对风电输出功率进行二次分配。

2.2.1 对储能功率($P_{\text{Hess}}(t)$)进行 EMD 分解

经验模态分解 EMD(empirical mode decompo-

sition) 是一种将原始信号进行分解后得到不同频率范围的本征模态分量 IMF(intrinsic mode function), 并且得到的 IMF 分量频率是由高到低依次排列的, 可表示为

$$x(t) = \sum I_{\text{IMFi}}(t) + r(t) \quad (9)$$

式中: $x(t)$ 为原始信号; $r(t)$ 为残差; $I_{\text{IMFi}}(t)$ 为第 i 个本征模态分量。

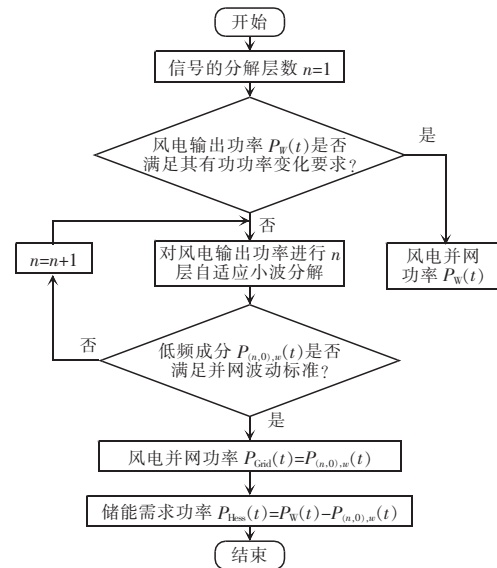


图 2 自适应小波分解的控制流程

Fig. 2 Flow chart of control of adaptive wavelet decomposition

2.2.2 对 EMD 分解得到的 IMF 分量进行希尔伯特变换

为了得到经 EMD 分解后各个 IMF 分量的瞬时频率和瞬时幅值, 以便确定储能功率的分界频率。将经 EMD 分解得到的 IMF 分量与 $1/\pi t$ 做卷积, 这实际上是一个使相位滞后 90° 的全通移相过程。这样就可以得到每个分量的瞬时频率、瞬时幅值。即 IMF 分量进行希尔伯特变换

$$H[x_i(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x_i(\tau) \frac{1}{t-\tau} d\tau \quad (10)$$

式中, $x_i(t)$ 为储能功率信号经 EMD 分解后的第 i 个分量的表达式。

将 IMF 分量 $x_i(t)$ 与经过 Hilbert 变换后的 $H[x_i(t)]$ 组成解析信号, 有

$$z(t) = x(t) + iH[x(t)] = a(t)e^{i\varphi(t)} \quad (11)$$

式中:

$$a(t) = \sqrt{x(t)^2 + H[x(t)]^2} \quad (12)$$

$$\varphi(t) = \arctan \frac{H[x(t)]}{x(t)} \quad (13)$$

式中: $\varphi(t)$ 为瞬时相位; $a(t)$ 为瞬时幅值。

由瞬时相位可以求得某个分量的瞬时频率 $f(t)$,
计算公式为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (14)$$

3 混合储能系统容量/功率配置计算方法

将风电输出功率经过一次分配和二次分配,可以得到蓄电池/超级电容各自需要吸收或者补偿的功率,依据该功率的实际情况对蓄电池与超级电容的额定容量与额定功率进行计算。

3.1 蓄电池与超级电容的额定容量确定

根据蓄电池与超级电容各自吸收或者补偿的功率,计算初始时刻到时刻需要吸收或者补偿的功率 $\Delta E(t)$ 。当 $\Delta E(t)$ 大于0时,表示储能设备吸收功率;当 $\Delta E(t)$ 小于0时,表示蓄能设备对风电并网系统进行功率补偿。 $\Delta E(t)$ 的计算公式为

$$\Delta E_b(t) = \int_0^t \left(P_b^+(t) \eta_{b,充} + \frac{P_b^-(t)}{\eta_{b,放}} \right) dt \quad (15)$$

$$\Delta E_{sc}(t) = \int_0^t \left(P_{sc}^+(t) \eta_{sc,充} + \frac{P_{sc}^-(t)}{\eta_{sc,放}} \right) dt \quad (16)$$

式中: $P_b^+(t)$ 、 $P_{sc}^+(t)$ 为在时刻 t 时的蓄电池与超级电容各自的充电功率; $P_b^-(t)$ 、 $P_{sc}^-(t)$ 为在时刻 t 时的蓄电池与超级电容各自的放电功率; $\eta_{b,充}$ 、 $\eta_{sc,放}$ 为蓄电池的充放电效率; $\eta_{sc,充}$ 、 $\eta_{b,放}$ 为超级电容的充放电效率。

对在时间段 $0 \sim t$ 内对 $\Delta E_b(t)$ 、 $\Delta E_{sc}(t)$ 取绝对值,然后将 $\Delta E_b(t)$ 、 $\Delta E_{sc}(t)$ 取绝对值后的最大值作为蓄电池与超级电容的额定容量,即

$$E_{b,rate} = \max_0^t (|\Delta E_b(0)|, \dots, |\Delta E_b(t)|) \quad (17)$$

$$E_{sc,rate} = \max_0^t (|\Delta E_{sc}(0)|, \dots, |\Delta E_{sc}(t)|) \quad (18)$$

3.2 蓄电池与超级电容的额定功率确定

设蓄电池与超级电容得额定功率分别为 $P_{b,rate}$ 、

$P_{sc,rate}$,考虑蓄电池与超级电容的充放电效率,则蓄电池与超级电容的额定功率配置可表示为

$$P_{b,rate} = \max \left\{ \max_{t \in (t_0, t_0+T)} |P(t)| \eta_{b,充}, \frac{\max_{t \in (t_0, t_0+T)} |P(t)|}{\eta_{b,放}} \right\} \quad (19)$$

$$P_{sc,rate} = \max \left\{ \max_{t \in (t_0, t_0+T)} |P(t)| \eta_{sc,充}, \frac{\max_{t \in (t_0, t_0+T)} |P(t)|}{\eta_{sc,放}} \right\} \quad (20)$$

式中: t_0 为初始时刻; $\eta_{sc,充}$ 、 $\eta_{sc,放}$ 为超级电容的充放电效率; $\eta_{b,充}$ 、 $\eta_{b,放}$ 为蓄电池的充放电效率。

4 仿真与结果分析

为了验证本文所提方法在风电输出功率平抑和储能系统容量配置的正确性与有效性,在MATLAB2017a环境中建立仿真模型。

4.1 大仿真参数设计

选取某风电场的历史数据作为仿真数据。该风电场的装机容量为40 MW,采样总时间为500 min,采样频率为5 s,得到该时间段的风电输出功率如图3所示。从图3可以看出,原始的风电输出功率存在较大的波动,若直接并网,会对电力系统的稳定及安全产生影响。

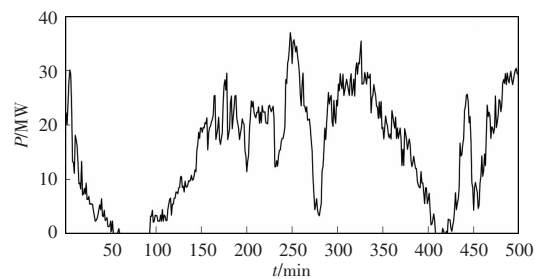


图3 风电输出功率曲线

Fig. 3 Wind power output curve

4.2 风电输出功率分配方法验证

4.2.1 自适应小波变换分解

首先利用自适应小波变换对图3中的风电输出功率进行分解,得到满足条件的并网功率和总的储能功率,分解结果如图4所示。根据式(1)计算可以得到混合储能系统吸收或者补偿的功率,如图5所示。

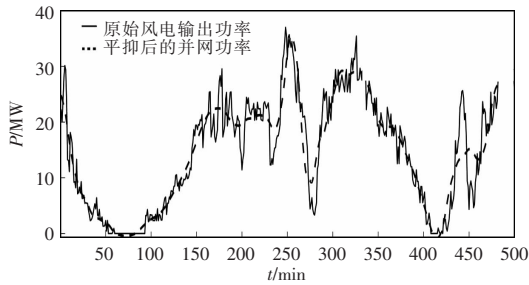


图 4 风电并网功率与原始风电输出功率

Fig. 4 Grid-connected wind power and original wind power output

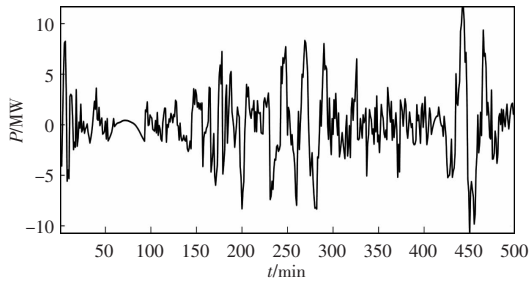


图 5 混合储能吸收/补偿的总功率

Fig. 5 Total absorption and compensation power of hybrid energy storage

由图 4 通过计算得到在 10 min 尺度下风电输出功率平抑前后的功率变化值,如图 6 所示。

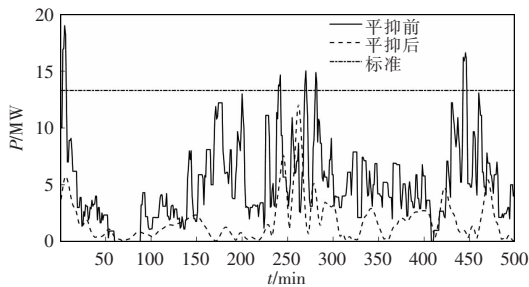


图 6 10 min 尺度下风电输出功率平抑前后的变化值

Fig. 6 Variation in wind power output before and after stabilization at 10 min scale

根据表 1 可知,在风电场装机容量为 40 MW 时,在 10 min 时间尺度下允许的最大功率变化值为 13.3 MW,超过这个指标,风力发电并网系统就会受到干扰,造成不良的影响。由图 6 可知,平抑前的原始风电输出功率存在多个时段的功率变化值大于 13.3 MW,不满足并网条件。平抑后,各时段的功率变化值均小于 13.3 MW,满足 10 min 尺度下的国家并网条件。

由图 3 通过计算得到 1 min 尺度下风电输出功率变化值,如图 7 所示。

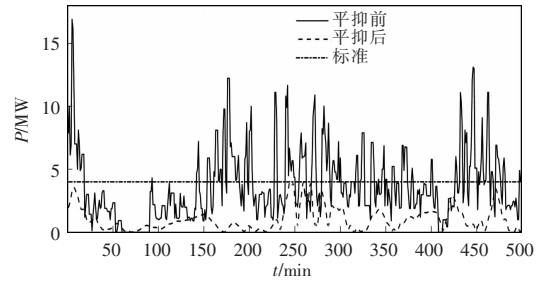


图 7 1 min 尺度下风电输出功率平抑前后的变化值

Fig. 7 Variation in wind power output before and after stabilization at 1 min scale

根据表 1 可知,在风电场装机容量为 40 MW 时,在 1 min 时间尺度下允许的最大功率变化值为 4 MW,超过这个指标,风力发电并网系统就会受到干扰,造成不良的影响。由图 7 可知,平抑前,原始风电输出功率存在多个时段的功率变化值大于 4 MW,不满足并网条件。平抑后,各时段的功率变化值均小于 4 MW,满足 1 min 尺度下的国家并网条件。

综上所述,经过平抑后的风电功率在 1 min 和 10 min 尺度下的风电功率变化值都在国家规定的变化值以下,符合并网条件。

4.2.2 HHT 变换分解

将图 5 中混合储能吸收/补偿的总功率进行 EMD 分解,得到一系列的本征模态分量 IMF 和残余分量,如图 8 所示。对图 8 中的经验模态分量 IMF 进行 HHT 变换,得到每个 IMF 的瞬时频率,分析结果如图 9 所示。

选取部分 IMF 分量的瞬时频率,如图 10 所示。

由图 9 可知,两两相邻的 IMF_i 和 IMF_{i+1} 分量总存在频率混叠的现象,会造成正负功率相抵消,使得蓄电池/超级电容的容量与功率配置产生误差。为了解决这个问题,选取频率混叠最少的分量作为分界频率,以避免正负功率抵消的不良影响。由图 10 可知,IMF3 与 IMF4 两个分量之间的频率混叠最少,因此取 $i=3$ 作为频率的分界点。然后将高于分界点的储能功率分配给超级电容,低于分界点的储能功率分配给蓄电池,分配结果如图 11 和图 12 所示。

蓄电池和超级电容各自吸收/补偿的功率如图 11 和图 12 所示,由于蓄电池与超级电容的充放电是双向的,取各自绝对值的最大值,可知赋予蓄电池的额定功率为 1.87 MW,超级电容的额定功率为 12.18 MW。同时根据式(15)、式(16)、式(17)、

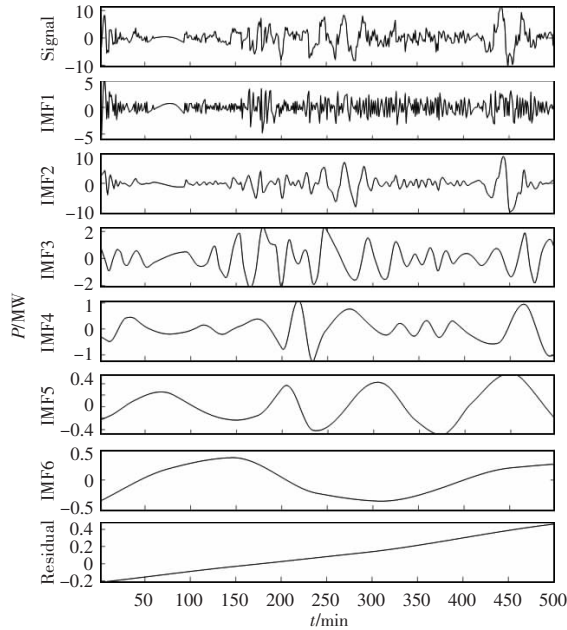


图 8 总的储能功率 EMD 分解结果

Fig. 8 EMD decomposition results of total energy storage power

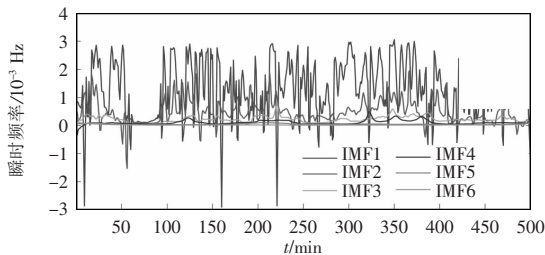


图 9 各 IMF 分量的瞬时频率

Fig. 9 Instantaneous frequency of each IMF component

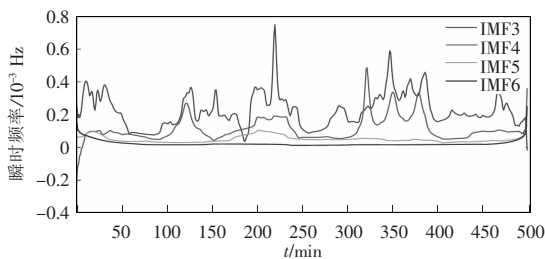


图 10 部分 IMF 分量的瞬时频率

Fig. 10 Instantaneous frequency of some IMF components

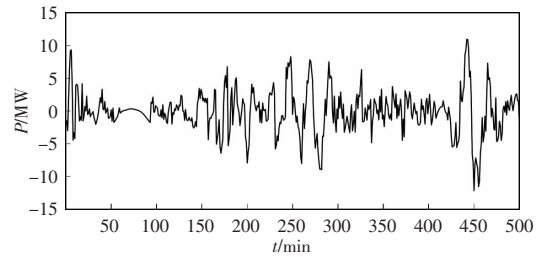


图 11 超级电容吸收/补偿的功率

Fig. 11 Absorption/compensation power of super capacitors

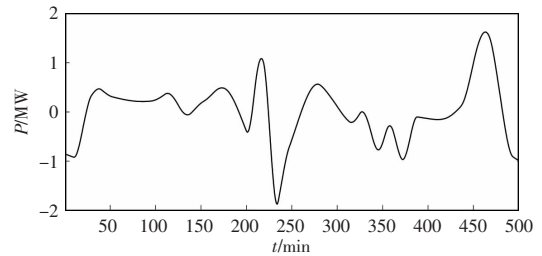


图 12 蓄电池吸收/补偿的功率

Fig. 12 Absorption/compensation power of batteries

式(18)计算得到,并除去极大个别毛粗信号点,蓄电池的额定容量为 37.11 MWh,超级电容的额定容量为 66.6 MWh。

5 结论

本文通过采用自适应小波变换与 HHT 对风电输出功率进行处理,得到满足条件的并网功率和超级电容与电池各自吸收或者补偿的功率,然后根据各自吸收或补偿的功率确定蓄电池与超级电容的额定容量。结论如下。

(1)本文方法与傅里叶变换相比,优势在于本文方法信号分解从频域扩展到了时频域;与小波包分解相比,本文方法不需要确定各分量的频率成分,且无需主观设定小波基函数与最优分解层数;与低通滤波相比,本文方法能够自适应调整时间尺度。

(2)以装机容量为 40 MW 的风电场并网为例,联合蓄电池与超级电容组成的混合储能系统,在满足并网条件下的容量配置分别为 37.11 MW、66 MW。此方法能有效的应用于其他多类型性储能方式的容量配置中,具体研究还将进一步展开。

参考文献:

- [1] Mahela O P, Shaik A G. Comprehensive overview of grid interfaced wind energy generation systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 260-281.
- [2] 徐国栋, 程浩忠, 马紫峰, 等. 用于平滑风电出力的储能系统运行与配置综述[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3470-3479.
Xu Guodong, Cheng Haozhong, Ma Zifeng, et al. An overview of operation and configuration of energy storage systems for smoothing wind power outputs [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3470-3479 (in Chinese).
- [3] Vivas F J, heras A D L, Sehura F, et al. A review of energy management strategies for renewable hybrid energy reviews [J]. Electric Power Systems Research, 2018, 82: 126-155.
- [4] 李瑞民, 张新敬, 徐玉杰, 等. 风光互补系统中混合储能容量优化配置研究[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(3): 512-522.
Li Ruimin, Zhang Xinjing, Xu Yujie, et al. Research on optimal configuration of hybrid energy storage capacity for wind-solar generation system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(3): 512-522 (in Chinese).
- [5] 李亚楠, 王倩, 宋文峰, 等. 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(7): 58-65.
Li Yanan, Wang Qian, Song Wenfeng, et al. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 58-65(in Chinese).
- [6] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.
Xu Jian, Liu Nian, Yu Lei, et al. Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 29-37 (in Chinese).
- [7] 吴杰, 丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平滑风电波动控制策略[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 (in Chinese).
- [8] 常丰祺, 郑泽东, 李永东. 一种新型混合储能拓扑及其功率分流算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 128-135.
Chang Fengqi, Zheng Zedong, Li Yongdong. A novel hybrid energy storage topology and its power sharing algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 128-135 (in Chinese).
- [9] 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. Coordinated control strategy of photovoltaic hybrid energy storage considering prediction error compensation and fluctuation suppression [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 130-138 (in Chinese).
- [10] 金涛, 陈毅阳, 段小华, 等. 基于改进 DFT 的电力系统同步相量测量算法研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 1-10.
Jin Tao, Chen Yiyang, Duan Xiaohua, et al. Research on synchronous phasor measurement algorithm of power system based on improved DFT [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 1-10 (in Chinese).
- [11] 王志锴, 许言路, 蒋理, 等. 基于离散傅里叶变换的微电网混合储能容量优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 32-38.
Wu Zhikai, Xu Yanlu, Jiang Li, et al. Hybrid energy storage capacity optimization of microgrid based on discrete Fourier transform [J]. Journal of North China Electric Power University(NATURAL SCIENCE EDITION), 2018, 45(2): 32-38 (in Chinese).

作者简介:

唐杰(1978-),男,博士,教授。研究方向:电力电子变换与控制技术、新能源发电与并网技术。E-mail:706648502@qq.com。

姜有华(1994-),男,通信作者,硕士研究生。研究方向:新能源发电。E-mail:2846177859@qq.com。



唐杰