

开关磁阻电机功率变换器综述*

易灵芝^{1,2}, 王力雄¹, 李旺³, 王艺皓¹, 段仁哲¹

- (1. 湘潭大学 自动化与电子信息学院湖南省多能源协同控制技术工程研究中心, 湖南 湘潭 411105;
2. 湖南省风电装备与能源变换 2011 协同创新中心, 湖南 湘潭 411105;
3. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 开关磁阻电机(SRM)具有坚固耐用、功率密度高、调速范围广、起动转矩大等一系列优点,然而关于其功率变换器的研究较少。结合国内外文献,分析不对称半桥功率变换器、公共开关型功率变换器、裂相型功率变换器以及三开关型功率变换器等传统功率变换器的结构特点;对比了传统变换器的优缺点,在此基础上分析了几类新型功率变换器拓扑结构以及电流电压转换关系,并概述了功率变换器未来发展趋势,为功率变换器发展提供参考。

关键词: 开关磁阻电机; 功率变换器; 功率密度; 转矩脉动; 能量回馈

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)09-0001-07

doi: 10.12177/emca.2020.109

Review of Power Converters for Switched Reluctance Motor*

YI Lingzhi^{1,2}, WANG Lixiong¹, LI Wang³, WANG Yihao¹, DUAN Renzhe¹

- (1. Hunan Province Engineering Research Center for Multi-Energy Collaborative Control Technology, School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
2. Hunan Province Cooperative Innovation Center for Wind Power Equipment and Energy Conversion, Xiangtan 411105, China;
3. The State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Switched reluctance motor (SRM) has the advantages of ruggedness, high power density, wide speed range, large starting torque and so on. However, there are few researches of power converter for SRM. On the basis of domestic and foreign literature, the asymmetric half-bridge power converter, common switching power converter, split-phase power converter, and three-switch power converter are analyzed. The advantages and disadvantages of these traditional converters are compared. After that, the topology of several new types of power converter and their current-voltage relationship are analyzed, and the future development trend of SRM power converters is summarized. This research will provide reference for the future development of power converters.

Key words: switched reluctance motor (SRM); power converter; power density; torque ripple; energy feedback

收稿日期: 2020-06-16; 收到修改稿日期: 2020-07-21

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61572416); 湖南省自科基金株洲联合基金项目(2020JJ6009); 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室开放课题(基于预见控制的货运列车自动驾驶速度跟踪系统研究)

作者简介: 易灵芝(1966—), 女, 教授, 博导, 研究方向为交流调速与电力电子装置、新能源发电和能源互联网。

王力雄(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

李旺(1987—), 男, 工程师, 研究方向为机车电控系统。

0 引言

开关磁阻电机 (SRM) 是一种新型的磁阻式电机, 具备结构简单、坚固耐用、耐高温等特点, 其定转子均为凸极结构, 转子上无绕组线圈, 定子上采用集中绕组方式。SRM 独特的结构使其必须配合功率变换器才能起动, 功率变换器提供其所需电流以及控制策略^[1]。

SRM 功率变换器是 SRM 调速系统的核心控制枢纽, 传统功率变换器基本由二极管、电容、电感、IGBT 等功率器件构成, 功率变换器的设计和选型将影响 SRM 调速系统的性能输出^[2-3]。

功率变换器的设计主要围绕 2 方面: 低成本和高性能。本文将结合国内外文献, 分析 SRM 各类功率变换器的结构特点, 并概述其优缺点和未来发展趋势。

1 传统 SRM 功率变换器

1.1 不对称半桥功率变换器

不对称半桥功率变换器拓扑结构如图 1 所示。电机每相均由开关管以及二极管构成回路, 相与相之间相互独立, 通过控制开关管的关断即可实现功率变换器不同模式的切换, 控制方式简单^[4-6]。适合任意相数的电机, 只需增加相应开关管即可, 开关管关断过程中, 不存在上下桥臂直通的现象, 因此不会出现短路故障。以 A 相为例进行说明, 当开关管 S1 和 S2 导通时, 电源 U_{dc} 向 A 相绕组供电, 电路图如图 2(a) 所示; 当开关管 S2 导通而 S1 关断时, 此时 A 相绕组和 VD1、S2 构成续流回路, 具体电路图如图 2(b) 所示; 当 S1、S2 均关断时, A 相绕组通过二极管实现能量回馈, 处于发电模式, 功率流向如图 2(c) 所示。

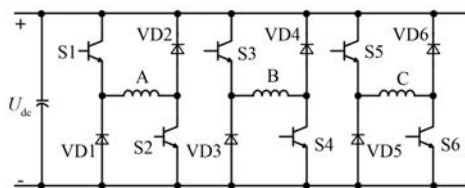


图 1 不对称半桥功率变换器

当采用不对称半桥功率变换器时, 电机 k 相电压表达式为

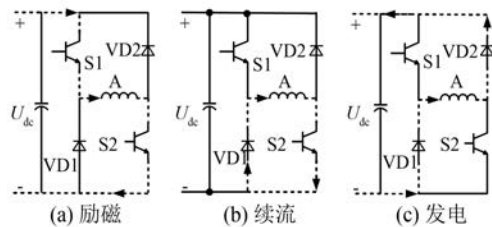


图 2 不对称半桥功率变换器运行模式

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

式中: i_k 为 k 相相电流; R_k 为 k 相总电阻; $\psi(\theta, i_k)$ 为 k 相磁链; θ 为转子位置角度。

1.2 公共开关型功率变换器

图 3 为公共开关型功率变换器结构图。该功率变换器最大的特点是多相绕组公用一个功率开关器件 S, 因此与不对称半桥功率变换器相比, 节省了器件数目, 但对公共开关器件性能要求高, 整体可靠性降低^[7-10]。

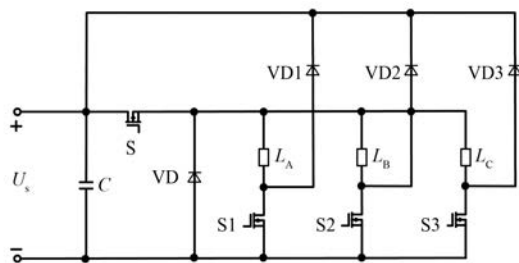


图 3 公共开关型功率变换器

以 A 相为例进行说明, 当开关管 S 和 S1 均导通时, U_s 给 A 相绕组通电, 电路图如图 4(a) 所示; 当 S1 导通, S 断开时, A 相绕组与 S1、VD 形成续流回路; 当 S 导通, S1 断开时, 绕组能量回馈至电容, 电机工作于发电状态。

当采用公共开关型功率变换器时, 电机 k 相电压表达式与式(1)相同。

1.3 裂相型功率变换器

裂相型功率变换器电路拓扑如图 5 所示。电容 C_1 、 C_2 将 U_s 分为两双极性直流电源, 该功率变换器只适合偶数相电机, 所需功率变换器较少^[11-14]。

裂相型功率变换器励磁、续流、发电模式如图 6 所示。当 VT1 导通时, 分压电容 C_1 通过 VT1 给 A 相绕组通电; 当 VT1 断开时, C_2

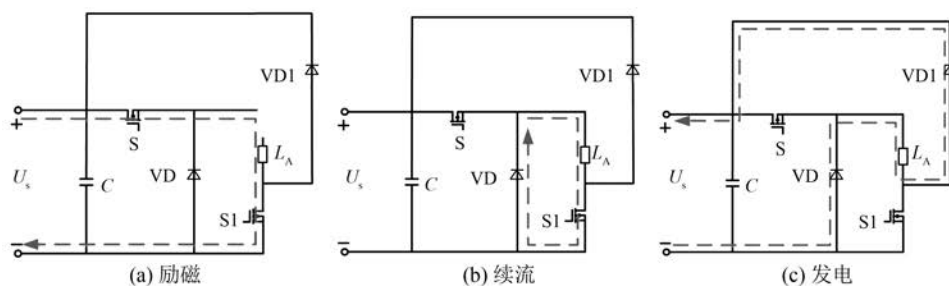


图4 公共开关型功率变换器运行模式

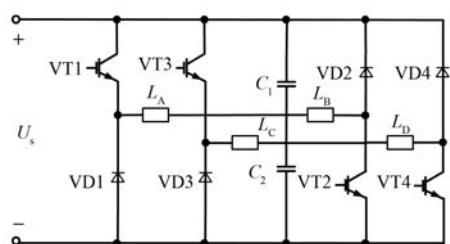


图5 裂相型功率变换器电路拓扑

和续流二极管 VD1 形成续流回路; A 相绕组通过 VD1、 C_1 将能量回收至 U_s 。

当采用公共开关型功率变换器时,电机 k 相电压表达式为

$$U_k = \left[i_k R_k + \frac{d\psi(\theta, i_k)}{dt} \right] \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

式中: C_1 、 C_2 为分压电容。

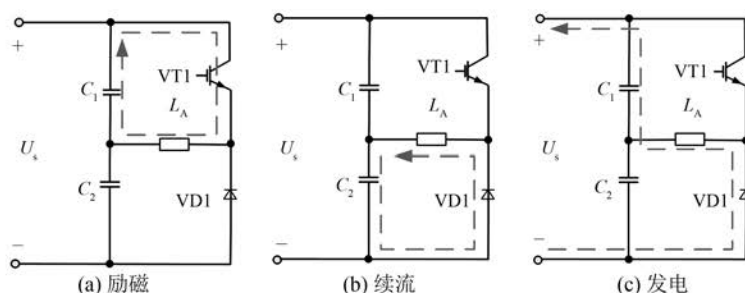


图6 裂相型功率变换器运行模式

1.4 三开关型功率变换器

三开关型功率变换器拓扑如图7所示。每相包含3个开关管,且每一相由偶数个线圈组成。每相之间相互独立,因为增加了额

外的开关器件,所以运行模式相对灵活^[15-17]。

三开关型功率变换器运行模式如图8所示。以A相为例进行说明,当开关管 VT1、VT2、VT3 都导通时, U_s 提供 A 相绕组供电;

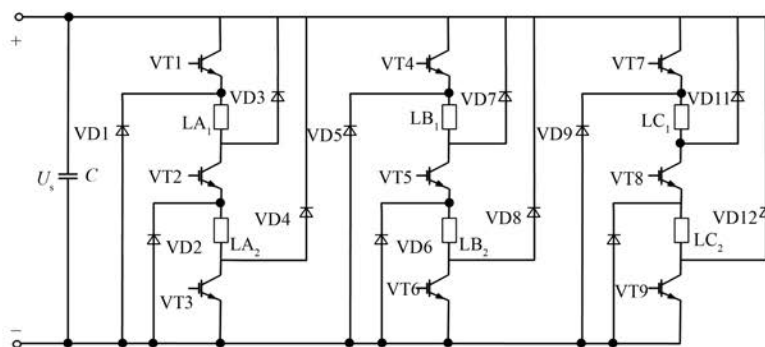


图7 三开关型功率变换器拓扑

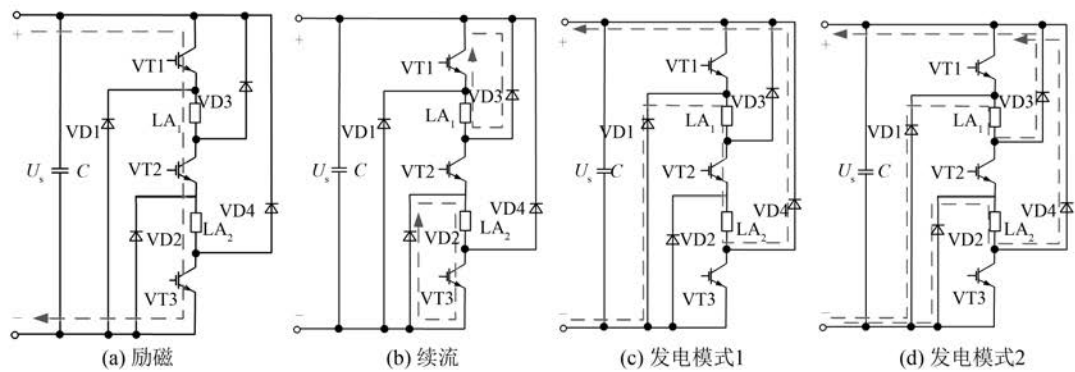


图 8 三开关型功率变换器运行模式

当断开 VT2, 导通 VT1、VT3 时, A 相绕组产生 2 个续流回路; 当 VT1、VT2、VT3 全部断开时, A 相绕组能量回收至电容存储, 电机工作于发电模式。

当采用三开关型功率变换器时, 电机 k 相电压表达式为

$$U_k = i_k R_{k1} + i_k R_{k2} + \frac{d\psi(\theta, i_k)}{dt} \quad (3)$$

式中: R_{k1} 、 R_{k2} 分别为 k 相两线圈上内阻。

不对称半桥功率变换器、公共开关型功率变换器、裂相型功率变换器以及三开关型功率变换器的优缺点对比如表 1 所示。

表 1 传统功率变换器性能对比		
类型	优点	缺点
不对称半桥功率变换器	结构简单, 各相相对独立	效率低, 励磁以及续流时间长
公共开关型功率变换器	元器件大大减少, 成本低	可靠性低, 对公共开关性能要求高
裂相型功率变换器	开关数量少, 能量回馈迅速	不适合奇数相电机, 中点电位不稳
三开关型功率变换器	控制方式灵活, 可工作于多种模式	所需元器件多, 成本相对较高

2 新型功率变换器

传统功率变换器存在转换效率低、输出转矩脉动大、换向时间长等缺点。为此, 国内外学者通过自主设计研发新型功率变换器, 弥补了传统功率变换器固有的缺陷, 取得了良好的效果。

2.1 准 Z 源多端口功率变换器

文献[18]提出一种改进的准 Z 源功率变换器(MQZSC), 增强了 SRM 驱动系统动力性能和提升了经济性能, 同时降低了输出转矩脉动。文献[19]提出一种准 Z 源集成多端口功率变换器(ZIMPC), 取代了传统 H 桥拓扑结构, 可有效降低换向期间提供电源纹波的电容要求, 通过控制准 Z 源单元直通时间, 可减少输入端的电源纹波, 与传统的 H 桥功率变换器相比, 可以补偿 90% 的周期性瞬态功率纹波。准 Z 源集成多端口功率变换器结构电路图如图 9 所示。

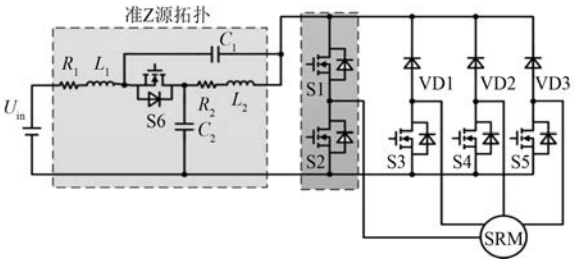


图 9 ZIMPC 结构电路图

ZIMPC 电流电压关系表达式为

$$\begin{cases} v_k = R_k i_k + \frac{d\varphi_k}{dt} \\ \frac{d\varphi_k}{dt} = L_k(\theta, i) \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial L_k(\theta, i)}{\partial \theta_k} \omega i_k \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω 为角速度; $L_k(\theta, i)$ 表示当角度为 θ 、电流为 i 时的电感。

2.2 混合并联型功率变换器

文献[20]在传统不对称半桥功率变换器

的基础上,提出 IGBT/MOSFET 混合并联拓扑,其中 MOSFET 作为辅助斩波开关,缩短 IGBT 管关断期间换向时间,通过控制准 Z 源

单元直通时间,可减少输入端的电源纹波。对比传统功率变换器,降低了开关损耗,提高了转换效率,拓扑结构如图 10 所示。

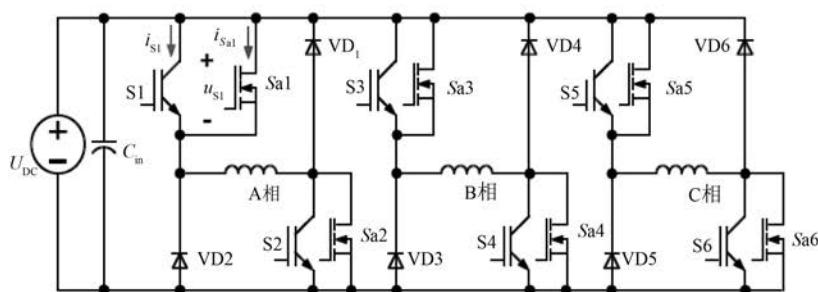


图 10 IGBT/MOSFET 混合并联型功率变换器

IGBT/MOSFET 混合并联型功率变换器电流电压关系表达式为

$$v_k(t) = R_k i_k(t) + \frac{d\varphi_k}{dt} \quad (5)$$

式中: $i_k(t)$ 表示 t 时刻的相电流值。

2.3 功能集成型功率变换器

文献[21]提出一种集成且紧凑的适用于电动汽车的功率变换器,该变换器集成了多种功能。当电动汽车充电时,该变换器可以切换太阳能充电模式和并网充电模式 2 种模式;当电动汽车驱动运行时,该变换器则可作为传统不对称半桥功率变换器。因此,大大

降低了系统成本,提升了功率变换器的实用性。由于常规混合动力卡车(PHEV)需要额外的转换器才能实现发电机、电池以及驱动电机之间电能转换,为此文献[22]提出一种新型集成式功率变换器,分析了不同工作模式情况下新型功率变换器的工作特点。功率变换器拓扑结构如图 11 所示。当卡车处于不同的工作状态时,通过控制相应开关管的开断即可实现智能能量管理,与传统功率变换器相比,有效减少了功率变换器换向过程中的续流时间,并提高了输出效率以及制动能量回收利用率。

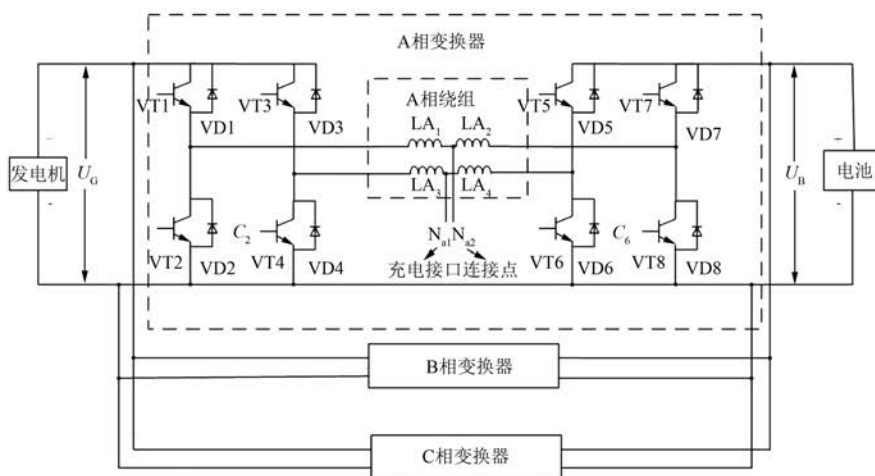


图 11 功能集成型功率变换器

该功率变换器的 k 相电流表达式为

$$i_k(\theta) = \begin{cases} \frac{U_{in}}{\omega_r} \frac{\theta - \theta_{on}}{L_{min}}, & \theta_{on} \leq \theta < \theta_2 \\ \frac{U_{in}}{\omega_r} \frac{\theta - \theta_{on}}{L_{min} + K(\theta - \theta_2)}, & \theta_{on} \leq \theta < \theta_{off} \\ \frac{U_{in}}{\omega_r} \frac{2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta}{L_{min} + K(\theta - \theta_2)}, & \theta_{off} \leq \theta < \theta_3 \\ \frac{U_{in}}{\omega_r} \frac{2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta}{L_{max}}, & \theta_3 \leq \theta < \theta_4 \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_{min} 和 L_{max} 分别是最小相电感和最大相电感; θ_{on} 、 θ_{off} 分别为开通角和关断角; θ_2 为定转子初始重叠位置角; θ_4 为定转子偏离时位置角; ω_r 为角速度; K 为相电感斜率因数; U_{in} 为绕组两端电压。

2.4 其他新型功率变换器

由于电容裂相式功率变换器存在中点电位不平衡、输出平均转矩低、转矩脉动大、容错能力有限等缺点。文献[23]提出一种中点电压有源调节功率变换器,相应减少了功率变换器件数目,同时提高了可靠性和输出效率,与电压斩波控制、角度位置控制以及电流斩波控制3种传统控制方式进行了对比,但未对最新智能控制方法进行分析。文献[24]将谐振电路加入功率变换器中,与传统不对称半桥功率变换器以及公共开关型功率变换器进行了对比分析,分析了输出转矩和相电流波形,得出其可提高输出效率以及降低转矩脉动,但其未对输出效率进行定性分析,说服力不够。文献[25]研究了共上管功率变换器,针对其退磁困难的问题,提出控制角度参数优化控制策略,与传统功率变换器相比,减少了功率变换开关管数目,但转矩脉动有所增大。文献[26]提出一种新型不对称半桥功率变换器,提升了控制模式灵活性,缩短了励磁时间以及续流时间,但所用器件相对较多,增加了成本。文献[27]提出 Buck-Boost 变换器和不对称半桥级联型集成驱动功率变换器,重点分析了该功率变换器高压续流特性,并搭建了功率变换器试验台架,验证了集成功率变换器拓扑可行性和稳定性。

3 功率变换器研究发展趋势

纵观国内外相关研究,SRM 新型功率变换器研究主要围绕以下几点:

(1) 在传统功率变换器结构的基础上引入新型功率变换器件,或采用公共开关器件减少器件数量,从而降低成本以及减少开关损耗。

(2) 针对不同的应用场合,设计新型最优功率变换器,达到节约安装空间,提升输出平均转矩和效率以及降低输出转矩脉动。

(3) 将功率变换器与先进控制方式相结合使之具备多重功能,以提高功率变换器的智能性和实用性。

4 结 语

SRM 是新兴的热门电机之一,引发了国内外学者的广泛关注,其功率变换器的研究更是重中之重,本文对比分析了国内外新型功率变换器,给出未来发展趋势,为 SRM 功率变换器研究提供了参考。

【参考文献】

- [1] 唐琛,杨剑,任兴,等. 基于小波变换的开关磁阻电机系统功率变换器故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2018,45(9): 125.
- [2] GAN C, WU J, HU Y, et al. New integrated multilevel converter for switched reluctance motor drives in plug-in hybrid electric vehicles with flexible energy conversion [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017,32(5): 3754.
- [3] 吴红星,倪永健,王璐,等. 开关磁阻电机功率变换器拓扑结构新技术[J]. 微电机, 2017,50(4): 93.
- [4] 彭寒梅,易灵芝,徐天昊,等. 开关磁阻发电机他励模式下的简易功率变换器控制[J]. 太阳能学报, 2012,33(8): 1334.
- [5] NIAKINEZHAD M, NUTKANI I U, FERNANDO N. A new modular asymmetrical half-bridge switched reluctance motor integrated drive for electric vehicle application[C]//2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2018.
- [6] XUE X D, CHENG K W E, BAO Y J. Control and integrated half bridge to winding circuit development for switched reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014,10(1): 109.
- [7] GUAN M, LIU C, WANG K. A novel low-cost and high-performance converter topology for six-phase SRM [C]//2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016.

- [8] SREEDHAR S K, MANJUNATH H V, DIXIT G G, et al. A comparison of C-dump and one common switch converter configurations for SRM used as electric actuator in flight control system [C] // 2014 International Conference on Electronics, Communication and Computational Engineering (ICECCE), 2014.
- [9] CHEN H, YANG J, XU S. Electrothermal-based junction temperature estimation model for converter of switched reluctance motor drive system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67 (2) : 874.
- [10] KILIC O, TOPCU A, HAQUE M E, et al. A new converter topology for switched reluctance machines to improve high-speed performance [C] // 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2019.
- [11] 甘醇. 开关磁阻电机新型功率变换器的研究与设计 [J]. 电机与控制应用, 2011, 38(3) : 12.
- [12] 孙庆国. 开关磁阻电机功率变换器设计优化与转矩波动抑制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [13] SINGH B, MISHRA A K. Performance analysis of a solar-powered water pumping using improved SIDO buck-boost converter [J]. IET Power Electronics, 2019, 12(11) : 2904.
- [14] MA M, YUAN K, YANG Q, et al. Open-circuit fault-tolerant control strategy based on five-level power converter for SRM system [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2019, 3(2) : 178.
- [15] 周峰, 蒋伟, 张安东. 小功率开关磁阻电机功率拓扑和驱动技术研究 [J]. 微电机, 2018, 51(4) : 45.
- [16] SINGH B, MISHRA A K. Canonical switching cell converter fed SRM drive for SPV array based water pumping [C] // 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2015.
- [17] THANKACHAN J, SINGH S P. A reduced switch multiport converter drive for solar-assisted SRM EV with integrated driving and charging features [C] // 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), 2020.
- [18] MOHAMADI M, RASHIDI A, NEJAD S M S, et al. A switched reluctance motor drive based on quasi-Z-source converter with voltage regulation and power factor correction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10) : 8330.
- [19] YI F, CAI W. A quasi-Z-source integrated multiport power converter as switched reluctance motor drives for capacitance reduction and wide-speed-range operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11) : 7661.
- [20] WOOTHIPATANAPAN S, JANGWANITLERT A, CHANCHAROENSOOK P. Efficiency improvement of converter for switched reluctance motor drives by mixed parallel operation of IGBT and MOSFET [C] // TENCON 2010—2010 IEEE Region 10 Conference, 2010.
- [21] FENG C, WU J, SUN Q, et al. An integrated BLIL boost converter-based switched reluctance motor drive for PEV applications with PFC charging function [C] // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.
- [22] HU Y, GAN C, SUN Q, et al. Modular tri-port high-power converter for SRM based plug-in hybrid electrical trucks [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4) : 3247.
- [23] 戴尚建, 刘闯, 韩守义, 等. 多相关开关磁阻电机中点电压有源调节功率变换器的研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(14) : 278.
- [24] 徐秋芳, 张京军, 张海军, 等. 新型开关磁阻电机功率变换器 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2014, 31(4) : 74.
- [25] 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.
- [26] 黄雷. 四相关开关磁阻电机新型 T 型功率变换器研究 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4) : 87.
- [27] 吴少龙. 电动车开关磁阻电机集成驱动功率拓扑与控制研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.