

一种用于光储联动系统的复合型储能控制策略研究

程婷婷, 王智高, 范伟强

(西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

摘要: 针对光伏并网系统中输出功率随机性、波动性的特点, 单一储能形式无法同时满足功率型、能量型二者共同的需求。本文提出一种基于超级电容器 SOC 值的复合储能控制策略, 用于光伏发电系统, 实现光伏输出平滑并网。首先, 分析了复合储能对光伏并网稳定性的作用; 其次详细介绍了基于超级电容器 SOC 值的复合储能控制策略; 最后在 Matlab/Simulink 搭建仿真模型, 对光伏平滑并网及恒功率并网进行仿真, 仿真结果验证了复合储能控制策略的可行性, 能够很好的配合光伏并网, 在“平滑波动”和“削峰填谷”中作用突出。

关键词: 光伏并网; 复合储能; 控制策略; 平滑并网

Research on Compound Energy Storage Control Strategy for PV-storage Linkage System

CHENG Tingting, WANG Zhigao, FAN Weiqiang

(Xi'an High Voltage Apparatus Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: As for the randomness and fluctuation of output power in grid-connected photovoltaic system, a single energy storage form cannot meet simultaneously the common needs of both power type and energy type. In this paper, a kind of compound energy storage control strategy based on SOC value of super capacitor for photovoltaic power generation system is proposed so to achieve smooth grid connection of photovoltaic output. Firstly, the effect of compound energy storage on the stability of PV grid connection is analyzed. Then, the compound energy storage control strategy based on SOC value of super capacitor is introduced in detail. Finally, a simulation model is set up in Matlab/Simulink to simulate photovoltaic smooth grid-connection and constant power grid-connection. The feasibility of the composite energy storage control strategy is verified by the simulation result, which can cooperate well with photovoltaic grid-connection and play a prominent role in *smooth fluctuation* and *peak cutting and valley filling*.

Keywords: photovoltaic grid-connected; compound energy storage; control strategy; smooth grid connection

0 引言

自“双碳”目标提出后, 国家出台相关政策, 大力发展光伏发电产业^[1-2]。储能具有平滑新能源发电波动和提高新能源发电利用率的作用, 尤其在分布式光伏发电系统中发挥着重要作用^[3-5]。

目前, 储能设备种类繁多, 如蓄电池、飞轮储能、超级电容、液流储能、超导储能等, 其中按照储能容量和功率密度可分为功率型和能量型两种类型^[6-10]。功率型储能的特征为功率密度较大, 能够快速响应功率指令, 但是其容量密度相对较小, 充放电持续时间短; 而能量密度较大的储能设备一般功率

响应较慢, 如化学储能设备和抽水储能等。目前, 单独使用一种储能形式比较常见, 比如单独使用蓄电池或者单独使用超级电容。但是在使用过程中, 也暴露了一定的弊端, 单独使用一种储能形式无法同时满足功率型、能量型二者共同的需求, 无法满足有此类要求的市场需求^[11], 因此在这种情况下, 基于储能协调技术的复合型储能系统就应运而生。复合型储能系统(也称为混合型储能系统, hybrid energy storage system, HESS)的关键就是把两种或多种类型的储能组合在一起形成复合型的储能系统, 从而提高储能系统的功率密度、能量密度、使用寿命及各方面应用性能^[12-15]。将复合型储能应用于光

伏并网系统中,可充分发挥复合型储能的特点,克服光伏发电的随机性、间歇性等问题,稳定并网功率,实现光伏发电大规模并网。这些有助于可再生能源的发展,对解决当前能源危机与环境污染问题具有重要的意义。

当前,复合型储能技术被广泛关注,文献[16]利用超前模糊控制策略,解决风电场未来时刻功率波动问题,提出的控制策略不仅能够降低风电并网波动越限概率,显著减少总输出功率与目标功率偏差值,而且能够使混合储能系统的电池荷电状态(state of charge, SOC)控制在合理范围内;文献[17]提出了基于功率外环加电流内环控制的控制策略,将蓄电池和超级电容结合应用于微电网中,提高微网的可靠性,缓解了电量供需的不平衡情况。

本文研究了基于超级电容器和锂电池的复合型储能技术,提出一种基于超级电容器 SOC 值的复合型储能控制策略。在 Matlab 仿真平台中,搭建额定输出 40 kW 的光伏发电模型,采用复合型储能控制策略,完成平滑功率并网和恒功率并网仿真;并且与单一电池作为储能单元的系统进行对比,仿真结果验证了复合型储能技术在光伏发电系统中的可行性和优越性。

1 复合储能对光伏并网稳定性的作用

在光伏发电系统中,采用复合型储能,在保持传统光储系统的优势基础上不但提高了储能系统的整体性能,而且使得光储联动系统运行更加灵活。

本文选择锂电池和超级电容器的组合,在光储联动系统运行优势有以下几个方面:

1)保障光伏发电安全运行。当天气状况不理想(阴雨天气)时,光伏发电功率降低,离网时不能承载负载所需功率,并网时入网功率大幅下降,利用复合型储能系统中的电池释放能量,补充光伏输出功率差额,使光伏发电系统正常运行。光储联动系统发电不足时运行特性见图 1,光伏输出功率不足时,通过电池补充功率差额,实现并网功率恒定;

2)平滑光伏发电的高频波动。光伏发电主要是以太阳光为来源,受自然条件影响较大,发电功率存在一定的高频波动,利用复合型储能系统中的超级电容器的功率快速响应特性,能够起到平滑功率波动、稳定并网电压的作用^[18-21]。如图 1 中电容器双向箭头表示其电流方向快速切换,吸收光伏输出的高频功率波动;

3)增加光伏的发电效率和利用率。在复合型储能系统的配合下,光伏发电可以工作在 MPPT 模

式,不存在弃光情况,多余的能量暂时存储起来,后续释放到电网,实现新能源利用最大化,光储联动系统发电充足时运行特性见图 2;

4)降低光伏系统投资成本。相对独立光伏系统,同等发电容量的光储联动系统的并网功率相对提高,因此可以降低光伏电池的投资成本。在复合型储能技术的控制下,可有效降低电池的充放电切换次数,提供电池的使用寿命,降低储能系统的维护成本。

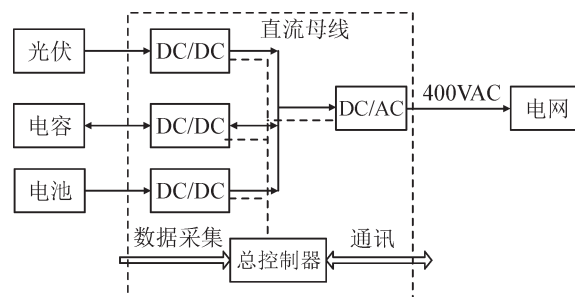


图 1 光储联动系统发电不足时运行特性图
Fig. 1 Operation characteristic diagram of PV-storage linkage system in case of insufficient power generation

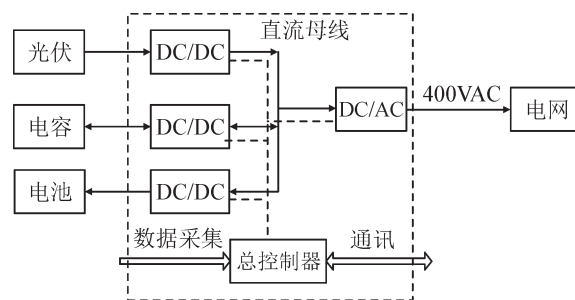


图 2 光储联动系统发电充足时运行特性图
Fig. 2 Operating characteristic diagram of the PV-storage linkage system in case of sufficient power generation

2 复合储能控制策略

目前复合型储能是当下储能系统的研究热点,其控制策略也是重要研究对象,本文通过分析现有控制策略,综合光伏出力特点和并网要求等因素,在此基础上提出一种基于超级电容器 SOC 的复合型储能协调控制策略。本控制策略主要以超级电容器充放电容量阈值为判据,对超级电容器与蓄电池进行协调控制。首先考虑正常天气情况下,光伏阵列发电功率的随机性和波动性,应保证光伏阵列以 MPPT 模型进行发电,然后将光伏发电功率进行频域滤波操作,低频成分直接送入交流电网,高频成分由超级电容器和蓄电池负责处理,以实现光伏功率平滑入网。先由超级电容器吸收光伏功率剩余或发送光伏功率差额,然后当超级电容器当前电

量(SOC 值)超过或少于规定的阈值,则由蓄电池进行补偿充放电。

本控制策略的依据超级电容器容量的 SOC 值控制蓄电池进行充放电。根据蓄电池的寿命特性、超级电容器的容量和工程经验,设定 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为蓄电池是否进行充放电的节点,其大小比较: $0.1 < X_1 < X_2 \leq 0.5 \leq X_3 < X_4 < 1$, 通常情况下可设定 $X_1=0.2$, $X_2=0.4$, $X_3=0.6$, $X_4=0.8$ 。设定电池放电功率为正,充电时功率为负值, P_1 和 P_2 是功率指令增量,其中 $0 < P_2 < P_1$ 。复合型储能协调控制工作方法流程见图 3。

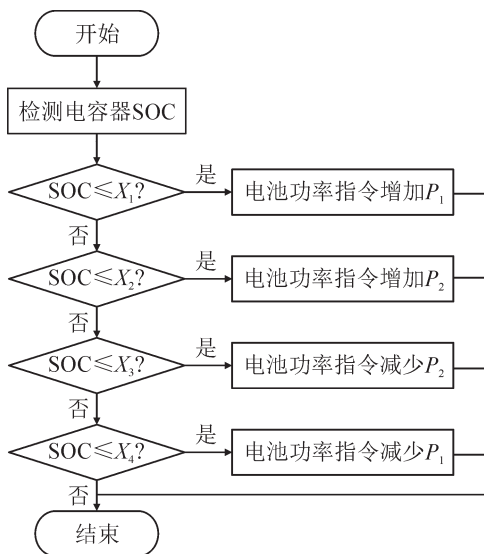


图3 复合型储能协调控制流程图
Fig. 3 Coordinated control flow chart of compound energy storage

在光伏阵列向交流母线发电过程中,检测超级电容器的当前电量 SOC 值,进行判断,以此作为蓄电池动作的判据:

1)若 $SOC \leq X_1$ 时,说明超级电容器当前电量不足需要充电,复合型储能系统处于放电状态,需要增加电池放电功率,即在当前电池功率指令上增加 P_1 ,电池向交流母线释放电能增加或吸收电能减少,超级电容器进行充放电吸收光伏发电波动,单次控制流程结束;

2)若 $X_1 < SOC \leq X_2$ 时,说明超级电容器当前电量不足 50%,可适当充电,需要增加电池放电功率,即在当前电池功率指令上增加 P_2 ,电池向交流母线释放电能增加或吸收电能减少,超级电容器进行充放电吸收光伏发电波动,单次控制流程结束;

3)若 $X_2 < SOC \leq X_3$ 时,说明超级电容器当前电量超过 50%,可适当放电,需要减少电池放电功率或者增加充电功率,即在当前电池功率指令上减少 P_2 ,电池向交流母线释放电能减少或吸收电能增加,超级电容器进行充放电吸收光伏发电波动,单次控制

制流程结束;

4)若 $X_4 < SOC$ 时,说明超级电容器当前电量充足,需要放电,通过增加电池充电功率或减少放电功率,即在当前电池功率指令上减少 P_1 ,电池向交流母线释放电能减少或吸收电能增加,超级电容器进行充放电吸收光伏发电波动,单次控制流程结束。

通过上述控制策略的控制,复合型储能系统若整体处于充电模式,超级电容器的 SOC 将处于 $X_3 \sim X_4$ 之间,电池一直处于充电模式,充电电流大小会有一定波动;复合型储能系统若整体处于放电模式,超级电容器的 SOC 将处于 $X_1 \sim X_2$ 之间,电池一直处于放电模式,放电电流大小会有一定波动。

3 光储联动系统

光储联动系统是由光伏发电、储能设备和智能控制终端组成的分布式发电系统,可为用户供给清洁无污染的电力。由于光伏出力的自然特点,光照强度决定了光伏发电大小,而光照强度受天气、温度等因素影响,波动性较大,从而导致光伏发电输出不稳定性,所以需要配合储能系统,平滑光伏出力差值以满足并网要求,提升系统稳定性及可靠性。

储能系统装置可以通过交流侧或者直流侧连接到母线上,交直流变换器是控制储能系统的功率双向流动及最佳运行的关键设备,不同的并网方式,影响储能系统的成本投入和运行方式。因此,根据应用环境的情况,考虑功能要求和资本投入之间的平衡,应当采用适合的并网结构。

直流侧并联方式是指光伏单元和各储能单元分别通过 DC/DC 换流器并联于系统直流侧,然后通过光伏逆变器(也称为 DC/AC 换流器),其中 DC/DC 换流器的作用主要是光伏输出功率控制及储能设备的充放电管理,DC/AC 换流器的作用是交流电网与光伏直流系统的电能交换,并且起到稳压直流电压的作用。

交流连接方式是指超级电容器与电池分别通过储能换流器(PCS,一般是由 DC/DC 和 DC/AC 两级拓扑组成)与光伏逆变单元通过光伏逆变器和电网在 PCC 点并联。交流侧 PCC 点并联方式,两种储能单元对应的 DC/AC 换流器是双向电能控制的,而光伏电源对应的光伏逆变器是单相的,3 种换流器是相对独立工作,灵活性强,可通过不同的控制目标实现光伏出力稳定并网。这种并网方式适用于许多储能系统,其优点是兼容性和扩展性强,且光伏及储能各自控制更为灵活;缺点是并网侧变流器的控制器要求较高,设备成本较高。

本文采用直流侧并联方式作为光储联动系统结构见图4,光伏发电单元、蓄电池组和超级电容器直接通过DC/DC变流器并联于直流母线处,然后通过光伏逆变器(DC/AC)并入电网。该结构相对交流侧连接方式具有以下优势:

- 1)储能换流器的基本拓扑为单极DC/DC拓扑,相对两级DC/AC的拓扑,控制算法简单,运行效率高,成本低;
- 2)锂电池和超级电容器的输出电压范围宽,配置方案相对灵活;
- 3)光伏发电到储能单元之间的电路变短,回路阻抗降低,电能损耗较低,提高整个光储联动系统的电能利用率。

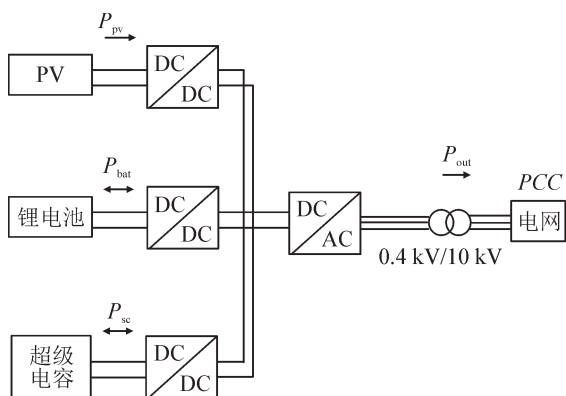


图4 光储联动系统结构图

Fig. 4 Structural diagram of PV-storage linkage system

4 仿真验证

光储联动系统并网和离网两种模式,当光储联动系统处于离网时输出功率由负荷决定,由于负荷在一定时间内变化小,若忽略负荷变化,此时输出功率恒定,可等效为恒功率并网模式。为了验证复合储能控制策略的有效性,本文在Matlab/Simulink建立光储联动系统模型,模拟一天正常情况下的光照波动,主要对平滑功率并网和恒功率输出两种模型进行仿真研究。

4.1 平滑并网功率仿真实验

仿真开始后,分别观察光伏输出功率、并网功率、超级电容器和电池的充放电功率波形。图5显示了光伏输出功率和并网功率:其中光伏输出功率在上午(0~0.5S)呈综合上升状态,午间(0.5~0.7S)呈综合平稳状态,下午(0.7~1.2S)呈综合下降状态,且全天存在功率波动情况,这与真实光伏输出情况基本一致,体现了光伏出力的随机性和波动性的特点。并网功率在上午呈平滑上升状态,午间呈稳定输出状态,下午呈平滑下降状态,满足光伏平滑并

网的要求,实现光伏输出平滑并网。

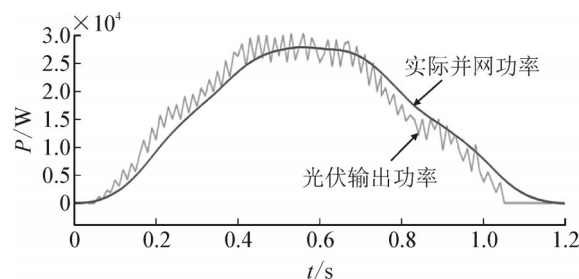


图5 光伏输出和并网功率图

Fig. 5 Photovoltaic output and grid-connected power diagram

复合型储能系统的充放电功率波形见图6,超级电容器的充放电功率曲线高频波动,用于平滑光伏发电的高频波动,期间超级电容器充放电快速切换,充分发挥了其寿命长、高功率密度的优势;电池在上午基本处于充电状态,将光伏发电量与并网电量的差额电能储存在电池里,下午电池处于放电状态,将其上午储存的电能释放到电网,若忽略储能系统的损耗,光伏发电量将全部送入电网,这充分体现了电池成本低、能量大的优势。工作期间电池充放电一天内切换一次,避免其寿命短的优点,延长电池使用年限。

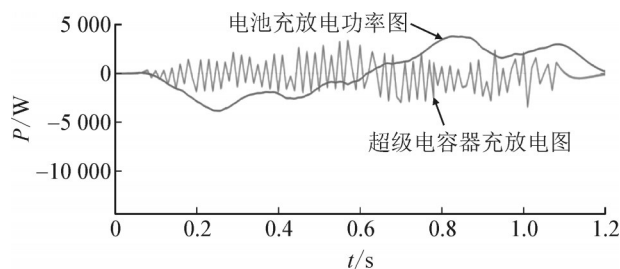


图6 复合型储能系统充放电功率波动图

Fig. 6 Charging and discharging power fluctuation diagram of compound energy storage system

超级电容器SOC值波动见图7,由于超级电容器充放电高频波动,其SOC随之变化,在复合型储能系统控制策略的控制下,SOC值在0.2~0.9之间波动,验证了其控制策略的可行性。

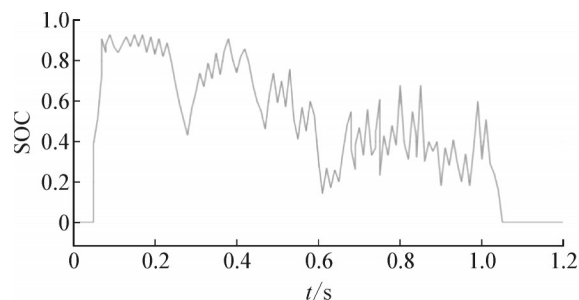


图7 超级电容器SOC值波动图

Fig. 7 Fluctuation diagram of SOC value of super capacitor

采用单一储能单元即电池储能时的仿真波形见图8,从该图中可以发现,电池在上午时处于充电状态,但其充电电流大小波动大;中午时,电池充放电频繁切换,功率波动大;下午,电池大部分时间处于放电状态,偶尔会进入充电,且充放电功率波动大。该实验表明,电池可以实现光伏发电的平滑并网,但电池充放电功率波动大,且切换次数多,由于电池的循环次数有限,频繁的充放电切换会使得电池使用年限降低,增加电池维护成本。

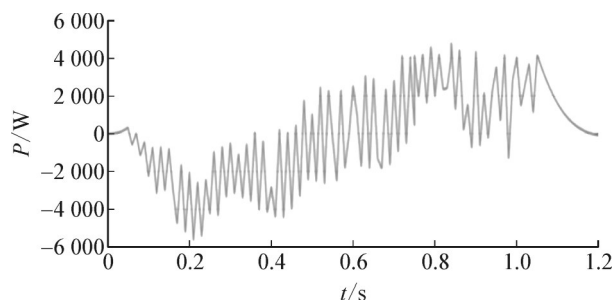


图8 单一储能系统充放电功率波动图
Fig. 8 Charging and discharging power fluctuation diagram of single energy storage system

4.2 恒功率输出仿真实验

根据光伏发电情况,日均输出功率为15 kW,所以本文设备并网功率为15 kW。并网功率和光伏输出功率的差额由复合型储能系统补偿,具体控制策略和平滑波动仿真的方法一致。

设指定并网功率为15 kW,如图9中,光伏输出功率依旧正常,并网功率上升至15 kW后稳定输出,实验结果表明并网功率稳定在15 kW,实现恒功率输出的目的。

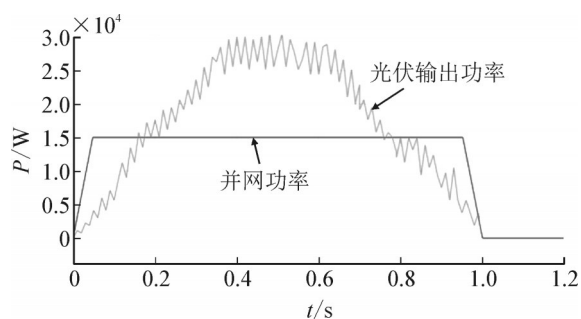


图9 恒功率输出时光伏输出和并网功率仿真图
Fig. 9 Simulation diagram of photovoltaic output and grid-connected power during constant power output

复合型储能系统的仿真波形见图10,图中超级电容器的充放电功率快速变化,充放电频繁切换,用于平滑光伏输出功率中的高频波动,发挥了超级电容器的高功率密度和长寿命特性。图中电池刚开始呈放电状态,用于补偿光伏上午输出功率的差额,待光伏输出功率大于并网功率设定值后,电池

接入充电模式,下午光伏输出功率减小后,电池再次进入放电模式,即电池在一天内有一次充电和两次放电模式,充放电的电能在一天内保持平衡,这些电能都来自于光伏发电。实验结果表明,电池可进行长期大功率充放电,且充放电功率波动小,有利于提高电池的寿命。

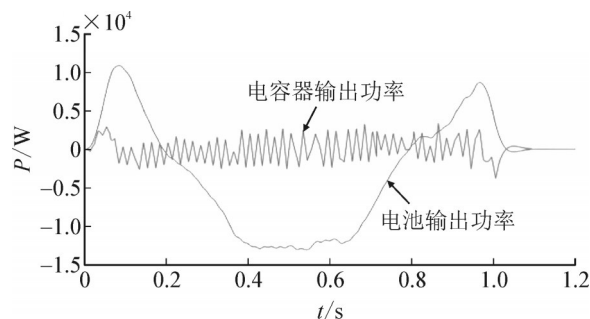


图10 复合型储能系统输出功率仿真图
Fig. 10 Output power simulation diagram of compound energy storage system

采用单一电池储能时的储能系统仿真见图11,实验结果显示:电池在一天内长期的充放电次数和复合型储能系统中的电池一样,但在工作中,输出功率波动大,且在充放电模式切换时,会有一定时间的反复状态,这些对电池的寿命有一定的影响,电池的维护成本会增加。通过仿真分析,复合型储能系统可以良好的配合光伏并网,在平滑并网功率和恒定功率并网中作用突出,验证了本文设计的复合储能控制策略的有效性。

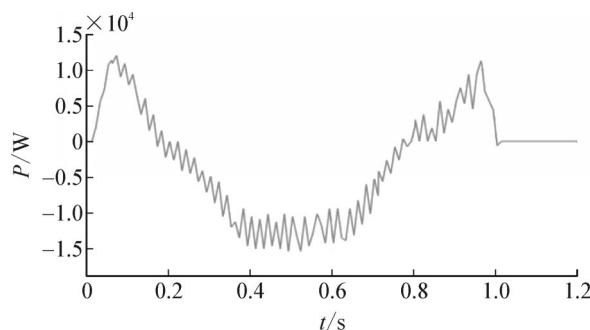


图11 单一储能系统仿真图
Fig. 11 Simulation diagram of a single energy storage system

5 结语

针对光伏并网系统中输出功率随机性、波动性的特点,本文提出一种基于超级电容器SOC值的复合储能控制策略,用于光伏发电系统,实现光伏输出平滑并网。通过仿真验证,采用单一电池储能也能实现光伏平滑并网和定功率并网两种模式,但工作期间输出功率波动大,电池会频繁充放电切换,降低电池的使用寿命,增加电池维护成本。而在复

合型储能系统中,虽然增加的超级电容器及相关设备会增加一点成本,但超级电容器容量小,相对电池的成本较少,且配合使用后,电池的使用寿命会大大提升,从而降低电池维护成本。因此,仿真结果验证了复合型储能技术在光伏发电系统中的可行性和优越性。

参考文献

- [1] 张全斌,周琼芳. “双碳”目标下中国能源CO₂减排路径研究[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(4): 22-30.
ZHANG Quanbin, ZHOU Qiongfang. Research on China's energy CO₂ emission reduction path under the goal of *Carbon peak and neutrality*[J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(4): 22-30.
- [2] 舒印彪,赵勇,赵良,等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1671.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low Carbon energy transition path toward *Carbon peak and Carbon neutrality*[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1671.
- [3] 马青梅. 储能技术在光伏电站并网中的应用研究[J]. 光源与照明, 2023(12): 111-113.
- [4] 张文建,崔青汝,李志强,等. 电化学储能在发电侧的应用[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 287-295.
ZHANG Wenjian, CUI Qingru, LI Zhiqiang, et al. Application of electrochemical energy storage in power generation [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 287-295.
- [5] 李建林,孟高军,葛乐,等. 全球能源互联网中的储能技术及应用[J]. 电器与能效管理技术, 2020(1): 1-8.
LI Jianlin, MENG Gaojun, GE Le, et al. Energy storage technology and its application in global energy Internet[J]. Low Voltage Apparatus, 2020(1): 1-8.
- [6] 孙玉树,杨敏,师长立,等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 80-89.
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.
- [7] 杨帆. 储能技术的分类与应用[J]. 电力系统装备, 2020(10): 194-195.
YANG Fan. Classification and application of energy storage technology[J]. Electric Power System Equipment, 2020(10): 194-195.
- [8] 曹雨军,夏芳敏,朱红亮,等. 超导储能在新能源电力系统中的应用与展望[J]. 电工电气, 2021(10): 1-6.
CAO Yujun, XIA Fangmin, ZHU Hongliang, et al. Application and prospect of superconducting energy storage in new energy power system[J]. Electrotechnics Electric (Jiangsu Electrical Apparatus), 2021(10): 1-6.
- [9] 饶宇飞,司学振,谷青发,等. 储能技术发展趋势及技术现状分析[J]. 电器与能效管理技术, 2020(10): 7-15.
RAO Yufei, SI Xuezhen, GU Qingfa, et al. Energy storage technology development trend and technology status analysis[J]. Low Voltage Apparatus, 2020(10): 7-15.
- [10] 王姝,石晶,龚康,等. 多元复合储能系统及其应用[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(3): 32-38.
WANG Shu, SHI Jing, GONG Kang, et al. Composite energy storage systems and its applications[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(3): 32-38.
- [11] 牟杰,杨依睿,徐永海,等. 接入电力电子变压器的光伏及混合储能协调控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(3): 143-152.
MU Jie, YANG Yirui, XU Yonghai, et al. Research on coordinated control strategy of photovoltaic and hybrid energy storage system connected to power electronic transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 143-152.
- [12] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [13] 吴杰. 平抑风电波动的混合储能系统控制策略及容量优化配置研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
- [14] 朱三立. 风电场复合型储能系统控制运行与规划研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
- [15] 张宇涵,杜贵平,雷雁雄,等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177-187.
ZHANG Yuhan, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 177-187.
- [16] 周丹,袁至,李骥,等. 考虑平抑未来时刻风电波动的混合储能系统超前模糊控制策略[J]. 发电技术, 2024, 45(3): 412-422.
ZHOU Dan, YUAN Zhi, LI Ji, et al. An advanced fuzzy control strategy for hybrid energy storage systems considering smoothing of wind power fluctuations at future moments[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(3): 412-422.
- [17] 王若谷,解振学,常小强,等. 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[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(2): 126-133.
WANG Ruogu, XIE Zhenxue, CHANG Xiaoqiang, et al. Research on method for improving tracking photovoltaic power generation output characteristics based on hydrogen and battery hybrid energy storage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 126-133.

- Modern Electric Power, 2013, 30(6): 6-10.
- [26] J. S. CONTRERAS-JIMENEZ, F. RIVAS-DÁVALOS, J. SONG, et al. Multi-state system reliability analysis of HVDC transmission systems using matrix-based system reliability method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 100: 265-278.
- [27] K. LI, M. HUANG, X. ZHA. Reliability analysis of multi-terminal VSC-HVDC based on semi-markov process[C]//2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), Guangzhou, IEEE, 2023: 1972-1975.
- [28] R. LEELARUJI, J. SETREUS, G. OLGUIN, et al. Availability assessment of the HVDC converter transformer system [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Rincon, IEEE, 2008: 1-8.
- [29] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [30] 赵翠宇, 齐磊, 陈宁, 等. ± 500 kV 张北柔性直流电网单极接地故障健全极母线过电压产生机理[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 530-536.
- ZHAO Cuiyu, QI Lei, CHEN Ning, et al. Research on producing mechanism of healthy pole bus overvoltage for monopolar grounding fault in ± 500 kV Zhangbei flexible DC power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 530-536.
- [31] 程林, 汪莹, 宋福龙, 等. 柔性交直流混联电网系统级可靠性评估[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 55-62.
- CHENG Lin, WANG Ying, SONG Fulong, et al. Reliability evaluation of flexible AC/DC hybrid power grid[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 55-62.
- [32] Z. ZHENG, Y. WANG, D. ZHANG, et al. Reliability evaluation model of Zhangbei multi-terminal HVDC transmission system[C]//2019 IEEE International Conference on Energy Internet, Nanjing, IEEE, 2019: 279-284.
- 作者简介:**
- 马彦琴(1980—), 女, 高级工程师, 研究方向为电网变电站控制保护。
- 杨刚(1983—), 男, 工程师, 研究方向为电网变电站控制保护。
- 李湛宇(1991—), 男, 工程师, 研究方向为电网变电二次保护。
- 郭莹(1993—), 女, 工程师, 研究方向为电网变电二次保护。
- 雷博鸿(2001—), 女, 硕士在读, 研究方向为柔性直流输电系统控制保护与可靠性。E-mail: lbh466773020@163.com。

(上接第97页)

- Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 126-133.
- [18] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.
- ZHANG Yunxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 93-98.
- [19] 王民华, 李凤霞. 混合储能平抑微电网功率波动控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 215-220.
- WANG Minhua, LI Fengxia. Study on control strategy of hybrid energy storage used in stabilization power fluctuation of microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 215-220.
- [20] 郭潇潇, 李岚, 吴雷, 等. 基于下垂控制的微电网混合储能系统调频策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 176-182.
- GUO Xiaoxiao, LI Lan, WU Lei, et al. Frequency modulation strategy of hybrid energy storage system of microgrid based on droop control[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 176-182.
- [21] 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): 237-244.
- WANG Chenyuan, FU Chunming, ZHANG Wenfu, et al. Study on stabilization strategy of photovoltaic-storage combined power station based on SOC consistency of multi-battery pack[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 237-244.
- 作者简介:**
- 程婷婷(1986—), 女, 工程师, 从事新能源技术工作。E-mail: 371336003@qq.com。
- 王智高(1987—), 男, 工程师, 从事新能源检测工作。
- 范伟强(1986—), 男, 高级工程师, 从事新能源检测工作。