

基于局部放电与 PDC 法的油膜介质老化程度研究

赵凯林¹, 张晨萌², 侯世英¹, 高晨璐¹, 程 铭¹

(1. 输配电装备系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 电力电容器在其长达数十年的运行周期中会随时间不断老化, 且以操作过电压造成的电老化为主。电容器的内绝缘——油膜介质在承受多次冲击电压后会发​​生绝缘性能下降, 甚至出现绝缘早期失效的现象。为了对不同老化程度的油膜型介质有一个初步的判断, 搭建了油膜介质老化与测试平台来对其施加不同次数的冲击电压, 并分别采用交流下的局部放电法与极化去极化电流法进行实验研究。结果表明, 随着油膜介质老化程度的加深, 其交流下局部放电的起始放电电压是下降的, 并且油膜介质 PDC 曲线去极化电流最大值呈上升的趋势。最后, 结合油膜介质在冲击电压作用下内部分子结构的变化进行了相应的解释。

关键词: 油膜介质; 冲击电压; 局部放电; PDC 法

中图分类号: TM21 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)03-0008-04

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.03.002

Research on Aging Degree of Oil – film Dielectric Based on Partial Discharge and PDC Method

Zhao Kailin¹, Zhang Chenmeng², Hou Shiyong¹, Gao Chenlu¹, Cheng Ming¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System

Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The power capacitor will age continuously with time in its long operation cycle of several decades, mainly caused by operating overvoltage. Internal insulation of capacitor — the oil – film dielectric will suffer from the decline of insulation state and even the early failure of insulation after it has been subjected to multiple impulse voltages. In order to have a preliminary judgment of oil – film dielectric with different aging degree, an oil – film dielectric aging and testing platform is established to apply multiple impulse voltage, and the partial discharge (PD) under AC and polarization and depolarization current (PDC) method are used respectively. The results show that the initial discharge voltage of PD decreases with the aging degree of oil film dielectric, and the maximum depolarization current of PDC curve increases. Finally, the above changes are explained by the changes of the internal molecular structure of oil – film dielectric under the impulse voltage.

Key words: oil – film dielectric; impulse voltage; partial discharge; PDC method

0 引 言

电容器作为电力系统中关键的无功补偿和滤波设备, 其良好的运行状态对于保证电网的稳定性具有重要意义^[1-3]。然而近几年, 输电系统中发生的故障事故大多数都来源于电容器的绝缘劣化^[4], 而电容器绝缘性能下降的主要原因是由于频繁的投切使其承受多次的操作过电压。电力电容器内的绝缘

材料为苜基甲苯和聚丙烯构成的复合介质(其中苜基甲苯作为绝缘油, 聚丙烯作为有机膜), 电力电容器在承受多次操作过电压下的失效过程也与这两种材料密切相关。因此, 通过对电容器施加多次的冲击电压来模拟其老化过程, 从中找到判断电容器老化程度的检测方法与相关特征量显得十分必要。

传统的电力电容器老化状态检测方法主要包括油中溶解气体、糠醛、平均聚合度、局部放电法等^[5-6], 但前3种方法或多或少都存在取样困难、不

易检测等问题,而局部放电法作为一种无损的绝缘检测技术,不仅可通过放电量、放电次数等参数来反映介质的绝缘状态,而且测试的灵敏度较高,在电力行业的应用十分广泛。文献[7]中研究了油膜介质中聚丙烯薄膜的绝缘状态对局部放电情况的影响,随着聚丙烯老化程度的加深,局部放电的严重程度明显增加,且放电部位周围介质的电导率也会发生变化。文献[8]通过直流局部放电信号研究了脉冲电容器的老化规律,并设计了一套直流局部放电测试系统;该系统能够滤除干扰脉冲从而提取出局部放电脉冲数,得到了不同老化阶段的局部放电统计特性,解决了现场局部放电测试中的低灵敏度和干扰大的问题。

近年来,作为一种新兴的老化程度检测手段,极化去极化电流法(polarization-depolarization current, PDC)受到广大学者的重视^[9-11]。该方法基于介电响应理论,在外加电场的作用下,电介质中的偶极子受到力的作用发生转向,该过程称为极化现象,主要包括偶极子转向极化、位移极化、分子界面极化等,产生一个极化电流;当撤去外电场时,偶极子不再受到力的作用,分子由于自身的弛豫性质会逐渐恢复到离散的状态^[12],称为去极化过程,产生一个去极化电流。PDC法具有非破坏性、测试速度快等优点,且当电介质材料出现老化后,其极化和去极化电流中包含了介质的绝缘状态信息,利用测试得到的PDC曲线提取相应的指标从而可以有效地对油膜介质的老化程度进行判断。文献[13]研究了变压器油纸绝缘极化/去极化电流法特征量,分别对油老化和纸老化提出了不同的特征量,并验证了其可行性。文献[14]采用极化去极化电流法来评估配电网中运行的交联聚乙烯(XLPE)电缆的绝缘状态,通过对比不同电缆的去极化电流曲线从而判断其绝缘性能,实验数据的拟合也达到了理想的效果。

因此,基于上述两种方法,分别对不同次数冲击电压下的油膜介质进行实验,以油膜介质交流局部放电下的起始放电电压与PDC曲线去极化电流最大值作为老化程度的判断依据,并结合电介质在冲击电压下其内部微观变化对实验现象进行了合理的解释。

1 实验基本原理

1.1 极化去极化电流法

当对待测的电介质施加一个电压时,由于复合

电介质可等效为电容,即可理解为外加电场 $E(t)$ 作用在试品电容上,根据全电流公式,电介质材料内部的电流可表示为

$$i(t) = C_0 \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} U(t) + \varepsilon_\infty \frac{dU(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) U(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

把外加电压替换成直流电压,此时电介质处于极化状态,即利用一恒定的直流源 $U(t)$ 为试品电容充电。由于是直流电压,式(1)中便不存在微分项,极化电流 i_p 可表示为

$$i_p(t) = C_0 U(t) \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + f(t) \right] \quad (2)$$

式中: C_0 为试品电介质的等效电容; σ_0 、 ε_0 分别为电介质的直流电导率与真空介电常数; $f(t)$ 为一衰减函数,用来表示电介质极化过程的响应能力,且衰减情况取决于电介质的材料以及外界因素。

当撤去该直流电源,即外电场的作用也相应地消失,进入去极化过程。电介质中的带电粒子由于自身弛豫性质产生与极化电流相反的去极化电流 i_d , 则 i_d 可表示为

$$i_d(t) = -C_0 U \left[f(t+t_d) - f(t) \right] \quad (3)$$

式中, t_d 为极化时间。

采用极化-去极化电流法所得出的曲线如图1所示。

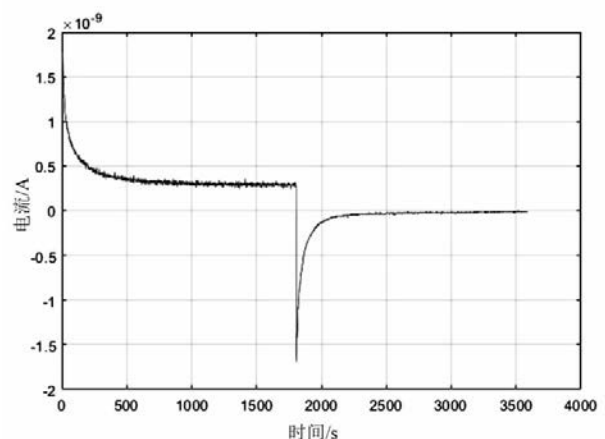


图1 极化去极化电流曲线

从图1曲线可以看出:不论电介质处于极化还是去极化状态,电流总是呈现出衰减的趋势,这种趋势由电介质中分子的极化程度是否充分决定;并且当极化时间足够长时,极化电流与去极化电流均会

趋于一个稳态值,去极化电流会逐渐衰减到0而极化电流的稳态值并不为0。这是因为油和膜组成的复合电介质存在一定的电阻,当外加电场作用于该介质时,极化电流的来源不仅是电介质中偶极子的定向移动,还有外加电压在等效电阻上产生的电导电流,所以其稳态值就是电导电流的大小;当移除了直流电压源,偶极子不再受到力的作用而恢复到起始的无序状态,这时没有电导电流的影响,故其稳态值会衰减到0。

综上所述,为了能够得到复合介质更精确的绝缘状态信息,完全反映电介质的绝缘情况,并排除电导电流的干扰,故将去极化电流作为对象来研究其与电介质老化程度的关系。

1.2 交流下局部放电试验

高压电力设备绝缘内部由于各种原因存在气泡、杂质等,而这些正是发生局部放电的根本原因。对于油膜绝缘这样的复合电介质,其内部存在的气泡可以等效为一个平行板电容器中含有气泡,相应的等值电路如图2所示。

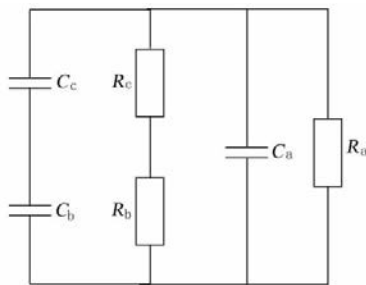


图2 等值电路

由于每次发生局部放电的时间极短,且是高频的脉冲信号,所以等值电路中不用考虑 R_a 、 R_b 、 R_c 这3个电阻的作用,即等值电路由其他介质的电容 C_a 、与气

泡串联介质的电容 C_b 和气泡的电容 C_c 三者组成^[15]。

随着交流电压的增加,气泡上的电压随着外加电压的变化而变化。当气泡两端的电压增加到其击穿值时,气泡发生放电并电离出正负离子,这些离子在外电场作用下移动形成反向电场使气泡两端的电压降低,气泡即停止放电。局部放电就是上述过程的重复。根据局部放电的特点,找到电介质中气泡第一次被击穿的电压,即起始放电电压,是关键的一步。在起始放电电压下不仅能够观察到局部放电的特征信号,而且也不会对电介质造成很大的损伤,故可将其作为判断电介质老化程度的一个判据。

2 实验研究方案

2.1 老化平台

采用如图3所示的连续冲击电压发生器来对油膜介质施加不同次数的冲击电压,通过改变球隙之间的距离来确保冲击电压发生器能够完全触发。为了使冲击电压能够连续施加,并且防止油膜介质在实验过程中不慎被击穿,该实验将冲击电压的幅值设置为17 kV,且每60 s施加一次冲击。

2.2 PDC 测试平台

根据如图4所示的实验原理图对样品及测量装置进行接线。其中,真空高压继电器、限流电阻、皮安表都内置于PDC测量仪器中。被试样品采用四层12 μm的聚丙烯薄膜,并将其完全浸没于苯基甲苯的绝缘油中。测量时,为保证油膜介质的充分极化以及足够的采样点数从而计算出更为精确的数据,因此将极化电压设置为1500 V,极化时间设为1800 s,采样点数设为1200个。

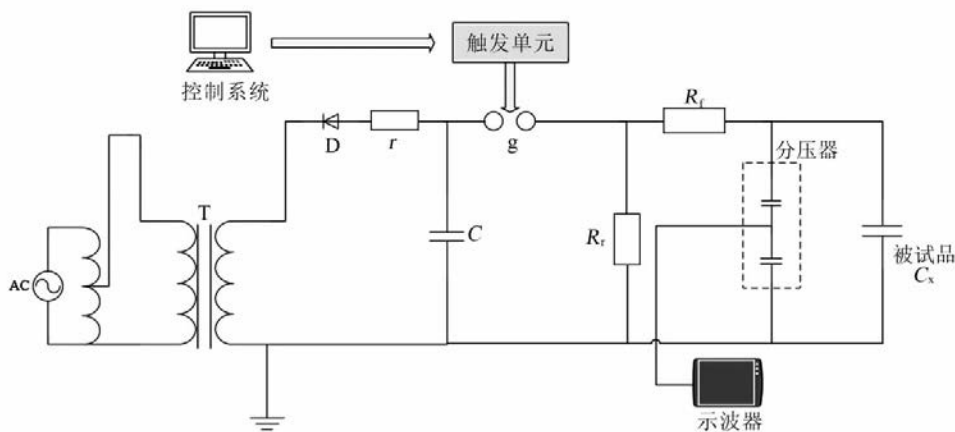


图3 冲击电压发生器实验原理

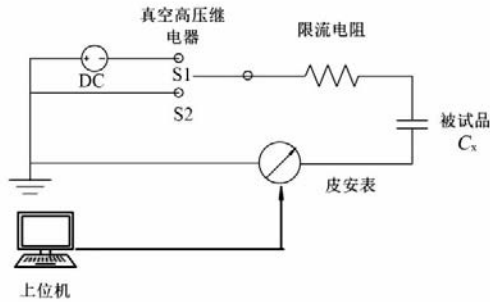


图 4 PDC 测试原理

2.3 交流局部放电测试平台

利用如图 5 所示的试验平台对不同老化程度的油膜样品进行交流下的局部放电试验。本实验采用高频电流传感器 (high frequency current transformer, HFCT) 作为局部放电信号的检测仪器。HFCT 的优势在于能对较宽频带的电流信号进行检测,且检测的稳定性好、精度较高。通过将 HFCT 安装在试品电容一端与接地线之间的导线上,不仅保证了局部放电信号的完整采集,同时实验的安全性也得到了保障。

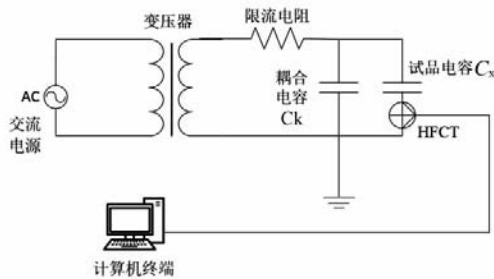


图 5 局部放电测试原理

3 实验结果分析

3.1 PDC 结果分析

实验过程中分别对样品施加 100、200、300、400 次冲击,通过对比不同老化程度下油膜介质 PDC 曲线,并对采样结果进行分析,发现油膜介质的去极化电流最大值呈现出如图 6 所示的变化规律。

当样品无损时,其去极化电流最大值仅为 1.69 nA。当对样品施加 100 次冲击后,其去极化电流最大值几乎增加了 1 倍,变为 3.30 nA。随着冲击电压次数的增加,样品的去极化电流最大值也是呈现出增加的趋势,最终当对样品施加 400 次冲击时,去极化电流最大值达到了 5.62 nA。结合油膜介质在多次冲击电压下的微观变化,图 6 中的递增规律可以概括为:随着样品老化程度的加深,复合介质中的油和膜均发生了不同程度的损伤,聚丙烯

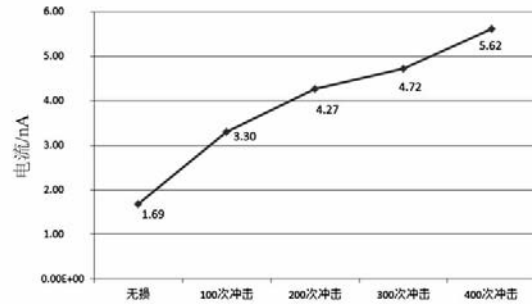


图 6 不同老化程度下去极化电流最大值变化情况

薄膜内部的部分分子链发生断裂生成新物质,部分绝缘油分子也会分解生成新的物质^[16],如带电粒子等;带电粒子数量的增加会使得在外电场作用下定向移动的粒子数量增加,当电场撤去的一瞬间,去极化电流的最大值也会增加,故去极化电流的最大值会随着老化程度的增加而上升。

3.2 交流局部放电实验结果分析

对不同冲击次数下的油膜介质进行交流局部放电实验来测量其起始放电电压,结果如表 1 所示。

表 1 不同冲击次数下的油膜介质起始放电电压

冲击次数/次	起始放电电压/kV
0(无损)	8.4
100	8.0
200	7.5
300	6.9
400	6.3

由表 1 可以看出,样品无损时的起始放电电压为 8.4 kV,随着冲击电压次数的增加,油膜介质交流局部放电下的起始放电电压在逐渐下降。当施加 400 次冲击时,油膜介质在 6.3 kV 的交流电压下就会出现局部放电信号。这是因为冲击电压的反复施加使油膜介质的损伤加大,油和膜的分子结构都会发生变化,复合介质内部的气泡和新生成的杂质物质都会增加;这将会使油膜介质在更低的电压下出现放电现象,因此其起始放电电压也会随之降低。

4 结语

为了模拟电容器在运行过程中承受的多次操作过电压,对油膜介质样品施加不同次数的冲击电压,并分别利用极化去极化电流(PDC)法与交流下的局部放电法对不同老化程度样品进行实验,进而分析其去极化电流最大值与起始放电电压的变化趋势,从而得出以下结论:

(下转第 52 页)

现状综述[J]. 山东电力技术, 2015, 42(1): 30-34.

[2] 唐法庆, 刘荣海, 耿磊昭, 等. 机器人路径规划及目标识别算法在变电站检测机器人中的应用[J]. 云南电力技术, 2017, 45(5): 78-81.

[3] 江渊, 刘珍, 张慕婕, 等. 机器人智能导航技术在变电站的研究与应用[J]. 电工技术, 2019(22): 126-127.

[4] 廖佳威. 变电站巡检机器人定位导航技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.

[5] 郑争光, 任小洪, 程亚军, 等. 未知环境下单目视觉移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2018(3): 255-258.

[6] 张书玮. 基于机器视觉和雷达数据融合的变电站巡检机器人自主导航方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

[7] 薛永胜. 变电站巡检机器人SLAM算法及其应用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.

[8] He Z, Wang Q. A Fast and Effective Dichotomy Based Hash Algorithm for Image Matching [C]. Advances in Visual Computing, International Symposium, Isvc, Las Vegas, Nv, Usa, December, Part I, 2008.

[9] 王博达. 基于激光雷达与视觉的监所机器人建图定位算法研发[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

[10] 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川阿泰因机器人智能装备有限公司. 一种复杂环境下的视觉定位方法: 中国, 201910620329.0 [P]. 2019-07-10.

作者简介:

谢晓娜(1978), 博士, 副教授, 主要研究方向为物联网与智能电网;

刘 曦(1982), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网设备材料抽检。

(收稿日期: 2020-04-09)

(上接第11页)

1) 随着油膜介质老化程度的加深, 油膜介质在冲击电压的反复作用下生成了新的带电粒子, 去极化电流的最大值呈现出上升的趋势;

2) 冲击电压次数的增加导致油膜介质的绝缘状态不断下降, 新增的气泡与杂质使得油膜介质的在交流下的起始放电电压降低。

参考文献

[1] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.

[2] 彭倩, 吴广宁, 周力任, 等. 电容器绝缘检测技术的现状与发展[J]. 绝缘材料, 2008, 41(1): 67-70.

[3] 党晓强, 刘念. 电力电容器在线监测技术研究[J]. 四川电力技术, 2003, 26(6): 6-7.

[4] 叶建铸, 管春伟, 谢超, 等. 高压直流输电工程用电力电容器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 71-75.

[5] 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, 2012.

[6] 彭倩, 吴广宁, 张星海, 等. 局部放电对脉冲电容器的绝缘老化及其失效的影响分析[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 489-492.

[7] Krishnan V, Nema R S. A Study on Partial Discharge Degradation of Polypropylene Films [C]. Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena - Annual Report 1987, IEEE, 2016: 120-125.

[8] 王鹏, 吴广宁, 罗杨, 等. 脉冲电容器绝缘老化和直流

局部放电测试系统[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1268-1274.

[9] 杨帆, 沈煜, 王彦博, 等. 基于极化/去极化电流法的交联聚乙烯电缆热老化程度判定[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 496-503.

[10] 周利军, 王林, 李先浪, 等. 基于极化/去极化电流法的油纸绝缘时域电导模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1433-1438.

[11] 赵荣普, 陈井锐, 赵威, 等. 基于极化-去极化电流法变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 绝缘材料, 2017, 50(12): 78-82.

[12] 田杰, 段绍辉, 许昊, 等. 温度及老化状态对油纸绝缘时域介电响应特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(S1): 69-75.

[13] 吴广宁, 宋臻杰, 杨飞豹, 等. 基于时域介电谱和去极化电量的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 195-202.

[14] 雷勇, 蒋世超, 周凯, 等. 基于极化-去极化电流方法的交联聚乙烯电缆绝缘无损检测[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2643-2649.

[15] 于成龙, 叶海福. 高压脉冲电容器的直流局部放电绝缘检测[J]. 高电压技术, 2006(6): 5-8.

[16] 司马文霞, 华杰方, 孙魄韬, 等. 冲击电压作用下冲击电容器用聚丙烯薄膜累积失效特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 358-365.

作者简介:

赵凯林(1996), 硕士研究生, 研究方向为电力电容器内绝缘与老化。

(收稿日期: 2020-03-20)