

光储联合发电系统调度优化控制策略^{*}

曹 帅¹, 吴 鑫¹, 刘锦玉¹, 张译铎²

(1. 中国科学院沈阳计算技术研究所有限公司, 辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳农业大学 信息与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘 要: 传统储能控制的调节速度较慢, 难以满足高比例新能源接入电网后的精准控制, 提出将调度周期内误差率引入储能系统优化控制策略, 利用误差率在电流闭环控制前加入反馈误差环节, 对储能电池的 DC/DC 双向控制器进行优化控制。以光储联合发电系统的有功出力与计划有功出力均方根误差最小为目标, 模型中考虑了储能电池荷电状态和联合发电系统允许偏差的限制条件。给出了双向 DC/DC 变换器中 BUCK/BOOST 电路的传递函数, 然后给出了光储联合发电系统并网运行时 PQ 控制策略, 采用有功功率和无功功率解耦控制。基于 MATLAB/Simulink 仿真平台, 建立了光储联合发电系统的仿真系统, 通过仿真结果分析, 验证了提出控制策略的有效性。

关键词: 光储联合系统; 调度优化; 解耦控制; 控制策略

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)07-0089-06

doi: 10. 12177/emca. 2023. 077

Scheduling Optimization Control Strategy of PV-and-Storage Combined Power Generation System^{*}

CAO Shuai¹, WU Xin¹, LIU Jinyu¹, ZHANG Yiduo²

(1. Shenyang Institute of Computing Technology Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The adjustment speed of traditional energy storage control is relatively slow, making it difficult to meet the precise control after a high proportion of new energy is connected to the power grid. The error rate in the scheduling cycle is introduced into the optimal control strategy of the energy storage system, and the feedback error link is added before the current closed-loop control using the error rate to optimize the control of the DC/DC bidirectional controller of the energy storage battery. With the goal of minimizing the root-mean-square error between the active output and the planned active output of the photovoltaic (PV)-and-storage combined generation system, the mathematical model takes into account the limiting conditions of the state of charge of the energy storage battery and the allowable deviation of the combined power generation system. The transfer function of the BUCK/BOOST circuit in the bidirectional DC/DC converter is given. Then the PQ control strategy for the grid-connected operation of the PV-and-storage combined generation system is given, and the active power and reactive power decoupling control is adopted. Based on the MATLAB/simulink simulation platform, the simulation system of the PV-and-storage combined

收稿日期: 2023-03-10; 收到修改稿日期: 2023-04-07

^{*} 基金项目: 沈阳市科学技术计划项目 (22-322-3-26)

作者简介: 吴 鑫 (1987—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力调控控制。

曹 帅 (1991—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力调控控制。

刘锦玉 (1996—), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为电力调控控制。

generation system is established. The effectiveness of the control strategy proposed in this paper is verified by the analysis of the simulation results.

Key words: PV-and-storage combined system; scheduling optimization; decoupling control; control strategy

0 引言

近年来新型清洁能源开始飞速发展,据国家统计局公布的数据显示,截止 2022 年一季度末,我国光伏发电设备的装机容量为 3.2 TW,到 2030 年我国光伏装机总容量将达到 12 TW 以上^[1]。但是光伏发电效率受温度、光照等因素影响,其出力呈现出一定的不确定性^[2]。随着光伏发电的普及,光伏发电出力不确定性对区域电网的调度产生了极大的挑战^[3]。

为了减少光伏出力不确定性对电网的影响,国内外学者提出利用光伏与储能电池组合成光储联合系统的方法,利用储能电池平滑光伏的有功出力^[4]。文献[5]提出基于多电池组电池荷电状态(SOC)一致性的光伏功率波动平抑策略,试验证明了当有电池组作为储能参与时能有效减少光伏功率波动。文献[6]提出一种微燃机与储能电池惯量互补的控制方法,以达到抑制系统并网点波动的目的。文献[7]提出利用直流母线电压和光伏无功功率对光储联合发电系统进行控制,能有效提高系统遭遇故障时的暂态稳定性,但该方法投资较大。文献[8]提出了一种基于源-网-荷协同优化的配电网光储联合系统规划方法,该方法增加了投资商收益,但是忽略了弃光的问题。文献[9]以系统发电成本最小化和光伏消纳最大化为目标,提出一种调度优化策略。文献[10-11]在构建光伏、蓄电池数学模型基础上,提出了以用电费用最低为优化目标,采用控制并网频率对智能小区进行能量的调度优化策略。目前关于光储联合系统的研究存在大量弃光、内部控制不够完善的缺点,如何保证光储联合发电系统的出力在不弃光的条件下满足区域电网的调度要求,成为了目前最棘手的问题之一。

针对光储联合系统弃光现象严重、控制不精确的问题,本文对储能部分的控制策略进行改进,提出一种新型光储联合系统控制策略,保证在不弃光的前提下,使得光储联合发电系统的出力满足区域电网的调度要求。

1 光储联合系统设计

1.1 光储联合系统结构

本文采取的光储联合系统结构如图 1 所示。主要包括光伏发电系统、储能系统和负载等 3 个结构模块^[12]。光伏发电系统经直流变压模块升压,并入直流母线,在最大功率点跟踪(MPPT)模式运行;储能系统经双向直流变换器连入直流母线,实现能量双向流动。



图 1 光储联合系统的结构图

1.2 确定储能电池容量的数学模型及求解方法

在调度周期内,且不弃光的前提下,利用储能电池的充放电调节光储联合发电系统的输出功率,实现光储联合发电系统的计划输出功率实时跟踪发电计划,即实现无偏差调度^[13]。

1.2.1 数学模型

(1) 目标函数。确定储能电池容量的目标函数为

$$\min f(x) = \sqrt{\sum_{t=1}^T [P_{PV}(t) + P_S(t) - P_L(t)]^2} \quad (1)$$

式中: T 为调度周期; $P_{PV}(t)$ 为 t 时段光伏系统输出有功功率; $P_S(t)$ 为 t 时段储能系统输出有功功率; $P_L(t)$ 为 t 时段计划输出有功功率。

(2) 储能电池约束条件。SOC 是衡量电池的一个重要参数,即电池在一定的放电倍率下,剩余电量与相同条件下额定容量的比值^[11]。储能电池的 SOC 需要满足约束如下

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (2)$$

式中: S_t 为 t 时段电池的荷电状态; $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$ 分别为允许的最小、最大荷电状态。

t 时段电池的荷电状态为

$$S_i = (1 - \rho) S_{i-1} - \Delta S_i \quad (3)$$

$$\Delta S_i = \begin{cases} P_s(t) \eta_c \Delta t, & P_s(t) \leq 0 \\ \frac{P_s(t)}{\eta_d} \Delta t, & P_s(t) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ 为蓄电池的自持放电率; ΔS_i 为时间段内的电量变化, 正值表示放电, 负值表示充电; η_c 为充电效率; η_d 为放电效率; Δt 为每个时段的间隔时间。

1.2.2 求解方法

本文采用粒子群算法求解 1.2.1 节中数学模型, 确定储能电池的容量^[14], 具体流程如图 2 所示。

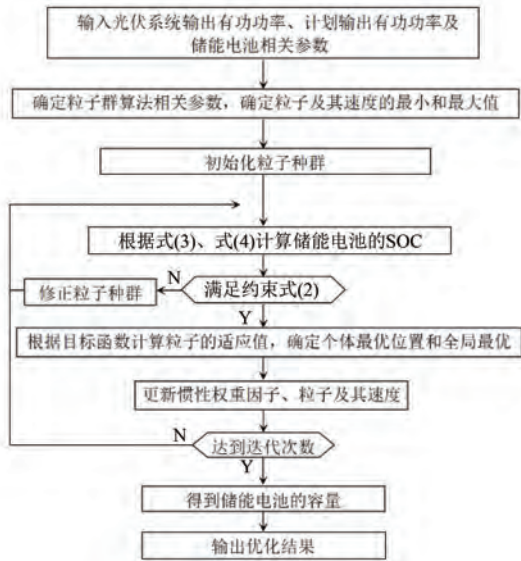


图2 模型求解流程图

2 光储联合系统的控制模型

为了实现无偏差调度优化, 在调度周期内, 光储联合系统需要实现精准控制, 即在调度周期内误差率 λ 的绝对值最小, λ 表达式为

$$\lambda = \frac{P_{pv}(t) + P_s(t) - P_L(t)}{P_L(t)} \quad (5)$$

同时需要满足储能电池的 SOC 约束, 还需要满足光储联合发电系统有功出力约束条件:

$$P_{t,\min} \leq P_t \leq P_{t,\max} \quad (6)$$

式中: P_t 为光储联合发电系统出力; $P_{t,\min}$ 、 $P_{t,\max}$ 分别为光储联合发电系统的允许偏移最小值和最大值。

3 光储联合系统控制策略

3.1 双向 DC/DC 变换器模型

双向 DC/DC 变换器是实现直流电能双向流动的装置, 主要应用于混合动力汽车和直流不间断供电系统等场合^[15]。本文利用 DC/DC 变换器对光伏系统和储能系统进行控制, 双向直流变换器采用经典 BUCK/BOOST 电路拓扑, 具备升降压双向变换功能, 即升降压斩波电路。其结构图如图 3 所示。

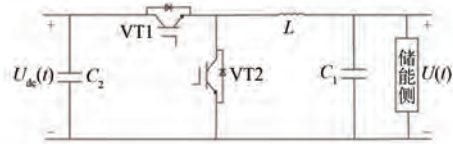


图3 双向 DC/DC 变换器结构图

图 3 中, $U_{dc}(t)$ 、 $U(t)$ 分别为直流母线电压和储能电池端电压; VT1、VT2 为开关管; L 为双向电感; C_1 、 C_2 分别为储能侧等效电容和直流母线侧等效电容。

BOOST 电路传递函数为

$$G_{v1}(t) = \frac{I_L L t + (1 - D) U_{dc}(t)}{C_2 L t^2 + \frac{L}{R t} + (1 - D)^2} \quad (7)$$

$$G_{i1}(t) = \frac{U_{dc}(t) \left(C_1 t + \frac{1}{R_{dc}} \right) + (1 - D) I_L}{C_2 L t^2 + \frac{L}{R t} + (1 - D)^2} \quad (8)$$

式中: I_L 为电感电流; D 为占空比; R 、 R_{dc} 分别为储能侧等效电阻和直流母线侧等效电阻。

BUCK 电路传递函数为

$$G_{v2}(t) = \frac{U_{dc}(t)}{C_2 L t^2 + \frac{L}{R t} + 1} \quad (9)$$

$$G_{i2}(t) = \frac{U_{dc}(t) (C_2 t + 1)}{C_2 L t^2 + \frac{L}{R t} + 1} \quad (10)$$

在 BUCK 电路中, 电感除了实现储能作用外, 还能实现降压的作用, 若电感 L 的数值过小, 会导致工作时, 储存的磁能较少, 难以降低电路电压。平波是电容在 BUCK 电路中的重要作用之一, 若电容 C 的数值过小, 会导致输出电压的脉动值过

大。一般来说,开关频率越高,电感 L 的取值越小,电压脉动越小,电容 C 的取值越小。

3.2 光伏出力控制策略

光伏电池于任何情况中,在光照强度与温度不变时,总有一点其功率输出值最大,这个点的位置根据光照和温度的不同而发生变化^[16]。为保证光伏电池输出功率最大化,采用 MPPT 控制策略,其工作流程如图 4 所示。

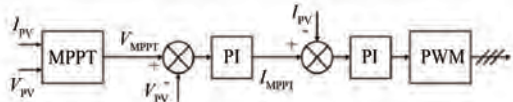


图 4 光伏部分 MPPT 控制流程图

MPPT 常与电压电流双环控制一起使用,即采用内环控制电流和外环控制电压获得触发信号,可以达到稳流的目的。本文选用电导增量法实现 MPPT,即通过比较太阳能电池板的电导增量和瞬间电导来输出控制信号。当输出电导的变化量等于输出电导的负值,即 $dI/dU = -I/U$ 时,太阳能电池板工作在最大功率点,此时得到的电压值为最大功率点电压 V_{MPPT} ;与实际的电池板输出电压比较作差,经过 PI 调节后得到基准电流 I_{MPPT} ,与电池板输出电流比较作差后,经过 PI 调节得到调制比,产生 PWM 信号驱动开关管从而实现光伏发电的输出。

3.3 储能系统优化控制策略

为了保证储能电池恒流充放电,电池的端电压随着电池荷电状态的改变而改变。传统的储能电池恒流充放电控制策略如图 5 所示。电流内环控制需要先给出一个给定值,通过负反馈调节,令输出电流与给定值相等。图 5 中, I_{charge} 为充电电流给定值; $I_{discharge}$ 为放电电流给定值; I_{batt}^* 为反馈电流。



图 5 储能电池恒流充放电控制策略

在上述电池控制策略的基础上,基于 PI 控制加入修正信号,引入式(2)中的误差率 λ 参与控制,改进后的控制策略流程如图 6 所示。图 6 中, I'_{charge} 为优化后的充电电流给定值; $I'_{discharge}$ 为优化

后的放电电流给定值。



图 6 改进后储能电池充放电控制策略

对充放电电流的给定值 I_{charge} 、 $I_{discharge}$ 进行补偿,得到实时更新的新给定值 I'_{charge} 、 $I'_{discharge}$,该值可以很好地反映出实时出力误差。当直流母线电压保持稳定时,光伏出力与光伏输出侧电流成正比,故更新后的给定值 I'_{charge} 、 $I'_{discharge}$ 与出力误差也成正比。当误差增大时, λ 变大,更新后的给定值变大,使得误差减小;反之同理。

3.4 光储联合发电系统控制策略

光储联合发电系统并网运行时采用 PQ 控制方式,控制光储联合发电系统按照一定的有功功率和无功功率值输出,图 7 为 PQ 控制流程图。

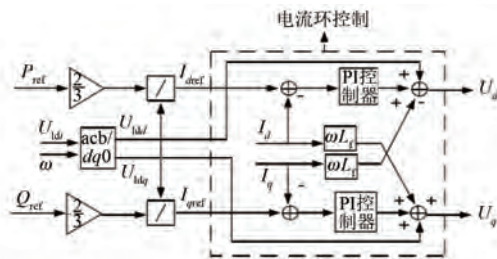


图 7 PQ 控制流程图

图 7 中, P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率参考值; ω 为电网频率; I_{dref} 、 I_{qref} 分别为功率解耦得到的 d 轴、 q 轴电流参考值; U_d 、 U_q 分别为电流环控制得到的 d 轴、 q 轴调制电压信号。

采用 PQ 控制,将有功功率和无功功率进行解耦,得到电流的参考值,与实际电流相比较,得到的差值经过瞬时电流环 PI 控制器作为逆变桥调制电压信号。

4 算例分析

为检验模型和控制策略的有效性,利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建图 1 中所示的光储联合发电系统模型,调度周期 T 为 24 h,仿真步长 $5 \mu s$ 。计划出力曲线参考文献[17],并结合文献[18]给出的光伏电站基本参数和式(7)~式(10),本文采取参数如表 1 所示。其中,光伏电

池型号为 1STH-220-P,根据 1.2 节数学模型及求解方法,确定储能电池容量如表 1 所示,表 1 中还给出了储能系统的其他参数。

表 1 光储联合发电系统内部参数	
参数名称	参数值
光伏电池开路电压/V	36.6
光伏电池最大输出功率/W	218.9
并联电池数量/个	100
串联电池数量/个	20
直流母线电压/V	700
储能电池额定电压/V	218
储能电池容量/Ah	10.05
储能侧等效电容/F	5×10^{-4}
直流母线侧等效电容/F	10^{-3}
双向 DC/DC 电感/H	10^{-5}
光伏侧占空比	0.8
储能侧占空比	0.6

图 8 和图 9 为某地区某日光伏独立运行与光储发电系统联合运行出力图。图 8 为不同系统出力曲线图;图 9 为不同系统与计划出力曲线误差曲线图。可明显看出光伏系统独立运行,除 7:00-10:00、15:00-17:00 与计划出力曲线误差较小外,其余时间的误差均不小于 1 000 kW;光储联合发电系统在全调度周期内,与计划出力曲线间的误差稳定在 200 kW 以下。

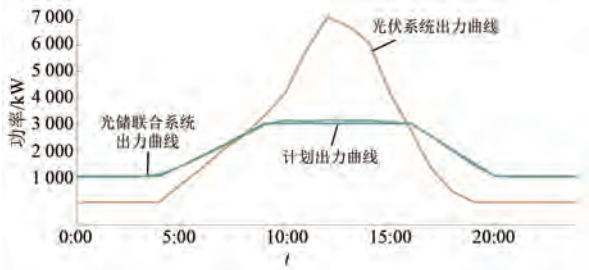


图 8 不同系统出力曲线图

将图 8 中 5:00-11:00 的仿真曲线展开,如图 10~图 12 中所示的仿真曲线。表 2 为仿真曲线优化前后误差率对比表。当储能系统进行动态优化控制后,在光伏出力较多时储能,光伏出力较少时放电,此时的优化结果如图 10 所示。将其优化结果与光伏电站单独作用时的结果进行对比,如图 11 所示。优化前后误差变化曲线如图 12 所示。

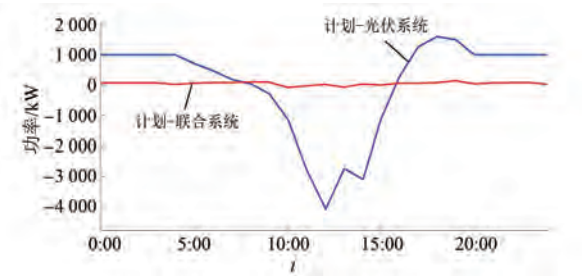


图 9 不同系统与计划出力曲线功率差额曲线图

表 2 优化前后各时段平均误差率					
时段/s	光储联合系统出力/kW	光伏单独出力/kW	计划输出有功功率/kW	优化前平均误差率/%	优化后平均误差率/%
0~1	2 055.0	2 101.8	1 940	8.32	5.93
1~2	2 480.7	2 560.6	2 394	6.96	3.62
2~3	3 289.3	3 303.3	3 168	4.27	3.83
3~4	3 494.5	3 578.2	3 448	3.77	1.35
4~5	2 975.9	2 997.5	2 911	2.97	2.23
5~6	2 758.7	2 767.0	2 683	3.13	2.82

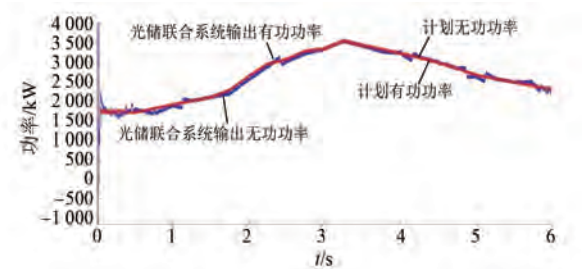


图 10 光储联合发电系统出力曲线

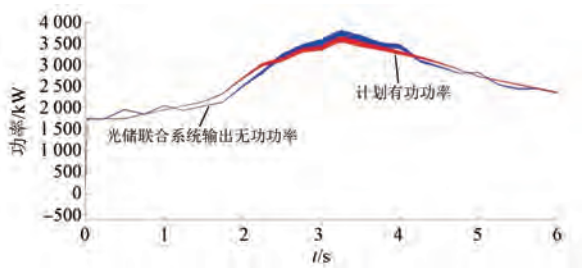


图 11 光储系统独立运行出力曲线

由图 10 和图 11 可知,当光伏电站单独运行时,因光伏受到温度和光照强度的影响,出力较为波动,很难实时满足上级电网下发的当日计划出力,与计划有功出力曲线的瞬时误差值最大达

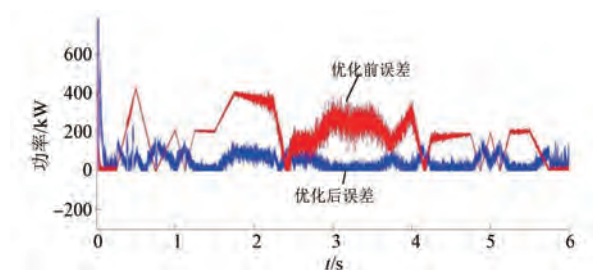


图 12 优化前后功率差额曲线

400 kW。采用优化控制策略后,联合供电系统的出力曲线明显平稳许多,基本与计划有功出力曲线相符。由图 12 可知,在功率差额过零瞬间,本文提出的优化控制策略会提供一个短时功率,以保证各用电设备的正常工作,避免了功率反向对各用电设备的影响。由表 2 可知,光储联合系统优化后的有功出力误差明显减小,此时与计划有功出力曲线间的瞬时误差小于 7%,功率误差方差仅为光伏电站单独运行时的 23.5%。

5 结 语

大规模光伏电站出力的不确定性,增加了区域电网调度难度。本文提出了光储联合系统的调度优化控制策略,并对储能部分的控制策略进行了改进。可以得出如下结论:

(1) 保证在不弃光的前提下,通过优化控制策略能更好地使光储联合发电系统跟踪区域电网的计划有功出力曲线。

(2) 本文提出的控制策略利用误差率对储能系统进行优化控制,提高储能系统响应速度,降低联合系统与计划出力曲线间的误差;并利用误差率对联合系统进行二次控制,减少储能系统动作次数,提高控制系统稳定性,提高了光储联合系统的可调度性。

【参考文献】

[1] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. [2023-02-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/28/content_5589283.html.

[2] 张哲深. 含高比例光伏电力系统中光储联合系统的优化控制[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.

[3] 吕泉, 张佳伟, 张娜, 等. 含多元灵活性资源的省级

电-热综合能源系统耦合平衡分析模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 95.

[4] 卢锦玲, 张伟, 张祥国, 等. 含混合储能的光伏微电网系统协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(8): 102.

[5] 牛瑞杰, 郭俊文, 李晓博, 等. 风光储联合发电系统储能控制策略[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 150.

[6] 蒋德秋. 适用于光储联合发电系统的组网型控制仿真分析[J]. 农村电气化, 2021(11): 59.

[7] 王陈园, 傅春明, 张文赋, 等. 基于多电池组 SOC 一致性的光储联合电站平抑策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 237.

[8] 吴鸣, 吕志鹏, 王鑫, 等. 考虑气储惯量互补的多能直流微网运行控制策略[J]. 电气传动, 2022, 52(11): 68.

[9] 高文根. 基于源荷功率预测的光伏微电网复合储能控制策略研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.

[10] 朱慧敏, 李春来, 苑舜, 等. 光储联合发电系统随机优化调度方法研究[J]. 机电信息, 2020(12): 31.

[11] 于港旭, 李中伟, 金显吉, 等. 基于光伏和蓄电池的智能小区能量调度优化策略研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(7): 21.

[12] 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.

[13] 虞临波, 寇鹏, 冯玉涛, 等. 风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 36.

[14] 孟晓芳, 王立地, 王小宁, 等. 利用分布式电源改善三相四线低压配电网运行特性方法[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4091.

[15] 章宝歌, 张振, 王天鹏, 等. 一种适用于 BESS 的交错并联双向 DC/DC 变换器[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1): 277.

[16] GUO S, HE Y, PEI H, et al. The multi-objective capacity optimization of wind-photovoltaic-thermal energy storage hybrid power system with electric heater[J]. Solar Energy, 2020, 195: 138.

[17] 刘思捷, 白杨, 陈中飞, 等. 碳中和背景下能源电力产业链预警研究框架[J]. 广东电力, 2021, 34(10): 1.

[18] 国家电网公司. Q/GDW 1617-2015 光伏发电站接入电网技术规定[S]. 北京: 国家电网公司, 2016.