

新型永磁同步电动机离线电感测量方法

何亚屏, 文字良, 许峻峰, 张朝阳, 刘 雄

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 提出了一种永磁同步电动机电感离线测量新方法, 通过对电机电压、电流和转子位置进行同步实时采样, 并将所采集的电压和电流信息进行傅立叶变换, 提取其基波信息; 利用永磁同步电机电压稳态数学模型推导出电机电感计算公式, 并利用 Matlab 软件离线计算电感, 将电感计算值代入转矩方程计算。通过转矩计算值与实际测量值的比较, 验证了本方案的有效性。

关键词: 同步采样; 离散傅立叶变换; 永磁同步电动机

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)03-0054-05

A New Off-line Measurement Method of Inductance for PMSM

HE Ya-ping, WEN Yu-liang, XU Jun-feng, ZHANG Chao-yang, LIU Xiong

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It proposes a new off-line measurement method of inductance for permanent magnet synchronous motor(PMSM). Voltage, current and rotor position of PMSM are synchronously sampled. Fundamental wave information can be got from DFT (discrete fourier transform) using sampled voltage and current information. Inductance calculation equation can be induced by the voltage steady-state equation. The inductance can be calculated off-line based on Matlab and the torque can be calculated from the measured inductance. This method is verified effective by the comparison between the actual torque and the calculated one.

Key words: synchronous sample; DFT; PMSM

0 引言

近年来, 随着社会对节能减排要求的日益提高, 永磁同步电动机(PMSM)因高效率和高功率因数的特点被广泛应用于各个领域, 对PMSM控制性能的要求也越来越高。无论采用矢量控制、弱磁控制还是无传感器控制等方法, 其前提都需要得到精确的电机参数; 而实际应用时, 受永磁材料特性的影响, 电机参数会因环境温度、磁场及湿度等因素的变化而变化。大量的研究发现, 在电机诸多参数中, 电感参数对PMSM控制性能的影响尤为明显。PMSM矢量控制中, 电压前馈解耦环节、电磁转矩计算环节、电流角度分配环节等与电感密切

相关; 在高速弱磁工况时, 直轴电感值大小直接影响弱磁性能, 因此电机电感参数测量方法的研究对提高PMSM控制系统性能有着非常重要的现实意义。

目前针对PMSM参数测量有在线和离线两种方式, 使用的计算策略包括: 直接基波算法、模型参考自适应及卡尔曼算法^[1-5]等。在线参数计算的实时性强, 但占用系统大量的硬件资源, 造成系统成本增加。本文以离散型傅立叶变换(DFT)理论为前提, 采用DSP严格进行电机信号同步采样, 利用Matlab软件离线准确地提取电机电流和电压的基波信息, 借助PMSM数学模型实现对PMSM电感的测量, 将测量结果作为控制用参数, 把电感计算值代入转矩公式计算, 通过与电机实际转矩的比较来验证本方案的有效性。

1 实时在线同步采样

DFT算法要求采样信号与测量信号成整数倍频严

收稿日期: 2012-02-20

作者简介: 何亚屏(1985-), 男, 硕士, 主要从事永磁同步电机牵引传动系统的研究开发工作。

格同步,使每一个采样数据段都能反映测量信号的完整信息,周期延续拓展后能够完整再现被测信号,否则测量信息始端和终端的相位将不连续,导致频谱泄露,造成DFT算法误差。因此,必须保持采样的电流、电压信号和位置信息在时域内的严格同步。

1.1 同步采样规则

为实现同步采样,定时器中采样周期不固定,根据角度偏移量对定时器中的采样周期值进行实时补偿,以保证采样同步性,从而保证采集信号的真实性,这对于后续电流及电压的基波信号的准确提取具有重要意义。

图1示出同步采样的周期分布。将一个周期假定成一个圆,圆上的采样点数固定为N,则每次采样的角度 $\theta=2\pi/N$;根据电机旋转的角速度可以求出定时器的定时周期 $T_s=\theta/\omega_e$ (ω_e 为电机电角速度),即可完成同步采样。一般而言,N以程序能够完成的最小时间为基准,经实验,各速度段的N取值如表1所示。

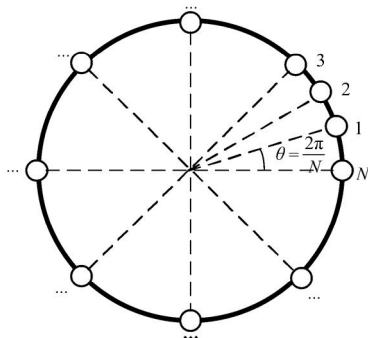


图1 同步采样周期分布
Fig.1 Distribution of a synchronous sampling period

表1 速度对应采样点选取表
Tab.1 Speeds and related sample points

速度 / r · min ⁻¹	[200,600]	[600,1 400]	[1 400,2 100]	[2 100,4 200]
N	360	180	120	90

由于硬件本身的定时误差以及速度信号振荡造成的定时周期不准确,给信号采集带来较大的误差。为了减少由此给参数测量带来的误差,保证采样的严格同步性,本文引入角度补偿方法,通过旋转变压器采样角度与目标角度的比较来补偿采样定时器的定时周期。假设旋转变压器采样角度为 θ_R ,采样点为 n ($0 < n \leq N$),则对应的目标采样角度为 $\theta_A=2\pi n/N$,计算误差角度为 $\Delta\theta_A=2\pi n/N-\theta_R$ 。将误差角度乘以系数K,补偿到实际的角度当中,得到下一个时刻将要走过的角度:

$$\theta_R(K+1)=\theta_R(K)+K\times\Delta\theta$$

（1）

角度的补偿反映到定时器周期的变化为:

$$T_s(K+1)=\frac{\theta_R(K+1)}{\omega_e}$$

（2）

采用角度补偿方法并利用式(2)来修正定时器周期,可减少因定时的不准确给参数测量带来的误差,保证采样的严格同步性,提高电机参数计算的准确性。

1.2 电机转子位置采样

软件同步采样及后续的电感计算都需要准确的位置信息,因此电机位置的准确检测相当重要。为使同步采样所用的转子位置信息与实际电机位置信息保持一致,需对控制器的旋转变压器采样过程进行处理。图2示出传动控制主从单元同时使用一组PMSM旋转变压器解码芯片的结构图。接线时必须保持主从控制器的共地,励磁信号由主控制器发送,但是主从控制器可以同时接受旋转变压器发送的正余弦信息进行解码,保持主从机箱采样的一致性。

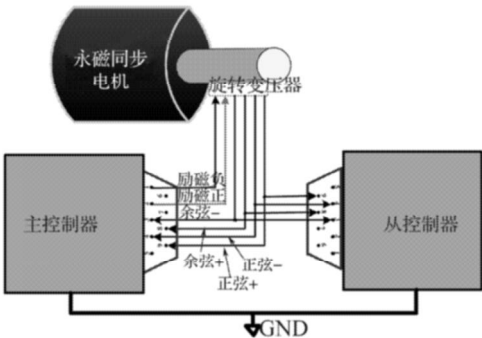


图2 两个控制器共旋转变压器结构图
Fig.2 Two controllers with the same sensor

由于在旋转变压器的解码过程中,锁相环过零时会带来180°的角度误差,在实验中利用旋转坐标下电流的正负校准角度根据矢量变换原理进行处理:

$$\left. \begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \\ i_q &= i_\beta \cos \theta + i_\alpha \sin \theta \end{aligned} \right\}$$

（3）

式中: i_d ——定子电流d轴分量幅值; i_q ——定子电流q轴分量幅值; i_α ——定子电流 α 轴分量幅值; i_β ——定子电流 β 轴分量幅值。

如果旋转变压器解码芯片得到的角度 θ' 与实际角度 θ 相差 π ,那么实际计算出的d轴和q轴电流变为:

$$\left. \begin{aligned} I'_d &= I_\alpha \cos(\theta + \pi) + I_\beta \sin(\theta + \pi) = -I_d \\ I'_q &= I_\beta \cos(\theta + \pi) + I_\alpha \sin(\theta + \pi) = -I_q \end{aligned} \right\}$$

（4）

由此可以纠正角度信号。采集的 I'_q 若为负值,则将采集到的角度信号减去 π ,得到实际的位置信息。

1.3 实时在线同步采样的实现

在线同步采样硬件电路模块如图3所示,电压传感器对电机的线电压进行采样,电流传感器进行相电流采样,旋转变压器进行位置速度采集,使用传动控制单元对数据处理。软件程序流程如图4所示,采集速度信

息以判断一个电周期内的采样点数,并计算每个采样点数电机走过的角度,通过计算角度与实际采样角度的比较补偿进行定时器 T_0 的周期计算,从而保证电流、电压信号与位置信号的同步。

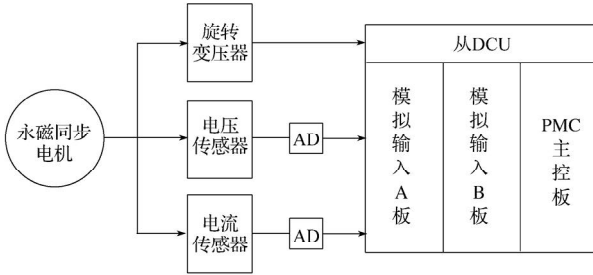


图3 在线采样的硬件结构图

Fig.3 Hardware diagram of on-line sampling

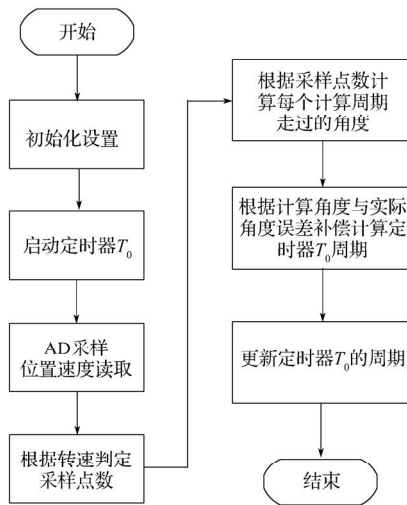


图4 同步采样的软件流程

Fig.4 Software process of synchronous sampling

2 离线计算

利用实时在线同步采样获取的测量数据,通过Matlab软件编程实现DFT的处理,基于PMSM数学模型完成电感参数的计算。

2.1 DFT基本原理

DFT是一个数学过程,用于确定离散信号序列所包含的谐波和频率成分,其在频域内的离散序列 $X(m)$ 定义为:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \times [\cos(2\pi \times n \times m / N) - j \sin(2\pi \times n \times m / N)] \quad (5)$$

式中: m ——谐波次数, $m=1$ 表示为离散信号的基波值; N ——采样序列每个周期内的采样点总数; n ——输入序列的每次采样样本; $x(n)$ ——每个采样点 n 对应的采样信息。

将式(5)化简,分别求出 $X(m)$ 的实部 Y_r 和虚部 Y_s :

$$\left. \begin{aligned} Y_r &= \frac{2}{N} \times \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \times \cos(2\pi \times n / N) \\ Y_s &= \frac{2}{N} \times \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \times \sin(2\pi \times n / N) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中 $2/N$ 为幅值还原标量因子。将基波的实部和虚部分别求解,得出基波信号的幅值 A 和相位 ϑ 信息,从而分解出正弦基波信息:

$$\left. \begin{aligned} A &= \sqrt{Y_r^2 + Y_s^2} \\ \vartheta &= \arctan(Y_s / Y_r) \\ X(1) &= A \times \cos \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

2.2 电感计算

PMSM在同步旋转坐标系下电压方程可表示为:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= R_s \times i_d + L_d \times p \times i_d - \omega_e \times L_q \times i_q \\ u_q &= R_s \times i_q + L_q \times p \times i_q + \omega_e \times L_d \times i_d + \omega_e \times \psi_f \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: u_d ——定子电压d轴分量; u_q ——定子电压q轴分量; i_d ——定子电流d轴分量; i_q ——定子电流q轴分量; L_d ——直轴同步电感; L_q ——交轴同步电感; ω_e ——电机角速度,且 $\omega_e = n_p \omega_r$ (n_p 为电机极对数, ω_r 为电机机械角速度); p ——微分算子; ψ_f ——永磁磁链。

从数学模型可以看出,影响模型的主要参数为 L_d , L_q , R_s 及 ψ_f ;而电机定子绕组一旦确定,其 R_s 值基本不变,永磁体磁链随温度保持线性关系,因此影响电机电压和电流的主要未知因素即 L_d 和 L_q ,它们若不准确,就不能得到准确的电机电压信息,因此本文主要对 L_d 和 L_q 进行参数测量。

PMSM稳态方程和转矩方程如式(9)和式(10)所示:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= R_s \times i_d - \omega_e \times L_q \times i_q \\ u_q &= R_s \times i_q + \omega_e \times (L_d \times i_d + \psi_f) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$T_e = 1.5 n_p \times i_q \times [\psi_f + (L_d - L_q) \times i_d] \quad (10)$$

化简稳态方程得到电感计算方程:

$$\left. \begin{aligned} L_d &= \left(\frac{u_q - R_s \times i_q}{\omega_e} - \psi_f \right) \times \frac{1}{i_d} \\ L_q &= \frac{R_s \times i_d - u_d}{\omega_e \times i_q} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

要得到准确电感信息,则式(11)中 i_d , i_q , u_d 和 u_q 必须为基波分量。首先将采样的三相电流和线电压值进行DFT处理,提取其基波值:

$$\left. \begin{aligned} I_u &= \text{DFT}(I_u) \\ I_v &= \text{DFT}(I_v) \\ U_{uv} &= \text{DFT}(U_{uv}) \\ U_{vw} &= \text{DFT}(U_{vw}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

化简式(12)中线电压,求出基波相电压值:

$$\left. \begin{aligned} U_u &= (2U_{uv} + U_{vw})/3 \\ U_v &= (U_{vw} - U_{uv})/3 \end{aligned} \right\}$$

(13)

对基波相电压进行Clark-park变换得到其d-q轴电压:

$$\left. \begin{aligned} U_\alpha &= U_u \\ U_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}(U_u + 2U_v) \\ U_d &= U_\alpha \times \cos \theta + U_\beta \times \sin \theta \\ U_q &= -U_\alpha \times \sin \theta + U_\beta \times \cos \theta \end{aligned} \right\}$$

(14)

对基波相电流进行Clark-park变化,得到其d-q轴电流(式(15))

$$\left. \begin{aligned} I_\alpha &= I_u \\ I_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_u + 2I_v) \\ I_d &= I_\alpha \times \cos \theta + I_\beta \times \sin \theta \\ I_q &= -I_\alpha \times \sin \theta + I_\beta \times \cos \theta \end{aligned} \right\}$$

(15)

式中: θ ——旋转变压器实时同步的角度信息。

将得到的d、q轴电流和电压基波信息代入式(11),得到交/直轴同步电感值,并通过式(10)计算出实际转矩。

2.3 离线的实施过程

在离线实现过程中,将采集到的数据格式转换成Matlab数据格式,将采集信息进行DFT处理,经过坐标变换后,依据式(12)计算得到电感值,其实现流程如图5所示。

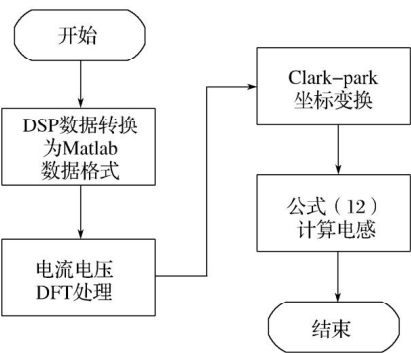


图5 离线计算的流程
Fig.5 Flowchart of off-line calculation

3 实验结果分析

以沈阳地铁用220 kW PMSM为例,利用同步采样电机稳态时的在线信息,经过离线计算得出PMSM电感值。

图6示出直轴电感 L_d 与定子电流 i_s 和转速 n 的关系。可以看出, L_d 随 n 的增加呈上升态势,同时随 i_s 的改变而改变,但相对而言, i_s 对 L_d 的影响更为明显。图7示出直轴电感与交/直轴电流的关系。可以看出, L_d 随着 i_d 绝对值的增加而减小(i_d 从-40 A变换到-100 A, L_d 减幅为15%左右),同时随着 i_q 正向增加(i_q 从80 A变换到180 A)亦逐渐减小(减幅为8%左右),相对而言, i_d 对 L_d 的影响更为明显。

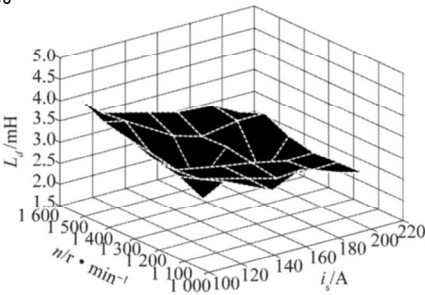


图6 L_d 与 i_s 和 n 的关系图
Fig.6 Relationship among L_d , i_s and n

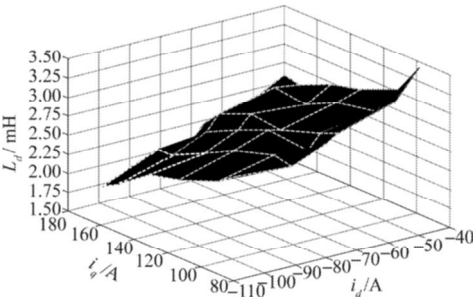


图7 L_d 与 i_d 和 i_q 的关系图
Fig.7 Relationship among L_d , i_d and i_q

图8示出交轴电感 L_q 与 i_s 和 n 的关系。可以看出, L_q 随 n 的增加而振荡变化,但变化的幅度不明显;同时随着 i_s 的改变, L_q 曲线振荡明显,幅度改变较大。图9示出 L_q 与 i_d 和 i_q 的关系。可以看出, L_q 随着交/直轴电流变化而变化,随着 i_d 绝对值的减小而减小(i_d 从-100 A变换到-40 A, L_q 值减小了8%),随着 i_q 的增加也减小(i_q 从80 A变换到180 A, L_q 减小了15%左右),因此相对而言, i_q 的变化对电感 L_q 的影响更为显著。

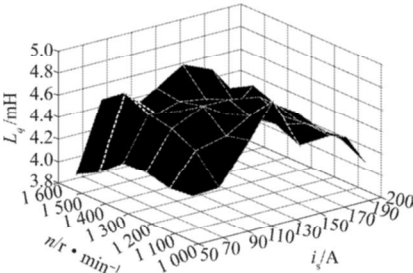


图8 L_q 与 i_s 和 n 的关系图
Fig.8 Relationship among L_q , i_s and n

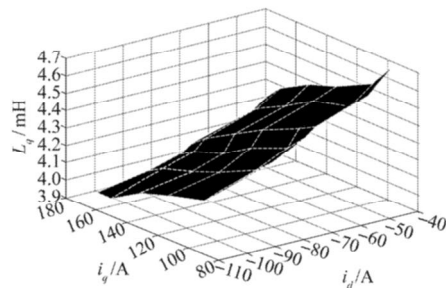


图9 L_q 与 i_d 和 i_q 的关系图
Fig.9 Relationship among L_q , i_d and i_q

取1250 r/min速度段电流和电压信息、实际转矩从100 N·m到900 N·m为验证条件,将 L_d 和 L_q 计算值代入式(10)得到 T_e 计算值,与实际 T_e 进行比较,其结果如图10所示。由误差曲线可知, T_e 计算值曲线与实际 T_e 曲线基本重合,误差为±2%左右,在允许的误差范围内,有效地验证了本文所提电感计算方案的准确性。

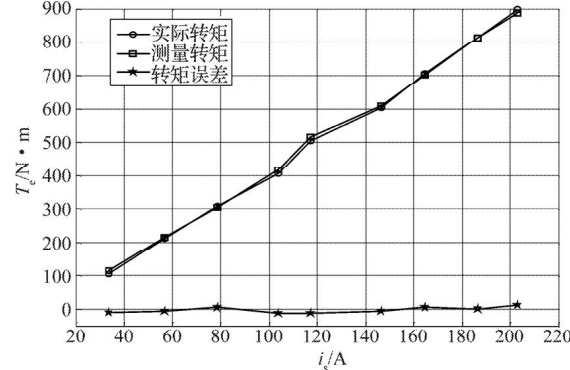


图10 T_e 与 i_s 的关系图
Fig.10 Relationship between T_e and i_s

.....

(上接第38页)

种用于变频调速的PMSM特性和参数的计算方法,按可逆原则,亦适用于定频和变频正弦波输出的永磁发电机。该方法准确度高,但计算量庞大,且依赖于电磁场计算软件的操控性。电机特性有限元分析仿真结果真实地反映了电机本体的输出能力,提供出转矩控制初始角,方便传动系统对电机的精确控制。至于电机的交、直轴同步电抗等重要电磁参数,可以通过电磁转矩计算数据的后处理得到。

参考文献:

[1] 唐任远. 现代永磁电机:理论与设计[M]. 北京:机械工业

4 结语

本文针对常用在线参数测量辨识精度不高的缺陷,提出了一种PMSM参数测量新方案。通过在线同步采样电机线电压、相电流和转子位置信息,结合DFT理论离线提取电流和电压的基波,利用PMSM数学模型直接计算电机的电感值,并将计算出的电感值参与反馈转矩的计算。本方案能较准确地计算出PMSM电感值,为提高PMSM控制性能奠定了设计基础,同时为PMSM设计平台的优化提供了参考。

参考文献:

[1] 安群涛,孙力,赵克. 一种永磁同步电动机参数的自适应在线辨识方法[J]. 电工技术学报,2008,23(6):31-36.
[2] 金海,黄进. 基于模型参考方法的感应电机磁链的自适应观测及参数辨识[J]. 电工技术学报,2006,21(1):65-69.
[3] 曲智勇,姚郁,韩俊伟. 基于改进型平方根UKF算法的永磁同步电机状态估计[J]. 电机与控制学报,2009,13(3):452-457.
[4] Liu L, Cartes D A. Synchronization based adaptive parameter identification for permanent magnet synchronous motors [J]. IET Control Theory Application, 2007, 1 (4) :1015-1022.
[5] Xu Yinglei Li Qunzhan Xu Junfeng Overview on permanent magnet synchronous motors traction system for urban rail rollingstock[J]. Motor Control and Its Applications 2009, 36(5) :7-10.

出版社,1997.
[2] 李钟明,刘卫国,刘景林,等. 稀土永磁电机[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
[3] Hsu J S, Ayers C W, Coomer C L, et al. Report on Toyota/Prius Motor Torque Capability, Torque Property, No-Load Back EMF and Mechanical Losses[R/OL]. Oak Ridge National Laboratory, 2004-09[2011-09]. <http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rpt/121119.pdf>.
[4] Ayers C W, Hsu J S, Marlin L D, et al. Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System Interim Report[R/OL]. Oak Ridge National Laboratory, 2007-07[2011-09]. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/921783-u5C2f6/921783.pdf>.