

## 四相开关磁阻电机的容错型功率变换器

肖 丽<sup>1</sup>, 孙鹤旭<sup>1</sup>, 刘卫鹏<sup>1</sup>, 范书瑞<sup>2</sup>, 张培培<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 控制科学与工程学院, 天津 300130;

2. 河北工业大学 信息工程学院, 天津 300130)

**摘要:** 在功率管发生开路故障时,为了使开关磁阻电机(switched reluctance motor, SRM)功率变换器的电机可继续保持正常功率,基于 Maxwell + Simplorer 环境,分析了功率变换器主要故障对电机性能的影响,并以不对称半桥型功率变换器为基础,针对功率开关管开路故障,提出了一种容错型功率变换器,即用不相邻正常相桥臂上的器件代替故障器件,有效地隔离了故障元件. 结果表明:该功率变换器具有良好的容错性能,能够使电机在故障后继续正常运行.

**关键词:** 容错; 功率变换器; 不对称半桥型结构; 开路故障; 开关磁阻电机

**中图分类号:** TM 352

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254 - 0037(2014)07 - 1054 - 06

## Fault Tolerant Power Converter for Four-phase Switched Reluctance Motor

XIAO Li<sup>1</sup>, SUN He-xu<sup>1</sup>, LIU Wei-peng<sup>1</sup>, FAN Shu-rui<sup>2</sup>, ZHANG Pei-pei<sup>1</sup>

(1. School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** To make the power converter of switched reluctance motor (SRM) continue to maintain the normal power when the open-circuit failure occurs, the effects of main faults of the power converter on motor's performances were analyzed in the environment of Maxwell + Simplorer and a fault tolerant power converter based on asymmetric half-bridge power converter was presented, which can make the device with non-adjacent normal phase bridge instead of faulty devices and effectively isolate the faulty devices. Results show that the power converter has good fault-tolerant performance and can enable the motor to operate normally after failure.

**Key words:** fault tolerant; power converter; asymmetric half-bridge; open-circuit fault; switched reluctance motor

开关磁阻电机(switched reluctance motor, SRM)结构简单、可靠性高,与其他类型电机相比,具有一定容错性能<sup>[1]</sup>. 由于该电机系统在磁路和电路上相互独立,电机一相或多相出现故障后,其余相不受故障相影响,可以继续工作,但 SRM 容错能力也是有限的<sup>[2]</sup>. 目前,国内外已成功研制出电机定子为“C”形、“E”形及混合气隙模块化形式的 SRM<sup>[3]</sup>,进

一步提高了 SRM 容错能力. 功率变换器作为开关磁阻电机驱动系统(switched reluctance drive system, SRD)的关键部分,是开关磁阻电机可靠运行的重要保障<sup>[4]</sup>. 由于功率变换器中的器件长期进行高频工作,会出现严重发热、受损等现象. 因此,对 SRM 容错型功率变换器的研究非常重要.

文献[5]已将 SRD 功率变换器、供电电流、位置

收稿日期: 2013-03-15

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAA07B04); 河北省自然科学基金资助项目(F2013202102)

作者简介: 肖 丽(1987—),女,博士研究生,主要从事现代传动方面的研究, E-mail: xiaoli060755@126.com

检测器存在的故障进行详细地总结、分类;文献[6-8]分析了 SRM 本体及其驱动系统短路、开路等故障对电机运行性能的影响,对电机正常运行及故障运行情况下电流、转矩性能进行对比;文献[9]主要介绍了 SRM 功率变换器中开关管和二极管短路和开路故障对电机供电电流、相电流及输出转矩的影响;文献[10]通过对比功率变换器发生故障后下方开关管电压的变化值实现了三相 SRM 故障检测,仅对三相 SRM 功率变换器的短路提出了容错控制方案,且此方案不适用于四相 SRM 功率变换器;文献[11]基于傅里叶变换对三相 SRM 功率变换器故障后相电流进行频谱分析,提取出故障检测信号,并提出变角度法实现功率管短路故障的容错控制;文献[12]通过对比功率变换器故障前、后各相电流、转矩的变化情况提出了基于给定电流与转矩实时调节的容错控制方法,调节方法较为复杂. 现有国内、外文献对 SRM 功率变换器容错控制方案的研究需进一步完善.

目前,SRD 常采用不对称半桥结构及 H 桥型的功率变换器. 从控制角度而言,H 桥型功率变换器在任一时刻必须保证两相导通,中性点电压在换相时易有较大波动<sup>[13]</sup>. 不对称半桥结构能够实现相与相间完全独立的电流控制,可使系统具有一定的容错性能,每相的 2 个开关管可进行 4 种状态控制,易采用多种控制算法,控制较为灵活. 本文基于不对称半桥功率变换器结构,提出一种四相 SRM 的容错型功率变换器. 在一相开关管发生开路故障后,能够利用与之不相邻的正常相开关管代替故障开关管,有效地隔离了故障器件,进而使故障相恢复正常运行,实现容错控制.

## 1 功率变换器开路故障模式分析

SRM 功率变换器的拓扑结构如图 1 所示. 以 A 相为例,A 相导通时,主开关器件  $Q_1$  和  $Q_2$  都处于导通状态,直流电源  $U_d$  加至 A 相绕组. 为减小转矩脉动及开关损耗,A 相下开关器件  $Q_2$  始终保持导通状态,上开关器件  $Q_1$  进行斩波控制. 换相时, $Q_1$  与  $Q_2$  同时关断,A 相通过正向导通的二极管  $VD_1$  与  $VD_2$  退磁,将能量返回直流电源. 本文基于 Maxwell + Simplerer 仿真软件建立 SRD 系统,分别对 A 相桥臂上、下开关开路故障进行分析.

功率变换器的功率管开路故障主要包括各相上、下开关器件开路及二极管开路. 二极管开路故障同样使相电流丧失续流回路,在此不作进一步介

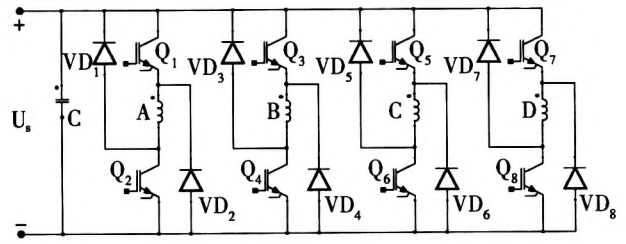
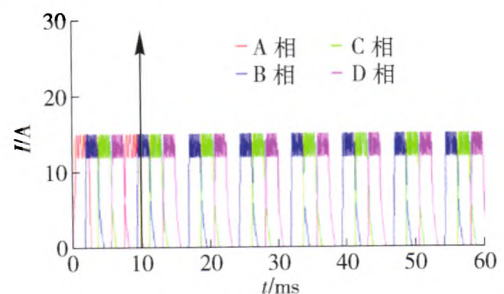


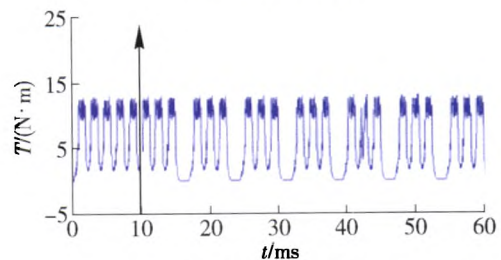
图 1 功率变换器拓扑结构

Fig. 1 Topology of power converter

绍. A 相桥臂的上开关器件  $Q_1$  或下开关器件  $Q_2$  的开路故障都将导致故障相 A 的电流为 0,且无转矩输出. 在过流保护限值范围内,控制系统通过增大正常相电流维持电机继续运行,但转矩波形会产生明显的周期性“死区”,转矩脉动也会增大,降低了系统的稳定性能,如图 2 所示.



(a) 电流仿真波形



(b) 转矩仿真波形

图 2 开关器件短路及开路故障仿真波形

Fig. 2 Fault simulation waveforms under switching device short circuit and open-circuit

## 2 容错型功率变换器

文献[11]已对功率变换器中上、下开关管的短路故障提出了变导通角容错控制策略. 本文针对容错型功率变换器上、下开关管的开路故障进行容错控制. 图 3 给出了该功率变换器的拓扑结构,从中可看出,该结构在普通不对称半桥功率变换器的基础上增加了少量的元件及连线. 电机正常运行时,开关管 IGBT1、IGBT2、IGBT3、IGBT4 均处于未导通状态,即 A 相与 C 相、B 相与 D 相间毫



无联系. 以 A 相为例, 若检测装置诊断出 A 相桥臂的上开关器件  $Q_1$  开路, 则控制系统命令 IGBT1、 $Q_5$  导通, 母线电流不再经过  $Q_1$ , 而是直接流向  $Q_5$ , 再经过 IGBT1 流入 A 相绕组, 具体回路如图 3 中  $L_1$  (红色虚线) 所示; 若检测装置诊断出 A 相桥臂的下开关管  $Q_2$  开路, 则控制系统命令 IGBT3 和  $Q_6$  导通, A 相绕组中的电流不再经过  $Q_2$ , 而是经过 IGBT3 及  $Q_6$  流入电源, 具体回路如图 3 中  $L_3$  (红色虚线) 所示. 再以 C 相为例, 若检测装置诊断出 C 相桥臂的上开关器件  $Q_5$  开路, 则控制系统命令 IGBT2、 $Q_1$  导通, 母线电流不经过  $Q_5$ , 而直接流向  $Q_1$  再经过 IGBT2 流入 C 相绕组, 具体回路如图 3 中  $L_2$  (蓝色虚线) 所示; 若检测装置诊断出 C 相桥臂的下开关器件  $Q_6$  开路, 则控制系统命令 IGBT4 和  $Q_2$  导通, A 相绕组中的电流不再经过  $Q_6$ , 而是经过 IGBT4 及  $Q_2$  流入电源, 具体回路如图 3 中  $L_4$  (蓝色虚线) 所示. B 相与 D 相容错原理亦同, 不再介绍. 这便实现了用不相邻相的正常开关器件代替故障器件, 隔离了发生开路故障的器件, 而又不破坏各相续流回路, 从而使故障相可以继续正常运行.

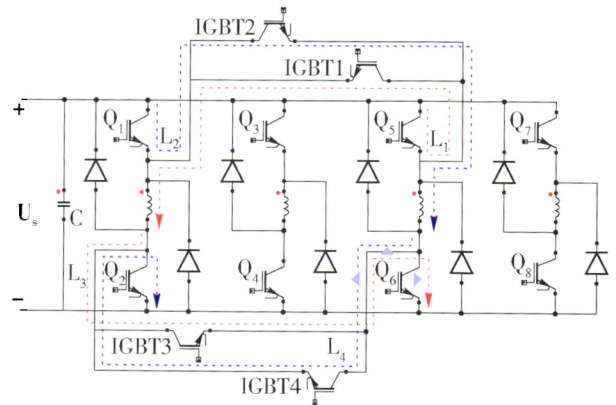


图3 容错型功率变换器拓扑结构  
Fig.3 Topology of fault-tolerant power converter

### 3 基于容错型功率变换器的SRD故障仿真

本文基于 Matlab/Simulink 仿真环境, 搭建具有容错型功率变换器的 SRD 仿真系统, 其中, 容错型功率变换器故障仿真模型如图 4 所示. 鉴于篇幅原因, 本文仅对以下 2 种情况进行容错仿真介绍: 情况 1, 仅有 A 相桥臂上功率开关管  $Q_1$  发生开路故障; 情况 2, A 相桥臂上功率开关管  $Q_1$  与 C 相桥臂上功率

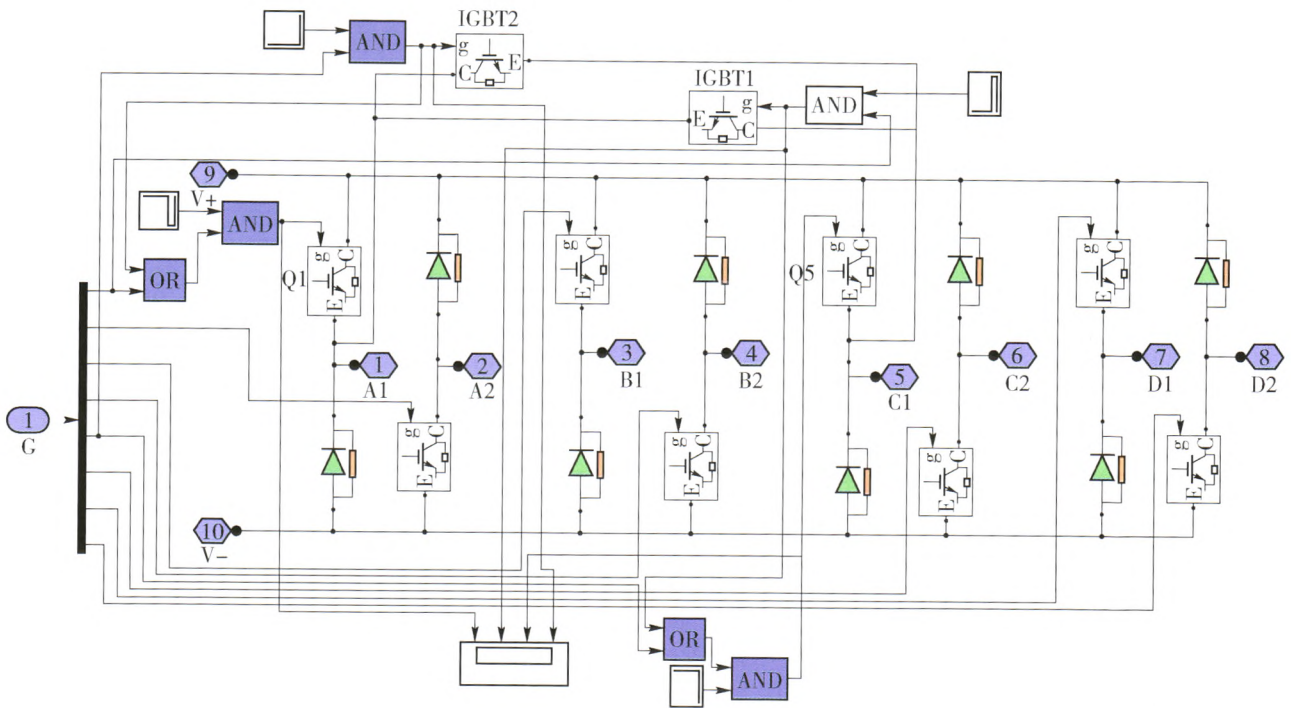


图4 容错型功率变换器仿真模型  
Fig.4 Simulation model of fault-tolerant power converter

开关管  $Q_5$  相继发生开路故障, 故障容错仿真模型如图 4 所示, 速度给定 1 500 r/min, 负载转矩为 5 N·m, 开通角为 37.5°, 关断角为 52.5°.

情况 1 电机在单相励磁条件下, 0.4 s 时 A 相桥臂上开关器件  $Q_1$  突发开路故障. 图 5(a)(b)(c) 分别为采用普通不对称半桥结构功率变换器的电

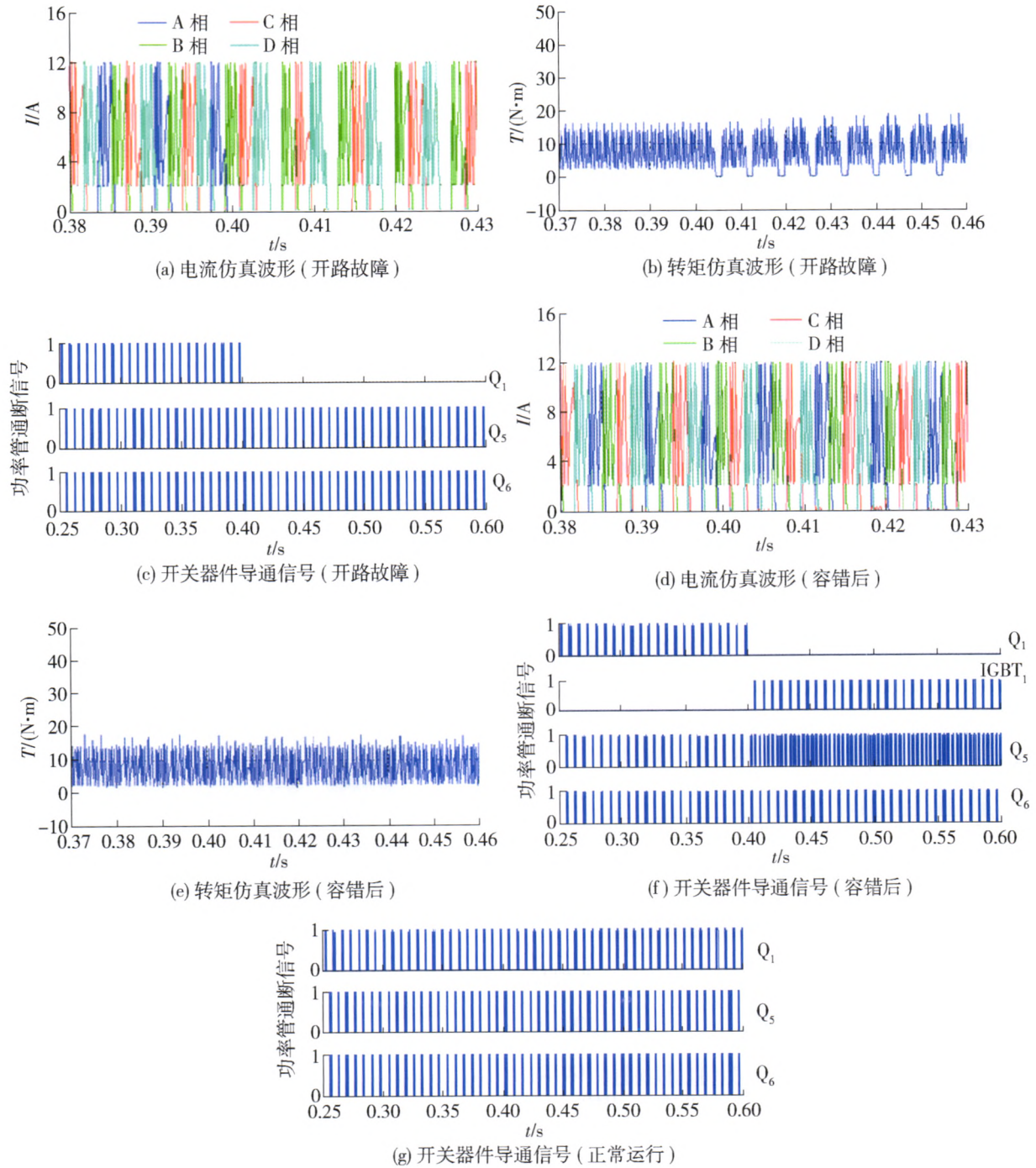


图 5 情况 1 仿真试验结果

Fig. 5 Simulation results of case 1

流、转矩及开关器件导通信号的仿真曲线。从图 5 (a)(b)(c)中可看出,  $Q_1$  突发开路故障(即 0.4 s 后), 开关管  $Q_1$  的触发信号由 1 变为 0, A 相电流立刻变为 0 A, 且永久消失, 但 B、C、D 三相仍继续正常运行, 转矩会产生明显的周期性“死区”。图 5(d)(e)(f)分别为采用容错型功率变换器的电流、转矩及开关器件导通信号的仿真曲线。从图 5(d)(e)(f)中可看出, 0.4 s 开路故障发生后, 由于采用 C 相

桥臂上方的开关器件  $Q_5$  替代了故障器件  $Q_1$ , A 相电流并没有消失, 而是与正常运行的电流波形一致, 且转矩也无死区出现。图 5(g)反映了电机无故障正常运行下各开关器件的导通情况。对比 3 幅器件通断图, 可发现, 开关器件  $Q_6$  的通断情况(每幅器件通断图中的最后一屏曲线)相同, 故容错型功率变换器未改变  $Q_6$  的通断节奏。图 5(f)中的第 1 屏曲线为开关器件  $Q_1$  的触发信号, 第 2 屏曲线为 IGBT1



器件的触发信号,故障前,该器件不工作,故障后,该器件按照正常运行时开关管  $Q_1$  的通断节奏工作,且上述 2 条曲线叠加后恰为图 5(g) 中正常运行时  $Q_1$  的通断曲线. 图 5(f) 中的第 3 条曲线为开关器件  $Q_5$  的通断情况,可见该器件在故障前按照电机正常运行时的通断状态工作,但该曲线在故障后为图 5(g) 中  $Q_5$  通断曲线与 IGBT1 器件通断曲线的叠加,由此可知,故障后开关器件  $Q_5$  不仅完成 C 相绕组正常导通时的通断要求,同时也完成 A 相绕组正常导通时的通断要求,实现了开路故障的容错控制.

**情况 2** 电机单相励磁下, A 相桥臂与 C 相桥臂上的开关器件  $Q_1$  与  $Q_5$  分别在 0.40 s 和 0.51 s 时突发开路故障,但控制器在 0.47 s 时驱动  $Q_1$  恢复正常. 图 6(a)(d) 为 2 个开关管发生故障后的通断情况,故障发生后,其通断信号变为 0. 图 6(b) 为电机在容错型功率变换器驱动下,开关器件  $Q_1$ 、IGBT1、 $Q_5$ 、IGBT2 的通断状态. 从图 6(b) 中可看出,  $Q_1$  在 0.40 s 发生开路故障后,停止工作,开关管 IGBT1 导通,使开关器件  $Q_5$  代替  $Q_1$ , 电流通过回路  $L_1$  流入 A

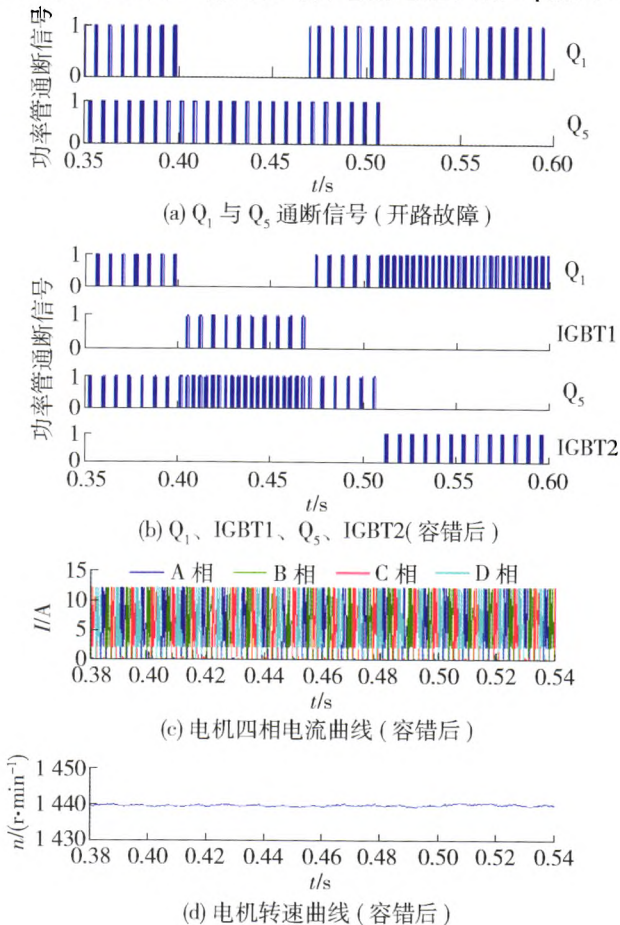


图 6 情况 2 仿真试验结果

Fig. 6 Simulation results of case 2

相绕组,即 A 相电流恢复正常. 控制器在 0.47 s 时命令开关器件  $Q_1$  恢复正常. 0.51 s 时  $Q_5$  发生开路故障,停止工作,开关器件 IGBT2 导通,使开关器件  $Q_1$  代替  $Q_5$  工作,电流通过回路  $L_2$  流入 C 相绕组,即 C 相电流恢复正常. 图 6(c)(d) 为容错后,各相电流及转速波形,可见,电机 A、C 两相电流及转速均恢复正常,该功率变换器对开路故障实现了容错控制,且其容错功能具有双向性,即  $Q_1$  发生故障可用  $Q_5$  代替,  $Q_5$  发生故障可用  $Q_1$  代替.

#### 4 实验结果及验证

本文以 8/6 极四相 SRM 为样机,额定功率为 2.2 kW,额定电压为 260 V,额定转速为 1500 r/min. 负载转矩为  $7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、开通角  $\theta_{\text{on}}$  及关断角  $\theta_{\text{off}}$  仍分别为  $25^\circ$  和  $55^\circ$ . 选取 DSP (TMS320LF2407) 为控制器核心,与 CPLD 共同构成硬件电路,功率变换器的主开关管选取日本富士公司生产的 EXB841 快速型 IGBT 专用驱动模块. 实验平台如图 7 所示.

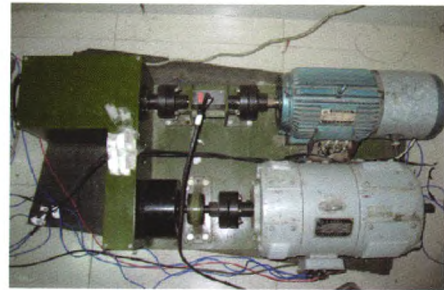
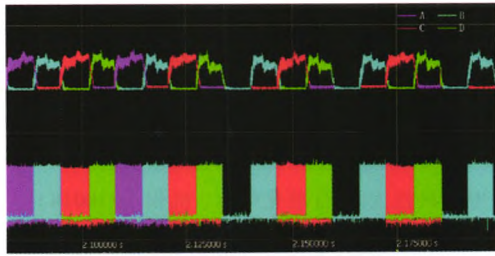


图 7 实验平台

Fig. 7 Experimental platform

电机在 2.13 s 时 A 相桥臂上开关管  $Q_1$  发生开路故障,图 8(a) 为采用普通不对称半桥结构功率变换器的实验结果,图 8(a) 中第 1 屏曲线为四相电流波形,第 2 屏曲线为各相桥臂上开关管通断信号. 从图 8(a) 中可见,  $Q_1$  开路后, A 相电流消失,  $Q_1$  管导通信号变为 0. 图 8(b) 为采用本文容错型功率变换器的实验结果,图 8(b) 中第 1 屏曲线仍为四相电流曲线,第 2 屏曲线为 C 相桥臂上开关管  $Q_5$  通断信号,第 3 屏曲线为图 3 中 IGBT1 管通断信号. 从图 8(b) 中可见,故障发生后,控制器驱动 IGBT1 导通,使母线电流经过开关管  $Q_5$  和 IGBT1 流入 A 相绕组,即用不相邻 C 相的开关管  $Q_5$  代替了发生故障的开关管  $Q_1$ ,实现了容错控制,因此, A 相电流没有消失且正常,同时未对 C 相电流造成影响.





(a) 四相电流及上开关管控制信号实验图(开路故障)

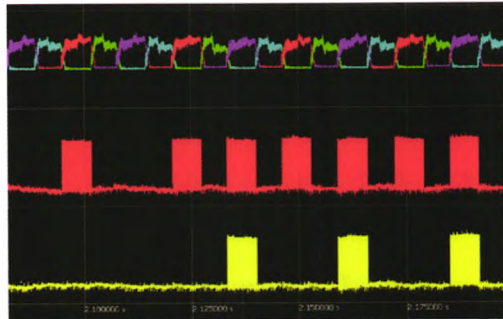
(b) 四相电流及 $Q_5$ 、IGBT1控制信号实验图(容错后)

图8 开路运行与容错后四相电流及开关管控制信号实验结果对比

Fig. 8 Comparison of current and on-off signal of switching devices under open-circuit fault and fault tolerance

## 5 结论

1) 本文针对功率管开路故障,提出一种容错型功率变换器,即用不相邻桥臂上的同位功率管代替故障元件,有效隔离了故障元件,且不影响非故障相的正常运行,使电机各相电流及转速恢复正常。

2) 仿真与实验的研究结果证明了该功率变换器具有良好的双向容错性能。

3) 该容错型功率变换器对各相桥臂上的所有单开路故障及相邻相桥臂的单故障、多故障均具有容错能力,但当不相邻桥臂上的2个同位开关管同时发生开路故障,该变换器尚不能对此情况进行容错控制,这是后续将解决的问题。

### 参考文献:

- [1] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 1-2.
- [2] 卢胜利. 开关磁阻电机系统的故障诊断方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学信息与电气工程学院, 2010. LU Sheng-li. Study on the fault diagnosos methods of switched reluctance motor system[D]. Xuzhou: School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, 2010. (in Chinese)
- [3] 陈小元, 邓智泉, 连广坤, 等. 高容错性模块化定子开关磁阻电机[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(6): 8-12.
- [4] 王喜莲, 王旭东, 刘宇华, 等. 开关磁阻电动机新型功率变换器及仿真分析[J]. 电机与控制学报, 2000, 4(2): 102-105. WANG Xi-lian, WANG Xu-dong, LIU Yu-hua, et al. A novel power converter and simulation of switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Control, 2000, 4(2): 102-105. (in Chinese)
- [5] GPALAKRISHNAN S, OMEKANDA A M, LEQUESNE B. Classification and remediation of electrical faults in the switched reluctance drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(2): 479-486.
- [6] STEPHENS C M. Fault detection and management system for fault tolerant switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27(6): 1098-1103.
- [7] CHEN Hao, ZHANG Chao. Analysis of electrical faults for switched reluctance motor driver[C]//3rd World Congress on Intelligent Control and Automation. Hefei: [s. n.], 2000: 666-669.
- [8] GAMEIRO N S, MARQUES CARDOSO A J. Analysis of SRM drives behaviour under the occurrence of power converter faults[C]//IEEE Int Symp Industrial Electronics (ISIE). Ann Arbor: [s. n.], 2003: 821-825.
- [9] LEE Kui-Jun, PARK Nam-Ju, KIM Kyung-Hwan, et al. Simple fault detection and tolerant scheme in VSI-fed switched reluctance motor [C] // Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, PESC 37th IEEE. [S. l.]: IEEE, 2006: 1-6.
- [10] LU Sheng-li, CHEN Hao, ZAN Xiao-shu. Fault diagnosis and fault-tolerant control strategy for power converter of switched reluctance motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009(11): 200-206.
- [11] GAMEIRO N S, CARDOSO A J M. Fault tolerant control strategy of SRM drives[C]// International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). [S. l.]: IEEE, 2008: 301-306.
- [12] 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): 12-16. GAN Chun. Research and design for new power converter circuit of switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Control Application, 2011, 38(3): 12-16. (in Chinese)
- [13] 何林, 孙鹤旭, 高洁, 等. SRM的两种功率拓扑结构的性能研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(3): 35-37. HE Lin, SUN He-xu, GAO Jie, et al. Performance research of two topologies of power converter for SRM [J]. Power Electronics, 2011, 45(3): 35-37. (in Chinese)

(责任编辑 刘 潇)