

永磁容错游标轮缘推进电机改进模型预测转矩控制

安 达, 朱景伟[†], 李 想, 乔田怀, 郑杰阳

(大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为提高永磁容错游标轮缘推进电机(FTPMV-RDM)在正常状态和一相开路故障状态下的控制性能, 本文提出了一种基于电压矢量预选的改进模型预测转矩(MPTC)控制方法. 针对六相独立H桥逆变器提供的备选电压矢量数量多导致MPTC系统计算量大的问题, 首先, 采用直接转矩控制中利用转矩、磁链误差及定子磁链位置信息确定预选电压矢量, 减少MPTC系统中电压矢量的枚举次数. 然后, 利用价值函数进行二次筛选得到最优电压矢量. 为了实现开路故障下的容错控制, 提出了一种更换备选电压矢量的开路故障容错控制策略. 实验结果表明, 基于电压矢量预选的FTPMV-RDM模型, 本文预测转矩控制算法能够在无故障和一相开路故障下抑制电流畸变, 进而有效降低转矩和磁链脉动.

关键词: 永磁容错游标轮缘推进电机; 模型预测转矩控制; 容错控制; 电压矢量预选

引用格式: 安达, 朱景伟, 李想, 等. 永磁容错游标轮缘推进电机改进模型预测转矩控制. 控制理论与应用, 2024, 41(5): 923–930

DOI: 10.7641/CTA.2023.20489

Improved model predictive torque control of permanent magnet fault tolerant vernier rim-drive motor

AN Da, ZHU Jing-wei[†], LI Xiang, QIAO Tian-huai, ZHENG Jie-yang

(School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: In order to improve the control performance of fault tolerant permanent magnet vernier rim driven moter (FTPMV-RDM) under normal state and one phase open circuit fault state, an improved model predictive torque control (MPTC) method based on the voltage vector preselection is proposed. In view of the large number of alternative voltage vectors provided by six phase independent H-bridge inverter, which leads to the large amount of calculation of MPTC system, the preselected voltage vector is determined by using torque, flux error and stator flux position information in direct torque control to reduce the enumeration times of voltage vector in MPTC system, and then the optimal voltage vector is obtained by secondary screening using value function. In order to realize fault-tolerant control under open circuit fault, an open circuit fault-tolerant control strategy of replacing alternative voltage vector meter is proposed. The experimental results show that the FTPMV-RDM model predictive torque control algorithm based on the voltage vector preselection can suppress current distortion without fault and one-phase open circuit fault, and then effectively reduce torque and flux ripple.

Key words: fault tolerant permanent magnet vernier rim-drive motor; model prediction torque control; fault tolerant control; voltage vector preselection

Citation: AN Da, ZHU Jingwei, LI Xiang, et al. Improved model predictive torque control of permanent magnet fault tolerant vernier rim-drive motor. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(5): 923–930

1 引言

近年来, 随着船舶推进系统的功率不断提高, 传统推进方式在效率和空间利用率方面的劣势尤为突出. 轮缘推进器是一种全新的电力推进方式, 电机的定子

与船体直接相连, 而转子与螺旋桨叶片集成于一体^[1–2]. 与吊舱式电力推进系统比较, 轮缘推进器具有体积小、重量轻、船舶推进效率高等优点, 在舰船、水面水下航行器、鱼雷等场合具有广阔的应用前景. 永

收稿日期: 2022–06–03; 录用日期: 2023–03–28.

[†]通信作者. E-mail: zjwdl@dlmu.edu.cn; Tel.: +86 18940817380.

本文责任编辑: 张承慧.

国家自然科学基金项目(52377037), 中央高校基本科研业务费专项项目(3132023522), 国防科技大学装备综合保障技术重点实验室稳定支持项目(WDZC20235250309)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (52377037), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (3132023522) and the Stability Support Project of the Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology (WDZC20235250309).

磁容错游标轮缘推进电机 (fault tolerant permanent magnet vernier rim-driven machine, FTPMV-RDM) 是磁场调制型永磁容错电机与轮缘推进器相结合的产物, 具有较高的转矩密度和较强的容错能力^[3]. 传统的模型预测转矩 (model predictive torque control, MPTC) 在电机固有参数基础上建立离散化的预测模型, 利用价值函数最小原则从数个备选电压矢量中选出下一周期的最优电压矢量以跟踪转矩和定子磁链^[4-5]. 由于备选电压矢量幅值单一, 空间角度种类少, 往往会导致最优电压矢量与理想电压矢量误差较大, 进而导致转矩和定子磁链脉动明显^[6-8]. 通过引入虚拟电压矢量增加备选电压矢量的多样性可以有效抑制转矩脉动^[9]. 引入占空比计算同样可以减小电压矢量幅值过大引起的转矩脉动^[10-11]. 对于多相电机, 较多的备选电压矢量个数通常会带来过大的计算量影响实际应用^[12]. 针对上述问题, 文献[13]将备选电压矢量分为4个扇区, 每个扇区包含6个电压矢量, 根据定子磁链误差进行扇区预选以减少控制系统的计算量. 文献[14-15]利用转矩和磁链无差拍控制原理预测下一周期参考电压矢量, 利用参考电压矢量角度为第2次筛选缩小范围, 进而降低计算量.

为提高多相电机驱动系统的可靠性, 控制算法中往往需要加入容错控制策略. 针对电机一相开路故障, 文献[16]对无故障相定子电流进行重新分配, 补偿缺失的故障相电流, 从而降低故障带来的转矩和磁链脉动. 文献[17]在传统直接转矩控制 (direct torque control, DTC) 的基础上, 以保持故障前后磁链轨迹不变为原则对电机进行容错控制. 文献[18-19]将容错技术加入到模型预测控制中, 构建谐波子空间预测模型, 并在价值函数中增加相应的限制, 提高了电机在一相开路故障下的稳定性. 但对于MPTC技术在多相电机容错控制领域的应用, 仍存在着计算量大的问题.

FTPMV-RDM采用的六相独立H桥逆变器可为电机系统提供729个电压空间矢量^[20]. 针对如此大量的备选电压矢量, 本文提出了一种改进模型预测转矩控制方法, 利用传统DTC理论中的转矩和定子磁链双滞环比较器提供的比较信号^[21-22], 筛选出下一周期最优电压矢量所在的扇区, 然后, 在此扇区内利用价值函数选出最优电压矢量, 可以有效减轻在MPTC中过多次枚举不同电压矢量带来的较大计算负担. 实验结果验证了本文提出的基于电压矢量预选的FTPMV-RDM模型预测转矩控制策略的优越性, 同时, 证明了重构备选电压矢量表开路容错控制策略的有效性.

2 FTPMV-RDM结构及数学模型

六相FTPMV-RDM是一种磁场调制型永磁容错电机, 其结构如图1所示. 定子上电枢齿和隔离齿交替排列, 每个电枢齿上开出两个调制极, 每个容错齿看作

一个调制极, 共同对气隙磁场进行调制. 六相FTPMV-RDM采用6个独立的H桥逆变电路驱动, 同时在隔离齿的作用下, 电机各相互感较小, 所以电机每相之间实现了电气、磁和热的隔离, 提高了容错能力. 定子六相绕组在空间上按双Y移相30°分布, 其H桥驱动拓扑结构如图2所示.

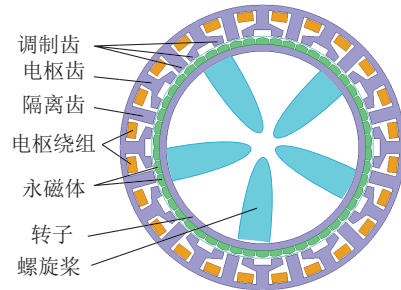


图1 六相FTPMV-RDM结构图

Fig. 1 Structure diagram of six-phase FTPMV-RDM

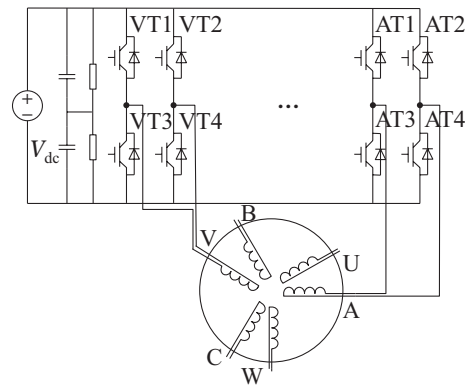


图2 六相FTPMV-RDM逆变电路

Fig. 2 Inverter circuit of six-phase FTPMV-RDM

在忽略涡流损耗、磁路饱和及磁滞损耗对电机磁路的影响下, 不考虑电机谐波影响, 忽略表面齿槽效应的影响的条件下, FTPMV-RDM在六相静止坐标系下的电压方程为

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt}, \quad (1)$$

磁链方程为

$$\psi_s = L_s i_s + \psi_f \cos(\theta + \delta_s), \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = n_p \psi_f (i_A \sin \theta + i_V \sin(\theta - \frac{\pi}{6}) + i_B \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_W \sin(\theta - \frac{5\pi}{6}) + i_C \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) + i_W \sin(\theta + \frac{\pi}{2})), \quad (3)$$

运动方程为

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt}, \quad (4)$$

式中: u_s , R_s , i_s , ψ_s , L_s , δ_s 分别为各相定子绕组的电压、电阻、电流、磁链、电感和相对于A相的角度; i_A ,

i_U, i_B, i_V, i_C, i_W 分别为定子每一相的相电流; ψ_f 为永磁体磁链; θ 为转子电角度; T_e 为电磁转矩; n_p 是转子极对数; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量。

六相 FTPMV-RDM 在两相静止坐标系(α - β 坐标系)中的电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_\alpha = R_s i_\alpha + \frac{d\psi_\alpha}{dt}, \\ u_\beta = R_s i_\beta + \frac{d\psi_\beta}{dt}, \end{cases} \quad (5)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_\alpha = L_\alpha i_\alpha + \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_f \cos \theta, \\ \psi_\beta = L_\beta i_\beta + \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_f \sin \theta, \end{cases} \quad (6)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = n_p(\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha), \quad (7)$$

式中: $u_\alpha, i_\alpha, \psi_\alpha, L_\alpha$ 分别是两相静止坐标系中 α 轴的电压、电流、磁链和电感; $u_\beta, i_\beta, \psi_\beta, L_\beta$ 分别是两相静止坐标系中 β 轴的电压、电流、磁链和电感。

3 模型预测转矩控制原理

3.1 传统MPTC

为减少计算量, 本文涉及的传统MPTC和基于电压矢量预选的MPTC均在两相静止坐标系下建立预测模型。由式(5)–(6)可得 α - β 坐标系中的电压方程为

$$\begin{cases} u_\alpha = R_s i_\alpha + L_\alpha \frac{di_\alpha}{dt} - \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_f \omega_e \sin \theta, \\ u_\beta = R_s i_\beta + L_\beta \frac{di_\beta}{dt} + \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_f \omega_e \cos \theta. \end{cases} \quad (8)$$

使用前向欧拉公式可把式(8)转化为离散状态方

程, 即

$$\begin{cases} i_\alpha^{k+1} = \frac{T_s}{L_\alpha} u_\alpha^k + (1 - \frac{T_s R_s}{L_\alpha}) i_\alpha^k + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{T_s}{L_\beta} \psi_f \omega_e \sin \theta, \\ i_\beta^{k+1} = \frac{T_s}{L_\beta} u_\beta^k + (1 - \frac{T_s R_s}{L_\beta}) i_\beta^k - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{T_s}{L_\beta} \psi_f \omega_e \cos \theta, \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i_\alpha^{k+1}, i_\beta^{k+1}, i_\alpha^k, i_\beta^k, u_\alpha^k, u_\beta^k$ 分别是 $k+1$ 时刻和 k 时刻的电流和电压变量; ω_s 是电机电角速度; T_s 为系统采样周期。根据式(9)可以得出 α - β 坐标系下一周期电流预测值, 结合式(6)–(7)可以计算得到下一周期电磁转矩预测值, 下一周期的定子磁链预测幅值为

$$|\psi_s^{k+1}| = \sqrt{(\psi_\alpha^{k+1})^2 + (\psi_\beta^{k+1})^2}, \quad (10)$$

式中: $\psi_s^{k+1}, \psi_\alpha^{k+1}, \psi_\beta^{k+1}$ 分别是 $k+1$ 时刻定子磁链预测值和在 α - β 坐标系下的磁链预测值分量。在式(9)所示的预测模型中枚举所有备选电压矢量, 为同时实现对给定转矩和磁链的跟踪, 构建式(11)所示价值函数, 以价值函数最小原则选取最优电压矢量, 即

$$g = |T_e^* - T_e^{k+1}| + \lambda |\psi_s^* - \psi_s^{k+1}|, \quad (11)$$

式中: g 为价值函数值; T_e^{k+1} 为 $k+1$ 时刻电磁转矩预测值; T_e^*, ψ_s^* 为电磁转矩和定子磁链参考值; λ 为价值函数中的权重系数, 选取经验参数。为了实现 $i_d = 0$ 控制, 本文定子磁链参考值依据电磁转矩的参考值计算得出, 其计算公式为

$$|\psi_s^*| = \sqrt{\psi_f^2 + L_s^2 (\frac{T_e^*}{n_p \psi_f})^2}. \quad (12)$$

电磁转矩的参考值由转速环PI调节器得到, 传统MPTC系统的结构框图如图3所示。

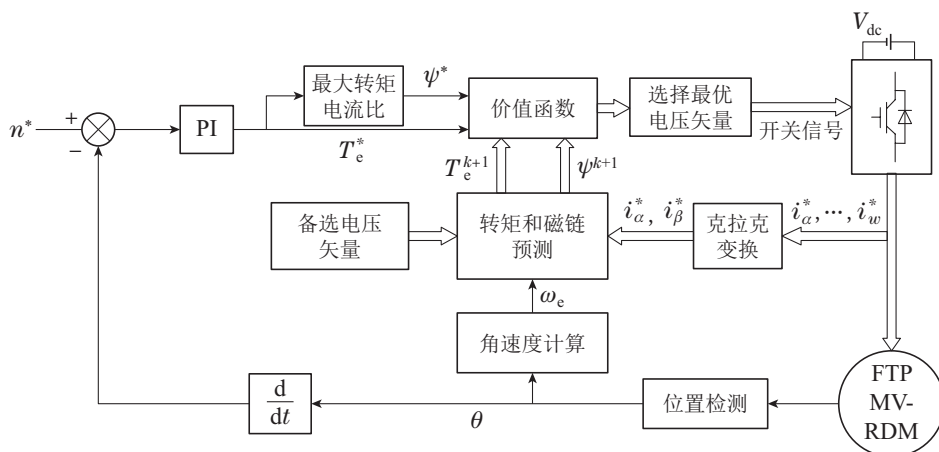


图3 传统MPTC系统结构框图

Fig. 3 Structure block diagram of traditional MPTC system

3.2 基于电压矢量预选的MPTC

六相独立H桥逆变器可以为电机提供729种开关组合, 作用在六相FTPMV-RDM时, 可以得到132个在

空间角度和幅值上完全不重合的电压矢量。对于传统MPTC策略而言, 选择最优电压矢量的计算量较大, 将降低控制系统的动态性能。如果选择较少的备选电压

矢量,一方面会造成转矩、磁链的脉动以及电流的畸变;另一方面FTPMV-RDM控制系统电压矢量多控制灵活的优势将无法体现. 综合考虑控制效果以及计算量,本文提出的改进MPTC控制策略中选择幅值、角度相对均匀的61个电压矢量构成备选电压矢量集合,并将其以30°为一扇区,均匀分成12个扇区,如图4所示.

本文结合传统直接转矩控制原理中的电磁转矩、定子磁链双滞环比较策略,提出了一种基于电压矢量预选的MPTC方法,控制系统结构框图如图5所示.

转矩滞环比较器控制原理如图6所示. 转矩比较器滞环宽度为 $T_l^* \sim T_h^*$,当误差在滞环范围内时输出0,在高于 T_h^* 或者低于 T_l^* 时分别输出-1和+1. 横坐标 t_{k+n} ($n = 1, 2, 3, \dots$)表示比较器以固定步长进行一次比较计算,开关频率固定,单个电压矢量作用一个完整周期,定子磁链滞环比较器与之相同.

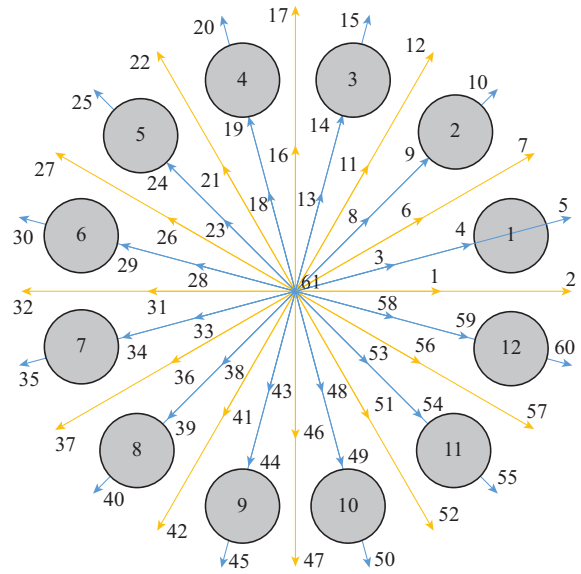


图4 电压矢量扇区划分图

Fig. 4 Voltage vector sector division diagram

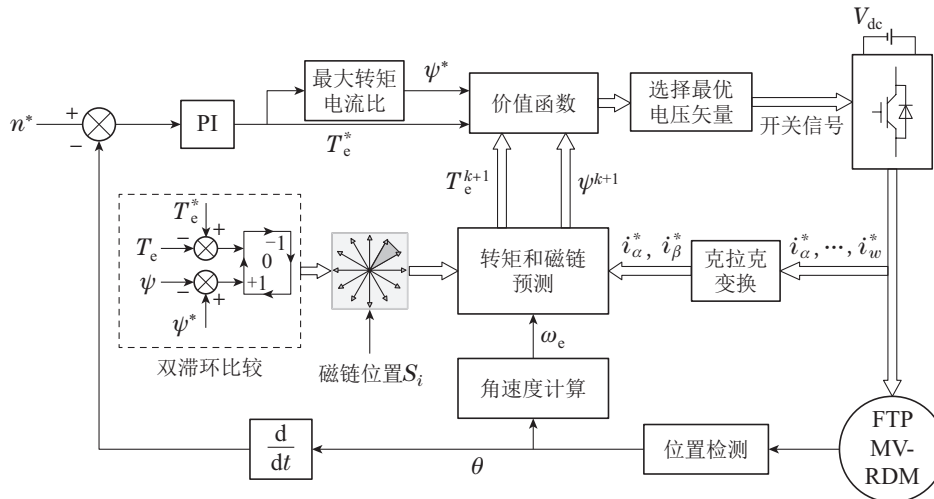


图5 基于电压矢量预选的MPTC系统框图

Fig. 5 Block diagram of MPTC system based on voltage vector preselection

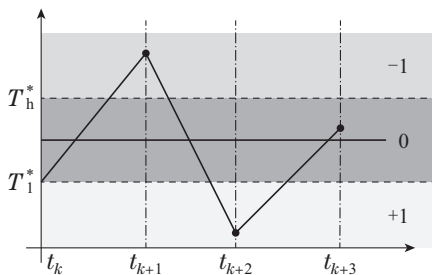


图6 转矩滞环比较原理

Fig. 6 Principle of the torque hysteresis comparison

首先,文章将电磁转矩和定子磁链的参考值与反馈值进行比较,并将差值送入滞环比较器. 再将滞环比较信号与转子扇区位置相结合,为备选电压矢量进行扇区预选,以减少模型预测的计算量. 以定子磁链位于第1扇区为例,假设此时电机需要增加转矩,减小磁链,则两个滞环比较器输出的结果分别是+1, -1,

其电压矢量预选流程图如图7所示.

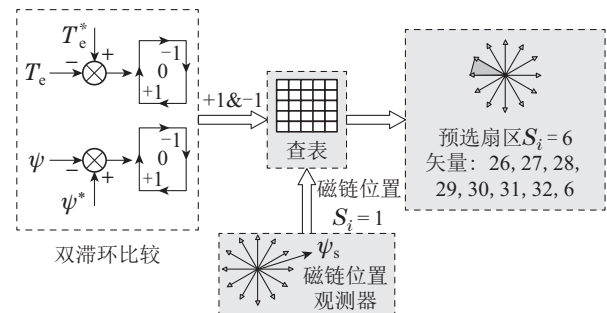


图7 电压矢量预选流程图

Fig. 7 Flow chart of voltage vector preselection

图7中查表环节所用到的表是利用两个滞环比较信号和定子磁链扇区位置信号建立起来的备选电压矢量扇区预选表. 如表1所示,其中预选结果“0”表示本周期继续保持上一时刻的最优电压矢量进行输出.

表1 备选电压矢量扇区预选表

Table 1 Parameters of simulation model

ψ	T_e	磁链位置 S_i											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
+1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	
+1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-1	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
+1	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
+1	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
-1	0	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
-1	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	

结合图4和图7可以看出, 经过电压矢量预选, 备选电压矢量个数从61个减少到8个(7个有效电压矢量和1个零矢量). 然后, 将预选出来的8个电压矢量通过枚举法和价值函数进行二次筛选出最优电压矢量, 并作用一个完整周期. 通过电压矢量的预选可以减少电压矢量在预测模型中的枚举次数, 减轻控制器的计算负担. 文献[13]中的电压矢量预选方法仅可以预选出 $\frac{1}{4}$ 的电压矢量, 而本文提出的方法可以预选出 $\frac{1}{12}$ 的电压矢量, 适用于电压矢量众多的六相FTPMV-RDM.

3.3 改进前后计算负担分析

在MATLAB/Simulink环境下, 对传统MPTC和改进MPTC进行运行时间比较. 仿真时间统一设置为2s, 采样周期为50 μ s. 不同控制策略下运行时间如表2所示.

表2 MATLAB运行时间对比
Table 2 MATLAB runtime comparison

类别	运行时间/s
传统MPTC	14.7741
改进MPTC	10.5128

由表2可知, 改进MPTC虽然增加了额外的运算步骤, 但是由于其显著减少了备选电压的枚举次数, 总体上计算用时更少, 减轻了计算负担.

3.4 一相开路故障MPTC策略

对于MPTC算法而言, 在电机发生一相开路故障时, 经过预测系统筛选出来的最优电压矢量因为一相开路的缘故会产生畸变. 以图4中的电压矢量“5”为例, 当A相发生开路故障时, 实际施加的电压矢量产生如图8所示的畸变.

在发生一相开路故障时, 若系统仍将健康的电压矢量带入公式(9)进行预测计算. 由于发生一相开路故障后大多数电压矢量已经发生畸变, 所以预测计算出

的下一周期转矩和磁链的预测值都会产生误差. 这就会导致价值函数筛选出的最优电压矢量在下一周期的实际作用效果与理论上不一致, 从而产生较大的转矩脉动. 例如, 价值函数最终筛选出的最优电压矢量所对应的逆变器开关工作状态分别为“1, 0, 1, -1, 0, 1”, 但由于A相的开路故障, 导致电机的实际工况与“0, 0, 1, -1, 0, 1”这一组开关信号相同(“1”, “0”, “-1”分别代表对应相绕组正向导通、不导通和反向导通).

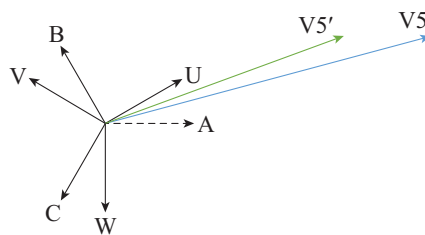


图8 开路故障电压矢量畸变示意图

Fig. 8 Schematic diagram of open circuit fault voltage vector distortion

针对上述问题, 本文提出了一种更换备选电压矢量的容错控制策略. 针对A相开路, 在图4所示的备选电压矢量的基础上, 预先考虑A相的缺失, 对电压矢量进行重构, 提出了新的备选电压矢量集合. 由于A相的缺失导致部分电压矢量重合, 备选电压矢量个数总体上由61减少至51个, 同时, 预选后的每个扇区内电压矢量减少至5~7个, 容错矢量集合如图9所示.

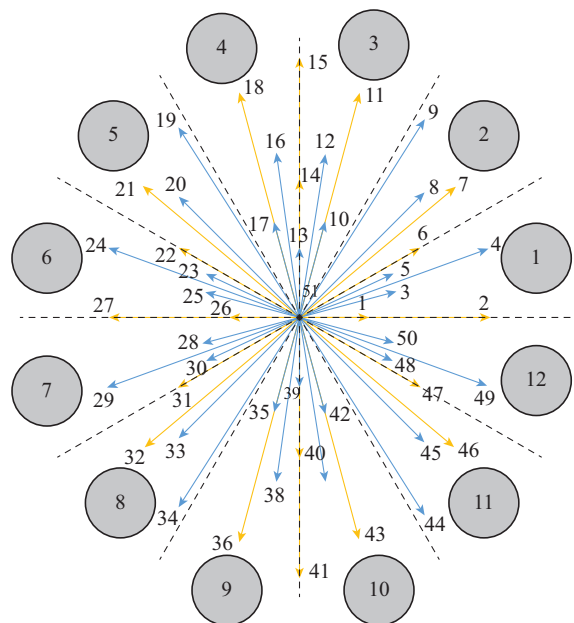


图9 一相开路故障容错电压矢量集合

Fig. 9 Fault tolerant voltage vector set of one phase open circuit fault

4 实验验证

在如图10所示的FTPMV-RDM控制系统实验平台上, 对本文所提出的改进模型预测转矩控制方法以及

开路容错策略进行实验验证. 实验平台中的控制器选择上海远宽能源科技有限公司研发的StarSim快速控制原型, 负载电机是一台由伺服驱动器控制的异步伺服电机. 系统采样频率设置为10 kHz. 六相FTPMV-RDM的主要参数如表3所示.

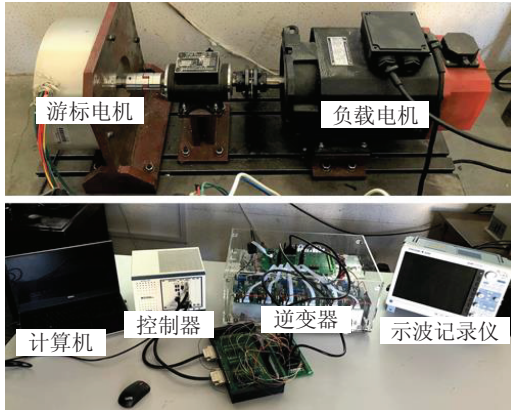


图 10 FTPMV-RDM控制系统实验平台

Fig. 10 Experimental platform of the FTPMV-RDM control system

表 3 六相FTPMV-RDM主要参数

Table 3 Main parameters of six-phase FTPMV-RDM

参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	1.7
定子电感 L/mH	28
极对数 n_p	25
额定转矩 $T/(N \cdot m)$	28
额定功率 P/kW	1.8
额定转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	600

4.1 无故障时算法实验验证

为对比分析传统MPTC和基于电压矢量预选的MPTC的性能, 本文分别对两种控制算法进行了调速实验和负载突变实验. 在调速实验时负载转矩为 $9 N \cdot m$, 给定转速从 $200 r/min$ 上升至 $400 r/min$. 在负载突变实验时, 速度给定值为 $300 r/min$, 负载由 $6 N \cdot m$ 上升至 $11 N \cdot m$. 两种控制算法调速实验波形如图11-12所示, 负载突变实验波形如图13-14所示. 为便于观察电机定子磁链脉动情况, 将实验中磁链数据导出, 绘制如图15所示的两种控制算法在不同负载下得到的磁链轨迹.

由实验波形可以明显看出, 相比于传统MPTC, 本文提出的改进MPTC能够有效降低转矩、磁链脉动, 抑制电流畸变.

为了评价不同控制算法的性能, 定义电机转矩脉动计算公式为

$$T_{ripple} =$$

$$\frac{\max \{|T_{max} - T_{avg}|, |T_{avg} - T_{min}|\}}{T_{avg}}, \quad (13)$$

其中: T_{ripple} , T_{avg} , T_{max} , T_{min} 分别是转矩脉动、平均转矩、最大转矩和最小转矩. 表4所示为两种控制算法在不同负载转矩下的转矩脉动. 由表4可知, 本文提出的改进MPTC算法可以获得较小的转矩脉动, 证明了所提出的改进MPTC的优越性.

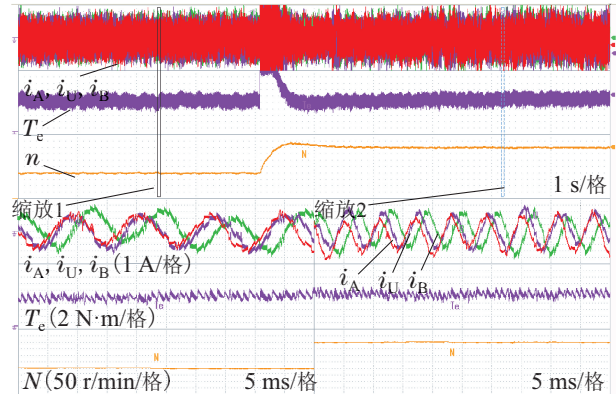


图 11 调速时传统MPTC策略电流、转矩、转速实验波形
Fig. 11 Experimental waveforms of current, torque and speed of traditional MPTC strategy during speed regulation

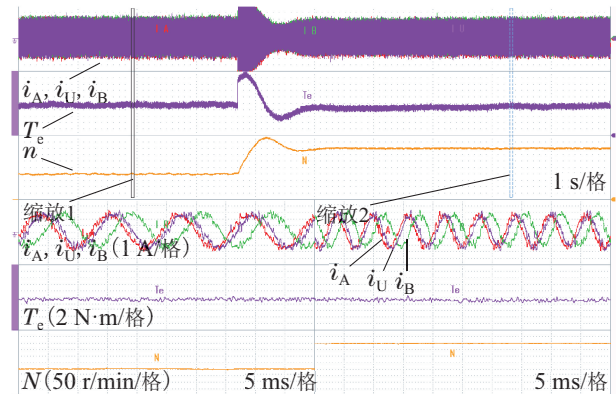


图 12 调速时改进MPTC策略电流、转矩、转速实验波形
Fig. 12 Experimental waveforms of current, torque and speed of improved MPTC strategy during speed regulation

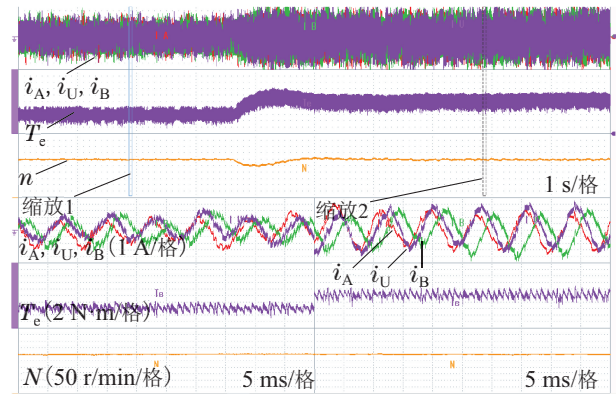


图 13 负载突变时传统MPTC策略电流、转矩、转速实验波形
Fig. 13 Experimental waveforms of current, torque and rotational speed of traditional MPTC strategy when the load is abruptly changed

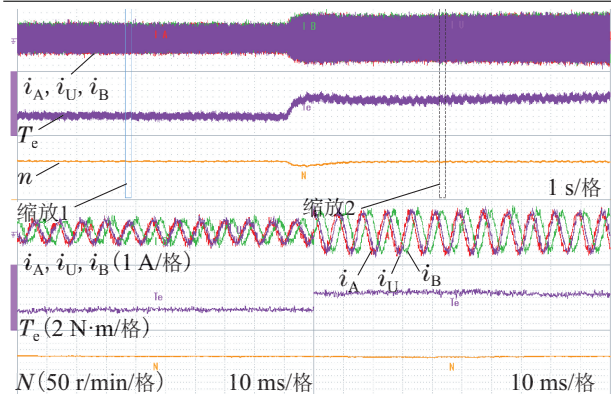


图 14 负载突变时改进MPTC策略电流、转矩、转速实验波形

Fig. 14 Experimental waveforms of current, torque and rotational speed of improved MPTC strategy when the load is abruptly changed

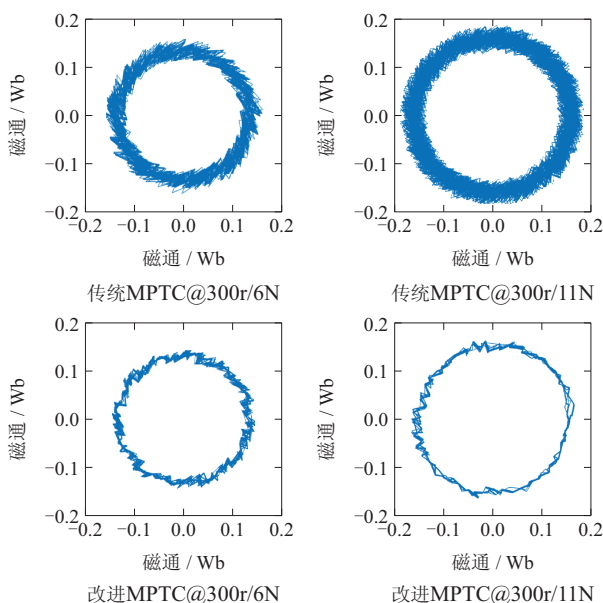


图 15 定子磁链轨迹实验对比

Fig. 15 Experimental comparison of stator flux trajectory

表 4 不同负载下两种算法的转矩脉动

Table 4 Torque ripple of two algorithms under different loads

	6 N·m	9 N·m	11 N·m
传统MPTC	33.5%	22.3%	18.9%
改进MPTC	25.3%	17.1%	12.3%

4.2 开路故障时MPTC策略实验验证

为验证本文提出的一相开路故障时MPTC容错控制策略的有效性,实验环节模拟了A相发生开路故障情况,实验结果如图16所示.首先,电机在给定转速300 r/min,负载为9 N·m的状态下正常运行.然后,发生A相开路故障,可见A相电流值变为零,同时转矩脉动明显增大,约为40.1%,电机进入故障运行状态.在

大概3 s后,加入容错控制策略,可以看出转矩脉动显著降低,约为20.7%,同时正常相电流增加.

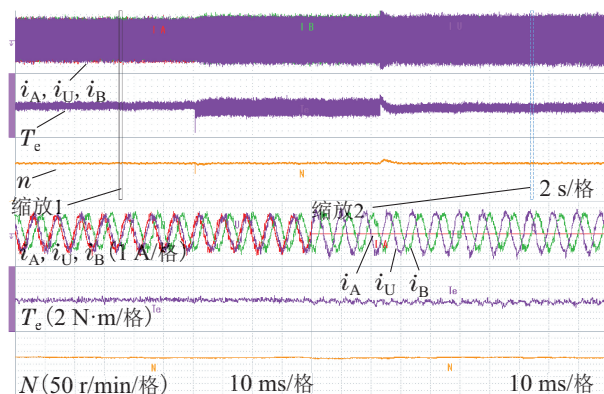


图 16 A相开路容错控制实验波形

Fig. 16 Experimental waveform of phase a open circuit fault tolerant control

5 结论

针对由六相独立H桥逆变电路驱动的FTPMV-RDM在传统MPTC下转矩和磁链脉动大、电流波形畸变严重的问题,本文结合传统直接转矩控制中,利用电磁转矩、定子磁链误差双滞环比较器以及磁链位置信号直接选择最优电压矢量的原理,结合六相FTP-MV-RDM备选电压矢量丰富的特点,提出了一种基于电压矢量预选的改进MPTC策略以及一相开路故障容错控制方法.实验结果表明,所提出的改进MPTC策略能够显著降低电机的转矩、磁链脉动和电流畸变.备选电压矢量预选策略能够降低MPTC算法面对众多备选电压矢量时的计算量,同时也充分发挥了六相独立H桥逆变器能为电机提供大量幅值、相位不同的电压矢量的优势.同时提出的一相开路故障MPTC容错策略能够在电机发生一相开路故障时,有效抑制因故障带来的转矩脉动,保证电机的稳定运行.

参考文献:

- [1] WANG Yong, LI Qing. Design of a new integrate-d motor propulsion system. *Chinese Journal of Ship Research*, 2011, 6(1): 82 – 85. (汪勇, 李庆. 新型集成电机推进器设计研究. *中国舰船研究*, 2011, 6(1): 82 – 85.)
- [2] TAN Weizhong, YAN Xinping, LIU Zhenglin, et al. Technology development and prospect of shaftless rim-driven propulsion system. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 39(3): 601 – 605. (谈微中, 严新平, 刘正林, 等. 无轴轮缘推进系统的研究现状与展望. *武汉理工大学学报*, 2015, 39(3): 601 – 605.)
- [3] QIAO Tianhuai, ZHU Jingwei, MA Rui. Design and optimization of flux-modulated fault tolerant permanent magnet rim-driven machine. *Journal of Dalian Maritime University*, 2021, 47(4): 100 – 107. (乔田怀, 朱景伟, 马瑞. 磁场调制型永磁容错轮缘推进电机设计与优化. *大连海事大学学报*, 2021, 47(4): 100 – 107.)
- [4] NIU Feng, LI Kui, WANG Yao. Model predictive direct torque control for permanent magnet synchronous machines. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(12): 60 – 67. (牛峰, 李奎, 王尧. 永磁同步电机模型预测直接转矩控制. *电机与控制学报*, 2015, 19(12): 60 – 67.)

- [5] LI Yaohua, YANG Qidong, QIN Yugui, et al. Model predictive torque control for permanent synchronous motor based on dynamic finite-control-set using fuzzy control. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(9): 94 – 103.
(李耀华, 杨启东, 秦玉贵, 等. 基于模糊控制的永磁同步电机动态有限状态集模型预测转矩控制. 电机与控制学报, 2021, 25(9): 94 – 103.)
- [6] SHAN Jiong. *Research on improved predictive torque control system for permanent magnet synchronous motor*. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.
(山炯. 永磁同步电机的改进预测转矩控制系统研究. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.)
- [7] WU Zhitao, XU Jianying, GU Weizhi. Optimum controller design for DTC of PMSM based on model prediction. *Small & Special Electrical Machines*, 2016, 44(3): 49 – 53.
(武志涛, 徐建英, 谷伟志. 基于模型预测的永磁同步电机直接转矩最优控制器设计. 微特电机, 2016, 44(3): 49 – 53.)
- [8] JIA Hongping, HE Yikang. Variable structure sliding mode control for PMSM DTC. *Small & Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, (1): 1 – 6.
(贾洪平, 贺益康. 永磁同步电机滑模变结构直接转矩控制. 电工技术学报, 2006, (1): 1 – 6.)
- [9] LIU Shen, GAO Lin. Improved model of predictive direct torque control for permanent magnet synchronous motor. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(1): 10 – 17.
(刘坤, 高琳. 永磁同步电机的改进模型预测直接转矩控制. 电机与控制学报, 2020, 24(1): 10 – 17.)
- [10] CHEN Hao, HE Yang, ZHAO Wenxiang, et al. Direct torque control of five-phase fault-tolerant permanent magnet vernier motor based on duty cycle modulation. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(5): 1055 – 1064.
(陈浩, 和阳, 赵文祥, 等. 基于占空比调制的五相容错永磁游标电机直接转矩控制. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1055 – 1064.)
- [11] XU Yanping, ZHOU Qin, LEI Yazhou, et al. Improved duty cycle model predictive torque control method of permanent magnet synchronous motor. *Electric Drive*, 2017, 47(5): 14 – 17.
(徐艳平, 周钦, 雷亚洲, 等. 永磁同步电机改进占空比模型预测转矩控制方法. 电气传动, 2017, 47(5): 14 – 17.)
- [12] LI Yaohua, YANG Qidong, LIU Yang, et al. Candidate voltage vectors set in MPC-DTC of surface PMSM. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(10): 87 – 99.
(李耀华, 杨启东, 刘洋, 等. 表面式永磁同步电机模型预测直接转矩控制备选电压矢量集合研究. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 87 – 99.)
- [13] HUANG W, HUA W, CHEN F Y. Enhanced model predictive torque control of fault-tolerant five-phase permanent magnet synchronous motor with harmonic restraint and voltage preselection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(8): 6259 – 6269.
- [14] ZHANG Xiaoguang, ZHANG Liang, HOU Benshuai. Improved model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor. *Proceeding of the CSEE*, 2017, 37(16): 4800 – 4809.
(张晓光, 张亮, 侯本帅. 永磁同步电机优化模型预测转矩控制. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4800 – 4809.)
- [15] XUE W X, WANG X C, XU W, et al. Finite-control-set model predictive torque control with a deadbeat solution for PMSM drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5402 – 5410.
- [16] BAI Hongfen. *Study of position-sensorless control technique for a dual-winding fault tolerant permanent magnet motor*. Dalian: Dalian Maritime University, 2018.
(白洪芬. 双绕组永磁容错电机无位置传感器控制技术. 大连: 大连海事大学, 2018.)
- [17] BERMUDEZ M, GONZALEZ-PRIETO I, BARRERO F, et al. Open-phase fault-tolerant direct torque control technique for five-phase induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(2): 902 – 911.
- [18] CHEN Fuyang, HUA Wei, HUANG Wentao, et al. Open-circuit fault-tolerant strategies for a five-phase flux-switching permanent magnet motor based on model predictive torque control method. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(2): 337 – 346.
(陈富扬, 花为, 黄文涛, 等. 基于模型预测转矩控制的五相磁通切换永磁电机开路故障容错策略. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 337 – 346.)
- [19] GUZMAN H, DURAN M, 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 Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(9): 4474 – 4484.
- [20] JI Yanming. *Study of direct torque control system of permanent magnet fault-tolerant rim driven motor*. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
(季彦名. 永磁容错轮缘推进电机直接转矩控制系统研究. 大连: 大连海事大学, 2020.)
- [21] DU Chengdong, NIE Ziling, LI Zhongrui. A model predictive direct torque control strategy for permanent magnet synchronous motor. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(5): 1 – 6.
(杜承东, 聂子玲, 李忠瑞. 一种基于模型预测的永磁同步电机直接转矩控制策略. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 1 – 6.)
- [22] SU Dandan, LI Haodong, YIN Yanzhou, et al. Improved model predictive direct torque control of permanent magnet synchronous motors. *Journal of Hebei University*, 2022, 40(6): 666 – 672.
(苏丹丹, 李浩东, 尹延周, 等. 改进的永磁同步电机模型预测直接转矩控制策略. 河北大学学报, 2022, 40(6): 666 – 672.)

作者简介:

安 达 硕士研究生, 研究方向为永磁容错游标电机控制技术、新型电机驱动技术, E-mail: anda5241@163.com;

朱景伟 博士生导师, 研究方向为永磁容错电机设计及其控制技术、电力电子变换技术等, E-mail: zjwdl@dlmu.edu.cn;

李 想 硕士研究生, 研究方向为永磁容错电机控制技术、新型电机驱动技术, E-mail: xianglee@dlmu.edu.cn;

乔田怀 硕士研究生, 研究方向为永磁容错电机设计, E-mail: th.qiao.2019@dlmu.edu.cn;

郑杰阳 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机驱动与控制, E-mail: adonaisaj@163.com.