

一种开绕组六相永磁同步电机单相上桥臂故障的模型预测容错控制方法

陈慧莹*, 张志锋

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

A Model Predictive Fault-Tolerant Control Method for an Open-End Winding Six-Phase PMSM with a Single Upper-Arm Fault

CHEN Huiying*, ZHANG Zhifeng

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] An improved method based on an optimized control set is proposed to address the issues of harmonic currents and torque ripple in the model predictive control (MPC) system of an open-end winding six-phase permanent magnet synchronous motor under single upper-arm faults. [Methods] Based on the vector space decoupling theory, the voltage vectors under single upper-arm faults and their distribution characteristics in both fundamental and harmonic planes were derived and analyzed. To ensure high voltage utilization, virtual vector synthesis was implemented. Addressing the challenge of selecting appropriate basic voltage vectors using conventional convex hull methods, an optimized control set-based model predictive fault-tolerant control (MPFTC) method was proposed in this study. Through post-fault vector characteristic analysis, an optimized control set was selected from the G_5 vector group, and its impact on harmonic currents and torque ripple performance was evaluated. Comparative simulations between conventional MPC and the proposed optimized control set-based MPFTC method were conducted under fault conditions. [Results] The simulation results demonstrated that the proposed MPFTC method effectively reduced the total harmonic distortion of the current from 50.54% to 5.96% under fault conditions, with the third-order harmonic component suppressed below 5%. Additionally, the electromagnetic torque exhibited only a transient drop of $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ and recovered within 10 ms, successfully mitigating the untreated 50 Hz oscillation with an amplitude of $\pm 50 \text{ N}\cdot\text{m}$. [Conclusion] The proposed MPFTC method demonstrates significant effectiveness in harmonic suppression and torque ripple control, verifying its strong fault tolerance and engineering application value.

Key words: permanent magnet synchronous motor; single

upper-arm fault; harmonic current; torque ripple; model predictive fault-tolerant control

摘要:【目的】针对开绕组六相永磁同步电机模型预测控制(MPC)系统在单相上桥臂故障时存在的谐波电流和转矩脉动等问题,提出一种基于优化控制集的改进方法。【方法】根据矢量空间解耦理论,推导出单相上桥臂故障时的电压矢量及在基波平面和谐波平面的分布情况,并分析矢量特性。为了保证高电压利用率,进行虚拟矢量合成。针对传统凸包法难以选取合适基本电压矢量的问题,本文提出一种基于优化控制集的模型预测容错控制(MPFTC)方法。根据故障后的矢量特性分析,在 G_5 组矢量中选取优化控制集,分析该控制方法对谐波电流和转矩脉动等性能的影响。在发生故障的情况下对传统MPC方法和本文所提基于优化控制集的MPFTC方法进行仿真对比分析。【结果】仿真结果表明,本文所提MPFTC方法将故障下电流总谐波失真由50.54%降至5.96%,3次谐波低于5%;电磁转矩仅出现 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的瞬时跌落,并在10 ms内恢复,有效抑制了未处理时 $\pm 50 \text{ N}\cdot\text{m}$,50 Hz的振荡。【结论】本文所提MPFTC方法在谐波抑制和转矩脉动控制方面效果显著,验证了其强容错能力和工程应用价值。

关键词: 永磁同步电机;单相上桥臂故障;谐波电流;转矩脉动;模型预测容错控制

0 引言

现代工业对电机系统的可靠性、效率和容错能力要求日益提高,具有先天结构优势的多相永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)凭借其高功率密度、低转矩脉动及

良好的容错性能等优点受到了广泛关注,成为高端驱动领域的研究热点^[1-2]。特别是,针对多相电机的控制与驱动技术,已有系统性的综述阐述了其发展脉络与挑战^[3]。其中,模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)作为一种先进的控制策略,因其动态性能优异而备受青睐,但其参数鲁棒性与预测结构仍是优化重点^[4]。

在众多拓扑结构中,开绕组结构凭借其绕组独立供电、直流电压利用率高及调制灵活等特点,为提升系统性能与容错能力提供了新思路。近年来,对其驱动系统模型预测电流控制^[5-6]、谐波抑制^[7]及容错控制^[8-9]等方面的深入研究,充分证明了该结构的潜力。

然而,在实际运行过程中,功率器件故障难以避免,一旦发生故障将导致系统性能急剧下降,这主要体现在两方面:一是会引入显著的谐波电流,现有研究针对双三相^[10]、六相^[11-12]等不同相数的电机对此问题进行了探讨;二是会引发剧烈的转矩脉动,对此学者们从逆变器并联^[13]、三相断相^[14]到六相缺相^[15]等多种故障场景下提出了容错控制策略。尽管传统 MPC 可通过容错运行减轻故障影响,但其计算复杂度仍是实际应用的瓶颈之一^[16]。

为提升故障下系统的运行性能,矢量空间解耦(Vector Space Decomposition, VSD)理论被广泛应用于多相电机的分析与控制中,通过将电机模型分解为基波平面与谐波平面,可分别实现电磁转矩与谐波电流的独立调控^[17-19]。然而,在单相上桥臂故障后,原有健康状态下的基本电压矢量部分失效,导致常规虚拟矢量合成策略无法覆盖整个可行电压区域,尤其在谐波平面中难以实现有效控制。

在多相 PMSM 容错控制领域,现有研究主要集中在双三相与五相系统。针对双三相 PMSM,文献[20-23]分别从容错控制、矢量切换策略、多矢量合成以及矢量集拓展四个维度对传统 MPC 进行了改进。文献[24-28]通过重构解耦变换矩阵、引入前馈补偿或设计新型空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)开关表等方式,在单相和两相开路两种故障下实现了 $d-q$ 轴电流解耦与转矩脉动抑制。然而,这类方法多依赖于精确的降阶数学模型重构,且对不

同故障模式需设计不同的变换矩阵与控制器参数,通用性与灵活性受限。对于五相 PMSM,文献[29-32]探索了基于虚拟矢量合成的容错直接转矩控制策略,可在无需修改控制结构的前提下实现磁链轨迹调控,提升了系统的兼容性。但该方法在高维电压空间中的矢量选择仍缺乏系统性优化机制,难以兼顾电压利用率与谐波抑制性能。

值得注意的是,相较于五相或三相系统,开绕组六相 PMSM 具有更高的冗余度与容错潜力,但其故障后电压矢量分布特性更为复杂,传统基于固定解耦矩阵或经验开关表的方法适用性有限。尤其在某一逆变器单相上桥臂开路故障下,可行电压矢量集发生不对称缩减,若直接沿用正常控制策略,将导致基波平面电压输出能力下降、谐波子空间激励增强,进而引发显著的转矩与电流脉动。

针对系统发生单相上桥臂开路故障,本文提出一种基于优化候选控制集的模型预测容错控制(Model Predictive Fault-Tolerant Control, MPFTC)方法。基于 VSD 理论,首先系统分析故障后电压矢量在基波子空间与谐波子空间的分布规律。其次,针对传统虚拟矢量合成方法在多故障场景下适应性不足的问题,提出将 G_s 组电压矢量作为有限控制集,在此基础上设计一种基于优化控制集的 MPFTC 方法。该方法通过优化控制集的选择,兼顾电压利用率与谐波抑制能力,有效降低转矩脉动与电流畸变。最后,通过搭建仿真模型验证所提方法在故障容错运行下的有效性与优越性。所提方法无需重构坐标变换矩阵或设计专用 SVPWM 查表,具备良好的工程可实现性。仿真结果验证了该方法在某一逆变器单相开路故障下的有效性与优越性。

1 INV1 中 A 相上桥臂开路故障的开绕组六相 PMSM 建模分析

本文研究对象为开绕组六相 PMSM 驱动系统。电机本体采用两套三相绕组,空间分布上相隔 60° 电角度,构成六相结构。通过将电机绕组的中性点打开,并分别接入电压源逆变器(INV1 和 INV2),形成双逆变器的馈电结构,保证了电机本身的结构和绕组分布均不变,其驱动系统拓扑

结构如图 1 所示。

电机某一逆变器单相上桥臂发生故障时,自然坐标系下电压和磁链方程可写为

$$\mathbf{U}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{I}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = \mathbf{L}_s \mathbf{I}_s + \boldsymbol{\lambda}_s \boldsymbol{\psi}_f \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U}_s = [u_A \ u_B \ u_C \ u_D \ u_E \ u_F]^T$; $\mathbf{I}_s = [i_A \ i_B \ i_C \ i_D \ i_E \ i_F]^T$; $\boldsymbol{\psi}_s = [\psi_A \ \psi_B \ \psi_C \ \psi_D \ \psi_E \ \psi_F]^T$; $\mathbf{R}_s = \text{diag} [R_s \ R_s \ R_s \ R_s \ R_s \ R_s]$; $\boldsymbol{\lambda}_s = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \pi) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{5\pi}{3}) \end{bmatrix}$; $\boldsymbol{\psi}_f$ 为转子永磁体磁链。

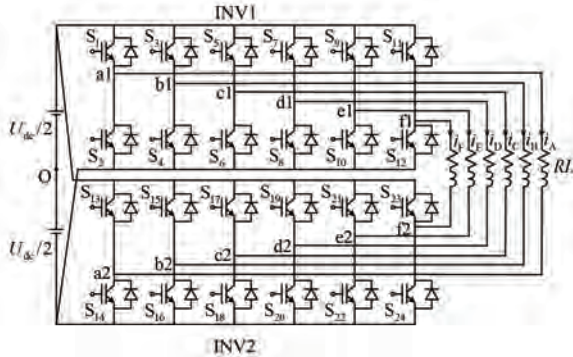


图 1 开绕组六相 PMSM 驱动系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of the open-end winding six-phase PMSM drive system

基波空间电压矢量 $\mathbf{u}_{\alpha\beta}$ 和谐波空间电压矢量 \mathbf{u}_{xy} 与逆变器 INV1 支路的开关函数 S_{a1} 、 S_{b1} 、 S_{c1} 、 S_{d1} 、 S_{e1} 、 S_{f1} 和逆变器 INV2 支路的开关函数 S_{a2} 、

S_{b2} 、 S_{c2} 、 S_{d2} 、 S_{e2} 、 S_{f2} 的关系式为

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta} = \frac{1}{3} U_{dc} [(S_{a1} - S_{a2}) + \alpha^1 (S_{b1} - S_{b2}) + \alpha^2 (S_{c1} - S_{c2}) + \alpha^3 (S_{d1} - S_{d2}) + \alpha^4 (S_{e1} - S_{e2}) + \alpha^5 (S_{f1} - S_{f2})] \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{xy} = \frac{1}{3} U_{dc} [(S_{a1} - S_{a2}) + \alpha^2 (S_{b1} - S_{b2}) + \alpha^4 (S_{c1} - S_{c2}) + \alpha^6 (S_{d1} - S_{d2}) + \alpha^8 (S_{e1} - S_{e2}) + \alpha^{10} (S_{f1} - S_{f2})] \quad (4)$$

式中: U_{dc} 为直流母线电压; $\alpha = \exp(j\pi/3)$ 为六相系统中的旋转算子。

在逆变器支路中,当上桥臂开关导通时,开关函数为 1;当下桥臂开关导通时,开关函数为 0。基于开关函数,电机电压矢量在基波和谐波空间的坐标可通过 VSD 方法计算得到,如式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos\theta & \cos(2\theta) & \cos(3\theta) & \cos(4\theta) & \cos(5\theta) \\ 0 & \sin\theta & \sin(2\theta) & \sin(3\theta) & \sin(4\theta) & \sin(5\theta) \\ 1 & \cos(2\theta) & \cos(4\theta) & \cos(6\theta) & \cos(8\theta) & \cos(10\theta) \\ 0 & \sin(2\theta) & \sin(4\theta) & \sin(6\theta) & \sin(8\theta) & \sin(10\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_D \\ u_E \\ u_F \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\theta = \pi/3$; u_α 、 u_β 分别为基波空间 α 、 β 轴上的电压幅值; u_x 、 u_y 分别为谐波空间 x 、 y 轴上的电压幅值。

当 INV1 中 A 相上桥臂 a1 发生开路故障时,开关函数 S_{a1} 为 0。由式(3)~(5)可以推导出开绕组六相 PMSM 系统在 a1 故障时产生的 2 048 个矢量的空间分布,根据在 α - β 空间的电压幅值 $U_{m\alpha\beta}$ 和 x - y 空间的电压幅值 U_{mxy} ,将电压矢量分为 8 组: $G_1(0.333 \ 3U_{dc})$ 、 $G_2(0.577 \ 4U_{dc})$ 、 $G_3(0.666 \ 7U_{dc})$ 、 $G_4(0.881 \ 9U_{dc})$ 、 $G_5(U_{dc})$ 、 $G_6(1.154 \ 7U_{dc})$ 、 $G_7(1.201 \ 9U_{dc})$ 和 $G_8(1.333 \ 3U_{dc})$ 。a1 故障时的电压矢量空间分布如图 2 所示。

2 控制集选取

为了提升容错运行状态下 U_{dc} 的利用率,首先分析 G_6 组矢量,如图 2(a)所示,该控制集在 α - β 基波子空间中的分布存在扇区间隙,导致可合成电压矢量范围受限。鉴于开绕组六相 PMSM 系统具有 4 096 种开关状态和丰富的电压矢量拓扑结构,理论上具备通过虚拟矢量合成技术扩展有效电压输出能力的潜力。

为进一步完善控制集,针对控制集中缺失的两个关键方向电压矢量,本文尝试从候选非零电

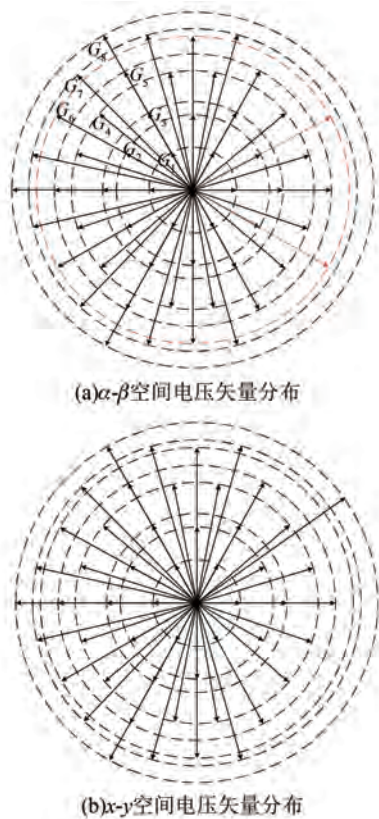


图 2 a1 故障时的电压矢量空间分布图

Fig. 2 Voltage vector space distribution diagram under a1 fault

压矢量中选取任意两个基本矢量进行线性组合, 以构造相应的目标虚拟矢量。合成过程遵循伏秒平衡原则, 合成矢量必须位于所选基本矢量所构成的凸包内部, 才能被非负系数线性合成。然而由于 G_5 组候选集中缺少高幅值或特定方向的矢量, 其凸包范围无法包围目标虚拟矢量, 导致无法通过传统虚拟矢量合成法去合成目标虚拟矢量, 这一局限性如图 3 所示。

由图 3 可知, 候选集中任意两个矢量按照伏秒平衡原则合成的最大矢量受限于凸包范围, 均无法覆盖目标虚拟矢量, 因此后续将对 G_5 组矢量进行分析。

a1 故障后开绕组六相 PMSM 系统的 G_5 组电压矢量包含 60 个有效矢量, 其中 $U_{mxy} = 0.333 3U_{dc}$ 的矢量有 36 个, $U_{mxy} = 0.577 4U_{dc}$ 的矢量有 24 个。以最小谐波为目的, 主要分析 $U_{mxy} = 0.333 3U_{dc}$ 的 36 个电压矢量。每个电压矢量由两个逆变器的 12 个开关状态 $[S_{a1} S_{b1} S_{c1} S_{d1} S_{e1} S_{f1} S_{a2} S_{b2} S_{c2} S_{d2} S_{e2} S_{f2}]$ 来确定。开绕组六相 PMSM

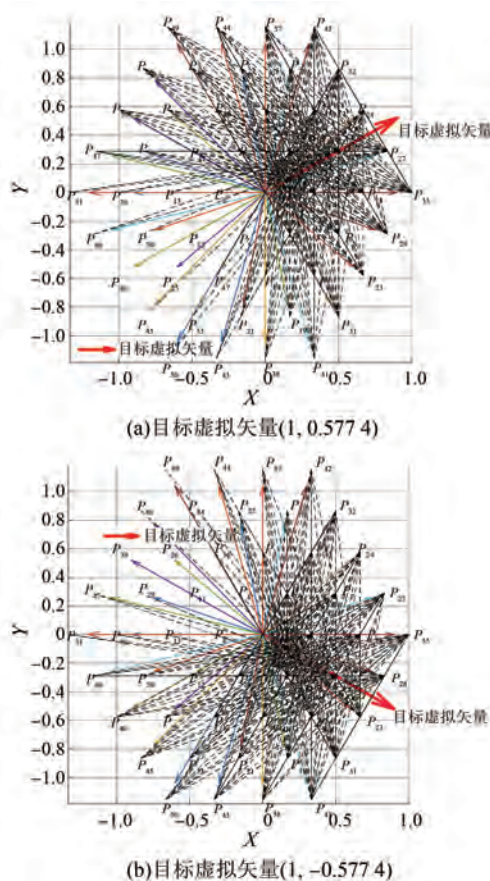


图 3 目标虚拟矢量合成分析图

Fig. 3 Analysis diagram of target virtual vector synthesis
 的逆变器共有 4 096 个开关状态, 通过开关组合可以得到 4 096 个电压矢量, 按照开关顺序将 12 位二进制数组变为 4 位十进制数组来表示电压矢量。a1 故障后开绕组六相 PMSM 系统的 G_5 组电压矢量中 $U_{mxy} = 0.333 3U_{dc}$ 的分布如图 4 所示。

对 G_5 组电压矢量构成的原始候选控制集进行分析发现, 其包含大量高开关频率组合, 不仅导

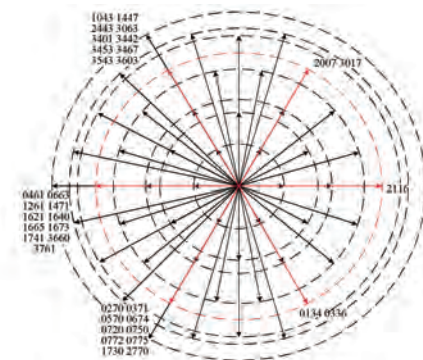


图 4 G_5 组电压矢量分布图

Fig. 4 Distribution diagram of G_5 group voltage vectors

致系统计算负担增加,且易激发谐波电流,引发显著的电流畸变和转矩脉动。因此需要对控制集进行筛选和重构,综合考虑电压矢量在子空间的分布特性、谐波抑制能力及开关损耗特性,引入 1 个零矢量(1111)以增强控制灵活性。通过遍历择优选取(1730)、(0134)、(2116)、(3017)、(3401)、(1621)和零矢量(1111)构成优化后的有限控制集。由于系统具有相间对称性,本文以 INV1 中 A 相上桥臂 a1 故障为代表展开讨论,其余 11 相上桥臂故障可依据相同原理类推。

3 a1 故障后开绕组六相 PMSM MPFTC

正常工况下,忽略磁饱和与交叉耦合效应,电机在同步旋转坐标系下的电压方程如式 6 所示:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega_e L_q i_q + \frac{d}{dt}(L_d i_d) \\ u_q = R_s i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f + \frac{d}{dt}(L_q i_q) \\ u_x = R_s i_x - \omega_e L_y i_y + \frac{d}{dt}(L_x i_x) \\ u_y = R_s i_y + \omega_e L_x i_x + \frac{d}{dt}(L_y i_y) \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_d, u_q 和 i_d, i_q 分别为同步旋转坐标系下 d, q 轴的电压分量和电流分量; u_x, u_y 和 i_x, i_y 分别为 $x-y$ 坐标系下的电压和电流分量; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感; L_x, L_y 分别为 x, y 轴电感; $\omega_e = p \cdot \omega_m$ 为电角速度, p 为极对数, ω_m 为机械角速度。

为便于数字实现,对式(6)进行一阶欧拉离散化,可得 $k+1$ 时刻的电流预测方程如式 7 所示:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = i_d(k) + \frac{T_s}{L_d} [u_d(k) - R_s i_d(k) + \omega_e(k) L_q i_q(k)] \\ i_q(k+1) = i_q(k) + \frac{T_s}{L_q} [u_q(k) - R_s i_q(k) - \omega_e(k) L_d i_d(k) - \omega_e(k) \psi_f] \\ i_x(k+1) = i_x(k) + \frac{T_s}{L_x} [u_x(k) - R_s i_x(k) + \omega_e(k) L_y i_y(k)] \\ i_y(k+1) = i_y(k) + \frac{T_s}{L_y} [u_y(k) - R_s i_y(k) - \omega_e(k) L_x i_x(k)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $i_d(k), i_q(k), i_x(k), i_y(k)$ 分别为当前采样周期 k 时刻 $d-q, x-y$ 轴的定子电流分量; $i_d(k+1), i_q(k+1), i_x(k+1), i_y(k+1)$ 分别为下一采样周期 $k+1$ 时刻的预测电流值; $u_d(k), u_q(k), u_x(k), u_y(k)$ 分别为当前时刻施加于各轴的定子电压分量; T_s 为控制系统采样周期; $\omega_e(k)$ 为 k 时刻的电角速度。

在数字控制系统中,由于电流采样、计算及 PWM 更新等环节,存在至少一个采样周期的延迟,若直接使用当前时刻 k 的电压矢量作用于 $k+1$ 时刻,将导致模型预测与实际系统响应不一致,降低控制性能。为此,需引入两步预测补偿机制。

具体而言,在 k 时刻进行优化时,首先基于候选电压矢量预测 $k+1$ 时刻的电流 $i(k+1|k)$,再以该预测值作为初始状态,施加同一电压矢量(或保持不变)预测 $k+2$ 时刻的电流 $i(k+2|k)$ 。最终,价值函数基于 $k+2$ 时刻的预测电流进行评估,从而等效补偿了一拍控制延时。 $k+2$ 时刻的电流预测如式 8 所示:

$$\begin{cases} i_d(k+2|k) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k+1) + \frac{L_q}{L_d} \omega_r T_s i_q(k+1) + \frac{T_s}{L_d} u_d(k+1) \\ i_q(k+2|k) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k+1) - \frac{L_d}{L_q} \omega_r T_s i_d(k+1) + \frac{T_s}{L_q} u_q(k+1) \\ i_x(k+2|k) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) i_x(k+1) + \frac{T_s}{L_s} u_x(k+1) \\ i_y(k+2|k) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) i_y(k+1) + \frac{T_s}{L_s} u_y(k+1) \end{cases} \quad (8)$$

模型预测电流控制通过最小化价值函数从有限电压矢量集中选取最优控制量。针对开绕组六相 PMSM,价值函数需同时反映 $d-q$ 轴转矩电流的跟踪性能和 $x-y$ 子空间谐波电流的抑制需求。在容错控制背景下,还需兼顾故障相电流重构后的平衡性。

当单相上桥臂发生开路故障时,本文采用加

权二次型价值函数, 如式 9 所示:

$$g = \omega_1 [i_d^*(k+2) - i_d(k+2|k)]^2 + \omega_2 [i_q^*(k+2) - i_q(k+2|k)]^2 + \omega_3 [i_x^*(k+2) - i_x(k+2|k)]^2 \quad (9)$$

式中: i_d^* 、 i_q^* 为给定参考电流, 通常由外环速度控制器生成; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权重系数, 取 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1$ 。

MPFTC 算法通过在每个采样时刻遍历逆变器所有开关状态, 利用系统当前状态预测未来输出, 并根据设计的价值函数选取最优开关组合, 实现对电力电子器件开关信号的直接控制。该算法核心特点是模型预测、滚动优化及反馈修正。a1 故障后基于优化控制集的开绕组六相 PMSM MPFTC 系统框图如图 5 所示。

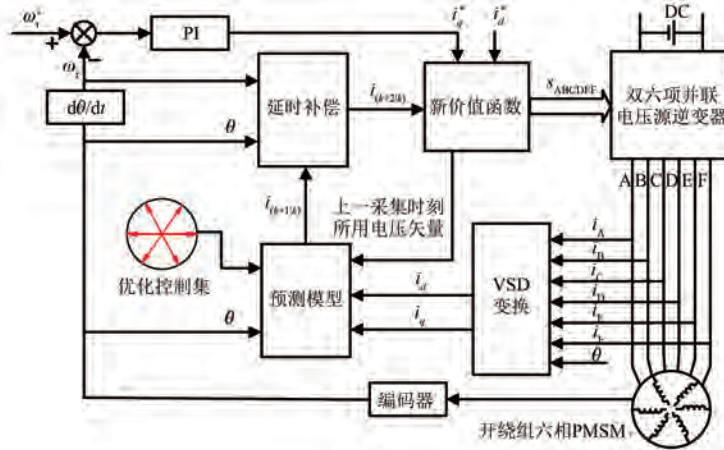


图 5 基于优化控制集的开绕组六相 PMSM MPFTC 系统框图

Fig. 5 Block diagram of the MPFTC system for an open-end winding six-phase PMSM based on the optimized control set

系统算法流程图如图 6 所示。在每个控制周期 k , 采集电机当前相电流 i_A 、 i_B 、 i_C 、 i_D 、 i_E 、 i_F 及转子位置 θ , 经 Clarke/Park 变换得到 d - q 与 x - y 子空间电流 $i_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 、 $i_x(k)$ 、 $i_y(k)$ 。外环速度控制器根据转速误差生成 i_q^* , 设 $i_d^* = 0$ 。在容错模式下, 参考电流保持不变, 由内环 MPC 自主调节非故障相电流以补偿故障影响。对优化控制集中每个候选电压矢量 (含 6 个非零矢量与 1 个零矢量) 进行两步滚动预测, 得到 $k+2$ 时刻的电流预测值。采用加权二次型价值函数 g , 遍历所有 j ($j=1, 2, \dots, 7$) 个候选矢量, 选取使 g 最小的最优电压矢量, 将其映射回对应的 12 位开关状态编码 $[S_{a1}, \dots, S_{a2}]$, 分别发送至 INV1 与 INV2 的驱动单元。系统进入 $k+1$ 周期, 重复上述流程, 实现滚动优化与闭环控制。

4 仿真分析

系统未发生故障时, 选用 G_8 组矢量作为控制集。根据理论计算, 电机正常运行时, 电压利用率为 0.666 7; 而在故障运行后, 采用优化后的 G_5 控

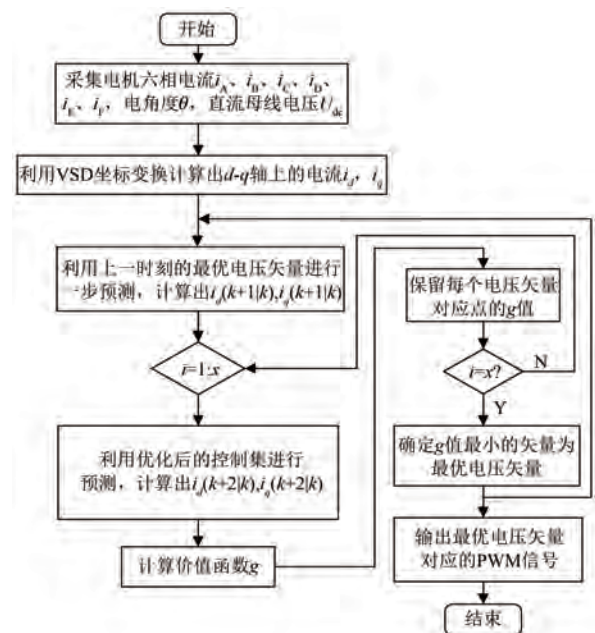


图 6 基于优化控制集的开绕组六相 PMSM MPFTC 算法流程图

Fig. 6 Flowchart of the MPFTC algorithm for an open-end winding six-phase PMSM based on the optimized control set

制集电压利用率为 0.5,故障后电压利用率降低了 16.8%。为了验证本文所提 MPFTC 方法的有效性,进行了仿真研究。

在仿真环境中,系统初始阶段保持正常运行状态。在仿真过程中, $t=0.4\text{ s}$ 时 A 相上桥臂发生开路故障。仿真系统参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

Tab. 1 Simulation system parameters

参数名称	参数值
相电阻 R_s/Ω	0.5
直轴电感 L_d/mH	2.45
交轴电感 L_q/mH	2.45
漏电感 L_σ/mH	5
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.059
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.005
极对数 p	5
额定转矩 $T_n/(\text{N}\cdot\text{m})$	20
直流电压/V	200
K_p	0.1
K_i	3

基于传统 MPC 方法,全程选用 G_8 组矢量作为控制集,仿真结果如图 7 所示。

由图 7(a)、(b)可知,基于传统 MPC 方法的 B 相电流出现剧烈振荡,并伴随明显的波形畸变与方向反转,导致严重的电流失真;对故障后的 B 相电流波形进行傅里叶分析可得,故障后电流的总谐波失真(Total Harmonic Distortion, THD)为 50.54%。由图 7(c)可知,基于传统的 MPC 方法(G_8 控制集)由于 A 相上桥臂故障后导致部分基本电压矢量无法正常输出,电磁转矩出现 $\pm 50\text{ N}\cdot\text{m}$ 并伴随 50 Hz 的大幅度周期性振荡。

本文所提基于优化控制集 MPFTC 方法的仿真结果如图 8 所示。其中,正常状态采用 G_8 控制集,故障后切换至优化的 G_5 控制集。

由图 8(a)、(b)可知,本文所提基于优化控制集的 MPFTC 方法在 A 相上桥臂故障后,B 相电流仅在故障初始阶段出现轻微波动,经调节后,电流波形迅速恢复正常。对故障后的 B 相电流进行傅里叶分析,得到电流 THD 为 5.96%。故障后采用本文所提优化控制集的 MPFTC 方法使得零序电流降低,二次谐波得到了显著的抑制,证明了所

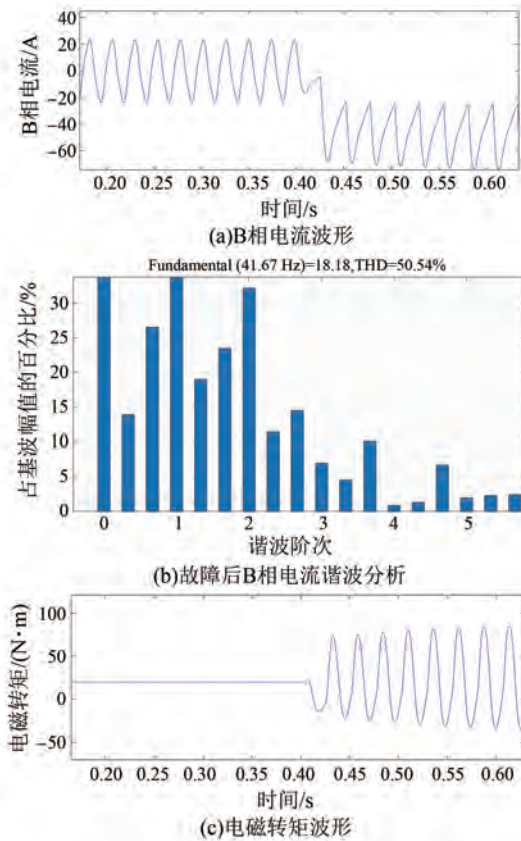


图 7 基于传统 MPC 方法(G_8 控制集)的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms based on the conventional MPC method (G_8 control set)

提方法的有效性。由图 8(c)可知,尽管在故障发生瞬间,转矩出现 $1\text{ N}\cdot\text{m}$ 的短暂跌落,但系统在 10 ms 内迅速恢复到给定值,并在整个后续运行过程中保持稳定。仿真结果证明了本文所提基于优化控制集的 MPFTC 方法的有效性。

5 结语

(1)理论分析和仿真结果表明,本文所提基于优化控制集的 MPFTC 方法在单相上桥臂故障后,相电流和电磁转矩仅在故障发生瞬间产生了短时波动。系统稳定后,电流 THD 和电磁转矩波动均能恢复至接近故障前的水平,证明本文所提方法的有效性。

(2)故障后为了保持电压矢量集的凸包性,选择 G_5 控制集,和正常状态下的 G_8 控制集相比,电压利用率降低了 16.8%,导致开绕组六相 PMSM 可能无法达到电机原来的最高转速,但确保了系统的稳定运行。

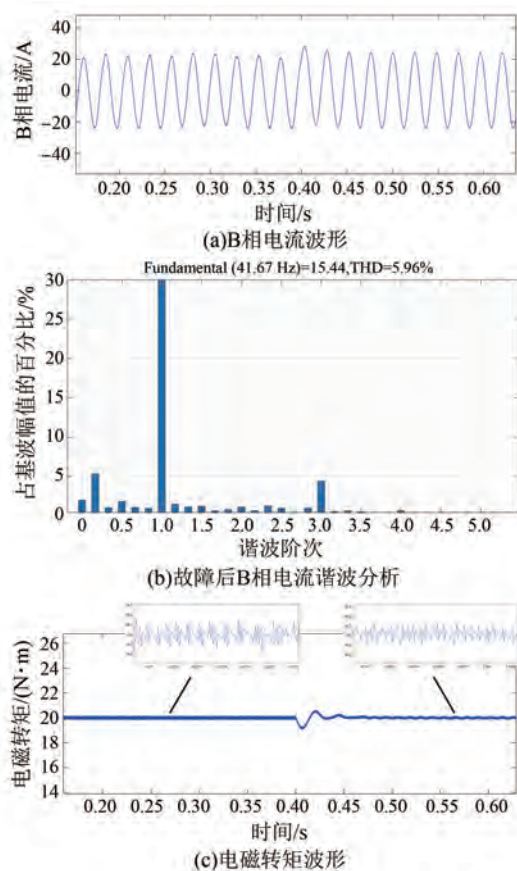


图 8 基于本文所提优化控制集 MPFTC 方法的仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of the MPFTC method based on the proposed optimization control set

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

陈慧莹进行了方案设计、内容总结与论文撰写, 张志锋参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summarization, and paper writing were conducted by Chen Huiying, while the paper review and modification were participated in by Zhang Zhifeng. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Tang R Y. Theory and design of modern permanent magnet machines [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [2] 杨耕, 罗应立. 电机与运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Yang G, Luo Y L. Electric machines and motion control systems [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [3] 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 Z C, Li Y D, Zheng Z D. Control and drive techniques for multi-phase machines: A Review [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 17-29.
- [4] 高思宇. 永磁同步电机模型预测控制参数鲁棒及预测结构优化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
Gao S Y. Research on parameter robustness and prediction structure optimization of model predictive control for permanent magnet synchronous motors [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [5] 于佳正. 开绕组六相永磁同步电机模型预测控制研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
Yu J Z. Research on model predictive control of open-end winding six-phase permanent magnet synchronous motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [6] 杨富阳. 六相永磁同步电机模型预测控制策略的研究[D]. 福州: 福州大学, 2023.
Yang F Y. Research on model predictive control strategy for six phase permanent magnet synchronous motor [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2023.
- [7] 刘成. 共母线型开绕组永磁同步电机的模型预测电流控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
Liu C. Research on model predictive current control of open-end winding permanent magnet synchronous motors with common bus [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [8] 姜春阳. 五相开绕组永磁同步电机驱动系统谐波电流抑制和容错控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈

- 尔滨工业大学, 2023.
- Jiang C Y. Harmonic current suppression and fault-tolerant control for five-phase open-end winding PMSM drive systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [9] 杜育轩. 开绕组五相永磁电机驱动系统低损耗容错控制策略[D]. 镇江: 江苏大学, 2024.
- Du Y X. Low-loss fault-tolerant control strategy for open-end winding five-phase permanent magnet motor drive systems [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024.
- [10] 崔佳. 双三相永磁电机高性能模型预测控制及其容错应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- Cui J. High-performance model predictive control and fault-tolerant application research for dual three-phase permanent magnet motor [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.
- [11] 牛峰, 刘龙, 黄少坡, 等. 基于多目标优化的永磁同步电机容错控制研究[J]. 河北工业大学学报, 2023, 52(6): 24-31.
- Niu F, Liu L, Huang S P, et al. Research on fault-tolerant control of permanent magnet synchronous motor based on multi-objective optimization [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2023, 52(6): 24-31.
- [12] 王涛, 王爱元, 孙健, 等. 两相开路六相永磁同步电机的容错控制研究[J]. 微电机, 2019, 52(8): 83-89.
- Wang T, Wang A Y, Sun J, et al. Research on fault-tolerant control of six-phase PMSM with two-open-phase [J]. Micromotors, 2019, 52(8): 83-89.
- [13] 白秉旭, 胡勤丰. 逆变器并联驱动永磁同步电机容错控制研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(8): 24-32+55.
- Bai B X, Hu Q F. Research on fault-tolerant control of permanent magnet synchronous motor driven by paralleled-inverter [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(8): 24-32+55.
- [14] 方敏, 周新秀, 刘刚. 三相永磁同步电机断相容错控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 2972-2981.
- Fang M, Zhou X X, Liu G. Fault-tolerant control strategy for three-phase permanent magnet synchronous motor in case of one phase open-circuit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 2972-2981.
- [15] 王永兴, 温旭辉, 赵峰. 六相永磁同步电机缺相容错控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 49-58.
- Wang Y X, Wen X H, Zhao F. The fault-tolerant control for six-phase permanent magnet synchronous machines with one phase failure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 49-58.
- [16] 杨狂彪, 陈鼎新, 石坚. 低复杂度永磁同步电机双矢量模型预测控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 87-96.
- Yang K B, Chen D X, Shi J. Low complexity dual vector model predictive control strategy for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 87-96.
- [17] 徐家扬. 基于模型预测的OW-PMSM逆变器开路故障容错控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- Xu J Y. Research on fault tolerant control of ow-PMSM inverter with open circuit fault based on model prediction method [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [18] 候增全. 六相永磁同步电机驱动系统故障诊断及容错控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- Hou Z Q. Fault diagnosis and fault-tolerant control of six-phase permanent magnet synchronous motor drive system [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.
- [19] 郭宝双. 六相永磁同步电机谐波电流抑制研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2021.
- Guo B S. Harmonic current suppression of six-phase permanent magnet synchronous motor [D]. Shanghai: Shanghai Dianji University, 2021.
- [20] 周符. 基于模型预测控制的永磁同步电机两相四开关容错控制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- Zhou F. Two-phase four-switch fault-tolerant control of permanent magnet synchronous motor based on model predictive control [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [21] 张奎. 永磁同步电机模型预测控制矢量切换方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- Zhang K. Research on model predictive control vector switching method for permanent magnet synchronous motor [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [22] 安一凡, 储剑波, 唐旭. 基于参考电流斜率的永磁同步电机三矢量模型预测电流控制[J]. 电机

- 与控制应用, 2023, 50(11): 22-29+73.
- An Y F, Chu J B, Tang X. Three-vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on reference current slope [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(11): 22-29+73.
- [23] 王德顺, 王开毅, 吕广宪, 等. 基于拓展矢量集的永磁同步电机模型预测控制[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(10): 9-16.
- Wang D S, Wang K Y, Lyu G X, et al. Model predictive control of permanent magnet synchronous motor based on extended vector set [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(10): 9-16.
- [24] 高一唱, 姚钢, 周荔丹, 等. 多相开路故障下的双三相 PMSM 统一容错控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(11): 94-102.
- Gao Y C, Yao G, Zhou L D, et al. Unified fault-tolerant control strategy of dual three-phase PMSM under multi-phase open-circuit faults [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(11): 94-102.
- [25] 李超男. 双三相永磁同步电机缺相容错控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- Li C N. Research on fault-tolerant control strategy for dual three-phase permanent magnet synchronous motor under open-phase fault [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [26] 郑冬霞, 刘咏莹. 绕组开路故障下的双三相永磁同步电机容错控制[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(5): 28-32+38.
- Zheng D X, Liu Y X. Fault-tolerant control of dual three-phase permanent magnet synchronous motors under open winding faults [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(5): 28-32+38.
- [27] 袁雷, 程剑波, 徐岸非, 等. 双三相永磁同步电机两相开路谐波抑制矢量容错控制[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(18): 5945-5958.
- Yuan L, Cheng J B, Xu A F, et al. Vector fault-tolerant control with harmonic suppression for dual three-phase permanent magnet synchronous motor under two-phase open-circuit conditions [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(18): 5945-5958.
- [28] 马超群. 双三相永磁同步电机直接转矩控制及容错控制研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- Ma C Q. Research on direct torque control and fault-tolerant control of dual three-phase permanent magnet synchronous motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [29] Wu L J, Yi J L, Hu S D, et al. Fault-tolerant operation for five-phase permanent magnet synchronous machine drives with five-phase six-leg inverter [J]. *IET Electric Power Applications*, 2024, 18(5): 489-502.
- [30] Zhou C P, Zhong R D, Sun G D, et al. Fault-tolerant direct torque control of five-phase permanent magnet synchronous motor under single open-phase fault based on virtual vectors [J]. *Energies*, 2024, 17(11): 2660.
- [31] 王凌波, 闫震, 周扬忠. 五相永磁同步电机缺两相容错型直接转矩控制[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(10): 58-65.
- Wang L B, Yan Z, Zhou Y Z. Fault tolerant direct torque control for five-phase permanent magnet synchronous motor under two-phase open circuit [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(10): 58-65.
- [32] Zeglache A, Mekki H, Benkhoris F M, et al. Robust fault-tolerant control of a five-phase permanent magnet synchronous motor under an open-circuit fault [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(12): 5190.

收稿日期:2025-11-14

收到修改稿日期:2025-12-19

作者简介:

陈慧莹(1998—),女,硕士研究生,研究方向为开绕组六相永磁同步电机容错控制,17861529773@163.com;

*通信作者:陈慧莹(1998—),女,硕士研究生,研究方向为开绕组六相永磁同步电机容错控制,17861529773@163.com。