

基于去极化电流子谱线的油纸绝缘老化评估

吴文宣^{1,3} 张孔林^{2,3} 蔡金锭³ 施广宇² 李安娜³

(1. 国家电网福建省电力公司, 福州 350001; 2. 福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007;
3. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108)

摘要 去极化电流能够很好表征油纸绝缘系统介质响应过程。本文对去极化电流内部弛豫特性进行研究, 引入子谱线和子谱线能量这两个新特征量, 探讨子谱线能量与绝缘老化状况的关系, 进而研究子谱线与油纸绝缘成分的对应关系, 从而得到油纸绝缘老化的判别方法。研究结果表明子谱线能量对老化变化灵敏, 它随绝缘水平的降低而显著增加; 绝缘油的状态与小时间常数子谱线相关; 绝缘纸的状态与大时间常数子谱线相关。因此, 去极化电流子谱线及其能量可重点作为绝缘诊断的判据, 其为准确评估油纸绝缘老化状态提供一种可靠有力的分析手段。

关键词: 去极化电流; 子谱线; 子谱线能量; 油纸绝缘

Aging Condition Evaluation of Oil-Paper Insulation based on Depolarization Current Sub-lines

Wu Wenxuan^{1,3} Zhang Konglin^{2,3} Cai Jinding³ Shi Guangyu² Li Anna³

(1. Sate Grid Fujian Provincial Electric Power Company Limited, Fuzhou 350001; 2. Sate Grid Fujian Provincial Electric Power Company Limited, Electric Power Tecnology and Research Institute, Fuzhou 350001;
3. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108)

Abstract Depolarization current analysis is a better method for reflecting characteristics of the polarization process of dielectric response. The inner relaxation characteristics of depolarization current are studied in this paper. Two new characteristic quantities including sub-lines and its energy are introduced so as to further analyze the relationship between sub-lines energy and aging condition of oil-paper insulation, and the correspondence between sub-lines and the compositions of oil-paper insulation. And then a method to distinguish aging condition of oil-paper insulation is derived. Results show that, the sensitivity of sub-lines energy is sensitive to aging condition, sub-lines energy increases with the lower insulation level .The state of insulating oil is closely related to sub-lines of small time constant. The state of insulating paper is closely related to sub-lines of big time constant. So, depolarization current sub-lines and its energy can be accepted as the criterion of insulation diagnosis. The research will be one of effective means in the assessment of oil-paper insulation aging status.

Keywords: depolarization current; sub-lines; sub-lines energy; oil-paper insulation

油纸绝缘设备在长期运行过程中, 受到电、热、机械等因素的影响, 其内部绝缘材料的微观分子结构发生变化, 同时产生水、醛、酸、酮等强极性老化产物, 使得油纸绝缘系统的介电特性发生改变^[1]。目前用于油纸绝缘老化状态评估方面的技术和方法众多, 在这些方法中有非电气特征量分析方法和电

气特征量判别法^[2-4]。近年来, 基于时域介电响应理论的电气特征量判别法颇受国内外学者的关注, 其中极化去极化电流(PDC)方法能有效地反应油纸绝缘老化状态也广受研究^[5-6]。大多学者采用实验方法研究去极化电流曲线与老化程度、温度等的关系, 但只是定性地分析在不同情况下去极化电流曲线的

变化，而对去极化电流内部弛豫特性与油纸绝缘老化状况的关系少有研究。

针对上述文献中出现的不足，本文研究去极化电流内部弛豫特性，并提出去极化电流子谱线的油纸绝缘老化判别方法。该方法首先基于扩展德拜模型等效电路建立指数式衰减的去极化电流函数，从中提取子谱线和子谱线能量这两个特征量。其次，探讨子谱线能量与绝缘老化状况的关系，从而得到油纸绝缘老化的判别方法，并进一步进行验证。最后，研究子谱线与油纸绝缘成分的对应关系，为进一步区分油或纸的老化奠定良好的基础。

1 等值电路模型及去极化电流函数

基于扩展 Debye 模型^[7]的介质响应等效电路常用来分析油纸绝缘系统的复杂极化过程，如图 1 所示。

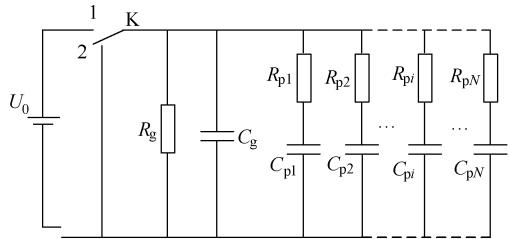


图 1 基于扩展 Debye 模型的介质响应等效电路

R_g 是油纸组合绝缘严格物理意义上的绝缘电阻，反映油纸组合绝缘的电导情况， R_g 可以通过最大时间处极化电流与去极化电流之差与直流电压的比值得到； C_g 是绝缘系统的几何电容，其为工频下的测量电容；利用 n 条 RC 串联支路的并联电路来等效极化电路。

将开关 K 合在 1 处，即在油纸绝缘设备的绝缘机构两极施加直流脉冲高电压 U_0 ，在时间段 t_c 内对油纸绝缘设备充电，电介质处于极化过程，此时流过电介质的电流为极化电流 i_p ；然后将开关 K 合在 2 处，即油纸绝缘设备的两极短路，放电 t_d 时间，此时电介质处于去极化过程，测量流过电介质中的反向去极化电流 i_d ，直至趋近于零为止。形成曲线如图 2 所示。

去极化电流 i_d 反映了油纸绝缘设备内部不同电介质的弛豫响应变化过程，其函数表达式为^[8]

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

$$B_i = U_0 \frac{[1 - \exp(-t_c/\tau_i)]}{R_i} \quad (2)$$

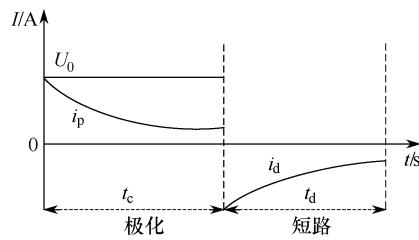


图 2 极化去极化电流测试过程

式中， C_0 为真空电容值， n 表示介质中弛豫机构的个数，也称为极化支路数， τ_i 为弛豫机构的响应时间， A_i 表示第 i 个弛豫机构的权重系数， $B_i = C_0 U_0 A_i$ ，它表示第 i 项弛豫机构对去极化电流的贡献。

从式 (1) 可以看到， n 条极化支路共同作用的去极化电流可以看成 n 个指数衰减项叠加而成，本文称每个指数衰减项为去极化电流的子谱线 i_{di} ，其表达式如下所示：

$$i_{di} = B_i e^{-t/\tau_i} \quad (3)$$

另外，引入一个新的特征量——子谱线能量 Q_i ，其表达式如式 (4) 所示

$$Q_i = \int_0^\infty i_{di} dt = \int_0^\infty B_i e^{(-t/\tau_i)} dt = B_i \tau_i \quad (4)$$

Q_i 能说明各子谱线能量积累和释放的过程，通过求取子谱线能量，可更好地获悉各个子谱线变化的微观过程。

而根据电介质理论，去极化电流属于介质中的吸收电流，它与弛豫极化强度 P_r 的关系为^[9]

$$i_d = S \frac{dP_r}{dt} \quad (5)$$

S 为吸收电流所流经的介质截面积，与介质的绝缘结构有关，它随老化的程度不大。

式 (5) 经变换有

$$P_{ri} = \frac{1}{S} \int_0^\infty i_{di} dt \quad (6)$$

通过比较式 (4) 和式 (6) 可知，各弛豫机构的子谱线能量与其相应的极化强度是相关的，因此可以用子谱线能量 Q_i 来表征绝缘介质的极化强度，其能更直观的判别油纸绝缘系统的老化状态。

2 应用子谱线能量分析油纸绝缘老化状况

2.1 子谱线能量与老化状况关系

本文对多台变压器的去极化电流测试数据进行仿真和分析，由于篇幅限制，现以下面两台不同绝缘状况的变压器如表 1 所示为例，研究子谱线能量

与不同老化状况的关系。

表 1 变压器的基本信息

序号	型号	运行年限/年	绝缘状况
T ₁	SFSZ10-180000/220	1	良好
T ₂	SFL-50000/110	22	老化严重

利用去极化电流测试法对上述两台变压器进行测试，试验回路示意图如图 3 所示。静电计内置直高压电源和高精度电流表，A 为高精度的测量仪表，能够把微小的去极化电流数值记录下来。开关 1 和 2 的功能与图 1 的一致。

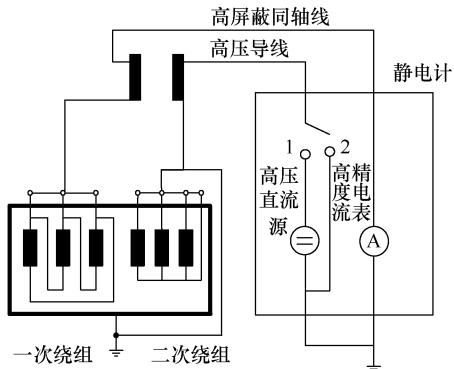


图 3 试验回路示意图

在充电电压为 2000V，充电时间和放电时间都为 1000s 时，测试得到的去极化电流曲线如图 4 所示。

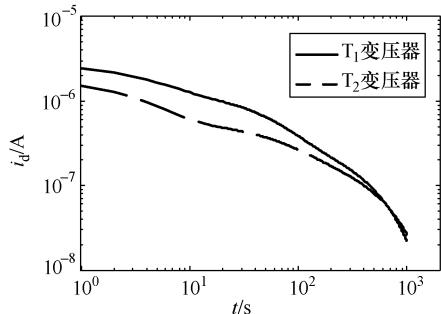


图 4 不同老化程度的去极化电流测试曲线

在去极化电流测量数据的情况下，采用最小二乘拟合法可以求解出各支路参数、时间常数和对去极化电流的贡献 B_i 。

随着支路数的增加，未知数也会增加，这将使参数计算更加困难。文献[10]采用 6 条极化支路时的计算结果已能较准确地吻合试验数据，因此，笔者采用 6 条极化支路进行计算分析。下面利用最小二乘拟合法^[11]，求解出 T₁ 和 T₂ 变压器的参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 T₁ 变压器的等效电路参数

子谱线	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF	τ_i/s	$B_i \cdot 10^{-7}$
1	7.2889	61.7811	450.31	2.7439
2	5.8865	10.6903	62.929	3.3976
3	1.6079	2.2573	3.6295	12.439
4	0.6912	0.1008	0.0697	28.935
5	0.4950	0.0315	0.0156	40.404
6	0.321	0.01	0.0032	62.305

表 3 T₂ 变压器的等效电路参数

子谱线	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF	τ_i/s	$B_i \cdot 10^{-7}$
1	5.331	68.12	363.15	3.7516
2	2.0489	23.283	47.705	9.7613
3	1.4076	2.9979	4.2198	14.421
4	0.5202	0.35471	0.1845	38.447
5	0.1941	0.7351	0.1427	103.04
6	0.1755	0.0937	0.0164	113.96

根据现有判别方法：去极化电流的 Debye 模型中最大和最小时时间常数对应的 R 、 C 可作为表征油纸绝缘老化程度的特征量^[12]，再结合表 2 和表 3 结果，可以判断 T₁ 的绝缘情况比 T₂ 的好。

根据式 (4)，子谱线能量 $Q_i=B_i\tau_i$ ，可以得到三台变压器的子谱线能量见表 4。

表 4 不同变压器的子谱线能量

$Q_i \cdot 10^{-7}/C$	T ₁ 变压器	T ₂ 变压器
1	1235.6	1362.4
2	213.81	465.66
3	45.146	59.958
4	2.0168	7.0942
5	0.6303	14.702
6	0.1994	1.8740

从表 4 可以看到，T₂ 变压器绝缘老化严重，其子谱线能量比 T₁ 变压器大。子谱线能量 Q_i 随绝缘水平的降低而显著增加，因此它可以作为老化诊断的新特征量。与现有判别方法对比，子谱线能量对老化变化更加灵敏，不同老化程度的子谱线能量差别大。为说明该结论的正确性，下面进行进一步验证。

2.2 结论验证

为证实子谱线能量可以作为老化诊断的新特征量，本文另取文献[4]的三条不同老化程度绝缘系统的去极化电流曲线进行分析，如图 5 所示。

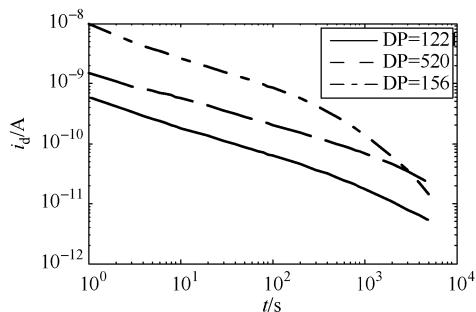


图 5 不同老化程度的去极化电流测试曲线

采用上述求解方法，可以得到不同老化程度的去极化电流子谱线能量见表5。

表 5 不同老化程度的子谱线能量

$Q_i \cdot 10^{-10} / C$	DP=1221	DP=520	DP=156
1	676.24	2888.2	3265.9
2	159.70	382.22	2223.9
3	43.584	144.94	693.41
4	17.016	51.167	231.75
5	8.3438	14.213	110.86
6	2.8340	8.5448	81.595

根据表5的分析结果，应用子谱线能量随绝缘水平的降低而显著增加这一结论，则可分别判断出三条去极化电流代表的绝缘状况：DP=1221的子谱线能量最低，DP=1221的老化程度比DP=520、DP=156轻，绝缘状况最好；而在三者中DP=156的子谱线能量最高，则其老化程度比DP=1221、DP=520严重，绝缘状况最差。

以上分析判断结果，与三条去极化电流代表的绝缘实际情况是相吻合的。这同时验证了本文提出的老化判别方法的正确性和可行性。

3 油纸绝缘成分与子谱线的对应关系

油纸绝缘介质的去极化电流是介质中各项弛豫机构共同作用的结果，许多学者已通过实验证实了变压器油、纸对去极化电流的不同影响。由此，寻找绝缘不同成分与去极化电流变化的关系，以及导致去极化电流产生相应变化的子谱线，既可建立绝缘不同成分与子谱线的对应关系。

绝缘油在电场作用下以电子位移极化为主，其极化时间短，对应的时间常数小，其产生的极化电流衰减较快，主要影响去极化电流的初始部分；而绝缘纸在电场作用下以偶极子转向极化为主，其极化时间较长，对应的时间常数大，主要影响去极化电流的末端部分^[13]。

以上述的T₁变压器为研究对象，将电路参数中6条子谱线分为两组，这两组时间常数分别反映了不同绝缘介质极化特性。一组为时间常数较大的子谱线（时间常数大于100s，对应于表2中的子谱线1）；一组为时间常数较小的子谱线（时间常数小于100s，对应于表2中的子谱线2、3、4、5和6），它们反映绝缘介质的缓慢极化过程。下面仿真分析模型子谱线变化时对去极化电流产生的影响，如图6所示。

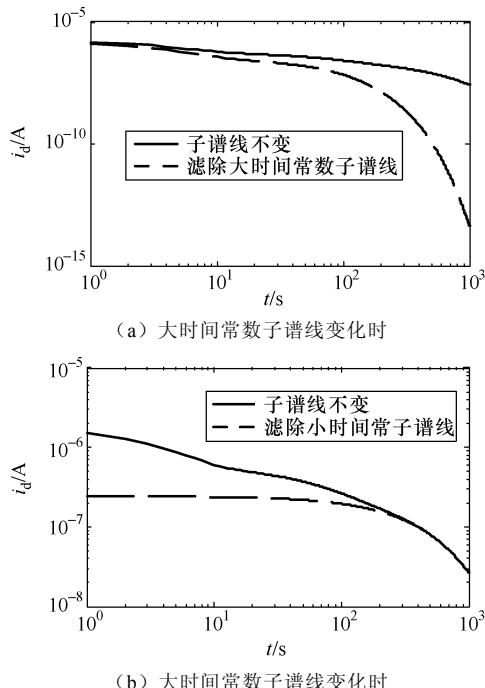


图 6 子谱线改变的去极化电流仿真图

图6(a)可见，当滤除原有模型中的大时间子谱线后，去极化电流末段发生塌陷，所以去极化电流末端主要由大时间常数子谱线支持。而图6(b)为小时间常数子谱线对去极化电流的影响，小时间常数子谱线主要作用于去极化电流的前段。

结合油纸绝缘成分与去极化电流曲线的关系和各时间常数子谱线对去极化电流的影响可以得到结论如下：

- 1) 绝缘油的状态与小时间常数子谱线相关，对应去极化电流曲线的初始部分。
- 2) 绝缘纸的状态与大时间常数子谱线相关，对应去极化电流曲线的末端部分。

4 结论

本文不再只是定性地分析在不同情况下去极化

(下转第72页)