

稀土永磁无刷直流电动机电枢反应的分析

胡文静¹, 吴彦平²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061;

2. 济南钢铁集团总公司, 山东 济南 250010)

摘 要: 对永磁无刷直流电动机电枢反应的特点作了详细分析, 分析结果认为它对气隙磁通、感应电势、电磁转矩的平均值的影响可忽略不计, 故为电磁设计时把空载工作点的磁通近似看作负载工作点的磁通的结论提供了理论依据, 并用此结论设计了样机, 对其进行了空载、负载实验, 实验结果和设计数据吻合较好。

关键词: 电枢反应; 反电势; 电磁转矩

中图分类号: TM 351

文献标识码: A

文章编号: 1001- 6848(2002)02- 0012- 04

Armature Reaction Analysis of the Rare- earth PM Brushless DC Motor

HU Wen- jing¹, WU Yan- ping²

(1. School of Electrical Engineering Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Jinan Steel and Iron Group Co. Ltd., Jinan 250010, China)

Abstract: The characteristics of the armature reaction of the rare- earth PM brushless DC motor are analysed in details, the analytical results conclude that the effects of the armature reaction on the air gap flux, inductive EMF (electro- motive force) and electromagnetic torque can be neglected, so it provides the theoretical foundation that the air gap flux of the no load work point can be approximately regarded as that of the load work point. After experiments on one sample motor which was designed according this conclusion, the results of the no load and load experiments are compared with the designing datas, they are perfectly identical.

Key words: armature reaction; inductive EMF; electromagnetic torque

1 引言

由于永磁无刷直流电动机的结构及工作状态与普通的有刷直流电动机有较大不同, 因而其电枢反应也比普通的有刷直流电动机复杂得多, 目前对前者电磁设计时, 通常考虑电枢反应来确定负载工作点。实践证明, 这样容易引起较大误差。通过分析, 认为它对感应电势、电磁转矩的平均值的影响可忽略不计, 文中就永磁无刷直流电动机的电枢反应对气隙磁通、感应电势、电磁转矩的影响进行讨论。

2 永磁无刷直流电动机电枢反应的总体效应

改变电机负载时, 电枢磁势对励磁磁势的影响, 就称为电枢反应, 而永磁无刷直流电动机的电枢反应比较复杂。这里以“一相导通三相星形三状态”径向励磁为例, 对电枢反应的总体效应进行分析。

电动机在运行中, 定子绕组一相一相依次通电, 从而形成了状态的跳跃式旋转磁场, 在图 1 中, 用矢量 AW_a 表示电枢绕组产生的磁势。

当 U 相绕组通电时, 电枢绕组磁势方向与该相绕组轴线重合, I、II 为磁状态角 φ 的边界, 故转子磁场处于磁状态角 φ 范围之内时, 电枢磁势的方向保持不变, 当转子磁场由位置 I 转过 φ 电角度达位置 II 时, 转子位置传感器立即发出信号, 通过电子换向开关, 将 U 相绕组切断, V 相绕组导通, 这时电枢磁势跳过 120 电角度, 当转子磁场处于位置 I 时, 电枢磁势对转子磁场起最大的去磁作用, 如图 1a 所示。转子磁场处于位置 II 时, 电枢反应对转子磁场起最大的增磁作用, 如图 1b 所示。

电枢反应直轴分量开始是去磁的, 当转子转到和电枢反应磁势轴线位置相垂直的位置时, 电枢反应直轴分量为零, 当转子转过大于 $\varphi/2$ 电角度时, 电枢反应直轴分量对转子磁场起增磁作用^[1], 电枢反应直轴分量在数值上等于 AW_a 在转子轴线方向上的投影, 其瞬时值为:

收稿日期: 2002- 02- 30

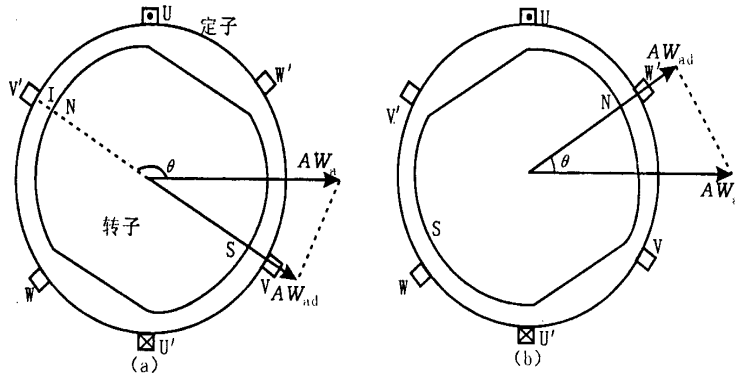
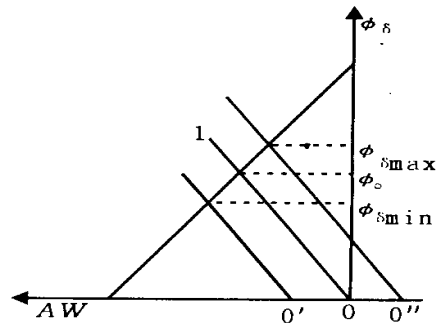


图1 电枢反应磁势对转子磁场的影响

$$AW_{ad} = \frac{1}{2P} K_w W_{\Phi} i \cos \theta \quad (i \text{ 为电枢电流})$$

式中, θ 为转子轴线与电枢磁势轴线正向的夹角。 W_{Φ} 为电枢绕组每相匝数, K_w 是绕组系数。

如图2所示, 由于电枢反应直轴分量 AW_{ad} 的作用, 使得每极总磁通在 $\Phi_{m \max}$ 和 $\Phi_{m \min}$ 之间发生变化(此处未考虑磁路饱和的影响), 可见电枢反应的直轴分量时而增磁时而去磁, 使气隙每极的合成磁通在发生变化, 图2中, oo' 和 oo'' 的长度为 AW_{ad} 的绝对值。



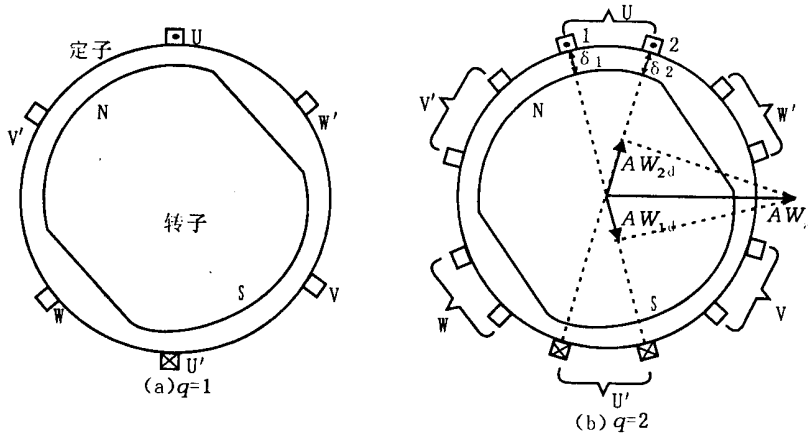
(曲线1为空载特性)

图2 稀土永磁电机的铁磁工作图

3 电枢反应对感应电势(称反电势)的影响

如图3所示, 设电枢绕组为 $q=1$ 、 $P=2$ 的整距绕组, 气隙均匀, 电枢磁势 AW_a 沿 $o1$ 和 $o2$ 方向连线投影, 可得两个电枢反应直轴分量磁势分别为 AW_{1d} ,

AW_{2d} , AW_{1d} 作用在磁路上使槽1处的转子磁场产生的磁密 $B_{\delta 1}$ 减小, AW_{2d} 使槽2处的磁密 $B_{\delta 2}$ 增加, 由于 AW_d 和 AW_{2d} 对称于 AW_a , 所以 AW_{1d} 和 AW_{2d} 的绝对值相等, 如果转子轴线从刚一进入U相的换向区间


 图3 电枢反应磁势 AW_a 的投影

起到离开U相的换相区间为止, AW_{1d} 和 AW_{2d} 作用的磁路结构一样, $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, AW_{1d} 对槽1处的去磁磁密 B_{a1} 和 AW_{2d} 对槽2处的增磁磁密 B_{a2} 相等, 因此槽1处的合成气隙磁密 $B_1 = B_{\delta} - B_{a2}$, 槽2处的合成气隙磁密 $B_2 = B_{\delta} + B_{a2}$, 所以, 槽1、2处导体产生的反电势分别为 e_1 、 e_2 :

$$e_1 = B_{\delta} L_a V = (B_{\delta} - B_{a1}) L_a V$$

$$e_2 = B_{\delta} L_a V = (B_{\delta} + B_{a2}) L_a V$$

每相绕组的合成反电势 $e = W_{\Phi} (e_1 + e_2) = W_{\Phi} L_a V (B_{\delta} + B_{\delta}) = e_0$ 式中, L_a 为电枢有效导体的长度, V 为转子线速度。

e_0 为未考虑电枢反应影响时的反电势, 由上式

可见,反电势和未考虑电枢反应影响时大小一样,

AW_a 的存在并未对反电势的大小产生影响。

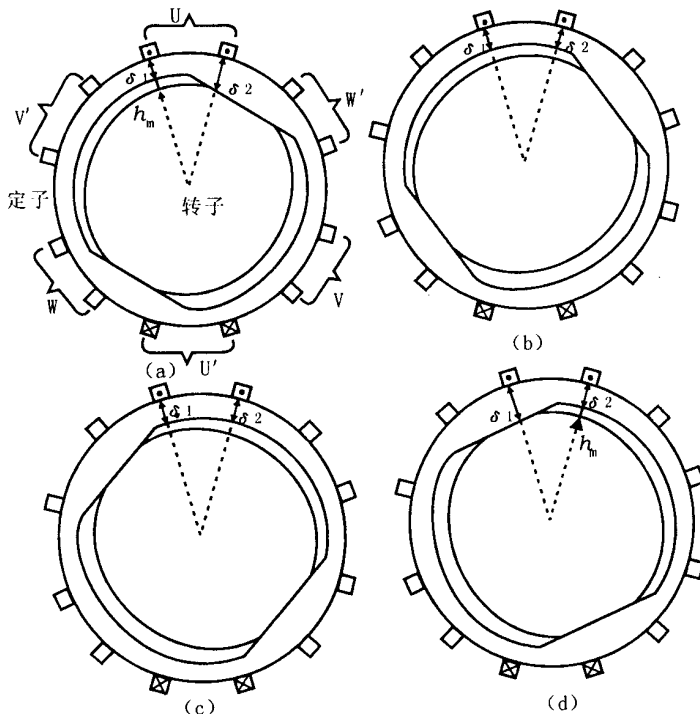


图 4 转子不同位置时的 AW_{1d} 和 AW_{2d}

如图 4 所示,如果 AW_{1d} 和 AW_{2d} 作用的磁路结构不同,用前述方法进行分析,同样得到 $AW_{1d} = AW_{2d}$,如果转子磁钢粘在极身上,磁钢厚度为 h_m ,极身为导磁材料,不考虑铁心饱和的影响,情况就比较复杂,现分析如下:

比较 $\delta_1 + h_m$ 和 δ_2 的大小,设 $\delta_1 + h_m < \delta_2$, 则 $B_{a1} > B_{a2}$, 所以槽 1、2 处的合成气隙磁密分别为:

$$B_1 = B_{\delta 1} - B_{a1}, B_2 = B_{\delta 2} + B_{a2}$$

$$e_1 = (B_{\delta 1} - B_{a1})L_a V, e_2 = (B_{\delta 2} + B_{a2})L_a V$$

$$e = W_{\Phi}(B_{\delta 1} + B_{\delta 2} + B_{a2} - B_{a1})L_a V <$$

$$W_{\Phi}(B_{\delta 1} + B_{\delta 2})L_a V = e_0$$

如果转子由图 4a 转到图 4b 的过程中, $\delta_1 + h_m < \delta_2$ 始终成立, 则 $e_1 < e_0$ 始终成立。图 4b 是转子磁极刚刚覆盖全部有流区, 用前述分析分法可推得 $e = e_0$, 转子由图 4b 转到图 4c 位置过程中 $e = e_0$, 转子从图 4c 转到图 4d 所示位置的过程中, 因为 $\delta_1 > \delta_2 + h_m$, 所以 $B_{a1} < B_{a2}$

$$e = W_{\Phi}(B_{\delta 1} + B_{\delta 2} + B_{a1} - B_{a2})L_a V >$$

$$W_{\Phi}L_a V (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) = e_0$$

$e > e_0$ 始终成立, 转子达到 d 位置时, U 相换向结束。

由上述分析可知, 由于整个磁状态过程中的对称性, 电枢反应使反电势的波形发生畸变, 而对反电势的平均值影响不大。

4 电枢反应对电磁转矩的影响

通常电磁转矩的表达式为(转子磁场为矩形波):

$$M_e = W_{\Phi} R_a L_a (B_{\delta 1} - B_{a1}) (U - U_d - e) / r_{\Phi} +$$

$$W_{\Phi} R_a L_a (B_{\delta 2} + B_{a2}) (U - U_d - e) / r_{\Phi} =$$

$$W_{\Phi} R_a L_a (B_{\delta 1} + B_{\delta 2} + B_{a2} - B_{a1}) \cdot$$

$$(U - U_d - e) / r_{\Phi}$$

式中, R_a 为电枢内半径, r_{Φ} 为每相绕组的电阻, U_d 为功率管饱和导通时的管压降。

将 $e = W_{\Phi}(B_{\delta 1} + B_{\delta 2} + B_{a2} - B_{a1})L_a V$ 代入上式, 则:

$$M_e = W_{\Phi} R_a L_a (B_{\delta 1} + B_{\delta 2} + B_{a2} - B_{a1}) \cdot$$

$$\frac{U - U_d - W_{\Phi}(B_{\delta 1} + B_{\delta 2} + B_{a2} - B_{a1})L_a V}{r_{\Phi}}$$

令 $B_{a2} - B_{a1} = B_d$ 代入上式得:

$$M_e = W_{\Phi} R_a L_a (B_{\delta 1} + B_{\delta 2} + B_d) \cdot$$

$$\frac{U - U_d - W_{\Phi}(B_{\delta 1} + B_{\delta 2} + B_d)L_a V}{r_{\Phi}} =$$

$$W_{\Phi} R_a L_a (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) \cdot$$

$$\frac{U - U_d - W_{\Phi}(B_{\delta 1} + B_{\delta 2} + B_d)L_a V}{r_{\Phi}} =$$

$$W_{\Phi} R_a L_a (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) \cdot$$

$$\frac{U - U_d - W_{\Phi}(B_{\delta 1} + B_{\delta 2})L_a V}{r_{\Phi}} +$$

$$W \Phi R_a L_a \frac{B_d}{r\Phi} [-W \Phi (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) L_a V +$$

$$U - U_d - W \Phi (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) L_a V - W \Phi B_d L_a V]$$

上式中, 第一项为不考虑电枢反应时的电磁转矩 M_{∞} , 第二项中 $U - U_d - W \Phi (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) L_a V - W \Phi B_d L_a V$ 是电机考虑电枢反应时电枢绕组上的电压降, 由于电枢绕组电阻比较小, 所以其电压降比较小, $W \Phi (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) L_a V$ 接近反电势的大小, 所以, 一般:

$$-W \Phi (B_{\delta 2} + B_{\delta 1}) L_a V + [U - U_d - W \Phi (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) L_a V - W \Phi B_d L_a V] < 0$$

$$M_e = M_{\infty} + W \Phi R_a L_a B_d / r\Phi [-W \Phi (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) L_a V + U - U_d - W \Phi (B_{\delta 1} + B_{\delta 2}) L_a V - W \Phi B_d L_a V]$$

式中, 第二项正负取决于 B_d , $B_d = B_{a2} - B_{a1} > 0$, $M_e < M_{\infty}$, $B_d = B_{a2} - B_{a1} < 0$, $M_e > M_{\infty}$ 对应于图 4, 当转子由图 4a 位置转到图 4b 位置时, 因为 $B_{a2} < B_{a1}$, 所以 $M_e > M_{\infty}$, 当转子由图 4b 转到图 4c 位置时, 因为 $B_{a1} = B_{a2}$, 所以 $M_e = M_{\infty}$, 当转子由图 4c 转到图 4d 位置时, 因为 $B_{a1} > B_{a2}$, 所以 $M_e < M_{\infty}$, 由于 B_d 较小, 电磁转矩变化不大, M_e 的平均值接近于 M_{∞} 。

对于其他导通方式的永磁无刷直流电动机可用上述方法进行类似分析, 其结果是一致的。

5 样机及实验

以上述理论为依据设计制作了 1 台样机, 在电磁设计时把空载工作点的磁通近似看作负载工作点的磁通, 配以电子控制及信号处理电路, 并对样机进行了空载和负载实验。

样机为额定功率 $P_n = 750W$, 额定电压 $U_n = 110V$, 额定转速 $n_n = 1500r/min$, 一相导通三相星形三状态。

磁钢采用 YLNF-2002 型 Nd-Fe-B 材料。

用实验结果作出空载特性曲线、负载特性曲线和机械特性曲线, 如图 5、6、7 所示。其中曲线 1 为实测曲线, 曲线 2 为设计曲线^[2]。

6 结论

样机的设计曲线和实测曲线基本吻合, 说明上述分析不但理论上正确, 而且实际中也是可行的。

电枢反应对电机的影响可归纳为: 电枢反应对转子磁场先去磁而后增磁, 使电机的每极总磁通在空载时每极总磁通 Φ 附近变化, 电枢反应使反电势和电磁转矩发生变化, 但对反电势及电磁转矩平均

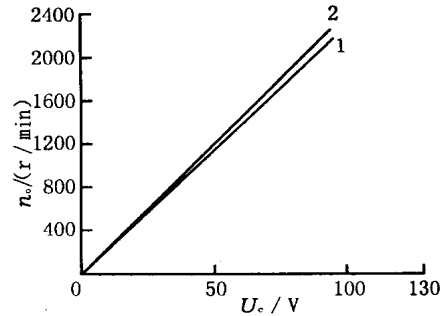


图 5 空载特性曲线

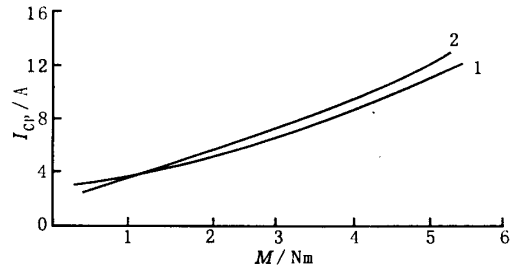


图 6 负载特性曲线

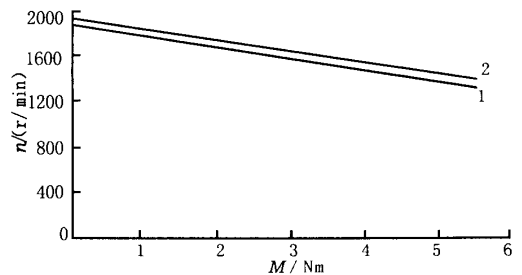


图 7 机械特性曲线

值影响不大, 故为电磁设计时把空载工作点的磁通近似看作负载工作点的磁通的结论提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 叶金虎 无刷直流电动机[M] 科学出版社, 1982
- [2] 胡文静 稀土永磁无刷直流电动机磁钢尺寸的设计[J] 微电机, 2001, 34(6): 21~24

作者简介: 胡文静(1968—), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为永磁电机, 电工新技术。

· 广 告 ·

温州市龙湾冠佳电机恒力弹簧厂

本厂专业生产各种规格特种不锈钢带、恒力弹簧。

电 话: 0577-86371108

传 真: 0577-86371126

手 机: 13806875284

联系人: 姜扬帆