

DOI: 10.11985/2024.03.001

电压源型并网变流器状态监测与故障 诊断方法综述*

宋少鹏 田艳军 李欣 徐小奇

(华北电力大学河北省分布式储能与微网重点实验室 保定 071003)

摘要: 电压源型变流器(Voltage source converter, VSC)广泛应用于分布式发电和储能单元等并网领域中, VSC系统严重影响并网系统的稳定运行。开发并网VSC潜在故障的健康状态监测和早期观测识别, 对于保证变流器持续安全稳定可靠运行具有重要意义。首先, 对并网VSC的主电路结构及常见电气故障进行了总结和分析, 包括DC-link电容故障、绝缘栅双极型晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)故障、滤波电感故障、交流侧电流传感器和电压传感器故障等, 并阐明了故障发生机理与故障特性; 其次, 以并网VSC状态监测和故障诊断方法为核心, 对国内外学者的相关研究进行了分类和归纳, 对比总结了不同状态监测和故障诊断方法的优点和不足; 最后, 对并网VSC状态检测和故障诊断技术未来的研究方向进行了展望。

关键词: 电压源变流器(VSC); 变流器故障; 故障机理与特性; 变流器状态监测; 变流器故障诊断

中图分类号: TM46

Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Methods for Grid-connected VSC

SONG Shaopeng TIAN Yanjun LI Xin XU Xiaochi

(Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-grid,

North China Electric Power University, Baoding 071003)

Abstract: Voltage source converter(VSC) is widely used in grid-connected areas such as distributed generation and energy storage units, and the VSC system seriously affects the stable operation of grid-connected system. The development of health state monitoring and early observation and identification of potential faults in grid-connected VSCs is of great significance to ensure the continuous safe, stable and reliable operation of the converter. First, the main circuit structure and common electrical faults of the grid-connected VSC are summarized and analyzed, including DC-link capacitor faults, insulated gate bipolar transistor(IGBT) faults, filter inductor faults, AC-side current and voltage sensor faults, etc. The fault occurrence mechanisms and fault characteristics are also explained. Secondly, with the grid-connected VSC condition monitoring and fault diagnosis methods as the core, the relevant researches of scholars at home and abroad are classified and summarized, and the advantages and shortcomings of different condition monitoring and fault diagnosis methods are compared and summarized. Finally, the future research direction of the grid-connected VSC condition detection and fault diagnosis technology is prospected.

Key words: Voltage source converter(VSC); converter faults; failure mechanisms and characterization; converter condition monitoring; converter fault diagnosis

* 国家自然科学基金(52077079)和河北省自然科学基金(E2022502032)资助项目。20240521收到初稿, 20240813收到修改稿

1 引言

电压源型变流器(Voltage source converter, VSC)具有提高电能利用率、控制方式灵活性和电能质量等功能^[1],被广泛应用于可再生能源发电并网^[2-4]、储能电站^[5]、电动汽车^[6]、高压直流输电等领域^[7]。近年来,我国柔性直流输电工程发展迅速,如张北四端柔性直流输电工程、南澳三端柔性直流输电工程,VSC变流器在柔性直流输电系统中广泛应用^[8]。

然而,VSC变流器拓扑结构相对复杂,工作状态多样化,集成度与功率密度逐年提高,同时变流器系统故障率仍是继续需要解决的技术难题^[9]。在光伏电站运行过程中,VSC故障比例占光伏电站常见故障的60%^[10],发生故障时,VSC直流侧母线电压产生波动,并且交流侧输出电压和电流发生畸变。在缺乏有效状态监测与故障诊断方法的情况下,可导致VSC停机甚至损坏,进而影响整体系统可靠性运行。因此,开发VSC的态势感知、故障诊断与早期预警技术具有重要意义。

VSC系统的故障可分为以下两种类型:结构性故障和参数性故障^[11]。结构性故障是指由系统元件发生短路或开路等引发的故障类型,具有突发性且对电路的危害较大。参数性故障是指系统元件随着性能的下降而导致元件参数发生偏离的故障模式,且会演变为结构性故障。

国内外学者针对VSC变流器故障诊断开展了大量研究,以提高VSC系统的可靠性,典型的方法是基于可靠性监测评估方案,提供有关电力设备健康状态的信息。通过对退化程度的评估,可以在灾难性故障发生之前,对设备进行维护,从而降低维护成本潜在的损失。

VSC变流器故障诊断面临的难点是故障类型多样,存在电气元件故障、控制软件问题以及环境因素影响,并且目前的故障诊断多针对单个器件故障进行研究,实际运行时可能发生多种故障耦合作用,故障特征难以单独提取^[12]。同一类型的故障在不同工况下相关变量或参数也不尽相同。传统故障诊断方法取得了一定的应用效果,但也存在显著问题,如成本较高,受制于诊断模型的适用性和精度^[13]。数据驱动的故障诊断技术可有效解决这一问题,但对数据集有特定的要求^[14]。因此,利用有限的运行数据,快速准确定位故障,是并网VSC故障诊断需要重点解决的问题。

本文阐明了系统元件故障对并网VSC的影响,

对不同故障情况的发生机理和特征进行了分析。同时,本文对国内外学者提出的VSC状态监测与故障诊断算法的基本原理、优缺点分别进行了分析与比较。在此基础上,对状态监测与故障诊断方法的近期发展趋势与未来研究方向进行总结与展望。

2 并网VSC拓扑

典型的三相并网VSC系统结构如图1所示,主要由直流侧电容器、功率开关器件组成的三相桥式逆变电路、交流侧的滤波电感以及用于逆变控制器信号采集的各类传感器组成。

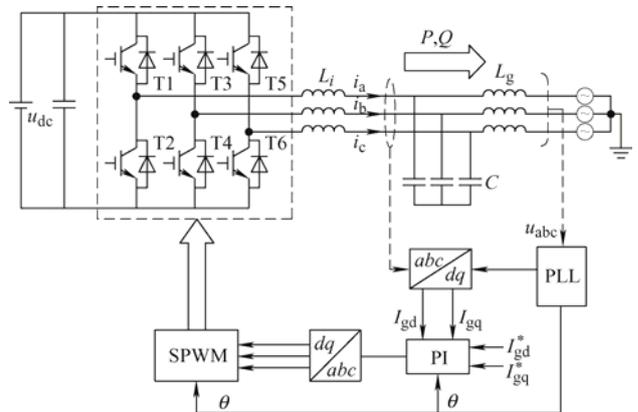


图1 VSC并网结构图

VSC并网运行过程中,传感器对三相电压和三相电流进行测量。通过锁相环从三相电压信号中提取相角 θ ,并结合电网电压的相角 θ 对三相电流进行坐标变换,将交流量转化为直流量。然后,可以利用PI控制系统对直流量跟踪控制,通过变流调制信号驱动绝缘栅双极型晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)开断。最终,输出的三相电流经滤波器抑制高频谐波,将电能输入到电网。由于长期处于电热应力的环境,VSC系统容易发生故障,常见的故障有IGBT故障、电容和电感老化故障、传感器故障等,故障种类繁多,可导致VSC非计划停机。为研究变流器的故障特性,需要建立准确的系统模型。状态空间模型的优点是能够从模型中获得系统的完整信息。根据基尔霍夫电压电流定律,将方程进行坐标变换,可得 $d-q$ 轴状态方程^[15]为

$$\begin{bmatrix} L \frac{di_{gd}}{dt} \\ L \frac{di_{gq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $L=L_i+L_g$ 是交流侧滤波电感和电网电感的加和, u_d 、 u_q 是变流器输出电压的 d - q 轴分量, u_{gd} 、 u_{gq} 是电网电压的 d - q 轴分量, i_{gd} 、 i_{gq} 是电网电流的 d - q 轴分量。

通过建立 VSC 的系统模型, 可以挖掘系统的故障特性, 快速准确地对 VSC 进行故障诊断。

3 故障发生机理及特性

3.1 DC-link 电容故障发生机理及特性

DC-link 电容主要有铝电解电容器、金属化聚丙烯薄膜电容器和多层陶瓷电容器。图 2 为电容器的简化模型, C 、 R_{ESR} 、 L_{ESL} 分别为电容、等效串联电阻、等效串联电感。电容的主要失效方式有短路、开路、电容值下降和等效串联电阻 R_{ESR} 增大等。

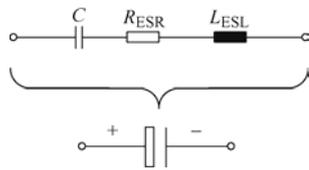


图 2 DC-link 电容器等效电路

当电容发生短路时, 母线电流突然增大, 电压降为零; 断路时, 母线电压波动增大。开路故障和短路故障主要由制造工艺问题引起, 可以在生产时通过老化试验进行检查。而电容在运行过程中, 主要由参数退化引起失效^[16]。

在系统运行过程中, 电容内部电化学反应使介质氧化膜不平整, 电容的性能下降, 承受过电压, 漏电流增大, 电容内部温度升高, 电解液挥发, 导致电容值减小, R_{ESR} 增大。表 1 总结了铝电解电容器(Aluminum electrolytic capacitors, AL-CAP)、金属化聚丙烯薄膜电容(Metallized polypropylene film capacitors, MPPF-CAP)和多层陶瓷电容器(Multi-layer ceramic capacitors, MLC-CAP)的典型寿命终止标准^[16]。

表 1 电容的典型寿命终止标准^[17]

电容类型	AL-CAP	MPPF-CAP	MLC-CAP
寿命终止判据	$C/C_0 < 80\%$ $R_{ESR}/R_{ESR0} > 2$	$C/C_0 < 95\%$	$C/C_0 < 90\%$

注: C 为电容, R_{ESR} 为等效串联电阻, C_0 为电容初始值, R_{ESR0} 为等效串联电阻初始值。

大多数电容器状态监测都是基于对电容 C 和等效串联电阻 R_{ESR} 的估计, 这是电容器典型的退化指标。由表 1 可知, 对于铝电解电容, 电容值降低 20%, 电容寿命终止。

3.2 IGBT 故障发生机理及特性

IGBT 故障主要分为两类: 开路故障和短路故障。焊线抬升导致门极驱动开路和驱动器故障导致的 IGBT 破裂都可以引起开路故障。而驱动电路故障、辅助电源故障和驱动电压错误会导致 IGBT 短路。IGBT 短路故障的检测和保护已有成熟的硬件解决方案, 所以本文主要讨论 IGBT 开路故障的诊断和保护处理。

如图 3 所示, 当 VSC 的单个桥臂的上管发生开路时, 故障相电流只有下半波, 非故障相电流也会发生畸变, 三相电流严重不对称。

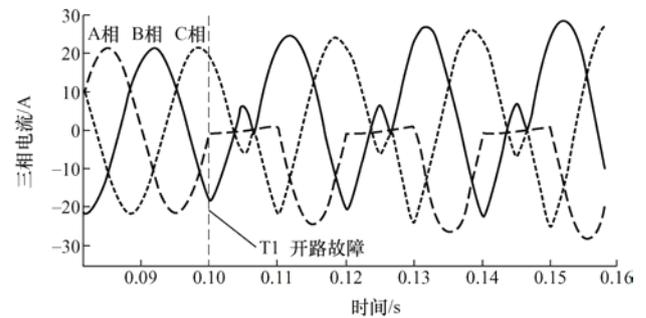


图 3 T1 管发生开路故障的交流侧电流波形

当发生双管开路故障, 故障特征不同, 在故障诊断时, 要进行分类讨论, 根据不同的故障特征诊断故障功率开关管。

针对以上故障机理和特征的故障诊断方法, 只有在 IGBT 发生故障后才能有效定位故障。如果了解器件发生老化但未发生故障时的中间状态, 可实现对器件的故障预警, 将有利于提高并网 VSC 的可靠性。

图 4 所示为 IGBT 模块剖面结构, 由多层不同材料组成, 端子与内部芯片之间采用键合线工艺连接起来。由于材料膨胀系数(Coefficient of thermal expansion, CTE)不同产生热应力, 当 IGBT 长期工作在热循环冲击下导致材料疲劳和老化, 最终导致键合线脱落^[18]和焊料层老化^[19]。当单根键合线脱落, 剩下其余键合线承担更大的电流和应力, 全部脱落会影响电流传输, 最终造成 IGBT 模块故障。此外, 由键合线脱落引起 IGBT 故障的概率高达 70%^[20], 由于键合线是逐渐脱落, 研究键合线失效过程, 对提高其可靠性具有十分重要的意义。当键合线脱落时, 会引起 IGBT 导通电阻增加, 饱和压降变大, 进而会影响 VSC 电压输出的大小, 造成电压畸变。并且在各种用于 IGBT 状态评估的状态参数中, 饱和压降更容易获得^[21]。因此, 可以通过检测饱和压降的变化来判断键合线是否失效, 实现对 IGBT 的状态监测。

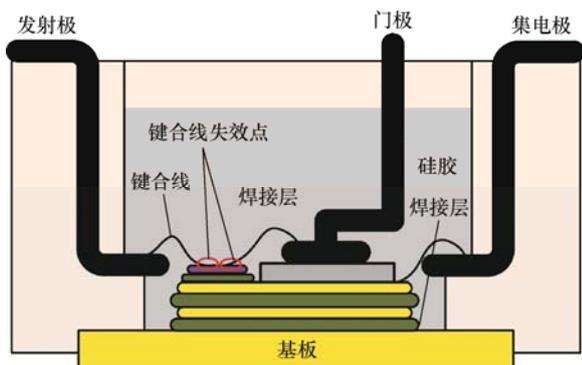


图4 IGBT 模块剖面图

3.3 传感器故障特性

网侧电压和电流传感器由于温度等环境条件变化和噪声干扰等原因导致输出信号偏差, 可导致并网 VSC 控制失败, 影响 VSC 的运行稳定性, 会发生五种故障: 开路、卡死、增益、偏差和噪声故障^[22], 表 2 总结了传感器的典型失效模式。

表 2 传感器的典型失效模式

故障类型	故障模式
开路故障	测量值为零或仅包含随机噪声
卡死故障	测量值保持一个常数
增益故障	测量值按比例增大或缩小
偏差故障	测量值发生偏移
噪声故障	测量值包含高幅值噪声

3.4 电感故障发生机理及特性

当电感受到电流的瞬时冲击, 内部的绕组和磁心受到应力, 随着时间的推移会发生老化, 导致其性能下降。但是, 当前对于电容器的失效模型和故障特征的研究比较深入, 对于电感的失效机理及故障特征的研究较少。文献[23]通过分析电感的特性, 建立了电感的模型及其失效标准。当电感绕组线圈绝缘层发生老化损坏时, 导致绕组匝数减少, 电感值和 R 值减小。因此, 将电感值偏小 20% 作为判定电感失效的标准, 电感等效电路模型如图 5 所示。

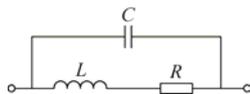


图5 电感等效电路模型

4 VSC 状态监测与故障诊断方法

VSC 变流器状态监测与故障诊断通过对获取的故障信号进行故障特征提取, 如电压、电流、温

度以及元件参数值等, 然后对故障机理和特性进行分析, 可构建故障诊断算法, 用于检查系统数据实时故障特征信息与健康系统的一致性, 并识别出故障元件和故障原因。具体的故障诊断与定位流程如图 6 所示。

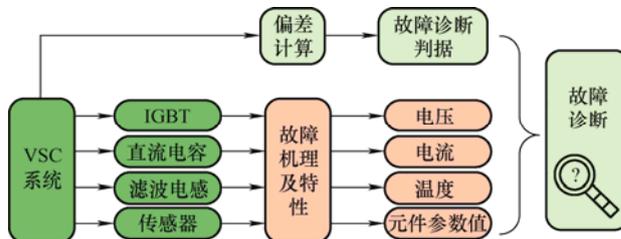


图6 VSC 故障诊断结构图

4.1 DC-link 电容状态检测与故障诊断

根据应用的方式, DC-link 电容状态监测方法又可分为离线诊断和在线诊断。由于电容器退化进程缓慢, 离线监测独立于拓扑结构的变化, 可适用于所有类型的变流器。离线监测通常可以使用 LCR 计、阻抗分析仪对电容的 R_{ESR} 、 C 进行测量或利用硬件电路进行参数测量。文献[24]在不同温度和电压应力条件下对电容器进行加速老化试验, 然后使用降维技术对阻抗谱进行处理, 并将其输入深度神经网络以预测电容器的老化状态。该方法预测误差较小, 可以实现系统故障预警。

离线方法估计电容 C 和 R_{ESR} 的准确度较高, 但其实施成本较高, 需要人工拆解电容, 在实际应用中, 并网 VSC 的数量和规模较大, 实际操作难度高。因此, 文献[25]提出一种准在线电容估计方法, 该方法在系统不工作时, 引入 LC 谐振, 电容值估计精度可达到 99%。该方法采用大振幅的信号测量和基于时间的多参数识别算法, 精度高, 对系统参数变化、测量噪声和温度漂移的影响不敏感, 并且无需添加额外的硬件, 系统成本较低。但是, 该方法只能在系统停止运行时进行测量, 不能保证系统连续运行。针对该问题, 文献[26]基于系统的模型, 利用电网侧电感电流、光伏板电流以及调制信号来估计电容电流, 从而在线计算出电容的值。该方法不仅保证了系统连续运行, 还提高了电容估计精度, 最大估计误差为 2.56%。

文献[27]通过测量电容器的功耗和均方根电流来估计 R_{ESR} 的值, 这种方法需要添加一个额外的电流传感器, 增加了硬件系统的体积和复杂程度, 而且会导致电容电压失真, 从而影响整体测量。为了避免传感器的增加, 文献[28]通过改变控制回路, 利用直流侧出现的低频纹波分量来估计 R_{ESR} 和电容

值。然而，该方法需要阻断变流器的正常运行。因此，文献[29]构建支持向量机模型并且实现准确的故障诊断，保证了变流器的高效率运行。但是，该方法需要离线训练和复杂的算法。文献[30]提出了一种基于人工神经网络(Artificial neural network, ANN)的直流链路电容估计技术，并且比较了两种人工神经网络的估计精度，ANN1 通过变流器输出电流和直流链路电压纹波来估计电容值。另一方面，ANN2 结合直流链路电压谐波来预测电容值，两种方法能以较小的估计误差预测电容值。该类方法不仅降低了系统的硬件成本，而且能够在 VSC 运行时准确定位故障。

但以上方法没有考虑工作温度对 C 值和 R_{ESR} 值的影响，文献[31]通过数学方程描述它们随温度变化的规律，在不同温度下将估计值与该温度下的参考值进行比较，如果超过阈值范围，则电容故障。表 3 给出了不同类型监测方法在算法实现难度、运行连续性和是否需要硬件等方面的差别。

表 3 电容状态监测方法对比

文献	类型	额外硬件	算法实现难度	运行连续性
[23]	离线	是	困难	中断
[24]	准在线	是	困难	中断
[25]	在线	否	简单	连续
[26]	在线	是	困难	连续
[27]	在线	否	简单	中断
[28]	在线	否	困难	连续
[29]	在线	否	困难	连续
[30]	在线	否	困难	连续

4.2 IGBT 状态监测与故障诊断

开路故障的诊断方法可以分为三类，主要包括基于模型、基于信号和数据驱动的方法。基于信号和数据驱动的故障诊断技术可以对 IGBT 器件进行状态监测，分析 IGBT 的健康状态。

4.2.1 基于模型的故障诊断

基于模型的故障诊断方法利用系统的状态信息和数学模型对开关管进行诊断，主要的建模方法有状态空间法^[32-34]、开关函数法^[35-37]、模型参考自适应法^[38-39]和混合逻辑动态法^[40-41]等。该类方法具有成本低和算法简单等优点。

文献[36]提出了基于 VSC 开关函数模型的故障诊断方法，该方法以故障情况和正常情况下器件承受电压的偏差为故障特征，对 IGBT 进行故障诊断。硬件诊断电路简单，诊断速度快，但只对单管和单

桥臂的故障诊断有效，不适用于多桥臂的多开关器件的故障诊断与定位。文献[37]同样基于 VSC 的开关函数法进行故障诊断，利用测量相电压与估计电压的残差实现故障 IGBT 的定位，该算法引入电压误差补偿机制，有效避免误诊断的情况发生，但是计算量大，算法复杂度高。

为了降低算法复杂度，文献[33-34]通过对观测器的输出信号与测量值进行比较，产生残差信号，实现故障诊断。文献[33]利用龙伯格观测器的观测电流与实测电流的比较来实现故障诊断，使用自适应阈值，具有较高的可靠性和鲁棒性。文献[34]构造滑模观测器来估计在加性模型(Additive model, AM)下的故障特征，可以对中点钳位式三电平 VSC 的多重故障进行诊断。以上采用状态空间模型的诊断方法，需要注入脉冲或切换状态定位故障开关，并且观测器的估计精度较差。

为了区分不同类别的故障，文献[39]提出了一种基于模型参考自适应的故障诊断，能有效检测和识别单开关短路和相短路故障，但是不能诊断双开关故障。文献[41]通过混合逻辑建模方法建立电机驱动的系统模型，利用电流残差诊断故障，克服了线性化建模无法揭示瞬态现象的缺点。基于模型的故障诊断方法需要精确的系统建模，而且易受噪声影响。针对此问题，文献[42-49]提出了基于信号的故障诊断方法。

4.2.2 基于信号的状态监测与故障诊断

基于信号的故障诊断方法通过提取变流器的固有电气特性，比较健康和故障状态下的不同特征对 IGBT 进行诊断，具有算法简单和诊断迅速的优点。

文献[42]用电流矢量轨迹分析法来诊断风机并网 VSC 的 IGBT 故障，将三相电流通过 Clark 变换转换到 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下。

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

识别故障方法是计算电流轨迹的斜率，可表示为

$$\psi = \frac{i_{\alpha}(k) - i_{\alpha}(k-1)}{i_{\beta}(k) - i_{\beta}(k-1)} \quad (3)$$

式中， $i_{\alpha}(k)$ 、 $i_{\beta}(k)$ 分别为 i_{α} 和 i_{β} 在 k 时刻的采样值。

当 IGBT 发生不同的故障时，电流矢量轨迹的变化如图 7 所示。

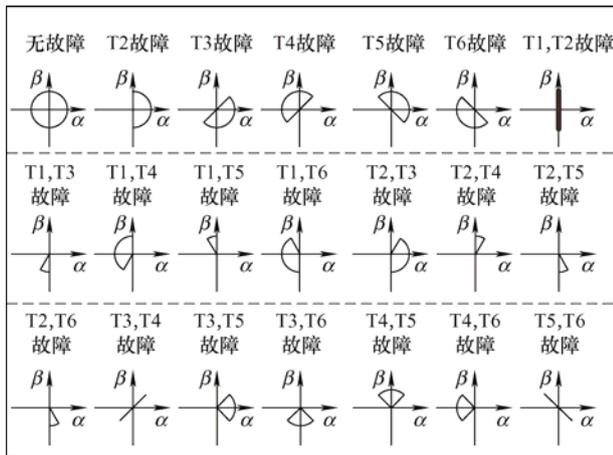
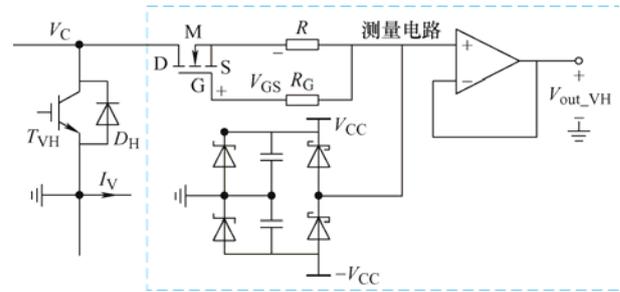


图7 电流矢量轨迹图

由图7可以看出,通过不同的斜率就可以定位开关管的故障。为了改进矢量分析法依赖于负载的缺点,文献[43]使用归一化平均电流的诊断方法,该方法不受负载变化的影响,可以减少误诊断情况的发生。文献[44]提出一种基于电流极性和调制电压的三电平VSC的开路故障诊断方法。该方法可以适用于不同的功率因数,鲁棒性较强。然而,上述只考虑IGBT的故障诊断方法易受到二极管故障的影响。针对此问题,文献[45]提出了一种基于信号残差的故障诊断算法,利用系统已有的电流测量值,通过分析电流残差的变化来定位故障开关。该方法诊断迅速,并且能够在不同工况下有效定位故障开关。文献[46]通过检测直流侧负极与电网中性点之间的电压,利用锁相环,结合电网电压的矢量角度,定位故障器件。但是以上诊断方法都是在发生故障之后有效,无法实现器件的故障预警。因此,文献[47]利用功率器件的开通关断波形来监测键合线的健康状态,但是需要高精度测量仪器,成本较高,不利于工业应用。针对此问题,文献[48]提出基于饱和压降热敏感电参数法监测IGBT模块键合线的状态,能快速有效地对IGBT模块健康状况进行评估。

CHOI等^[49]提出了IGBT的导通电压 V_{CE_ON} 和二极管的正向电压 V_F 的实时测量电路。如图8所示,其主要包括金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET)、电阻和运算放大器等。其中,测量电路中MOSFET的漏极与IGBT集电极相连,通过运算放大器的输出电压得到IGBT的导通压降($V_{CE_ON}=V_{out_VH}$),实现对IGBT的状态监测。

图8 实时 V_{CE_ON} 测量电路

IGBT导通压降受结温波动的影响,文献[50]对键合线老化程度与 V_{ce} 的对应关系进行了分析,利用动态自适应参考值来消除结温的影响,该方法能够对牵引整流器IGBT进行有效的状态监测。

随着IGBT运行时温度升高,导致应力集中,使得焊料层开裂,因此监测IGBT焊料层的老化状态是实现故障预警的有效措施之一^[51]。文献[52]通过分析IGBT模块电磁、热和力学应力特性,结合焊料层失效机理建立寿命预测模型,对功率循环下的IGBT进行寿命预测,但是该方法未实现对变流器的在线状态监测。由于IGBT的焊料层老化和焊线断裂都可以反映在导通压降参数中^[53],因此文献[54]结合粒子群算法,建立了单相整流器的数字孪生模型,结合数学模型和实际系统采集电信号,确定IGBT的导通压降和通态电阻等健康特征参数。该方法具有非侵入性,并且可以实现在线状态监测,但该方法在拓扑和控制方面高度依赖于变流器的结构。对于元件较多的变流器,其建模复杂性和计算负担可能会增加。为了解决该问题,文献[55]提出了一种即插即用的导通压降测量电路,该方法可以精准测量IGBT导通压降,并且减少了电路的复杂性、尺寸和连接端子。

表4给出了上述IGBT状态监测方法在监测位置、监测手段、系统运行状态和是否需要额外硬件四个方面的对比分析。

表4 IGBT状态监测方法对比

参考文献	失效位置	监测手段	系统状态	额外硬件
[47]	键合线	实时开关波形	在线	是
[48]	键合线	LabVIEW平台	在线	是
[49]	键合线	压降测量电路	在线	是
[52]	焊料层	寿命预测模型	离线	是
[54]	焊料层	数字孪生法	在线	否
[55]	键合线	压降测量电路	在线	是

4.2.3 基于数据驱动的状态监测与故障诊断

数据驱动通过机器学习实现故障诊断和定位,

不需要准确的系统模型。在诊断过程中，该方法首先提取故障特征小波系数和小波能量等，输入神经网络进行训练，之后进行故障诊断，并且不需要添加额外的硬件检测电路。

文献[56]通过贝叶斯网络诊断定位故障功率开关器件，利用快速傅里叶变换提取信号特征并通过 BP 神经网络(Back propagation neural network, BPNN)进行故障检测和诊断。在传感器输出信号有噪声和偏移的情况下，仍能准确地进行故障诊断，鲁棒性较强。然而，贝叶斯算法的计算量大，处理高维数据性能差。针对此问题，文献[57]将无监督学习用于三相 VSC 的开路故障诊断，利用直流侧电流的归一化值来寻找相关故障特征，并采用自适应和动态聚类算法对数据进行处理，标记特征变量来检测开路故障。该方法对数据进行预处理，节省了算法运行的时间，但它需要选择并提取一定的特征。为了使开路故障诊断独立于特征挖掘，文献[58]提出一种基于卷积神经网络全局平均池化(Convolutional neural networks-global average pooling, CNN-GAP)的故障诊断方法，具体工作流程如图 9 所示。首先，该方法获取原始时间序列形式的 VSC 电压、电流输出数据，通常为二维形式。在输入层中，二维数据转换为具有卷积和池化层架构的二维图像。该方法通过使用全局平均池化层代替 2~3 层全连接层，改进了传统 CNN 的模型结构。改进后的方法大大减少了传统 CNN 模型的可训练参数数量，可以直接从原始的一维时间序列数据中提取故障特征，而且无需进行耗时的人工特征提取和信号处理操作。

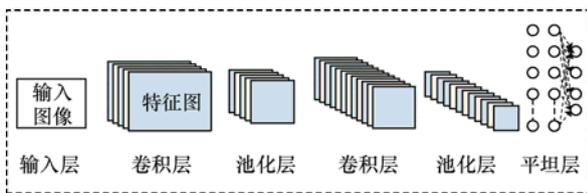


图 9 CNN-GAP 基本工作流程图

表 5 给出了上述诊断方法在实现难度、诊断参数、是否需要额外硬件及鲁棒性四个方面的对比分析。

表 5 IGBT 开路故障诊断方法对比

诊断方法	实现难度	诊断参数	额外硬件	鲁棒性
模型	低	电压和电流	否	强
电流矢量轨迹	低	三相电流	否	弱
归一化平均电流	低	三相电流	否	强
瞬时电流畸变	中	三相电流	否	中
锁相环	低	电压	否	弱
AI	高	电压和电流	否	强

4.3 交流侧状态监测与故障诊断

在 VSC 系统中，由于采用闭环控制策略，传感器故障比 IGBT 故障更具有破坏性^[59]。当并网 VSC 的传感器发生故障时，将错误的电信号反馈到控制器中，控制器产生错误的开断信号驱动 IGBT，可能造成三相电流不平衡，甚至导致系统停机。

滤波电感发生短路故障时，会导致变流器三相参数不对称，三相并网电流不平衡，谐波增多，母线电流波动增大。发生断路故障时，非故障相的电流增大且反向，母线电流发生畸变。并且电感会发生参数退化故障，影响 VSC 系统的稳定运行。

4.3.1 电流传感器故障诊断

文献[60-61]提出了可以处理单个和多个交流电流传感器的故障诊断方法。文献[61]提出一种自适应估计方法来估计交流电流传感器的输出信号偏差，用于在线补偿干扰因素的影响。然而，上述方法都没有考虑直流传感器故障的传播效应。因此，为了避免交直流耦合造成的误诊断，文献[62]通过建立并网 VSC 的离散时间非线性模型，利用在线估计，为交流侧的每相电流和直流侧电压生成一组残差信号来表征估计量与测量值的偏差。以上估计方案利用的是常数估计器增益矩阵，所以不适用于传感器早期故障的诊断。因此，文献[63]提出了一种基于模型的交流电流传感器早期故障诊断，设计了具有时变观测器增益的线性描述估计器，不仅可以实现传感器的早期故障诊断，而且算法的鲁棒性较高。

4.3.2 电压传感器故障诊断

文献[64]通过虚拟磁链法来估计电网的电压，利用估计值与测量值的偏差进行故障诊断。虽然该方法受电网频率波动较小，但是没有考虑到电网电压幅值波动的影响，如果传感器获得不正常的电压幅值，可能会造成误诊断。因此文献[65]提出一种能识别并区分这两种故障的方法。该方法以发生故障前后 q 轴的电压偏差作为故障检测依据，区分故障的原理如图 10 所示，利用 PI 电流控制器的 q 轴输出电压 V_{dq_fb} ，抵消了电网 q 轴前馈电压 $V_{dq_ff}^c$ 产生的脉动，显著降低了误诊断率。

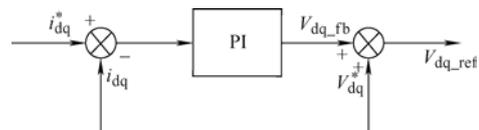


图 10 电流控制结构图

4.3.3 滤波电感状态监测与故障诊断

文献[23]利用最小二乘递推算法对电感进行参

数辨识, 首先建立电感的等效模型, 选择电感值作为故障特征参数, 将电感值退化 20% 确定为故障阈值, 然后利用最小二乘递推算法, 对 VSC 的电感进行参数辨识, 实现状态监测。

文献[66-68]介绍了基于模型预测控制算法的电感参数辨识方法, 可以实现并网 VSC 系统的故障预测。文献[66]结合电网电压和电感电压的空间矢量关系, 进行电感参数辨识。该方法保证在静态和动态过程中都能准确辨识滤波电感的大小。但是, 预测精度受到电网电压的影响, 鲁棒性较差。针对该问题, 文献[67]通过建立电感辨识模型, 加入预测电流延时补偿环节, 增强了算法的鲁棒性, 准确地计算出电感值。文献[68]通过将预测控制、直接功率控制与空间矢量调制相结合, 实现电感在线辨识, 减少了复杂矢量作用时间的计算量, 并且具有良好的静、动特性。为了更加有效地保证 VSC 的稳定运行, 文献[69]提出了一种基于矢量拟合算法的并网 VSC 电路和控制器参数辨识方法, 不仅辨识滤波器参数, 而且辨识控制器参数。首先使用频率扫描方法测量 VSC 的 dq 域阻抗频率响应, 应用向量拟合算法生成系统传递函数, 从中识别电路和控制器参数。然而, 该方法没有考虑电网电压波动和三相不平衡的影响。为了解决该问题, 文献[70]利用两个无物理意义的虚构量的模型参考自适应系统来实时估计 VSC 和电网之间的等效电阻和电感; 同时, 使用基于李雅普诺夫能量函数的方法对估计算法进行了详细的稳定性分析, 证明了该算法的全局稳定性。与基于数学模型的故障诊断方法相比, 基于人工智能(Artificial intelligence, AI)的故障诊断方法不依赖于系统的数学模型。文献[71]提出了一种基于径向基函数神经网络(Radial basis function neural network, RBFNN)的数据分析方法, 用于电网和 VSC 系统元件参数的识别和预测, 而且结合物理模型的振荡特性对并网 VSC 的实时稳定性进行预测, 提高了诊断算法的自学习能力和自适应能力。

上述方法能够有效地解决传感器或滤波电感故障诊断问题, 但是在某些情况下, 传感器故障特征与滤波电感故障特征相似。例如, 当滤波电感发生短路故障与电流传感器发生卡死故障时, 都会导致三相电流不平衡, 故障特征难以提取, 可能会发生误诊断。因此, 如何实现多故障综合诊断是提高故障诊断精度亟待解决的关键问题。

5 结论与展望

并网 VSC 系统的健康状态监测和故障诊断可以有效延长 VSC 的寿命, 减小故障持续存在对并网系统产生的不良影响, 提升并网系统的经济效益。本文对国内外研究学者提出的状态监测与故障诊断进行总结和分类。将 VSC 的故障诊断方法主要分为基于硬件和软件两类方法。并网 VSC 状态监测与故障诊断方法在未来的研究趋势和改进之处如下所述。

(1) 基于信号的故障诊断方法简单、诊断迅速, 但是硬件监测电路复杂且成本较高。因此, 降低监测系统成本、提高诊断速度和精度、增强算法的鲁棒性是研究的重点。

(2) 目前 VSC 的故障诊断针对单器件故障能够有效诊断和定位, 但在实际运行中, 可能同时发生多种故障, 其耦合的故障特征复杂, 因此多故障同时发生的故障诊断是研究的重点。

(3) 人工智能的故障诊断能降低诊断系统的设计难度, 并且故障诊断精度很高。但是, 在对数据的需求、系统在线响应速度和学习效率方面需要进行优化研究。

(4) 所有可行的方法都能有效地对变流器进行故障检测和后续保护, 但是, 较慢的响应时间使得在故障发生时无法防止系统进入故障状态。因此, 早期状态监测与故障预警仍需要进一步探索。

(5) 电力电子元件状态监测案例研究仍然局限于实验室测试。对于工业应用, 需要考虑更多的实际问题, 例如由连接线寄生参数引起的测量噪声、监测电路成本和尺寸以及传感器精度。

参 考 文 献

- [1] 钟庆, 马新华, 王钢, 等. 电压源型换流器稳态等值电路模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2485-2489.
ZHONG Qing, MA Xinhua, WANG Gang, et al. Static equivalent circuit models of voltage source converter[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2485-2489.
- [2] 赫玉莹, 王学华, 刘福鑫. LCL 型并网逆变器分裂电流单环控制及其强鲁棒性权值设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3536-3546.
HE Yuying, WANG Xuehua, LIU Fuxin. Splitting current single-loop control and robust weight value design for LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3536-3546.

- [3] 王爱华, 葛维春, 李铁, 等. LCL 型并网逆变器电容电压微分反馈有源阻尼实现技术研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1): 126-132.
WANG Aihua, GE Weichun, LI Tie, et al. Research on realization technology of active damping method with differential feedback of filter capacitance voltage for LCL filter based grid-connected inverters[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(1): 126-132.
- [4] 卞文彬, 邓艾东, 刘东川, 等. 基于改进深度残差收缩网络的风电机组滚动轴承故障诊断方法[J]. 机械工程学报, 2023, 59(12): 202-214.
BIAN Wenbin, DENG Aidong, LIU Dongchuan, et al. Fault diagnosis method of wind turbine rolling bearing based on improved deep residual shrinkage network[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(12): 202-214.
- [5] 李楠, 张磊, 马士聪, 等. 基于模块化多电平换流器的电池储能系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 144-150.
LI Nan, ZHANG Lei, MA Shicong, et al. Control strategy for battery energy storage system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 144-150.
- [6] 张云, 魏逸航, 刘强强, 等. 基于车载宽增益双向直流变换器的多源电动汽车充放电一体化方法[J]. 电气工程学报, 2022, 17(2): 101-109.
ZHANG Yun, WEI Yihang, LIU Qiangqiang, et al. Integrated scheme of charging/discharging for parking multi energy sources electric vehicles based on wide voltage-gain range bidirectional DC-DC converters[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(2): 101-109.
- [7] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋, 等. 多直驱风机经 VSC-HVDC 并网系统场内/场网次同步振荡特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3835-3847.
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, GAO Benfeng, et al. Inside-wind-farm/wind-farm-grid sub-synchronous oscillation characteristics analysis in multiple D-PMSGs interfaced with VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3835-3847.
- [8] 徐攀腾, 朱博, 喻文翔, 等. 多类型元件混合直流电网机电暂态建模仿真[J]. 电气工程学报, 2021, 16(3): 54-61.
XU Panteng, ZHU Bo, YU Wenxiang, et al. Electromechanical transient modeling and simulation of multi-type component hybrid DC grid[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(3): 54-61.
- [9] 徐帅, 张建忠. 多电平电压源型逆变器的容错技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 39-50.
XU Shuai, ZHANG Jianzhong. Overview of fault-tolerant techniques for multilevel voltage source inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 39-50.
- [10] 易伟. 光伏电站设备故障检测与诊断方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
YI Wei. Research on the detection and diagnosis method for photovoltaic power station equipment fault[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [11] 胡存刚, 王海涛, 朱文杰, 等. 三相逆变器数字孪生系统的参数辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 177-187.
HU Cungang, WANG Haitao, ZHU Wenjie, et al. Parameter identification of three-phase inverters based on a digital twin system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 177-187.
- [12] LI Z, WHEELER P, WATSON A, et al. A fast diagnosis method for both IGBT faults and current sensor faults in grid-tied three-phase inverters with two current sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(5): 5267-5278.
- [13] 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 Zehao, XIAO Lan. Review of IGBT open-circuit fault diagnosis and localization methods for modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1501-1517.
- [14] 龙寰, 杨婷, 徐劲辉, 等. 基于数据驱动的风电机组状态监测与故障诊断技术综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 55-69.
LONG Huan, YANG Ting, XU Shaohui, et al. Review of data-driven condition monitoring and fault diagnosis technologies for wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 55-69.
- [15] 魏星. 基于 LCL 滤波器的三相并网逆变器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
WEI Xing. Research on three-phase grid-connected inverter with LCL filter[D]. Nanjing: Nanjing University

- of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [16] 杜银瑜. 铝电解电容失效对 DC/DC 变换器健康状况的影响分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2014.
DU Yinyu. Analysis of the influence of aluminum electrolytic capacitor failure on the health condition of DC/DC converter[D]. Beijing: Capital Normal University, 2014.
- [17] ZHAO Z, DAVARI P, LU W, 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.
- [18] 赖伟, 陈民铀, 冉立, 等. 老化试验条件下的 IGBT 失效机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5293-5300.
LAI Wei, CHEN Minyou, RAN Li, et al. Analysis of IGBT failure mechanism based on ageing experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5293-5300.
- [19] YU Y, DU X, ZHOU J, et al. Condition monitoring of thermal fatigue of IGBT module using turning point of preheating stage of case temperature[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(3): 2866-2871.
- [20] 王学梅, 张波, 吴海平. 基于失效物理的功率器件疲劳失效机理[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 717-727.
WANG Xuemei, ZHANG Bo, WU Haiping. A review of fatigue mechanism of power devices based on physics-of-failure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 717-727.
- [21] 杨旭. 基于饱和和压降测量的 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.
- [22] 赵楠, 郑泽东, 刘建伟, 等. 级联 H 桥变换器 IGBT 开路故障分析与冗余方法研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1608-1619.
ZHAO Nan, ZHENG Zedong, LIU Jianwei, et al. IGBT open-circuit fault analysis and fault-tolerant method for cascaded H-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1608-1619.
- [23] 王禹玺. 多能源储能系统中三相逆变器故障诊断方法与参数辨识的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
WANG Yuxi. Fault diagnosis and parameter identification of three phase inverter in multi-energy storage system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [24] LIU H, CLAEYS T, PISSOORT D, et al. Prediction of capacitor's accelerated aging based on advanced measurements and deep neural network techniques[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(11): 9019-9027.
- [25] LI H, XIANG D, HAN X, et al. High-accuracy capacitance monitoring of DC-link capacitor in VSI systems by LC resonance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 12200-12211.
- [26] AHMAD M W, KUMAR P N, ARYA A, et al. Noninvasive technique for DC-link capacitance estimation in single-phase inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(5): 3693-3696.
- [27] VOGELBERGER 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.
- [28] PU X S, NGUYEN T H, LEE D C, et al. Fault diagnosis of DC-link capacitors in three-phase AC/DC PWM converters by online estimation of equivalent series resistance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 4118-4127.
- [29] ABO-KHALIL A G, LEE D C. DC-link capacitance estimation in AC/DC/AC PWM converters using voltage injection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1631-1637.
- [30] SOLIMAN H, DAVARI P, WANG H, et al. Capacitance estimation algorithm based on DC-link voltage harmonics using artificial neural network in three-phase motor drive systems[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Cincinnati, OH, USA. IEEE, 2017: 5795-5802.
- [31] LAADJAL K, SAHRAOUI M, CARDOSO A J M. On-line fault diagnosis of DC-link electrolytic capacitors in boost converters using the STFT technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(6): 6303-6312.
- [32] XU S, HUANG W, HUANG D, et al. A reduced-order observer-based method for simultaneous diagnosis of open-switch and current sensor faults of a grid-tied NPC inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(7): 9019-9032.

- [33] J LASSI I, ESTIMA J O, KHOJET E K S, et al. Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2689-2702.
- [34] PECINA SANCHEZ J A, CAMPOS-DELGADO D U, ESPINOZA-TREJO D R, et al. Fault diagnosis in grid-connected PV NPC inverters by a model-based and data processing combined approach[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(12): 3254-3264.
- [35] ZHOU D, TANG Y. A model predictive control-based open-circuit fault diagnosis and tolerant scheme of three-phase AC-DC rectifiers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(4): 2158-2169.
- [36] AN Q T, SUN L Z, ZHAO K, et al. Switching function model-based fast-diagnostic method of open-switch faults in inverters without sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 26(1): 119-126.
- [37] CHEN G, CAI X. Reconfigurable control for fault-tolerant of parallel converters in PMSG wind energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 10(2): 604-614.
- [38] ZHOU D, YANG S, TANG Y. A voltage-based open-circuit fault detection and isolation approach for modular multilevel converters with model-predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9866-9874.
- [39] JUNG S M, PARK J S, KIM H W, et al. An MRAS-based diagnosis of open-circuit fault in PWM voltage-source inverters for PM synchronous motor drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2514-2526.
- [40] YIN H, CHEN Y, CHEN Z, et al. Adaptive fast fault location for open-switch faults of voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021, 68(9): 3965-3974.
- [41] 葛兴来, 苟斌, 蒲俊楷, 等. 基于混合逻辑动态模型的逆变器开路故障诊断[J]. 铁道学报, 2016, 38(8): 35-40. GE Xinglai, GOU Bin, PU Junkai, et al. Diagnosis of open circuit faults for traction inverter based on mixed logic dynamic model[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(8): 35-40.
- [42] KO Y J, LEE K B, LEE D C, et al. Fault diagnosis of three-parallel voltage-source converter for a high-power wind turbine[J]. IET Power Electronics, 2012, 5(7): 1058-1067.
- [43] ESTIMA J O, CARDOSO A J M. 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.
- [44] WU Z, SUN J, SONG Y, et al. An open-circuit fault diagnosis method for four-wire T-type three-level rectifier[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 11(1): 1045-1055.
- [45] ZHANG M, ZHANG Z, LI Z, et al. A unified open-circuit-fault diagnosis method for three-level neutral-point-clamped power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(3): 3834-3846.
- [46] 耿乙文, 李伟, 王凯. 一种三相光伏并网逆变器故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 203-209. GENG Yiwen, LI Wei, WANG Kai. A fault diagnosis method for three-phase photovoltaic grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 203-209.
- [47] 沈刚, 周维维, 杜雄, 等. 基于小波奇异熵理论的IGBT模块键合线脱落故障特征分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 165-171. SHEN Gang, ZHOU Luwei, DU Xiong, et al. Characteristics analysis of IGBT module with bond wire lift-off based on wavelet singular entropy theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 165-171.
- [48] 孙志宇, 马铭遥, 初开麒, 等. 基于LabVIEW的三电平逆变器IGBT模块键合线监测系统[J]. 太阳能学报, 2020, 41(7): 165-172. SUN Zhiyu, MA Mingyao, CHU Kaiqi, et al. Wire bonding monitoring system based on LabVIEW for three-level inverter IGBT modules[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(7): 165-172.
- [49] CHOI U M, BLAABJERG F, JØRGENSEN S, et al. Reliability improvement of power converters by means of condition monitoring of IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 7990-7997.
- [50] 戴健, 葛兴来, 杨旭, 等. 基于动态自适应参考值的牵引整流器IGBT键合线老化状态监测方法[J]. 中国电机

- 工程学报, 2022, 42(7): 2650-2663.
- DAI Jian, GE Xinglai, YANG Xu, et al. A condition monitoring method for IGBT bond wires aging in traction rectifiers based on the dynamic adaptive reference values[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2650-2663.
- [51] 王磊, 周明超, 郭梦雪, 等. 基于任务剖面的牵引变流器 IGBT 模块焊料层疲劳应力与剩余使用寿命的映射方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 269-278.
- WANG Lei, ZHOU Mingchao, GUO Mengxue, et al. A mapping method of solder layer fatigue stress and remaining useful life for IGBT module in a traction converter based on the mission-profile[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 269-278.
- [52] 张宇娇, 范虹兴, 张炫焜, 等. 柔性直流输电换流阀用 IGBT 模块焊料层疲劳寿命研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3381-3389.
- ZHANG Yujiao, FAN Hongxing, ZHANG Xuankun, et al. Fatigue life analysis of IGBT module solder layer for VSC-HVDC valve[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3381-3389.
- [53] DU M, KONG Q, OUYANG Z, et al. Strategy for diagnosing the aging of an IGBT module by ON-state voltage separation[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(11): 4858-4864.
- [54] ZHANG S, SONG W, CAO H, et al. A digital twin based health status monitoring method for single-phase PWM rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14075-14087.
- [55] PENG Y, WANG H. A self-power method for a converter-level on-state voltage measurement concept[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8743-8751.
- [56] CAI B, ZHAO Y, LIU H, 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.
- [57] PHAM T H, LEFTERIU S, LABARRE C, et al. Auto-adaptive and dynamical clustering for open-circuit fault diagnosis of power inverters[C]//2019 18th European Control Conference, June 25-28, 2019, Naples, Italy. IEEE, 2019: 3298-3303.
- [58] GONG W, CHEN H, ZHANG Z, et al. A data-driven-based fault diagnosis approach for electrical power DC-DC inverter by using modified convolutional neural network with global average pooling and 2-D feature image[J]. IEEE Access, 2020, 8: 73677-73697.
- [59] WANG X, WANG Z, XU Z, et al. Comprehensive diagnosis and tolerance strategies for electrical faults and sensor faults in dual three-phase PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6669-6684.
- [60] YU Y, ZHAO Y, WANG B, et al. Current sensor fault diagnosis and tolerant control for VSI-based induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(5): 4238-4248.
- [61] PAPADOPOULOS P M, HADJIDEMETRIOU L, KYRIAKIDES E, et al. Robust fault detection, isolation, and accommodation of current sensors in grid side converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 53(3): 2852-2861.
- [62] MEHMOOD F, PAPADOPOULOS P M, HADJIDEMETRIOU L, et al. Model-based fault diagnosis scheme for current and voltage sensors in grid side converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(4): 5360-5375.
- [63] MEHMOOD F, HADJIDEMETRIOU L, TZORTZIS I, et al. Incipient current and voltage sensors fault diagnosis scheme for grid side converters[C]//2023 31st Mediterranean Conference on Control and Automation, June 26-29, 2023, Limassol, Cyprus. IEEE, 2023: 31-36.
- [64] YOUSSEF F B, SBITA L. Sensors fault diagnosis and fault tolerant control for grid connected PV system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 42(13): 8962-8971.
- [65] IM W S, KIM J M, LEE D C, et al. Fault diagnosis of voltage sensor in grid-connected 3-phase voltage source converters[C]//2013 IEEE International Conference on Industrial Technology, February 25-28, 2013, Cape Town. IEEE, 2013: 515-520.
- [66] 杨勇, 索迹, 祁春清, 等. 三相并网逆变器电感在线辨识控制[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(3): 52-57.
- YANG Yong, SUO Ji, QI Chunqing, et al. Inductance online identification control for three-phase grid-connected inverters[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(3): 52-57.
- [67] 李伟, 张勇军, 肖雄. 实时电感辨识的模型预测并网逆变器控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15):

- 3450-3460.
- LI Wei, ZHANG Yongjun, XIAO Xiong. The model predictive grid-connected inverter control method based on real-time inductance identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3450-3460.
- [68] 葛凯, 阮毅, 赵梅花. 电感在线辨识的网侧变流器预测直接功率控制[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(11): 1-6, 13.
- GE Kai, RUAN Yi, ZHAO Meihua. Predictive direct power control for grid-side converter with online inductance identification[J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(11): 1-6, 13.
- [69] ZHOU W, TORRES-OLGUIN R E, GÖTHNER F, et al. A robust circuit and controller parameters' identification method of grid-connected voltage-source converters using vector fitting algorithm[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 10(3): 2748-2763.
- [70] CHOWDHURY V R, KIMBALL J W. Control of a three-phase grid-connected inverter under non-ideal grid conditions with online parameter update[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1613-1622.
- [71] QIU Y, WANG Y, TIAN Y, et al. An intelligent stability prediction method of grid-connected inverter considering time-varying parameters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 60(2): 3685-3697.
-
- 作者简介：宋少鹏，男，2000年生，硕士研究生。主要研究方向为微电网及其换流器、稳定优化控制与故障诊断。
E-mail: songshaopeng@163.com
- 田艳军(通信作者)，男，1986年生，博士，副教授。主要研究方向为新能源发电、电力电子变流器串并联控制、变流器阻抗匹配特性、级联变流器。
E-mail: yti@ncepu.edu.cn