

变压器油纸绝缘气隙放电能量-小波矩特征 及放电过程划分

陈伟根¹, 杜杰¹, 凌云², 谢波¹, 龙震泽¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 南方电网公司深圳供电局, 广东 深圳 518001)

摘要: 基于油纸绝缘气隙放电模型, 研究放电能量的变化规律。通过引入放电重复率, 提出用每秒平均放电能量描述气隙放电的发展过程。引入放电发生的工频相位, 构造基于放电能量的 φ - W - n 三维统计图谱, 投影到放电能量-相位平面得到灰度图像。采用一种基于小波矩特征的局部放电灰度图像特征提取方法, 得到灰度图像的全局特征和局部特征。根据提取到的不同放电时刻的小波矩特征值, 采用模糊 C -均值聚类的方法将整个放电过程划分为放电产生和振荡发展阶段、微弱放电阶段、放电爆发阶段以及放电预击穿阶段。

关键词: 变压器; 绝缘; 油纸绝缘; 气隙放电; 放电能量; 小波矩特征; 模糊 C -均值聚类; 局部放电

中图分类号: TM 855

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.016

0 引言

随着电力系统电压等级不断提高, 局部放电作为电力系统各种大型设备绝缘劣化的一个重要因素而备受重视。油纸绝缘是油浸式变压器内绝缘的重要组成部分形式, 局部放电是引起变压器内部绝缘老化和破坏的主要原因之一^[1-4]。及时了解局部放电的产生和发展特性能有效判断运行变压器的潜伏性故障及其发展, 因此研究油纸绝缘局部放电发展特性, 随时了解运行变压器内部局部放电发展情况和绝缘劣化程度, 对保证变压器安全可靠运行意义重大。

最早用于表征局部放电的特征参量是最大放电能量 $Q_{\max}$, 但文献[5-8]的研究表明: 局部放电的末期, 其最大放电能量甚至可能小于局部放电初期, 因此, 用最大放电能量表征局部放电的发展特性是不可靠的。近年来, 随着数字化局部放电测量系统的普及和应用, 基于局部放电二维谱图(φ - q 、 φ - n 、 q - n)、三维谱图(φ - q - n , 其中 φ 是放电发生的相位, q 是放电量, n 是每秒内放电次数)、脉冲波形等特征提取方法已成功地应用于局部放电发展特性研究^[9-12]。目前国内学者针对局部放电的研究大多集中于局部放电的测量方法的改进以及不同放电类型的模式识别上, 而对局部放电的产生发展到最后击穿的整个放电过程的研究却鲜有报道, 用于表征局部放电发展阶段的有效特征量也相对较少。由于局部放电对绝缘材料的破坏作用是局部放电消耗的能量直接相关的, 因此对放电消耗功率的测量很早就引起人们的

重视^[13]。文献[14]根据小波理论建立了表征局部放电脉冲信号的三维时频谱图, 综合反映了局部放电脉冲信号时间分量、频率分量和放电能量 3 个基本特征的分布, 克服了指纹法受电压值的影响, 有效区分了局部放电类型。文献[15]从能量-相位分布图中提取局部放电特征量进行模式识别, 将工频周期 360° 等分成 60 个小区间, 取每个区间第一个采样点的值得到能量-相位分布图, 虽然减少了输入参量的维数, 但忽略了放电重复率这一重要参量。笔者综合考虑局部放电发生的相位及放电重复率, 从放电能量的角度对局部放电的发展过程进行诠释。

本文结合油纸绝缘气隙放电模型, 在相同的实验条件下采用恒压法重复开展模拟局部放电实验, 着重研究整个放电发展过程中放电能量变化规律, 同时, 借鉴 PRPD 谱图中 φ - q - n 的思想, 构造不同放电时刻放电能量-相位的灰度图像, 并采用小波矩算法提取不同尺度因子和位移因子下的小波矩特征参量。在无任何先验经验前提下, 根据不同放电时刻小波矩特征参量的变化规律, 采用模糊 C -均值(FCM)聚类算法对整个气隙放电发展过程进行阶段划分。

1 油纸绝缘气隙放电实验及其能量变化规律

1.1 油纸绝缘气隙放电实验

根据 CIGRE II 推荐的方法, 制作了油纸绝缘气隙放电模型, 3 层绝缘纸板间用很薄的绝缘胶粘合而成, 其具体结构与尺寸见图 1。本文采用的实验平台、接线图及实验法与文献[16]中相同, 因此不再赘述。

本文试验过程中制作了多个尺寸相同的气隙放电模型, 在盛满变压器油的模拟变压器油箱中, 以相同的实验条件重复进行油纸绝缘气隙放电恒压法实验, 所得实验规律大致相同, 因此本文只列出其中一

收稿日期: 2013-06-25; 修回日期: 2013-12-22

基金项目: 国家创新研究群体基金资助项目(51021005); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB724506)

Project supported by the Funds for Innovative Research Groups of China(51021005) and the National Basic Research and Development Program of China(973 Program)(2009CB724506)

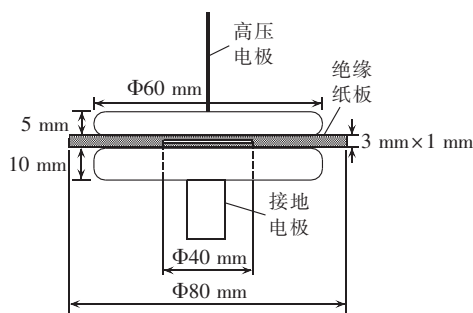


图 1 气隙放电缺陷模型

Fig.1 Model of air-gap discharge in defected insulation

次实验结果。油纸绝缘气隙放电模型起始放电电压为 9 kV, 根据前期试探性实验, 选取实验电压为 11 kV 并保持恒定, 提取不同放电时刻的局部放电数据。

1.2 油纸绝缘气隙放电的能量

局部放电是一种随机复杂物理现象, 其在不同发展阶段有不同放电特性和表现。本文选取放电能量作为研究对象, 探索油纸绝缘气隙放电在整个放电发展过程中放电能量的变化规律。所建气隙放电模型为单气隙模型, 其示意图及等效电路图见图 2、3^①, 图中 δ 为气隙厚度, d 为整个介质的厚度, R_c 、 C_c 为气泡的电阻和电容, R_b 、 C_b 为与气泡串联部分介质的电阻和电容, R_a 、 C_a 为其余部分介质的电阻和电容。

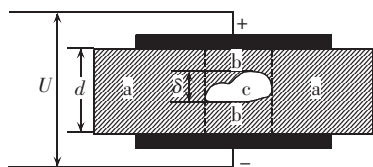


图 2 含有单气隙的绝缘介质示意图

Fig.2 Schematic diagram of insulation medium with single air-gap

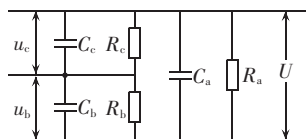


图 3 气隙放电等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of air-gap discharge

根据等效电路, 气隙产生局部放电时, 当 u_c 随 u 增加到气隙放电电压 U_c 时, 气隙内发生放电, 使气隙上电压急剧下降, 当 C_c 上电压降至放电熄灭电压 U_r 时放电熄灭。此后, C_c 又开始充电, 直到 C_c 上电压再次达到 U_c 发生下一次放电, 其中 u 是施加到试品的工频交流电压。

考虑到介质电阻 R_a 、 R_b 及气隙电阻 R_c 都很大, 并且 $C_a \gg C_b$, 一次放电气隙两端电压变化为 $U_c - U_r$, 真实放电量 Δq_r 为:

$$\Delta q_r = \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) (U_c - U_r) \approx (C_c + C_b) (U_c - U_r) \quad (1)$$

在进行局部放电检测时, 真实放电量 Δq_r 无法通过测量求得, 通常测量视在放电量 Δq 。视在放电量与真实放电量之间的关系为:

$$\Delta q = \frac{C_b}{C_c + C_b} \Delta q_r \quad (2)$$

设 C_c 放电时试品上的电压为 U_i , 则存在关系:

$$U_c = U_i \frac{C_b}{C_c + C_b} \quad (3)$$

文献[17]指出, 单次局部放电的能量 W 可测量:

$$W = \frac{1}{2} \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) (U_c^2 - U_r^2) \quad (4)$$

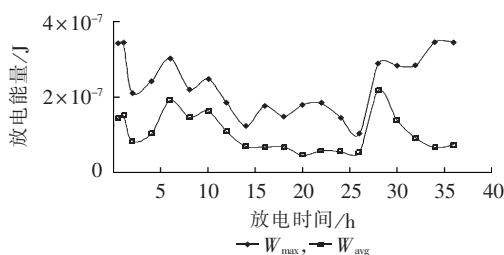
将式(1)~(3)代入式(4), 且 $C_a \gg C_b$, 近似地认为 $U_r = 0$, 得到:

$$W = \frac{1}{2} \Delta q \frac{U_i}{U_c} (U_c + U_r) = \frac{1}{2} \Delta q U_i \quad (5)$$

根据上述公式表明: 单次局部放电能量可以用视在放电量与其对应的外施电压的瞬时值乘积的一半来表达。考虑选用放电能量表征局部放电的发展过程, 不仅更加直观, 而且有助于在放电机理上对局部放电的发展做出合理的物理解释。

1.3 油纸绝缘气隙放电能量变化规律

基于实验室数据, 按式(5)计算得到不同放电时刻的局部放电能量值。为了便于统计分析, 将整个工频相位划分为 256 个相位窗, 然后提取出每个相位窗中放电能量的最大值 $W_{\max}$ 以及放电能量的平均值 W_{avg} , 最后求取所有相位窗内的 $W_{\max}$ 以及 W_{avg} 的最大值。气隙放电从产生、发展到最终击穿的整个过程中, 其变化规律如图 4 所示。

图 4 $W_{\max}$ 、 W_{avg} 的最大值变化规律Fig.4 Variation laws of maximum $W_{\max}$ and W_{avg}

由局部放电试验现象以及图 4 可知: 当油纸绝缘气隙放电模型刚开始 (0.5 h) 发生局部放电时, 最大放电能量的幅值较高, 局部放电较为剧烈, 但其平均局部放电能量幅值较低。随后, 气隙放电能量都处于振荡状态, 放电极不稳定, 当放电 10 h 后, 局部放电的能量逐渐变小, 并稳定在一个较低的水平, 该阶段放电较弱且相对比较平稳, 文献[16]将该阶段称为放电稳定阶段。当气隙放电到 26 h 后, 最大放电能量及平均放电能量会出现一个明显的陡增。随后最大放电能量保持稳定并略微增加, 而平均放电能量有下降的趋势。由于绝缘介质的劣化是一个积累的

① 李剑. 局部放电及其测量讲义. 2007.

过程,所以即使放电末期平均放电能量较小,也会导致最终的击穿。由上述分析可知较之最大放电能量,平均放电能量能更好地表征局部放电发展特性。

1.4 每秒平均放电能量

最大放电能量和平均放电能量的幅值在局部放电的发展过程中有明显的变化规律,但刚开始产生放电阶段与放电末期的放电能量幅值相差并不大,无法单一地从能量幅值的角度来区分放电初期和放电末期从而判断出绝缘劣化的程度。

实验过程中,当放电进入末期临近击穿阶段,出现连续密集的放电脉冲,放电重复率明显上升。已有研究表明^[18]:对于局部放电危险程度的判断,放电重复率比最大放电量具有更大的灵敏度。本文尝试将放电重复率引入放电能量的计算中,提出一种新的特征参量,即每秒平均放电能量 W_{asec} ,来表征气隙放电的发展特性,其计算公式如下:

$$W_{\text{asec}} = W_{\text{avg}} \bar{n} \quad (6)$$

其中, $\bar{n}$ 为放电重复率的统计值。

由式(6)计算得到不同放电时刻的每秒平均放电能量 W_{asec} ,并得到其随时间的变化规律,见图 5。

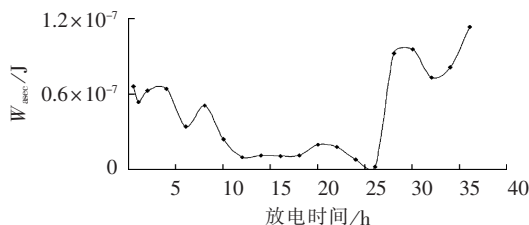


图 5 每秒平均放电能量变化规律

Fig.5 Variation law of average discharge energy per second

观察图 5 可以看到, W_{asec} 与图 4 中 W_{avg} 最显著的不同就是放电末期预击穿阶段的变化规律:放电达到末期时,放电量 q 反而会出现下降的情况,导致其平均放电能量减小,由于先前长时间的气隙放电对绝缘损伤的累积效应,因此在较低的平均放电能量下也会导致击穿;同时,气隙放电末期放电次数急剧增加,导致放电重复率也迅速上升,即便是平均放电能量处于一个较小的值,两者的乘积也较大并出现一个明显的增加量。由此,将放电重复率引入放电能量的计算中,不仅可以很好地通过放电现象在机理上做出物理解释,也可以方便进一步采用数学算法识别局部放电发展阶段。

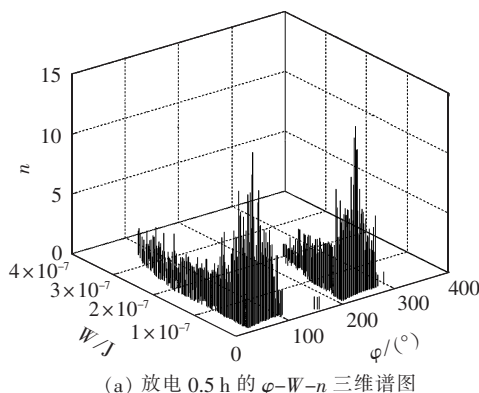
2 基于能量-灰度图像的小波矩特征提取

2.1 基于能量的三维谱图及灰度图像的构造

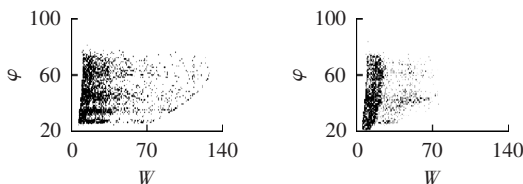
虽然通过 W_{asec} 已经可以粗略地对不同放电发展阶段进行一个区分,但是要想精确、定量地对气

隙放电发展阶段进行划分还略显粗糙。

进一步引入放电发生的工频相位,借鉴 PRPD 三维谱图的构建思想,本文构造了基于放电能量的 φ - W - n 三维谱图。将 φ - W - n 直角坐标系的 φ 、 W 轴分成 256×128 个小区间,统计各小区间中的放电脉冲数目 n ,得到一个对应的 256×128 的关于 n 的矩阵,绘制 φ - W - n 三维谱图。进一步将三维谱图投影到 φ - W 平面上得到了基于放电能量-相位的灰度图像。将正、负工频周期的灰度图像分开计算,分辨率均为 128×128 ,最大灰度级为 255。图 6 为放电 0.5 h 的 φ - W - n 三维谱图以及工频正负半周的 φ - W 灰度图像。



(a) 放电 0.5 h 的 φ - W - n 三维谱图



(b) 工频正半周 φ - W 灰度图 (c) 工频负半周 φ - W 灰度图

图 6 放电 0.5 h 的三维谱图和灰度图像

Fig.6 Three-dimensional graph and gray intensity image after discharging for 0.5 h

2.2 灰度图像的小波矩特征

本文将小波理论引入矩特征参量的提取过程中,利用小波可以“放大”局部特征信息的特点,提取出不同尺度因子和位移因子下的矩特征,既可以得到局部放电灰度图像的全局性特征,又可以得到灰度图像中一些局部比较弱化的特征信息^[19-20]。

对于二维连续分布函数 $f(x, y)$,定义其 $p+q$ 阶原点矩 m_{pq} 为:

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (7)$$

小波矩就是用小波变换系数来表示几何矩,用于提取在某一尺度的特征。将式(7)中的 x 、 y 分别用 $r \cos \theta$ 、 $r \sin \theta$ 来表示,便可以得到极坐标下矩特征的表达式:

$$M_{pq} = \iint f(r, \theta) g_p(r) e^{iq\theta} r dr d\theta \quad (8)$$

其中, $g_p(r)$ 为变换核的径向分量; $e^{iq\theta}$ 为变换核的角度分量。用小波函数 $\psi_{m,n}(r)$ 作为式中的 $g_p(r)$ 就可以

得到小波不变矩的表达式。

$$W_{m,n,q}^r = \iint f_N(r, \theta) \psi_{m,n}(r) e^{jq\theta} r dr d\theta \tag{9}$$

令 $S_q(r) = \int f_N(r, \theta) e^{jq\theta} d\theta$, 定义径向小波基函数 $\psi_{m,n}(r) = 2^{m/2} \psi(2^m r - n)$, 其中 m, n 分别为尺度因子和位移因子, 代入式 (9) 可以得到:

$$W_{m,n,q}^r = \int S_q(r) \psi_{m,n}(r) r dr \tag{10}$$

要保证小波矩 $\|W_{m,n,q}^r\|$ 保持与几何矩一样的坐标平移和尺度变换不变性特质, 在计算小波矩之前要先对目标图像进行归一化处理, 使得各个图像的中心位于坐标原点, 并且各图像的尺寸要保持一致。图像的尺寸归一化至 $r \leq 1$ 之后, 利用不同的尺度因子和位移因子, $\psi_{m,n}(r)$ 就可以遍及整个径向空间。

2.3 气隙放电灰度图像的小波矩特征提取

本文所考虑的小波函数族形式为:

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \tag{11}$$

其中, a 为尺度因子, b 为位移因子, a, b 均离散取值。由于目标图像在预处理时已归一化在 $r \leq 1$ 范围, 参数的离散值一般为 $a = 0.5^m$ (m 为整数), $b = n \times 0.5^m$, 令函数在所有角度上进行矩运算即可得图像全局特征和局部特征。本文采用三次 B 样条函数作为母小波:

$$\psi(r) = \frac{4\alpha^{n+1}}{\sqrt{2\pi(n+1)}} \sigma_\omega \cos[2\pi f_0(2r-1)] \times \exp\left[-\frac{(2r-1)^2}{2\sigma_\omega^2(n+1)}\right] \tag{12}$$

其中, $n=3, \alpha=0.697066, f_0=0.409177, \sigma_\omega^2=0.561145$ 。

小波函数沿轴向定义为:

$$\psi_{m,n}(r) = 2^{m/2} \psi(2^m r - n) \tag{13}$$

则小波矩为:

$$\|W_{m,n,q}^r\| = \left\| \int S_q(r) \psi_{m,n}(r) r dr \right\| \quad q=0, 1, \cdots \tag{14}$$

对某固定的 $r, S_q(r) = \int f_N(r, \theta) e^{jq\theta} d\theta$ 代表图像 $f(r, \theta)$ 在相位空间 $[0, 2\pi]$ 中第 q 个特征, 用不同尺度因子和位移因子, 小波函数 $\psi_{m,n}(r)$ 可遍及整个径向空间, 得到目标图像 $f(r, \theta)$ 在不同尺度上的特征参量。

当尺度因子和位移因子取值过大时, 会导致所得到的特征参数维数过高, 甚至导致“维数灾难”; 取值过小时, 不能充分地区分相类似的放电灰度图谱。通过反复的计算, 设定尺度因子 m 和平移因子 n 取值范围均为 $[1, 3]$, 在尽量保证不产生零值小波矩的同时, 保证局部特征信息足够反映不同放电灰度图谱的差异, 同时又不至于使得产生的特征维数过高, 工频正负半周共得到一组 18 维的特征参量。

2.4 小波矩特征参量提取结果

本文在放电的初期和放电发展阶段以及放电末

期至预击穿阶段, 每隔 0.5 h 提取一组放电信号, 在放电中期放电十分微弱的阶段, 每隔 1 h 提取一组放电信号, 共采集到了 62 组不同放电阶段的油纸绝缘气隙放电信号。按照时间的先后顺序标号为 t_1-t_{62} , 样本号 t_1-t_{27} 以及 $t_{38}-t_{62}$ 为每隔 0.5 h 采集的一组放电信号, 样本号 $t_{28}-t_{37}$ 为每隔 1 h 采集的一组放电信号。计算各个时刻的小波矩特征参量, 表 1 给出了不同放电时刻下 $\varphi-W$ 灰度图谱的小波矩特征值。

表 1 不同放电时刻小波矩特征值
Tab.1 Wavelet moment feature values for different times

放电时期	m	小波矩特征值(放电 0.5 h)		
		$n=1$	$n=2$	$n=3$
工频正半周	1	31.0849	8.1562	21.9205
	2	3.0782	3.4961	8.4028
	3	1.1865	1.0205	0.2627
工频负半周	1	25.9464	12.3282	20.7622
	2	1.7812	4.4344	10.8388
	3	0.3234	0.0825	0.7697
放电时期	m	小波矩特征值(放电 12 h)		
		$n=1$	$n=2$	$n=3$
工频正半周	1	9.1068	5.0675	0.4161
	2	2.8370	4.3776	2.9908
	3	0.2301	0.2447	0.7792
工频负半周	1	13.2105	6.3592	1.1505
	2	0.9866	4.8754	5.0107
	3	0.0907	0.0288	0.1533
放电时期	m	小波矩特征值(放电 26.5 h)		
		$n=1$	$n=2$	$n=3$
工频正半周	1	30.9938	5.9594	12.7367
	2	2.8994	8.3080	9.7537
	3	0.2764	0.4386	0.2029
工频负半周	1	35.1449	11.0013	10.5416
	2	0.4323	10.7701	11.9072
	3	0.1778	0.5095	0.7276
放电时期	m	小波矩特征值(放电 36 h)		
		$n=1$	$n=2$	$n=3$
工频正半周	1	42.2740	16.7385	21.4330
	2	3.8017	15.6058	15.5550
	3	0.0365	0.5207	1.6249
工频负半周	1	41.7487	14.4560	13.9670
	2	4.1908	17.1444	16.9209
	3	0.0395	0.2790	0.6111

通过对比每个放电时刻的小波矩特征值, 可以得到以下结论。

a. 从时间纵向来看, 可以明显看出放电能量的变化规律, 即放电越剧烈, 其放电能量的幅值就会越大。同时放电次数增加, 对应于能量灰度图谱而言, 就是有效灰度点所占据的区域越大, 灰度值也就越高, 通过与小波函数的积分就会得到较大的小波矩特征值。

b. 从某一时刻的小波矩在不同尺度因子和位移因子下的取值横向对比来看, 其代表着灰度值不同分块区域内的强弱。小波窗所在区域内的灰度图像

越深,表明其灰度值越大,所得到的 小波矩值就越大,就可以反映出在该区域对应的相位处,放电能量越密集,从某些角度而言具有一定的统计意义。

通过对气隙放电灰度图谱的小波矩计算以及分析,充分表明:采用小波矩理论提取特征参量,不仅可以反映出放电灰度图像的全局特征,而且得到传统矩特征无法得到的局部细微特征,提高了灰度图像信息的利用率。

3 基于聚类分析的气隙放电发展阶段划分

3.1 FCM 聚类原理

本文引入聚类方法,在无任何先验条件的情况下对提取的小波矩特征量进行分类,考察其能否对局部放电的发展过程起表征作用。常用的聚类方法有 C 均值聚类、ISODATA 聚类、递阶聚类^[21-22]等,但这几种聚类方法都属于非模糊化的方法,不同聚类间的界限是明显的,这不适用于局部放电的阶段划分过程,因为其发展阶段往往很难找到清楚 的分类界限。模糊聚类方法克服了这方面的不足,它给出了每个样本隶属于某个聚类的隶属度。本文采用 FCM 聚类算法,通过引入隶属度函数将特征空间中距离相近的样本点归入一类,从而实现放电阶段的划分。

根据第 2 节中每秒平均放电能量的总体变化趋势以及笔者之前的研究成果^[16],设定聚类数目 $c=4$,算法停止迭代的阈值为 10^{-6} 。如图 7 所示,经过 15 次迭代之后,目标函数基本达到收敛。表 2 给出了通过 FCM 聚类所得到的聚类结果。

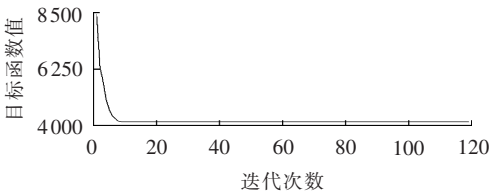


图 7 目标函数值变化曲线

Fig.7 Variation curve of objective function value

表 2 聚类结果
Tab.2 Clustering results

类别	样本编号
1	$t_{21}—t_{42}, t_{55}$
2	$t_1—t_{20}, t_{46}$
3	$t_{51}, t_{56}—t_{62}$
4	$t_{43}—t_{50}, t_{52}—t_{54}$

3.2 FCM 聚类结果分析

a. 阶段 1。通过分类结果可以得到,样本点 $t_1—t_{20}$ 的放电信号划分为一类,对应放电时间为初始放电至放电 10 h。在放电产生初期放电比较剧烈,放电次数在 2500~4500 次左右。由图 4 和图 5 可知,此阶段初始放电能量幅值较大,但该阶段放电极不稳

定,时强时弱,总体呈现一个微弱的振荡衰减趋势。这个阶段总体的小波矩特征值比较相近,而与其他几类的小波矩值却相差较大。通过模糊聚类得到的结果也反映了这个放电阶段中特征参量的相似性规律,本文在此称之为放电产生和振荡发展阶段。

b. 阶段 2。聚类结果将样本点 $t_{21}—t_{42}$ 划分为一类,对应的放电时间为放电 10.5~21 h。从图 4 和图 5 可得,该阶段放电水平较低,放电能量幅值较前一阶段有明显减小。同时,放电次数也大为减少,最少的一组样本点也只有 374 次放电。在实际的实验过程中,有很长一段时间无法在示波器上观察到有效的放电脉冲,计算得到的小波矩值也较其他几类小很多。FCM 聚类结果很好地反映了本阶段特征参量的“抱团”特性,因此称该放电阶段为微弱放电阶段。

c. 阶段 3。聚类结果将样本点 $t_{43}—t_{50}, t_{52}—t_{54}$ 划分为一类,对应的放电时间为放电 21.5~27 h。由图 4 和图 5 可知放电 26 h 之后,放电能量有一个明显的陡增,放电突然变剧烈。虽然该阶段的放电能量幅值也较大,但是与阶段 1 相比并没有提高太多,之所以能够与阶段 1 分离开是因为进入该放电阶段后放电次数明显增加。本阶段的平均放电次数基本在 6500 次左右,计算得到该阶段的小波矩特征值较前面 2 个阶段的小波矩值均有所增加,本文将这一阶段称之为放电爆发阶段。

d. 阶段 4。在经过一段时间的剧烈放电之后,油纸绝缘介质的绝缘性能已经劣化,局部放电也越来越剧烈。这个阶段对应的样本点为 $t_{56}—t_{62}$,对应的放电时间为放电 27.5~36 h。在放电爆发阶段之后,放电保持稳定的剧烈放电。由放电能量的变化规律发现:与前一阶段相比,最大放电能量相差不大,而平均放电能量有稍微降低的趋势。但由于放电重复率增大,每秒平均放电能量变化并不明显。特别是临近击穿瞬间,放电次数有着显著的变化,放电重复率突然上升,最高达到 12 000 次。放电次数越多表明能量灰度图谱的灰度值越大,在不同尺度因子和平移因子小波窗下积分得到的小波矩值就越大,因此将该阶段称为放电预击穿阶段。

3.3 FCM 聚类结果讨论

样本点 t_{46} 在特征空间中与样本点 $t_1—t_{20}$ 之间的放电特征较为接近而被划分到阶段 1。样本点 t_{55} 虽然在放电时间上处于放电的末期,但是其放电能量幅值和放电次数均比放电后期的样本点有明显的降低,而被划分到阶段 2。样本点 t_{51} 由于放电剧烈,与预击穿阶段的放电点距离较近而被划分为阶段 4。分析结果显示,从单一的放电能量大小无法精确地判断放电所处的阶段,而小波矩特征参量的聚类分析,为其提供了思路。从总体的划分结果来看,同

一发展阶段下的特征量具有“抱团”特性,采用FCM聚类算法能够较好地将油纸绝缘气隙放电划分为4个阶段:放电产生和振荡发展阶段、微弱放电阶段、放电爆发阶段以及放电预击穿阶段。

4 结论

a. 油纸绝缘气隙放电的最大放电能量 $W_{\max}$ 和平均放电能量 W_{avg} 的最大值在放电过程中变化规律明显,引入放电重复率,提出每秒平均放电能量 W_{asec} ,能更好地描述气隙放电的发展过程。

b. 借鉴 PRPD 谱图的构建思想,绘制了基于放电能量-相位的灰度图像,将小波矩引入局部放电灰度图像的特征提取过程,利用不同尺度因子和位移因子的小波窗与灰度图谱积分得到了工频正负半周的小波矩特征参量。

c. 根据各个时刻样本点小波矩特征参量的变化规律,采用FCM聚类算法将整个气隙放电发展过程划分为放电产生和振荡发展阶段、微弱放电阶段、放电爆发阶段以及放电预击穿阶段。

参考文献:

- [1] SAHA T K. Review of modern techniques for assessing insulation condition in aged transformers[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(5): 903-917.
- [2] 杜林,颜梁钦,甘德刚,等. 超高频扫描比较式局部放电在线监测系统[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 120-124.
DU Lin, YAN Liangqin, GAN Degang, et al. Online partial discharge monitoring system by UHF scanning and comparison[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 120-124.
- [3] 朱德恒,谈克雄. 电绝缘诊断技术[M]. 北京:中国电力出版社, 1998: 1-20
- [4] 廖瑞金,段炼,汪可,等. 基于时频分析和2DNMF的局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 20-25.
LIAO Ruijin, DUAN Lian, WANG Ke, et al. Partial discharge pattern recognition based on time-frequency analysis and 2DNMF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 20-25.
- [5] STONE G C, WARREN V. Effect of manufacturer, winding age and insulation type on stator winding partial discharge levels [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20(5): 13-17.
- [6] 苑津莎,尚海昆. 基于主成分分析和概率神经网络的变压器局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 27-31.
YUAN Jinsha, SHANG Haikun. Pattern recognition based on principal component analysis and probabilistic neural for partial discharge of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 27-31.
- [7] 胡岳,司良奇,张卫东,等. 局部放电超高频脉冲分段采集及相角计算方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 70-74.
HU Yue, SI Liangqi, ZHANG Weidong, et al. Segmental acquisition of partial discharge UHF pulses and its phase angle calculation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 70-74.
- [8] 刘凡,张昀,姚晓,等. 基于K近邻算法的换流变压器局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 89-93.
LIU Fan, ZHANG Yun, YAO Xiao, et al. Recognition of PD mode based on KNN algorithm for converter transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 89-93.
- [9] BIRSEN Y. Statistical pattern analysis of partial discharge measurements of quality assessment of insulation systems in high-voltage electrical machinery[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(6): 1579-1594.
- [10] 李剑,孙才新,杜林,等. 局部放电图像组合特征提取方法[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 11-13.
LI Jian, SUN Caixin, DU Lin, et al. Method for extraction combination features of partial discharge images[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 11-13.
- [11] HANS-GERD K. PD pulse sequence analysis and its relevance for on-site PD defect identification and evaluation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 276-284.
- [12] SATISH L, ZAENGL W S. Can fractal features be used for recognizing 3-D partial discharge patterns?[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(3): 352-359.
- [13] 郭俊,吴广宁,张血琴,等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 29-35.
GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 29-35.
- [14] 杜伯学,魏国忠. 基于小波与分形理论的电力设备局部放电类型识别[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 76-80.
DU Boxue, WEI Guozhong. Partial discharge classification based on wavelet and fractal theory[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 76-80.
- [15] 李新,孙才新,李剑,等. 从放电能量分布特征量识别PD类型的方法[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 26-27.
LI Xin, SUN Caixin, LI Jian, et al. Research on PD pattern recognition based on extracting features from PD energy distribution[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 26-27.
- [16] 陈伟根,蔚超,凌云,等. 油纸绝缘气隙放电特征信息提取及其过程划分[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 7-12.
CHEN Weigen, WEI Chao, LING Yun, et al. Feature information extraction of air-gap discharge in oil-paper insulation and its process partition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 7-12.
- [17] 李军浩,司文荣,姚秀,等. 油纸绝缘内部气隙缺陷劣化过程中局部放电的测量与模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 128-134.
LI Junhao, SI Wenrong, YAO Xiu, et al. Measurement and simulation of partial discharge in disc-void of oil-pressboard insulation with electrical degradation process[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 128-134.
- [18] 施围,邱毓昌,张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 58-90.
- [19] 孙晓丽. 基于小波矩特征的小波神经网络目标识别研究[D]. 南京:东南大学, 2006.
SUN Xiaoli. Researches on wavelet neural network in automatic target recognition based on wavelet moment invariants[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [20] DINGGANG S, HORACE H S I. Discriminative wavelet shape descriptors for recognition of 2-D patterns[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(2): 151-165.
- [21] 司文荣,李军浩,杨景刚,等. 局部放电脉冲群的实用快速分类

技术及应用[J]. 西安交通大学学报,2008,42(8):1021-1025.

SI Wenrong,LI Junhao,YANG Jinggang,et al. Fast and practical grouping techinque for partial discharge pulse sequence and its application[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(8):1021-1025.

[22] 张锋,李剑,杨丽君,等. 油纸绝缘电热老化的聚类判别算法[J]. 高电压技术,2009,35(5):1020-1025.

ZHANG Feng,LI Jian,YANG Lijun,et al. Clustering algorithm for electrical-thermal aged oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering,2009,35(5):1020-1025.

作者简介:



陈伟根

陈伟根(1967-),男,浙江绍兴人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电气设备的在线智能检测及故障诊断技术方面的研究工作(E-mail:weigench@cqu.edu.cn);

杜杰(1987-),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备的在线智能检测及故障诊断技术(E-mail:darajie87@163.com)。

Energy-wavelet moment characteristics of air-gap discharge in oil-paper insulation of transformer and partition of discharge process

CHEN Weigen¹, DU Jie¹, LING Yun², XIE Bo¹, LONG Zhenze¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518001, China)

Abstract: The variation law of discharge energy is researched based on the model of air-gap discharge in oil-paper insulation. The discharge repetition rate is introduced and the average discharge energy per second is proposed to describe the developing process of air-gap discharge. The phase of power frequency is introduced and a three-dimensional statistic graph φ - W - n is constructed based on the discharge energy, which is then projected to the discharge energy-phase plane to obtain the gray intensity image. A feature extraction method based on wavelet moment feature is adopted to extract the global and local features of the obtained gray intensity image. Based on the wavelet moment feature values extracted at different times, the whole discharge process is divided into four stages by the fuzzy C -means clustering method: the discharge generation and oscillation development stage, the weak discharge stage, the discharge outbreak stage and the pre-breakdown stage.

Key words: electric transformers; insulation; oil-paper insulation; air-gap discharge; discharge energy; wavelet moment characteristics; fuzzy C -means clustering; partial discharges

(上接第 88 页 continued from page 88)

sulfur hexafluoride(SF₆) taken from electrical equipment and specification for its reuse[S]. [S.I.]:IEC,2004.

[20] 中国电力科学研究院. 运行设备中 SF₆ 气体分解产物检测现场应用[R]. 北京:中国电力科学研究院,2011.

[21] IEC. IEC60376-2005 Specification of technical grade sulfur hexafluoride(SF₆) for use in electrical equipment[S]. [S.I.]:IEC,2005.

[22] 全国化学标准化技术委员会. GB/T12022—2006 工业六氟化硫[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

作者简介:



颜湘莲(1977-),女,湖南安仁人,高级工程师,博士,研究方向为电力系统过电压和电弧建模、开关设备故障诊断与 SF₆ 气体检测技术(E-mail:alian_yan@163.com)。

Gas-insulated switchgear state monitoring based on SF₆ decomposition products detection

YAN Xianglian¹, SONG Gao¹, WANG Chengyu¹, JI Yansong¹, YANG Ren²,

JIAN Yongfeng², LIU Hanmei¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: The method of SF₆ decomposition products detection is analyzed and the online decomposition products detection is carried out for different grid GISs(Gas-Insulated Switchgears). The detection results are statistically analyzed and the decomposition products characteristics of different GISs are obtained, which shows that, no SO₂ or H₂S content is detected in normally operating GISs; more than 50% of GISs contain CO with the concentration less than 20 μL/L; the probability of transducer containing CO and with higher concentration is big. The GISs containing SO₂ are traced and combined with the operating conditions, their states are comprehensively estimated. The inspection by GIS disassembly verifies the effectiveness of the proposed detection method and monitoring results.

Key words: SF₆; decomposition products; gas-insulated switchgear; monitoring; insulation