

无刷直流电动机的方波与正弦波驱动

王宗培¹, 韩光鲜², 程 智¹, 程树康²

(1. 珠海运控电机有限公司, 广东 珠海 519001;

2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用电子换向取代机械换向的BLDCM, 绕组电流除了与传统的DCM 一样接近方波以外, 还可以是正弦波, 都是有DCM 的特性, 都属于BLDCM。二种驱动方式的机械特性和转矩特性相接近, 但运行平衡性、调速范围和噪声等则很不一样。正弦波驱动要好得多。目前正弦波驱动BLDCM 多用于要求高的伺服系统, 价格甚高, 这不会影响正弦波驱动应是BLDCM 的重要发展方向。

关键词: 无刷直流电动机; 方波驱动; 正弦波驱动; 转矩脉动

中图分类号: TM 381

文献标识码: A

文章编号: 1001- 6848(2002)06- 0003- 04

Square- wave Drive and Sine- wave Drive of BLDCM

WANG Zong- pei¹, HAN Guang- xian², CHEN G Zhi¹, CHEN G Shu- kang²

(1. Zhuhai Motion Control Motor Co. Ltd., Zhuhai 519001, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The phase current of BLDCM, with replacement of mechanical commutation by the use of electrical commutation, can be approximate to square- wave as the traditional DCM; and can also be a sine one. Both of them belong to BLDCM with the characteristics of DCM. Although these two types of driving style are almost with the same mechanical and torque characteristics, the stability, the velocity modulating range and noise are quite different. The sine- wave drive system is much better than the square- wave one. By far the sine- wave drive system is mostly used to the higher requirement application and with a higher price, with can not be a barrier of the sine- wave drive representing the important developing orientation of BLDCM.

Key words: BLDCM; square- wave drive; sine- wave drive; torque pulsations

1 无刷直流电动机(BLDCM)

传统的电动机分成同步电动机(SM)、异步电动机(M)和直流电动机(DCM)三大类。它们的基本特点和区别可以这样描述: (1) 同步电动机的转子转速由供电交流电源的频率决定, 增大负载时转子速度不变。或者说转子角速度与交流电源的角频率同步。(2) 异步电动机的转子转速也主要取决于供电交流电源的频率, 但转子角速度只有在理想空载情况下才与电源角频率同步, 实际上总小于同步角速度, 即有一定的转差, 且转差随负载增加而增大。(3) 直流电动机的转子转速取决于加在电枢上直流电压的值, 负载增大时, 转速也随着下降。异步电动机为鼠笼型结构, 没有电刷; 小容量同步电动机大部分为永磁转子结构, 也没有电刷; 传统的直流电动机则无一例外地都是有刷结构。因为电刷和换向器是直流电

动机中将产生交流电势的电枢绕组与直流电源联接的枢纽, 是直流电机构成的关键组成部分, 可以理解为将电枢绕组的交流电势整流成直流电势与电源相联, 也可以理解为将电源的直流电压逆变成多相交流电压与电枢绕组相联。可见, 对于传统的电动机, 同步和异步电动机——交流电动机基本上是无刷电动机, 而直流电动机则无例外地为有刷电动机。

近代新发展起来的BLDCM 是指没有电刷但具有DCM 特性的电动机。与传统的DCM 相比, BLDCM 用电子换向取代DCM 的机构换向, 取消了电刷和换向器; 并将原有DCM 中的定转子颠倒, 即电枢绕组在定子上, 与静止的电子换相电路联接方便, 励磁在转子上, 为永磁体, 不需要励磁绕组, 也更不需要向转子通电的滑环和电刷; 在DCM 中, 换向器在转子上, 它能保证当电枢导体从一个定子磁极下转到另一个极下时其中的电流同步改变方向, BLDCM 电枢绕组中电流方向的改变由功率管的开

收稿日期: 2002- 11- 05

来控制, 为保证开关信号与转子磁极转过的位置同步, 需要有检测转子位置角的传感器。基本组成部分如图 1 所示。可以看出 BLDCM 是 1 台反装的 DCM, 用电子换向, 作用原理基本不变, 基本特性自然就相一致。

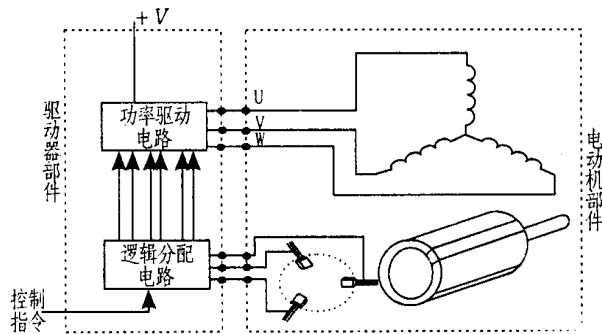


图 1 BLDCM 的基本组成部分

2 方波和正弦波驱动

BLDCM 的电子换向, 基本的方式与 DCM 中完全一致, 相绕组中的电流改变方向与绕组轴线所处磁极下位置极性改变同步, 称为方波驱动的 BLDCM, 相绕组基本上为方波。但是电子换向毕竟与机械换向不一样, 它具有更灵活的可控性, 电子换向不仅可实现随磁极位置同步改变相绕组内电流的方向, 必要时还可以实现电流波形的控制, 例如让相绕组电流为正弦波形, 称为正弦波驱动的 BLDCM。尽管相绕组电流为正弦波形, 看起来与传统的 DCM 有些不同, 可是这种带角位置传感器和电子换向电路的永磁电动机, 它的作用原理和基本特性仍与 DCM 相一致, 应归类为 BLDCM。

在英美的文献中, 把这类正弦波驱动的 BLDCM 称为“永磁同步电动机(PMSM)”^[1]或者“无刷交流电动机(BLACM)”^[2], 在日本和欧洲则大多数情况下称为“交流伺服电动机(AC servo)”, 国内基本上也多数采用 AC servo 的名称。这些名称在工业和商业领域通用以后很难加以改变, 但是从学术的角度应作一些澄清, 否则会造成混淆。转子上没有位置传感器, 或不通过位置讯号换向的永磁电动机,

才具有同步电动机的基本特性, 是名副其实的 PMSM。通过位置讯号进行电子换向的永磁电动机, 即使相绕组电流波形为正弦波与交流电动机一样, 但基本特性与 DCM 相一致, 应归类为 DCM, 而不是 SM。把它称为 BLACM 就更不清楚了, 难道传统的 ACM 都有刷吗? 传统的鼠笼型异步电动机和永磁电动机都是无刷结构, 都是 BLACM。通常所说的 AC servo, 如前所说, 它不是同步电动机的工作特性, 又不具备异步电动机的基本结构, 所以从本质上讲不是 1 台通常意义上的 AC 电动机, 只是从形式上看, 绕组电流为正弦波形, 与通常 ACM 的绕组电流情况相同, 实际上称作无刷直流伺服电动机(BLDC servo)较为恰当。

3 运行性能实例对比

实验用的电动机是珠海运控电机有限公司生产的 123BL (3)A 40—20(ST-1) 型 AC servo, 这是一台 $P_N = 400W$, $n_n = 2000 \text{ r/min}$ 的中惯量 AC servo, 定子绕组相数 $m = 3$, 转子极数 $2P = 8$, 位置传感器为 2500 线的光学编码器, 具有 U、V、W 和 A、B、Z 信号。与同一公司生产的 PSDA-2023A 1 型交流伺服驱动器配套, 构成了典型的正弦波驱动 BLDCM。在给定转速为最高限速值, 电源电压 $V = 220V$ 不变的条件下, 负载特性测试数据如表 1 所示。机械特性和转矩特性如图 2a 和 b 所示。图 2a 曲线表明, 在 $T_L \leq 2.7N\cdot m$ 范围内, 电动机运行在稳速情况下, $T_L > 2.7N\cdot m$ 时, 超出了该给定转速下的最大转矩, 转速下降, 电动机运行在速度开环情况下。将下降段曲线向上延长, 如图中虚线段所示, 将表示完全速度开环时的机械性, 从它与纵轴的交点可得, 开环时空载转速约为 $n_0 = 3700 \text{ r/min}$ 。图 2a 的曲线还表明, 如果 $n = 2000 \text{ r/min}$ 时, 最大负载转矩为 $5.0N\cdot m$, 为额定转矩的 2.5 倍。即该电动机在保持额定转速不变的条件下, 具有 2.5 倍的过载能力。

采用珠海运控电机有限公司生产的方波 BLDCM 驱动器, 型号为 BLDA-04211A 1, 与实验

表 1 $V = 220V$ 伺服驱动器最高限速时负载实验数据实例

负载转矩 $T_L/N\cdot m$	0	0.9	1.85	2.7	3.6	4.5	5.4
转速 $n/(r/min)$	2728	2728	2727	2728	2450	2140	1860
桥臂电压 U_s/V (DC)	307	300	298	291	286	284	279
桥臂电流 I_s/A (DC)	0.27	1.20	2.30	3.33	4.31	5.00	5.80
输入功率 $P_1 = U_s I_s/W$	82.9	360.0	685.4	969.0	1232.7	1420.0	1618.2
输出功率 $P_2 = T_L \omega/W$	0	257.1	528.3	771.3	923.6	1008.5	1051.8

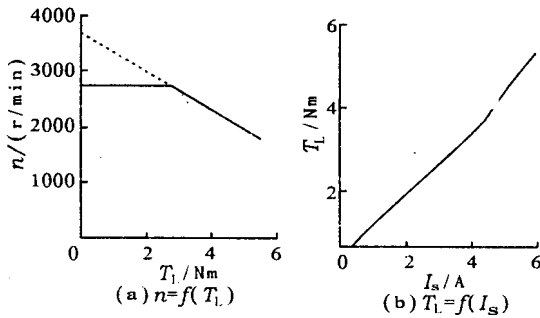


图2 正弦波驱动BLDCM 机械特性和转矩特性
用的电动机配套,便构成方波驱动BLDCM。在方波驱动BLDCM 产品中,都采用3个开关霍尔元件作转子位置传感器,产生互差120电角度的方波位置信号。如果只是为了实验测试,则用光学编码器的U、V、W信号也一样。上述同一台实验电动机,在电源电压保持 $V = 220\text{V}$ 不变的条件下,方波驱动负

表2 $V = 220\text{V}$ 时方波驱动BLDCM 负载实验数据实例

负载转矩 T_L/Nm	0	0.9	1.85	2.6	3.4	4.3	5.2
转速 $n/(\text{r/min})$	3700	3165	2800	2530	2260	2000	1760
桥臂电压 $U_s/\text{V (DC)}$	306	301	295	294	291	280	282
桥臂电流 $I_s/\text{A (DC)}$	0.34	1.27	2.14	2.90	3.68	4.5	5.45
输入功率 $P_1 = U_s I_s/\text{W}$	104.0	382.3	631.3	852.6	1070.9	1260.0	1536.9
输出功率 $P_2 = T_L \omega/\text{W}$	0	298.3	543.4	688.8	804.7	900.6	958.4

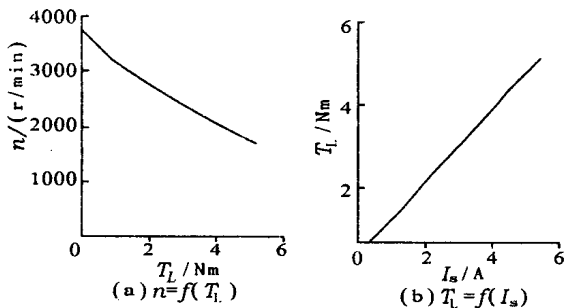


图3 方波驱动BLDCM 机械特性和转矩特性

表2的数据和图3的曲线表明,方波驱动BLDCM的额定数据大体上可给定为: $n_N = 2500\text{r/min}$, $T_N = 2.6\text{Nm}$, $P_N = 680\text{W}$, $I_N = 2.9\text{A (DC)}$, $V_N = 220\text{V (AC)}$ 。按珠海运控电机有限公司型号表示方法应为123BL(1)A68-25H(ST-1)型,即1台400W、2000r/min的AC servo改用方波驱动器就成了1台680W、2500r/min的BLDCM。这些数据丝毫也不能表明方波驱动电动机能输出更大的功率,实际上AC servo若运行在2500r/min时,能输出的最大转矩要比2.6Nm更大一些。对应2000r/min额定转速、400W的电动机有2.5倍的过载能力,但是方波驱动BLDCM在超过额定转矩时转速便低于额定转速。

载实验测试数据如表2所示。机械特性和转矩特性如图3a和b所示。与图2a和b的曲线相对比可以看出,(1)在速度开环情况下,相同电压条件下,二种驱动方式时电动机的空载转速基本相同,并同样具有随负载增大而转速下降的机械特性。(2)在相同负载转矩条件下,方波驱动BLDCM的转速略低一些,即转速降略大一些。(3)转矩特性基本一致,转矩和电流几乎成线性关系,在同一负载转矩时,方波BLDCM的电流略小。在相同负载转矩条件下,方波驱动BLDCM的转速稍低,输出功率较小,相应地输入功率也要小一些,在同样电压条件下,桥臂电流小一些是在预料之中的。至于方波驱动BLDCM转速下降要稍大一些,当然是和换向过程有关,可参看有关电枢等效电阻的分析^[3,4],对转矩系数有影响也是相关联的^[5]。

4 正弦波和梯形波旋转电压(反电势)

一个相关的问题是电动机旋转电压(EMF)的波形。在一些文献中对BLDCM的特点描述为:具有永磁转子,定子绕组的设计使EMF为梯形波^[6]。并认为方波绕组电流和梯形波EMF作用的结果能获得恒定无脉动的电磁转矩。正弦波驱动的电动机才设计成EMF为正弦波,并称为PM SM或BLACM。前面已经论述过,只要根据位置讯号实现电子换向,即便绕组电流与ACM一样为正弦波,仍是DCM原理具有DCM的基本特性,便是BLDCM。正弦波驱动BLDCM设计成正弦波EMF,能产生恒定无脉动的电磁转矩,与传统ACM相类似,那么方波驱动BLDCM的EMF是否要追求梯形波。

限于篇幅,对这个问题这里无法作详细的论述,仅简要指出几点。(1)方波(梯形波)EMF只有在下述条件下才能得到,即气隙磁密分布为方波,全距集中绕组,不斜槽和不斜极。真的满足这些条件可获得方波EMF,但电动机的定位转矩会很大,严重影响运行性能而无法接受。(2)在小容量BLDCM中,产生方波EMF的条件很难达到。小容量BLDCM一般每极槽数很少,槽开口对气隙磁密分布的影响很

大,因为要保证足够下线的工艺尺寸。如果转子采用多极磁环,磁性材料为各向同性,充磁后较难获得足够顶宽度的平顶波。小容量 BLDCM 常常采用与转子极数相近的定子槽数,构成分数槽绕组,定位力矩可以很小,EMF 波形则接近正弦波。总之实际的小容量的 BLDCM 产品,大都具有接近正弦的 EMF 波形。(3)理论上讲,具有方波 EMF 的电动机,在绕组也是方波电流的作用下,可以产生恒定无脉动的电磁转矩,但是由于换向过程的影响,绕组电流在大部分实际运行过程中与方波相距甚远,再加上 EMF 波形也总与理想的平顶波有一定的差距,所以实际的方波 EMF 电动机,在方波驱动方式运行时,运行平稳性未见得有所改善。

5 正弦波驱动是发展方向

从目前市场上通行的产品看,正弦波驱动 BLDCM,都采用光学编码器,驱动器设计包含电流环、速度环和位置环,成为高性能的伺服单元,通常称为交流伺服电动机或交流伺服单元(AC servo),运行平衡性好,噪声低,调速比高(达 10 000 或以上),响应快,定位精度高,还具有可靠性高和维护方便的特点,是当今伺服驱动的主流产品。不足之处是价格昂贵,近一二年国内市场上通用 AC servo 的价格已有一定幅度的下降,但还是价格甚高。首先是光学编码器相当贵,市场价要高出数百瓦永磁电动机本体的成本。其次驱动控制线路较复杂,所用的电流传感器及专用芯片等也较贵。采用旋变作位置传感器的 AC servo 国外产品,有少量进入国内市场,价格不比光学编码器的 AC servo 便宜。价格因素限制了这类高性能 BLDCM 在更广范围内的应用。

更广泛的产品是方波驱动的 BLDCM,通常采用 3 个开关霍尔元件作位置传感器,驱动控制电路也较简单,因此成本低廉,适合众多大量应用的场合。但是在典型的方波驱动 BLDCM 中,绕组电流含有丰富的谐波,使电磁转矩脉动大,导致电动机运行的平稳性变差,振动和噪声增大。另外,这类电动机在一圈范围内的位置信息量甚少,用它来控制转速不能达到高的稳速精度,调速比也较小(在 10 左右)。这就使得普通方波驱动 BLDCM 不能适应一些对噪声和调速比要求稍高的应用场合。

基于以上实际现状,普遍的说法认为“转矩波动是 BLDCM 存在的突出问题”^[7]。国内外的研究人员针对这个问题做了大量工作,提出了各种解决和改善这个问题的途径和方案。本文不可能对这方面众多的研究作出评述,仅简单提出一些想法。

(1)笼统地认为“转矩波动是 BLDCM 存在的突出问题”可能会引起误解或产生误导,特别是对于尚未深入工业生产和应用实际研究的研究者,高校的研究生就是例子。明确一点应该是:简单廉价的方波驱动 BLDCM 较突出的不足之处是转矩波动;价格较高的 AC servo,属于正弦波驱动 BLDCM,并不存在转矩波动;所以 BLDCM 的转矩波动,决不是偏重理论和方法的问题,更多地是侧重于降低成本的实际工程问题。

(2)三相永磁电动机各相绕组旋转电压(EMF)瞬时值用 u_a 、 u_b 和 u_c 表示,电流瞬时值用 i_a 、 i_b 和 i_c 表示,在给定角速度(ω)不变条件下,只要能使得:

$$u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = \text{const} \quad (1)$$

就可以获得恒定无脉动的电磁转矩。通常电动机的三相绕组是对称的, u_a 、 u_b 和 u_c 的波形是相同的,只是互差一定的相位, i_a 、 i_b 和 i_c 也一样。理论上讲,不论 EMF 为什么波形,只要波形已知,就能找到一个满足式(1)要求的电流波形,并且用近代电流波形控制技术来实现。反过来,在给定电流波形情况下,也能找到一个满足式(1)要求的 EMF 波形,但是 EMF 波形的控制,就不那么容易实现了,除非要求正弦波形,这在传统 ACM 设计理论中有较为成熟的理论和方法。实际上要满足式(1),使电磁转矩恒定,不论给定 EMF 波形,还是给定电流波形,都只有让二者都是正弦波最为方便和现实。

(3)事物总是要向完善的方向发展,对于 BLDCM,正弦波驱动是发展方向。目前成本较高的局面,不是一成不变的。如果退回 10 年看,BLDC servo(AC servo)的价格很高,但是并没有妨碍它逐步取代 DC servo 的发展趋势。在目前情况下,结合不同应用场合的要求,研究和开发较为经济的正弦波驱动 BLDCM 值得关注,用不同的方法来取代价格不菲的光学编码器首当其冲。

参考文献:

- [1] P. Pillay, R. Krishnan Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-magnet Motor Drives, Part I: The Permanent-magnet Synchronous Motor Drive[J] IEEE Trans Ind Appl 1, 1989, 25(2): 265 - 273
- [2] J. R. Hendershot Jr., TJE Mirler Design of Brushless Permanent-magnet Motors[M] Magna Physics Publishing and Clarendon Press · Oxford, 1994, 1- 2

(下转第 18 页)

$$\Phi_{\delta} = \left[\frac{\theta}{\theta_2} \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} - 1 \right) \right] \Phi_{\delta 0}$$

式中, δ_1 为主气隙长度, δ_2 为凸台处气隙长度, θ 为电枢冲片齿角度, θ_2 为凸台角度, $\Phi_{\delta 0}$ 为无凸台时, 每极气隙磁通。

气隙磁通量:

$$\Phi_{\delta} = \left[1 + \frac{\theta}{\theta_2} \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} - 1 \right) \right] \Phi_{\delta 0}$$

电枢磁场与磁极磁场中心线夹角:

$$\theta = \arcsin \frac{\Phi_{\delta}}{\Phi_{\delta 0}}$$

电枢绕组感应电势:

$$E = \frac{2P}{15\alpha} W \Phi_{\delta n} = C_e \Phi_{\delta n}$$

式中, $C_e = \frac{2PW}{15\alpha}$, 为电动势常数, P 为极对数, α 为计算极弧系数, W 为电枢绕组匝数, n 为电机转速。

电枢电流:

$$I_a = \frac{U_N - 2U - E}{R_a}$$

式中, U 为功率晶体管压降, R_a 为电枢绕组电阻, U_N 为额定电压。

电动机转速:

$$n = 7.5\alpha \frac{U_N - 2U - I_a R_a}{PW \Phi_{\delta}}$$

空载转速:

$$n_0 = 7.5\alpha \frac{U_N - 2U}{PW \Phi_{\delta}}$$

电磁转矩:

$$T_{em} = 2B \delta W l_{ef} D_i I_a$$

式中, B_{δ} 为永磁体产生的气隙磁密, l_{ef} 为电枢计算长度, D_i 为定子内径。

样机研制中, θ 角大于 4° 才能解决电动机起动和运行时死点。试验数据见表 1。

表 1 电动机试验数据

输入功率/W	14.95	19.1	23.1
输入电压/V	23.93	24.07	24.07
输入电流/A	0.62	0.79	0.96
电机转速/(r/min)	3270	3039	2872
输出力矩/Nm	0.021	0.03	0.04

5 结 语

单相无刷直流电动机的电磁计算特点: 永磁体和电枢集中绕组产生梯形波气隙磁密, 不同正弦波气隙磁密的计算; 定子冲片齿端凸台造成气隙磁通量增加, 应满足电枢磁场与磁极磁场中心线夹角 θ 大于 4° ; 单相电动机的压降系数、漏磁系数比三相电动机大。反接串联的电枢绕组比二组绕组轮流通电的单相无刷直流电动机可获得更高的效率。对小型驱动控制器, 可选用功能更多的单片集成电路模块, 例如, UDN3626M 适用于 24V 电压, 工作电流小于 0.4A, 它包括了霍尔传感器、过流保护电路等。外转子式单相无刷直流电动机也可采用齿端凸台的不均匀气隙。随着单片集成电路模块功能提高、价格降低, 电动机规格增加, 使更多的无刷直流电动机应用在家用电器领域。

参考文献:

- [1] 唐任远 现代永磁电机理论与设计[M] 机械工业出版社, 1997.
- [2] 李钟明, 刘卫国 稀土永磁电机[M] 国防工业出版社, 1999.
- [3] 丁道宏 电力电子技术[M] 航空工业出版社, 1995.
- [4] 谭建成 电机控制常用集成电路[M] 机械工业出版社, 1997.
- [5] 王庆文 高速单相无刷直流电动机的原理和计算[J] 微特电机, 1998(4).

作者简介: 吴远骏(1977—), 男, 助理工程师, 学士, 主要从事电气技术及控制。

(上接第 6 页)

- [3] 韩光鲜, 谢占明, 王宗培, 等 无刷直流电动机电枢等效电阻的实例研究[J] 微电机, 2002(1), 3- 5
- [4] 韩光鲜, 谢占明, 王宗培, 程智 无刷直流电动机电枢等效电阻的研究[J] 微电机, 2002(2), 3- 6
- [5] 韩光鲜, 谢占明, 王宗培, 等 无刷直流电动机转矩系数的研究[J] 微电机, 2002(3), 3- 5
- [6] P. Pillay, R. Krishnan Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-magnet Motor Drives, Part

II: The Brushless DCMotor Drive[J] IEEE Trans Ind Appl, 1989, 25(2): 274- 279

- [7] 胡文静 永磁无刷直流电动机的发展及展望[J] 微电机, 2002(4), 37- 38

作者简介: 王宗培(1932—), 男, 哈尔滨工业大学教授, 博导, 长期从事电机的教学与研究, 发表论文 260 篇, 出版教材及专著 6 部。