

# 一种新型的永磁同步电机直接转矩控制方法

刘建, 杨建飞, 吴华仁, 华心怡, 郭爱琴

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)  
(2. 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 210042)

**[摘要]** 永磁同步电机传统直接转矩控制方法采用磁链和转矩双闭环结构实现对电机转矩的直接控制. 由于控制过程中要保持磁链幅值恒定, 不仅限制了电机的动态性能, 同时, 为了实现恒定的定子磁链幅值, 还需要额外的无功电流, 降低了电机功率因数, 增加了系统损耗. 本文从转矩优化和无功电流优化控制的角度出发, 提出了一种新型的直接转矩控制方法, 控制过程中直接根据转矩控制要求选择电压矢量, 不要求磁链幅值恒定, 对转子位置要求不高, 控制过程中能够实现磁链幅值的动态调整, 电机在具有良好动态性能的同时具有较高的功率因数. 仿真结果验证了理论分析的正确性和方法的可行性.

**[关键词]** 永磁同步电机, 功率因数, 无功电流, 直接转矩控制

**[中图分类号]** TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2014)04-0017-08

## A Novel Direct Torque Control Method for Permanent Magnet Synchronous Motor

Liu Jian, Yang Jianfei, Wu Huaren, Hua Xinyi, Guo Aiqin

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)  
(2. 3D Printing Equipment and Manufacturing Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** The double closed loop structure of stator flux linkage and torque is used to realize direct control of motor torque in traditional direct torque control of permanent magnet synchronous motor. Because flux amplitude is kept as constant, dynamic performance of the motor is not only restricted, but also reactive current is increased. When reactive current is increased, motor power factor is reduced and system loss is increased. From the points of perspective of optimal control of the torque and reactive current, a novel direct torque control method is presented in this paper. Voltage vectors are merely selected according to the requirement of the torque control in the period of control. In the control process, stator flux amplitude can be dynamically adjusted and rotor position is less demanded. So dynamic performance of the motor and power factor are significantly improved. The correctness and feasibility of the proposed method are verified by the simulation results.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor, power factor, reactive current, direct torque control

众所周知, 电机控制的本质是控制其转矩, 永磁同步电机直接转矩控制方法(DTC)将电机和逆变器作为一个整体, 直接以电机转矩作为控制对象, 通过选择合适的空间电压矢量实现对电机转矩快速准确的控制<sup>[1-4]</sup>. 传统DTC的核心思想是在保持定子磁链幅值恒定的条件下, 通过控制转矩角实现对电机转矩的直接控制, 因此, 在具体实现方法上采用的是转矩和磁链双闭环结构<sup>[5-7]</sup>.

永磁同步电机传统DTC中, 电机转矩和磁链幅值恒定的控制最终都是归结为选择合适的空间电压矢量<sup>[8-11]</sup>. 对于所选择的电压矢量而言, 要同时实现对电机转矩和磁链的最优控制是比较困难的, 也即, 传统DTC中空间电压矢量对电机转矩和磁链幅值的控制是不解耦的, 磁链幅值恒定的控制要求必然影响到对电机转矩的控制效果, 这和直接转矩控制方法的本质要求相悖, 进一步地, 也必然会影响永磁同步电

收稿日期: 2014-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金(61273243、51407095)、江苏省高校自然科学基金(12KJB470011、13KJB590001).

通讯联系人: 杨建飞, 博士, 讲师, 研究方向: 电机控制与三维打印. E-mail: yjfsmile@njnu.edu.cn

机的其他运行性能.

文献<sup>[12]</sup>通过对永磁同步电机转矩变化规律的深入分析指出,传统 DTC 采用磁链和转矩的双闭环结构无法实现对电机转矩的最优控制,并初步提出了一种基于定子绕组三角形连接的转矩控制方案,实验结果验证了理论分析的正确性.文献<sup>[12]</sup>所提的控制方法侧重于从转矩优化的角度进行分析,而对该方法下定子磁链的变化规律,对电机永磁体性能的影响,以及对功率因数等性能的影响没有进行研究.

本文以常用的定子绕组星形连接的隐极式永磁同步电机为研究对象,详细分析了其转矩和磁链变化的特点,提出了一种新型的永磁同步电机直接转矩控制方法,该方法以直接控制电机转矩为目标,同时考虑定子磁链的变化规律,以实现电机具有优良动态性能的同时能够以高功率因数、高效率运行.

## 1 一种新型的直接转矩控制方法

### 1.1 纯转矩控制方法下电压矢量的选择

对于定子绕组为星形连结的永磁同步电机,常采用如图 1 所示的空间电压矢量和坐标系进行分析.

其中, $\alpha\beta$  轴坐标系为两相静止坐标系, $dq$  轴为转子同步旋转坐标系, $xy$  轴坐标系为定子同步旋转坐标系. $\psi_s$  是定子磁链矢量,相对于  $\alpha$  轴的角度为  $\theta_s$ . $\psi_f$  是永磁体转子磁链矢量,与  $\alpha$  轴的角度为  $\theta_r$ .定转子磁链之间的转矩角为  $\delta$ . $u_1 \sim u_6$  为 6 个电压矢量.在  $dq$  坐标系下隐极式永磁同步电机各个参数对电机转矩的变化过程的影响如式(1)所示:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3p}{2L_d} \psi_f \frac{d\psi_{sq}}{dt}. \quad (1)$$

由(1)式可知,由于转子永磁体的磁链幅值  $\psi_f$  不变,电机转矩  $T_e$  的变化仅与定子磁链的交轴分量  $\psi_{sq}$  变化有关.因此,若能实现对定子磁链交轴分量  $\psi_{sq}$  的准确控制,也就能够实现对电机转矩的准确控制.而定子磁链的控制最终又归结于电压矢量的选择,对永磁同步电机而言,电压矢量和定子磁链矢量之间满足如下关系:

$$u_s - R_s i_s = \frac{d\psi_s}{dt}, \quad (2)$$

式中, $u_s$  为电压矢量, $R_s$  为定子电阻, $i_s$  为定子电流矢量.

由式(2)知,在忽略定子电阻  $R_s$  压降的情况下,定子磁链矢量变化的方向与电压矢量运动方向一致.结合式(1)可知,为准确控制电机转矩的变化,应选取使定子磁链交轴分量变化最快的空间电压矢量.结合图 1,当转子磁链位置发生变化,空间电压矢量交轴分量也发生变化.为便于分析,令空间电压矢量幅值为 1 V,逆时针旋转方向为参考方向.根据图 1 可得各个空间电压交轴分量随转子磁链角度变化如式(3)所示:

$$\begin{cases} u_{1q} = \sin(-\theta_r), \\ u_{2q} = \sin(60-\theta_r), \\ u_{3q} = \sin(120-\theta_r), \\ u_{4q} = \sin(180-\theta_r), \\ u_{5q} = \sin(240-\theta_r), \\ u_{6q} = \sin(300-\theta_r). \end{cases} \quad (3)$$

图 2 所示为式(3)中各个空间电压矢量交轴分量随转子旋转角度的变化关系.

由图 2 可知,电机转子的一个位置周期被平均分为 6 个扇区,且在每个扇区内电压矢量的交轴分量都存在一个最大值和一个最小值,结合式(1)~(2)即可得到仅根据转矩控制要求条件下电压矢量的选择依据.以  $[0, \pi/3]$  扇区为例,在该扇区

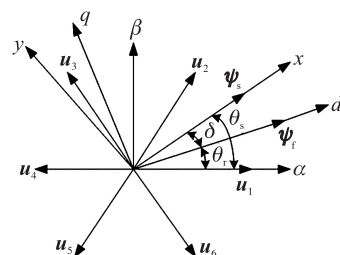


图 1 永磁同步电机的空间电压矢量与定转子磁链位置

Fig. 1 Position of stator, rotor flux linkage and voltage vector for PMSM

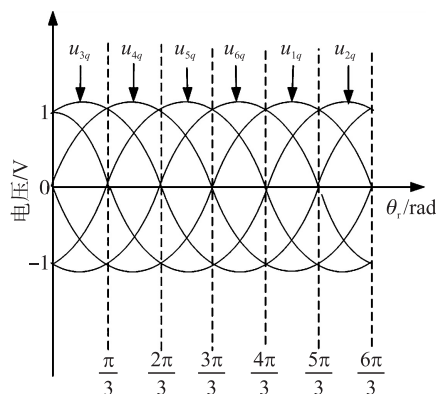


图 2 空间电压矢量交轴分量随转子磁链角度变化情况

Fig. 2 D-axis voltage vector VS rotor position

内,若要迅速增加电机转矩,应选择空间电压矢量  $u_3$ ,通过快速增加定子磁链的交轴分量达到增加转矩的目的;同理,若要迅速减小电机转矩,应选择空间电压矢量  $u_6$ ;当需要保持电机转矩时,则选择零电压矢量.其余扇区的电压矢量选择可依此得到.综上所述,可得表 1 所示的纯转矩控制模式下电压矢量选择表.其中, $\tau$  为转矩调节器的输出, $\tau$  为 1,表示需要增加电机转矩; $\tau$  为 -1,表示需要减少电机转矩; $\tau$  为 0,表示需要保持电机转矩.

表 1 转矩控制条件下电压矢量选择

Table 1 Voltage vector selecting table under torque control condition

$\tau$	$\theta_r$					
	$[0, \pi/3]$	$(\pi/3, 2\pi/3]$	$(2\pi/3, 3\pi/3]$	$(3\pi/3, 4\pi/3]$	$(4\pi/3, 5\pi/3]$	$(5\pi/3, 6\pi/3]$
1	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$
0	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$	$u_0(u_7)$
-1	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$

电机运行过程中,根据转矩调节器的输出,同时仅需要知道转子位置处于哪个位置范围,即可根据表 1 选择合适的电压矢量作用于电机,通过迅速改变定子磁链交轴分量以实现对电机转矩的准确控制,控制过程中不要求保持定子磁链幅值恒定,不需要严格的转子位置信息.

## 1.2 定子磁链优化控制

纯转矩控制模式下通过控制空间电压矢量的交轴分量直接对转矩准确控制,但由于非零空间电压矢量作用于永磁同步电机后,不仅使转矩迅速变化,同时也必然引起定子磁链幅值的变化,而定子磁链的变化对电机运行性能的影响较大,这里主要从对电机功率因数的影响角度分析.

传统 DTC 实现过程中要求保持定子磁链幅值恒定,在  $dq$  同步坐标系中,定子磁链直交轴分量和定子磁链幅值之间的关系如式(4)所示:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_d i_{sd} + \psi_f, \\ \psi_{sq} = L_q i_{sq}, \\ |\psi_s| = \sqrt{\psi_{sd}^2 + \psi_{sq}^2}. \end{cases} \quad (4)$$

式中, $i_{sd}$ 和 $i_{sq}$ 分别为定子电流的直轴分量和交轴分量, $L_d$ 和 $L_q$ 分别为电机的直交轴电感.结合式(4),在传统 DTC 中,当负载发生变化时,各个参数的变化情况如图 3 所示.

从图 3 可知,当电机转矩角从轻载时的  $\delta_1$  增加到重载时的  $\delta_2$  时,在传统 DTC 中,由于要保持定子磁链幅值不变,随着转矩角  $\delta$  的增大,定子磁链交轴分量逐渐增加,定子磁链直轴分量逐渐减少.由式(4)知,定子磁链的直轴分量均与定子电流的直轴分量有关.由纯转矩控制部分的分析知,电机转矩只与定子磁链交轴分量有关,也即只与定子电流的交轴分量有关.当负载转矩为空载或轻载时,由图 3 可知,此时所需的电流交轴分量较小,直轴无功电流分量却较大.

由于电机转矩的产生仅与电流交轴分量有关,与直轴的无功电流无关.而无功电流的引入对电机的功率因数的影响较大.在仅考虑基波分量的情况下,电机各参数与电机功率因数角的关系可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\theta_w = \arcsin \frac{2T_e L_d}{3p |\psi_s| \psi_f} - \arctan \frac{i_{sd}}{i_{sq}}, \quad (5)$$

式中, $\theta_w$ 为功率因数角, $p$ 为极对数,对功率因数角求余弦便可得到电机功率因数.在电机转矩不变的情况下,定子电流交轴分量也不变,从式(5)可知,若直轴的无功电流越大,电机损耗越大,功率因数就越小,使电机不能高效率运行.因此为提高电机运行的功率因数与运行效率,需对直轴的无功电流分量进行优化控制.

当直轴无功电流正向增大时,从式(4)知定子磁链直轴分量大于转子磁链幅值,若此时定子磁链幅值过大可能引起定子磁链绕组饱和,使电机无法运行,严重降低电机功率因数.

当直轴无功电流为负向增大时,从式(4)知定子磁链直轴分量小于转子磁链幅值,若此时定子磁链幅

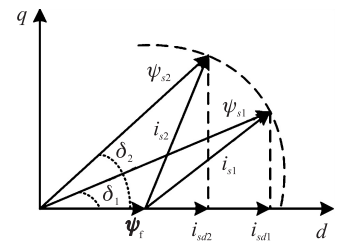


图 3 永磁变化同步电机传统 DTC 矢量变化

Fig. 3 Vector changes under PMSM traditional DTC

值过低可能引起严重的去磁情况,可能导致转子永磁体发生不可逆退磁<sup>[13]</sup>,对电机运行造成严重的影响.

基于上述考虑,在电机空载或轻载时,无论直轴电流正向过大或负向过大时,都会对电机造成损耗,降低电机功率因数,使电机无法正常稳定高效率运行.由于直轴无功电流与定子磁链直轴分量成线性关系,对无功电流的优化控制可归结到对定子磁链的优化控制.因此在迅速控制转矩的同时,需要对定子磁链进行优化控制,在有效控制电机转矩的同时提高电机运行的功率因数.

由于  $xy$  定子磁链同步旋转坐标系直接以定子磁链定向,因此,在该坐标系下分析定子磁链优化控制方法.在该坐标系下电压矢量和定子磁链矢量之间的关系如下所示:

$$\begin{cases} u_x = R_s i_x + \frac{d|\psi_s|}{dt}, \\ u_y = R_s i_y + \left( \frac{d\delta}{dt} + \omega_r \right) |\psi_s|. \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $u_x, u_y$  是电压矢量在  $xy$  轴的分量;  $i_x, i_y$  是定子电流在  $xy$  轴的分量;  $\omega_r$  是转子旋转电角速度.

从式(6)可知,在忽略定子电阻的情况下,电压矢量的  $x$  轴分量直接和定子磁链幅值有关,  $y$  轴方向分量决定了定子磁链矢量的速度.为便于分析,设非零电压矢量幅值为 1 V,逆时针旋转为参考方向,则各个电压矢量在  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的分量如式(7)、式(8)所示,其中  $u_{1x}$  为电压矢量  $\mathbf{u}_1$  在  $x$  轴方向的分量,  $u_{1y}$  为电压矢量  $\mathbf{u}_1$  在  $y$  轴方向的分量,其他依此类推:

$$\begin{cases} u_{1x} = \cos(-\theta_s), \\ u_{2x} = \cos(60^\circ - \theta_s), \\ u_{3x} = \cos(120^\circ - \theta_s), \\ u_{4x} = \cos(180^\circ - \theta_s), \\ u_{5x} = \cos(240^\circ - \theta_s), \\ u_{6x} = \cos(300^\circ - \theta_s). \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_{1y} = \sin(-\theta_s), \\ u_{2y} = \sin(60^\circ - \theta_s), \\ u_{3y} = \sin(120^\circ - \theta_s), \\ u_{4y} = \sin(180^\circ - \theta_s), \\ u_{5y} = \sin(240^\circ - \theta_s), \\ u_{6y} = \sin(300^\circ - \theta_s). \end{cases} \quad (8)$$

为便于比较分析,将式(7)、式(8)中空间电压矢量随定子磁链角度变化的规律示于图4.

从图4(a)中可以看出,根据空间电压矢量的变化情况,在  $0 \sim 2\pi$  范围内,定子磁链的角度被分成了6个扇区,每个扇区内电压矢量的分量均存在一个最大值和一个最小值.结合图4(a)和图4(b)可得到定子磁链优化控制下最优电压矢量的选取原则.

当定子磁链幅值过大,需要减小定子磁链幅值时,以  $\pi/6 \sim 3\pi/6$  位置范围为例,此时需要减小定子磁链幅值,可选的电压矢量为  $\mathbf{u}_4$ 、 $\mathbf{u}_5$  和  $\mathbf{u}_6$ .在定子磁链优化限幅的同时还需要考虑转矩的控制要求,结合图4(b),需要增加电机转矩时,则选择使定子磁链幅值减小,同时又能使定子磁链角度增大的电压矢量  $\mathbf{u}_4$ ;需要减小转矩时,则选择使定子磁链幅值减小同时减小定子磁链角度的空间电压矢量  $\mathbf{u}_6$ ;当要保持转矩时,则选择使定子磁链幅值减小,同时对定子磁链角度的影响在一个扇区内平均值为零的电压矢量  $\mathbf{u}_5$ .

当定子磁链幅值过小,需要增加定子磁链幅值时,同理,仍以  $\pi/6 \sim 3\pi/6$  位置范围为例,此时需要增加定子磁链幅值,则能够选择的电压矢量为  $\mathbf{u}_1$ 、 $\mathbf{u}_2$ 、 $\mathbf{u}_3$ .同样在定子磁链优化时要对转矩进行优化控制,由图4(b)知,需要增加电机转矩时,则选择使定子磁链幅值增大,同时又能使定子磁链角度增大的电压矢量  $\mathbf{u}_3$ ;需要减小转矩时,则选择使定子磁链幅值增大同时减小定子磁链角度的空间电压矢量  $\mathbf{u}_1$ ;当要保持转矩时,则选择使定子磁链幅值增大,同时使定子磁链角度在一个扇区内平均值为零的电压矢量  $\mathbf{u}_2$ .其他扇区可依此类推.



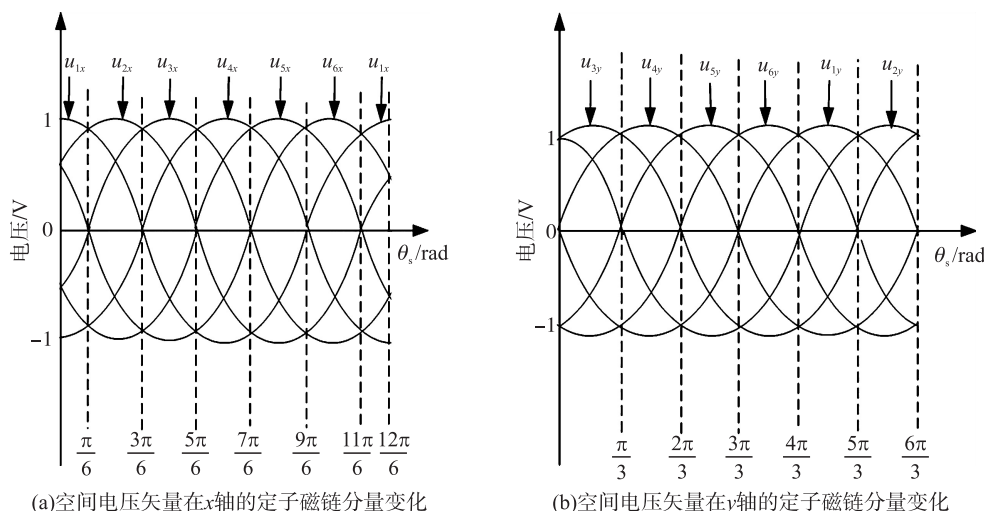


图 4 空间电压矢量随定子磁链变化情况

Fig. 4 Space voltage vector components VS stator flux linkage

最终整理得到如表 2 所示的定子磁链优化控制的电压矢量选择表,其中  $\tau$  为转矩调节器输出,  $\tau$  为 1 时增加转矩,  $\tau$  为 0 时保持转矩,  $\tau$  为 -1 时减小转矩.  $\varphi$  为定子磁链优化标志,  $\varphi$  为 1 时表示需要增加定子磁链幅值,  $\varphi$  为 -1 时表示需要减少定子磁链幅值.

表 2 定子磁链优化条件下电压矢量选择表

Table 2 Voltage vector selecting table under stator flux linkage amplitude optimization mode

$\varphi$	$\tau$	$\theta_s$					
		$[-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}]$	$(\frac{\pi}{6}, \frac{3\pi}{6}]$	$(\frac{3\pi}{6}, \frac{5\pi}{6}]$	$(\frac{5\pi}{6}, \frac{7\pi}{6}]$	$(\frac{7\pi}{6}, \frac{9\pi}{6}]$	$(\frac{9\pi}{6}, \frac{11\pi}{6}]$
1	1	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$
	0	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$
	-1	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$
-1	1	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$
	0	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$
	-1	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$

电机运行过程中采用传统 DTC 的磁链观测和转矩计算方法,但区别在于不要求保持定子磁链幅值恒定,仅需将定子磁链幅值和最大最小限定值比较,若未超出则根据表 1 选择电压矢量,只有在超出限幅值时根据表 2 选择电压矢量,进而实现对定子磁链的优化控制,以实现电机的高功率因数运行.

## 2 仿真分析

为了验证所提方法,利用 Matlab/Simulink 分别建立新型的直接转矩和传统的直接转矩控制的仿真模型. 永磁同步电机参数如表 3 所示,在传统 DTC 中,定子磁链幅值给定为 0.19 Wb;在新型的直接转矩控制中,定子磁链上限为 0.19 Wb,下限为 0.18 Wb. 系统控制周期 60  $\mu$ s.

### 2.1 不同负载条件下仿真

永磁同步电机在额定转速时分别采用传统 DTC 和新型的直接转矩控制方法,不同负载转矩情况下转矩波形如图 5 所示,为便于比较将两种控制方法的转矩脉动整理如表 4 所示.

由表 4 中的电机额定转速下的两种转矩控制方法在不同负载作用下的稳态转矩脉动可知,新型的直

表 3 永磁同步电机参数

Table 3 Parameters of PMSM

电机参数	数值
母线电压/V	300
额定转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	4 250
定子电阻/ $\Omega$	1.6
直轴电感/H	0.006 365
交轴电感/H	0.006 365
转子磁链/Wb	0.185 2
电机极对数	2
额定转矩/( $N \cdot m$ )	2.8

接转矩控制方法直接以转矩为控制目标,仅根据转矩控制要求选择优化的电压矢量,进而能够实现对转矩的准确控制,相比于传统 DTC,该方法具有更低的转矩脉动,尤其在空载和半载条件下,抑制转矩脉动的效果更好,稳态性能更好. 仿真结果初步验证了理论分析的正确性.

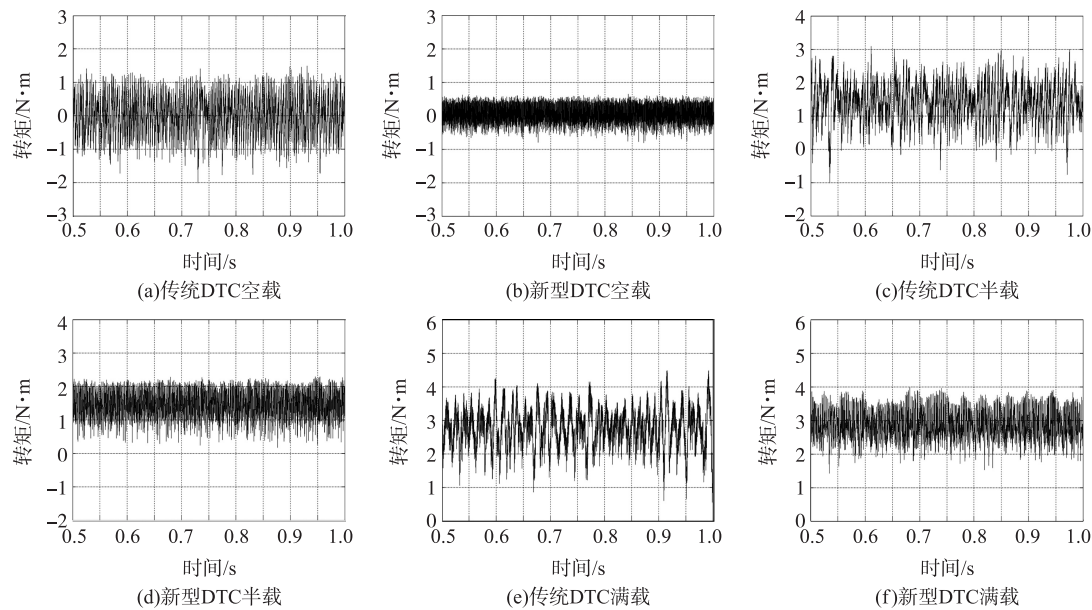


图 5 不同控制方法的稳态转矩波形

Fig. 5 Steady torque waveforms under different methods

表 4 额定转速下的稳态转矩脉动

Table 4 Steady torque ripple under rated speed

负载转矩	传统 DTC 转矩脉动/(N·m)	新型的直接转矩脉动/(N·m)
空载	3.7	1.45
半载	3.92	2.14
满载	4.01	2.57

2.2 不同负载直交轴电流和功率因数比较

电机在额定转速条件下不同负载直交轴电流波形如图 6 所示. 为便于比较将不同负载转矩的仿真结果整理如表 5 所示.

表 5 两种控制方法额定转速不同负载转矩下的仿真结果

Table 5 The simulation results of different load torque under the different control methods

负载转矩	传统 DTC			新型的直接转矩控制		
	$i_{sd}$ 平均值/A	$i_{sq}$ 平均值/A	功率因数	$i_{sd}$ 平均值/A	$i_{sq}$ 平均值/A	功率因数
空载	1	0	0	0	0	1
0.3 倍额定负载	0.92	1.55	0.88	0	1.55	0.998 7
半载	0.74	2.5	0.979	0	2.5	0.996
满载	0	5.2	0.985	0	5.2	0.985

由于电机转矩变化仅与定子电流交轴分量变化有关,直轴分量并未参与转矩产生,因此,从表 5 可知,在这两种控制方法中的交轴电流平均值均相同,但直轴无功电流却差别较大,尤其在电机空载、轻载时,传统 DTC 为保持定子磁链恒定,需要额外的无功电流;而新型的直接转矩控制通过对定子磁链的优化控制,使直轴的无功电流平均值为 0,具有很高的功率因数. 随着负载转矩的增加,传统 DTC 的电机直轴电流逐渐降低,交轴电流逐渐增加;而在新型的直接转矩中,直轴无功电流始终为 0,交轴电流逐渐增加,保证了较低的电机损耗,提高了电机运行效率. 仿真结果验证了该改进方法的正确性.

2.3 两种控制方法动态性能仿真

当电机在 0.2 s 突加给定转矩 2.8 N·m,采用两种控制方法的转矩波形如图 7 所示.

从图 7 可知,传统 DTC 转矩响应时间约为 0.35 ms,新型的转矩控制方法响应时间约为 0.24 ms,两种

控制方法均具有良好的动态性能,但传统 DTC 要求控制定子磁链幅值恒定,无法实现对电机转矩的解耦控制,限制了其动态性能的进一步提高;而新型的直接转矩控制方法仅根据转矩控制要求选择电压矢量,实现了对转矩的准确控制,因而具有更好的动态响应性能。

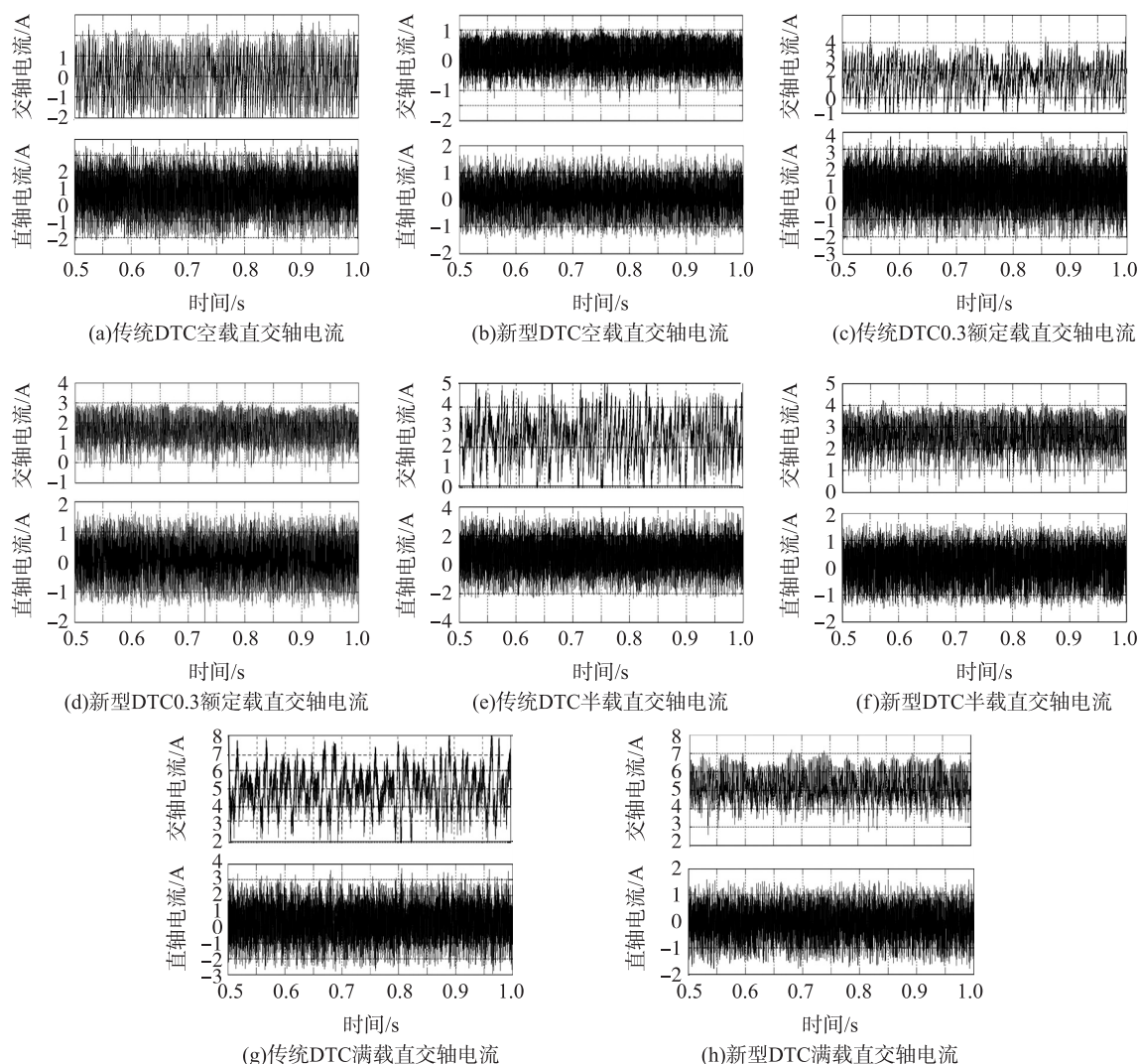


图 6 不同控制方法的额定转速下的电机直交轴电流

Fig. 6 Motor orthogonal axis current under different control methods

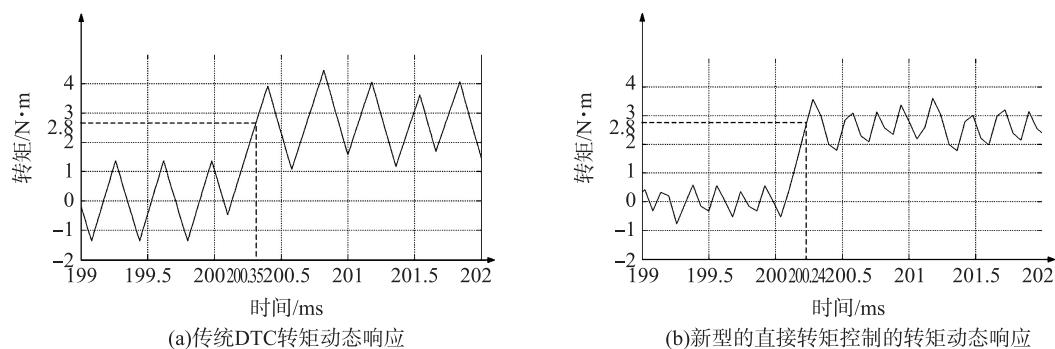


图 7 两种控制方法的转矩动态响应

Fig. 7 Torque dynamic response waveforms under two different methods

### 3 结语

永磁同步电机传统 DTC 由于保持定子磁链幅值不变,在空载、轻载时增加了无功电流,降低了电机功率因数。以定子绕组星形连接的永磁同步电机为研究对象,通过对电机转矩变化规律,以及对定子磁链与

电机功率因数之间变化关系的深入分析,提出了一种新型的直接转矩控制方法,所提方法从转矩和定子磁链两方面进行优化控制,仿真结果说明了该新型直接转矩控制方法具有良好的动、静态性能,为永磁同步电机高性能控制方法的研究提供了新的思路。

### [参考文献](References)

- [1] Hu Yuwen, Tian Cun, Gu Yikang, et al. In-depth research on direct torque control of permanent magnet synchronous motor [C]//28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Sevilla: IEEE Industrial Electronics Society, 2002: 1 060-1 065.
- [2] Takahashi I, Ohmori Y. High-performance direct torque control of an induction motor [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1989, 25(2): 25-26.
- [3] Zhong L, Rahman M F, Hu Y W, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528-535.
- [4] 许峻峰, 徐英雷, 冯江华, 等. 永磁同步电机直接转矩控制中定子磁链的分析 [J]. 电气传动, 2005, 35(1): 10-18.  
Xu Junfeng, Xu Yinglei, Feng Jianghua, et al. Analysis of stator flux permanent magnet synchronous motor direct torque control [J]. Electric Drive, 2005, 35(1): 10-18. (in Chinese)
- [5] 杨建飞, 胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制转矩调节设计 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 76-81.  
Yang Jianfei, Hu Yuwen. A torque control design for permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 76-81. (in Chinese)
- [6] 周扬忠, 钟技. 用于永磁同步电动机直接转矩控制系统的新型定子磁链滑模观测器 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 97-102.  
Zhou Yangzhong, Zhong Ji. A novel stator flux linkage estimator based on sliding mode theory for direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 97-102. (in Chinese)
- [7] 许俊峰, 徐英雷, 冯江华, 等. 基于改进型积分器的永磁同步电机直接转矩控制 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 77-80.  
Xu Junfeng, Xu Yinglei, Feng Jianghua, et al. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on improved integrator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 77-80. (in Chinese)
- [8] 徐艳平, 刘煜, 钟彦儒. 永磁同步电机的无速度传感器直接转矩控制 [J]. 电气传动, 2010, 40(4): 24-27.  
Xu Yanping, Liu Yu, Zhong Yanru. Speed sensor-less direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Drive, 2010, 40(4): 24-27. (in Chinese)
- [9] 孙笑辉, 张曾科, 韩曾晋. 基于直接转矩控制的感应电动机转矩脉动最小化方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 109-112.  
Sun Xiaohui, Zhang Zengke, Han Zengjin. Direct torque control of induction motor based on torque ripple minimization methods [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 109-112. (in Chinese)
- [10] 尚重阳, 周建华, 邓利红, 等. 空间矢量调制的永磁同步电机调速控制方法 [J]. 大电机技术, 2008(5): 16-18.  
Shang Chongyang, Zhou Jianhua, Deng Lihong, et al. Space vector modulation of permanent magnet synchronous motor on speed control method [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2008(5): 16-18. (in Chinese)
- [11] 何师, 邱阿瑞, 袁新枚. 基于 SVM 的永磁同步电机直接转矩控制实验研究 [J]. 微电机, 2008, 41(4): 6-8.  
He Shi, Qiu Arui, Yuan Xinmei. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on SVM [J]. Micromotor, 2008, 41(4): 6-8. (in Chinese)
- [12] 杨建飞, 胡育文. 永磁同步电机最优直接转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 109-115.  
Yang Jianfei, Hu Yuwen. Optimal direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 109-115. (in Chinese)
- [13] 窦汝振, 温旭辉. 永磁同步电动机直接转矩控制的弱磁运行分析 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 117-121.  
Dou Ruzhen, Wen Xuhui. Analysis of field weakening operation for the direct torque control of PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 117-121. (in Chinese)
- [14] 杨建飞. 永磁同步电机直接转矩控制系统若干关键问题研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2011.  
Yang Jianfei. Several key research questions on permanent magnet synchronous motor direct torque control system [D]. Nanjing: College of Automatic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]