

基于级联多电平换流器的链式储能系统控制策略及直流侧谐波抑制策略研究

祁琦, 盛晓东, 王宇

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 储能技术是构建以新能源为主体的新型电力系统的关键技术。基于级联多电平换流器的链式储能系统采用与交流电网直连的方式, 若干功率模块级联实现交流输出电压的提升。该方案延续了储能设备响应速度快、效率高的特点, 同时相较于传统的升压式储能损耗更小、谐波含量更低, 尤其适用于大容量储能电站的应用。然而, 链式储能系统的拓扑结构决定了其功率模块直流侧有较大的电流二次谐波, 该谐波直接注入电池系统将导致电池系统高频率充放电, 严重影响电池的使用寿命, 降低储能系统的可靠性; 国内外现有研究中, 功率模块可以通过无源滤波设备与电池系统进行连接, 一定程度上降低了电池侧的电流脉动。研究了基于级联多电平换流器的链式储能系统的控制策略, 针对其功率模块直流电流二次谐波含量高的问题, 提出了一种利用 DC/DC 变换器抑制电流谐波的策略, 该策略可大幅降低功率模块直流电流二次谐波含量, 适用于中压大容量级联多电平链式储能系统。最终, 通过仿真和实验验证了所提控制策略的可行性和有效性。

关键词: 储能技术; 链式储能; 控制策略; 谐波抑制

Research on strategy for control and restraining harmonics of cascaded h-bridge converter storage

QI Qi, SHENG Xiaodong, WANG Yu

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Energy storage is the key support for building a new power system with new energy as the main body. Cascaded H-bridge converter energy storage directly connects to power grid, several power modules are cascaded to increase the voltage of the AC side. Cascaded H-bridge converter energy storage continues the advantages of fast response speed and high efficiency, while it also has the advantages of less losses and low harmonic content. It is especially suitable for the application of large capacity energy storage. However, the DC side of the power module in cascaded H-bridge converter energy storage has a large second harmonic current, which directly injected into the battery system will result in high-frequency charging and discharging of the battery system. The second harmonic current seriously affect the service life of the battery and reduce the reliability of the energy storage system. Therefore, the control strategy of cascaded H-bridge converter energy storage is Studied. Aiming at the problem of high second harmonic content of battery current, a strategy of DC/DC converter for restraining harmonics is proposed. This strategy can be widely used in cascaded H-bridge converter energy storage. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy are verified by simulation and experiment.

Key words: energy storage; chain energy storage; control strategy; restraining harmonics

内蒙古自治区科技重大专项 2021ZD0039 适应高比例新能源消纳的储能电站协调运行控制关键技术研究
与示范应用

0 引言

“双碳”目标持续推进，以新能源为主体的新型电力系统建设，成为未来电力发展的重要方向。应用电池储能电站实现平滑风光功率输出、参与系统调频、削峰填谷、暂态有功出力紧急响应和暂态电压紧急支撑等多种应用，已成为一种可行方案^[1-2]。

当前储能接入方式分为升压式储能与直挂式储能。升压式储能技术起步早，产品相对成熟，但单个储能单元容量小，为满足系统级储能容量需求，往往需要多个储能单元并联配置^[3-5]，因此出现了系统损耗较大、多变流器协调控制复杂等问题。基于级联多电平换流器的链式储能系统采用与交流电网直连的方式，若干功率模块级联达到提高交流输出侧电压的目的，在每一个功率模块的直流侧配置电池^[6]。该方案不仅省去了工频变压器，提高了转换效率，还提升了储能系统的容量，并解决了电池单元间的环流问题，尤其适用于大容量储能电站的应用。

然而，链式储能系统的功率模块直流侧存在较大的电流二次脉动，直接注入电池系统严重影响电池的使用寿命。国内外现有研究和示范工程中，功率模块通过无源滤波设备与电池系统连接，一定程度上降低了电池侧的电流脉动，但是使用无源滤波设备控制自由度不高，且滤波器体积较大^[7]。为此本文提出了带DC/DC变换器的两级式链式储能系统，研究两级式储能系统的总体控制策略和DC/DC变换器控制策略，对比带无源滤波单级式储能系统和带DC/DC变换器的两级式链式储能系统，最终通过仿真和实验验证理论分析的可行性。

1 基于级联多电平换流器的链式储能系统结构

1.1 级联多电平链式储能系统结构拓扑

传统的升压式储能采用三相全桥拓扑或者中点钳位型三电平拓扑作为功率转换变流器，交流

侧经升压变压器与主网连接，该方案目前发展相对成熟，但是储能单元电压等级较低，单个储能单元容量较小；同时损耗相对较大，多单元协调控制复杂。

基于级联多电平换流器的链式储能系统结构如图1所示，每一相由 N 个功率模块级联而成，模块数根据系统的交流电压等级和容量需求灵活调整。每个功率模块主要由H桥功率器件及其驱动电路、母线电容、旁路开关、谐波抑制电路和电池系统等部分组成。成套设备在交流侧通过滤波电感、交流熔断器直接接入电网。该拓扑是将电池分散到每一个功率模块中，若干功率模块级联以提高输出侧交流电压。H桥子模块拓扑是最常用的功率模块方案，模块化设计便于拓展，方便灵活，易于实现故障冗余。

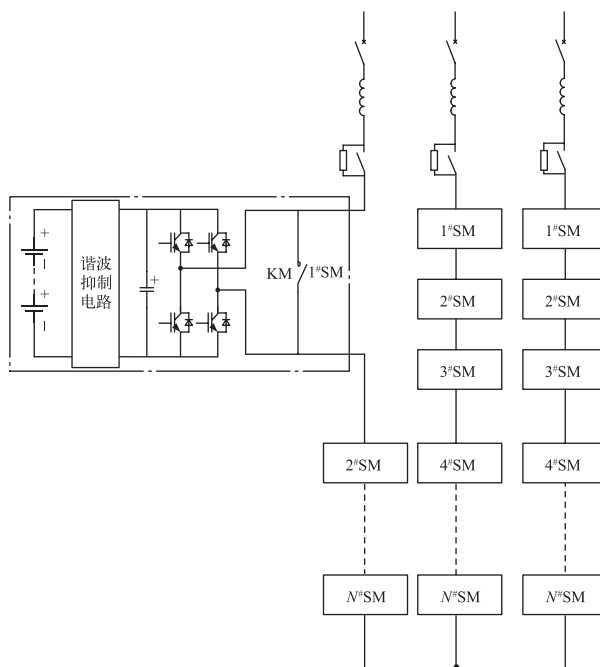


图1 链式储能系统结构示意图

Fig. 1 The topology of cascaded H-bridge converter storage system

1.2 带无缘滤波电路的链式储能系统

常规链式储能系统的谐波抑制电路，是在H桥模块和电池系统间串入无缘滤波电路，以抑制流入电池系统的二次谐波电流，常见的无源滤波电路方案有LC串联谐振，如图2所示。

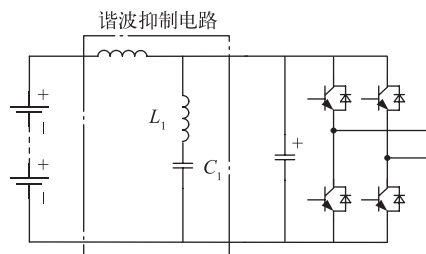


图2 无源滤波电路示意图

Fig. 2 The topology of passive filtering circuit

通过对无源滤波电路中电感 L_1 和电容 C_1 的选型,设计合理的截止频率,从而达到对电池侧电流特定频率滤波的效果。选型公式为

$$\sqrt{L_1 C_1} = \frac{1}{2\pi f_2} \quad (1)$$

式中, L_1 为LC串联谐振电感值; C_1 为LC串联谐振电容值; f_2 为电流二次脉动频率值, 对于链式储能系统, 电网频率为50 Hz, 因此 f_5 为100 Hz。

根据式(1)选取合适的串联谐振电感电容值,可以大大抑制流入电池系统的二次脉动电流。

基于LC串联谐振回路的链式储能系统,结构简单,控制环节少,但是LC参数选型设计难度大,同时滤波设备体积较大,影响链式储能的整体优化设计。

1.3 带DC/DC变换器的链式储能系统

带DC/DC变换器的两级式链式储能系统单个功率单元的结构如图3所示, 谐波抑制电路是在H桥模块和电池系统之间增加了一级DC/DC变换器, 提高了系统控制的自由度, 实现对H桥模块直流电压和注入电池系统电流的双重控制, 保证链式储能系统的安全可靠运行。

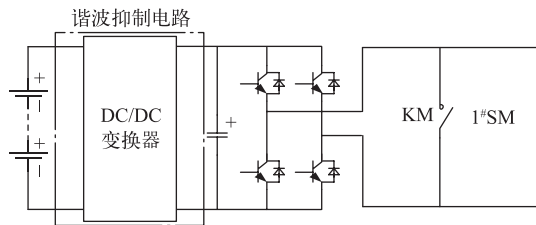


图 3 带 DC/DC 变换器的模块示意图

Fig. 3 The topology of module with DC/DC converter

DC/DC变换器采用双路交错并联双向BUCK/ BOOST拓扑, 结构如图4所示。交错并

联拓扑适用于电池容量较大的场合，支路间控制具有耦合性，等效开关频率较高，有利于消除开关频次特征谐波。

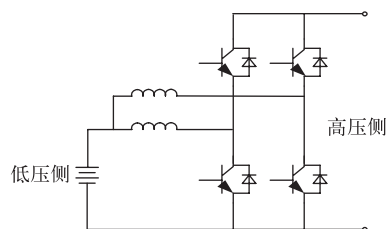


图 4 双向 BUCK/BOOST 拓扑示意图

Fig. 4 The topology of dual BUCK/BOOST converter

2 控制策略及直流谐波抑制策略

2.1 总体控制策略

带DC/DC变换器的两级式链式储能系统总体控制策略如图5所示,包括功率解耦控制、模块直流电压控制和谐波抑制控制。

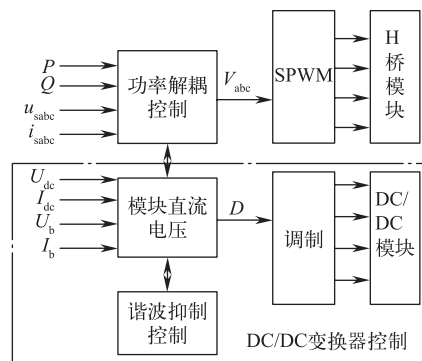


图 5 两级式链式储能系统的总体控制策略框图

Fig. 5 The control strategy of double-stage chain energy storage system

其中,功率解耦控制采用锁相环对电网电压进行锁相,并基于同步旋转坐标系,对电网电压和电流进行 abc/dq 变换,基于储能系统有功和无功的控制目标,结合瞬时无功理论得到链式储能系统的交流侧输出电压指令。利用DC/DC变换器,实现模块直流电压控制和对电池系统输入电流二次脉动的抑制作用。

功率解耦控制的基本原理如图6所示,采用锁相环对电网电压进行锁相,并基于同步旋转坐标系,对电网电压 u_{sabc} 、电流 i_{sabc} 进行abc/dq变

换，将电压电流变换为 u_d 、 u_q 、 i_d 和 i_q 。基于储能系统有功 P_{ref}^* 和无功 Q_{ref}^* 的控制目标，结合瞬时无功理论公式得到 i_{dref} 和 i_{qref} ，叠加前馈量并进一步解耦得到 v_d 、 v_q ，再经 dq 反变换得到链式储能变流器（PCS）的交流侧输出电压指令。

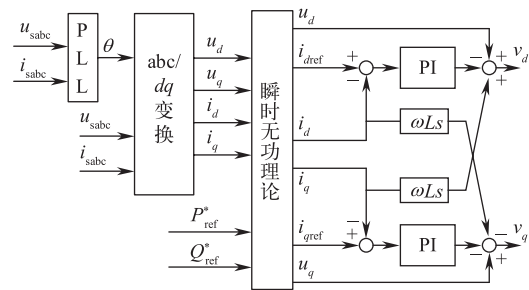


图 6 功率解耦控制策略框图

Fig. 6 Diagram of power decoupling control strategy

2.2 DC/DC变换器控制

图5总体控制策略中直流电压控制和谐波抑制控制是由DC/DC变换器实现的。电池接入DC/DC变换器的低压侧，H桥模块的直流侧接入DC/DC变换器的高压侧，因此有

$$\begin{cases} U_{in} = U_b \\ U_{out} = U_{dc} \end{cases} \tag{2}$$

$$\frac{U_{dc}}{U_b} = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{1-D} \tag{3}$$

式中， U_{in} 为DC/DC变换器的电池侧电压； U_{out} 为DC/DC变换器的功率模块侧电压； U_b 为电池端口电压； U_{dc} 为H桥模块直流电压； D 为双向BUCK/BOOST变换器下桥臂开关器件占空比。

因此，可通过控制占空比 D 实现对直流侧输出电压的有效控制。具体的，控制外环将H桥模块直流电压控制到目标值 $U_{dc ref}$ ，得到的外环输出作为每一路电流内环的输入。电流内环包含二次谐波抑制，可实现对直流侧馈入的二倍频波动进行有效控制，总体控制方案如图7所示。

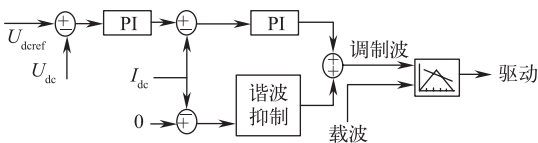


图 7 DC/DC 变换器控制策略框图

Fig. 7 Block diagram of dual DC/DC converter control strategy

3 仿真研究

为验证本文所提控制策略的可行性和有效性，搭建图8所示的系统架构进行仿真。

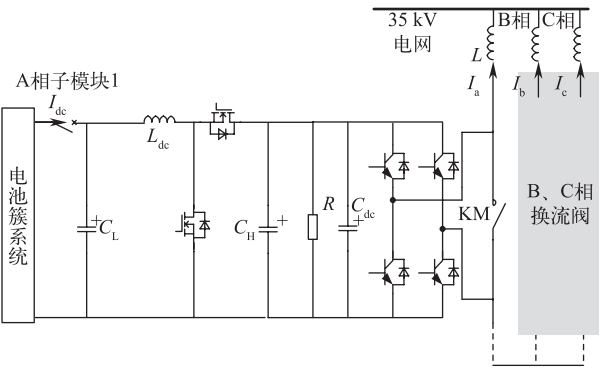


图 8 链式储能仿真系统整体架构

Fig. 8 Structure of chain energy storage simulation system

仿真系统参数见下表。系统电压为35kV，每相共有42个模块。

表 仿真系统主要参数的选取

Tab. Selection of the main parameters of time-domain simulation system

参数类型	数值
电网交流电压 /kV	35
交流侧额定电流 /A	200
单相子模块数目 N/ 个	42
电池直流电压 U_{bat}/V	700

图9为控制链式储能系统有功输出0.5（pu）时的35 kV交流侧仿真波形。图9中， P_1 为链式储能系统的放电功率； I_{abc} 为链式储能系统三相入网电流。

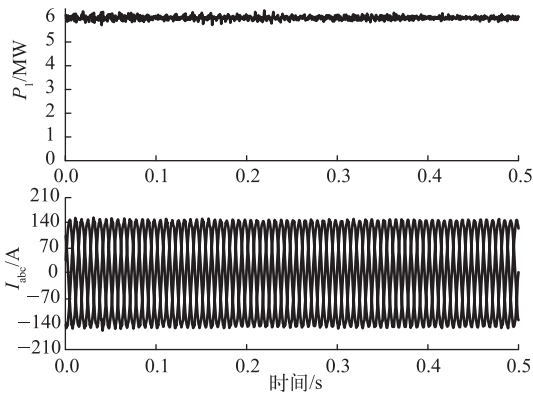


图 9 功率输出仿真波形图

Fig. 9 Simulation waveform of power output

从波形可以看出,有功持续稳定在控制目标6 MW,电流波形良好且幅值基本一致。

图10为链式储能系统充放电转换仿真波形,控制有功输出从放电0.5pu到充电0.5pu。

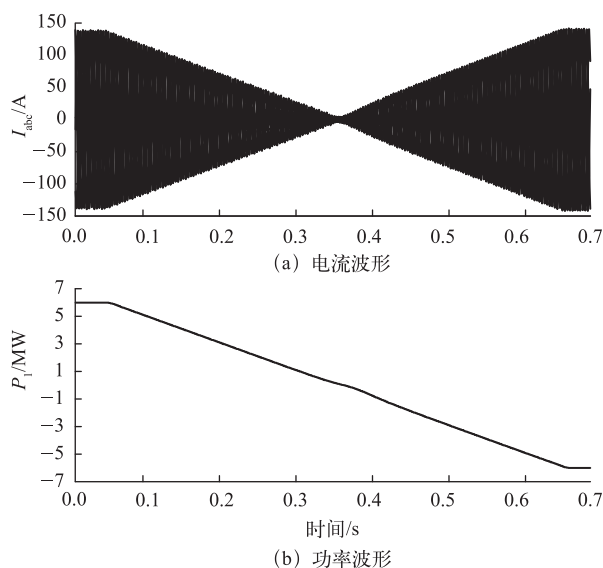


图 10 充放电转换仿真波形图

Fig. 10 Simulation waveform of charging and discharging switch

从波形可以看出,系统充放电切换时,电流波形良好,功率平滑从6 MW切换到-6 MW。

不带DC/DC变换器和带DC/DC变换器的对比仿真波形如图11所示。其中, I_{dc1} 、 I_{dc2} 分别为有无DC/DC变换器时的电池侧电流。

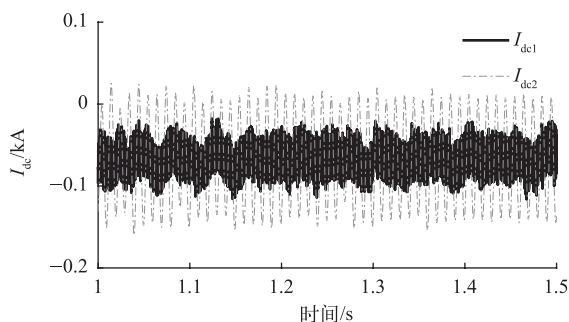


图 11 谐波抑制仿真波形图

Fig. 11 Simulation waveform of armonics restrained

从图11中可以看出,对于0.5 (pu) 功率输出工况下,没有DC/DC变换器,电池侧电流二倍频波动明显,波动范围在20~150 A之间,存在双向电流,而在加入DC/DC变换器的谐波控制之后,电池侧电流的二倍频波动得到显著抑制,波

动范围在30~100 A之间,大大降低了二倍频电流对电池本体的损害。

由上述仿真结果可知,加入了DC/DC变换器的链式储能系统可以正常实现功率精确输出、电池侧谐波抑制等功能,具有较好的稳态和动态性能。

3 实验验证

为了验证理论分析和仿真的正确性,研制了一套35 kV/12 MW·h链式储能系统,额定功率6 MW,每相配置42个功率模块。利用该系统进行满功率实验,稳态实验波形如图12所示。

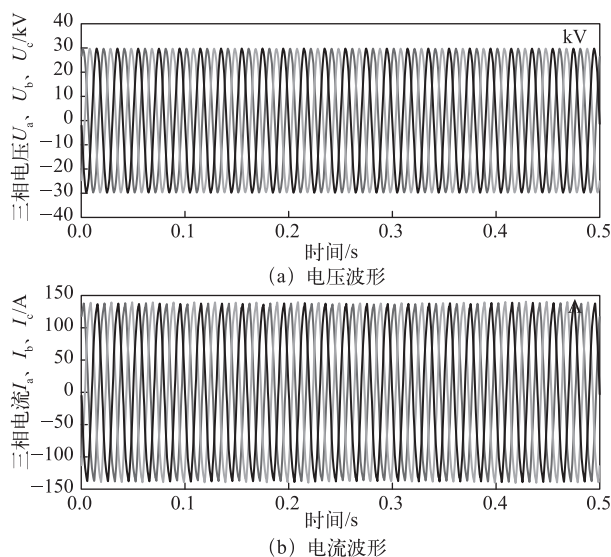


图 12 功率输出实验波形图

Fig. 12 Experiment waveform of power output

图12中, U_a 、 U_b 、 U_c 为35 kV电网相电压, I_a 、 I_b 、 I_c 为储能系统交流测进网电流。从实验波形可以看出,三相电网电压和三相进网电流波形良好,电流相间平衡性高,幅值基本一致,有效值为100 A,有功功率稳定在额定值。

系统小功率充放电切换实验波形如图13所示。

图13中, U_a 、 U_b 、 U_c 为35 kV电网相电压, I_a 、 I_b 、 I_c 为储能系统交流测进网电流。从实验波形可以看出,三相电网电压和三相进网电流波形良好,储能系统平滑从充电1.8 MW切换到放电1.8 MW。

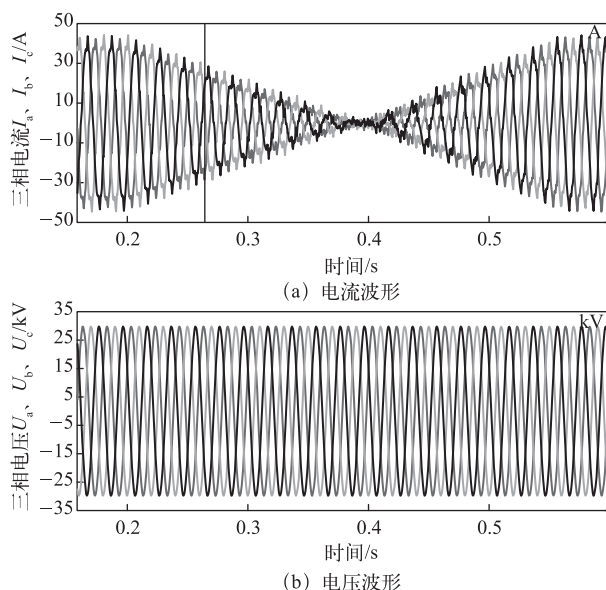


图 13 充放电实验波形图

Fig. 13 Experiment waveform of charging and discharging switch

单个功率模块的电池电流波形如图14所示。图14中， I_b 为单个功率模块电池电流。从实验波形可以看出，电池电流输出稳定，二次脉动值小于5 A，大大降低了二次脉动电流对电池系统的影响，验证了理论分析和仿真结果的正确性。

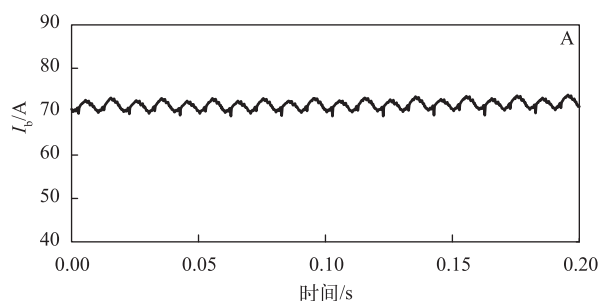


图 14 电池电流实验波形图

Fig. 14 Experiment waveform of battery current

4 结束语

随着新型电力系统的不断发展，储能系统作为其重要的组成部分扮演着举足轻重的角色。链式储能系统采用级联式拓扑结构，具备谐波含量小、响应速度快和一致性好等优势。本文基于链式储能拓扑，研究了系统总体控制策略，提出了

一种级联功率模块直流侧电流脉动的抑制方法，有效地抑制了功率模块电池系统的直流谐波电流，提高了系统的可靠性。通过搭建仿真模型和实验，验证了所提控制策略的有效性和可行性，为后续的工程发展提供了理论基础。

参考文献

- [1] 李建林, 王上行, 袁晓冬, 等. 江苏电网侧电池储能电站建设运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 1-9, 103.
- [2] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [3] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89.
- [4] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008(7): 1-9.
- [5] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006(15): 54-58.
- [6] SOONG T, LEHN P W. Evaluation of emerging modular multilevel converters for BESS applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2086-2094.
- [7] 蔡旭, 李睿, 刘畅, 等. 高压直挂储能功率变换技术与世界首例应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 200-211.

作者简介

祁琦(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为变流器及大功率电力电子应用技术。

盛晓东(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为柔性交流输电技术。

王宇(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为柔性交流输电技术和风电变流器。

(收稿日期: 2023-03-20)