

文章编号:1000-582X(2011)01-094-06

变压器油纸绝缘沿面放电特性及其产气规律

陈伟根, 杨剑锋, 凌云, 陈曦

(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)

摘要:基于油纸绝缘沿面放电模型,在实验室模拟变压器油箱内进行局部放电试验,研究油纸绝缘沿面放电发展特性及其特征量的变化规律,并着重研究放电发展过程中油中溶解气体的变化特性。实验结果表明,油纸绝缘沿面放电幅值在放电起始阶段呈上升的趋势,放电 2~3 h 幅值达到最大,然后放电强度开始慢慢减弱;随着油纸绝缘局部放电的发展,CO 的绝对产气速率以一个值为中心上下波动,变化幅值较小;而油中沿面放电 H₂ 和 CH₄ 的绝对产气速率先增加再减少,放电谱图变化与油中溶解气体绝对产气速率变化表现出较高的相似性。

关键词:变压器;油纸绝缘;沿面放电;发展特性;放电特征量;溶解气体

中图分类号:TM 411

文献标志码:A

Surface discharge characteristics and gas generation law in oil-paper insulation of transformer

CHEN Wei-gen, YANG Jian-feng, LING Yun, CHEN Xi

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Based on a surface discharge model, partial discharge experiment in the simulation transformer tank is carried out to research the development characteristics and characteristic parameters' variation law of surface discharge in transformer oil-paper insulation, and the variation characteristic of dissolved gases in oil in the discharge process is emphatically researched. The results show that the surface discharge value increases at the beginning stage of the discharge process, and reaches its maximum after 2~3 h, then it decreases gradually. As the development of partial discharge, the absolute generation speed of CO fluctuates around a certain value with small variation. While, the absolute generation speeds of H₂ and CH₄ increase first and then decrease, and the variation of discharge spectrum is highly similar to the variation of oil-dissolved gas' absolute generation speed.

Key words: transformer; oil-paper insulation; surface discharge; development characteristics; discharge characteristic parameters; dissolved gas

油浸式电力变压器的绝缘结构主要是由油、纸和其他固体绝缘等构成的油-纸绝缘结构,局部放电对运行中的变压器是一种隐患,往往会导致绝缘劣化和损坏,甚至会引起重大内绝缘事故^[1]。油纸绝

缘沿面放电是局部放电的主要形式,主要发生在绝缘介质边界表面和绝缘介质与金属部件之间,如油隔板、围屏、垫块等绝缘件表面,其对固体绝缘造成的损坏是不可恢复的^[2-3]。因此,研究油纸绝缘沿面

收稿日期:2010-08-15

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目 973 计划(2009CB724506)

作者简介:陈伟根(1967-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电气设备在线智能检测及诊断技术研究,

(E-mail) weigench@cqu.edu.cn。

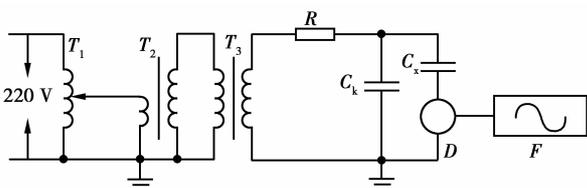
放电发展特性对确保变压器的安全运行是有十分重要的现实意义。

目前,对于油纸绝缘沿面放电发展机理尚不完全清楚,传统的局部放电特性研究是利用基本特征参量,如:视在放电量,局部放电起始电压和熄灭电压等^[4-6],由于该类特征量具有很强的随机性,且易受影响,近年来从放电量的相位分布图($\varphi-q$),放电次数的相位分布图($\varphi-n$)等图谱中提取统计特征量受到了更多的关注^[7-10]。另外,油中溶解气体分析方法(DGA)对于判断慢性局部潜伏性缺陷十分有效,且故障与其特征气体间的相关性很强,国内外已普遍地采用 DGA 来诊断变压器的局部放电故障^[11-13],但是仍然局限于局部放电的故障诊断。国内外对于变压器油纸绝缘局部放电发展特性的研究尚处于起步阶段,还需要进行大量而深入的试验研究。

因此,笔者基于油纸绝缘沿面模型,针对沿面放电发展特性及其统计特征量的变化规律进行了研究,并分析了沿面放电发展过程中溶解于油中的特征气体组分、浓度及其产气率的变化规律,为判断变压器内绝缘早期局部放电故障及其发展机理提供依据。

1 变压器油纸绝缘沿面放电模拟实验方法

采用的局部放电实验线路^[14-15]如图 1 所示。



T_1 —自耦调压器; T_2 —隔离变压器; T_3 —高压试验变压器;
 R —保护电阻; C_k —耦合电容; C_x —放电模型; D —电流传感器;
 F —数字示波器

图 1 局部放电实验回路

油纸绝缘沿面放电模型结构如下:试验电极由两块 $\phi 100\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 和 $\phi 60\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的黄铜板构成,中间绝缘纸板为 $\phi 80\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ (厚)。绝缘纸板均经过充分的干燥(5 d)和真空浸油(6 d 以上)处理;纸板周围各边角事先打磨光滑,无尖角或者毛刺。随后将放电模型浸在模拟油箱中,为了模拟真实变压器油循环,在油箱中安装了一个油泵循环系统,从而可以加快油中气体溶解平衡速度和使油箱中油温均匀,具体结构如图 2 所示。同时还考虑到变压器常年运行温度,将油箱置于专门设计的

恒温箱内,把绝缘油的温度控制在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

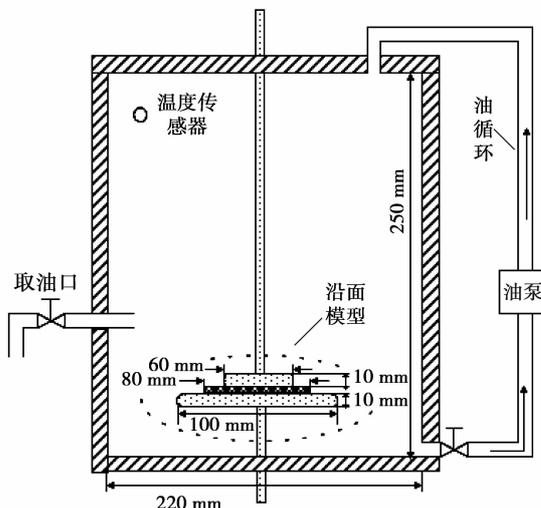


图 2 油中沿面放电模型及模拟油箱

为了确定气体在油中的溶解平衡时间,对变压器较为常见的油中沿面放电模型施加电压 13 kV ,持续加压时间 1 h 后,断开电源,保持油体循环,然后每隔 20 min 取油样,分析油中溶解气体的变化特性。图 3 为几种主要气体溶解平衡曲线,由图中可以看出,随放置时间的增加,几种特征气体变化微弱,说明模拟变压器油箱循环系统较好,气体在油中能够较均匀的溶解,模拟油箱溶解平衡性高。

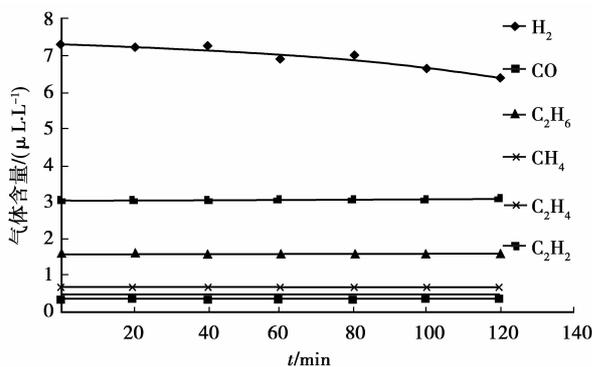


图 3 气体溶解平衡曲线

实验时,把电压缓慢升高到起始电压的 $120\% \sim 160\%$ 左右,然后保持电压稳定,让其加压一段时间后开始采集信号。设置采样率为 10 MS/s ,每次采集 500 组工频局部放电信号,用于统计分析局部放电发展过程中局部放电特征参量和相位特征参量的变化特性。在局部放电发展过程中,不断电的情况下,每隔一段时间取油样(间隔时间为 $0.5 \sim 1\text{ h}$),然后做气相色谱分析,分析局部放电发展过程中油中溶解气体的变化特性。

2 沿面放电发展特性分析

油中沿面放电的起始电压为 9 kV, 试验时在试样两端缓慢加压到 13 kV, 然后让其持续加压 6 h. 局部放电的基本参量主要为放电最大幅值和平均幅值, 统计的放电最大幅值和平均幅值随时间变化曲线如图 4 所示.

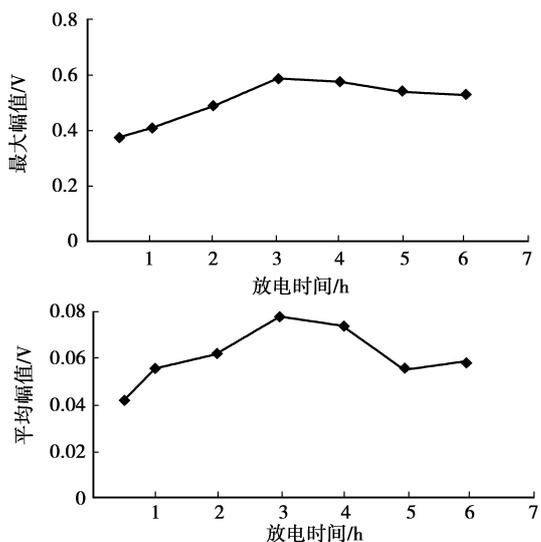


图 4 油纸沿面放电幅值随时间变化曲线

从图 4 可以看出, 放电幅值在放电起始阶段呈上升的趋势, 放电 3 h 幅值达到最大, 然后放电强度开始慢慢减弱. 实验中发现: 开始阶段, 放电较弱, 随着放电时间的增长, 放电开始增强, 并且在放电过程中可以听到“吱吱”的放电声, 放电一段时间以后放电开始减弱.

相对局部放电的基本参量而言, 局放的统计特征参量能提供更全面的信息, 可以真实地反映油纸绝缘沿面放电的发展趋势及其对绝缘的危害程度. 因此, 引入局部放电统计特征参量分析局部放电发展特性, 包括最大放电量相位特征谱图 $H_{q_{max}}(\varphi)$ 和放电次数相位特征谱图 $H_n(\varphi)$, 以及基于谱图的统计参量因子偏斜度 Sk 、翘度 Ku 、不对称度 Asy 和分布相关系数 cc . 根据多个工频周期的局部放电幅值、相位数据, 可得出各种局部放电谱图^[16-17]. 油纸沿面放电不同时间段的最大放电量相位特征谱图 $H_{q_{max}}(\varphi)$ 和放电次数相位特征谱图 $H_n(\varphi)$ 如图 5 所示.

从图 5 中可以看出放电主要集中在第一、三象限, 并且在 0° 和 180° 之前也有放电, 随着放电时间的增长, 0° 和 180° 之前的放电减少, 放电更为集中, 放电以 $30^\circ \sim 45^\circ$ 和 $210^\circ \sim 225^\circ$ 为中心的一个区域内.

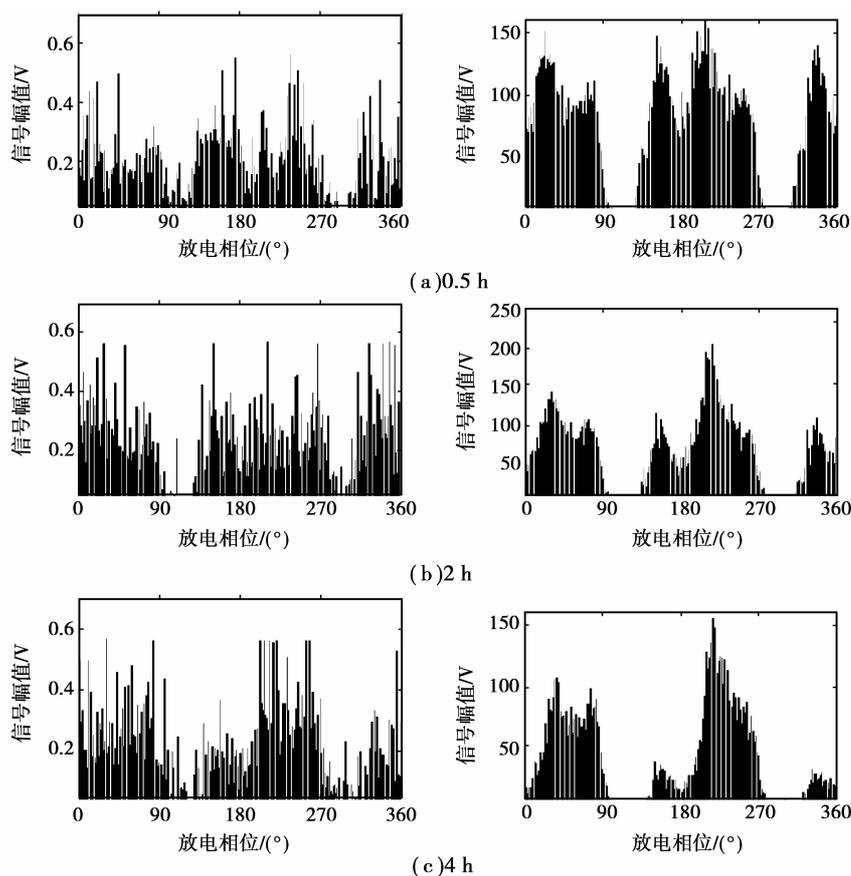


图 5 3 个不同放电阶段的图谱 $H_{q_{max}}(\varphi)$ 和 $H_n(\varphi)$

根据放电相位特征谱图,计算其正、负半周期上的偏斜度 Sk^+ 、 Sk^- 和翘度 Ku^+ 、 Ku^- 以及不对称度 Asy 和分布相关系数 cc ,结果见表 1。 Sk 用于描述某种形状分布对比于正态分布的偏斜度; Ku 用于描述某种形状的分布对比于正态分布形状的突起程度。两相位特征谱图 $H_{qmax}(\varphi)$ 和 $H_n(\varphi)$ 的 Sk 和 Ku 均大于 0,随放电时间增长, Sk 呈增长的趋势,说明正负半周谱图相对于正态分布向左偏; Ku 也呈增长的趋势,说明正负半周谱图相对于正态分布

陡峭。

Asy 反映了负半周和正半周局部放电总量的比值; cc 表示正负半周分布形状的差异。随着放电时间的增长,两相位特征谱图 $H_{qmax}(\varphi)$ 和 $H_n(\varphi)$ 的 Asy 逐渐变大,说明随着放电时间增长,负半周的放电相对于正半周的放电加剧了;而 cc 则成倍增加,说明放电初期正负半周波形具有较大的差异,但随着放电时间的增长,正负半周波形相似度开始增加。

表 1 油中沿面放电谱图统计参量分析结果

加压时间/h	$H_{qmax}(\varphi)$					$H_n(\varphi)$						
	Sk^+	Sk^-	Ku^+	Ku^-	Asy	cc	Sk^+	Sk^-	Ku^+	Ku^-	Asy	cc
0.5	0.04	0.25	1.57	1.76	0.88	0.15	0.34	0.41	1.59	1.63	1.02	0.12
2	0.39	0.01	1.69	1.62	1.04	0.30	0.65	0.81	2.06	2.30	1.11	0.15
4	0.48	0.56	2.10	2.13	1.11	0.38	1.00	1.31	3.31	4.04	1.14	0.23

说明:“+”、“-”代表工频相位正负半周

3 沿面放电发展过程中油中溶解气体变化特性

在沿面放电发展过程中,不断电的情况下,在不同放电时间下取油样做色谱分析,考察沿面放电发展过程中油中溶解气体组分及其气体浓度的变化特性。表 2 为不同放电时间油纸沿面放电气体含量,在放电开始阶段产生的气体以 H_2 、 CH_4 和 CO 为主,伴随有 C_2H_6 、 C_2H_4 和 C_2H_2 气体产生。随着放电时间的增长,每种气体的所占组分不同,放电 0.5 h 时 H_2 占氢烃的 75.5%,放电 2 h 时 H_2 占氢烃的 86%,放电 4 h 时 H_2 占氢烃的 89.1%,放电 6 h 时, H_2 占氢烃的 93%;放电 0.5 h 时 CH_4 占烃类气体的 56.3%,放电 2 h 时 CH_4 占烃类气体的 72.3%,放电 4 h 时 CH_4 占烃类气体的 77.2%,放电 6 h 时 CH_4 占烃类气体的 78.3%。随着放电时间的增加,氢气占氢烃的比重增大,占 90% 以上; CH_4 占烃类气体的比重也增大,占 75% 以上。各种气体含量随时间变化曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,油中沿面放电产生的每种气体含量随时间变化趋势不同, H_2 、 CH_4 和 CO 气体含量高且增长较快,但 4 h 以后增长速率随放电强度减弱而开始减缓。

的气体速率下降。试验后发现纸板上存在炭化的痕迹,说明介质板表面存在树枝状放电,导致 CO 含量随放电时间呈线性增长。 C_2H_6 、 C_2H_4 和 C_2H_2 随放电时间增长变化小。 C_2H_4 和 C_2H_2 是在较高温度或高能量放电的条件下产生的,由于放电处于低能量局部放电,放电能量小未达到 C_2H_4 和 C_2H_2 分解的条件,所以随着放电时间的增长, C_2H_4 和 C_2H_2 2 种气体变化很小。因此油纸绝缘沿面放电的特征气体为 H_2 、 CH_4 和 CO ,这也与运行变压器低能量放电的产气规律相吻合^[1]。

表 2 不同放电时间油中沿面放电的气体含量 μL

放电时间/h	气体组分					
	H_2	CO	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2
0	1.20	1.32	0.42	0.26	0.21	0.15
0.5	5.73	2.47	1.02	0.27	0.34	0.18
1.0	10.32	4.06	1.47	0.29	0.40	0.19
2.0	25.80	6.09	3.03	0.33	0.62	0.21
3.0	34.80	8.34	3.95	0.32	0.73	0.20
4.0	43.70	11.30	4.74	0.34	0.83	0.23
6.0	58.20	15.50	5.76	0.35	1.01	0.24

说明:表中数据为 1 L 气体中不同气体组分的含量。

根据图 4 可知放电平均幅值在放电 3~4 h 后有下降的趋势,放电强度减弱,因此,局部放电产生

由于在变压器油中的故障气体有一个累积的过

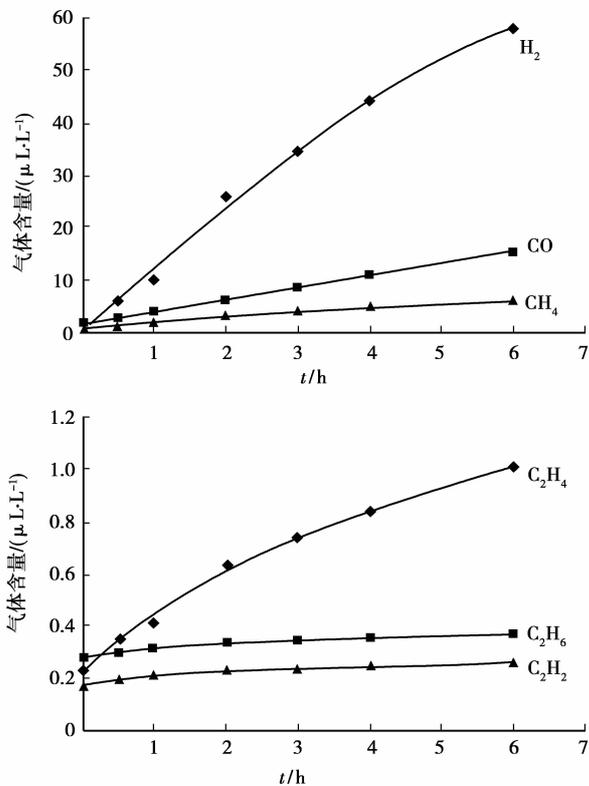


图 6 油纸沿面放电气体变化曲线

程,利用油中溶解气体浓度来反映沿面放电状态不够灵敏。因此,引入绝对产气速率,试图通过绝对产气速率来刻画故障的发展趋势。

绝对产气速率表示法能直接反映出故障性质和发展程度,包括故障源的功率、温度和面积等。不同设备的绝对产气速率具有可比性,不同性质故障的绝对产气速率也有其独特性。绝对产气速率是每单位运行时间内产生某种气体的平均值^[18],即:

$$r_a = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{\Delta t}, \quad (1)$$

式中: r_a 为绝对产气速率, $\mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{h})$; C_{i1} 为第1次取样测得油中组分*i*的气体浓度, $\mu\text{L}/\text{L}$; C_{i2} 为第2次取样测得油中组分*i*的气体浓度, $\mu\text{L}/\text{L}$; Δt 为两次取样时间间隔,h。由式(1)计算得到沿面放电所产生气体的绝对产气速率,然后经过二次曲线拟合得到气体绝对产气速率变化规律。

局部放电属于低能量放电,且放电有固体绝缘介入,所以放电过程产生的气体主要是 CO、H₂ 和 CH₄, 伴随有少量的 C₂H₆、C₂H₄ 和 C₂H₂ 气体。因此,笔者主要以 H₂、CH₄ 和 CO 3 种特征气体绝对产气速率为例分析局部放电发展过程中油中溶解气体变化特性,图 7 分别为 H₂、CH₄ 和 CO 3 种气体绝对产气速率变化曲线图。

从图 7 中可以看出,在局部放电持续的时间内,

CO 主要由绝缘纸板放电产生,放电过程中绝缘纸板放电较稳定,所以放电过程中 CO 的绝对产气速率在一个值上下波动,变化幅值较小。沿面放电幅值有一个先增加再减少的过程,而油中沿面放电 H₂ 和 CH₄ 的绝对产气速率也出现了相应的趋势。这就表明油中溶解气体的绝对产气率与放电强度是成正比的关系,因此,在局部放电发展过程中,可以采用油中溶解气体的绝对产气率作为一个新的特征量来反映沿面放电的严重程度。

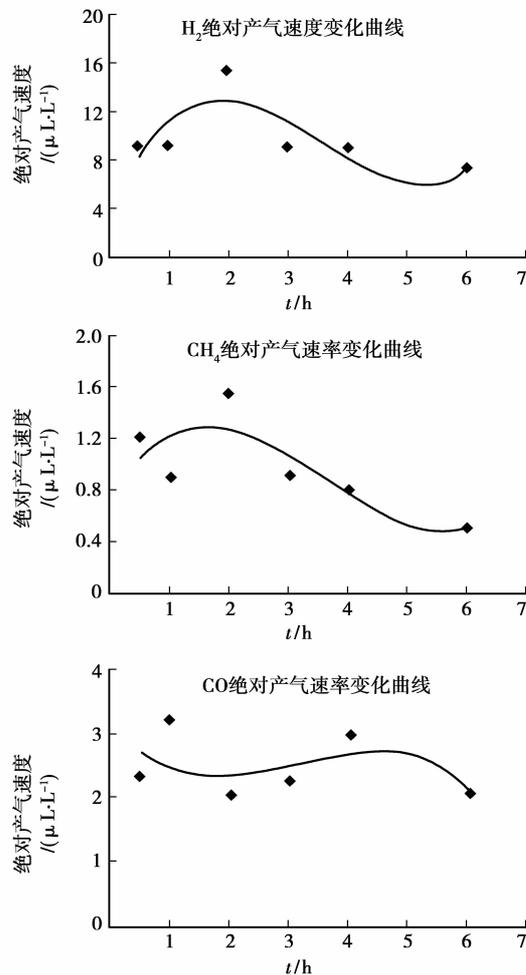


图 7 油中溶解气体绝对产气速率变化曲线

4 结 语

1) 实验结果表明,油纸绝缘沿面放电幅值在放电起始阶段呈上升的趋势,放电 2~3 h 幅值达到最大,然后放电强度开始慢慢减弱;而相位特征谱图 $H_{qmax}(\varphi)$ 和 $H_n(\varphi)$ 的统计参量因子随放电时间的增长而增大。

2) 随着油纸绝缘局部放电的发展,CO 的绝对产气速率以一个值为中心上下波动,变化幅值较小;

而油中沿面放电 H_2 和 CH_4 的绝对产气速率先增加再减少,放电谱图变化与油中溶解气体绝对产气速率变化表现出较高的相似性。因此可以采用油中溶解气体的绝对产气率作为一个新的特征量来表征沿面放电的发展程度。

参考文献:

- [1] 王昌长,李福琪,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [2] WADA J, NA KAJIMA A, MIYAHARA H, et al. Surface breakdown characteristics of silicone oil for electric power apparatus [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 830-837.
- [3] PETER M. Assessment of dielectric degradation by ultrawide-band PD detection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 744-759.
- [4] LAPP A, KRANZ H G. The use of the CIGRE data format for PD diagnosis applications [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(1): 102-112.
- [5] HANAOKA R, KOHRIN T, MIYAGAWA T. Creepage discharge characteristics over solid-liquid interfaces with grounded side electrode [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2):308-315.
- [6] 李军浩,司文荣,姚秀,等. 油纸绝缘沿面局部放电特性研究[J]. 西安交通大学学报,2009, 43(6):108-112. LI JUN-HAO, SI WEN-RONG, YAO XIU, et al. Partial discharge characteristics over oil-paper interface[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2009, 43(6): 108-112.
- [7] SAHOO N C, SALAMA M M A. Trends in partial discharge pattern classification: a survey [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 248-264.
- [8] MEHDI V, TREVOR R B, JAMES R E. Semiconducting layer as an attractive PD detection sensor of XLPE cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 885-891.
- [9] OUSSALAH N, ZEBBOUDJ Y, BOGGS S A. Partial discharge pulse propagation in shielded power cable and implications for detection sensitivity [J]. Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(6):5-10.
- [10] 满玉岩,高文胜,高凯,等. 发电机局部放电的统计特征识别[J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 41-45. MAN YU-YAN, GAO WEN-SHENG, GAO KAI, et al. Statistical recognition of discharge patterns in power generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(4): 41-45.
- [11] 孙才新,陈伟根,李俭,等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] DUVAL M. Dissolved gases analysis; it can save your transformer[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1989, 5(6): 22-27.
- [13] LIN C E, LING J M, HUANG C L. An expert system for transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(1): 231-238.
- [14] TOSHIHIRO H, SHIRO M, KENICHI N, et al. A unique sensitivity verification combined with real-time partial-discharge identification method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1890-1896.
- [15] GROSJEAN D F, SCHWEICKART D L, KASTEN D G, et al. Development of procedures for partial discharge measurements at low pressures in air, argon and helium[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1535-1543.
- [16] 张晓虹,张亮,乐波,等. 基于局部放电的矩特征分析大电机主绝缘的老化[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 94-98. ZHANG XIAO-HONG, ZHANG LIANG, YUE BO, et al. Analysis on aging condition of stator winding insulation of generator based on the moment characteristics of partial discharge [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 94-98.
- [17] BAEK S, JOUN G J, KIM H, et al. Experimental research on the surface discharge characteristics for HTS cable termination [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2351-2355.
- [18] 贺以燕,杨治业. 变压器试验技术大全[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社,2006.