矢量重构的五相永磁电机多矢量模型预测电流容错控制

陶涛, 赵文祥*, 吉敬华, 和阳

江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013

* E-mail: zwx@ujs.edu.cn

收稿日期: 2020-06-29; 接受日期: 2020-08-17; 网络版发表日期: 2021-03-31

国家自然科学基金重大项目(批准号: 51991383)和国家杰出青年科学基金项目(批准号: 52025073)资助

摘要 为了应对电机绕组开路故障, 本文提出一种多矢量模型预测容错控制. 该控制主要包括重构容错矢量分布以及一种减小计算量的矢量选择方法. 其中, 重构的容错矢量以铜耗最小为原则, 采用多个基本矢量预合成的方法产生, 兼顾了产生标准的PWM波和扩大可调制范围. 提出的矢量选择方法通过两次使用预测控制算法, 避免了评估所有的备选矢量, 从而减小了计算负担并且不会产生矢量选择的误差. 与此同时, 为进一步改善容错运行性能, 引入了占空比调制的方法以优化备选矢量幅值. 实验结果验证了本文所提出的容错控制策略的可行性和有效性.

关键词 五相永磁电机, 模型预测控制, 容错控制, 重构矢量分布, 减小计算量, 占空比调制

1 引言

随着电力电子技术以及控制理论的发展, 多相永磁电机驱动系统得到越来越多的关注^[1~3]. 与传统三相永磁电机相比, 多相永磁电机有额外的控制自由度, 无需改变硬件结构即可实现电机带故障的容错运行. 因此, 多相电机驱动越来越多地应用于航空航天、舰船推进、电动汽车等要求高可靠性的应用场合. 与此同时, 关于多相电机容错控制一直是国内外学术界的研究热点问题^[4~6].

绕组开路故障是电机最常见的故障之一, 国内外学者针对发生该故障后的容错控制开展了大量研究工作^[7~9]. 目前, 主要容错控制方法可分为采用不变解耦

矩阵和采用降阶解耦矩阵两类. 其中, 采用不变解耦矩阵容错方法通常采用滞环电流控制器^[10], 因而带来开关频率不固定、电磁干扰大等缺点. Sun等人^[11]采用传统的PI电流控制器, 但是该控制器受带宽限制, 不能在容错工况下有效地消除电流误差. Tani等人^[12]设计了适用于容错工况下的双向PI电流控制器, 但是带来了繁琐的参数调节过程. 另一种常见的容错控制是利用降阶解耦矩阵对故障电机建模并控制. Tian等人^[13]采用一种降阶正交解耦矩阵, 在同步旋转坐标系下利用传统PI控制器实现了电机带故障运行. Bermudez等人^[14]利用虚拟电压矢量构建了一种改进的开关表, 实现了容错直接转矩控制. Liu等人^[15]提出了一种磁链改进型容错直接转矩控制, 通过修正降阶矩阵确

引用格式: 陶涛, 赵文祥, 吉敬华, 等. 矢量重构的五相永磁电机多矢量模型预测电流容错控制. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1419–1428
Tao T, Zhao W X, Ji J H, et al. Multi-vector model predictive fault-tolerant current control using reconstructed vector distribution for five-phase PM motor (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1419–1428, doi: 10.1360/SST-2020-0264

保基波平面磁动势不变。

近年来,随着高性能数字处理芯片和电力电子器件的发展,有限控制集模型预测控制得到国内外学者越来越多的关注^[16-22]。它具有概念清晰简单、动态响应快、无需参数整定等优点。由于上述优点,国内外学者将模型预测控制的思想应用到电机容错控制领域。Guzman等人^[23]提出一种非正交降阶解耦矩阵,使得故障后的电机模型与正常状态时一致,通过控制谐波空间分量实现容错控制。但是,该方法每个控制周期只作用一个基本矢量,导致容错运行的效果较差。在一个控制周期内作用多个基本矢量是改善运行性能的有效办法。因此,国内外学者将占空比调制或虚拟电压矢量的方法引入模型预测容错控制。Tao等人^[24]提出了采用虚拟电压矢量作为控制集的模型预测容错控制。该方法兼顾了减小计算量和抑制谐波空间分量。但是,由于零矢量独立作用于逆变器,因而每个备选矢量有固定的幅值,这也限制了该方法容错运行性能的提高。为解决备选矢量幅值固定的缺点, Lu等人^[25]引入了占空比调制的方法。通过分配给零矢量一定作用时间实现备选矢量幅值的优化。但是,故障后的矢量分布变得不规则,这会影响预测控制在选择矢量时的精度。还需注意的是,预测控制是一种遍历寻优的算法,过多的备选矢量会带来过大的计算量。

为了解决上述问题,本文提出了一种重构矢量分布的多矢量模型预测容错控制。首先采用一种降阶解耦矩阵建立故障状态下的电机数学模型,介绍了传统模型预测容错控制,并分析了故障后的电压矢量分布。在传统方法的基础上,通过矢量合成的方法重构容错矢量分布,重构后的容错矢量作为提出的预测容错控制的基本控制集。为了进一步提高容错运行性能,引入占空比调制的方法优化备选矢量幅值。与此同时,本文提出一种可以减小计算量的最优矢量选择方法。最后,通过实验验证了本文所提出方法的可行性和优越性。

2 一相开路五相永磁电机数学模型

本文中的五相永磁电机由一个五相两电平电压源逆变器驱动。假定a相绕组发生开路故障,a相电流变为零,但因为故障相反电动势的存在,此时的电压方程需修正为

$$\begin{bmatrix} u_b \\ u_c \\ u_d \\ u_e \end{bmatrix} = \frac{u_{dc}}{4} \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_b \\ g_c \\ g_d \\ g_e \end{bmatrix} - \frac{\text{emf}_a}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, u_i ($i=b, c, d, e$) 为正常相相电压; g_i ($i=b, c, d, e$) 为各相功率器件的驱动信号; u_{dc} 为直流母线电压值; emf_a 为故障相反电动势。

文献^[23]引入了一种非正交降阶解耦矩阵。通过该矩阵建模,电机故障后的基波平面数学模型与正常运行时一致,通过控制谐波空间分量即可实现容错控制。该降阶解耦矩阵为

$$T_{\text{postfault}} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} \cos\gamma - 1 & \cos 2\gamma - 1 & \cos 3\gamma - 1 & \cos 4\gamma - 1 \\ \sin\gamma & \sin 2\gamma & \sin 3\gamma & \sin 4\gamma \\ \sin 2\gamma & \sin 4\gamma & \sin 6\gamma & \sin 8\gamma \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $\gamma=2\pi/5$ 。与之对应的降阶同步旋转坐标变换为

$$D(\theta_r) = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r & 0 & 0 \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, θ_r 为转子位置角。此时,开路故障的电机数学模型为

$$i_s(k+1) = i_s(k) + \frac{T_s}{L_s}(u_s - r_s i_s(k) + e), \quad (4)$$

式中,

$$i_s = [i_d \quad i_q \quad i_y]^T,$$

$$\frac{1}{L_s} = \left[\frac{1}{L_d} \quad \frac{1}{L_q} \quad \frac{1}{L_{ls}} \right]^T,$$

$$e = [\omega_e L_q i_q \quad -\omega_e (L_d i_d + \psi_f) \quad 0]^T,$$

i_d 和 i_q 分别为 dq 轴电流; i_y 为 y 轴电流; L_d 和 L_q 分别为 dq 轴电感; L_{ls} 为谐波平面漏感; ω_e 为旋转电角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

3 传统模型预测容错控制

传统有限控制集模型预测电流控制的基本原则是:遍历控制集中所有电压矢量,计算出电流在下一时刻的预测值;输出使得价值函数最小的那一电压矢量。

根据该原则, 预测模型和控制集是实现预测控制的两个基本要素. 利用式(1)和(2)可以得到五相电机单相开路后的容错矢量分布, 如图1所示.

由图1可知, 故障后的备选电压矢量数量由32个减少到16个, 并且幅值和分布状态呈现不规则的特点. 将这种不规则分布的矢量应用于模型预测控制时可能会导致最优矢量选择的误差增大. 因为幅值过大的矢量使得价值函数最小的可能性降低, 导致实际可调制范围变小. 此外, 在一个控制周期内作用多个矢量还需考虑y轴分量的影响. 还需要注意的是, 故障后的16个备选矢量构成了预测模型的控制集. 显然, 16次的遍历寻优将带来过大的计算负担.

Tao等人^[24]采用虚拟电压矢量的方法实现多矢量模型预测容错控制, 该方法预先合成使得谐波空间分量为零的电压矢量, 并将其作为预测容错控制的控制集. 该容错虚拟电压矢量分布如图2所示.

该方法兼顾了控制谐波空间分量和减小计算量, 但未能利用零矢量优化备选矢量的幅值. 此外, 备选矢量数量较少会导致较大的控制误差. 这两个缺点影响了该方法的容错运行性能.

4 提出的容错控制算法

本文提出的模型预测容错控制在文献[24]的基础上, 利用基本矢量预合成的办法重构容错矢量分布, 重构后的矢量分布考虑了扩大可调制范围、标准PWM波的生成以及矢量选择的精度. 与此同时, 为了解决过多备选矢量和计算量之间的矛盾, 提出一种减小计算量的最优矢量选择方法.

4.1 容错矢量重构

根据前文分析可知, 可调制的范围越大, 容错运行性能越好. 因此, 在图2的基础上, 利用图1的基本矢量, 合成更多备选矢量. 合成的原则是确保y轴分量为零. 具体步骤如下.

第一步, 分别合成 U_1 和 U_2 , U_3 和 U_4 , U_4 和 U_5 , U_6 和 U_1 之间的矢量. 令 $U_1(v_9)$ 和 $U_2(v_8, v_{13})$ 的占空比固定为0.5即可合成一个新的矢量. 其他象限采用同样的方式合成. 合成之后的矢量分布如图3(a)所示.

第二步, 分别合成 U_2 和 U_3 , U_5 和 U_6 之间的矢量. 与第一步不同的是, 这一步需要考虑标准PWM波的生

图1 (网络版彩图)五相电机单相开路容错矢量分布. (a) $\alpha\beta$ 空间; (b) y轴

Figure 1 (Color online) Fault-tolerant vector distribution of five-phase drive in single phase open circuited situation. (a) $\alpha\beta$ space; (b) y-axis.

图2 (网络版彩图)容错虚拟电压矢量^[24]

Figure 2 (Color online) Fault tolerant virtual voltage vector [24].

成. 因为相邻的 $U_2(v_8[1000], v_{13}[1101])$ 和 $U_3(v_4[0100], v_{14}[1110])$ 的开关次序不能产生标准PWM波形. 为解决这一问题, 分别利用 v_8 , v_{12} 和 v_{14} , v_{12} 合成出 U_2 和 U_3 之间的两个矢量. $U_5(v_2, v_7)$ 和 $U_6(v_1, v_{11})$ 之间利用 v_7 , v_3 和 v_1 , v_3 以同样的方法合成出两个矢量. 合成之后的矢量分布如图3(b)所示.

第三步, 减小过大的矢量幅值. 如图3(b)所示, 矢量空间分布已经趋于规则, 但是有部分矢量幅值过大. 这不利于模型预测控制的矢量选择. 为了提高矢量选择的精度, 可采用零矢量减小有效矢量幅值, 即减小有效矢量的实际作用时间. 为降低复杂程度并使备选矢量幅值尽量一致, 将图3(b)中 U_1 和 U_4 的占空比固定为0.9, 第二步合成的4个矢量的占空比固定为0.75. 幅值优化之后的矢量分布如图3(c)所示. 此时的容错矢

图3 (网络版彩图)重构容错矢量. (a) 第一步; (b) 第二步; (c) 第三步

Figure 3 (Color online) Reconstructed fault-tolerant vector. (a) First step; (b) second step; (c) third step.

量分布趋于规则分布. 值得注意的是, 插入零矢量调整备选矢量长度会略微减小电压利用率. 考虑到在实际控制中, 图3(b)中幅值过大的矢量使价值函数最小的可能性降低, 导致备选矢量数量减少, 继而降低容错运行的性能. 此外, 插入零矢量并没有减小线性可调制区域. 因此, 减小过大的矢量幅值有利于提高容错运行性能. 综上所述, 图3(c)中重构的容错矢量的合成原则可表示为

$$V_i(v_m, v_n, d, v_0) = d(0.382v_m + 0.618v_n) + (1-d)v_0, \quad (5)$$

式中, v_m 和 v_n 是图1中的基本矢量; 0.382与0.618用于确保y轴分量为零; v_0 为图1中零矢量, 用以减小过大矢量的幅值. 重构后的矢量考虑了模型预测控制的矢量选择过程以及产生标准PWM波. 表1详细罗列了图3(c)容错矢量的组合方式.

4.2 确定最优控制集

本节介绍一种减小计算量的矢量选择方法. 该方法避免了遍历所有备选矢量且不带来矢量选择的误差. 首先根据图3(c)构造一个控制集, 包括7个不相邻矢量. 此时的预测算法可表示为

$$\begin{aligned} \min J_1 &= \text{norm}(i_{dq}^* - i_{dq}(k+1))^2, \\ \text{s.t. } i_{dq}(k+1) &= i_{dq}(k) + \frac{T_s}{L_{dq}}(u_{s1} - r_s i_{dq}(k)) + e_{dq}, \\ u_{s1} &\in \left\{ \begin{array}{l} V_{1dq}, V_{3dq}, V_{5dq}, V_{7dq}, \\ V_{9dq}, V_{11dq}, V_{13dq} \end{array} \right\} - \frac{\text{emf}_{a dq}}{4}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $V_{1dq}, V_{2dq}, \dots, V_{13dq}$ 为图3(c)中的矢量经同步旋

转变换后的矢量; $e_{dq} = [\omega_e L_{dq} i_q - \omega_e (L_d i_d + \psi_f)]^T$; $\text{emf}_{a dq}$ 为同步旋转坐标系下的故障相反电势. 绕组发生开路故障之后, 故障相电流变为零, 但是故障相反电势依然存在. 因此, 控制集 u_{s1} 除了包含基本电压矢量, 还需考虑故障相反电势. 通过对 u_{s1} 遍历寻优, 使价值函数最小的矢量将用来确定最优控制集. 式(6)的最优矢量和与之对应的最优控制集如表2所列.

假设 V_{1dq} 使得 J_1 最小, 则最终的控制集将包括 V_{1dq}, V_{2dq} 以及 V_{14dq} , 即 V_{1dq} 及其相邻的两个矢量. 这样确定最优控制集的原理是: 当理想的最优矢量落于某一扇区时, 与之相邻两个矢量必定使得价值函数最小或次小. 经过上述分析可知, 采用本节提出的矢量选择方法, 遍历寻优的次数是10次, 而传统矢量选择的寻优次数是14次. 此外, 表2的组合实质上已经考虑了所有备选矢量, 因此, 本节介绍的方法避免了遍历所有备选矢量且不会带来矢量选择的误差.

4.3 备选矢量幅值优化

虽然最优控制集中的矢量较其他备选矢量有最好的控制效果, 但是由于矢量幅值固定, 将影响电机在不同工况下的运行效果. 为了解决这一问题, 本文采用了占空比调制的方法. 该方法原理是: 通过插入零矢量并为其分配一定的作用时间, 以优化备选矢量的幅值. 占空比的计算以 dq 轴电流无差拍为原则, 即 $k+1$ 时刻 dq 轴的实际电流应等于 dq 轴的电流给定值. 用公式可表示为

$$i_{dq}(k+1) = i_{dq}(k) + s_0(T_s - T_i) + s_i T_i = i_{dq}^*, \quad (7)$$

表 1 重构容错矢量的构成原则

Table 1 Generation principle of reconstructed fault-tolerant vector

V_i	v_m	v_n	d
V_1	v_9	v_9	0.9
V_2	$0.5 \times v_9 + 0.5 \times v_{13}$	$0.5 \times v_9 + 0.5 \times v_8$	1
V_3	v_{13}	v_8	1
V_4	v_8	v_{12}	0.75
V_5	v_{14}	v_{12}	0.75
V_6	v_4	v_{14}	1
V_7	$0.5 \times v_4 + 0.5 \times v_6$	$0.5 \times v_{14} + 0.5 \times v_6$	1
V_8	v_6	v_6	0.9
V_9	$0.5 \times v_2 + 0.5 \times v_6$	$0.5 \times v_7 + 0.5 \times v_6$	1
V_{10}	v_2	v_7	1
V_{11}	v_7	v_3	0.75
V_{12}	v_1	v_3	0.75
V_{13}	v_{11}	v_1	1
V_{14}	$0.5 \times v_9 + 0.5 \times v_{11}$	$0.5 \times v_9 + 0.5 \times v_1$	1

表 2 最优控制集

Table 2 Optimal control set

式(6)最优矢量	最优控制集
V_{1_dq}	$V_{1_dq}, V_{2_dq}, V_{14_dq}$
V_{3_dq}	$V_{3_dq}, V_{4_dq}, V_{2_dq}$
V_{5_dq}	$V_{5_dq}, V_{6_dq}, V_{4_dq}$
V_{7_dq}	$V_{7_dq}, V_{8_dq}, V_{6_dq}$
V_{9_dq}	$V_{9_dq}, V_{10_dq}, V_{8_dq}$
V_{11_dq}	$V_{11_dq}, V_{12_dq}, V_{10_dq}$
V_{13_dq}	$V_{13_dq}, V_{14_dq}, V_{12_dq}$

式中, T_i 是备选矢量作用时间.

$$i_{dq} = \begin{bmatrix} i_d & i_q \end{bmatrix}^T, \quad (8)$$

$$s_i = \frac{di_{dq}}{dt} \bigg|_{u_{s1} = \{V_{1_dq}, V_{2_dq}, V_{14_dq}\} - \frac{\text{emf}_{a_dq}}{4}},$$

$$s_0 = \frac{di_{dq}}{dt} \bigg|_{u_{s2} = \{U_0, U_{15}\}}.$$

式(7)是关于 T_i 的函数. 为求得有效矢量的占空比, 令式(7)对 T_i 求解偏导数, 并令其等于零:

$$\frac{\partial((i_d^* - i_d(k+1))^2 + (i_q^* - i_q(k+1))^2)}{\partial T_i} = 0. \quad (9)$$

求解式(9), 即可求解出对应备选矢量的占空比和作用时间, 可分别表示为

$$d(i) = \frac{\text{dot}((i_{dq}^* - i_{dq}(k+1) - s_0 T_s), (s_i - s_0))}{T_s \times (s_i - s_0)^2}, \quad (10)$$

$$T_i = d(i) \times T_s. \quad (11)$$

此时, 根据确定的最优控制集以及对应的占空比, 最终的预测控制问题可以表示为

$$\min J_2 = \text{norm}(i_{dq}^* - i_{dq}(k+1))^2,$$

$$\text{s.t. } i_{dq}(k+1) = i_{dq}(k) + \frac{T_s}{L_{dq}}(u_{adj} - r_s i_{dq}(k) + e_{dq}), \quad (12)$$

$$u_{adj} \in \{d(1)V_{1_dq}, d(2)V_{2_dq}, d(14)V_{14_dq}\} - \frac{\text{emf}_{a_dq}}{4}.$$

由式(12)可知, 本文提出的控制算法保留了传统有限集模型预测控制的优点, 即无需参数调节、优化过程简单直观、无调制环节. 其次, 利用了价值函数的灵活性, 可同时确定最优矢量和占空比, 扩大了调制范围. 此外, 故障相反电动势的影响也能在矢量选择过程中得以考虑.

图4为备选矢量 V_2 的PWM波形. 由该图可以看出, 该波形中心对称, 中间部分为高电平, 两端为低电平, 为标准的PWM波. 与此同时, V_2 包含了三个基本电压矢量和两个零矢量. 式(13)给出了各基本矢量的作用时间. 根据基本电压矢量的开关序列和式(10)求解的占空比可以得到每一相的占空比, 即可实现一个控制周期多矢量输出. 与 V_2 相似, 其他备选矢量均能产生标准的PWM波, 对应基本矢量的作用时间可以根据表1及式(10)计算得出.

$$T_0 = (1 - d(2)) \times T_s,$$

$$T_8 = 0.382 \times 0.5 \times d(2) \times T_s,$$

$$T_{13} = 0.618 \times 0.5 \times d(2) \times T_s,$$

$$T_1 = 0.5 \times d(2) \times T_s. \quad (13)$$

5 实验验证及分析

为验证本文提出方法理论分析的有效性, 搭建了五相永磁电机驱动系统实验平台. 该实验平台包括一台五相永磁电机; 以DSP为核心的电机驱动器; 作为负载的直流发电机及电阻等. 实验平台照片如图5所示. 其中, 控制器开关频率为20 kHz, 直流母线电压为

图 4 V_2 的PWM波形
Figure 4 PWM waveform of V_2 .

150 V, 五相永磁电机参数如表3所列.

为了验证本文提出算法的可行性及优越性, 首先记录了一种传统的模型预测容错控制稳态实验波形^[24]. 该传统容错方法利用图2中的6个虚拟电压矢量和两个零矢量构建控制集. 根据模型预测控制的基本原则, 经过遍历寻优, 使价值函数最小的矢量输出到逆变器. 实验中, 速度给定为450 r/min, 负载转矩为10 Nm, a相绕组开路. 通过示波器记录b相电流、实测转矩、y轴电流等波形.

图6为该传统模型预测容错控制的稳态实验波形. 图6(a)为容错运行的b相电流, 此时的相电流畸变严重. 图6(b)为实测转矩波形, 平均转矩为10 N m, 但转矩脉动较大. 虽然采用了谐波分量为零的虚拟电压矢量, 但图6(c)中的y轴电流没能得到很好的抑制. 总的来说, 传统的容错方法稳态运行性能较差, 其原因在于: 过少的备选矢量会带来较大的控制误差; 幅值固定的备选矢量也会影响容错控制的运行效果.

表 3 五相永磁电机参数

Table 3 Parameters of five-phase PM machine

参数	数值
额定转速 (r/min)	450
永磁体极对数	31
定子槽数	20
永磁体磁链 (Wb)	0.0248
dq轴电感 (mH)	3.1
定子电阻 (Ohm)	1.0

图7为本文提出的模型预测容错控制的稳态实验波形. 采用本文提出的方法之后, 图7(a)中的相电流畸变得得到改善, 图7(b)中的转矩脉动较传统方法明显变小, y轴电流能得到很好的抑制. 运行性能改善的原因包括: 更多的备选矢量减小了控制误差; 利用零矢量优化备选矢量的幅值可以得到更精确的控制效果. 这证明了本文提出算法的可行性和优越性.

图8为本文提出容错控制的在线切换实验. 实验中, 速度给定为450 r/min, 负载转矩为10 N m. 实验包括三个工况: 首先, 电机正常运行一段时间, 然后通过继电器断开a相, 故障运行4 s之后切入本文提出的容错算法. 用示波器记录了转速、转矩、a相和b相电流等波形. 由图8的实验结果可以看出, 正常情况下的速度和转矩波形脉动都较小. 故障发生后, a相电流为零, b相电流幅值变大, 转速波动变大. 切入本文的容错控制之后, b相容错电流幅值较故障运行时的电流幅值更小, 且波形较为正弦. 转速波动较故障运行下明显变小, 几乎与正常运行工况一致. 该实验结果证实了本文提出的容错控制可以在故障发生后无需停机维护即可实现电机带故障运行.

图 5 (网络版彩图)五相永磁电机实验平台
Figure 5 (Color online) Test rig of the five-phase PM machine.

图 6 (网络版彩图)传统方法的稳态实验. (a) b相电流; (b) 转矩; (c) y轴电流

Figure 6 (Color online) Steady state performance of conventional method. (a) Current of phase-b; (b) torque; (c) current of y-axis.

图 7 (网络版彩图)本文提出方法的稳态实验. (a) b相电流; (b) 转矩; (c) y轴电流

Figure 7 (Color online) Steady state performance of proposed method. (a) Current of phase-b; (b) torque; (c) current of y-axis.

图9为本文提出容错控制的速度响应实验. 实验中, 负载转矩为10 N·m, 速度给定由300 r/min变为450 r/min, 稳定运行之后再变回300 r/min. 用示波器记录了转速、转矩、b相电流和y轴电流等波形. 由图9实验波形可以看出, 实际转速能较快地跟随给定转速; 不同速度工况下, y轴电流都能得到很好的抑制, 相电流畸变率也较低. 该实验结果证实了本文提出的容错控制有较好的速度跟随性, 在不同速度工况下均有理想的稳态性能.

图10为本文提出容错控制的变转矩响应实验. 实验中, 速度给定为450 r/min, 负载转矩由5 N·m突变为10 N·m, 稳定运行之后再变回5 N·m. 用示波器记录了转速、转矩、b相电流和y轴电流等波形. 由图10实验结果可以看出, 负载转矩突变之后, 实际转速能快速

图 8 (网络版彩图)本文提出方法的在线切换实验

Figure 8 (Color online) Online switching experiment of proposed method.

图 9 (网络版彩图)本文提出方法的变速度响应实验

Figure 9 (Color online) Speed response of proposed method.

图 10 (网络版彩图)本文提出方法的变负载响应实验

Figure 10 (Color online) Dynamic response with load change of proposed method.

跟随给定转速; 相电流波形在不同转矩下都呈现较小的畸变, y轴电流也能得到较好的抑制。这证实了本文提出的容错控制在不同负载工况下均有较好的稳态效果。此外, 该实验还证实了利用本文提出的容错控制方

法, 电机带故障运行工况下依然能有效抑制外部负载扰动。

5 结论

本文提出了一种矢量重构的多矢量模型预测容错控制。通过基本矢量预合成的办法, 以谐波空间分量为零的约束条件重构容错矢量分布。重构的容错矢量考虑了谐波空间分量的抑制, 标准PWM波的产生以及矢量选择的精度。为了减小遍历寻优带来过大的计算量, 提出了一种减小计算量的矢量选择方法。与此同时, 引入占空比调制的方法优化备选矢量的幅值, 从而达到最优的控制效果。实验结果表明, 所提出的模型预测容错控制方法能够有效地改善容错运行的稳态性能。在不同负载和转速工况下, 均有较好运行性能。此外, 在线切换实验证实了采用本文提出的容错控制, 无需停机维护即可实现较好的容错运行效果。

参考文献

- Wang D, Wu X Z, Cheng S W, et al. Steady state performance analysis of multi-phase induction motor with non-sinusoidal supply (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2015, 45: 322–329 [王东, 吴新振, 程思为, 等. 非正弦供电多相感应电机稳态性能分析. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 322–329]
- Feng G, Lai C, Kelly M, et al. Dual three-phase PMSM torque modeling and maximum torque per peak current control through optimized harmonic current injection. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 66: 3356–3368
- Liu Z C, Li Y D, Zheng Z D. Control and drive techniques for multiphase machines: A review (in Chinese). *Trans CES*, 2017, 32: 17–29 [刘自程, 李永东, 郑泽东. 多相电机控制驱动技术研究综述. 电工技术学报, 2017, 32: 17–29]
- Gu H, Wang Y, Xiao W Y, et al. Torque impulse balance control strategy for fault tolerant flux switching permanent magnet motor under single-phase and multi-phase short circuit conditions (in Chinese). *Proc CSEE*, 2019, 39: 5843–5856, 5913 [顾惠, 王宇, 肖文妍, 等. 容错型永磁磁通切换电机单相及多相短路情况下转矩冲量平衡控制策略. 中国电机工程学报, 2019, 39: 5843–5856, 5913]
- Ji J H, Pan X Y, Zhao W X, et al. Operation principle analysis of air-gap magnetic field modulation in five-phase fault-tolerant flux-switching permanent-magnet motor (in Chinese). *Proc CSEE*, 2017, 37: 6227–6236 [吉敬华, 潘小云, 赵文祥, 等. 五相容错式磁通切换永磁电机的气隙磁场调制运行机理分析. 中国电机工程学报, 2017, 37: 6227–6236]
- Tao T, Zhao W X, Cheng M, et al. Review on fault-tolerant control of multi-phase machines and their key technologies (in Chinese). *Proc CSEE*, 2019, 39: 316–326, 629 [陶涛, 赵文祥, 程明, 等. 多相电机容错控制及其关键技术综述. 中国电机工程学报, 2019, 39: 316–326, 629]
- Liu H T, Yi X Q, Wang D, et al. An efficiency-optimized control strategy in the full torque operation range for five-phase induction motor under open-circuited fault conditions (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 40: 1642–1653 [刘海涛, 易新强, 王东, 等. 五相感应电机缺相容错运行的全转矩范围效率优化控制策略. 中国电机工程学报, 2020, 40: 1642–1653]
- Xiong C, Xu H P, Zhou P, et al. Fault-tolerant field oriented control for five-phase permanent-magnet motors under single phase open fault (in Chinese). *Proc CSEE*, 2019, 39: 7055–7064, 7118 [熊聪, 许海平, 周鹏, 等. 五相永磁同步电机单相开路故障的容错矢量控制策略. 中国电机工程学报, 2019, 39: 7055–7064, 7118]
- Zheng J, Rong F, Huang S D, et al. Six-phase space vector PWM based on stator single phase open-circuit fault (in Chinese). *Proc CSEE*, 2019, 39: 3016–3029 [郑剑, 荣飞, 黄守道, 等. 基于定子单相开路故障的六相空间矢量PWM. 中国电机工程学报, 2019, 39: 3016–3029]
- Yu F, Cheng M, Xia Z P, et al. Fault tolerant control of flux-switching permanent magnet motors with three kinds of harmonic current injections

- (in Chinese). *Proc CSEE*, 2016, 36: 836–844 [於锋, 程明, 夏子朋, 等. 3种谐波电流注入模式下的磁通切换永磁电机缺相容错控制. *中国电机工程学报*, 2016, 36: 836–844]
- 11 Sun Z G, Wang J B, Jewell G W, et al. Enhanced optimal torque control of fault-tolerant PM machine under flux-weakening operation. *IEEE Trans Ind Electron*, 2010, 57: 344–353
 - 12 Tani A, Mengoni M, Zarri L, et al. Control of multiphase induction motors with an odd number of phases under open-circuit phase faults. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, 27: 565–577
 - 13 Tian B, An Q T, Duan J D, et al. ESO-based low-speeds position-sensor less-control of a five-phase PM motor under single phase open circuit (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 2448–2457 [田兵, 安群涛, 段建东, 等. 基于扩张状态观测器的五相电机在单相开路故障下的低速无位置控制技术. *中国电机工程学报*, 2018, 38: 2448–2457]
 - 14 Bermudez M, Gonzalez-Prieto I, Barrero F, et al. Open-phase fault-tolerant direct torque control technique for five-phase induction motor drives. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 902–911
 - 15 Liu G H, Gao M H, Zhou H W, et al. Flux-modification-based fault-tolerant DTC for five-phase PMSM (in Chinese). *Proc CSEE*, 2019, 39: 359–365, 633 [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. *中国电机工程学报*, 2019, 39: 359–365, 633]
 - 16 Xu Y P, Wang J B, Zhou Q, et al. Double optimization three-vector-based model predictive current control for permanent magnet synchronous motors (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 1857–1864, 1923 [徐艳平, 王极兵, 周钦, 等. 永磁同步电动机双优化三矢量模型预测电流控制. *中国电机工程学报*, 2018, 38: 1857–1864, 1923]
 - 17 Zhao W, Tao T, Zhu J, et al. A novel finite-control-set model predictive current control for five-phase PM motor with continued modulation. *IEEE Trans Power Electron*, 2020, 35: 7261–7270
 - 18 Yin F B, Hua W, Huang W T, et al. Voltage vector optimization-based model predicted torque control of flux-reversal permanent magnet machines (in Chinese). *Proc CSEE*, 2017, 37: 6524–6533, 6764 [殷芳博, 花为, 黄文涛, 等. 基于电压矢量优化的磁通反向永磁电机模型预测转矩控制. *中国电机工程学报*, 2017, 37: 6524–6533, 6764]
 - 19 Qin Y Z, Yan Y, Chen W, et al. Three-vector model predictive current control strategy for permanent magnet synchronous motor drives with parameter error compensation (in Chinese). *Trans CES*, 2020, 35: 255–265 [秦艳忠, 阎彦, 陈炜, 等. 永磁同步电机参数误差补偿-三矢量模型预测电流控制. *电工技术学报*, 2020, 35: 255–265]
 - 20 Xia C L, Li F, Wang H M, et al. Loss minimization predictive current control based on iron loss on-line calculation (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 266–274, 364 [夏长亮, 李帆, 王慧敏, 等. 基于铁耗在线计算的最小损耗预测电流控制方法. *中国电机工程学报*, 2018, 38: 266–274, 364]
 - 21 Xiong C, Xu H, Guan T, et al. A constant switching frequency multiple vector based model predictive current control of five-phase PMSM with non-sinusoidal back-EMF. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 67: 1965–1977
 - 22 Huang W, Hua W, Chen F, et al. Model predictive torque control with SVM for five-phase PMSM under open-circuit fault condition. *IEEE Trans Power Electron*, 2020, 35: 5531–5540
 - 23 Guzman H, Duran M J, Barrero F, et al. Speed control of five-phase induction motors with integrated open-phase fault operation using model-based predictive current control techniques. *IEEE Trans Ind Electron*, 2014, 61: 4474–4484
 - 24 Tao T, Zhao W, Du Y, et al. Simplified fault-tolerant model predictive control for a five-phase permanent-magnet motor with reduced computation burden. *IEEE Trans Power Electron*, 2020, 35: 3850–3858
 - 25 Lu H, Li J, Qu R, et al. Fault-tolerant predictive current control with two-vector modulation for six-phase permanent magnet synchronous machine drives. *IET Electric Power Appl*, 2018, 12: 169–178

Multi-vector model predictive fault-tolerant current control using reconstructed vector distribution for five-phase PM motor

TAO Tao, ZHAO WenXiang, JI JingHua & HE Yang

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

To address a single-phase open-circuit fault, this paper proposes multi-vector finite-control-set model predictive fault-tolerant current control. This method includes reconstruction of the post-fault vector distribution and introduces a vector selection method with a reduced computational burden. The reconstructed vector distribution is based on the principle of minimizing the copper loss, and is generated by combining several basic vectors. Standard PWM waveforms and an enlarged modulation area are considered simultaneously. The vector selection method adopts the basic principle of classic finite-control-set model predictive control twice, which avoids evaluation of all the candidate vectors. The computational burden can thus be reduced without a vector selection error. In addition, to further improve the operational performance, duty cycle modulation technology is adopted to optimize the amplitude of the candidate vectors. A thorough experimental evaluation is performed, which demonstrates the effectiveness and superiority of the proposed fault-tolerant method.

five-phase PM motor, model predictive control, fault-tolerant control, reconstructed vector distribution, reduced computational burden, duty cycle modulation

doi: [10.1360/SST-2020-0264](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0264)