

基于电流矢量分析的 PMSM 系统开路故障 诊断方法

赵金涛*, 郭凯凯, 高 雄, 丁志强

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

Open-Circuit Fault Diagnosis Method for PMSM Systems Based on Current Vector Analysis

ZHAO Jintao*, GUO Kaikai, GAO Xiong, DING Zhiqiang

(College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, China)

Abstract: [Objective] To address the problem that the current detection method in open-circuit fault diagnosis for permanent magnet synchronous motor (PMSM) system needs to set the fault diagnosis threshold empirically when using the normalized current average value to detect and locate the open-circuit fault, this paper proposes an adaptive diagnostic threshold method based on the current vector analysis.

[Method] The open-circuit fault of insulated gate bipolar transistor (IGBT) was diagnosed by Park normalized current average. The fault detection variables were obtained from the average values of normalized three-phase stator currents. An adaptive diagnostic threshold was then established using the absolute average value of these currents, which determined the fault diagnosis criterion and enabled fault detection and localization. The Crested Porcupine optimization (CPO) algorithm and the least squares support vector machine (LSSVM) were introduced. The LSSVM served as the basic fault classification model, with fault detection variables used as its fault feature vectors. The CPO algorithm was utilized to optimize the LSSVM classification model. A simulation model of IGBT open-circuit fault diagnosis was built using Matlab/Simulink, and the optimized fault classification model was used to classify and predict the four types of faults studied in this paper. [Results] The simulation results showed that the adaptive diagnostic threshold established using the absolute

average values of three-phase stator currents normalized by Park vector modulus after the IGBT open-circuit fault occurred would change adaptively with the location of the fault IGBT in different types of open-circuit faults. The fault classification accuracy of the LSSVM classification model optimized by the CPO algorithm reached 99.21%.

[Conclusion] The method proposed in this paper can not only address the shortcomings of the current detection method, but also achieve high fault classification accuracy. It offers significant advantages in IGBT open-circuit fault classification and provides the best fault diagnosis performance.

Key words: permanent magnet synchronous motor; fault diagnosis; adaptive threshold; Crested Porcupine optimization algorithm; least squares support vector machine

摘 要: 【目的】针对永磁同步电机(PMSM)系统开路故障诊断方法中电流检测法在利用归一化电流平均值进行开路故障检测和定位时需要根据经验设置故障诊断阈值的问题,本文提出了一种基于电流矢量分析的自适应诊断阈值方法。【方法】通过 Park 归一化电流平均值对绝缘栅双极晶体管(IGBT)开路故障进行诊断。首先,根据归一化三相定子电流的平均值得到了故障检测变量,利用归一化三相定子电流的绝对平均值建立故障诊断自适应阈值,从而确定故障诊断准则,实现故障的检测和定位。然后,介绍了冠豪猪优化(CPO)算法和最小二乘支持向量机(LSSVM),并以 LSSVM 作为基础故障分类模型,把故障检测变量作为故障分类模型的故障特征向量,利用 CPO 算法对 LSSVM 分类模型进行优化。最后,基于 Matlab/Simulink 搭建 IGBT 开路故障诊断的仿真模型,并利用优化后的故障分类模型对本文所研究的四类故障进

基金项目: 安徽省教育厅基金重大项目(022AH040110); 国家自然科学基金青年项目(51905003)

Major Fund Project of Anhui Education Department (2022AH040110); Youth Project of National Natural Science Foundation of China (51905003)

行分类预测。【结果】仿真结果表明,在 IGBT 发生开路故障后由 Park 矢量模值归一化的三相定子电流的绝对平均值所建立的故障诊断自适应阈值会随着不同开路故障类型中故障 IGBT 的位置自适应地发生变化,经 CPO 算法优化后的 LSSVM 分类模型的故障分类准确率达到了 99.21%。

【结论】本文所提方法不仅能够弥补电流检测法的不足,还具有较高的故障分类准确率,在 IGBT 开路故障分类方面具有明显的优势且能够获得最佳故障诊断性能。

关键词: 永磁同步电机; 故障诊断; 自适应阈值; 冠豪猪优化算法; 最小二乘支持向量机

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因其高效率、高可靠性等优越性能,被广泛应用于工业系统、交通运输等领域^[1]。在实际运行过程中,由于电机驱动系统长期工作在环境恶劣、大电流和高温的情况下,极大地增加了电机驱动系统发生故障的概率^[2]。PMSM 驱动系统中最易发生故障的是逆变器绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT),其故障发生概率约为 37.9%^[3]。然而,在 IGBT 发生开路故障后,虽然短时间内系统仍可继续运行,但是会导致系统性能降低,增加其他健康功率组件的电压和电流压力^[4]。若不及时检测并加以消除,可能会引起其他健康功率组件发生二次故障或永久性损坏,严重时会影响整个系统,带来巨大的经济损失,甚至造成人身安全问题^[5]。因此,为了保证电机驱动系统能够安全稳定运行,对电机驱动系统中 IGBT 进行故障诊断具有重要意义。

目前专家学者已提出多种 IGBT 开路故障诊断方法,主要可分为电流检测法、电压检测法和数据驱动智能检测法^[6]。电流检测法中的电流信号直接从控制系统中获得,虽然不需要额外的传感器,但是电流信号易受负载影响,容易出现误诊断。文献[7]通过电流特征分析,以归一化后电流信号的绝对值和平均值对 IGBT 开路故障进行诊断和定位,不需要设定阈值,但是电流信号易受负载影响。文献[8]利用混合逻辑动态模型输出的电流残差极性实现开路故障诊断,有效地消除了转速和负载对结果的影响,但在故障定位时需设置阈值。文献[9-10]通过分析电流特征对 IGBT 开路故障进行诊断和定位,但只能诊断并定

位出部分故障,同时需要根据经验设定阈值,容易出现误诊断。文献[11]通过解析电流轨迹实现 IGBT 开路故障的诊断与定位,但是在 IGBT 发生故障时电流轨迹会产生形变。

电压检测法一般需要额外的传感器,增加了系统的成本。文献[12]通过分析三相逆变器在 ab 平面上输出电压轨迹半径的偏离程度实现了逆变器开路故障的诊断和定位,但该方法需要设定半径偏离程度的阈值,并且需要电压传感器测量输出线电压。文献[13]以逆变器上、下电容电压残差值以及指令电压和输出电压残差值的平均值对 IGBT 开路故障进行诊断与定位,但各种电压的数值都需要通过电压传感器测量获得。文献[14]将电压信号特征与电流信号特征混合进行故障诊断,既保留了电压检测法诊断速度快的优点又克服了电流检测法可靠性低的缺陷,然而需要传感器来测量电压信号。文献[15]将六相电机驱动系统和磁链观测器相结合,对相电压法进行改进,把由经验设定阈值转换为正负值进行诊断,不需要额外的电压传感器。文献[16]通过混合逻辑动态模型测得的三相电压偏差实现故障诊断,无需使用传感器但需要设置阈值。

随着机器学习理论的不完善与发展,越来越多的数据驱动智能检测法被应用到故障诊断中。文献[17]采用快速傅里叶变换分解相电流以获得频域特征样本,然后通过生成对抗网络对样本增强获得新样本,新样本输入卷积神经网络进行故障识别。文献[18]以相电流的均方根比作为特征提取对象,使用集成袋机器学习分类来准确预测逆变器的故障开关。文献[19]利用三相电流的经验模态分解能量熵和互补集合经验模态分解能量熵构建故障特征向量,然后采用误差反向传播神经网络对故障进行诊断和分类,该方法具有较高的抗干扰性。文献[20]以逆变器输出的故障电流信号作为原始特征,利用马尔可夫转移场将其转化为二维特征用于卷积神经网络模型的输入数据实现故障诊断,该方法具有诊断速度快、抗干扰性强的优点。文献[21]在卷积神经网络中加入自注意力机制以增强故障信号中的重要信息,利用通道注意力机制来提高模型的性能,通过分类器完成故障分类和识别,具有较高准确

率和抗噪性能。

本文针对 PMSM 系统开路故障诊断方法中电流检测法需要根据经验设置故障诊断阈值的问题,提出了一种自适应阈值方法。故障检测变量和故障特征通过结合均方根比和归一化三相定子电流的平均值来确定的,自适应阈值通过归一化三相定子电流的绝对平均值建立,通过对故障检测变量和自适应阈值的判断实现故障开关管的定位。然后,利用冠豪猪优化(Crested Porcupine Optimization,CPO)-最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machine,LSSVM)对故障进行分类和预测。仿真结果表明,该方法不仅能准确地诊断出 PMSM 系统的开路故障,还具有较高的分类准确率,证明了该方法的可行性和有效性。

1 IGBT 故障类型

图 1 为 PMSM 系统的等效电路图。其中, i_a 、 i_b 和 i_c 为三相定子电流; e 为三相绕组反电动势; R 为定子电阻; L 为定子电感; V_{dc} 为直流侧电压; $T_1 \sim T_6$ 为逆变器中的 6 个 IGBT。

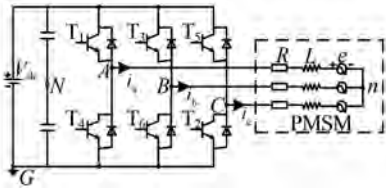


图 1 PMSM 系统等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of PMSM system

本文对单个 IGBT 故障、同相的两个 IGBT 同时故障、两相同侧的两个 IGBT 同时故障以及两相异侧的两个 IGBT 同时故障这四类故障类型进行研究,具体如下。

(1) 单个 IGBT 故障有 6 种情况,分别是 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 和 T_6 发生开路故障。图 2 为 T_1 发生开路故障时的三相定子电流波形图。由图 2 可知,此时 A 相电流为负,其他两相电流均发生不同程度的畸变。

(2) 同相的两个 IGBT 同时故障有 3 种情况,分别是 T_1T_4 、 T_2T_5 和 T_3T_6 发生开路故障。图 3 为 T_1T_4 发生开路故障时的三相定子电流波形图。由图 3 可知,此时 A 相无电流,而其他两相电流互相对称。

(3) 两相同侧的两个 IGBT 同时故障有 6 种

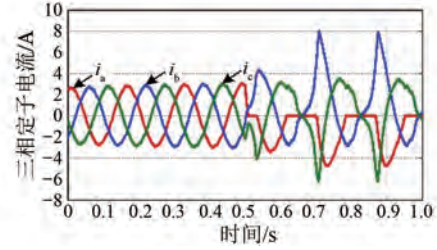


图 2 T_1 开路故障

Fig. 2 T_1 open circuit fault

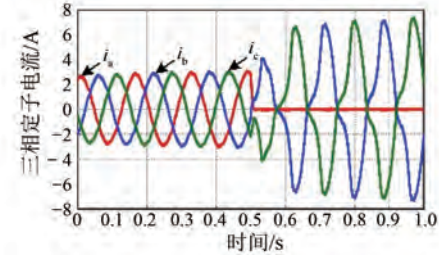


图 3 T_1T_4 开路故障

Fig. 3 T_1T_4 open circuit fault

情况,分别是 T_1T_3 、 T_1T_5 、 T_3T_5 、 T_4T_6 、 T_4T_2 和 T_6T_2 发生开路故障。图 4 为 T_1T_3 发生开路故障时的三相定子电流波形图。由图 4 可知,此时 A 相和 B 相的电流为负,对于 C 相电流有研究表明^[22]:由于电流的对称性,即使 C 相的两个 IGBT 没有发生故障也会呈现出与开路 IGBT 相似的特征。

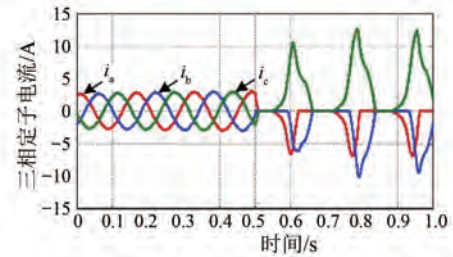


图 4 T_1T_3 开路故障

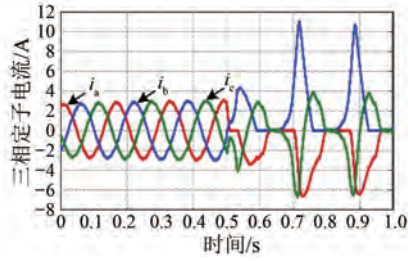
Fig. 4 T_1T_3 open circuit fault

(4) 两相异侧的两个 IGBT 同时故障有 6 种情况,分别是 T_1T_6 、 T_1T_2 、 T_3T_4 、 T_3T_2 、 T_5T_4 和 T_5T_6 发生开路故障。图 5 为 T_1T_6 发生开路故障时的三相定子电流波形图。由图 5 可知,此时 A 相电流为负,B 相电流为正。

2 故障诊断方法

2.1 故障诊断原理

文献[23]表明三相定子电流信号的平均值

图 5 T_1T_6 开路故障Fig. 5 T_1T_6 open circuit fault

在 IGBT 发生开路故障后会呈现出一个明显的故障特征。因此,本文通过 Park 归一化电流平均值对 IGBT 开路故障进行诊断。

定义 PMSM 工作在正常状态下的三相定子相电流 i_n ($n=a, b, c$) 为

$$i_n = \begin{cases} i_a = I_m \sin(\omega t) \\ i_b = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c = I_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_m 为三相定子电流的幅值; ω 为三相定子电流的角频率。

Park 矢量模值定义如式(2)所示:

$$\begin{cases} i_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a - \frac{\sqrt{6}}{6} i_b - \frac{\sqrt{6}}{6} i_c \\ i_\beta = \frac{\sqrt{2}}{2} i_b - \frac{\sqrt{2}}{2} i_c \\ |i_t| = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_α 、 i_β 分别为经 Park 变换后的 α 、 β 轴电流分量; $|i_t|$ 为 Park 矢量模值。

由式(1)和式(2)计算出归一化三相定子电流:

$$i_{nN} = \frac{i_n}{|i_t|} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\omega t) \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_{nN} ($n=a, b, c$) 为归一化三相定子电流。

由式(3)可知, i_{nN} 的大小始终是一个定值, 与 I_m 无关。

归一化三相定子电流的平均值和绝对平均值如式(4)所示:

$$\begin{cases} \bar{i}_{nN} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{nN} dt \\ |\bar{i}_{nN}| = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} |i_{nN}| dt \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{i}_{nN}$ 、 $|\bar{i}_{nN}|$ 分别为归一化三相定子电流的平均值、绝对平均值。

利用均方根比三相定子电流进行处理, 结合归一化三相定子电流的平均值得到故障检测变量 M_n :

$$\mu_n = \frac{\bar{i}_n}{\langle i_n \rangle} = \frac{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_n dt}{\sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_n^2 dt}} \quad (5)$$

$$M_n = \frac{\bar{i}_{nN} \cdot (\mu_n)^2 \cdot \pi^2}{2} \quad (6)$$

式中: $\bar{i}_n$ 、 $\langle i_n \rangle$ 和 μ_n 分别为三相定子电流的平均值、均方根值和均方根比。

故障诊断自适应阈值 D_n 由式(4)中归一化三相定子电流的绝对平均值计算得到:

$$D_n = |\bar{i}_{nN}| - \frac{\sum |\bar{i}_{nN}|}{6} \quad (7)$$

IGBT 故障诊断和定位的自适应阈值诊断准则如式(8)所示:

$$\begin{cases} M_n \geq D_n, & \text{下 IGBT 开路} \\ -D_n < M_n < D_n, & \text{正常} \\ M_n \leq -D_n, & \text{上 IGBT 开路} \\ D_n < M_n < -D_n, & \text{单相故障} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 CPO 算法

CPO 算法是一种模拟冠豪猪在捕食者面前生存而采取防御行为的算法^[24]。冠豪猪的四种防御阶段分别为视觉、声音、气味和物理攻击, 每种防御阶段的具体步骤如下。

(1) 视觉防御阶段

当冠豪猪发现捕食者时, 捕食者可能会靠近冠豪猪也可能远离冠豪猪, 此时冠豪猪与捕食者之间的位置关系可以用式(9)表示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \tau_1 |2\tau_2 \mathbf{x}_{CP}^t - \mathbf{y}_i^t| \\ \mathbf{y}_i^t = (\mathbf{x}_i^t + \mathbf{x}_r^t)/2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$, N 为种群数量; $\mathbf{x}_i^t$ 、 $\mathbf{x}_r^t$ 和 $\mathbf{y}_i^t$ 分别为迭代次数为 t 时第 i 个个体、随机个体和捕食

者的位置矢量; $\mathbf{x}'_{CP}$ 为函数评估 t 的最优解; τ_1, τ_2 和 r 分别为基于正态分布、 $[0, 1]$ 上和 $[1, N]$ 上的随机数。

(2) 声音防御阶段

在该阶段冠豪猪通过声音威胁捕食者,当捕食者靠近时,冠豪猪会发出更大的声音,这一阶段冠豪猪与捕食者之间的位置关系如式(10)所示:

$$\mathbf{x}'_{i+1} = (1 - U_1)\mathbf{x}'_i + U_1[\mathbf{y}'_i + \tau_3(\mathbf{x}'_{r_1} - \mathbf{x}'_{r_2})] \quad (10)$$

式中: $\mathbf{x}'_{r_1}$ 和 $\mathbf{x}'_{r_2}$ 为迭代次数为 t 时随机个体的位置矢量; $\mathbf{y}'_i$ 为捕食者的位置矢量; r_1 和 r_2 为 $[1, N]$ 上的随机数; τ_3 为 $[0, 1]$ 上的随机数; U_1 为 $[0, 1]$ 上的随机向量,表示捕食者向冠豪猪靠近的概率。

(3) 气味防御阶段

在该阶段冠豪猪会在其活动区域周围分泌一种恶臭以防止捕食者靠近,这一阶段冠豪猪与捕食者之间的位置关系如式(11)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}'_{i+1} = \mathbf{x}'_i(1 - U_1) + \\ \quad U_1[\mathbf{x}'_{r_1} + S'_i(\mathbf{x}'_{r_2} - \mathbf{x}'_{r_3}) - \tau_3\delta\gamma_t S'_i] \\ \delta = \begin{cases} 1, & rand \leq 0.5 \\ -1, & \text{others} \end{cases} \\ \gamma_t = 2rand\left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)^{\frac{t}{t_{\max}}} \\ S'_i = \exp\left[\frac{f(\mathbf{x}'_i)}{\sum_{k=1}^N f(\mathbf{x}'_k) + \varepsilon}\right] \end{cases} \quad (11)$$

式中: r_3 为 $[1, N]$ 上的随机数; δ 为搜索方向参数向量; S'_i 为气味扩散因子; γ_t 为防御因子; $t_{\max}$ 为最大迭代次数; $rand$ 为 $[0, 1]$ 上的随机数; $f(\cdot)$ 为目标函数; ε 为避免分母为 0 的小常数。

(4) 物理攻击防御阶段

在该阶段当捕食者对冠豪猪发动攻击时,冠豪猪会用全身的刺反击捕食者,这一阶段冠豪猪与捕食者之间的位置关系如式(12)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{F}'_i = \tau_6 m_i (\mathbf{v}'_{i+1} - \mathbf{v}'_i) \\ m_i = \frac{f(\mathbf{x}'_i)}{\exp\left[\sum_{k=1}^N f(\mathbf{x}'_k) + \varepsilon\right]} \\ \mathbf{v}'_i = \mathbf{x}'_i \\ \mathbf{v}'_{i+1} = \mathbf{x}'_r \\ \mathbf{x}'_{i+1} = \mathbf{x}'_{CP} - \tau_5 \delta \gamma_t \mathbf{F}'_i + \\ [\beta(1 - \tau_4) + \tau_4](\delta \mathbf{x}'_{CP} - \mathbf{x}'_i) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{F}'_i$ 为迭代次数为 t 时冠豪猪对第 i 个捕食者的平均力; τ_4, τ_5 和 τ_6 为 $[0, 1]$ 上的随机数; m_i 为迭代次数为 t 时第 i 个捕食者的质量; $\mathbf{v}'_i$ 为迭代次数为 t 时第 i 个捕食者的初始速度矢量; $\mathbf{v}'_{i+1}$ 为迭代次数为 $t+1$ 时第 i 个捕食者的最终速度矢量; β 为收敛速度因子。

2.3 最小二乘支持向量机

LSSVM 是一种把支持向量机理论中的二次规划求最优解的过程转化为通过线性方程组求解的机器学习方法^[25-27]。设数据集为 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$, 其中 x_i, y_i 分别为输入量和输出量, LSSVM 求最优解问题的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min J(\mathbf{w}, b, \mathbf{u}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^m \xi_i^2 \\ s. t. y_i [\mathbf{w}^T \varphi(x_i) + b] = 1 - \xi_i \end{cases} \quad (13)$$

式中: J 为优化目标参数; $\mathbf{u}$ 为误差向量; $\varphi(x_i)$ 为 x_i 在高维空间的非线性映射; b 为偏置因子; $\mathbf{w}$ 为权向量; ξ_i 为松弛变量; C 为惩罚系数。

通过对式(13)引入拉格朗日算子 α_i , 得到拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{w}, b, \zeta, \alpha) = J(\mathbf{w}, b, \zeta) -$$

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i \{ y_i [\mathbf{w}^T \varphi(x_i) + b] - (1 - \zeta_i) \} \quad (14)$$

利用径向基函数(Radial Basis Function, RBF)对式(14)进行偏导计算得到 LSSVM 的分类函数:

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

$$y(x) = \text{sign}\left[\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i K(x, x_i) + b\right] \quad (16)$$

式中: $K(x, x_i)$ 为 RBF; σ 为 RBF 的参数。

在定位出故障 IGBT 的位置后,本文采用 LSSVM 模型对四类故障进行分类预测,然而 LSSVM 模型中的惩罚因子 C 和 RBF 参数 σ 对最终的分类精度影响很大。

因此,为了提高故障分类的准确率,本文采用 CPO 对 LSSVM 中的 C, σ 进行优化,整体诊断流程如图 6 所示。IGBT 故障分类标签如表 1 所示。

3 仿真分析

3.1 故障定位

在 Matlab/Simulink 中搭建 IGBT 开路故障仿

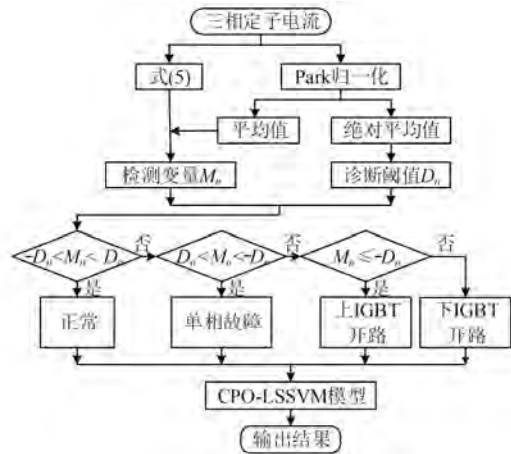


图 6 故障诊断流程图

Fig. 6 Fault diagnosis flowchart

表 1 IGBT 故障分类标签

Tab. 1 IGBT fault classification label

故障类型	故障分类标签
单个 IGBT 故障	1
同相的两个 IGBT 同时故障	2
两相同侧的两个 IGBT 同时故障	3
两相异侧的两个 IGBT 同时故障	4

真模型,对所提方法进行仿真验证。电机参数为:定子电阻 $R=2.875\ \Omega$;定子电感 $L_d=L_q=0.025\ \text{H}$;永磁体磁链 $\varphi_f=0.175\ \text{Wb}$;极对数 $p=4$;直流侧电压 $V_{dc}=311\ \text{V}$;转动惯量 $J=0.003\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$;摩擦因数 $B=0.008\ \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ 。

图 7 为 T_1 开路故障仿真结果。正常状态下 M_n 趋近于 0 且保持在 $(-D_a, D_a)$ 内,当 T_1 在 0.6 s 发生开路故障时, M_a 减小从而小于 $-D_a$,而 M_b 和 M_c 分别仍处于各自正常阈值范围内,由自适应阈值诊断准则可以定位出 T_1 发生开路故障。

图 8 为 T_1T_4 开路故障仿真结果。当 T_1T_4 在 0.6 s 发生开路故障时, M_n 基本没有发生变化,但由于 A 相阈值发生变化使得此时 M_a 大于 D_a 或小于 $-D_a$,而 M_b 和 M_c 分别仍处于各自正常阈值范围内,由自适应阈值诊断准则可以定位出 T_1T_4 发生开路故障。

图 9 为 T_1T_3 开路故障仿真结果。当 T_1T_3 在 0.6 s 发生开路故障时, M_a 、 M_b 减小从而分别小于 $-D_a$ 、 $-D_b$,而 M_c 由于电流的对称性即使 C 相的两个 IGBT 没有发生故障也会呈现出与开路 IGBT 相似的特征,因此此时 M_c 增大从而大于 D_c ,由自适应阈值诊断准则可以定位出 T_1T_3 发生开路故障。

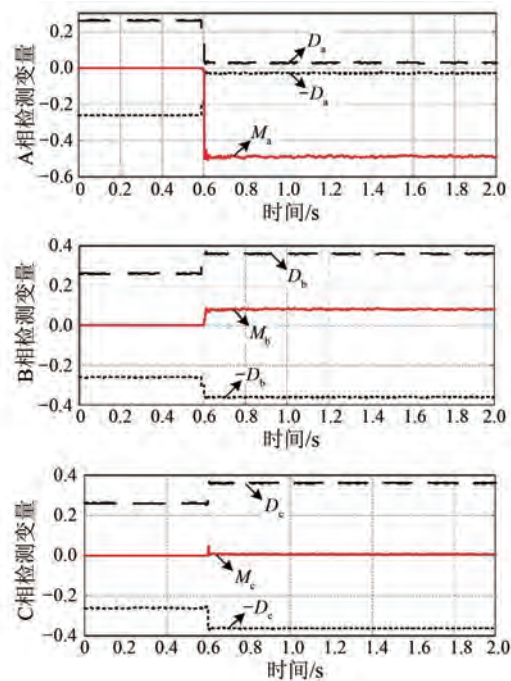


图 7 T_1 开路故障仿真结果

Fig. 7 T_1 open-circuit fault simulation results

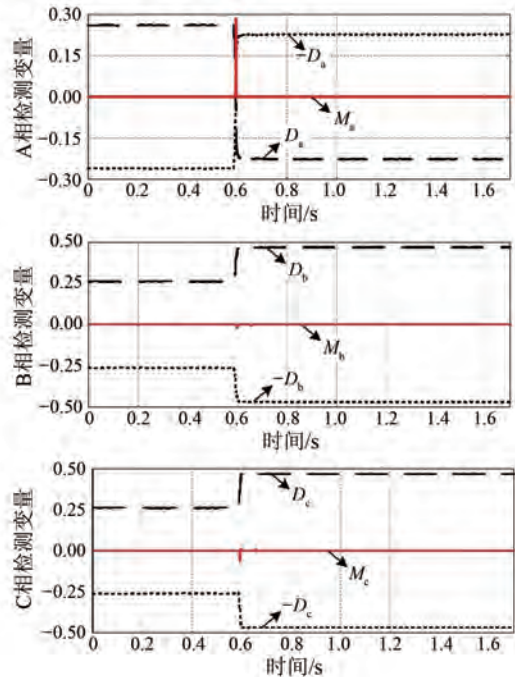
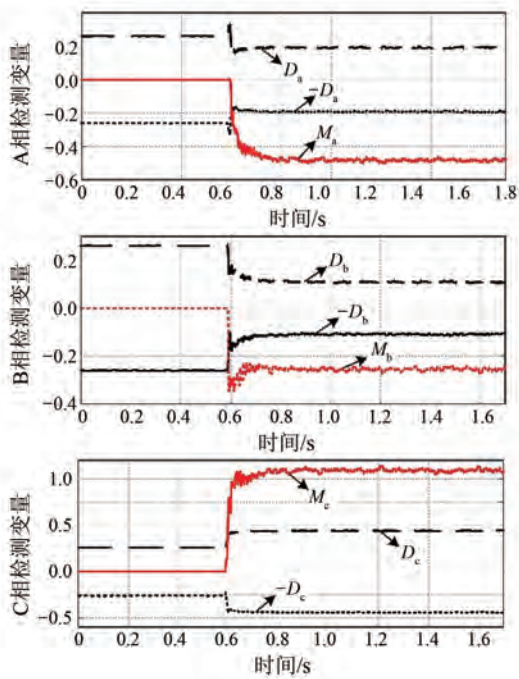
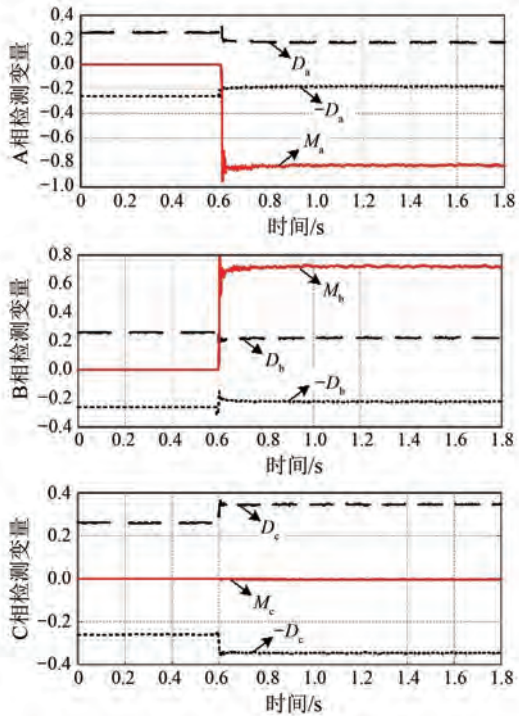


图 8 T_1T_4 开路故障仿真结果

Fig. 8 T_1T_4 open-circuit fault simulation results

图 10 为 T_1T_6 开路故障仿真结果。当 T_1T_6 在 0.6 s 发生开路故障时, M_a 减小从而小于 $-D_a$, M_b 增大从而大于 D_b ,而 M_c 变化不大仍处于正常阈值范围内,由自适应阈值诊断准则可以定位

图9 T_1T_3 开路故障仿真结果Fig. 9 T_1T_3 open-circuit fault simulation results图10 T_1T_6 开路故障仿真结果Fig. 10 T_1T_6 open-circuit fault simulation results

出 T_1T_6 发生开路故障。

图7~图10的仿真结果表明不同位置的IGBT发生开路故障后,诊断阈值 D_n 不需要根据

经验设定,能够自适应的随故障 IGBT 的位置改变而发生相应的变化,根据自适应阈值诊断准则能够准确地定位出故障 IGBT 的所在位置。

3.2 故障分类

本文以故障检测变量 M_n 作为故障特征,在 IGBT 发生开路故障后不间断地截取一个电流周期长度的 M_n 共构成 420 组故障特征向量,以 7:3 的比例划分为训练集和测试集输入到 CPO-LSSVM 模型进行分类预测,并对 IGBT 故障进行分类和预测。

图11为CPO-LSSVM模型输出结果的混淆矩阵,表2为不同方法的分类准确率。结合图11和表2可以发现采用CPO-LSSVM模型时只有第2类故障(同相的两个IGBT同时故障)的准确率为97.3%,其他类故障的准确率均为100%,整体故障分类准确率为99.21%。与其他方法相比,CPO-LSSVM具有更高的分类准确率、更明显的优势和更优的故障诊断性能。

表2 不同方法的分类准确率

Tab. 2 Classification accuracy of different methods

分类方法	准确率/%
CPO-LSSVM	99.21
LSSVM	95.42
随机森林	97.71
卷积神经网络	96.95
极限学习机	97.71

4 结语

(1) 通过 Park 矢量模值归一化三相定子电流的绝对平均值,建立了不需要根据经验设置的自适应故障诊断阈值。在 IGBT 发生开路故障后,诊断阈值会随着故障IGBT的位置改变自适应地发生相应的变化,通过故障检测变量和自适应诊断阈值建立的诊断准则可以准确地定位出故障 IGBT 的所在位置。

(2) 以故障检测变量作为故障特征,利用 CPO-LSSVM 模型对单个 IGBT 故障、同相的两个 IGBT 同时故障、两相同侧的两个 IGBT 同时故障以及两相异侧的两个 IGBT 同时故障这四类故障进行分类,通过仿真得到故障诊断准确率为99.21%,与其他方法相比证明了该方法在 IGBT 开路故障分类方面具有明显的优势且能够获得最佳故障诊断性能。

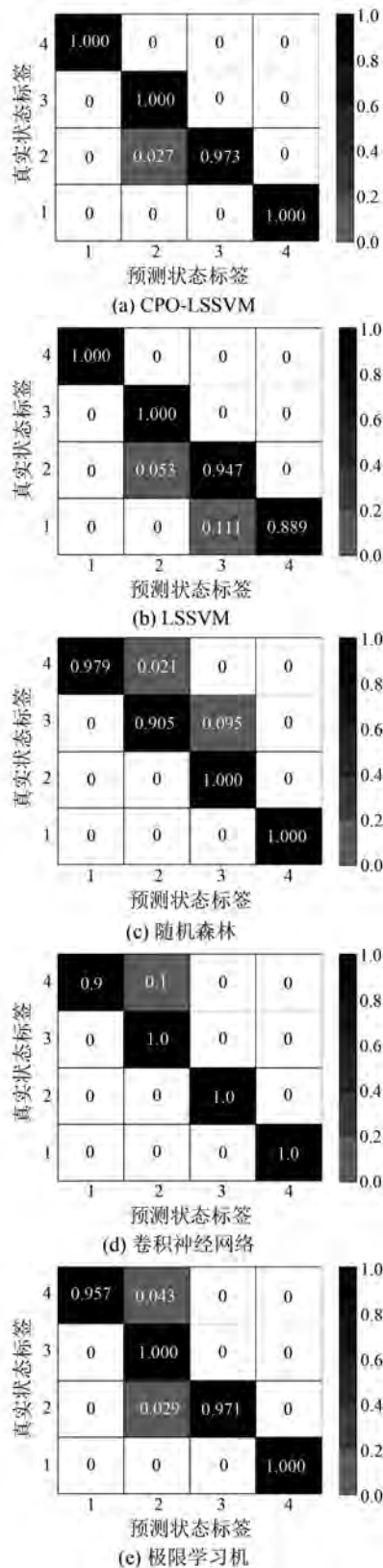


图 11 不同方法的混淆矩阵

Fig. 11 Confusion matrix of different methods

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 interest.

作者贡献

赵金涛进行了试验研究与论文撰写,郭凯凯进行了方案设计与内容总结,高雄、丁志强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 experiment and paper writing were carried out by Zhao Jintao. The scheme design and content summary were conducted by Guo Kaikai. The manuscript was revised by Gao Xiong, Ding Zhiqiang. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 张国强, 杜锦华. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(01): 1-13.
ZHANG G Q, DU J H. Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 1-13.
- [2] 马铭遥, 凌峰, 孙雅蓉, 等. 三相电压型逆变器智能化故障诊断方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7683-7699.
MA M Y, LING F, SUN Y R, et al. Review of intelligent fault diagnosis methods for three-phase voltage-model inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7683-7699.
- [3] 王霞霞, 陈超波, 高嵩. 逆变器开关管故障诊断方法综述[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(8): 1-6.
WANG X X, CHEN C B, GAO S. Review of fault diagnosis methods for switches in inverter [J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(8): 1-6.
- [4] 刘泽浩, 肖岚. 模块化多电平变流器 IGBT 开路故障诊断与定位方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1501-1517.
LIU Z H, XIAO L. Review of IGBT open-circuit fault diagnosis and localization methods for modular

- multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1501-1517.
- [5] 王晓鹏,姚帅亮,姚芳,等. 逆变器功率管开路故障诊断方法综述[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 156-169.
- WANG X P, YAO S L, YAO F, et al. Review of open-circuit fault diagnosis methods for inverter power transistors [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 156-169.
- [6] 冯桢,杨晨曦. 三相逆变器故障诊断方法综述[J]. 技术与市场, 2020, 27(12): 89-90.
- FENG Z, YANG C X. Summary of fault diagnosis methods of three-phase inverter [J]. Technology and Market, 2020, 27(12): 89-90.
- [7] MESAI-AHMED H, JLASSI I, CARDOSO A J M, et al. Multiple open-circuit faults diagnosis in six-phase induction motor drives using stator current analysis [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7275-7285.
- [8] 杜嘉晨,樊启高,黄文涛. 基于混合逻辑动态模型的 PMSM 系统开路故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(8): 100-108.
- DU J C, FAN Q G, HUANG W T. Open-circuit fault diagnosis for PMSM system based on mixed logical dynamic model [J]. Electrical Machines and Control, 2023, 27(8): 100-108.
- [9] SEJIR K E K, IMED J, CARDOSO A J M, et al. Diagnosis of open-switch and current sensor faults in PMSM drives through stator current analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5925-5937.
- [10] 李龚睿子,陈超波,张彬彬,等. 基于改进电流法的 PMSM 绕组开路诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(7): 63-69.
- LI G R Z, CHEN C B, ZHANG B B, et al. PMSM winding open-circuit diagnosis method based on improved current method [J]. Electrical Machines & Control Application, 2022, 49(7): 63-69.
- [11] 伍珣,陈特放,成庶,等. 基于输出电流轨迹的机车逆变器开路故障在线诊断方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊2): 87-95.
- WU X, CHEN T F, CHENG S, et al. An online diagnosis method based on output current locus for open circuit faults of inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 87-95.
- [12] 徐小健,于飞. 基于输出电压轨迹的三相逆变器开关管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 1106-1117.
- XU X J, YU F. A fault diagnosis method based on output voltage patterns for switch open-circuit fault of three-phase inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1106-1117.
- [13] 张远,史丽萍,文超,等. 一种基于电压残差的 T 型逆变器故障检测方法[J]. 电力电子技术, 2022, 56(11): 4-7.
- ZHANG Y, SHI L P, WEN C, et al. A fault detection method for T-type inverter based on voltage residuals [J]. Power Electronics, 2022, 56(11): 4-7.
- [14] 刘志龙,李瞳希,聂常华,等. 基于电量参数特征分析的逆变器开路故障诊断方法研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(8): 44-49.
- LIU Z L, LI T X, NIE C H, et al. Research on inverter open circuit fault diagnosis method based on characteristic analysis of electrical parameters [J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(8): 44-49.
- [15] 刘青,朱景伟,李明轩,等. 基于改进相电压法的永磁容错电机开路故障诊断策略[J/OL]. 大连海事大学学报, 2024-09-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1360.U.20240912.1832.002.html>.
- LIU Q, ZHU J W, LI M X, et al. Open-circuit fault diagnosis strategy of permanent magnet fault-tolerant motor based on improved phase voltage [J/OL]. Journal of Dalian Maritime University, 2024-09-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1360.U.20240912.1832.002.html>.
- [16] 杨宝顺,陈权,胡存刚. 基于电压偏差的三电平逆变器故障诊断与定位[J]. 电力电子技术, 2022, 56(6): 19-22.
- YANG B S, CHEN Q, HU C G. Fault diagnosis and localization of three-level inverter based on phase voltage deviation [J]. Power Electronics, 2022, 56(6): 19-22.
- [17] 孙权,彭飞,李宏胜,等. 样本不均衡下基于 CGAN-CNN 的逆变器故障诊断方法[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 318-326.
- SUN Q, PENG F, LI H S, et al. Imbalanced samples fault detection using CGAN-CNN for power inverter [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 318-326.

- [18] IBEM C N, FARRAG M E, ABOUSHADY A A, et al. Multiple open switch fault diagnosis of three phase voltage source inverter using ensemble bagged tree machine learning technique [J]. IEEE Access, 2023, 11: 85865-85877.
- [19] 钱存元, 吴昊, 陈昊然. 基于 EMD-BPNN 的逆变器 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 电气工程学报, 2024, 19(3): 432-442.
- QIAN C Y, WU H, CHEN H R. Open-circuit fault diagnostics method for IGBT of inverter based on EMD-BPNN [J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(3): 432-442.
- [20] 董唯光, 王宁, 张周卫, 等. 基于 MTF-CNN 的三相光伏并网逆变器 IGBT 故障诊断[J/OL]. 电源学报, 2024-09-02. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240830.1626.002.html>.
- DONG W G, WANG N, ZHANG Z W, et al. Open circuit diagnosis of three-phase PV grid-connected photovoltaic inverter IGBT based on MTF-CNN [J/OL]. Journal of Power Supply, 2024-09-02. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240830.1626.002.html>.
- [21] 徐玉珍, 邹中华, 刘宇龙, 等. 基于多尺度卷积神经网络和双注意力机制的 V2G 充电桩开关管开路故障信息融合诊断[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024-05-14. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232309>.
- XU Y Z, ZOU Z H, LIU Y L, et al. Information fusion diagnosis of switching tube open-circuit fault in V2G charging piles based on multi-scale convolutional neural network and dual-attention mechanism [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024-05-14. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232309>.
- [22] 赏昊俊, 何正友, 胡海涛, 等. 基于 IGBT 输出功率的逆变器开路故障诊断方法[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1140-1145.
- SHANG W J, HE Z Y, HU H T, et al. An IGBT output power-based diagnosis of open-circuit fault in inverter [J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1140-1145.
- [23] ESTIMA O J, CARDOSO M, et al. A new approach for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-source inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2487-2494.
- [24] MOHAMED A, REDA M. Crested porcupine optimizer: A new nature-inspired metaheuristic [J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 284: 11257.
- [25] 臧旭, 张甜瑾, 邵心悦, 等. 基于时变滤波经验模态分解和 SSA-LSSVM 的变压器内部机械故障诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(9): 49-56.
- ZANG X, ZHANG T J, SHAO X Y, et al. A transformer internal mechanical fault diagnosis method based on TVFEMD and SSA-LSSVM [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(9): 49-56.
- [26] 刘可真, 姚岳, 赵现平, 等. 基于样本集成学习和 SO-SVM 的变压器故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 21-31.
- LIU K Z, YAO Y, ZHAO X P, et al. Transformer fault diagnosis based on sample integration learning and SO-SVM [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 21-31.
- [27] 郭家豪, 欧阳晖, 刘振兴. 基于 APSO-SSVM 的异步电动机转子故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 91-99.
- GUO J H, OUYANG H, LIU Z X. Rotor fault diagnosis of asynchronous motor based on APSO-SSVM [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 91-99.
-
- 收稿日期:2024-09-12
收到修改稿日期:2024-09-27
作者简介:
赵金涛(1999-),男,硕士研究生,研究方向为电机控制,1366275771@qq.com;
*通信作者:赵金涛(1999-),男,硕士研究生,研究方向为电机控制,1366275771@qq.com。