

无刷直流电机转子位置的电流注入估算新方法

牛海清, 谢运祥, 刘文泽, 张 平

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 介绍了凸极无刷直流电动机转子位置检测的电流注入法, 该方法是在定子绕组中注入微弱的高频交流信号, 通过对端电压的处理, 计算出转子的位置。文中利用该方法对正常运转的电动机转子位置进行了仿真, 验证了其有效性。

关键词: 无刷直流电动机; 转子位置估计; 电流注入法

中图分类号: TM 381 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001- 6848(2003)05- 0003- 03

Rotor Flux Position Estimation of Sensorless Brushless DC Motor Used by a New Current Injection Method

N U Hai- qing, X IE Yun- xiang, L U Wen- ze, ZHANG Ping

(Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper describes a current injection method to detect the rotor flux position of the salient- pole brushless motor. The method is used to calculate the rotor position by injecting a small high frequency AC current into the stator windings and processing the stator winding voltages. Then the simulation is made by using this method to estimate the rotor position of the running motor, and results show it is valid.

Key words: brushless DC motor; estimation of the rotor position; current injection method

1 引 言

无刷直流电动机以其优良的调速性能、高转矩惯量比和高效率等优异性能, 广泛应用于社会生活的各个领域: 军事工业、航空航天、医疗、信息、家电以及工业自动化等。无刷直流电动机采用转子的位置信号, 作为逆变器功率管的换相信号, 实现电机的无刷运行, 同时也为闭环控制提供转速信息。

传统的方法是通过位置传感器来获得所需的转子位置信号, 如磁敏式的霍尔位置传感器、光电编码器、旋转变压器等。但传感器的引入不仅增加了电机制造的工艺要求和成本, 且由于传感器本身对环境条件敏感, 使得整个系统的可靠性得不到保证, 因而无位置传感器技术应运而生。现有的方法可归纳为: 反电动势方法^[1~4], 通过检测未导通相感应电动势的过零点得到换相信号, 该方法只能得到几个换相时刻信号, 适用于方波电机; 3次谐波方法^[5,6], 利用反电动势的3次谐波分量, 经过处理, 得到转子的位

置信号; 逆变器开关状态监视法^[7], 通过逆变器中的电流通路来检测转子位置; 观察器方法^[8,9], 利用现代控制理论, 估计出转子的位置, 该方法需要复杂的估计技术。

以上方法各有其特点, 但在电机静止或极低速时, 均有其局限性。文中介绍一种新的凸极无刷直流电机转子位置的检测方法——电流注入法: 在定子绕组中注入微弱的高频交流信号^[10,11], 通过一系列运算, 估算出转子的位置。该方法不仅在正常运转时可用, 而且在低速和静止时也有效。文中介绍了其工作原理, 对正常运转下转子位置进行了仿真, 验证了方法的可靠性和可行性。

2 原 理

图1是永磁凸极直流电动机模型的坐标关系, 给出了3个不同坐标系统: 静止三相的 a - b - c 系统、静止两相的 A - B 系统、与转子同步旋转的 d - q 坐标系统。其中 a 轴与 A 轴重合, 另外, 设在 $t=0$ 时刻, d 轴与 a 轴重合, 则转子的位置角 θ 如图1所示。

在正常运转时, 设定子绕组通以两种电流:

(1) 工作电流 I_0 (此时转子以角速度 ω 旋转):

收稿日期: 2003- 09- 03

基金项目: 广州市科技计划项目(2002J1- C0041)和教育部重点项目(03131)

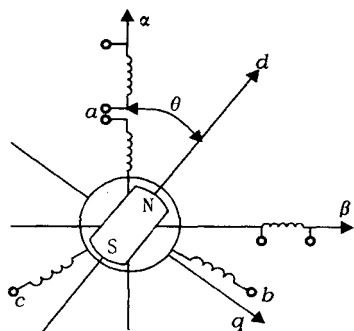


图 1 转子位置与坐标系的关系

$$\begin{cases} i_{a0} = i_m \sin X_t \\ i_{b0} = i_m \sin (X_t - 2P\phi_3) \\ i_{c0} = i_m \sin (X_t + 2P\phi_3) \end{cases} \quad (1)$$

(2) 以 X_h 旋转的测试电流 I_h , 其幅值是工作电流幅值的 k 倍(其中 $X_h = h^3 X_h$ 为正整数):

$$\begin{cases} i_{ah} = k^3 i_m \sin X_h t \\ i_{bh} = k^3 i_m \sin (X_h t - 2P\phi_3) \\ i_{ch} = k^3 i_m \sin (X_h t + 2P\phi_3) \end{cases} \quad (2)$$

则总的定子电流 $I = I_0 + I_{h0}$

将定子电流 I 转换到以角速度 X 旋转的 $d-q$ 坐标系下, 得到 i_d, i_q :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos X_t & \cos(X_t - 2P\phi_3) & \cos(X_t + 2P\phi_3) \\ -\sin X_t & -\sin(X_t - 2P\phi_3) & -\sin(X_t + 2P\phi_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用凸极无刷直流电机的电压方程, 可以求得在 $d-q$ 坐标系下的端电压:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -X_L q \\ X_L d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ X\phi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, R 为定子电阻; p 为微分算子; ϕ_f 为永磁钢磁链; L_d, L_q : $d-q$ 坐标下的电感。经过坐标交换之后, 得到静止两相坐标下的定子电压:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos X_t & -\sin X_t \\ \sin X_t & \cos X_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

U_A, U_B 中包含有直流分量、工频分量和测试频率分量, 经过一个带通滤波器, 获取频率 X_h 的信号:

$$\begin{bmatrix} U_{Ah} \\ U_{Bh} \end{bmatrix} = R i_h \begin{bmatrix} \sin X_h t \\ -\cos X_h t \end{bmatrix} + \frac{1}{2} X_h i_h (L_d + L_q) \begin{bmatrix} \cos X_h t \\ \sin X_h t \end{bmatrix} + \frac{1}{2} X_h i_h (L_d - L_q) \begin{bmatrix} \cos(2H X_h t) \\ \sin(2H X_h t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

将定子电压从静止 $A-B$ 两相坐标转换到以 X_h 旋转的 $s-t$ 坐标:

$$\begin{bmatrix} U_s \\ U_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos X_h t & -\sin X_h t \\ \sin X_h t & \cos X_h t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{Ah} \\ U_{Bh} \end{bmatrix} = R i_h \begin{bmatrix} \sin 2X_h t \\ -\cos 2X_h t \end{bmatrix} + \frac{1}{2} X_h i_h (L_d + L_q) \begin{bmatrix} \cos 2X_h t \\ \sin 2X_h t \end{bmatrix} + \frac{1}{2} X_h i_h (L_d - L_q) \begin{bmatrix} \cos 2H X_h t \\ \sin 2H X_h t \end{bmatrix} \quad (7)$$

在上式等号的右边包含有频率为 $2X_h$ 的分量和直流分量, 其直流分量可以用下式表示:

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{td} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} X_h i_h (L_d - L_q) \begin{bmatrix} \cos 2H X_h t \\ \sin 2H X_h t \end{bmatrix} \quad (8)$$

当检测到直流分量 U_{sd}, U_{td} , 转子的位置角可以通过计算得到:

$$H = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U_{td}}{U_{sd}}\right) + \frac{nP}{2} \quad (9)$$

3 仿真分析

利用 Matlab 6.1 对该方法进行仿真, 其中设定子电阻 R 为 0.3, 转子角速度 X 为 314, 永磁钢磁链 ϕ_f 与角速度 X 的乘积为 30, d 轴电感为 0.2, q 轴电感为 0.5。

在正常运转时, 设定子绕组通以频率为 X 三相正弦工作电流和频率为 X_h 的测试电流(此时转子以角速度 X 旋转)。得到转子位置与时间的关系曲线如图 2 所示。仿真结果表明, 起始 0.1 个周期后, 转子位置与时间保持线性关系。且转子位置与时间的比值(转速)为一定值, 该值与给定的转速相等, 说明该方法是可靠的。

起始 0.1 个周期后仿真结果与理论值的误差如图 3 所示。从图中看出, 转子角度误差不超过 $\pm 2^\circ$; 且其误差具有周期性。

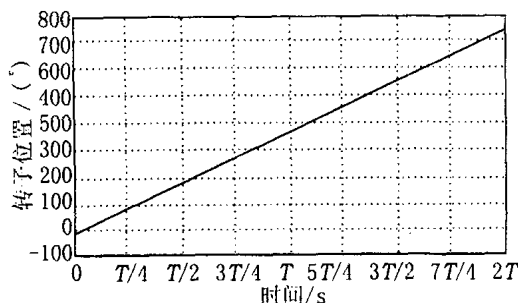


图 2 转子位置与时间关系曲线

此外, 为了更清楚地了解位置估算误差情况, 在保持测试电流的频率不变时, 电机工作在不同转速时的最大转子位置误差曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 电机的工作频率越高, 估计出的转子位置误差也越大, 这与测试电流频率不变有关。仿真研究表

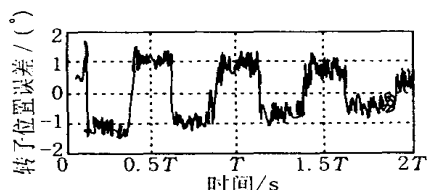


图3 转子位置误差与时间的关系

明,在工作频率为 1 Hz 时,电流注入法估计的转子位置误差为 0.26° ;说明了该方法对低速旋转的电机,也具有有效性。

在仿真时,改变电动机的参数,如定子电阻、 d 轴电感、 q 轴电感等,不影响转子位置的估算结果,即该方法有其通用性。仿真研究也发现,当注入电流的频率过低时,将会产生较大的误差。

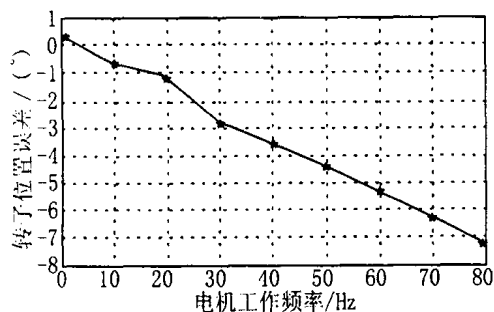


图4 转子位置误差与转速的关系

4 结 论

电流注入法对凸极电机或有一定电感变化的电机适用,旋转时,即使在低速情况下,该方法都可以获得准确的转子位置角。

参考文献:

- [1] Lizuka K, Uzuhashi H, Kano M. Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1985, 21(4): 595- 601.
- [2] Inventor D. Erdman. Electronically Commutated Motor[P]. United States Patent, October 2, 1979(4): 169, 990.
- [3] Gui- Jia Su, John W. Mc Keever. Low Cost Sensorless Control of Brushless DC Motor With Improved Speed Range[J]. Proceedings of 2002 Applied Power Electronics and Exposition, 2002, 1: 286- 292.
- [4] 陈 瑜, 黄 玉, 王兴华. 无刷直流电机转子位置检测新方法[J]. 微电机, 2002, 35(128): 26- 29.
- [5] J. C. Moreira. Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating Over a Wide Speed Range[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1996, 32(6): 1391- 1401.
- [6] 陈 剑, 陆云波, 鱼振民. 无刷直流电机驱动控制的 3 次谐波检测法, 微电机, 2002, 35(5): 23- 25.
- [7] Ogasawara, S., Akagi, H.. An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors[J]. Conference Record of the 1990 Industry Applications Society Annual Meeting, 1990, 1: 443- 447.
- [8] T. Furuhashi, S. Sangwongwanich, S. Okuma. A Position- and- velocity Sensorless Control for Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Mode Observer[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1992(39): 88- 95.
- [9] Zhiqian Chen, Mutuwo Tomita, Shinji Doki, Shigeru Okuma. New Adaptive Sliding Observers for Position and Velocity- sensorless Controls of Brushless DC Motors[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2000, 47(3): 582 - 591.
- [10] Nobuyuki Kasa, Hiroshi Watanabe. A Sensorless Position Control System by Salient- pole Brushless DC Motor. Industrial Electronics[J]. Control and Instrumentation, 1997. IECON 97. 23rd International Conference on, 1997, 2: 931- 936.
- [11] Nobuyuki Kasa, Hiroshi Watanabe. A Mechanical Sensorless Control System for Salient- Pole Brushless DC Motor with Autocalibration of Estimated Position Angles[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2000, 47(2): 389- 395.

作者简介: 牛海清(1969-), 女, 陕西渭南人, 讲师, 硕士, 主要从事电力电子技术和电压传感技术的研究。

喜 讯

西安微电机研究所为我国“神舟”五号载人宇宙飞船推进仓研制生产的两种型号无刷直流稳速电动机及其驱动器组件, 主要用于飞船的环境温度控制。在本次飞行试验中运行良好, 圆满完成任务。西安微电机研究所全体参研职工将再接再厉, 为我国“神舟”号系列载人飞船的成功发射再立新功。

张 侠 供稿