

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.05.005

一种电动车用开关磁阻电机四象限双极性转速环 控制系统研究

刘沛麟¹, 刘 闯¹, 施仁杰², 朱学忠¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106; 2. 安徽全柴动力股份有限公司, 全椒 239500)

摘要: 开关磁阻电机 (Switched reluctance motor, SRM) 因结构简单坚固、起动转矩大和转速范围宽的特点, 在电动车驱动系统有着广阔的应用前景。不同于异步电机和同步电机依靠调节器双极性输出量实现四象限工作, 传统单极性 SRM 转速环控制系统需要依靠外部给定来切换工作象限, 在四象限运行工况下存在切换过程平滑性难以控制的问题。针对此, 本文提出一种将 SRM 转速环控制系统及其四象限控制方法相结合, 以传统的角度位置控制 (Angle position control, APC) 理论为基础, 将转速调节器双极性输出量与电机转速方向进行逻辑判断形成新的 APC 控制参数, 配合传统电流斩波控制 (Chopping current control, CCC) 形成新型的四象限转速环控制系统。该系统优化了 SRM 频繁电制动切换的顿挫问题, 为电动车坡道动态行驶安全提供了平滑切换的保障。仿真和实验结果均验证了该系统原理的可行性, 较好地实现了电动车 SRM 驱动系统的四象限工况切换。

关键词: 开关磁阻电机; 转速环; 四象限; 双极性

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)05-0823-11

Bipolar Speed-Regulator System of Four-Quadrant Switched Reluctance Motor For Electric Vehicle

LIU Peilin¹, LIU Chuang¹, SHI Renjie², ZHU Xuezhong¹

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Anhui Quanchai Engine Co., Ltd., Quanjiao 239500, China)

Abstract: Switched reluctance motor (SRM) has heralded considerable applications in electric vehicle drive systems, primarily due to its robust and simple construction, high starting torque, and broad speed range. Unlike asynchronous and synchronous motors that leverage the bipolar output of regulators for quadrant IV operation, traditional unipolar SRM speed loop control systems rely on external inputs to toggle operational quadrants, leading to challenges in ensuring smooth transition during such quadrant shifts. To address this issue, this paper introduces an integration of the SRM speed loop control system with its four-quadrant control approach. Based on the foundational theory of angle position control (APC), this paper logically associates the bipolar output of speed regulators with motor speed direction to form a novel APC control parameter. When combined with traditional chopping current control (CCC), it creates a new model for four-quadrant speed loop control systems. This system alleviates the jerkiness issues associated with frequent braking switches in SRMs, ensuring smooth transitions for electric vehicles during hill-climbing scenarios. Simulation and experimental results both affirm the feasibility of this system's principle, and enhance the smoothness of quadrant transitions in electric vehicle SRM drive systems.

基金项目: 国家自然科学基金 (51877108, 52207059); 直升机传动技术重点实验室基金 (HTL-A-21G01)。

收稿日期: 2023-10-14; **修订日期:** 2024-01-25

通信作者: 刘闯, 男, 教授, E-mail: lc@nuaa.edu.cn。

引用格式: 刘沛麟, 刘闯, 施仁杰, 等. 一种电动车用开关磁阻电机四象限双极性转速环控制系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(5): 823-833. LIU Peilin, LIU Chuang, SHI Renjie, et al. Bipolar speed-regulator system of four-quadrant switched reluctance motor for electric vehicle[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(5): 823-833.

Key words: switched reluctance motor(SRM); speed-regulator; four-quadrant; bipolar

开关磁阻电机(Switched reluctance motor, SRM)控制系统是继直流调速和变频调速之后发展起来的新一代无级控制系统^[1-4],但由于SRM的定转子双凸极结构导致其运行时存在转矩脉动大及具有严重的非线性特点,且实现闭环控制时系统参数整定需要反复整定,因而其在闭环稳定性要求较高的场合应用受到限制^[5-7]。

为了提高SRM闭环性能,国内外学者针对SRM的转矩环控制进行了大量的研究。文献[8-9]介绍了转矩分配的思路,理想情况下,当扰动量不发生变化,调节器根据实际观测转矩与设定转矩的差值信号,结合转矩分配思路决定对应相功率管的开关状态,进而实时精确控制电机的电磁转矩,最终使得电机在达到目标转速条件下,尽可能实现动态受力平衡,同时具备更小的稳定转速波动。文献[10]在所研究转矩分配基础上围绕3步换相法对换相过程的时间参数进行了优化设计,进而减小系统在电流斩波过程的振动。文献[11]通过设计转矩双滞环控制器有效抑制转矩失控现象。文献[12]考虑到SRM在调速参数整定过程繁琐,研究了转速环和电流环的传递函数,分别形成了根据转子不同位置的自适应比例积分(Proportional-integral, PI)参数整定的方法。

对于车用SRM系统研究,文献[13-15]围绕一种50 kW电动车SRM展开应用研究,参照并对比同功率等级的普瑞斯二代内置式永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM),通过优化SRM极数、定转子齿形等措施提高系统功率密度。文献[16-22]则针对普瑞斯三代内置式永磁同步电机的尺寸及性能指标,设计优化同级60 kW电动车SRM,研究内容主要围绕有限元精确建模、路况仿真验证、振动噪声及风阻计算等领域。

考虑到电动车频繁驻车与启动、上坡与下坡的复杂工况,对SRM的闭环系统提出了四象限控制要求。SRM四象限系统早在2000年就已作为电牵引系统成功应用于矿山机械。文献[23]分析了一种煤矿井下的运输车采用SRM牵引系统,该文献阐述了煤矿运输车复杂多变的运行工况和牵引电机高性能运行的需求,进而重点探索了四象限SRM调速系统工作原理,即SRM电动与制动的切换取决于人为的输入给定。文献[24]将采煤机在大倾角煤层开采过程的上行和下行工况与SRM四象限运行相结合,推导了牵引系统上行电动和下行制动功率对应普通工况的基本关系式,实验验证SRM在矿机应用良好的应用前景。文献[25]研究

了一种四象限开关磁阻的无位置传感器控制模式,通过采用滑模观测器对转子位置进行估计,通过比较相电流实际与估计值间的误差来判断位置估算的准确性,由于涉及SRM四象限控制,文献给出了系统不同象限内激励定子相绕组具体切换逻辑。文献[26]研究一种基于转矩环的SRM四象限控制策略,研究重点在于严格定义了不同驱动模式下各导通相的滞环区间,实验实现电机从静止到反向电动,而后通过直接改变给定转矩方向实现电机从反向制动到正向电动的调速实验,但该方法滞环区间涉及变量较多。文献[27]针对SRM起动和发电切换过程建压和调压控制问题,设计一种遗传算法寻优的滑模变结构控制器,动态响应具有一定的优越性,属于SRM四象限控制的一种优化。

结合文献分析,传统SRM实现四象限控制仅需要改变导通角度区间即可实现电制动切换,但实际切换过程通常依靠设定或手动切换,在电动制动的切换过程中,电流极易出现不可控,这不仅会引发功率器件过流,同时会产生较大的冲击转矩,电动车进入坡道后需要SRM工作象限切换,这对电动车坡道行驶稳定性造成影响。目前市场上较为普遍的电动车牵引电机采用异步或永磁同步电机,二者系统通过矢量控制或直接转矩控制可实现系统的四象限调速,由于这类系统的象限切换过程控制电流变化平缓,对系统造成冲击转矩可控,因而适用于电动车复杂工况^[28-31]。

本文首先分析传统单极性SRM转速环控制系统应用于电动车坡道牵引控制存在的调速缺陷,给出SRM传统四象限工作模式,新方法将转速调节器(Automatic speed regulator, ASR)输出量与电机转速方向进行逻辑判断,形成一种双极性SRM四象限转速环控制逻辑应用于电动车牵引系统。仿真和实验均证明,针对传统单极性SRM闭环调速系统,本文双极性SRM四象限转速环控制系统可提高扰动发生极性变化下系统的稳定性;优化一四、二三象限切换过程电流幅值,减小此类切换带来冲击转矩。

1 单极性SRM转速环控制系统分析

1.1 SRM数学模型

SRM通常运行在电流斩波控制(Current chopping control, CCC)模式和角度位置控制(Angle position control, APC)模式,根据文献[11]中相关机电能量转换方程,简化后的SRM单相电磁转矩 T_e 为

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (1)$$

式中: i 为相电流(A), L 为相电感(H), θ 为角度($^\circ$)。SRM 转矩方向仅由电感变化率极性决定,与电流极性无关,而相电流 i 只能影响转矩的幅值。为便于分析,式(2)给出了 SRM 线性模型下的电感表达式,即

$$L = \begin{cases} L_{\min} & \theta_1 \leq \theta < \theta_2 \\ L_{\min} + K(\theta - \theta_1) & \theta_2 \leq \theta < \theta_3 \\ L_{\max} & \theta_3 \leq \theta < \theta_4 \\ L_{\min} - K(\theta - \theta_4) & \theta_4 \leq \theta < \theta_5 \\ L_{\min} & \theta_5 \leq \theta < \theta_6 \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2)绘制曲线图如图 1 所示。图中 $\theta_1 \sim \theta_6$ 之间距离为转子齿距角 θ_r 。结合式(2)和图 1,当转子由 θ_1 向 θ_6 运动时, $K > 0$, 系统在 $\theta_2 \sim \theta_3$ 为电动状态,在 $\theta_4 \sim \theta_5$ 为制动状态;当转子由 θ_6 向 θ_1 运动时, $K < 0$, 系统在 $\theta_5 \sim \theta_4$ 为电动状态,而在 $\theta_3 \sim \theta_2$ 为制动状态。

1.2 单极性 SRM 转速环控制系统

区别于永磁同步电机电磁转矩与 q 轴电流近

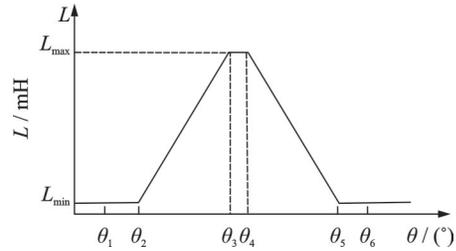


图 1 SRM 线性模型下电感随转子角度变化曲线
Fig.1 Inductance changing with rotor angle of linear model of SRM

似的线性关系,同时改变 q 轴电流极性即可改变电磁转矩方向。结合式(1)SRM 无法通过改变电流极性实现电磁转矩极性的变化,因而一般来说速度调节器相对于电磁转矩为单极性变量。图 2 给出了传统单极性 SRM 转速环控制系统,图中 i_k 代表 ASR 的输出量, i_{kmax} 代表 ASR 输出量的最大值, n_{ref} 代表给定输入转速(r/min), i^* 代表 CCC 的斩波限, I_{dra}, \dots, I_{drk} 代表电流调节器(Automatic current regulator, ACR)输出的各相电流斩波驱动信号;而 $\theta_{dra}, \dots, \theta_{drk}$ 代表 APC 输出各相角度位置驱动信号。

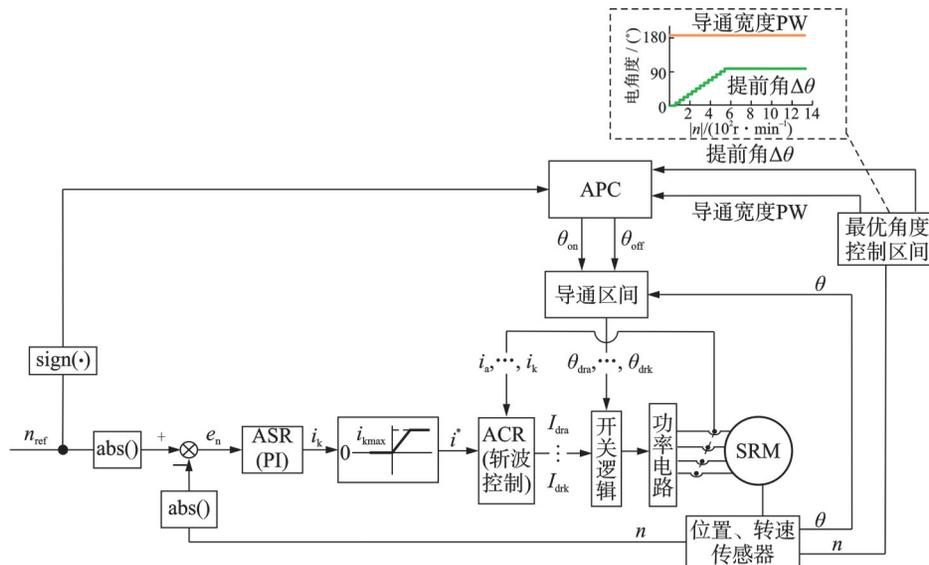


图 2 传统 SRM 转速环控制系统框图

Fig.2 Block diagram of unipolar speed-regulator of SRM system

1.2.1 转速调节器

针对图 2 中的 ASR,为便于分析采用 PI 控制器。PI 控制器在工业领域有着广泛的应用,针对本文研究的系统,调节器采用比例积分反馈控制率,定义 $e_n = |n_{ref}| - |n|$, 即控制量 i_k 有

$$i_k = k_p e_n + k_i \int e_n dt \quad (3)$$

式中 k_p 和 k_i 分别代表控制器的比例系数和积分系数,用于控制电机转速跟踪误差的衰减过程。

i_k 作为 PI 控制器的输出量需要经图 2 中限制环节输出后成为电流斩波控制的斩波限 i^* 。参考

常规 PI 控制器抗饱和特性,设定 i_k 向上的限值为 i_{kmax} , 设定 i_k 向下的限值为 i_{kmin} , 当 i_k 分别达到上、下限值时停止积分。

由于本例功率变换器主电路采用图 3 所示的不对称半桥拓扑结构,且无论何种斩波方式,相绕组中电流始终保持单一方向,因而 i_{kmax} 与 i_{kmin} 分别满足 $i_{kmax} > 0, i_{kmin} = 0$ 。为避免 n 与 n_{ref} 方向相反时出现 ASR 与 APC 逻辑异常,结合图 2 形成表 1 所示的 n_{ref} 与 n 对应 i_k 限制条件,结合表 1 当给定输入转速 n_{ref} 与实际转速 n 方向相反时, $i_k = 0$ 。

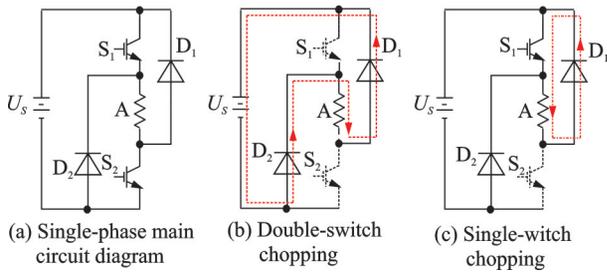


图3 单相不对称半桥拓扑结构及斩波方式

Fig.3 Diagram of single-phase asymmetric half bridge topology and chopping mode

表1 n_{ref} 与 n 逻辑关系对应 i_k 限制条件

Table 1 Logical relationship between n_{ref} and n corresponding to i_k

$sign(n_{ref})$	$sign(n)$	i_k
1	1, 0	i_k
1	-1	0
0	null	0
-1	1	0
-1	-1, 0	i_k

1.2.2 角度位置控制器

APC作为SRM控制的重要部分影响电机的性能,针对电动车牵引控制系统,通常考虑电动过程的闭环控制,结合图1的电感参数,图4给出了单极性SRM转速环控制系统不同方向的 n 与 n_{ref} 对应提前角 $\Delta\theta$ 、导通宽度PW以及整个导通区间的移动方向,图4中 $\Delta\theta$ 与PW受转速变化而变化,具体取值可以通过仿真或实验找到不同转速区间最优的 $\Delta\theta$ 与PW, θ_{on} 和 θ_{off} 分别表示SRM调速过程的开通角和关断角。

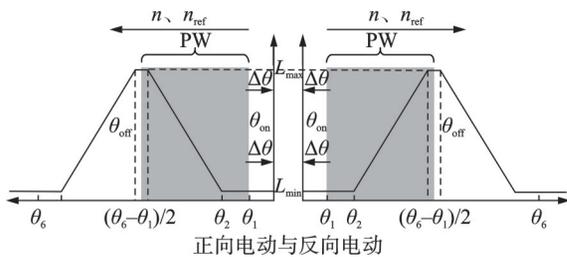


图4 SRM的APC工作方式示意图

Fig.4 APC diagram of SRM

1.3 传统单极性SRM转速环控制系统分析

通过对单极性SRM转速环控制系统的梳理,可形成电动车用SRM牵引控制模型。考虑驾驶员对于电动车行驶过程速度稳定的要求,图5和图6给出了当 n_{ref} 不变情况下,传统SRM转速环控制系统应对两种较为常用工况的调速过程。模拟电动车稳定行驶过程,电机转速环给定输入转速 $n_{ref}=300$ r/min。

如图5所示工况(平地-上坡-平地),开始阶段,电动车行驶于平地,系统总扰动 $T_D=10$ N·m,4 s时刻电动车进入坡道上坡,为简化模型,忽略总扰动渐变的过程,电动车行驶于坡道上行,考虑坡道阻力的影响,总扰动 T_D 变化为40 N·m,由于此时 T_D 增大,原本 i_k 不足以提供使系统产生稳定运行的电磁转矩,转速 n 下降,因而受ASR影响, i_k 增加,系统逐渐趋于稳定;8 s时刻,电动车又行驶入平地,总扰动 T_D 恢复至10 N·m,由于此时 i_k 为系统提供过量的电磁转矩,转速 n 上升,受ASR影响, i_k 减小,系统逐渐趋于稳定。可以看到,单极性SRM转速环控制系统,在应对图5所示的工况下,由于总扰动 T_D 始终与给定输入转速 n_{ref} 方向相异,当总扰动仅幅值出现变化,转速 n 出现如框线所标的波动,在ASR调节下 i_k 得到改变,从而使系统回到稳定状态。

如图6所示工况(平地-下坡),开始阶段,电动车行驶于平地,系统总扰动 $T_D=10$ N·m,4 s时刻电动车进入坡道下行,考虑坡道阻力的影响,总扰动 T_D 变化为-40 N·m,且 T_D 与给定输入转速 n_{ref} 方向相同。尽管系统ASR已经将 i_k 降至0,但系统最终受总扰动影响仍将处于失速状态。

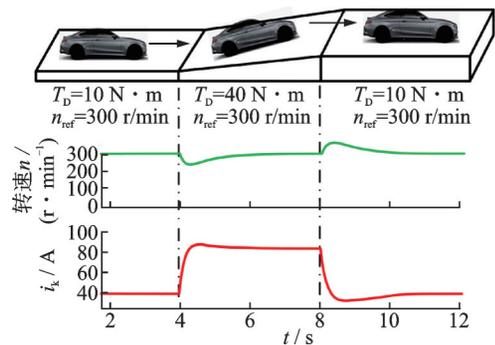


图5 单极性SRM转速环控制系统在常规扰动变化下调速

Fig.5 Unipolar speed-regulator system of SRM under conventional variable load

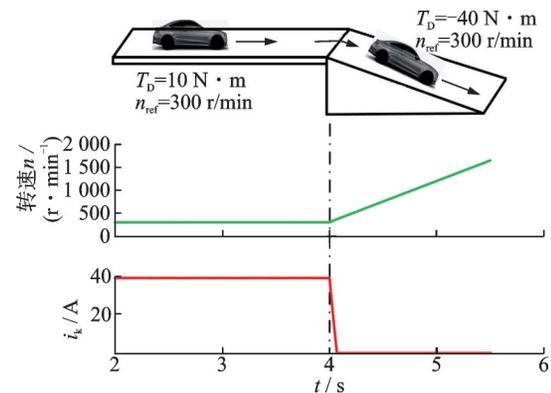


图6 单极性SRM转速环控制系统在 T_D 方向发生变化下的调速

Fig.6 Unipolar speed-regulator system of SRM under change direction of T_D

1.4 传统单极性SRM转速环控制系统总结

考虑工业应用中SRM的 T_D 主要由各类型摩擦阻力矩和加速阻力矩组成,二者均与转速方向相反;而在电动车驱动领域则存在坡道这类工况,系统所受扰动方向可分为:(1)车辆为坡道上行姿态, T_D 与正向转速反向;(2)车辆为坡道下行姿态, T_D 与正向转速同向。对于图5工况,行驶工况的变化并未影响 T_D 与转速之间的关系,而图6中,行驶工况的变化使得 T_D 与转速之间的关系发生变化。在式(1)的转矩公式下,电流控制量为单极性变量,系统无法从电流控制量实现电、制动的转换,进而出现失速的情况。

2 SRM四象限转速环控制系统设计

针对图6所示单极性SRM转速环控制系统存在的调速缺陷,可以采用以下两种方法:(1)系统借助外部制动器进行调速;(2)改变系统工作象限,切换为正向制动或反向制动工作模式。

图7所示为SRM牵引电动车的2种典型的制动方式。借助制动器长时间调速无疑降低了制动器热稳定性,且增加了整车控制系统(Vehicle control unit, VCU)协调的复杂性。而仅改变电机控制系统的工作象限,使其工作在制动模式,既可以将机械能转换为电能,同时又可以实现稳定调速。

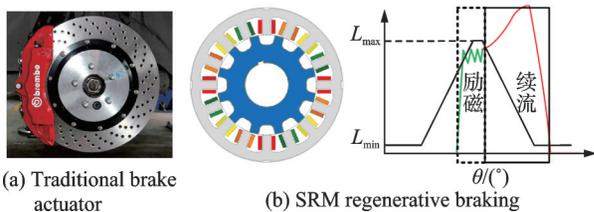


图7 SRM牵引电动车的2种典型制动方式

Fig.7 Two typical braking methods for SRM-driven electric vehicles

2.1 传统SRM四象限控制方法

结合式(1)与图1中电机转矩、电流和电感的关系,图8给出了SRM四象限控制方法,并给出以电感-转矩-转子机械位置角为坐标系下电流的典型表现形式。此策略将实际电机的转速 n 与电机

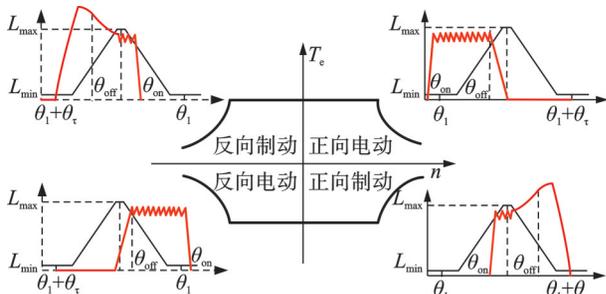


图8 SRM四象限控制理论示意图

Fig.8 Diagram of four-quadrant control theory of SRM

的电磁转矩 T_e 进行区间划分,形成了SRM的4种驱动模式。结合图1, θ_1 与 θ_6 对应图1, θ_1 与 θ_6 的间距仍为 θ_c (转子齿距角)。电动模式下功率电路通常采用斩单管控制,这不仅可以抑制转矩脉动且也可有效降低斩波频率^[6];制动模式下由于需要能量回馈,功率电路通常采用斩双管控制。根据图3,表2展示了SRM四象限工作模式下导通区间内的两种斩波方式。

表2 四象限工作模式下导通区间内斩波方式

Table 2 Chopping mode in the conduction range of four-quadrant SRM

电机状态	斩波方式
正向电动	斩单管
正向制动	斩双管
反向电动	斩单管
反向制动	斩双管

2.2 双极性SRM四象限转速环控制系统设计

结合对SRM四象限控制方法的梳理,针对图6所示工况,可在4 s时刻将系统工作模式切换为正向制动,即可以实现稳定调速,但此方法在模式切换时刻电流斩波限几乎不变,因而系统易受冲击转矩影响;而当电动车行驶入平地后,仍需再次将系统切换为正向电动模式,增加了系统的复杂性。而这种延时切换电动、制动的方式也不利于电动车频繁的起停。

本文考虑采用双极性SRM四象限转速环控制系统来应对电动车复杂工况。由于总扰动 T_D 方向变化仅引起的 n 变化将直接影响系统ASR部分的输入 e_n 与输出 i_k ,考虑将 e_n 或 i_k 作为四象限模式切换的标志位。若将图2中的 e_n 作为模式切换的标志位,常规调速过程中的如图5中跟踪给定 n_{ref} 的短暂超调现象将会使得 e_n 发生极性变化,从而改变驱动模式,进而增加系统调速的不稳定性。若将图2中 i_k 极性变化作为模式切换的标准,图5中由于 i_k 不发生极性变化,因此工作方式不会改变;而对于图6中的工况, i_k 根据ASR的调节会出现极性变化,若相应调整电机工作模式,进入制动状态,当系统实现电磁转矩与负载转矩的平衡,则车辆最终在坡道实现行驶稳定。

考虑到车辆会以后退状态下坡,为完善与 i_k 极性变化相关的电、制动切换逻辑,结合SRM四象限控制理论,形成如图9所示的双极性SRM四象限转速环控制系统,系统在保留原ASR基础上改变了 i_k 遇限停止积分的下限 i_{kmin} ,因而在 i_{kmax} 保持不变情况下,满足 $i_{kmin} = -i_{kmax}$,并调整了APC环节,将ASR输出双极性变量 i_k 的极性与转速 n 的方向作为系统判断四象限工作模式的依据。

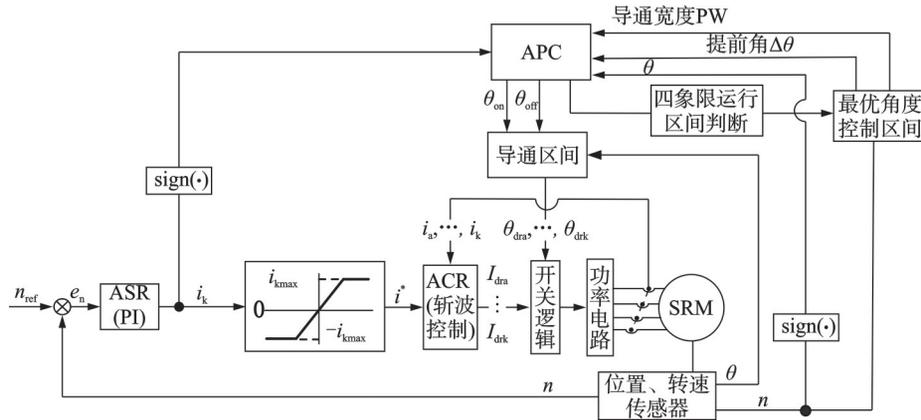


图9 双极性SRM四象限转速控制理论示意图

Fig.9 Block diagram of bipolar speed-regulator of four quadrant SRM system

图10展示了本文SRM四象限判断逻辑,该逻辑通过 n 与 i_k 的关系决定系统选择的四象限工作模式。一旦系统的工作模式被确定,可以形成如图11的SRM四象限APC,在电动模式下, $\Delta\theta$ 的变化仍然以 θ_1 为基准,导通区间选取电感上升区;在制动模式下, $\Delta\theta$ 在制动过程的变化则以 θ_s 为基准,导通区间选取电感下降区。图10和图11共同决定了新系统APC的控制逻辑。可以看到,在图6情况下,当车辆以 $n > 0$ (前进姿态下坡) 由平地向坡道下行,总扰动 T_D 的变化会使得控制量 i_k (见图6, i_k 初始状态大于0) 向0趋近。在此工况下,相较于图2中传统方法对于 i_k 的极性限制,图9中保留了 i_k 的

正负极性变化, i_k 最终会小于0,结合图10的关系表述, n 与 i_k 的关系对应第四象限,系统工作在正向制动。最终经过ASR对 i_k 的连续调节,电磁转矩 T_e 与 T_D 相互抵消,系统实现动态稳定。

3 仿真验证

3.1 模型参数设置

本文研究的SRM四象限转速环控制系统拟应用在电动叉车的牵引控制系统中,结合实际电动叉车的参数和路面工况。仿真验证平台以图9为参照,在Simulink中搭建SRM四象限转速环控制系统机电模型,如图12所示。SRM的参数导入参考文献[6],通过有限元Ansys Maxwell导出电机一个电周期内磁化曲线、矩角特性曲线,并通过线性插值方式形成角度-电流-磁链、角度-电流-转矩2张表格,供机电模型调用。图13为2组数据生成的三维图。为简化模型搭建,本文将系统电动与制动模式的提前角与导通宽度统一起来,根据仿真和实验的需要,图14给出了APC中提前角 $\Delta\theta$ (电角度) 关于转速绝对值 $|n|$ 的选取,而导通宽度PW统一选取为 180° (电角度),而系统ASR采用调整后的PI进行调制。

除了SRM本身参数的设置,对于车辆这种动态系统,需要考虑系统的转动惯量和阻力设置。参考文献[32],可将整车质量折算到电机转子侧,形成一个大致的转动惯量 J_s 。而对于车辆所受的行驶阻力,则主要包含空气阻力、滚动阻力,但由于本文电动叉车车速不超过15 km/h,因而模型中空气阻力可以不考虑;对于滚动阻力通常分为弹性迟滞阻力、摩擦阻力和风扇效应阻力,结合低速分析,为便于讨论与分析,滚动阻力仅考虑摩擦阻力^[32]。



图10 SRM四象限判断逻辑

Fig.10 Judgment of four-quadrant operation interval of SRM

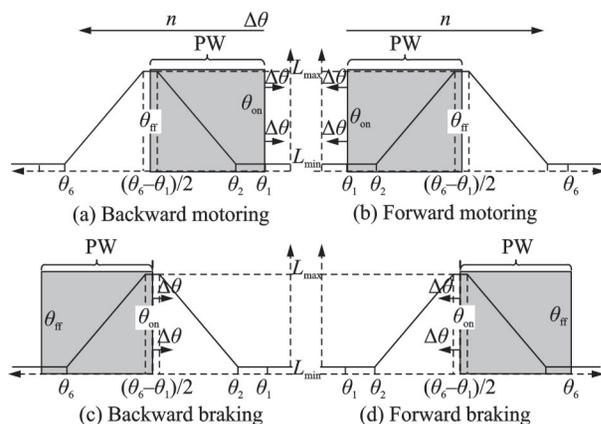


图11 SRM四象限APC示意图

Fig.11 APC diagram of four-quadrant SRM

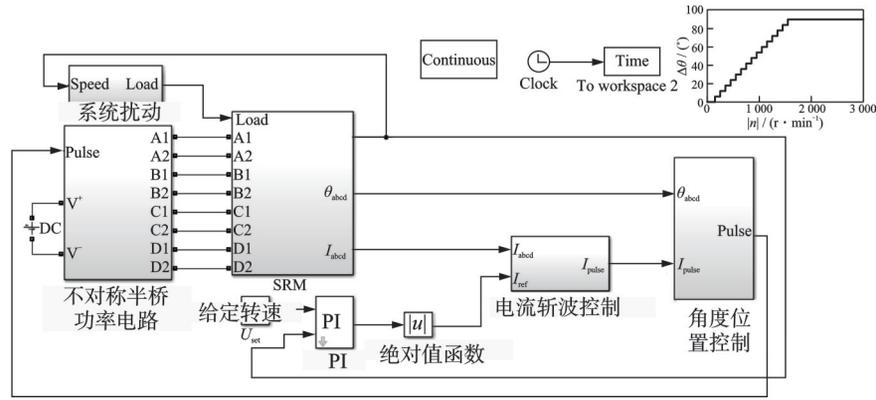
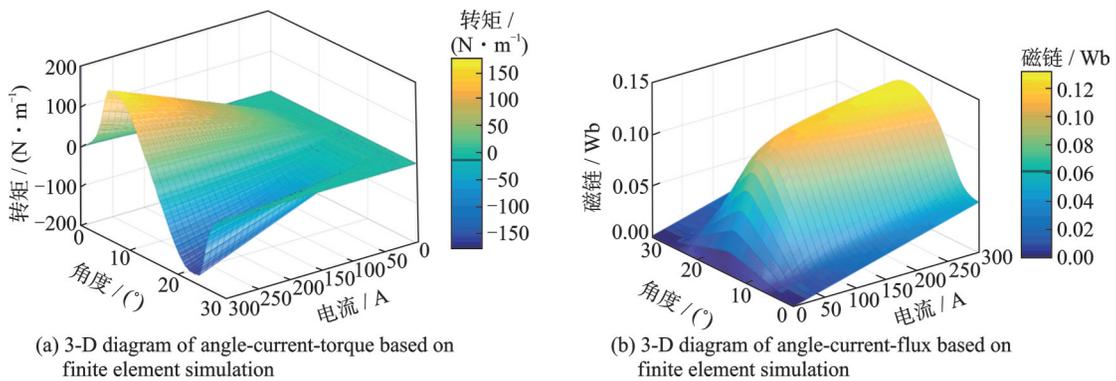


图 12 SRM 的 Simulink 仿真模型
Fig.12 Simulink simulation model of SRM



(a) 3-D diagram of angle-current-torque based on finite element simulation

(b) 3-D diagram of angle-current-flux linkage based on finite element simulation

图 13 基于有限元仿真的角度-电流-转矩、角度-电流-磁链三维图

Fig.13 3-D diagrams of angle-current-torque and angle-current-flux linkage based on finite element simulation

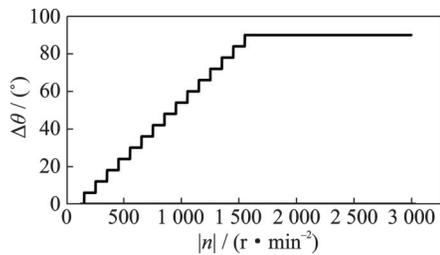


图 14 APC 中提前角 $\Delta\theta$ 随转速绝对值 $|n|$ 变化曲线
Fig.14 Advance angle $\Delta\theta$ in APC changing with $|n|$

表 3 电机模型动态仿真关键参数

Table 3 Major parameters of simulation model

参数	数值	参数	数值
额定功率/W	9 000	额定电压/V	48
定子外径/mm	260	定子内径/mm	170
定/转子极数	16/12	相数	4
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 000	最大转速/($r \cdot \min^{-1}$)	3 200
启动转矩/($N \cdot m$)	120	额定转矩/($N \cdot m$)	86
齿轮变比	26.5:1	铁心长度/mm	170
整车质量 M_v /kg	4 570	平地总扰动 T_f /($N \cdot m$)	11.9
整车折算到转子侧惯量 J_r /($kg \cdot m^2$)	0.42	坡道下行总扰动 $-T_s$ /($N \cdot m$)	40

针对本文研究的电动叉车系统, T_D 产生方向的变化源于电动叉车由平地行驶到坡道下行的过程, 此时车辆重力沿坡道的分力大于摩擦力, T_D 与 n_{ref} 变为同方向。电机模型动态仿真关键参数见表 3。如表 3 所示, T_f 为平地总扰动, 方向与始终 n 方向相反, 平地工况下 T_D 与 T_f 满足 $T_D = T_f$; T_s 为整车行驶在坡道下行过程的总扰动, T_s 方向始终与 n 方向相同, 在坡道下行工况过程中 T_D 与 T_s 满足 $T_D = -T_s$ 。图 15 为仿真工况示意图, 仿真内容分别为对比单、双极性 SRM 四象限转速环控制系统通过调节器实现稳定的过程。为突出对比性, 两套系统均采用相同的 PI 控制参数, 且初始工况为平地, 同步 4 s 后进入坡道下行工况。

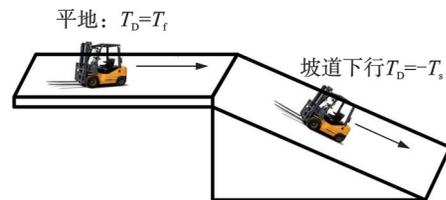


图 15 T_D 方向变化的仿真工况示意图

Fig.15 Schematic diagram of simulation working conditions for variable T_D direction

3.2 单极性 SRM 四象限转速环控制系统

针对图 2 所示的单极性电动车用 SRM 牵引控

制系统,结合图6所示工况存在失速的情况,可以通过传统的四象限控制实现系统稳定,当现有模式无法有效调节之后,切换系统工作象限,图16给出了单极性SRM四象限转速环控制系统应对整车由平地工况进入坡道下行工况时的仿真验证波形,系统在进入坡道下行工况后0.5 s(仿真时间4.5 s)后切换系统的工作象限。结合图8系统实现了二三象限的切换,由于实现模式切换过程,仅改变了象限的工作模式。如图16所示,制动模式调节器输出量与启动时电动过程输出量 i_k 近似,因此象限切换时刻,转矩幅值差异较大,对系统产生冲击转矩较大,过渡过程不平滑。结合图7、16,SRM制动过程励磁阶段的大电流易造成续流阶段电流不可控。而限制这类情况一般采用:(1)调整制动模式下的ASR控制参数;(2)调整制动模式下的提前角 $\Delta\theta$ 和导通宽度PW。二者均可有效降低励磁阶段电流幅值,但这也为系统设置带来复杂性。

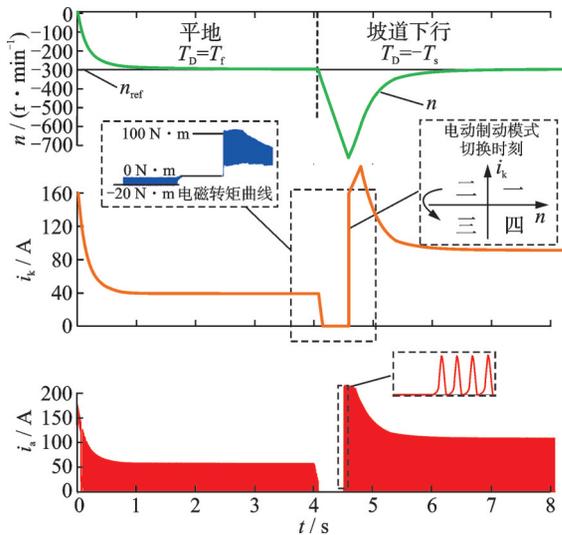


图16 T_D 方向发生变化下传统单极性SRM四象限转速环调速仿真验证

Fig.16 Simulation verification of unipolar speed-regulator of four-quadrant SRM with variable T_D direction

3.3 双极性SRM四象限转速环控制系统

图17给出了双极性SRM四象限转速环控制系统应对整车由平地工况进入坡道下行工况时仿真验证波形,4 s时刻 T_D 发生方向变化,尽管此时系统仍处于电动状态,但是 i_k 值逐渐减小,直到穿越0时刻,系统结合图10进入电动-制动的模式切换,实现了二三象限的切换,系统转变为制动模式,而后系统产生制动转矩逐渐平衡总扰动,最终实现系统的稳定。图18给出了在 i_k 穿越0值时刻,相电流的波形,结合表2,模式切换前后,电流斩波方式发生变化,且模式切换电流幅值较小,过渡过程平滑。

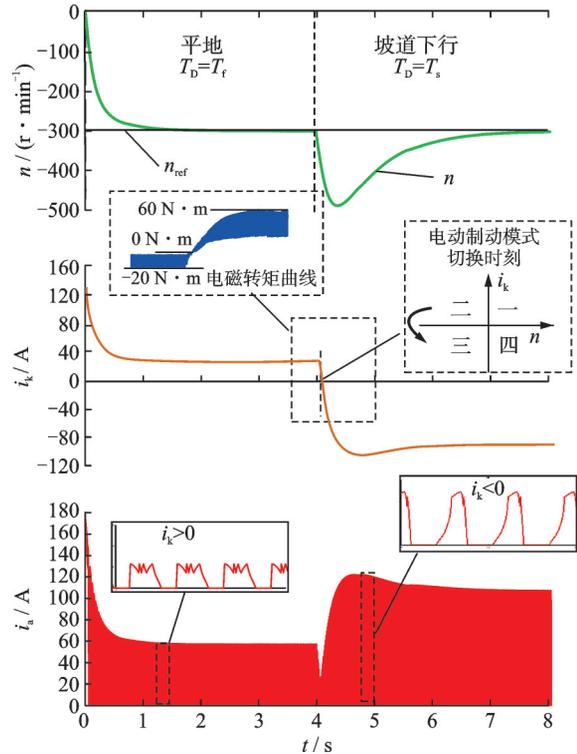


图17 T_D 方向发生变化双极性SRM四象限转速环调速仿真验证

Fig.17 Simulation verification of bipolar speed-regulator of four-quadrant SRM with variable T_D direction

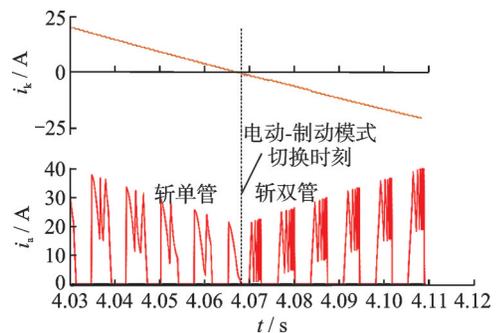


图18 电动-制动模式切换时刻电流波形

Fig.18 Current waveforms at switch from motoring to braking

4 实验验证

结合仿真验证,传统单极性SRM四象限转速环控制系统,尽管可以通过强制方式实现象限切换,但切换过程由于控制量阶跃变化,相电流幅值较高,不仅增加功率器件的损毁风险,同时产生的冲击转矩较大,整车控制平顺性和安全性较差;而双极性SRM四象限转速环控制系统利用ASR输出量 i_k 的极性变化根据转速方向切换工作模式,在总扰动发生图6所示工况情况下能最终使系统保持稳定,且过渡过程平滑,实验部分将以此进一步展开验证。

图19为本文实验的电动叉车SRM牵引系统

及坡道测试平台,图中控制器放置于车辆后侧(配重块向车内侧),SRM则置于车辆前轮传动系统中。样机及样车参数均按照表3对应数据,控制器系统核心采用STM32F103芯片,图20(a)展示了系统的硬件拓扑,图20(b)展示了SRM驱动信号产生的形式。APC参数采用图14数据,导通宽度 180° (电角度)。在实验中,系统设定转速 n_{ref} 由驾驶员通过油门踏板给定。



图 19 样机及实验平台
Fig.19 Experiment platform

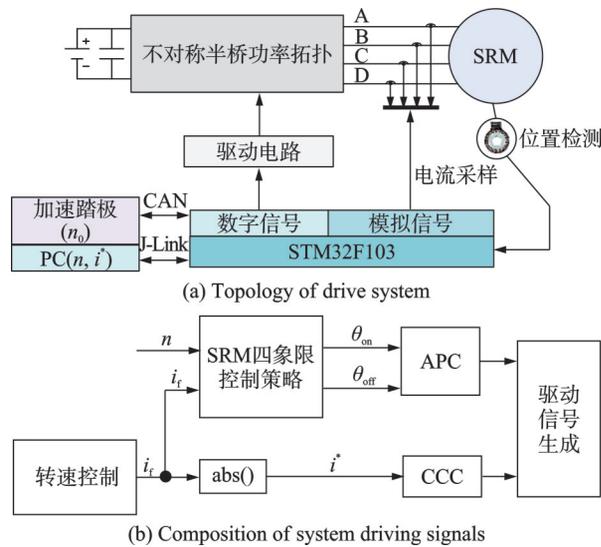


图 20 驱动系统拓扑结构和驱动系统组成
Fig.20 Topological structure and composition of driving system

图 21 给出了具体的实验工况以及系统相应的驱动方式, n_{ref} 始终为 -300 r/min 。图 22 为调速实验的四相电流波形。为便于分析,本节将图 21 波形划分成 4 个时间区间,结合图 21 有: S_1 为电动叉车在平地,系统处于反向电动状态,且保持 $n=-300\text{ r/min}$,对应图 22(a)波形; S_2 为电动叉车开始进入坡道下行,由于电动叉车的四轮未完全进入坡道,此时总扰动逐渐变化为与转速 n 同方向,而 $|i_k|$ 受转速环影响逐渐减小,系统仍然工作在反向电动阶段; S_3 为电动叉车完全进入坡道下行状态,由于选用标准坡道,此时总扰动增大到一个定值附近,当 $|n|$ 继续增大, $|i_k|$ 逐步减小至 0,且此时区系统仍然工作在反向电动阶段; S_4 为电动叉车完全处于坡道下行状态,但 i_k 发生了极性变化,此时系统工

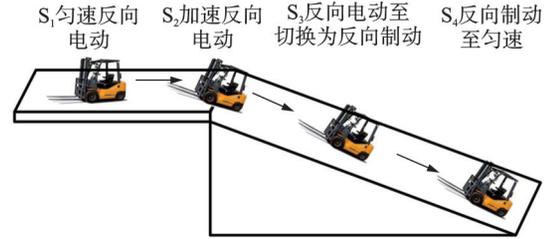
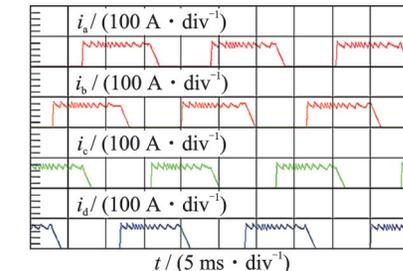
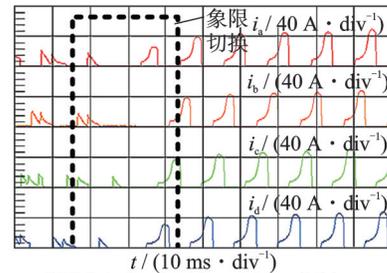


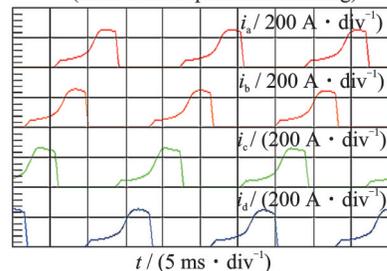
图 21 T_D 方向变化的实验工况及系统工作方式示意图
Fig.21 Schematic diagram of variable T_D direction experiment condition and system driving mode



(a) Motoring state (-300 r/min , the third quadrant)



(b) Motoring-braking state switching (third-second quadrant switching)



(c) Braking state (-300 r/min , second quadrant)

图 22 SRM 四象限转速环调速实验的四相电流

Fig.22 Current waveforms of experiment verification of speed-regulator of four-quadrant SRM

作在反向制动阶段, $|i_k|$ 受调节器影响开始增大, $|n|$ 经历一段增大后开始逐步回归平衡点转速,有 $n_{ref}=-300\text{ r/min}$ 。图 22(b)给出了系统由电动模式向制动模式过渡的电流波形,图 22(c)给出了系统在坡道稳定运行的电流波形。整个过程实现了从反向电动 -300 r/min 稳定到反向制 -300 r/min 稳定,且实验过程中模式切换电流幅值较小,过渡过程平滑。图 23 给出了相应工况下电机转速 n 与 ASR 输出量 i_k 的关系。

相较于图 17 的模式切换过程,尽管采用相同的斩波方式,仿真与实验制动电流存在差异性,这主要源于仿真与实验电机电感的差异性以及仿真

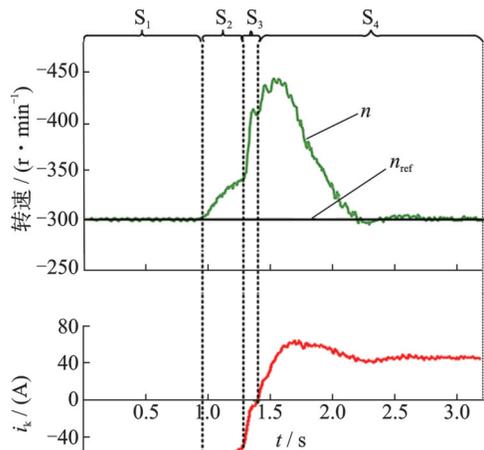


图23 SRM四象限转速环调速实验验证

Fig.23 Experiment verification of speed-regulator of four-quadrant SRM

步长的选取,但图18与图22(b)均呈现了由电动(斩单管)至制动(斩双管)的过渡过程。

尽管实验与仿真存在差异性,但结合整车实验,仍可验证本文研究的系统能够实现转速环四象限运行,且象限切换过程平滑,适合应用于电动车牵引系统。

5 结 论

本文针对传统单极性SRM转速环控制系统在四象限运行时存在冲击转矩大的问题,提出了一种双极性SRM四象限转速环控制方法,并成功应用于电动车牵引控制,系统结合ASR输出双极性变量 i_k 的极性与转速 n 的方向形成具体的四象限工作模式,并基于传统APC形成相应控制角参数。仿真和实验均验证该系统能够实现四象限转速环运行,且象限切换过程平滑。本文研究内容为SRM应用于电动车坡道安全控制提供了一种有效方案。

参考文献:

[1] LIN J, SCHOFIELD N, EMADI A. External-rotor 6-10 switched reluctance motor for an electric bicycle [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(4): 348-356.

[2] GERADA D, MEBARKI A, BROWN N L, et al. High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2946-2959.

[3] BARTOLO J B, DEGANI M, ESPINA J, et al. Design and initial testing of a high-speed 45-kW switched reluctance drive for aerospace application[J]. IEEE Transactions Industrial Electronics, 2017, 64(2): 988-997.

[4] 陈辉,张旻明,蒋冬青,等. 开关磁阻电机共上管功率变换器的宽转速安全退磁控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 3979-3988.
CHEN Hui, ZHANG Yangming, JIANG Dongqing, et al. Safe demagnetization control strategy for switched reluctance motor with common upper switch power converter during wide speed range[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 3979-3988.

[5] WIGUNA C A, FURQANI J, CHIBA A. Improved current profile selection for noise reduction of switched reluctance motor at middle speed considering back EMF[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5): 4707-4719.

[6] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2014.
WANG Honghua. Switched reluctance drive[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014.

[7] YANG Zhi, SHANG Fei, MEMBER S, et al. Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 1(3): 245-254.

[8] VLADAN P V. Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive[J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2012, 27(1): 388-399.

[9] DE PAULA M V, BARROS T A D S, MOREIRA H S, et al. Dahlin cruise control design method for switched reluctance motors with minimum torque ripple point tracking applied in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(1): 730-740.

[10] 孙剑波,詹琼华,王双红,等. 开关磁阻电机减振降噪和低转矩脉动控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 134-138.
SUN Jianbo, ZHAN Qionghua, WANG Shuang hong, et al. Control strategy of switched reluctance motor to restrain vibration, acoustic noise and torque ripple[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(12): 134-138.

[11] 许爱德,樊印海,李自强. 空间电压矢量下SRM转矩脉动最小化[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(1): 35-40.
XU Aide, FAN Yin Hai, LI Ziqiang. SRM torque ripple minimization based on space voltage vector[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(1): 35-40.

[12] 王喜莲,许振亮. 基于PI参数自适应的开关磁阻电机调速控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4215-4223.
WANG Xilian, XU Zhenliang. Speed regulation control of switched reluctance motors based on PI parameter self-adaptation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4215-4223.

[13] CHIBA A, TAKANO Y, TAKENO M, et al. Torque density and efficiency improvements of a

- switched reluctance motor without rare-earth material for hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1240-1246.
- [14] CHIBA A, TAKENO M, HOSHI N, et al. Consideration of number of series turns in switched-reluctance traction motor competitive to HEV IPMSM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2333-2340.
- [15] TAKENO M, CHIBA A, HOSHI N, et al. Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1327-1334.
- [16] KIYOTA K, CHIBA A. Design of switched reluctance motor competitive to 60-kW IPMSM in third-generation hybrid electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2303-2309.
- [17] KIYOTA K, KAKISHIMA T, SUGIMOTO H, et al. Comparison of the test result and 3D-FEM analysis at the knee point of a 60 kW SRM for a HEV[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5): 2291-2294.
- [18] KIYOTA K, SUGIMOTO H, CHIBA A. Comparing electric motors: An analysis using four standard driving schedules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 20(4): 12-20.
- [19] KAWA M, KIYOTA K, FURQANI J, et al. Acoustic noise reduction of a high-efficiency switched reluctance motor for hybrid electric vehicles with novel current waveform[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2519-2528.
- [20] SOBUE H, CAI Y F, CHIBA A, et al. Analysis and experimental comparison of acoustic noise of three switched reluctance motors made of conventional steel, high silicon steel, and amorphous iron[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6): 5907-5915.
- [21] FURQANI J, KAWA M, CHIBA A, et al. Current reference selection for acoustic noise reduction in two switched reluctance motors by flattening radial force sum[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3617-3629.
- [22] ADI WIGUNA C, FURQANI J, CHIBA A. Improved current profile selection for noise reduction of switched reluctance motor at middle speed considering back EMF[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5): 4707-4719.
- [23] 闫志平, 高超, 杜忠. 电牵引采煤机用开关磁阻电机的研制[J]. 煤矿机电, 2004(5): 94-99.
YAN Zhiping, GAO Chao, DU Zhong. Development of electrical haulage shearer using SRD[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2004(5): 94-99.
- [24] 张庆洋, 周海亮. 四象限开关磁阻电牵引系统在煤矿大倾角采煤机中的应用[J]. 煤矿机电, 2014(6): 7-10.
ZHANG Qingyang, ZHOU Hailiang. Application of four-quadrant SRD electrical haulage system in mine large inclined angle shearer[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2014(6): 7-10.
- [25] 张旭隆, 谭国俊, 崩松岩. 在线建模的开关磁阻电机四象限运行无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 26-33.
ZHANG Xulong, TAN Guojun, KUAI Songyan. Four-quadrant position sensorless control of switched reluctance motors based on on-line modeling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 26-33.
- [26] FUENGWARODSAKUL N H, MENNE M, INDERKA R B, et al. High-dynamic four-quadrant switched reluctance drive based on DITC[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1232-1242.
- [27] 刘勇志, 周政, 盛增津, 等. 开关磁阻电机起动/发电状态切换控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(10): 57-63.
LIU Yongzhi, ZHOU Zheng, SHENG Zengjin, et al. Study of control strategy for status switching of switched reluctance starter/generator[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(10): 57-63.
- [28] ZUO Y, ZHU L, QUAN L, et al. Active disturbance rejection controller for speed control of electrical drives using phase-locking loop observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021(66): 1748-1759.
- [29] ZUO Y, MEI J, JIANG C, et al. Linear active disturbance rejection controllers for PMSM speed regulation system considering the speed filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021(36): 14579-14592.
- [30] 程飞, 过学迅, 别辉. 电动车用永磁同步电机的双模糊控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 18-22.
CHENG Fei, GUO Xuexun, BIE Hui. The double fuzzy control of PMSM in electric vehicle[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18): 18-22.
- [31] 王毅, 马洪飞, 赵凯岐, 等. 电动车用感应电机磁场定向矢量控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 113-117.
WANG Yi, MA Hongfei, ZHAO Kaiqi, et al. Field-oriented vector control of induction motor for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 113-117.
- [32] 战祥真. 纯电动汽车动力系统试验台研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHAN Xiangzhen. Research on test bench of pure electric vehicle power system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.