

基于小波变换的混合储能二次调频容量优化配置方法研究

杨鼎全¹, 魏平²

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049; 2. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048)

A Study on the Optimal Capacity Configuration Method for Secondary Frequency Regulation of Hybrid Energy Storage Based on Wavelet Transform

YANG Dingquan¹, WEI Ping²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

2. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

ABSTRACT: To ensure safe and stable secondary frequency regulation operation in thermal power units assisted by hybrid energy storage systems while boosting economic efficiency, this paper proposes a wavelet transform-based method for secondary frequency regulation optimal capacity allocation. First, a hybrid energy storage secondary frequency regulation system model integrating thermal power units, battery energy storage, and compressed air energy storage is established. Second, the wavelet transform-based approach for optimally configuring secondary frequency regulation capacity is proposed, encompassing both power allocation and capacity configuration for battery and compressed air energy storage. Finally, a comprehensive cost-benefit model and evaluation indices are introduced to analyze the economic benefits and frequency regulation performance of the hybrid energy storage optimal configuration. A simulation model for hybrid energy storage secondary frequency regulation is built in simulation software to validate the method's effectiveness.

KEY WORDS: hybrid energy storage; secondary frequency regulation; wavelet transform; capacity configuration; economic benefits

摘要: 立足于保证混合储能辅助火电机组二次调频的安全稳定运行并提高其经济性, 提出了一种基于小波变换的混合储能二次调频容量分配方法。首先, 建立了包含火电机组、电池储能、压缩空气储能的混合储能二次调频系统模型; 其次,

提出了一种基于小波变换的混合储能二次调频容量配置方法, 对电池储能以及压缩空气储能进行了功率分配与容量配置; 最后, 引入成本效益模型及评价指标, 综合分析了混合储能优化配置的经济效益与调频效果, 在仿真软件中搭建了混合储能二次调频仿真模型, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 混合储能; 二次调频; 小波变换; 容量配置; 经济效益

在“碳达峰”、“碳中和”目标下, 电网中可再生能源发电装机容量逐年上升, 截至 2024 年 6 月底, 全国可再生能源发电装机达到 16.53 亿 kW, 同比增长 25%, 约占我国发电总装机的 53.8%, 其中风电光伏发电合计装机 11.8 亿 kW, 已超过煤电装机的 11.7 亿 kW^[1-2]。含高比例可再生能源的电网安全稳定运行面临日益严峻的挑战, 频率越限风险加剧^[3]。二次调频中的系统负荷扰动变化多样, 传统的火电机组爬坡率低、响应速度慢, 难以满足以新能源为主体的新型电力系统二次调频的容量需求以及快速响应需求^[4]。引入储能系统不仅可以平滑可再生能源的随机性和波动性, 而且能有效解决传统火电机组调频调峰能力不足的问题, 提升系统整体的二次调频能力^[5]。但是, 仅使用单一的储能系统来平抑波动, 可能会出现投入成本提高、循环寿命缩短等问题。因此, 为了在保持电网频率稳定的同时获得较好的经济效益, 亟需开展短时与长时储能相结合的混合储能系统参与电网二次调频的优化配置, 根据短时与长时储能的能量与功率密度差异, 利用短时储能承担变化幅度较小

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5100-202255013A-1-1-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of the SGCC (5100-202255013A-1-1-ZN).

但变化频率较大的功率分量,利用长时储能承担变化幅度较大但变化频率较小的功率分量。相比于仅使用单一的短时储能,可以进一步提升电网二次调频能力,减少投资成本^[6],保证电网运行的安全稳定运行和经济性,同时延长储能系统的使用寿命。

近年来,关于混合储能参与电网二次调频的研究多集中在以蓄电池和超级电容器等为主的短时储能系统上。其中,针对直流微电网中蓄电池与超级电容间不平衡功率的分配问题,张玉等人^[7]以传统下垂控制为基础,提出了模糊-下垂控制策略,该策略能够动态调整下垂系数,削弱系统内部因素所产生的负面影响,最终实现了两种储能设备间不平衡功率的合理分配。Abdelkader等人^[8]提出了一种基于动态规划过程的混合储能分级算法,实现了电池和超级电容器的二次调频功率分配。针对储能系统的控制需求,朱晓荣等人^[9]提出了一种将下垂控制与虚拟惯性控制相结合的控制方法。该方法的核心在于配置可随频率偏差动态改变的下垂系数,以此达成增发功率在常规机组与储能系统间的优化分配效果。但仅考虑短时储能,在频繁的充放电过程中会加速电池老化,缩短寿命。同时,在应对长时间或大幅度的频率偏差时调节能力不足,难以满足经济性和技术要求^[10]。因此,需要从不同时间尺度、功率和能量密度特性等方面构建短时与长时储能相耦合的混合储能系统。

目前,针对短时与长时储能相结合的混合储能二次调频的相关研究较少。汪德成等人^[11]建立了一种含有超导储能、锂离子电池、超级电容、铅酸电池、液流电池和压缩空气储能的混合储能系统,研究了单一及混合储能技术对风光发电的综合能源系统能源成本和碳排放的影响,并提出了一种新型的基于碳排放和能源成本的混合储能容量最优化配置方法。戴毅茹等人^[12]建立了混合储能与负荷之间的协调运行模型,以系统综合经济运行成本为优化目标,探讨了典型日逐时和全年逐时负荷下的混合储能最佳出力容量配置问题。文献[11-12]在成本计算和容量优化方面取得了一定进展。但缺乏详细的混合储能二次调频并网控制模型,无法进行精确的功率分配和容量配置,得到合适的优化配置方案。

混合储能参与电网二次调频的研究主要集中在蓄电池、超级电容器等短时储能的功率分配及容量配置上,采用小波变换和经验模态分解等分频方法,进而实现容量配置。近年来,小波变换因为具有低

熵性、去相关性等优势,从而得到了广泛应用。郭东泽等人^[13]提出了一种以自适应滑动平均滤波-小波包分解为基础的双层功率分解与分配策略,实现了混合储能功率的最优分解和合理分配。于琳琳等人^[14]提出了一种以储能系统经济性最优为目标的小波变换容量配置方法。程龙等人^[15]分析了储能介质频率与小波变换分解层数之间的关系,对储能介质响应功率频率进行了合理划分。但现有研究缺乏针对短时与长时储能相耦合的混合储能系统的功率分配与容量配置方法,没有同时针对二次调频经济性与调频效果的综合评价指标,未能兼顾混合储能辅助火电机组进行电网二次调频的安全稳定运行与经济性问题。

首先,本文建立了包含火电机组、代表短时储能的电池储能、代表长时储能的压缩空气储能的混合储能二次调频负荷频率控制模型,针对火电机组和混合储能均构建了详细的控制模型;其次,提出了一种基于小波变换的混合储能二次调频容量配置方法,将区域控制误差(area control error, ACE)信号分解成高频、中频和低频分量,对储能电池以及压缩空气储能进行了功率分配与容量配置;最后,引入成本效益模型及调频评价指标,仿真并对比分析了混合储能优化配置的调频效果与经济效益,验证了本文提出的采用小波变换的混合储能二次调频容量配置方法,具有良好的调频效果,且经济效益最优,同时有助于延长储能系统的使用寿命。

1 混合储能二次调频系统模型

1.1 二次调频频率响应系统搭建

基于负荷频率控制,建立混合储能参与二次调频的区域电网等效模型,如图1所示。图1中,ACE为区域控制偏差信号; R 为调差系数; ΔP_C 为火电机组中汽轮机输出功率的变化量; ΔP_{BESS} 为锂离子电池输出功率的变化量; ΔP_{CAES} 为压缩空气储能输出功率的变化量; ΔP_L 为负荷变化量; ΔP_{tie} 为联络线功率的变化量; Δf_i 为该区域电网输出的频率偏差; Δf_j 为其他区域电网输入的频率偏差。火电机组的原动机选择单级再热汽轮机组,混合储能选择锂离子电池储能与压缩空气储能,结合电池储能能量密度大和压缩空气储能功率密度大且循环次数多的特点,利用相应的协调分配方法。例如小波变换分解、经验模态分解、高低频滤波等方法,对ACE信号

进行分解,从而对火电机组和混合储能进行功率分配和容量配置。

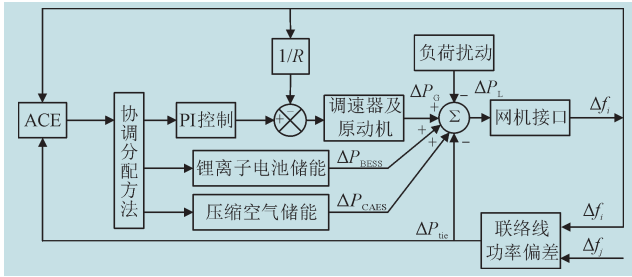


图1 混合储能参与二次调频区域电网等效模型
Fig.1 Equivalent model of a regional power grid for participation of hybrid energy storage in secondary frequency regulation

1.2 火电机组模型

表征火电机组响应延迟的基本传递函数为

$$G_{gov}(s) = \frac{1}{1 + sT_g} \quad (1)$$

式中： T_g 为火电机组调速器时间常数，取0.25； s 为复频域变量。

常规再热汽轮机的传递函数 $G_s(s)$ 为

$$G_s(s) = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (2)$$

式中： T_{CH} 、 T_{RH} 、 F_{HP} 分别为汽轮机时间常数、再热器时间常数和再热器增益，分别取值0.45、0.55、0.3。

发电机组的串联模型传递函数 $G_g(s)$ 为

$$G_g(s) = G_{gov}(s)G_s(s) \quad (3)$$

为验证所建模型的有效性与准确性，采用与文献[16]中相同的参数及工况进行模型仿真，所得到的汽轮机输出功率曲线与文献仿真结果进行对比，如图2所示。二者的曲线变化趋势相似，符合良好，验证了所采用模型的有效性与准确性。

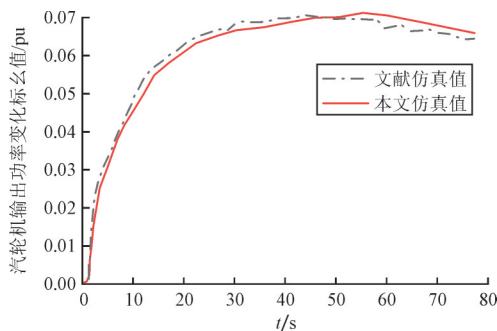


图2 火电机组模型验证
Fig.2 Model validation of thermal power units

1.3 电池储能模型

本文以锂离子电池为研究对象，构建适用于二次调频的电池储能等效模型。

用于储能调频的设备由若干电池单体构成，不考虑电池单体间的微小差异，仅依据串并联的基础特性构建电池系统模型。具体搭建流程如下：先将 $m(m=10)$ 个储能单体串联为一个电池模块，再将 $n(n=24)$ 个电池模块串联成一个电池柜，随后将 $k(k=6)$ 个电池柜并联构成一个储能单元，最终将 $l(l=5)$ 个储能单元并联，即可形成锂离子电池综合模型如图3所示。图中， V_{oc} 为电池的开路电压； R_0 为电池内部电解液、电极等欧姆内阻； R_s 、 R_1 、 C_s 、 C_1 为二阶RC等效电路的内部电阻和电容； V_b 为电池的输出电压； P_b 为电池输出功率； K_b 为比例系数； T_b 为时间常数； V_o 为 R_0 两端的电压； V_s 为 R_s 和 C_s 组成的RC电路端电压； V_1 为 R_1 和 C_1 组成的RC电路端电压。其中， V_{oc} 、 R_0 、 R_s 、 R_1 、 C_s 、 C_1 的值均由电池的荷电状态 S_{oc} (state of charge, SOC)决定^[17]。

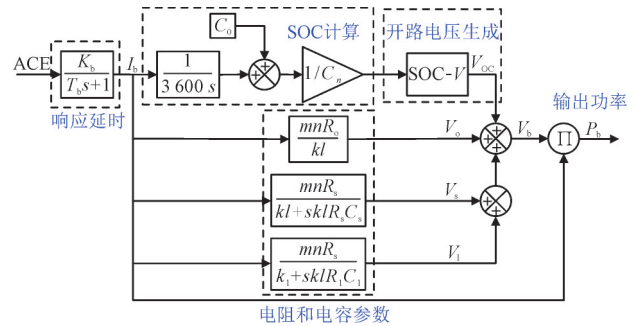


图3 锂离子电池二次调频综合模型
Fig.3 Comprehensive model of lithium-ion battery secondary frequency regulation

为验证所建模型的有效性与准确性，采用与文献[17]中相同的参数进行模型仿真，采用160 mA的周期性脉冲电流作为输入，所得到的锂离子电池放电电压曲线与文献中的典型电压放电曲线进行对比，如图4所示。二者的曲线变化趋势相似，符合良好，验证了所采用模型的有效性与准确性。

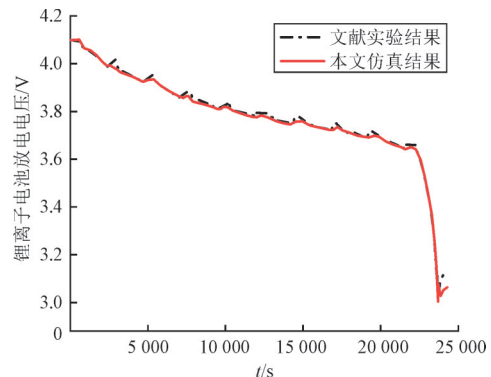


图4 锂离子电池模型验证
Fig.4 Model validation of Lithium-ion batteries

到的压缩机输出功率曲线与文献仿真结果进行对比,如图8所示。二者的曲线变化趋势相似,符合良好,验证了所采用模型的有效性、准确性。

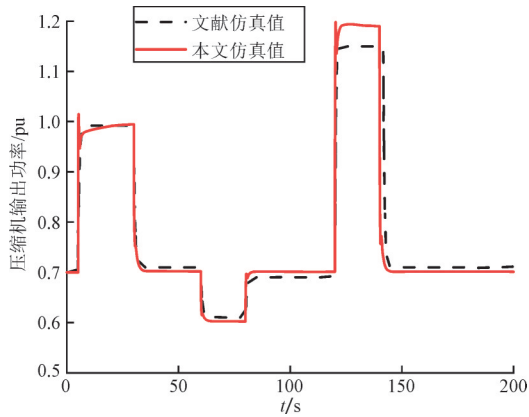


图8 压缩空气储能储能阶段模型验证

Fig.8 Model validation of charging phase for CAES

2 混合储能二次调频功率分配及容量配置方法

2.1 ACE信号的小波变换

基于锂离子电池储能和压缩空气储能的不同特性,对ACE信号进行连续小波变换。设初始信号为 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$,其中 $L^2(\mathbb{R})$ 为函数空间,则连续小波变换的具体公式为^[14]

$$W_f(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t - \tau}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中: Ψ 为小波基函数; a, τ 分别为尺度和小波基在频域和时域上的伸缩和平移; t 为时间; dt 为时间的微小间隔。

将ACE信号进行小波变换,可获取频率由低至高排列的 d_1 至 d_6 分量。随后将上述高频分量进行重组,以此作为锂离子电池储能系统的调频功率指令 $P_{\text{BESS}}(t)$;中频分量重新组合,作为压缩空气储能的调频功率指令 $P_{\text{CAES}}(t)$;低频分量重新组合,作为火电机组的调频功率指令 $P_{\text{C}}(t)$ 。

采用小波变换进行信号分解,相比于经验模态分解等其他信号分解方法,小波变换更适合处理非平稳信号,能更好地提取信号的局部特征,同时其计算效率较高,可以快速确定分解尺度,并对目标信号进行高低频分解,同时确保分解出的信号不存在中心频率重叠。

2.2 混合储能额定功率与额定容量配置

2.2.1 功率配置

为了在采样时间段内满足二次调频对频率平

抑的需求,储能系统的额定功率应取决于小波变换信号所分配的最大值。此外,还需考虑储能变流器的转换效率以及储能系统的充放电效率,额定功率 P_{rate} 的配置方程为

$$P_{\text{rate}} = \max \left\{ \eta_{\text{ch}} |\min [P_{\text{ch}}(t)]|, \frac{\max [P_{\text{dis}}(t)]}{\eta_{\text{dis}}} \right\} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{ch}}(t)$ 为储能系统充电功率; $P_{\text{dis}}(t)$ 为储能系统放电功率; $\eta_{\text{ch}}, \eta_{\text{dis}}$ 分别为储能系统充、放电效率。

2.2.2 容量配置

储能系统处于正常运行状态下,需保障放电量达到最大值时SOC不低于下限,同时确保充电量处于最大值时SOC不高于上限,储能系统的额定容量 E_{rate} 应符合式(6),以满足任何时间点的二次调频需求以及经济性要求。

$$E_{\text{rate}} = \frac{\max \left(\int_0^{t_0} P_e(t) \right) - \min \left(\int_0^{t_0} P_e(t) \right)}{S_{\text{OC}, \text{max}} - S_{\text{OC}, \text{min}}} \quad (6)$$

式中: $P_e(t)$ 为 t_0 周期内储能系统的功率; $S_{\text{OC}, \text{max}}, S_{\text{OC}, \text{min}}$ 分别为储能系统的SOC上、下限值。

3 储能辅助火电机组调频的成本-效益模型及评价指标

为了更好地将储能调频资源整合到市场中,本研究基于二次调频控制策略,目标为最大化系统净效益进行容量优化。在成本-效益模型中,成本包含储能系统的投资、运维费用以及调频机组的损耗;效益则包括实时电量收益、备用功率收益、发电收入提升和环境效益等。同时,引入电网频率的均方根误差作为评估指标,以综合评价混合储能系统和火电机组在二次调频中的效果。

3.1 成本模型

1) 储能系统的初始投资成本 C_{inv} 主要包括功率及容量成本,公式为

$$C_{\text{inv}} = c_{\text{pcs}} P_{\text{rate}} + c_e E_{\text{rate}} \quad (7)$$

式中: c_{pcs} 为单位功率储能变流器的投资成本; c_e 为单位容量储能的投资成本。

2) 储能系统在运行期间的定期维护费用 C_{ma} 主要取决于系统的功率大小,公式为

$$C_{\text{ma}} = c_{\text{ma}} P_{\text{rate}} \quad (8)$$

式中: c_{ma} 为年维护成本。

3) 火电机组在频率调节过程中,其成本主要由机组频繁调整输出功率带来的磨损成本 C_{ram} ,以及

机组参与调频导致功率偏离经济调度需求所产生的额外费用 C_{eco} 所组成,公式为

$$C_{\text{ram}} = \sum_T \gamma_1 |P_G(t) - P_G(t-1)| \Delta t \quad (9)$$

$$C_{\text{eco}} = \sum_T \gamma_2 |P_G(t)| \Delta t \quad (10)$$

式中: γ_1 、 γ_2 分别为火电机组频繁调整输出功率产生的损耗成本和因偏离经济调度最优出力曲线产生的额外费用; $P_G(t)$ 为火电机组调频功率指令; Δt 为每个调频区间的时长。

根据储能的运行寿命,拆分其生命周期成本进行,将年度运维费用及机组在调频周期内的成本进行整合,建立了日调频成本模型,公式为

$$C_{\text{day}} = \frac{C_{\text{inv}} \frac{(1+r)^T r}{(1+r)^T - 1} + C_{\text{ma}}}{365} + C_{\text{ram}} + C_{\text{eco}} \quad (11)$$

式中: C_{day} 为日调频成本; r 为储能系统贴现率; T 为储能运行寿命。

3.2 收益模型

1) 环境效益

在电力系统运行中,传统火电机组会产生 SO_2 、 NO_x 等有害气体。通过引入储能系统辅助调频,可减少火电机组的频繁调节,从而降低污染物排放量,产生环境效益,公式为

$$R_{\text{env}} = (\rho_{\text{SO}_2} m_{\text{SO}_2} + \rho_{\text{NO}} m_{\text{NO}}) \sum_T P_E^d(t) \Delta t \quad (12)$$

式中: ρ_{SO_2} 、 ρ_{NO} 为污染物的处理价格; m_{SO_2} 、 m_{NO} 为机组产生单位电能污染物排放量; $P_E^d(t)$ 为储能在 t 时刻的放电功率。

2) 机组增加的发电收益

储能系统承担了部分调频任务,从而释放了火电机组的备用容量。这部分释放的容量可参与电力市场交易,产生额外收益,其收益 R_{sell} 的计算公式为

$$R_{\text{sell}} = (\varphi_c - \varphi_s) \sum_T P_E^d(t) \Delta t \quad (13)$$

式中: φ_c 为售电价格; φ_s 为发电成本。

3) 实时电量效益

储能系统的实时电量收益指的是在调频周期中,通过充电和放电操作所获得的收益,其表达式为

$$R_{\text{rea}} = \sum_{m=1}^{24} r_{\text{rea},m} |P_E(t)| \Delta t \quad (14)$$

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, $m=1,2,\dots,24$,实时电量价格如图9所示^[19]。

4) 上下可调功率效益

储能系统增加放电或减少充电即为储能上调,

减少放电或增加充电则为下调。

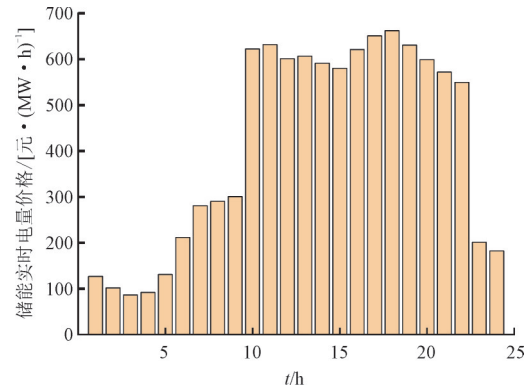


图9 储能实时电量价格

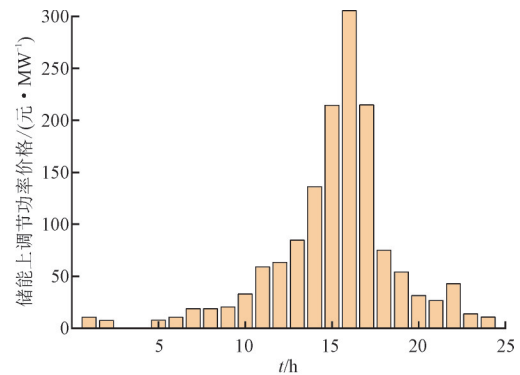
Fig.9 Real-time energy storage price

其上下调节功率效益 R^{up} 和 R^{down} 分别如式(15)、式(16)所示。

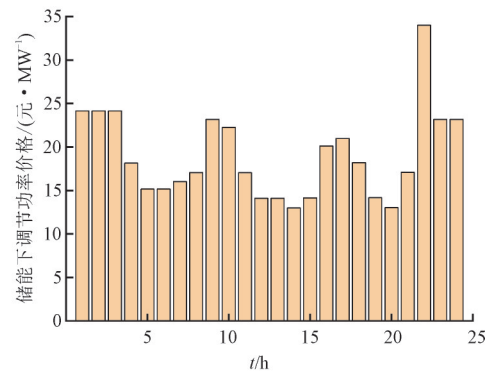
$$R^{\text{up}} = \sum_{m=1}^{24} r_{\text{up},m} (P_{\text{rate}}(t) - P_E(t)) \quad (15)$$

$$R^{\text{down}} = \sum_{m=1}^{24} r_{\text{down},m} (P_E(t) + P_{\text{rate}}(t)) \quad (16)$$

式中: $P_E(t)$ 为储能在 t 时刻的实际输出功率; $r_{\text{up},m}$ 、 $r_{\text{down},m}$ 分别为储能上调及下调功率价格,如图10(a)和图10(b)所示^[20]。



(a) 储能每小时电力备用上调电价



(b) 储能每小时电力备用下调电价

图10 储能电力备用调节价格

Fig.10 Energy storage power reserve regulation price

当储能系统 SOC 较低时,其主要进行下调动作;而当其 SOC 较高时,则主要进行上调动作。本文假设储能系统上调时间和下调时间相等,因此储能系统的调节功率效益公式为

$$R_{up,down} = \frac{1}{2}(R^{up} + R^{down}) \quad (17)$$

储能参与调频的日收益模型,公式为

$$R_{day} = R_{rea} + R_{up,down} + R_{sell} + R_{env} \quad (18)$$

所以,储能参与调频的日成本-效益计算模型公式为

$$S_{day} = R_{day} - C_{day} \quad (19)$$

3.3 调频效果评价指标

选取电网频率的均方根误差 Δf_{rms} 为调频效果评价指标,公式为

$$\Delta f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_0)^2} \quad (20)$$

式中: $f_0=50$ Hz; f_i 为每分钟采样的频率值。

4 结果与讨论

4.1 ACE 信号的小波变换

采用 2022 年国内某电网公司的区域控制偏差 (ACE) 信号数据作为分析对象。以 1 min 为采样间隔,获取完整调频日(00:00 至 23:59)的连续采样数据,共计 1440 个样本点,原始的 ACE 曲线如图 11 所示。

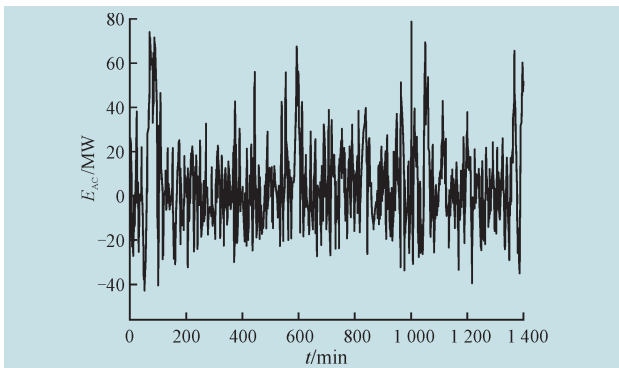


图 11 ACE 原始数据

Fig.11 Original data of ACE

采用小波变换对原始 ACE 信号进行分解,为了保证计算结果精确度的同时减少计算量,本文选取各小波分量中心频率不重叠的最大分解尺度作为最优分解尺度,具体流程以及确定分解尺度的方法,如图 12 所示。

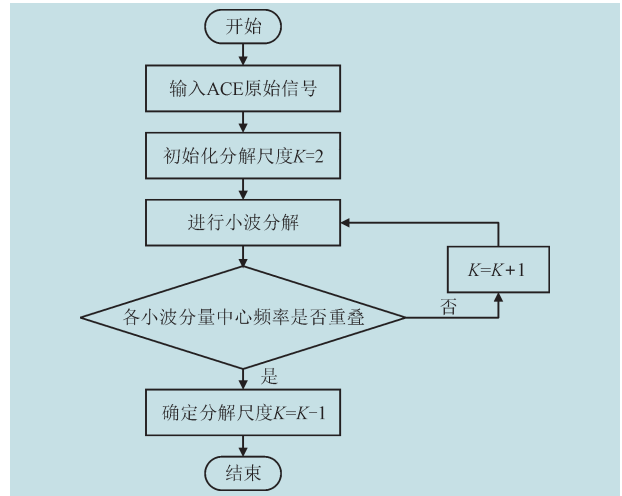


图 12 小波变换流程图

Fig.12 Flowchart of wavelet transform

本文所采用的小波基函数为 db 4,最终确定的分解尺度为 6 层,分解后的波形,如图 13 所示。由图可知, d_1 和 d_6 为 ACE 信号分解得到的最高频和最低频信号,从 d_1 到 d_6 ,其波动频率逐渐降低,幅值逐渐增加。

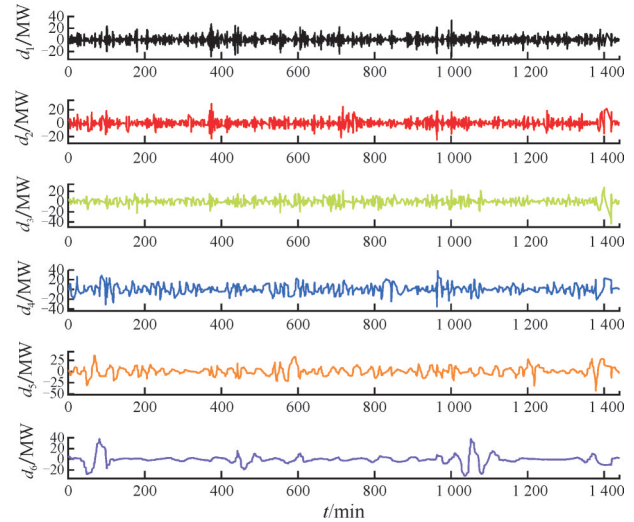


图 13 小波变换后的各层信号波形

Fig.13 Results of wavelet transform

对分解得到的 $d_1 \sim d_6$ 信号进行快速傅里叶变换分析,得到各层信号的频谱特征,如图 14 所示。可知, $d_1 \sim d_6$ 各层信号所包含的频率逐渐降低, d_1 所包含的高频分量最多, d_6 所包含的高频分量最少。以 d_4 为界,其波动频率集中于 0.3×10^{-3} Hz, $d_1 \sim d_3$ 的频率集中于 $0.5 \times 10^{-4} \sim 2.3 \times 10^{-4}$ Hz, d_6 和 d_7 的频率集中于 $0 \sim 0.3 \times 10^{-4}$ Hz。每个信号的中心频率不发生重叠,体现了不同信号各自独有的频谱特征。

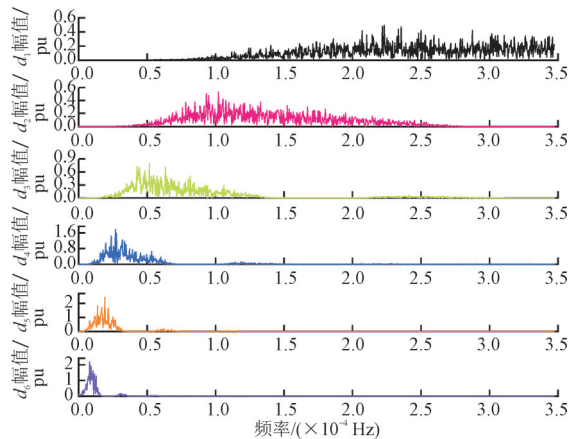


图14 小波变换后各层信号频谱特征

Fig.14 Spectral characteristics of signals in each layer after wavelet transform

根据储能系统和传统火发电机组的调频特性,分配给火发电机组的 ACE 分量主要为波动较小但幅值较大的功率;分配给压缩空气储能的 ACE 分量主要为波动适中但幅值较大的功率;分配给锂离子电池储能的 ACE 分量主要为波动较大但幅值较小的功率,具体的分配方案如表 1 所示。混合储能的相关参数如表 2 所示。

表1 混合储能ACE功率信号分配方案

Table 1 Hybrid energy storage ACE power signal allocation scheme

方案	火电机组 分配 ACE 分量	锂离子电池 分配 ACE 分量	压缩机分配 ACE 分量	透平分配 ACE 分量
1	$d_4 \sim d_6$	d_1	d_2	d_3
2	$d_5 \sim d_6$	d_1	d_2	$d_3 \sim d_4$
3	$d_5 \sim d_6$	$d_1 \sim d_2$	d_3	d_4
4	d_6	d_1	d_2	$d_3 \sim d_5$
5	d_6	d_1	$d_2 \sim d_3$	$d_4 \sim d_5$
6	d_6	$d_1 \sim d_2$	d_3	$d_4 \sim d_5$
7	d_6	$d_1 \sim d_3$	d_4	d_5
8	d_6	d_1	$d_2 \sim d_4$	d_5
9	d_6	d_1	$d_3 \sim d_5$	d_2
10	d_6	d_1	$d_4 \sim d_5$	$d_2 \sim d_3$

表2 混合储能相关参数

Table 2 Parameters related to hybrid energy storage

参数	锂离子电池储能	压缩空气储能
单位功率成本/万元	60	600
单位容量成本/万元	90	20
充放电效率/%	90	70
S_{oc} 初始值	0.5	0.5
S_{oc} 限值	0.1~0.9	0.2~0.8

4.2 经济效益分析

在混合储能联合火电机组参与二次调频过程中,针对 4.1 节表 1 中的 10 种 ACE 信号配置方案进行混合储能与火电机组的功率分配,再根据第 3 节的成本、收益以及调频效果公式,计算得到各方案下的日净收益变化曲线如图 15 所示。由图可知,从方案 1 到方案 4,分配给混合储能的调频分量越大,所带来的经济效益越好。从方案 5 到方案 7,对于混合储能,分配给锂离子电池储能的调频分量越大,所带来的经济效益越差。由方案 4、方案 5 和方案 8 可知,分配给火电机组和锂离子电池的调频分量不变时,适当增加分配给压缩机的调频分量,将次高频分量 $d_2 \sim d_3$ 分配给压缩机,将中频分量 $d_4 \sim d_5$ 分配给透平,这种配置方案下所得到的日净收益最大,可到达 6.118 万元。

将分配给火电机组和锂离子电池储能的调频分量分别保持为 d_6 和 d_1 不变,改变压缩机和透平的功率分配,即方案 4、方案 5、方案 8 到方案 10。由图 15 可知,适当增加分配给压缩机的调频分量可以有效提高日净收益(方案 4、5),但分配给压缩机的分量过高,超过透平时,日净收益会显著减小(方案 8 到方案 10)。

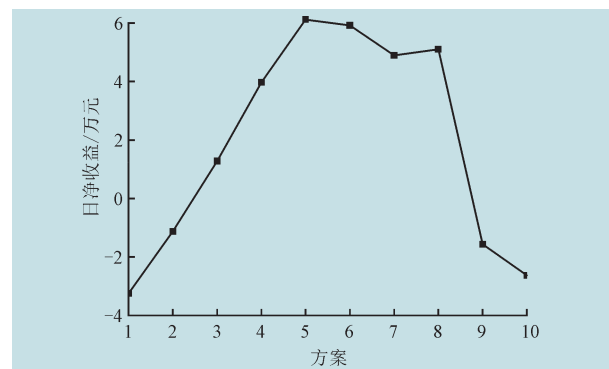


图15 不同配置方案下的净收益曲线

Fig.15 Net profit curves under different configuration schemes

4.3 调频效果分析

系统频率变化曲线如图 16 所示。由图可知,从方案 1 到方案 3,分配给火电机组的调频分量越小,系统频率变化幅度越大;从方案 3 到方案 5,适当增加分配给压缩机的调频分量,可使调频效果更好;从方案 5 到方案 7,分配给锂离子电池储能的调频分量越大,系统频率变化幅度越大。

同时,适当增加分配给压缩机的调频分量可以有效降低系统频率变化幅度(方案 4、5、8),但分配

给压缩机的分量过高,超过透平时,频率变化幅度会相应增加(方案8到方案10)。

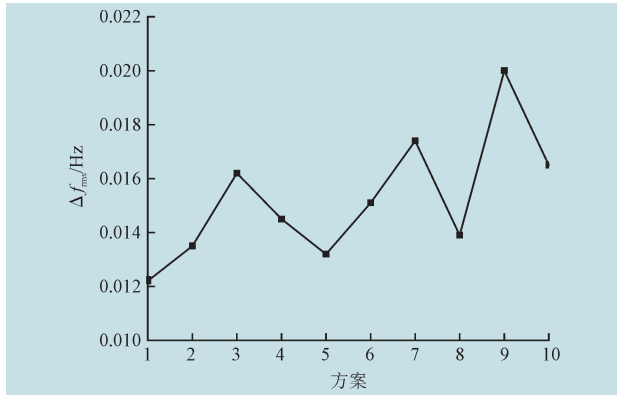


图16 不同配置方案下的系统频率变化曲线

Fig.16 System frequency variation curves under different configuration schemes

4.4 混合储能优化配置结果综合分析

综合考虑10种配置方案的日净收益以及调频效果,如表3所示。

表3 二次调频配置结果

Table 3 Configuration results of secondary frequency regulation

方案	锂离子电池额定功率/MW	锂离子电池额定容量/(MW·h)	压缩空气储能额定功率/MW	压缩空气储能额定容量/(MW·h)	日净收益/万元	$\Delta f_{rms}/\text{Hz}$
1	2.295	1.028	46.691	80.342	-3.249	0.0122
2	2.565	2.169	59.246	113.628	-1.125	0.0135
3	3.882	3.062	45.356	77.547	1.283	0.0162
4	2.501	2.016	79.465	160.326	3.970	0.0145
5	2.351	2.595	75.993	124.890	6.118	0.0132
6	3.905	4.002	73.143	121.339	5.920	0.0151
7	4.126	4.676	45.740	72.956	4.895	0.0174
8	2.432	2.915	69.743	120.005	5.102	0.0139
9	2.374	2.856	65.500	111.960	-1.563	0.0200
10	2.216	2.981	81.343	125.016	-2.629	0.0165

由表1、表3分析可知,从方案1到方案3,火电机组所占的调频分量较大,虽然此时调频效果好但经济效益较差;方案4到方案7,将火电机组和锂离子电池储能的调频所占分量降至最小,适当增加压缩机的调频分量,但不大于透平,这样可使调频效果和经济效益最优(方案5);根据方案4、方案5、方案8到方案10可知,分配给压缩机的分量过

高,超过透平时,调频效果和经济效益均会降低。因此,本文所提出的方案5为最优配置方案。

基于优化配置方案5的火电机组及混合储能功率曲线与SOC变化曲线如图17、图18所示。由图17可知,幅值较大、波动平滑的低频功率部分由火电机组承担;幅值较小、波动较大的高频部分由锂离子电池储能承担;而介于二者之间的中低频部分由压缩空气储能承担,这种基于小波变换的二次调频功率分配方式充分发挥了锂离子电池和压缩空气储能的调频特性,使得调频效果和经济效益最大化。

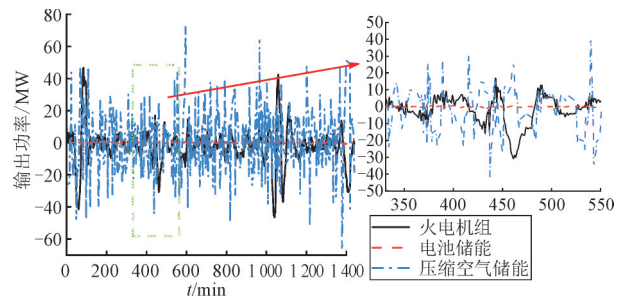


图17 火电机组及混合储能功率曲线

Fig.17 Power curves of thermal power units and hybrid energy storage

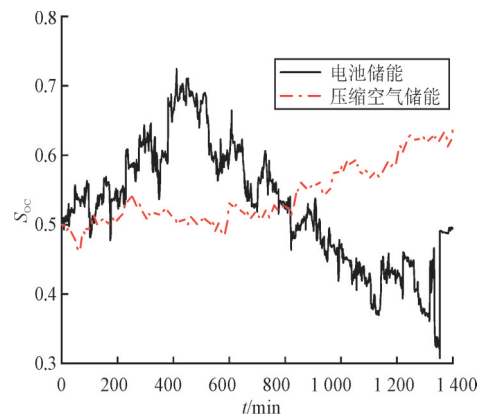


图18 混合储能SOC变化曲线

Fig.18 SOC variation curves for thermal power units and hybrid energy storage

由图18可知,锂离子电池储能的SOC在0.3~0.72波动,充放电状态变化频繁;而压缩空气储能的SOC在0.45~0.72波动,其SOC波动幅度比锂离子电池储能小,较长的充放电周期有助于延长储能系统的使用寿命,这反映了系统在中低频段的能量处理能力,可对提升可再生能源消纳和用电系统的安全稳定运行提供理论指导。

将本文采用的基于小波变换的混合储能功率

分配及容量配置方法,与现有的常用方法(方法1、方法2)相比较并进行电网频率波动偏差与经济性的综合对比分析。其中,采用的方法1与方法2具体内容如表4所示。方法1为采用小波变换方法,但没有考虑压缩空气储能,方法2采用基于经验模态分解的分频配置方法^[21],混合储能的构成与本文一致。

表4 本文方法与现有常用方法介绍

Table 4 Introduction of the proposed method and commonly used existing methods

采用方法	具体内容
本文方法	火电机组+电池储能+压缩空气储能+小波变换
方法1	火电机组+电池储能+小波变换
方法2	火电机组+电池储能+压缩空气储能+经验模态分解

不同方法下的对比结果如表5所示。可知,方法1在没有压缩空气储能的情况下,仅依靠电池储能辅助火电机组进行调频(方法1),电池储能由于其功率和容量特性限制,在长时间平抑大幅度功率波动时,会导致其循环寿命缩短、调频成本过高等问题,使得电网的调频效果和经济性均相对较差。而采用经验模态分解的方法,将分解得到的低频分量分配给火电机组,将高频分量分配给锂离子电池,将中频分量分给压缩空气储能。这种方法虽然使得电网频率波动大幅减小,但由于分解时存在功率分量的中心频率重叠,没有充分发挥不同类型储能的调频优势,导致经济性较差。

表5 不同方法下的优化配置结果

Table 5 Optimization results under different methods

采用方法	锂电池额定功率/MW	锂电池额定容量/(MW·h)	压缩空气储能额定功率/MW	压缩空气储能容量/(MW·h)	日净收益/万元	$\Delta f_{rms}/\text{Hz}$
本文方法	2.351	2.595	75.993	124.890	6.118	0.013 2
方法1	8.692	37.718	—	—	1.509	0.019 9
方法2	3.833	1.112	23.486	118.367	3.810	0.018 9

同时,通过对比混合的额定功率及额定容量配置结果,相较于经验模态分解的方法,本文采用的小波变换方法,其配置的额定容量较大。这样的配置结果有利于储能系统因容量小而进行的频繁充放电,有助于延长储能系统的使用寿命。

采用本文的优化配置方法,可使电网的频率波动相较于方法1减小了33.67%,相较于方法2减小了30.16%;日净收益较于方法1增加了305.43%,相较于方法2增加了60.58%。本文方法兼顾了储能系统的安全稳定运行与调频的经济性,使得整个系统的调频效果最优。

5 结论

针对混合储能二次调频系统并网控制模型不完善、缺乏短时与长时储能相耦合的混合储能系统的功率分配与容量配置方法、未能兼顾混合储能辅助火电机组进行电网二次调频的安全稳定运行与经济性问题。本文首先建立了包含火电机组、电池储能、压缩空气储能的混合储能二次调频系统模型;其次,提出了一种基于小波变换的混合储能二次调频容量配置方法;最后,综合分析了混合储能优化配置的调频效果与经济效益。具体结论如下。

1) 建立了混合储能辅助火电机组参与二次调频的区域电网等效模型。其中,火电机组选用再热汽轮机,以锂离子电池为研究主体构建包含多个电池单体的储能电池,采用非绝热双机压缩空气储能,并对压缩空气储能进行空气流量、温度以及入口导叶控制,在保证安全性的前提下同时增强了对压缩空气储能的输出功率调节精度。

2) 采用小波变换将ACE信号分解成高频、中频和低频分量。根据储能系统和传统火电机组的调频特性,分配给火电机组的ACE分量主要为波动较小但幅值较大的功率;分配给压缩空气储能的ACE分量主要为波动适中但幅值较大的功率;分配给锂离子电池储能的ACE分量主要为波动较大但幅值较小的功率。

3) 通过引入成本效益模型和评价指标,分析了10种配置方案的日净收益和调频效果。并与常用方法1和方法2比较,本文方法的电网频率波动分别减少了33.67%和30.16%,日净收益分别增加了305.43%和60.58%。本文方法兼顾了电网的安全稳定运行与调频的经济性,使得整个系统的调频效果最优。同时,该方法有助于延长储能系统的使用寿命,可对提升可再生能源消纳和用电系统的安全稳定运行提供理论指导。

参考文献

- [1] 魏妍萍,王军,李南帆.可再生能源接入对电网电能质量的影响分析[J].电网与清洁能源,2022,38(1): 108-114.
WEI Yanping, WANG Jun, LI Nanfan. An analysis of the influence of grid-connected renewable energy on power quality of power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 108-114.
- [2] 国家能源局.我国风电光伏发电装机规模超过煤电[EB/OL].[2024-08-02].https://www.nea.gov.cn/2024-08/02/c_1310783697.htm.
- [3] 郭峰,王悦,陆鑫,等.含高比例风电的新型电力系统的经济运行及储能配置[J].智慧电力,2023,51(11): 76-82.
GUO Feng, WANG Yue, LU Xin, et al. Economic operation and energy storage configuration of new power system with high penetration of wind power[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 76-82.
- [4] 郭佳俊,陈俊儒,刘雨珊,等.构网型新能源电网支撑性能测试评估[J].智慧电力,2023,51(12): 23-29.
GUO Jiajun, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. Support performance test and evaluation of grid-forming renewable energy systems[J]. Smart Power, 2023, 51(12): 23-29.
- [5] 李登峰,张澳归,刘育明,等.考虑设备安全的新能源场站参与电网频率协调控制方法[J].智慧电力,2023,51(9): 8-15.
LI Dengfeng, ZHANG Aogui, LIU Yuming, et al. Frequency coordination control method of power system contained renewable energy stations considering equipment safety[J]. Smart Power, 2023, 51(9): 8-15.
- [6] 黄俊滔,杨苓.基于粒子群算法的光储微电网谐波电流抑制参数组寻优策略[J].智慧电力,2023,51(7): 44-50.
HUANG Juntao, YANG Ling. Parameter group optimization strategy to suppress harmonic current of PV-storage microgrid based on PSO algorithm[J]. Smart Power, 2023, 51(7): 44-50.
- [7] 张玉,罗浩文,王瑜琳.基于模糊-下垂控制的光伏直流微电网混合储能功率分配及母线稳压研究[J].电测与仪表,2023,60(5): 51-58.
ZAHNG Yu, LUO Haowen, WANG Yulin. Research on hybrid energy storage power distribution and bus voltage stabilization of photovoltaic DC micro-grid based on fuzzy-droop control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 51-58.
- [8] ABBASSI A, ALI DAMI M, JEMLI M. A statistical approach for hybrid energy storage system sizing based on capacity distributions in an autonomous PV/Wind power generation system[J]. Renewable Energy, 2017, 103: 81-93.
- [9] 朱晓荣,韩啸.储能电池与常规机组配合参与一次调频的自适应控制策略[J].电测与仪表,2023,60(9): 34-42.
ZHU Xiaorong, HAN Xiao. The adaptive control strategy of energy storage battery cooperating with conventional generating units to participate in primary frequency regulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 34-42.
- [10] 郭国栋,徐倩雯,龚雁峰.考虑需求响应的互联交直流混合微电网的分布式经济调度模型[J].电测与仪表,2023,60(5): 116-125.
GUO Guodong, XU Qianwen, GONG Yanfeng. A distributed economic dispatching model for networked hybrid AC/DC microgrids considering demand response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 116-125.
- [11] 汪德成,李妍,张群,等.一种基于碳排放和能源成本的混合储能容量最优化配置方法研究[J].节能技术,2025,43(2): 127-136.
WANG Decheng, LI Yan, ZHANG Qun, et al. Allocation analysis of the energy storage system in integrated energy systems considering the carbon emissions and cost[J]. Energy Conservation Technology, 2025, 43(2): 127-136.
- [12] 戴毅茹,刘飞翔,曾依浦.基于光气电混合供能的区域综合能源系统优化配置研究[J].节能技术,2022,3(2): 110-117.
DAI Yiru, LIU Feixiang, ZENG Yipu. Optimal deployment of solar PV-gas-electricity combined regional integrated energy system[J]. Energy Conservation Technology, 2022, 3(2): 110-117.
- [13] 郭东泽,张继红,王庆宇,等.平抑风电出力波动的混合储能功率分配策略[J].储能科学与技术,2024,13(5): 1564-1573.
GUO Dongze, ZHANG Jihong, WANG Qingyu, et al. Hybrid energy storage power allocation strategy for smoothing wind power output fluctuations[J]. Energy

- Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1564–1573.
- [14] 于琳琳, 司瑞华, 常青青, 等. 基于区域控制偏差的电池储能参与电网二次调频的容量配置方法[J]. 可再生能源, 2023, 41(8): 1129–1136.
- YU Linlin, SI Ruihua, CHANG Qingqing, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation based on area control error[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(8): 1129–1136.
- [15] 程龙, 张方华. 用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 100–104, 128.
- CHENG Long, ZHANG Fanghua. Wavelet transform method for hybrid energy storage system smoothing power fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 100–104, 128.
- [16] GAO L, DAI Y P. A new linear model of fossil fired steam unit for power system dynamic analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2390–2397.
- [17] CHEN M, RINCON-MORA G A. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I–V performance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 504–511.
- [18] CALERO I, CAÑIZARES C A, BHATTACHARYA K. Compressed air energy storage system modeling for power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3359–3371.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 戴申华, 王琨玥, 曹蓓, 等. 基于 CEEMDAN 功率分解的火电厂混合储能容量优化配置[J]. 电气工程学报, 2024, 19(1): 57–66.
- DAI Shenhua, WANG Kunyue, CAO Bei, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage capacity in thermal power plants based on CEEMDAN power decomposition[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(1): 57–66.
-
- 收稿日期: 2024-09-20。 修回日期: 2025-07-24。
- 作者简介:
杨鼎全(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能与并网技术;
魏平(1980—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划与控制技术。
- (编辑 徐花荣)