

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.06.008

## 基于 DITC 的开关磁阻电机软斩波 PWM 控制

蔡燕, 刘慧

(天津工业大学 电气工程学院, 天津 300387)

**摘要:** 针对传统直接瞬时转矩控制(DITC)在每个采样周期下只施加给电机绕组固定的电压,不能根据转矩误差的大小及时调整电机绕组两端电压而造成转矩脉动大的问题,提出了一种软斩波 PWM 控制与双滞环 DITC 控制相结合的控制方法。根据转矩误差的大小及时调整施加在绕组两端的平均电压,并通过重新划分导通区域,根据区域特点制定合适的控制策略,以达到抑制转矩脉动的目的。基于 MATLAB/Simulink 构建系统的仿真模型,比较传统 DITC 控制与新型 PWM-DITC 控制的转矩脉动,并探究不同滞环宽度和开关频率对转矩脉动的影响。仿真结果表明:本文 PWM-DITC 控制方法克服了传统 DITC 控制不能根据转矩误差的大小及时提供给绕组两端合适电压的缺点,有效地抑制了开关磁阻电机的转矩脉动,相比于传统 DITC 控制,转矩脉动降低幅度在 8%~16%。

**关键词:** 开关磁阻电机(SRM); 转矩脉动; 直接瞬时转矩控制(DITC); 软斩波 PWM 控制

中图分类号: TM352

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)05-0055-09

## Soft chopping PWM control of switched reluctance motor based on DITC

CAI Yan, LIU Hui

(School of Electrical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In response to the problem of large torque ripple caused by traditional direct instantaneous torque control (DITC), which only applies a fixed voltage to the winding at each sampling cycle and cannot adjust the voltage at both ends of the motor winding in a timely manner based on the magnitude of torque error, a control method that combines soft chopping PWM control with double hysteresis DITC control is proposed. This method can adjust the average voltage applied to both ends of the winding in a timely manner based on the magnitude of torque error. It also redefines the conduction regions, formulates appropriate control strategies according to the characteristics of each region, and thereby achieves the goal of suppressing torque ripple. A simulation model of the system was constructed based on MATLAB/Simulink, and the torque ripple of the traditional DITC control strategy and the novel PWM-DITC control strategy were compared. The influence of different hysteresis widths and switching frequency torque ripple was explored. The simulation results show that the proposed PWM-DITC control method overcomes the disadvantage of traditional DITC control that cannot timely provide appropriate voltage to both ends of the winding based on the magnitude of torque error, effectively suppressing the torque ripple of the switched reluctance motor (SRM), compared with the traditional DITC control, the torque ripple is reduced by 8%–16%.

**Key words:** switched reluctance motor (SRM); torque ripple; direct instantaneous torque control (DITC); soft chopping PWM control

开关磁阻电机(switced reluctance motor, SRM)因具有结构简单、成本低、启动转矩大、控制方式灵活和对恶劣工作环境适应性好等特点,已广泛应用于电动

汽车<sup>[1-2]</sup>、航空<sup>[3]</sup>和矿山运输等领域。然而,由于开关磁阻电机具有双凸极结构,其输出转矩是定子电流和转子位置的非线性函数,因此,如果没有适当的控制,固

收稿日期: 2024-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777137);天津市应用基础研究多元投入项目(22JCZDJC00930)

通信作者: 蔡燕(1964—),女,博士,教授,主要研究方向为开关磁阻电机驱动、监测及功率变换器。E-mail: caiyan\_tj@163.com

有的转矩脉动会成为 SRM 驱动的主要问题,也会阻碍电机的广泛应用<sup>[4-7]</sup>。因此,如何抑制 SRM 的转矩脉动成为众多学者解决的核心问题。

针对开关磁阻电机转矩脉动大的问题,国内外学者主要采用 2 种方法:一是从电机本体设计入手来抑制转矩脉动,文献[8]主要是通过定子开槽、定子侧添加极靴的方式抑制开关磁阻电机的径向力和转矩脉动;二是根据不同控制需求采用合适的控制策略来抑制转矩脉动,主要依据总期望转矩直接对各相瞬时输出转矩进行调节的直接瞬时转矩控制(direct instantaneous torque control, DITC)<sup>[9]</sup>、对各相电流或磁链进行调节以实现总输出转矩恒定的间接瞬时转矩控制(indirect instantaneous torque control, IITC)<sup>[10-11]</sup>以及将滑模控制(sliding mode control, SMC)<sup>[12-13]</sup>或神经网络控制(neural network control, NNC)<sup>[14-15]</sup>等现代控制理论与转矩控制相结合的方法来实现转矩脉动的抑制。

DITC 直接将瞬时转矩作为被控对象,根据参考转矩和各相瞬时转矩产生的转矩误差生成相应的开关信号,不需要精确控制相电流,简化了控制系统的结构并降低了实现难度。文献[16-17]采用内、外双滞环的 DITC 控制方法,通过相邻两相绕组配合共同生成所需转矩,并通过调节双滞环阈值来实现转矩脉动的抑制。文献[18]提出了一种电流软斩波分段变占空比的控制方法,并根据转速和参考电流拟合出了一个分段变占空比调制公式,以得到最优的电压矢量。文献[19]提出了一种结合 DITC 和脉宽调制的控制方法,对每相占空比进行调整,但存在占空比的选取受参数影响大的问题。文献[20-23]考虑到同一个采样周期只施加固定电压引起转矩脉动大的问题,在 DITC 控制的基础上引入了 PWM 控制方法,具有一定的可行性,但其使用单滞环 DITC 控制,对转矩误差的大小区分能力不足,且制定控制策略时使用硬斩波方式或硬斩波和软斩波结合的方式,最终的结果与期待的结果仍然存在一定的差距。

针对传统 DITC 控制存在的在同一个采样周期不能根据转矩误差的大小给电机绕组提供合适电压的问题,本文提出了一种 PWM 控制与 DITC 控制相结合的控制方法,实现了大转矩误差下的滞环控制和小转矩误差下的 PWM 软斩波控制,优化的控制策略能够在确定的开关频率下根据转矩误差的大小及时调整施加在绕组两端的平均电压,并设计了合适的滞环宽度和开关频率,进一步抑制了 SRM 的转矩脉动。

## 1 传统 DITC 控制策略

### 1.1 传统 DITC 结构

传统 DITC 系统的结构如图 1 所示,主要由转速和转矩内、外双闭环构成。其中:外环通过速度调节器提供 SRM 的参考转矩  $T_{ref}$ ;内环根据转子位置信息和各相电流,通过转矩计算单元模块提供瞬时输出转矩  $T_{est}$ ;  $T_{ref}$  与  $T_{est}$  的偏差  $\Delta T$  作为转矩滞环控制器的输入,转矩滞环控制器根据  $\Delta T$ 、转子位置  $\theta$  和偏差的转移方向选择不同的电平状态,实现总的合成转矩跟踪参考转矩。

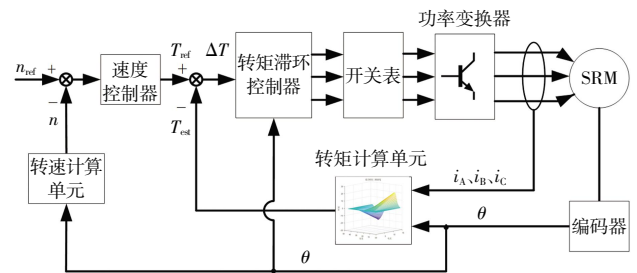


图 1 传统 DITC 系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of traditional DITC system

### 1.2 不对称半桥功率变换器

目前,通常采用不对称半桥功率变换器作为开关磁阻电机绕组和电源进行能量交换的桥梁,其功率变换器拓扑图如图 2 所示。它能提供给 SRM 各相绕组 3 种工作状态,分别为励磁状态“+1”、续流状态“0”和退磁状态“-1”,各工作状态电路如图 3 所示。

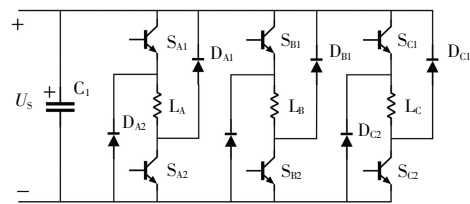


图 2 不对称半桥功率变换器拓扑图

Fig.2 Topology of asymmetric half-bridge converter

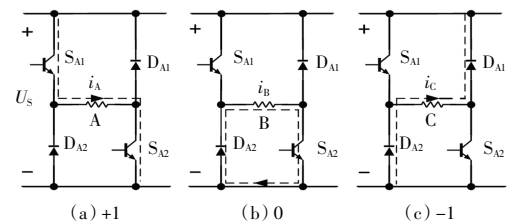


图 3 不对称半桥功率变换器的 3 种工作状态

Fig.3 Three working states of asymmetric half-bridge converter

分别采用  $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$  表示 A 相、B 相、C 相的工作状态。以 A 相为例对 3 种工作状态进行分析。图 3a 为

2 个开关管  $S_{A1}$ 、 $S_{A2}$  都处于导通状态的情况，该相处于励磁状态，记为  $S_A = 1$ ，此时相绕组两端的电压为直流母线电压  $U_{S0}$ 。图 3(b) 为只导通一个开关管  $S_{A2}$  的情况，该相处于续流状态，记为  $S_A = 0$ ，此时下桥臂的二极管  $D_{A2}$  正向导通，相绕组两端的电压为 0。图 3(c) 为 2 个开关管都关断的情况，该相绕组处于退磁状态，记为  $S_A = -1$ ，若此时绕组相电流为零，则该相绕组反向截止；若绕组相电流不为零，则绕组两端的电压为  $-U_{S0}$ 。

### 1.3 SRM 的数学模型

SRM 的瞬时相电压如式(1)所示：

$$U_k = R_k \cdot i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (1)$$

式中： $U_k$  为  $k$  相绕组的电压； $R_k$  为  $k$  相绕组的电阻； $i_k$  为  $k$  相绕组的电流； $\psi_k$  为  $k$  相绕组的磁链。 $\psi_k$  和  $i_k$ 、转子位置  $\theta$  有关，可表达为

$$\psi_k = \psi_k(i_k, \theta) \quad (2)$$

忽略互感， $\psi_k$  可以表示为绕组电感  $L_k$  和电流  $i_k$  的乘积

$$\psi_k = L_k(i_k, \theta) \cdot i_k \quad (3)$$

将式(3)带入式(1)得到具体的电压平衡方程

$$U_k = R_k \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{dL(i_k, \theta)}{dt} \quad (4)$$

式(4)表明，相绕组电压  $U_k$  与相绕组压降、变压器电动势和运动电动势三部分相平衡。

开关磁阻电机在任一运行点处的瞬时电磁转矩根据虚位移原理，得

$$T_e = \left. \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right|_{i=\text{const}} = - \left. \frac{\partial W}{\partial \theta} \right|_{\phi=\text{const}} \quad (5)$$

式中： $W'$  为相绕组的磁共能，与绕组电感满足如下等式

$$W' = \int_0^i L(i, \theta) i di \quad (6)$$

忽略磁路饱和，将式(6)带入式(5)可以得到简化后的电机相绕组瞬时转矩计算公式

$$T(i, \theta) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (7)$$

式(7)通常用于输出转矩的定性分析，但与实际转矩有一定的偏差。本文采用电机静特性测量的方法<sup>[24]</sup>获得 SRM 的电磁特性数据，并根据神经网络建模的方法得到关于角度和电流的三维非线性转矩模型如图 4 所示。考虑到转矩控制的实时性要求，基于所得到的转矩模型采用查表法来获得不同角度下的瞬时输出转矩。

### 1.4 传统 DITC 控制策略

图 5 为三相 12/8 极 SRM 的相电感和相电流示意图。DITC 系统根据转子位置信息依次导通和关断各相

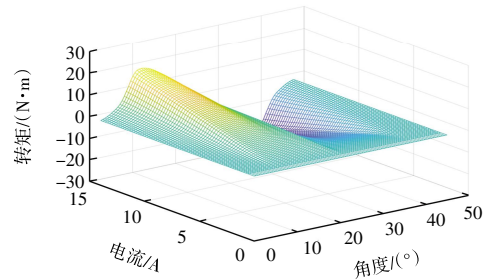


图 4 SRM 的非线性转矩模型

Fig.4 Nonlinear torque model of SRM

绕组，三相绕组轮流导通一次为一个电周期，分别将每 1/3 电周期划分为换相区域和单相导通区域。以 A 相和 B 相换相为例进行分析，从开通相(B 相)的开通角  $\theta_{on,b}$  到关断相(A 相)的定转子对齐位置  $\theta_a$  为换相区域，此区域 A 相和 B 相的电感均在增加，两相同时产生电机所需的输出转矩； $\theta_a$  到下一开通相 (C 相) 的开通角  $\theta_{on,c}$  的区域为 B 相的单相导通区域，此时 A 相进入电感下降区域，B 相仍处于电感上升区域，因此由 B 相单独提供正转矩。

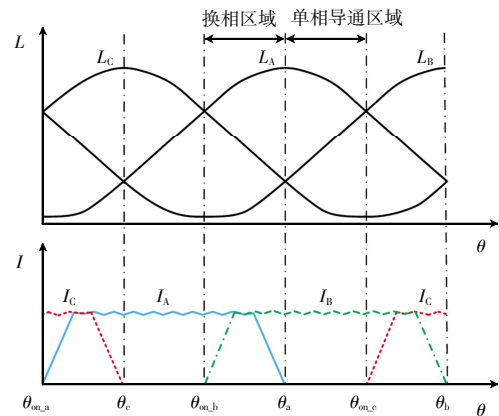


图 5 三相 12/8 极 SRM 的相电感和相电流示意

Fig.5 Schematic diagram of phase inductance and phase current for a three-phase 12/8-pole SRM

基于上述区域划分方式，换相区域和单相导通区域的滞环控制策略如图 6 所示。图 6 中实线和虚线的箭头分别表示转矩误差的 2 个转移方向，纵轴为每相绕组的电平状态，横轴为转矩误差，横轴上设置了内、外双滞环宽度。在 SRM 运行期间，控制策略根据转矩误差的大小和转移方向选择不同的开关状态来调节各相转矩，使总的合成转矩跟踪参考转矩。

传统 DITC 控制在每个采样周期内只提供绕组固定电压，不能根据转矩误差的大小及时调整绕组两端的电压，表现为大的转矩脉动，且直接瞬时转矩控制开关频率难以确定。转矩脉动与滞环宽度强相关，若滞环宽度设计得小，理论上可以提高响应速度、降

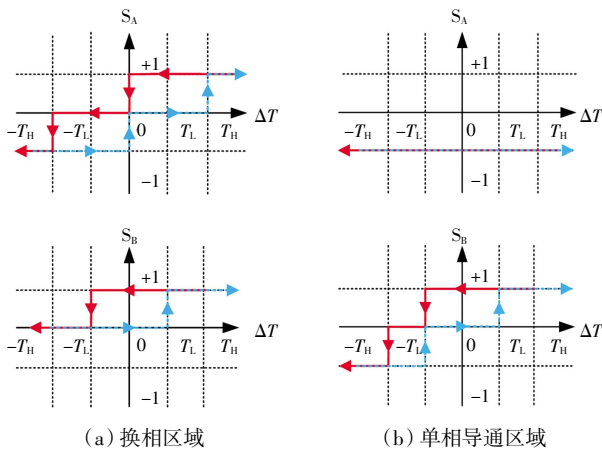


图 6 传统 DITC 各个区域的转矩滞环控制策略

Fig.6 Torque hysteresis control strategies for each region of traditional DITC

低转矩脉动,但对开关管频率的要求大幅提升,实际中可能因为过高的开关频率损坏开关器件;若采用的滞环宽度较大,会削弱系统的控制效果,无法控制转矩在一个滞环带内,这就意味着需要更高的开关频率来减小转矩脉动。

## 2 PWM-DITC 控制系统及控制策略

本文针对传统 DITC 控制存在的问题,提出了一种将软斩波 PWM 控制与双滞环 DITC 控制相结合的新型 PWM-DITC 控制,根据转矩误差的大小及时地调整电机绕组两端的电压,以抑制转矩脉动,并可以克服传统 DITC 控制开关频率不确定的问题。

### 2.1 PWM-DITC 控制系统

PWM-DITC 系统的结构框图如图 7 所示,与传统 DITC 系统不同的是,采用了软斩波 PWM 控制策略与双滞环 DITC 相结合的控制方式,双滞环的设置相比于单滞环更有利于判断转矩误差的大小,相较于硬斩波,软斩波具有转矩脉动小的优点。系统对  $\Delta T$  采样保持一个周期  $T_s$ ,记为  $\Delta T_1$ ,根据  $\Delta T_1$ 、三角载波和转子位置来调节占空比,以改变电机绕组两端的平均电

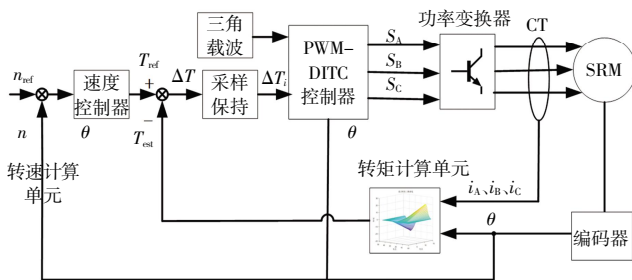


图 7 PWM-DITC 系统的结构框图

Fig.7 Structure diagram of PWM-DITC system

压,实现对输出转矩的控制,达到减小 SRM 转矩脉动的目的。

### 2.2 PWM-DITC 控制策略

由于传统的区域划分方式未考虑关断角对系统相电流以及转矩的影响,本文重新划分导通区域,对 12/8 极 SRM 三相绕组依次导通,以 1/3 电周期为研究域对  $\theta_{on,b}$  至  $\theta_{on,c}$  区域进行分析。以 A 相关断角为界限,将其划分为换相区域和单相导通区域,如图 8 所示。

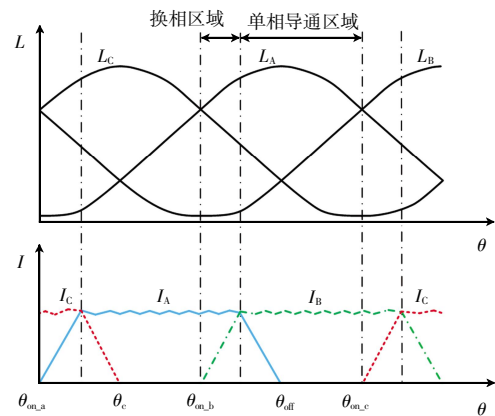


图 8 PWM-DITC 控制策略的区域划分方法

Fig.8 Region division method of PWM-DITC control strategy

在划分区域的基础上,为了获得固定的开关频率,在每个区域都制定了 PWM-DITC 控制策略。A 相关断角至 C 相开通角为单相导通区域,该区域的控制策略与传统 DITC 单相导通区域的策略类似。B 相在滞环阈值  $-T_l$  和  $T_l$  构成的内滞环内根据转矩误差的大小来实时调整占空比,而将退磁状态设置在滞环阈值  $-T_H$  和  $-T_L$  构成的外滞环; B 相开通角至 A 相关断角为换相区域。此区域 A 相电感较大,能产生较大的转矩, A 相为主要的转矩输出相, B 相相电感较小,主要用来建立相电流,并且 B 相即将进入单相导通区域,为了避免较大的波动应尽量避免其工作在退磁状态。即将关断相(A 相)和最新开通相(B 相)根据转矩误差的大小,应提供给绕组不同的电压。因此,分别制定对应的控制策略如图 9 和图 10 所示。 $T_H$  和  $-T_H$  为设置的滞环带区域,  $S_A$ 、 $S_B$  为给出的功率变换器的驱动指令。

A 相-即将关断相:

$$S_A = \begin{cases} "+1" & \Delta T_1 > T_L \\ "+1, 0" & 0 < \Delta T_1 \leq T_L \\ "0, -1" & -T_H < \Delta T_1 \leq 0 \\ "-1" & \Delta T_1 \leq -T_H \end{cases} \quad (8)$$

当采样后的转矩误差  $\Delta T_1 > T_L$ , 可知即将关断相的输出转矩能力不足,系统需要增加转矩,应该输出 "+1" 状态,进入励磁状态满足系统要求;当  $\Delta T_1 < -T_H$ ,

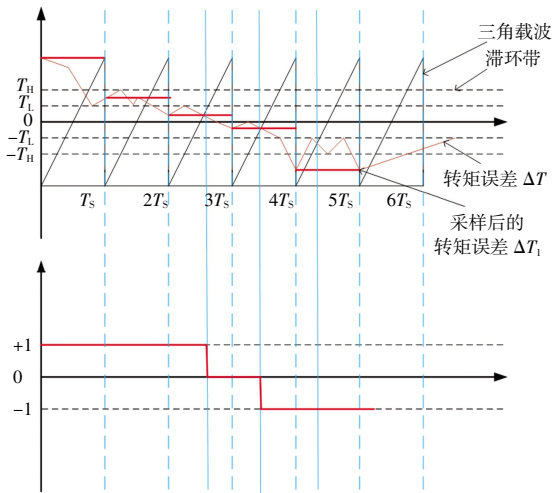


图 9 即将关断相控制策略

Fig.9 Diagram of turn-off phase control strategy

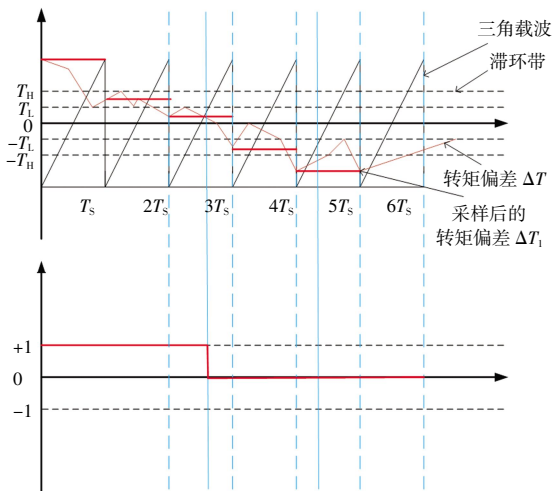


图 10 最新开通相控制策略

Fig.10 Diagram of turn-on phase control strategy

此时输出转矩过大,应该尽量输出“-1”退磁状态;当  $\Delta T_1 \in (0, T_L)$  时,可知三相输出转矩不足,根据转矩误差的大小“+1”状态和“+0”状态进行切换,提供所需的转矩。其中:当  $\Delta T_1 >$  三角载波调制信号时,绕组施加“+1”状态;当  $\Delta T_1 \in (-T_H, 0)$  时,可知输出转矩有小幅超量,此时,根据转矩误差的大小采用“0”状态和“-1”状态切换的方式来减小转矩;当  $\Delta T_1 >$  三角载波调制信号时,绕组施加零电压。

B 相-最新开通相:

$$S_B = \begin{cases} \text{“+1”} & \Delta T_1 > T_L \\ \text{“+1, 0”} & -T_L < \Delta T_1 \leq T_L \\ \text{“0”} & \Delta T_1 \leq -T_L \end{cases} \quad (9)$$

当采样后的转矩误差  $\Delta T_1 > T_L$ , 可知输出转矩能力应该增加,输出“+1”状态,使得输出转矩增加;当  $\Delta T_1 < -T_L$ , 可知输出转矩过大,系统应该减小转矩的输

出,绕组工作在“0”状态;当  $\Delta T_1 \in (-T_L, T_L)$  时,根据转矩误差的大小“+1”状态和“0”状态之间切换来增加输出转矩。

### 2.3 控制参数的选取

合理选择控制参数在电机控制中至关重要,本文主要对角度控制参数和滞环宽度进行设计。

#### 2.3.1 角度控制参数的设定

角度控制参数的设定在整个导通过程中起着关键作用,因此,在制定新型控制策略的基础之上,还需进行角度控制参数的优化设计,以实现在各种不同的转速和负载等运行条件下抑制转矩脉动的目的。

转速为 400 r/min 且关断角为  $19.5^\circ$  时,换相区域三相电流、电压、转矩误差和三相合成转矩波形图如图 11 所示。关断角  $\theta_{off}$  为换相区域和单相导通区域的分界点,是关断相退磁的位置。当  $\theta_{off}$  过于靠后时,会导致相电流延伸至电感下降区域,从而产生负转矩;当  $\theta_{off}$  过于靠前,由于关断相仍具有一定的转矩输出能力,会导致输出转矩突然减小,如图 11 中区域 N 所示;此外,关断相过早地关断,会使得输出转矩减小,必须要求开通相输出更大的转矩,导致开通相出现较大的峰值电流,如图 11 中区域 M 所示。因此,  $\theta_{off}$  存在一个最优角度,不宜过于靠前也不宜过于靠后。

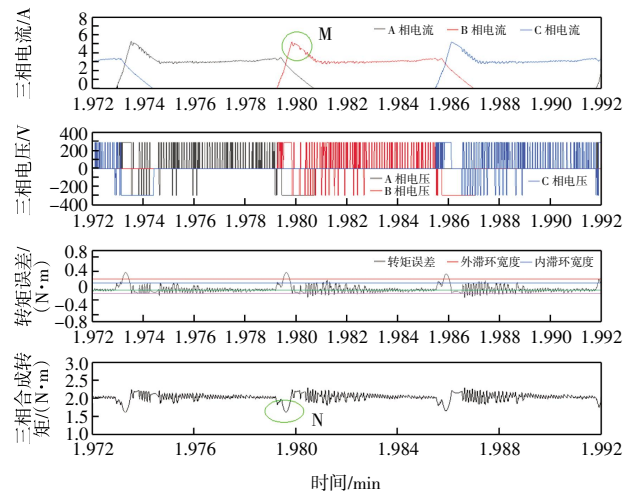


图 11 转速为 400 r/min 且关断角为  $19.5^\circ$  时的波形

Fig.11 Simulation waveforms at 400 r/min speed and  $19.5^\circ$  turn-off angle

为了提高优化速率,应排除一些非最优结果的参数组合,以缩小搜索范围。为了确保换相区域的平滑转矩过渡,关断相的关断角应设置在开通相转子非对齐位置之后,即设置最小关断角为  $15^\circ (\theta_{off}(\min))$ , 另外,开通相应关断相关断之前开通,所以存在最小的导通角  $15^\circ (\theta_d(\min))$ 。通过角度遍历寻优控制参数,图 12 展示了通过搜索算法得出的开通角和关断角的

优化结果。

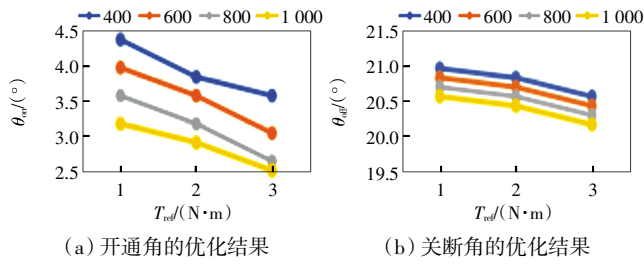


图 12 开通角和关断角的优化结果

Fig.12 Optimization results of turn-on angle and turn-off angle

2.3.2 滞环宽度的设定

滞环宽度的选取对于转矩脉动有很大的影响,转矩脉动可由式(10)进行描述:

$$K = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{av}} \quad (10)$$

式中:  $T_{max}$ 、 $T_{min}$  和  $T_{av}$  分别表示最大瞬时转矩、最小瞬时转矩和平均转矩。本文根据式(10)选取  $T_H$  值,期待转矩脉动在 20%左右,选取  $T_H$  为  $T_{av}/10$ ,  $T_{av}$  的值等于参考转矩。

3 仿真验证

为了验证所提出的新型 PWM-DITC 控制方法的可行性,以一台 1.1 kW 三相 12/8 极 SRM 作为样机开展研究,其参数如表 1 所示。基于 MATLAB/Simulink 环境构建了控制系统的仿真模型,通过仿真比较了传统 DITC 控制与新型 PWM-DITC 控制对转矩脉动的抑制效果,并基于 2 种控制进行了滞环宽度和开关频率对转矩脉动的影响研究。

表 1 电机主要参数

Tab.1 Parameters of motor

参数	数值	参数	数值
额定电压/V	295	相数	3
额定功率/kW	1.1	定/转子极数	12/8
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 000	绕组电阻/ $\Omega$	3.3

3.1 对转矩脉动的抑制效果

图 13 和图 14 分别为  $T_H = 0.2$ 、转速为 400 r/min 且负载为 2 N·m 时传统 DITC 控制与新型 PWM-DITC 控制的仿真波形。图中从上到下分别为三相电流、三相电压、转矩误差、各相转矩和三相合成转矩。

由图 13 中红色椭圆圈区域可以看出,电机运行在低速时,传统 DITC 控制未能根据转矩误差的大小对施加在绕组两端的电压进行调节,导致合成转矩有

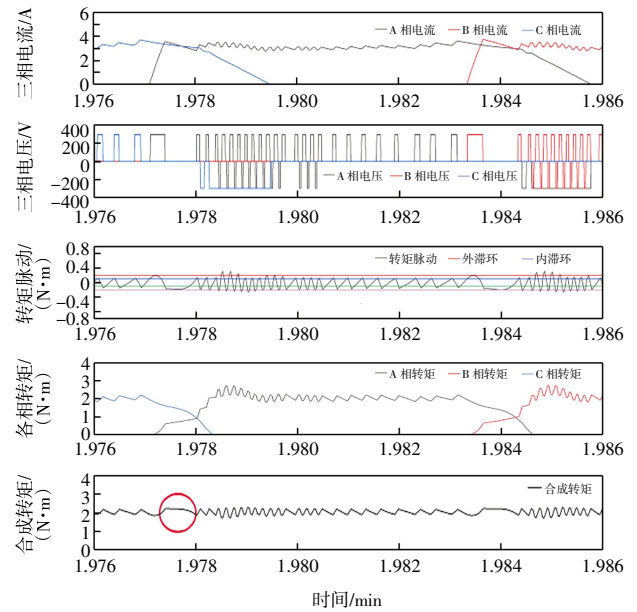


图 13 转速为 400 r/min 且负载为 2 N·m 时传统 DITC 控制仿真波形

Fig.13 Traditional DITC control simulation waveform when speed is 400 r/min and load is 2 N·m

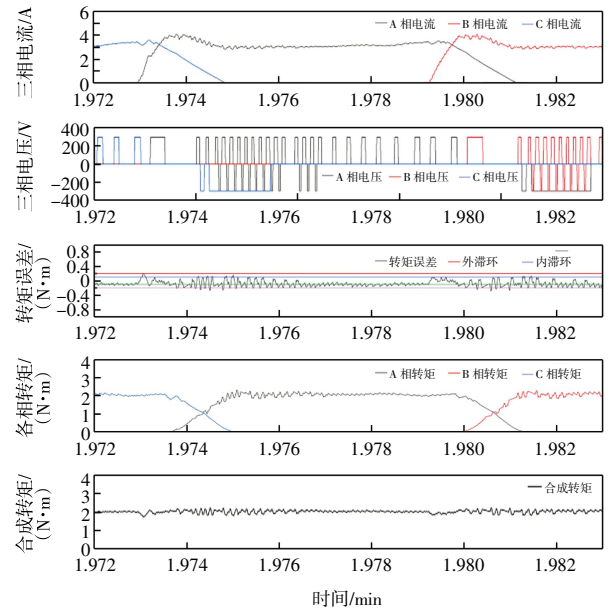


图 14 转速为 400 r/min 且负载为 2 N·m 时 PWM-DITC 控制仿真波形

Fig.14 PWM-DITC control simulation waveform when speed is 400 r/min and load is 2 N·m

明显的向上波动,而本文提出的 PWM-DITC 控制根据转矩误差的大小改变占空比,以改变绕组两端的平均电压,可以有效减小转矩脉动。仿真得到 PWM-DITC 控制和传统 DITC 的转矩脉动分别为 23.5%和 31.5%,PWM-DITC 控制的转矩脉动比传统 DITC 控制降低了 8%。

### 3.2 滞环宽度对转矩脉动的影响

电机转速为 600 r/min 且负载为  $2 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,不同滞环宽度下传统 DITC 控制与本文 PWM-DITC 控制的转矩脉动如表 2 所示。

表 2 不同滞环宽度下传统 DITC 控制和 PWM-DITC 控制的转矩脉动

Tab.2 Torque ripple of traditional DITC control and PWM-DITC control under different hysteresis widths

外滞环/ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	内滞环/ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	传统 DITC 转矩脉动/ %	PWM-DITC 转矩脉动/ %
0.400	0.200	37.6	30.4
0.350	0.175	36.6	27.8
0.300	0.150	36.5	26.1
0.250	0.125	36.2	24.2
0.200	0.100	35.2	23.6
0.150	0.075	35.5	25.1

由表 2 可以看出,在一定范围内,滞环宽度越小,转矩脉动越小,但当滞环宽度小于某一个值时,转矩脉动反而增大,因此,并不是滞环宽度越小抑制转矩脉动的效果越好,应合理地选择滞环宽度。当  $T_H$  为 0.20 时,转矩脉动抑制效果趋于理想,也验证了本文 2.3.2 节对滞环宽度设定的合理性。对比可知,PWM-DITC 控制的转矩脉动比传统 DITC 控制降低了 11.6%。

### 3.3 开关频率对转矩脉动的影响

电机转速为 400 r/min 且负载为  $2 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,不同开关频率下传统 DITC 控制和 PWM-DITC 控制的转矩脉动情况如表 3 所示。

表 3 在不同开关频率下传统 DITC 控制和 PWM-DITC 控制的转矩脉动

Tab.3 Torque ripple of traditional DITC control and PWM-DITC control under different switching frequency

采样周期/ $\mu\text{s}$	开关频率/ kHz	传统 DITC 转矩脉动/ %	PWM-DITC 转矩脉动/ %
10.0	100	23.8	22.8
12.5	80	24.5	23.2
20.0	50	25.8	23.3
25.0	40	28.5	23.4
50.0	20	31.5	23.0
100.0	10	58.9	33.7

由表 3 可知,对比 2 种不同方法下的转矩脉动,开关频率较高时,传统 DITC 控制可以很好地抑制转矩脉动,但随着开关频率降低,开关周期内同一个固定工作状态作用的时间过长,不能合理地根据转矩误差的大小施加给绕组两端合适的电压,且传统 DITC 控

制很容易受到开关频率的影响;相反,PWM-DITC 控制能够根据转矩误差和三角载波调制信号及时地调整绕组两端的平均电压,有效地抑制 SRM 的转矩脉动,且 PWM-DITC 控制受采样周期的影响较小。在选取开关频率时考虑了 IGBT 所承受的最大开关频率以及算法在每个控制时间内执行需要的时间,因此,仿真中开关频率限制在 20 kHz。

### 3.4 转速和负载对转矩脉动的影响

在不同转速下,负载分别为  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$  和  $2 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,传统 DITC 控制与 PWM-DITC 控制的转矩脉动情况如表 4 所示。

表 4 不同转速、不同负载下的传统 DITC 控制和 PWM-DITC 控制的转矩脉动

Tab.4 Torque ripple of traditional DITC control and PWM-DITC control under different speeds and loads

转速/ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	负载/ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	传统 DITC 转矩脉动/ %	PWM-DITC 转矩脉动/ %
400	1	40.0	33.0
600	1	43.1	33.1
800	1	49.9	34.1
1 000	1	52.3	35.7
400	2	31.5	23.5
600	2	35.2	23.6
800	2	36.0	24.2
1 000	2	36.1	24.7

由表 4 不难看出,同一个负载下,随着转速的提升,转矩脉动会有一定的上升,并且 PWM-DITC 控制的转矩脉动皆低于传统 DITC 控制,在低、中速轻载阶段的转矩脉动抑制效果尤其显著,电机转速为 800 r/min 且负载为  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,相比于传统 DITC 控制,本文所提出的 PWM-DITC 控制的转矩脉动降低了 15.8%。同时,新型 PWM-DITC 控制的转矩脉动受转速和负载的影响小,可以平滑地输出转矩。

## 4 结论

针对传统 DITC 控制在每个采样周期下只施加给电机绕组固定的电压,不能根据转矩误差的大小及时调整电机绕组两端电压造成转矩脉动大的问题,本文提出了一种新型的 PWM-DITC 控制方法,该控制方法可以根据转矩误差的大小及时地提供给电机绕组两端合适的电压,以抑制转矩脉动。本文基于 MATLAB/Simulink 构建了电机控制系统的仿真模型,就传统 DITC 控制与新型 PWM-DITC 控制的转矩脉动进行了比较分析,并进行了滞环宽度和开关频率对转矩脉动的影响研究。仿真结果表明:电机在不同工况下使用

PWM-DITC 控制策略的转矩脉动皆低于传统 DITC 控制,降低幅度在 8%~16%左右。

#### 参考文献:

- [1] GAAFAR M A, ABDELMAKSOU D A, ORABI M, et al. Switched reluctance motor converters for electric vehicles applications: Comparative review[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(3): 3526–3544.
- [2] SHAH V, PAYAMI S. Fully integrated multilevel power converter for SRM drive with charging capabilities (G2V) for electric vehicle application[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2023, 4(1): 198–208.
- [3] YANG C Y, SONG S J, LIU C Y, et al. Development of high voltage switched reluctance starter/generator system for more electric aircraft[C]//2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Helsinki, Finland: IEEE, 2023: 1–6.
- [4] 范盼飞, 张团善, 杨斌, 等. 开关磁阻电机控制系统设计与仿真[J]. *西安工程大学学报*, 2017, 31(1): 88–94.  
FAN P F, ZHANG T S, YANG B, et al. Design and simulation of switched reluctance motor control system[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2017, 31(1): 88–94(in Chinese).
- [5] LI S F, ZHANG S, HABETLER T G, et al. Modeling, design optimization, and applications of switched reluctance machines: A review[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(3): 2660–2681.
- [6] YAN W J, CHEN H, LIAO S, et al. Design of a low-ripple double-modular-stator switched reluctance machine for electric vehicle applications[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 1349–1358.
- [7] 胡子慧. 大功率开关磁阻起动/发电系统控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.  
HU Z H. Research on control strategy of high power switched reluctance starting/generating system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023(in Chinese).
- [8] 黄朝志, 石王丰, 郭桂秀, 等. 基于转矩脉动和径向力的定子极形优化[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(6): 98–106.  
HUANG C Z, SHI W F, GUO G X, et al. Optimization of stator pole shape based on torque ripple and radial force[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(6): 98–106(in Chinese).
- [9] 孙建忠, 李默竹, 孙斐然. 开关磁阻电机的直接瞬时转矩控制研究[J]. *电源学报*, 2012, 10(2): 21–24.  
SUN J Z, LI M Z, SUN F R. Research on direct instantaneous torque control for switched reluctance motor[J]. *Journal of Power Supply*, 2012, 10(2): 21–24(in Chinese).
- [10] RANA A K, RAVI TEJA A V. A mathematical torque ripple minimization technique based on a nonlinear modulating factor for switched reluctance motor drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(2): 1356–1366.
- [11] 李孟秋, 高天, 朱慧玉, 等. 基于转矩分配函数的开关磁阻电机预测转矩控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(9): 123–129.  
LI M Q, GAO T, ZHU H Y, et al. Predictive torque control of switched reluctance motor based on torque sharing function[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(9): 123–129(in Chinese).
- [12] DHALE S B, MOBARAKEH B N, NALAKATH S, et al. Digital sliding mode based model-free PWM current control of switched reluctance machines[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(9): 8760–8769.
- [13] YIN Y H. Optimal direct instantaneous torque control for SRMs using advanced sliding mode controller[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(23): 12177.
- [14] SUN X D, XIONG Y F, YANG J F, et al. Torque ripple reduction for a 12/8 switched reluctance motor based on a novel sliding mode control strategy[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(1): 359–369.
- [15] 党选举, 李亚星. 基于机理特性的 SRM 神经网络电感模型构建及转矩脉动控制[J]. *微电机*, 2022, 55(9): 39–44, 63.  
DANG X J, LI Y X. Construction of neural network inductance model based on mechanism characteristics and SRM torque ripple suppression control[J]. *Micromotors*, 2022, 55(9): 39–44, 63(in Chinese).
- [16] 蔡燕, 居春雷, 王浩楠, 等. 开关磁阻电机的新型直接瞬时转矩控制方法及其高效率运行[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(18): 4625–4637.  
CAI Y, JU C L, WANG H N, et al. A new direct instantaneous torque control method of switched reluctance motor and its high efficiency operation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(18): 4625–4637(in Chinese).
- [17] 宋士华. 基于多电平电路的开关磁阻电机 DITC 转矩脉动抑制研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2022.  
SONG S H. Research on torque ripple suppression of switched reluctance motor DITC based on multilevel circuits[D]. Tianjin: Tiangong University, 2022(in Chinese).
- [18] 马铭遥, 袁克湘, 杨晴晴, 等. 基于电流软斩波的开关磁阻电机分段 PWM 变占空比控制[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(18): 5582–5589.  
MA M Y, YUAN K X, YANG Q Q, et al. Subsection PWM variable duty cycle control of switched reluctance motor based on current soft chopping[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(18): 5582–5589(in Chinese).
- [19] 朱叶盛, 章国宝, 黄永明. 基于 PWM 的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(7): 31–39.  
ZHU Y S, ZHANG G B, HUANG Y M. PWM-based direct

- instantaneous torque control of switched reluctance machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 31-39(in Chinese).
- [20] 许爱德, 黄乐鹏, 李倩妮, 等. 基于高转矩电流比的开关磁阻电机 DITC 优化控制[J]. 电气传动, 2021, 51(5): 64-69. XU A D, HUANG L P, LI Q N, et al. Direct instantaneous torque control optimization of switched reluctance motor for high torque per ampere ratio[J]. Electric Drive, 2021, 51(5): 64-69(in Chinese).
- [21] WANG H J, LEE D H, AHN J W. Torque ripple reduction of SRM using advanced direct instantaneous torque control scheme[C]//2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Seoul, Korea:IEEE, 2007: 492-496.
- [22] 程勇, 曹晓晓, 张怡龙. 开关磁阻电机滞环-脉宽调制直接瞬时转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 74-82. CHENG Y, CAO X X, ZHANG Y L. Hysteresis-PWM direct instantaneous torque control of switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(8): 74-82(in Chinese).
- [23] WANG S H, HU Z H, CUI X P. Research on novel direct instantaneous torque control strategy for switched reluctance motor[J]. IEEE Access, 2020, 8:66910-66916.
- [24] CAI Y, WANG C C, JU C L, et al. Research on torque model based on pretreatment method for switched reluctance motor [C]//2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Wuhan, China: IEEE, 2018: 1881-1885.

#### 本文引文格式:

蔡燕, 刘慧. 基于 DITC 的开关磁阻电机软斩波 PWM 控制[J]. 天津工业大学学报, 2025, 44(6): 55-63.

CAI Y, LIU H. Soft chopping PWM control of switched reluctance motor based on DITC [J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(6): 55-63(in Chinese).

(责任编辑:孙广宇)

(上接第 54 页)

- 制备及染料[J]. 天津工业大学学报, 2023, 42(3):1-6. ZHANG Y F, CHEN B Q, ZHANG J. Preparation and dye/salt separation of cellulose acetoacetate loose nanofiltration membrane[J]. Journal of Tiangong University, 2023, 42(3):1-6 (in Chinese).
- [25] 郭紫荆, 贾辉, 石晓雪, 等. 高炉粉尘基臭氧催化微电解填料对垃圾渗滤液的处理:与不同填料对比研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(7): 389-397. GUO Z J, JIA H, SHI X X, et al. Treatment of landfill leachate with blast furnace dust-based ozone-catalyzed micro-electrolysis filler; A comparative study with different fillers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(7):389-397(in Chinese).

#### 本文引文格式:

王越, 赵蓉, 郭佳然, 等. 高炉粉尘电极对印染废水的电絮凝降解[J]. 天津工业大学学报, 2025, 44(6): 48-54, 63.

WANG Y, ZHAO R, Guo J R, et al. Electrocoagulation degradation of dyeing wastewater using blast furnace dust electrodes[J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(6): 48-54, 63(in Chinese).

(责任编辑:程晓英)