

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.01.018

双通道开关磁阻发电机建模及故障仿真研究

杨涵轶, 朱学忠*

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210000)

摘要:针对双通道开关磁阻电机两个通道之间存在强烈电磁耦合从而导致系统缺相运行时相电流严重畸变的问题,设计了一种单通道容错控制方法。首先利用基于场路耦合有限元法的仿真软件 JMAG 构建了一个 12/8 双通道开关磁阻发电机的仿真模型;然后在理论分析总结得出系统的大部分故障将导致系统缺相运行的基础上,基于仿真模型仿真分析了系统正常运行状态和缺相运行状态时的发电性能;最后针对系统缺相运行状态提出了单通道容错控制方案,并通过仿真对该方案进行了验证。研究表明,该容错控制方案能够有效改善缺相故障下系统的输出性能,为该类发电系统的故障诊断和容错控制提供了依据。

关键词:双通道;开关磁阻发电机;JMAG;有限元;故障

中图分类号:TH39;TM352;TM619

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)01-0086-04

Modeling and fault simulation of dual-channel switched reluctance generator

YANG Han-yi, ZHU Xue-zhong

(Automatic Department, University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the mutual electromagnetic coupling between each channel in the dual-channel switched reluctance machine caused phase current distortion when phase failure occurred, an one-channel fault-tolerant method was designed. Firstly, a simulation model of 12/8 dual-channel switched reluctance generator was established with JMAG simulation software based on field-circuit coupled finite element method. Secondly, most failures were analyzed theoretically. And it turned out that most failures lead to phasing failure. Then on the basis of the model, generating performance of the normal condition and the phase fault condition was simulated and analyzed by using JMAG software. At last, aiming at the phase fault condition, the one-channel fault-tolerance method was presented and simulated. The results indicate that the one-channel fault-tolerance method can improve the generating performance effectively. The modeling and fault-tolerant method also has certain reference value to fault diagnosis and fault-tolerant research of the kind of generating system.

Key words: dual-channel; switched reluctance generator; JMAG; finite element; fault

0 引言

近年来,随着电机技术的快速发展以及应用市场的广泛需求,开关磁阻发电技术越来越受到人们的关注。相对于传统的发电系统,开关磁阻发电机具有结构简单、可靠性高、发电量大、控制方式多样、起动和发电功能易于结合等特点。这些特点使其非常适合应用于远距离运载领域中,并作为该类领域设备的发电机起动系统和主电源发电系统,如航空、航天、船舶等领域^[1-2]。

在传统的开关磁阻电机中,功率变换器和控制器

作为系统的重要组成部分,同时也是系统的薄弱环节,一旦发生故障,将可能导致整个系统的瘫痪。通过将电机内部绕组分为两个部分并分别配备独立的变换器和控制器,构成冗余结构的双通道开关磁阻起动/发电系统,可以有效地解决这个问题^[3]。当发电系统某个通道发生故障时可切除该故障通道,由另一个通道构成单通道控制系统,实现供电系统的容错工作模式,从而提高系统的安全性与可靠性^[4]。

双通道开关磁阻起动/发电系统以其高可靠性的特点在航空领域中已引起越来越多的关注。目前,针

收稿日期:2013-09-16

作者简介:杨涵轶(1988-),女,江苏溧阳人,主要从事开关磁阻电机故障诊断和容错控制方面的研究。E-mail:yanghanyisky@163.com

通信联系人:朱学忠,男,副教授,硕士生导师。E-mail:zxz@nuaa.edu.cn

对双通道开关磁阻电机的研究比较少,仅国外部分学者掌握了双通道开关磁阻电机的初步技术,国内相关领域的研究仍处于起步阶段。

本研究基于有限元分析软件 JMAG 搭建一个 12/8 结构的双通道开关磁阻发电机模型,并对其故障状态进行仿真与分析,为该发电系统的故障诊断和容错控制提供依据。

1 双通道开关磁阻发电机的有限元建模

开关磁阻电机本身是一个非线性系统,其工作状态和参数都难以精确计算,给建模带来了一定的困难,而双通道开关磁阻电机的双通道之间又存在强烈的耦合,进一步增加了建模的难度。因此,单纯的静态磁场分析方法并不适用于双通道开关磁阻发电机。本研究采用基于场路耦合有限元法的仿真软件—JMAG 来搭建双通道开关磁阻发电机的仿真模型^[5]。JMAG 软件可以较为直观地获取电机的各项参数,如绕组电流、磁链、电磁转矩等,比较适合双通道开关磁阻发电机的仿真分析。

12/8 结构的双通道开关磁阻发电机的内部结构如图 1 所示。物理位置上相对的两个凸极构成某通道中的一相,物理位置相对的凸极极性相同,相邻的凸极极性相反。为了减小由于转子偏心而引起的振动噪声问题,系统中的绕组采用并联方式。

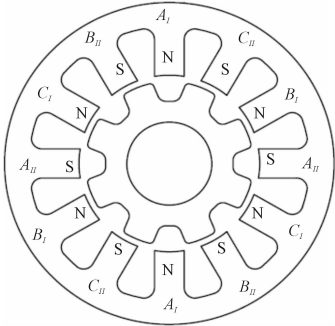


图 1 12/8 结构开关磁阻电机示意图

本研究中所采用样机的参数如表 1 所示。

表 1 样机的结构参数

参数	数值
额定功率/kW	7.5
额定电压/V	270
定子内径/mm	85
定子外径/mm	155
定子极弧系数	0.5
转子内径/mm	30
转子外径/mm	84
转子极弧系数	0.39
铁心长度/mm	74
每齿匝数	78
气隙长度/mm	0.5

在 JMAG 中搭建的该样机的本体有限元模型如图 2 所示,功率变换器模型如图 3 所示。

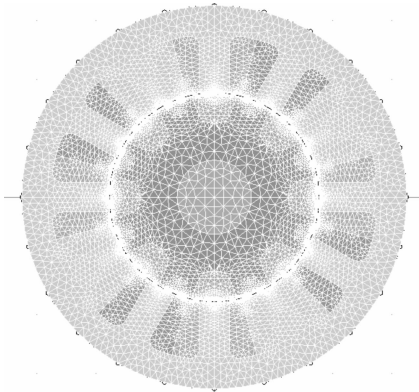


图 2 电机本体有限元结构

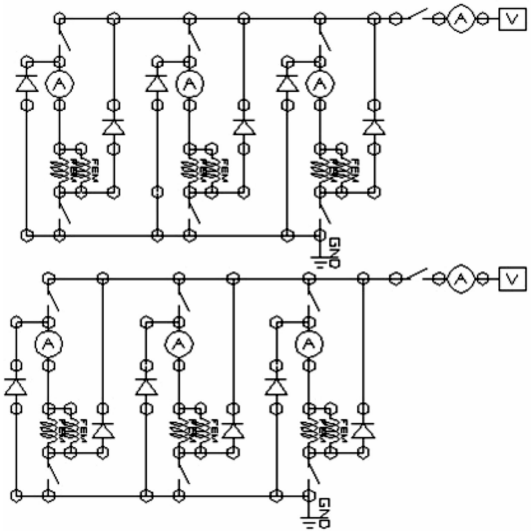


图 3 功率变换器结构

2 双通道开关磁阻发电机故障模式分析

开关磁阻发电机的工作原理可参考文献[1],此处不再赘述。传统开关磁阻发电机相间耦合较小,故障情况下仍能以缺相运行状态维持一定的输出^[6-7]。双通道开关磁阻发电机除了相间耦合,双通道之间也存在着强烈的耦合,这导致其在故障情况下的运行状态与传统三相开关磁阻发电机具有很大的区别,需要另行分析。从系统的结构上来看,双通道开关磁阻发电机系统的主要故障包括电机本体故障和功率变换器故障两大类。

2.1 电机本体故障

双通道开关磁阻发电机采用双凸极结构,转子无绕组和永磁体,定子集中绕组,因此电机本体的故障主要集中于定子绕组上,包括绕组开路故障、绕组短路故障、接地故障等^[8-10]。

(1) 绕组开路故障。发电机发生开路故障时,开路的相将不输出电能,电机工作在缺相状态。当该故障发生在某个通道的一相时,由于两个通道之间存在强耦合,未发生故障的通道三相电流也将不对称。此时可选择关闭故障通道,通过改变正常通道的控制策略、增大励磁电压或改变开关角来保持额定输出。

(2) 绕组短路故障。发生在励磁工作状态时,某一相短路将导致电流迅速上升,一般会触发功率管的过流保护动作;发生在发电阶段时,由于存在反电动势,线圈中将产生短路电流以维持原来的磁链不变,同时由于存在线圈电阻,短路电流将通过该绕组回路衰减,过大的短路电流可能烧毁该相绕组。短路故障发生后可通过断开故障相来进行容错控制,此时的故障情形与绕组开路故障类似。

(3) 接地故障。当绕组的励磁源负极与中心抽头连通时,电流将绕开下部的开关器件,导致功率变换器的损坏。此时,续流回路将不包含电源部分,无法输出功率。

2.2 功率变换器故障

功率变换器一般可发生功率开关管、二极管的开路和短路故障,由于在本研究中电机同一相的两个开关管采用同时导通关断的策略,功率开关管开路将导致故障相开路,从而导致电机缺相运行。功率开关管的单管短路和双管短路都将导致绕组电流的快速升高,从而触发过流保护动作,导致电机缺相运行。二极管的开路、短路故障同样将转变为缺相故障,这里不再详述。

通过上面的分析可知,双通道开关磁阻电机的大部分故障最终都会导致电机缺相运行。

3 双通道开关磁阻发电机故障仿真分析

本节将通过 JMAG 软件对所构建的发电机模型在正常运行、缺相运行时的发电性能进行仿真分析。励磁方式采用直流 270 V 自励,转速为 $9\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,控制方法采用角度位置控制。通过反复试验,得到一组最优控制参数,即:开通角为 12° ,关断角为 31° 。

正常运行时两个通道完全对称,此时给出其中一个通道的相电流波形和合成转矩的波形,分别如图 4、图 5 所示。其中,由于电机工作在发电状态,合成转矩为负值。

假设通道 1 的 AI 相发生故障,此时电机工作在缺相状态,两个通道各相的电流波形如图 6 所示。从图 6 中可以看出,通道 1 的 AI 相电流为零,通道 2 的三相电流波形较正常情况发生了较大的变化,其中 AII

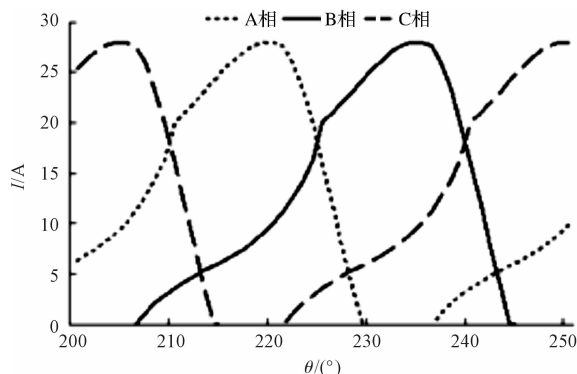


图 4 正常运行时相电流波形

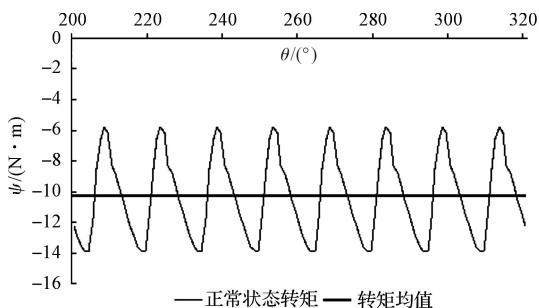


图 5 正常运行时的合成转矩波形

相电流很大,且在关断角处存在电流尖峰,这是由于通道 1 和通道 2 之间存在着强烈的耦合,通道 1 缺相工作时相间互感影响了通道 2 的电流波形。电机的合成转矩波形图如图 7 所示,由于 AI 相电磁转矩缺失,合成转矩略小于正常状态,且波形发生畸变,电机振动和噪声增加。

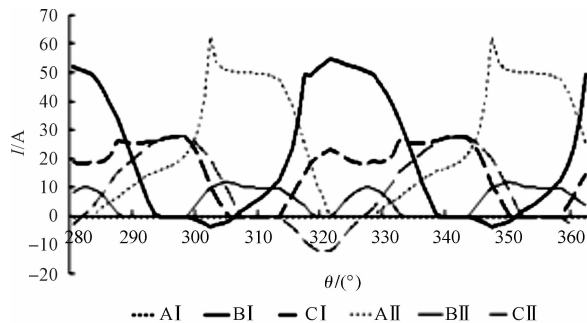


图 6 缺 AI 相运行时各相电流波形

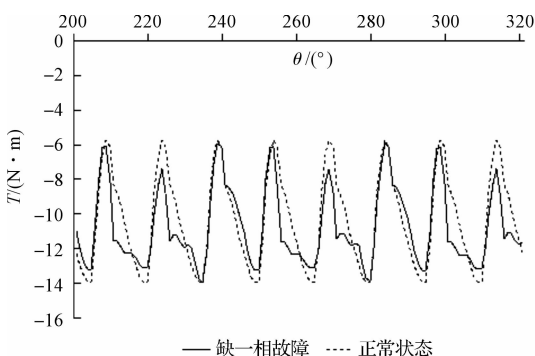


图 7 缺 AI 相运行时的合成转矩波形

考虑到某通道缺相将会导致各相电流严重畸变,从而影响系统正常工作,这里采用关闭故障相通道的方法来消除缺相故障所带来的影响。此时,非故障通道的电流波形和合成转矩波形分别如图8、图9所示。从图8中可以看出,相电流波形规整,少数的毛刺是由于双通道之间的互感所致。从图9中可以看出,单通道情况下的合成转矩约为相同控制参数时双通道合成转矩的1/4,此时的输出功率小于双通道情况下的一半。

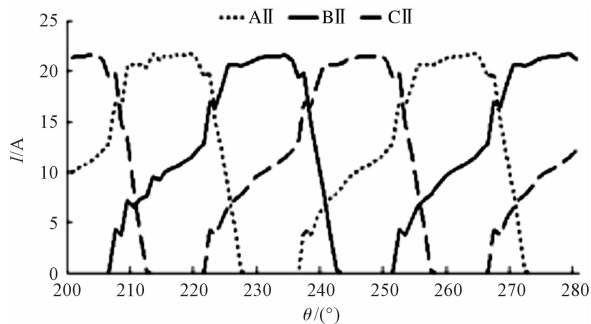


图8 单通道模式下相电流波形

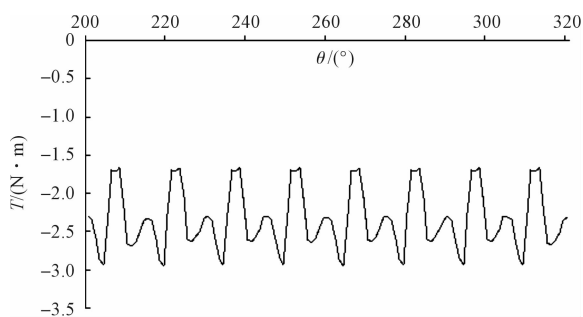


图9 单通道模式下合成转矩波形

通过以上的仿真分析可知,由于存在通道间的强耦合现象,缺相故障将会导致发电机系统工作异常。单通道容错方法可以在一定程度上改善系统的运行状态,但是会降低系统的输出功率。如何在不影响输出功率的前提下进行双通道开关磁阻发电机的单通道容错控制运行还有待进一步的研究,例如设计出新的绕组连接方式等。

4 结束语

本研究通过电磁场分析软件 JMAG 搭建了一个

12/8 双通道开关磁阻发电机系统的仿真模型,分析了该系统在各类故障情况下的运行状况。通过 JMAG 仿真软件对系统在正常工作和缺相工作下的运行状态进行了仿真分析,并采用单通道容错方法对系统进行了容错控制,同时指出了该容错方法的不足,为双通道开关磁阻发电系统的发展提供了依据。另外,该有限元模型也为今后开关磁阻电机的研究提供了一种行之有效的分析方法。

参考文献 (References):

- [1] 刘迪吉,曲民兴,朱学忠,等. 开关磁阻发电机[J]. 南京航空航天大学学报,2003,35(2):1-6.
- [2] JACEK F G. Comparison of high-power high-speed machines: cage induction versus switched reluctance motors [J]. *Africon IEEE*,1999(2):675-678.
- [3] RADUN A V, FERREIRA, RICHTER C A, et al. Two-channel switched reluctance starter/generator results [J]. *IEEE Transactions*,1998,34(5):1026-1034.
- [4] 周强,严加根,刘闯,等. 航空开关磁阻发电机双通道容错性能研究[J]. 航空学报,2007,28(5):1146-1152.
- [5] 毕涛,朱学忠. 基于 JMAG 的双通道开关磁阻发电机建模与仿真[J]. 现代驱动与控制,2009(6):21-23.
- [6] 李雷军,丁春芳. 开关磁阻电机缺相运行特性的研究[J]. 煤矿机电,2004(2):28-30.
- [7] 马瑞卿,吉攀攀,王翔. 开关磁阻发电机系统的故障仿真研究[J]. 计算机仿真,2010,27(4):21-23.
- [8] CHINDURZA I, DORRELL D G, COSSAR C. Non-invasive fault diagnosis for switched-reluctance machines with incorrect winding turns, inter-turn winding faults and eccentric rotors[C]// The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Brazil: [s. n.],2003:17-20.
- [9] 严加根. 航空高压直流开关磁阻起动/发电机系统的研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2006.
- [10] SANCHEZ J A, ANDRADA P, BLANQUE B, et al. Post-fault performance of a switched reluctance motor drive [C]//The 11th European Conference on Power Electronics and Applications. Germany:[s. n.],2005:1-8.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

杨涵轶,朱学忠. 双通道开关磁阻发电机建模及故障仿真研究[J]. 机电工程,2014,31(1):86-89.

YANG Han-yi, ZHU Xue-zhong. Modeling and fault simulation of dual-channel switched reluctance generator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(1):86-89.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>