

基于十二扇区 DITC 的周向错角开关磁阻电机换相转矩跌落抑制

周云红, 胡涵章*, 郑 涵, 徐 磊, 王琴彬
(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

Twelve-Sector DITC Based Commutation Torque Drop Suppression for Circumferential Staggered Switched Reluctance Motors

ZHOU Yunhong, HU Hanzhang*, ZHENG Han, XU Lei, WANG Chenbin

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: [Objective] Circumferential staggered switched reluctance motor (SRM) utilizes auxiliary winding to compensate for torque drop in the main winding during commutation, which is of positive significance in suppressing the inherent torque ripple problem of SRM. Sector division is a critical factor affecting the efficacy of direct instantaneous torque control (DITC). [Methods] Firstly, the torque ripple suppression effect as well as the switching losses were considered comprehensively, and the turn-on and turn-off angles of the auxiliary winding were optimized by parametric methods. Then, a twelve-sector DITC strategy was developed by introducing the main winding advance conduction mechanism. Finally, a field-circuit coupled co-simulation model of circumferential staggered SRM was established to compare the operating performance between the nine-sector DITC strategy and twelve-sector DITC strategy with optimized turn-on and turn-off angles. [Results] The simulation results showed that compared with the nine-sector DITC strategy, the twelve-sector DITC strategy with optimized turn-on and turn-off angles significantly reduced the torque ripple coefficient by about 84%, and the torque per ampere also improved considerably by about 54%. Moreover, the main winding current of the demagnetized phase exhibited no current spike at the end of commutation, thereby alleviating its torque

output burden during commutation and ensuring smoother current and torque transitions throughout the process.

[Conclusion] The proposed twelve-sector DITC strategy effectively reduces the torque ripple during the commutation process of circumferential staggered SRM and enhances the torque per ampere and the system operating efficiency. It significantly enhances the smoothness of current profiles in the commutation region and the steady-state performance of the motor.

Key words: circumferential staggered switched reluctance motor; direct instantaneous torque control; twelve-sector; torque ripple suppression

摘 要:【目的】周向错角开关磁阻电机(SRM)利用辅助绕组补偿换相过程中的主绕组转矩跌落,对抑制 SRM 固有的转矩脉动问题具有积极意义。扇区划分是影响直接瞬时转矩控制(DITC)效果的关键因素之一。【方法】首先,综合考虑转矩脉动抑制效果以及开关损耗,通过参数化方法优化了辅助绕组的开通角和关断角。然后,引入主绕组提前导通机制,制定了十二扇区 DITC 策略。最后,构建了周向错角 SRM 的场路耦合联合仿真模型,对比采用九扇区 DITC 策略和开通关断角优化后的十二扇区 DITC 策略的运行效果。【结果】仿真结果表明,相较于九扇区 DITC 策略,采用开通关断角优化后的十二扇区 DITC 策略大幅降低了转矩脉动系数,降幅约为 84%;转矩电流比也有较大提高,提升幅度约为 54%。并且,退磁相主绕组电流在在换向结束时不会出现电流尖峰,减小了在换相过程中的转矩出力负担,使换相期间的电流和转矩更加平稳。【结论】所提十二扇区 DITC 策略有效降低了周向错角 SRM 换相过程中的转矩脉动,同时提升了转矩电流比和系统运行效率,显著改善了电机在换相区的电流平滑性及稳态运行性能。

基金项目: 南京工程学院科技创新基金项目(YKJ202208); 江苏省重点研发计划项目(BE2021094); 国家自然科学基金(51977103)

Science and Technology Innovation Fund of Nanjing Institute of Technology (YKJ202208); Key R&D Plan Project in Jiangsu Province (BE2021094); National Natural Science Foundation of China (51977103)

关键词: 周向错角开关磁阻电机; 直接瞬时转矩控制; 十二扇区; 转矩脉动抑制

0 引言

开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor, SRM) 因其制造成本低廉、结构简单、恒功率区域宽以及容错性高, 在工业自动化、家用电器和电动汽车等领域备受关注^[1-2]。由于 SRM 双凸极结构的特点以及脉冲式的供电方式, 在运行过程中会伴随着较大的转矩脉动^[3-5]。为降低运行过程中的转矩脉动, 进一步提高电机的工作效率和转矩密度, 多定子、多转子结构的电机越来越受重视^[6-9]。

对于新型 SRM 的设计, 学者们通常采用优化结构参数和改进结构来提升电机性能^[10-13]。有学者在传统单定子 SRM 的转子内部增设一个内定子, 设计了一种双定子开关磁阻电机 (Double Stator SRM, DSSRM), DSSRM 的结构能明显提高机电能量转换效率, 使其具有成为下一代牵引电机的巨大潜力^[14-16]。文献[17]对转子结构进行设计优化, 通过在转子交替段的旋转方向上进行角度位移来减小转矩脉动。文献[18]采用 U 型分块定子结构, 优化内外定子磁场的极性分布, 使内外定子磁场解耦。文献[19]对三种不同的定子绕组结构进行分析, 试验比较得出单齿绕组和整距绕组结构提升了电机的转矩性能。文献[20]根据电机运行条件对极弧组合进行约束, 并提出了一种转矩评估原理来选择产生较高转矩的最佳极弧组合。

除了优化 SRM 的结构, 国内外学者对 SRM 控制策略也进行了改进, 如直接瞬时转矩控制 (Direct Instantaneous Torque Control, DITC)、滑模控制、预测控制以及转矩分配函数控制等^[21-24]。文献[25]提出了一种基于自适应终端滑模控制的改进型 DITC, 有效降低了转矩脉动, 提高了系统的稳定性和响应速度。文献[26]从 SRM 的低电感区非线性模型和电动力学方程出发, 提出了一种优化开通角和关断角的解析方法, 推导出最佳开通角, 提高了电机低速和高速工况下的效率。文献[27]针对 SRM 严重的非线性特性问题, 采用小波神经网络方法建立了 SRM 的非线性仿真模

型, 分别以最大转矩、最大输出和最优效率为目标优化了三种情况下的开通、关断角。文献[28]对定子磁链扇区进行了细分, 并通过预测控制选择最优电压矢量, 有效降低了转矩脉动。文献[29-30]提出一种基于扇区划分的直接转矩控制策略, 设计空间电压矢量表, 仿真结果证明该策略能有效抑制转矩脉动。

综上所述, 优化开通、关断角能减少换相时造成的转矩跌落, 扇区划分能提升控制精度, 两者均能有效降低转矩脉动。本文在文献[16]的基础上, 对周向错角 SRM 的辅助绕组开通角和关断角进行优化, 并引入主绕组提前导通机制, 设计了十二扇区 DITC 策略, 并在 Maxwell-Simplorer 场路耦合联合仿真环境下验证了所提控制方法的有效性和优越性。

1 周向错角 SRM 的基本结构及运行原理

周向错角 SRM 结构如图 1 所示, 其包含内、外两个定子, 内、外定子之间存在周向错角, 外定子极上绕制 A、B、C 三相主绕组, 内定子极上绕制 a、b、c 三相辅助绕组。径向相对的四个主绕组极 $A_1 \sim A_4$ 上的主绕组依次串接构成 A 相, 其余 B、C、a、b、c 相绕组的分布及连接方式与 A 相类似。主绕组与辅助绕组的电磁路径相互独立, 辅助绕组用于弥补主绕组换相期间的转矩跌落。

定义转子外凸极与 A 相定子极重合时为转子位置角 θ 的 0° 位置, 转子逆时针旋转方向为正方向, 绘制该电机的主绕组自感曲线 L_A 、 L_B 、 L_C 与

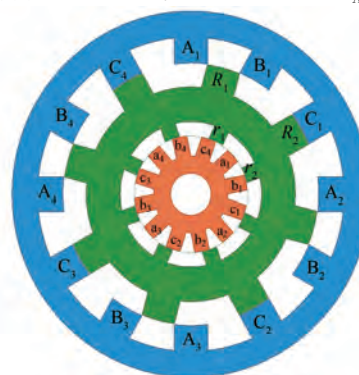


图 1 周向错角 SRM 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the circumferential staggered SRM structure

辅助绕组自感曲线 L_a 、 L_b 、 L_c ,如图 2 所示。在 $\theta = 0^\circ$ 处,主绕组需要由 A 向 B 换相;在 $\theta = -15^\circ$ 处,主绕组需要由 C 向 A 换相;在 $\theta = 15^\circ$ 时,主绕组需要由 B 向 C 换相。将 $\theta = -15^\circ$ 、 0° 、 15° 记作主绕组的理想换相角。

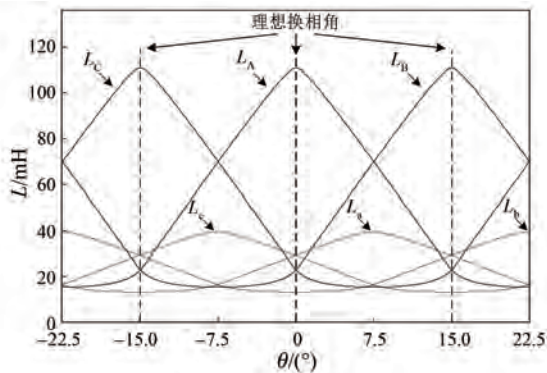


图 2 电感-转子位置角曲线

Fig. 2 Inductance-rotor position angle curves

2 辅助绕组的开通角及关断角

在弥补主绕组换相期间的转矩脉动时,辅助绕组无需在其整个电感上升区间均保持导通,为了降低开关器件的通断次数与开关损耗,辅助绕组导通时间应尽可能短。鉴于辅助绕组从开通至电流完全建立需要一定时间,因此其导通区间又不能太小,否则无法有效提供辅助转矩,使转矩弥补效果不佳。综合考虑转矩脉动抑制效果以及开关损耗,本节对辅助绕组开通角与关断角进行参数化寻优。

2.1 辅助绕组开通角

辅助绕组开通角应超前于相应的主绕组理想换相角,故首先分别将 a、b、c 三相辅助绕组的开通角 θ_{aon} 、 θ_{bon} 、 θ_{con} 缩小在 $(-7.5^\circ, 0^\circ)$ 、 $(7.5^\circ, 15^\circ)$ 、 $(-22.5^\circ, -15^\circ)$ 范围内。

在 $(-7.5^\circ, 0^\circ)$ 范围内,对 θ_{aon} 进行参数化仿真分析,依次将 θ_{aon} 设置为 -7.5° 、 -6.5° 、 -5.5° 、 -4.5° 、 -3.5° 、 -2.5° 、 -1.5° 和 -0.5° ,对比 a 相辅助绕组电流 i_a 的建立情况,如图 3 所示。

由图 3 可知, θ_{aon} 越小,在 $\theta = 0^\circ$ 处, a 相绕组中建立的电流越大。由于绕组所提供的转矩的大小与绕组中电流的平方成正比,仅从更好地弥补主绕组转矩跌落的角度分析,辅助绕组中的电流在合理范围内越大越好,因此将 θ_{aon} 确定为

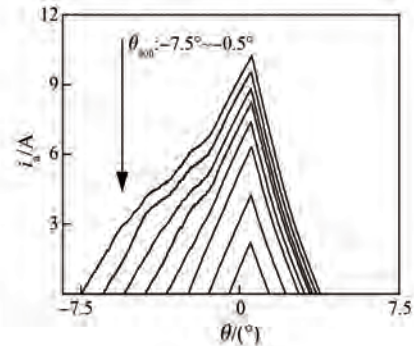


图 3 a 相辅助绕组电流的建立情况

Fig. 3 Establishment of auxiliary winding current of phase a

-7.5° ,同理 θ_{bon} 、 θ_{con} 分别确定为 7.5° 、 -22.5° 。

2.2 辅助绕组关断角

主绕组换相后,新开通相主绕组中电流未能完全建立,且刚关断相主绕组电流在衰减过程中会产生一定的负转矩,因此总转矩跌落幅度大、回升慢。在主绕组换相后,辅助绕组仍需保持一段时间的开通状态,从而使得转矩平稳过渡。因此辅助绕组的关断角应滞后于主绕组理想换相角,分别将 a、b、c 三相辅助绕组关断角 θ_{aoff} 、 θ_{boff} 、 θ_{coff} 缩小在 $(0^\circ, 7.5^\circ)$ 、 $(15^\circ, 22.5^\circ)$ 、 $(-15^\circ, -7.5^\circ)$ 范围内。

为了降低开关器件的通断频率和开关损耗,当新开通相主绕组电流完全建立至能够独立负责所需转矩输出时,尽可能提前将辅助绕组关断,即尽可能缩短辅助绕组导通的区间。在此前提条件下,以转矩脉动最小为目标,对关断角 θ_{aoff} 进行参数化仿真分析,依次将 θ_{aoff} 设置为 0.1° 、 0.2° 、 0.3° 、 0.4° 、 0.5° ,对比电磁转矩 T_e 和转矩跌落幅值 ΔT ,如图 4 所示。

由图 4 可知, θ_{aoff} 越大,主绕组换相带来的转矩波动以及辅助绕组关断瞬间带来的转矩波动会越小,因此将 θ_{aoff} 确定为 0.5° 。同理 θ_{boff} 、 θ_{coff} 分别确定为 15.5° 、 -14.5° 。

3 周向错角 SRM 的十二扇区 DITC

周向错角 SRM 的 DITC 系统原理框图如图 5 所示,包括电机本体模块、扇区判断模块、转矩估算模块、转速外环、转矩内环、DITC 逻辑开关模块以及功率驱动模块。通过转矩估算模块,实时估算电机瞬时转矩 T_{real} ,然后与参考转矩 T_{ref} 进行比较,将转矩偏差值 ΔT_{real} 与扇区判断结果输入至

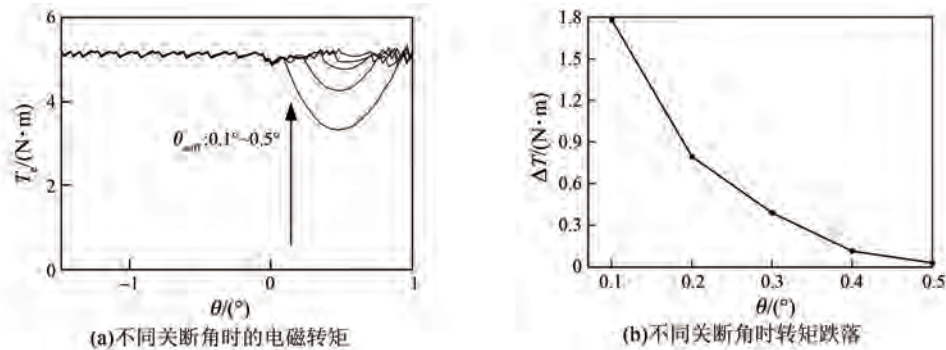


图 4 a 相不同关断角时的转矩对比

Fig. 4 Comparison of torque at different turn-off angles for phase a

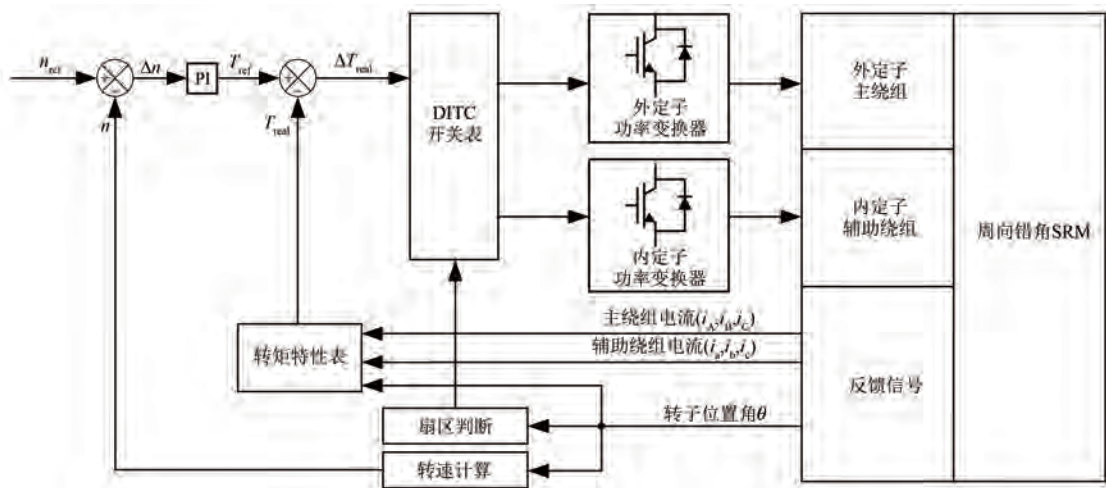


图 5 周向错角 SRM DITC 系统原理框图

Fig. 5 Block diagram of DITC system for the circumferential staggered SRM

DITC 开关表, 输出功率变换器开关元件的逻辑控制信号, 通过调整电机绕组的工作模式来调节电流大小, 进而调节输出转矩。

3.1 扇区划分

基于周向错角 SRM 的电感特性, 对其运行周期进行扇区划分, 分为单相导通区 (O 区)、换相区 (T1 区) 以及过渡区 (T2 区)。其中, 换相区又细分为双相导通区 (T1-1 区) 和三相导通区 (T1-2 区)。三相导通区是在双相导通区的基础上, 使下一相主绕组提前导通, 从而提前建立电流以减小过渡区的转矩跌落。共划分成 12 个扇区, 如表 1 所示。

A 相扇区细分示意图如图 6 所示。主绕组由 A 相到 B 相的换相过程如下。

(1) 在 O_A 区, A 相主绕组电感正处于上升阶段, 对其单独励磁就能提供足够的转矩输出。

(2) T1-1_{Aa} 区和 T1-2_{Aa} 区以 B 相的提前换

相角 θ_{Bon} 作为分界线。在 T1-1_{Aa} 区, 逐步减小 A 相主绕组电流, 以缩短其关断后电流衰减的时间, 减小负转矩带来的转矩跌落, 称为退磁相; 而 a 相辅助绕组应全电压励磁以迅速建立电流, 帮助主绕组完成换相, 称为励磁相。在 T1-2_{Aa} 区, 除保持 A 相主绕组与 a 相辅助绕组导通外, 还将 B 相主绕组提前导通从而使其建立电流的过程提前, 称 B 相相较于其理想开关角 0° 提前导通的角度为提前换相角, B 相为提前导通相。

(3) T2 区是指主绕组完成换相瞬间至对应辅助绕组关断的区间。在 T2_{Ba} 区, B 相主绕组刚刚导通, 应保证全电压励磁从而使其电流快速建立, 故称之为励磁相; 保持 a 相辅助绕组处于导通状态, 直到 B 相主绕组电流完成建立至可以单独提供转矩输出为止, 在这个过渡过程结束后, a 相辅助绕组将会关断, 故称之为退磁相。

表 1 十二扇区划分表
 Tab. 1 Twelve-sector division table

扇区名称	转子位置角范围	A 相	B 相	C 相	a 相	b 相	c 相
O_C	$(-22.5^\circ, \theta_{con}), (\theta_{boff}, 22.5^\circ)$	/	/	单独导通	/	/	/
$T1-1_{Cc}$	$(\theta_{con}, \theta_{Aon})$	/	/	退磁相	/	/	励磁相
$T1-2_{Cc}$	$(\theta_{Aon}, -15^\circ)$	提前导通相	/	退磁相	/	/	励磁相
$T2_{Ac}$	$(-15^\circ, \theta_{coff})$	励磁相	/	/	/	/	退磁相
O_A	$(\theta_{coff}, \theta_{aon})$	单独导通	/	/	/	/	/
$T1-1_{Aa}$	$(\theta_{aon}, \theta_{Bon})$	退磁相	/	/	励磁相	/	/
$T1-2_{Aa}$	$(\theta_{Bon}, 0^\circ)$	退磁相	提前导通相	/	励磁相	/	/
$T2_{Ba}$	$(0^\circ, \theta_{aoff})$	/	励磁相	/	退磁相	/	/
O_B	$(\theta_{aoff}, \theta_{bon})$	/	单独导通	/	/	/	/
$T1-1_{Bb}$	$(\theta_{bon}, \theta_{Con})$	/	退磁相	/	/	励磁相	/
$T1-2_{Bb}$	$(\theta_{Con}, 15^\circ)$	/	退磁相	/	/	励磁相	/
$T2_{Cb}$	$(15^\circ, \theta_{boff})$	/	/	提前导通相	/	退磁相	/

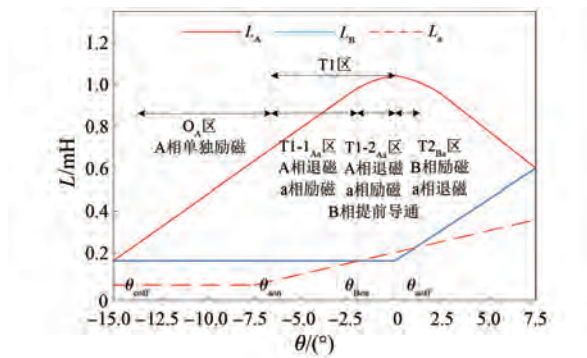


图 6 A 相扇区细分示意图
 Fig. 6 Schematic diagram of sector subdivision
 for phase A

3.2 控制逻辑

单相导通区、双相导通区以及过渡区的控制逻辑参考文献[16]。三相导通区的控制逻辑如图 7 所示。其中,模式“1”代表电源向绕组提供全压供电,使电流迅速建立;模式“0”代表绕组处于零压续流状态,使电流缓慢衰减;模式“-1”代表绕组电流回流至电源,使电流迅速减小。

在 T1-2 区,始终保持提前导通相的功率变换器为模式“1”。这是为了使提前导通相能在换相前迅速建立起较大的电流,从而在后续进入过渡区后以尽可能短的时间承担起转矩输出的任务。由于在 T1-2 区,提前导通相绕组的电感相对于转子位置角的变化率很小,因此不会对励磁相和退磁相的总输出转矩产生较大的影响。

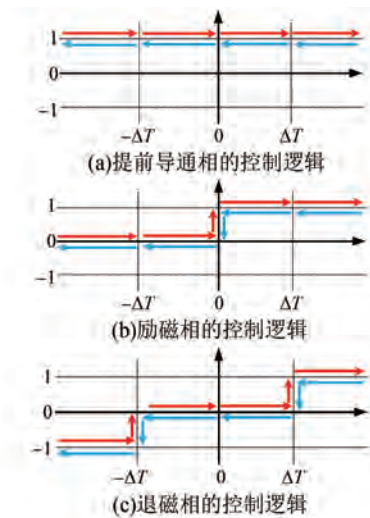


图 7 三相导通区的控制逻辑
 Fig. 7 Control logic in the three-phase conduction zones

假设励磁相和退磁相的功率变换器初始模式均为模式“1”,当转矩偏差 ΔT_{real} 超过正向偏差限值 ΔT ,即 $\Delta T_{real} > \Delta T$ 时,励磁相与退磁相的功率变换器均维持模式“1”,两相绕组同时全压励磁,加速转矩回升;当转矩偏差回到正向偏差限值以内,即 $0 < \Delta T_{real} < \Delta T$ 时,励磁相保持模式“1”不变,而退磁相在模式“0”和“1”之间切换;若瞬时转矩继续上升,使 $-\Delta T < \Delta T_{real} < 0$,则退磁相保持模式“0”不变,而励磁相在模式“0”和“1”之间切换;若瞬时转矩仍继续上升,使转矩偏差超出反向偏差限值,即 $\Delta T_{real} < -\Delta T$ 时,则励磁相保持模式“0”不

变,而退磁相在模式“-1”和“0”之间切换,以维持转矩稳定。

3.3 开关信号表

周向错角 SRM 在十二扇区的 DITC 开关信号

表 2 十二扇区 DITC 开关信号表

转矩偏差	0 区	T1-1 区		T1-2 区		T2 区		
	/	励磁相	退磁相	励磁相	退磁相	励磁相	退磁相	提前导通相
(-∞, -ΔT)	-1	0	-1	0	-1	0	-1	1
(-ΔT, 0)	0	0	0	0	0	0	0	1
(0, ΔT)	1	1	0	1	0	1	0	1
(ΔT, +∞)	1	1	1	1	1	1	1	1

4 基于场-路耦合的联合仿真

在 Maxwell2D 中搭建周向错角 SRM 的二维有限元模型,电机具体参数同文献[4]。在 Simplorer 中搭建功率变换器以及 DITC 电路。通过场-路耦合联合仿真,分析转矩脉动抑制效果。设置总仿真时长为 30 ms,转矩滞环宽度为 ±0.02 N·m,a、b、c 三相辅助绕组的开通角依次为 θ_{aon} = -7.5°、θ_{bon} = 7.5°、θ_{con} = -22.5°,关断角依次为 θ_{aoff} = 0.5°、θ_{boff} = 15.5°、θ_{coff} = -14.5°,给定参考转矩为 6 N·m。针对电机以 1 000 rpm 匀速运转的工况,验证对于给定转矩的跟踪控制效果。

4.1 转矩分析

为了量化转矩脉动情况,本文用转矩脉动系数 K_{rip} 作为参考标准,其计算式为

$$K_{rip} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \tag{1}$$

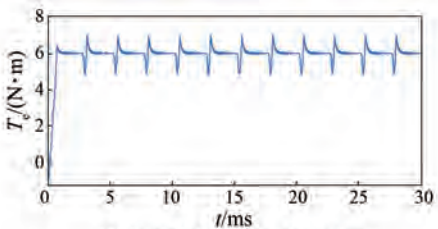
式中:T_{max}、T_{min} 分别为转矩最大、最小值;T_{avg} 为平均转矩。

九扇区 DITC 与开通关断角优化前后的十二扇区 DITC 下的周向错角 SRM 转矩波形对比如图 8 所示。具体转矩参数如表 3 所示。

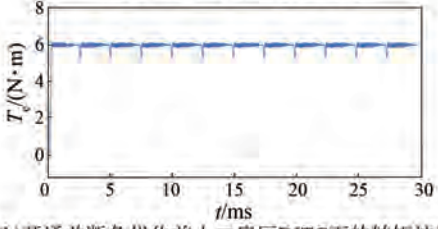
表 3 三种控制策略下的转矩性能对比

Tab. 3 Comparison of torque performance under three control strategies			
转矩参数	九扇区 DITC	优化前十二扇区 DITC	优化后十二扇区 DITC
T _{max} /(N·m)	6.813	6.210	6.151
T _{min} /(N·m)	5.187	5.254	5.902
T _{avg} /(N·m)	6.132	5.602	6.038
K _{rip}	0.265	0.171	0.041

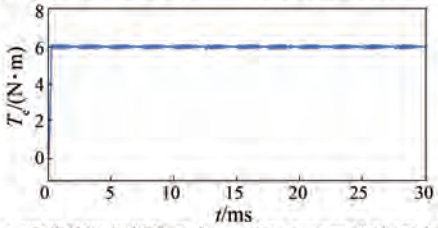
表如表 2 所示。转矩偏差分为负大偏差(-∞, -ΔT)、负小偏差(-ΔT, 0)、正小偏差(0, ΔT)和正大偏差(ΔT, +∞)四种,功率变换器有“1”、“0”、“-1”三种工作模式。



(a)九扇区DITC下的转矩波形



(b)开通关断角优化前十二扇区DITC下的转矩波形



(c)开通关断角优化后十二扇区DITC下的转矩波形

图 8 三种控制策略下的转矩波形对比

Fig. 8 Comparison of torque waveforms under three control strategies

由表 3 可知,在九扇区 DITC、优化前后十二扇区 DITC 下,电机的转矩脉动分别为 1.626、0.956、0.249,转矩脉动系数分别为 0.265、0.171、0.041。可以看出,开通关断角优化后的十二扇 DITC 策略对转矩脉动的抑制效果最明显。

4.2 电流分析

九扇区 DITC 和开通关断角优化后的十二扇区 DITC 下的六相电流波形对比如图 9 所示,电流

波形局部放大图如图 10 所示。

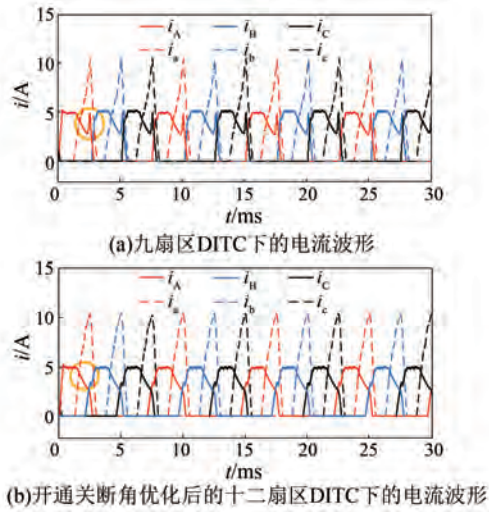


图 9 不同控制策略下的电流波形对比
Fig. 9 Comparison of current waveforms under different control strategies

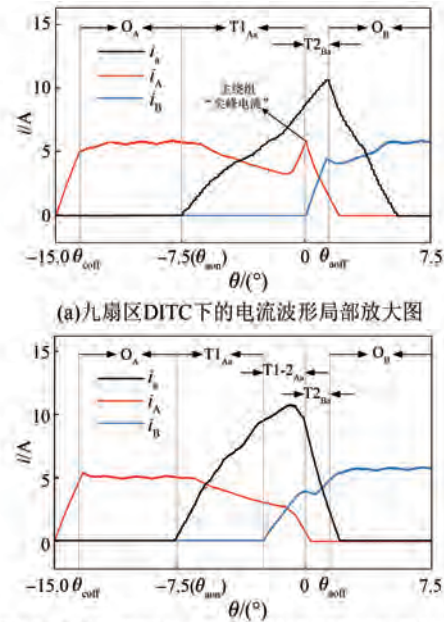


图 10 不同控制策略下的电流波形局部放大图
Fig. 10 Partial enlargement of current waveforms under different control strategies

由图 9(a)可知,采用九扇区 DITC 时,在换相过程中,退磁相主绕组电流升高,以维持在换相区间的转矩稳定。由图 9(b)可知,采用优化后的十二扇区 DITC 时,在换相过程中,退磁相主绕组电流逐渐衰减,这是因为提前导通相的提前导通使其电流提前建立,分担了退磁相主绕组在换相过

程中的转矩出力负担。

由图 10(a)可知,采用九扇区 DITC 时,在 $T1_{Aa}$ 区与 $T2_{Ba}$ 区的交界处,退磁相主绕组电流 i_A 出现了尖峰,这是因为此时 A 相主绕组的电感变化率趋于 0,而 a 相辅助绕组无法完全弥补 A 相主绕组的转矩跌落,因此需要提高 i_A 来保证转矩稳定。由图 10(b)可知,采用十二扇区 DITC 时,退磁相主绕组电流 i_A 在 $T1-2Aa$ 区末端未出现尖峰,呈现持续下降趋势,这是因为在 $T1-2Aa$ 区, A、B、a 三相绕组导通, B 相主绕组提前导通建立了较大的电流,可以接替 A 相的转矩输出任务,因此在换相完成后, i_A 能够迅速衰减为 0。

4.3 转矩电流比分析

转矩电流比表示电机在单位电流下产生的转矩,是电机设计和分析中的一个重要参数。转矩电流比对于评估电机的效率和性能非常重要,在相同的转矩输出下,转矩电流比越大,所需的电流越小,从而减少能量损耗,提高电机的工作效率。

平均转矩表达式为

$$T_{avg} = \frac{N_r}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} i^2(\theta) \frac{dL_k(\theta)}{d\theta} d\theta \quad (2)$$

式中: N_r 为转子极对数; L_k 为第 k 相电感。

转矩电流比 μ 计算式为

$$\mu = \frac{T_{avg}}{I_{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{N_r}{8\pi}} \cdot \int_0^{2\pi} i^2(\theta) \frac{dL_k(\theta)}{d\theta} d\theta}{\sqrt{\int_0^{2\pi} i^2(\theta) d\theta}} \quad (3)$$

式中: I_{rms} 为电流有效值。

开通关断角优化后的十二扇区 DITC 与九扇区 DITC 下的电机性能对比如表 4 所示。

表 4 不同控制策略下的电机性能对比

Tab. 4 Comparison of motor performance under different control strategies

参数名称	九扇区	十二扇区
转矩脉动/(N·m)	1.626	0.249
转矩脉动系数 K_{rip}	0.265	0.041
主绕组电流有效值/A	43.142	27.510
辅助绕组电流有效值/A	66.546	40.575
转矩电流比 μ	0.142	0.219

由表 4 可知,采用开通关断角优化后的十二扇区 DITC 策略可以大幅降低转矩脉动系数,降

幅约为 84%, 转矩电流比也有较大提高, 提升幅度约为 54%。

5 结语

本文针对周向错角 SRM, 提出了一种十二扇区 DITC 策略, 来抑制电机的转矩脉动。场路耦合联合仿真结果表明, 相较于九扇区 DITC 策略, 采用开通关断角优化后的十二扇区 DITC 策略可以大幅降低转矩脉动系数, 降幅约为 84%, 转矩电流比也有较大提高, 提升幅度约为 54%; 并且退磁相主绕组电流在换相区末尾处不会出现电流尖峰, 减小了在换相过程中的转矩出力负担, 使换相期间的电流和转矩更加平稳。仿真结果验证了所提策略的可行性和有效性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

周云红、胡涵章进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写, 周云红、胡涵章进行了试验研究, 郑涵、徐磊和王琴彬参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, experimental research, content summary and paper writing were carried out by Zhou Yunhong and Hu Hanzhang. The manuscript was reviewed and revised by Zheng Han, Xu Lei and Wang Chenbin. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] KHODADADEH O, CHESHMEHBEIGI H M, MOUSAVI M. Design, simulation and optimisation of a novel low ripple outer-rotor switched reluctance machine for variable speed application [J]. International Journal of Electronics, 2024, 111(4): 579-598.
- [2] 鲍旭聪, 王晓琳, 彭旭衡, 等. 高速电机驱动关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6856-6870.

BAO X C, WANG X L, PENG X H, et al. Review of key technologies of high-speed motor drive [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6856-6870.

- [3] 孙庆国, 兰天泽, 刘旭. 基于特征位置区间电感阈值约束的 SRM 中高速无位置传感器容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4800-4810.
- SUN Q G, LAN T Z, LIU X. Sensorless fault-tolerant control of SRM at medium high speed based on the inductance threshold constraint within the feature position interval [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4800-4810.
- [4] 周云红, 陈泽楠, 李汉杰, 等. 结构优化与直接瞬时转矩控制下的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 76-87.
- ZHOU Y H, CHEN Z N, LI H J, et al. Torque ripple suppression in switched reluctance motors under structural optimization and direct instantaneous torque control [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(10): 76-87.
- [5] VALENCIA D F, TARVIRDILU-ASL R, GARCIA C, et al. A review of predictive control techniques for switched reluctance machine drives. Part I: Fundamentals and current control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(2): 1313-1322.
- [6] DALDABAN F, USTKOYUNCU N. Multi-layer switched reluctance motor to reduce torque ripple [J]. Energy Conversion & Management, 2008, 49(5): 974-979.
- [7] SUGIURA M, ISHIHARA Y, ISHIHARA H, et al. Improvement of efficiency by stepped-skewing rotor for switched reluctance motors [C]//2014 International Power Electronics Conference, Hiroshima, 2014.
- [8] TORKAMAN H, GHAHERI A, KEYHANI A. Axial flux switched reluctance machines: A comprehensive review of design and topologies [J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(3): 310-321.
- [9] 闫文举, 张东, 李海龙, 等. 一种多模式双定子开关磁阻电机混合控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7829-7840.
- YAN W J, ZHANG D, LI H L, et al. A hybrid control system for multi-mode double stator switched reluctance motor [J]. Proceedings of the CSEE,

- 2024, 44(19): 7829-7840.
- [10] 孙玉坤, 张宾宾, 袁野. 飞轮储能用磁悬浮开关磁阻电机多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(10): 53-58+119.
- SUN Y K, ZHANG B B, YUAN Y. Multi-objective optimal design of single winding bearingless switched reluctance motor for flywheel energy storage [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(10): 53-58+119.
- [11] 李彦伦, 唐小波, 周飞, 等. 高速两相 4/2 结构 SRM 锥形转子结构优化设计[J]. 微电机, 2021, 54(5): 34-38.
- LI Y L, TANG X B, ZHOU F, et al. Conical rotor optimization of high-speed two phase 4/2 SRM [J]. Micromotors, 2021, 54(5): 34-38.
- [12] 刘爱民, 刘权, 姜家川, 等. 基于天牛须算法的新型开关磁阻电机优化研究[J]. 微特电机, 2022, 50(4): 1-6+11.
- LIU A M, LIU Q, LOU J C, et al. Research on optimization of new type of switched reluctance motor based on beetle antennae search algorithm [J]. Small & Special Electrical Machines, 2022, 50(4): 1-6+11.
- [13] 徐执诏, 杜钦君, 赵金阳, 等. 考虑 MPTC 的开关磁阻电机系统级多目标优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(11): 182-192.
- XU Z Z, DU Q J, ZHAO J Y, et al. System-level multi-objective optimization design of switched reluctance motor considering MPTC [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(11): 182-192.
- [14] YAN W J, CHEN H, LIU Y Q, et al. A low ripple double modular-stator switched reluctance machine for electric vehicles applications [C]//2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Tianjin, 2020.
- [15] ABBASIAN M, MOALLEM M, FAHIMI B. Double-stator switched reluctance machines (DSSRM): Fundamentals and magnetic force analysis [J]. IEEE Transactions on energy conversion, 2010, 25(3): 589-597.
- [16] 周云红, 刘晨宇, 李汉杰, 等. 周向错角开关磁阻电机及其直接瞬时转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 90-102.
- ZHOU Y H, LIU C Y, LI H J, et al. Circumferentially staggered switched reluctance motor and its direct instantaneous torque control [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 90-102.
- [17] GUPTA T D, CHAUDHARY K, ELAVARASAN R M, et al. Design modification in single-tooth winding double-stator switched reluctance motor for torque ripple mitigation [J]. IEEE Access, 2021, 9: 19078-19096.
- [18] 闫文举, 陈昊, 马小平, 等. 不同转子极数下磁场解耦型双定子开关磁阻电机的研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2945-2956.
- YAN W J, CHEN H, MA X P, et al. Development and investigation on magnetic field decoupling double stator switched reluctance machine with different rotor pole numbers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 2945-2956.
- [19] 于丰源, 陈昊, 王星, 等. 不同定子绕组结构双定子轴向磁通开关磁阻电机性能对比研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7728-7741+7776.
- YU F Y, CHEN H, WANG X, et al. Comparative study on the double stator axial flux switched reluctance motors with different winding structures [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(24): 7728-7741+7776.
- [20] SUN Q G, WU J H, GAN C, et al. DSSRM design with multiple pole arcs optimization for high torque and low torque ripple applications [J]. IEEE Access, 2018, 6: 27166-27175.
- [21] 任浩天, 甘醇, 曲荣海, 等. 基于电流转矩协同控制的开关磁阻电机新型直接瞬时转矩控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7794-7806.
- REN H T, GAN C, QU R H, et al. Current-torque coordinated control based direct instantaneous torque control strategy for switched reluctance motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7794-7806.
- [22] 赵晨, 邓福军. 基于滑模神经网络直接瞬时转矩控制的优化[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 102-109.
- ZHAO C, DENG F J. Optimization of direct instantaneous torque control based on sliding mode neural network [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 102-109.

- [23] 任萍, 朱景伟, 赵燕, 等. 一种基于快速傅里叶建模方法的开关磁阻电机模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5764-5776.
- REN P, ZHU J W, ZHAO Y, et al. Model predictive control of switched reluctance motor based on fast Fourier modeling method [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5764-5776.
- [24] 刘迪, 赵永生, 范云生, 等. 基于 TSF 的开关磁阻电机脉宽调制变占空比控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 15-20+35.
- LIU D, ZHAO Y S, FAN Y S, et al. Pulse width modulation variable duty cycle control of switched reluctance motor based on torque sharing function [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(1): 15-20+35.
- [25] SUN X D, FENG L Y, DIAO K K, et al. An improved direct instantaneous torque control based on adaptive terminal sliding mode for a segmented-rotor SRM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(11): 10569-10579.
- [26] XU Y Z, ZHONG R, CHEN L, et al. Analytical method to optimise turn-on angle and turn-off angle for switched reluctance motor drives [J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(9): 593-603.
- [27] ZAN X S, HUO Y J, GU J. Optimization research of turn-on angle and turn-off angle based on switched reluctance starter/generator system [C]//2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Halifax, 2015.
- [28] 王荣博, 郭士杰, 王文圣. 基于模型预测的 PMSM 直接转矩控制转矩脉动抑制方法[J]. 微电机, 2021, 54(10): 61-67.
- WANG R B, GUO S J, WANG W S. Torque ripple suppression method for PMSM direct torque model predictive control [J]. Micromotors, 2021, 54(10): 61-67.
- [29] 黄朝志, 孙燕文, 代礼祥, 等. 九扇区永磁辅助式开关磁阻电机转矩脉动抑制方法[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(6): 117-125.
- HUANG C Z, SUN Y W, DAI L X, et al. Torque ripple suppression method of nine-region permanent magnet switched reluctance motor [J]. Journal of Detection & Control, 2024, 46(6): 117-125.
- [30] 何昆仑, 许爱德, 曹玉昭, 等. 基于 12 扇区的开关磁阻电机直接转矩控制脉动抑制研究[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(10): 19-23.
- HE K L, XU A D, CAO Y Z, et al. Research of switched reluctance motor direct torque control ripple reduction based on twelve sector division [J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(10): 19-23.

收稿日期:2025-04-02

收到修改稿日期:2025-06-20

作者简介:

周云红(1982-),女,博士,教授,研究方向为电力传动,404740702@qq.com;

*通信作者:胡涵章(2000-),男,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机优化设计及控制,huhanzhang2025@163.com。