

# 永磁同步电机直接转矩和矢量控制 运行稳定性对比研究

李昊洋,邱 鑫,李思祥,冯春梅,杨继全

(南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室,江苏 南京 210023)

[摘要] 目前永磁同步电机的主流控制方式主要有直接转矩控制和矢量控制,而系统能否稳定运行是这些电机控制算法的基础. 分别基于两种控制算法的基本原理,从实际运行工作点出发,结合转矩角、磁链、电流角限幅和系统的单调性等理论,分析了永磁同步电机直接转矩控制和矢量控制的稳定运行区间,并运用仿真实验对理论分析进行了验证,对比分析了两种控制算法稳定运行规律的异同点.

[关键词] 永磁同步电机,直接转矩控制,矢量控制,稳定运行,单调性

[中图分类号] TM301.2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2018)01-0030-07

## Comparative Study on Operating Stability of Direct Torque Control and Vector Control Using in Permanent Magnet Synchronous Motor

Li Haoyang, Qiu Xin, Li Sixiang, Feng Chunmei, Yang Jiquan

(Jiangsu Key Laboratory 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** At present, the mainstream control methods of permanent magnet synchronous motor are direct torque control and field-oriented control. The stability is the basis of these motor control algorithms and it is important to implementation. In this paper, the stable operation range of permanent magnet synchronous motor direct torque control and permanent magnet synchronous motor field-oriented control is analyzed by combining the torque angle, flux linkage, power angle limiting and monotonicity of the system. A theoretical analysis is verified with the simulation, and the similarities and differences of stable operation of the two control algorithms are contrastively analyzed.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor, direct torque control, field-oriented control, stable operation, monotonicity

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)自 20 世纪 50 年代问世以来,凭借其优秀的效率和功率密度已成为主流电机. 其主流控制方法主要有两种:直接转矩控制(direct torque control, DTC)和矢量控制(field-oriented control, FOC)策略. DTC 策略通过对电磁转矩、磁链的直接控制来实现系统的稳定运行,凭借其鲁棒性强和动态响应好等方面的优势现已成为 PMSM 控制系统中的重要控制策略之一<sup>[1-3]</sup>,而 FOC 策略通过直接对交直流电流进行控制,进而间接控制电机电磁转矩和磁场,凭借其控制特性直观和低速性能好等优势已成为 PMSM 主流控制策略<sup>[4-5]</sup>.

虽然两种控制策略基本原理不同,但殊途同归,均能实现 PMSM 的可靠运行,均已被广泛运用于 PMSM 控制系统. 当前大量文献针对两种控制策略进行优化和改进<sup>[6-9]</sup>,然而这些研究主要集中在动静态性能提高(如减小转矩脉动)、优化定子磁链观测器等方面<sup>[7-11]</sup>,或高可靠性等额外性能研究,如无位置传感器控制、容错控制等<sup>[12-13]</sup>. 但目前对电机控制算法的稳定运行区域的研究相对较少,尤其缺少结合两种控制策略对比分析的研究. 电机控制算法稳定运行区域的确定可有效保证系统的安全可靠运行,同时也可依此充分利用电机及控制器能力. 基于此,本文主要从电机参数、转矩角、功角、定子磁链以及控制系统单调性等几个方面对

收稿日期:2017-10-31.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51607094、51407095)、江苏省高校自然科学基金(15KJB470010)、江苏省自然科学基金(BK20151548).

通讯联系人:邱鑫,博士,讲师,研究方向:永磁电机及控制、三维打印装备. E-mail:qiuxin\_nh@163.com

PMSM 在两种控制策略下的稳定运行区间进行对比理论分析,并通过仿真对理论结果进行验证。

## 1 PMSM DTC 稳定运行区间

电机的电磁转矩来源于磁场的相互作用,PMSM 的电磁转矩  $T_e$  可以用转矩角为主变量的公式表示,

$$T_e = \frac{3P\psi_s}{2L_d L_q} [L_q \sin \delta (\psi_f - \psi_s \cos \delta) + \psi_s L_d \sin \delta \cos \delta]. \quad (1)$$

式中, $\delta$  为转矩角,即定转子磁链矢量之间的夹角, $P$  为极对数, $\psi_s$  与  $\psi_f$  分别为定转子磁链, $L_q$  与  $L_d$  为交直流电感. 根据上面的公式(1)绘制  $T_e$  随  $\delta$  和  $\psi_s$  变化波形图(以正转矩为例,假设凸极率  $L_q/L_d=2$ ).

由图 1 可见,在合理控制定子磁链幅值时,电磁转矩随转矩角增加而增加,因此,PMSM 的转矩调节可以等效为对它转矩角的调节,这也是 DTC 转矩调节的主要机理。

但图中的曲线并非完全线性变化,为保证电机的单调性运行,其工作点不能位于曲线最高点的右半段,即对应图中区域 B,其次曲线斜率须大于 0,所以工作点也不得位于 A,因此我们需要对定子磁链幅值和转矩角均要进行进一步限制。

由于逆变器驱动运行的 PMSM 存在电流和电压的极限约束条件,即存在电流和电压的极限方程为:

$$\begin{cases} I_d^2 + I_q^2 \leq I_{\max}^2 \Rightarrow \left( \frac{\psi_d - \psi_f}{L_d} \right)^2 + \left( \frac{\psi_q}{L_q} \right)^2 \leq I_{\max}^2, \\ \omega_e \psi_s \leq U_{\max} \Rightarrow \omega_e \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2} \leq U_{\max}. \end{cases} \quad (2)$$

式中, $I_{\max}$  为允许的最大定子电流, $U_{\max}$  为允许的最大定子电压,一般由逆变器直流母线电压  $U_{dc}$  决定,即  $U_{\max} = U_{dc}/\sqrt{3}$ ,根据此条件进一步限制转矩角和定子磁链幅值, $\omega_e$  为电角速度。

### 1.1 转矩、转矩角限制

上图中曲线未考虑 PMSM 的退磁特性,当  $\delta = \pi/2$  时, $\psi_d = 0$ ,即直轴磁场为 0,但并不是任意 PMSM 均能跨越这一点,还需结合电机本体情况具体分析,下文对  $\psi_f$  与  $I_{\max} L_d$  大小关系分类讨论。

如图 2 所示,分别以直交轴磁链  $\psi_d$ 、 $\psi_q$  为横纵坐标,电流、电压极限由圆形范围标出. 由于永磁材料存在不可逆退磁的现象,因此在普通永磁电机设计中通常要满足  $\psi_f > I_{\max} L_d$ . 图 2(a)中虽然 PMSM 中的永磁体工作点不能低于退磁拐点下,但若能通过特殊的电机设计,提供额外的弱磁磁通路径,则可工作在图 2(b)中  $\psi_f \leq I_{\max} L_d$  的情况。

不考虑电机饱和情况,其中图 2(a)中 A、B 点分别表示最大弱磁能力和最大增磁能力,C 点为电流限流圆与电压限压圆交点,即能达到的最大转矩角的对应点,C 点对应的最大转矩角为

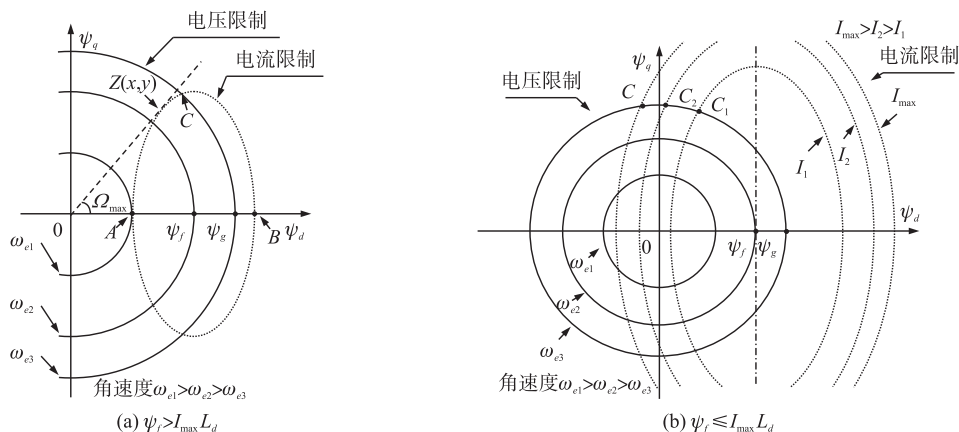


图 2 PMSM DTC 中电压电流限制

Fig. 2 Constraints of the voltage and current in PMSM DTC

$$\delta_{\max} = \arccos \frac{\psi_f L_q^2 - L_d \sqrt{\alpha}}{\psi_g (L_q^2 - L_d^2)}. \quad (3)$$

式中,  $\alpha = I_{\max}^2 L_q^4 + \psi_f L_q^2 + \psi_g^2 L_d^2 - \psi_g^2 L_q^2 - I_{\max}^2 L_d^2 L_q^2$ .

如图 2(b) 所示, 与情况  $\psi_f > I_{\max} L_d$  不同的是, 若给定磁链为  $\psi_g$ , 随着电流幅值的增加 ( $I_{\max} > I_2 > I_1$ ), 转矩角可大于  $90^\circ$ , 如对应  $\psi_g$  的磁链圆与对应  $I_{\max}$  的电流限制椭圆的交点  $C$ . 此时最大转矩角  $\delta_{\max}$  由交点  $C$  和单调性条件共同决定, 取两者中较小值, 即

$$\delta_{\max} = \min \left( \arccos \frac{\psi_f L_q^2 - L_d \sqrt{\alpha}}{\psi_g (L_q^2 - L_d^2)}, \arccos \frac{\frac{L_q \psi_f}{L_q - L_d} - \sqrt{\left( \frac{L_q \psi_f}{L_q - L_d} \right)^2 + 8 \psi_g^2}}{4} \right). \quad (4)$$

结合上述理论分析得到, 在 PMSM DTC 中, 必须对此时定子磁链幅值对最大转矩(角)进行限制, 以保证电机运行在电流限幅内的稳定运行区域.

## 1.2 定子磁链幅值限制

根据式(2), 忽略电阻压降, PMSM 给定定子磁链幅值由母线电压  $U_{dc}$  和电角速度  $\omega_e$  决定,

$$\psi_g \leq \frac{U_{\max}}{\omega_e} = U_{dc} / (\sqrt{3} \omega_e). \quad (5)$$

在满足式(5)条件时, PMSM DTC 工作在恒转矩区, 定子磁链幅值给定可为转子磁链幅值, 也可根据控制性能需要改变定子磁链给定, 通常  $\psi_g > \psi_f$ .

当 PMSM DTC 运行至恒功率区时, 若  $\psi_f > \psi_{\max} L_d$ , 则电流限幅限制了最小磁链给定

$$\psi_g \geq \psi_f - I_{\max} L_d. \quad (6)$$

若  $\psi_f \leq \psi_{\max} L_d$ , 则电机可完全弱磁, 理论上可无限升速. 然而, 随着转速升高, 电机摩擦等损耗转矩也随之上升, 必然需要一定的电磁转矩以保持转矩平衡, 也即需要一定幅值的定子磁链来产生这个电磁转矩. 另一方面, 电机转速也存在限制, 在本体设计时已限定电机最大转速(对应角速度  $\omega_{\max}$ ), 即

$$\psi_g \geq U_{dc} / (\sqrt{3} \omega_{\max}). \quad (7)$$

定子磁链幅值根据式(5)~(7)综合确定. 为了顺利过渡至弱磁控制, 通常需要保证一定电压裕量, 即适当加深弱磁深度.

上述分析表明, 在 PMSM DTC 中, 必须从转矩调节单调性以及实际电机及控制器电压电流限幅等方面综合考虑, 从转矩/转矩角和定子磁链幅值方面限制电机的运行区域, 以保证可靠运行.

## 2 PMSM FOC 稳定运行区间

PMSM 的矢量控制直接的控制量为交直流电流, 带入基本转矩公式得到

$$T_e = 1.5P [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \quad (8)$$

定义定子电流  $i_s$  与  $d$  轴夹角为电流角  $\theta$ , 于是有

$$\begin{cases} i_d = i_s \cos \theta, \\ i_q = i_s \sin \theta. \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)带入式(8), 得到

$$T_e = 1.5P [\psi_f i_q + 0.5(L_d - L_q) i_s^2 \sin(2\theta)]. \quad (10)$$

由上式可得出  $T_e - \theta$  关系曲线图 3 所示, 电磁转矩(曲线 III)由两部分合成: 一部分是定子  $q$  轴电流与转子永磁磁链产生的永磁转矩(曲线 I), 另一部分是由转子凸极效应引起的磁阻转矩(曲线 II) [4].

从图 3 可见, 电流角与输出转矩呈非线性关系, 最大转矩点对应的电流角极值  $\theta_{\max}$  在  $[90^\circ, 135^\circ]$  区间内, 具体数值与永磁转矩幅值与磁阻转矩幅值之比有关, 是永磁磁链、交直流电感差值、定子电流幅值的函数.

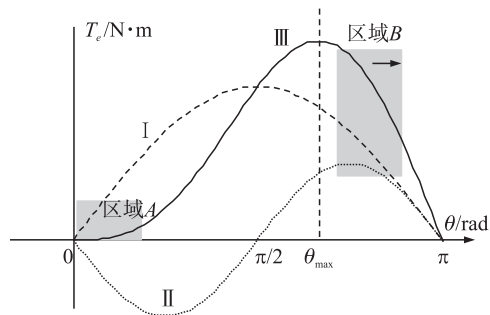


图 3 PMSM FOC 电磁转矩与转矩角关系图

Fig. 3  $T_e - \theta$  diagram of PMSM FOC

从图3可以看出为稳定PMSM运行,工作点的选取应选在线性工作区域,区域A可能出现因系统参数不能保证单调运行的情况,需在此限定参数以确定转矩随电流角的单调增加.而区域B工作点同样无法保证电机的单调稳定运行,需计算出电流角 $\theta_{\max}$ .

结合式(10),转矩对电流角求导可以得出

$$\theta_{\max} = \arccos \frac{\sqrt{8(L_d - L_q)^2 i_s^2 + P^2 \psi_f^2} - P\psi_f}{4(L_d - L_q)i_s}. \quad (11)$$

在区域A结合线性变化情况对系统的参数进行限制,结合式(10)得到,确定转矩随电流角单调增加时的 $i_s$ 范围

$$i_s \leq P\psi_f / (L_q - L_d). \quad (12)$$

因此,在FOC策略下的PMSM电机,同样需对电流角和电流幅值等参数进行限制才能保证系统的稳定可靠运行.

### 3 PMSM DTC 和 FOC 控制结构

为实际分析不同情况下的稳定运行区间,构建PMSM的SVM-DTC模型以及FOC模型并作仿真对比分析.

#### 3.1 PMSM SVM-DTC 控制框图

图4所示为传统PMSM SVM-DTC结构框图,结合上文可知,在定子磁链幅值一定的情况下,电磁转矩主要由转矩角来决定.因此可利用PI调节器将转矩的误差反映到转矩角的变化上,通过参考磁链计算电压空间矢量的给定值,实现对转矩和磁链的有效控制.

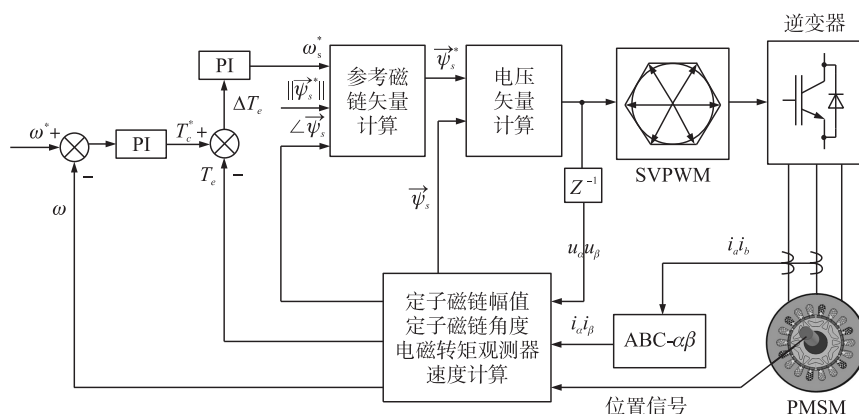


图4 传统PMSM SVM-DTC 结构框图

Fig. 4 Traditional PMSM SVM-DTC block diagram

#### 3.2 PMSM FOC 控制框图

图5为PMSM FOC控制框图,在FOC控制中,系统直接控制量为交直流电流,结合上文原理分析可知,系统的稳定运行需通过交直流电流间接限制电流角和电流幅值.

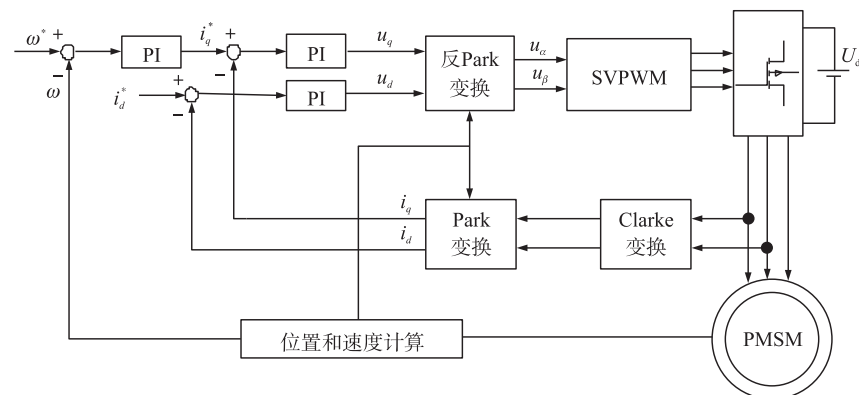


图5 PMSM 控制结构框图

Fig. 5 Structure diagram of PMSM control

4 仿真研究

为验证上述理论分析的正确性,利用 Matlab/Simulink 上述控制结构,并进行仿真研究,被控电机参数如表 1 所示.

首先进行 PMSM DTC 仿真分析,运行条件是空载启动至转速 1 000 rad/min,并于 0.05 s 突加负载 15 N·m,通过设置速度 PI 调节器的限幅和不同负载,调整转矩角的范围,进而找寻失控范围,得到图 6 为直接转矩控制失控与稳定状态仿真波形.

在 PMSM FOC 系统中,仿真运行条件是空载启动至转速 750 rad/min,并于 0.05 s 突加负载 15 N·m. 系统直接控制的是交直流电流,设定限制输出电流幅值,变化负载以推动电流角,越过最大转矩点,使得系统无法正常稳定在工作区域,进而影响转速、转矩的稳定,得到图 7 所示失控和稳定情况波形.

表 1 永磁同步电动机参数  
Table 1 Permanent magnet synchronous motor parameters

电机参数	数值
额定功率/kW	1
额定转速/(rad·min <sup>-1</sup> )	1 000
定子电阻/Ω	1.3
<i>d</i> 轴电感/mH	0.7
<i>q</i> 轴电感/mH	1.4
电机极对数	4
转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.000 8

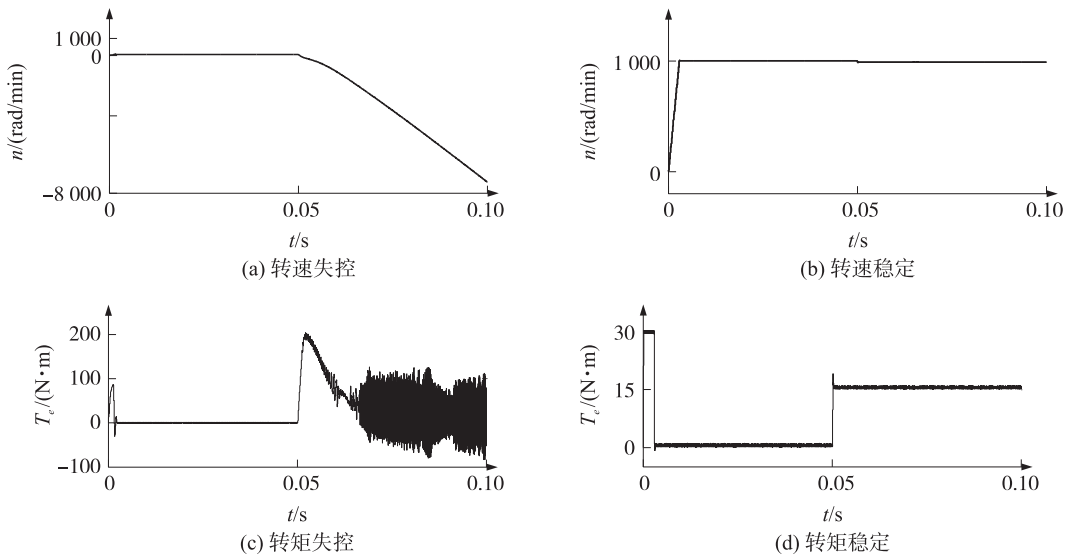


图 6 PMSM SVM-DTC 下失控前后波形

Fig. 6 PMSM SVM-DTC waveforms before and after losing control

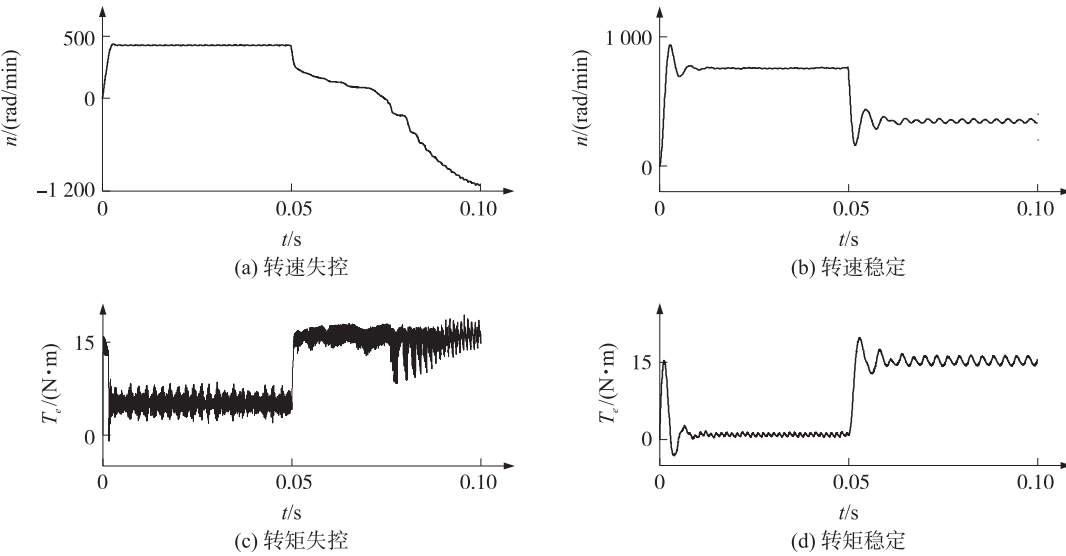


图 7 PMSM FOC 失控前后波形

Fig. 7 PMSM FOC waveforms before and after losing control

在仿真过程中,通过改变工作点的位置得到稳态和失控状态的波形.由上述结果分析,从失控状态输出转矩变化规律上看,FOC 策略在失控时输出转矩相比 DTC 策略较为缓和,该特点与控制方式直接相关,FOC 限制了电流幅值和角度则限制转矩输出,而 DTC 的输出转矩易完全失控.

从电流限幅角度分析,FOC 策略是直接控制交直流电流,进而控制转子的电流,在闭环下对电流的控制性更强,更易于实现以电流极限圆为上限的极限控制,而 DTC 策略则是通过观测电磁转矩及磁链并进行直接控制,对转矩的控制更强,但电流则为间接控制量,因此在极限边缘,易出现过流的现象.

从单调性角度分析,虽然 FOC 同 DTC 策略具有类似的单调性,但 FOC 可限制最大电流,达到间接限制功角的功能,DTC 策略则较为直接,可稍保守限制转矩角,以避免失控.

## 5 结语

在 PMSM DTC 和 FOC 两种控制方式下都存在系统稳定工作区和失控区,为使 PMSM 稳定运行,避免失控,需要从多方面对系统进行限制,并结合实际情况调整相关控制变量.在 DTC 策略下,需观测转矩角的大小并结合磁链进行控制,在 FOC 策略下,则需从电流角度间接限制电流角.两种控制策略各有特点,后续研究中将研究两者的结合,达到取长补短.

### [参考文献] (References)

- [1] 刘军,俞金寿. 永磁同步电机控制策略[J]. 上海电机学院学报,2007,10(3):180-185.  
LIU J, YU J S. Control schemes of the permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Shanghai dianji university, 2007, 10(3):180-185. (in Chinese)
- [2] 高晓宇,韩志平,田德文,等. 基于永磁同步电机的发动机高低压联合起动策略研究[J]. 车辆与动力技术,2017,37(1):29-32.  
GAO X Y, HAN Z P, TIAN D W, et al. Research on combination start-up control strategy of diesel based on the PMSM system[J]. Vehicle and power technology, 2017, 37(1):29-32. (in Chinese)
- [3] 周泉. 电动汽车驱动电机的演变与控制技术基础[J]. 汽车电器,2014,54(12):78-81.  
ZHOU Q. Development of EV driving motor and its control technology base[J]. Auto electric parts, 2014, 54(12):78-81. (in Chinese)
- [4] 田硕,阳林,叶磊,等. 电动汽车动力系统矢量控制策略仿真研究[J]. 机电工程技术,2017,46(8):164-168.  
TIAN S, YANG L, YE L, et al. Research on vector control strategy simulation of electric car power system[J]. Electric power engineering technology, 2017, 46(8):164-168. (in Chinese)
- [5] 张少华. 永磁同步电机矢量控制策略研究与控制器实现[D]. 长沙:中南大学,2008.  
ZHANG X H. Research on vector control strategy and controller implementation of permanent magnet synchronous motor[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- [6] ZHONG L, RAHMAN M F, HU W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE transactions on power electronics, 1997, 12(3):528-535.
- [7] RAHMAN M F, ZHONG L, HAQUE M E, et al. A direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive without a speed sensor[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2009, 16(2):137-147.
- [8] FOO G H B, RAHMAN M F. Direct torque control of an IPM-synchronous motor drive at very low speed using a sliding-mode stator flux observer[J]. IEEE transactions on power electronics, 2010, 25(4):933-943.
- [9] ZHANG Y C, ZHU J G, XU W, et al. A simple method to reduce torque ripple in direct torque-controlled permanent-magnet synchronous motor by using vectors with variable amplitude and angle[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2011, 58(7):2 848-2 859
- [10] TANG L, ZHONG L, RAHMAN M F, et al. A novel direct torque control for interior permanent-magnet synchronous machine drive with low ripple in torque and flux-a speed-sensorless approach[J]. IEEE transactions on industry applications, 2002, 39(6):1 748-1 756.
- [11] 邱鑫. 电动汽车用永磁同步电机驱动系统若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.  
QU X. Research on key techniques of permanent magnet synchronous motor drive system using in electric vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

- 
- [12] 刘云,贾洪平,张鹏,等. 基于 SVPWM 的无刷直流电机矢量控制系统研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1 177-1 181.  
LIU Y, JIA H P, ZHANG P, et al. Research of vector control system of BLDCM based on SVPWM[J]. Journal of mechanical and electrical engineering, 2014, 31(9): 1 177-1 181. (in Chinese)
- [13] 吴茂刚. 矢量控制永磁同步电动机交流伺服系统的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.  
WU M G. Research on AC servo system of vector-controlled permanent magnet synchronous motor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]