

无刷直流电机驱动控制容错方案研究

林海, 严卫生, 李宏

(西北工业大学航海学院, 710072, 西安)

摘要: 在分析一种容错逆变器工作原理的基础上,研究了逆变器侧发生故障的 3 种容错方案(A 相容错、B 相容错和 C 相容错). 由常规的六开关三相无刷直流电机控制中的电流特性得到一条通用结论:只要控制非容错相的两相相电流就可以实现无刷直流电机逆变器侧故障情况下的电流控制. 由此结论,提出了一种基于容错逆变器的无刷直流电机新型控制策略. 该策略利用容错逆变器的 4 个“非对称电压矢量”,仅通过非容错相的两相电流控制器实现了系统故障时电机三相电流的控制. 该策略简单可行,仿真和实验进一步验证了策略的正确性和有效性.

关键词: 容错逆变器;无刷直流电机;电流控制

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)02-0053-05

Inverter Fault-Tolerant Operation of Brushless DC Motor Drives

LIN Hai, YAN Weisheng, LI Hong

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A novel inverter fault-tolerant control scheme is proposed to drive brushless dc motor (BLDC) based on current character of the traditional six-switch three phases converter BLDC. Analysing a fault-tolerant inverter and its three fault-tolerant schemes(phase A fault-tolerant, phase B fault-tolerant, and phase C fault-tolerant). A general conclusion is drawn that BLDC can be controlled by controlling two faultless phases currents when inverter is faulty. In the proposed strategy, three phase currents are shaped directly by two faultless phases current hysteresis controllers, and the conducting sequence of four power switches is rearranged by four asymmetric voltage vectors. The simulation and experimental results demonstrate the strategy is able to operate stably and continuously with good dynamic performance.

Keywords: fault-tolerant converter; brushless DC motor; current control

近年来,由于无刷直流电机(BLDC)具有结构简单、体积小、可靠性高、输出转矩大等特点,被广泛应用在家电、电力机车、飞行器、船舶推进等交流调速领域中. 各个领域对电机控制的要求越来越高,既要考虑成本低廉、控制算法合理,又要兼顾控制性能好、开发周期短等方面,同时也对 BLDC 数字化研究也提出了更高的要求,即在特定场合电机控制系统发生故障时具有容错控制能力.

目前,电机控制系统故障检测、诊断及容错运行已经成为交流电机调速领域研究热点之一. 研究人

员对交流电机调速系统中电机、逆变器及传感器的故障容错控制策略进行了大量的工作^[1-10]. 文献[1]提出了两种异步电机调速系统容错逆变器拓扑结构. 文献[2-3]分析了异步电动机及发电机故障发生后四开关逆变器供电下的新型 DTC 策略. 随着研究的广泛开展,针对永磁同步电机的容错控制策略也在不断研究中^[4-5],文献[4]分析永磁同步电机的故障检测和容错方法,文献[5]针对永磁同步电机直接转矩控制系统提出了一种新型容错控制方法. 然而,对于无刷直流电机的容错控制策略研究较少,大

$$\left. \begin{aligned} u_{an} &= V_d(2S_c - S_a - 0.5)/3 \\ u_{bn} &= V_d(1 - S_c - S_a)/3 \\ u_{cn} &= V_d(2S_a - S_c - 0.5)/3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

联合式(1)、式(6)和式(7),当A相和B相开关发生故障时,电压矢量方程分别为

$$u_s(S_b, S_c) = \frac{2}{3}V_d(0.5 + \alpha S_b + \alpha^2 S_c) \quad (8)$$

$$u_s(S_a, S_c) = \frac{2}{3}V_d(0.5\alpha + S_c + \alpha^2 S_a) \quad (9)$$

对于四开关三相逆变器,由不同的开关状态可以得到4个不同的基本电压空间矢量.在3种容错方式(A相容错、B相容错和C相容错)下,其4个基本电压空间矢量如表1所示.

表1 3种逆变器容错方式下的4个电压空间矢量

容错相	$v'_1(00)$	$v'_2(10)$	$v'_3(11)$	$v'_4(10)$
A相	$\frac{1}{3}V_d e^{j0}$	$3^{-\frac{1}{2}}V_d e^{j\frac{1}{2}\pi}$	$\frac{1}{3}V_d e^{j\pi}$	$3^{-\frac{1}{2}}V_d e^{j\frac{3}{2}\pi}$
B相	$\frac{1}{3}V_d e^{j\frac{2}{3}\pi}$	$3^{-\frac{1}{2}}V_d e^{j\frac{7}{6}\pi}$	$\frac{1}{3}V_d e^{j\frac{5}{3}\pi}$	$3^{-\frac{1}{2}}V_d e^{j\frac{1}{6}\pi}$
C相	$\frac{1}{3}V_d e^{-j\frac{2}{3}\pi}$	$3^{-\frac{1}{2}}V_d e^{-j\frac{1}{6}\pi}$	$\frac{1}{3}V_d e^{j\frac{1}{3}\pi}$	$3^{-\frac{1}{2}}V_d e^{j\frac{5}{6}\pi}$

由表1得出,3种容错方式下4个电压矢量在定子静止坐标系 $\alpha\beta$ 下的空间分布如图3所示.

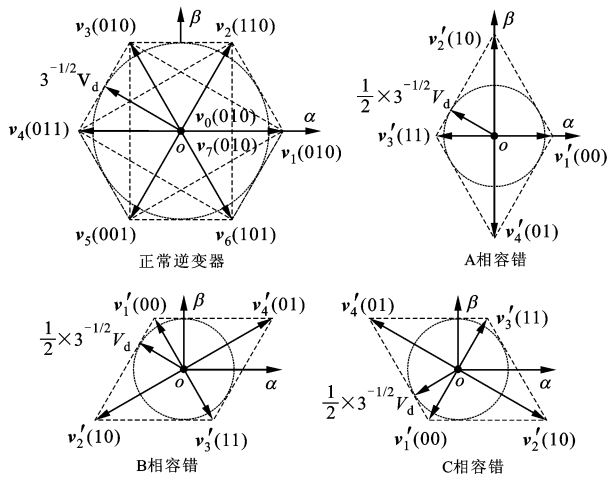


图3 逆变器的4个电压矢量空间分布

如图3所示,正常逆变器(六开关三相逆变器)有6个对称的非零电压矢量和2个零电压矢量,3种容错方式下的逆变器有4个幅值不等的“非对称电压矢量”,且无零矢量.可以看到,在无过调制的PWM控制方式下,四开关三相逆变器适合产生峰值为 $\frac{1}{2} \times 3^{-\frac{1}{2}}V_d$ 的基本相电压,该峰值为正常工作

条件下常规6个开关逆变器(峰值为 $3^{-\frac{1}{2}}V_d$)的基本相电压的一半.因此,四开关三相逆变器仅能产生一半的额定功率.

2 容错控制方案

对于六开关三相无刷直流电机,在二二导通控制方式下,电机电流、反电动势和转矩如图4所示.从电机的角度上看,即使在无刷直流电机由四开关三相逆变器供电,电机的电流波形、反电动势也必须与六开关三相无刷直流电机的相同.定子电流定义如表2所示.

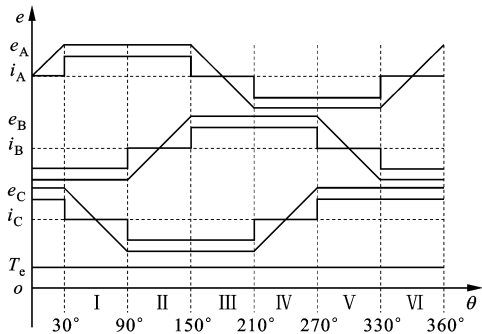


图4 六开关三相无刷直流电机电流、反电动势和转矩

表2 无刷直流电机三相定子电流

θ_c	I	II	III	IV	V	VI
i_A	$+i_s$	$+i_s$	0	$-i_s$	$-i_s$	0
i_B	$-i_s$	0	$+i_s$	$+i_s$	0	$-i_s$
i_C	0	$-i_s$	$-i_s$	0	$+i_s$	$+i_s$

注: θ_c 为转子位置信号分区,具体定义可参考图4; i_s 为相电流幅值.

由图2可知,当容错逆变器C相容错时,由于电机C相绕组直接连接到两个“劈相”电容中点,故C相绕组电流不能由逆变器直接控制.考虑无中线引出的无刷直流电机三相定子电流之和为0,因此C相电流满足

$$-i_C = i_A + i_B \quad (10)$$

要控制C相定子电流,可以通过间接控制A相和B相定子电流来实现.此时仅控制A相和B相定子电流就可以实现三相定子电流的控制.对于容错逆变器A相和B相容错的分析与以上分析类似.

综上所述,在无刷直流电机容错逆变器控制中,只要控制非容错相的两相相电流就可以实现无刷直流电机三相电流控制,即可以实现逆变器侧故障情况下的无刷直流电机控制.

控制方案采用速度和电流双闭环控制方式(见

图 5). 速度控制器采用 PI 控制器, 电流控制器采用滞环控制器. 定子电流的参考幅值(i_s^*)可以通过参考转速和实际转速比较后经过转速 PI 控制器得到. 三相参考电流可通过参考电流幅值和电机转子位置信号经过参考电流信号发生器得到, 具体信号产生可参考表 2. 三相参考电流与实际检测三相电流比较后经过电流滞环控制器得到容错逆变器开关触发信号, 从而驱动电机运行. 需要注意的是, 在数字信号处理器(DSP 或 ARM)中, 为了防止同桥臂上两个功率开关同时导通, 算法编程中需要考虑对开关信号的死区补偿.

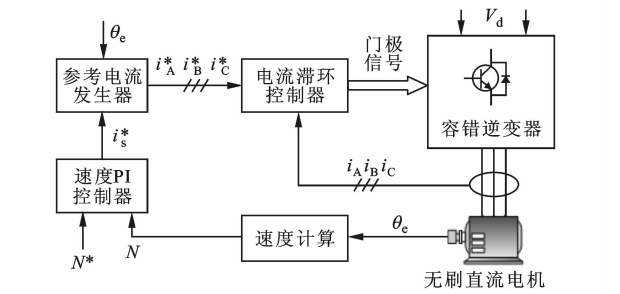


图 5 控制方案结构框图

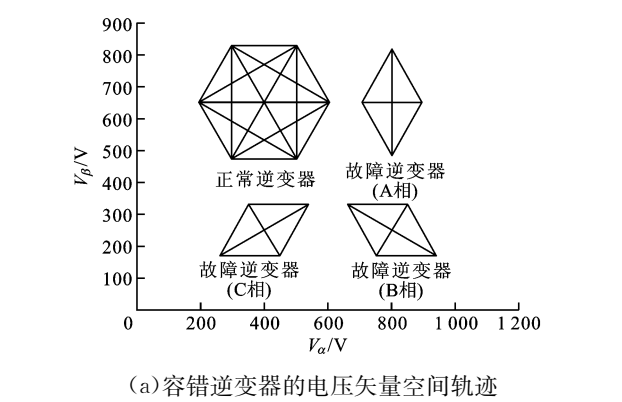
3 仿真和实验分析

为了验证所提出的控制策略, 以 1 台额定转速为 2 000 r/min 的无刷直流电机作为实验电机, 用德州仪器公司 2812DSP 作为主控芯片, 对新控制方案作了实验验证, 并用 Matlab 软件进行仿真验证. 图 6a 为正常逆变器和 3 种容错方式下(A 相容错、B 相容错和 C 相容错)的容错逆变器的电压矢量空间轨迹, 图 6b 为容错逆变器 C 相桥臂在 0.2 s 时发生故障的系统瞬态性能仿真结果. 图 7 为逆变器 C 相容错时的电机三相定子绕组电流实验结果.

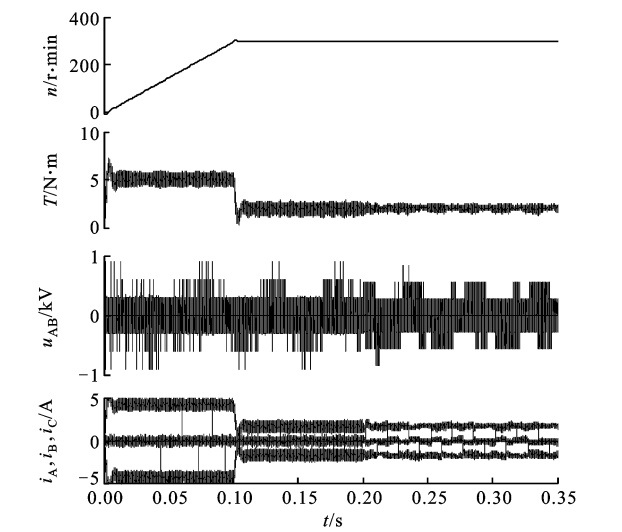
在仿真结果中, 所提出的控制策略能有效实现无刷直流电机逆变器侧故障控制, 4 种相电压空间轨迹符合理论分析. 实验结果中, C 相电流非换向区域电流脉动明显小于其他两相电流, 在 C 相零电流区域内, 其他两相电流的脉动较其他区域大. 这主要是由于三相电流仅由控制 A 相和 B 相电流来实现, C 相电流的控制是间接控制 A 相和 B 电流完成.

4 结 论

本文提出了无刷直流电机容错逆变器控制策略. 该策略可以有效控制电机在逆变器发生故障时稳定运行. 研究中得到一条通用结论: 只要控制非容错相的两相相电流, 就可以实现无刷直流电机逆变器侧故障情况下的控制. 该结论同样适用于其他电



(a) 容错逆变器的电压矢量空间轨迹



(b) 容错逆变器 C 相桥臂故障时的系统瞬态性能

图 6 控制方案仿真结果

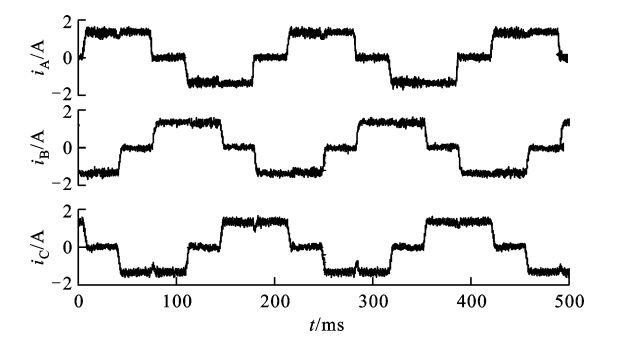


图 7 容错逆变器 C 相桥臂故障下的电机三相定子电流实验结果

机容错控制. 控制策略中使用了滞环电流控制器, 其容差的大小会直接影响电机非换向区域处的电流脉动, 因此在今后研究中可进一步考虑解决.

参考文献:

[1] MENDES A M S, MARQUES CARDOSO A J. Continuous operation performance of faulty induction motor drives[C]// IEEE International Electric Machines

and Drives Conference. Madison, USA: IEEE, 2003: 547-553.

[2] 张兰红,胡育文,黄文新. 容错型四开关三相变换器异步发电系统的直接转矩控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(18): 140-145.

ZHANG Lanhong, HU Yuwen, HUANG Wenxin. Research on direct torque control of tolerant type four-switch three-phase converter induction generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18):140-145.

[3] 张兰红,胡育文,黄文新. 基于直接转矩控制技术的异步电机驱动系统两种容错方案研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005,37 (1):34-39.

ZHANG Lanhong, HU Yuwen, HUANG Wenxin. Two machine tolerant schemes for drive system based on induction DTC strategy [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37 (1):34-39.

[4] LEE Y K, HABETLER T G. An on-line stator turn fault detection method for interior PM synchronous motor drives[C]// Proc 22nd Annual IEEE Applied Power Electronics Conf. Piscataway,NJ, USA:IEEE, 2007;825-831.

[5] SUN D, HE Y K. A modified direct torque control for PMSM under inverter fault[C]//Proc Electrical Machines and Systems Conf. Nanjing, China; [n. s.], 2005;2469-2473.

[6] WELCHKO B A, LIPO T A, JAHNS T M, et al. Fault-tolerant three-phase AC motor drive topologies: a comparison of features, cost, and limitations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (4):1108-1116.

[7] LEE K S, RYU J S. Instrument fault detection and compensation scheme for direct torque controlled induction motor drives [J]. IEE Proc of Control Theory and Applications, 2003,150(4): 376-382.

[8] SERGIO M A, CRUZ A J, MARQUES C. Diagnosis of stator inter-turn short circuits in DTC induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(5):1349-1360.

[9] PARK S H, KIM T S, AHN S C, et al. A simple current control algorithm for torque ripple reduction of BLDCM using four-switch three-phase inverter[C]// 34th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. New York, USA:IEEE, 2003;574-579.

[10] LEE B K, KIM T H, EHSANI M. On the feasibility of four-switch three-phase BLDC motor drives for low cost commercial applications: topology and control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18 (1):164-172.

(编辑 杜秀杰)

[文摘预登]

构建复杂回响状态网络的新方法

宋青松, 冯祖仁

(西安交通大学系统工程研究所, 710049, 西安)

研究了人工神经网络混沌时间序列预测应用中的拓扑选择问题,受大脑皮层生长发育过程启发,提出一种类皮层网络——复杂回响状态网络(CESN)的构建算法. 将影响皮层网络生长发育过程的依赖距离和依赖时间窗口的 2 个生长机制中的规模因子、距离敏感因子、密度敏感因子、种子神经元个数,以及时间窗宽度等调控因子,类比地定义为 CESN 构建过程中的构造参数. 实验发现,CESN 的拓扑结构能够被这些构造参数惟一地确定,并且当种子神经元个数取值约为网络规模的 10%情形下,构建出的 CESN 几乎具有最优的预测精度. 仿真实验证实,根据这个发现,CESN 能够被更省时地构建并获得更好的预测精度,表明所提算法是一个高效的网络构建方法.