

控制与决策

Control and Decision

三相六开关容错逆变器驱动异步电机FCS-MPTC

缪仲翠, 余现飞, 张文宾, 李东亮, 王志浩

引用本文:

缪仲翠, 余现飞, 张文宾, 等. 三相六开关容错逆变器驱动异步电机FCS-MPTC[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1377–1383.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于中立型系统理论的异步电机电流解耦控制方法

Decoupling current control scheme for induction motors based on neutral system theory

控制与决策. 2020, 35(2): 329–338 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0757>

基于ESO的无速度传感器PMSM系统自适应滑模FCS-MPC

Sensorless adaptive sliding mode FCSMPC using ESO for PMSM system

控制与决策. 2018, 33(6): 999–1007 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0295>

基于变结构模型参考自适应的双绕组永磁容错电机转子位置估计算法

Estimation algorithm of rotor position for dual-winding fault tolerant permanent magnet motor drive based on SMO-MRAS

控制与决策. 2018, 33(1): 27–36 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1227>

基于抗饱和PI控制器和占空比调制的直线游标永磁电机直接推力控制

Direct thrust force control of linear vernier PM motor based on anti-windup PI controller and duty ratio modulation

控制与决策. 2018, 33(1): 175–180 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1417>

基于预测控制的高超声速飞行器容错控制器设计

Fault tolerant controller design based on predictive control for hypersonic vehicles

控制与决策. 2017, 32(11): 2085–2089 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1205>

三相六开关容错逆变器驱动异步电机 FCS-MPTC

缪仲翠^{1,2†}, 余现飞¹, 张文宾¹, 李东亮¹, 王志浩¹

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 兰州 730070;

2. 甘肃省人工智能与图形图像处理工程研究中心, 兰州 730070)

摘要: 针对异步电机驱动系统中三相六开关逆变器单管故障问题, 提出一种逆变器在故障状态下的三相六开关容错控制策略, 较三相四开关容错控制可以提供较多的电压矢量, 进而可以有效抑制转矩脉动. 结合有限集预测控制思想, 提出一种基于三相六开关容错逆变器的异步电机有限控制集模型预测转矩控制策略, 同时采用模糊 PI 转速控制器替代固定参数的 PI 控制器, 进一步提高系统的稳定性、快速性和鲁棒性. 仿真结果表明, 采用此方案进行控制的异步电机驱动系统能够持续稳定运行, 具有良好的动态性能, 进一步验证了所提出方法的有效性.

关键词: 异步电机; 三相六开关; 容错控制; 有限控制集模型预测控制; 模糊 PI

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Three-phase six-switch fault-tolerant inverter drives induction motor FCS-MPTC

MIAO Zhong-cui^{1,2†}, YU Xian-fei¹, ZHANG Wen-bin¹, LI Dong-liang¹, WANG Zhi-hao¹

(1. Department of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Provincial Engineering Research Center for Artificial Intelligence and Graphics & Image Processing, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the problem of single-tube fault of three-phase six-switch inverters in induction motor drive systems, a three-phase six-switch fault-tolerant control strategy of inverter under fault condition is proposed, which can provide more voltage vectors than three-phase four-switches and then the torque ripple can be effectively suppressed. Combined with the idea of finite-set predictive control, a three-phase six-switch fault-tolerant inverter finite-control-set model predictive torque control (FCS-MPTC) strategy is proposed. At the same time, the fuzzy PI speed controller is used to replace the fixed-parameter PI controller to further improve the stability, rapidity and robustness of the system. The simulation results show that the induction motor drive system controlled by this scheme can continue to operate stably and has good dynamic performance, and further validates the effectiveness of the proposed method.

Keywords: induction motor; three-phase six-switch; fault-tolerant control; finite-control-set model predictive torque control; fuzzy PI

0 引言

异步电机直接转矩控制作为继矢量控制后发展起来的一种高性能控制方法, 以其控制结构简单、动态响应快、对电机参数不敏感等优点, 得到了广泛应用^[1]. 然而, 直接转矩控制中存在转矩和磁链脉动较大、开关频率不稳定等问题, 阻碍了其在高精度控制场合的应用. 近年来, 模型预测控制因其可以直接考虑被控过程的输入、状态和输出的约束条件, 能够直接处理耦合多变量系统, 具有动态响应快、控制灵活等优点, 得到了广泛的关注和研究^[2-5]. 文献[2]用模型预测控制方法替代传统直接转矩控制, 显

著地提高了驱动性能. 文献[3]将预测的最优电压矢量作用于每个采样周期, 获得可变的开关频率和较低的开关损耗. 作为预测控制中重要的控制方法, 有限集模型预测控制 (finite-control-set model predictive control, FCS-MPC) 能够很好地将逆变器的开关状态和控制目标结合起来, 易于实现, 成为当前研究的热点^[6-7]. 文献[6]首次提出将 FCS-MPC 应用于三相电压型逆变器的电流预测控制中, 取得了较好的效果. 文献[7]将 FCS-MPC 与传统 PI 控制进行对比分析, 消除了传统 PI 控制存在的电流耦合, 展现出优良的控制特性. 结合有限集模型预测控制优点, 有学

收稿日期: 2018-08-12; 修回日期: 2018-12-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61663022).

责任编辑: 刘向杰.

†通讯作者. E-mail: miaozhongcui@mail.lxjtu.cn.

者提出有限集模型预测直接转矩控制 (finite-control-set model predictive torque control, FCS-MPTC), 它具有快速动态响应、内部完全解耦和易于引入非线性约束条件等优点, 近年来广泛应用于电机控制领域^[8-14]. 但是, 该控制过程在线计算量较大, 会导致系统存在控制延时, 影响其控制性能^[11]. 针对这一问题, 文献[12]根据最小开关切换原则筛选出部分待选矢量, 虽然减小了计算量, 但不能保证选择出的矢量为全局最优电压矢量, 有可能会影响系统的动、静态性能. 文献[13]提出了一种基于转矩与磁链无差拍估算每个控制周期内电压矢量控制集优化方法, 但计算较为复杂. 对于控制系统而言, 控制策略固然重要, 但保障其驱动系统输出的稳定同样不可或缺.

控制系统中的驱动单元能否正常稳定地工作对其控制性能至关重要, 异步电机控制系统的驱动单元为逆变器模块, 一旦逆变器中的开关管发生故障, 控制系统的稳定性和可靠性便得不到保证. 因此, 研究逆变器开关管故障状态下的容错控制方法, 保障控制系统运行的稳定性具有重要的研究意义. 近年来, 已有学者对异步电机不同的容错控制方法进行了研究, 其中三相四开关容错逆变器是常见的容错拓扑结构, 其控制方案简单, 易于操作, 逐渐成为逆变器容错研究的热点^[14-17]. 但三相四开关容错逆变器相较于正常工况下的三相六开关逆变器电压矢量减少, 会加剧转矩脉动, 且当剩余的4个开关管任意一个出现故障时, 整个系统便无法工作. 所以, 如何在不改变三相四开关逆变器拓扑结构的前提下, 通过对控制策略的改进, 充分挖掘正常开关管的潜能, 增加故障下系统运行的稳定性与可靠性, 获得更优良的控制性能, 成为容错控制需要解决的问题之一^[17].

考虑以上情况, 本文针对 FCS-MPTC 计算量大和存在控制延时的缺点进行优化改进, 提出一种带延迟补偿 FCS-MPTC 的策略. 针对三相四开关容错所能提供电压矢量少、转矩脉动大的问题, 在文献[17]对三相四开关和三相六开关逆变器电压矢量比较分析的基础上, 通过驱动系统的运行模式建立了三相六开关容错逆变器数学模型, 并将其应用于控制系统中. 考虑到电机的非线性特性以及运行过程中电机参数的不断变化, 使得传统固定增益参数的 PI 控制器难以满足电机在大范围调速及负载变化时对系统静、动态性能的要求^[18-19], 为了兼顾控制系统的动静态性能, 采用模糊 PI 控制器代替传统的 PI 控制器, 设计了基于模糊 PI 转速控制器的三相六开关容错逆变器驱动异步电机 FCS-MPTC 系统. 最后通过仿真验

证所提出方法的有效性.

1 异步电机和三相六开关容错逆变器数学模型

1.1 异步电机数学模型

假设异步电机的磁动势沿气隙圆周正弦分布, 忽略铁损影响, 电机在两相静止坐标系 (α - β 坐标系) 中的动态数学模型^[20]为

$$px = Ax + Bu. \quad (1)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r + R_r L_s}{\sigma L_s L_r} I + j\omega & \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{1}{T_r} I - j\omega \right) \\ -R_s I & 0 \end{bmatrix},$$

$$j = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_s L_r}{L_m^2},$$

$$x = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{s\alpha} \quad \psi_{s\beta}], \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ \sigma L_s \\ I \end{bmatrix},$$

$i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 为 α - β 轴的定子电流分量, $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ 为 α - β 轴转子磁链分量, $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 为 α - β 轴定子电压分量, $T_r = L_r/R_r$ 为转子电磁时间常数, L_r 、 L_s 分别转子和定子电感, L_m 为电磁互感, ω 为转子电角速度, R_r 、 R_s 分别为转子和定子电阻, σ 为漏磁系数.

定子磁链幅值方程表达式为

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2}. \quad (2)$$

电磁转矩方程表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}), \quad (3)$$

其中 n_p 为电机磁极对数.

1.2 三相六开关容错逆变器拓扑结构及数学模型

不失一般性, 以 a 相故障为例, 与传统三相四开关容错控制不同, 当开关管 1 发生故障时, 三相六开关容错控制策略并不关闭 2 号开关管, 而只关闭 1 号开关管, 同时启用 7 号开关管, 并对 2 号和 7 号开关管加以控制. 由此可得到故障状态下的三相六开关容错逆变器驱动异步电机系统结构, 如图 1 所示.

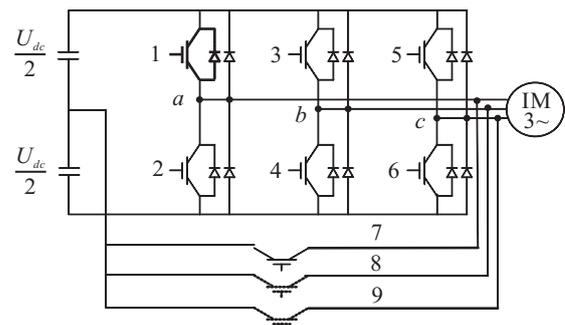


图1 三相六开关容错逆变器驱动异步电机系统结构

此时,控制系统在2~7号开关管的作用下,将形成7个基本电压矢量,其中一个为零电压矢量.将电压矢量空间同样分为6个扇区,用I~VI表示,如图2所示.

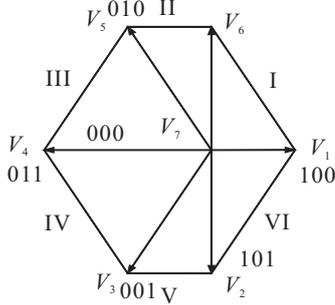


图2 故障状态下三相六开关控制电压矢量

根据文献[17]对三相六开关容错逆变器的研究,并参照三相四开关容错控制及正常工况下三相六开关控制的定子绕组各相电压公式,推导出三相六开关容错控制定子绕组各相电压公式如下:

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{3}U_{dc}(s_a - s_b - s_c), \\ u_b &= \frac{1}{3}U_{dc}(2s_b - \frac{1}{2}s_a - s_c), \\ u_c &= \frac{1}{3}U_{dc}(2s_c - \frac{1}{2}s_a - s_b). \end{aligned} \quad (4)$$

其中: U_{dc} 为直流母线电压; $s_i(i = a, b, c)$ 为第*i*条桥臂上的开关函数, $s_i = 1$ 表示桥臂上通下断, $s_i = 0$ 表示桥臂上断下通,共具有(000)、(100)、(110)、(010)、(011)、(001)、(101)七种开关状态.

2 容错逆变器模型预测控制

2.1 有限集模型预测直接转矩控制

FCS-MPTC的基本控制思想是利用逆变器的离散特性和开关状态的有限性,基于系统模型预测下一时刻状态变量的变化,通过遍历法选择出使目标函数最小的电压矢量并直接应用于控制系统.整个控制系统由3部分组成:目标代价函数、转矩和磁链预测、滚动优化,控制系统结构如图3所示.

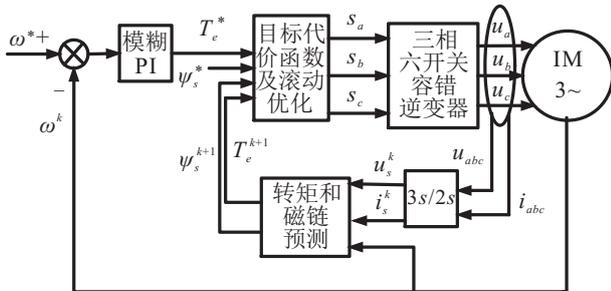


图3 三相六开关容错逆变器FCS-MPTC

定子电压在 α - β 坐标系分量为

$$u_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}}(u_a - \frac{1}{2}(u_b + u_c)),$$

$$u_\beta = \frac{\sqrt{2}}{2}(u_b - u_c). \quad (5)$$

为了得到下一时刻定子电流和定子磁链的预测值,并保证预测精度,采用二阶欧拉法对式(1)进行离散,得到定子电流和定子磁链的预测模型如下:

$$\begin{aligned} x_n(k+1) &= x(k) + T_s(Ax(k) + Bu(k)), \\ x(k+1) &= x_n(k+1) + \frac{T_s}{2}A(x_n(k+1) - x(k)). \end{aligned} \quad (6)$$

其中: T_s 为系统采样周期, $x(k)$ 、 $x(k+1)$ 分别为当前时刻和下一时刻的状态变量, $x_n(k+1)$ 为中间预测校正变量.

根据离散化方程(6)得到 $k+1$ 时刻 α - β 坐标下的状态变量 $x(k+1) = [i_s(k+1) \ \psi_s(k+1)]^T$,再由式(2)和(3)得到 $k+1$ 时刻的电磁转矩和定子磁链幅值,分别为

$$\begin{aligned} T_e(k+1) &= \frac{3}{2}n_p(\psi_{s\alpha}(k+1)i_{s\beta}(k+1) - \\ &\quad \psi_{s\beta}(k+1)i_{s\alpha}(k+1)), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\psi_s(k+1) = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2(k+1) + \psi_{s\beta}^2(k+1)}. \quad (8)$$

以磁链和电磁转矩误差绝对值之和最小化为控制目标,选取目标函数如下所示:

$$g = |T_e^* - T_e(k+1)| + \lambda|\psi_s^* - \psi_s(k+1)|. \quad (9)$$

其中: T_e^* 、 ψ_s^* 分别为给定电磁转矩和给定磁链; λ 为权重系数,一般取 $\lambda = T_N/\psi_{sN}$,在实际应用中为了获取较好的控制效果还需进一步调整.

2.2 延时补偿

在实际应用中,由于数字控制系统存在一拍延迟,使得当前时刻预测得到的最优电压矢量无法直接应用于下一时刻的控制,造成控制延迟,进而影响系统控制性能.为了消除控制延迟带来的影响,需要对一拍延迟进行有效补偿.具体为在 k 时刻开始计算 $k+2$ 时刻的最优开关矢量,这样经过一个周期的计算,在 $k+2$ 时刻可以直接将选定的最优开关矢量应用在 $k+2$ 时刻.再将由式(6)得到的 $k+1$ 时刻的变量作为初值,对 $k+2$ 时刻的变量进行预测,由式(6)得到 $k+2$ 时刻的变量表达式为

$$\begin{aligned} x_n(k+2) &= x(k+1) + T_s(Ax(k+1) + \\ &\quad Bu(k+1)), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} x(k+2) &= x_n(k+1) + \frac{T_s}{2}A(x_n(k+2) - \\ &\quad x(k+1)). \end{aligned} \quad (11)$$

延时补偿后的目标函数为

$$g = |T_e^* - T_e(k+2)| + \lambda|\psi_s^* - \psi_s(k+2)|. \quad (12)$$

考虑数字控制延迟补偿的MPTC流程图如图4所示。

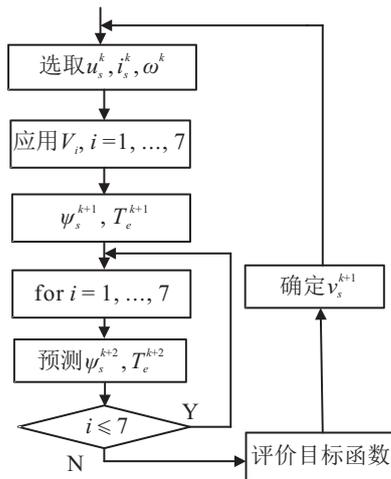


图4 考虑数字控制延迟补偿的MPTC流程

3 模糊PI转速控制器设计

模糊PI转速控制器结构如图5所示,取转速偏差 e 和转速偏差的变化率 ec 作为模糊控制器的输入,

PI控制器中的 k_p 、 k_i 的变化值作为输出对PI参数进行在线调整,以提高系统控制精度和动态响应速度^[20-21]。模糊控制主要由模糊化、模糊推理和去模糊化3部分构成。文中采用Mamdani模糊推理结构和重心法去模糊化。

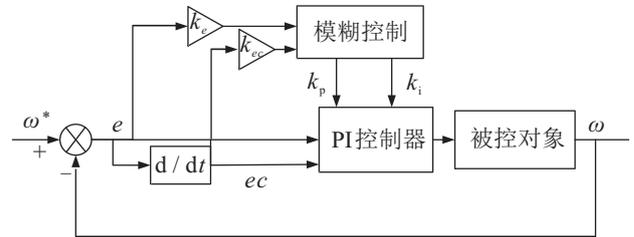


图5 模糊PI转速控制器结构

定义输入变量 e 、 ec 和输出变量 k_p 、 k_i 的模糊子集为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},对应的论域为 $[-3, 3]$, k_e 、 k_{ec} 为量化因子,在专家经验的基础上,通过仿真实验进一步调整建立的模糊控制规则如表1所示。

表1 模糊控制规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	ZO/ZO
NM	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS
NS	PM/NB	PM/NM	PM/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/PM	NS/PM
ZO	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NM/PM	NM/PM
PS	PS/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PB
PM	PS/ZO	ZO/ZO	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PB	NB/PB
PB	ZO/ZO	ZO/ZO	NM/PS	NM/PM	NM/PM	NB/PB	NB/PB

4 系统仿真

为了提高系统的稳定性和稳态精度,隶属度函数选择灵敏度高但不规则的三角形函数,即在误差为零附近增加规则数。得到的输入输出变量隶属度函数如图6所示。

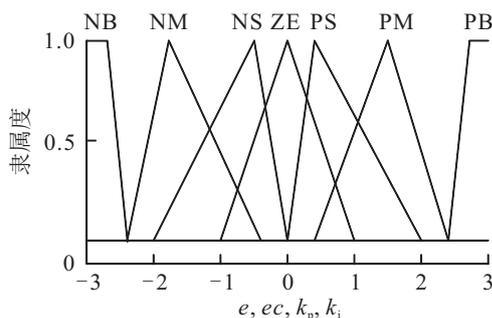


图6 输出变量隶属度函数

为验证所提出基于模糊PI转速调节器的三相六开关容错逆变器驱动异步电机FCS-MPTC的有效性,在Matlab仿真平台进行仿真实验。实验中采用的异步电机参数如表2所示。直流母线电压 U_{dc} 为511 V,系统采样周期为10 us,权重系数 λ 为85,模糊PI转速调节器中的初始参数为 $k_p = 20$, $k_i = 0.05$, $k_e = k_{ec} = 1$ 。

为验证三相六开关容错控制策略对系统的性能的改善程度,将基于传统PI控制器的三相六开关容错预测控制系统设为系统1,基于传统PI控制器的三相四开关容错预测控制系统设为系统2,分别从输出转速、转矩、磁链和电流4个方面进行仿真对比。系统给定转速为600 r/min,给定磁链为1.2 Wb,带5 N·m的负载启动,仿真结果如图7~图13所示。

表2 异步电机参数

参数	数值
电压 U_N / V	380
定子电阻 R_s / Ω	1.85
转子电阻 R_r / Ω	2.658
互感 L_m / H	0.2838
频率 f_N / Hz	50
定子绕组自感 L_s / H	0.2941
转子绕组自感 L_r / H	0.2898
极对数 n_p	2

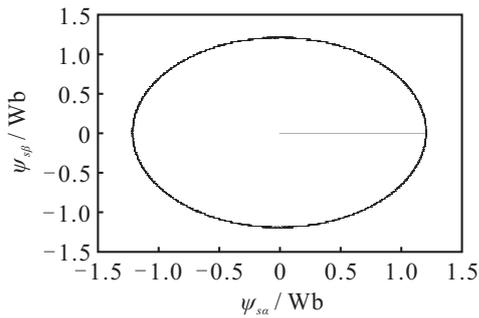


图7 系统1定子磁链响应

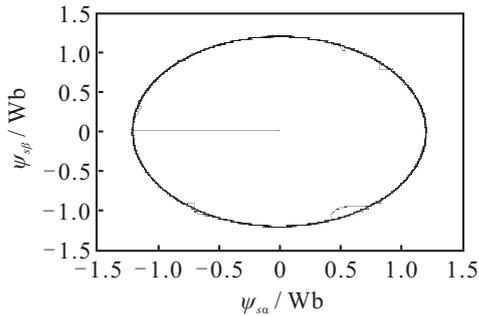


图8 系统2定子磁链响应

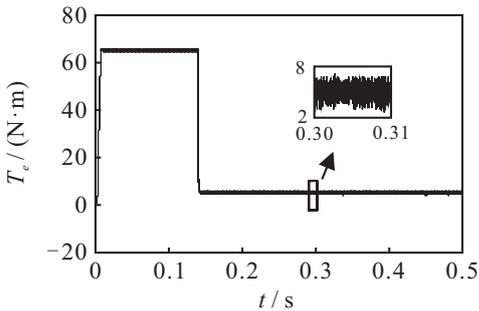


图9 系统1转矩响应

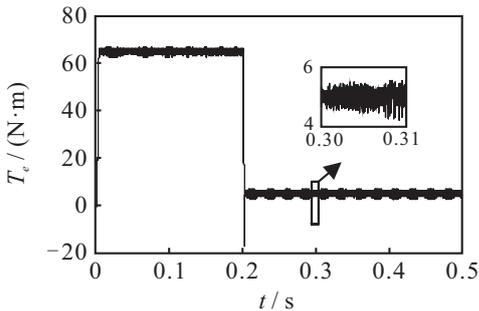


图10 系统2转矩响应

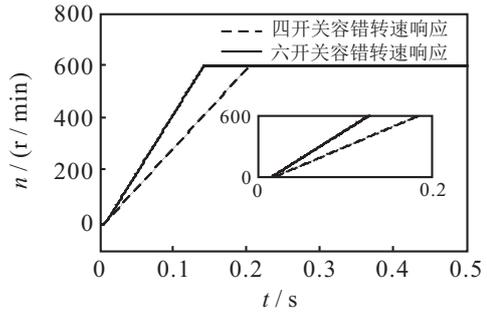


图11 系统1和系统2转速响应

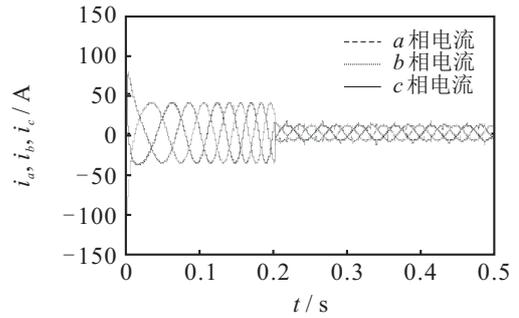


图12 系统1电流响应

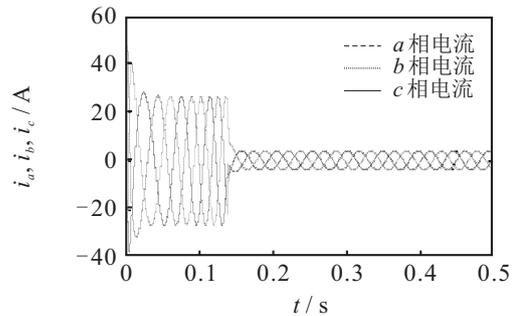


图13 系统2电流响应

图7和图8分别为两系统定子磁链响应曲线,可以看出,系统1中磁链更加平稳光滑,具有较少的毛刺,而系统2在运行时磁链波动较大.定子磁链的性能直接决定电机输出转矩的稳定性.图9和图10分别为两系统电磁转矩响应曲线,系统达到稳态时,系统2转矩脉动为 ± 2.5 N·m,系统1转矩脉动为 ± 1.2 N·m,可见三相六开关容错控制策略有效减小了电磁转矩脉动.图11为系统1和系统2的速度响应曲线,系统1的转速上升时间为0.107 s,系统2的上升时间为0.159 s,三相六开关容错控制系统动态响应更快.图12和图13分别为两系统定子电流响应曲线.由图12可见,三相四开关容错控制的电流波动较大,三相六开关的电流输出曲线比较光滑.系统1和系统2的三相定子电流谐波失真(total harmonic distortion, THD)如表3所示. THD公式定义为

$$THD_x = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X_n^2}}{X_1}$$

其中: X_1 为基波, X_n 为高阶谐波, THD_x 为 ($x = a, b,$

c) 相的谐波失真. 由表3可见, 采用三相六开关容错控制策略的系统定子电流具有更小的THD值.

表3 定子电流THD值 单位: %

相电流	a相电流	b相电流	c相电流
系统2	8.39	7.63	7.35
系统1	5.38	5.51	5.49

由以上比较分析可知, 当逆变器发生单管故障后, 采用提出的三相六开关容错控制系统能够使电机连续平稳地运行. 并且与传统三相四开关容错控制策略相比, 系统到达稳态的时间更短, 转矩脉动更小, 定子电流和磁链输出更加平滑.

为了进一步提高控制系统性能, 将本文所设计的模糊PI速度控制器应用到三相六开关容错控制系统中(设为系统3), 并与系统1进行仿真对比. 图14为系统3的转矩响应曲线, 稳态时转矩脉动为 $\pm 0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 相比于系统1转矩脉动得到进一步减小.

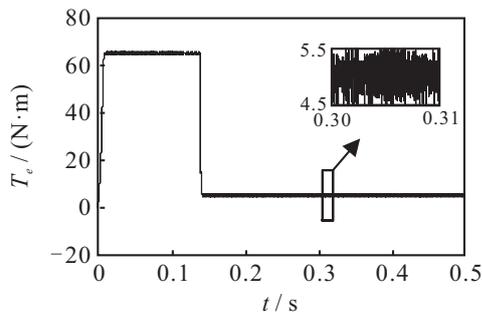


图14 系统3转矩响应曲线

5 结论

本文研究了逆变器单管故障状态下的异步电机模型预测控制策略. 针对传统三相四开关容错控制存在转矩脉动大、所能提供电压矢量少的缺点, 提出了将三相六开关容错控制策略应用到预测控制系统. 为了消除数字控制系统中存在的控制延迟带来的影响, 对预测控制系统进行一拍延迟补偿, 同时为了进一步改善系统的动静态性能, 用模糊PI控制器替代传统的PI控制器. 仿真结果表明, 所提出控制策略具有响应速度更快、转矩脉动更小的优点, 显示出良好的控制效果.

参考文献(References)

- [1] 张兴华, 石万. 感应电机直接转矩控制系统的转矩脉动极小化方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 140-144.
(Zhang X H, Shi W. Torque ripple minimization of direct torque control system for induction motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 140-144.)
- [2] Karlovsky P, Lettl J. Improvement of induction motor

drive performance using predictive control method instead of DTC method[C]. International Conference on Applied Electronics. Pilsen: IEEE, 2016: 121-124.

- [3] Won I K, Kim D Y, Jang Y H, et al. Improved FOC of IPMSM using model predictive current control decreasing switching loss for EV[C]. International Conference on Electrical Machines and Systems. Chiba: IEEE, 2017: 1-6.
- [4] Zhang Y, Xia B, Yang H, et al. Overview of model predictive control for induction motor drives[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 2(1): 62-76.
- [5] 张虎, 张永昌, 杨达维. 基于双矢量模型预测直接功率控制的双馈电机并网及发电[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 69-76.
(Zhang H, Zhang Y C, Yang D W. Two-vectors-based model predictive direct power control of doubly fed induction generator for grid connection and power regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 69-76.)
- [6] Rodriguez J, Cortes P. Predictive control of a three-phase inverter[J]. Electronics Letters, 2004, 40(9): 561-563.
- [7] Mohamed I S, Zaid S A, Abu-Elyazeed M F, et al. Model predictive control—A simple and powerful method to control UPS inverter applications with output LC filter[C]. Electronics, Communications and Photonics Conference. Fira: IEEE, 2013: 1-6.
- [8] 张虎, 张永昌, 夏波, 等. 基于空间矢量调制的感应电机无速度传感器模型预测磁链控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 97-104.
(Zhang H, Zhang Y C, Xia B, et al. Speed sensorless model predictive flux control of induction motor drives based on space vector modulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 97-104.)
- [9] 魏海峰, 韦汉培, 张懿. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机PWM电流预测控制[J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 351-355.
(Wei H F, Wei H P, Zhang Y. PWM predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on extended state observer[J]. Control and Decision, 2018, 33(2): 351-355.)
- [10] 张永昌, 杨海涛. 异步电机无速度传感器模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2422-2429.
(Zhang Y C, Yang H T. Model predictive control for speed sensorless induction motor drive[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2422-2429.)
- [11] 柳志飞, 杜贵平, 杜发. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 58-69.
(Liu Z F, Du G P, Du F. Research status and development trend of finite control set model predictive

- control in power electronics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 58-69.)
- [12] Preindl M, Bolognani S. Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, part 1: Maximum torque per ampere operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 4(9): 1912-1921.
- [13] 薛诚, 宋文胜, 武雪松, 等. 无差拍优化五相永磁同步电机有限集模型预测转矩控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 7014-7023.
(Xue C, Song W S, Wu X S, et al. Finite-control-set model predictive torque control algorithm with deadbeat optimization for five-phase permanent-magnet synchronous machines drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (23): 7014-7023.)
- [14] 李国飞, 滕青芳, 高锋阳, 等. 容错三相四开关逆变器PMSM的模型预测转矩控制[J]. 信息与控制, 2015, 44(6): 697-702.
(Li G F, Teng Q F, Gao F Y, et al. Model predictive torque control of fault-tolerant three-phase four-switch inverter permanent magnet synchronous motor[J]. Information and Control, 2015, 44(6): 697-702.)
- [15] Zhou D, Zhao J, Liu Y. Online tuning of weighting factors based on sugeno fuzzy method in predictive torque control of four-switch three-phase inverter-fed IM[C]. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Anacapri: IEEE, 2016: 734-739.
- [16] 王波. 基于三相四开关逆变器供电永磁同步电机直接转矩控制容错运行研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2010.
(Wang B. Fault-tolerant operation of direct torque control for permanent magnet synchronous motor powered by three-phase four-switch inverter[D]. Hangzhou: School of Electrical Engineering, Zhejiang University, 2010.)
- [17] 韩力, 王崇任, 李辉, 等. 基于DTC的异步电机三相六开关容错控制策略[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(10): 7-14.
(Han L, Wang C R, Li H, et al. Three-phase six-switch tolerant control strategy of induction machine based on DTC[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(10): 7-14.)
- [18] Jahan E, Hazari M R, Mannan M A, et al. Fuzzy logic based speed control of an induction motor with considering core loss, stray load loss, and variations of motor parameters[C]. International Conference on Electrical Machines and Systems. Chiba: IEEE, 2016: 1-4.
- [19] 林远, 卢子广, 卢泉, 等. 基于模糊PI矢量控制的异步电机调速系统[J]. 电气传动, 2017, 47(8): 15-18.
(Lin Y, Lu Z G, Lu Q, et al. Induction motor speed control system based on fuzzy PI vector control[J]. Electric Drive, 2017, 47(8): 15-18.)
- [20] 吕小意, 王艳, 纪志成, 等. 感应电机变结构PID速度控制及转子电阻辨识[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(12): 3132-3138.
(Lv X Y, Wang Y, Ji Z C, et al. Variable structure pid speed control and rotor resistance identification of induction motor[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3132-3138.)
- [21] 杨璐, 雷菊阳. 基于Matlab的参数自整定模糊PID控制器的两种设计方法[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(2): 1212-1214.
(Yang L, Lei J Y. Two design methods of parameters self-tuning fuzzy-PID controller in Matlab[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(2): 1212-1214.)

作者简介

缪仲翠(1971—), 女, 副教授, 从事电机先进控制等研究, E-mail: miaozhongcui@mail.lxjtu.cn;

余现飞(1992—), 男, 硕士生, 从事电力电子与电力传动的研究, E-mail: 15095421603@163.com;

张文宾(1993—), 男, 硕士生, 从事电机控制技术的研
究, E-mail: 745946118@qq.com;

李东亮(1994—), 男, 硕士生, 从事电机控制技术的研
究, E-mail: 1276706728@qq.com;

王志浩(1995—), 男, 硕士生, 从事多相电机智能控制的
研究, E-mail: 1458882051@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)