

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.2.75

中图分类号: TM46

文献标志码: A

三相链式储能变换器相间 SOC 均衡最大环流功率控制

杨春来¹, 袁晓磊¹, 郝伟杰², 殷 喆¹, 李剑锋¹, 阚志忠²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050021; 2. 燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘要: 三相链式储能变换器可提高电网中风、光等可再生能源功率的可控性。针对三相输出链式储能变换器相间储能电池荷电状态 SOC(state-of-charge)不均衡问题, 提出相间环流功率闭环控制实现相间储能电池 SOC 均衡方法, 通过向 a、b、c 相注入零序电压在相间产生有功环流功率实现三相储能电池组的 SOC 均衡, 在建立链式储能变换器相间最大有功环流功率与 SOC 偏差数学模型基础上, 通过相间环流有功功率闭环控制使得系统以最大环流功率进行相间电池组 SOC 均衡, 实现相间 SOC 均衡速度最大化, 从而加快相内 SOC 均衡速度。最后通过 MATLAB 的仿真模型和实验平台验证了所提出方法的正确性和可行性。

关键词: 注入零序电压; 荷电状态均衡; 并网系统; 相间环流功率

Maximum Circulating Current Power Control for Phase-to-phase SOC Balance Applied to Three-phase Chain-link Energy Storage Converter

YANG Chunlai¹, YUAN Xiaolei¹, HAO Weijie², YIN Zhe¹, LI Jianfeng¹, KAN Zhizhong²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 2. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Three-phase chain-link energy storage converters (TPCLESCs) are promising in enhancing the controllability of renewable energy in power grid, such as wind and solar power. Aimed at the problem of state-of-charge (SOC) imbalance of energy storage battery among phases of a TPCLESC, a phase-to-phase SOC balance method based on phase-to-phase circulating current power closed-loop control is proposed. Through the zero-sequence voltage injection into phases a, b and c, the active circulating current among phases is generated to realize the SOC balance in the three-phase energy storage battery groups. A mathematical model of the maximum phase-to-phase circulating current power of the chain-link energy storage converter and SOC deviation is established. On this basis, the phase-to-phase SOC balance in battery groups is realized at the maximum circulating current power through the phase-to-phase circulating current active power closed-loop control. As a result, the phase-to-phase SOC reaches its balance at the maximum speed, and the process of phase-to-phase SOC balance is accelerated. Finally, the correctness and feasibility of the proposed method were verified by a MATLAB simulation model and an experimental platform.

Keywords: Zero-sequence voltage injection; state-of-charge (SOC) balance; grid-connected system; phase-to-phase circulating current power

电力储能系统并网技术的发展为解决电网中大规模间歇性新能源导致电能质量恶化问题带来

希望^[1-3]。储能电池与三相链式变换器构成的电力储能系统具有多电平输出、模块化、无需工频变压器、体积小、效率高、输出电流谐波低、可实现高压大容量变换等优点^[4-8], 三相链式变换器的每一个 H 桥均接入储能电池。由于储能电池初始电荷量不同及 H 桥变换器开关器件的损耗不同等因素导

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-06-01, 2022-06-28, 2022-07-09; 录用日期: 2022-07-15; 网络首发日期: 2022-09-05
基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目(kj2021-047)

This work is supported by State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Science and Technology Project under the grant kj2021-047

致运行中的每个储能电池的荷电状态 SOC (state-of-charge) 值不同, 为保证储能电池安全工作, 防止其因过度充、放电而损坏, 需要对储能电池进行在线 SOC 均衡控制。

解决储能电池 SOC 均衡问题的方法可归结为储能电池的差异化充、放电功率控制方法。文献[9]针对储能电池 SOC 不均衡问题, 研究了 1 种基于特征谐波消除脉宽调制 SHE-PWM(selective harmonic elimination-pulse width modulation)方法实现差异化充、放电的均衡控制策略, 其具体方法是当储能电池的 SOC 值不均衡时, 利用傅里叶分解方法计算出各个 H 桥逆变器的触发角, 通过改变逆变器开关管触发角最终改变各个 H 桥储能电池的充、放电时间, 进而实现储能电池 SOC 均衡, 但是该方法需要大量在线计算, 实现难度大; 文献[10]针对储能电池 SOC 不均衡问题, 提出 1 种对储能电池进行差异化充、放电控制的方法, 首先计算三相储能电池的 SOC 值, 然后改变逆变器的调制波, 最终改变储能电池的充、放电速度, 从而实现逆变器直流侧所接储能电池 SOC 均衡, 但是该方法存在影响电力储能系统稳定性的问题且导致三相变换器总输出功率发生变化; 文献[11]研究了根据单相链式储能逆变器储能电池 SOC 偏差, 成比例地调节 H 桥逆变单元输出电压实现 SOC 均衡的方法, 依据储能电池工作在充电和放电模式, 其比例系数分别取正值和负值, 可视为 1 种单相链式变换器 SOC 均衡的基本方法; 文献[12]研究了光伏并网系统中集成储能电池的级联 Z 源逆变器 SOC 均衡控制问题, 提出了根据光伏输出功率确定储能电池功率的 SOC 方法。综上所述, 解决链式储能变换器中 SOC 均衡问题可归结为对变换器的输出有功功率的合理控制问题。

本文在分析并网工作的三相链式储能变换器注入零序电压产生的相间环流功率与 SOC 均衡关系的基础上, 提出 1 种注入最大零序电压的相间 SOC 均衡的闭环控制方法, 利用注入最大零序电压在三相链式储能变换器相间产生最大环流有功功率并对其进行闭环控制, 从而实现储能电池 SOC

在三相之间达到均衡并提高了均衡速度, 同时提高了系统的稳定性。最后通过仿真和实验, 验证了所提出的零序电压注入最大环流功率控制方法的正确性。

1 三相链式储能变换器

1.1 主电路结构

三相链式储能变换器的每相由多组 H 桥逆变器单元在桥臂侧链式连接而成, 如图 1 所示, 每个 H 桥逆变器直流母线接入 1 组储能电池, 同时还接入与储能电池并联的电容 C_{xi} ($x = a, b, c; i = 1, 2, \dots, n$), 以稳定直流侧电压并滤除谐波电流, a、b、c 三相链式变换器采用星型连接以提高输出电压, L_a 、 L_b 、 L_c 为链式储能逆变器的输出电感。

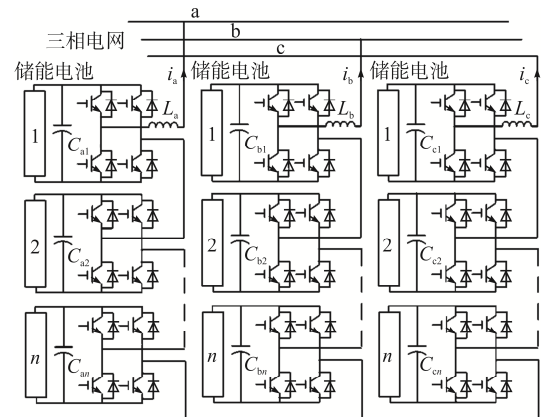


图 1 链式储能变换器主电路结构

Fig. 1 Main circuit structure of chain-link energy storage converter

1.2 链式变换器调制及控制方式

链式储能变换器的系统控制框图如图 2 所示, 其中: e_d 、 e_q 为电网电压空间矢量在 $d-q$ 旋转坐标系下的分量; i_d 、 i_q 为并网电流空间矢量在 $d-q$ 旋转坐标系下的分量; $e_{abc} = [e_a \ e_b \ e_c]$ 为三相电网电压的瞬时值构成的相量; $i_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]$ 为三相并网电流的瞬时值构成的相量; P^* 、 Q^* 分别为并网有功功率和无功功率给定值; u_a^* 、 u_b^* 、 u_c^* 为输出电压的调制信号; v_0^* 为零序分量的调制信号。链式变换器采用载波移相调制方式, 这种调制方式具有实现简单、输出电流谐波含量低的优点。链式储能变换器

采用电网电压定向的矢量控制, 在 d - q 旋转坐标系下, 比例积分控制器与输出电流前馈实现 dq 轴电流解耦闭环控制, 得到 dq 轴的调制信号 u_d^* 、 u_q^* , 经过 dq - abc 变换形成 u_a^* 、 u_b^* 、 u_c^* 信号与注入的零序电压信号 v_0^* 相叠加产生三相调制波信号, 最终分别实现有功电流 i_d 和无功电流 i_q 的闭环独立控制和储能电池 SOC 相间均衡。

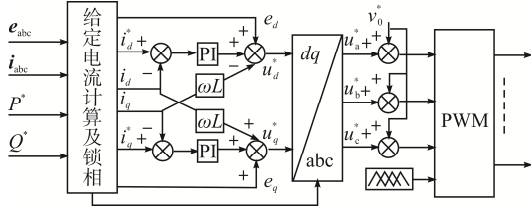


图2 链式储能变换器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of chain-link energy storage converter

2 相间最大环流功率 SOC 均衡控制

分析三相链式储能变换器注入零序电压实现 SOC 均衡的工作原理, 由于如图 1 所示三相链式储能变换器交流输出端采用星型连接方式, 三相交流之间无零序电流通路, 所以在三相链式储能变换器注入零序电压后不影响其并网输出功率。假设注入的零序电压瞬时值为

$$v_0 = \sqrt{2}V_0 \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: V_0 为注入零序电压的有效值; ω 为电网电压的角频率; φ_0 为注入零序电压的初相角。

在未注入零序电压时, 链式储能变换器 a、b、c 三相交流输出电流瞬时值分别为

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2}I_a \cos(\omega t + \delta) \\ i_b = \sqrt{2}I_b \cos(\omega t + \delta - 2\pi/3) \\ i_c = \sqrt{2}I_c \cos(\omega t + \delta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_a 、 I_b 、 I_c 分别为三相电流的有效值, 在三相电网电压平衡的条件下 $I_a = I_b = I_c = I$; δ 为 a 相电流初相角。

注入零序电压后, 由式(1)和式(2)计算 a、b、c 三相间的有功环流功率分别为

$$\begin{cases} P_{0a} = V_0 I \cos(\varphi_0 - \delta) \\ P_{0b} = V_0 I \cos(\varphi_0 - \delta + 2\pi/3) \\ P_{0c} = V_0 I \cos(\varphi_0 - \delta + 4\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

假设链式储能变换器每相由 n 个 H 桥变换器组成, 每相储能电池 SOC 平均值分别为 $S_{OC,a}$ 、 $S_{OC,b}$ 、 $S_{OC,c}$, 其计算式分别为

$$\begin{cases} S_{OC,a} = (S_{OC,a1} + S_{OC,a2} + \dots + S_{OC,an})/n \\ S_{OC,b} = (S_{OC,b1} + S_{OC,b2} + \dots + S_{OC,bn})/n \\ S_{OC,c} = (S_{OC,c1} + S_{OC,c2} + \dots + S_{OC,cn})/n \end{cases} \quad (4)$$

式中, $S_{OC,xi}$ ($x = a, b, c; i = 1, 2, \dots, n$) 为每个 H 桥变换器储能电池的荷电状态。假设 a、b、c 三相 SOC 平均值为 \bar{S}_{OC} , 其计算式为

$$\bar{S}_{OC} = \frac{1}{3}(S_{OC,a} + S_{OC,b} + S_{OC,c}) \quad (5)$$

假设 a、b、c 三相的 SOC 值与 \bar{S}_{OC} 的偏差值分别为 $\Delta S_{OC,a}$ 、 $\Delta S_{OC,b}$ 、 $\Delta S_{OC,c}$, 其计算式为

$$\begin{cases} \Delta S_{OC,a} = S_{OC,a} - \bar{S}_{OC} \\ \Delta S_{OC,b} = S_{OC,b} - \bar{S}_{OC} \\ \Delta S_{OC,c} = S_{OC,c} - \bar{S}_{OC} \end{cases} \quad (6)$$

假设实现相间 SOC 均衡所需时间为 t_0 , SOC 偏差与链式储能变换器相间环流功率关系为

$$\begin{cases} \Delta S_{OC,a} = \frac{t_0}{QU_0} V_0 I \cos(\varphi_0 - \delta) = kP_{0a} \\ \Delta S_{OC,b} = \frac{t_0}{QU_0} V_0 I \cos(\varphi_0 - \delta + 2\pi/3) = kP_{0b} \\ \Delta S_{OC,c} = \frac{t_0}{QU_0} V_0 I \cos(\varphi_0 - \delta + 4\pi/3) = kP_{0c} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Q 为储能电池额定荷电容量; U_0 为储能电池电压; k 为比例系数, $k = t_0/(QU_0)$ 。达到三相储能电池 SOC 均衡后, 三相储能电池的 SOC 值相等, SOC 偏差为 0, 即

$$\Delta S_{OC,a} = \Delta S_{OC,b} = \Delta S_{OC,c} = 0 \quad (8)$$

以图 3 说明三相正序电压 U_a 、 U_b 、 U_c 分别与注入的零序电压叠加后得到的三相电压 U'_a 、 U'_b 、 U'_c 及三相并网电流相位关系。

根据图 3 所示矢量图确定注入零序电压的幅值和相位, 首先确定注入零序电压的初相角 φ_0 。根据式(7)推导出三相 SOC 偏差与注入零序电压初相角 φ_0 的关系为

$$\begin{cases} \Delta S_{OC,a} = kV_0 I \cos(\varphi_0 - \delta) \\ \Delta S_{OC,b} = kV_0 I \cos(\varphi_0 - \delta + 2\pi/3) \\ \Delta S_{OC,c} = kV_0 I \cos(\varphi_0 - \delta + 4\pi/3) \end{cases} \quad (9)$$

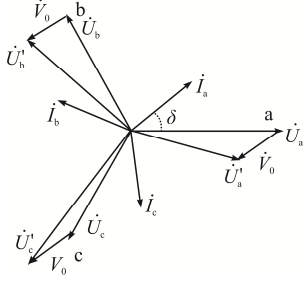


图 3 注入零序电压的三相电流矢量

Fig. 3 Three-phase current vector for zero-sequence voltage injection

如果认为 $\varphi_0 - \delta$ 为自变量, $kV_0 I$ 、 δ 为常数, 则可把 $\Delta S_{OC,a}$ 、 $\Delta S_{OC,b}$ 、 $\Delta S_{OC,c}$ 看作图 3 所示 abc 三相坐标系下的分量。为求出 φ_0 , 在如图 4 所示坐标系把三相 SOC 偏差变换到 α - β 两相坐标系, 变换矩阵为

$$C_{2/3} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过变换矩阵(10)得到 α - β 坐标系下 $\Delta S_{OC,\alpha}$ 、 $\Delta S_{OC,\beta}$ 的表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta S_{OC,\alpha} \\ \Delta S_{OC,\beta} \end{bmatrix} = C_{2/3} \begin{bmatrix} \Delta S_{OC,a} \\ \Delta S_{OC,b} \\ \Delta S_{OC,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \Delta S_{OC,a} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta S_{OC,b} - \Delta S_{OC,c}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

如图 4 所示 abc 与 α - β 坐标系中, 由 $\Delta S_{OC,a}$ 、 $\Delta S_{OC,b}$ 、 $\Delta S_{OC,c}$ 构成空间矢量 $\Delta \mathbf{S}_{OC}$, 角度 γ 的计算式为

$$\gamma = \begin{cases} \arctan(\Delta S_{OC,\beta} / \Delta S_{OC,\alpha}) & \Delta S_{OC,\alpha} \neq 0 \\ \pi/2 & \Delta S_{OC,\alpha} = 0 \text{ 且 } \Delta S_{OC,\beta} > 0 \\ -\pi/2 & \Delta S_{OC,\alpha} = 0 \text{ 且 } \Delta S_{OC,\beta} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

图 4 中 $\Delta \mathbf{S}_{OC}$ 的模为

$$|\Delta \mathbf{S}_{OC}| = \Delta S_{OC} = \sqrt{\Delta S_{OC,a}^2 + \Delta S_{OC,b}^2 + \Delta S_{OC,c}^2} \quad (13)$$

根据式(9)~式(12)得到零序电压的初相角 φ_0 为

$$\varphi_0 = \delta + \gamma \quad (14)$$

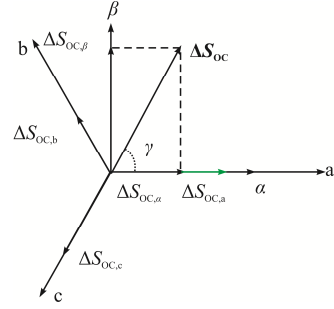


图 4 坐标变换

Fig. 4 Coordinate transformation

根据图 5 所示链式储能变换器工作在放电模式下各相电压相量、注入的零序电压相量的相位关系, 分析 $S_{OC,a}$ 、 $S_{OC,b}$ 、 $S_{OC,c}$ 均衡的方向。注入零序电压相量 \dot{V}_0 后链式储能变换器输出相电压 \dot{U}'_a 、 \dot{U}'_b 、 \dot{U}'_c , 在注入零序电压之前变换器输出电压 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 。在 a 相 $S_{OC,a}$ 最大的条件下, 链式储能变换器输出的零序电压 \dot{V}_0 分别与电压相量 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 的夹角如图 5(a)所示, 比较图 5(a)中零序电压 \dot{V}_0 与 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 的夹角, 发现其中 \dot{V}_0 与 \dot{U}_a 夹角最小, 能够使得 a 相输出功率大于 b、c 相输出功率, 从而使得 a 相电池组平均值 $S_{OC,a}$ 降低。同理, 图 5(b)中 \dot{V}_0 与 \dot{U}_b 的夹角最小使得 b 相的输出功率大于 a、c 相输出功率, 导致 b 相储能电池

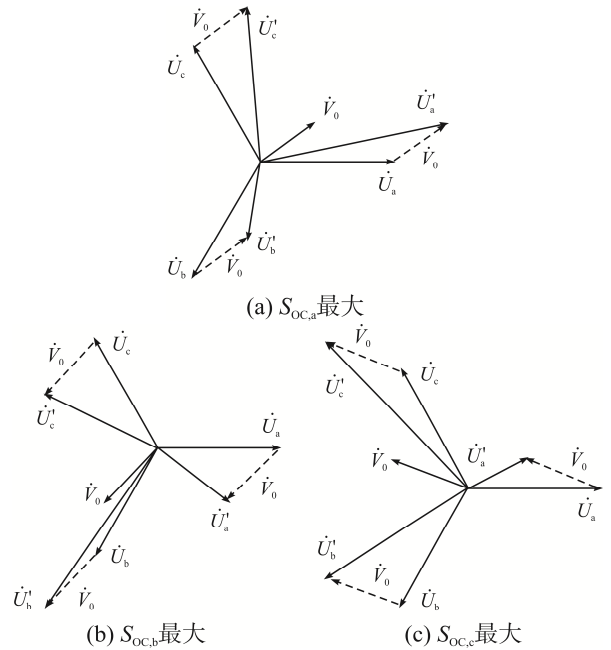


图 5 注入零序电压后电压矢量

Fig. 5 Voltage vector after zero-sequence voltage injection

组平均值 $S_{OC,b}$ 降低, 图 5(c) 中零序电压 \dot{V}_0 与 c 相电压 \dot{U}_c 夹角最小使得 c 相输出功率大于 a、b 相输出功率, 从而导致 c 相电池组平均值 $S_{OC,c}$ 降低。可知根据零序电压 \dot{V}_0 与相电压 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 的相位关系可确定 $S_{OC,a}$ 、 $S_{OC,b}$ 、 $S_{OC,c}$ 升高或降低的方向。

分析零序电压的幅值, 根据 PWM 调制原理, 若注入零序电压 V_0 过大将导致链式储能变换器过调制问题, 影响系统输出正弦电流波形。若注入零序电压 V_0 过小将减小相间 SOC 均衡速度, 通过加入环流功率闭环, 可调节零序电压幅值, 保证 SOC 均衡速度不变。首先检测注入的零序电压在 a、b、c 三相所产生的环流有功功率, 在注入零序电压前 a、b、c 三相输出功率均等于总功率给定值 P^* 的 1/3, 注入零序电压后, 链式储能变换器输出 a、b、c 三相输出的零序环流功率为

$$\begin{cases} \Delta P_{0a} = P_a - \frac{1}{3}P^* \\ \Delta P_{0b} = P_b - \frac{1}{3}P^* \\ \Delta P_{0c} = P_c - \frac{1}{3}P^* \end{cases} \quad (15)$$

式中: P_a 、 P_b 、 P_c 分别为链式储能变换器 a、b、c 相输出有功功率; ΔP_{0a} 、 ΔP_{0b} 、 ΔP_{0c} 分别为 a、b、c 相输出环流功率; P^* 为三相储能变换器并网输出总有功功率。

以 a 相为例, 计算该相允许输出的最大环流功率。由式(3)可知, 由于系统输出三相稳定功率时, I_a 、 φ_0 、 δ 为常数, P_{0a} 达到最大值的条件是 V_0 达到最大值。

根据文献[13]可知, 为保证储能系统正常工作, 要求在注入零序电压后链式储能变换器各相输出电压的最大幅值小于各相 H 桥变换器直流侧储能电池电压之和, 否则, 因开关管占空比失调将导致储能变换器输出电压畸变, 因此, 在图 5(a) 所示情况下, a 相输出电压幅值需满足不等式 $\sqrt{2}U'_a < V_{adc}$; 在图 5(b) 所示情况下, b 相输出电压幅值需满足不等式 $\sqrt{2}U'_b < V_{bdc}$; 在图 5(c) 所示情况下, c 相输出电压幅值需满足不等式 $\sqrt{2}U'_c < V_{cdc}$ 。其中, V_{adc} 、 V_{bdc} 、 V_{cdc} 分别为 a、b、c 相链式变换器直流侧电压之和。因此, 求出 U'_a 、 U'_b 、 U'_c 的最大值分别为

$$U_{amax}、U_{bmax}、U_{cmax}, \text{ 即} \begin{cases} U_{amax} = V_{adc} \\ U_{bmax} = V_{bdc} \\ U_{cmax} = V_{cdc} \end{cases} \quad (16)$$

以图 5(a) 工作情况为例, 在已知 U_a 和 U'_a 后, 根据余弦定理求出 a 相电压注入零序电压 V_0 , 即

$$U_a^2 = V_0^2 + U_a'^2 - 2U_a V_0 \cos(\pi - \varphi_0) \quad (17)$$

$$(V_0 + U_a \cos \varphi_0)^2 = U_a'^2 - U_a^2 \sin^2 \varphi_0 \quad (18)$$

$$V_0 = \sqrt{U_a'^2 - U_a^2 \sin^2 \varphi_0} - U_a \cos \varphi_0 \quad (19)$$

因此, 由式(16)~式(19), 求出 a 相电压达到最大值时 V_0 最大值 V_{0amax} 为

$$V_{0amax} = \sqrt{0.5V_{adc}^2 - U_a^2 \sin^2 \varphi_0} - U_a \cos \varphi_0 \quad (20)$$

同理, 由图 5(b) 和 (c) 所示工作情况, 分别求出 b、c 相电压最大值 V_{0bmax} 、 V_{0cmax} 分别为

$$V_{0bmax} = \sqrt{0.5V_{bdc}^2 - U_b^2 \sin^2(240^\circ - \varphi_0)} - U_b \cos(240^\circ - \varphi_0) \quad (21)$$

$$V_{0cmax} = \sqrt{0.5V_{cdc}^2 - U_c^2 \sin^2(120^\circ - \varphi_0)} - U_c \cos(120^\circ - \varphi_0) \quad (22)$$

最终, 根据式(3)求出 a、b、c 相环流功率最大值为

$$\begin{cases} P_{0amax} = V_{0amax} I_a \cos(\varphi_0 - \delta) \\ P_{0bmax} = V_{0bmax} I_b \cos(\varphi_0 - \delta + \frac{2}{3}\pi) \\ P_{0cmax} = V_{0cmax} I_c \cos(\varphi_0 - \delta + \frac{4}{3}\pi) \end{cases} \quad (23)$$

图 6 给出储能蓄电池放电模式下链式储能变换器相间环流功率控制框图, 为进一步说明放电模式下三相链式储能变换器相间 SOC 均衡及电网电压定向并网电流矢量控制过程, 图 7 给出其控制流程。

图 6 中, 并网电流环部分实现对储能变换器并网三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 的闭环控制, SOC 均衡开环控制器根据 SOC 偏差产生三相零序电压目标值 V_{02}^* , SOC 均衡闭环控制器按照本文提出的环流功率最大控制策略产生注入三相零序电压给定值目标值 V_{01}^* 。图 6 中根据三相链式储能变换器直流电压及 SOC 偏差最大值确定 P_{0xmax} ($x = a, b, c$), 作为最大环流功率设定值, 根据式(15)计算出环流功率作为闭环的反馈值, 相间环流功率闭环采用比例控制器, 比例控制器输

工作。所以, 在 SOC 均衡后期, 当 ΔS_{OC} 的值小于设定值 $\Delta S_{OC,ref}$ 时, 将 SOC 均衡算法切换为传统的零序电压开环 SOC 控制, 随着 ΔS_{OC} 逐渐减为 0, 零序电压也减为 0, 以增加 SOC 均衡控制的稳定性。

如图 7 所示, 储能变换器放电模式启动作为运行并网电流闭环和 SOC 均衡控制程序的条件, 在变换器放电模式启动有效的情况下: ①测量三相电网电压、变换器滤波电感电流计算得到链式储能变换器每相并网输出功率, 运行锁相环进行电网电压定向; ②计算三相链式储能变换器的 SOC 平均值及 SOC 偏差, 根据 SOC 偏差判断是否启动 SOC 均衡算法, 如果满足 $\bar{S}_{OC} > \Delta S_{OC,ref}$ 则首先计算零序电压的初相角, 然后在满足 $\Delta S_{OC} > \Delta S_{OC,ref}$ 条件下, 系统运行最大零序电压 SOC 均衡闭环控制程序, 否则运行 SOC 开环控制程序; ③运行并网有功电流和无功电流的闭环控制程序, 最终分别计算三相电压的调制波。

3 仿真验证

为验证注入零序电压最大环流功率闭环控制实现三相间平均 SOC 均衡策略的有效性, 建立链式储能变换器的 MATLAB/Simulink 仿真模型并对其均衡控制方法进行验证, 仿真参数见表 1。

三相链式储能变换器采用图 6 所示传统开环控制实现相间 SOC 均衡过程中输出功率、输出电流、电网电压的仿真波形如图 8 所示。由图 8 可见, 三相电网电压幅值相同, 三相链式储能变换器的并网电流幅值相同、相位保持稳定。在 0.06 s 注入零序电压后, 链式储能系统开始进行 a、b、c 相间 SOC 均衡, a 相输出功率增大 1 kW, b 相输出功率减小 100 W、c 相输出功率减小 900 W, 随着 SOC 趋近均衡, 三相有功功率逐渐趋近于相同值 100 kW。

传统相间 SOC 均衡时输出功率、SOC、调制波波形如图 9 所示。由图 9 可以看出, 在 0.06 s 时刻注入零序电压, 三相 SOC 的偏差值 ΔS_{OC} 逐渐衰减, 同时所注入零序电压调制波幅值逐渐减小, 经过约

0.9 s 相间 SOC 达到均衡。

表 1 链式储能型变换器仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters in chain-link energy storage converter

参数	数值
三相系统线电压/kV	3
电网频率 /Hz	50
各相级联单元数 N	6
直流侧电容 $C/\mu\text{F}$	1 410
开关频率/kHz	5
滤波电感 L/mH	8
直流侧电压/V	600
截止频率 f_c/kHz	2
a 相储能电池 SOC/%	90
b 相储能电池 SOC/%	80
c 相储能电池 SOC/%	70

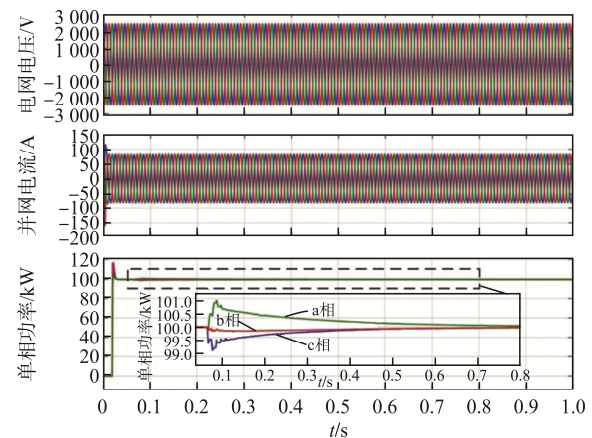


图 8 传统相间 SOC 均衡开环控制仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of phase-to-phase SOC balance under traditional open-loop control

三相链式储能变换器采用提出的最大环流功率闭环控制实现相间储能电池 SOC 均衡过程中电网电压、并网电流、单相输出功率、三相总功率、三相 SOC、SOC 偏差、零序电压调制波及 a 相电压调制波的仿真波形分别如图 10 和图 11 所示。由图 10 可见, 链式储能变换器三相输出的并网电流幅值、相位稳定, 并网功率相同。为验证最大环流功率闭环控制的动态性能, 在 0.04 s 突然增加环流功率给定值对 SOC 均衡控制系统进行扰动, 图 10 所示并网电流及图 11 所示三相总功率波形均不受环流功率给定值扰动影响。由图 10 所示三相功率波形局部放大波形可见, 在开始阶段 a、b、c 三相输

出功率差值较小,在 0.04 s 后环流功率给定值突然增大, a、b、c 相功率差值增大,随着三相 SOC 达到均衡, a、b、c 相功率之间的差值减小,最终 a、b、c 相输出功率均趋于稳定值 100 kW。

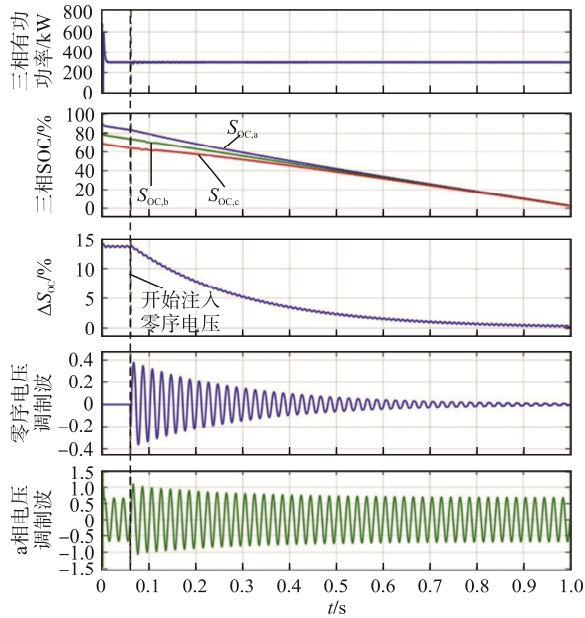


图 9 传统相间 SOC 均衡时输出功率、SOC、调制波波形
Fig. 9 Waveforms of output power, SOC and modulation wave in the case of traditional phase-to-phase SOC balance

由图 10 所示单相功率的放大仿真波形可见,环流功率给定值突然增大后,功率曲线上升时间较短、超调小,因此环流功率闭环控制的动态性能较好; a、b、c 三相功率值随 SOC 均衡逐渐达到一致,当 ΔS_{oc} 值小于设定阈值后,将 SOC 均衡控制策略转换到传统相间 SOC 均衡控制,三相 SOC 的偏差值 ΔS_{oc} 继续减小,最终达到相间 SOC 均衡后, a、b、c 三相的功率差变为 0。由图 11 所示三相 SOC 仿真波形可见,在 0.06 s 时刻链式储能变换器注入零序电压,每相 SOC 值及相间 SOC 偏差值逐渐减小,在 0.5 s 左右达到相间 SOC 均衡;与图 9 所示仿真波形相比,本文所提 SOC 均衡控制方法能够缩短均衡时间,加快 SOC 均衡速度。由图 11 所示 ΔS_{oc} 仿真波形可见,在 0.06~0.20 s 时段,环流功率闭环控制功率给定值较小, ΔS_{oc} 以较小斜率下降;从 0.20 s 时刻环流功率给定值增加为新值, ΔS_{oc} 下降的斜率增大;从 0.50 s 时刻 ΔS_{oc} 值低于设定值后,由环流功率闭环控制相间 SOC 均衡控制切换为

传统的 SOC 均衡开环控制策略,三相 SOC 的偏差值平滑地趋于 0。由图 11 所示零序电压调制波形可见,在 0.06 s 开始链式储能变换器注入零序电压,相间 SOC 偏差波形开始降低,在 0.2 s 时刻环流功率给定值增大为新值后注入的零序电压亦随之增大, a 相调制波形的幅值增大,在达到相间 SOC 均衡后, a 相调制波波形恢复并保持为无 SOC 均衡控制状态的幅值。

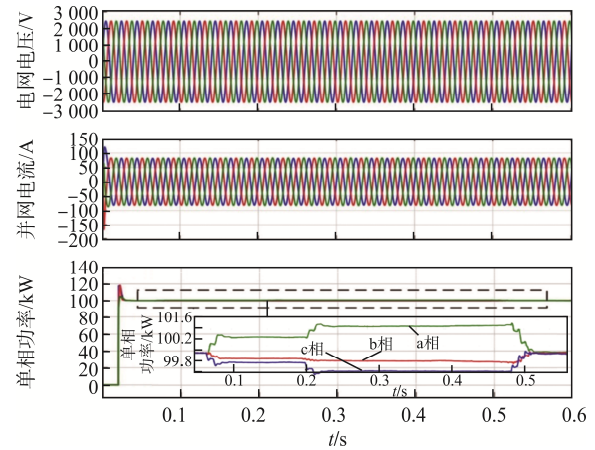


图 10 相间环流功率环相间 SOC 均衡仿真波形
Fig. 10 Simulation waveforms of phase-to-phase SOC balance under phase-to-phase circulating current power control

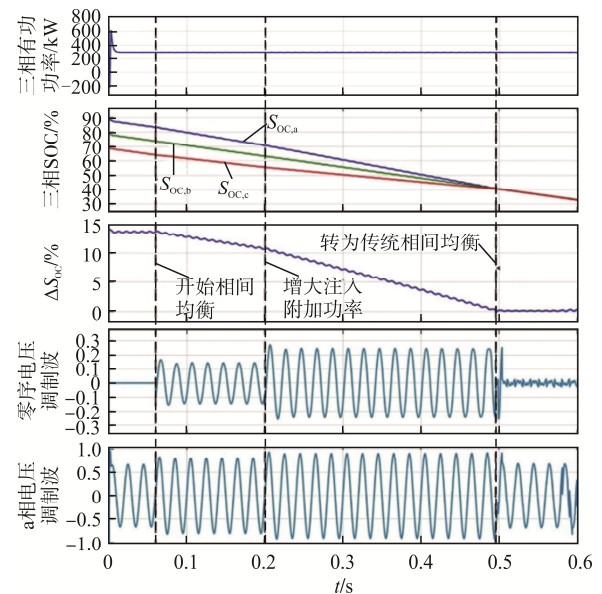


图 11 相间环流功率闭环控制输出功率、SOC、调制波波形
Fig. 11 Waveforms of output power, SOC, and modulation wave under phase-to-phase circulating current power closed-loop control

4 实验验证

为进一步验证注入零序电压最大环流功率闭环控制实现三相间平均 SOC 均衡策略的有效性, 设计用数字信号处理器 TMS320F28335 实现控制算法的链式储能变换器实验平台。三相链式储能变换器实验平台如图 12 所示, 实验参数见表 2。

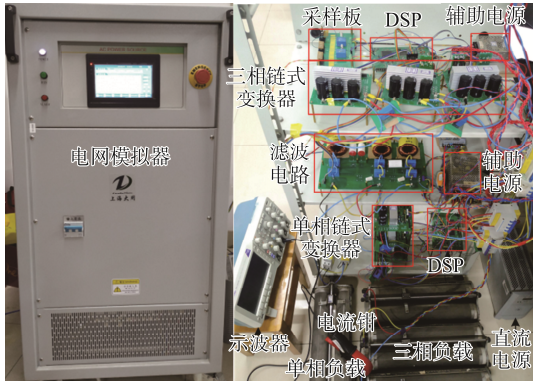


图 12 实验平台

Fig. 12 Experimental platform

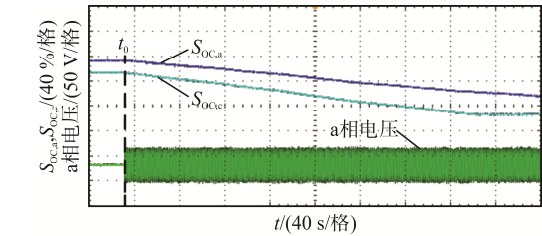
表 2 链式储能型变换器实验参数

Tab. 2 Experimental parameters of chain-link energy storage converter

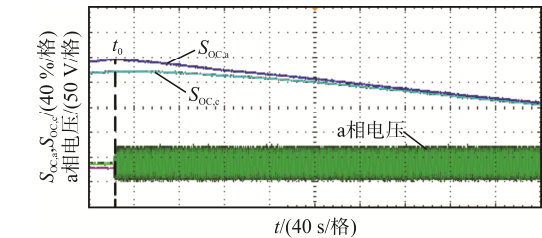
参数	数值
各相级联单元数 N	1
直流侧电容/ μF	1 410
滤波电感/ mH	3
滤波电容/ μF	10
直流侧电压/ V	150
开关频率/ kHz	15
a 相储能电池 SOC/%	90
b 相储能电池 SOC/%	80
c 相储能电池 SOC/%	70

在未采用相间 SOC 均衡控制条件下, 运行链式储能变换器, a 相 $S_{\text{OC},a}$ 和 c 相 $S_{\text{OC},c}$ 、a 相输出电压实验波形如图 13(a)所示, 在实验过程中预先设定链式储能变换器每相储能电池 SOC 的初始值, 并测量变换器直流侧电池的充、放电电流及储能电池电压, 通过安时法实时计算电池 SOC 的变化量。分别设置 SOC 的初值: $S_{\text{OC},a}=90\%$ 、 $S_{\text{OC},b}=80\%$ 、 $S_{\text{OC},c}=70\%$, 由图 13(a)可见, 从 t_0 时刻储能变换器

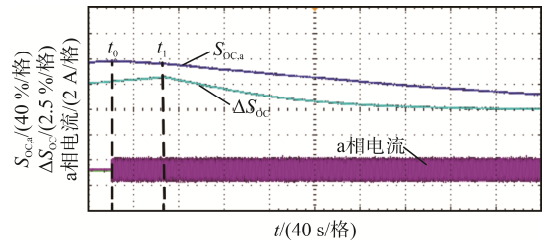
运行, 在 t_0 时刻之前链式储能变换器输出电压、电流均为 0, $S_{\text{OC},a}$ 、 $S_{\text{OC},c}$ 均保持不变; 在 t_0 时刻以后链式储能变换器开始输出功率, a 相输出电压有效值 23 V, 由于三相链式储能变换器向电网输出功率, 储能电池放电, 其 $S_{\text{OC},a}$ 、 $S_{\text{OC},c}$ 开始减小。由于实验中未对相间 SOC 进行均衡控制, $S_{\text{OC},a}$ 、 $S_{\text{OC},c}$ 的实验波形始终保持其差值并且有逐渐增大趋势。



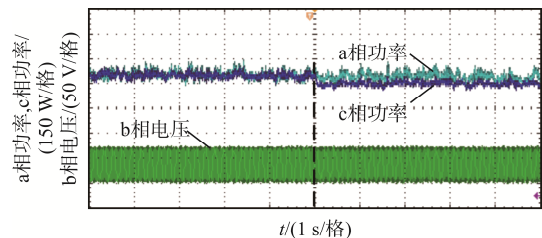
(a) 未加均衡时 a、c 相 SOC 波形



(b) 加入均衡控制 a、c 相 SOC 波形



(c) 有、无均衡控制 SOC 和 ΔS_{OC} 波形对比



(d) 加入均衡控制时 a 相和 c 相功率波形

图 13 相间 SOC 均衡控制实验波形

Fig. 13 Experimental waveforms under phase-to-phase SOC balance control

图 13(b) 为采用零序电压注入最大环流功率实现相间 SOC 均衡闭环控制时得到的实验波形, 同样在 t_0 时刻储能变换器运行, 在 t_0 时刻之前, 储能变

换器输出功率为 0, 所以 $S_{OC,a}$ 和 $S_{OC,c}$ 不发生变化, 在 t_0 时刻链式储能变换器运行并输出功率, 输出电压有效值仍然为 23 V。由于采取了 SOC 均衡控制, $S_{OC,a}$ 和 $S_{OC,c}$ 曲线逐渐下降并趋于一致。

为进一步验证注入零序电压最大环流功率实现相间 SOC 均衡闭环控制的有效性, 图 13(c) 给出 $S_{OC,a}$ 和 ΔS_{OC} 、a 相输出电流实验波形。链式储能变换器在 t_0 时刻运行, 因为变换器在 t_0 时刻之前无输出功率, $S_{OC,a}$ 和 ΔS_{OC} 的实验波形基本不变; 从 t_0 时刻, 不进行相间 SOC 均衡控制, $S_{OC,a}$ 的波形开始减小, ΔS_{OC} 波形逐渐增大; 从 t_1 时刻采用相间 SOC 均衡控制, 从图 13(c) 可见 SOC 的偏差值 ΔS_{OC} 开始逐渐减小为 0, 最终达到相间 SOC 均衡, 从 t_0 时刻, 输出并网电流一直保持稳定, 不受 SOC 均衡控制的影响。

图 13(d) 给出链式储能变换器 a 相、c 相输出功率, b 相输出电压的实验波形。在 t_0 时刻之前, 未进行相间 SOC 均衡控制, 在 t_0 时刻之后, 开始运行相间 SOC 均衡控制。 t_0 时刻之前 a、c 相输出功率相等, t_0 时刻之后, 由于采用了相间 SOC 均衡控制策略, a 相输出功率增大、c 相输出功率减小, 因此 a 相的 SOC 将下降速度值加快, c 相的 SOC 值下降速度减缓, 最终实现均衡, 在 t_0 时刻前后 b 相输出电压波形不变, 一定程度上反映了所提出的 SOC 均衡控制不影响系统的稳定性。

5 结语

在分析三相链式储能变换器注入零序电压产生环流功率与相间 SOC 偏差之间关系基础上, 提出了注入零序电压的最大相间环流功率实现 SOC 均衡的闭环控制方法, 通过采集电网电压, 并网电感电流、各相 H 桥逆变器直流侧电压及电流, 计算各功率及相间环流功率, 并比较出三相环流功率最大值, 经过闭环控制得到零序电压幅值信息; 通过三相储能电池的 SOC 偏差得到零序电压初相角, 将零序电压调制波叠加到并网电流调节器输出信号, 得到链式储能变换器的调制波。在三相链式储

能变换器与电网之间进行功率交换过程中, 同时在相间形成附加的循环流动有功功率, 实现其相间储能电池的 SOC 均衡。相比较于传统的 SOC 均衡开环控制, 所提出的最大环流功率间 SOC 均衡闭环控制方法可提高 SOC 均衡速度, 同时可保证三相链式储能系统并网稳定运行。最后通过 MATLAB/Simulink 仿真模型及实验样机验证了控制方法的正确性和可行性。

参考文献:

- [1] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 194-207.
Jiang Haiyang, Du Ershun, Zhu Guiping, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 194-207. (in Chinese)
- [2] 阙志忠, 柴秀慧, 靳本豪, 等. 基于蓄电池-超级电容混合储能的风力发电功率平滑控制[J]. 燕山大学学报, 2018, 42(6): 501-509.
Kan Zhizhong, Chai Xiuhui, Jin Benhao, et al. Wind power smoothing control based on battery and super capacitor hybrid energy storage system [J]. Journal of Yanshan University, 2018, 42(6): 501-509. (in Chinese)
- [3] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.
Liu Chang, Zhuo Jiankun, Zhao Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18. (in Chinese)
- [4] 刘畅, 蔡旭, 陈强. 链式电池储能系统的荷电状态复合均衡控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 68-77.
Liu Chang, Cai Xu, Chen Qiang. Compound balancing control strategy of SOC for battery energy storage system based on cascaded H-bridge converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 68-77. (in Chinese)
- [5] 陈石明, 范焯, 刘晶. 智能电网内规模化分布式电池储能系统的调频控制方法[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 120-131.

- Chen Shiming, Fan Ye, Liu Jing. Frequency modulation control method for large-scale distributed battery energy storage systems in smart grid [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1):120-131. (in Chinese)
- [6] 胡玉华, 张兴, 毛旺, 等. 电网低次谐波电压下级联 H 桥光伏并网逆变器控制策略[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 95-102.
- Hu Yuhua, Zhang Xing, Mao Wang, et al. Control strategy of cascaded H-bridge photovoltaic grid-connected inverter under low-order harmonic voltage of grid [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(11): 95-102. (in Chinese)
- [7] 李勇琦, 陈满, 伍科, 等. H 桥级联电池储能系统四级均衡控制研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1291-1297.
- Li Yongqi, Chen Man, Wu Ke, et al. Research on four levels balancing control for cascaded H-bridge based battery energy storage system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(5): 1291-1297. (in Chinese)
- [8] 王聪, 张国澎, 王俊, 等. 一种适用于级联 H 桥整流直流侧电容电压快速平衡的新型调制方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 120-127.
- Wang Cong, Zhang Guopeng, Wang Jun, et al. A novel modulation method for fast balancing DC-link capacitor voltages of cascaded H-bridge rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 120-127. (in Chinese)
- [9] 艾洪克, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 级联式储能系统中电池自均衡控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 442-449.
- Ai Hongke, Wu Junyong, Hao Liangliang, et al. Research on battery self-balancing control strategy in cascade energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 442-449. (in Chinese)
- [10] 郑征, 王永帅, 张国澎, 等. 级联 H 桥储能系统均衡系数能量均衡策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(5): 47-54.
- Zheng Zheng, Wang Yongshuai, Zhang Guopeng, et al. Energy equilibrium strategy with equilibrium coefficient for cascaded H-bridge energy storage system [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2020, 32(5): 47-54. (in Chinese)
- [11] Xu Bei, Tu Hao, Du Yuhua, et al. A distributed control architecture for cascaded H-bridge converter with integrated battery energy storage [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 845-856.
- [12] Ge Baoming, Liu Yushan, Abu-Rub H, et al. State-of-charge balancing control for a battery-energy-stored quasi-Z-source cascaded-multilevel-inverter-based photovoltaic power system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2268-2279.
- [13] 郝伟杰. 链式储能变换器并网功率及 SOC 均衡控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- Hao Weijie. Research on grid-connected power and SOC balance control of chain energy storage converter [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021. (in Chinese)



杨春来

作者简介:

杨春来(1987—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师。研究方向: 储能控制技术及应用、嵌入式系统。E-mail: yangchunlai1987@126.com。

袁晓磊(1973—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 储能控制技术、热工控制技术。E-mail: hbdyyxl@163.com。

郝伟杰(1996—), 男, 硕士研究生。研究方向: 大容量储能变换器及其应用。E-mail: 1010535936@qq.com。

殷喆(1982—)女, 本科, 高级工程师。研究方向: 储能控制技术、热工控制技术。E-mail: qingzheyin@163.com。

李剑锋(1986—), 男, 本科, 高级工程师。研究方向: 综合能源。E-mail: lijianfeng1986@126.com。

阚志忠(1970—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 可再生能源分布式发电及控制。E-mail: 382122116@qq.com。