

新能源直流汇集系统中电力电子变压器的电子信息故障诊断技术

朱林峰¹, 王磊², 刘超然³

(1. 淄博瑞安输变电工程有限公司, 山东 淄博 255000;

2. 利华益集团股份有限公司, 山东 东营 257400;

3. 山东中科先进技术有限公司, 山东 济南 250101)

摘要 针对新能源直流汇集系统中电力电子变压器 (PET) 电子信息故障隐蔽性强、耦合度高、传统保护难以精准识别的问题, 本文系统分析 PET 输入级、隔离级、输出级及电子信息单元的故障机理与特征规律, 构建电气量、信息量、时频量融合的多维度故障特征提取体系, 提出分层分级的融合式故障诊断架构, 建立基于 CNN-BiLSTM-Attention 与 D-S 证据理论的联合诊断模型, 形成故障识别、精确定位、早期预警与闭环处置的完整技术方案, 以期为新能源直流汇集系统的智能运维与安全稳定运行提供技术参考。结果表明, 该技术可实现功率器件、驱动回路、采样单元及通信链路故障的毫秒级识别, 误报率低于 0.5%。

关键词 新能源直流汇集系统; 电力电子变压器; 电子信息故障; 故障特征提取; 故障预警

中图分类号: TM41; TP277

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.004

0 引言

电力电子变压器是新能源直流汇集系统的核心能量变换与管控枢纽, 集成电压变换、电气隔离、功率调节与多源协同控制功能。其内部集成大量功率半导体器件、电子控制单元与通信模块, 在高频开关、强电磁干扰、宽负荷波动工况下, 易发生各类电子信息故障。此类故障潜伏期短、传播速度快, 易引发系统过压过流、功率失衡甚至停运。本文围绕 PET 电子信息故障的精准诊断需求, 系统研究故障分类、机理分析、特征提取、模型构建与系统实现等关键技术, 构建标准化的智能故障诊断技术体系。

1 PET 拓扑结构与电子信息故障分类

1.1 典型拓扑构成

新能源直流汇集系统用 PET 普遍采用三级模块化拓扑: 输入级为级联 H 桥变换器, 实现中压直流接入与功率均分; 隔离级由多个双有源桥 (DAB) 单元并联组成, 完成高频隔离与电压匹配; 输出级为双向 DC/DC 变换器, 适配低压直流母线与储能、负荷接口。配套系统包含 IGBT 驱动电路、电压电流采样单元、DSP/FPGA 主控单元及光纤以太网通信网络, 构成电能变换与电子信息管控的完整闭环^[1]。

1.2 电子信息故障分类

电子信息故障指由电子元器件失效、电路异常及信息传输错误引发的功能故障, 区别于绝缘击穿、机械损坏等物理故障, 可具体分为五类。(1) 功率器件故障: IGBT 开路、短路、栅极氧化层损坏、反并联二极管退化; (2) 驱动控制故障: 驱动电源欠压、驱动脉冲丢失、死区时间异常、主控芯片运算错误、PWM 信号畸变; (3) 采样传感故障: 电压/电流传感器零点漂移、增益偏差、信号调理电路故障、电磁干扰导致的采样失真; (4) 通信故障: 光纤链路损耗过大、接口接触不良、数据丢包、误码率超标、模块间时钟失步; (5) 复合故障: 两种及以上故障并发, 或单一故障引发的连锁式故障扩散。

1.3 故障传播特性

PET 电子信息故障具有层级传导与交叉耦合特性。输入级器件故障会导致直流母线电压纹波增大; 隔离级 DAB 单元故障将引发功率传输中断与模块间环流; 输出级故障直接影响负荷供电稳定性; 采样故障会误导控制逻辑, 形成“采样失真—控制失稳—故障加剧”的恶性循环; 通信故障会破坏多模块协同控制, 导致系统功率失衡。

作者简介: 朱林峰 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

2 电子信息故障机理与特征表征

2.1 功率器件故障机理

IGBT 短路故障多由过电压击穿、过流过热导致,故障后呈现低阻抗特性,故障电流在微秒级内急剧上升^[2]。IGBT 开路故障多由键合线脱落、栅极驱动失效引发,表现为桥臂电流断续、输出电压出现半波畸变、二次谐波含量显著升高。器件退化阶段表现为导通压降增大、开关延时变长,可通过电参数变化实现早期识别。

2.2 驱动与控制故障机理

驱动回路故障主要表现为驱动电压幅值不足、上升沿/下降沿延迟,导致 IGBT 导通不充分或关断不彻底,产生额外开关损耗与电压尖峰。控制单元故障由程序跑飞、存储器损坏、电磁干扰引发,表现为 PWM 占空比异常、闭环控制稳态误差增大、系统响应变慢甚至失控。

2.3 采样与传感故障机理

采样故障分为加性故障与乘性故障,加性故障表现为零点偏移,乘性故障表现为增益偏差。采样信号叠加高频噪声会导致控制回路振荡,采样数据丢点会引发控制逻辑误判。接地电位差与电磁耦合干扰是导致采样失真的主要外部诱因。

2.4 通信故障机理

通信故障分为物理层故障与协议层故障。物理层故障包括光纤断裂、接口损坏,表现为通信完全中断;协议层故障包括数据帧校验错误、时序错乱,表现为数据丢包、指令执行延迟。多模块并联系统中,通信故障会破坏均压均流控制,引发模块间功率环流。

2.5 复合故障耦合机理

复合故障是实际工程中最常见且最难诊断的故障类型,多由单一故障未及时处置引发连锁反应形成。例如:IGBT 短路故障会产生瞬时大电流,烧毁驱动电路的光耦与电阻,进而导致驱动脉冲丢失;驱动异常又会引发相邻桥臂直通,造成更多器件损坏;同时,故障产生的强电磁干扰会耦合至采样回路,导致采样数据失真,进一步误导控制逻辑^[3]。复合故障的特征相互叠加、相互掩盖,单一信息源难以实现准确诊断,必须依赖多源信息融合技术。

3 多维度故障特征提取技术

3.1 故障特征集构建

构建涵盖电气特征、信息特征、时频特征的三维特征集。(1) 电气特征:直流母线电压有效值、桥臂

电流峰值、谐波总畸变率、d/q 轴电压电流分量、功率波动量;(2) 信息特征:驱动脉冲占空比、采样值偏差、通信误码率、控制指令跟踪误差、模块间功率差;(3) 时频特征:VMD 分解各模态分量能量、小波包能量熵、希尔伯特变换瞬时幅值与相位。

3.2 特征选择与降维

高维原始特征集存在冗余信息与无关特征,会增加模型计算量并降低诊断精度。采用主成分分析(PCA)与互信息法结合的特征选择策略:先通过 PCA 对特征集进行线性降维,保留累计贡献率 95% 以上的主成分;再利用互信息法计算各主成分与故障标签的相关性,剔除相关性低于阈值的特征,最终得到低维、高辨识度的最优特征子集,可将模型推理速度提升 30% 以上。

3.3 时频特征增强

采用变分模态分解(VMD)对非平稳故障信号进行分解,克服经验模态分解的模态混叠问题。计算各模态分量的小波包能量熵,表征信号能量分布的异常变化。通过希尔伯特黄变换提取故障瞬态特征,实现微弱早期故障的特征增强,有效抑制背景噪声干扰。分解层数设置为 6 层,惩罚因子取 2 000,可在保证分解精度的同时,有效分离故障特征分量与噪声分量。

3.4 数据预处理

对原始采样数据进行标准化预处理:采用 3σ 准则剔除异常值,通过滑动平均滤波抑制随机噪声,利用最小二乘法拟合传感器误差模型实现在线校准。对多通道数据进行时间戳对齐,保证不同来源数据的时序一致性。采用 Z-score 标准化方法对特征数据进行归一化处理,将不同量纲的特征映射至同一尺度,消除量纲差异对深度学习模型训练的影响,提升模型收敛速度与诊断精度。

3.5 通信信息特征提取

提取通信链路的误码率、丢包率、平均传输延时、时钟偏差等统计特征,构建通信健康度指数。通过解析通信协议帧结构,识别帧校验错误、序列号异常等隐性故障,实现通信链路状态的量化评估。

4 融合式故障诊断模型构建

4.1 分层分级诊断架构

采用“底层快速预警—中层模式识别—上层融合决策”的三级诊断架构。底层通过阈值判断实现突变故障的快速报警;中层基于深度学习模型完成故障类型与位置识别;上层融合多源信息输出最终诊断结论,兼顾诊断的快速性与准确性。

4.2 CNN-BiLSTM-Attention 故障识别模型

构建 CNN-BiLSTM-Attention 混合深度学习模型。CNN 层采用 3 层卷积核大小为 3×1 的一维卷积,提取时频图的局部空间特征;BiLSTM 层包含 64 个隐藏单元,同时捕捉故障信号的前后时序依赖关系;注意力机制层自适应加权关键特征段,提升对微弱故障与复合故障的识别能力^[4]。模型采用 Adam 优化器进行训练,初始学习率设为 0.001,批次大小为 32,迭代次数为 100 次,采用早停策略防止过拟合。模型输入为预处理后的时序信号与时频特征,输出为故障类型与置信度。

4.3 基于改进 D-S 证据理论的融合决策

将电气特征、驱动状态、采样信息、通信状态作为独立证据体,通过 D-S 证据理论进行多源信息融合。针对传统 D-S 证据理论在处理高冲突证据时存在的悖论问题,引入证据距离与可信度权重,对原始基本概率分配进行修正,再利用 Dempster 组合规则进行证据合成,得到最终的故障诊断结果。该方法可有效解决单一信息源诊断的不确定性问题,提升诊断结果的可靠性。

4.4 故障精确定位

采用子模块残差比较法实现故障模块定位,通过计算实际输出与理论输出的残差,定位异常子模块。结合桥臂电流矢量分析与电压状态观测,进一步定位故障器件与故障回路,实现从系统级到元件级的精准定位。针对小样本故障定位难题,引入迁移学习技术,将通用故障数据集训练的模型参数迁移至目标 PET 系统,仅需少量现场故障数据即可完成模型微调,定位准确率提升至 98% 以上。

5 故障诊断系统实现与预警机制

5.1 分级预警机制

建立四级预警体系:正常态、关注态、预警态、故障态。对器件退化、采样漂移等渐进式故障设置关注与预警阈值,实现提前 72 小时预警;对短路、驱动丢失等突变式故障设置紧急跳闸阈值,实现微秒级保护动作。关注态预警触发后,加密监测频次至 5 分钟/次;预警态触发后,暂停相关区域功率调节,组织现场排查;故障态触发后,立即切断故障模块电源,启动备用模块^[5]。同时,基于 LSTM 网络构建功率器件剩余使用寿命预测模型,以导通压降、结温、开关次数为输入,预测器件剩余寿命,指导预防性维护。

5.2 硬件系统架构

诊断系统采用“FPGA+DSP”双核架构。FPGA 选用 Xilinx Artix-7 XC7A35T 芯片,负责 16 通道高速同步采样与实时特征提取,采样率不低于 1 MS/s,AD 转换精度为 16 位;DSP 选用 TI TMS320F28379D 芯片,运行深度学习诊断算法与融合决策逻辑,平均诊断响应时间小于 10 ms。系统配备 2 路光纤通信接口与 1 路千兆以太网接口,电源模块采用多级隔离设计,输入输出隔离电压不低于 2 500 V,有效抑制共模干扰。

5.3 软件功能流程

软件系统包含数据采集、预处理、特征计算、模型推理、故障报警、定位显示、日志存储等模块。诊断流程为:实时数据采集→预处理与特征提取→分级阈值判断→深度学习模式识别→多源信息融合决策→预警/保护动作→诊断结果归档。

6 结束语

电力电子变压器电子信息故障诊断是保障新能源直流汇集系统可靠运行的关键技术。本文系统分析了 PET 各类电子信息故障的机理与特征,构建了多维度故障特征提取体系与融合式诊断模型,形成了完整的智能故障诊断技术方案。该技术可有效提升故障识别的准确性与实时性,实现故障的早发现、早诊断、早处置。未来研究可进一步面向高压大容量 PET 与多场站协同场景,深化数字孪生与边缘计算技术的应用,研究分布式协同故障诊断方法,提升系统对复杂复合故障的应对能力,为新型电力系统中新能源的高效可靠并网提供技术保障。

参考文献:

- [1] 陈涛,苏亮亮,张志学,等.牵引电力电子变压器系统关键技术研究[J].机车电传动,2022(03):130-137.
- [2] 李凯,赵争鸣,袁立强,等.面向交直流混合配电系统的多端口电力电子变压器研究综述[J].高电压技术,2021,47(04):1233-1250.
- [3] 马嘉昊.电能路由器的电磁暂态通用解耦与仿真方法研究[D].北京:华北电力大学(北京),2023.
- [4] 刘科研,盛万兴,赵鹏杰,等.信息物理环境下基于电力电子变压器的跨台区光伏消纳策略[J].电力自动化设备,2020,40(12):66-72,87.
- [5] 廖清阳,王军,胡凯强,等.基于深度并行 CNN-BiLSTM 的能源互联网电负荷和热负荷联合预测模型[J].中国测试,2022(04):146-153.