

# 基于多维介电参数雷达谱图的XLPE电缆老化状态综合评估

王尉军<sup>1</sup>, 陈旻<sup>1</sup>, 殷慧<sup>1</sup>, 李原<sup>2</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司贵阳供电局, 贵州 贵阳 550004;

2. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**极化-去极化电流(PDC)法被广泛用于评估交联聚乙烯(XLPE)电缆的绝缘状态,但现有研究倾向于采用单一介电特征参数反映绝缘的老化情况,未充分利用PDC结果中丰富的介电响应信息,且单一介电参数难以适用于不同的老化类型。为解决上述问题,本文提出了一种改进的雷达谱图评估方法,以综合利用多维介电参数,全面评估XLPE电缆的绝缘状态。为验证所提方法的有效性,对人工加速热老化与水树老化的XLPE短电缆试样进行了PDC测试,并利用提出的多维介电参数雷达谱图方法对PDC测试结果进行分析。结果表明:雷达谱图中多边形面积参数能够较好地反映两种老化XLPE电缆的老化程度。

**关键词:**XLPE电缆;电缆绝缘状态;低频信号感应;绝缘老化;在线监测

中图分类号:TM215;TM247 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.02.010

## Comprehensive evaluation for ageing condition of XLPE cable based on radar chart of multidimensional dielectric parameters

WANG Weijun<sup>1</sup>, CHEN Min<sup>1</sup>, YIN Hui<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>2</sup>

(1. Guizhou Power Grid Co., Ltd. Guiyang Power Supply Bureau, Guiyang 550004, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Polarization-depolarization current (PDC) method is widely used to evaluate the insulation status of cross-linked polyethylene (XLPE) cables. However, the existing studies tend to use a single dielectric characteristic parameter to reflect the ageing condition of insulation, which does not make full use of the rich dielectric response information in PDC results, and a single dielectric parameter is difficult to apply to different ageing types. To solve the above problems, an improved radar spectroscopy evaluation method was proposed to evaluate the insulation condition of XLPE cable by comprehensively utilizing multidimensional dielectric parameters. To verify the effectiveness of the proposed method, PDC test was conducted on short XLPE cable specimens after being artificially accelerated thermal and water tree ageing. Then the PDC results were analyzed by the proposed multidimensional dielectric parameter radar spectroscopy method. The results show that the area parameter of polygon in radar chart can effectively reflect the degree of ageing in both types of aged XLPE cables.

**Key words:** XLPE cable; cable insulation status; low frequency signal induction; insulation ageing; online monitoring

## 0 引言

随着我国经济飞速发展与城市化建设推进,电力电缆逐渐替代架空输电线,成为城市电能传输的主要载体,而交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)因电气、力学性能优异,抗热应力能力强等特点成为了应用最为广泛的电缆绝缘材料<sup>[1]</sup>。然而,大多数XLPE电缆由于运行环境恶劣且缺乏定

期维护,其绝缘会在电应力、热应力、机械应力及潮湿环境等复合因素作用下逐渐发生劣化,严重威胁输配电系统的安全稳定运行<sup>[2]</sup>。因此,如何充分对XLPE电缆绝缘状态进行检测及评估是目前众多研究者的关注重点。

近年来,介电响应手段因其无损测量、装置便携及测试信息量丰富等优点被广泛应用于高压电力设备的绝缘状态检测<sup>[3]</sup>。其中,极化-去极化电流(polarization and depolarization current, PDC)法作为一种时域介电响应测试方法,因其设备容量需求

基金项目:贵州电网科技项目(GZKJXM20210405);国家自然科学基金资助项目(51877142)。

小及测试耗时短等优点,尤其适用于对实际工程中的长电缆进行状态检测<sup>[4-5]</sup>。赵艾萱等<sup>[6]</sup>提出了能够反映XLPE绝缘内部陷阱的参数 $A$ 与反映极化过程电荷量迁移的参数 $Q$ ,对在运XLPE电缆的绝缘状态进行了评估,并总结得到电缆的受潮判据。叶刚等<sup>[7]</sup>利用扩展Debye模型对水树老化电缆的PDC测试结果进行分析,阐明了模型参数与电缆水树老化程度的关系。黄明等<sup>[8]</sup>对电缆的PDC测试结果进行时频变换获得其低频介质损耗特性,该处理方式能够良好地判断出电缆的受潮及水树老化情况。B OYEGOKE等<sup>[9]</sup>定义不同极化电压下测得电导率的比值为非线性系数,以此判断电缆绝缘中是否存在水树。S MORSALIN等<sup>[10]</sup>借助于扩展Debye模型对在运电缆的绝缘状态实现了良好判别。M A DAKKA等<sup>[11]</sup>通过对PDC测试电流进行积分得到极化过程电荷量参数,并对潮湿环境下XLPE电缆的绝缘状态进行了定量分析。

综上所述,大量研究结果均表明PDC法能够对XLPE电缆的绝缘老化情况进行有效研判。然而,已有研究大都通过提取单一介质特征参数实现对XLPE电缆绝缘的状态诊断,对特定的劣化类型采用对应的特征参数实现其劣化程度评估<sup>[12-13]</sup>。此类方法的问题在于:对于实际工程中的地下电缆,无法预先明确电缆绝缘具体老化类型(如热老化、水树老化与电化学老化等),这不仅不利于对电缆老化状态的精准评估,也难以对老化电缆的后续处理提供指导。因此,除对XLPE电缆绝缘进行劣化程度的评估外,对其具体劣化类型的判别也同样重要。不同劣化类型对绝缘介电性能的影响特性有所区别,进而对各介电参数的影响特征也不尽相同。前述已有研究成果说明PDC测试结果中实际上蕴含了丰富的绝缘介电信息,已有众多的介质特征参数与分析模型被提出。因此,若能充分利用PDC测试结果中的介电响应信息,则有望同时实现对XLPE电缆绝缘劣化类型的区分及劣化程度的评估。

基于前期研究成果,本文提出一种多介电特征参数融合评估XLPE电缆绝缘老化状态的方法,并以谱图形式实现绝缘状态可视化。并在实验室制备得到不同热老化与水树老化程度的电缆试样,利用所提方法实现对两类老化电缆试样的老化程度表征以及老化类型辨识。

## 1 实验

### 1.1 加速老化实验

选用国内某电缆公司生产的YJLV22-8.7/15 kV型XLPE电缆,从同一盘电缆上截取多根长度为50 cm的短电缆作为实验试样。

电缆试样的热老化实验实施方式为:将短电缆放入预设温度为140℃的恒温箱内进行人工加速老化,分别于老化时间108、216、324、432 h取样以得到不同热老化程度的电缆试样。

通过图1所示的水针电极法对电缆试样进行水树老化实验,其具体实施方式为<sup>[14]</sup>:首先将短电缆两端外半导体层剥离以预留绝缘距离,并在两端缆芯上压装铜鼻子以减少尖端放电。将电缆中间部位作为水树区域,使用曲率半径为 $(2.5\pm 0.5)\mu\text{m}$ 的两排钢针垂直扎入3 mm以制造针孔缺陷,针孔间距为5 mm。随后,在电缆两端套上热缩管并向其内部注满0.1 mol/L的NaCl溶液。最后,通过插入溶液中的铜电极施加7.5 kV/400 Hz的交流电压进行水树培养。分别于老化时间25、40、60、75、90 d取样以得到不同水树老化程度的电缆试样。

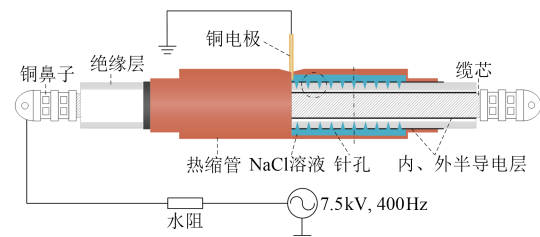


图1 水树老化实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of water tree aging experiment

### 1.2 PDC测试

对定期取样的短电缆试样进行PDC测试,其测试原理如图2所示。PDC测试前,先将涂有导电胶的薄铜带缠绕粘连到短电缆试样剩余半导体层上作为测试电极,且保证铜带与电缆外半导体层紧密接触。需要注意的是,对于水树老化的电缆试样,需在取样后使用无水乙醇充分擦拭其绝缘及外半导体层表面,以避免表面残留NaCl溶液对测试结果的干扰。随后将电缆试样置于带有金属屏蔽的人工环境室中,控制室内温度为20℃。在电缆两端预

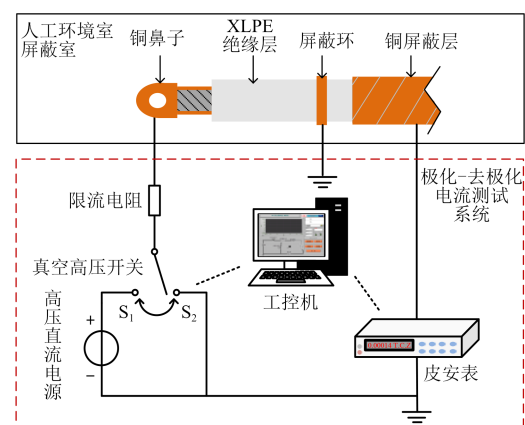


图2 XLPE电缆试样的PDC测试原理图

Fig.2 Schematic diagram of PDC test for XLPE cable sample

留绝缘表面加装金属屏蔽环以避免沿面电流对测试结果的干扰。进行PDC测试时,当真空高压开关置于 $S_1$ 时,直流高压施加于电缆绝缘上,此为极化过程;当真空高压开关置于 $S_2$ 时,绝缘介质接地,此为去极化过程。通过程序设定极化电压为6 kV,极化过程与去极化过程的时间均为1 000 s。

## 2 介电特征参数提取

绝缘介质在外施直流电场作用下存在电导与极化两种基本物理过程<sup>[5]</sup>,PDC测试能够较好地表征材料的以上两种过程,因为PDC测试的极化电流包含了电场作用下材料的电导电流与极化松弛电流两部分,而去极化电流主要为材料的松弛电流,所以通过相应计算即可获得材料的电导特性与极化特性。本文选取以下参数或模型从不同方面表征XLPE电缆的基本介电特性。

### 2.1 直流电导率

介质的电导特性可直接由直流电导率( $\sigma$ )反映,基于PDC测试结果的 $\sigma$ 计算公式为式(1)。兼顾信噪比与电流曲线的衰减特性,本文选择末尾段200 s的极化电流与去极化电流的平均值计算直流电导率。

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0(i_p - i_d)}{C_0 U_0} \quad (1)$$

式(1)中: $\varepsilon_0$ 为真空介电常数; $i_p$ 为极化电流; $i_d$ 为去极化电流; $C_0$ 为XLPE电缆的几何电容; $U_0$ 为外施直流电压。

### 2.2 单位化去极化电荷量

对去极化电流积分获得的去极化电荷量对应着绝缘介质的极化松弛特性,已有研究证明该参数能够良好地反映电力设备的绝缘状态<sup>[3]</sup>。但该参数受待测试样的几何电容影响较大,对于电缆而言,其与电缆长度、缆芯面积、绝缘厚度有关。为使本文方法能够普适于不同型号、长度的地下电缆绝缘诊断,此处提出单位绝缘体积内的去极化电荷量( $Q_n$ ),计算方法如式(2)所示。

$$Q_n = \frac{\int_0^{t_d} i_d(t) dt}{\pi L (D_e^2 - D_i^2)} \quad (2)$$

式(2)中: $t_d$ 为去极化时间; $L$ 为测试电缆试样长度; $D_e$ 为电缆绝缘层外径; $D_i$ 为电缆绝缘层内径。

### 2.3 极化介质损耗因数

对PDC测试电流进行时频变换是目前获得低频段频域介电特性的一种处理方式,结合文献[10],本文选用在电缆绝缘评估方面效果较好的介质损耗因数( $\tan\delta(\omega)$ )作为特征参数之一。首先,XLPE电缆介质响应函数 $f(t)$ 可根据去极化电流计算得到,如式(3)所示。

$$f(t) = \frac{i_d(t)}{C_0 U_0} \quad (3)$$

对 $f(t)$ 进行傅里叶变换得到复极化率,如式(4)所示。

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) = \dot{F}(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

式(4)中, $\chi'(\omega)$ 与 $\chi''(\omega)$ 为复极化率的实部与虚部。

则介质损耗因数计算方法如式(5)所示。

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}}{\varepsilon_{\infty} + \chi'(\omega)} + \frac{\chi''(\omega)}{\varepsilon_{\infty} + \chi'(\omega)} \quad (5)$$

式(5)右边第一项定义为电导损耗因数,表示材料电导过程造成的介质损耗;第二项定义为极化损耗因数,表示极化过程造成的介质损耗。因为前文已有直流电导率参数对电缆的电导特性进行描述,所以本文中仅讨论极化损耗因数。结合前期关于电缆状态评估的相关测试经验,极化损耗因数最大值 $\tan\delta(\omega)_{p-max}$ 能够较好地表征XLPE电缆的绝缘状态,本文将其作为介电特征参数之一。

### 2.4 扩展Debye模型参数

高分子聚合物介质的弛豫形式往往并不是单一的,测得的外部宏观PDC电流也是多种弛豫形式的共同作用。扩展Debye模型是一种能够分离不同弛豫形式所贡献介电响应信息的方法,能够进一步提取介质中的详细弛豫信息,同时也是学者们深入研究介质弛豫机理的手段<sup>[6]</sup>。该模型设定介质的松弛电流(即去极化电流)可由式(6)表示。

$$i_d = \sum_{i=1}^n A_i e^{-t/\tau_i} \quad (6)$$

式(6)中: $n$ 为弛豫类型的数量;参数 $A_i$ 与 $\tau_i$ 分别表示 $i$ 类弛豫类型所贡献的电流强度及对应的弛豫时间常数。

实际上,结合电介质物理相关理论与介电响应原理,时间常数 $\tau_i$ 是对应弛豫类型的本征特性参数,通过 $\tau_i$ 的数值判断介质内部存在的弛豫过程也是学者们的关注重点<sup>[7]</sup>。同时,参数 $A_i$ 能够反映各弛豫过程对应的强度,因此将参数 $A_i$ 与 $\tau_i$ 作为介电特征参数。如何对式(6)中的相关模型参数进行辨识是利用扩展Debye模型分析PDC测试结果的关键,鉴于传统拟合类方法难以保证辨识结果的唯一性,本文采取文献[18]所提出的矩阵束算法对测试结果进行参数辨识。

## 3 XLPE电缆绝缘老化状态综合评估

### 3.1 老化XLPE电缆介电特征参数

基于上述介绍的介电特征参数提取方法,计算得出不同程度热老化及水树老化XLPE电缆试样的介电特征参数,如表1所示。

表1 XLPE电缆试样的介质特征参数

Tab.1 Dielectric characteristic parameters of XLPE cable samples

老化类型	老化时间	$\sigma/(S/m)$	$Q_n/(C/m^3)$	$\tan\delta(\omega)_{p-max}/\%$	$A_1$	$\tau_1$	$A_2$	$\tau_2$	$A_3$	$\tau_3$
热老化	0 h	$2.06 \times 10^{-16}$	$1.28 \times 10^{-4}$	0.13	$3.20 \times 10^{-11}$	19.52	—	—	—	—
	108 h	$9.02 \times 10^{-17}$	$1.49 \times 10^{-4}$	0.20	$9.37 \times 10^{-11}$	38.37	—	—	—	—
	216 h	$1.89 \times 10^{-16}$	$2.29 \times 10^{-4}$	0.32	$2.59 \times 10^{-10}$	12.18	$4.66 \times 10^{-11}$	79.93	—	—
	324 h	$2.19 \times 10^{-16}$	$2.87 \times 10^{-4}$	0.37	$2.68 \times 10^{-10}$	7.99	$4.30 \times 10^{-11}$	76.41	$5.11 \times 10^{-12}$	1 518.59
	432 h	$4.44 \times 10^{-16}$	$2.92 \times 10^{-4}$	0.46	$2.76 \times 10^{-10}$	7.57	$4.13 \times 10^{-11}$	78.55	$6.58 \times 10^{-12}$	2 074.88
水树老化	0 d	$2.11 \times 10^{-16}$	$1.19 \times 10^{-4}$	0.13	$1.13 \times 10^{-11}$	102.66	—	—	—	—
	25 d	$2.01 \times 10^{-16}$	$1.07 \times 10^{-4}$	0.15	$9.53 \times 10^{-11}$	13.52	—	—	—	—
	40 d	$2.11 \times 10^{-16}$	$0.89 \times 10^{-4}$	0.13	$9.27 \times 10^{-11}$	11.76	—	—	—	—
	60 d	$2.35 \times 10^{-16}$	$1.79 \times 10^{-4}$	0.20	$6.59 \times 10^{-11}$	24.69	$1.83 \times 10^{-12}$	404.63	—	—
	75 d	$2.30 \times 10^{-16}$	$2.25 \times 10^{-4}$	0.31	$1.40 \times 10^{-10}$	18.30	$1.05 \times 10^{-11}$	202.19	—	—
	90 d	$1.96 \times 10^{-16}$	$2.89 \times 10^{-4}$	0.47	$1.89 \times 10^{-10}$	17.06	$4.22 \times 10^{-11}$	90.19	—	—

从表1可以看出,对于热老化试样而言, $Q_n$ 与 $\tan\delta(\omega)_{p-max}$ 均随老化时间的增加而增大,故推测电缆试样经过热老化后,由于XLPE分子链被热氧化断链,形成了较多的极性基团,使得这两种表征介质极化性能的参数增大。而对水树老化试样而言, $Q_n$ 与 $\tan\delta(\omega)_{p-max}$ 随老化时间的增加呈现先减小后增大的情况,上述两参数在老化时间为25 d与40 d的值较新电缆更小的可能原因是:此阶段水树生长处于滞长期,水树生长表现为水树枝密度增加而长度停滞增长,水树枝之间的电场屏蔽作用使得极化行为减弱<sup>[19]</sup>。在此之后,水树又进入高速生长阶段, $Q_n$ 与 $\tan\delta(\omega)_{p-max}$ 逐渐增大。对水树老化电缆试样进行切片观察获得的水树长度数据如图3所示,验证了上述提及的水树生长特性。

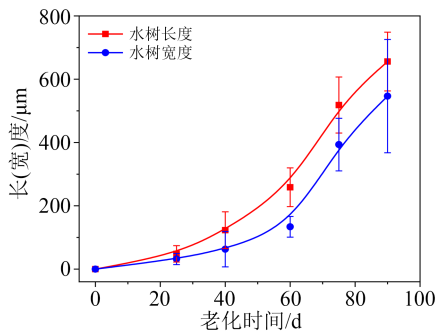


图3 不同老化程度电缆试样的水树长度  
Fig.3 Water tree length of cable samples with different ageing degree

分析表1中扩展Debye模型各支路时间常数及支路系数 $A_1$ 、 $\tau_1$ 、 $A_2$ 、 $\tau_2$ 、 $A_3$ 、 $\tau_3$ 可以得出,扩展Debye模型的弛豫类型数 $n$ 逐渐增大。这是因为随着老化的进行,XLPE中晶体的结构遭到破坏,聚乙烯分子链发生断链,对于水树老化还形成了水树充水微孔与微通道,以上裂解过程导致绝缘介质中的极化类型种类增多。热老化试样老化后期辨识出3种弛豫类

型;而水树老化试样则至多出现两种弛豫类型。由于对老化过程中各具体弛豫行为的分析不是本文讨论重点,此处不对各弛豫过程参数变化特性进行机理阐释。

### 3.2 多介电参数综合评估方法

如前所述,不同介电特征参数反映了绝缘介质的不同弛豫信息,由表1也可以看出,各介电参数变化特性与XLPE电缆试样老化类型、程度均有关联。故采用单一介电参数难以同时评判电缆具体老化类型及程度。考虑到不同介电参数反映的弛豫信息量存在差异,本节对上述介电参数进行赋权处理,在此基础上,引入改进雷达谱图方法进行绝缘状态综合评估。

#### 3.2.1 组合赋权方法

多参数评估指标的赋权方法主要可分为主观赋权法与客观赋权法。主观赋权法可以体现用户对各介电指标的特殊要求,但无法体现评估指标的重要程度随时间的渐变特性;客观赋权法能够客观反映指标的数据信息差别,但忽视了决策者经验的重要性。采用组合赋权方法可克服二者的局限性并保留各自优势。本文选用群体模糊层次分析法(group fuzzy analytic hierarchy process, GFAHP)作为主观赋权方法<sup>[20]</sup>、熵权法为客观赋权方法对表1中列举的各介电参数进行赋权<sup>[21]</sup>。

GFAHP通过引入三角模糊数实现群体模糊分析,三角模糊数的具体定义如下:对于模糊集 $\tilde{M}$ ,其隶属度函数 $\mu_{\tilde{M}}(x)$ 可表示为式(7)。

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} 0, & x < l \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m < x \leq u \\ 0, & x > u \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: $l$ 表示模糊数的最小可能值; $m$ 表示模糊数

的中间值;  $u$  表示模糊数的最大可能值, 且  $l \leq m \leq u$ 。

将  $\tilde{M}$  记为三角模糊数  $\tilde{M} = (l, m, u)$ 。假设  $\tilde{M}_1 = (l_1, m_1, u_1)$  与  $\tilde{M}_2 = (l_2, m_2, u_2)$  均为三角模糊数, 则  $\tilde{M}_1 \geq \tilde{M}_2$  的概率  $V$  如式(8)所示。

$$V(\tilde{M}_1 > \tilde{M}_2) = \begin{cases} 1, m_1 > m_2 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, m_1 \leq m_2, u_1 \geq l_2 \\ 0, \text{其他情况} \end{cases} \quad (8)$$

而  $\tilde{M} \geq \tilde{M}_1, \tilde{M}_2, \dots, \tilde{M}_n$  的概率如式(9)所示。

$$V(\tilde{M} \geq \tilde{M}_1, \tilde{M}_2, \dots, \tilde{M}_n) = \min V(\tilde{M} \geq \tilde{M}_i), \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

GFAHP 的具体实施方式为:

(1) 表2给出了评估量表与三角模糊数的对应关系, 标号 P 和 DP 表示重要程度的相反关系。由电缆绝缘领域的专家根据各指标反映绝缘状态的效率给出三角模糊数评价矩阵, 如式(10)所示。

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1P} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \dots & \tilde{a}_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{P1} & \tilde{a}_{P2} & \dots & \tilde{a}_{PP} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式(10)中:  $\tilde{a}_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, P$ ) 为表2中的标号, 具体表示评估参数  $i$  对应于参数  $j$  的重要程度;  $P$  为评估参数的个数;  $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ ,  $\tilde{a}_{ij} = 1/\tilde{a}_{ji}$ 。

表2 评价标准与模糊数关系映射

Tab.2 Evaluation scale and fuzzy number mapping

评价标准	标号	模糊数	标号	模糊数
完全等价	P	(1, 1, 1)	DP	(1, 1, 1)
略微重要	C	(1/2, 1, 3/2)	DC	(3/2, 1, 2)
稍微重要	L	(1, 3/2, 2)	DL	(1/2, 2/3, 1)
较为重要	G	(3/2, 2, 5/2)	DG	(2/5, 1/2, 2/3)
非常重要	V	(2, 5/2, 3)	DV	(1/3, 2/5, 1/2)
极其重要	E	(5/2, 3, 7/2)	DE	(2/7, 1/3, 2/5)

(2) 检验评价矩阵的一致性。模糊评价矩阵  $\tilde{A}$  与其对应的去模糊矩阵  $A = (a_{ij})_{P \times P}$  有相同的一致性, 去模糊矩阵可通过式(11)计算获得。

$$a_{ij} = \frac{l_{ij} + 4m_{ij} + u_{ij}}{6} \quad (11)$$

矩阵一致性指数  $C_I$  如式(12)所示。

$$C_I = \frac{\lambda_{\max}}{P - 1} \quad (12)$$

式(12)中,  $\lambda_{\max}$  是矩阵  $A$  的最大特征值。

矩阵一致性系数可通过式(13)获得。

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (13)$$

式(13)中,  $R_I$  值如表3所示, 其中  $I$  表示特征参数个数。有且仅当  $C_R < 0.1$  时, 评价矩阵才通过一致性验证, 否则需要重新建立评价矩阵。

表3 不同特征参数个数的  $R_I$  值

Tab.3  $R_I$  value of different number of characteristic parameters

$I$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_I$	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

(3) 第  $i$  个介电特征参数的模糊权重可由式(14)计算。

$$\tilde{w}_i = \sum_{j=1}^P \tilde{a}_{ij} \times \left( \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P \tilde{a}_{ij} \right)^{-1}, \quad i = 1, 2, \dots, P; j = 1, 2, \dots, P \quad (14)$$

利用式(8)~(9)对模糊权重进行去模糊处理, 最终得到主观权重, 如式(15)所示。

$$w_i = V(\tilde{w}_i \geq \tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_{i-1}, \tilde{w}_{i+1}, \dots, \tilde{w}_P), \quad i = 1, 2, \dots, P \quad (15)$$

熵权法是一种应用较为广泛的客观赋权方法, 在利用 GFAHP 方法与熵权法获得各介电特征参数的主观权重与客观权重后, 结合最小信息熵理论计算其组合权重, 如式(16)所示。

$$\omega_i = \frac{\omega_{gi} \omega_{ei}}{\sum_{i=1}^P \omega_{gi} \omega_{ei}} \quad (16)$$

式(16)中,  $\omega_i$ 、 $\omega_{gi}$  与  $\omega_{ei}$  分别为第  $i$  个介电特征参数的组合权重、主观权重与客观权重。

基于课题组前期经验与电介质物理基础理论以及表1中实验结果, 对不同算法的各介电特征参数进行主观权重计算, 得到各介电特征参数在整体加权中的权重, 如表4所示, 该计算过程综合考虑了实验数据与理论基础, 为介电特征参数的综合评估提供了科学依据。

表4 介电特征参数的权重值

Tab.4 The weight values of the dielectric characteristic parameters

介电参数	GFAHP	熵权法	组合赋权
$\sigma$	0.179 0	0.122 3	0.201 4
$\tan\delta(\omega)_{p-\max}$	0.116 2	0.123 8	0.129 2
$Q_n$	0.154 2	0.125 1	0.172 8
$A_1$	0.098 5	0.119 7	0.106 7
$\tau_1$	0.070 3	0.102 3	0.066 2
$A_2$	0.078 5	0.090 1	0.057 5
$\tau_2$	0.061 3	0.119 2	0.064 4
$A_3$	0.121 0	0.106 9	0.113 3
$\tau_3$	0.121 0	0.090 5	0.088 5

### 3.2.2 改进雷达谱图方法

雷达谱图被用于实现多评价指标的可视化处理与综合评估。然而传统雷达谱图法在进行评估

时,忽略了各评价指标的不同重要性,最终使得评估模型并不精确。因此,本研究首先利用前述组合赋权方法计算出各介电特征参数的权重,在此基础上,提出改进雷达谱图对热老化电缆试样与水树老化电缆试样的绝缘性能进行综合评判。具体绘制过程如下:

(1)根据表4中计算得出的组合权重为各介电评估指标分配不等的扇形区域,假设待评价指标数为 $n$ ,根据组合赋权得出的权重向量为 $\omega=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ ,则第 $j$ 项指标在雷达图中对应的扇形区域的角度为 $\theta_j=2\omega_j\pi$ 。

(2)在坐标系中做单位圆,以圆心为起点水平向右引出单位长度的线段,按逆时针方向 $\theta_1$ 处做第二条线,该扇形区域代表第一个指标 $\sigma$ ,按照此方法依次做出剩余线段及扇形区域。随后,以坐标原点为起点,做出各扇形区域的角平分线,将此作为每个参数的坐标轴。

(3)对前述各指标进行归一化处理,对于参数 $\sigma, \tan\delta(\omega)_{p-max}, Q_n, A_1, A_2, A_3$ 而言,它们的值越大,表明老化程度越严重,采用式(17)进行归一化处理。

$$V_{ij}' = 0.85 \cdot \frac{V_{ij} - \min_i (V_{ij})}{\max_i (V_{ij}) - \min_i (V_{ij})} + 0.15 \quad (17)$$

对于参数 $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ 而言,它们的值越小,表明老化程度越严重,采用式(18)进行归一化处理。

$$V_{ij}' = 0.85 \cdot \frac{\max_i (V_{ij}) - V_{ij}}{\max_i (V_{ij}) - \min_i (V_{ij})} + 0.15 \quad (18)$$

式(17)~(18)中: $V_{ij}$ 表示第 $i$ 个老化试样的第 $j$ 项评价指标; $V_{ij}'$ 表示归一化后的值; $\max_i (V_{ij}), \min_i (V_{ij})$ 表示第 $j$ 项评价指标的最大值与最小值。该归一化方法使雷达谱图的坐标范围 $V_{ij}' \in [0.15, 1]$ ,主要目的是保证谱图的美观性。

(4)将各项指标量化数值 $V_{ij}'$ 按长度在指标轴上标出相应点,连接各点得到雷达谱图,如图4所示。

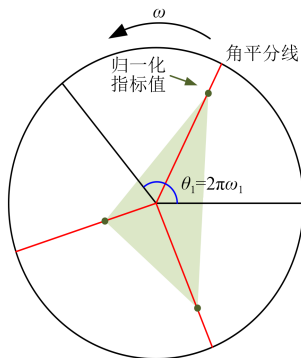


图4 改进雷达谱图绘制示意图

Fig.4 Schematic diagram of improved radar chart

### 3.3 基于改进雷达谱图的电缆试样绝缘状态评估

图5与图6分别为热老化电缆试样与水树老化电缆试样的改进雷达谱图。从图5~6可以看出,对同一老化类型不同老化阶段试样,图中多边形面积随老化时长增加而增大。因此,将雷达谱图中多边形的面积作为评估电缆老化程度的特征参数,建立了该参数与老化程度的定量关系,结果如图7所示。

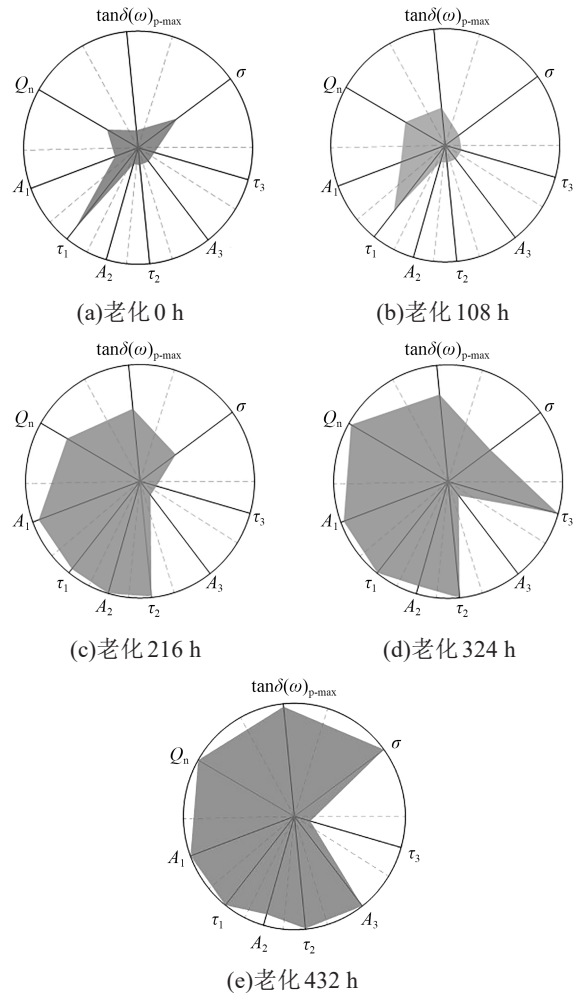


图5 热老化电缆试样的雷达谱图

Fig.5 Radar charts of thermal ageing cable samples

从图7可以看出,多边形面积参数能够较好地反映XLPE电缆热老化及水树老化的程度,且该参数包含了PDC测试结果中的多维介电弛豫信息。值得注意的是,对于热老化电缆而言,其老化程度与该参数呈现正比关系;而对于水树老化电缆而言,其老化程度与该参数则呈现指数函数关系,说明这两种老化发展趋势并不相同。

## 4 结论

(1)对于XLPE电缆的热老化与水树老化而言,仅通过PDC测试结果计算出的直流电导率并不能

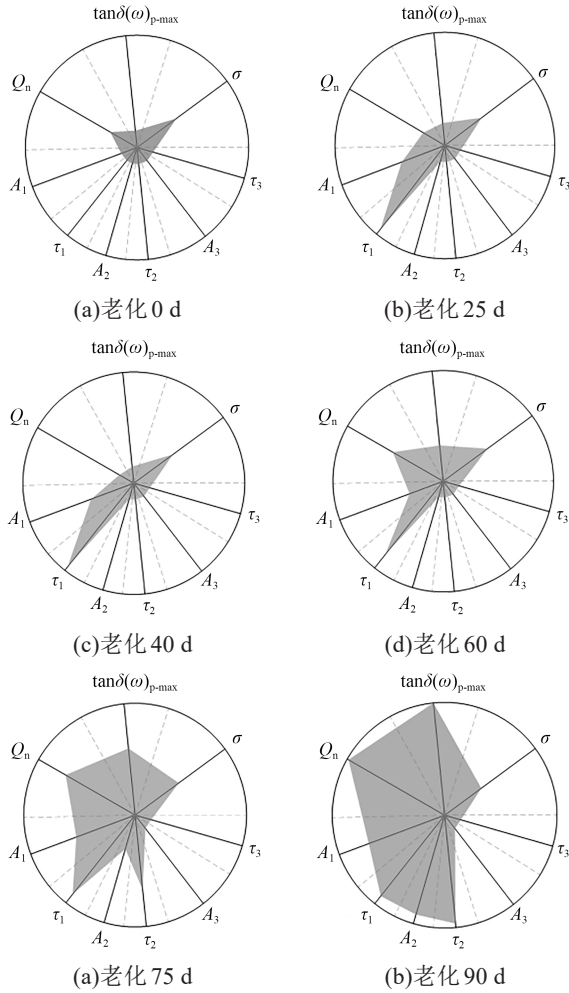


图6 水树老化电缆试样的雷达谱图

Fig.6 Radar charts of water tree ageing cable samples

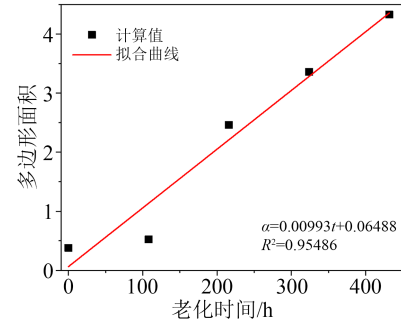
较好地反映电缆的绝缘状态。而表征材料极化特性的参数,如  $Q_n$  与  $\tan\delta(\omega)_{p-max}$  都随老化时间的增加而增大,与绝缘老化程度的关系更为密切。此外,扩展 Debye 模型中弛豫类型数增多也是老化发展的特征之一。

(2)采用组合赋权法计算得出本文列举的各介电特征参数对 XLPE 电缆绝缘老化评估的信息贡献度。在此基础上得到的改进雷达谱图结果表明,随着老化的发展,雷达谱图中多边形区域面积逐渐增加,且热老化与水树老化电缆对应的雷达谱图区域分布有所区别。

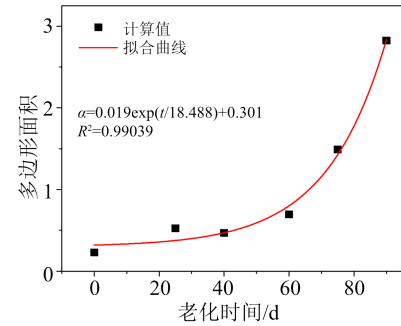
(3)对雷达谱图做进一步的特征参数提取,提出的多边形面积参数能够较好地定量表征出本文电缆试样的绝缘老化程度。在后续研究工作中,将考虑利用本文所提方法对更多老化类型以及在运电缆进行评估分析。

参考文献:

[1] 李欢,李建英,马永翔,等.不同温度热老化对 XLPE 电缆绝缘材



(a)热老化电缆试样



(b)水树老化电缆试样

图7 多边形面积与电缆老化程度的关系

Fig.7 Relationship between polygon area and ageing degree of cable samples

料晶体结构的影响研究[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6740-6748,6787.

[2] 周凯,李诗雨,尹游,等.退运中压 XLPE 和 EPR 电缆老化特性分析[J].电工技术学报,2020,35(24):5197-5206.

[3] 赵艾萱,陈曦,徐龙,等.时域/频域介电响应在 XLPE 电缆绝缘诊断的应用[J].高电压技术,2020,46(1):292-302.

[4] ZAENGL W S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2003,19(5):5-19.

[5] 饶显杰,周凯,谢敏,等.稳定图法在极化等效电路参数辨识中的应用[J].电工技术学报,2020,35(10):2248-2256.

[6] 赵艾萱,刘健,徐龙,等.基于 PDC 法的在运 XLPE 电缆绝缘状态评估[J].高电压技术,2019,45(5):1542-1550.

[7] 叶刚,姚星辰,李涛,等.XLPE 电缆绝缘老化的时频域介电特性[J].高电压技术,2018,44(11):3713-3719.

[8] 黄明,周凯,黄科荣,等.基于 PDC 法的绝缘老化电缆低频损耗特性分析[J].高电压技术,2019,45(3):959-967.

[9] OYEGOKE B, HYVONEN P, ARO M, et al. Application of dielectric response measurement on power cable systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2003,10(5):862-873.

[10] MORSALIN S, PHUNG B T. Dielectric response study of service-aged XLPE cable based on polarisation and depolarisation current method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(1):58-66.

[11] DAKKA M A, BULINSKI A, BAMJI S. Correlation between DC polarization and failure characteristics of XLPE and EPR aged with AC voltage in a wet environment[J]. IEEE Transac-

- tions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(4):700-708.
- [12] BANERJEE C M, BARAL A, CHAKRAVORTI S. Detrapped charge-affected depolarization-current estimation using short-duration dielectric response for diagnosis of transformer insulation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020,69(10):7695-7702.
- [13] 李明志,周凯,黄科荣,等. 基于PDC法的XLPE长电缆中局部水树的诊断[J]. 高电压技术,2020,46(12):4234-4240.
- [14] 尹游,周凯,李诗雨,等. 基于极化去极化电流法的水树老化XLPE电缆界面极化特性分析[J]. 电工技术学报,2020,35(12):2643-2651.
- [15] 雷清泉,刘关宇. 如何理解工程电介质中极化与电导两个基本物理过程及其测量的科学原理与方法[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(23):6769-6789,7113.
- [16] SAHA T K, PURKAIT P, MULLER F. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):149-157.
- [17] 高竣,廖瑞金,王有元,等. 基于扩展Debye模型的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 电工技术学报,2016,31(4):211-217.
- [18] 张晨萌,苏少春,谢敏,等. 基于矩阵束算法的XLPE电力电缆绝缘介质响应参数辨识[J]. 高电压技术,2019,45(5):1647-1653.
- [19] 周凯,黄科荣,黄明,等. 交联聚乙烯电缆绝缘中的水树生长特性[J]. 高电压技术,2019,45(10):3207-3213.
- [20] ZHANG L, CHAI J, XIN H, et al. Evaluating the comprehensive benefit of hybrid energy system for ecological civilization construction in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278:123769.
- [21] 李响,牛赛. 双碳目标下源-网-荷多层评价体系研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(S1):178-184.
- 
- 收稿日期:2023-04-03;修回日期:2023-06-08。  
作者简介:王尉军(1982-),男(汉族),江西抚州人,高级工程师,主要从事高压电缆运维管理的研究。