

永磁同步电机转子位置的无传感器检测

王群京 谭 徽 李国丽
(合肥工业大学 合肥 230009)

A Detector of a Sensorless PM SM Rotor Position

Wang Qunjing Tan Hui Li Guoli
(Hefei Univ. of Technology, Hefei 230009)

【摘 要】 永磁同步电机的矢量控制系统由永磁同步电机、功率变换器、控制器以及位置和转速估计等环节组成,而位置和转速估计在很大程度上影响着整个系统的运行特性和控制精度。本文研究了无位置传感器的情况下对永磁同步电动机的转子磁极位置的检测方法,着重研究了静止和低速状态下的无位置传感器的转子磁极位置检测方法。

【关键词】 永磁同步电机 转子位置 无传感器检测

【Abstract】 The vector control system of PM SM consists of a PM SM、power converter, controller as well as position and speed prediction components The detection to rotor position and speed will to the great extent effect the performance and resolution of the system. This paper investigates the detection to a sensorless PM SM rotor position, the standstill and low - speed situations are especially emphasized

【Keywords】 PM SM rotor position sensorless detection

1 无传感器的永磁同步电机转子位置检测方法简介

近年来人们在无位置传感器的电机控制方面做了大量的工作,其中大部分方法都是采用分析端电压和(或)线电流的波形,间接地实现转子的位置检测。1982年,Hoang Le- Huy 等人提出利用转子旋转时定子绕组中感应的反电势进行转子位置检测,是目前最广为人知的无位置传感器的转子位置检测方法。端电压检测原理较简单,即利用光电耦合器件等电平检测装置检测线电压的过零点,如图1a、b所示,并将检测到的信号(图1c)经整形变换成代表电机端电压电位的信号(图1d),再经微机

处理后变成满足一定控制要求的逆变器触发信号。

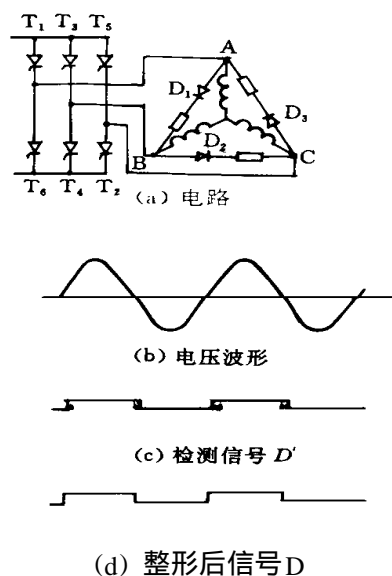


图1 端电压检测方法

但实际工作时,由于整流器输出的6倍频300Hz谐波以及电机反电势中的齿谐波,逆变器1/6周期出现的换流尖峰及凹陷等,都将使电机端电压严重畸变,过零点不明确。因此,还需对所检测的电压进行滤波并送入“三相互锁”电路进行处理。

其次,可以采用线电流和端电压的测量实现转子磁极位置检测。采用相系统分析的积分法检测永磁同步电机转子位置的框图如图2示。

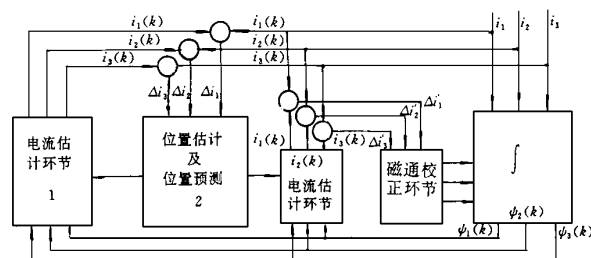


图2 积分法检测永磁同步电机转子位置框图

本文 1996 年 7 月 15 日收到

以上这两种方法,端电压位置检测方法简单易行,能够满足位置检测的快速性要求,适宜于高速运行状态下的转子位置检测,缺点是受到转速下限的限制;后一种方法虽然能够适用于低速时的位置检测,但是计算复杂,结果受参数的影响很大,而PM SM 本身就又是一个非线性环节,所以这种位置检测方法的实用较困难。

由此可知,如能找到一种对电机参数依赖性小,又能适用于低速运行的转子磁极位置检测方法,将其与端电压检测法相结合,便可以使无位置传感器矢量控制系统的运行范围大大提高。

2 静止状态下的 PM SM 的转子位置检测

静止状态下,PM SM 的电枢电压方程可以写成:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} + i_d R \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + i_q R \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_d ——直轴磁通链;

ψ_q ——交轴磁通链;

R ——定子相绕组电阻。

而

$$\begin{cases} \psi_d(t) = L_{d0}(i_{d0} + i_{fict,m}) + L_{d,diff} \cdot \Delta i_d(t) \\ \psi_q(t) = L_{q0}i_{q0} + L_{q,diff} \cdot \Delta i_q(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{d0}, i_{q0} ——直、交轴稳态直流分量;

$\Delta i_d(t), \Delta i_q(t)$ ——直、交轴的交流分量;

$i_{fict,m}$ ——永磁体虚拟激磁电流;

L_{d0}, L_{q0} ——永磁体稳态工作点所对应的直、交轴电感;

$L_{d,diff}, L_{q,diff}$ ——直、交轴交流分量所对应的微分电感。

由式(1)、(2)可得到:

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta i_d)}{dt} = \frac{1}{L_{d,diff}} u_d + \frac{R}{L_{d,diff}} i_d \\ \frac{d(\Delta i_q)}{dt} = \frac{1}{L_{q,diff}} u_q + \frac{R}{L_{q,diff}} i_q \end{cases} \quad (3)$$

由于 R 很小,若将其忽略,上式可写成:

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta i_d)}{dt} = \frac{1}{L_{d,diff}} u_d \\ \frac{d(\Delta i_q)}{dt} = \frac{1}{L_{q,diff}} u_q \end{cases} \quad (4)$$

以 $d-q$ 坐标平面为复平面, d 轴为实轴, q 轴为虚轴,则有:

$$u = u_d + j u_q; \Delta i = \Delta i_d + j \Delta i_q \quad (5)$$

永磁同步电机转子位置的无传感器检测

现定义如下形式的复参量 Y_c :

$$Y_c = Y_{re} + j Y_{im} \quad (6)$$

$$\text{使其满足: } \frac{d(\Delta i)}{dt} = Y_c u \quad (7)$$

由 $d-q$ 坐标空间相量图(图3)可知:

$$\begin{cases} u_d = |u| \cos \epsilon \\ u_q = |u| \sin \epsilon \end{cases} \quad (8)$$

式中: ϵ ——电压空间相量 u 与直轴 d 之间的夹角。

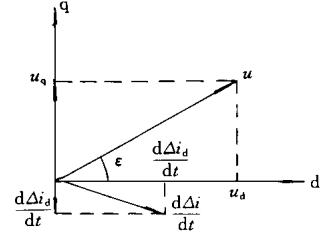


图3 $d-q$ 坐标中的空间相量图

由式(4)、(7)可得:

$$\begin{cases} Y_c = Y_{re} + j Y_{im} \\ Y_{re} = \frac{L_{d,diff}^{-1} + L_{q,diff}^{-1}}{2} - \frac{L_{q,diff}^{-1} - L_{d,diff}^{-1}}{2} \cdot \cos(2\epsilon) \\ Y_{im} = \frac{L_{d,diff}^{-1} - L_{q,diff}^{-1}}{2} \cdot \sin(2\epsilon) \end{cases} \quad (9)$$

在 $\alpha-\beta$ 坐标系中,可以通过检测得到任意时刻的电压空间相量和电流空间相量(如图4),从而可由式(7)计算出复参量 Y_c ,由式(9),从 Y_c 可计算出 ϵ ,此时 d 轴的空间位置 θ 为:

$$\theta = \gamma - \epsilon \quad (10)$$

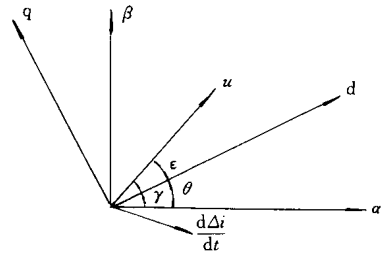


图4 $d-q$ 及 $\alpha-\beta$ 坐标中的空间相量图

但是,为了避免求解复参量 Y_c ,可以在两个不同的空间相量方向上进行测量,从而使位置测量与参数无关。可以在以 A 相相轴为 α 轴,电压空间矢量分别为 $(2/3)\pi$ 和 $(3/4)\pi$ 的情况下进行 a, b 两次检测,由式(7)和式(10),并由式(9)可以得到:

$$\begin{cases} F_1 = \operatorname{Re}(Y_c|_a) - \operatorname{Re}(Y_c|_b) \\ = -\sqrt{3} \cdot \frac{L_{q,diff} - L_{d,diff}}{2} \sin(2\theta) \\ F_2 = \operatorname{Im}(Y_c|_a) - \operatorname{Im}(Y_c|_b) \\ = -\sqrt{3} \cdot \frac{L_{q,diff} - L_{d,diff}}{2} \cos(2\theta) \end{cases} \quad (11)$$

从而有 $2\theta = \arctg \frac{E_1}{F_2} (+ \pi)$ (12)

采用上述原理的静止状态位置检测实验电路如图 5 所示, 其数据采集流程图如图 6 示。单片机与 PC 之间通讯程序框图见图 7。

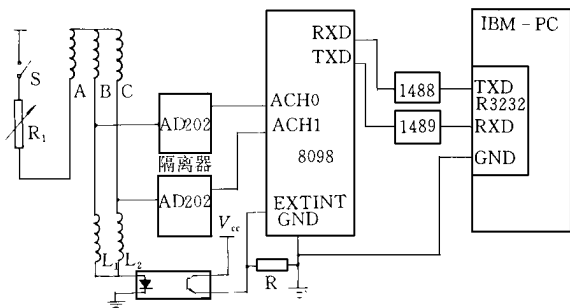


图 5 静止状态实验电路

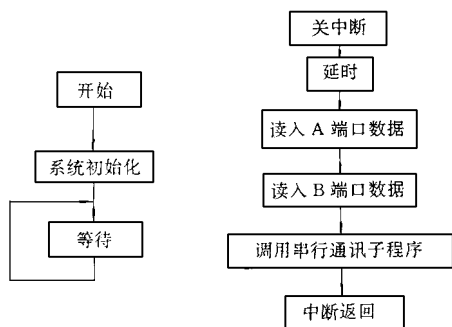


图 6 数据采集流程图

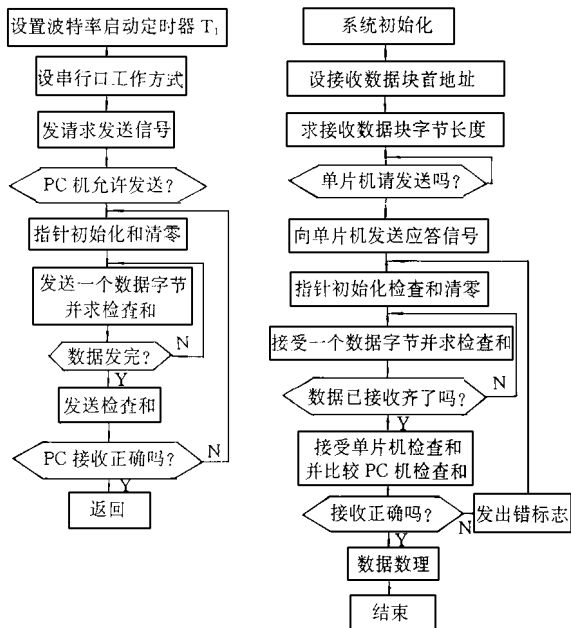


图 7 单片机与 PC 机之间通讯程序框图

按照上述实验方法所测得的转子位置与实际转子位置之间的关系如图 8。

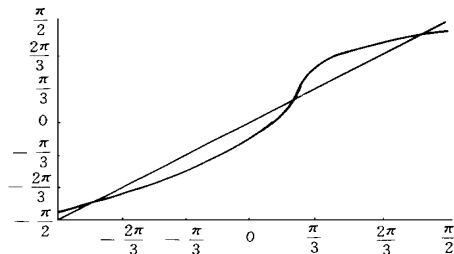


图 8 检测位置与实际位置比较

3 永磁同步电机低转速时的转子位置检测

PM SM 旋转时的电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = i_d R + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \\ u_q = i_q R + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega \psi_d \end{cases} \quad (13)$$

很明显, d, q 轴电路中出现了运动电势 $\omega \psi_q$ 和 $\omega \psi_d$, 为了消除运动电势的影响, 可以将相邻的两个采样周期所得的结果相减。由于采样周期很短, 认为电机的转速相等, 由此可得:

$$\begin{cases} \Delta u_d = (i_{d, I} - i_{d, II})R + \left\{ \frac{d\psi_{d, I}}{dt} - \frac{d\psi_{d, II}}{dt} \right\} \\ \quad - \omega (\psi_{q, I} - \psi_{q, II}) \\ \Delta u_q = (i_{q, I} - i_{q, II})R + \left\{ \frac{d\psi_{q, I}}{dt} - \frac{d\psi_{q, II}}{dt} \right\} \\ \quad - \omega (\psi_{d, I} - \psi_{d, II}) \end{cases} \quad (14)$$

再进一步, 由于电机为感性元件, 短时间内有:

$$\begin{cases} i_{d, I} = i_{d, II} & i_{q, I} = i_{q, II} \\ \psi_{d, I} = \psi_{d, II} & \psi_{q, I} = \psi_{q, II} \end{cases} \quad (15)$$

式(14)便为:

$$\begin{cases} \Delta u_d = \frac{d\psi_{d, I}}{dt} - \frac{d\psi_{d, II}}{dt} = L_{d, diff} \left(\frac{di_{d, I}}{dt} - \frac{di_{d, II}}{dt} \right) \\ \quad = L_{d, diff} \cdot \Delta i_d \\ \Delta u_q = \frac{d\psi_{q, I}}{dt} - \frac{d\psi_{q, II}}{dt} = L_{q, diff} \left(\frac{di_{q, I}}{dt} - \frac{di_{q, II}}{dt} \right) \\ \quad = L_{q, diff} \cdot \Delta i_q \end{cases} \quad (16)$$

与静止态时相似, 可以将式(16)改写成:

$$\Delta i = Y_c \cdot \Delta u \quad (17)$$

其中: $\Delta i = \Delta i_d + j \Delta i_q$, $\Delta u = \Delta u_d + j \Delta u_q$, $Y_c = Y_{re} + j Y_{im}$

因此, 在低速下分析方法与静止态是完全相仿。

4 结束语

本文在比较无传感器位置检测(下转第 31 页)

4 实验结果与结论

逆变器主开关元件采用VMOS管,控制部分采用硬件电路,以减少滞流时间。逆变器每桥臂上下两开关为避免直通,在轮换开关过程中,需有一同时关断时间 T_q ,如果 T_q 取 $2\mu s$,结果表明:

(1) 电压利用率约为85%左右(如下表),基本达到了额定磁通所需的电压与频率关系。

| | | | | | |
|----------|----|----|----|----|----|
| 输出频率(Hz) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 输出电压(V) | 15 | 28 | 41 | 55 | 68 |

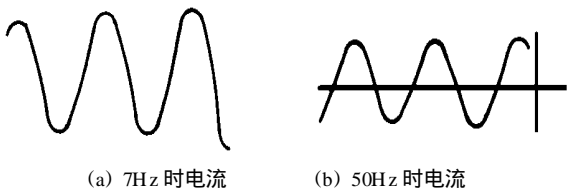


图 6

(2) 低频时,电流含谐波稍大;高频时,开关频

率较高,谐波较小(如图 6)。

(3) 带载或空载时,转动均无振荡感,噪音小。

(4) 带载从静止到 50Hz 或从 50Hz 到 5Hz 用 16s 时间无异常现象。

总之,采用准圆形磁链轨迹的电压矢量控制方法,具有很强的实用性。

参 考 文 献

- 1 Murai Y, Hosono I and Tsunehiro Y. On system stability of PWM Inverter - fed Induction Motor. IEEJ Tran, 1985, 105 (5).
- 2 Dedpnbrock M. Direct Self - Control(DSC) of Invert - Fed Induction Machine. IEEE Trans Power Electronics, 1988, 3(4).
- 3 采用 PWM 逆变器的感应电动机直接控制法 国外电气自动化, 1989, (1).

第一作者简介: 南余荣,男,1966 年生,讲师

Nan Yu rong, male, born in 1966, lecturer

(上接第 12 页)

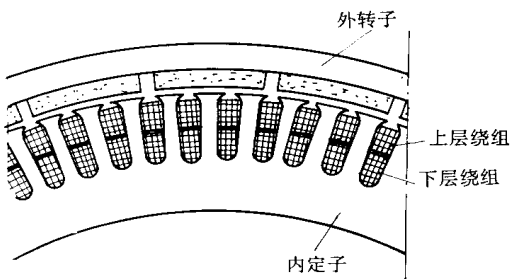


图 11 中国科学院电工研究所四轮电动车驱动用电机定子结构示意图

7.3 车辆驱动用无刷直流电动机发展展望

国外发展电动车的国家有日本、美国、德国、法国、英国、意大利等国家;国内发展电动车的省市地区有北京、上海、香港、台湾、广东、湖北、四川、河南等地区。

我们相信,随着我们对无刷直流电动机的设计原理研究的不断深入,电子功率元器件的功率等级

不断提高,控制与驱动集成电路的功能不断完善,蓄电池的性能不断提高而价格不断下降,充电方式的不断简便,永磁材料的性能不断提高而价格不断下降,人们对生态环境的保护意识不断加强,对节能不断重视,车辆驱动用电动机向无刷化、直流化、易控化方向发展的趋势不断明朗化,无刷直流电动机必将在车辆驱动用电动机中占主导地位,从而不断推动电动车的发展和运用。

参 考 文 献

- 1 富士半导体“—タブ”I²L²SIPMOS^R富士P—MOSFET 编 日本富士电机公司 1994 年版
- 2 MITSUBISHI SEMICONDUCTORS POWER MOSFET 日本三菱电机公司 1996 年版

周 涌,男,1969 年生,工程师

Zhou Yong, male, born in 1969, engineer

(上接第 18 页) 方法基础上,着重分析了检测静止状态时的转子磁极位置的方法,并进行了实验验证。对低转速情况下的转子位置检测公式进行了推导,并得出改善的办法: 根据实验所得的误差曲线建立纠偏函数; 在计算过程中采用滤波算法。

参 考 文 献

- 1 颜新祥,严仰光 带有转子位置检测器类电动机的几种测速方法的研究 微特电机, 1994, (6).

用于绕线机的一种简易型逆变器的研制

- 2 Schroedl M. Control of a permanent magnet synchronous machine using a new position estimator ICEM, Boston 1990, proc vol III, pp. 1218- 1224
- 3 Schroedl M et al A new rotor position detector for permanent magnet synchronous machines using the NFORM - method to appear in ETE- Archir (W. Germany), VDE- Verlag Berlin-afterbach, 1990
- 4 贺益康等 无位置检测器永磁无换向器电机的起动与运行控制 杭州: 浙江大学学报, 1993, 27(6).