

无刷直流电动机转矩系数的研究

韩光鲜, 谢占明, 王宗培, 程树康
(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 实例表明, 在 BLDCM 中转矩系数等于电势系数的关系, 实际上不成立, 至少是不确切的。文中分析了 BLDCM 中的机电能量转换过程, 阐明了转矩系数不等于电势系数的原因和影响二者差别的因素。

关键词: 无刷直流电动机; 转矩系数; 电势系数; 机电能量转换

中图分类号: TM 381

文献标识码: A

文章编号: 1001- 6848(2002)03- 0003- 03

Study of Torque Constant in Brushless DC Motor

HAN Guang-xian, XIE Zhan-ming, WANG Zong-pei, CHENG Shu-kang
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Based on example, this paper indicates that torque constant k_t and back-EMF constant k_e are not identical in BLDCM, at least can be said their relationship used to think is inexact. And then analyses the process of electromechanical energy conversion in BLDCM and brings out the reason why k_t and k_e are not identical and the factors making them different.

Key words: brushless DC motor; torque constant; back-EMF constant; electromechanical energy conversion

1 概 述

无刷直流电动机(BLDCM)发展很快,产量迅速增加,应用领域不断扩大,可是对这类电动机的基础理论研究有些跟不上,包括电动机的基本模型和基本参数在内,这对于加快产品开发和提高技术水平会有一定的影响。本文就转矩系数的问题作一研究。

2 转矩系数与电势系数不相等的原因

BLDCM 的稳态模型与普通直流电动机一样,为:

$$\left. \begin{aligned} U &= k_e \omega \\ T &= k_t I \\ V &= R I + U \\ T &= T_0 + T_L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, U 为电枢的旋转电压, k_e 为旋转电压系数(电势系数), ω 为转子角速度, T 为电磁转矩, k_t 为转矩系数, I 为电枢电流, V 为端电压, R 为电枢电阻, T_0 为机械损耗转矩, T_L 为负载转矩。通常认为转矩系数与电势系数相等:

$$k_t = k_e \quad (2)$$

式(2)是一项确定无疑的关系,正是由于这种关系,常常用测定电势系数的方法来确定转矩系数,因为电压和转速的测定既方便又容易准确。

可是只要对实际 BLDCM 的电势系数和转矩系数进行认真的考察,就会发现它们并不总是相等,甚至可能有相当明显的差别。举一实例,实例电动机是珠海运控电机有限公司生产的 57BL-A-10-30H(1)(ST)型电动机,这是 1 台 $2P=8$ 个极的三相永磁电动机,采用开关型霍尔位置传感器。配套驱动器由珠海运控电机有限公司生产,直接接 220V 交流电源,内部整流后作功率桥电压,一组负载特性测试数据如表 1 所示。作成相关的特性如图 1 所示。从图 1b 得对应于电枢电流为零的理想空载转速 $n_0=5950\text{r/min}$, 对应的直流供电电压 $V_{s0}=329\text{V}$, 可得实测的电势系数为:

$$k_e = \frac{V_{s0} \times 60}{2\pi n_0} = 0.528\text{V} \cdot \text{s/rad} \quad (3)$$

图 1c 为负载转矩与电枢电流的关系。负载转矩与电磁转矩之间相差一个不大的空载损耗转矩,不计空载损耗转矩微小变化的影响,该曲线的斜率可以认为就是电磁转矩与电枢电流的比值,即通常所定义的 BLDCM 的转矩系数(k_t)。从图 1 中曲线可得:

$$k_t = \frac{T}{I} = 0.65\text{Nm/A} \quad (4)$$

收稿日期: 2002- 01- 28

表 1 57BL-A 型电动机负载实验数据

电源电压 /V (AC)	功放桥电压 /V (DC)	负载转矩 /Nm	电流 /A (DC)	转速 /(r/min)
233	329	0	0.02	5 814
233	326	0.043	0.09	5 407
233	325	0.092	0.16	4 903
233	324	0.135	0.22	4 570
233	323	0.184	0.30	4 277
233	320	0.230	0.37	3 984
233	319	0.278	0.44	3 721

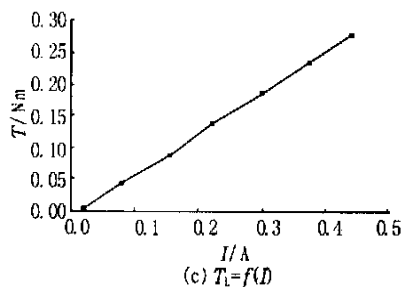
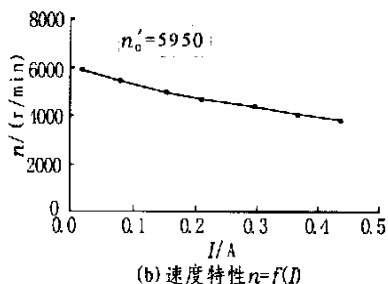
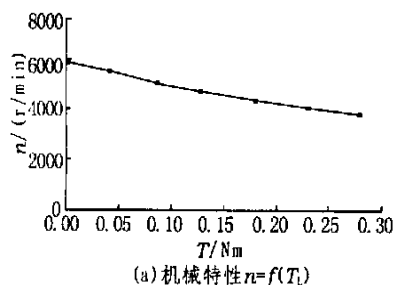


图 1 57BL-A 电动机实测特性示例

与式(3)的数字相比较可看出, k_t 和 k_e 的实际值有明显不同, 不可能是测试误差造成的差别。

在对 BLDCM 电枢等效电阻研究时^[1], 已经看出换向过程对机电能量转换过程有影响, 自然要影响其基本参数的含义。所以对转矩系数的深入分析, 仍需从分析换向过程入手。以图 2 所示的典型系统为例。对稳态过程分析, 可在一个换向周期内进行, 按 T_1T_2 导通来分析。取 T_1T_2 导通状态的起始点为时间 t 和转子位置角 θ 的参考坐标, 即 $t=0$ 和 $\theta=0$ 。 $\theta=0$ 也是上一个导通状态(T_6T_1)的结束点, 这时

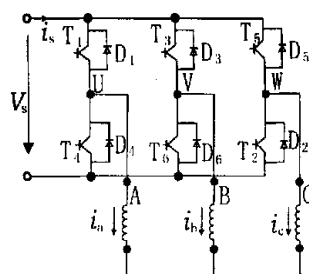


图 2 BLDCM 主电路简图(绕组 Y 接)

$i_c=0$, $i_a=-i_b$ 通常为相电流的最大值; 经过一个换向周期, $t=\tau$ 或 $\theta=\frac{\pi}{3}$ 时, T_1T_2 导通状态结束时, $i_b=0$, $i_a=-i_c$ 达到相电流的最大值, 电枢电路也从 AB 导通改变成 AC 导通, 如图 3a 和 b 所示: 相绕组的

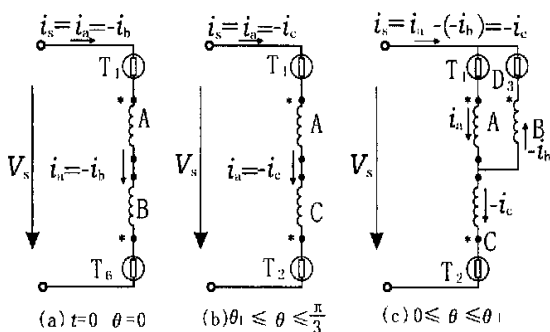


图 3 一个换向周期内的三种电路拓扑结构

电流 i_b 和 i_c 在 $t=0$ 时不应发生突变, 需要一个续流回路, 如图 3c 所示, D_3 为 i_b 提供了回路, $-i_b$ 衰减到零的同时, $(-i_c)$ 从零上升到与 i_a 相等的过程通常称为续流过程。图 4 所示为在 1 个换向周期范围

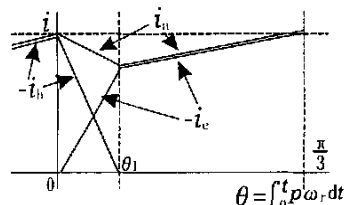


图 4 T_1T_2 导通换向周期内绕组电流的变化曲线

内, 三相绕组内电流变化典型过程。

电动机的电磁功率, 毫无疑问应为:

$$P_e = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c =$$

$$u_a i_a + (-u_b)(-i_b) + (-u_c)(-i_c) \quad (5)$$

考虑到: $i_a = (-i_b) + (-i_c) \quad (6)$

可得: $P_e = u_{ab}(-i_b) + u_{ac}(-i_c) \quad (7)$

$$\left. \begin{aligned} u_{ab} &= u_a - u_b \\ u_{ac} &= u_a - u_c \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

u_a, u_b, u_c 为相绕组的旋转感应电压, 在绕组星接的情况下, 按这里所选的时间和转角参考坐标, 应有:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= k_{e1} \omega \sin(\theta + 90^\circ) \\ u_b &= k_{e1} \omega \sin(\theta - 30^\circ) \\ u_c &= k_{e1} \omega \sin(\theta - 150^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{ab} &= \sqrt{3} k_{e1} \omega \sin(\theta + 120^\circ) \\ u_{ac} &= \sqrt{3} k_{e1} \omega \sin(\theta + 60^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

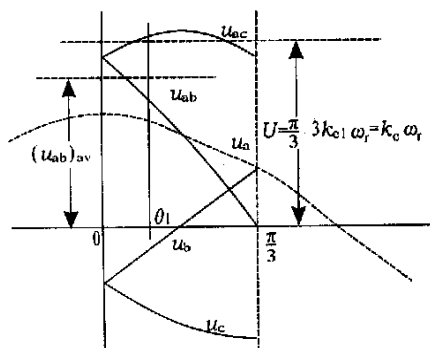


图5 旋转电压曲线

在一个换向周期内电磁功率的平均值, 也就是 BLDCM 稳态运行的平均值, 为:

$$P_e = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} P_e d\theta = U I_s + (u_{ab})_{av} I \quad (11)$$

式中 U ——电枢绕组的直流旋转电压

$$U = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} \sqrt{3} k_{e1} \omega d\theta = k_e \omega \quad (12)$$

k_{e1} ——相绕组基波(幅值)电势系数

k_e ——BLDCM 电枢绕组直流电势系数

$$k_e = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} \sqrt{3} k_{e1} d\theta \quad (\text{Y 接}) \quad (13)$$

I_s ——电枢直流电流

$$I_s = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} (-i_c) d\theta$$

$(u_{ab})_{av}$ ——续流时间 $(0 \sim \theta)$ 内 u_{ab} 的平均值

$$(u_{ab})_{av} = [(u_{ab})_0 + (u_{ab})_{\theta}] / 2 \quad (14)$$

I ——换相电流平均值

$$I = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} (-i_b) d\theta \quad (15)$$

电磁转矩:

$$T = \frac{P_e}{\omega} = k_t I_s \quad (16)$$

$$k_t = k_e \left[1 + \frac{(u_{ab})_{av}}{U} \cdot \frac{I}{I_s} \right] \quad (17)$$

这个式子清楚地表明, BLDCM 的转矩系数(k_t)和旋转电压系数(k_e)实际上不相等。很显然这是由于续流回路的电流在电枢绕组内部自行闭合, 不反映在电源提供的电枢总电流内造成的, 式(11)可改写为:

$$P_e = U [I_s + I \cdot \frac{(u_{ab})_{av}}{U}] = U (I_s + I) \quad (18)$$

式(18)表明, 产生电磁功率的电枢电流, 除了电源提供的 I_s 以外, 还有一个较小的分量 I 。这个分量电流的能量来源不是由电源直接提供, 而是由磁场的储能产生, $(-i_b)$ 从最大值衰减到零的过程中, 与它相对应的磁场储能除小部分变为绕组铜损耗和开关管导通电阻损耗外, 大部分转换成电磁功率。

式(11)也可以改写为:

$$P_e = I_s [U + (u_{ab})_{av} \cdot \frac{I}{I_s}] = I_s (U + U) \quad (19)$$

这个式子表明, 产生机电能量转换的除了电枢绕组的旋转电压 U 以外, 还有一个较小的分量 U 。这个分量与电源电流作用的功率实际上先转换成磁储能, 然后在续流的过程中再转换成电磁功率, 即参与机电能量的转换。不难看出, 这里的 U 与文献[1]中所说的电感压降, 或者说换向电阻(R_c)电压降, 实际上密切相关。

3 研究实例

为便能有一些定量的认识, 举一实例电动机的数据, 样机是珠海运控电机有限公司生产的 57BL-A-10-30H(1)(ST)型无刷直流电动机, 其主要技术数据为: 额定功率 $P_N = 100\text{W}$, 额定转速 $n_N = 3000\text{r/min}$, 配套驱动器额定供电电压 $V_N = 220\text{V (AC)}$, 电动机极数 $2P = 8$; 三相绕组 Y 型连接; 相绕组电阻 $R_{11} = 32\Omega (25^\circ\text{C})$, 相绕组自感 $L_{11} = 115\text{mH}$, 相绕组间互感 $L_{12} = -8\text{mH}$, 相电势系数 $k_{e1} = 0.32\text{V} \cdot \text{s/rad}$; 机械摩擦转矩 $T_f = 0.0014\text{Nm}$; 机械阻尼系数 $\beta = 1.07 \times 10^{-5}\text{Nm}/(\text{rad/s})$, 转子惯量 $J_r = 1.57 \times 10^{-5}\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 负载转矩 $T_L = 0.12\text{Nm}$, 外加额定电压进行仿真分析的结果如下所述。各相绕组的

(下转第 13 页)

电机的振动和噪声指标均达到了产品的要求。

4 结 论

(1) 通过电磁分析, 导出了考虑定转子齿槽、转子偏心及磁路饱和时, 计算单相感应电动机振动、噪声频谱的通用公式, 并通过样机实测进行了验证。

(2) 电机定子固有振动频率对电机的振动和噪声有重要影响。

(3) 提高电机定、转子的同轴度, 是降低单相感应电动机振动和噪声的有效措施。

参考文献:

- [1] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [2] Zhu, Z Q, Howe, D. Vibrational Torque in Single-phase Induction Motors and Their Relation to Vibration Noise[J]. Electric Machines and Power Systems, 1992, 20, 483- 492
- [3] Yang, S J. Acoustic Noise From Small 2- pole Single- phase Induction Machines[J]. Proc IEE, 1975, 122, 1391- 1396

作者简介: 逢永久(1964—), 男, 工程师, 学士, 山东省金龙企业集团公司总经理助理。

(上接第 5 页)

电流、相绕组回路的旋转电压及电磁功率的波形如图 6 所示。主要数据如表 2 所示。这些曲线表明了机电能量转换和电磁功率的瞬时变化规律, 也可以形象地表明各个分量的值和大致比例关系。表 2 所列是一些基本电磁量的平均值, 清楚地表明了换相过程影响的定量关系。

图 6 清楚地表明, 电枢绕组电流 I_s 是 $(-i_c)$ 的平均值, $(-i_c)$ 产生的不是全部电磁功率和转矩, 续流回路的电流也产生一定的电磁功率和转矩, 但续流电流在电机内部自行闭合不通过电源; 电枢总电

表 2 57BL-A 型电动机, $T_L = 0.12\text{Nm}$ 主要技术数据

功放桥臂电压 V_s/V (DC)	326 497 27
电枢电流平均值 I_s/A (DC)	0 191 38
转速 $n/(\text{r/min})$	4 468 367 35
电磁转矩 T/Nm	0 123 68
转矩系数 $k_t/(\text{Nm/A})$	0 646 3
旋转电压 U/V	247 772 28
续流回路旋转电压 $(u_{ab})_{av}/\text{V}$	193 623 11
续流电流平均值 I/A	0 055 97
续流区间 θ/rad	0 440 9

流在每个换相周期内是波动的, 在每个换相周期开始时为零, 电动机的电磁功率和电磁转矩这时都并不为零, 因为这时续流回路的电流为最大值, 就是说电动机的电磁功率和电磁转矩并不像电枢总电流那样波动明显; BLDCM 的转矩系数定义为电磁转矩与电枢总电流的比值, 而电磁转矩又不完全由电枢总电流产生, 使得 k_t 的值变得不确定, 只有续流回路的电流相对很小可以忽略时, k_t 的值才是确定的并与 k_e 相等; k_t 与 k_e 的差别实际上主要取决于 1 个换向周期内磁储能的变化与转换机电能量的比例关系, 与换向周期的长短即转速有关, 与绕组电感有关, 与绕组电流有关。

从表 2 可见, $T_L = 0.12\text{Nm}$ 时的转矩系数 $k_t = 0.6463\text{Nm/A}$, 与式(4)的实测值较为接近, 与式(3) k_e 的实测值有明显差别。应说明的是 k_t 和 k_e 的值还受饱和效应的影响, 其变化的精确规律要用非线性模型来分析。

参考文献:

- [1] 韩光鲜, 谢占明, 王宗培, 等. 无刷直流电动机电枢等效电阻的研究[J]. 微电机, 2002, 35(2).

作者简介: 韩光鲜(1970—), 男, 博士研究生, 从事伺服及步进驱动单元的运行分析及仿真研究。

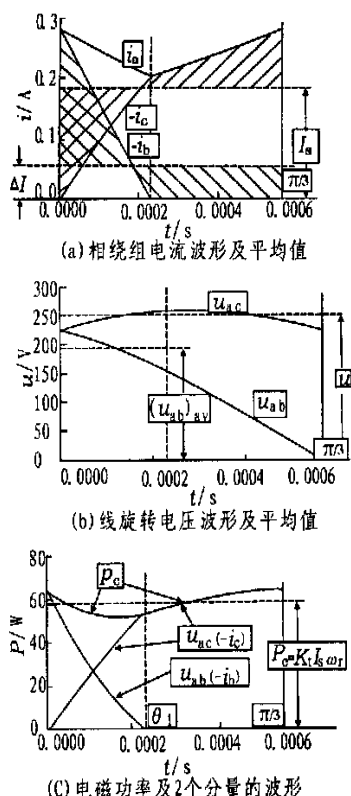


图 6 57BL-A 型电动机, $T_L = 0.12\text{Nm}$ 仿真曲线示例