

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190466

基于变分模态分解的储能辅助传统机组调频的容量优化配置

李卫国¹, 焦盘龙¹, 刘新宇¹, 徐备²

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 广东电网肇庆供电局, 广东 肇庆 526000)

摘要: 储能辅助常规机组参与电网调频, 可以改善常规机组调频的弊端, 提高调频质量, 有利于提高系统的稳定性。通过变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)将调频指令信号进行初级分配, 在考虑机组的爬坡限制以及储能的功率和荷电状态(State Of Charge, SOC)等限制后, 确定各调频源在每分钟内的功率约束。提出了指令信号越限时再分配的方法, 以实现在每分钟时间段内以最优比例在两种资源间分配调频指令。以所构建的成本-效益模型为目标, 通过粒子群算法进行寻优, 从而得到经济性最优的储能容量配置。最后基于实测的区域控制误差(Area Control Error, ACE)信号, 分析了不同分配方案对储能容量配置、效益以及技术性的影响, 验证了所提方法的可行性与有效性。

关键词: 储能调频; VMD; 爬坡率; SOC; 成本-效益模型; 容量配置

Capacity optimization configuration of energy storage auxiliary traditional unit frequency modulation based on variational mode decomposition

LI Weiguo¹, JIAO Panlong¹, LIU Xinyu¹, XU Bei²

(1. Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Zhaoqing Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid, Zhaoqing 526000, China)

Abstract: Energy storage assisted conventional units participating in power grid frequency modulation can improve the drawbacks of conventional unit frequency modulation, enhance the quality of frequency modulation, and help to improve the stability of the system. In this paper, the frequency modulation command signal is initially assigned by Variational Mode Decomposition (VMD). After considering the limitation of the generator ramp rate, and the power and State Of Charge (SOC) of the energy storage, the power constraints of each frequency regulation source in each minute are determined. Then, the redistribution method when the command signal exceeds the limit is proposed. This achieves the allocation of frequency regulation commands between the two resources in an optimal ratio over a period of minutes. Taking the cost-benefit model constructed as the goal, the PSO algorithm is used to optimize the energy storage capacity configuration. Finally, based on the measured Area Control Error (ACE) signal, the effects of different allocation schemes on energy storage capacity allocation, efficiency and technicality are analyzed, which verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1766204) and the Special Fund for Industrial Innovation of Jilin Province Development and Reform Commission (No. 2017C017-2).

Key words: energy storage frequency modulation; VMD; ramp rate; SOC; cost-benefit model; capacity configuration

0 引言

近些年来, 随着风电等波动性较强的新能源在电网中大规模的渗透, 其严重威胁了系统的频率稳

定^[1-4], 以火电燃煤机组为主的传统调频机组在响应自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)中的弊端愈加明显, 具体表现为调节延迟、调节偏差(超调和欠调)、调节反向、单向调节、AGC补偿效果差等现象。

储能资源能够更快地响应调频指令, 又能带来可观的收益, 越来越多的储能资源进入调频市场,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1766204); 2017年吉林省发改委产业创新专项项目资助(2017C017-2)

参与频率调节^[5]。事实上，在评估储能的各项性能时，使用储能进行频率调节是效率最高的服务之一，美国调频服务市场的改革也有效激励了储能参与调频的应用^[6]。文献[7]对电池储能参与调频的成本-效益、容量配置等进行了研究，表明电池储能作为优质的调频资源可以带来一定的经济效益。

在储能系统参与 AGC 时，需要相应的控制策略来完成对调频指令的协调分配，为充分利用各自的调频特性，文献[8]对系统二次调频需求的高低频分量进行了定量分析，并提出将 ACE 信号进行低通滤波，其高频分量分配给储能系统，低频分量分配给机组。文献[9]基于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法，提出了一种储能参与二次调频的初始指令分配方法，并提出了相应的容量配置方案。文献[10]提出采用基于集合经验模态分解(Ensemble EMD, EEMD)的方法，通过构造时空滤波器，将 ACE 信号按不同时间尺度进行分解，从而完成对两种调频源的指令分配。分配方式的不同严重影响着对调频指令的精确完成度，以及相应的储能容量配置，因此，合适的指令分配策略是保障系统经济性和技术性的前提。

储能参与调频容量配置时，其核心目标是在满足调频需求的基础上，最大化系统整体的调频收益^[11-13]，且容量配置还能够为控制策略以及经济性分析提供参考。文献[14]对于在孤岛系统中，针对储能参与频率调节时的 SOC，提出了动态优化的方法，为其容量配置提供了参考。文献[15]根据储能的 SOC 来实时调整充放电功率以实现频率调节，文献[16]考虑了储能的快速调节特性，提出了动态可用 AGC 的概念，并和优先级以及比例 AGC 信号分配策略结合使用，但其忽略了成本问题。文献[17]对具有与传统机组同等调频能力的储能容量进行分析，但其没有考虑机组的爬坡约束等，从而弱化了储能快速响应的优势，导致成本过高。文献[18]以最大化净收益为目标进行控制策略的研究，但没有对容量配置问题进行研究。文献[19]在对储能参与风电辅助服务的效益分析中，考虑了容量收入、电量收入和环境效益等，对于本文构建效益模型具有一定的参考意义。

由以上分析可以得到，当前储能参与二次调频的容量配置的研究和储能参与调频的效益模型还不完善。对于调频指令的分配研究，传统的高通、低通滤波器会产生延迟，滤波系数确定较难；而采用 EMD 方法时，虽能够进行自适应分解，但其本身会产生模态混叠效应；EEMD 方法虽能够一定程度上减小模态混叠，但其数据计算量很大。另外，

调频控制策略大多针对长时间段的性能提升，较少关注对每个小调频时间段的控制，未能充分发挥两种调频资源的优势，导致配置的可优化空间减小。

基于以上背景，本文采用 VMD 对 AGC 指令进行初级分配，该方法能够克服传统方法的不足，其理论基础坚实且鲁棒性较好，运算效率高，在模态分离和重构方面性能优良^[20-21]，在调频指令的分配过程中，对参与调频的机组和储能的调频指令区间进行细化控制，考虑传统机组的爬坡率和储能的 SOC，实现了在每分钟时间段内以最优比例在两种资源间分配调频指令。在所构建的成本-效益模型中，考虑的因素较全面，如机组调频损耗成本、环境效益和传统机组增加的发电收益等难以计算却不可忽略的部分，可以更好地为储能容量配置提供一定的支撑。最后在 Matlab 中对某电网实测数据进行仿真分析以验证本文方案的有效性。

1 储能辅助火电机组参与 AGC 结构

在本文中，储能系统辅助常规火电机组参与频率调节的系统结构图如图 1 所示。其中，AGC 系统的数据收集中心从电网侧采集如电网频率变化和联络线功率等运行数据，经过计算得到 ACE，然后，通过本文提出的分配策略，计算出储能与机组各自需要承担的调频指令。通过能量管理系统(Energy Management System, EMS)将指令下发给火电机组的集散控制系统(Distributed Control System, DCS)和储能主控制器，以实现各自的调频出力，共同提高频率的稳定性。

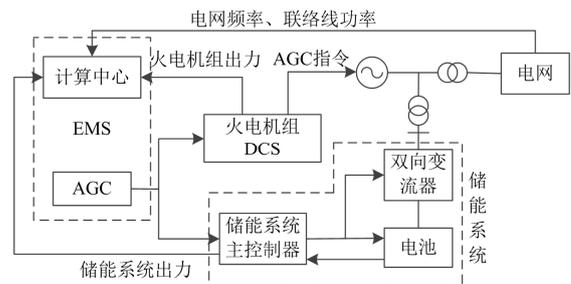


图 1 储能辅助火电机组参与 AGC 结构图
Fig. 1 Joint AGC structure of thermal units and energy storage systems

2 基于 VMD 的调频指令分配

传统的燃煤机组受跟随时滞和蒸汽压力的过程性变化等限制，难以满足调频的控制速度和精度要求。在储能辅助火电机组参与调频的过程中，应充分利用储能电池的快速充放电特性，提高调频性能。本文利用 VMD 对原始调频功率指令进行分配，

将低频 AGC 信号分配给传统机组, 将高频 AGC 信号分配给储能装置。

2.1 变分模态分解

电网的调频指令信号是一种典型的非平稳、非线性信号, 使用传统的频域信号分解方法时, 具有很大的局限性。VMD 是 2014 年 Konstantin Dragomirskiy 提出的完全非递归、准正交的自适应信号处理新方法^[22]。其通过设置合适的分解尺度 K 将输入的待分解信号分为 K 个中心频率各不相同的本征模态函数(IMF), 并使得每个 IMF 的估计带宽之和最小。该方法本质是自适应维纳滤波组, 对噪声具有很强的鲁棒性, 并通过一定的约束来降低采样效应产生的影响。

对调频指令信号进行 VMD 分解, 得到 K 个中心频率不同的子序列 $u_k(t) (k=1,2,\dots,K)$, 其中每个子序列的估计带宽和最小, 各子序列之和等于输入的调频指令功率之和, 则变分问题的构造如式(1)。

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|^2 \right\}, \\ \text{s.t. } \sum_k u_k = f \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$; $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$; $\delta(t)$ 为单位脉冲函数。

对于约束性变分问题的求解引入增广拉格朗日函数, 过程如下。

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = & \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|^2 + \\ & \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \end{aligned} \quad (2)$$

式中: α 为惩罚因子; $\lambda(t)$ 为拉格朗日乘子。采用 ADMM 交替更新 u_k^{n+1} 、 ω_k^{n+1} 和 λ_k^{n+1} 寻找式(1)的“鞍点”, 其中 u_k^{n+1} 的表达式为

$$\begin{aligned} u_k^{n+1} = & \arg \min \left\{ \alpha \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|^2 + \right. \\ & \left. \left\| f(t) - \sum_i u_i(t) + \frac{\lambda(t)}{2} \right\|_2^2 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\omega_k = \omega_k^{n+1}$; $\sum_i u_i(t) = \sum_{i \neq k} u_i(t)^{n+1}$ 。

基于 Parseval/Plancherel 傅里叶等距变换, 得到各子序列和中心频率的频域更新, 具体表达式为

$$\hat{u}_k^{n+1} = \frac{f(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

式中, ω_k^{n+1} 为当前子模态函数中心频率。对 $\hat{u}_k(\omega)$ 进行傅里叶逆变换, 其实部即为 $u_k(t)$ 。

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau(f(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega)) \quad (6)$$

对于预先设置的精度 $e > 0$, 若满足迭代停止条件 $\sum_k \left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2 / \left\| \hat{u}_k^n \right\|_2 < e$ 时, 则停止迭代过程。

2.2 基于 VMD 的调频指令分配

ACE 信号经过 VMD 分解为频率由低到高的 n 个 IMF 分量, 其中将高频分量进行重构作为储能系统的 AGC 指令 P_{AGC}^H , 低频分量重构作为常规机组的 AGC 指令 P_{AGC}^L 。

$$P_{AGC}^L(t) = \sum_{k=1}^m u_i(t) \quad (7)$$

$$P_{AGC}^H(t) = \sum_{k=m+1}^n u_i(t) \quad (8)$$

为了满足调频需求, 则传统调频机组和储能电池的功率应满足如下条件:

$$P_G^{\max} = \max_t \{P_{AGC}^L(t)\} \gamma_1 \quad (9)$$

$$P_E^{\max} = \max_t \{P_{AGC}^H(t)\} \gamma_2 \quad (10)$$

考虑到调频指令中可能存在部分异常尖峰信号以及功率响应效率的影响, 乘以容量系数 γ_1 和 γ_2 , $\gamma_1, \gamma_2 \in [0, 1]$, 其数值大小具体由得到的分配指令信号确定。在本文中, 对 AGC 信号进行采样一天, 采样时间间隔为 1 min, 共 1 440 组数据, 从而可以挑选出高频部分和低频部分的最大值进行容量的确定。

3 调频控制策略

为增大储能系统参与调频的经济性, 实现在未来大规模的商业应用, 必须制定合适的控制策略来降低储能成本, 提高调频收益。在储能配合火电机组参与调频的控制策略制定的过程中, 首先考虑了两种调频资源的实际约束, 如机组的爬坡率和储能的 SOC, 以 1 min 为时间尺度, 把控制区间细分为连续的控制时间段, 从而确定在每个调频间隔内各

自的功率调整范围,然后将可调整范围与指令信号做比较,若 AGC 信号超出调整范围时,则对该信号进行再分配,具体过程如下。

3.1 功率调整范围的确定

根据发电机的功率约束以及爬坡率限制,在调频时刻 t 可输出的功率范围为

$$P_G^+(t) = \min \{ P_G^{\max}, P_G(t-1) + \lambda \Delta t \} \quad (11)$$

$$P_G^-(t) = \max \{ -P_G^{\max}, P_G(t-1) - \lambda \Delta t \} \quad (12)$$

式中: $P_G^+(t)$ 和 $P_G^-(t)$ 分别代表在调频时刻 t 常规调频发电机组的最大功率与最小功率; λ 为机组的爬坡率,与机组的实际情况相关,在本文的仿真模型中,取 0.03 p.u./min。

储能电池的功率范围不仅与其本身的功率容量有关,还要考虑其 SOC 状态,在 t 时刻,储能系统的 SOC 可用式(13)表示。

$$\begin{cases} SOC(t) = (1 - \rho)SOC(t-1) + \frac{\omega_c |P_E^c(t-1)| \Delta t \eta_c - \omega_d P_E^d(t-1) \Delta t / \eta_d}{E_{\text{rate}}} \\ 0 \leq \omega_c + \omega_d \leq 1 \\ \omega_c, \omega_d \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $SOC(t)$ 为储能电池的荷电状态,其表示某一时刻剩余电量与额定容量之比; ρ 为电池的自放电率, %/min; Δt 为采样时间间隔, min; η_c 和 η_d 分别为储能电池的充电和放电效率, %; E_{rate} 为储能的额定容量大小, MW·h; ω_c 和 ω_d 为储能电池的充放电状态表示,正常工作时, $\omega_c + \omega_d = 1$, 闲置时, $\omega_c + \omega_d = 0$; $P_E^c(t)$ 和 $P_E^d(t)$ 为 t 时刻的充电与放电功率, MW, 其满足:

$$P_E(t) = P_E^c(t) + P_E^d(t) \quad (14)$$

$$P_E^c(t) \cdot P_E^d(t) = 0 \quad (15)$$

储能参与调频所配置的能量容量为 E_{rate} , 其应该满足在调频时间段内的能量需求, 计算式为

$$E_{\text{rate}} \geq \max \left\{ \frac{\max_{t \in T} \left[\int_0^{t \Delta t} P_E(t) dt \right]}{SOC_{\max} - SOC(0)}, \frac{-\min_{t \in T} \left[\int_0^{t \Delta t} P_E(t) dt \right]}{SOC(0) - SOC_{\min}} \right\} \quad (16)$$

式中, SOC_{\min} 和 SOC_{\max} 分别代表储能的最小与最大荷电状态, 本文分别取为 0.05 和 0.95。

储能的电量与荷电状态 SOC 之间满足

$$E(t) = SOC(t) E_{\text{rate}} \quad (17)$$

在综合考虑储能电池的功率限制和能量约束后, 储能可在调频时刻 t 可输出的功率范围为

$$P_E^+(t) = \min \left\{ P_E^{\max}, \frac{SOC(t) - SOC_{\min} \cdot \eta_d \cdot E_{\text{rate}}}{\Delta t} \right\} \quad (18)$$

$$P_E^-(t) = \max \left\{ -P_E^{\max}, \frac{SOC(t) - SOC_{\max} \cdot \eta_c \cdot E_{\text{rate}}}{\Delta t \cdot \eta_c} \right\} \quad (19)$$

式中, $P_E^+(t)$ 和 $P_E^-(t)$ 分别表示储能电池在调频时刻 t 内的最大和最小输出功率, 令放电功率为正, 充电功率为负。通过该策略将储能输出功率在每个调频间隔时间内进行约束, 可以保证储能的荷电状态随时处于 SOC_{\min} 和 SOC_{\max} 之间, 从而防止电池的过充过放, 减小电池的损耗, 并且使得电池在任意时间段内都具有一定的上下调频能力。

3.2 调频指令功率的再分配过程

在原始功率经过 VMD 分解为高频分量和低频分量后, 将其对应分配给储能电池和传统调频机组的过程中。由上节可以得到, 在每个响应时间段内, 两种调频资源都有其各自的功率限制, 所以有时不能精确地完成调频指令, 为了提高调频质量, 将功率限制外的那一部分调频指令进行再分配, 从而最大化地补偿 AGC 指令的实时偏差。具体过程介绍如表 1。

表 1 调频指令功率的再分配过程

Table 1 Frequency allocation command power redistribution process

	$P_{\text{AGC}}^L(t) \leq P_G^-(t)$	$P_G^-(t) < P_{\text{AGC}}^L(t) < P_G^+(t)$	$P_{\text{AGC}}^L(t) \geq P_G^+(t)$
$P_{\text{AGC}}^H(t) \leq P_E^-(t)$	情形 A④	情形 B②	情形 A②
$P_E^-(t) < P_{\text{AGC}}^H(t) < P_E^+(t)$	情形 B④	情形 C	情形 B③
$P_{\text{AGC}}^H(t) \geq P_E^+(t)$	情形 A③	情形 B①	情形 A①

情形 A

① 当 $P_{\text{AGC}}^L(t) \geq P_G^+(t)$, $P_{\text{AGC}}^H(t) \geq P_E^+(t)$ 时, 即储能与机组初始指令都越过各自功率上限时, 令 $P_G(t) = P_G^+(t)$, $P_E(t) = P_E^+(t)$;

② 当 $P_{\text{AGC}}^L(t) \geq P_G^+(t)$, $P_{\text{AGC}}^H(t) \leq P_E^-(t)$ 时, 即低频指令越过机组功率上限, 高频指令越过储能功率下限时, 令 $P_G(t) = P_G^+(t)$, $P_E(t) = P_E^-(t)$;

③ 当 $P_{\text{AGC}}^L(t) \leq P_G^-(t)$, $P_{\text{AGC}}^H(t) \geq P_E^+(t)$ 时, 即低频指令越过机组功率下限, 高频指令越过储能功率上限时, 令 $P_G(t) = P_G^-(t)$, $P_E(t) = P_E^+(t)$;

④ 当 $P_{\text{AGC}}^L(t) \leq P_G^-(t)$, $P_{\text{AGC}}^H(t) \leq P_E^-(t)$ 时, 即低频指令越过机组功率下限, 高频指令越过储能功率下限时, 令 $P_G(t) = P_G^-(t)$, $P_E(t) = P_E^-(t)$ 。

情形 B

① 当 $P_G^-(t) < P_{AGC}^L(t) < P_G^+(t)$, $P_{AGC}^H(t) \geq P_E^+(t)$, 即低频指令在机组可调节功率范围内, 高频指令越过储能功率上限时, 令 $P_E(t) = P_E^+(t)$, 则

a) 当 $P_{AGC}^L(t) + P_{AGC}^H(t) - P_E^+(t) \geq P_G^+(t)$ 时, 令 $P_G(t) = P_G^+(t)$ 。

b) 当 $P_{AGC}^L(t) + P_{AGC}^H(t) - P_E^+(t) < P_G^+(t)$ 时, 令 $P_G(t) = P_{AGC}^L(t) + P_{AGC}^H(t) - P_E^+$ 。

② 当 $P_G^-(t) < P_{AGC}^L(t) < P_G^+(t)$, $P_{AGC}^H(t) \leq P_E^-(t)$, 即低频指令在机组可调节功率范围内, 高频指令越过储能功率下限时, 令 $P_E(t) = P_E^-(t)$ 。

a) 当 $P_{AGC}^L(t) + P_{AGC}^H(t) - P_E^-(t) \leq P_G^-(t)$ 时, 令 $P_G(t) = P_G^-(t)$ 。

b) 当 $P_{AGC}^L(t) + P_{AGC}^H(t) - P_E^-(t) > P_G^-(t)$ 时, 令 $P_G(t) = P_{AGC}^L(t) + P_{AGC}^H(t) - P_E^-(t)$ 。

③ 当 $P_E^-(t) < P_{AGC}^L(t) < P_E^+(t)$, $P_{AGC}^H(t) \geq P_G^+(t)$, 即高频指令在储能可调节功率范围内, 低频指令越过机组功率上限时, 令 $P_G(t) = P_G^+(t)$, 则

a) 当 $P_{AGC}^H(t) + P_{AGC}^L(t) - P_G^+(t) \geq P_E^+(t)$ 时, 令 $P_E(t) = P_E^+(t)$ 。

b) 当 $P_{AGC}^H(t) + P_{AGC}^L(t) - P_G^+(t) < P_E^+(t)$ 时, 令 $P_E(t) = P_{AGC}^H(t) + P_{AGC}^L(t) - P_G^+(t)$ 。

④ 当 $P_E^-(t) < P_{AGC}^L(t) < P_E^+(t)$, $P_{AGC}^H(t) \leq P_G^-(t)$, 即高频指令在储能可调节功率范围内, 低频指令越过机组功率下限时, 令 $P_G(t) = P_G^-(t)$, 则

a) $P_{AGC}^H(t) + P_{AGC}^L(t) - P_G^-(t) \leq P_E^-(t)$ 时, 令 $P_E(t) = P_E^-(t)$ 。

b) $P_{AGC}^H(t) + P_{AGC}^L(t) - P_G^-(t) > P_E^-(t)$ 时, 令 $P_E(t) = P_{AGC}^H(t) + P_{AGC}^L(t) - P_G^-(t)$ 。

情形 C

当 $P_G^-(t) < P_{AGC}^L(t) < P_G^+(t)$, $P_E^-(t) < P_{AGC}^H(t) < P_E^+(t)$ 时, 此时, 高频指令与低频指令分别处于储能和机组的可调节范围内, 无需进行指令的再分配, 此时令 $P_E(t) = P_{AGC}^H(t)$, $P_G(t) = P_{AGC}^L(t)$ 。

3.3 调频效果指标

通过功率的再分配过程, 确定了储能和传统机组在响应调频过程中的具体出力大小, 为了说明两种调频资源的响应情况, 即能达到的调频效果, 我们定义如下调频效果指标 J 为

$$J = \sqrt{\frac{1}{1440} \sum_{t=1}^{1440} (P_E(t) + P_G(t) - P_{AGC}(t))^2} \quad (20)$$

J 值越小, 代表两种调频资源响应指令信号的能力越强, 即代表了调频效果越好。

4 储能辅助机组调频的容量配置

为了能够使储能调频资源更好地进入市场, 针对本文提出的调频控制策略, 基于系统的净效益最大, 采用粒子群算法进行容量优化配置。在构建成本-效益模型时, 成本方面考虑了储能电池的投资成本、运行维护成本以及调频机组的损耗成本, 效益方面综合考虑了实时电量效益、备用功率效益、机组增加的发电收益和环境效益等, 构建了储能辅助火电机组参与 AGC 的成本-效益模型。

1) 成本模型

a) 储能电池的初始投资成本 C_{inv} 主要为额定功率 P_{rate} 所决定的功率成本和额定容量 E_{rate} 所决定的容量成本组成。

$$C_{inv} = c_{pcs} P_{rate} + c_e E_{rate} \quad (21)$$

式中: c_{pcs} 为单位容量储能 PCS 的投资成本, 取为 130 万元/MW; c_e 为单位容量储能电池的投资成本, 为 300 万元/MW·h

b) 储能系统在工作过程中, 需要进行必要的运行维护, 其成本 C_{ma} 主要与功率大小有关。

$$C_{ma} = c_{ma} P_{rate} \quad (22)$$

式中, c_{ma} 为年维护成本, 6 万元/MW。

c) 常规的火电机组在响应频率调节的过程中, 所产生的成本主要分为两部分, 第一部分为由于机组的频繁爬坡而带来的磨损成本 C_{ram} , 第二部分为机组由于参与调频而偏离了经济调度的要求功率而带来的额外成本 C_{eco} 。

$$C_{ram} = \sum_T \chi_1 |P_G(t) - P_G(t-1)| \Delta t \quad (23)$$

$$C_{eco} = \sum_T \chi_2 |P_G(t)| \Delta t \quad (24)$$

式中, χ_1 和 χ_2 分别代表火电机组频繁爬坡而产生的损耗成本价格和偏离经济调度最优出力曲线的额外成本价格, 其中, $\chi_1 = 63.5$ 元/MW·h, $\chi_2 = 30$ 元/MW·h。

根据储能系统的使用年限, 将其在全寿命周期内的成本进行分解, 结合年运行维护成本与常规机组在调频周期内的成本, 得到该系统的日调频成本模型为

$$C_{day} = \frac{C_{inv} \frac{(1+r)^T r}{(1+r)^T - 1} + C_{ma}}{365} + C_{ram} + C_{eco} \quad (25)$$

式中: C_{day} 为日调频成本, 元; r 为储能系统的贴现

率, 为 8%; T 为储能系统的使用寿命, 本文取 20 年。

2) 收益模型

a) 环境效益

传统机组发电过程主要排放 SO_2 和 NO 等, 给大气带来污染, 储能辅助传统机组参与调频可以减少污染物的排放从而带来环境效益 R_{env} 。

$$R_{\text{env}} = (\rho_{\text{SO}_2} m_{\text{SO}_2} + \rho_{\text{NO}} m_{\text{NO}}) \sum_T P_E^d(t) \Delta t \quad (26)$$

式中: ρ_{SO_2} 和 ρ_{NO} 表示污染物的处理价格; ρ_{SO_2} 为 0.5 元/kg, ρ_{NO} 为 0.76 元/kg; m_{SO_2} 和 m_{NO} 为机组产生单位电能污染物排放量, m_{SO_2} 为 7 kg/MW·h, m_{NO} 为 3 kg/MW·h。

b) 机组增加的发电收益

在储能系统参与调频的过程中, 由于储能分担了调频任务, 使得火电机组调频备用容量减小, 则火电机组可以将该部分备用容量进行电力市场交易, 其收益 R_{sell} 计算公式为

$$R_{\text{sell}} = (\varphi_c - \varphi_s) \sum_T P_E^d(t) \Delta t \quad (27)$$

式中: φ_c 为售电价格, 取为 600 元/MW·h; φ_s 为发电成本, 取为 330 元/MW·h。

c) 实时电量效益

储能的实时电量收益是储能在调频周期内的充放电带来的收益, 其表达式为

$$R_{\text{rea}} = \sum_{m=1}^{24} r_{\text{rea},m} |P_E(t)| \Delta t \quad (28)$$

式中: R_{rea} 为日实时电量效益; $r_{\text{rea},m}$ 为储能每小时的实时电量价格, 元/MW·h, $m=1, 2, \dots, 24$, 其实时电量价格参考文献[23]。

d) 上下可调功率效益

在使用本文介绍的策略进行储能参与调频的过程中, 在每个调频周期 Δt 内, 储能的充放电功率均处于最大充放电功率之间, 这使得储能具有一定的上下可调节功率裕量, 这部分类似于机组的备用功率, 能够带来一定的效益。且同一时刻, 储能同时具有上下调节能力, 储能的上下调节功率效益 R^{up} 和 R^{down} 分别如下:

$$R^{\text{up}} = \sum_{m=1}^{24} r_{\text{up},m} (P_{\text{rate}} - P_E(t)) \quad (29)$$

$$R^{\text{down}} = \sum_{m=1}^{24} r_{\text{down},m} (P_E(t) + P_{\text{rate}}(t)) \quad (30)$$

式中, $r_{\text{up},m}$ 和 $r_{\text{down},m}$ 分别为储能上调节功率价格和下调节功率价格, 元/MW, 价格参考文献[24]。

在本文中, 假设储能上调和下调时间各占一半, 则储能的上下可调功率效益为

$$R_{\text{up,down}} = \frac{1}{2} (R^{\text{up}} + R^{\text{down}}) \quad (31)$$

则储能参与调频的日收益模型为

$$R_{\text{day}} = R_{\text{rea}} + R_{\text{up,down}} + R_{\text{sell}} + R_{\text{env}} \quad (32)$$

所以储能参与调频的日成本-效益计算模型为

$$S_{\text{day}} = R_{\text{day}} - C_{\text{day}} \quad (33)$$

5 算例分析

5.1 原始 ACE 信号的 VMD 分解

本文采用 2018 年国内某电网公司某日的 ACE 数据进行仿真验证, 采样时间间隔为 1 min, 如图 2 所示为该日的 ACE 曲线。

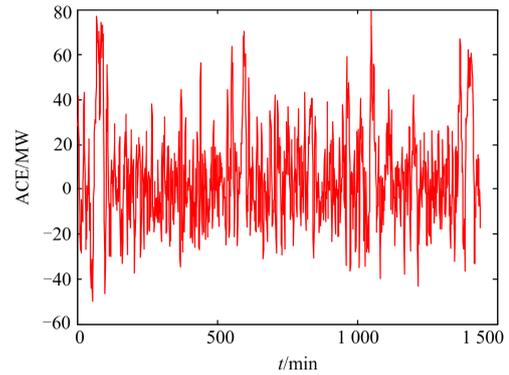


图 2 ACE 原始数据

Fig. 2 Original data of ACE

采用 VMD 方法对 ACE 信号进行分解, 确定合理的分解参数 K 是获取准确的模态分量的关键环节。在本文中, 根据图 3 所示的方法进行参数 K 的确定, 最终令 $K=10$ 进行 VMD 分解, 其分解得到的各模态分量如图 4 所示。

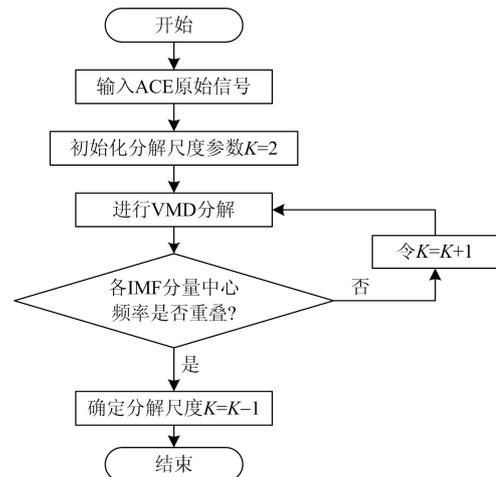


图 3 VMD 分解确定参数 K 流程图

Fig. 3 Flowchart of decomposing VMD to determine parameter K

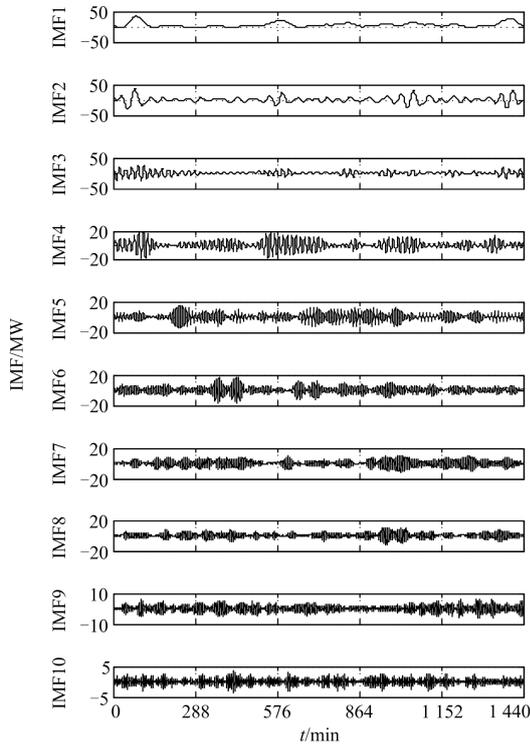


图4 VMD分解后的IMF分量

Fig. 4 IMF component after VMD decomposition

在图4中, 原始ACE信号经过分解后得到频率不同的10个IMF分量, 从上到下, 频率越来越高, 在该系统中, 将调频分量按照不同的分解层数进行重构, 作为各自的初始功率指令下发给传统机组和储能系统。

5.2 不同的重构点 m 下的容量配置结果分析

在本文中, 传统机组承担的IMF1~IMF m 分量, 储能系统承担的是IMF($m+1$)~IMF10分量, 即 m 为分配调频功率的分界点, 以所构建的成本-效益模型为目标函数, 如图5和图6分别为不同 m 值下的最优功率容量和能量容量配置结果。可以看到, 随着 m 值的增加, 储能所承担的高频部分的能量越来越小, 其所配置的功率容量和能量容量也会越来越小。

在本文的储能和调频机组参与调频功率分配的过程中, 由于在每一个调频时间段 Δt 内, 对储能的功率都进行了约束, 在保证较好的频率响应的同时, 可以尽可能地减小储能的能量容量配置。在改变 m 值大小进行容量配置时, $E_{\text{rate}}/P_{\text{rate}}$ 最大值为0.135, 此时 $m=1$, $E_{\text{rate}}=9.147 \text{ MW}\cdot\text{h}$, $P_{\text{rate}}=67.879 \text{ MW}$; $E_{\text{rate}}/P_{\text{rate}}$ 最小值为0.028, 此时 $m=7$, $E_{\text{rate}}=0.394 \text{ MW}\cdot\text{h}$, $P_{\text{rate}}=14.207 \text{ MW}$ 。由于当前储能的能量容量配置价格要远远高于功率配置的价格, 在储能系统的成本模型中, 容量配置的价格占比极高, 通过本文的调频策略, 可以减小储能容量

的配置, 从而在保证调频效果的同时提高经济性。

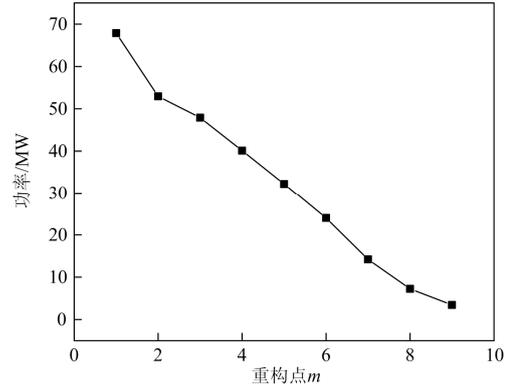


图5 功率容量配置结果

Fig. 5 Power capacity configuration result

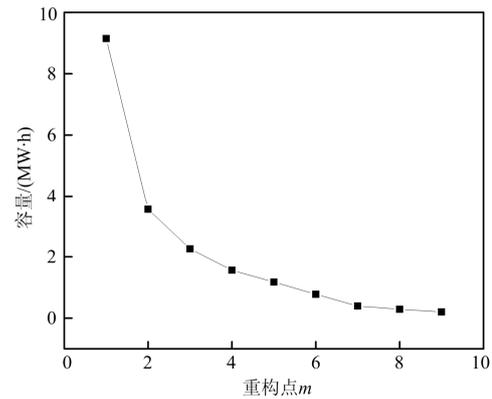


图6 能量容量配置结果

Fig. 6 Energy capacity configuration result

5.3 成本-效益分析

在储能联合火电机组参与调频的过程中, 对于同一调频信号, 通过改变 m 的大小可以得到不同的配置方案, 从而得到各自 m 值下的最优效益, 具体如图7所示。

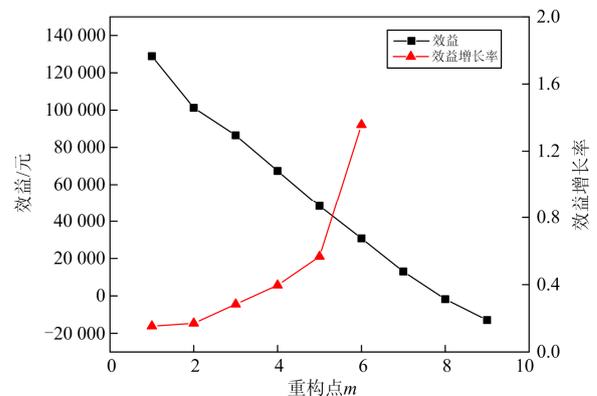


图7 不同配置方案下的效益和效益增长率

Fig. 7 Benefit and benefit growth rates under different configurations

由图 7 分析,随着 m 值的增大,分配给储能系统的调频分量越少,其所带来的效益也越来越小。尤其当 $m=8$ 或 9 时,此时由于储能的调频成本要大于调频带来的收益,效益均出现了负值。例如,当 $m=8$ 时,日调频总成本为 25 599 元,其中,投资和运行维护日成本为 4 489.2 元,机组爬坡损耗和偏离经济运行点的总损耗为 21 109.8 元,日调频收益为 23 820 元,所得净收益为-1 779 元。可以看出,由于此时调频机组承担的调频分量远大于储能,机组损耗占比很大,所以造成净收益为负。

在本文所构建的成本-效益模型中,其收益模型四部分全部与储能的出力大小 P_E 有关,随着 m 值的不断减小,储能的出力随其承担的调频分量不断增大,所以其收益也一直递增,但储能配置成本的不断提升制约了效益的增加,导致其增长率呈减小趋势,增长缓慢。

5.4 调频效果分析

在本文所研究的系统中,当 $m=1$ 时,所配置的系统取得的效益最大,但此时的调频效果差,调频效果指标 $J=4.1935$,储能与机组联合响应功率与调频指令偏差较大。究其原因,通过实验分析发现,此时由于储能承担的调频分量较多,调频机组承担的调频分量较少,根据本文方法所配置的 P_{rate} 较大,而 E_{rate} 相对很小,在功率调整范围确定阶段,例如在确定 $P_E^+(t)$ 时, $(SOC(t) - SOC_{min}) \cdot \eta_d \cdot E_{rate} / \Delta t < P_E^{max}$ 的情况发生相对较多,这就容易造成 SOC 到达 SOC_{min} ,同理在确定 $P_E^-(t)$ 时,容易造成 SOC 到达 SOC_{max} ,从而造成系统对接下来的调频指令响应不准确,降低了调频效果。

表 2 为不同重构点下容量配置计算结果及评价指标。根据实验结果,当重构点选取过大时,储能承担的调频分量很少,其优异的调频性能不能很好地发挥,重构点选取过小时,储能承担的调频分量较多,虽然其能够发挥响应迅速的调频特性,但加重了储能能量的调频负担,不利于荷电状态管理,为了达到该协调配置方案所期望的技术与经济性能,本文选择 $m=6$ 为最佳的重构点。此时, $P_{rate} = 24.203 \text{ MW}$, $E_{rate} = 0.778 \text{ MW} \cdot \text{h}$,调频日收益为 30 785 元, J 为 0.001。

为突出 VMD 分解方法的优势所在,采用 EMD 方法对本文容量进行配置,其配置结果如表 3 所示。采用 VMD 进行配置的结果明显优于 EMD,这是由于 VMD 有效避免了模态分量中心频率混叠的现象,降低了配置功率和容量,提高了系统整体的经济性。

表 2 不同重构点下容量配置计算结果及评价指标

Table 2 Capacity calculation results and evaluation indicators under different reconstruction points

重构点 m	功率大小/ MW	容量大小/ (MW·h)	效益/元	效果指标 J
1	67.879	9.147	116 752	4.194
2	52.944	3.551	101 242	1.103
3	47.911	2.258	86 503	0.308
4	40.116	1.563	67 398	0.048
5	32.207	1.176	48 245	0.045
6	24	0.778	30 785	0.001
7	14.207	0.394	13 061	0.377
8	7.255 6	0.288	-1 779	0.689
9	3.440 5	0.2	-12 929	1.260 1

表 3 不同分解方法下的配置结果分析

Table 3 Analysis of configuration results under different decomposition methods

	功率大小/MW	容量大小/(MW·h)	效益/元	效果指标 J
VMD	24	0.778	30 785	0.001
EMD	26.753	1.301	21 826	0.031

当 $m=6$ 时,调频机组与储能响应各自调频指令的出力曲线如图 8 和图 9 所示。可以看出,储能出力波动大,幅值小;机组出力波动小,幅值大,符合两种调频源的调频技术特性。

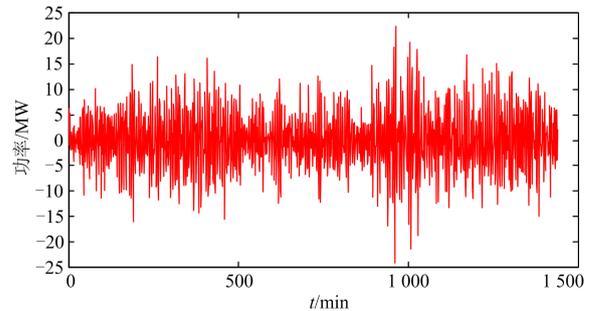


图 8 $m=6$ 时储能响应 ACE 出力

Fig. 8 Energy storage response ACE when $m=6$

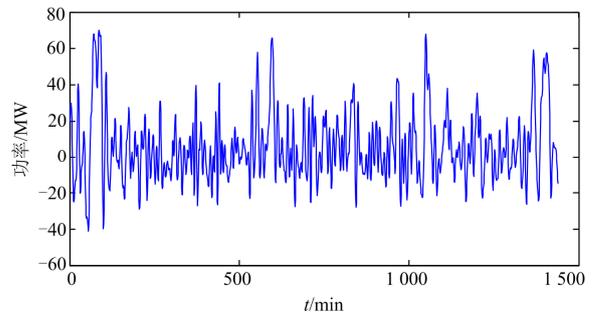


图 9 $m=6$ 时机组响应 ACE 出力

Fig. 9 Unit output response ACE when $m=6$

图 10 为储能系统在整个调频时间内的 SOC 状态, 可见 SOC 大多时刻在 0.2~0.7 之间波动。表明在本文方法下, 储能系统可以满足被分配的调频指令能量需求, 并且有较高的利用率, 证明本文的容量配置结果合理有效。

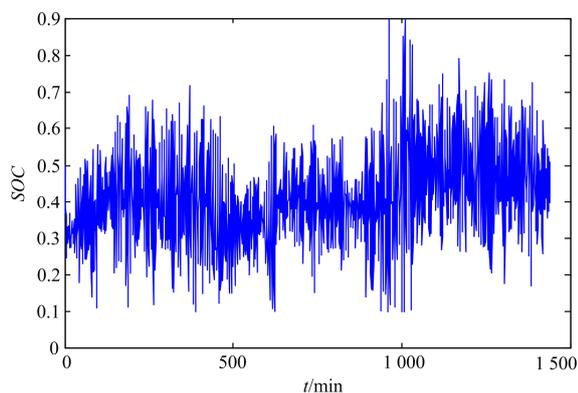


图 10 $m=6$ 时储能的 SOC 变化

Fig. 10 SOC change of energy storage when $m=6$

6 结语

本文基于 VMD 方法对 ACE 信号进行分解, 避免了传统分解手段的不足, 在不同的重构点下基于所构建的成本-效益模型实现了各自的容量优化配置。在调频指令的分配过程中, 对参与调频的机组和储能的调频指令区间进行细化处理, 充分考虑了传统机组的爬坡率和储能的能量管理, 给出了功率约束的上下限以及越限时的功率再分配方法, 在每分钟时间段内以最优比例在两种资源间分配调频指令, 使得调频效果达到最优。最后对不同方案下的容量配置结果、经济性和技术性进行了分析。

实验结果分析表明:

1) 采用本文的指令分配策略进行容量优化, 在保证调频效果的同时, 可以减小 E_{rate} 的配置, 从而减小配置成本, 提高净效益。

2) 在进行最佳重构点选择的过程中, 应该协调好配置方案的经济性和技术性, 不宜过大也不宜过小。需要说明的是, 最佳重构点的选择与所在电网的结构特性和具体的 ACE 指令有关, 应该灵活选择。

参考文献

[1] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10.
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the Integration of distributed renewable energy[J]. Transactions

of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10.
[2] 丁立, 乔颖, 鲁宗相, 等. 高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 1-8.
DING Li, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Impact on frequency regulation of power system from wind power with high penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 1-8.
[3] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
[4] 侯贤军, 罗春辉, 武学伟, 等. 计及 PEV 聚合器的含可再生能源电力系统 AGC 调节功率的协调调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 63-70.
HOU Maojun, LUO Chunhui, WU Xuewei, et al. Coordinated dispatching of AGC regulation power considering PEV aggregator in power system with large-scale renewable energy sources[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 63-70.
[5] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
[6] 陈大字, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 9-13.
CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, et al. Deployment of energy storage in frequency regulation of unite states and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 9-13.
[7] OUDALOV A, CHARTOUNI D, OHLER C. Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1259-1266.
[8] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5080-5087.
HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080-5087.
[9] 汤杰, 李欣然, 黄际元, 等. 以净效益最大为目标的储

- 能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 963-972.
- TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 963-972.
- [10] 贾燕冰, 郑晋, 陈浩, 等. 基于集合经验模态分解的火-储联合调度调频储能容量优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2930-2937.
- JIA Yanbing, ZHENG Jin, CHEN Hao, et al. Capacity allocation optimization of energy storage in thermal-storage frequency regulation dispatch system based on EEMD[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2930-2937.
- [11] 葛炬, 张粒子, 周小兵, 等. AGC 机组参与电力市场辅助服务的探讨[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 61-65.
- GE Ju, ZHANG Lizi, ZHOU Xiaobing, et al. Discussion on AGC units participating ancillary services in electricity market[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 61-65.
- [12] 黄永皓, 尚金成, 康重庆, 等. 电力辅助服务交易市场的运作机制及模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 33-36.
- HUANG Yonghao, SHANG Jincheng, KANG Chongqing, et al. An operation mechanism and model of electricity ancillary service trading market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 33-36.
- [13] STOFT S. Power system economics: designing markets for electricity[M]. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 2002.
- [14] MERCIER P, CHERKAOUI R, OUDALOV A. Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1469-1477.
- [15] 谭绍杰. 储能电源参与含风电的电力系统 AGC 的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- TAN Shaojie. Research on automatic generation control of power system with wind power using energy storage[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [16] CHENG Y, TABRIZI M, SAHNI M, et al. Dynamic available AGC based approach for enhancing utility scale energy storage performance[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1070-1078.
- [17] 丁冬, 杨水丽, 李建林, 等. 辅助火电机组参与电网调频的 BESS 容量配置[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(4): 302-307.
- DING Dong, YANG Shuili, et al. Capacity configuration of battery energy storage as an alternative to thermal power units for frequency regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(4): 302-307.
- [18] 陈大宇, 张粒子, 王立国. 储能调频系统控制策略与投资效益评估研究[J]. 现代电力, 2016, 33(1): 80-86.
- CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Ligu. Control strategy of energy storage system for frequency regulation and evaluation of investment income[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(1): 80-86.
- [19] 马美婷, 袁铁江, 陈广宇, 等. 储能参与风电辅助服务综合经济效益分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3362-3367.
- MA Meiting, YUAN Tiejiang, CHEN Guangyu, et al. Analysis on economic benefit of energy storage in auxiliary service of wind power[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3362-3367.
- [20] 王振威. 基于变分模态分解的故障诊断方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- WANG Zhenwei. Research on fault diagnosis method based on variational mode decomposition[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [21] 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.
- [22] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [23] LEOU R C. An economic analysis model for the energy storage system applied to a distribution substation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 34(1): 132-137.
- [24] FARES R L, MEYERS J P, WEBBER M E. A dynamic model-based estimate of the value of a vanadium redox flow battery for frequency regulation in Texas[J]. Applied Energy, 2014, 113: 189-198.

收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-06-17

作者简介:

李卫国(1970—), 男, 硕士, 副教授, 从事储能应用等相关技术研究; E-mail: lionwg@163.com

焦盘龙(1996—), 男, 硕士生, 研究方向为储能辅助火电机组参与调频; E-mail: 13844634788@163.com

刘新宇(1995—), 男, 硕士生, 研究方向为储能在电力系统中的应用。E-mail: 310595617@qq.com

(编辑 魏小丽)