

DOI: 10.7652/xjtuxb202002012

三次谐波抑制的五相永磁电机 容错控制策略及仿真分析

程 伟, 杜钦君, 张 铭, 宋传明, 张明哲
(山东理工大学电气与电子工程学院, 255000, 山东淄博)

摘要: 针对列车风机用五相永磁同步电机(FPMSM)一相断路故障情况,基于五相电机特有的三维子空间,提出一种考虑三次谐波抑制的五相永磁电机容错控制策略。建立五相永磁同步电机数学模型,根据驱动拓扑结构分析空间电压矢量分布规律,利用五相电机三维空间中大矢量与中矢量对磁链作用效果相反的特点,构建虚拟电压矢量抑制相电流三次谐波;根据不同扇区中虚拟电压矢量对转矩及磁链的作用效果,建立故障前后电压矢量开关选择表对转矩和磁链进行调节,降低一相断路故障引起的转矩脉动,使五相电机发生故障后仍能稳定运行,提高风机驱动系统运行可靠性。在 MATLAB/Simulink 环境下搭建五相电机系统仿真模型,对不同负载情况进行仿真,仿真结果表明:五相永磁电机在一相断路故障前后输出转矩和转速基本不变,风机驱动系统仍能稳定运行,证明了容错控制策略的有效性。该方法可扩展到多相永磁电机容错控制。

关键词: 列车风机系统;五相永磁同步电机;容错控制;三次谐波抑制;开关选择表
中图分类号: TM301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)02-0095-09

A Fault-Tolerant Control Strategy and Simulation Analysis of Five-Phase Permanent Magnet Motor with Third-Harmonic Suppression

CHENG Yi, DU Qinqun, ZHANG Ming, SONG Chuanming, ZHANG Mingzhe
(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: A fault-tolerant control strategy for five-phase permanent magnet synchronous motor (FPMSM) with third-harmonic suppression is proposed based on the three-dimensional subspace of five-phase motors. A mathematical model of FPMSM is established and the distribution of space voltage vector is analyzed according to the driving topology. A virtual voltage vector is constructed to suppress the third harmonic of phase current by utilizing the opposite effect of large vector and medium vector on magnetic flux in three-dimensional space of five-phase motors. According to the effects of virtual voltage vector on torque and flux linkage in different sectors, a voltage vector switch selection table is established to adjust the torque and flux linkage before and after a fault to reduce the torque ripple caused by open-phase fault of one phase, so that the driving motor can still run steadily after the fault, and the reliability of the fan drive system is improved. A simulation model of the five-phase motor system is built in the MATLAB/Simulink environment to simulate different load conditions. The simulation results show that the output

torque and speed of the motor are basically unchanged before and after a one-phase open-circuit fault, and the fan drive system still operates stably. The results prove the effectiveness of the fault-tolerant control strategy. The method can be applied to fault-tolerant control of multi-phase permanent magnet synchronous motors.

Keywords: train fan system; five-phase permanent magnet synchronous motor; fault-tolerant control; third-harmonic suppression; switch selection table

列车风机系统运行效果与空调送风的均匀性与合理性有关,其性能直接影响车厢环境舒适度。如果风机驱动系统发生断路故障,会导致电机运行不对称,产生转矩脉动,影响系统稳定性^[1]。多相电机相数的增加提高了系统控制自由度,故在电机发生故障时,可通过合适的控制策略,实现故障状态下的无扰容错运行,提高系统运行可靠性^[2]。

文献[3-4]提出最优电流容错控制,当电机缺相时,调整其余正常相电流的幅值和相位控制逆变器输出,可以使电机仍能对称运行。文献[5]提出一种容错电流优化策略,通过注入三次谐波电流抑制五相电机缺相时的转矩脉动。文献[6]采用相量法对故障状态下的转矩脉动进行分析,提出最优电流直接控制策略,降低电机故障后的转矩脉动。文献[7]通过解耦变换推导出电机故障后的变换矩阵,降低容错控制复杂性。文献[8]针对六相永磁同步电机,提出一种缺任意两相的容错直接转矩控制。以上容错控制均是通过调整电流实现,并未结合多相电机的驱动拓扑^[9]。

本文针对列车风机系统研究了具有容错能力的五相永磁电机直接转矩控制算法,将电机和驱动拓扑作为一个整体,利用中矢量在三维空间中与大矢量、小矢量对磁链作用效果相反的特点,构建虚拟电压矢量抑制电流三次谐波,并确立故障前后电压矢量开关选择表。利用逆变器输出电压矢量对转矩和磁链进行调节,使电机在故障前后输出转矩与转速基本不变,保障风机系统持续稳定送风,维持车厢温度舒适性。

1 数学建模与电压矢量分析

五相永磁电机正常运行时,在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压和转矩方程为

$$\begin{bmatrix} U_{a1} \\ U_{\beta1} \\ U_{a3} \\ U_{\beta3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & & & \\ & R_s & & \\ & & R_s & \\ & & & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{\beta1} \\ i_{a3} \\ i_{\beta3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{a1} \\ \Psi_{\beta1} \\ \Psi_{a3} \\ \Psi_{\beta3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_{a1} 、 $U_{\beta1}$ 表示定子电压在一维空间中的分量;

i_{a1} 、 $i_{\beta1}$ 表示定子电流在一维空间中的分量; Ψ_{a1} 、 $\Psi_{\beta1}$ 表示磁链在一维空间中的分量; U_{a3} 、 $U_{\beta3}$ 表示定子电压在三维空间中的分量; i_{a3} 、 $i_{\beta3}$ 表示定子电流在三维空间中的分量; Ψ_{a3} 、 $\Psi_{\beta3}$ 表示磁链在三维空间中的分量; R_s 为定子电阻; t 为时间。

电磁转矩

$$T_e = \frac{5}{2} n_p (\Psi_{a1} i_{\beta1} - \Psi_{\beta1} i_{a1}) \quad (2)$$

式中: n_p 为电动机磁极对数。

五相永磁同步电机驱动电路主拓扑结构如图1所示。 S_i ($i=a, b, c, d, e$)代表逆变器在a、b、c、d、e五相桥臂的通断情况。 $S_i=1$ 表示上管导通,下管关断; $S_i=0$ 表示下管导通,上管关断。一维与三维空间中五相永磁电机电压矢量为^[10]

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V}_{n,1} &= \sqrt{\frac{2}{5}} U_{dc} (S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{5}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{5}} + S_d e^{j\frac{6\pi}{5}} + S_e e^{j\frac{8\pi}{5}}) \\ \mathbf{V}_{n,3} &= \sqrt{\frac{2}{5}} U_{dc} (S_a + S_b e^{j\frac{6\pi}{5}} + S_c e^{j\frac{2\pi}{5}} + S_d e^{j\frac{8\pi}{5}} + S_e e^{j\frac{4\pi}{5}}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据不同的开关状态组合,共得到32个电压矢量在 $\alpha_1-\beta_1$ 和 $\alpha_3-\beta_3$ 坐标系中的分布情况,如图2所示。除0和31号两个零矢量外,其余30个有效电压矢量根据幅值大小分为大、中、小3组^[11],幅值比为 $1.618^2:1.618:1$ 。

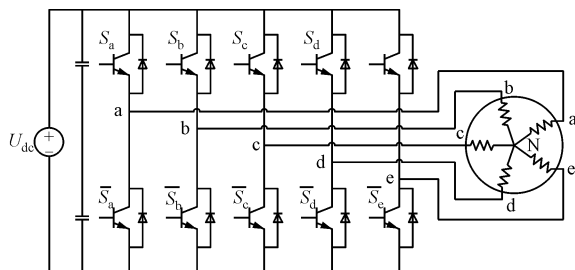
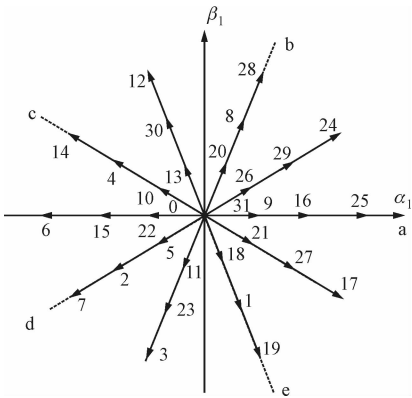


图1 五相永磁同步电机驱动拓扑结构图

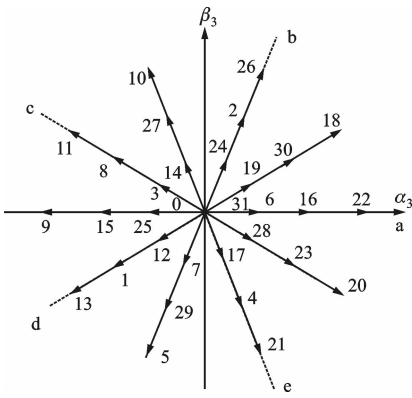
2 三次谐波抑制的直接转矩控制

2.1 抑制三次谐波的虚拟电压矢量构造

传统直接转矩控制在制定开关表时仅考虑一维空间中的电压矢量,五相电机三维空间中电压矢量



(a)一维空间 $\alpha_1-\beta_1$ 坐标系



(b)三维空间 $\alpha_3-\beta_3$ 坐标系

图 2 正常状态下电压矢量分布

不受控,磁链处于失控状态,三次电流谐波含量较大。

分析图 2 得电压矢量在一维和三维空间分布规律:一维空间下大矢量映射为三维空间小矢量(如 V_{25}),小矢量映射为三维空间大矢量(如 V_9),中矢量保持相同幅值(如 V_{16});一维空间中同向的 3 个电压矢量(如 V_{25}, V_{16}, V_9)映射到三维空间后,大矢量与小矢量仍保持同向(如 V_{25}, V_9),但中矢量与大、小矢量方向相反(如 V_{16}),这表明三维空间中的大、小矢量与中矢量对磁链作用效果相反^[12]。

基于以上规律,选取一维空间中同一方向上的中矢量与大矢量进行合成,使其作用时间满足一定比例,即可使三维空间中合成电压为零,能有效抑制电流三次谐波。合成虚拟电压矢量为

$$\tilde{V}_i(V_1, V_m) = V_1 K_1 + V_m K_m \quad (4)$$

式中: V_1 为可用大矢量; V_m 为可用中矢量; K_1 为大矢量在控制周期内的占空比; K_m 为中矢量在控制周期内的占空比。

设合成电压矢量在一维空间幅值为 U_1 ,在三维空间幅值为 U_3 ,在一个控制周期 T_s 中,根据伏秒原则得^[13]

$$\left. \begin{aligned} |U_1| T_s &= 0.6472 U_{dc} K_1 T_s + 0.4 U_{dc} K_m T_s \\ |U_3| T_s &= 0.4 U_{dc} K_1 T_s - 0.6472 U_{dc} K_m T_s \\ K_1 + K_m &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

为消除三维空间中平均电压矢量,令

$$|U_3| = 0 \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),得

$$\left. \begin{aligned} |U_1| &= 0.5527 U_{dc} \\ K_1 &= 0.618 \\ K_m &= 0.382 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由式(7)得,大矢量作用时间为 $0.618 T_s$,中矢量作用时间为 $0.382 T_s$,当大矢量作用时间为中矢量作用时间的 1.618 倍时可抑制电流三次谐波。按上述原则,共得到 10 个虚拟电压矢量,在 $\alpha_1-\beta_1$ 坐标系中的分布如图 3 所示^[14]。

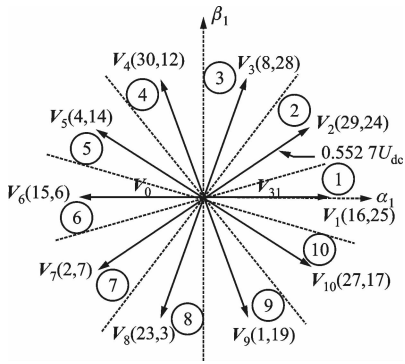


图 3 虚拟电压矢量在 $\alpha_1-\beta_1$ 坐标系中的分布

2.2 五相永磁电机直接转矩控制

FPMSM 直接转矩控制框图如图 4 所示,图中 n^* 为转速给定值, n 为转速观测值, T_e^* 为转矩给定值, T_e 为转矩观测值。根据磁链和转矩偏差,结合定子磁链所在扇区,通过电压矢量开关选择表,选择合适的电压矢量对磁链和转矩进行直接控制^[15]。

五相电机转矩观测器的转矩公式如式(2)所示,磁链观测器的转矩公式为

$$\Psi_{sk} = L_s I_s + \Psi_f \cos(\theta_r + \delta_k) \quad (8)$$

式中: Ψ_{sk} 为 k 相绕组磁链; L_s 为相电感; I_s 为相电流; Ψ_f 为永磁体磁链幅值; θ_r 为转子旋转的电角度; δ_k 为 k 相绕组与 a 相轴线的电角度。

根据不同扇区中虚拟电压矢量径向与切向分量对转矩和磁链的作用效果,建立电机正常运行时空电压矢量开关选择表,如表 1 所示。

表 1 中,参数 φ 表征磁链幅值应增减的趋势

$$\varphi = \begin{cases} 1, & |\varphi_s| \text{ 要求增大} \\ -1, & |\varphi_s| \text{ 要求减小} \end{cases} \quad (9)$$

的分布如图 5 所示。对比图 5 与图 2 可看出,电机一相绕组发生故障后,可用电压矢量由 32 个减少为 16 个。根据虚拟电压矢量构造方法,共得到 8 个故障后虚拟电压矢量,将空间分为 8 个扇区。故障后虚拟电压矢量在 $\alpha_1-\beta_1$ 坐标系中分布情况如图 6 所示^[19]。

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{\beta 1} \\ V_{a3} \\ V_{\beta 3} \end{bmatrix} = \frac{2}{5} \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{2\pi}{5} - 1 & \cos \frac{4\pi}{5} - 1 & \cos \frac{6\pi}{5} - 1 & \cos \frac{8\pi}{5} - 1 \\ \sin \frac{2\pi}{5} & \sin \frac{4\pi}{5} & \sin \frac{6\pi}{5} & \sin \frac{8\pi}{5} \\ \sin \frac{4\pi}{5} & \sin \frac{8\pi}{5} & \sin \frac{12\pi}{5} & \sin \frac{16\pi}{5} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \end{bmatrix} \quad (17)$$

当定子磁链位于不同扇区时,选取合适的电压矢量进行控制^[20]。如图 6 所示,定子磁链位于第一扇区且需增大磁链与转矩时,选择虚拟电压矢量 $\tilde{V}_2$;需减小磁链、增大转矩时,选择 $\tilde{V}_4$ 。同理,当定子磁链位于其他扇区时,选择合适的电压矢量对磁链和转矩进行调节,以获取所需的定子磁链幅值及

表 2 五相电机 a 相故障时虚拟电压矢量开关选择表

φ	τ	Ψ_s 所在扇区							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	$\tilde{V}_2$	$\tilde{V}_3$	$\tilde{V}_4$	$\tilde{V}_5$	$\tilde{V}_6$	$\tilde{V}_7$	$\tilde{V}_8$	$\tilde{V}_1$
	-1	$\tilde{V}_8$	$\tilde{V}_1$	$\tilde{V}_2$	$\tilde{V}_3$	$\tilde{V}_4$	$\tilde{V}_5$	$\tilde{V}_6$	$\tilde{V}_7$
	0	$\tilde{V}_0$	$\tilde{V}_{15}$	$\tilde{V}_0$	$\tilde{V}_{15}$	$\tilde{V}_0$	$\tilde{V}_{15}$	$\tilde{V}_0$	$\tilde{V}_{15}$
-1	1	$\tilde{V}_4$	$\tilde{V}_5$	$\tilde{V}_6$	$\tilde{V}_7$	$\tilde{V}_8$	$\tilde{V}_1$	$\tilde{V}_2$	$\tilde{V}_3$
	-1	$\tilde{V}_6$	$\tilde{V}_7$	$\tilde{V}_8$	$\tilde{V}_1$	$\tilde{V}_2$	$\tilde{V}_3$	$\tilde{V}_4$	$\tilde{V}_5$
	0	$\tilde{V}_{15}$	$\tilde{V}_0$	$\tilde{V}_{15}$	$\tilde{V}_0$	$\tilde{V}_{15}$	$\tilde{V}_0$	$\tilde{V}_{15}$	V_0

4 仿真分析

为验证本文所述容错控制策略的有效性,采用 MATLAB/Simulink 搭建五相电机系统仿真模型,对电机分别工作在正常稳定状态、一相开路后无容错控制和容错控制后 3 种状态下的电流、转矩及转速波形进行仿真分析。

五相永磁电机仿真参数如下:额定功率为 750 W,额定电压为 300 V,定子电阻为 0.74 Ω ,电感为 0.014 H,电机转速范围为 600~1 350 r/min,转子磁链为 0.045 Wb,极对数为 3。根据电机参数设置

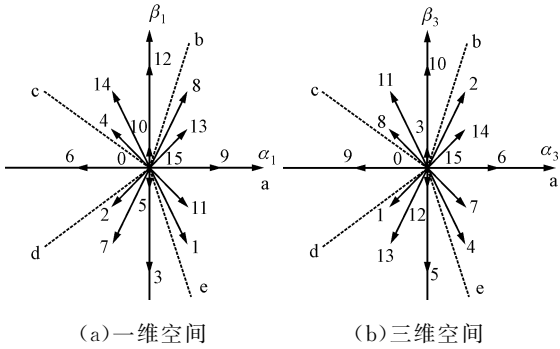


图 5 a 相断路故障时电压矢量分布

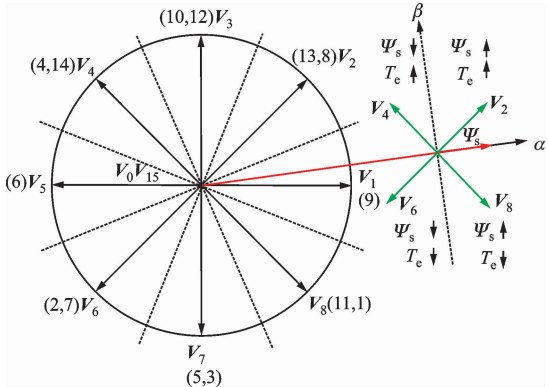


图 6 故障后一维空间虚拟电压矢量分布及作用效果

转矩的大小。由此建立故障后的虚拟电压矢量开关选择表,如表 2 所示。

仿真参数如下:电机给定转速 1 000 r/min,定子磁链幅值 0.16 Wb,负载转矩 1 N·m,直流母线电压 300 V;转速 PI 控制器参数设定为 $K_p=2, K_I=20$,采样频率 10 kHz。

为准确反映电机不同状态下转矩性能,定义转矩脉动系数^[21]

$$K = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{av}} \times 100\%$$

(18)

式中: T_{av} 、 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 分别为电磁转矩的平均值、最小值及最大值。

五相电机正常运行时测得电流、转矩及转速波

形如图 7 所示。正常状态下,电流波形正弦度较高,各相电流对称分布且幅值相等;转矩脉动系数 K 为 20.3%,此时电机平稳运行。

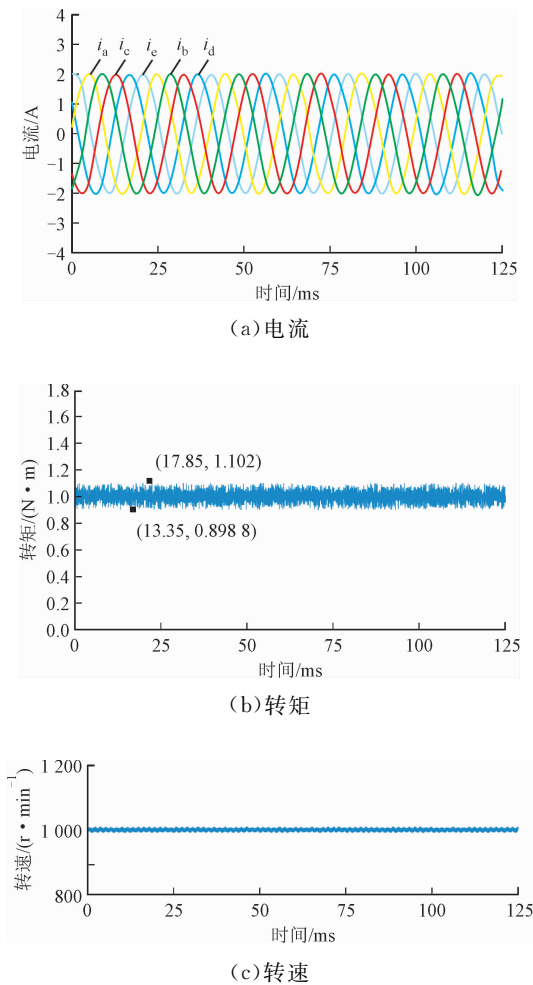


图 7 五相电机正常运行时仿真波形图

a 相断路故障后,无容错控制时测得电流、转矩及转速波形如图 8 所示。从图 8 中可看出,相同负载转矩下,故障后各相电流发生畸变,电流谐波含量增多;转矩脉动系数 K 约为 64.7%,转矩脉动增加;转速出现较大波动,平均转速有所降低,电机出现明显噪声和振动,系统送风不均匀。

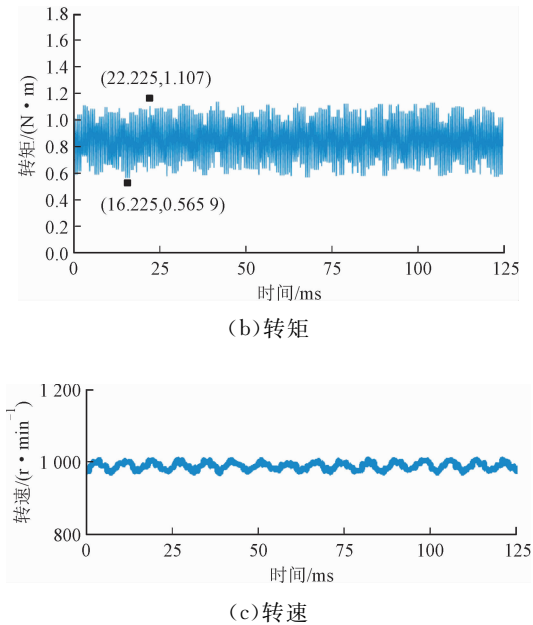
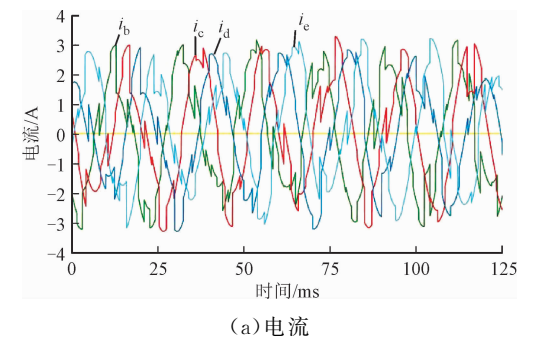
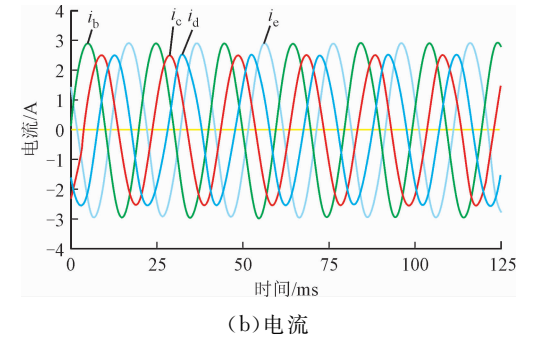
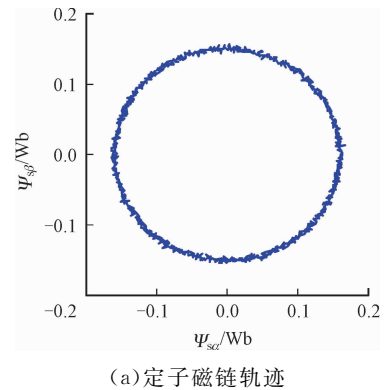


图 8 a 相故障后无容错控制仿真波形图

a 相断路故障后,采用文中所述容错控制算法后测得磁链、电流、转矩及转速波形如图 9 所示。由图 9a 容错控制后定子磁链轨迹可看出,采取容错控制后定子磁链整体跑圆,转矩输出基本稳定。a 相断路后,其电流幅值变为 0,其余四相电流幅值变大,以补偿故障相缺失造成的转矩跌落。电流正弦度较好,相电流谐波得到抑制;转矩脉动系数 K 为 23.2%,有效抑制了转矩脉动;容错控制后转速稳定



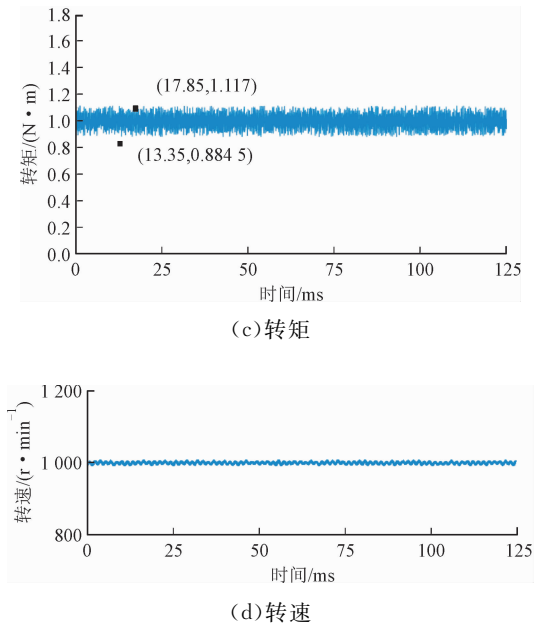


图 9 a 相故障后采用容错控制时仿真波形图

在给定值 1 000 r/min,转速波动得到控制,电机平稳运行,从而验证了控制策略的有效性。

为测试电机运行在不同功率和负载情况下的容错控制性能,在电机给定转速 1 000 r/min 情况下,重新给定负载转矩 4.3 N·m。电机故障前后转矩波形如图 10 所示, T_c^* 为给定参考转矩, T_c 为实际测得转矩。电机正常稳定运行时,转矩脉动约为 21.2%;a 相断路故障瞬间,输出转矩略有波动;采用文中所述容错控制算法后,转矩得到有效调节,转矩脉动降低,电机输出转矩逐渐恢复到故障前水平。

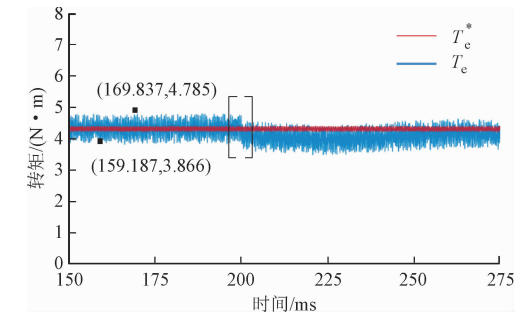


图 10 负载转矩为 4.3 N·m 时的电机故障前后转矩波形

电机故障前后转速波形如图 11 所示, n^* 为转速给定值, n 为转速观测值。故障前电机稳定运行,

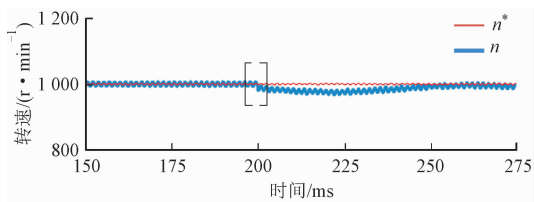


图 11 负载转矩为 4.3 N·m 时的电机故障前后转速波形

转速保持 1 000 r/min;故障瞬间转速略有下降;容错控制后,转速开始回升并逐渐稳定在给定值,转速得到有效控制,电机恢复稳定运行,从而验证了控制策略对不同负载情况控制的有效性。

5 结 论

本文针对列车风机用五相永磁同步电机驱动系统断相故障提出一种考虑三次谐波抑制的容错控制策略,主要结论如下。

(1)利用五相电机一维和三维空间中大矢量与中矢量对磁链作用效果相反的特点,构造虚拟电压矢量抑制电流三次谐波。

(2)基于故障前后磁动势不变原则,确定故障前后电压矢量开关选择表,利用逆变器输出电压矢量对磁链与转矩进行调节,抑制转矩脉动,保持一相断路故障下磁链与电磁转矩同电机正常运行时相当,实现驱动系统容错控制。

(3)仿真结果表明:考虑三次谐波抑制的五相永磁电机容错控制策略,在一相断路故障的情况下相电流谐波得到抑制,转矩脉动系数 K 由故障时的 64.7%降低为 23.2%,有效抑制了转矩脉动,转速稳定在给定值 1 000 r/min,电机平稳运行。实现了五相电机输出转矩与转速基本不变,提高了风机驱动系统运行稳定性,满足了列车风机驱动系统需求。

参考文献:

[1] 刘自程,李永东,郑泽东. 多相电机控制驱动技术研究综述 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(24): 17-29.
LIU Zicheng, LI Yongdong, ZHENG Zedong. Control and drive techniques for multiphase machines: a review [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 17-29.

[2] 高宏伟,杨贵杰. 五相永磁同步电机缺相运行的建模与控制 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 93-101.
GAO Hongwei, YANG Guijie. Modeling and control of five-phase permanent magnet synchronous motor with one phase open-circuit fault [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 93-101.

[3] PARSA L, TOLIYAT H A. Fault-tolerant five-phase permanent magnet motor drives [C]//Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference; 39th IAS Annual Meeting. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2004: 1048-1054.

[4] PARSA L, TOLIYAT H A. Direct torque control of five-phase interior permanent-magnet motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,

- 2007, 43(4): 952-959.
- [5] 赵品志, 杨贵杰, 李勇. 五相永磁同步电机单相开路故障的容错控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 68-76.
- ZHAO Pinzhi, YANG Guijie, LI Yong. Fault-tolerant control strategy for five-phase permanent magnetic synchronous motor under single phase open-circuit fault condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 68-76.
- [6] 郝振洋, 胡育文, 黄文新, 等. 永磁容错电机最优电流直接控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 46-51.
- HAO Zhenyang, HU Yuwen, HUANG Wenxin, et al. Optimal current direct control strategy for fault tolerant permanent magnet motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 46-51.
- [7] ZHOU Huawei, ZHAO Wenxiang, LIU Guohai, et al. Remedial field-oriented control of five-phase fault-tolerant permanent-magnet motor by using reduced-order transformation matrices [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 169-178.
- [8] 林晓刚, 周扬忠, 程明. 基于虚拟变量的六相永磁同步电机缺任意两相容错型直接转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 231-239.
- LIN Xiaogang, ZHOU Yangzhong, CHENG Ming. A novel direct torque control for six-phase permanent magnet synchronous motor with two opened phases based on defining fictitious variables [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 231-239.
- [9] 郝振洋, 胡育文, 沈天珉. 永磁容错电机的直接转矩控制策略 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 180-188.
- HAO Zhenyang, HU Yuwen, SHEN Tianmin. Direct torque control strategy of fault tolerant permanent magnet motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 180-181.
- [10] YU Fei, ZHANG Xiaofeng, QIAO Minzhong, et al. The direct torque control multiphase permanent magnet synchronous motor based on low harmonic space vector PWM [C]// International Conference on Industrial Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [11] 薛诚, 宋文胜, 冯晓云. 五相永磁同步电机多目标优化直接转矩控制算法 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1695-1704.
- XUE Cheng, SONG Wensheng, FENG Xiaoyun. A direct torque control algorithm of five-phase permanent-magnet machines with multi-objective optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1695-1704.
- [12] 刘国海, 程燃, 赵万祥, 等. 考虑三次谐波抑制的改进型五相永磁电机直接转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4212-4221.
- LIU Guohai, CHENG Ran, ZHAO Wanxiang, et al. Improved direct torque control for five-phase permanent magnetic synchronous motor based on third-harmonic suppression [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4212-4221.
- [13] 武雪松, 宋文胜, 薛诚. 基于虚拟电压矢量集占空比优化的五相永磁同步电机直接转矩控制算法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 39(3): 857-867.
- WU Xuesong, SONG Wensheng, XUE Cheng. Direct torque control schemes for five-phase permanent-magnet synchronous machines based on duty ratio optimization of virtual voltage vector sets [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 1-9.
- [14] ZHENG L B, FLETCHER J E, WILLIAMS B W, et al. A novel direct torque control scheme for a sensorless five-phase induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 503-513.
- [15] 胡育文, 高瑾. 永磁同步电动机直接转矩控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 209-282.
- [16] HOSSEYNI A, TRABELSI R, MIMOUNI M F. Fault tolerant control strategy of a five-phase permanent magnet synchronous motor drive [C]// 2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 218-222.
- [17] BERMÚDEZ M, GONZÁLEZ-PRIETO I, BARRERO F, et al. Open-phase fault operation of 5-phase induction motor drives using DTC techniques [C]// 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 595-600.
- [18] HUANG Wentao, HUA Wei, CHEN Fuyang, et al. Model predictive current control of open-circuit fault-tolerant five-phase flux-switching permanent magnet motor drives [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 1840-1849.
- [19] BERMUDEZ M, GONZALEZ-PRIETO I, BARRERO F. Open-phase fault-tolerant direct torque control technique for five-phase induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 902-911.

(下转第 136 页)