

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.026

温度和老化程度对油纸绝缘频域谱的影响研究

李 洁¹, 侯英洒¹, 赵建利², 张 鹏²

(1. 内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古 包头 014000; 2. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 为研究温度和老化程度对变压器绝缘状况的影响情况, 进一步推广频域谱法在油纸绝缘检测方面的应用; 在实验室中制备不同温度和老化程度的油纸样品并开展频域谱测试, 通过分析所得曲线变化规律, 提出一种以不同频率对数点对应的 $\tan\delta$ 值为特征量来区分温度和老化程度产生的影响, 并对其进行实例探究。结果表明, 温度主要影响 $\tan\delta$ 值在频率对数为 $-3\sim 0$ 范围内的曲线, 而老化则影响 $-3\sim 2$ 之间的曲线, 且在 $-1\sim 2$ 之间更为明显, 故选取频率对数为 -3 、 -2 、 -1 和 0 、 1 时的 $\tan\delta$ 值分别作为温度和老化程度评估的特征参量, 对其进行理论分析并得出对应的函数关系; 通过应用新方法对在役变压器进行温度和老化程度测试, 验证了它的有效性。
关键词: 变压器; 老化时间; 频域谱; 绝缘; 温度

Effects of Temperature and Aging Degree on Frequency Spectrum of Oil Paper Insulation

LI Jie¹, HOU Yingsa¹, ZHAO Jianli², ZHANG Peng²

(1. Information Engineering College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Inner Mongolia Baotou 014000, China;
2. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Inner Mongolia Hohhot 010000, China)

Abstract: To reveal the effects of temperature and aging degree on insulation condition of transformer, and promote the application of the frequency spectrum method to detection of oil paper insulation, oil paper samples with different temperature and aging degree were prepared for frequency spectrum measurement in laboratory. The variation of the obtained spectrum curves was analyzed, and it was suggested that the parameter $\tan\delta$ corresponding to different logarithmic frequency be taken as a characteristic quantity to distinguish the effects of temperature and aging degree. A real case was analyzed with the proposed method, and the results showed that temperature affects the curve in the range of logarithmic frequency values from -3 to 0 , while aging degree affects the curve in the range from -3 to 2 , especially in the range from -1 to 2 . So the $\tan\delta$ values corresponding to the logarithmic frequency values -3 , -2 , -1 , 0 and 1 were taken as the characteristic parameters for evaluation of temperature and aging degree. Furthermore, functions were deduced. The proposed method was applied to a transformer in service for measurement of temperature and aging degree, and its validity was verified.

Key words: transformer; aging time; frequency spectrum; insulation; temperature

0 引言

在中国工业飞速发展和用电量大幅提升的背景下, 油浸式电力变压器作为电力系统的“心脏”, 其作用更加凸显。变压器随使用年限的增加, 内绝缘性能在温度、水和酸等因素的综合作用之下逐渐下降。变压器所有故障中, 内绝缘老化引发的故障占据重要比例, 因此加强监测变压器绝缘状态, 并进行准确评估意义重大。

现阶段, 对变压器绝缘状况评估较为认可的方法主要有 3 种^[1]: 聚合度分析(DP)法、糠醛分析法和油中溶解气体分析(DGA)法^[2]。其中, 聚合度分析法需要对变压器进行吊罩、取样等操作, 会对变压器造成损害, 且实施困难大^[3]; 变压器运行过程中会进行滤油等操作, 使油中的化学参量不能准确地反映变压器绝缘状况, 导致后 2 种方法测量结果不准确。鉴于 3 种方法在诊断绝缘状态时的不足, 寻求更好的绝缘状况检测方法在国内外研究人员中成为热点。

回复电压(RVM)法、极化去极化电流(PDC)法和频域介电谱(FDS)法是以介电响应理论为基础的新型油纸绝缘评估方法^[4],因其无损、测量准确、携带信息全面和抗干扰能力强等特点,成为研究人员的“新宠”。RVM法仅能测量油纸绝缘的整体绝缘状况,无法区分各自的影响^[5];PDC法易受现场噪音影响,测量时间长,测试频率最高只能达到 1 Hz,不能进行全频率范围的测量;和上述两种方法比较,FDS法具有测量简便、抗干扰能力强和测量范围宽等优点,更加适合评估变压器油纸绝缘状况,国内外学者对其进行了大量的研究。文[6]通过实验获得不同水分含量和老化程度的油纸绝缘频域谱曲线,提出一种以为特征参量来区分水分和老化影响的评估办法;文[7]首先制备不同水分含量样品,然后在 30 ℃和 50 ℃下进行频域谱测试,提出采用复介电常数实部和虚部积分作为水分评估的特征参量;文[8]搭建油纸绝缘 XY 模型,利用仿真所得数据和现场测量数据进行比较得出变压器的含水情况;文[9]通过实验得出随油纸样品含水量和温度的不断增加,复介电常数、介质损耗角正切值在低频段会相应的增加。

为了深入研究温度、老化程度对绝缘状况的影响,文中首先阐述 FDS 法的测量原理,开展相关试验,测量温度、老化程度和各参数的关系,并进行理论分析^[10];然后提出一种区分温度和老化程度的新特征量,通过实例验证,探究其在测量上是否正确。

1 FDS 法测试

FDS 法是以介电响应为基础,在频域范围内研究介质极化特性的检测方法,利用极化和弛豫理论分析并判断变压器的绝缘状况^[11]。

对样品两端施加频率为 f 的正弦电压信号 $E(t) = E_m \sin \omega t$ 时,电感应强度 $D(t) = D_m \sin(\omega t - \delta)$,则相对介电常数 ε^* 可通过式(1)得出。

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \frac{D}{\varepsilon_0 E} = \frac{D_m}{E_m} e^{-j\delta} \quad (1)$$

式(1)中: $E = E_m e^{j\omega t}$; $D = D_m e^{j(\omega t - \delta)}$; δ 为电感应强度 D 和电场强度 E 在时间上的相位差; $\varepsilon'(\omega)$ 为相对介电常数实部,反映介质的束缚电荷能力; $\varepsilon''(\omega)$ 为相对介电常数虚部,反映介损大小; ε_0 为真空介电常数,其值为 8.85×10^{-12} F/m。

频域中,介质损耗可以表达为复介电常数实部和虚部的比值,见式(2)。

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (2)$$

2 实验准备

2.1 样品制备

试验采用的绝缘纸为厚度 0.25 mm 的普通牛皮纸,矿物油采用克拉玛依 25 号新油。样品具体制备过程如下:

1)将绝缘纸剪成直径为 40 mm 的圆形纸片共 50 片,放入 100 ℃/50 Pa 的真空箱中进行干燥使样品的含水量相同,时间设定为 60 h;

2)真空箱温度调整为 50 ℃,将纸样分别放入 50 个磨口玻璃瓶中,将事先经脱气除水的矿物油加入到玻璃瓶进行浸渍(油纸比例为 10:1),浸渍时间为 40 h,并在每个瓶中放入直径为 20 mm,厚度为 2 mm 的圆形铜片一个以模拟真实变压器环境,随后在瓶中充入氮气至 1 个标准大气压,密封,即得到 50 组样品。测试时只需将绝缘纸取出,用去油纸擦去纸表面的矿物油,然后放入测试装置夹持在两电极之间进行测试即可;

3)取其中的 25 组,分为 5 份,每份 5 个样品,分别放入测试装置中,然后整体放入恒温箱中,恒温箱的温度分别设定为 25、40、55、70、85 ℃,达到设定温度后,取样测量;

4)取剩下的 25 组样品也同样分为 5 份,放入 150 ℃老化箱中老化,并分别在 0、10、20、30、45 天时取样测量。

2.2 油纸绝缘频域介电谱测试系统模型

为方便测量样品绝缘状况,设计如图 1 的装置开展试验。该模型是一个正方体的金属容器,容器中有两个直径分别为 50 mm 的圆形平行铜电极,电极中间夹持制备的样品。容器内充入经过脱气除水的矿物油,两边的两个压紧杆通过旋转螺母固定容器盖。

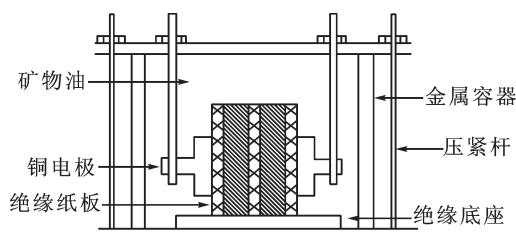


图 1 频域谱测试系统装置

Fig. 1 Frequency domain spectral test system

试验所采用的测量仪器是由 OMICRON 公司生产的 DIRANA(FDS-PDC 介质响应分析仪),该仪器频率测量范围是 0.1 mHz~5 kHz,测量电压为 ± 200 V,测量电流范围为 $-20 \sim 20$ mA,除此之外该仪器还能实现 3 种不同方式的测量:PDC、FDS 和 FDS-PDC。

基于上述特点,该仪器能圆满完成试验测量任务。

3 结果分析及特征参量提取

3.1 不同温度影响下的油纸绝缘频域谱

在测量温度和老化对参数影响规律时,为减小测量误差,对不同温度和老化程度均测量了5组样品,求其平均值,并绘制最终曲线。变压器正常运行的温度范围是70~80℃,且测量过程中需要变压器停运,温度会低于80℃,故试验选取最高测试温度为85℃,最低测试温度为25℃。不同温度对频域谱参数的影响见图2。

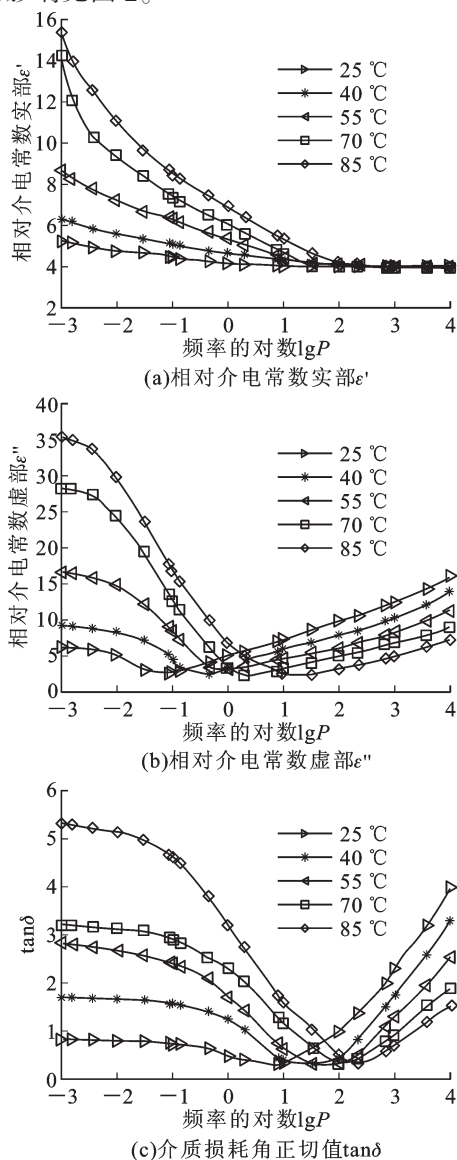


图2 不同温度影响下的频域介电谱

Fig. 2 Frequency domain dielectric spectra under different temperatures

随温度增加, ε' 、 ε'' 和 $\tan\delta$ 均不同程度增大;不同的是 ε' 在频率对数在-3~2之间逐渐减小,大于2之后稳定在4左右,而 ε'' 和 $\tan\delta$ 先减小到最小值后

又逐渐增大,末端值随温度增加而减小,最小值随频率增加向高频区移动,随温度增加逐渐变小。

电介质中载流子随温度的增加活性变大,运动速度加快,促使电导率变大,电导损耗增加,随即介质损耗上升,反映损耗大小的 ε'' 也随之增大。在低频区,温度的升高使离子的极化强度加大,介质束缚电荷的能力增强,而在高频区,极化速度不能跟上电场的变化速度,故 ε' 先减小而后趋于稳定。在低频弥散区($\omega\tau \approx 1$),样品两端所施加电压的周期和极化时间 τ 比较接近,当温度上升后, τ 值变小,低频弥散区随之向高频区移动,因此 $\tan\delta$ 曲线随温度增加向高频区平移。

3.2 不同老化程度的油纸聚合度测试

变压器用绝缘纸最主要的成分纤维素是由 β -D-吡喃葡萄糖基($C_6H_{10}O_5$)彼此以 β -苷键连接而成的线性高分子聚合物^[12],其在老化过程中会裂解为小分子。聚合度是衡量 β -D-吡喃葡萄糖基($C_6H_{10}O_5$)或重复结构单元数量的参量,是油纸老化最直接的反映,对其进行测试,能真实地反映绝缘纸的老化状况。试验时,绝缘纸经过无水乙醇抽提取样、室温挥发、蒸馏水中浸泡、薄膜刮片后溶于铜乙二醇溶剂中,通过测量溶液的特性粘度来确定油纸的聚合度^[13]。

对不同老化程度纸样分别进行聚合度测试,求每份中5个样品数值的平均值并绘制曲线,见图3。

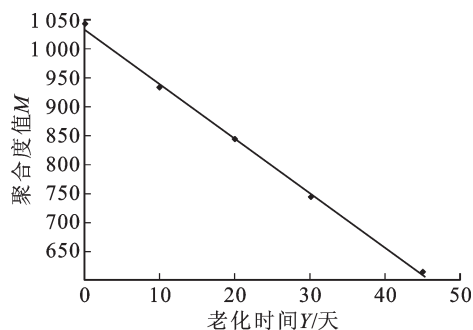


图3 聚合度随老化时间的变化曲线

Fig. 3 Change curve of polymerization degree with different aging degree

老化开始后,DP值从1000左右开始下降,油纸的老化状态也随之下降。拟合曲线可知,DP值和老化程度近似满足线性关系,拟合公式为: $M = -0.916Y + 1039$,聚合度 $R^2 = 0.9969$ 。可查阅DL/T 984—2005准则得知具体评估意见。变压器的聚合度判据见表1。

3.3 不同老化程度的油纸绝缘频域谱

在150℃条件下,测量不同老化程度绝缘纸的介电谱参数变化见图4。

表 1 变压器绝缘聚合度判据

Table 1 Polymerization degree criterion of transformer insulation

聚合度(DP)	>500	500~250	250~150	<150
诊断意见	良好	可以运行	视情况处理	退出运行

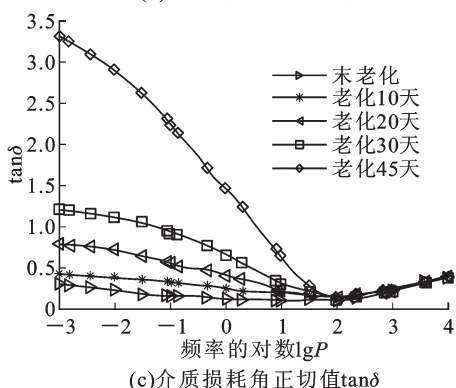
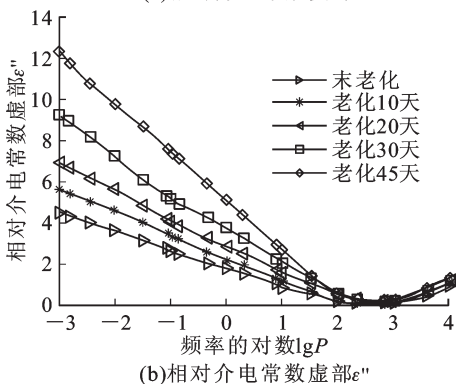
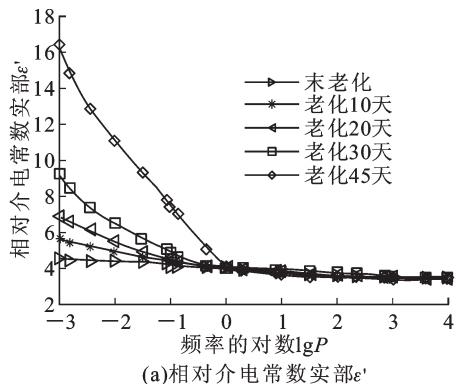


图 4 不同老化程度的频域谱

Fig. 4 Frequency domain spectra under different aging degree

随老化加剧, ϵ' 、 ϵ'' 和 $\tan\delta$ 均不同程度增加, 且 ϵ' 和 $\tan\delta$ 的变化较 ϵ'' 明显; 随频率对数的增加, ϵ' 逐渐变小, 在频率对数为 0 后稳定, 并一直保持在 5 左右; ϵ'' 和 $\tan\delta$ 随频率对数增加而减小, 在频率对数达到 2 之后, 曲线基本上重合。

老化开始后, 油纸内部大分子链发生裂解的速度逐渐加大, 变成小分子链的个数随之增加。大分子链中非极性键的增加削弱分子的极化能力, 小分子链中极性键随裂解程度的加深而变多, 松弛损耗

随之加大^[14]; 绝缘纸老化之后, 内部高分子化合物发生反应, 产生出诸如酸、水等产物, 促使内部带电粒子增加, 电导率上升, 电导损耗加大。高频区电场变化比低频区快, 极化速度随即跟不上电场的变化速度^[15], 极化变慢, 松弛损耗相继减小, 这就是各参数在低频区随老化时间的增加均有所增加, 而在高频区则有所减小的原因。

3.4 特征量提取

研究表明, ϵ 易受样品尺寸的影响, 而 $\tan\delta$ 是 ϵ' 和 ϵ'' 之比, 样品尺寸对其影响很小, 因此选取 $\tan\delta$ 作为对象来提取特征量以区分温度和老化对绝缘状况的影响。比较图 2(c) 和图 4(c) 可知, 在温度影响下, $\tan\delta$ 值在频率对数 -3~0 范围内比较稳定, 在大于 0 之后, 曲线逐渐下降; 在老化影响下, $\tan\delta$ 值在频率对数小于 2 范围均能看出其变化状态。为区分温度和老化的影响, 选取频率对数为 -3、-2、-1 时的 $\tan\delta$ 值作为温度影响下的特征参量, 选取频率对数为 0 和 1 时的 $\tan\delta$ 值作为老化影响下的特征参量。特征量选取情况见表 2。

表 2 特征量选取

Table 2 Feature selection

参数	频率对数点 (lg f)	代表含义
X_1	-3	温度特征量
X_2	-2	
X_3	-1	
X_4	0	老化时间特征量
X_5	1	

选取温度和老化各自对应的特征量, 做出其随 $\tan\delta$ 值变化的曲线见图 5、6, 对曲线进行拟合, 得出各自的函数关系见表 3。

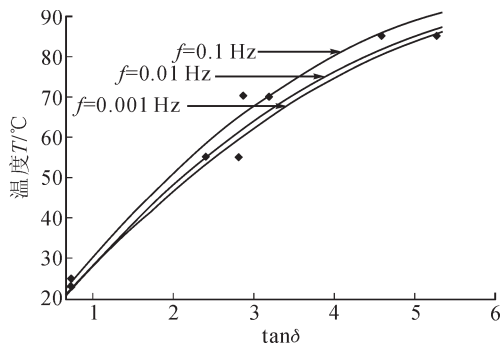


图 5 温度 T 与 δ 的关系图

Fig. 5 Relational figure between temperature T and δ

根据表 3 可知, T 和 Y 与 $\tan\delta$ 之间存在如下的函数关系:

$$T_m = A X_m^2 + B X_m + C \quad m = -3, -2, -1; \quad (3)$$

$$Y_n = D \exp(E X_n) + F \exp(G X_n) \quad n = 0, 1. \quad (4)$$

结合式 (3)、(4) 可知, 对变压器油纸绝缘状况进

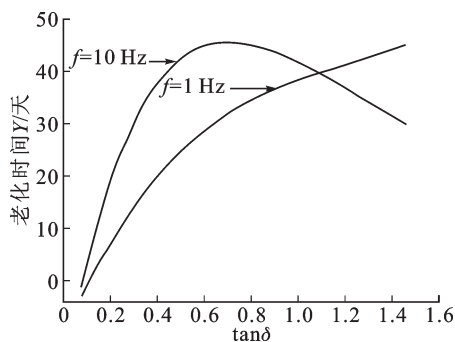


图6 老化时间Y与tanδ的关系图

Fig. 6 Relational figure between aging degree Y and tanδ

表3 温度T、老化程度Y和tanδ的函数关系

Table 3 Function relationship of temperature T, aging degree Y and tanδ

参数	拟合公式	R ²
X ₁	T ₁ =-1.647 9X ₁ ² +23.933X ₁ +5.515 8	0.978 8
X ₂	T ₂ =-1.783 9X ₂ ² +24.779X ₂ +5.494 1	0.982 1
X ₃	T ₃ =-2.009 8X ₃ ² +26.684X ₃ +5.526 5	0.985 6
X ₄	Y ₁ =45.11exp(0.050 9X ₄)-56.79exp(-1.916X ₄)	0.999 9
X ₅	Y ₂ =-2.265exp(-1.62X ₅)-2.365exp(-1.619X ₅)	0.998 5

行测量的时候^[16],可首先通过仪器测得在特征频率点处对应的值,然后带入式(4)中即可得知该样品所处的温度和老化程度,进而转化为聚合度来评估变压器绝缘状态。

4 实例验证

文中选取内蒙古鄂尔多斯某变电站 220 kV 1号主变压器 B 相高一低压绕组进行状态评估,来对新提出的测试方法进行应用。

由于试验是在单层绝缘纸基础上进行的,对现场变压器内部结构不再适用,故首先需要将其转化到 X-Y 模型上来,之后将现场测得的相对介电常数代入到式(5)中得到纸板的相对介电常数再通过提取特征量代入拟合公式中,进行评估。

$$\varepsilon^* = \frac{1-Y}{A+B} + Y\varepsilon_2^* \quad (5)$$

式(5)中: $A = \frac{(1-X)\varepsilon_0\omega}{2.2\varepsilon_0\omega - j\sigma(T)}$,其中 $\sigma(T)$ 为 T ℃时绝缘油的直流电导率, X 为纸板和油道厚度之和的比值; $B = \frac{X}{\varepsilon_2^*}$; ε^* 为油纸绝缘主相对介电常数; ε_2^* 为绝缘纸的相对介电常数; Y 为全部撑条累积的总宽度和两绕组间主绝缘周长之比的比值。

X-Y 模型是变压器内部绝缘系统的简化模型,为方便研究将变压器内部一系列纸板、油隙和撑板分别进行合并得到,见图 7。

将 B 相高一低压绕组间的纸板和油隙根据该

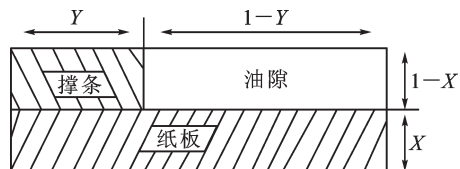


图7 X-Y 模型

Fig. 7 X-Y model

变压器参数进行集成,得到 X 和 Y 的值;对变压器油进行直流电导率测试,得到 $\sigma(T)$ ^[17];使用 DIRANA 在 200 V 电压下,对 B 相高一低绕组进行测试,频率的测试范围为 $10^{-3} \sim 10^4$ Hz。测量得到绝缘纸的复电容,通过式(5)进行计算得到相对介电常数 ε_2^* ,结合式(1)、(2)得到介质损耗角正切值 tanδ,其曲线见图 8。

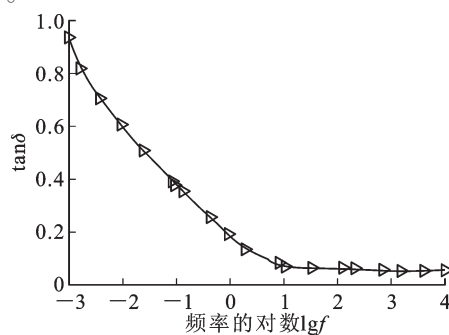


图8 高一低压绕组间的 tanδ 曲线

Fig. 8 tanδ curves between high and low voltage winding

选取频率对数为-3~1 的 5 个点处特征值,带入拟合所得的函数关系式中,得到该变压器所处的温度和绝缘纸的老化程度,进而通过聚合度来判断变压器绝缘状况,见表 4。

表4 测试结果

Table 4 Test result

参数	频率对数点(lg f)	温度 T/℃	聚合度值 M
X ₁	-3	71.5	—
X ₂	-2	68.0	—
X ₃	-1	63.5	—
X ₄	0	—	203
X ₅	1	—	186

变压器在特征频率对数点处的温度分别为 71.5、68.0、63.5 ℃,可通过引入频温平移因子对温度曲线进行平移,绘制出主曲线来消除温度产生的影响,对这方面的研究较多,不再赘述。由特征频率对数点处的介损值推断而来的油纸聚合度值分别为 203 和 186,查阅 DL/T 984—2005 准则知该变压器聚合度在 250~150 之间,正处在运行末期,需要根据情况对其进行处理。从变电站查阅资料可知,该变压器自 1991 年春投入运行,到现在已运行 24 年,而正常变压器的运行年限是 30 年,可知该变压器

已经快接近运行年限^[18]。从上述分析可知,文中所提的关于温度和老化程度的新特征量检测方法有一定的正确度。

5 结论

通过在 FDS 法基础上开展试验,对不同温度和老化程度的油纸样品进行频域谱测试,研究温度和老化对频域谱各参数的影响,得到如下结论:

1)温度和老化时间使 ε' 和 ε'' 在变化趋势、最小值和末端值等方面产生差异;而 $\tan\delta$ 在频率对数 $-3\sim 0$ 范围内受温度影响,在 $-3\sim 2$ 整个范围内均受老化程度的影响。

2)温度、老化程度和 $\tan\delta$ 之间分别近似呈二次函数和指数关系;新方法在现场的有效验证,为油纸绝缘状态评估提供新思路。

参考文献:

- [1] 张辉杰,周毅.油浸式电力变压器的绝缘材料及应用[J].西藏科技,2014(5):74-75.
ZHANG Huijie,ZHOU Yi. Insulation materials and application of oil immersed power transformer[J]. Tibet's Science & Technology,2014(5):74-75.
- [2] 张欲晓,李胜利,王梦君,等.变压器绝缘纸的聚合度变化规律[J].高电压技术,2011,37(10):2458-2463.
ZHANG Yuxiao,LI Shengli,WANG Mengjun,et al. Degree of polymerization of insulation paper in the transformer[J]. High Voltage Engineering,2011,37(10):2458-2463.
- [3] 高宗宝.基于回复电压法的变压器油纸绝缘状态研究[D].成都:西南交通大学,2011.
GAO Zongbao. Study on oil-paper insulation in transformer based on return voltage measurement[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2011.
- [4] 廖瑞金,马志钦,郝建,等.水分对变压器油和绝缘纸频域介电谱特性的影响[J].高电压技术,2010,36(12):2869-2875.
LIAO Ruijin,MA Zhiqin,HAO Jian,et al. Influence of water content on frequency domain spectroscopy characteristics of transformer oil and insulation paper[J]. High Voltage Engineering,2010,36(12):2869-2875.
- [5] 文华,马志钦,王耀龙,等.变压器油纸绝缘频域介电谱特性的XY模型仿真及试验研究[J].高电压技术,2012,38(8):1956-1964.
WEN Hua,MA Zhiqin,WANG Yaolong,et al. Experimental investigation and XY model simulation on the frequency domain spectroscopy characteristics of transformer oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering,2012,38(8):1956-1964.
- [6] 杨丽君,齐超亮,吕彦冬,等.变压器油纸绝缘状态的频域介电谱特征参量及评估方法[J].电工技术学报,2015,30(1):212-219.
YANG Lijun,QI Chaoliang,LYU Yandong,et al. Characteristic parameters and assessment methods of frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(1):212-219.
- [7] 廖瑞金,刘捷丰,吕彦冬,等.变压器油纸绝缘含水量定量评估的频域介电特征参量研究[J].电工技术学报,2015,30(1):204-211.
LIAO Ruijin,LIU Jiefeng,LYU Yandong,et al. Frequency domain dielectric characteristic parameters for quantitative assessment of moisture content of oil-paper insulation in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(1):204-211.
- [8] KOCH M,KRUGER M. Measuring and analyzing the dielectric response of power transformers[J]. High Voltage Engineering,2009,35(8):1933-1939.
- [9] YEW J H,PRADHAN M K,SAHA T K. Effects of moisture and temperature on the frequency domain spectroscopy analysis of power transformer insulation[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting,Pittsburgh,USA:IEEE,2008:1-8.
- [10] 田杰,段绍辉,许昊,等.温度及老化状态对油纸绝缘时域介电响应特性影响的实验研究[J].中国电机工程学报,2012,32(z1):69-75.
TIAN Jie,DUAN Shaohui,XU Hao,et al. Experimental research on effects of temperature and aging state on time domain dielectric response characteristics of oil-impregnated press board insulation[J]. Proceeding of the CSEE,2012,32(z1):69-75.
- [11] 刘益岑.变压器油纸绝缘电解质响应测试系统的研究[D].成都:西南交通大学,2012.
LIU Yicen. Study on dielectric response measurement system of oil-paper insulation on transformer[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2012.
- [12] 郝建.变压器油纸绝缘热老化的时频域介电和空间电荷特性研究[D].重庆:重庆大学,2012.
HAO Jian. Study on time/frequency domain dielectric spectroscopy and space charge characteristics of transformer oil-paper insulation thermal aging[D]. Chongqing:Chongqing University,2012.
- [13] 毕鹏翔,张文元,秦少臻,等.变压器固体绝缘状况的监测方法[J].高电压技术,2000,26(3):47-49.
BI Pengxiang,ZHANG Wenyuan,QIN Shaozhen,et al. Methods for monitoring the condition of insulation in power transformers[J]. High Voltage Engineering,2000,26(3):47-49.
- [14] 廖瑞金,袁泉,唐超,等.不同老化因素对油纸绝缘

(下转第168页)

- [12] LIANG J J, QIN A K, SUGANTHAN P N, et al. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 281-295.
- [13] 程声烽, 程小华, 杨 露. 基于改进粒子群算法的小波神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 37-42.
CHENG Shengfeng, CHENG Xiaohua, YANG Lu. Application of wavelet neural network with improved particle swarm optimization algorithm in power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 37-42.
- [14] 蔡红梅, 陈剑勇, 苏浩益. 基于灰云模型的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 151-155.
CAI Hongmei, CHEN Jianyong, SU Haoyi. Fault diagnosis of power transformer based on grey cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 151-155.
- [15] 周志华, 尹旭日, 陈兆乾, 等. 神经网络在电力变压器运行状态检测中的应用[J]. 自动化学报, 2002, 28(2): 301-305.
ZHOU Zhihua, YIN Xuri, CHEN Zhaoqian, et al. Application of neural network to the detection of power transformer running state[J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(2): 301-305.
- [16] 许惠君, 王宗耀, 苏浩益. 基于 DGA 的反馈云熵模型电力变压器故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 115-119.
XU Huijun, WANG Zongyao, SU Haoyi. Dissolved gas analysis based feedback cloud entropy model for power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 115-119.
- [17] 胡汉梅, 鲍亮亮, 赵海军. 神经网络在变压器故障诊断中典型算法研究[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 217-220.
HU Hanmei, BAO Liangliang, ZHAO Haijun. Research on typical artificial neural networks in power transformer fault diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 217-220.
- [18] 项文强, 张 华, 王 姮, 等. 基于 L-M 算法的 BP 网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 100-103.
XIANG Wenqiang, ZHANG Hua, WANG Heng, et al. Application of BP neural network with L-M algorithm in power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 100-103.
- [19] 王晓霞, 王 涛. 基于粒子群优化神经网络的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2362-2367.
WANG Xiaoxia, WANG Tao. Power transformer fault diagnosis based on neural network evolved by particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2362-2367.
- [20] 程加堂, 熊 伟, 徐绍坤, 等. 基于改进粒子群优化神经网络的电力变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 42-45.
CHENG Jiatang, XIONG Wei, XU Shaokun, et al. Power transformer fault diagnosis based on neural networks with improved particle swarm optimization[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 42-45.
- 苗长新(1976—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为无功补偿与谐波治理。
申 坤(1991—), 男, 硕士, 研究方向为煤矿自动化和故障诊断。
钟世华(1989—), 女, 硕士, 研究方向为无功补偿与谐波治理。

(上接第 162 页)

- 介质频域谱特性的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1612-1618.
LIAO Ruijin, YUAN Quan, TANG Chao, et al. Influence of different aging conditions on characteristics of frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation medium[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1612-1618.
- [15] 刘宏亮. 水分对油纸绝缘频率响应的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
LIU Hongliang. Research on response of moisture on frequency of oil-paper insulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [16] 刘 君, 吴广宁, 周利军, 等. 变压器油纸绝缘微水扩散暂态的电介质频率响应[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 171-178.
LIU Jun, WU Guangning, ZHOU Lijun, et al. Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation with transient moisture equilibrium[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(1): 171-178.
- [17] 缪 金, 董 明, 杨彦博, 等. 纳米改性变压器油电导率改进模型[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(2): 87-91.
MIU Jin, DONG Ming, YANG Yanbo, et al. Modified electrical conductivity model for transformer oil-based nanofluids[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(2): 87-91.
- [18] 杨庆华. 配电网变压器经济运行策略探讨[J]. 黑龙江科技信息, 2011(35): 32-32.
YANG Qinghua. Discussion on economic operation strategy of transformer in distribution network[J]. Heilongjiang Scientific and Technological Information, 2011(35): 32-32.
- 李 洁(1964—), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析。