

## 基于改进标准间相关性方法的 CVT 绝缘状态评估

段平韬, 李 原, 周 凯, 袁 豪, 周 浩

(四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 为保障电容式电压互感器(CVT)的安全稳定运行,提升其绝缘可靠性,基于改进标准间相关性(CRITIC)方法对 CVT 进行了绝缘状态评估研究。首先,对 CVT 进行人工加速热老化,在不同老化周期下对其进行电容量与介质损耗因数、极化-去极化电流及电压和电流测试。结果表明:在老化后,CVT 总电容量从 10.106 nF 增大至 10.155 nF,第三支路时间常数从 62.35 s 增大至 82.80 s,电流电压相位差从 96.3° 增大至 97.8°,绝缘特征量中只有一次侧视在阻抗值呈递减趋势。随后,利用余期望系数及激活熵对 CRITIC 法进行改进,并利用改进 CRITIC 法对 CVT 绝缘特征量赋权及评分,在赋权结果中,0.1 Hz 低频介质损耗因数权重最大,为 0.323 3,C1 介质损耗因数权重最小,为 0.091 2,使用该赋权方法解决了信息残缺的问题。最后,将 CVT 绝缘评分与实际工况运行时间相联系,并对其绝缘状态进行评估,当绝缘评分为 0 分时,对应工况运行 29.88 年,与工程实际相符。根据 CVT 绝缘评分,即可判断其内部绝缘状态。

**关键词:** 电容式电压互感器;绝缘状态评估;老化特性;改进 CRITIC 法;绝缘评分

## CVT insulation status evaluation based on improved criteria importance through intercriteria correlation method

DUAN Pingtao, LI Yuan, ZHOU Kai, YUAN Hao, ZHOU Hao

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to ensure the safe and stable operation of capacitor voltage transformer (CVT), improve its insulation reliability, the insulation state of CVT was evaluated based on improved criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) method. Firstly, the CVT was conducted the artificially accelerated thermal ageing, and its capacitance and dielectric loss factor, polarization and depolarization current, voltage and current were tested under different ageing cycles. The results show that after ageing, the total capacitance of CVT increases from 10.106 nF to 10.155 nF, the time constant of the third branch increases from 62.35 s to 82.80 s, the current and voltage phase difference increases from 96.3° to 97.8°, and only the primary side apparent impedance value decreases among the insulation characteristic parameters. Subsequently, the CRITIC method was improved by residual expectation coefficient and activation entropy, and the improved CRITIC method was used to weight and score the CVT insulation characteristic parameters. In the empowerment results, the weight of 0.1 Hz low frequency dielectric loss factor is the largest, which is 0.323 3, and the weight of C1 dielectric loss factor is the smallest, which is 0.091 2, and the improved CRITIC method solves the problem of information incompleteness. Finally, the insulation score of CVT was correlated with the operating time under actual working condition, and its insulation status was evaluated. When the insulation score is 0 points, the corresponding operating time under working condition is 29.88 years, which is consistent with the actual project. According to CVT insulation score, the internal insulation state can be judged.

**Key words:** CVT; insulation status evaluation; ageing characteristics; improved CRITIC method; insulation score

### 0 引言

电压互感器是电力系统中重要的计量及保护装置,其稳定运行对电力系统的经济效益及安全性至关重要<sup>[1]</sup>。目前,电磁式电压互感器(potential

transformer, PT)和电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)在电力系统中被广泛应用<sup>[2]</sup>。与 PT 相比,CVT 具有绝缘结构简单、可靠性高、成本低等优点<sup>[3]</sup>。因此,目前在 110 kV 及以上电压等级的电力系统中,CVT 占有率高达 90%<sup>[4]</sup>。

在制作及运输过程中,CVT 的电容芯子易出现绝缘缺陷。同时,在电网运行中,电容芯子会受到

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52107159);四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC1872)。

电场和各种环境因素的影响,导致其绝缘劣化<sup>[5]</sup>。而绝缘缺陷及绝缘劣化均会造成电容芯子的电气参数发生偏移,影响计量精度<sup>[6]</sup>,严重时甚至造成电容元件击穿,导致CVT发生故障<sup>[7]</sup>。因此,亟需开展CVT绝缘老化特性及绝缘状态评估研究,并以此为依据制定合理的运维措施。

针对CVT绝缘老化引起的计量精度误差,李鹏程等<sup>[8]</sup>仿真了电容元件的温度特性、老化及受潮对计量精度的影响,结果表明CVT的比差与角差随电容元件温度的升高呈线性增大趋势,随老化和受潮情况的加剧呈先快速增大后稳定的趋势。但除电容单元外,电磁单元对比差与角差也具有较大影响,上述仿真并未对其展开研究。针对CVT绝缘的老化特性,朱检<sup>[9]</sup>对CVT电容单元膜纸绝缘的局部放电过程进行了仿真研究。通过仿真发现,气泡的存在对纸层绝缘内部场强影响较大,且在局放过程中,纸层绝缘的劣化速度快于膜层绝缘。上述研究均未考虑热老化等其他老化形式对电容单元绝缘性能的影响,其研究结果有待进一步丰富和拓展。

在CVT绝缘状态评估方面,多数学者均通过计量误差特征参量来实现评估<sup>[10]</sup>。MENG Z等<sup>[11]</sup>利用模糊聚类法将CVT计量误差特征参量与典型内绝缘状态相匹配,实现了分压电容击穿和介损异常两种故障状态的在线识别。H SEYEDI等<sup>[12]</sup>以CVT输出电压的正序电压、负序电压、零序电压以及帕克变换结果作为计量误差特征参量,并利用证据理论将各个特征参量转化为证据片段,通过比较绝缘状态正常时与故障时的证据片段,实现了对CVT绝缘状态的实时评估。徐云武<sup>[13]</sup>量化了CVT内绝缘状态异常时输出电压上的附加计量误差特征参量,并将其与内绝缘状态正常时的运行数据构建样本集,之后采用深度置信网络对实时特征参量进行检测和分析,实现了CVT内绝缘状态的在线评估。上述评估方法均利用计量误差特征参量对CVT绝缘状态进行间接评估,并未对内绝缘参量进行直接考量。考虑到计量误差特征参量受设备绝缘参量影响显著,从绝缘基本特征参量出发,有望获得更为精准的绝缘状态评估结果。

针对上述CVT绝缘老化特性及绝缘状态评估研究的不足,本文提出利用改进标准间相关性(criteria importance through inter-criteria correlation, CRITIC)方法对CVT绝缘状态进行评估。首先,对

CVT进行人工加速热老化,在不同老化周期下对其进行电容量与介质损耗因数、极化-去极化电流及电压和电流测试,并从中提取出可有效表征CVT绝缘状态的特征量。其次,利用余期望系数及激活熵改进传统CRITIC法,并对不同绝缘特征量赋权,进而对CVT绝缘状态进行评分。最后,利用评分与视在寿命的关系,对待测CVT绝缘状态做出评判,为工程实际提供一定指导。

## 1 老化条件与测试方法

本文在实验室条件下制备了不同老化程度的CVT样本,并对其主要参数进行了测量,下面就具体老化条件及测试方法进行阐述。

### 1.1 老化条件

为获得不同老化程度的CVT样本,在实验室对3台型号为TYD35/ $\sqrt{3}$ -001HF的CVT进行人工加速热老化,每个周期的老化条件如表1所示,即在热老化的同时,对CVT一次侧施加额定工作电压。每老化5个周期(160 h)对老化样本进行测试,共老化20个周期获取5种不同老化程度样本数据。

表1 CVT老化条件

一次侧电压/kV	环境温度/°C	老化周期时间/h
35/ $\sqrt{3}$	70	32

在额定工作电压与标准环境温度(25°C)下,全密封结构的油浸式互感器由于工作时产生的温升,其内部整体温度为55~65°C。根据标准,CVT的顶层油温应不超过80°C<sup>[14]</sup>。相较于标准环境温度,本文设置的环境温度为70°C,额定工作电压下CVT内部温度预计可达到100°C以上,因此在本文设置的环境温度下,可实现CVT的加速老化。

### 1.2 测试方法

#### (1)电容量与介质损耗因数测试

CVT电容单元由高、中压电容串联而成,电容量的变化会引起分压变化,而介质损耗因数的变化会引起相位变化,进而影响二次侧计量精度。在现场测试时,电容量与介质损耗因数是表征CVT绝缘状态的重要参数。常用的测试方式有正接法、反接法及自激法。在本实验中,使用正接法对电容单元整体电容量进行测试,使用自激法对高压电容和中压电容的介质损耗因数进行测试。

#### (2)极化-去极化电流测试

极化-去极化电流 (polarization and depolarization current, PDC) 法是一种无损的时域介电响应测试方法, 具有测试回路简单、测试时间短及诊断信息丰富等优点<sup>[15-17]</sup>, 利用 PDC 法对电容单元进行测试, 可有效辨识老化前后电容单元极化及电导特性变化, 进而更为全面地掌握电容单元老化特性。

极化-去极化电流测试采用如图 1 所示的系统, 极化电压为 1 kV, 极化时间为 270 s<sup>[18-19]</sup>。在进行测试后, 通过式(1)与式(2)可计算得到待测 CVT 的去极化电荷量与 0.1 Hz 低频介质损耗因数。此外, 使用拟合分析法对 CVT 极化电流进行分析<sup>[20]</sup>, 计算扩展 Debye 模型各支路弛豫强度系数  $A_i$  及弛豫时间  $\tau_i$ , 以探究老化前后电容单元不同极化过程各参数的变化趋势。

$$Q = \int_0^t |i_{dep}(t)| dt \quad (1)$$

$$\tan \delta(\omega)_{0.1} = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega}}{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega)} + \frac{\chi''(\omega)}{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega)} \quad (2)$$

式(1)~(2)中:  $Q$  为去极化电荷量;  $t$  为去极化时间;  $\tan \delta(\omega)_{0.1}$  为 0.1 Hz 低频介质损耗因数;  $\varepsilon''(\omega)$  为复介电常数实部;  $\varepsilon'(\omega)$  为复介电常数虚部;  $\sigma_0$  为直流电导率;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数;  $\omega$  为角频率;  $\chi'(\omega)$  和  $\chi''(\omega)$  分别为绝缘介质束缚电荷能力值和有损极化损耗值,  $\varepsilon_\infty$  为光频介电常数。

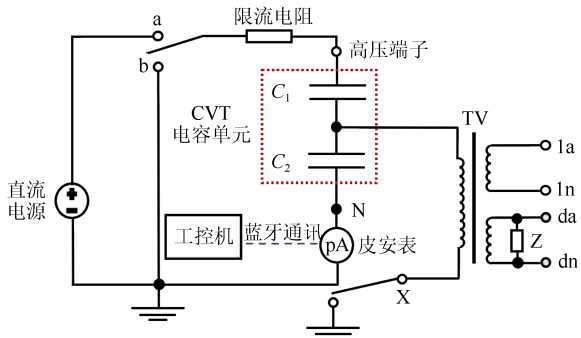


图1 PDC测试系统图

Fig.1 Test system diagram of PDC

(3) 电压与电流测试

流过 CVT 电容单元与电磁单元原边的电流共同组成一次侧电流, 而二次侧电压与一次侧电流蕴含着电容单元与电磁单元众多的绝缘信息<sup>[21]</sup>。在电网实际运行中, 运维人员通过传感器对 CVT 二次侧电压与一次侧电流进行实时测量<sup>[22]</sup>。本实验使用零磁通电流传感器对一次侧电流进行测量, 并对二次

侧输出电压信号幅值及相位差进行测试, 具体接线如图 2 所示。

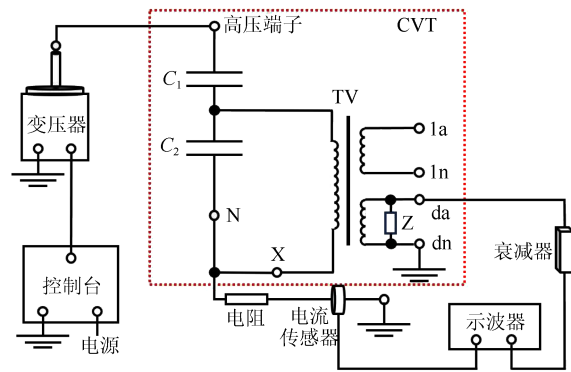


图2 电压与电流测试接线图

Fig.2 Voltage and current test wiring diagram

2 结果与分析

每老化 5 个周期, 对 CVT 进行电容量、介质损耗因数、极化-去极化电流及电压与电流测试。

2.1 电容量及介质损耗因数测试结果

CVT 电容单元的总电容量如图 3 所示, 高压电容  $C_1$ 、中压电容  $C_2$  的介质损耗因数测试结果如图 4 所示。从图 3 和图 4 可以看出, 随着老化时间的增加, 总电容量、高压电容  $C_1$  和中压电容  $C_2$  的介质损耗因数均增大, 说明电容单元的绝缘性能和电气性能有所下降。

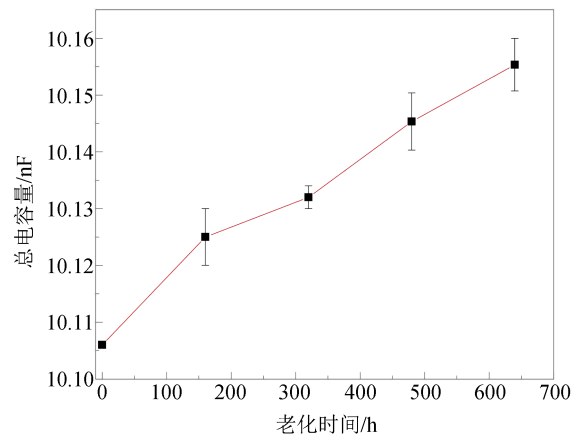


图3 总电容量与老化时间的关系曲线

Fig.3 Relationship curve between total capacitance and ageing time

CVT 电容单元由电容量相近的电容元件串联而成, 其电容量与电容元件电容量的关系如式(3)所示。

$$C = \frac{C_0}{N} \quad (3)$$

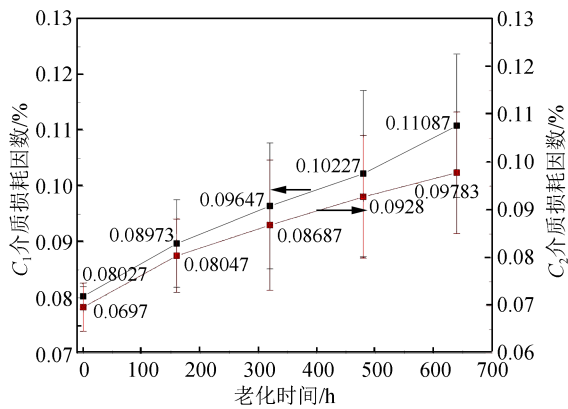


图4 介质损耗因数与老化时间的关系曲线

Fig.4 Relationship curves between dielectric loss factor and ageing time

式(3)中: $C$ 为电容单元电容量; $C_0$ 为电容元件电容量; $N$ 为电容元件总数。

随着老化的进行,电容元件电介质会发生劣化与分解,从而使电容元件绝缘击穿。此时构成电容单元的电容元件电容量不变,而电容元件总数减小,故电容单元电容量呈增大趋势。且在老化过程中还伴随绝缘材料裂解,这一过程会产生较多极性小分子物质,导致电容单元中偶极子增多,介质损耗因数增大<sup>[23]</sup>。

### 2.2 极化-去极化电流测试结果

CVT的去极化电荷量和0.1 Hz低频介质损耗因数测试结果如图5和图6所示。从图5和图6可以看出,二者均随老化时间的增加呈递增趋势,这是由于电热应力的作用使绝缘油、聚丙烯薄膜及电容器纸裂解,产生水、酸及左旋葡萄糖等极性小分子<sup>[24]</sup>。在外施直流电场作用下,上述极性小分子会发生极化并改变绝缘材料的介电常数,故而使去极化电荷量与0.1 Hz低频介质损耗因数增大。

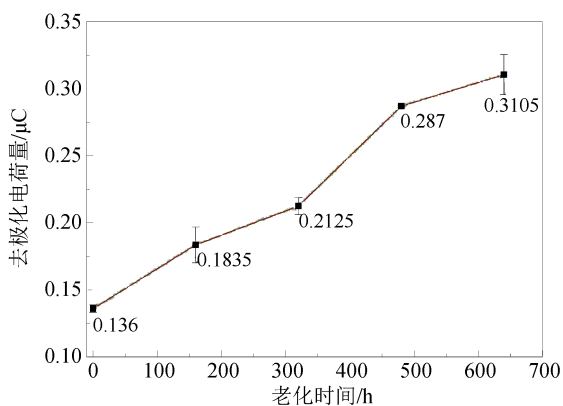


图5 去极化电荷量与老化时间的关系曲线

Fig.5 Relationship curve between  $Q_n$  and ageing time

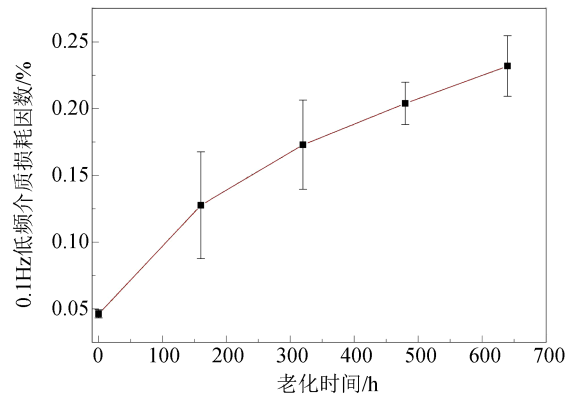


图6 0.1 Hz低频介质损耗因数与老化时间的关系曲线

Fig.6 Relationship curve between 0.1 Hz low frequency dielectric loss factor and ageing time

对极化电流曲线进行支路辨识,结果如表2所示,表2中 $A$ 为支路的幅值系数, $\tau$ 为支路的时间常数。电容单元为聚丙烯薄膜、电容器纸及绝缘油组成的复合结构,当对其进行极化时,就会出现以液体、固体和不同界面极化为主导的极化过程。从表2可以看出, $\tau_1$ 值最小,且在老化前后并未出现明显的规律变化; $\tau_2$ 值较大,在3~12 s之间; $\tau_3$ 值最大,分布在62~83 s之间,且 $\tau_2$ 与 $\tau_3$ 都随着老化时间的增加呈递增趋势。根据电介质极化理论可推断, $\tau_1$ 对应极化时间较短的液体内部极化过程,而 $\tau_2$ 及 $\tau_3$ 则对应极化时间较长的固体内部及界面极化过程<sup>[25]</sup>。

表2 3阶支路辨识结果

Table 2 Three branches identification results

参数	时间/h				
	0	160	320	480	640
$A_1$	$2.92 \times 10^{-7}$	$3.21 \times 10^{-7}$	$1.88 \times 10^{-7}$	$1.43 \times 10^{-7}$	$1.42 \times 10^{-7}$
$A_2$	$1.28 \times 10^{-7}$	$3.95 \times 10^{-8}$	$3.17 \times 10^{-8}$	$2.56 \times 10^{-8}$	$1.58 \times 10^{-7}$
$A_3$	$4.54 \times 10^{-9}$	$8.99 \times 10^{-9}$	$1.07 \times 10^{-8}$	$1.17 \times 10^{-8}$	$1.35 \times 10^{-8}$
$\tau_1/s$	0.68	0.53	0.59	0.55	0.47
$\tau_2/s$	3.63	5.55	6.96	8.01	11.64
$\tau_3/s$	62.35	67.77	70.34	76.99	82.80

正如前文所言,在热老化过程中,电容单元内会生成较多极性小分子,这些极性分子不仅会在各自介质中产生偶极子转向极化,并且会沉降吸附在聚丙烯薄膜及电容器纸表面<sup>[26]</sup>,增强界面极化强度。此外,随着老化程度的加深,膜纸绝缘结构会变得松散、不均匀,导致极性小分子与绝缘油进一步渗入到绝缘内部,形成更多油纸界面,这也会显著增强界面极化强度。因此,在不同老化程度下的极化过程中, $\tau_1$ 并未发生明显变化,而 $\tau_2$ 及 $\tau_3$ 呈递增趋势。

### 2.3 电压与电流测试结果

定义一次侧电压有效值与一次侧电流有效值的比值为一次侧视在阻抗  $S^*$ ，如式(4)所示，一次侧电流与二次侧电压相位差  $\sigma$  如式(5)所示。

$$S^* = \frac{U_{1\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_U \quad (5)$$

式(4)~(5)中： $U_{1\text{rms}}$ 为一次侧电压有效值； $I_{1\text{rms}}$ 为一次侧电流有效值； $\sigma_1$ 为一次侧电流相位值； $\sigma_U$ 为一次侧电压相位值。

在一次侧电压不变的情况下，CVT 一次侧视在阻抗的变化即代表一次侧电流有效值的变化，且一次侧视在阻抗的变化趋势能够更为直接地反映出 CVT 一次侧绝缘状态。

电压与电流测试结果及一次侧视在阻抗计算结果如表 3 所示，其变化趋势如图 7 所示。

表 3 测试及计算结果

Table 3 Test and calculation results

老化时间 /h	一次侧电流 有效值/mA	电流电压相位差 /(°)	一次侧视在阻抗值 /kΩ
0	65.78	96.3	304.043 78
160	65.96	96.7	303.214 07
320	66.35	97.0	301.431 80
480	66.61	97.3	300.255 22
640	66.96	97.8	298.685 78

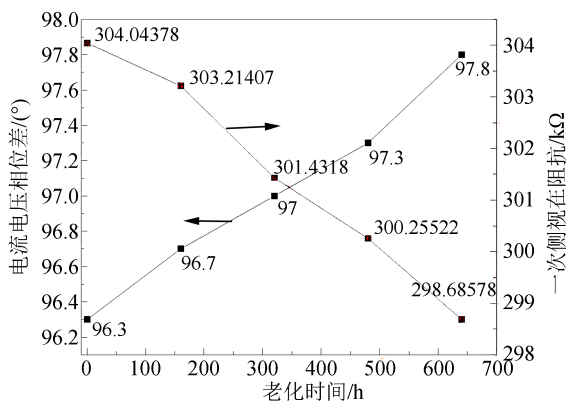


图 7 相位差和视在阻抗与老化时间关系曲线

Fig.7 Relationship curves between  $\sigma$  and  $S^*$  with ageing time

从表 3 和图 7 可以看出，随老化时间的增加，电流电压相位差呈近似线性上升趋势，一次侧视在阻抗呈近似线性下降趋势。这是由于在热老化过程中，介质损耗因数增大会导致一次侧电流与二次侧电压相位差增大<sup>[27]</sup>；而高压与中压电容的电容量呈递增趋势，因此电容单元容抗减小，一次侧电流增

大，进而导致一次侧视在阻抗减小。

## 3 CVT 绝缘状态诊断方法

如仅靠单一绝缘特征量对 CVT 绝缘状态进行评估，则无法确保评估结果的准确性。因此，本文选取总电容量、 $C_1$  介质损耗因数、0.1 Hz 低频介质损耗因数、第三支路时间常数、电流电压相位差及一次侧视在阻抗变化值作为诊断 CVT 绝缘状态的特征量，并从客观角度赋予其权重，利用权重对不同老化程度的 CVT 绝缘状态进行量化评分，具体方法如下。

### 3.1 基于改进 CRITIC 法的绝缘特征量权重确定

常见客观赋权方法有变异系数法、熵权法及 CRITIC 法，其中 CRITIC 法在考虑变异性的同时，还考虑了各指标间冲突性<sup>[28]</sup>，对指标数据的利用更全面，且针对小数据量赋权依然有效，是一种更优异的客观赋权方法。

在使用 CRITIC 法计算过程中，相关系数计算结果可能为负值，而标准差易受量纲及均值影响，且衡量信息量的指标缺乏对信息冗余度的计算，这均会影响最终赋权结果准确性。因此，本文采用基于余期望系数及激活熵改进的 CRITIC 法，以解决 CRITIC 法在赋权计算中的不足，具体计算步骤如下：

(1) 对各绝缘特征量测试数据进行归一化处理。前述绝缘特征量中，除一次侧视在阻抗外，均为成本型指标。故采用一次侧视在阻抗变化值对老化前后一次侧视在阻抗的变化进行表征，则所有绝缘特征量均按照式(6)进行最小值标准化。

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (6)$$

式(6)中： $x_{ij}$ 为第  $i$  行第  $j$  列的绝缘特征量值； $x'_{ij}$ 为第  $i$  行第  $j$  列的绝缘特征量按照最小值标准化后的值，其值介于 0~1； $\max(x_j)$ 为第  $j$  列绝缘特征量中的最大值； $\min(x_j)$ 为第  $j$  列绝缘特征量中的最小值。

本文根据 CVT 老化程度对归一化处理上下限进行确定，具体阐述如下：根据 Arrhenius 方程可知，化学反应速率常数随温度变化，两者关系如式(7)所示。

$$k = A \times e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

式(7)中： $k$ 为化学反应速率常数； $A$ 为指前因子； $E_a$ 为表观反应活化能； $R$ 为摩尔气体常量，其值为

8.314 J/(mol·K);  $T$ 为热力学温度。

由式(7)可知,在相同温差下,反应速率常数的变化率与表观反应活化能呈正相关。在 CVT 绝缘材料中,聚丙烯薄膜表观反应活化能最大,为 123.4 kJ/mol<sup>[29]</sup>,故经相同时间老化后,聚丙烯薄膜的绝缘性能变化最大。因此,在进行时温等效换算时,应以聚丙烯薄膜表观反应活化能为基准,以此表征 CVT 整体的老化程度。

根据 Arrhenius 方程,在本文老化条件(105℃)与工况运行条件(60℃)下,对 CVT 老化程度进行时温等效换算,可得出本文老化条件下 CVT 寿命仅为工况运行条件下的 1/202,即老化 20 周期对应正常工况运行 14.76 年。电力设备的运行寿命年限一般设计为 30 年,故在归一化处理时,设定未老化 CVT 数据为最大值 1,老化 640 h CVT 数据为最小值 0.5,并以此为标准对不同老化周期 CVT 数据进行归一化处理。

(2)计算各绝缘特征量的冲突性,如式(8)和式(9)所示。在计算过程中,对相关系数取绝对值,以避免其为负数时对冲突性造成影响。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x'_{ki} - \bar{x}'_i)(x'_{kj} - \bar{x}'_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x'_{ki} - \bar{x}'_i)^2 \sum_{k=1}^n (x'_{kj} - \bar{x}'_j)^2}} \quad (8)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|) \quad (9)$$

式(8)~(9)中: $r_{ij}$ 为第  $i$  项绝缘特征量与第  $j$  项绝缘特征量的线性相关系数; $R_j$ 为第  $j$  项绝缘特征量的矛盾性大小; $n$ 为指标的总数。

(3)计算各绝缘特征量的变异性,如式(10)和

式(11)所示。本文使用余期望系数代替标准差,余期望系数是经济学中常用于衡量收入差距的指标,相比于其他衡量差距的指标,余期望系数具有更高的可信度<sup>[30]</sup>。

$$e_j = \frac{\sum_{j=1}^n p_j \log(p_j)}{\log n} \quad (10)$$

$$S_j = 1 + e_j \quad (11)$$

式(10)~(11)中: $p_j$ 为指标  $j$  发生概率; $e_j$ 为指标  $j$  信息熵相反数,其值介于  $-1 \sim 0$ ;  $S_j$ 为余期望系数,其值越接近 0,则代表差异性越小,越接近 1,则代表差异性越大。

(4)计算各绝缘特征量的信息量。在传统 CRITIC 法计算信息量的基础上,本文引入改进后的激活熵,使信息量更为丰富<sup>[31]</sup>,计算公式如(12)所示,将改进后的激活熵引入信息量的计算中,如式(13)所示。

$$E'_j = 1 - \frac{1}{1 + e^e} \quad (12)$$

$$C_j = S_j \times R_j \times E'_j \quad (13)$$

式(12)~(13)中: $E'_j$ 为第  $j$  项绝缘特征量改进后的激活熵; $C_j$ 为第  $j$  项绝缘特征量的信息量。

(5)计算各绝缘特征量的权重。通过式(14),按照各绝缘特征量的信息量占比,计算出各绝缘特征量的权重。

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (14)$$

式(14)中, $w_j$ 为第  $j$  项绝缘特征量的权重。

本文选取的绝缘特征参量及其在不同老化周期下的测试数据如表 4 所示。

表 4 绝缘特征量数值

Table 4 Insulation characteristic parameter value

老化时间 /h	总电容量 /nF	$C_1$ 介质损耗因数 /%	0.1 Hz 低频介质损耗因数 /%	第三支路时间常数 /s	电流与电压相位差 /(°)	一次视在阻抗变化值 /kΩ
0	10.106 00	0.080 267	0.046 155	62.35	96.3	0
160	10.125 00	0.089 733	0.143 326	67.77	96.7	829.71
320	10.132 00	0.096 467	0.157 188	70.34	97.0	2 611.98
480	10.145 33	0.102 267	0.203 927	76.99	97.3	3 788.56
640	10.155 33	0.110 867	0.231 930	82.80	97.8	5 358.00

结合表 4 数据,利用上述改进 CRITIC 法对 CVT 绝缘特征量进行赋权,结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,0.1 Hz 低频介质损耗因数权重最大,而一次

### 3.2 基于视在寿命偏差的 CVT 绝缘状态诊断

在得到不同绝缘特征量权重后,将表 5 中的权

侧视在阻抗变化值的权重次之。这是由于在结算过程中两个特征量的冲突性、余期望系数及激活熵均比其他特征量大,使得其信息量计算结果最大。重与归一化后特征量数值矩阵转置相乘,以未老化 CVT 特征量乘积结果为评分上限,老化 20 周期

表5 改进 CRITIC 法赋权结果  
Table 5 Improve CRITIC method empowerment results

绝缘特征量	总电容量	$C_1$ 介质损耗因数	0.1 Hz 低频介质损耗因数	第三支路时间常数	电流与电压相位差/(°)	一次视在阻抗变化值
权重	0.112 6	0.091 2	0.323 3	0.142 6	0.109 4	0.220 9

CVT 特征量乘积结果为评分下限,按照式(15)将乘积结果转化为百分制评分,可得到不同老化程度下 CVT 绝缘状态的百分制评分。对绝缘评分与老化时长的关系进行拟合,如图 8 所示,其拟合关系如式(16)所示。

$$S_i^* = \frac{S_i}{S_0} \times 100 (i = 0, 5, 10, \dots, 5n) \quad (15)$$

式(15)中: $S_i$ 为第*i*个老化周期下 CVT 绝缘状态乘积; $S_i^*$ 为第*i*个老化周期下 CVT 绝缘状态的百分制评分。

$$P^* = -0.0756x + 98.01002 \quad (16)$$

式(16)中: $P^*$ 为 CVT 绝缘评分; $x$ 为老化时间。

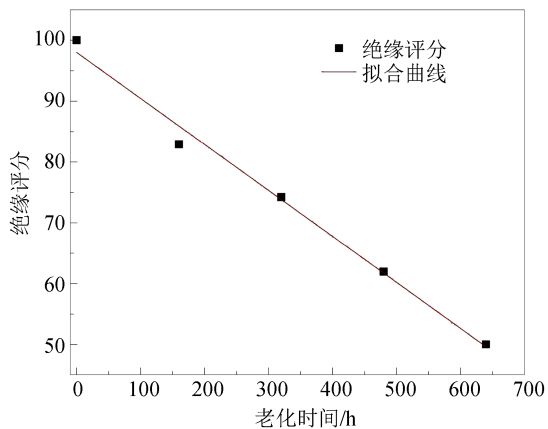


图8 绝缘评分与老化时间关系曲线

Fig.8 Relationship curve between insulation score and ageing time

从图8可以看出,不同老化时间下 CVT 绝缘评分与老化时长具有良好的线性关系,根据拟合曲线外推可知,当绝缘评分为0时,对应老化周期约为40.5个,即工况下运行29.88年,接近 CVT 寿命终点,与工程实际相符。

进一步结合本文老化条件与实际工况对应关系,即可求解出视在运行年限 $a^*$ 与绝缘评分关系,如式(17)所示。所谓视在运行年限 $a^*$ 即为在该评分下对应的理论工况运行年限。

$$a^* = 26.7869 - 0.2733S^* \quad (17)$$

当已知待测 CVT 运行年限 $a$ 时,可利用前文测试方法,对待测 CVT 绝缘特征量进行测试。以表4中测试数据的最大值与最小值为标准,将测试所得

绝缘特征量数据进行最小值标准化,再将其与对应权重相乘,并转化为百分制评分,代入式(17),求得视在运行年限 $a^*$ 。最后利用式(18)求解出视在寿命偏差 $W$ 。

$$W = \frac{a^* - a}{a} \quad (18)$$

所谓视在寿命偏差 $W$ 即待测 CVT 理论工况运行年限 $a^*$ 与实际运行年限 $a$ 的差值比。该差值比越小,代表此台 CVT 在运行年限 $a$ 中绝缘状态老化越不严重,其值可为判断 CVT 内部绝缘状态及是否需要检修提供一定指导。

## 4 结论

本文提出利用改进 CRITIC 法对 CVT 绝缘特征量赋权,以此对其内绝缘状态进行评分,并根据评分结果对待测 CVT 内部绝缘状态进行有效诊断,得出结论如下:

(1)老化后, CVT 总电容量从 10.106 nF 增至 10.155 nF,第三支路时间常数从 62.35 s 增至 82.8 s,电流电压相位差从 96.3°增至 97.8°。除一次侧视在阻抗值呈递减趋势外,其余绝缘特征量均呈递增趋势。

(2)余期望系数及激活熵改进的 CRITIC 法包含更丰富的信息量,解决了信息残缺的问题。在赋权结果中,0.1 Hz 低频介质损耗因数权重最大,为 0.323 3, $C_1$  介质损耗因数权重最小,为 0.091 2,使用该赋权法对 CVT 绝缘特征量进行赋权具有较高可信度。

(3)利用本文评估方法得到的 CVT 绝缘评分与老化时长之间具有良好线性关系,当绝缘评分为0分时,对应工况运行 29.88 年,符合工程实际。待测 CVT 视在寿命偏差 $W$ ,可为判断其内部绝缘状态及是否需要检修提供一定指导。

## 参考文献 References

- [1] 熊小伏,周家启,周永忠.基于迭加原理的 CVT 暂态特性校正新方法[J].电工技术学报,2006,21(8):107-111.  
XIONG X F, ZHOU J Q, ZHOU Y Z. A new method of correcting transient characteristics of capacitive voltage transformer using principle of superposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 107-111.

- [2] 邱太洪,陈贤熙,张伟忠,等.基于能量管理系统数据的电容式电压互感器二次电压在线监测在绝缘诊断中的应用[J].绝缘材料,2019,52(1):68-72.  
QIU T H, CHEN X X, ZHANG W Z, et al. Application of online monitoring of capacitor voltage transformer secondary voltage in insulation diagnosis based on EMS data[J]. Insulating Materials, 2019,52(1):68-72.
- [3] SHEN X S, HONG C, CAO M. Research on capacitance voltage transformer harmonic measurement[J]. Sensors and Materials, 2019,31(5):1499-1512.
- [4] 梅成林,张超树.电压互感器铁磁谐振分析[J].电网技术,2008,32(S2):311-313.  
MEI C L, ZHANG C S. Analysis of voltage transformer ferroresonance[J]. Power System Technology, 2008,32(S2):311-313.
- [5] 冉汉政,吴广宁,舒雯,等.膜纸复合储能电容器的直流局部放电信号分析方法[J].电工技术学报,2006,21(4):46-49.  
RAN H Z, WU G N, SHU W, et al. Study of DCPD analyzing method of energy-storage capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006,21(4):46-49.
- [6] 王文洪,侯慧.220 kV 电容式电压互感器的缺陷分析和故障预防[J].武汉大学学报(工学版),2006(1):97-100.  
WANG W H, HOU H. Deficiency analysis and malfunction prevention of 220 kV capacitance voltage transformers[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006(1):97-100.
- [7] 李勇明.电容式电压互感器运行中存在的问题及应对措施[J].企业技术开发,2015,34(26):95-96.  
LI Y M. Problems and countermeasures in the operation of capacitive voltage transformers[J]. Technological Development of Enterprise, 2015,34(26):95-96.
- [8] 李鹏程,徐宏伟,丛中笑,等.电容元件温度特性、老化和受潮对 CVT 计量精度的影响研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(5):88-94.  
LI P C, XU H W, CONG Z X, et al. Study on influence of temperature characteristics, aging and moisture of capacitor element on CVT metering accuracy[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020,41(5):88-94.
- [9] 朱检. CVT 电容单元膜纸绝缘局部放电及显微特性研究[D].保定:华北电力大学,2022.  
ZHU J. Study on partial discharge and microscopic characteristics of film-paper insulation in CVT capacitor[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022.
- [10] 张耀.基于局部谐振峰特征参数的 CVT 内部典型故障分层诊断研究[D].重庆:重庆大学,2022.  
ZHANG Y. Research on hierarchical diagnosis of typical faults of CVT based on characteristic parameters of local resonance peak[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [11] MENG Z, LI H B, ZHANG C J, et al. Research on the reliability of capacitor voltage transformers calibration results[J]. Measurement, 2019,146:770-779.
- [12] SEYEDI H, DARYANI N. Evidence theory-based identification of aging for capacitive voltage transformers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016,10(14):3646-3653.
- [13] 徐云武.电容式电压互感器计量误差及内绝缘状态在线评估方法研究[D].武汉:华中科技大学,2022.  
XU Y W. Research on on-line evaluation method of measurement error and internal insulation state of capacitive voltage transformer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [14] 全国互感器标准化技术委员会.互感器 第1部分:通用技术要求:GB/T 20840.1—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.  
National Technical Committee for Standardization of Instrument Transformers. Instrument transformers-Part 1: General requirements: GB/T 20840.1—2010[S]. Beijing: Standard Press of China, 2010.
- [15] 蔡钢,刘曦,濮峻嵩,等.基于 PDC 法的水树老化电缆绝缘诊断[J].绝缘材料,2016,49(7):61-64,71.  
CAI G, LIU X, PU J S, et al. Insulation diagnosis of water-treed cables based on polarization and depolarization current method [J]. Insulating Materials, 2016,49(7):61-64,71.
- [16] ZHOU K, YUAN H, LI Y, et al. Assessing aging status and type of XLPE cable insulation with a graphic approach based on PDC measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022,37(6):5114-5123.
- [17] 李巍巍,张睿,罗洋,等.配电网冷缩中间接头受潮特性研究[J].绝缘材料,2024,57(4):60-65.  
LI W W, ZHANG R, LUO Y, et al. Study on moisture characteristics of cold shrinkage intermediate joint for distribution cable [J]. Insulating Materials, 2024,57(4):60-65.
- [18] 郭金明,覃秀君,李婧.电缆温升对 PDC 法检测水树老化电缆结果的影响[J].绝缘材料,2018,51(10):57-61,66.  
GUO J M, QIN X J, LI J, et al. Effect of cable temperature rise on PDC method test results of water tree aged cables[J]. Insulating Materials, 2018,51(10):57-61,66.
- [19] 马骁,马毅,王晓峰,等.基于 PDC 多特征量权重的电缆绝缘老化状态评估方法研究[J].绝缘材料,2022,55(9):80-88.  
MA X, MA T, WANG X F, et al. Evaluation method of cable insulation ageing state based on PDC multi feature weight[J]. Insulating Materials, 2022,55(9):80-88.
- [20] 林晨,吝伶俐,雷志鹏,等.基于 PDC 的多应力老化乙丙橡胶电缆绝缘状态评估[J].绝缘材料,2020,53(1):70-75.  
LIN C, LIN L Y, LEI Z P, et al. State evaluation of multi-stress aged EPR cable insulation based on PDC[J]. Insulating Materials, 2020,53(1):70-75.
- [21] DONG W, SUN Z L, GAO C, et al. Research and experiment verification of the shielding effect of a 1000 kV equipotential shielding capacitor voltage transformer in consideration of surface leakage current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023,38(2):859-866.
- [22] 王恒山. CVT 绝缘在线监测与故障分析[J].高电压技术,2001,27(2):14-15,32.  
WANG H S. On-line measurement and fault analysis of CVT insulation[J]. High Voltage Engineering, 2001,27(2):14-15,32.
- [23] 王鑫.基于时域介电响应的电力电容器绝缘状态检测方法研究[D].重庆:重庆大学,2020.

- WANG X. Research on the insulation state detection method of power capacitor based on time domain dielectric response[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [24] ZHANG C M, ZHAO K L, XIE S J, et al. Research on the time-domain dielectric response of multiple impulse voltage aging oil-film dielectrics[J]. *Energies*, 2021, 14(7): 1948.
- [25] BARAL A, CHAKRAVORTI S. Prediction of moisture present in cellulosic part of power transformer insulation using transfer function of modified Debye model[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, 21(3): 1368-1375.
- [26] 魏建林, 王世强, 彭华东, 等. 变压器油纸绝缘的介电响应特性研究——加速热老化的介电谱[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(5): 56-62.
- WEI J L, WANG S Q, PENG H D, et al. Investigation of dielectric response characteristics of transformer oil-paper insulation—dielectric spectroscopy of accelerated thermal aging[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(5): 56-62.
- [27] CHEN X S, LI Y S, JIAO Y, et al. Distributed capacitance calculation model in GIS voltage transformer's error test[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 3785(738-739): 820-825.
- [28] 赵洪山, 李静璇, 米增强, 等. 基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3): 1-8.
- ZHAO H S, LI J X, MI Z Q, et al. Grading evaluation of power quality based on CRITIC and improved Grey-TOPSIS[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(3): 1-8.
- [29] CRISTINA S, MARTIN H, PETRU N, et al. Evidence theory-based identification of aging for capacitive voltage transformers [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2020, 10(10): 1647-1656.
- [30] 尚卫平. 一种反映收入差异程度的新指标——余期望系数[J]. *统计研究*, 2004(1): 35-37.
- SHANG W P. A new indicator of the degree of income disparity-residual expectation coefficient[J]. *Statistical Research*, 2004(1): 35-37.
- [31] 吴忠, 关娇, 何江. 最低工资标准测算实证研究——基于 CRITIC-熵权法客观赋权的动态组合测算[J]. *当代经济科学*, 2019, 41(3): 103-117.
- WU Z, GUAN J, HE J. An empirical study on the calculation of minimum wage standard-dynamic combination calculation based on objective weight of CRITIC-entropy weight method[J]. *Modern Economic Science*, 2019, 41(3): 103-117.

收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2024-08-05。

作者简介:

段平韬(1999—), 男(汉族), 四川雅安人, 硕士生, 主要从事 CVT 绝缘状态检测及膜纸绝缘老化特性的研究;

通信作者: 李原(1991—), 男(汉族), 陕西咸阳人, 副教授, 博士, 主要从事油浸式电力设备绝缘状态监测及复合绝缘老化特性的研究。