

容错型开关磁阻起动/发电系统的非线性建模及仿真

刘勇智¹, 王熔基¹, 戴 聰², 周 政³

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 94672 部队, 南京, 211199;
3. 95148 部队, 湖南耒阳, 421849)

摘要 建立了一种容错型开关磁阻起动/发电系统的非线性模型。基于开关磁阻电机的数学模型, 包括电路方程和机械方程, 利用模块化思想搭建了开放型模型, 分析了模型的可行性: ①电动状态下额定电压 380 V 时, 输出转矩能达到恒转矩起动要求; ②发电状态下在 2 000 r/min 的原动机的带动下, 实现空载快速建压, 能够快速稳定在 270 V 附近并实现调压。针对功率器件开路故障率高的特点, 利用硬件冗余思想设计了一种容错性的功率变换器。为了验证系统的容错性能, 人为设置故障进行了仿真对比分析, 结果表明: ①电动状态容错系统不仅消除了转矩死区, 而且提高了平均转矩、减小了转矩脉动; ②发电状态下输出电压在 0.2 s 内使得输出电压恢复到 270 V 左右, 相电流也下降至正常运行范围, 容错性能良好。

关键词 开关磁阻起动/发电系统; 不对称半桥式功率变换器; 容错性; 非线性建模

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.04.002

中图分类号 TM352 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)04-0012-07

Fault Tolerance of Switched Reluctance Starter/ Nonlinear Modeling in Generator System

LIU Yongzhi¹, WANG Rongji¹, DAI Cong², ZHOU Zheng³

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Unit 94672, Nanjing 211199, China; 3. Unit 95148, Leiyang 421849, Hunan, China)

Abstract: A non-linear model of fault-tolerant switched reluctance starter/generator system is proposed in this paper. Based on the mathematical model of switched reluctance motor, including circuit equation and mechanical equation, an open model is built with modularization idea. The feasibility of the model is analyzed: ① when the rated voltage is 380V under condition of electromotive state, the output torque can meet the needs of constant torque starting; ② under condition of electric power state, driven by the prime mover with 2 000 r/min, the no-load rapid voltage building can be realized, and the voltage can be quickly stabilized at near 270 V and regulated. In view of the high open-circuit fault rate of power devices, a fault-tolerant power converter is designed based on the idea of hardware redundancy. In order to verify the fault-tolerant performance in the system, the simulation results show that: ① the fault-tolerant system at the electric state not only eliminates the dead-time of the torque, but also improves the average torque and re-

收稿日期: 2018-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61603411); 航空科学基金(20155896026)

作者简介: 刘勇智(1972—), 男, 湖南娄底人, 副教授, 主要从事航空电气工程研究。E-mail: liuyz_kj@163.com

通信作者: 王熔基(1995—), 男, 河南沈丘人, 硕士生, 主要从事航空电气工程研究。E-mail: 785655786@qq.com

引用格式: 刘勇智, 王熔基, 戴聪, 等. 容错型开关磁阻起动/发电系统的非线性建模及仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(4): 12-18. LIU Yongzhi, WANG Rongji, DAI Cong, et al. Fault Tolerance of Switched Reluctance Starter/ Nonlinear Modeling in Generator System[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(4): 12-18.

duces the torque ripple; ② the output voltage restores to about 270 V within 0.2 s, and the phase current also drops to the normal operating range, the fault-tolerant performance is good.

Key words: switched reluctance generator system; asymmetric half-bridge power converter; fault tolerant; nonlinear modeling

开关磁阻(Switched Reluctance, SR)电机借助控制灵活的特点将电动机和发电机集成一体化形成开关磁阻起动/发电(Switched Reluctance Starter/Generator,SRS/G)系统,不仅在混合动力车上运用成熟^[1-2],在航空领域上也得到了一定的关注和研究。目前,国内学者对于航空 SRS/G 系统的研究还处于一个试探阶段,南京航空航天大学针对 6 kW 和 7.5 kW 的高压直流 SRS/G 系统进行了非线性建模、仿真实验平台、实验平台和数字控制平台的研究。文献[3~4]通过对电机本体进行优化,提高了可靠性和容错性,但新型电机一般缺乏通用性;文献[5]增加了并联支路达到容错效果,额外的器件增加了经济成本和电机体积;文献[6~7]从电磁和热量 2 个方面详细设计了 1 台高速 SRS/G 系统,并利用这台 SR 电机进行起动和发电之间切换最优控制策略研究;文献[8]针对双通道 SRS/G 系统进行建模,并仿真验证了模型的正确性;文献[9~10]针对 SRS/G 系统的故障特点,通过仿真和实验对 SR 电机进行了一定的故障诊断和容错控制研究。文献[11~12]基于上下续电流实现了对 SRS/G 系统的各类故障诊断,但是没有提出相应的容错办法。文献[13]通过对比定子绕组相电流变化情况给定容错控制办法,但其控制过程和参数精度要求过于复杂;文献[14]引进支持向量机等智能算法,实现故障预测。文献[15]采用并联线圈的方式设计了新型功率变换器实现了容错控制。

本文分析了 SRS/G 系统的起动、发电和切换过程;结合有限元分析软件 Ansoft,对 SR 电机进行了非线性建模;针对功率变换器的高故障率,提出了一种具有容错功能的功率变换器,并对改进后的非线性模型进行了仿真实验验证。

1 SRS/G 系统工作原理

根据发动机启动的转速变化将 SRS/G 系统工作状态分为起动状态、切换过程和发电状态 3 种,见图 1。在低转速时,为防止相电流过大击穿电子器件,本文采用电流斩波控制(Current Chopping

Control, CCC);在高转速时,为了增大效率和输出转矩,本文采用角度位置控制(Angle Position Control, APC)。

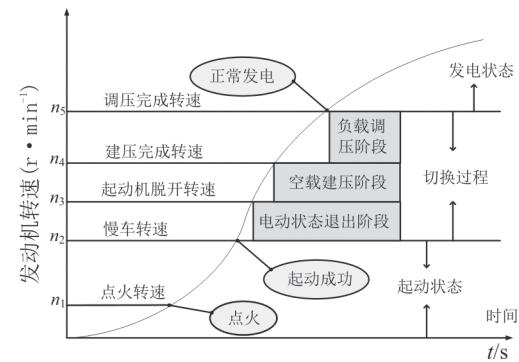


图 1 SRS/G 系统的工作状态

当 SRS/G 工作在电动状态,如图 2(a)所示,控制器控制 SR 电机工作在电感 L 上升阶段,产生正向转矩,带动发动机转动,直至达到慢车转速状态,发动机起动成功。

当 SRS/G 工作在发电状态,如图 2(b)所示,控制器控制 SR 电机工作在电感 L 的下降阶段,将机械能转换为磁储能;SR 电机工作在电感 L 的最小阶段时,机械能和磁储能都转换为电能,从而实现发电。

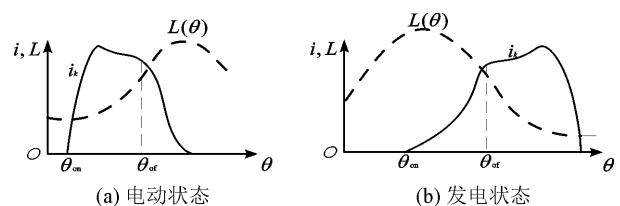


图 2 SRS/G 电感电流角度关系

2 SRS/G 一体化系统非线性模型

从硬件而言,SRS/G 系统是 2 个相逆的系统;从控制而言,SRS/G 系统是 2 种控制策略的系统;所以 SRS/G 系统可以实现一体化建模。

2.1 数学模型

SR 电机是 SRS/G 一体化系统中核心的部分,也是非线性最严重的部分,更是建模的重难点。根据电磁感应定律和能量守恒定律,由电路方程、机械方程和机电方程联立所组成 SR 电机的数学模型来

描述其动态过程。互感、涡流和磁滞效应不计,根据电磁感应定律,可得到 SR 电机第 k 相的电压平衡方程为:

$$\mathbf{U}_k = \mathbf{R}_k \cdot \mathbf{i}_k + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_k}{dt} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\Psi}_k = L_k(\mathbf{i}_k, \theta) \mathbf{i}_k = \int (\mathbf{U}_k - R_k \mathbf{i}_k) dt \quad (2)$$

$$\mathbf{i}_k = \frac{\boldsymbol{\Psi}_k}{L_k} = \frac{1}{L_k} \int (\mathbf{U}_k - R_k \mathbf{i}_k) dt \quad (3)$$

式中: \mathbf{U}_k 为第 k 相的绕组相电压; \mathbf{R}_k 是 k 相绕组电阻; \mathbf{i}_k 是绕组内的电流; $\boldsymbol{\Psi}_k$ 是 k 相绕组磁链。

结合上式可知:

$$\mathbf{U}_k = R_k \mathbf{i}_k + \frac{\partial \boldsymbol{\Psi}_k}{\partial \mathbf{i}_k} \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial \boldsymbol{\Psi}_k}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} =$$

$$R_k \mathbf{i}_k + (L_k + i_k \frac{\partial L_k}{\partial i_k}) \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \quad (4)$$

按照运动力学公式,电磁转矩和负载转矩共同作用下的转子运动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum_{k=1}^m \mathbf{T}_k - \mathbf{T}_L - F\omega \quad (5)$$

式中: J 是转子转动惯量; $d\theta/dt = \omega$ 是角速度; m 是电机的总相数, \mathbf{T}_k 为第 k 相电磁转矩; \mathbf{T}_L 是负载转矩; F 为系统阻尼系数。

电机一相的磁共能 W 和磁储能 W_f 为:

$$W = \int_0^i \boldsymbol{\Psi}(i, \theta) di; \quad W_f = \int_0^\psi \mathbf{i}(\boldsymbol{\Psi}, 0) d\boldsymbol{\Psi} \quad (6)$$

一相绕组整个工作周期内,机械能的变化量 ΔW_m 就等于磁共能 ΔW 的变化,即 $\Delta W_m = \Delta W = -\Delta W_f$;根据机电转换原理: $\Delta W_m = T_{avg} \Delta \theta$, T_{avg} 指周期内的平均转矩,有:

$$T_{avg} = \frac{\Delta W}{\Delta \theta} = -\frac{\Delta W_f}{\Delta \theta} \quad (7)$$

可得到瞬时转矩为:

$$\mathbf{T}_a = \frac{\partial W}{\partial \theta} |_{i=const} = -\frac{\partial W_f}{\partial \theta} |_{\Psi=const} \quad (8)$$

由于各相之间对称,在一个周期内积分后取平均,可得 SR 电机平均转矩为:

$$T_{avg} = \frac{mN_r}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{N_r}} \mathbf{T}_a(\theta, i(\theta)) d\theta = \\ \frac{mN_r}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{N_r}} \int_0^{i(\theta)} \frac{\partial l(\theta, \xi)}{\partial \theta} \xi d\xi d\theta \quad (9)$$

式中: ξ 为相电流的中间变量; N_r 为 SRM 转子齿数。

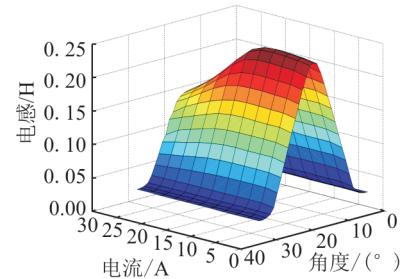
2.2 仿真模型

由于 SR 电机是高度非线性的,利用解析法计算复杂,本文借助于有限元软件 Ansoft 进行 SR 电机的非线性磁场分析,得到磁链曲线和数据。实验室现有 SR 电机参数见表 1,将该 SR 电机尺寸参数

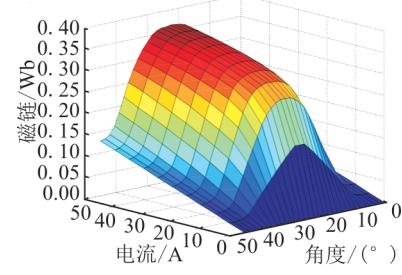
导入有限元软件 Ansoft 中可得数据 $L-i-\theta$ 和 $\psi-i-\theta$,如图 3 所示。

表 1 SR 电机参数

定子极数	12	转子极数	8
定子极弧	15	转子极弧	16
定子外径/mm	126.3	转子外径/mm	71.2
定子内径/mm	72.0	转子内径/mm	34.8
定子轭高/mm	7.0	转子轭高/mm	5.9
铁芯长度/mm	78.8	硅钢片	DW360_50
气隙/mm	0.4	匝 数	40
额定功率/mm	7.5	额定转速/(r·m⁻¹)	1 500



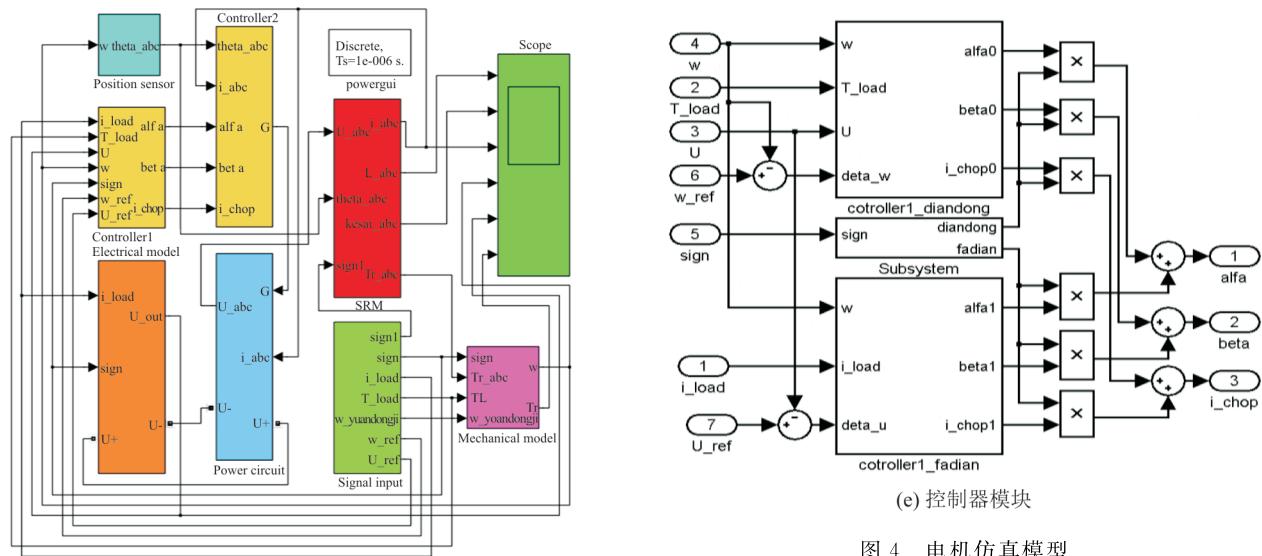
(a) 三相12/8的开关磁阻电机 $L-i-\theta$



(b) 三相12/8的开关磁阻电机 $\psi-i-\theta$

图 3 SR 电机参数关系

本文基于电机物理模型的数学分析和 Ansoft 软件对 SR 电机进行的有限元电磁分析,充分结合 SimPower Systems 组件与 Simulink 逻辑元件进行建模,根据组成结构将整个 SRS/G 系统分为 SR 电机本体模块、功率变换器模块、励磁电源模块、电气模块、机械模块、控制器模块、位置传感器模块和输入参数模块。其中,励磁电源模块、功率变换器模块、电气模块等由 Simulink 自带的 SimPower Systems 组件根据电路设计实现搭建;而 SR 电机本体模块、控制器模块、位置传感器模块等由 Simulink 库中的基本元件根据数学模型搭建组合而成,必要时辅助以自定义 M 函数进行补充,使模型更具开放性和可操作性,便于进行容错控制等优化措施。具体模型如图 4 所示。



(e) 控制器模块

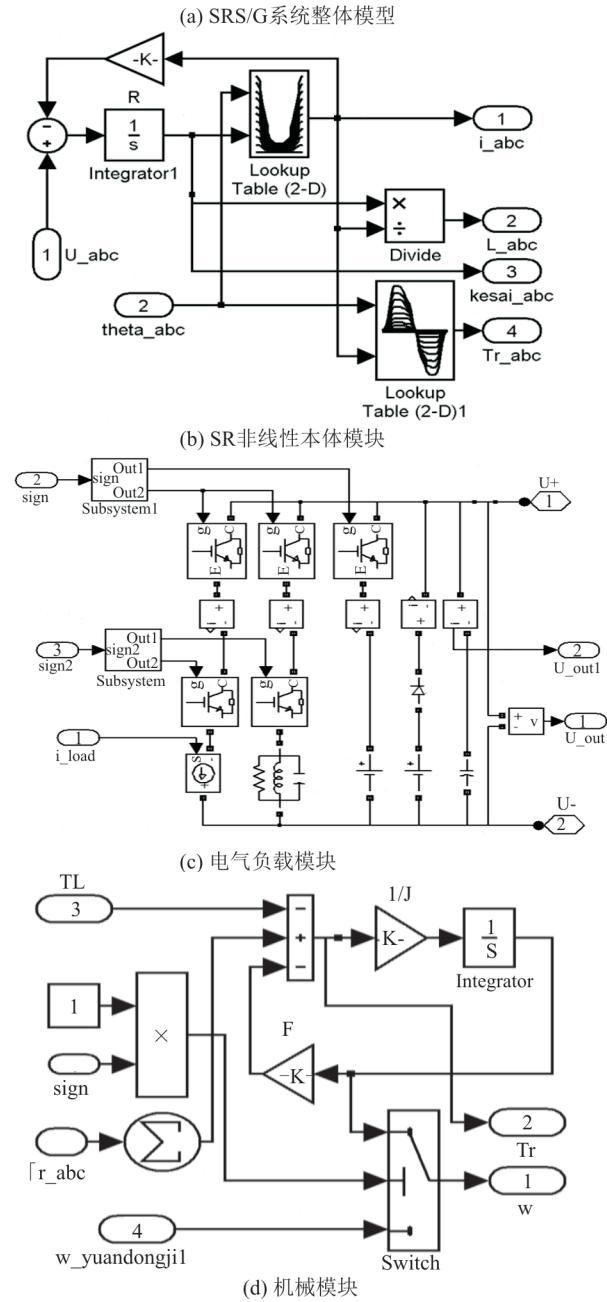
图4 电机仿真模型

图4(a)为SRS/G系统整体模型;图4(b)为SR电机本体模块,利用查表模块将有限元数据 $L-i-\theta$ 和 $\psi-i-\theta$ 进行导入,实现非线性模型的建立;图4(c)为电气负载模块,由恒压源支路、恒流源支路、RLC负载支路、输出滤波电容支路、以及励磁电源支路并联构成;图4(d)为根据机械方程搭建的机械模块;图4(e)为APC-CCC控制策略的控制器模块,进行电流和电压进行反馈控制,确定控制参数*i_chop*、 θ_{on} 和 θ_{off} ;sign就是电动与发电之间的切换开关,当sign=1时,SRS/G系统工作在发电状态,当sign=0时,SRS/G系统工作在电动状态,设置切换状态临界转速为1500 r/min。

2.3 仿真分析

电动状态下,当额定电压为380 V时,如图5(a)所示,输出转矩能够达到一个恒转矩起动的过程。由于输出转矩是合成转矩,输出转矩在换相时存在一定的脉动,这是SR电机本身的特点,只能减少而无法消除,但模型基本上处于一个平稳状态。

发电状态下,在转速为2000 r/min的原动机的带领下,进行空载快速建压,能够快速稳定在270 V附近,在1 s时突增恒流源负载10 A,实现调压,达到稳定后,2 s时突减恒流源负载5 A,观察输出电压和相电流的变化确定模型的正确性和可行性。如图5(b)所示,该SRS/G系统能够快速建压并稳定在270 V,且在突加或突减负载情况下,用较短的时间和较小的超调恢复到额定值,验证了该模型是可行的。限于篇幅,只对A相进行功率变换仿真,A相臂中的功率变换器件K_{A1}和K_{A2}的驱动信号如图5(c)所示,K_{A1}进行交替导通和关断,而K_{A2}在不断的交替的同时还在不断的进行斩波,实现APC-CCC的控制。



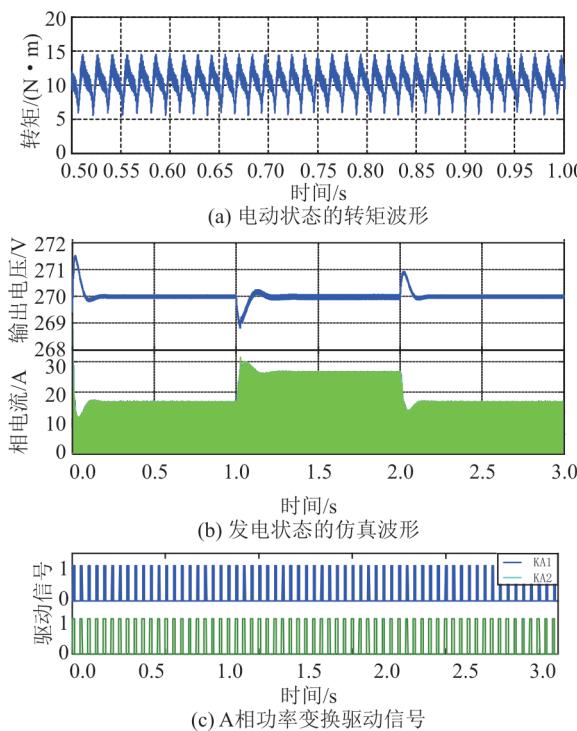


图 5 A 相仿真结果

SRM/G 系统仿真模型的建立是故障分析及其容错控制的基础。实际工作中,SRM/G 系统最常见故障为缺相运行,系统在缺相运行时的工作效率和供电品质大为降低。而造成系统缺相运行的原因主要有定子绕组开路或功率器件开路。若运行中定子绕组开路,尚无可行控制办法可解决,所以针对功率管故障条件下的 SRM/G 系统容错控制很有必要。

3 容错型 SRS/G 系统的非线性模型

功率变换器是 SRS/G 系统中关键部件,长期处于高频工作状态,其功率器件(开关管和二极管)很容易击穿,开路故障率较高。本文针对开路故障,设计了一种容错型的功率变换器,并进行建模与仿真验证。

3.1 容错控制结构

三相不对称半桥式功率变换器如图 6(a)所示,每相由 2 个开关管和 2 个二极管组成。以 A 相为例,当开关管 K_{A1} (K_{A2}) 出现开路故障,所在相定子绕组无法励磁,系统进入缺相运行状态。当 D_{A1} (D_{A2}) 出现开路故障,SRS/G 系统无法进行续流,控制保护电路会断开 A 相驱动信号,使得 SRS/G 系统进入缺相运行状态。由于负载不变,正常相将会增大相电流,提高各相的输出功率。

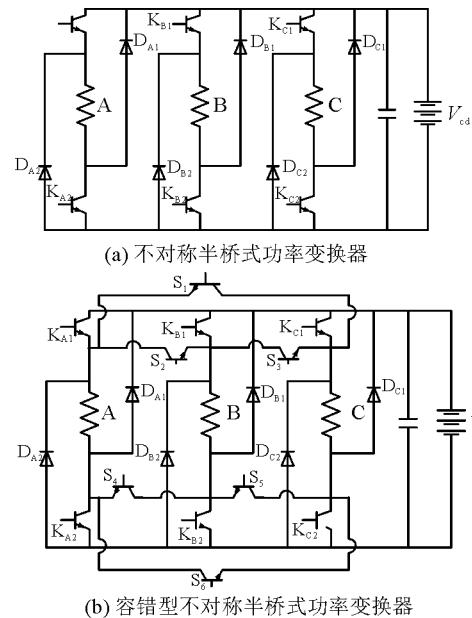


图 6 功率变换器结构

SR 电机各相轮流工作,始终会存在一相或两相处于空闲状态。本文利用硬件冗余的思想设计了一种具有容错性的功率变换器,利用空闲相的功率变换器件代替故障相的功率变换器件。如图 6(b)所示,当 K_{A1} 出现开路故障时,导通容错开关 S_1 ,利用空闲相 K_{C1} 代替 K_{A1} 进行电流斩波;其他器件替换具体对应如表 2 所示。

表 2 容错控制开关

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}

3.2 仿真验证

针对以上容错型功率变换器,利用 6 个 IGBT 管作为容错开关,如图 7 所示。限于篇幅,只对 K_{A1} 出现故障进行仿真。

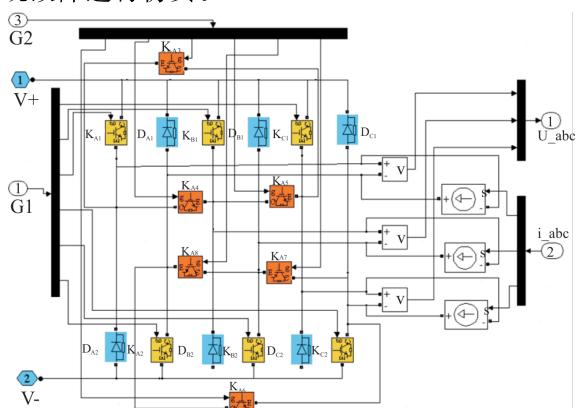


图 7 容错型功率变换器

3.2.1 故障状态

利用人为设置故障,对故障状态下的输出性能进行仿真。发电状态下,设置2 000 r/min的转速和10 A的恒流源负载,在1 s时 K_{A1} 出现开路故障,SRS/G系统进入缺相运行,如图8(a)所示,A相的最大值电流由18 A迅速将至0 A,B、C相的最大相电流将会增大至25 A,增大了B、C相功率器件的负担;输出电压虽然能迅速回到额定值270 V,但是电压脉动将增大接近3倍。输出性能的下降,会大大影响用电设备的寿命和SRS/G系统本身的效果。

起动状态下,在额定电压为380 V的条件下,合成转矩几乎达到10 N·m。当起动后运行到0.75 s时,设置A相 K_{A1} 开路故障,合成转矩如图8(b)所示,由于A相不再输出转矩,合成转矩出现死区。SRS/G系统本身虽有一定的容错性,但其输出性能将随着故障的出现会大大下降,如不及时处理将导致故障扩大化或者产生二次故障。

无论是发电还是电动状态下,功率变换器 K_{A1} 的驱动信号都会变为0,这里只对发电状态下进行分析仿真。如图8(c)所示,当1 s发生故障后, K_{A1} 的驱动信号迅速变为零,而转子和定子的角度还在不断的改变, θ 与 θ_{on} 、 θ_{off} 不断进行比较,形成 K_{A2} 的驱动信号。

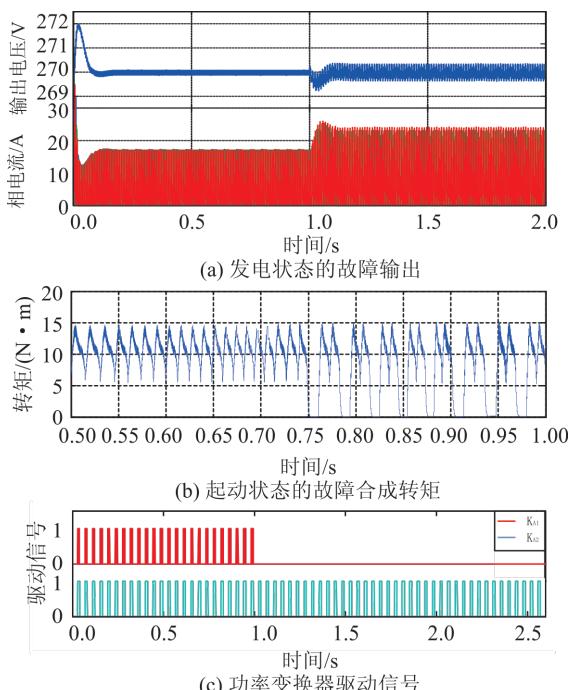


图8 故障条件下的输出

3.2.2 容错状态

发电状态下,设置2 000 r/min的原动机转速和10 A的恒流源负载,在1 s时 K_{A1} 开路故障,经过短暂的调整,系统自动闭合容错开关 S_1 ,将 K_{A1} 斩波驱动信号加至 K_{C1} ,使得系统能正常运行,从而达到容错的作用。如图9(a)所示,输出电压在短暂的时间内调节,使得输出电压恢复到270 V左右,且电压

脉动也满足要求(6 V内),相电流也下降至正常运行的附近,大大提高了SRG系统的输出性能。电动状态下,额定电压380 V起动后,在0.75 s设置 K_{A1} 故障,SRS系统自动闭合容错开关 S_1 ,用 K_{C1} 代替 K_{A1} ,从而使得A相能够正常。如图9(b)所示,不仅消除了转矩死区,而且提高了平均转矩和减小了转矩脉动。功率变换器 K_{A1} 、 K_{A2} 、 K_{C1} 、 K_{C2} 的驱动信号如图9(c)所示,容错后 K_{C1} 的驱动信号的频率大了一倍。

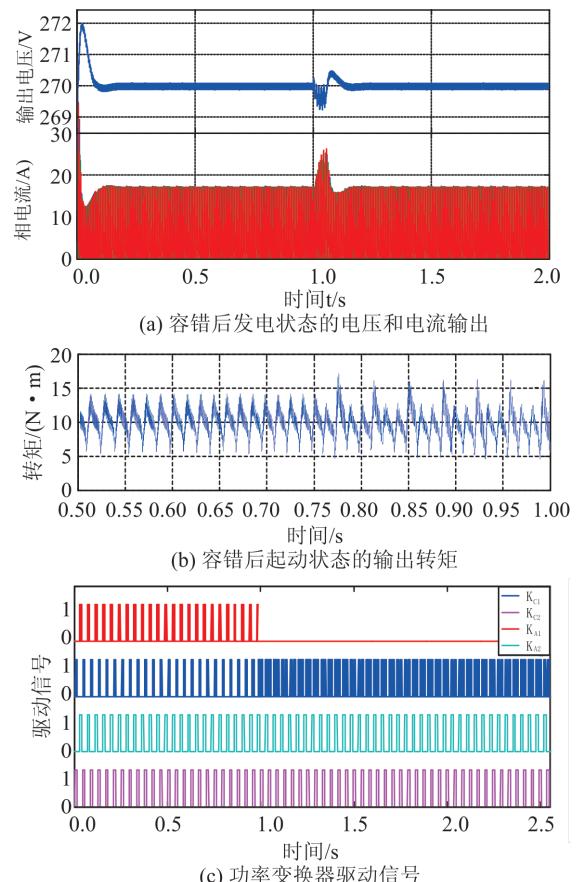


图9 容错后的系统输出

4 结语

SRS/G系统是多/全电飞机的起动、发电一体化的系统,具有很高的研究价值。本文利用Ansoft和Matlab仿真软件,搭建了SRS/G非线性仿真平台,并验证了模型的正确性;针对系统中高故障率的功率变换器,对比了开路故障的输出性能规律,设计了一种容错型功率变换器,并搭建成仿真模块与SRS/G仿真平台结合成容错型SRS/G仿真平台,分别在电动和发电状态下进行验证,大大提高了SRS/G系统的输出性能。但是仍存在一定的问题,容错后,替换的功率变换器件将增大一倍的斩波频率,增大了该功率变换器件的故障率,SRS/G系统不能长期工作在容错状态。

参考文献(References) :

- [1] 朱叶盛,章国宝,黄永明.基于 PWM 的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制[J].电工技术学报,2017,32(7):31-39.
ZHU Y S, ZHANG G B, HUANG Y M. PWM-Based Direct Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 31-39. (in Chinese)
- [2] 陈飞,瞿遂春,邱爱兵,等.电动车用开关磁阻电机设计与优化方法[J].电机与控制应用,2017,44(10):114-118.
CHEN F, QU S C, QIU A B, et al. A Design and Optimization Method of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(10):114-118. (in Chinese)
- [3] RUBA M, VIOREL I A, SZABO L. Modular Stator Switched Reluctance Motor for Fault Tolerant Drive Systems [J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7 (3): 159-169.
- [4] SZABO L, RUBA M. Segmental Stator Switched Reluctance Machine for Safety-Critical Applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (6): 2223-2229.
- [5] HU Y H, GAN C, CAO W P. Central-Tapped Node Linked Modular Fault-Tolerance Topology for SRM Applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1541-1554.
- [6] SONG S J, LIU W G, PEITSCH C D, et al. Detailed Design of a High Speed Switched Reluctance Starter/Generator for More/All Electric Aircraft [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(2):216-226.
- [7] 宋受俊, 刘卫国, Uwe Schaefer. 多/全电飞机用高速开关磁阻起动/发电机优化控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4):44-52.
SONG S J, LIU W G, SCHAEFER U . Optimal Control of a High Speed Switched Reluctance Starter/Generator for the More/All Electric Aircraft [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4):44-52. (in Chinese)
- [8] 丁文, 梁得亮. 双通道开关磁阻起动/发电系统建模与仿真[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(5):78-86.
DING W, LIANG D L. Modeling and Simulation of Dual-Channel Switched Reluctance Starter /Generator System[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15 (5):78-86. (in Chinese)
- [9] 蔡永红. 开关磁阻电机智能建模及容错控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
CAI Y H. Intelligent Modeling and Fault-Tolerant Control of Switched Reluctance Motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [10] 卢胜利, 陈昊, 翁小舒. 开关磁阻电机功率变换器的故障诊断与容错策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 200-206.
LU S L, CHEN H, ZAN X S. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for Power, Converter of Switched Reluctance Motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 200-206. (in Chinese)
- [11] 刘星平, 罗湘运, 李世军. 开关磁阻电机功率变换器故障在线诊断[J]. 控制工程, 2016, 23(5):788-794.
LIU X P, LUO X Y, LI S J. Online Fault Diagnosis for Power Converter of Switched Reluctance Motor [J]. Control Engineering of China, 2016, 23(5):788-794. (in Chinese)
- [12] 刘勇智, 戴聪, 周政, 等. 基于上下续电流的功率变换器故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21 (11):62-72.
LIU Y Z, DAI C, ZHOU Z, et al. Fault Diagnosis of Power Converter Based on Stream Current [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(11): 62-72. (in Chinese)
- [13] 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 C. Research and Design for New Power Convert Circuit of Switched Reluctance Motor[J]. Electric Machines and Control Applications, 2011, 38 (3): 12-16. (in Chinese)
- [14] LIU C. A New Design Method for the Fault Diagnosis on the Rotating Rectifier of Aeronautic Synchronous Generator [J]. Advanced Material Research, 2012, 8: 544.
- [15] SAWATA T, KIAER P, COSSAR C, et al. Fault-Tolerant Operation of Single-Phase Switched Reluctance Generators[C]//Proceedings of 12th Applied Power Electronics Conference and Exposition. Atlanta, USA: [s. n.], 1997: 553-558.
- [16] XIAO L, SUN H X, LIU W P, et al. Fault Tolerant Power Converter for Four-Phase Switched Reluctance Motor[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(7): 1054-1059.
- [17] 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):8-20.
CHEN X Y, DENG Z Q, LIAN G K, et al. High Performance Fault Tolerant Switched Reluctance Motors with Modular Stators[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(6):8-20. (in Chinese)
- [18] 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. Ischia, Italy: IEEE, 2008: 301-306.

(编辑: 徐楠楠)