

正弦波无刷直流电机的新型转子位置检测方法

邹继斌, 徐永向, 于成龙

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

A NOVEL DETECTING METHOD OF THE ROTOR POSITION OF PMSM

ZOU Ji-bin, XU Yong-xiang, YU Cheng-long

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: This paper presents a novel method using one latched Hall IC to detect the rotor position of PMSM in wide speed range to overcome the limitation of other recent detecting methods. The conversion and compensation of the rotor position signal are analyzed in detail. The steady precision and the harmonics of three-phase reference voltages in dynamic state are analyzed. Speed-stabilization control of a 30,000 r/min PMSM is achieved with this method. The theoretical analysis and experimental results show that this method has the wide detecting range and the high precision. So the method is especially suitable for speed-stabilization control.

KEY WORDS: PMSM; detection of the rotor position; speed range; speed-stabilization

摘要: 针对现有的正弦波无刷直流电机转子位置检测方法, 该文提出了一种以单个锁定型霍尔元件实现的宽转速范围正弦波无刷直流电机转子位置检测方法, 并详细分析了转子位置信号转换与补偿的方法, 同时对该位置检测方法的静态误差和动态过程中给定电压谐波进行了分析。该方法用于 3×10^4 r/min 的高速同步电机驱动, 实现了高速电机的准正弦波驱动的稳速控制。理论分析和实验结果表明, 该方法具有很宽的检测范围和高检测精度, 很适合稳速控制。

关键词: 正弦波无刷直流电机; 转子位置检测; 转速范围; 稳速

中图分类号: TM351 文献标识码: A

1 引言

正弦波驱动无刷直流电机具有效率高、转矩波动小、噪声低、运行可靠、控制特性良好等优点, 近年来发展很快。传统的正弦波无刷直流电机需要专门转子位置传感器如旋转变压器、光电编码器来

产生正弦波参考信号。这些传感器价格昂贵, 而且安装调试复杂。无位置传感是一种比较好的策略, 常用的正弦波无刷直流电机转子位置估计方法有: 卡尔曼滤波法、假想坐标法、磁链法、电感法。但这些转子位置估计方法算法复杂、计算量大, 需要高速运算处理器, 成本也较大。

本文提出了一种新型的宽转速范围的正弦波无刷直流电机转子位置检测方法, 在超前定子某相绕组轴线 90° 电角度位置加一个锁定型霍尔。经过适当处理, 从中可以同时提取转子位置信号和速度信号, 并产生正弦波参考电压信号。将该方法用于稳速系统中, 在稳速时, 检测的转子位置信号误差很小。

对于高速无刷直流电机要求转子有足够的机械强度和刚度, 转轴尽可能设计得短一些, 以提高其刚度。如果在高速电机的转轴上安装位置传感器, 无论从电机结构上考虑还是传感器的装配与调试都有较大的难度。而且高速正弦波无刷直流电机的绕组电感小, 逆变器输出基波频率与载波频率较接近的, 因此, 一般无位置传感方法不太适合。

本文将该检测方法用于额定转速为 3×10^4 r/min、额定功率为 3.3kW 的高速正弦波无刷直流电机系统中, 省去了单独的测速电路, 实现了高速正弦波无刷直流电机的稳速控制。该稳速系统能可靠启动, 并具有较高的静态和动态稳速精度。

2 位置检测原理

在正弦波无刷直流电机中, 在定子适当位置安放一个霍尔元件, 转子匀速旋转时, 霍尔元件就会输出一个上升沿和下降沿与转子磁场强度 B_0 的过

零点相对应的方波信号,将方波信号分频处理,便得到数字式的转子位置信号 q ,用这个数字量去查表,经D/A转换和放大后即得正弦波参考电压,如图1所示。霍尔元件的输出应与某相绕组的空载反电势同相位,所以霍尔元件应放在超前某相绕组轴线 90° 电角度位置处。某些电机超前某相绕组轴线 90° 电角度位置并不在某个齿上,而是在槽上。而为了安装的方便,将霍尔元件安装在离超前某相绕组轴线 90° 电角度位置最近的齿旁中间。对于安装位置与理想位置的偏差可由电路进行校正补偿。霍尔元件位于绕组端部,距离铁芯和绕组有一定的距离,克服了电枢反应磁场和绕组漏磁场对位置信号的影响。

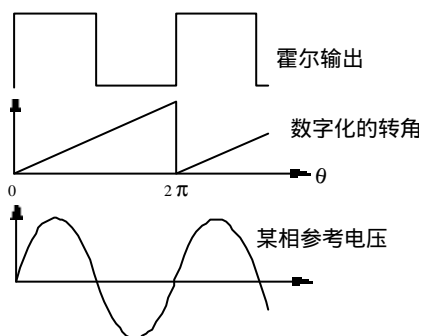


图1 霍尔输出与对应的转子位置关系

Fig.1 Schematic diagram of the generation of the reference voltage

3 位置信号的转换和补偿

由于开关霍尔输出信号只能反应转子位置的过零点,如何把电角度从0到 2π 用数字信号来表示就成为关键。本文采用锁相技术,转换和补偿原理框图如图2所示。

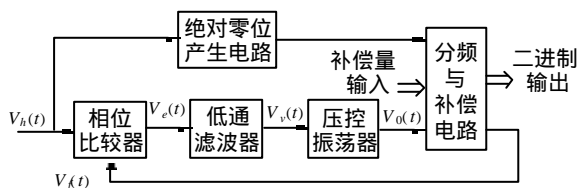


图2 位置信号转换和补偿原理框图

Fig.2 Block diagram of conversion and compensation

相位比较器有两个输入信号 $V_h(t)$ 和 $V_f(t)$ 。 $V_h(t)$ 为霍尔输出信号, $V_f(t)$ 为 $V_o(t)$ 的 2^N 分频输出(设二进制输出位 N 位)。 $V_e(t)$ 正比于 $V_h(t)$ 和 $V_f(t)$ 的相位差。 $V_e(t)$ 经低通滤波器后得到一个平均电压 $V_v(t)$,这电压控制压控振荡器的频率变化,使 $V_h(t)$ 和 $V_f(t)$ 的频率之差不断减少,直到相差为

零。此时, $V_h(t)$ 和 $V_f(t)$ 的频率相位都相同,处于锁定状态, $V_o(t)$ 正好是 $V_h(t)$ 的 2^N 倍频。通过补偿后的转子位置信号与 $V_f(t)$ 的相位总是存在一定的差值 q_0 ,稳态时,与 $V_h(t)$ 的相位存在差值 q_0 。因此,霍尔的输出与实际转子位置的相差可得到补偿,同时,超前角也可设定。于是每一个二进制数 $(Q_{N-1} \wedge Q_0)_2$ 对应一个位置角度。设 $x = (Q_{N-1} \wedge Q_0)_2$,则对应的角度 q_x 为

$$q_x = \frac{x}{2^N} 2\pi \quad (1)$$

绝对零位使得 $V_h(t)$ 和 $V_f(t)$ 的零位总是相同,即下降沿相同,所以,鉴相器检测到的相差与频差成比例,这样提高了跟踪速度和跟踪准确度。采用这种转换与补偿方法可以取得很好的补偿效果,如图3所示。由于安装误差可以通过电路来补偿,所以,霍尔元件可以在较大范围内安放,而不影响精度。

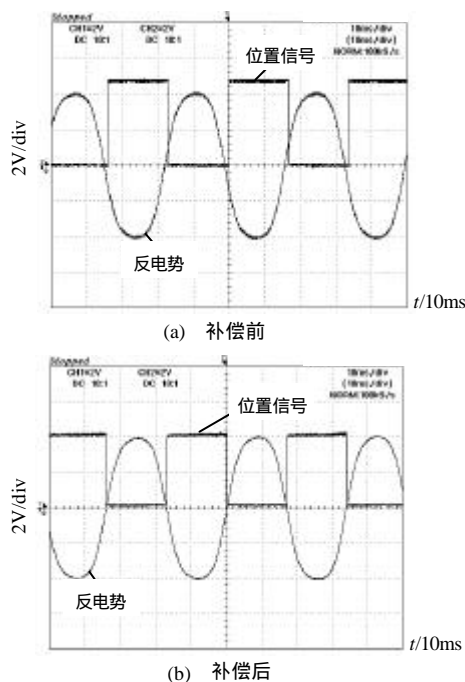


图3 补偿前后的位置信号和A相空载电势

Fig.3 The signal of the rotor position and the EMF of phase A before compensation and after compensation

用数字式的转子位置信号 q_x 去查表,经D/A转换后即得三相电压参考信号,霍尔的输出信号与A相给电压参考信号如图4所示。两信号的相差是安装误差的补偿值与超前角之和。

由于 $V_o(t)$ 正好是 $V_h(t)$ 的 2^N 倍频,在压控振荡器线性范围内, $V_v(t)$ 与 $V_h(t)$ 的频率成线性关系,

所以可以作为速度反馈信号。

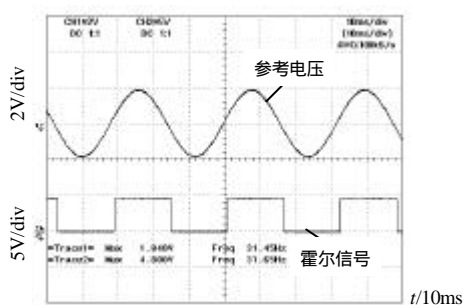


图4 霍尔的输出信号与A相给定电压参考信号

Fig.4 The output of the Hall IC and the reference voltage of phase A

4 精度及动态过程分析

(1) 精度

这种转子位置检测方法的检测精度是分频系数决定，当分频系数为 2^N 时，检测精度为：

$$q_{\min} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{2^N} \quad (2)$$

当 $2^N = 256$ 时，稳速运行位置检测精度达 0.703° 。

(2) 给定电压谐波分析

由于查表时使用的方波信号的周期是前一个周期。稳速运行时，相邻周期相同，所以，给定参考电压无谐波，如图4所示。而加速时，当前周期小于上一个周期，所以查表所得的正弦参考电压信号没达到一个完整周期时，绝对零位已使查表从头开始，所以正弦波被削掉一部分。反之，在减速过程中，当前周期大于前一个周期，查表得到完整周期正弦波信号后多出一部分。这将产生给定谐波电压，且给定基波电压也会发生变化。在一般情况下，加速度不太大，波形畸变不明显。人为加大加速度，使得相邻两个周期相差很大，如图5，在减速情况下的A、B两相给定参考电压。上面波形为A相，下面波形为B相。

锁相环中的相位比较器只根据两个信号的上升沿来确定相位差。因此，在位置信号和反馈方波信号的上升沿之前，计数器的时钟是前一个周期的；在位置信号或反馈方波信号的上升沿之后，锁相环根据相差来使时钟频率增加（加速时）或减少（减速时），这是一个动态过程，在这过程中时钟频率是变化的；在位置信号和反馈方波信号的上升沿之后，时钟频率是固定的，是最新的周期。所以，在加速时，在方波信号的上升沿前一小段时间内，

波形有些下凹；在减速时，在方波信号的上升沿后一小段时间内，波形有些外凸。理论上，这会产生一些谐波，但这在一般情况下很小，可以忽略。如图5，在较大的加速度下，波形外凸也并不明显。

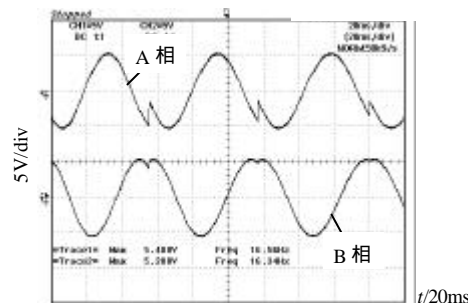


图5 减速情况下的A相与B相给定参考电压

Fig.5 The reference voltages of phase A and phase B when speed is decreased

文献[4]对动态过程中的三相参考电压基于转角的函数进行了傅立叶分析，各次谐波的幅值和相位是补偿角 q_0 与 $\Delta T/T$ 的二元函数。在加速度不是特别大的情况下，特别是稳速系统中，相邻两个周期差 ΔT 较小。在本文采用这种位置检测方法的高速无刷直流电机稳速系统中，动态稳速精度达 1.2%，其实从稳态到最大偏差需多个周期，所以前后两个周期之差很小， $\Delta T/T$ 远小于 1.2%。图6给出了 $\Delta T/T = 0.01$ 、 $q_0 = 0.221$ 时的三相参考电压的频谱图。在这么大的加速度下，谐波含量很小。

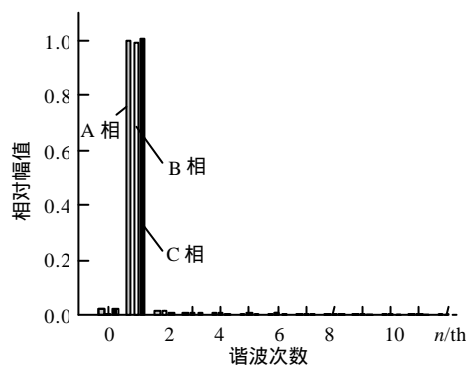


图6 $\Delta T/T=0.01$ 、 $q_0 = 0.221$ 时的三相参考电压的频谱图

Fig.6 Frequency spectrum of three phases' reference voltages with $\Delta T/T=0.01$ and $q_0 = 0.221$

在稳速时，各相参考电压无谐波。稳速过程中，参考电压信号虽然会有一些的畸变，但畸变率很小。因此，此检测方法非常适合正弦波无刷直流电机稳速控制系统中。

（下转第 55 页 Continued on page 55）

- Guidance of Control, Greece, 1991.
- [12] Compas J.M., Decarreau P., Lanquetin G. *et al.* Industrial applications of predictive functional control to rolling mill, fast robot, river dam[C]. 3rd IEEE Conference on Control Application. Glasgow, 1994.
- [13] 潘红华, 苏宏业, 胡剑波, 等 (Pan Honghua, Su Hongye, Hu Jianbo *et al.*). 预测函数控制及其在导弹控制系统中的应用 (Predictive functional control and its application in missile control system)[J]. 火力与指挥控制 (Fire Control & Command Control), 2000, 25(2): 56-60.
- [14] 金晓明, 王树青, 荣冈 (Jin Xiaoming, Wang Shuqing, Rong Gan). 预测函数控制 (PFC)——一种新型预测控制策略 (Predictive functional control (PFC)—one new control strategy)[J]. 化工自动化及仪表 (Control and Instruments in Chemical Industry), 1999, 26(2): 74-80.
- [15] 王东风, 张栎英, 李遵基 (Wang Dongfeng, Zhang Luanying, Li Zunji). 大迟延快时变汽温系统的多模型预估控制 (Predictive control with multiple modules in steam temperature system with long time-delay and slow time-varying)[A]. 中国自动化学会 2000 年哈尔滨学术年会论文集 (Proceedings of CAA Conference in Haerbin in 2000)[C], 2000, 17-21.
- [16] 韩璞, 朱希彦 (Han Pu, Zhu Xiyan). 自动控制系统数字仿真 (Digital simulation of automatic control system)[M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1996, 242.
- 收稿日期: 2002-02-21。
- 作者简介:
- 王国玉 (1977-), 博士研究生, 研究方向为预测控制、智能控制理论及应用;
- 韩璞 (1959-), 教授, 博士生导师, 研究方向为智能控制理论及应用、计算机辅助工程、分散控制系统研究和计算机视觉;
- 王东风 (1971-), 博士, 讲师, 研究方向为模糊控制、预测控制、鲁棒控制及热工过程软测量技术;
- 周黎辉 (1971-), 博士研究生, 讲师, 研究方向为计算机辅助工程、计算机视觉。
- (责任编辑 王彦骏)

(上接第 49 页 Continued from page 49)

5 结论

通过以上理论分析和实验结果, 可得出如下结论:

(1) 本文提出的一单个霍尔进行位置检测并实现正弦波驱动的方法是可行的。

(2) 该方法具有很宽的检测范围, 适合于多种转速要求的正弦波无刷直流电机系统, 对于高速正弦波无刷直流电机系统是一个很好的解决方案。

(3) 该方法在稳速时, 给定参考电压无谐波。在动态过程中, 给定参考电压谐波很小, 很适合于稳速系统。

参考文献

- [1] Tskahashi I, Koganezawa T, *et al.* A Super high-speed PM motor drive system by a quasi-current source inverter[J]. IEEE Trans. Ind. App., 1994, 30 (3): 683-690.

- [2] Haylock J A, Mecrow B C, Jack A G, *et al.* Enhanced current control of high-speed PM machine drives through the use of flux Controllers [J]. IEEE Trans. Ind. App., 2000: 1030-1038.
- [3] 王旭东, 王炎, 等 (Wang Xudong, Wang Yan, *et al.*). 开关磁阻电机新型位置传感器 (A novel position sensor of switched reluctance motor) [J]. 哈尔滨工业大学学报 (Journal of Harbin Institute of Technology). 1999, 31 (4): 58-61.
- [4] 徐永向 (Xu Yongxiang). 以霍尔元件为传感器的高速正弦波无刷直流电机稳速系统 (Speed control of a high-speed permanent magnet synchronous motor with latched hall sensors) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 (Harbin: Harbin Institute of Technology). 2001.

收稿日期: 2002-2-30。

作者简介:

邹继斌 (1958-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 研究领域为一体化电机;

徐永向 (1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为电机控制及电力电子;

于成龙 (1975-), 男, 硕士研究生, 研究方向为一体化电机。

(责任编辑 王彦骏)