

五相永磁同步电机磁链校正容错控制策略

李凤祥, 贾军成, 汤军

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:针对五相永磁同步电机出现两相开路故障时系统电磁转矩及转速脉动大、动态响应差,且利用空间电压矢量调制技术(SVPWM)推导过程又极其复杂的问题,提出了一种磁链校正容错控制策略。该策略在正常运行模式下克拉克变换矩阵的基础上推导出两相开路故障模式下的推广克拉克变换矩阵,计算出两相静止坐标系下的定子磁链表达式。对比正常运行状态下的磁链表达式,设计相关系数,使其恢复到正常运行状态,从而间接控制磁动势。采用直接转矩控制技术实现电机转矩和磁链控制。仿真结果表明该方法能够平缓故障状态下的转矩和转速,实现电机的容错运行。

关键词:五相永磁同步电机;多相故障;容错控制;磁链校正;直接转矩控制

中图分类号:TM351 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22153

Fault-tolerant Control Strategy of Flux Correction for Five-phase Permanent Magnet Synchronous Motor

LI Fengxiang, JIA Juncheng, TANG Jun

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: For the five-phase permanent magnet synchronous motor with two-phase open-circuit fault, the system has large electromagnetic torque and speed pulsation, poor dynamic response, and the problem that the derivation process using space voltage vector modulation (SVPWM) is extremely complicated. A fault tolerant control strategy for flux correction was presented. Based on the Clarke transformation matrix in normal operation mode, the extended Clarke transformation matrix in two-phase open-circuit failure mode was derived, and the expression of stator magnetic chain in two-phase static coordinate system was calculated. By comparing the expression of magnetic chain in normal operation state, the correlation coefficient was designed to restore it to normal operation state, so as to indirectly control the magnetic momentum. Direct torque control (DTC) technology was used to control the motor's torque and magnetic chain. The simulation results show that this method can smooth the torque and rotating speed under the fault state and realize the fault tolerant operation of the motor.

Key words: five-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM); multiphase fault; fault-tolerant control; magnetic chain correction; direct torque control(DTC)

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因其具有转矩波动小、参数依赖少、维护成本低、容错性能好等优点,在动力系统领域受到广大厂商青睐^[1-3]。对比三相电机,多相电机的可控自由度更高。多出的自由度可利用其来实现故障电机的无扰容错运行^[4-5]。

目前国内外PMSM的调速大多采用矢量控制,其主要是运用转子磁链定向技术完成磁链和转矩的解耦。在 $d-q$ 坐标系下通过PI控制器完成

对转矩和电流的控制,同时通过PI控制器调节转速,但是其要进行复杂的坐标变换,计算量大、鲁棒性低^[6-9];而直接转矩控制(DTC)具有鲁棒性强、计算简单、性能稳定等优点而成为研究热点^[10]。

文献[11]为解决永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制系统在各种逆变器故障下的逆变器容错运行,引入了一种具有容错能力的拓扑修正逆变器,将其重新配置为三相四开关逆变器。该策略具有独特的非线性垂直磁链观测器和反馈补

作者简介:李凤祥(1962—),男,教授,Email:lfx@ujs.edu.cn

通讯作者:贾军成(1995—),男,硕士研究生,Email:953812484@qq.com

偿方案,能够稳定连续地运行。但是这种方法只能解决单管故障问题,并且转矩脉动大。对此,文献[12]在保证电路拓扑结构和IGBT管个数不变情况下,计算出单管故障模式下的电压矢量扇区和开关表,提出了故障模式下三相六开关容错控制策略。并提出了可能出现的连锁故障的解决方法。但是该方法还无法解决不同支路对位双管故障,缺乏实测数据。文献[13]对五相永磁同步电机两相故障进行了模型分析提出了基于SVPWM的转子磁场定向控制(field oriented control, FOC)。但是该方法没有考虑故障模式下绕组中点电位受电机运行状态发生偏移的问题。对此文献[14]提出了一种电压补偿策略减弱中性点电位偏移对SVPWM的影响,但是该方法计算复杂、实现成本高。文献[15]提出了五相永磁同步电机在单相故障模式下磁链改进容错控制方法,但是并未对多相故障进行分析。

本文针对五相永磁同步电机(five-phase permanent magnet synchronous motor, FPMSM)两相故障提出了磁链系数修正直接转矩控制方法。该控制方法首先分析正常模式运行下的五相永磁同步电机模型,根据磁动势不变原则推导出两相开路故障下三阶Clarke变换矩阵。然后对比正常运行模式下的数学模型,设计相关参数以修正定子磁链,达到电机容错运行的目的。最后进行Matlab/Simulink仿真验证了所提方法的有效性。

1 正常运行条件

五相永磁同步电机正常运行时在静止坐标系下的电压和磁链方程为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{5s} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{5s} + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_{5s}}{dt} \\ \boldsymbol{\Psi}_{5s} = \mathbf{L}_{5s} \mathbf{i}_{5s} + \boldsymbol{\Psi}_{5m} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \boldsymbol{\Psi}_{5m} = \Psi_m \begin{bmatrix} \cos \kappa \\ \cos(\theta - \kappa) \\ \cos(\theta - 2\kappa) \\ \cos(\theta + 2\kappa) \\ \cos(\theta + \kappa) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{L}_{5s} = L_s \begin{bmatrix} 1 & \cos \kappa & \cos(2\kappa) & \cos(3\kappa) & \cos(4\kappa) \\ \cos(4\kappa) & 1 & \cos \kappa & \cos(2\kappa) & \cos(3\kappa) \\ \cos(3\kappa) & \cos(4\kappa) & 1 & \cos \kappa & \cos(2\kappa) \\ \cos(2\kappa) & \cos(3\kappa) & \cos(4\kappa) & 1 & \cos \kappa \\ \cos \kappa & \cos(2\kappa) & \cos(3\kappa) & \cos(4\kappa) & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{u}_{5s} 为各相电压矩阵; \mathbf{r}_s 为定子绕组电阻矩阵; \mathbf{i}_{5s} 为各相电流矩阵; \mathbf{L}_{5s} 为定子电感矩阵; $\boldsymbol{\Psi}_{5m}$ 为与定子交链的磁链矩阵^[16]; κ 为相邻两相之间的空间角度,由电机结构决定,这里为 72° ; L_s 为电感幅值; $\boldsymbol{\Psi}_m$ 为转子磁动势在各绕组中感应的磁链幅值。

五相永磁同步电机正常运行状态下的Clarke变换矩阵如下式所示^[14]:

$$\mathbf{T}_{\text{clarke}} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 1 & \cos \kappa & \cos(2\kappa) & \cos(3\kappa) & \cos(4\kappa) \\ 0 & \sin \kappa & \sin(2\kappa) & \sin(3\kappa) & \sin(4\kappa) \\ 1 & \cos(3\kappa) & \cos(6\kappa) & \cos(9\kappa) & \cos(12\kappa) \\ 0 & \sin(3\kappa) & \sin(6\kappa) & \sin(9\kappa) & \sin(12\kappa) \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

五相永磁同步电机(PMSM)能够正常运行的必要条件是定子绕组在转子空间位置产生圆形的旋转磁动势。采用式(4)将A~E相电流、定子磁动势和磁链变换到两相静止坐标系中,可得^[15]:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 1 & \cos \kappa & \cos(2\kappa) & \cos(3\kappa) & \cos(4\kappa) \\ 0 & \sin \kappa & \sin(2\kappa) & \sin(2\kappa) & \sin(2\kappa) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_D \\ i_E \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.5N & 0 \\ 0 & 2.5N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} 2.5 & 0 \\ 0 & 2.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \Psi_m \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: i_α, i_β 为基波电流 I 在两相静止坐标系下的分量; F_α, F_β 为定子磁动势在两相静止坐标系下的分量; N 为绕组匝数; θ 为电机转子位置角。

由式(6)、式(7)可知,定子绕组产生的磁动势可看作 α - β 坐标系中两个电流分量所产生的磁动势。因为定子磁链与电流有关,可控制定子磁链轨迹为圆形,则 i_α, i_β 在两相静止坐标系下的运行轨迹也为圆形,因而可以控制磁动势轨迹为圆形,即可实现电机转矩的平稳输出。

2 不相邻两相故障

2.1 模型分析

本文以BE相故障为例,当BE相当于发生开路故障时,故障相电枢电流为零,因此不会影响其他相。此时系统剩余两个自由度,由式(4)可将五阶模型降为三阶,公式如下:

$$T_{\text{clarke}} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\kappa) & \cos(3\kappa) \\ 0 & \sin(2\kappa) & \sin(3\kappa) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对式(8)第一行进行修正并将 $\kappa=72^\circ$ 代入,得到修正后的降阶 Clarke 变换矩阵:

$$T_{BE-\text{clarke}} = \begin{bmatrix} 0.4824 & -0.2412 & -0.2412 \\ 0 & 0.2351 & -0.2351 \\ 0.4 & 0.4 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

在 BE 相出现故障后,其他相在自然坐标系下的电压和磁链方程为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{3s} = \mathbf{r}_{3s} \mathbf{i}_{3s} + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_{3s}}{dt} \\ \boldsymbol{\Psi}_{3s} = \mathbf{L}_{3s-ACD} \mathbf{i}_{3s} + \boldsymbol{\Psi}_{3m} \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{u}_{3s} 为剩余正常相定子电压矩阵; \mathbf{r}_{3s} 为正常相定子电阻矩阵; \mathbf{i}_{3s} 为正常相定子电流矩阵; \mathbf{L}_{3s-ACD} 为剩余相电感矩阵; $\boldsymbol{\Psi}_{3m}$ 为与定子绕组交链的磁链矩阵。

在故障时,故障相开路无电流不能产生感应磁链,只有永磁体可以产生磁链。此时可以用正常相来补偿,从而使合成磁链恢复到正常状态。

将正常模式下电感矩阵 \mathbf{L}_{3s} 去掉第二、第四行和第二、第四列得到剩余项电感矩阵 \mathbf{L}_{3s-ACD} ,联立式(9)、式(10)进行坐标变换,得到 BE 相故障模式下定子电压、磁链在两相静止坐标系下方程:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{r}_{3s} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{L}_{3s-ACD} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \boldsymbol{\Psi}_m \begin{bmatrix} 0.873\cos\theta \\ 0.276\sin\theta \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

$$\quad (12)$$

可推导出电机转矩为

$$T_e = p(3.64\Psi_\alpha i_\beta - 9.045\Psi_\beta i_\alpha) \quad (13)$$

式中: p 为电机极对数。

可见只需要控制两相静止坐标系下的磁链使其恢复到正常值,便可以实现电流恢复到正常值,从而保持转矩的平稳输出。在这里引入两个系数得出如下2个等式:

$$\begin{cases} \Psi'_\alpha = 1.456\Psi_\alpha \\ \Psi'_\beta = 3.618\Psi_\beta \end{cases} \quad (14)$$

对 BE 相出现开路故障的五相永磁同步电机,它的有效相电压的表达式可以表示为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = T_{BE-\text{clarke}} \left(\frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_A \\ S_C \\ S_D \end{bmatrix} + \frac{\sum_{i=A,C,D} u_i}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \quad (15)$$

式中: v_0 为零序电压分量; S_A, S_C, S_D 为开关状态,1表示接通,0表示为关断; U_{dc} 为直流电源电压; u_i

为各相电压。

定子电压修正为

$$\begin{cases} u'_\alpha = 1.456u_\alpha \\ u'_\beta = 3.618u_\beta \end{cases} \quad (16)$$

则修正后的磁链和转矩可以表述如下:

$$\begin{bmatrix} \Psi'_\alpha \\ \Psi'_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{L}_{3s-ACD} \begin{bmatrix} 2.5 & 0 \\ 0 & 2.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \boldsymbol{\Psi}_m \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$T'_e = \frac{5}{2} p(\Psi'_\alpha i_\beta - \Psi'_\beta i_\alpha) \quad (18)$$

由式(17)、式(18)可知,改进后的定子磁链为圆形,则控制定子电流为圆形、间接地控制定子磁动势为圆形。电磁转矩恢复到与正常状态相同,从而达到无扰容错运行的目的。

2.2 磁链观测和电压预测

修正后磁链观测器设计为^[17]

$$\begin{cases} \Psi'_\alpha = \int (u'_\alpha - 1.456R_s i_\alpha) dt \\ \Psi'_\beta = \int (u'_\beta - 3.618R_s i_\beta) dt \end{cases} \quad (19)$$

设计电压预测器^[17]可估算出 α - β 平面上的电压参考值,据此可用 Clarke 矩阵逆变换计算出剩余正常三相输出电压的参考值:

$$\begin{cases} u_\alpha^* = \frac{\Psi_s^* \cos(\theta_s + \Delta\delta) - \Psi'_\alpha \cos\theta_s}{\Delta T} + i_\alpha R_s \\ u_\beta^* = \frac{\Psi_s^* \sin(\theta_s + \Delta\delta) - \Psi'_\beta \sin\theta_s}{\Delta T} + i_\beta R_s \end{cases} \quad (20)$$

式中: θ_s 为修正后定子磁链角; Ψ_s^* 为修正后的磁链给定值; ΔT 为采样周期; $\Delta\delta$ 为负载角度变化量; R_s 为正常相定子电阻。

3 相邻两相开路故障

3.1 模型分析

当 AB 相邻两相发生故障时,推导出三阶修正 Clarke 变换矩阵为

$$T_{AB-\text{clarke}} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} \cos(2\kappa) - \cos\kappa & \cos(3\kappa) - \cos\kappa & \cos(4\kappa) - \cos\kappa \\ \sin(2\kappa) - \tan(\frac{\kappa}{2})\cos\kappa & \sin(3\kappa) - \tan(\frac{\kappa}{2})\cos\kappa & \sin(4\kappa) - \tan(\frac{\kappa}{2})\cos\kappa \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

同理可推导出 AB 两相故障下定子电压和磁链方程如下:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{r}_{3s} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{L}_{3s-CDE} \begin{bmatrix} 1.809 & 0 \\ 0 & 1.809 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + 0.7236\boldsymbol{\Psi}_m \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (23)$$

此时电机转矩为

$$T_e = 3.45p(\Psi'_\alpha i_\beta - \Psi'_\beta i_\alpha) \quad (24)$$

需要控制静止坐标系下的定子磁链使其恢复到正常值便可以控制电流,从而保持磁动势恒定。在这里引入两个新的系数得到新的等式如下:

$$\begin{cases} \Psi'_\alpha = 1.382\Psi_\alpha \\ \Psi'_\beta = 1.382\Psi_\beta \end{cases} \quad (25)$$

对AB相出现开路故障的五相永磁同步电机,它的有效相电压的表达式可以表示为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = T_{AB-clark} \left(\frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_C \\ S_D \\ S_E \end{bmatrix} + \frac{\sum_{i=C,D,E} u_i}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \quad (26)$$

定子电压修正为

$$\begin{cases} u'_\alpha = 1.382u_\alpha \\ u'_\beta = 1.382u_\beta \end{cases} \quad (27)$$

则修正后的磁链和转矩可以表述如下:

$$\begin{bmatrix} \Psi'_\alpha \\ \Psi'_\beta \end{bmatrix} = L_{3s-CDE} \begin{bmatrix} 2.5 & 0 \\ 0 & 2.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \Psi_m \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$T'_e = \frac{5}{2} p(\Psi'_\alpha i_\beta - \Psi'_\beta i_\alpha) \quad (29)$$

由式(28)、式(29)可知,在AB相发生开路故障后,经修正,定子磁链恢复为圆形轨迹,最终间接控制磁动势轨迹为圆形。达到无扰容错运行的目的且转矩与正常模式下相同。

3.2 磁链观测和电压预测

修正后磁链观测器可设计为

$$\begin{cases} \Psi'_\alpha = \int (u'_\alpha - 1.382R_s i_\alpha) dt \\ \Psi'_\beta = \int (u'_\beta - 1.382R_s i_\beta) dt \end{cases} \quad (30)$$

电压预测器设计为

$$\begin{cases} u^*_\alpha = \frac{\Psi_s^* \cos(\theta_s + \Delta\delta) - \Psi'_\alpha \cos\theta_s}{\Delta T} + i_\alpha R_s \\ u^*_\beta = \frac{\Psi_s^* \sin(\theta_s + \Delta\delta) - \Psi'_\beta \sin\theta_s}{\Delta T} + i_\beta R_s \end{cases} \quad (31)$$

4 容错直接转矩控制

以BE相故障为例,五相永磁同步电机磁链校正容错控制系统框图如图1所示。采样故障相电流和开关状态量经过Clarke变换分别得到两相静止坐标系下的电流和电压 i_α, i_β 和 u_α, u_β 。通过磁链观测器校正磁链对故障状态进行矫正,得到矫正后的磁链及位置角 θ_s 。根据磁共能法推导出转矩 T_e 。通过转速误差求出给定转矩 T_e^* ,再根据转矩误差,通过PI调节器最终求出负载角变化量

$\Delta\delta$ 。采用电压预测器计算出两相静止坐标系上的参考电压 u^*_α, u^*_β 。最后引用ZVI-CPWM调制技术^[18]调控逆变器输出剩余正常相电压,达到容错运行的目的。

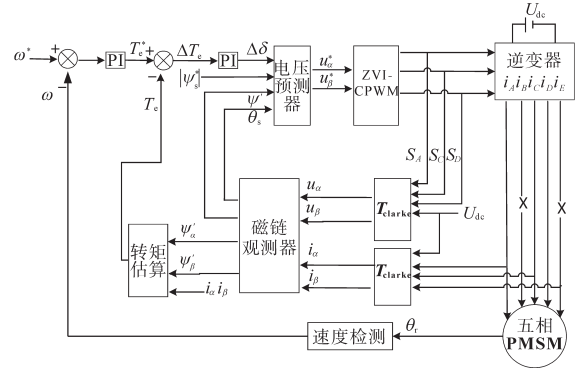


图1 五相永磁同步电机容错控制框图

Fig.1 Block diagram of fault tolerant control system for FPMSM

5 实验分析

为了验证理论分析的正确性和有效性,利用Matlab/Simulink搭建仿真模型。

仿真电机参数如下:额定电压200V,永磁体极对数4,d轴电感1.35mH,q轴电感1.35mH,永磁磁链0.041Wb,电阻2.875Ω,平均转矩12.5N·m。

图2为五相永磁同步电机正常运行状态下磁链轨迹。

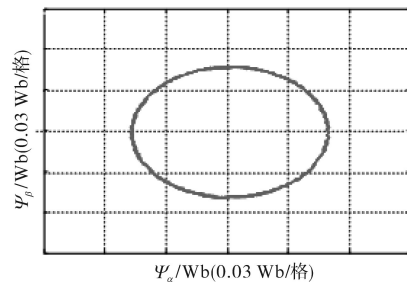


图2 正常运行状态下定子磁链轨迹

Fig.2 Stator flux linkage locus under normal operation

图3、图4分别为电机由正常到故障再到容错控制下的不相邻两相故障、相邻两相故障仿真结果图。故障位置切换时间在0.1s,开始容错运行时间在0.15s。

从仿真图3a和图4a对比图2可以看出,故障模式下和正常模式下磁链轨迹满足公式推导,与式(14)和式(25)相符。图3b和图4b为电机转速变化,对比可以看到转速在故障模式下波动较大,畸变严重,在采取容错控制后转速平缓,有效控制了转速波动。图3c和图4c为电磁

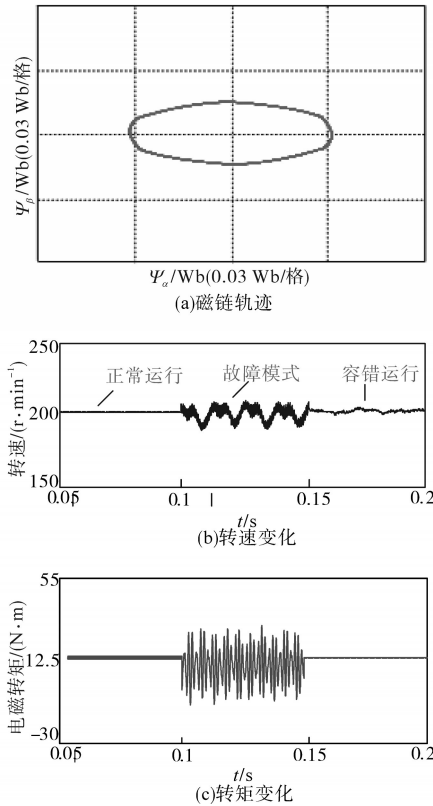


图3 不相邻两相故障仿真

Fig.3 Simulation of non-adjacent two-phase fault

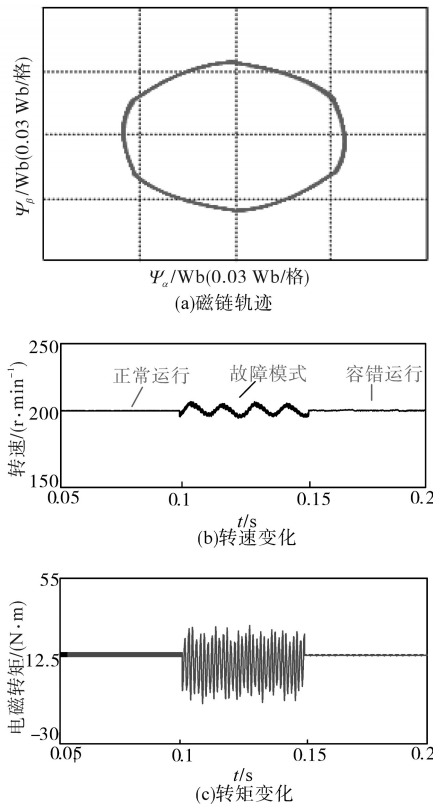


图4 相邻两相故障仿真

Fig.4 Simulation of adjacent two phases fault

转矩变化,可以看到转矩在故障模式下波动幅度巨大,在采取本文容错控制方法后能有效控制

转矩脉动。

6 结论

为了实现五相永磁同步电机在两相开路故障下能继续运行并保持转速、转矩稳定,本文提出了一种磁链矫正的容错控制方法。此容错方法具有以下优点:

1)所提策略推算出故障后的Clarke矩阵,设计修正系数,确保了两相静止坐标系中磁链与正常情况相同。

2)采用直接转矩控制方法降低了计算难度和设计成本。

3)所提策略有效抑制故障模式下的转矩转速脉动,系统动态响应良好。

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] 周长攀,杨贵杰,苏健勇,等.基于正常解耦变换的双三相永磁同步电机缺相容错控制策略[J].电工技术学报,2017,32(3):86-96.
Zhou Changpan, Yang Guijie, Su Jianyong, et al. The control strategy for dual three-phase PMSM based on normal decoupling transformation under fault condition due to open phases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 86-96.
- [3] Dordevic O, Jones M, Levi E. A comparison of carrier-based and space vector PWM techniques for three-level five-phase voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 609-619.
- [4] 刘剑,苏健勇,杨贵杰,等.六相永磁同步发电机容错控制的谐波补偿研究[J].电机与控制学报,2014,18(1):1-10.
Liu Jian, Su Jianyong, Yang Guijie, et al. Study of harmonic compensation for six-phase PMSG in fault tolerant control[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(1): 1-10.
- [5] 朱鹏,张晓锋,乔鸣忠,等.五相集中整距绕组感应电机缺相容错控制[J].中国电机工程学报,2011,31(33):131-137.
Zhu Peng, Zhang Xiaofeng, Qiao Mingzhong, et al. Tolerant control strategy for five-phase concentrated full-pitch windings induction motor under open phases fault[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(33): 131-137.
- [6] 吴荒原,王双红,辜承林,等.内嵌式永磁同步电机改进型解耦控制[J].电工技术学报,2015,30(1):30-37.
Wu Huangyuan, Wang Shuanghong, Gu Chenglin, et al. An

- improved decoupling control strategy for the IPMSM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 30-37.
- [7] Cortes P, Kazmierkowski M P, Kennel R M, *et al.* Predictive control in power electronics and drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 4312-4324.
- [8] 王庆龙, 张兴, 张崇巍. 永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 897-902.
Wang Qinglong, Zhang Xing, Zhang Chongwei. Double sliding-mode model reference adaptive system speed identification for vector control of permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(6): 897-902.
- [9] Cassio Luciano Baratieri, Humberto Pinheiro. New variable gain super-twisting sliding mode observer for sensorless vector control of nonsinusoidal back-EMF PMSM[J]. Control Engineering Practice, 2016, 4(3): 59-69.
- [10] 潘峰, 闫庚龙, 苑伟华, 等. 基于双滑模的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S2): 427-433.
Pan Feng, Yan Genglong, Yuan Weihua, *et al.* Research on direct torque control for permanent magnet synchronous motor based on the double sliding mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 427-433.
- [11] Yznaga Blanco IVONNE. Study on inverter fault-tolerant operation of PMSM DTC [J]. Journal of Zhejiang University, 2008, 6(2): 156-164.
- [12] 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, 22.
Han Li, Wang Chongren, Li Hui, *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, 22.
- [13] 刘国海, 宋成炎, 徐亮, 等. 基于SVPWM的五相永磁同步电机两相开路故障容错控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 23-32.
Liu Guohai, Song Chengyan, Xu Liang, *et al.* SVPWM-based fault-tolerant control strategy under two-phase open circuit fault of five-phase permanent-magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 23-32.
- [14] 田兵. 五相永磁同步电机驱动系统容错控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Tian Bing. Research on fault-tolerant control of five-phase permanent magnet synchronous motor drive[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2018.
- [15] 刘国海, 高猛虎, 周华伟, 等. 五相永磁同步电机磁链改进型容错直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 359-365, 633.
Liu Guohai, Gao Menghu, Zhou Huawei, *et al.* Flux-modification-based fault-tolerant DTC for five-phase PMSM[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2019, 39(2): 359-365, 633.
- [16] 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.
- [17] 张成胜, 张晓锋, 乔鸣忠, 等. 基于SVPWM五相感应电机直接转矩控制研究[J]. 电机与控制学报, 2008(3): 304-308.
Zhang Chengsheng, Zhang Xiaofeng, Qiao Mingzhong, *et al.* SVPWM method of five-phase induction motor direct torque control[J]. Electric Machines and Control, 2008(3): 304-308.
- [18] 刘国海, 赵万祥, 周华伟, 等. 基于零序电压谐波注入式脉宽调制的五相永磁电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1517-1527.
Liu Guohai, Zhao Wanxiang, Zhou Huawei, *et al.* Direct torque control of five-phase permanent magnet motor based on zero-sequence voltage harmonic injection pulse width modulation[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2017, 37(5): 1517-1527.

收稿日期:2020-07-10

修改稿日期:2020-07-22

(上接第26页)

- tric Power Applications, 2005, 152(1): 81-88.
- [12] 欧林, 王渝红, 李兴源, 等. 直驱风电网侧换流器前馈补偿控制环节仿真研究[J]. 电气传动, 2014, 44(2): 31-35.
Ou Lin, Wang Yuhong, Li Xingyuan, *et al.* Study on feed-forward control of the grid-side converter in drive-wind power[J]. Electric Drive, 2014, 44(2): 31-35.
- [13] 汤赐. 基于LCL输出滤波器的并网逆变器四种PI控制器设计方法[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3268-3275.
Tang Ci. Four design methods for proportional-integral controller of grid-connected inverter with LCL output filter[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3268-3275.
- [14] 周华伟, 温旭辉, 赵峰, 等. IPMSM控制系统逆变器死区效应分析与在线补偿[J]. 电气传动, 2012, 42(1): 26-30.
Zhou Huawei, Wen Xuhui, Zhao Feng, *et al.* Analysis and online compensation of inverter dead-time effects in IPMSM drive system[J]. Electric Drive, 2012, 42(1): 26-30.
- [15] 贺诗明, 熊健, 代大一, 等. 三相电压型PWM整流器建模、控制及稳定性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2049-2057.
He Shiming, Xiong Jian, Dai Dayi, *et al.* Modeling, control and stability analysis of three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2049-2057.

收稿日期:2020-04-18

修改稿日期:2020-07-27