

基于母线电流脉动的无刷直流电机断相故障诊断法

杨瑞坤¹, 陈长兴¹, 徐浩翔²

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学 科研部, 陕西 西安 710051)

摘要:无刷直流电动机断相后运行的危害很大,将故障及时地发现与定位,对提高航空稀土永磁(REPM)无刷直流电动机(BLDCM)运行的可靠性及对装备的保障效能,意义十分重大。基于此,在对无刷直流电动机运行与控制特性进行专门的研究后,提出了利用无刷直流电机自身固有的相电流换相脉动特性,通过分析脉动的母线电流,并结合 Hall 位置信号来诊断与定位断相故障的方法。经过 Matlab 仿真和实验,验证了理论分析的正确性,为后续稀土永磁无刷直流电动机的断相故障诊断与保护装置研究,提供了科学地参考。

关键词:稀土永磁无刷直流电机;断相;电流脉动;母线电流;故障诊断

中图分类号: TP206+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)05-0070-05

随着电力电子技术和稀土永磁材料的发展,以稀土永磁(REPM)无刷直流电动机(BLDCM)为核心的电驱动系统在航空领域的应用越来越多,在未来先进飞机电驱动系统中,占有重要的地位^[1-2]。但其机电一体化技术又带给后方技术人员越来越繁重的无刷直流电机保障任务^[3-4],所以对及时发现与定位故障和提高装备保障及维护效能意义重大。出于无刷直流电机驱动及控制原理的特殊性,针对一类常见的断相故障,本文提出了利用母线电流脉动特性结合 Hall 位置信号来判断与定位故障点的方法。通过建模仿真和实验,验证了该方法的有效性。

1 无刷直流电机工作的等效电路模型

以航空 270 V 稀土永磁无刷直流电机为例:定子绕组为三相六状态导通,对称“Y”形连接。假定电机气隙磁场为梯形波,顶宽为 120°电角度。正常工作时,无刷电机运行周期由 6 个开关状态组成,如图 1(a)所示: VT₆、VT₁、VT₁、VT₂、VT₂、VT₃、VT₃、VT₄、VT₅、VT₅、VT₆。由这 6 个导通状态可以得出无刷电

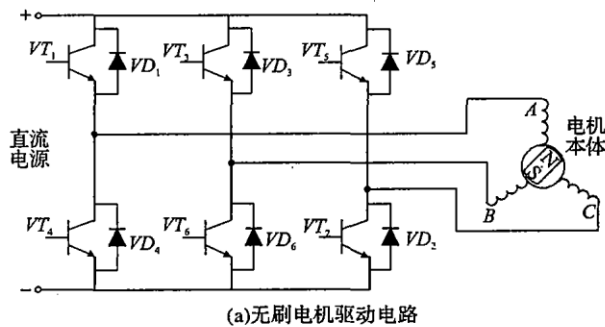


图1 无刷直流电机主电路

Fig. 1 Main circuit of BLDCM system

机正常工作时的定子合成磁场及磁链轨迹如图 1(b)所示。其中, A/B 代表电流从 A 相流入 B 相流出,即开关管为 VT₁、VT₆ 导通,其它类似。

由无刷电机相关理论可知,每一个导通状态可等效为两个分状态——定子绕组两相导通稳态和定子绕

收稿日期:2007-12-10

基金项目:国家“863”创新基金资助项目(2007AAJ129)

作者简介:杨瑞坤(1978-),男,陕西西安人,讲师,主要从事电机拖动与控制研究;E-mail:yrk0499@hotmail.com

陈长兴(1964-),男,河北宝坻人,教授,主要从事电路、信号处理与系统理论研究。

组相两两切换暂态,由此即可建立起无刷直流电动机运行时的等效电路模型,见图2。

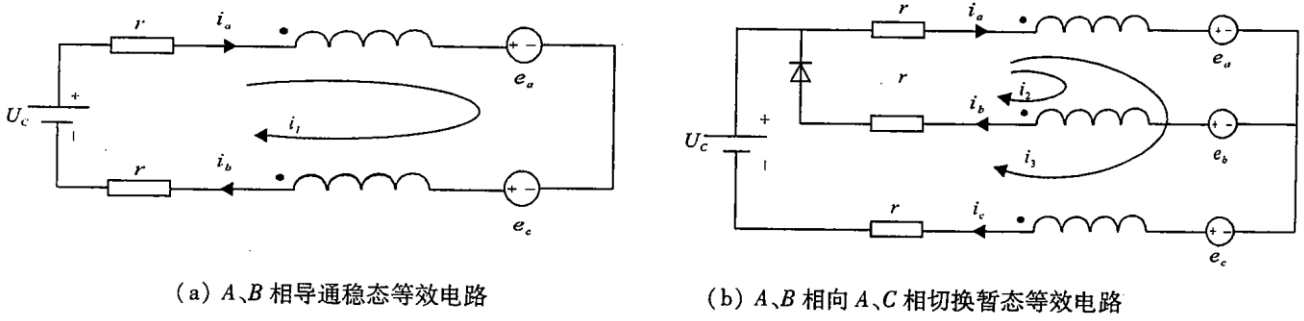


图2 BLDCM 运行等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit of a running BLDCM

2 驱动电路母线电流脉动原因

2.1 由 PWM 调制引起的电流脉动

假定逆变桥的调制模式为:Hon - Lpwm(上管常开,下管斩波)方式。以 A/B 导通状态为例,图 2(a) 电路的回路方程为

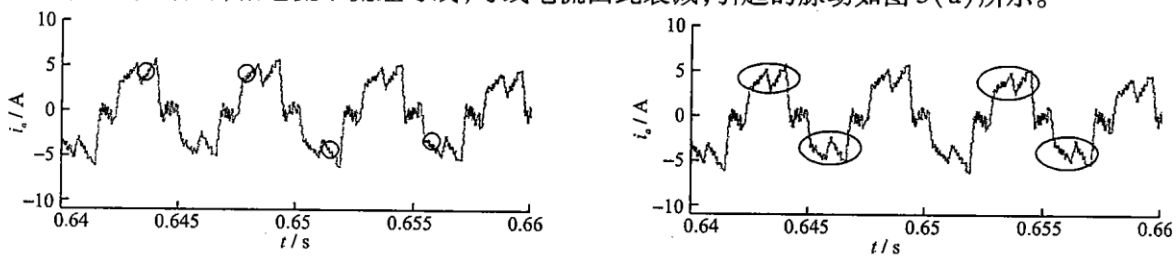
$$e_a - e_b + 2ri_1 + 2(L - M) \frac{di_1}{dt} = SU_c \tag{1}$$

式中: $i_a = i_b = i_1, i_c = 0$; S 为开关管状态; r 为相绕组电阻; L 为定子绕组自感; M 为定子绕组互感。

1) $S = 1$ 时, VT_1 导通,相电流的流向为“电源 +” $\rightarrow VT_1 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow VT_6 \rightarrow$ “电源 -”,此时母线电流等于电机相电流;

2) $S = 0$ 时, VT_6 关断,相电流续流,电流流向为: $VT_1 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow VD_3 \rightarrow VT_1$,电机相电流不流经母线。

由此得到结论:当逆变桥工作于占空比小于 1 的 PWM 调制模式时,电流呈“增长—续流—增长”变化趋势,开关频率决定了导通相相电流中含有的高次谐波成分,即纹波幅值大小;开关导通时,母线电流即是电机的相电流,斩波关断时,相电流不流经母线,母线电流因此衰减,引起的脉动如图 3(a) 所示。



(a) 由 PWM 斩波引起的相电流脉动 (b) 由换相引起电流脉动

图3 无刷直流电机电流脉动

Fig. 3 Current ripple of BLDCM

2.2 两相切换过程引起的换相脉动

当 A/B 导通向 A/C 导通状态切换瞬时,由图 2(b) 可得电路方程为

$$e_a - e_b + 2ri_1 + ri_3 + 2(L - M) \frac{di_2}{dt} + (L - M) \frac{di_3}{dt} = 0 \tag{2}$$

$$e_a - e_c + 2ri_1 + ri_3 + (L - M) \frac{di_2}{dt} + 2(L - M) \frac{di_3}{dt} = U_c \tag{3}$$

由以上方程解得:

$$i_2 = \frac{e_{bc} - e_{ab} - U_c}{3r} + (i_{20} - \frac{e_{bc} - e_{ab} - U_c}{3r}) e^{\frac{-r}{L-M}t}; \quad i_3 = \frac{2U_c + e_{ca} - e_{bc}}{3r} - \frac{2U_c + e_{ca} - e_{bc}}{3r} e^{\frac{-r}{L-M}t} \tag{4}$$

式中: $i_b = i_2$ 为续流相电流瞬时值; $i_c = i_3$ 为开通相电流瞬时值; $i_a = i_2 + i_3 = i_b + i_c$ 为常开相电流。

可见,在换相瞬时刻,电机转速 $\frac{d\omega}{dt} = 0$,各相反电势 $e_i = C_e \Phi n = C$, Φ 为每极气隙磁通均值。由于 $i_b \neq i_c$,且变化率 $i'_b \neq i'_c$,因此引起常通相电流 i_a 的脉动(见图 3(b))。相间电流越不平衡,脉动越明显;同时,母线电流从常开相电流 i_a 切换到 i_c ,并且 $i'_a \neq i'_c$,从而引起母线电流脉动^[2],这是母线电流受换相影响,表现出明显的周期性脉动的主要原因,其脉动频率与电机每 60°的换相频率相同。换相是无刷电机运行所固有的特性,因此各类文献中提到的利用新的调制方式抑制非导通相续流现象^[5-7]、改变调制比来改变续流时间^[8-10]等脉动抑制方法,都不能完全消去实际电机的电流脉动,而只能部分抑制此现象。

基于以上分析得出:

1) 母线电流只在上、下管同时导通时才等于电机相电流,PWM 调制时,开关管关断产生的短暂续流过程,电流不流经母线,会引发母线电流脉动;

2) 斩波续流引起的母线电流脉动,存在于每个 60°导通状态的相电流中,属高次谐波,谐波成分由斩波频率而定,但远高于电机换相频率;

3) 换相引起的母线电流脉动在每个 60°导通状态切换时出现,其频率与电机转速有关,但远小于斩波频率,占母线电流脉动的主要成分,属低次谐波,斩波引起的母线脉动电流是高次谐波。

因此,由换相引起的脉动是导致母线电流脉动的主要原因。其仿真的波形见图 4(电机由零开始运行)。

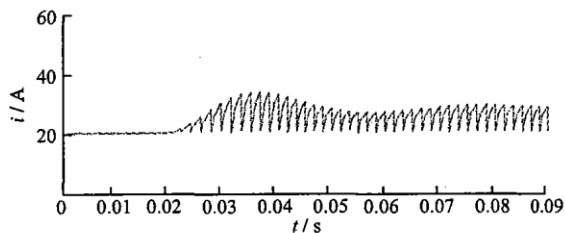


图 4 无刷直流电机运行时母线电流脉动波

Fig. 4 DC-link current ripple of the running BLDCM

3 基于母线脉动的断相定位方法

母线电流脉动主要是由换相引起,其频率与换相频率相同,故母线脉动周期就和逆变桥每个导通状态的切换周期相同。在一对极时,电机转子完整的运行一周,母线电流由 6 个脉动周期组成,由此,母线电流脉动波与逆变桥导通状态间建立起了对应关系。针对实际电机参数,Matlab 仿真的实际电压参数为:额定电压 $U = 270 \text{ V}$,额定转速 $n = 3000 \text{ r/min}$,负载 $T_L = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$, $p = 2$,各相定子绕组电阻 $r = 0.5 \Omega$,各相定子绕组自感 $L = 8.5 \text{ mH}$,互感 $M = 0.56 \text{ mH}$,转子的转动惯量 $J = 0.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,取仿真时间 1.4 s。让电机先空载起动,在 0.5 s 加负载,在 1.0 s 人为使电机发生断相故障(A 相故障),得到的仿真波形见图 5,纵坐标轴上电流每格 20 A。

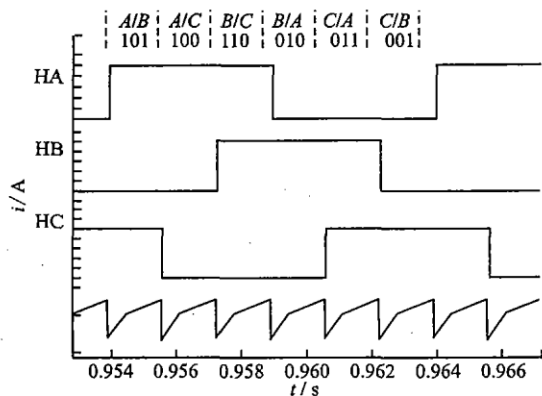


图 5 正常运行时逆变桥母线电流脉动波与 Hall 位置信号对应关系仿真

Fig. 5 DC-link current ripple wave of the inverter and corresponding Hall position signal

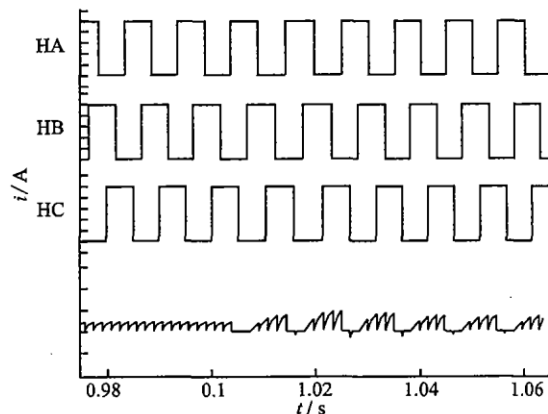


图 6 VT_1 损坏母线电流脉动波与 Hall 位置关系

Fig. 6 DC-link current ripple wave of the inverter and corresponding Hall position signal after VT_1 broken

由此引出,当逆变桥开关管单管损坏断相后,造成了部分导通状态的缺失——例如 VT_1 管损坏后,导通

状态缺少2个:A/B和A/C状态,对应Hall位置信号为101、100,那么该对应位置下的母线脉动波形也会缺失,仿真波形图6为 VT_1 管损坏而造成断相后,母线电流脉动和Hall位置信号的对应关系。

由实验证实,对于以上单管损坏的断相故障,定子磁场存在缺失,转子受力存在死区,见图7。在 VT_1 损坏后故障的死区为A/B-A/C导通区和A/C-B/C导通区,但在轻载条件下(一般为正常带载1/3-2/3),由于负载转动惯量的存在,转子可以滑过死区,使得电机在发生故障后仍能运行,此时的故障不易察觉,较为隐蔽,电机处于断相运行状态,危害很大,若负载继续加大,转子因不能滑过死区而最终导致电机停止。

在此类故障发生后,电机断相运行的这个时间段内,选择对母线电流脉动波形进行判断,结合Hall位置信号,就可以定位故障功率开关管,做到故障快速定位。对该方法的仿真验证已被图7所证实(假设 VT_1 损坏,其它故障情形波形及判断方法类似,不一一列举)。

由母线波形可以看出,在 VT_1 损坏后,导通状态缺失101(A/B)和100(A/C)状态时,母线电流脉动波也有缺失,故障管可立刻确定。图8给出了母线电流脉动情况的实测波形(设 VT_4 损坏),通过实测可以看出,Hall位置信号与母线缺失波形存在对应关系,实际情况与理论分析吻合。

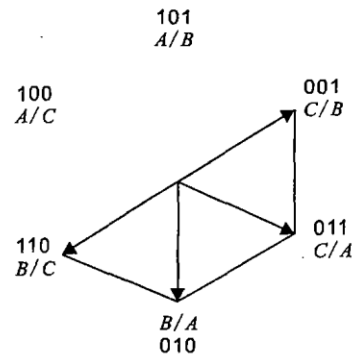
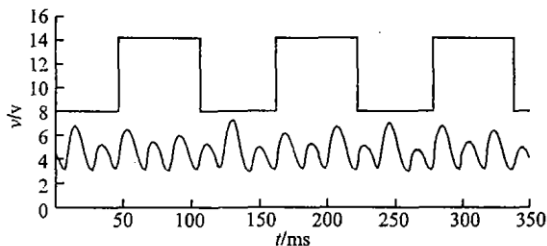
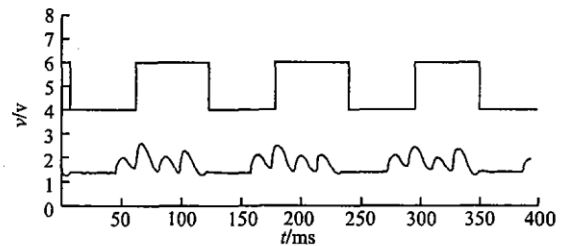


图7 VT_1 损坏后磁场矢量

Fig. 7 Magnetic vector after VT_1 broken



(a)电机正常工作时的母线电流与Hall信号



(b) VT_4 损坏后的母线电流与Hall信号

图8 VT_4 损坏前后母线电流脉动波与Hall信号实测波形

Fig. 8 Experimental result of DC-link current ripple wave and corresponding Hall position signal

4 结束语

针对无刷直流电机驱动逆变桥断相故障,提出了利用母线电流脉动特性加Hall位置信号来判断与定位故障点的方法;利用Matlab建立航空用稀土永磁无刷直流电机模型对故障模态进行验证性仿真并搭建电路实测,均证实了理论分析的正确,为提高航空无刷直流电机保障及故障诊断效率,提供了有效、科学地参考。

参考文献:

- [1] Dai M, Keyhani A, Sebastian T. Torque Ripple Analysis of A Trapezoidal Back-EMF Permanent Magnet Brushless DC Motor Using Finite Element Method; Proc Int Electric Machines Drives Conf[C]. Cambridge; MA, 2001; 241-245.
- [2] 王兴华, 励庆孚, 王曙鸿, 等. 永磁无刷直流电机换相转矩波动的分析研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(6): 612-616.
WANG Xinghua, LI Qingfu, WANG Shuhong, et al. Analysis of the Commutation Torque Ripple of Permanent Magnet Brushless DC Motors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(6): 612-616. (in Chinese)
- [3] Moseler O, Isermann R. Application of Model-based Fault Detection to A Brushless DC Motor[J]. IEEE Transactions on Ind Electron, 2000, 47: 1015-1020.
- [4] Song Ke, Liu Weiguo, Luo Guangzhao. Analysis of Current Waves and Faults Recognition in Rare Earth Permanent Magnet Brushless DC Motor[J]. Proc IEEE International Conf on Mechatronics and Automation, 2007: 3481-3485.
- [5] 韦鲲, 林平, 张仲超. 一种新的消除无刷直流电机非导通相续流的PWM调制方式[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 104-108.
WEI Kun, LIN Ping, ZHANG Zhongchao. A Novel PWM Scheme to Eliminate the Diode Freewheeling[J]. Journal of CSEE, 2005, 25(7): 104-108. (in Chinese)

- [6] 张相军,陈伯时. 无刷直流电机控制系统中 PWM 调制方式对换相转矩脉动的影响[J]. 电机与控制学报,2003,6(2): 87-91.
ZHANG Xiangjun, CHEN Boshi. The Different Influences of Four PWM Modes on Commutation Torque Ripples in Brushless DC Motor Control System[J]. Electric Machines and Control, 2003, 6(2): 87-91. (in Chinese)
- [7] 揭贵生,马伟明. 考虑换相时无刷直流电机脉宽调制方法研究[J]. 电工技术学报,2005,20(9):66-71.
JIE Guisheng, MA Weiming. Research on the Pulse-width Modulation Methods of Brushless DC Motor Taking Consideration of Commutation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 66-71. (in Chinese)
- [8] 堵洁,孙承波,陈国呈,等. 无刷直流电机换相过程中续流对电压电流的影响[J]. 电工技术杂志,2002,21(7):5-8, 18.
DU Jie, SUN Chengbo, CHEN Guocheng, et al. Analysis of Influence of Commutation Freewheeling on The Voltage and Current of BLDCM[J]. The Magazine of the Power Technology, 2002, 21(7): 5-8, 18. (in Chinese)
- [9] MA Ruiqing, LIU Weiguo, XIE En, et al. The Fault Analysis of Rotor Position Sensor and Its Influence to Brushless DC Motor: Proceedings of the Ninth International Conference on Electrical Machines and System (ICEMS) [C]. Nagasaki, Japan: [s. n], 2006: 20-23.
- [10] Ricardo Lúcio de Araujo Ribeiro, Cursino Brando Jacobina, Celine Theys, et al. Fault Detection of Open-switch Damage in Voltage-fed PWM Motor Drive Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(2): 587-593.

(编辑:徐楠楠)

A Diagnosis and Detecting Method Based on Current-ripple to Phase-open Fault of BLDCM

YANG Rui-kun¹, CHEN Chang-xing¹, XU Hao-xiang²

(1. Science institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Science Research Department Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To improve the efficiency of maintaining and servicing Aero REPM-BLDCM, detecting the fault in time is of great importance. Thus, an efficient method of failure diagnosis and mistake detection, by using the inherent characteristic of running BLDCM, through an analysis of bus-current ripple and in combination with Hall position signal, is put forward. Combining with Hall-signal, the DC-link current ripple wave can help filter out the broken switch tube. The correctness of the result based on theoretical analysis is tested and verified by simulation and experiment, which offers a scientific reference for the further researches in electronic protector and fault diagnosis device of REPM-BLDCM.

Key words: REPM-BLDCM; phase-break; current ripple; bus-current; fault-diagnosis