

四相开关磁阻电机新型 T 型功率变换器研究*

黄 雷^{1,2}

(1. 天津职业技术师范大学 自动化与电气工程学院, 天津 300222;
2. 天津市信息传感与智能控制重点实验室, 天津 300222)

摘 要: 为了扩大四相开关磁阻电机(SRM)驱动系统的输出功率范围,提出了一种新型不对称 T 型功率变换器。该功率变换器由改进的 T 型功率变换器和辅助电路构成:T 型变换器为多电平电路,可使得电机绕组在多种模式下工作,控制灵活;辅助电路能够使直流侧分压电容在实现直流侧电压钳位的同时用作电机相电流上升及下降期间的电压抬升。对电机不同运行模式进行了详细分析,并对比了所提 T 型功率变换器与二极管中性点钳位(NPC)功率变换器的效率及成本。对 SRM 系统进行了仿真研究,结果表明所提新型 T 型功率变换器可提升 SRM 系统的转速及功率输出能力,提高系统整体效率,适用于电机高速运行场合。

关键词: 开关磁阻电机; 不对称 T 型功率变换器; 升压电容; 中性点钳位变换器

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0087-05

doi: 10.12177/emca.2019.188

Research on New T-Type Power Converter for Four-Phase Switched Reluctance Motor Drives*

HUANG Lei^{1,2}

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Information Sensing and Intelligent Control, Tianjin 300222, China)

Abstract: Aiming at extending the output speed range of four-phase switched reluctance motors, a new asymmetric T-type power converter is proposed. The power converter is composed of modified T-type three-level converters and auxiliary circuits. T-type converter is a multi-level converter which can provide more flexible phase control. The DC-link capacitors in the auxiliary circuits are used for voltage level clamping as well as DC voltage-boosting capacitors to produce additional voltage during the rise and fall period of a motor phase current. The operation and analysis are detailed for different operation modes. Comparisons are made between the proposed converter and diode neutral-point clamped (NPC) multilevel converters on efficiency and cost. The simulation results show that the proposed new T-type power converter increases both speed and output power, improves the efficiency of SRM system, and is suitable for high speed applications.

Key words: switched reluctance motor (SRM); asymmetric T-type power converter; voltage-boosting capacitor; neutral point clamped (NPC) converter

0 引 言

开关磁阻电机(SRM)由于具有起动转矩大、

结构简单、可靠性高和成本低等优点得到了越来越广泛的关注。功率变换器电路通过电力电子开关器件实现 SRM 与电源间的能量转换,是 SRM

收稿日期: 2019-12-20; 收到修改稿日期: 2020-03-02

* 基金项目: 国家留学基金项目(201807760010);天津市教委科研项目(JWK1617)

作者简介: 黄 雷(1980—),男,博士,高级工程师,研究方向为电机控制及新能源并网逆变控制。

驱动系统的核心。合适的功率变换器能够降低 SRM 驱动系统的成本,提高电机动态响应,扩展电机转速范围,减小变换器的开关损耗。

不对称半桥结构 SRM 变换器最早被提出且应用较为广泛,该电路每相均需要 2 个开关管和 2 个续流二极管^[1]。很多文献研究了不同功率变换器拓扑结构,以实现不同的功能需求^[2-8]。文献[3]采用升压电路形成四电平拓扑,结合直接瞬时转矩方法实现了转矩脉动的抑制。为了加快励磁和续流过程,文献[4]针对四相 SRM 提出了一种增加辅助电容和二极管电路来提升绕组端电压从而提升电机相电流上升和下降速度的方法。文献[5]在 C-dump 电路基础上增加了 Buck-Boost 电路,可提高去磁过程的电压,减小转矩脉动,但因为导通期间的电压仍为直流母线电压,所以电机系统的输出功率并未提高。文献[6]提出了一种不对称三电平二极管中性点钳位(NPC)变换器,实现了改善电流波动、减小转矩脉动、降低系统损耗的目的。文献[7]提出了一种带有辅助升压电路的 NPC 变换器及控制方法,提高了电机系统的输出功率和效率,但该电路中所用开关器件较多,成本较高。文献[8]提出一种应用于混合

动力电动汽车 SRM 的不对称三相 T 型变换器,与 NPC 变换器电路相比,该方案可以减少开关管数量,降低开关损耗。但是,该电路没有辅助升压电路,不具备快速励磁和快速退磁功能。

本文提出一种四相 SRM 的新型不对称 T 型功率变换器方案。该方案具有 T 型多电平电路器件少、控制模式灵活等优点,同时结合辅助电路提高了励磁和续流电压,可加快励磁和续流过程。

1 不对称 T 型变换器

图 1 为四相 SRM 不对称 T 型功率变换器主电路拓扑。该电路由分别用于控制 A、C 相及 B、D 相的 2 组 T 型电路及辅助电路构成。辅助电路的 S_{xy} 及 4 个二极管用作能量回馈。直流分压电容除了作为 T 型电路电压钳位功能外,还可以实现电压抬升功能。在电流下降区间对应相的去磁能量存储在直流分压电容,使得绕组端电压上升,在加速电流下降过程的同时可扩展正向转矩区间;电容存储的能量在下一相导通时释放,可加快励磁电流建立过程,提升电机输出转速范围和功率输出能力。变换器在电机需要再生制动时,还可将能量回馈至电池。

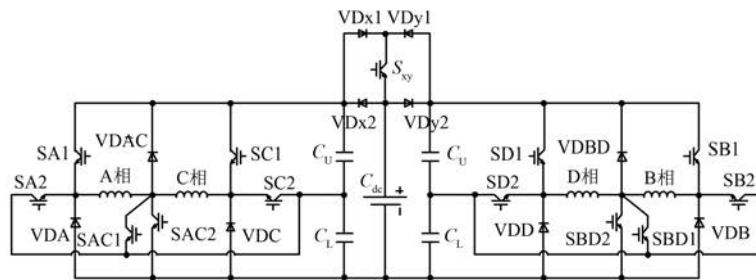


图 1 四相 SRM 不对称 T 型功率变换器主电路拓扑

在上述功率变换器中,分压电容的取值是基于电路的升压特性选取的。电容值选取过小将使电压升压较大,对电容耐压的要求更高;反之,电容值选取过大则升压效果不明显。本文电容取值参考文献[7],不再赘述。

变换器的电动模式和制动模式的不同工作状态详述如下。

1.1 电动模式

在电动模式下,辅助电路的开关 S_{xy} 断开, VD_{x2} 及 VD_{y2} 导通。在电机电感上升区间,电流

流入对应相绕组。根据开关管的工作状态,变换器可在电机绕组产生 5 种电平。电动模式下新型 T 型功率变换器电平状态如图 2 所示。本文以 A 相为例进行说明。

$+U$ 电平:当 SA1 及 SAC2 导通时,A 相绕组两端电压为 $+U$,如图 2(a) 所示。此状态下若分压电容 C_u 和 C_l 上电压之和大于 U_{dc} ,将加速电机绕组电流励磁过程,提升输出功率。此状态绕组端电压起始值为 $U_{dc} +$ 抬升电压 U_{boost} ,当电容存储能量释放完毕后,电容电压将等于电池电

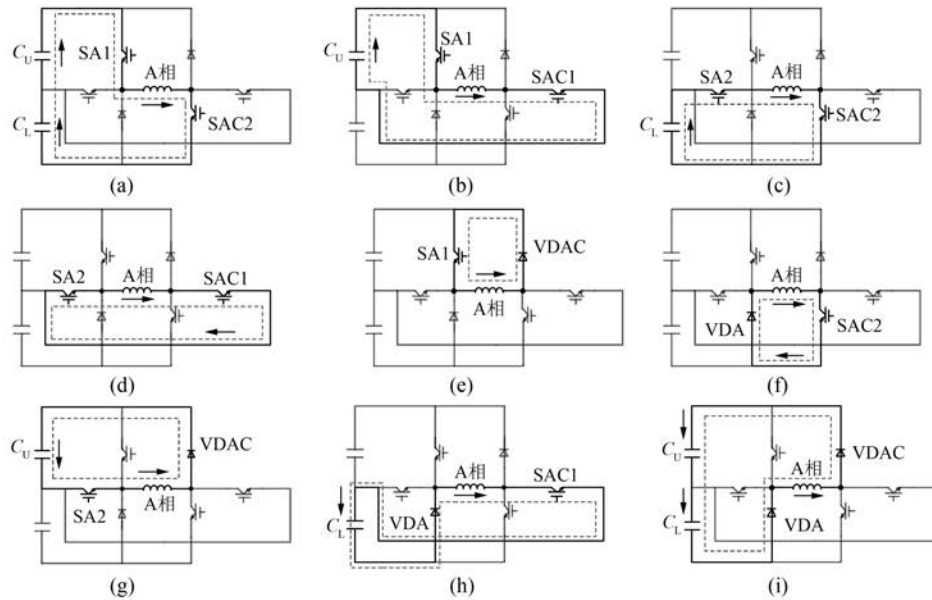


图2 电动模式下新型T型功率变换器电平状态

压 $+U_{dc}$ 。

$+1/2U$ 电平: 当 SA1、SAC1、SA2、SAC2 导通时, A 相绕组两端电压为 $+1/2U$, 如图 2(b)、图 2(c) 所示, 是 T 型变换器运行的中间状态, 可实现 T 型变换器的分压电容的平衡。图 2(b) 中电流流入分压电容中性点, 中性点电压上升; 图 2(c) 中电流流出分压电容中性点, 中性点电压下降。

0 电平: 图 2(d)~2(f) 所示的 3 种工作状态下电机绕组电压为零。这 3 种状态对分压电容中性点电压没有影响。

$-1/2U$ 电平: 当 SA2 导通, SA1、SAC1、SAC2 均关断(二极管 VD_{AC} 续流)情况下, 以及 SAC1 导通, SA1、SA2、SAC2 均关断(二极管 VDA 续流)情况下, A 相绕组两端电压为 $-1/2U_{dc}$, 如图 2(g)、图 2(h) 所示。该状态也是 T 型变换器运行的中间状态, 可实现 T 型变换器的分压电容的平衡。图 2(g) 中中性点电压下降, 图 2(h) 中中性点电压上升。

$-U$ 电平: 当开关管均关断, 只有二极管 VDA 和 VDAC 续流时, 相绕组两端起始电压为 $-U_{dc}$, 如图 2(i) 所示。电机绕组的去磁能量给 2 个分压电容充电, 使得分压电容电压升高, 加速电机绕组电流退磁过程。状态结束时电容电压为 $U_{dc}+U_{boost}$ 。

由上述分析可知, 变换器可产生 5 种电平。

更多的电压状态会提高 SRM 转矩性能, 获得更好的输出转矩特性。

1.2 制动模式

在电机电感下降区间通电流将产生制动转矩, 存在 2 种制动模式, 如图 3 所示。图 3(a) 的状态与电动模式的图 2(a) 类似, SA1 及 SAC2 导通, 但此时的励磁能量由电池提供, 二极管 VD_{x2} 导通。当 S_{xy} 施加触发信号, 其余开关管均关断时, 在电机电感下降区结束前将产生制动转矩, 电流通过二极管 VDA、VDAC、 VD_{x1} 、开关管 S_{xy} 流动, 如图 3(b) 所示。电机绕组存储的能量将回

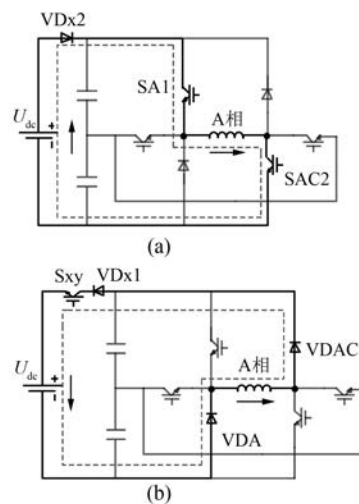


图3 制动模式

馈至电池,实现快速的制动过程。

表 1 所示为新型 T 型变换器在电动和制动工

作模式下的工作切换流程,其中 $+1/2U$ 及 $-1/2U$ 电平用作电容电压的平衡。

表 1 新型 T 型变换器输出电压状态切换方法

| 电动模式 | | | 制动模式 | | |
|--------------------------|---|---|---|---|---|
| 励磁阶段+U | 中间斩波阶段+U、0 | 终了阶段-U | 起始励磁阶段+U | 中间阶段-U、0 | 终了阶段-U |
| 基速 0→+U (e)→(a) | +U→+1/2U→0→ +1/2U→+U (a)→(b)→(e)→(b)→(a) (a)→(c)→(f)→(c)→(a) | 0→-1/2U→-U (d/f/e)→(g/h)→(i) +U→-U (a)→(i) | 0→+U (e)→(a) 0→+1/2U→+U (e)→(b)→(a) (f)→(c)→(a) | -U→-1/2U→0→-1/2U→-U (i)→(g)→(d)→(g)→(i) (i)→(h)→(f)→(h)→(i) | 0→-1/2U→ -U (d/f/e)→(g/h)→(i) +U→-U (a)→(i) |
| 基速 以上 0→+U (e)→(a) | 不存在 | +U→-U (a)→(i) | 0→+U (e)→(a) | 不存在 | +U→-U (a)→(i) |

说明:()内状态为图 2 所示不同模式下变换器的开关状态;(d)状态下导通损耗较大,避免使用。

1.3 新型 T 型变换器与 NPC 变换器的对比

从图 2、图 3、表 1 可看出,本文所提出的改进型 T 型变换器结构在某相工作时只有 2 个器件在导通(开关管或二极管,不考虑附加电路),而文献[7]提出的 NPC 变换器则存在多个(3 个或 4 个)器件导通的状态,可知在导通损耗方面,新型 T 型变换器低于 NPC 变换器。在开关损耗方面,NPC 变换器的电力电子开关器件承受电压均为 $+1/2U$,而所提新型 T 型变换器部分器件承受电压为 U ,开关损耗稍大于 NPC 变换器。综合导通损耗和开关损耗,可知新型 T 型变换器比 NPC 的效率更高^[8]。

变换器中开关器件数量方面,除去附加电路,新型 T 型变换器共需 12 个电力电子开关,6 个二极管,而 NPC 变换器则共需 12 个电力电子开关和 12 个二极管。新型 T 型变换器所用器件数量较少,但所用电力电子开关耐压高于 NPC 变换器。因此,综合比较,二者成本接近。

此外,T 型变换器在开关器件出现开路故障情况下可在两电平模式下降额运行,而 NPC 变换器则需要改变电路结构才可以实现容错控制^[9]。综上所述,与文献[7]所提出的方案相比,本文提出新型 T 型逆变器更具有优势。

2 仿真研究及分析

根据文中所述控制方法,采用 MATLAB/Simulink 仿真软件对额定功率为 1.25 kW 的四相 8/6 极 SRM 进行了基于新型 T 型功率变换电路

的仿真研究。直流母线电压设定为 100 V,分压电容选为 60、90 μF 2 种情况对比。电机控制方式为基速以下采用电流斩波模式控制,基速以上采用角度控制。

图 4 所示为 SRM 系统测试波形。图 4(a)、图 4(b)分别为基速以下和基速以上相电流波形。图 4(c)为容值分别为 60、90 μF 下分压电容 C_u 的电压波形,可见选择合适的分压电容,可使得分压

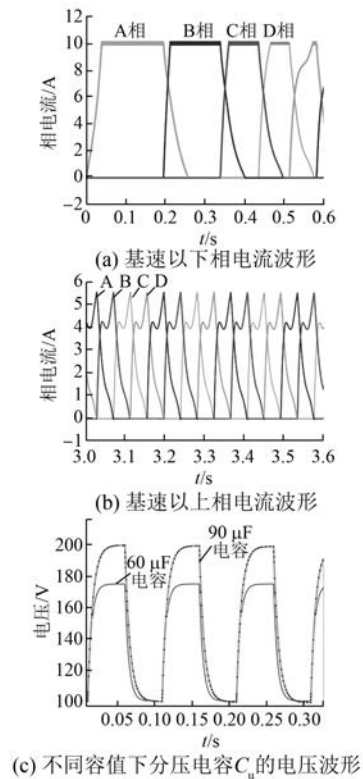


图 4 SRM 系统测试波形

值,达到了快速励磁和快速退磁的目的。

图 5 所示为不采用升压电路和采用升压电路的电机转速波形对比。图 6 所示为不采用升压电路和采用不同容值升压电路的电机转矩-转速关系。当采用 $90 \mu\text{F}$ 电容时,电机的基速由 600 r/min 提升至 880 r/min 。从图 5、图 6 可以看出,采用新型 T 型变换器可以增大 SRM 的恒转矩区域,从而在不增加电机电流的前提下提升电机的功率潜力,提高 SRM 的功率密度比。

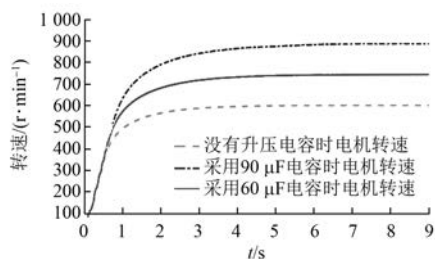


图 5 电机转速波形对比

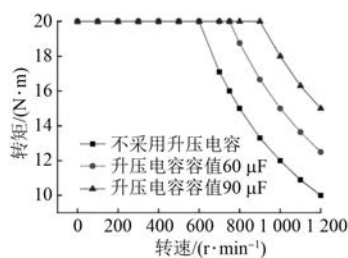


图 6 电机转矩-转速关系

3 结 语

本文针对四相 SRM 提出了一种新型 T 型变换器。该电路结构可实现电机的多电平运行,且具备电压升压功能,实现了电机的快励磁和续流过程,减少了转矩脉动提升电机转速,提高了输出功率和效率。另外,新型 T 型变换器比 NPC 电路在效率和容错性等方面更具优势。仿真分析结果验证了所提新型 T 型变换器拓扑及控制方法的有效性。

【参 考 文 献】

- [1] KRISHNAN R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [2] 常中意. 用于开关磁阻电机驱动系统的多电平功率变换器拓扑及控制研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [3] 李珍国, 魏艳君, 阚志忠, 等. 基于四电平功率变换电路的开关磁阻电机瞬时转矩控制 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 144.
- [4] DESSOUKY Y, WILLIAMS B, FLETCHER J. A novel power converter with voltage-boosting capacitors for a four-phase switched reluctance motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 815.
- [5] CHITHRABHANU A, VASUDEVAN K. A novel SRM drive employing a buck-boost energy recovery stage [C] // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018.
- [6] 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.
- [7] ABDEL-AZIZ A A, AHMED K H, WANG S, et al. A neutral-point diode-clamped converter with inherent voltage-boosting for a four-phase SRM drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5313. DOI: 10.1109/TIE.2019.2931268
- [8] AZER P, BAUMAN J. An asymmetric three-level T-type converter for switched reluctance motor drives in hybrid electric vehicles [C] // 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2019.
- [9] CHOI U M, LEE K B, BLAABJERG F. Diagnosis and tolerant strategy of an open-switch fault for T-type three-level inverter systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(1): 495.