

# 基于 PCA 的逆变器开关管微小故障诊断

朱琴跃<sup>†</sup>, 王颖婕, 史玉明, 薛忠一, 成翔宇

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 针对逆变器中开关管微小故障引起的特征信号微弱、检测难度大的问题, 提出一种在逆变器输出端提取相关故障特征参数, 并利用 PCA 方法实现故障检测的故障诊断方法. 通过分析绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 微小故障与逆变器输出电压波形之间的关系, 选取暂态故障特征参数——超调量、峰值时间、峰值电压斜率, 以及稳态故障特征参数——输出稳态电压, 通过划分时间片的方法从逆变器输出电压中提取故障特征参数. 在此基础上, 利用 PCA 对故障特征参数样本进行分解得到主元空间和残差空间, 计算两个空间中的统计量  $T^2$  和 SPE 判断是否发生故障. 仿真与实验验证结果表明, 与现有方法相比, 所提出方法能够实现 IGBT 微小故障的精确诊断, 具有良好的应用价值.

**关键词:** 逆变器; 绝缘栅双极晶体管; 微小故障; 特征提取; 主成分分析

中图分类号: TM46 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1425

引用格式: 朱琴跃, 王颖婕, 史玉明, 等. 基于 PCA 的逆变器开关管微小故障诊断 [J]. 控制与决策, 2025, 40(10): 3167-3176.

## A PCA-based method for diagnosing incipient faults of IGBTs in inverters

ZHU Qin-yue<sup>†</sup>, WANG Ying-jie, SHI Yu-ming, XUE Zhong-yi, CHENG Xiang-yu

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of weak characteristic signals and difficult detection caused by incipient faults of IGBTs in inverters, a fault diagnosis method is proposed, which extracts fault characteristic parameters from the inverter output and utilizes PCA (principal component analysis) for fault detection. By analyzing the relationship between incipient fault in Insulate-Gate Bipolar Transistor (IGBT) and inverter output voltage, overshoot, peak time and peak voltage slope are selected as the transient fault parameters, and output steady-state voltage is selected as the steady-state fault characteristic parameters. These fault characteristic parameters are extracted by the method of time-slice segmentation. On this basis, PCA is used to decompose the fault characteristic parameter samples into the principal subspace and residual subspace, where statistical indices  $T^2$  and SPE are calculated to determine whether there is a fault. Simulation and experimental tests results demonstrate that, compared with the existing methods, the proposed method achieves accurate diagnosis of incipient faults in IGBT, offering significant value for applications.

**Keywords:** inverter; IGBT; incipient fault; feature extraction; principal component analysis

## 0 引言

功率开关器件绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 是城市轨道交通牵引逆变器中的核心部件, 其工作状态直接影响列车是否能够安全可靠运行. 与之相对应的是, IGBT 在长期工作中会经常遭受电压、电流、温度等各种应力冲击, 以及环境或线路中的各种电磁干扰, 造成 IGBT 模块内部发生键合线断裂等微小故障<sup>[1]</sup>. 而 IGBT 的微小故障引起的故障特征远没有

其他显著故障明显, 使得微小故障的故障检测变得

十分困难. 针对逆变器中 IGBT 微小故障的诊断方法可以分为基于解析模型、基于专家知识和基于数据驱动的方法. 现有基于解析模型的 IGBT 微小故障诊断方案<sup>[2-3]</sup>主要是通过建立可靠的系统模型, 根据观测器与实际系统生成的残差特征信号进行故障定位与诊断. 该方法过于依赖模型的准确性, 而现实中难以全面准确地获取逆变器开关管的内部参数、结构等数据, 难以建立可靠的解析模型. 基于专家知识的方法无需数学模型, 且结果易于理解, 但专家知识无法自

我学习完善,已逐渐被基于数据驱动的方法取代<sup>[4]</sup>.

根据数据处理方法的不同,基于数据驱动的故障诊断方法可进一步划分为基于统计分析的方法、基于信号处理的方法以及基于人工智能的方法3种类型<sup>[5]</sup>.常见的基于信号处理的方法有小波变换(WT)<sup>[6]</sup>、经验模式分解(EMD)<sup>[7]</sup>等算法,对于振动、电流等频域特征明显的信号有较好的处理能力,但对高维数据处理能力较差,且易受噪声影响.近年来,随着人工智能技术的不断发展,基于人工智能的诊断方法得到了广泛关注.此类方法通过智能算法对大量样本数据进行深层次特征分析,实现故障诊断.常见的算法包括卷积神经网络(CNN)<sup>[8]</sup>、反向传播(BP)神经网络<sup>[9]</sup>、长短时记忆(LSTM)网络<sup>[10]</sup>等,这些算法虽然在诊断过程中取得了良好的结果,但算法复杂度较高,对标签数据的需求较大<sup>[11]</sup>.相比之下,基于统计分析的方法在计算效率和可解释性方面具有显著优势,其中主成分分析<sup>[12]</sup>(PCA)方法在数据降维能力、去噪能力、可解释性方面有着较为优异的表现.

在传统基于数据驱动的IGBT微小故障诊断方案中,以下两个问题长时间被视为挑战:

1) 故障特征信号的选取. 键合线断裂是IGBT模块出现微小故障最主要的表现形式之一. IGBT的封装结构很难直接观测键合线的故障状态,以往的IGBT微小故障研究主要是选取单个IGBT模块的门极电压、短路电流等参数作为微小故障特征<sup>[13]</sup>. 对于在逆变器中处于工作状态的IGBT来说,采集这些故障特征需要在逆变器内部安装各种传感器,不仅增加了系统的复杂度,还会影响逆变器的正常运行.

2) 如何有效提取并利用故障特征信号中的故障信息. 逆变器IGBT模块常见微小故障以单开关管或多开关管的故障为主,所提取的故障特征参数应当适用于诊断多种故障<sup>[14]</sup>. 现有的故障诊断方法往往不能兼顾诊断多种故障与特征参数提取简易性两方面.

基于上述问题,本文以两电平牵引逆变器为研究对象,在探究其中IGBT发生微小故障对逆变器输出端电压信号影响的基础上,提出一种基于PCA方法的开关管微小故障诊断方法. 相比于现有方法,本文所提出方法主要具有以下两点优势: 1) 直接在逆变器输出端提取相应的微小故障特征参数,避免在逆变器内部安装多余传感器,在工程实现上更加方便快捷; 2) 采用基于数据驱动的PCA故障诊断策略,能够更好地挖掘故障特征,兼顾较高的故障诊断准确率和诊断速率.

## 1 逆变器输出端微小故障特征参数的选取

### 1.1 两电平逆变器的基本工作原理

两电平逆变器的电路拓扑结构如图1所示,由6个功率开关器件组成,分为3个桥臂,每个桥臂各有上下2个IGBT模块. 以A相为例,选择如图1所示的输出端与直流电源负端两点之间的电压作为故障特征提取的输出电压信号. 后续所提到的输出电压均指该两点间电压. 其余两相波形相同,仅相位不同.

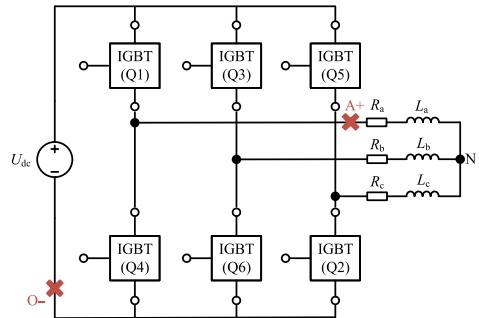


图1 两电平逆变器输出端与直流电源负端采样点

IGBT模块由于内部结构和外部封装等因素,存在包括寄生电容、杂散电感、杂散电阻在内的多种杂散参数. IGBT发生微小故障时会引起这些杂散参数发生相应变化,进而影响逆变器输出电压等电气参数. 计及杂散参数的IGBT等效模型<sup>[15]</sup>如图2所示, IGBT三个电极上分别存在杂散电阻 $R_G$ 、 $R_C$ 、 $R_E$ , 杂散电感 $L_G$ 、 $L_C$ 、 $L_E$ , 寄生电容 $C_{GC}$ 、 $C_{GE}$ 、 $C_{CE}$ .

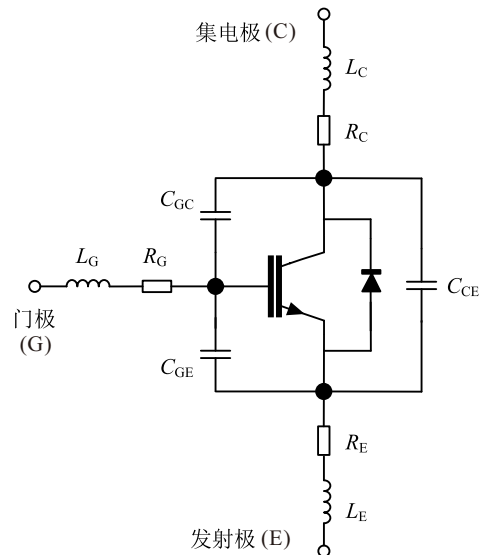


图2 计及杂散参数的IGBT等效模型

### 1.2 稳态故障特征参数的选取

根据图1所示的采样点采集逆变器输出电压,此时逆变器输出电压的上稳态值主要与桥臂上开关管的导通相关,以Q1、Q2、Q3导通阶段为例,计及IGBT模块的杂散参数,可得到图3所示的逆变器稳

态等效电路图. 其中 $Z_{IG1}$ 、 $Z_{IG2}$ 、 $Z_{IG3}$ 分别为Q1、Q2、Q3的等效杂散阻抗,  $Z_A$ 、 $Z_B$ 、 $Z_C$ 分别为A、B、C三相输出负载阻抗.

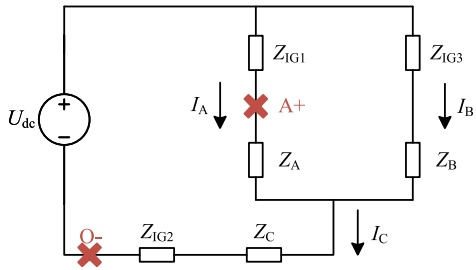


图3 Q1、Q2、Q3 稳态导通状态下逆变器等效电路

在图3中, 以A相为例, A相输出端电压采集点如A+和O-所示. A相输出上稳态电压表达式为

$$U_{s1} = U_{A+,O-} = I_A Z_A + I_C (Z_C + Z_{IG2}). \quad (1)$$

若A相桥臂上开关管(Q1)发生微小故障, 将导致 $Z_{IG1}$ 增大, 则电流 $I_A$ 、 $I_C$ 都将减小, A相输出上稳态电压 $U_{s1}$ 将相应减小. 上稳态电压能够反映逆变器上桥臂IGBT微小故障的发生, 可选取作为微小故障特征参数.

同理, 逆变器输出电压的下稳态值主要与桥臂下开关管的导通相关, 以Q2、Q3、Q4导通阶段为例, 计及IGBT模块的杂散参数, 可得到图4所示的逆变器稳态等效电路图. 其中 $Z_{IG2}$ 、 $Z_{IG3}$ 、 $Z_{IG4}$ 分别为开关管Q2、Q3、Q4的等效杂散阻抗,  $Z_A$ 、 $Z_B$ 、 $Z_C$ 分别为A、B、C三相输出负载阻抗.

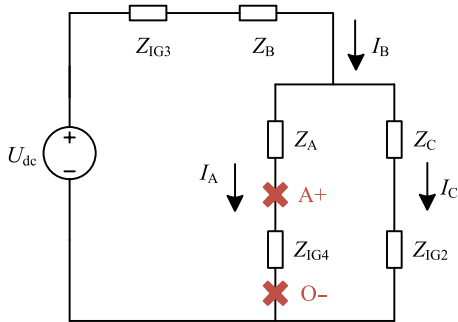


图4 Q2、Q3、Q4 稳态导通状态下逆变器等效电路

同样以A相为例, A相输出电压采集点如图4所示, A相输出下稳态电压表达式为

$$U_{s2} = U_{A+,O-} = U_{dc} - I_B (Z_{IG3} + Z_B) - I_A Z_A. \quad (2)$$

若A相桥臂下开关管(Q4)发生微小故障, 将导致 $Z_{IG4}$ 增大, 电流 $I_A$ 、 $I_B$ 减小, 则逆变器输出下稳态电压 $U_{s2}$ 将相应增大, 能够反映桥臂下开关管微小故障的发生, 可选取作为微小故障特征参数.

### 1.3 暂态故障特征参数的选取

由上述分析可知, 逆变器输出电压的向下跃变振荡暂态过程主要与上桥臂开关管的关断过程相关,

该暂态过程与上开关管两侧电压暂态过程(即直流电源正极与输出端A+之间电压)相对应. 以A相为例, 首先探究A相上开关管关断暂态过程. 假设逆变器的开关管导通状态由Q1、Q2、Q6导通转换为Q4、Q2、Q6导通, 该过程Q1关断, Q4导通. 由于Q1存在一定的关断时间, 在关断时间内, 原本被短路的IGBT寄生电容被接入电路. Q1关断过程中逆变器等效电路如图5所示, 其中 $R_{CE}$ 、 $L_{CE}$ 表示上桥臂IGBT的杂散电阻和杂散电感,  $R_{ld}$ 和 $L_{ld}$ 等效于其他电阻和电感,  $C_{IG1}$ 表示开关管Q1的寄生电容.

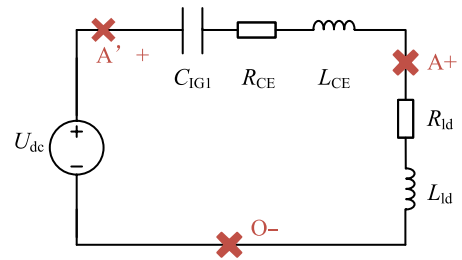


图5 A相上桥臂开关管关断过程简化等效电路

根据图5所示的等效电路图, 令 $R_1 = R_{ld} + R_{CE}$ ,  $L_1 = L_{ld} + L_{CE}$ ,  $C_1 = C_{IG1}$ . IGBT关断过程中, 寄生电容 $C_{IG1}$ 接入电路, 图5等效成一个RLC二阶电路, 据此可列出电路方程

$$L_1 C_1 \frac{du_{C_1}^2}{dt^2} + R_1 C_1 \frac{du_{C_1}}{dt} + u_{C_1} = U_{dc}. \quad (3)$$

忽略数量级很小的IGBT模块杂散阻抗, 此时A相上开关管两侧电压 $U_{A'+,A+}$ 为

$$U_{A'+,A+} \approx u_{C_1}. \quad (4)$$

由此可得逆变器A相输出电压的暂态表达式为

$$U_A = U_{A+,O-} = U_{dc} - U_{A'+,A+} = U_{dc} - u_{C_1}. \quad (5)$$

由式(5)可看出, 在A相上桥臂开关管关断过程中, A相输出电压与IGBT寄生电容两侧电压相关, 因此只要分析电容电压 $u_{C_1}$ 即可.

式(3)为一个二阶线性非齐次微分方程, 根据二阶系统计算规则可得该系统的自然振荡频率 $\omega_n$ 与阻尼系数 $\xi$ 分别为

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \quad \xi = \frac{R_1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{L_1}}. \quad (6)$$

根据实际测定的IGBT模块杂散电感、电阻及寄生电容的数值范围, 结合实际应用中负载电感及电阻的大小范围<sup>[16]</sup>, 图5的等效电路中一般存在 $R_1/2 < \sqrt{L_1/C_1}$ . 在实际应用中, 阻尼系数 $\xi$ 一般满足 $0 < \xi < 1$ , 该二阶系统处于欠阻尼状态, 说明 $u_{C_1}$ 的波形是一个稳定值为 $U_{dc}$ 的正弦衰减振荡波形. 因此, A相输出电压的波形是一个稳定值为0且

向下振荡的正弦衰减振荡波形. 基于此, 可求得 $u_{C1}$ 的超调量和峰值时间参数为

$$\sigma = e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}}, t_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}. \quad (7)$$

假设正常状态下 IGBT 有  $x$  根键合线并联排列. 以发射极为例, 当 IGBT 发射极发生  $k(k < x)$  根键合线断裂的微小故障时, 根据并联计算规则<sup>[17]</sup>, 将导致图 5 中的 IGBT 杂散电阻  $R_{CE}$  和杂散电感  $L_{CE}$  分别增大为

$$R'_{CE} = \frac{x}{x-k}R_{CE}, L'_{CE} = \frac{x}{x-k}L_{CE}. \quad (8)$$

将其代入  $R_1$ 、 $L_1$  及式 (6) 可得

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{x}{x-k}L_{CE} + L_{ld}\right)C_{IG1}}}, \quad \xi = \frac{\left(\frac{x}{x-k}R_{CE} + R_{ld}\right)}{2} \sqrt{\frac{C_{IG1}}{\left(\frac{x}{x-k}L_{CE} + L_{ld}\right)}} = \frac{\sqrt{C_{IG1}}}{2} \frac{R_{CE} + \left(1 - \frac{k}{x}\right)R_{ld}}{\sqrt{\left(1 - \frac{k}{x}\right)L_{CE} + \left(1 - \frac{k}{x}\right)^2 L_{ld}}}. \quad (9)$$

根据式 (9) 容易判断 $\omega_n$ 随着 $k$ 的增大而减小, 而 $\xi$ 随着 $k$ 增大的变化规律分析如下:

将 $\xi$ 对 $k$ 求导得

$$\frac{d\xi}{dk} = \frac{\sqrt{C_{IG1}}}{2x} \frac{\frac{1}{2}R_{CE}L_{CE} + \left(R_{CE}L_{ld} - \frac{1}{2}R_{ld}L_{CE}\right)\left(1 - \frac{k}{x}\right)}{\left[\left(1 - \frac{k}{x}\right)L_{CE} + \left(1 - \frac{k}{x}\right)^2 L_{ld}\right]^{3/2}}. \quad (10)$$

由  $R_{CE}$ 、 $L_{CE}$ 、 $R_{ld}$  和  $L_{ld}$  的实际数量级大小可知, 在实际应用中一般满足

$$R_{CE}L_{ld} - \frac{1}{2}R_{ld}L_{CE} > 0. \quad (11)$$

将其代入式 (10), 可得  $d\xi/dk > 0$ . 由此说明  $\xi$  随着  $k$  增大而增大.

由式 (7) 可进一步得到: 超调量  $\sigma$  将随着  $\xi$  的增大而变小, 峰值时间  $t_p$  将随着  $\omega_n$  的减小和  $\xi$  的增大而相应变大. 因此, 当逆变器上桥臂 IGBT 发生微小故障时, 可以将逆变器输出电压向下振荡过程中的超调量  $\sigma$  和峰值时间  $t_p$  作为故障特征参数.

此外, 将振荡的起始点与峰值点相连得到电压峰值斜率

$$k_s = \frac{U_{dc}(1 + \sigma)}{t_p}. \quad (12)$$

由式 (12) 可知,  $k_s$  随着  $\sigma$  的变小和  $t_p$  的变大而变小, 同样可以作为反映 IGBT 微小故障的特征参数.

同理, 下开关管的关断过程将体现在输出电压的向上跃变暂态过程中, 进而可选取输出电压向上跃变过程的超调量、峰值时间和峰值电压斜率作为下开关管微小故障的故障特征参数.

综上所述, 可以选择逆变器某相输出电压的向上跃变振荡和向下跃变振荡 2 个暂态过程中的 2 个超调量  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ 、2 个峰值时间  $t_{p1}$  和  $t_{p2}$  以及 2 个峰值电压斜率  $k_{s1}$  和  $k_{s2}$  (共 6 个参数), 作为该相开关管微小故障的暂态故障特征参数, 选择上稳态电压  $U_{s1}$  和下稳态电压  $U_{s2}$  作为该相开关管微小故障的稳态故障特征参数. 具体如表 1 所示.

表1 逆变器输出端的暂态和稳态故障特征参数

暂态故障特征参数		稳态故障特征参数
向上跃变振荡过程	向下跃变振荡过程	
超调量 $\sigma_1$	超调量 $\sigma_2$	上稳态电压 $U_{s1}$
峰值时间 $t_{p1}$	峰值时间 $t_{p2}$	下稳态电压 $U_{s2}$
峰值电压斜率 $k_{s1}$	峰值电压斜率 $k_{s2}$	/

以 A 相为例, 当上开关管与下开关管分别发生微小故障时, 所选故障特征参数变化如图 6 和图 7 所示.

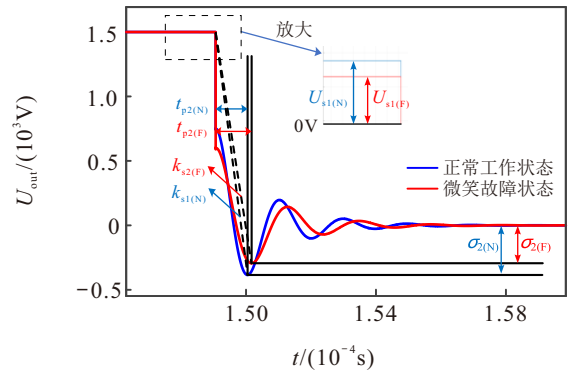


图6 A 相上开关管老化故障前后 A 相输出电压向下振荡过程放大波形

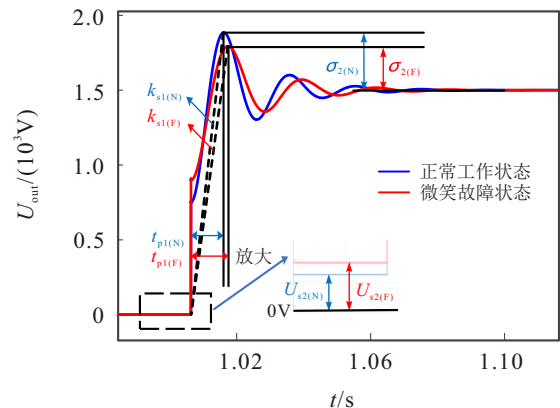


图7 A 相下开关管老化故障前后 A 相输出电压向下振荡过程放大波形

## 2 微小故障特征参数提取

本文采用划分时间片的方式,对采集到的逆变器输出电压数据进行故障特征参数提取,以向上跃变振荡过程为例,特征参数提取具体步骤如下。

step 1: 对降噪后的原始数据从零时刻开始等间隔地划分时间片,各时间片段内样点数目相等,如图8所示。

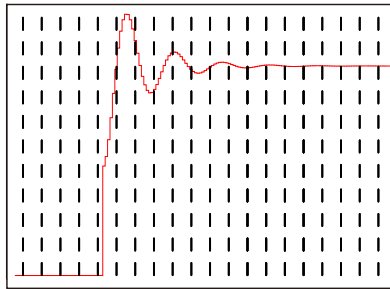


图8 原始数据划分时间片放大示意

step 2: 求解上稳态电压  $U_{s1}$ 。

稳态值所在时间片必定出现在峰值所在时间片后,故先求解峰值点对应时间  $t_{peak}$ 。从零时刻开始求解每个时间片内样点的最大值  $U_{max}^i$  (为减小偶然性误差,  $U_{max}^i$  一般取该时间片内前  $q$  个最大值的平均值)。将最大值  $U_{max}^i$  与设定的阈值  $U_{th\_set}$  比较,该阈值应大于振荡过程的理想稳态值 (在本文的输出电压采集方法中,理想稳态值即等于输入直流电压值  $U_{dc}$ ),若最大值大于设定的阈值,则说明峰值点可能处于该时间片内。当该时间片的最大值满足大于阈值的条件时,进一步求解该时间片的前一个时间片最大值  $U_{max}^{i-1}$  和后一个时间片的最大值  $U_{max}^{i+1}$ ,若满足  $U_{max}^i > U_{max}^{i-1}$  且  $U_{max}^i > U_{max}^{i+1}$ ,则说明峰值点落在该时间片内,即  $U_{peak} = U_{max}^i \cdot t_{peak}$  为  $U_{max}^i$  对应的时间片内前  $q$  个最大值所对应的时间点的平均值。

在峰值所在时间片的后续时间片中,求解各时间片中样点的平均值  $U_{mean}^j$  和标准差  $Std_j (j > i)$ ,同时设定标准差阈值  $Std_{th\_set}$ ,将平均值  $U_{mean}^j$  与理想稳态值  $U_{wen}$  相减并与差值阈值  $D_{th\_set}$  比较,若存在

$$|U_{mean}^j - U_{wen}| < D_{th\_set}, Std_j < Std_{th\_set}, \quad (13)$$

则说明该时间片处于稳态过程中。

在稳态过程中,应有多个时间片处于稳态过程,为减小误差,对处于稳态过程的时间片所有样本点求解平均值,即为实际的输出电压稳态值  $U_{s1}$ 。

step 3: 求解超调量  $\sigma_1$ 。

根据式 (14) 可以求得超调量

$$\sigma_1 = \frac{U_{peak} - U_{s1}}{U_{s1}}. \quad (14)$$

step 4: 求解峰值时间  $t_{p1}$ 。

峰值时间表示电压峰值对应时刻减去暂态起始时刻,即  $t_{p1} = t_{peak} - t_{origin}$ 。由上稳态电压  $U_{s1}$  求解步骤可得  $t_{peak}$ 。起始时刻  $t_{origin}$  所处的时间片一般存在两种情况:一种情况是该时间片对应的第 1 个时间即为起始时间;另一种情况是该时间片包含了一部分上一阶段的稳态过程,起始时刻处于该时间片的中间位置。为了确定具体的起始时刻,采用计算斜率的方法来进行。假设一个时间片共有  $g$  个样本点,第  $b$  个样本点为  $u_b$ ,采样时间为  $\Delta t$ 。将时间片分为前后间隔相等的两个部分,分别求解前一部分的斜率  $k_{front} = \left| \sum_{b=1}^{g/2-1} \frac{u_{b+1} - u_b}{g\Delta t/2} \right|$  及后一部分的斜率  $k_{back} = \left| \sum_{b=g/2+1}^{g-1} \frac{u_{b+1} - u_b}{g\Delta t/2} \right|$ ,比较  $k_{front}$  和  $k_{back}$ ,存在以下 3 种情况:

1)  $k_{front} \approx k_{back}$ 。此时说明前后两部分没有转折,起始时刻所处时间片的第 1 个时间点即为起始时刻。

2)  $k_{front} \approx 0$  且  $k_{back} > 0$ 。此时说明前一部分为上一阶段的稳态过程,起始时刻应处于后一部分中,在后一部分重复 step 3,直到满足情况 1)。

3)  $k_{front} > 0, k_{back} > 0$  且  $k_{front} < k_{back}$ 。此时说明起始时刻应处于前一部分中,在前一部分重复 step 3,直到满足情况 1)。

step 5: 求解峰值电压斜率  $k_{s1}$ 。

求得超调量  $\sigma_1$  和峰值时间  $t_{p1}$  后,可根据式 (12) 进一步求得峰值电压斜率  $k_{s1}$ 。

## 3 基于PCA的微小故障诊断

在逆变器输出端采集到的输出电压经过故障特征参数提取后,将会得到包含 8 个故障特征参数和数量庞大的样本组成的待检测样本矩阵。通过标准化处理与 PCA 分解<sup>[18]</sup> 可以将原始数据样本  $Z_a$  分解为主元空间  $P_c$  和残差空间  $P_r$ ,分别求解基于主元空间的 Hotelling  $T^2$  统计量和基于残差空间的 SPE 统计量,此两项统计量分别从主元和残差空间的角度反映了待检测样本数据与正常工作状态的偏离程度,根据它们是否超出相应的控制范围来判断是否发生了故障<sup>[9]</sup>。其故障诊断流程如下。

1) 正常状态下 PCA 训练集的获取。

采集正常工作状态下逆变器的 A 相输出电压,从中提取相应的 8 个故障特征参数。假设采集到的输出电压中 IGBT 共发生了  $M_n$  次开关过程,可得到正常状态下 A 相的故障特征参数样本共  $M_n$  个,每个样本包含 8 个特征参数,由此可得到大小为  $M_n \times 8$  的 PCA 原始训练样本矩阵

$$\mathbf{Z}_a = \begin{bmatrix} \sigma_{1(1)} & \sigma_{1(2)} & \cdots & \sigma_{1(M_n)} \\ \sigma_{2(1)} & \sigma_{2(2)} & \cdots & \sigma_{2(M_n)} \\ t_{p1(1)} & t_{p1(2)} & \cdots & t_{p1(M_n)} \\ t_{p2(1)} & t_{p2(2)} & \cdots & t_{p2(M_n)} \\ k_{s1(1)} & k_{s1(2)} & \cdots & k_{s1(M_n)} \\ k_{s2(1)} & k_{s2(2)} & \cdots & k_{s2(M_n)} \\ U_{s1(1)} & U_{s1(2)} & \cdots & U_{s1(M_n)} \\ U_{s2(1)} & U_{s2(2)} & \cdots & U_{s2(M_n)} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

2) 故障诊断阈值  $T_{th}^2$  和  $SPE_{th}$  求解.

对原始数据样本  $\mathbf{Z}_a$  进行标准化处理与 PCA 分解. 在正常工作状态下, 计算得到的被测试样本统计量  $T^2$  和  $SPE$  将落在某个特定的范围内, 若系统发生故障, 将使得样本发生一定程度的偏移, 使得  $T^2$  统计量超出控制范围, 据此来判断是否有故障的发生.  $T^2$  统计量的故障诊断阈值

$$T_{th}^2 = \frac{r(M+1)(M-1)}{M(M-r)} F_{\alpha}(M, M-r). \quad (16)$$

其中:  $M$  表示的是原始样本的个数,  $r$  为主元向量的个数,  $F_{\alpha}(M, M-r)$  表示自由度分别为  $M$  和  $M-r$ , 置信水平为  $\alpha$  时  $F$  分布的临界点值.

$SPE$  统计量的故障诊断阈值

$$SPE_{th} = \theta_1 \left[ \frac{c_{\alpha} \sqrt{2\theta_2 h_0^2}}{\alpha} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\alpha^2} \right]^{\frac{1}{h_0}}. \quad (17)$$

其中:  $\theta_i = \sum_{j=r+1}^N \lambda_j^i, i = 1, 2, 3$ , 与残差空间中协方差矩阵 COVZ 的特征值有关;  $h_0 = 1 - \frac{2\theta_1\theta_3}{3\theta_2^2}$ ;  $c_{\alpha}$  表示置信水平为  $\alpha$  时标准正态分布的临界点值.

3) 采集逆变器实时运行过程中的 A 相输出电压, 经过特征参数提取得到  $M_f$  个故障特征参数样本, 每个样本包含 8 个特征参数, 得到大小为  $M_f \times 8$  的 PCA 测试样本矩阵.

$T^2$  统计量反映的是投影到主元空间中的各样本点与样本中心的距离偏差, 有

$$T^2 = \mathbf{A}\mathbf{A}_c^{-1}\mathbf{A}^T = \mathbf{Z}\mathbf{P}_c\mathbf{A}_c^{-1}\mathbf{P}_c^T\mathbf{Z}^T. \quad (18)$$

其中:  $\mathbf{A}$  为原始样本投影到主元空间的主元向量矩阵,  $\mathbf{Z}$  为标准化的样本矩阵,  $\mathbf{A}_c = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$  为协方差矩阵 COVZ 对应的前  $r$  个特征值组成的特征值对角矩阵.

$SPE$  统计量反映的是投影到残差空间的样本点与主元空间的距离偏差, 有

$$SPE = \|\mathbf{e}_k\|^2 = \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T = \mathbf{Z}(\mathbf{I} - \mathbf{P}_c\mathbf{P}_c^T)\mathbf{Z}^T. \quad (19)$$

其中:  $\mathbf{e}_k$  表示残差矩阵中的第  $k$  行样本向量,  $\mathbf{I}$  为  $r \times r$  的单位矩阵.

4) 将步骤 3) 中计算得到的  $T^2$  和  $SPE$  统计量与

步骤 2) 中计算得到的故障诊断阈值  $T_{th}^2$  和  $SPE_{th}$  相比较, 判断 A 相开关管是否发生微小故障的判断准则如下:

$$\begin{cases} T^2 \leq T_{th}^2 \text{ and } SPE \leq SPE_{th}, & \text{正常工作状态;} \\ T^2 > T_{th}^2 \text{ or } SPE > SPE_{th}, & \text{故障状态.} \end{cases} \quad (20)$$

根据上述理论, 基于 PCA 的 IGBT 微小故障诊断流程如图 9 所示.

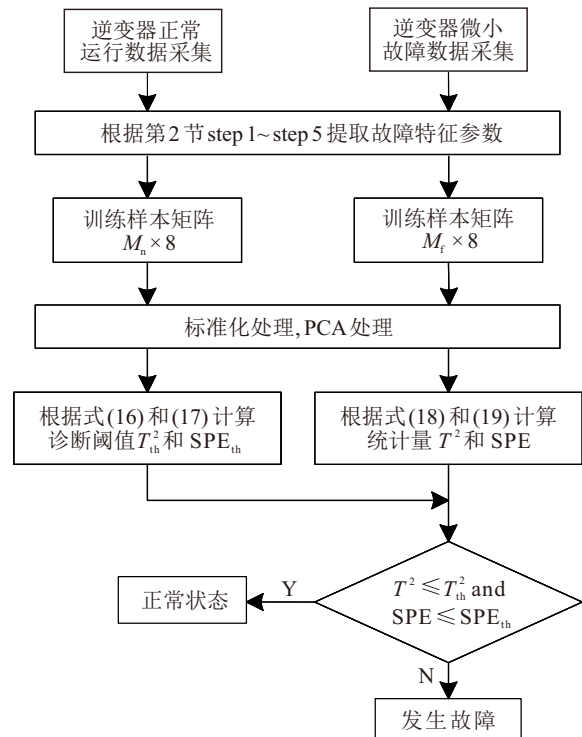


图9 基于 PCA 的微小故障诊断流程

## 4 仿真与实验

### 4.1 仿真实验

以英飞凌 FF75R12RT4 模块为参考, 根据图 1 所示电路图在 Matlab/Simulink 中搭建两电平逆变器仿真模型, 其整体电路主要仿真参数如表 2 所示.

表2 逆变器整体电路的仿真参数

参数	数值
直流电源 $U_{dc}/V$	1 500
负载电阻 ( $R_a, R_b, R_c$ )/ $\Omega$	100
负载电感 ( $L_a, L_b, L_c$ )/H	$5 \times 10^{-3}$
正弦调制波频率/Hz	50
载波频率/kHz	10

根据前文所述故障诊断流程, 首先采集正常工作状态下逆变器输出电压数据, 提取 500 个样本作为 PCA 的训练集, 每个样本均由 8 个故障特征参数组成. 将该训练集经过 PCA 处理后计算得到  $T^2$  和  $SPE$  两个统计量的诊断阈值  $T_{th}^2$  和  $SPE_{th}$ .

1) 正常工作情形.

为了检验PCA故障诊断方法在逆变器正常工作状态下是否会发生误检,采集逆变器正常工作状态下A相输出电压,提取得到200个测试样本.将该

测试样本经过PCA处理后计算 $T^2$ 和SPE统计量,并将其与诊断阈值相比较,得到如图10所示的 $T^2$ 和SPE统计量与诊断阈值对比图.

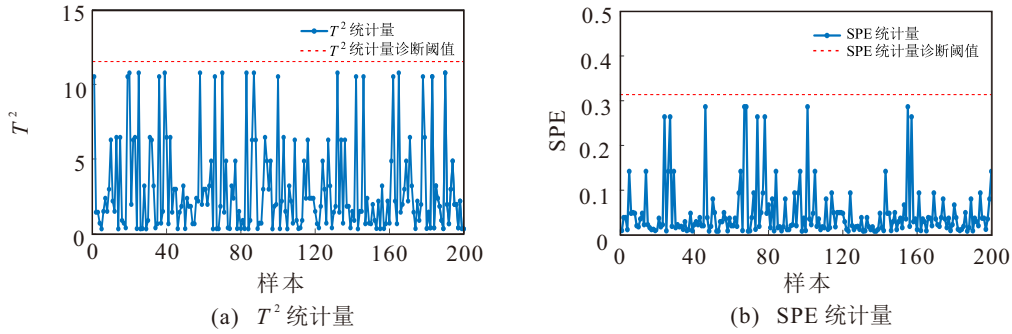


图10 正常工作测试样本的 $T^2$ 和SPE统计量与诊断阈值对比

由图10所示的诊断结果可知,正常工作状态下,基于 $T^2$ 统计量和SPE统计量的故障检出率均为0,即故障误检率为0,没有发生故障误检的情况.仿真结果表明基于PCA的故障诊断方法能够准确识别逆变器的正常工作状态.

为了验证本文所提出方法对不同位置微小故障的故障检测能力,分别模拟A相上开关管故障、下开关管故障和上下开关管同时故障的情况进行仿真.假设开关管发射极发生3根键合线断裂的微小故障情况,此时开关管的杂散电阻 $R_E$ 和杂散电感 $L_E$ 将分别增大为 $0.24\ \Omega$ 和 $2.4\times 10^{-8}\ \text{H}$ .分别采集3种不同故

2) 逆变器不同位置微小故障情形.

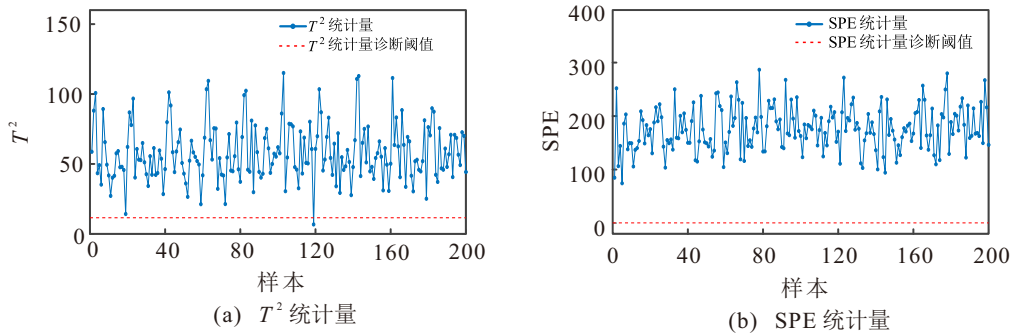


图11 上开关管发生故障时测试样本的 $T^2$ 和SPE统计量与诊断阈值对比

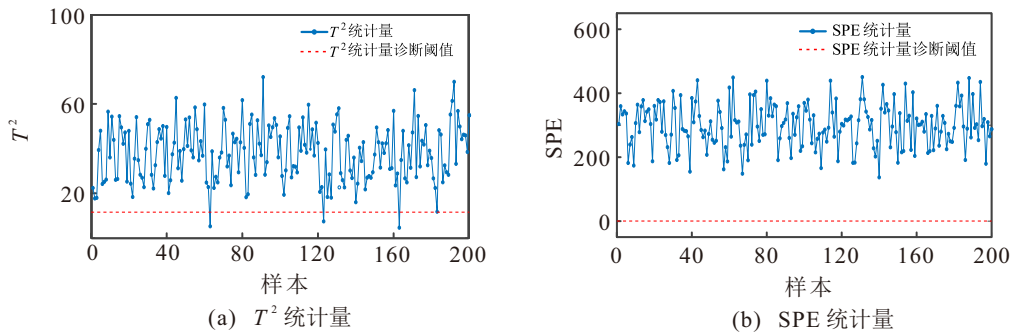


图12 下开关管发生故障时测试样本的 $T^2$ 和SPE统计量与诊断阈值对比

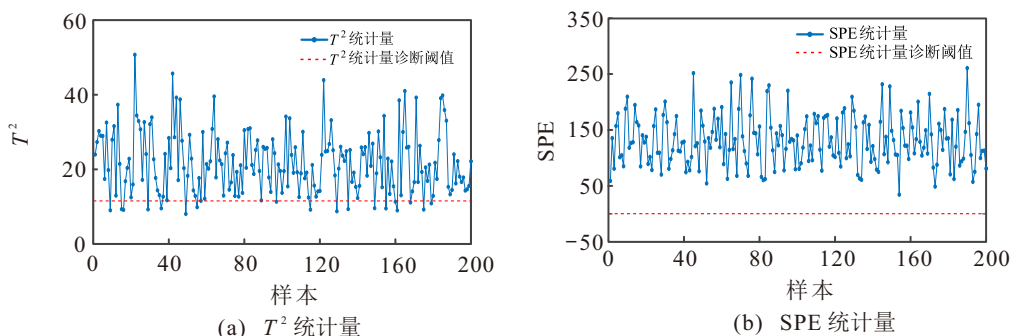


图13 上下开关管同时发生故障时测试样本的 $T^2$ 和SPE统计量与诊断阈值对比

障情况下的 A 相输出电压数据,各自提取得到 200 个测试样本,将测试样本经过 PCA 处理后得到图 11 ~ 图 13 所示的  $T^2$  和 SPE 统计量与诊断阈值对比图。

由图 11 ~ 图 13 所示结果可以看出,在下开关管故障情况下,基于  $T^2$  统计量和 SPE 统计量的故障检出率分别为 98.5% 和 100%,与上开关管发生微小故障的检测结果接近。而上下开关管同时故障时,基于  $T^2$  统计量的故障检出率为 91%,相比单管故障时的故障检出率略微下降,这是因为双管同时故障时故障参数相互影响造成了一定的误差;基于 SPE 统计量的故障检出率仍然保持为 100%。由此可知,当 A 相不同位置的开关管发生微小故障时,PCA 故障诊断方法均具有较好的故障检测能力。

#### 4.2 实验验证

为了进一步验证所提出故障诊断方法,在实验室中搭建了两电平逆变器电路,如图 14 所示。其中整体电路主要由 110 V 直流电源、三相 IGBT 开关管及三相对称阻感负载组成。3 个 IGBT 模块选择的是英飞凌的 FF75R12RT4 模块,其控制信号由 DSP 开发板产生并经过驱动电路输入,驱动电路需要 12 V 直流电源供电。

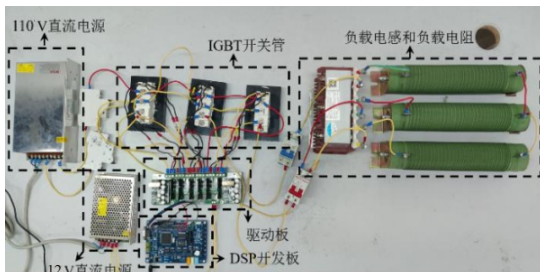
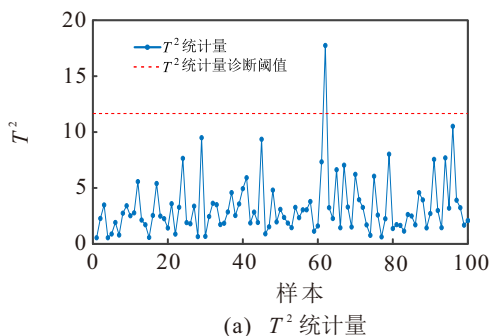
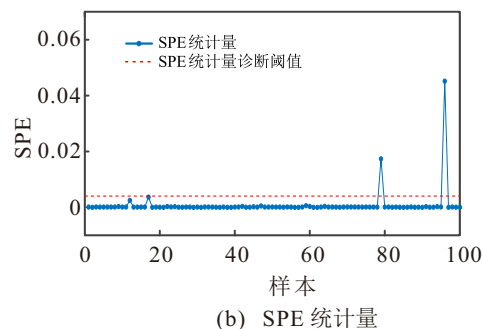


图14 两电平逆变器实验电路

实验选择发射极发生 3 根键合线断裂的 IGBT 模块作为微小故障模块,将两个故障模块分别替换到逆变器 A 相可以实现 A 相不同位置开关管发生微小故障的情况。正常和故障的 IGBT 模块对比如图 15 所示。



(a)  $T^2$  统计量



(b) SPE 统计量

图16 正常样本的  $T^2$  和 SPE 统计量与诊断阈值对比



(a) 正常情况

(b) 3根键合线断裂

图15 正常和 3 根键合线断裂情况下的 IGBT 模块

根据故障诊断流程,首先在正常状态下多次运行逆变器电路,利用示波器采集逆变器 A 相输出电压和 A 相上桥臂两侧电压数据;再根据故障特征参数提取步骤,得到长度 300 的 PCA 训练样本,并求解故障诊断阈值  $T_{th}^2$  和  $SPE_{th}$ 。

##### 1) 正常工作情形。

为了验证 PCA 方法对正常工作状态下的样本是否有误检,另外采集一组逆变器正常工作下的 A 相输出电压数据,从中提取 100 组故障特征参数样本作为测试集,对该测试集进行 PCA 处理并求解相应的  $T^2$  和 SPE 统计量,将其与诊断阈值对比,如图 16 所示。

由图 16 可知,基于  $T^2$  和 SPE 统计量对正常工作状态下的样本进行故障诊断,发生误检的几率分别为 1% 和 2%,可以认为几乎不发生误检。

##### 2) 逆变器不同位置微小故障情形。

为了验证本文所提出方法对不同位置微小故障的故障检测能力,利用两个故障模块分别模拟 A 相上开关管故障、下开关管故障及上下开关管同时故障共 3 种故障类型。分别提取得到 3 组长度均为 100 的故障特征参数样本,将 3 组故障样本分别作为测试集进行 PCA 处理,得到的  $T^2$  和 SPE 统计量与诊断阈值的对比结果如图 17 ~ 图 19 所示。

由上述结果可知,利用 PCA 对 A 相不同位置的开关管微小故障进行诊断时,基于  $T^2$  和 SPE 统计量的故障检出率均为 100%。实验结果表明,基于 PCA

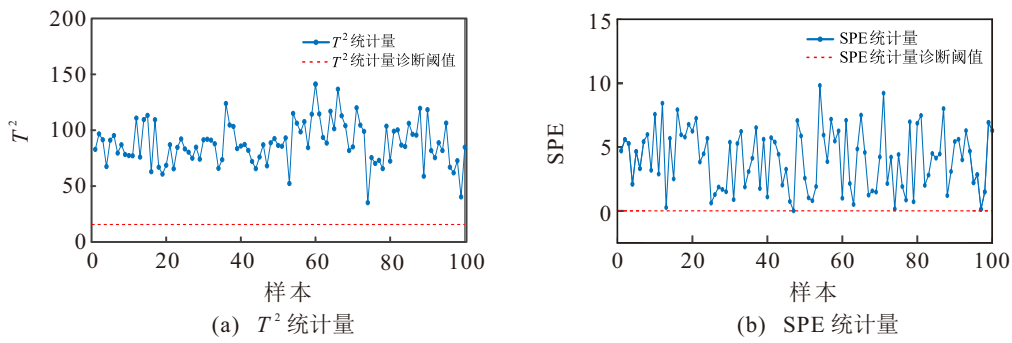


图17 上开关管故障时 $T^2$ 和SPE统计量与诊断阈值对比

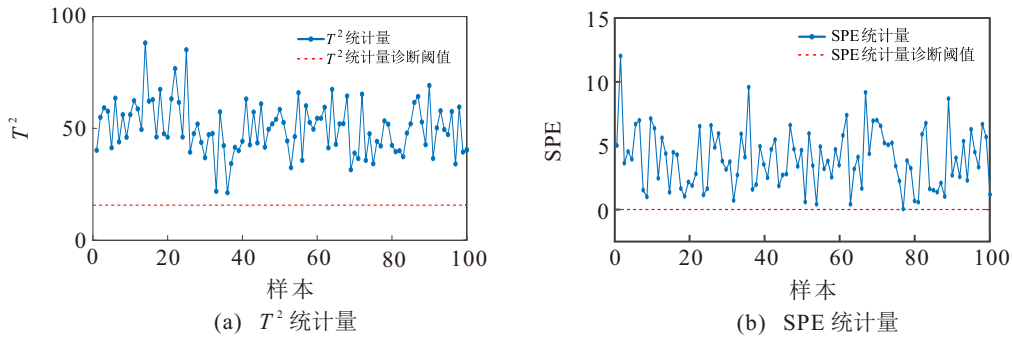


图18 下开关管故障时 $T^2$ 和SPE统计量与诊断阈值对比

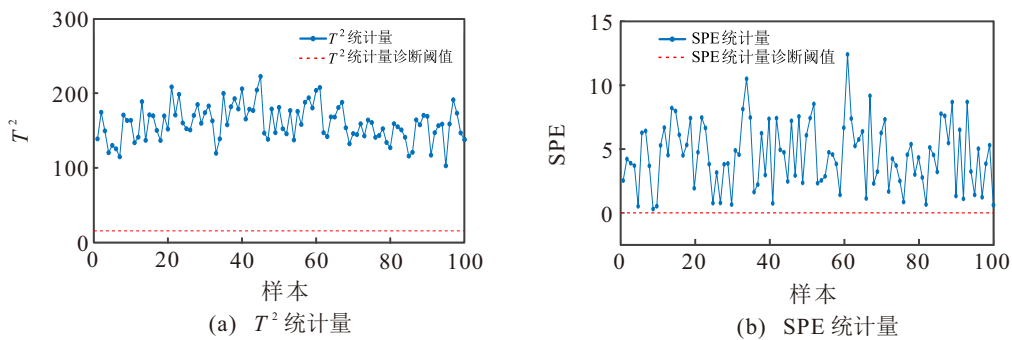


图19 上下开关管同时故障时 $T^2$ 和SPE统计量与诊断阈值对比

的方法既能够在逆变器发生开关管微小故障时较为准确及时地检测出故障,也能够保证在逆变器正常工作不发生误诊断,具有较好的故障诊断能力.

### 5 结论

本文在逆变器输出端选取并提取了能够反映IGBT微小故障的暂态和稳态故障特征参数,并提出了基于PCA统计量的故障诊断策略,通过仿真与实验验证了所提出方法的有效性.

1) 通过分析逆变器中IGBT微小故障与IGBT杂散参数和逆变器输出电压之间的关系,在逆变器输出端选取了包括超调量、峰值时间、峰值电压斜率和稳态电压在内共8个故障特征参数,并采用划分时间片的方式从逆变器输出电压数据中提取.所选参数能够有效地反映IGBT微小故障,避免在逆变器内部安装过多的传感器,在工程上更易于实现.

2) 提出了一种基于PCA的微小故障诊断方法,该方法将原始样本数据分解成主元空间和残差空间,利用两个空间中的统计量 $T^2$ 和SPE实现故障诊断,

在保持高故障检出率的同时还能较大程度地降低误检率.

3) 通过仿真和实验分别模拟不同位置的IGBT微小故障,利用本文所提出PCA故障诊断方法对不同故障进行诊断,验证了所提出PCA故障诊断方法的有效性.

基于本文的研究成果,未来可进一步通过数据驱动的方法对已发生微小故障的逆变器开展故障定位研究,确定故障开关管的具体位置,及时修复或更换相关器件,保证逆变器的稳定可靠运行.

### 参考文献 (References)

[1] 姜斌, 吴云凯, 陆宁云, 等. 高速列车牵引系统故障诊断与预测技术综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 841-855.  
(Jiang B, Wu Y K, Lu N Y, et al. Review of fault diagnosis and prognosis techniques for high-speed railway traction system[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 841-855.)

[2] Xu S Q, Chen X Y, Liu F, et al. A novel adaptive SMO-

- based simultaneous diagnosis method for IGBT open-circuit faults and current sensor incipient faults of inverters in PMSM drives for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-15.
- [3] 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 location of three-level inverter based on phase voltage deviation[J]. *Power Electronics*, 2022, 56(6): 19-22.)
- [4] Gonzalez-Jimenez D, del-Olmo J, Poza J, et al. Data-driven fault diagnosis for electric drives: A review[J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 4024.
- [5] 毛琦, 汪一龙, 王为介, 等. 基于混合数据驱动的牵引整流器故障诊断方法[J]. *铁道科学工程学报*, DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20241684. (Mao Q, Wang Y L, Wang W J, et al. A hybrid data-driven fault diagnosis method for traction rectifier[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20241684.)
- [6] 周晨阳, 沈艳霞. 基于小波分析的二重三相电压型逆变器开路故障诊断[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(9): 65-75. (Zhou C Y, Shen Y X. Open circuit fault diagnosis of dual three-phase voltage source inverter based on wavelet analysis[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(9): 65-75.)
- [7] Wu Y, Zhang Z F, Li Y, et al. Open-circuit fault diagnosis of six-phase permanent magnet synchronous motor drive system based on empirical mode decomposition energy entropy[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 91137-91147.
- [8] 张亚洲, 赵小强, 惠永永, 等. 基于多传感器数据融合的SA-DACNN齿轮箱故障诊断方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(11): 3699-3708. (Zhang Y Z, Zhao X Q, Hui Y Y, et al. SA-DACNN gearbox fault diagnosis method based on multi-sensor data fusion[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(11): 3699-3708.)
- [9] Wang S D, Dragicevic T, Gao Y, et al. Neural network based model predictive controllers for modular multilevel converters[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(2): 1562-1571.
- [10] 黄潇, 冯莉, 罗洪林. 基于GAN-LSTM的PMSM逆变器开路故障诊断研究[J]. *电力电子技术*, 2024, 58(12): 49-53. (Huang X, Feng L, Luo H L. Research on open circuit fault diagnosis of PMAM inverter based on GAN-LSTM[J]. *Power Electronics*, 2024, 58(12): 49-53.)
- [11] 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*, DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.222838. (Liu Z H, Xiao L. Summary of open circuit fault diagnosis and location methods of IGBT in modular multilevel converter[J]. *China Industrial Economics*, DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.222838.)
- [12] Chen H T, Jiang B, Lu N Y, et al. Deep PCA based real-time incipient fault detection and diagnosis methodology for electrical drive in high-speed trains[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(6): 4819-4830.
- [13] Yang Y Y, Zhang P J. A novel bond wire fault detection method for IGBT modules based on turn-on gate voltage overshoot[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(7): 7501-7512.
- [14] Xia Y, Xu Y, Zhou N. A transferrable and noise-tolerant data-driven method for open-circuit fault diagnosis of multiple inverters in a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(7): 8017-8027.
- [15] 姚陈果, 李孟杰, 余亮, 等. 基于脉冲耦合响应的IGBT故障检测方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(15): 3235-3244. (Yao C G, Li M J, Yu L, et al. A condition detecting method for the IGBT module based on pulse coupling response[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(15): 3235-3244.)
- [16] 邱腾飞, 程建华, 宋术全. IGBT功率模块主电路杂散参数提取及分析[J]. *电力电子技术*, 2019, 53(10): 118-120. (Qiu T F, Cheng J H, Song S Q. Parasitic parameter extraction and analysis of IGBT power module[J]. *Power Electronics*, 2019, 53(10): 118-120.)
- [17] 丁雪妮, 陈民铀, 赖伟, 等. 多芯片并联IGBT模块老化特征参量甄选研究[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(13): 3304-3316. (Ding X N, Chen M Y, Lai W, et al. Selection of aging characteristic parameter for multi-chips parallel IGBT module[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(13): 3304-3316.)
- [18] 刘金平, 王杰, 刘先锋, 等. 基于递归稀疏主成分分析的工业过程在线故障监测和诊断[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 2006-2012. (Liu J P, Wang J, Liu X F, et al. Online fault monitoring and diagnosis using recursive sparse principal component analysis[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(8): 2006-2012.)
- [19] Wang G, Yang J H, Jiao J F. Voltage correlation-based principal component analysis method for short circuit fault diagnosis of series battery pack[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(9): 9025-9034.

## 作者简介

朱琴跃 (1970-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电气智能诊断、电力电子变流控制, E-mail: zqymelisa@tongji.edu.cn;

王颖婕 (2000-), 女, 硕士生, 主要研究方向为电气智能诊断、电力电子变流控制, E-mail: 2332156@tongji.edu.cn;

史玉明 (2001-), 男, 硕士生, 主要研究方向为轨道交通电气化智能控制, E-mail: 2332155@tongji.edu.cn;

薛忠一 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为电力电子变流控制, E-mail: 2331811@tongji.edu.cn;

成翔宇 (2002-), 男, 硕士生, 主要研究方向为轨道交通电气化智能控制, E-mail: 2432300@tongji.edu.cn.