

# 基于皮尔逊相关系数法的水树枝与超低频介损的相关性研究

杨帆<sup>1</sup>, 冯翔<sup>2</sup>, 阮羚<sup>1</sup>, 陈俊武<sup>2</sup>, 夏荣<sup>3</sup>, 陈昱龙<sup>4</sup>, 金志辉<sup>5</sup>

(1. 国网湖北省电力公司电力科学研究院国家电网公司电气设备现场试验技术重点实验室, 武汉 430077;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074; 3. 中国电力科学研究院, 武汉 430074;

4. 武汉市规划研究院, 武汉 430074; 5. 国网武汉供电公司, 武汉 430074)

**摘要:** 水树枝是交联电缆的主要缺陷, 相关研究表明, 超低频介质损耗因数与交联电缆水树劣化状态具有较强相关性。笔者通过使用皮尔逊相关系数法, 对国际电气电子工程师协会 IEEE P4002.9/D9—2010 推荐的超低频电压下介损平均值、介损变化率与介损随时间的稳定性 3 个评价指标, 与交联电缆绝缘内部水树枝的密度、长度进行了相关性分析, 研究结果对于采用上述指标评估水树枝的生长特性具有较好的理论价值与指导作用。

**关键词:** 皮尔逊相关系数; 显著性水平; 水树枝; 介损

**中图分类号:** TM247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)06-0021-05

## Correlation Study of Water Tree and VLF $\tan\delta$ Based on Pearson Correlation Coefficient

YANG Fan<sup>1</sup>, FENG Xiang<sup>2</sup>, RUAN Ling<sup>1</sup>, CHEN Junwu<sup>2</sup>,

XIA Rong<sup>3</sup>, CHEN Yulong<sup>4</sup>, JIN Zhihui<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of High-voltage Field-test Technique of SGCC, Electric Power Research Institute of Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. China Electric Power Research Institute of SGCC, Wuhan 430074, China; 4. Wuhan Planning & Design Institute, Wuhan 430074, China; 5. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** As the main defect of the cross-linked polyethylene(XLPE), water tree has a good correlation to  $\tan\delta$  under very low frequency (VLF). This paper studied the correlations between water tree and three indexes of VLF- $\tan\delta$ : the average values of  $\tan\delta$ , differential  $\tan\delta$ ,  $\tan\delta$  stability which is suggested by Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE P4002.9/D9—2010 by using person correlation coefficient. Accordingly, it was suggested that these indexes could be used to describe the growth characteristics of water tree of XLPE insulation.

**Key words:** pearson correlation coefficient; significance level; water tree; dielectric loss

## 0 引言

目前, 交联聚乙烯(XLPE)电缆已广泛应用于各电压等级城市输配电网中。然而, 交联电缆在漫长的运行过程中, 由于本身的制造缺陷和施工过程中造成的机械损伤, 加之通道运行环境不佳, 会导致绝缘水平的不断降低, 严重影响其安全稳定运行。

水树枝是交联电缆绝缘初期劣化的主要形式,

而其一旦产生, 将会使绝缘介质的损耗增加, 绝缘电阻和击穿电压下降, 降低交联电缆的绝缘强度<sup>[1-4]</sup>, 更为重要的是, 伴随着水树枝的生长, 水树枝尖端的电场将愈加集中, 水树枝的形态和其中电荷的动态过程将造成局部高场强并最终会导致水树枝尖端产生电树枝, 从而造成绝缘击穿导致停运事故的发生<sup>[5]</sup>。一般认为, 水树老化是造成中压交联电缆绝缘在运行中发生击穿的主要原因<sup>[6-10]</sup>。

相关研究表明, 相对于工频, 超低频介损检测具有体积小、对电缆损耗较低、灵敏度好以及使用

收稿日期: 2013-12-07; 修回日期: 2014-01-10

基金项目: 湖北省电力公司 2013 年科技计划项目(52153213020J)。

Project Supported by Hubei Electric Power Company Science and Technology Program in 2013(52153213020J)。

方便等优点<sup>[11-15]</sup>,且超低频下介质损耗因数与交联电缆的水树枝劣化具有更强的相关性<sup>[16-17]</sup>,根据 IEEE P400.2/D9—2010 规程送审稿的指引,推荐采用超低频下的“介损平均值(VLF-TD)”,“介损变化率(VLF-DTD)”以及“介损随时间的稳定性(VLF-TD stability)”作为评价电缆线路绝缘状况的重要指标,并根据评估结果制定“无需检修”、“进一步维修”与“立即检修”3个等级的检修策略<sup>[18]</sup>。

应该指出,水树枝的形态对于绝缘剩余寿命的影响具有显著差异,个别长水树枝的危害可能高于高密度的短水树枝,然而从国内外研究现状而言,关于超低频介损与水树枝密度与长度等生长特性的关联性研究还未见诸报道。

笔者以武汉某地区在线运行电缆为例,首先对该地区多条电缆进行超低频介质损耗测量,将异常电缆的缺陷部分现场截取后在试验室开展二次检测,同步开展水树枝观察,并对介损测量数据与水树枝观察结果进行统计分类。最后,利用皮尔逊相关系数法对水树与介损数据进行相关性分析。

## 1 试验与分析方法

### 1.1 超低频介损测量

文中采用德国 sebaKMT 公司的 VLF Sinus34 介损测量系统开展测试研究。该系统采用高压侧采样的测量方式,有效避免了低压侧混杂大量接地电流、耦合电流及杂散电流的干扰,测量精度能够达到十万分之一。测量时使用 0.01~0.1 Hz 超低频正弦波电压,对被测电缆在升压过程中,在 0.5U<sub>0</sub>、1.0U<sub>0</sub>、1.5U<sub>0</sub> 3个电压等级下分别测量 5 个周期的数据,并利用 TanDelta5.0 的数据分析功能,自动生成“介损平均值”、“介损变化率”以及“介损随时间的稳定性”3个指标,作为后期的分析数据。

### 1.2 皮尔逊相关系数法

#### 1.2.1 相关系数 r 的计算

皮尔逊相关系数法是一种准确度量两个变量之间的关系密切程度的统计学的方法<sup>[19-21]</sup>。对于两个变量 x 和 y,通过试验可以得到若干组数据,记为(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>)(i=1, 2, …, n),则相关系数的数学表达式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式(1)中,  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  分别为 n 个试验值的均值。相关系数 r 的取值范围在 -1 和 +1 之间,即  $|r| \leq 1$ 。|r| 越接近 1,则表明 x 与 y 线性相关程度越高。若 r=-1,表明 x

与 y 之间为完全负线性相关关系,见图 1;若 r=+1,表明 x 与 y 之间为完全正线性相关关系,见图 2;若 r=0,表明两者不存在线性相关关系。

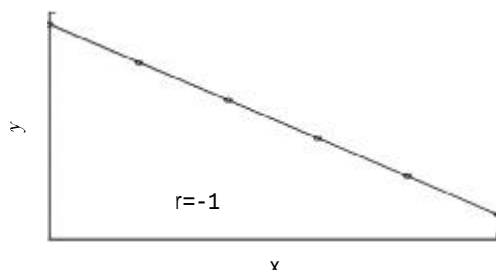


图 1 散点图(r=-1)

Fig. 1 Scatter plot (r=-1)

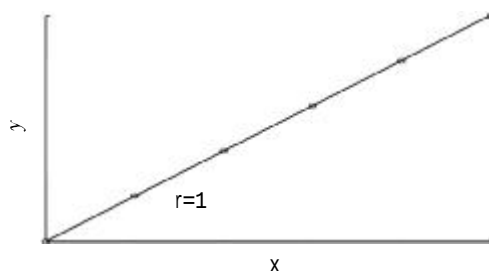


图 2 散点图(r=+1)

Fig. 2 Scatter plot (r=+1)

一般情况下, r 的取值在 (-1, 1) 之间, 相关程度可分为以下几种情况: 当  $|r| \geq 0.8$  时, 可视为高度相关;  $0.5 \leq |r| < 0.8$  时, 视为中度相关;  $0.3 \leq |r| < 0.5$  时, 视为低度相关; 当  $|r| < 0.3$  时, 说明两个变量之间的相关程度极弱, 可视为非线性相关。

#### 1.2.2 r 的显著性检验

相关系数 r 是通过样本数据计算而得, 其值受到样本抽样的随机性、样本的数量等影响, 因此需要考察样本相关系数的可靠性, 即进行显著性检验。首先样本不相关推断的零假设为  $H_0$ ; 其次计算检验的统计量, 通常情况下采用 t 分布检验, 计算式为

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \sim t(n-2) \quad (2)$$

最后, 根据给定的显著性水平  $\alpha$  和自由度  $d_f = n-2$ , 利用 t 分布表查出  $t_{\alpha/2}(n-2)$  的临界值。若  $|t| > t_{\alpha/2}$ , 则拒绝原假设  $H_0$ , 表明总体两个变量之间存在显著的线性关系。

由于文中主要侧重于相关性的分析, 因此并未给定显著性水平  $\alpha$ , 而是通过式(2)计算得出统计量, 并通过查 t 分布表得出满足拒绝  $H_0$  的  $\alpha$  值。

## 2 数据处理与相关性分析

### 2.1 数据的统计与处理

根据 IEEE P400.2/D9—2010 的评价导则, 现场超低频介损检测发现 2 条电缆绝缘异常, 绝缘内部

可能存在水树枝缺陷。而从水树的形成原理分析,外护套破损点可能使水分浸入主绝缘后在电场作用下产生水树并逐渐发展,因此考虑采用外护套破损点定位的方式寻找可能存在的水树区域。按照上述方法对缺陷部分进行了现场截取,并带回实验室进行二次测量,检测结果见表 1。

表 1 试验室超低介损测量结果

| Tab. 1 Laboratory measurements results of VLF-tanδ |                        |                        |                           |
|----------------------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 电缆<br>编号                                           | 介损<br>平均值( $10^{-3}$ ) | 介损<br>变化率( $10^{-3}$ ) | 介损随时间<br>稳定性( $10^{-3}$ ) |
| L-1                                                | 7.95                   | 7.95                   | 0.03                      |
| L-2                                                | 7.47                   | 10.76                  | 0.09                      |
| L-3                                                | 7.13                   | 10.40                  | 0.03                      |
| L-4                                                | 8.27                   | 6.50                   | 0.03                      |
| L-5                                                | 5.91                   | 3.07                   | 0.01                      |
| L-6                                                | 5.50                   | 2.08                   | 0.01                      |

将电缆切成厚度为 0.6 mm 的圆形样品进行水树观察,其结果见表 2、3。

表 2 水树观察统计结果(1)

| Tab. 2 Statistics of observation of water tree (1) |                        |              |              |
|----------------------------------------------------|------------------------|--------------|--------------|
| 项目                                                 | 领结形水树/cm <sup>-3</sup> |              |              |
|                                                    | 0.14~0.25 mm           | 0.26~0.51 mm | 0.52~0.77 mm |
| L-1                                                | 1 214.30               | 61.90        | 0.00         |
| L-2                                                | 809.70                 | 283.20       | 66.70        |
| L-3                                                | 788.40                 | 288.80       | 29.50        |
| L-4                                                | 510.10                 | 14.80        | 0.00         |
| L-5                                                | 88.89                  | 37.13        | 0.00         |
| L-6                                                | 52.58                  | 11.80        | 2.15         |
| 合计                                                 | 3 463.97               | 697.63       | 98.35        |

表 3 水树观察统计结果(2)

| Tab. 3 Statistics of observation of water tree (2) |                        |                |                        |
|----------------------------------------------------|------------------------|----------------|------------------------|
| 电缆<br>编号                                           | 领结形水树/cm <sup>-3</sup> |                | 发散形水树/cm <sup>-3</sup> |
|                                                    | 0.78~1.02 mm           | 1.030~1.258 mm | 0.40~0.51 mm           |
| L-2                                                | 0.0                    | 3              | 0.00                   |
| L-3                                                | 1.5                    | 0              | 0.00                   |
| L-5                                                | 0.0                    | 0              | 1.13                   |

由于文中只讨论水树密度与长度对超低频介损的影响,因此将 L-5 号电缆的发散形水树归为长度 0.26~0.51 mm 区间内的水树,则根据观察结果可得图 3 的饼图。由图 3 可见,水树长度主要分布在 0.25 mm 以内,少量分布在 0.25 mm 以外。

根据以上分析讨论结果,文中对水树观察数据做如下处理:

1)研究水树密度的相关性时,忽略水树的长度等其他因素影响,仅考虑单位体积下的水树个数即总密度。

2)研究长度的相关性时,忽略水树形状等其他

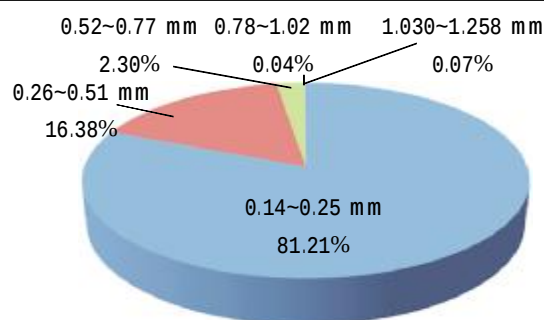


图 3 不同长度的水树饼图

Fig. 3 Pie graph from different length of water tree  
因素,且以各长度水树枝的密度代替个数表示其含量多少。同时,由水树观察结果可知水树长度主要分为两部份:长度 $\leq 0.25$  mm 和长度 $>0.25$  mm,因此在文中定义水树枝长度大于 0.25 mm 为“长水树”,小于或等于 0.25 mm 为“短水树”。

经过以上数据处理,最终得到的结果见表 4。

表 4 水树枝数据处理结果

| Tab. 4 Processing results of water treeing data |                       |                      |                  |
|-------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------|
| 电缆<br>编号                                        | 水树密度/cm <sup>-3</sup> |                      |                  |
|                                                 | 总密度                   | 短水树( $\leq 0.25$ mm) | 长水树( $>0.25$ mm) |
| L-1                                             | 1 276.20              | 1 214.30             | 61.90            |
| L-2                                             | 1 162.60              | 809.70               | 352.90           |
| L-3                                             | 1 108.20              | 788.40               | 319.80           |
| L-4                                             | 524.90                | 510.10               | 14.80            |
| L-5                                             | 126.02                | 88.89                | 38.26            |
| L-6                                             | 66.53                 | 52.58                | 3.95             |

## 2.2 水树与超低频介损的相关性分析

### 2.2.1 水树密度与超低频介损的相关性分析

根据式(1)以及表 1 和表 4 的相关数据,计算水树密度与介损平均值,介损变化率以及介损随时间稳定性的相关系数,所得结果见表 5。

表 5 水树总密度与超低频介损的相关性计算结果

| Tab. 5 Results of correlation between VLF-tanδ and density of water treeing |       |         |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------|---------|
| 参数                                                                          | 水树总密度 |         |
| 介损平均值                                                                       | 相关系数  | 0.718 6 |
|                                                                             | 显著性水平 | 0.108 0 |
| 介损变化率                                                                       | 相关系数  | 0.926 0 |
|                                                                             | 显著性水平 | 0.008 0 |
| 介损随时间稳定性                                                                    | 相关系数  | 0.646 9 |
|                                                                             | 显著性水平 | 0.165 0 |

由表 5 可见,水树总密度与介损变化率相关系数为 0.926 0,显著性水平为 0.008 0,表明总体全部数据中线性不相关的概率小于 0.8%,即两者之间存在显著的线性关系且相关程度高。其次为介损平均值,线性相关性程度最小的为介损随时间稳定性。水树密度与介损变化率的线性拟合图见图 4。

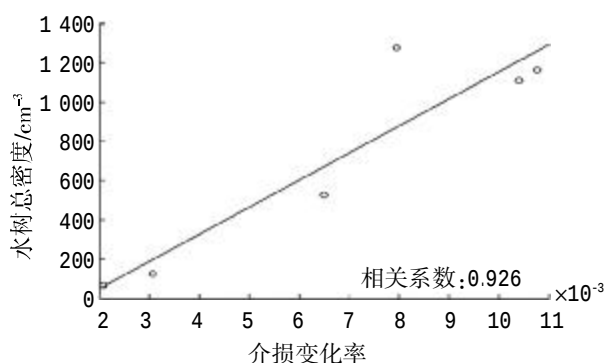


图 4 水树密度与超低频介损变化率线性拟合图

Fig. 4 Linear fitting between density of water treeing and VLF-DTD

### 2.2.2 短水树与超低频介损的相关性分析

根据皮尔逊相关系数法计算短水树枝与介损 3 个指标的相关系数, 所得结果见表 6。

表 6 短水树与超低频介损的相关性计算结果

Tab. 6 Results of correlation between VLF-tan $\delta$  and short water tree

| 参数       | 短水树( $\leq 0.25$ mm)          |
|----------|-------------------------------|
| 介损平均值    | 相关系数 0.785 8<br>显著性水平 0.064 0 |
| 介损变化率    | 相关系数 0.817 8<br>显著性水平 0.047 0 |
| 介损随时间稳定性 | 相关系数 0.513 8<br>显著性水平 0.297 0 |

由表 6 可见, 3 个指标中, 短水树与介损变化率的线性相关程度最高, 且相关系数和显著性水平分别为 0.817 8 与 0.047 0, 表明两者显著线性相关; 介损变化率与短水树也有较好的线性相关性, 其显著性水平为 0.064 0; 介损随时间稳定性与短水树的相关系数虽为 0.513 8, 呈中度相关, 但显著性水平仅为 0.297 0, 表明总体全部数据中线性不相关的比例较高, 因此两者可能并非线性关系。图 5 给出了短水树与介损变化率的线性拟合图。

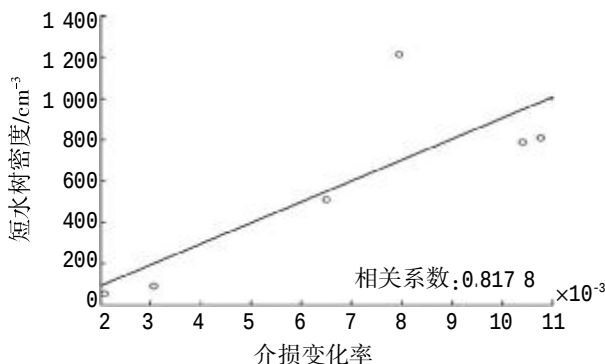


图 5 短水树与超低频介损变化率线性拟合图

Fig. 5 Linear fitting between short water tree and VLF-DTD

### 2.2.3 长水树与超低频介损相关性分析

长水树与超低频介损 3 个指标相关系数计算结果见表 7。

表 7 长水树与超低频介损的相关性计算结果

Tab. 7 Results of correlation between VLF-tan $\delta$  and long water tree

| 参数       | 长水树( $> 0.25$ mm)         |
|----------|---------------------------|
| 介损平均值    | 相关系数 0.233<br>显著性水平 0.657 |
| 介损变化率    | 相关系数 0.836<br>显著性水平 0.034 |
| 介损随时间稳定性 | 相关系数 0.751<br>显著性水平 0.085 |

由表 7 可见, 长水树与介损变化率的线性相关程度在 3 个参量中最高, 且呈显著线性关系, 其次为介损随时间稳定性, 由于介损平均值与长水树相关系数仅为 0.233, 因此两者基本线性不相关。长水树与介损变化率的线性拟合图见图 6。

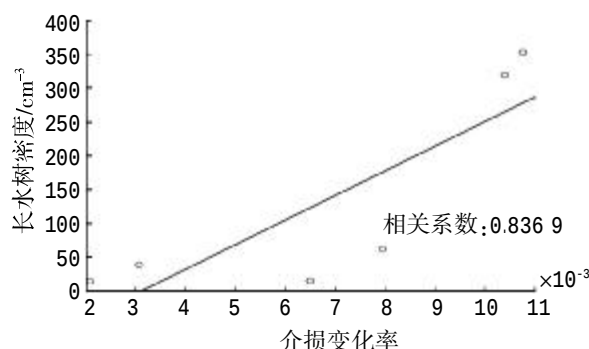


图 6 长水树与超低频介损变化率线性拟合图

Fig. 6 Linear fitting between long water tree and VLF-DTD

### 2.2.4 结果与讨论

根据研究结果可知, 水树的密度对超低频介损的 3 个指标都有较好的相关性。对不同长度的水树枝而言, “介损平均值”主要与短水树枝线性相关, 而与长水树的线性相关度不高; “介损随时间稳定性”同样与两种长度的水树枝相关, 并且长水树枝与它的线性相关程度更高。 “介损变化率”与短水树枝和长水树枝均有较高的线性相关性, 且在 3 个指标中其与长水树枝线性相关程度最高, 水树造成的损耗主要是由于水分深入水树后电导率发生变化所引起的, 而随着电压的增加由于水分子震动剧烈导致水树枝导通程度逐渐增加引起数值中的损耗增大, 因而, 超低频介损随电压的变化率能够在一定程度上反应电缆内部的长水树枝状况。

需要指出的是, 在现场采用超低频介损诊断长

缆线路的绝缘状况时,是一种整体性的评估方法。单纯采用平均介损值这一指标无法真实反映电缆线路局部高密度水树区域的水树枝状况,而电缆线路的绝缘薄弱点正是个别“危险”长水树枝,因此,综合采用超低频介质损耗测量的3个指标作为判断绝缘水树老化状态依据更为合理,尤其可以通过介损变化率来反映绝缘中长水树枝的生长情况。

### 3 结语

水树枝与超低频介损具有较强关联性,笔者通过皮尔逊相关系数方法对水树密度和长度与超低频电压下“介损平均值(VLF-TD)”、“介损变化率(VLF-DTD)”以及“介损随时间的稳定性(VLF-TD stability)”进行了相关性分析。分析表明,上述3指标与水树密度和长度均有良好的线性相关性,其中介损变化率与水树密度以及长度均呈显著正相关,且相关程度最高;介损平均值与短水树具有较好的相关性,但长水树与其线性相关程度低;介损随时间的稳定性与长水树枝线性相关度较高,但同样与短水树枝也具有其一定的线性关系。

相对于短水树枝,长水树枝由于其更易发展成为电树枝,从而直接影响交联聚乙烯绝缘的剩余寿命,其危害性更大。文中研究结果表明,通过测量超低频介损变化率来反映绝缘内部长水树是一种可行的方法。

### 参考文献:

- [1] 杨黎明,徐林华,何晓辉,等. 中压电缆绝缘料的水树老化研究[J]. 电力设备,2004,5(8):14-17.  
YANG Liming,XU Linhua,HE Xiaohui,et al. XLPE aging research on medium voltage cable insulation material[J]. Power Equipment,2004,5(8):14-17.
- [2] CASTELLANI L, PERUZZOTTI F, ZAOPO A, et al. Water treeing retardant materials for cable insulators[C]//1997 IEEE Annual Report—Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]:IEEE,1997:312-316.
- [3] 高小庆,姜芸,罗俊华,等. XLPE 电力电缆过负荷温升与早期损坏机理的研究[J]. 高电压技术,1997,23(2):62-64.  
GAO Xiaoqing, JIANG Yun, LUO Junhua, et al. The principle of earlier period damage of XLPE power cable due to temperature rise by overload [J]. High Voltage Engineering,1997,23(2):62-64.
- [4] 孙辉,喻岩珑,王伟,等. 交联聚乙烯电缆中水树枝诊断的研究现状[J]. 电网与清洁能源,2011,27(6):40-42.  
SUN Hui,YU Yanlong,WANG Wei,et al. Development status of water tree diagnosis in XLPE cable insulation[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(6):40-42.
- [5] NITTA Y. A possible mechanism for propagate on of water tree from water electrodes[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1974,9(3):109-112.
- [6] 史济康,朱海钢,徐永铭,等. 35 kV 及以下 XLPE 绝缘电力电缆品质分析[J]. 高电压技术,2005,31(11):48-51.  
SHI Jikang,ZHU Haigang,XU Yongming, et al. Quality analysis of XLPE power cable rated voltage up to 35 kV [J]. High Voltage Engineering, 2005,31(11):48-51.
- [7] 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, 2012,46(7):100-104.  
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing,et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2012,46(7):100-104.
- [8] 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]. Insulating Materials,2010,43(5):50-56.
- [9] CASTELLANI L,PERUZZOTTI F, ZAOPO A, et al. Water treeing retardant materials for cable insulators[C]//1997 IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and dielectric phenomena. [S.l.]:IEEE,1997:312-316.
- [10] 陈涛,魏娜娜,陈守娥,等. 交联聚乙烯电力电缆水树产生机理、检测及预防[J]. 电线电缆,2009(4):1-7.  
CHEN Tao, WEI Nana, CHEN Shou'e, et al. Mechanism, detection and prevention of water treeing in XLPE Power Cables[J]. Electric Wire & Cable, 2009(4):1-7.
- [11] EAGER G, KATZ C, FRYSZCZYN B, et al. High voltage VLF testing of power cables[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997(12):565-570.
- [12] IEEE Std. 400—2001 IEEE guide for field testing and evaluation of the insulation of shielded power cable systems [S]. 2001.
- [13] IEEE Std. 400.2—2004 IEEE guide for field testing of shielded power cable systems using very low frequency (VLF) [S]. 2004.
- [14] 赵建刚,侯建设. 0.1 Hz 超低频试验在交联电缆中的应用[J]. 高电压技术, 2004,30(S1):77-78.  
ZHAO Jiangang,HOU Jianshe. Application of 0.1 Hz AC test in XLPE cable [J]. High Voltage Engineering, 2004,30 (S1):77-78.
- [15] 隋文波,孙显增,王作君. XLPE/PE 电缆 0.1 Hz 超低频  $\tan\delta$  测量[J]. 高电压技术,2001,27(104):34-35.  
SUI Wenbo, SUN Xianzeng, WANG Zuojun.  $\tan\delta$  measurement using 0.1 Hz voltage for XLPE cable [J]. High Voltage Engineering,2001,27(104):34-35.

(下转第 31 页)

- [8] 马小蓉, 解璞, 王勇. 军用电站雷电过电压影响因素及抑制方法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(3):16-20.  
MA Xiaorong, XIE Pu, WANG Yong. Research on the influence factors and limiting methods for lightning over-voltage in military power supply [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(3):16-20.
- [9] 崔乐, 詹花茂, 武炬臻. 35 kV 电缆雷电过电压仿真与分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(7):31-35.  
CUI Le, ZHAN Huamao, WU Juzhen. Simulation and analysis of lightning overvoltage in the 35 kV power cable [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(7):31-35.
- [10] 隋延民. 电气化铁道接触网关节式分相技术要点探讨[J]. 中国铁路, 2010(11):30-34.  
SUI Yanmin. Key problems of electrified railway catenary electric split phase technology[J]. Chinese Railways, 2010(11):30-34.
- [11] GONG Yansheng. Research of over-voltages of electric locomotive passing the articulated phase insulator [J]. Journal of the China Railway Society, 2008(4):105-109.
- [12] 施围. 电力系统过电压计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [13] 刘明光, 路延安, 魏宏伟, 等. 关节式电分相过电压试验研究[J]. 电气化铁道, 2007(4): 15-17.  
LIU Mingguang, LU Yan'an, WEI Hongwei, et al. Study on articulated neutral section over-voltage test[J]. Electric Railway, 2007(4):15-17.
- [14] 邢海瀛, 陈柏超, 田翠华. 超高压系统中可控电抗器抑制工频过电压研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12):25-28.  
XING Haiying, CHEN Baichao, TIAN Cuihua. Restraint of power frequency over-voltage by controllable reactor in EHV system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 25-28.
- [15] 徐宏雷, 郑伟, 王维洲, 等. 750 kV 变压器高压侧空载合闸过电压因素分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8):148-151.  
XU Honglei, ZHENG Wei, WANG Weizhou, et al. Analysis of overvoltage factors during primary-side closing of 750 kV transformer without load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8):148-151.
- [16] 杨永林. 韶山 7D 型电力机车[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [17] 叶齐政, 孙敏. 电磁场[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008.
- [18] 李娜. 电力机车系统电磁暂态过程研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.  
LI Na. Research on electromagnetic transient process of electric locomotive system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [19] CHEOL L S, HEE N K. Overvoltage suppression filter design methods based on voltage reflection theory [J]. Journal of Safety Research, 2004, 19(2):264-271.

屈志坚(1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电气工程自动化、铁道电气化与自动化。

(上接第 25 页)

- [16] 郑晓泉, 王国红. 含水树 XLPE 电缆绝缘的超低频损耗特性研究[J]. 绝缘材料通讯, 2000(4):30-33.  
ZHENG Xiaoquan, WANG Guohong. Research on water tree XLPE cable insulation ultra-low-frequency loss characteristics[J]. Insulation Materials Communications, 2000(4):30-33.
- [17] 王永红, 何丽娟, 吴建尔, 等. 0.1 Hz 超低频下 XLPE/PE 电缆  $\tan\delta$  测量[J]. 高电压技术, 2000, 26(2):74-79.  
WANG Yonghong, HE Lijuan, WU Jiang'er, et al. The measurement of  $\tan\delta$  of XLPE/PE cables at 0.1 Hz very low frequency[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2):74-79.
- [18] IEEE P400.2/D9—2010 IEEE guide for field testing of shielded power cable systems using very low frequency (VLF) less than 1 Hz[S]. 2010.
- [19] 贾俊平. 统计学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [20] RODGERS J L, NICEWANDER W A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient[J]. The American Statistician, 1988, 42(1): 59-66.
- [21] 董永权, 王占民. 关于相关系数  $\rho$  的几点注释[J]. 大学数学, 2008, 24(2):182-186.  
DONG Yongquan, WANG Zhanmin. Some notes about correlation coefficient  $\rho$  [J]. College Mathematics, 2008, 24(2):182-186.

杨帆(1982—), 男, 工学博士, 工程师, 主要从事高压电气试验技术及电力电缆绝缘诊断技术研究工作。

冯翔(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电缆绝缘检测与诊断。