

基于磁共能的开关磁阻电机转矩在线快速估算^{*}

张旭隆¹, 李大鹏², 静国梁³

(1. 徐州工程学院 信电工程学院, 江苏 徐州 221018;

2. 国家电网 济宁供电公司, 山东 济宁 272100;

3. 山东理工职业学院 光电工程学院, 山东 济宁 272067)

摘 要: 为避免复杂的数学运算及降低处理器数据存储空间要求, 在电压斩波控制的基础上, 提出了一种基于磁共能的开关磁阻电机(SRM)转矩在线快速估算策略。详细阐述了磁链特性测量方法, 给出了磁共能与转矩的计算公式。仿真和试验结果表明, 瞬时转矩的在线快速估算值与实际测量值误差较小, 说明磁共能方法适于转矩的在线快速估算。

关键词: 开关磁阻电机; 磁共能; 转矩; 在线快速估算

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)04-0087-05

Online Rapid Estimation of SRM Torque Based on Magnetic Common-Energy^{*}

ZHANG Xulong¹, LI Dapeng², JING Guoliang³

(1. School of Information and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology,

Xuzhou 221018, China;

2. Jining Power Supply Company of State Grid, Jining 272100, China;

3. College of Optoelectronics Engineering, Shandong Polytechnic College, Jining 272067, China)

Abstract: In order to avoid the complex mathematical operation and reduce the requirement of processor data storage space, a strategy for online fast estimation of switched reluctance motor (SRM) torque with magnetic common-energy was proposed based on voltage chopper control. The measurement method of magnetic flux characteristics was described in detail, and the calculation formula of magnetic common energy and torque was given. The simulation and experimental results showed that the error of the instantaneous torque was small, proving that this method was suitable for the online estimation of torque.

Key words: switched reluctance motor (SRM); magnetic common-energy; torque; online rapid estimation

0 引 言

开关磁阻电机(SRM)的定子和转子均为双凸极结构, 定子绕组为集中式, 转子无绕组也无永磁体, 具有结构简单、免维护和可靠性高等特点, 因而在工业现场获得越来越多的应用, 如机车牵引、绞车提升、传送机和电动汽车驱动等应用场合^[1-2]。

为了实现 SRM 转矩的高性能控制, 转矩的精

确估算必不可少。对于瞬时转矩的估算策略, 国内外学者做了大量的研究^[3-5]。传统的瞬时转矩估算需进行查表操作, 对电机转矩进行离线计算, 生成 $T(\theta, i)$ 表格, 且处理器需要较大的数据存储容量; 利用人工神经网络(ANN)可实现转矩的精确估算, 然而由于 ANN 的迭代特性, 需进行神经网络数据训练, 而训练的精确程度很大程度上决定了转矩估算的精确程度。为了减少电机数据对

^{*} 基金项目: 住建部科技计划项目(2016-K1-015); 江苏省高校自然科学研究面上项目(18KJB470024); 徐州市应用基础研究计划项目(KC17077); 徐州工程学院校科研青年项目(XKY2018228)

作者简介: 张旭隆(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子与电力传动。

处理器内存的需求,同时避免复杂的数学运算过程,相电感傅里叶函数逼近、磁链-电流-角度函数关系曲线拟合等策略逐渐被学者所研究,通过函数公式将相电感或转矩进行函数表示,拟合函数的精确程度决定了电感或转矩的估算精度。

本文在电压斩波控制的基础上,提出了一种转矩在线快速估算策略。该方法不需要大量的电机数据,只需少量预先估算的磁共能数据,避免了复杂的数学运算,减少了处理器的数据计算时间。试验结果表明,瞬时转矩的估算值与实际测量值误差在允许范围内,可进行转矩的在线快速估算。

1 SRM 转矩在线快速估算策略

SRM 转矩在线快速估算原理如图 1 所示。由图 1 可知,根据开关管导通时间、直流母线电压 U_{dc} 和相电流 i_{ph} 可估算出每相的磁链 ψ_{ph} 。然后由磁链和相电流计算得到磁共能 W_c ,计算得到的磁共能连同相电流和转子位置信号 θ ,储存在三维查询表中,通过实时计算的磁共能和查表得到的前一采样点的磁共能,对转子位置求导,即可得转矩 T 。

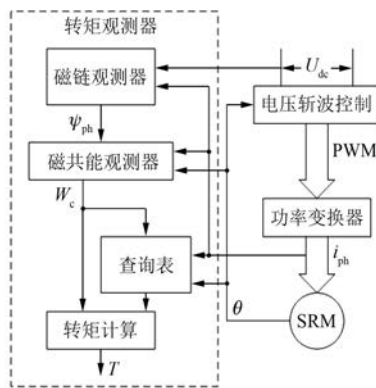


图 1 SRM 转矩在线快速估算原理图

2 SRM 转矩在线快速估算策略的实现

2.1 SRM 磁链特性测量

SRM 磁链特性是进行电机控制的基础,磁链特性检测的准确性直接影响 SRM 电机转矩估算的精确程度。SRM 磁链检测方法主要分为直接检测和间接检测两种。直接法需安装磁链传感器,增大了系统复杂程度,加大了成本,不具有普遍适用性;间接法是通过检测相电流和相电压来计算磁链,方法简单易行,具有较高的精度。本文采用堵转试验进行间接 SRM 磁链测量。

每相电压平衡方程为

$$\psi(t) = \int_0^t [u(t) - Ri_{ph}(t)] dt + \psi(0) \quad (1)$$

式中: $u(t)$ ——相电压;

R ——相绕组电阻;

$\psi(0)$ ——电机的初始磁链,通常预留足够的退磁时间,使 $\psi(0) = 0$ 。

由式(1)可知,绕组磁链通过检测绕组相电流和相电压计算可得。SRM 磁链测量的试验装置图如图 2 所示。

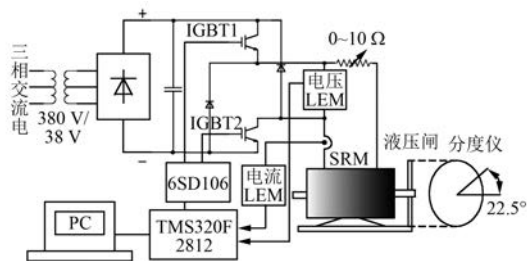


图 2 SRM 磁链测量试验装置图

为了防止通电过程中电流上升过快从而影响数据的采集,在 380 V 的进线电压处增加降压变压器(380 V/38 V)。串接在绕组中的大功率变阻器(0~10 Ω)用来调节 SRM 绕组中的电流。DSP 通过驱动模块 6SD106 来控制 IGBT 的开通与关断,进而调节绕组两端的电压。绕组的相电流和相电压通过霍尔电流传感器 LEM LT108-S7 和霍尔电压传感器 STCVI/800 V/40 mA 检测可得。同时 DSP 通过最大采样频率为 500 kHz 的 ADS7864 的模数转换芯片实时采样传感器输出的电流和电压信号。分度仪用来完成 SRM 转子位置的定位工作,本文使用的样机为 18.5 kW 的三相 12/8 极电机,其定位角度范围为 0°~22.5°。堵转试验测量 SRM 磁链特性的试验步骤如下:(1)通过位置传感器确定转子位置,结合分度仪,将转子固定在电感最小位置;(2)预留较长的时间间隔,使电机完全退磁,保证磁链初值 $\psi(0) = 0$;(3)DSP 发出脉冲指令,控制 IGBT 的导通与关断,实时测量相电流和相电压,并存储到内存;(4)通过 MATLAB 软件处理电压和电流数据,根据式(1)计算绕组磁链;(5)转动转子至下一待测角度后,重复上述过程。

图 3 所示为 SRM 定子凸极与转子凹槽轴线重合位置、定子凸极与转子凸极轴线重合位置的

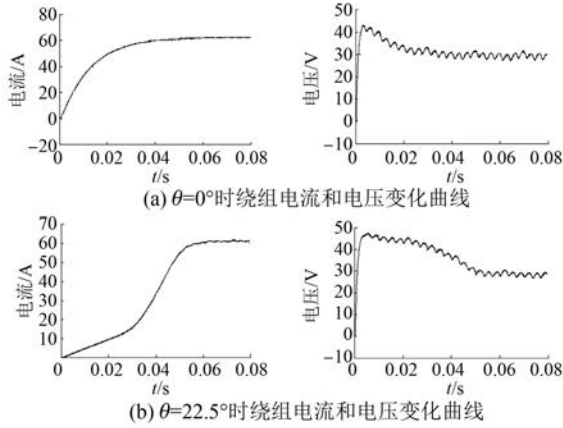


图3 实测电流、电压波形

相电流和相电压曲线。

图4所示为样机通过堵转试验测得的磁链特性曲线,其中 $\theta=0^\circ$ 为定转子凸极完全不对齐位置; $\theta=22.5^\circ$ 为定转子凸极完全对齐位置。每隔 1° 测量一组磁链特性数据。由图4分析可知,SRM磁链特性在电流小于15A时呈现线性变化规律,当电流大于15A时则呈现非线性变化趋势。

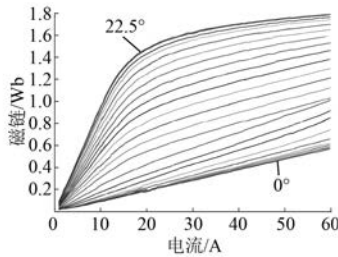


图4 SRM磁链特性

2.2 SRM磁共能估算

由SRM电机数学模型分析可知,每相的磁共能 W_c 由磁链对电流的积分可得:

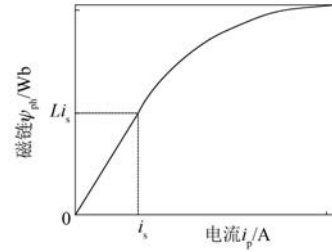
$$W_c = \int_0^{i_{ph}} \psi_{ph} di \quad (2)$$

由于磁链非线性,采用准线性模型将其简化,磁链-电流曲线被分为线性区域和非线性区域两部分,如图5所示。

当相电流小于饱和电流值 i_s 时,磁链与电流呈线性特性,磁共能表达式可变为

$$W_c = \frac{1}{2} \psi_{ph} i_{ph} \quad (3)$$

当相电流大于饱和电流值时,磁链由两部分

图5 两段式磁链-电流 i_{ph} 曲线

组成。相电流低于饱和电流值的部分是线性部分,其磁链计算为

$$\psi_{ph} = Li_{ph} \quad i_{ph} \leq i_s \quad (4)$$

相电流超出饱和电流值的部分为非线性部分,其磁链计算为

$$\psi_{ph} = Li_s + a \frac{i_{ph} - i_s}{b + i_{ph} - i_s}, i_{ph} > i_s \quad (5)$$

其中, a 、 b 是在线待定系数,其值的确定由以下公式计算得到。

对式(5)进行一阶求导可得:

$$\frac{\partial \psi_{ph}}{\partial i_{ph}} = \frac{ab}{(b + i_{ph} - i_s)^2} \quad (6)$$

式(6)中,当相电流取值为饱和电流时,其磁链的一阶导数等于磁链特性曲线线性部分的斜率,即线性部分饱和电流时的电感值,公式如下:

$$\left. \frac{\partial \psi_{ph}}{\partial i_{ph}} \right|_{i_{ph}=i_s} = \frac{ab}{(b + i_{ph} - i_s)^2} \Big|_{i_{ph}=i_s} = L \quad (7)$$

计算后可得:

$$b = \frac{a}{L} \quad (8)$$

将测量的相电流、估算的磁链和式(8)代入式(5)可得:

$$\psi_{ph} = Li_s + \frac{aL(i_{ph} - i_s)}{a + L(i_{ph} - i_s)} \quad (9)$$

整理式(9)可得:

$$a = \frac{L(\psi_{ph} - Li_s)(i_{ph} - i_s)}{L(i_{ph} - i_s) - (\psi_{ph} - Li_s)} \quad (10)$$

根据式(8)和式(10),式(5)中的在线待定系数 a 和 b 均已确定,磁共能是磁链对电流的积分,将磁链分为两部分分别积分,如式(11)所示:

$$W_c = (a + Li_s)(i_{ph} - i_s) - ab \ln \left(\frac{b + i_{ph} - i_s}{b} \right) + \frac{1}{2} Li_s^2 \quad (11)$$

最终由式(3)和式(11)可得磁共能的分段解析式为

$$W_c = \begin{cases} \frac{1}{2} \psi_{ph} i_{ph}, i_{ph} \leq i_s \\ (a + Li_s)(i_{ph} - i_s) - ab \ln\left(\frac{b + i_{ph} - i_s}{b}\right) + \\ \frac{1}{2} Li_s^2, i_s < i_{ph} \leq i_{max} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 SRM 瞬时转矩估算

由磁共能计算瞬时转矩为

$$T = \left. \frac{\partial W_c(\theta, i_{ph})}{\partial \theta} \right|_{i_{ph} = \text{constant}} \quad (13)$$

由式(13)可知,瞬时转矩由磁共能对转子位置求导可得,可进一步展开为

$$T = \frac{W_c(\theta_n, i_{ph}) - W_c(\theta_{pre}, i_{ph})}{\theta_n - \theta_{pre}} \quad (14)$$

式中: θ_n ——现在的转子位置;

θ_{pre} ——在同一电流值下前一采样点的转子位置。

磁共能 $W_c(\theta_n, i_{ph})$ 由式(12)计算可得,而前一采样点的磁共能 $W_c(\theta_{pre}, i_{ph})$ 查表可得。

3 仿真与试验验证

为了验证所提转矩在线快速估算策略的正确性,首先在磁链数据的基础上离线计算 SRM 的转矩特性曲线。由式(12)计算得到电机磁共能曲线,再由式(14)得到 SRM 的转矩特性曲线。

以堵转试验测得的样机磁链特性为基础,将磁链-电流数据导入 MATLAB 软件中进行数据处理,其中电流变化范围为 1~60 A,转子位置变化范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$,每隔 1° 进行一次磁共能计算,SRM 磁共能数据图如图 6 所示。

在磁链特性曲线中,磁共能的取值为每条磁链特性曲线与横轴电流所围图形的面积,因此角度越大磁共能越大。由图 6 可知,磁共能与角度成正比关系,在一个周期内以 22.5° 对称分布。

将计算所得的磁共能代入式(14),每隔 1° 进行一次磁共能采样,电流变化范围为 1~60 A,转子位置变化范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$,每隔 1 A 进行一次瞬时转矩计算。SRM 转矩数据图如图 7 所示。

由图 7 可知,随着电流的增大,瞬时转矩不断

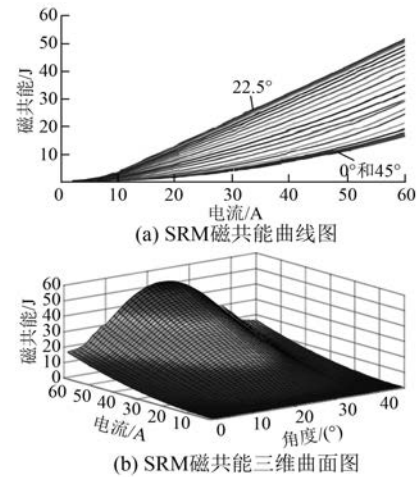


图 6 SRM 磁共能数据图

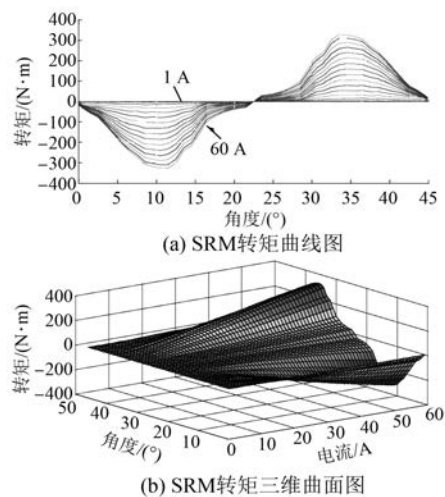


图 7 SRM 瞬时转矩数据图

增大,且以 22.5° 为中心对称,这与电感曲线的上升与下降区位置有关。

图 8 和图 9 所示分别为 SRM 转矩在线快速

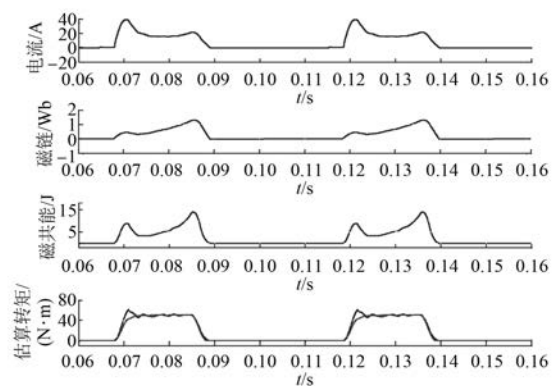


图 8 SRM 转矩在线快速估算仿真波形

估算仿真与试验波形。由图 8、图 9 可知,在 A 相转子位置信号处于高电平时,系统实时进行磁共能计算,估算转矩能够及时跟踪输出给定转矩,转矩误差较小,在线快速估算转矩能够达到转矩反馈控制的要求,具有较好的可行性和易用性。

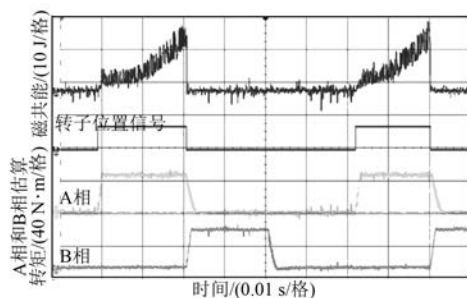


图 9 SRM 转矩在线快速估算试验波形

4 结 语

本文提出了一种 SRM 转矩在线快速估算方法,在电压斩波控制的基础上,给出了 SRM 转矩

在线快速估算原理图。详细论述了电机磁链特性测量方法,并给出了磁共能和瞬时转矩估算公式。仿真和试验验证结果表明,该转矩在线快速估算策略有效可行、易于实现,有助于实现高性能转矩控制。

【参 考 文 献】

- [1] 王如乾,王国峰,李存贺,等.开关磁阻电机固定频率预测电流控制策略[J].电机与控制应用,2018,45(7): 1.
- [2] 王勉华,邢幸.开关磁阻电机直接转矩滑模变结构控制[J].电机与控制应用,2017,44(6): 35.
- [3] 程勇,闫伟康.基于转矩误差 PWM-DITC 开关磁阻电机控制策略[J].电气传动,2018,48(7): 14.
- [4] 史钟林,黄运生,陈学.基于转矩分配策略的开关磁阻电机控制系统研究[J].煤矿机械,2010,31(10): 59.
- [5] 陈海进,李锦阳.一种开关磁阻电动机瞬时转矩在线估算方法[J].微特电机,2018,46(3): 25.

收稿日期: 2018-10-11

(上接第 81 页)

- [4] 张凤阁,陈进华,刘光伟,等.面贴式异向旋转双转子永磁电机的磁场解析计算[J].电工技术学报,2011,26(12): 28.
- [5] RAHIDEH A, KORAKIANITIS T. Analytical armature reaction field distribution of slotless brushless machines with inset permanent magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(7): 2178.
- [6] 于吉坤,李立毅,张江鹏,等.定子开槽永磁同步电机气隙比磁导解析计算[J].电工技术学报,2016,31(增刊 1): 45.
- [7] 李灏淳,李立毅,于吉坤,等.多边形转子磁轭永磁同步电机空载气隙磁场解析计算[J].中国电机工程学报,2018,38(11): 3354.
- [8] 郭思源,周理兵.表面埋入式永磁电机磁场解析

[J].中国电机工程学报,2015,35(3): 710.

- [9] GYSEN B L J, MEESSEN K J, PAULIDES J J H, et al. General formulation of the electromagnetic field distribution in machines and devices using Fourier analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(1): 39.
- [10] 薛志强,周羽,李槐树.考虑定转子双边开槽时表贴式永磁电机空载磁场解析计算[J].中国电机工程学报,2017,37(8): 2399.
- [11] 徐媛媛,葛红娟,荆岩.永磁同步电机偏心磁极优化设计[J].哈尔滨工程大学学报,2013,34(7): 873.
- [12] 卢晓慧,梁加红.表面式永磁电机气隙磁场分析[J].电机与控制学报,2011,15(7): 14.

收稿日期: 2018-10-22