DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.06.028

五相永磁同步电机容错控制仿真

银豪,王腾飞,高超,汪慧明

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘　要:研究了五相永磁同步电机的容错控制,基于五相电机多相短路以及逆变器发生短路和断路故障提出解决方案并进行过程仿真。当五相电机逆变器发生故障时,通过双向晶闸管切除故障支路,接通冗余支路使电机正常运行;当五相电机发生两相断路时,无论是毗邻的两相还是非毗邻的两相,利用降维的修正克拉克和帕克变换矩阵,重新分配正常三相的定子电流,使空间磁动势不变,并且保证转子磁链在 2 s 坐标系下保持圆形轨迹,使电机在缺相下正常运行。容错方案均在 Matlab/simulink 环境下进行了仿真。

关键词:五相永磁同步电机;逆变器;容错控制;解耦模型

中图分类号:TM341　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1671-5276(2019)06-0107-04

Fault Tolerant Control of Five-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor and Its Process Simulation

YIN Hao, WANG Tengfei, GAO Chao, WANG Huiming

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper investigates fault tolerant control for five-phase PMSM, puts forward its solutions under open fault and inverter fault. If the fault occurs in the inverter, the bidirectional diode thyristor is used to open the fault circuit and make on the redundant circuit. If the open circuit fault occurs on the two phases of this motor no matter what happened, the phases are adjacent or nonadjacent, the reduced-order clarke and park transformation are used to distribute the stator current again, thus making the five-phase PMSM operate normally. All the fault tolerant solutions are simulated in Matlab/Simulink environment.

Keywords: five-phase PMSM; inverter; fault tolerant control; decoupled modeling

0　引言

当今电子元件驱动正逐步取代传统的机械、气动驱动系统,电子驱动具有高效率、易于控制、体积小等优点得到了人们的重视。半导体电子元件的应用对电子驱动系统起到了更进一步的作用,但是半导体元件被证实更容易损坏,因此在一些安全级别较高的系统或者敏感性更强的产品需要采用容错驱动控制。在驱动系统的所有部件中,由于功率开关在变载荷变温度的环境下工作,因此更容易发生故障;同时,电机相断路故障也应考虑,因为它们在变化频繁的情况下工作,由于故障的频发性导致控制系统运行不稳定甚至无法运行,因此,调速系统的容错控制引起了人们的广泛关注。

关于逆变器的故障,文献[1]提出了关于逆变器故障的容错方案;为了达到故障后的稳定运行,电机或者逆变器故障支路的中性点与直流电压的中点连起来,采用两个电容器的方案[2];文献[3]采用电磁继电器来分离故障支路和连接冗余支路;文献[4]介绍了 FOC 控制系统中不同部件如 DSP、逆变器、位置编码器、电流传感器发生故障采用的解决方案,在解决逆变器故障时,采用了双向晶闸管分离故障支路和接通冗余支路;为了分析电压型逆变器的开路和短路故障特性,提出了逆变器与积分因果关系的阻感负载的键合图模型[5]。此外五相电机可以在一相或者多相断路的情况下正常运行,故障后空间的磁动势将会和故障前的磁动势保持一样[6-7]。文献[8-9]提出了如何在两相断路的情况下,重新分配正常三相电流;文献[10]给出了降维的克拉克与帕克变换,分析了两相断路后的电机运行性能,采用 SMC 来降低故障后的转矩脉动;为了确保故障后的高效运行,文献[11-12]提出了优化的解决方案且增加限制;文献[13]介绍了五相电机一相断路采用基于定子铜耗方程的容错电流控制;文献[14]介绍了五相感应电机缺相故障基于磁动势不变的原则确定容错控制策略。

本文针对五相永磁同步电机驱动的容错控制,分析了逆变器的支路发生短路和断路情况,通过采用双向晶闸管去分离故障支路和接通冗余支路,两电平电压型逆变器可以正常逆变将交流电流输入五相电机,电机仍然可以正常运行。通过 simulink 仿真了断路和短路过程并且采取容错控制解决方案,显示了容错思路的正确性。仿真了五相电机在两相缺相下的运行过程,采用了降维修正的克拉克和帕克变换矩阵,重新分配了三相电流,保证了磁动势和转子磁链在 $\alpha\beta$ 坐标系下做旋转运动。通过合理的变换,五相电机在不平衡的同步坐标系中得到了解耦,可以很好

作者简介:银豪(1995—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为车辆工程。

地利用 FOC 和 CHBPWM 进行控制,从仿真图像可以看出,五相电机在缺相的情况下仍然正常运行,定子空间磁动势轨迹保持圆形。

1　五相电机的逆变器容错原理

图 1 为五相电机逆变器容错的原理图。

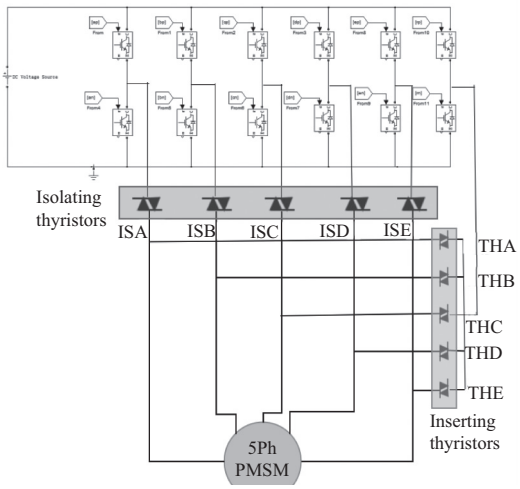


图 1　逆变器容错原理图

一个标准的两电平五相逆变器包含了五相支路,但是容错逆变器由六相支路组成,其中一相是冗余支路,当逆变器中没有故障时该冗余支路不被使用。双向晶闸管(ISA、ISB、ISC、ISD、ISE)连接逆变器各相输出端(VA、VB、VC、VD、VE)和电机的五相输入端,这些晶闸管用来切除故障支路,而晶闸管(THA、THB、THC、THD、THE)与冗余支路的输出端和电机五相输入端相连,用来接通冗余支路。

以下几种故障情况将影响系统运行:1)单个 IGBT 开路;2)相支路开路故障;3)单个 IGBT 短路;4)相支路短路故障。由于同一支路的两个支路同时发生短路这种情况概率很低,因此将不研究 4)这种情况。

1.1　IGBT 断路的容错仿真

IGBT 的开路故障可能是由于门控驱动的故障或者是结合线的断开造成的。当其中一个 IGBT 发生断路时,为了保证电机继续运行,在故障那相的电流将会在半个周期内为 0。如果是上面的 IGBT 断路,那么在电流的正半周期,与该相连接的线路电流将会为 0,直到负半周期电流的到来。为了补偿这种不平衡,补偿电流将会在正常支路平均分配,这将会导致晶体管的热缺陷响应,因此必须尽快检查出故障。当 IGBT 的断路故障被检查出来后,门控信号输送信号给相应的支路晶闸管(ISA、ISB、ISC、ISD、ISE)使其分离,同时,原来输送给故障支路的信号传输到冗余支路上,控制 IGBT 的通断,并且控制相应的晶闸管(THA、THB、THC、THD、THE)通断,这个方法同样适用于支路断路故障。

在 simulink 环境中,建立相断路的仿真模型,仿真参数见表 1。

图 2 展示了 A 相支路上部 IGBT 断路整个仿真过程的模型,对各个物理量采用示波器观测。该模型假设断路发生后经过 0.02 s 发现故障,当 0.1 s 时 A 相上方的 IGBT 发生断路,当 0.12 s 时,系统发现故障,传送信号给 ISA 封锁 A 相支路,同时传送信号给 THA,打开冗余支路使之传送到电机 A 相,并将原先传送给 A 相 IGBT 的通断信号传送给冗余支路的 IGBT。

表 1　仿真参数表

参数	值
转子磁链 Ψf/Wb	0.175
d 轴电感 Ld/mH	8.5
Q 轴电感 Lq/mH	8.5
磁极对数 p	4
转动惯量 J/kg·m^2	0.8×10^{-3}
电机定子电阻 R/Ω	2.875
IGBT 内阻 R_1/Ω	0.001
IGBT 缓冲电阻 R_2/Ω	1×10^5

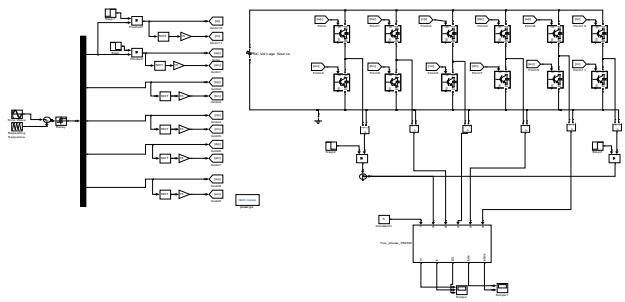


图 2　IGBT 断路时的仿真模型

仿真的结果如图 3 所示。从上到下依次为转子转速、电磁转矩、电角度、定子电流。在 0.1 s~0.14 s,各物理量在此区间产生了一定的波动。0.1 s 时,电磁转矩瞬时下降并且转子转速也大幅下降,并在很大范围内产生波动,随着时间的推移,波动幅度逐渐减小,到 0.14 s 时,各物理量基本达到了稳定,控制系统继续稳定地运行,电机恢复正常工作。

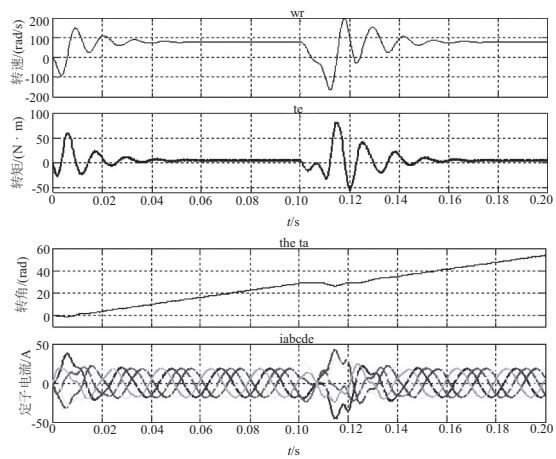


图 3　仿真结果图像

1.2　IGBT 的短路容错仿真

IGBT 的短路故障可能是由于门控驱动出现故障或者

在IGBT内发生了永久性破坏造成的。IGBT发生短路时,硬件保护将会关闭所有的IGBT让短路电流变为0来分离故障支路。通过理论分析和实验[15],证明了关闭所有的IGBT和晶闸管可以让短路电流变为0。当短路电流达到0后,经过一段延迟(大约500 μs),接入冗余支路,同时剩余的支路也恢复通断,各支路的IGBT通断信号以及支路上的晶闸管信号正常接通。因此,永磁同步电机内送入了正常的电流,电机恢复正常运转。图4展示了该过程的仿真模型,此模型假设0.1 s时A相上部IGBT发生短路,并且经过0.02 s发现该故障,并且关闭所有IGBT和晶闸管让短路电流变为0,0.1206 s时,接入冗余支路分离故障支路,同时恢复各相信号。

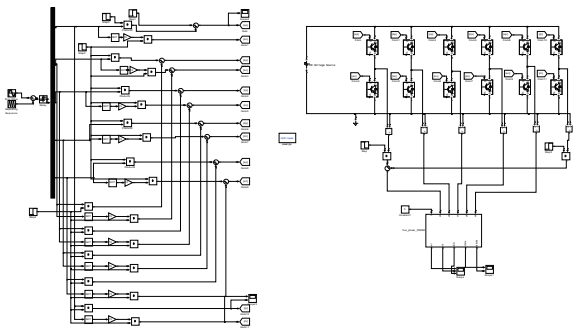


图4　IGBT短路的仿真模型

仿真结果如图5所示,从上到下依次为转速、电磁转矩、电角度和五相电流。0.01 s时A相上方IGBT发生短路,电磁转矩此时存在瞬时的增长,因为短路电流造成了电磁转矩的升高,紧接着电磁转矩和转速发生了很大的波动,同时,定子电流也有增大的趋势。0.1206 s时,冗余支路接入且故障支路被分离,其余相也恢复正常,直到0.15 s,各物理量基本达到了稳定。

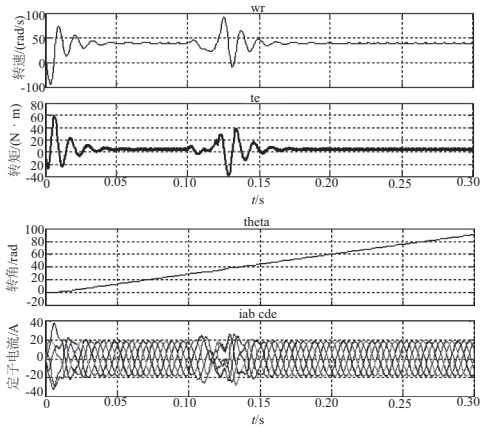


图5　仿真结果图像

2　五相永磁同步电机的两相断路容错

介绍了两相断路(无论是毗邻还是非毗邻)的解耦模型,为了使故障后MMF与转子磁链在$\alpha\beta$坐标系中仍然保持圆形运动,利用修正的克拉克和帕克变换矩阵,重新分配三相正常相路上的电流。

关于哪两相断路,有10(C_5^2)种可能,因此需要在DCS系统中存入10种变换矩阵,通过检测器判断哪两相发生断路从而采用哪种变换。

分析毗邻相的断路情况,假设定子线圈上的分量满足正弦规律,并且转子磁链为常数,磁饱和与齿槽效应不考虑。

2.1　降维修正的Clarke和Park变换

当AB相发生断路,在正常相的定子电流需要保证产生的磁动势和故障前相同,即:

$$\frac{5}{2}I^{j}\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right)=iA+e^{j\frac{2\pi}{5}}iB+e^{j\frac{4\pi}{5}}iC+e^{j\frac{6\pi}{5}}iD+e^{j\frac{8\pi}{5}}iE$$

$$(iA=0,iB=0) \tag{1}$$

正常情况下,$\Psi_{m-\alpha}$、$\Psi_{m-\beta}$在$\alpha\beta$坐标系下的轨迹是圆形,而$\Psi_{m-\alpha}^{AB}$、$\Psi_{m-\beta}^{AB}$在$\alpha\beta$坐标系下却为椭圆,见图6。

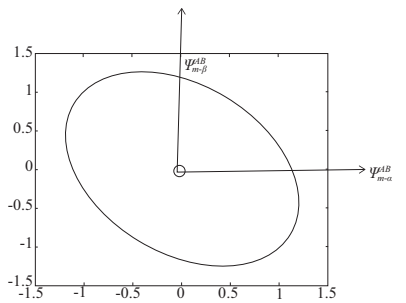


图6　$\Psi_{m-\alpha}^{AB}$、$\Psi_{m-\beta}^{AB}$的轨迹

椭圆运行是不稳定的,可以发现永磁磁链的零序分量不为0,并且相对Ψ_A滞后$\pi+\frac{\pi}{5}$,因此零序分量可以用来调整$\Psi_{m-\alpha}^{AB}$、$\Psi_{m-\beta}^{AB}$的轨迹,使其呈圆周运动,见图7。

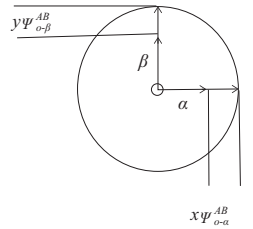


图7　补偿原理示意图

补偿后可得:

$$\begin{vmatrix}\Psi_{m-\alpha}^{AB}\\ \Psi_{m-\beta}^{AB}\\ \Psi_{m-o}^{AB}\end{vmatrix}=\frac{2}{5}\begin{vmatrix}\cos\frac{4\pi}{5}-\cos\frac{2\pi}{5} & \cos\frac{6\pi}{5}-\cos\frac{2\pi}{5} & \cos\frac{8\pi}{5}-\cos\frac{2\pi}{5}\\ \sin\frac{4\pi}{5}-\tan\frac{\pi}{5}\cos\frac{2\pi}{5} & \sin\frac{6\pi}{5}-\tan\frac{\pi}{5}\cos\frac{2\pi}{5} & \sin\frac{8\pi}{5}-\tan\frac{\pi}{5}\cos\frac{2\pi}{5}\\ 1 & 1 & 1\end{vmatrix}\begin{vmatrix}\Psi_{m-c}\\ \Psi_{m-d}\\ \Psi_{m-e}\end{vmatrix}=\Psi_m\begin{vmatrix}\left(0.6+0.4\cos\frac{2\pi}{5}\right)\cos\theta\\ \left(0.6+0.4\cos\frac{2\pi}{5}\right)\sin\theta\\ -0.647\ 2\cos\left(\theta-\frac{\pi}{5}\right)\end{vmatrix} \tag{2}$$

其中:$\Psi_{m-\alpha}^{AB}$、$\Psi_{m-\beta}^{AB}$、Ψ_{m-o}^{AB}代表当AB断路时永磁磁链在α轴、β轴以及零序轴上的分量,Ψ_{m-c}、Ψ_{m-d}、Ψ_{m-e}代表永磁磁链在正常情况下在c、d、e轴上的分量,$\Psi_{m-\alpha}$、$\Psi_{m-\beta}$、Ψ_{m-o}代表正常情况下永磁磁链在α轴、β轴以及零序轴上的分量。

修正后的clarke与park变换矩阵见式(3)、式(4)。

$$\boldsymbol{T}_{\text{clarke}}^{AB}=\frac{2}{5}\begin{vmatrix}\cos\frac{4\pi}{5}-\cos\frac{\pi}{5} & \cos\frac{6\pi}{5}-\cos\frac{\pi}{5} & \cos\frac{8\pi}{5}-\cos\frac{\pi}{5}\\ \sin\frac{4\pi}{5}-\tan\frac{\pi}{5}\cos\frac{2\pi}{5} & \sin\frac{6\pi}{5}-\tan\frac{\pi}{5}\cos\frac{2\pi}{5} & \sin\frac{8\pi}{5}-\tan\frac{\pi}{5}\cos\frac{2\pi}{5}\\ 1 & 1 & 1\end{vmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{T}_{\text{park}}=\begin{vmatrix}\cos\theta & \sin\theta & 0\\ -\sin\theta & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 1\end{vmatrix} \tag{4}$$

2.2 AB相断路仿真

采用经典的FOC,$id=0$控制,AB断路的仿真模型如图8所示。

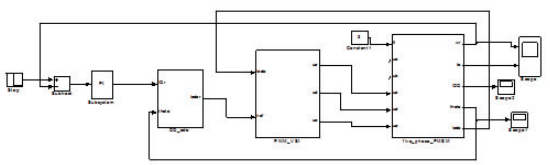


图8　AB相断路仿真控制图

仿真中设置负载转矩为3N·m,转子转速设置为100 rad/s,到0.1 s时变为30 rad/s,仿真图像如图9所示。

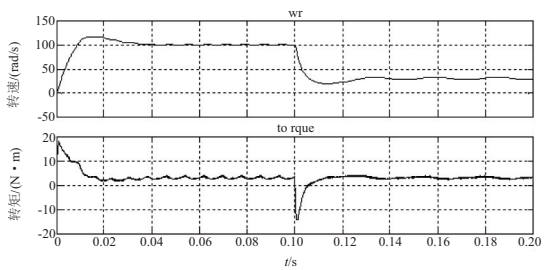
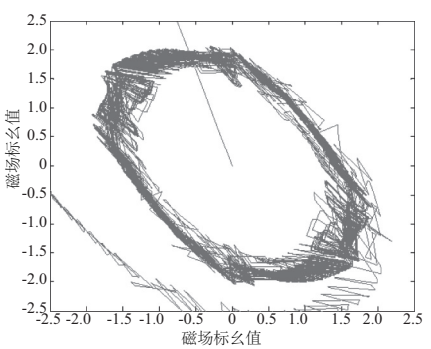
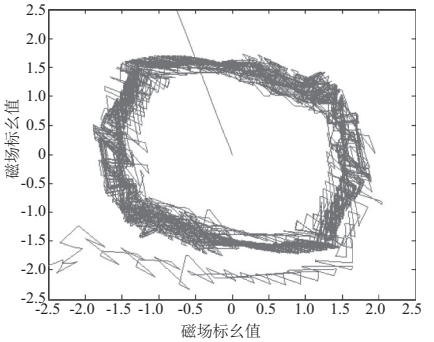


图9　仿真结果

转矩和转速很好地跟踪了指令值,当转速较低时,转速和转矩具有比较大的波动,电机正常运行,验证了修正Clarke和Park变换原理的正确性。图10展示了不重新分配电流与重新分配电流的定子磁动势轨迹。



a) 不重新分配电流



b) 重新分配电流

图10　定子空间磁动势轨迹

修正的Clarke与Park变换可以保持磁动势为圆形,从而产生稳定的转矩。其余两相断路情况分析相同。

3　结语

研究了五相永磁同步电机驱动系统的容错控制,建立了IGBT断路与短路容错控制仿真模型以及电机两相缺相的容错模型,采取双向晶闸管切除接通与修正变换矩阵重新分配电流的措施,在simulink环境下仿真,验证了方案的可行性,为进一步研究五相驱动系统高效的容错性能提供了依据。

参考文献:

[1] B.A.Welchko,T.A.Lipo,T.M.Jahns, et al. Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies:a comparison of features,cost, and limitations[J]. IEEE Trans.Power Electron, 2004,19(4):1108-1116.

[2] T.H.Liu,J.R.Fu, T.A.Lipo. A strategy for improving reliability of field-oriented controlled induction motor drives[J]. IEEE Trans. Ind.Applicant, 1993,29(1A):910-918.

[3] M.Naidu,S.Gopalakrishnan, T.W.Nehl. Fault-tolerant permanent magnet synchronous motor drive topologies for automotive X-by-wire systems[J]. IEEE Trans.Ind.Applications, 2010,46:841-848.

[4] RR Errabelli,P Mutschler. A fault tolerant control and power electronic for a permanent magnet synchronous motor drive[J]. European Conference on Power Electronics & Applications, 2011,41(8):1-10.

[5] 韩旺旺,陈则王,李川江. 电压型逆变器键合图建模及其故障诊断研究[J]. 机械制造与自动化,2016,45(6):114-117.

[6] S.Payami,R.K.Behera, A. Iqbal, et al. Common-mode voltage and vibration mitigation of a five-phase three-level NPC inverter-fed induction motor drive system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topic in Power Electronics, 2015(3):349-361.

[7] G.Liu,L.Qu,W.Zhao,et al. Comparison of two SVPWM control strategies for five-phase faulted-tolerant permanent-magnet motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015,31(9):1-5.

[8] M.I.Masoud,S.M.Dabour,A.E.W.Hassan, et al. Control of five-phase induction motor under open-circuit phase fault fed by fault tolerant VSI[C]. Diagnostics for Electrical Machine, Power Electronics and Drives(SDEMPED),2015 IEEE 10th International Symposium, 2015:327-332.

(下转第149页)