

# 基于弛豫贡献度的变压器油纸绝缘系统老化状态评估

叶 荣, 蔡金锭

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 本文以改进弛豫介电响应函数为基础, 研究去极化电流的弛豫贡献度在油纸绝缘状态的变化规律。已有研究通过不同弛豫时间的线型因子、弛豫谱线能量等反映油纸绝缘老化状态, 存在反映灵敏度较低、特征量区分度较小的不足, 本文提出的去极化电流弛豫贡献度在反映油纸绝缘状态方面具有更高的灵敏度和区分度。通过不同运行年限、不同绝缘状况的变压器现场测试数据的计算分析可知, 相比于线型因子、弛豫谱线能量特征参数, 弛豫贡献度表征绝缘老化状态更为显著, 且具有一定规律性; 对弛豫贡献度反映绝缘状态的机理进行分析, 结合验证结果表明, 弛豫贡献度越大, 绝缘老化越严重。本文研究可为变压器油纸绝缘系统的状态评估提供一种新特征量。

**关键词:** 去极化电流; 介电响应; 弛豫贡献度; 油纸绝缘状态; 老化评估

**DOI:** 10.12067/ATEEE1802014      **文章编号:** 1003-3076(2018)11-0015-08      **中图分类号:** TM411

## 1 引言

油纸复合绝缘系统是油浸式电力变压器的主要绝缘结构, 其绝缘状态是影响和评估变压器寿命的主要因素<sup>[1,2]</sup>。基于时域介电响应的极化去极化电流法(Polarization and Depolarization Current, PDC)作为一种无损诊断方法, 所测量去极化电流曲线具有携带信息丰富等优点, 被广泛应用于油纸绝缘的老化状态和微水含量评估<sup>[3]</sup>。

为了更好地研究油纸绝缘老化和受潮程度与介质响应特征量的内在联系, 近些年有学者在构建油纸绝缘等效电路模型的基础上, 挖掘去极化电流中蕴含的绝缘介质老化特征信息, 提取能够反映绝缘状态的特征量。文献[4]基于PDC图谱提出极化电量斜率 $K_p$ 与稳定极化电量 $Q_{p-5000}$ 特征量用于变压器油纸绝缘含水量的定量评估; 文献[5]分析了极化/去极化电流曲线的不同阶段对于绝缘纸老化特征的反映, 提出以初始去极化电流作为油浸纸老化聚合度的映射特征量, 以稳态极化电流作为油浸纸水分含量的映射特征量; 文献[6]利用分解去极化电流微分弛豫谱线, 计算弛豫谱线能量对油纸绝缘老化进行判别; 文献[7]基于改进的去极化电流弛

豫响应函数, 提取不同弛豫时间的线型因子, 诊断绝缘油和绝缘纸的老化状态。

在已有研究中, 基于去极化电流曲线提取的极化电量、弛豫能量、线型因子等特征量均能在一定程度上表征油纸绝缘系统的老化状态, 但是存在不同绝缘状态下特征量表征区分度不明显、灵敏性较低等不足, 而且利用单个特征量判别老化状态时可能出现误诊断, 不适合作为融合多参量进行绝缘状态的综合评估。已有研究中大时间常数支路( $\tau_i > 100s$ )反映绝缘纸极化, 中时间常数支路( $1s < \tau_i < 100s$ )表征油纸绝缘界面极化, 而小时间常数支路( $\tau_i < 1s$ )反映绝缘油极化<sup>[7]</sup>。故本文在已有研究的改进弛豫介电响应函数基础上, 采用不同时间常数的去极化电流弛豫贡献度来反映不同介质的绝缘状态; 通过不同绝缘状态的变压器现场PDC测试数据, 验证了弛豫贡献度相比于弛豫谱线能量、线型因子等特征量, 反映老化状态时更为显著, 可以间接表征油纸绝缘的优劣状态, 可作为油纸绝缘系统状态评估的一种新特征量。

## 2 改进弛豫介电响应函数分析

油浸式变压器的内绝缘系统主要由绝缘油、隔

收稿日期: 2018-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174117)

作者简介: 叶 荣(1993-), 男, 福建籍, 硕士研究生, 研究方向为电气设备绝缘老化诊断;

蔡金锭(1954-), 男, 福建籍, 教授, 博士, 研究方向为电力系统故障智能诊断。

板、撑条以及油隙等组成。单一极化支路的德拜电路模型无法描述复合介质的不同弛豫过程,因此目前对油纸绝缘等效电路研究中,广泛采用扩展德拜等效电路(如图1所示)来表征油纸绝缘变压器复合绝缘介质,分析油纸绝缘系统的弛豫过程<sup>[8,9]</sup>。

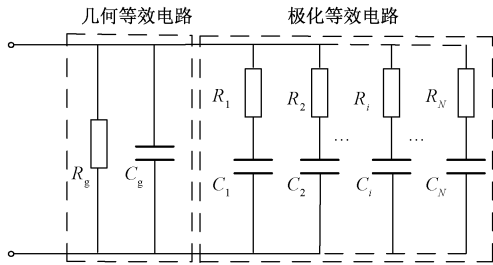


图1 油纸绝缘扩展德拜等效电路

Fig. 1 Extended Debye equivalent circuit of oil-paper insulation

等效电路中包括几何等效电路和极化等效电路。几何等效电路中  $R_g$  为绝缘电阻,  $C_g$  为绝缘系统的几何电容,与绝缘结构有关;极化等效电路由多条 RC 串联支路并联而成,  $R_i$ 、 $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 元件代表不同弛豫过程的极化电阻和极化电容,模拟不同弛豫时间  $\tau_i$  ( $\tau_i = R_i C_i$ ) 下的介质极化现象。在研究变压器油纸绝缘系统的介质极化过程时,通常采用传统弛豫响应函数来反映弛豫过程,如式(1)所示<sup>[8]</sup>:

$$f(t) = \sum_{i=1}^N B_i e^{-t/\tau_i} \quad (1)$$

式中,  $N$  为弛豫响应机构数;  $\tau_i$  为弛豫时间;  $B_i$  为第  $i$  个弛豫机构对整体作用所占比重。

该弛豫响应函数是在假设偶极子松弛介质之间不会产生相互作用的条件下提出的<sup>[10]</sup>,但在实际极化过程中,不同外界条件下呈现不同的弛豫过程。大量的热释电弛豫数据表明<sup>[11]</sup>,当存在外力或外场作用时,电介质的极化弛豫遵循随机弛豫规律,其弛豫响应遵循  $\exp(-t/\tau_i)$  的指数响应函数;在无外加作用时遵循自由弛豫规律,其弛豫响应遵循  $\exp(-t/\tau_i)^{1/2}$  的均方根指数衰减规律。

变压器油纸绝缘的实际极化过程中,偶极子弛豫扩散过程受到制约,衰减规律应该既包含一部分随机弛豫过程,同时也有一部分自由弛豫过程,故其衰减速度应该处于指数衰减与均方根指数衰减之间,衰减指数  $\alpha$  被约束在 0.5 ~ 1 之间,故改进后的弛豫响应函数如式(2)所示。结合该函数分析 PDC 去极化过程,便可提取出相关弛豫响应特征量。

$$f(t) = \sum_{i=1}^N B_i e^{(-t/\tau_i)^{\alpha_i}} \quad \alpha_i \in [0.5, 1] \quad (2)$$

### 3 去极化电流的改进弛豫响应参数

#### 3.1 去极化电流弛豫贡献度的提取

PDC 是一种基于时域介质响应的绝缘状态无损诊断测量方法,可用于研究绝缘介质的极化过程。测量过程为:在变压器绝缘设备两端施加直流电压  $U_0$  (一般为 500 ~ 2000V) 进行充电,时间为  $t_c$ ,该阶段称为电介质的极化过程,此时可测量流过绝缘介质的极化电流  $i_p$ ;然后绝缘设备两端短路进行放电,时间为  $t_d$ ,这段时间称为电介质的去极化过程,此时可测量流过绝缘介质的去极化电流  $i_d$ 。

基于扩展德拜模型的去极化电流  $i_d(t)$  和弛豫响应函数之间具有线性关系<sup>[12,13]</sup>。由第2节分析可知,考虑油纸绝缘系统极化过程中的自由弛豫与随机弛豫,  $i_d(t)$  对应的弛豫响应函数可表示为:

$$i_d(t) = C_0 U_0 \sum_{i=1}^N B_i e^{(-t/\tau_i)^{\alpha_i}} = \sum_{i=1}^N A_i e^{(-t/\tau_i)^{\alpha_i}} \quad (3)$$

式中,  $U_0$  为充电电压;  $C_0$  为真空电容值;  $N$  为极化支路数;  $\tau_i = R_i C_i$ , 为第  $i$  条极化等效电路的弛豫时间;  $A_i = C_0 U_0 B_i$ , 表征第  $i$  个机构的极化强度对去极化电流数值上的贡献,定义为弛豫贡献度;  $\alpha_i \in [0.5, 1]$ , 为反映自由弛豫与随机弛豫过程的线型因子。  $i_{di}(t)$  表示第  $i$  条极化等效支路去极化电流,对应弛豫响应函数为:

$$i_{di}(t) = A_i e^{(-t/\tau_i)^{\alpha_i}} \quad (4)$$

油纸绝缘系统的去极化电流  $i_d(t)$  实质为  $N$  项弛豫机构贡献的分支电流以  $A_i e^{(-t/\tau_i)^{\alpha_i}}$  形式叠加而成。在实际的变压器油纸绝缘结构中,各极化支路的弛豫时间常数一般相差较大,固体绝缘(绝缘纸)的弛豫时间相对较长,一般大于 100s,而液体绝缘(绝缘油)的弛豫时间则很小,一般小于 1s。去极化电流表达式由不同弛豫时间常数的指数型衰减函数  $A_i e^{(-t/\tau_i)^{\alpha_i}}$  组成,且衰减函数末端数值较大  $\tau_i$  可以忽略前一项数值较小  $\tau_{i-1}$  的影响<sup>[14]</sup>。因此,为求解出各极化支路的弛豫参数  $A_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\tau_i$ ,可在去极化电流曲线  $i_d(t)$  的末端任意取三个不为零的点 ( $t_1, i_d(t_1)$ )、( $t_2, i_d(t_2)$ ) 和 ( $t_3, i_d(t_3)$ ),建立如下方程组:

$$\begin{cases} A_i e^{(-t_1/\tau_i)^{\alpha_i}} - i_d(t_1) = 0 \\ A_i e^{(-t_2/\tau_i)^{\alpha_i}} - i_d(t_2) = 0 \\ A_i e^{(-t_3/\tau_i)^{\alpha_i}} - i_d(t_3) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以解出较大时间常数对应的弛豫参数  $A_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\tau_i$ ,从而得到式(4)的弛豫响应函数表达式,将  $i_d(t)$  减去当前所求的函数,得到剩余曲线;再选取剩余的去极化电流曲线末端三点,按照同样步骤便可求解出其余极化支路的弛豫响应函数,最终计算出所有极化支路的弛豫贡献度  $A_i$ 、线型因子  $\alpha_i$  以及弛豫时间  $\tau_i$ 。

3.2 弛豫贡献度反映绝缘老化的机理分析

根据 PDC 测试原理,结合去极化过程中的扩展德拜模型等效电路,考虑自由弛豫与随机弛豫过程,由基本电路理论可知,第  $i$  条极化支路上极化电容  $C_i$  的电压可表示为<sup>[15]</sup>:

$$u_{Ci}(t) = U_0(1 - e^{-t_c/\tau_i})e^{(-t/\tau_i)^{\alpha_i}} \tag{6}$$

第  $i$  条极化支路的弛豫贡献度为<sup>[15]</sup>:

$$A_i = \frac{U_0(1 - e^{-t_c/\tau_i})}{R_i} \tag{7}$$

油浸式变压器在正常运行过程中,随着运行年限的增加,油纸绝缘系统开始逐步发生老化,绝缘介质的内部结构特性发生变化,介质响应过程也随之改变,导致其扩展德拜等效电路的极化支路数、极化电阻、电容值均发生改变<sup>[14]</sup>。变压器在出现绝缘油劣化或绝缘纸老化后,各弛豫机构的极化电阻  $R_i$  将减小,极化电容  $C_i$  增大,时间常数  $\tau_i$  将减小<sup>[16]</sup>。主要原因在于:变压器内部固体绝缘介质的绝缘纸中纤维素存在非晶区,相互作用力弱,在长期运行过程中受到电、热、机械等应力作用,将会引起纤维素的非极性大分子出现断裂,从而产生微水、酸类、糠醛等老化强极性产物,导致油纸绝缘介质中电导离子的增加,从而使导电率增大,极化电阻  $R_i$  减小。根据式(7)可知,在充电时间  $t_c$  较长、充电电压  $U_0$  不变时,  $A_i$  与  $R_i$  近似成反比例关系。因此随着老化程度的不断加剧,极化电阻  $R_i$  减小,弛豫贡献度  $A_i$  将增大,因此去极化电流的弛豫贡献度可作为反映油纸绝缘状态的一个显著特征量。

4 不同绝缘老化状态的弛豫贡献度分析

4.1 同一台变压器不同状态的弛豫参数

4.1.1 换油前后的弛豫参数对比

油浸式变压器 T1 型号为 SFPS-180000/220,运行年限为 8 年。该变压器绝缘油发生劣化,绕组绝缘状态良好,需进行换油处理。分别在其换油前后进行 PDC 测试,外加充电电压  $U_0$  设置为 2000V,充放电时间均为 5000s,测试温度为 28℃,从高压侧测得换油前后的去极化电流曲线,如图 2 所示。

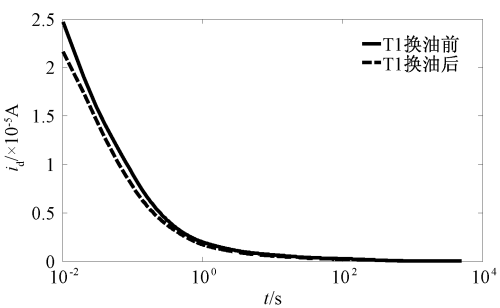


图2 变压器 T1 换油前后的去极化电流测试曲线  
Fig.2 Depolarization current test curves of transformer T1 before and after oil change

采用 3.1 节方法求解出换油前后的各极化支路弛豫响应参数  $A_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\tau_i$ ,具体结果见表 1。为了对比已有研究特征量,同时按文献[6]方法计算各弛豫谱线能量  $Q_i$ ,结果见表 1。

表 1 T1 各弛豫参数与弛豫谱线能量计算结果

弛豫参数		极化支路					
		1	2	3	4	5	6
$\tau_i/s$	换油前	301.1	12.8	1.37	0.23	0.061	0.014
	换油后	413.6	17.2	1.87	0.30	0.062	0.017
$A_i/ \times 10^{-7}A$	换油前	3.737	6.84	18.3	63.5	113.1	184.1
	换油后	3.692	6.67	17.7	56.9	92.6	136.5
$\alpha_i$	换油前	0.88	0.97	0.95	0.97	0.97	0.977
	换油后	0.87	0.97	0.94	0.95	0.96	0.963
$Q_i/ \times 10^{-7}C$	换油前	1125	87.7	25.1	15.0	7.05	2.551
	换油后	1125	87.7	25.3	15.3	5.79	2.293

根据  $\tau_i$  大小,可以将各极化支路划分为体现不同介质的极化过程,故由表 1 结果可知,极化支路 1 体现绝缘纸,极化支路 2、3 体现油纸界面,极化支路 4~6 则体现绝缘油。从表 1 计算结果分析可见,换油处理后的变压器相比于换油前的弛豫参数  $A_i$ 、 $\alpha_i$  以及弛豫谱线能量  $Q_i$  均有一定的变化。换油后线型因子  $\alpha_i$ 、弛豫贡献度  $A_i$  均有所减小,且变化幅度较大;换油后  $Q_i$  则出现增大或减小,无明显规律性。

为了直观地对比各特征量在换油前后的变化情况,可计算各特征量的变化率,结果见表 2。由表 2 可见,各极化支路的  $A_i$  变化率均比其余两个特征量大,其中表征绝缘油状态的极化支路 4~6 中的  $A_i$  变化率明显大于  $\alpha_i$ 、 $Q_i$  两个参数,表明该特征量在反映绝缘油老化状态时具有更高的灵敏度。通过分析弛豫时间小于 1s 的极化支路弛豫贡献度大小即可间接反映变压器油的绝缘质量。



表 2 换油前后各特征量变化率

Tab. 2 Change rate of each characteristic quantity  
before and after oil change

极化 支路	特征参量变化率(%)		
	弛豫贡献度 $A_i$	线型因子 $\alpha_i$	弛豫谱线能量 $Q_i$
1	-1.20	-0.64	-0.0002
2	-2.51	-0.51	-0.04
3	-2.28	-1.08	0.43
4	-10.37	-1.34	2.26
5	-18.12	-1.02	-19.71
6	-26.01	-1.43	-10.10

4.1.2 更换绕组前后的弛豫参数对比

油浸式变压器 T2 型号为 SFP9-240000/220,运行年限为 5 年。该变压器油绝缘状态良好,但发现低压绕组设计缺陷,对其进行检修更换低压绕组。在更换绕组前后,分别进行 PDC 测试。充电电压  $U_0$  设置为 2000V,充放电时间均为 5000s,测试温度为 30℃,在低压侧测得更换绕组前后去极化电流曲线,如图 3 所示。

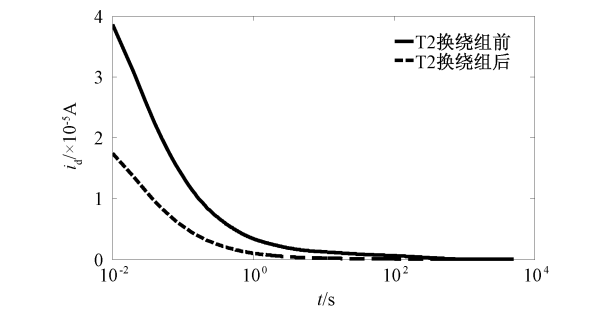


图 3 变压器 T2 换绕组前后的去极化电流测试曲线  
Fig.3 Depolarization current test curves of transformer T2 before and after changing winding

同样采用上述方法求解出 T2 更换绕组前后的各极化支路弛豫响应参数  $A_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\tau_i$ ,以及弛豫谱线能量  $Q_i$ ,计算结果见表 3。

从表 3 各特征参数结果可见,更换绕组前后的弛豫参数  $A_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\tau_i$  以及弛豫谱线能量  $Q_i$  均有一定的变化。其中  $\tau_i > 100s$  极化支路的  $\alpha_i$  减小,  $Q_i$  与  $A_i$  则减小明显,这是由于在检修期间更换低压绕组,使得绝缘纸的质量提升,大时间常数对应的弛豫参数发生明显变化。同样计算绕组前后各参量的变化率,对比各特征量反映绝缘纸状态的灵敏度,结果见表 4。可以看出,表征绝缘纸状态的极化支路 1 的  $A_i$  与  $Q_i$  变化率远大于  $\alpha_i$ ,故弛豫贡献度与弛豫

谱线能量在表征绝缘纸状态时同样具有较高灵敏度。

表 3 T2 各弛豫参数与弛豫谱线能量计算结果

Tab.3 Relaxation parameters and relaxation spectral line  
energy calculation results of T2

弛豫参数		极化支路					
		1	2	3	4	5	6
$\tau_i/s$	换绕组前	301.2	15.5	1.55	0.29	0.066	0.020
	换绕组后	394.1	10.3	1.32	0.25	0.061	0.019
$A_i/ \times 10^{-7} A$	换绕组前	8.64	7.94	30.4	81.4	161.9	221.3
	换绕组后	0.98	6.23	28.1	76.1	150.5	214.6
$\alpha_i$	换绕组前	0.94	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96
	换绕组后	0.86	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95
$Q_i/ \times 10^{-7} C$	换绕组前	2604	123	47.1	23.1	10.7	4.51
	换绕组后	389.3	64.6	37.1	19.5	9.93	4.14

表 4 更换绕组前后各特征量变化率

Tab.4 Change rate of each characteristic quantity before  
and after change winding

极化 支路	特征参量变化率(%)		
	弛豫贡献度 $A_i$	线型因子 $\alpha_i$	弛豫谱线能量 $Q_i$
1	-88.58	-9.40	-85.05
2	-21.55	0.22	-47.66
3	-7.49	-0.04	-21.28
4	-6.45	-0.61	-15.30
5	-7.06	-1.22	-7.44
6	-3.02	-0.57	-8.20

4.2 不同老化程度变压器的弛豫参数

为了进一步研究去极化电流中弛豫响应参数在油纸绝缘不同老化情况下的变化规律,现选取不同运行年限、不同老化程度的油纸绝缘变压器(T3 ~ T10)的现场测试数据进行分析验证。

变压器基本信息见表 5。为了尽量避免油纸绝缘系统结构等因素干扰,故所选变压器的电压等级与容量均为 220kV 和 240MV·A。在 PDC 测试过程中,外加充电电压均设置为 2000V,充放电时间均为 5000s。所测得不同老化程度变压器的去极化电流曲线如图 4 所示。

表 5 变压器基本信息

Tab.5 Basic information of transformers			
编号	型号	运行 年限/年	实际运行状况
T3	SFP9	18	检修前,老化严重且受潮
T4	SFSZ	0.5	刚投运,绝缘良好
T5	SFPS	15	老化较严重且受潮
T6	SFSZ	8	检修后投运,绝缘良好
T7	SFSE9	10	高压侧绕组老化
T8	SFLP9	5	绝缘状态较好
T9	SFSE9	1	新投运,绝缘良好
T10	SFP9	7	低压侧老化较严重

基于所测的去极化电流曲线,同样按照 3.1 节中改进弛豫响应函数特征参数的提取方法,计算出

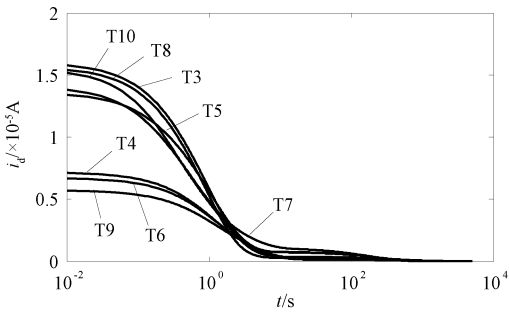


图 4 不同绝缘状况变压器的去极化电流测试曲线  
Fig.4 Depolarization current curves of transformers with different insulation conditions

各变压器的各极化支路弛豫响应参数  $A_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\tau_i$ , 计算结果见表 6。同样计算各弛豫谱线能量  $Q_i$ , 进行对比分析, 计算结果见表 7。

表 6 各变压器的弛豫参数计算结果

Tab.6 Relaxation parameters calculation results of each transformer							
变压器	弛豫参数( $A_i/\times 10^{-7}A,\alpha_i,\tau_i/s$ )						
	( $A_1,\alpha_1,\tau_1$ )	( $A_2,\alpha_2,\tau_2$ )	( $A_3,\alpha_3,\tau_3$ )	( $A_4,\alpha_4,\tau_4$ )	( $A_5,\alpha_5,\tau_5$ )	( $A_6,\alpha_6,\tau_6$ )	( $A_7,\alpha_7,\tau_7$ )
T3	(7.95, 0.94, 376.95)	(9.94, 0.95, 162.08)	(12.09, 0.98, 16.92)	(24.42, 0.99, 0.83)	(25.77, 0.98, 0.66)	(79.68, 0.99, 0.08)	(162.60, 0.99, 0.0028)
T4	(1.23, 0.86, 1556.20)	(1.62, 0.91, 19.32)	(13.13, 0.92, 1.14)	(19.88, 0.92, 0.36)	-	-	-
T5	(7.53, 0.91, 318.3)	(9.46, 0.93, 149.24)	(12.67, 0.93, 14.56)	(22.17, 0.97, 0.83)	(22.57, 0.98, 0.66)	(61.53, 0.98, 0.13)	(93.02, 0.99, 0.0058)
T6	(1.93, 0.86, 928.8)	(2.16, 0.92, 11.68)	(2.33, 0.93, 9.67)	(20.28, 0.95, 0.77)	(22.49, 0.96, 0.35)	-	-
T7	(10.79, 0.92, 259.42)	(15.22, 0.93, 108.53)	(15.65, 0.96, 10.52)	(33.23, 0.97, 0.67)	(34.13, 0.97, 0.44)	(32.00, 0.97, 0.15)	-
T8	(2.73, 0.86, 695.4)	(3.20, 0.91, 9.14)	(12.82, 0.92, 1.72)	(25.77, 0.93, 0.56)	(88.49, 0.95, 0.15)	-	-
T9	(1.47, 0.86, 1278.72)	(1.78, 0.90, 16.91)	(22.42, 0.91, 0.78)	(24.97, 0.92, 0.36)	-	-	-
T10	(3.75, 0.94, 851.2)	(6.15, 0.95, 271.7)	(7.81, 0.96, 23.63)	(21.95, 0.97, 1.22)	(61.35, 0.98, 0.21)	(54.20, 0.97, 0.12)	-

表 7 各变压器的弛豫谱线能量计算结果

Tab.7 Relaxation spectral line energy calculation results of each transformer							
变压器	弛豫谱线能量 $Q_i/\times 10^{-7}C$						
	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$
T3	2999.99	1612.00	204.60	20.40	17.00	6.20	0.46
T4	1919.52	31.26	15.10	7.14	-	-	-
T5	2399.99	1412.00	184.60	18.40	15.00	8.00	0.054
T6	1791.73	25.26	22.59	15.61	7.94	-	-
T7	2799.99	1652.00	164.59	22.40	15.01	5.02	-
T8	1897.56	29.26	22.01	14.40	13.14	-	-
T9	1881.52	30.60	17.60	9.14	-	-	-
T10	3191.00	1671.99	184.60	26.80	13.00	6.62	-

为了更直观地对比不同特征量,进一步将  $A_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $Q_i$  计算结果以图形形式表示,如图 5 ~ 图 7 所示。

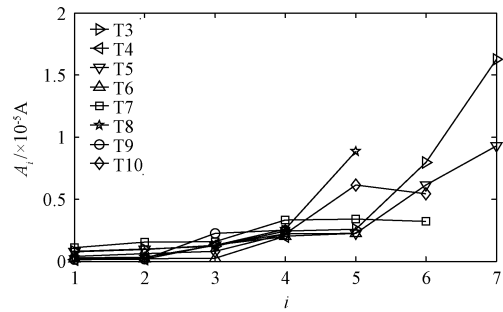


图 5 弛豫贡献度计算结果

Fig. 5 Calculation results of relaxation contribution

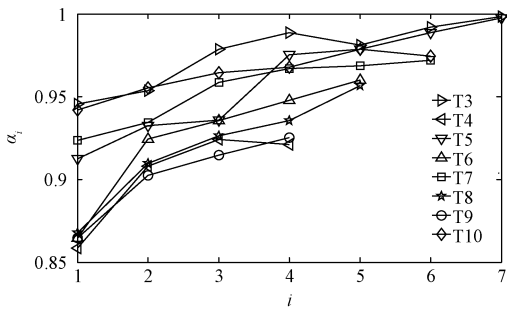


图 6 线型因子计算结果

Fig. 6 Calculation results of linear factor

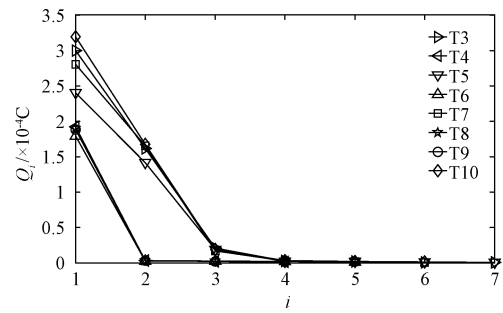


图 7 弛豫谱线能量计算结果

Fig. 7 Calculation results of relaxation spectral line energy

结果分析如下:

(1)由表 6 计算结果可以看出,不同老化程度的油纸绝缘等效极化支路数有所差异,如新投运的变压器 T4、T9 的极化支路只有 4 条,而运行年限较长且老化严重的变压器 T3、T5 极化支路数达到了 7 条,说明老化程度越深,极化支路将会增加,这与文献[6,7]的结论一致。

(2)由图 5 ~ 图 7 中不同弛豫参数和弛豫谱线能量的计算结果,结合表 6 和表 7 具体数值可知,随

着油纸绝缘老化加深,各极化支路的弛豫贡献度  $A_i$ 、线型因子  $\alpha_i$ 、弛豫谱线能量  $Q_i$  均为增大趋势。 $A_i$  在小时间常数支路变化明显, $Q_i$  在大时间常数下变化较明显, $\alpha_i$  在各极化支路均有所变化。

为了对比不同弛豫特征量在不同老化程度下的反映灵敏度,可以进一步计算各特征参量的变化率。由于变压器 T4 为刚投运的变压器,其绝缘情况理论上为最佳状态,故以 T4 计算结果为基准计算其余变压器的弛豫参数变化率。同时,老化程度不同的变压器极化支路数有所不同,因此取所有极化支路的弛豫参数均值进行变化率计算。各参量的平均变化率结果见表 8。

表 8 各变压器的特征量平均变化率

变压器	运行年限/年 (实际绝缘状况)	of each transformer 特征量平均变化率(%)		
		$A_i$	$\alpha_i$	$Q_i$
T3	18(老化严重且受潮)	413.80	3.66	40.78
T4	0.5(绝缘良好)	0	0	0
T5	15(老化较严重且受潮)	264.84	2.71	16.95
T6	8(检修后,绝缘良好)	9.76	1.53	-24.45
T7	10(高压侧绕组老化)	162.13	4.01	57.43
T8	5(绝缘状态较好)	196.72	0.95	-19.82
T9	1(绝缘良好)	41.19	-0.02	-1.75
T10	7(低压侧老化较严重)	188.53	2.54	72.13

从表 8 的各特征量变化率可以看出,弛豫贡献度  $A_i$  在绝缘老化程度不断加深的过程中,特征值变化显著,且均为增加趋势;弛豫谱线能量  $Q_i$  的变化率也较大,总体规律为随绝缘老化加深而增大,但绝缘状态相差不大时,变化规律出现不一致的情况,如变压器 T6、T8、T9 的  $Q_i$  出现减小;线型因子  $\alpha_i$  对绝缘状态反映有一定的规律性,即随着绝缘质量的提升,线型因子将减小,但其变化率较小,反映灵敏度不如  $A_i$  与  $Q_i$ 。综上所述,本文提出的弛豫贡献度相比于线型因子、弛豫谱线能量对变压器油纸绝缘老化的反映更为明显,且变压器运行年限越长,绝缘状态越差,弛豫贡献度越大。

5 结论

在改进弛豫介电响应函数的基础上,提取了去极化电流曲线中各极化支路的弛豫参数。通过不同运行年限、不同老化状态的变压器测试数据,研究了各弛豫参数对绝缘状态的变化规律,同时对比了线型因子、弛豫谱线能量,计算不同特征量随老化的变

化率情况。可以得到以下结论:

(1)极化支路的弛豫贡献度  $A_i$  在变压器油纸绝缘状态上具有很高的反映灵敏度;相同情况下,相比于线型因子  $\alpha_i$ 、弛豫谱线能量  $Q_i$  特征量,弛豫贡献度对绝缘老化的反映更加显著,更适合作为单个或多个特征量融合对油纸绝缘状态进行评估。

(2)不同弛豫时间常数下的弛豫贡献度  $A_i$  越大,表示对应反映的介质绝缘质量越差,根据弛豫贡献度大小可以间接表征同一变压器油和绝缘纸的不同老化状态,可为油纸复合绝缘系统的分类状态评估提供新的思路。

## 参考文献 (References):

- [1] 宋人杰,刘瑞英,王林 (Song Renjie, Liu Ruiying, Wang Lin). 灰色定权聚类 and 变权模式在变压器状态评估中的应用研究 (Application of grey fixed weight clustering and variable weight model in transformer condition evaluation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (3): 75-80.
- [2] 周远翔,黄欣,黄猛,等 (Zhou Yuanxiang, Huang Xin, Huang Meng, et al.). 温度对油纸绝缘空间电荷消散特性的影响 (Influences of temperature on space charge dissipation in oil-paper insulation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (7): 1-7.
- [3] 黄云程,蔡金锭 (Huang Yuncheng, Cai Jinding). 应用去极化能量谱评估变压器绝缘老化受潮状态 (Diagnosis of insulation condition of transformers by using depolarization energy spectrum) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (1): 53-59.
- [4] 刘捷丰,廖瑞金,吕彦冬,等 (Liu Jiefeng, Liao Ruijin, Lv Yandong, et al.). 电力变压器油纸绝缘含水量定量评估的时域介电特征量 (Time domain dielectric characteristics for quantitative assessment of moisture content in transformer oil-paper insulation) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (2): 196-203.
- [5] 黎成林,曹保江,尹小兵,等 (Li Chenglin, Cao Baojiang, Yin Xiaobing, et al.). 基于 PDC 的变压器油浸纸老化程度与水分含量评估方法研究 (Assessment method for aging degree and moisture content of transformer oil-paper based on PDC) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2017, 53 (11): 115-121.
- [6] 刘丽军,蔡金锭,江修波,等 (Liu Lijun, Cai Jinding, Jiang Xiubo, et al.). 去极化电流弛豫谱线特性的油纸绝缘老化判别研究 (Research of depolarization current relaxation spectrum characteristics in identifying oil-paper insulation aging) [J]. 仪器仪表学报 (Chinese Journal of Scientific Instrument), 2015, 36 (7): 1626-1631.
- [7] 郑文迪,蔡金锭,曾静岚 (Zheng Wendi, Cai Jinding, Zeng Jinglan). 采用线型因子的油纸绝缘系统老化状态评估 (Aging evaluation of oil-paper insulation system using line shape factor) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (2): 677-682.
- [8] 陈杨,蔡金锭,林燕桢 (Chen Yang, Cai Jinding, Lin Yanzhen). 基于油纸绝缘等效电路的变压器微水含量研究 (Research of micro water content of oil-paper transformer based on oil-paper insulation system's equivalent circuit method) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (5): 47-53.
- [9] 李安娜,蔡金锭,甘露,等 (Li Anna, Cai Jinding, Gan Lu, et al.). 基于区间-粒子群算法的油纸绝缘等效电路参数计算 (Parameter calculation for equivalent circuit of oil-paper insulation based on interval-particle swarm optimization algorithm) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (4): 37-42.
- [10] 李景德,曹万强,李向前,等 (Li Jingde, Cao Wanyang, Li Xiangqian, et al.). 时域介电谱方法及其在应用 (Time domain dielectric spectroscopy method and its application) [J]. 物理学报 (Acta Physica Sinica), 1996, 45 (7): 1225-1231.
- [11] 李景德,李家宝,符史流,等 (Li Jingde, Li Jiabao, Fu Shiliu, et al.). 自由和随机介电弛豫 (The free and random dielectric relaxations) [J]. 物理学报 (Acta Physica Sinica), 1992, 41 (1): 155-161.
- [12] 王林,周利军,李先浪,等 (Wang Lin, Zhou Lijun, Li Xianlang, et al.). 基于扩展 Debye 模型的变压器油纸绝缘时域介电响应法分析 (Time-domain analysis of dielectric response in oil-paper insulation using extended Debye model) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2013, 49 (5): 35-43.
- [13] Saha T K, Purkait P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11 (1): 144-154.
- [14] 黄云程,蔡金锭 (Huang Yuncheng, Cai Jinding). 油纸绝缘系统回复电压函数建模及拓扑结构辨识 (Return voltage function modeling and topology recognition of oil-paper insulation system) [J]. 电力自动化设备 (E-

lectrical Power Automation Equipment), 2016, 36 (3): 149-153.

[15] 彭积城, 蔡金锭 (Peng Jicheng, Cai Jinding). 基于等效电路极化支路和特征量的油纸绝缘变压器老化诊断 (Study on polarization branch and feature of equivalent circuit to evaluate transformer oil-paper insulation condition) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (8): 38-43, 50.

[16] 宋臻杰, 杨飞豹, 吴广宁, 等 (Song Zhenjie, Yang Feibao, Wu Guangning, et al.). 变压器油和绝缘纸老化对扩展 Debye 模型参数的影响研究 (Aging effects of transformer oil and insulation paper on extended Debye model parameters) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2016, 52 (8): 101-107.

Evaluation of aging status of transformer oil-paper insulation system based on relaxation contribution degree

YE Rong, CAI Jin-ding

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** Based on the modified dielectric response function, the variation of the contribution of depolarization current to the insulation state of oil paper is studied. In view of the deficiency of the existing research in defining the state of insulation aging by the linear factor of different relaxation time and relaxation spectrum energy, that is, low sensitivity and lack of characteristic small discrimination, the proposed depolarization current relaxation contribution is more sensitive and discriminative in reflecting the status of oil paper insulation. Through calculation and analysis of the transformer field test data with different operating time and different insulation conditions, the relaxation contribution degree is more obvious and has some regularity, as compared with the linear factor and the energy characteristic parameters of the relaxation spectrum line. The mechanism of the relaxation contribution reflects the insulation state is analyzed, and the results show that the greater the contribution of the relaxation is, the more serious the insulation aging is. It can provide a new characteristic quantity for the state evaluation of the transformer oil paper composite insulation.

**Key words:** depolarization current; dielectric response; relaxation contribution; oil-paper insulation state; aging assessment