

# 直接瞬时转矩控制策略在开关磁阻电机上的应用

## Application of Direct Instantaneous Torque Control System in Switched Reluctant Motor

西北工业大学自动化学院 程 勇 林 辉

[摘要] 从直接瞬时转矩控制原理出发,分析了开关磁阻电机响应速度和转矩脉动的抑制原理,提出了一种基于DITC的改进的滞环策略。从仿真结果可知,该控制策略提高了系统响应速度,更增强了转矩脉动的抑制能力。

关键词: 开关磁阻电机 直接瞬时转矩 转矩脉动

[ABSTRACT] A new hysteresis-controller is proposed with researching of direct instantaneous torque control. New hysteresis-controller is modified in response and reduction of torque ripple. In terms of simulating results, response speed and reduction of torque ripple are enhanced effectively.

Keywords: Switched reluctance motor (SRM) Direct instantaneous torque control (DITC) Torque ripple

开关磁阻电机<sup>[1]</sup>(SRM)因为结构简单、工作可靠、调速性能优越等性能,成为了极具竞争力的一种调速电动机。但是,由于特殊的双突极结构造成了电机磁通的非线性,也由此影响电机的输出转矩脉动。转矩脉动直接影响着SRM驱动系统的特性,特别是低速时会导致速度振荡。因此,如何抑制SRM转矩脉动是各国学者研究的一个热点,也取得许多显著的成果。神经网络<sup>[2]</sup>和迭代学习控制<sup>[3]</sup>方法,主要是通过电流优化达到控制转矩的目的。利用这类方法,一旦电机变化,控制性能就会下降。有学者<sup>[4]</sup>提出通过BOOST电路形成四电平的拓扑,实现了转矩脉动的抑制。关断角补偿<sup>[5]</sup>中,利用模糊控制器对SRM的关断角进行实时补偿,自动调节SRM关断角,减小转矩脉动。文献[6]提出了旋转矢量法减小转矩脉动。但是算法复杂,适用性和鲁棒性差,且计算量大,在实际控制中实时性差,推广比较困难。

瞬时转矩控制<sup>[7-8]</sup>是通过转矩误差控制相绕组上的电压控制输出转矩的方法。本文根据直接瞬时转矩控制论,提出了新的滞环控制策略即单相导通和换相控制策略,详细分析了工作过程,最后仿真结果验证了该方法的有效性。

### 1 开关磁阻电机 DITC 分析

假设四相SRM电动机各相绕组采用正向方式连接,且相间互感可以忽略不计,同时各相绕组具有相同的电磁特性。

$$T_{ek} = \frac{\partial W'(\theta, i_k)}{\partial \theta} \Big|_{i_k=\text{常数}}, \quad (1)$$

$$T_e = \sum T_{ek}, \quad (2)$$

式中, $W'$ 、 $T_e$ 表示电机第 $k$ 相绕组的磁共能、总电磁转矩; $T_{ek}$ 是第 $k$ 相的瞬时转矩。式(1)描述了SRM每相转矩 $T_{ek}$ 与磁共能 $W'$ 、位置角 $\theta$ 的关系。在式(2)中,所有 $k$ 相绕组输出转矩相加就表示电机的总电磁转矩<sup>[1]</sup>。由式(1)可知,磁共能与转子位置、绕组电流的瞬时值相关。在DITC理论中,通过控制定子绕组电压可以控制瞬时输出转矩<sup>[4,7-8]</sup>。文中SRM的瞬时反馈转矩利用查表法得到。转矩电流角度表根据文献[9]中的有限元方法建立,控制时通过查表法获得SRM瞬时输出转矩。

### 2 拓扑分析

不对称半桥式结构是SRD中<sup>[9]</sup>一种单极性驱动电源。在不对称半桥式电路中,每相轮流导通,可忽略互感对电磁转矩的影响。根据不对称半桥工作原理,定子绕组电压定义3个状态:2个开关管同时导通设定为状态1,绕组上电压为正值( $+U_s$ );1个开关管关断的续流阶段设定为状态0,绕组上电压为0;2个开关管同时关断设定为状态-1,绕组上电压为负值( $-U_s$ )。图1给出了相绕组上电压状态,其中 $S_k$ 是第 $k$ 相绕组电压状态。

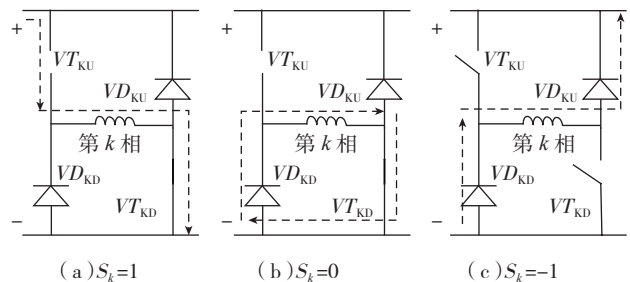


图1 相绕组电压状态

Fig.1 Voltage state of phase winding

### 3 直接瞬时转矩控制策略研究

直接瞬时转矩控制(DITC)算法的关键是转矩误差的滞环控制。通过滞环控制,利用不同的相绕组电压状态来控制不同位置角下相绕组电压,控制电磁转矩。本文SRM控制结构如图2所示。其中,由查表法得到的瞬时转矩作为控制量,与参考转矩进行比较后,再送入转矩调节器控制。也可以在该结构上在增加速度环,实现双闭环控制。在每个极矩角内,各相绕组轮流导通,导通角分成单相导通区和换相导通区2类。

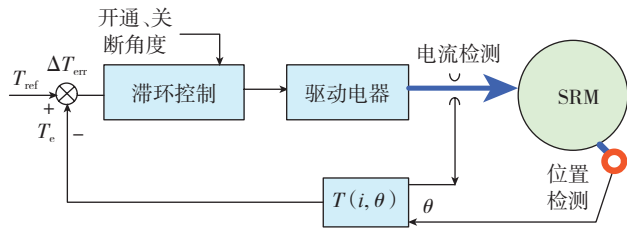


图2 直接瞬时转矩控制原理图

Fig.2 Control scheme structure of instantaneous torque control system

根据SRM的线性化公式<sup>[8]</sup>,相电流产生电磁转矩可简化为:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (3)$$

由式(3)可知,转矩在电感随角度变化的一个极矩角内,在一个电感周期中,转矩在电感随角度上升区( $\frac{\partial L}{\partial \theta} > 0$ )为正,在电感随角度下降区( $\frac{\partial L}{\partial \theta} < 0$ )为负。

所以,开关磁阻电动机起动并连续运行的条件是转矩为正。在电感的上升区输出各相转矩,在电感下降区输出负转矩将会给输出总转矩带来很大的波动。因此,本文各相转矩输出区间都在电感随角度变化的正值区间。

在DITC中,转矩是直接控制的变量,绕组相电压由参考转矩和瞬时转矩之差决定。在SRM运行期间,按不同位置导通相数的不同,把转子角度产生转矩的区域分为单相导通区域和换相区域,如图3所示。

#### 3.1 各相电感和换相角之间的关系

四相绕组电感和转矩及位置角导通、关断关系如图4所示。可以把每相在一个极矩角(四相SRM为60°)导通区间分成两相换相区间和单相导通区间2个部分。以D相和A相为例说明导通区间关系。

在  $0 \sim \theta_{Aon}$ , D相单相导通,有  $\frac{\partial L_D}{\partial \theta} > 0$ , D相产生正转矩。此时虽然A相  $\frac{\partial L_A}{\partial \theta} > 0$ ,但是  $\frac{\partial L_A}{\partial \theta}$  很小,因此A相在这个位置角区间并不导通。

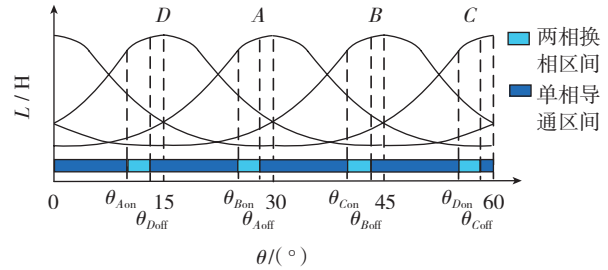


图3 各相电感与位置角关系图

Fig.3 Relation of induction and position angle

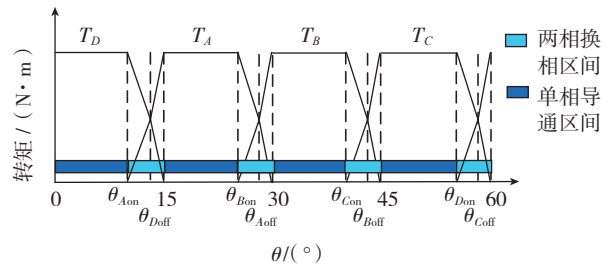


图4 各相转矩与位置角关系示意图

Fig.4 Diagram of each phase torque in different position

在  $\theta_{Aon} \sim \theta_{Doff}$ ,  $\frac{\partial L_A}{\partial \theta} > 0$  并且使得  $i_A$  迅速增加,因此选择  $\theta_{Aon}$  做A相绕组开通角,选择  $\theta_{Doff}$  作为D相关断角,在该区间两相换相同时导通。具体分工是,增加输出转矩主要A相(即将单相导通相)承担,减少转矩主要D相(即将关断相)承担,这样主要为了  $i_A$  尽可能增加,满足其单独输出转矩的需要。

在  $\theta_{Doff} \sim 15^\circ$  之间完成两相绕组的换相,  $i_A$  尽可能大且要保证在  $15^\circ \sim \theta_{Bon}$  之间单相导通产生足够转矩,  $i_D$  应该在  $15^\circ$  前减小到0。之后,会有A相到B相, B相到C相, C相到D相的换相过程,这里不再一一赘述。

#### 3.2 转矩滞环控制

滞环控制策略是DITC的重要部分,针对SRM每相定子绕组导通角的单相导通区和换相导通区,滞环策略应该有所区别,如图5所示。在单相导通区,相绕组电感在上升区,本文利用不对称桥式电路的特性提出单相导通区滞环控制策略。引入状态“-1”是为了加速绕组的放电过程。在转矩误差大于0时,如果转矩误差继续增加超过  $\Delta T_1$ ,那么绕组电压状态从“0”跃变到“1”,加速绕组励磁。如果转矩误差减小,则说明输出转矩仍然需要增加,所以绕组电压状态是“1”。过零检测是为了更好地控制转矩的输出特性。

换相区间角内,应将对应两相功能重新分配。对于即将关断的相,由于该相已经运动到了电感较大的位置,电流较大且输出转矩较大,对转矩进行“粗调”。那么该相绕组可以加相电压状态“0”、“1”、“-1”且转矩误差限可以较大。但是,对于开始导通相,由于对应电

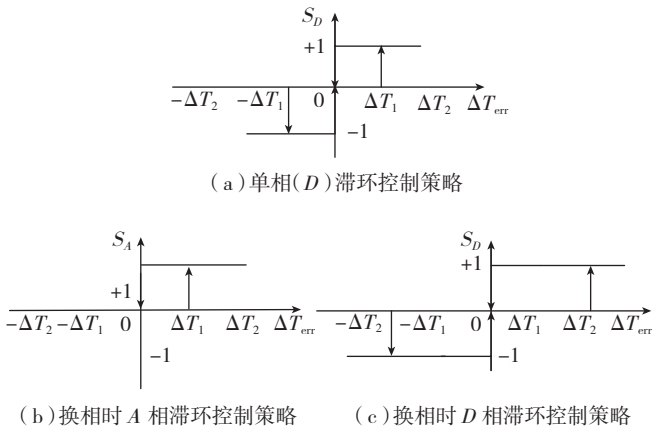
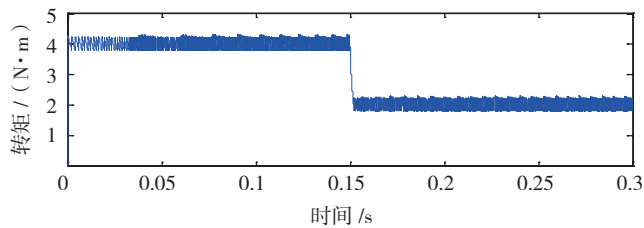


图5 单相和换相滞环控制策略

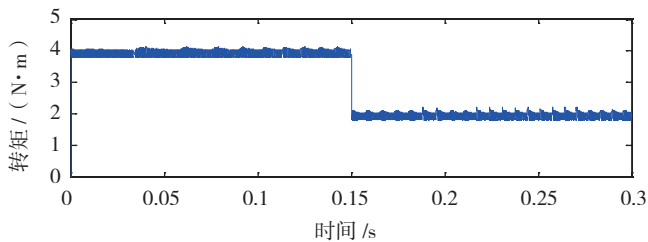
Fig.5 Diagram of torque hysteresis-controller in conduction and two phases commutation

流和电感变化率都很小,因此在转矩误差控制时,考虑加“0”和“1”状态且转矩误差限要小,对转矩进行“微调”。

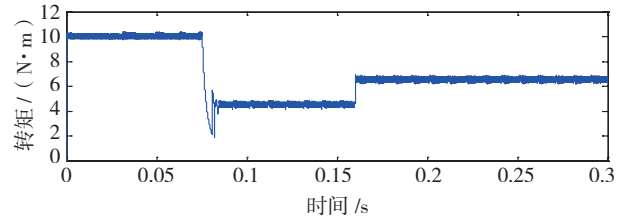
下面分析 SRM 由  $D$  相绕组换相到  $A$  相的过程。在转矩误差大于 0 时,说明此时输出转矩需要增加。如果转矩误差增加且在  $0 \sim \Delta T_1$  间,那么  $A$  相和  $D$  相都在续流“0”状态。如果误差继续增加且  $\Delta T_2 > \Delta T_{err} > \Delta T_1$ ,那么  $A$  相绕组进入“1”, $D$  相仍然续流“0”。如果误差继续增加且  $\Delta T_{err} > \Delta T_2$ ,那么  $A$  相绕组仍然在“1”状态, $D$  相也在“1”状态。如果转矩误差减小且  $\Delta T_{err} > 0$ , $A$  相和  $D$  相都在“1”状态,保持励磁。在转矩误差小于 0 的负半区间,需要减小电机输出转矩。但是,由于  $A$  相是即将单相导通绕组,考虑到电流尽可能平缓变化, $A$  相



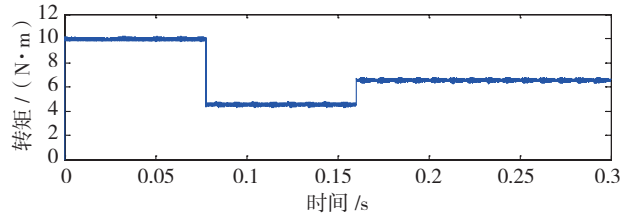
(a)文献 [10] 中 DITC 的转矩响应曲线



(c)本文的 DITC 转矩响应曲线



(a)文献 [10] 的转矩曲线



(b)本文的转矩曲线

图6 速度转矩双闭环下转矩仿真比较

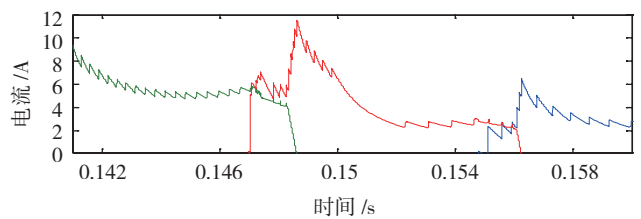
Fig.6 Simulation of torque with double loop control

续流“0”。 $D$  相可以通过“-1”去磁,这里分析从略。

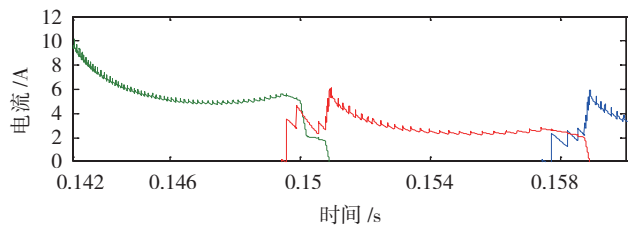
#### 4 仿真结论

根据文中所述算法,采用 Matlab 仿真软件,对四相 8/6 极电机进行了 DITC 方法的仿真研究,设开通角度  $\theta_{on}$  和关断角度  $\theta_{off}$  分别为  $12^\circ$  和  $27^\circ$ ,电源电压为电机定子绕组额定电压(240V)。选择转矩误差滞环门限  $\Delta T_1=0.2, \Delta T_2=0.3$ 。其中比较 DITC 控制策略与文献 [10] 中方法完全相同。仿真结果为了说明转矩的特性,部分选取了  $B、C、D$  三相波形。其余仿真条件完全相同。仿真实验分成两部分:

(1)基于 DITC 的调速系统仿真。速度环给定转矩



(b)文献 [10] 的 DITC 的电流响应曲线



(d)本文的 DITC 电流响应曲线

图7 两DITC空载时的仿真结果比较

Fig.7 Simulation results of two DITC with no-load

门限为  $10\text{N}\cdot\text{m}$ , 给定转速为  $500\text{r}/\text{min}$ , 启动时给定负载转矩为  $4\text{N}\cdot\text{m}$ , 在  $0.16\text{s}$  时, 给定转矩跃变到  $6\text{N}\cdot\text{m}$  由图 6 可以看出, 在  $0.075\text{s}$  时速度达到给定转速, 输出转矩开始调整, 而本算法在转矩鲁棒性上明显好于文献 [10] 给出的 DITC。而在  $0.16\text{s}$  时, 负载转矩由  $4\text{N}\cdot\text{m}$  跃变到  $6\text{N}\cdot\text{m}$  时, 本算法的转矩波动和响应速度也好于文献 [10] 给出的 DICT 方法。

(2) 空载下的转矩和电流响应速度研究。空载下,  $0.15\text{s}$  时指令转矩由  $4\text{N}\cdot\text{m}$  跃变到  $2\text{N}\cdot\text{m}$  时, 本文的控制策略在转矩响应速度上明显好于文献 [10] 的方法。而对应的相电流幅值小于文献 [10] 的电流。

在 2 种 DITC 算法下, 本算法转矩脉动抑制效果明显好于文献提出的滞环控制算法。图 7 是仿真结果。

## 5 结论

针对 SRM 非线性的特性, 文章详细地分析了不对称半桥结构下的 DITC 滞环控制策略。通过仿真实验证明, 相比于电流优化算法 DITC 算法简单。而且本文提出的指环控制策略有效地提高了转矩脉动抑制能力和系统的响应速度及其鲁棒性。

### 参考文献

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [2] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 夏长亮, 陈自然, 李斌. 基于 RBF 神经网络的开关磁阻电机瞬时转矩控制. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 127-132.
- [4] 李红梅, 张志全, 李忠杰. 减小小功率开关磁阻电机转矩脉动的迭代学习控制. 电工技术学报, 2006, 21(10): 67-70.
- [5] 李珍国, 魏艳君, 阚志忠, 等. 基于四电平功率变换电路的开关磁阻电机瞬时转矩控制. 电工技术学报, 2007, 22(8): 144-149.
- [6] Nicholas J N, Robert D L. Rotating vector methods for smooth torque control of a switched reluctance motor drive. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000(2): 540-548.
- [7] Robert B I, De Doncker R W. Direct instantaneous torque control of switched reluctance drives//IEEE 37th IAS Annual Meeting, 2002: 1605-1609.
- [8] Nisai H F, Marcus M, Robert B I. High-dynamic four-quadrant switched reluctance drive based on DITC. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005(5): 1232-1242.
- [9] Parreira B, Rafael S, Pires A J, et al. Obtaining the Magnetic Characteristics of an 8/6 Switched reluctance machine: from FEM analysis to the experimental tests. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005(6): 1635-1643.
- [10] Rodrigues M, Costa B P J, Suemitsu W. Fuzzy logic torque ripple reduction by turn-off angle compensation for switched reluctance motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001(3): 711-715.

(责编 夏宛)

(上接第 87 页)

切端面”的目的是在激光下料后, 增加机加铣切工序, 光滑的去掉  $0.3\sim 0.5\text{mm}$  材料, 以保证氮气与钛的氧化层被去除。增加“丙酮擦拭”、“刮削端面”、“打磨待焊区”的目的是确保焊前清理的清洁度。

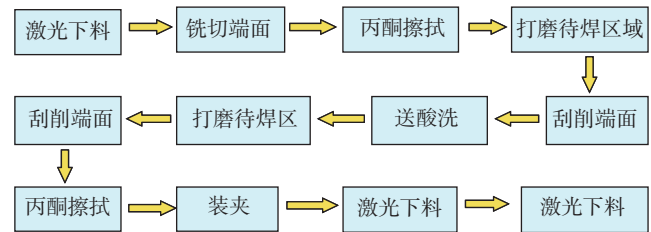


图4 方案三  
Fig.4 Scheme III

最后按方案三进行了 1 组共计 6 件试件的试验。试验选取表 2 中的序号 3 参数。试件焊接完后, 外观质量完全符合焊道表面平整光滑, 无咬边、凸起、凹坑等缺陷要求, X 射线检查除有 1 件存在一处气孔外, 其余 5 件都未发现气孔, 焊接质量完全符合 GJB 1718A 中 II 级检验标准的要求。

## 7 零件的焊接

根据试验结果, 最终确定选取方案三、表 2 中序号 3 的规范进行零件焊接, 焊后零件一次交检合格率达到 100%, 成功实现了零件的电子束焊接。

## 8 结论

(1) 本文根据零件结构, 结合电子束焊接要求, 设计了合理的焊接工装夹具, 保证了焊接变形的要求。

(2) 在焊接前对零件进行了严格的清理, 保证了清洁度, 同时防止了二次污染, 这对于获得合格的焊缝是至关重要的。

(3) 采用不同的方案对薄壁 TC4 钛合金零件的电子束焊接进行研究。通过试验, 确定了最优的焊接参数, 制定了合理的焊接方案。

(4) 薄壁钛合金焊接件在选用激光切割下料时, 应避免选用氮气保护, 优选氩气保护。

(5) 成功的实现了薄壁 TC4 钛合金零件的电子束焊接, 同时也为薄壁钛合金零件的电子束焊接积累了经验, 对于类似薄壁钛合金零件的电子束焊接具有实际的指导意义。

### 参考文献

- [1] 李文鹏, 陈永楠, 魏建锋, 等. TC4 合金  $800\text{C}$  热循环组织和力学性能变化. 稀有金属材料与工程, 2010(39): 74-76. (责编 亦非)