

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.212

电力电缆初期绝缘故障检测方法综述

任广振¹, 王云鹤², 曹俊平¹, 陈维召³, 成城⁴, 雍静²

(1. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310000; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 3. 济南能源集团, 济南 250011; 4. 浙江省送变电工程有限公司, 杭州 310020)

摘要:严重的电力电缆局部绝缘缺陷会导致显著的电压电流扰动, 准确检测出这种电缆初期故障产生的扰动, 可以对即将发生永久故障的电力电缆进行及时的运维处理, 防止无计划停电的发生。文中对现有相关研究进行全面综述, 归纳现场收集到的各种电缆局部缺陷导致的电压电流扰动波形及波形特征; 对现有文献报道的初期故障检测方法, 按照其检测原理和使用的检测数据类型, 从暂态电力扰动的时频特征阈值法和人工智能方法两个角度对检测方法进行综述, 同时对不同方法进行分析 and 评价。基于现有研究成果, 对电缆初期故障在线检测技术的进一步研究提出建议。

关键词: 电力电缆; 局部绝缘缺陷; 暂态电力扰动; 检测方法; 在线检测

中图分类号: TM726.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)11-001-12

Review of incipient insulation fault detection methods for power cables

REN Guangzhen¹, WANG Yunhe², CAO Junping¹, CHEN Weishao³, CHENG Cheng⁴, YONG Jing²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310000, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. Jinan Energy Group, Jinan 250011, P. R. China; 4. Zhejiang Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310020, P. R. China)

Abstract: Serious local insulation defects in power cables can cause distinct voltage and current disturbances. Precisely identifying these disturbances empowers utility companies to proactively manage cable maintenance and prevent unexpected power outages. This paper presents a comprehensive review of related research, detailing voltage and current disturbance waveforms across different systems. It categorizes existing incipient fault detection methods based on detection principles and data types, distinguishing between time-frequency characteristic threshold-based and artificial intelligence-based methods for transient power disturbances analysis. The study conducts a thorough comparison and evaluation of these methods. Drawing from existing research, recommendations are provided for further research on online detection technology for cable incipient faults.

Keywords: power cable; local insulation defects; transient power disturbance; detection method; online detection

收稿日期: 2022-06-14 网络出版日期: 2023-03-02

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS20007P)。

Supported by Scientific and Technical Funds of Zhejiang Electric Power Corporation (5211DS20007P).

作者简介: 任广振(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事电力电缆运维检修, 配网运维检修等, (E-mail)xyz981005@163.com。

通信作者: 王云鹤, 男, 博士研究生, (E-mail)1542253671@qq.com。

电力电缆是承载电能传输的重要一次设备,电缆绝缘状态检测是维护电缆安全运行的必要环节。电缆局部绝缘缺陷不断发展最终导致电缆永久性故障,但局部绝缘缺陷特征在起始阶段不明显,常采用局部放电法^[1]、时频域反射法^[2]等离线检测方法。离线绝缘状态检测技术因为需要电缆停运检修且不能频繁检测等问题无法满足对电缆运行状态信息长期监测的需求,而局部放电在线检测易受环境噪声干扰,实际绝缘检测中仍以离线检测方式为主。

近年来,在电力电缆发生永久性故障前可以观测到明显的暂态电压电流扰动,暂态电力扰动间歇性出现,且在电缆持续运行一段时间后发生永久性故障^[3-4],因此及时检测到电缆绝缘缺陷产生的暂态电力扰动,就能够提前发出预警信号,避免电缆永久性故障^[5]。由于电缆初期故障阶段具有显著的电力扰动特征,对此进行检测和定位较局部放电检测更容易,引起电力公司和学者们的广泛关注和研究。本文中针对电缆初期故障导致的电力扰动特征和现有检测方法进行综述,并分析提出现有各方面研究的不足和进一步研究的建议。论文综述部分主要有两个方面内容:一是电缆初期故障引发的电力扰动特征,其中包括现场检测到的波形特征和实验得到的波形特征,在第1、2节进行综述和分析;二是根据电缆初期故障电力扰动特征进行电缆初期故障检测的方法,包括基于扰动时频特征的检测方法和基于人工智能技术的检测方法,在第3、4节进行综述和分析;第5节针对研究现状提出存在的问题及今后可能的研究方向和思路。

1 电缆局部绝缘缺陷产生的初期故障暂态电力扰动

近年来,来自现场的实测数据不断证实,电缆严重局部缺陷会导致电缆电压电流显现出独特的暂态电力扰动现象,是电缆初期故障的重要表征,本节从电力扰动波形特征和发生频次特征两个方面对文献中报道的现场数据进行归纳分析。

1.1 电缆初期故障暂态电力扰动特征及规律

电缆绝缘在生产、安装、运行过程中均可能产生局部绝缘缺陷,电缆绝缘层微小的局部缺陷不断发展逐渐延展至绝缘层两端,在电应力等作用下形成放电通道,由于此时绝缘尚未完全破坏,放电通道间歇性导通,形成一种间歇性电弧故障,也称电缆初期故障。这种电缆初期故障随着绝缘内部电弧的熄灭可自主消除,因此电缆仍可以持续运行。

电缆绝缘层内部间歇性电弧导致电压扰动和电流扰动,现场记录到的典型扰动波形如图1所示^[6]。可见,扰动在工频电压峰值附近形成,意味着在峰值电压处,绝缘缺陷承受不了电压而发生放电,于是呈现出暂态电力扰动。电缆绝缘缺陷处通常存在水分,放电通道放电时释放大量热能,热能蒸发水分形成高压蒸汽熄灭电弧,从而扰动的电压电流波形恢复正常。由于局部绝缘缺陷仍然存在,随着时间的持续,当缺陷处再次呈现潮湿状态,将导致下一次间歇性电弧放电,形成又一个电力扰动现象。

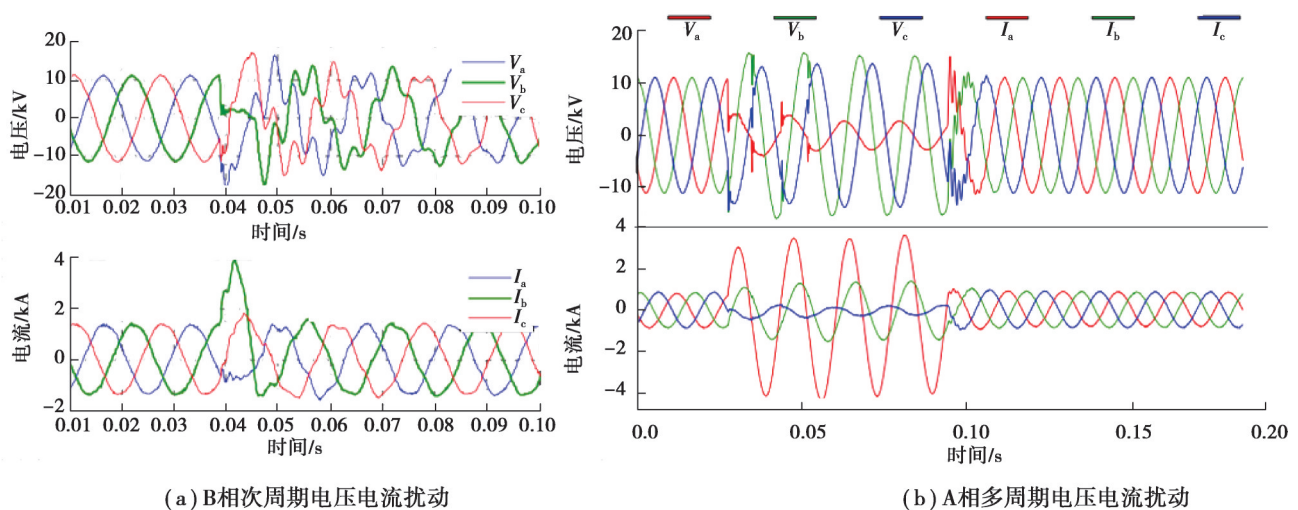


图1 电缆局部绝缘缺陷产生的暂态电力扰动波形图^[6]

Fig. 1 Waveforms of transient power disturbances caused by local insulation defects of cables^[6]

电缆局部绝缘缺陷产生的暂态电力扰动大多持续 $1/4$ 个工频周期,也称为次周期扰动,如图 1(a)所示;也有一部分报道称观察到多周期暂态电力扰动,持续时间为 $1\sim 4$ 个工频周期,如图 1(b)所示。在电缆初期故障发生期间,电流扰动持续时间短,电流脉冲幅值相对较小,因此基于有效值计算的过流保护不能有效检测此类扰动。

统计表明 $10\%\sim 15\%$ 的电缆在其绝缘发生永久故障前会出现暂态电力扰动^[7]。通过现场实测得到电流和电压扰动的特征如下。

1) 电压扰动起始于相电压峰值附近,既有正半周扰动,也有负半周扰动,其中多周期电压扰动波形近似方波。Moghe 等^[8]通过对含有 4 条 1970 年代安装的中压(13.2 kV)电力电缆进行数月的电压电流波形监测,从监测数据中捕捉到 141 个次周期扰动,分析结果表明:这些扰动均起始于相应的电压峰值附近,说明这种初期故障形成的电力扰动是源于电缆绝缘缺陷处能够承受的电压强度降低。

2) 电流扰动持续时间为 $1/4\sim 4$ 个周期,扰动幅值可高达几倍负荷电流值。文献[8]中电流扰动持续时间为 $0.25\sim 0.47$ 个工频周期,电流扰动幅值在 $1\sim 5$ p.u. 范围内变化;Kulkarni 等^[6]分析了 70 多个次周期电流波形特征,电流突变部分持续时间在 $1/4\sim 1/2$ 个工频周期,电流突变部分的幅值在 $0.7\sim 6.2$ p.u. 范围内变化,与 Moghe 等^[8]得到的电流扰动特征相似,且存在持续多周期的暂态电力扰动。

3) 电流扰动波形主要含有低次谐波,其中直流分量和 2、3 次谐波与电流扰动幅值变化趋势接近。

通过对现场实测数据进行统计分析得出电压电流扰动在持续时间、突变幅值变化、频域变化方面的特征,这些特征是电缆初期故障的独特特征。当电缆初期故障得不到有效检测时,可以结合上述特征设计检测算法。由于现场数据量较少,仅能得到上述相对明显便于分析的特征变化,电缆初期故障暂态扰动中存在的隐含特征需要采用更有效的方法进行提取以便有效检测。

1.2 电力扰动发生的频次特征

通过对现场实测数据进行观察分析表明,电缆初期故障引发的电力扰动出现频次与绝缘永久失效之间具有明显的关系。

Kojovic 等^[3]对一起电缆接头绝缘失效前的电力扰动进行持续观察。在电缆接头损坏前发现监测到的电压电流扰动出现频率逐渐增加,扰动出现在同一相且在电压峰值附近发生。对电缆接头故障原因进行追溯发现,由于架空线端的电缆接头存在缺陷,雨水进入电缆与导体发生反应形成气体,气体挤出浸入水分,形成自清除的绝缘闪络。水分不断重新积聚,反复闪络使电缆绝缘逐渐损坏,最终引发永久性故障。上述一系列事件共导致更换了 3 个电缆接头,每次更换前均检测到电力扰动,第 1 个接头更换前扰动由开始的每天 3 次增加到 12 次;第 2 个接头更换前扰动由每天 4 次增加到 8 次,第 3 个接头更换前也存在扰动频率逐渐增加的情况。在其他电缆线路上也监测到此种电力扰动,且在损坏之前一周内,一根电缆上总共记录下 23 个类似图 2 所示扰动。上述损坏接头在永久故障前,均未触发任何保护装置动作。

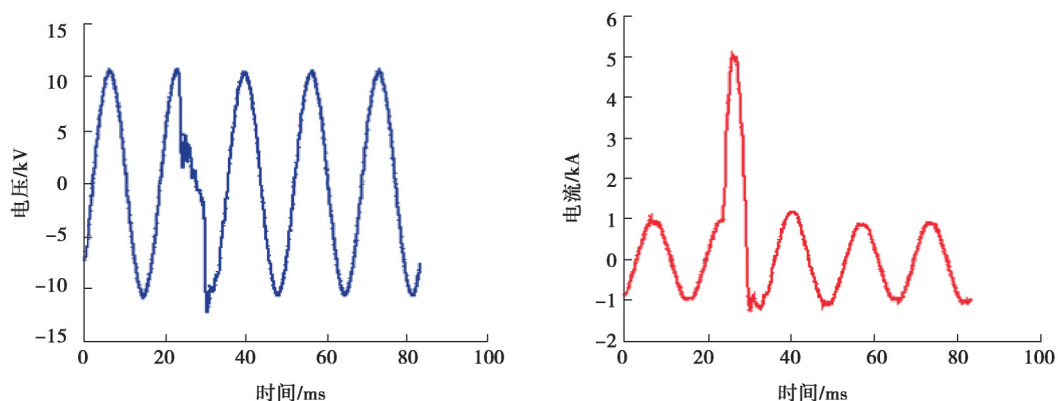


图 2 电缆接头绝缘故障导致的电压电流扰动^[3]

Fig. 2 Voltage and current disturbance caused by cable splice insulation fault^[3]

电力扰动发生频次与电缆绝缘失效的时间关系表明,随时间推移,电力扰动频次逐渐增加,扰动强度逐渐增强,文献[6]和[8]的数据也给出了相似的结论。

图3所示为文献[8]中记录到的第一个和最后一个电流扰动波形,期间间隔9个月时间。可见随着时间推移,扰动电流幅值增大很多,说明初期故障日趋严重。在电缆发生永久故障前,电流扰动频次逐渐增多,幅值逐渐升高。

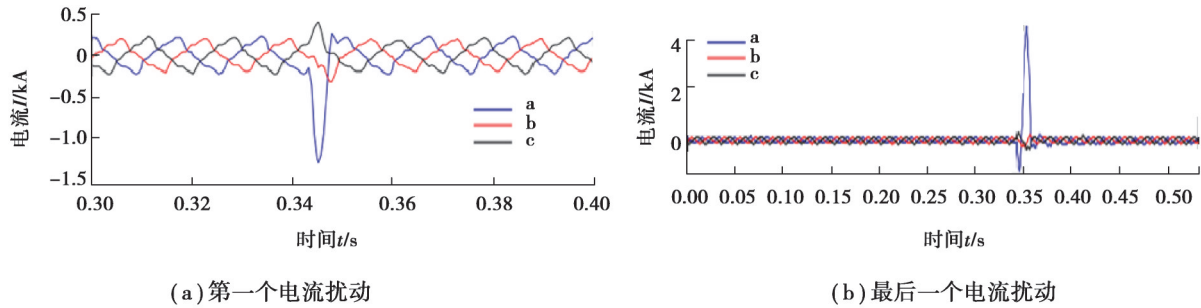


图3 电缆局部绝缘缺陷产生的电流扰动波形图^[8]

Fig. 3 Waveform of current disturbance caused by local insulation defects of cables^[8]

从现场获得的电缆初期故障电力扰动特征可见:电缆初期故障伴随着出现频次逐渐增加、起始于电压峰值处的次周期电压和电流扰动。尽管现场数据显示出明确的电缆初期故障电力扰动特征,但是观察到的扰动信号强弱及细节难以与故障点发生位置进行关联。进一步对电缆初期故障的发生机理、检测及故障定位方法的研究需要建立较为准确的故障模型,以便对不同系统中电缆在不同故障位置下的电力扰动传播特征进行研究。

2 电缆初期故障暂态电力扰动的试验模拟

鉴于需要安装电压电流波形监测装置,现场实际监测到的电缆初期故障现象非常有限,为了进一步研究其特征和发生机理,部分学者^[3,9-11]通过试验方法模拟电缆绝缘缺陷产生的电力扰动。

试验模拟采用的局部绝缘缺陷模拟方法主要有2类。

2.1 用熔断器模拟局部缺陷

选择熔体电流合适的熔断器连接在模拟缺陷处,模拟相对地或者相对中性线间的绝缘缺陷点,对电缆进行加压试验,观察电缆初期故障导致的电力扰动。以熔断器模拟绝缘缺陷可以通过熔断器迅速实现故障电弧的自清除。由于试验电缆非常短,可以认为观察到的扰动就是电缆局部缺陷点处的电力扰动。

图4所示为中压电缆的试验接线和电流扰动波形^[3]。

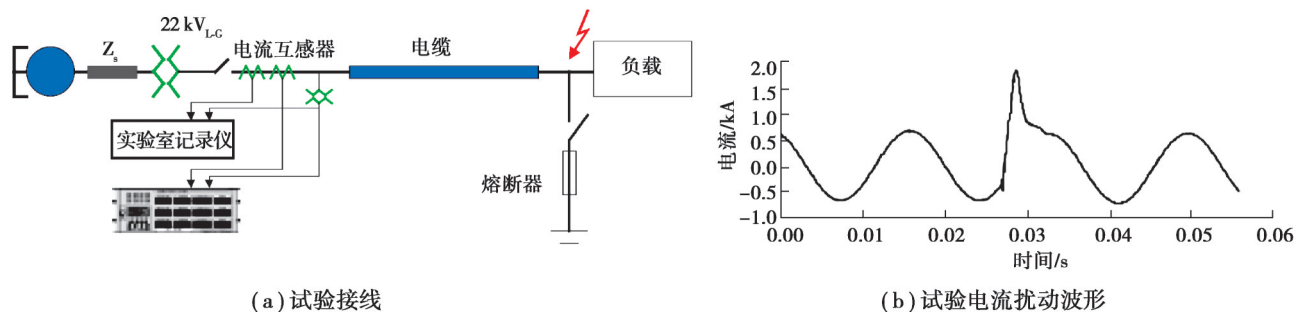


图4 电缆初期故障模拟试验^[3]

Fig. 4 Cable incipient fault simulation test^[3]

图5所示为低压电缆中观察到的间歇性电弧导致的电流和电压波形^[9]。试验是在不同环境下进行的,相对于干燥条件下,电缆绝缘缺陷处存在水分时更易触发间歇性电弧故障,且在试验过程中间歇性电弧故障未

触发保护装置。

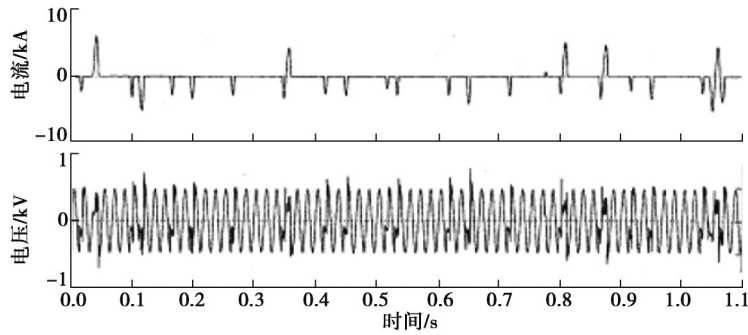


图 5 低压电缆间歇性电弧故障电流电压波形^[9]

Fig. 5 Current and voltage waveforms of intermittent arc faults in LV cables^[9]

虽然熔断器可快速地模拟电缆绝缘中电弧的自清除特征,但电缆绝缘层间歇性放电过程是否能够用熔断器熔断过程替代,尚无有说服力的依据。

2.2 用浸水缺陷电缆模拟电缆初期故障

用缺陷电缆浸水模拟电缆初期故障都是针对低压电缆进行试验。图 6 所示为试验中监测到的电压电流扰动^[10],电压波形表现为从峰值处开始凹陷的次周期电压扰动,持续约 1/4 个工频周期后电压波形恢复正常,由于试验回路中未接入负载,电流扰动波形表现为直流脉冲。该试验验证了缺陷电缆会出现间歇性电力扰动,但未对电力扰动波形特征进行统计分析。

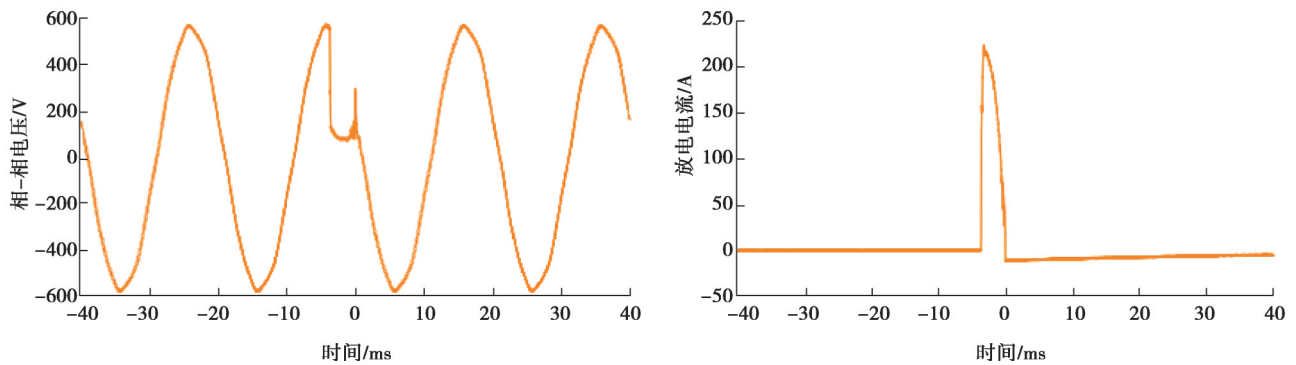


图 6 低压电缆间歇性电弧模拟试验电压电流波形^[10]

Fig. 6 Voltage and current waveforms of intermittent arc simulation test in LV cables^[10]

图 7 所示为从低压油浸纸绝缘电缆试验中观察到的间歇性电弧放电电压和电流^[11]。该放电过程可能持续几小时或几分钟,且出现次周期凹陷的电压波形。试验模拟了整个电缆绝缘失效过程,并表明电缆绝缘失效过程中电气量变化趋势与最终故障相关。

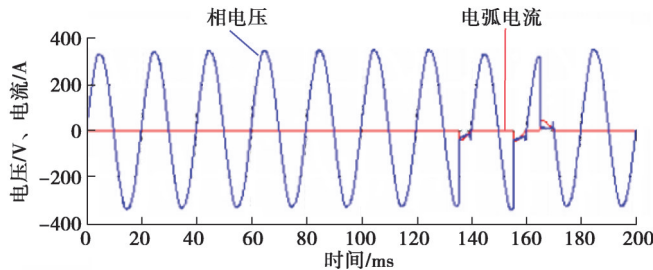


图 7 低压油浸纸绝缘电缆试验间歇性电弧放电波形^[11]

Fig. 7 Waveforms of intermittent arc discharge in LV oil-impregnated paper insulated cable test^[11]

上述试验模拟研究从最初的电流扰动波形外部特征模拟到模拟电缆缺陷产生的电压电流扰动逐渐接近电缆运行工况,但仅限于验证电缆绝缘缺陷会产生间歇性电力扰动,并未对电力扰动波形特征深入分析,没有采用特征参数量化扰动波形,对后续的检测研究作用有限。现有研究对低压电缆初期故障导致的间歇性电力扰动能够较好地通过试验装置进行复现,但对于中、高压电力电缆,在实验条件下对其进行复现和研究尚未见报道。

3 基于暂态电力扰动时频特征的电缆初期故障检测方法

电缆局部绝缘缺陷产生的暂态电力扰动含有大量的时频特征信息,大量研究通过不同方法提取扰动中时频特征参数并设定阈值检测电缆初期故障。基于电力扰动时频特征的电缆初期故障检测方法可以归纳为:1)基于暂态电流扰动的时频阈值法;2)基于暂态电压扰动的时频阈值法;3)基于暂态电流电压扰动的时频阈值法;4)暂态电力扰动时序阈值法。

3.1 基于暂态电流扰动的时频阈值法

现场监测数据表明,电缆初期故障导致电流波形出现反复的脉冲形态,基于暂态电流扰动的时频阈值法通过设置不同电流阈值和电流扰动持续时间检测电流脉冲型扰动。具体方法有如下几类^[7,12-15]:

- 1)设置阈值为大于负荷电流 k 倍及持续时间小于 n 个工频周期;这种阈值设置方法很难兼顾不同系统中电缆运行条件下 k 和 n 的取值。对电流幅值较小的次周期扰动会造成漏检,且无法区分不同暂态电力扰动;
- 2)根据次周期扰动特征,以半周波以内的高频电流扰动作为电缆初期故障检测依据;
- 3)采用各种小波变换方法提取扰动电流的细节,并设置阈值作为判别电缆初期故障依据。

上述各类方法中阈值的设定除文献[12]外均由仿真数据确定,而目前缺乏公认的电缆初期故障模型,仿真中的故障模型都是现有电弧模型或者根据现有电弧模型的改进模型。此外,仅部分研究^[13-15]将电缆初期故障扰动与系统中其他扰动进行了区分研究。因为电缆初期故障仅发生在电缆出现严重局部绝缘损伤的阶段,是一种并不常见的电流扰动,有效地将电缆初期故障扰动从其他扰动中正确区分是避免误检的必要环节。

3.2 基于暂态电压扰动的时频阈值法

现场监测到的电缆初期故障暂态电压扰动数据报道较少,暂态电压扰动较为明显的特征是电压幅值的短时跌落。基于暂态电压扰动的时频阈值法通过设置不同的波形偏差量检测电压扰动,具体方法有如下2类^[16-19]:

- 1)设置阈值为电压扰动波形偏离参考波形的程度。这种参考波形的设定主要以正弦波或方波为基准,结合扰动持续时间进行检测,而阈值的设定依据样本集,但所提算法通常计算量较小,便于在线实现。
- 2)设置阈值为故障处电压波形总谐波畸变率^[19]。所提出的方法仅适用多周期电压扰动,而次周期电压扰动的频率成分与多周期扰动存在明显的差异,仅以电压总谐波畸变率作为检测阈值不能通用。

上述研究分别利用电流、电压扰动作为电缆初期故障的特征电气量,在电缆初期故障检测的早期研究过程中,因为电流扰动变化较大,便于采集,是被用于电缆初期故障检测的主要电气量;随着对电缆初期故障研究的不断发展,近几年,电压扰动特征逐渐被用于电缆初期故障检测,如文献[19]中提出了考虑补偿电压扰动沿线衰减的检测方法。

3.3 基于暂态电流电压扰动的时频阈值法

电缆初期故障暂态电流扰动容易被其他扰动干扰,而电压扰动特征会沿线衰减,通过电流电压扰动提取复合特征可进一步提高检测结果的可靠性^[20-21]。基于暂态电流电压扰动的时频阈值法主要是结合电缆初期故障时三相电压电流、零序电压电流的变化特征形成复合判据作为检测依据。复合判据的形成依赖于多种电气量的同时变化,在增加可靠性的同时也增加了判据的复杂性,阈值的设定多依据经验,容易忽视微小的暂态扰动变化而造成漏检。

3.4 暂态电力扰动时序阈值法

电缆初期故障是一种间歇性电弧故障,故障持续时间内电缆绝缘逐渐恶化,暂态电力扰动逐渐加剧,通

过扰动波形的时序特征变化可以预警故障。具体方法有如下 2 类^[22-25]:

- 1) 根据暂态电力扰动波形与参照标准的偏移量随时间增大的特征设定阈值判别电缆初期故障;
- 2) 根据暂态电力扰动间隔时间逐渐减小的特征设定阈值判别电缆初期故障。

暂态电力扰动的时序变化检测方法主要是以离线数据集作为检测的样本集,为了使电缆绝缘状态预警更具实际参考意义,需要建立电缆电压电流长期监测机制以达到动态在线监测电缆绝缘的目的。但目前缺乏对电缆绝缘恶化状态评价标准,这需结合大量实测数据或试验进一步分析,量化时序特征参数变化范围,以便设定阈值预警绝缘缺陷状态。

4 基于人工智能技术的电缆初期故障检测方法

随着人工智能在电力系统中的广泛应用,人工智能检测方法也被用于电缆初期故障检测。人工智能方法能够对暂态电力扰动信号与电缆绝缘缺陷的潜在关联关系进行建模,减少对电缆初期故障先验知识的依赖,加快检测方法设计流程。现有基于人工智能技术的电缆初期故障检测方法可归纳为传统机器学习方法和深度学习方法两大类。

4.1 传统机器学习方法

传统机器学习方法是人工智能研究领域在 2000 年以前的主要成果,用于检测电缆初期故障的具体方法有如下几类^[26-34]。

4.1.1 决策树(decision tree, DT)

决策树是一种通过对输入特征参数递归选择决策树中的分支确定事件类型的分类方法。决策树需要提取暂态电力扰动波形特征参数作为决策树的输入^[26],直接采用原始数据会导致检测结果差,如文献[27]中检测精度仅为 67.7%,同时集成多个决策树融合权重形成随机森林(random forest, RF)^[28]方法可以提高检测精度。

4.1.2 支持向量机(support vector machine, SVM)

支持向量机是一种二分类方法,通过在特征空间内求解最大间隔超平面实现分类,支持向量机的决策边界仅依赖少量分类边界处的支持向量,与训练的总体数据样本无关,算法计算量小,结构简单。基于支持向量机的检测方法能够通过时间参数特征^[29]、S 变换(Stockwell transform, ST)提取的时频参数特征^[30]、7 个扰动相关的特征参数^[31]识别电缆初期故障,其中文献[31]中采用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)提升支持向量机参数求解速度。但支持向量机仅适用于小样本量分类,样本量较大时容易产生不收敛等问题。

4.1.3 人工神经网络(artificial neural network, ANN)

人工神经网络可以通过模拟生物学中的神经网络原理实现复杂非线性关系的映射,用于电缆初期故障识别的人工神经网络有自组织映射(self-organizing map, SOM)、概率神经网络(probabilistic neural network, PNN)和自适应线性神经网络(adaptive linear neural network, Adaline)。自组织映射采用暂态扰动的不同频段特征作为输入,通过不同扰动特征之间的竞争实现最终分类^[32];概率神经网络通过条件概率进行分类,文献[33]中以扰动数据的谐波含有率作为输入特征进行扰动识别,但仅考虑电缆初期故障和电容器投切 2 种扰动类型;当考虑计算速度时,自适应线性神经网络具有在线调整参数、计算速度快的特点,文献[34]中利用自适应线性神经网络的权重因子变化特征构建判据检测电缆次周期、多周期电流扰动。

上述检测方法仍需要对扰动信号进行预处理以提取特征参数,存在提取扰动信号局部特征能力不足、检测时间窗过长、同时对于微小的扰动检测存在漏检等问题。但传统机器学习方法简化了分类器设计流程,在对电缆初期故障没有深入了解的情况下也能实现有效检测。

4.2 深度学习方法

深度学习方法利用多层神经网络结构强化对扰动信号的特征提取过程,随神经网络层数增加逐步表征局部特征到整体特征,所需先验知识更少,对扰动数据仅需简单处理即可进行电缆初期故障检测。深度学习是现阶段人工智能研究中的热点方向,用于检测电缆初期故障的具体方法有如下几类^[35-42]。

4.2.1 卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)

卷积神经网络是一种具有局部连接、权重共享等特性的深层前馈神经网络,采用多层神经网络时参数较多、网络庞大。为解决卷积神经网络的过拟合问题,文献[35]中通过随机函数和自适应学习率优化提升准确率;为增强噪声条件下扰动识别的准确性,文献[36]中通过变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)提取时频特征后作为卷积神经网络输入进行扰动识别。

4.2.2 循环神经网络(recurrent neural network, RNN)

相比于卷积神经网络的局部特征提取能力,循环神经网络是一种具有短期记忆能力的神经网络,能够检测扰动之间的时序相关性。徐子弘等^[37]为解决循环神经网络存在的梯度爆炸或消失的问题,采用门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)简化循环神经网络结构用于检测电缆初期故障。

4.2.3 深度生成模型(deep generative models, DGM)

深度生成模型是一种具有许多隐含层的神经网络,它被训练成使用大量样本逼近复杂的高维概率分布。电缆初期故障检测中应用的深度生成模型有自动编码器(auto-encoder, AE)和受限玻尔兹曼机(restricted boltzmann machine, RBM)2种,它们能够将输入的高维特征降维成低维的浅层特征。为避免自动编码器降维时直接输入原始波形维度过高,可以采用S变换^[38]、平稳小波变换(stationary wavelet transform, SWT)^[39]提取扰动信号初级特征,文献[39]中为提升对电流扰动信号的稀疏性和减小建模误差采用非负约束自编码器(non-negative constraint autoencoder, NCAE)。为进一步减少人为特征提取环节,自动编码器与受限玻尔兹曼机的组合算法^[40-41]可以实现输入原始扰动波形对特征进行直接提取,其中文献[41]中采用堆叠受限玻尔兹曼机形成深度信念网络(deep belief network, DBN)。上述检测算法均采用堆叠自动编码器(stacked auto-encoder, SAE)且在提取特征后均采用softmax分类器进行电缆初期故障识别,其中文献[40]表明仅降维处理时间就远大于扰动持续时间,算法运行速度提升有限。

4.2.4 小样本学习(few-shot learning, FSL)

类人概念学习(human-level concept learning, HLCL)^[42]是一种小样本学习方法,在较少的现场监测数据条件下可以自动学习扰动数据的结构特征,并通过特征组合形成不同的扰动波形,该方法扩展了扰动数据集,弥补了小数据集难以采用深度学习方法的缺点,但数据集由算法生成,数据集的可信度尚待验证。

人工智能检测方法能够实现电缆初期故障检测且具备较高的准确率,传统机器学习方法结构简单,分类器设计相对简单,但需要较多的先验知识;深度学习方法结构复杂,需要较少的先验知识,但分类器结构复杂。人工智能检测方法所需庞大的样本数据集和深度学习算法中海量的参数、复杂的结构使提出的检测算法不便实际应用,仅停留在理论验证阶段。目前的人工智能检测方法往往为提高检测精度而增加算法复杂程度,较少评价在相近算法复杂程度下的检测方法有效性。为便于人工智能检测方法实际应用,后续的研究需要在保持检测准确率的同时尽量减少输入特征参数,简化提取扰动参数流程。

不同人工智能方法的电缆初期故障检测方法如表1所示。

表1 不同人工智能检测方法比较

Table 1 Comparison of different artificial intelligence detection methods

文献	检测算法	特点	实现方式	有效性/%
[26]	DT	结构简单	离线仿真	
[28]	RF	结构简单	离线仿真	99.20
[29]	SVM	结构简单,适用少量计算	离线仿真	98.52
[30]	ST+SVM	结构简单,适用少量计算	离线仿真	86.00
[31]	PSO+SVM	结构简单,适用少量计算	离线仿真	85.58
[32]	SOM	结构简单	离线仿真	
[33]	PNN	结构简单	离线仿真	95.42
[34]	Adaline	结构简单	离线仿真	97.50
[35]	CNN	结构复杂	离线仿真	97.90

续表 1

文献	检测算法	特点	实现方式	有效性/%
[36]	VMD+CNN	结构复杂	离线仿真	96.10
[37]	AE+GRU	结构复杂	离线仿真	97.60
[38]	ST+SAE	结构复杂	离线仿真	98.80
[39]	SWT+NCAE	结构复杂	离线仿真	96.80
[40]	RBM+SAE	结构复杂	离线仿真	95.62
[41]	DBN	结构复杂	离线仿真	97.50
[42]	HLCL	结构复杂	离线仿真	95.84

5 电缆初期故障在线检测技术现状及展望

在电缆运行过程中,电缆初期故障现象仅出现在其生命周期末期,该现象频繁出现后,距离永久性故障往往只有数天到数周的时间,因此在线检测技术及时发现初期故障征兆具有重要的意义。在线检测往往需要多个或者多点同步数据的配合,目前获得多点电流电压同步信号已非技术难题,电缆初期故障产生的暂态电力扰动信号可由电压电流互感器、波形检测单元等信号采集装置获取^[43-44],并在线分析扰动数据及时检测扰动。下面针对现有尚不完善的电缆初期故障在线检测技术进行分析。

第 3、4 节综述的电缆初期故障检测方法中,由于算法复杂性的差异,大多数方法难以在检测到扰动的时刻,立即确定该扰动是否为电缆初期故障引发的电力扰动,而是需要进一步的分析,这将延迟故障检测的时间。其中文献[7]和[10]中提出的方法,可以在线实现。文献[7]中的方法通过仿真验证了算法的有效性,所提电流保护算法已经集成在专门的检测装置中,但未测试该方法对不同电流扰动的有效性。文献[10]中采用 2 种电流采集装置在线检测电缆中的过电流扰动,以超过负荷电流均方根 80% 的电流值为阈值,采集的电流扰动数据中还包含涌流扰动,该方法可通过电缆次周期电流扰动与涌流的过流时间差异区分扰动。

此外,文献[45-48]中提出的方法均具有一定在线实现的优势,但因为仅对扰动信号来源识别,或者算法复杂,或对数据采样精度要求极高,实现电缆初期故障的在线检测尚有难度。

总之,电缆初期故障在线检测理论上可以实现,主要问题是与其他扰动的区分,这需要对电缆初期故障扰动的细节进行研究,找出与电力系统中其他扰动之间的差异。研究电缆初期故障的机理和模型是解决该问题的有效途径。

另外,目前尚未见报道电缆初期故障定位的研究内容,电缆初期故障定位对提高初期故障位置查找具有重要的意义。该方面研究也需要有效的电缆初期故障模型,研究初期故障扰动在电缆上的传播特征,以便建立故障点与数据监测点之间的关联。

根据上述对电缆初期故障电力扰动特征及检测方法的综述和分析,可见现有检测技术尚无法满足要求。主要问题和进一步的研究建议如下。

1) 深入和全面的实验研究和机理分析

电缆初期故障检测研究的数据主要为少量现场监测数据、大量仿真数据,采用的研究主要依靠仿真,但现有的电缆初期故障模型并不能完整描述电缆初期故障。现场数据集需要长期监测电缆运行中的电压电流数据,获取数据存在周期长、效率低且可能难以获得等问题;而采用实验方式获取数据是快速、便捷的有效手段,能够模拟电缆运行中的各种环境状态和电缆绝缘缺陷的发展过程。通过大量试验数据分析电力扰动数据特征,并结合现场监测数据,有助于更加全面地认识电缆初期故障。

2) 研究中高压电力电缆局部缺陷形成的暂态电力扰动特征

大部分现场得到的实测波形为电流波形,电压波形较少,而电压波形由于受到系统和电缆参数的影响,扰动发生点与监测点的波形特征可能存在极大的差异,对进一步分析扰动特征量造成困难;由于无法获得扰动发生点的原始扰动波形,对研究分析扰动在系统中的传播也造成困难,而且对验证检测方法的有效性也形成障碍。这需要结合试验的就地电压波形及电力系统中的各设备参数进行关联分析,研究电压沿电缆线路

的传递规律,研究暂态电力扰动在电力系统中的影响因素。

3) 电缆初期故障定位研究

电缆初期故障准确定位是急需进一步研究的重要问题。电力电缆由于其隐蔽敷设的特点,故障点寻找相对耗时且维护困难。重复的初期故障显现时,已经到了电缆即将永久故障阶段,因此准确的故障检测及定位,对降低电缆永久故障造成的非计划停电概率有非常重要的作用。

4) 建立电缆运行中扰动数据的长期在线监测系统

电缆初期故障是永久性故障的先兆,但目前多数电缆研究仅在电缆故障后展开,对绝缘缺陷导致的暂态电力扰动特征关注程度不足,不能达到早期预警的目的。建立在线监测系统能够获取现场数据,可以深入认识暂态扰动现象,有利于在后续研究中将在线监测系统转换为在线检测系统,为检测方法实际应用创造有利的前提条件,同时结合电缆初期故障定位形成完善的电缆初期故障诊断系统,这将形成新的电缆绝缘状态在线监测体系。

6 结 论

电缆初期故障产生的暂态电力扰动表明电缆绝缘即将完全损坏,及时对绝缘状态预警可以预防发生永久性故障。电缆初期故障检测技术以电压电流扰动特征为检测依据,目前提出的检测方法能够解决一部分理论问题,但仍存在检测算法复杂、在线实现困难的问题。当电缆初期故障检测技术的实用性研究取得进展后,基于暂态电力扰动的电缆绝缘缺陷检测方法有望成为一种新型电缆绝缘状态在线监测手段。

参考文献

- [1] 赵爱华,李伟,叶剑涛,等. 超声波局部放电检测法在电缆终端中的应用[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(6): 112-118.
Zhao A H, Li W, Ye J T, et al. Application of ultrasonic detection for partial discharge to cable terminals [J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(6): 112-118. (in Chinese)
- [2] 王昱皓,周凯,汪先进,等. 基于改进时频域反射法的电力电缆局部缺陷定位[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2584-2594.
Wang Y H, Zhou K, Wang X J, et al. Power cable defects location based on improved time-frequency domain reflectometry [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2584-2594. (in Chinese)
- [3] Kojovic L A, Williams C W Jr. Sub-cycle overcurrent protection for self-clearing faults due to insulation breakdown [C]//52 Annual Texas A&M Relay Conference. 1999: 1-12.
- [4] Stringer N T, Kojovic L A. Prevention of underground cable splice failures[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 230-239.
- [5] Pickett B, Elkin P, Benner C, et al. Reducing outages through improved protection, monitoring, diagnostics, and autorestitution in transmission substations(69 kV and above) [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1327-1334.
- [6] Kulkarni S, Allen A J, Chopra S, et al. Waveform characteristics of underground cable failures [C]//IEEE PES General Meeting. IEEE, 2010: 1-8.
- [7] Kasztenny B, Voloh I, Jones C G, et al. Detection of incipient faults in underground medium voltage cables [C]//2008 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers. IEEE, 2008: 349-366.
- [8] Moghe R, Mousavi M J, Stoupis J, et al. Field investigation and analysis of incipient faults leading to a catastrophic failure in an underground distribution feeder [C]//2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. IEEE, 2009: 1-6.
- [9] Hamel A, Gaudreau A, Cote M. Intermittent arcing fault on underground low-voltage cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1862-1868.
- [10] Deursen A V, Wouters P, Steennis F. Corrosion in low-voltage distribution networks and perspectives for online condition monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1423-1431.
- [11] Rowland S M, Wang M. Fault development in wet, low voltage, oil-impregnated paper insulated cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 484-491.
- [12] Naseri F, Ghanbari T, Farjah E. Incipient fault monitoring of medium voltage UD-EPR power cable using Rogowski coil [C]//2015 International Congress on Electric Industry Automation. IEEE, 2015: 33-36.
- [13] 姚海燕,张静,留毅,等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制,

- 2015, 43(9): 115-123.
- Yao H Y, Zhang J, Liu Y, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association [J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(9): 115-123. (in Chinese).
- [14] Huang M, Wu Q, Han X, et al. Detection of incipient faults in distribution cables based on mathematical morphology [C]//2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). IEEE, 2019: 1-6.
- [15] Sidhu T S, Xu Z. Detection of incipient faults in distribution underground cables [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(3): 1363-1371.
- [16] Ghanbari T. Kalman filter based incipient fault detection method for underground cables [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(14): 1988-1997.
- [17] Samet H, Tajdinian M, Khaleghian S, et al. A statistical-based criterion for incipient fault detection in underground power cables established on voltage waveform characteristics [J]. *Electric Power Systems Research*, 2021, 197: 107303.
- [18] Samet H, Khaleghian S, Tajdinian M, et al. A similarity-based framework for incipient fault detection in underground power cables [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 133: 107309.
- [19] Zhang W, Xiao X, Zhou K, et al. Multicycle incipient fault detection and location for medium voltage underground cable [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(3): 1450-1459.
- [20] 胡婧, 周洋. 基于零序电压小波变换的小电流接地系统电缆早期故障检测[J]. *内蒙古电力技术*, 2021, 39(2): 1-6.
- Hu J, Zhou Y. Cable incipient fault detection for non-solidly grounding system based on zero sequence voltage wavelet transform [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2021, 39(2): 1-6. (in Chinese).
- [21] 楚恬歆, 张文海, 瞿科, 等. 基于复合判据的小电流接地系统接地型早期故障检测[J]. *高电压技术*, 2022, 48(3): 1022-1031.
- Chu T X, Zhang W H, Qu K, et al. Grounded incipient fault detection based on compound criterion in non-solidly grounding system [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(3): 1022-1031. (in Chinese)
- [22] 瞿科, 张文海, 肖先勇, 等. 基于波形衰减因子的电缆接头绝缘早期故障状态监测[J]. *高电压技术*, 2022, 48(1): 318-327.
- Qu K, Zhang W H, Xiao X Y, et al. Condition monitoring for incipient faults of cable joint insulation based on waveform attenuation factor [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(1): 318-327. (in Chinese)
- [23] Kim C J, Lee S J, Kang S H. Evaluation of feeder monitoring parameters for incipient fault detection using laplace trend statistic [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(6): 1718-1724.
- [24] Moghe R, Mousavi M J. Trend analysis techniques for incipient fault prediction [C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2009: 1-8.
- [25] Mousavi M J, Butler-Purry K L. Detecting incipient faults via numerical modeling and statistical change detection [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(3): 1275-1283.
- [26] Almalki M M, Hatziaodoniu C J. Classification of many abnormal events in radial distribution feeders using the complex morlet wavelet and decision trees [J]. *Energies*, 2018, 11(3): 546.
- [27] Mishra S, Swain S C, Naik N B. Tree based incipient fault identification in underground cable [C]//2021 5th International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology. IEEE, 2021: 1-4.
- [28] 李胜辉, 白雪, 董鹤楠, 等. 基于平稳小波变换与随机森林的电缆早期故障识别方法[J]. *电工电能新技术*, 2020, 39(3): 40-48.
- Li S H, Bai X, Dong H N, et al. Cable incipient fault identification based on stationary wavelet transform and random forest [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2020, 39(3): 40-48. (in Chinese).
- [29] Mousavi M J, Butler-Purry K L. A novel condition assessment system for underground distribution applications[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(3): 1115-1125.
- [30] Faisal M F, Mohamed A, Shareef H. Prediction of incipient faults in underground power cables utilizing S-transform and support vector regression[J]. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2012, 4(2): 186-201.
- [31] Chang G W, Hong Y H, Li G Y. A hybrid intelligent approach for classification of incipient faults in transmission network [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(4): 1785-1794.
- [32] Butler-Purry K L, Cardoso J. Characterization of underground cable incipient behavior using time-frequency multi-resolution analysis and artificial neural networks [C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. IEEE, 2008: 1-11.
- [33] 戴铭. 10kV 地下电缆早期故障检测与识别方法探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- Dai M. Discussion methods of incipient fault detection and identification in 10kV underground cables [D]. Chengdu:

Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

- [34] Jannati M, Vahidi B, Hosseinian S H. Incipient faults monitoring in underground medium voltage cables of distribution systems based on a two-step strategy[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(4): 1647-1655.
- [35] 汪颖, 孙建风, 肖先勇, 等. 基于优化卷积神经网络的电缆早期故障分类识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(7): 10-18.
Wang Y, Sun J F, Xiao X Y, et al. Cable incipient fault classification and identification based on optimized convolution neural network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(7): 10-18. (in Chinese).
- [36] Deng J, Zhang W, Yang X. Recognition and classification of incipient cable failures based on variational mode decomposition and a convolutional neural network[J]. *Energies*, 2019, 12(10): 2005.
- [37] 徐子弘, 季天瑶, 邓伟民, 等. 基于AE和GRU神经网络的电缆早期故障检测和识别方法[J]. *广东电力*, 2020, 33(9): 27-34.
Xu Z H, Ji T Y, Deng W M, et al. Detection and identification of cable incipient fault based on autoencoder and GRU neural network [J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(9): 27-34. (in Chinese).
- [38] 汪颖, 卢宏, 杨晓梅, 等. 堆叠自动编码器与S变换相结合的电缆早期故障识别方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(8): 117-124.
Wang Y, Lu H, Yang X M, et al. Cable incipient fault identification based on stacked autoencoder and S-transform [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(8): 117-124. (in Chinese).
- [39] 邵宝珠, 李胜辉, 白雪, 等. 非负约束自动编码器在电缆早期故障识别中的应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 16-23.
Shao B Z, Li S H, Bai X, et al. Application of nonnegative constraint autoencoder in cable incipient fault identification [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 16-23. (in Chinese).
- [40] Wang Y, Lu H, Xiao X, et al. Cable incipient fault identification using restricted Boltzmann machine and stacked autoencoder [J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2020, 14(7): 1242-1250.
- [41] Liu N, Fan B, Xiao X, et al. Cable incipient fault identification with a sparse autoencoder and a deep belief network [J]. *Energies*, 2019, 12(18): 3424.
- [42] Xiong S, Liu Y, Fang J, et al. Incipient fault identification in power distribution systems via human-level concept learning [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 5239-5248.
- [43] Xu W, Huang Z, Xie X, et al. Synchronized waveforms – a frontier of data-based power system and apparatus monitoring, protection and control [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(1): 3-17.
- [44] Izadi M, Mohsenian-Rad H. Synchronous waveform measurements to locate transient events and incipient faults in power distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 4295-4307.
- [45] Yang L. Fault location system for radial MV underground distribution cable networks [C]//2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). IEEE, 2018: 1-6.
- [46] Shi S, Hu Z, Ma Z, et al. Travelling waves-based identification of sub-health condition of feeders in power distribution system [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(5): 1067-1073.
- [47] Zhang C, Kang X, Ma X, et al. On-line incipient faults detection in underground cables based on single-end sheath currents [C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2016: 795-799.
- [48] Cui T, Dong X, Bo Z, et al. Hilbert-transform-based transient/intermittent earth fault detection in noneffectively grounded distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(1): 143-151.

(编辑 罗 敏)