

基于 FDS 的变压器油浸纸老化程度与水分含量评估方法

黎成林,曹保江,孙健翔,雷帆,吴广宁,高波

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 搭建了频域介电谱(FDS)技术测试试验平台,测试了不同老化程度和不同水分含量油浸纸样品的复介电常数,并对测试结果进行对比分析。分析结果表明:绝缘纸聚合度的降低使油浸纸样品的复介电常数实部和虚部在低频段增大,而在高频段基本不变;绝缘纸水分含量的增加使油浸纸样品的复介电常数实部在 10^2 Hz 以下的频域范围内增大,虚部在整个测试频域范围内增大,且虚部曲线随水分含量的增大呈现向右平移趋势。提出利用复介电常数虚部的等效下降幅度作为绝缘纸聚合度映射特征量,以此评估油浸纸的老化状态。拟合出特征频率 10^{-4} Hz 处复介电常数实部与水分含量的关系式,以此提出一种适用于不同老化程度和油浸纸水分含量的频域介电特征量评估方法。

关键词: 变压器; 油纸绝缘; 材料老化; FDS; 聚合度; 水分; 等效下降幅度

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.035

0 引言

随着我国电力系统电压等级不断提升,装机容量逐年扩大,电网安全运行变得尤为重要。电力变压器在电力系统输变电过程中扮演核心角色,一旦发生故障将对国民经济造成不可估量的损失^[1-3]。油纸绝缘作为大型电力变压器的主绝缘系统,在运行过程中长期受到温度、水分、氧气、酸、电场、机械力等应力的作用而逐渐老化,导致其机械性能和绝缘性能下降^[4-7]。其中水分被认为是导致油纸绝缘老化的“第二大杀手”(热应力被认为是头号杀手)^[8],对绝缘纸的机械强度和电气强度造成严重破坏。研究表明,绝缘纸的机械寿命会随着水分含量的增加迅速减小,热老化速度也将成倍增加^[9-10]。水分还是油、纸纤维素等高分子材料化学降解反应的催化剂,对材料降解老化产生不可逆的加速作用^[11]。

由此可见,油纸绝缘系统水分含量评估是变压器故障诊断的一个重要环节。绝缘油老化后可以进行滤油操作或者直接更换新油以改善其绝缘性能,而老化后的绝缘纸不能更换,一台变压器的运行寿命基本取决于其内部绝缘纸的寿命,因此绝缘纸老化状态的评估显得尤为重要。目前,通常采用卡尔费休滴定法评估油浸纸的水分质量分数,即在处于平衡状态的油纸体系中测量绝缘油中的水分质量分数,然后根据油纸水分平衡曲线,得到纸中水分质量分数^[12-14]。这种方法在进行过程中将会吸收来自外界的水分,对实验结果造成误差,当绝缘油中水分较小时,误差更为明显。另外,如今适用的几大水分平衡曲线都是在实验室条件下以全新绝缘油和绝缘纸为实验材料得

出,只适用于刚投入运行的油纸绝缘系统。油纸绝缘老化后其材料的化学特性和物理结构将会发生变化,原有的水分平衡曲线不再适用。近年来,随着测控技术的快速发展,介电响应技术逐渐应用到变压器油纸绝缘的无损状态评估。如今用于变压器故障诊断的介电响应法主要有回复电压法(RVM)、极化去极化电流(PDC)法和频域介电谱(FDS)法。其中 FDS 法因具有携带信息丰富、测量频带窄、抗干扰能力强等优点,更适用于现场测量^[15-17]。大量研究证明,FDS 中的特征量(复介电常数、介质损耗因素等)曲线可以反映油纸绝缘系统的老化状态。文献[18]测量了不同含水量油浸纸板的频域介电特性,发现水分含量的变化在整个测试频域范围内都对 FDS 特性产生影响,且介质损耗随着油浸纸板水分含量的增大而明显增大。文献[19]测量发现水分含量的增加使复介电常数的实部和虚部曲线都向高频移动,且虚部最小值随水分含量增加而增大。此外,水分含量增加到一定程度时,曲线在低频区出现损耗峰。文献[20]研究了复介电常数和介质损耗因素随水分含量及测试温度的变化情况,拟合出水分含量与不同频率处频域介电特征参量的关系式,运用时温叠加理论提出了适用于不同运行温度下的油纸绝缘水分含量评估方法。上述研究都是以新变压器油与新绝缘纸为实验基础,并不适用于老化变压器水分含量的评估。如何辨别老化和水分各自对油纸绝缘 FDS 特性的影响,进而提出适用于不同老化状态的油浸纸水分含量评估方法更具有实际意义。

本文制备了不同水分含量、不同老化程度的油浸纸样品并对其进行 FDS 测试,分析了绝缘纸老化程度和水分含量对其频域介电特性的影响,并从绝缘纸

的极化特性和老化机理分析了产生这种影响的原因,最后提出一种适用于不同老化程度油浸纸的水分含量评估方法。

1 FDS 测试原理

电介质的介电常数也称为电容率,是描述电介质极化的宏观常数,定义为:

$$\epsilon_r = \frac{D}{\epsilon_0 E}$$
 (1)

其中, ϵ_r 为电介质的介电常数; D 为电介质中电通量密度; E 为宏观电场强度; ϵ_0 为真空介电常数。

当电介质处于 $E^* = E_m e^{j\omega t}$ 的交变电场中时,若电介质中存在松弛极化,则 D^* 将滞后于 E^* 并产生相角差 δ ,即 $D^* = D_m e^{j(\omega t - \delta)}$,此时的复电介质常数定义为:

$$\epsilon^* = \frac{D^*}{\epsilon_0 E^*} = \frac{D_m}{\epsilon_0 E_m} e^{-j\delta} = \bar{\epsilon} e^{-j\delta} = \epsilon' - j\epsilon''$$
 (2)

其中, $\bar{\epsilon}$ 为复介电常数的模; ϵ' 为复介电常数的实部,与相对介电常数具有相同的意义,代表电介质的极化强度; ϵ'' 为复介电常数的虚部,代表电介质在电场中的损耗。电介质的介质损耗因数定义为相角差 δ 的正切值,可以直接用 $\tan \delta$ 表示,其与复介电常数的关系为:

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

FDS 法就是通过给电介质外加正弦电压,得到介电常数、介质损耗因数一系列与频率有关的参数的变化情况。若在油纸绝缘系统中应用 FDS 法,就可以运用上述参数的变化情况来反映油纸绝缘系统的老化状态。

2 实验设计

2.1 实验材料

本文采用厚度为 0.3 mm 的普通牛皮变压器绝缘纸和 25 号克拉玛依变压器矿物绝缘油作为实验材料进行老化试验和 FDS 测试,实验材料具体信息如表 1 所示。

表 1 实验材料详细信息
Table 1 Detailed information of experimental materials

实验材料	材料规格	水分含量/%	聚合度	产地
绝缘纸	0.3 mm 厚牛皮纸	6.5	1 192	乐山造纸厂
绝缘油	25 号环烷基油	1.79×10^{-3}	—	克拉玛依

2.2 实验流程

为提高测试结果精确度,先对试验材料进行以下处理:将绝缘纸剪裁成半径约为 11 cm 的圆形纸板,然后将若干张剪裁好的单层绝缘纸压制为厚度约为 1 mm 的圆形绝缘纸试样;将压制好的绝缘纸试样在 90℃/50 Pa 的环境下干燥 60 h 直至其水分含量小于 0.1%;矿物油经真空脱气后在 40℃/50 Pa 的条件下

干燥至水分含量约为 10 μg/g。

绝缘纸的聚合度(DP)是表征其机械特性的物理量,代表构成纸纤维的葡萄糖单体的个数,是绝缘纸老化程度最重要且最直接的表征量。全新绝缘纸的聚合度为 1 200~1 500,如果聚合度低于 200 就认为变压器的寿命结束^[21-22]。为了得到不同聚合度的绝缘纸样品,将压制好的绝缘纸置于老化箱中进行不同温度和时间的等效热老化,具体流程如表 2 所示。绝缘纸聚合度的测量参照文献[24]执行,为提高测量精度,取 3 份经同类等效老化的绝缘纸进行聚合度测量,取其平均值作为该类等效老化的最终聚合度值。每种等效老化处理流程完成后将绝缘纸在矿物油中静置 48 h,让绝缘纸老化后的大部分产物存在于绝缘油中,以减小老化产物(主要是酸)对试验结果的影响。

表 2 不同聚合度绝缘纸试样处理流程
Table 2 Pre-processing of insulating paper samples with different polymerization degrees

聚合度	处理流程
1 292	25℃ 下真空浸油
735	100℃/ 50 Pa/ 20 d
420	140℃/ 50 Pa/ 20 d
215	150℃/ 50 Pa/ 40 d

将经过等效老化得到的每种聚合度绝缘纸充分干燥后,使其自然吸潮获得水分含量分别为 1%、2%、3% 和 4% 的绝缘纸样品,将样品与干燥好的绝缘油置入实验装置中,在 60℃ 的环境下静置 48 h,待水分在油纸间达到稳态后测量绝缘纸中的水分含量并进行 FDS 测试。

本文进行 FDS 测试所用仪器为美国 Megger 公司生产的绝缘诊断分析仪 IDAX300,其测量频率范围为 0.1 mHz~10 kHz。未消除环境温湿度会对实验结果造成影响,所以将油纸绝缘系统置于老化箱中,老化箱中为真空环境,温度设置为 60℃。

3 实验结果分析

水分在油纸绝缘系统中达到平衡后,不同聚合度绝缘纸中的水分含量如表 3 所示。

表 3 不同聚合度绝缘纸达到稳态后的水分含量
Table 3 Moisture content of insulating papers with different steady-state polymerization degrees

聚合度	稳态水分含量/%			
	$c_w = 1\%$	$c_w = 2\%$	$c_w = 3\%$	$c_w = 4\%$
1 192	0.981	1.988	2.969	3.885
735	0.976	1.989	2.961	3.871
420	0.969	1.965	2.954	3.856
215	0.961	1.957	2.943	3.842

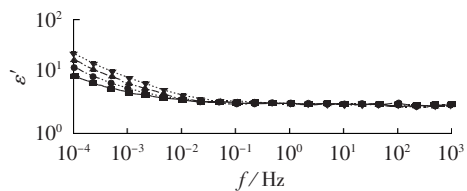
注: c_w 为水分含量期望值。

由表 3 可以看出,水分在油纸间达到稳态后,绝缘

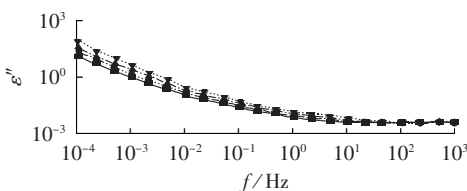
纸的水分含量都比相应的水分含量期望值稍小,即在水分平衡过程中,少量水分从绝缘纸转移到绝缘油中。水分含量期望值相同时,绝缘纸聚合度越低,达到平衡后其水分质量分数越小。这是因为绝缘纸纤维素分为结晶区和无定形区,结晶区纤维素分子排列紧密,水分子与油分子很难进入,无定形区纤维素分子排列松散,水分与油分子容易进入该区域。绝缘纸老化会使纤维素的部分结晶区向无定形区转化,其内部空隙增大,因绝缘油浓度远大于水分浓度,绝缘油将首先进入这些空隙而使水分无法进入,因此聚合度越低其水分含量相对越低。因绝缘纸中实际水分含量与期望值差异不大,实验中可以近似认为不同聚合度的绝缘纸中水分含量与期望值相等。

3.1 绝缘纸聚合度对 FDS 特性的影响

图 1 和图 2 分别为水分含量为 1% 和 3% 的情况下不同聚合度绝缘纸的复介电常数测试曲线。水分



(a) 复介电常数实部

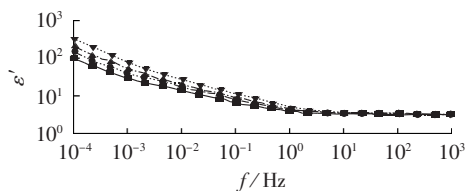


(b) 复介电常数虚部

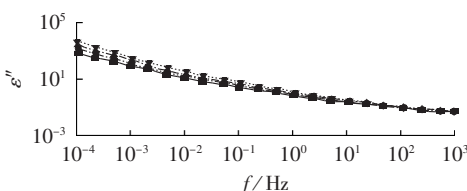
— DP=1292, - - DP=735, ··· DP=420, - ··· DP=215

图 1 水分含量为 1% 时,不同聚合度绝缘纸的复介电常数

Fig.1 Complex permittivity of insulating papers with different polymerization degrees when moisture content is 1%



(a) 复介电常数实部



(b) 复介电常数虚部

— DP=1292, - - DP=735, ··· DP=420, - ··· DP=215

图 2 水分含量 3% 时,不同聚合度绝缘纸的复介电常数

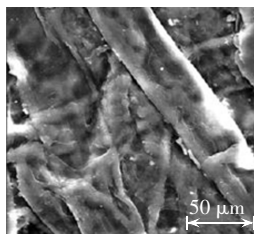
Fig.2 Complex permittivity of insulating papers with different polymerization degrees when moisture content is 3%

含量为 2% 和 4% 时的测试曲线具有相似规律,这里不再赘述。

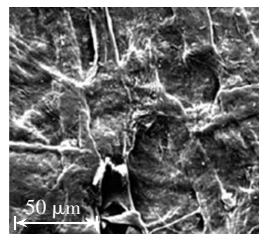
油纸绝缘系统极化体系在低频段由界面极化主导,在高频段由转向极化决定。从图 1 和图 2 可以看出,相同条件下,复介电常数的实部和虚部均随着频率的升高而减小,且在高频区域基本保持不变。这是因为在较低的频域下,油纸绝缘系统可以完成更多的极化过程,随着频率的升高,一些所需时间较长的极化过程(如夹层界面极化和空间电荷极化)逐渐跟不上电场的变化速度,从而使复介电常数的实部、虚部减小。

从图 1、2 中可以看出,当绝缘纸中水分含量相同时,复介电常数的实部与虚部在低频段随聚合度的减小而增大,在高频段略微增加,增加幅度可以忽略,且聚合度越小,复介电常数的实部和虚部虚线在低频段随着频率升高而下降的趋势越陡峭。这与文献[18]所得结论吻合。这是因为低频段油纸绝缘的极化体系由界面极化主导。聚合度随着绝缘纸热老化不断降低,热应力不仅使纤维素结晶区转化为无定形区,还使非结晶区结构更加疏松。纤维素分子间的相互作用力减弱,更多绝缘油分子侵入绝缘纸与纤维素分子接触,形成更多的油纸界面,油纸界面极化程度增强,油纸界面极化损耗也随之增大,因此复介电常数的实部和虚部在低频段随聚合度的减小而增大。

图 3 为通过绝缘纸老化扫描电镜 SEM(Scanning Electron Microscope)将绝缘纸放大 800 倍后的图像,图 3(a)为全新绝缘纸试样,图 3(b)为 130℃ 下老化 132 d 的绝缘纸试样。从图中可以看出,未老化的绝缘纸纤维素排列有序且紧密,纤维素平均宽度较老化后的纤维素宽;老化后绝缘纸的纤维素排列松散无序,平均直径减小,这将使绝缘油更容易进入绝缘纸并为其提供更多的容纳空间。



(a) 未老化



(b) 老化 132 d

图 3 放大 800 倍的不同老化程度绝缘纸试样 SEM 图

Fig.3 Insulating paper samples with different aging degrees, magnified 800 times by SEM

3.2 不同聚合度绝缘纸的水分含量评估

图 4 和图 5 分别为聚合度为 1292 和 420 时不同水分含量绝缘纸的复介电常数测试曲线(聚合度为 735 和 215 时具有相似规律,本文不再赘述)。从图

中可以看出,当绝缘纸聚合度相同时,复介电常数实部在 10^2 Hz 以下的频率范围内随水分含量的增大而增大。这是因为水分分子是极性分子,它将参与油纸绝缘的极化过程,绝缘纸中水分含量越大,参与极化的极性分子越多,极化强度越强。另外,随着水分含量的升高,复介电常数虚部在整个测试频域范围内增大, ϵ'' 曲线呈现向右平移趋势。这是因为绝缘纸中的水分含量的增加不仅增加了油纸界面损耗,同时油纸绝缘电导率也随水分含量的增加而增大,其电导损耗也随之增大。

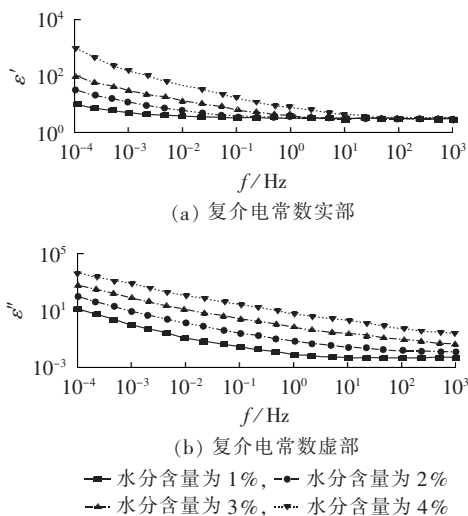


图 4 聚合度为 1292 时,不同水分含量绝缘纸的复介电常数
Fig.4 Complex permittivity of insulating papers with different moisture contents when DP is 1292

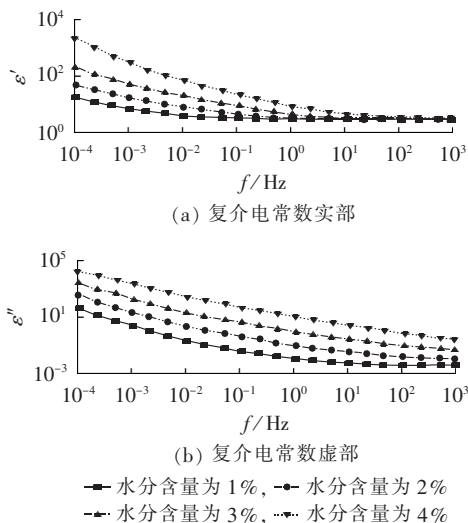


图 5 聚合度为 420 时,不同水分含量绝缘纸的复介电常数
Fig.5 Complex permittivity of insulating papers with different moisture contents when DP is 420

为探究适用于不同老化程度绝缘纸水分含量的频域介电特征量评估方法,需从复介电常数曲线中寻求可以表征绝缘纸聚合度的特征量。由图 1 和图 2 可以看出,绝缘纸水分含量相同时,随着绝缘纸聚合度的降低,复介电常数的实部和虚部曲线在低频段的

下降趋势变陡。从图 4 和图 5 可以看出,绝缘纸聚合度相同时,复介电常数虚部曲线随水分含量的增加呈向右平移趋势,且通过观察可知 4 种水分含量下的虚部曲线基本平行,可以推测若在均匀坐标系中复介电常数虚部将具有相同的下降幅度。因此本文提出利用复介电常数虚部曲线在 10^2 Hz 以下频率范围内的等效下降幅度作为绝缘纸聚合度的映射特征量。以聚合度为 1292 的绝缘纸式样为例,将图 4(b)变换为如图 6 所示的均匀坐标图;图 4(b)中 Y 轴最小值 10^{-3} 与最大值 10^5 分别对应均匀坐标系中 Y 轴最小值 0 与最大值 80;X 轴最小值 10^{-4} 与最大值 10^3 分别对应均匀坐标系中 X 轴的最小值 0 与最大值 70,复介电常数虚部曲线在均匀坐标系中的下降幅度即为等效下降幅度值。图 4(b)中每条曲线在 10^{-4} Hz 和 10^2 Hz 处的值在均匀坐标系中的对应值相减后作为该水分含量条件下的下降幅度。取 4 种水分含量虚部曲线下降幅度的平均值作为该聚合度对应的等效下降幅度。按照此方法求得不同聚合度下,水分含量不同的油浸纸虚部曲线在均匀坐标系中的下降幅度值及等效下降幅度值,如表 4 所示。从表 4 可以看出,同一聚合度条件下不同水分含量的油浸纸的虚部曲线在均匀坐标系中的下降幅度基本相同,且每种聚合度的等效下降幅度随聚合度的减小而增大,这与前文推测的结果吻合。

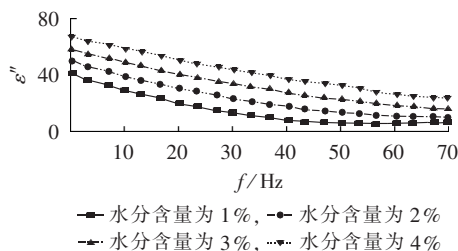


图 6 均匀坐标图
Fig.6 Complex permittivity curves in homogeneous coordinates

表 4 虚部曲线的下降幅度与等效下降幅度
Table 4 Decline extent and equivalent decline extent of imaginary part curve

聚合度	下降幅度				等效下降幅度
	$c_w=1\%$	$c_w=2\%$	$c_w=3\%$	$c_w=4\%$	
1292	34.4578	34.4646	34.4184	34.4684	34.4629
735	40.8722	40.9845	40.8478	41.1091	40.9534
420	45.1156	45.0176	45.1224	44.9424	45.0495
215	47.8546	47.7752	47.8168	48.0670	47.8784

图 7 为等效下降幅度与绝缘纸聚合度的拟合关系图,拟合关系式为:

$$y=50.339-0.0124x \tag{4}$$

其中, y 为等效下降幅度值; x 为相应的聚合度值。拟合优度较高,为 0.99788,因此可以利用该式对绝缘纸的老化状态进行评估。

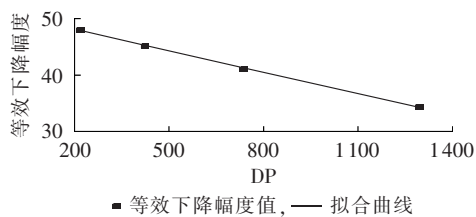


图 7 等效下降幅度与聚合度的关系
Fig.7 Relationship between DP and equivalent decline extent

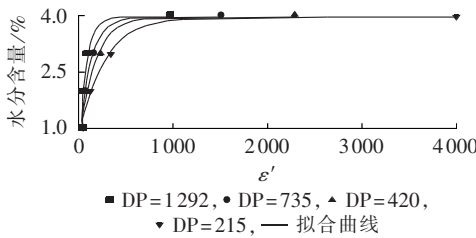


图 8 水分含量与特征参数的关系
Fig.8 Relationship between moisture content and characteristic parameter

为评估不同老化程度绝缘纸的水分含量,本文选取 10^{-4} Hz 处的 ϵ' 作为水分含量评估的频域介电特征量。图 8 为 4 种老化程度的绝缘纸水分含量与特征频率处 ϵ' 之间的关系。由图 8 可见,不同老化程度绝缘纸的水分含量与 10^{-4} Hz 处的 ϵ' 存在如式(5)所示的函数关系:

$$y_{mc}=B+A \exp \left(-\frac{x}{t}\right)$$

(5)

其中, y_{mc} 为绝缘纸中的水分含量; x 为特征频率 10^{-4} Hz 处的 ϵ' 值,其拟合参数如表 5 所示。由表中数据可知,随着聚合度的降低,绝缘纸水分含量与频域介电特征量间函数的拟合优度 R^2 呈现下降趋势,说明油浸纸老化越严重,其极化特征机理越复杂,影响其频域介电特性的因素更多;当绝缘纸聚合度下降到 215 时,拟合优度小于 0.9,其他老化状态下拟合优度都较高,实际运行中变压器绝缘纸聚合度不会低于 500,因此可用该系列拟合函数对不同老化程度绝缘纸的水分含量进行评估。

表 5 不同老化程度绝缘纸的水分含量的拟合参数
Table 5 Fitting parameters for moisture content of insulating papers with different aging degrees

聚合度	B	A	t	R ²
1292	0.39732	-0.33178	73.7576	0.97419
735	0.39600	-0.31575	112.3202	0.94355
420	0.39594	-0.30889	161.4093	0.93415
215	0.39629	-0.29529	264.0576	0.86508

综上所述,评估不同老化程度油浸纸水分含量时,可先通过绝缘纸聚合度与等效下降幅度的拟合关系求出油浸纸的聚合度,再根据不同聚合度油浸纸水分含量与频域介电特征量的拟合关系式对水分含量进行评估。

4 结论

本文在实验室中制备了不同聚合度、不同水分含量的油浸纸样品并测量其频域介电特性,通过对测试结果的分析,区分了老化程度与水分含量对油浸纸 FDS 特性的影响。本文初步探索出一种适用于不同老化程度油浸纸水分含量的评估方法,为实际运行中的电力变压器油纸绝缘水分含量评估提供了参考。本文的主要结论如下。

(1)聚合度的变化主要在低频段对油浸纸的频域介电特性产生影响。聚合度不同但水分含量相同时,随着绝缘纸聚合度的降低,其复介电常数的实部与虚部在低频段均增大,在高频段基本保持不变;且聚合度越低,复介电常数实部与虚部在低频段随频率升高而下降的趋势越陡峭。

(2)水分含量相同而聚合度不同时,复介电常数实部 ϵ' 在 10^2 Hz 以下的频率范围内随绝缘纸水分含量的升高而增大,复介电常数虚部 ϵ'' 在整个测试频域范围内随绝缘纸水分含量的升高而增大,且 ϵ'' 曲线呈现向右平移趋势。

(3)提出将等效下降幅度作为绝缘纸老化程度的映射特征量,得到了其与绝缘纸聚合度的关系式,可以利用该关系式对油浸纸的老化程度进行评估。同时拟合出不同聚合度绝缘纸在特征频率点 10^{-4} Hz 处 ϵ' 值与水分含量的关系式,进而探索出适用于不同老化程度油浸纸水分含量的评估方法。

需要指出的是,本试验材料为全新绝缘油与不同老化程度的绝缘纸,这种情况与经过滤油或更换新油的变压器运行情况相符。实际中为考虑电网运行经济性,不可能经常进行滤油与更换新油操作,绝缘纸与绝缘油的老化产物如酸、糠醛、油中溶解气体等存在于油纸绝缘系统中,加之变压器实际运行环境错综复杂,油纸绝缘系统水分含量及老化状态还受到温度、压力等因素的影响,因此要更好地实现实际运行变压器油纸绝缘水分含量与老化状态的评估,还需要建立精度更高的多因素融合的映射方法及映射数据库。

参考文献:

[1] WANG M,VANDERMAAR A J,SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2002,18(6):12-25.

[2] 周利军,汤浩,张血琴,等. 油纸绝缘微水扩散的暂态分布模型[J]. 中国电机工程学报,2008,28(7):134-140.

ZHOU Lijun,TANG Hao,ZHANG Xueqin,et al. Disequilibrium moisture partition in oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(7):134-140.

[3] 黄云程,蔡金铨. 油纸绝缘系统回复电压函数建模及拓扑结构辨识[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):149-153.

HUANG Yancheng,CAI Jinding. Return voltage function modeling and topology recognition of oil-paper insulation system[J].

- Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 149-153.
- [4] 陈伟根, 杜杰, 凌云, 等. 变压器油纸绝缘气隙放电能量-小波矩特征及放电过程划分[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 84-95. CHEN Weigen, DU Jie, LING Yun, et al. Energy-wavelet moment characteristics of air-gap discharge in oil-paper insulation of transformer and partition of discharge process[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 84-95.
- [5] 王晓剑, 吴广宁, 李先浪, 等. 酸值对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 133-139. WANG Xiaojian, WU Guangning, LI Xianlang, et al. Influence of acid value on recovery voltage parameters of transformer oil-paper insulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 133-139.
- [6] 郑君亮, 江修波, 蔡金铨. 变压器油纸绝缘等效电路参数辨识及绝缘状态对参数的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 168-172. ZHENG Junliang, JIANG Xiubo, CAI Jinding. Parameter identification for equivalent circuit of transformer oil-paper insulation and effect of insulation condition on parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 168-172.
- [7] SUPRAMANIAM G K, HUSSIAN Z F, AIZAM M. Application of Frequency Domain Spectroscopy (FDS) in assessing dryness and ageing state of transformer insulation systems[C]//IEEE International Conference on Power and Energy. Johor Baharu, Malaysia; IEEE, 2008: 55-61.
- [8] FOFANA I, WASSERBERG V, BORSI H, et al. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers. Investigations of mixed liquid impregnated paper insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(4): 5-16.
- [9] 周利军, 李先浪, 王晓剑, 等. 基于回复电压曲线的油纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 489-496. ZHOU Lijun, LI Xianlang, WANG Xiaojian, et al. Status assessment of oil-paper insulation based on recovery voltage method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 489-496.
- [10] 杨丽君. 变压器油纸绝缘老化特征量与寿命评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. YANG Lijun. Study on aging characteristics of oil-paper in transformer and its lifetime estimation method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [11] 闰春江. 油浸电力变压器固体绝缘老化的诊断及其应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2003. RUN Chunjiang. Diagnosis and its application of immersed power transformers solid insulation aging[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [12] OOMMEN T V. Moisture equilibrium charts for transformer insulation drying practice[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(10): 3063-3067.
- [13] 周利军, 汤浩, 吴广宁, 等. 油纸绝缘微水扩散的稳态分布[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 27-30. ZHOU Lijun, TANG Hao, WU Guangning, et al. Equilibrium moisture distribution in oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 27-30.
- [14] 江修波, 张涛, 黄彦婕. 变压器油纸绝缘极化谱的仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 31-35. JIANG Xiubo, ZHANG Tao, HUANG Yanjie. Simulation of transformer insulation polarization spectrum[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 31-35.
- [15] SONERUD B, BENGTSSON T, BLENNOW J, et al. Dielectric response measurements utilizing semi-square voltage waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 920-926.
- [16] 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 Jianlin, WANG Shiqiang, PENG Huadong, 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.
- [17] 段宗超, 吴广宁, 高波, 等. 油纸绝缘频域介电谱特性与聚合度的关联影响规律研究[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2881-2887. DUAN Zongchao, WU Guangning, GAO Bo, et al. Study of linkage effects between degree of polymerization and frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2881-2887.
- [18] SHAYEGANI A A, MOHSENI H, BORSI H, et al. Diagnostics of power transformers with dielectric response measurements[C]//IEEE International Power System Conference. Columbus, United States; IEEE, 2005: 1-8.
- [19] LINHJELL D, LUNDGAARD L, GAFVERT U. Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 156-169.
- [20] 杨丽君, 郝建, 廖瑞金, 等. 变压器油纸绝缘水分含量的频域介电特征参量及评估方法研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 59-66. YANG Lijun, HAO Jian, LIAO Ruijin, et al. Frequency-domain dielectric characteristic parameter and moisture content assessment methods study on frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 59-66.
- [21] OOMMEN T V, PREVOST T A. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part II-maintaining insulation integrity and life[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2006, 22(2): 5-14.
- [22] PREVOST T A, OOMMEN T V. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part I-history and development[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 22(1): 28-35.
- [23] GIELNIAK J, GRACZKOWSKI A, MORANDA H, et al. Moisture in cellulose insulation of power transformers-statistics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 982-987.
- [24] 造纸工业标准化技术委员会. 纸浆粘度的测定: GB/T 1548—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

作者简介:



黎成林

黎成林(1990—),男,四川眉山人,硕士研究生,主要从事变压器绝缘老化机理及其状态评估方面的研究(E-mail: lichenglin37@163.com);

曹保江(1970—),男,四川成都人,副教授,主要从事高电压与绝缘技术方面的教学和科研工作(E-mail: cbjswjtu@163.com)。

FDS-based assessment of aging degree and moisture content
for oil-paper in transformer

LI Chenglin, CAO Baojiang, SUN Jianxiang, LEI Fan, WU Guangning, GAO Bo
(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A test platform is established based on the FDS(Frequency domain Dielectric Spectroscopy), the complex permittivity of oil-paper samples with different aging degrees and moisture contents are measured and the results are contrastively analyzed, which show that, the decrease of DP(Degree of Polymerization) of oil-paper makes the real and imaginary parts of its complex permittivity increased in the low-frequency band while basically unchanged in the high-frequency band; the increase of moisture content of oil-paper makes the real part of its complex permittivity increased in the frequency domain lower than 10^2 Hz while the imaginary part increased over the whole frequency domain and the imaginary permittivity curve moved rightward in parallel. It is proposed to adopt the equivalent decline extent of imaginary permittivity as the mapping characteristic parameter of DP to assess the aging degree of oil-paper. The formula of relationship between moisture content and real permittivity is fitted at the characteristic frequency of 10^{-4} Hz for assessing the permittivity of oil-papers with different aging degrees and moisture contents.

Key words: power transformers; oil-paper insulation; aging of material; FDS; polymerization degree; moisture; equivalent decline extent

+++++

(上接第 181 页 continued from page 181)

Research on interaction during active power-flow control of UPFC
MA Peng¹, LIU Qing¹, ZOU Jiaping², LIU Cheng³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Guohua Yuedian Taishan Power Generation Company Ltd., Taishan 529228, China; 3. Guohua Huizhou Cogeneration Branch Company of Shenhua Energy Company Ltd., Huizhou 516082, China)

Abstract: There are interactions among the sub-controllers of UPFC(Unified Power Flow Controller), which may affect its control performance. The effect of the active-power reference change of UPFC on the controlled voltage of its voltage controller is analyzed and the limitation of applying mathematical formula to reflect this effect is expounded. The time-domain simulation with PSCAD/EMTDC is carried out to obtain the dynamic data of voltage, which are used to fit a Logistic model for deducing a mathematical expression to describe the effect of active-power compensation degree on the nodal voltage variation. The deduced expression is then applied to predict the interaction degree according to the active-power compensation degree, which is then used to analyze the effect of UPFC active power-flow control on the operation of its voltage controller at parallel side.

Key words: unified power flow controller; interactions; power-flow control; voltage controller; voltage fluctuation value; Logistic model