

操作冲击电压累积作用对油纸绝缘性能影响的研究

司马文霞, 陆琛, 杨庆, 袁涛, 孙魄韬

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 过电压对于油纸绝缘的性能影响的研究目前主要集中在油纸绝缘在冲击电压作用下的 $U-N$ 特性方面, 而对于油纸绝缘在冲击电压作用下的物理化学特性的变化方面的研究比较少, 并且研究主要集中在雷电冲击方面, 对于操作冲击电压的影响规律的研究却比较少。因此, 文中对操作冲击电压累积作用下油纸绝缘的电气特性和机械性能变化进行了研究, 研究发现: 在承受操作过电压的累积冲击之后, 油纸绝缘的直流体积电导率呈上升趋势; 油纸绝缘的介电特性和交流电导率在 $10^{-2} \sim 10^0$ Hz 频域内呈上升趋势, 而在 $10^0 \sim 10^7$ Hz 的范围内基本保持不变; 其介质损耗角正切值在 $10^{-2} \sim 10^3$ Hz 频域内呈上升趋势, 而在 $10^3 \sim 10^7$ Hz 范围内基本保持不变; 就其在工频 50 Hz 频率下的电气特性而言, 油纸绝缘的介电常数、体积电导率、击穿电压变化均不大, 局部放电起始电压以及局部放电截止电压呈下降趋势, 但是其介质损耗则会上升; 同时, 操作冲击电压的累积作用会使得绝缘纸的聚合度轻微下降, 但对于油纸绝缘的抗拉强度则影响不大。

关键词: 操作冲击电压; 油纸绝缘; 累积作用; 电气特性; 聚合度; 抗拉强度

Effect of Accumulative Switching Impulses on Oil-paper Insulation

SIMA Wenxia, LU Chen, YANG Qing, YUAN Tao, SUN Potao

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Current researches on the effect of overvoltage on oil-paper insulation focus on the voltage-number($U-N$) characteristic of oil-paper insulation under impulse voltage. However, the researches about the change of physical and chemical characteristics of oil-paper insulation under accumulative effect of impulse voltage are insufficient and with emphasis on the effect of lightning impulse. In this study, the changes of electrical and mechanical characteristics of oil-paper insulation under accumulative effect of switching impulses are investigated. The results show that: 1) The DC conductivity of the oil-paper insulation samples increases under accumulative effect of switching impulse; 2) The dielectric characteristic and conductivity of the oil-paper insulation samples increase in $10^{-2} \sim 10^0$ Hz and keep steady in $10^0 \sim 10^7$ Hz; 3) The dielectric loss factor of the oil-paper insulation samples increases in $10^{-2} \sim 10^3$ Hz and keeps steady in $10^3 \sim 10^7$ Hz; 4) For the electrical characteristics of the oil-paper insulation at power frequency, the dielectric characteristic, conductivity and the breakdown voltage keep steady, but the inception and extinction voltages of partial discharge decrease, while the dielectric loss factor increases; 5) The degree of polymerization of the oil-paper insulation decreases slightly while its tensile strength keeps steady under the accumulative effect of switching impulses.

Key words: switching impulse; oil-paper insulation; accumulative effect; electrical characteristics; degree of polymerization; tensile strength

收稿日期: 2015-03-12; 修回日期: 2015-04-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 项目)(2009CB724504)。

Project Supported by National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB724504).

0 引言

变压器的安全直接决定着电网的安全^[1]。而过电压则是造成变压器故障的一个重要原因^[2-4]。因此,过电压对于油纸绝缘的影响也引起了国内外学者的广泛关注^[5]。

目前,过电压对油纸绝缘的影响的研究主要分两个方向,一是关于油纸绝缘在冲击电压累积作用下的绝缘寿命的研究,通过对油纸绝缘所施加的冲击电压的峰值与该电压使绝缘发生击穿所需的冲击次数的关系也就是其 voltage-number($U-N$)特性来分析不同的实验参数对油纸绝缘的冲击寿命的影响,以便分析如何减小冲击电压对于油纸绝缘的损伤;另一个则是研究累积冲击过程中油纸绝缘的电气参量以及物理化学参量的变化,用以分析冲击电压对于油纸绝缘的性能造成会哪些影响。

文[6]中研究了雷电冲击电压作用下油纸绝缘的 $U-N$ 特性以及冲击电压的波形参数对该特性的影响,文中认为波头时间的减小和波尾时间的延长均会使冲击对油纸绝缘造成的损伤加大;文[7]中研究了变压器内不同的绝缘布置方法以及绝缘油的洁净程度、油温以及电场极性对于油纸绝缘的雷电冲击 $U-N$ 特性的影响;文[8]中则对油纸绝缘操作冲击电压的 $U-N$ 特性与雷电冲击电压的 $U-N$ 特性进行了对比,发现雷电冲击电压对于油纸绝缘的损伤要高于操作冲击电压;文[9-10]中认为在雷电冲击电压的累积作用下油浸绝缘纸的聚合度会降低,而其工频局部放电起始电压和截止电压以及拉伸破坏载荷均无明显变化;文[11]中发现在雷电和操作过电压的累积作用下油纸绝缘的工频击穿电压并无明显变化;文[12]中则发现油纸绝缘在雷电冲击电压的累积作用下会产生烃类气体。

从以上内容可以看出,目前对于过电压对油纸绝缘的影响的研究主要集中在对其 $U-N$ 特性的研究,对于过电压作用下油纸绝缘的性能变化的研究则比较少,并且对于这部分的研究主要集中在雷电冲击电压对于油纸绝缘的影响方面,而对于操作冲击电压对油纸绝缘的影响方面的研究则偏少,根据重庆 110 kV 先锋变电站 2006—2008 3 年内的过电压监测数据,1 台变压器每年所承受的操作过电压次数达 70 次,幅值最高可达 3.0 p.u.,在变压器长达 30 年的寿命中,变压器累积承受的操作过电压次数将超过 2 000 次,因此有必要研究操作过电压对油纸绝缘的性能的影响。文中将对标准操作冲击电压累积作用后的油纸绝缘的电气性能以及机械性能的

变化进行研究,油纸绝缘的电气性能直接影响油纸绝缘的绝缘质量,而油纸绝缘的机械性能则决定了油纸绝缘的绝缘寿命,同时,研究油纸绝缘的电气性能和机械性能的变化也能够为油纸绝缘在冲击电压作用下的损伤机理研究提供帮助,可为今后评估此状况下变压器的运行状态提供理论支持,有助于完善现有的变压器绝缘性能评估方法。

1 油纸绝缘的操作冲击试验

1.1 操作冲击试验系统

为研究累积操作冲击电压对油纸绝缘性能的影响,试验设计了冲击试验平台,见图 1。冲击电压发生器产生的冲击电压通过导线连接至油罐中间的电极固定轴,电极固定轴上可以固定电极,试验电极根据 IEC 60243-1—1998 标准制作,其结构见图 2。图 2 中:高压电极为直径 25 mm、高 25 mm 的圆柱体;低压电极同样为直径 25 mm、高 25 mm 的圆柱体;端部采用圆角过渡, $R=3$ mm, 高压电极的上端和低压电极的下端均开有螺口,可以固定到油罐中间的电极固定轴上,电极固定轴高度可调。

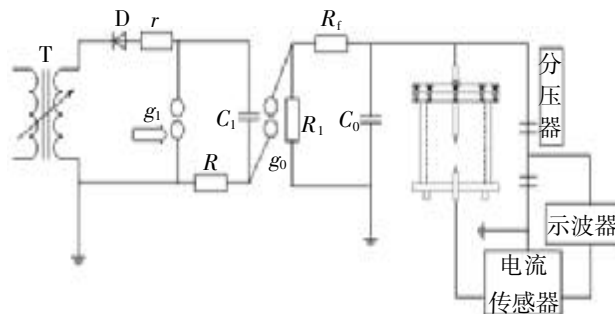


图 1 累积冲击试验平台示意图

Fig. 1 The impact experiment platform of impulse voltage

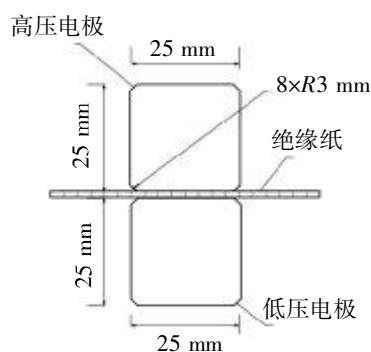


图 2 累积实验电极

Fig. 2 The accumulation effect test electrode

绝缘纸采用直径 80 mm、厚 0.5 mm 的普通绝缘纸,绝缘油采用新疆克拉玛依 25 号变压器油,为保证油纸绝缘的水分、微生物以及气体体积分数符合国家标准,需要将绝缘纸放在温度为 90 ℃、真空度

为 50 Pa 的真空箱中干燥 48 h, 然后将绝缘纸浸入已经经过脱气除水处理的绝缘油中, 然后将真空箱温度调整为 40 ℃ 后进行真空浸油 24 h, 真空度保持不变, 最后冷却至室温。

1.2 试验参数设定

试验参数的设定主要是操作冲击电压的波形、幅值以及操作冲击电压的冲击间隔的设定。实验采用 250/2 500 μs 的极性标准操作冲击电压对油纸绝缘进行冲击; 文[11]中在进行标准操作冲击电压对油纸绝缘的冲击试验时选择的试验场强为最低击穿场强的 80%, 而该模型的最低标准操作冲击击穿电压为 54 kV, 因此实验选取标准操作冲击电压的幅值为 43 kV; 冲击间隔的选择则以防止空间电荷累积对实验产生影响作为选择标准, 施加两次脉冲之间的时间间隔应大于油纸绝缘中的空间电荷的消散时间, 根据文[13]所述, 油纸绝缘内部的空间电荷消散时间约为 30 s, 因此该实验选择两次冲击之间的间隔为 60 s, 同时为了保证空间电荷的泄放速度, 在实验油罐中加装了自动接地装置, 使得每次冲击结束之后油纸绝缘上的电荷能够快速泄放, 根据实际测试, 在油浸绝缘纸承受 10、200、400、600 次的 43 kV 正极性标准操作冲击电压的累积作用之后, 油浸绝缘纸中并无空间电荷累积, 因此实验选择的冲击电压施加间隔时间为 60 s。经试验, 在上述实验条件下, 油纸绝缘试品在操作冲击电压的累积作用下的绝缘寿命在 627~854 次之间分布, 因此实验选取分别承受了 0、200、400、600 次操作冲击电压冲击的 4 个不同的冲击损伤情况的油浸绝缘纸样品来进行电气特性和机械性能的对比分析。

2 操作冲击电压对于油纸绝缘的电气特性的影响

2.1 电气特性的测量项目和测量方法

极化、电导、损耗和击穿是绝缘介质的 4 种基本电气特性^[14]。极化一般分为弹性极化和松弛极化, 介电常数或者相对介电常数是描述介质极化特性的宏观参数, 分为实部和虚部, 其中实部表征了包括弹性极化和松弛极化在内的无功极化水平, 而虚部代表了松弛极化造成的损耗; 损耗则包括电导损耗和松弛极化造成的损耗, 其特性可由介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 来表征; 击穿表明了介质在电场作用下的极限能力, 一般使用电气强度来表现介质的这种能力。

对于油纸绝缘而言, 其局部放电参数也是一个重要的电气参量, 一般认为如果油纸绝缘没有发生局部放电的话, 电场的作用对于其绝缘寿命基本没

有影响, 但是若油纸绝缘发生局部放电的话则会导致绝缘的加速劣化, 最终导致击穿^[15]。油纸绝缘的工频局部放电起始电压和截止电压表征了油纸绝缘耐受工频电压而不发生局部放电的能力。

采用 Concept80 宽带介电谱测量系统(novocontrol GmbH) 测量累积冲击过程中油浸绝缘纸的频域介电谱、频域介损谱和频域内的体积电导率; 油浸绝缘纸的直流电导率采用高阻仪进行测量; 工频电气强度则根据 IEC 60243-1—1998 标准进行测量; 工频起始和截止局放电压则采用 WavePro7100 示波器观察局部放电信号后进行测量。为减小误差, 采用同条件下进行 5 次重复试验取测量平均值作为测量结果的方法来进行实验。

2.2 油纸绝缘在操作冲击电压累积作用下的电气特性变化规律

2.2.1 油纸绝缘的介电性能变化规律

图 3 是峰值为 43 kV 的标准操作冲击电压作用下冲击次数不同的油浸绝缘纸的频域介电谱(频域范围为 10^{-2} ~ 10^7 Hz)。其中图 3(a)为介电常数的实部; 图 3(b)为介电常数的虚部。从图 3 中可以看出, 油浸绝缘纸的相对介电常数实部 ϵ' 在 10^0 ~ 10^7 Hz 内基本在 3.5~5.0 范围内保持稳定, 但在 10^0 Hz 以下的低频区域呈上升趋势。于此同时, 介电常数的虚部 ϵ'' 随频率减小出现先减小后增加的现象, 出现最小值, 随着冲击次数的增加, 虚部频域谱线在 10^{-2} ~ 10^3 Hz 频域内呈上升趋势, 而在 10^3 ~ 10^7 Hz 范围内基本保持不变。

图 4 是不同频率等级下油纸绝缘的相对介电常数与电压冲击次数的关系图, 其中图 4(a)为介电常数的实部 ϵ' ; 图 4(b)为介电常数的虚部 ϵ'' 。从图 4(a)中可知, 频率越低, 油浸绝缘纸在该频率下的相对介电常数实部 ϵ' 随冲击次数的增加而增大的速度越快, 在频率上升至 10^0 Hz 时, ϵ' 的增长已经趋向于 0, 因而在工频 50 Hz 状况下, ϵ' 会随着冲击次数的增加而基本保持不变。从图 4(b)中可发现, 油浸绝缘纸相对介电常数虚部 ϵ'' 随冲击次数的增加而增大的速度同样会随着频率的降低而加大, 但只有上升至 10^3 Hz 时, ϵ'' 的变化值才会趋向于 0, 因此在工频 50 Hz 状况下, ϵ'' 也会随着冲击次数的增加而增大。

2.2.2 油纸绝缘的体积电导率的变化规律

图 5 是油浸绝缘纸在承受不同次数的 43 kV 标准操作冲击电压的累积作用后的直流体积电导率变化图。从图 5 中可以看到, 在经受了操作过电压的累积作用之后, 油纸绝缘试品在直流下的体积电导率呈上升趋势。

图 6 是油浸绝缘纸在承受不同次数的 43 kV 标

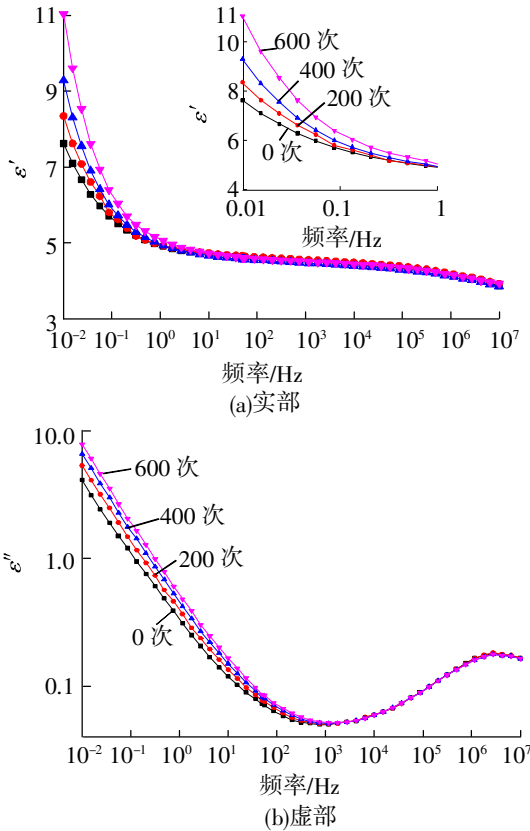


图3 承受不同冲击次数的油纸绝缘的介电常数的实部和虚部

Fig. 3 Relative and imaginary permittivity of oil-paper insulation sample with different impulse numbers

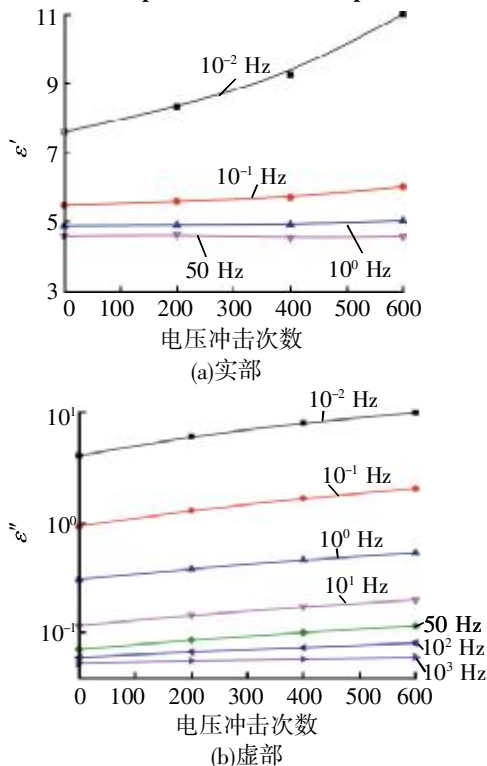


图4 低频下油浸绝缘纸的相对介电常数的实部和虚部与电压冲击次数的关系图

Fig. 4 Relation between the impact number and the relative and imaginary permittivity of immersed paper sample at low frequency

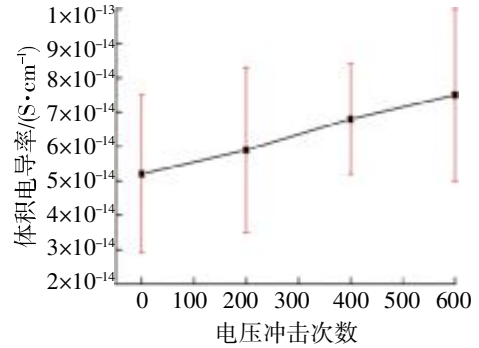


图5 承受不同冲击次数的油纸绝缘的直流体积电导率

Fig. 5 DC conductivity of oil-paper insulation sample with different impulse numbers

准操作冲击电压的累积作用后的频域体积电导率变化图。从图6中可以看到,油纸绝缘试品的体积电导率 σ 随频率的升高而增大;在 $10^{-2} \sim 10^0$ Hz范围内,油纸绝缘试品的体积电导率随绝缘承受的冲击次数的增加而增大;在 $10^0 \sim 10^7$ Hz范围内,承受不同冲击次数的油纸绝缘试品的电导率基本相同。

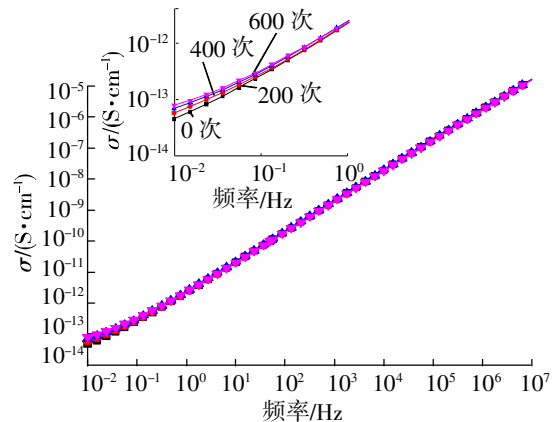


图6 承受不同冲击次数的油纸绝缘的体积电导率

Fig. 6 Volume conductivity of oil-paper insulation sample with different impulse numbers

图7是不同频率等级下油纸绝缘的体积电导率 σ 与电压冲击次数的关系图。从图7中可以发现,油浸绝缘纸的体积电导率 σ 随冲击次数的增加而增大的速度会随着频率的降低而加大,在频率上升至 10^0 Hz时, σ 的变化值已经趋向于0。因此在工频50 Hz状况下, σ 会随着冲击次数的增加而基本保持不变。

2.2.3 油纸绝缘的介质损耗正切的变化规律

图8是油浸绝缘纸在承受不同次数的43 kV标准操作冲击电压的累积作用后的频谱内介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 的变化规律图。从图8中可以看到,油纸绝缘的介质损耗角正切随频率减小出现先减小后增加的现象,出现最小值,随着冲击次数的增加,介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 在 $10^{-2} \sim 10^3$ Hz频域内呈上升趋势,而在 $10^3 \sim 10^7$ Hz范围内基本保持不变。

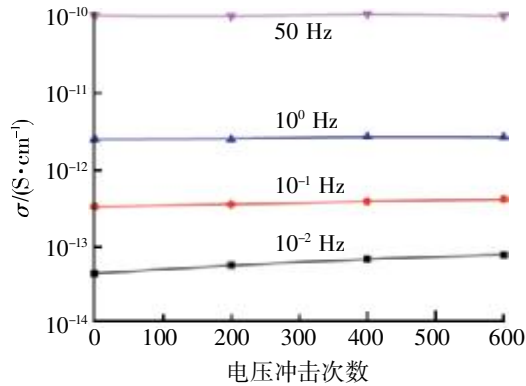


图 7 低频下油浸绝缘纸的体积电导率与电压冲击次数的关系图

Fig. 7 Relation between the impact number and the volume conductivity of immersed paper sample at low frequency

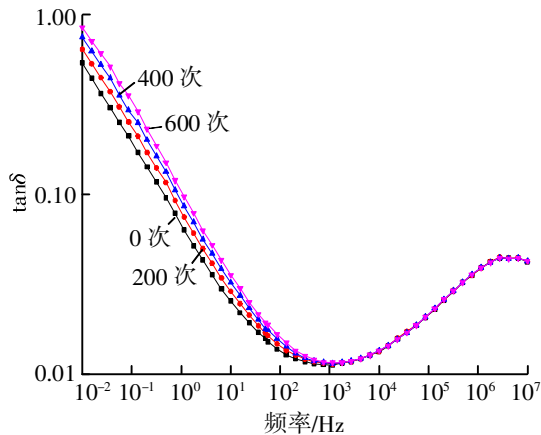


图 8 承受不同冲击次数的油纸绝缘的介质损耗角正切值
Fig. 8 Dielectric loss factor of oil-paper insulation sample with different impulse numbers

图 9 是不同频率等级下油纸绝缘的介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 与电压冲击次数的关系图。从图 9 中可以发现,油浸绝缘纸介质损耗因数 $\tan\delta$ 随冲击次数的增加而增大的速度会随着频率的降低而加大,在频率上升至 10^3 Hz 时, $\tan\delta$ 的变化值已经趋向于 0。因此,在工频 50 Hz 状况下, $\tan\delta$ 也会随着冲击次数的增加而增大。

2.2.4 冲击过程中油纸绝缘的工频击穿电压的变化规律

图 10 是油纸绝缘在承受不同次数的 43 kV 标准操作冲击电压的累积作用后的工频击穿电压 U_{BD} 的变化图。从图 10 中可知,在经受了操作冲击电压的冲击之后,油纸绝缘的工频击穿电压保持在 21.5 kV 左右,其相对变化值不超过 2%,其值基本没有变化。

2.2.5 冲击过程中油纸绝缘的工频局部放电起始电压以及截止电压

图 11 是油浸绝缘纸在承受不同次数的 43 kV 标准操作冲击电压的累积作用后的工频局部放电起

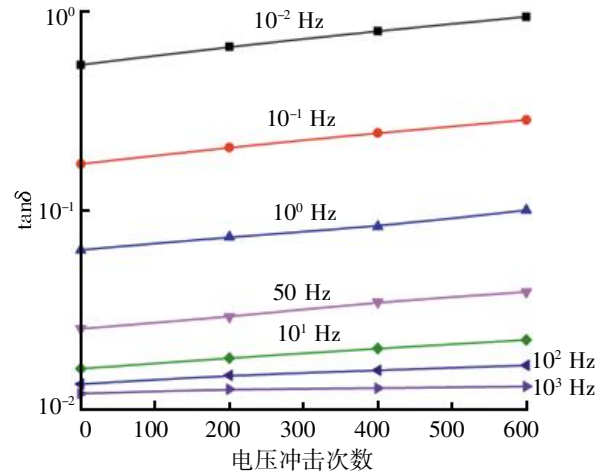


图 9 低频下油浸绝缘纸的介质损耗因数与电压冲击次数的关系图

Fig. 9 Relation between the impact number and dielectric loss factor of immersed paper sample at low frequency

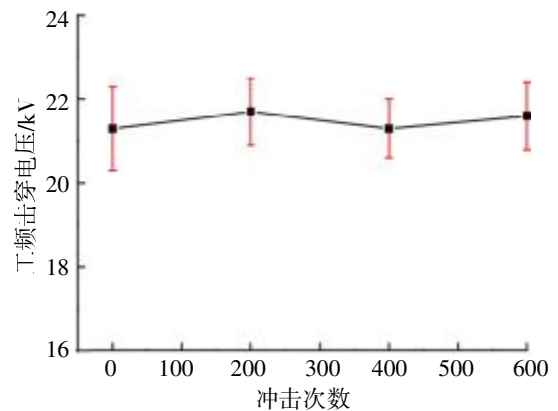


图 10 承受不同冲击次数的油纸绝缘的工频击穿电压
Fig. 10 Breakdown voltage of oil-paper insulation sample with different impulse numbers at power frequency

始电压 U_i 和工频局部放电截止电压 U_e 的变化图。从图 11 中可以看到,在承受了操作冲击电压的冲击之后,油纸绝缘的工频局部放电起始电压 U_i 以及工频局部放电截止电压 U_e 则均随着冲击次数的增加呈下降趋势。

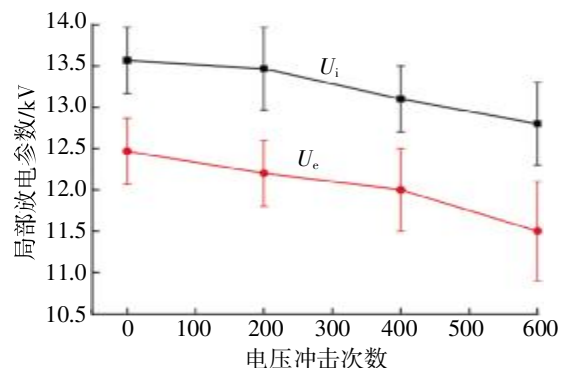


图 11 承受不同冲击次数的油纸绝缘的工频局部放电起始电压 U_i 和工频局部放电截止电压 U_e 的变化图

Fig. 11 The inception(U_i) and extinction(U_e) voltages of oil-paper insulation sample with different impulse numbers at power frequency

3 操作冲击电压对于油纸绝缘的机械特性的影响

3.1 机械特性的测量项目和测量方法

油纸绝缘的机械性能决定了油纸绝缘的寿命,当绝缘纸的机械性能已经无法保证绝缘纸在工况下的安全工作的时候,就认为油纸绝缘的寿命已经达到终点。一般来说,有两种通过油纸绝缘机械特性来判断其老化情况的方法^[16]:一是测定老化绝缘纸的抗拉强度,并将其强度损失 50% 作为材料的寿命终点;另一种是测定纸纤维素分子聚合度(DP)。纤维素分子解聚老化后,抗拉强度降低,当聚合度下降到 200 时,认为材料寿命达到终点,不能再继续使用。因此实验将通过测量油纸绝缘承受冲击之后的抗拉强度和聚合度来研究操作冲击电压对于油纸绝缘的机械特性的影响。

在实验中,聚合度采用 GB/T 29305—2012 标准规定的粘度测量法进行测量,而抗拉强度则根据 GB/T 12914—2008 标准进行测量。

3.2 油纸绝缘在操作冲击电压累积作用下的机械特性变化规律

3.2.1 油浸绝缘纸聚合度变化规律

图 12 是油浸绝缘纸在承受不同次数的 43 kV 标准操作冲击电压的累积作用后的聚合度变化图。从图 12 中可以看到,在承受了操作过电压的冲击之后,绝缘纸的聚合度从 1 080 下降至 1 000 左右,下降了大约 7.5%,同时,从图 12 中可以看到随着冲击次数的增加,绝缘纸的聚合度下降趋势在减缓,对平均聚合度进行数据拟合得到累积次数 N 与聚合度 DP 的关系见式(1)。

$$DP = 987.05 + 93.38 \cdot e^{-0.006N} \quad (1)$$

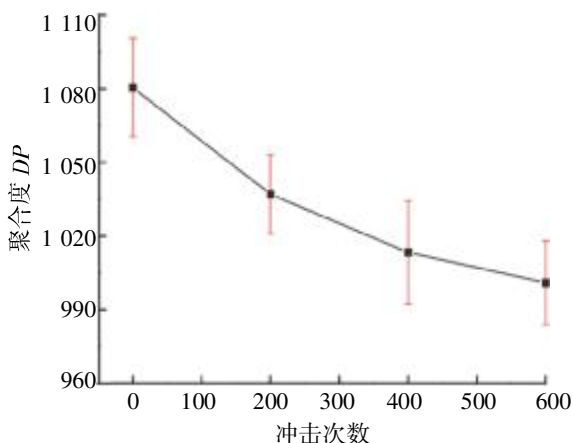


图 12 承受不同冲击次数的油纸绝缘的聚合度变化

Fig. 12 Degree of polymerization of the paper sample with different impulse numbers

拟合优度为 0.998 7,从式(1)可以看出,随着冲

击次数的增大,油浸绝缘纸的聚合度呈下降趋势,但其下降趋势逐渐减小。

3.2.2 油浸绝缘纸的抗拉强度变化规律

图 13 是油浸绝缘纸在承受不同次数的 43 kV 标准操作冲击电压的累积作用后的抗拉强度的变化图。从图 13 中可以看到,在承受了操作过电压的累积冲击之后,绝缘纸的抗拉强度在 45 N/mm² 左右浮动,其值基本不变。由文[16]中可知,绝缘纸的抗拉强度与聚合度存在对应关系,而在聚合度为 800~1 200 之间时,绝缘纸的抗拉强度基本不变。根据上文所述,在冲击电压的累积作用下,油浸绝缘纸的聚合度仅下降 80,因此其抗拉强度基本不会有变化。

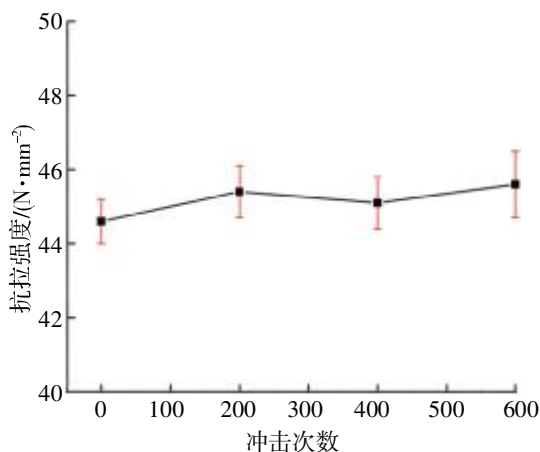


图 13 承受不同冲击次数的油浸绝缘纸的抗拉强度变化

Fig. 13 Tensile strength of the paper sample with different impulse numbers

4 油纸绝缘电气特性变化原因分析

4.1 油纸绝缘介电特性变化原因分析

从油浸绝缘纸的聚合度变化情况可以看出,在经受了操作冲击电压的累积作用之后,油浸绝缘纸中的分子链在冲击电压的作用下会发生断裂,使得分子链的长度变短,从而使油纸绝缘的聚合度降低。而分子链的断裂则会导致绝缘纸中出现更多的油纸界面^[17]。油纸界面的增大会导致其夹层介质界面极化的增大,进而使油浸绝缘纸在低频区域内的相对介电常数实部的上升。同时由于夹层介质极化属于有损极化,因此油纸绝缘的极化损耗也会相应增大。另外由于分子链在冲击电压作用下的断裂会使得大分子降解为小分子,而大分子中非极性键占大多数导致其极化能力不强,而小分子中有更多的极性键,这就会导致油纸绝缘的偶极子式极化损耗增加^[18],进而导致油纸绝缘的相对介电常数的虚部随着冲击次数的增加而增加。

4.2 油纸绝缘损耗特性变化原因分析

在实际电介质中,由于存在电导,电介质的介质

损耗角正切值 $\tan\delta^{[19]}$ 可表示为式(2)。

$$\tan\delta = \frac{\frac{\sigma_0}{\omega\epsilon_0} + \epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} \quad (2)$$

式(2)中: $\epsilon'(\omega)$ 和 $\epsilon''(\omega)$ 分别为复介电常数的实部和虚部; σ_0 为电介质的电导率; ω 为角频率。绝缘体的电导率一般低于 10^{-10} S/cm 数量级, 因而在实验所测量的频域中, 相对于极化损耗, 电导损耗可以忽略不计。因此介损可采用式(3)进行计算。

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} \quad (3)$$

同时由于介电常数的实部的变化相对于介电常数虚部的变化而言非常小, 因此介损的变化也会与介电常数的虚部的变化较为一致。

4.3 油纸绝缘电导特性变化原因分析

由油浸绝缘纸的聚合度变化情况可以看出, 在操作过电压的累积作用下, 油纸绝缘中的分子链已经发生了断裂, 而在生成较短分子链的同时, 绝缘纸中也会产生一系列带电粒子, 从而提高了油浸绝缘纸中的载流子浓度。使油纸绝缘的直流电导率会随着操作冲击电压的累积作用而呈现上升趋势。

对于油纸绝缘的交流电导率而言, 其模值 $|Y|$ 可以由式(4)计算得出^[18]。

$$|Y| = \sqrt{\omega^2 C^2 + \frac{1}{R^2}} \quad (4)$$

式(4)中, C 和 R 分别为油浸绝缘纸的几何电容和电阻。由式(4)可知, 油浸绝缘纸的交流电导率由直流电导和交流电导两部分组成, 但由于在高频部, ω 的值比较大, 因此交流电导占主要地位, 所以直流电导的上升对于交流电导率在高频部的大小影响不大; 而在低频部, 由于操作冲击电压的累积作用会导致油浸绝缘纸的相对介电常数实部增大, 其几何电容也会增大, 从而交流电导也随之增大, 同时由于交流电导率在低频区中的直流电导所占比例将会变大, 而直流电导的增大也会导致交流电导率在低频部的增大。因而在经过操作冲击电压的累积作用之后, 油纸绝缘的交流电导率同样会在低频部出现上升趋势。

4.4 油纸绝缘击穿与局部放电特性变化原因分析

油纸绝缘的局部放电主要是其沿面放电, 随着冲击次数的增加, 每次冲击产生的流注会从电极与绝缘纸交界处沿绝缘纸表面向外扩张, 每次冲击都会对绝缘纸表面产生灼烧效果, 流注造成的损伤会使得绝缘纸的表面电导增加, 从而导致绝缘纸表面更加容易产生沿面放电。

5 结语

1) 在经受了操作冲击电压的累积冲击之后, 油纸绝缘的电气特性会发生变化: 油浸绝缘纸的直流体积电导率会呈现上升趋势; 油浸绝缘纸的介电特性和交流体积电导率在 $10^{-2} \sim 10^0$ Hz 频域范围内呈上升趋势, 而在 $10^0 \sim 10^7$ Hz 的频域范围内基本保持不变; 油浸绝缘纸的介质损耗因素在 $10^{-2} \sim 10^3$ Hz 频域范围内呈上升趋势, 而在 $10^3 \sim 10^7$ Hz 的频域范围内基本保持不变;

2) 就油纸绝缘的工频 50 Hz 下的电气特性而言, 在经受了操作冲击电压的累积冲击之后, 其击穿电压无明显变化, 但其局部放电起始电压以及局部放电截止电压均呈下降趋势, 而交流体积电导率与介电常数也基本保持不变, 但是其介质损耗与直流体积电导率均呈上升趋势, 在经过 600 次的标准操作冲击电压的累积冲击之后, 其绝缘损耗上升程度高达 22.1%;

3) 操作冲击电压累积冲击之后, 油纸绝缘的机械性能会发生变化: 油浸绝缘纸的聚合度会发生轻微下降, 并且下降的速度随着冲击次数的增加而呈下降趋势, 在经过 600 次的标准操作冲击电压的累积冲击之后, 其聚合度下降达 7.5%; 与此同时, 油浸绝缘纸的抗拉强度基本保持不变。

参考文献:

- [1] 郭剑波. “八五”期间电网事故统计分析[J]. 电网技术, 1998, 22(2): 72-74.
GUO Jianbo. Statistics and analysis of incidents in bulk power system from 1991 to 1995[J]. Power System Technology, 1998, 22(2): 72-74.
- [2] 王梦云. 2002-2003 年国家电网公司系统变压器类设备事故统计与分析(一)[J]. 电力设备, 2004, 5(10): 20-26
WANG Mengyun. Statistics and analysis of transformer's incidents in power system from 2002 to 2003: Part I[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(10): 20-26
- [3] 王梦云. 2004 年度 110 kV 及以上变压器事故统计分析[J]. 电力设备, 2005, 6(11): 31-37.
WANG Mengyun. Statistics and analysis of 110 kV transformer's incidents in power system in 2004[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(11): 31-37.
- [4] 王梦云. 2005 年度 110(66) kV 及以上变压器事故与缺陷统计分析[J]. 电力设备, 2006, 7(11): 99-102.
WANG Mengyun. Statistics and analysis of 110(66) kV transformer's incidents in power system in 2005[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(11): 99-102.

- [5] VANDERMAAR A Z, WANG M, NEILSON J B, et al. The electrical breakdown characteristics of oil-paper insulation under steep front impulse voltages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1926-1935.
- [6] BALAJI S P, SHEEMA I, KRITHIKA G, et al. Effect of repeated impulses on transformer insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 2069-2073.
- [7] SHIGEMITSU O. Voltage-time and voltage-number characteristics of insulation elements with large scale oil-immersed transformers under field-use conditions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 14(6): 2061-2077.
- [8] SHIGEMITSU O. Voltage-time and voltage-number characteristics of insulation elements with oil-filled transformers in EHV and UHV classes [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 436-444.
- [9] BHOOMIAH A, MUKHERJI S, GUPTA S C, et al. Effect of repetitive impulse voltage on models of ehv transformer windings to determine ageing of paper insulation [M]. IEEE Report Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomenon, 2005: 206-209.
- [10] BALAJI S P, LAVANYA L, USA S. Effect of repeated impulses on OIP [C] // 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. Shanghai, China: [s.n.], 2012: 558-561.
- [11] 汪德军. 大型电力变压器状态评估方法的理论研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
WANG Dejun. Theoretical study on condition assessment of large power transformer [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [12] 谌 军. 电力变压器状态评估方法的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
SHEN Jun. Study on the methodology about condition assessment of power transformer [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [13] 周远翔, 田冀焕, 王云杉, 等. 变压器油纸绝缘系统中的空间电荷现象 [J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 520-527.
ZHOU Yuanxiang, TIAN Jihuan, WANG Yunsha, et al. Space charge phenomenon in oil-paper insulation system of power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 520-527.
- [14] RAMU T S. On the estimation of life of power apparatus insulation under combined electrical and thermal stress [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1985(20): 70-78.
- [15] 杨丽君, 廖瑞金, 孙才新, 等. 油纸绝缘的局部放电特征量分析及危险等级评估方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 123-130.
YANG Lijun, LIAO Ruijin, SUN Caixin, et al. Partial discharge characteristics and risk assessment method for oil-paper [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 123-130.
- [16] 刘玉仙. 油纸绝缘变压器中水分的聚积及其对热老化寿命的影响 [J]. 变压器, 2004, 41(2): 8-13.
LIU Yuxian. Water accumulation in oil-paper insulation transformer and its influence to life time [J]. Transformer, 2004, 41(2): 8-13.
- [17] 王世强, 魏建林, 杨双锁, 等. 油纸绝缘加速热老化的频域介电谱特性 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 125-131.
WANG Shiqiang, WEI Jianlin, YANG Shuangshuo, et al. Frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation under accelerated thermal aging [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 125-131.
- [18] JONSCHEER A K. Dielectric relaxation in solids [M]. London: Chelsea Dielectrics Press, 1983: 42-47.
- [19] 张良莹, 姚 熹. 电介质物理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 177-210.
ZHANG Liangying, YAO Xi. Dielectric physics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991: 177-210.
- 司马文霞(1965—), 女, 博士, 教授, 博导, 主要从事电力系统防雷与过电压防护研究、特殊环境中外绝缘放电特性及机理的研究。
- 陆 琛(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事过电压对于变压器内绝缘的影响方面的研究。