

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

周云红^{1,2}, 陈泽楠^{2*}, 李汉杰², 刘晨宇², 胡涵章², 王凯毅²

(1. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211167;

2. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

Torque Ripple Suppression in Switched Reluctance Motors under Structural Optimization and Direct Instantaneous Torque Control

ZHOU Yunhong^{1,2}, CHEN Ze'nan^{2*}, LI Hanjie², LIU Chenyu², HU Hanzhang², WANG Kaiyi²

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network, Nanjing 211167, China;

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

Abstract: Torque drop during winding commutation is one of the main causes of significant torque ripple in switched reluctance motors. Based on an analysis of the causes of torque ripple in conventional switched reluctance motors, this paper studied a torque ripple suppression method that combined structural optimization with direct instantaneous torque control to address this issue. The method added an internal stator and auxiliary windings, forming a circumferentially staggered switched reluctance motor. The auxiliary windings on the internal stator provided supplementary torque to compensate for the torque drop in the main windings on the external stator during commutation. A direct instantaneous torque control strategy was then designed, which switched the operating mode of the power converter based on torque deviation signals and sector signals, offering fast response and precise torque control. Finally, a field-circuit coupling co-simulation environment was constructed for the six-phase winding of the motor. The torque and speed characteristics were comparatively analyzed under three operating conditions: starting, acceleration/deceleration, and load increase/reduction. The simulation results showed that the improved motor exhibited excellent

torque ripple suppression and good operational characteristics.

Key words: switched reluctance motor; torque ripple suppression; structural optimization; direct instantaneous torque control

摘 要: 绕组换相时的转矩跌落是造成开关磁阻电机转矩脉动大的主要原因之一。针对该问题,本文在分析普通开关磁阻电机转矩脉动成因的基础上,研究了一种结构性优化与直接瞬时转矩控制相结合的转矩脉动抑制方法。通过增设内定子以及辅助绕组,构造一种周向错角开关磁阻电机,由内定子上的辅助绕组提供辅助转矩,以补偿外定子上主绕组在换相期间的转矩跌落。之后设计了直接瞬时转矩控制策略,根据转矩偏差信号以及扇区信号来直接切换功率变换器的工作模式,具有快速响应和转矩精确控制的优点。最后,在场-路耦合联合仿真环境下,搭建该电机六相绕组的直接瞬时转矩控制电路,对比分析了启动、加减速以及增、卸负载三种工况下的转矩特性以及转速特性。仿真结果表明,改进后的电机具有很好的转矩脉动抑制功能,且运行特性良好。

关键词: 开关磁阻电机; 转矩脉动抑制; 结构优化; 直接瞬时转矩控制

基金项目: 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目资助(XTCX202406); 江苏省重点研发计划项目(BE2021094); 国家自然科学基金项目(51977103)

Projects supported by Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network (XTCX202406); Key R&D Plan Project in Jiangsu Province (BE2021094); National Natural Science Foundation of China (51977103)

0 引言

近年来,我国积极呼吁保护环境,大力推行“双碳”政策,因此电动汽车作为新能源汽车,在汽车市场占比不断提高。电机作为电动汽车的核心部件,应具备结构稳定、可靠性高、价格低廉、加

速快以及调速范围宽等优点, 开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor, SRM) 在该方面表现尤为突出^[1]。但是由于双凸极的结构特点以及脉冲式的供电方式, SRM 在运行时会伴随着较大的转矩脉动^[2], 对电动汽车运行时的平稳性与舒适性有较大影响, 限制其应用广度与发展。因此 SRM 的转矩脉动抑制成为了研究热点。

现阶段主要是从本体机械结构优化以及控制策略改进两个方向来减小转矩脉动。文献[3-4]以降低转矩脉动、提高平均转矩为目标, 对开关磁阻电机本体参数进行多目标寻优。文献[5]通过在定转子齿部开窗, 减小气隙磁密, 以减小径向力和转矩脉动。文献[6-8]中提出对开关磁阻电机的定子、转子进行开槽处理, 并多目标寻优, 确定最终结构参数, 使得转矩脉动减小。文献[9]中对定子极面进行改进, 有效抑制转矩脉动。这些方法可以较好地抑制转矩脉动, 但是也会由于增加有效气隙而导致总转矩减小等问题。文献[10]指出在转子极数大于定子极数的前提下, 尽可能增加定子极齿槽数, 可以提高平均转矩, 从而降低转矩脉动。文献[11]在分析了传统集中式绕组轴向磁通开关磁阻电机原理的基础上, 设计了两种新型双定子的轴向磁通开关磁阻电机, 提高了电机输出转矩平稳性以及带载能力。文献[12]针对传统 SRM 强转矩脉动的缺点, 设计了一种多运行模式的双定子 SRM, 对其内定子、外定子、双定子、内外定子串联以及内外定子并联五种工作模式下电机的转矩、效率等做了综合分析, 验证了双定子开关磁阻电机的可行性以及优越性。

与改变电机机械结构相比, 通过优化控制策略, 可以在更大的工作范围内将转矩脉动减弱。文献[13]在传统转矩分配函数的基础上, 提出一种重叠角自适应的新型转矩分配函数控制方法, 将两相交换区划分为小电感区和电感变化率突变区, 在小电感区给退磁相分配更多转矩, 在突变区给励磁相分配更多转矩, 有效提高转矩追踪性能, 有效抑制转矩脉动。文献[14-15]中利用的直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC) 以及文献[16-18]中利用的直接瞬时转矩控制 (Direct Instantaneous Torque Control, DITC), 都能够实时准确地对转矩进行控制, 有效地降低了转矩脉动,

并提高系统稳定性和响应速度。文献[19]在传统 DITC 策略的基础上引入了反向传播神经网络控制策略, 以转矩误差的平方为性能指标函数对传统 DITC 策略进行优化, 有效地抑制了转矩脉动。文献[20]中提出了在换相时, 通过转矩实时补偿以及转矩分配函数控制、针对前一相拖尾电流引起的负转矩进行自适应控制、选取合适的换相角, 有效抑制转矩脉动。

为抑制开关磁阻电机内的强转矩脉动, 本文从结构性改进入手, 通过增设内定子及辅助绕组, 由辅助绕组在主绕组换相期间提供辅助转矩, 弥补主绕组换相期间的转矩跌落, 从而降低电机转矩脉动。设计了 DITC 策略, 快速响应系统状态的变化, 从而有效抑制电机的转矩脉动。模拟启动、调速以及增、卸负载的运行工况, 进行了动态仿真, 分析了转速和转矩的性能, 验证了结构改进及直接瞬时转矩控制对抑制 SRM 转矩脉动的有效性。

1 SRM 转矩脉动成因分析

开关磁阻电机可以视为一种包含电端口和机械端口的二端口装置, 其第 k 相绕组电压平衡方程为

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

式中: U_k 、 R_k 、 i_k 、 φ_k 分别为第 k 相绕组的电压、电阻、电流、磁链; θ 为转子位置角。

忽略绕组间互感时, 第 k 相绕组的磁链可以表示为其电感 L_k 与电流 i_k 的乘积, 即:

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

为了简化分析, 忽略电阻压降, 假设磁路线性且不饱和, 绕组电感不受电流影响, 则式(1)可以简化为

$$U_k = L_k \frac{di_k}{d\theta} \omega_r + i_k \frac{dL_k}{d\theta} \omega_r \quad (3)$$

式中: ω_r 为电机转速, $\omega_r = d\theta/dt$ 。

将式(3)两边同时乘以 i_k , 可得:

$$U_k i_k = L_k i_k \frac{di_k}{d\theta} \omega_r + i_k^2 \frac{dL_k}{d\theta} \omega_r \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 忽略功率损耗后, 输入的电功率转化为磁场储能 $\left(L_k i_k \frac{di_k}{d\theta} \omega_r \right)$ 以及机械功

率输出 $\left(i_k^2 \frac{dL_k}{d\theta} \omega_r\right)$ 。

由于电机转矩与输出的机械功率直接相关,因此 $dL_k/d\theta$ 和电流 i_k 都会影响转矩输出。若在电感上升区通电,则旋转电动势为正,机械输出功率为正,产生正转矩;若在电感下降区通电,则旋转电动势为负,机械输出功率为负,产生负转矩。

当满足前述假设简化条件时,以三相(记作 A、B、C)开关磁阻电机为例,输出的合成转矩可以近似表示为

$$T_e = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} + \frac{1}{2} i_B^2 \frac{dL_B}{d\theta} + \frac{1}{2} i_C^2 \frac{dL_C}{d\theta} \quad (5)$$

显然,为了得到较大的合成转矩,一方面在绕组电感开始进入上升区时应尽快使绕组流过较大的电流;另一方面,在绕组电感开始进入下降区时尽快使绕组电流衰减到零,以尽量减小制动转矩。根据该原则,设置绕组的导通角和关断角,得到开关磁阻电机在一个运行周期内的电流、电感以及合成转矩波形,如图 1 所示,分三个区间进行分析:

(1) 在 (θ_1, θ_2) 区间,关断 C 相绕组,开通 A 相绕组, i_C 逐渐下降, L_A 数值及变化率均接近最小值,因此 i_A 近似按直线规律上升,合成转矩明显跌落。

(2) 在 (θ_2, θ_3) 区间, A 相电感直线上升,由于旋转电动势仍小于电源电压,因此 $di_A/dt > 0$, i_A 继续上升但增速变慢。C 相“拖尾电流”未衰减至 0,合成转矩继续跌落。

(3) 在 (θ_3, θ_4) 区间,仅 A 相独立提供转矩, A 相电感仍直线上升,旋转电动势大于电源电压,因此 i_A 下降,转矩经历短暂上升后开始回落。

在 (θ_1, θ_3) 区间实现 C→A 换相,转矩跌落非常显著。主要原因有三点:

(1) 新开通的 A 相虽然电流上升速率很快,但 dL_A/dt 很小,因此 A 相能提供的转矩小。

(2) dL_C/dt 逐渐趋于 0 的过程中, C 相能提供的正转矩迅速减小。

(3) 当 dL_C/dt 转为负值后, C 相绕组中的“拖尾电流”会产生负转矩。

2 基于结构改进的转矩脉动抑制

2.1 结构性改进思路

SRM 中绕组换相期间的转矩跌落明显,会引

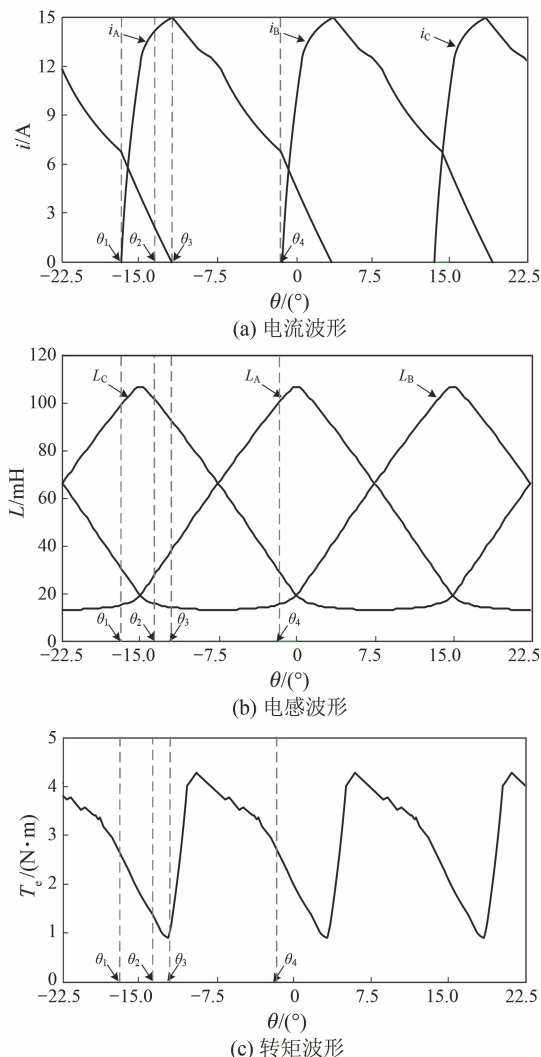


图 1 SRM 的电流、电感以及转矩波形

Fig. 1 Current, inductance, and torque waveforms of SRM

起严重的转矩脉动问题。为此,本文合理利用电机的径向内部空间,增设内定子以及辅助绕组,在外定子上的绕组换相时由内定子上的辅助绕组提供辅助转矩,弥补主绕组换相时的转矩跌落。

改进后的拓扑结构如图 2 所示,外定子、内定子以及转子同心嵌套,外定子极上设置主绕组,内定子极上设有辅助绕组。转子上同时设置内凸极和外凸极,且在周向上错开一定角度。外定子极 A1 与内定子极 a1 之间存在一个周向的错角,称为定子极差角,记作“ α ”;相邻的转子外凸极 R_1 与转子内凸极 r_1 之间也存在一个周向的错角,称为转子极差角,记作“ β ”。为表述方便,将结构改进后的开关磁阻电机记作“周向错角开关磁阻电机”。

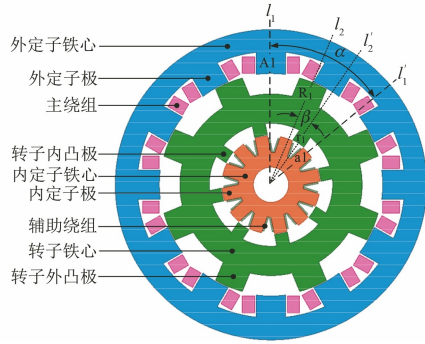


图 2 电机结构

Fig. 2 Motor structure

该电机共包含六相绕组, 具体的分布规律如图 3 所示。可以看出, 外定子极 A1~A4 上四个绕组串接构成 A 相主绕组, 内定子极 a1~a4 上四个绕组串接构成 a 相辅助绕组。B、C 相主绕组和 b、c 相辅助绕组的分布分别与 A 相和 a 相类似。

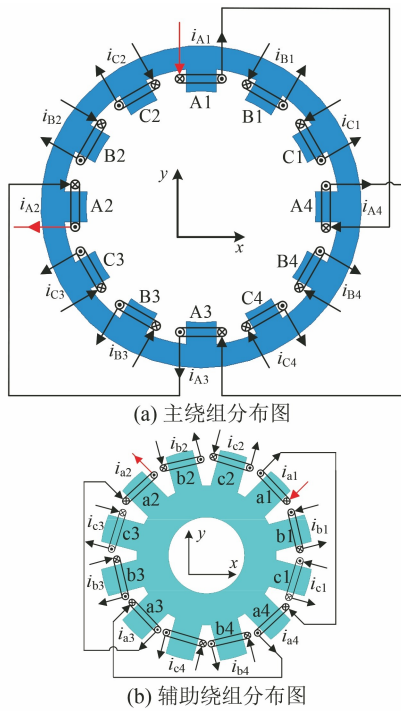


图 3 绕组分布示意图

Fig. 3 Windings distribution diagram

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。假设要求该电机处于电动运行状态, A、B、C、a、b、c 六相绕组分别通以相同大小的电流时, 相电感曲线如图 4 所示。

可以看出, A、B、C 三相主绕组的电感变化及分布与普通开关磁阻电机类似, 依次相差 15° ; 辅

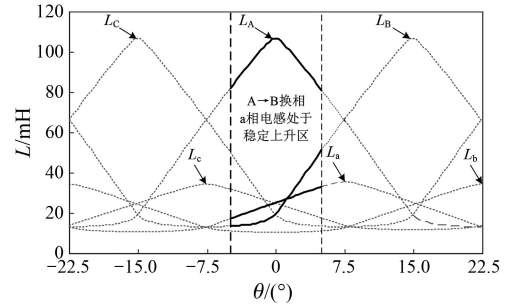


图 4 电感曲线

Fig. 4 Inductance curves

助绕组 a、b、c 三相绕组的电感也依次相差 15° ; A-a、B-b、C-c 相绕组的电感分别相差 7.5° 。以 $\theta=0^\circ$ 位置为例, 此时 A 相主绕组电感已上升到峰值, B 相主绕组电感刚到上升初期, a 相辅助绕组电感处于稳定上升阶段。

进一步地, 六相绕组分别通以同样大小的电流后, 得到各相电磁转矩与转子位置角的关系曲线如图 5 所示。其中, T_{ei} 代表第 i 相电磁转矩, $i=A, B, C, a, b, c$ 。可以看出, 在主绕组换相过程中, 辅助绕组可以有效地输出转矩, 若用于弥补主绕组换相时的转矩跌落, 将有助于抑制转矩脉动。

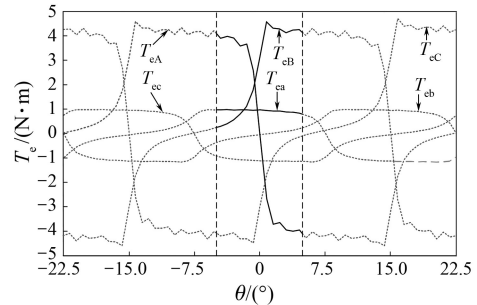


图 5 各相电磁转矩与转子位置角的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between phase electromagnetic torque and rotor position angle

2.2 辅助绕组与主绕组的协同原理

由于采用内-外双定子结构, 因此该电机的主绕组与辅助绕组的磁路是近似独立的。主绕组励磁后仅在转子外凸极上产生转矩, 辅助绕组励磁后仅在转子内凸极上产生转矩。

以图 6 所示 $\theta=0^\circ$ 位置为例, 此时外定子极 A1 与转子外凸极 R_1 正好对齐, 外定子极 B1 的前沿刚好与转子外凸极 R_2 的前沿对齐, 而转子内凸极 r_2 的前沿还没有与内定子极 a1 的后沿对齐。由于绕组电流产生的转矩正比于其相电感相对于转子位置角的变化率, 此时 A 相绕组如果继续通

电将产生负转矩,因此需要关断 A 相绕组,转而开通 B 相绕组。由于 A 相电流不能立即关断,且 B 相电流需要一个过程才能完全建立起来,因此主绕组提供的转矩一定会有明显的跌落。此时,保持 a 相辅助绕组导通,则可以由 a 相提供辅助转矩以弥补主绕组换相期间的转矩跌落,从而降低转矩脉动。

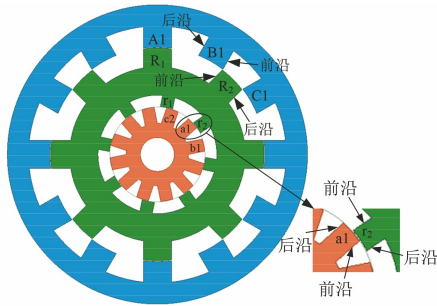


图 6 $\theta=0^\circ$ 位置处
Fig. 6 Position at $\theta=0^\circ$

3 基于直接瞬时转矩控制的转矩脉动抑制

配合使用优良的控制策略,能进一步抑制 SRM 的转矩脉动。DITC 直接根据转矩偏差信号以及扇区信号来切换功率变换器的工作模式,具有快速响应和转矩精确控制的优点。

3.1 扇区划分

相较于普通开关磁阻电机,周向错角开关磁阻电机增设了内定子及 a、b、c 三相辅助绕组。根据转子位置角,将该电机的一个运行周期 45° 共划分为九个扇区,其中换相区三个,分别记作 $D1_{Aa}$ 、 $D1_{Bb}$ 、 $D1_{Cc}$;过渡区三个,分别记作 $D2_{Ac}$ 、 $D2_{Ba}$ 、 $D2_{Cb}$;另外还有三个主绕组单相导通区,分别记作 S_A 、 S_B 、 S_C ,具体如图 7 所示,图中还注明了励磁相和退磁相的具体分布。“退磁相”是指在下一个扇区内要关断的相,“励磁相”是指在本扇区内刚开通的相。

3.2 转矩估计

DITC 需要对瞬时转矩实时精确地调控,因此瞬时转矩的估算是 DITC 系统中的关键步骤之一。SRM 具有强烈的非线性,在磁路饱和之后,利用传统的数学模型表达式计算出来的转矩会不准确,因此可以通过有限元分析得到转矩关于电流及角度的转矩特性曲线,建立 $T(i, \theta)$ 表格,在

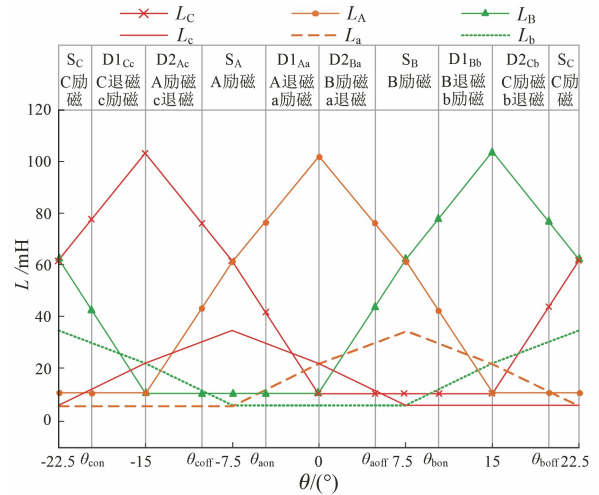


图 7 扇区划分示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sector division

电机实际控制过程中,使用查表法,根据检测到的瞬时电流以及转子位置角,得到瞬时转矩。

3.3 开关信号表

表 1 为该周向错角开关磁阻电机的 DITC 开关表。在不同扇区内,根据转矩偏差情况,来决定功率变换器的工作模式。其中,转矩偏差共分成四种情形,分别为 $(-\infty, -\Delta T)$ 、 $(-\Delta T, 0)$ 、 $(0, \Delta T)$ 和 $(\Delta T, +\infty)$ 。每一相绕组的功率变换器的工作模式都分成三种,分别为“-1”、“0”和“1”。

功率变换器采用不对称半桥结构。工作模式“1”时,电源全压向绕组供电,绕组电流迅速建立;工作模式“0”时,绕组零压续流,电流缓慢衰减;工作模式“-1”时,绕组电流迅速回流至电源,电流迅速减小。

表 1 DITC 开关信号表

Tab. 1 DITC switching signal table

工作模式 转矩偏差	区间划分	S 区		
		单相	励磁相	退磁相
$(-\infty, -\Delta T)$		-1	0	-1
$(-\Delta T, 0)$		0	0	0
$(0, \Delta T)$		1	1	0
$(\Delta T, +\infty)$		1	1	1

4 联合仿真模型搭建

设计 Maxwell/Simplorer 场路耦合联合仿真环境下的 DITC 电路,在此基础上验证对于开关磁阻电机转矩脉动的抑制效果,其原理框图如图 8 所示。

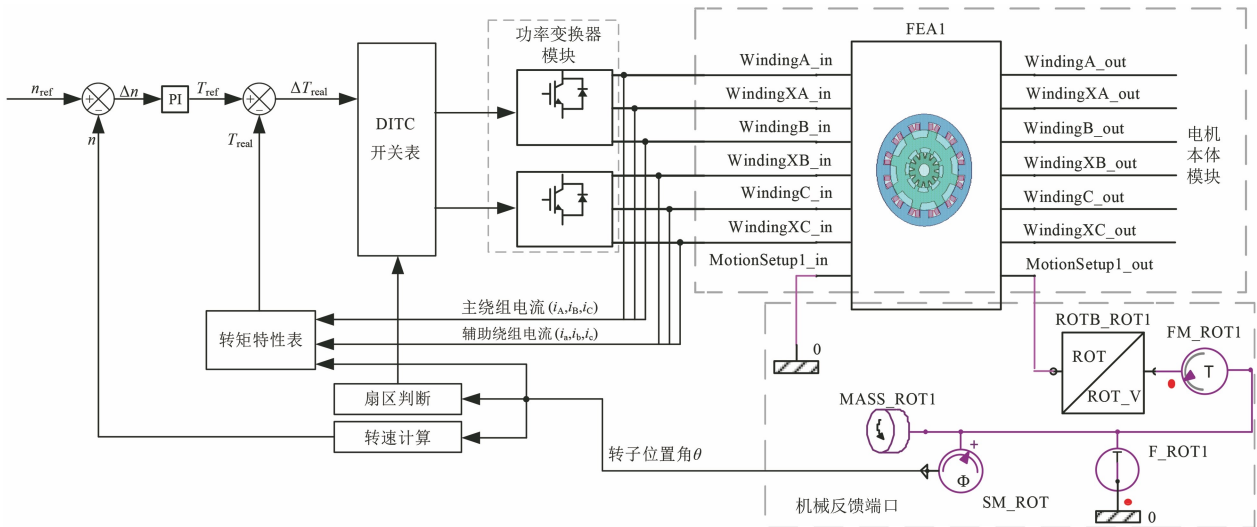


图 8 DITC 系统框图

Fig. 8 Block diagram of DITC system

将参考转速 n_{ref} 与实际转速 n 的偏差值 Δn 通过一个比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器生成参考转矩值 T_{ref} , 与实际转矩值 T_{real} 比较后得到转矩偏差信号 ΔT_{real} , 再与扇区判断信号一起送入 DITC 开关表, 得到相应的功率管开关信号以控制功率变换器切换工作模式。其中, 转子所处扇区根据转子位置角确定, 实际转矩 T_{real} 可由 Maxwell 直接反馈, 因此可以省去转矩估算。

4.1 本体模块

在 Ansoft/Maxwell 2D 中建立该周向错角开关磁阻电机的有限元模型, 电机参数如表 2 所示。导入至 Simplorer 中的电机模块如图 8 所示, 共有 14 个端口, 包含六个绕组输入端口、六个绕组输出端口以及一个机械输入端口和一个机械输出端口。12 个绕组端口分别对应电机主绕组和辅助绕组的 A-a-B-b-C-c 相, 负责输入、输出电流。机械输入端口和输出端口一端接地作为参考点, 另一端连接 Simplorer 元件库中的相应元件, 便于实时读取电机转速、转矩以及转子位置等信息。

4.2 功率变换器模块

功率变换器是电机本体与控制电路的桥梁, 为了便于每相电流的单独控制, SRM 一般采用不对称半桥结构的功率变换器。图 9 所示为 Simplorer 环境中的不对称半桥型功率变换器, 主要包含电源 E1、开关管 IGBT、二极管 D 以及信号源等元件。设置电源电压值为电机额定电压 380 V。十二路的 IGBT 栅极给定信号由控制电

路提供, 以分别控制各个 IGBT 的通断。

表 2 电机尺寸参数

Tab. 2 Motor size parameters			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
外定子外径/mm	121	转子外径/mm	88.7
外定子内径/mm	89.2	转子内径/mm	45.7
外定子轭厚/mm	5.9	转子轭厚/mm	6.7
外定子极弧/(°)	15	转子极弧/(°)	15
内定子外径/mm	45.2	平均气隙长度/mm	0.25
内定子内径/mm	13.7	转子极差角 α /(°)	45
内定子轭厚/mm	5.9	定子极差角 β /(°)	15
内定子极弧/(°)	15	内、外定子绕组匝数	20、30

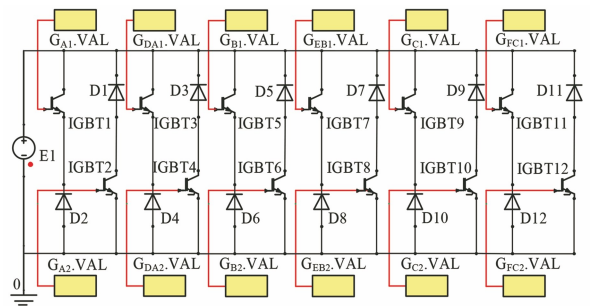


图 9 Simplorer 环境中的不对称半桥功率变换器
Fig. 9 Asymmetric half-bridge power converter in Simplorer

5 联合仿真结果分析

设定仿真总时长为 60 ms, 转矩滞环宽度为 $\pm 0.02 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转速外环 PI 调节器的比例系数为

0.5、积分系数为 0.05,PI 调节器的最大、最小限幅分别为 $20 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $3 \text{ N}\cdot\text{m}$,a、b、c 三相辅助绕组的开通角依次为 $\theta_{\text{aon}} = -7.5^\circ$ 、 $\theta_{\text{bon}} = 7.5^\circ$ 、 $\theta_{\text{con}} = -22.5^\circ$,关断角依次为 $\theta_{\text{aoff}} = 0.5^\circ$ 、 $\theta_{\text{boff}} = 15.5^\circ$ 、 $\theta_{\text{coff}} = -14.5^\circ$ 。

5.1 启动过程分析

负载转矩设置为 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$,给定转速设置为 $1\,000 \text{ rpm}$,模拟启动过程,得到的仿真波形如图 10 所示。图 10(a)为电流波形,在启动时,电流迅速建立,主绕组和辅助绕组都会产生尖峰电流,在电机达到设定的转速后,电流幅值会降低,主绕组、辅助绕组依次导通,符合设定的 DITC 规则。图 10(b)为转速波形,在 5.00 ms 时转速达到峰值 $1\,006.3 \text{ rpm}$,经过一个振荡过程,在 5.325 ms 后转速可以维持在设定的参考转速 $1\,000 \text{ rpm}$ 左右,呈现微小波动,波动范围在 $\pm 0.25 \text{ rpm}$ 左右。图 10(c)为转矩波形,在启动初期,转矩迅速上升,达到 PI 控制器设定的上限 $20 \text{ N}\cdot\text{m}$,当转速达到设定值之后,转矩迅速下降并最终稳定在与负载转矩数值相当,转矩波动约 $\pm 0.5 \text{ N}$,转矩脉动系数约为 0.196。

同理,模拟主要尺寸相同的 SRM 启动过程,所用控制策略也相同,得到的电流、转速、转矩波形如图 11 所示,具体性能参数比较如表 3 所示。可以看出,在启动过程中,周向错角开关磁阻电机提速更快,振荡过程更短,振荡次数更少,且在转速稳定后的运行过程中,尤其是主绕组换相时,周向错角开关磁阻电机的转矩和转速波动比同尺寸 SRM 更小,电机运行更平稳。

表 3 启动过程主要性能参数对比

Tab.3 Comparison of major performance parameters during starting process

性能参数	周向错角 SRM	同尺寸 SRM
振荡过程的振荡次数/次	1	2~3
转速到达参考值时间/ms	5.025	7.019
稳定运行时的转矩脉动系数	0.192	0.453

5.2 加减速过程分析

模拟汽车在行驶过程中,由于不同的环境与路况,需要进行频繁的加减速,保持负载转矩为 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 不变,设置电机初始转速为 800 rpm ,模拟该电机的加减速过程。在 20 ms 时给定转速增加

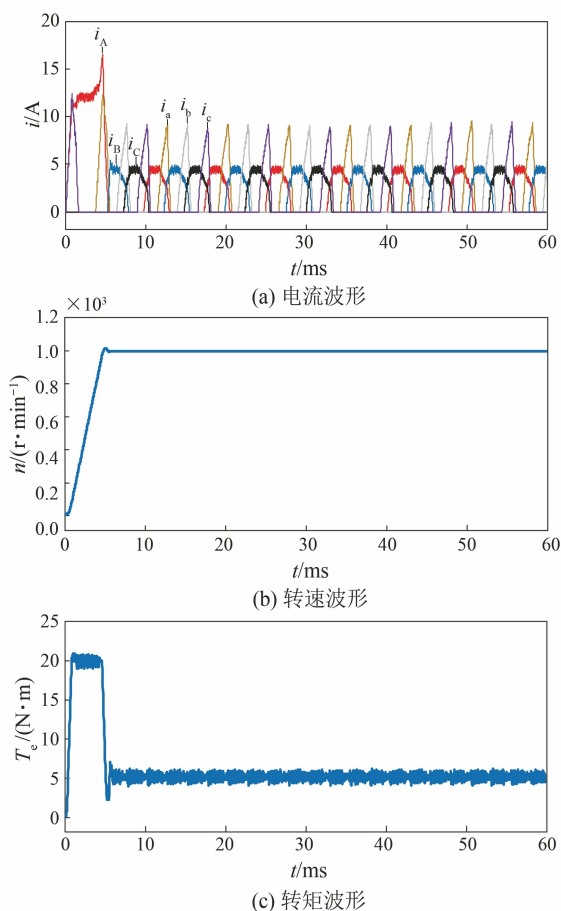


图 10 周向错角 SRM 启动过程波形图

Fig. 10 Starting process waveforms of the circumferentially staggered SRM

到 $1\,000 \text{ rpm}$,在 40 ms 时给定转速降低到 700 rpm ,得到的仿真结果如图 12 所示。可以看出,提速 200 rpm 需要 2.04 ms ,减速 300 rpm 需要 4.13 ms ,在转速调节至稳定之后,转矩也会恢复到负载转矩附近,整体控制效果良好。

同样的仿真条件下,对同尺寸 SRM 的加减速过程进行仿真分析,转速和转矩波形如图 13 所示,加减速过程中的主要性能参数对比如表 4 所示。可以看出, 20 ms 时,转速从 800 rpm 开始向 $1\,000 \text{ rpm}$ 提升,提速 200 rpm 用时 3.17 ms ; 40 ms 时,转速从 $1\,000 \text{ rpm}$ 开始向 700 rpm 减速,减速 300 rpm 用时 3.79 ms 。同尺寸 SRM 加减速过程的转矩波形变化规律与周向错角开关磁阻电机加减速过程类似,但转矩波动较大,且转矩振荡过程较长,振荡次数较多。在加减速过程中,周向错角开关磁阻电机加速过程更快,加速 200 rpm 用时比同尺寸开关磁阻电机快 1.13 ms ;减速过程稍慢,

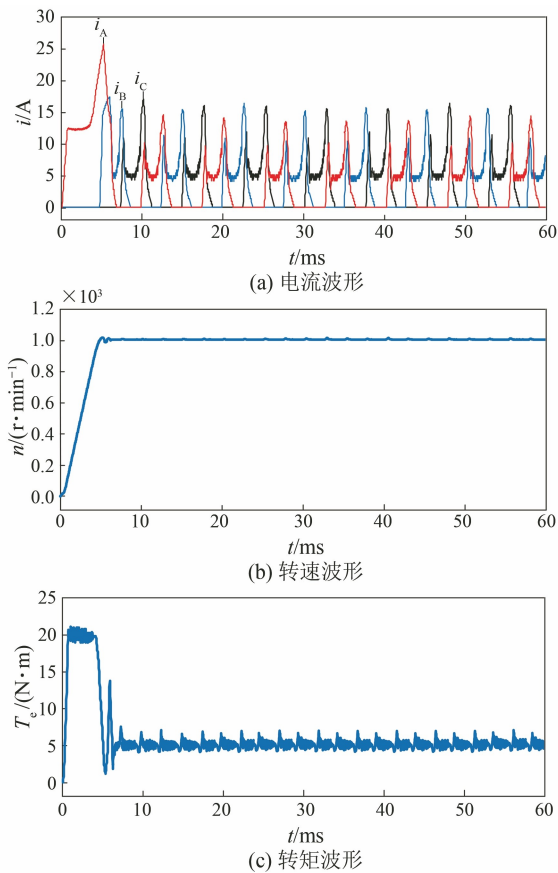


图 11 同尺寸 SRM 启动过程波形图
Fig. 11 Starting process waveforms of the SRM of the same size

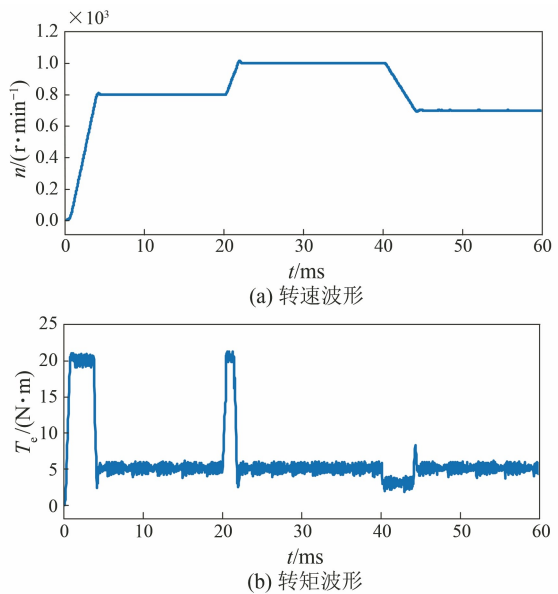


图 12 周向错角 SRM 加减速过程波形图
Fig. 12 Waveforms of acceleration and deceleration process of the circumferentially staggered SRM

减速 300 rpm 用时比同尺寸 SRM 慢 0.34 ms; 另外还注意到周向错角开关磁阻电机加减速过程振荡次数少, 过渡更为平滑。

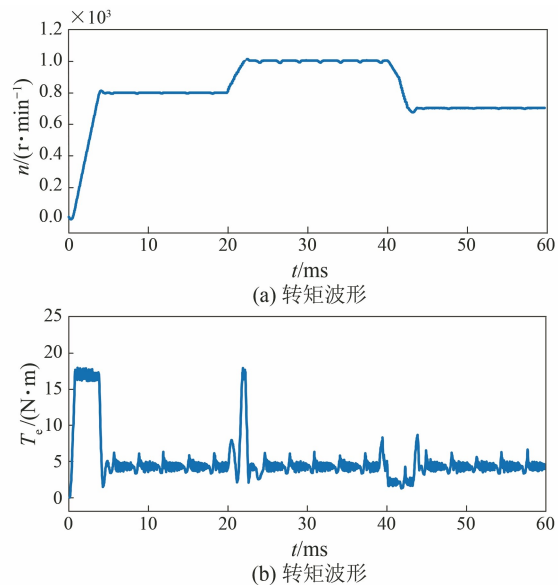


图 13 同尺寸 SRM 加减速过程波形图
Fig. 13 Waveforms of acceleration and deceleration process of the SRM of the same size

表 4 加减速过程主要性能参数对比
Tab. 4 Comparison of major performance parameters during acceleration and deceleration process

性能参数	周向错角 SRM	同尺寸 SRM
提速 200 rpm 用时/ms	2.04	3.17
减速 300 rpm 用时/ms	4.13	3.79

5.3 增卸负载过程分析

模拟汽车在行驶过程中会遇到上下坡等负载变化的情况, 设给定转速维持在 1 000 rpm, 初始负载转矩为 5 N·m, 模拟该电机的增卸负载过程。在 20 ms 时将负载转矩提升至 10 N·m, 在 40 ms 时将负载转矩降低至 5 N·m, 得到的仿真结果如图 14。可以看出, 在负载转矩突变后, 转速依然能够维持在设定的参考转速附近, 仅有 1.59 rpm 的波动, 影响很小, 动态转速性能良好。在负载转矩突然增大和突然减小后, 电机电磁转矩能够分别在 0.31 ms 以及 0.52 ms 的时间内, 迅速调节至符合要求。

同样的仿真条件下, 对同尺寸 SRM 的增卸负载过程进行仿真分析, 转速和转矩波形如图 15 所示, 增卸负载过程中的主要性能参数对比如表 5 所示。

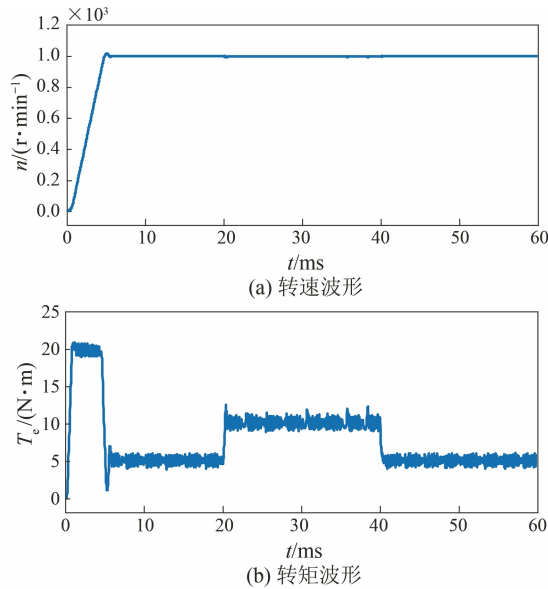


图 14 周向错角 SRM 增卸负载过程波形图

Fig. 14 Waveforms of loading and unloading process of the circumferentially staggered SRM

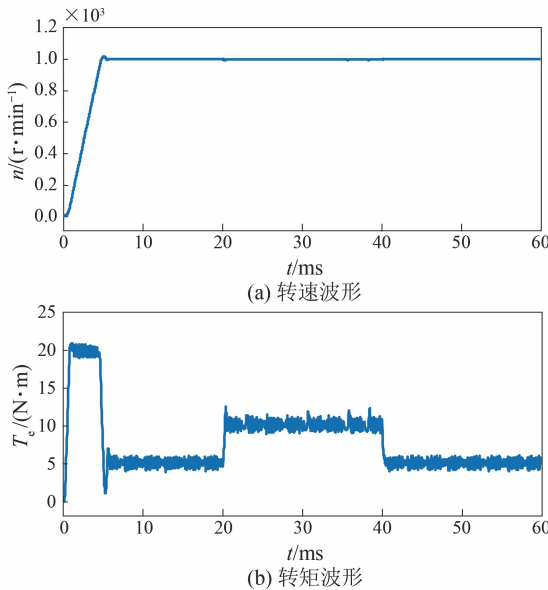


图 15 同尺寸 SRM 增卸负载过程波形图

Fig. 15 Waveforms of loading and unloading process of the SRM of the same size

从表 5 可以看出,在负载转矩突变时,周向错角开关磁阻电机的电磁转矩的调节速度更快,这是由于其电磁转矩是由一相主绕组与一相辅助绕组共同提供的,两相绕组的调节速度要优于同尺寸 SRM 的单相绕组。

6 结语

本文分析了 SRM 转矩脉动产生的主要原因,

研究了一种结构优化设计与直接瞬时转矩控制相结合的方法,来抑制电机的转矩脉动。通过场路耦合联合仿真,验证了该方法对抑制 SRM 转矩脉动的有效性。取得的有益效果如下:

表 5 增卸负载过程主要性能参数对比

Tab. 5 Comparison of major performance parameters during loading and unloading process

性能参数	周向错角 SRM	同尺寸 SRM
负载增加时电磁转矩调节时间/ms	0.31	0.49
负载减小时电磁转矩调节时间/ms	0.52	0.72

(1) 利用 SRM 的径向空间,增设内定子及辅助绕组,构成了包含主绕组和辅助绕组的周向错角开关磁阻电机。周向错角可保证主绕组换相区与辅助绕组电感稳定上升区重叠,从而在主绕组提供转矩能力显著下降的区间,辅助绕组能提供稳定辅助转矩作为补充。

(2) 协同考虑主绕组及辅助绕组,共分成六相,设计了直接瞬时转矩控制策略,包括具体的扇区划分及开关信号表。相对于传统的电机控制方法,DITC 能够快速响应包括负载扰动在内的系统状态的变化,从而有效抑制电机的转矩脉动。通过对电机转矩的精确控制,减少电机运行过程中的转矩脉动,进而降低机械振动和噪音水平,提升系统运行性能。

(3) 由于传统的开关磁阻电机数学模型不适用于该新型周向错角开关磁阻电机,因此本文利用 Maxwell 建立其本体模型,从而避免复杂的数学模型推导过程,且通过与 Simplorer 中所建功率变换器以及控制电路的链接,可以直接提供 DITC 所需的实际转矩信号,还能避免转矩估计环节。

参考文献

- [1] OMID K, MORADI H C, HOSSEIN M 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] 党选举, 彭慧敏, 姜辉, 等. 基于模糊分数阶 PID 的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制[J]. 振动与冲击, 2018, 37(23): 104-110.
- DANG X J, PENG H M, JIANG H, et al. Direct instantaneous torque control of a switched reluctance

- motor based on fuzzy fractional order PID [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(23): 104-110.
- [3] 陈吉清, 冼浩岚, 兰凤崇, 等. 开关磁阻电机结构性转矩脉动抑制方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(20): 106-119.
- CHEN J Q, XIAN H L, LAN F C, et al. Structural torque ripple suppression method of switched reluctance motor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(20): 106-119.
- [4] 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.
- [5] 项倩雯, 彭振德, 欧钰, 等. 基于定转子开窗的混合励磁双定子 BSRM 振动抑制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 43-50.
- XIANG Q W, PENG Z D, OU Y, et al. Vibration suppression of hybrid excitation double-stator BSRM based on stator-rotor fenestrating [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 43-50.
- [6] 蔡燕, 张东学. 开关磁阻电机新型转子齿形对转矩脉动抑制的仿真研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊2): 64-70.
- CAI Y, ZHANG D X. Simulation study on torque ripple reduction of a switched reluctance motor using new rotor tooth [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S2): 64-70.
- [7] 周云红, 胡泮, 蒋嘉豪, 等. 新型开关磁阻电机优化设计[J]. 微电机, 2021, 54(12): 43-50+76.
- ZHOU Y H, HU P, JIANG J H, et al. Optimization design of new switched reluctance motor [J]. Micromotors, 2021, 54(12): 43-50+76.
- [8] 张鑫, 王秀和, 杨玉波, 等. 基于转子齿两侧开槽的开关磁阻电机振动抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1508-1515.
- ZHANG X, WANG X H, YANG Y B, et al. Vibration reduction of a switched reluctance motor using new rotor tooth with slot on each side [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1508-1515.
- [9] LIU X, WANG Z M, WAN D D, et al. Structure optimization of switched reluctance motor for torque ripple suppression [C] // 2019 22nd Conference on Electrical Machines and Systems, Harbin, 2019.
- [10] ZHU J W, CHENG K W E, XUE X D, et al. Design of a new enhanced torque in-wheel switched reluctance motor with divided teeth for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1-4.
- [11] 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/OL]. 电工技术学报, 2024-6-21. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231916>.
- 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/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024-6-21. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231916>.
- [12] 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/OL]. 中国电机工程学报, 2024-6-21. <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231104>.
- YAN W J, ZHANG D, LI H L, et al. A hybrid control system for multi-mode double stator switched reluctance motor [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024-6-21. <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231104>.
- [13] 黄朝志, 肖任全, 徐俊鑫, 等. 重叠角自适应 TSF 控制对开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(5): 232-241.
- HUANG Z Z, XIAO R Q, XU J X, et al. Torque ripple suppression of switched reluctance motor using overlap angle adaptive TSF control [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(5): 232-241.
- [14] 周凯, 石增. 开关磁阻电机转矩脉动抑制技术[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 85-92.
- ZHOU K, SHI Z. Torque ripple reduction technique for switched reluctance motor [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(12): 85-92.
- [15] REDDY P K, RONAICKI D, PERUMAL P. Efficiency improvement and torque ripple minimisation of four-phase switched reluctance motor drive using new direct torque control strategy [J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(1): 52-61.

- [16] 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.
- [17] YE J, BILGIN B, EMADI A. An offline torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 726-735.
- [18] MORON C, GARCIA A, TREMPES E, et al. Torque control of switched reluctance motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(4): 1661-1664.
- [19] 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.
- [20] 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.
-
- 收稿日期:2024-04-29
收到修改稿日期:2024-06-24
作者简介:
周云红(1982-),女,博士,教授,研究方向为电力传动,zyh@njit.edu.cn;
*通信作者:陈泽楠(1999-),男,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机优化设计及控制,chen_zenan@qq.com。

Torque Ripple Suppression in Switched Reluctance Motors under Structural Optimization and Direct Instantaneous Torque Control

ZHOU Yunhong^{1,2}, CHEN Ze'nan^{2*}, LI Hanjie², LIU Chenyu², HU Hanzhang², WANG Kaiyi²

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network, Nanjing 211167, China;

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

Key words: switched reluctance motor; torque ripple suppression; structural optimization; direct instantaneous torque control

In recent years, China has actively advocated for environmental conservation and vigorously promoted the “dual-carbon” policy. As a result, electric vehicles, as new energy vehicles, have gradually increased their market share. Motors, being the core component of electric vehicles, should possess advantages such as structural stability, high reliability, low cost, rapid acceleration, and a wide speed regulation range. Among these, switched reluctance motors (SRMs) particularly stand out. However, owing to the double salient pole structure and pulsed power supply mechanism, SRMs experience significant torque ripple during operation, which negatively affects the smoothness and comfort of electric vehicle operation, thereby limiting its wider application and further development.

To address this issue, this paper investigated a circumferentially staggered SRM. The external and internal stators were mutually offset by a certain angle in the circumferential direction, with auxiliary windings on the internal stator providing supplementary torque to compensate for the torque drop in the main windings of the external stator during phase commutation. Fig. 1 showed the inductance curve of the circumferentially staggered SRM. During phase commutation of the main windings on the external stator, the inductance of the auxiliary winding remained in an ascending phase, providing torque compensation to offset the torque drop during commutation, thereby suppressing torque

ripple.

Based on a field-circuit coupling co-simulation environment, the direct instantaneous torque control system of this motor was modularly constructed, and simulation tests were conducted under various operating conditions, such as starting, acceleration/deceleration, and load increase/reduction, to analyze its torque and speed performance. The motor model was developed using finite element software, which not only avoided the need for complex mathematical model derivations but also directly provided feedback to the control circuit about the actual torque, eliminating the need for a torque estimation stage. When the motor's structure, parameters, and control strategy were altered, corresponding adjustments could be made within the relevant modules. This field-circuit coupling co-simulation method was highly portable and valuable for quickly verifying the effectiveness of structural designs and control strategies during the research process.

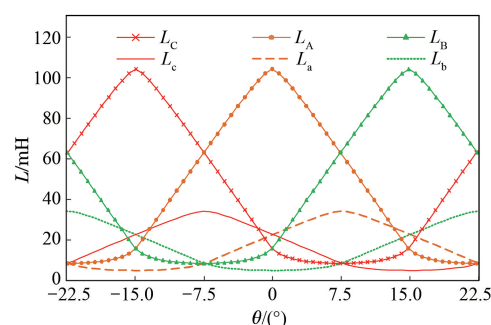


Fig. 1 Inductance curves