

# 开通角控制的无刷直流电机转矩脉动抑制新方法

李轶华, 王爱元, 王明星  
(上海电机学院, 上海 201306)

**摘要:** 在分析无刷直流电机的等效电路模型和换相过程的基础上, 考虑了电磁时间常数和反电势对换相转矩的影响。通过导出换相时关断相电流下降到零的时间和开通相电流上升到最大的时间, 分析高、低速运行状态下两者的关系, 引入一个开通角的变量, 通过控制开通相的开通时刻来抑制换相时的转矩脉动; 并且考虑非理想的气隙磁密等因素对开通角进行修正。结合场路耦合的有限元进行仿真, 结果表明此思路是可行的。

**关键词:** 无刷直流电机; 换相分析; 转矩脉动; 开通角控制

**中图分类号:** TM 301.2   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1673-6540(2017)12-0054-04

## New Method for BLDCM Torque Ripple Suppression with Turn-on Angle

LI Yihua, WANG Aiyuan, WANG Mingxing  
(Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Bases on the analysis of the equivalent circuit model and the commutation process of the BLDCM, the effects of electromagnetic time constant and the back EMF to torque ripple were considered, by solving the time what opening and closing phase need, the relationship between the two different operating conditions was analyzed, introducing a variable which called turn-on angle, controlling the torque ripple during the phase change by controlling the opening time of the opening phase; and the non ideal air gap magnetic density and other factors to modify the opening angle were considered. Combined with finite element simulation, the results showed that this method was feasible.

**Key words:** brushless DC motor; phase change analysis; torque ripple; turn-on angle control

## 0 引言

无刷直流电机具有效率高、功率密度大、调速性能好、起动转矩大等一系列特点, 在工农业、医疗器械等行业有着广泛应用<sup>[1]</sup>。无刷直流电机采用电子换相电路代替普通直流电机的电刷和换向器, 避免了换相过程中电刷的磨损, 提高了电机的使用寿命; 但由于电子换相器的存在, 电机在换相时转矩容易产生波动。

产生换相转矩脉动的主要原因是电机在换相过程中, 由于反电势的影响, 关断相和导通相的电流变化率不相等。换相产生的转矩脉动一般情况下可以达到额定转矩的 50%, 因此限制了其在高精度场合的应用<sup>[2]</sup>。当前的研究主要有换相重叠

角控制, 文献[3]将这种控制方法与平均转矩控制方法结合, 采用换相期三相开通, 导通期两相开通的方法抑制转矩脉动, 缺点是忽略了反电势畸变对转矩波动的影响。文献[4]提出用 PWM 调制改变换相时电子换相电路开关管的占空比, 减小关断相的续流, 从而减小转矩脉动。文献[5]引入一个正比于瞬时转矩的合成电流变量, 使得非换相电流与合成电流成正比, 通过改变非换相电流来改变合成电流从而达到减小转矩脉动的目的。文献[6]通过研究驱动电路与电机输出母线电压的关系, 提出了母线电压和反电动势的函数解析式, 指出当母线电压小于四倍的反电势的时候时, 在换相中非换相合成相电流减小, 会使得转矩产生波动, 因此, 通过在驱动电路前接入电力电

作者简介: 李轶华(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

子斩波电路可以达到减小转矩脉动的目的<sup>[7-10]</sup>。文献[11-12]是以电机的双闭环控制为基础,将给定转矩与测量转矩的差作为反馈环节进行转矩抑制,但是此方法需要实时测量转矩,计算方法比较复杂。文献[13]提出了在换相期间插入一个缓冲期,在此期间将下一个导通相提前导通,通过对缓冲区进行 PWM 调节来减小转矩脉动的思想,但忽略了电阻对换相电流的影响。文献[14-15]研究了非理想的反电势对转矩脉动的影响,并通过调节电机电流抑制转矩波动。

本文通过对无刷直流电机的等效电路图的分析,推导出电机换相过程中关断相电流下降到零的时间和开通相电流上升到最大的时间,引入一个开通角的变量,通过改变开通相的开通时刻来改变开通角,提出了在低速时滞后开通相、高速时提前开通相的控制策略来减小转矩脉动,同时考虑非理想反电势波形的影响对开通角进行了修正,最后验证此思路的可行性。

### 1 换相过程分析

无刷直流电机通过三相桥式逆变电路驱动电机进行换相,传统的换相控制信号同时加到关断相和导通相的功率开关。由于电机绕组电感的存在,电机在换相时,导通相和关断相的电流不会突变,因此换相过程会持续一段时间。在不同运行状态,关断相和导通相电流的变化不相同,使得非换相相电流在换相持续期间产生波动。在一个状态区内,电机的电磁转矩与三相电流均有关系,电流的波动就会造成电机转矩的波动。图1具体给出了电机在高速、临界和低速三种运行状态换相时的三相电流变化关系:低速时非换相电流增大,高速时减小,临界时不变。图2为无刷直流电机的等效电路图,其中  $R$  表示电枢电阻,  $L_M = L - M$  表示等效电感,  $L$  是自感,  $M$  是互感。

无刷直流电机位置传感器将位置信号传输给驱动电路,驱动电路通过控制开关管的开通和关

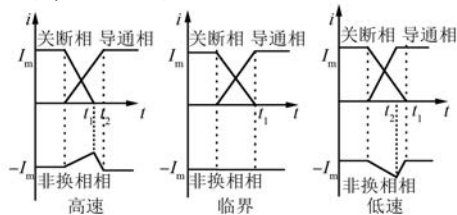


图1 传统换相控制的电流变化

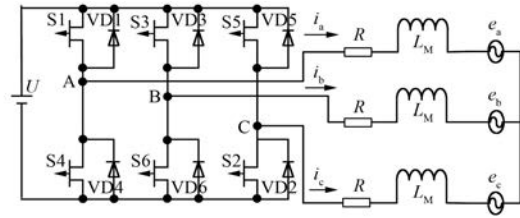


图2 无刷直流电机等效电路图

断进行换相,电机每隔  $60^\circ$  电角度进行一次换相,换相过程为:AB-AC-BC-BA-CA-CB。

电机等效电路的电压平衡方程式为

$$\begin{cases} u_a = Ri_a + L_M \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_b = Ri_b + L_M \frac{di_b}{dt} + e_b \\ u_c = Ri_c + L_M \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (1)$$

以 AC/BC 换相为例进行分析。在此阶段, S2 持续导通, S1 由开通变为关断, A 相绕组由于电感的存在,电流不会突变至 0,而是通过与 A 相绕组下管反并联的二极管 VD4 续流,直至电流减小为 0,所用的时间为  $t_1$ , S3 由关断切换为导通, BC 两相构成回路, B 相的电流从零逐渐上升至最大值,所用的时间为  $t_2$ 。在换相开始时,反电势的关系可以表示为  $E = 2E_\phi = e_b = e_c = -e_a$ ,其中  $E$  表示线电势,  $E_\phi$  表示相电势,根据三相反电势关系和基尔霍夫定律可得出:

$$\begin{cases} 0 = Ri_a + L_M \frac{di_a}{dt} - Ri_c - L_M \frac{di_c}{dt} + 2E_\phi \\ U = Ri_b + L_M \frac{di_b}{dt} - Ri_c - L_M \frac{di_c}{dt} + 2E_\phi \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得

$$\begin{cases} 0 = 2E_\phi + 2L_M \frac{di_a}{dt} + L_M \frac{di_b}{dt} + 2Ri_a + Ri_b \\ U = 2E_\phi + 2L_M \frac{di_b}{dt} + L_M \frac{di_a}{dt} + 2Ri_b + Ri_a \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)进行等效变化可得

$$\begin{cases} -U = 2E_\phi + 3L_M \frac{di_a}{dt} + 3Ri_a \\ 2U = 2E_\phi + 3L_M \frac{di_b}{dt} + 3Ri_b \end{cases} \quad (4)$$

通过式(4)可得换相时关断相的电流表达式:

$$\frac{di_a}{dt} + \frac{R}{L_M} i_a = -\frac{U + 2E_\phi}{3L_M} \quad (5)$$

电流在换相初始时刻的值为  $I_m$ , 可以得出 A 相电流与时间的表达式:

$$i_a = -\frac{U + 2E_\phi}{3L_M} + \left( I_m + \frac{U + 2E_\phi}{3R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

式中:  $\tau$ ——电磁时间常数,  $\tau = L_M/R$ 。

又因为 A 相电流下降到 0 所用的时间为  $t_1$ , 令  $i_a = 0$ , 因此:

$$t_1 = -\tau \ln \left( \frac{U + 2E_\phi}{U + 2E_\phi + 3RI_m} \right) \quad (7)$$

同理可得 B 相电流上升至最大电流的时间:

$$t_2 = -\tau \ln \left( \frac{2U - 2E_\phi - 3RI_m}{2U - 2E_\phi} \right) \quad (8)$$

## 2 开通角分析

### 2.1 临界运行

当  $t_1 = t_2$ , 即  $U = 4E_\phi + 3RI_m$  时, 电机在换相时电流上升到最大值所用的时间等于电流下降到零所用的时间, 即单位时间内关断相电流减小量和开通相电流增大量相等, 非换相电流保持不变, 没有产生换相转矩波动, 此时电机运行在临界状态, 电流约为 20 A, 转速约为 700 r/min。

### 2.2 低速运行

当  $t_1 > t_2$ , 即  $U > 4E_\phi + 3RI_m$  时, 电机在低速区运行, 电流上升到最大值所用的时间小于电流下降到零所用的时间, 即单位时间内开通相电流增大量大于关断相电流减小量, 使用推迟开通相开通时刻的方法来抑制转矩脉动。推迟开通时刻用  $t_L$  表示

$$t_L = \frac{t_1 - t_2}{2} = -0.5\tau \ln \frac{(U + E)(2U - E)}{(U + E + 3RI_m)(2U - E - 3RI_m)} \quad (9)$$

### 2.3 高速运行

当  $t_1 < t_2$ , 即  $U < 4E_\phi + 3RI_m$  时, 电机在高速区运行, 电流上升到最大值所用的时间大于电流下降到零所用的时间, 即单位时间内开通相电流增大量小于关断相电流减小量, 采用提前开通相开通时刻的方法来抑制转矩脉动。提前开通时刻用

$t_H$  表示

$$t_H = \frac{t_2 - t_1}{2} = -0.5\tau \ln \frac{(U + 2E + 3RI_m)(2U - E - 3RI_m)}{(U + E)(2U - E)} \quad (10)$$

电机运行的电角速度  $\Omega_c = \frac{2np\pi}{60} = \frac{np\pi}{30}$ , 由开通时刻可得开通角:

$$\gamma^* = -\frac{\pi pn}{60} \tau \ln \frac{(U + E + 3RI_m)(2U - E - 3RI_m)}{(U + E)(2U - E)} \quad (11)$$

考虑式(9)、式(10)中的  $t_H$  和  $t_L$  为互为相反数, 可以认为当  $\gamma^* > 0$  表示开通角提前, 当  $\gamma^* < 0$  表示开通角滞后。

实际的直流无刷电机, 气隙磁密波形受到漏磁、加工工艺、电枢反应等因素影响, 不是理想的平顶波, 本文引入一个修正系数  $k$  ( $0.8 < k < 1$ ), 重新定义开通角为

$$\gamma = k\gamma^* \quad (12)$$

图3所示为转速电流双闭环控制的无刷直流电机控制系统。根据实时检测的转速(反电动势和转速存在一定的线性关系)和电流由式(11)、式(12)得到开通角, 送入换相逻辑控制。

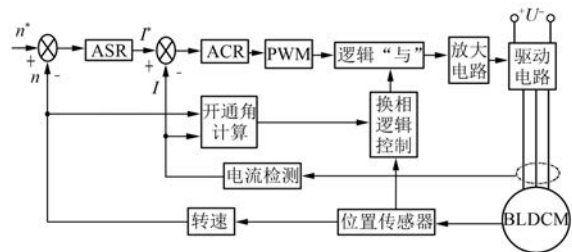


图3 开通角控制的无刷直流电机控制系统

## 3 仿真实例分析

为了证明所提思路的可行性, 本文通过场路耦合的有限元仿真来验证。仿真所涉及的样机参数如表1所示。电机在高速运行时通过计算得到的改进开通角进行提前开通控制, 在低速运行时则进行滞后开通控制, 本文以 500 r/min 为低速, 1 200 r/min 为高速。图4为采用开通角的改进控制与传统控制的转矩波形, 表2为转矩波动率的对比, 结果表明采用开通角的改进控制后转矩波动得到明显的抑制。

表 1 样机参数

参数名称	参数值
额定转速 $n_N / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 500
等效电感 $L_M / \text{H}$	0.001 69
额定电压 $U_N / \text{V}$	220
额定功率 $P_N / \text{W}$	550
极对数 $p$	2

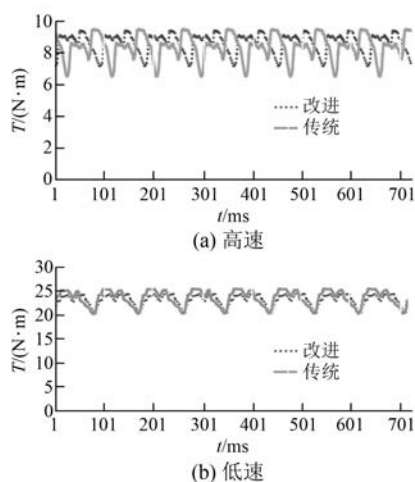


图 4 改进前后转矩波动图

表 2 转矩波动率对比

类别	控制状况	高速	低速
转矩波动率 $\Delta T / \%$	传统	11.8	7.1
	改进	9.4	5.3

## 4 结 语

提出了抑制无刷直流电机换向过程转矩脉动的开通角控制,根据转速和电流的变化实时计算开通角,适用于电动机不同转速下的运行。场路耦合的有限元仿真结果证明了该方法的可行性,具有进一步的工程应用价值。

### 【参考文献】

[ 1 ] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
 [ 2 ] ZHU Z, LEONG J H. Analysis and mitigation of torsional, vibration of pm brushless AC/DC direct torque controller[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1296-1306.

[ 3 ] 盛田田, 杨晓琳, 顾聪, 等. 一种使用重叠换相法的无刷直流电机平均转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3939-3947.  
 [ 4 ] 陈基锋, 张晓峰. 基于统一式的无刷直流电机换相转矩脉动抑制新策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 51-56.  
 [ 5 ] 李珍国, 王江浩. 一种合成电流控制的无刷直流电机转矩脉动抑制系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5592-5599.  
 [ 6 ] CARLSON R, LAJOIE M M, FAGUNDES J C D S. Analysis of torque due to phase commutation in brushless DC machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(3): 632-638.  
 [ 7 ] 宋飞, 周波, 吴小倩, 等. 抑制无刷直流电机换相转矩脉动的新型补偿策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 28-33.  
 [ 8 ] 林平, 韦鲲, 张仲超, 等. 新型无刷直流电机换相转矩脉动的抑制控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 153-158.  
 [ 9 ] 张晓峰, 胡庆波, 吕征宇, 等. 基于 BUCK 变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 72-81.  
 [ 10 ] 张晓峰, 陈基锋, 王斯然, 等. 基于能量单元法的无刷直流电机导通区转矩脉动[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 36-41.  
 [ 11 ] 李珍国, 钟松发, 周海生, 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.  
 [ 12 ] LIU Y, ZHU Z Q, HOWE D. Commutation torque ripple minimization in direct-torque-controlled PM brushless DC drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(4): 1012-1021.  
 [ 13 ] 石坚, 李铁才. 无刷直流电动机低转矩脉动超前换相控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 112-117.  
 [ 14 ] SHEN Y, ZHU Z Q. Investigation of permanent magnet brushless machines having unequal-magnet height pole [J]. IEEE Transaction on Magentics, 2012, 48(12): 4815-4830.  
 [ 15 ] FANG J C, LI H, HAN B. Torque ripple reduction in BLDC torque motor with non-ideal back EMF [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4630-4637.

收稿日期: 2016-12-12