

电力电缆状态感知与检测技术研究综述

吴春芳¹, 陈云^{2,3}, 黄韬², 肖佳朋², 王超¹, 甄威扬¹, 陈彦文²,
成延庭², 赵鹏², 郝艳捧²

(1. 广东电网有限责任公司江门供电局, 广东 江门 529000; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510641;
3. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 电力电缆是电力系统中的重要设备, 电缆的运行状态关系到输配电系统的安全可靠运行。电缆状态检测技术指根据电缆运行状态的历史数据, 综合运用停电试验、带电检测、在线监测等技术对电缆状态量进行智能感知, 为电缆运行性能综合评估提供关键参考信息。文中综述了近年关于电缆状态感知及检测技术的国内外研究现状, 分别从温度、载流量、局部放电、受潮、应变/振动和接地电流等状态量进行评述, 阐明了不同状态量的检测原理, 介绍了目前电缆状态检测技术研究及实践中的应用情况和发展水平, 并探讨电缆状态检测技术的主要发展趋势。

关键词: 电力电缆; 运行状态; 状态量; 停电试验; 带电检测; 在线监测; 温度; 载流量; 局部放电; 受潮; 应变/振动; 接地电流

Overview of Condition Sensing and Detection Technology for Power Cables

WU Chunfang¹, CHEN Yun^{2,3}, HUANG Tao², XIAO Jiapeng², WANG Chao¹, ZHEN Weiyang¹,
CHEN Yanwen², CHENG Yanting², ZHAO Peng², HAO Yanpeng²

(1. Jiangmen Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Jiangmen 529000, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Power cable is an important equipment in power systems and its operation conditions are related to safe and reliable operation of transmission and distribution system. The condition detection technology of cable refers to intelligent perception of cable in accordance with the historical data of operation conditions of cable and comprehensive application of such technologies as power off test, live test and online monitoring detection so to provide key reference information for the comprehensive assessment of operating performance of cable. In this paper, the research status of condition sensing and detection technology of cable at home and abroad in recent years are reviewed, such conditions as temperature, ampacity, partial discharge, moisture, strain/vibration and earth current are described respectively and the detection principles of different conditions are explained, the application and development level of condition detection technology of cable in research and practice are described and the main development trend of cable condition detection technology are discussed.

Key words: power cable; operating condition; condition; power off test; live test; online monitoring; temperature; ampacity; partial discharge; moisture; strain/vibration; earth current

0 引言

“十三五”期间, 中国城镇化率和经济发展总量逐年提升, 光伏、风电等新能源、“一带一路”建设、

智能制造产业加快发展, 促进了中国特高压坚强电网的快速建设与优化发展。电力电缆作为能源输送的重要电力设备, 安全、可靠、布线美观^[1], 电网建设的“长距离、大范围、高容量、高电压”格局将进

收稿日期: 2024-05-12; 修回日期: 2024-07-21

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(030700KK52180147)。

Project Supported by Science & Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd.(030700KK52180147).

一步带动电缆使用量的快速增长。此外,随着中国海上风电的快速发展,对高压电缆尤其是海底电缆的需求呈“井喷”状态^[2]。截至2020年底,国家电网公司在运110 kV及以上电缆34 195 km,6~20 kV电缆线路82.1万km。其中,交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)绝缘电缆由于电气、机械和理化性能优秀,迅速受到世界各国电缆生产商和电力供应部门的广泛关注^[3]。据统计,我国XLPE电缆保有量占比高达99%^[4]。

国家发改委和能源局颁发的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》和《能源技术革命重点创新行动路线图》中多处提及,重点发展电力电缆等先进输变电装备技术、电力设备在线监测/检测先进传感技术,并加强电网大面积停电的在线/实时预警和评估技术研究。2021年是“十四五”规划开局之年,要提升电力安全保障能力,推动电力绿色转型升级,大力促进技术创新。在此背景下,电力电缆状态感知和检测技术成为亟待解决的重要课题。

XLPE电缆设计寿命一般为30~40年。但电缆在长期运行中不断受到电、热、机械和环境等应力作用;其次,中间接头和终端绝缘结构较薄弱,在生产、安装、维修过程中可能出现缺陷^[5-6]。在上述因素的单一或协同作用下,电缆绝缘逐渐老化、劣化,极易发生故障,极大影响其长期使用可靠性。2020年美国阿雷西博射电望远镜坍塌、2006年欧洲大停电、2003年美国东北部、加拿大大停电,均与电缆故障相关。另一方面,电网电缆化率持续攀升,地下电缆通道资源越发紧张,大面积停电风险依然存在。能源局和中电联联合发布的《2019年度全国电力可靠性指标》指出,电缆线路是纳入可靠性管理的输变电设施之一,但2019年全国供电可靠性仍然呈现不均衡态势。电缆破坏后,修复难度大,抢修时间长。因此,提高电缆运行可靠性对防御电网大面积停电和防患安全事故发生至关重要。

在长期运行过程中,电缆运行状态可反映不同状态量,如接头导体压接不良或周围环境引起的过热故障可用异常温升表示;金属护层、铠装等明显弯曲、过度拉伸、变形、破损等表示可能受到机械力损坏;局部放电(partial discharge, PD)对绝缘缺陷尤为敏感;交叉互联接地箱进水、外护层破损等会引起护层接地电流过高;绝缘电阻和介质损耗可表征绝缘损耗、受潮等^[7-9]。因此开展电缆状态感知与检测工作,获取电缆运行状态特征量,有效发现电缆线路潜伏性运行隐患,对于实现电缆故障预防和状态评估具有重要意义。

随着电缆应用范围越来越广,巡检维护量增大,电缆状态感知不能满足智能电网、能源互联网的发展要求。传感技术是智能电网基础技术之一,传感器在恶劣环境和强电磁场下有易受电磁干扰、数据采集和传输可靠性低等技术瓶颈。光波在光纤中传播时,表征光波的特征参量如波长、相位、偏振态、振幅等发生变化,光纤传感技术通过测量这些变化量,获取外界信息如电压、电流、温度、湿度、应变等,实现电缆状态检测和诊断,具有无源、本征绝缘、耐受高电压、抗电磁干扰、灵敏度高、测量精度高等优点,此外,光纤体积小、耐腐蚀、结构紧凑,便于内置安装到电力设备内部,同时还可实现长距离、分布式或准分布式、多参量在线检测^[10],受到学者们广泛关注。

近年来针对电缆状态感知与检测技术的相关成果大量涌现,而现有专门的综述年限较长,缺乏较全面、系统的梳理。因此,文中充分总结了电缆常见运行状态量,分为温度、局部放电、受潮、应变/振动和接地电流等,阐述了不同状态量的检测原理,综述了电缆状态检测技术的特点,探讨了各种检测技术在实验研究和工程实际的相关发展及重要成果,展望了未来研究方向。文中可清晰反映当前研究成果,更有效地引导今后该领域发展。

1 电缆运行状态与状态检测技术

电缆线路由电缆本体、附件、附属设备和附属设施等构成。其附件包含中间接头和终端等;附属设备包括接地系统和交叉互联系统等;附属设施包括电缆隧道、电缆井、排管和电缆沟等^[11]。中、高压电缆分别以三芯统包和单芯XLPE电缆为主,主绝缘系统一般使用“导体屏蔽—绝缘—绝缘屏蔽”3层共挤结构,内、外半导体层主要用以均化电场。

1.1 电缆运行状态与状态量

根据国际大电网(CIGRE) WG B1.10和标准Q/GDW 456—2010,电缆运行状态指电缆线路运行时的健康状况,分为正常、注意、异常和严重4种类型。电缆线路出现非正常状态的可能原因包括故障、缺陷或老化;其中,故障指电缆线路无法正常运行,包括接地、短路、断线等;缺陷指电缆线路不满足设计要求,但能继续运行,须采取测试或检修措施,主要有材料质量缺陷如气隙、杂质、尖刺、应力锥错位等,设计制作缺陷如附件设计不合理、电场分布不均匀等,以及外力缺陷如碰撞、挤压造成电缆外护层与金属护层受损、变形等;老化指电缆材料在各种应力作用下,其性能发生的不可逆变化,

如热老化、机械老化、电老化等^[12-13]。

状态量指直接或间接反映电缆运行状态、性能的各类技术参数的总称,视状态量对电缆线路安全运行的影响程度,从轻到重分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ 4个等级^[14-16]。电缆线路常见状态量及其异常状态影响因素^[13,16-18]见表1。

表1 电缆线路常见状态量及其异常状态影响因素

Table 1 Common condition indicators and its influencing factors of abnormal condition for cable lines

状态量	异常状态影响因素
温度	导体电阻过大或相间绝缘电阻较小
	过电压、较大冲击电流
	负荷重载或超载
	附件连接不良造成接触电阻过大,温度/温差/温升异常
	高阻故障导致泄漏电流增大、损耗增加
	受潮导致绝缘损坏、绝缘电阻降低
	电缆沟严重超容或安装时排列过密,通风散热不好
局部放电	土壤热阻系数变化
	火灾、周围环境恶劣
	绝缘缺陷如气隙、导电尖端、刀痕等
	绝缘老化形成电树枝
	负荷过大或电压(耐受电压、过电压)过高
受潮	终端外绝缘爬距不满足要求
	电缆工作井/电缆沟/排管井等积水
	电缆未采用阻水结构
	制造生产工艺不精导致护层破裂
	运输、贮藏封闭不严,附件密封性不够
应变/振动	使用中护层被物体刺穿或受腐蚀
	地面运动引发内部机械应力
	环境温度变化引发热应力
	施工引起机械损伤
	水底电缆保护区内有水下作业或船只弃锚
接地电流	附件铅封开裂、护层变形破损
	电缆盗窃
	外护层破损
	接地不良或被盗
	箱体进水
腐蚀	箱体接触不良、连接线连接不良
	护层保护器性能下降
	铜屏蔽层锈蚀,其电阻和导体电阻比增大
	辅助设施锈蚀
	电缆沟体堆积酸碱性物质
污秽	生物腐蚀
	终端头严重积污

1.2 电缆状态检测技术

状态检测指利用红外、局部放电和接地电流检测等技术手段综合评估并诊断电缆的运行状况、绝缘老化和工艺缺陷等潜伏性故障^[19-20]。电缆状态检测技术根据检测时电缆的运行状态,分为在线法和离线法,在线法又细分为带电检测和在线监测。带电检测指采用便携设备对运行状态下的电缆状态量进行短时间、现场检测,自动化和智能化程度不高;而在线监测则对电缆进行连续或周期性的自动监视,但对传感器和检测设备的可靠性要求较高,且干扰多,难以有效排除,目前大多数在线监测技术无判断标准。离线法通过定期评估获得电缆状态,对传感器可靠性要求不高,通过定校可保证检测设备可靠性,干扰少,但检测时线路需停电,时效性较差^[21-22]。

CIGRE WG B1.29统计了电缆线路状态检测技术,包括温度检测、局部放电检测、耐压试验、接地电流检测、绝缘介质理化分析等,见表2^[23]。

2 温度检测

在电缆运行过程中,若电缆线路过载、接头接触电阻增大、电缆绝缘水平下降,导致泄漏电流增大,损耗增加,均会使电缆温度急剧升高,加快电缆绝缘老化,甚至引发热击穿。因此,温度升高是引起电缆线路非正常运行状态的重要因素,可将温度作为表征电缆线路运行情况的重要参量^[7]。

温度检测主要基于传感系统获取与温度特性有关的信息。目前国内外电缆测温技术可分为电信号测温、红外测温、光纤测温和无源无线测温等^[24]。电信号测温技术非常成熟,如热电偶将温度信号反映为热效应信号,热敏电阻将温度变化转换为自身阻值变化,具有结构简单、灵敏度高、成本低等优点,但防电磁干扰和电气隔离措施较难实现,可靠性不高。

2.1 红外测温

常见的红外测温系统为红外测温仪或红外热像仪,其原理为通过测量发热物体产生红外辐射的能量大小及其按波长的分布,得到物体表面温度。辐射功率与温度的关系为^[25]

$$P_b(\lambda T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad (1)$$

式(1)中: P_b 为光谱辐射通量密度; λ 为光谱辐射波长; T 为待测物体温度; c_1 、 c_2 为辐射常数。

红外测温为非接触、实时可见的测温技术,但其设备价格昂贵,测量精度受中间介质影响大,较难准确反映电缆绝缘内部温度分布,且由于辐射率

表2 电缆线路状态检测技术

Table 2 Condition detection technology of cable lines

状态检测技术	检测对象	检测原因	在线/离线	检测频率
目测(红外光)	终端、非直埋接头	可能的热温点	在线	每5年
光纤	电缆、接头	温度速率过快	离线/在线	连续
局部放电检测	终端、非直埋接头	安装失误,界面接触压力小,主绝缘收缩,绝缘液体污染,气体老化或泄漏,绝缘子开裂	离线/在线	必要时
高压试验(AC、VLF等)	终端、非直埋接头	主绝缘/应力锥/界面缺陷	离线	必要时
接地电流/护层环流	电缆、接头	三相不平衡、绝缘电阻过低等	离线/在线	连续
介质损耗角试验	终端、非直埋接头	主绝缘进水	离线	必要时
绝缘液理化分析如DGA、tanδ、含水量、颗粒	终端、液体填充非直埋接头	内部绝缘液污染	离线	每年
X-ray	终端、非直埋接头	电缆移动	离线	必要时
目测(可见光、紫外光)	终端、非直埋接头	表面污染,机械损伤,电缆移动,腐蚀,动物咬蚀,泄漏,户外绝缘子开裂等	在线	每年
泄漏电流检测	终端	绝缘子表面污染、开裂或损伤	在线	每年
表面受潮特征	终端	户外聚合物绝缘子表面污染	离线	必要时
目测	接地、交叉互联箱	连接箱进水,复合绝缘状态,连接布置	离线	每年
护层电压限制器电压检测	接地、交叉互联箱	额定运行电压下护层电压限制器故障	离线	必要时
接地系统电阻检测	辅助设施	接地回路的完整性	离线	每年
液体/气体压强连续监测	辅助设施	液体/气体压强下降	在线	连续
定期维护及校准	辅助设施	终端内绝缘液体/气体泄漏	在线	每年
SF ₆ 嗅探器或摄像头	辅助设施	终端内绝缘液体/气体泄漏	在线	每年
液体/气体检测设备的检测	辅助设施	检测绝缘液体/气体压强报警设置及报警信号	离线	每年

可变,测量地下电缆时误差较大,不适合长距离在线监测^[24,26]。

标准 Q/GDW 11223—2014 和 Q/GDW11316—2014 分别针对 35~500 kV 交流电缆线路和 10~500 kV XLPE 电缆线路,规定巡检试验时对电缆线路中具有电流、电压或其他致热效应的部位进行温度检测,电缆导体、金属护层与外部金属连接的同部位相间温差超过 6 K 应增强监测,超过 10 K 应停电检查,而终端、接头本体同部位相间温差超过 2 K 应增强监测,超过 4 K 应停电检查^[19,27]。

2.2 光纤光栅测温

光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)为典型波长调制型传感器。当入射光波(宽带光)传输到光栅处,光栅将选择性反射一中心波长为bragg波长的窄带光。若光栅温度和应变发生变化,由于光纤热胀冷缩及热光效应,芯层有效折射率和光栅条纹周期产生变化,bragg波长随之而变,表示为^[28]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$
 (2)

式(2)中: λ_B 为 bragg 波长; n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅条纹周期。

FBG 不仅具备普通光纤温度传感器的优点,而且其传感信号为波长调制,因此测量信号不受光源

起伏、光纤损耗等因素影响^[29]。但其仅能测量单个具体位置点的温度信息,无法测量大范围区域温度,限制了实际应用发展。FBG 准分布式传感系统将多个点式 FBG 以串联或其他网络结构形式组合连接起来,利用空分复用、时分复用、波分复用等技术,可实现长距离、大范围、多点测量^[30]。在应用中,FBG 还需考虑封装、温度和压力交叉敏感的消除等因素^[31]。

江苏电科院开发的 FBG 电缆在线测温系统范围-55~125 ℃、所有监测点测量时间<1 s、测温精度 0.5 ℃、分辨率 0.1 ℃、光纤传输距离>45 km,其应用在南京供电公司 110 kV 变电站,运行情况优良,测温数据真实可靠^[32]。武汉理工大学优化设计了 FBG 封装,并将其安装在 220 kV 电缆上进行一年现场试验,结果显示优化后的 FBG 测温技术可靠、误差小、响应时间短、可实现长距离测量^[31]。中科院半导体研究所研制的 FBG 单温度传感器精度 0.1 ℃,测温范围 0~35 ℃,灵敏度 30 pm/℃;之后研制的 FBG 温度和压力传感器测温精度可达 0.01 ℃,压力精度 0.1%^[33]。

2.3 分布式光纤测温

分布式光纤测温 (distributed temperature

sensing, DTS)技术只需完成一次测量便可得到整条电缆成千成万个独立测量点的温度信息,真正实现连续监测及全线检测,相比FBG测温性价比更高。

2.3.1 测温光纤布置方式

光纤在电缆中的布置方式是DTS应用实现的关键点,需考虑光纤传感效果、对电缆的影响以及工艺可行性等问题。测温光纤通过敷设在电缆表面(外置式)或内置在电缆中(内置式)^[26,34-36],实现对电缆和环境温度的实时监测,见表3。

表3 测温光纤布置方式

Table 3 The arrangement of temperature sensing fibers

电缆系统	测温光纤布置方式	文献
本体	外置式	
	沿外表面轴向布置	[26, 36-37]
	缠绕外表面螺旋布置	[30, 34-35, 38]
	阻水带间	[34-35, 39-40]
	内置式	
	外半导体层外表面	[35, 41]
	分割导体中央	[42]
	海缆专门测温层	[41]
	接头导体连接管外接头盒接续	[43-44]
	中间接头	
终端	锥形连接管中部通孔引出,连接管与屏蔽罩间接续	[45]
	分割导体引入,套管下密封板引出孔穿出	[41]
	终端内部绝缘油穿过,地电位的光缆通道穿出	[46]

内置式是在生产时将光纤置于电缆结构层中,见图1^[35],直接测量电缆内部温度,不受环境影响,测量精度高,实时性好;其在国内外电缆厂商中已有成熟制造技术^[36]。外置式适合将要敷设的电缆使用^[26],主要有2种方式,一种沿着电缆外表面轴向布置,光纤传感距离和电缆长度一致,布置方便;另一种绕着电缆外表面螺旋布置,光纤传感距离大于电缆长度,更有利于温度监测空间定位,但布置较繁琐。

附件是电缆的薄弱部位,也是测温的关键环节。中间接头主要关注接头内接续问题;终端既是电缆系统末端,也是测温光纤从高电位至低电位的引出点,主要关注引出方式。光纤引入引出方法的安全性和可实施性有待进一步研究。

2.3.2 光纤散射效应

光在光纤中传播时,散射光类型有瑞利散射(Rayleigh scattering, RLS)、拉曼散射(Raman scattering, RMS)和布里渊散射(Brillouin scattering, BS)^[10, 47]。DTS基于光纤散射效应,可在光时域反射

(optical time domain reflectometer, OTDR)或光频域反射(optical frequency domain reflectometer, OFDR)进行^[10]。

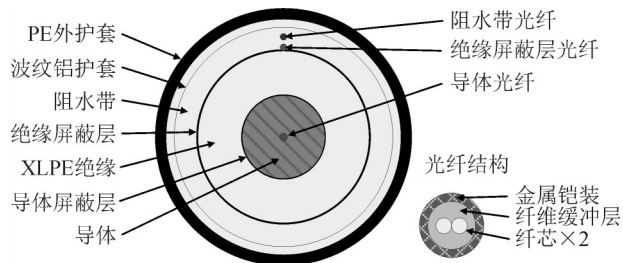


图1 110 kV XLPE 光纤复合电缆结构图

Fig. 1 Structure diagram of the 110 kV XLPE optical fiber composite cable

1)RLS由光纤折射率变化引起,对振动敏感,通过检测振动前后RLS光信号相位、强度变化获得外部振动和晃动事件的相关信息。RLS主要用于光纤线路损耗、接续点、断点测量、故障定位和振动检测^[48-49]。

2)RMS是基于光学声子的散射光,对温度敏感。当入射光进入光纤后,由于光纤芯层折射率不均匀,入射光子与散射介质分子相互作用并放出或吸收一个与分子振动相关的高频声子,称为斯托克斯光(Stokes)或反斯托克斯光(Anti-Stokes)。通过检测RMS的Anti-Stokes光强与Stokes光强的变化,获取温度信息可表示为^[50]

$$\frac{I_{as}}{I_s} \propto \exp(hc\sigma/kT) \quad (3)$$

式(3)中: I_{as} 、 I_s 分别为Anti-Stokes和Stokes光强; h 为普朗克常数; c 为真空中光速; k 为波尔兹曼常数; σ 为波数; T 为绝对温度。根据光在光纤中的传播速率和RMS光返程时间可对温度点进行定位。

基于RMS的DTS技术(如ROTDR和ROFDR)已较为成熟,结构简单,应用最为广泛^[24, 51]。但RMS信号强度较弱,传感范围小。该技术若使用多模光纤,损耗较大,特别是模间色散引入脉冲展宽致使长距离传感空间分辨率不够,限制了光纤传感距离以及和通讯光纤的功能合并;若使用单模光纤,有效模场面积较小,且系统复杂、成本较高。近年来学者们研制了少模光纤,其模场面积较大、模间色散较小,可保证高空间分辨率并延长测温距离^[52]。

3)BS是基于声学声子的散射光,对温度和应力敏感。BS和注入光的频率差称为布里渊频移(Brillouin frequency shift, BFS)。BFS与温度或应变变化存在线性关系表示为^[53]

$$v_B = C_{vBT} \cdot \Delta T + C_{vBe} \cdot \Delta \varepsilon + v_{B0} \quad (4)$$

式(4)中: v_B 是BFS; C_{vBT} 和 C_{vBe} 分别是光纤温度

和应变系数; ΔT 和 $\Delta \varepsilon$ 分别是传感点温度和应变变化量; v_{B0} 是参考温度 T_0 下的 BFS。

基于 BS 的 DTS 系统(如 BOTDR)获得了持续关注和广泛应用^[54-55]。BS 光强度远大于 RMS, 适合监测长距离光纤沿线的温度和受力情况, 仅需使用单模光纤^[56], 不影响光纤通信, 但单一信道无法同时测量多维度、多参量, 且温度、应力存在交叉敏感, 研制具有空分复用特性的异质多芯^[57]、少模^[58] 光纤可解决上述问题。

2.3.3 发展和应用

武汉高压研究院研制 ROFDR 装置, 可满足 ≥ 110 kV、15 km 电缆表面温度在线检测技术要求, 其测温范围 $-30 \sim 120$ $^{\circ}\text{C}$, 精度 ± 1.5 $^{\circ}\text{C}$, 分辨率 1 m, 并先后在杭州、北京、厦门等供电公司超过 50 条 220 kV 电缆线路投入运行^[59]。多家电力公司、电厂等也相继应用 DTS 系统^[24, 36]。

DTS 长距离监测技术逐步成熟, 其联合应力监测功能并应用于海缆成为发展方向^[8, 60]。福建 110 kV 光电复合海缆利用光纤散射原理监测海缆运行过程中振动、温度和应变等情况, 检测距离 40 km; 基于 RLS 的振动监测系统振动频率范围 1~10 kHz, 定位精度 10 m; 基于 RMS 的温度监测系统测温范围 $-10 \sim 200$ $^{\circ}\text{C}$, 分辨率 1 $^{\circ}\text{C}$, 空间分辨率 2 m,

故障定位精度 1 m; 基于 BS 的应变监测系统应变精度 ± 20 $\mu\varepsilon$, 应变分辨率 ± 10 $\mu\varepsilon$, 故障定位精度 5 m^[61]。南澳 ± 160 kV 直流海缆工程综合利用 Φ -OTDR(基于 RLS 的相位敏感 OTDR), ROTDR 和 BOTDA(受激布里渊光时域分析)技术, 其中 Φ -OTDR 系统定位精度 50 m; ROTDR 系统定位精度为 1 m, 温度分辨率为 0.1 $^{\circ}\text{C}$, 精度 ≤ 1 $^{\circ}\text{C}$; BOTDA 系统应变精度 ± 20 $\mu\varepsilon$, 分辨率 ± 4 $\mu\varepsilon$ ^[62]。

实验室方面, 华南理工大学在电缆水循环环境中开展加载电流的电缆升温试验, 将基于 BOTDR 的光纤测温结果与热电偶对比, 试验布置示意图见图 2。结果表明, 在外半导体层表面和阻水带间植入光纤可行, 而导体光纤易受机械损伤^[34]。加拿大 Bao X. 等指出超过 2 km 传感长度的 BOTDR 最高空间分辨率 2 cm, 最长传感长度 150 km, 空间分辨率 2 m, 温度分辨率 1 $^{\circ}\text{C}$ ^[54]。加拿大 Victor L. 等研制的 BOTDR 的温度和应力灵敏度比普通光纤提升 6 倍, 分别达 7 MHz/ $^{\circ}\text{C}$ 和 0.3 MHz/ $\mu\varepsilon$ ^[53]; 此后该团队又改进了 BOTDR, 温度应力灵敏度达 4 MHz/ $^{\circ}\text{C}$ ^[63]。印度 Ukil A. 等指出典型 DTS 技术指标为测试长度 30 km, 测温精度 ± 1 $^{\circ}\text{C}$, 分辨率 0.01 $^{\circ}\text{C}$, 空间分辨率 1 m; BOTDR 可实现测量水平 100 km, 测温精度 1 $^{\circ}\text{C}$, 应变精度数十微应变^[47]。

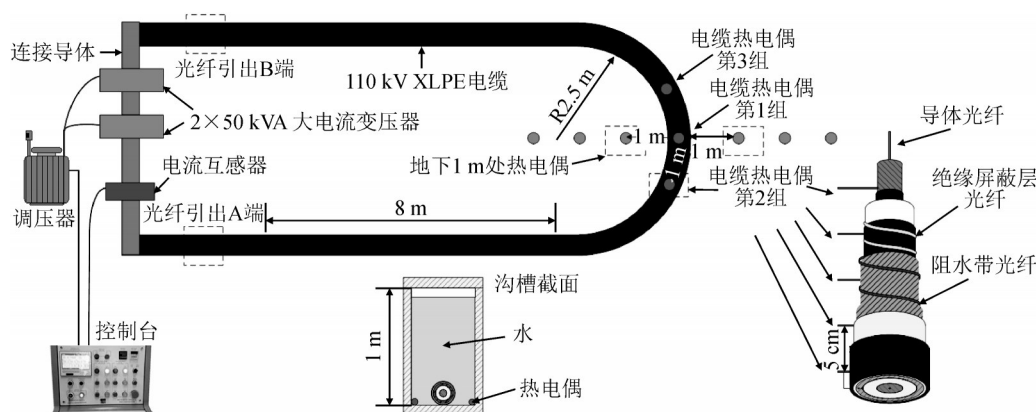


图2 基于BOTDR的XLPE光纤复合电缆测温试验布置示意图

Fig. 2 Temperature experimental arrangement diagram of the XLPE optical fiber composite cable based on BOTDR

标准 DL/T 1573—2016 规定了用于单芯电缆的 DTS 测温主机的主要技术要求为测温范围 $-40 \sim 150$ $^{\circ}\text{C}$, 测温精度 $\leq \pm 1$ $^{\circ}\text{C}$, 分辨率 ≤ 0.5 $^{\circ}\text{C}$, 空间分辨率 ≤ 2 m, 定位准确度 $\leq \pm 1$ m, 且需具备温度报警功能^[51]。标准 DL/T 1506—2016 还规定了用于 110 kV 及以上交流 XLPE 电缆的点型测温系统的空间分辨率 ≤ 10 cm^[14]。

2.4 无源无线测温

随着科技的快速发展, 温度检测逐渐走向智能化。研究者们考虑到 DTS 需大量布线、成本提升、

维护不方便, 提出采用 ISM 频段射频和 GSM 结合、ZigBee、GPRS、Wi-Fi、蓝牙等无线测温法^[24, 64-65]。

声表面波(surface acoustic wave, SAW)测温技术是一种新兴的无源无线测温途径。当 SAW 传感器的压电基片表面温度发生变化时, SAW 的传播速度和发射栅间距发生改变, 引起谐振器的谐振频率发生变化可表示为^[65]

$$f = f_0 \left[1 + a_0 (T - T_0) + b_0 (T - T_0)^2 + \dots \right] \quad (5)$$

式(5)中: f 为谐振频率; T 为被测温度; T_0 为参考温度; f_0 为 T_0 处谐振频率; a_0 、 b_0 分别为 T_0 时的一阶、二阶频率温度系数。

SAW发展前景广阔,测量精度高、抗干扰能力强、成本低、安装简便,常用于高压开关柜和电缆接头温度监测;但其仍处于发展阶段,传输距离和稳定性问题亟待解决^[66]。

2.5 载流量检测

随着DTS的迅速发展,学者们普遍采用热路法计算电缆载流量,通过测温光纤得到全线电缆表面温度,结合电缆运行载流量,并利用动态负荷^[67]、动态载流量^[68]分析系统,可计算出电缆导体温度、负荷状况和短时动态载流量^[69],实现电缆载流量评估、负荷监控和发现潜在热温点。虽然DTS较为成熟,但全线布置价格昂贵,应用范围有限,已有报道的应用案例均为高压电缆^[67]。

然而,上述电缆载流量检测技术将传感器附着于电缆表面或填充层内,无法实时准确掌握运行电缆情况。2020年全球首个10 kV智能电缆测控系统在深圳投入运行,电缆系统采用导体内置测温光纤方法,直接测量导体温度,并基于温度数据变化,附加环境温度、电压电流等参数的专家数据分析诊断平台,实时监测电缆运行状态、实现载流量动态调控,保证了采集真实性和精确性^[45,70]。

3 局部放电检测

根据标准IEC 60270—2015,局部放电为导体间绝缘仅被部分桥接的局部电气放电,其可能发生在或不发生在导体附近。对于电缆线路,缺陷类型主要有气隙型、交界面型、尖刺型和悬浮电位型4种,分别对应于内部气隙放电、沿面放电、电晕放电和悬浮放电4种局部放电类型^[6]。局部放电产生时伴随着电、热、光、化学和磁效应的变化,据此发展出多种局部放电检测方法。局部放电不仅能真实反映电缆绝缘的老化和故障特征,还可表征绝缘破坏严重程度,因此局部放电检测对于电缆绝缘故障预防和状态评估具有重要意义。

3.1 离线检测

脉冲电流法是电缆局部放电离线检测的主要手段,是IEC、IEEE、CIGRE等国际电力权威机构和国内外专家学者一致推荐的最有效方法^[71]。一般局部放电离线检测使用工频电压或串联谐振电压试验电源。工频试验最接近电缆实际运行状态,能较全面、可靠地反映绝缘状况,但鉴于电缆电容量较大,试验设备需求功率大,体积重量大,运输困难。

串联谐振试验利用LC串联谐振原理,试验设备需求功率大为减小,但体积重量依然较大,且谐振回路产生噪声会影响局部放电现场检测^[72]。

为此,研究者们提出通过降低试验电压频率或使用谐振原理来解决这一难题^[73]。超低频(very low frequency, VLF)试验原理为利用电力电子设备对电缆反复直流充放电而实现,常用频率0.1 Hz,电压波形主要有正弦波和余弦方波,理论上其试验设备的容量和体积是工频设备的1/500,现场使用方便,操作性强。0.1 Hz正弦波试验可有效发现电缆绝缘水树枝老化等缺陷^[74],但目前仅适合中压电缆,且频率降低、测试时间长,与工频试验的等效性需进一步研究。0.1 Hz余弦方波试验电压波形的极性转换过程由电力电子开关模拟,与工频电压波形相近、等效性较好,可用于激发潜在缺陷,体积小巧^[73]。振荡波(damped alternating current, DAC)试验采用LCR阻尼振荡原理测量电缆内部潜在缺陷产生的局部放电,并基于时域反射技术(time domain reflectometry, TDR)定位局部放电^[75]。目前DAC应用最为广泛,体积小巧,测试时间短,与工频试验的等效性较好^[19,72-75]。

从1996年开始,中国上海、烟台、北京等地逐步采用VLF耐压联合介损试验作为发现电缆运行绝缘缺陷的无损试验手段^[76]。从2006年开始,中国各地供电公司开始应用电缆DAC检测技术并经过了重大保电项目的实际应用验证,广州亚运会利用DAC对462条10 kV电缆进行局部放电检测,发现绝缘缺陷22起^[77]。

标准Q/GDW 11316—2014规定10~500 kV XLPE电缆诊断性试验时可采用DAC电压进行局部放电检测^[27]。标准Q/GDW 11838—2018规定10~35 kV XLPE电缆交接试验和诊断性试验时可采用DAC、VLF正弦波或余弦方波电压进行局部放电检测,检测方法符合IEEE Std 400.2™和IEEE Std 400.4™相关规定^[78]。标准DL/T 1576—2016给出了6~35 kV电缆振荡波局部放电测试方法^[79]。

3.2 在线检测

在线检测方面,见表4^[80-81]。按照局部放电发射电磁波频带的信号频率高低,可分为高频电流传感器(high frequency current sensor, HFCT)法和特高频(ultra high frequency, UHF)法等;按照局部放电信号耦合方式,可分为电磁耦合法、电容耦合法和方向耦合法等;根据局部放电发生时产生的非电现象,主要有超声波法、红外热成像法和特征分解气体光谱法等;此外,还有暂态对地电压(transient earth voltage, TEV)法。

表4 电缆局部放电常用在线检测方法

Table 4 Common PD on-line detection methods of power cables

检测方法	原理	特点
HFCT	HFCT检测互联线或接地线的高频电流信号,分外置式、内置式	安装方便、非侵入式,抗干扰能力强,灵敏度较高,但信号衰减较快、受接地线干扰信号影响
UHF	天线传感器检测局部放电电脉冲引发并传播的特高频电磁波信号	抗低频干扰能力强,灵敏度较高,定位精度高,可识别缺陷类型,但信号衰减快、无法量化描述缺陷程度、内置式安装不当可能影响电缆电场分布
电容耦合法	电容型金属带感应局部放电高频信号,分外置式、内置式	灵敏度较高,能定量放电量,但抗干扰能力较差
方向耦合法	外半导体层和金属护层间的方向耦合传感器判断局部放电及方向	抗干扰能力较强,有效判断方向,但结构复杂
超声波法	超声波传感器或光纤传感器检测局部放电超声波信号	操作简便,灵敏度较高,但检测范围有限,信号衰减较严重;光纤传感器应用前景良好
TEV	电容耦合传感器检测终端屏蔽层断续处泄漏的高频局部放电信号在对地传播过程中产生的短暂电压脉冲信号	抗电磁干扰强,检测效果比同频段的HFCT好

目前电测法应用最广、灵敏度最高,然而其易受电磁干扰、试验电源受冲击电压波形干扰、电力设备电容量较大时灵敏度不足等。超声波法是除电测法外最常用的方法之一,基于局部放电超声波信号的光纤传感技术见表5^[82-86]。主流的局部放电超声波法基于光学干涉(optical interference, OI)的光纤传感技术。OI包括马赫—曾德(Mach Zehnder interferometric, MZI)、萨格纳克(Sagnac interferometric, SI)、迈克尔逊(Michelson interferometric, MI)和法布里—帕罗(Fabry Perot interferometric, FPI)等基本干涉结构及上述基本结构的复合干涉结构。MZI、MI光纤原理和结构相似,可相互替换。MZI、MI相比SI光纤,因传感光和参考光分别在独立的光路中传输,不产生寄生干涉噪声,信噪比高;而相比于FPI光纤,无需制备复杂的

反射腔室,结构简单,灵敏度更高^[85-86]。

表5 基于局部放电超声波信号的光纤传感技术

Table 5 Optical fiber sensing technology based on PD ultrasonic signal

检测方法	特点
SI	灵敏度较高,可长距离局部放电检测,定位能力较好,但传感系统频率响应受光路影响
MZI	灵敏度高,信噪比高,传感系统频率响应不受光路影响
MI	信噪比高,节省光纤,光程长有利于小型化设计,光纤端部反射镜制作工艺要求高
FPI	有本征型、非本征型,线性复合腔3种结构,结构小巧,频率带宽更宽,解调方法多,但需封装和制备反射腔,制作要求高
FBG	裸光纤检测频率宽但灵敏度低;封装设计可提高灵敏度但降低了检测带宽;复用性能好,单根光纤可多点测量
OTDR	分布式传感,可大规模监测

搭建 MZI 光纤干涉系统,用于检测电缆局部放电超声波,发现保偏弯曲不敏感光纤比普通 1 550 nm 单模光纤制成的传感器光路损耗小,干涉明显,能检测到 40 kHz 超声波^[85]。随后,将光纤内置在 10 kV XLPE 电缆终端作为 MZI 信号臂,见图 3。并在终端主绝缘内部制作不同体积的气隙缺陷,局部放电试验结果表明电缆终端未因植入光纤而产生局部放电, MZI 光纤检测系统可识别 196 pC 的局部放电^[87]。上海大学用 MI 光纤成功检测到高压电缆附件处局部放电超声波,试验表明该光纤灵敏度较高,频率最高达 150 kHz^[88]。大连交通大学用长尾 SI 光纤检测高压电缆局部放电超声波,试验表明定位精度 16 m^[89]。

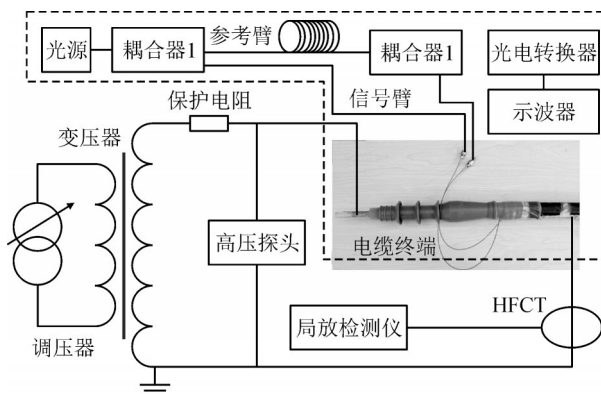


图3 内置光纤的电缆终端局部放电试验平台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of PD test platform for the cable terminal with built-in optical fiber

也有学者利用FBG传感技术和基于光纤散射效应的分布式光纤传感技术测量局部放电超声波

信号。印度 Sarkar B.等研究用于高压设备内部局部放电超声波检测的光强调制型FBG,其具有良好的动态响应、信噪比和灵敏度^[90]。FBG在电气设备缺陷定位方面具有潜在的应用前景,但是由于FBG中硅的变形很小,因此检测灵敏度不足,特别是检测局部放电产生的弱脉冲声压^[82]。Rohwetter P等利用C-OTDR(相干光时域瑞利后向反射)检测高压电缆终端实际模型局部放电超声波,检测灵敏度达1 nC^[91]。

多种局部放电检测方法的组合使用有助于全面分析电缆局部放电状况。上海交通大学结合HFCT、UHF和声发射法,提出多传感器联合检测的局部放电定位方法,有效识别局部放电信号和外部干扰信号,提高了系统诊断正确性、定位成功率和定位精度^[92]。工业上,便携式局部放电检测仪和在线监测系统也日趋完善,集成多种局部放电检测方法对绝缘状况进行综合评估和放电源定位,通过先进的专家诊断系统对放电类型进行模式识别,局部放电量测量范围可实现10~10 000 pC。

标准 Q/GDW 11316—2014 和 Q/GDW11838—2018 分别对10~500 kV和10~35 kV XLPE 电缆线路的局部放电检测作了规定,见表6^[27, 78]。标准 Q/GDW 11223—2014 给出35~500 kV 交流电缆线路局部放电检测的技术规范,包括检测项目、要求、周期、方法和判据,各种局部放电检测方法的适用范围见表7,重点检测部位为终端和接头^[19]。标准 Q/GDW 11224—2014 规定了10 kV 及以上交流电缆局部放电带电检测设备的技术指标^[93]。标准 DL/T 1506—2016 规定110 kV 及以上交流 XLPE 电缆局部放电在线监测系统的主要技术指标为频带范围1~20 MHz 且中心频率可调,检测量程5~5 000 pC,灵敏度≤5 pC,并要求提供信号幅值、相位、放电频次等基本局部放电表征参数及二维、三维谱图^[14]。

表6 电缆局部放电检测的标准规定

Table 6 Standard regulations of PD detection for cables

参数	Q/GDW 11838—2014	Q/GDW 11316—2014
电压等级	10~35 kV	10~500 kV
交接试验	具备条件的宜开展局部放电检测	局部放电检测
例行试验	超声波法、TEV	—
诊断性试验	HFCT、UHF	超声波法、HFCT、UHF

局部放电模式识别是局部放电检测的核心问题之一,主要包括谱图构造、特征提取、模式分类等环节。常见谱图有局部放电相位分布谱图(phase resolved partial discharge, PRPD)、局部放电时间分布

表7 各种局部放电检测方法的适用范围

Table 7 The application scope of various PD detection methods

方法	适用电缆电压等级	检测方法	备注
HFCT	110 kV 及以上	在线	必做
UHF	110 kV 及以上	在线	选用
超声波法	110 kV 及以上	在线	选用
串联谐振局部放电试验	110 kV 及以上	离线	必做
DAC局部放电试验	35 kV	离线	必做

谱图(time resolved partial discharge, TRTD)、脉冲序列分析(pulse sequence analysis, PSA)等。目前较为热门的特征提取思路是构建特征指纹或降维处理等方式。随着计算机应用技术日新月异的发展,新的模式识别方法不断涌现,如支持向量机、卷积神经网络等^[94]。

4 受潮检测

南方地区空气、土壤水分和潮气较重,XLPE 电缆常位于积水沟道里或与潮湿土壤直接接触。电缆受潮缺陷主要有:①附件复合界面闪络:电缆热胀冷缩或附件密封不严,水分和潮气通过复合界面呼吸效应或电场电泳效应进入电缆^[95-96];②绝缘层水树枝:残留微水、机械损伤致使水分侵入绝缘层等,在电场长期作用下形成水树枝;水树枝是导致XLPE 电缆故障的重要原因,多发生于中低压等级XLPE 电缆^[97];③缓冲层故障:近年来国内外出现的一种新型故障,高压电缆皱纹铝护套和外半导体层间出现大量烧蚀痕迹和白色粉末,见图4。华南理工大学认为故障原因是受潮、机械压力和放电的共同作用,其中受潮是白色粉末形成的必要条件,机械压力是加速因子^[98-100]。

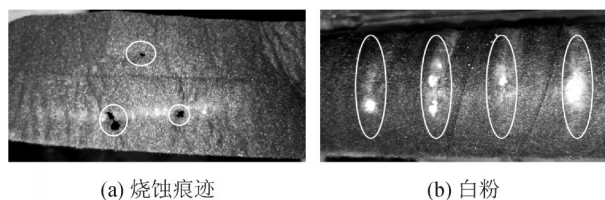


图4 高压电缆缓冲层故障后阻水带出现烧蚀痕迹和白粉
Fig. 4 Ablated traces and white powder appear on the water blocking tape after the buffer layer failure of high voltage cables

研究显示,绝缘电阻和介质损耗是评判XLPE 电缆整体绝缘老化、受潮等的重要技术指标。

4.1 绝缘电阻

绝缘电阻测量常用以协助分析电缆主绝缘性

能,吸收比 K 或极化指数 P 可量化表征电缆老化程度。若电缆XLPE绝缘层受潮、出现集中性导电通道,其绝缘电阻明显下降,造成 K 和 P 下降^[101]。

离线检测常采用兆欧表测量 K 和 P 。在线检测主要有直流叠加法、交流叠加法和直流成分法等,见表8。常用于电缆受潮、水树枝诊断。这些方法测量方便、判断快速,但对局部劣化不灵敏,不能准确识别集中却未贯通的老化现象^[80],目前不宜在高压电缆系统中大面积推广应用。

表8 在线检测方法

Table 8 On-line detection technology

检测方法	测量参量	电压
直流叠加法	绝缘电阻	工频+直流
交流叠加法	特征电流	工频+交流
低频叠加法	低频特征电流	工频+低频
直流成分法	直流成分	工频
谐波分量法	谐波分量	工频+交流

4.2 介质损耗

介质损耗因数即介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 。以往 $\tan\delta$ 离线检测采用电桥法,随着电力电子技术的进步,VLF介损检测逐步被采用^[76],标准IEEE Std 400.2™:2013推荐VLF耐压、局部放电和介损三合一试验^[102]。 $\tan\delta$ 与电源电压角频率 ω 、试样电容 C 、并联等效电路绝缘电阻 R 的关系为^[103]

$$\tan\delta = 1/(\omega RC) \quad (6)$$

由于 R 和 C 基本不随 ω 变化,因此,当 ω 变小时, $\tan\delta$ 变大,即在低频下有较大的 $\tan\delta$,能在试验电压较低时发现电缆绝缘层水树枝等缺陷^[74,76]。虽然离线法测量精度高,但停电、拆卸和安装等过程增加了运维成本,且无法检测运行状态下的电缆绝缘状况。

在线检测通过电压互感器TV和电流互感器TA得到电缆电压信号和流过绝缘的工频电流信号,再将电压电流信号送至 $\tan\delta$ 数字化测量装置,经傅里叶分析方法或其他算法给出电缆绝缘 $\tan\delta$ 。当电缆绝缘 $\tan\delta > 0.01$ 时,可判断绝缘不良,因此现场使用灵敏度0.01%的测量装置能检测电缆绝缘状态^[101]。

4.3 宽频阻抗谱

宽频阻抗谱(broadband impedance spectroscopy, BIS)检测技术运用阻抗分析仪测量电缆首端输入阻抗随频率变化的曲线,即宽频阻抗谱,从而得到电缆运行状态数据。当频率较高时,BIS主要由电缆传播系数决定。通过线性共振或快速傅里叶反变换分析得到BIS数据,可诊断电缆局部缺陷如水树枝、热老化、机械破坏等^[104-105]。BIS检测受潮缺陷电

缆,其灵敏度比VLF介损更优,且能精确定位进水缺陷部位^[106],故障定位精度优于0.3%,被测电缆长度可达300 km。BIS研究尚处在起步阶段,但具有较大应用价值,应进一步深化研究。

然而,目前针对电缆缓冲层的新型故障,国内外暂无统一、有效的检测方法,需要进一步深入研究缓冲层故障机理,光纤传感技术或许是一个研究方向,可将光纤埋入缓冲层,缓冲层吸水膨胀使光纤发生物理形变,通过实时监测电缆沿线应力变化及受潮情况并定位缺陷位置。

5 应变/振动检测

海缆扰动(船只落锚振动和挂缆拖拽等)、电缆热伸缩、电缆安装运输中产生机械损伤、周围环境施工等导致电缆发生应力应变或振动,进而引发绝缘劣化、附件铅封开裂、金属护层变形破损等^[6,8],不但威胁电网整体运行,还威胁相关人员安全,因此对电缆进行应变/振动检测十分必要。

5.1 光纤传感技术

光纤传感元件对应力应变/振动十分敏感,基于光纤传感技术的应变检测技术应运而生。由于应变/振动信号和局部放电产生的超声波信号本质都属于机械波,所以用于振动和超声波检测的光纤传感技术相似,主要包括FBG传感技术、基于光纤散射效应的分布式光纤传感技术、基于OI的光纤传感技术等^[82]。

MZI、MI和SI干涉技术以光纤本体为传感元件,外界因素作用于传感光纤引起光纤长度、折射率或半径变化,干涉光相位随之改变,如式(7)所示^[107];而FPI干涉技术通常在光纤末端加特殊反射膜片构成微腔室,外界因素作用于膜片引起腔长变化,干涉光相位也发生改变,如式(8)所示^[108]。

$$\Delta\varphi = \beta L \frac{\Delta L}{L} + L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n + L \frac{\partial\beta}{\partial a} \Delta a \quad (7)$$

式(7)中: $\Delta\varphi$ 为由外界因素引起的干涉光相位差; β 为光纤传播常数; L 为光纤长度; n 为光纤折射率; a 为光纤半径; ΔL 、 Δn 、 Δa 分别表示差值。

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nL \cos\theta \quad (8)$$

式(8)中: δ 为由外界因素引起的干涉光相位差; λ 为入射光波长; n 为谐振腔中介质折射率; L 为腔长; θ 为折射角。

OI因结构简单、检测灵敏、实时性高等优点被广泛采用,但是OI还存在以下问题:①多点振动定位,在超远距离监测需求中,光纤布设长达几十公里,多点同时振动的可能性很高,单点监测系统极

可能造成定位误判、漏判;②抗环境干扰,自然环境对超长距离布设光纤干扰极其严重,需重点解决风、雨等自然噪声干扰^[109-110];③振动源类型自动识别是进一步发展趋势^[111]。针对OI抗干扰能力差的问题,重庆大学建议采用FBG检测异常振动,而用OI检测局部放电超声波^[182]。

标准GB/T 33213—2016未明确规定基于点式和分布式光纤传感技术的应力监测系统的具体参数,仅规定光纤应变传感器应有测试合格证书。点式光纤应变传感器内容应包括测量范围、线性度、灵敏度、信噪比等;连续式应包含空间分辨力、应变分辨力等^[112]。

5.2 其他技术

随着电缆综合管廊电力舱、隧道的快速增加和运行环境日趋复杂,防外力破坏形势愈加严峻。安装一定数量的可见光及红外高清监控摄像机可实时、全方位图像监控电缆附件、通道内部环境、出入口等重要位置的异常信息。目前广州供电局已实现高压电缆线路通道关键位置100%覆盖智能视频监控装置,北京、上海、深圳等也大力推广视频监控技术的应用。视频监控系统也逐步应用于海缆,结合BOTDR应变报警系统和船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS),可对海缆上方海域过往船只进行全天候、实时安全监控^[61-62]。2020年深圳供电局应用了全国电力行业内首款5G智能摄像头,该摄像头以多功能智能杆为载体,融合5G、4K技术,同时还搭载AI智能算法,可识别电缆盖板开合、工程围栏、大型车辆、机械施工、远距离顶管机作业等现场情况,对高压电缆通道沿线及周边施工情况进行智能监控,实现高压电缆通道360°全息感知,全方位保障电缆线路安全运行^[113]。

此外,涡流探伤检测技术可有效检测电缆铅封开裂缺陷,超声导波检测技术可判别和定位铝护套破损缺陷,这些检测手段具有一定针对性,可作为电缆应变和振动状态检测技术的有效补充^[17,114]。

6 接地电流检测

在工作电压下,交变电流通过高压单芯电缆导体,金属护层出现环流。若电缆外护层绝缘状态差、屏蔽层断裂、金属护层接地方式错误等均会导致金属护层环流异常,使绝缘局部发热、老化,降低载流量,严重时出现击穿故障。实践证明,护层接地电流检测可作为定性分析电缆护层绝缘及接地系统运行状态的有效手段^[115]。

传统方法常通过停电测量电缆护层绝缘电阻

或采用便携式大口径钳形电流表钳套在护层接地线上进行带电检测,存在工作量大、耗时长、不连续等缺点;此后逐步向自动化、智能化过渡。上海电缆所利用光纤光栅电流传感器实时监测运行电缆接地电流和接地线偷盗情况,电流检测精度0.25% F.S,检测距离>20 km,检测、定位和报警时间<1 min^[116]。北京电科院选取集成式护层电流采集器及三合一电流互感器(current transformer, CT)和数据采集装置等监测单元,不间断采集电缆负荷电流和护层电流,监测单元测量量程为交流0~1 000 A,精确度±2%^[117]。

理论方面,北京和冀北电力公司建立交叉互联电缆系统护层电流等值电路模型,通过仿真提出适用于12种电缆故障的诊断及定位标准,可准确识别并定位护层回路开路、接头内环氧预制件击穿和交叉互联箱进水等电缆故障^[118-119]。天津大学建立了三类接地电流典型特征模型,更正了北京地区93条高压电缆接地系统的状态评估结果^[115]。

标准Q/GDW 11316—2014和Q/GDW 11838—2018分别针对10~500 kV和10~35 kV XLPE电缆线路,规定巡检试验或例行试验时使用在线监测装置或钳形电流表测量电缆金属护层接地电流和负荷电流,单芯电缆线路接地电流应同时满足接地电流<100 A,不超过负荷电流的20%,单相接地电流最大值/最小值<3,但实际中应结合电缆线路负荷情况、接地方式和接地电流异常发展变化趋势进行综合分析^[27,78]。标准DL/T 1506—2016规定110 kV及以上交流XLPE电缆护层接地电流在线监测系统的电流测量范围0.1~1 000 A,测量精度0.5级,频率测量范围10~1 000 Hz^[14]。

7 结语与展望

文中分析了电缆常见运行状态,综述了电力电缆状态检测技术的研究现状。温度检测技术对发热、过流类缺陷较为有效,并可结合电缆运行载流量实现电缆载流量评估和负荷监控。局部放电检测技术是电缆状态检测的重要手段,可检出大部分典型绝缘类缺陷。绝缘电阻和介损等检测技术可作为辅助验证手段,检测电缆整体性、集中性缺陷,若出现异常情况,则电缆被测段绝缘水平可能已全面劣化。应变/振动检测技术可检测电缆外部环境状况和防盗、防外破。接地电流检测技术对电缆接地系统类缺陷非常敏感。

随着传感器技术的发展,为了突破电池供电带来的问题障碍,无源传感技术脱颖而出,其中光纤

传感器能实现多物理量同时测量,应用潜力尤为突出,但未来仍需进一步研究,解决空间分辨率、灵敏度、稳定性、结构微型化和复用性等诸多问题,并重点研究在恶劣环境(高温、高压、化学腐蚀)下低成本、多功能传感器的研发和应用。

在线监测系统和电力电子监测元件的不断发展,使电缆线路状态检测技术朝着自动化、智能化和实用化的方向发展,要求实时报警、故障精确定位、分布式和多功能综合监测,进而实现任意位置、任意时刻、任意状态的全面智能感知。基于泛在电力物联网理念的人工智能高压电缆隧道系统、海缆综合监控系统、智能电缆测控系统等,以及近年来无人机/直升机、智能机器人巡检等新兴技术不断涌现,但目前基于电缆(特别是高压电缆)运行状态的在线监测技术尚不完善,难以得到全面推广应用,特别是各种检测技术的抗干扰能力、缺陷信号提取和识别技术还需进一步创新。电缆状态检测技术应充分结合多种检测手段,发挥各个检测手段的突出优势,取长补短,并融合微气象、微地形和设备状态等多属性信息,建立智能、多状态量的电缆综合状态检测集成平台,实时掌握电缆的相关运行参数和性能,并基于状态检测结果、结合导致该状态的原因,提前辨识电缆缺陷情况及其形成过程,进行及时、必要的运维。

因此,研究电力电缆运行状态与检测技术原理与新技术、新方法,发展智能、多状态量的电缆综合状态检测集成系统,对电缆线路智能化状态感知和运行安全研究有非常重大的应用价值,符合国家战略需求,对实现国家的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》和“十四五”规划的战略目标有重要意义。

参考文献:

- [1] 周远翔,赵健康,刘睿,等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [2] 郝艳捧,陈云,阳林,等. 高压直流海底电缆电—热—流多物理场耦合仿真[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3534-3542.
HAO Yanpeng, CHEN Yun, YANG Lin, et al. Coupled simulation on electro-thermal-fluid multiple physical fields of HVDC submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3534-3542.
- [3] 周恺,杨亮,倪周,等. 基于小波变换的XLPE电缆介质损耗在线监测研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 99-106.
ZHOU Kai, YANG Liang, NI Zhou, et al. Online monitoring of XLPE cable dielectric loss based on wavelet transform[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 99-106.
- [4] 王航. 考虑非线性负荷的电缆温度和载流量评估[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
WANG Hang. The estimation of the cable temperature and ampacity in presence of non-linear loads[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [5] 马鑫,张怀垠,吴继岩,等. 温度对交联聚乙烯电缆尖刺缺陷局部放电特性的影响[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 151-156.
MA Xin, ZHANG Huaigen, WU Jiyan, et al. Effect of temperature on partial discharge characteristics of needle defects in cross-linked polyethylene cable[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 151-156.
- [6] 吴童,孙抗,师文文. 基于AVMD—自适应小波包法的电缆局部放电去噪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 95-103.
WU Tong, SUN Kang, SHI Wenwen. Research on cable partial discharge denoising based on an AVMD-adaptive wavelet packet method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 95-103.
- [7] 曹俊平,蒋愉宽,王少华,等. XLPE电力电缆接头缺陷检测关键技术分析与展望[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 87-97.
CAO Junping, JIANG Yukuan, WANG Shaohua, et al. Analysis and prospect of defect detection key technology for XLPE power cable joints[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 87-97.
- [8] 吕安强. 基于分布式光纤应变和温度传感的光纤复合海底电缆状态监测方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
LYU Anqiang. Research on condition monitoring of optical fiber composite submarine power cable based on distributed strain and temperature sensing technology using optical fiber[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [9] EIGNER A, RETHMEIER K. An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016, 32(2): 48-55.
- [10] BAO Xiaoyi, CHEN Liang. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(12): 8601-8639.
- [11] 电力电缆线路运行规程: DL/T 1253—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
Code of operation for power cable line: DL/T 1253—2013 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [12] CIGRE WG B1.10. Brochure 379 update of service experi-

- ence of HV underground and cable systems[R]. Paris, France: CIGRE, 2009.
- [13] 电缆线路状态评价导则: Q/GDW 456—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
Guide for condition evaluation of power cable: Q/GDW 456—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [14] 高压交流电缆在线监测系统通用技术规范: DL/T 1506—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
General technical specification for on-line monitoring system on high voltage AC power cables: DL/T 1506—2016 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [15] 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
Regulations of condition-based maintenance & test for electric equipment: DL/T 393—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [16] 配网设备状态检修导则: Q/GDW 644—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
Guidelines of condition based maintenance for electric distribution network equipments: Q/GDW 644—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [17] 周路遥, 曹俊平, 王少华, 等. 基于多状态量特征及变化规律的高压电缆状态综合评估[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3954-3963.
ZHOU Luyao, CAO Junping, WANG Shaohua, et al. Comprehensive state evaluation of high voltage cable based on multi-state variables characteristics and variation law[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3954-3963.
- [18] 朱晓辉, 杜伯学, 周凤争, 等. 高压交联聚乙烯电缆在线监测及检测技术的研究现状[J]. 绝缘材料, 2009, 42(5): 58-63.
ZHU Xiaohui, DU Boxue, ZHOU Fengzheng, et al. Research of high voltage XLPE cable online monitoring and detection technology[J]. Insulating Materials, 2009, 42(5): 58-63.
- [19] 高压电缆线路状态检测技术规范: Q/GDW 11223—2014 [S]. 2014.
Technical specification for state detection for high voltage cable lines: Q/GDW 11223—2014[S]. 2014.
- [20] 配网设备状态检修试验规程: Q/GDW 643—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
Regulation of condition based maintenance test for electric distribution network equipments: Q/GDW 643—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [21] 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 168—2008[S]. 2008.
Regulations of condition-based maintenance & test for electric equipment: Q/GDW 168—2008[S]. 2008.
- [22] 变电设备在线监测系统技术导则: Q/GDW 534—2010 [S]. 2010.
Technical guide for on-line monitoring system of transformation equipment: Q/GDW 534—2010[S]. 2010.
- [23] CIGRE WG B1.29. Guidelines for maintaining the integrity of XLPE cable accessories[R]. France: CIGRE, 2013.
- [24] 高云鹏, 谭甜源, 刘开培. 电力电缆温度监测方法的探讨[J]. 绝缘材料, 2014, 47(6): 13-17.
GAO Yunpeng, TAN Tianyuan, LIU Kaipei. Discussion of power cable temperature monitoring methods[J]. Insulating Materials, 2014, 47(6): 13-17.
- [25] 孙晓刚, 李云红. 红外热像仪测温技术发展综述[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 101-104.
SUN Xiaogang, LI Yunhong. Review of the development of temperature measurement technology with infrared thermal imager[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(2): 101-104.
- [26] 刘英, 曹晓珑. 电力电缆在线测温及载流量监测的研究进展与应用[J]. 电网与水力发电进展, 2007, 23(5): 11-14.
LIU Ying, CAO Xiaolong. Research and application of online temperature and load monitoring for power cables[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2007, 23(5): 11-14.
- [27] 电力电缆线路试验规程: Q/GDW 11316—2014[S]. 2014.
Test code for power cables: Q/GDW 11316—2014[S]. 2014.
- [28] HILL K, MELTZ G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [29] SAMPATH U, KIM D, KIM H, et al. Fiber optic sensor for simultaneous strain and temperature monitoring in composite materials at cryogenic condition[C]//25th Optical Fiber Sensors (OFS). Jeju, Korea (South): IEEE, 2017: 1-4.
- [30] 王丽, 罗健斌. 城市电网高压电缆光纤传感在线监测技术比对试验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 63-68.
WANG Li, LUO Jianbin. Experimental research on comparison of fiber sensing technology for urban power grid transmission cables on-line monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 63-68.
- [31] 甘维兵, 王立新, 张翠. 分布式光纤光栅测温技术在线监测电缆温度[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 577-581.
GAN Weibing, WANG Lixin, ZHANG Cui. Distributed optical fiber grating technology applied in cable temperature measurement[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(5): 577-581.
- [32] 李军. 光纤光栅测温系统在电力电缆温度在线监测中的应用[J]. 华东电力, 2005, 33(12): 61-63.
LI Jun. Application of optical fiber grating temperature sensing system to on-line monitoring for power cables[J]. East China Electric Power, 2005, 33(12): 61-63.
- [33] 王璿, 王永杰, 张登攀. 面向海洋应用的光纤光栅温度传感器研究进展[J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 515-522.
WANG Jin, WANG Yongjie, ZHANG Dengpan. Research progress of fiber bragg grating temperature sensors for

- ocean application[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(5): 515-522.
- [34] YANG Lang, QIU Weihao, HUANG Jichao, et al. Comparison of conductor-temperature calculations based on different radial-position-temperature detections for high-voltage power cable[J]. *Energies*, 2018, 11(1):1-17.
- [35] 邱伟豪, 阳林, 郝艳捧, 等. XLPE 电缆内置分布式光纤的温度监测试验[J]. *广东电力*, 2018, 31(8):175-181.
QIU Weihao, YANG Lin, HAO Yanpeng, et al. Temperature monitoring experiment for XLPE built-in distributed optical fiber[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(8): 175-181.
- [36] 何伟斌, 廖维君, 薛志亚, 等. 基于分布式光纤测温的电力电缆在线监测技术研究[J]. *广东电力*, 2013, 26(5):23-26.
HE Weibin, LIAO Weijun, XUE Zhiya, et al. Research on online power cable monitoring technology based on distributed optical fiber temperature measurement[J]. *Guangdong Electric Power*, 2013, 26(5): 23-26.
- [37] 王立, 李华春, 薛强, 等. 220 kV 电缆分布式光纤测温系统运行情况分析[J]. *电力设备*, 2007, 8(6):36-41.
WANG Li, LI Huachun, XUE Qiang, et al. Operation condition analysis of distributed optical fiber thermometric system for 220 kV cable[J]. *Electrical Equipment*, 2007, 8(6): 36-41.
- [38] 梁国华. 220 kV 交联聚乙烯绝缘光纤测温电力电缆的研制及性能试验[J]. *电线电缆*, 2013(4):13-15.
LIANG Guohua. Research and properties monitoring on 220 kV XLPE optical fiber temperature measurement power cable[J]. *Electric Wire & Cable*, 2013(4): 13-15.
- [39] 金元. 高压光纤复合测温电缆的研制[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2012(5):21-23.
JIN Jinyuan. Development of the composite high voltage optical fiber temperature measurement cable[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2012(5): 21-23.
- [40] 高益明, 郭高飞, 马庆强, 等. 110 kV 光纤复合电缆接头制作工艺研究[J]. *华东电力*, 2012, 40(2):329-331.
GAO Yiming, GUO Gaofer, MA Qingqiang, et al. Processing technology of 110 kV optical fiber composite cable connector[J]. *East China Electric Power*, 2012, 40(2): 329-331.
- [41] 吕庚民, 张道利, 富成伟, 等. 分割导体内预置测温光纤的 XLPE 电缆及附件的研制及试验[J]. *电线电缆*, 2013(5):8-11.
LYU Gengmin, ZHANG Daoli, FU Chengwei, et al. Split conductor in preset temperature fiber XLPE cables and accessories of the development and test[J]. *Electric Wire & Cable*, 2013(5): 8-11.
- [42] 吕安强, 李永倩, 李静, 等. 基于 BOTDR 的光纤复合海底电缆应变/温度监测[J]. *高电压技术*, 2014, 40(2): 533-539.
LYU Anqiang, LI Yongqian, LI Jing, et al. Strain and temperature monitoring of 110 kV optical fiber composite submarine power cable based on Brillouin optical time domain reflectometer[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(2): 533-539.
- [43] 杨毅, 朱文滔, 肖莹莹. 电缆内置测温光纤的绝缘与温度特性测试[J]. *广东电力*, 2015, 28(4):112-116.
YANG Yi, ZHU Wentao, XIAO Yingying. Testing on insulation and temperature characteristics of temperature measurement fiber in cables[J]. *Guangdong Electric Power*, 2015, 28(4): 112-116.
- [44] NAKANISHI Y, FUJIMORI A, FUKUNAGA S, et al. Development of prefabricated joint for 275 kV XLPE cable[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10(3): 1139-1147.
- [45] 邓世聪, 胡冉, 叶文忠. 基于内置导体温度测量的配网电缆状态评价技术[J]. *高电压技术*, 2020, 46(12): 339-343.
DENG Shicong, HU Ran, YE Wenzhong. State evaluation technology of distribution network cables based on internal conductor temperature measurement[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(12): 339-343.
- [46] 杨峰, 张成先, 张东明, 等. 高压电力电缆终端及其安装方法:200710172693.2[P].2009-06-24.
YANG Feng, ZHANG Chengxian, ZHANG Dongming, et al. High voltage power cable terminals and their installation methods: 200710172693.2[P].2009-06-24.
- [47] UKIL A, BRAENDLE H, KRIPPNER P. Distributed temperature sensing: review of technology and applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5): 885-892.
- [48] PASTOR-GRAELLS J, MARTINS H, GARCIA-RUIZ A, et al. Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13121-13133.
- [49] 刘刚, 金尚儿, 黄嘉盛. 10 kV XLPE 电缆击穿振动在砂土中的传播规律[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(8):34-38.
LIU Gang, JIN Shang'er, HUANG Jiasheng. Propagation law of 10 kV XLPE cable breakdown vibration in sand[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2014, 42(8): 34-38.
- [50] LIU Yunpeng, YIN Junyi, TIAN Yuan, et al. Design and performance test of transformer winding optical fibre composite wire based on Raman scattering[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 1-14.
- [51] 电力电缆分布式光纤测温系统技术规范: DL/T 1573—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
Technical specifications for power cable distributed optical fiber temperature sensor system: DL/T 1573—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [52] 童维军, 杨晨, 刘彤庆, 等. 光纤传感用新型特种光纤

- 的研究进展与展望[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 12-25.
- TONG Weijun, YANG Chen, LIU Tongqing, et al. Progress and prospect of novel specialty fibers for fiber optic sensing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(9): 12-25.
- [53] IEZZI V, LORANGER S, MAROIS M, et al. High-sensitivity temperature sensing using higher-order Stokes stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 857-860.
- [54] BAO Xiaoyi, CHEN Liang. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. Sensors, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [55] MOTIL A, BERGMAN A, TUR M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2016(78): 81-103.
- [56] SASAKI Y, TAKENAGA K, MATSUO S, et al. Few-mode multicore fibers for long-haul transmission line[J]. Optical Fiber Technology, 2017(35): 19-27.
- [57] ZHAO Z, DANG Y, TANG M, et al. Spatial-division multiplexed Brillouin distributed sensing based on a heterogeneous multicore fiber[J]. Optics Letters, 2017, 42(1): 171-174.
- [58] WU H, WANG R, LIU D, et al. Few-mode fiber based distributed curvature sensor through quasi-single-mode Brillouin frequency shift[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1514-1517.
- [59] 罗俊华, 周作春, 李华春, 等. 电力电缆线路运行温度在线检测技术应用研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 169-172.
- LUO Junhua, ZHOU Zuochun, LI Huachun, et al. Application of operation temperature detection technique for on-line power cable lines[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 169-172.
- [60] CHERUKUPALLI S, MACPHAIL A, NELSON R, et al. Application of distributed fiber optic temperature sensing on BC Hydro's 525 kV submarine cable system[C]//CIGRE WG B1.203. Paris, France: CIGRE, 2006: 1-9.
- [61] 吴文庚, 林雪倩. 海底电缆综合监测关键技术及应用[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 129-135.
- WU Wengeng, LIN Xueqian. Application and key technologies of submarine cable integrated monitoring[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 129-135.
- [62] 张畅生, 郭旭敏, 刘龙春, 等. 高压直流海缆综合在线监测系统研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(22): 27-33.
- ZHANG Changsheng, GUO Xumin, LIU Longchun, et al. Study on integrated online monitoring system of HVDC submarine cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(22): 27-33.
- [63] IEZZI V, LORANGER S, KASHYAP R. High sensitivity distributed temperature fiber sensor using stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32591-32601.
- [64] 解 军, 张喜林, 卢庆港, 等. 基于ISM与GSM链接的电力电缆接头温度监测系统[J]. 电测与仪表, 2014, 51(7): 81-85.
- XIE Jun, ZHANG Xilin, LU Qinggang, et al. Monitoring system of power cable connector temperature based on ISM and GSM link[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(7): 81-85.
- [65] 陈新岗, 赵 唐, 余 兵, 等. 基于声表面波和ZigBee的高压开关柜电缆室温度监测[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 48-54.
- CHEN Xingang, ZHAO Tang, YU Bing, et al. High voltage switch cabinet cable chamber temperature monitoring based on acoustic surface wave and ZigBee[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 48-54.
- [66] 吴 翔, 何怡刚, 邓芳明, 等. 基于SAW-RFID的电力电缆温度在线监测技术研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018(6): 113-117.
- WU Xiang, HE Yigang, DENG Fangming, et al. Research on online temperature monitoring technology of power cable based on SAW-RFID[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(6): 113-117.
- [67] 田 野, 郭金明, 傅明利, 等. 超高压交流XLPE电缆输电工程应用现状综述[J]. 南方电网技术, 2016, 10(9): 30-36.
- TIAN Ye, GUO Jinming, FU Mingli, et al. Review on power transmission projects with UHVAC XLPE cables[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(9): 30-36.
- [68] 李 强, 王艳松, 刘学民. 光纤温度传感器在电力系统中的应用现状综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 135-140.
- LI Qiang, WANG Yansong, LIU Xuemin. Application situation of temperature monitoring of optic fiber sensor in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 135-140.
- [69] Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables - Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages: IEC 60853—2—1989[S]. 1989.
- [70] 南方电网报. 全球首个10千伏智能电缆测控系统在深圳投运[EB/OL]. [2024-05-12]. http://www.csg.cn/xwzx/2020/gsyw/202006/t20200619_311706.html.
- China Southern Power Grid. The world's first 10 kV intelligent cable measurement and control system was put into operation in Shenzhen[EB/OL]. [2024-05-12]. http://www.csg.cn/xwzx/2020/gsyw/202006/t20200619_311706.html.
- [71] BOGGS S, DENSLEY J. Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(5): 13-18.
- [72] 熊 俊, 张 强, 马国明, 等. 大容量长距离交流XLPE电缆交接试验方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3727-

3735.
XIONG Jun, ZHANG Qiang, MA Guoming, et al. Commissioning test methods for large capacity and long-distance AC XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3727-3735.
- [73] HOU Zhe, LI Hongjie, CHEN Shuo, et al. Development of a novel 20 kV 0.1 Hz very low frequency cosine-rectangular voltage generator for multi-functional insulation testing of MV power cables[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(1): 1-8.
- [74] SU C, LI C. Using very-low-frequency and oscillating-wave tests to improve the reliability of distribution cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(1): 38-45.
- [75] GULSKI E, CICHECKI P, WESTER F, et al. On-site testing and PD diagnosis of high voltage power cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1691-1700.
- [76] 罗俊华, 马翠姣, 邱毓昌, 等. 35 kV 及以下 XLPE 电力电缆试验方法的研究[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 58-61.
LUO Junhua, MA Cuijiao, QIU Yuchang, et al. Study on test methods of XLPE power cable rated up to 35 kV[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 58-61.
- [77] 熊俊, 宁宇, 黄慧红, 等. 振荡波电压法检测交联聚乙烯电缆中间接头新缺陷的试验与仿真[J]. 现代电力, 2011, 28(2): 7-11.
XIONG Jun, NING Yu, HUANG Huihong, et al. Experiment and simulation on detection of middle joint in XLPE power cables based on oscillating wave test system[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2): 7-11.
- [78] 配电电缆线路试验规程: Q/GDW 11838—2018[S]. 2018.
Test code for distribution power cables: Q/GDW 11838—2018[S]. 2018.
- [79] 6 kV-35 kV 电缆振荡波局放测试方法: DL/T 1576—2016 [S]. 2016.
The method for partial discharge testing of 6 kV~35 kV power cables based on oscillating wave voltage: DL/T 1576—2016[S]. 2016.
- [80] 聂永杰, 赵现平, 李盛涛. XLPE 电缆状态监测与绝缘诊断研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1361-1371.
NIE Yongjie, ZHAO Xianping, LI Shengtao. Research progress in condition monitoring and insulation diagnosis of XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1361-1371.
- [81] 吴科, 周凯, 李旭涛, 等. 基于双电容串联模型的 TEV 传感器在电缆终端局放检测中的研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(1): 55-61.
WU Ke, ZHOU Kai, LI Xutao, et al. Research on partial discharge detection of cable termination with TEV sensor based on two capacitors in series model[J]. Insulating Materials, 2016, 49(1): 55-61.
- [82] CHEN W, WANG J, WAN F, et al. Review of optical fibre sensors for electrical equipment characteristic state parameters detection[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 271-281.
- [83] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局放检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [84] 孙廷玺, 陈浩, 钱森, 等. 光纤传感技术在局放检测的研究进展[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 1-8.
SUN Tingxi, CHEN Hao, QIAN Sen, et al. Progress of fiber optic sensor in partial discharge detection for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 1-8.
- [85] 刘颖, 郝艳捧, 陈彦文, 等. 光纤 Mach-Zehnder 干涉法超声波检测研究[J]. 广东电力, 2020, 33(2): 117-124.
LIU Ying, HAO Yanpeng, CHEN Yanwen, et al. Research on Mach-Zehnder fiber interference to ultrasonic detection[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(2): 117-124.
- [86] 周宏扬, 马国明, 张猛, 等. 基于 Michelson 光纤干涉的 GIS 局放超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6452-6459.
ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in GIS based on the Michelson fiber optic interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6452-6459.
- [87] HAO Y, CHEN Y, CHEN Y, et al. A partial discharge detection system for XLPE cable terminals and acoustic wave sensing characteristics based on fiber optic Mach-Zehnder Interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021.
- [88] ZHANG T, PANG F, LIU H. A fiber optic sensor for acoustic emission detection in a high voltage cable system[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2026-2027.
- [89] SONG Z, GUO M, WANG Q. A partial discharge detection and localization system for high voltage cable based on long tailed sagnac interferometric fiber optic sensor[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2017, 59(9): 2132-2136.
- [90] SARKAR B, MISHRA D, KOLEY C, et al. Intensity-modulated fiber bragg grating sensor for detection of partial discharges inside high-voltage apparatus[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(22): 7950-7957.
- [91] ROHWETTER P, EISERMANN R, KREBBER K. Distributed acoustic sensing: Towards partial discharge monitoring [C]//24th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS). Curitiba, Brazil: SPIE, 2015: 1-4.
- [92] 郑文栋, 杨宁, 钱勇, 等. 多传感器联合检测技术在 XLPE 电缆附件局放定位中的试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 84-88.
ZHENG Wendong, YANG Ning, QIAN Yong, et al.

- Experimental research on partial discharge localization in XLPE cable accessories using multi sensor joint detection technology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20):84-88.
- [93] 电力电缆局放带电检测设备技术规范:Q/GDW 11224—2014[S].2014.
- Technical specification for on line detection equipment of partial discharge for power cables: Q/GDW 11224—2014 [S].2014.
- [94] 杨丰源. 高压直流电缆局放特征分析及辨识技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2018.
- YANG Fengyuan. Study on partial discharge characteristic analysis and recognition of high voltage DC cables[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [95] 曹雯,张敏,刘倩,等. 电缆接头复合界面处水分对其闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2018,44(11):3699-3706.
- CAO Wen, ZHANG Min, LIU Qian, et al. Influence of moisture on flashover performance of composite interface cable joint[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3699 - 3706.
- [96] 李蓉,周凯,万航,等. 基于频域反射法的10 kV配电电缆中间接头受潮定位[J]. 电网技术,2021,45(2):825-832.
- LI Rong, ZHOU Kai, WAN Hang, et al. Moisture location of 10 kV cable joints in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 825-832.
- [97] 赵健康,欧阳本红,赵学童,等. 水树对XLPE电缆绝缘材料性能和微观结构影响的研究进展[J]. 绝缘材料,2010,43(5):50-56.
- ZHAO Jiankang, OUYANG Benhong, ZHAO Xuetong, et al. Review of influence of water-tree on microstructure and properties of XLPE cable insulation material[J]. Insulation Materials, 2010, 43(5): 50-56.
- [98] CHEN Y, HUI Baojun, CHENG Yanting, et al. Failure investigation of buffer layers in high-voltage XLPE cables[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 113(10): 1-15.
- [99] CHEN Yun, HUI Baojun, CHENG Yanting, et al. Effects of connection conditions between insulation screen and Al sheath on the buffer layer failures of high-voltage XLPE cables[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 122(4): 1-9.
- [100] 陈云. 高压XLPE电缆缓冲层故障特征与机理[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- CHEN Yun. Fault characteristics and mechanism of high voltage XLPE cable buffer layer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [101] 李伟,吴麟琳,张幸,等. 交联聚乙烯电缆的老化及其诊断方法研究进展[J]. 绝缘材料,2016,49(11):36-44.
- LI Wei, WU Linlin, ZHANG Xing, et al. Research progress in ageing and evaluation of XLPE cable[J]. Insulating Materials, 2016, 49(11):36-44.
- [102] IEEE guide for field testing of shielded power cable systems using very low frequency (VLF) (less than 1 Hz): IEEE Std 400.2™—2013[S].2013.
- [103] 王伟. 交联聚乙烯绝缘电力电缆技术基础[M]. 3版. 西安:西北工业大学出版社,2011.
- WANG Wei. Technical basis of XLPE insulated power cables[M]. 3rd ed. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2011.
- [104] OHKI Y, HIRAI N. Location feasibility of degradation in cable through Fourier transform analysis of broadband impedance spectra[J]. Electrical Engineering in Japan, 2013, 183(1): 1-8.
- [105] HIRAI N, YAMADA T, OHKI Y. Comparison of broadband impedance, spectroscopy and time domain reflectometry for locating cable degradation[C]//IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 229-232.
- [106] 吕峰,何光华,王昱力,等. 高水位运行条件下电缆接头进水缺陷检测技术比对分析[J]. 电气应用,2019,38(9):41-46.
- LYU Feng, HE Guanghua, WANG Yuli, et al. Comparative analysis of detecting methods for water inlet defect of cable joints under high water level condition[J]. Electro-technical Application, 2019, 38(9): 41-46.
- [107] 张睿,江山,闫奇众,等. 基于Mach-Zehnder干涉的全光纤防区型周界系统[J]. 激光技术,2013,37(3):334-337.
- ZHANG Rui, JIANG Shan, YAN Qizhong, et al. All-fiber perimeter alarm system based on Mach - Zehnder interference[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 334-337.
- [108] 李川. 光纤传感器技术[M]. 北京:科学出版社,2020.
- LI Chuan. Fiber optic sensor technology[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [109] XU Fan, WANG Yuanqing. Signal enhancement of a novel multi - address coding lidar backscatters based on a combined technique of demodulation and wavelet denoising [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015(74): 122-129.
- [110] 江俊峰,邹盛亮,王双,等. 空间扫描型光纤法布里—珀罗传感解调中信噪比的影响研究[J]. 光学学报,2015,35(11):79-86.
- JIANG Junfeng, ZOU Shengliang, WANG Shuang, et al. Research on signal-to-noise ratio effect in spatial scanning optical fiber Fabry-Perot sensing demodulation system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 79-86.
- [111] 王贺,孙琪真,李晓磊,等. 干涉型分布式光纤振动传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(2):30-41.
- WANG He, SUN Qizhen, LI Xiaolei, et al. Progress in optical fiber interferometer based distributed vibration

- sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 30-41.
- [112] 无损检测 基于光纤传感技术的应力监测方法: GB/T 33213—2016[S]. 2016.
- Non-destructive testing-practice for strain monitoring based on fiber sensing technology: GB/T 33213—2016[S]. 2016.
- [113] 电力设备状态监测. 高压电缆防外破新装备[EB/OL]. [2024-05-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/tKC8tQraL2U5PHJ79er9hw>.
- Power Equipment Condition Monitoring. New equipment for preventing high voltage cable from external damage[EB/OL]. [2024-05-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/tKC8tQraL2U5PHJ79er9hw>.
- [114] 曹俊平, 刘浩军, 杨勇, 等. 高压电缆附件铅封涡流探伤方法试验验证及应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3720-3726.
- CAO Junping, LIU Haojun, YANG Yong, et al. Verification and application of lead sealing eddy current testing method of high voltage cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3720-3726.
- [115] LI Zhonglei, DU Boxue, LI Wang. Evaluation of high-voltage AC cable grounding systems based on the real-time monitoring and theoretical calculation of grounding currents[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 38-43.
- [116] 丁薇霞. 应用光纤传感技术的高压电缆护层绝缘监测系统[J]. 电线电缆, 2014(5): 22-24.
- DING Weixia. The insulation monitoring system of the HV cable sheath with fiber grating sensing technology[J]. Electric Wire & Cable, 2014(5): 22-24.
- [117] 郭卫, 周松霖, 王立, 等. 电力电缆状态在线监测系统的设计及应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3459-3466.
- GUO Wei, ZHOU Songlin, WANG Li, et al. Design and application of online monitoring system for electrical cable states[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3459-3466.
- [118] 杨静, 朱晓岭, 董翔, 等. 基于护层电流的高压电缆故障在线监测和诊断[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3616-3625.
- YANG Jing, ZHU Xiaoling, DONG Xiang, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults based on sheath currents[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3616-3625.
- [119] DONG Xiang, YANG Yang, ZHOU Chengke, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults by sheath system currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2281-2290.
- 吴春芳(1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事配网运行和安全管理(Email: 184550569@qq.com)。
- 陈云(1993—), 女, 博士研究生, 研究方向为关键电力设备状态检测和故障诊断等(通信作者)(E-mail: epchenyun@mail.scut.edu.cn)。
- 郝艳捧(1974—), 女, 博士(后), 教授, 博士生导师, 研究方向为输电设备状态感知技术、介质阻挡放电和局放等气体放电理论、输变电设备外绝缘安全等(E-mail: yphao@scut.edu.cn)。

(上接第85页)

- System Protection and Control, 2022, 50(21): 43-53.
- [21] 孙东磊, 赵龙, 孙凯祺, 等. 新能源接入下配电系统混合储能选址定容优化策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 423-432.
- SUN Donglei, ZHAO Long, SUN Kaiqi, et al. Research on optimization strategy of HESS site and capacity selection in distribution system with renewable energy access[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(1): 423-432.
- [22] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23.
- PEI Yixuan, GUO Min. The fundamental principle and application of sliding average method[J]. Gun Launch & Control Journal, 2001(1): 21-23.
- [23] PINCUS S M. Assessing serial irregularity and its implications for health[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2001(954): 245-267.
- [24] 王苏蓬, 张新慧, 吴文浩, 等. 用于风电平抑的混合储能选型和容量优化配置方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 16-23.
- WANG Supeng, ZHANG Xinhui, WU Wenhao, et al. Hybrid energy storage selection and capacity optimization configuration method for wind power smoothing[J]. Smart Power, 2021, 49(9): 16-23.
- 刘禹彤(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为主要研究电力系统、能源战略、新能源发展及储能等方面。
- 赵琳(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为能源电力规划、综合能源系统分析、电价与电力市场研究。
- 王鑫太(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为多类型混合储能在电力系统中的应用(通信作者)(E-mail: 18584358018@163.com)。