

基于电压直接计算的逆变器死区补偿 改进算法研究

马 强, 张林楠*

(湖北文理学院 纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室, 湖北 襄阳 441053)

Research on Improved Dead-Time Compensation Algorithm of Inverter Based on Direct Voltage Calculation

MA Qiang, ZHANG Linnan*

(Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle,
Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)

Abstract: [Objective] The existence of dead-time in the operation of a three-phase inverter results in the generation of high-order harmonics in both the output voltage and output current. Specifically, when switching devices with a relatively high switching frequency are employed, severe switching oscillation will be induced. To address the problem of complex calculation associated with traditional dead-time compensation methods, this paper proposes an improved dead-time compensation method of inverters based on direct voltage calculation, which significantly simplifies the calculation process of the traditional approaches. [Methods] Firstly, the influence mechanism of dead-time in voltage space vector modulation on the phase voltage and phase current of the motor was analyzed. Then, a dead-time compensation method based on the polarity determination of the phase current at the voltage neutral point was proposed. This method compensated the voltage by calculating the voltage vector conduction time in segments according to the different polarities of the phase current at the voltage midpoint, which reduced the computational complexity of the traditional dead-time compensation methods. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified through simulations and experiments. [Results] The simulation results showed that before and after the implementation of the compensation method, the total harmonic distortion (THD) of the phase A output current was reduced from 7.29% to

3.45%. Experimental results demonstrated that with the proposed dead-time compensation strategy applied, the phase current THD was below 4%, whereas the THD exceeded 6% without dead-time compensation.

[Conclusion] The strategy proposed in this paper can effectively mitigate the impacts caused by the dead-time effect and improve the waveform quality of the output voltage and output current.

Key words: three-phase inverter; dead-time compensation; total harmonic distortion; voltage vector conduction time

摘 要: [目的] 三相逆变器在运行过程中由于死区的存在, 导致输出电压和输出电流中出现高次谐波, 尤其采用较高开关频率的开关器件时, 会引发严重的开关振荡现象。针对传统死区补偿方法存在的计算复杂问题, 本文提出了一种基于电压直接计算的逆变器改进死区补偿方法, 有效简化了传统死区补偿方法的计算步骤。[方法] 首先, 分析了电压空间矢量调制死区时间对电机相电压和相电流的影响机理。然后, 提出基于电压中性点相电流极性测定的死区补偿方法。该方法通过电压中间值相电流的不同极性, 分段计算电压矢量导通时间来补偿电压, 降低了传统死区补偿方法的计算复杂性。最后, 通过仿真和试验, 对所提方法的有效性进行了验证。[结果] 仿真结果表明, 实施补偿方法前后, A 相输出电流总谐波失真(THD)由 7.29% 降为 3.45%。试验结果表明, 施加死区补偿策略后, 电流 THD 低于 4%, 而无死区补偿时, THD 高于 6%。[结论] 本文所提策略能有效减少死区效应带来的影响, 提升输出电压和输出电流的波形质量。

关键词: 三相逆变器; 死区补偿; 总谐波失真; 电压矢量导通时间

基金项目: 湖北省自然科学基金(联合基金重点)项目(2025AFD028)

Hubei Provincial Natural Science Foundation (Joint Fund Key) Project (2025AFD028)

0 引言

随着电力电子技术的快速发展,三相逆变器被广泛应用于电机驱动、轨道交通等场景^[1-2]。三相逆变器具有功率输出高、电压幅值稳定以及受输入波动影响小等特点。在实际应用中,为了防止上下桥臂直通,保证逆变器安全可靠运行,通常需要引入死区时间。死区时间导致实际电压与理想电压之间产生偏差,这种偏差会引入额外的电压谐波,导致输出电压波形畸变^[3],从而引起电机产生电磁振动噪声^[4-6]。因此,研究并实施有效的逆变器死区补偿策略至关重要^[7-9]。

死区补偿旨在消除或降低死区时间带来的负面影响,提高逆变器的输出电压质量和效率^[10]。目前,学者们已经提出了多种死区补偿方法,包括电压补偿法、基于模型预测的补偿法以及基于电流极性检测的补偿法等。文献[11]对 dq 旋转坐标轴下的误差电压进行实时计算,进而实现误差电压的死区补偿^[12]。文献[13]使用改进的梯形补偿电压实现补偿策略。但上述电压补偿法只针对实际输出电压与实际输出的差值进行电压补偿,不够精确,补偿效果欠佳^[14-15]。为提升补偿效果,文献[16]通过高阶扩展状态观测器对误差电压进行估计,该方法表现出较好的补偿性能^[17-19]。在此基础上,文献[20]设计了一种无需检测电流极性的观测器^[21],有效抑制了死区带来的不利影响。文献[22]建立数学模型来计算电流预测值,并进行实时电压补偿。文献[23]通过模型预测电流环周期的电角度,进行线性相位延时补偿。基于模型预测的电压补偿依赖模型的准确性,计算量通常比较大,过程比较复杂。文献[24]分析了过零区和非过零区的死区消除原理,通过计算电流纹波值进行消除^[25],但该方法依赖纹波值的准确性。文献[26]根据建立的预测模型得到零点处的电流纹波值并划分过零区和非过零区,进行分段补偿,但该方法计算量较大,死区补偿方法分析过程较简单。因此,建立简洁的模型来分析死区影响下的谐波特性,揭示死区对谐波畸变的作用机制,具有重要意义。

基于此,本文提出了一种基于电压直接计算的逆变器死区补偿改进算法。首先,分析了电压空间矢量调制死区时间对电机相电压和相电流的影响

机理。然后,提出基于电压中性点相电流极性测定的死区补偿方法。该方法通过电压中间值相电流的不同极性,分段计算电压矢量的导通时间来补偿电压,降低了传统死区补偿方法的计算复杂性。最后,通过仿真和试验,验证了所提方法能有效减少死区效应带来的影响,改善相电压和相电流波形。

1 死区效应分析

图 1 为三相逆变器拓扑结构。其中,VP、VN 分别为同一桥臂的上、下开关器件,当电流 i_a 为正时,流入负载 Z ;当电流 i_a 为负时,流出负载 Z 。逆变器工作时,为了防止上、下两个开关器件同时导通,发生短路,需引入一个死区时间^[27]。在死区时间内,上、下两个开关器件关断,电流仅通过二极管续流。

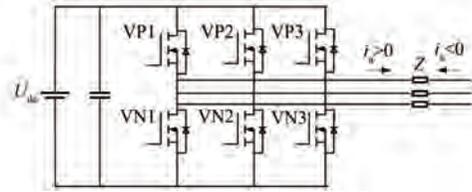


图 1 三相逆变器拓扑结构图

Fig. 1 Three-phase inverter topology diagram

假设 t_d 为死区时间, t_{on} 、 t_{off} 分别为考虑器件非理想开关特性下的导通、关断时间。当 $i_a > 0$ 时,与理想时间相比,上开关管导通时间减少了 $t_d + t_{on} - t_{off}$;当 $i_a < 0$ 时,与理想时间相比,下开关管导通时间增加了 $t_d + t_{on} - t_{off}$,因此可以得出干扰电压 ΔV 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta V = -\frac{t_d + t_{on} - t_{off}}{T_s} U_{dc}, i_a > 0 \\ \Delta V = \frac{t_d + t_{on} - t_{off}}{T_s} U_{dc}, i_a < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_s 为电流采样周期; U_{dc} 为直流电压。

推广到三相电流,三相平均失真电压与电流方向之间的关系为

$$\begin{cases} \Delta u_a = -\Delta V \left[\frac{2\text{sign}(i_a) - \text{sign}(i_b) - \text{sign}(i_c)}{3} \right] \\ \Delta u_b = -\Delta V \left[\frac{2\text{sign}(i_b) - \text{sign}(i_a) - \text{sign}(i_c)}{3} \right] \\ \Delta u_c = -\Delta V \left[\frac{2\text{sign}(i_c) - \text{sign}(i_a) - \text{sign}(i_b)}{3} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $sign(i_{a,b,c}) = \begin{cases} 1, & i_{a,b,c} > 0 \\ -1, & i_{a,b,c} < 0 \end{cases}$; Δu_a 、 Δu_b 和 Δu_c 分别为 A、B、C 相平均失真电压。

2 电压中性点相电流极性测定法的工作原理

三相电压源型逆变器输出电压波形如图 2 所示。图中, V_{as}^* 、 V_{bs}^* 和 V_{cs}^* 分别为 A、B 和 C 相的参考电压。由图 2 可知, 在任一时刻三相参考电压均存在最大、最小和中间值, 分别用 V_{max}^* 、 V_{min}^* 和 V_{mid}^* 表示。在图 2 所示的时间段内, 电压的最大值分别为 A 相电压、C 相电压和 B 相电压, 中间电压的极性总是在变化。

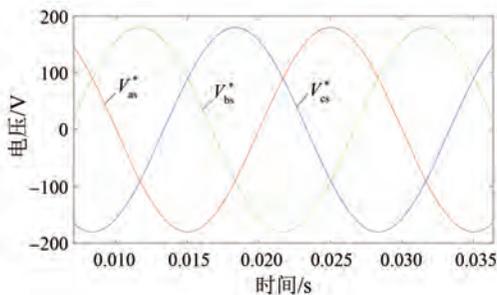


图 2 三相参考电压波形

Fig. 2 Three-phase reference voltage waveforms

实际情况并没有按照理想的输出模式输出电压, 电路中影响电压精度的因素有很多, 这些因素包括死区时间、开关管驱动延迟和功率器件的管压降。为了更加准确分析这些因素对实际输出电压的影响, 有必要更详细地分析模型的非线性。

相电流大于零和小于零时, 将死区时间添加到逆变器后, 实际开关器件的触发信号和实际逆变器输出电压如图 3 所示。输出电压误差可以分为两个部分: 一部分是功率管开关器件和二极管的电压降, 另一部分是由于延迟时间引起的管压降。图中, S_{VP}^* 、 S_{VN}^* 分别为理想状态的上、下桥臂波形; S_{VP} 、 S_{VN} 分别为存在死区时间、开通延时以及关断延时的上、下桥臂波形; U_A^* 、 U_A 分别为 A 相理想电压、实际电压。

一个开关周期内的电流预测模型如图 4 所示。其中, T_0 、 T_1 和 T_2 为电压矢量的导通时间。

令中间相相电流大于零, 每个时间段的等效电路图如图 5 所示。 $t_0 \sim t_1$ 和 $t_6 \sim t_7$ 时间段的等效

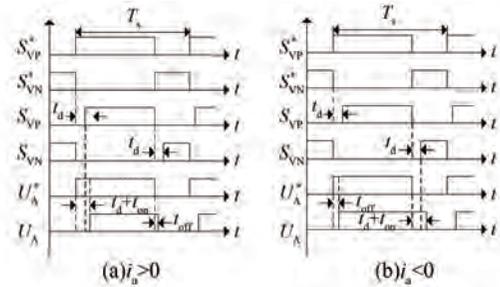


图 3 实际开关器件的触发信号和实际逆变器输出电压波形

Fig. 3 Trigger signals of actual switching devices and output voltage waveforms of actual inverter

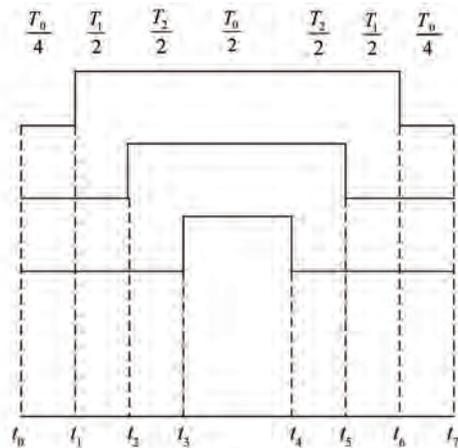


图 4 一个开关周期内的电流预测模型

Fig. 4 Current prediction model within one switching period

电路图如图 5(a) 图所示, 此时 A、B、C 三相上桥臂关断, 下桥臂开关管和二极管为有效器件。 $t_1 \sim t_2$ 和 $t_5 \sim t_6$ 时间段的等效电路图如图 5(b) 所示, 此时有两相上桥臂关断。 $t_2 \sim t_3$ 和 $t_4 \sim t_5$ 时间段的等效电路图如图 5(c) 所示, 此时有一相上桥臂关断。 $t_3 \sim t_4$ 时间段的等效电路图如图 5(d) 所示, 此时 A、B、C 三相下桥臂关断, 上桥臂开关管和二极管为有效器件。

电压误差的大小取决于功率器件的特性以及电流的大小。一般认为最大电压 V_{max} 的相电流方向为正, 最小电压 V_{min} 的相电流方向为负, 中间电压 V_{mid} 的相电流方向为正或负。

$t_0 \sim t_1$ 和 $t_6 \sim t_7$ 时间段是电压矢量(000)的作用时间, 有效导通时间为

$$T_{000} = \frac{T_0}{4} + t_d + t_{on} + \frac{T_0}{4} - t_{off} = \frac{T_0}{2} + t_d + t_{on} - t_{off} \quad (3)$$

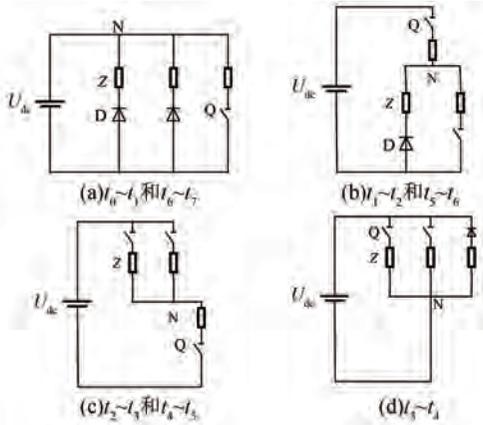


图 5 每个时间段的等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram for each time interval

$t_1 \sim t_2$ 和 $t_5 \sim t_6$ 时间段是电压矢量(00)的作用时间,有效导通时间为

$$T_{00} = \frac{T_1}{2} - t_d - t_{on} + t_d + t_{on} + \frac{T_1}{2} - t_{off} + t_{off} = T_1 \quad (4)$$

$t_2 \sim t_3$ 和 $t_4 \sim t_5$ 时间段是电压矢量(11)的作用时间,有效导通时间为

$$T_{11} = \frac{T_2}{2} - t_d - t_{on} + t_{off} + \frac{T_2}{2} - t_d - t_{on} + t_{off} = T_2 - 2t_d - 2t_{on} + 2t_{off} \quad (5)$$

$t_3 \sim t_4$ 时间段是电压矢量(111)的作用时间,有效导通时间为

$$T_{111} = \frac{T_0}{2} + t_d + t_{on} - t_{off} \quad (6)$$

与死区时间对逆变器实际输出电压误差的影响相比,开关管的电压降 $V_{ce}(i)$ 和二极管的电压降 $V_d(i)$ 对逆变器实际输出电压误差的影响相对较小。因此,一般认为 $V_{ce}(i)$ 与 $V_d(i)$ 的值等于饱和电压 V_{sat} 。电压矢量(000)作用时的最大、最小和中间电压为

$$V_{\max(000)} = [-V_N - V_d(i_{\max})] \cdot \frac{T_{000}}{T_s} \quad (7)$$

$$V_{\text{mid}(000)} = [-V_N - V_d(i_{\text{mid}})] \cdot \frac{T_{000}}{T_s} \quad (8)$$

$$V_{\min(000)} = [-V_N - V_{ce}(i_{\min})] \cdot \frac{T_{000}}{T_s} \quad (9)$$

$$V_N = \frac{1}{3}[-V_d(i_{\max}) - V_d(i_{\text{mid}}) + V_{ce}(i_{\min})] \quad (10)$$

式中: V_N 为等效电路图中的节点电压。

同理可得电压矢量(00)、(11)和(111)作用时的最大、最小和中间电压。当中间电压的相电流大于零时,可得:

$$V_{\max} = V_{\max(000)} + V_{\max(00)} + V_{\max(11)} + V_{\max(111)} \quad (11)$$

$$V_{\min} = V_{\min(000)} + V_{\min(00)} + V_{\min(11)} + V_{\min(111)} \quad (12)$$

由此得到,当中间电压的相电流大于零时, T_0 、 T_1 和 T_2 分别为

$$T_1 = \frac{2V_{\max} + V_{\min}}{U_{dc}} \cdot T_s \quad (13)$$

$$T_2 = \frac{2V_{\text{sat}} - V_{\max} - 2V_{\min}}{U_{dc}} \cdot T_s + 2(t_d + t_{on} - t_{off}) \quad (14)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (15)$$

同样地,当中间电压的相电流小于零时, T_0 、 T_1 和 T_2 分别为

$$T_1 = \frac{2V_{\max} + V_{\min} + 2V_{\text{sat}}}{U_{dc}} \cdot T_s + 2(t_d + t_{on} - t_{off}) \quad (16)$$

$$T_2 = -\frac{V_{\max} + 2V_{\min}}{U_{dc}} \cdot T_s \quad (17)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (18)$$

3 仿真分析

本文所提死区补偿策略的结构框图如图 6 所示。为验证补偿策略的有效性,在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型,主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数

Tab. 1 Main simulation parameters

参数名称	参数值
直流电压/V	560
基波频率/Hz	50
输出电感/mH	3
负载电阻/ Ω	20

图 7 为 T_0 、 T_1 和 T_2 随时间变化的波形图。以 A 相为例,补偿前后的输出电流波形对比如图 8 所示。

由图 8 可知,设置死区时间后,输出电流波形

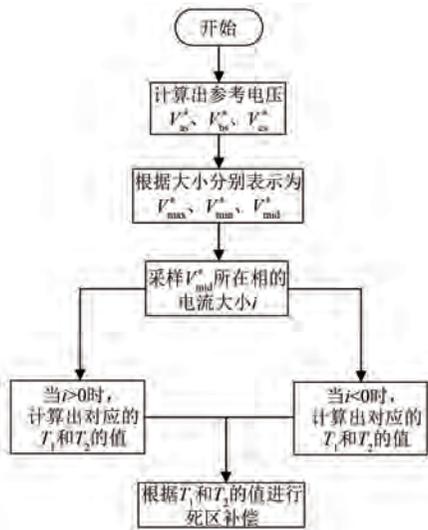


图 6 死区补偿策略结构框图

Fig. 6 Block diagram of dead-time compensation strategy

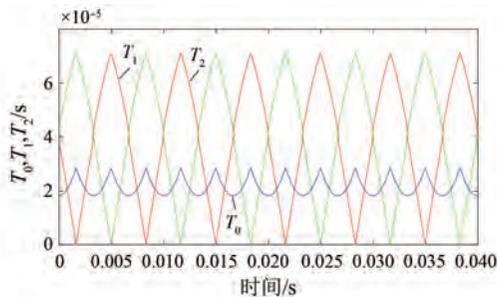


图 7 T_0, T_1 和 T_2 随时间变化的波形

Fig. 7 Waveforms of T_0, T_1 and T_2 varying with time

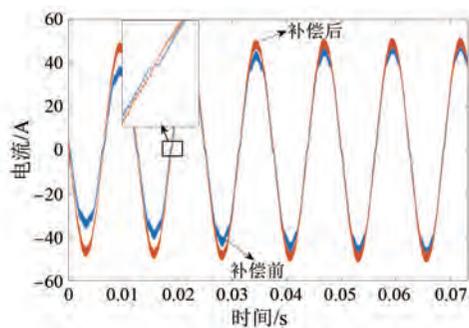


图 8 补偿前后的输出电流波形对比

Fig. 8 Comparison of output current waveforms before and after compensation

比较发散,并且死区效应严重,尤其在零点部位, A 相电流的总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD) 为 7.29%;采用所提死区补偿策略后,输出电流波形质量得到明显提升,波形比较稳定,零点部位与无补偿时相比波形更平缓,THD 降为 3.45%,降幅为 47.3%。

4 试验验证

搭建如图 9 所示的试验平台以验证所提死区补偿策略的有效性。该试验平台主要包括主电路、芯片模块、开关电源模块、驱动及保护模块、信号调理及 AD 转换模块等。直流电压 U_{dc} 为 24 V,死区时间 t_d 为 $1 \mu s$ 。



图 9 试验平台

Fig. 9 Experiment platform

图 10、图 11 分别为补偿前、后的 A 相电流波形。由图 10 可知,无死区补偿时,A 相电流谐波比较严重。由图 11 可知,采用所提死区补偿策略后,A 相电流波形比较平滑,接近理想正弦波形,与无补偿时的波形相比,正弦度有了明显改善,谐波含量明显降低,特别是过零点处畸形明显减小。



图 10 补偿前 A 相电流波形

Fig. 10 Waveform of phase A current before compensation

进一步地,在不改变开关频率和死区时间的条件下,对所提死区补偿策略进行验证。不同调制比下,补偿前、后的 A 相电流 THD 如图 12 所示,实际与理论输出的基波电压幅值之比 (K 值) 如图 13 所示。 K 值越接近 1,表明相位特性接近线性,测量方法越可靠;反之则表明测量方法可靠性降低。

由图 12 可知,无论有无死区补偿策略,THD 随调制比的增大而减小;施加死区补偿策略后,在调制比为 0.6~1.15 区间内,THD 低于 4%;而无死

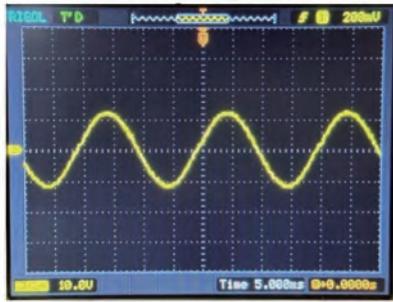


图 11 补偿后 A 相电流波形

Fig. 11 Waveform of phase A current after compensation

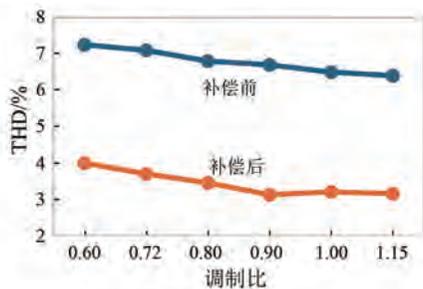


图 12 不同调制比下的 A 相电流 THD

Fig. 12 THD of phase A current under different modulation ratios

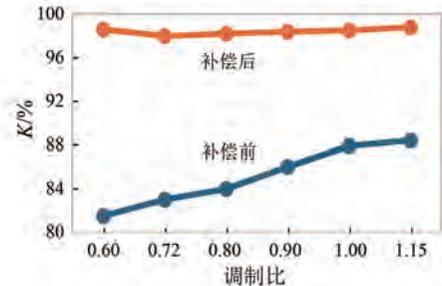


图 13 不同调制比下的 K 值

Fig. 13 K values at different modulation ratios

区补偿时, THD 高于 6%。可见, 实施补偿策略后, THD 显著降低, 波形质量得到有效提升。

由图 13 可知, 无死区补偿时, 随着调制比升高, K 值呈上升趋势, 在调制比为 1.15 时, K 值仅为 88.3%; 而实施死区补偿策略后, K 值基本稳定在 98%。可见, 所提死区补偿策略能够有效消除死区效应。

5 结语

针对传统死区补偿方法计算复杂性较高的问题, 本文提出了一种采用电压中性点相电流极性测定的死区补偿方法, 根据中间电压相电流的不

同极性分段计算电压矢量的导通时间来补偿电压。仿真和试验结果表明, 本文所提方法能有效减少死区效应带来的影响, 提升输出电压和输出电流的波形质量。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

马强进行了方案设计与内容总结, 张林楠进行了试验研究与论文撰写, 马强和张林楠参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design and content summary were carried out by Ma Qiang. The experimental study and paper writing were conducted by Zhang Linnan. The manuscript was reviewed and revised by Ma Qiang and Zhang Linnan. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 刘纪奥, 张博, 冯威, 等. 开绕组永磁同步电机非共母线双逆变器供电模型预测电流控制方法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(10): 1137-1147.
Liu J A, Zhang B, Feng W, et al. Model predictive current control for open-winding PMSM with non-common bus dual inverter power supply [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(10): 1137-1147.
- [2] 王智杰. 基于 SiC 逆变器的永磁同步电机电流谐波抑制研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023.
Wang Z J. Research on current harmonic suppression of PMSM based on SiC inverter [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023.
- [3] 刘锟, 高剑, 刘晨旭, 等. 基于 MOGA 优化注入谐波电流的永磁同步电机振动抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(10): 1039-1049.
Liu K, Gao J, Liu C X, et al. Vibration suppression strategy for PMSM based on MOGA optimized harmonic current injection [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(10): 1039-1049.

- [4] 狄伟, 赵凯诺, 张李娜, 等. 计及参数失配的电励磁双凸极电机改进型双矢量模型预测电流控制策略[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(10): 1063-1074.
- Di W, Zhao K N, Zhang L N, et al. Improved dual-vector model predictive current control strategy for doubly salient electromagnetic machine considering parameter mismatch [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(10): 1063-1074.
- [5] 张涛, 孙全增, 高梓伦, 等. 一种基于虚拟矢量的模糊无权重系数改进模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(9):1006-1015.
- Zhang T, Sun Q Z, Gao Z L, et al. An improved model predictive torque control with fuzzy unweighted factor based on virtual vectors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(9): 1006-1015.
- [6] 樊森, 董锋斌, 罗育恒, 等. 三相电压型逆变器的谐波抑制研究[J]. 电力电子技术, 2024, 58(12): 4-8+13.
- Fan B, Dong F B, Luo Y H, et al. Research on harmonic suppression of three-phase voltage inverter [J]. Power Electronics, 2024, 58(12):4-8+13.
- [7] 黄辰, 王业勤, 钟再敏. 基于带有开尔文源极 SiC MOSFET 的高频 BUCK 电路振铃抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(9):944-956.
- Huang C, Wang Y Q, Zhong Z M. Ringing suppression strategy for high-frequency BUCK circuit based on SiC MOSFET with Kelvin source [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(9):944-956.
- [8] 曹颖强, 赵云. 逆变器模型分析及死区补偿控制策略研究[J]. 湖北工业大学学报, 2024, 39(2): 76-81+92.
- Cao Y Q, Zhao Y. Inverter model analysis and dead time compensation control strategy research [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2024, 39(2):76-81+92.
- [9] 王泽文. 基于边带谐波的三相逆变器信能同传方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- Wang Z W. Research on power and signal simultaneous transmission for three phase inverter based on sideband harmonics [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025.
- [10] 张凯, 周云艳, 瞿超然, 等. 基于 Simulink 的 SPWM 三相逆变器仿真分析[J]. 现代信息科技, 2025, 9(17): 28-31+37.
- Zhang K, Zhou Y Y, Qu C R, et al. Simulation analysis of SPWM three-phase inverter based on Simulink [J]. Modern Information Technology, 2025, 9(17): 28-31+37.
- [11] 焦宁, 刘天琪, 王顺亮, 等. 三相两电平逆变器死区效应谐波分析及其补偿方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2169-2176.
- Jiao N, Liu T Q, Wang S L, et al. Harmonic analysis and compensation method for dead-time effects in three-phase two-level inverters [J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2169-2176.
- [12] 周国祥, 王邦继, 王梦轩, 等. 高频伺服系统逆变器死区非线性补偿策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(8):2630-2642.
- Zhou G X, Wang B J, Wang M X, et al. Dead-time nonlinearity compensation strategy for inverter in high frequency servo systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(8): 2630-2642.
- [13] Lim J W, Bu H, Cho Y. Novel deadtime compensation strategy for wide current range in a three phase inverter [J]. Electronics, 2019, 8(1): 92.
- [14] Zhang N Z, Song Q, Wang M S, et al. A dead-time compensation method for motor drive inverters based on nonlinear observer [J]. Computers & Electrical Engineering, 2024, 120(PartA): 109668.
- [15] 于家文, 朱鹏程, 徐永向. 基于直轴电压分析的 PMSM 逆变器死区补偿策略[J]. 电气工程学报, 2021, 16(4):51-58.
- Yu J W, Zhu P C, Xu Y X. Dead zone compensation strategy for inverter of PMSM based on direct axis voltage analysis [J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(4):51-58.
- [16] 张士强, 葛兴来, 左运, 等. 基于高阶扩展状态观测器的感应电机驱动系统逆变器死区效应在线补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1946-1958.
- Zhang S Q, Ge X L, Zuo Y, et al. An inverter dead-time on-line compensation method for induction motor drive system based on high-order extended state observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1946-1958.
- [17] 郭玉敬, 张峻槐, 王帅, 等. 一种模型预测控制 PMSM 系统共模电压抑制策略[J]. 电机与控制学

- 报, 2024, 28(3): 56-65.
- Guo Y J, Zhang J H, Wang S, et al. Common-mode voltage suppression strategy of PMSM system using model predictive control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 28(3): 56-65.
- [18] 李麟, 李君, 庞博, 等. 基于观测器的逆变器特性自学习与补偿控制[J]. *吉林大学学报*, 2022, 52(7): 1534-1540.
- Li L, Li J, Pang B, et al. Observer-based inverter characteristic self-learning and compensation control [J]. *Journal of Jilin University*, 2022, 52(7): 1534-1540.
- [19] 龙江, 杨明, 陈扬洋, 等. 基于误差电压精确计算的表贴式永磁同步电机逆变器非线性补偿方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(17): 6425-6436.
- Long J, Yang M, Chen Y Y, et al. Inverter nonlinearity compensation method for SPMSM drives based on accurate voltage error calculation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(17): 6425-6436.
- [20] 林健, 张树龙, 周磊, 等. 基于 DOB 死区补偿下 EKF 的 PMSLM 无传感器控制[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022(7): 57-61.
- Lin J, Zhang S L, Zhou L, et al. PMSLM sensorless control based on EKF under the dead time compensation of the DOB [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2022(7): 57-61.
- [21] 卢凯尔, 刘战, 王旭, 等. 一种无传感器的 ANPC-5L 逆变器死区效应消除方法[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(10): 87-89+94.
- Lu K E, Liu Z, Wang X, et al. A method for eliminating dead-time effects of ANPC-5L inverter without sensor [J]. *Power Electronics*, 2021, 55(10): 87-89+94.
- [22] 田凯, 金雪峰, 张策, 等. 一种基于电机模型预测的三电平死区补偿方法[J]. *电气传动*, 2016, 46(4): 16-21.
- Tian K, Jin X F, Zhang C, et al. Method of dead-time compensation in three-level inverter based on motor model predictive control [J]. *Electric Drive*, 2016, 46(4): 16-21.
- [23] 王珂, 李扬, 谢成杰. 基于电角度相位补偿的死区在线补偿算法设计[J]. *电力电子技术*, 2024, 58(4): 17-21.
- Wang K, Li Y, Xie C J. Design of online deadtime compensation algorithm based on electrical angle phase compensation [J]. *Power Electronics*, 2024, 58(4): 17-21.
- [24] 党晓圆, 李洁, 于仁泽, 等. 基于电流纹波的 SiC MOSFET 逆变器死区消除方法[J]. *电力电子技术*, 2020, 54(10): 50-52+63.
- Dang X Y, Li J, Yu R Z, et al. A dead-time elimination method considering current ripple for SiC MOSFET inverter [J]. *Power Electronics*, 2020, 54(10): 50-52+63.
- [25] 胡存刚, 尹政, 芮涛, 等. 计及采样扰动抑制的电压源逆变器三矢量无模型预测电流控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(6): 2408-2418.
- Hu C G, Yin Z, Rui T, et al. Triple-vector model-free predictive current control method for voltage source inverter with sampling disturbance suppression [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(6): 2408-2418.
- [26] 柏树根, 孙承晨, 张新松, 等. SiC MOSFET 逆变器分段调制死区补偿策略[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(10): 28-37.
- Bai S G, Sun C C, Zhang X S, et al. The dead-time compensation strategy for segmented modulation of the SiC MOSFET inverter [J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(10): 28-37.
- [27] 陶顺, 朱歆艺, 陈慧琳, 等. 并网逆变器死区耦合谐波源建模[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(22): 8718-8729+10005.
- Tao S, Zhu X Y, Chen H L, et al. Dead-time coupling harmonic source modeling of grid-connected inverter [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(22): 8718-8729+10005.

收稿日期:2025-11-13

收到修改稿日期:2025-12-19

作者简介:

马强(1981—),男,博士,副教授,研究方向为交通设备与系统控制及电动汽车驱动电机控制技术, richardkinbvl@163.com;

*通信作者:张林楠(2000—),女,硕士研究生,研究方向为逆变器死区补偿技术,2269311267@qq.com。