

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.021

基于 PDC 法的干式套管用胶浸纸绝缘受潮状态评估

张寒¹, 万保权¹, 胡伟¹, 许佐明¹, 尹朋博¹, 司文荣²

(1. 中国电力科学研究院电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 国网上海市电力公司, 上海 200437)

摘要:为了提取表征胶浸纸(RIP)绝缘受潮状态的特征参量,文中将时域介电响应技术应用用于受潮状态评估,并利用极化/去极化电流(PDC)测量法对其进行深入研究。首先在实验室制备不同含水量的 RIP 绝缘样片并测试获得 PDC 曲线;然后引入遗传算法和内点法相结合的优化算法,利用 Matlab 获得扩展德拜模型参数;最后提取 2 个受潮状态特征参量,即最大时间常数分支的弛豫贡献系数 A_0 和稳定去极化电量 $Q_{d,5000}$ 。研究表明:PDC 曲线随含水量的增加整体向上移动;受潮造成 RIP 绝缘的直流电导率增加,绝缘电阻、吸收比和极化指数显著降低;建立的 9 支路扩展德拜模型等效电路参数对 RIP 绝缘受潮状态的反应较为灵敏, A_0 与含水量呈线性拟合关系;去极化电量对含水量较为敏感, $Q_{d,5000}$ 与含水量呈指数拟合关系。

关键词:胶浸纸(RIP)绝缘;极化/去极化电流(PDC);含水量;扩展德拜模型;时域介电响应;受潮评估

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)03-0178-08

0 引言

高压套管作为输变电工程的核心部件,在高压输电稳定运行过程中扮演重要角色,一旦发生绝缘故障,将造成巨大的直接和间接经济损失。高压套管的主要绝缘结构可分为油浸纸电容式结构和胶浸纸(resin impregnated paper, RIP)电容式结构 2 种。油浸纸电容式套管结构相对成熟,但近年来因其自身材料导致的绝缘事故频频发生,漏油、爆炸和燃烧的风险不可避免^[1]。因此由皱纹纸和铝箔交替卷制,在真空条件下干燥再经环氧树脂浇注、固化后形成的干式套管,即 RIP 套管逐渐成为换流变阀侧套管和穿墙套管的主流绝缘结构^[2-5]。尽管套管在安装前会进行干燥,但在长期运行过程中,芯体吸收的潮气难以除去,而水分会危害绝缘结构稳定运行,对 RIP 套管的运行安全和使用寿命造成严重影响^[6]。

如何有效评估高压套管绝缘状况长期以来备受关注。以介电响应理论为基础的诊断方法,作为一种新型的绝缘状态无损诊断方法,近年来被广泛应用于高压套管绝缘性能检测,其测试方法主要有 3 种,包括时域的回覆电压测量(recovery voltage measurement, RVM)^[7]、极化/去极化电流(polarization and depolarization current, PDC)测量^[8]以及频域介电谱(frequency-domain dielectric spectroscopy, FDS)测量^[9]。由于 RVM 法受现场的干扰较大,已

逐渐被淘汰。FDS 测量法携带信息丰富、测量频带宽、抗干扰能力强,但相比于 PDC 法,其测量时间较长,且当含水量较低时评估误差较大^[10-11]。目前国外已开发出商用的 PDC 测量设备,如奥地利 OMICRON 公司生产的介电响应分析仪 DIRANA、ALF Engineering 公司生产的 PDC-Analyser-1MOD,因此文中尝试将 PDC 测量技术应用于 RIP 绝缘含水量的定量评估。

为解释受潮 PDC 测试结果,目前主要技术路线有:(1)不同含水量的 PDC 曲线之间相互对比,获得变化趋势,定性得到受潮状态;(2)根据实际情况建立绝缘等效模型,如经典德拜弛豫模型,通过模型参数变化分析绝缘状态;(3)提取 PDC 曲线特征参数,构建特征参数与受潮特征量之间的拟合关系,从而实现绝缘状态评估。

文中研究了基于 PDC 法的 RIP 绝缘受潮状态评估方法,在实验室条件下搭建了 PDC 测试平台,测量不同含水量的 RIP 绝缘样片 PDC 曲线,分析 PDC 图谱的变化规律;建立扩展德拜模型,利用 Matlab 仿真拟合获得了扩展德拜模型各分支参数及拟合曲线,并提取用于含水量定量评估的特征参量。该研究成果为 RIP 绝缘的受潮状态评估提供了数据参考和技术支撑。

1 试验方法及理论基础

1.1 试验方法

文中主要从理论角度探索受潮状态对 RIP 绝缘性能的影响,为排除受潮均匀度对结果的干扰,

收稿日期:2022-02-03;修回日期:2022-04-07

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(GY71-19-053)

仅考虑均匀受潮的情况。文中试验采用的试品是从工程用 RIP 套管电容芯体上切割打磨加工成的 $7\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 1\text{ mm}$ 样片。为制备不同含水量的 RIP 绝缘样片,试验开始前须对样片进行干燥处理,将样片放入水分测定仪内,在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 环境下干燥至重量不再减少,获得样片初始重量 m_0 。该水分测定仪同时具备加热和称重功能,其加热源为高效卤素灯,可使样片均匀受热,加热温度范围为 $50\text{ }^\circ\text{C} \sim 180\text{ }^\circ\text{C}$,重量测量的分辨率为 0.001 g 。之后将样片浸没水中 2 h ,取出自然晾干并称重,重量为 m ,再进行不同程度的干燥处理得到不同含水量的样品。样片的含水量为:

$$w_{mc} = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

一般认为含水量小于 0.5% 为完全干燥^[12-13],文中试验制备的样片含水量为 $0.88\% \sim 2.03\%$,该范围可囊括工程中的范围。在实验室中搭建如图 1 所示的 PDC 测试平台,将样片放入三电极测量系统中并夹紧,保护电极可有效消除边缘效应以及沿面泄漏电流对 PDC 测量结果的影响,该三电极结构则放置于金属容器内。PDC 测量采用奥地利 OMICRON 公司开发的 DIRANA 介电响应分析仪,该设备可提供最高 200 V 的直流电压,电流测量范围为 $\pm 20\text{ mA}$,测量精度为 0.5% 测量值 $\pm 1\text{ pA}$ 。

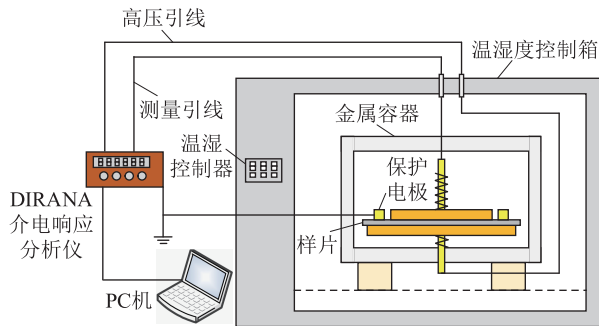


图 1 PDC 测试平台

Fig.1 PDC test platform

PDC 测量需持续很长时间才能使所有的极化物质达到松弛状态^[14],DIRANA 用户指南中指出 $5\text{ }000 \sim 7\text{ }000\text{ s}$ 的极化持续时间足以评估电力设备的绝缘状态,同样的时间也建议用于去极化持续时间。因此试验设置 200 V 的恒定激励电压源,极化和去极化时间均设置为 $5\text{ }000\text{ s}$ 。较长时间暴露在空气中的 RIP 绝缘样片很容易二次受潮而影响介电性能,为保证试验过程中样片状态的稳定性,试验中将测试所用的三电极结构连同金属容器放置于温湿度控制箱内,测量引线引至温湿度控制箱外部与 PDC 测量设备相连。为减小环境温湿度对试

验结果的影响,对 RIP 绝缘样片进行的所有测试均保持温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度为 30% 。PDC 测量前后各测一次质量,取平均值作为样片的 m 值。为防止样片内部杂散电流和残存电荷对测试结果产生影响,每次 PDC 测量前都将其静置 24 h 保证充分放电。

1.2 PDC 测量原理

PDC 测量简化图如图 2(a) 所示,图 2(b) 为阶跃充电电压 U_0 作用下的典型波形图,其中 T_p 为极化持续时间,即极化电流测量的最大时间; T_d 为去极化持续时间。PDC 测量法通过在样片两端施加和撤去直流电压,测量阶跃电压作用下的充电电流和松弛状态下的放电电流来诊断样片的绝缘状态。

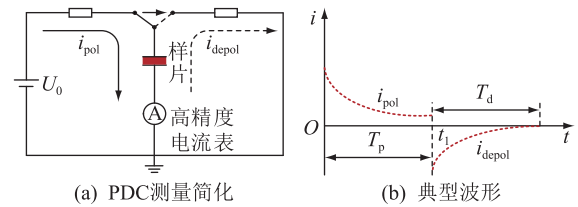


图 2 PDC 测量原理

Fig.2 Principle of PDC measurement

在 T_p 时间段内,由于样片的导电性和各种极化过程将产生极化电流 i_{pol} ,当 $t = t_1$ 时撤掉激励电压,并将样片两端短暂短接,去除表面电荷的干扰,此时样片内部会产生去极化现象,产生去极化电流 i_{depol} ,可表示为^[15]:

$$i_{pol}(t) = C_0 U_0 (\sigma_0 / \varepsilon_0 + f(t)) \quad (2)$$

$$i_{depol}(t) = -C_0 U_0 (f(t) - f(t + T_p)) \quad (3)$$

式中: C_0 为几何电容; ε_0 为真空介电常数,为 $8.852 \times 10^{-12}\text{ F/m}$; σ_0 为样片直流电导率; $f(t)$ 为介电响应函数。若充电时间足够长, $f(t + T_p) \approx 0$,去极化电流可简化为:

$$i_{depol}(t) = -C_0 U_0 f(t) \quad (4)$$

文献[16]指出可根据测量时间最大时的极化电流和去极化电流,利用式(2)一式(4)计算直流电导率 σ_0 。

$$\sigma_0 = \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_0} (i_{pol}(T_p) - i_{depol}(T_p)) \quad (5)$$

1.3 扩展德拜模型及求解

通过对绝缘系统建模解谱分析,可以更好地理解 RIP 绝缘的介电响应。去极化电流包括出现在 RIP 绝缘内不同位置的各种弛豫机制的总和。RIP 绝缘样片中,每个极性基团的构型都不同,在施加电场后的响应时间也不同,极化过程可用一个耗能元件 R 和一个储能元件 C 串联的支路模拟^[17]。因此 RIP 绝缘结构可用一系列电阻和电容串、并联的 R - C 电路模型表示,即扩展德拜模型,如图 3 所示,

其满足 $\tau_i = R_i C_i$ 的时间常数规律。除极化电流外,在电场作用下绝缘层还流动传导电流,其由图 3 中的绝缘电阻 R_0 引起。

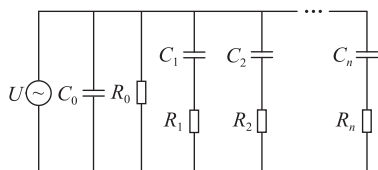


图 3 扩展德拜模型

Fig.3 Extended Debye model

根据 PDC 法的实际测量值求解模型参数, C_0 可由传统的工频电容测量技术确定, R_0 由最大时间 T_p 的极化电流和去极化电流之差计算得出。其他参数可通过拟合去极化电流确定, 见式(6)~式(8)。

$$i_{\text{depol}}(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-t/\tau_i} \quad (6)$$

$$i_{\text{pol}}(t) = \frac{U_0}{R_0} + \sum_{i=1}^n U_0 \frac{e^{-t/\tau_i}}{R_i} \quad (7)$$

$$A_i = U_0 \frac{1 - e^{-T_p/\tau_i}}{R_i} \quad (8)$$

式中: R_i, C_i, A_i, τ_i 分别为第 i 条支路的电阻、电容、弛豫贡献系数、时间常数。推导可得 R_i, C_i 分别为:

$$R_i = (1 - e^{-T_p/\tau_i}) U_0 / A_i \quad (9)$$

$$C_i = \tau_i / R_i \quad (10)$$

对于电路模型的求解,微分解析法^[18-20]虽然避免了计算模型参数不唯一的问题,但微分过程的物理意义难以解释,且数学计算的工作量和误差均较大;末端点解析法^[21-22]虽然避免了大量的数学计算,但由于去极化电流噪声较大,取某一点计算会对求解结果的误差影响过大。因此文中注重拟合优度,选择智能优化算法^[23-24]进行解谱分析。

由于文中构建的等效模型是非线性非凸问题,传统的数学优化算法,如最小二乘法拟合精度不够、拟合效果较差,将不再适用。遗传算法(genetic algorithm, GA)属于进化类算法^[25],对初值依赖性较低,可以在全局范围内进行搜索,具有一定的跳出局部最优的能力,但求解结果具有一定的随机性。内点法求解速度快,得到的优化结果稳定性高,但对初值依赖较高,在求解非线性非凸问题时,不同的初值对求解结果影响较大,容易陷入局部最优。考虑到目标函数,即式(11)中只包含较少的优化变量,因此提出 GA 与内点法相结合的方式求解。利用 GA 的初值不敏感性和较强的全局搜索能力,先计算一个局部次优解,然后将其作为内点法的初值,执行进一步的迭代优化,得到最终的拟合结果。

$$\min \sum_{i=1}^n |i_{\text{depol}}^{\text{measure}}(t) - i_{\text{depol}}^{\text{fitting}}(t)| \quad (11)$$

式中: $i_{\text{depol}}^{\text{measure}}(t)$, $i_{\text{depol}}^{\text{fitting}}(t)$ 分别为去极化电流的实测值和拟合值。

最后引入拟合优度 R^2 对整体拟合效果进行评价,其定义为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

式中: y_i 为实测数据; \hat{y}_i 为拟合数据; \bar{y} 为实测数据的平均值; $R^2 \in (0, 1)$, 其值越逼近 1, 拟合效果越好。

由于 RIP 绝缘的高电阻性,去极化电流通常在非常小的范围内还会受到感应交流电流、电磁干扰和附近高压静电装置静电感应的影 响。采用德拜模型可以对现场测量的 PDC 噪声进行去噪,拟合得出光滑的电流曲线,这也是后期相关参数准确计算的基础。

2 受潮时域试验结果及分析

2.1 受潮状态对 PDC 的影响

样片不同含水量的 PDC 实测结果见图 4, 为便于比较,试验将去极化电流值的极性改为正值。显而易见, RIP 绝缘样片受潮状态对 PDC 曲线有较大影响。

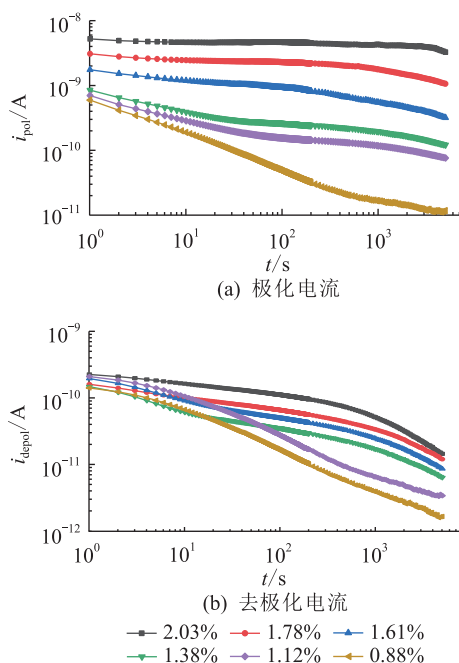


图 4 RIP 绝缘样片不同含水量的 PDC

Fig.4 PDC of RIP insulation samples with different moisture contents

由图 4(a) 可知,极化初期,由于电荷的注入及较快的迁移速率,极化电流值较大,该部分为吸收

电流;随极化时间增加,极化电流波形逐渐趋于平稳,此阶段为介质极化弛豫过程。整体来看,随着RIP绝缘样片含水量的增加,极化电流 i_{pol} 逐渐增大,随时间衰减的幅度也发生显著变化。绝缘样片中的水分迁移会对其电导率产生较大影响,含水量增加提高了RIP绝缘的直流电导率,增加了极化强度,导致极化电流曲线上升。

由图4(b)可知,去极化电流 i_{depol} 随含水量的增加逐渐增大,去极化曲线的衰减时间常数也增大。去极化电流与绝缘样片内部带电粒子的极化密切相关^[14]。水作为一种强极性分子,其相对介电常数较高,含水量增加将促使RIP绝缘样片在外加极化电压下产生的束缚电荷越多,样片内部的电荷密度增大,因此去极化电流增大。在去极化过程中去极化电流衰减越来越慢,导致其衰减到0的时间也越久。同时水分子能与RIP绝缘样片中的某些亲水性的离子或基团结合,使其更容易偏离平衡位置,极化强度和响应速度增加,因此去极化电流增大。

文献[14]指出当极化时间足够长(一般大于3000s)时,对于线性电介质材料,其电导电流等于极化电流与去极化电流之差。图5为RIP绝缘样片不同含水量的电导电流。可以看出,随着含水量的增加,电导电流变大,样片的电导率明显增大。电导电流曲线与极化电流曲线几乎一致,尤其在曲线后期,其主要原因为测试后期大部分极化过程已经衰减完,极化电流主要由电导电流组成^[18]。

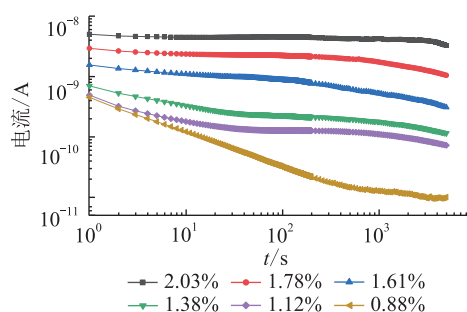


图5 RIP绝缘样片不同含水量的电导电流
Fig.5 Conductivity currents of RIP insulation samples with different moisture contents

2.2 绝缘电阻和吸收比

由图4(a)可知,极化电流的衰减快慢同RIP绝缘样片含水量具有较为一致的对应关系,此即电流吸收现象。绝缘电阻和吸收比均为反映绝缘性能的基本指标,工程上主要通过测量这2个指标来判断受潮情况。绝缘电阻定义为加压60s后测得的电阻值,即:

$$R_{60} = U_0 / i_{\text{pol}}(60) \quad (13)$$

吸收比 K_a 定义为绝缘电阻与加压15s的电阻

值之比,即:

$$K_a = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{\text{pol}}(15)}{i_{\text{pol}}(60)} \quad (14)$$

极化指数 P_i 定义为加压600s的电阻值与60s的电阻值之比,即:

$$P_i = \frac{R_{600}}{R_{60}} = \frac{i_{\text{pol}}(60)}{i_{\text{pol}}(600)} \quad (15)$$

式中: $i_{\text{pol}}(15)$, $i_{\text{pol}}(60)$, $i_{\text{pol}}(600)$ 分别为加压15s、60s和600s的极化电流值。

不同含水量的直流电导率可由式(5)计算得到,对于文中的试验样片,式(5)可等效为:

$$\sigma_0 = \frac{d}{SU_0} (i_{\text{pol}}(T_p) - i_{\text{depol}}(T_p)) \quad (16)$$

式中: d 为试验样片厚度; S 为高压电极与测量电极间样片面积,即 $0.025^2 \pi \text{ m}^2$; $U_0 = 200 \text{ V}$; $T_p = 5000 \text{ s}$ 。

表1给出了上述时域特征参数的计算值,可以看出随着含水量增加,绝缘电阻 R_{60} 、吸收比 K_a 、极化指数 P_i 均逐渐减小,而直流电导率 σ_0 逐渐增加。其原因为当绝缘性能变差时,电流吸收现象不明显,电流随时间下降缓慢。一般认为 $K_a > 1.3$ 表示绝缘合格, $K_a < 1.3$ 表示绝缘受潮或存在局部缺陷,可见,当含水量大于1.38%时不再符合RIP套管安全运行标准。该时域特征参数作为反应绝缘性能的基本指标,在一定程度上反映了RIP绝缘样片受潮状态。但与PDC曲线结果相比,其提供的绝缘状态信息较少,尤其在RIP套管内部绝缘结构较复杂时,不能提供全面丰富的绝缘状态信息。

表1 RIP绝缘样片不同含水量的时域特征参数

Table 1 Time domain characteristic parameters of RIP insulation samples with different moisture contents

$w_{\text{mc}}/\%$	$R_{60}/\text{G}\Omega$	K_a	P_i	$\sigma_0/(\text{pS}\cdot\text{m}^{-1})$
2.03	43.04	0.99	1.08	8.297
1.78	85.43	1.03	1.20	2.672
1.61	202.15	1.14	1.61	0.787
1.38	732.19	1.27	1.29	0.293
1.12	1 189.12	1.47	1.32	0.185
0.88	3 019.51	2.28	2.49	0.025 68

2.3 扩展德拜模型拟合结果

澳大利亚学者^[18]在进行德拜模型参数辨识研究中指出,模型的极化支路数应在6~10条,理论上无法确定通用最优支路数。但考虑到拟合结果的优劣直接反应了与真实微观过程的吻合程度,文中以拟合优度 R^2 作为主要指标确定最优支路数,分别在支路数 $n \in [6, 10]$ 时对含水量1.78%进行拟合,得到的拟合优度 R^2 与支路数 n 的关系如图6所示。

当 $n < 9$ 时,拟合优度随支路数的增加而显著增大;
 $n = 9$ 或 $n = 10$ 时,拟合优度几乎不变,因此兼顾拟合
 效果和算法求解复杂度,文中取 $n = 9$ 。

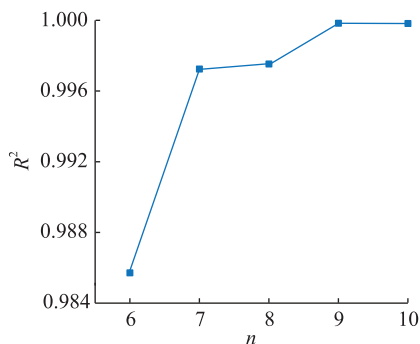


图6 拟合优度与支路数的关系

Fig.6 Relationship between goodness of fit and the number of branches

图7给出了含水量为0.88%时拟合方法解析的结果,拟合参数数值见表2。对其他含水量的RIP绝缘样片,因篇幅限制,扩展德拜模型拟合参数部分结果见表3、表4,不同含水量的去极化电流拟合优度均高于0.99。因此,通过扩展德拜模型拟合可以对实测PDC进行去噪,拟合得出光滑的电流曲线。整体来看,随着时间常数的增加,极化电容 C_i 逐渐增加,而极化电阻 R_i 和极化电流弛豫贡献系数 A_i 没有明显变化规律。最大时间常数分支的 A_i (即 A_9) 随含水量增加而变大, A_i 的变大反映了去极化电流尾部电流值上升情况。

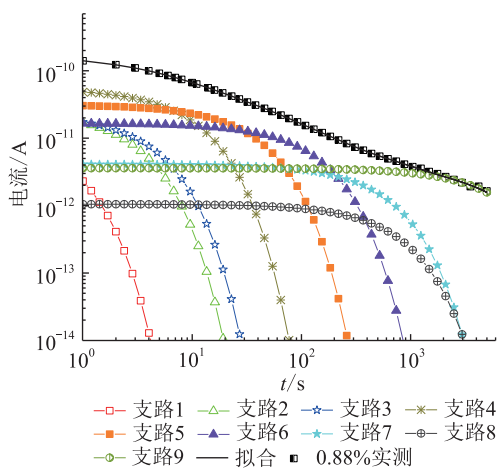


图7 含水量为0.88%时去极化电流及各分支拟合结果

Fig.7 Depolarization currents and fitting results of each branch with the moisture content of 0.88%

3 受潮特征参量提取

最大时间常数分支的 A_i 与含水量之间的变化规律如图8所示。由图8可见, A_9 与含水量 w_{mc} 存在拟合效果较好的线性函数关系,函数表达式见式

表2 w_{mc} 为 0.88% 时的扩展德拜模型等效电路参数

Table 2 Equivalent circuit parameters of the extended Debye model when w_{mc} is 0.88%

支路 i	τ_i/s	$A_i/10^{-12}$	$R_i/10^{12}\Omega$	$C_i/10^{-13}F$
1	0.58	12.90	15.50	0.375
2	2.47	25.40	7.88	3.13
3	3.61	23.00	8.71	4.15
4	8.98	54.30	3.68	24.40
5	33.04	31.40	6.38	51.80
6	115.42	16.70	12.00	96.40
7	510.93	4.10	48.80	105
8	667.25	1.05	190	35.20
9	6 041.41	3.60	31.30	1 930

表3 w_{mc} 为 1.38% 时的扩展德拜模型等效电路参数

Table 3 Equivalent circuit parameters of the extended Debye model when w_{mc} is 1.38%

支路 i	τ_i/s	$A_i/10^{-12}$	$R_i/10^{12}\Omega$	$C_i/10^{-13}F$
1	0.50	13.50	14.80	0.338
2	2.41	60.40	3.31	7.28
3	3.61	50.90	3.93	9.19
4	10.20	13.40	14.90	6.83
5	28.60	10.00	19.90	14.40
6	103.49	13.20	15.20	68.30
7	168.40	1.33	150	11.20
8	794.07	16.30	12.30	648
9	5 903.63	14.60	7.82	7 550

表4 w_{mc} 为 1.78% 时的扩展德拜模型等效电路参数

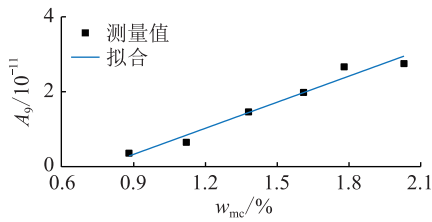
Table 4 Equivalent circuit parameters of the extended Debye model when w_{mc} is 1.78%

支路 i	τ_i/s	$A_i/10^{-12}$	$R_i/10^{12}\Omega$	$C_i/10^{-12}F$
1	1.60	36.20	5.53	0.289
2	2.44	33.00	6.07	0.403
3	8.97	24.30	8.22	1.09
4	34.29	19.50	10.20	3.35
5	160.11	23.00	8.68	18.40
6	839.82	1.07	187	4.50
7	1 038.15	23.80	8.34	124
8	1 081.14	3.64	54.30	19.90
9	6 088.36	26.60	4.21	1 450

(17),拟合优度为0.967,因此 A_9 可以作为评估受潮状态的特征参量。

$$A_9 = 2.318 \times 10^{-11} w_{mc} - 1.756 \times 10^{-11} \quad (17)$$

由图4(b)可以看出,5 000 s 去极化电流的幅值对RIP绝缘样片的受潮状态非常敏感,含水量越高,RIP绝缘样片的去极化电流幅值越大。然而,直接利用去极化电流值难以定量分析RIP绝缘的受潮状态,因此文中提出了一种通过计算RIP绝缘去

图8 最大时间常数分支的 A_0 与含水量的关系Fig.8 Relationship between A_0 of maximum time constant branch and moisture contents

极化电量 $Q_{\text{depol}}(t)$ 的方法将受潮状态与 PDC 测量结果联系起来,将其定义为去极化电流 $i_{\text{depol}}(t)$ 对测量时间的积分。

$$Q_{\text{depol}}(t) = \int_1^t \sum_{i=1}^n (A_i e^{-t/\tau_i}) dt \quad 1 < t \leq 5000 \quad (18)$$

图9给出了不同含水量下 RIP 绝缘样片的 $Q_{\text{depol}}(t)$ 随测试时间的变化,去极化电量与时间呈二次多项式拟合关系,即 $Q_{\text{depol}}(t) = at^2 + bt + c$,不同含水量的 a, b, c 参量如表5所示。

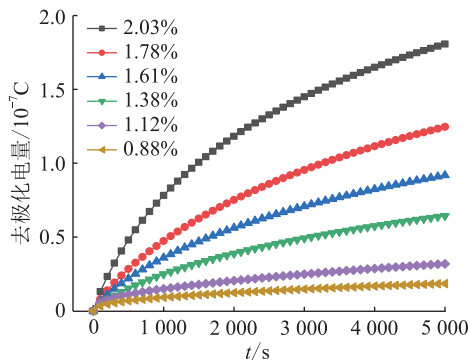


图9 RIP 绝缘样片不同含水量的去极化电量

Fig.9 Depolarization charge quantity of RIP insulation samples with different moisture contents

表5 RIP 绝缘样片不同含水量的拟合参数

Table 5 Fitting parameters of RIP insulation samples with different moisture contents

$w_{\text{mc}}/\%$	$a/10^{-16}$	$b/10^{-12}$	$c/10^{-9}$	R^2
0.88	-4.32	4.93	4.13	0.989
1.12	-6.61	8.21	6.64	0.991
1.38	-17.10	20.00	5.30	0.997
1.61	-25.80	29.20	7.53	0.996
1.78	-34.20	39.60	8.96	0.997
2.03	-61.20	61.90	17.60	0.993

显而易见,去极化电量随样片含水量的增加而显著增大。文中将极化时间为 5 000 s 时的 $Q_{\text{depol}}(t)$ 定义为稳定去极化电量,记为 $Q_{\text{d-5000}}$,并拟合研究 $Q_{\text{d-5000}}$ 与 RIP 绝缘样片含水量之间的关系,如图10所示,得到的拟合方程见式(19)。稳定去

极化电量与含水量 w_{mc} 呈指数函数关系,拟合优度为 0.997。因此, $Q_{\text{d-5000}}$ 可以作为评估 RIP 绝缘样片受潮状态的特征参量。

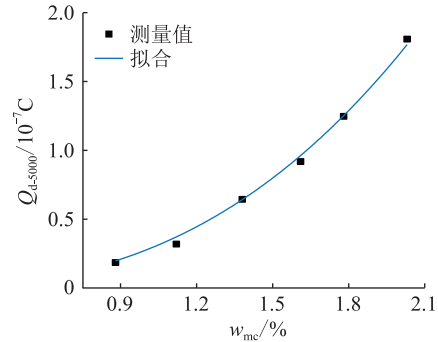


图10 稳定去极化电量和含水量的关系

Fig.10 Relationship between stable depolarization charge quantity and moisture contents

$$Q_{\text{d-5000}} = 2.755 \times 10^{-8} \times w_{\text{mc}}^{2.625} \quad (19)$$

4 结论

文中通过对不同含水量的 RIP 绝缘样片进行 PDC 测量,分析受潮状态对扩展德拜模型的影响,并提取特征参量对 RIP 绝缘样片的受潮状态进行定量分析,得出以下结论:

(1) 随着含水量的增加,PDC 曲线整体向上移动;计算得到的多个时域特征参数 (R_{60}, K_a, P_i 和 σ_0) 均对含水量变化反应灵敏。绝缘电阻 R_{60} 、吸收比 K_a 、极化指数 P_i 均逐渐减小,而直流电导率 σ_0 逐渐增加。

(2) 构建 RIP 绝缘等效电路模型是其绝缘状态评估的关键,等效电路参数辨识是该研究的难点。针对原有 PDC 测量等效模型参数辨识方法的不足,文中创新性地提出了 GA 与内点法相结合的拟合方法,建立的 9 支路扩展德拜模型可以较好地拟合 RIP 绝缘不同松弛极化过程。

(3) 提取了 2 个受潮状态特征参量,即最大时间常数分支的弛豫贡献系数 A_0 和稳定去极化电量 $Q_{\text{d-5000}}$ 。RIP 绝缘的含水量越高,去极化电量越大; A_0 与含水量同线性函数具有 0.967 的拟合优度; $Q_{\text{d-5000}}$ 与含水量同指数函数具有 0.997 的拟合优度,均可作为评估 RIP 绝缘样片受潮状态的特征参量。

现场运行过程中,环境温度、介质损耗发热、不均匀受潮和老化等都将对 RIP 套管的绝缘状态产生很大影响,因此若将 PDC 测量技术用于 RIP 套管绝缘的状态评估,还须进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 孔灿,张大宁,田杰,等. 110 kV 变压器油纸绝缘套管不均匀绝缘受潮劣化分析[J]. 智慧电力,2020,48(4):119-124.

- KONG Can, ZHANG Daning, TIAN Jie, et al. Non-uniform moisture degradation analysis of 110 kV transformer oil-paper insulation bushing[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 119-124.
- [2] 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 China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3051-3058.
- [3] WANG Y Q, LUO Y, GUAN J, et al. Dielectric properties of epoxy resin impregnated paper insulation in different stages of partial discharge development[J]. Polymer Composites, 2020, 41(1): 360-368.
- [4] 宋友, 徐卓林, 兰贞波, 等. 1 200 kV 特高压交流胶浸纤维穿墙套管技术应用研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 41-46.
- SONG You, XU Zhuolin, LAN Zhenbo, et al. Application of 1 200 kV UHV AC resin impregnated fiber wall bushing technology[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 41-46.
- [5] 王黎明, 聂章翔, 赵晨龙, 等. 水分在环氧树脂复合绝缘子护套中的渗透特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 173-180.
- WANG Liming, NIE Zhangxiang, ZHAO Chenlong, et al. Water permeation characteristic in cycloaliphatic epoxy resin composite insulator sheath[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 173-180.
- [6] ZHANG H L, LIU P, ZHANG X Y, et al. Dielectric spectra of epoxy resin impregnated crepe paper composites in different humidity[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chengdu, China. IEEE, 2016: 1-4.
- [7] SAHA T K, YAO Z T. Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service-aged transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 128-135.
- [8] GU C, ZHU M Z, ZHU W B, et al. Thermal ageing condition assessment for transformer using natural ester-paper insulation based on polarization and depolarization current[C]//2018 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika). Pilsen, Czech Republic. IEEE, 2018: 1-4.
- [9] VERMA H C, BARAL A, PRADHAN A K, et al. A method to estimate activation energy of power transformer insulation using time domain spectroscopy data[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 3245-3253.
- [10] 刘伟, 李洋, 张璐, 等. 不均匀受潮油纸绝缘套管频域介电谱仿真研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 143-150.
- LIU Wei, LI Yang, ZHANG Lu, et al. Simulation of frequency domain spectroscopy characteristics of oil-paper insulated bushing under non-uniform moisture content[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 143-150.
- [11] 周凯, 李明志, 饶显杰, 等. 基于极化-去极化电流法的变压器油纸绝缘低频介电损耗特性分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2830-2838.
- ZHOU Kai, LI Mingzhi, RAO Xianjie, et al. Analysis of low-frequency dielectric loss characteristics of oil-paper insulation based on polarization and depolarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2830-2838.
- [12] MORSALIN S, PHUNG B T. Dielectric response study of service-aged XLPE cable based on polarisation and depolarisation current method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 58-66.
- [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.
- WU Guangning, SONG Zhenjie, YANG Feibao, et al. Study on aging characteristics of transformer oil-paper insulation based on the time domain dielectric spectroscopy and depolarization charge quantity[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 195-202.
- [14] SAHA T K, PRADHAN M K, YEW J H. Optimal time selection for the polarisation and depolarisation current measurement for power transformer insulation diagnosis[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA. IEEE, 2007: 1-7.
- [15] 饶显杰, 周凯, 李明志, 等. 基于电力电缆绝缘去极化电流的扩展 Debye 等效电路参数辨识[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 1037-1043.
- RAO Xianjie, ZHOU Kai, LI Mingzhi, et al. Parameter identification for extended Debye equivalent circuit based on depolarization current of power cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 1037-1043.
- [16] YANG L J, CHEN J R, WANG S H, et al. Dielectric response measurement of oil-paper insulation based on system identification and its time-frequency-domain conversion method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1688-1698.
- [17] MISHRA D, HAQUE N, BARAL A, et al. Assessment of interfacial charge accumulation in oil-paper interface in transformer insulation from polarization-depolarization current measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1665-1673.
- [18] 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.
- [19] 吴广宁, 夏国强, 宋臻杰, 等. 基于小波分析和时域介电谱的变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 226-233.
- WU Guangning, XIA Guoqiang, SONG Zhenjie, et al. Status assessment of aging condition of transformer oil-paper insulation based on time domain dielectric spectroscopy and wavelet analysis[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 226-233.
- [20] 蔡金锭, 祝顺才. 基于灰色聚类-集合赋权法的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 765-771.
- CAI Jinding, ZHU Shuncai. Evaluation of transformer oil-paper

- insulation statement based on gray clustering and set weighting methods[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 765-771.
- [21] 张晓燕,刘庆珍,蔡金锭. 基于末端双点解析法的变压器油纸绝缘新特征量提取及老化诊断[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3317-3326.
- ZHANG Xiaoyan, LIU Qingzhen, CAI Jinding. Extraction of new characteristic parameters and aging diagnosis for transformer oil-paper insulation based on terminal two-point analytical method [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3317-3326.
- [22] 高竣,廖瑞金,王有元,等. 基于扩展 Debye 模型的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 211-217.
- GAO Jun, LIAO Ruijin, WANG Youyuan, et al. Ageing characteristic quantities of oil-paper insulation for transformers based on extended Debye model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 211-217.
- [23] 高浩,刘庆珍,蔡金锭. 基于去极化电流 Prony 拟合的油纸绝缘德拜参数辨识方法[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 210-218.
- GAO Hao, LIU Qingzhen, CAI Jinding. Debye parameter identification method of oil-paper insulation based on depolarization current Prony algorithm fitting[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 210-218.
- [24] 蔡金锭,曾静岚,李安娜. 采用 I-APSO 算法的弛豫响应等效电路参数辨识[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(11): 78-83, 97.
- CAI Jinding, ZENG Jinglan, LI Anna. Parameter identification for equivalent circuit of relaxation response based on interval-active particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(11): 78-83, 97.
- [25] 郑嘉龙. 基于非线性规划遗传算法的并网逆变器 LCL 滤波器参数优化研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(5): 146-150.
- ZHENG Jialong. Study on parametric optimization of LCL filter of grid-connected inverter based on nonlinear programming genetic algorithm[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(5): 146-150.

作者简介:



张寒

张寒(1997),女,硕士在读,研究方向为高压套管在线监测与绝缘诊断技术(E-mail: zhanghan0510@126.com);

万保权(1971),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统电磁环境和电磁兼容技术;

胡伟(1979),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为特高压输电变电外绝缘技术及高压套管绝缘特性。

Evaluation of dampness status of resin impregnated paper insulation for dry-type bushing based on PDC method

ZHANG Han¹, WAN Baoquan¹, HU Wei¹, XU Zuoming¹, YIN Pengbo¹, SI Wenrong²

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: In order to obtain the characteristic parameters of dampness status of resin impregnated paper (RIP), the time domain dielectric response technique is performed on the dampness status evaluation, and the RIP moisture contents are intensively studied based on polarization and depolarization current (PDC) method. Firstly, RIP insulation samples with different moisture contents are prepared in the laboratory and the PDC curves are measured. Then, the optimization algorithm combining genetic algorithm and interior point method is introduced, and the parameters of extended Debye model are obtained by Matlab simulation. Finally, two characteristic parameters of dampness status are extracted, which are the relaxation contribution coefficient of the maximum time constant branch A_9 and the stable depolarization charge quantity Q_{d-5000} . Conclusions from the research results are as follows. The PDC curve moves upward as the moisture content increases. The dampness of the RIP insulation results in the increase of its conductivity and the decrease of its insulation resistance, absorption ratio and polarization index. The parameters of the 9-branch extended Debye model are sensitive to the RIP insulation dampness status, and the A_9 shows a linear relationship with moisture content. The depolarization charge quantity is sensitive to moisture content, and the Q_{d-5000} shows an exponential relationship with moisture content.

Keywords: resin impregnated paper (RIP) insulation; polarization and depolarization current (PDC); moisture content; extended Debye model; time domain dielectric response; dampness status assessment

(编辑 陆海霞)