

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.03.016

一种可容错的无刷直流电机驱动控制方法

王 帅,熊官送,曹东海

(北京自动化控制设备研究所,北京 100074)

摘 要:针对反电势为梯形波的永磁无刷直流电机断路故障,提出了一种可容错的驱动控制方法,利用电流传感器对故障进行检测和定位,对发生的一相断路故障,通过在传统三相全桥驱动电路基础上增加一路半桥,并将电机星型连接点引出与之相连,实现故障状态下的容错驱动。在 Simulink 中建立正常运行模型和容错运行模型,对所提出的驱动方案进行验证和分析。最后,通过实验证明了该方案的可行性以及理论分析和仿真的正确性。

关键词:无刷直流电机;断路故障;容错控制

中图分类号:TM351

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2018)03-0093-06

A Method of Open Circuit Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of BLDCM

WANG Shuai, XIONG Guan-song, CAO Dong-hai

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: For the open circuit fault of back-EMF trapezoidal waveform permanent magnet brushless direct current motor, a fault-tolerant control method using current sensor to measure the phase current in multiple sectors to determine the faulty phase is presented. First, to solve the open circuit problem, by adding a half-bridge to the common three-phase full bridge and connecting it to the junction point of Y connection phase winding, a novel control strategy only using two phases is proposed. Then, the simulation models of normal operating and fault-tolerant operating are established in Simulink, the results of which verifies the feasibility of the control strategy. Finally, the specific driver is designed, and the experiment results demonstrate the correctness of the control strategy.

Key words: Brushless direct current motor (BLDCM); Open circuit fault; Fault-tolerant control

0 引言

永磁无刷直流电机以其高功率密度、高可靠性、控制简单等优点,在运动控制领域得到了广泛的应用,其可靠性对于控制系统具有至关重要的作用^[1]。常用的无刷直流电机大都采用三相星型连接的电枢绕组和二二导通的方式,控制器通过采集 Hall 传感器信号确定转子所在扇区,控制驱动电路

给三相绕组通电,驱动电机转动。因此,如果电机一相绕组断路或者与驱动器的连接断开,则在相应的扇区无力矩输出,电机无法正常工作。对于断路故障,可以通过电流传感器进行实时检测,并在断路故障发生时,定位故障相。

针对断路故障,目前研究较多的是三相四开关容错逆变器^[2-5]和双绕组无刷直流电机^[6-9],但对三相四开关容错逆变器的研究通常针对对逆变器侧的

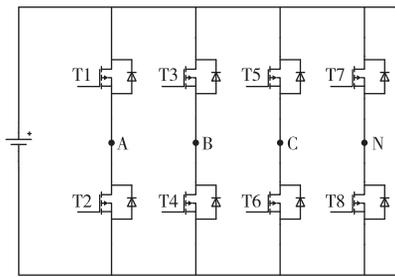
收稿日期:2017-10-31;修订日期:2017-12-08

作者简介:王帅(1991-),男,硕士,主要从事舵系统驱动与控制方面的研究。E-mail:1476456497@qq.com

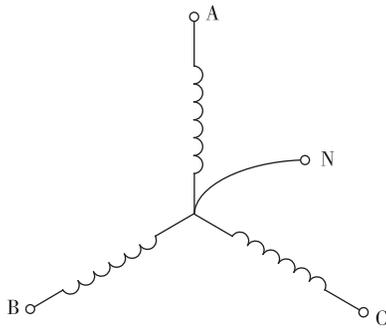
故障及其容错控制,双绕组无刷直流电机容错能力更强,但需要专门设计的电机,以及2个六开关驱动器,结构复杂,成本较高。本文提出一种新型的无刷直流电机容错控制方案,通过将普通星型连接的三相无刷电机星型连接点引出,并增加一路半桥驱动,在相比原系统变化较小的情况下,实现对无刷电机的容错控制。

1 容错驱动器结构

图1所示为驱动器与电机三相连接图,其中(a)为驱动器结构,由4个半桥组成;(b)为三相星型连接的无刷直流电机,N端为引出的星型连接点,驱动器输出端分别与电机的A、B、C、N端相连。



(a) 驱动器结构



(b) 电机引出线

图1 驱动器与电机连接图

Fig. 1 Connection of the driver and motor

2 断路故障诊断及容错控制原理

2.1 断路故障诊断原理

对于二二导通的无刷直流电机,电机正常运行时,转子位置与导通相的一种对应关系如表1所示。

当转子位于某一扇区时,根据表1所示的转子所在扇区与导通相的对应关系,可以利用电流传感器判断相应相的导通情况,进而判断该相是否断路。由于每次有两相导通,当某相断路时,需

判多个扇区才能确定故障相。为减小电流传感器的采样频率,采用每个PWM周期仅采一次电流,采样时刻在靠近导通结束时刻的方法,以确保对绕组通断的可靠检测,并避开导通时刻可能出现的电流尖峰。

表1 转子位置与导通相对应关系

Tab. 1 Correspondence between rotor angle and turn-on phase

扇区	HALL 状态	导通开关管	导通相
1	0 0 1	T3 T6	B C
2	1 0 1	T2 T3	B A
3	1 0 0	T2 T5	C A
4	1 1 0	T4 T5	C B
5	0 1 0	T1 T4	A B
6	0 1 1	T1 T6	A C

2.2 容错控制原理

引出星型连接点后,可以利用该引出线给一相绕组通电,也可以不使用该引出线,给串联的两相绕组通电,首先给出相电压方程、线电压方程和电磁转矩方程。

式(1)为无刷直流电机定子三相绕组的电压方程。

$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, u_{AN} 、 u_{BN} 、 u_{CN} 为 A、B、C 三相的相电压; R_A 、 R_B 、 R_C 、 L_A 、 L_B 、 L_C 、 M_{AB} 、 M_{BA} 、 M_{AC} 、 M_{CA} 、 M_{BC} 、 M_{CB} 分别为各相的电阻、自感和互感; i_A 、 i_B 、 i_C 和 e_A 、 e_B 、 e_C 分别为相电流和相反电势。相电流以流向星型连接点为正,相反电势以由星型连接点指向相绕组另一端为正。通常满足相电阻 $R_s = R_A = R_B = R_C$, 相电感 $L = L_A = L_B = L_C$, 相绕组互感 $M = M_{AB} = M_{BA} = M_{AC} = M_{CA} = M_{BC} = M_{CB}$ 。对三相星型绕组,星型连接点未引出或引出线上无电流时,满足

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (2)$$

则式(1)可以简化为

$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

线电压方程可由相电压方程相减得到

$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -R_s & 0 \\ 0 & R_s & -R_s \\ -R_s & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & M-L & 0 \\ 0 & L-M & M-L \\ M-L & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A - e_B \\ e_B - e_C \\ e_C - e_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

电机电磁功率

$$P_{em} = T_{em} \Omega = e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C \quad (5)$$

其中, Ω 为电机角速度, 电磁转矩

$$T_{em} = (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) / \Omega \quad (6)$$

由式(1)可得, 相电压稳态方程(以 A 相为例)

$$u_{AN} = R_A i_A + e_A \quad (7)$$

串联两相导通时, 导通相电流之和为 0, 反电势大小相等, 符号相反, 则由式(4)可得, 线电压稳态方程

$$u = 2R_s i + 2e \quad (8)$$

其中, u 为线电压, i 为线(相)电流, e 为相反电势。

当某相断路时, 为保证电机继续运行, 使驱动器 N 端工作, 仅使用两相, 使电机继续运行, 容错运行状态下, 根据式(7)和式(8), 若利用星型连接点引出线给单相绕组通电, 施加的电压应为正常状态的一半, 实际中可通过将 PWM 信号占空比减半来实现, 此时两种导通状态下, 稳态电流相等。

由式(6), 为使电机在各扇区能够产生方向相同的电磁转矩, 结合式(1)中关于相电流和相反电势方向的说明, 应使各相电流与相应的相反电势的乘积具有相同的符号^[10]。因此, 需要根据电机反电势确定具体的通电相与施加电压方向, 与表 1 相对应, 给出无刷电机三相绕组理想反电势波形, 如图 2 所示。其中, θ 为电角度。

与表 1 和图 2 对应, 给出 C 相断路, 仅使用 A、B 相作容错运行时, 转子位置与导通相的对应关系, 如表 2 所示。其中“+”“-”号表示在该端施加电压的正负。

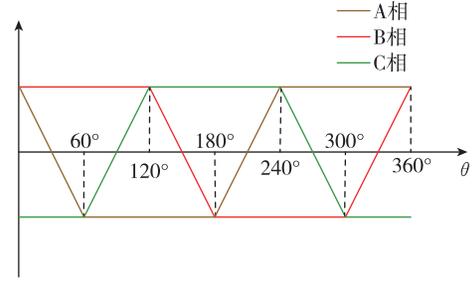


图 2 理想反电势波形

Fig. 2 The ideal waveforms of back-EMF

表 2 容错运行时转子位置与导通相对应关系

Tab. 2 Correspondence between rotor angle and turn-on phase in fault-tolerant state

扇区	电角度	导通开关管	导通相
1	0~60°	T3 T8	B+
2	60°~120°	T2 T3	B+ A-
3	120°~180°	T2 T7	A-
4	180°~240°	T4 T7	B-
5	240°~300°	T1 T4	A+B-
6	300°~360°	T1 T8	A+

2.3 性能分析

由式(6), 在容错运行状态下, 相比串联两相通电状态, 仅使用单相绕组时, 电机输出力矩减半, 在 6 个扇区中, 2 个扇区输出完整力矩, 4 个扇区输出减半的力矩, 平均力矩下降为原来的 2/3。因此, 电机的带载能力下降, 在空载或轻载状态下, 也会出现转速下降的现象。

3 仿真分析

在 Simulink 中对容错运行方式进行仿真, 图 3(a)为正常情况下无刷电机的驱动模型, 图 3(b)为容错运行方式下无刷电机的驱动模型, 驱动信号为占空比固定的 PWM 信号。模型均为开环, 以便对电机特性进行对比分析。

设置母线电压为 12V, PWM 周期为 15K, 正常运行时占空比为 50%。容错运行时, 若两相通电, 则占空比为 50%; 若单相通电, 则占空比为 25%。

图 4 所示为正常运行与容错运行启动转速对比, 图 5 所示为正常运行与容错运行电流波形。电机处于容错运行状态时, 由于平均输出力矩减小,

转速由 1000r/min 下降到 945r/min,电机的转速波动较正常运行状态也明显增大。容错运行状态下,平均电流增大为原来的约 1.1 倍,图 5(b)中,单相

通电时,电流峰值较大,但占空比较小,因此平均电流与串联的两相通电时基本不变,转矩较两相导通时减半,与理论分析相符。

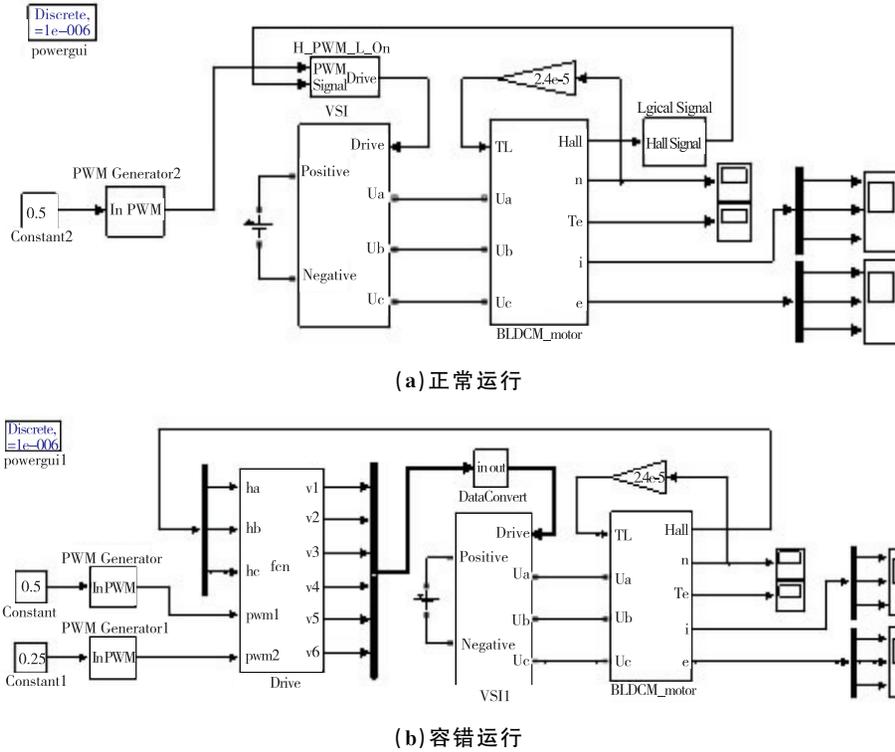


图 3 正常运行及容错运行 Simulink 模型

Fig. 3 Simulink models of normal state and fault-tolerant state

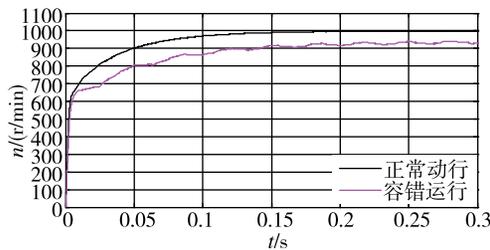
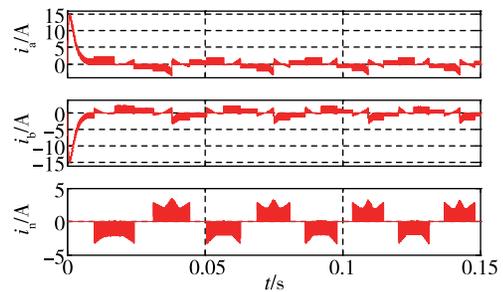


图 4 正常运行和容错运行启动转速

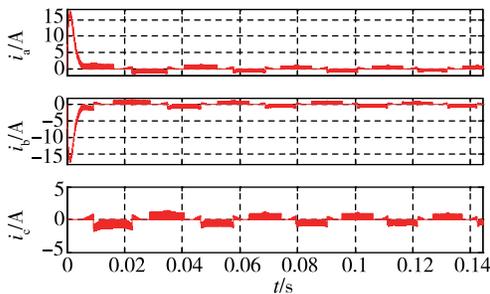
Fig. 4 Start-up rotational speed of normal state and fault-tolerant state



(b) 容错运行相电流

图 5 电流波形

Fig. 5 Current waveforms



(a) 正常运行相电流

4 实验验证及分析

实验使用的电机和驱动器如图 6 所示,该电机为星型连接点引出的永磁无刷直流电机,驱动器使用 4 个半桥芯片,输出端按图 1 所示方式与电机连接。图 7 和图 8 所示分别为由正常状态切换为容错状态的转速和电流变化。



图 6 驱动器与电机
Fig. 6 Driver and motor

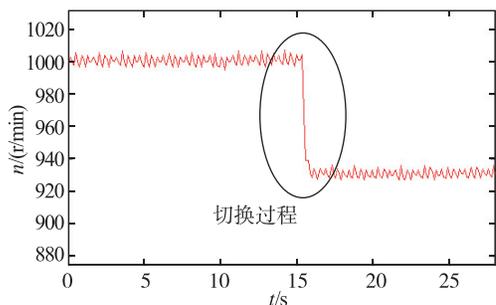


图 7 电机转速变化
Fig. 7 Variation of rotational speed

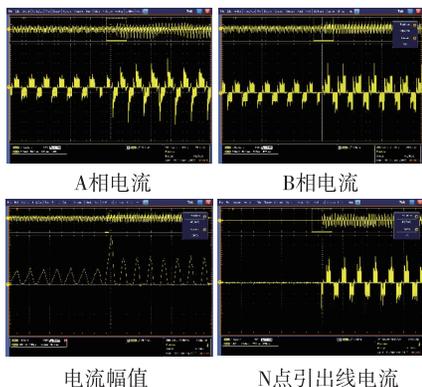


图 8 相电流变化
Fig. 8 Variations of phase current

正常运行时,电机转速为 1000r/min,断开驱动器与电机 C 相的连接,模拟电机 C 相绕组断路故障,系统在检测到 C 相断路后,切换为仅使用 A、B 两相,由驱动器 A、B、N 端驱动的容错运行模式。图 8 中电流幅值为容错运行模式下,单相通电和两相通电时的电流,两种情况下电流均值基本相同,与前述理论和仿真分析相符。容错运行模式下,电机转速由 1000r/min 减小为 930r/min,电流增大为原来的约 1.1 倍,与仿真结果基本吻合,验证了理论分析和仿真的正确性。

当电机闭环带恒定负载时,由正常运行状态切换为容错运行状态,电机转速减小,由式(7)与式

(8),电机电流会迅速增大。由 2.3 节性能分析部分可知,当电流增大到原来的约 1.5 倍时,电机输出力矩与负载力矩平衡,电机转速下降幅度与施加 1.5 倍负载时相当;当电机负载能力余量达到指标要求的 50%时,电机转速仍能维持在额定值附近,系统性能仍可以满足指标要求。

图 9 所示为容错运行状态下,仅 B 相通电且施加正向电压时,设置 T3 由 PWM 控制,T8 常开,A 相由反电势产生的电流。参考图 2,该反电势在半个扇区逐渐减小为 0,随后反向增大。因此,借助星型连接点引出线,在半个扇区内电流达到较大的幅值,产生较大的阻力矩,使电机效率下降,振动和噪声变大。当 T8 和 T7 在此扇区同时调制时,如图 8 所示,该电流可以得到有效抑制。



图 9 反电势引起的相电流
Fig. 9 Phase current caused by back-EMF

5 结论

本文针对反电势为梯形波的永磁无刷直流电机断路故障,设计利用电流传感器判多个扇区的方法进行故障检测和定位,对发生的一相断路故障,提出了一种新颖的容错驱动控制方法。通过在传统三相全桥驱动电路基础上增加一路半桥,并将电机星型连接点引出与之相连,实现对单相的导通控制。根据电机转子位置与反电势的对应关系,以及两相串联导通和仅单相导通的电压方程,设计了基于两相绕组的驱动方案。在 Simulink 中建立了正常运行模型和容错运行模型,对所提出的驱动方案进行了验证和分析。最后,设计相应的驱动器,并与星型连接点引出的无刷直流电机构成硬件实验平台,实验结果验证了理论分析和仿真分析的正确性以及该方案的可行性。

参考文献

[1] 卢二宝,闫丽媛,于志远,等. 航空航天机电伺服系统

- 可靠性设计综述[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(4): 53-57.
- [2] Zhou W, Sun D, Chen M, et al. Simplified PWM for fault tolerant control of open winding PMSM fed by hybrid inverter[C]// 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2015: 2912-2918.
- [3] Yuan Q, Zhao R. DC-link capacitor voltage offset suppression with no filters for three-phase four-switch inverter fed PMSM drives [J]. Electronics Letters, 2017, 53(11): 746-748.
- [4] 林海, 李宏. 无刷直流电机驱动控制容错方案研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 53-57.
- [5] 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.
- [6] Heo H J, Im W S, Kim J M, et al. Fault tolerant control methods of dual type independent multi-phase BLDC motor under open-switch fault conditions[C]// 2012 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2012: 1591-1596.
- [7] 周元钧, 董慧芬, 王自强. 飞行控制用无刷直流电动机容错运行方式[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(2): 190-194.
- [8] Zhang T, Wei J, Tao W, et al. A fault-tolerant strategy for the dual stator doubly salient electro-magnet motor drives with the dual inverter topology[C]// 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2017: 1-7.
- [9] 毛由正, 王莉, 史涇激. 多绕组永磁无刷直流电机容错性能研究[J]. 微电机, 2015, 48(3): 34-38.
- [10] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 143-151.