

功率变换器的容错设计及验证

周 政¹, 刘勇智¹, 宋金龙¹, 马卫民², 王真亮³

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 94354 部队, 山东 济宁 272000; 3. 航空大学 95926 部队, 长春 130051)

摘 要: 为提高航空开关磁阻发电系统的可靠性, 对系统中功率变换器常见的开路故障进行分析。结合不对称半桥式功率变换器各相独立的优势, 设计一种容错型功率变换器。利用空闲相功率器件代替故障相功率器件实现功率变换器的开路故障容错。搭建容错型开关磁阻起动/发电系统的仿真实验平台和硬件实验平台进行实验验证, 结果表明, 该容错型功率变换器具有较好的容错性能, 容错后系统的输出电压最大脉动幅度在 6 V 以内, 满足标准的要求。

关键词: 开关磁阻发电系统; 功率变换器; 容错性; 开路故障; 输出电压

中文引用格式: 周 政, 刘勇智, 宋金龙, 等. 功率变换器的容错设计及验证[J]. 计算机工程, 2017, 43(2): 120-123, 130.

英文引用格式: Zhou Zheng, Liu Yongzhi, Song Jinlong, et al. Fault-tolerance Design and Validation of Power Converter[J]. Computer Engineering, 2017, 43(2): 120-123, 130.

Fault-tolerance Design and Validation of Power Converter

ZHOU Zheng¹, LIU Yongzhi¹, SONG Jinlong¹, MA Weimin², WANG Zhenliang³

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. The Unit of 94354, Jining, Shandong 272000, China; 3. The Unit of 95926, Air University, Changchun 130051, China)

[Abstract] In order to improve the reliability of the Switch Reluctance Generation (SRG) system, several common failures of power converter are analyzed. Combined with the superiority of the independence of asymmetrical bridge power converter, a kind of fault-tolerant power converter is devised. The fault-tolerance power converter makes use of the free-phase power tubes to replace the fault-phase power tubes. A hardware platform and a simulation platform of fault-tolerant switch reluctance starter/generator system are established to validate. Simulation and experiment results show that fault-tolerant power converter has great fault-tolerant performance and the maximum amplitude of the output voltage is less than 6 V which meets the requirements of relevant standard.

[Key words] Switch Reluctance Generation (SRG) system; power converter; fault-tolerant; open-circuit fault; output voltage

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.02.020

0 概述

随着多/全电飞机的不断地发展^[1], 高压直流电源系统成为人们研究的热点。凭借结构坚固、控制灵活和容错性能好的优势, 开关磁阻发电 (Switch Reluctance Generation, SRG) 系统成为航空高压直流电源最受欢迎之一。SRG 系统主要包括开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor, SRM)、控制器、功率变换器、发动机、位置传感器和电流检测器^[2]。目前人们主要研究 SRM 的控制策略^[3-4]和本体结构设计^[5-6], 而忽略了故障诊断和容错控制, 文献[7-8]分

析 SRG 系统中典型的电气故障, 包括 13 种短路故障和 7 种开路故障, 其中功率变换器是 SRG 系统的关键部件, 长期处于高频状态, 其故障率极高。针对功率变换器的故障, 文献[9-11]阐述了 SRM 工作时功率变换器故障对电磁转矩、相电流和转速的影响; 文献[12-14]利用故障前后电流和电压的变化, 形成功率变换器的故障检测和故障诊断方案, 以及提出了变角度法控制, 实现功率管故障的软容错控制。

本文针对 SRG 系统中功率变换器的开路故障进行研究, 分析了功率变换器的故障机理, 根据其工作原理, 设计一种新型功率变换器, 实现功率变换器

作者简介: 周 政 (1993—), 男, 硕士, 主研方向为航空航天电气系统; 刘勇智, 教授; 宋金龙, 硕士; 马卫民, 高级工程师; 王真亮, 助理工程师。

收稿日期: 2015-12-30

修回日期: 2016-03-03

E-mail: zhou_zheng_1@163.com

的开路容错控制,并分别对其进行 Simulink 仿真和 2.2 kW 的样机实物实验验证。

1 功率变换器

功率变换器是 SRG 系统的核心部件,主要是用于控制 SRG 系统的励磁和续流、机械能和电能之间的转换,其拓扑结构^[15]多样,本文采用的三相不对称半桥式功率变换器具有下列优势:1)各相支路相互独立;2)具有的容错性;3)相绕组和主开关串联,避免发生直通短路。

1.1 工作原理

功率变换器的拓扑结构如图 1 所示,由于三相工作原理相同,本文只对 A 相支路进行研究。A 相支路正常工作时,转子和定子相对角为 θ_{on} ,导通上、下功率管 K_{A1} 和 K_{A2} ,由励磁电源向 A 相绕组进行励磁,将电能和机械能转换为磁场能,为了防止 SRM 低速时相电流过大, K_{A1} 进行斩波控制。当转子和定子相对角为 θ_{off} 时,关断 K_{A1} 和 K_{A2} ,绕组与二极管 D_{A1} 和 D_{A2} 形成回路,进入续流发电状态,机械能转换为磁场储能再迅速转换为电能,给电源充电,实现发电功能。SRG 系统的相电流如图 2 所示。由此可见,功率变换器在 SRG 系统中的关键地位,但是功率管的状态的切换频率高,其故障率也高,下面将对功率变换器进行典型的开路故障分析以及系统的输出性能影响。

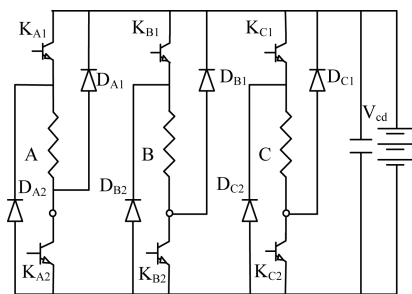


图 1 半桥式不对称功率变换器

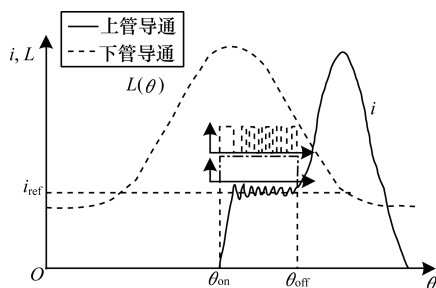


图 2 控制信号和相电流

1.2 故障模式分析

1.2.1 功率管故障

当上、下功率管 K_{A1} 和 K_{A2} 在 1 s 时发生开路故障时,A 相电流通过二极管续流迅速衰减为 0,SRG

系统的容错功能使得 SRG 系统进入缺相运行状态运行。A、B、C 相电流和输出电压如图 3 所示,A 相电流迅速为 0,当负载不变时,B、C 相的电流由 18 A 增大至 25 A;输出电压脉动由 0.5 V 增大至 1.5 V。

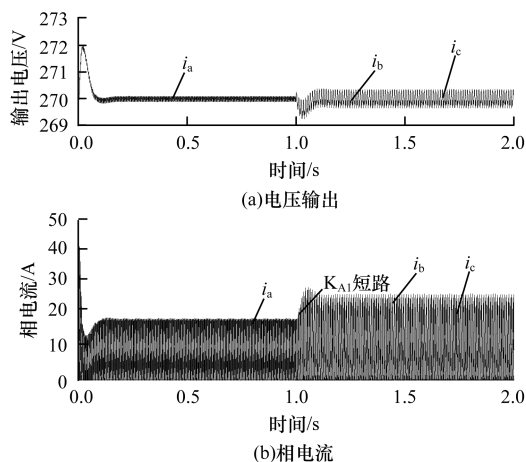


图 3 开关管 K_{A1} 故障状态下的相电流和输出电压

1.2.2 二极管故障

二极管在 SRG 系统中起续流作用,正常情况下续流回路为 D_{A2} -A- D_{A1} 。当二极管 D_{A1} (D_{A2}) 出现开路故障时,续流回路为 D_{A2} -A- K_{A2} 回路。A 相电流缓慢下降直至下一周期,使得三相电流同时增大。如图 4 所示,相电流的幅值迅速由 18 A 增大至 52 A,并且输出电压的纹波系数达到 6% 左右。

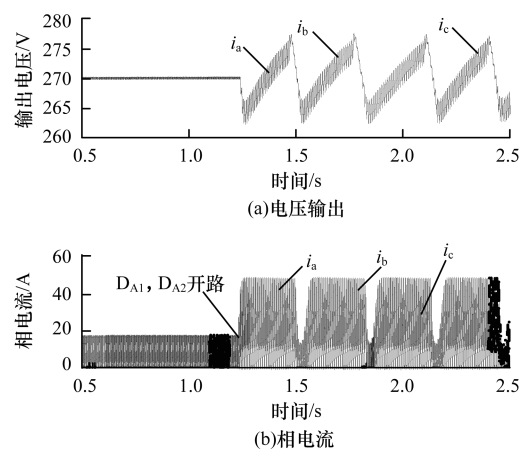


图 4 二极管 D_{A1} , D_{A2} 故障状态下的相电流与输出电压

2 功率变换器的容错设计

SRG 系统的三相电流示意图如图 5 所示,根据各相具体工作情况,将一个周期分为 3 种状态(励磁阶段、发电阶段和空闲阶段)和 6 个区间。各区间工作状态如表 1 所示,始终存在至少一相处于空闲状态,本文利用空闲相的器件代替故障

相的器件,设计一种容错型功率变换器,如图 6 所示,从而实现 SRG 系统的故障容错,具体控制策略如表 2 所示。

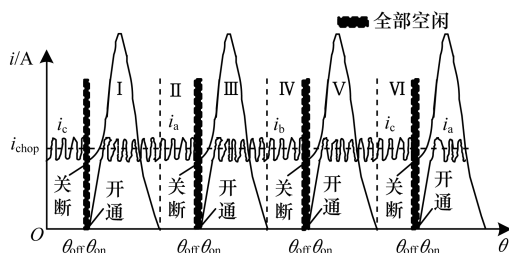


图 5 相电流示意图

表 1 工作状态和区间

序号	A 相	B 相	C 相	工作器件			
I	励磁	空闲	发电	K_{A1}	K_{A2}	D_{C1}	D_{C2}
II	励磁	空闲	空闲	K_{A1}	K_{A2}		
III	发电	励磁	空闲	D_{A1}	D_{A2}	K_{B1}	K_{B2}
IV	空闲	励磁	空闲	K_{B1}	K_{B2}		
V	空闲	发电	励磁	D_{B1}	D_{B2}	K_{C1}	K_{C2}
VI	空闲	空闲	励磁	K_{C1}	K_{C2}		

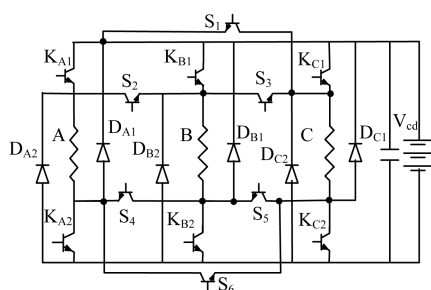


图 6 容错型功率变换器

表 2 容错控制策略

故障器件	容错开关	容错器件	故障器件	容错开关	容错器件
K_{A1}	S_1	K_{C1}	D_{B1}	S_4	D_{A1}
K_{A2}	S_6	K_{C2}	D_{B2}	S_2	D_{A2}
D_{A1}	S_6	D_{C1}	K_{C1}	S_3	K_{B1}
D_{A2}	S_1	D_{C2}	K_{C2}	S_5	K_{B2}
K_{B1}	S_2	K_{A1}	D_{C1}	S_5	D_{B1}
K_{B2}	S_4	K_{A2}	D_{C2}	S_3	D_{B2}

3 仿真和实验验证

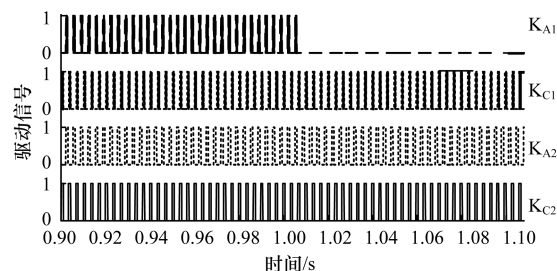
3.1 仿真验证

基于实验室已有的 SRS/G 系统的实验平台^[3], 对该容错型功率变换器分别进行仿真验证和实验验证。基于 Matlab/Simulink 和 Ansoft/Maxwell 仿真环境搭建了容错型 SR 起动/发电系统非线性模型,

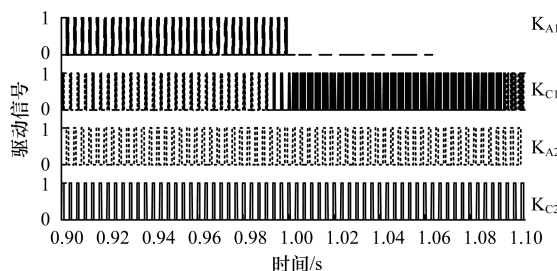
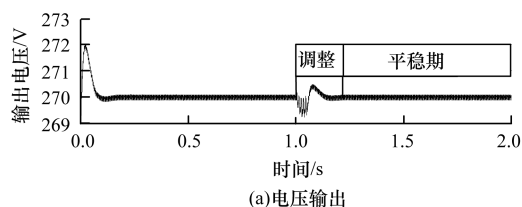
并进行相关仿真实验。

3.1.1 K_{A1} 开路故障

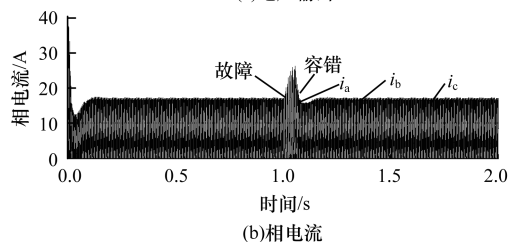
SRG 系统的输入转速为 12 000 rpm, 正常稳定运行 1 s, 设置 K_{A1} 发生开路故障, K_{A1} , K_{A2} , K_{C1} , K_{C2} 的驱动信号如图 7 所示。

图 7 K_{A1} 开路故障时驱动信号

K_{A1} 的驱动信号保持为 0, K_{A2} , K_{C1} , K_{C2} 正常进行工作, 其相电流和输出电压如图 3 所示。接入容错型功率变换器, 对其进行再次仿真, K_{A1} , K_{A2} , K_{C1} , K_{C2} 的驱动信号如图 8 所示, 其各相电流和输出电压如图 9 所示。

图 8 K_{A1} 容错后驱动信号

(a) 电压输出

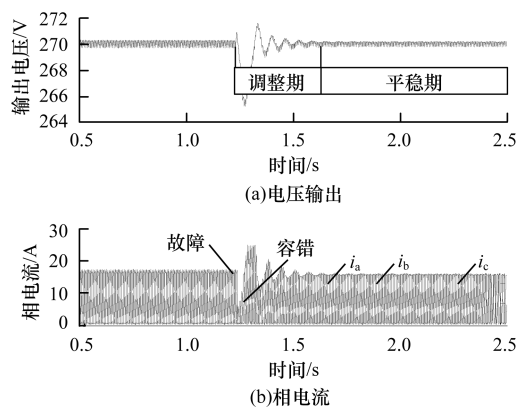


(b) 相电流

图 9 K_{A1} 容错后相电流和输出电压

3.1.2 D_{A1} , D_{A2} 开路故障

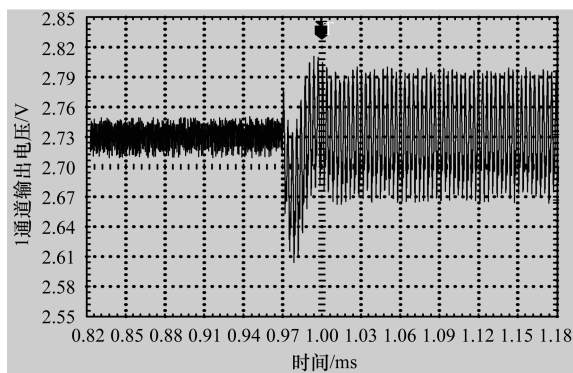
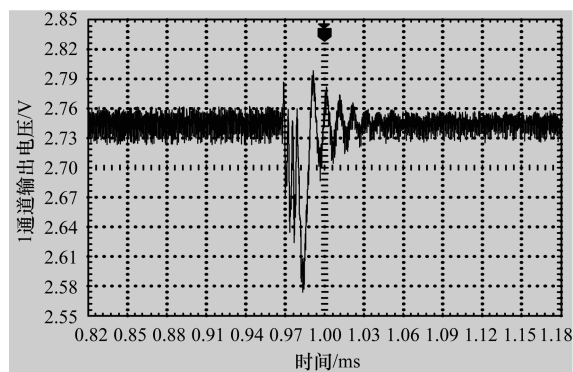
SRG 系统正常稳定运行 1 s, 设置 D_{A1} , D_{A2} 发生开路故障, 其输出电压和相电流如图 4 所示; 控制保护器使得 SRG 系统工作在缺相运行状态下。接入容错型功率变换器, 导通容错开关 S_1 和 S_6 , D_{C1} , D_{C2} 代替 D_{A1} , D_{A2} , 使得 A 相支路能够正常运行发电, 相电流和输出电压波形如图 10 所示。

图 10 D_{A1} , D_{A2} 容错后相电流和输出电压

3.2 实验验证

本文选取 TMS320LF2407DSP 为核心的数字控制器,与 CPLD 等机构共同构成硬件电路,主功率管选取快速型 IGBT 专用驱动模块,数据采集使用 DS1102D 型号示波器。通过外部继电器人为控制功率管驱动信号模拟系统的开路故障。

SRG 系统启动稳定后,控制继电器使得 K_{A1} 发生开路故障,SRG 系统输出如图 11 所示,输出电压故障后的脉动明显增大,很难满足相关标准的要求。SRG 系统采用该容错型功率变换器时,在系统稳定后, K_{A1} 发生开路故障,控制保护器迅速隔离故障器件,接通相应的容错开关 S_1 ,其容错后输出如图 12 所示。

图 11 K_{A1} 开路故障下的输出电压图 12 K_{A1} 容错后的输出电压

该容错型功率变换器中 K_{A1} 和 K_{C1} 故障前后驱动信号如图 13 所示。由以上实验可知,容错前后输出电压得到相当大的改善,具体如图 14 所示。由图 14 可知,容错后的输出电压纹波系数和最大电流得到较好的改善,几乎与正常运行时的输出性能一致。

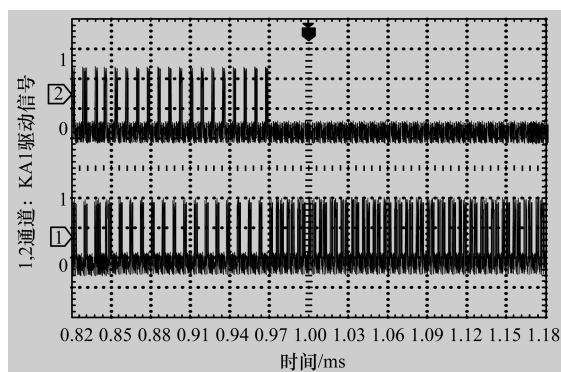


图 13 功率变换器的驱动信号

		输出电压/V			
		最大值	最小值	平均值	纹波系
正常运行		271.8	267.9	270.1	1.44
K_{A1}	故障	273.2	266.4	270.8	2.51
	容错	271.5	268.6	269.9	1.07
D_{A1}	故障	277.1	261.4	268.8	5.84
	容错	271.2	268.5	269.7	1.00

图 14 容错前后输出电压和电流

4 结束语

针对 SRG 系统中功率变化器故障率高的问题,本文结合硬件冗余的思想设计一种容错型功率变换器。通过 Simulink 仿真实验和实物实验的结果表明,该容错型功率换化器具有较强的容错性,容错后的输出电压脉动从 6% 降低至 1%,最大相电流由 76 A 恢复至 25 A,与正常运行的输出基本一致。但该容错型功率变换器也存在以下的不足:1) 器件的增加必然会引起成本的增加;2) 容错后的器件切换频率增加 1 倍。所以,该容错型功率变换器只适用于空中停车等紧急情况,下一步将对上述问题进行改进。

参考文献

- [1] Quigley R E J. More Electric Aircraft[C]//Proceedings of the 8th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. San Diego, USA: [s. n.], 1993: 906-911.
- [2] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [3] 刘勇智,周 政. 基于续电流的功率变换器故障诊断方案研究[J]. 空军工程大学学报,2016,17(3): 63-68.

(下转第 130 页)

- [6] Zakharov V A, Smelyansky R L, Chemeritsky E V. A Formal Model and Verification Problems for Software Defined Networks[J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2014, 48(7): 398-406.
- [7] 魏祥麟, 陈 鸣, 范建华, 等. 数据中心网络的体系结构[J]. 软件学报, 2013, 24(2): 295-316.
- [8] Hu Yannan, Wang Wendong, Gong Xiangyang, et al. BalanceFlow: Controller Load Balancing for OpenFlow Networks[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Cloud Computing and Intelligent Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 780-785.
- [9] Chen Wenbo, Shang Zhihao, Tian Xinning, et al. Dynamic Server Cluster Load Balancing in Virtualization Environment with OpenFlow[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11(7).
- [10] 李 龙, 付斌章, 陈明宇, 等. Nimble: 一种适用于 OpenFlow 网络的快速流调度策略[J]. 计算机学报, 2015, 38(5): 1056-1068.
- [11] 李 勇, 刘学军. 基于 OpenFlow 的 SDN 网络中路由机制研究[J]. 移动通信, 2015, 39(7): 51-56.
- [12] Németh F, Stipkovits Á, Sonkoly B, et al. Towards SmartFlow: Case Studies on Enhanced Programmable Forwarding in OpenFlow Switches[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 85-86.
- [13] Tootoonchian A, Ganjali Y. HyperFlow: A Distributed Control Plane for OpenFlow [C]//Proceedings of Internet Network Management Workshop on Research on Enterprise Networking. San Jose, USA: [s. n.], 2010: 85-86.
- [14] Kotani D, Okabe Y. A Packet-in Message Filtering Mechanism for Protection of Control Plane in OpenFlow Networks[C]//Proceedings of ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems. Los Angeles, USA: ACM Press, 2014: 29-40.
- [15] Curtis A R, Mogul J C, Tourrilhes J, et al. DevoFlow: Scaling Flow Management for High-performance Networks[C]//Proceedings of SIGCOMM'11. New York, USA: ACM Press, 2011: 254-265.
- [16] 毛健彪, 卞洪飞, 韩 彪, 等. PiBuffer: 面向数据中心的 OpenFlow 流缓存管理模型[J]. 计算机学报, 2015, 38(6): 1092-1104.
- [17] 周 烨, 杨 旭, 李 勇, 等. 基于分类的软件定义网络流表更新一致性方案[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1746-1752.
- [18] 鄂跃鹏, 陈 智, 葛敬国, 等. 一种高效的 OpenFlow 流表存储与查找实现方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(10): 1280-1288.
- [19] Canini M, Venzano D, Peresini P, et al. A Nice Way to Test OpenFlow Applications [C]//Proceedings of the 9th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. Berkeley, USA: USENIX, 2012.
- [20] 邓 昱, 龚正虎, 王 宏. 现代数据中心网络特征研究[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(2): 395-407.

编辑 金胡考

(上接第 123 页)

- [4] Liu Chong. A New Design Method for the Fault Diagnosis on the Rotating Rectifier of Aeronautic Synchronous Generator[J]. Advanced Material Research, 2012, 12(8): 544-552.
- [5] 徐 文. 双通道开关磁阻起动/发电系统故障诊断和容错控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [6] 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, 2010.
- [7] 周 政. 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): 57-64.
- [8] Alwi H, Edwards C, Tan Che pin. Fault Detection and Fault-tolerant Control Using Sliding Modes [M]. London, UK: [s. n.], 2011.
- [9] Ishnan S G, Lequesneb M, Omekanda A. Classification and Remediation of Electrical Faults in the Switched Reluctance Drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(2): 479-486.
- [10] Lee Kui-jun, Kim Kyung-hwan. Simple Fault Detection and Tolerant Scheme in VSI-fed Switched Reluctance Motor[C]//Proceedings of PESC'11. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [11] 刘勇智, 王海波. 用于调压器动态性能测试的发电机非线性建模方法[J]. 空军工程大学学报, 2011, 12(1): 1-5.
- [12] Sharma V K, Murthy S S, Singh B. Analysis of Switched Reluctance Motor Drive Under Fault Conditions[C]//Proceedings of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1998: 553-562.
- [13] Lu Shengli, Chen Hao, Zan Xiaoshu. Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Strategy for Power Converter of Switched Reluctance Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 26(11): 200-206.
- [14] Gameiro N S, Cardoso A J M. Fault Tolerant Control Strategy of SRM Drives [C]//Proceedings of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 301-306.
- [15] 陈 昊, 谢桂林, 张 超. 开关磁阻电机功率变换器主电路研究[J]. 电力电子技术, 2000, 12(3): 22-26.

编辑 索书志