DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.317 **中图分类号**：TM73 **文献标志码**：A

一种基于 HHT 的交直流微电网故障检测方案

张建文[1,2]，包义玖[1]，臧甲杰[3]，周剑桥[2]，施 刚[2]，杨兴武[1]
(1.上海电力大学电气工程学院，上海 200090；2.电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学)，上海 200240；3.上海工程技术大学电子电气工程学院，上海 201620)

摘要：交直流微电网能够有效促进可再生能源的应用。然而，由于互联变换器的存在，交流和直流侧之间产生了较强的电气耦合，导致系统内故障特性更加复杂，严重影响系统安全运行。在交直流微电网中，传统的基于互联变换器 IGBT 闭锁后故障特征的故障检测方案，在故障检测灵敏性和速动性方面难以满足系统的故障检测和保护需求。结合系统接地方式和交直流微电网的故障耦合特征，针对故障期间 IGBT 未闭锁暂态过程中交直流系统的特征形态，探索利用希尔伯特-黄变换 HHT(Hilbert-Huang transform)频谱及能量幅值进行交直流微电网故障检测应用的可行性。通过仿真验证，所提基于 HHT 的故障检测方案能够实现 2 ms 内对交直流微电网故障类型的快速、准确识别，有效提高了微电网的安全性和可靠性。

关键词：交直流微电网；互联变换器；故障耦合特性分析；希尔伯特-黄变换；故障检测

HHT-based Fault Detection Scheme for AC-DC Microgrid

ZHANG Jianwen[1,2], BAO Yijiu[1], ZANG Jiajie[3], ZHOU Jianqiao[2], SHI Gang[2], YANG Xingwu[1]
(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China; 3. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The AC-DC microgrid can effectively facilitate the applications of renewable energy sources. However, the strong electrical coupling between the AC and DC sides caused by an interconnected converter complicates the fault characteristics within the system, threatening the system's safe operation. The traditional fault detection schemes based on the fault characteristics may not have enough sensitivity or rapidity to meet the system's fault detection and protection requirements. Notably, the system exhibits significant fault characteristics before blocking the interconnected converter's IGBTs in the AC-DC microgrid. Therefore, with the combination of grounding schemes for the system and the AC-DC microgrid's electrical coupling characteristics, the feasibility of a novel fault detection scheme for the AC-DC microgrid based on the Hilbert-Huang transform (HHT) spectrum and energy amplitude is explored, which is aimed at the AC-DC system's characteristics during the transient process before blocking the IGBTs under fault. Through simulation verification, it is found that the proposed HHT-based fault detection scheme can realize rapid and accurate identification of fault types for the AC-DC microgrid within 2 ms, which effectively improves the safety and reliability of the microgrid.

Keywords: AC-DC microgrid; interconnected converter; analysis of fault coupling characteristics; Hilbert-Huang transform (HHT); fault detection

收稿日期：2023-09-21；**修回日期**：2023-11-23；**录用日期**：2023-12-04；**网络首发日期**：2024-05-15
基金项目：国家重点研发计划政府间国际科技创新合作资助项目(2019YFE0104800)；国家自然科学基金资助项目(52277193)；上海市白玉兰人才计划浦江资助项目(23PJ1404000)；宁德时代未来能源(上海)研究院有限公司校企合作资助项目
This work is supported by the National Key R&D Program of China for Intergovernmental International Scientific and Technological Innovation Cooperation under the grant 2019YFE0104800; National Natural Science Foundation of China under the grant 52277193; Shanghai Magnolia Talent Program Pujiang Project under the grant 23PJ1404000; CATL Future Energy (Shanghai) Research Institute School-enterprise Cooperation Project

交直流微电网作为电力系统应对大规模新能源接入的重要发展方向，具有能源利用效率高、可靠性强、环境友好及经济性好的优势[1-4]。互联变换器是交直流微电网间的功率枢纽，可实现交直流微电网间不同能源、负荷、储能间的灵活功率调控。交直流微电网互联变换器的强电气耦合特性会导致故障传递，如直流侧发生短路故障，故障电流会通过互联变换器传递到交流侧，导致交流侧电压波动和不稳定，引起电气设备故障或系统崩溃。当交流侧发生故障时，交流电流会通过互联变换器传递到直流侧，对系统内的设备造成不良影响[5]。目前，交直流微电网系统保护措施尚不成熟，为保护系统中的电气设备，亟需快速可靠的故障隔离及保护方案[6]。

目前，交流微电网故障检测与定位、隔离、保护技术相对成熟。国内外学者亦对直流微电网故障检测进行研究，常用的方式主要有时域检测、频域检测等。时域故障检测方法通过采集并直接对比端口电流信号的时域值来判断线路是否发生故障。Bhargav 等[7]提出了过电流保护方案，将故障电流和极间电压的计算值作为故障检测的判据，当超过设定的阈值后，即判断故障发生，但其准确度易受高阻抗和运行模式的影响；文献[8]采用电流变化率检测，利用故障电流一阶导数和二阶导数来鉴定故障发生，但采样易受噪声信号干扰，从而导致故障误检；Rao 等[9]提出了距离保护方案，利用电阻代替电流和电压来判别线路故障，通过比较线路两端的估计电阻来检测故障，但是受到短路电阻的影响，该方案不易识别极间故障；方向纵联保护采用故障电流方向来检测故障类型，但存在成本高、通信要求严苛等缺陷[10]；Chauhan 等[11]在电流差动保护方案中提出了通过计算不同电流回路下正负极电流的大小来判断是否发生单极接地故障、区外故障等，但存在极间故障不易识别等问题。时域故障检测方式具有计算简单、检测迅速、反应灵敏等优势，但由于存在阈值选取问题，易造成故障误判或漏判，在交直流微电网故障检测中受到一定限制。频域故障检测方法通常是将时域信号变换为频域信号，用于故障检测。短时傅里叶变换将固定长度时间窗口内采集的时域信号转换为频域信号，定量地利用瞬态高频分量的叠加判别出特定频率上出现的非零幅度来检测故障，但存在时间窗口固定、易受噪声影响[12]等问题。何佳伟等[13]提出了小波变换故障检测方案，利用故障时线路边界对电流高频分量的阻滞作用，通过小波变换提前区分内外故障的高频暂态能量差异快速识别故障，但母小波难选取，易造成检测与定位的不准确。随着人工智能技术的发展，智能算法逐渐应用在交直流微电网的故障检测中。其中，利用人工神经网络将不同位置、不同故障程度的各种数据训练用于故障检测和分类，快速且准确，但算法性能易受到分类算法的选择和训练样本数量的影响[14]。文献[15]探索了深度神经网络、卷积神经网络及决策树在故障检测中应用的可行性，但均存在样本及样本数量选取难的问题。

希尔伯特-黄变换 HHT(Hilbert-Huang transform)在电力电子换流器 IGBT 故障诊断领域已被广泛研究与使用。文献[16]利用 HHT 可选择合适的时间窗口，对比 IGBT 闭锁后暂态与稳态的故障特性，提取故障时换流器零序电流的暂态分量进行 HHT 时频分析以检测故障；文献[17]利用 HHT 过程中的经验模式分解 EMD(empirical mode decomposition)技术和本征模式能量熵，量化了瞬态电流在频域的能量分布离散度来对 MMC 交/直流侧故障进行检测；Song 等[18]提出对互联换流器直流电压波形进行 HHT，提取直流电压的瞬态频率和瞬态振幅特征来快速诊断直流系统故障；文献[19]指出，由于直流电容器快速放电、短路故障会在换流器系统中产生快速增长的瞬态电流，HHT 可利用 VSC 直流线路电流的瞬时能量密度水平作为故障检测标准，强调了故障瞬态特性。但是，现存的大多数研究采用 HHT 处理换流器 IGBT 闭锁后的故障暂态和稳态特征以检测故障，缺乏对 IGBT 闭锁前故障状态的描述和说明，以及交直流系统不同故障情况下的 HHT 频谱对比。因此，现有故障检测方案通常采用互联变换器 IGBT 闭锁后的故障特征来判定故障，其故障特征不显著，故障检测准确性

和速动性难以保证，严重影响交直流微电网的故障诊断。为解决现有故障检测方案存在的缺陷，需提高故障检测的速动性和灵敏性，考虑到互联变换器 IGBT 闭锁前的故障特征较为显著，但其为极短时间内非线性非平稳的暂态信号，现有时域和频域故障检测方案均难以对其进行信号提取与处理。HHT 适用于非线性非平稳信号，可用于提取、分析系统故障时短时间内 IGBT 闭锁前的暂态信号，从而大幅提高故障检测速度。因此，本文采用 HHT 分析交直流微电网故障特性，并实现故障检测。同时，由于 HHT 经 EMD 可提取出本征模态函数 IMF(intrinsic mode function)分量的瞬时频率和振幅，因此可以依据不同故障状态下 HHT 频谱与能量特性判别故障类型。本文针对交直流微电网系统故障，综合系统接地方式，分析暂态过程的故障形态特征，提出基于 HHT 的交直流微电网系统多类型故障检测方法。最后基于交直流微电网系统仿真平台，对所提故障检测方法的可行性及准确性进行验证。

1　HHT 故障检测方法

Huang 等基于瞬时频率 IF(instantaneous frequency)提出了 1 种适用于检测非线性非平稳信号的方法 HHT。HHT 将复杂信号通过经验模式分解成若干个 IMF，将 IMF 进行 Hilbert 变换使信号瞬时频率变为单分量，求出每个 IMF 的瞬时频率、瞬时幅值及能量，得出原始信号的时频分布，进一步提高 Hilbert 谱在时频分辨率方面的精度。

多次经验模态分解过程中产生的多次信号易受到噪声和突变信号源的影响，导致 HHT 的信号抗干扰能力一般，但是可以采用相应措施减小干扰。文献[20]提出抑制干扰的措施有 3 种，分别为对干扰源进行消除、对干扰途径进行切断和产生干扰后的处理。本文可通过增加屏蔽测试仪器来消除和切断外来干扰信号，以从信号源角度减少干扰噪声，在前端避免了 HHT 受到噪声的影响，从而为后期处理的准确性提供条件。

1.1　本征模态函数与经验模态分解

IF 为关于时间 t 的单值函数，必须满足每一时刻仅有 1 个频率与之对应，因此 IF 只能为单分量信号。非线性非稳态的暂态信号可由多分量组合，导致 IF 不可能恒为单分量，失去了实际物理意义，因此采用如图 1 所示的 IMF 函数。IMF 必须满足 2 个基本定义条件：①在整个信号长度上，极值点和过零点的数量必须相等或者至多相差 1 个；②在任意时刻，由极大值点定义的上包络线和由极小值点定义的下包络线的平均值为 0，即信号的上下包络线对称于时间轴[21]。

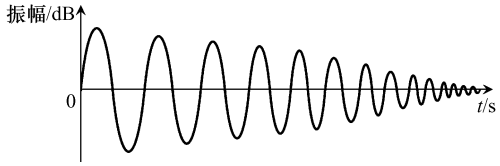


图 1　典型 IMF 函数

Fig. 1 Typical IMF

利用 HHT 分析 IMF 具有良好的时频特性，但大部分非平稳非线性信号不是 IMF，因此采用 EMD 选取最优 IMF。EMD 过程流程如图 2 所示。图中：$X(t)$为测量点的故障电流输入信号；h_k 为 EMD 筛分过程中随迭代次数 k 更新的中间过渡信号。EMD 将输入信号分解为 n 个 IMF 分量和 1 个残差分量之和。EMD 的本质是将输入信号反复减去上、下包络线定义的均值，直到筛选出 1 个满足 IMF 定义的 IMFc_1，然后对残差 $r_1=x(t)-c_1$ 采用同样的过程得到第 2 个 IMFc_2。当残差 r_n 成为单调函数或小于设定值时，此筛选过程停止。输入信号经 EMD 分解后，得到一系列具有频率振荡范围的平稳 IMF 信号，振荡频率由高到低。EMD 过程不存在能量损耗，可重新准确地构造出输入信号，自适应强，适用于非平稳信号。

1.2　希尔伯特谱

利用 EMD 得到的 IMF 通过希尔伯特变换 HT(Hilbert transform)求解瞬时频率及希尔伯特谱。时域信号 $x(t)$的希尔伯特变换为

$$y(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{x(\tau)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

式中，τ 为积分变量。

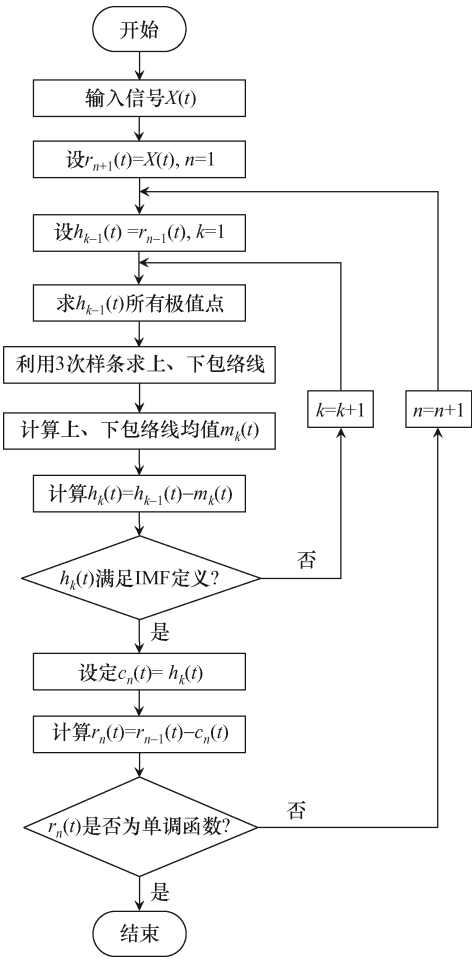


图 2 EMD 流程

Fig. 2 Flow chart of EMD

$x(t)$与 $y(t)$构成解析信号 $z(t)$，时域信号 $x(t)$的每个 IMF 分量的瞬时频率 $\omega_i(t)$与瞬时幅值 $a_i(t)$可表示为

$$\begin{cases} z(t)=x(t)+\mathrm{j}y(t)=\sqrt{x^2(t)+y^2(t)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta(t)} \\ \theta(t)=\arctan\dfrac{y(t)}{x(t)} \\ \omega(t)=\dfrac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t} \end{cases} \Rightarrow$$

$$x(t)=\sum_{i=1}^{n}a_i(t)\exp\left[\mathrm{j}\int\omega_i(t)\mathrm{d}t\right] \tag{2}$$

瞬时频率 $\omega_i(t)$和瞬时幅值 $a_i(t)$均随时间变化。将 $x(t)$经欧拉变换后，实数部分即表示振幅的时频希尔伯特谱 $H(\omega,t)$，具体为

$$H(\omega,t)=\sum_{i=1}^{n}a_i(t)\cos\left[\int\omega_i(t)\mathrm{d}t\right] \tag{3}$$

假设把$|x(t)|^2$ 看作信号的能量，那么 $H^2(\omega,t)$就是希尔伯特能量谱，即

$$E(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}H^2(\omega,t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

式(4)所示的希尔伯特能量谱表示能量随频率和时间的变化，可提高各个频率分量幅值分布的辨识率。

1.3 基于 HHT 的故障诊断

交直流微电网故障时，为准确、快速地诊断故障，需提取、分析系统故障后互联变换器 IGBT 闭锁前的极短时间内非线性非平稳暂态信号特征，判别故障类型。采用 HHT 能提取、分析极短时间内非线性非平稳信号的应用特点，以识别故障暂态信号及特征，可实现系统故障的快速诊断。与传统频域故障检测中常采用的快速傅里叶变化法 FFT(fast Fourier transform)、短时傅里叶变换法 STFT(short-time Fourier transform)、小波变换法 WT(wavelet transform)等方法的对比见表 1，HHT 具有自适应性强、分辨率高且更直观高效等优势。另外，基于人工智能算法的方案尽管能够实现快速准确的故障识别，但受限于样本数量选取难的问题，该类方法仍无法满足现阶段“双高”电网的发展需求[22]。相反地，HHT 基函数可直接采用原始信号，无需自定义选取；HHT 采用解析信号相位求导的方式获得瞬时频率，可打破 FT 不能同时在时域和频域都具有高分辨率的限制。通过希尔伯特谱将每个 IMF 按时间−频率−幅值(能量)形式表现为三维图且平面谱也可体现出 3 种数值。

交直流微电网故障发生时，以故障电流、直流侧电流、交流侧相电流等作为原始信号 $I(t)$，为获取准确的故障特征，保证故障检测的速动性，需提取 $I(t)$故障后若干个暂态数据点作为 EMD 的输入信号 $X(t)$。输入信号 $X(t)$可为非线性非平稳信号，不一定满足 IMF 标准要求，$X(t)$经 EMD 处理后的最优 IMF 作为 HT 的时域信号 $x(t)$，最优 IMF 的判断依据以相邻 2 个 IMF 的标准差为基准，取 0.2~0.3 之间的数值。最后，由 HT 获得各故障测量点的瞬时频率 $\omega_i(t)$和 HHT 频谱 $H(\omega,t)$及能量 $E(\omega)$。不同故障情况发生时，各暂态电流变化情况也不相同，

导致最优 IMF 以及各 HT 谱现象均不相同，可利用　　各频谱及能量幅值来诊断故障类型。

表 1　故障检测方案分类

Tab. 1 Classification of fault detection schemes

检测方式	检测方案	优点	缺点
时域检测	过电流保护	简单快速、易于实现	受高阻抗和运行模式影响、阈值不易选取
	电流变化率保护	简单快速、不受运行模式影响	采样易受噪声信号干扰
	距离保护	高阻抗和近距离故障条件下受影响较小	不易识别极间故障
	方向纵联保护	选择性强、可靠性高、采样率要求不高	成本高、通信信号要求高
	电流差动保护	快速准确、不依赖通信网络	不易识别极间故障
频域检测	STFT	快速准确、无阈值选取问题	时间窗口固定、易受噪声影响
	WT	无通信、较强的抗过渡电阻能力	计算复杂度高
人工智能检测	人工智能算法	快速准确	样本数量选取难

2　交直流微电网故障特性分析

在图 3 所示的低电压等级交直流微电网架构下，交直流微电网互联变换器常采用两电平/三电平结构。以图 4 两电平拓扑为例，分析交直流多类型故障特性。图中：R 与 L 分别为故障回路等效电阻与电感参数；f_1、f_2 分别为直流侧正极接地故障与极间短路故障；f_3 为交流侧单相接地故障；R_d 为线路电阻；L_d 为线路电感；R_l 为负载电阻；R_f 为故障点电阻。影响故障特性的主要因素有接地方式、故障暂态信号、故障类型等，针对不同的影响因素进行详细分析。

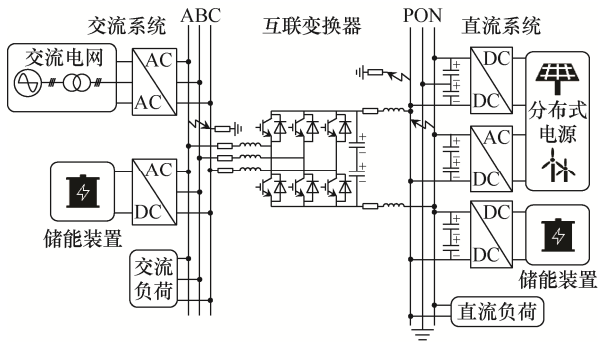


图 3　交直流微电网系统架构

Fig. 3 Framework of AC-DC microgrid system

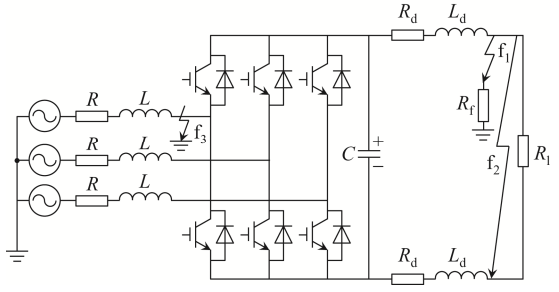


图 4　两电平变换器拓扑结构

Fig. 4 Topology of two-level converter

2.1　接地方式

交直流微电网系统中互联变换器交流侧接地方式有 3 种：不接地、直接接地、经电阻接地；直流侧接地方式有 3 种：不接地、电容中点直接接地、电容中点经电阻接地。交流侧不接地时，单相接地故障易造成另两相对地电压升高，击穿绝缘。交流侧直接接地与经电阻接地避免了交流侧单相接地故障后，直流侧过电压的问题，但经电阻接地存在绝缘要求高、投资大等问题。直流侧电容中点直接接地与经电阻接地均存在发生单极接地故障时，上、下单个电容需承受直流侧全部电压，易造成电容元件损坏的问题。直流侧不接地避免了上、下电容承担整个直流侧电压的问题。本文交直流微电网系统中采用交流侧直接接地、直流侧不接地的接地方式。

2.2　故障暂态特征提取及分析

故障暂态蕴含了丰富的频谱信息，为获取显著故障特征，交直流微电网故障分析及诊断常提取故障暂态信号。文献[18]采用了交直流微电网系统变换器 IGBT 闭锁后不同故障情况的暂态过程，但对 IGBT 闭锁前暂态故障特征并未提及，缺乏对换流器暂态故障过程完整的分析。实际上，各故障阶段对应着不同故障特征，暂态信号的选取对故障检测及保护具有重要影响。

2.2.1 IGBT 暂态未闭锁故障信息提取原因

换流器在实际运行过程中采用过流保护进行 IGBT 闭锁保护，系统故障发生后，如图 5 所示，当 IGBT 故障电流超过 IGBT 额定电流 2 倍时，IGBT 自身保护会进行退饱和工作导致闭锁[23]，换流器故障时，IGBT 由未闭锁到闭锁状态的时间约为 20 ms[24]。如图 6 所示，以直流侧极间短路故障为例，故障发生后存在短暂 IGBT 未闭锁的故障暂态状态，由于受直流侧电容直接放电的影响，IGBT 未闭锁期间，故障电流将在极短时间内迅速上升至峰值并快速下降；在 IGBT 闭锁后，故障电流的变化较为平缓。因此，采用 IGBT 闭锁前的故障电流作为暂态信号有利于提升故障检测的速度和精度。

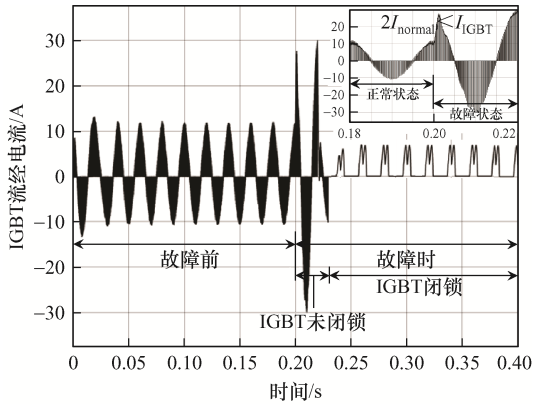


图 5 极间故障 IGBT 流经电流

Fig. 5 Fault current of IGBT under pole-to-pole fault

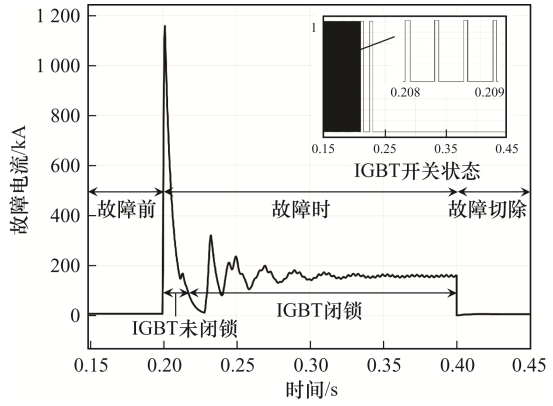


图 6 极间故障 IGBT 不同状态下的故障电流

Fig. 6 Fault current of IGBT under pole-to-pole fault in different states

2.2.2 故障暂态分析

交直流微电网故障类型繁多，交流系统故障中以单相接地故障为主；直流系统故障最常见的为单极接地与极间短路故障。本文将针对其直流侧单极接地与极间短路、交流侧单相接地等 3 种故障类型展开相关研究，如图 4 所示。

(1)直流侧单极接地故障

在故障期间，考虑互联变换器闭锁前的情况时，互联变换器按照常规运行状态进行调制及控制。共模电压 u_{cm} 主要取决于调制及控制，因此可由正常运行条件求取共模电压。由 u_{cm} 定义与交流侧三相的相同参数可得交流侧接地点与故障接地点构成正极接地故障等效回路，如图 7 所示。图中：u_{sg} 为交流侧三相电压；i_{fg} 为交流侧三相故障电流；R_1 与 L_1 为三相交流侧等效参数；R_d 与 L_d 为直流线路参数。

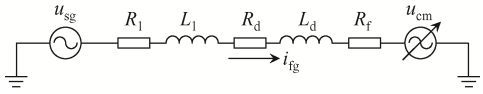


图 7 正极接地故障等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit under positive-pole grounding fault

根据 $u_{sg}=u_{sa}+u_{sb}+u_{sc}=0$、$i_{fg}=i_{fa}+i_{fb}+i_{fc}=i_f$，可将等效故障电路 KVL 方程化简为

$$u_{sg}+i_{fg}R_{eq}+L_{eq}\frac{\mathrm{d}i_{fg}}{\mathrm{d}t}+u_{cm}=0\Rightarrow i_f=$$
$$\mathrm{e}^{-\int\frac{R_{eq}}{L_{eq}}\mathrm{d}t}\left(\int\mathrm{e}^{\int\frac{R_{eq}}{L_{eq}}\mathrm{d}t}-\frac{3u_{cm}}{L_{eq}}\mathrm{d}t+C_1\right) \tag{5}$$

式中：R_{eq} 为交流侧与直流线路的等效电阻；L_{eq} 为交流侧与直流线路的等效电感；i_f 为故障等效电流。

对共模电压 u_{cm} 进行频谱分析，u_{cm} 在 SPWM 调制下的傅里叶展开式为

$$u_{cm}=\begin{cases}\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{4U_{dc}}{2n\pi}\right)(-1)^{\frac{n-1}{2}}\left\{J_0\left(\frac{Mn\pi}{2}\right)\cos(n\omega_c t)+\sum_{m=2}^{\infty}J_m\cdot\left(\frac{Mn\pi}{2}\right)\left[\cos(m\omega_0+n\omega_c)+\cos(m\omega_0-n\omega_c)\right]\right\}\\ \quad n=1,3,5;\ m=2l,\ l=1,2,3\cdots\\ \displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{4U_{dc}}{2n\pi}\right)(-1)^{\frac{n}{2}}\left\{\sum_{m=1}^{\infty}J_m\left(\frac{Mn\pi}{2}\right)\cdot\left[\sin(m\omega_0+n\omega_c)+\sin(m\omega_0-n\omega_c)\right]\right\}\\ \quad n=2,4,6;\ m=2l-1,\ l=1,2,3\cdots\end{cases} \tag{6}$$

式中：U_{dc} 为直流分量；J_0 为零阶贝塞尔函数；M 为调制比；ω_c 为开关频率；J_m 为贝塞尔函数；ω_0 为基波频率。

直流侧输入检测的故障电流 i_f 的频谱特性主要受式(5)和式(6)共模电压 u_{cm} 中 ω_0 与 ω_c 的影响，一般情况下 $\omega_c>>\omega_0$，i_f 频谱能量主要集中在开关频率 ω_c 左右。

(2)直流侧极间短路故障

对于极间短路故障，互联变换器 IGBT 未闭锁时，故障电流主要包括电容放电阶段与交流侧 IGBT 导通阶段。

第一阶段电容放电等效电路如图 8 所示，故障电流主要由直流侧电容放电主导。故障电流由电容放电电流与交流侧回路电流 i_{VSC} 叠加组成。根据等效故障电路及 KVL 可知

$$\begin{cases} L_d\dfrac{\mathrm{d}i_f}{\mathrm{d}t}+R_d i_f+u_{dc}=0 \\ i_f=i_{VSC}+C\dfrac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{7}$$

式中：u_{dc} 为电容 C 的电压。二阶常系数非齐次线性微分方程由通解和特解组成，即

$$L_dC\frac{\mathrm{d}^2u_{dc}}{\mathrm{d}t^2}+R_dC\frac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t}+u_{dc}=L_d\frac{\mathrm{d}i_{VSC}}{\mathrm{d}t}+R_di_{VSC} \tag{8}$$

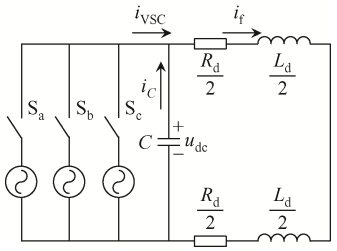


图 8　电容放电等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit of capacitance discharge

由于互联变换器的 IGBT 交替导通，很难得出特解的准确形式，故将特解设为

$$u_{dc}^{*}(t)=H(t) \tag{9}$$

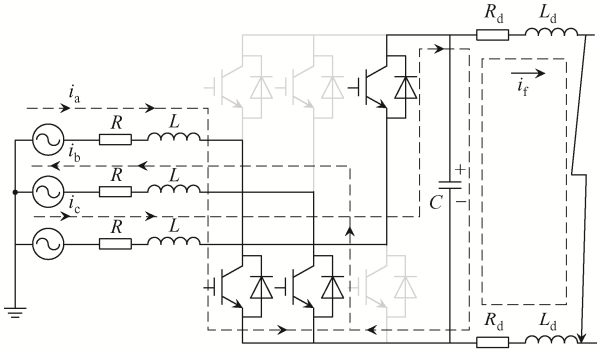
故障电流与式(9)中的特解有关。

第二阶段电容电压降低，网侧相电压瞬时最大差值高于直流侧电压时，进入交流侧 IGBT 交替导通阶段。共有 8 种开关状态，图 9 以 2 种开关状态为例，假设 c 相电压瞬时值最大，b 相最小。图 9(a)和(b)的故障回路方程可分别表示为

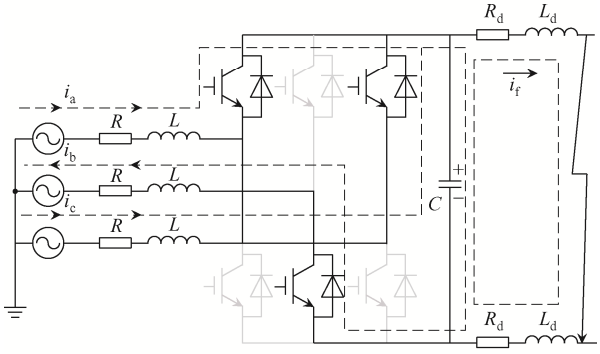
$$\begin{cases} i_C=C\dfrac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t},\ i_b=i_a+i_c,\ i_f=i_a-i_C \\ L\dfrac{\mathrm{d}(i_a-i_b)}{\mathrm{d}t}+R(i_a-i_b)=u_{sa}-u_{sb} \\ L\dfrac{\mathrm{d}(i_b-i_c)}{\mathrm{d}t}+R(i_b-i_c)=u_{dc}+u_{sb}-u_{sc} \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} i_C=C\dfrac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t},\ i_b=i_a+i_c,\ i_f=i_b-i_C \\ L\dfrac{\mathrm{d}(i_b-i_a)}{\mathrm{d}t}+R(i_b-i_a)=u_{dc}+u_{sb}-u_{sa} \\ L\dfrac{\mathrm{d}(i_b-i_c)}{\mathrm{d}t}+R(i_b-i_c)=u_{dc}+u_{sb}-u_{sc} \end{cases} \tag{11}$$

由式(10)和式(11)可获取故障电流 i_f 与不同电气量之间的联系，提取显著变量特征实现故障辨识。直流侧输入检测的 i_f 频谱特性主要受式(10)和式(11)中交流侧三相电压 u_{sa}、u_{sb}、u_{sc} 中基频分量的影响，i_f 频谱能量集中在基频附近。



(a) IGBT1导通流径



(b) IGBT4导通流径

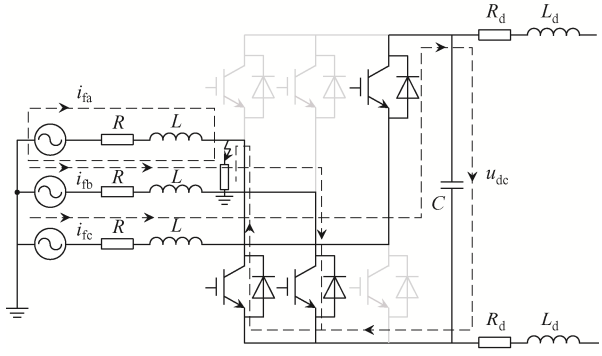
图 9　直流侧极间短路故障电流流径

Fig. 9 Current path under DC-side pole-to-pole short-circuit fault

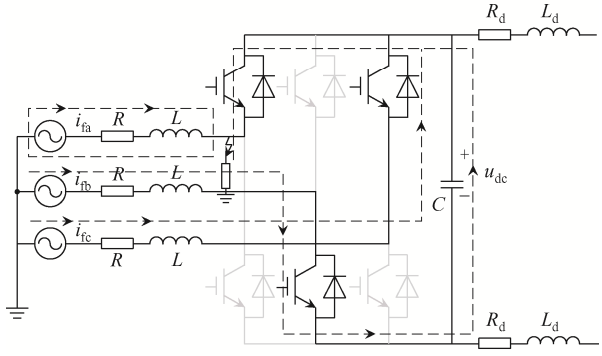
(3)交流侧单相接地故障

交直流微电网交流侧单相接地故障特性受

IGBT 开关状态影响。交流侧故障相和另外两相构成的故障回路与是否通过直流侧电容及等效回路阻抗有关。如图 10 所示，以交流侧 a 相接地故障为例，IGBT 未闭锁状态下故障电流的等效故障回路用于分析判断影响故障电流的主要因素。



(a) IGBT1导通流径



(b) IGBT4导通流径

图 10 交流侧单相接地故障电流流径

Fig. 10 Current path under AC-side single-phase grounding fault

根据等效故障回路及 KVL 可得

$$u_{fs}+(R+R_f)i_{fs}+L\frac{di_{fs}}{dt}+Mu_{dc}=0 \tag{12}$$

式中：u_{fs}为故障时交流侧三相电压；i_{fs}为交流侧三相故障电流。由 $u_{fs}=u_{fa}+u_{fb}+u_{fc}=0$、$i_{fs}=i_{fa}+i_{fb}+i_{fc}=i_f$ 可将式(12)化简为

$$(R+R_f)i_f+L\frac{di_f}{dt}+\frac{M}{3}u_{dc}=0 \tag{13}$$

联立式(12)与式(13)，可得故障电流 i_f为

$$i_f=e^{-\int\frac{R+R_f}{L}dt}\left(\int e^{\int\frac{R+R_f}{L}dt}\frac{Mu_{dc}}{3L}dt+C_1\right) \tag{14}$$

此推导以交流侧线路末端为故障发生点。若故障发生在任意交流侧线路上时，故障回路中等效阻抗不同，导致故障电流 i_f频谱特性受故障交流侧三相电压 u_{fg}中基频分量的影响。

在交直流微电网系统接地方式及故障暂态信号确定的条件下，不同故障类型直接影响采集点 HHT 的频谱特性。交流侧单相接地故障电流与直流侧极间故障电流频谱特性影响因素相似，两者 HHT 频谱与正常工况下互联变换器的基频分量有关，但交流侧单相接地故障存在故障接地电阻，故障电流小于极间故障，其 HHT 频率能量幅值应小于极间故障，而直流侧单极接地故障 HHT 频谱应主要集中在开关频率左右。

3 仿真验证分析

在MATLAB中搭建交直流微电网中互联变换器交直流故障模型。故障设置在 0.2 s 处发生，故障持续时间 0.2 s。仿真结合故障系统参数及暂态特征验证了不同故障下的 HHT 频谱和能量幅值现象。

3.1 仿真故障系统参数

图 3 的交直流微电网系统由变换器将交流与直流系统互联。为规范比较和简化计算，需消除单位的差异性，以方便进行跨系统的比较和分析，设计进行标幺化处理。选取电压基准为 220 V，功率基准为 10 kW。由文献[25]可知，互联变换器交流侧电感标幺值 5×10^{-4} p.u.$<L_s<2.46\times10^{-3}$ p.u.，直流侧电容标幺值 $C>2.195\times10^{-2}$ p.u.。实际值为 2.40 mH$<L_s<$11.81 mH，$C>$0.3 mF。MATLAB 中互联变换器仿真的具体参数见表 2。通过常规变流器的参数设计方法及系统设计规范可知，按照 2 倍额定电流作为过流的保护阈值，以及信号调节低通滤波特性等环节，同时考虑极限运行工况及故障条件，2 ms 为比较适合的故障检测窗口。为保证故障信息的准确性及完整性，设定信号采样频率为 f_s=200 kHz。提取互联变换器闭锁前(此过程可由故障闭锁逻辑确定)400 个数据点作为检测数据样本集，形成 2 ms 故障信息采集窗口。选取互联变换器开关频率 ω_c=5 kHz，采样点位置可选交流侧输出端或直流侧

输入端。

表 2　互联变换器参数

Tab. 2 Parameters of interconnected converter

参数	数值
交流侧电感标幺值(p.u)	1.25×10^{-3}
直流侧电容标幺值(p.u)	7.32×10^{-2}
交流侧电感/mH	6
直流侧电容/mF	1
额定功率/kW	10
交流侧电压/V	380
直流侧电压/V	700
直流线路(材质)/km	2(Cu)

3.2　不同故障下的故障电流及暂态电流 IMF

不同故障下的故障电流变化情况如图 11 所示。故障时，由于直流侧电容电压快速放电，导致各故障电流均迅速升高，最后趋于稳定。直流侧极间故障电流上升最快，其次是直流侧单极接地故障，最后为交流侧单相接地故障。因此，为保障电气设备不会由于冲击电流过大而损坏，需以极间故障为例进行特定分析。

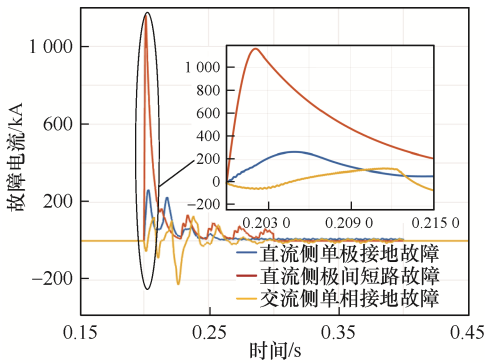


图 11　不同故障条件下的故障电流

Fig. 11 Fault current under different fault conditions

图 12 为各故障状态下，交直流互联变换器不同故障电流 2 ms 暂态信号经 EMD 分解后的 IMF。由图12(a)可见，直流侧单极接地故障时，IMF 的幅值波动较小(−6~6 dB)；由图 12(b)可见，直流侧极间短路故障时，IMF 的幅值波动较大(−300~300 dB)且极值较少；由图12(c)可见，交流侧单相接地故障时，IMF 的幅值波动最小(−2.0~1.5 dB)。各故障电流暂态信号经 EMD 分解均满足 IMF 定义且存在明显差异，但无法体现频谱特性及能量变化情况。

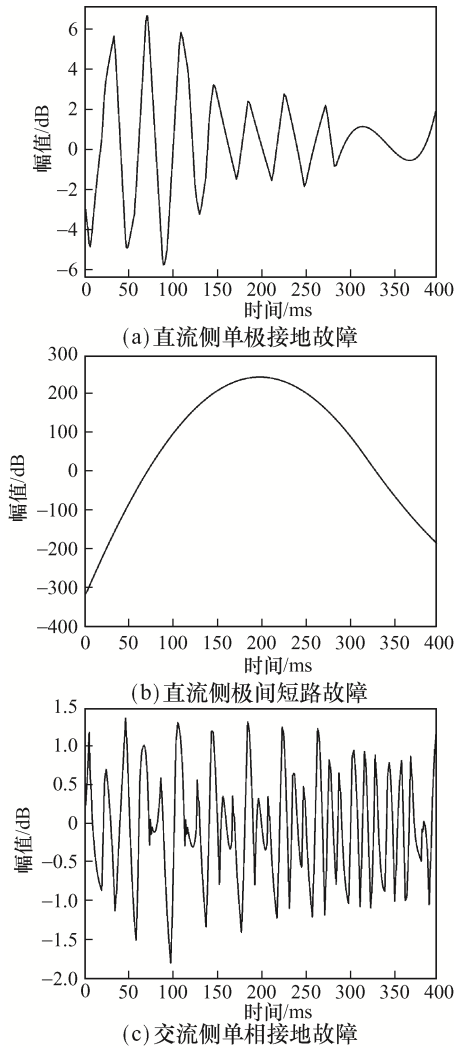


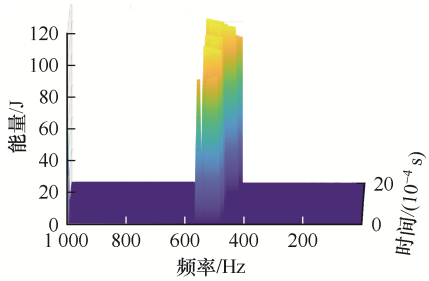
图 12　各故障电流的 IMF

Fig. 12 IMF of current under different fault conditions

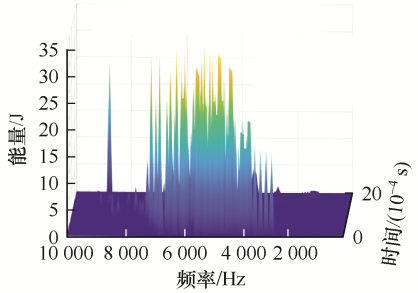
3.3　不同故障下的 HHT 谱

将不同故障下的 HHT 频谱特征与正常工况进行对比分析。图13(a)为正常工况未发生故障时的 HHT 频谱；图 13(b)~(d)为不同故障下的 HHT 频谱。由图 13(a)与图 13(b)~(d)的对比可知，不同故障条件下 HHT 频谱特性与正常工况在频率分布及能量幅值方面存在显著差异。正常工况下能量幅值高的频率分布在 500 Hz 左右；直流侧单极接地故障能量幅值高的频率主要分布在 4~6 kHz；直流侧极间短路故障与交流侧单相接地故障能量幅值高的频率主要分布在 500 Hz 左右，与正常工况分布相似；直流侧极间短路故障 500 Hz 能量幅值主要在 60~80 dB 区间，且存在能量幅值较大的 500 Hz 以下频

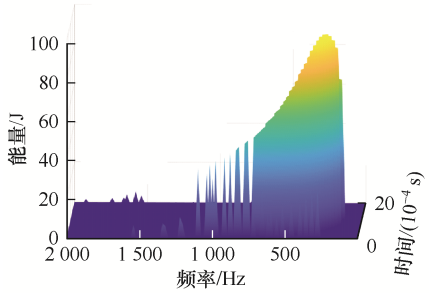
率；交流侧单相接地故障 500 Hz 能量幅值主要在 15~25 dB 区间，两者 500 Hz 能量幅值均低于正常工况。基于 HHT 频率分布及能量幅值可识别不同交直流故障类型，进行准确的故障定位与快速隔离及保护。



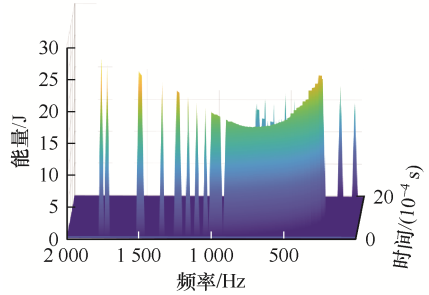
(a) 正常工况



(b) 直流侧单极接地故障



(c) 直流侧极间短路故障



(d) 交流侧单相接地故障

图 13 不同故障情况下的 HHT 频谱

Fig. 13 HHT spectra under different fault conditions

3.4 故障检测仿真总结

将上述不同故障的 HHT 频谱特征进行汇总，见表 3。由表 3 可知，不同故障类型分别对应着不同的 HHT 频谱和能量幅值。3 种典型交直流故障可直接由 HHT 频谱准确识别，当交/直流传感器通过 HHT 方式检测出不同故障特性时，可快速、灵敏地将通断信号输入到交/直流断路器中，实现故障的快速隔离及保护。

表 3 各种故障类型的 HHT 频谱

Tab. 3 HHT spectra under different types of fault

HHT 频谱	HHT 能量幅值/J	故障类型
500 Hz 左右	120 左右	未故障
4~6 kHz	25~35	单极接地
500 Hz 左右	60~80	极间短路
500 Hz 左右	15~25	单相接地

4 结语

基于 HHT 原理，结合互联变换器的应用特性，通过分析故障后互联变换器 IGBT 未闭锁的故障暂态特性，探索了基于 HHT 频谱及能量幅值进行交直流微电网故障检测的可行性。该方法克服了现有故障检测方案响应速度慢的缺陷，解决了常规时域和频域故障检测对非线性非平稳暂态信息的提取问题，减少了智能算法的计算量和采样量。仿真验证了基于 HHT 方案可在 2 ms 内精准检测互联变换器 IGBT 未闭锁时的不同交直流故障，实现了交直流微电网中快速、准确、灵敏的故障类型诊断。基于所述 HHT 故障检测方案，通过分析信号的频率动态和振幅变化，可以帮助检测交直流微电网的故障情况，后续可深入研究其保护原理和保护机制，以实现更好的系统保护和故障预防。但本文存在短时间内难以同时快速诊断多种故障类型的缺陷，为解决此问题，未来将开展互联变换器 IGBT 未闭锁时多故障暂态特征的进一步探索与研究，实现多故障同时发生情况下进行快速、准确的故障诊断。

参考文献：

[1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.

Yang Xinfa, Su Jian, Lü Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE,

2014, 34(1): 57-70. (in Chinese)

[2] 唐伟宁, 杨建荣, 鞠默欣, 等. 基于功率平衡的微电网多逆变器并联电压控制[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 36-40.
Tang Weining, Yang Jianrong, Ju Moxin, et al. Parallel voltage control of multiple inverters in microgrid based on power balance [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 36-40. (in Chinese)

[3] 孔惠文, 马静, 程鹏, 等. 基于子网优先级驱动的交直流混合微网集群双向互联变流器分散式控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2667-2681.
Kong Huiwen, Ma Jing, Cheng Peng, et al. Decentralized control strategy for hybrid microgrid cluster bidirectional interlinking converters based on sub-grid priority drive [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2667-2681. (in Chinese)

[4] 蔡瑶, 卢志刚, 潘尧, 等. 计及多重差异的交直流混合多能微网多时间尺度优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3392-3410.
Cai Yao, Lu Zhigang, Pan Yao, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of AC-DC hybrid multi-energy microgrid considering multiple differences [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3392-3410. (in Chinese)

[5] 柴锦, 陈阿莲, 王瑞琪, 等. 交直流混合微电网动态架构重组研究[J]. 电源学报, 2019, 17(2): 109-116.
Chai Jin, Chen Alian, Wang Ruiqi, et al. Research on dynamic reconfiguration of hybrid AC/DC micro-grid [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(2): 109-116. (in Chinese)

[6] 黄旭程, 何志兴, 伍文华, 等. 交直流微电网中变换器级联系统稳定性分析与协同控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1432-1443.
Huang Xucheng, He Zhixing, Wu Wenhua, et al. Stability analysis of converters cascade system in the hybrid AC/DC microgird and coordinative control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1432-1443. (in Chinese)

[7] Bhargav R, Bhalja B R, Gupta C P. Algorithm for fault detection and localisation in a mesh-type bipolar DC microgrid network [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(15): 3311-3322.

[8] Meghwani A, Srivastava S C, Chakrabarti S. A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 172-181.

[9] Rao G K, Jena P. Fault detection in DC microgrid based on the resistance estimation [J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1): 1009-1020.

[10] 张林, 郤能灵, 刘剑, 等. 直流微电网方向纵联保护方法研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(20): 1-7.
Zhang Lin, Tai Nengling, Liu Jian, et al. Analysis of directional pilot protection method for DC microgrid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(20): 1-7. (in Chinese)

[11] Chauhan P, Gupta C P, Tripathy M. A current difference based protection technique for low voltage DC microgrid [C]// 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE). Trivandrum, India, 2022: 1-6.

[12] Yeap Y M, Geddada N, Satpathi K, et al. Time- and frequency-domain fault detection in a VSC-interfaced experimental DC test system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(10): 4353-4364.

[13] 何佳伟, 李斌, 李晔, 等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6878-6887, 7078.
He Jiawei, Li Bin, Li Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6878-6887, 7078. (in Chinese)

[14] Lan Sheng, Chen Moujie, Chen Duanyu. A novel HVDC double-terminal non-synchronous fault location method based on convolutional neural network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 848-857.

[15] Luo Guomin, Tan Yingjie, Yao Changyuan, et al. Deep learning-based fault location of DC distribution networks [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 3301-3305.

[16] 张林. 基于 HHT 的单相接地故障检测研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
Zhang Lin. Research on single-phase grounding fault detection based on HHT [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)

[17] 宁连营, 郜能灵, 郑晓冬, 等. 基于单端暂态电流的MMC-HVDC 输电线路保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5010-5017, 5220.
Ning Lianying, Tai Nengling, Zheng Xiaodong, et al. Research on MMC-HVDC transmission line protection scheme based on one terminal transient current [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5010-5017, 5220. (in Chinese)

[18] Song Ying, Hou Gaoyang, Wang Song. DC fault detection method for DC grids based on frequency domain voltage characteristics [C]// 2021 6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Shanghai, China, 2021: 196-201.

[19] Li Dongyu, Ukil A, Satpathi K, et al. Hilbert-Huang transform based transient analysis in voltage source converter interfaced direct current system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 11014-11025.

[20] 程养春, 李成榕, 王伟. 用傅立叶级数法消除局部放电检测中窄带干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 106-111.
Cheng Yangchun, Li Chengrong, Wang Wei. Research on eliminating narrow frequency noise by Fourier series in partial discharge detection [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 106-111. (in Chinese)

[21] 向玲, 朱永利, 唐贵基. HHT 方法在转子振动故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(35): 84-89.
Xiang Ling, Zhu Yongli, Tang Guiji. Application of Hilbert-Huang transform method in vibration faults diagnosis for rotor system [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(35): 84-89. (in Chinese)

[22] 孙权, 彭飞, 李宏胜, 等. 样本不均衡下基于 CGAN-CNN 的逆变器故障诊断方法[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 318-326.
Sun Quan, Peng Fei, Li Hongsheng, et al. Inverter fault diagnosis method based on CGAN-CNN under sample imbalance [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 318-326. (in Chinese)

[23] 戴志辉, 葛红波, 严思齐, 等. 柔性直流配电网接地方式对故障特性的影响分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2353-2364.
Dai Zhihui, Ge Hongbo, Yan Siqi, et al. Effects of grounding mode on fault characteristics in flexible DC distribution system [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2353-2364. (in Chinese)

[24] 孙晓云, 同向前, 高鑫. VSC-HVDC 系统中 IGBT 的开路故障特性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2541-2549.
Sun Xiaoyun, Tong Xiangqian, Gao Xin. Analysis of IGBT open-circuit fault characteristic in VSC-HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2541-2549. (in Chinese)

[25] 张兴. PWM 整流器及其控制策略的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
Zhang Xing. Study on the PWM rectifier and its control strategies [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003. (in Chinese)



张建文

作者简介：

张建文(1981—)，男，博士，研究员。研究方向：大功率电力电子在电力系统中的应用，可再生能源功率变换与并网技术。E-mail：icebergzjw@sjtu.edu.cn。

包义玖(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：低压交直流微电网的故障诊断与识别技术。E-mail：baoyijiu123@163.com。

臧甲杰(1989—)，男，通信作者，博士，讲师。研究方向：大功率电力电子技术，交直流混合电网。E-mail：jiajie_zang@sues.edu.cn。

周剑桥(1992—)，男，博士。研究方向：柔性互联技术，固态变压器。E-mail：jianqiaozhou@sjtu.edu.cn。

施刚(1984—)，男，博士，助理研究员。研究方向：可再生能源功率变换与并网技术。E-mail：gangshi@sjtu. edu.cn。

杨兴武(1981—)，男，博士，教授。研究方向：新能源并网，电能质量分析与控制。E-mail：yangxingwu@shiep. edu.cn。

(责任编辑：耿越)