

开关磁阻电机位置控制系统的变磁链 SVPWM-DTC 算法

王紫旂,赵世伟

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘 要:针对传统直接转矩控制(DTC)在开关磁阻电机(SRM)位置控制系统中存在的开关频率不定、转矩脉动大、定子铜耗高等问题,提出一种变磁链空间矢量调制-直接转矩控制(SVPWM-DTC)算法。在传统DTC的基础上,对SVPWM-DTC算法中电压矢量的选择及作用时间进行推导,使磁链能被定量调节。结合SRM的基本工作原理,详细分析磁链给定值与定子电流的关系,提出变磁链控制策略。充分考虑磁链变化角及磁链给定值之间的相互影响,结合电机磁链数据,给出磁链给定值选取原则,在减小转矩脉动的同时,保证电机铜耗最小化。以三相6/4极SRM为仿真控制对象,将DTC、SVPWM-DTC与变磁链SVPWM-DTC进行仿真对比。结果表明:变磁链SVPWM-DTC算法能够有效提高位置控制系统的动、静态特性及效率。

关键词:开关磁阻电机;直接转矩控制;变磁链;铜耗;转矩脉动

中图分类号:TM352 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0138-05

Variable Flux SVPWM-DTC Algorithm in Switched Reluctance Motor Position Control System

WANG Ziyi, ZHAO Shiwei

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To settle the problems of unfixed switching frequency, large torque ripple and high stator copper consumption in switched reluctance motor(SRM) position control system of traditional direct torque control(DTC), a scheme of variable flux space vector modulation direct torque control(SVPWM-DTC) is put forward. Based on the traditional DTC, the selection of voltage vectors and their duration in SVPWM-DTC algorithm is derived to achieve the quantitative adjustment of flux linkage. By combination of the basic working principle of SRM, the relationship between the given value of the flux linkage and the steady-state stators current is analyzed, and a variable flux linkage control strategy is proposed. Sufficient consideration to the interaction between the flux linkage angle and value is given, and by integration with the flux linkage data of SRM, the selection principle of the steady-state flux linkage value is provided to minimize the motor copper consumption while reducing the torque ripple. With a three-phase 6/4 pole SRM as the control object, DTC, SVPWM-DTC and variable flux SVPWM-DTC are compared and simulated. The results show that the variable flux SVPWM-DTC algorithm can improve the dynamic, static performance and the efficiency of the position system.

Keywords: switched reluctance motor; direct torque control; variable flux linkage; copper loss; torque ripple

0 引言

开关磁阻电机(switched reluctance motor,SRM)具有结构简单、制造成本低、效率高等一系列优点,但由于其固有的双凸极结构,使电机转矩脉动较大,影响和制约了SRM在位置控制等要求转矩脉动较小领域的应用^[1]。

直接转矩控制(direct torque control,DTC)的独特性在于转矩的直接控制,动态响应很快,且已在感应电机控制应用中获得成功^[2-4]。研究表明,将DTC引入到SRM中,回避了复杂数学模型的同时,在抑制SRM转矩脉动方面效果也比较理想。文献[5-6]重新设计了转矩滞环规则;文献[7]中引入PWM取代转矩滞环,通过调节占空比来调节基本电压矢量作用的时间,但无法精确纠正转矩偏

差。文献[8-10]用模糊直接转矩控制器替换原系统的滞环控制器,可以根据不同运行情况判断磁链和转矩的优先级,从而选择不同的电压矢量。文献[11]提出一种基于分子动理论占空比调节的直接转矩控制;文献[12]在细分扇区的同时,对传统DTC的电压矢量选取规则进行改进,使转矩和磁链的调节更加合理;文献[13-16]在换相区增加新的电压矢量,能够实现各换相区对应的励磁目标提前导通,减小换相区的转矩失控现象,但仍然无法从根本上规避滞环控制所带来的问题。文献[17]提出了磁链无差拍控制(DB-FC),使磁链能被定量调节,但定子绕组的稳态铜耗较大。文献[18]提出一种基于变磁链的模糊控制器,该控制器通过速度偏差间接调整磁链;文献[19-20]通过速度调节器输出的参考转矩来获取给定的参考磁链;文献[21]通过实验拟合得到电机转速与磁链给定值的关

系,但其在位置控制中无法使用;文献[22]在细分扇区的同时,将模型预测控制运用到 DTC 中,但计算较为繁琐,且需要较为精确的电机磁链特性曲线。

针对位置控制系统高精度的控制要求以及现有研究中的不足,本文在传统 DTC 的基础上引入空间电压矢量调制技术(space vector modulation, SVPWM),提出变磁链 SVPWM-DTC 策略。该控制策略可对控制矢量作用时间进行占空比调制,控制频率固定且减小了转矩的过冲或缺失。变磁链策略详细分析了稳态磁链值对定子电流分配的影响,结合 SRM 磁链特性数据,可对不同工况下的磁链给定值做出合理选择,以解决系统损耗大的问题,并实现转矩脉动最小化。

1 SVPWM-DTC 策略

1.1 DTC 原理

SRM 的瞬时转矩极性判断可表示为^[23]

$$T_e \approx i \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

由于 SRM 的相绕组是单极性驱动,且在一个微小的控制周期内,电流的变化率相对于磁链的速度变化有一个一阶延迟的作用,在分析瞬时转矩变化的时候可认为电流为恒值^[17]。因此, $\partial \psi(\theta, i) / \partial \theta$ 的符号直接决定了转矩的符号。如果定子磁链对转子角度的变化率 > 0 , 瞬时转矩为正;反之为负。因此,只需通过控制定子磁链相对于转子位置的超前或者滞后,就可有效控制电机转矩。

SRM 的电压方程为

$$U_k = R_k i_k + \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial t} \quad (2)$$

式中 U_k 、 R_k 、 i_k 分别为 k 相绕组的电压、电阻和电流。

若忽略绕组电阻上的压降,并将式(2)进行离散化处理,可得

$$\psi(k) = \psi(k-1) + U(k) T_s \quad (3)$$

式中 $U(k)$ 为电压矢量。即磁链对转矩的控制可以转换为选择合适的电压矢量对转矩的控制。

1.2 传统 DTC 弊端

传统 DTC 有以下弊端:

1) 滞环控制器的存在使功率器件的开关频率不固定,谐波含量较多;在一个开关周期内,控制电压矢量只根据误差方向选择,造成调节力度过大或过小,引起转矩脉动;滞环宽度过小,开关频率过高,在实际应用中受到软件处理速度和硬件电路的双重限制。

2) 磁链给定值 ψ^* 对电机的转矩脉动以及定子电流大小有直接影响。为维持圆形磁场,传统 DTC 在转子旋转时将不可避免地产生负转矩。

1.3 SVPWM-DTC 原理

为解决上述问题,采用一种广泛应用于交流电机中的 SVPWM 方法。SVPWM 方法可以得出准确补偿转矩和磁链误差所需的任意幅值和方向的电压矢量 U 。该方法主

要步骤为:根据转矩误差和磁链误差确定 U 所处扇区;计算包围该扇区的两个电压矢量和零电压矢量在一个周期的作用时间;得到功率器件的切换时刻。

由于 SRM 非线性严重,无法直接求出能使转矩误差为 0 的 U 。由 1.1 节知,调节磁链可以达到控制转矩的目的。因此可将 U 定义为:能使磁链误差为 0 的电压矢量。

U 满足:1) 使电机转矩偏差减小;2) 纠正定子磁链运动轨迹与给定磁链圆偏差,使控制周期结束时定子磁链矢量尖落在预定磁链圆上。

图 1 为采样时刻 $t(k-1)$ 时电压矢量选择原理图。 $\Delta \theta$ 为合成磁链的旋转角度,即磁链变化角; ψ^* 为 k 时刻要达到的磁链幅值,即 $|\psi(k)| = \psi^*$; $\psi(k-1)$ 为当前时刻的定子磁链; T_s 为采样周期; $U(k)$ 为待求的参考电压矢量。

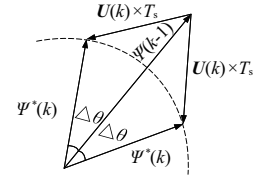


图 1 电压矢量选择原理图

若要使磁链矢量由 $\psi(k-1)$ 运动变化到 $\psi^*(k)$, 则 $t(k)$ 时刻所需要的电压矢量

$$U(k) = \frac{\psi^*(k) - \psi(k-1)}{T_s} \quad (4)$$

将其表示在静止 $\alpha\beta$ 坐标系中,为:

$$U_\alpha(k) = \frac{\psi_\alpha^*(k) - \psi_\alpha(k-1)}{T_s} \quad (5)$$

$$U_\beta(k) = \frac{\psi_\beta^*(k) - \psi_\beta(k-1)}{T_s} \quad (6)$$

$$\psi_\alpha^*(k) = \psi^*(k) \cos(\theta \pm \Delta \theta) \quad (7)$$

$$\psi_\beta^*(k) = \psi^*(k) \sin(\theta \pm \Delta \theta) \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(5)、式(6),即可求得在静止 $\alpha\beta$ 坐标系中所需的空间电压矢量:

$$U_\alpha(k) = \frac{\psi^*(k) \cos(\theta \pm \Delta \theta) - \psi_\alpha(k-1)}{T_s} \quad (9)$$

$$U_\beta(k) = \frac{\psi^*(k) \sin(\theta \pm \Delta \theta) - \psi_\beta(k-1)}{T_s} \quad (10)$$

根据式(9)、式(10)可判断参考电压矢量 $U(k)$ 所在扇区。电压矢量扇区定义见图 2。假设由式(9)、式(10)确定的 U 位于扇区 1, 则应选取 U_1 、 U_6 进行矢量合成。由伏秒积分守恒得:

$$U_{ref} T_s = (U_\alpha + U_\beta) T_s = U_1 T_1 + U_6 T_6 + U_0 T_0 \quad (11)$$

$$U_\alpha = \frac{T_1}{T_s} |U_1| \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + \frac{T_6}{T_s} |U_6| \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (12)$$

$$U_\beta = \frac{T_1}{T_s} |U_1| \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) - \frac{T_6}{T_s} |U_6| \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (13)$$

$$|U_1| = |U_6| = \sqrt{3} U_{DC} \quad (14)$$

$$T_1 = \frac{(U_\alpha + \sqrt{3} U_\beta) T_s}{3 U_{DC}} \quad (15)$$

$$T_6 = \frac{(U_\alpha - \sqrt{3} U_\beta) T_s}{3 U_{DC}} \quad (16)$$

当 $T_1 + T_6 \geq T_s$ 时,会出现 $T_0 < 0$,此时需进行饱和处理:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_1}{T_1 + T_2} T \\ T_2 = \frac{T_2}{T_1 + T_2} T_s \end{cases} \quad (17)$$

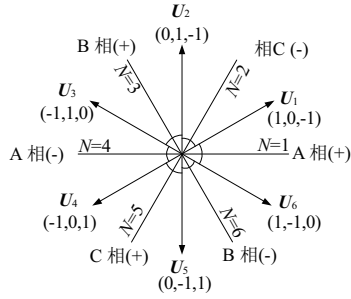


图2 基于 SVPWM-DTC 的电压矢量空间图

为使功率器件的开关频率恒定且尽可能减小开关频率,本文采用集中式的电压矢量作用方式。仍以 U_1 、 U_6 为例,每个控制周期内各矢量的作用时刻见式(18)。

$$\begin{aligned} t_s &= \text{rem}(t, T_s) \\ \begin{cases} U_1 & t_s \leq T \\ U_6 & T_1 < t_s \leq T_1 + T_6 \\ U_0 & T_1 + T_6 \leq t_s \leq T_s \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

2 变磁链 SVPWM-DTC 策略

2.1 变磁链 SVPWM-DTC 原理

综上, $\Delta\theta$ 是计算 U 的关键。文献[17]、文献[24]都仅定量计算 $\Delta\theta$ 的最大值,并将其设为饱和限幅,见式(19)。文献[25]中的 $\Delta\theta$ 由转矩偏差量经过 PI 控制器得到,忽略了 $\Delta\theta$ 的变化对磁链跟随情况的影响。

$$\Delta\theta_{\max} = T_s \frac{\sqrt{3} U_{DC}}{|\psi^*|} \quad (19)$$

$\Delta\theta$ 的取值对 SVPWM-DTC 的影响可结合图3分析。图中 $\Delta\theta_1 < \Delta\theta_{\max}$, $\Delta\theta_2 > \Delta\theta_{\max}$ 。若选择 $\Delta\theta_1$ 作为磁链变化角,则 $k-1$ 时刻选择的 U 为 U_1 ,磁链矢量在一个控制周期后变为 $\psi_1(k)$ 。若选 $\Delta\theta_2$ 作为磁链变化角,则 $k-1$ 时刻选择 U_2 ,其在一个周期内只能将磁链调整到 $\psi'_2(k)$,造成磁链幅值有所降低。考虑到电机起动需要较大电流,一般取 ψ^* 为饱和值,所以并不会出现磁链骤减、转矩不足的情况。

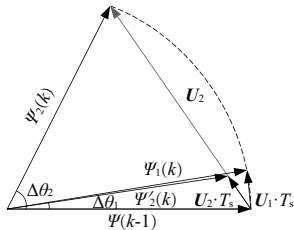


图3 $\Delta\theta$ 对参考电压选择的影响

由式(19)可知, $\Delta\theta$ 代表了 U 使电机转矩变化的程度, $\Delta\theta$ 越大, U 在一个周期内使转矩的改变量越大;反之越小。因此在起动阶段,应合理增大 $\Delta\theta$;而在转矩指令趋于平稳后,应减小 $\Delta\theta$ 以降低稳态转矩脉动。 $\Delta\theta$ 之前的正号、负号根据转矩偏差的符号决定,若偏差为正,则 $\Delta\theta$ 为正;反之为负。

理想的电流分配策略中,各相磁链值无需提供用来中和负转矩的那部分电流。所以,减小电机 ψ^* 尤为重要。

如图4所示,当 ψ^* 由 $|\psi_1|$ 变化到 $|\psi_2|$ 时,若依次选择 $\Delta\theta$ 为 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 和 $\Delta\theta_3$,则其分别对应的电压矢量变化情况为: $U_1 \rightarrow U'_1$ 、 $U_2 \rightarrow U'_2$ 、 $U_3 \rightarrow U'_3$ 。由数学几何关系可知, $\Delta\theta = 60^\circ$ 时(即 1 rad),一个周期内 U 偏差程度最小。

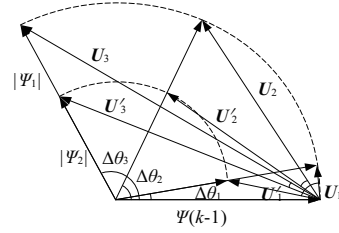


图4 $\Delta\theta$ 和 ψ^* 对参考电压选择的影响

2.2 磁链给定值 ψ^* 的选取原则

本文的 SRM 磁链特性曲线如图5所示。对磁链特性数据进行处理,可以得到三相电感关系如图6所示。三相定子绕组电阻取值为 1Ω 。在线性模型中,当某相流经一定电流(在一个控制周期内视电流为常数)时,产生的转矩与电感的变化率成正比^[20],而产生的磁链大小与电感成正比。

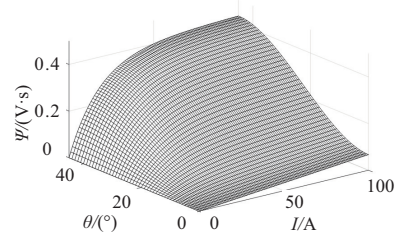


图5 SRM 磁链特性曲线

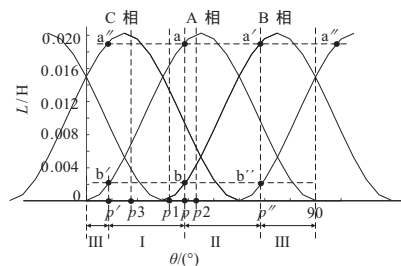
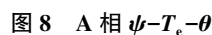


图6 三相电感关系图

假设在位置 p 处, A 相和 B 相的供力能力一样(即电感变化率一样);在 p_1 处, B 相供力能力小于 A 相;在 p_2

综合 SRM 的 ψ - i - θ 和 T_e - θ - i , 可得 ψ - T_e - θ 。绘制位置点 m 、 n 所对应的 ψ - T_e - θ 曲线, 并且每隔 5° 插入一组 ψ - T_e - θ 数据, 如图 8 所示。在负载转矩一定时, 不同位置处所对应的 ψ^* 近乎成线性变化。为保证数据精度, 同时减小数据的储存量和计算量, 本文仅取位置 m 、 n 两处的 ψ - T_e - θ 数据, 其他位置的数据采用线性插值获取。



3 仿真实验分析

图 9 变磁链 SVPWM-DTC 系统框图

显然,相较于传统 DTC 和 SVPWM-DTC,变磁链 SVPWM-DTC 能大幅降低空载及负载时电机稳态转矩脉动;定磁链 SVPWM-DTC 在空载时的转矩脉动小于传统 DTC,但因为 $\Delta\theta$ 较大,所以在负载时的转矩脉动反而大于传统 DTC。

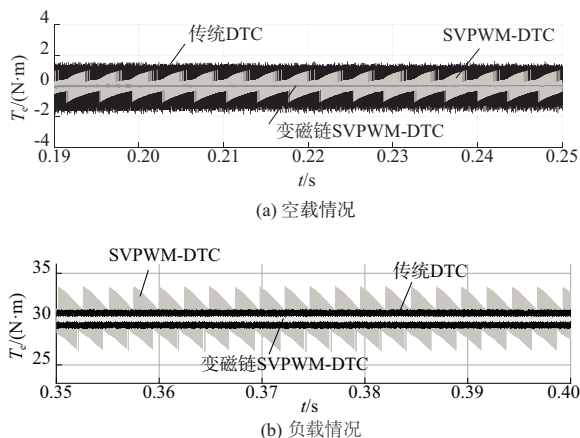


图 10 不同控制策略下转矩脉动波形

表 1 稳态 ΔT_{pp} 对比

负载/N	传统 DTC	SVPWM-DTC	变磁链 SVPWM-DTC
0	3.310	2.070	0.025
30	2.100	7.150	0.910

为研究控制算法优化前后,电机位置控制过程的动态响应,使用正反方向波位置指令对电机电态伺服跟随性能进行仿真,结果如图 11、图 12 所示。

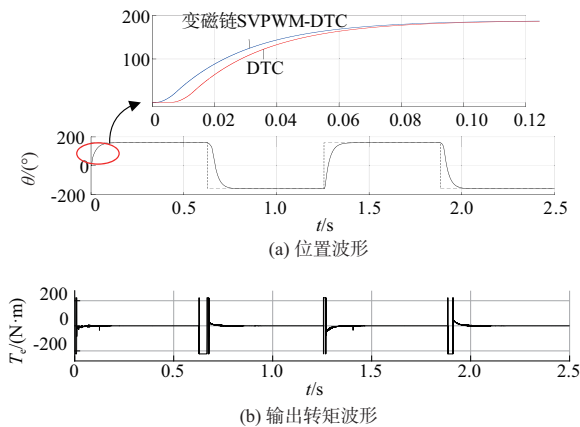


图 11 动态伺服跟随性能

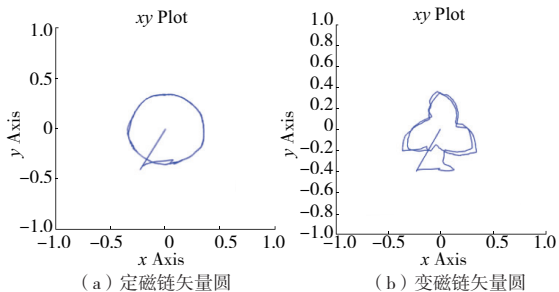


图 12 磁链矢量圆对比图

为研究变磁链 SVPWM-DTC 在变载时 ψ^* 与三相电流值的关系,给出了电机稳态变载的运行波形,如图 13 所示。此时的 ψ^* 随着负载的变化而变化,且远小于饱和磁

链值。三相电流值也随着 ψ^* 的变化而变化,且 i_A 变化程度远大于 i_B 、 i_C 。

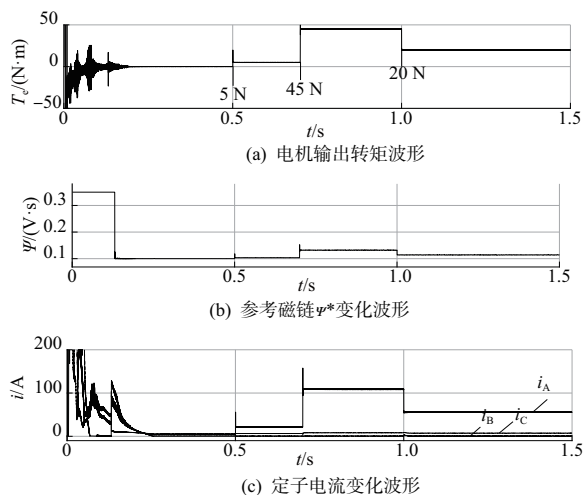


图 13 变磁链 SVPWM-DTC 负载变化时稳态波形

为进一步分析稳态 ψ^* 对定子电流的影响,分别对传统 DTC 和变磁链 SVPWM-DTC 在空载、轻载、重载时进行测试,将结果列于表 2。

表 2 传统 DTC 与变磁链 SVPWM-DTC 性能比较

算法	负载/N	i_A/A	i_B/A	i_C/A	$i_{总}/A$
传统 DTC	0	3.0	42.5	80.0	125.5
	5	3.5	35.5	77.5	116.5
	35	62.5	0.7	54.0	117.2
变磁链 SVPWM-DTC	0	0.1	3.8	5.8	9.7
	5	21.5	0.6	6.5	28.6
	35	87.5	0.6	7.9	96.0

以位置指令 190° 为例分析,其他位置同理。本文建模时,将电机的 0 位置设定为 A 相完全不对齐位置。故稳态时 A 相和 C 相处于电感上升阶段, B 相处于电感下降阶段,如图 6 中 p' 。

1) 空载稳态:主要通电相为 B 相和 C 相。 i_C 主要用于维持磁链, i_B 用来平衡 C 相产生的正转矩。此时 ψ^* 越大, $i_{总}$ 越大。

2) 定磁链稳态:若轻载,主要通电相为 B、C 相。 i_C 用于维持磁链, i_B 用来平衡 C 相过剩的正转矩。此时 i_A 很小;若重载,因 i_C 无法提供足够转矩,故 i_A 较大。但 i_A 无法提供足够磁链,故 i_C 仍较大。

3) 变磁链稳态:轻载、重载均无需大于 i_C 。

4 结语

本文在传统 DTC 的基础上,提出了变磁链 SVPWM-DTC 策略。该控制策略的控制频率固定且减小了转矩的过冲或缺失;结合 SRM 磁链特性数据的变磁链策略,详细分析 SRM 运行过程中磁链值的选取原则,解决了稳态定子电流不合理分配的问题,增大了磁链有效利用率。仿真

(下转第 154 页)

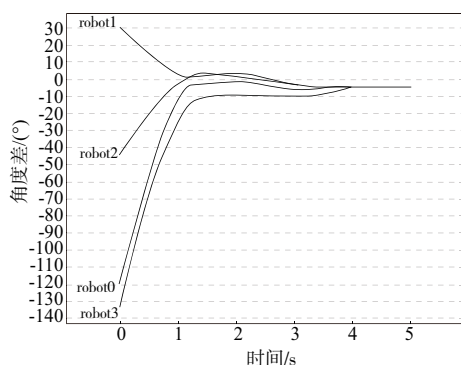


图8 横排编队偏航角误差图

5 结语

本文针对二维平面内多 AUV 控制系统的编队问题进行研究,选用渐近一致性算法和虚拟领航结构法来解决问题,完成了定点编队及横排编队控制,验证了控制策略

的可行性。将本课题研究的控制器应用到多 AUV 系统在三维的 6 自由度编队是今后的研究重点。

参考文献:

- [1] 林伟民. 多移动机器人协同控制策略的研究[D]. 天津:天津职业技术师范大学,2019.
- [2] 刘兆清. 无人水面舰艇的协同编队控制策略研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2018.
- [3] HEALEY A. Application of formation control for multiple vehicle robotic minesweeping[J]. Proceedings of the IEEE CDC-2001, 2001: 325-332.
- [4] 刘瑞轩. 多水下机器人协调控制研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2018.
- [5] 许彦营. 多水下机器人通信及协调方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
- [6] 李宗刚,赵振乾,葛立明,等. 基于二阶一致性算法的多仿生机器鱼分布式编队控制[J]. 控制与决策,2019,34(1): 31-42.
- [7] 韩宗亭. 多智能体系统一致性问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.

收稿日期:2020-10-26

(上接第 142 页)

结果显示,变磁链 SVPWM-DTC 策略不仅能够大幅降低电机转矩脉动,同时也有效降低了功率器件的开关损耗以及定子绕组的铜耗,使位置控制系统具有良好的动、静态性能。

参考文献:

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [2] 理文祥. 高性能无速度传感器直接转矩控制系统的研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2012.
- [3] 解良,刘思贝,姚文熙,等. 基于空间矢量的同步磁阻电机直接转矩控制[J]. 机电工程,2017,34(10):1156-1161.
- [4] 郑大伟. 永磁同步电机无传感器直接转矩滑模控制研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2019.
- [5] 李晓光. 开关磁阻电机转矩算法研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2016.
- [6] 林诚才,张月玲,肖逢. 基于 DTC 的开关磁阻电机平稳起动的研究[J]. 计算机仿真,2015,32(9):180-184.
- [7] 桑徐阳,颜钢锋,王远东,等. 一种改进的四相关磁阻电机直接转矩控制策略研究[J]. 机电工程,2019,36(1):60-65.
- [8] 陈建龙. 基于模糊控制的开关磁阻电机转矩脉动抑制方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [9] 王子煜,邓福军. 基于模糊理论的开关磁阻电机直接转矩控制[J]. 大连交通大学学报,2013,34(2):97-100,116.
- [10] 霍东亮. 基于滑模变结构的开关磁阻电机直接转矩模糊控制[D]. 大连:大连交通大学,2018.
- [11] 刘烈焜. 矿用自卸车的开关磁阻电机驱动系统研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2016.
- [12] 刘勇智,鄱成龙,林博闻,等. 基于自适应二阶终端滑模的 SRM 直接转矩控制[J]. 北京航空航天大学学报,2018,

44(10):2043-2051.

- [13] 高旭东. 电动汽车用开关磁阻电机低转矩脉动控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [14] 孟庆阳. 基于 DSP 的开关磁阻电机直接转矩控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [15] 徐爽. 开关磁阻电机低转矩脉动控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- [16] 许爱德,樊印海,李自强. 空间电压矢量下 SRM 转矩脉动最小化[J]. 电机与控制学报,2010,14(1):35-40,46.
- [17] 许爱德,张文,何昆仑,等. 磁链无差拍控制的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 电机与控制学报,2019,23(8):57-66.
- [18] 刘占千. 开关磁阻电机转矩脉动抑制方法研究[D]. 成都:西华大学,2017.
- [19] 周颖,边敦新,熊立新. 基于模糊自适应的开关磁阻电机变磁链研究[J]. 水电能源科学,2018,36(10):173-176,205.
- [20] 胡春龙. 开关磁阻电机直接转矩控制调速系统研究[D]. 西安:西安科技大学,2015.
- [21] 陈金文,杨明发. 基于转速磁链特性的开关磁阻电机直接转矩控制[J]. 电气传动,2014,44(8):7-10.
- [22] 颜宁,曹鑫,张蕾,等. 基于直接转矩控制的开关磁阻电机模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(18): 5446-5453,5544.
- [23] CHEOK A D, FUKUDA Y. A new torque and flux control method for switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2002,17(4):543-557.
- [24] 何昆仑. 开关磁阻电机转矩脉动抑制策略研究[D]. 大连:大连海事大学,2017.
- [25] 刘畅. 基于滑模变结构的同步电机 SVM 直接转矩控制的研究[D]. 济南:山东大学,2008.

收稿日期:2020-11-30