

基于占空比调节的无刷直流电机直接转矩控制^{*}

潘 峰, 周运杰, 卢沁雄, 闫庚龙, 韩如成
(太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 传统直接转矩控制(DTC)在每一个控制周期对电机施加一个不变的电压矢量,从而导致较大的转矩脉动,而且开关管的开关频率不固定。为减小转矩脉动同时使开关管的开关频率恒定从而提升系统的稳定性,将占空比调制技术引入到无刷直流电机(BLDCM)DTC系统当中,并研究了4种占空比生成方法对转矩脉动的抑制效果。由于引入了占空比调制技术,零电压矢量和非零电压矢量作用的时间随占空比的改变而改变,因此能够对转矩进行更精细的控制从而抑制转矩脉动。仿真和试验结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 无刷直流电机;直接转矩控制;占空比;转矩脉动

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)11-0042-08

Direct Torque Control with Duty Cycle Control Strategy for Brushless DC Motor^{*}

PAN Feng, ZHOU Yunjie, LU Qinxiong, YAN Genglong, HAN Rucheng
(Electronic Information and Engineering College, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: For the traditional direct torque control (DTC) system of Brushless DC Motors (BLDCM), the motor was imposed on one fixed voltage vector during a control cycle, which lead to great torque ripples and inconstant switching frequency. In order to suppress the torque ripples and keep the switching frequency constant so that the reliability of the system could be improved, the duty ratio control method was introduced into the DTC system of BLDCM and the effect of four duty ratio determination method for suppressing the torque ripples were studied. By using the duty ratio control method, the acting time of the active voltage vector and zero voltage vector during one control cycle were decided by the duty ratio, so the torque could be controlled more accurately and the torque ripples could be suppressed. The results of the simulation and experiments highlight the validation of the method proposed.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); direct torque control (DTC); duty ratio; torque ripple

0 引 言

直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)以电磁转矩为主要控制变量使系统具有较高的动态响应性能,但是在每一个固定的控制周期内一直施加不变的电压矢量会引起较大的转矩脉动,降低了系统的稳态性能且开关频率不恒定^[1-3]。针对此问题众多学者进行了研究和改进。其中一种方法是在系统中加入空间矢量调制技术^[4-6],通过相邻

的两个有效电压矢量和零电压矢量分别作用不同时间,从而合成一个等效的电压矢量。该等效电压矢量可有效减小转矩和磁链误差。另一种方法是在系统中引入占空比调节技术^[2,3,7-11],依据占空比确定一个控制周期内有效电压矢量的作用时间,剩余时间施加零电压矢量从而达到控制转矩的目的。

考虑到无刷直流电机(Brushless DC Motor, BLDCM)运行时各变量的非正弦特性,占空比调节方法相比于空间矢量调制技术更易应用于无刷

^{*} 基金项目: 山西省自然科学基金项目(2010011024-3)

作者简介: 潘 峰(1974—),男,副教授,研究方向为电力电子与电力传动。

周运杰(1988—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

直流电机 DTC 系统中。另外已有不少文献研究了将占空比调节用于异步电机 DTC 系统和正弦波永磁同步电机 DTC 系统时的可行性及效果,而关于将占空比调节技术应用于 BLDCM 的 DTC 系统的研究并不多,因此本文在分析了有效电压矢量和零电压矢量对电磁转矩影响的基础上,研究了将占空比调节技术应用于两相导通模式下的 BLDCM 的 DTC 系统中的可行性及有效性,并研究了 4 种占空比产生方法^[4, 12-15]对电磁转矩脉动的抑制效果。

1 BLDCM 的 DTC 系统

1.1 传统 BLDCM 的 DTC 系统

无刷直流电机等效电路如图 1 所示,其中 R_a 、 R_b 、 R_c 和 L_a 、 L_b 、 L_c 分别为电机各相定子绕组的等效电阻和等效电感, e_a 、 e_b 、 e_c 和 u_{an} 、 u_{bn} 、 u_{cn} 分别为电机各相反电动势和各相相电压, i_a 、 i_b 、 i_c 为相电流。各相反电动势和各相电流的正方向如图 1 所示, U_{dc} 为直流母线电压。

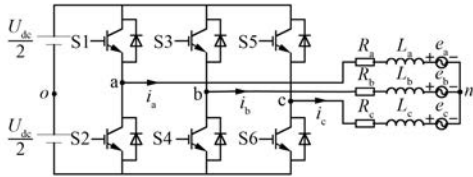


图 1 无刷直流电机等效电路

假定 $R_a = R_b = R_c = R$, $L_a = L_b = L_c = L$, 则 BLDCM 的电压方程为

$$\begin{cases} u_{an} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_{bn} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ u_{cn} = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (1)$$

电磁转矩方程为

$$T_{em} = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega_{rm}} \quad (2)$$

式中: T_{em} ——电磁转矩;

ω_{rm} ——转子机械角速度。

在两相导电模式下, BLDCM 的 DTC 系统整体结构框图如图 2 所示^[16-17], 其中需要计算电磁转矩而取消了定子磁链的观测^[18-20], 使系统更简

洁有效。在两相导通模式下, 逆变器输出的有效电压矢量应为导通相相电压合成矢量^[19-20], 在 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系中, 其分布如图 3 所示。

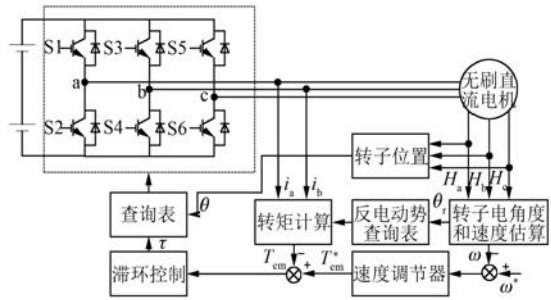


图 2 BLDCM 的 DTC 系统整体框图

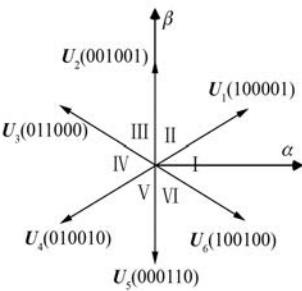


图 3 导通相相电压合成矢量及其在 $\alpha\beta$ 平面中的分布

6 个有效电压矢量及其相应的零电压矢量的定义如表 1 所示。其中: 每一行包括一个有效电压矢量及其所对应的两个零电压矢量, 如表 1 中最后一行包括 U_6 及其所对应的两个零电压矢量 $U_0(000100)$ 和 $U_0(100000)$ 。N 是为各电压矢量分配的序号。在图 3 中, 6 个有效电压矢量将 $\alpha\beta$ 坐标系均匀分成 I 至 VI 六个扇区, 每一个扇区占 60° 电角度。

表 1 有效电压矢量及相应零电压矢量定义

N	有效电压矢量	N	零电压矢量 1	N	零电压矢量 2
0	$U_1(100001)$	7	$U_0(100000)$	8	$U_0(000001)$
1	$U_2(001001)$	8	$U_0(000001)$	9	$U_0(001000)$
2	$U_3(011000)$	9	$U_0(001000)$	10	$U_0(010000)$
3	$U_4(010010)$	10	$U_0(010000)$	11	$U_0(000010)$
4	$U_5(000110)$	11	$U_0(000010)$	12	$U_0(000100)$
5	$U_6(100100)$	12	$U_0(000100)$	7	$U_0(100000)$

在图 2 中, 根据霍尔信号 H_a 、 H_b 和 H_c 可得出转子所在的扇区 θ 、电机角速度 ω 及转子所在位

置 $\theta_r^{[21]}$, 再由转子所在位置 θ_r 计算出相反电动势, 从而由式(2)得到电机的瞬时转矩; 瞬时转矩与速度调节器输出的转矩给定之差值经过滞环控制器得到转矩控制信号 τ ; 最后依据转矩控制信号 τ 和转子所在的扇区 θ 结合查询表(如表 2 所示), 给系统施加有效电压矢量和零电压矢量以达到快速控制转矩的目的。

表 2 查询表

$H_a H_b H_c$	θ	$\tau = +1$	$\tau = -1$
001	I	$U_2(001001)$	$U_0(000001)$
011	II	$U_3(011000)$	$U_0(001000)$
010	III	$U_4(010010)$	$U_0(010000)$
110	IV	$U_5(000110)$	$U_0(000010)$
100	V	$U_6(100100)$	$U_0(000100)$
101	VI	$U_1(100001)$	$U_0(100000)$

1.2 引入占空比调节的 BLDCM 的 DTC 系统

引入占空比调节后的 BLDCM 的 DTC 系统与传统的 BLDCM 的 DTC 系统的区别如图 4 所示, 即把图 2 中的转矩滞环控制器用占空比产生模块替代。占空比产生模块利用转矩误差确定占空比, 由所确定的占空比决定一个控制周期中非零电压矢量的作用时间, 而剩余时间则为零电压矢量的作用时间。转子所在的扇区 θ 用于选择应该施加的有效电压矢量和零电压矢量。

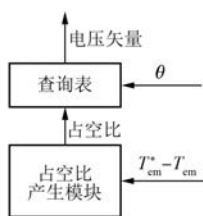


图 4 引入占空比调节的 BLDCM 的 DTC 系统改进部分

2 占空比产生方案

为确定占空比, 首先考虑以下两种情形时转矩的变化率。下面对这两种情形进行分析。

情形 1: 转子位于 VI 区域且系统被施加有效矢量 $U_1(100001)$, 此时电流流向如图 5 所示。电路方程为

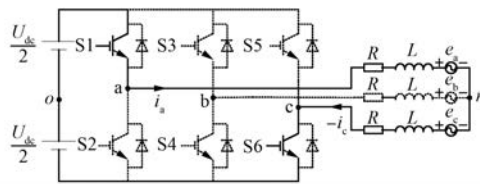


图 5 $\theta = \text{VI}$ 且系统被施加有效矢量 $U_1(100001)$ 时电流流向示意图

$$\begin{cases} i_a + i_c = 0, i_b = 0 \\ u_{an} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_{cn} = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \\ u_{an} - u_{cn} = U_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

此时 $e_a = +E, e_c = -E$, 其中 E 为反电动势的幅值。在假定转速不变及忽略各相电阻 R 的条件下有:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{U_{dc} - 2E}{2L} \\ \frac{di_b}{dt} = 0 \\ \frac{di_c}{dt} = -\frac{U_{dc} - 2E}{2L} \end{cases} \quad (4)$$

结合式(2)可得电磁转矩变化率为

$$f_1 = \frac{dT_{em1}}{dt} = \frac{E}{\omega_{rm}} \left(\frac{U_{dc} - 2E}{L} \right) \quad (5)$$

情形 2: 转子处于 VI 区域且系统被施加零电压矢量 $U_0(100000)$, 电流流向示意图如图 6 所示, 结合式(1), 电路方程为

$$\begin{cases} u_{an} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_{cn} = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \\ u_{an} = u_{cn} \\ i_a = -i_c \end{cases} \quad (6)$$

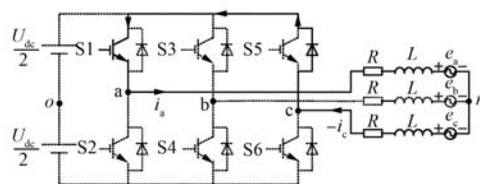


图 6 $\theta = \text{VI}$ 且系统被施加零电压矢量 $U_0(100000)$ 时电流流向示意图

此时 $e_a = +E, e_c = -E$, 在假定转速不变及忽略 A 相及 C 相电阻 R 的条件下有:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{-E}{L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{E}{L} \end{cases} \quad (7)$$

结合式(2)可得电磁转矩变化率为

$$f_2 = \frac{dT_{em2}}{dt} = 2 \frac{E}{\omega_{rm}} \frac{di_a}{dt} = -\frac{2E^2}{\omega_{rm}L} \quad (8)$$

情形 1 和情形 2 分别推导出了转子位于 VI 区域时系统被施加非零电压矢量和零电压矢量时电磁转矩的变化率 f_1 与 f_2 的计算公式。非换相期间转子位于其他区域时电磁转矩的变化率计算公式也与上述公式相同。

2.1 PI 控制

使用 PI 控制器作为占空比产生模块, 一个控制周期内有效电压矢量的占空比 d_1 表达式为

$$d_1 = k_p(T_{em}^* - T_{em}) + k_i \int (T_{em}^* - T_{em}) dt \quad (9)$$

式中: k_p, k_i ——比例系数和积分系数;

T_{em}, T_{em}^* ——电磁转矩实际值和给定值。

2.2 最终值法

利用转矩无差拍控制的思想, 在每一个控制周期内, 施加一定时间的非零电压矢量而剩余时间施加零电压矢量, 从而在控制周期结束时使实际转矩 T_{em} 等于给定转矩 T_{em}^* [4, 12]。如图 7 所示, 控制周期刚开始时实际转矩为 T_{em0} , 在 t_1 时间段内施加非零电压矢量则转矩增量为 $f_1 t_1$, 在 t_2 时间段内施加零电压矢量则转矩增量为 $f_2 t_2$, 从而使实际转矩 T_{em} 在控制周期结束时为 T_{em}^* 。由此便可确定占空比 d_2 :

$$d_2 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{T_{em}^* - T_{em0} - f_2(t_1 + t_2)}{(f_1 - f_2)(t_1 + t_2)} \quad (10)$$

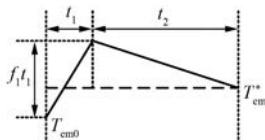


图 7 用最终值法计算占空比示意图

2.3 平均值法

平均值法是利用一个控制周期内平均转矩等于给定转矩的思想来确定占空比的值, 亦即使一

个控制周期内转矩误差的平均值为零 [13-14]。如图 8 所示, 设起始时刻为 0, 用表达式可表示为

$$\frac{1}{t_1 + t_2} \int_0^{t_1+t_2} (T_{em}^* - T_{em}) dt = 0 \quad (11)$$

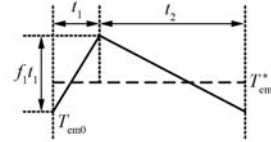


图 8 用平均值法或有效值法计算占空比的示意图

从而可解得占空比 d_3 :

$$d_3 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = 1 - \sqrt{\frac{2(T_{em0} - T_{em}^*) + f_1(t_1 + t_2)}{(f_1 - f_2)(t_1 + t_2)}} \quad (12)$$

2.4 有效值法

有效值法的思想是使得每个控制周期内转矩误差的有效值最小 [15]。如图 8 所示, 用数学语言

可描述为求 t_1 使得 $\frac{1}{(t_1 + t_2)} \int_0^{t_1+t_2} (T_{em}^* - T_{em})^2 dt$ 取最小值。从而可求得占空比 d_4 :

$$d_4 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{2(T_{em}^* - T_{em0}) - f_2(t_1 + t_2)}{(2f_1 - f_2)(t_1 + t_2)} \quad (13)$$

确定了占空比之后, 在每一个控制周期内, 施加非零电压矢量一段时间剩余时间施加零电压矢量, 即可达到控制转矩的目的, 其中非零电压矢量的作用时间由所确定的占空比计算得出。

3 仿真结果及分析

为验证占空比调节技术是否能够减小 BLDCM 的 DTC 系统的转矩脉动, 搭建了仿真模型, 其系统结构框图如图 2 所示。在转速给定为 900 r/min 且负载恒定的情况下, 仿真结果如图 9~图 14 所示。

图 9 和图 10 为引入占空比技术前 BLDCM 的 DTC 系统的电磁转矩和 A 相电流的波形。其中图 9 中系统的控制周期为 50 μs , 图 10 中系统的控制周期为 25 μs 。对比两图可以发现控制周期减小时系统的转矩脉动也随之减小。

图 11~图 14 为加入占空比技术后电机的电磁转矩和 A 相电流的波形及所产生的占空比的

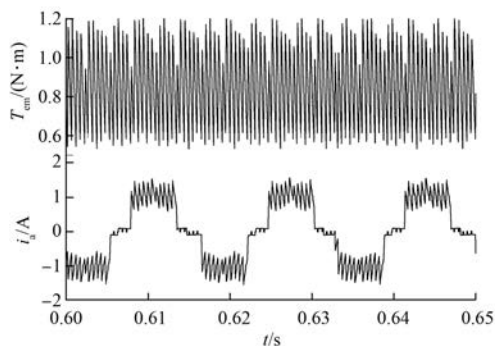


图9 控制周期为 $50\ \mu\text{s}$ 且使用传统 DTC 控制方法时电磁转矩和 A 相电流的仿真波形

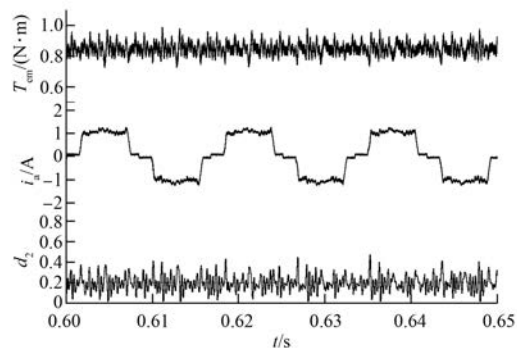


图12 控制周期为 $50\ \mu\text{s}$ 且使用最终值法产生占空比用于 DTC 控制时电磁转矩、A 相电流和所产生占空比的仿真波形

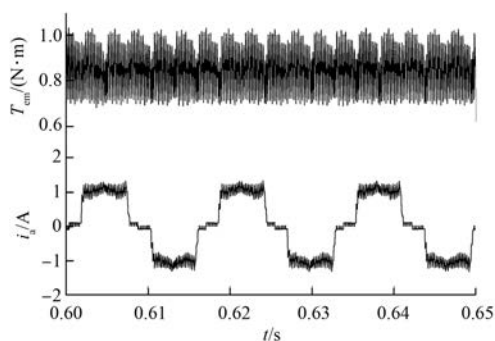


图10 控制周期为 $25\ \mu\text{s}$ 且使用传统 DTC 控制方法时电磁转矩和 A 相电流的仿真波形

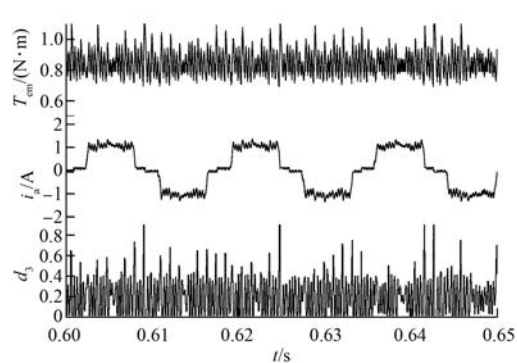


图13 控制周期为 $50\ \mu\text{s}$ 且使用平均值法产生占空比用于 DTC 控制时电磁转矩、A 相电流和所产生占空比的仿真波形

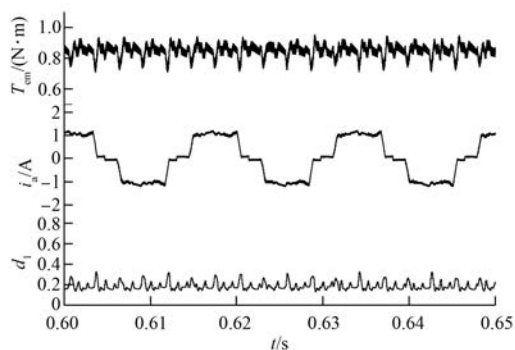


图11 控制周期为 $50\ \mu\text{s}$ 且使用 PI 控制器产生占空比用于 DTC 控制时电磁转矩、A 相电流和所产生占空比的仿真波形

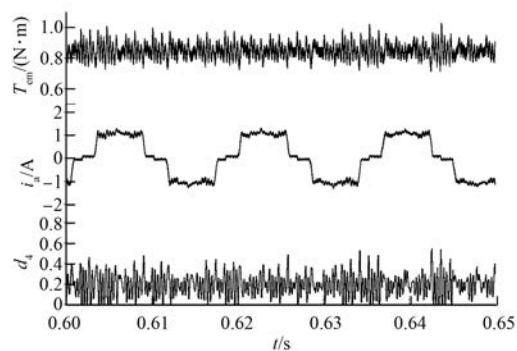


图14 控制周期为 $50\ \mu\text{s}$ 且使用有效值法产生占空比用于 DTC 控制时电磁转矩、A 相电流和所产生占空比的仿真波形

波形,且依次使用 PI 控制器、最终值法、平均值法、有效值法来产生占空比,并且控制周期均为 $50\ \mu\text{s}$ 。将图 11~图 14 依次与图 9 或图 10 对比,可以看到转矩脉动量有较明显的减小,验证了所

提出方法的有效性。再将图 11~图 14 相互对比能够发现运用平均值法时电机的转矩脉动最为明显,而其他 3 种方法的效果相当。

4 试验结果及分析

为验证实际中占空比调节对 BLDCM 的 DTC 系统转矩脉动的抑制效果并进一步验证仿真结果的准确性,在 DSP 电机控制综合试验开发平台上进行了试验,处理器型号为 TMS320F2812。试验结果如图 15~图 20 所示,其中负载恒定,转速同样给定为 900 r/min。

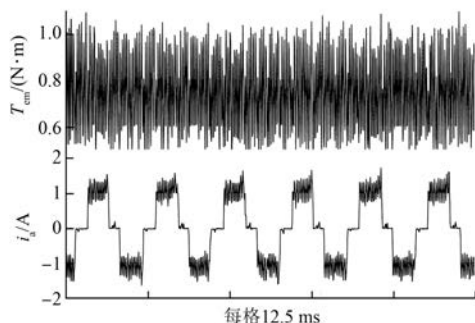


图 15 控制周期为 50 μ s 且使用传统 DTC 控制方法时电磁转矩和 A 相电流的试验波形

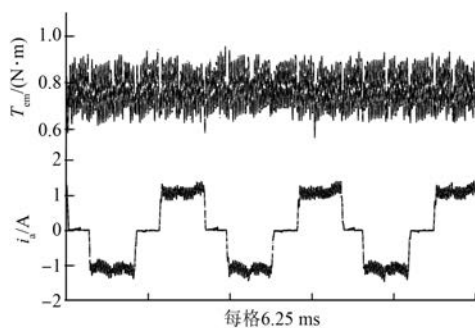


图 16 控制周期为 25 μ s 且使用传统 DTC 控制方法时电磁转矩和 A 相电流的试验波形

图 15~图 20 依次与仿真结果中的图 9~图 14 相对应。将图 15~图 20 依次与仿真结果中的图 9~图 14 对比能够发现,试验结果中的转矩脉动量均较仿真结果中的转矩脉动量小,而试验结果中的占空比脉动量均较仿真结果中的占空比脉动量大。这是由于仿真中的条件与试验中的实际情况有一定的差异所造成的。

从试验结果中可以发现:引入占空比调节前当控制周期减小时,电磁转矩脉动量会减小;引入占空比调节后(相对于引入前),电磁转矩脉动量

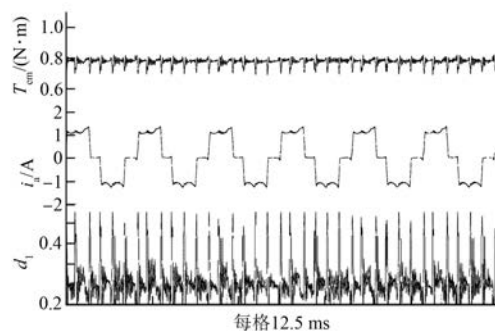


图 17 控制周期为 50 μ s 且使用 PI 控制器产生占空比用于 DTC 控制时电磁转矩、A 相电流和所产生占空比的试验波形

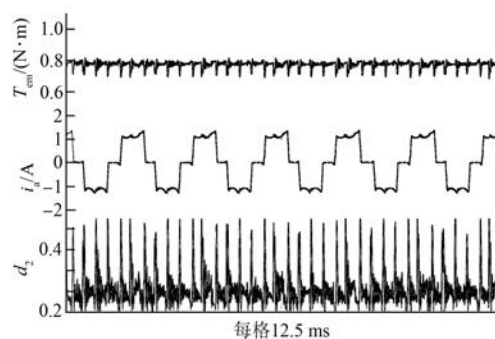


图 18 控制周期为 50 μ s 且使用最终值法产生占空比用于 DTC 控制时电磁转矩、A 相电流和所产生占空比的试验波形

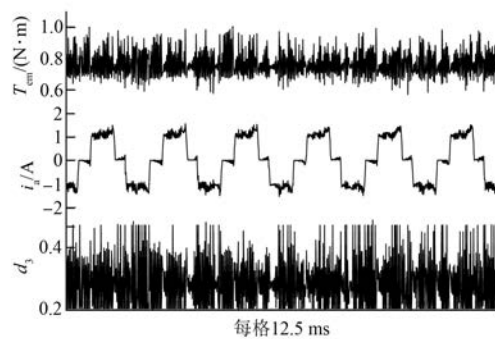


图 19 控制周期为 50 μ s 且使用平均值法产生占空比用于 DTC 控制时电磁转矩、A 相电流和所产生占空比的试验波形

会有明显减小;4 种占空比产生方法中,平均值法对电磁转矩脉动的抑制效果不如其他 3 种方法,而其他 3 种方法对电磁转矩脉动的抑制效果没有太大的差异。上述结论与仿真结果所得到的结论

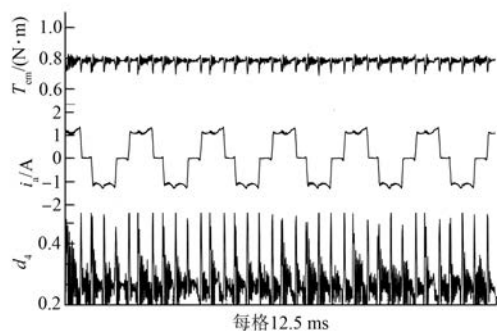


图 20 控制周期为 $50\ \mu\text{s}$ 且使用有效值法产生占空比用于 DTC 控制时电磁转矩、A 相电流和所产生占空比的试验波形

是一致的。

5 结 语

针对传统 BLDCM 的 DTC 系统中存在的开关频率不恒定、每个控制周期一直施加一个电压矢量造成转矩脉动大的问题,将占空比调节技术引入到 BLDCM 的 DTC 系统中。研究了 4 种不同占空比产生方法对电磁转矩脉动的抑制效果。主要结论如下:在一定条件下,对于传统 BLDCM 的 DTC 系统,控制周期越小系统电磁转矩脉动越小;将占空比调制技术引入到 BLDCM 的 DTC 系统中能明显抑制电磁转矩的脉动;4 种占空比产生方法中平均值法对转矩脉动的抑制效果没有其他 3 种方法好,其他 3 种方法对转矩脉动的抑制效果没有太明显的差异。

【参考文献】

- [1] ROMERAL L, ARIAS A, ALDABAS E, et al. Novel direct torque control (DTC) scheme with fuzzy adaptive torque-ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(3): 487-492.
- [2] ZHANG Y, ZHU J. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor with reduced torque ripple and commutation frequency [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1): 235-248.
- [3] 李政学, 张永昌, 李正熙, 等. 基于简单占空比调节的异步电机直接转矩控制 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 72-80.

- [4] HABETLER T G, PROFUMO F, PASTORELLI M, et al. Direct torque control of induction machines using space vector modulation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(5): 1045-1053.
- [5] YEN S L, JIAN H C. A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(3): 220-227.
- [6] ZHU H, XIAO X, LI Y. Torque ripple reduction of the torque predictive control scheme for permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 871-877.
- [7] TELFORD D, DUNNIGAN M W, WILLIAMS B W. A novel torque-ripple reduction strategy for direct torque control of induction motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(4): 867-870.
- [8] 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.
- [9] 李政学, 张永昌, 李正熙, 等. 异步电机新型占空比直接转矩控制方案 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 23-31.
- [10] 牛峰, 李奎, 王尧. 基于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, 2014, 29(11): 20-29.
- [11] 徐艳平, 钟彦儒. 基于占空比控制的永磁同步电机新型直接转矩控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 27-32.
- [12] KENNY B H, LORENZ R D. Stator and rotor-flux-based deadbeat direct torque control of induction machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 1093-1101.
- [13] FLACH E, HOFFMANN R, MUTSCHLER P. Direct mean torque control of an induction motor [C] // Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications, 1997: 672-677.
- [14] PACAS M, WEBER J. Predictive direct torque control for the PM synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1350-1356.
- [15] JUN K K, SEUNG K S. New direct torque control of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(5): 1076-1082.

- [16] MASMOUDI M, EL B B, MASMOUDI A. Direct torque control of brushless DC motor drives with improved reliability [J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2014, 50(6): 3744-3753.
- [17] ZHU Z Q, LEONG J H. Analysis and mitigation of torsional vibration of PM brushless AC/DC drives with direct torque controller [J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2012, 48(4): 1296-1306.
- [18] OZTURK S B, TOLİYAT H. Direct torque and indirect flux control of brushless DC motor [J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2011, 16(2): 351-360.
- [19] 胡育文, 高瑾, 杨建飞, 等. 永磁同步电动机直接转矩控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [20] 杨建飞, 胡育文. 无刷直流电机无磁链观测直接转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 90-95.
- [21] CAPPONI F G, DONATO G D, FERRARO L D, et al. AC brushless drive with low-resolution Hall-effect sensors for surface-mounted PM Machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(2): 526-535.

收稿日期: 2016-11-09

(上接第 41 页)

- [9] 刘飞, 段善旭, 查晓明. 基于 LCL 滤波器的并网逆变器双环控制设计 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(S1): 234-240.
- [10] 杨会敏, 宋建成. 基于双环控制的单相电压型 PWM 逆变器建模与仿真 [J]. 电气传动自动化, 2009, 31(1): 15-18.
- [11] 唐诗颖, 彭力, 康勇. 脉宽调制逆变电源数字双环控制技术 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 55-60.
- [12] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
- [13] 王锦, 林小峰, 宋绍剑. 同步发电机的模糊控制设计 [J]. 装备制造技术, 2010(4): 73-75.
- [14] 杨旭红, 王毅舟, 王创典, 等. 基于重复控制和模糊 PI 控制的 Z 源逆变器并网研究 [J]. 电机与控制应用, 2016, 43(5): 22-27.
- [15] 李浩然, 杨旭红, 薛阳, 等. 基于模糊 PI 参数自整定和重复控制的三相逆变器并网研究 [J]. 电机与控制应用, 2015, 42(2): 31-36.
- [16] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电技术 [J]. 电源学报, 2012(3): 1-6, 12.
- [17] 徐湘楚, 朱凌, 郭本峰. 基于虚拟同步发电机的逆变电源控制策略研究 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(2): 80-84.

收稿日期: 2017-02-15

[期刊订阅]

在邮局漏订的读者, 可直接从邮局汇款至我杂志社发行部补订

地址: 上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》发行部

邮编: 200063 电话: 021-62574990-745 传真: 021-62576377

国内邮发代号: 4-199 每册定价: 12.00 元 全年定价: 144.00 元

中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国学术期刊(光盘版)

全国优秀科技期刊 华东优秀科技期刊

中国科学引文数据库来源期刊 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊