

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.12.001

永磁同步电机直接转矩控制新型占空比调制策略

袁天清, 王大志, 李 烨, 王兴宇
(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对传统永磁同步电机直接转矩控制系统转矩脉动和磁链脉动较大, 现有占空比调制策略计算复杂等问题, 提出一种新型占空比调制策略. 该调制策略利用定子磁链和扇区电压矢量的作用角区分转矩脉动和磁链脉动在控制系统中的权重系数, 并设计新型开关表, 保证在任一控制周期中最佳电压矢量的选择. 在保证系统计算量较低的前提下, 利用权重系数和最佳电压矢量推导最优占空比计算公式. 仿真和实验结果证明, 所提出的新型占空比调制策略可以大幅度抑制转矩脉动和磁链脉动, 获得较好的稳态运行性能, 并保持系统快速动态响应性能.

关 键 词: 占空比调制; 永磁同步电机; 直接转矩控制; 转矩脉动; 磁链脉动
中图分类号: TM 30 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)12-1673-06

Novel Duty Ratio Modulation Strategy for PMSM DTC System

YUAN Tian-qing, WANG Da-zhi, LI Ye, WANG Xing-yu
(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YUAN Tian-qing, E-mail: tqyuan@stumail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to suppress the significant torque ripple and flux linkage ripple in CDTC (conventional direct torque control)-driven PMSM(permanent magnet synchronous motor), and to reduce the calculations in conventional duty ratio modulation strategies, a novel duty ratio modulation strategy for PMSM DTC(direct torque control) system was proposed. The impact factors of torque and flux linkage ripples could be distinguished using the proposed strategy through the active angle between stator linkage and sector vector. A new switching table was designed to ensure the optimal choice of voltage vector. The simplified duty ratio calculation equations were obtained with the minimum calculations. Simulation and experimental results show that the novel modulation strategy can maintain the dynamic response in CDTC and suppress torque and flux linkage ripples efficiently.

Key words: duty ratio modulation; PMSM(permanent magnet synchronous motor); DTC(direct torque control); torque ripple; flux linkage ripple

永磁同步电机具有高功率密度、高可靠性、高效率等优点, 广泛应用于航空航天、冶金、化工、医疗器械等领域. 目前永磁同步电机采用的控制策略以矢量控制和直接转矩控制为主. 其中, 直接转矩控制系统动态响应快速且控制原理简单, 特别适合应用于对调速性能要求较高的永磁同步电机^[1]. 但传统永磁同步电机直接转矩控制系统存在转矩脉动和磁链脉动较大等问题, 使得电机稳态性能较差. 如何保持永磁同步电机直接转矩控制系统快速动态响应性能, 并准确、简单地抑制系统转矩脉动和磁链脉动, 是国内外学者研究直接转矩控制系统的难点和热点^[2-4].

直接转矩控制系统开关表中储存了 8 个电压矢量. 根据电机转矩和磁链实际值与预测值的误差, 开关表中合适电压矢量会被选择并应用于控制系统的下一个控制周期^[5]. 传统直接转矩控制系统被选择的电压矢量作用于控制系统整个周期, 导致转矩或者磁链过补偿, 这是导致直接转矩

控制系统转矩脉动和磁链脉动难以抑制的原因. 为有效抑制转矩脉动和磁链脉动,文献[6-9]提出对被选择电压矢量进行占空比调制,分别利用了新型的控制拓扑结构、简化占空比调节器、PI 调节器和自适应饱和和积分控制器等策略,提升了系统的稳态性能. 但这些调制策略对系统性能提升有限,存在占空比求解复杂等问题,且转矩脉动和磁链脉动对控制系统性能影响权重系数被看作是相同的,没有根据系统指标变化及时调整各自权重系数,这也会导致所求得占空比值并不是最佳值.

针对上述问题,本文提出一种新型占空比调制策略. 首先,计算每个周期中转矩脉动和磁链脉动的权重系数;其次,根据得到的权重系数与定子磁链所在扇区位置,从设计的新型开关表中选择最佳电压矢量;最后,利用推导的简化占空比公式得到下一个控制周期的最优电压矢量占空比.

仿真和实验结果验证了所提出的新型占空比调制策略的可行性和有效性. 与传统直接转矩控制系统相比较,提出的新型占空比调制策略可以在保证传统控制系统良好动态响应性能前提下,利用简化的计算过程实现控制系统转矩脉动和磁链脉动的有效抑制,达到提升控制系统稳态性能的目的.

1 新型开关表设计

采用 $\alpha-\beta$ 坐标系对直接转矩控制系统的各参量进行分析与计算,如图 1 所示. 传统直接转矩控制系统开关表如表 1 所示.

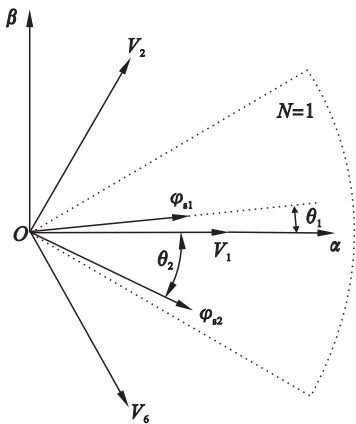


图 1 $\alpha-\beta$ 坐标系中直接转矩控制系统的电压矢量和定子磁链

Fig. 1 Space voltage vector and stator flux linkage sector in $\alpha-\beta$ reference frame

在直接转矩控制系统中,两电平逆变器可以产生 8 个电压矢量,采用 V_n 表示,包括 6 个有效

矢量($V_1 \sim V_6$)和 2 个零矢量(V_0 和 V_7). 定子磁链 φ_s 在 $\alpha-\beta$ 坐标系中旋转,其瞬时位置所在扇区采用 $N(1 \sim 6)$ 表示^[5]. 定义 θ 为作用角,表示定子磁链和定子磁链所在扇区电压矢量 V_N 之间的夹角. 根据定子磁链所在扇区位置 N ,转矩误差 e_T 和磁链误差 e_F ,合适的电压矢量 V_n 被选择并应用于控制系统下一个控制周期.

表 1 传统开关表			
Table 1 Conventional switching table			
定子磁链扇区 N	转矩 T 补偿预测		
	\uparrow	\downarrow	
磁链 F 补偿预测	\uparrow	V_{N+1}	V_{N+2}
	\downarrow	V_{N-2}	V_{N-1}

假设图 1 中定子磁链为 φ_{s1} ,磁链扇区 N 是 1,作用角 θ_1 很小. 如果转矩和磁链都需要增大,转矩误差较小而磁链误差较大,电压矢量 V_2 会被选择并应用于下一个控制周期. 当 V_2 作用于控制系统后, V_2 对转矩的补偿会超过其需求,而对磁链的补偿又不足够消除误差,会导致控制系统性能变差. 分析定子磁链和电压矢量的关系可知,电压矢量 V_1 才是最适合下一控制周期应用的电压矢量,这是由电压矢量 V_n 对转矩 T 和磁链 F 的作用因子会随着 θ 的变化而改变造成的.

为消除传统直接转矩控制系统开关表存在的非最佳电压矢量选择等问题,设计了新型开关表,如表 2 所示. 新型开关表考虑了作用角与电压矢量对转矩和磁链作用因子的关系. 避免了错误电压矢量的选择,保证控制系统的稳定性.

表 2 新型开关表							
Table 2 New switching table							
权重系数 λ		定子磁链扇区 N					
		1	2	3	4	5	6
$\lambda_T < \lambda_F$	$\uparrow(F)$	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
	$\downarrow(F)$	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3
$\lambda_T \geq \lambda_F$	$\uparrow(T)$	$\uparrow(F)$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
	$\downarrow(F)$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	$\uparrow(F)$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	$\downarrow(F)$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

2 简化占空比计算

2.1 转矩和磁链补偿分析

当定子磁链变为图 1 中 φ_{s2} 时,作用角 θ_2 接近 30° ,转矩和磁链都需要增大时,电压矢量 V_2

会被选择应用于下一控制周期,导致转矩脉动的补偿量远大于磁链脉动补偿量,分别为 $500\% e_T$ 和 $20\% e_F$. 根据文献[6-9]占空比 d 求解公式可得

$$\left. \begin{aligned} d_T &= \frac{e_T}{500\% e_T} = 0.2, \\ d_F &= \frac{e_F}{20\% e_F} = 5. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由于占空比变化范围是 $(0, 1)$, d_T 值在合理区间内,保持不变,而 d_F 值超过合理范围,取最大值 1. 在传统占空比调制策略中,转矩脉动和磁链脉动权重系数相同^[6-9],故占空比为

$$d = \frac{d_T + d_F}{2} = 0.6. \quad (2)$$

在下一个控制周期,电压矢量 V_2 被应用于系统中,且其占空比 d 为 0.6,控制周期剩余时间使用零矢量填充. 转矩补偿和磁链补偿分别为

$$\left. \begin{aligned} e'_T &= 500\% e_T \times 0.6 = 300\% e_T, \\ e'_F &= 20\% e_T \times 0.6 = 12\% e_F. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

从上述分析结果可以看出,在控制周期结束后,控制系统转矩误差补偿过度,而磁链误差补偿远低于需求,控制系统的稳态性能变得更差. 因此上述求解的占空比不是最佳占空比,有必要对控制系统占空比值求解过程及结果进行重新推导、仿真及实验验证.

2.2 基于权重系数的占空比求解

上述占空比值的求解公式是在转矩脉动和磁链脉动在控制系统中权重系数相同的前提下得出的,从式(3)结果已经得出这种占空比求解方法并不合理. 采用文献[10]转矩脉动和磁链脉动复合总脉动最小化思想推导最优占空比求解公式,利用复合总脉动值来衡量系统稳定性,控制系统的复合总脉动值为

$$E = \sum_{i=T,F} \left(\lambda_i \times \frac{e'_i - e_i}{e_i^*} \right)^k. \quad (4)$$

式中权重系数 λ_i 利用文献[8-9]中的 PI 控制器和自适应积分饱和控制器采用的线性控制策略得到:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_T &= k_T \times \frac{e_T}{e_T^*}, \\ \lambda_F &= k_F \times \frac{e_F}{e_F^*}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, e_T^* 和 e_F^* 是电机转矩和磁链参考值. k_T 和 k_F 根据控制系统工况进行设置,具体设置方式如下:首先,利用传统直接转矩控制系统的仿真实验可以获得电机额定工况下转矩脉动和磁链脉动;其次,设定权重系数 $\lambda_T = \lambda_F$,则可以获得在转矩

与磁链同等重要性条件下的 k_T 和 k_F 参考值;最后,在新型占空比调制中,根据系统需求,合理调整 k_T 和 k_F 具体值,就可以获得需要的性能.

2.3 系统占空比求解

在不同占空比情况下,仿真分析式(4)中变量 k 对复合总脉动值 E 的影响,如图 2 所示.

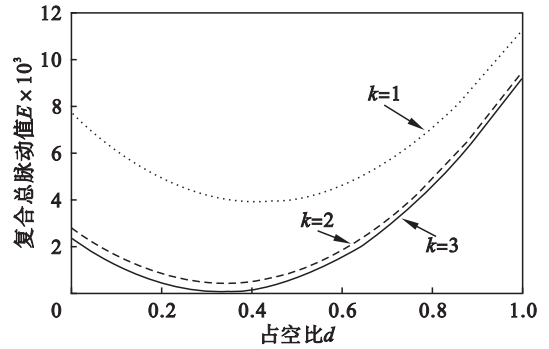


图 2 复合总脉动值与占空比和变量 k 的关系
Fig. 2 Relationships between the total ripple value and duty ratio and the variable k

从图 2 仿真结果可知,变量 k 取 2 时系统性能最佳,既保证复合总脉动值较低,也保证计算量较少. 对式(4)求导,得到系统最优占空比值为

$$d = \frac{\lambda_T^2 \cdot k_T \cdot \left(\frac{e_T}{e_T^*} \right)^2 + \lambda_F^2 \cdot k_F \cdot \left(\frac{e_F}{e_F^*} \right)^2}{\lambda_T^2 \cdot k_T^2 \cdot \left(\frac{e_T}{e_T^*} \right)^2 + \lambda_F^2 \cdot k_F^2 \cdot \left(\frac{e_F}{e_F^*} \right)^2}. \quad (6)$$

2.4 新型占空比调制系统框图

本文提出的基于新型占空比调制策略永磁同步电机直接转矩控制方案系统框图如图 3 所示. 其中,权重系数求解器代替传统滞环比较器. 表 2 设计了新型开关表代替表 1 传统开关表;最优占空比计算模块采用式(6)进行计算,得到的最优占空比值和最佳电压矢量作用于两电平电压型逆变器驱动永磁同步电机.

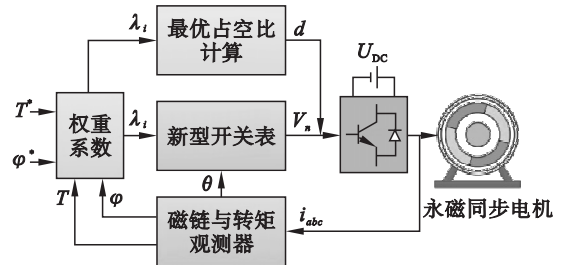


图 3 新型占空比调制系统框图
Fig. 3 Novel duty ratio modulation system diagram

3 仿真与实验结果分析

通过 MATLAB/SIMULINK 仿真与样机实验

的方式对比分析传统直接转矩控制系统(CDTC)和新型占空比调制直接转矩控制系统(DDTC)稳态与动态性能. 永磁同步电机样机参数如表 3 所示.

表 3 永磁同步电机参数
Table 3 Parameters of the PMSM

变量	符号	数值
极数	p	4
定子电阻	R/Ω	0.8
绕组电感	L_s/H	0.001 6
直流电源电压	U_{DC}/V	36
额定功率	P/W	100
额定转速	$n/(r \cdot min^{-1})$	3 000
额定转矩	$T/(N \cdot m)$	0.32

3.1 转矩脉动和磁链脉动抑制效果及动态响应性能仿真分析

为真实反映电机在不同转速和不同负载情况下动静态响应性能,仿真参数设置与电机实验设置相同. 考虑到实际电机转速较高而转矩较小,为方便观察分析不同控制策略下电机转矩脉动抑制效果,采用降低电机转速同时增大负载方式,使电机运行于低速大转矩状态.

仿真初始运行时刻,设定负载为 $1 N \cdot m$,转速为 $500 r/min$,在 $0.2 s$ 时增大负载到 $2 N \cdot m$,在 $0.3 s$ 时降低转速到 $300 r/min$. 电机定子磁链参考值设定为 $0.3 Wb$,控制系统采样周期为 $10 \mu s$. 传统直接转矩控制系统和基于占空比调制直接转矩控制系统仿真波形如图 4 ~ 图 6 所示.

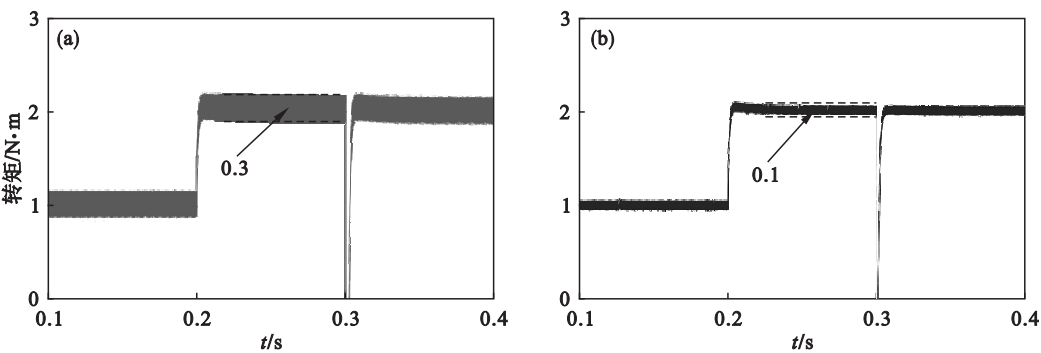


图 4 传统直接转矩控制系统和新型占空比调制直接转矩控制系统转矩脉动波形
Fig. 4 Torque ripples waveforms of CDTC and DDTC systems
(a)—传统直接转矩控制系统; (b)—新型占空比调制直接转矩控制系统.

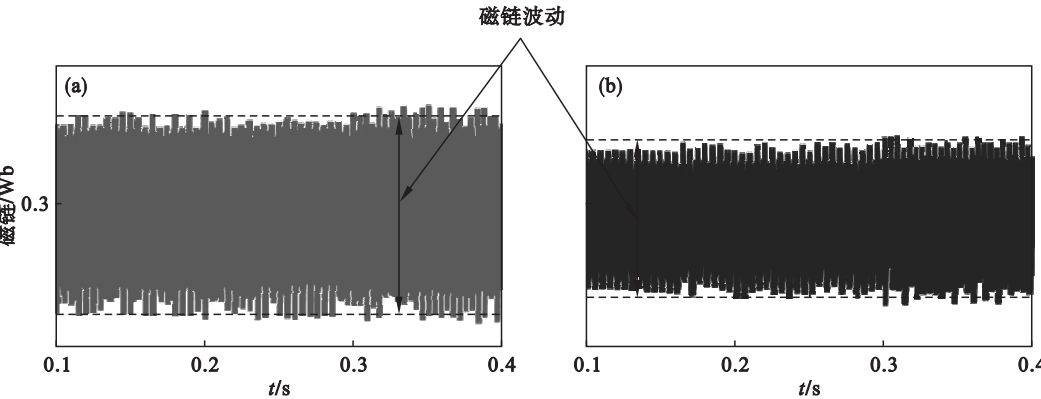


图 5 传统直接转矩控制系统和新型占空比调制直接转矩控制系统磁链脉动波形
Fig. 5 Flux linkage ripples waveforms of CDTC and DDTC systems
(a)—传统直接转矩控制系统; (b)—新型占空比调制直接转矩控制系统.

从图 4 转矩脉动抑制仿真结果可以看出,传统直接转矩控制系统的转矩脉动是 $0.3 N \cdot m$,采用占空比调制策略后,转矩脉动减小到 $0.1 N \cdot m$,转矩脉动降低约 66%. 从图 5 磁链脉动抑制仿真结果分析可知,占空比调制策略可以抑制 25% 的磁链脉动,使得直接转矩控制系统稳态性能更佳.

如图 6 所示,当负载变化时,采用两种控制策略的系统调节时间分别为 $t_1 = 28 ms$ 和 $t_3 = 33 ms$;当转速变化时,两种控制系统的调节时间分别为 $t_2 = 30 ms$ 和 $t_4 = 27 ms$. 两种控制系统的动态响应时间相差很小,新型占空比调制策略没有降低直接转矩控制系统的动态响应性能.

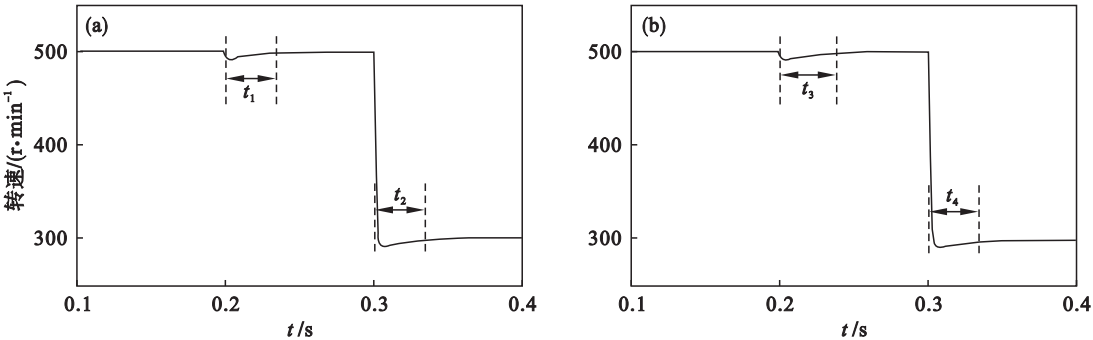


图 6 传统直接转矩控制系统和新型占空比调制直接转矩控制系统动态响应波形
Fig. 6 Dynamic response waveforms of CDTC and DDTC systems
(a)—传统直接转矩控制系统；(b)—新型占空比调制直接转矩控制系统。

3.2 转矩脉动和磁链脉动抑制效果实验验证

采用样机实验的方式,对比分析传统直接转矩控制系统和基于占空比调制的直接转矩控制系统的转矩脉动和磁链脉动,对上述理论推导及仿真分析加以验证.实验平台如图 7 所示.仅对样机稳态运行情况下采用不同控制策略的转矩脉动和磁链脉动进行研究分析.电机所带负载由连接永磁同步电机的磁粉制动器给定,额定情况下设定其负载值为 $1\text{ N}\cdot\text{m}$,控制系统参考磁链选择为 0.3 Wb .基于传统直接转矩控制和新型占空比调制两种不同控制策略下电机的转矩波形和磁链波形分别如图 8 和图 9 所示.

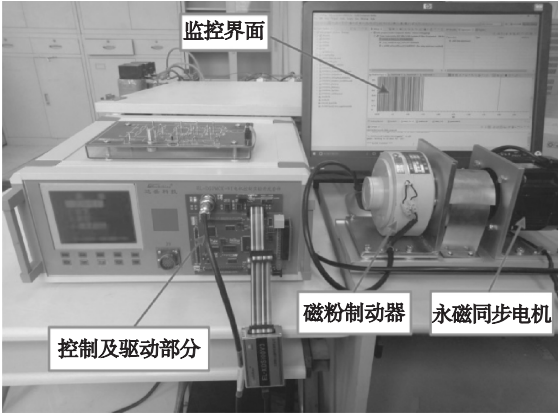


图 7 实验系统
Fig. 7 Experiment system

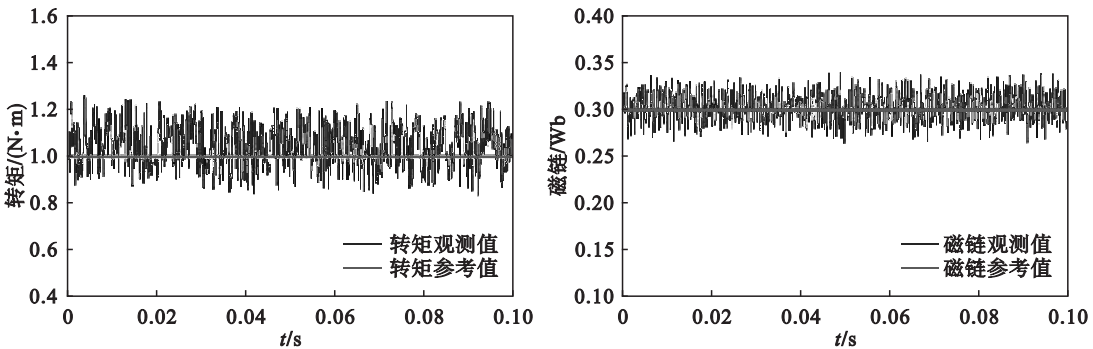


图 8 传统直接转矩控制方式下永磁同步电机转矩波形和磁链波形
Fig. 8 Torque and flux linkage waveforms of PMSM under CDTC

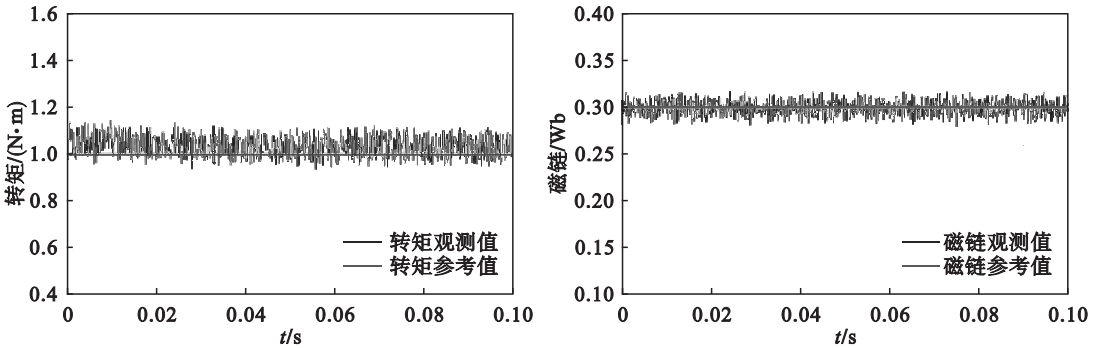


图 9 新型占空比调制直接转矩控制方式下永磁同步电机转矩波形和磁链波形
Fig. 9 Torque and flux linkage waveforms of PMSM under DDTC

从样机实验波形可以看出,采用传统直接转矩控制方式和采用新型占空比调制直接转矩控制方式下电机的转矩脉动分别为 0.35 和 0.2 N·m,两种控制方式下电机的磁链脉动分别为 0.04 和 0.025 Wb,电机的平均输出转矩分别为 1.1 和 1.05 N·m.

对比分析上述两组实验结果可知,采用新型占空比调制策略的直接转矩控制系统相对于传统直接转矩控制系统可以抑制 42% 转矩脉动和 37% 磁链脉动.提出的新型占空比调制策略可以有效解决传统永磁同步电机直接转矩控制系统转矩脉动和磁链脉动较大的问题,提升系统运行的稳定性.

4 结 论

1) 本文提出利用定子磁链和扇区电压矢量的作用角计算转矩脉动和磁链脉动的权重系数,进而设计出所需的新型开关表,保证在每一个控制周期中电压矢量选择的准确性.

2) 利用转矩脉动和磁链脉动的复合总脉动值最小原则推导简化占空比求解公式,保证在计算量较小的前提下得到最优占空比值.

3) 利用软件仿真与样机实验验证了所提出的新型占空比调制策略的可行性和优越性.这种调制策略可以在不影响控制系统动态响应性能的前提下,大幅度降低转矩脉动和磁链脉动,提高控制系统的稳态性能.

参考文献:

[1] Putri A K,Rick S,Franck D,et al. Application of sinusoidal field pole in a permanent-magnet synchronous machine to improve the NVH behavior considering the MTPA and

MTPV operation area[J]. *IEEE Transactions on Industrial Applications*,2016,52(3):2280 – 2288.

[2] Cheema M A M,Fletcher J E,Xiao D,et al. A direct thrust control scheme for linear permanent synchronous motor based on online duty ratio control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2016,30(6):4416 – 4428.

[3] Ren Y,Zhu Z Q,Liu J M. Direct torque control of permanent magnet synchronous machine drives with a simple duty ratio regulator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2014,61(10):5249 – 5258.

[4] Choi Y S,Choi H H,Jung J W. Feedback linearization direct torque control with reduced torque and flux ripples for IPMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2016,31(5):3728 – 3737.

[5] Zhang Z,Zhao Y,Qiao W,et al. A space vector modulated sensorless direct torque control for direct drive PMSG wind turbines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2014,50(4):2331 – 2341.

[6] Zhang Y,Zhu J. A novel duty cycle control strategy to reduce both torque and flux ripples for DTC of permanent magnet synchronous motor drives with switching frequency reduction [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2011,26(10):3055 – 3067.

[7] Zhang Y,Zhu J,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):2848 – 2859.

[8] Niu F,Li K. Direct torque control for permanent magnet synchronous machines based on duty ratio modulation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2015,62(10):6160 – 6170.

[9] Zhang Z,Wei C,Qiao W,et al. Adaptive saturation controller-based direct torque control for permanent magnet synchronous machines [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2016,31(10):7112 – 7122.

[10] 吕帅帅,林辉,马冬麒. 基于最优占空比调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. *电工技术学报*,2015,30(1):35 – 42. (Lyu Shuai-shuai, Lin Hui, Ma Dong-qi. Direct torque control for permanent magnet synchronous motor with optimal duty cycle control [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2015,30(1):35 – 42.)