

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.247006

基于7电平T型变换器的SRM改进转矩分配函数控制策略

王鸿翔¹, 王国平², 王星², 陈昊^{2,3,4}, 潘剑飞⁵, 徐立军⁴

(1. 江苏电子信息职业学院, 江苏 淮安 223003; 2. 中国矿业大学新能源电动车技术与装备中东欧国家国际联合研究中心, 江苏 徐州 221008; 3. 中国矿业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057; 4. 新疆工程学院控制工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023; 5. 深圳大学机电与控制工程学院, 广东 深圳 518054)

摘要: 为解决传统不对称半桥变换器对开关磁阻电机(switched reluctance motor, SRM)驱动能力以及转矩脉动抑制上的不足, 提出了一种基于7电平T型变换器的电平矢量矩阵位移改进转矩分配函数(torque sharing function, TSF)控制策略。首先, 构造出新型7电平T型变换器, 其串并联结构和T型结构能够产生额外4种工作电平。然后, 改进了电平矢量矩阵位移TSF的转矩滞环比较过程并提出了电平矢量矩阵位移策略, 通过转矩闭环实现电平矢量矩阵位移以抑制换相区的转矩脉动。最后, 仿真和实验验证了所提变换器以及控制策略不仅提高了电机的转矩输出能力, 而且抑制了转矩脉动。

关键词: 多电平变换器; 开关磁阻电机; 转矩分配函数控制; 转矩脉动

An improved torque sharing function control strategy for SRM based on a 7-level T-type converter

WANG Hongxiang¹, WANG Guoping², WANG Xing², CHEN Hao^{2,3,4}, PAN Jianfei⁵, XU Lijun⁴

(1. Jiangsu Vocational College of Electronics and Information, Huaian 223003, China; 2. International Joint Research Center of Central and Eastern European Countries on New Energy Electric Vehicle Technology and Equipment, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Shenzhen Research Institute, China University of Mining and Technology, Shenzhen 518057, China; 4. School of Control Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China; 5. School of Electromechanical and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518054, China)

Abstract: To overcome the limitations of conventional asymmetric half-bridge converters in terms of driving capability and torque ripple suppression for switched reluctance motors (SRM), an improved torque sharing function (TSF) control strategy with voltage-level vector shift is proposed based on a 7-level T-type converter. First, a novel 7-level T-type converter is constructed with a series-parallel switching function and a T-type structure that generate four additional voltage levels. Subsequently, the TSF's torque hysteresis comparison process is improved, and a voltage-level vector shift strategy is proposed. Torque ripple in the phase change region is suppressed by implementing the voltage-level vector shift through the closed-loop torque control. Finally, simulations and experiments verify that the proposed converter and control strategy not only improve the torque output capability of the motor but also significantly reduce torque ripple.

This work is supported by the Special Fund for Science and Technology Program of Jiangsu Province (No. BZ2022014).

Key words: multilevel converter; switched reluctance motor; torque sharing function control; torque ripple

基金项目: 江苏省科技计划专项资金(创新支撑计划国际科技合作/港澳台科技合作)项目资助(BZ2022014); 深圳市基础研究专项(自然科学基金)重点项目资助(JCYJ20220818100000001); 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目资助(NJ2023-27); 江苏省高校优秀科技创新团队项目资助(JSESTITU2021-53); 淮安市逆向工程与数字化设计重点实验室项目资助(HAP202303)

0 引言

近年来,为了解决能源紧张问题,电动汽车作为清洁能源主要的民用应用场景,有着很大的发展潜力^[1-3]。开关磁阻电机(switched reluctance motor, SRM)具有成本低、结构简单、启动转矩大以及环境适应性强等优点^[4-7],在交通运输、工业生产以及航空航天等领域有着广阔的发展前景^[8]。然而,SRM的非线性特征造成的高噪声、振动和转矩脉动使其作为电动汽车驱动电机的优势并不明显,这也限制了其在电动汽车特别是乘用车领域的发展^[9-10]。

对SRM变换器拓扑进行优化能够大幅度提高其对电机电流和转矩控制能力,从而减小转矩脉动。一些多电平变换器能够产生多种不超过电源电压的励磁和退磁电平,虽然不能提高基速和输出功率,但能够改善转矩纹波并提高效率^[11]。文献[12]提出的5电平中性点二极管钳位变换器比具有相同成本的不对称半桥变换器(asymmetric half bridge converter, AHBC)有着更低的电流纹波、转矩脉动、噪声以及损耗。然而,这些变换器结构不能产生高于电源电压的励磁电压。为了提高电机转矩的滞环跟随性能,需要改进变换器结构以给绕组提供高于电源电压的励磁电压以及更低的励磁电压。文献[13]中设计了一种通过升压模块提供高于传统AHBC励磁电平的5电平变换器,采用直接瞬时转矩滞环控制策略,提高了电机转矩的控制能力。同样,文献[14]设计的变换器通过两级电容升压可以产生3倍电源电压的励磁电平,提高了电机基速进而提高了输出功率。但是其升压模块三相共用,换相重叠区的控制相对复杂,且对电机动态性能影响较大。

由于新型功率变换器需要匹配新的控制策略,转矩控制策略的优化就显得尤为重要^[15-17]。基于AHBC变换器所开发的控制方法很多,大多数方法旨在减小转矩脉动。转矩分配函数(torque sharing function, TSF)控制主要有两种方法来抑制转矩脉动:1)通过找到更匹配实际转矩变化趋势的转矩分配函数,使得换相区前后两相转矩互相补偿,从而减小转矩脉动;2)增加多个更高和更低的励磁和退磁电平来使相转矩尽可能地跟随给定相转矩。文献[18-19]以电机前一个换相区的给定相转矩和实际转矩的差值对下一个换相区两相的给定相转矩进行补偿以抑制转矩脉动。文献[20]提出一种新的转矩分配函数控制以适应电机的转矩特性。文献[21]和文献[22]都提出了与所提新型变换器相匹配的新型直接瞬时转矩控制(direct instantaneous torque control, DITC)方法,与传统DITC相比,实现了宽调速范围下的转矩与电

流脉动的抑制。

本文提出一种具有更多电平的7电平T型功率变换器,并根据多电平的特点,提出了改进的TSF控制策略,其转矩滞环比较过程更好地适应所提变换器的多电平特性,同时,提出了转矩闭环电平矢量矩阵位移(voltage-level vector shift, VVS)控制方法,能够根据转矩脉动的大小和特性改变各个区间的电平矢量矩阵、改变换相区间的实际转矩相对于分配转矩的偏移程度,以达到前后相转矩互相补偿从而减小电机转矩脉动。与传统的基于AHBC的TSF控制相比,所提控制策略能够显著提高电机的转速和转矩性能。

1 传统转矩分配函数控制策略

开关磁阻电机是一个非线性系统,其相转矩与转子位置、励磁电压以及电流有关。同时,电机相电感变化特性也是影响转矩的因素之一。一般情况下,SRM控制过程中电感的非线性变化可以被简化成线性变化。图1是由不对称半桥变换器驱动的SRM的各相绕组的相电感 L_k 、相电流 i_k 、相转矩 T_k 与转子位置 θ 的关系示意图($k=a,b,c$)。可以看出,在开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 之间进行励磁能够产生正转矩,此过程相电感处于上升期;若在电感下降区产生电流,则会产生负转矩。因此,对转矩进行控制应当在电感上升区进行励磁和退磁。

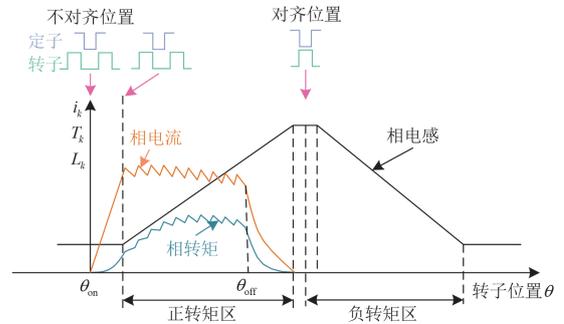


图1 电感、电流和转矩与转子位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of motor inductance, current and torque vs. rotor position

若忽略磁饱和的影响,开关磁阻电机的相转矩 T_k 可以写成

$$T_k = \frac{1}{2} \frac{dL_k}{d\theta_k} i_k^2 \quad (1)$$

传统AHBC和三相12/10径向SRM系统采用的传统TSF控制系统如图2所示。在传统TSF控制系统中,转速PI控制器通过实际转速 ω 和参考转速 ω_{ref} 的差值 $\Delta\omega$ 输出总转矩给定值 T_{ref} ,再经过转矩分配函数模块生成三相相转矩给定值 T_{kref} 。对 T_{kref} 与相

转矩 T_k 的差值进行滞环比较得到变换器各相的工作电平标号 s_a 、 s_b 和 s_c ，经过控制信号生成器产生开关管驱动信号。对于 AHBC 来说，有励磁、续流和退磁 3 种工作状态，分别用标号表示为“1”、“0”和“-1”。 T_k 是通过得到相电流 i_k 与转子位置 θ_k 具体值之后，通过对有限元仿真得到的转矩-电流-转子、磁链-电流-转子位置二维查找表得到。转矩滞环比较过程以直接输出的相转矩误差 ΔT_k 作为控制对象，能够有效保证电机相转矩 T_k 跟随 T_{kref} 。与传统电流斩波控制方法不同的是，TSF 控制是直接以总转矩作为参考，因此在控制过程中，有限元仿真得到的二维查找表数据更为精确。

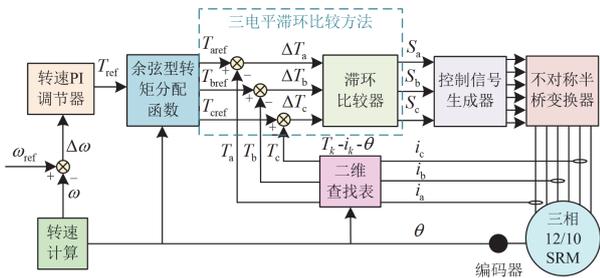


图2 基于 AHBC 的传统 TSF 控制策略系统框图

Fig. 2 Block diagram of conventional TSF control system based on AHBC

传统 TSF 控制策略在某一时刻最多只允许相邻两相或单相绕组励磁产生转矩，此时其他相转矩给定值和相转矩都为 0。在单相导通的情况下，总转矩 T_c 全部由一相提供，即 $T_{kref} = T_{ref} = T_c$ 。当相邻两相都导通时，在换相区间，前一相相转矩给定值 T_{aref} 逐渐减小，后一相的相转矩给定值 T_{bref} 逐渐增大，两相转矩给定值满足式(2)。

$$T_{aref} + T_{bref} = T_{ref} \quad (2)$$

T_{kref} 通过转矩分配函数 $f_k(\theta_k)$ 进行分配，常见的转矩分配函数有直线型、余弦型、指数型和立方型 4 种，本文所采用的是余弦型函数，则 T_{kref} 表达式为

$$T_{kref}(\theta_k) = f_k(\theta_k)T_{ref} = \begin{cases} 0, & 0 \leq \theta_k < \theta_{on} \\ \frac{1}{2}T_{ref} \left[1 - \cos \left[\frac{\theta_k - \theta_{on}}{\theta_{ov}} \pi \right] \right], & \theta_{on} \leq \theta_k < \theta_{on} + \theta_{ov} \\ T_{ref}, & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta_k < \theta_{off} \\ \frac{1}{2}T_{ref} \left[1 + \cos \left[\frac{\theta_k - \theta_{off}}{\theta_{ov}} \pi \right] \right], & \theta_{off} \leq \theta_k < \theta_{off} + \theta_{ov} \\ 0, & \theta_{off} + \theta_{ov} \leq \theta_k < \theta_r \end{cases} \quad (3)$$

式中： θ_{ov} 表示换相重叠角； θ_r 表示转子极距角，对

于 12/10 的 SRM 来说， $\theta_r = 36^\circ$ 。

图 3 为 TSF 控制下总转矩 T_c 、相转矩 T_k 以及给定相转矩 T_{kref} 示意图。相转矩及时跟随给定相转矩是抑制转矩脉动的关键因素。然而，一般情况下，由于导通时相电感较小，产生转矩较小，此时相转矩低于给定相转矩。同样，关断之后的实际相转矩也难以跟随给定相转矩，因此在换相区容易产生较大的转矩脉动。

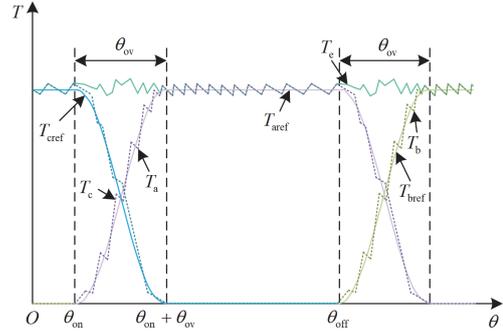


图3 TSF 控制策略下总转矩、相转矩与给定相转矩示意图

Fig. 3 Schematic diagram of total torque, phase torque and given phase torque under TSF control strategy

图 4 为传统 TSF 控制下 AHBC 的 A 相 3 种工作状态以及转矩滞环比较过程。图 4(a)—图 4(c) 分别给出了励磁、续流和退磁 3 种工作状态下的相电流路径，3 种工作状态产生的工作电平标号 s_a 为“1”、“0”和“-1”。图 4(d) 中 ΔT_a 为相转矩误差， T_1 为滞环参数 ($T_1 > 0$)，当 ΔT_a 逐渐增大时， s_a 根据上升路径得到，当 ΔT_a 减小时， s_a 根据下降路径得到， s_a 会在“1”、“0”和“-1”中来回切换以使相转矩跟随给定相转矩。将图 4(d) 中 3 种工作状态按照顺序写成矩阵的形式，可以得到 A 相电平矢量矩阵 $S_a = [1, 0, -1]$ 。

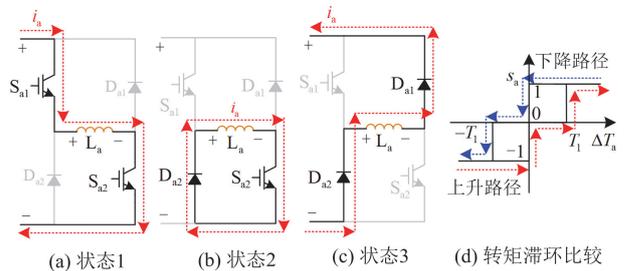


图4 传统 TSF 控制下 AHBC 的 A 相 3 种工作状态以及转矩滞环比较过程

Fig. 4 Three operating states of A-phase of AHBC under conventional TSF control and the torque hysteresis loop comparison process

图 5 中给出了传统 TSF 控制下转矩跟随关系示意图。换相重叠区被分成了 3 个相等的区间，则一个转子周期有 8 个区间。其中前一相的区间 V、VI 和 VII 和后一相的区间 I、II 和 III 重叠，3 个区间长度相等。图 5(a) 中 A 相导通时由于电感和电感变化率都很小，虽然电流能够快速上升，但相转矩提升速度较慢且很难跟随给定相转矩，此时 C 相转子位置处于区间 V，由于电感较大，相转矩下降速度较快且能够跟随给定相转矩，因此总转矩 T_c 出现了较小的波动；在区间 III 时，A 相相转矩上升速度加快，能够很好地跟随给定相转矩。此时 C 相处于区间 VII，由于电感较大且接近下降区，相比于区间 V 和区间 VI，区间 VII 处的相转矩下降速度慢，跟随给定相转矩能力较差，总转矩出现了正向波动。

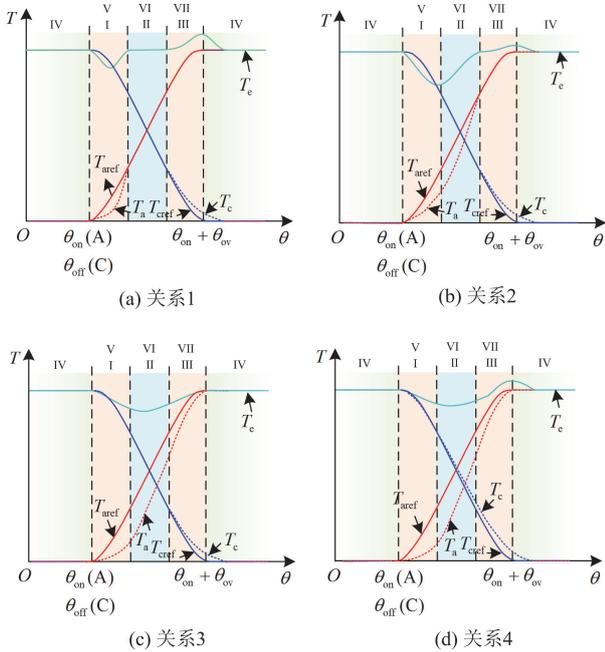


图 5 传统 TSF 控制下转矩关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of torque relationship with conventional TSF control

同理，图 5(b)——图 5(d) 中前一相区间 V—VII 和后一相区间 I—III 中都有可能出现相转矩难以跟随给定相转矩的情况，会造成转矩上下波动，在换相重叠区尤为明显。

综上所述，基于 AHBC 的传统 TSF 控制策略有着很多局限性。例如，即使在换相区后一相以最高电平励磁，换相区间的转矩跟随仍然较慢。这就需要转矩分配函数在换相区能够使得前一相产生更大的转矩来补偿后一相的转矩下降。然而，在电机性能或者控制参数发生变化时，传统的转矩分配函数无法自适应调整，导致转矩下降。同时单一的励磁

和退磁电平都会导致电流变化较快和转矩脉动较大。因此需要设计一种具有更高更多电平的变换器，并匹配改进 TSF 控制策略以自适应地抑制 SRM 的电流峰值和转矩脉动，提高电机运行效率。

2 基于 7L-TC 的电平矢量矩阵位移改进 TSF 控制策略

本文提出了一种新型 7 电平 T 型变换器(7-level t-type converter, 7L-TC)，能实现励磁、退磁和续流 3 个状态，具有 7 种工作电平，其拓扑如图 6 所示。

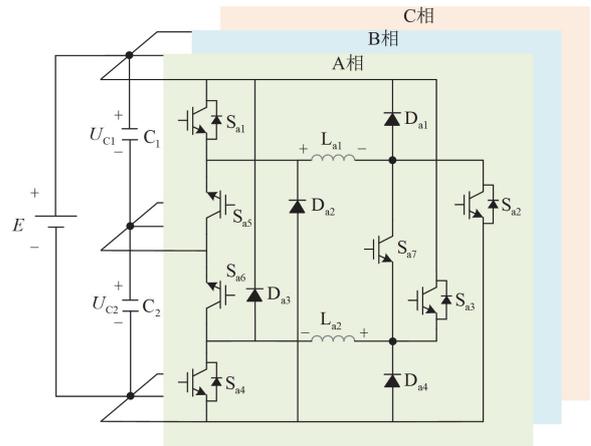


图 6 7 电平 T 型变换器拓扑

Fig. 6 Topology of 7-level T-type converter

该变换器是针对每相具有两个平衡分段绕组的三相 SRM 所设计，结合了绕组重构型变换器的两倍电源电压励磁、退磁和 T 型变换器的二分之一电源电压的励磁、退磁的特点。其中 S_{k1} — S_{k7} 为开关管， S_{k1} — S_{k4} 采用 MOSFET， S_{k5} — S_{k7} 采用不带反并联二极管的 IGBT； D_{k1} — D_{k4} 为二极管； C_1 和 C_2 为电容，当 C_1 、 C_2 串联时，其承担一半的电源电压。各相两个分段绕组分别表示为 L_{k1} 和 L_{k1} 。所提变换器能实现的 7 种工作电平标号分别表示为“+3”、“+2”、“+1”、“0”、“-1”、“-2”和“-3”。

2.1 新型 7 电平 T 型变换器的工作原理

以 A 相为例，产生 7 种工作电平的 9 种工作状态的电流路径如图 7 所示，具体分析如下所述。

状态 1: 工作电平标号为“+3”，开关管 S_{a1} — S_{a4} 导通，绕组 L_{a1} 、 L_{a2} 并联且均以等于电源电压的电平励磁。

状态 2: 工作电平标号为“+2”，开关管 S_{a7} 导通，绕组 L_{a1} 、 L_{a2} 串联，同时开关管 S_{a1} 、 S_{a4} 导通，串联的两个绕组以电源电压励磁。

状态 3-1 和状态 3-2: 工作电平标号都为“+1”，

开关管 S_{a7} 导通, 绕组 L_{a1} 、 L_{a2} 串联, 通过开关管 S_{a5} (S_{a6}) 使串联的两个绕组以电容 C_2 (C_1) 进行励磁。电容 C_1 、 C_2 参数相同, 其电压相等且均为电源电压的一半。在实际运行过程中, 由于其中一个电容电压励磁导致两个电容电压不平衡, 因此需要滞环比较两个电容电压值, 当两个电容电压差值超过设定值时, 采用状态 3-1 进行励磁, 当差值低于设定值时, 采用状态 3-2 励磁。

状态 4(0): 工作电平标号为“0”, 开关管 S_{a5} — S_{a7} 导通, 两个分段绕组 L_{a1} 、 L_{a2} 串联进行零电压续流。

状态 5-1 和状态 5-2: 工作电平标号为“-1”, 开关管 S_{a7} 导通, L_{a1} 、 L_{a2} 串联, 然后分别通过 S_{a5} 和 D_{a3} (S_{a6} 和 D_{a2}) 向 C_1 (C_2) 退磁。同理, 与状态 3 一样, 两电容电压超过(低于)设定值时, 采用状态

5-2(5-1)退磁。

状态 6: 工作电平标号为“-2”, 此时开关管 S_{a7} 导通, 串联的 L_{a1} 、 L_{a2} 通过二极管 D_{a2} 、 D_{a3} 以电源电压退磁, 两个绕组两端总电压为负电源电压。

状态 7: 工作电平标号为“-3”, 分段绕组 L_{a1} 、 L_{a2} 分别通过 D_{a1} 、 D_{a2} 和 D_{a3} 、 D_{a4} 以电源电压退磁, 此时绕组两端总电压为负的两倍电源电压。

所提变换器通过增加一个让分段绕组并联的方式, 得到了两倍电源电压励磁状态, 该工作状态可以在某相刚导通时提高电流和转矩的上升速度, 相转矩得以紧密跟随给定相转矩。另外, 所提变换器具有以二分之一电源电压电平励磁和退磁的能力, 使得在单向导通区的电流和转矩变化较为平缓, 减小了电流纹波。多电平励磁和退磁控制电流和转矩更为灵活。

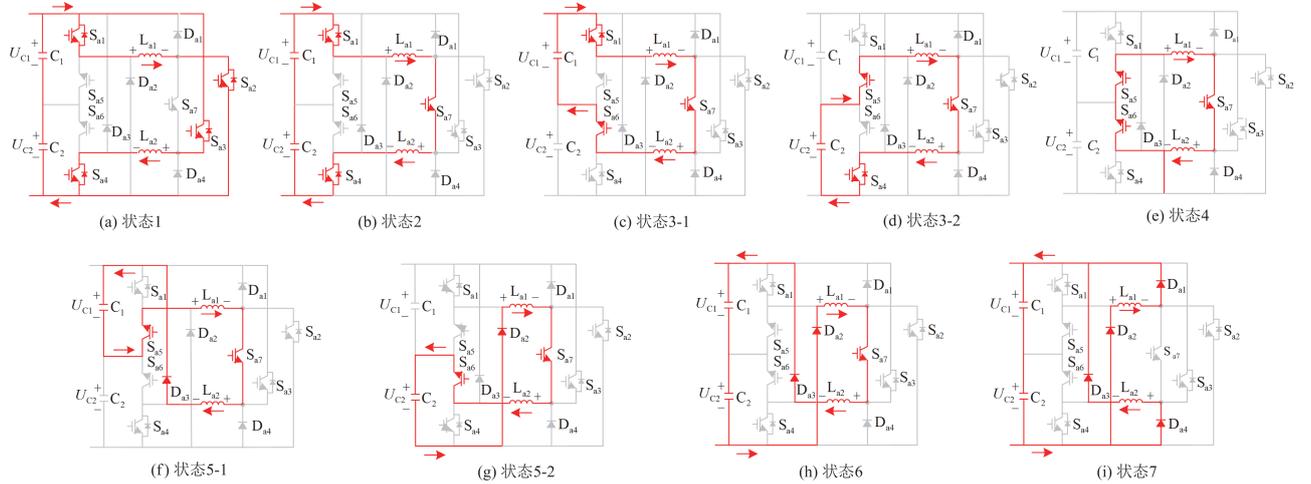


图 7 7L-TC 的工作状态

Fig. 7 Operating state of 7L-TC

2.2 基于 7L-TC 的改进的多电平转矩比较方法

本文对传统的 TSF 控制策略的三电平滞环比较方法进行改进, 提出了基于 7L-TC 的改进的多电平转矩比较方法, 以适应所提的新型变换器特性。按照图 5 所示的区间分类方法, 将一个转子极距角分为 8 个区间。区间 IV 为单相导通区域, 而区间 VII 为强制关断区域。以 A 相为例, 保留传统的滞环参数 T_1 , 根据相转矩误差 ΔT_a 与 T_1 、0 和 $-T_1$ 的关系得到 4 种工作电平标号 s_a , 可以表示为

$$\begin{cases} s_a = S_{a,11} & \Delta T_a \geq T_1 \\ s_a = S_{a,12} & 0 \leq \Delta T_a < T_1 \\ s_a = S_{a,13} & -T_1 \leq \Delta T_a < 0 \\ s_a = S_{a,14} & \Delta T_a < -T_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_{a,ij}$ 表示 S_a 的第 i 行第 j 列元素。

表 1 中给出了 8 个区间的初始电平矢量矩阵, 当各相的转子位置处于任何一个区间时, 控制器采用与该区间对应的初始电平矢量矩阵, 并通过式(4)得到变换器的工作电平标号。值得注意的是, 工作电平标号 $s_a = 1$ 或 -1 时, 实现这两个工作电平的工作状态会根据两个电容的电压大小被交替采用。

表 1 区间-电平矢量矩阵表

Table 1 Interval-voltage level vector matrix table

区间	S_a	区间	S_a
I	[3,3,2,1]	V	[1,0,-1,-2]
II	[3,2,1,0]	VI	[0,-1,-2,-3]
III	[2,1,0,-1]	VII	[-1,-2,-3,-3]
IV	[1,0,-1,-2]	VIII	[-3,-3,-3,-3]

2.3 VVS 改进 TSF 控制

所提的基于7L-TC的TSF控制策略不改变转矩分配函数,而是通过转矩脉动实时调节各个区间电平矢量矩阵来间接调节相转矩与给定相转矩之间的差值,使得换相时前后相转矩能够及时互相补偿来抑制转矩脉动。由于这种调节电平矢量矩阵方法是根据总转矩波动得到,使得电机在不同性能和工况下具有良好的鲁棒性。

图8给出了区间I、VII中 T_{kref} 上升和下降时,两种不同电平矢量矩阵控制下相转矩跟随给定相转矩示意图。其中工作电平标号按照式(4)得到,图8中垂直线段由4个长度为 T_1 的线段构成,其中心点与 T_{kref} 重合,采样周期为 T_s 。假设实际相转矩 T_k 在不同工作电平下具有恒定斜率,且工作电平越高,斜率越大。可以看出,当电平矢量矩阵 $S_a = [3,3,2,1]$ 时,相转矩 T_k 高于 T_{kref} ,而电平矢量矩阵 $S_a = [3,2,1,0]$ 时,相转矩 T_k 低于 T_{kref} 。同理,在 T_{kref} 呈下降趋势时,电平矢量矩阵前移,实际相转矩比给定相转矩高,电平矢量矩阵后移,则实际转矩要比给定转矩低。因此,当总转矩低于给定总转矩时,电平矢量矩阵前移可以使相转矩高于给定相转矩从而弥补转矩脉动的降低。当电平矢量矩阵后移时,相转矩低于给定相转矩,抑制总转矩的下降。

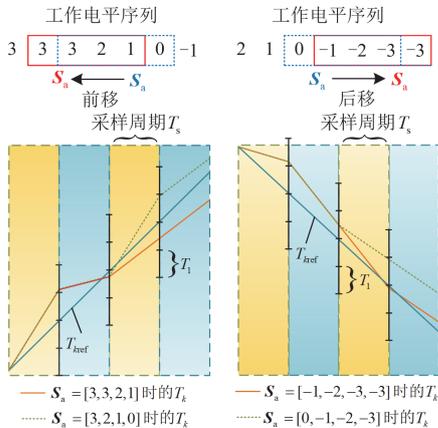


图8 两种不同电平矢量矩阵控制下相转矩跟随给定相转矩示意图

Fig. 8 Schematic diagram of phase torque following a given phase torque under matrix controls of two different voltage level vectors

电平矢量矩阵的前移和后移都是以整数为步长的。设定位移量 m 为整数, $m < 0$ 时,表示后移, $m > 0$ 时表示前移。则电平矢量矩阵前移与后移可以表示为

$$S_{a(l)} = S_{a(l-1)} + m, m \in Z \quad (5)$$

式中: $S_{a(l)}$ 表示当前采样时刻的电平矢量矩阵; Z 表示整数集。

T_{ref} 和 T_c 的差值 ΔT 如式(6)所示。

$$\Delta T = T_{ref} - T_c \quad (6)$$

转矩PI调节器输出的值 ΔT_{ref} 可以表示成

$$\Delta T_{ref} = \Delta T_{(l-1)} + K_p [\Delta T_{(l)} (1 + T_s K_i) - \Delta T_{(l-1)}] \quad (7)$$

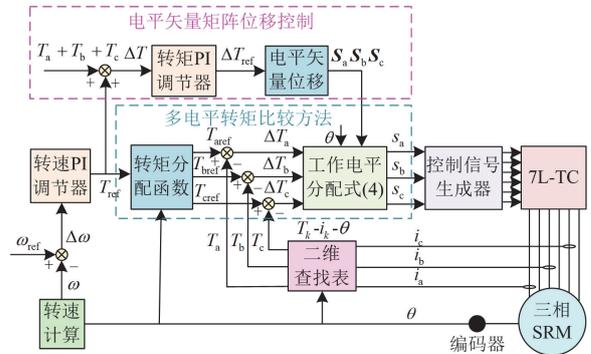
式中: $\Delta T_{(l)}$ 表示当前采样时刻 T_{ref} 和 T_c 的差值; K_p 、 K_i 分别表示比例和积分系数。

控制过程中8个区间的电平矢量矩阵叠加位移量之后不能够改变该区间原本的励磁和退磁属性,即区间I叠加位移量 m 之后, S_a 中最大的元素要高于0电平,即 $3+m > 0$;同理,区间VII的 S_a 中最小的元素 $-3+m < 0$,求解不等式可以得到 m 的取值范围为 $(-3,3)$,则位移量可以由式(8)得到。

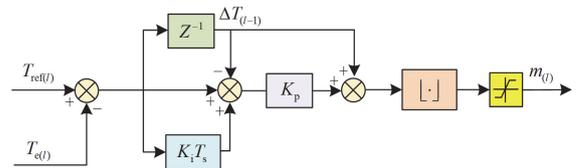
$$\begin{cases} m = 3, & [\Delta T_{ref}] \geq 3 \\ m = [\Delta T_{ref}], & -3 < [\Delta T_{ref}] < 3 \\ m = -3, & [\Delta T_{ref}] \leq -3 \end{cases} \quad (8)$$

式中:“ $[\cdot]$ ”表示向下取整运算。

图9中给出了基于7L-TC的VVS改进TSF控制策略的系统框图和VVS控制框图。相比于图2中传统TSF控制系统,所提控制策略根据多电平变换器的特性,改进了转矩滞环比较过程,有效地抑制转矩脉动并提高了电机控制性能。



(a) 基于7L-TC的VVS改进TSF控制策略框图



(b) VVS控制策略框图

图9 基于7L-TC的VVS改进TSF控制策略和VVS控制策略

Fig. 9 Block diagram of VVS improved TSF control system based on the proposed 7L-TC

图 9(b)中给出了 VVS 控制策略框图。其中： Z^{-1} 表示延迟一个采样周期输出； $T_{ref(l)}$ 、 $T_{e(l)}$ 分别表示第 l 个采样时刻的给定总转矩 T_{ref} 和实际总转矩 T_e ； $m_{(l)}$ 表示第 l 个采样时刻的位移量。

3 仿真分析与实验验证

为了验证所提控制方法对所提 7 电平 T 型变换器的有效性，在 MATLAB/Simulink 中分别搭建了图 2 中基于 AHBC 的 TSF 控制系统和图 9 中基于 7L-TC 的 VVS 改进 TSF 控制系统模型，并对其进行了仿真和实验。

所采用的样机为 12/10/12 轴向磁通模块化双定子混合励磁 SRM(axial flux modular-double-stator hybrid-excitation SRM, AFMHSRM)电机^[23]，该电机三相各有两个平衡分段绕组，其主要参数如表 2 所示。

表 2 AFMHSRM 电气参数

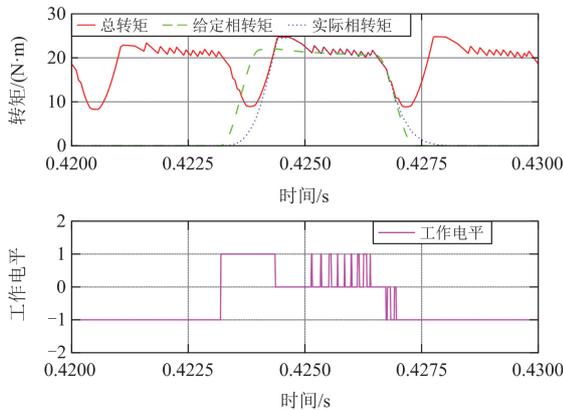
Table 2 AFMHSRM electrical parameters

参数	数值
额定转矩/(N·m)	19.14
额定转速/(r/min)	600
额定电压/V	96
额定功率/W	1200

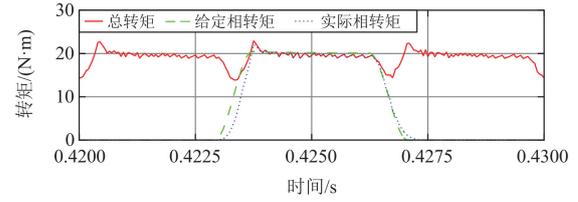
3.1 仿真分析

在仿真中，比例、积分系数 K_p 、 K_i 分别设为 0.8 和 1.0，开通角和关断角分别设为 0° 、 12° ，换相重叠角 θ_{ov} 设为 3° 。电机在额定转矩下以额定转速运行。基于 AHBC 的传统 TSF、基于所提 7L-TC 的改进 TSF 以及 VVS 改进 TSF 控制策略下电机的转矩、电流和工作电平如图 10 所示。

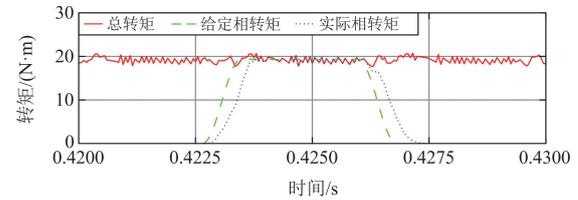
图 10(a)采用基于 AHBC 的传统 TSF 控制策略，由于是以电源电压励磁，A 相刚导通时转矩产生能力较弱，远远低于给定相转矩。前一相转矩产生能力较强，能够很好地跟随给定相转矩，导致换相区总转矩落差较大。



(a) 基于 AHBC 的传统 TSF 控制



(b) 基于 7L-TC 的改进 TSF 控制



(c) 基于 7L-TC 的 VVS 改进 TSF 控制

图 10 不同变换器和控制方法下转矩和工作电平仿真波形
Fig. 10 Simulated waveforms of torque and operating voltage level with different converters and control methods

图 10(b)中采用了基于 7L-TC 的改进 TSF 控制策略。根据所设定的各个区间的电平矢量矩阵，电机绕组以更高的电压励磁和更低的电压退磁，因此 A 相刚导通时相转矩上升较快，关断时更低的退磁电压使得相转矩更好地跟随给定相转矩。然而，虽然改进 TSF 控制提供了更多种类的工作电平，若表 1 中各个区间电平矢量矩阵保持不变，前一相的转矩不能补偿 A 相刚导通时的转矩不足，同样会造成转矩跌落。

图 10(c)中，当总转矩出现大幅度下降时，电平矢量矩阵均前移，前一相因电平矢量矩阵产生的工作电平升高(即退磁电压减小)，转矩下降变缓；后一相的工作电平升高(即励磁电压升高)，从而补偿总转矩跌落。相反，当总转矩出现上升波动时，电平矢量矩阵会后移，此时前一相退磁电压增大，相转矩下降加快，后一相励磁电压降低，相转矩增加变缓，从而抑制了总转矩的正向脉动，显著减小了总转矩波动。

表 3 分别给出了不同转速下 3 种不同控制策略下的相电流有效值 I_{ams} 、转矩脉动 T_{ripple} 以及效率 η 。在转速为 600 r/min 时,基于 AHBC 的传统 TSF 控制策略转矩脉动较大。在 1200 r/min 时,由于励磁电压为电源电压,带载能力减小,电机的转矩性能下降。在 600 r/min 的转速下,基于 7L-TC 的改进 TSF 控制比基于 AHBC 的传统 TSF 控制策略下的转矩脉动降低了 43.76%。虽然在 1200 r/min 的转速下,基于 7L-TC 的改进 TSF 控制策略比基于 AHBC 的传统 TSF 控制策略下的转矩脉动高 7.6%,转矩要比传统控制策略高 169.58%。在 600 r/min 和 1200 r/min 的转速下,基于 7L-TC 的 VVS 改进 TSF 控制策略下比基于 AHBC 的传统 TSF 控制策略转矩脉动分别降低了 78.57%和 58.23%。

表 3 不同变换器和 TSF 控制策略下的仿真参数

Table 3 Simulation parameters for different converter and TSF control strategies

参数	基于 AHBC 的传统 TSF 控制策略		基于 7L-TC 的改进 TSF 控制		基于 7L-TC 的 VVS 改进 TSF 控制	
	600	1200	600	1200	600	1200
转速/(r·min)	600	1200	600	1200	600	1200
T_e /(N·m)	19.14	7.10	19.14	19.14	19.14	19.14
I_{ams} /A	24.08	12.44	24.32	24.16	24.85	23.71
T_{ripple} /%	78.96	78.05	44.41	84.00	16.92	32.60
η /%	59.53	63.54	38.05	60.28	35.78	69.51

3.2 实验验证

为了验证所提 7L-TC 采用 VVS 改进 TSF 控制的有效性,搭建了 7 电平 T 型变换器和 AFMHSRM 样机组成的实验平台。采用 RTUBOX-204 作为控制器,采样频率为 18 kHz;通过有限元仿真得到转矩-电流-转子、磁链-电流-转子位置的二维查找表。转速和转矩 PI 调节器参数与仿真相同。7L-TC、样机以及控制电路组成的实验平台如图 11 所示,各个器件型号或参数如表 4 所示。

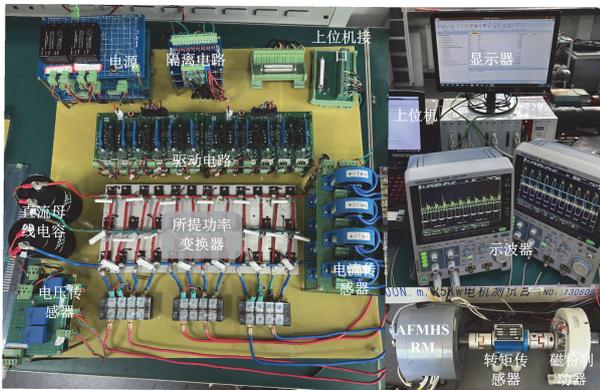


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platforms

表 4 实验平台器件型号与参数

Table 4 Experimental platform device model and parameters

器件名称	型号或参数	器件名称	型号或参数
MOSFET	IRFP4668	电流传感器	FXBY20
IGBT	FGW75N65W	电压传感器	QBV10/25A
二极管	RURG8060	旋转编码器	DLM3024
母线电容	2200 μ F/450 V	直流电源	ZKT8030-002J
吸收电容	0.0001 μ F/1000 V	控制器	RTU-BOX204

图 12 中分别给出基于 AHBC 的传统 TSF、基于 7L-TC 改进 TSF 以及基于 7L-TC 的 VVS 改进 TSF 控制策略下的 A 相给定相转矩 T_{ref} 和相转矩 T_a 、工作电平标号 S_a 、绕组电压 u_{a1} 和 u_{a2} 、绕组电流 i_{a1} 和 i_{a2} 以及总转矩 T_e 。根据图 12 中数据计算,在 600 r/min 的转速和额定负载下,本文所提方法的转矩脉动为 41.78%,分别比基于 AHBC 的传统 TSF 和基于 7L-TC 改进 TSF 控制策略低了 44.86%和 11.13%。在 1200 r/min 的转速和额定负载下,所提的控制方法转矩脉动为 68.63%,与基于 7L-TC 的改进 TSF 控制策略相比,降低了 27.56%。可以看出所提的基于 7L-TC 的 VSS 改进 TSF 控制可以有效提高电机的转矩输出和转矩脉动抑制能力。

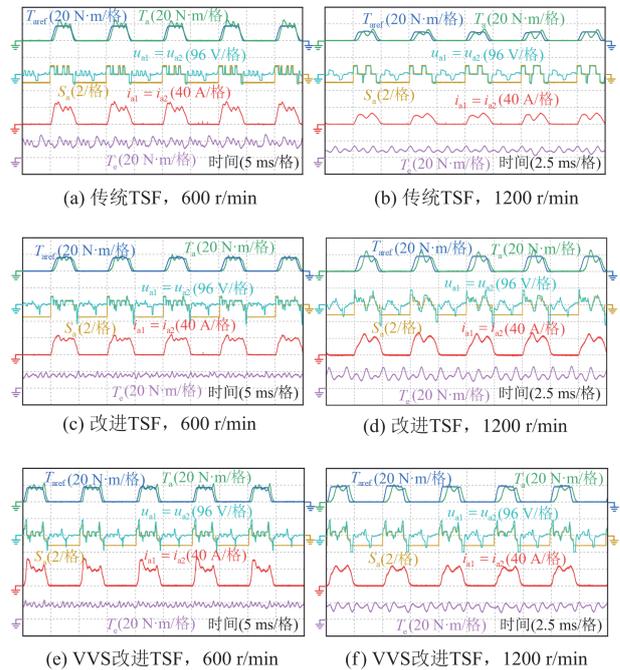


图 12 不同转速下 3 种控制策略的实验波形

Fig. 12 Experimental waveforms of three control strategies at different speeds

图 13 中给出了 3 种不同控制策略下电机的动态性能波形。变速状态负载为额定转矩,电机转速从 600 r/min 突变到 1200 r/min,再变为 300 r/min;变

载状态电机保持额定转速不变, 电机从空载状态突加额定负载, 再变为空载状态。可以看出, 所提的基于 7L-TC 的 VVS 改进 TSF 控制相比另外两种控制策略响应速度更快, 具有更好的动态性能。

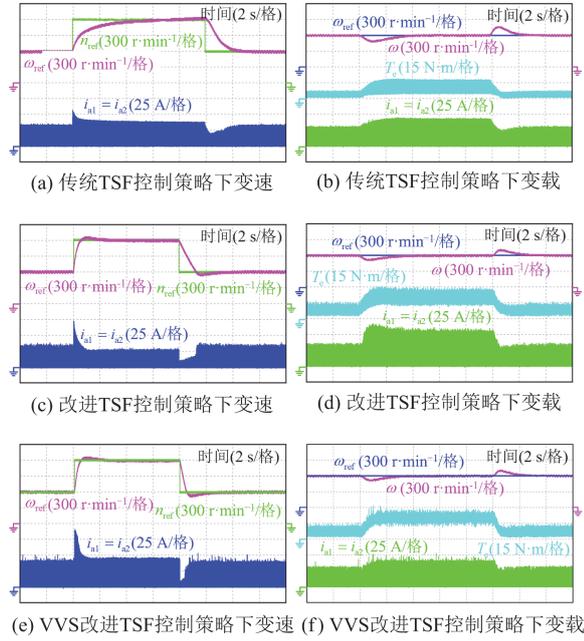


图 13 不同控制策略的动态性能比较实验波形

Fig. 13 Comparative experiment waveforms for dynamic performance of different control strategies

4 结论

本文提出了一种 7 电平 T 型 SRM 逆变器以及 VSS 改进 TSF 控制策略, 与传统的 AHBC 和 TSF 控制相比, 具有以下特性。

1) 所提 7 电平 T 型逆变器工作电平比传统 AHBC 多了 4 个, 提高了 SRM 的转矩输出能力以及转矩控制能力。

2) 提出了适用于 7L-TC 的 8 区间工作 VVS 改进 TSF 控制, 通过电平矢量矩阵与区间实现电机性能匹配, 与传统 TSF 控制相比, 额定状态下转矩脉动降低了 37.83%。

3) 提出了工作电平矢量矩阵位移控制, 实时调节相转矩跟随程度使得前后相转矩互相补偿, 转矩脉动进一步减小了 11.13%, 同时提高了动态响应能力。

采用 7L-TC 以及 VSS 改进 TSF 控制策略控制的电机具有转矩脉动小、输出转矩大、调速范围广和动态响应能力好的特点, 适合应用于电动汽车和乘用车等需要大扭矩、低转矩脉动以及快响应速度的场合。

参考文献

- [1] 黄博, 胡博, 谢开贵, 等. 计及交通事故影响的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 47-59.
- [2] HUANG Bo, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Electric vehicle path planning and charging navigation strategies considering the impact of traffic accidents[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 47-59.
- [3] BIAO X, GUIYUAN Z, KE L, et al. Publisher correction: reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-13.
- [4] 申永鹏, 谢俊超, 梁伟华, 等. 电动汽车混合储能系统 CEEMD-PE 能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 122-131.
- [5] SHEN Yongpeng, XIE Junchao, LIANG Weihua, et al. Electric vehicle hybrid energy storage system CEEMD-PE energy management strategy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 122-131.
- [6] 马雯雯. 基于有取向硅钢的轴向磁通开关磁阻电机分析和设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [7] 闫文举, 杨宏伟, 辛俊, 等. 电动汽车轴径向混合磁通同齿极开关磁阻电机设计与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 156-165.
- [8] YAN Wenju, YANG Hongwei, XIN Jun, et al. Design and analysis of an axial and radial hybrid flux switched reluctance motor with identical poles for electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 156-165.
- [9] 石凡, 王宏华, 李昊, 等. 一种计及定转子磁极磁阻的单绕组无轴承开关磁阻电机新型数学模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7712-7727.
- [10] SHI Fan, WANG Honghua, LI Hao, et al. A new mathematical model for single-winding bearingless switched reluctance motor considering the reluctance of stator and rotor poles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(24): 7712-7727.
- [11] 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.
- [12] LI Mengqiu, XU Xianwei, PAN Qianhua. Zero-voltage dispersion modulation strategy for switched reluctance motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 286-295.
- [13] 谭阳, 吴国庆, 茅靖峰, 等. 垂直轴 SRG 风力发电系统 MPPT 动态滑模控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 109-116.
- [14] TAN Yang, WU Guoqing, MAO Jingfeng, et al. MPPT dynamic sliding mode control for vertical axis SRG wind power generation system[J]. Power System Protection

- and Control, 2017, 45(21): 109-116.
- [9] VELMURUGAN G, BOZHKO S, YANG T. A review of torque ripple minimization techniques in switched reluctance machine[C] // 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), November 7-9, 2018, Nottingham, UK.
- [10] AHN J W, LUKMAN G F. Switched reluctance motor: Research trends and overview[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(4): 339-347.
- [11] TEICHMANN R, BERNET S. A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drives, traction, and utility applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 855-865.
- [12] PENG F, YE J, EMADI A. An asymmetric three-level neutral point diode clamped converter for switched reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8618-8631.
- [13] 程勇, 林辉. 五电平拓扑下开关磁阻电机直接瞬时转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(4): 18-22.
CHENG Yong, LIN Hui. Direct instantaneous torque control of switched reluctance motor with five level converter[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(4): 18-22.
- [14] HAN G, CHEN H. Improved power converter of SRM drive for electric vehicle with self-balanced capacitor voltages[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1339-1348.
- [15] 孙庆国, 陈李枚, 刘旭, 等. 自适应三管导通机制下模块化开关磁阻电机系统转矩交叉补偿控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2886-2897.
SUN Qingguo, CHEN Limei, LIU Xu, et al. Torque cross compensation control of modular switched reluctance motor systems under adaptive three-switch conduction mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2886-2897.
- [16] CAI Jun, ZHAO Xingqiang. An on-board charger integrated power converter for EV switched reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 3683-3692.
- [17] SUN Haitao, MOGHADDAM A F, SERGEANT P, et al. A novel driving method for switched reluctance motor with standard full bridge inverter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 994-1003.
- [18] 胡艳芳, 康智勇, 孙德博, 等. 基于区间分段转矩分配函数的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(10): 54-62.
HU Yanfang, KANG Zhiyong, SUN Debo, et al. Torque ripple suppression of switched reluctance motor based on interval segmentation torque sharing function[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(10): 54-62.
- [19] 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, 2022, 26(6): 91-100, 111.
SUN Qingguo, WEI Gongmin, LIU Xu. Torque ripple suppression strategy of switched reluctance motor based on adaptive com-mutation and torque compensation[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(6): 91-100, 111.
- [20] 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): 1671-1683.
YANG Fan, CHEN Hao, LI Xiaodong, 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): 1671-1683.
- [21] 凌辉, 杜钦君, 冯晗, 等. 基于五电平变换器的开关磁阻电动机转矩脉动抑制方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(12): 1608-1618.
LIN Hui, DU Qinjun, FENG Han, et al. Torque ripple reduction method of switched reluctance motor based on five-level converter[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(12): 1608-1618.
- [22] 陈凡强, 李存贺, 杜钦君, 等. 基于桥臂共享型多电平变换器的 SRM 瞬时转矩控制[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-15[2024-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2625.v.20240703.1324.003>
CHEN Fanqiang, LI Cunhe, DU Qinjun, et al. Instantaneous torque control of SRM based on arm-shared multilevel converter[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: 1-15[2024-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2625.v.20240703.1324.003>
- [23] 王国平, 陈昊, 戚湧, 等. 轴向磁通模块化混合励磁开关磁阻电机及其绕组故障特性[J]. 电工技术学报, 2025, 40(4): 1090-1104.
WANG Guoping, CHEN Hao, QI Yong, et al. Research on axial flux modular hybrid excitation switched reluctance motor and its winding fault characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(4): 1090-1104.

收稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2025-05-04

作者简介:

王鸿翔(1970—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为农机智能控制及制造技术; E-mail: 651108384@qq.com

王星(1974—), 女, 通信作者, 硕士, 副教授, 研究方向为开关磁阻电机及其控制。E-mail: 3512@cumt.edu.cn

(编辑 张颖)