

DOI:10.13382/j.jemi.B2205184

一种前端级联 DC/DC 变换器的 开关磁阻电机驱动拓扑*

周大林^{1,2} 陈昊^{1,2} Mohamed Orabi³ Alecksey Anuchin⁴ 李晓东⁵ Vitor Ferno Pires^{6,7} Joao Martins⁸

(1. 中国矿业大学电气工程学院 徐州 221116; 2. 徐州市新能源电动车技术与装备重点实验室 徐州 221116;
3. 阿斯旺大学工程学院电气工程系 阿斯旺 81542; 4. 国立研究大学“莫斯科动力学院”电力传动系 莫斯科 111250;
5. 澳门科技大学资讯科技学院 澳门 999078; 6. 塞图巴尔理工学院塞图巴尔高等技术学院 塞图巴尔 2914-508;
7. INESC-ID 研究所 里斯本 1049-001 葡萄牙; 8. 里斯本新大学科学与技术学院电气工程系 卡帕里卡 2829-516)

摘要:针对开关磁阻电机传统不对称半桥功率变换器在电动汽车应用中的不足,提出了一种新型 DC/DC 变换器级联在不对称半桥功率变换器前端,以实现母线电压的调节以及制动能量的可控回馈。首先,理论分析了变换器的工作模式;其次,分别建立了励磁电压、退磁电压和关断角关于转速、负载的查找表,从而根据电机工况匹配合适的母线参考电压,并给出了系统整体的闭环控制方案;最后,在一台三相 6/4 结构开关磁阻电机上进行了实验,实验结果验证了提出的新型功率变换器的有效性。

关键词: 开关磁阻电机;功率变换器;前端 DC/DC 变换器;电动汽车

中图分类号: TM352 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Switched reluctance motor drive topology with front-end cascaded DC/DC converter

Zhou Dalin^{1,2} Chen Hao^{1,2} Mohamed Orabi³ Alecksey Anuchin⁴Li Xiaodong⁵ Vitor Ferno Pires^{6,7} Joao Martins⁸

(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Xuzhou Key Laboratory of New Energy Electric Vehicle Technology and Equipment, Xuzhou 221116, China; 3. Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Aswan University, Aswan 81542, Egypt; 4. Electric Drives Department, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow 111250, Russia; 5. Faculty of Information Technology, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China; 6. Superior Technical School of Setúbal, Polytechnic Institute of Setúbal, Setúbal 2914-508, Portugal; 7. INESC-ID, Lisbon 1049-001, Portugal; 8. Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, NOVA University of Lisbon, Caparica 2829-516, Portugal)

Abstract: In view of the shortcomings of the traditional asymmetric half bridge (AHB) power converter of switched reluctance motor (SRM) in electric vehicle drives, a novel DC/DC converter cascaded at the front-end of the AHB power converter is proposed to realize the regulation of DC-link voltage and the controllable feedback of braking energy. Firstly, the operating modes of the power converter are analyzed theoretically. Then, the look-up tables of the excitation voltages, the demagnetization voltages and the turn-off angles about speeds and loads are established, respectively, so as to match the proper DC-link reference voltage according to the motor working conditions. And the overall closed-loop control scheme is given. Finally, the experiments are carried out on a three-phase 6/4 switched reluctance motor and the experimental results verify the effectiveness of the proposed power converter.

Keywords: switched reluctance motor; power converter; front-end DC/DC converter; electric vehicle

收稿日期: 2022-02-14 Received Date: 2022-02-14

* 基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目-2019年度国家自然科学基金委员会与埃及科学研究技术院合作研究项目(51961145401)、南京市国际合作项目(202002034)、徐州市推动科技创新专项资金项目-创新能力建设计划(KC21315)资助

0 引言

为了缓解化石能源紧张和环境污染问题,新能源技术受到了越来越多的关注^[1],其中绿色交通工具是新能源技术研究的热点之一^[2],电动汽车因其高能量转换效率、高性价比、零污染排放等优点,是绿色交通工具的最理想解决方案,已有文献针对电动汽车的相关技术进行了大量研究,包括电机驱动技术^[3]、充电技术^[4]、能量管理技术等^[5]。

对于电动汽车用驱动电机,永磁电机由于高转矩密度和高效率等优点,是目前电动汽车驱动电机的主流^[6],然而永磁电机需要稀土材料制造的永磁体,这增加了永磁电机的成本,降低了结构坚固性,限制了其在电动汽车上的大规模应用。相比永磁电机,开关磁阻电机(switched reluctance motor, SRM)无需稀土材料,具有结构简单坚固,容错能力强,起动转矩大,恶劣环境中较好的鲁棒性等特有的优势,是电动汽车驱动电机的潜在替代者^[7],许多文献基于电动汽车对电机驱动系统的特性需求对 SRM 驱动系统展开了研究,包括 SRM 新结构设计以及优化设计方法^[8],提高系统可靠性的无传感器控制和容错控制策略^[9-10],降低转矩脉动的转矩控制方案^[11]以及提高系统效率的控制策略^[12]等。

除了电机本体和控制策略外,功率变换器对于电机驱动系统的性能同样具有重要影响。不对称半桥功率变换器能够实现各相独立控制,通常用来驱动 SRM,然而不对称半桥拓扑无法实现母线电压的调节,造成低速时电流脉动增加和高速时电流响应较慢,为了解决该问题,已有文献提出了多电平功率变换器,根据 SRM 工况分配不同的电平,文献[13]提出了一种不对称三电平中性点二极管钳位功率变换器,实现了更小的电流脉动和更快的电流动态响应;文献[14]提出了一种基于开关电容的前端三电平变换器,同时能够实现电容电压的自平衡;文献[15]通过改变一相绕组的连接方式,加快了高速运行时的电流响应,能够达到和泵升母线电压同样的效果,但绕组需要引出额外的端口。上述方案虽然实现了母线电压调节,但只能在几种固定的电平之间切换,同时增加了更多的功率开关。然而,电动汽车复杂多变的工况要求功率变换器能够提供不同的母线电压值,同时保证母线电压恒定,避免电流较大波动对电池的冲击,延长电池使用寿命,双向 DC/DC 变换器能够实现能量的双向调节,文献[16-18]在不对称半桥功率变换器前端级联双向 Buck-Boost 变换器和准 Z 源变换器,实现了电动时母线电压的调节和制动能量对蓄电池的充电,提高了驱动效率,同时集成了 G2V 和 V2G 功能;此外,为了提升电动汽车的续航能力,节约有限的车内空间,电动汽车用功率变

换器正朝着集成多端口方向发展,文献[19-20]提出了应用于插电式混合动力汽车(PHEV)的 SRM 集成变换器,但混合驱动模式时,母线电压不可调;文献[21-22]提出了基于 SRM 驱动的 PHEV 的模块化集成多端口变换器,实现了多电平驱动,但能量直接向蓄电池回馈,较大的能量容易损害蓄电池。

纯电驱动是新能源汽车最高效清洁的驱动形式,为了满足电动汽车电机驱动系统的运行需求,本文提出了一种新型 DC/DC 变换器级联在不对称半桥功率变换器前端,分析了变换器的工作模式,设计了系统的闭环控制方案,能够根据电机工况匹配合适的母线参考电压,相比现有的 SRM 功率变换器,本文提出的功率变换器能够实现励磁电压和退磁电压的独立调节,且退磁电压大于励磁电压,因而具有更短的换相时间,同时能够实现退磁能量到蓄电池的可控回馈,有助于延长蓄电池的寿命和续航里程,最后,在三相 6/4 结构 SRM 实验平台上对提出的功率变换器的可行性进行了验证。

1 新型功率变换器拓扑

不对称半桥功率变换器能够实现每相的独立控制,充分发挥 SRM 的容错能力,是 SRM 驱动系统中应用最广泛的拓扑,如图 1 所示,不对称半桥功率变换器中每相励磁由两个开关管独立控制,具有 3 种工作模式:以 A 相为例,当 S_{Ah} 、 S_{Al} 同时开通,绕组电流在正母线电压作用下开始上升,建立励磁过程, $u_A = U_E$,电流路径如图 1 中①所示;当 S_{Ah} 、 S_{Al} 其中一个开关管关断,另一个保持开通,绕组工作在零电压续流模式, $u_A = 0$,电流路径如图 1 中②所示;当 S_{Ah} 、 S_{Al} 均关断,绕组电流在负母线电压作用下快速下降,进入退磁换相阶段, $u_A = -U_E$,电流路径如图 1 中③所示。可以看出,不对称半桥拓扑中母线电压恒等于电池电压,尤其在高速重载情况下,电流峰值较大,反电动势增大,且转子经过一个周期的时间缩短,退磁电流很容易进入电感下降区产生负转矩,限制了 SRM 高速时的带载能力,降低了系统的效率。

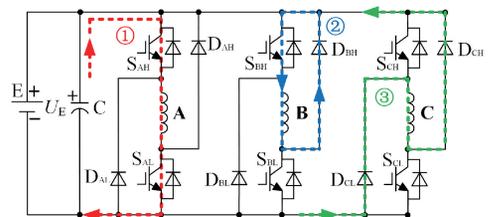


图 1 传统不对称半桥功率变换器

Fig. 1 Traditional asymmetric half-bridge converter

为了克服该缺点,同时保留不对称半桥拓扑的优点,本文在不对称半桥功率变换器的前端级联一种新型 DC/

DC 变换器,能够实现励磁电压和退磁电压的独立调节,从而加快换相过程,新型功率变换器拓扑如图 2 所示。以 A 相为例,对新型功率变换器的 4 种工作模式进行分析。

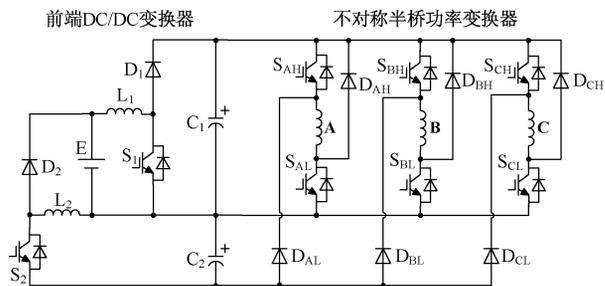


图 2 新型功率变换器拓扑

Fig. 2 Proposed novel power converter topology

1.1 励磁电压调节模式

新型功率变换器励磁电压调节模式的电流路径如图 3 所示。其中,蓄电池 E、电感 L₁、开关管 S₁、二极管 D₁ 和母线电容 C₁ 构成 Boost 电路。当 SRM 处于高速重载时,通过控制开关管 S₁ 的占空比可以实现母线电容 C₁ 两端电压的泵升,降低 SRM 高速运行时较大的反电动势对相电流的不利影响,增大电动转矩;当 SRM 处于低速轻载时,退出 Boost 工作状态,直接由较低电压的电池 E 为绕组提供励磁电压,可减小电流脉动,平滑电流波形,抑制转矩脉动。忽略功率器件的导通压降,当系统工作在稳态时,A 相绕组励磁电压为:

$$U_A = U_E / (1 - K_1) \pm \Delta U_{C1} \quad (1)$$

式中:K₁ 为开关管 S₁ 的占空比,ΔU_{C1} 为母线电容 C₁ 的纹波电压值。

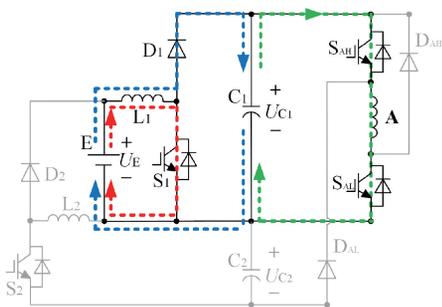


图 3 励磁电压调节模式的电流路径

Fig. 3 Current paths of excitation voltage regulation mode

1.2 退磁电压调节模式

新型功率变换器退磁电压调节模式的电流路径如图 4 所示。当 S_{AH} 和 S_{AL} 都关断时,A 相绕组电流经 D_{AL} 和 D_{AH} 续流,将绕组储存能量回馈到电容 C₁ 和 C₂ 中,退

磁电压为 -(U_{C1}+U_{C2}),高退磁电压迫使 A 相电流迅速下降。C₁ 中存储的退磁能量会在下一相导通时对绕组进行励磁,而电容 C₂ 始终处于退磁能量积累状态,使 U_{C2} 不断提高,因此需外加电路释放 C₂ 能量。

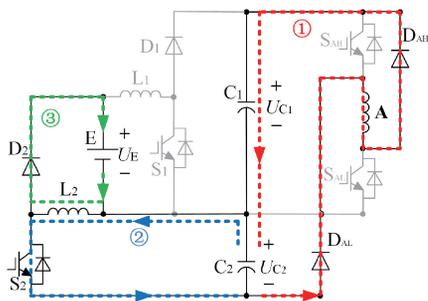


图 4 退磁电压调节模式的电流路径

Fig. 4 Current paths of demagnetization voltage regulation mode

根据 Buck-Boost 电路原理,前端 DC/DC 变换器中设计了由电容 C₂、电感 L₂、开关管 S₂、二极管 D₂ 和电池 E 组成的 C₂ 能量回馈路径。在开关管 S₂ 导通期间,电容 C₂ 储存的能量转移到电感 L₂ 中,如路径②所示;在 S₂ 关断期间,电感 L₂ 中储存的能量回馈到电池 E 中,如路径③所示。通过该过程,SRM 不仅具有较高的可控退磁电压以缩短退磁时间,而且退磁能量可回馈至电源避免能量浪费。忽略功率器件的导通压降,则绕组退磁电压为:

$$U_A = -U_E \frac{1 - K_1 + K_1 K_2}{(1 - K_1) K_2} \pm \Delta U_{C12} \quad (2)$$

式中:K₂ 为 S₂ 的导通占空比,ΔU_{C12} 为电容 C₁ 和 C₂ 的纹波叠加电压值。

1.3 零压续流和制动能量回馈

功率变换器的零电压续流和制动能量回馈的电流路径如图 5 所示。路径①为零压续流状态,在导通区内, A 相下管 S_{AL} 关断,绕组电流通过 D_{AH}、S_{AH} 续流,相绕组电压为 0,这种工作模式能够减小电流斩波控制下的电流脉动,降低开关管的斩波频率,减小开关损耗;路径②为低反压续流状态,B 相上管 S_{BH} 关断,B 相绕组电流通过 S_{BL}、C₂ 和 D_{BL} 续流,续流电压值为 -U_{C2},在电动状态下,因有零压续流和高压 -(U_{C1}+U_{C2}) 续流两种状态,因此该续流电压值 (-U_{C2}) 的存在价值不明显,但在制动状态下,若将电容 C₂ 替换为超级电容,可吸收较大绕组制动能量,迅速存储电机机械能,从而提供较大的电磁制动力,当电容 C₂ 能量过高时,结束电磁制动,采用单一机械制动,并通过 Buck-Boost 电路将电容 C₂ 能量回馈至电池 E,因此前端 DC/DC 变换器能够实现制动能量回收,同时还可解决较大电磁制动电流无法直接回馈到电池的问题。

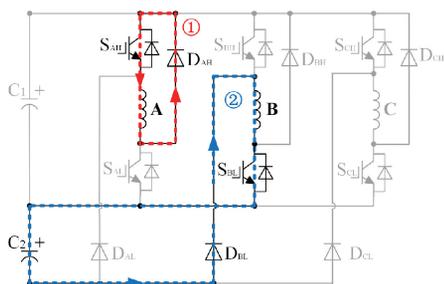


图 5 零压续流和制动能量回馈的电流路径
Fig. 5 Current paths of zero voltage freewheeling and braking energy feedback

2 仿真分析及控制策略

2.1 仿真分析

当 SRM 高速运行时,提高母线电压,一方面能够抑制反电动势对电流响应速度的不利影响,提高相电流对电流给定的跟踪能力,此外,加快退磁电流的衰减,降低进入电感下降区的电流有效值,拓宽导通区间,有利于提高高速时电机的带负载能力。低速轻载时,通常通过电流斩波控制实现对电机转速转矩的调节,如果仍采用较高的母线电压,对于相同的采样频率,电流的脉动会增加;对于相同的电流滞环宽度,需要增加开关频率将电流脉动限制在电流滞环内,这会增加开关损耗、铁损和绕组损耗。因此,在不同转速和负载情况下,合理调整励磁电压,有利于带载能力的提升和系统性能的优化。

图 6 为不同转速和负载下,所需的最小励磁电压。从图 6 中可看出,励磁电压对输出功率的影响很大。因此,在低速轻载时,可通过降低励磁电压来减少开关损耗,降低转矩脉动;而在高速重载时,在耐压允许范围内,增大励磁电压,满足功率需求,提高动力性能。

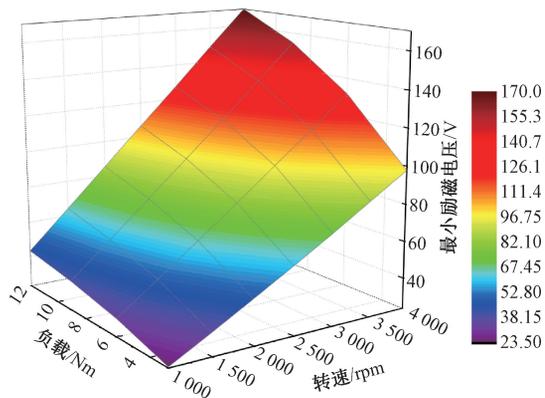


图 6 励磁电压与转速和负载的关系
Fig. 6 Excitation voltage vs. speed and torque

转矩可近似表示为:

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

在高速时,相绕组导通时间较短,重载时,电流较大。由式(3)知,需要前移关断角,避免电流出现在 $dL/d\theta < 0$ 区间而产生负转矩,但关断角的提前会缩短 $dL/d\theta > 0$ 的导通区间,影响电动转矩的产生。通过提高退磁电压,可缩短退磁时间,从而在不影响电动转矩的前提下,减小负转矩,提高总转矩。图 7 为不同转速时,提高退磁电压带来转矩提升的仿真结果。从图中可看出,速度越高,退磁电压对最大转矩的影响越明显,因此,在低速时,适当提高退磁电压即可;而在高速时,在耐压允许范围内,增大退磁电压,减小负转矩,增强电机输出转矩。

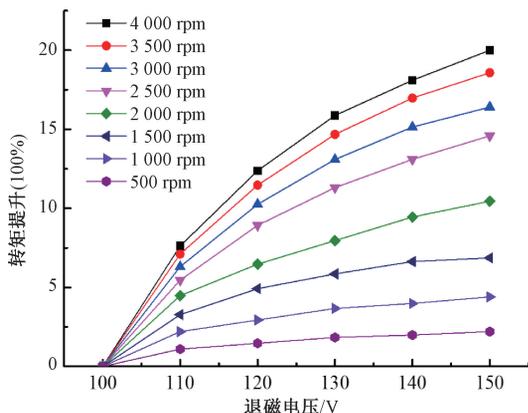


图 7 退磁电压对最大转矩的影响
Fig. 7 Demagnetization voltage vs. maximum torque

图 8 为不同转速时,不同退磁电压下的最大转矩所对应的关断角。从中可以看出,随着转速的提高,该关断角会提前,造成导通区间减小,从而影响转矩输出;若增大退磁电压,该关断角又会后移,从而增大导通区间,进而增大正转矩。

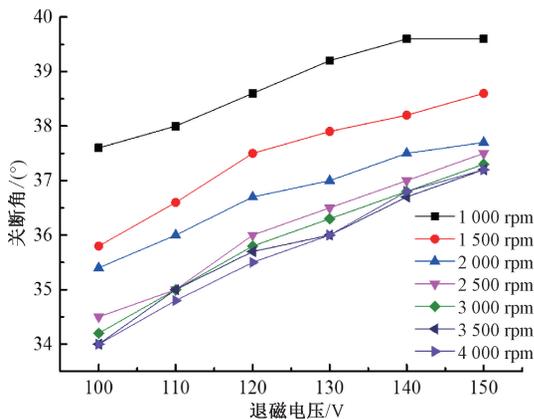


图 8 退磁电压对关断角的影响
Fig. 8 Demagnetization voltage vs. turn-off angle

忽略磁路非线性及饱和的影响,开关磁阻电机电磁

2.2 系统控制策略

励磁电压和退磁电压的调节都与转速和负载相关,转速通过位置传感器的信号来计算得到,负载则可通过电流斩波限值来反映。通过仿真和实验,得到不同转速、负载下的励磁电压、退磁电压及关断角,构建查找表,应用于控制系统。图 9 为系统整体控制策略原理图。表 1 和 2 分别为励磁电压、退磁电压和关断角的查找表。

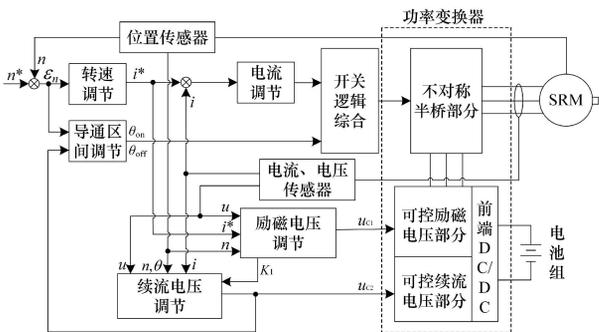


图 9 系统控制策略原理图

Fig. 9 Principle diagram of overall control strategies

表 1 励磁电压查找表

Table 1 Excitation voltage lookup table

U_{C1}	i^*			
	0~30	30~60	60~90	>90
0~500	45	50	55	60
500~1 000	45	50	55	60
1 000~1 500	50	55	60	65
n 1 500~2 000	55	65	75	85
2 000~2 500	65	80	95	105
2 500~3 000	75	100	120	125
>3 000	100	110	125	125

表 2 退磁电压和关断角查找表

Table 2 Demagnetization voltage and turn-off angle lookup table

U_{C2}, θ_{off}	i^*			
	0~30	30~60	60~90	>90
0~1 000	(110, 40.0)	(110, 39.0)	(115, 38.5)	(115, 38.5)
1 000~1 500	(110, 39.0)	(110, 38.0)	(115, 37.5)	(115, 37.5)
n 1 500~2 000	(115, 37.5)	(115, 37.0)	(120, 36.5)	(120, 36.5)
2 000~2 500	(120, 36.5)	(125, 36.0)	(125, 36.0)	(125, 36.0)
2 500~3 000	(120, 36.5)	(125, 36.0)	(125, 35.5)	(125, 35.5)
>3 000	(120, 35.0)	(125, 35.0)	(125, 35.0)	(125, 35.0)

3 实验验证

在一台三相 6/4 SRM 样机上对提出的功率变换器的可行性进行了验证,实验平台如图 10 所示。SRM 由前端级联了 DC/DC 变换器的不对称半桥拓扑进行驱动,两节

12 V 的蓄电池串联为系统供能,采用基于 DSP28335 的控制器以实现系统的控制策略,相电流和相电压利用霍尔传感器进行检测,并通过 16 位的 AD 芯片进行采样。

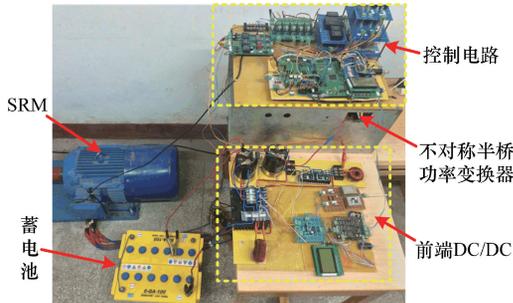


图 10 实验平台

Fig. 10 Experiment platform

3.1 调节励磁电压

图 11 给出了退磁电压为 50 V,导通区间为 0°~45°,低速 500 rpm 运行时,不同励磁电压下的相电压和相电流波形,图 11(a)、(b)、(c)分别为励磁电压 75 V、50 V、25 V,相电压和相电流波形。可以看出,随着励磁电压的降低,电流波形趋于平滑,在低速轻载时,可通过该方法来减小电流脉动、降低功率器件开关损耗和电机的铁损耗和绕组损耗。

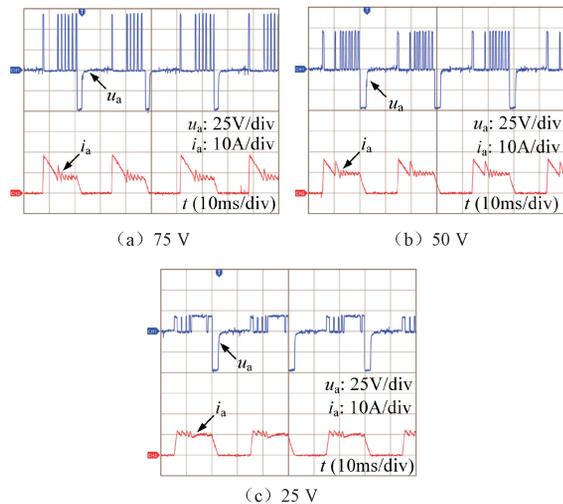


图 11 低速 500 rpm 时不同励磁电压下相电压和相电流
Fig. 11 Voltage and current waveforms under different excitation voltages at the low speed of 500 rpm

图 12 给出了退磁电压为 75 V,导通区间 0°~45°,高速 2 000 rpm 运行时,不同励磁电压下的相电压和相电流波形,图 12(a)、(b)、(c)分别为 50 V、75 V、100 V 励磁时,相电压和相电流波形。可以看出,在转速较高时,若励磁电压较低,会因较大反电动势而导致电流在电感上升区末端不能跟随给定,通过提高励磁电压,可使电流跟

随给定,因此高速运行时,可通过该方法削弱反电动势的影响,提高转矩输出能力。

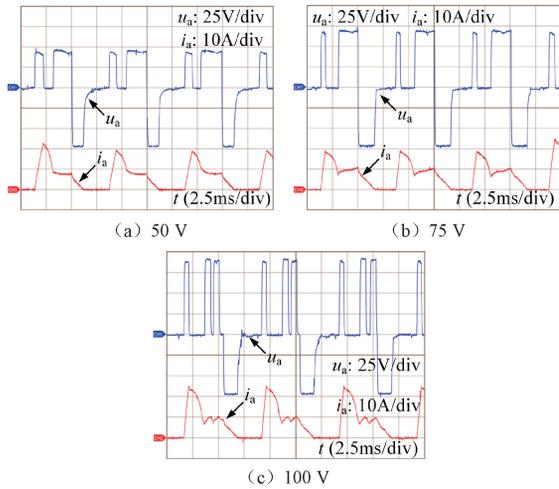


图 12 高速 2 000 rpm 时不同励磁电压下相电压和相电流
Fig. 12 Voltage and current waveforms under different excitation voltages at the high speed of 2 000 rpm

3.2 调节退磁电压

图 13 给出了励磁电压为 50 V,导通区间为 $0^\circ \sim 45^\circ$, 低速 500 rpm 运行时,不同退磁电压下的相电压和相电流波形,图 13(a)、(b)、(c) 分别为 50 V、75 V、100 V 退磁时,相电压和相电流波形。从图中可以看出,随着退磁电压的提高,退磁电流下降速率提高,退磁时间变短。退磁电压从 50 V 提高到 75 V 时,退磁时间缩短较明显,从 75 V 提高到 100 V 时,退磁时间缩短并不多,这对于减小负转矩并无明显意义。

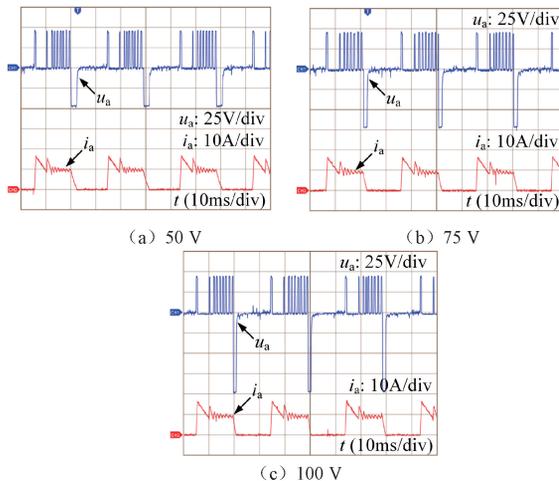


图 13 低速 500 rpm 时不同退磁电压下相电压和相电流
Fig. 13 Voltage and current waveforms under different demagnetization voltages at the low speed of 500 rpm

图 14 给出了励磁电压为 50 V,开通区间为 $0^\circ \sim 45^\circ$, 高速 3 000 rpm 运行时,不同退磁电压下的相电压和相电流波形,图 14(a)、(b)、(c) 分别为 50 V、75 V、100 V 退磁时,相电压电流波形图。通过与图 13 的对比可以看出,当转速提升后,退磁电压的提高对于退磁电流下降速率有着明显的影响,这对于减小负转矩有明显意义。因此,在低速时,退磁电压适度提高即可,而在高速时,可在耐压等级允许范围内,较大幅度提高退磁电压来减小负转矩。

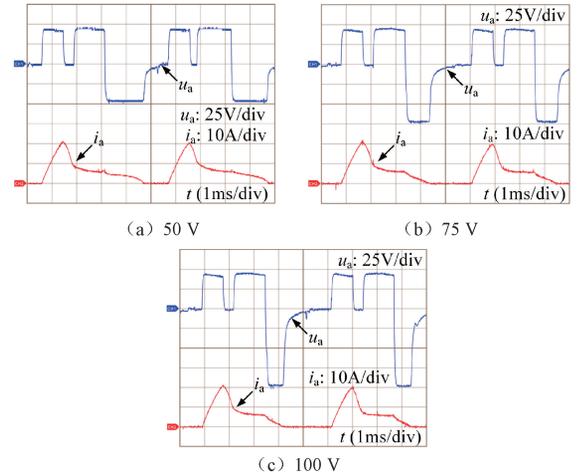


图 14 高速 3 000 rpm 时不同退磁电压下相电压和相电流
Fig. 14 Voltage and current waveforms under different demagnetization voltages at the high speed of 3 000 rpm

4 结 论

本文提出一种前端级联 DC/DC 变换器的开关磁阻电机新型功率变换器拓扑,适用于如电动汽车等采用不可控单电源供电的应用场合,能有效改善电机驱动系统的性能。通过理论分析和实验,得到如下结论:

- 1) 通过提出的前端级联 DC/DC 变换器,在电源恒压不可控的条件下,实现了励磁电压和退磁电压的独立调节;
- 2) 在低速轻载时,可通过降低励磁电压得到较为平滑的电流波形,以降低功率器件的开关损耗;在高速时,可通过提高励磁电压削弱反电动势的影响,来提高转矩输出能力;
- 3) 退磁电压的提高对转矩的影响主要体现在高速时,因此高速时可在耐压允许范围内较大幅度提高退磁电压,以缩短退磁时间,从而减少负转矩的产生,提高带载能力。

参考文献

[1] 杜尔顺,张宁,康重庆,等. 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J]. 中国电机工程学

- 报, 2016, 36(21): 5765-5775.
- DU ER SH, ZHANG N, KANG CH Q, et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5765-5775.
- [2] EHSANI M, SINGH K V, BANSAL H O, et al. State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(6): 967-984.
- [3] 刘庆, 刘和平, 刘平, 等. 电动汽车用异步电动机低速转矩最大化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(24): 30-41.
- LIU Q, LIU H P, LIU P, et al. Torque maximization about electric vehicle induction motor at low speed[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 30-41.
- [4] 佟明昊, 程明, 许芷源, 等. 电动汽车用车载集成式充电系统若干关键技术问题及解决方案[J]. 电工技术学报, 2021, 36(24): 5125-5142.
- TONG M H, CHENG M, XU ZH Y, et al. Key issues and solutions of integrated on-board chargers for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(24): 5125-5142.
- [5] ZHENG C H, LI W M, LIANG Q. An energy management strategy of hybrid energy storage systems for electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1880-1888.
- [6] 徐奇伟, 孙静, 杨云, 等. 用于混合动力车的复合结构永磁电机电磁优化设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 126-135.
- XU Q W, SUN J, YANG Y, et al. Electromagnetic optimization design of compound-structure permanent-magnet motor for hybrid electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 126-135.
- [7] BOSTANCI E, MOALLEM M, PARSAPOUR A, et al. Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: A comparative study[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1): 58-75.
- [8] CHEN H, YAN W J, GU J J. Multiobjective optimization design of a switched reluctance motor for low-speed electric vehicles with a Taguchi-CSO algorithm[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(4): 1762-1774.
- [9] 匡斯建, 张小平, 王易华, 等. 考虑磁路饱和的开关磁阻电机无位置传感器控制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 202-209.
- KUANG S J, ZHANG X P, WANG Y H, et al. Position sensorless control method for switched reluctance motor considering magnetic circuit saturation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 202-209.
- [10] 韩国强. 开关磁阻电机系统容错控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- HAN G Q. Research on tolerant control of switched reluctance motor system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [11] CHENG H, CHEN H, YANG Z. Average torque control of switched reluctance machine drives for electric vehicles[J]. IET Electric Power Applications, 2015, 9(7): 459-468.
- [12] NGUYEN D, BAHRI I, KREBS G, et al. Efficiency improvement by the intermittent control for switched reluctance machine in automotive application[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 4167-4182.
- [13] 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.
- [14] HAN G Q, 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] TOMCZEWSKI K, WROBEL K. Quasi-three-level converter for switched reluctance motor drives reducing current rising and falling times [J]. IET Power Electronics, 2012, 5(7): 1049-1057.
- [16] THANKACHAN J, SINGH P S. Bidirectional multiport solar-assisted SRM drive for pure electric vehicle applications with versatile driving and autonomous charging capabilities [J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(4): 570-583.
- [17] CHEN H C, HUANG B W. Integrated G2V/V2G switched reluctance motor drive with sensing only switch-bus current [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 9372-9381.
- [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): 8330-8339.
- [19] CHENG H, WANG L J, XU L, et al. An integrated electrified powertrain topology with SRG and SRM for plug-in hybrid electrical vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10): 8231-8241.
- [20] CHENG H, WANG Z L, YANG S Y, et al. An

integrated SRM powertrain topology for plug-in hybrid electric vehicles with multiple driving and onboard charging capabilities [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(2): 578-591.

- [21] WU T H, LI W, NI K, et al. Modular tri-port converter for switched reluctance motor based hybrid electrical vehicles[J]. IEEE Access, 2019, 7: 15989-15998.
- [22] SUN Q G, WU J H, GAN C, et al. Cascaded multiport converter for SRM-based hybrid electrical vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11940-11951.

作者简介



周大林, 2015 年于中国矿业大学获得学士学位, 现为中国矿业大学博士研究生, 主要研究方向为电动汽车开关磁阻电机驱动系统。

E-mail: dlzhoubetter@163.com

Zhou Dalin received his B. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2015. Now he is a Ph. D. candidate at China University of Mining and Technology. His main research interests include switched reluctance motor drives for electric vehicle applications.



陈昊(通信作者), 1991 年和 1996 年于南京航空航天大学分别获得学士学位和博士学位, 现为中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为新型电机系统及其控制。

E-mail: hchen@cumt.edu.cn

Chen Hao (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1991 and 1996, respectively. Now he is a professor and a Ph. D. supervisor at China University of Mining and Technology. His main research interests include new motor drive system and its control.