

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211646

基于换相重叠角实时变化的SRM转矩脉动抑制控制策略^{*}

于继飞¹ 隋先富¹ 陶明² 张贺铭² 周明磊² 郝瑞祥²

(1. 海洋石油高效开发国家重点实验室 北京 100028; 2. 北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要: 开关磁阻电机因其特殊的双凸极结构及严重的非线性问题,会导致有很大的转矩脉动存在,严重限制了其应用范围。传统的转矩分配函数受转矩特性和电压限制等影响,在换相期间仍然存在较大的转矩脉动,并且在不同的速度段,受电流变化率及换相周期的影响,在换相重叠角固定时,其转矩脉动现象会更加明显。本文提出一种换相重叠角随转速实时变化的控制策略,通过检测电机运行过程中实际转矩过零点所对应的角度,计算出相对应的换相重叠角,并建立转矩负载-电机转速-换相重叠角之间的查值表,据此可以在不同负载下随着电机转速变化查询最合适的换相重叠角,使开关磁阻电机的转矩脉动最小。最后为了验证该策略的有效性与可行性,以一台3 kW、3相12/8极开关磁阻电机为控制对象进行仿真与实验验证,证明所提方法能够在较宽的速度范围内有效抑制开关磁阻电机的转矩脉动。

关键词: 开关磁阻电机;转矩脉动;转矩分配函数;换相重叠角;实时变化

中图分类号: TM352 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Torque ripple suppression control strategy of SRM based on real-time change of commutation overlap angle

Yu Jifei¹ Sui Xianfu¹ Tao Ming² Zhang Heming² Zhou Minglei² Hao Ruixiang²

(1. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100028, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Due to its special double salient structure and serious nonlinear problems, Switched reluctance motor has a large torque ripple, which severely limits its application range. The traditional torque sharing function is affected by torque characteristics and voltage limitation, and there are still large torque ripples during the commutation period. In different speed segments, affected by current change rate and commutation period, the torque ripple will be more obvious when the commutation overlap angle is fixed. Based on this phenomenon, this paper proposes a control strategy in which the commutation overlap angle changes with the speed in real-time. By detecting the angle corresponding to the actual torque crossing zero during the operation of the motor, the corresponding commutation overlap angle is calculated, and a look-up table between torque load-motor speed-commutation overlap Angle is established. According to this reference table, the most suitable commutation overlap angle can be look-up with the change of motor speed under different loads to minimize the torque ripple of switched reluctance motor. Finally, in order to verify the effectiveness and feasibility of the strategy, a 3 kW, 3-phase 12/8-pole switched reluctance motor is used as the control object for simulation and experimental verification, which proved that the proposed method could effectively suppress the torque ripple of the switched reluctance motor in a wide speed range.

Keywords: switched reluctance motor; torque ripple; torque sharing function; commutation overlap angle; updated in real time

0 引言

开关磁阻电机^[1-4] (switched reluctance motor, SRM)

具有结构简单、可靠性高、成本低、效率高、可四象限运行等的优点,并且可控参数多、控制方法灵活受到了国内外电气传动界的广泛关注,但由于其特殊的双凸极结构、非线性的

收稿日期:2022-10-10

^{*} 基金项目:海洋石油高效开发国家重点实验室开放课题基金(2021GX01)项目资助

电磁关系导致开关磁阻电机具有很大的转矩脉动与电磁噪声,在换相期间尤为严重,这严重限制了开关磁阻电机在调速系统中的应用与推广。针对于此,国内外众多学者致力于抑制开关磁阻电机的转矩脉动中,并取得了较为显著的成就。

目前,学者们主要从两个方面入手来抑制开关磁阻电机的转矩脉动:一方面优化电机的本体设计,文献[5]将传统均匀气隙结构改成两段式的非均匀气隙结构,优化结构参数与磁场分布,进而抑制 SRM 转矩脉动,文献[6]提出一种新的定子极面结构,并在转子侧面安装极靴,使气隙变化进而改善磁化特性削弱开关磁阻电机的转矩脉动,文献[7]通过改变定子齿的数目,使转子凸极多于定子凸极,进而改善开关磁阻电机的转矩脉动,这些方法都能有效的降低开关磁阻电机的转矩脉动,但实现起来比较复杂,因此学者们更热衷于从另一方面:优化控制策略来改善开关磁阻电机的转矩脉动,转矩分配函数(torque sharing function, TSF)作为一种高性能的控制方法,能有效降低开关磁阻电机的转矩脉动,得到广泛应用,文献[8-9]对换相期间的 TSF 进行补偿,对输出相在换相开始时实现正补偿,对输入相在换相结束时实现负补偿,以此来减小转矩脉动,文献[10]不事先规定转矩分配函数的形状,依据当前期望转矩与实际转矩的差值作为下一相的转矩给定,使总转矩脉动为零,文献[11]采用交叉补偿型转矩分配函数,合成转矩期望值分别减去相邻两相的实际转矩,将得到的转矩值作为另一相的期望转矩值,使合成转矩恒定无脉动,文献[12]提出一种在线补偿技术,将上一相的转矩差值转化为电流差值与下一相电流值相加,降低 SRM 的转矩脉动,文献[13]采用一种在线 TSF 方法,不仅提高了常规 TSF 的转矩跟踪能力,也减小了转矩脉动,文献[14]同样对转矩分配函数进行补偿,将转矩误差加入到转矩分配函数中,抑制开关磁阻电机的转矩脉动。在这些控制方法中都是对转矩分配函数形式进行优化,但很少有学者对换相重叠角进行研究与优化,文献[15]实时监测电流的特征对电流重叠角进行实时计算,有一定的转矩脉动抑制作用,但转矩与电流之间并不是线性关系,实验结果并不是精确,文献[16]分析了换相重叠角对 SRM 转矩脉动的影响,采用遗传算法优化换相重叠角,虽然在一定程度上起到了优化转矩脉动的作用,但实现过程十分复杂,文献[17]提出换相重叠角与转速有关,在不同转速段取不同的换相重叠角,但并未给出两者具体公式。

受转矩特性、电压限制和转速升高等因素的影响,开关磁阻电机在换相期间存在较大转矩脉动,在传统的转矩分配函数控制策略中,随着转速升高,换相频繁,换相时间缩短,但换相重叠角保持固定,导致电流跟踪效果变差,转矩脉动现象尤为明显。本文提出一种基于换相重叠角实时变化的转矩分配函数控制策略。在电机加速运行过程中,检测输出相转矩过零点对应的角度,将其与关断角做差,将此

差值作为下次两相换相的换相重叠角,并采集此实时变化的换相重叠角与转速值,通过 Matlab 拟合工具箱拟合出两者之间的函数表达式,代入到传统的基于 TSF 的直接瞬时转矩控制(direct instantaneous torque control, DITC)中,为了验证所提方法的有效性,以一台 3 kW、3 相 12/8 极开关磁阻电机为控制对象进行仿真分析,证明所提方法能够在较宽的速度范围内有效抑制开关磁阻电机的转矩脉动。

1 开关磁阻电机的本体仿真模型

本文所提方法是在基于 TSF 的 DITC 策略基础上进行优化,为了实现基于 TSF 的 DITC 策略,以及验证本文所提方法有效性与可行性,使用一台 3 kW、3 相 12/8 极开关磁阻电机为控制对象,此电机参数如表 1 所示。

表 1 3 相 12/8 极 SRM 参数

参数	值
额定功率/kW	3
额定电压/V	380
额定转矩/(N·m)	19.1
额定转速/rpm	1 500
定转子极数	12/8
相数	3
绕组匝数/匝	125
定子齿宽/mm	11.55
转子齿宽/mm	12.46
定子外径/mm	155
定子内径/mm	90
定子轭高/mm	9.5
转子外径/mm	89.6
转子内径/mm	34
转子轭高/mm	13
气隙/mm	0.2
转子轴长/mm	140
硅钢材料	DW470-50

为获得开关磁阻电机的磁链特性,使用表中的数据在 ANSYS 中的 Maxwell 模块进行有限元分析,获得磁链特性曲线 $\psi - \theta - i$ 如图 1 所示,转矩特性曲线 $T - \theta - i$ 如图 2 所示,电感特性曲线 $L - \theta - i$ 如图 3 所示。

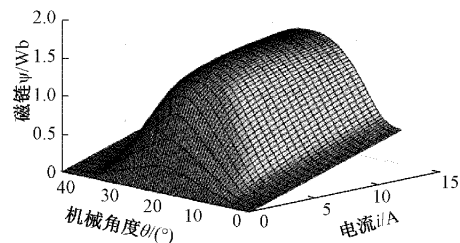


图 1 磁链特性曲线

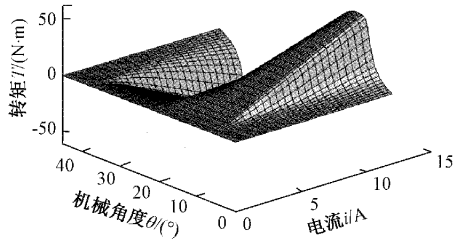


图2 转矩特性曲线

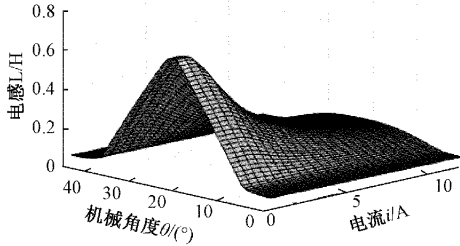


图3 电感特性曲线

开关磁阻电机具有严重的磁路非线性和相间耦合问题,导致对相关物理量的计算非常困难,为了解SRM的基本电磁关系和基本特性,常采用线性模型进行简化分析。

第 k 相绕组的电压平衡方程式为:

$$U_k = i_k R_k + \frac{d\psi_k}{dt} = i_k R_k + \left(L_k + i_k \frac{\partial L_k}{\partial i_k} \right) \frac{di_k}{dt} +$$

$$i_k \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

式中: U_k 、 R_k 、 i_k 、 ψ_k 和 L_k 分别为开关磁阻电机的相电压、相电阻、相电流、第 k 相磁链和第 k 相电感,

$\left(L_k + i_k \frac{\partial L_k}{\partial i_k} \right) \frac{di_k}{dt}$ 为相电流变化引起的感应电动势,

$i_k \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}$ 为转子位置角度变化引起的旋转电动势,忽略绕组电阻压降,由式(1)可得相电流的变化率为:

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{U_k - \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}}{\frac{\partial \psi_k}{\partial i_k}} = \frac{U_k - i_k \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \omega_r}{L_k} \quad (2)$$

式中: ω_r 为电机转速,从式(2)可以看出,电流变化率与电机转速、相电压和相电感有关,低速时电机转速较低,旋转电动势较小,电流变化率比较大,相电流有较好的跟踪能力,相转矩能极好的跟踪参考转矩,随着转速的升高,旋转电动势变大,电流变化率变小,相电流跟踪能力不足,相转矩无法完全跟踪参考转矩,导致在高速运行时电机转矩脉动很大^[18]。

在线性模型中,电机的电磁转矩为:

$$T_k = \frac{\partial W_e(i_k, \theta)}{\partial \theta} \Big|_{i_k = \text{const}} = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \quad (3)$$

式中: T_k 为第 k 相转矩, W_e 为磁共能,由式子可以看出转矩与相电流及相电感随转子位置的变化率有关。

2 转矩分配函数控制策略

开关磁阻电机由于其转矩特性具有严重的非线性特性,导致其具有很大的转矩脉动,经研究发现,转矩脉动主要存在于换相期间,关断相转矩的跌落值不等于开通相转矩的增长值,造成很大的转矩脉动产生。根据此现象,相关学者提出转矩分配函数控制策略,通过定义各相的转矩分配函数,对各相转矩进行分配,保证合成转矩恒定。

2.1 基于TSF的直接瞬时转矩控制系统结构

图4为基于TSF的直接瞬时转矩控制系统流程,总参考转矩由转速差值经PI调节器获得,而后结合电机转子位置角,通过转矩分配函数获得每相的参考转矩,每相实际转矩可以通过包含转矩-电流-转子位置角特性的数据表格查表获得,各相参考转矩与各相实际转矩的差值经过转矩滞环比较器生成开关信号,以此驱动各相开关。

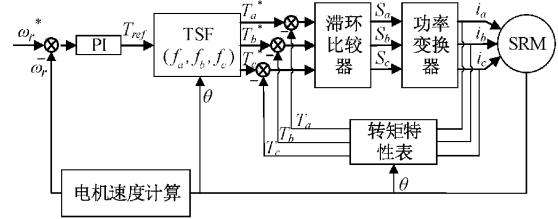


图4 基于TSF的传统直接瞬时转矩控制流程

2.2 转矩分配函数

转矩分配函数是实现SRM控制的一种有效方法,预设各相在不同位置角处的参考转矩,使合成转矩保持恒定。定义第 j 相转矩的分配函数为 $f_j(\theta)$,TSF的通式为:

$$\begin{cases} T_j(\theta) = T_{ref} f_j(\theta), & j = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^m f_j(\theta) = 1, & 0 \leq f_j(\theta) \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 为SRM的相数; T_j 为第 j 相的瞬时转矩; T_{ref} 为合成瞬时转矩指令值。

第 k 相转矩分配函数表达式 $f_j(\theta)$ 为:

$$f_j(\theta) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \theta \leq \theta_{on} \\ f_{rise}(\theta), & \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ 1, & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \\ f_{fall}(\theta), & \theta_{off} \leq \theta \leq \theta_{off} + \theta_{ov} \\ 0, & \theta_{off} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \tau_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_{on} 、 θ_{off} 和 θ_{ov} 分别为开通角、关断角和相邻两相的换相重叠角; $f_{rise}(\theta)$ 和 $f_{fall}(\theta)$ 分别为TSF上升段和下降段的函数; τ_r 为转子极距角。

为了保证电机运行时实际转矩能保持恒定,转矩分配函数的设计显得尤为重要。转矩分配函数需要满足两个条件:一个是在电机运行的任意时刻,每一相转矩输出不能为负;另一个是电机运行中的任意时刻,仅有一相或者相邻两相绕组通电励磁。

为了使实际转矩能良好跟踪参考转矩,转矩分配函数

的变化率不应选的过大。常见的转矩分配函数有 4 种类型:直线型、余弦型、立方型和指数型,如图 5 所示,图中转矩分配函数分为两个区域,Ⅰ区是换相导通区,输出转矩由两相配合产生;Ⅱ区是单相导通区,在此区域只有一相通电,输出转矩由一相独立产生。

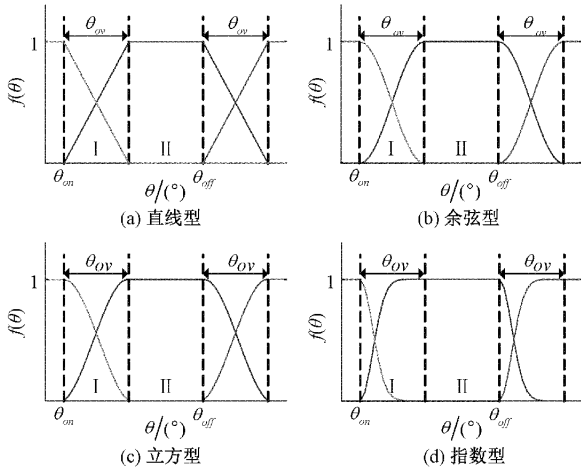


图 5 TSF 波形

基于提高转速范围和减小铜耗综合考虑,本文采用余弦型 TSF 进行分析。

图 6 和 7 分别为开关磁阻电机在低速 200 r/min 和高速 1 000 r/min 时采用基于 TSF 的直接瞬时转矩控制策略的转矩波形图。从图中可以看出电机在不同速度段运行时,在换相区间均存在较大的转矩脉动。从图中波形可以看出,造成换相区间存在较大转矩脉动的原因是因为实际转矩并未完全跟踪参考转矩引起的。由式(2)可知,随着转速的升高,电流变化率会逐渐减小。在电机低速运行时换相周期大,但电流变化率较大,在恒定的换相重叠角下,导致实际转矩在参考转矩降为零之前就已经降为零,从而导致转矩脉动;随着转速的升高,换相周期减小,电流变化率

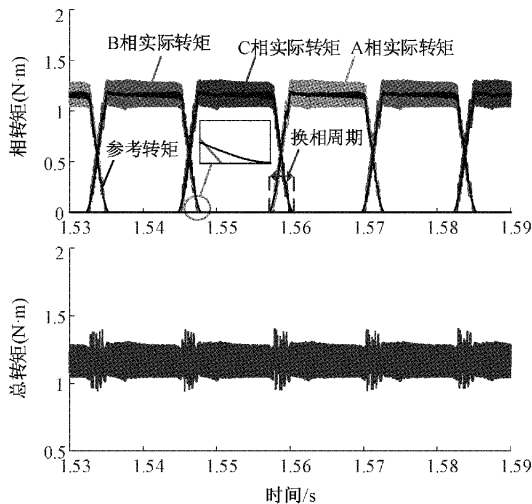


图 6 转矩波形图(转速为 200 rpm)

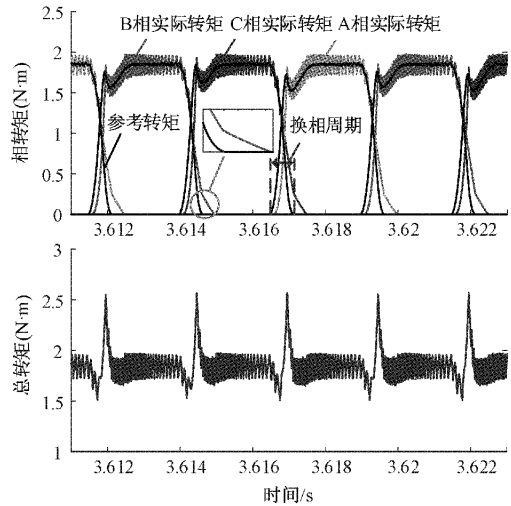


图 7 转矩波形图(转速为 1 000 rpm)

减小,在恒定的换相重叠角下,导致实际转矩在参考转矩降为零之后仍然存在,从而导致转矩脉动。

3 换相重叠角实时变化控制策略

如上所述,电机低速运行时,换相周期长,电流变化率大,实际转矩下降的很快,在换相区间结束之前就已下降为零,因此产生转矩脉动,因此希望在此速度段有较小的换相重叠角,使实际转矩在换相区间结束时刚好降为零,与预设参考转矩有较好的跟踪,减小转矩脉动;随着速度的升高,换相周期变短,电流变化率变小,实际转矩下降的很慢,在换相区间结束时实际转矩仍然存在,因而产生很大的转矩脉动,在此速度段希望有较大的换相重叠角,使实际转矩在换相区间有足够的时间下降,使得实际转矩能对预设参考转矩有很好的跟踪,以此减小开关磁阻电机的转矩脉动。

本文基于此思想,提出了一种换相重叠角随转速实时变化的控制方法,工作原理为当电机在不同速度段运行时,采集关断相在换相重叠角区域的实际转矩过零点所对应的角度,与关断角做差,将其差值作为下一次另外两相的换相重叠角,如图 8 所示。并在额定负载范围内进行多组仿真,将此变化的换相重叠角与相对应的速度值和所加负载值进行离线保存,建立三维查值表,将此查值表代入到传统的基于 TSF 的直接瞬时转矩控制中,得到本文所设计的系统,如图 10 所示。通过这种方法,开关磁阻电机可以在不同负载下于不同速度运行时,均可以获取足够精确的换相重叠角用于换相过程,对抑制转矩脉动起到十分显著的作用。

图 8 所示为本文所提方法的换相重叠角获取机理图, θ_A 、 θ_B 和 θ_C 分别为 A 相、B 相和 C 相绕组在换相重叠区实际转矩为零时所对应的角度,转矩数值通过转矩特性曲线 $T-\theta-i$ 获取,电机角度与电流信号分别通过磁编码器和电流传感器获取, θ_{off} 为三相绕组的关断角, θ_{ovA} 、 θ_{ovB} 和 θ_{ovC} 是依据 θ_A 、 θ_B 和 θ_C 与关断角 θ_{off} 计算得出的换相重叠角,

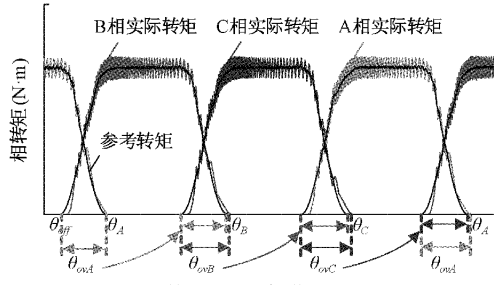


图8 换相重叠角获取机理图

其中 θ_{ovA} 的计算公式为:

$$\theta_{ovA} = \theta_A - \theta_{off} \quad (6)$$

将计算得出的 θ_{ovA} 作为 BC 相的换相重叠角,同理道理, θ_{ovB} 为 CA 相的换相重叠角, θ_{ovC} 为 AB 相的换相重叠角。

在电机的加速过程中,从空载到额定负载工况下进行多组仿真,利用仿真所得数据建立负载转矩-电机转速-换相重叠角之间的查值表,如图9所示。

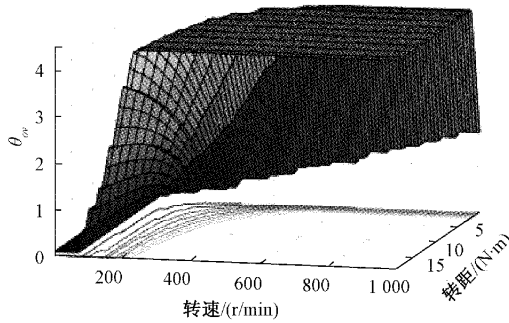


图9 查值表

基于此查值表对传统的基于TSF的直接瞬时转矩控制系统进行改进与优化,得到本文设计系统,如图10所示。

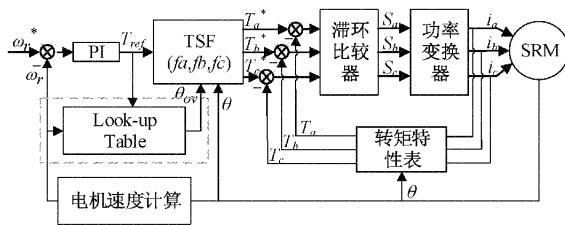


图10 基于换相重叠角实时变化的设计方案

在本文所提方案中,换相重叠角能随转速实时变化,解决了因不同速度段引起的转矩脉动问题,对于不同速度段都能有很好地抑制转矩脉动作用。

4 实验结果

以一台3 kW、3相12/8极开关磁阻电机为控制对象,搭建其调速系统的实验平台进行实验验证。图11为该实验平台。

相转矩由转矩-电流-角度表格查值获得,电流与角度分别通过电流传感器和磁编码器获得。设置开通角为

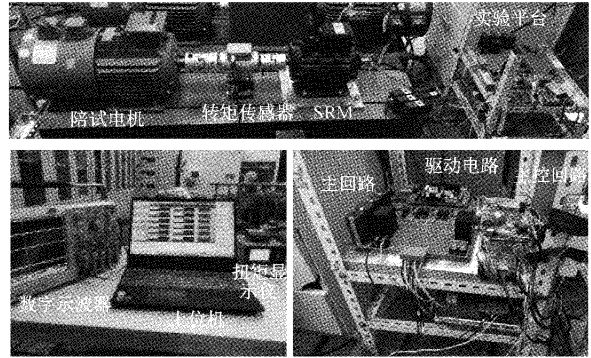


图11 控制系统实验平台

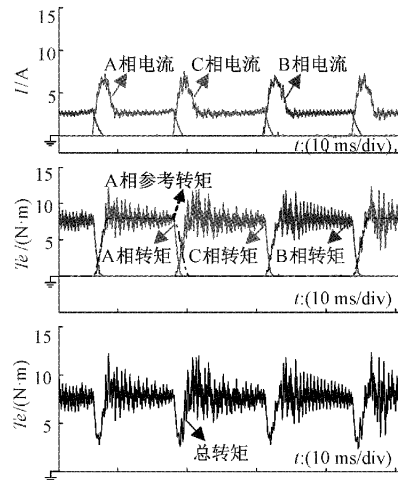
25.5°,关断角为40.5°,加压200 V,带载8 N·m,转矩滞环宽度为0.05 N·m。对于基于TSF的DITC方法,换相重叠角设为3°。对于本文所提方法,换相重叠角采用图9所示的负载转矩-电机转速-换相重叠角之间的查值表查值得出。所查得的换相重叠角随电机转速实时变化。对于电机来说,更关注的是其转矩输出性能,因此在不同方法进行对比时,重点对其转矩输出性能,特别是转矩脉动大小进行比较。

由于电机在不同速度下的电流和转矩输出特性存在明显不同,为了对电机在全速度范围的控制性能进行对比,本文分别选取了200 r/min,500 r/min,1 000 r/min,1 500 r/min等低速、高速下不同速度下两种控制方法的控制性能进行了综合对比。

4.1 低速200 r/min运行阶段

首先在低速200 r/min下进行实验,如图12所示为在低速200 r/min时的改进前后的实验波形图,其中图12(a)为基于TSF的DITC方法,图12(b)为本文所提方法。

其中基于TSF的DITC的最大总转矩为12.2 N·m,最小转矩为2.6 N·m,转矩平均值为7.5 N·m,根据式(8)计算得出转矩脉动系数等于128.25%;而本文所提方法的最大总转矩为11.2 N·m,最小转矩为4.6 N·m,转矩平均值为7.73 N·m,转矩脉动系数等于85.3%。根



(a) 基于TSF的DITC方法

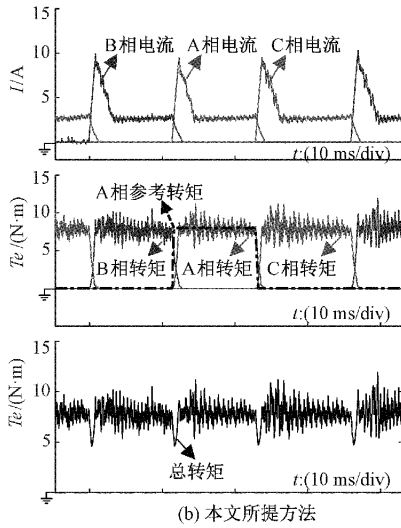


图 12 200 r/min 时带载实验

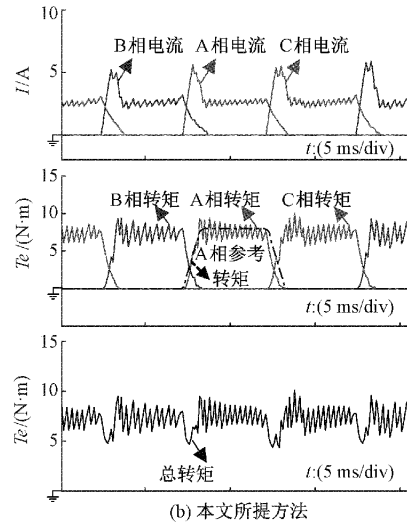


图 13 500 r/min 时带载实验

据此数据可以得出当开关磁阻电机在低速段带载运行时, 本文所提方法相较传统型控制方法具有更小的转矩脉动, 抑制转矩脉动作用更显著。

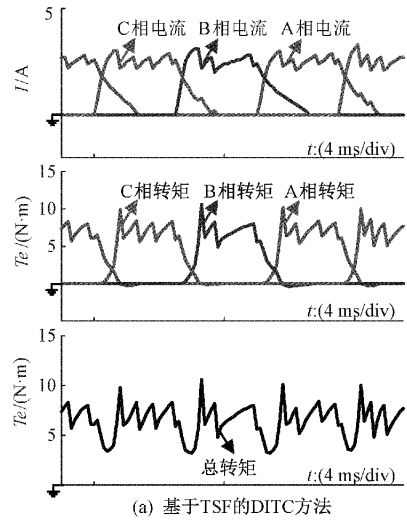
4.2 中低速 500 r/min 运行阶段

其次在中低速 500 r/min 时进行带载实验, 如图 13 所示为在 500 r/min 稳态阶段的实验波形图, 其中图 13(a) 为基于 TSF 的 DITC 方法, 图 13(b) 为本文所提方法。

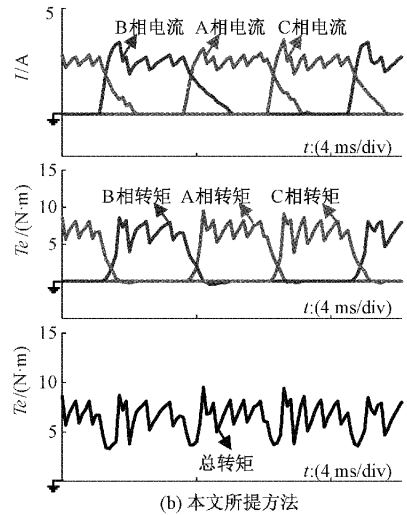
对图中数据进行分析, 基于 TSF 的 DITC 的最大总转矩为 12.1 N·m, 最小转矩为 3.9 N·m, 转矩平均值为 7.24 N·m, 根据式 (8) 计算得出转矩脉动系数等于 113.26%; 而本文所提方法的最大总转矩为 10.1 N·m, 最小转矩为 4.4 N·m, 转矩平均值为 7.18 N·m, 转矩脉动系数等于 79.39%。通过数据对比, 可以得出当开关磁阻电机在中低速带载运行时, 本文所提方法对抑制其转矩脉动具有很显著的作用。

4.3 中高速 1 000 r/min 运行阶段

图 14 所示为开关磁阻电机在带载 8 N·m 时于中高



(a) 基于TSF的DITC方法



(b) 本文所提方法

图 14 1 000 r/min 时带载实验

速 1 000 r/min 稳态阶段的实验波形图, 其中图 14(a) 为基于 TSF 的 DITC 方法, 图 14(b) 为本文所提方法。可以发

现随着速度的升高,由于电机电压指令幅值逐渐饱和,变流器实际开关频率逐渐降低,电机电流和转矩波形从高频脉动逐渐变为更低频的脉动形式。

从图中获知,基于TSF的DITC的最大总转矩为 $10.6\text{ N}\cdot\text{m}$,最小转矩为 $3.2\text{ N}\cdot\text{m}$,转矩平均值为 $6.35\text{ N}\cdot\text{m}$,根据式(8)计算得出转矩脉动系数等于 116.54% ;而本文所提方法的最大总转矩为 $9.5\text{ N}\cdot\text{m}$,最小转矩为 $3.3\text{ N}\cdot\text{m}$,转矩平均值为 $6.38\text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动系数等于 97.18% 。通过对数据进行分析可以得出当SRM在中高速带载运行时,本文所提方法相较传统型控制方法具有更小的转矩脉动。

4.4 高速1500 r/min运行阶段

最后在高速1500 r/min时进行 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 带载实验。图15所示为开关磁阻电机在高速1500 r/min稳态阶段的实验波形图,其中图15(a)为基于TSF的DITC方法,图15(b)为本文所提方法。

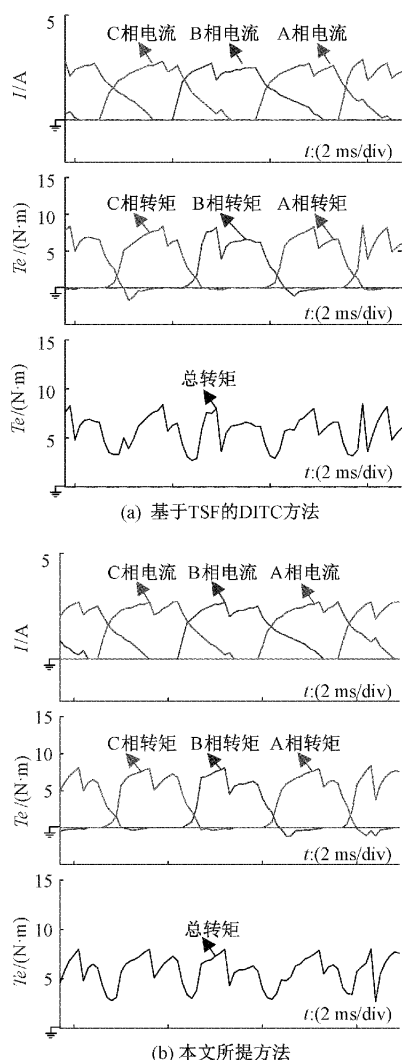


图15 1500 r/min时带载实验

根据图中数据进行分析,基于TSF的DITC的最大总

转矩为 $8.4\text{ N}\cdot\text{m}$,最小转矩为 $2.7\text{ N}\cdot\text{m}$,转矩平均值为 $5.66\text{ N}\cdot\text{m}$,根据式(8)计算得出转矩脉动系数等于 100.77% ;而本文所提方法的最大总转矩为 $8\text{ N}\cdot\text{m}$,最小转矩为 $2.8\text{ N}\cdot\text{m}$,转矩平均值为 $5.72\text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动系数等于 90.86% 。因此,当开关磁阻电机在高速带载运行时,本文所提方法相较传统型控制方法具有更小的转矩脉动,在抑制开关磁阻电机转矩脉动方面作用更加显著。

为了便于比较与分析,将带载实验的数据进行归纳,如表2所示。

表2 实验下转矩脉动对比

转矩参数	$T_{\max}/$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	$T_{\min}/$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	$T_{\text{avg}}/$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	$K_T/$ %	
传统型	低速时	12.2	2.6	7.5	128.25
	中低速	12.1	3.9	7.24	113.26
	中高速	10.6	3.2	6.35	116.54
改进型	高速时	8.4	2.7	5.66	100.77
	低速时	11.2	4.6	7.73	85.3
	中低速	10.1	4.4	7.18	79.39
	中高速	9.5	3.3	6.38	97.18
	高速时	8	2.8	5.72	90.86

通过实验结果表明,本文所提方法相比传统型控制策略在低速、中低速、中高速、高速段都具有明显的抑制开关磁阻电机转矩脉动的效果,进而验证了本文所提方法在抑制开关磁阻电机转矩脉动方面卓有成效。并且与仿真波形前后呼应,充分证明了本文所提方法的可行性和有效性。

5 结 论

本文提出了一种基于换相重叠角实时变化的SRM转矩脉动抑制策略来抑制开关磁阻电机的转矩脉动,使其更加平稳的运行。

在本文所提方法中,通过采集电机运行时实际转矩为零点所对应的电机角度,不断更新计算出换相重叠角,在额定负载范围内,从空载到满载进行多组仿真,将此变化的换相重叠角与相对应的速度值和所加负载值进行离线保存,建立三维查值表,将此查值表代入到传统的基于TSF的直接瞬时转矩控制中,得到本文所设计的系统,使换相重叠角依据电机转速实时变化,抑制了在不同速度段因换相周期及电流变化率的影响带来的转矩脉动问题,最后通过一台 3 kW 、三相12/8极开关磁阻电机为控制对象,在不同速度范围内进行仿真验证,将结果与传统型基于TSF的直接瞬时转矩控制的结果进行了比较,证明本文所提方法能够实现在全速度范围内降低电机转矩脉动幅值,即使在降低幅度最小的高速区也可以使转矩脉动系数降低超过10个百分点。

参考文献

- [1] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2001:7-13.
- [2] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014:1-33.
- [3] 张文港,张小平,李俊乐,等. 基于分段解析建模的开关磁阻电机在线转矩估算方法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(11):163-169.
- [4] 刘攀,陈轩,王文江. 基于反步法的开关磁阻电机电流斩波控制[J]. 电子测量技术,2017,40(10):12-16.
- [5] 张向龙,王军,杨燕翔,等. 基于新型定子极面结构的开关磁阻电机转矩脉动抑制研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(5):80-83.
- [6] KWON C Y, SUNG Y H, SEOP K C. Shape optimization of a switched reluctance motor having 6/4 pole structure for the reduction of torque ripple using response surface methodology[J]. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers B, 2006, 55(12):608-616.
- [7] DESAI P C, KRISHNAMURTHY M, SCHOFIELD N, et al. Novel switched reluctance machine configuration with higher number of rotor poles than stator poles: Concept to implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2):649-659.
- [8] SUN Q, WU J, GAN C, et al. OCTSF for torque ripple minimisation in SRMs [J]. IET Power Electronics, 2016, 9(14):2741-2750.
- [9] 孙庆国,吴建华. 基于转矩分配函数在线修正的开关磁阻电机转矩脉动抑制策略[J]. 电机与控制学报,2017, 21(12):1-8.
- [10] 费晨,颜建虎,汪盼,等. 基于改进的转矩分配函数法的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 电工技术学报,2018, 33(S2):394-400.
- [11] 杨彬,张广明,王德明,等. 基于交叉补偿型转矩分配函数的开关磁阻电机转矩脉动抑制系统设计[J]. 电机与控制应用,2016,43(10):46-52.
- [12] CHITHRABHANU A, VASUDEVAN K. Online compensation for torque ripple reduction in SRM drives[C]. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India), IEEE, 2017.
- [13] HARIKRISHNAN R, FERNANDEZ F M. Improved online torque-sharing-function based low ripple torque control of Switched Reluctance Motor Drives[C]. 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), IEEE, 2017.
- [14] HAMOUDA M, ULLAH Q S, SZAMEL L. Compensation of switched reluctance motor torque ripple based on TSF strategy for electric vehicle applications [C]. 2018 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET), 2018.
- [15] 陶天伟,王军,甘仲权,等. 开关磁阻电机变电流重叠角的 DITC[J]. 微特电机,2017,45(9):49-51,55.
- [16] XUE X D, CHENG K W E, HO S L. Optimization and evaluation of torque-sharing functions for torque ripple minimization in switched reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 9(24): 2076-2090.
- [17] MAKSOUH H A. Torque ripple minimization of a switched reluctance motor using a torque sharing function based on the overlap control technique[J]. Engineering, Technology and Applied Science Research, 2020, 10(2): 5371-5376. DOI: 10.48084/etasr.3389.
- [18] 卿龙,王惠民,葛兴来. 一种高效率开关磁阻电机转矩脉动抑制方法[J]. 电工技术学报,2020, 35(9): 1912-1920.

作者简介

于继飞, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为油气田开发, 海上油田采油工艺及智能化等。

E-mail: yujf2@cnooc.com.cn

隋先富, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为油气田开发、采油工程理论与技术、智能油田等。

E-mail: suixf@cnooc.com.cn

陶明, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动、电机控制。

E-mail: 21121491@bjtu.edu.cn