第 53 卷 第 11 期 电机与控制应用 Vol. 53 No. 11, November, 25, 2026
2026 年 11 月 25 日 Electric Machines & Control Application CCBY-NC-ND 4.0 License
DOI:10.12177/emca.2026.235 文章编号:1673-6540(2026)11-1191-14 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

基于误差补偿与开关角-电压动态调节 SRM 转矩脉动控制

蒋建权, 蔡 辉*
(长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114)

SRM Torque Ripple Control Based on Error Compensation and Dynamic Adjustment of Switching Angle and Voltage

Jiang Jianquan, Cai Hui*
(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: **[Objective]** Switched reluctance motor (SRM) possesses an inherent large torque ripple owing to its unique doubly salient structure, which hinders its deployment in high-performance applications. For conventional torque sharing function (TSF) control strategy, the decreased inductance variation rate in the late commutation stage degrades torque tracking performance and induces prominent torque ripple. **[Methods]** To address this issue, this paper designed a compensated TSF based on cross-phase torque error. The steady-state torque tracking error of the outgoing phase at the late commutation stage was taken as a dynamic correction term and superimposed in real time onto the reference torque command of the incoming phase. By utilizing the high control gain of the incoming phase in the inductance rising region, precise compensation of commutation error was achieved, so as to improve the torque tracking accuracy throughout the commutation process. Furthermore, aiming at the insufficient current eatablishment/decay time as well as aggravated negative torque induced by magnetic saturation under high speed and heavy load conditions, a coordinated regulation strategy of turn-on/turn-off angles and winding voltage was further proposed within the framework of the compensated TSF. The turn-on and turn-off angles were dynamically optimized according to the rotational speed to reserve sufficient time for current establishment and decay. Combined with the Cuk converter and the conventional asymmetric half-bridge topology, the direct current bus voltage was dynamically boosted with the operating speed to accelerate the winding demagnetization process under high-speed conditions and effectively suppressed braking negative torque. **[Results]** To verify the effectiveness of the proposed strategy, a 6/4-pole SRM simulation model was built in Matlab/Simulink. Comparative simulations between the proposed novel TSF and the conventional TSF were carried out under three typical operating conditions: medium-speed light-load, high-speed light-load and high-speed heavy-load, and tests were performed on the experimental platform. The results showed that compared with the conventional TSF, the proposed novel TSF reduced the torque ripple coefficients from 5.63%, 12.99% and 13.45% to 2.86%, 3.96% and 3.69%, with reductions of 2.77%, 9.03% and 9.76%, respectively. Under high-speed light-load and high-speed heavy-load conditions, the amplitudes of negative torque decreased from 0.600 N·m and 1.127 N·m to 0.096 N·m and 0.219 N·m. **[Conclusion]** The proposed novel TSF control strategy can effectively suppress torque ripple and significantly reduce negative torque under various operating conditions. It can tackle the dual challenges induced by speed and load variations and possesses superior adaptability across the full operating range.

Key words: switched reluctance motor; torque sharing function; torque ripple; error compensation

摘 要:**【目的】**开关磁阻电机(SRM)具有特殊的双凸极结构,固有转矩脉动较大,难以满足高性能场景的应用需求。传统转矩分配函数(TSF)控制策略在换相末期电感变化率降低,转矩跟踪性能劣化,转矩脉动显著。**【方法】**为解决该问题,本文设计了一种基于跨相转矩误差的补偿型 TSF。将前一相换相末期的稳态转矩跟踪误差作为动态修正量,实时叠加至当前相的参考转矩指令;利用当前相在电感上升区的高控制增益,实现换相误差的精确补偿,从而提升换相全过程的转矩跟踪精度。其次,针对

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

转速与负载升高带来的电流建立/衰减时间不足,以及磁饱和加剧诱发的负转矩问题,在补偿型 TSF 框架下进一步提出开通/关断角与绕组电压协同调节策略:依据转速动态优化开通角与关断角,为电流建立和衰减预留充足时间;结合 Cuk 变换器与传统不对称半桥拓扑,根据运行转速动态抬升直流母线电压,加快高速工况下的绕组退磁进程,有效抑制制动性负转矩。【结果】为验证所提策略的有效性,基于 Matlab/Simulink 搭建 6/4 极 SRM 仿真模型,在中速轻载、高速轻载和高速重载三种典型工况下,对所提新型 TSF 与传统 TSF 开展对比仿真,并在试验平台完成测试。结果表明:相较于传统 TSF,所提新型 TSF 可将三种工况下的转矩脉动系数由 5.63%、12.99%、13.45% 分别降至 2.86%、3.96%、3.69%,降幅依次为 2.77%、9.03%、9.76%;在高速轻载、高速重载工况下,负转矩幅值由 0.600 N·m、1.127 N·m 分别降低至0.096 N·m、0.219 N·m。【结论】所提新型 TSF 控制策略在多种运行条件下均能有效抑制转矩脉动并显著削弱负转矩,能有效应对转速与负载的双重挑战,具有优越的全工况适应性。

关键词:开关磁阻电机;转矩分配函数;转矩脉动;误差补偿

0 引言

开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)具有结构简单、成本低以及容错高等特点,被广泛应用于各领域[1-4]。SRM 独特的双凸极结构,固有转矩脉动较大,制约了其在高性能场合的应用[5-7]。显著的转矩脉动不仅会引发电机剧烈振动发出噪声,还会降低传动系统的控制精度,加速机械部件的疲劳损坏,直接影响传动系统寿命。

近年来,国内外专家学者主要从两方面抑制转矩脉动。一方面是对电机本体设计进行优化,主要包括定转子极弧和齿型优化、材料选择、电机结构优化和电机几何参数优化[8-11];另一方面是对电机的控制策略进行优化。

目前,抑制 SRM 转矩脉动的控制策略主要有直接转矩控制(Direct Torque Control,DTC)、直接瞬时转矩控制(Direct Instantaneous Torque Control,DITC)、模型预测控制和转矩分配函数(Torque Sharing Function,TSF)等[12-15]。与其他控制策略相比,TSF 优势明显。文献[14]以电感边界点为划分依据,将换相区拆分为两个子区间,并针对各区间的特征设计差异化 TSF,该方法虽能在一定程度上抑制转矩脉动,但改善效果有限。文献[15]基于总转矩与期望转矩间的稳态偏差,引入傅里叶逼近曲线对分配转矩进行补偿,提升了实际转矩对分配转矩的跟随能力。文献[16]以转矩电流比为分界点,将换相过程分为两个阶段,对相邻两相的参考转矩进行补偿,但在换相结束后,负转矩问题依然突出。文献[17]利用参考转矩与估计转矩的误差,对参考转矩进行补偿,该方法显著削弱了转矩脉动,但未能消除负转矩。文献[18]将 DITC 的快速动态响应与 TSF 的平滑能力相结合,以确保有效的相转矩分布,从而保证瞬时总转矩恒定,有效减少了转矩脉动。文献[19]将模糊控制与比例积分微分控制相结合,自动调整比例因子,并根据不同转速采用不同控制策略,减少了转矩脉动,提升了系统响应速度。

在 SRM 运行过程中,随着转速升高,绕组电流建立与衰减的时间缩短。固定的开通/关断角导致电机在低速区转矩脉动增大、效率降低,在高速区出现转矩缺口。通过动态调整开通/关断角,可以为电流变化争取时间,实现全速域的高性能运行[20-21]。文献[22]通过检测关断相相电流来调整关断角,防止该相产生负转矩;通过 TSF 得到最佳参考转矩,将其与实际转矩进行对比以调整开通角,从而有效抑制 SRM 的转矩脉动。文献[23]将 DITC 与开通/关断角控制相结合,调整相邻两相的转矩误差和换向电流误差来自动确定开通角度,使 DITC 可以更灵活地调节转矩。文献[24]通过将电机相电流和转速与开通/关断角关联,计算延迟或提前开通/关断角,以选取其最优值。文献[25]通过参数化方法优化辅助绕组的开通/关断角,并引入主绕组提前导通机制,制定了十二扇区 DITC 策略。

当转速进一步升高时,非对称半桥型功率变换器的直流母线电压无法调节,且 DITC 只能输出单一电平状态,SRM 仍然存在转矩脉动和负转矩,因此需要电压脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制或者改变功率变换器的结构来优化控制效果[26-28]。文献[29]提出一种结合电流滞环与 PWM 的变占空比控制方法,依据电感线性模型分段调节绕组电压,有效减小了电流跟踪误差和转矩脉动。文献[30]提出一种软斩波 PWM 控制与双滞环 DITC 相结合的方法,该方法根据转矩误差动态调节绕组两端的平均电

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

压，克服了传统 DITC 因电压固定而无法及时响应误差的缺点。

本文设计了一种基于跨相转矩误差补偿的 TSF 控制方法，利用前一相的转矩跟踪误差实时修正当前相的参考转矩，提高转矩跟踪能力。并在补偿型 TSF 控制的基础上，根据转速和负载转矩实时调整开通/关断角以及绕组电压，以进一步减少转矩脉动。以三相 6/4 极 SRM 为控制对象，其磁链特性以二维查表形式输入，表中数据基于电机的有限元分析（Finite Element Analysis，FEA）计算得到，并在 Simulink 仿真环境中进行测试，验证所提方法的有效性。

1 SRM 驱动系统

SRM 具有独特的多相绕组间动态耦合作用，且定子与转子均为凸极结构。因此，第 k 相磁链 $\psi_k(\theta,i_k)$、输出转矩 $T_k(\theta,i_k)$ 和电感 $L_k(\theta,i_k)$ 与相电流 i_k 和转子位置角 θ 都呈现出高度非线性，难以构建精确的数学模型。

第 k 相绕组的电压平衡方程为

$$U_{\mathrm{dc}} = R_k i_k - e_k = R_k i_k + \frac{\mathrm{d}\psi_k(\theta,i_k)}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中：R_k、e_k 分别为第 k 相绕组电阻、感应电动势。

忽略相电流对电感的影响，将 $\psi(\theta)=L(\theta)i(\theta)$ 代入式(1)，得到：

$$U_{\mathrm{dc}} = R_k i_k + L_k \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t} + i_k \frac{\mathrm{d}L_k}{\mathrm{d}t} = R_k i_k + L_k \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t} + i_k \frac{\mathrm{d}L_k}{\mathrm{d}\theta}\omega \tag{2}$$

式中：ω 为转子转速。

式(2)右边第一项为电阻压降，第二项为变压器电动势（由电流变化引起），第三项为反电动势（由转子位置变化引起）。可见，相绕组外加电压与其电路中三部分电压相平衡。

SRM 转子机械运动方程为

$$T_{\mathrm{e}} = J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t} + D\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + T_{\mathrm{L}} \tag{3}$$

式中：T_{e} 为电磁转矩；J 为转动惯量；D 为摩擦因数；T_{L} 为负载转矩。

根据虚位移原理，SRM 在任一运行点 x 处的瞬时电磁转矩为

$$T_x = \left.\frac{\partial W'}{\partial\theta}\right|_{i=\mathrm{const}} = -\left.\frac{\partial W}{\partial\theta}\right|_{\psi=\mathrm{const}} \tag{4}$$

式中：$W' = \int_0^i \psi \mathrm{d}i = \int_0^i L(\theta,i)i\mathrm{d}i$ 为绕组的磁共能；$W = \int_0^{\psi} i(\psi,\theta)\mathrm{d}\psi$ 为绕组储能。

2 误差补偿型 TSF 控制策略

2.1 传统 TSF 控制策略

传统 TSF 控制策略框图如图 1 所示。比例积分（Proportional-Integral，PI）控制器通过计算参考转速 ω_{ref} 与实际转速 ω 的差值 $\Delta\omega$ 得到总参考转矩 T_{ref}；TSF 将 T_{ref} 解耦成各相的参考转矩 $T_{k\mathrm{ref}}$，滞环控制模块对各相实际转矩 T_k 与 $T_{k\mathrm{ref}}$ 的差值进行处理，得到相应的控制信号；控制信号传输至功率变换器调节功率开关，实现 SRM 输出转矩的精确跟踪。

TSF 控制模块的输入为 θ 与 T_{ref}，设计准则为确保 SRM 在任意转子位置下的合成转矩恒等于总参考转矩。TSF 通式为

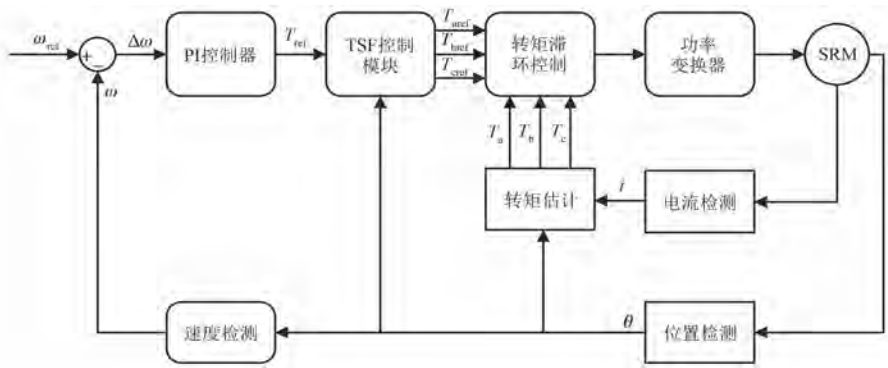


图 1 传统 TSF 控制策略框图

Fig. 1 Block diagram of conventional TSF control strategy

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

$$\begin{cases} T_{k\mathrm{ref}}(\theta) = T_{\mathrm{ref}} f_k(\theta) \\ \sum_{k=1}^{m} f_k(\theta) = 1, 0 \leqslant f_k(\theta) \leqslant 1 \end{cases} \tag{5}$$

式中:$f_k(\theta)$为第 k 相的 TSF;m 为电机相数。

在传统 TSF 控制中,开通、关断角 θ_{on}、θ_{off} 满足:

$$\theta_{\mathrm{off}} = \theta_{\mathrm{on}} + \tau_{\mathrm{r}} \tag{6}$$

$$\tau_{\mathrm{r}} = \frac{360}{m \cdot N_{\mathrm{r}}} \tag{7}$$

式中:τ_{r}、N_{r} 分别为转子极距、极数。

TSF 控制策略相较其他策略最大区别在于:在换相区,当前相导通时前一相不会立刻关断。这种控制方式可以使当前相的转矩平滑上升而前一相转矩平滑下降,前一相减少的转矩恰好由当前相增加的转矩来弥补,两者之和始终保持恒定。各相的参考转矩与位置的关系为

$$T_{k\mathrm{ref}} = \begin{cases} 0, & 0 \leqslant \theta < \theta_{\mathrm{on}} \\ f_{\mathrm{rise}} \cdot T_{\mathrm{ref}}, & \theta_{\mathrm{on}} \leqslant \theta < \theta_{\mathrm{on}} + \theta_{\mathrm{ov}} \\ T_{\mathrm{ref}}, & \theta_{\mathrm{on}} + \theta_{\mathrm{ov}} \leqslant \theta < \theta_{\mathrm{off}} \\ f_{\mathrm{decay}} \cdot T_{\mathrm{ref}}, & \theta_{\mathrm{off}} \leqslant \theta < \theta_{\mathrm{off}} + \theta_{\mathrm{ov}} \\ 0, & \theta_{\mathrm{off}} + \theta_{\mathrm{ov}} \leqslant \theta < \tau_{\mathrm{r}} \end{cases} \tag{8}$$

式中:f_{rise}、f_{decay} 分别为换相时励磁相、退磁相的 TSF;θ_{ov} 为重叠角。

TSF 设计应满足:在换相区的起点和终点值为零(或很小);在换相区内连续光滑,即 TSF 变化率不能过大;单相的输出转矩为正转矩;任何时刻,最多只有相邻两相绕组同时励磁。常见的 TSF 有直线型、余弦型、指数型和立方型 4 种。余弦型 TSF 曲线如图 2 所示。

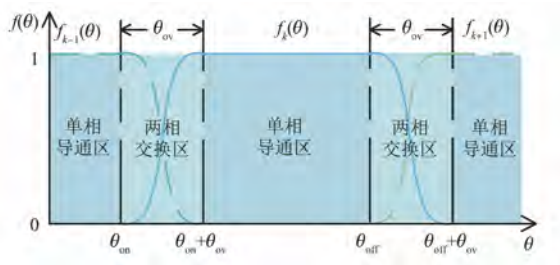


图 2　余弦型 TSF 曲线

Fig. 2　Cosine-type TSF curve

传统 TSF 虽能有效抑制转矩脉动,但换相末期跟踪能力差,实际转矩容易偏离参考值,引起转矩脉动;且参数固定,无法适应转速和负载变化。

2.2　误差补偿型 TSF 控制策略

忽略相电流对电感的影响及磁场边缘扩散效应,瞬时电磁转矩可近似为

$$T_k(\theta, i_k) = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\mathrm{d}L_k(\theta)}{\mathrm{d}\theta} \tag{9}$$

由式(9)可知,瞬时电磁转矩与电感变化率成正比。相电感随转子位置角呈周期性变化,如图 3 所示。

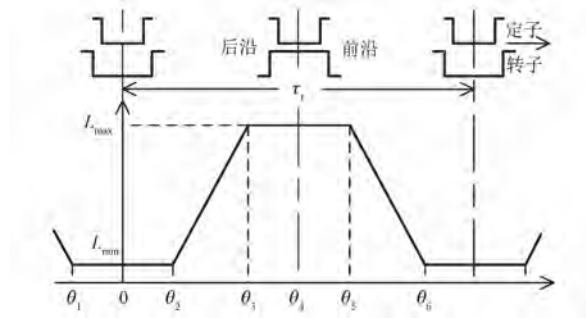


图 3　定转子相对位置及相电感变化曲线

Fig. 3　Curves of stator-rotor relative position and phase inductance variation

由图 3 可知,在换相末期,当前相转子位置在 $\theta_2 \sim \theta_3$ 范围内,此时绕组电感变化率较高,能够精确追踪参考转矩。前一相转子位置在 θ_3 附近,随着继续转动,转子趋近位置 θ_4,电感变化率迅速衰减,无法有效跟踪参考转矩,实际转矩大于参考转矩,此时合成转矩偏大,造成转矩脉动。传统 TSF 控制策略下的参考转矩、实际转矩和合成转矩如图 4 所示。

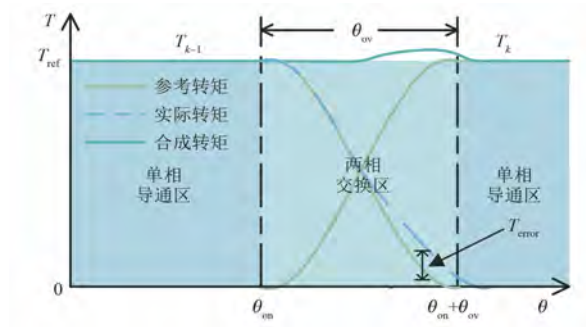


图 4　传统 TSF 控制策略下的参考转矩、实际转矩和合成转矩

Fig. 4　Reference torque, actual torque and synthesized torque under conventional TSF control strategy

为此,本文提出一种误差补偿型 TSF 控制策略。该策略下的各转矩如图 5 所示。该策略将前一相在换相末期存在的稳态转矩误差 T_{error} 作为动态修正量引入当前相的参考转矩指令中。利用当前相实际转矩能够快速准确地响应修正后的参

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

考转矩的特点，使实际转矩产生一个对应的下降量，前一相存在误差的转矩分量由当前相予以精确补偿，二者在换相末期实现动态平衡，使合成转矩保持平滑。

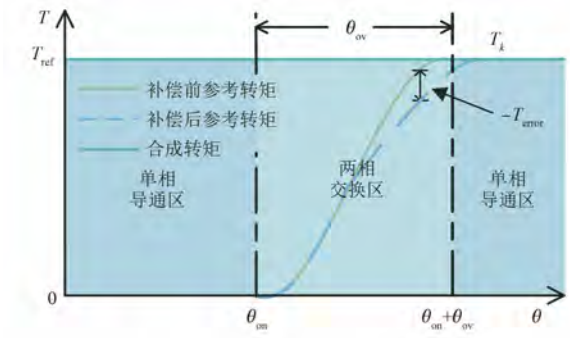


图 5　误差补偿 TSF 控制策略下的参考转矩、实际转矩和合成转矩

Fig. 5　Reference torque，actual torque and synthesized torque under the error-compensated TSF control strategy

稳态转矩误差可表示为

$$T_{error} = T_{kref} - T_k \tag{10}$$

误差补偿型 TSF 的表达式为

$$T_{kref} = \begin{cases} 0, & 0 \leqslant \theta < \theta_{on} \\ f_{rise} \cdot T_{ref} + T_{error}, & \theta_{on} \leqslant \theta < \theta_{on} + \theta_{ov} \\ T_{ref} + T_{error}, & \theta_{on} + \theta_{ov} \leqslant \theta < \theta_{off} \\ f_{decay} \cdot T_{ref}, & \theta_{off} \leqslant \theta < \theta_{off} + \theta_{ov} \\ 0, & \theta_{off} + \theta_{ov} \leqslant \theta < \tau_r \end{cases} \tag{11}$$

3　多变量动态调节策略

3.1　固定开通/关断角的影响

传统 TSF 中，开通/关断角通常设为固定值，难以适应 SRM 宽速域运行工况，成为转矩脉动乃至转矩缺口的主要原因。固定的开通/关断角在低速运行时可能表现良好，但在高速运行环境下，无法补偿电流电磁惯性带来的影响。若开通角设计滞后，电流无法在短暂的电感上升区内及时建立，导致转矩跟踪滞后；若关断角设计滞后，电流在电感下降区无法充分衰减，致使绕组在关断后仍存在电流，产生制动性负转矩。二者协同作用，在换相区形成显著的转矩缺口，造成总转矩剧烈波动。高速运行时不同开通/关断角对相转矩的影响如图 6 所示。

由图 6 可知，固定开通/关断角难以适应负载转矩的变化。随着负载增加，固定的关断角导致绕组电流在深度饱和的电感下降区无法完全衰减，产生强烈的制动性负转矩，加剧转矩脉动，降低电机运行效率；固定的开通角也可能因饱和效应偏离最佳位置，不仅会引入额外的电流应力，还制约系统效率的进一步优化。

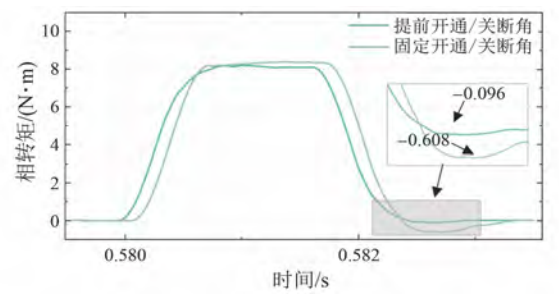


图 6　高速运行工况下不同开通/关断角对 SRM 相转矩的影响

Fig. 6　Effect of different turn-on/turn-off angles on SRM phase torque under high-speed operating conditions

3.2　动态调节开通/关断角控制策略

动态调节开通/关断角可以有效降低转矩脉动并从根本上减小负转矩。负转矩 T_{neg} 表达式为

$$T_{neg} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta},\ \frac{dL}{d\theta} < 0 \tag{12}$$

要消除负转矩，就必须在电感进入下降区前将电流降至阈值以下。电机高速运行时，需适当提前开通/关断角，确保电流能够及时建立和衰减，减小转矩脉动。

在重载条件下，调节开通/关断角的核心目标在于抑制因磁饱和加剧而产生的制动性负转矩。为此，关断角应适当提前，避免退磁不及时产生制动性负转矩。对于开通角，传统观点认为可略微滞后以缓解电流冲击，然而仿真结果表明，在深度饱和状态下，略微提前开通角对电流波形的影响并不显著。因此，综合理论分析与仿真结果，并参考式(7)的关系，在重载工况下开通角亦可适当提前，以协同优化转矩响应与换相平滑性。

基于此，本文提出一种基于基准角+双补偿量的动态调节开通/关断角控制策略。该策略将转速和负载对开通/关断角的影响进行解耦，并分别设计补偿函数，以实现开通/关断角在宽速域的动态调节。优化后的开通、关断角可表示为

$$\begin{cases} \theta_{on} = \theta_{on_base} + \theta_{on_speed} + \theta_{on_load} \\ \theta_{off} = \theta_{off_base} + \theta_{off_speed} + \theta_{off_load} \end{cases} \tag{13}$$

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

式中:θ_{on_base}、θ_{off_base} 分别为基准开通角、关断角;θ_{on_speed}、θ_{on_load} 和 θ_{off_speed}、θ_{off_load} 分别为开通角和关断角的转速补偿量、负载补偿量。

θ_{on_speed}、θ_{off_speed} 用于克服电磁惯性,确保电流能够及时建立和衰减,以减小转矩脉动。其表达式为

$$\begin{cases}\theta_{on_speed} = -k_1(\omega - \omega_{base}) \\ \theta_{off_speed} = -k_2(\omega - \omega_{base})\end{cases} \tag{14}$$

式中:k_1、k_2 分别为开通角、关断角的转速补偿系数;ω_{base} 为基准转速。

θ_{on_load}、θ_{off_load} 用于应对磁高饱和非线性,避免产生制动性负转矩。其表达式为

$$\begin{cases}\theta_{on_load} = -k_3(T_L - T_{L_base}) \\ \theta_{off_load} = -k_4(T_L - T_{L_base})\end{cases} \tag{15}$$

式中:k_3、k_4 分别为开通角、关断角的负载补偿系数;T_{L_base} 为基准负载转矩。

3.3 动态调节绕组电压控制策略

当 SRM 运行于宽速域时,恒定直流母线电压下的瞬时转矩调节能力有限。在高速工况下,反电动势较高,电流建立后会自然下降,磁饱和效应导致电感变化率降低,电流难以迅速回升,导致单相导通区的相转矩下降。另一方面,固定电压下关断相电流无法及时衰减,绕组关断后仍存在残余电流,产生制动性负转矩。二者协同作用,使合成转矩出现明显脉动。针对这一问题,需要通过改变功率变换器结构,提升高速工况下的绕组电压,以改善控制效果。不同绕组电压对相转矩和相电流的影响如图 7 所示。

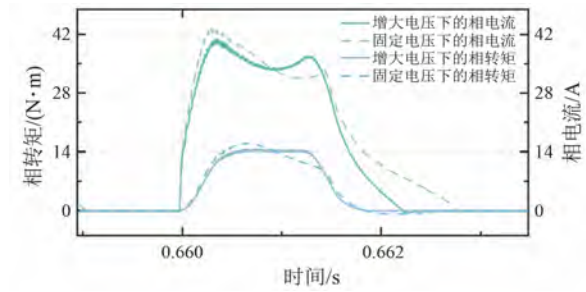


图 7 不同绕组电压对相转矩和相电流的影响

Fig. 7 Effects of different winding voltages on phase torque and phase current

Cuk 变换器因其输出电压与电流纹波小、输出电流连续等优点,近年来在电机驱动领域得到广泛应用。本文结合 Cuk 变换器与传统非对称半桥结构,提出一种升降压调节功率变换器。该变换器可根据转速动态调节直流母线电压,从而在高速工况下实现绕组电流的快速建立以及退磁通路的快速退磁。SRM 功率变换器拓扑结构如图 8 所示。图中,S 和 $S_1 \sim S_6$ 为开关管;D 和 $D_1 \sim D_6$ 为二极管;L_1、L_2 为电感;C_1、C_2 为电容;U_{in}、U_{out} 分别为 Cuk 电路的输入、输出电压;U 为直流母线电压。

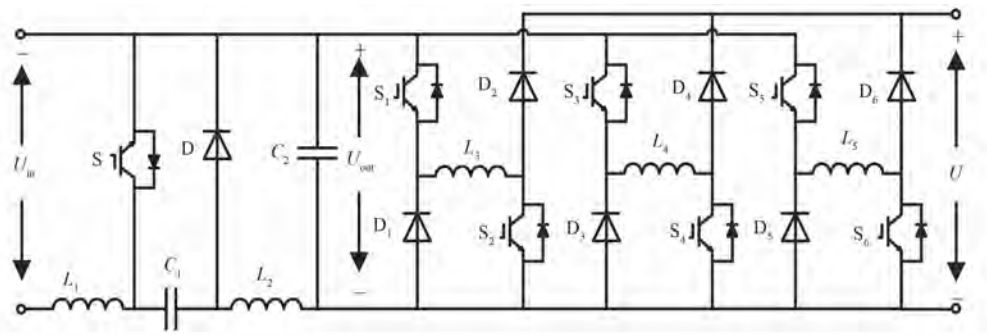


图 8 SRM 功率变换器拓扑结构

Fig. 8 Topology of the SRM power converter

S 开通时的电路图如图 9 所示。此时 C_1 放能,L_1、L_2 充能。流过 L_1、L_2 的电流 $i_{L_1^+}$、$i_{L_2^+}$ 的变化量可表示为

$$\Delta i_{L_1^+} = \int_0^{t_{on}} \frac{U_{in}}{L_1} dt = \frac{U_{in}}{L_1} \cdot t_{on} \tag{16}$$

$$\Delta i_{L_2^+} = \int_0^{t_{on}} \frac{U_{C_1} + U_{out}}{L_2} dt = \frac{U_{C_1} + U_{out}}{L_2} \cdot t_{on} \tag{17}$$

式中:U_{C_1} 为 C_1 两端电压;t_{on} 为开通时间。

S 关断时的电路图如图 10 所示。此时 C_1 充能,L_1、L_2 放能。流过 L_1、L_2 的电流 $i_{L_1^-}$、$i_{L_2^-}$ 的变化量可表示为

$$\Delta i_{L_1^-} = \int_{t_{on}}^{t_S} \frac{U_{C_1} - U_{in}}{L_1} dt = \frac{U_{C_1} - U_{in}}{L_1} \cdot t_{off} \tag{18}$$

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

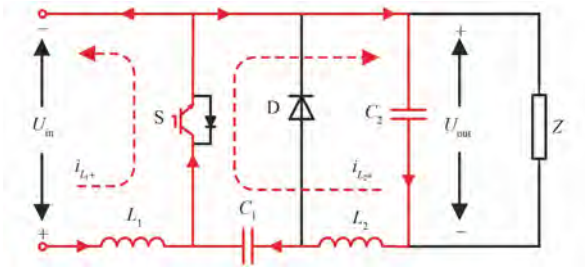


图 9　S 开通时的电路图

Fig. 9　Circuit diagram when S is turned on

$$\Delta i_{L_{2-}} = \int_{t_{on}}^{t_S} \frac{U_{out}}{L_2} \mathrm{d}t = \frac{U_{out}}{L_2} \cdot t_{off} \tag{19}$$

式中：t_S 为一个开关周期；t_{off} 为关断时间。

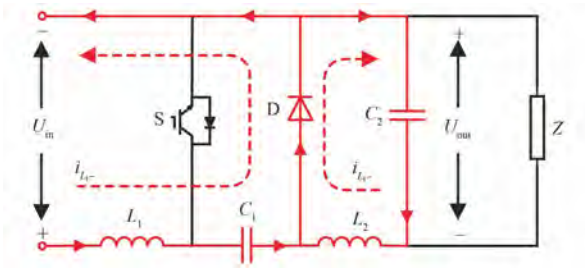


图 10　S 关断时的电路图

Fig. 10　Circuit diagram when S is turned off

两个电感在开关开通和关断阶段的电流变化量是相等的，所以：

$$\Delta L_{1+} = \Delta L_{1-} \tag{20}$$

$$\Delta L_{2+} = \Delta L_{2-} \tag{21}$$

由式(17)、(19)和(21)可得：

$$U_{in} D = (U_{C_1} - U_{in})(1 - D) \tag{22}$$

式中：D 为 S 的占空比。

由式(16)、(18)和(20)可得：

$$(U_{C_1} + U_{out}) D = - U_{out}(1 - D) \tag{23}$$

联立式(22)、(23)可得：

$$U_{out} = U_{in} \frac{-D}{1 - D} \tag{24}$$

由式(24)可知，只需根据转速调节 Cuk 电路中的开关 S 便可以调节直流母线电压。

4　仿真分析

SRM 因双凸极结构与磁路饱和效应，其电磁特性呈现强非线性。目前常用的非线性建模方法主要有三类：解析模型法、FEA 查表法和智能学习建模法。

综合考虑建模精度、计算复杂度与工程实用性，本文采用 FEA 查表法建立 SRM 的转矩-电流-位置非线性模型。该模型考虑了磁路饱和引起的电感非线性变化，相比线性电感模型能更准确地反映实际电机的电磁行为，其三维曲面图如图 11 所示。

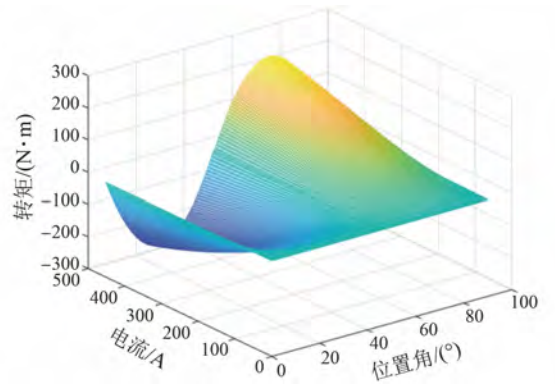


图 11　转矩-电流-位置三维曲面图

Fig. 11　Torque-current-position 3D surface plot

为了直观比较传统 TSF、误差补偿型 TSF 以及开通/关断角动态调节的新型 TSF 控制策略在转矩脉动抑制方面的性能差异，以一台三相 6/4 极 SRM 为研究对象，在 Matlab/Simulink 中分别建立三种控制策略的仿真模型。SRM 参数如表 1 所示。新型 TSF 控制策略框图如图 12 所示。

表 1　SRM 参数

Tab. 1　SRM parameters

参数名称	参数值
额定功率/kW	3
额定转速/(r·min^{-1})	2 000
额定电流/A	20
额定电压/V	150
定子相电阻/Ω	0.1
转动惯量/(kg·m^2)	0.008 2
摩擦因数/(N·m·s·rad^{-1})	0.01
定子外径/mm	180
转子外径/mm	99
气隙长度/mm	0.4

4.1　转矩脉动仿真结果

电机运行在低速区时，充裕的控制时间、微弱的反电动势干扰以及趋近线性的电磁特性，使传统 TSF 控制实现高性能运行，与另外两种控制策略对转矩脉动的抑制效果差异不大。随着转速升高，上述有利条件逐一丧失，从而使其控制性能显

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

著恶化。为验证不同控制策略在更严苛工况下的适应能力,设置了三种典型运行工况进行对比分析:中速轻载工况(1 500 r/min,5 N·m)、高速轻载工况(3 000 r/min,5 N·m)和高速重载工况(3 000 r/min,10 N·m)。

在三种工况下,分别对传统 TSF、误差补偿型 TSF 以及本文所提新型 TSF 控制策略进行仿真对比。

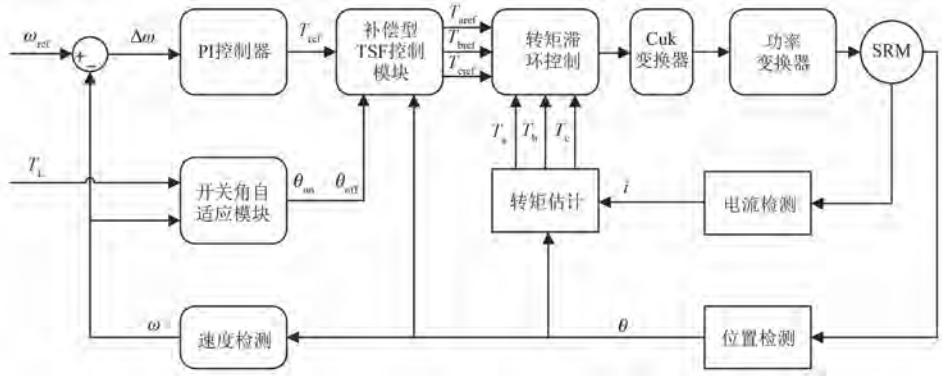


图 12　基于误差补偿 TSF 与多变量动态调节的新型 TSF 控制策略框图

Fig. 12　Block diagram of the novel TSF control strategy based on error-compensated TSF and multivariable dynamic adjustment

定义转矩脉动系数 k_T 为

$$k_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100\% \tag{25}$$

式中:T_{max}、T_{min} 和 T_{avg} 分别为同一周期内的总转矩最大值、最小值和平均值。

电机运行于中速轻载工况下的仿真波形如图 13 所示。由图 13 可知,传统 TSF 控制在换相末期出现明显的转矩脉动,转矩脉动系数为 5.63%。补偿型 TSF 与所提新型 TSF 控制策略的总转矩波形更平滑,转矩脉动系数分别降至 3.74% 和 2.86%。该结果验证了所提新型 TSF 控制策略在中速轻载工况下对转矩脉动的有效抑制能力。

电机运行于高速轻载工况下的仿真波形如图 14 所示。由图 14 可知,与中速轻载工况相比,传统 TSF 在该工况下的总转矩脉动明显加剧,转矩脉动系数上升至 12.99%。误差补偿型 TSF 有效抑制了转矩脉动,转矩脉动系数降至 3.98%,降幅达 9.01%,表明补偿机制具有良好的动态响应能力,但其负转矩并未有效减小。引入补偿控制策略虽在转矩脉动方面极大缓解了负转矩的影响,但并未从源头消除负转矩。新型 TSF 控制策略在误差补偿型 TSF 的基础上引入多变量动态调节机制,将负转矩幅值由 0.6 N·m 降至 0.096 N·m,转矩脉动系数降至 3.96%。该结果验证了本文所提新型 TSF 控制策略在高速轻载运行工况下对转矩脉动的有效抑制能力。

电机运行于高速重载工况下的仿真波形如图 15 所示。由图 15 可知,传统 TSF 控制策略下,转矩脉动系数进一步增至 13.45%,表明其性能随负载升高持续恶化。采用误差补偿型 TSF 控制策略后,转矩脉动得到明显抑制,转矩脉动系数降至 3.96%,负载升高导致电机磁路趋于饱和,从而产生更为强烈的制动性负转矩,其幅值升至 1.127 N·m。引入动态调节机制后,负转矩从 1.127 N·m 降至0.219 N·m,转矩脉动系数进一步优化至 3.69%。该结果表明,新型 TSF 控制策略能有效应对转速与负载的双重挑战,从源头上改善系统的综合运行性能,具有优越的全工况适应性。

传统 TSF、补偿型 TSF 和新型 TSF 控制策略在三种工况下的转矩脉动系数和负转矩幅值如图 16 所示。对数据进行汇总,结果如表 2 所示。

4.2　动态性能验证

为评估所提策略在非稳态工况下的控制性能,设置转速突变(由 2 000 r/min 突增至 4 000 r/min)以及转矩突变(由 5 N·m 突增到 10 N·m)两种动态工况。由于控制结构采用转矩环,转矩指令由速度环 PI 控制器直接生成,因此在动态响应分析中重点考察转速与转矩的跟踪性能。转速突变和负载突变下的相转矩与转速响应

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

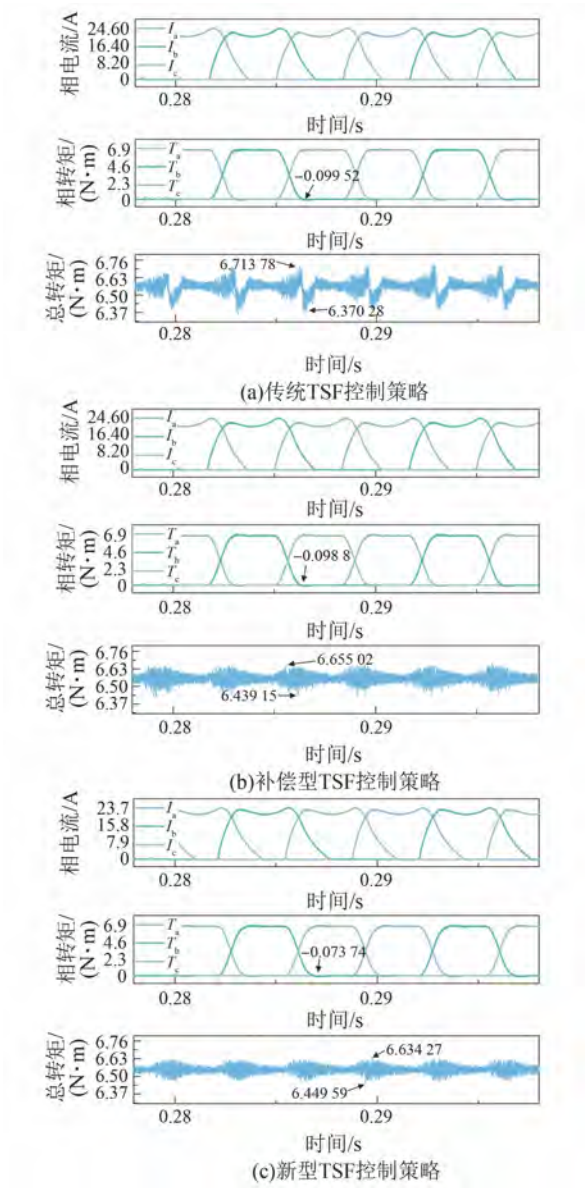


图 13 电机运行在中速轻载工况下的仿真波形

Fig. 13 Simulation waveforms of the motor operating at medium-speed and light-load condition

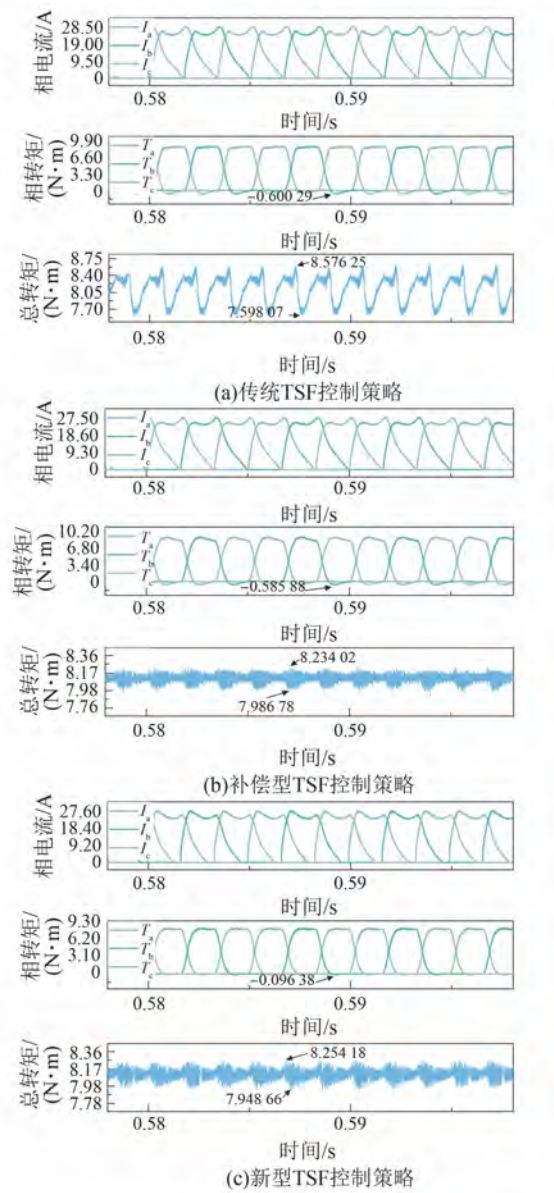


图 14 电机运行在高速轻载工况下的仿真波形

Fig. 14 Simulation waveforms of the motor operating at high-speed and light-load condition

波形如图 17 和图 18 所示。

由图 17(a)可知，加速过程中转矩指令被限幅环节限制在 50 N·m，电机以最大允许转矩加速，当转速接近给定值时，转矩平滑回落至对应稳态值。由图 17(b)可知，在所提新型 TSF 策略下，转速响应上升迅速，无超调，调节时间 33 ms，略快于传统 TSF 控制策略，整个加速过程转矩响应快速且无振荡。结果表明，所提策略在宽速域内具有良好的动态跟踪能力。

由图 18 可知，负载突变时，转矩环能够快速响应，且转速能够达到对应稳态值，转速最大跌落为 5 r/min。该结果验证了所提策略具有良好的抗负载扰动能力。

4.3 试验验证

为进一步验证所提策略的有效性，在 SRM 试验平台上进行测试。试验平台以数字信号处理器 TMS320F28335 为控制核心，功率变换器采用不对称半桥拓扑，转矩信号通过示波器采集，转速由编码器反馈获取。控制器采用与仿真一致的查表法处理转矩-电流-位置的非线性映射关系，试验平

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

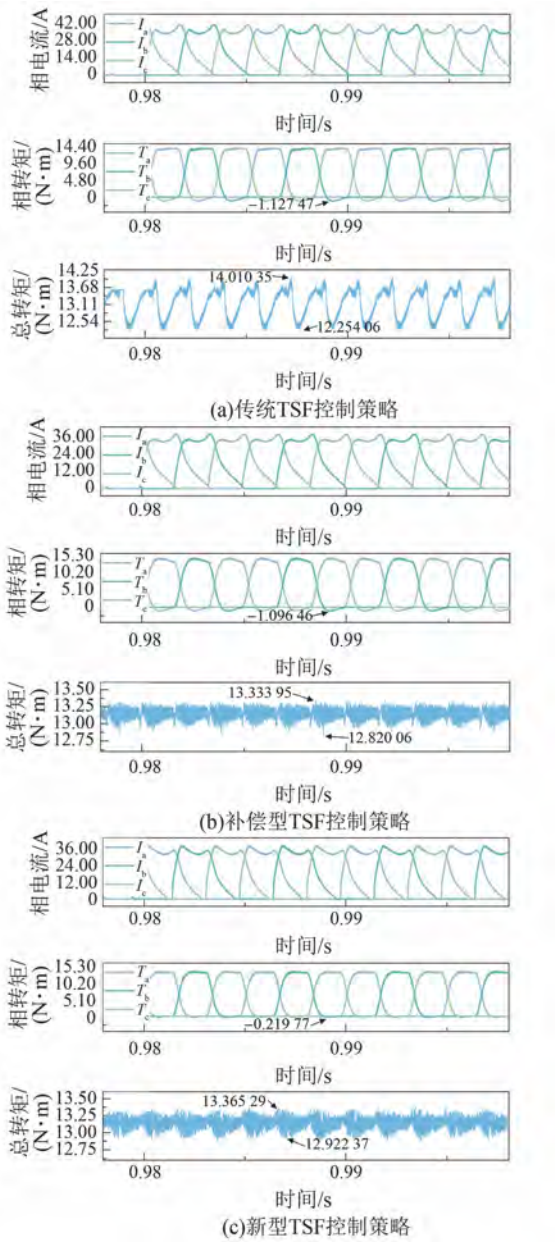


图 15　电机运行在高速重载工况下的仿真波形

Fig. 15　Simulation waveforms of the motor operating at high-speed and heavy-load conditions

台如图 19 所示。

设置三种试验工况:中速轻载(1 500 r/min, 5 N·m)、高速轻载(3 000 r/min, 5 N·m)、高速重载(3 000 r/min, 10 N·m)。三种工况下传统 TSF 与所提新型 TSF 控制策略的试验波形如图 20~22 所示。

以中速轻载工况为例,传统 TSF 控制下转矩脉动较明显;而新型 TSF 控制下的转矩波形更加平滑,转矩脉动显著减小。由图21和22可知,随着转速与负载升高,传统 TSF 控制的转矩脉动急剧恶化;新型 TSF 控制则始终保持较小的转矩脉动,且负转矩幅值得到有效抑制。

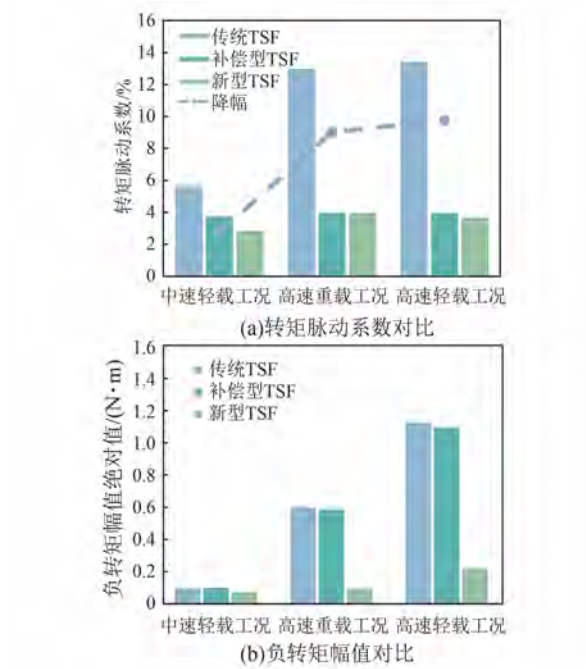


图 16　三种控制策略在不同工况的转矩脉动系数与负转矩幅值

Fig. 16　Torque ripple coefficient and negative torque amplitude of the three control strategies under different operating conditions

表 2　三种控制策略在不同工况的性能对比

Tab. 2　Performance comparison of three control strategies under different operating conditions

工况名称	控制策略	转矩脉动系数/%	负转矩幅值/(N·m)
中速轻载	传统 TSF	5.63	-0.099
	补偿型 TSF	3.74	-0.098
	新型 TSF	2.86	-0.073
高速轻载	传统 TSF	12.99	-0.600
	补偿型 TSF	3.98	-0.586
	新型 TSF	3.96	-0.096
高速重载	传统 TSF	13.45	-1.127
	补偿型 TSF	3.96	-1.096
	新型 TSF	3.69	-0.219

试验与仿真波形趋势一致,验证了本文所提策略在实际系统中的有效性与工程可行性。试验与仿真之间存在的微小偏差主要源于实际系统中的功率器件的非理想特性、传感器噪声及参数误

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

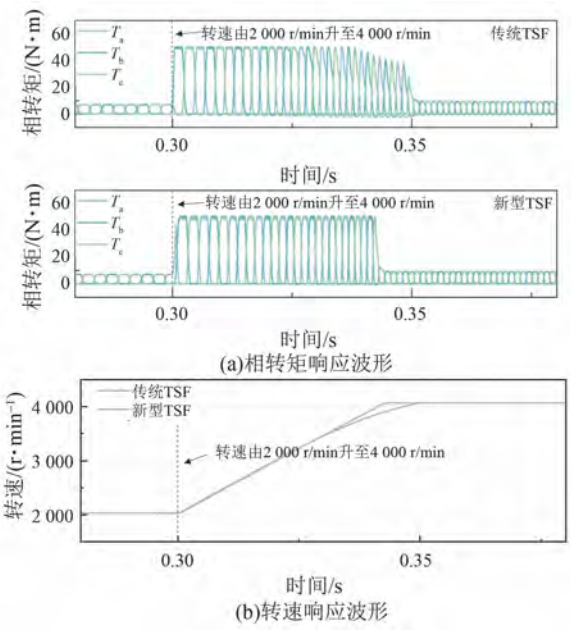


图 17　转速突变工况下的转速与相转矩波形

Fig. 17　Waveforms of rotational speed and phase torque under sudden speed change condition

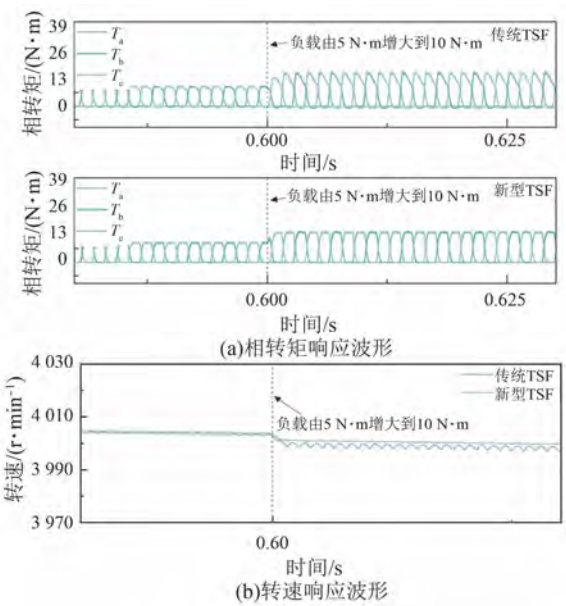


图 18　负载转矩突变工况下的转速与相转矩波形

Fig. 18　Waveforms of rotational speed and phase torque under sudden load change condition

差等非理想因素。

5　结语

本文提出一种基于误差补偿型 TSF 与开通/关断角动态调节的 SRM 控制策略。该策略根据前一相的转矩跟踪误差实时修正当前相的参考转矩，直接修正了换相末期的跟踪偏差，使合成后的总转矩保持稳定，大幅减小转矩脉动。进一步引入一种根据转速和负载的多变量动态调节控制策略，将转速和负载对开通/关断角以及电压的影响进行解耦，分别设计补偿函数，抑制因磁饱和加剧而产生的制动性负转矩，进一步降低了转矩脉动，从而降低系统损耗、提升电流应力耐受能力与控制裕度。

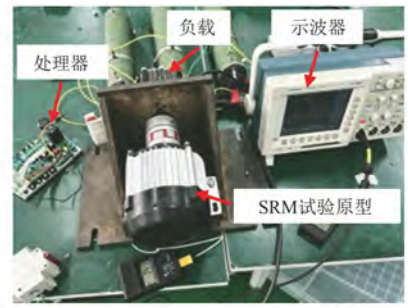


图 19　试验平台

Fig. 19　Experimental platform

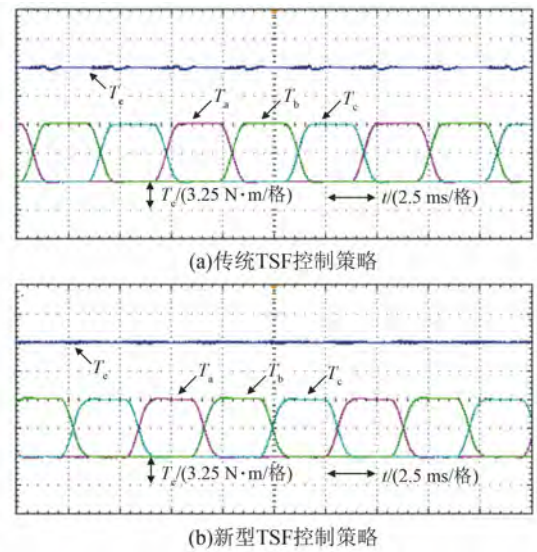


图 20　电机运行在中速轻载工况下的试验波形

Fig. 20　Experimental waveforms of the motor operating at medium-speed and light-load condition

相较于传统 TSF，所提新型 TSF 在中速轻载、高速轻载及高速重载三种工况下，将转矩脉动系数由 5.63%、12.99%、13.45% 分别降至 2.86%、3.96%、3.69%，降幅依次为 2.77%、9.03%、9.76%；在高速轻载、高速重载工况下，将负转矩幅值由 0.600 N·m、1.127 N·m 分别降低至0.096 N·m、0.219 N·m。本文所提新型 TSF 控制策略能够有效应对转速与负载的双重挑战，具有优越的全工况

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

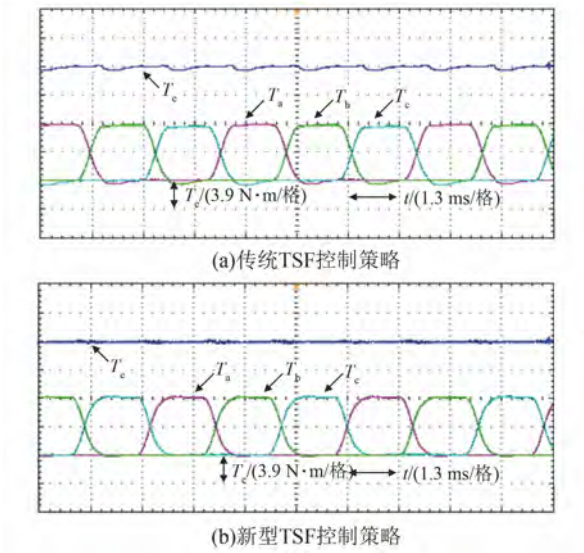


图 21　电机运行在高速轻载工况下的试验波形

Fig. 21　Experimental waveforms of the motor operating at high-speed and light-load condition

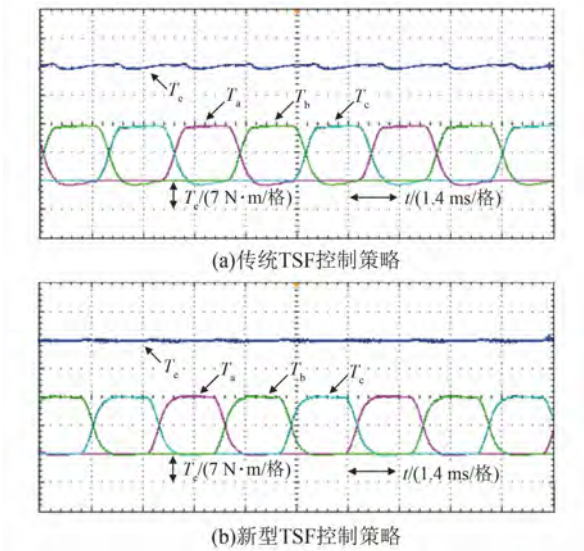


图 22　电机运行在高速重载工况下的试验波形

Fig. 22　Experimental waveforms of the motor operating at high-speed and heavy-load condition

适应性。

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

蒋建权进行了方案设计、试验研究、数据采集与分析以及论文撰写与修改,蔡辉参与了试验研究指导、论文审核与修订。所有作者均已阅读并同意最终稿件的提交。

Jiang Jianquan completed scheme design, experimental research, data collection and analysis, and paper writing and revision. Cai Hui participated in the guidance of experimental research, paper review and revision. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

[1] Aiso K, Nakao N, Akatsu K. A single phase SRM driven by commercial AC power supply [C]//2014 International Power Electronics Conference, Hiroshima, Japan, 2014: 1141-1147.

[2] 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.

[3] Dhumal K R, Dhamse S S. Solar PV array based water pumping by using SRM drive: A review [C]// 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, Chennai, India, 2018: 140-146.

[4] Akbar I, Ismail N, Hamidi E A Z, et al. PI-based SRM speed control system [C]//2021 IEEE 7th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications, Bandung, Indonesia, 2021: 190-194.

[5] 蔡辉, 王辉, 李孟秋, 等. 基于预测电流控制算法的开关磁阻电机转矩脉动抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4702-4711.
Cai H, Wang H, Li M Q, et al. Predictive current control of switched reluctance motor for torque ripples minimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4702-4711.

[6] 任萍, 朱景伟, 赵燕, 等. 基于双滑模控制器的开关磁阻电机调速策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4501-4512.
Ren P, Zhu J W, Zhao Y, et al. Speed control strategy for switched reluctance motor based on dual

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

sliding mode controller [J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(11)：4501-4512.

[7] 李孟秋，徐贤炜，潘倩华. 一种开关磁阻电机零压分散调制策略[J]. 中国电机工程学报，2024，44(增刊 1)：286-295.
Li M Q，Xu X W，Pan Q H. Zero-voltage dispersion modulation strategy for switched reluctance motor [J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(S1)：286-295.

[8] Deepak M，Janaki G，Bharatiraja C. Optimize SRM rotor geometry analysis for 3 kW light electric vehicle grade performances [C]//2022 International Interdisciplinary Conference on Mathematics，Engineering and Science Durgapur，India，2022：1-6.

[9] 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)：76-84.
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)：76-84.

[10] 杨承周. 轴径向磁通开关磁阻型轮缘推进电机设计与优化研究[D]. 大连：大连海事大学，2023.
Yang C Z. Design and optimization of axial-radial flux switched reluctance rim driven motor [D]. Dalian：Dalian Maritime University，2023.

[11] 薛惟栋，曲兵妮. 抑制开关磁阻电机振动的结构设计研究[J]. 电机与控制应用，2021，48(11)：39-44.
Xue W D，Qu B N. Structural design of switched reluctance motor for vibration suppression [J]. Electric Machines & Control Application，2021，48(11)：39-44.

[12] 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)：102-108.
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)：102-108.

[13] 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)：9-14.
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)：9-14.

[14] Deepak M，Janaki G，Bharatiraja C. Model predictive torque control for enhanced SRM with improving drive hardware performance [C]//2023 IEEE International Transportation Electrification Conference，Bengaluru，India，2023：1-6.

[15] 杨帆，陈昊，李晓东，等. 一种优化开关磁阻电机换相区控制策略的高效率转矩分配函数[J]. 电工技术学报，2024，39(6)：1-10.
Yang F，Chen H，Li X D，et al. An efficient torque sharing function for optimizing the commutation zone control strategy of switched reluctance motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(6)：1-10.

[16] 黄朝志，肖勇，肖任全，等. 一种降低开关磁阻电机转矩脉动的新型转矩分配函数控制策略[J]. 科学技术与工程，2025，25(10)：4136-4144.
Huang C Z，Xiao Y，Xiao R Q，et al. A novel torque sharing function control strategy for reducing torque ripple in switched reluctance motors [J]. Science Technology and Engineering，2025，25(10)：4136-4144.

[17] 李红伟，罗华林. 一种开关磁阻电机转矩分配优化控制策略[J]. 郑州大学学报(工学版)，2025，46(1)：126-132.
Li H W，Luo H L. A torque sharing optimization control strategy for switched reluctance motors [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)，2025，46(1)：126-132.

[18] 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+111.
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+111.

[19] 王雷，高亨，张晗广，等. 基于误差补偿转矩分配函数的 SRM 转矩脉动抑制研究[J]. 电工电气，2025(8)：14-19.
Wang L，Gao H，Zhang H G，et al. Research on SRM torque ripple suppression based on error compensation torque sharing function [J]. Electrotechnics Electric，2025(8)：14-19.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

[20] Saleh A L, Számel L. Optimal torque sharing-based direct instantaneous torque control strategy for torque ripple reduction in switched reluctance motors [C]// 2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference, Istanbul, Turkey, 2025: 293-299.

[21] Song X, Zhu J, Ren P, et al. An improved fuzzy control for switched reluctance motor based on torque sharing function [C]//2021 6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering, Dalian, China, 2021: 119-123.

[22] Ding Y, Yu K, Tao N, et al. Operation control strategies for switched reluctance motor driven flywheel energy storage system with switching angle optimization [C]//2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies, Shanghai, China, 2022: 1013-1019.

[23] Zhang M, Mininger X, Bahri I, et al. Improvement of the variable turn-off angle control for SRM regarding vibration reduction [C]//2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, FL, USA, 2017: 1-7.

[24] 李红岩, 王展, 刘宝. 一种高效抑制开关磁阻电机转矩脉动的方法[J]. 计算机仿真, 2025, 42(2): 311-316.
Li H Y, Wang Z, Liu B. A method for efficiently suppressing torque ripple in switched reluctance motors [J]. Computer Simulation, 2025, 42(2): 311-316.

[25] 周云红, 胡涵章, 郑涵, 等. 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[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(9): 1016-1022.
Zhou Y H, Hu H Z, Zheng H, et al. Twelve-sector DITC based commutation torque drop suppression for circumferential staggered switched reluctance motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(9): 1016-1022.

[26] Chen Y, Jiang Q, Zhai L, et al. Direct instantaneous torque control of switched reluctance motor using adaptive excitation angle [C]//2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Kristiansand, Norway, 2020: 1359-1364.

[27] 高爽. 直流母线电压动态调节的 SRM 直接瞬时转矩控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
Gao S. SRM direct instantaneous torque control of DC-link voltage dynamic regulation [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.

[28] 黄雷. 四相开关磁阻电机新型 T 型功率变换器研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4): 87-93.
Huang L. Research on new T-type power converter for four-phase switched reluctance motor drives [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(4): 87-93.

[29] 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.
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.

[30] 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.

收稿日期:2026-05-28
收到修改稿日期:2026-08-04

作者简介:
蒋建权(2002—),男,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机控制,jjq20509@163.com;
*通信作者:蔡 辉(1986—),男,博士,讲师,研究方向为电力电子与电气传动,caihui@csust.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.