

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.021

配电电缆试验方法的研究现状和发展趋势

王超¹, 陈云^{2,3}, 肖佳朋², 黄韬², 吴春芳¹, 甄威扬¹, 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: 配电电缆是电网设备的重要组成部分,其绝缘缺陷引发局部放电、整体绝缘老化是导致电缆故障的主要原因。为预防电缆故障、保证配网安全可靠运行,研究配电电缆试验方法具有重要意义。文中总结国内外现行试验标准;阐述配电电缆各种试验方法的原理和试验规程,包括工频电压试验、串联谐振电压试验、振荡波电压试验、超低频正弦波电压试验、超低频余弦方波电压试验;重点综述振荡波和超低频电压试验方法的研究现状和存在问题,讨论电缆局放特性;最后总结上述试验方法的优缺点,探讨其在配电电缆绝缘状态诊断应用的主要发展趋势。

关键词: 配电电缆; 耐压试验; 局放; 介质损耗; 串联谐振; 振荡波; 超低频

Research Status and Development Trend of Distribution Cable Test Methods

WANG Chao¹, CHEN Yun^{2,3}, XIAO Jiapeng², HUANG Tao², WU Chunfang¹,

ZHEN Weiyang¹, 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: Distribution cable is an important part of equipment of power grid. Partial discharge and overall insulation aging due to its insulation defects are main reasons leading the the cable failures. For preventing cable failures and ensuring safe and reliable operation of the distribution power grid, it is of great significance to study the test method of distribution cable. In this paper, the existing test standards both at home and abroad are summarized, the principles and test specification of various test methods for distribution cable, including power frequency voltage test, series resonance voltage test, oscillation wave voltage test, very low frequency sinusoidal wave voltage test, very low frequency cosine rectangular wave voltage test, are described. And the study status and the existed problem of the oscillation wave and very low frequency voltage test method is reviewed in detail and the partial discharge characteristic of cable is discussed. Finally, the prons and cons of the test method mentioned above is summarized and its main development trends of their application in the insulation condition diagnosis of distribution cable are discussed.

Key words: distribution cable; withstand voltage test; partial discharge; dielectric loss; series resonance; oscillating wave; very low frequency

0 引言

近年来,交联聚乙烯(crosslinked polyethylene, XLPE)配电电缆在配网中广泛应用^[1-3]。电缆在长期运行过程中易受电、热、环境等因素作用,导致其绝缘性能逐渐劣化,故障逐年增长^[4-6]。为减少配电网

缆故障停电率,有必要研究配电电缆试验方法,保证配网供电可靠性。

目前配电电缆试验方法众多,主要包括耐压试验和绝缘诊断性试验。耐压试验为破坏性试验,目的是判断电缆能否在特定电压等级和测试耗时内承受负载。绝缘诊断性试验是非破坏性试验,通过

收稿日期:2023-11-21; 修回日期:2024-01-25

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).

绝缘状态参数反映电缆绝缘状况,包括局部缺陷和整体绝缘评估。其中,局部缺陷诊断主要指局部放电试验,可识别并定位电缆绝缘的局放活动,局放现象是反映电力设备绝缘状况的显著指标;整体绝缘诊断方法以介质损耗试验和老化诊断为主,可检测电缆是否老化或是否存在潜在损伤^[7-8]。

电缆耐压试验、绝缘诊断性试验需要高压、低噪声供电系统产生预期励磁电压。现场试验通常使用50/60 Hz交流正弦电压,但考虑到充电设备成本、尺寸和重量,为选择实用经济的供电系统,可在其他电压或频率下开展试验。因此,试验电压波形有直流电压(direct current, DC)、工频电压、串联谐振电压、超低频正弦波电压(very low frequency sinusoidal wave, VLF-sin)、超低频余弦方波电压(very low frequency cosine rectangular wave, VLF-CR)、振荡波电压/阻尼交流电压波(damped alternative current, DAC)^[9-11]。

然而,国内外研究单位和学者们对配电电缆试验方法的有效性、与工频电压的等效性等仍有争论,且目前缺少关于不同电压或频率下电缆局放特性的较全面的研究综述。因此,文中从国内外现行试验标准出发,介绍配电电缆各种试验方法;并重点综述振荡波和超低频电压下试验方法的研究现状及存在问题,讨论其局放特性,包括局放起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)、局放熄灭电压(partial discharge extinction voltage, PDEV)、局放量、局放幅值和局放相位分辨谱图(phase resolved partial discharge, PRPD)等;最后总结上述试验方法的优缺点;在此基础上,展望该领域今后的主要发展趋势。

1 配电电缆试验方法

配电电缆典型试验电压波形见图1。虽然DC试验装置简单轻便,但大量研究显示,直流电压下,XLPE电缆特别是缺陷处存储的单极性残余空间电荷使电场畸变、破坏绝缘;且绝缘中水树易转化为电树,加速绝缘劣化^[12-14]。因此,XLPE电缆现场试验通常使用工频电压。标准GB 50150—2016建议对XLPE电缆优先进行20~300 Hz交流耐压试验^[15]。同时,为降低交流电力电缆充电所需无功功率,DAC和VLF试验得以广泛应用。基于此,文中在XLPE电缆交流电压试验基础上,主要针对DAC和VLF试验展开详细论述。

1.1 工频电压试验

工频电压试验最接近电缆实际运行工况,试验

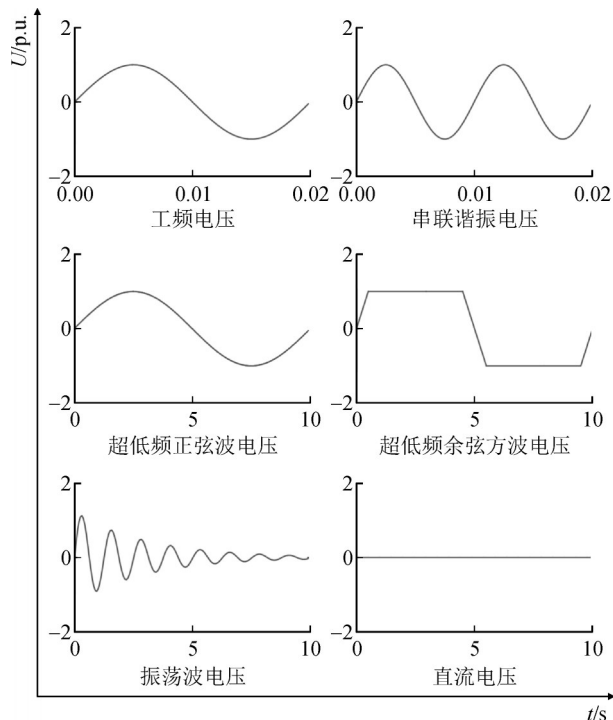


图1 配电电缆典型试验电压波形

结果能较全面、可靠地反映电缆绝缘状况。工频电压试验原理见图2,工频高电压由试验变压器产生^[16-17]。

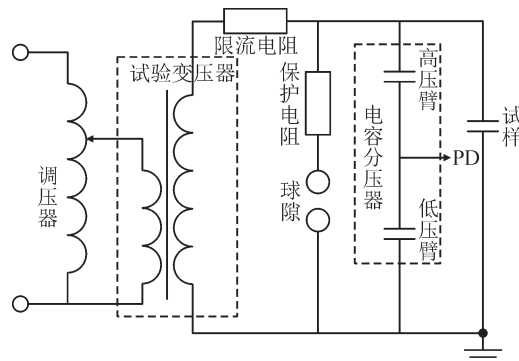


图2 工频电压试验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of power frequency voltage test

1.2 串联谐振电压试验

工频电压试验装置体积、重量、容量等和试验电压等级以及电缆试样长度成正比,因此对于现场长电缆试验,该方法受到限制。串联谐振电压试验利用谐振原理,可大幅缩小变压器尺寸,且试验效果与工频电压等效性较好^[18-19]。

串联谐振电压试验原理见图3。当回路处于串联谐振状态,要求电源频率 f 、电感 L 和试样电容 C 满足式(1)的谐振条件^[16-17]。根据调节方式不同,串联谐振装置分为工频串联谐振装置和变频(10~300 Hz^[17])串联谐振装置两大类。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

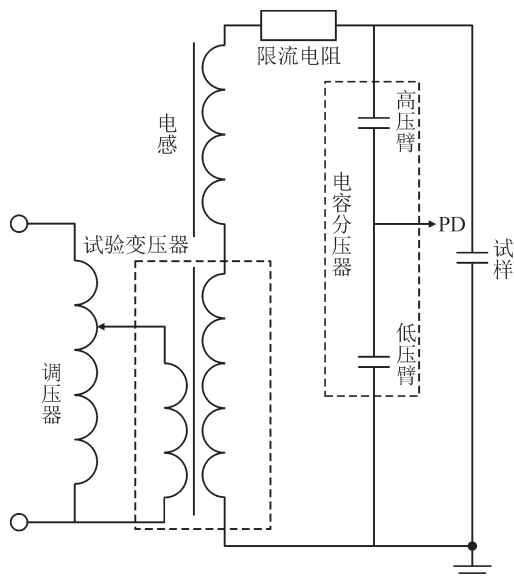


图3 串联谐振电压试验原理图

Fig. 3 Schematic diagram of series resonant voltage test

标准规定的工频和串联谐振电压试验频率,耐压、局放和介损的试验电压及时长见表1^[20-26]。

表1 工频和串联谐振电压试验方法

Table 1 Test methods for power frequency and series resonant voltage

电缆	试验频率/Hz	耐压	局放	介损	标准
电缆	30~300(推荐45~65)	$2U_0/5 \text{ min}$	—	—	Q/GDW 643—2011
新	20~300	①18/30 kV 以下, $2.5U_0/5 \text{ min}$ 或 $2U_0/60 \text{ min}$; ②21/35 kV 和 26/36 kV, $2U_0/60 \text{ min}$	—	U_0	Q/GDW 11838—2018
旧		①18/30 kV 以下, $2U_0/5 \text{ min}$ 或 $1.6U_0/60 \text{ min}$; ②21/35 kV 和 26/36 kV, $1.6U_0/60 \text{ min}$	—		
本体	49~61	$3.5U_0/5 \text{ min}$ 或 $2.5U_0/30 \text{ min}$	$2U_0/10 \text{ s}$ 后 降至 $1.73U_0$	—	GB/T 12706.2—2008、GB/T 12706.3—2008、IEC 60502-2:2014
电缆附件	49~61	$4.5U_0/5 \text{ min}$	$1.73U_0$	—	GB/T 12706.4—2008、IEC 60502-4:2010

1.3.1 试验原理

DAC 指频率 20~500 Hz, 波幅按指数衰减的交流电压波。DAC 系统是基于谐振电感和电缆试样谐振电路的开关组合^[29], 常用直流激励式^[30], 见图4。其中, 谐振电感为低内阻电感, 应满足轻阻尼振荡条件^[31-32]。DAC 试验原理为: 固体开关闭合前, 直流电源通过限流电阻、谐振电感向电缆试样充电; 当充电电压达预设值, 固体开关快速闭合, 谐振电路产生衰减振荡波并直接作用于电缆试样, 激发缺陷部位产生局放, 局放信号通过电容分压器和检测阻抗获取。

1.3.2 试验方法

DAC 试验可应用于电缆耐压试验和绝缘诊断性试验, 如局放和介损试验^[28, 33]。DAC 耐压试验时

串联谐振装置虽可通过无功功率补偿方法减小试验容量, 但其体积、重量仍较大; 此外, 装置容量随电缆试验电压等级、长度的变化而变化。串联谐振装置通常装配在大型车辆中, 便于移动使用, 主要用于高压电缆耐压试验, 不适于较长距离中低压电缆耐压试验。解决该问题主要有两种方法^[27]:

1) 使用谐振原理, 进行 DAC 试验。DAC 设备结构简单, 试验时间短, 供电容量远小于谐振装置, 高压电源的尺寸、重量也大大减小。

2) 降低电压频率, 开展 VLF 试验。因为对绝缘系统施加应力所需电源功率与试验频率、试验电压和试验对象电容成正比, 所以, 低频下, 相同长度的试验电缆所需的电源功率降低, 试验设备的容量和体积也随之降低。

1.3 振荡波电压试验

20 世纪 80 年代末, DAC 系统由荷兰代尔夫特理工大学 Gulski E 教授研发, 作为传统连续交流或直流试验的替代方法^[28]。

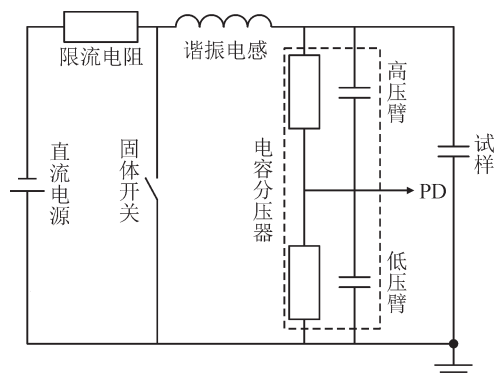


图4 直流激励式DAC试验原理图

Fig. 4 Schematic diagram of DC excited DAC test

结合局放试验, 更能有效发现电缆缺陷。DAC 试验对电缆绝缘影响较小。试验时, 利用电缆等值电容和谐振电感产生正弦振荡波, 在近似工频的 DAC 下

检测局放,且能标定视在放电量。其次,试验过程仅在充电阶段产生直流稳态电场,持续时间比传统耐压试验短,不损坏绝缘^[6,34]。

研究表明,DAC试验电压幅值、频率、激励次数和激励持续时间对电缆性能和检测效果非常重要^[35-37]。DAC局放试验方法见表2^[20-21,32,38]。其中,标准IEEE 400.4:2015根据现场经验,推荐了不同电压等级电缆在20~500 Hz的DAC试验电压值,激励次数50次,加压过程见图5^[38]。

表2 DAC局放试验方法

Table 2 DAC partial discharge test method

电缆	最高试验电压/次数	标准
电缆	推荐采用DAC	Q/GDW 643—2011
新	$2U_0 \geq 5$ 次	Q/GDW 11838—2018
旧	$1.7U_0 \geq 5$ 次	
新	$2U_0/3$ 次	DL/T 1576—2016
旧	$1.7U_0/3$ 次	
新	$3U_0$	IEEE 400.4:2015
旧	$2.4U_0$	

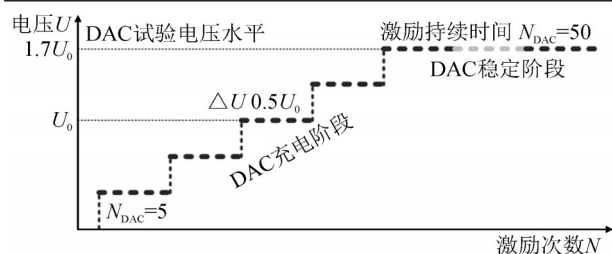


图5 DAC加压过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of DAC voltage application process

此外, Gulski E, Seitz P P, 和 Houtepen R 等指出,根据DAC衰减特性可估计绝缘材料介损值^[39-41]。介损试验特别适合于检测油纸绝缘电缆的绝缘老化,介损值通常在0.1%以上,而XLPE电缆介损值通常低于0.1%。目前国内暂无标准推荐采用DAC进行介损试验,标准IEEE 400.4:2015仅给出了油纸绝缘电缆的试验电压值^[38]。

1.3.3 DAC试验和局放特性

自荷兰代尔夫特理工大学发明DAC系统以来,该校 Gulski E, Smit J J, Morshuis P H F, Wester F J 等人采用DAC在实验室和现场对电缆进行了大量局放试验^[39,42-44],德国、美国、日本等国家、国内高校和各供电局等也进行了很多试验,证明DAC检测缺陷电缆局放的有效性。Gulski E等详细研究了DAC局放试验的评估方法,包括利用多个DAC进行局放定位、利用PRPD谱图识别不同绝缘局部缺陷等^[28]。华南理工大学、广州供电局、广东电科院等利用DAC检测出XLPE电缆终端和接头缺陷^[45-49]。广州供电

局利用DAC进行多源缺陷诊断,在一根电缆接头发现3种局放缺陷^[50]。

为证明DAC产生的局放特性与工频电压相似,通过制作缺陷电缆试样,比较两种电压波形下的PDIV、PDEV、放电量、PRPD谱图、局放定位结果等局放特征,得出DAC与工频电压无显著差异^[28,33,43,51-53]。但有些文献认为DAC的PDIV比工频电压下大得多,局放量也不尽相同^[28,42,45-46,52,54-55]。

然而,DAC在检测电缆水树枝方面争议较大。日本Takahashi T等研究表明DAC检测老化XLPE电缆水树枝具有适用性^[56]。西安交通大学为研究DAC下水树枝缺陷电缆的局放特性,分别测试200 kHz DAC在14、30、34 kV电压下的单个局放波形、幅频特性、相位信息,结果显示与工频电压无明显区别^[57]。但罗俊华则通过试验发现DAC检测进潮和水树枝缺陷电缆效果较差^[58]。

DAC试验结果与电压频率可能存在一定关系。西安交通大学研究发现针尖缺陷电缆试样在20~300 Hz DAC下的击穿电压强烈依赖于频率^[59]。Morshuis P H F等研究不同DAC频率下空气模型气隙放电特征,发现DAC频率越高,局放量越小^[55]。西安交通大学研究表明,DAC频率增大,缺陷电缆试样局放脉冲数增多、幅值增大,PDIV降低,PDEV升高^[60]。华北电力大学研究表明,随DAC频率增大,缺陷电缆试样PDIV越低,局放脉冲数在首个振荡波周期内先增大后减小^[37]。

此外,DAC激励次数与电缆局放也有关系。Wester F J等指出,在较低外施电压下,由于延迟时间较长,为获得稳定的起始局放,需增加DAC激励次数,这取决于DAC衰减因子而不是试验频率^[43]。华北电力大学制作10 kV XLPE电缆中间接头缺陷试样,研究不同DAC激励次数对缺陷电缆最大局放量、局放脉冲数等特性的影响^[61]。

经多年推广使用,DAC试验因运输方便、检测效果好而广泛应用于电力电缆局放无损检测和定位,国内外电力单位也制定了DAC试验要求、导则和标准。2011年,标准Q/GDW 643—2011《配网设备状态检修试验规程》规定,电缆线路诊断性试验推荐采用DAC局放检测^[20]。2016年,标准DL/T 1576—2016《6~35 kV电缆振荡波局放测试方法》实行^[32]。2018年,标准Q/GDW 11838—2018《配电电缆线路试验规程》明确将DAC试验作为配电电缆交接和诊断性试验方法之一^[21]。

在实际应用中,由于被测电缆长度不同,DAC频率会发生变化,从而导致电缆绝缘缺陷引发的局

放特性的变化,因此DAC频率对局放特性及相关放电物理特性的影响有待进一步研究^[62]。

1.4 超低频电压试验

VLF指频率0.01~1 Hz的交流电压^[63-64],常用频率0.1 Hz;电压波形为正弦波、余弦方波、三角波或梯形波^[65-66],前两者应用较多,虽然其他波形可用于电缆试验,但尚未确定推荐的试验电压幅值^[67]。因VLF试验频率仅为0.1 Hz,理论上其试验装置的容量和体积为工频电压装置的1/500,使用方便,操作性强。

1.4.1 超低频正弦波电压试验原理

1961年,通用电气、ASEA等公司将VLF试验方法用于电机绝缘^[68]。20世纪90年代,世界各地电网公司开始采用VLF-sin进行配电电缆耐压、介损和局放试验。

VLF-sin试验原理见图6。VLF-sin可用下述方法产生:控制正极性和负极性高压直流电源对容性试样充电;通过可调电阻对试样放电^[63-64]。

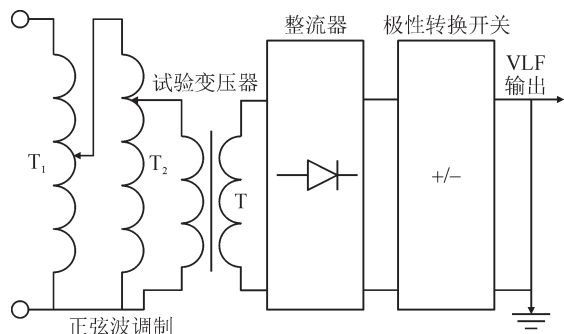


图6 VLF-sin试验原理图

Fig. 6 Schematic diagram of VLF-sin test

1.4.2 超低频余弦方波电压试验原理

20世纪80年代早期,Hagenuk KMT发明VLF-

CR试验技术^[69]。VLF-CR试验原理见图7。首先直流电源对电缆试样正向充电,当达到预设电压及半周期时间时,断开电源,闭合固体开关,此时谐振电感与电缆试样形成串联谐振回路,试样两端电压转换极性,然后关断固体开关,闭合负极性直流电源,对电缆试样负向充电。当电压达到预设值且半周期时间时,切断负极性直流电源,闭合固体开关,谐振电感与电缆试样形成串联谐振回路,电压极性反转为正极性。如果循环往复,即可形成一定周期的VLF-CR。

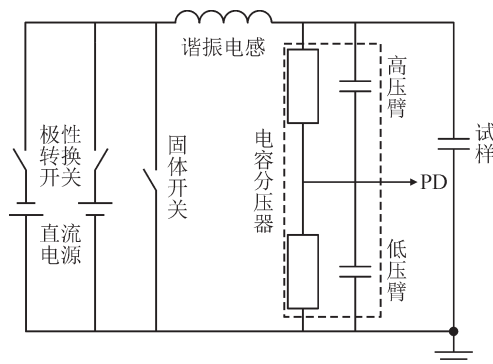


图7 VLF-CR试验原理图

Fig. 7 Schematic diagram of VLF-CR test

1.4.3 试验方法

VLF局放或介损试验可结合耐压试验同步开展。VLF试验方法见表3^[21, 67]。标准IEEE 400.2: 2013根据实际电缆运行经验推荐了中低压电缆VLF试验电压值^[67]。VLF介损试验电压应以规定步进值逐渐升高至规定值,每个步进电压下应至少完成规定次数的测量。介损特征可通过介损稳定性(U_0 下介损值标准偏差)、介损变化量($1.5U_0$ 与 $0.5U_0$ 差值)和介损平均值(U_0)进行表征。

表3 VLF电压试验方法

Table 3 VLF voltage test method

电缆	耐压	局放(最高试验电压/时长)	介损(试验电压/次数)	标准
新	18/30 kV 以下, $3U_0/15$ min 或 $2.5U_0/60$ min	VLF-sin $3U_0 \geq 15$ min 或 VLF-CR $2.5U_0 \geq 15$ min	U_0 、 $2U_0$, 每级电压 ≥ 5 次	Q/GDW 11838—2018
旧	21/35 kV 和 26/35 kV, $2.5U_0/15$ min 或 $2U_0/60$ min	VLF-sin $2.5U_0 \geq 15$ min 或 VLF-CR $2U_0 \geq 15$ min	$0.5U_0$ 、 U_0 、 $1.5U_0$, 每级电压 ≥ 5 次	
电缆	详见标准	—	$0.5U_0$ 、 U_0 、 $1.5U_0$, 每级电压 ≥ 6 次	IEEE 400.2: 2013

1.4.4 VLF试验和局放特性

VLF试验起源之初仅用于交流耐压方法,后来逐渐发展成为集耐压、介损、局放试验为一体的配电电缆综合性试验方法,尤其是介损试验^[70-71],具有高检测灵敏度、准确反映电缆整体绝缘老化状态的优点。目前该技术已在国际上广泛应用,电力单位

采用该技术在电缆绝缘老化状态评价及部分典型缺陷诊断方面取得一定成果。

与DAC试验相反,VLF试验对电缆受潮、水树枝的检测效果得到国内外电力行业一致认可。西北电力试研院对运行超过10年、含水树的电缆进行试验,发现早期水树在VLF下能很快发展直至击穿^[72]。

马来西亚 Chong M S 分析 VLF 试验结果,发现检测到的电缆故障几乎都由接头引起,水通过被刺穿的电缆护套或接缝处无效的防潮密封胶而渗入接头^[73-74]。德国 Gockenbach E 和罗俊华等研究认为,VLF 对水树枝缺陷电缆最敏感,VLF 下击穿电压显著低于工频电压下^[118, 75]。

尽管 VLF 耐压和介损试验可能表现良好,但不能定位绝缘缺陷;局放试验可检测接头、终端缺陷并定位大多数局放,但是现场局放检测在噪声、测量灵敏度和精度方面存在困难^[76]。意大利 Krotov V 和 Cavallini A 也指出在局放试验中,VLF 可能不是最好的选择。一方面,VLF 局放幅值通常低于工频电压,且 VLF 系统中使用的开关器件噪声更大。另一方面,VLF-sin 的 PRPD 谱图与工频时相当;而 VLF-CR 局放模式与工频时可能不同,识别要复杂得多^[77]。埃及 Gouda O E 等则推荐在中压电缆诊断过程开始时使用 VLF-CR,因为局放大多发生在极性变化区,有利于检测隐藏缺陷,然后使用 VLF-sin 继续诊断,因其结果与工频电压等效性较好^[78-79]。

局放试验方面,大多数研究集中在低频和工频的试验结果是否相似。虽然学者们已对低频下局放特性和机理做了大量研究,但在频率依赖性方面仍存在不一致性。埃及 Gouda O E 等建立带人工空穴缺陷的中压 XLPE 电缆试样,利用 50、0.1、0.01 Hz 的正弦波和 0.1、0.01 Hz 的余弦方波进行局放试验,并采用 Comsol 和 MATLAB 进行数值模拟,结果显示试验和仿真吻合较好。电缆局放取决于电压波形和频率。统计时延对局放频率依赖性有很大影响,导致在较低频率增加局放脉冲数,在较高频率增加局放幅度^[78-79]。澳大利亚 Hong V P N 等在 VLF 和工频电压下,研究由固体绝缘材料包围的圆柱形空穴的内部放电随空穴尺寸和施加电压的变化,分析局放幅度、重复率、PRPD 谱图。结果表明局放特性与电压频率和上升速率相关;无论电压波形如何,VLF 放电量通常低于工频下^[80]。奥地利 Rethmeier K 指出,因电压过零次数较少,0.1 Hz 时的局放重复率比工频电压下低,因此局放重复率不能作为判断电缆或其附件状况的手段^[81]。瑞典 Forssen C 等研究内含空穴缺陷的聚碳酸酯在 0.01~100 Hz 频率下的局放特性,其频率依赖性随电压幅值、空腔位置和空腔直径的变化而变化^[82-84]。罗俊华指出 VLF 局放试验的有效性和判据、与工频电压的等效性,有待现场试验数据的积累和深入研究^[75]。

VLF 试验电压幅值和试验时间与发现电缆绝缘缺陷有效率直接相关。罗俊华根据国内外实验

室和现场试验结果,通过数理统计法得出 VLF 试验电压 $3U_0$ 、试验时间 40 min,能满足电缆绝缘状态评估的试验要求^[85]。Hernandez-Mejia J C 和 Hampton R N 等统计了超过 9 000 英里电缆的 VLF 耐压试验结果,发现电缆绝缘缺陷越严重,耐压越低,耐压时间也越短;过高电压值可能对完好绝缘造成永久损伤^[113, 86-87]。

自 2012 年以来,IEEE、IEC 等国际标准陆续推荐配电电缆进行 VLF 介损、局放、耐压三合一试验。标准 IEEE 400.2:2013 详细阐述了 VLF 试验流程和诊断评估方法^[67]。2018 年,标准 Q/GDW 11838—2018《配电电缆线路试验规程》规定,配电电缆交接和诊断性试验可采用 VLF 试验^[21]。2020 年,标准 T/CEC 243—2019《10~35 kV 挤包绝缘电力电缆系统超低频(0.1 Hz)现场试验方法》实行,规定 VLF 试验是电缆绝缘状态评价的试验方法之一^[88]。

应注意的是,VLF 试验方法的选择通常由经济因素决定,现有研究多集中在局放特性频率依赖性的物理机理上,对工业应用研究较少,尚缺乏可靠的 VLF 局放诊断方法。因此未来应重点关注 VLF 局放检测的实际应用^[62]。

2 配电电缆试验方法对比

国内外研究单位和学者们对配电电缆试验方法进行了大量研究。目前,DAC 和 VLF 试验因其装置体积重量小、使用方便、试验效果好,在电缆实际应用中并存,但其耐压、局放、介损试验结果的有效性、与工频电压试验结果的等效性,仍是行业内激烈争论的重点。此外,每种试验方法对应装置的性能改进,特别是 DAC、VLF 这两种装置的结合使用,也是当下研究热点。

2.1 不同试验方法优缺点

日本 Uchida K 等对不同缺陷 XLPE 电缆分别进行工频电压、DAC、VLF 和 DC 耐压试验,给出不同试验电压下的击穿电压与工频电压的等效系数的雷达分布图。其中,DC 试验等效系数较大;VLF 试验等效系数在气隙缺陷处有较大尖端;DAC 试验等效系数分布较均衡。因此,与工频耐压试验结果的等效性方面,DAC 试验优于 DC 和 VLF 试验^[89]。

罗俊华对含缺陷 XLPE 配电电缆试样同时进行 DC、工频电压、DAC 和 VLF 下的耐压、介损及局放试验,得到 DC、VLF 和 DAC 试验与工频电压试验的等效系数,并认为 VLF 和 DAC 试验分别适合配电电缆绝缘预防性试验和竣工试验。研究还表明,由于 VLF 试验电压幅值和极性变化缓慢,不利于准确检

测介质缺陷局放;而DAC试验则易产生局放,且与工频电压试验结果等效性较好^[90]。

奥地利BAUR公司通过试验研究表明,与工频电压相比,VLF试验下电树枝生长快,能使缺陷更快击穿,灵敏度更好。此外,VLF-sin试验检测绝缘介电强度比DAC试验更敏感^[91]。

浙江电科院和中国电科院采用DAC、VLF-sin和VLF-CR对9种含不同缺陷的10 kV XLPE电缆进行介损、局放试验。结果表明,VLF-CR与DAC试验的局放特性相似,因为其激励波形有效部分,即正负极性间电压上升速率相当,但VLF-CR频率较低,可能导致PDIV较高、放电幅度较小,建议将VLF-CR最大电压等级提高到 $2.5U_0$ 进行验收试验。而VLF-sin试验对潮湿、电损耗附件检测能力较好,但VLF-sin试验比VLF-CR试验需更高电压水平来弥补激励电树效率不足,达到与DAC试验相同程度。

建议新安装电缆验收试验中将VLF-sin监测耐压及介损试验、DAC或VLF-CR局放试验相结合作为现场诊断工具^[92]。

根据标准IEEE 400.2:2013、IEEE 400.4:2015,DAC和VLF试验各有优缺点。VLF介损试验优于DAC;而接近实际运行电压频率时,DAC局放试验优于VLF^[38,67]。DAC试验持续时间较短,可能比VLF试验的破坏性小,因此DAC试验可作为绝缘缺陷检测的第一步^[76]。此外,VLE-CR下,大多数局放发生在电压极性变化期间,有利于检测电缆隐蔽缺陷,因此该电压波形也可用于电缆诊断过程的开始^[69,79,93]。实验室和现场试验表明,DAC和VLF试验检测配电电缆不同缺陷具有不同灵敏度,DAC试验对空穴放电引起击穿的缺陷敏感,而VLF试验对直接由电树起始引起击穿的缺陷敏感^[94]。配电电缆不同试验方法的优缺点见表4。

表4 配电电缆不同试验方法优缺点

Table 4 Advantages and disadvantages of different test methods for distribution cables		
电压波形	优点	缺点
工频	最接近电缆实际运行工况	现场使用不便 需外接局放和介损测量系统
串联谐振电压	缺陷激发较为有效 接近出厂试验和电缆实际运行工况 适用于所有电缆类型	体积重量大 电抗器易发热 谐振回路噪音大 需外接局放和介损测量系统
DAC	体积重量小 检出局部缺陷灵敏度高、等效性好 试验时间短,对绝缘伤害性小 内置局放和介损测量系统	大多直流激发 只能在前半周期控制电压大小 无法连续测量、需多次激发 耐压试验不如工频电压有效 由于可变频率和阻尼波形,PRPD谱图难以解释
VLF-sin	体积重量小 不聚集空间电荷 检出水树、受潮缺陷特别有效 内置局放和介损测量系统	试验时间长、可能损伤绝缘 试验电压上限值低 等效性有待验证 介损试验结果受温度影响 无法精确定位缺陷
VLF-CR	体积重量小 不聚集空间电荷 转换斜率类似工频电压、等效性好 内置局放和介损测量系统	频率降低、试验时间长 介损试验结果受温度影响 PRPD谱图难以解释

2.2 配电电缆试验系统性能改进

国内外对DAC和VLF系统的技术改进也作了研究。泰国Seesanga S为缩小VLF装置尺寸、降低成本,开发了以级联多电平技术为基础的VLF-sin高压发生器^[66]。西安交通大学发明了一种基于调频串联谐振技术和电容器组的低成本DAC系统^[95]。该团队还将高压直流电源与固态开关结合,利用可

控绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)代替直流电压倍增器中的二极管,以较低成本生成双极DAC,双极充电功能可用于VLF-CR或VLF-sin发生器^[96]。

DAC系统内部组件与VLF-CR系统相同,只需对放电开关作微小修改,就可在DAC模式下运行VLF-CR测试集^[69]。因此,两种试验系统的集成,适

于更多状态下的电缆绝缘状态诊断,DAC能有效诊断主绝缘和附件局放缺陷,VLF-CR更易发现水树击穿、进水受潮等缺陷。Onsite HV公司Cejka G和Gulski E等将DAC和VLF-sin系统相结合,用于40 kV电缆试验,通过改变DAC系统中固体开关的设计,使其在串联谐振阶段也能打开,且该开关起双极作用,使用VLF数字控制电源方便地产生正弦波。这些改变不会增大系统体积和重量,而成本低于单独DAC和VLF两套系统的成本^[97]。

3 结语

文中介绍了配电网工频电压试验、串联谐振电压试验、振荡波电压试验、超低频正弦波电压试验、超低频余弦方波电压试验的原理和试验规程;重点综述了振荡波和超低频电压试验方法的研究现状,分析了其特点与局限性;总结了上述试验方法的优缺点;探讨了其在配电网电缆绝缘状态诊断应用的主要发展趋势。

振荡波和超低频电压试验因其装置体积重量小、运输方便、试验效果良好而得到国内外电力行业的广泛认可。这两种试验可检测特定类型缺陷,在缺陷检测能力方面互补,两者结合可提高缺陷检测能力。但振荡波试验频率取决于电缆回路总电容量、电感量,国内外规定的振荡波试验电压幅值、激励次数和激励时间存在差异;而超低频试验电压幅值和时长也暂无统一论。此外,振荡波和超低频电压下的耐压、局放、介损试验结果的有效性、与工频电压的等效性,仍是学者们极为关注和研究的焦点。

未来应在实体长电缆上开展更多典型缺陷试样的耐压和绝缘诊断性试验,统计分析不同波形下的击穿特性、局放特性和介损特性等,形成更为全面、有效的电缆绝缘状态评估系统;并通过建立物理过程的数学模型,分析微观过程,与试验结果相互佐证,为现场试验选择合适的试验电压波形参数及制定合理的试验规程奠定基础,保证现场试验的科学性和有效性。

参考文献:

- [1] 柳怡晨,于竞哲,陈向荣,等.基于TOPSIS-RSR方法的水环境下交流配网XLPE电缆绝缘状态评估[J]. 高压电器,2021,57(7):105-111.
LIU Yichen, YU Jingzhe, CHEN Xiangrong, et al. Insulation condition assessment of XLPE cable in AC distribution network under water environment based on TOPSIS-RSR method[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 105-111.
- [2] 单秉亮,李舒宁,杨霄,等. XLPE配电网电缆缺陷诊断与定位技术面临的关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22):4809-4819.
SHAN Bingliang, LI Shuning, YANG Xiao, et al. Key problems faced by defect diagnosis and location technologies for XLPE distribution cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22):4809-4819.
- [3] 邓红雷,杨浩,谢月,等. 基于高温介电谱测量的XLPE老化状态评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4):156-161.
DENG Honglei, YANG Hao, XIE Yue, et al. Aging assessment of XLPE based on high temperature dielectric spectra [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 156-161.
- [4] 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 Huaiyin, 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.
- [5] 王昊月,李成榕,王伟,等. 高压频域介电谱诊断XLPE电缆局部绝缘老化缺陷的研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6):1542-1553.
WANG Haoyue, LI Chengrong, WANG Wei, et al. Local aging diagnosis of XLPE cables using high voltage frequency domain dielectric spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1542-1553.
- [6] 杜浩,关弘路,蒋琛,等. 交流电压下交联聚乙烯电缆典型缺陷局部放电特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12):164-170.
DU Hao, GUAN Honglu, JIANG Chen, et al. Investigation of partial discharge characteristics of typical defects in XLPE cable under AC voltages[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 164-170.
- [7] 王昊月,王晓威,孙茂伦,等. XLPE电缆绝缘热老化的高压频域介电谱诊断方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17):4497-4507.
WANG Haoyue, WANG Xiaowei, SUN Maolun, et al. High voltage frequency domain dielectric spectroscopy diagnosis method for thermal aging of XPLE cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4497-4507.
- [8] 刘维功,王昊展,时振堂,等. 基于改进XGBoost算法的XLPE电缆局部放电模式识别研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4):98-106.
LIU Weigong, WANG Haozhan, SHI Zhentang, et al. Research on partial discharge pattern recognition of XLPE cable based on improved XGBoost algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 98-106.

- [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] DENSLEY J. Review of international standards and practices for medium voltage power cable diagnostics[C]//2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Winchester: IEEE, 2007: 711-716.
- [11] 林涛, 翟璐, 孙浩飞, 等. 长距离 330 kV 交联聚乙烯电缆交接试验研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 28-36.
LIN Tao, ZHAI Lu, SUN Haofei, et al. Study on commissioning test of long-distance 330 kV XLPE power cable[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 28-36.
- [12] EAGER G S, FRYSZCZYN B, KATZ C, et al. Effect of DC testing water tree deteriorated cable and a preliminary evaluation of VLF as alternate[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1582-1591.
- [13] HAMPTON R N, PERKEL J, HERMANDEZ J C, et al. Experience of withstand testing of cable systems in the USA [C]//43rd International Conference on Large High Voltage Electric Systems. France: CIGRE, 2010: B1-303.
- [14] DISSADO L A, LAURENT C, MONTANARI G C, et al. Demonstrating a threshold for trapped space charge accumulation in solid dielectrics under DC field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3): 612-620.
- [15] 电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB 50150—2016[S]. 2016.
Electric equipment installation engineering standard for hand-over test of electric equipment: GB 50150—2016 [S]. 2016.
- [16] 电线电缆电性能试验方法 第8部分: 交流电压试验: GB/T 3048.8—2007[S]. 2007.
Test methods for electrical properties of electric cables and wires-Part 8: AC voltage test: GB/T 3048.8—2007[S]. 2007.
- [17] 现场绝缘试验实施导则 交流耐压试验: DL/T 474.4—2006[S]. 2006.
Guide for insulation test on site AC voltage withstanding test: DL/T 474.4—2006[S]. 2006.
- [18] GOCKENBACH E, HAUSCHILD W. The selection of the frequency range for high-voltage on-site testing of extruded insulation cable systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(6): 11-16.
- [19] 赵健康, 欧阳本红. 高压电缆竣工试验变频耐压与工频耐压等效性研究[C]//第十三届全国工程电介质学术会议. 西安: 中国电工技术学会, 2011: 393-397.
ZHAO Jiankang, OUYANG Benhong. Study on equivalence between variable frequency and power frequency voltage test of after-laying test for HV cable[C]//the 13th National Engineering Dielectric Academic conference. Xi'an: China Electrotechnical Society, 2011: 393-397.
- [20] 配网设备状态检修试验规程: Q/GDW 643—2011[S]. 2011.
Regulation of condition based maintenance test for electric distribution network equipments: Q/GDW 643—2011 [S]. 2011.
- [21] 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.
- [22] 额定电压 1 kV ($U_m=1.2$ kV) 到 35 kV ($U_m=40.5$ kV) 挤包绝缘电力电缆及附件 第2部分: 额定电压 6 kV ($U_m=7.2$ kV) 到 30 kV ($U_m=36$ kV) 电缆: GB/T 12706.2—2008[S]. 2008.
Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m=1.2$ kV) up to 35 kV ($U_m=40.5$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m=7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV): GB/T 12706.2—2008 [S]. 2008.
- [23] 额定电压 1 kV ($U_m=1.2$ kV) 到 35 kV ($U_m=40.5$ kV) 挤包绝缘电力电缆及附件 第3部分: 额定电压 35 kV ($U_m=40.5$ kV) 电缆: GB/T 12706.3—2008[S]. 2008.
Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m=1.2$ kV) up to 35 kV ($U_m=40.5$ kV) - Part 3: Cables for rated voltage of 35 kV ($U_m=40.5$ kV): GB/T 12706.3—2008[S]. 2008.
- [24] 额定电压 1 kV ($U_m=1.2$ kV) 到 35 kV ($U_m=40.5$ kV) 挤包绝缘电力电缆及附件 第4部分: 额定电压 6 kV ($U_m=7.2$ kV) 到 35 kV ($U_m=40.5$ kV) 电力电缆附件试验要求: GB/T 12706.4—2008[S]. 2008.
Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m=1.2$ kV) up to 35 kV ($U_m=40.5$ kV) - Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV ($U_m=7.2$ kV) up to 35 kV ($U_m=40.5$ kV): GB/T 12706.4—2008[S]. 2008.
- [25] Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m=1.2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m=7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV): IEC 60502-2: 2014[S]. 2014.
- [26] Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m=1.2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV) - Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV ($U_m=7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV): IEC 60502-4: 2010[S]. 2010.
- [27] 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.
- [28] GULSKI E, WESTER F J, SMIT J J, et al. Advanced partial discharge diagnostic of MV power cable system using

- oscillating wave test system[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(2): 17-25.
- [29] 李旭, 郝晓光, 朱明正, 等. 两起不同工艺 35 kV 电缆中间接头振荡波局部放电缺陷对比分析[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 260-264.
- LI Xu, XI Xiaoguang, ZHU Mingzheng, et al. Comparative analysis of oscillating wave induced partial discharge defects in two 35 kV cable joints with different processes [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 260-264.
- [30] KOO J Y, KIM J T, LEE J S, et al. A study on the oscillating wave voltage test as an after-laying test for distribution power cables[C]//IEEE 1997 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Minneapolis: IEEE, 1997: 334-341.
- [31] 6 kV~35 kV 电缆振荡波局部放电测量系统: DL/T 1575—2016[S]. 2016.
- Partial discharge measuring system for 6 kV~35 kV power cables based on oscillating wave voltage: DL/T 1575—2016 [S]. 2016.
- [32] 6 kV~35 kV 电缆振荡波局部放电测量方法: 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.
- [33] WESTER F J. Condition assessment of power cables using partial discharge diagnosis at damped AC voltages[D]. Delft: Delft University of Technology, 2004.
- [34] 杨连殿, 朱俊栋, 孙福, 等. 振荡波电压在 XLPE 电力电缆检测中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 27-30.
- YANG Liandian, ZHU Jundong, SUN Fu, et al. Use of oscillating wave voltage in the measurements of XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 27-30.
- [35] GULSKI E, RAKOWSKA A, SIODLA K, et al. On-site testing and diagnosis of transmission power cables up to 230 kV using damped AC voltages[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014, 30(3): 27-38.
- [36] 姜义虎. 振荡波加压次数对电缆缺陷局部放电特性及电缆绝缘损伤的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- JIANG Yihu. Study on the influence of oscillating voltage exciting times on partial discharge characteristics of cable defects and cable insulation damage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [37] 张瀚驰. 振荡波频率对交联聚乙烯电缆缺陷局部放电特性影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- ZHANG Hanchi. Research on effect of DAC frequencies on partial discharge characteristics of defects in XLPE cables [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [38] IEEE Guide for field testing of shielded power cable systems rated 5 kV and above with damped alternating current (DAC) voltage: IEEE Std 400.4: 2015[S]. 2015.
- [39] HOUTEPEN R, CHMURA L, SMIT J J, et al. Estimation of dielectric loss using damped AC voltages[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(3): 20-25.
- [40] GULSKI E, SMIT J J, WESTER F J, et al. Condition assessment of high voltage power cables[C]//2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. Paris: IEEE, 2004: 1661-1666.
- [41] SEITZ P P, QUAKE B, GULSKI E, et al. Novel method for on-site testing and diagnosis of transmission cables up to 250 kV[C]//the 7th International Conference on Insulated Power Cables. Paris: Jicable, 2007: 1-6.
- [42] GULSKI E, SMIT J J, SEITZ P, et al. PD measurements on-site using oscillating wave test system[C]//Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 98CH36239). Arlington: IEEE, 1998: 420-423.
- [43] WESTER F J, GULSKI E, SMIT J J. Detection of partial discharges at different AC voltage stresses in power cables [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(4): 28-43.
- [44] WILD M, TENBOHLEN S, GULSKI E, et al. Basic aspects of partial discharge on-site testing of long length transmission power cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1077-1087.
- [45] 刘刚, 阮班义, 陈志娟, 等. 10 kV XLPE 电缆接头连接管含空气隙缺陷的电场分析[J]. 绝缘材料, 2011, 44(5): 62-66.
- LIU Gang, RUAN Banyu, CHEN Zhijuan, et al. Analysis on the electric field of 10 kV XLPE cable joint connecting pipe with air gap defects[J]. Insulating Materials, 2011, 44(5): 62-66.
- [46] 刘刚, 陈志娟. 10 kV 交联聚乙烯电缆终端主绝缘含空气隙缺陷试验[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 678-683.
- LIU Gang, CHEN Zhijuan. Air gap defect test of 10 kV XLPE cable terminal insulation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 678-683.
- [47] 陆国俊, 熊俊, 王勇, 等. 振荡波电压法检测 10 kV 电缆局部放电试验[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 137-140.
- LU Guojun, XIONG Jun, WANG Yong, et al. 10 kV XLPE cable partial discharge detection based on oscillating waves [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 137-140.
- [48] 陆国俊, 熊俊. 10 kV 电缆局部放电的振荡波电压法检测[J]. 南方电网技术, 2013, 7(4): 34-38.
- LU Guojun, XIONG Jun. The partial discharge diagnosis of 10 kV cables by using oscillating wave voltage method[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(4): 34-38.
- [49] 彭发东, 庞小峰, 喇元, 等. 电缆中间接头应力锥安装

- 错位检测的试验研究[J]. 广东电力, 2013, 26(3): 41-44.
- PENG Fadong, PANG Xiaofeng, LA Yuan, et al. Study on test for installation malposition detection of cable joint stress cone[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(3): 41-44.
- [50] LU G, WU G, XIONG J, et al. Sensitivity analysis of cable oscillating wave test system on multi - source defects diagnostics[C]//24th International Conference on Electricity Distribution(CIRED 2017), Glasgow: IET, 2017: 1-5.
- [51] 陈成伟. 10 kV XLPE 电缆振荡波试验电压研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- CHEN Chengwei. Study of 10 kV XLPE cable detection using oscillating voltage[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [52] GULSKI E, MEIJER S, SMIT J J, et al. Transmission power cables PD detection at damped AC voltages[C]//Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Indianapolis: IEEE, 2004: 462-465.
- [53] BRETTSCHEIDER S, LEMKE E, HINKLE J L, et al. Recent field experience in PD assessment of power cables using oscillating voltage waveforms[C]//Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 02CH37316). Boston: IEEE, 2002: 546-552.
- [54] 陈志娟. 基于振荡波电压法的 10 kV XLPE 电缆局部缺陷检测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- CHEN Zhijuan. The research on detection of 10 kV XLPE cable partial defects based on oscillatory voltage method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [55] MORSHUIS P H F, BODEGA R, LAZZARONI M, et al. Partial discharge detection using oscillating voltage at different frequencies[C]//IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No. 00CH37276). Anchorage: IEEE, 2002: 431-435.
- [56] TAKAHASHI T, TAKAHASHI T, OKAMOTO T. Insulation diagnosis for XLPE cables using damping oscillating high voltage[C]//2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Beijing: IEEE, 2008: 471-474.
- [57] CICHECKI P, JONGEN R A, GULSKI E, et al. Statistical approach in power cables diagnostic data analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1559-1569.
- [58] 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(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(12): 58-61.
- [59] 周立, 周福升, 王诗航, 等. 阻尼振荡波电压下含针尖缺陷交联聚乙烯电缆绝缘的击穿特性研究[J]. 绝缘材料, 2013, 46(1): 49-52.
- ZHOU Li, ZHOU Fusheng, WANG Shihang, et al. Breakdown characteristic of XLPE cable insulation with needle defect under damped AC voltage[J]. Insulating Materials, 2013, 46(1): 49-52.
- [60] 张龙, 王笑棠, 黄晨曦, 等. 不同频率振荡波电压下 XLPE 电缆局部放电特性的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 128-133.
- ZHANG Long, WANG Xiaotang, HUANG Chenxi, et al. Characteristics of partial discharge in XLPE cable under damped AC voltage with different frequencies[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 128-133.
- [61] 姜义虎, 张瀚驰, 范伟男, 等. 振荡波加压次数对电缆缺陷局部放电特性的影响[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 140-145.
- JIANG Yihu, ZHANG Hanchi, FAN Weinan, et al. Influence of oscillating voltage exciting times on partial discharge characteristics of cable defects[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 140-145.
- [62] NIASAR M G, WANG X, KHIZA R C. Review of partial discharge activity considering very - low frequency and damped applied voltage[J]. Energies, 2021, 14: 1-20.
- [63] 高电压试验技术第 3 部分: 现场试验的定义及要求: GB/T 16927.3—2010[S]. 2010.
- High voltage test techniques - Part 3: Definitions and requirements for on - site testing: GB/T 16927.3—2010 [S]. 2010.
- [64] High - voltage test techniques - Part 3: Definitions and requirements for on - site testing: IEC 60060 - 3: 2006 [S]. 2006.
- [65] PUTTER H T, GÖTZ D, PETZOLD F, et al. The evolution of VLF testing technologies over the past two decades[C]//PES T&D 2012. Orlando: IEEE, 2012: 1-4.
- [66] SEESANGA S, KONGNUN W, SANGSWANG A, et al. A new type of the VLF high voltage generator[C]//2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Krabi: IEEE, 2008: 929-932.
- [67] 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.
- [68] PESCHEL M T. Needed changes in medium voltage cable testing. Were you in on it? welcome to the world of VLF[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Diego: IEEE, 2010: 1-5.
- [69] PROBST R, PUTTER H, PETZOLD F, et al. Excitation voltages for partial discharge diagnostics on medium voltage distribution cables[C]//2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). Denver: IEEE,

- 2018:1-5.
- [70] 刘英,王林杰,苏宇,等.基于0.1 Hz下 $\tan\delta$ 的XLPE电缆绝缘老化状态评估技术[J].绝缘材料,2016,49(5):41-45.
- LIU Ying, WANG Linjie, SU Yu, et al. Ageing condition assessment of XLPE cable insulation based on $\tan\delta$ at 0.1 Hz[J]. Insulating Materials, 2016, 49(5):41-45.
- [71] HERNANDEZ-MEJIA J C, PERKEL J, HARLEY R, et al. Correlation between $\tan\delta$ diagnostic measurements and breakdown performance at VLF for MV XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1):162-170.
- [72] 张重午.德国交联聚乙烯电力电缆的0.1 Hz交流耐压和 $\tan\delta$ 试验[J].西北电力技术,1998(1):60-65.
- ZHANG Chongwu. 0.1 Hz AC withstand voltage and $\tan\delta$ test of German XLPE power cable[J]. Northwest China Electric Power, 1998(1):60-65.
- [73] CHONG M S. Partial discharge mapping of medium voltage cables-TNB's experience[C]//16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. (IEE Conf. Publ. No. 482). Amsterdam: IET, 2001:1-5.
- [74] CHONG M S. Very low frequency testing its effectiveness in detecting hidden defects in cables[C]//17th International Conference on Electricity Distribution(CIRED 2003). Barcelona: IET, 2003:1-3.
- [75] 罗俊华,付丽玮,陶士利,等.0.1 Hz和50 Hz电压下XLPE电缆局部放电对比试验[J].高电压技术,2010,36(8):2000-2004.
- LUO Junhua, FU Liwei, TAO Shili, et al. Comparing tests of partial discharge on XLPE power cable at 0.1 Hz voltage and 50 Hz voltage[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8):2000-2004.
- [76] SU C Q, 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.
- [77] KROTOV V, CAVALLINI A. Comparison of PD patterns at power and very low frequency: Is diagnostic possible?[C]//IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Bologna: IEEE, 2013:109-112.
- [78] GOUDA O E, ELFARSKOURY A A, ELSINNARY A R, et al. Investigating the effect of cavity size within medium voltage power cable on partial discharge behaviour[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2017, 12(5):1190-1197.
- [79] GOUDA O, ELFARASKOURY A, ELSINAR A R, et al. Investigating the effect of frequency and wave shape of voltage source on partial discharge behaviour within cavity in medium voltage cable[C]//2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). Cairo: IEEE, 2017:1093-1099.
- [80] NGUYEN H V P, PHUNG B T. Void discharge behaviours as a function of cavity size and voltage waveform under very low-frequency excitation[J]. High Voltage, 2018, 3(2):96-102.
- [81] RETHMEIER K, MOHAUPT P, BERGMANN V, et al. New studies on PD measurements on mv cable systems at 50 Hz and sinusoidal 0.1 Hz(VLF) test voltage[C]//19th International Conference on Electricity Distribution(CIRED 2007). Vienna: IET, 2007:1-4.
- [82] FORSSEN C, EDIN H. Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 1: Measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6):1601-1609.
- [83] FORSSEN C, EDIN H. Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 2: Measurements and modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6):1610-1616.
- [84] FORSSEN C. Modelling of cavity partial discharges at variable applied frequency[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2008.
- [85] 罗俊华,周作春,张丽. VLF电压试验电压幅值与试验时间的优选[J].高电压技术,2006,32(6):18-20.
- LUO Junhua, ZHOU Zuochun, ZHANG Li. Optimizing validation of voltage and time for VLF(0.1 Hz) voltage testing[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6):18-20.
- [86] HERNANDEZ-MEJIA J C, HARLEY R, HAMPTON N, et al. Characterization of ageing for MV power cables using low frequency $\tan\delta$ diagnostic measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(3):862-870.
- [87] PERKEL J, HERNANDEZ J C, HAMPTON R N, et al. Challenges associated with the interpretation of dielectric loss data from power cable system measurements[C]//8th International Conference on Insulated Power Cables - JICABLE 2011, France: DEI, 2011:1-7.
- [88] 10~35 kV挤包绝缘电力电缆系统超低频(0.1 Hz)现场试验方法:T/CEC 243—2019[S]. 2019.
- Field test method using very low frequency(0.1 Hz) of power cables with extruded insulation for rated voltages from 10 kV to 35 kV:T/CEC 243—2019[S]. 2019.
- [89] UCHINDA K, TANAKA H, HIROTSU K. Study on detection for defects of XLPE cable lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 2(11):663-668.
- [90] 罗俊华. XLPE电力电缆绝缘特性试验方法的研究[D]. 西安:西安交通大学,2003.
- LUO Junhua. Research on the test method of XLPE power cable insulation characteristics[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong

- 99-103.
LI Dejun, SHEN Wei, GUO Zhiqiang. Application comparison between conventional and ultrasonic detection methods for GIS partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 99-103.
- [22] 刘弘景, 李 伟, 任志刚, 等. GIS不同绝缘缺陷的局放检测有效性对比研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(9): 53-60.
LIU Hongjing, LI Wei, REN Zhigang, et al. Comparative study on partial discharge test effectiveness of different insulation defects in GIS[J]. Insulating Materials, 2018, 51(9): 53-60.
- [23] 马飞越, 张 涛, 丁 培, 等. 运行电压下GIS异物颗粒飞行特征速查法研究及应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 118-125.
MA Feiyue, ZHANG Tao, DING Pei, et al. Research and application of quick check method for the flying characteristics of foreign particles in GIS under operating voltage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 118-125.
- [24] 牛 勃, 马飞越, 丁 培, 等. GIS局部放电智能巡检定位技术及应用[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 188-196.
NIU Bo, MA Feiyue, DING Pei, et al. Intelligent inspection and location technology of GIS partial discharge and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 188-196.
- 林 岑(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力设备状态监测与故障诊断工作(通信作者)(E-mail: 466958838@qq.com).
- 邱 炜(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力设备状态监测与故障诊断工作。
- 周 波(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电气设备状态诊断工作。
- 杨红权(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电设备一次检修技术工作。
- 刘彦琴(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事变电设备一次检修技术工作。
- 刘 鑫(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事变电设备二次检修技术工作。
- 高 竣(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高电压试验技术工作。
- 曾晓维(1991—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电测仪表及热工检定技术工作。

(上接第184页)

- University, 2003.
- [91] BAUR M, MOHAUPT P, SCHLICK T. New results in medium voltage cable assessment using very low frequency with partial discharge and dissipation factor measurement[C]//17th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2003). Barcelona: IET, 2003: 1-5.
- [92] XIE Cheng, WANG Yuli, SHAO Xianjun, et al. The application research of very low frequency diagnostic methods in acceptance tests on new cable systems of medium voltage [C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin: IEEE, 2018: 47-53.
- [93] SALATHE D. New methods for offline PD diagnosis on MV cable systems[C]//2015 30th International Power System Conference (PSC). Tehran: IEEE, 2015: 374-379.
- [94] OYEGOKO B, HYVONEN P, ARO M, et al. Selectivity of damped AC (DAC) and VLF voltages in after-laying tests of extruded MV cable systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(5): 874-882.
- [95] LU Yuxin, ZHAO Xuefeng, GENG Yingjie, et al. A low-cost DAC system for on-site PD testing of HV cables based on ACRF and capacitor bank[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2551-2553.
- [96] YANG Saike, LI Hongjie, XU Penglei, et al. A novel DAC generator for PD testing of MV cable insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 499-501.
- [97] 瑞士 ONSITE. 振荡波和0.1 Hz超低频正弦集成技术在配电网综合试验和诊断中的应用[EB/OL]. [2023-11-21]. https://mp.weixin.qq.com/s/p227-_8x6GVqlBa80i3nZA.
ONSITE Switzerland. The application of integrated technology of oscillating wave and 0.1 Hz very low frequency sinusoidal wave in comprehensive testing and diagnosis of distribution cables[EB/OL]. [2023-11-21]. https://mp.weixin.qq.com/s/p227-_8x6GVqlBa80i3nZA.
- 王 超(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事配网运行和安全管理。
- 陈 云(1993—), 女, 博士, 工程师, 研究方向为高压电力设备绝缘试验与检测新技术、先进设备及绝缘材料开发等(通信作者)(E-mail: chenyun2@csg.cn)。
- 肖佳朋(1998—), 男, 硕士, 工程师, 从事输变电设备状态感知、特高压运维工作。
- 黄 韬(1997—), 男, 硕士, 工程师, 从事电网规划设计工作。
- 吴春芳(1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事配网生产技术支持。
- 甄威扬(1991—), 男, 本科, 工程师, 从事主配网生产技改修理项目管理。
- 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。