DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.77 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

基于矢量注入策略的电流源型变换器相电压重构技术

薛宇斌[1,2](中国电源学会学生会员)，明 磊[1,2](中国电源学会会员)，谷自航[1,2]，王 阳[1,2]，王 科[1,2]

(1.河北工业大学电气工程学院，天津 300401；2.智能配用电装备与系统全国重点实验室，天津 300401)

摘要：基于宽禁带双向开关的电流源型变换器BDS-CSC(bidirectional switch-based current source converter)可高频、双向(整流/逆变)运行，满足电气化交通和储能等系统对三相AC-DC变换器高可靠、高效和高功率密度的需求，应用前景广阔。变换器的高品质运行依赖可靠、高效的换流和控制，两者均需获取交流侧相电压信息。基于此，首先对电流源型变换器中有源电流矢量、母线电压与相电压的关系进行分析，提出一种基于矢量分解特性的相电压重构技术，仅需采样1路直流电压即可获取交流侧相电压信息。接着为抑制扇区边界区域与低调制比区域引入的重构盲区影响，进一步提出了基于矢量注入的互补矢量策略，实现了高质量的相电压重构。最后在一台3 kW的电流源型变换器中验证了所提方法的有效性。

关键词：电流源型变换器；相电压重构；矢量注入；盲区补偿

A Phase Voltage Reconstruction Method Based on Vector Injection Strategy for Current Source Converter

XUE Yubin[1,2], *Student Member*, *CPSS*, MING Lei[1,2], *Member*, *CPSS*, GU Zihang[1,2], WANG Yang[1,2], WANG Ke[1,2]

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System, Tianjin 300401, China)

Abstract: The bidirectional switch-based current source converter (BDS-CSC) has broad application prospects for high-frequency bidirectional operation (rectification/inversion), which meets the requirements for reliable, efficient, and high-power-density three-phase AC-DC converter in systems such as electrified transportation and energy storage systems. High-quality operation of the BDS-CSC relies on reliable and efficient commutation and control, both of which require AC side phase voltage information. Based on this analysis, the relationship among active current vectors, the DC-link voltage and the phase voltage are firstly analyzed. a phase voltage reconstruction method is proposed that utilizes vector decomposition characteristics. Then, to suppress the effect of blind zone caused by low modulation ratio and sector boundary regions, a complementary vector strategy based on vector injection is further proposed to achieve high-quality-reconstruction. Finally, the effectiveness of the proposed method is validated on a 3 kW current source inverter.

Keywords: Current source converter; phase voltagere-construction; vector injection; blind zone compensation

收稿日期：2025-01-16；**修回日期**：2025-03-17；**录用日期**：2025-04-02；**网络首发日期**：2026-04-16

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52207196)；河北省科技厅春晖人才资助项目(E2022202013)；河北省教育厅青年拔尖人才资助项目(BJK2022017)

This work is supported by National Nature Science Foundation of China under the grant 52207196; the Bureau of Science and Technology of Hebei Province under the grant E2022202013; Science and Technology Project of Hebei Education Department under the grant BJK2022017

基于宽禁带双向开关的电流源型变换器BDS-CSC(bidirectional switch-based current source converter)可实现高频、双向(整流/逆变)运行[1]，满

足高压直流输电[2]、集成化电机驱动[3]与光伏发电[4]等系统对三相 AC-DC 变换器高可靠、高效和高功率密度的需求[5-6]，具有广阔的应用前景。可靠、高效的换流是 BDS-CSC 高性能运行的前提。传统的四步换流策略[7]能实现可靠的换流，但存在输出电流畸变严重、母线电流纹波增大、换流效率低等问题[8]。改进的换流策略如三步换流[9]、两步换流[10]可实现高效换流，但均依赖准确的相电压信息。因此，相电压信息对变换器的高品质运行至关重要。

传统的三相电流源型变换器通常在交流侧安装多个电压传感器以获取相电压信息。然而，提取的相电压信息存在滞后、衰减与非线性失真等问题，甚至导致换流失败[10-11]。部分研究采用滤波电路与双二阶广义积分算法对采样滞后进行补偿[12]，但仍然存在采样延时。文献[13-14]设计电压反馈模块以减小采样误差，但通常会使系统的成本增加、体积增大，且控制算法复杂。

采用单个电压传感器实现相电压重构，既能获取精确的相电压信息，又能有效缩减变换器的成本和体积。面向电压源型变换器的单电流传感器相电流重构技术已经应用在深水伺服与航空航天等领域[14]，其基本原理是通过获得有源电压矢量下的母线电流，实现相电流的重构[15-17]。然而，重构电流的精度受采样时序和盲区的影响，现有解决方案主要分为 2 类：第 1 类为改进调制策略，通过优化矢量序列提高采样精度，实现全范围的电流重构，但易引入额外谐波，且增加了控制复杂度[18-20]；第 2 类为优化采样位置，通过零矢量采样获得多支路电流和以简化控制算法，但对电路参数变化较为敏感[21-22]。上述技术为相电压重构提供了有益指导，然而，由于拓扑的特殊性，上述方案并不能直接用于 BDS-CSC。

为此，本文提出了一种面向电流源型变换器的高精度、低成本相电压重构技术。该技术仅需单个直流侧电压传感器，利用矢量分解特性获得不同矢量作用下直流母线电压与相电压的映射关系，实现相电压重构。为抑制扇区边界与低调制比区域引入的负面效应，进一步提出了基于矢量注入的重构盲区补偿策略，通过延长有源矢量作用时间满足时间约束条件，提高相电压重构质量。最终搭建了一台 3 kW 的电流源型变换器，验证了本文所提方法的有效性。

1 电路拓扑及换流故障分析

1.1 双向电流源型变换器拓扑

BDS-CSC 的原理如图 1 所示，BDS-CSC 桥臂中的双向开关器件由 2 个 MOSFET S_{xA}、S_{xB}(x=1, 2,…, 6)共源极连接构成。直流侧电感 L_{dc} 用于降低直流母线电流 i_{dc} 纹波，交流侧滤波电容 C_f 用于维持交流电压的连续性，直流母线电压 u_{dc} 通过变换器转换为交流侧三相电压 u_a、u_b 和 u_c。图中：u_{ca}、u_{ab}、u_{bc} 为线电压；i_a、i_b、i_c 为输入相电流；N 为电容中性点；i_{oa}、i_{ob}、i_{oc} 分别为输出相电流；R 为负载电阻；n 为负载中性点。

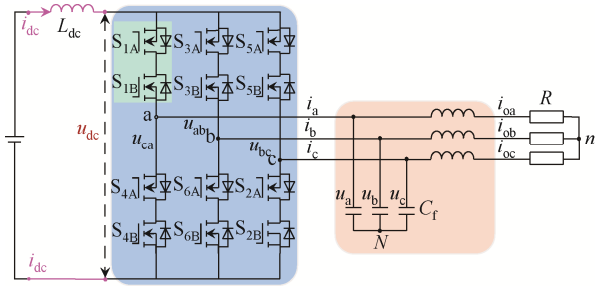


图 1 BDS-CSC 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of BDS-CSC

通过控制 6 个功率器件的通断得到 9 个电流矢量，包括 6 个有源电流矢量($\boldsymbol{I}_1 \sim \boldsymbol{I}_6$)和 3 个零矢量($\boldsymbol{I}_7 \sim \boldsymbol{I}_9$)，如图 2 所示。图中：$\boldsymbol{i}_{ref}$为参考电流矢量；

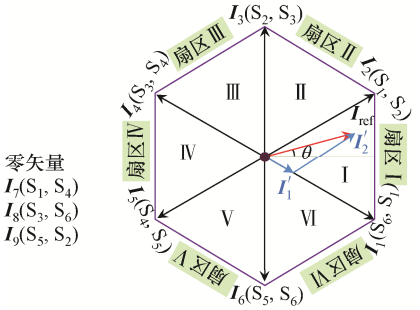


图 2 电流源型变换器的空间矢量

Fig. 2 Space vector of CSC

θ 为参考矢量的空间电角度；$\boldsymbol{I}_1'$、$\boldsymbol{I}_2'$ 为合成有源矢量的参考矢量。

1.2 换流策略

根据三相电压的相对大小，将交流侧电压划分为过渡区间和非过渡区间，如图 3 所示。

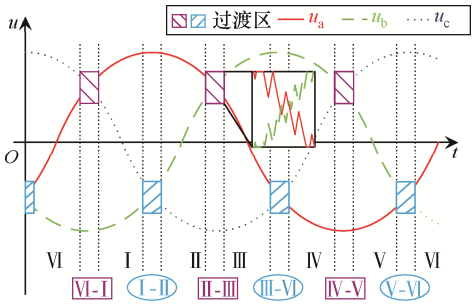
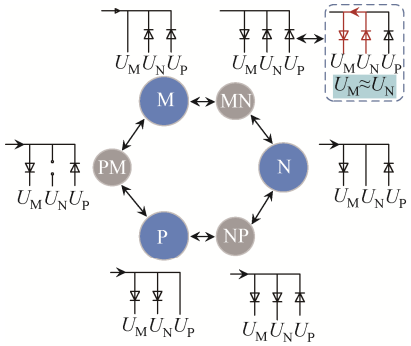


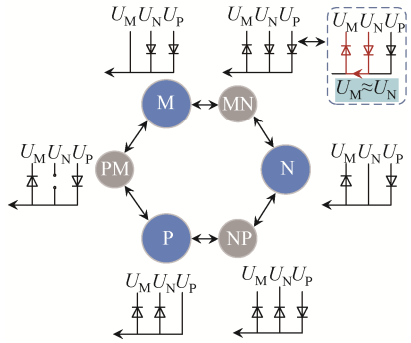
图 3　电容电压的区间分布

Fig. 3 Distribution of capacitor voltage within intervals

然而，在过渡区间，传统的电压采样方法由于换流相电压差值较小与电压纹波的干扰，易发生电压误判，最终引发相电容间短路故障。以图 4 所示的 BDS-CSC 上、下桥臂采用的两步换流策略为例，深色区域(M、N、P)表示变换器处于稳定工作状态，浅色区域(MN、NP、PM)表示变换器处于换流状态。该策略根据相电压的大小，将电压划分为 M、N、P 三相，U_M 为最高相电压，U_N 为中间相电压，U_P 为最低相电压，如图 3 中第Ⅰ区间电压大小为 $u_a>u_c>u_b$，U_M、U_N、U_P 分别对应 u_a、u_c、u_b。依据换流相中与较高电压相连接的器件需正向导通的原则，可确定换流过程中的常闭器件。然而，若电压的相对大小判断错误，将导致常闭器件选择不当，从而使换流失败。



(a)BDS-CSC的上桥臂两步换流策略



(b)BDS-CSC的下桥臂两步换流策略

图 4　BDS-CSC 两步换流策略示意

Fig. 4 Schematic of two-step commutation strategy for high-frequency BDS-CSC

1.3 故障分析

对图 1 进行星三角变换，根据基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律建立电流源型变换器的时域模型，其 u_{ab}、u_{bc}、u_{ca} 和 i_a、i_b、i_c 的表达式分别为

$$\begin{cases} u_{ab}=L\dfrac{\mathrm{d}i_{L_a}}{\mathrm{d}t}+u_{oab}-L\dfrac{\mathrm{d}i_{L_b}}{\mathrm{d}t} \\ u_{bc}=L\dfrac{\mathrm{d}i_{L_b}}{\mathrm{d}t}+u_{obc}-L\dfrac{\mathrm{d}i_{L_c}}{\mathrm{d}t} \\ u_{ca}=L\dfrac{\mathrm{d}i_{L_c}}{\mathrm{d}t}+u_{oca}-L\dfrac{\mathrm{d}i_{L_a}}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} i_a=C\dfrac{\mathrm{d}u_{ab}}{\mathrm{d}t}-C\dfrac{\mathrm{d}u_{ca}}{\mathrm{d}t}+i_{L_a} \\ i_b=C\dfrac{\mathrm{d}u_{bc}}{\mathrm{d}t}-C\dfrac{\mathrm{d}u_{ab}}{\mathrm{d}t}+i_{L_b} \\ i_c=C\dfrac{\mathrm{d}u_{ca}}{\mathrm{d}t}-C\dfrac{\mathrm{d}u_{bc}}{\mathrm{d}t}+i_{L_c} \end{cases} \tag{2}$$

式中：L 为电感；i_{L_a}、i_{L_b}、i_{L_c} 为电感相电流；u_{oab}、u_{obc}、u_{oca} 为变换后的三相负载电压；C 为电容。对式(1)与式(2)进行拉普拉斯变换，可得其在复频域下的关系式。当 BC 相间发生短路，其短路阻抗为 r，对应相间短路故障的等效电路如图 5 所示。

假设三相逆变桥臂的输出为理想电流源，且在短路暂态过程中保持原有输出特性不变。在此条件下，电感电流和电容电压需满足约束条件

$$\begin{cases} I_{L_a}(s)+I_{L_b}(s)+I_{L_c}(s)=0 \\ i_{L_a}(0^-)+i_{L_b}(0^-)+i_{L_c}(0^-)=0 \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} U_{oab}(s)+U_{obc}(s)+U_{oca}(s)=0 \\ u_{ab}(0^-)+u_{bc}(0^-)+u_{ca}(0^-)=0 \end{cases} \tag{4}$$

式中：$i_{L_a}(s)$、$i_{L_b}(s)$、$i_{L_c}(s)$ 和 $u_{oab}(s)$、$u_{obc}(s)$、$u_{oca}(s)$

分别为电感电流和电容电压；$i_{L_a}(0^-)$、$i_{L_b}(0^-)$、$i_{L_c}(0^-)$和$u_{ab}(0^-)$、$u_{bc}(0^-)$、$u_{ca}(0^-)$分别为故障前电感电流和电容电压的稳态值。根据图 5 与式(3)、式(4)得到故障时的输出相电流为

$$\begin{cases} I_{oa}(s)=\dfrac{U_{oab}(s)-U_{oca}(s)}{R} \\ I_{ob}(s)=U_{obc}(s)\left(\dfrac{1}{R}+\dfrac{1}{r}\right)-\dfrac{U_{oab}(s)}{R} \\ I_{oc}(s)=\dfrac{U_{oca}(s)}{R}-\dfrac{U_{obc}(s)}{R}\left(\dfrac{1}{R}+\dfrac{1}{r}\right) \end{cases} \tag{5}$$

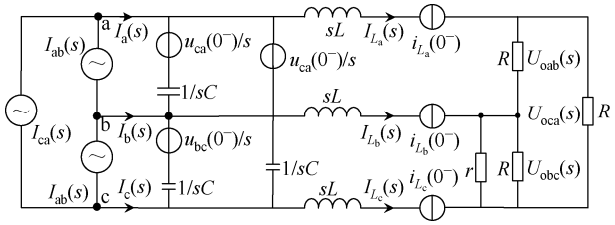


图 5 电流源型变换器相间短路故障等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of phase-to-phase fault for current source inverter

对 I_{ob} 进行拉普拉斯反变换，可得相间短路时的故障电流，表达式为

$$I_{ob}\big|_{t=0}=\frac{(R+r)u_{obc}(0)-ru_{oab}(0)}{Rr} \tag{6}$$

式(6)表明，短路故障时，相电容间电压差越大，瞬态短路激增的电流越大。因此，为确保 BDS-CSC 高品质运行，需获取准确的相电压信息。

2 相电压重构技术

2.1 相电压与直流母线电压

电流源型变换器存在多种开关组合(矢量状态)，其对应桥臂间的电压差蕴含丰富的线电压信息，据此可实现相电压重构。BDS-CSC 包含 7 个电压支路，如图 6 所示，不同电流矢量作用下各支路电压与相电压的对应关系见表 1。

由表 1 可知，支路①包含的相电压信息比支路②~⑦完整。在有源电流矢量作用下，对 u_{dc} 采样即可获得完整的线电压信息，而零矢量作用下的 u_{dc} 为 0，即无需获取零矢量作用下的电压。若电压传感器位于支路②~⑦，则在有源电流矢量的作用下会出现采样结果与相电压无关的情况，即使结合零矢量作用的 u_{dc}，仍无法重构出完整的相电压。因此，需选定 u_{dc}(支路①)实现相电压重构。

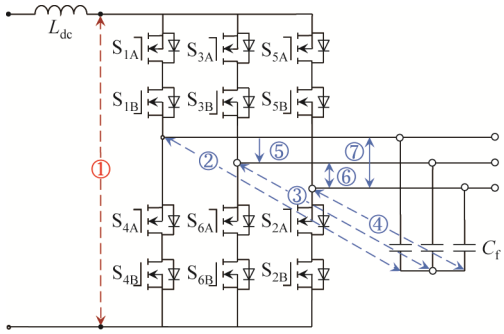


图 6 BDS-CSC 电压支路示意

Fig. 6 Schematic of BDS-CSC voltage paths

表 1 不同电流矢量下各支路电压与相电压对应关系

Tab. 1 Relationships between the path voltages in different current vectors and the phase voltage

支路	$\boldsymbol{I}_1$	$\boldsymbol{I}_2$	$\boldsymbol{I}_3$	$\boldsymbol{I}_4$	$\boldsymbol{I}_5$	$\boldsymbol{I}_6$	$\boldsymbol{I}_0$
①	u_a-u_b	u_a-u_c	u_b-u_c	u_b-u_a	u_c-u_a	u_c-u_b	0
②	u_a	u_a	—	u_a	u_a	—	u_a
③	u_b	—	u_b	u_b	—	u_b	u_b
④	—	u_c	u_c	—	u_c	u_c	u_c
⑤	u_a-u_b	—	—	u_b-u_a	—	—	—
⑥	—	—	u_b-u_c	—	—	u_c-u_b	—
⑦	—	u_c-u_a	—	—	u_a-u_c	—	—

2.2 相电压重构策略

本文以通用的空间矢量脉冲宽度调制 SVPWM (space vector pulse width modulation)算法为例，对各矢量作用下的 u_{dc} 进行分析。在扇区Ⅰ中，有源电流矢量分别为 $\boldsymbol{I}_1$ 和 $\boldsymbol{I}_2$，在其作用下进行 u_{dc} 采样，可获得 u_{ab} 和 u_{ca}。同理，在其余 5 个扇区内，仅需采样有源电流矢量作用下的 u_{dc}，即可获取相应的线电压信息。

电压重构策略为：①通过单电压传感器采集 u_{dc} 信息；②根据 u_{dc} 与有源电流矢量的对应关系，确定有效的线电压信息；③利用线电压与相电压之间的转换关系实现相电压重构。

扇区Ⅰ的相电压重构技术分析如图 7 所示，有

源电流矢量分别为 $\boldsymbol{I}_1$(1 −1 0)和 $\boldsymbol{I}_2$(1 0 −1)，其中，“1”表示该相桥臂的上管开通、下管关断，“0”表示桥臂上、下管均关断，“−1”表示桥臂的上管关断、下管开通。

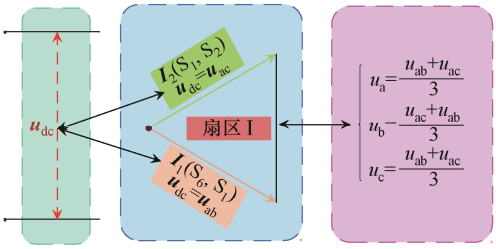


图 7　扇区Ⅰ相电压重构技术分析

Fig. 7 Analysis diagram of phase voltage reconstruction technology in sector Ⅰ

当 $\boldsymbol{I}_1$ 作用时，电流从 A 相流入、B 相流出，此时电压传感器采集的 u_{dc} 信息为 u_{ab}；$\boldsymbol{I}_2$ 作用时，电流从 A 相流入、C 相流出，此时采集的 u_{dc} 信息为 u_{ac}。因此，在 1 个载波周期内，获取 2 个有源矢量作用下的 u_{dc} 信息，即可获得对应的 2 个线电压，如 u_{ab} 和 u_{ac}。三相电容为星型连接，线电压之间满足关系式 $u_{ab}+u_{bc}+u_{ca}=0$，据此可得 u_{ab}、u_{bc}、u_{ca}。根据图 7 所示关系式推导出 u_a、u_b、u_c，实现完整的相电压重构。同理，在其余扇区内均可通过该方法获取相电压信息，完成整个系统的相电压重构。

3　重构盲区及补偿策略

3.1　电压重构盲区分析

利用单电压传感器重构相电压，需要确保在 1 个载波周期内获取有源电流矢量作用下的 u_{dc}。理想情况下，u_{dc} 的采样时刻可为有源矢量作用下的任意时刻。然而，BDS-CSC 中的实际 u_{dc} 受系统延迟时间 T_{SET}、器件的导通时间 T_{on} 及重叠时间 t_d 等因素的影响，如图 8(a)所示，导致 u_{dc} 理想值与实际值之间存在偏差，从而无法获取有效的电压信息。

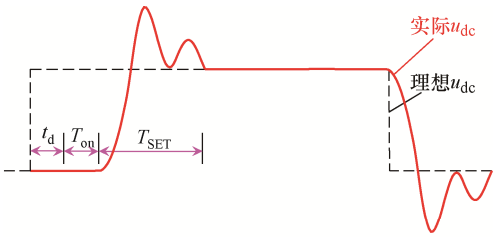
为此，必须预留充足的时间裕量，即有源电流矢量的作用时间需满足最小作用时间 T_{min} 约束，具体表达式为

$$T_{min}=T_{SET}+T_{on}+t_d \tag{7}$$

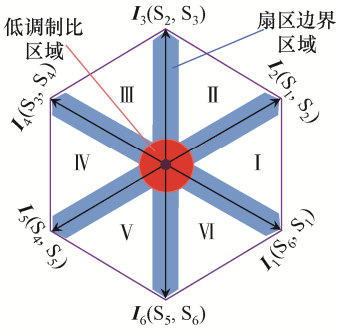
在电流源型变换器的空间矢量中，因构成参考矢量的有源电流矢量作用时间不满足 T_{min} 约束，无法完成将电压重构的区域定义为重构盲区。该区域可分为如下 2 个部分。

(1)扇区边界区域：如图 8(b)中圆形阴影外的深色区域所示，此区域内的 2 个有源电流矢量的作用时间分配较为不均，导致 1 个有源电流矢量的作用时间小于 T_{min}。

(2)低调制比区域：如图 8(b)中圆形区域所示，此区域内涉及的 2 个有源电流矢量的作用时间均小于 T_{min}，即对应的调制比 $m\leqslant\sqrt{2}\,(T_{min}/T_s)$，其中 T_s 为动作周期。



(a)理想母线电压与实际母线电压情况差异



(b)电压重构盲区

图 8　电压重构盲区分析图

Fig. 8 The phase voltage reconstruction dead zones

上述 2 个区域内均无法获取有效的 u_{dc} 信息，从而影响重构相电压的准确性。

3.2　重构盲区补偿策略

为提高重构相电压的质量，本文提出了一种基于矢量注入的重构盲区补偿方法。该方法利用零矢量的平衡特性，将零矢量的作用时间均匀分配至部分有源矢量及其互补矢量，从而有效延长了有源电流矢量的作用时间，以满足 T_{min} 约束。

具体补偿策略为：①根据参考矢量所处的扇区

位置，明确需要补偿的有源电流矢量；②利用空间矢量图的对称性，确定补偿矢量的互补矢量；③依据伏秒平衡原理，将零矢量的作用时间均匀分配至补偿矢量和互补矢量中。

针对扇区Ⅰ内的 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{ref}}$，选取 $\boldsymbol{I}_1$ 和 $\boldsymbol{I}_2$ 用于合成参考矢量，并将零矢量的作用时间 T_0 分配至 $\boldsymbol{I}_2$ 和互补矢量 $\boldsymbol{I}_5$。该策略既延长了 $\boldsymbol{I}_2$ 的作用时间，使其满足 $T_{\min}$ 约束，又保持原调制的对称性与合成参考矢量的精确性，其原理如图 9 所示。当参考矢量位于扇区Ⅰ的不可观测区域(即扇区边界区域)，$\boldsymbol{I}_2$ 的作用时间不满足 $T_{\min}$ 约束，故无法获得 u_{ac}，仅可获得 $\boldsymbol{I}_1$ 作用下的 u_{ab}。该盲区补偿策略将零矢量的作用时间分配给 $\boldsymbol{I}_2$ 和 $\boldsymbol{I}_5$，通过延长 $\boldsymbol{I}_2$ 的作用时间以获取 u_{ac}。$\boldsymbol{I}_2$ 的作用时间由 T_2 延长为 T_2+T_{y}，且 $T_2+T_{\mathrm{y}}>T_{\min}$，其中 T_{y} 为延长时间；$\boldsymbol{I}_5$ 的作用时间由 0 延长为 T_{y}；零矢量的作用时间变为 $T'_0=T_0-2T_{\mathrm{y}}$。

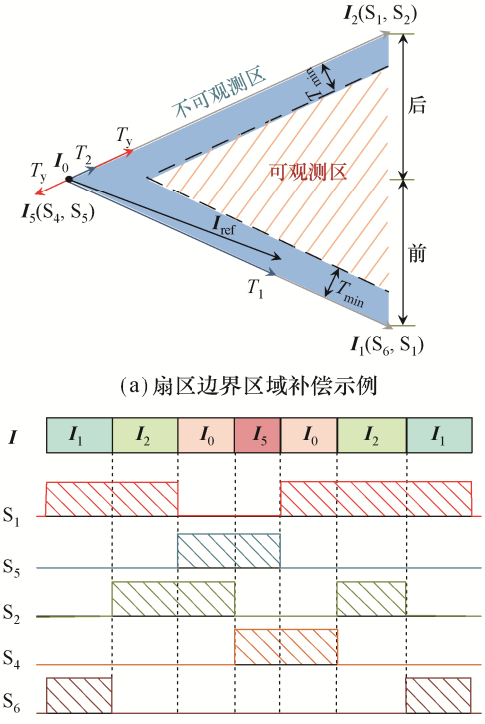


图 9 互补矢量调制策略基本原理

Fig. 9 The basic principle of complementary vector modulation strategy

如图 9(a)所示，经过补偿后的各有源矢量 $\boldsymbol{I}_1$、$\boldsymbol{I}_2$、$\boldsymbol{I}_5$ 可以准确地合成参考矢量。如图 9(b)所示，设延长 $\boldsymbol{I}_2$ 和 $\boldsymbol{I}_5$ 的作用时间 T_y 均来自 T_0。根据伏秒平衡原理，补偿后的矢量方程为

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{ref}}T_{\mathrm{s}}=\boldsymbol{I}_1T_1+\boldsymbol{I}_2(T_{\mathrm{y}}+T_2)+\boldsymbol{I}_5T_{\mathrm{y}}+\boldsymbol{I}_0T'_0 \tag{8}$$

每个扇区内均存在 2 个有源矢量，其中与参考矢量距离较近的有源矢量为有源矢量 1 ACV1(active vector 1)，作用时长为 T_1；距离较远的有源矢量为有源矢量 2 ACV2 (active vector 2)，作用时长为 T_2。定义 $T_1>T_2$ 为扇区Ⅰ的前半部分，$T_1<T_2$ 为扇区Ⅰ的后半部分，如图 10(a)所示。以扇区Ⅰ为例，当参考电流矢量进入扇区Ⅰ-Ⅵ与Ⅰ-Ⅱ的边界区域($T_1\leqslant T_{\min}$ 或 $T_2\leqslant T_{\min}$)：若 $T_1>T_{\min}\geqslant T_2$，需要补偿的矢量为 ACV2($\boldsymbol{I}_2$)；若 $T_2>T_{\min}\geqslant T_1$，需要补偿的矢量为 ACV1($\boldsymbol{I}_1$)。扇区Ⅰ前半部分，如图 10(a)所示，延长 ACV2($\boldsymbol{I}_2$)的作用时间，同时 $\boldsymbol{I}_5$(末尾标示)作为 $\boldsymbol{I}_2$(中间标示)的互补矢量处于矢量序列的中部，其作用时间为 $T_{\mathrm{y}}(T_0/3)$；扇区Ⅰ后半部分，如图 10(b)所示，在 ACV1 内插入补偿矢量 $\boldsymbol{I}_1$(中间标示)，矢量 $\boldsymbol{I}_4$(末尾标示)为互补矢量。

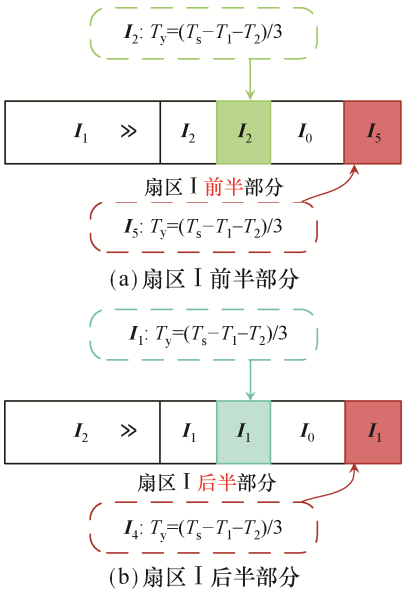


图 10 相电压盲区重构矢量补偿原理

Fig. 10 The vector compensation principle of the phase voltage reconstruction dead zones

根据对扇区Ⅰ的盲区补偿分析，得出该策略在扇区Ⅰ前半部分的矢量切换顺序为 $\boldsymbol{I}_1$–$\boldsymbol{I}_2$–$\boldsymbol{I}_0$–$\boldsymbol{I}_5$–$\boldsymbol{I}_0$–$\boldsymbol{I}_2$–$\boldsymbol{I}_1$，在扇区Ⅰ后半部分的矢量切换顺序为 $\boldsymbol{I}_2$–$\boldsymbol{I}_1$–$\boldsymbol{I}_0$–$\boldsymbol{I}_4$–$\boldsymbol{I}_0$–$\boldsymbol{I}_1$–$\boldsymbol{I}_2$，其中补偿矢量均位于矢量序列的中

心位置。扇区Ⅰ~Ⅵ中，盲区补偿后的矢量序列见表 2。

表 2　各扇区补偿矢量分布表

Tab. 2 The distribution of compensation vector for each sector

扇区	ACV1>ACV2	ACV1<ACV2
Ⅰ	I_1-I_2-I_0-I_5-I_0-I_2-I_1	I_2-I_1-I_0-I_4-I_0-I_1-I_2
Ⅱ	I_2-I_3-I_0-I_6-I_0-I_1-I_3	I_3-I_2-I_0-I_5-I_0-I_2-I_3
Ⅲ	I_3-I_4-I_0-I_1-I_0-I_4-I_3	I_4-I_3-I_0-I_6-I_0-I_3-I_4
Ⅳ	I_4-I_5-I_0-I_2-I_0-I_5-I_4	I_5-I_4-I_0-I_1-I_0-I_4-I_5
Ⅴ	I_5-I_6-I_0-I_3-I_0-I_6-I_5	I_6-I_5-I_0-I_2-I_0-I_5-I_6
Ⅵ	I_6-I_1-I_0-I_4-I_0-I_1-I_6	I_1-I_6-I_0-I_3-I_0-I_6-I_1

4　实验验证

4.1　实验平台

BDS-CSC 实验样机如图 11 所示，系统参数见表 3，该系统采用两步换流策略[23]实现换流。

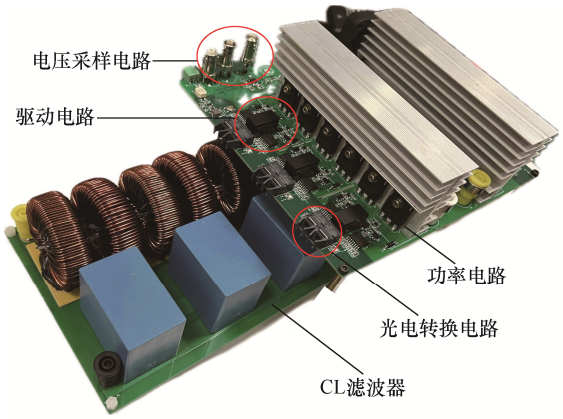


图 11　3 kW BSD-CSC 实验样机实物

Fig. 11 Physical of a 3 kW BSD-CSC experimental prototype

表 3　样机参数

Tab. 3 Parameters of prototype

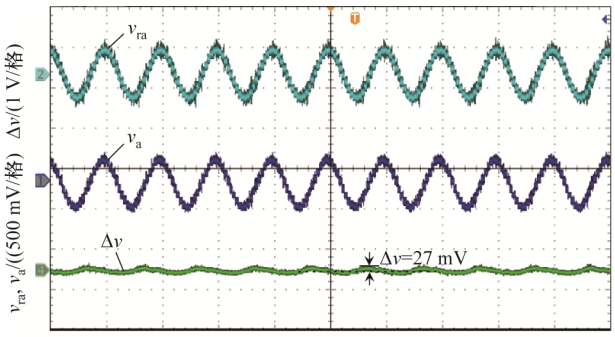
参数	数值
直流母线电流 i_{dc}/A	2
开关频率 f_s/kHz	12
直流侧电感 L_{dc}/mH	5
滤波电容 C_f/μF	30
滤波电感 L_f/mH	3

为对比分析相电压重构的效果，除在直流母线侧配置单一电压传感器获取 u_{dc} 外，在交流侧也安装了 2 个电压传感器，用于直接获取 BDS-CSC 交流侧的三相电压信号。

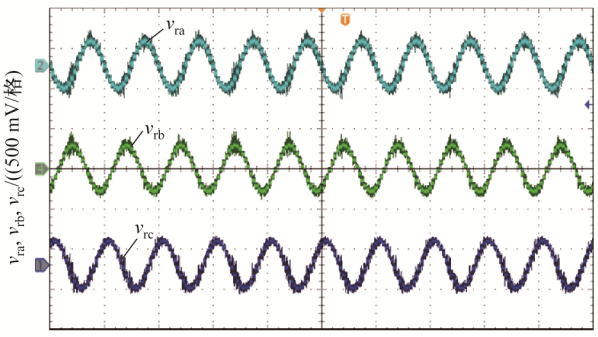
4.2　实验结果

4.2.1　稳态工况

图 12(a)展示了相同工况下 A 相实际电压 v_a 与 A 相重构电压 v_{ra} 的对比结果。其中，v_a 与 v_{ra} 的误差 Δv 为 27 mV(误差率为 3.78%)，表明了重构电压能跟随实际电压变化。图 12(b)展示了三相重构电压 v_{ra}、v_{rb}、v_{rc}，表明所提相电压重构策略可重构出三相电压。



(a) A相实际电压与重构电压对比波形图



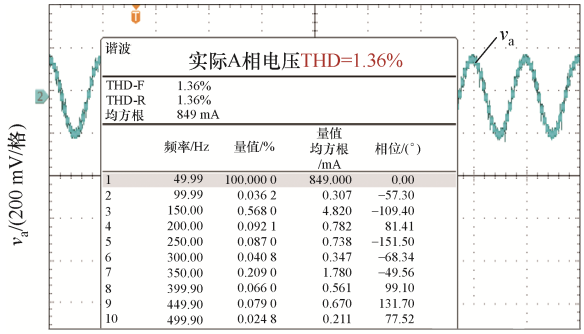
(b) 重构三相电压波形

图 12　实际与重构三相电压波形

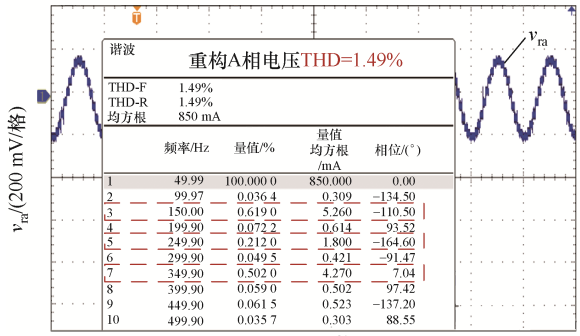
Fig. 12 The actual and reconstructed three-phase voltage waveforms

图 13 对实际相电压与重构相电压波形的谐波含量进行分析，两者的总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)分别为 1.36%和 1.49%，表明本文所提的相电压重构策略具有较高的精度。

如图 14 所示，在电压区间切换边界处 Δv= 26 mV，相对误差小于 4.59%，表明重构电压具有良好的跟踪性能。



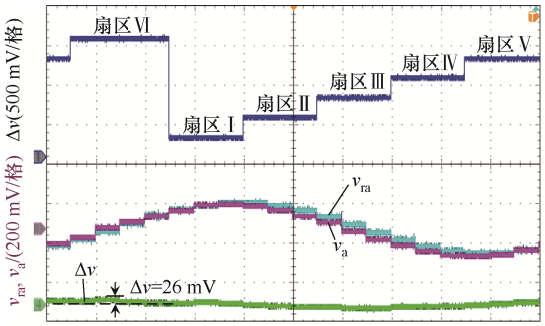
(a) A相实际电压



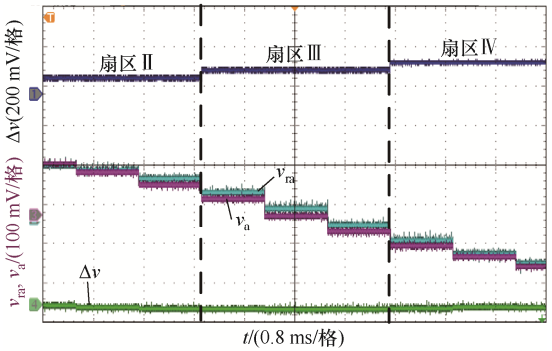
(b) A相重构电压

图 13 A 相实际电压与重构电压 THD 对比

Fig. 13 THD comparison between the actual and reconstructed A-phase voltage



(a) 单个周期重构电压波形



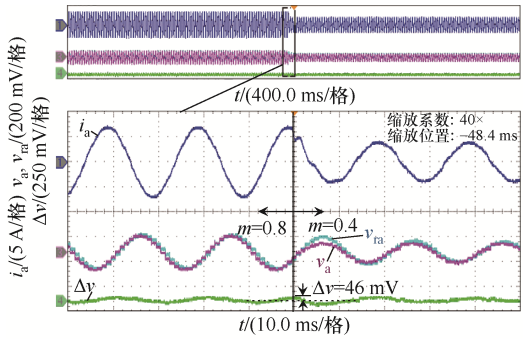
(b) 电压区间边界处重构电压波形

图 14 A 相实际电压与重构电压局部放大波形

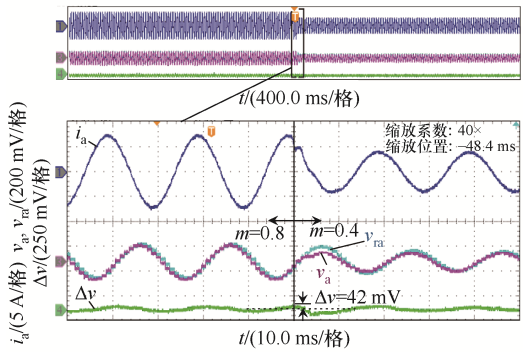
Fig. 14 Magnified waveforms of the actual and reconstructed A-phase voltages

4.2.2 暂态工况

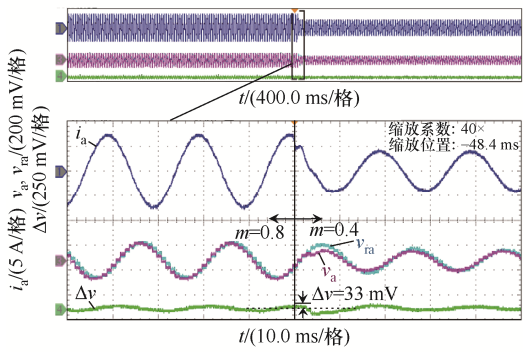
图 15 展示了该相电压重构策略在不同 f_s (6 kHz、12 kHz 和 24 kHz)、m(0.8 和 0.4)下的动态特性。由图可知，在 m 突降瞬间引发 i_a 幅值波动，发生瞬态降落。



(a) 6 kHz下



(b) 12 kHz下



(c) 24 kHz下

图 15 不同 f_s 下重构电压的暂态波形

Fig. 15 Transient waveforms of reconstructed voltage under different f_s

由图可知，Δv 与 f_s 呈负相关，Δv 由 46 mV (6 kHz)降低至 33 mV(24 kHz)。重构电压在 1/4 基波周期内完成误差收敛，定义为$|\Delta v|$<30 mV。当 f_s 升高时，每个开关周期的持续时间变短，因此每次开关动作产生的纹波电压幅值会减小，进而减小重构电压误差。实验结果验证了所提相电压重构策略

具有良好的动态响应性能。

5　结语

相电压信息对高频 BDS-CSC 的高品质运行至关重要。基于此，本文首先针对多支路电压采样存在的局限性，提出了一种基于矢量分解特性的相电压重构技术。该技术通过有源电流矢量作用下的直流母线电压与相电压间的对应关系，实现相电压的重构。接着为提高重构相电压的质量，本文提出了一种基于矢量注入的重构盲区补偿策略。该策略通过延长有源电流矢量作用时间满足 $T_{\min}$ 约束，提高重构电压的准确性。最后，搭建了一台 3 kW 的 BDS-CSC 样机，对所提重构策略进行了充分验证，比较了不同 f_s(6 kHz、12 kHz、24 kHz)、不同 m(0.4、0.8)下其重构精度(THD、静态误差)和动态响应，验证了所提策略的有效性。基于单电压传感器的相电压重构技术降低了采样成本，为电流源型变换器的换流和控制提供了支撑，适用电源逆变和电机控制等场景。

参考文献：

[1] Wu Bin. High-Power Converters and AC Drives [M]. Hoboken: Wiley, 2005.

[2] Wei Qiang, Wu Bin, Xu Dewei, et al. Further study on a PWM current-source-converter-based wind energy conversion system considering the DC-link voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5378-5387.

[3] 李宁, 杨家林, 田博文, 等. 串联谐振型 DAB 变换器回流功率及损耗优化策略[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 1-9.
Li Ning, Yang Jialin, Tian Bowen, et al. Optimization strategy of power return and loss for series resonant DAB converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 1-9. (in Chinese)

[4] Wang Zheng, Xu Yang, Liu Pengcheng, et al. Zero-voltage-switching current source inverter fed PMSM drives with reduced EMI [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 761-771.

[5] He Jinwei, Lyu Yuan, Han Junfei, et al. An SVM approach for five-phase current source converters output current harmonics and common-mode voltage mitigation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5232-5245.

[6] Musumeci S, Panizza M, Stella F, et al. Monolithic bidirectional switch based on GaN gate injection transistors [C]// 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Delft, Netherlands, 2020: 1045-1050.

[7] Liu Pengcheng, Wang Zheng, Xu Yang, et al. Optimal overlap-time distribution of space vector modulation for current-source rectifier [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4586-4597.

[8] 梅杨, 鲁乔初, 黄伟超. 双向隔离型 AC-DC 矩阵变换器的软开关复合调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2474-2483.
Mei Yang, Lu Qiaochu, Huang Weichao. Soft-switching composite modulation strategy for bidirectional isolated AC-DC matrix converters [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2021, 41(7): 2474-2483. (in Chinese)

[9] 梅杨, 魏铮, 刘璟琳, 等. 高频链 AC-DC 矩阵变换器的变控制频率软开关调制策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(4): 158-166.
Mei Yang, Wei Zheng, Liu Jinglin, et al. Variable control frequency soft-switching modulation strategy for high-frequency link AC-DC matrix converter [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(4): 158-166. (in Chinese)

[10] Liu Zhao, Tan Di, Sun Xincheng, et al. Research on improved one-step commutation for matrix bidirectional converter [C]// IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China, 2017: 1481-1486.

[11] 王文杰. 基于单支路采样的永磁同步电机相电流重构技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.

Wang Wenjie. Research on phase current reconstruction technique for PMSM based on single branch sampling [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)

[12] 张又文, 裴雪军, 杨敏, 等. 三相逆变电源相间短路暂态响应分析研究[J]. 海军工程大学学报, 2023, 35(3): 29-35.

Zhang Youwen, Pei Xuejun, Yang Min, et al. Analysis of transient response of phase-to-phase short-circuit of three-phase inverter [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2023, 35(3): 29-35. (in Chinese)

[13] 高锋阳, 杨凯文, 宋志翔, 等. 非隔离型光伏并网逆变器漏电流抑制控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 51-60.

Gao Fengyang, Yang Kaiwen, Song Zhixiang, et al. Control strategy for leakage current suppression in non-isolated grid-connected photovoltaic inverter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 51-60. (in Chinese)

[14] 霍士翔, 张驰, 舒鑫东, 等. 永磁同步电机单采样双更新电流控制方法研究[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(9): 162-169.

Huo Shixiang, Zhang Chi, Shu Xindong, et al. Single sampling and double current update method for current-control of PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(9): 162-169. (in Chinese)

[15] 申永鹏, 武克轩, 梁伟华, 等. 误差自校正互补非零矢量相电流重构研究[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 76-83, 172.

Shen Yongpeng, Wu Kexuan, Liang Weihua, et al. Research on phase current reconstruction of error self-correction complementary non-zero vector [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 76-83, 172. (in Chinese)

[16] 章勇高, 秦盛, 刘鹏. 一种基于多调整策略的电机相电流重构技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 63-72.

Zhang Yonggao, Qin Sheng, Liu Peng. A motor phase current reconstruction technology based on multiple adjustment strategies [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 63-72. (in Chinese)

[17] 陈思宇, 向学位, 李辉, 等. 基于改进零脉冲插入法的永磁同步电机相电流重构策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(6): 25-35.

Chen Siyu, Xiang Xuewei, Li Hui, et al. Phase current reconstruction strategy of PMSM based on improved zero pulse insertion method [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(6): 25-35. (in Chinese)

[18] Wang Wenjie, Yan Hao, Xu Yongxiang, et al. New three-phase current reconstruction for PMSM drive with hybrid space vector pulse width modulation technique [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 662-673.

[19] 徐航, 肖曦, 谢玉龙, 等. 基于单电流传感器的改进相电流重构技术[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6): 96-101.

Xu Hang, Xiao Xi, Xie Yulong, et al. Improved phase current reconstruction technology based on single current sensor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 96-101. (in Chinese)

[20] Tang Qipeng, Shen Anwen, Li Wuhua, et al. Multiple-positions-coupled sampling method for PMSM three-phase current reconstruction with a single current sensor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 699-708.

[21] Xu Yongxiang, Yan Hao, Zou Jibin, et al. Zero voltage vector sampling method for PMSM three-phase current reconstruction using single current sensor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3797-3807.

[22] Yan Hao, Xu Yongxiang, Zhao Weiduo, et al. DC drift error mitigation method for three-phase current reconstruction with single hall current sensor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(2): 8100604.

[23] Gu Zihang, Ming Lei, Cao Yufeng, et al. An improved twostep commutation method for bidirectional switch-based current source converter [C]// 2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). Chengdu, China, 2024: 3274-3279.

[24] 马星河, 董红令, 赵军营, 等. 一种矩阵变换器电压型两步换流研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 685-690.
Ma Xinghe, Dong Hongling, Zhao Junying, et al. Research on a voltage source two-step commutation strategy of matrix converter [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2016, 35(5): 685-690. (in Chinese)

[25] 邵国安, 邓文浪, 郭有贵, 等. 精简矩阵变换器新型两步换流策略研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(4): 26-29.
Shao Guoan, Deng Wenlang, Guo Yougui, et al. Research on two-step commutation strategy of reduced matrix converter [J]. Power Electronics, 2015, 49(4): 26-29. (in Chinese)



薛宇斌

作者简介：

薛宇斌(2000—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：高功率密度电力电子变换器。E-mail：202221401054@stu.hebut.edu.cn。

明磊(1990—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：功率半导体器件封装与集成，高功率密度电力电子变换器。E-mail：minglei@hebut.edu.cn。

谷自航(2000—)，男，博士研究生。研究方向：功率半导体器件封装与集成。E-mail：202231402013@stu.hebut.edu.cn。

王阳(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：功率半导体器件封装与集成。E-mail：202231402107@stu.hebut.edu.cn。

王科(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：功率半导体器件封装与集成。E-mail：202231402030@stu.hebut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)



公益广告来源：重庆市人民政府网