

基于续电流的功率变换器故障诊断方案

刘勇智¹, 周政^{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;3.95926 部队,长春,130051)

摘要 针对航空开关磁阻起动/发电系统中功率变换器的 4 种典型电气故障,综合分析上、下续电流并引入数字化提出了一种新的故障诊断方法。在分析功率变换器能量转化过程的基础上,从励磁和续流 2 个阶段分析了不同故障对上、下续电流的影响,从中提取故障特征,并提出以上、下续流电流差作为故障特征的故障诊断方案。最后搭建了故障仿真模型并进行验证,结果表明,采用该方法提取的故障特征向量,综合了更多的故障量,与单一的相电流检测方法相比,诊断结果清晰明确,可以实现更准确的故障诊断。

关键词 开关磁阻起动/发电系统;功率变换器;故障诊断;续电流分析;故障特征向量

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.006

中图分类号 V242;TM352 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)03-0028-05

A Study of Fault Diagnosis of Power Converter Based on Stream Current

LIU Yongzhi¹, ZHOU Zheng¹, SONG Jinlong¹, MA Weiming², WANG Zhenliang³

(1.Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038,China;
2. Unit 94354, Jining 272000,Shandong,China; 3. Unit 95926, Changchun 130051,China)

Abstract: Aimed at the four typical electrical troubles of power converter in the switched reluctance starting/generation system, and on the basis of analyzing upper and lower following current, and introduction of digitizer, a new method of fault diagnosis is proposed. Converter's operational principle and the energy convert process are analyzed. The effects of faults on the upper and lower following current are analyzed in exciting state and current-following state, then, according to the fault-feature, the scheme of fault diagnosis is put forward based on the difference between upper and lower following current. Finally, a fault diagnose model of switched reluctance starter/generator is built and validated. The result shows that the fault diagnosis scheme is more accurate than that of the fault diagnosis with only phase-current.

Key words: switched reluctance starting/generation (SRS/G); power converter; fault diagnosis; the analysis of stream current; fault-feature vector

随着多/全电飞机的不断发展,起动/发电技术也越来越成熟;航空开关磁阻电机^[1]借助控制简单、

容错性能好和切换无需附件等特点成为起动/发电的首选对象。航空开关磁阻起动/发电(Switched

收稿日期:2015-12-03

基金项目:陕西省自然科学基金(S2015YFJM0413)

作者简介:刘勇智(1972—),男,湖南涟源人,教授,主要从事航空电气工程研究.E-mail:Liuyz_kj@163.com

通讯作者:周政(1993—),男,硕士生,主要从事航空开关磁阻电机研究.E-mail:zhou_zheng_1@163.com

引用格式:刘勇智,周政,宋金龙,等.基于续电流的功率变换器故障诊断方案[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(3):28-32. LIU Yongzhi, ZHOU Zheng, SONG Jinlong, et al. A Study of Fault Diagnosis of Power Converter Based on Stream Current[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(3): 28-32.

Reluctance Starting/Generation, SRS/G) 系统^[2] 主要由开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor, SRM)、功率变化器、位置传感器、控制保护器和电流电压互感器组成,其中功率变换器^[3-4]是系统的核心部件,实现电能和机械能之间的转换、电动和发电状态的切换,其重要性也不言而喻。文献[5~8]分析了 SRS/G 系统的典型故障,包括绕组故障、功率变换器故障、位置传感器故障和负载、原动机故障等,以及故障对输出性能的影响。其中,功率变换器故障和绕组故障的频率和严重性最高,所以对功率变换器的故障诊断和容错控制的研究很有必要且迫在眉睫。文献[9~10]分析了功率变换器的 4 种故障,提出了基于神经网络和支持向量机等智能算法的故障诊断并实验验证。文献[11~13]结合功率变换器故障时母线电流、相电流和续电流的变化特点,提出了几种在线故障诊断方案。本文结合航空 SRS/G 系统的研究热点,分析了故障发生在不同阶段(励磁和续流)时,对上、下续电流的影响,提出了一种基于上、下续电流的在线故障诊断方案,并搭建 SRS/G 系统故障模型进行验证。

1 功率变换器拓扑及原理分析

功率变换器的拓扑结构众多^[14],这里采用三相不对称半桥式功率变换器。该功率变换器三相相互独立,提高了 SRS/G 系统的自身容错能力。由于三相支路相互独立且原理相同,下面只对 A 相支路进行研究。功率管的导通和关断将航空 SRS/G 系统工作周期分为励磁和续流 2 个阶段,励磁回路见图 1 中双点画线,续流回路见图 1 中虚线。本文同时采用电流斩波控制^[15] (Current Chopping Control, CCC)和位置导通控制^[16] (Angle Position Control, APC),上功率管 K_{A1} 为电流斩波管,实现 CCC,防止 SRM 低速运行时,绕组相电流过大击穿功率管或损坏其它器件;下功率管 K_{A2} 为位置导通管,实现 APC,防止在电动状态出现负向转矩和发电状态下降低发电效率。

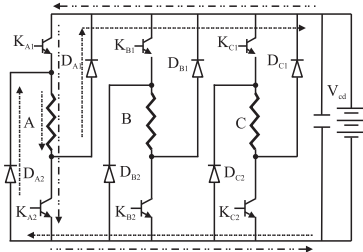


图 1 三相功率变换器

Fig.1 Three phase power converter

2 典型故障模式分析

二极管的过流承受能力远大于功率管,且功率管处于高频开关状态,所以功率管的故障率高于二极管,只对功率管进行故障分析。功率管故障包括 K_{A1} 开路故障、 K_{A1} 短路故障、 K_{A2} 开路故障和 K_{A2} 短路故障,见图 2。下面就这 4 种典型故障分别发生在励磁和续流阶段时,分析上、下续电流的变化。

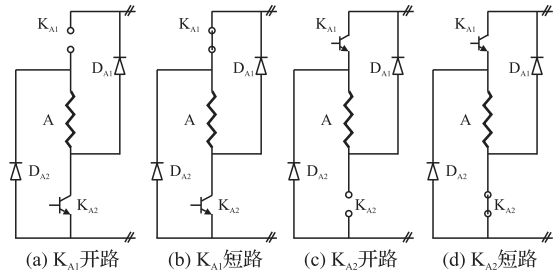


图 2 典型功率变换器电气故障示意图

Fig.2 Power converter of classical electrical fault

2.1 励磁阶段

故障发生在励磁阶段,不仅对励磁阶段产生影响,对续流阶段和下一周期也会产生影响。

K_{A1} 出现开路故障,见图 2(a)、3(a),励磁回路断开,提前进入续流阶段,续流回路为 $D_{A2} \rightarrow A \rightarrow K_{A2}$ 。此刻,上续电流为 0,下续电流等于绕组相电流,并缓慢地下降。当达到 θ_{off} 时, K_{A2} 关断,续流回路变为正常的回路 $D_{A2} \rightarrow A \rightarrow D_{A1}$,电流将会迅速下降至 0。下一周期,该相支路将会停止工作。

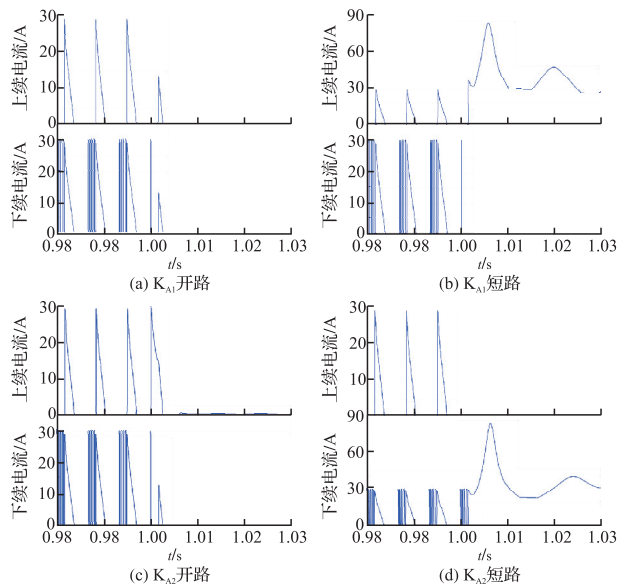


图 3 励磁阶段上下续电流

Fig.3 Stream current in exciting state

K_{A1} 出现短路故障,见图 2(b)、3(b)。当 SRM 低速运行时,相电流会超出 i_{chop} ,造成其它器件损坏。当达到 θ_{off} 时,进入续流阶段,续流回路为

$D_{A1} \rightarrow A \rightarrow K_{A1}$; 下续电流为0, 上续电流将会增大, 下一周期的初始电流不为0。

K_{A2} 出现开路故障, 见图 2(c)、3(c), 同 K_{A1} 开路故障相似; 励磁阶段提前结束, 形成续流回路 $D_{A1} \rightarrow A \rightarrow K_{A1}$ 。此时下续电流为0, 上续电流将缓慢下降; 当达到 θ_{off} 时, 续流回路为正常续流回路 $D_{A1} \rightarrow A \rightarrow D_{A2}$, 上、下续电流迅速下降为0; 下一周期, 该相支路将会停止工作。

K_{A2} 出现短路故障, 如图 2(d)、3(d), 同 K_{A1} 短路相似, 上续电流为0, 下续电流会增大; 由于下一周期的初始电流不为0, 使得电流的幅值会更大。

2.2 续流阶段

故障发生在续流阶段, 将会对续流阶段和下一周期产生影响, 下面分析各类故障对上、下续电流的影响。见图 4。

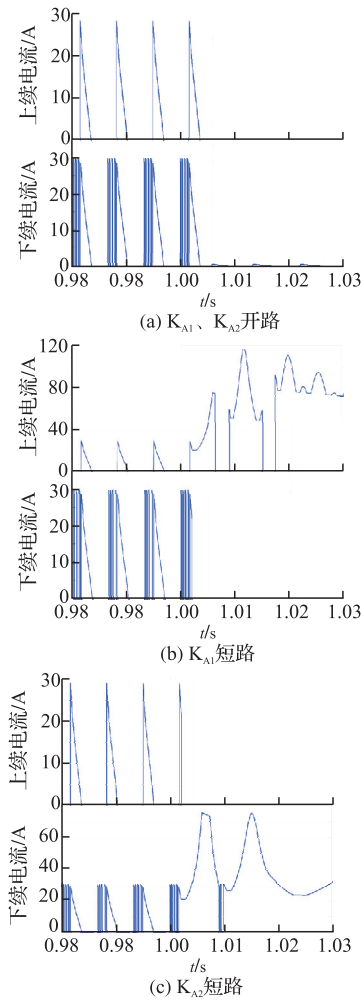


图 4 续流阶段上下续电流

Fig.4 Stream current in current-following state

K_{A1} 发生开路故障, 由于续流阶段 K_{A1} 本身处于关断状态, 不会产生影 响; 但下一周期没有励磁回路, 该相支路停止工作。 K_{A2} 发生开路故障, 与 K_{A1} 开路故障相似, 具体上、下续电流见图 4(a)。

K_{A1} 发生短路故障, 续流回路为 $K_{A1} \rightarrow A \rightarrow D_{A1}$,

使得下一周期的初始电流不为0, 下一周期的上续电流将会增大, 下续电流为0; 具体上下续电流见图 4(b), 与图 3(b) 变化趋势相似。

K_{A2} 发生短路故障, 续流回路为 $K_{A2} \rightarrow A \rightarrow D_{A2}$, 与 K_{A1} 短路故障相似; 上续电流为0; 下续电流缓慢下降; 下一周期的初始电流不为0, 上续电流会增大, 下续电流仍为零; 具体见图 4(c)。

3 基于续流电流分析的故障诊断

通过上文分析可知, 不同的故障对上、下续流电流的影响各异, 但在续流和励磁阶段, 同一故障上、下续电流的变化趋势一致, 所以续流和励磁阶段可以用同一故障特征进行故障诊断。下面提出一种在线的故障诊断方案。

3.1 故障特征量的提取

无论是励磁阶段还是续流阶段, 上、下续电流均可以作为故障诊断的依据。在 K_{A1} 、 K_{A2} 开路故障下, 上下续电流将会迅速下降至0。 K_{A1} 短路故障, 上续电流增大而下续电流下降为0; K_{A2} 短路故障, 下续电流上升而下续电流下降为0, 具体见表 1。

表 1 故障下上下续电流变化趋势

Tab.1 The change trend of current

	上续电流	下续电流	上下续电流差值/A
K_{A1} 开路	减少为 0	减少为 0	0~30
K_{A1} 短路	上升为 100	减少为 0	0~110
K_{A2} 开路	减少为 0	减少为 0	0~30
K_{A2} 短路	减少为 0	上升为 80	0~80

仅仅利用本周期内上、下续电流的幅值不能诊断出具体故障, 但是可以将其作为一种故障特征。设电流 i_1 为上续电流, i_2 为下续电流, e_A 为上下续电流之差, f_A 为 e_A 一个周期内的积分:

$$e_A = i_1 - i_2 \quad (1) \quad f_A = \int e_A \quad (2)$$

3.2 故障诊断

本文设计了基于 f_A 和 i_1 、 i_2 的故障诊断方案, 见图 5。 f_A 、 i_1 和 i_2 与零和阈值进行比较, 结合故障后的上、下续电流, 确定故障类型和故障位置。结合数字化思想, 将判断结果转换为跳变沿信号, 有利于捕获。当 $i_f < f_A < 0$ 时, 结果为 -2; 当 $f_A < 0$ 且 $f_A < i_f$ 时, 结果为 -1; 当 $0 < f_A < i_f$ 时, 结果为 1; 当 $f_A > 0$ 且 $f_A > i_f$ 时, 结果为 2。当 $i_1, i_2 > i_e$ 时, 结果为 1; 当 $0 < i_1, i_2 < i_e$ 时, 结果为 0; 当 $i_1, i_2 \leq 0$ 时, 结果为 -1。最终利用跳变沿的综合特征进行故障识别和诊断。

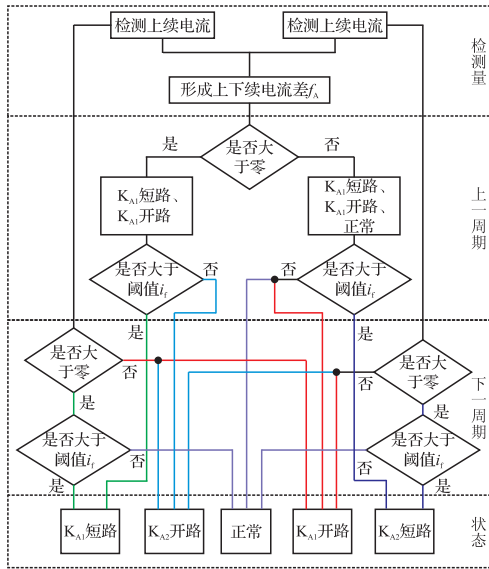


图 5 故障诊断流程图

Fig.5 Flow chart of fault diagnose

4 仿真实验

本文搭建了 SRS/G 系统的故障诊断模型^[17]。电机模型参数见表 2,故障诊断的阈值 i_f 和 i_e 分别取 0.03 和 80。

表 2 开关磁阻电机参数

Tab.2 Parameter of SRM

定子参数	级数	12	转子参数	级数	8
	外径	126.3		外径	71.2
	内径	72.0		内径	34.8
	极弧	15		极弧	16
铁芯长度	134	额定功率	2.2 kW		
额定转速	12 000 r/min	输出电压	270 V		

仿真实验见图 6。

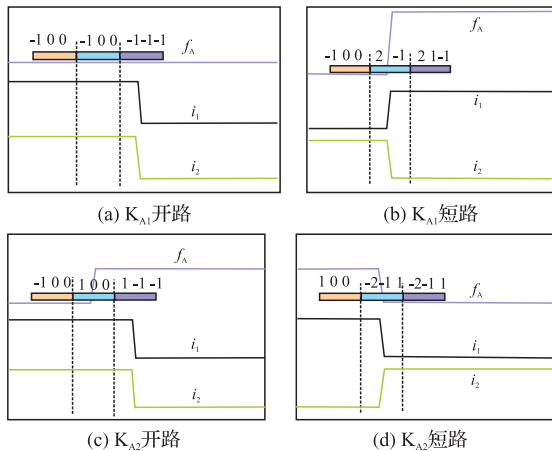


图 6 故障诊断特征系数图

Fig.6 Characteristic Features of fault diagnose

正常情况下, f_A 应保持 -1 , 而 i_1 和 i_2 应保持为 0 。发生故障后, 当 f_A 增大超过正阈值会现出一

$1 \rightarrow 2$ 的上升沿; 当 f_A 增大至 0 和阈值之间, 会出现 $-1 \rightarrow 1$ 的上升沿, 当 f_A 减少至负阈值, 会出 $-1 \rightarrow 2$ 的下降沿。同理, 可以得上、下续电流 i_1 和 i_2 的跳变沿。具体故障诊断见表 3。

表 3 故障诊断表

Tab.3 Fault diagnose diagram

	正常	K_{A1} 开路	K_{A1} 短路	K_{A2} 开路	K_{A2} 短路
上一周期	f_A	-1	-1	-1	-1
	i_1	0	0	0	0
	i_2	0	0	0	0
	状态	-1,0,0	-1,0,0	-1,0,0	-1,0,0
该周期	f_A	-1	-1	2	1
	i_1	0	0	1	0
	i_2	0	0	-1	0
	状态	-1,0,0	-1,0,0	2,1,-1	1,0,0
下一周期	f_A	-1	-1	2	1
	i_1	0	-1	1	-1
	i_2	0	-1	-1	-1
	状态	-1,0,0	-1,-1,-1	2,1,-1	1,-1,-1

综上所述, 故障状态和故障特征对应见表 3。该方案利用多个特征系数综合进行故障诊断, 相比文献[14]中相电流故障诊断方案, 降低了虚警率, 为下一步的容错控制提供了更加可靠的依据。

5 结语

本文结合工程应用实际情况, 分析了 SRS/G 系统的组成和常见故障, 最终针对高故障率的功率变换器进行故障分析, 结合三相不对称半桥式功率变换器的特点, 分别对励磁和续流阶段进行分析, 利用上、下续电流的变化, 提取出故障特征并设计了故障特征系数, 基于上、下续电流提出了一种在线故障诊断方案, 通过仿真验证, 故障诊断取得很好的效果, 相对于相电流故障诊断而言, 降低了虚警率。本文方法的实际可行性还有待下一步验证。

参考文献 (References):

[1] 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.
WU Hongxing. Switched Reluctance Motor System Theory and Control Technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010. (in Chinese)

[2] SONG Shoujun, LIU Weiguo, Dieter Peitsch. Detailed Design of a High Speed Switched Reluctance Starter/Generator for More/All Electric Aircraft [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 25 (23): 216-226.

- [3] SHENG Zengjin. Regulator Strategies for Switched Reluctance Generator Based on Direct Energy Control [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 14(5):263-266.
- [4] GPALAKR Ishnan S, OMEKANDA A M, LEQUESNEB. Classification and Remediation of Electrical Faults in the Switched Reluctance Drive [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, 42(2):479-486.
- [5] LEE KuiJun, KIM KyungHwan, et al. Simple Fault Detection and Tolerant Scheme in VSI-fed switched Reluctance Motor [C]//In Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, PESC 39th IEEE, 2011:1-6.
- [6] LIU Chong. A New Design Method for the Fault Diagnosis on the Rotating Rectifier of Aeronautic Synchronous Generator [J]. *Advanced Material Research*, 2012, 8:544-552.
- [7] 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.
CHEN Hao, XIE Guilin, ZHANG Chao. Study of Switched Reluctance Motor Power Converter Main Circuit [J]. *Power Electronic Technology*, 2000, 12(3):22-26. (in Chinese)
- [8] 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.
XU Wen. Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control of Two-Channel Switched Reluctance Starter/Generator System [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [9] 尹航, 周波, 魏佳丹. 双凸极电机主功率变换器故障在线诊断 [J]. *电子技术学报*, 2008, 23(10):88-94.
YIN Hang, ZHOU BO, WEI Jiadan. Study of On-line Fault Diagnosis of Main Power Converter for Doubly Salient Motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(10):88-94. (in Chinese)
- [10] ZHOU Zheng. The Status Switching Control Study of Switched Reluctance Starter/generator Based on Sliding Mode Variable Structure [C]//in Proceedings of CAC, Wuhan, 2015:271-276.
- [11] 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.
LU Shengli. Study on the Fault Diagnosis Methods of Switched Reluctance Motor System [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] 阳杰, 雷晓彝, 刘曙伟. 基于强化缓冲算子的六相永磁容错电机故障预测 [J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2015, 12(5):24-27.
YANG Jie, LEI Xiaoben, LIU Shuwei, et al. Fault Prediction of Six Phase Permanent Magnet Tolerant Motor Based on Strengthening Buffer Operator [J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2015, 12(5):24-27.
- [13] LU Shengli, CHEN Hao, ZAN Xiao-shu. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for Power Converter of Switched Reluctance Motor [J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2009, (11):200-206.
- [14] GAMEIRONS, CARDOSO A J M. Fault Tolerant Control Strategy of SRM Drives [C]//International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), IEEE, 2012: 301-306.
- [15] GAN Chun, WU Jianhua. Design and Analysis on Switched Reluctance Motor System Using Field-Circuit Coupled Method [C]//Proc Electrical Machines and Systems 17th International Conference, 2014: 3296-3301.
- [16] GAMEIRO N S, MARQUES CARDOSO A J. A New Method for Power Converter Fault Diagnosis in SRM Drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2012, 48(2):653-662.
- [17] 刘勇智, 周政, 盛增, 等. 开关磁阻电机起动/发电切换控制策略研究 [J]. *电机与控制学报*, 2015, 19(10):57-63.
LIU Yongzhi, ZHOU Zheng, SHENG Zengjin, et al. Study of Control Strategy for Status Switching of Switched Reluctance Starter/generator [J]. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(10):57-63. (in Chinese)

(编辑:徐敏)