

新型SVM-DTC控制算法的BLDCM 转矩脉动抑制策略

王宇飞, 王博, 江秀红

(沈阳航空航天大学 电子信息学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 无刷直流电机具有高可靠性、高效率等优点,但由于自身结构特点以及驱动特点,在运行过程中会产生较大的转矩脉动。针对该运行问题,提出了一种改进的无刷直流电机直接转矩控制策略,采用新型空间脉宽调制技术替代传统直接转矩控制中的开关表模块,并且和滑模控制器相结合。对空间脉宽调制技术的运算过程进行改进,简化了计算过程。引入滑模控制器替代传统的PI控制器,利用超螺旋算法优化控制过程。在仿真环境下,对比了传统直接转矩控制和新型直接转矩控制策略,结果表明,新型直接转矩控制策略在电机响应时间、转速超调量和转矩波动幅度方面均有显著改善。

关键词: 无刷直流电机;直接转矩控制;转矩脉动抑制;空间脉宽调制技术;滑模控制

中图分类号: TM33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26313

BLDCM Torque Ripple Reduction Strategy of Novel SVM-DTC Control Structure

WANG Yufei, WANG Bo, JIANG Xiuhong

(School of Electronic Information, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China)

Abstract: Brushless DC motor has the advantages of high reliability and high efficiency, but due to its own structural characteristics and driving characteristics, it will produce large torque pulsation during operation. In light of this operation problem, an improved direct torque control strategy for brushless DC motor was proposed, which adopts a new space vector pulse width modulation technique to replace the switching table module in the traditional direct torque control, and combines it with the sliding mode controller. The arithmetic process of the spatial pulse width modulation technique was improved to simplify the calculation process. The sliding mode controller was introduced to replace the traditional PI controller, and the control process was optimized using the super-helix algorithm. Under the simulation environment, the traditional direct torque control and the new direct torque control strategy were compared, and the results show that the new direct torque control strategy has significant improvement in motor response time, speed overshoot and torque fluctuation amplitude.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); direct torque control (DTC); torque ripple reduction; space vector pulse width modulation (SVPWM); sliding mode control

无刷直流电动机 (brushless DC motor, BLDCM) 继承了直流电机的优点,有着良好的启动和调速性能,并且没有换向器和电刷的接触,延长了使用时间。BLDCM 由于其体积小、重量轻、效率高、易于控制的特性,在众多应用领域中被广泛使用,从小型家用电器到精密医疗设备,再到高端航空领域,无刷直流电机均展现出广泛的应用潜力,成为推动现代工业与技术进步的重要

力量。

在高性能无刷直流电机驱动系统设计中,转速调节的动态性能与稳态误差至关重要。实际应用中,无刷直流电机普遍存在转矩脉动现象,导致振动和噪音,降低运行性能。因此,抑制和减小转矩脉动成为研究重点^[1]。

研究者已经提出了许多抑制转矩脉动的策略,比如电流控制法、拓扑结构法以及直接转矩

基金项目: 辽宁省教育厅重点攻关项目 (JYT2020160)

作者简介: 王宇飞 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为信息获取与处理技术, Email: 1549511246@qq.com

通讯作者: 王博 (1985—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电机与电器, Email: wangbo@sau.edu.cn

控制法^[2]。电流控制法是由于电机在开通和关断时相电流的变化率不相同,会在换向期间产生转矩脉动,为了保证转矩恒定,通过对相电流进行控制,使非换向电流值保持不变;但是电流控制法无法精确计算相电流换向时间,无法达到良好的稳定性,抑制转矩脉动效果较差。拓扑结构法一般是通过改变硬件系统的结构,从而抑制转矩脉动;但是改变硬件在实现上难度较大。通过比较前两种方法,直接转矩控制(direct torque control, DTC)通过直接控制电机的转矩来减小转矩脉动。利用定子电压和定子电流实时计算出电磁转矩和磁链,并根据给定值计算出误差,从而实现转矩和磁链的控制。空间脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)技术利用平均值等效原理,即在一个开关周期内,对基本矢量电压进行组合,使其平均值等于给定的电压矢量。通过控制基本矢量电压的作用时间,实现合成的目标矢量电压在空间中按接近圆形轨迹旋转,从而使产生的实际磁通接近理想的磁通圆。

目前已经有很多直接转矩控制技术应用在无刷直流电机上,并且取得了良好的控制效果。文献[3]提出了一种基于主矢量占空比调节的无刷直流电机无位置传感器直接转矩控制方法,推导了每个控制周期内主矢量和副矢量作用的占空比。文献[4]提出了一种双直流母线三电平直接转矩控制系统,它是将电机的磁链轨迹由正六边形轨迹变成正十二边形轨迹,并根据改变后的磁链轨迹设计新的电压矢量表。文献[5]提出通过特定的电压空间矢量来对换相时沿反并联二极管续流的关断相电流进行控制。文献[6]提出将SVPWM放到DTC中,将开关表替代,用SVPWM控制算法来选择电压矢量。

在传统直接转矩控制中通常使用PI控制器来调节系统,但是PI参数难以调节,抗干扰能力较差,由此引出滑模控制器(sliding mode controller, SMC)。一阶滑模控制器存在抖振的问题,高阶滑模控制器继承了一阶滑模控制器的优点,并且可以有效地抑制抖振。本文将在传统SVPWM结合DTC的基础上,运用新型SVPWM算法,简化原本SVPWM算法的复杂计算,从而提高系统整体的运算能力,并且将SMC控制加入其中,使整个系统更加的稳定,响应速度变得更快。

1 传统DTC控制方案

1.1 BLDCM的工作原理

BLDCM的驱动电路原理图如图1所示,图中的R,L,M分别为每相电机绕组的电阻、自感和互感。图中的逆变器连接电机的三个定子绕组,a,b,c为该逆变器上的三个桥臂,1和2,3和4,5和6为逆变器三相桥臂上的开关,上下两个开关不能同时导通。图中的n为电机的三相绕组的中性点。

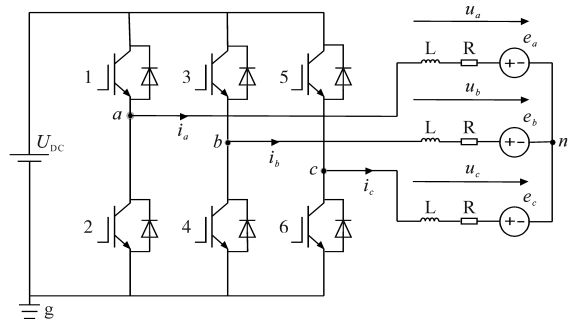


图1 无刷直流电机驱动电路原理图

Fig.1 Schematic diagram of brushless DC motor drive circuit

为便于分析,作如下假设:电机三相定子绕组完全对称,互差120°;电机转子为表贴式结构,磁路处于不饱和状态;忽略齿槽效应、涡流损耗及磁滞损耗。

BLDCM的数学模型可表示为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_a, u_b, u_c 为三相定子绕组的相电压; i_a, i_b, i_c 为三相定子绕组的相电流; e_a, e_b, e_c 为三相定子绕组的反电动势; R, L 分别为三相定子绕组的等效电阻与电感。

BLDCM定子绕组形成的电磁转矩为

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (2)$$

BLDCM的运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中: T_e, T_L 分别为电磁转矩和负载转矩; J 为电

机的转动惯量。

由式(2)可知,为保持转矩恒定,当转速一定时, $e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$ 必须保持恒定。假设电机的反电势为理想梯形波,为了实现平稳的转矩输出,通常会产生与反电势平顶波同相位的方波相电流。

1.2 BLDCM传统DTC控制策略

传统直接转矩控制中,通过设定的转矩与实际转矩、设定的定子磁链与实际定子磁链之间的差值,直接对电压矢量进行控制,以此实现对转矩的直接调节,其控制策略拓扑图如图2所示。

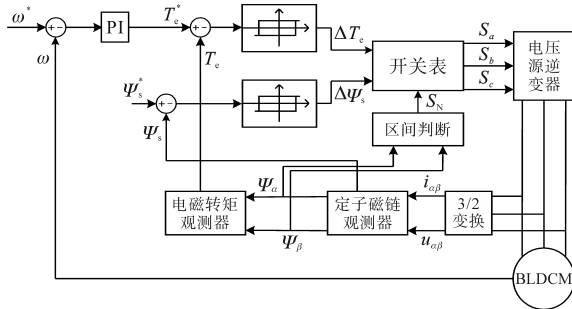


图2 传统直接转矩控制策略拓扑图

Fig.2 Topology diagram of a traditional direct torque control strategy

定子磁链和电磁转矩一般是通过选择最优电压空间矢量进行控制,磁链 Ψ_s 的电压矢量关系式如下:

$$\Psi_s = \int (u_s - Ri_s) dt \quad (4)$$

式中: u_s, i_s 分别为 α 轴的电压和 β 轴的电流。

当忽略电阻压降 R 的作用时,可得磁链表达式为

$$\Psi_s = \int u_s dt \quad (5)$$

由式(5)可知,定子磁链的大小由电压矢量来决定,可以通过六个扇区的电压矢量对定子磁链完成控制。以第 I 扇区为例,电压矢量对第 I 扇区的控制如图3所示。

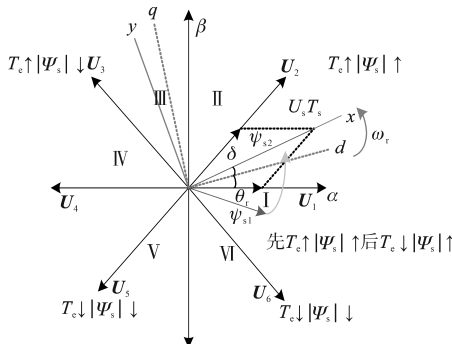


图3 电压矢量控制图

Fig.3 Voltage vector control diagram

传统直接转矩控制是利用滞环比较器通过给定的转矩与实际转矩、给定的定子磁链与实际定子磁链之间的差值来确定输出信号,选择出能够同时控制转矩和磁链的最优电压矢量,然后将信号发送至逆变器,从而控制电机系统。

由于传统直接转矩控制只能通过电压矢量对定子磁链进行控制,无法根据需求选择合适电压矢量,无刷直流电机在换相过程中会产生转矩脉动。所以本文将传统直接转矩控制中的开关表换成空间电压矢量调制技术,能够准确地对转矩和磁链进行控制。

2 新型空间矢量调制的直接转矩控制

区别于传统直接转矩控制,新型SVM-DTC控制策略包括将传统PI控制器替换成改进超螺旋滑模控制器,将传统SVPWM算法用新型SVPWM算法替代,仿真数据表明可以有效减小转矩脉动,提高响应速度。

2.1 改进超螺旋控制算法

传统PI控制器包含比例和积分两个模块, k_p 和 k_i 相互作用,使波形达到想要的效果。但是它的抗干扰能力较差,参数能调节的范围较大,响应速度不够快。为了提升系统的响应速度,并且使其更加稳定,采用滑模控制器来替代传统PI控制器,将磁链环和转矩环用二阶滑模控制器来替代^[7]。

传统滑模控制方法将开关控制信号 u 应用于系统的一阶导数中。在这种控制策略下,首先需要确定一个切换函数 s , 然后根据系统达到滑模面的需求以及动态和静态性能的要求,采用合适的趋近律来设计理想的滑模控制器,最终生成变结构的输出 u 。由于滑模控制在计算机快速运算过程中表现出不连续的开关特性,这可能导致控制系统出现抖振现象。相比之下,高阶滑模控制理论通过在短时间内寻找一个新的反馈控制量,并将开关作用应用于更高阶的导数上,即作用于滑模变量的高阶微分上,从而有效减少了抖振问题,提高了整个系统的控制精度。二阶滑模控制一般如下式所示:

$$u = K_a \operatorname{sgn} [k_1 \dot{y} + k_2 |y|^2 \operatorname{sgn}(y)] + K_b \operatorname{sgn} [k_3 \dot{y} + k_4 \operatorname{sgn}(y)] \quad (6)$$

式中: $\operatorname{sgn}(y)$ 为符号函数; K_a, K_b 为增益值。

当 $k_1 = k_4 = 0$ 时,得到 Super-Twisting 滑模(Super-Twisting sliding mode, STSM)控制。

超螺旋滑模算法由不连续的滑模面函数和连续的导数函数两部分组成。在实际的控制过程中,系统在相平面上展现出螺旋状的轨迹,围绕着原点旋转。这种特性会导致幅值大幅度的减小,从而有效地抑制了滑模抖振的产生,其相轨迹图如图4所示。

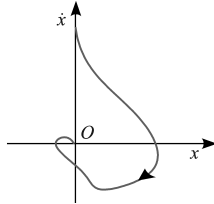


图4 超螺旋算法相轨迹图

Fig.4 Phase trajectory diagram of supercoiled algorithm

定义磁链的滑模面函数 s_ψ 为

$$s_\psi = \Psi_r^* - \Psi_r \quad (7)$$

通过超螺旋算法的二阶滑模控制器的基本原理,得到磁链控制器函数为

$$u_d^* = K_p |s_\psi|^r \text{sgn}(s_\psi) + u_{sd} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} u_{sd} = k_i \text{sgn}(s_\psi) \quad (9)$$

其中, $k_i > 0, k_p > 0$, 均为可调节参数。

同理,定义转矩滑模函数 s_T 为

$$s_T = T_e^* - T_e \quad (10)$$

转矩控制器函数为

$$u_q^* = k_p |s_T|^r \text{sgn}(s_T) + u_{sq} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} u_{sq} = k_i \text{sgn}(s_T) \quad (12)$$

以上这些公式设计的是磁链和转矩的滑模函数;这个控制器可以分成两个部分:一个是非连续的滑模函数,其中包括指数函数 r 和比例函数 K_p 。被控制量的动态性能主要由 K_p 的值决定,而非线性函数则受到变量 r 的影响;另一个部分则由积分函数组成,通过调节 K_i 的值可以提高被控制量的稳态性能。

本节采用基于强化学习的人工智能算法,设计了一种基于无刷直流电机的自适应超螺旋滑模控制器。该算法采用一个行动者-批评者代理,其目标是优化行动者的策略,并训练一个批评者以获得奖励,产生适当的增益,并且不需要知道系统。该算法采用了深度确定性策略梯度(DDPG),由300个神经元组成的网络用于Agent的学习,这些神经元不断从奖励中学习,并使用LQG标准成本函数评估控制信号的最佳程度,表明控制器达到参考信号的努力最少。评论家允许获得的比例和积分控制器的权重,分别在RL代理进行训练。该算法允许基于强化学习获得自适应常数,其中包含由能够建立RL代理的神经网络形成的演员和评论家。在这种算法中,突出了两个主要组成部分:代理和环境,目标是确保代理持续地与环境交互,以实现特定目标,如图5所示。

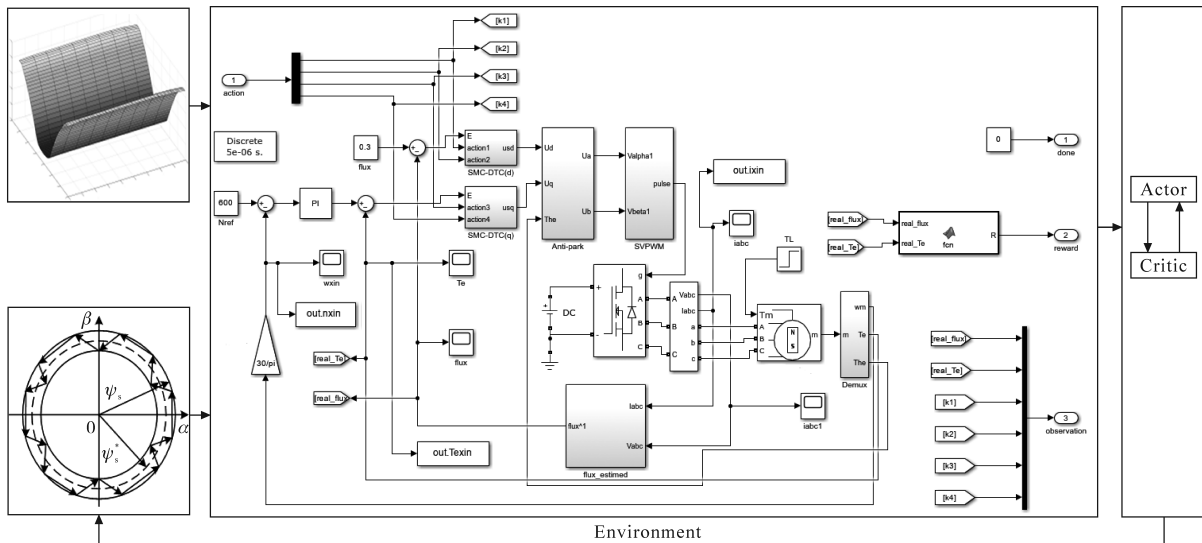


图5 强化学习拓扑结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of reinforcement learning topology

2.2 新型空间矢量调制

传统的空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法利用逆变器生成六个基本非零电压空间矢量和两

个零电压空间矢量。这些矢量在空间中的分布和它们所处的扇区位置通常可以通过图6所示分布图来表示。

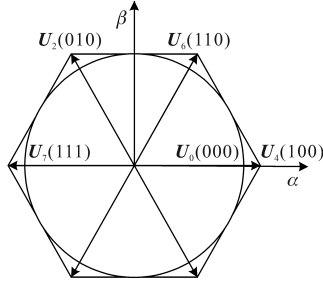


图6 扇区位置分布图

Fig.6 Sector location distribution map

以七段式SVPWM算法为例,它主要分为三步完成:1)电压空间矢量所在扇区位置判断;2)基本电压空间矢量作用时间计算;3)开关切换时刻的计算。

传统SVPWM算法提出了八个基本电压矢量和扇区的概念,通过引入中间量,使其方便运算。为了简化中间量造成的复杂运算,本文使用新型SVPWM算法,它不需要算出各个电压矢量的作用时间,而是直接通过三相桥臂对应的开关状态来合成参考电压矢量,很大程度上减少了计算量。根据三相电压在空间中的分布关系,逆变器的三相桥臂电压 U_a, U_b, U_c 与空间 120° 坐标系恰好对应,具体如图7所示。

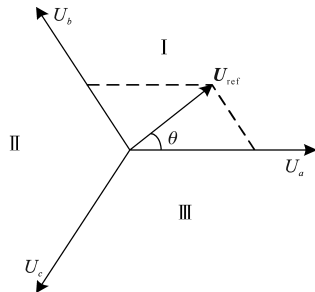


图7 三维坐标系示意图

Fig.7 Schematic diagram of the three-dimensional coordinate system

利用图7中的三个电压组合来合成参考电压 U_{ref} ,根据伏秒平衡原理,有:

$$T_s U_{ref} = T_a U_a + T_b U_b + T_c U_c \quad (13)$$

式中: T_s 为三相桥臂开关周期; T_a, T_b, T_c 分别为三相电压 U_a, U_b, U_c 的作用时间。

选取 U_a 和 U_b 作为 120° 坐标系,将 U_c 投影到 U_a 和 U_b 轴上,代入得:

$$T_s U_{ref} = (T_a - T_c) U_a + (T_b - T_c) U_b \quad (14)$$

令 $T_x = (T_a - T_c), T_y = (T_b - T_c)$,式(14)可以表示为

$$T_s U_{ref} = T_x U_a + T_y U_b \quad (15)$$

根据正弦定理式(15)得:

$$\begin{cases} T_x = \frac{T_s U_{ref} \sin(120^\circ - \theta)}{U_a \sin 60^\circ} \\ = \frac{\sqrt{3} T_s}{U_{dc}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} U_\alpha + \frac{1}{2} U_\beta \right) \\ T_y = \frac{T_s U_{ref} \sin \theta}{U_b \sin 60^\circ} = \frac{\sqrt{3} T_s U_\beta}{U_{dc}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: U_{dc} 为直流母线电压; U_{ref} 为矢量 U_{ref} 的幅值; U_a, U_b 分别为矢量 U_a 和 U_b 的幅值; U_α, U_β 分别为 U_{ref} 在 $\alpha - \beta$ 坐标系上分量的幅值。

令 T_a, T_b, T_c 中最小的一个为0,可得:

$$[T_a \ T_b \ T_c] = \begin{cases} [T_x \ T_y \ 0] & T_x, T_y \geq 0 \\ [0 \ T_y - T_x \ -T_x] & T_x \leq T_y, \overline{T_x}, \overline{T_y} \geq 0 \\ [T_y - T_x \ 0 \ -T_y] & T_x > T_y, \overline{T_x}, \overline{T_y} \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

这样就得到了三相电压的作用时间,其中 T_c, T_a 和 T_b 分别为0时对应图7中的I区、II区和III区。

对于确定的 T_a, T_b 和 T_c ,零矢量的作用时间为

$$T_0 = T_s - \max\{T_a, T_b, T_c\} \quad (18)$$

由此就可以得到三相桥臂的开关作用时间分别为

$$\begin{cases} T'_a = T_a + \frac{T_0}{2} \\ T'_b = T_b + \frac{T_0}{2} \\ T'_c = T_c + \frac{T_0}{2} \end{cases} \quad (19)$$

新型空间矢量脉宽调制的算法数字实现步骤为:

1)根据给定的参考电压在两相 120° 坐标系下分解,得 T_x 和 T_y ;

2)将 T_x 和 T_y 代入式(9)求得三相桥臂开通时间,并用占空比形式表示;

3)根据对输出PWM波形的需要利用式(12)对开关模式进行控制;

4)将求得的变量代入寄存器与载波交截产生PWM波。

为方便计算引入变量 $T_3 = T_x - T_y$,详细步骤如下:

1)定义变量 $T_3 = T_x - T_y$;

2)若 $T_3 > 0, T_y > 0$,则 $T_a = T_x, T_b = T_y, T_c = 0$;

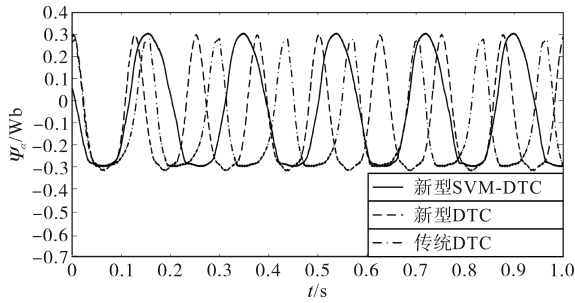


图 11 磁链对比图

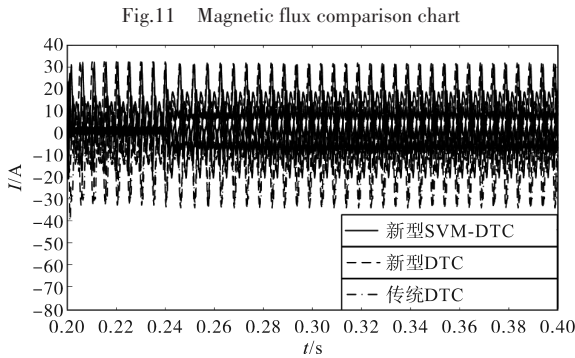


图 12 相电流对比图

Fig.12 Phase-current comparison diagram

机转速相关性数值。

图 10 为传统 DTC 控制、改良多扇区 DTC 控制以及提出的新型 SVM-DTC 控制仿真下的 BLDCM 转矩对比图。

结果验证了本文所提出的新型 SVM-DTC 转矩脉动策略,将传统 DTC 的开关表替换成新型 SVPWM 模块,通过合成电压矢量来补偿电磁转矩和定子磁链误差信号。它能够获取恒定的开关频率,从而有效降低转矩的脉动。表 2 为传统 DTC 仿真、改良多扇区 DTC 仿真和新型 DTC 仿真三种策略下电机转矩相关性数值。

表 1 转速性能比较

Tab.1 Comparison of rotational speed performance

	响应时间 t/s	转速/(r·min ⁻¹)
传统 DTC	0.009 7 (↑45.3%)	669.8 (↑8.5%)
新型 DTC	0.007 1 (↑25.4%)	636.9 (↑3.8%)
新型 SVM-DTC	0.005 3	612.8

表 2 转矩性能比较

Tab.2 Comparison of torque performance

	响应时间 t/s	转矩 T _e /(N·m)
传统 DTC	0.005 4 (↑68.5%)	58.15 (↑51.8%)
新型 DTC	0.003 3 (↑48.4%)	38.40 (↑25.4%)
新型 SVM-DTC	0.001 7	28.65

图 11 为传统 DTC 控制、改良多扇区 DTC 控

制以及提出的新型 SVM-DTC 控制算法仿真下的 Ψ_e 对比图。在改良后的磁链波形中,可以观察到其轮廓更加清晰且平滑,与原始波形相比,显著减少了波动和不规则性。这种优化表明,经过调整的磁链控制策略有效提升了磁链分布的均匀性和稳定性,进而增强了电机的整体性能和运行效率。

图 12 为传统 DTC 控制、改良多扇区 DTC 控制以及提出的新型 SVM-DTC 控制算法仿真下的相电流对比图。应用新型 SVM-DTC 控制算法后,三相电流曲线呈现出良好的平滑特性。这一特性表明,该控制策略在应对负载转矩变化时,展现出良好的连续性与稳定性。通过有效抑制电流波动与畸变,新型 SVM-DTC 控制算法显著提升了电机的控制精度与整体稳定性。

利用 Maxwell/Ansoft 针对转矩、电流及电机转子的转角位置,通过 Matlab 得到的结果如图 13 所示,以电机转子角度为 x 轴,以电流为 y 轴,以转矩为 z 轴,可以直观看出整个系统各个参数变化情况。

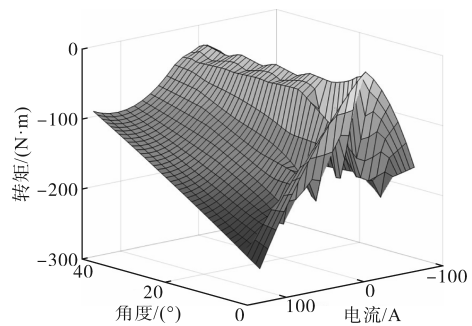


图 13 转矩-电流-角度特性曲线图

Fig.13 Torque-current-angle characteristic graph

4 结论

本文将传统直接转矩控制算法进行改进,将 DTC 与空间脉宽调制算法相结合,用 SVPWM 算法模块替代 DTC 中的开关表模块,免去了电压矢量的选择,减小了转矩脉动;并且将传统 SVPWM 算法进行改进,使其在计算时更加简便快速。

本文还将磁链环和转矩环的 PI 控制器换成了改进超螺旋滑模控制器,使整个系统响应更加迅速,鲁棒性更好。在仿真中证明了方法的正确性和可行性。

本文所提出的新型 SVM-DTC 算法策略下,电机响应更快,较传统 DTC 提升了 45.3%,较改良 DTC 提升了 25.4%;转速超调与其他两种方法相

比也有了明显的改善,较传统DTC提升了8.5%,较改良DTC提升了3.8%。转矩在新型SVM-DTC策略下,电机转矩响应更快,较传统DTC提升了68.5%,较改良DTC提升了48.4%,电机转矩相对平稳,电机转矩超调值较传统DTC提升了51.8%,较改良DTC提升了25.4%,转矩脉动明显减小。在仿真中证明了方法的正确性和可行性。

参考文献

- [1] 李珍国,章松发,周生海,等.考虑转矩脉动最小化的无刷直流电机直接转矩控制系统[J].电工技术学报,2014,29(1):139-146.
LI Zhenguo, ZHANG Songfa, ZHOU Shenghai, et al. Direct torque control system for brushless DC motor considering torque pulsation minimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 139-146.
- [2] 梁超,段富海,邓君毅,等.无刷直流电机转矩脉动抑制方法研究综述[J].机电工程技术,2020,49(11):20-22,170.
LIANG Chao, DUAN Fuhai, DENG Junyi, et al. Literature review of brushless DC motor torque ripple suppression method [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(11): 20-22, 170.
- [3] 王剑,闫子壮.无刷直流电机无位置传感器直接转矩控制[J].控制工程,2023,30(3):487-493.
WANG Jian, YAN Zizhuang. Sensorless direct torque control for brushless DC Motor[J]. Control Engineering of China, 2023, 30(3): 487-493.
- [4] 王颂帅,程小华.无刷直流电机三电平直接转矩控制系统[J].电气自动化,2019,41(4):68-69,118.
WANG Songshuai, CHENG Xiaohua. Three level direct torque control system for the brushless DC motor[J]. Electrical Automation, 2019, 41(4): 68-69, 118.
- [5] 简献忠,钱双杰.电压矢量最优的无刷直流电机直接转矩控制[J].系统仿真学报,2017,29(4):902-909.
JIAN Xianzhong, QIAN Shuangjie. Direct torque control for brushless DC motor with optimal voltage space vector[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 902-909.
- [6] 李泽宇,王家军.基于SVM的BLDCM直接转矩和磁链控制研究[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2020,40(6):63-69.
LI Zeyu, WANG Jiajun. Research on direct torque and flux control of BLDCM based on SVM[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University(Natural Sciences), 2020, 40(6): 63-69.
- [7] 王玲.基于滑模控制的SRM直接转矩控制[D].南京:东南大学,2019.
WANG Ling. The direct torque control of SRM based on sliding mode control[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

收稿日期:2024-11-12

修改稿日期:2025-03-04