

参数对永磁无刷直流电动机 稳态性能的影响

莫会成 (西安微电机研究所)

励鹤鸣 陈世坤 (西安交通大学)

【摘 要】从永磁无刷直流电动机基本工作原理出发,阐述换向角与电动机各矢量之间的关系,并根据所得的矢量图,分析不考虑凸极和考虑凸极效应时电机参数对电机的机械特性、效率及功率因数等特性的影响。给出计算实例,得出了一些有用的结论和计算公式。

【叙 词】无刷直流电动机 永磁电机 参数 计算

1 引 言

永磁无刷直流电动机的基本结构特点是应用电子换向代替了有刷直流电动机的换向器和电刷,定子采用多相交流绕组代替有刷直流电动机转子上的直流绕组,转子上安装永磁磁极。因此它不仅保持了有刷直流电动机的各项性能,而且还具有寿命长、可靠性高、出力大、体积小、动态性能好等特点。因而近年来发展很快,已广泛使用于数控机床、工业机器人、纺织、机械、工业自动化及军用武器器装备等各个领域。

一般认为永磁无刷直流电动机的稳态性能和永磁有刷直流电动机的稳态性能相似,相当于并激直流电动机,有较硬的机械特性,且通常也只考虑电阻对特性的影响,忽略或较少考虑电感的影响。实际上,由于永磁无刷直流电动机定子上采用了多相交流绕组,转子部分为永磁体结构,从结构上来说与永磁同步电动机极为相似。由于参与换向的绕组为一相绕组,而不是单个线圈,因此电感较大,往往不能忽略,否则在分析时就会造成很大误差,甚至得出错误的结论。本文针对三相永磁无刷直流电动机两种基本的结构形式,

讨论电阻 r_s 、电感 L 和换向角 δ 等参数对电动机机械特性、效率,功率因数等特性的影响,并给出计算实例,得出一些有用的结论和实用的计算公式。

2 基本原理和结构

尽管永磁无刷直流电动机的结构形式多种多样,但最常见的还是定子采用三相 Y 连接绕组,逆变器为桥式逆变器结构形式,如图 1 所示,通常电动机有两种基本运行状态,即 120° 导通状态和 180° 导通状态。 120° 导通状态

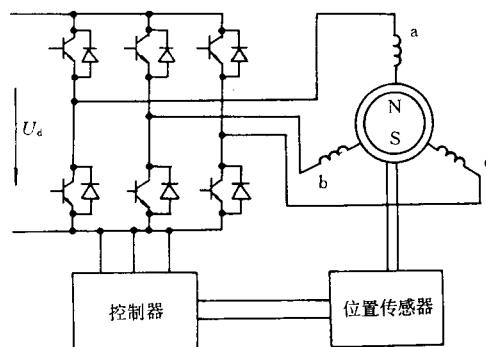


图 1 三相永磁无刷直流电动机原理图
的特点是每个时刻电动机有两相绕组导通,逆变器只有两个桥臂上下各一晶体管导通,各相绕组的导通顺序为 ab' 、 ac' 、 bc' 、 ba' 、 ca' 、

cb'。180°导通状态时,电动机每一时刻三相绕组都导通,逆变器3个桥臂各有1个晶体管导通,电机绕组的导通顺序为ab'c'、abc'、a'bc'、a'bc、a'b'c、ab'c。但是,不论哪一种导通方式,其运行原理都是相同的,因为两种导通状态均每隔60°换相一次,形成一个导通状态,一个周期被分成6个状态。也就是说电动机旋转1个周期,电机定子的磁场中心线变化6次,形成定子的步进磁场。在每一导通状态,定子磁场中心线(忽略电感时)与永磁转子的磁场中心线之间的夹角变化60°电角度,如图2所示。根据 $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 是大于180°、等于180°还是小于180°三种情况,分别称之为超前、正常和滞后三种换向型式。而换向的时刻和顺序则是由转子位置传感器检测转子位置来保证的。

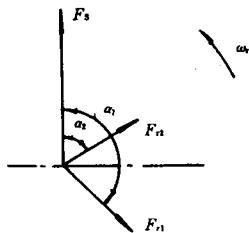


图2 定转子磁场关系(一个状态)

永磁无刷直流电动机的转子结构也有各种各样的形式,从对参数和电气性能的影响的角度考虑则只有两种基本形式,其典型结构如图3a和图3b所示。第一种结构是转子表面粘贴瓦形或环形永磁体,永磁体产生的磁场直接进入气隙而形成气隙磁场。由于一般采用高性能稀土永磁材料,因而电机的等效气隙较大,其凸极效应可以忽略不计。另一种结构称为内嵌式或隐极式,这种结构永磁体产生的磁场不是直接进入气隙,而是经过极靴或导磁体进入气隙,这时电动机的凸极效应较大,不能忽略,与凸极同步电动机相似。

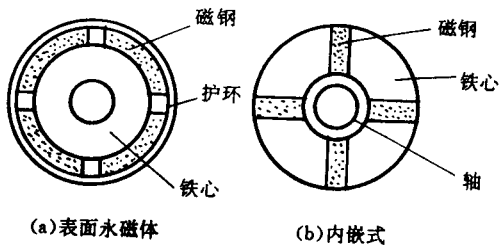


图3 永磁无刷直流电动机转子结构

3 不考虑凸极效应时的性能分析

永磁无刷直流电动机转子采用图3a所示结构时,其凸极效应可以忽略,设 L_d 和 L_q 分别代表直轴和交轴电感,因而这时有:

$$L_d = L_q = L \quad (1)$$

同时假定电机三相绕组的电压为正弦波,转子产生的永磁磁场也为正弦波,也就是忽略高次谐波的影响。从图2磁场关系图可看出,所谓的磁场中心线实际上就是定子电压矢量,且在一个导通状态中也转过了60°电角度,而不是位置不变。即转子磁场和定子电压矢量同步旋转,两者之间的夹角不变。图4a为根据图2所画出的矢量图。图4b为对应的电路图。图中 E 为忽略电枢反应时转子磁场感应的反电势(按电压方向)。 $\delta = -90^\circ + (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ 为电动机的换向角,在运行时不变,由电动机的位置传感器决定,由此可得:

$$V_s = (r_s + j\omega L)I + E \quad (2)$$

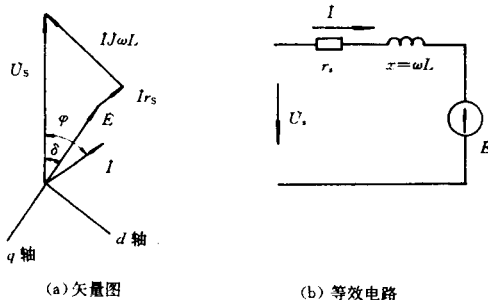


图4 不考虑凸极效应时的矢量图

$$E = K_e \omega_r = K_e \frac{\omega}{P} \quad (3)$$

式中 K_e ——反电势常数

P ——电动机的极对数

取 E 为参考矢量, 则:

$$\begin{aligned} I &= \frac{V_s I \delta - E}{r_s + j\omega L} \\ &= I_r + jI_i \\ &= \frac{r_s(V_s \cos \delta - E) + V_s \sin \delta \cdot \omega L}{r_s^2 + (\omega L)^2} \\ &\quad + j \frac{r_s V_s \sin \delta - \omega L(V_s \cos \delta - E)}{r_s^2 + (\omega L)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

电磁功率为:

$$\begin{aligned} P_{em} &= mEI_r \\ &= mE \frac{r_s(V_s \cos \delta - E) + V_s \sin \delta \cdot \omega L}{r_s^2 + (\omega L)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

电磁转矩为:

$$\begin{aligned} T_{em} &= mK_e \\ &\quad \cdot \frac{r_s(V_s \cos \delta - K_e \omega_r) + V_s \sin \delta \cdot \omega_r I P}{r_s^2 + (\omega_r I P)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

功率因数由矢量图可有:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \cos(\delta - \text{tg}^{-1} \frac{I_i}{I_r}) \\ &= \cos\{\delta - \text{tg}^{-1} \\ &\quad [\frac{r_s V_s \sin \delta - \omega L(V_s \cos \delta - E)}{r_s(V_s \cos \delta - E) + V_s \sin \delta \cdot \omega L}]\} \end{aligned} \quad (7)$$

电动机的输入功率为:

$$\begin{aligned} P_{in} &= mV_s I \cos \varphi \\ &= \frac{mV_s [r_s(V_s - E \cos \delta) + E \sin \delta \cdot \omega L]}{r_s^2 + (\omega L)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

忽略机械损耗和附加损耗后的效率为:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{em}}{P_{in}} \\ &= \frac{r_s E(V_s \cos \delta - E) + E V_s \sin \delta \cdot \omega L}{r_s V_s(V_s - E \cos \delta) + E V_s \sin \delta \cdot \omega L} \end{aligned} \quad (9)$$

由式(6)、(7)、(9)可知, 电动机的电磁转矩、功率因数和效率不仅与电动机的速度有关, 而且和电动机的参数 δ 、 r_s 、 L 等有关。

3.1 换向角 δ

换向角 δ 实际上就是电压矢量和反电势矢量之间的夹角, 对式(6)求导, 并令其等于零, 得电磁转矩最大时的 δ 值。

$$\delta = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L}{r_s} \quad (10)$$

由上式可看出, 换向角的大小直接影响电动机的电磁转矩, 且不同转速时取得最大电磁转矩的 δ 值也是变化的, 如果不考虑电感, 则 $\delta = 0$ 时电磁转矩最大, 考虑电感时 $\delta > 0$ 。

3.2 忽略电感

按图 3a 所示的转子结构, 永磁体采用稀土永磁材料, 电动机的电感可以设计得很小, 如果电动机的转速不是很高, 角频率 ω 也很小, 从而电动机的感抗 ωL 也很小, 这时电磁转矩变为:

$$T_{emr} = mK_e \frac{V_s \cos \delta - K_e \omega_r}{r_s} \quad (11)$$

按式(10)可取 $\delta = 0$, 则式(11)成为:

$$\begin{aligned} T_{emr} &= mK_e \frac{V_s}{r_s} - mK_e^2 \frac{\omega_r}{r_s} \\ &= T_0 - K \omega_r \end{aligned} \quad (12)$$

可见此时的机械特性与一般永磁直流电动机或它激直流电动机完全类似。

功率因数和效率在忽略电感时变成:

$$\cos \varphi = \cos(\delta - \text{tg}^{-1} \frac{V_s \sin \delta}{V_s \cos \delta - K_e \omega_r}) \quad (13)$$

$$\eta_r = \frac{K_e \omega_r (V_s \cos \delta - K_e \omega_r)}{V_s (V_s - K_e \omega_r \cos \delta)} \quad (14)$$

$\delta = 0$, 则:

$$\cos \varphi = 1 \quad (15)$$

$$\eta_r = \frac{E}{V_s} = \frac{K_e \omega_r}{V_s} \quad (16)$$

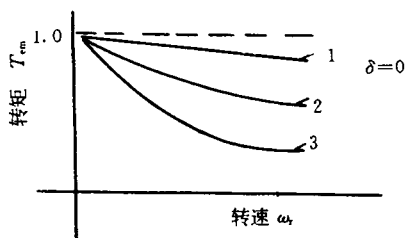
3.3 忽略电阻

一般说来, 电阻是不能忽略的, 但如果电动机的电感较大, 电机的转速较高, ωL 相对于电机的电阻较大时, 则有:

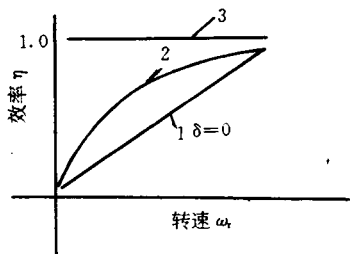
$$T_{eml} = \frac{mK_e V_s \sin \delta}{LP\omega_r} = K \frac{V_s}{\omega_r} \quad (17)$$

$$\cos \varphi_l = \cos(\delta - \tan^{-1} \frac{V_s \cos \delta - K_e \omega_r}{V_s \sin \delta}) \quad (18)$$

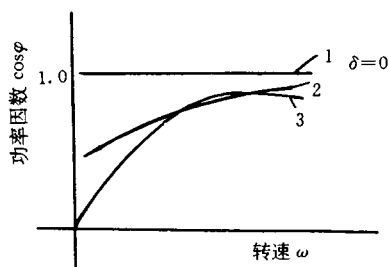
可见此时的机械特性与串激直流电动机的机械特性完全类似,从式(18)还可看出,换向角 δ 必须大于零而不能小于等于零,否则将没有功率输出,这也正是永磁无刷直流电动机的换向必须超前的根本原因。



(a) 机械特性



(b) 效率



(c) 功率因数

图5 永磁无刷直流电动机特性曲线

1. 忽略电感时 2. 实际曲线 3. 忽略电阻

一般,电动机的电阻和电感均不得忽略,因而其特性介于二者之间,图5为几种典型情况下的特性曲线,图中横坐标为转速 ω_r ,均采用了标么值。

4 考虑凸极效应时的性能分析

一般电机总有凸极效应,尤其采用内嵌式(见图3b)结构时更不可忽略,考虑凸极效应时的矢量图如图6所示,采用同样的分析方法由图可得:

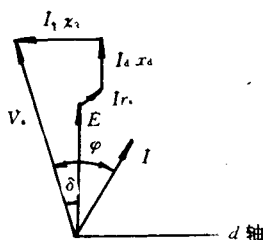


图6 考虑凸极效应时的矢量图

$$\begin{cases} V_s \cos \delta = E + x_d I_d + r_s I_q \\ V_s \sin \delta = x_q I_q - r_s I_d \end{cases} \quad (19)$$

可得:

$$I_d = \frac{x_q (V_s \cos \delta - E) - r_s V_s \sin \delta}{x_d x_q + r_s^2} \quad (20)$$

$$I_q = \frac{x_d V_s \sin \delta + r_s (V_s \cos \delta - E)}{x_d x_q + r_s^2} \quad (21)$$

可得电磁转矩:

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{P_{em}}{\omega_r} \\ &= \frac{m V_s I \cos \varphi - m I^2 r_s}{\omega_r} \\ &= \frac{m [E_q I_q + I_d I_q (x_d - x_q)]}{\omega_r} \\ &= m K_e \frac{\omega_r P L_d V_s \sin \delta + r_s (V_s \cos \delta - K_e \omega_r)}{P^2 L_d I_q \omega_r^2 + r_s^2} + m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{r_s P L_q \omega_r (V_s \cos \delta - K_e \omega_r)^2 - r_s L_d P \omega_r V_s^2 \sin^2 \delta + V_s \sin \delta (V_s \cos \delta - K_e \omega_r) (P^2 L_d I_q \omega_r^2 - r_s^2)}{(P^2 L_d I_q \omega_r^2 - r_s^2)^2} \\ & \cdot P (L_d - L_q) \end{aligned} \quad (22)$$

从式(22)可知,如果不考虑凸极效应,即 $I_d = I_q$,则变成式(6);而如果忽略电感, $I_d = I_q = 0$,式(22)就变成了式(11)。因而式(22)是个更全面的电磁转矩表达式,不仅适合于考虑凸极效应时的情况,也适合于不考虑凸极效应时的情况。下面再看忽略电阻时的情形,这时有:

$$T_{eml} = m \frac{V_s K_s}{P L_d} \sin \delta \frac{1}{\omega_r} + m V_s^2 \frac{L_d - I_q}{2 P L_d I_q} \cdot \frac{1}{\omega_r^2} \sin 2\delta \quad (23)$$

可见此时的电磁转矩也与凸极同步电动机的电磁转矩完全类似,这一点完全可以理解,只不过这里的 δ 是换向角而不是功角。同时还可看出其机械特性也类似串激直流电动机,如果 $I_q > I_d$,则特性更软。

实际的无刷直流电动机电阻是不能忽略的,因而机械特性只能用式(22)计算,所以其机械特性较为复杂;一般它介于并激和串激之间,与不考虑凸极效应时的结果类似。

5 结 论

根据上述分析,针对两台样机进行了实例计算。其中 1 号样机采用图 3b 的结构形式,磁钢为 Sm-Co 永磁材料,参数为 $L_d = 30\text{mH}$, $I_q = 70\text{mH}$, $r_s = 4.6\Omega$ 。2 号样机采用

图 3a 所示结构,永磁体采用 Nd-Fe-B 永磁材料,参数为 $L_d = I_q = 2\text{mH}$, $r_s = 0.82\Omega$ 。两台样机的机械特性按式(22)和式(6)计算,前者特性很软,呈串激电机特性,后者特性较硬,主要呈并激电机特性,二者均与实测结果一致。

a. 参数对永磁无刷直流电动机性能的影响,不仅表现在电阻,而是电阻和电感同时作用,采用不同的结构形式时,二者影响程度不同。

b. 当电机转子采用表面永磁体结构时(见图 3a),电动机电感较小,电阻起主要作用,电动机主要呈并激或它激直流电动机特性。

c. 当电机转子采用内嵌式结构时(见图 3b),电动机电感相对较大,电感起主要作用,电动机主要呈串激直流电动机特性。

d. 电动机 d 、 q 轴效应较严重时,参数对电动机性能影响更大,特性更差。

e. 一般情况下,电动机电感和电阻参数均不得忽略,故其特性介于串激和并激直流电动机之间。

f. 换向角 δ 对电动机性能影响较大,在不同转速下,电动机存在一个最佳换向角,且一般需满足 $\delta > 0$ 。

THE EFFECT OF PARAMETERS ON STABLE CHARACTERISTICS OF BRUSHLESS D. C. MOTOR

[Abstract] This paper describes the relationship between commutation angle and motor vectors from the basic operation principles of brushless D. C. motors. From the vector diagrams, it analyses the effects of motor parameters on the mechanical characteristics, efficiency and power factor etc. considering the salient pole or not. The calculating examples are presented, and some useful conclusion and formulae are obtained.

[Keywords] brushless D. C. motor, permanent magnet machines, parameter, calculate

启 事

欢迎订阅 1994 年《微电机》

1994 年《微电机》每期定价 2.80 元,全年定价 11.2 元。邮政代号 52-92,西安市邮局总发行,全国各地邮局订购。如错过邮局订阅时间,可直接与《微电机》编辑部联系订阅。编辑部地址:西安市桃园西路 2 号西安微电机研究所内,邮政编码:710077。