

无机纳米填充对聚酰亚胺高频脉冲下局放特性的影响研究

郭小霞, 吴广宁, 周凯, 高波, 吴建东

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 聚酰亚胺薄膜作为特种工程塑料薄膜之一, 目前被广泛应用于变频调速牵引电机对地绝缘和匝间绝缘中, 是变频电机的基础绝缘材料。笔者在高频脉冲方波条件下, 对纳米和非纳米聚酰亚胺薄膜进行了不同频率和不同上升时间下的局部放电测试, 比较分析了其特征参量的变化情况。结果表明: 气隙表面电导率对局部放电有很大影响, 上升时间对 PD 参数的影响主要取决于初始电子的延迟和气隙的动态电场 ΔE , 无机纳米填料在聚合物中产生大量界面改善了材料的电导率, 电荷沿着气隙表面运动更加容易, 同时纳米材料中大量浅陷阱的存在, 使局部放电初始电子的产生更加容易。

关键词: 牵引电机; 高频脉冲; 聚酰亚胺; 局部放电

中图分类号: TM21

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)05-0442-03

Influence of Inorganic Nano-filler on Partial Discharge of Polyimide Film under High-frequency Impulse

GUO Xiao-xia, WU Guang-ning, ZHOU Kai, GAO Bo, WU Jian-dong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Polyimide film is applied widely in turn to turn insulation and turn to ground insulation of inverter-fed traction motors. In this paper, measurement of partial discharge is performed on nanometer hybrid polyimide film and non nanometer polyimide film under high-frequency square impulse with different frequency and different rise time. Some parameters of PD are discussed based on the measurement results. The results show that the gap surface conductivity has a great impact on PD, the impact of rise time on PD parameters mainly depends on the initial electron delay and the dynamic electric field in the gap, the large number of interfaces formed by inorganic nano-filler improve the conductivity of the material to facilitate the movement of charge along the gap surface, and PD initial electrons generate more easily due to the existence of sufficient shallow traps in the nano-materials.

Key words: traction motor; high-frequency impulse; polyimide; partial discharge

0 引言

随着变频调速传动技术的不断发展, 脉宽调制 (PWM) 逆变器以其技术优势广泛地应用于机车牵引领域^[1,2]。然而目前国内生产的变频电机寿命一般只有 1~2 年, 有些电机甚至在试运行中就发生击穿破坏^[3]。高频脉冲电压频率较高, 上升沿较陡, 其对绝缘材料的老化、失效机理和工频、直流电压条件下有很大的不同^[4], 传统工频、直流电机的绝缘设计理论已经不适合于变频电机。因此研究高频脉冲电压下绝缘材料的老化、失效机理, 为变频电机绝缘结构设计提供理论基础日益迫切。

近年来聚酰亚胺薄膜材料被广泛地应用于电力、电子绝缘中^[5], 随着纳米技术的发展, 无机纳米杂化的聚酰亚胺材料应运而生, 纳米杂化聚酰亚胺材料在耐热性、强度、模量、尺寸稳定性等方面显示了明显的优势, 在光、电、磁等方面的功能更为诱人, 具有较好的绝缘性和耐电晕性特点^[6]。但高频脉冲电压下非纳米聚酰亚胺薄膜和纳米聚酰亚胺薄膜的 PD 特性有何不同, 目前国内外报导较少。

笔者以非纳米和纳米聚酰亚胺薄膜为实验对象, 用一种脉冲电流传感器 (ICS) 有效地测量出脉冲方波下的局部放电, 利用小波包分析方法提取局部放电信号^[7], 比较和分析了在高频脉冲条件下, 上升时间和频率对非纳米和纳米聚酰亚胺薄膜局部放电特征参量的影响及其变化规律。

收稿日期: 2007-09-07; 修回日期: 2008-03-12

基金项目: 教育部博士点基金 (20050613008)。

作者简介: 郭小霞 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高速机车变频牵引电机绝缘性能评估的研究。

1 实验装置及测量系统

1.1 实验装置

在对绝缘材料击穿强度的测试中, 试验电极至关重要。电极必须具有良好的导电、导热性能, 表面平整光滑并与试样保持良好接触, 在试验过程中与试样不会有相互作用。该试验选用不锈钢材质的电极, 电极系统, 包括上下电极和电极绝缘支撑3部分。上电极为圆柱形棒状电极, 下电极为圆形电极, 绝缘部分为云母板。其中上电极 $\Phi 25$ mm, 下电极 $\Phi 40$ mm; 测试电极结构图见图1。

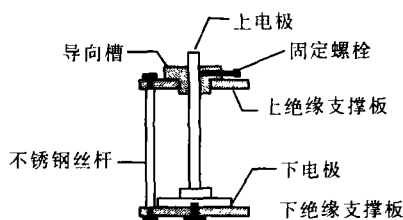


图1 测试电极结构图

1.2 测量系统

局部放电信号测量系统见图2, 由高频脉冲发生器、分压装置、试样、脉冲电流传感器(ICS)、示波器、计算机组成。高频脉冲发生器输出双极性脉冲, 峰值范围为0~10 kV, 占空比为50%, 频率范围为10 Hz~20 kHz, 具体的结构与技术原理参见文[8]。电缆将脉冲电源和试样连在一起, 并在它们之间连接了分压和测量系统。电缆能起到屏蔽来自外界的电磁高频干扰的作用。为了得到从脉冲电源中输出的准确的方波脉冲波形以进行观察和参量统计, 测试回路中还采用了电容分压装置, 以便从示波器中能读取出脉冲电源电压信号。针对高压方波脉冲下局部放电信号弱、频谱宽、干扰强的特点, 专门设计了一个高频脉冲电流传感器(ICS), 具有频带宽, 响应速度快、动态特性优良等特点^[3]。ICS通过屏蔽电缆与示波器相连, 再把示波器上显示的脉冲电源电压信号和测试到的局部放电信号通过局域网传输到计算机上进行数据处理和分析, 这里设定示波器采样频率为500 kHz。测量数据由信号处理软件进行分解、滤波、重构, 提取局部放电信号^[4]。

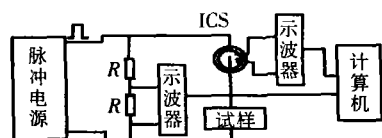


图2 脉冲下局部放电测量系统

试样为变频电机绕组中绝缘材料聚酰亚胺(PI)薄膜, 厚度50 μm , 面积为5 cm^2 。纳米聚酰亚胺膜选用KAPTON 100-CR型, 厚度25 μm , 面积为5 cm^2 。由于PI膜的介电性能受水分及杂质影响很大, 因此试样测试前要进行酒精清洗和热处理, 并且测试的环

境条件尽量保持一致。为保证电极与试样的良好接触, 使试验数据的分散性减小, 在试样两侧涂有银浆。

2 实验结果及分析讨论

2.1 频率对PD的影响

在脉冲电压上升时间为1 μs 、脉冲电压峰值为1300 V的条件下, 脉冲电压频率对纳米和非纳米材料平均放电量和放电次数的影响见图3、4。

从图3、4可以得出以下结论:

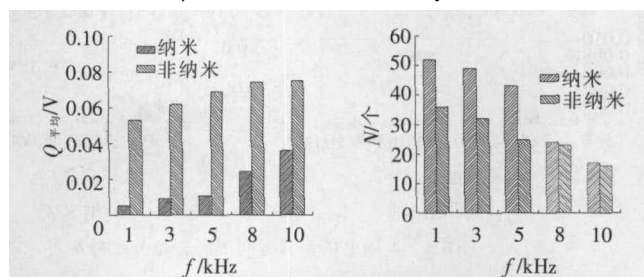


图3 不同频率下的PD平均放电量 图4 不同频率下的放电次数

(1)随着频率升高, 两种材料的PD平均放电量逐渐增大; 纳米材料的PD平均放电量明显小于非纳米材料。

(2)随着频率升高, 两种材料的放电次数逐渐减少; 纳米材料的放电次数在低频时明显大于非纳米材料, 但在高频区相差不多。

事实上在两次放电的间隔中, 气隙内部电荷并不静止, 而是会沿着气隙表面运动或扩散进深陷阱。其电荷变化用文[9]中的RC气隙表面电路模型, 给出放电间隔气隙表面电荷 Q 变化为

$$Q(t+\Delta t) = Q(t) \exp(-\Delta t/\tau) \quad (1)$$

时间常数 τ 可以估算为

$$\tau = \frac{\epsilon_0 D}{4\gamma} \quad (2)$$

式(2)中, D 为气隙直径; γ 为气隙表面电导。气隙表面在局部放电作用下, 在表面形成半导体层, 从式(1)、(2)可看到, 气隙表面电导率对局部放电产生比较大的影响, 当 γ 大时, 电荷扩散作用明显, 即 τ 小, 内部电荷衰减迅速, 因此, 脉冲电压极性翻转时叠加电场较小。

由于频率升高, 在上升和下降时间保持不变的情况下, 电荷的扩散取决于时间常数 τ 和脉冲电压频率。当时间常数 τ 保持不变、频率增加后, 周期 T 缩短, 即电荷扩散时间缩短, 电荷衰减作用减弱, 由于试验中用到双极性脉冲电压, 则导致反向电场叠加作用增强, 因此频率越高PD幅值越大。纳米材料的平均放电量要比非纳米材料小, 主要是因为纳米材料无论表面电导率还是体积电导率都比非纳米材料大, 从而导致气隙表面电导大, 即时间常数 τ 小, 内部电荷衰减迅速, 使气隙内部反向电场减小, 因此纳米材料的平均放电量要比非纳米材料小^[10-12]。

同时频率增加即周期缩短后,初始电子获得的概率减小,从而导致放电次数减少。由于纳米材料中大量浅陷阱的存在,使局部放电初始电子的产生更加容易,因此纳米材料的放电次数大于非纳米材料,但在高频区域由于电荷的存储达到饱和,使得两种材料的放电次数相差不多。

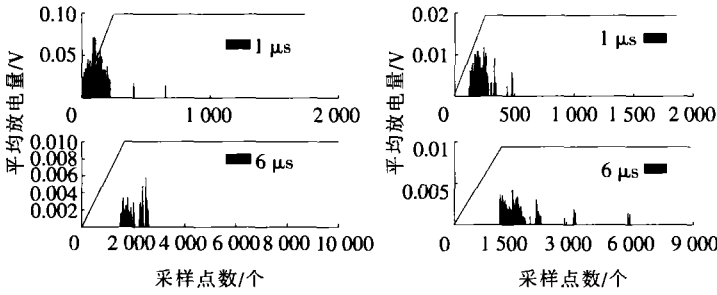


图5 不同电压上升时间下的相位分布特征

材料,其放电相位往脉冲电压的过零点偏移。

(2)随着上升时间增长,两种材料的平均放电量减小;非纳米材料的平均放电量变化比较明显。

(3)随着上升时间增长,两种材料的放电次数明显减少;纳米膜的放电次数多于非纳米膜。

保持相同的频率,改变脉冲电压上升时间,电荷衰减时间常数 τ 不变。气隙直径 D 可根据起始放电电压计算, γ 为两种材料的表面电导率,纳米材料和非纳米材料的时间常数 τ 根据式(2)可近似估计为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ s,而脉冲电压的上升时间变化范围为 $1 \sim 10 \mu s$,其等效频率远大于时间常数,因此电荷在快速的上升和下降时间内衰减是几乎不可能的。随着上升时间的缩短,无论纳米还是非纳米材料,其放电相位往脉冲电压的过零点偏移,说明随着上升时间的缩短电荷产生比较强的存储效应,因此上升时间的缩短,电荷的存储效应更为明显。一个可能的解释见图8。

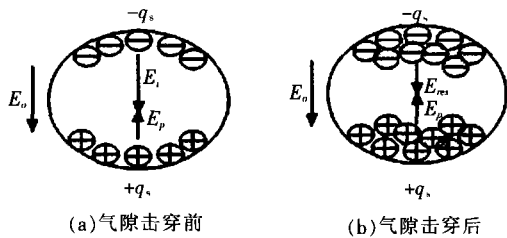


图8 放电前后气隙内部电场

因此快速上升和下降时间的变化对PD参数的影响主要取决于初始电子的延迟和气隙的动态电场 ΔE ,同样导致电场的叠加。因此可以看到纳米和非纳米膜的PD平均放电量均随着上升时间的缩短而增大。但是由于无机纳米填料形成的大量界面改善了材料的电导率,导致电荷沿着气隙表面运动容易,减小了反向电场的叠加效应,从而导致PD幅值减少。

2.2 电压上升时间对PD的影响

在频率为2 kHz、脉冲电压峰值为1800 V的条件下,脉冲电压上升时间对纳米和非纳米材料平均放电量 and 放电次数的影响见图5~7。从图5~7可得出以下结论。

(1)随着上升时间的缩短,无论纳米还是非纳米

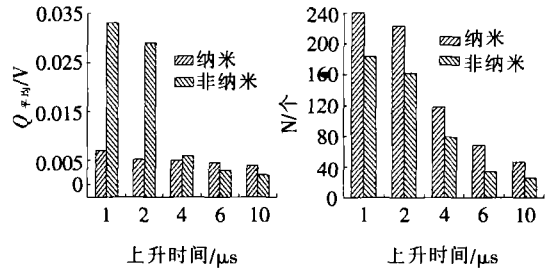


图6 不同电压上升时间下PD平均放电量 图7 不同电压上升时间下放电次数

在不同上升时间、气隙形状保持不变的情况下,由于脉冲电压周期不变,初始电子的获得概率保持不变,当大于放电电压后,初始电子获得概率一样,PD的幅值取决于电压上升率,即 du/dt ,所以其值越大,PD幅值越大,因此随着上升时间增长,PD平均放电量减小。

3 结论

笔者通过在高频脉冲方波条件下,对纳米和非纳米聚酰亚胺薄膜进行不同频率和不同上升时间下的局部放电实验,可得如下结论:

(1)在两次放电的间隔中,气隙内部电荷并不静止,而是会沿着气隙表面运动或扩散进深陷阱,气隙表面电导率对局部放电产生比较大影响。

(2)随着上升时间的缩短电荷产生比较强的存储效应,快速的上升和下降时间的变化对PD参数的影响主要取决于初始电子的延迟和气隙的动态电场。

(3)无机纳米填料在非纳米聚酰亚胺膜中产生大量界面改善了材料的电导率,电荷沿着气隙表面运动更加容易,同时纳米材料中大量浅陷阱的存在,使局部放电初始电子的产生也更加容易。

参考文献:

[1] FABIANI D, MONTANARI G C, CONTIN A. Aging Acceleration of Insulating Materials for Electrical Machine Windings Supplied by PWM in the Presence and in the Absence of Partial Discharges [C]// IEEE ICSD, Eindhoven, the Netherlands, 2001: 283-286.
 [2] FABIANI D, MONTANARI G C, CAVALLINI A, et al. Relation between Space Charge Accumulation and Partial Discharge Activity in Enamelled Wires under PWM-like Voltage Waveforms[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 27-32. (下转第448页)

线越多,对雷电流分流也越大,侵入波过电压越低,因此两线一变运行方式的绕击和反击结果不再列出。雷电波侵入变电站时,变压器侧的 MOA 动作,使变压器上的电压低于其绝缘水平。但是这并不意味着变压器就能够安全运行了,因为雷击多次折反射会使变压器绕组内出现频率较高的振荡冲击波,振荡波产生的谐振过电压可能导致绕组匝间绝缘事故^[10],从而要对变压器上所受过电压的波形作出频谱分析。由表 3~5 可知,当运行方式 2 雷击塔顶时,变压器上的过电压最严重,这种情况下变压器上的电压波形及其频谱分析见图 8、9。

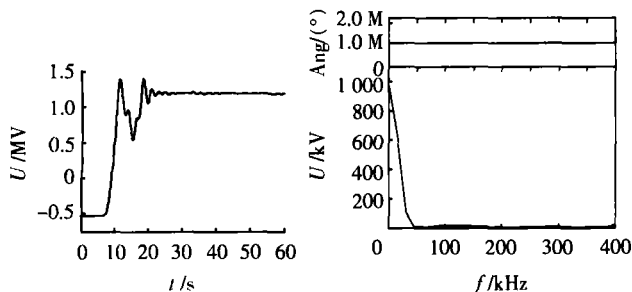


图 8 变压器上电压波形图 图 9 变压器电压波形的频谱分析

由图 8、9 可知,对变压器绕组的匝间绝缘有较大威胁的高频分量幅值不超过 150 kV,而且最高频率不超过 300 kHz。而频率在几十 kHz 的低频分量的幅值,也不超过 1000 kV,远低于变压器绕组的绝缘水平。可见,在变压器侧 MOA 的保护下,雷电过电压对变压器绕组的匝间绝缘不构成威胁。

4 结论

(1)在研究 750 kV 变电站雷电侵入波时,应将变电站和进线段结合起来,看成一个整体,区分雷击杆塔处,一般为变电站进线段 1~6 号杆塔,从而更接近实际。

(2)MOA 按照方案 1~3 布置的情况下,变电站

各设备的绕击过电压水平偏高。MOA 按照方案 4 布置,各设备的绕击和反击过电压均在绝缘允许范围内,而且有更大的绝缘裕度。即对于敞开式 750 kV 变电站高抗和母线侧均需安装避雷器。

(3)MOA 按照方案 4 布置且反击电流取 220 A 时,设备上的过电压略高,但此雷电流的概率为 0.001%,即反击概率很低。线路杆塔越高越易发生绕击,所以应该注重绕击过电压的防护。

(4)通过对变压器上所受过电压波形的频谱分析,在变压器侧 MOA 的保护下,雷电过电压对变压器绕组的匝间绝缘不构成威胁。

参考文献:

- [1] 谷定燮,周沛洪,戴敏,等. 1000 kV 交流输电工程防雷保护研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 40-44.
- [2] 刘渝根,刘伟,陈先禄. 500 kV 变电站雷电侵入波研究[J]. 重庆大学学报, 2000, 23(3): 17-19.
- [3] YAMADA T, NARITA T, SHIODA T, et al. Observation and Analysis of Lightning Surges at Substations Connected with UHV Designed Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 675-683.
- [4] 张纬敏,高明玉. 电力系统过电压及绝缘配合 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [5] 曹祥麟. EMTF 在特高压交流输电研究中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 64-68.
- [6] 张水记,司马文霞,张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 93-97.
- [7] HARA T, YAMAMOTO O. Modelling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis [J]. IEE Proc of Transm Distrib, 1996, 143(3): 283-289.
- [8] 谷定燮,樊灵孟. 对我国 500 kV 线路防雷的新思考 [J]. 中国电力, 2004, 37(12): 18-21.
- [9] 王秉钧. 金属氧化物避雷器 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [10] 颜湘莲,文远芳. 变压器绕组纵绝缘连续式绕组分段并联 MOV 保护[J]. 高电压技术, 2003, 28(1): 11-12.

(上接第 444 页)

- [3] 张血琴,吴广宁,郭俊,等. 高频连续脉冲作用下电机绝缘局部放电信号的提取[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 103-107.
- [4] 佟来生,刘曦,吴广宁,等. 周期性脉冲电压作用下绝缘局部放电的测量与分析 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 61-64.
- [5] 周凯,吴广宁,邓桃,等. 纳米复合绝缘材料的热刺激电流测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 76-82.
- [6] 张维国,王坤,刘岩,等. 纳米无机杂化聚酰亚胺薄膜的热刺激电流谱特性[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 9(1): 40-42.
- [7] 吴广宁,刘曦,佟来生. 提取 PWM 脉冲下局部放电信号的 Sym4 小波滤波器的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 35-38.
- [8] 佟来生,吴广宁,林同光,等. 一种用于脉冲绝缘老化试验的高压脉冲电源[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 1-3.
- [9] MAZZANTI G, MONTANARI G C, ALISON J M. A Space Charge Based Method for the Estimation of Apparent Mobility and Trap Depth as Markers for Insulation Degradation Theoretical Basis and Experimental Validation[J]. IEEE Trans. Dielect. & Electr. Insul., 2003, 10(2): 187-197.
- [10] 刘曦,吴广宁,佟来生,等. 高频脉冲方波局部放电特征参量比较的研究[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 61-64.
- [11] 佟来生,吴广宁,温凤香. 变频牵引电机端子过电压产生原理及影响因素 [J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 673-676.
- [12] ANDRE R. Evaluation of Partial Discharge in Inverter Driven Medium Voltage Propulsion Coils [C]// Industry Applications Conference, 2003: 1869-1873.