

容错逆变器 PMSM 无位置传感器控制系统

赵克, 安群涛, 孙力, 叶伟

(哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了提高系统的可靠性, 针对系统中的功率管和位置传感器等脆弱环节, 提出一种容错逆变器-永磁同步电动机无位置控制系统结构。系统中的逆变器采用容错拓扑结构, 由四开关实现逆变器器件开路故障后的容错运行; 自适应滑模观测器用于估算电机转子位置和转速, 实现永磁同步电动机的无位置传感器控制。为减少四开关逆变器的输出谐波, 对其 SVPWM 控制策略进行研究分析。对故障前后运行状况进行对比, 仿真和实验结果证明所提出系统能够实现功率管开路故障后的可靠运行。

关键词: 永磁同步电动机; 容错逆变器; 三相四开关; 无位置传感器; 自适应滑模观测器

中图分类号: TM 351

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2010)04-0025-06

Fault-tolerant inverter permanent magnet synchronous motor position sensorless control system

ZHAO Ke, AN Qun-tao, SUN Li, YE Wei

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve reliability, a new fault-tolerant inverter based permanent magnet synchronous motor (PMSM) position sensorless control system is proposed to avoid fragile parts of power components and position sensor. The fault-tolerant inverter topology was adopted and its four switches were used to maintain running when an open-switch fault happened. Sensorless control of PMSM was implemented by means of an adaptive sliding mode observer (SMO). Space vector pulse width modulation of four-switch inverter was studied in order to reduce harmonic. Operating conditions of the system both before and after faults were analyzed and compared by simulations and experiments. The simulation results as well as experimental ones illustrate that the proposed structure and method can realize reliably operation of the system after open-circuit faults in switches.

Key words: permanent magnet synchronous motors; fault-tolerant inverter; three-phase four-switch; position sensorless control; adaptive sliding mode observer

0 引言

永磁同步电动机以其优越的调速性能得到了广

泛研究和应用, 为了降低成本、解决机械位置传感器安装困难、环境适应能力及可靠性差等问题, 无位置传感器控制技术成为人们关注的热点^[1-2]。电压源

收稿日期: 2008-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(50477009)

作者简介: 赵克(1973—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电机控制和风力发电;

安群涛(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为交流伺服系统及故障诊断;

孙力(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机控制、风力发电及电磁兼容;

叶伟(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电机驱动。

逆变器(voltage source inverter, VSI)是永磁同步电动机控制系统中最常采用的功率变换器。然而,其中的功率半导体器件及其控制电路是最易发生故障的薄弱环节,其可靠性问题一直没有得到有效解决。最新研究表明:变频调速系统中功率变换器的故障占整个驱动系统故障的82.5%,是驱动系统中最易发生故障的薄弱环节^[3]。功率变换器一旦发生故障,轻则将造成系统停机影响生产,重则造成灾难性事故。尽管人们为提高调速系统的可靠性而采取降额设计或使用并联冗余元件等方法,但这会使系统造价过高,仅适用于空间条件许可的场合。为改变这种状况,国外已有研究者提出逆变器容错技术^[4-6]。容错控制使系统在发生故障的情况下,能够自动补偿故障的影响以维护系统的稳定性和尽可能恢复系统故障前的性能,从而保证系统的运行稳定可靠,是提高系统可靠性和安全性的一个重要途径。

本文将具有容错功能的逆变器单元与无位置传感器控制技术相结合,提出容错逆变器-永磁同步电动机无位置传感器控制系统结构,力图从整体上提高永磁同步电动机系统的可靠性。

1 容错逆变器 PMSM 无位置传感器控制系统构成

容错逆变器-永磁同步电动机无位置传感器控制系统结构如图1所示。逆变器部分采用容错拓扑结构,根据诊断出的故障,结合相应的控制策略实现逆变器的容错。同时,无论在正常的三相六开关还是在故障容错的三相四开关状态下,基于滑模观测器的无位置传感器控制算法都能有效估算出电机的转子位置和转速,实现无位置传感器控制。

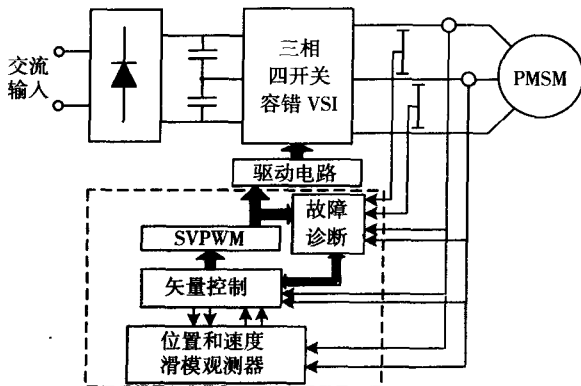


图1 容错 VSI-PMSM 无位置传感器控制系统
Fig.1 Fault-tolerant VSI-PMSM position sensorless control system

2 容错逆变器拓扑及其控制

2.1 逆变器故障诊断与容错拓扑

容错逆变器拓扑如图2(a)所示。母线串联电容的中点通过3个双向晶闸管分别连接到绕组输入端,结构简单,需要的功率器件少,且无需电机绕组中性点。

要实现逆变器的容错控制,首先应诊断出故障的位置,这里采用电压检测法^[7-8]:当功率开关发生断路故障时,逆变器相电压(图2(a)中a、b、c点与o点之间的电压)、电机相电压、电机线电压或电机中性点电压与正常工作时相比均有偏差,根据这些电压偏差即可诊断故障位置。根据故障开关位置(假设a相桥臂故障),触发相应的双向晶闸管导通TR_a,将电容中点与a相绕组短接,就构成了三相四开关逆变器,如图2(b)所示。

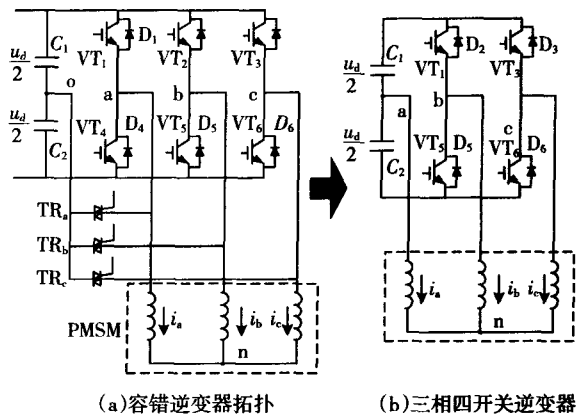


图2 容错逆变器拓扑和三相四开关逆变器

Fig.2 The fault-tolerant inverter topology and three-phase four-switch inverter

2.2 三相四开关逆变器的 SVPWM 控制

空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)以三相对称正弦波电压供电时交流电动机产生的理想圆形磁链轨迹为基准,用逆变器不同的开关模式产生的实际磁链去逼近基准磁链圆,从而达到较高的控制性能^[9-10]。传统的六开关逆变器可提供6个有效电压矢量和2个零矢量,而四开关逆变器只有4个开关状态,对应4个基本电压矢量,且没有零矢量。对于图2(b)所示的四开关逆变器,用开关函数 s_b 、 s_c 表示b、c两相桥臂功率开关管的通断状态:1代表上管导通,下管关断;0代表上管关断,下管导通。三相四开关逆变器的基本电压矢量如图3所示,4个基本电压矢量,将矢量空间划为4个扇区。

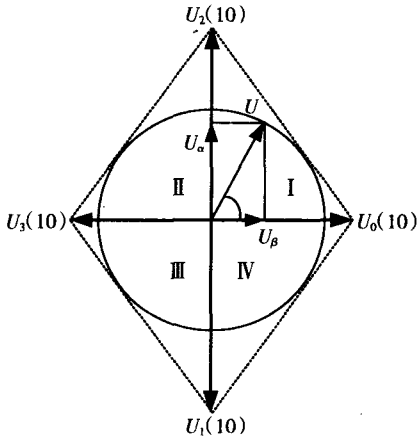


图3 三相四开关逆变器电压矢量

Fig.3 Voltage vectors of three-phase four-switch inverter

电机相电压可以用开关函数表示为

$$\left. \begin{aligned} u_a &= \frac{u_d}{3}(1 - s_b - s_c), \\ u_b &= \frac{u_d}{3}\left(2s_b - s_c - \frac{1}{2}\right), \\ u_c &= \frac{u_d}{3}\left(2s_c - s_b - \frac{1}{2}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: u_a 、 u_b 、 u_c 分别为电机相电压; u_d 为直流母线电压。

定义电压矢量 U 为

$$U = \frac{2}{3}(u_a + au_b + a^2u_c). \quad (2)$$

利用 Clarke 变换, 得到电压在两相静止 $\alpha - \beta$ 坐标系下的 2 个分量为

$$\left. \begin{aligned} u_\alpha &= \frac{u_d}{3}(1 - s_b - s_c), \\ u_\beta &= \frac{u_d}{\sqrt{3}}(s_b - s_c). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则有

$$U = U_\alpha + jU_\beta. \quad (4)$$

四开关逆变器的 4 个基本电压矢量 $\alpha - \beta$ 轴上的分量如表 1 所示。

表1 四开关逆变器的基本电压矢量

Table 1 Basic voltage vectors of three-phase four-switch inverter

$U(s_b s_c)$	u_α	u_β
$U_0(00)$	$u_d/3$	0
$U_1(01)$	0	$-u_d/\sqrt{3}$
$U_2(10)$	0	$u_d/\sqrt{3}$
$U_3(11)$	$-u_d/3$	0

如图 3 所示, 在任一扇区内, 参考电压矢量 U 可以由互差 90° 的相邻两电压矢量主矢量来合成。

定义参考电压矢量与其旋转方向上落后电压矢量间的位置角为 θ 。以扇区 I 为例, U_0 、 U_2 为用于合成参考电压矢量的 2 个相邻主矢量。 U_0 、 U_2 的作用时间可以表示为

$$T_x = UT \sin \theta / U_0, \quad (5a)$$

$$T_y = UT \cos \theta / U_2. \quad (5b)$$

通常 T_x 与 T_y 之和并不一定等于采样周期 T , 差值为 $T_0 = T - T_x - T_y$ 。在传统六开关逆变器系统中, 由于存在零矢量, 时间 T_0 可通过施加零矢量来补足。但四开关系统中不存在零矢量, 因此可考虑在相同时间内施加 2 个相反方向电压矢量来等效零矢量的作用^[11-13]。

3 PMSM 转子位置和转速自适应滑模观测器

考虑永磁同步电动机在 $\alpha - \beta$ 坐标系下的电流状态方程

$$\dot{i} = Ai + B(u - e), \quad (6)$$

$$\text{式中: 系数矩阵 } A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix},$$

其中 R 、 L 分别为电机绕组电阻和电感; $i = [i_\alpha \ i_\beta]^T$

和 $\dot{i} = [\dot{i}_\alpha \ \dot{i}_\beta]^T$ 分别为定子电流矢量及其导数; $u = [u_\alpha \ u_\beta]^T$ 为定子电压矢量; $e = [e_\alpha \ e_\beta]^T = [-\omega\psi_f \sin\theta \ \omega\psi_f \cos\theta]^T$ 为反电势, 其中 ω 为转子电角速度, ψ_f 为转子永磁磁链。

基于式(6), 定义滑模面 $S(X) = \dot{i} - \hat{i}$, 永磁同步电动机的滑模观测器方程为

$$\dot{\hat{i}} = A\hat{i} + B[u - K_{sw} \text{sign}(\hat{i} - i)], \quad (7)$$

式中: 符号“ $\hat{\cdot}$ ”代表对应变量的估计值; 符号“ \cdot ”代表变量的导数; $K_{sw} = kI$ 为滑模增益矩阵, 其中 k 为正常数, I 为单位矩阵。

选择合适的 k 值, 可以保证观测器收敛到实际值^[14-15]。由式(7)减去式(6)得到误差方程为

$$\dot{\tilde{i}} = A\tilde{i} - BK_{sw} \text{sign}(\tilde{i} - i) + Be, \quad (8)$$

式中符号“ $\tilde{\cdot}$ ”代表对应变量的误差, $\tilde{i} = \hat{i} - i$ 。

由于系统进入滑模面后, $\dot{\tilde{i}} = \tilde{i} = 0$, 将其代入式(8)可以得到切换函数为

$$\left. \begin{aligned} z_\alpha &= k \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha), \\ z_\beta &= k \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 $\text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)$ 、 $\text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta)$ 为开关信号, 包含着

反电势信息,只要对其进行低通滤波,就能得到反电势估算值,即

$$\left. \begin{aligned} \hat{e}_\alpha &= \frac{\omega_{\text{cutoff}}}{s + \omega_{\text{cutoff}}} z_\alpha, \\ \hat{e}_\beta &= \frac{\omega_{\text{cutoff}}}{s + \omega_{\text{cutoff}}} z_\beta. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 ω_{cutoff} 为低通滤波器的截止频率。

转子位置估算值可根据估算出的反电势计算得到

$$\hat{\theta} = -\tan^{-1} \frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}. \quad (11)$$

转速可由滑模观测器估算出的反电势作为输入,利用自适应辨识的方法获得。相对于估算的反电势,转子速度 ω 变化要慢得多,可以看作常量,即 $\dot{\omega} = 0$,从而有

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{e}}_\alpha \\ \dot{\hat{e}}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

以式(12)作为参考模型,构造转速自适应参数可调模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{e}}_\alpha \\ \dot{\hat{e}}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\omega} \\ \hat{\omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha - e_\alpha \\ \hat{e}_\beta - e_\beta \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: \hat{e}_α 和 \hat{e}_β 分别为 e_α 和 e_β 的状态估计值; $G = gI$ 为反馈回路增益, g 为常数。

转速自适应估算器结构如图4所示,当速度估算存在误差时,将导致系统产生状态误差 $\varepsilon = [\hat{e}_\alpha - e_\alpha \quad \hat{e}_\beta - e_\beta]^T$,借助 Popov 超稳定性理论设计参数自适应律来调整可调模型,就能够使系统状态误差 ε 收敛到零,从而得到转速的估计值 $\hat{\omega}$ 。自适应律为

$$\dot{\hat{\omega}} = (k_p + k_i/s) g \hat{e}^T J \hat{e}, \quad (14)$$

式中: $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$; k_p, k_i 为比例和积分系数。

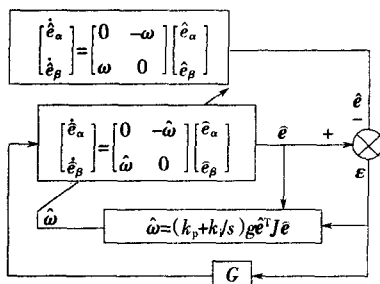


图4 转速自适应估算器结构

Fig.4 The structure of speed adaptive estimator

4 系统仿真结果

利用 Matlab 对文中所提的容错逆变器-永磁同步电动机无位置控制系统进行了仿真研究,仿真参数为:绕组电阻 $R_s = 3.5\Omega$;绕组 d、q 轴电感 $L_d = L_q = 11.5\text{mH}$;转子永磁磁链 $\psi_r = 0.12\text{Wb}$;转子转动惯量 $J = 4.4 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$;极对数 $n_p = 3$,速度给定值 $1000 \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$;直流母线电压 300V ;器件开关频率 10kHz ;负载转矩 $3\text{N} \cdot \text{m}$ 。

系统在 0.05s 时发生 a 相上管开路故障,经过一个采样周期后, a 相桥臂被切除掉,逆变器重构为三相四开关拓扑,同时,逆变器的 PWM 调制由传统六开关 SVPWM 算法切换为四开关 SVPWM。图5为电机定子三相电流仿真波形,图6为电机转速波形。可以看出,当发生开路故障后,定子电流和转速都发生了畸变,但经过很短的时间就恢复了正常,转速波动较小。图7为转矩波形,图8和图9分别为转子位置和转速的实际值与估算值,估算值能够很好地反应出实际值。从仿真结果可以看出,在发生故障后系统能够实现由六开关至四开关运行的平滑切换,位置滑模观测器未受影响,四开关逆变器供电时的系统运行平稳,无明显转矩波动。

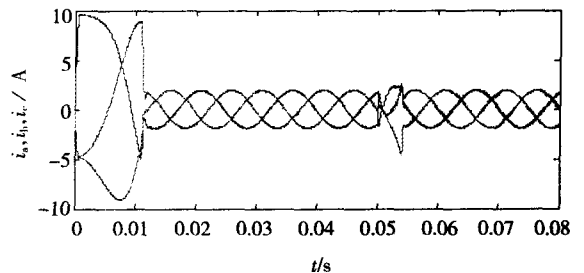


图5 电机三相电流波形

Fig.5 Three-phase current curves of the motor

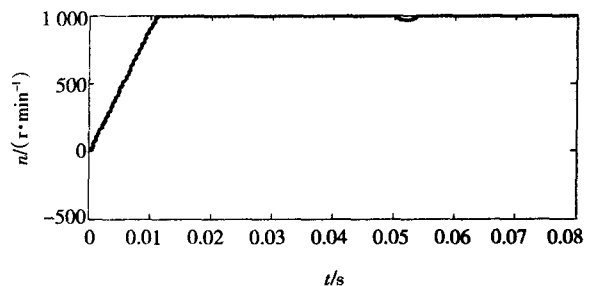


图6 电机转速波形

Fig.6 Speed curve of the motor

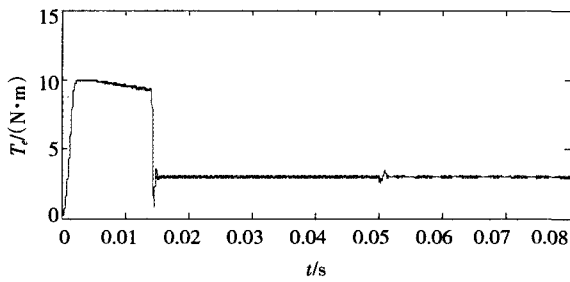


图7 电机转矩波形

Fig.7 Torque curve of the motor

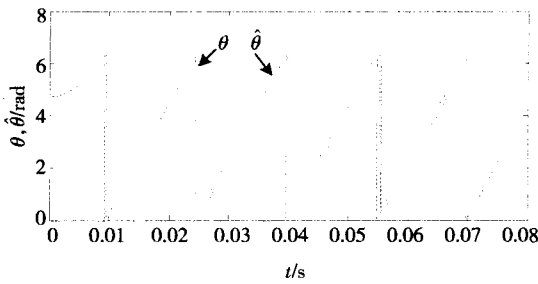


图8 转子位置角的实际值与估算值

Fig.8 Real and estimated value of rotor position

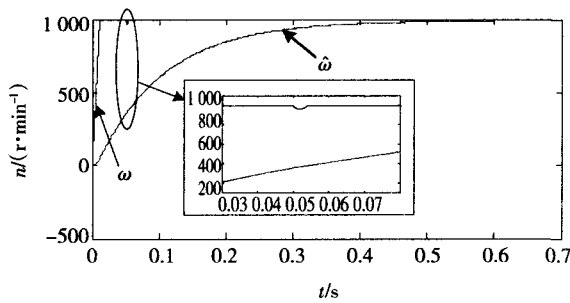


图9 电机转速的实际值与估算值

Fig.9 Real and estimated value of motor speed

5 实验结果与分析

基于 TMS320F2812 DSP 和三菱智能功率模块 PS21867 搭建了容错逆变器-永磁同步电动机无位置控制系统平台,并在此平台上对文中所提出的方法进行了实验研究。图 10 和图 11 分别为三相六开关和四开关逆变器下的电机相电流波形。图 12 和图 13 分别为三相六开关和四开关逆变器的 SVPWM 波形,实验得到六开关 SVPWM 波形为相位相差 120°的三相对称“马鞍形”,而四开关 SVPWM 波形为相位相差 60°的两相正弦波,由此可知,也可以通过两路相位相差 60°的正弦波作为调制波来实现四开关逆变器的控制。图 14 为滑模切换函数和反电势估算值。图 15 为转子位置的测量值与估算值。从实验结果可以看出,容错逆变器-永磁同步电动机无位置控制系统可行,为提高系统可靠性提供了途径。

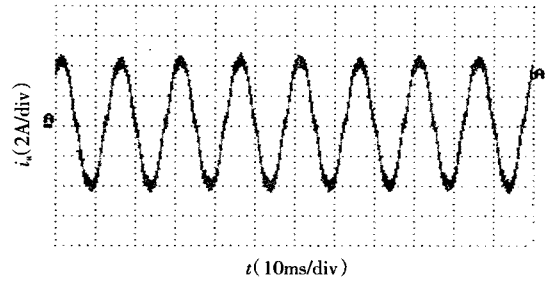


图10 六开关下的电机定子电流

Fig.10 The winding current under six-switch

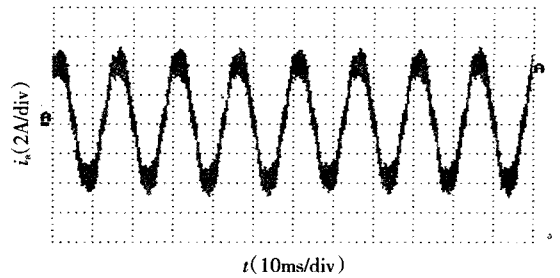


图11 四开关下的电机定子电流

Fig.11 The winding current under four-switch

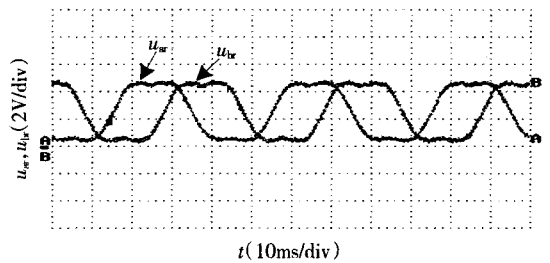


图12 六开关逆变器的 SVPWM 波形

Fig.12 The SVPWM graph of six-switch inverter

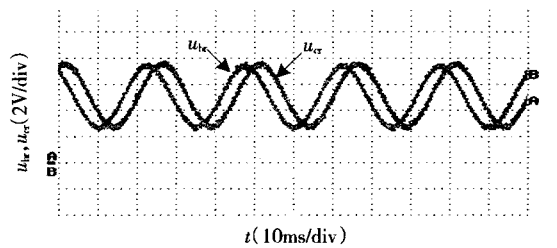


图13 四开关逆变器的 SVPWM 波形

Fig.13 The SVPWM graph of four-switch inverter

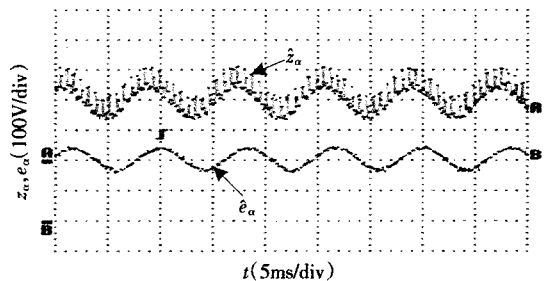


图14 切换函数与反电势估算值

Fig.14 The switch function and estimated EMF

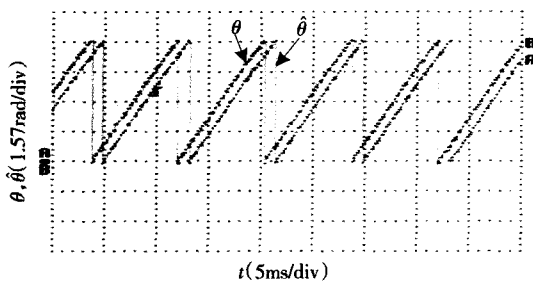


图15 转子位置测量值与估算值

Fig.15 Measured and estimated values of rotor position

6 结 语

功率逆变器和位置传感器是永磁同步电动机控制系统中易发生故障的薄弱环节,为提高系统可靠性,提出了容错逆变器-永磁同步电动机无位置控制系统结构。逆变器发生故障后,四开关工作方式在降低带载能力的前提下保障了系统的可靠运行。另外,系统采用转子位置和速度的自适应滑模观测器消除了机械位置传感器带来的安装困难、环境适应能力差、可靠性较低等问题。仿真和实验结果表明,该结构为提高系统可靠性提供了途径。

参 考 文 献:

- [1] 梁艳,李永东. 无传感器永磁同步电动机矢量控制系统概述[J]. 电气传动, 2003, 33(4): 4-9.
LIANG Yan, LI Yongdong. The state of art of sensor-less vector control of PMSM[J]. *Electric Drive*, 2003, 33(4): 4-9.
- [2] 李玉忍,谢利理,齐蓉,等. 永磁同步电机无位置传感器调速系统的研究[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(4): 428-431.
LI Yuren, XIE Lili, QI Rong, et al. A new sensorless speed regulating system for PMSM driver[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2003, 21(4): 428-431.
- [3] WIKSTRON P W, TEREN S L, KOBI A H. Reliability, availability, and maintainability of high-power variable-speed drive systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, 36(1): 231-241.
- [4] PARK Byounggun, KIM Taesung. Fault tolerant strategies for BLDC motor drives under switch faults[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006: 1637-1641.
- [5] RIBEIRO R L A, JACOBINA C B, DA SILVA E R C, et al. Compensation strategies in the PWM-VSI topology for a fault tolerant induction motor drive system[C]//4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, August 24-26, 2003, Stone Mountain, USA. 2003: 211-216.
- [6] YE H C C, DEMERDASH N A O. Fault tolerant operations in adjustable-speed drives and soft starters for induction motors[C]//2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, USA. 2007: 1942-1949.
- [7] RIBEIRO R L A, JACOBINA C B, DA SILVA E R C, 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.
- [8] RIBEIRO R L A, JACOBINA C B, DA SILVA E R C. Fault detection in voltage-fed PWM motor drive systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000: 242-247.
- [9] 杨贵杰,孙力. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 79-83.
YANG Guijie, SUN Li. Study on space pulse width modulation method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(5): 79-83.
- [10] 周卫平,吴正国,唐劲松,等. SVPWM的等效算法及SVPWM与SPWM的本质联系[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 133-137.
ZHOU Weiping, WU Zhengguo, TANG Jinsong, et al. A novel algorithm of SVPWM and the study on the essential relationship between SVPWM and SPWM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(2): 133-137.
- [11] 蒋志坚,徐殿国,朱香娟. 感应电动机四开关低成本逆变器的磁链轨迹改进控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 74-79.
JIANG Zhijian, XU Dianguo, ZHU Xiangjuan. An improved development of four-switch low cost inverter on induction motor with magnetic-flux control method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(11): 74-79.
- [12] 孙丹,何宗元,贺益康. 四开关逆变器供电永磁同步电机直接转矩控制系统转矩脉动抑制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 47-52.
SUN Dan, HE Zongyuan, HE Yikang. Torque ripple reduction for a four-switch inverter fed PMSM DTC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(21): 47-52.
- [13] 张兰红,胡育文,黄文. 容错型四开关三相变流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.
- [14] PAPONPEN K, KONGHIRUN M. An improved sliding mode observer for speed sensorless vector control drive of PMSM[C]//IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, August 14-16, 2006, Shanghai, China. 2006:1-5.
- [15] 黄雷,赵光宙,贺益康. PMSM的自适应滑模观测器无传感器控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(7): 1107-1110.
HUANG Lei, ZHAO Guangzhou, HE Yikang. Adaptive sliding mode observer for speed sensorless control of PMSM[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2007, 41(7): 1107-1110.