

DOI:10.11784/tdxbz202510017

多维数据驱动电压源型变流器状态感知技术及其应用综述

田艳军^{1,2}, 任文字^{1,2}, 刘海军³, 陈 涵³, 王志凯³

(1. 河北省分布式储能与微网重点实验室, 保定 071003; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 保定 071003;

3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要: 电压源型变流器(VSC)广泛应用于分布式发电与储能单元的并网应用领域, 其运行可靠性对系统的安全稳定运行至关重要。电力电子设备中, 功率开关器件和无源器件(如电感、电容)在其全寿命周期内存在参数衰减与特性退化, 严重影响设备可靠性和运行特性。由器件老化引发的参数性故障通常难以直接观测, 若未及时识别并处理, 可能进一步演变为结构性故障, 从而威胁系统运行安全并造成经济损失。因此, 基于多维数据驱动的 VSC 状态感知技术, 已成为实现其健康状态监测、退化趋势评估与故障预警等进一步应用的关键手段, 对提高 VSC 系统运行可靠性具有重要意义。本文以并网逆变器为研究对象, 首先阐述 VSC 典型拓扑结构与控制逻辑架构, 包括辅助控制、双闭环控制及脉宽调制环节。其次, 梳理 VSC 多维度数据体系与分类, 论述常规反馈数据、直接状态监测数据以及感知数据的特点, 并对比分析不同类别数据的获取方法与测量技术。之后从数据获取、处理建模与工程应用 3 个层面分析技术应用框架, 系统论述状态感知技术在状态评估、故障诊断、冗余控制与寿命预测等典型场景中的应用路径与发展现状。最后, 提出当前基于多维数据驱动的 VSC 状态感知技术在实际应用中面临的关键挑战, 并对其未来发展趋势进行展望, 旨在进一步提升 VSC 状态感知的精准性与工程实用性。

关键词: 电压源型变流器; 多维数据驱动; 状态感知

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)10-0997-18

Multidimensional Data-Driven State Perception Technologies for Voltage Source Converters and Their Applications: A Review

Tian Yanjun^{1,2}, Ren Wenyu^{1,2}, Liu Haijun³, Chen Han³, Wang Zhikai³

(1. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-Grid, Baoding 071003, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Voltage source converters (VSCs) have been employed extensively in grid integration applications for distributed generation and energy storage units. Their operational reliability is critical to safe, stable system operations. In power electronic equipment, power switching devices and passive components (e.g., inductors and capacitors) undergo parameter degradation and characteristic deterioration throughout their lifecycle, significantly affecting equipment reliability and operational performance. However, parametric faults caused by device aging are usually difficult to observe directly. If not promptly identified and addressed, these faults may evolve into structural failures, threatening operational safety and causing economic losses. Consequently, multidimensional data-driven VSC state perception technology has emerged as a key approach for health status monitoring, degradation trend assessment, and fault prediction, with significant implications for enhancing the operational reliability of VSC systems. This paper considers grid-connected inverters as the research object. First, the typical topological structure and control logic framework of VSC, including auxiliary control, dual-closed-loop control, and pulse width

收稿日期: 2025-10-21; 修回日期: 2025-12-12.

作者简介: 田艳军(1986—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 田艳军, yti@ncepu.edu.cn.

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52039925000A-060-ZN).

Supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52039925000A-060-ZN).

modulation, are established. Second, the multidimensional data framework and classification for VSC are summarized, and the characteristics of conventional feedback data, direct condition monitoring data, and perception data are discussed. The acquisition methods and measurement techniques for each data type are compared and analyzed. Subsequently, the paper examines the technical application framework across three levels: data acquisition, processing and modelling, and engineering implementation. This framework enables a systematic discussion of the application pathways and development status of state perception technology in typical scenarios, including condition assessment, fault diagnosis, redundancy control, and lifetime prediction. Finally, this paper identifies the key challenges faced by multidimensional data-driven VSC state perception technology in practical applications and outlines its future development trends, aiming to enhance the accuracy and engineering practicability of VSC state perception.

Keywords: voltage source converter; multidimensional data-driven; state perception

在高比例新能源与高度电力电子化的“双高”电力系统中,电压源型变流器(voltage source converter, VSC)被广泛应用于可再生能源并网、分布式发电和电机驱动等领域,因其具有可向无源网络供电、有功与无功灵活控制、潮流双向可控等优势。

在 VSC 运行过程中,需要实时采集直流侧与交流侧的电压、电流等常规反馈数据,以支撑系统的双闭环控制及过压、过流、过温等实时保护功能。随着新能源发电装机容量的持续增长,VSC 的应用场景与数量规模愈发广泛,与此同时,其可靠性面临的挑战也愈加严峻。研究表明,绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)功率开关器件、电容器等是 VSC 系统中发生老化失效的重要环节^[1],其参数性故障显著影响 VSC 系统的可靠性与稳定性。由器件老化引发的参数性故障通常难以直接观测,因此通常需要通过直接或间接提取的特征参数来反映器件的健康状态。若未及时采取有效的运维措施,参数性故障可能进一步演变为结构性故障。这不仅会威胁电网的稳定运行,还可能造成重大经济损失。因此,开展多维数据驱动的 VSC 状态感知技术及其应用研究具有重要意义^[2]。

故障预测与健康管理(prognostic and health management, PHM)技术通过集成传感器采集的多源信息,并结合多种数据驱动建模方法,能够实现对系统健康状态的实时监测、综合评估与智能管理。该技术旨在系统失效发生前,实现早期故障预警与剩余使用寿命(remaining useful life, RUL)预测,并及时采取容错控制或预测性维修策略,从而有效提升系统整体运行可靠性^[3-4]。在 VSC 系统中,PHM 技术能够从运行数据中提取关键器件的特征参数,构建其与器件健康状态之间的映射模型。通过运用数据驱动建模算法,该技术能够评估器件的性能退化趋势并预测其 RUL,从而为系统实施预测性维护提供决策依据^[5]。

因此,亟需深入开展多维数据驱动的状态感知与 PHM 技术的融合研究。

目前,国内外诸多学者对 VSC 系统中 IGBT 和电容等关键器件的老化机理、特征参数及其提取方法开展了广泛研究。在面向大数据环境及数据驱动建模技术快速发展背景下,本文以并网逆变器为研究对象,系统性概述多维度数据驱动的 VSC 状态感知技术及其应用。首先,阐述 VSC 的拓扑与控制结构,梳理多维度数据类型及其获取与处理方法,归纳数据与状态之间的映射关系;其次,对比分析不同状态特征参数,论述多维度数据驱动的 VSC 状态感知技术在状态监测、状态评估、故障诊断、RUL 预测及运维策略优化等典型场景中的应用现状;最后,探讨现阶段影响该技术应用效果的关键问题,并对未来研究方向进行展望。

1 VSC 拓扑控制及多维映射数据

1.1 VSC 拓扑结构

作为并网应用的关键接口装置,VSC 并网逆变器承担将新能源机组并网电能转换的重要责任^[6]。图 1 所示为典型三相两电平 VSC 拓扑结构,并标示了系统需采集的关键数据类型。图中, C_{dc} 为直流侧支撑电容, L_1 、 L_2 分别为逆变器输出侧和网侧滤波电感, C_f 为滤波电容, L_g 为电网等效电感, U_{dc} 为直流侧电容电压, I_{dc} 为直流侧电流, i_{labc} 为变流器交流侧三相输出电流, u_{gabc} 为三相并网点电压, i_{gabc} 为三相并网电流。

1.2 VSC 控制结构

网侧 VSC 的核心控制目标是维持直流母线电压稳定,将直流电转换为符合电网要求的交流电,以及灵活调节电网侧的功率因数。基于上述控制目标可知,由于电网电压具有恒定的幅值和频率,因此 VSC

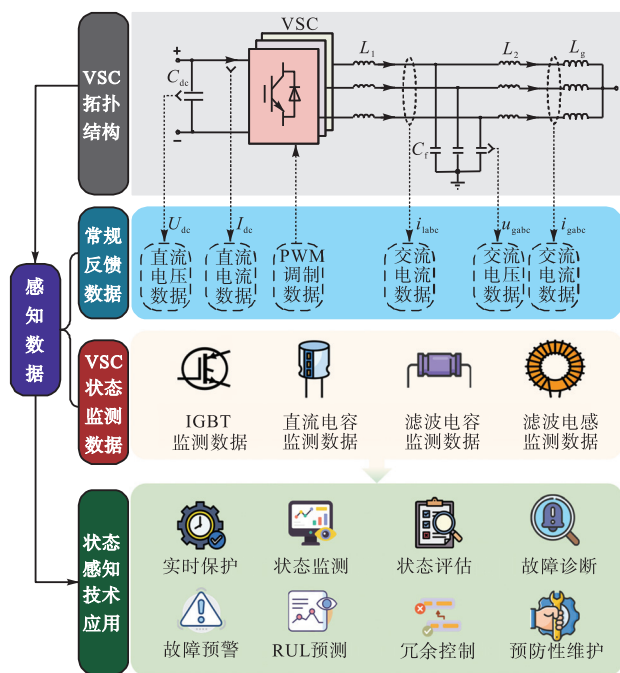


图 1 VSC 的拓扑及采集数据类型示意

Fig.1 Schematic of VSC topology and collected data types

的控制重点在于对网侧输出电流进行精确调控。通过对其输出电流的 dq 轴分量实施解耦控制,可以实现对有功功率和无功功率的独立调节。

为实现上述控制目标,VSC 通常采用分层控制架构。该架构主要包括辅助控制层、双闭环控制层和 PWM 触发调制层,其结构如图 2 所示。

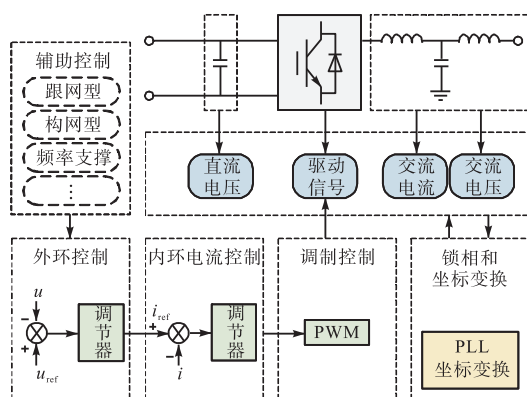


图 2 VSC 控制结构

Fig.2 VSC control structure

辅助控制层根据调度目标生成双闭环控制所需的参考指令,双闭环控制层通过跟踪该参考指令,可实现对关键电气量的动态调节^[7]。

外环控制将采集到的数据从三相静止坐标系变换到两相同步旋转坐标系,变换后的数据与参考指令之间的偏差经过 PI 等控制器调节,最终生成内环电

流控制所需的参考电流^[8]。内环电流控制则负责快速且准确地跟踪外环输出的电流参考指令,并通过 PI 等控制器生成输出参考电压信号。随后,该信号通过反 Park 变换转换为三相静止坐标系下的调制波信号,并传送至 PWM 调制层^[9]。

PWM 调制环节根据接收到的调制波信号,生成相应的驱动脉冲,直接控制 IGBT 的导通与关断。通过控制 IGBT 的导通与关断,该环节最终实现对并网电能质量的有效调控。

1.3 多维数据驱动 VSC 状态感知技术应用流程

多维数据驱动的 VSC 状态感知技术应用流程通常包括多维数据采集、数据处理与数据驱动建模以及数据应用 3 个核心环节,如图 3 所示。

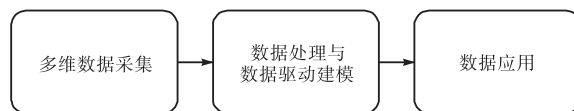


图 3 多维数据驱动的 VSC 状态感知技术总体应用流程

Fig.3 Overall application process of multidimensional data-driven VSC state perception technology

2 VSC 多维度数据获取

根据数据来源、用途及处理层次的不同,可将 VSC 多维度数据分为常规反馈数据、直接状态监测数据以及状态感知数据 3 类。

2.1 常规反馈数据

常规反馈数据主要用于支持 VSC 双闭环控制以及过压、过流、过温等保护功能,分为直流侧数据与交流侧数据。直流侧数据主要包括直流侧电压与直流侧电流;交流侧数据主要包括网侧电感电流、网侧电容电压及滤波电感电流。表 1 与表 2 分别对典型的电压与电流测量方法进行了综合对比。

表 1 电压测量方法对比

Tab.1 Comparison of voltage measurement methods

测量方法	特点	备注/适用场景
分压电阻 ^[10]	优点: 结构简单,成本低 缺点: 电阻温漂,需隔离耐压	需接入被测电路
霍尔电压传感器 ^[11-12]	优点: 精度高,抗干扰,动态优 缺点: 成本高,带宽有限	可用于测量任意波形电压
电压互感器 ^[10]	优点: 抗干扰,输出标准化 缺点: 体积大,有误差,响应慢	仅适用于测量交流

2.2 直接状态监测数据

以往研究表明,功率开关器件与无源器件是 VSC 系统中失效率较高的关键部件,其可靠性对系

表 2 电流测量方法对比
Tab.2 Comparison of current measurement methods

测量方法	特点	备注/适用场景
分流电阻 ^[13]	优点: 结构简单, 成本低 缺点: 大电流损耗大, 易受干扰	需接入被测电路
霍尔电流传感器 ^[14-16]	优点: 精度高, 抗干扰, 动态优 缺点: 成本高, 对温度变化敏感	可用于测量任意波形电流
罗氏线圈 ^[17]	优点: 带宽大, 成本较低, 抗干扰 缺点: 无法测直流或低频电流	仅适用于测量交流
电流互感器 ^[18]	优点: 带宽大, 可测大电流 缺点: 磁饱和风险, 无法测直流	仅适用于测量交流

统运行的安全性和稳定性具有决定性影响^[19]。器件可靠性降低表现为故障和老化两种形式: 故障通常伴随着快速且显著的参数变化, 监测难度较低; 而老化过程则表现为缓慢且微弱的特性衰减, 监测难度较大。因此, 开展 IGBT 健康状态的在线监测可为提升功率开关器件可靠性、实现 VSC 系统安全高效运行提供重要保障^[20-21]。

根据数据获取与生成方式的不同, 状态监测数据可分为两类: 一类是可通过直接测量获取的直接状态监测数据, 例如功率开关器件的饱和压降、电容器的纹波电压与电流等; 另一类是通过数学计算或算法建模等手段从采集数据中提取的特征参数, 例如功率开关器件的结温、电容器的等效串联电阻和电容值等, 属于状态感知数据范畴。

2.2.1 功率开关器件的直接状态监测数据

IGBT 是 VSC 系统的核心功率开关器件, 同时也是系统中易于失效的关键元件之一。IGBT 由具有不同热膨胀系数的材料封装组成, 且其内部芯片与外部端子之间通过键合线实现电气连接^[22]。常见的 IGBT 失效模式主要包括焊料层老化、键合线脱落或断裂、栅氧化层损伤以及金属化重构等^[23]。

在老化过程中, IGBT 的集射极饱和压降、关断时间、栅极峰值电流、栅射极阈值电压、结温、结壳热阻及导通电阻等参数均会发生不同程度的变化, 为评估其健康状态提供了重要依据^[24]。其中, IGBT 的直接状态监测数据主要包括如下。

(1) IGBT 集射极饱和压降 ($V_{CE(sat)}$): 焊料层老化、键合线疲劳以及金属化重构等失效模式均对 $V_{CE(sat)}$ 有一定影响, 因此常采用 $V_{CE(sat)}$ 对 IGBT 老化状态进行监测。现有标准通常将 $V_{CE(sat)}$ 较初始值升高 5% 作为判定模块失效的阈值^[25]。由于 $V_{CE(sat)}$ 在 IGBT 老化过程中的变化幅度较小, 需采用专用的高精度测量电路捕捉其微弱偏差。常用测量方法是在 IGBT 导通时将其接入检测回路以采集 $V_{CE(sat)}$, 关断时则将其断开以隔离高压。图 4(a)、(b) 和 (c) 分别展

示了基于继电器^[26]、MOSFET^[27]以及二极管^[28]的 $V_{CE(sat)}$ 测量电路。

(2) IGBT 关断时间 (t_{off}): IGBT 的键合线疲劳与焊料层老化均会导致其关断时间 t_{off} 延长, 因此 t_{off} 是评估 IGBT 健康状态的重要参数^[29-30]。IGBT 延时是指 V_{GE} 下降至驱动峰值的 90% 到 V_{CE} 上升至关断电压的 90% 的时间段。对于开尔文封装的 IGBT, 可利用开尔文端子与发射极端子之间的电压变化特性来提取 t_{off} 。关断时延法的测量频率为 IGBT 开关频率, 能对器件实现非侵入式测量, 具有良好的线性度。但该方法会受到外部运行条件的影响, 灵敏度较低^[31]。

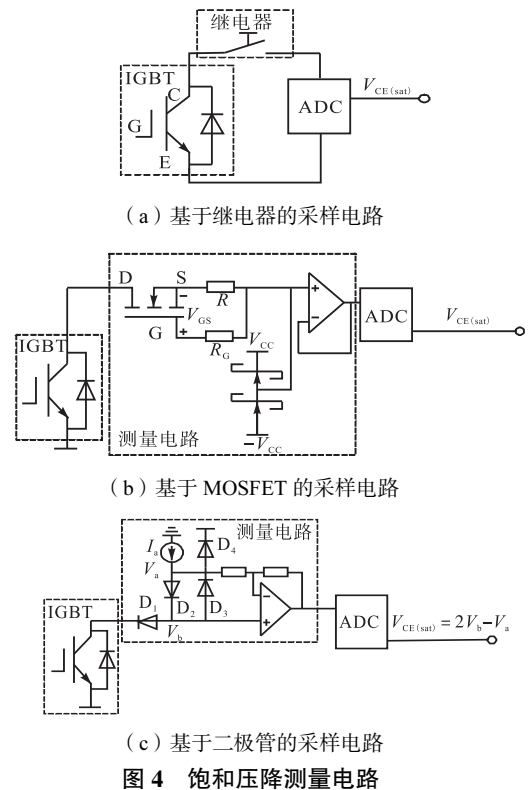


图 4 饱和压降测量电路

Fig.4 Measurement circuit for saturation voltage drop

(3) IGBT 栅极峰值电流 (I_{gpeak}): I_{gpeak} 是监测 IGBT 键合线老化状态的常用参数, 其可通过采样电阻或传感器直接测量。然而, I_{gpeak} 的测量精度易受外部干扰, 目前在实际工程中的应用较少。

(4) IGBT 栅射极阈值电压 ($V_{GE,th}$): 栅氧化层损伤会导致 $V_{GE,th}$ 升高^[32-33]。栅极信号的响应时间极短, 对测量硬件要求极高, 并且这类信号仅在芯片上的键合线完全脱落后才会产生明显变化。因此, 栅极信号主要适用于芯片故障的在线监测, 其变化难以反映 IGBT 的渐进老化过程^[24]。

(5) IGBT 结温 (T_j): 焊料层老化会导致热阻增大, 阻碍芯片热量向壳体传递, 使得 T_j 升高; 同时, T_j 升高又会进一步加速器件老化^[34-35]。因此, 在线实时

监测 T_j 是保障 IGBT 可靠运行的关键环节。 T_j 的获取方式可分为直接测量与间接估计两类。直接方法包括使用热电阻或热电偶等接触式传感器进行测量^[36], 或采用基于红外热成像仪的光学非接触方法^[37]; 间接方法则主要包括热阻抗模型预测法^[38]及温敏电参数法^[39]。前者适用于 T_j 的实时监测, 后者则更适用于 T_j 的长期趋势预测。

2.2.2 无源器件的直接状态监测数据

无源器件老化及其引发的参数漂移, 是导致 VSC 故障和并网电流质量下降的重要原因^[40]。以往研究表明, 电容器故障约占变流器总故障的 17%, 电感器件故障占比约 5%^[19]。

电容器在长期运行过程中承受多应力耦合作用, 导致其等效电容 C 逐渐减小、等效串联电阻 R_{ESR} 逐渐增大^[41]。因此, 可选取 C 或 R_{ESR} 作为电容器老化特征参数进行监测。

电容器的老化特征参数及失效判据会因其类型不同而有所差异, 表 3 总结了不同类型电容器的失效判定原则。

表 3 不同类型电容器的老化特征参数和失效判定原则^[42]

Tab.3 Eging parameters and end-of-life criteria for different types of capacitors^[42]

项目	铝电解	金属薄膜	多层陶瓷
老化特征参数	C 和 R_{ESR}	C	C
失效判定原则	C : 下降 20% R_{ESR} : 初始值 2 倍	C 下降 5%	C 下降 10%

电感器件在高频环境下工作时, 其线圈与连接部位易发生老化, 同时磁芯的磁性性能会逐渐退化, 导致电感值 L 逐渐下降, 进而影响电感的储能与滤波性能^[43]。因此, 通过监测 L 值的变化可有效评估电感器件的实时老化程度。通常将 L 值减小 20% 作为电感器件的失效判据^[44]。

无源器件的状态监测分为离线与在线两种方法。离线方法通过实验直接测量器件参数, 具有操作简单、测量精度高等优点, 但无法反映器件参数的时变特性; 在线方法能在 VSC 不停机的情况下, 根据器件的相关电气参数, 实时监测器件的老化特征量的值, 利用在线方法得到的老化特征量对电容器的健康状态进行实时评估^[45-47]。根据电容器的低频段或中频段纹波电压和纹波电流, 可以在线测量电容器的 C 或 R_{ESR} ^[48]。

表 4 总结了 VSC 关键器件的老化特征监测参数及主要失效机理。

2.3 状态感知数据

状态感知数据是指基于前两类数据, 通过数学计

表 4 VSC 关键器件的失效机理与老化参数

Tab.4 Failure mechanism and aging parameters of key VSC components

器件类型	主要失效机理	监测参数
IGBT	焊料层疲劳, 键合线疲劳, 金属化重构, 栅氧化层失效	$V_{CE(sat)}, T_j, R_{th(j-c)}, V_{GE,th}, t_{off}, R_{ds(on)}$
电容器	温升, 材料老化	C, R_{ESR}
电感器件	温升, 材料老化, 电磁力	L

算、信号处理或人工智能算法等方法提取的、能够有效表征系统状态的特征参数。根据处理方法的不同, 状态感知数据可分为常规感知数据与数据驱动感知数据两类, 而数据驱动感知数据又可细分为常规数据驱动感知数据与人工智能驱动感知数据。

2.3.1 常规感知数据

常规感知数据是指依据明确的物理定律、电路方程或解析模型, 通过计算或观测器估计得到的特征参数如下。

(1) IGBT 结温 (T_j): 热阻抗模型预测法基于 IGBT 功率损耗与结温的关系预测结温, 但易产生预测误差。设计状态观测器, 依据模型与实测数据实时估计 IGBT 结温可有效减小器件状态估计误差^[49]。

(2) IGBT 结壳热阻 ($R_{th(j-c)}$): $R_{th(j-c)}$ 会随着 IGBT 焊料层的老化而逐渐增大^[50]。通过监测 $R_{th(j-c)}$ 的变化, 可及时评估 IGBT 的健康状态。通常将 $R_{th(j-c)}$ 较初始值增加 20% 作为器件失效的判定阈值^[51]。由于 $R_{th(j-c)}$ 难以直接在线测量, 一般需通过测量 T_j 进行间接监测。基于热电偶测试法, 可在同步采集结温 T_j 、壳温 T_c 和功率损耗 P 后, 根据式 (1) 计算 $R_{th(j-c)}$:

$$R_{th(j-c)} = \frac{T_j - T_c}{P} \quad (1)$$

(3) IGBT 导通电阻 ($R_{ds(on)}$): $R_{ds(on)}$ 的增大是 IGBT 键合线出现裂纹或脱落的关键特征之一。以往研究表明, 当键合线脱落数超过总数的 40% 时, 导通电阻会增大约 5%, 这一变化可作为判定键合线失效的依据。测量 $R_{ds(on)}$ 最常用的方法为同时测量 IGBT 的通态电压与集电极电流, 在任意时刻, 二者之比即为该时刻的 $R_{ds(on)}$ ^[52]。

(4) 无源器件参数 (等效串联电阻 R_{ESR} 、电容 C 及电感 L): 分别提取电容器低频段和中频段的纹波电压与纹波电流, 可根据式 (2) 计算出电容器的 R_{ESR} 和 C ^[53-54]。基于电容电压、电流、温度及热阻计算得到电容器功率损耗, 根据损耗与 R_{ESR} 的关系能够计算获取 R_{ESR} 值^[55]。

$$\begin{cases} R_{\text{ESR}} = \frac{V_{\text{ripple},l}}{I_{\text{ripple},l}} \\ X_c = \frac{V_{\text{ripple},m}}{I_{\text{ripple},m}} \\ C = \frac{1}{2\pi f X_c} \end{cases} \quad (2)$$

2.3.2 数据驱动感知数据

基于原始数据,通过数据拟合、信号处理、统计分析等常规方法或人工智能算法间接提取的特征参数,属于数据驱动状态感知数据^[56]。根据处理方法的不同,数据驱动感知数据可分为常规数据驱动感知数据与人工智能数据驱动感知数据。VSC 数据驱动感知数据主要包括如下。

(1) IGBT 集射极饱和压降($V_{\text{CE(sat)}}$):采用专用的测量电路监测 IGBT 老化状态时,可能影响 VSC 正常运行。为此,可采用非线性最小二乘曲线拟合算法实现 $V_{\text{CE(sat)}}$ 的精准辨识^[57]。此外,可通过数据拟合方法构建如式(3)所示的三维曲面模型,通过分析 $V_{\text{CE(sat)}}$ 的实测值与模型预测值之间的偏差,即可识别 IGBT 老化状态^[58]。基于基板空间多点温度信息的监测方法能够在线监测 IGBT 键合线和焊料层的老化状态,具有成本低、可靠性高等优势^[59]。

$$V_{\text{CE(sat)}} = f(T_j, I_c) \quad (3)$$

(2) IGBT 结温(T_j):热敏电参数法将 IGBT 芯片本身视为温度传感器,通过提取与 T_j 相关的电气特征量^[60],并建立特征量与 T_j 之间的映射关系,来间接感知 T_j 。将可观测变量 $V_{\text{CE(sat)}}$ 和 I_c 作为输入,以状态变量 T_j 作为输出,通过训练人工神经网络(artificial neural network, ANN),可构建输入与输出之间的映射关系,从而有效感知 T_j ^[61]。表 5 对 IGBT 常见特征参数及其对应的失效机理进行了对比分析。

(3) 无源器件参数(等效串联电阻 R_{ESR} 、电容 C 以及电感 L):当无源器件发生参数性故障时,可借助

信号处理技术提取故障特征参数,从而实现器件状态感知^[62]。通过参数辨识方法建立器件的输入-输出模型,并基于实测输入、输出数据,利用常规算法或人工智能算法对模型参数进行估计,同样能够有效完成无源器件的状态感知。

表 5 IGBT 常见特征参数及其对应失效机理对比

Tab.5 Comparison of common characteristic parameters of IGBT and their corresponding failure mechanisms

特征参数	数据类型	对应失效机理
$V_{\text{CE(sat)}}$	直接监测数据	焊料层老化,键合线疲劳,金属化重构
t_{off}	直接监测数据	键合线疲劳,栅氧化层损坏
I_G	直接监测数据	键合线全部脱落
$V_{\text{GE,th}}$	直接监测数据	栅氧化层损坏
T_j	直接监测或感知数据	焊料层老化,键合线疲劳
$R_{\text{th(j-c)}}$	感知数据	焊料层老化
$R_{\text{ds(on)}}$	感知数据	键合线疲劳

卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)基于状态方程与观测方程,通过预测和校正两个步骤实现对系统状态的实时估计与预测。将时域分析与 KF 相结合,可实现电容器 R_{ESR} 的精准辨识,并能够通过自回归模型对 C 进行预测^[63]。最小二乘法(least squares method, LSM)通过建立测量信号的数学模型,实现 VSC 滤波电容或电感的在线辨识^[64]。为提高辨识结果的可靠性,在使用 LSM 前,通常需先对测量数据进行异常值检测,并剔除其中的异常数据^[65]。

以电容电压和电流为输入,利用 ANN 可有效估计 C 值^[66-67];将电容纹波电压、纹波电流和温度信号同时作为 ANN 的输入,并将 C 和 R_{ESR} 作为输出,能够实现电容器参数的在线辨识;设计自适应神经模糊推理系统,通过融合电源电压与插值电容纹波电压信号,可同步估计 C 和 R_{ESR} ^[68]。

图 5 总结了 VSC 多维数据分类及典型应用。

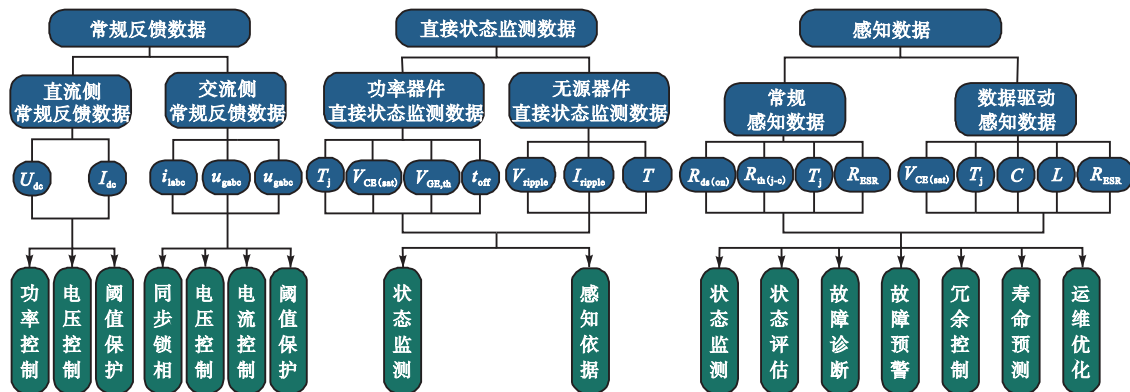


图 5 VSC 多维数据分类及典型应用

Fig.5 Classification and typical applications of VSC multidimensional data

3 VSC数据处理与数据驱动建模

3.1 VSC多维数据处理

3.1.1 数据预处理

数据质量是决定数据驱动建模精度的关键因素之一。在数据采集环节,传感器易受噪声、环境温度等干扰因素影响,可能导致测量数据的准确性和模型的精度降低。因此,通常需要对原始数据进行去噪、清洗、融合等预处理操作,为特征提取与数据驱动建模改善数据质量^[69-70]。

最小二乘法通过最小化观测值与模型预测值之间的残差平方和,可消除多源数据之间的误差,即使在噪声干扰下仍能提供较为准确的数据拟合结果。卡尔曼滤波是一种高效的递归滤波算法,能够从含噪声的测量数据中动态估计系统的状态。神经网络具备强大的非线性建模能力,利用神经网络构建数字滤波器对传感器输出进行滤波,可显著提高信号精度。

3.1.2 特征提取

特征提取是指从相关数据中提取能够表征器件健康状态的关键特征。常见方法包括频域分析、时域分析及人工智能法。傅里叶变换将时域信号转换至频域,从中提取相关频率成分,是分析信号频域特性的基础工具。小波分析具备良好的时频局部化能力,可同时捕捉信号的时域与频域特征,适用于非平稳信号分析^[71]。神经网络能够有效提取信号中的有用信息,在抑制干扰与噪声等方面表现良好。深度学习可自动从数据中学习层次化特征,尤其适用于高维复杂数据的特征提取。

3.2 数据驱动建模

数据驱动建模以数据特征为主要依据^[72],从输入、输出数据中提取有效信息,并利用这些信息构建和优化状态映射模型^[73]。通过从数据中学习隐含规律,数据驱动建模能够显著提高模型的可靠性与准确性。表 6 对典型数据驱动建模算法的基本原理、技术特点及其应用场景进行了综合分析。

表 6 典型数据驱动建模算法对比
Tab.6 Comparison of typical data-driven modeling algorithms

典型算法	基本原理	特点	典型应用	是否 AI
最小二乘法 ^[46]	通过最小化观测值与模型预测值之间的残差平方和,确定最佳拟合参数	优点:计算简单,收敛快,无偏估计 缺点:精度低,静态数据处理,易局部最优	数据处理 状态估计	否
卡尔曼滤波 ^[74]	基于线性系统状态方程,结合状态预测与实际观测,迭代实现最优状态估计	优点:可处理动态数据,鲁棒性强 缺点:依赖模型准确度,仅适用于线性系统	状态估计 数据融合	否
梯度下降法 ^[75]	从初始点出发,沿目标函数反梯度方向迭代更新参数,逐步逼近目标函数的极小值	优点:收敛快 缺点:对初始值和步长敏感,易局部最优	参数优化	否
粒子滤波 ^[76]	利用一组在状态空间中传播的随机样本对后验概率密度函数进行近似	优点:适用于非线性,非高斯系统 缺点:计算量及成本较大,易出现粒子贫化	状态估计 寿命预测	否
粒子群优化 ^[76]	通过个体之间的相互协作搜寻最优解	优点:算法简单,需调整参数数量少 缺点:寻优精度高于粒子滤波	状态估计 寿命预测	否
人工神经网络 ^[77]	模拟人脑结构,基于输入-输出数据直接建立非线性映射模型	优点:自学习,自动去噪,适应非线性系统 缺点:训练数据依赖,收敛慢,解释性差	状态评估 故障诊断	是
反向传播神经网络 ^[78]	基于最速下降法,通过反向传播调整权值和偏置,使网络的误差平方和最小	优点:自学习,可并行处理,可非线性映射 缺点:解释性差,收敛慢,易局部最优	故障诊断	是
支持向量机 ^[79]	通过核函数将原始数据集映射到高维空间,求解线性约束二次规划问题获得全局最优解	优点:计算量较小,保证全局最优解 缺点:解释性差,仅适用小样本数据	状态评估 故障诊断	是
最小二乘支持向量机 ^[80]	在 SVM 基础上,将求解二次规划问题转化为求解线性方程组问题,降低计算复杂度	优点:计算复杂度降低,求解速度更快 缺点:需为线性核函数,更擅长短期预测	寿命预测	是

4 VSC数据驱动状态感知技术应用

开展 VSC 关键器件的状态感知与 PHM 技术研究,可为实现器件与系统的实时监测、科学评估与精准维修提供理论依据。当前,实现 PHM 的技术途径主要分为模型驱动方法与数据驱动方法两类。模型驱动方法首先建立能够描述器件物理特性和失效机

理的数学模型,然后利用该模型对器件的健康状态进行评估。该方法物理意义明确、可解释性强,但通常难以有效处理系统中的不确定性问题,适应性较差。数据驱动方法则无需依赖精确的数学模型,而是基于关键器件的历史数据与实时运行数据,实现对 VSC 系统的控制与状态评估,因此在 PHM 领域得到了广泛应用^[81-83]。多维数据驱动的 VSC 状态感知技术实现架构可分为物理层、感知层、分析层和应用

层,如图 6 所示.

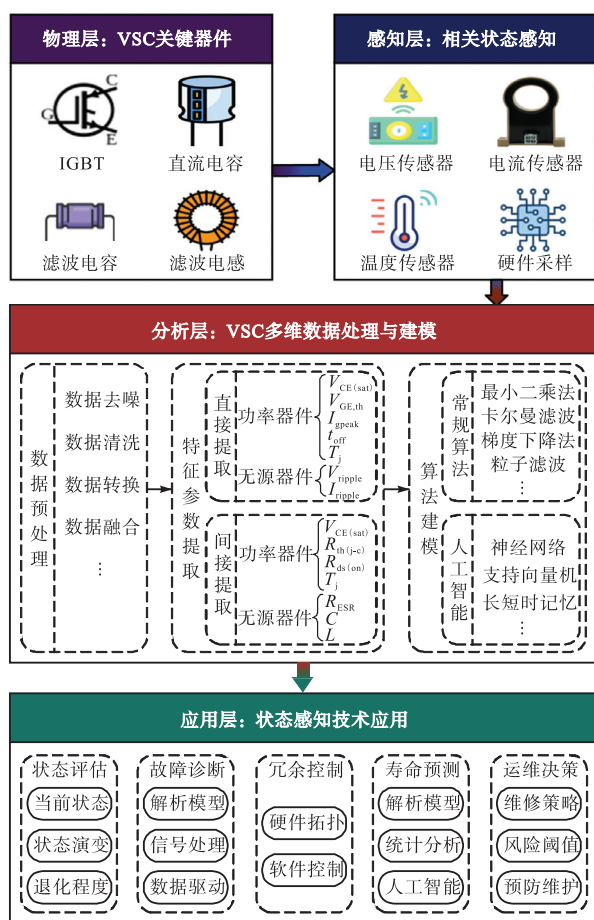


图 6 多维数据驱动的 VSC 状态感知技术实现架构

Fig.6 Architecture for implementing multidimensional data-driven VSC state perception technology

4.1 功率器件与无源器件的状态监测、评估及故障预警

VSC 系统关键器件的状态监测通常指监测可表征其健康状态的关键参数,主要包括 IGBT 功率开关器件、支撑电容、网侧电感和网侧电容等器件的特征参数. 现有状态监测方法主要分为模型特性分析法和数据驱动法两类. 模型特性分析法主要依据 VSC 系统工作原理与器件工作特性,直接估算待测的模型参数;数据驱动法则通常需要利用大量实测数据训练模型,进而实现参数监测^[84].

状态评估主要采用机器学习中的分类学习方法,对器件健康状态进行评级,为后续应用决策提供依据^[85-88]. 若评估为“正常”状态,系统将持续运行并持续监测;若评估为“故障”状态,则需启动故障诊断流程,以确定故障类型、定位故障位置、分析故障原因,并及时采取维修措施;若评估为“异常”状态,系统将发出故障预警,并需进一步预测器件的 RUL^[89].

故障诊断可被视为一种确定性的健康状态评估,

而健康状态评估也可被视为故障诊断的前期预警环节^[90]. 通过实施状态监测与评估,能够及时发出故障预警或完成故障诊断,从而有效提高系统关键器件的利用率和运行可靠性.

4.2 功率器件与无源器件的故障诊断与冗余控制

功率器件和无源器件故障均可能对 VSC 系统造成严重经济损失. 因此,需要基于状态评估结果,通过特征提取与故障诊断两个步骤,实现关键器件的故障识别、定位及严重程度判定. 根据故障诊断结果,运维人员可及时采取暂时切断故障器件或启用容错控制等措施,从而有效防止系统状态进一步恶化^[91]. 故障诊断方法主要分为 3 类,即基于解析模型、基于信号处理和基于数据驱动的方法^[92].

基于解析模型的方法根据依据对象的运行机理建立数学模型,然后根据观测参数与模型输出之间的残差实现故障的检测与定位^[89,93]. 根据残差生成方式的不同,该方法可分为状态估计法和参数估计法. 状态估计法通常采用卡尔曼滤波或状态观测器构建状态变量,通过对比其与实际输出形成的残差来提取故障信息^[94];参数估计法则依据系统实测值与参考模型特征输出之间的残差进行故障诊断^[95].

基于信号处理的方法直接利用测量信号的时域或频域特征实现故障检测与定位. 这类方法通常也作为其他故障诊断方法的前置步骤.

基于数据驱动的方法首先对采集数据进行预处理,结合信号处理方法提取故障特征,然后将特征向量输入故障诊断算法,从而高效处理复杂 VSC 系统的故障诊断问题^[96]. 该方法可进一步分为统计分析法与人工智能法^[97]. 统计分析法借助数学手段揭示数据特性与内在联系,其核心功能集中于特征提取与特征降维,因此常需结合其他分类算法才能实现故障定位. 机器学习作为特征识别手段时,也常需与特征提取方法联合使用;而深度学习算法能够自动从数据中提取层次化的故障特征,实现端对端的故障诊断^[98].

神经网络能够有效模拟复杂非线性系统的输入-输出映射关系,在 VSC 故障诊断领域应用广泛^[99]. 基于神经网络的故障诊断方法是指通过在线训练大量已知故障数据样本,确定合适的网络结构和参数,再将待诊断的故障信息输入训练好的神经网络模型中,即可实现故障诊断^[100-101]. 傅里叶变换神经网络法将傅里叶变换后的信号作为 BP 神经网络的输入,其输出直接对应故障的分类结果^[102-103]. 小波神经网络法则首先利用小波变换对采集数据进行预处理和特征提取,再通过主成分分析进行特征降维,最终借

助神经网络对特征值进行训练,有效提高了故障诊断的精度^[104-106]。

VSC 采用故障容错策略,使其具备一定的冗余控制能力。当器件发生故障时,具备冗余控制能力的 VSC 系统能够通过重构硬件拓扑或调整软件容错策略,在不中断运行或仅出现部分性能轻微下降的情况下,维持长期、安全且稳定的运行^[107]。

4.3 功率器件与无源器件的剩余使用寿命预测

通过分析 VSC 关键器件故障特征参数的变化规律,可推演其故障演变趋势。因此,故障预测问题可转化为故障特征参数的时间序列预测问题^[108]。RUL 预测旨在估计器件从当前状态运行至寿命终结所剩余的时间^[109],其典型方法可分为两类,即基于解析模型与数据驱动的方法^[110]。

基于解析模型的方法未考虑器件失效具体的物理过程,而是仅利用统计原理建立器件参数与系统性能之间的解析表达式,从而描述器件寿命与加速老化试验中各应力变量之间的关系^[111]。常见的解析模型包括 Coffin-Manson 模型^[112]、Lesit 模型^[113]、Norris-Landzberg 模型以及 Bayerer 模型^[114-115]等。

基于数据驱动的方法基于对加速老化过程中相关参数变化的分析,首先提取出老化特征参数,然后通过训练模型,构建参数与寿命之间的映射关系,最终实现 RUL 预测。这类方法通常采用统计分析或人工智能模型对时间序列及其变化趋势进行外推,目前已成为 RUL 预测的主流方法^[116-118]。

统计数据驱动方法通常预设器件的老化模型已知,并基于状态监测数据对模型参数进行离线估计与在线修正。机器学习方法则借助信号处理等手段从运行数据中提取器件老化特征,并利用学习算法实现其 RUL 预测^[77]。深度学习进一步允许将原始信号直接输入模型,从而完成对 VSC 关键器件的健康评估与 RUL 预测^[119]。

在电容器的 RUL 预测中,粒子滤波(particle filter, PF)利用同类产品的历史实验数据对电容器退化状态进行评估,进而预测其 RUL 的概率分布^[120]。针对 PF 算法可能出现的粒子贫化问题,粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法基于电容器退化数据建立经验退化模型,能够获得更精确的状态估计与 RUL 预测结果^[76]。最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LS-SVM)算法可对电容器的 C 和 R_{ESR} 进行参数辨识,并实现电容器 RUL 的短期预测^[80]。

在 IGBT 的 RUL 预测中,LSM 可用于拟合加速老化试验数据,并构建相应的 RUL 预测模型^[121]。基

于功率循环加速老化试验数据,将 IGBT 不同寿命阶段的特征参数作为长短时记忆(long short-term memory, LSTM)网络的输入,可实现对其 RUL 的有效评估^[122]。通过融合多源传感器数据与 LSTM 神经网络,基于多维感知数据可实现 IGBT 高精度的 RUL 预测^[123]。

4.4 功率器件与无源器件的运维决策优化

基于 VSC 关键器件的 RUL 预测结果,综合考虑运维技术可行性、资源可用性以及系统实际运行需求等多重约束条件,通过建立以系统全生命周期运维总成本最小为目标的优化模型,可以实现运维策略的智能决策^[124]。

运维人员可以根据 RUL 预测信息,在器件失效前及时采取预防性维护措施,而非等到故障发生后才实施应急维修。这种预防性维护措施能够有效避免因器件突发故障导致的安全事故、减少经济损失,在保障 VSC 系统运行可靠性的同时,最大限度地延长功率开关器件与电感、电容等关键器件的实际可用寿命。

5 挑战与趋势

尽管基于多维数据驱动的状态感知技术在 VSC 系统健康管理中展现出巨大的应用潜力,其在实际应用中仍面临诸多挑战。

(1) 数据质量欠佳与模型泛化能力不足:数据驱动建模的准确性依赖于数据质量,而传感器噪声、测量误差等问题难以完全避免;此外,基于部分工况数据训练得到的学习模型通常难以适应器件多样化的运行条件与老化模式,导致其泛化能力受限。

(2) 状态评估模型的精确性欠佳:功率开关器件与无源器件的失效通常受到电、热、机械等多应力耦合作用影响。然而,现有故障诊断方法通常针对单一状态信息进行分析,仅提取单数据信息的故障特征,导致诊断与预测结果的可靠性较低。

(3) 数据安全存在潜在风险:状态感知系统涉及大量数据的采集、传输与云端处理,易成为网络攻击的目标。数据在传输与存储过程中可能面临被窃取或篡改的风险。如何构建鲁棒的数据安全防护体系,保障数据在全生命周期中的完整性、机密性与可用性,已成为影响该技术落地的关键问题。

6 结 论

本文系统综述了多维数据驱动的 VSC 状态感知

技术及其应用. 首先, 阐述了 VSC 的拓扑与控制结构, 建立了从数据采集到状态感知应用的完整技术框架, 并详细分析了多维数据的分类、获取与处理方法. 在此基础上, 对典型数据驱动建模算法进行了归纳分析, 并重点探讨了状态感知技术在状态监测、状态评估、故障预警或诊断、RUL 预测及运维决策优化等方面的应用现状. 随着电力系统数字化与智能化进程的不断深入, 多维数据驱动的 VSC 状态感知技术展现出广阔的发展前景, 未来可在以下方面展开进一步研究.

(1) 多源数据融合研究: 多源数据能够反映 VSC 关键器件的多种特性. 融合多传感器的采集数据, 可有效提高数据的完整性、可靠性和关联性, 从而提高状态感知精度. 通过深度融合多源数据, 深入挖掘多应力耦合作用下的退化规律与失效特征, 构建能够反映实际复杂工况的状态感知模型, 是未来值得重点关注的研究方向.

(2) 故障特征参数选择研究: 随着功率开关器件与无源器件的老化, 其对电路所产生的输入输出特性将逐步退化. 如何从多维度数据中选取鲁棒的故障特征参数, 以准确表征器件健康状态, 是现阶段的研究热点之一.

(3) 多数据驱动建模算法融合的状态感知技术研究: 单一数据驱动建模算法通常仅能处理部分问题, 诊断与预测性能存在局限. 融合多种数据驱动建模算法的混合状态感知技术, 可发挥不同算法的优势, 为 PHM 提供更加全面、可靠的决策支持.

(4) 标准化通信架构与安全传输机制研究: 构建支持异构终端设备接入的标准化通信模块, 实现多源设备间的互联互通与高效数据交换, 同时加强数据传输过程的安全性及稳定性, 是推动该技术规模化应用的重要基础.

参考文献:

- [1] 宋少鹏, 田艳军, 李欣, 等. 电压源型并网变流器状态监测与故障诊断方法综述[J]. 电气工程学报, 2024, 19(3): 1-13.
Song Shaopeng, Tian Yanjun, Li Xin, et al. Review of condition monitoring and fault diagnosis methods for grid-connected VSC[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(3): 1-13 (in Chinese).
- [2] 唐文虎, 牛哲文, 赵柏宁, 等. 数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的研究与应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 2985-2999.
Tang Wenhui, Niu Zhewen, Zhao Boning, et al. Research and application of data-driven artificial intelligence technology for condition analysis of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 2985-2999 (in Chinese).
- [3] 杨新宇, 马齐爽, 张琳, 等. 变频机组故障预测与健康管理系统[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(4): 33-38.
Yang Xinyu, Ma Qishuang, Zhang Lin, et al. Research on prognostics and health management system of frequency converter[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(4): 33-38 (in Chinese).
- [4] 连光耀, 吕晓明, 黄考利, 等. 基于 PHM 的电子装备故障预测系统实现关键技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(9): 1959-1961.
Lian Guangyao, Lü Xiaoming, Huang Kaoli, et al. Study of key realization technology for fault prediction system of electronic equipment based on PHM[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(9): 1959-1961 (in Chinese).
- [5] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理系统综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 1-9.
Peng Yu, Liu Datong, Peng Xiyuan. A review: Prognostics and health management[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1): 1-9 (in Chinese).
- [6] 张兴, 李明, 郭梓暄, 等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 506-515.
Zhang Xing, Li Ming, Guo Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515 (in Chinese).
- [7] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及其原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277-297.
Liu Hui, Yu Siqi, Sun Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-297 (in Chinese).
- [8] 张静. VSC-HVDC 控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
Zhang Jing. On Control Strategies for VSC-HVDC[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009 (in Chinese).
- [9] Ooi B T, Wang X. Voltage angle lock loop control of

- the boost type PWM converter for HVDC application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1990, 5(2): 229-235.
- [10] 方春恩, 李 伟, 王佳颖, 等. 基于电阻分压的 10 kV 电子式电压互感器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 58-63.
Fang Chun'en, Li Wei, Wang Jiaying, et al. 10 kV electronic voltage transformer based on resistor divider[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 58-63(in Chinese).
- [11] 杨春振, 石茂林, 郭晓伟. 基于新型霍尔传感器的高精度直流隔离传送与检测[J]. 大学物理实验, 2012, 25(3): 11-13.
Yang Chunzhen, Shi Maolin, Guo Xiaowei. High accuracy isolated transmission and detection of DC based on new hall-effect sensor[J]. Physical Experiment of College, 2012, 25(3): 11-13(in Chinese).
- [12] 吴金宏, 倪向阳, 吴 昊. 霍尔电流电压传感器/变送器模块的性能及应用[J]. 国外电子元器件, 2001(1): 12-15.
Wu Jinhong, Ni Xiangyang, Wu Hao. Performance and application of Hall current-voltage sensor/transducer[J]. International Electronic Elements, 2001(1): 12-15(in Chinese).
- [13] 和劭延, 吴春会, 田建君. 电流传感器技术综述[J]. 电气传动, 2018, 48(1): 65-75.
He Shaoyan, Wu Chunhui, Tian Jianjun. Review of the current transducer techniques[J]. Electric Drive, 2018, 48(1): 65-75(in Chinese).
- [14] 彭文辉, 郑钧宜. 高精度多路绝缘检测装置设计[J]. 电子测量技术, 2002, 25(4): 19-21.
Peng Wenhui, Zheng Junyi. Design of the high precious multi-channel insulation detection device[J]. Electronic Measurement Technology, 2002, 25(4): 19-21(in Chinese).
- [15] 董耀文. 电动汽车用霍尔电流传感器的设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
Dong Yaowen. Design of Hall Current Sensor for Electric Vehicle Application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019(in Chinese).
- [16] 李富安. 闭环霍尔电流传感器的设计与测试[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
Li Fu'an. Design and Experiment of Closed Loop Hall Effect Current Sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012(in Chinese).
- [17] 陈启明, 喻 莹. 罗氏线圈雷电流传感器研究[J]. 湖北电力, 2009, 33(3): 16-18.
Chen Qiming, Yu Ying. Study on lightning current sensor of Rogowski coil[J]. Hubei Electric Power, 2009, 33(3): 16-18(in Chinese).
- [18] Ziegler S, Woodward R C, Iu H H, et al. Current sensing techniques: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(4): 354-376.
- [19] Yang S Y, Bryant A, Mawby P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.
- [20] 李 辉, 刘盛权, 冉 立, 等. 大功率并网风电机组变流器状态监测技术综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 1-10.
Li Hui, Liu Shengquan, Ran Li, et al. Overview of condition monitoring technologies of power converter for high power grid-connected wind turbine generator system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 1-10(in Chinese).
- [21] Yang S Y, Xiang D W, Bryant A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(11): 2734-2752.
- [22] Ji B, Pickert V, Cao W P, et al. *In situ* diagnostics and prognostics of wire bonding faults in IGBT modules for electric vehicle drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5568-5577.
- [23] Lehmann J, Netzel M, Herzer R, et al. Method for electrical detection of bond wire lift-off for power semiconductor[C]//2003 IEEE 15th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Cambridge, UK, 2003: 333-336.
- [24] 龚 灿. 功率变流器中关键器件在线监测技术的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
Gong Can. Research on Online Condition Monitoring Method of Key Devices in Power Converter[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017(in Chinese).
- [25] 周维维, 吴军科, 杜 雄, 等. 功率变流器的可靠性研究现状及展望[J]. 电源学报, 2013, 11(1): 1-15.
Zhou Luowei, Wu Junke, Du Xiong, et al. Status and prospects of reliability research on power converters[J]. Journal of Power Supply, 2013, 11(1): 1-15(in Chinese).

- [26] Nielsen R Ø, Due J, Munk-Nielsen S. Innovative measuring system for wear-out indication of high power IGBT modules[C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, USA, 2011: 1785-1790.
- [27] Choi UM, Blaabjerg F, Munk-Nielsen S. Reliability improvement of power converters by means of condition monitoring of IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 7990-7997.
- [28] Ghimire P, de Vega A, Beczkowski S, et al. Improving power converter reliability: Online monitoring of high-power IGBT modules[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(3): 40-50.
- [29] Liu H T, Wang F, Shen C Y, et al. Monitoring IGBT module bond wire fatigue use turn-off time[C]//49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2023. Singapore, 2023: 194573.
- [30] Luo H Z, Chen Y X, Sun P F, et al. Junction temperature extraction approach with turn-off delay time for high-voltage high-power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5122-5132.
- [31] 王莉娜, 邓洁, 杨军一, 等. Si 和 SiC 功率器件结温提取技术现状及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 703-716.
Wang Lina, Deng Jie, Yang Junyi, et al. Junction temperature extraction methods for Si and SiC power devices: A review and possible alternatives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 703-716(in Chinese).
- [32] Rodriguez M A, Claudio A, Theilliol D, et al. A new fault detection technique for IGBT based on gate voltage monitoring[C]//2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Orlando, USA, 2007: 1001-1005.
- [33] Patil N, Celayaj J, Das D, et al. Precursor parameter identification for insulated gate bipolar transistor (IGBT) prognostics[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58(2): 271-276.
- [34] Huai W, Liserre M, Blaabjerg F. Toward reliable power electronics: Challenges, design tools, and opportunities[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 17-26.
- [35] Held M, Jacob P, Nicoletti G, et al. Fast power cycling test of IGBT modules in traction application[C]//Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Singapore, 1997: 425-430.
- [36] Sathik M H M, Pou J, Prasanth S, et al. Comparison of IGBT junction temperature measurement and estimation methods: A review[C]//Proceedings of the 2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification. Singapore, 2017: 1-8.
- [37] Nishiguchi M, Fujihara M, Miki A, et al. Precision comparison of surface temperature measurement techniques for GaAs ICs[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1993, 16(5): 543-549.
- [38] Sonnenfeld G, Goebel K, Celaya J R. An agile accelerated aging, characterization and scenario simulation system for gate controlled power transistors[C]//2008 IEEE AUTOTESTCON. Salt Lake City, USA, 2008: 208-215.
- [39] 任磊, 沈茜, 龚春英. 电力电子电路中功率晶体管结温在线测量技术研究现状[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1750-1761.
Ren Lei, Shen Qian, Gong Chunying. Current junction temperature online measurement techniques of power transistors in power electronic converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1750-1761(in Chinese).
- [40] 蔡富裕, 郭文勇, 赵闯, 等. 基于参数在线辨识的电流源型变流器状态监测及自适应控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 67-74, 119.
Cai Fuyu, Guo Wenying, Zhao Chuang, et al. State monitoring and adaptive control of current source converter based on online identification of parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 67-74, 119(in Chinese).
- [41] Soliman H, Wang H, Blaabjerg F. A review of the condition monitoring of capacitors in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4976-4989.
- [42] 吴宇. 三相变流器中直流母线电容的状态监测技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Wu Yu. Study on Condition Monitoring Technique of DC-Link Capacitors in Three-Phase AC/DC/AC PWM Power Converters[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016(in Chinese).
- [43] 任磊, 龚春英. 基于修正混杂系统模型的 Boost 变换器 LC 参数辨识方法[J]. 中国电机工程学报,

- 2018, 38(22): 6647-6654.
- Ren Lei, Gong Chunying. An LC parameter identification method for Boost converter based on modified hybrid system model[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6647-6654(in Chinese).
- [44] 吴 伟. 电力电子电路故障特征参数提取与健康预报研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- Wu Yi. Research on Fault Characteristic Parameters Extraction and Health Forecast Methods of Power Electronic Circuits[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013(in Chinese).
- [45] 顾菊平, 蒋 凌, 张新松, 等. 基于特征提取的锂离子电池健康状态评估及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5330-5342.
- Gu Juping, Jiang Ling, Zhang Xinsong, et al. Estimation and influencing factor analysis of lithium-ion batteries state of health based on features extraction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5330-5342(in Chinese).
- [46] 范兴明, 封 浩, 张 鑫. 最小二乘算法优化及其在锂离子电池参数辨识中的应用[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1577-1588.
- Fan Xingming, Feng Hao, Zhang Xin. Optimization of least squares method and its application in parameter identification of lithium-ion battery model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1577-1588(in Chinese).
- [47] 熊小伏, 陈 康, 郑 伟, 等. 基于最小二乘法的光伏逆变器模型辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 52-57, 63.
- Xiong Xiaofu, Chen Kang, Zheng Wei, et al. Photovoltaic inverter model identification based on least squares method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 52-57, 63(in Chinese).
- [48] 孙凤艳, 王友仁, 崔 江, 等. 功率变换电路电解电容器故障预测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 29-33.
- Sun Fengyan, Wang Youren, Cui Jiang, et al. Research on failure prediction method of electrolytic capacitor used in power conversion circuit[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1): 29-33(in Chinese).
- [49] 邱绵浩, 王明玉, 魏 辉, 等. 采用全阶状态观测器的 IGBT 模块结温预测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(7): 84-91.
- Qiu Mianhao, Wang Mingyu, Wei Hui, et al. Predicting junction temperature of IGBT module based on full-order state observer[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(7): 84-91(in Chinese).
- [50] Xiang D W, Li R, Tavner P, et al. Monitoring solder fatigue in a power module using the rise of case-above-ambient temperature[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2578-2591.
- [51] Hamidia A, Becka N, Thomasb K, et al. Reliability and lifetime evaluation of different wire bonding technologies for high power IGBT modules[J]. Microelectronics Reliability, 1999, 39(6/7): 1153-1158.
- [52] 任 磊. 电力电子电路故障特征提取技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- Ren Lei. Research on Fault Feature Parameter Extraction Techniques for Power Electronic Circuits[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019(in Chinese).
- [53] Laadjal K, Sahraoui M, Cardoso A J M, et al. Online estimation of aluminum electrolytic-capacitor parameters using a modified Prony's method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4764-4774.
- [54] Aeloiza E, Kim J-H, Enjeti P, et al. A real time method to estimate electrolytic capacitor condition in PWM adjustable speed drives and uninterruptible power supplies[C]//2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. Dresden, Germany, 2005: 2867-2872.
- [55] Vogelsberger M A, Wiesinger T, Ertl H. Life-cycle monitoring and voltage-managing unit for DC-Link electrolytic capacitors in PWM converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 493-503.
- [56] 任 磊, 韦 微, 龚春英, 等. 电力电子电路功率器件故障特征参数提取技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3089-3101.
- Ren Lei, Wei Zheng, Gong Chunying, et al. Fault feature extraction techniques for power devices in power electronic converters: A review [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3089-3101(in Chinese).
- [57] 田艳军, 宋少鹏, 徐小奇, 等. 基于卡尔曼滤波数据优化与非线性最小二乘法的 IGBT 饱和压降监测技术[J]. 电工技术学报, 2026, 41(8): 2641-2657.
- Tian Yanjun, Song Shaopeng, Xu Xiaochi, et al. IGBT saturation voltage drop monitoring technology

- based on Kalman filter data optimization and nonlinear least squares method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(8): 2641-2657(in Chinese).
- [58] 杨旭. 基于饱和压降测量的 IGBT 功率模块状态评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Yang Xu. A Study on an IGBT's Condition Assessment Method Based on the Measurement of Saturation Voltage[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012(in Chinese).
- [59] 胡震, 崔曼, 吴晓华, 等. 基于空间多点位温度 IGBT 器件参数逆推的健康状态在线监测方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(2): 452-462.
Hu Zhen, Cui Man, Wu Xiaohua, et al. On-line condition monitoring of IGBT module based on parameter inversion of spatial multi-point temperature[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(2): 452-462(in Chinese).
- [60] 徐国卿, 王翔, 竺伟, 等. 电力电子器件故障预测与健康状态管理技术的研究现状和趋势[J]. 电机工程学报, 2023, 43(5): 1912-1927.
Xu Guoqing, Wang Xiang, Zhu Wei, et al. Prognostics & health management technology for power electronic devices and its advances[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1912-1927(in Chinese).
- [61] 姚芳, 胡洋, 李铮, 等. IGBT 模块结温预测 BP 神经网络模型[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 367-374.
Yao Fang, Hu Yang, Li Zheng, et al. The research on the BP neural network model of junction temperature of IGBT modules[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2017, 47(3): 367-374(in Chinese).
- [62] 雷亚国, 贾峰, 孔德同, 等. 大数据下机械智能故障诊断的机遇与挑战[J]. 机械工程学报, 2018, 54(5): 94-104.
Lei Yaguo, Jia Feng, Kong Detong, et al. Opportunities and challenges of machinery intelligent fault diagnosis in big data era[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(5): 94-104(in Chinese).
- [63] 周慧德. 开关电源中铝电解电容可靠性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Zhou Huide. Research on Reliability of Aluminum Electrolytic Capacitor in SMPS[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010(in Chinese).
- [64] 刘鑫龙. PWM 整流器的参数辨识与控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Liu Xinlong. Research on Parameter Identification and Control Strategy for PWM Rectifiers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013(in Chinese).
- [65] 朱琦. 电机驱动系统母线电容状态监测与寿命预测方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
Zhu Qi. Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prediction for DC-Link Capacitors in Motor Drives[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022(in Chinese).
- [66] Zhao Z Y, Davari P, Lu W G, et al. An overview of condition monitoring techniques for capacitors in DC-link applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 3692-3716.
- [67] Soliman H, Wang H, Gadalla B, et al. Condition monitoring of DC-link capacitors based on artificial neural network algorithm[C]//2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Riga, Latvia, 2015: 587-591.
- [68] Kamel T, Biletskiy Y, Chang L. Capacitor aging detection for the DC filters in the power electronic converters using ANFIS algorithm[C]//2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Halifax, Canada, 2015: 663-668.
- [69] 方洪鹰. 数据挖掘中数据预处理的方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
Fang Hongying. Data Processing Method of Dimensionless[D]. Chongqing: Southwest University, 2009(in Chinese).
- [70] 李刚, 于长海, 刘云鹏, 等. 电力变压器故障预测与健康状态管理: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 156-167.
Li Gang, Yu Changhai, Liu Yunpeng, et al. Power transformer fault prediction and health management: Challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 156-167(in Chinese).
- [71] 万勇. 基于数据驱动的三相逆变器开路故障诊断研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2024.
Wan Yong. Research on Open-Circuit Fault Diagnosis Methods of Three-Phase Inverters Based on Data Drive[D]. Hefei: Anhui University, 2024(in Chinese).
- [72] 郜传厚, 渐令, 陈积明, 等. 复杂高炉炼铁过程的数据驱动建模及预测算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 725-730.

- Gao Chuanhou, Jian Ling, Chen Jiming, et al. Data-driven modeling and predictive algorithm for complex blast furnace ironmaking process[J]. *Acta Automation Sinica*, 2009, 35(6): 725-730(in Chinese).
- [73] 任志伟. 面向数据驱动建模的数据预处理方法研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013.
- Ren Zhiwei. Research of Data Preprocessing for Data-driven Modeling[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013(in Chinese).
- [74] 揭由翔. 基于模型的电力电子电路故障预测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- Jie Youxiang. Research on Fault Prediction of the Power Electronics Based on Models[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013(in Chinese).
- [75] 张 威, 陈欣铭, 左东升, 等. 基于梯度下降的光伏发电微电网能源优化[J]. *计算机仿真*, 2025, 42(6): 388-392, 423.
- Zhang Wei, Chen Xinming, Zuo Dongsheng, et al. Gradient descent method based energy optimal dispatch for microgrid with photovoltaic unit[J]. *Computer Simulation*, 2025, 42(6): 388-392, 423(in Chinese).
- [76] 秦 琪, 赵 帅, 陈绍炜, 等. 基于粒子群优化粒子滤波的电容剩余寿命预测[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(20): 237-241, 258.
- Qin Qi, Zhao Shuai, Chen Shaowei, et al. Remaining useful life prediction of electrolytic capacitor based on particle swarm optimization particle filter[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(20): 237-241, 258(in Chinese).
- [77] 金建新, 虞儒新, 刘 刚, 等. 锂离子电池健康状态估算方法研究进展[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(1): 33-48.
- Jin Jianxin, Yu Ruxin, Liu Gang, et al. Research progress on state-of-health estimating method for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(1): 33-48(in Chinese).
- [78] 贺开放. 基于多维尺度和神经网络的电力电子电路故障诊断方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- He Kaifang. A Method for Fault Diagnosis Based on Multidimensional Scaling and Neural Network in Power Electronic Circuit[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018(in Chinese).
- [79] 胡 清, 王荣杰, 詹宜巨. 基于支持向量机的电力电子电路故障诊断技术[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(12): 107-111.
- Hu Qing, Wang Rongjie, Zhan Yiju. Fault diagnosis technology based on SVM in power electronics circuit[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(12): 107-111(in Chinese).
- [80] 李 文. 变流器中铝电解电容的参数辨识与寿命预测[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- Li Wen. Parameter Identification and Life Prediction of Aluminum Electrolytic Capacitor in Converter[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021(in Chinese).
- [81] 葛磊蛟, 金雨含, 李小平, 等. 人工智能赋能电力电容器运行状态感知及优化控制技术综述[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(4): 1-12.
- Ge Leijiao, Jin Yuhan, Li Xiaoping, et al. Overview of operation state sensing and optimal control technology of artificial intelligence empowered power capacitor[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(4): 1-12(in Chinese).
- [82] 张宝珍, 曾天翔. 先进的故障预测与状态管理技术[J]. *测控技术*, 2003, 22(11): 4-6.
- Zhang Baozhen, Zeng Tianxiang. Advanced prognostics and health management technology[J]. *Measurement & Control Technology*, 2003, 22(11): 4-6(in Chinese).
- [83] 齐 波, 张 鹏, 荣智海, 等. 基于数据驱动和多判据融合的油色谱监测传感器有效性评估方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(11): 3662-3669.
- Qi Bo, Zhang Peng, Rong Zhihai, et al. Validity assessment method of DGA sensors based on data driven and multiple criterion integration[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(11): 3662-3669(in Chinese).
- [84] 张思慧, 宋文胜, 唐 涛, 等. 一种基于数字孪生的灰盒单相 PWM 整流器建模与健康参数监测方法[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(2): 463-476.
- Zhang Sihui, Song Wensheng, Tang Tao, et al. A gray-box single-phase PWM rectifier modeling and health parameter monitoring method based on digital twins[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(2): 463-476(in Chinese).
- [85] 蒋翔宇, 冯毅雄, 洪兆溪, 等. 基于多级数据融合的核电站运行功能健康状态评估[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(4): 200-211.
- Jiang Xiangyu, Feng Yixiong, Hong Zhaoxi, et al. Health status assessment on the operation function of nuclear power plants based on multi-level data fu-

- sion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(4): 200-211 (in Chinese).
- [86] 廖广纯. 数据驱动的设备健康评估与维修决策[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- Liao Guangchun. Data-Driven Methods of Equipment Health Assessment and Maintenance Decision-Making[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).
- [87] 黄蔓云, 卫志农, 孙国强, 等. 数据挖掘在配电网态势感知中的应用: 模型、算法和挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6588-6599.
- Huang Manyun, Wei Zhinong, Sun Guoqiang, et al. Review of distribution system situation awareness based on data mining: Modeling, algorithms and challenges[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6588-6599 (in Chinese).
- [88] 陈自强. 基于 LSTM 网络的设备健康状况评估与剩余寿命预测方法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- Chen Ziqiang. Research on Equipment Health Assessment and Remaining Useful Life Prediction Method Based on LSTM[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019 (in Chinese).
- [89] 周东华, 魏慕恒, 司小胜. 工业过程异常检测、寿命预测与维修决策的研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 711-722.
- Zhou Donghua, Wei Muheng, Si Xiaosheng. A survey on anomaly detection, life prediction and maintenance decision for industrial processes[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(6): 711-722 (in Chinese).
- [90] 纪方旭, 苏 营, 丁 坤, 等. 光伏阵列数学建模与健康状态评估方法综述[J]. 综合智慧能源, 2025, 48(2): 1-18.
- Ji Fangxu, Su Ying, Ding Kun, et al. Review of mathematical modeling and health status evaluation methods for PV arrays[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 48(2): 1-18 (in Chinese).
- [91] 江秀臣, 盛戈皞. 电力设备状态大数据分析的研究和应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1041-1050.
- Jiang Xiuchen, Sheng Gehao. Research and application of big data analysis of power equipment condition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1041-1050 (in Chinese).
- [92] 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 Xiaxia, Chen Chaobo, Gao Song. Review of fault diagnosis methods for switches in inverter[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(8): 1-6 (in Chinese).
- [93] Zhang M Y, Zhang Z B, Li Z, et al. A simple and effective open-circuit-fault diagnosis method for grid-tied power converters: A new technique based on Tellegen's theorem[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 11(2): 2203-2213.
- [94] 吴 迪. 基于神经网络的电力电子电路故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- Wu Di. The Power Electronic Circuit Fault Diagnosis Based on the Neural Network[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).
- [95] 文小玲, 尹项根, 谭尚毅. 一种电力电子电路故障诊断方法[J]. 电工技术杂志, 2003, 22(7): 49-51.
- Wen Xiaoling, Yin Xianggen, Tan Shangyi. A scheme for fault diagnosis of power electronic circuits[J]. Electrotechnical Application, 2003, 22(7): 49-51 (in Chinese).
- [96] 齐 波, 冀 茂, 郑玉平, 等. 电力物联网技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3012-3031.
- Qi Bo, Ji Mao, Zheng Yuping, et al. Application status and development prospect of power internet of things technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3012-3031 (in Chinese).
- [97] 郭 群. 基于数据驱动的逆变器功率器件故障诊断方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- Guo Qun. Data-Driven Fault Diagnosis Method for Power Devices in Inverter[D]. Changchun: Jilin University, 2024 (in Chinese).
- [98] 马 帅. 变工况下电力电子电路参数故障诊断方法研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.
- Ma Shuai. Research on Parametric Fault Diagnosis Method of Power Electronic Circuits Under Variable Operating Conditions[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2025 (in Chinese).
- [99] 王伯荣. T 型逆变器功率开关管开路故障诊断方法和容错策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- Wang Borong. Research on Fault Diagnosis and Tolerance for Power Transistor Open-Circuit Faults in T-Type

- Inverters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022 (in Chinese).
- [100] 张建民. 基于波形分析技术的电力电子电路故障诊断方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- Zhang Jianmin. The Research on Fault Diagnosis of Power Electronic Circuits Based on the Waveform Analysis[D]. Changsha: Hunan University, 2007 (in Chinese).
- [101] 宋 威, 施伟锋, 卓金宝, 等. 多电平逆变器开关管故障诊断方法综述[J]. 微电机, 2019, 52(10): 110-117.
- Song Wei, Shi Weifeng, Zhuo Jinbao, et al. Review of fault diagnosis methods for switching tubes of multi-level inverters[J]. Micromotors, 2019, 52(10): 110-117 (in Chinese).
- [102] Khomfoi S, Tolbert L M. Fault diagnostic system for a multilevel inverter using a neural network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(3): 1062-1069.
- [103] Babu B P, Srinivas J, Vikranth B, et al. Fault diagnosis in multi-level inverter system using adaptive back propagation neural network[C]//2008 Annual IEEE India Conference. Kanpur, India, 2008: 494-498.
- [104] Cai B P, Zhao Y B, Liu H L, et al. A data-driven fault diagnosis methodology in three-phase inverters for PMSM drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5590-5600.
- [105] 罗 慧, 王友仁, 崔 江, 等. 电力电子电路多源特征层融合故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(4): 92-96.
- Luo Hui, Wang Youren, Cui Jiang, et al. Intelligent fault diagnosis for power electronic circuits based on multi-source feature-level fusion[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(4): 92-96 (in Chinese).
- [106] 郑 磊, 蒋 玮, 胡仁杰, 等. 基于小波变换和神经网络的模拟电子电路故障诊断[J]. 南京理工大学学报, 2024, 48(3): 310-317.
- Zheng Lei, Jiang Wei, Hu Renjie, et al. Fault diagnosis of analog electronic circuits based on wavelet transform and neural network[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2024, 48(3): 310-317 (in Chinese).
- [107] 杨晓冬, 王崇林, 史丽萍. H 桥逆变器 IGBT 开路故障诊断方法研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 112-118.
- Yang Xiaodong, Wang Chonglin, Shi Liping. Study of IGBT open-circuit fault diagnosis method for H-bridge inverter[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 112-118 (in Chinese).
- [108] 何 英, 周东华, 俞 容. 一种基于性能退化数据的电子设备缓变故障预报方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(7): 1526-1529.
- He Ying, Zhou Donghua, Yu Rong. Gradual failure prediction of electronic equipment based on performance degradation data[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(7): 1526-1529 (in Chinese).
- [109] 武新龙. 针对焊料层失效的 IGBT 物理寿命预测模型研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- Wu Xinlong. Research on Physical Lifetime Prediction Model of IGBT Module for Solder Layer Fatigue[D]. Changsha: Hunan University, 2020 (in Chinese).
- [110] Pecht M G. Prognostics and Health Management of Electronics[M]. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [111] 方 鑫, 周维维, 姚 丹, 等. IGBT 模块寿命预测模型综述[J]. 电源学报, 2014, 12(3): 14-21.
- Fang Xin, Zhou Luowei, Yao Dan, et al. An overview of IGBT life prediction models[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(3): 14-21 (in Chinese).
- [112] Ciappa M. Selected failure mechanisms of modern power modules[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4/5): 653-667.
- [113] Pecht M, Dasgupta A, Lall P. A failure prediction model for wire bonds[C]//Proceedings of ISHM. Baltimore, USA, 1989: 607-613.
- [114] Norris K C, Landzberg A H. Reliability of controlled collapse interconnections[J]. IBM Journal of Research and Development, 1969, 13(3): 266-271.
- [115] Bayerer R, Herrmann T, Licht T, et al. Model for power cycling lifetime of IGBT modules—Various factors influencing lifetime[C]//5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. Nuremberg, Germany, 2008.
- [116] 李 超. 基于监测数据的机械设备剩余寿命预测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- Li Chao. Research on Remaining Useful Life Prediction of Mechanical Equipment Based on Monitoring Data [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [117] 孟冬辉. 牵引变流器的故障预测与健康管理(PHM)及可靠性评估技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.

- Meng Linghui. Research on the Fault Prognostics and Health Management and Reliability Assessment of Traction Converter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017(in Chinese).
- [118] 胡昌华, 张 浩, 喻 勇, 等. 基于深度学习的复杂退化系统剩余寿命预测研究现状与挑战[J]. 电光与控制, 2021, 28(2): 1-6.
- Hu Changhua, Zhang Hao, Yu Yong, et al. Deep learning based RUL prediction of complex degradation systems: State of the art and challenges[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(2): 1-6(in Chinese).
- [119] 郭 亮, 李长根, 高宏力, 等. 大数据背景下基于特征学习的机械设备剩余寿命预测[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(4): 730-735, 768.
- Guo Liang, Li Changgen, Gao Hongli, et al. Residual life prediction of mechanical equipment based on feature learning in big data background[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(4): 730-735, 768(in Chinese).
- [120] 熊诗成, 鲁军勇, 郑宇锋, 等. 金属化膜电容器寿命预测方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2378-2384.
- Xiong Shicheng, Lu Junyong, Zheng Yufeng, et al. Lifetime prediction of metallized film capacitor based on particle filter[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2378-2384(in Chinese).
- [121] 陈 明, 胡 安, 刘宾礼. 绝缘栅双极型晶体管失效机理与寿命预测模型分析[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(10): 65-71.
- Chen Ming, Hu An, Liu Binli. Failure mechanism and lifetime prediction modeling of IGBT power electronic devices[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(10): 65-71(in Chinese).
- [122] Li W P, Wang B X, Liu J C, et al. IGBT aging monitoring and remaining lifetime prediction based on long short-term memory(LSTM) networks[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 114: 113902.
- [123] Moniruzzaman M, Okilly A H, Choi S, et al. A comprehensive study of machine learning algorithms for GPU based real-time monitoring and lifetime prediction of IGBTs[C]//2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Long Beach, USA, 2024: 2678-2684.
- [124] 刘云鹏, 许自强, 李 刚, 等. 人工智能驱动的数据分析技术在电力变压器状态检修中的应用综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 337-348.
- Liu Yunpeng, Xu Ziqiang, Li Gang, et al. Review on applications of artificial intelligence driven data analysis technology in condition based maintenance of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 337-348(in Chinese).

(责任编辑: 田 军)