

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.02.018

一种基于混合储能改善跟踪光伏发电出力特性方法的研究

王若谷¹, 解振学¹, 常小强², 高欣¹

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 光伏输出受天气影响具有较大波动性, 若直接接入电网则会对电网的电能质量造成严重影响。为减轻光伏电站并网功率对电网的影响, 提出了一种基于氢与电池混合储能改善跟踪光伏发电出力特性的方法。首先, 利用高斯函数逼近光伏预测功率, 形成光伏次日出力计划, 并根据次日凌晨电池 SOC 大小和氢储能调节灵活性对出力计划进行修正。考虑氢储能和电池储能运行状态, 设计了包含有主调度和协调调度的实时调度方案。最后, 通过算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 氢与电池混合储能系统; 跟踪光伏出力计划; 调度方法; SOC 区间

Research on Method for Improving Tracking Photovoltaic Power Generation Output Characteristics Based on Hydrogen and Battery Hybrid Energy Storage

WANG Ruogu¹, XIE Zhenxue¹, CHANG Xiaoqiang², GAO Xin¹

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Photovoltaic power has great fluctuation due to weather which, in case of being directly connected to the grid, will seriously affect the power quality of the grid. For reducing the influence of grid-connected power of PV station on the grid, a method based on Hydrogen and battery hybrid energy storage to improve the tracking of photovoltaic power generation output characteristics is proposed. Firstly, the Gaussian function is used to approximate the predicted PV power to form the PV output plan for the next day. And the PV output plan is modified in accordance with the SOC size of the battery in the early morning and the adjustment flexibility of Hydrogen energy storage. Considering the operation state of Hydrogen energy storage and battery energy storage, a real-time scheduling scheme including master scheduling and coordinated scheduling is designed. Finally, an example is given to verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Hydrogen and battery hybrid energy storage system; tracking PV power plan; scheduling; SOC range

0 引言

光伏出力具有波动性, 大量接入电网会影响电网电能质量^[1-3]。为减轻光伏对电网的影响, 根据其预测功率制定并网出力计划是一种可行方案。但光伏功率难以准确预测, 实际出力会偏离出力计划, 进而引起并网功率波动。储能电池因具有吞吐电能的能力可以补偿预测误差, 能够有效降低光伏出力波动对电网造成的冲击^[4-5]。但因为光伏出力

波动性强, 容易引起储能电池频繁充放电, 且储能电池在过低或过高荷电状态情况下出力会受到限制, 进而影响储能系统跟踪光伏出力计划的效果。相较于储能电池, 氢储能中电解槽的使用寿命长, 能够频繁吸收波动的光伏功率^[6]。但氢储能只能吸收多余的光伏功率, 而不能为系统提供功率, 即单一的氢储能仍不具备跟踪光伏出力的能力。如何有效地利用储能技术改善跟踪光伏出力特性已成为当下光伏发展中的一大难题。

收稿日期: 2023-06-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905605); 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院项目(风光氢储微电网系统的关键技术研究, 5226KY17001J)。

目前关于利用储能技术改善光伏计划出力特性方法的研究较多。文献[7]根据最大预测误差制定光伏出力计划误差范围,基于机会约束理论建立了光储日前跟踪计划出力优化模型,模型中考虑了储能 SOC 约束。文献[8]提出了只考虑储能容量限制的单因素平滑方法和同时考虑储能容量和电网功率限制的混合型平滑措施。文献[9]提出了带 SOC 自调整的平抑光伏波动控制策略,有效提高了储能系统运行的灵活性。文献[10]利用模糊聚类经验模态分解方法将光伏功率分为低频和高频两部分,低频部分作为并网功率,高频部分利用电池吸收。上述文献所提方法具有一定的光滑跟踪光伏功率作用,但均采用单一储能系统,单一储能系统中所有光伏波动均需由储能电池平抑,不利于储能寿命的保持,且单一储能系统一旦进入高 SOC 状态,将会失去调节能力。考虑到单一储能系统的不足,也有研究者着手研究混合储能系统。文献[11-12]从能量、爬坡功率等方面,研究了超级电容器、压缩空气、铅酸电池和飞轮储能之间的混合系统光滑光伏功率技术。文献[13]研究了超级电容器、燃料电池和电解槽稳定光伏功率的策略。当光伏与负荷之间出现功率差时优先使用超级电容器平抑,然后使用燃料电池,最后使用电解槽。文献[14]基于储能电池和电解槽提出了一种三阶段调度方法,可平滑光伏并网功率。混合储能的研究中大多采用电池储能和超级电容器的组合系统平抑光伏波动,也有部分研究了氢储能或电解槽,但仅局限于让氢储能或电解槽作为负载来吸收多余光伏功率,未充分考虑电解槽功率调节的灵活性。

基于以上分析,为克服单一电池储能的不足,在顾及氢储能平抑光伏波动时的调节灵活性的情况下,本文主要提出一种氢与电池混合系统的调度方法,可避免电池频繁充放电,和精确跟踪光伏发电计划。

1 系统设计

在进行电池储能与氢储能配合改善光伏出力的研究时,所研究的系统如图 1 所示。该系统中有两部分储能系统,分别是储能电池系统和氢储能系统,其中氢储能主要为电解槽,考虑到燃料电池的氢电转换效率低^[15],本文只考虑利用氢储能制氢,不再次利用氢发电。电池储能和氢储能相互配合,跟踪光伏出力计划,此计划即为向电网输送的稳定光伏功率。

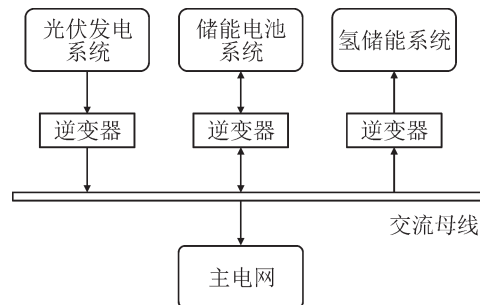


图1 光伏电站系统结构图

Fig. 1 System structure diagram of photovoltaic power station

2 电池储能与氢储能配合时的调度方法

由于光伏预测功率与实际功率之间存在误差,为确保光伏电站具备光滑且稳定的输出,需要对光伏电站的光伏功率进行跟踪平滑^[16-17]。在传统的单一电池储能系统中,因光伏功率的波动容易引起电池频繁充放电^[18],会影响电池使用寿命,且单一电池为了确保跟踪效果,电池需要在过低或过高荷电状态范围内继续运行,面临调节能力差和过充过放的问题。氢储能主要由电解槽构成,输入功率波动对其寿命影响不明显。基于二者的优点,设计氢与电池混合系统跟踪光伏出力计划的方法,具体思路为:利用高斯函数逼近短期光伏预测功率,形成次日光伏出力计划,并根据次日凌晨电池 SOC 大小和氢储能调节灵活性对出力计划进行修正;次日的实时调度包括主调度和协调调度两种模式,其中在主调度区中,为避免电池频繁充放电优先利用氢储能进行调节,而协调调度中电池 SOC 临近限值,电池调节能力差,为避免因电池出力受限而导致跟踪误差增大情况的发生,协调调度以减少储能电池在该区间运行时间为目的。

2.1 光伏出力计划制定

短期光伏预测功率与实际功率变化趋势大致相同^[19],可以以预测功率为参考制定次日光伏出力计划。考虑到光伏功率曲线形状与高斯函数曲线形状接近,因此采用高斯函数来逼近短期光伏预测功率,以高斯函数曲线作为光伏次日调度计划^[20]。高斯函数可表述为^[21-22]

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (1)$$

式中: a 代表曲线幅值; b 代表曲线中心; c 代表曲线宽度。

利用高斯函数逼近光伏预测功率时,最重要的是确定 a 、 b 、 c 3 个参数。为提高逼近效果,提出利用粒子群算法,以光伏短期预测功率曲线和高斯曲

线各采样点间的欧式距离和最小为目标进行最优高斯曲线的确定,目标函数可以表述为

$$\min \text{error} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{pv \cdot i} - P_{plan \cdot i})^2} \quad (2)$$

式中: error 为光伏预测功率与高斯曲线之间的总误差; $P_{pv \cdot i}$ 为光伏预测功率; $P_{plan \cdot i}$ 为高斯曲线,代表光伏出力计划; n 为采样点个数。

2.2 光伏出力计划修正

由于电解槽具备最小开启功率限制和超功率运行能力^[23-24],且为了使得氢储能具备灵活的功率调节能力,本文设定电解槽次日运行计划为日出后以额定功率 P_h 运行,这样当光伏功率发生变化时,氢储能可以在 $[20\% P_h, 130\% P_h]$ 范围内进行调节,其中 $20\% P_h$ 为电解槽最小开启功率, $130\% P_h$ 为电解槽最大运行功率。为给氢储能预留出 P_h 大小的运行功率,需要在光伏出力计划中减去电解槽次日运行计划部分,所以光伏计划为

$$\begin{cases} P'_{plan} = \max(P_{plan} - P_h, 0), & P_{plan} > 0 \\ P'_{plan} = 0, & P_{plan} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: P'_{plan} 为考虑氢储能调节能力时的光伏出力计划修正结果; P_{plan} 为利用高斯函数逼近预测功率而制定的光伏出力计划。

此外,为了提高日出后储能电池具备灵活的充放电调节能力,本文提出根据次日凌晨储能电池 SOC 大小,对光伏出力计划再次进行修正,修正过程如下:

次日凌晨检测储能电池 SOC,若 $SOC > 50\%$,则由电池向氢电解槽放电,放电功率大小恒为 P_h ,直至电池的 $SOC = 50\%$ 时停止放电。此种情况下,光伏计划出力不用修正, $P_{Gp} = P'_{plan}$; 若 $SOC < 50\%$,则需要修正日出后小范围内的光伏计划出力,次日日出后优先利用光伏为电池充电至 50% 附近,然后进入跟踪光伏计划出力模式。为尽快将电池的电量充至预设值 50% 附近,采用电池的最大充电功率进行计算预充电持续时间,计算过程见式(4)。

$$T_{pre} = \frac{(50\% - SOC(\%))C}{(100 \times P_{Bmax} \times \eta_c)} \quad (4)$$

式中: T_{pre} 为预充电持续时间; $SOC(\%)$ 是凌晨时电池 SOC; C 是电池容量; η_c 是电池充电效率; P_{Bmax} 为电池最大充放电功率。

则在日出后 $[time_1, time_1 + T_{pre}]$ 时段内对光伏计划出力进行如下修正:

$$P_{Gp} = \begin{cases} 0, & P'_{plan} < P_{Bmax} \\ P'_{plan} - P_{Bmax}, & P'_{plan} \geq P_{Bmax} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $time_1$ 为日出时刻,即光伏开始出力的时刻。

2.3 实时调度

为保证储能电池使用寿命^[25-32],在实时调度中优先利用氢储能平滑光伏实时功率与光伏出力计划之间的功率波动,当氢储能无法平抑波动时再利用储能电池进行平抑。氢储能可调节范围为 $[20\% P_h, 130\% P_h]$,当氢储能按照运行计划以额定功率 P_h 运行时,在光伏发生波动的情况下,氢储能可减少输入功率范围为 $[20\% P_h, P_h]$,吸收外部功率范围为 $[P_h, 130\% P_h]$,即氢储能等效向外提供功率能力强于吸收外部功率的能力。氢储能吸收功率能力的不足需要利用储能电池来弥补,容易导致储能电池充电过程强于放电过程。为避免储能电池频繁充放电和 SOC 过高情况的发生,在实时调度中根据电池 SOC 的不同将调度过程分为主调度和协调调度两种。储能电池 SOC 划分示意图见图 2。

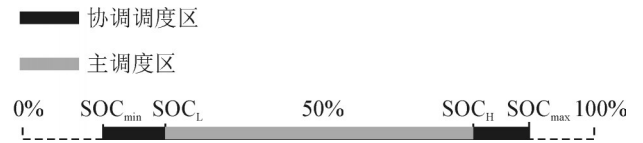


图2 储能电池 SOC 划分示意图
Fig. 2 SOC division diagram of energy storage battery

如图 2 所示,将储能电池 SOC 以 4 个 SOC 点分为 3 个 SOC 区间^[33],在这 3 个 SOC 区间里采用不同的调度方法。其中 SOC 的 4 个点是 SOC_{min} 、 SOC_L 、 SOC_H 、 SOC_{max} , 3 个不同的 SOC 区间是 $SOC_{min} < SOC \leq SOC_L$ 、 $SOC_L < SOC \leq SOC_H$ 和 $SOC_H < SOC \leq SOC_{max}$, SOC_{min} 是储能电池放电最小 SOC 限值; SOC_L 是判断储能电池 SOC 接近 SOC_{min} 与否的阈值,当 $SOC < SOC_L$ 时说明电池的 SOC 已接近其可放电的最小值,但还可以进行放电; SOC_H 是判断储能电池 SOC 接近 SOC_{max} 与否的阈值,当 $SOC > SOC_H$ 时说明电池的 SOC 已接近其可充电的最大值,但还可以进行充电; SOC_{max} 是储能电池充电时最大的 SOC 限值。

当荷电状态处于 $SOC_{min} < SOC \leq SOC_L$ 时,储能电池放电功率不能超过其额定功率,但可正常充电,充电功率不超过 P_{Bmax} ,此阶段采用协调调度方法。当荷电状态处于 $SOC_L < SOC \leq SOC_H$ 时,储能电池可正常充放电,充放电功率不超过 P_{Bmax} ,但为了避免储能电池以大功率频繁充放电而影响寿命,优先使用氢储能进行调节,此阶段采用主调度方法。当荷电状态处于 $SOC_H < SOC \leq SOC_{max}$ 时,应尽

可能减少储能电池在该状态的运行时间,此阶段采用协调调度方法。

2.3.1 主调度方法

计算功率波动 $P_s = P_{Gp} + P_h - P_t$, 其中: P_{Gp} 为光伏计划出力; P_t 为光伏实时出力。

1) $|P_s| < \delta$ 时, 功率波动在误差范围内, 储能系统不动作, 氢储能以 P_h 大小按计划运行。其中, δ 为跟踪精度。

2) $P_s > \delta$ 时, 光伏实时出力小于光伏与氢储能出力计划之和, 优先通过减小氢储能运行功率来补偿功率缺额, 若当氢储能运行功率减小到 $20\% P_h$ 时, 依然存在功率缺额时, 利用储能电池向外放电补偿剩余功率, 储能电池最大放电功率不能超过 P_{Bmax} 。

3) $P_s < -\delta$ 时, 光伏实时功率大于光伏与氢储能出力计划之和, 优先通过增大氢储能运行功率来吸收多余光伏功率, 若当氢储能运行功率增大到 $130\% P_h$ 时依然存在功率盈余, 则利用储能电池进行吸收剩余光伏功率。

主调度过程可用图3所示框图表示。

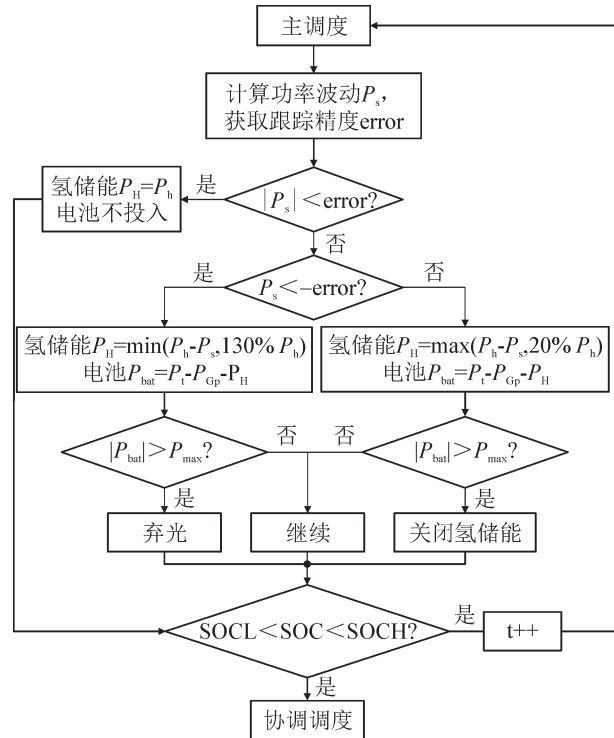


图3 主调度流程图

Fig. 3 Main dispatching flow chart

2.3.2 协调调度方法

2.3.2.1 $SOC_{min} < SOC < SOC_L$ 时

在该种情况下储能电池的SOC偏小, 为避免储能电池过度放电, 此阶段关闭氢储能, 由储能电池负责跟踪光伏功率。重新计算功率波动为

$$P_s = P_{Gp} - P_t。$$

1) $|P_s| \leq \delta$ 时, 光伏出力在允许范围内, 储能电池和氢储能均不启动。

2) $P_s > \delta$ 时, 光伏出力较小, 氢储能不启动, 需储能电池进行补偿 $P_{bat} = \min\{P_e, P_{Gp} - P_t\}$ 。当 $SOC \leq SOC_{min}$, 储能电池退出运行, 停止放电。其中, P_e 为储能电池的额定功率。

3) $P_s < -\delta$, 光伏超计划出力, 此时多余光伏功率全部为电池充电, 分两种情况:

① $P_t - P_{Gp} < P_{Bmax}$ 时, 储能电池的充电功率为 $P_{bat} = P_t - P_{Gp}$, 氢电解槽依然处于关闭状态。

② $P_t - P_{Gp} > P_{Bmax}$ 时, 优先为储能电池充电, 充电功率为 $P_{bat} = P_{Bmax}$, 氢电解槽的开启与否需要判断, 判断方法如下:

a、若 $0 < P_t - P_{Gp} - P_{Bmax} < P_{Eon}$, 则仅靠多余的光伏出力是不能让电解槽进行工作, 电解槽关闭。

b、若 $P_t - P_{Gp} - P_{Bmax} > P_{Eon}$, 则多余的光伏出力已经能够使电解槽进行工作, 所以此时 $P_E = P_t - P_{Gp} - P_{Bmax}$ 。

检测储能电池的SOC, 当SOC小于 SOC_L 时, 下一时刻继续执行协调调度; 当SOC大于 SOC_L 时, 下一时刻进入主调度。

2.3.2.2 $SOC_H < SOC < SOC_{max}$ 时

电池SOC较高, 需利用氢储能消耗部分电池能量, 此时功率波动为 $P_s = P_{Gp} + P_h - P_t$ 。

1) $|P_s| < \delta$ 时, 光伏出力在允许范围内, 储能电池不动作, 氢储能以功率 P_h 运行。

2) $P_s > \delta$ 时, 光伏实时功率小于出力计划, 优先利用储能电池向外放电补偿, 其次通过减少氢储能功率补偿。

3) $P_s < -\delta$ 时, 光伏超计划出力, 为使得储能电池SOC能够在较短时间内回到正常范围内, 电池和光伏一起向氢储能供电, 氢储能始终以最大功率运行。直至SOC小于50%时, 再由主调度进行跟踪。

协调调度过程可用图4所示框图表示。

3 算例

某典型日光伏功率曲线见图5。典型日光伏短期预测功率和实时功率数据见图5(a)所示, 利用粒子群算法对短期预测功率进行逼近, 粒子群算法参数见表1, 氢储能和储能电池相关参数见表2, 最优逼近功率曲线结果见表3和图5(b)。

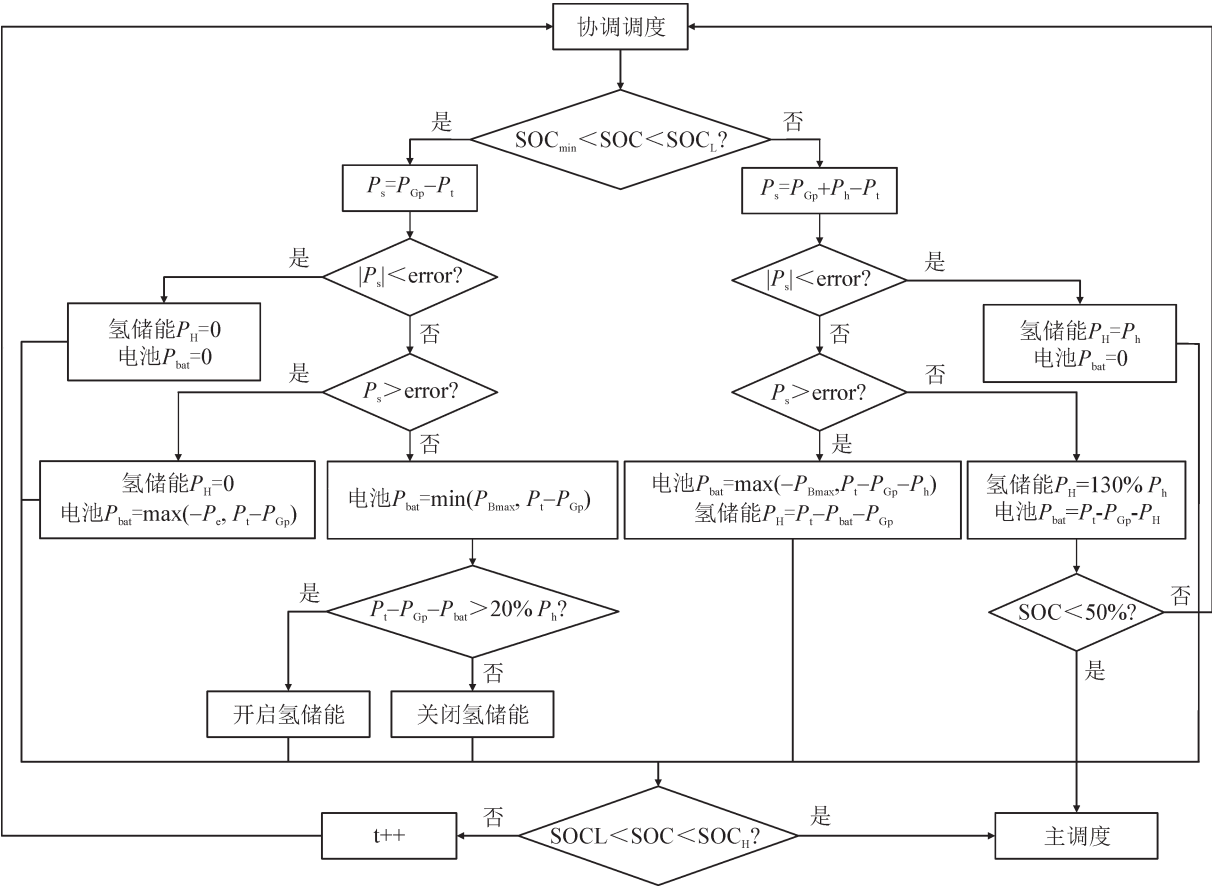


图4 协调调度流程图
Fig. 4 Coordinated dispatching flow chart

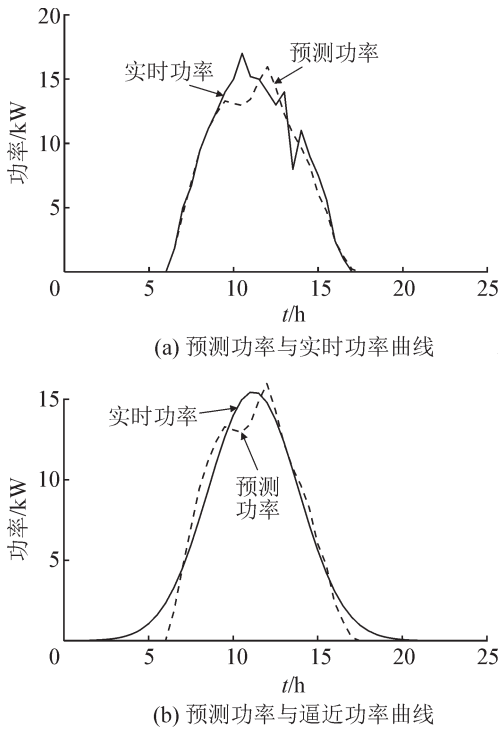


图5 典型光伏短期预测功率、实时功率及高斯逼近功率曲线
Fig. 5 Typical photovoltaic short-term predicted power, real-time power and Gaussian approximation power curves

表1 粒子群算法参数 Table 1 Parameters of PSO	
参数	数值
粒子维度	[a,b,c]
粒子个数	50
迭代次数	100
学习因子	[2,2]

表2 混合储能配置参数 Table 2 Configuration parameters of hybrid energy storage	
参数	数值
氢储能额定功率 P_H /kW	3
储能电池额定容量/kWh	5
储能电池最大充放电功率/kW	2.5
$[SOC_{min}, SOC_{max}]$	[0.1, 0.9]
$[SOC_L, SOC_H]$	[0.2, 0.8]
跟踪精度 δ	0

表3 最优逼近功率曲线参数 Table 3 Optimal approximation power curve parameters		
a	b	c
15.485	11.198	2.671

为了提高储能电池和氢储能调节的灵活性，对逼近功率曲线进行修正，修正结果见图6，其中图6(a)是考虑电池在日出后灵活性时的修正结果，图6(b)是同时考虑电池与氢储能灵活性时的光伏出力计划修正结果。

图 6(b)中光伏计划出力修正功率为次日光伏电站向电网输送的最终功率计划,在次日的实时调度中储能电池和氢储能应确保光伏电站输出功率能够准确跟踪此修正功率。

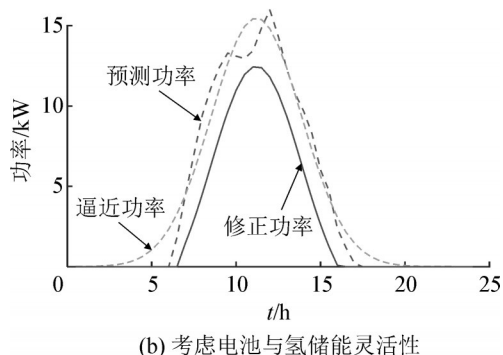
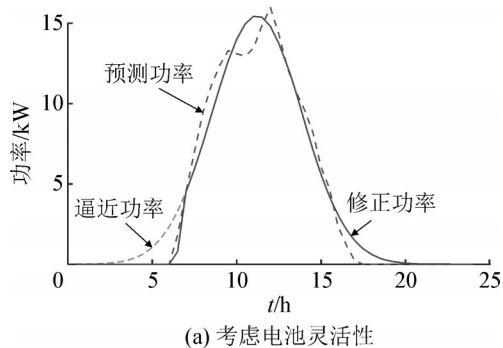


图 6 光伏出力计划修正结果

Fig. 6 Correction results of PV output plan

利用 2.3 节中的实时调度方法,对该典型日光伏电站进行调度,调度结果见图 7。

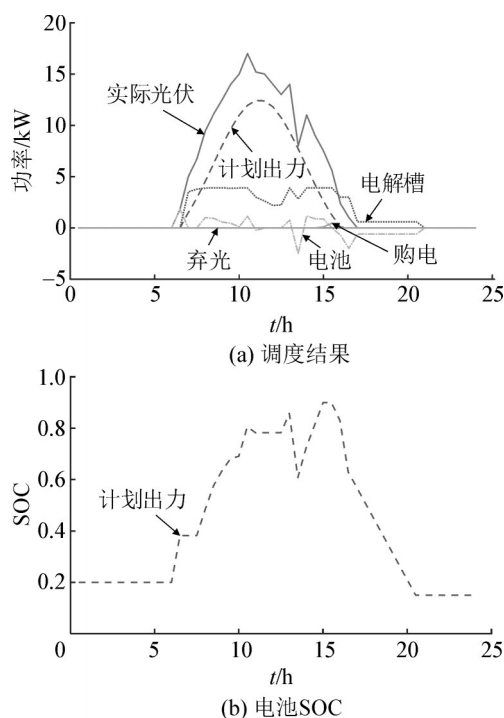


图 7 典型日光伏功率跟踪结果

Fig. 7 Typical daily photovoltaic power tracking results

从图 7(a)中可以看出,在日出后优先利用光伏功率为储能电池进行充电, SOC 充至 40% 附近停止。在此后的调度过程中优先利用氢储能进行调节,且氢储能输入功率在额定功率附近波动。相比于氢储能,储能电池的调节功率变化范围小,从图 7 (b)可以看出储能电池 SOC 变化平稳,有利于寿命的维持。由于在修正光伏出力计划时考虑了氢储能调节的灵活性,光伏实际功率整体上高于光伏计划出力,且氢储能吸收功率的能力弱于其提供功率的能力,容易导致储能电池长时间运行在高 SOC 状态,但经过本文所提协调调度方法的调节,储能 SOC 主要在 20%~80% 范围内变化,有利于提高储能电池调节的灵活性。

4 结语

本文所提出的利用电池储能和氢储能跟踪光伏出力计划的方法,采用高斯函数逼近预测功率,形成光伏出力计划,根据次日凌晨储能电池 SOC 大小和氢储能调节灵活性对光伏出力计划进行修正。在实时调度中根据电池荷电状态的不同,将调度分为主调度和协调调度,在主调度中优先利用氢储能进行调节,避免了储能电池频繁的充放电,而在协调调度中以保证储能电池调节的灵活性为目的,尽可能减少储能电池在过高或过低荷电状态区间运行时间,有利于提高对光伏出力的跟踪能力。

本文提出的调度方法可以精确跟踪光伏计划出力,使光伏电站拥有常规电源一样的出力特性,减少了光伏电站对电力系统的影响,也为大量光伏电站并网提供了理论依据。

参考文献

- [1] 丁明,陈忠,苏建徽,等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-25.
DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25.
- [2] 张小雷. 风力发电和光伏发电并网问题研究[J]. 中国设备工程, 2021(1): 206-208.
- [3] 王鸣阳,刘昌嘉,刘仁和. 并网型光伏电站储能功率波动平滑控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 115-120.
WANG Mingyang, LIU Changjia, LIU Renhe. A study on the smooth control of energy storage power fluctuation of grid-connected photovoltaic power station[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2022, 38(1): 115-120.

- [4] 林达,赵波,李鹏,等. 铅炭电池实时平抑光伏电站功率波动的方法[J]. 电网技术,2018,42(5):1518-1525.
LIN Da, ZHAO Bo, LI Peng, et al. Real-time fluctuation smoothing method for photovoltaic power station using lead carbon battery[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1518-1525.
- [5] 李德鑫,王佳蕊,张家郡. 基于光伏波动性的储能出力特性分析[J]. 电网与清洁能源,2021,37(2):99-107.
LI Dexin, WANG Jiarui, ZHANG Jiajun. Analysis of energy storage output characteristics based on photovoltaic volatility[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2021, 37(2):99-107.
- [6] 王侃宏,赵政通,罗景辉,等. 风光互补发电制氢储能系统模拟仿真研究及性能分析[J]. 节能,2019,38(11):79-84.
- [7] 杨婷婷. 用于跟踪光伏发电计划出力的储能系统控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
- [8] 常健,陈峦,董立淑,等. 光伏并网有功功率平滑措施研究[J]. 贵州电力技术,2017,20(3):17-22.
CHANG Jian, CHEN Luan, DONG Lishu, et al. Research on smoothing measures of photovoltaic grid-connected active power[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2017, 20(3):17-22.
- [9] 薛宇石,徐少华,李建林,等. 光伏电站储能系统多种工作模式协同运行与切换策略研究[J]. 电器与能效管理技术,2017(13):46-55.
XUE Yushi, XU Shaohua, LI Jianlin, et al. Research on cooperative operation and switching strategy of energy storage system in photovoltaic power plant[J]. Low Voltage Apparatus, 2017(13):46-55.
- [10] 杨锡运,曹超,任杰,等. 利用储能系统平滑光伏波动的模糊聚类经验模态分解方法[J]. 高电压技术,2016,42(7):2127-2133.
YANG Xiyun, CAO Chao, REN Jie, et al. Control method of smoothing PV power output with battery energy storage system based on fuzzy ensemble empirical mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2127-2133.
- [11] 张锐. 混合储能能在并网光伏功率波动平抑中的应用[D]. 济南:山东大学,2020.
- [12] 李卿. 考虑蓄电池SOC安全范围的风光储发电系统功率平抑策略研究[D]. 银川:宁夏大学,2018.
- [13] KAMAL T, HASSAN S Z, ESPINOSA-TRUJILLO M J, et al. An optimal power sharing and power control strategy of photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2016, 8(3):035301.
- [14] LIANG Zhirui, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua, et al. Three-stage scheduling scheme for hybrid energy storage systems to track scheduled feed-in PV power[J]. Solar Energy, 2019, 188(5):1054-1067.
- [15] 许传博,刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望[J]. 中国工程科学,2022,24(3):89-99.
XU Chuanbo, LIU Jianguo. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: application value, challenges, and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3):89-99.
- [16] 朱秋璇. 混合储能平抑光伏发电功率预测误差的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2021.
- [17] 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.
- [18] 於跃,高文根,何飞帆,等. 基于三频段分解的混合储能功率分配策略研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(9):27-33.
YU Yue, GAO Wengen, HE Feifan, et al. Research on power allocation strategy of hybrid energy storage based on three-band decomposition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(9):27-33.
- [19] 茆美琴,洪嘉玲,张榴晨. 考虑光伏出力预测误差修正的储能优化配置方法[J]. 太阳能学报,2021,42(2):410-416.
MAO Meiqin, HONG Jialing, ZHANG Liuchen. Energy storage optimization configuration method considering conditional forecast error correction[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(2):410-416.
- [20] 梁芷睿,宋政湘,王建华,等. 液态金属电池储能系统在光氢耦合微电网中的优化配置[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):64-69.
LIANG Zhirui, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua, et al. Optimal configuration of liquid metal battery energy storage system in photovoltaic and Hydrogen coupled microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):64-69.
- [21] 王丹平,陈之栩,涂孟夫,等. 考虑大规模风电接入的备用容量计算[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):24-28.
WANG Danping, CHEN Zhixu, TU Mengfu, et al. Reserve capacity calculation considering large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21):24-28.
- [22] GE Yan, ZHOU Chengke, HEPBURN D M. Domestic electricity load modelling by multiple Gaussian functions[J]. Energy and Buildings, 2016, 126(5):455-462.
- [23] 沈小军,聂聪颖,吕洪. 计及电热特性的离网型风电制氢

- 碱性电解槽阵列优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3):463-472.
- SHEN Xiaojun, NIE Congying, LYU Hong. Coordination control strategy of wind power-Hydrogen alkali line electrolyzer bank considering electrothermal characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 463-472.
- [24] FANG Ruiming, LIANG Yin. Control strategy of electrolyzer in a wind-hydrogen system considering the constraints of switching times[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(46): 25104-25111.
- [25] 程林, 章海静, 夏楠, 等. 含大规模储能的多端直流输电系统协调控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 91-99.
- CHENG Lin, ZHANG Haijing, XIA Nan, et al. A study on the coordinated control strategy of the multi-end DC transmission system with large-scale energy storage[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 91-99.
- [26] 王凯, 郑会奇. 浅谈35 kV及以下油浸式光伏发电用变压器的温升设计[J]. 变压器, 2023, 60(1): 8-10.
- WANG Kai, ZHENG Huiqi. Discussion on temperature rise characteristics of 35 kV and below oil-immersed photovoltaic transformers[J]. Transformer, 2023, 60(1): 8-10.
- [27] 李正力, 李肖辉, 王京, 等. 锂离子电池储能电站热失控预警与防护研究进展[J]. 高压电器, 2023, 60(1): 87-99.
- LI Zhengli, LI Xiaohui, WANG Jing, et al. Research progress on thermal runaway warning and protection of Lithium-ion battery in energy storage power station [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 60(1): 87-99.
- [28] 周毅, 黄森, 石少伟, 等. 基于分群结构优化的储能配置规划[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 126-133.
- ZHOU Yi, HUANG Sen, SHI Shaowei, et al. Optimal planning of energy storage based on site selection of cluster structure optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 126-133.
- [29] 袁昊, 金鑫, 戈君. 基于模糊决策算法的主动配电网储能容量最佳配比方法[J]. 东北电力技术, 2021, 42(6): 45-48.
- YUAN Hao, JIN Xin, GE Jun. Optimal allocation method of energy storage capacity in active distribution network based on fuzzy decision algorithm[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(6): 45-48.
- [30] 邱纯, 应展烽, 冯奕, 等. 计及碳配额的混合储能综合微能源网优化运行研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 119-127.
- QIU Chun, YING Zhanfeng, FENG Yi, et al. Optimal operation of hybrid energy storage integrated micro-energy network considering Carbon quote[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 119-127.
- [31] 张伟骏, 李智诚, 陈大玮, 等. 配网侧分布式储能系统的随机优化配置和选址方法[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 125-135.
- ZHANG Weijun, LI Zhicheng, CHEN Dawei, et al. Stochastic optimal configuration and site selection method of grid-side distributed energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 125-135.
- [32] 赵熙临, 桂玥, 付波, 等. 考虑SOC的自适应分组策略在储能参与一次调频中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 116-125.
- ZHAO Xilin, GUI Yue, FU Bo, et al. Adaptive grouping strategy of the battery energy storage system participating in the primary frequency regulation considering SOC[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 116-125.
- [33] 田春光, 田利, 李德鑫, 等. 基于混合储能系统跟踪光伏发电输出功率的控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 75-83.
- TIAN Chunguang, TIAN Li, LI Dexin, et al. Control strategy for tracking the output power of photovoltaic power generation based on hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 75-83.

作者简介:

王若谷(1984—),男,高级工程师,主要从事于电网中新能源与储能的研究。E-mail:ZZZX_Wangyonghui@126.com。

解振学(1967—),男,高级工程师,主要从事于电网中新能源与储能的研究工作。

常小强(1995—),男,研究生,主要从事于微电网及其控制的研究工作。

高欣(1993—),女,工程师,主要从事于电网中新能源与储能的研究工作。