

# 扩展 Debye 模型大时间常数与变压器油纸绝缘老化的定量关系研究

刘捷丰<sup>1,2</sup>, 张懿议<sup>2</sup>, 徐建建<sup>3</sup>, 贾 瑞<sup>1</sup>, 张冠军<sup>4</sup>, 柳立为<sup>1</sup>

(1. 国网河北省电力公司石家庄供电分公司, 河北 石家庄 050000;

2. 广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 510080;

3. 河北电力调度控制中心, 河北 石家庄 050021; 4. 国网山东省电力公司济宁供电分公司, 山东 济宁 272100)

**摘要:** 目前, 应用极化/去极化电流(PDC)法量化变压器油纸绝缘系统老化状态需深入研究, 为了推动该研究工作, 通过一系列加速热老化试验以及吸潮试验制备了不同老化状态和水分含量的油纸绝缘样品, 测量了样品的 PDC 图谱; 借助扩展 Debye 电路模型拟合了 PDC 图谱并获取了模型参数, 在深入研究老化对 Debye 模型参数的影响规律后提出了时域介电特征量扩展 Debye 模型大时间常数来量化绝缘纸板老化状态。研究结果表明, 扩展 Debye 模型大时间常数与绝缘纸板的聚合度存在较好的指数关系, 但与样品的绝缘尺寸无关。

**关键词:** 变压器; 油纸绝缘; 极化/去极化电流; 扩展 Debye 电路模型; 大时间常数; 定量评估

**中图分类号:** TM 41

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.031

## 0 引言

近年来, 国家电网公司提出建设以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网, 这给电力设备的绝缘性能带来了巨大考验<sup>[1]</sup>。油纸绝缘是大型电力变压器广泛使用的绝缘类型, 然而, 在变压器服役过程中, 受热、电、氧、潮湿等复杂因素的影响, 油纸绝缘会逐渐老化<sup>[2-4]</sup>。现有研究成果已经表明, 绝缘老化会改变油纸绝缘系统的微观结构, 从而导致影响油纸绝缘电介质材料的电导与极化过程<sup>[5]</sup>。

介质响应诊断技术作为一种简便、有效、无损的绝缘检测方法, 广泛应用于电力变压器油纸绝缘老化状态评估<sup>[6-8]</sup>。基于时域介电响应理论的极化/去极化电流(PDC)法由于携带绝缘信息丰富等优点成为了变压器油纸绝缘老化状态评估领域的研究热点。近年来, 虽然对该方法的深入报道已较多, 但绝大部分文献集中于定性描述油纸绝缘 PDC 在测量温度、水分含量、老化程度等因素影响下的变化规律<sup>[9-13]</sup>。虽然部分学者尝试利用 PDC 曲线提取时域介电响应特征量并量化变压器固体绝缘的老化状态, 但提取的特征量与变压器油纸绝缘的尺寸相关。目前, 如何有效提取与变压器油纸绝缘尺寸无关的时域介电特征量并量化固体绝缘的老化状态的相关研究较少。

鉴于上述研究不足, 本文在实验室通过加速热老化试验以及吸潮实验制备了不同老化状态和不同水分含量的油纸绝缘样品; 然后测试了上述油纸绝缘样品的 PDC 图谱; 借助扩展 Debye 模型拟合了 PDC 图谱并获取了模型参数; 在深入研究老化对 Debye 模型参数的影响规律后提出了能够量化绝缘纸板老化状态的时域介电特征量——扩展 Debye 模型大时间常数。

## 1 PDC 的基本测试原理

PDC 法能揭示绝缘介质材料内部缓慢极化作用的过程, 是一种新型无损的绝缘诊断方法。该测试方法的原理如下: 在绝缘材料的两端施加一直流电压  $U_0$  时, 绝缘材料内部偶极子呈现从无序状态转向定向排列的趋势, 表面出现束缚电荷, 内部偶极子定向排列, 这个过程中绝缘材料内流过的微弱电流称为极化电流  $i_p$ ; 经过时间  $T_p$  后短接绝缘材料, 撤去外施电压并短接两极后, 表面电荷立即释放, 同时介质内部会发生缓慢的去极化过程, 绝缘材料的内部偶极子从定向排列向无序状态过渡, 这个过程产生的微弱电流称为去极化电流  $i_d$ 。测量电路如图 1 所示。

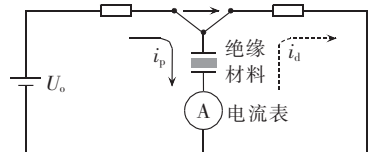


图 1 极化/去极化电流法基本测量原理图  
Fig.1 Schematic diagram of PDC measuring

## 2 油纸绝缘样品的制备

### 2.1 油纸绝缘样品的预处理

为模仿实际变压器的生产处理流程, 需要对油

收稿日期: 2015-12-18; 修回日期: 2017-01-14  
基金项目: 广西自然科学基金资助项目(2015GXNSFBA139-235); 广西科技厅资助项目(AE020069); 广西教育厅资助项目(T3020097903)  
Project supported by the Natural Science Foundation of Guangxi Province(2015GXNSFBA139235), Guangxi Science & Technology Department(AE020069) and Guangxi Education Department(T3020097903)

纸绝缘样品初始状态进行预处理。按照 DL/T 596—2005《电力设备预防性试验规程》<sup>[14]</sup>中的规定对变压器油以及绝缘纸板进行预处理,预处理过程如下:

a. 将绝缘纸板加工成直径为 160 mm、厚度为 2 mm 的圆盘状,均匀地放在干燥架上,然后将绝缘纸板和绝缘油按照 20:1 的油纸比例分开放置于真空浸油箱中,在 105℃/50 Pa 的条件下真空干燥 48 h;

b. 将经干燥处理的绝缘纸板连同干燥架一起迅速放入除气干燥的绝缘油中,在 40℃/50 Pa 的条件下真空浸油 48 h。

## 2.2 不同老化状态的油纸绝缘样品制备

为研究样品老化对 PDC 的影响,本次试验中制备了 5 种老化状态的油纸绝缘样品。制备不同老化程度油纸绝缘样品的热老化试验步骤如下:

a. 将预处理后的油纸绝缘样品分成等量的 5 组(每组绝缘油 12 L,绝缘纸板 13 个),分别放入编号为 1、2、3、4、5 的老化钢罐内;

b. 分别在每个老化钢罐中放入适量的铜条,密封后对其进行抽真空、充氮气处理;

c. 1 号老化钢罐用于保存未老化样品,2—5 号老化钢罐分别放入热老化烘箱中,在 130℃ 的条件下进行加速热老化。

在老化 8、21、32、42 d 时,分别将 2、3、4、5 号老化钢罐取出,并在恒温下放置 48 h,然后对 2、3、4、5 号老化钢罐开罐取样,测试其 PDC 图谱。

## 2.3 不同含水量的油纸绝缘样品制备

不同老化程度的油纸绝缘样品也会因为含水量的不同产生不同的介电响应测试结果。因此,本文在不同老化状态的油纸绝缘样品的基础上,对其进行吸潮处理,将其制成预期水分含量为 1%、2%、3% 和 4% 的油纸绝缘样品,从而研究相同水分含量下的不同老化状态对油纸绝缘在时-频域介电响应方面的影响。

具体吸潮实施步骤为:每次试验从相应老化阶段的油纸绝缘样品中取出 3 个样品,将纸板表面的绝缘油擦净以利于吸潮,然后将纸板放置于精密电子天平上,并记录初始质量;计算吸潮到目标水分含量所需质量,打开加湿器,提高空气湿度,观察天平示数,一旦达到目标质量,迅速将纸板放入三电极测量系统中并在 45℃ 下静置 48 h。

# 3 PDC 测试平台简介

## 3.1 三电极测量系统简介

为了完成油浸渍绝缘纸板样品的 PDC 图谱测试,参照国标 GB/T 1410—2006《固体绝缘材料体积电阻率试验方法》<sup>[15]</sup>在实验室制作了一套三电极测试系统,如图 2 所示。三电极系统包括高压电极、测量电极和保护电极;高压电极、测量电极均采用圆柱体结构,直径分别为 141 mm、113 mm,保护电极主要

是为了消除沿面泄漏电流对 PDC 测量结果的影响。3 种电极均采用黄铜材质制成,并通过黄铜接线柱与外部相连。测试时,将制备好的油纸绝缘样品放入高压电极和测量电极之间,高压电极外接一个铜盘,保证纸板与电极接触紧密。为保证每次试验均有较好的重复性,需要除去电极和纸板间的气泡,因此,将整个三电极系统放入一可抽为真空状态的钢罐中。

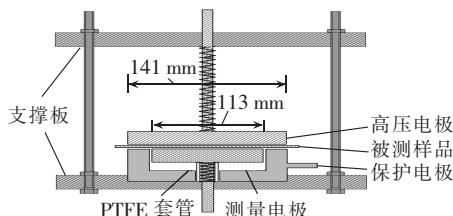


图 2 三电极测试系统

Fig.2 Three-electrode measurement system

## 3.2 DIRANA 介电响应分析仪简介

本文选用奥地利 Omicron 公司生产的 DIRANA 介电响应分析仪进行 PDC 测量。资料<sup>①</sup>中指出,对于油浸式电力变压器,5000~7000 s 的极化/去极化时间即可以充分评估其绝缘状况,因此,本文中油纸绝缘样品的极化/去极化测试时间均为 5000 s,测量电压设置为  $U_0=200\text{ V}$ ,测试温度设置为  $T=45^\circ\text{C}$ 。为了保证 PDC 数据的重复性,本文中的 PDC 数据均测试 3 遍,最后取平均值作为最终的 PDC 测试结果。

# 4 PDC 测试结果及分析

## 4.1 老化对极化电流的影响

图 3 给出了各预期水分含量下不同老化状态的油纸绝缘样品在 45℃ 时的极化电流测试结果。可以看出,除老化 8 d 且预期水分含量为 2% 的油纸绝缘样品测试结果出现异常外,随着热老化时间的增加,各个老化状态下被测油纸绝缘样品的极化电流曲线整体向左上方移动且极化电流尾部逐渐增大。极化电流曲线整体向上方移动,说明绝缘油和绝缘纸板的电导率在不断增加;极化电流曲线整体向左移动,说明油纸绝缘老化所引起的极化响应速度显著加快。文献<sup>[16-18]</sup>得到了类似的结论。

## 4.2 老化对去极化电流的影响

图 4 给出了各预期水分含量下不同老化状态的油纸绝缘样品在 45℃ 时的去极化电流测试结果,可以看出,各预期水分含量下,被测油纸绝缘样品的去极化电流曲线随着热老化时间的增加整体向左上方移动且去极化电流曲线的尾部逐渐增大。热老化时间越长,上述现象越明显。这种去极化电流变化的原因和老化对极化电流影响的原因相同。

现有文献表明<sup>[18]</sup>:由于 PDC 测试结果主要反映

① Alff Engineering. PDC-ANALYSER-1MOD user's guide. 2000.

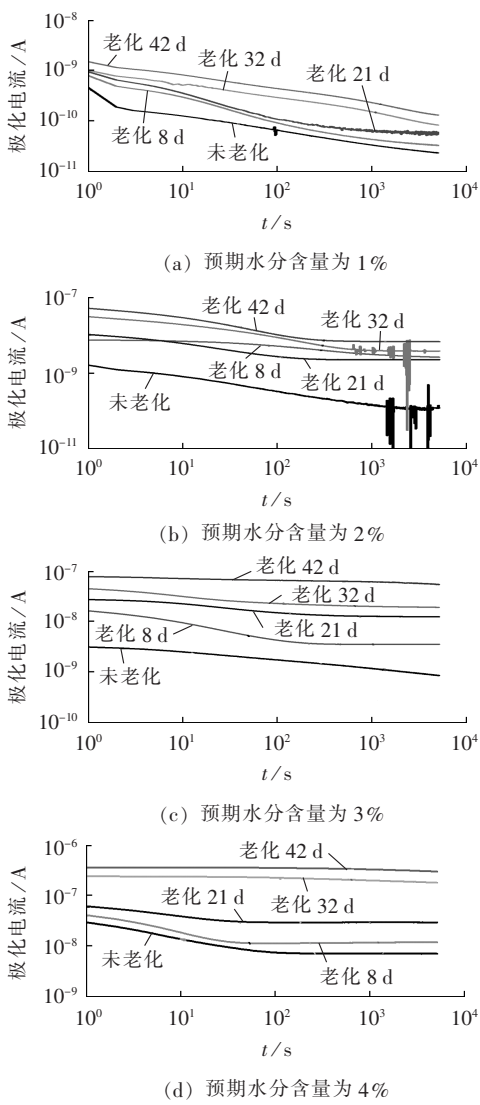


图 3 不同热老化时间油纸绝缘样品的极化电流测量结果

Fig.3 Polarization current measurements of insulation oilpaper specimens for different aging days

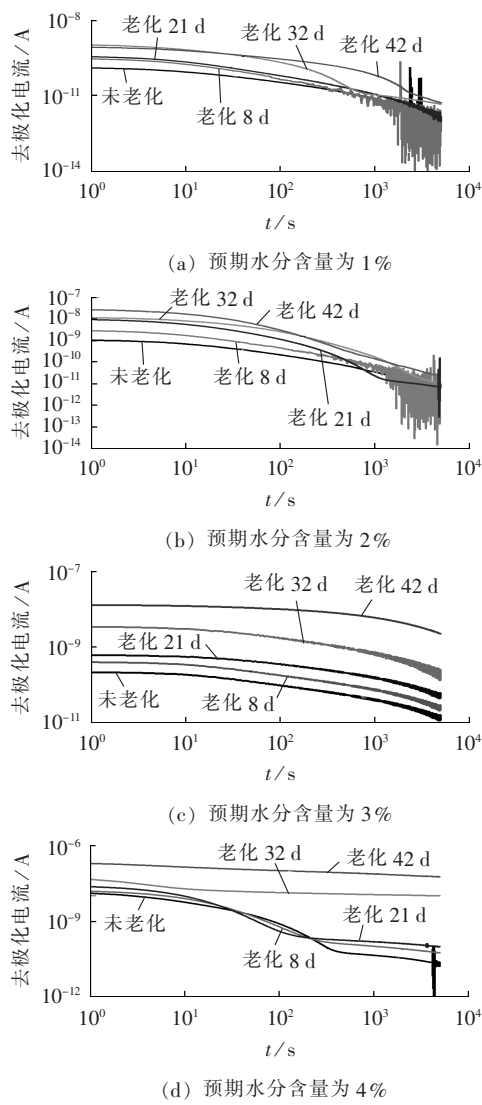


图 4 不同热老化时间油纸绝缘样品的去极化电流测试结果

Fig.4 Depolarization current measurements of insulation oilpaper specimens for different aging days

油纸夹层界面极化及绝缘纸板内的界面极化,而绝缘纸板内的界面极化响应时间一般在 5000 s 以上。由于本文 PDC 测试极化时间恰好为 5000 s,因此,本文认为图 4 所示的去极化电流主要是由油纸绝缘夹层界面与纸板内部偶极子极化共同引起的。

5 应用扩展 Debye 模型大时间常数量化固体绝缘的老化状态

变压器的主绝缘系统由绝缘纸筒、油道以及支撑条构成。图 5 给出了双绕组变压器的主绝缘结构示意图(三绕组变压器的主绝缘结构与双绕组变压器类似,这里不再赘述)。Jonscher 指出<sup>[19]</sup>,组合电介质的松弛极化可以采用一组包含  $n$  个松弛元素的指数函数之和来表示,对应电路模型上就是  $n$  个 RC 串联支路的并联。根据此原理,

T. K. Saha 等<sup>[20]</sup>将变压器油纸绝缘结构作为一个整体,把等效电路中的电阻、电容进行简化,得到了如图 6 所示的扩展 Debye 等效模型。图中,  $R_0$ 、 $C_0$  分别为油纸绝缘系统的绝缘电阻和几何电容;  $R_i$ 、 $C_i$  分别为第  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 条支路的电阻和电容值。

下文将对变压器油纸绝缘样品的 PDC 测试结果进行多项指数拟合,获得其扩展 Debye 电路模型参数,并研究油纸绝缘样品的绝缘尺寸与老化对扩展 Debye 电路模型大时间常数的影响。

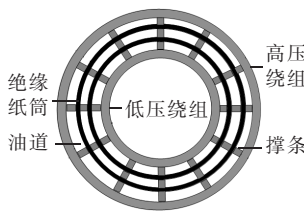


图 5 双绕组变压器的主绝缘结构

Fig.5 Main insulation structure of dual-winding transformer

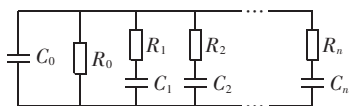


图 6 扩展 Debye 电路模型  
Fig.6 Extended Debye model

5.1 绝缘尺寸对大时间常数的影响

目前,如何量化油纸绝缘老化,特别是固体绝缘的老化对 PDC 特性的影响成为了国内外专家学者的研究热点<sup>[21-23]</sup>。

借鉴文献<sup>[22-23]</sup>的研究成果并参考文献<sup>[23]</sup>中系统极点的表示方法,扩展 Debye 电路模型时间常数可表示为:

$$\begin{cases} R_i = \rho_i L / S \\ C_i = \epsilon_0 \epsilon_r^i S / L \end{cases} \Rightarrow \tau_i = R_i C_i = \rho_i \epsilon_0 \epsilon_r^i \quad i=1,2,\cdots,n \quad (1)$$

其中, $i$  代表油纸绝缘中不同类型的偶极子组; $n$  为偶极子组个数,通常  $n < 10$ ;  $\tau_i$  为第  $i$  个偶极子组的时间常数,该参量反映了不同的偶极子组的弛豫特性;  $R_i$  为第  $i$  个偶极子组的绝缘电阻;  $C_i$  为第  $i$  个偶极子组的电容;  $S$  为样品的有效截面积;  $L$  为样品的有效厚度;  $\rho_i$  为第  $i$  个偶极子组的电阻率;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $\epsilon_r^i$  为第  $i$  个偶极子组的相对介电常数。  $\rho_i$  和  $\epsilon_r^i$  与样品的绝缘尺寸无关,因此,扩展 Debye 模型各支路的时间常数  $\tau_i$  与样品的绝缘尺寸无关。

研究表明<sup>[20,24-28]</sup>,PDC 的初始测量结果与绝缘油的状态存在相关性(该部分可用扩展 Debye 模型的小时间常数拟合),而 PDC 末期的测量结果反映了固体绝缘的状态(该部分可用扩展 Debye 模型的大时间常数拟合)。因此,本文采用扩展 Debye 模型的最大时间常数  $\tau_{\max1}$  和次最大时间常数  $\tau_{\max2}$  评估变压器固体绝缘的老化状态,其定义如式(2)所示。

$$\begin{cases} \tau_{\max1} = R_{\max1} C_{\max1} = \rho_{\max1} \epsilon_0 \epsilon_r^{\max1} \\ \tau_{\max2} = R_{\max2} C_{\max2} = \rho_{\max2} \epsilon_0 \epsilon_r^{\max2} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $C_{\max1}$ 、 $R_{\max1}$ 、 $\rho_{\max1}$ 、 $\epsilon_r^{\max1}$  分别为最大时间常数分支的电容、电阻、电阻率和相对介电常数;  $C_{\max2}$ 、 $R_{\max2}$ 、 $\rho_{\max2}$  和  $\epsilon_r^{\max2}$  分别为次最大时间常数分支的电容、电阻、电阻率和相对介电常数。

5.2 老化对大时间常数的影响

图 7 给出了相同水分含量下,最大和次最大时间常数随热老化时间增加的变化规律。可以看出,纸板老化导致了最大和次最大时间常数增大。

由电路原理的基本知识可知,时间常数表征了 RC 电路电容电流的衰减速度,该参量表明偶极子电容的放电电压以及放电电流共有的指数衰减因子  $e^{-t/(RC)}$  衰减至其初始值的  $1/e$  所需要的时间。反映绝缘纸或纸板老化的偶极子组的最大和次最大时间常数越大,PDC 越大。

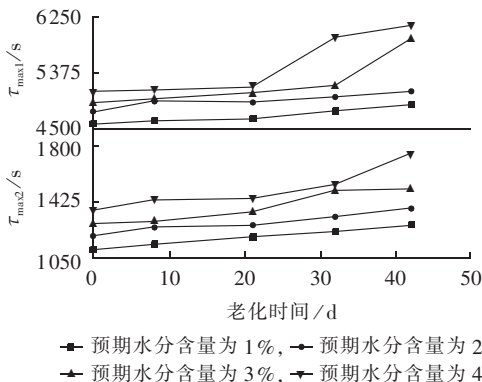


图 7 不同老化时间下最大和次最大时间常数变化规律  
Fig.7 Curves of  $\tau_{\max1}$  and  $\tau_{\max2}$  vs. aging time

上述计算结果表明:状态较差的绝缘纸和纸板会增加大时间常数的值,从而使 PDC 曲线末端部分的幅值增大;相反,绝缘状态较好的绝缘纸或纸板会使大时间常数减小,从而使 PDC 曲线末端部分的幅值减小。文献<sup>[22,26]</sup>也得到了类似结论。

5.3 大时间常数与聚合度之间的量化关系

图 8 为最大和次最大时间常数分别与绝缘纸板聚合度之间的拟合关系,可以发现,对于各个水分梯度相同的绝缘纸板样品,随着绝缘纸板聚合度的减小,其最大和次最大时间常数呈现逐渐增大的趋势。

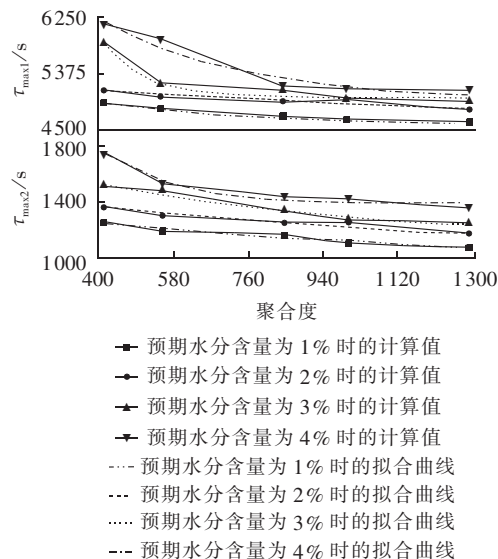


图 8 最大和次最大时间常数与聚合度的关系  
Fig.8 Curves of  $\tau_{\max1}$  and  $\tau_{\max2}$  vs. DP

通过拟合最大和次最大时间常数分别与绝缘纸板聚合度之间的关系可以发现,对于各个水分含量近似的油纸绝缘样品,其最大和次最大时间常数与油纸绝缘的聚合度有较强的指数关系,如表 1 与表 2 所示(表中  $D_p$  为聚合度)。可以看出,除预期水分含量为 2% 的油纸绝缘样品外(拟合优度只有 0.80),其余 3 种预期水分含量下,指数关系拟合优度均达到了 0.92 以上。

表 1 最大时间常数与聚合度之间的拟合关系  
Table 1 Fitting function of  $\tau_{\max 1}$  with DP

| 预期水分含量 / % | 拟合方程                                                    | 拟合优度 |
|------------|---------------------------------------------------------|------|
| 1          | $\tau_{\max 1}=4548.317+932.157 \exp (-0.0024 D_p)$     | 0.99 |
| 2          | $\tau_{\max 1}=-33049.599+38257.396 \exp (-8.0977 D_p)$ | 0.80 |
| 3          | $\tau_{\max 1}=4984.090+48336.764 \exp (-0.0098 D_p)$   | 0.96 |
| 4          | $\tau_{\max 1}=4934.992+4360.154 \exp (-0.0030 D_p)$    | 0.91 |

表 2 次最大时间常数与聚合度之间的拟合关系  
Table 2 Fitting function of  $\tau_{\max 2}$  with DP

| 预期水分含量 / % | 拟合方程                                                 | 拟合优度 |
|------------|------------------------------------------------------|------|
| 1          | $\tau_{\max 2}=852.655+506.382 \exp (-0.0007 D_p)$   | 0.92 |
| 2          | $\tau_{\max 2}=1028.678+482.556 \exp (-0.0010 D_p)$  | 0.96 |
| 3          | $\tau_{\max 2}=1126.325+728.836 \exp (-0.0015 D_p)$  | 0.93 |
| 4          | $\tau_{\max 2}=1381.403+4040.509 \exp (-0.0059 D_p)$ | 0.95 |

6 结论

本文在实验室通过加速热老化及吸潮试验制备了不同老化状态和水分含量的油纸绝缘样品;测试了上述油纸绝缘样品的 PDC 图谱并深入研究了 PDC 图谱的变化规律;借助扩展 Debye 电路模型拟合了 PDC 图谱并获取了模型参数,并借鉴系统极点方法提出了时域介电特征量——扩展 Debye 模型大时间常数;最后,深入分析了扩展 Debye 模型大时间常数分别与固体绝缘尺寸及聚合度间的关系,结论如下。

a. 随着热老化时间的增加,绝缘油和绝缘纸板的电导率不断增加,导致被测油纸绝缘样品的 PDC 曲线整体向左上方移动且 PDC 曲线尾部逐渐增大。

b. 偶极子组电阻率  $\rho_i$ 、真空介电常数  $\epsilon_0$ 、偶极子组相对介电常数  $\epsilon_i^r$  均与绝缘尺寸无关。因此,扩展 Debye 模型各支路的时间常数  $\tau_i$  与绝缘尺寸无关。

c. 随着热老化时间的增加,对于各水分含量下的油纸绝缘样品,其最大和次最大时间常数随绝缘纸板聚合度的减小呈逐渐减增大的趋势,即绝缘纸板的聚合度与最大和次最大时间常数存在负相关性。

d. 对于各个水分含量近似的油纸绝缘样品,通过拟合最大和次最大时间常数分别与绝缘纸板聚合度之间的关系发现,其最大和次最大时间常数分别与绝缘纸板聚合度遵循良好的指数关系。通过该指数关系可以量化固体绝缘的老化状态。

参考文献:

[1] 廖瑞金,刘捷丰,杨丽君,等. 电力变压器油纸绝缘状态评估的频域介电特征参量研究[J]. 电工技术学报,2015,30(6):247-254.  
LIAO Ruijin,LIU Jiefeng,YANG Lijun,et al. Investigation on frequency domain dielectric characteristics for condition assessment of transformer oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(6):247-254.

[2] LIAO Ruijin,LIU Jiefeng,YANG Lijun,et al. Understanding and analysis on frequency dielectric parameter for quantitative diagnosis of moisture content in paper-oil insulation system[J].

IET Electric Power Applications,2015,9(3):213-222.

[3] 杨丽君,廖瑞金,孙会刚,等. 变压器油纸绝缘热老化特性及特征量研究[J]. 电工技术学报,2009,24(8):28-33.  
YANG Lijun,LIAO Ruijin,SUN Huigang,et al. Investigation on properties and characteristics of oil-paper insulation in transformer during thermal degradation process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(8):28-33.

[4] 廖瑞金,刘骁,刘捷丰,等. 现场变压器油纸绝缘的时频域介电特征量提取及状态评估[J]. 电力系统自动化,2015,39(5):94-100.  
LIAO Ruijin,LIAO Xiao,LIU Jiefeng,et al. Extraction of time and frequency domain dielectric characteristics and condition assessment for field transformer oil-paper insulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(5):94-100.

[5] 蔡金锭,黄云程. 基于灰色关联诊断模型的电力变压器绝缘老化研究[J]. 高电压技术,2015,41(10):3296-3301.  
CAI Jinding,HUANG Yuncheng. Study on insulation aging of power transformer based on gray relational diagnostic model[J]. High Voltage Engineering,2015,41(10):3296-3301.

[6] LIAO Ruijin,LIU Jiefeng,YANG Lijun,et al. Quantitative analysis of insulation condition of oil-paper insulation based on frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(1):322-334.

[7] 黄云程,蔡金锭. 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 Yuncheng,CAI Jinding. Return voltage function modeling and topology recognition of oil-paper insulation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):149-153.

[8] SETAYESHMEHR A,FOFANA I,EICHLER C,et al. Dielectric spectroscopic measurements on transformer oil-paper insulation under controlled laboratory conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(4):1100-1111.

[9] 王林,周利军,李先浪,等. 应用极化/去极化电流法分析油纸绝缘微水扩散暂态过程[J]. 高电压技术,2013,39(2):354-359.  
WANG Lin,ZHOU Lijun,LI Xianlang,et al. Analysis of transient moisture diffusion in oil-paper insulation using polarization and depolarization current method[J]. High Voltage Engineering,2013,39(2):354-359.

[10] LEIBFRIED T,KACHLER A K. Insulation diagnostics on power transformers using the Polarisation and Depolarisation Current (PDC) analysis[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation 2002. Bosto,USA:IEEE,2002:170-173.

[11] EKANAYAKE C,GUBANSKI S M,GRACZKOWSKI A,et al. Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(3):1309-1317.

[12] JADAV R B,EKANAYAKE C,SAHA T K. Understanding the impact of moisture and ageing of transformer insulation on frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(1):369-379.

[13] 杨丽君,齐超亮,邓帮飞,等. 采用修正 Cole-Cole 模型提取油纸绝缘频域介电谱的特征参量方法[J]. 高电压技术,2013,39(2):310-317.  
YANG Lijun,QI Chaoliang,DENG Bangfei,et al. Application of modified cole-cole model to extract characteristics of frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering,2013,39(2):310-317.

[14] 中国南方电网责任有限公司. 电力设备预防性试验规程:DL/T 596—2005[S]. 北京:中国电力出版社,2005.

[15] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 固体绝缘材料体积电阻率试验方法:GB/T 1410—

- 2006[S]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [16] WANG S Q,ZHANG G J,WEI J L,et al. Investigation on dielectric response characteristics of thermally aged insulating pressboard in vacuum and oil-impregnated ambient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(6):1853-1862.
- [17] 魏建林. 变压器油浸纸绝缘热老化的介电响应特性及特征参量研究[D]. 西安:西安交通大学,2011.
- WEI Jianlin. Investigation on dielectric response and characteristics of the thermal aging in transformer oil-impregnated paper insulation[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2011.
- [18] 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.
- [19] JONSCHER A K. Dielectric relaxation in solids [M]. London, UK:Chelsea Dielectric Press,1983:62-96.
- [20] SAHA T K,PURKAIT P,MÜLLER 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.
- [21] LIAO Ruijin,HAO Jian,CHEN G,et al. Quantitative analysis ageing status of natural ester-paper insulation and mineral oil-paper insulation by polarization/depolarization current[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012,19(1):188-199.
- [22] FOFANA I,HEMMATJOU H,MEGHNEFI F,et al. On the frequency domain dielectric response of oil-paper insulation at low temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(3):799-807.
- [23] HADJADJ Y,MEGHNEFI F,FOFANA I,et al. On the feasibility of using poles computed from frequency domain spectroscopy to assess oil impregnated paper insulation conditions [J]. Energies, 2013,6(4):2204-2220.
- [24] FOFANA I,HEMMATJOU H,MEGHNEFI F,et al. Low temperature and moisture effects on polarization and depolarization currents of oil-paper insulation [J]. Electric Power Systems Research,2010,80(1):91-97.
- [25] 张军强. 基于极化去极化电流检测的油纸绝缘状态研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
- ZHANG Junqiang. The study of oil-paper insulation based on polarization and depolarization current detection[D]. Beijing: North China Electric Power University,2013.
- [26] 唐盼. 基于极化去极化电流法的变压器油纸绝缘状态研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
- TANG Pan. Study of oil-paper insulated transformer's aging state based on PDC method [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2013.
- [27] 贡春艳. 极化去极化电流法和回复电压法融合的油纸绝缘老化状态评估[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- GONG Chunyan. Condition evaluation method of transformer oil-paper insulation based on fusion of PDC and RVM [D]. Chongqing:Chongqing University,2013.
- [28] 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.

#### 作者简介:



刘捷丰

刘捷丰(1985—),男,河北衡水人,工程师,博士,主要研究方向为大型油浸式变压器绝缘在线监测与故障诊断 (E-mail: liujiefeng9999@163.com);

张懿议(1986—),男,广西崇左人,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为电气设备绝缘在线监测与故障诊断 (E-mail: yiyizhang@gxu.edu.cn)。

## Quantitative relationship between aging condition of transformer oil-paper insulation and large time constant of extend Debye model

LIU Jiefeng<sup>1,2</sup>,ZHANG Yiyi<sup>2</sup>,XU Jianjian<sup>3</sup>,JIA Rui<sup>1</sup>,ZHANG Guanjuan<sup>4</sup>,LIU Liwei<sup>1</sup>

(1. Shijiazhuang Power Supply Bureau of State Grid Hebei Electric Power Corporation, Shijiazhuang 050000, China;  
2. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 510080, China;  
3. Hebei Electric Power Dispatching and Control Center, Shijiazhuang 050021, China;  
4. Jining Power Supply Bureau of State Grid Shandong Electric Power Corporation, Jining 272100, China)

**Abstract:** Since how to quantify the aging condition of transformer oil-paper insulation by PDC(Polarization and Depolarization Current) method needs further research,several oil-paper insulation specimens with different aging conditions and different moisture contents are prepared by a series of accelerated thermal aging and moisture absorption experiments,and their PDC diagrams are measured. The extended Debye model is adopted to fit the PDC diagram and the model parameters are obtained. The influence of oil-paper aging on the model parameters is studied,and the time-domain dielectric characteristic parameter,i.e. the large time constant of extend Debye model is proposed to quantify the aging condition of transformer pressboards. Results of research show that,there is better exponential relationship between the large time constant of extend Debye model and DP(Degree of Polymerization) and the large time constant is immune to the insulation size.

**Key words:** power transformers; oil-paper insulation; polarization/depolarization current; extend Debye model; large time constant; quantitative evaluation