

方波、正弦波无刷直流电机及 永磁同步电机结构、性能分析

长沙交通学院 (410076) 曹荣昌 黄娟

摘要 本文首先论述了方波、正弦波永磁无刷直流电机和永磁同步电机本质上并无多大差异,都属于永磁同步电机范畴。然后从电机工作原理结构,和转矩脉动等方面分析了3种电机的不同特点。

步,这时,电机就是一台异步起动的永磁同步电机。它结构简单,开环运行,成本低廉,对于动态响应要求不高或高输出转矩和恒速运行场合比较适用。

1 引言

电力电子技术,新的永磁材料以及具有快速运算能力的DSP的发展,为电机的研究开发提供了新的契机,现代电机工业,家电工业的发展又为新的电机的应用提供了舞台,如为了适应电梯精确、平衡平层,人们设计了低速纹波转矩很小的正弦波驱动永磁无刷直流电机;为了适应家电工业低噪声,低成本的需要,人们开发了方波永磁无刷直流电机;为了适应纺织工业要求均速,高效节能,人们开发了永磁同步电机。方波、正弦波永磁无刷直流电机和永磁同步电机,这3种电机在本质上并无多大区别;在性能、结构及控制方法上又具有各自的特点,适用场合也不尽相同,对此作分析如下。

2 方波、正弦波永磁无刷直流电机和永磁同步电机的工作原理

图1为上述3种电机的模型,定子为三相绕组,每极分成3个相带,每相由4个元件串联而成且每相带依次相隔 60° ,当电机通以图2所示三相交流电,电机将在异步转矩作用下加速到亚同步状态,然后在脉振转矩和磁阻转矩作用下牵入同

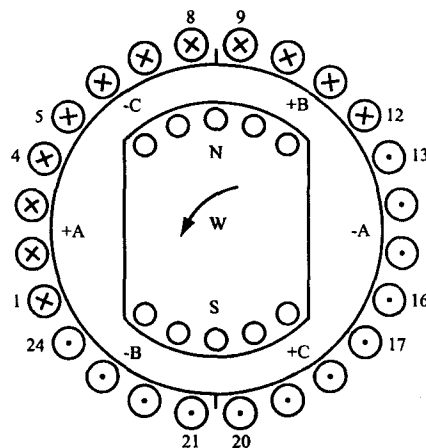


图1 电机模型

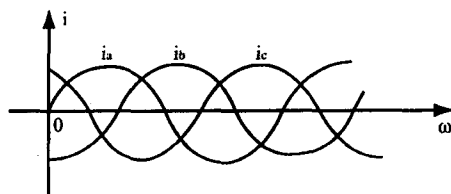


图2 三相交流电

三相方波永磁无刷直流电机,模型如图1所示,这时电源为直流电源,通过逆变器向定子绕组提供三相电源。如图3所示,每次每极3个相带导通,每个相带导通 180° ,转子每转 60° ,一个相

带换相, 三相电流变化如图4所示, 分析图2和图4, 二者变化规律相同, 只是一个呈正弦变化, 一个呈方波变化。分析图1, 我们发现, 随着转子转动, 磁极下电枢绕组的电流方向始终没有变化, 这和直流电机非常相似, 只是直流电机由换向器和电刷实现这一功能, 而方波无刷直流电机由电子开关来实现。电子开关什么时刻开、关, 则根据转子位置信号来决定, 因此方波无刷直流电机必须有获取转子位置信号的装置。由于方波无刷直流电机具有普通有刷直流电机的特性, 因此具有起动转矩大, 加速快, 动态制动简便, 转速—转矩呈线性及效率高等优异特性。

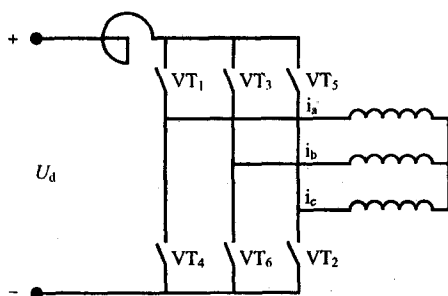


图3 逆变器模型

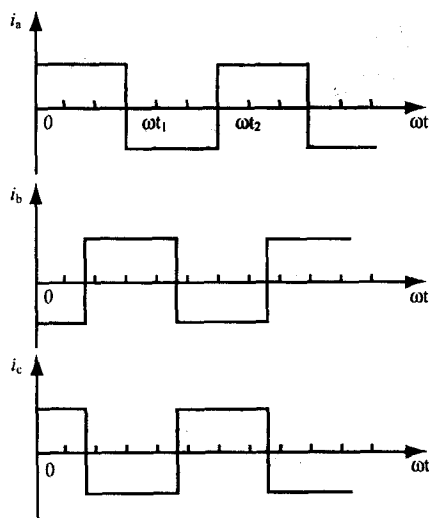


图4 方波无刷直流电机电流模型图(180°方波)

正弦波永磁无刷直流电机, 模型仍为图1, 它的工作原理和同步永磁电机相似, 电源为逆变器供电的三相近似正弦变化的交流电, 但电流幅值和频率都随转子的转速而自动调节, 不象永磁同

步电机电压和频率只有唯一值 ($U\phi=220V$, $f=50Hz$)。为了得到幅值和频率都可调节的电源, 和方波无刷直流电机一样需位置传感器, 由于方波无刷直流电机只需获取触发时刻那一点的位置信息, 因此传感器比较简单。而正弦波无刷直流电机需跟踪转子位置, 以获取同转子磁场同步的正弦波位置信号, 因此位置传感器稍显复杂, 一般采用旋转变压器或增量式光电编码器, 以旋转变压器为例, 它的三相输出电压为

$$U_1 = U_m \sin \theta_e \sin \omega t$$

$$U_2 = U_m \sin (\theta_e - 120^\circ) \sin \omega t$$

$$U_3 = U_m \sin (\theta_e + 120^\circ) \sin \omega t$$

其中 θ_e —转子磁极轴线和A相绕组轴线的夹角

ω —转子激磁频率, 把输出电压经全相敏检波和滤波就可得到转子的正弦位置信号, 然后通过 $e^{j\theta_e}$ 和 $e^{j\theta}$ 变换, 和其它一处理, 就可获取控制

$$e^{j\theta_e} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_e + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \theta_e & -\sin(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta_e + \frac{2}{3}\pi) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$

SPWM逆变器的触发信号, 由于高速DSP的发展, 也可将旋转变压器的输出信号送入轴角变换器ADIS82转换成16位数字位置角度量, 再经DSP(如ADMC331)处理和其它一些变换直接得到控制SPWM逆变器的触发信号。从而获得频率和幅值可调的近似正弦变化的定子电流, 这样正弦波无刷直流电机的旋转磁场和转子磁场始终相对静止, 因此它可以自行起动而且动态响应快。通过一些控制手段, 可以使电机运行于最大转矩/电流控制或d轴电流 $i_d=0$ 控制或最大输出功率控制。由于电流和气隙磁场都接近正弦波, 电机纹波转矩小。这些特点, 使它广泛应用于数控机床, 加工中心, 工业机器人等高精度伺服系统中。

3 方波、正弦波永磁无刷直流电机和同步永磁电机的结构差异

方波永磁无刷直流电机由于定子电流为方波或梯形波。为了使其出力最大，气隙磁密常设计成方波或接近方波，故常常把它的转子做成瓦片

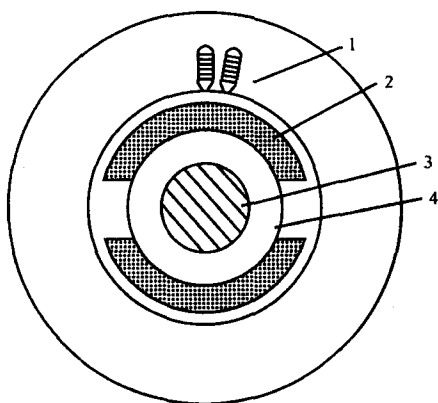


图5 方波电机转子结构
1 定子 2 永磁体 3 转轴 4 转子铁心

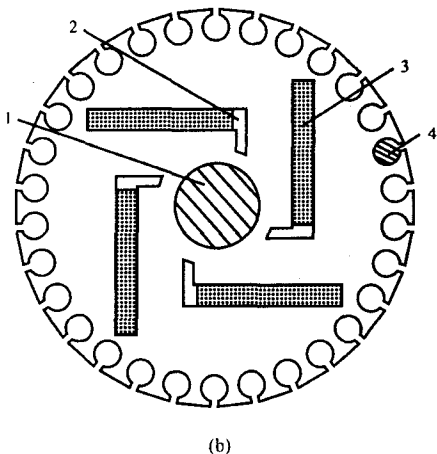
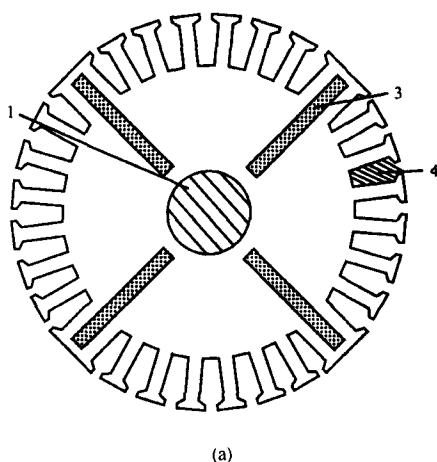


图6 永磁同步电机转子结构
1 转轴 2 空气隔磁槽 3 永磁体 4 转子导条

形，如图5所示，异步起动永磁同步电机由于定子电流为正弦波，为减小纹波转矩和谐波损耗，气隙磁密通常设计为正弦波或接近正弦波，因此其转子常采用图6形式，其中图a为内置切向式转子结构。图b为内置混合式转子磁路结构。当然还有其它形式的转子结构，从图6可知，永磁同步电机的转子结构较简单且较牢固，正弦波永磁无刷直流电机和永磁同步电机转子结构相似，一般也可采用图6形式。但可以去掉转子导条，有时为了使气隙磁密更接近正弦波，转子也做成图7形式，直接把永磁体做成正弦波形式。3种电机的定子绕组也稍有不同，方波电机一定是集中整距绕组，以提高绕组的利用率，正弦波永磁无刷直流电机一般采用分布短距绕组，有时也采用分数槽或正弦绕组，以进一步减小纹波转矩。为了减小齿槽转矩，永磁同步电机一般采用分布，短距绕组，以减弱谐波的影响。三种电机都可以把定子做成斜槽形式。

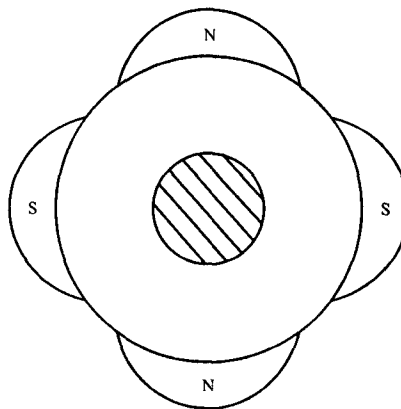


图7 正弦波无刷直流电机转子结构

4 方波、正弦波永磁无刷直流电机和永磁同步电机转矩脉动分析

方波永磁无刷直流电机因定子电流为方波，电枢绕组一组一组元件换相，而非一个元件一个元件换相，在图1所示瞬间转子磁势 F_r 和电枢磁势 F_s 的关系如图8(a)所示，转子转动 60° 后+B、-B相换流，在换流瞬间之前， F_r 和 F_s 的关系如

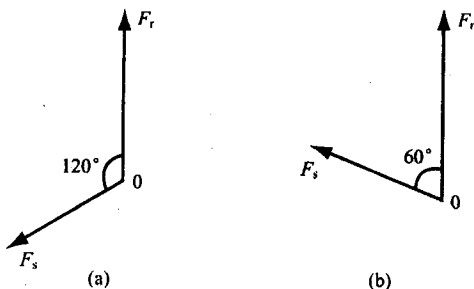


图8 方波永磁电机定子磁势关系

图8(b)所示, 因电机电磁转矩 T_m 近似为:

$$T_m = k F_r F_s \sin \theta$$

θ 为 F_r 和 F_s 的夹角, 可见方波电机由于电枢磁势摆动而引起转矩脉动, 加上电流换流的冲击和齿槽效应引起的齿槽转矩, 因此方波电机的转矩脉动比较大, 特别是低速时, 这一缺陷更加明显, 限制了它在高精度场合的运用。对于正弦波永磁无刷直流电机, 因其定子电流近似正弦变化。

$$i_A = I_m \sin \omega t$$

$$i_B = I_m \sin (\omega t + 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

在图1所示瞬间 $\omega t = 0$, 这时

$$i_A = 0$$

$$i_B = +\frac{\sqrt{3}}{2} I_m$$

$$i_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m$$

转子磁势 F_r 与定子 A 相、B 相、C 相磁势关系如图9(a)所示, 转子转过 60° 电角度, 这时定子电流也变化 60° , 即 $\omega t = 60^\circ$, 这时:

$$i_A = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m$$

$$i_B = 0$$

$$i_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m$$

转子磁势 F_r 和定子 A 相、B 相、C 相磁势关系如图9(b)所示。从图中两个特殊点可知, F_r 和 $F_{\text{合}}$ 的夹角 θ 始终为 90° , 没有方波无刷直流电机电枢磁势那样的摆动, 从这一点来说, 正弦波永磁无刷直

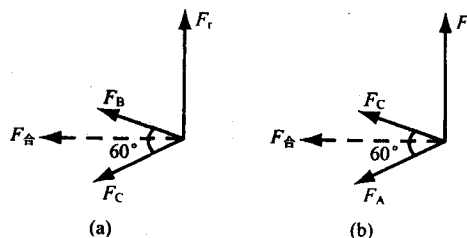


图9 正弦波永磁无刷电机定子磁势关系

流电机转矩波动有了很大改善, 但由于正弦波永磁无刷直流电机的定子电流由 SPWM 逆变器提供, 不可能是标准正弦波形, 因此电流中会含有一些高次谐波, 由于气隙磁密也不是标准正弦波, 这样在电机中将会产生一些谐波转矩。加上永磁体和定子槽产生的定位力矩。因此正弦永磁无刷直流电机的电磁转矩仍有一些纹波成分。但只要在电机设计上和控制策略上加以充分考虑, 是能有效抑制这些纹波幅度的。永磁同步电机因开环运行, 牵入同步需要一定时间, 稳态运行后, 当负载发生变化, 电磁转矩要经过一个振荡过程才能与负载平衡, 这也决定了它只能运用在一些控制精度要求不高的场所。

通过以上的分析, 我们对上述3种电机有了一个比较全面的了解, 3种电机本质上相差不大。方波永磁无刷直流电机因其定子电流和气隙磁密都为方波, 其运行特性同直流电机接近, 不足之处是转矩脉动较大; 正弦波永磁无刷直流电机因其结构设计和控制特点, 定子电流和气隙磁密都接近正弦波, 其运行特性同永磁同步电机接近, 不足之处是控制较复杂, 成本较高。因此我们应根据具体应用场合, 选用上述3种电机。

参考文献

- 1 曹荣昌. 无刷直流电机的绕组联接和相数选择. 电机技术. 2001.1
- 2 唐任远. 现代永磁同步电机—理论与设计. 北京机械工业出版社. 1998
- 3 杨贵杰. 无刷直流电机直接驱动系统动态特性分析. 电机与控制学报. 2000.3.1

(收稿日期: 2002-07-11)

第一作者: 曹荣昌 男 1966年生 硕士 讲师