

永磁同步电机转子磁场初始位置检测研究

王征宇, 陈建明, 谭 森

(湖南南车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 介绍了采用电流变化率法检测永磁同步电机转子磁场初始位置的原理和实现方法, 并给出了转子锁定情况的试验结果。针对此方法的不易操作性, 在其基础上给出了两种自动寻优方法以及试验结果, 试验结果表明电流变化率法是可行的。

关键词: 电流变化率; 转子磁场初始位置; 自动寻优。

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)01-0053-03

Research on Initial Position Detection of Rotor Magnetic Field for Permanent Magnet Synchronous Motor

WANG Zheng-yu, CHEN Jian-ming, TAN Miao

(Hunan CSR Times Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: It describes the principle and realization method to detect initial position of rotor magnetic field for permanent magnet synchronous motor with current change rate, and the experimental results in the locked rotor case are given. Because this method is not easy to implement, two automatic optimization methods are given as well as the experimental results, which indicates that current change rate method is feasible.

Key words: rate of current change; rotor magnetic field initial position; automatic optimization

0 引言

永磁同步电机由于其效率高、功率密度大、转矩响应快等优点越来越广泛应用于电动汽车驱动。永磁同步电机控制方式多种多样, 但都离不开转子磁场位置^[1]的获取, 目前用得较多的控制方式为转子磁场定向矢量控制。电动汽车因其工况复杂多变, 无速度传感器/位置传感器控制几乎不可能, 现在主要用旋转变压器结合RD解码芯片进行转子磁场位置检测^[2], 为保证控制的准确性, 需要确定转子初始位置。因电动汽车电机一般为多极对数, 在机械上难以精确标定电机定转子与旋变定转子的相对位置。而汽车行业是一个规模产

业, 需要有一种永磁同步电机转子初始位置标定的方法, 从而确定电机转子磁场位置。目前有多种永磁同步电机转子初始位置估计方法, 包括基于定子铁心非线性饱和特性^[3]的电流变化率法、高频电压注入法^[4]等。本文将重点介绍采用电流变化率法^[5]对转子磁场位置进行估计。

1 检测原理

基于 d 、 q 轴解耦的永磁同步电机的数学模型如式(1)和式(2):

$$U_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p_n \omega_r L_q i_q \quad (1)$$

$$U_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - p_n \omega_r (L_d i_d + \psi_f) \quad (2)$$

式中: U_d 、 U_q —— d 、 q 轴电压; R_s ——定子电阻; L_d 、 L_q ——

收稿日期: 2012-06-20

作者简介: 王征宇(1980-), 男, 工程师, 主要从事电动汽车电机驱动系统开发工作。

等效的 d 、 q 轴电感； p_n ——电机的极对数； ω_r ——电机转速； i_d 、 i_q ——电机的 d 、 q 轴电流； ψ_f ——转子永磁磁链。

如果假定电机处于静止状态，给定任意角度 θ （假定为相对 d 轴方向）， $U_{sd}=U$ ， $U_{sq}=0$ ，则可以根据图1和上述模型得出假定 d 、 q 轴（ S_d 、 S_q ）的电流变化率。

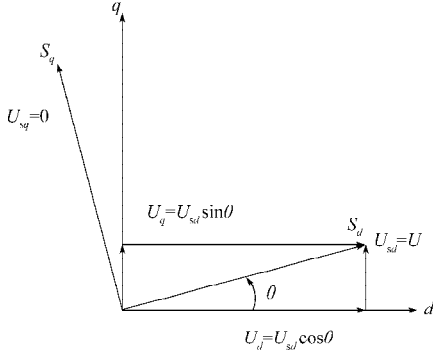


图1 d 、 q 轴电压给定
Fig.1 Voltage given of d and q shaft

由图中可得， d 、 q 轴的电压为：

$$U_d = U_{sd} \cos \theta \quad (3)$$

$$U_q = U_{sd} \sin \theta \quad (4)$$

由式(1)、(2)、(3)、(4)可以得到 d 、 q 电流的变化率为：

$$\frac{di_d}{dt} = (U_{sd} \cos \theta - R_s i_d) / L_d \quad (5)$$

$$\frac{di_q}{dt} = (U_{sd} \sin \theta - R_s i_q) / L_q \quad (6)$$

忽略电阻的影响，则：

$$\frac{di_d}{dt} = U_{sd} \cos \theta / L_d \quad (7)$$

$$\frac{di_q}{dt} = U_{sd} \sin \theta / L_q \quad (8)$$

进而可以得到假定 d 、 q 轴（ S_d 、 S_q ）的电流变化率：

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{di_d}{dt} \cos \theta + \frac{di_q}{dt} \sin \theta = \frac{U \cos^2 \theta}{L_d} + \frac{U \sin^2 \theta}{L_q} \quad (9)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{di_q}{dt} \cos \theta - \frac{di_d}{dt} \sin \theta = \frac{U \cos \theta \sin \theta}{L_q} - \frac{U \sin \theta \cos \theta}{L_d} \quad (10)$$

由仿真得到 S_d 、 S_q 轴电流的变化情况，如图2所示，可以看出， S_d 轴电流逐渐增大到稳态值，而 S_q 轴电流的稳态值则为零。

由仿真得到不同 θ 下假定 d 、 q 轴电流的变化率情况（ $\theta=0$ 为真实 d 轴），如图3所示。

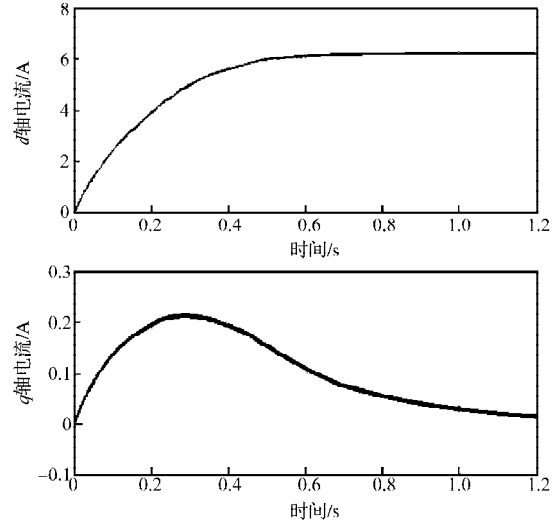


图2 d 、 q 轴电流在给定电压下的变化规律
Fig.2 Variation of d and q shaft current as the voltage is given

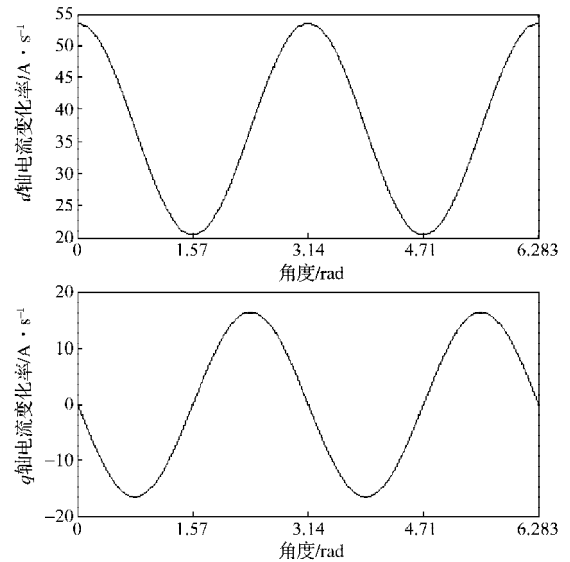


图3 假定的 d 、 q 轴电流变化规律
Fig.3 Current variation of assumed d and q shaft

图中可以看出， d 、 q 轴电流的变化率与 θ 有直接关系，如果 θ 越接近真实的 d 轴，则假定 d 轴的电流变化率越大。

由于所采用的永磁同步电机模型为理想状态，没有考虑电机内部的磁链饱和^[4]，所以 d 轴正负两个方向的电感与电流变化率是一样的。但是实际情况并非如此，因为 d 轴的正方向在正向电流的作用下更容易饱和，所以电流的上升率比 d 轴的负方向小，这一特性可以用来确定 d 轴的正方向，即极N、S极。

利用永磁同步电机 d 、 q 轴电感不同的特性在不同的转子角度给定相同的电压脉冲，通过观测对应 di/dt 的不同可以反映出此处电感的大小，从而确定 d 、 q 轴的位置。

2 实现方法

由上面分析可知，要确定转子位置，需要在整个圆

周上施加特定方向上的电压向量,同时检测相应的 d 轴电流变化率,最大的变化率对应的点即为 d 轴磁场方向,在应用中以电压向量作用时间结束的电流值来替代电流变化率值。为保证磁场位置检测的准确性,需要做到以下两点:

(1) 直流母线电压恒定,以保证测试条件相同;

(2) 电机的转子锁死,因为电机处于静止状态时,干扰会比较小,得到的实验结果与转子、定子的结构直接相关,不会出现很大的实验误差。

锁定电机转子,读取当前转子位置 θ_0 (相对于旋变零位),如图4所示。以A相轴线开始加幅值为 U 、角度为 θ 的电压向量,并且作用一段时间,采样电流 i_a 、 i_b 、 i_c ,并做以给定电压向量方向为 d 轴的 dq 变换,得到 i_{sd} 、 i_{sq} 。按照电流变化率法原理,间接得到 di_{sd}/dt ,即 θ 方向(S_d 轴)的电流增长量, di_{sq}/dt 为 S_q 轴方向的电流增长量,控制流程图如图4所示。在程序中,设置电压向量的角度增加步长为 $\Delta\theta$ 。当 di_{sd}/dt 最大时,按原理分析,即为当前转子磁场位置。其中 θ 为当前转子位置相对于转子磁场零位的角度,如图5所示。

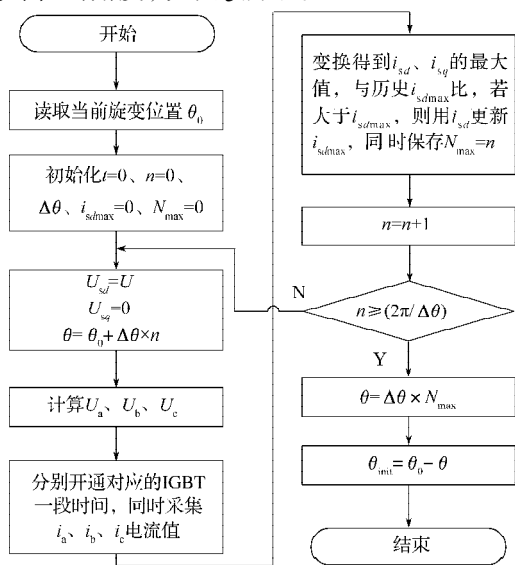


图4 算法流程图

Fig.4 Flow chart of algorithm

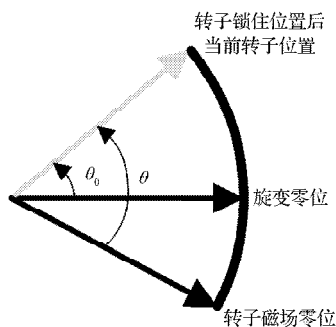
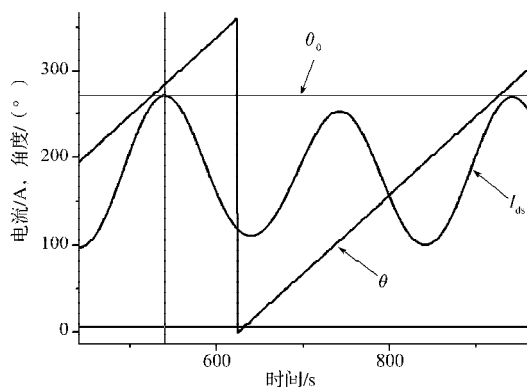


图5 位置相对关系图

Fig.5 Relation diagram of relative position

3 实验

在测试时,参数的选取至关重要。既要能很好地区分角度,同时又要避免电流过大而导致的电机过热或逆变器过流。以某永磁同步电机驱动系统为例进行本实验验证,电机参数 $L_d=0.261$ mH、 $L_q=0.5548$ mH。逆变器额定容量为60 kVA、峰值容量为120 kVA、过流保护值为400 A,逆变器开关频率为4 kHz,逆变器供电直流母线额定电压为336 V。电机转子位置角锁定在 70.875° ,逆变器供电直流母线电压为229 V。在给定 θ 角方向上施加固定幅值的电压, θ 从 70.787° 到 $(360+70.787)^\circ$ 逐渐增加,得到 $i_{sd\max}$ 、 $i_{sq\max}$ 曲线,如图6所示。从曲线中找出对应 $i_{sd\max}$ 最大值,并且对应 $i_{sq\max}$ 过零点,就是永磁体N极;而 $i_{sd\max}$ 的次最大值,并且对应 $i_{sq\max}$ 过零点,就是永磁体S极。利用Matlab对不同电压下 $i_{sd\max}$ 、 $i_{sq\max}$ 曲线进行傅里叶变化计算,得出的转子位置分别为 73.309° 和 71.988° 。



i_{ds} — S_d 轴电流; θ_0 —转子初始位置; θ —转子位置

图6 $i_{sd\max}$ 、 $i_{sq\max}$ 变化曲线

Fig.6 Variation curves of $i_{sd\max}$ and $i_{sq\max}$

试验结果表明这种方法确实能检测出转子初始位置,但缺点是必须锁死转子位置。由于在车上电机位置无法锁死,所以该方法实用性差。在这种方法的基础上进行改进后得到两种不需要锁死电机位置的 di/dt 法,分别是自动寻 di_{sd}/dt 最大值估算转子位置法和自动寻 di_{sq}/dt 为零估算转子位置法。这两种方法都通过了试验验证,均能准确检测出转子初始位置,试验结果如图7、图8所示。

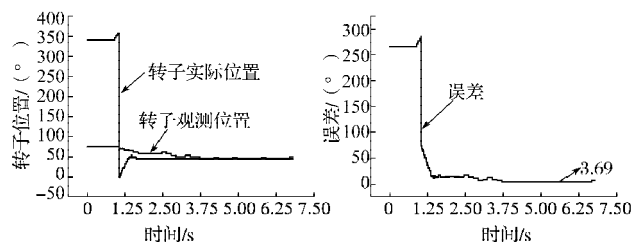


图7 自动寻 di_{sd}/dt 最大值法观测转子位置

Fig.7 Automatic search method as di_{sd}/dt is maximum for observing rotor position

(下转第60页)

