

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.002

# 基于超低频介损的XLPE电缆绝缘受潮检测判据研究

马楠<sup>1</sup>, 李晋贤<sup>2</sup>, 周海<sup>3</sup>, 余鹏<sup>1</sup>, 房占凯<sup>2</sup>, 卢旭<sup>1</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 3. 重庆泰山电缆有限公司, 重庆 401120)

**摘要:** 电缆超低频介损测试技术在国内刚刚起步, 所采用的 IEEE Std 400.2—2013 超低频介损判据并不完全适用于我国本土化交联聚乙烯(XLPE)电缆, 开展针对电缆超低频介损检测的研究迫在眉睫。文中通过加速水树老化实验验证了超低频介损检测对于检测水树劣化情况的有效性, 并开展现场测量, 对所测 252 组数据进行状态分级, 发现介损变化率为负的电缆线路处于注意或异常状态, 多处于异常状态; 且介损的波动值可更加清晰直观地反映电缆运行状态。因此, 在现有的电缆超低频介损三大判据之外, 提出了新的特征量反向介损变化率和介损极差, 吸纳韩国 Skirt 介损判据, 最终形成更为完善的超低频介损检测判据体系, 为我国配网电缆绝缘老化状态评价规程的制定提供参考。

**关键词:** 交联聚乙烯(XLPE)电缆; 超低频介损; 电缆水树; 检测判据; 反向介损变化率; 介损极差

**中图分类号:** TM854

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)05-0010-06

## 0 引言

目前, 我国配网电缆线路敷设和运行环境较为恶劣, 特别在南方沿海地区, 气候多雨潮湿, 致使电缆沟或隧道空气湿度大, 严重时甚至进水浸泡电缆, 造成电缆的绝缘受潮老化, 形成水树枝<sup>[1-5]</sup>。长时间运行后, 水树的不断生长可能诱发电树的形成, 最终导致电缆绝缘的击穿<sup>[6-8]</sup>。因此, 对配网电缆的绝缘水树老化情况进行检测是检修的重点。

近年来, 超低频介损测量技术在国外的广泛应用证明了其在电缆绝缘水树检测方面的优越性, IEEE Std 400.2—2013<sup>[9]</sup> 提出超低频介损三大判据: 介损随时间稳定性(stability of tangent delta, STD), 介损变化率(differential of tangent delta, DTD)和介损平均值(tangent delta, TD)。可以对电缆绝缘整体水树老化缺陷及局部长水树的缺陷有所表征, 且已逐步在国内北京、成都等地展开试点应用<sup>[10-11]</sup>。但是 IEEE 超低频介损判据是根据北美上万条不同类型的电缆实测数据进行威布尔分布统计得来的测量判据, 是否适用于我国的交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆值得商榷。自 2010 年以来, 韩国电力公司进行 0.1 Hz 超低频介损测量诊断中压地下电缆, 建立数据库超过 14 000 条数据<sup>[12-13]</sup>, 并根据现有的 IEEE Std 400.2—2013 超低

频介损检测判据进行了本地化修订, 提出了新的介损检测判据, 定义为 Skirt, 其值为同一电压下 8 个测量值中最大值与最小值之差。中国香港在 2009 年开展超低频检测, 参考 IEEE 国际测试规程, 2012 年初颁布执行了香港地区的电缆超低频介损检测评估导则<sup>[14]</sup>。新加坡电网公司自 2013 年开始对大量的配网电缆进行了普测, 制定了自身的超低频介损评估导则。文献[15—16]翻译了国际规程 IEEE P400.2/D11—2012《有屏蔽电力电缆系统 1 Hz 以下超低频方法现场试验指引》, 为我国制定有本土特色的介损老化评价规程提供了参考建议。

文中基于加速水树老化实验验证超低频介损测量对电缆绝缘水树老化检测的有效性, 分析了某地区电缆超低频介损现场测量数据并研究了国外标准, 提出新的检测判据, 即反向介损变化率(reversed differential of tangent delta, RDTD)和介损极差(extreme differential of tangent delta, ETD), 同时吸纳韩国检测判据 Skirt, 完善了我国超低频介损判据。

## 1 加速水树老化实验

### 1.1 试样制作及水树老化实验

实际运行中 XLPE 电缆绝缘中水树的生长非常缓慢, 潮湿环境下, 配网电缆需约 3~5 a 开始形成水树枝。为了能够在实验室环境下短时间内得到水树试样, 文献[17—18]依据 IEC TS61956—1999 标准《评定绝缘材料水树枝化的试验方法》, 人为制造针孔缺陷, 泡在一定浓度的 NaCl 溶液中进行 XLPE 绝缘的加速水树老化培养, 外施高频电压为 400

收稿日期:2020-03-05; 修回日期:2020-04-16

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B080360); 中国南方电网有限责任公司科技项目(090000-KK52170137)

Hz, 6 kV。文中以此为基础对加速水树老化的实验平台进行改良,设计的加速水树实验罐如图 1 所示。主要包括圆形铜电极板、柱形铜电极棒及有机玻璃制作的罐本体和底座等。其中罐本体高度为 127.8 mm,外径为 130 mm;罐盖上方中央通过螺丝固定铜电极棒下接铜针,用于在绝缘样品缺陷处接入高频电压;罐底座下方中央通过螺丝固定直径为 55 mm 的圆形铜电极板,用于绝缘样品的接地。

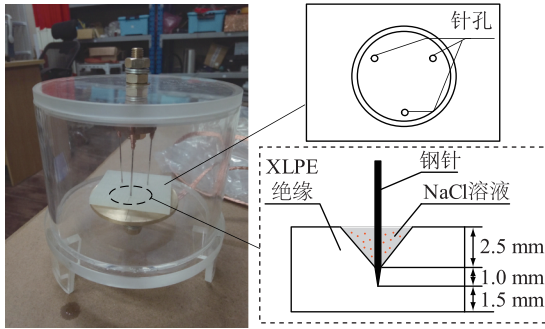


图 1 加速水树老化装置和样品

Fig.1 Accelerated water tree aging test

选取制作电力电缆的 XLPE 绝缘材料进行样品制备,制得长 58 mm、宽 48 mm、厚 5 mm 的长方形 XLPE 薄片样品;并以 XLPE 薄片样品的中心为圆心,构造同心圆,绘制 3 个针孔缺陷的位置,各自相差  $120^\circ$ ;制作直径约为 3 mm、深度为 2.5 mm 的圆坑区域,并在 XLPE 绝缘样品圆坑中央插入加热至  $300^\circ\text{C}$  的钢针来制造深度约为 1 mm 的针孔缺陷。电解液有利于水树枝的扩散和电缆的加速老化,因此配制质量分数约为 20% 的 NaCl 溶液,并注入圆坑中,保证溶液完全淹没针尖端部。

在罐盖铜电极引入高频电压源,串联保护电阻,罐底座铜电极连地,进行加速水树老化实验。实验接线如图 2 所示。其中高频高压电源采用的是射频等离子体实验电源 CTP-2000K;中心频率 10 kHz,频率可调范围 5~20 kHz,电源功率 0~500 W,输出电压 0~30 kV;电路中的保护电阻用于在电缆绝缘样品放电或击穿时限制电流,从而保护电源和调压器,电阻值约为 500 k $\Omega$ 。XLPE 绝缘样品上施加的高频电压峰值为 15 kV,频率为 5 kHz。通过设置不同的水树老化时间参数衡量电缆水树老化的不同程度。

## 1.2 试样观察

实验中通过光学显微镜来观察 XLPE 绝缘的水树枝结构。首先取出 XLPE 绝缘样品,在针孔缺陷沿尖端方向纵向切片,得到厚度 200~400  $\mu\text{m}$  的切片样品。将 0.25 g 亚甲基蓝溶于 100 mL 蒸馏水得到染色液,将切片样品浸泡在染色液中加热至  $90^\circ\text{C}$

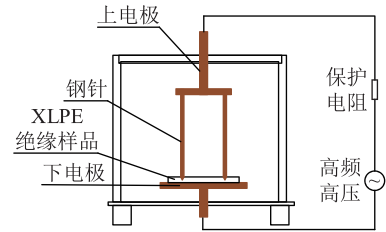


图 2 电缆水树加速实验接线

Fig.2 Cable water tree acceleration test connection

染色 30 min。染色完成后,充分清洗试样表面,采用光学显微镜进行观察,放大倍数分别为 80, 200 和 800。不同加压时间的水树样品显微镜观察结果如图 3 所示。

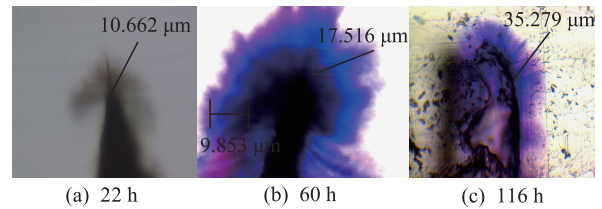


图 3 不同加压时间水树样品

Fig.3 Water tree samples with different pressurization time

## 1.3 实验结果分析

对加速水树实验形成的样品进行介损测量,采用德国生产的 Novocontrol 宽频介电阻抗谱仪,在室温  $25^\circ\text{C}$  下,测得不同频率下的样品介损值如图 4 和表 1 所示。

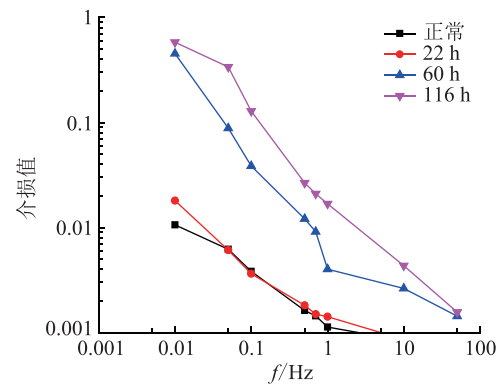


图 4 不同频率下的水树老化样品介损值

Fig.4 Water loss value of water tree aging samples at different frequencies

表 1 不同水树老化样品的介损值

Table 1 TD value of different water tree aging samples

实验样品	不同加压时间的介损值			
	正常	22 h	60 h	116 h
0.1 Hz	$3.83 \times 10^{-3}$	$3.63 \times 10^{-3}$	$3.85 \times 10^{-2}$	$1.28 \times 10^{-1}$
50 Hz	$7.92 \times 10^{-4}$	$6.91 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-3}$	$1.56 \times 10^{-3}$

由图4和表1可知,随着外加电压时间的增长,同一频率下不同样品的介损值逐渐升高;同一样品,随着频率的升高,介损值显著下降,0.1 Hz的介损值较工频50 Hz介损值大,在介质损耗测量现场干扰众多的情况下,0.1 Hz下的介损测量更容易反映电缆介损情况。实验结果与文献[19—20]中0.1 Hz下的介质损耗检测对检测电缆的水树老化极为有效的结论一致。通过对比不同水树老化时间样品的介损变化,验证了超低频介损测试对检测绝缘水树劣化情况的有效性。

## 2 超低频检测判据研究

### 2.1 超低频介损现场测试方法

目前,国内仍然采用 IEEE Std 400.2—2013 执行超低频介损测量及评估,如表2所示。直到2018年,中国电力科学研究院有限公司主持起草标准《10(6) kV~35 kV 挤包绝缘电力电缆系统超低频(0.1 Hz)现场试验方法》,深圳供电局主持起草南方电网企业标准《6 kV~35 kV 电缆系统超低频介损测试方法》。现行超低频介损测量仪主要有奥地利保尔公司的电缆介损测试系统、德国赛巴超低频介损测试仪和瑞士 Onsite 等,电缆超低频介损试验接线如图5所示。

表2 IEEE Std 400.2—2013 电缆老化状态评估表

Table 2 Aging status evaluation table for cables in IEEE Std 400.2—2013

状态分级	介损随时间稳定性 $\times 10^{-3}$	介损变化率 $\times 10^{-3}$	介损平均值 $\times 10^{-3}$
无需采取检修行动	<0.1	与 <5	与 <4
建议进一步测试	0.1~0.5	或 5~80	或 4~50
需要采取检修行动	>0.5	或 >80	或 >50

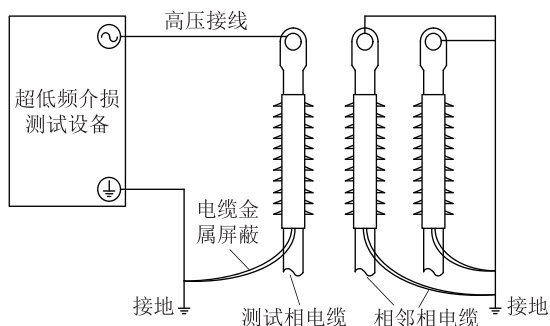


图5 电缆超低频介损试验接线

Fig.5 Cable VLF-TD test connection

### 2.2 超低频介损现场测试结果分析

对2016年至2018年某地区的电缆展开超低频介损普测,共测量86条10 kV三芯配电电缆线路,测量数据共252组,按照 IEEE Std 400.2—2013 评

判,有172条测量线处于正常状态,49条测量线处于注意状态,31条测量线处于异常状态,分布情况如图6所示。

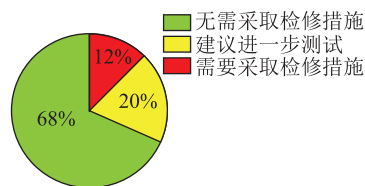
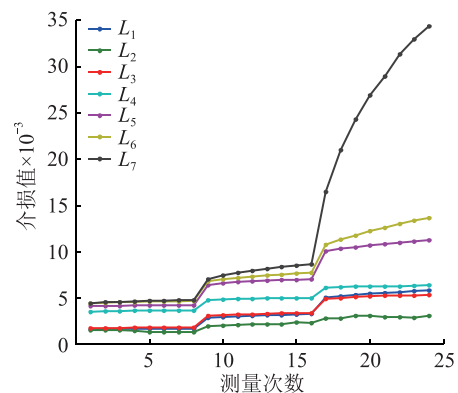
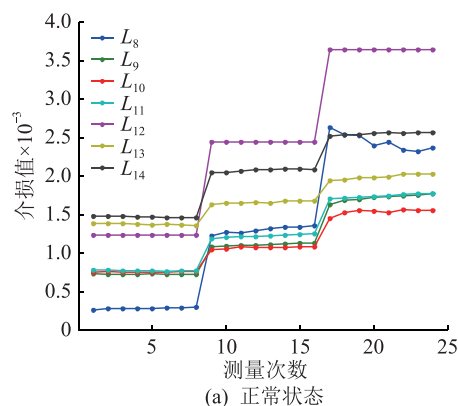
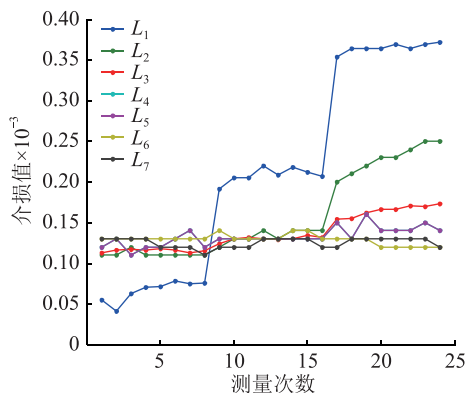


图6 所测线路的 IEEE 评判结果分布

Fig.6 IEEE evaluation result distribution of measured lines

在上述3种状态的电缆中,分别任意选取14条进行绘图,分析介损数据变化规律,如图7所示。其中测量次数为在 $0.5U_0$ 、 $U_0$ 和 $1.5U_0$ 下各测量8个周期,共24次, $U_0$ 为电缆导体与绝缘屏蔽层或金属护套之间的额定工频电压。



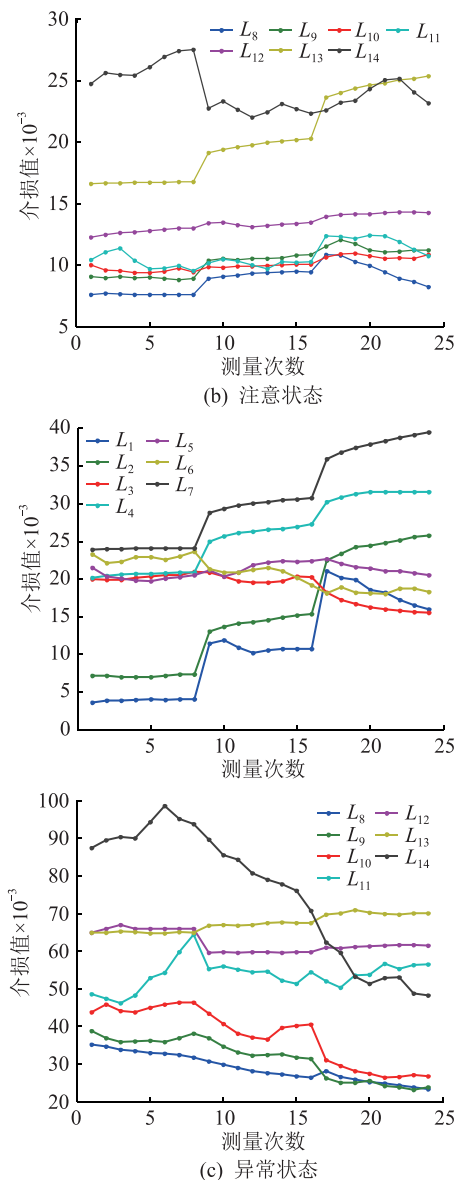


图7 电缆介损(0.1 Hz)变化规律  
(IEEE Std 400.2—2013)

Fig.7 Variation law of cable VLF-TD (0.1 Hz)  
(IEEE Std 400.2—2013)

运行中的受潮电缆停运后,电缆缆芯温度逐渐下降至与环境温度一致而平衡,因此内部的绝缘层水树极有可能因为热胀冷缩而吸取水分进入绝缘,所以实际在离线下测量得到的介损水平与实际运行时的水平相比较为恶劣。通过对图7超低频介损测量数据的进行分析可得表3,并且得到以下结论:

(1) 正常状态的92.8%电缆介损数据随着测量时间的增长和电压的升高,保持缓慢上升或者基本不变。注意状态和异常状态不断上升的电缆线路占比分别为71.4%和28.6%,可见电缆水树老化越严重,电缆介损下降或者振荡可能性越大。

(2) 异常状态中71.4%电缆线路介损数据随着测量时间和电压的升高而不断下降或振荡。注意

状态和正常状态不断下降或振荡的电缆线路占比分别为28.6%和7.1%。通过以上分析可知DTD为负值的电缆线路处于注意或异常状态,且大多处于异常状态,但是在正常电缆中DTD存在微小负值,可理解为测量的误差。因此,DTD是否为负可以作为衡量电缆状态的一个判据。目前的IEEE判据和韩国、新加坡等国家和地区的判据直接将DTD定义为绝对值,相对而言有些简单粗暴,不能反映DTD为负的情况,因此文中提出了新的RDTD。

(3) 处于正常状态电缆的波动幅值(最大值与最小值之差)为0~2.3,注意状态为2~30,异常状态的为5~50,由此可见,电缆介损的波动值可更为清晰直观地反映电缆状态。韩国电力公司所提出的Skirt判据定义为每个测量电压下最大值和最小值的差,这与文中数据特征相吻合,验证了Skirt判据的有效性。因此文中提出了ETD,定义为在不同测量时间内介损最大值和最小值的差。

表3 超低频介损数据分析结果

Table 3 VLF-TD data analysis results

电缆状态	基本不变		不断上升		不断下降或振荡			
	条数	比例/%	条数	比例/%	幅值	条数	比例/%	幅值
正常	3	21.4	10	71.4	0~2.3	1	7.1	0~0.4
注意	0	0	10	71.4	2~30	4	28.6	2~5
异常	0	0	4	28.6	3~20	10	71.4	5~50

### 2.3 超低频介损检测判据体系

目前IEEE超低频介损的状态表征有3个判据,分别是代表介损平均状态的TD、代表介损随电压稳定性的DTD和代表介损随时间稳定性的STD,综合RDTD和ETD这2个新的检测判据,吸纳韩国Skirt判据,得到更完善的超低频介损检测判据体系,其定义与相关表征如表4所示。

表4 超低频介损检测判据的定义

Table 4 Definition of VLF-TD detection criterion

检测判据	定义	表征
TD	$U_0$ 下所测8个周期介损值的平均值	介损平均水平
STD	$U_0$ 下所测8个周期介损值的标准差	介损随时间稳定性
DTD	$1.5U_0$ 和 $0.5U_0$ 下的介损平均值之差的绝对值( $ 1.5U_0 - 0.5U_0 $ )	介损随电压稳定性
RDTD	$0.5U_0$ 和 $1.5U_0$ 的介损平均值之差( $0.5U_0 - 1.5U_0$ ),为正值	介损随电压稳定性
ETD	3个测试电压24个测量周期介损最大值与最小值之差	介损随电压和时间的综合稳定性
Skirt	$1.5U_0$ 下所测8个周期介损最大值与最小值之差	介损随时间稳定性

### 3 结语

在电缆水树老化实验中,随着老化时间增长,电缆水树尺寸增大,同时其 0.1 Hz 下介损值增大,验证了超低频介损检测对于判断 XLPE 绝缘水树老化情况的有效性。文中通过分析介损数据,提出新的介损检测判据,即 RDTD 和 ETD,同时吸纳韩国介损 Skirt 判据,形成更加完善的介损检测判据体系,为制定国内配网电缆介损状态评价规程提供参考。

#### 参考文献:

[1] 朱立位,潘宏承,应展烽,等. 计及轴向传热的中低压单芯电缆导体温升状态空间模型[J]. 电力工程技术,2019,38(1):30-36.  
ZHU Liwei, PAN Hongcheng, YING Zhanfeng, et al. The state space model of conductor temperature estimation considering axial heat conduction for middle and low voltage single core power cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1):30-36.

[2] 杨帆,曾菀,阮玲,等. 中压交联电缆接头复合界面受潮缺陷的诊断方法研究[J]. 高压电器,2014,50(5):1-5.  
YANG Fan, ZENG Chun, RUAN Ling, et al. Study on diagnostic method of compound boundary in medium voltage cross-linked cable joints moistened[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5):1-5.

[3] 杨颖,游蛟,贾志东,等. 10 kV 交联聚乙烯电缆运行状态评估分析[J]. 高电压技术,2017,43(5):1684-1692.  
YANG Ying, YOU Jiao, JIA Zhidong, et al. Evaluation analysis of 10 kV XLPE cable's operation condition[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5):1684-1692.

[4] 袁野,陈剑,贾志东,等. 10 kV XLPE 电缆受潮绝缘特性研究[J]. 电网技术,2014,38(10):2875-2880.  
YUAN Ye, CHEN Jian, JIA Zhidong, et al. Study about insulating properties of 10 kV XLPE damp cable[J]. Power System Technology, 2014, 38(10):2875-2880.

[5] 李巍巍,杨琳,朱柯,等. 在运水树老化电缆绝缘性能提升技术的应用[J]. 电工电气,2018(4):44-47.  
LI Weiwei, YANG Lin, ZHU Ke, et al. Application of technology of improving insulation performance of water tree aging cable[J]. Electrotechnics Electric, 2018(4):44-47.

[6] 杜伯学,马宗乐,霍振星,等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器,2010,46(7):100-104.  
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7):100-104.

[7] 刘飞. 35 kV 及以下 XLPE 电力电缆绝缘老化评估研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.  
LIU Fei. Evaluation of the insulation aging of 35 kV and below XLPE power cables[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2014.

[8] 叶冠豪,郭湘奇,王一磊,等. XLPE 电缆交叉互联系统接地直流电流在线监测[J]. 电力工程技术,2016,35(3):39-41.

YE Guanhao, GUO Xiangqi, WANG Yilei, et al. On-line monitoring of ground DC current for cross-linking XLPE cable system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2016, 35(3):39-41.

[9] IEEE draft 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.

[10] 戴东亚,张彦林,黄立,等. 10 kV 交联电缆老化状态评价实测案例[C]//全国电力电缆运行经验交流会论文集. 2012:532-536.  
DAI Dongya, ZHANG Yanlin, HUANG Li, et al. 10 kV XLPE cable aging state evaluation test case[C]//Proceedings of the National Power Cable Operation Experience Exchange Meeting. 2012:532-536.

[11] 任志刚,李伟,周峰,等. 基于超低频介损检测的电缆绝缘性能评估与影响因素分析[J]. 绝缘材料,2018,51(4):64-68.  
RENG Zhigang, LI Wei, ZHOU Feng, et al. Evaluation of cable insulation performance and analysis of its influence factors based on ultra low frequency dielectric loss detection[J]. Insulating Materials, 2018, 51(4):64-68.

[12] LEE Jae Bong, JUNG Yeon Ha. An amendment of the VLF tan $\delta$  criteria to improve the diagnostic accuracy of the XLPE-insulated power cables[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2010, 59(9):1644-1650.

[13] KIM D, CHO Y, KIM S M. A study on three dimensional assessment of the aging condition of polymeric medium voltage cables applying very low frequency(VLF) tan $\delta$  diagnostic[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2014, 21(3):940-947.

[14] SUNG Tai, CHER Leung. HK electric's experience of VLF diagnostic testing on distribution cables[C]//第五届中国国际供电会议(GIRED)论文集. 2012:1-6.  
SUNG Tai, CHER Leung. HK electric's experience of VLF diagnostic testing on distribution cables[C]//Proceedings of the 5th China International Power Supply Conference (GIRED). 2012:1-6.

[15] 戴东亚. IEEE P400. 2/D11 规程修订考虑的电缆老化评价实测数据[C]//全国第九次电力电缆运行经验交流会论文集. 2012:521-526.  
DAI Dongya. Cable aging evaluation measured data considered in the revision of IEEE P400. 2/D11[C]//Proceedings of the 9th National Power Cable Operation Experience Exchange Meeting. 2012:521-526.

[16] 朱亮,李振杰,戴东亚. 35 kV 及以下配电网电缆介损老化状态评价国际规程修订动态与趋势[J]. 中国电机(技术版), 2012(11):32-39.  
ZHU Liang, LI Zhenjie, DAI Dongya. Amendment dynamics and trends of international regulations for dielectric loss aging evaluation of distribution cables of 35 kV and below[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2012(11):32-39.

[17] 王乐,孙颖,汪辉平,等. 评定绝缘材料中水树枝化的标准

- 试验方法 [C]//全国电工测试技术学术交流会议论文集. 2006:47-51.
- WANG Le, SUN Ying, WANG Huiping, et al. Standard test for assessing water dendrites in insulating materials [C]//Proceedings of the National Electrical Testing Technology Academic Exchange Conference. 2006:47-51.
- [18] 陶文彪, 马振国, 宋述勇, 等. 有限元法分析交联聚乙烯电缆水树生长机理[J]. 绝缘材料, 2016, 49(12):70-75.
- TAO Wenbiao, MA Zhenguo, SONG Shuyong, et al. Mechanism of water tree growth in XLPE cables based on finite element method[J]. Insulating Materials, 2016, 49(12):70-75.
- [19] PUTTER H T, PETZOLD F, HERPERTZ P, et al. The evolution of VLF testing technologies over the past two decades [C]//Transmission & Distribution Conference & Exposition. 2012.
- [20] 曾莼. 基于局放和介损的 10 kV XLPE 电缆绝缘诊断研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2014.
- ZENG Chun. Study on insulation diagnosis of 10 kV XLPE cable based on PD and dielectric loss[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology, 2014.

作者简介:



马楠

马楠(1983),男,硕士,工程师,从事配网安全运维相关工作(E-mail:mananxjt@139.com);

李晋贤(1992),男,博士在读,研究方向为电缆超低频介损检测;

周海(1993),男,学士,助理工程师,从事电力工程相关工作。

## Detection criterion of XLPE cable insulation based on very low frequency dielectric loss

MA Nan<sup>1</sup>, LI Jinxian<sup>2</sup>, ZHOU Hai<sup>3</sup>, YU Peng<sup>1</sup>, FANG Zhankai<sup>2</sup>, LU Xu<sup>1</sup>

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 3. Chongqing Taishan Cable Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

**Abstract:** The cable very low frequency dielectric loss (VLF-TD) test technology has just started in China. The IEEE Std 400.2—2013 VLF-TD criterion is not fully applicable to localized XLPE cable of China. It is extremely urgent to carry out research on cable VLF-TD test. Therefore, the effectiveness of VLF-TD test for water tree degradation detection is verified by accelerating water tree aging test and carries out on-site measurement. The 252 sets of data measured are classified and it is found that the cable line with a negative dielectric loss rate is in a state of attention or abnormality, and is mostly in an abnormal state. And the fluctuation value of the dielectric loss can more clearly and intuitively reflect the running state of the cable. Therefore, in addition to the three existing criteria of VLF-TD, the new characteristic quantity reverse dielectric loss change rate and extreme difference of dielectric loss are proposed, and the Korean Skirt dielectric loss criterion is absorbed, which is finally improved. The VLF-TD test criterion system provides a reference for the formulation of the VLF-TD aging state evaluation procedure for distribution cables in China.

**Keywords:** cross-linked polyethylene (XLPE) cable; very low frequency dielectric loss (VLF-TD); cable water tree; detection criteria; reverse dielectric loss rate; extreme difference of dielectric loss

(编辑 方晶)