

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.017

变压器油和绝缘纸老化对扩展Debye模型参数的影响研究

宋臻杰, 杨飞豹, 吴广宁, 高 波

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 为研究变压器油和绝缘纸老化对扩展Debye模型参数的影响, 以及确定变压器油换油时间, 首先在实验室条件下对油纸绝缘试样进行130 °C加速老化试验和PDC试验, 然后建立不同试样相对应的扩展Debye模型, 深入研究变压器油和绝缘纸老化时扩展Debye模型支路参数的变化规律, 最后提出用中间时间常数分支电容变化率作为变压器的换油阈值。结果表明: 变压器油主要影响扩展Debye模型时间常数小于500 s的支路参数, 随着变压器油老化天数增加, 油老化产物会增加油中偶极子组的转向极化及油纸界面极化, 去极化电流起始部分幅值增大, 较小时间常数支路电阻变小, 电容变大; 绝缘纸主要影响扩展Debye模型时间常数大于500 s的支路参数, 随着绝缘纸老化天数增加, 纸老化产物仅会增加纸内总体极化强度, 去极化电流曲线末端升高, 较大时间常数支路电阻变小, 电容变大; 扩展Debye模型中间时间常数支路电容变化率可作为换油阈值, 当电容变化率大于0.36%时变压器油介损值达到4.0%, 此时应进行换油处理。

关键词: 油纸绝缘; 扩展Debye模型; 去极化电流; 油纸界面极化; 时间常数; 电容变化率

Aging Effects of Transformer Oil and Insulation Paper on Extended Debye Model Parameters

SONG Zhenjie, YANG Feibao, WU Guangning, GAO Bo

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To investigate the aging effects of transformer oil and insulation paper on the extended Debye model parameters and determine oil change time, accelerated aging experiment at 130 °C and PDC test on oil-paper insulation samples were carried out in laboratory. Then corresponding extended Debye models corresponding to every sample were established, and the changing rules of those models' branch parameters with aging of transformer oil and insulation paper were analyzed, respectively. It is suggested that the capacitance variation rate of intermediate time constant branch be taken as a threshold for changing transformer oil. It is demonstrated that: 1) Transformer oil mainly influences the branch parameters with time constant less than 500 s, oil aging products will increase steering polarization of dipoles in oil and oil-paper interface polarization, the initial part amplitude of depolarizing current rises, the resistance of smaller time constant branch decreases while the capacitance increases; 2) Insulation paper mainly influences branch parameters with time constant larger than 500 s, paper aging products only enhance the overall polarization in paper with aging time increasing, the end of depolarizing current curve rises, the branch resistance with larger time constant decreases while the capacitance increases; and 3) The capacitance variation rate of intermediate time constant branch of extended Debye model can be taken as a threshold for changing oil. When capacitance change rate rises over 0.36% and dielectric loss of transformer oil reaches 4.0%, oil should be changed.

Key words: oil-paper insulation; extended Debye model; depolarizing current; oil-paper interface polarization; time constant; capacitance variation rate

0 引言

随着现代电力系统的发展,电网的特点呈现大机组、跨区域、高电压的趋势,作为电力系统枢纽的电力变压器是电网中不可或缺的设备之一,其连续、可靠运行与否关系到整个电网供电可靠性^[1-2]。变压器故障不仅会导致自身失效,也会对电力输送造成影响^[3-4]。当前高压、超高压输电系统中,油浸式变压器占了绝大部分的比重,其内部油纸绝缘结构会随着变压器运行时间增加而老化,导致变压器电气、机械等性能大幅下降^[5]。由于绕组的性能基本不变,电力变压器的寿命主要由油纸绝缘性能决定^[6]。因此,研究变压器油和绝缘纸老化对油纸绝缘时域介电特性的影响十分必要。以往检测油纸绝缘老化程度一般采用油色谱分析、局部放电检测、油纸老化产物含量分析及绝缘纸聚合度分析方法^[7-9],但是上述方法存在吊芯复杂、受现场干扰影响大等缺点^[10]。研究发现,油纸绝缘的介电特性可用等效电路模型进行仿真^[11],油纸绝缘等效模型主要有扩展 Debye 模型、Cole-Cole 弛豫模型^[12]。文[13]中对油纸绝缘模型进行变温实验,研究温度对油纸绝缘时域介电特性及其特征参量影响;文[14]中通过扩展 Debye 模型仿真了油纸绝缘的频域介电谱特性;文[15]中研究扩展 Debye 模型参数受温度的影响规律。但目前的研究都集中在求取模型参数方法以及温度、水分对模型参数变化规律上,对于绝缘纸和变压器油老化对扩展 Debye 模型参数的影响规律,以及用 Debye 模型参数变化率去确定变压器换油操作时间的研究鲜有报道。

笔者通过对油纸绝缘试样进行 130 °C 加速老化试验,得到变压器油、绝缘纸老化 7、18、29 天的 6 组试样。在对上述试样和对照组进行 PDC 试验并建立扩展 Debye 模型基础上,研究油纸绝缘和扩展 Debye 模型支路的对应关系,并用极化理论解释参数变化规律,最后采用试验得出变压器的换油阈值。

1 变压器油纸绝缘等效模型

1.1 扩展 Debye 模型

变压器油纸绝缘加上直流电压瞬间,试样中会流过两种电流,一种是由于试样本身载流子移动的电导电流;另外一种是由于偶极子转向极化产生的极化电流。在电场存在下,油纸绝缘中偶极子会发生转向极化,产生极化电流;当电场被移走时,已经转向一致的偶极子又会回复到起始的无序状态。因此,极化和去极化过程可用一个耗能元件 R 和储能元

件 C 串联的电路去模拟。由于变压器油纸绝缘结构是复合电介质结构,油纸中不同部位的偶极子转向与回复时间有所不同,油纸绝缘的介电性能要用多组串联 RC 电路组成的扩展 Debye 模型去等效^[16-17],见图 1。

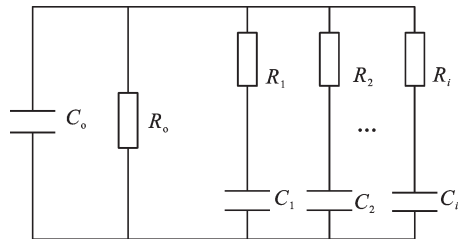


图 1 油纸绝缘扩展 Debye 模型

Fig. 1 Extended Debye model for oil-paper insulation

图 1 中: R_0 为绝缘电阻,反映油纸绝缘的电导情况; C_0 为几何电容; R_i 、 C_i 模拟了不同弛豫时间下的介质极化现象^[17]。

1.2 模型参数确定

扩展 Debye 模型的几何电容 C_0 在变压器运行中几乎不会发生变化,可以通过电容测量仪测量^[17],文中对于扩展 Debye 模型串联支路参数求解采用文[18]中的参数辨识方法,其根据极化/去极化电流曲线求解模型参数,极化/去极化电流见图 2。绝缘电阻值 R_0 可根据式(1)计算得到,其余 RC 串联支路参数可由式(2)–(4)求得^[18]。

$$R_0 = \frac{U_0}{i_p(t_p) - i_d(t_p)}; \quad (1)$$

$$i_d = - \sum_{i=1}^n [A_i \cdot e^{(-t/\tau_i)}]; \quad (2)$$

$$A_i = U_0 \cdot \frac{1 - e^{(-t_p/\tau_i)}}{R_i}; \quad (3)$$

$$\tau_i = R_i \cdot C_{i0}. \quad (4)$$

式(1)–(4)中: U_0 为施加的直流电压; i_p 为极化电流; i_d 为去极化电流; t_p 为测量的最大时间; R_i 和 C_i 分别为第 i 条支路电阻和电容; τ_i 为第 i 条支路时间常数。

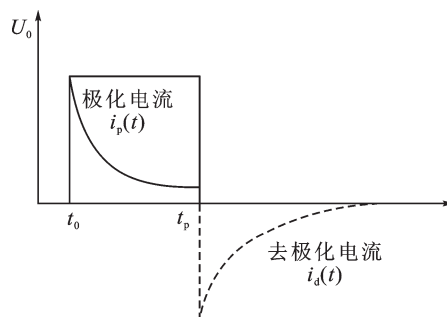


图 2 极化/去极化电流曲线

Fig. 2 Polarization/depolarization current curve

关于模型支路数的确定,多数文献都采用6条支路,但在讨论支路参数分类时多将其分为3类,较大时间常数支路、中间时间常数支路和较小时间常数支路。基于对应规律的明显性文中统一采用3条支路拟合去极化电流。模型支路按时间常数从小到大分布,即 $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ 。每个试样模型有3条衰减的指数函数组成,分别对应扩展 Debye 模型3条串联支路。

2 试品制备及试验

文中选用如图3所示的油纸绝缘试样,该试样选取0.2 mm厚普通纤维素绝缘纸和25号变压器油,老化样品在试验前全部进行预处理,具体步骤见图4。老化终点为29天,此时试样的聚合度已经下降到绝缘寿命终点^[5]。

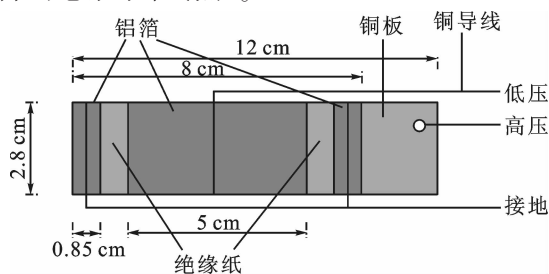


图3 油纸绝缘绕组试品

Fig. 3 Oil-paper insulation sample

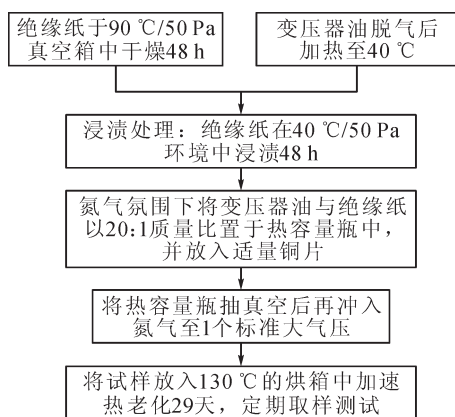


图4 油纸绝缘热老化流程

Fig. 4 Thermal aging flowchart of oil-paper insulation

将试样分为4组,分别在130℃下老化0、7、18、29天,定义状态量 $P_i O_j$ 表示油纸绝缘试样的组合情况。其中, $i=0,1,2,3$ 分别表示绝缘纸的老化天数为0、7、18、29天; $j=0,1,2,3$ 分别表示变压器油的老化天数为0、7、18、29天。

PDC测试开始前,将老化后试样的变压器油和绝缘纸分离,分别与未老化的绝缘纸和变压器油组成新的油纸绝缘试样,依次编号为 $P_1 O_0, P_2 O_0, P_3 O_0$ 和 $P_0 O_1, P_0 O_2, P_0 O_3$,并设置对照组 $P_0 O_0$;新的油纸绝

缘试样在PDC试验前要进行图4浸渍处理,浸渍处理不仅能在换油/换纸后使新的试样混合均匀,还能稀释残留在绝缘纸中的老化绝缘油的影响。文中老化试验在130℃下进行,故认为图4温度下的浸渍处理对试验结果的影响可以忽略。

文中试验设备为PDC-Analyser-1MOD极化/去极化电流测试仪,测量分辨率1 pA,数据记录分辨率0.1 pA。极化时的直流电压为500 V,测试时间为10 000 s。

分析讨论变压器油老化对模型参数影响时,选择 $P_0 O_1, P_0 O_2, P_0 O_3$ 和对照组 $P_0 O_0$;分析讨论绝缘纸老化模型参数影响时,选择 $P_1 O_0, P_2 O_0, P_3 O_0$ 和对照组 $P_0 O_0$ 。

3 结果与分析

3.1 变压器油老化对 Debye 模型参数影响

不同老化天数绝缘油组成的油纸绝缘试样去极化电流见图5,相应 Debye 模型参数变化见图6。

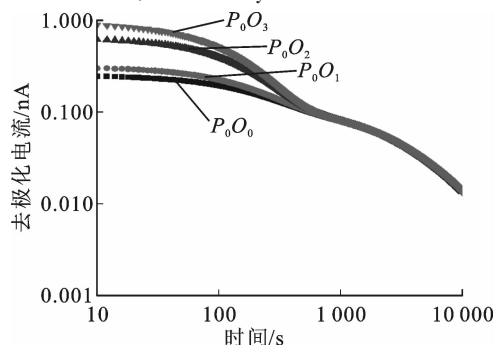


图5 油纸绝缘试样 $P_0 O_i$ 的去极化电流

Fig. 5 Depolarizing current of oil-paper insulation samples $P_0 O_i$

从图5可以看出,随着变压器油老化程度的增加,去极化电流起始部分幅值会增大,500 s以内的电流幅值明显上移;去极化电流曲线中部相差不是很大,尾端几乎重合。这是因为变压器油相对绝缘纸分子相对分子质量小,分布于油中的偶极子组转向极化完成时间短,对应时间常数较小的支路。

3.1.1 模型电阻 R_i 变化

从图6(a)可以看出,随着变压器油老化天数增加,绝缘电阻 R_0 和支路电阻 R_1 下降较为明显, R_2 略有下降,而 R_3 几乎不变。变压器油在老化过程中会发生氧化反应,生成醇、酸等氧化产物及酸性化合物,同时生成少量的低分子烃及CO、CO₂等气体。这些老化产物多为极性,增大了试样的电导率和极化强度,导致试样的绝缘状态下降,所以表征试样电导绝缘状况的绝缘电阻 R_0 和表征极化绝缘状况的 R_i 也下降。 R_1 下降最明显可以用前面油的情况

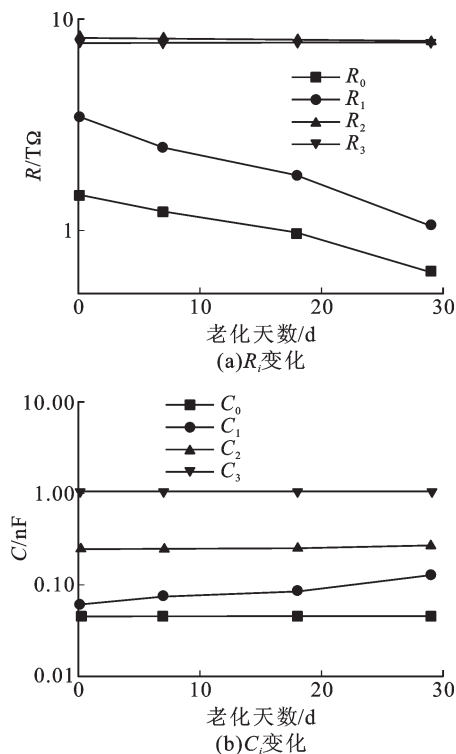


图6 变压器油单独老化支路电阻和电容变化

Fig. 6 Variation of slip resistance and capacitance with transformer oil aging alone

影响较小时间常数支路解释, R_2 的下降可用油纸界面极化去解释: 当油老化程度增加时, 油老化产物含量增加, 不仅增强了油中偶极子的转向极化, 油老化产物还扩散到纸中和绝缘纸中的偶极子组形成油纸界面极化, 由此可以得出, 中间时间常数表征了油纸界面极化; 对于 R_3 在油老化过程中并未发生变化, 文中认为其值和纸的绝缘状况有关。

3.1.2 模型电容 C_i 变化

从图 6(b) 中可以看出, 随着油老化天数的增加, 只有 C_1 明显上升, C_2 在老化前期变化不大, 老化后期略微上升, 几何电容 C_0 和 C_3 几乎不变。油老化并未改变试样的几何结构, 故 C_0 不变; C_1 表征了油中偶极子组的转向极化强度, 油老化产物会增强油中转向极化强度; C_2 表征了油纸绝缘间界面极化的作用强度, C_2 先不变上升说明了只有当油的老化达到一定程度时界面极化才会有较明显的增强; C_3 变化解释同 3.1.1 节 R_3 。

3.2 绝缘纸老化对于 Debye 模型参数影响

不同老化天数绝缘纸组成的油纸绝缘试样去极化电流见图 7, 相应 Debye 模型参数变化见图 8。

从图 7 可以看出, 随着绝缘纸老化程度的增加, 油纸绝缘去极化电流尾端幅值会增大, 500 s 以后的去极化电流变化很明显, 500 s 以前曲线几乎重合。这是因为绝缘纸是由纤维素长链分子构成,

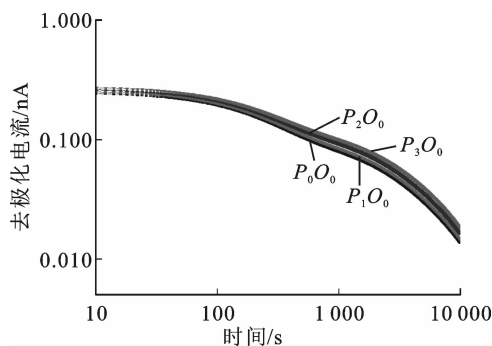
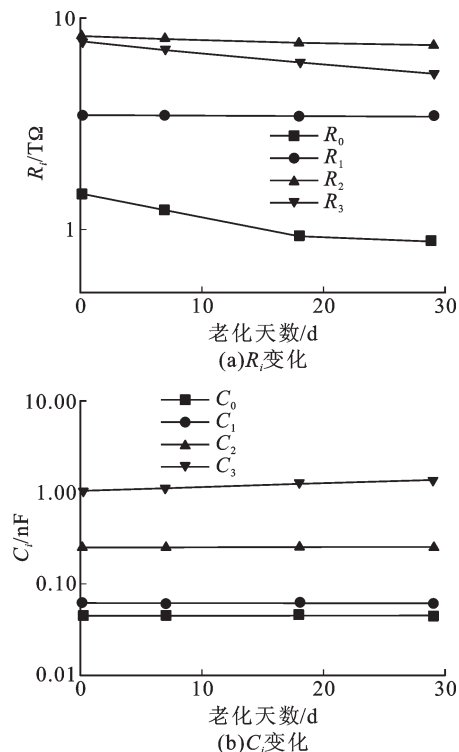
图7 油纸绝缘试样 P_iO_0 的去极化电流Fig. 7 Depolarizing current of oil-paper insulation samples P_iO_0 

图8 绝缘纸单独老化时支路电阻和电容变化

Fig. 8 Variation of slip resistance and capacitance with insulation paper aging alone

相对分子质量较大, 分布其中的偶极子组转向极化较油中偶极子组转向极化困难, 极化完成时间长。对应模型中时间常数较大的支路。

3.2.1 模型电阻 R_i 变化

从图 8(a) 中可以看出, 随着绝缘纸老化天数的增加, 绝缘电阻 R_0 和极化电阻 R_3 下降较为明显, R_1 和 R_2 几乎不变。绝缘纸在老化过程中会发生水解、热解和氧化降解等化学反应, 纤维素链发生断裂生成水分、低分子酸、糠醛等极性物质, 极性物质的存在会增强纸内极化电流和电导电流, 造成试样整体绝缘状况下降, 故 R_0 和 R_3 下降明显; 和油老化不同的是, 纸老化产物扩散速度小, 其产物多在纸内部集聚, 产生纸内界面极化而不是油纸间的界面

极化, 纸内整体极化强度得到增强, 表征纸绝缘强度的 R_3 下降而表征油纸界面极化的 R_2 几乎不变。

3.2.2 模型电容 C_i 变化

从图 8(b)可以看出, 串联 RC 支路电容 C_1 有较为明显的增幅, C_0 和 C_1 、 C_2 几乎不变。由于纸老化也并未改变试样的几何结构故 C_0 不变; 而纸老化产物增强了纸的整体极化强度而并未增加油纸间界面极化, 故 C_3 上升明显而 C_1 、 C_2 不发生变化。

4 确定换油阈值

4.1 电容变化率

由文中第 3 章可知, 油纸绝缘在老化过程中会产生极性老化产物, 使得油纸绝缘的电导率和极化强度增加, 去极化电流幅值增大。为了保证变压器油纸绝缘强度保持在较稳定水平, 相关部门需对变压器油进行换油处理^[9]。换油后变压器油纸绝缘的时域介电性能发生了改变, 绝缘性能得到一定程度回复。但是在实际运行过程中, 变压器油因为环境、负荷等因素的不同老化速率不同, 更换变压器油的时间难以确定。

由第 3 章分析可得, 中间时间常数分支电容值可表征油纸绝缘油纸界面极化强度, 换油指标中容易超标的一般是油中微水含量和油介损两项, 但是微水含量在短时内波动明显, 不宜作为换油阈值; 笔者认为油介损达到 4.0% 时为换油时刻, 通过建立油纸界面极化强度和变压器油介损间的联系来确定换油时刻^[19-20]。定义中间时间常数电容变化率为

$$\theta_i = \frac{C_2^{i+1} - C_2^i}{C_2^i \cdot \Delta T_i} \quad i=0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

式(5)中: θ_i 是电容变化率, F/d 。 C_2^{i+1} 和 C_2^i 分别是间隔 PDC 试验对应 Debye 模型支路电容 C_2 ; ΔT_i 是第 i 次和第 $i+1$ 次 PDC 试验的间隔天数。

4.2 试验过程

为了避免试样模型选择导致阈值精确性, 文中采用图 3 和另外两种不同的试样模型, 分别标为 S_1 、 S_2 、 S_3 , 出于篇幅考虑不列出 S_2 、 S_3 试样示意图, 试验流程图见图 9。需说明的是从图 6(b) C_2 变化情况知试样油纸界面极化产生于老化 8~20 天, 为节省油样和时间, 文中只对老化 8~20 天的试样进行介损试验。

4.3 试验结果

电容变化率见图 10, 试验的介损变化见图 11。从图 10 可以看到, 电容变化率随测量间隔次数的增加呈现先上升后下降的变化趋势, 3 组试样虽然

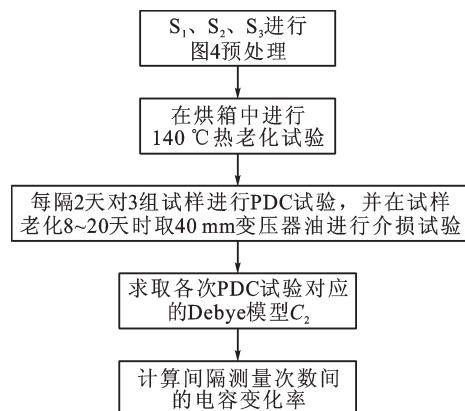


图 9 换油阈值确定试验流程

Fig. 9 Process of oil change threshold determination test

到达峰值的时间有所差异, 但是电容变化率的峰值相差不大; 且电容变化率在老化初期值较小, 波动平稳, 这是因为老化初期试样的整体绝缘状态良好; 在老化的中期, 电容变化率急剧上升, 此时油中老化产物扩散到纸中, 形成油纸界面极化, 使试样绝缘状况迅速下降; 电容变化率达到峰值后这种绝缘高速恶化情况会持续一段时间, 到老化末期, 电容变化率会突然下降, 此时并非是试样绝缘情况得到改善, 而是试样的绝缘寿命到达晚期, 绝缘劣化裕度变小, 对应变压器绝缘失效阶段。从上述分析可知, 油纸界面极化增加速率有个最大值, 虽然不同试样的电容变化率达到最大值的时间不同, 但是峰值却相差很小, 约为 0.65% 左右; 考虑到电容变化率达到峰值后迅速下降此时绝缘已经失效, 以峰值作为换油阈值没有太大意义。

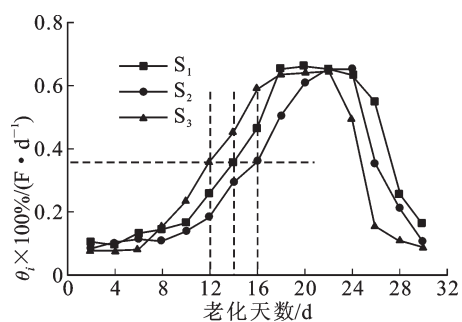


图 10 中间时间常数支路电容变化率

Fig. 10 Capacitance change rate of intermediate time constant branch

通常变压器油介损应控制在 4.0% 以下^[21], 在图 11 中求出 3 组试样介损达到 4.0% 时的老化天数, 分别为 14、16、12 天, 再通过图 10 求得所对应的电容变化率, 可以看到, 3 组试样此时的电容变化率非常接近, 取其均值 0.36% 作为换油阈值。

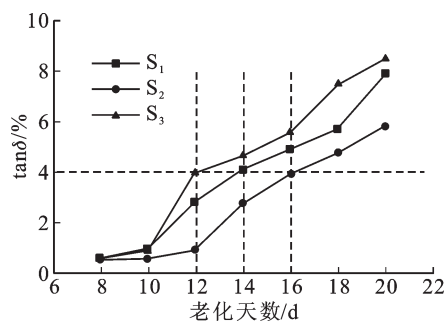


图 11 3组试样老化介损值

Fig. 11 Aging dielectric loss of three samples

5 结论

1) 变压器油主要影响扩展 Debye 模型时间常数小于 500 s 的支路参数, 随着变压器油老化, 对应支路电阻减小, 电容增大; 绝缘纸主要影响扩展 Debye 模型时间常数大于 500 s 的支路参数, 随着绝缘纸老化, 对应支路电阻减小, 电容增大。

2) 变压器油老化会增加油中偶极子的转向极化和油纸间界面极化; 绝缘纸老化会增强纸中偶极子组的转向极化和纸内界面极化; 扩展 Debye 模型参数能为评估油纸绝缘老化状态提供依据: 时间常数小于 500 s 的支路参数可评估变压器油绝缘状况; 时间常数大于 500 s 的支路参数可评估绝缘纸绝缘状况。

3) 油纸绝缘老化到一定程度会产生油纸界面极化, 此时油纸绝缘整体绝缘状况迅速恶化, 扩展 Debye 模型中间时间常数支路电容变化率 θ_i 可表征油纸界面极化, 可取 0.36% 的电容变化率为变压器换油阈值, 此时油介损达到 4.0%, 应进行换油处理。

参考文献:

- [1] 胡晓萌, 邓江桂. 110 kV 变压器抗短路能力典型案例分析及对策[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 133-136.
HU Xiaomeng, DENG Jiangui. Typical case analysis and countermeasures for 110 kV transformer anti-short circuit ability[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 133-136.
- [2] 刘易勇, 姚斯立, 冯建强, 等. 智能高压电器磁场及传导抗扰度屏蔽室的电磁环境电平研究[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 18-22.
LIU Yiyong, YAO Sili, FENG Jianqiang, et al. Research on EM ambient level of shielded room for magnetic-field and conduct sensitivity aiming for intelligent HV appliances[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 18-22.
- [3] 陆宇航, 杜伯学, 朱晓辉. 基于匹配滤波法的超高频局部放电信号检测[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 84-89.
LU Yuhang, DU Boxue, ZHU Xiaohui. Ultra high-frequency partial discharge detection based on matched filter algo-

rithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 84-89.

- [4] 王永强, 律方成, 李和明. 基于粗糙集理论和贝叶斯网络的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 137-141.
WANG Yongqiang, LYU Fangcheng, LI Heming. Synthetic fault diagnosis method of power transformer based on rough set theory and Bayesian network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 137-141.
- [5] 廖瑞金, 冯 运, 杨丽君, 等. 油纸绝缘老化特征产物生成速率研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 142-147.
LIAO Ruijin, FENG Yun, YANG Lijun, et al. Study on generation rate of characteristic products of oil-paper insulation aging[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 142-147.
- [6] 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): 27-33.
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): 27-33.
- [7] EMSLEY A M, STEVENS G C. Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers[J]. IEE Proceedings of Science, Measurement and Technology, 1994, 141(5): 324-334.
- [8] SHROFF D H, STANNETT A W. Review of paper ageing in power transformers[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1985, 132(6): 312-319.
- [9] PAHLAVANPOUR P, EKLUND, MARTINS M A. Insulating paper ageing and furfural formation[C]//Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference.[S.l.]: IEEE, 2003: 283-288.
- [10] SAHA T K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(5): 903-917.
- [11] GUBANSKI S M, BOSS P, CSEPES G, et al. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(3): 12-18.
- [12] GAFVERT U, FRIMPONG G, FUH J. Modeling of dielectric measurement on power transforms[C]//International Conference on Large HV Electric Systems. Paris, France: CIGRE, 1998: 15-103.
- [13] 杨丽君, 齐超亮, 吕彦冬, 等. 热老化时间及测试温度对油纸绝缘时域介电特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 162-169.
YANG Lijun, QI Chaoliang, LYU Yandong, et al. Study on influences of thermal aging time and testing temperatures on time-domain dielectric characteristics of oil-paper insu-

- lation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 162-169.
- [14] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘频域介电谱特性的仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 113-119.
- LIAO Ruijin, HAO Jian, YANG Lijun, et al. The simulation and experimental study on dielectric spectrum characteristics of transformer oil-paper insulation in the frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 113-119.
- [15] 高竣, 刘捷丰, 廖瑞金, 等. 热老化程度及测试温度对扩展 Debye 模型参数的影响研究[C]//2013 年中国电机工程学会年会论文集. 成都: 中国电机工程学会, 2013: 8.
- GAO Jun, LIU Jiefeng, LIAO Ruijin, et al. Research on the influence of thermal aging degree and test temperature to the expansion Debye model parameters[C]//Chinese Society of Electrical Engineering Symposium of Annual Conference in 2013. Chengdu: Chinese Society of Electrical Engineering, 2013: 8.
- [16] 殷之文. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 57-63.
- YIN Zhiwen. Dielectrics physics[M]. Beijing: Science Press, 2006: 57-63.
- [17] SAHA T K, PURKAIT P, MULLER 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.
- [18] 王骞, 臧春艳, 张明丽. 油纸绝缘结构介质响应电路模型的参数辨识方法研究[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 7-11.
- WANG Qian, ZANG Chunyan, ZHANG Mingli. Research on the method of parameter identification for dielectric response equivalent circuit of oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 7-11.
- [19] 雷铭. 电力设备诊断手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- LEI Ming. Power equipment diagnostic manual[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [20] 孙秀娟. 变压器换油现场处理工艺[J]. 电工技术, 2009(2): 14-15.
- SUN Xiujuan. Field treatment process for changing transformer oil[J]. Electric Engineering, 2009(2): 14-15.
- [21] 甘德刚, 青晨唯, 刘凡. 基于最小二乘法的变压器油中微水含量在线监测方法[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 48-52.
- GAN Degang, QING Chenwei, LIU Fan. Study on the on-line monitoring of moisture content in power transformer oil using least square method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 48-52.
- 宋臻杰(1991—), 男, 硕士, 主要从事变压器状态评估与绝缘监测方面的研究。
- 杨飞豹(1989—), 男, 硕士, 主要从事变压器状态评估与绝缘监测方面的研究。
- 吴广宁(1969—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事高电压与绝缘技术相关教学与科研工作。