

基于改进转矩分配函数的轴向错角 高速开关磁阻电机控制策略

任广旭, 刘爱民

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Control Strategy for Axial Stagger High-Speed Switched Reluctance Motor Based on Improved Torque Sharing Function

Ren Guangxu, Liu Aimin

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] The axial stagger high-speed switched reluctance motor employs dual stator-rotor sets with a staggered angle to mitigate the high torque ripple inherent in conventional switched reluctance motors (SRMs) due to their double salient structure and nonlinear magnetic circuit. In order to further reduce the torque ripple and improve the efficiency of the motor, a new torque sharing function strategy for switched reluctance motor with stagger structure is proposed in this paper. [Methods] The strategy, aimed at the steady-state operation phase, takes into account the two sets of stator and rotor are in single-phase conduction and single-phase conduction and two-phase exchange conduction respectively. The former allocated the torque of the two conduction phases according to the torque per square ampere, while the latter used the torque generated at the single-phase conduction side to compensate for the lack of torque at the two-phase exchange side, in order to achieve optimal allocation of torque to each phase winding on both sides of the motor. What's more, in order to ensure the reliability of the control system, the operation process of the control system was designed. The current chopping control strategy was adopted in the start-up phase to limit the current peak while ensuring the rapid tracking of the given speed. The torque sharing function in the transition phase was designed to realize the smooth switching from the start-up phase to the steady-state operation phase. Finally, a simulation model of the motor control system was built using Simulink to verify the effectiveness of the control strategy proposed in this paper. [Results] The transient simulation results indicated that the proposed control strategy optimized the speed regulation time and overshoot, ensuring a smooth transition between the start-up phase and the steady-state phase, thereby verifying the

reliability of the proposed control strategy. The steady-state simulation results demonstrated that the torque ripple coefficient and torque current ratio of the improved torque sharing function strategy were superior to other four traditional torque sharing function strategies under both low-speed and high-speed conditions. [Conclusion] The control strategy proposed in this paper has the feasibility and stability, which can reduce the torque ripple and improve the efficiency of the motors, and provides a new idea for improving the control performance of high-speed switched reluctance motors.

Key words: high-speed switched reluctance motor; stagger structure; torque per square ampere; torque sharing function

摘要: [目的] 轴向错角高速开关磁阻电机采用两套定转子错角结构,以改善传统开关磁阻电机因双凸极结构和非线性磁路导致的转矩脉动问题。为进一步降低电机转矩脉动,提高电机效率,本文提出了一种应用于错角结构开关磁阻电机的新型转矩分配函数策略。[方法] 该策略针对稳态运行阶段,考虑到了两套定转子均处于单相导通和分别处于单相导通与两相交换导通的情况,前者按照转矩电流平方比分配两个导通相的转矩,后者用单相导通侧产生的转矩来补偿两相交换侧缺少的转矩,以实现电机两侧各相绕组所分配转矩的最优配置。此外,设计了控制系统总体运行流程以保证系统可靠性。起动升速阶段采用电流斩波控制策略,限制电流峰值的同时确保快速跟踪给定转速;过渡阶段设计了转矩分配函数以实现起动阶段至稳态运行阶段的平滑切换。最后采用 Simulink 搭建电机控制系统仿真模型,验证本文所提控制策略的有效性。[结果] 瞬态仿真结果表明,所提出的控制策略优化了转速调节时间与超调量,且起动升速阶段与稳态运行阶段过渡平稳,验证了所提控制策略的可靠性。稳态仿真结果表明低速与高速工况下采用改进

转矩分配函数策略的转矩脉动系数与转矩电流比均优于四种传统转矩分配函数策略。【结论】本文所提出的控制策略具有可行性与稳定性,起到了降低电机转矩脉动与提高电机效率的作用,为改善高速开关磁阻电机控制性能提供了一种新思路。

关键词: 高速开关磁阻电机;错角结构;转矩电流平方比;转矩分配函数

0 引言

开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor, SRM) 具有结构简单、成本较低、调速范围宽、稳定性强等优点,目前被广泛应用于新能源电动车驱动、通用工业、家用电器和纺织机械等领域^[1-2]。但由于其具有双凸极结构以及磁路的高饱和性,导致 SRM 具有较高的转矩脉动与振动噪声,这限制了 SRM 的应用场景^[3-4]。

近年来,国内外专家学者就 SRM 转矩脉动抑制进行了大量的研究,这些研究大致可以划分为两个方面,其一是优化电机本体结构,主要调整对开关磁阻电机性能影响较大的电机结构参数,包括定子与转子极对数、定子与转子外径、气隙长度、定转子相对极弧宽度、绕组的连接方式等。实现的手段有优化绕组结构、添加永磁材料、改进定子与转子结构^[5-7]、多目标优化^[8-9]等。另一个方面是对电机控制策略与控制算法进行优化,所采用的方法包括转矩分配函数 (Torque Sharing Function, TSF)^[10-11]、直接瞬时转矩控制^[12-13]、直接转矩控制^[14-15]、模型预测控制^[16-17]、模糊控制^[18]、神经网络算法^[19]、群智能优化算法^[20]、滑模控制^[21]、自抗扰控制^[22]等。

针对 TSF 控制策略的改进是控制策略优化的一个重点研究方向。文献[23]提出了一种基于换相区域转矩在线补偿的 TSF 策略,通过低速转矩电流比和中高速转矩磁链比划分换相区间,进行正、负转矩补偿以抑制转矩脉动,但其自适应换相角调整依赖电流实时采样,易受外界扰动影响,导致计算误差和额外转矩波动。文献[24]采用 NSGA-II 算法优化直线型 TSF 的正弦补偿曲线参数,以降低峰值电流和转矩脉动,但算法计算复杂度高,无法满足实时控制需求。文献[25]设计了一种混合控制策略,低速采用 TSF 与直接瞬时转

矩控制,高速采用自抗扰算法与角度位置控制,但策略切换过程易产生转矩峰值,且控制逻辑复杂、实时性差。文献[26]针对双定子开关磁阻电机提出了一种改进 TSF 策略,错开内、外定子换相区间,并通过状态划分在线修正参考转矩,旨在降低转矩脉动,但未以转矩电流比为优化目标,电机效率提升有限。

本文以三相 6/4 轴向错角高速开关磁阻电机 (Axial Stagger High-speed Switched Reluctance Motor, ASHSRM) 为研究对象,该电机在机体设计与优化方面已经取得了一定的进展^[27-28],但控制策略与算法方面的研究亟待完善^[29]。本文结合 ASHSRM 的工作原理与控制性能要求,针对电机稳态运行阶段提出基于转矩电流平方比和转矩补偿的转矩分配函数 (Torque Per Square Ampere and Torque Compensation Torque Sharing Function, TPSA-TC-TSF) 控制策略。根据该控制策略,设计电机控制系统运行流程,起动升速阶段采用电流斩波策略,在限制电流的同时快速跟踪参考转速;并设计过渡阶段转矩分配函数以实现起动阶段至稳态运行阶段的平滑切换。然后搭建电机控制系统 Simulink 仿真模型,进行对比仿真分析,以验证所提出的改进 TSF 控制策略在改善电机控制性能上的有效性。

1 ASHSRM 工作原理

ASHSRM 的拓扑结构如图 1 所示,该电机采用三相 6/4 结构,包含两套处于同一轴线上的定转子。ASHSRM 的截面图如图 2 所示,两侧的转子错开 15° ,该角度为电机步距角的一半,可以实现转矩的互补,进而减小转矩脉动。电机采用轴向充磁方案,在两套定转子间连接有导磁环,磁路走向示意图如图 3 所示。此外,在两套定转子的定子导磁环中间安装有圆环形的永磁体,以实现辅助励磁,辅助励磁可以增加铁心磁饱和程度,增大气隙磁密,提高电机平均输出转矩,进而提高电机的效率^[30]。

ASHSRM 与普通 SRM 一样遵循“最小磁阻原理”,按照一定的顺序给不同相绕组线圈通电,确保对应相的定转子由不对齐位置转动到对齐位置。由于 ASHSRM 的两套定转子之间存在 15° 错角,因此两套定转子对应相绕组线圈的通电次序

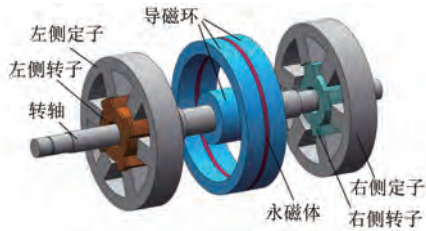


图1 ASHSRM 拓扑结构

Fig.1 Topological of ASHSRM

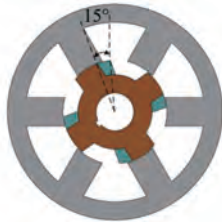


图2 转子错角截面图

Fig.2 Rotor staggered angle cross section

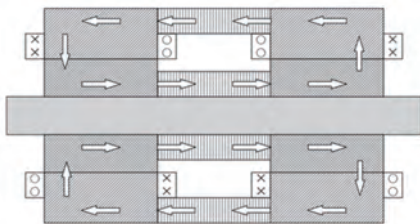


图3 ASHSRM 磁路走向示意图

Fig.3 Schematic diagram of ASHSRM magnetic circuit

也存在 15° 的相位差。

ASHSRM 的相电压平衡方程可表示为

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

式中: U_k 、 i_k 、 R_k 分别为第 k 相的绕组电压、电流、内阻; ψ_k 为第 k 相磁链。

ψ_k 可以改写为相电感 L_k 与相电流的乘积形式,如下所示:

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

将式(2)代入式(1),可得:

$$U_k = R_k i_k + \frac{\partial \psi_k}{\partial i_k} \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

式中: θ 为转子位置角度。

由式(3)可以看出第 k 相的相电压由内阻压降、变压器电动势和运动电动势组成。

若忽略磁路饱和,则 ASHSRM 的相转矩公式可表示为

$$T_k(\theta, i_k) = \frac{i_k^2}{2} \frac{dL_k}{d\theta} \quad (4)$$

式中: T_k 为第 k 相的绕组转矩。

ASHSRM 的机械运动方程可表示为

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (5)$$

式中: T_e 为电磁转矩,其是电机运行过程中各相绕组转矩之和; J 为转动惯量; D 为黏滞摩擦因数; T_L 为负载转矩。

2 传统 TSF 控制策略

TSF 控制策略旨在给各相转矩设定分配函数,使得各相转矩按照分配函数值来对参考转矩进行分配,其目的是抑制两相绕组换相导通期间的转矩脉动。TSF 控制策略遵循以下公式:

$$\begin{cases} T_k(\theta) = T_{ref} f_k(\theta) \\ \sum_{k=1}^m f_k(\theta) = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $T_k(\theta)$ 为各相的参考转矩; T_{ref} 为总参考转矩; $f_k(\theta)$ 为各相的分配函数值。

T_{ref} 乘以各相的分配函数值后得到各相的参考转矩。各相的分配函数值之和为 1。常见的 TSF 公式可以分为直线型、余弦型、指数型、立方型等,其中余弦型 TSF 公式如下:

$$f_k(\theta) = \begin{cases} f_{rise}(\theta) & \theta_{on} < \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on} + \theta_{ov} < \theta \leq \theta_{off} \\ f_{fall}(\theta) & \theta_{off} < \theta < \theta_{off} + \theta_{ov} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f_{rise}(\theta)$ 为励磁上升段的分配函数; $f_{fall}(\theta)$ 为退磁下降段的分配函数; θ_{on} 为开通角; θ_{off} 为关断角; θ_{ov} 为重叠角。

$$f_{rise}(\theta) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\pi \frac{\theta - \theta_{on}}{\theta_{ov}}\right) \quad (8)$$

$$f_{fall}(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\pi \frac{\theta - \theta_{off}}{\theta_{ov}}\right) \quad (9)$$

余弦型 TSF 示意图如图 4 所示。由图 4 可知,在一个转子周期内,某相绕组的 TSF 函数可分为励磁上升段、单相导通段(函数值为 1)、退磁下降段、关断段(函数值为 0)。转子位置达到 θ_{on} 时进入励磁上升段;转子位置达到 θ_{off} 时进入退磁下降段;励磁上升段与退磁下降段所持续的角度

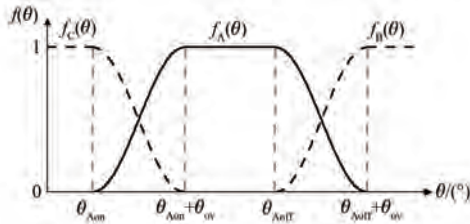


图 4 余弦型 TSF 示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cosine-type TSF

即是重叠角 θ_{ov} 。

传统 TSF 控制策略可以满足普通 SRM 电机控制性能优化的需要,但 ASHSRM 采用两套定转子错角结构,不仅要考虑同一套定转子内各相绕组的转矩分配问题,还需要考虑两套定转子之间的转矩分配问题,因此本文提出 TPSA-TC-TSF 控制策略以满足稳态运行阶段 ASHSRM 的控制需要。

3 TPSA-TC-TSF 控制策略

ASHSRM 各相绕组电感与导通区间划分示意图如图 5 所示,两套定转子错开 15° ,分别对应电机 A、B、C 相与 X、Y、Z 相。一个转子周期可划分为 12 个区间。

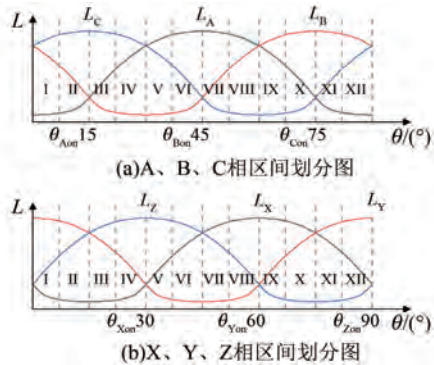


图 5 ASHSRM 各相电感与导通区间划分图

Fig. 5 Schematic diagram of inductance curve and conduction interval division for each phase of ASHSRM

依据相绕组电感变化率大小确定各相绕组的励磁、单相导通、退磁以及关断区间。以 A 相绕组为例,励磁区间为 II 区间,该区间起点位置为 A 相绕组开通角 θ_{Aon} ,单相导通区间为 III、IV、V 区间,退磁区间为 VI 区间,该区间的起点位置为 A 相绕组关断角 θ_{Aoff} 。为确保同一侧绕组任意时刻至少有一相处于导通状态,将各相绕组的导通角度确定为 30° ,使得后一相绕组的开通角与前一相绕组的关断角重合。同一相绕组关断角 θ_{off} 与

开通角 θ_{on} 的关系式为

$$\theta_{off} = \theta_{on} + 30^\circ \quad (10)$$

θ_{on} 的选取主要受到转速影响。低速时,绕组转矩跟踪能力强,退磁电流衰减快,采用较大开通角可扩大单相导通区间,提升转矩电流比;高速时,转矩跟踪延迟大,退磁缓慢,需设置较小开通角以延长换相区间,抑制转矩脉动。

ASHSRM 在 I-IV 区间的各相绕组导通情况如表 1 所示,同理可得其余区间的导通情况。按照绕组的通断状态可以分为两种情况,其一是两套定转子均处于单相导通状态(即表 1 中 I、III 等区间);其二是一套定转子处于两相换相状态,另一套定转子处于单相导通状态(即表 1 中 II、IV 等区间)。

表 1 ASHSRM 各相绕组导通情况

Tab. 1 Conduction status of each phase winding of ASHSRM

区间	转子位置	绕组导通情况
I	$0^\circ \sim \theta_{Aon}$	C、Z 单相
II	$\theta_{Aon} \sim 15^\circ$	A 励磁, C 退磁, Z 单相
III	$15^\circ \sim \theta_{Xon}$	A、Z 单相
IV	$\theta_{Xon} \sim 30^\circ$	A 单相, X 励磁, Z 退磁

由式(4)可知,转矩电流平方比的大小 T/i^2 与电感变化率 $dL/d\theta$ 成正比,这意味着当电流一定时,相绕组电感变化率越大,转矩输出能力越强,从而提升转矩电流比和电机效率。由于电感变化率不易直接测量,本文以转矩电流平方比代替电感变化率作为两套定转子均为单相导通情况的转矩分配依据。

对于一侧换相、一侧单相导通的情况,考虑到单相导通相转矩产生能力较强,换相侧励磁相在刚进入导通状态时产生转矩的能力弱,退磁相需要及时退磁以确保转子位置在对齐位置前相电流降至零,以免产生负转矩降低电机效率。为此本文构造平方函数,为处于换相阶段的两相绕组分配相较于传统余弦 TSF 策略更少的转矩,为单相导通相分配较多转矩以补偿换相侧不足,实现对电机各相参考转矩的合理配置。

基于上述考虑,本文所提出的 TPSA-TC-TSF 策略示意图如图 6 所示,对应的函数如式(11)所示:

$$T_{ref}(\theta) = \begin{cases} m_1 \left(\frac{\theta - \theta_{on}}{15^\circ - \theta_{on}} \right)^2 & \theta_{on} \leq \theta < 15^\circ \\ K_{TPSA} + (m_1 - m_{10}) \frac{\theta - 15^\circ - \theta_{on}}{\theta_{on}} & 15^\circ \leq \theta < \theta_{on} + 15^\circ \\ 1 - m_1 \left(\frac{\theta - \theta_{on} - 15^\circ}{15^\circ - \theta_{on}} \right)^2 - n_2 \left(\frac{30^\circ - \theta}{15^\circ - \theta_{on}} \right)^2 + [(1 - n_2) - m_2] \frac{\theta - 30^\circ}{15^\circ - \theta_{on}} & \theta_{on} + 15^\circ \leq \theta < 30^\circ \\ K_{TPSA} + [n_1 - (1 - m_1)] \frac{\theta - \theta_{off}}{\theta_{on}} & 30^\circ \leq \theta < \theta_{off} \\ n_2 \left(\frac{45^\circ - \theta}{15^\circ - \theta_{on}} \right)^2 & \theta_{off} \leq \theta \leq 45^\circ \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: K_{TPSA} 为该相绕组转矩电流平方比占各相绕组转矩电流平方比之和的比值; m_1, m_2, n_1, n_2 为当前转子周期转子位置分别为 $15^\circ, \theta_{on} + 15^\circ, 30^\circ, \theta_{off}$ 时的 K_{TPSA} 值; m_{10} 为转子位置达到 15° 及 15° 之后上一个转子周期转子位置 15° 时的 K_{TPSA} 值。

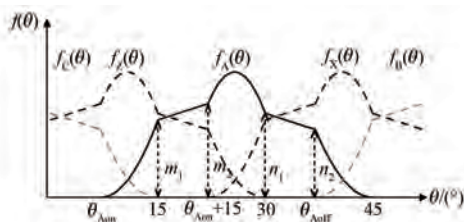


图 6 TPSA-TC-TSF 示意图

Fig. 6 Schematic diagram of TPSA-TC-TSF

K_{TPSA} 的计算式为

$$K_{TPSA} = \frac{f_{TPSA}^k(\theta, i)}{\sum_{m=1}^6 f_{TPSA}^m(\theta, i)} \quad (12)$$

图 6 中,当 A 相转子位置进入 $(\theta_{Aon}, 15^\circ)$ 区间时(对应图 5 的区间 II),A 相处于励磁初期,转矩产生能力较弱,C 相需要快速退磁,以确保转子位置达到 45° 之前相电流降至零,因此为换相侧(A、C 相)分配较少转矩。而另一侧 Z 相处于单相导通状态,电感变化率较大,转矩生成能力强,故分配较多转矩以补偿换相侧不足。当 A 相转子位置进入 $(15^\circ, \theta_{Aon} + 15^\circ)$ 区间时(对应图 5 的区间 III),A 相与处在另一侧的绕组 Z 相均处于单相导通状态,二者电感变化率大小随转子位置发生变化,其中 A 相不断增大,Z 相不断减小,因此根据此时各相的转矩电流平方比,计算其占据

转矩电流平方比总和的比值 K_{TPSA} 作为其分配函数值,这样就实现了按照产生转矩的能力来分配单相导通的两相的转矩,可以降低单相导通期间产生单位大小转矩所需要的电流,提高电机运行效率。图 6 中其他区间的分析同理。

考虑到电机运行过程中可能会受到负载扰动等情况的影响,使得不同转子周期内的 m_1, m_2, n_1, n_2 值产生变化,为避免由此造成的分配函数值跳变进而引发转矩脉动,本文为交界点前后分配函数不一致的交界点之后区间增加动态补偿项。将转子位置处于交界点 $15^\circ, \theta_{on} + 15^\circ, 30^\circ$ 进入新区间的分配函数值 $m_1, (1 - n_2), n_1$ 与前一时刻处于旧区间分配函数值 $m_{10}, m_2, (1 - m_1)$ 作差,在一个区间内对 K_{TPSA} 变化值进行均匀补偿,使得分配函数曲线平滑,补偿前后的分配函数示意图如图 7 所示。

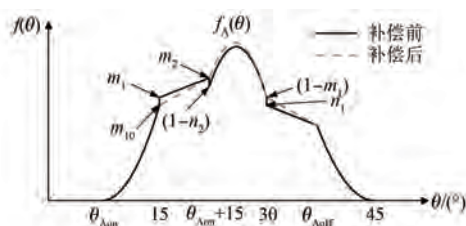


图 7 加入动态补偿项前后的 TPSA-TC-TSF 示意图

Fig. 7 Block diagram of TPSA-TC-TSF before and after dynamic compensation

此外,为确保两侧单相导通期间分配函数尽可能平滑,本文采用一阶低通滤波器对 K_{TPSA} 进行滤波处理,滤波器原理见下式:

$$y(t) = \alpha \cdot u(t) + (1 - \alpha) \cdot y(t - 1) \quad (13)$$

式中: $u(t)$ 为输入值; $y(t)$ 为输出值; α 为滤波系数, 其范围在 0 与 1 之间, α 值越小, 滤波结果越平滑, 但延迟也越大。

随着给定转速增大, 单位转子周期经过时间减小, 对于滤波跟踪性能的要求就会更高, 因此高速工况下需选取更大的滤波系数。滤波系数 α 与转速 n 的关系式如下:

$$\alpha = k_{\alpha} n \quad (14)$$

式中: k_{α} 为滤波比例系数。

在给定转速 3 000 r/min 时, 滤波前/后的一相绕组 K_{TPSA} 波形如图 8 所示。由图 8 可知, 滤波后的 K_{TPSA} 波形更加平滑, 有助于改善因此产生的转矩波动。

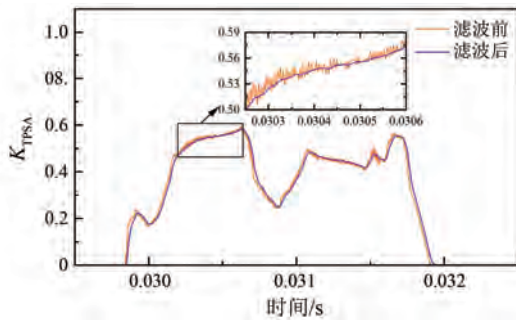


图 8 滤波前/后的 K_{TPSA} 波形对比图

Fig. 8 K_{TPSA} curve comparison before and after filtering

$$T_{\text{ref}}(\theta) = \begin{cases} 0.5 \times \left(\frac{\theta - \theta_{\text{on}}}{15^\circ - \theta_{\text{on}}} \right)^2 & \theta_{\text{on}} \leq \theta \leq 15^\circ \\ 0.5 & 15^\circ < \theta < \theta_{\text{on}} + 15^\circ \\ 1 - 0.5 \times \left(\frac{\theta - \theta_{\text{on}}}{15^\circ - \theta_{\text{on}}} \right)^2 - 0.5 \times \left(\frac{45^\circ - \theta}{15^\circ - \theta_{\text{on}}} \right)^2 & \theta_{\text{on}} + 15^\circ \leq \theta \leq 30^\circ \\ 0.5 & 30^\circ < \theta < \theta_{\text{off}} \\ 0.5 \times \left(\frac{45^\circ - \theta}{15^\circ - \theta_{\text{on}}} \right)^2 & \theta_{\text{off}} \leq \theta \leq 45^\circ \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

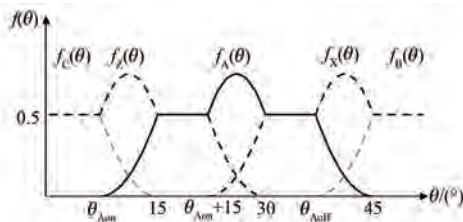


图 9 过渡阶段转矩分配函数示意图

Fig. 9 Schematic diagram of TFS in transition state

4 ASHSRM 控制系统搭建

4.1 控制系统运行流程分析

TPSA-TC-TSF 控制策略以转矩电流平方比作为控制依据, 并引入了动态补偿与滤波机制, 适用于稳态运行阶段。但在电机起动升速阶段, 由于电机转速低且转速误差大, 使得各相绕组参考转矩值偏大, 进而使电流与转矩波形异常, 不能得到很好的控制效果。根据控制系统实际情况, 本文在电机起动升速阶段采用电流斩波控制 (Current Chopping Control, CCC) 策略, 以确保各相绕组在功率变换器所能承受的电流限幅条件下, 产生尽可能大的转矩, 以尽快跟踪给定转速。

为确保起动升速阶段与稳态运行阶段之间的平稳过渡, 提高控制系统的稳定性与可行性, 提出过渡阶段转矩分配函数, 如图 9 与式 (15) 所示。过渡阶段转矩分配函数与 TPSA-TC-TSF 函数的主要区别是将两侧皆为单相导通状态时的相绕组转矩分配值均设定为 0.5, 不按照转矩电流平方比进行分配。过渡阶段仍根据式 (12) 计算 K_{TPSA} 值, 其作用是确定刚进入转速稳态阶段时 TPSA-TC-TSF 函数的 m_1 、 m_2 、 n_1 、 n_2 值。

电机控制系统运行流程图如图 10 所示, 电机起动阶段采用 CCC 策略, 当转速差值小于 50 r/min 时进入到过渡阶段, 并计算策略切换角度 θ_1 , 转速差值一直小于 50 r/min 且转子转过 θ_1 后进入转速稳定阶段, 采用 TPSA-TC-TSF 控制策略。

图 10 中策略切换角度 θ_1 是由过渡状态 TC-TSF 策略切换到转速稳态阶段 TPSA-TC-TSF 的交界角度, 其与转速差 e 和电机累计转过角度 θ_0 的

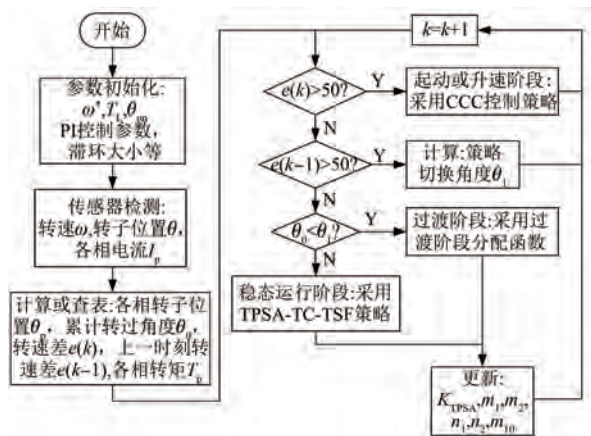


图 10 ASHSRM 控制系统运行流程图

Fig. 10 Control system operation flow chart of ASHSRM

关系式为

$$\theta_1 = 15^\circ \times \text{ceil}(\theta_0/15^\circ) + 360^\circ \quad (16)$$

为减少切换控制策略造成分配函数值的突变,本文将 θ_1 确定为转矩分配函数区间交界处,即 15° 的倍数。式(16)首先用 ceil 函数(向上取整函数)确定最接近于 15° 的倍数的累计转子角度,然后在此基础上增加一定余量(本文取 4 个转子周期,即 360°),以确保过渡阶段结束后转速保持稳定。

4.2 稳态运行阶段控制系统结构搭建

稳态运行阶段基于 TPSA-TC-TSF 控制策略的 ASHSRM 控制系统框图如图 11 所示。该系统转速环采用 PI 控制,输出总参考转矩 T_{ref} 经过 TPSA-TC-TSF 进行转矩分配,得到电机各相参考转矩,与转矩模型得到的电机各相转矩作差得到差值 ΔT ,通过转矩滞环模块确定功率变换器件开关管的通断,实现对电机各相绕组转矩的直接控制。

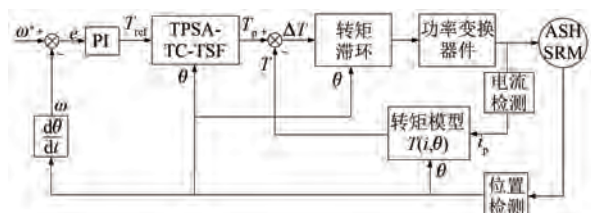


图 11 基于 TPSA-TC-TSF 的 ASHSRM 控制系统框图

Fig. 11 Block diagram of ASHSRM control system based on TPSA-TC-TSF

采用 Ansys 的 Maxwell 模块搭建 ASHSRM 三维仿真模型,对其进行静态仿真分析,并将所得数据进行二维线性插值,得到电机的转矩特性曲面,

如图 12 所示。在电机控制系统中,转矩特性曲面的作用是根据传感器获取的转子位置与相电流信息推算电机各相转矩。

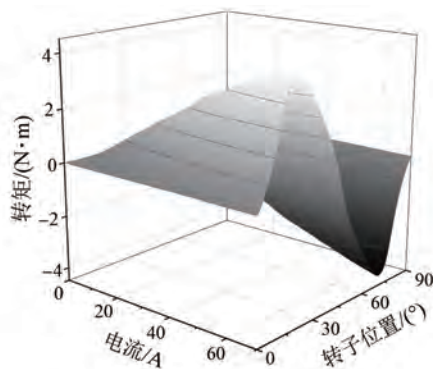


图 12 ASHSRM 转矩特性曲面

Fig. 12 Torque characteristic surface of ASHSRM

在转矩特性数据基础上,对处于正转矩区间的各个数据点除以电流平方,然后进行二维线性插值;对于负转矩区间的转矩电流平方比值设为零,即可获得如图 13 所示的转矩电流平方比特性曲面。该曲面用于确定式(12)中的各相转矩电流平方比取值,进而确定式(11)中的 K_{TPSA} 值。

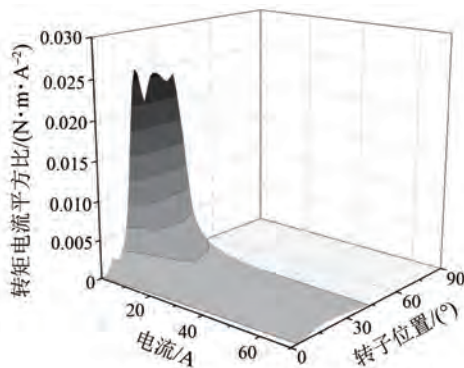


图 13 ASHSRM 转矩电流平方比特性曲面

Fig. 13 Torque per square ampere characteristic surface of ASHSRM

5 仿真分析

采用 Matlab/Simulink 搭建控制系统仿真模型,相关仿真参数如下:电机额定转速 20 000 r/min,额定转矩 $1.43 \text{ N}\cdot\text{m}$,母线电压 270 V,转动惯量 $J = 0.000\ 127 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,内阻 $R_s = 0.1 \Omega$,起动升速阶段电流限幅值 50 A,电流滞环大小 0.1 A,稳态运行阶段转矩滞环大小 $0.001\ 2 \text{ N}\cdot\text{m}$,转矩限幅值 $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$,滤波比例系数

$k_{\alpha} = 2.3 \times 10^{-5}$, PI 控制器参数 $K_p = 1.5, K_i = 0.005$ 。

5.1 瞬态仿真分析

为验证前文所论述的控制系统运行流程的合理性与可靠性, 对其进行瞬态仿真。图 14 与图 15 为给定转速 3 000 r/min、负载 1 N·m 时, 采用余弦型 TSF 与所提出控制策略的相电流、相转矩、总转矩与转速波形图。

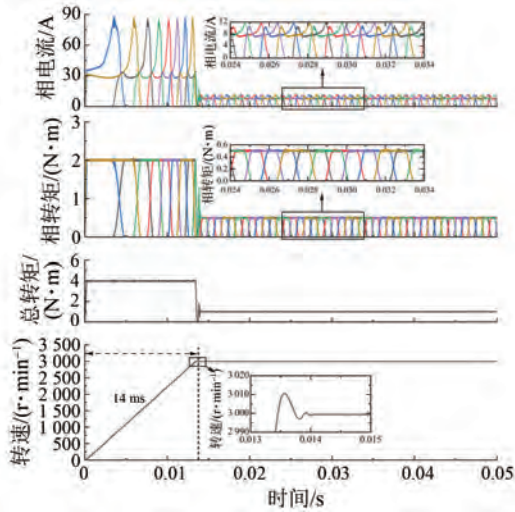


图 14 余弦 TSF 瞬态仿真波形

Fig. 14 Transient waveform of cosine TSF

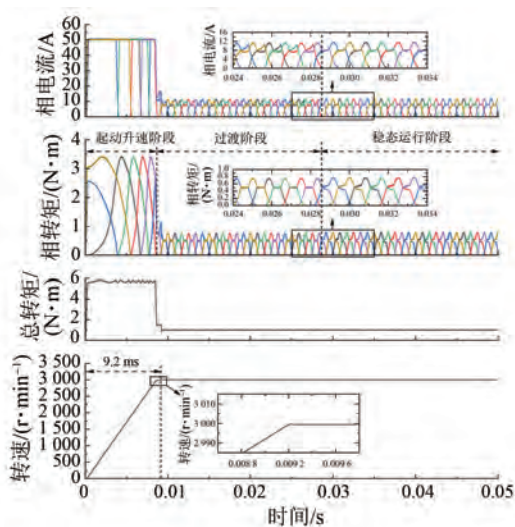


图 15 所提出控制策略瞬态仿真波形

Fig. 15 Transient waveform of the proposed control strategy

对比仿真波形可知, 余弦 TSF 为维持参考转矩值, 相电流出现较大超调, 峰值电流达到 87.3 A, 而本文所提控制策略起动升速阶段采用 CCC 控制, 电流被限幅在 50 A, 可以保护功率变

换器件不受过高电流冲击而损坏。余弦 TSF 从起动到转速稳定所用时间为 14 ms, 最大转速为 3 010.6 r/min, 超调量为 0.35%; 本文所提控制策略用到的调节时间为 9.2 ms, 超调量为 0.01%。由此可见本文所提控制策略有更好的响应性能与稳定性。此外, 起动升速阶段与稳态运行阶段过渡平稳, 电流与转矩波形未出现异常, 这验证了本文所提控制策略的可行性。

5.2 稳态运行阶段仿真分析

为验证所提出的 TPSA-TC-TSF 策略在降低转矩脉动与提高转矩电流比上的有效性, 对其进行稳态运行阶段对比仿真分析。

单位时间内转矩脉动系数为

$$K_{rip} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100\% \quad (17)$$

式中: T_{max} 与 T_{min} 为瞬时转矩最大值与最小值, T_{avg} 为单位时间内转矩平均值。

转矩电流比是一个转子周期内平均转矩 T_{avg} 与电流有效值 I_{rms} 的比值, 转矩电流比越大, 意味着产生单位转矩所消耗的电流越小, 即电机效率越高。转矩电流比 μ 的计算式如下:

$$\mu = \frac{T_{avg}}{I_{rms}} = \frac{T_{avg}}{\sqrt{\frac{N_r}{2\pi} \int_0^{2\pi/N_r} \sum_{k=1}^m i_k^2 d\theta}} \quad (18)$$

式中: N_r 为转子极数; m 为电机相数。

图 16 与图 17 为给定转速 3 000 r/min、负载 1 N·m 工况下, 采用余弦型 TSF 与 TPSA-TC-TSF 策略下的稳态运行阶段的定子各相电流、各相转矩与总转矩波形图, 其中开通角 $\theta_{on} = 7^\circ$ 。

对比仿真波形可知, 在低速工况下, 余弦型 TSF 在换相区励磁相与退磁相电流均出现超调以确保转矩跟踪; 改进 TSF 为励磁相与退磁相分配的转矩更少, 使得二者电流较小, 由另一侧的单相导通相补偿转矩缺额, 使得单相导通相电流较大。双侧定转子均单相导通时, 余弦型 TSF 有一相电流偏大, 而改进 TSF 按转矩电流平方比分配转矩, 使两相电流均较小。采用改进 TSF 策略后的平均电流更小, 转矩电流比由 0.110 13 上升至 0.117 67, 上升幅度 6.8%; 转矩脉动系数由 0.082 51 下降至 0.074 63, 下降幅度 9.6%。

图 18 与图 19 为给定转速 20 000 r/min、负载 1 N·m 工况下, 采用余弦型 TSF 与 TPSA-TC-TSF

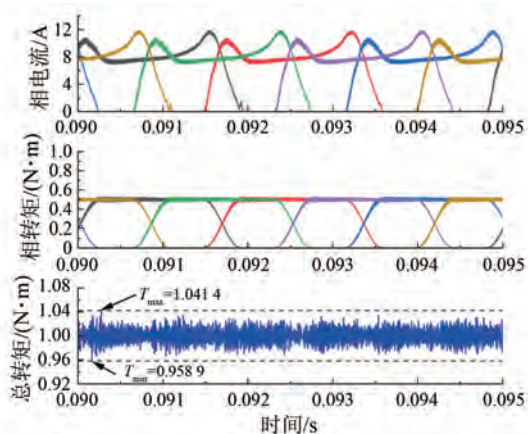


图 16 3 000 r/min,1 N·m 的余弦型 TSF 稳态仿真波形

Fig. 16 Steady state waveform plot of cosine TSF under 3 000 r/min and 1 N·m

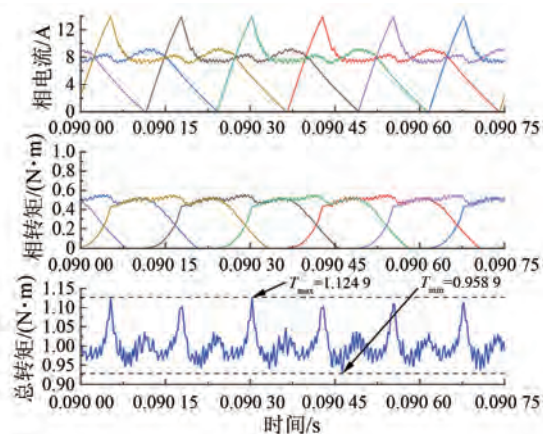


图 18 20 000 r/min,1 N·m 的余弦型 TSF 稳态仿真波形

Fig. 18 Steady state waveform plot of cosine TSF under 20 000 r/min and 1 N·m

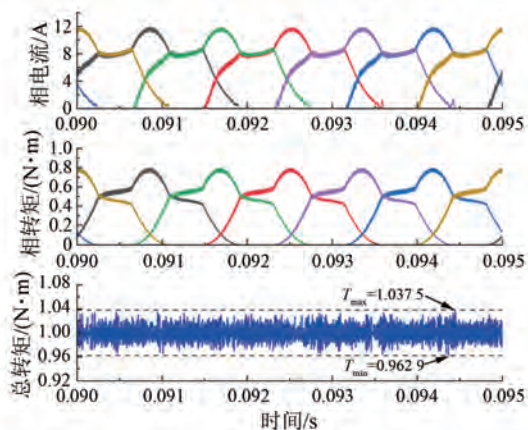


图 17 3 000 r/min,1 N·m 的 TPSA-TC-TSF 稳态仿真波形

Fig. 17 Steady state waveform plot of TPSA-TC-TSF under 3 000 r/min and 1 N·m

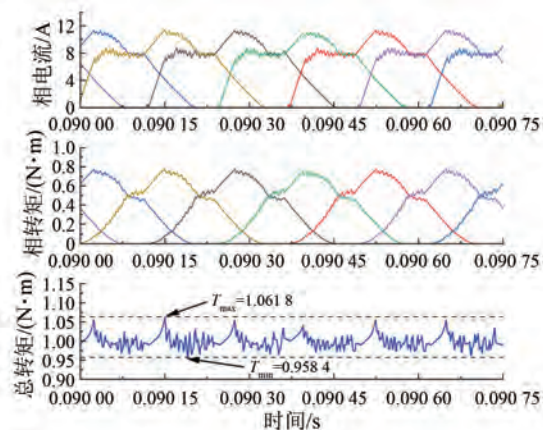


图 19 20 000 r/min,1 N·m 的 TPSA-TC-TSF 稳态仿真波形

Fig. 19 Steady state waveform plot of TPSA-TC-TSF under 20 000 r/min and 1 N·m

策略下的稳态运行阶段定子各相电流、各相转矩与总转矩波形图,其中开通角 $\theta_{on} = 3.5^\circ$ 。

相较于低速工况,高速工况下各相转矩跟随参考转矩的难度更大,因此设置较小的开通角来扩大励磁相与退磁相换相区间。由图 16~图 19 可知,高速工况下余弦 TSF 策略的转矩脉动明显大于低速工况,TPSA-TC-TSF 对各相转矩重新分配,充分利用各相绕组产生转矩能力大的导通区间,转矩脉动系数由 0.195 61 下降至 0.103 48,下降幅度 47.1%,峰值电流由 13.9 A 下降至 11.4 A,转矩电流比由 0.106 97 上升至 0.114 98,提升幅度 7.5%。

给定转速 3 000 r/min 与 20 000 r/min,负载

1 N·m 工况下采用各类型传统 TSF 与本文所提出的 TPSA-TC-TSF 策略的稳态转矩脉动与转矩电流比汇总见表 2 和表 3。为确保对比分析的严谨性,同一工况下各种控制策略的开通角 θ_{on} 保持

表 2 低速工况下电机性能参数对比

Tab. 2 Comparison of performance parameters of motor under low-speed condition

控制策略	转矩脉动系数	转矩电流比
余弦 TSF	0.082 51	0.110 13
直线 TSF	0.079 59	0.108 75
指数 TSF	0.076 23	0.104 03
立方 TSF	0.086 13	0.110 23
TPSA-TC-TSF	0.074 63	0.117 67

表 3 高速工况下电机性能参数对比

Tab. 3 Comparison of performance parameters of motor under high-speed condition

控制策略	转矩脉动系数	转矩电流比
余弦 TSF	0.195 61	0.106 97
直线 TSF	0.162 49	0.106 23
指数 TSF	0.313 08	0.106 49
立方 TSF	0.182 51	0.107 37
TPSA-TC-TSF	0.103 48	0.114 98

一致。由表 2~表 3 可知,所提出的 TPSA-TC-TSF 策略稳态性能不仅优于余弦型 TSF 策略,也优于直线型、指数型、立方型 TSF 策略,进一步验证了所提 TPSA-TC-TSF 策略在改善 ASHSRM 稳态性能方面的有效性。

6 结语

本文针对 ASHSRM 稳态运行阶段设计了一种新型转矩分配函数控制策略,该策略根据转矩电流平方比对均处于单相导通状态的两侧绕组进行转矩分配,同时为产生转矩能力更强的单相导通侧绕组分配更多转矩,以弥补两相换相侧所产生转矩的不足。此外,为改善系统瞬态性能,设计控制系统运行流程,起动阶段采用电流斩波控制策略,并设计过渡阶段转矩分配函数以实现起动阶段与稳态运行阶段的平稳过渡。

本文基于 Simulink 搭建了 ASHSRM 控制系统仿真模型,进行对比仿真分析。瞬态仿真结果表明,所提出的 TPSA-TC-TSF 控制策略可以改善起动升速阶段调节时间与超调量,且具有稳定性与可靠性。稳态仿真结果表明,本文所提出的 TPSA-TC-TSF 控制策略相较于四种传统 TSF 策略能有效抑制电机的转矩脉动,提高电机的工作效率,后续将搭建实物试验平台进一步验证其工程上的可行性。

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

任广旭进行了方案设计、仿真、内容总结与论

文撰写,刘爱民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, simulation, content summary and paper writing were conducted by Ren Guangxu. The manuscript was revised by Liu Aimin. All authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献

- [1] 李涛,梁玉秀,杨业,等. 轴向磁通开关磁阻电机研究进展综述[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 115-135.
Li T, Liang Y X, Yang Y, et al. Review of research progress on axial flux switched reluctance motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 115-135.
- [2] 李涛,张幽彤,梁玉秀,等. 定子无磁轭模块化轴向磁通永磁电机研究进展综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 340-353.
Li T, Zhang Y T, Liang Y X, et al. An overview on research progress of yokeless and segmented armature axial flux permanent magnet machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 340-353.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 周云红,谭正一,王东,等. 宽转子无轴承开关磁阻电机的计及磁饱和径向力模型[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 90-102.
Zhou Y H, Tan Z Y, Wang D, et al. Radial force modeling of a bearingless switched reluctance motor with wide rotors considering magnetic saturation [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 90-102.

- (2): 90-102.
- [6] 周云红, 李汉杰, 孟思洁, 等. 宽转子无轴承开关磁阻电机的转子极形优化[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 108-117.
Zhou Y H, Li H J, Meng S J, et al. Optimization of rotor pole shape for bearingless switched reluctance motor with wide rotor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(12): 108-117.
- [7] 于丰源, 陈昊, 闫文举, 等. 宽窄定子极轴向磁通开关磁阻电机的设计与分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1261-1274.
Yu F Y, Chen H, Yan W J, et al. Design and characteristic analysis of a wide-narrow stator poles axial flux switched reluctance machine [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(5): 1261-1274.
- [8] 刘爱民, 刘权, 娄家川, 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.
- [9] 黄朝志, 耿永民, 原红卫. 基于 NSGA-II 的局部范围搜索算法的电机参数优化[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(6): 9-18.
Huang C Z, Geng Y M, Yuan H W. Parameter optimization of motor by regional local search algorithm based on NSGA-II [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(6): 9-18.
- [10] Xia Z, Bilgin B, Nalakath S, et al. A new torque sharing function method for switched reluctance machines with lower current tracking error [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(11): 10612-10622.
- [11] Zhang X H, Feng L Y, Mao Y, et al. Torque online correction control of switched reluctance motor based on optimized torque sharing function [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2024, 39(3): 1750-1762.
- [12] 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.
- [13] Hu Y F, Gu C J, Zhang Z, et al. Torque ripple minimization of six-phase switched reluctance motor based on enhanced direct instantaneous torque control [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2024, 10(2): 4371-4382.
- [14] 李梦茹, 冬雷, 于坤洋, 等. 开关磁阻电机直接转矩控制方法的优化[J]. 微特电机, 2022, 50(11): 16-22.
Li M R, Dong L, Yu K Y, et al. Optimization of direct torque control method of switched reluctance motor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2022, 50(11): 16-22.
- [15] 黄朝志, 曹晓刚, 孙燕文, 等. 开关磁阻电机自抗扰无磁链直接转矩控制[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(2): 138-148.
Huang C Z, Cao X G, Sun Y W, et al. SRM active disturbance rejection direct torque control without flux [J]. *Journal of Detection & Control*, 2024, 46(2): 138-148.
- [16] 黄苏丹, 刘付榕, 曹广忠, 等. 基于在线差分进化算法的平面开关磁阻电机约束预测位置控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5239-5250.
Huang S D, Liu F R, Cao G Z, et al. Constrained predictive position control of planar switched reluctance motors using on-line differential evolution algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(13): 5239-5250.
- [17] Ge L F, Guo J X, Mao S, et al. A composite model predictive control method of SRMs with PWM-based signal for torque ripple suppression [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(2): 2469-2478.
- [18] 栾茹, 邹洪建. 开关磁阻电机转速调节器参数模糊自整定的研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 14-20.
Luan R, Zou H J. Research on adaptive parameters adjustment of speed regulator of switched reluctance motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(11): 14-20.
- [19] 胡春龙. 基于神经网络的五相开关磁阻电机直接转矩控制系统研究[J]. 机械与电子, 2021, 39(8): 36-40.
Hu C L. Research direct torque control system of five

- phase switched reluctance motor based on neural network [J]. *Machinery & Electronics*, 2021, 39(8): 36-40.
- [20] 杨辉, 李昕涛, 王茹愿, 等. 基于粒子群算法的开关磁阻电机控制系统研究[J]. *微特电机*, 2024, 52(4): 65-71.
Yang H, Li X T, Wang R Y, et al. Research on switched reluctance motor control system based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2024, 52(4): 65-71.
- [21] 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*, 2021, 68(11): 10569-10579.
- [22] 曹晓刚. 基于自抗扰的永磁辅助开关磁阻电机直接转矩控制策略研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2024.
Cao X G. Research on direct torque control strategy of permanent magnet assisted-switched reluctance motor based on active disturbance rejection [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2024.
- [23] 孙庆国, 卫功民, 刘旭. 自适应换相与转矩补偿的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(6): 91-100.
Sun Q G, Wei G M, Liu X. Torque ripple suppression strategy of switched reluctance motor based on adaptive commutation and torque compensation [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(6): 91-100.
- [24] 贲彤, 聂恒, 陈龙, 等. 一种正弦补偿型转矩分配函数的SRM转矩脉动抑制策略[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(8): 100-111.
Ben T, Nie H, Chen L. SRM torque ripple suppression strategy based on sinusoidal compensation torque sharing function [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(8): 100-111.
- [25] 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): 7829-7839.
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): 7829-7839.
- [26] Yan W J, Xin J, Zhang K, et al. Torque ripple reduction of double stator switched reluctance machine with complementary inner and outer stator torques [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(4): 9602-9612.
- [27] 芦思宇. 轴向错角高速开关磁阻电机损耗研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
Lu S Y. Research on loss of axial stagger high-speed switched reluctance motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [28] 臧洪颖, 刘爱民, 任达, 等. 新型轴向磁通转子错角斜极SRM研究[J]. *大电机技术*, 2022(2): 1-5+31.
Zang H Y, Liu A M, Ren D, et al. Analysis of axial flux switched reluctance motor with malposed and skewed rotor [J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2022(2): 1-5+31.
- [29] 黄宇超. 轴向错角高速开关磁阻电机控制技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
Huang Y C. Research on the control technology of high speed switched reluctance motor with axial misalignment [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [30] 任鑫宇, 刘爱民. 新型轴向磁通永磁辅助磁阻电机研究[J]. *大电机技术*, 2022(5): 1-7.
Ren X Y, Liu A M. Analysis of novel axial flux permanent magnet assisted reluctance motor [J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2022(5): 1-7.

收稿日期:2025-12-14

收到修改稿日期:2026-03-03

作者简介:

任广旭(1999—),男,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机及其控制,527849618@qq.com;

*通信作者:刘爱民(1961—),女,博士,教授,研究方向为水下机器人智能控制、特种电机及其驱动系统研究, yunamy163@163.com。