

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240632

基于等值老化容抗的变压器油纸绝缘状态评估

林智勇^{1,2}, 苏若杭^{1,2}, 黄国泰³, 李荣华^{1,2}, 张达敏^{1,2}

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门市高端电力装备及智能控制重点实验室, 福建 厦门 361024; 3. 福建省电力物资有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 针对频域介电谱特征量难以定量分析变压器油纸绝缘老化状态的问题, 提出应用等值老化容抗定量分析油纸绝缘老化状态的评估方法。首先, 采用回复电压特征量构建变压器绝缘系统等效电路。然后, 分析扩展德拜等效电路参数与频域介电谱的内在联系, 研究时-频域介电谱相互转化的可行性。最后, 通过仿真分析等效电路参数变化对复电容实部谱线的影响规律, 定量分析等值老化容抗与主时间常数的关系。研究结果表明: 等值老化容抗与主时间常数具有指数函数关系, 当等值老化容抗越小时, 变压器油纸绝缘老化越严重。由主时间常数与变压器绝缘老化状态关系可划分不同的变压器绝缘状态所对应的等值老化容抗范围, 为准确评估变压器油纸绝缘老化状态提供新的参考依据。

关键词: 等效电路; 频域介电谱法; 主时间常数; 等值老化容抗

Evaluation of the oil-paper insulation state of a transformer based on equivalent aging capacitance

LIN Zhiyong^{1,2}, SU Ruohang^{1,2}, HUANG Guotai³, LI Ronghua^{1,2}, ZHANG Damin^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. Xiamen Key Laboratory of Frontier Electric Power Equipment and Intelligent Control, Xiamen 361024, China;
3. Fujian Electric Power Supplies Limited, Fuzhou 350003, China)

Abstract: To address the difficulty in quantitatively analyzing the aging state of transformer oil-paper insulation using frequency domain spectroscopy characteristics, an evaluation method is proposed for analyzing the aging state of oil-paper insulation by equivalent aging capacitance. Firstly, the equivalent circuit of a transformer insulation system is constructed using recovery voltage characteristics. Then, the intrinsic relationship between the parameters of the extended Debye equivalent circuit and the frequency domain spectroscopy is analyzed, and the feasibility of time-frequency domain spectroscopy spectrum interconversion is studied. Finally, through simulation analysis, the influence of changes in equivalent circuit parameters on the real part of a complex capacitance spectrum is examined, and the relationship between equivalent aging capacitance and the main time constant is quantitatively analyzed. The results indicate that there is an exponential relationship between the equivalent aging capacitance and main time constant; the smaller the equivalent aging capacitance, the more severe the aging state of transformer oil-paper insulation. From the relationship between the main time constant and the aging state of the transformer oil-paper insulation, the equivalent aging capacitance range corresponding to different transformer insulation states can be determined, providing a new reference for accurately evaluating the aging state of transformer oil-paper insulation.

This work is supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51407151).

Key words: equivalent circuit; frequency domain spectroscopy; principal time constant; equivalent aging capacitance

0 引言

油浸式变压器是电力系统最重要电气设备之一,

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51407151); 福建省自然科学基金项目资助(2020J01281); 福建省中青年教育科研项目资助(JZ230048)

其关系着电力系统能否安全稳定运行^[1-3]。变压器在实际运行过程中, 会持续受到磁场、电场和温度等环境因素的影响, 其内部绝缘介质会发生复杂的化学变化, 产生糠醛、酸、水等老化产物, 最终降低其绝缘性能。研究表明, 油浸式变压器发生故障主要是由其内部绝缘系统的绝缘性能下降引起的^[4-5]。而变压器绝缘状态越差, 内部老化产物越多, 其发生

故障的概率越大。因此,若能准确评估变压器油纸绝缘状态,便可为变压器检修策略提供科学依据,对于降低变压器故障率和提高电力系统供电可靠性具有重要意义^[6-8]。

频域介电谱法是利用介损角与复电容实虚部等老化特征量对变压器绝缘状态进行评估,具有易于现场测量、受环境干扰小、携带信息丰富、测试简单和无损检测等优点。鉴于此,目前国内外学者主要青睐应用频域介电谱法评估变压器油纸绝缘状态^[9-11]。文献[12]通过制备具有不同老化及受潮状态的油浸纸绝缘样本,提取用于表征绝缘劣化状态的特征量,采用多元回归分析构建用于训练老化状态分类模型的拟合介电特征参量数据库,提出一种融合频域介电谱以及支持向量机的变压器油浸纸绝缘老化状态评估方法。文献[13]通过实验分析了受潮和温度对极化去极化电流以及频域介电谱曲线的影响情况,提出利用时-频域介电响应特征量和灰色关联算法构建油纸绝缘受潮状态评估模型。文献[14]通过扩展德拜模型参数,并结合时-频域转换获取频域介电谱,验证了基于扩展德拜等效电路获取频域介电谱的可行性。文献[15]通过加速老化实验结果提出利用电容相对变化量和绕组间电容变化量分析频域介电谱特征量的影响情况,从而研究变压器绝缘老化机理。

这些方法绝大部分是利用实验方法获取时频老化特征量,并在此基础上构建变压器油纸绝缘老化状态评估模型,为频域介电谱法综合诊断变压器老化状态提供新参考方向。但这些方法大部分都是定性评估变压器绝缘老化状态,而且结论是否适合实际运行的变压器,还有待进一步研究。

为解决以上问题,本文通过实际测试的回复电压特征量构建扩展德拜等效模型,并利用时频介电谱与等效电路的内在联系,研究基于回复电压特征量的频域介电谱构建方法,进一步挖掘复电容实部谱线的老化特征量,提出应用新的频域老化特征量——等值老化容抗定量评估变压器油纸绝缘老化状态,为准确评估变压器老化状态提供新方法。

1 时-频介电谱法与扩展德拜模型

1.1 扩展德拜等效电路模型

根据 Maxwell 定理,当绝缘介质外加电场 $E(t)$ 为阶跃电场时,流经绝缘介质两端的电流密度 $j(t)$ 表达式^[16]为

$$j(t) = \sigma E(t) + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \left\{ \int_0^t f(\tau) E(t-\tau) d\tau \right\} \quad (1)$$

式中: σ 为介质的直流电导率; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为相对介电常数; $f(\tau)$ 为介质响应函数。

在绝缘介质中,外加电场与直流电压源 $U(t)$ 的关系为

$$E(t) = \frac{U(t)C_0}{\varepsilon_0 S} \quad (2)$$

式中, C_0 为真空电容值, $C_0 = \varepsilon_0 S/d$, 其中 S 为极板面积, d 为两极板的间距。

根据式(1)和式(2),流经绝缘介质两端的电流 $i(t)$ 为

$$i(t) = \int_S j(t) dS = C_0 \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} U(t) + \varepsilon_r \frac{d}{dt} U(t) + \frac{d}{dt} \int_0^t f(\tau) U(t-\tau) d\tau \right] \quad (3)$$

在绝缘介质中,由于绝缘电阻 $R_g = \varepsilon_0 / (\sigma C_0)$, 几何电容 $C_g = \varepsilon_r C_0$ 。式(3)进一步变化为

$$i(t) = \frac{U(t)}{R_g} + C_g \frac{dU(t)}{dt} + C_0 \frac{d \int_0^t f(\tau) U(t-\tau) d\tau}{dt} \quad (4)$$

由式(4)可知,流过绝缘介质的电流由 3 部分组成,分别是电场作用于电阻时产生的电导电流、电场作用于电容时产生的位移极化电流以及绝缘介质内部偶极子在转向极化过程中产生的松弛极化电流。松弛极化电流衰减性质则可通过 RC 串联极化等效电路来描述^[17],所以变压器等效电路可由 n 个表征不同弛豫响应的 RC 串联支路、电阻支路、电容支路并联构成,即扩展德拜等效电路,其电路结构如图 1 所示。其中串联支路中的 R_{pi} 与 C_{pi} 为极化电阻与极化电容,不同支路则表征不同极化弛豫速率的极化反应,反映不同绝缘介质的老化情况^[18-20]。

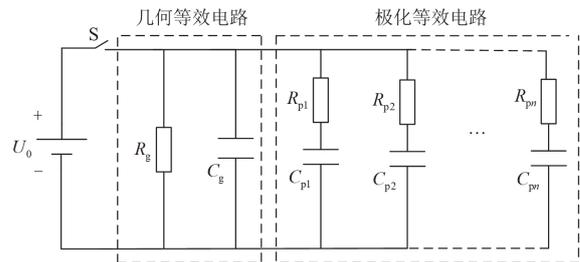


图 1 扩展德拜等效电路模型

Fig. 1 Extended Debye equivalent circuit model

1.2 回复电压法及参数辨识

本文采用回复电压测试仪 RVM5461 对变压器进行回复电压测量,现场接线如图 2 所示,其测量过程如图 3 所示,首先在绝缘介质两端加直流电压源 U_0 ,在电场作用下,其表面产生束缚电荷,发生

极化反应；经过充电时间 t_c 后，断开 U_0 并短接绝缘介质两端，绝缘介质发生去极化反应，两端表面电荷相互中和；经过放电时间 t_d 后，断开短接线，剩余未中和的自由电荷会在绝缘介质两端产生电势差，该电势差称为回复电压。在开路测量过程中获取回复电压初始斜率 $\frac{dU_r}{dt}$ ，回复电压最大值 U_{max} 以及其对应的峰值时间 t_{peak} [21]。

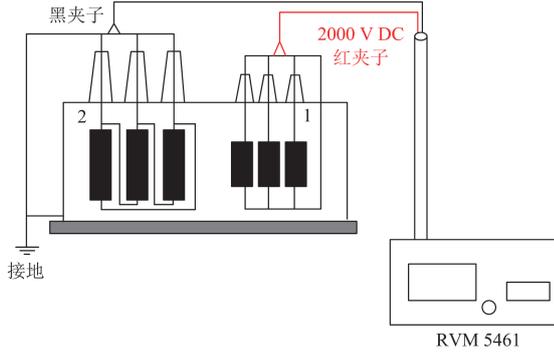


图 2 现场接线图
Fig. 2 Field wiring diagram

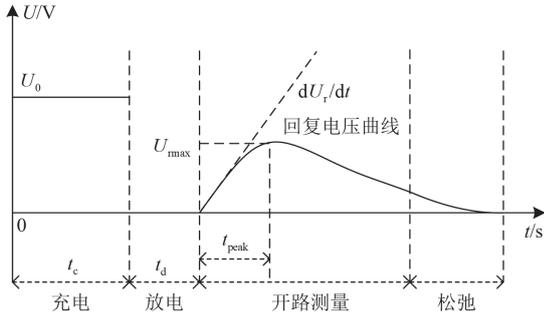


图 3 回复电压的测量过程
Fig. 3 Measurement process of recovery voltage

根据回复电压特征量，结合改进粒子群算法辨识扩展德拜等效电路参数。主要辨识过程[22]如下所述。

当测量处于开路测量过程(即开关 S 断开)，根据基尔霍夫电压与电流定理对图 1 扩展德拜等效模型进行分析。

$$C_g \frac{dU_r(t)}{dt} + \frac{U_r(t)}{R_g} + \sum_{i=1}^n C_{pi} \frac{dU_{cpi}(t)}{dt} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{U_r(t) - U_{cpi}(t)}{R_{pi}} = C_{pi} \frac{dU_{cpi}(t)}{dt} \quad (6)$$

$$U_{cpi}(t) = U_0(1 - e^{-t/t_c/\tau_i})e^{-(t+t_d)/\tau_i} \quad (7)$$

式中： $U_r(t)$ 为 t 时刻绝缘介质(即等效电路)两端的回复电压； $U_{cpi}(t)$ 为极化电容 C_{pi} 两端的电压； τ_i 为

极化支路 i 的时间常数， $\tau_i = R_{pi}C_{pi}$ 。

联系式(5)一式(7)可得

$$C_g \frac{dU_r(t)}{dt} + \frac{U_r(t)}{R_g} + \sum_{i=1}^n \frac{U_r(t)}{R_{pi}} - \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left(e^{-\frac{t+t_d}{\tau_i}} - e^{-\frac{t+t_c+t_d}{\tau_i}} \right) = 0 \quad (8)$$

当 $t=0$ 时， $U_r(t)=0$ ，将多组回复电压测量数据代入式(8)，可得

$$\begin{cases} \left. \frac{dU_{r1}(t)}{dt} \right|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left(e^{-\frac{t_{d1}}{\tau_i}} - e^{-\frac{t_{c1}+t_{d1}}{\tau_i}} \right) = 0 \\ \vdots \\ \left. \frac{dU_{rj}(t)}{dt} \right|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left(e^{-\frac{t_{dj}}{\tau_i}} - e^{-\frac{t_{cj}+t_{dj}}{\tau_i}} \right) = 0 \\ \vdots \\ \left. \frac{dU_{rm}(t)}{dt} \right|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left(e^{-\frac{t_{dm}}{\tau_i}} - e^{-\frac{t_{cm}+t_{dm}}{\tau_i}} \right) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\left. \frac{dU_{rj}(t)}{dt} \right|_{t=0}$ 为第 j 次回复电压测量获取的初始斜率， $j=1,2,\dots,m$ ， $m=2n+1$ ； t_{cj} 为对应测量的充电时间； t_{dj} 为对应测量的放电时间。

由式(9)可得到粒子群算法所需的目标函数 F 为

$$F = \min \left\{ \frac{1}{2n+1} \sum_{j=1}^{2n+1} \left[\left. \frac{dU_{rj}(t)}{dt} \right|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \cdot \left(e^{-\frac{t_{dj}}{\tau_i}} - e^{-\frac{t_{cj}+t_{dj}}{\tau_i}} \right) \right]^2 \right\} \quad (10)$$

根据目标函数进行算法的迭代计算，最终得到所需的支路参数。

1.3 频域介电谱特征量函数解析

根据图 1 的扩展德拜等效模型电路，结合电路端口导纳等效原理，可得其端口导纳表达式[23]为

$$\frac{1}{Z} = j\omega C_g + \frac{1}{R_g} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{pi} + 1/(j\omega C_{pi})} \quad (11)$$

式中： Z 为端口阻抗； ω 为角频率，与测试频率有关。

则电介质复电容 C^* 表达式为

$$C^* = \frac{1}{j\omega Z} = C_g - \frac{1}{\omega R_g} j + \sum_{i=1}^n \frac{C_{pi}(1 - j\omega R_{pi}C_{pi})}{1 + (\omega R_{pi}C_{pi})^2} \quad (12)$$

复电容的实部 $C'(\omega)$ 与虚部 $C''(\omega)$ 表达式分别为

$$C'(\omega) = \operatorname{Re} \frac{1}{j\omega Z} = C_g + \sum_{i=1}^n \frac{C_{pi}}{1 + (\omega R_{pi} C_{pi})^2} \quad (13)$$

$$C''(\omega) = -\operatorname{Im} \frac{1}{j\omega Z} = \frac{1}{\omega R_g} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_{pi} C_{pi}^2}{1 + (\omega R_{pi} C_{pi})^2} \quad (14)$$

介质损耗角计算表达式为

$$\tan \delta = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (15)$$

由式(11)一式(15)可知, 频域介电谱复电容实部、虚部和介质损耗角均与扩展德拜等效电路参数具有相应的函数关系式, 利用扩展德拜等效电路参数能够构建频域介电谱复电容实部、虚部和介质损耗角的谱线, 为时频介电谱相互转换提供理论基础。

2 变压器油纸绝缘状态评估

2.1 频域介电谱求解

本文对两台不同老化状态的变压器 T_1 (10 kV, 250 kVA, 绝缘老化严重, 已投运 15 年, 纸中微水含量 3.62%) 与 T_2 (10 kV, 250 kVA, 绝缘老化轻微, 已投运 8 年, 纸中微水含量 1.68%) 进行回复电压测量。设置充电电压为 2000 V, $t_c/t_d = 2$, 改变充放电时间获取老化特征量。再利用结合改进的粒子群算法对变压器 T_1 、 T_2 进行扩展德拜等效电路参数辨识, 辨识结果如表 1、表 2 所示, 辨识得到的变压器 T_1 、 T_2 的 C_g 、 R_g 分别为 33.11 nF、0.584 GΩ 和 141.474 nF、2.980 GΩ。

再利用式(11)一式(15)获取变压器 T_1 、 T_2 频域复电容实部与虚部谱线, 并与各自实测频域复电容实部与虚部谱线作对比, 对比结果分别如图 4、图 5 所示。

本文采用如式(16)所示的拟合度公式验证仿真计算值与实测值的重合情况。

$$N = 1 - \frac{\sum y}{\sum y^*} \cdot \frac{|y^* - y|}{y} \quad (16)$$

表 1 变压器 T_1 的等效电路参数辨识结果

Table 1 Identification results of equivalent circuit parameters of transformer T_1

极化支路	变压器 T_1 低压侧		
	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF	τ_i/s
1	0.116	0.177	0.021
2	0.102	1.017	0.104
3	0.161	3.419	0.551
4	0.298	9.354	2.786
5	0.791	16.067	12.724
6	4.361	19.944	86.982

表 2 变压器 T_2 的等效电路参数辨识结果

Table 2 Identification results of equivalent circuit parameters of transformer T_2

极化支路	变压器 T_2 低压侧		
	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF	τ_i/s
1	0.015	3.424	0.050
2	0.058	8.191	0.471
3	0.276	15.233	4.204
4	0.429	88.973	38.143
5	0.608	345.476	210.015
6	2.449	444.872	1089.447

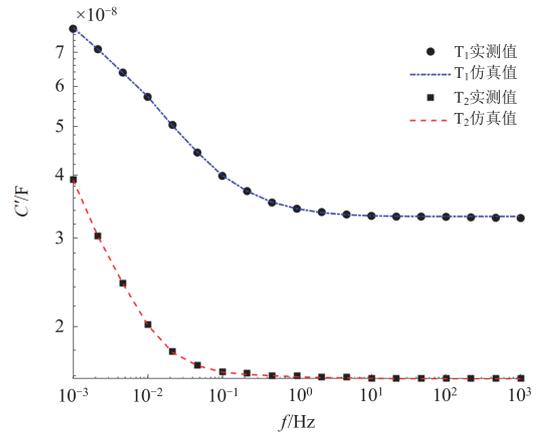


图 4 复电容实部实测值与仿真值对比图

Fig. 4 Comparison between the measured value and the simulated value of real part of complex capacitance

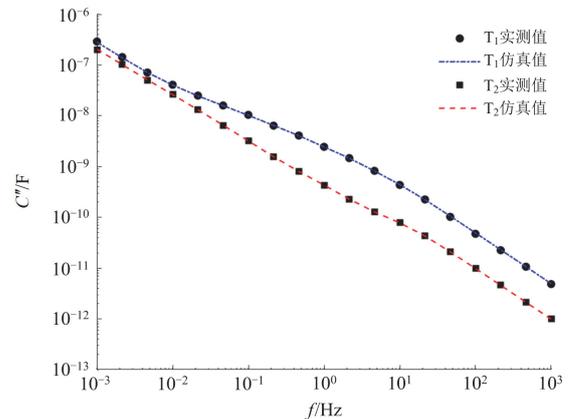


图 5 复电容虚部实测值与仿真值对比图

Fig. 5 Comparison between the measured and simulated values of imaginary part of complex capacitance

式中: N 表示拟合度; y 为实测值; y^* 表示计算值。当 N 越接近 1 时, 代表计算值与实测值的重合度越高。

通过计算可知, 变压器 T_1 复电容实部与虚部谱

线的拟合度分别为 0.9759、0.9977；变压器 T₂ 复电容实部与虚部谱线的拟合度分别为 0.9761、0.9980。通过对其他台变压器的验证分析，其拟合度均在 95% 以上，由于篇幅限制，不再一一列举。因此，通过回复电压特征量参数可以获取对应的频域介电谱，为扩展介电谱老化特征量提供新方法。

2.2 频域介电谱与绝缘老化分析

将图 4、图 5 中变压器 T₁、T₂ 的复电容实部与虚部谱线作对比分析可知：一方面，复电容实部与虚部均随着频率的增大而减小，这是由于复电容实部表征绝缘介质的极化强度，虚部表征由电导损耗和极化损耗组成的介质损耗，随着频率增大，极化时间则变短，从而导致极化强度和介质损耗变小；另一方面，绝缘状态较差的变压器 T₁ 复电容实部和虚部数值均大于变压器 T₂，这是由于随着变压器老化程度加深，绝缘油、绝缘纸老化反应所产生的微水、糠醛、酸等极性分子老化产物增多，导致变压器绝缘介质极化强度增强，电导损耗和极化损耗均增加，从而使得复电容实部与虚部数值增大^[24-27]。且在高频段(10¹~10³ Hz)，复电容实部基本不受频率变化的影响，这是由于频率处于高频段时，极化和弛豫时间非常短，绝缘介质的老化产物不足以影响绝缘系统整体的极化强度，导致复电容实部高频段只受几何电容的影响，而基本不受频率影响，与式(13)的理论分析一致。

综上可知，复电容实部与虚部谱线能够有效反映变压器绝缘状态，有必要深入挖掘频域介电谱隐含的老化特征量，为变压器老化状态评估提供新方法。

2.3 等值老化容抗分析

由上文可知，变压器的老化状态对复电容实部谱线的影响更加明显。为了深入研究变压器老化状态对复电容实部谱线的影响规律，现通过改变变压器 T₁(180 MVA/220 kV)等效电路参数研究复电容实部谱线的影响情况，仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知，随着变压器老化程度加重(即极化电阻减小，极化电容增大)，低频阶段谱线斜率增大，拐点更明显，谱线整体升高。因此，复电容实部谱线与横轴之间的面积与绝缘老化具有正相关性。根据式(13)可知，复电容实部高频阶段幅值主要受几何电容 C_g 影响，而几何电容 C_g 仅影响回复电压大小，并不影响主时间常数大小^[28]，且回复电压主时间常数是变压器绝缘老化的重要特征量。

因此，本文提出剔除几何电容影响的极化等效复电容实部(简称等效复电容实部)研究其与主时间

常数的内在联系，其表达式如式(17)所示。

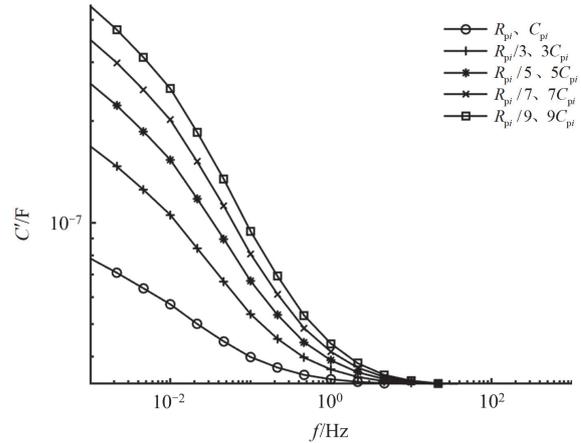


图 6 变压器 T₁ 不同老化状态仿真

Fig. 6 Simulation of different aging states of transformer T₁

$$C'_{dx}(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{C_{pi}}{1 + (\omega\tau_i)^2} \quad (17)$$

由图 6 可知，当频率在[10⁻³,10¹] Hz 内时，复电容实部谱线积分面积变化呈现一定规律。为了便于分析并结合容抗的定义，现对式(17)进一步转化，提出频域介电谱新老化特征量——等值老化容抗 C_{dz}(无量纲)，如式(18)所示。

$$C_{dz}(\omega) = \lg\left(1 / \int C'(\omega)d\omega\right) = -\lg \sum_{i=1}^n \frac{\text{arctan}(\tau_i\omega)}{R_{pi}} \quad (18)$$

为研究等值老化容抗对变压器绝缘老化特征量的影响规律，根据上文提出的等值老化容抗求解方法，获取多台不同老化状态的变压器等值老化容抗值，变压器状态信息和等值老化容抗值如表 3 所示。

表 3 多台变压器实测数据

Table 3 Measured data of multiple transformers

名称	容量/MVA	绝缘状态	等值老化容抗	主时间常数/s	纸中微水含量/%
T ₃	31.5	老化严重	7.30	109.1	3.03
T ₄	180	老化轻微	8.29	833.3	1.03
T ₅	180	一般	8.55	1409.4	0.77
T ₆	240	良好	8.65	1741.2	0.47
T ₇	240	良好	8.77	2480.7	0.49

由表 3 可知，随着变压器绝缘状态老化加剧，纸中微水含量逐渐增多，其主时间常数逐渐减小，等值老化容抗也逐渐减小。这是因为变压器绝缘系统发生老化时，绝缘油因氧化降解会产生酸性等具有强极化特性的化合物以及碳氧化物、CH₄ 等烃类气体。而绝缘纸在温度、氧气和水的作用下分别发生热降解、氧化降解和水降解，主要产生水、甲酸、甲醇、丙酮等具有强极化特性的老化产物。随着变

压器绝缘老化程度加深, 其内部极性分子老化产物的含量增多, 绝缘系统内部极化现象就越明显。而水分既是绝缘介质老化的催化剂也是老化反应的产物, 因此水分对绝缘系统的老化具有重要影响。在外加电场的作用下, 绝缘介质和水分等极性分子老化产物会产生偶极子转向极化, 且这类老化产物的介电常数较大, 一方面加快了绝缘介质极化弛豫速度, 使得等效电路支路时间常数变小, 最终引起主时间常数变小; 另一方面增强了其极化强度, 增大绝缘介质电导率和介质损耗, 导致等效电路极化电容增大, 极化电阻减小, 复电容实部低频段特征值变大, 等值老化容抗变小, 与上文的数学方法和理论分析结果相一致。

根据表 3 数据, 进一步拟合变压器主时间常数 T_m 与等值老化容抗 C_{dz} 的关系, 拟合结果如图 7 所示。

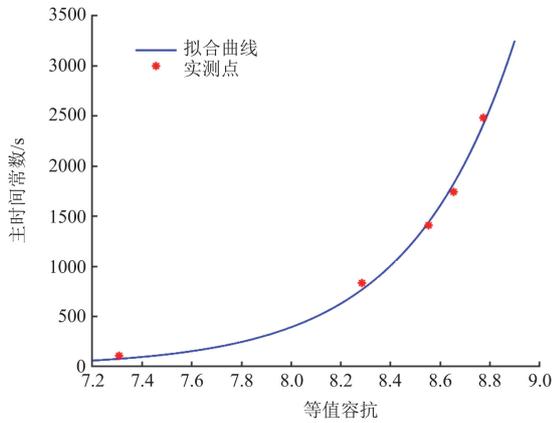


图 7 等值老化容抗与主时间常数关系

Fig. 7 Relation between equivalent aging capacitance and principal time constant

该曲线拟合均方根值为 0.9950, 根据拟合曲线可得到式(19)。

$$T_m = 2.724 \times 10^{-6} \cdot e^{2.349C_{dz}} \quad (19)$$

由拟合结果可知, 主时间常数与等值老化容抗具有相应的指数关系, 等值老化容抗数值越大, 变压器主时间常数越大, 表明变压器绝缘状态越好, 通过等值老化容抗能够定量分析变压器主时间常数, 从而判定变压器绝缘状态。

2.4 实例验证

为验证该表达式的可靠性, 本文通过另外 3 台变压器等效电路进行分析, 变压器信息如表 4 所示。

同理, 运用上文所提出的等值老化容抗求解方法计算变压器 T_8 — T_{10} 的等值老化容抗值, 并通过式(19)计算各自的主时间常数, 并与现场回复电压测量获取的主时间常数作误差分析, 分析结果如表

5 所示。

表 4 变压器 T_8 — T_{10} 基本信息

Table 4 Basic information of transformers T_8 — T_{10}

名称	容量/MVA	电压等级/kV	主时间常数/s	纸中微水含量/%	绝缘状态
T_8	31.5	110	324.6	1.49	老化轻微
T_9	120	220	888.8	0.99	一般
T_{10}	240	220	2049.3	0.49	良好

表 5 变压器 T_8 — T_{10} 主时间常数仿真值与实测值误差分析

Table 5 Error analysis between simulation value and measured value of transformer T_8 — T_{10} principal time constant

名称	等值老化容抗	仿真主时间常数/s	实测主时间常数/s	误差/%
T_8	7.88	297.5	324.6	8.34
T_9	8.37	933.6	888.8	5.04
T_{10}	8.67	1903.2	2049.3	7.12

根据表 5 的结果进一步验证了式(19)的准确性。根据研究结果表明, 当变压器主时间常数 $T_m > 1000$ s 时, 变压器绝缘状态良好; 当 $1000 \text{ s} \geq T_m > 500$ s, 绝缘状态一般; 当 $500 \text{ s} \geq T_m > 250$ s 时, 绝缘老化轻微; 当 $T_m \leq 250$ s 时, 绝缘老化严重^[29]。因此, 结合式(19)可知: 当等值老化容抗 $C_{dz} \leq 7.8$ 时, 变压器绝缘老化严重; 当 $7.8 < C_{dz} < 8.1$ 时, 变压器绝缘老化轻微; 当 $8.1 \leq C_{dz} \leq 8.4$ 时, 变压器绝缘状态一般; 当 $C_{dz} > 8.4$ 时变压器绝缘状态良好。

3 结论

本文通过回复电压特征量构建变压器油纸绝缘系统扩展德拜等效电路, 并结合频域介电谱特征量与等效电路参数的内在联系, 获取频域介电谱谱线, 验证了时频介电谱转化的可行性和可靠性; 并提出利用等值老化容抗研究变压器油纸绝缘老化状态, 得出以下结论。

1) 等值老化容抗与主时间常数具有对应的函数关系, 变压器老化越严重, 等值老化容抗越小。

2) 基于等值老化容抗的变压器油纸绝缘老化评估判据: 若 $C_{dz} \leq 7.8$ 时, 则变压器绝缘老化严重; 若 $7.8 < C_{dz} < 8.1$ 时, 则变压器绝缘老化轻微; 若 $8.1 \leq C_{dz} \leq 8.4$ 时, 则变压器绝缘状态一般; 若 $C_{dz} > 8.4$ 时, 则变压器绝缘状态良好。运用评估判据可以合理评估变压器绝缘老化情况, 为变压器绝缘状态检修提供可靠依据。

参考文献

- [1] LI Zongbo, JIAO Zaibin, HE Anyang, et al. A denoising-classification neural network for power transformer protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 814-827.
- [2] 张德文, 张健, 曲利民, 等. 基于 PSO-ELM 的变压器油纸绝缘状态无损评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 201-208.
ZHANG Dewen, ZHANG Jian, QU Limin, et al. The assessment method of transformer oil-paper insulation state based on PSO-ELM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 201-208.
- [3] 李元, 李星辉, 孙渭薇, 等. 基于多模型级联的油浸式电力变压器故障诊断方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(6): 86-92.
LI Yuan, LI Xinghui, SUN Weiwei, et al. Fault diagnosis method of oil-immersed power transformer based on multi-model cascade fusion[J]. Smart Power, 2023, 51(6): 86-92.
- [4] MANDLIK M, RAMU T. Moisture aided degradation of oil impregnated paper insulation in power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 186-193.
- [5] 刘智超, 吐松江·卡日, 马小晶, 等. 基于云相似度与证据融合的电力变压器状态评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 79-90.
LIU Zhichao, TUSONGJIANG·Kari, MA Xiaojing, et al. Condition assessment method for power transformers based on cloud similarity and evidence fusion[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 79-90.
- [6] 李波, 张文乾, 刘维, 等. 基于熵权层次法的油浸式变压器绝缘状态评价[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 223-230.
LI Bo, ZHANG Wenqian, LIU Wei, et al. Insulation condition evaluation of oil-immersed transformer based on entropy weight hierarchy method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 223-230.
- [7] 杨志, 黄雯利, 赵丽娟. 光纤传感技术在油浸式电力变压器状态监测应用的研究进展[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 137-146.
YANG Zhi, HUANG Wenli, ZHAO Lijuan. Research progress of fiber-optic sensing technology in condition monitoring and application in oil-immersed power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 137-146.
- [8] 张朋, 张健, 杨航, 等. 基于改进 NSGA 多目标值优化的油纸绝缘状态评估方法[J]. 中国电力, 2023, 56(10): 124-132.
ZHANG Peng, ZHANG Jian, YANG Hang, et al. Improved NSGA multi-objective optimization based oil-paper insulation status assessment method[J]. Electric Power, 2023, 56(10): 124-132.
- [9] 杨寅明. 油纸不均匀热老化对变压器频域谱的影响研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(4): 16-21.
YANG Yinming. Research on influence of uneven thermal aging of oil paper on frequency domain spectrum of transformer[J]. Automatic Instrumentation, 2022, 43(4): 16-21.
- [10] 张明泽, 刘骥, 吕佳璐, 等. 油纸绝缘频域介电谱归算方法研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(12): 27-34.
ZHANG Mingze, LIU Ji, LÜ Jialu, et al. Research on method of frequency normalizing in frequency domain of oil-paper insulation[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(12): 27-34.
- [11] 曲利民, 张健, 孟繁昊, 等. 变压器油纸绝缘非线性介电弛豫模型构建方法研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(3): 72-81.
QU Limin, ZHANG Jian, MENG Fanhao, et al. Research on construction method of nonlinear dielectric relaxation model for transformer oil-paper insulation[J]. Insulation Materials, 2024, 57(3): 72-81.
- [12] 范贤浩, 刘捷丰, 张懿议, 等. 融合频域介电谱及支持向量机的变压器油浸纸绝缘老化状态评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2161-2168.
FAN Xianhao, LIU Jiefeng, ZHANG Yiyi, et al. Aging evaluation of transformer oil-immersed insulation combining frequency domain spectroscopy and support vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 2161-2168.
- [13] 姚欢民, 穆海宝, 张大宁, 等. 基于灰色关联与时-频域介电响应的油纸绝缘受潮状态快速评估方法[J]. 绝缘材料, 2023, 56(3): 54-60.
YAO Huanmin, MU Haibao, ZHANG Daning, et al. Rapid evaluation method of oil-paper insulation damp condition based on grey correlation and time-frequency domain dielectric response[J]. Insulating Materials, 2023, 56(3): 54-60.
- [14] VARACKA L, KUDELICKI J, GUTTEN M. Dielectric frequency response of mineral oil impregnated pressboard[C] // 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2015: 662-665.
- [15] YOUSOF M F M, EKANAYAKE C, SAHA T K. Examining the ageing of transformer insulation using FRA and FDS techniques[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(2): 1258-1265.
- [16] 吴迪星. 基于回复电压法的变压器油纸绝缘老化状态评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
WU Dixing. Research on assessment of insulation candidate: aging status of transformer oil-paper based on RVM[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2023.

- [17] 张涛. 基于回复电压特征量的变压器油纸绝缘状态诊断研究[D]. 福州: 福州大学, 2010.
ZHANG Tao. Research on diagnosis of oil-paper insulation condition in transformer based on return voltage characteristic quantities[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010.
- [18] 杜林, 冉鹏蔓, 蔚超, 等. 基于扩展德拜模型的油纸绝缘受潮频域特征量研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3051-3058.
DU Lin, RAN Liman, WEI Chao, et al. Study on frequency domain characteristics of moisture in oil-paper insulation based on extended Debye model[J]. Transactions of Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3051-3058.
- [19] 邹阳, 何津, 金涛. 基于 NRS 和 D-S 证据理论的变压器油纸绝缘状态评估模型[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(10): 89-96.
ZOU Yang, HE Jin, JIN Tao. Evaluation model of transformer oil-paper insulation based on neighborhood rough set and Dempster-Shafer evidence theory[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(10): 89-96.
- [20] 邹阳, 林锦茹, 李安娜, 等. 基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 35-43.
ZOU Yang, LIN Jinjia, LI Anna, et al. Evaluation of transformer oil-paper insulation status based on grey relational analysis and a cluster cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 35-43.
- [21] 邹阳, 俞豪奕, 金涛. 融合模糊 K 近邻及证据理论的变压器油纸绝缘状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 55-63.
ZOU Yang, YU Haoyi, JIN Tao. Evaluation method of the oil-paper insulation condition of a transformer based on fuzzy K nearest neighbor and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 55-63.
- [22] 林智勇, 张达敏, 黄国泰, 等. 采用回复电压曲线分解法的变压器等效电路研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 18-23.
LIN Zhiyong, ZHANG Damin, HUANG Guotai, et al. Research on equivalent circuit of transformer by decomposing return voltage curve[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 18-23.
- [23] 闫婷. 油纸绝缘劣化的高压介电谱特征研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
YAN Ting. Characterization of high voltage dielectric spectrum of oil-paper insulation degradation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [24] 江阳, 赵贺, 宋一凡, 等. 基于频域介电谱的环氧树脂浸渍皱纹纸绝缘受潮状态评估[J]. 绝缘材料, 2023, 56(7): 60-66.
JIANG Yang, ZHAO He, SONG Yifan, et al. Moisture condition evaluation of epoxy resin impregnated crepe paper based on frequency domain spectroscopy[J]. Insulating Materials, 2023, 56(7): 60-66.
- [25] 李长云, 郝爱东. 机-热协同老化对纤维素绝缘纸频域介电谱特性的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3705-3712.
LI Changyun, HAO Aidong. Influence of the mechanical-thermal aging on the frequency-domain dielectric spectroscopy of cellulose insulation paper[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3705-3712.
- [26] 刘骥, 闫爽, 王守明, 等. 基于低频高压频域介电谱的 XLPE 电缆电树枝老化状态评估[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2510-2518.
LIU Ji, YAN Shuang, WANG Shouming, et al. Evaluation of electrical tree aging state of XLPE cables based on low frequency and high voltage frequency domain spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2510-2518.
- [27] 王昊月, 李成榕, 王伟, 等. 高压频域介电谱诊断 XLPE 电缆局部绝缘老化缺陷的研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1542-1553.
WANG Haoyue, LI Chengrong, WANG Wei, et al. Local aging diagnosis of XLPE cables using high voltage frequency domain dielectric spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1542-1553.
- [28] 林智勇, 蔡金锭. 变压器等效电路参数变化对极化谱的影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 292-298.
LIN Zhiyong, CAI Jinding. Analysis for influence of transformer equivalent circuit parameters change on polarization spectrum[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(3): 292-298.
- [29] 张涛, 左倩, 任乔林, 等. 油纸绝缘非标准极化谱的中心时间常数提取[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(8): 82-88.
ZHANG Tao, ZUO Qian, REN Qiaolin, et al. Central time constant of nonstandard polarization spectrum of oil-paper insulation[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(8): 82-88.

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-10-07

作者简介:

林智勇(1989—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电气设备绝缘监测与故障诊断; E-mail: 625720199@qq.com

苏若杭(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为变压器油纸绝缘检测。E-mail: 962248338@qq.com

(编辑 张颖)