

王坤, 肖劲松, 叶韩, 等. 永磁同步电机匝间短路故障建模与分析[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(3): 121-127. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 24052201

永磁同步电机匝间短路故障建模与分析

王坤, 肖劲松, 叶韩, 农高海
(百色学院 信息工程学院, 广西 百色 533000)

摘要: 为能有效获取永磁同步电机发生匝间短路故障时的故障信息, 基于 dq 坐标系对匝间短路故障下的 PMSM 模型进行了推导, 并利用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型。采用 $id=0$ 的矢量控制策略, 其中包括转速环 PI 控制器、电流环 PI 控制器和 SVPWM 调制系统。仿真结果表明, 文中所搭建的仿真模型结果与理论分析结果一致, 且具有较好的精度和仿真效果, 能为 PMSM 匝间短路故障的相关研究提供模型基础和数据来源。

关键词: 永磁同步电机; 匝间短路故障; 矢量控制

中图分类号: TM306

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)03-0121-07

Modeling and analysis of inter-turn short circuit fault in Permanent Magnet Synchronous Motor

WANG Kun, XIAO Jinsong, YE Han, NONG Gaohai

(School of Information Engineering, Baise University, Baise 533000, Guangxi, China)

Abstract: In order to effectively obtain the fault information of the permanent magnet synchronous motor when a inter-turn short circuit fault occurs, the PMSM model under the inter-turn short circuit fault is derived based on the dq coordinate system, and the simulation model is built using Matlab/Simulink. The vector control strategy with $id=0$ is adopted, which includes the speed loop PI controller, the current loop PI controller and the SVPWM modulation system. The simulation results show that the simulation model results built in this paper are consistent with the theoretical analysis results, and have good accuracy and simulation effect, which can provide a model basis and data source for the relevant research on PMSM inter-turn short circuit fault.

Key words: Permanent Magnet Synchronous Motor; inter-turn short circuit fault; vector control

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 因其高功率密度、高效率、结构简单及运行可靠等优点, 被广泛应用于电动汽车、航空航天、工业机器人等领域^[1-3]。然而, PMSM 在运行过程中, 由于振动、高温、潮湿、粉尘等复杂环境, 以及频繁的启停、加速、减速等因素^[4-5], 易致使电机发生故障, 尤其是定子匝间短路故障; 在电机的故障类型中, 定子匝间短路故障占比高达 38%^[6]。该故障不仅会引起绕组温度升高, 进而导致绝缘失效, 甚至

可能引发更严重的机械和电气问题, 威胁电机的安全运行和使用寿命^[7-9]。因此, 对 PMSM 匝间短路故障的有效检测和诊断具有重要的实际意义和研究价值。

然而对于开展 PMSM 匝间短路故障的诊断工作, 往往需要搭建一个合理、可行的电机故障平台。但在多数情况下, 实际的物理平台不便于直接测量故障信息, 而通过建模仿真的形式却能极为方便地获取。当前, 电机建模的方式主要有基于 Matlab/Simulink^[10-11] 和有限元分析^[12-13] 等方式, 而前者因其能够很好地进行控制策略的设计, 被大多数学者

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2025KY0772, 2024KY0755); 2022 年度广西高等教育本科教学改革工程项目 (2022JGA327); 百色学院人才引进科研启动经费项目 (DC2300001741)。

作者简介: 王坤 (1994—), 男, 讲师, 主要研究方向: 人工智能与智能计算, 电机控制技术等; 叶韩 (1992—), 女, 讲师, 主要研究方向: 机器学习算法, 信息与通信技术等; 农高海 (1973—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 电子学, 计算机控制技术等。

通信作者: 肖劲松 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 计算机技术, 风力发电技术等。Email: wk2020beyond@163.com。

收稿日期: 2024-05-22

采用。文献[14]中建立了完整的匝间故障模型,但其未能考虑到故障后绕组对称性被破坏,中性点电压不再为零的问题,同时忽略了故障时重要的 3 次谐波分量,使得所建立模型的精度不高,对于微弱故障下的诊断研究并不适用。文献[15-16]建立了 A 相绕组故障下的 PMSM 匝间短路故障模型,但其是在自然坐标系 abc 下搭建的模型,使得变量的解耦和仿真模型的设计变得困难。文献[17]建立 dq 坐标系下的匝间故障模型,但仅给出了故障下的电压方程,却未给出短路电流等计算方式。

鉴于上述研究所构建模型的不足,文中基于 dq 坐标系对 PMSM 发生匝间短路故障时的数学模型进行了推导和仿真模型的搭建。在 dq 坐标系下的电机模型能够实现定子电流和转矩的解耦,从而简化故障分析和控制策略的设计,可以更直观地揭示匝间短路故障对电机运行性能的影响。同时,文中结合 Matlab/Simulink 仿真平台,搭建了带有匝间短路故障的 PMSM 的仿真模型。通过对正常状态和故障状态下电机性能的对比分析,文中模型不仅能够准确模拟 PMSM 在匝间短路故障时的电流和转矩特性,同时验证了所提出模型的有效性和准确性。

综上所述,本文的研究内容主要包括以下几个方面:首先,详细推导了在 dq 坐标系下 PMSM 匝间短路故障状态下的数学模型,并能通过参数调整模拟匝间短路故障的不同程度;其次,采用矢量控制策略对电机进行仿真,分析故障前后电机的运行特性;最后,通过实验验证模型的准确性和实用性,可为 PMSM 的故障诊断和容错控制等提供模型基础和数据支撑。

1 PMSM 数学模型

永磁同步电机的数学模型主要由定子电压方程、磁链方程、电磁转矩方程和运动方程组成。通常情况下,为了更好地实现解耦和控制器的设计,将自然坐标系 abc 下的 PMSM 模型经 Park 变换到同步坐标系 dq 下。在同步坐标系 dq 下的定子电压方程为^[18-19]:

$$\begin{cases} \dot{u}_d = R i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_e \psi_q \\ \dot{u}_q = R i_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

其中, $u_d, u_q, i_d, i_q, \psi_d, \psi_q, L_d, L_q$ 分别表示 d 轴和 q 轴的电压、电流、磁链和电感, ω_e, ψ_f 分别表示电角速度和永磁体磁链。电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (3)$$

运动方程为:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (4)$$

其中, $n_p, \omega_m, T_e, T_L, J, B$ 分别表示极对数、机械角速度、电磁转矩、负载转矩、转动惯量和阻尼系数。

2 匝间短路故障下的 PMSM 数学模型

不失一般性,文中假设 PMSM 的 A 相定子绕组发生匝间电路故障,故障后的绕组情况如图 1 所示。故障后, A 相绕组等效为增加一个故障回路,故障电阻 R_f 将绕组分为故障部分 a_1 和正常部分 a_2 , a_1 由于短路故障出现短路电流 i_f , 而 a_2 为正常电流 i_a 流过。

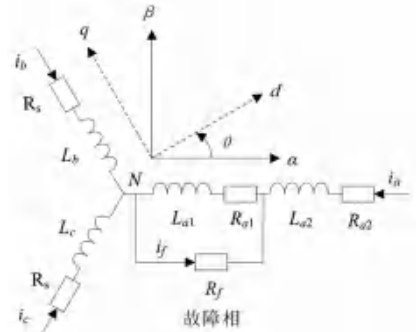


图 1 PMSM 匝间短路故障模型

Fig. 1 PMSM turn-to-turn short circuit fault model

文中引入参数 μ 表示短路匝数与电机总匝数的比值,用于体现故障的程度。当 PMSM 发生匝间短路后,由于短路回路的增加,绕组的对称性遭到破坏,进而使得三相电压和电流不再对称,从而致使电机中性点 N 的电压不再为零,需要单独列写而不能忽略。为此,根据故障模型可得到 PMSM 匝间故障下的数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \\ \dot{u}_c \\ 0 \end{cases} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \mu R_s \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ \mu R_s & 0 & 0 & \mu R_s + R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \\ \dot{u}_c \\ \dot{u}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\psi}_a \\ \dot{\psi}_b \\ \dot{\psi}_c \\ \dot{\psi}_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c, \psi_a, \psi_b, \psi_c$ 分别表示三相电压、电流和磁链; L_{AA}, L_{BB}, L_{CC} 表示三相绕组自感; M_{AB}, M_{BC}, M_{AC} 为互感; u_n 为中性点电压。

将式(5)第一行、第四行展开可以得到:

$$\begin{cases} u_a = R_s i_a + \mu R_s i_f + \frac{d}{dt}(L_{AA} i_a + M_{AB} i_b + M_{AC} i_c + \mu L_{AA} i_f + \psi_a) + u_n \\ 0 = \mu R_s i_a + (\mu R_s + R_f) i_f + \frac{d}{dt}(\mu L_{AA} i_a + \mu M_{AB} i_b + \mu M_{AC} i_c + \mu^2 L_{AA} i_f + \mu \psi_a) \end{cases} \quad (6)$$

进行配项可得:

$$\begin{aligned} 0 = \mu R_s i_a + (\mu R_s + R_f) i_f + \frac{d}{dt}(\mu L_{AA} i_a + \mu M_{AB} i_b + \mu M_{AC} i_c + \mu^2 L_{AA} i_f + \mu \psi_a) = (\mu R_s + R_f - \mu^2 R_s) i_f + \mu [R_s i_a + \mu R_s i_f + \frac{d}{dt}(L_{AA} i_a + M_{AB} i_b + M_{AC} i_c + \mu L_{AA} i_f + \psi_a)] = [\mu(1 - \mu)R_s + R_f] i_f + \mu(u_a - u_n) \end{aligned} \quad (7)$$

由此可得到故障电流 i_f 的计算式为:

$$i_f = -\frac{\mu(u_a - u_n)}{\mu(1 - \mu)R_s + R_f} \quad (8)$$

由于故障回路的增加, Park 变换矩阵修改为^[20]:

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & 0 \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{3}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其逆矩阵为:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 & 0 \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & 1 & 0 \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于绕组对称性被破坏, 永磁体磁链的三次谐波需进行考虑, 表达式为:

$$\begin{cases} \psi_a = \psi_f \cos \theta + \psi_{3h} \cos 3\theta \\ \psi_b = \psi_f \cos(\theta - 2\pi/3) + \psi_{3h} \cos 3\theta \\ \psi_c = \psi_f \cos(\theta + 2\pi/3) + \psi_{3h} \cos 3\theta \end{cases} \quad (11)$$

将式(9)~(10)代入到式(5)中, 可得到 dq 坐标系下 PMSM 匝间故障的数学模型:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} L_d i_d - \omega L_q i_q + \omega \psi_f - \frac{2}{3} \mu R_s i_f \cos \theta - \frac{2}{3} \omega \mu L_d i_f \sin \theta + \frac{2}{3} \mu L_q i_f \sin \theta \\ u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} L_q i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f - \frac{2}{3} \mu R_s i_f \sin \theta - \frac{2}{3} \omega \mu L_q i_f \cos \theta - \frac{2}{3} \mu L_d i_f \cos \theta \\ u_n = -\frac{1}{3} \mu R_s i_f - \frac{1}{3} \mu L_0 \frac{d}{dt} i_f + 3\omega \psi_{3h} \sin 3\theta \\ 0 = -\omega \mu \psi_f \sin \theta + \mu L_d \frac{d}{dt} i_d \cos \theta - \omega \mu L_d i_d \sin \theta - \mu L_q \frac{d}{dt} i_q \sin \theta - \omega \mu L_q i_q \cos \theta + \frac{2}{3} \mu^2 L_{AA} \frac{d}{dt} i_f + \mu R_s i_d \cos \theta - \mu R_s i_q \sin \theta + (\mu R_s + R_f) i_f \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{cases} L_d = L_{AA} \cos^2 \theta + L_{BB} \sin^2 \theta + L_{CC} \sin^2 \theta + \mu^2 L_{AA} \\ L_q = L_{AA} \sin^2 \theta + L_{BB} \cos^2 \theta + L_{CC} \cos^2 \theta + \mu^2 L_{AA} \\ L_0 = L_{AA} + L_{BB} + L_{CC} \end{cases} \quad (13)$$

经整理后得:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} L_d i_d - \omega L_q i_q + \omega \psi_f - \frac{2}{3} \mu R_s i_f \cos \theta - \frac{2}{3} \omega \mu L_d i_f \sin \theta + \frac{2}{3} \mu L_q i_f \sin \theta \\ u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} L_q i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f - \frac{2}{3} \mu R_s i_f \sin \theta - \frac{2}{3} \omega \mu L_q i_f \cos \theta - \frac{2}{3} \mu L_d i_f \cos \theta \\ u_n = -\frac{1}{3} \mu R_s i_f - \frac{1}{3} \mu L_0 \frac{d}{dt} i_f + 3\omega \psi_{3h} \sin 3\theta \\ 0 = -\omega \mu \psi_f \sin \theta + \mu L_d \frac{d}{dt} i_d \cos \theta - \omega \mu L_d i_d \sin \theta - \mu L_q \frac{d}{dt} i_q \sin \theta - \omega \mu L_q i_q \cos \theta + \frac{2}{3} \mu^2 L_{AA} \frac{d}{dt} i_f + \mu R_s i_d \cos \theta - \mu R_s i_q \sin \theta + (\mu R_s + R_f) i_f \end{cases} \quad (14)$$

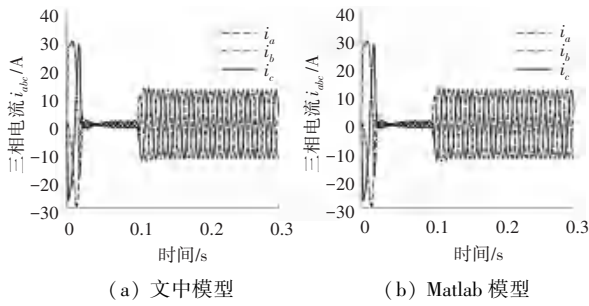


图3 无故障状态下电流对比图

Fig. 3 Comparison chart of current under fault-free condition

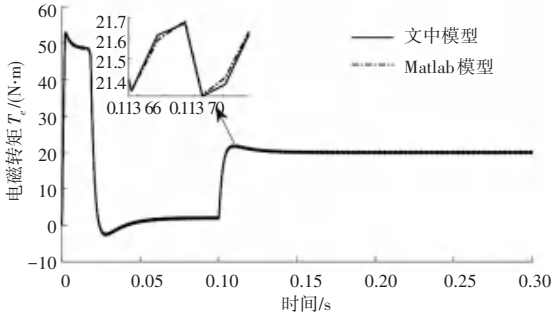


图4 无故障状态下电磁转矩对比图

Fig. 4 Comparison chart of electromagnetic torque under fault-free condition

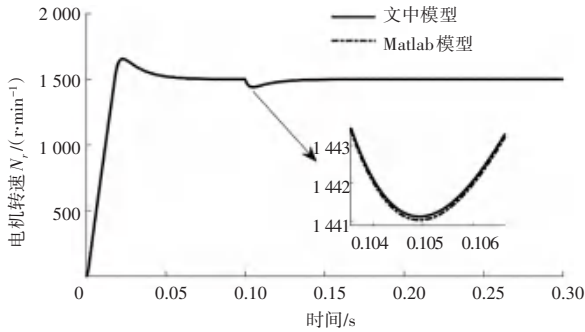


图5 无故障状态下转速对比图

Fig. 5 Comparison chart of speed under fault-free condition

由图3可知,在无故障情况下,文中构建的模型与Matlab自带封装模型三相定子电流响应几乎完全一致,都能在控制系统下保持正弦波形变化,没有出现突变和较严重的波纹现象。结合图4的电磁转矩响应可以看到,系统启动后很快就能达到给定转矩,在0.1s时阶跃至给定值 $20\text{ N}\cdot\text{m}$,且响应迅速、超调较小,文中模型与Matlab封装模型几乎一致。从图5的转速跟踪情况可以看到,文中模型和Matlab模型都能很好地跟踪给定转速,响应迅速,二者几乎一致。综合来看,文中模型的电流、电磁转矩和转速变化曲线都能很好地反应PMSM正常运行时的特性,且与Matlab自带模型的响应非常接近,二者间误差非常小。由此可以表明,文中所构建的PMSM模型的是正确、合理的,且精度是符合要求的。

3.3 有故障状态仿真

设置故障程度参数 $\mu = 0.2$,故障电阻 R_f 为 $0.5\ \Omega$,在0.4s时PMSM发生匝间短路故障。仿真结果如图6~图9所示。

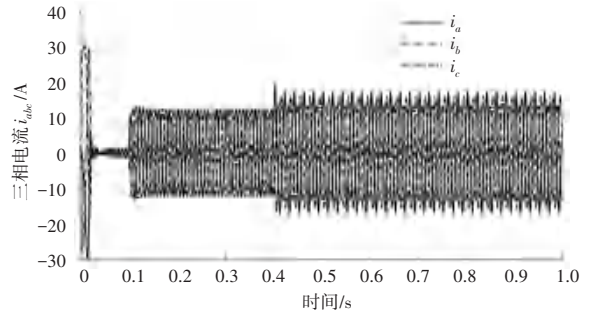


图6 故障状态($\mu=0.2$)下电流响应图

Fig. 6 Current response diagram under fault condition ($\mu=0.2$)

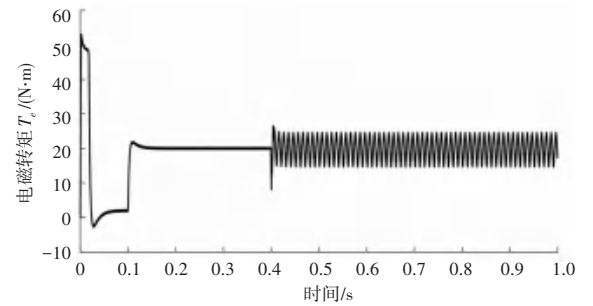


图7 故障状态($\mu=0.2$)下电磁转矩响应图

Fig. 7 Electromagnetic torque response diagram under fault condition ($\mu=0.2$)

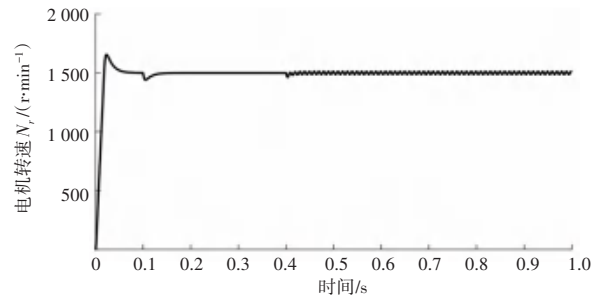


图8 故障状态($\mu=0.2$)下转速响应图

Fig. 8 Speed response diagram under fault condition ($\mu=0.2$)

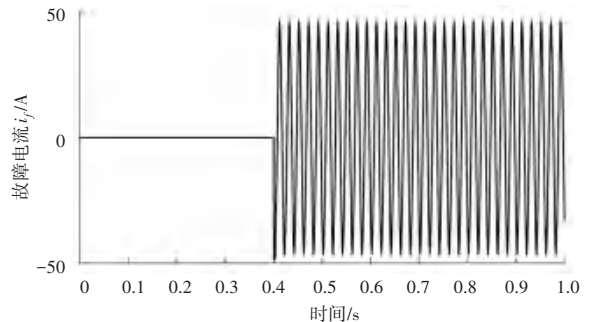


图9 故障状态($\mu=0.2$)下故障电流 i_f 响应图

Fig. 9 Fault current i_f response diagram under fault condition ($\mu=0.2$)

由图6的电流响应可以看到,当系统启动后能较快地运行至稳态,0.4 s前未发生故障,三相电流波形保持对称,波形平稳;0.4 s时A相绕组开始发生匝间短路故障,电流对称性被打破,此时回路中故障电流 i_f 不再为0,致使a相电流 i_a 增加最大,其次为 i_c , i_b 相对增加最少。图7中在故障发生后,电磁转矩开始出现震荡,尤其是在刚发生匝间故障时,振幅最大。从图8的转速响应来看,在故障发生前能很好地跟踪给定转速,且非常平稳,当0.4 s时发生匝间短路故障,转速开始出现波动。图9中故障电流 i_f 的值在 $[-46,46]$ 之间波动,可见由于匝间短路的发生,出现较大的故障电流 i_f 。 i_f 实际工况下往往不能直接测量,而通过建模仿真能够较好地获取。

对正常和故障下的a相电流 i_a 进行快速傅里叶分析(FFT),结果如图10所示。从图10中可以发现,PMSM发生故障后,a相电流中3次谐波明显增加,也出现了少量5次谐波分量,与理论分析一致。同时总谐波失真(THD)较正常情况增加了4.79%,故障特征明显,在进行故障诊断时,可以利用该特征进行有效诊断。

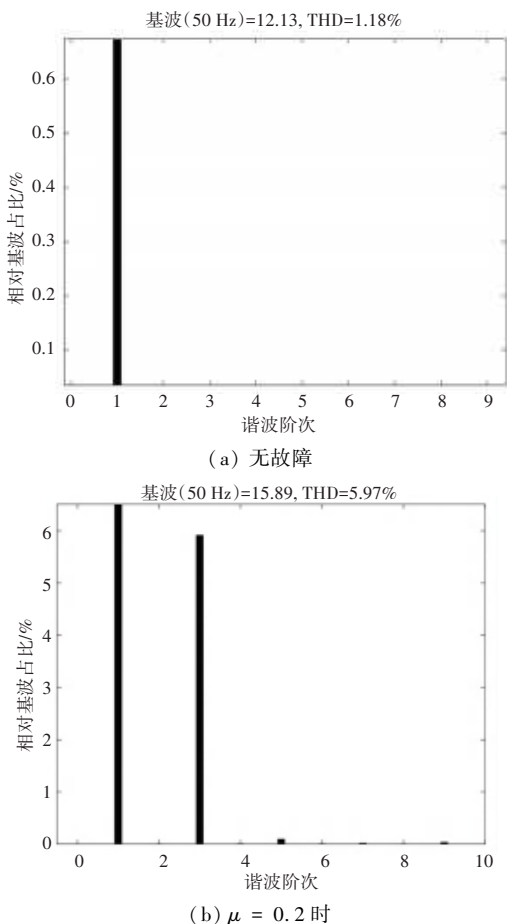


图10 电流 i_a 快速傅里叶分析结果图

Fig. 10 FFT result diagram of current i_a

4 结束语

为便于获取PMSM发生匝间短路故障时的故障信息,文中基于 dq 坐标系对故障下PMSM数学模型进行了推导和仿真分析。通过仿真结果可知,当PMSM发生匝间短路故障后:

(1)故障相的电流会增大,且明显大于其他两相。

(2)由于故障回路的产生,会出现明显的故障电流 i_f 。

(3)由于故障回路的影响,电磁转矩 T_e 、转速 N_r 会出现较为明显的震荡现象。

(4)故障相的电流谐波会明显增大,可作为故障诊断的依据。

后续研究将利用故障下的PMSM模型结合机器学习算法开展故障诊断,以实现不同程度匝间故障的有效识别,为电机的预知性维修提供指导。

参考文献

- [1] ZAFARANI M, GOKTAS T, AKIN B, et al. An investigation of motor topology impacts on magnet defect fault signatures [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(1):32-42.
- [2] CHEN X, QIN P, CHEN Y, et al. Inter-turn short circuit fault diagnosis of PMSM[J]. Electronics, 2022, 11(10):1576.
- [3] 王力新, 王晓远, 高鹏, 等. 电动汽车用内置式永磁同步电机转矩脉动分析及抑制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20):6386-6396.
- [4] ZHAO Jing, GUAN Xiaoqing, LI Chenghai, et al. Comprehensive evaluation of inter-turn short circuit faults in pmsm used for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22(1):611-621.
- [5] 徐政, 张建忠, 姜永将, 等. 基于高频信号注入的永磁同步电机局部退磁故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8):3205-3214.
- [6] 王坤. 风力发电机的转子绕组匝间短路故障预测研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2020.
- [7] HU Rongguang, WANG Jiabin, MILLS A R, et al. Current-residual-based stator interturn fault detection in permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(1):59-69.
- [8] 夏焰坤, 寇坚强, 李欣洋. 基于IWOA-VMD的永磁同步电机匝间短路故障振动信号去噪方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4):202-216.
- [9] 陈昊, 张楠, 高彩霞, 等. 永磁同步电机匝间短路故障短路线圈定位方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(3):124-134.
- [10] 王坤, 周克. 双馈风电系统的建模仿真研究与设计[J]. 智能计算机与应用, 2019, 9(4):55-59.
- [11] 韩鑫, 史浩, 陈前, 等. 采用无差拍电流跟踪的五相永磁同步电机匝间短路故障容错控制[J]. 电气工程学报, 2025, 20(5):117-125.
- [12] 何玉灵, 李勇, 张文, 等. 永磁同步发电机匝间短路故障对绕

- 组绝缘温升特性的影响[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(4): 18-30.
- [13] 夏焰坤, 李欣洋, 任俊杰, 等. 基于 CEEMDAN-HT 的永磁同步电机匝间短路振动信号故障特征提取研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(5): 72-81.
- [14] 王小强, 苏建徽. 永磁同步电机常见故障建模与仿真研究[J]. 微特电机, 2020, 48(5): 7-13.
- [15] 杨胜明, 吴钦木. 永磁同步电机匝间短路故障建模及仿真分析[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(2): 184-187.
- [16] 周光亮, 吴钦木. 永磁同步电机匝间短路故障电流分析[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(11): 56-60.
- [17] 丁石川, 王清明, 杭俊, 等. 计及模型预测控制的永磁同步电机匝间短路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3697-3708.
- [18] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016.
- [19] 杭俊, 胡齐涛, 丁石川, 等. 基于电流残差矢量模平方的永磁同步电机匝间短路故障鲁棒检测与定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 340-351.
- [20] 杜博超. 电动汽车永磁同步电机驱动系统故障诊断与容错技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.