

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.01.010

双级矩阵变换器 Delta-Sigma 变频调制策略

周湛清, 谢琦坤, 耿 强

(天津工业大学 电气工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对定开关频率调制下输出侧含有高频谐波边带的问题, 提出了双级矩阵变换器变频调制策略, 以提升双级矩阵变换器的电磁兼容性能以及运行性能。将 Delta-Sigma 矢量调制技术应用于双级矩阵变换器的逆变级中, 基于仿真与实验结果分析了该调制策略下的双级矩阵变换器运行性能。仿真与实验结果表明: 本文所提调制策略有效实现了双级矩阵变换器输出电流的频谱整形, 不再含有高频谐波尖峰, 有效降低了输出侧相电流高频谐波边带的幅值; 本文调制策略下双级矩阵变换器输出相电流 THD 最高为 4.26%, 最低为 1.62%, 相较于空间矢量调制策略输出相电流 THD 平均降低了 0.256%, 这表明本文策略具有良好的运行性能; 动态实验结果表明该策略具有良好的动态特性。

关键词: 双级矩阵变换器; Delta-Sigma 调制; 变频调制; 频谱整形; 运行性能

中图分类号: TM921.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)01-0069-06

Variable frequency modulation of two-stage matrix converter based on Delta-Sigma modulation

ZHOU Zhanqing, XIE Qikun, GENG Qiang

(School of Electrical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to eliminate the high-frequency harmonic sidebands caused by the constant switching frequency modulation, a variable frequency modulation strategy of the two-stage matrix converter is proposed to improve the electromagnetic compatibility performance and the operational performance. The Delta-Sigma vector modulation is applied to the inverter stage of the two-stage matrix converter, the operational performance of the two-stage matrix converter is analyzed based on simulation and experimental results. The simulation and experimental results show that the modulation strategy realizes the spectrum shaping of the output current of the two-stage matrix converter effectively, and reduces the amplitude of the high-frequency harmonic sideband of the phase current at the output side. The output phase current THD of the two-stage matrix converter is 4.26% at the highest and 1.62% at the lowest. Compared with the space vector modulation, the output phase current THD of the two-stage matrix converter is reduced by 0.256% on average. By synthesizing the experimental waveforms, it can be seen that the proposed strategy has good operational performance and dynamic characteristics.

Key words: two-stage matrix converter; Delta-Sigma modulation; variable frequency modulation; spectrum shaping; operational performance

近年来, 双级矩阵变换器(two-stage matrix converter, TSMC)作为一种交流-交流电力电子变换器, 具有功率密度大、安全性能高与网侧功率因数高等诸多优势, 在新能源发电、电网功率因数补偿与轮船等诸多工业场合得到了广泛应用^[1-5]。因此, 提升TSMC的运行性能具有实际性的意义。

对提升 TSMC 系统性能的研究主要集中于拓扑结构与调制策略等方面^[6-8]。对于拓扑结构的研究主要集中于增加硬件附加电路, 其工程实现较为复杂^[9-10]。在调制策略的研究中, 可以将调制策略分为定频调制策略与变频调制策略。文献[11]针对两电平逆变器, 通过二重傅里叶分析的方法发现, 逆变器采用定频调制策

收稿日期: 2023-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52377066); 浙江省自然科学基金项目(LY24E070001)

通信作者: 周湛清(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电机系统设计与智能控制。E-mail: zhouzhanqing@tiangong.edu.cn

略进行调制时,输出电压或者电流会产生高次谐波边带。由此可得,针对 TSMC 的逆变级,其采用定频调制时,TSMC 输出电流会产生高频谐波边带。针对高频谐波边带问题,可以采用变频调制技术来抑制其产生^[12]。变频调制技术中,随机变频调制技术往往能很好地实现扩频效果。文献[13]针对 TSMC 系统,通过引入混沌数学模型中的 Logistic 序列使载波频率混沌化,对负载侧电压高频谐波幅值有较好的抑制效果,但未考虑到输出侧的电流谐波畸变率。文献[14]变频调制技术与抑制 TSMC 输入电流谐波联合起来,根据预测模型推导出输入电流纹波与开关频率的关系,通过变频技术优化了频谱以及运行性能。

Delta-Sigma 调制策略作为一种脉冲密度调制型的变频调制策略,无需载波参与调制过程,具有控制策略简单与扩频效果好的优点,并且能够避免窄脉冲的出现^[15-17]。文献[18]将 Delta-Sigma 调制器应用到双电平逆变器-开绕组电机传动系统中,在实现输出电压频谱整形的同时消除了由零序电压引起的电流畸变。文献[19]针对直接型矩阵变换器系统,采用标量 Delta-Sigma 调制器进行调制,并且通过弃用零矢量来降低共模电压,改善了输出与输入电流的波形质量。文献[20]针对三电平逆变器,采用 Delta-Sigma 矢量调制策略,优化了输出电压以及电流的频谱,并且较传统调制策略提升了运行性能。本文以 TSMC 系统为研究对象,针对输出侧高频谐波边带问题,通过利用 Delta-Sigma 矢量调制技术,提出一种 TSMC 变频调制策略,并对所提策略进行仿真与实验,以期验证该策略对 TSMC 的电磁兼容性能与运行性能的提升效果。

1 Delta-Sigma 调制技术

Delta-Sigma 调制器作为一种过采样模数转换器,其工作流程为信号采样、噪声量化以及数字编码。相比于 Nyquist 采样模数转换器,Delta-Sigma 调制器首先通过过采样技术扩大采样信号带宽,将量化过程中产生的量化噪声分布范围拓宽,减少了量化器带宽范围内噪声,从而实现信噪比的提升。通过使用积分器和引入反馈回路将低频噪声迁移到带宽外,实现了噪声整形。图 1 为 Delta-Sigma 调制器模型,其由积分器、量化器以及反馈回路组成。

输入信号与量化误差信号为该系统的输入,可以得到该系统 z 域下的传递函数如式(1)所示:

$$Y(z) = \frac{H(z)}{1+H(z)}X(z) + \frac{1}{1+H(z)}E(z) = (z^{-1})X(z) + (1-z^{-1})E(z) \quad (1)$$

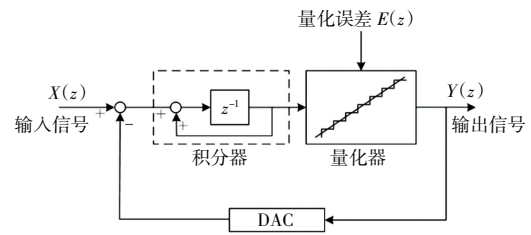


图 1 Delta-Sigma 调制器模型

Fig.1 Model of Delta-Sigma modulator

式中: $X(z)$ 为输入信号; $E(z)$ 为量化误差信号; $Y(z)$ 为输出信号。由式(1)可见,可将输入信号与输出信号的函数关系定义为信号传递函数(signal transfer function, STF),如式(2)所示。将量化误差信号与输出信号的函数关系定义为噪声传递函数(noise transfer function, NTF),如式(3)所示。

$$\text{STF}(z) = \frac{H(z)}{1+H(z)} = z^{-1} \quad (2)$$

$$\text{NTF}(z) = \frac{1}{1+H(z)} = 1-z^{-1} \quad (3)$$

信号传递函数 $\text{STF}(z)$ 表明调制器对输入信号的干扰近乎为零。噪声传递函数 $\text{NTF}(z)$ 具有高通滤波特性,对量化误差产生的低频段噪声进行抑制。

2 双级矩阵变换器系统变频调制技术

图 2 为 TSMC 系统的拓扑结构。

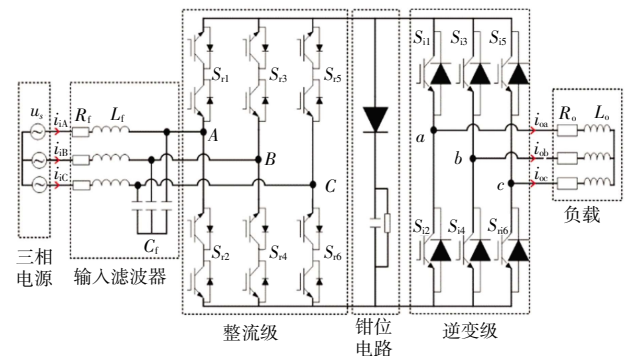


图 2 TSMC 拓扑结构

Fig.2 Topology of TSMC

由图 2 可见,TSMC 的调制过程可分为整流级调制与逆变级调制部分。本文提出的双级矩阵变换器系统变频调制技术在双级矩阵变换器的整流级采用无零矢量空间调制策略。由于 Delta-Sigma 调制策略属于脉冲密度调制策略,在固定控制频率的前提下可实现变开关频率的效果,故在逆变级采用 Delta-Sigma 调制策略,解决了传统变频调制策略需要变控制周期的问题。

2.1 整流级调制策略

在 TSMC 系统中, 整流级采用无零矢量的空间矢量调制策略。定义 TSMC 的网侧输入三相电压 \mathbf{u}_i 为

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} u_{iA} \\ u_{iB} \\ u_{iC} \end{bmatrix} = U_{im} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{iA}) \\ \cos(\theta_{iB}) \\ \cos(\theta_{iC}) \end{bmatrix} = U_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_i t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: ω_i 为输入电压角频率; U_{im} 为输入相电压基波的幅值; u_{iA} 、 u_{iB} 、 u_{iC} 分别为输入电压的三相电压; θ_{iA} 、 θ_{iB} 、 θ_{iC} 分别为输入电压的三相电压相位角。

首先对输入电压进行扇区判断, 以输入电压处于 $[-\pi/6, 11\pi/6]$ 区间为例, 扇区划分如图 3 所示。

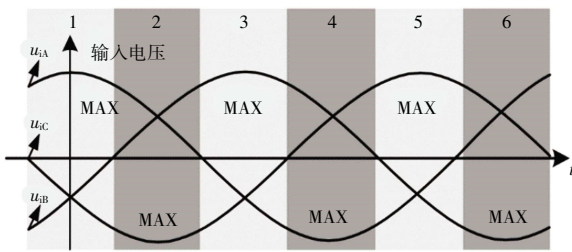


图 3 整流级扇区划分

Fig.3 Division of rectification stage sector

为了保证 TSMC 直流侧电压极性始终为正, 由图 3 可知, 整流级开关状态应如表 1 所示。

表 1 整流级开关状态

Tab.1 Switch states of rectification stage

扇区号	第 1 段导通开关	第 2 段导通开关
1	S_{r1}, S_{r4}	S_{r1}, S_{r6}
2	S_{r3}, S_{r6}	S_{r1}, S_{r6}
3	S_{r3}, S_{r6}	S_{r3}, S_{r2}
4	S_{r5}, S_{r2}	S_{r3}, S_{r2}
5	S_{r1}, S_{r2}	S_{r5}, S_{r4}
6	S_{r1}, S_{r4}	S_{r5}, S_{r4}

根据整流级扇区确定整流级开关状态后, 下一步需确定开关状态的占空比。假设整流级处于第 1 扇区, 可由平均值合成原理推得占空比为:

$$\begin{cases} d_m = \sin(\frac{\pi}{6} - \theta_i) / \cos \theta_i = \frac{-u_{iB}}{u_{iA}} \\ d_n = \sin(\frac{\pi}{6} + \theta_i) / \cos \theta_i = \frac{-u_{iC}}{u_{iA}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_i 为输入电压相位角; d_m 和 d_n 分别为开关 S_{r4} 和 S_{r6} 的占空比。进一步可得, TSMC 的直流链电压平均值 u_{pm} 为:

$$u_{pm} = d_m(u_{iA} - u_{iB}) + d_n(u_{iA} - u_{iC}) \quad (6)$$

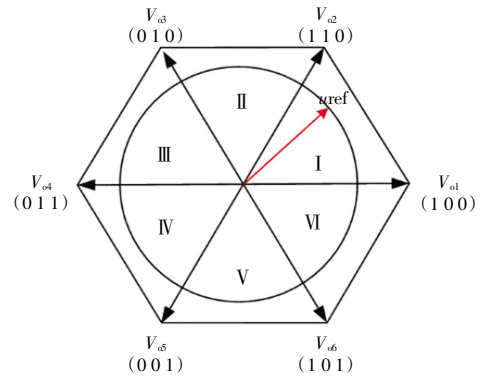
2.2 逆变级调制策略

TSMC 逆变级调制目标为逆变级输出电压形成圆形旋转磁场, 可依此定义 TSMC 的输出侧三相参考电压 \mathbf{u}_o 为

$$\mathbf{u}_o = \begin{bmatrix} u_{oA} \\ u_{oB} \\ u_{oC} \end{bmatrix} = U_o \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_o t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: ω_o 为输出参考电压角频率; U_o 为输出参考相电压基波的幅值; u_{oA} 、 u_{oB} 、 u_{oC} 分别为输出参考电压的三相相电压。

TSMC 的逆变级空间矢量如图 4 所示。由图 4 可见, TSMC 的逆变级矢量包含 6 个有效矢量和 2 种零矢量, 其中 $V_{o1}(100)$ 表示 A 相上桥臂与 B、C 相下桥臂导通, 其余开关保持关闭。



零矢量 $V_{o(000)}$ 或 $V_{o(111)}$

图 4 逆变级空间矢量

Fig.4 Inverter space vector

由于 TSMC 的逆变级调制工作是将给定的模拟电压信号转换为开关数字信号的过程, 因此可以应用 Delta-Sigma 调制技术。本文采用 Delta-Sigma 矢量调制策略进行 TSMC 的逆变级调制, 其具体调制结构如图 5 所示。

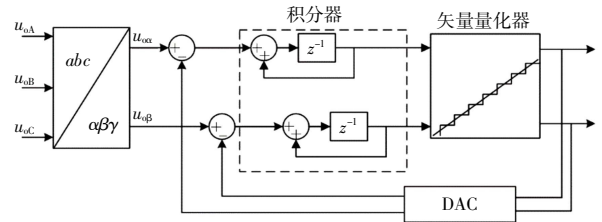


图 5 Delta-Sigma 矢量调制器结构

Fig.5 Structure of Delta-Sigma vector modulator

由图 5 可见, 给定参考电压转换成 $\alpha-\beta$ 坐标系下的 u_{α} 与 u_{β} 进行调制。 u_{α} 和 u_{β} 与反馈回路中 DAC 根据开关状态得到的实际输出电压作差, 其差值为误差电压矢量, 矢量量化器将误差电压矢量量化成逆变器开关状态, 完成逆变级的调制过程。

量化器首先根据参考电压所处扇区得到备选矢量, 进一步选择矢量的标准是选择离误差电压矢量最近的电压矢量, 所以误差电压矢量幅值小于 $u_{pm}/3$, 选

择零矢量,将矢量图中该区域定义为维诺区域 G,同理可以定义维诺区域 A、B、C、D、E 与 F 分别对应区间 $[11\pi/6, \pi/6]$ 、 $[\pi/6, \pi/2]$ 、 $[\pi/2, 5\pi/6]$ 、 $[5\pi/6, 7\pi/6]$ 、 $[7\pi/6, 3\pi/2]$ 与 $[3\pi/2, 11\pi/6]$ 。

依据误差电压矢量所处维诺区域与参考电压所处扇区可以选择逆变级矢量,其中选择零矢量的标准是降低开关频率,电压矢量选取表如表 2 所示。

表 2 电压矢量选取

Tab.2 Determination of voltage vector

扇区 N	区域 M						
	A	B	C	D	E	F	G
I	V_{o1}	V_{o2}	V_{o2}	V_{o7}	V_{o7}	V_{o1}	V_{o0}
II	V_{o2}	V_{o2}	V_{o3}	V_{o3}	V_{o0}	V_{o0}	V_{o7}
III	V_{o7}	V_{o3}	V_{o3}	V_{o4}	V_{o4}	V_{o7}	V_{o0}
IV	V_{o0}	V_{o0}	V_{o4}	V_{o4}	V_{o5}	V_{o5}	V_{o7}
V	V_{o6}	V_{o7}	V_{o7}	V_{o5}	V_{o5}	V_{o6}	V_{o0}
VI	V_{o1}	V_{o1}	V_{o0}	V_{o0}	V_{o6}	V_{o6}	V_{o7}

3 仿真与实验结果分析

为了验证本文所提策略的有效性,本文通过仿真与实验对此进行验证,并基于结果对其展开分析,参数设置如表 3 所示。

表 3 参数设置

Tab.3 Setting of parameters

系统参数	参数值
网侧相电压有效值/V	100
网侧电压频率/Hz	50
网侧滤波电容/ μF	35
网侧滤波电感/mH	1.37
网侧滤波电阻/ Ω	10
负载电阻/ Ω	10
负载电感/mH	40
输出电压频率/Hz	10

设置系统的载波频率为 5 kHz,控制频率为 20 kHz。基于 Matlab/Simulink 环境搭建仿真模型进行仿真。定义 TSMC 电压传输比(voltage transfer ratio, VTR)为 U_o/U_{in} ,在电压传输比为 0.5 时,仿真结果如图 6 与图 7 所示。

由图 6 可见,在空间调制策略调制下的 TSMC 输出侧含有高频谐波边带。由图 6 与图 7 的频谱图对比可知,本文所提策略较好地实现了输出侧电压与电流的频谱整形,输出电流总谐波失真(THD)从 1.02%降至 1.01%,优化了 TSMC 输出性能。

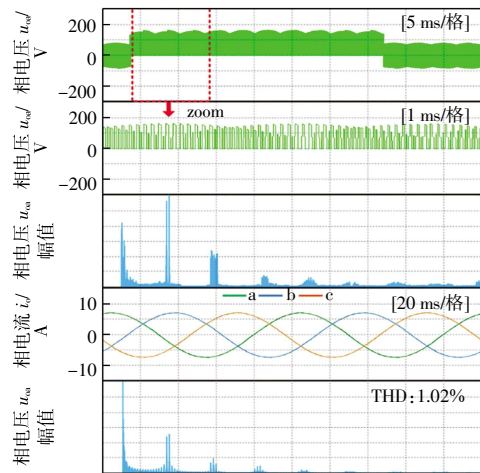


图 6 空间矢量调制时负载侧相电流与电压

Fig.6 Current and voltage of load side phase during space vector modulation

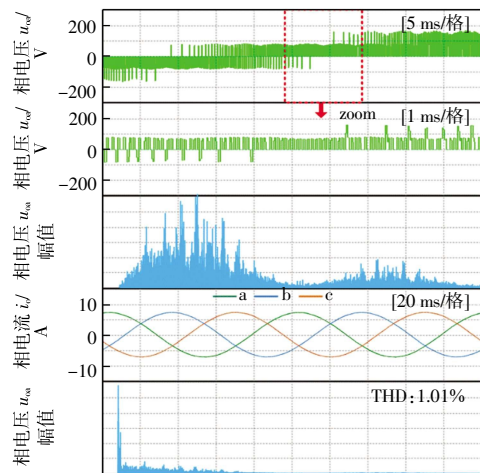


图 7 所提策略负载侧相电流与电压

Fig.7 Current and voltage of load side phase during proposed method

为了进一步验证本文所提策略的频谱整形效果,以及分析输出电流的波形质量,设置 VTR = 0.5 进行试验与仿真,负载侧相电流实验结果如图 8 所示,与仿真结果的对比如图 9 所示。

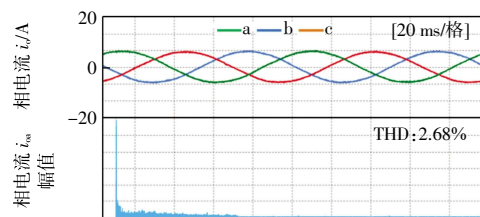


图 8 所提策略负载侧相电流实验结果

Fig.8 Experimental results of current of load side phase of proposed strategy

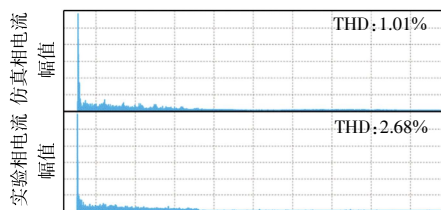


图9 实验与仿真结果比较

Fig.9 Comparison of experimental and simulation results

由图8可以看出,TSMC输出相电流THD为2.68%,输出相电流对称性较好,具有较好的输出波形质量,且实现了输出电流的频谱整形。对比仿真结果与实验结果中的电流频谱图可知,频谱中不再含有高频谐波边带,所提出的双级矩阵变换器变频调制策略实现了良好的频谱整形效果。仿真中输出相电流THD值为1.01%,而实验中为2.68%,这是由于仿真中的功率回路与控制回路信号的传递均处于理想情况下,而在实验中存在杂散电感干扰以及电磁干扰等一系列干扰现象,故实验中的输出电流THD值高于仿真中的输出电流THD值。

为了验证该调制策略下的TSMC动态性能,将TSMC的VTR由0.5突变为0.8,其动态实验下TSMC输出相电流波形如图10所示。由图10可见,在突变之后实现了较好的追踪性,表明本文提出的TSMC变频调制策略具有良好的动态追踪性能。

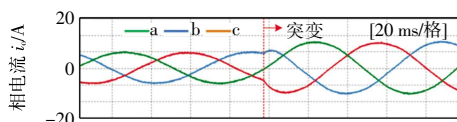


图10 所提策略负载侧相电流动态波形

Fig.10 Dynamic waveform of phase current at load side of proposed strategy

本文在实验中比较了不同VTR条件下空间矢量调制策略与本文所提策略下的TSMC输出相电流THD,结果如表4所示。由表4可知,本文所提策略TSMC输出相电流THD最高为4.26%,最低为1.62%,相较于空间矢量调制策略输出相电流THD平均降低了0.256%,有效降低了TSMC输出电流的谐波含量。

表4 输出相电流THD

Tab.4 THD of output phase current

VTR	空间矢量调制策略/%	本文所提策略/%
0.2	4.80	4.26
0.5	2.84	2.68
0.6	2.43	2.38
0.8	1.97	1.71
0.85	1.89	1.62

4 结论

针对定频调制导致的高频谐波边带问题,本文提出了TSMC变频调制策略进行优化,有效实现了频谱整形,输出相电流不再含有谐波边带,从而提升了TSMC的电磁兼容能力。实验结果表明:

(1) 本文所提策略有效降低了输出侧电流的谐波畸变率,与空间矢量调制策略相比,输出相电流THD平均降低了0.256%,提升了运行性能。

(2) 本文提出的变频调制策略逆变级无需载波进行调制,在调制过程中不会产生窄脉冲,提升了系统的安全性能。

参考文献

- [1] 夏长亮, 阎彦. 矩阵变换器-永磁同步电机系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 1-9.
XIA C L, YAN Y. Matrix converter-permanent magnet synchronous motor system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 1-9(in Chinese).
- [2] 黄海涛, 周波, 秦显慧, 等. 双级矩阵变换器输入功率因数可调的载波调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 177-184.
HUANG H T, ZHOU B, QIN X H, et al. Carrier modulation strategy with adjustable input power factor for two-stage matrix converter[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015, 35(1): 177-184(in Chinese).
- [3] TARISCIOTTI L, LEI J X, FORMENTINI A, et al. Modulated predictive control for indirect matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 4644-4654.
- [4] XIA C L, LI S H, YAN Y, et al. Research on linear output voltage transfer ratio for ultrasparse matrix converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(3): 1811-1815.
- [5] ISRAYELU M, SASHIDHAR S. Hybrid switched inductor step-up Ultra-Sparse matrix converter for wind generator applications[C]//IECON 2021-47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Toronto, ON, Canada: IEEE, 2021: 1-6.
- [6] TSOUPOS A, KHADKIKAR V. A novel SVM technique with enhanced output voltage quality for indirect matrix converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(2): 832-841.
- [7] 孙盼, 孙军, 吴旭升, 等. 间接矩阵变换器优化SVPWM及其简化的同步控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2187-2193.
SUN P, SUN J, WU X S, et al. Optimal SVPWM and its simplified synchronization control for indirect matrix converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10):

- 2187-2193(in Chinese).
- [8] BOZORGI A M, FARASAT M, KARAMAN E. Novel modulation schemes and switching pattern for Z-Source Ultra-Sparse matrix converter[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2017: 4223-4229.
- [9] WANG H, SU M, SUN Y, et al. Two-stage matrix converter based on third-harmonic injection technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(1):533-547.
- [10] 程启明, 魏霖, 程尹曼, 等. 基于准 Z 源矩阵变换器的永磁同步电机无源控制驱动系统[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6746-6756.
CHENG Q M, WEI L, CHENG Y M, et al. Passive control drive system of permanent magnet synchronous motor based on quasi-Z source matrix converter[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2019, 39(22):6746-6756 (in Chinese).
- [11] HUANG Y, XU Y, ZHANG W, et al. Hybrid RPWM technique based on modified SVPWM to reduce the PWM acoustic noise[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(6):5667-5674.
- [12] 刘洪臣, 庄严, 孙立山, 等. 基于混沌扩频的双级矩阵变换器调制策略的研究[J]. 电源学报, 2012(6):9-13.
LIU H C, ZHUANG Y, SUN L S, et al. Research on modulation strategy of two-stage matrix converter based on chaotic spread spectrum[J]. Journal of Power Supply, 2012(6):9-13 (in Chinese).
- [13] 齐琛, 陈希有. 一种简化换流的双级矩阵变换器混沌载波频率调制技术[J]. 电工技术学报, 2014, 28(8):149-156.
QI C, CHEN X Y. Chaotic carrier frequency modulation technique for two-stage matrix converter with simplified commutation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 28(8):149-156(in Chinese).
- [14] SHI T N, WANG Z W, MA C L, et al. A variable switching frequency PWM method for indirect matrix converters[J]. IET Conference Proceedings, 2021, 2020(7):943-948.
- [15] MENON M A, JACOB B. A simplified space vector pulse density modulation scheme without coordinate transformation and sector identification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(5):4431-4439.
- [16] JACOB B, BAIJU M R. A new space vector modulation scheme for multilevel inverters which directly vector quantize the reference space vector[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(1):88-95.
- [17] JACOB B, BAIJU M R. Space vector based dithered sigma delta modulator for two-level inverter to suppress the harmonic spikes[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012: 2005-2011.
- [18] 耿乙文, 王亮, 许家斌, 等. 基于 Sigma-Delta 调制的双两电平逆变器调制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 239-247.
GENG Y W, WANG L, XU J B, et al. Modulation strategy of dual two-level inverter based on Sigma-Delta modulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 239-247(in Chinese).
- [19] MIR T N, SINGH B, BHAT A H. Delta-sigma modulation based common-mode voltage elimination in direct matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17(2):1048-1057.
- [20] JACOB B, BAIJU M R. Simple multilevel inverter-based induction motor drive scheme using Sigma-Delta converter with Space-Vector quantiser[J]. IET Power Electronics, 2012, 5(8):1483-1490.

本文引文格式:

- 周湛清, 谢琦坤, 耿强. 双级矩阵变换器 Delta-Sigma 变频调制策略[J]. 天津工业大学学报, 2024, 44(1): 69-74.
ZHOU Z Q, XIE Q K, GENG Q. Variable frequency modulation of two-stage matrix converter based on Delta-Sigma modulation[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 44(1): 69-74(in Chinese).