

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202208027



扰动电压观测器与线性补偿策略 相结合的死区补偿方法

胡启国, 马鉴望, 张祥, 白熊

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为克服逆变器死区时间及开关的导通压降等非线性特性对永磁同步电机(PMSM)无传感器控制系统检测精度的影响,提出一种将扰动电压观测器与线性补偿策略相结合的新型死区补偿方法,对逆变器死区效应带来的不良影响进行抵消。搭建基于脉振高频电压注入算法的 PMSM 无传感器控制系统模型,分别加入新型死区补偿方法与普通线性死区补偿方法,并进行 Simulink 仿真分析。实验结果表明:加入新型死区补偿后,系统电流钳位现象得到缓解,转速估计误差减小 20% 左右,转子位置估计更为准确,证实了新型死区补偿方法的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 死区补偿; 无传感器控制; 扰动电压观测器; 线性补偿

中图分类号: TP 273; TM 351.012 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)01-0021-08

Dead-Time Compensation Method Based on Disturbance Voltage Observer and Linear Compensation Strategy

HU Qiguo, MA Jianwang, ZHANG Xiang, BAI Xiong

(School of Mechanotronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to overcome the influences of the dead zone time of inverter and the conduction voltage drop of switch on the detection accuracy of the sensorless control system of permanent magnet synchronous motor (PMSM), a new dead zone compensation method combining disturbance voltage observer with linear compensation strategy was proposed to counteract the negative effects of inverter dead zone. The PMSM sensorless control system model based on high frequency pulse voltage injection algorithm was built, the new dead zone compensation method and the common linear dead zone compensation method were added respectively, and Simulink simulation was carried out. The experimental results showed that after adding the new dead zone compensation, the system current clamping phenomenon was alleviated, the speed estimation error was reduced by about 20%, and the rotor position estimation was more accurate, which confirmed the effectiveness of the new dead zone compensation method.

Keywords: permanent magnet synchronous motors; sensorless control; dead zone compensation; disturbance voltage observer; linear compensation

永磁同步电机(PMSM)因体积小、效率高、转矩大等优点,被普遍应用于混合型动力汽车、工业机器

收稿日期: 2022-08-29

通信作者: 胡启国(1966-),男,教授,博士,主要从事机械可靠性分析及优化、机械系统动力学研究。E-mail: swpi-hqg@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375519);重庆市基础科学与前沿技术研究专项资助项目(cstc2015cyjBX0133)

人及航空航天等领域. 传感器检测法是进行 PMSM 转速与转子位置信号检测的常用方法,但电机振动、高温等工况影响传感器的可靠性与准确度,且由于制造工艺缺陷,传感器容易出现诸多故障. 因此,无传感器技术成为了当前研究的热点^[1-3].

PMSM 逆变器所特有的死区效应会影响无传感器技术对电机转速及转子位置信号的检测. 为此,对逆变器进行死区补偿以削弱其不良影响变得尤为重要. 近年来,国内外学者提出了若干补偿方法. 刘兵等^[4]利用续流的二极管,提出关断与之反并联的晶体管并进行死区补偿,这种方法无需手动设置死区时间,但需要额外增加检测电流极性的硬件电路. 于家斌等^[5]通过对死区时间和开关导通压降造成的输出电压误差进行分析,提出一种改进电压前馈死区补偿方法,这种方法能够很好地利用电流幅值改善电流钳位现象,且能够对输出电压误差进行补偿,但也需要额外附加检测电路. 乔木等^[6]提出一种基于功率因数的单相桥臂脉宽调制整流器的死区补偿方法,该方法通过对矢量控制系统的反馈信号进行采集,从而计算功率因数,再进行加权计算得到有效的加权平均值作为输出电压误差的补偿值.

以上补偿方法都需要额外增加硬件电路检测,增加了系统复杂性与成本. 因此,本文提出一种新型的死区补偿方法,从而改善整个控制系统性能.

1 逆变器死区效应

考虑逆变器开关器件开关间隙造成导通延时、发生短路现象,在上、下开关管之间添加一段延迟时间,从而形成死区时间,而死区时间所带来的影响即为死区效应^[7-9].

A 相桥臂电路,如图 1 所示. 图 1 中: S_1, S_4 为开关管; D_1, D_4 为续流二极管; I_A 为 A 相电流; U_{dc} 为直流母线电压. 以图 1 为例,在延迟时间内,开关管 S_1, S_4 同时关闭,且续流二极管 D_1, D_4 其中之一接通,若

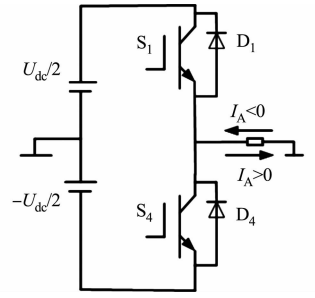
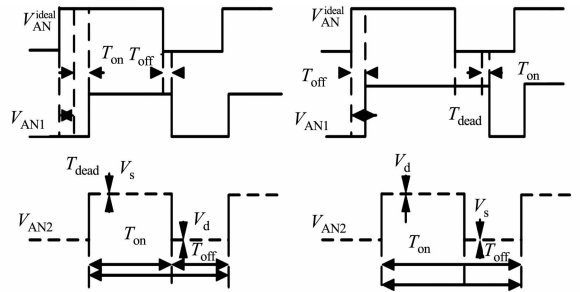


图 1 A 相桥臂电路

Fig. 1 A phase bridge arm circuit

电流方向为正,那么, $I_A > 0$ 时, D_4 接通; $I_A < 0$ 时, D_1 接通,此时, A 相电压值为 $U_{dc}/2$ 或 $-U_{dc}/2$.

由 A 相电流方向可以得到实际电压输出值,逆变器死区效应输出电压波形,如图 2 所示. 图 2 中: V_{AN}^{ideal} 为理想电压波形; V_{AN1} 为实际电压波形; V_{AN2} 为考虑通断延时状态和电压压降状态的电压波形; V_s 为开关管饱和压降; V_d 为续流二极管导通压降; T_{dead} 为死区误差; T_{on} 为启动误差; T_{off} 为关闭误差. 则有 A 相逆变器实际导通误差 $T_{A,e}$ 为



(a) $I_A > 0$

(b) $I_A < 0$

图 2 逆变器死区效应输出电压波形

Fig. 2 Output voltage waveform of inverter dead zone effect

$$\left. \begin{aligned} T_{A,e} &= T_{dead} + T_{on} - T_{off}, & I_A > 0, \\ T_{A,e} &= -(T_{dead} + T_{on} - T_{off}), & I_A < 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由式(1)可得

$$T_{A,e} = (T_{dead} + T_{on} - T_{off}) \operatorname{sgn}(I_A). \quad (2)$$

式(2)中: sgn 为开关函数.

A 相单周期内,实际状态与理想状态下电压输出平均误差 $V_{A,e}$ 为

$$V_{A,e} = \frac{T_{A,e}}{T_s} U_{dc} = V_e \operatorname{sgn}(I_A). \quad (3)$$

式(3)中: T_s 为采样周期; V_e 为死区效应状态的电压输出值,当开关管饱和状态和续流二极管导通状态压降时, V_e 表示为

$$V_e = \frac{T_{dead} + T_{on} - T_{off}}{T_s} (U_{dc} - V_s + V_d) + \frac{V_s + V_d}{2}. \quad (4)$$

同理,可得 B, C 两相的电压输出平均误差 $V_{B,e}, V_{C,e}$ 分别为

$$V_{B,e} = \frac{T_{B,e}}{T_s} U_{dc} = V_e \operatorname{sgn}(I_B), \quad V_{C,e} = \frac{T_{C,e}}{T_s} U_{dc} = V_e \operatorname{sgn}(I_C). \quad (5)$$

式(5)中: $T_{B,e}, T_{C,e}$ 分别为 B 相、C 相逆变器的实际导通误差; I_B, I_C 分别为 B 相、C 相电流.

2 新型死区补偿方案设计

通过建立扰动电压观测器, 实时观测输出电压的误差值, 并采用改进线性补偿增益的方法对电流钳位造成的影响进行补偿, 从而抑制死区效应带来的影响, 此方法不需要对电流极性进行检测^[10-12]. 首先, 搭建 PMSM 在两相旋转坐标系, 即 d - q 轴坐标系下的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} u_d &= R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_e L_q I_q, \\ u_q &= R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_e L_d I_d + \omega_e \psi_f, \\ J \frac{d\omega_e}{dt} &= T_e - T_L - \mathbf{B}\omega_e, \\ T_e &= \frac{3}{2} p_n \psi_f I_q. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中: u_d, u_q 分别为 d, q 轴定子电压分量; I_d, I_q 分别为 d, q 轴电流分量; R_s 为定子绕组电阻; ω_e 为转子角速度; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感分量; ψ_f 为永磁体磁链; J 为转动惯量; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; $\mathbf{B} = [0 \quad 1/J \quad 0]^T$; p_n 为极对数.

由式(1)可知, 加入死区效应造成的电压误差后, 电压方程为

$$\left. \begin{aligned} U_d + V_{e,d} &= R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_e L_q I_q, \\ U_q + V_{e,q} &= R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_e L_d I_d + \omega_e \psi_f. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)中: U_d 和 U_q 分别为 d, q 轴的目标电压; $V_{e,d}$ 和 $V_{e,q}$ 分别为 d, q 轴的电压误差.

将式(7)改为电流状态方程, 即

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_d}{dt} &= \frac{U_d}{L_d} - \frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{L_q \omega_e}{L_d} I_q + \frac{V_{e,d}}{L_d}, \\ \frac{dI_q}{dt} &= \frac{U_q}{L_q} - \frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{L_d \omega_e}{L_q} I_d - \frac{\omega_e \psi_f}{L_q} + \frac{V_{e,q}}{L_q}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由式(8)可知, 在补偿时就不必考虑电流极性的问题, 只需要将扰动电压看作是输出电压的误差, 并作为状态变量, 利用设计的扰动观测器进行估计.

假设 Z_d, Z_q 分别为 I_d 和 I_q 的观测值, 为了更好地实现对观测值的稳定跟踪, 以 d 轴电流状态方程为例设计扰动观测器, 由式(8)可得

$$e_d = \hat{V}_{e,d} - V_{e,d}, \quad (9)$$

$$\dot{\hat{V}}_{e,d} = -\frac{k_1}{L_d} (\hat{V}_{e,d} - V_{e,d}) = -\frac{k_1}{L_d} \hat{V}_{e,d} + k_1 \left(\frac{dI_d}{dt} + \frac{R_s I_d}{L_d} - \frac{U_d}{L_d} - \omega_e I_q \right). \quad (10)$$

式(9), (10)中: $\hat{V}_{e,d}; \hat{V}_{e,q}$ 分别为 d, q 轴电压误差的估计值; e_d 为 d 轴电压误差的估计误差; k_1 为观测器增益.

令 $Z_d = \hat{V}_{e,d} - k_1 I_d$, 则

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_d &= -\frac{k_1}{L_d} (Z_d + k_1 I_d) + k_1 \left(\frac{R_s I_d}{L_d} - \frac{U_d}{L_d} - \omega_e I_q \right), \\ \dot{\hat{V}}_{e,d} &= \dot{Z}_d + k_1 \frac{dI_d}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

同理可得, q 轴上扰动观测器设计为

$$e_q = \hat{V}_{e,q} - V_{e,q}, \quad (12)$$

$$\dot{\hat{V}}_{e,q} = -\frac{k_2}{L_q} (\hat{V}_{e,q} - V_{e,q}) = -\frac{k_2}{L_q} \hat{V}_{e,q} + k_2 \left(\frac{dI_q}{dt} + \frac{R_s I_q}{L_q} - \frac{U_q}{L_q} + \omega_e I_d + \omega_e \psi_f \right). \quad (13)$$

式(12), (13)中: e_q 为 q 轴电压误差的估计误差; k_2 为观测器增益.

令 $Z_q = \hat{V}_{e,q} - k_2 I_q$, 则

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_q &= -\frac{k_2}{L_q}(Z_q + k_2 I_q) + k_2 \left(\frac{R_s I_q}{L_q} - \frac{U_q}{L_q} + \omega_e I_d + \omega_e \psi_f \right), \\ \dot{V}_{e,q} &= \dot{Z}_q + k_2 \frac{dI_q}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

然后,采用扰动观测器进行幅度补偿,并采用线性补偿调节增益的方法对电流钳位所造成的影响作进一步补偿.改进的线性补偿原理,如图3所示.图3中: K 为线性补偿增益; I 为相位电流; ΔI 为电流误差.此时,线性补偿增益 K 为

$$K = \tan\left(\frac{\pi}{4\Delta I} \cdot I\right). \quad (15)$$

通过对三相电流是否过零点进行采集判断,从而对补偿值增长斜率进行调节,改善电流的增加速度,在电流没有过零点前,正向增益可以抑制电流的钳位区间^[13].

3 脉振高频电压注入算法的 PMSM 无传感器控制

将外部高频电压激励引入 d - q 坐标系时,高频激励会产生一个相应的高频电流响应,并采用低通滤波器对该电流响应进行提取和解调,再通过一种位置观测器对该信号进行实时观测,从而获取 PMSM 的转速和转子位置^[14-16].由式(6)可知,注入外部激励后的 PMSM 电压方程可以改写为

$$\begin{bmatrix} u_{d,h} \\ u_{q,h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J\omega_h L_{d,h} & 0 \\ 0 & J\omega_h L_{q,h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{d,h} \\ I_{q,h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{d,h} & 0 \\ 0 & L_{q,h} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{d,h} \\ I_{q,h} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

式(16)中: $u_{d,h}, u_{q,h}$ 分别为 d, q 轴的高频电压分量; $I_{d,h}, I_{q,h}$ 分别为 d, q 轴的高频电流分量; $L_{d,h}, L_{q,h}$ 分别为 d, q 轴的高频电感分量; ω_h 为高频激励的频率.

但由于实际坐标系 d - q 位置的不确定性,其只能将外部激励注入到估计坐标系 \hat{d} - \hat{q} 中,两种坐标系 $\alpha\beta$ 的关系,如图4所示.图4中: θ_e 为转子位置角实际值; $\hat{\theta}_e$ 为转子位置角估计值; $\Delta\theta_e$ 为转子位置角估计误差, $\Delta\theta_e = \theta_e - \hat{\theta}_e$.

由图4可知,实际坐标系中高频电压和电流可按照式(17)转换到估计坐标系中,即

$$\left. \begin{aligned} R(\Delta\theta_e) \begin{bmatrix} \hat{u}_{d,h} \\ \hat{u}_{q,h} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_{d,h} \\ u_{q,h} \end{bmatrix}, \\ R(\Delta\theta_e) \begin{bmatrix} \hat{I}_{d,h} \\ \hat{I}_{q,h} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_{d,h} \\ I_{q,h} \end{bmatrix}, \\ R(\Delta\theta_e) &= \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_e & \sin \Delta\theta_e \\ -\sin \Delta\theta_e & \cos \Delta\theta_e \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式(17)中: $\hat{u}_{d,h}, \hat{u}_{q,h}$ 分别为 \hat{d}, \hat{q} 轴的高频电压分量; $\hat{I}_{d,h}, \hat{I}_{q,h}$ 分别为 \hat{d}, \hat{q} 轴的高频电流分量.

向 \hat{d} - \hat{q} 轴坐标系中的 \hat{d} 轴注入高频电压激励,即

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{d,h} \\ \hat{u}_{q,h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_h \cos \omega_h t \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

式(18)中: U_h 为高频激励的幅值.

由式(16),(17),得出 \hat{d} - \hat{q} 坐标下电流响应为

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{d,h} \\ \hat{I}_{q,h} \end{bmatrix} = \frac{U_h \cos \omega_h t}{\omega_h (L^2 - \Delta L^2)} \begin{bmatrix} L - \Delta L \cos 2\Delta\theta \\ -\Delta L \sin 2\Delta\theta \end{bmatrix}. \quad (19)$$

将式(19)中 q 轴上的电流估计值 $\hat{I}_{q,h}$ 改写为

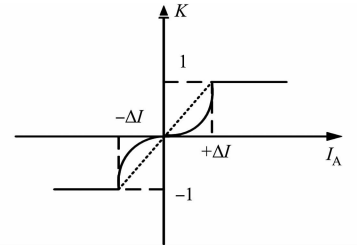


图3 改进线性补偿原理图

Fig. 3 Schematic diagram of improved linear compensation

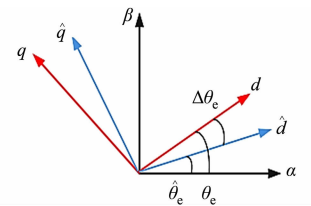


图4 估计坐标系与实际坐标系对应关系

Fig. 4 Correspondence relationship of estimated coordinate system and actual coordinate system

<http://www.hdxh.hqu.edu.cn>

4.2 仿真结果分析

设定 PMSM 负载转矩为 $150\text{ N}\cdot\text{m}$, 初始转速为 $100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$. 仿真结果, 如图 7~11 所示.

在 PMSM 矢量控制系统中分别加入普通线性死区补偿方法和新型死区补偿方法的三相电流波形对比图, 如图 7 所示. 图 7 中: t 为时间; I_{ABC} 为三相电流值. 由图 7 可知: 在电机转速相同时, 加入普通线性死区补偿方法时, PMSM 三相电流钳位现象明显更加严重, 此时, 电流波形正弦度较差; 在加入新型死区补偿方法后, 钳位现象得到了较大的改善. 逆变器死区效应带来的影响比较严重, 采用所提新型死区补偿方案进行补偿后, 控制系统的稳定性得到了有效的提高.

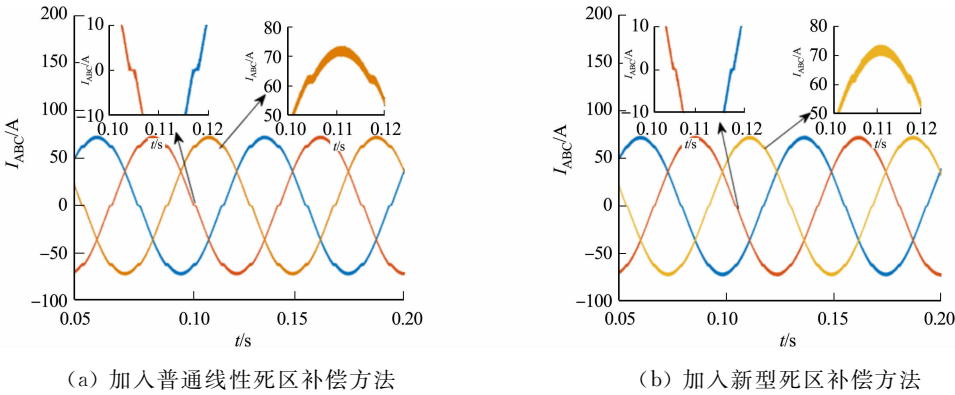


图 7 PMSM 三相电流波形对比图

分别加入两种死区补偿方法后, PMSM 转速实际值与估计值对比图, 如图 8 所示. 图 8 中: n 为转速. 由图 8 可知: 基于脉振高频电压注入算法的转速估计方法能够很好地实现低速时转速的估计, 但加入普通线性死区补偿方法时, 转速的估计值与实际值偏差较大, 而加入新型死区补偿方法后, 转速估计值与实际值曲线重合度较高, 进一步验证了新型死区补偿方法的补偿效果较好.

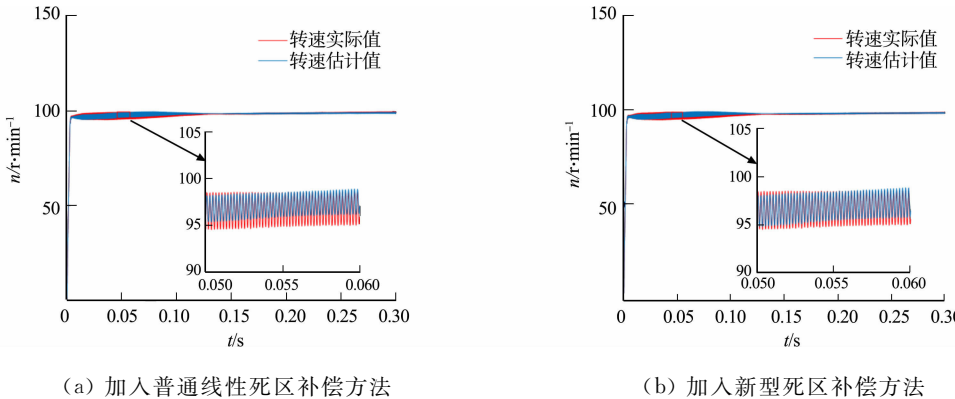


图 8 PMSM 转速实际值与估计值对比图

分别加入两种死区补偿方法后, PMSM 转速估计误差对比图, 如图 9 所示. 图 9 中: Δn_e 为转速估计误差. 由图 9 可知: 加入普通线性死区补偿方法时, 转速的估计误差曲线在 0.30 s 时接近于零, 而在加入新型死区补偿方法后, 误差曲线在 0.15 s 时斜率明显变小.

分别加入两种死区补偿方法后, PMSM 转子位置角实际值与估计值对比图, 如图 10 所示. 图 10 中: θ 为转子位置角. 由图 10 可知: 加入普通线性死区补偿方法时, 转子位置角估计值与实际值偏差较大, 而加入新型死区补偿方法后, 转子位置角跟踪效果更好, 曲线重合度更高. 同时也可以看出, 采用脉振高频电压注入算法能够准确地估计转子位置角, 且估计值近似等于实际值.

分别加入两种死区补偿方法后, PMSM 转子位置角估计误差对比图, 如图 11 所示. 图 11 中: $\Delta\theta_e$ 为转子位置角估计误差. 由图 11 可知: 加入普通线性死区补偿方法时, 估计误差接近于 0.04 , 而在加入新型死区补偿方法后, 转速估计误差曲线明显波动较小, 估计误差接近于 0.03 , 与加入普通线性死区补偿方法相比, 误差减小 20% 左右.

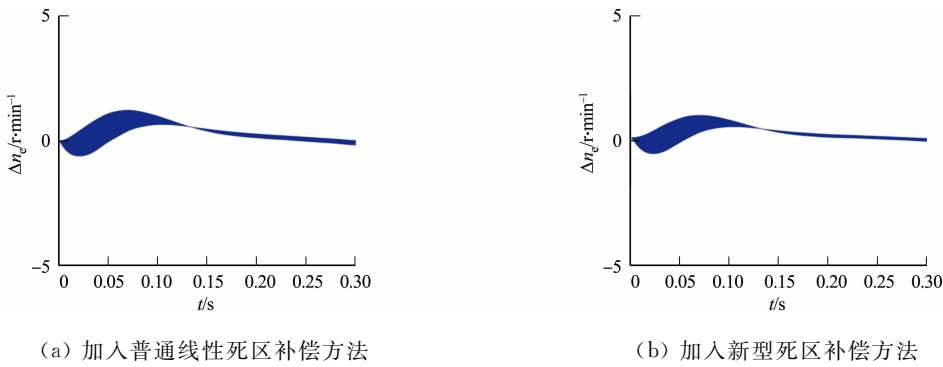


图 9 PMSM 转速估计误差对比图

Fig. 9 Comparison diagrams of speed estimation error of PMSM

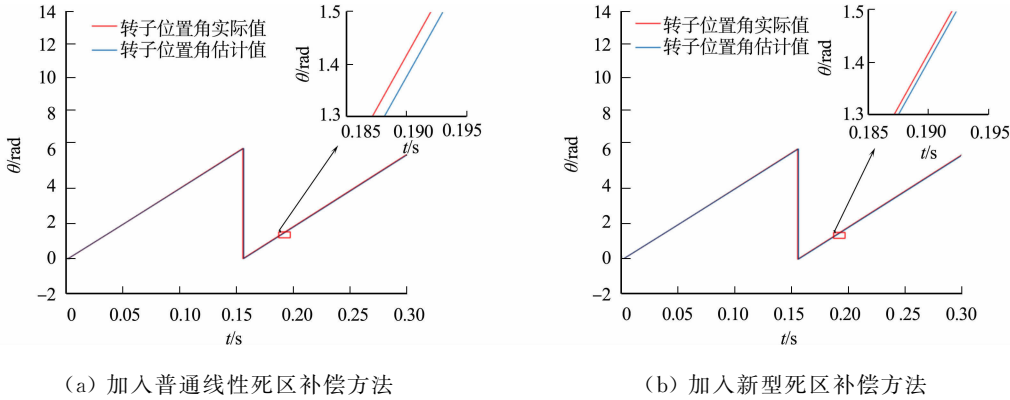


图 10 PMSM 转子位置角实际值与估计值对比图

Fig. 10 Comparison diagrams of actual and estimated rotor position angle value of PMSM

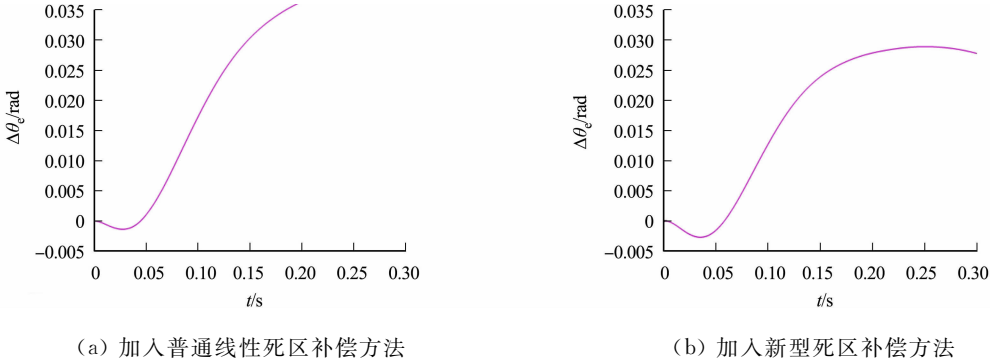


图 11 PMSM 转子位置角估计误差对比图

Fig. 11 Comparison diagrams of rotor position angle estimation error of PMSM

综上所述,死区效应在低速时对车用永磁同步轮毂电机的整体性能影响较大,而通过实验对比结果可知,加入新型死区补偿方法后,能有效减小估计误差。

5 结束语

针对 PMSM 无传感器控制系统中逆变器开关器件的死区效应,提出一种扰动电压观测器与线性补偿策略相组合的死区补偿方法.利用 Simulink 搭建控制系统模型,对新型死区补偿方法与普通线性死区补偿方法进行仿真对比.结果表明:加入新型死区补偿方法后,PMSM 无传感器控制系统的电流钳位现象得到明显改善,系统稳定性得到了提升;电机转速及转子位置检测误差减小 20%左右,精度得到进一步提高.并通过仿真结果给予了良好的证实。

参考文献:

[1] 赵其进,廖自力,张运银,等. 轮毂电机全速度范围无位置传感器控制研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 22-33. DOI:

- 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.05.003.
- [2] RACA D,GARCIA P,REIGOSA D D,*et al.* Carrier-signal selection for sensorless control of PM synchronous machines at zero and very low speeds[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(1):167-178. DOI:10.1109/TIA.2009.2036551.
- [3] DING Hongchang,FU Huibin,FAN Yuhua,*et al.* Initial rotor position estimation of SPMSM based on voltage vector injection method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2019,105:4929-4939. DOI:10.1007/s00170-019-04201-3.
- [4] 刘兵,周波. 脉振高频电压注入 SPMSM 无位置传感器控制的估计误差分析与抑制方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(14):4232-4241,4329. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.171683.
- [5] 于家斌,刘翠玲,秦晓飞,等. 一种改进型永磁同步电主轴死区补偿算法[J]. 计算机仿真,2013,30(10):271-274.
- [6] 乔木,刘品宽. 永磁电机空间矢量脉宽调制技术及其死区时间补偿的仿真[J]. 机电一体化,2018,24(6):51-56. DOI:10.16413/j.cnki.issn.1007-080x.2018.06.009.
- [7] 张志刚,李腾,杜劭琨,等. 基于死区补偿的 PMSM 转矩脉动抑制研究[J]. 控制工程,2021,28(6):1108-1114. DOI:10.14107/j.cnki.kzgc.2019061.
- [8] 朱利东,王鑫,朱焜秋. 基于 NNBP-EKF 的内置式永磁同步电机死区补偿方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(15):5011-5020. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.191879.
- [9] CHENG Jingling,CHEN Dongdong,CHEN Guozhu. Modeling and compensation for dead-time effect in high power IGBT/IGCT converters with SHE-PWM modulation[J]. Energies,2020,13(17):4348. DOI:10.3390/en13174348.
- [10] CHEN Mou,CHEN Shaodong,WU Qingxian. Sliding mode disturbance observer-based adaptive control for uncertain MIMO nonlinear systems with dead-zone[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing,2017,31(7):1003-1018. DOI:10.1002/acs.2744.
- [11] 王大方,李琪,张鹏,等. 带有相电压补偿基于 EKF 的无传感器感应电机转速估计[J]. 电机与控制学报,2019,23(1):39-48. DOI:10.15938/j.emc.2019.01.005.
- [12] 姜燕,刘思美,罗德荣,等. 基于高频正交方波电压注入的永磁同步电机初始位置辨识[J]. 电工技术学报,2019,34(19):4006-4016. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181144.
- [13] WANG Jing,YAN Jianhu,YING Zhanfeng. Initial rotor position and inductance estimation of PMSMs utilizing zero-current-clamping effect[J]. Journal of Power Electronics,2022,22:50-60. DOI:10.1007/S43236-021-00340-7.
- [14] 李浩源,张兴,杨淑英,等. 基于高频信号注入的永磁同步电机无传感器控制技术综述[J]. 电工技术学报,2018,33(12):2651-2664. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180219.
- [15] 柴俊,江延宇,彭艳. 永磁同步电机脉振高频电压注入转子位置检测[J]. 控制工程,2020,27(1):143-147. DOI:10.14107/j.cnki.kzgc.170938.
- [16] WU Jingbo,WANG Yongwei,GUO Zhijun. Hybrid pulse high-frequency voltage injection control algorithm of sensorless IPMSM for vehicles[J]. Computational Intelligence and Neuroscience,2022,2022:4248643. DOI:10.1155/2022/4248643.
- [17] 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2016.
- [18] 王艳,刘旭东. 基于扰动补偿的永磁同步电机预测位置控制[J]. 控制工程,2022,29(5):828-836. DOI:10.14107/j.cnki.kzgc.20210487.
- [19] HA D H,KIM R. Nonlinear optimal position control with observer for position tracking of surfaced mounded permanent magnet synchronous motors[J]. Applied Sciences,2021,11(22):10992. DOI:10.3390/AP112210992.
- [20] 赵其进,廖自力,张新喜,等. 电传动车辆轮毂电机无位置传感器控制研究[J]. 火力与指挥控制,2019,44(8):43-47,52. DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2019.08.008.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴跃勤)