

基于多传感器融合的电力电子变换器单管开路故障诊断方法

黄影¹ 王振水¹

HUANG Ying WANG Zhenshui

摘要

电力电子变换器单管开路故障会同时引发电压、电流和温度等多物理量的异常变化。传统故障诊断方法通常仅依赖单一传感器信号进行判断,无法捕捉故障的多维度表现,导致易漏诊隐蔽性故障,误报率较高。为此,文章提出一种基于多传感器融合的电力电子变换器单管开路故障诊断方法。通过部署多个传感器构建多物理场耦合监测网络,实时捕捉电压、电流、温度等故障敏感信号。对捕捉到的信号进行单传感器状态估计,采用滑动平均法处理电压信号、低通滤波处理电流信号、指数加权移动平均法处理温度信号,并进行多传感器信息融合。从融合信号中量化出电压突变幅度与持续时间、电流对称性指标和温度梯度标准差等关键特征参数,提取出关键故障特征。提出多特征融合的故障定位方法,通过构建故障特征向量和决策表,基于特征相似度匹配准确定位故障器件,实现单管开路故障诊断。实验结果表明,该方法在负载突变工况下的故障诊断误报率明显低于其他3种现有方法。

关键词

多传感器融合; 电力电子变换器; 单管开路故障; 关键故障特征; 定位故障器件

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.10.026

0 引言

功率电子变换器被广泛用于工业控制、新能源发电、电动汽车等诸多领域。但在高压大电流环境下,功率开关器件极易出现开路故障,严重影响了系统的安全与可靠性。因此,快速准确地诊断出功率电子变换器中的单管断路故障是保证电网安全可靠的关键。针对电力电子变换器单管开路故障诊断问题,荣飞等人^[1]提出了基于最近电平逼近调制的IGBT开路故障诊断方法,通过分析子模块故障特性、计算电容电压中位数进行预测值实现诊断。张磊等人^[2]提出了基于FastICA-LDA的故障诊断方法,用快速独立成分分析算法判定故障,通过线性判别分析模型输出工作状态编号实现诊断。宋保业等人^[3]提出基于深度自编码器网络的开关管开路故障诊断方法,自动学习故障特征实现端到端智能诊断。然而,这些方法多依赖单一信号源或特征,易受噪声干扰,无法捕捉故障多维度表现,诊断误报率较高。针对这一问题,本文提出了一种基于多传感器融合的故障诊断方法。该方法通过配置电压、电流和温度等多种传感器,全面采集故障信号,并采用多传感器信息融合技术进行状态估计和关键故障特征提取,最终实现对故障部件的精确定位。

1 基于多传感器融合的变换器单管开路故障诊断设计

1.1 多传感器融合监测下单管开路故障信号捕捉

本文针对电力电子变换器单管开路故障,鉴于该故障发

生时其电气和热特性会产生异常变化,且这些变化会体现在电压、电流、温度等信号上,为及时发现故障以保障设备正常运行、避免故障扩大引发设备损坏或系统停机,首先通过部署多个传感器构建了多物理场耦合监测网络。在电压监控中,将高精度的闭环霍尔电压传感器安装于各功率开关装置的集极和发射极处,并确保传感器工作带宽大于1 MHz,以适应如100 kHz的开关频率^[4]。在正常工作状态下,功率开关装置开启时其两端的电压几乎为零,断开时为母线电压;而当发生开路故障时,故障元件上的电压会异常升高,且不会随着驱动信号的改变而变化。

在电流监测方面,基于上述电压监控,利用开环霍尔传感技术和高精度的并联电阻,结合差分放大器,对三相电流进行闭环检测^[5]。检测电路采用罗氏线圈,用于捕获电流的高频率谐波。对于三相系统,对每一相的电流进行独立监控,并计算其不平衡度,用公式表示为:

$$I_m = \frac{\max(|I_a|, |I_b|, |I_c|) - \min(|I_a|, |I_b|, |I_c|)}{I_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_a 、 I_b 、 I_c 分别表示各相电流; I_0 表示平均电流。

通过上述设计,实现了对电力电子变换器单管开路故障敏感信号的高效捕捉,从而能够及时察觉故障,保障电力电子变换器的稳定运行。

1.2 基于多传感器融合的信号状态估计

在电力电子变换器单管开路故障诊断时,开路故障会体现在电压异常、电流不对称、局部温升等多个物理量变化中,捕捉到的故障敏感信号有小波动。若未进行状态估计,直接

1. 郑州科技学院电子与电气工程学院 河南郑州 450064

依据这些带噪声的信号判断故障，易将正常波动误判为故障。因此，捕捉到信号后需进一步进行状态估计。首先进行单传感器信号状态估计，对于电压信号，考虑到其可能受噪声干扰而波动，对一段时间内的电压数据进行滑动平均处理，用公式表示为：

$$V_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (2)$$

式中： V_s 表示稳态电压估计值； N 表示滑动窗口大小； V_i 表示窗口内的电压数据。

通过对稳态电压的估算，并将其与设定的门限相比较，来判定该电压有无异常。在此基础上，鉴于电流信号同样可能存在噪声且其平衡状态与故障密切相关，利用低通滤波器对电流进行滤波，得到了电流的等效大小和对称度^[6]。当对称度被用来衡量电流的大小时，主要用于评估三相电流的平衡性状态。对于温度信号，由于温度的变化趋势对于判断故障隐患至关重要，使用指数加权移动平均法来平滑数据，并追踪温度趋势，用公式表示为：

$$T_e(k) = \alpha \cdot T(k) + (1 - \alpha) \cdot T_e(k-1) \quad (3)$$

式中： α 表示平滑系数； $T(k)$ 表示当前温度值。

该方法能够赋予近期数据更高的权重，从而更准确地反映温度的变化趋势，有助于提前发现潜在的故障隐患。

单传感器仅反映某一物理量的局部信息，不同传感器信号间存在内在关联，单一传感器估计无法全面准确判断故障。为此，在得到单传感器信号状态估计后，进行信息融合，融合规则如下：

(1) 电压 - 电流关联分析：若某器件电压异常升高且所在相电流下降，则标记为疑似开路。

(2) 温度 - 电压协同判断：若某器件温度异常升高且电压波动超阈值，则进一步确认故障。

若 A 相上桥臂 IGBT 电压异常升高、电流下降且温度超标，则判定其存在开路故障。通过上述步骤，完成基于多传感器融合的信号状态估计。

1.3 基于多传感器融合信号的关键故障特征提取

在电力电子变换器单管开路故障诊断过程中，融合估计信号状态后，得到的融合信号虽然综合了多个传感器的信息，但信息繁杂，包含大量与故障直接相关性不强的数据，难以直接确定故障的具体位置和类型。为将融合信号转化为反映故障本质的特征量，在获得融合信号状态后，进一步提取关键故障特征，为准确、快速定位故障器件和诊断单管开路故障提供依据。

电压信号特征主要关注故障瞬间的电压冲击强度及其持续时间^[7]。由于单管开路故障可能会导致电压出现突变，因此通过计算电压异常升高幅度 ΔV 量化开路故障导致的电压突变程度，用公式表示为：

$$\Delta V = V_p - V_s' \quad (4)$$

式中： V_p 表示故障期间电压峰值； V_s' 表示稳态电压值。

在此基础上，统计电压超出设定阈值的连续时间 τ_V ，以区分瞬时干扰与持续性故障。

电流信号特征的提取聚焦于故障对电流幅值与平衡性的影响。单管开路故障会破坏电流的平衡状态，通过计算电流对称性指标 σ_I 反映电流平衡性破坏程度，用公式表示为：

$$\sigma_I = \text{std}(I_A, I_B, I_C) \quad (5)$$

式中： I_A 、 I_B 和 I_C 分别表示三相电流有效值；std 表示标准差计算。若某相电流有效值下降且 σ_I 超过 5%，则表明该相可能存在开路故障。

温度信号特征的提取通过计算温度梯度标准差 σ_{VT} ，量化局部温度波动的离散程度，用公式表示为：

$$\sigma_{VT} = \text{std}(\nabla T_x, \nabla T_y, \nabla T_z) \quad (6)$$

式中： ∇T_x 、 ∇T_y 和 ∇T_z 分别表示温度梯度在 3 个方向的分量。若 σ_{VT} 超过阈值，则表明器件存在非均匀热分布或异常温升。

通过上述步骤，从融合信号中提取出关键故障特征，这些特征能够描述单管开路故障在电压、电流和温度方面的表现，将用于后续的故障诊断和定位。

1.4 多特征融合决策表与相似度计算下的开路故障定位方法

在单管开路故障诊断过程中，提取出的关键故障特征虽能描述故障在电压、电流和温度方面的表现，但单一特征往往仅能反映故障的某一方面信息，难以全面、准确地确定故障器件的具体位置和类型。鉴于不同故障特征之间可能存在相互关联和补充的关系，本节提出一种多特征融合的故障定位方法。

该方法首先将电压、电流、温度三类特征参数进行融合，构建故障特征向量 $\mathbf{F} = [\Delta V, \tau_V, \sigma_I, \sigma_{VT}]$ 。根据特征向量与故障模式的对应关系，构建决策表，如表 1 所示。

表 1 故障特征决策表

序号	特征参数	正常状态范围	故障状态阈值
1	ΔV	$< 5\% V_{dc}$	$> 20\% V_{dc}$
2	τ_V	$< 1 \text{ ms}$	$> 10 \text{ ms}$
3	σ_I	$< 3\%$	$> 5\%$
4	σ_{VT}	< 0.3	> 0.5

基于特征相似度进行故障定位。首先针对变换器不同器件的单管开路故障，预先测量并存储其故障特征向量 $\mathbf{F}_r$ 。进一步将当前故障特征向量 $\mathbf{F}_c$ 与数据库中的 $\mathbf{F}_r$ 进行相似度计算，用公式表示为：

$$S_i = \frac{\mathbf{F}_c \cdot \mathbf{F}_{r,i}}{\|\mathbf{F}_c\| \cdot \|\mathbf{F}_{r,i}\|} \quad (7)$$

式中： S_i 表示第 i 个参考故障的特征相似度，取值范围为 $[0,1]$ 。设定相似度阈值 S_{th} ，若 $S_i > S_{th}$ ，则判定为第 i 个参考故障对

应的器件发生开路故障。通过上述步骤能够准确定位电力电子变换器中的单管开路故障器件，从而实现故障诊断。

2 实验分析

2.1 测试环境

实验基于三相两电平电压源型逆变器（VSI）平台开展，该平台采用 IGBT 作为功率开关器件，直流母线电压设定为 600 V，开关频率为 10 kHz，其拓扑结构如图 1 所示。

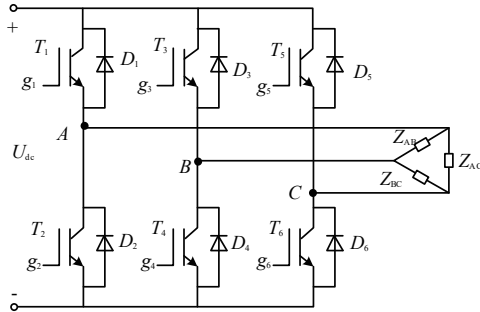


图 1 三相两电平电压源型逆变器拓扑结构

在实验中，将 LEM-LV-25P 闭环霍尔传感器分别安装在 IGBT 的集电极和发射极的两端，使其带宽达到 1 MHz，且非线性度 < 0.1%，能够精确测量 IGBT 两端的电压。母线电流采用开环霍尔传感器监测，相电流采用高精度分流电阻配合差分放大器实现闭环测量，输出端布置罗氏线圈，获取电流的幅值和平衡性等信息。在此基础上，实验利用可编程电源仿真负荷的变化，设定 IGBT 单管开路的故障，对本文提出的诊断方法进行验证。

2.2 实验参数

在实验过程中，为验证基于多传感器融合的电力电子变换器单管开路故障诊断方法的有效性，设置了关键实验参数，具体如表 2 所示。在 IGBT 的工作频率（10 kHz）和故障的特征频带基础上，将滑动窗设置为 10 个切换周期，并将其工作在 5 kHz 范围内，实现对高频噪声的抑制。在此基础上，利用 EWMA 算法对温度进行实时监控，并利用光滑系数 0.2 进行温度跟踪。采用 ROC 曲线优选方法，将故障特征相似性阈值设定为 0.8。在实验过程中，采用断开 IGBT 的方式对开路故障进行仿真。同时，通过设定负载突变范围，将最大转矩由 5 N·m 改为 14 N·m，以检验其对动态负荷的响应能力。

表 2 实验相关参数设置表格

序号	参数名称	参数设置值
1	滑动窗口大小	100 个采样点
2	低通滤波器截止频率	5 kHz
3	平滑系数	0.2
4	相似度阈值	0.8
5	故障注入方式	切断 IGBT 驱动信号模拟开路故障
6	负载突变范围	转矩从 5 N·m 突变为 14 N·m

2.3 开路故障诊断结果

不同负载条件下，变换器输出电压、电流会变化，负载变化还会改变内部功率损耗，影响温度分布。为验证诊断方法有效性，在负载变化条件下，应用本文提出的基于多传感器融合的电力电子变换器单管开路故障诊断方法开展实验，诊断结果如图 2 所示。

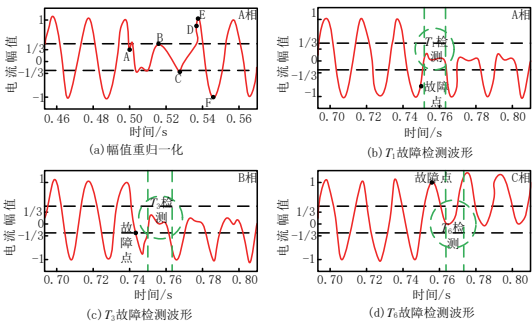


图 2 开路故障定位诊断结果图

图 2 呈现了开路故障定位诊断的详细情况。在图 2(a) 中，可以清晰地观察到负载功率在点 A 处迅速下降。随后， T_1 幅值在点 B 发生变化， T_2 幅值在点 G 也出现改变。本文的诊断方法在点 D 监测到这些幅值变化，并立即进行重新归一化处理，使得幅值 T_1 和 T_2 都归一化为 1，如点 E、F 所示。图 2(b~d) 分别展示了 T_1 、 T_3 开路故障以及 T_6 故障检测波形的诊断情况。 T_1 、 T_3 和 T_6 的故障检测波形内的所有电流值均低于 1/3。依据构建的表 1 故障特征决策表，对提取的故障特征进行匹配和判断，相似度计算能够准确地衡量当前故障与已知故障之间的相似程度。设定相似度阈值后，判断当前故障对应的器件，最终检测结果为 T_1 和 T_3 发生开路故障。

上述实验结果表明，本文所提出的基于多传感器融合的电力电子变换器单管开路故障诊断方法，能够在负载变化的复杂工况下，实现故障器件的精确定位。

2.4 不同方法诊断误报率对比分析

为了进一步验证本文所提方法的优越性，将其与现有的 3 种故障诊断方法进行了对比。3 种方法分别为：方法 1 基于最近电平逼近调制的 IGBT 开路故障诊断方法，方法 2 基于 FastICA-LDA 的故障诊断方法和方法 3 基于深度自编码网络的开关管开路故障诊断方法。4 种方法在相同实验条件下的诊断误报率结果如图 3 所示。

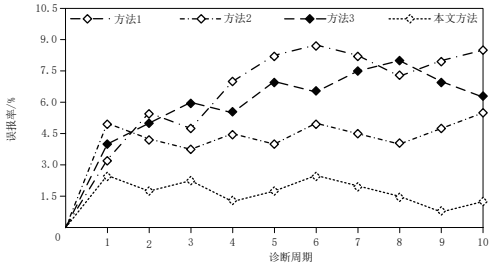


图 3 不同方法诊断误报率对比图

（下转第 120 页）

- [5] Flannel[EB/OL].[2025-06-19].<https://github.com/flannel-io/flannel>.
- [6] 刘渊, 乔巍. 云环境下基于 Kubernetes 集群系统的容器网络研究与优化[J]. 信息网络安全, 2020, 20(3): 36-44.
- [7] QI S X, KULKARNI S G, RAMAKRISHNAN K K. Assessing container network interface plugins: functionality, performance, and scalability[J]. IEEE transactions on network and service management, 2020, 18(1): 656-671.
- [8] QI S X, KULKARNI S G, RAMAKRISHNAN K K. Understanding container network interface plugins: design considerations and performance[C/OL]//2020 IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks, LANMAN.Piscataway:IEEE,2020[2025-02-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9153266>.DOI: 10.1109/LANMAN49260.2020.9153266.
- [9] NOVIANTI S, BASUKI A. The performance analysis of container networking interface plugins in kubernetes[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology.NewYork: ACM, 2021: 231-234.

- [10] Calico[EB/OL].[2025-04-25]. <https://github.com/projectcalico/calico>.
- [11] Cilium[EB/OL].[2025-06-09]. <https://cilium.io/>.
- [12] 尚佳友, 王晓锋, 刘渊. 面向 Kubernetes 的高性能网络方案研究[J]. 现代计算机, 2021 (21): 15-21.
- [13] 肖文扬, 刘伟鸿, 朱宗卫. 容器网络插件的测试与量化分析[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(8): 140-148.
- [14] 严振星. 云环境下的容器网络性能优化与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.

【作者简介】

李雯(1987—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 副研究员, 研究方向: 交通信息工程及控制。

戴琳琳(1983—), 女, 福建莆田人, 硕士研究生, 研究员, 研究方向: 铁路客运信息化应用。

李贝贝(1987—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生, 副研究员, 研究方向: 容器云原生、人工智能等。

潘浪涛(1985—), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 副研究员, 研究方向: 铁路计算机应用技术等。

(收稿日期: 2025-04-30 修回日期: 2025-10-14)

(上接第 114 页)

由图 3 可以看出, 与其他 3 种方法相比, 本文所提方法的单管开路故障诊断误报率最低。这主要得益于本文方法综合考虑了电压、电流和温度等多种信号, 通过多特征融合和模式识别, 实现了故障器件的精准定位与诊断。

3 结语

本文针对电力电子变换器单管开路故障诊断, 创新提出基于多传感器融合的方法。搭建多物理场耦合监测网络, 实时捕获电压、电流、温度等故障敏感信号, 采用滑动平均、低通滤波等技术对单传感器信号精准状态估计, 运用关联分析等融合规则挖掘信号内在联系。在此基础上, 量化电压突变幅度、电流对称性指标等关键特征参数, 精准提取故障特征。构建故障特征向量 and 决策表, 利用特征相似度匹配定位故障器件。实验验证表明, 在负载突变工况下, 该方法误报率大幅降低, 有效提升了故障诊断可靠性。

参考文献:

- [1] 荣飞, 孙克强. 基于最近电平逼近调制的 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 湖南电力, 2022, 42(4): 7-12.
- [2] 张磊, 余茂全, 夏远洋. 基于 FastICA-LDA 的光伏并网逆变器故障诊断[J]. 新余学院学报, 2024, 29(5): 40-48.

- [3] 宋保业, 鲁朋, 许琳. 基于深度自编码器网络的逆变器开关管开路故障诊断[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 117-128.
- [4] 张国宝, 王朝廷, 黄伟民, 等. 基于多源传感器数据融合的断路器故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 660-668.
- [5] 刘洋, 赵鲁, 马呈瑶, 等. 双向 CLLC 谐振变换器开关管开路故障特性分析[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 531-539.
- [6] 申永鹏, 马梓洋, 金楠, 等. 三相电压源型逆变器单传感器相电流重构故障诊断策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(10): 135-146.
- [7] 罗屿, 陈春阳, 石英春, 等. 基于电流值分析的三相逆变器开关管开路故障诊断方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(10): 4370-4382.

【作者简介】

黄影(1998—), 女, 重庆人, 硕士, 助教, 研究方向: 电力电子技术。

王振水(1991—), 男, 河南邓州人, 硕士, 助教, 研究方向: 电力电子技术、电机及驱动技术。

(收稿日期: 2025-04-16 修回日期: 2025-10-11)