

文章编号:1001-1609(2005)06-0445-04

一种新结构自愈式高储能密度脉冲电容器的实验研究

王科¹, 杨兰均¹, 张乔根¹, 许继业², 金玲²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安电力电容器厂, 陕西 西安 710082)

Experimental Study on a New Structure Self-healing High Energy Density Pulse Capacitor

WANG Ke¹, YANG Lan-jun¹, ZHANG Qiao-gen¹, XU Ji-ye², JIN Ling²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Xi'an Power Capacitor Factory, Xi'an 710082, China)

摘要:研制了一种金属化膜脉冲电容器。通过采用内串结构、选择合适的金属膜方阻值,提高了电容器的储能密度。而通过改变金属膜方阻值的大小以及对电极端部的加厚处理进行改进,在保持其储能密度一定的情况下,有效延长了电容器的使用寿命。寿命试验表明,单个元件喷金层的脱落是造成电容器失效及寿命缩短的主要原因,而外层薄膜自愈严重及其中轴处的横贯内外层的自愈是造成单支元件电容量下降的主要原因。

关键词:脉冲电容器;自愈;内串结构;方阻值

中图分类号: TM531.2

文献标识码: A

Abstract: A sort of metallized polypropylene pulse capacitor has been designed and two ways are introduced to increase the energy density of the capacitor: adopting inner series structure, choosing appropriate metallized film, ohm/sq. For prolonging the life of the metallized film is adjusted and the metallized film electrode rim is thickened more. The life test results reveal that the reason of the capacitor's destroying can be confirmed to the breaking off of one element's sprayed end, while the elements' capacitance drop is due to the serious self-healing of the elements' outer layer film and the entire self-healing of the metallized film middle interspace.

Key words: pulse capacitor; self-healing;

inner series structure; ohm per square

1 引言

脉冲电容器广泛应用于脉冲电源、医疗器械、电磁武器、粒子加速器及环保等领域。随着脉冲功率技术的不断发展,对其储能密度及使用寿命等方面提出了更高的要求。而脉冲电容器储能密度的高低常受限于所应用的材料及制作工艺。早期的铝箔/纸结

构电容器其储能密度在几十 J/L,经过改进其储能密度也只有上百 J/L^[1-3]。金属化蒸镀技术的应用及新型介质薄膜材料的引入使得金属化膜电容器的应用迅速发展起来,相应电容器的储能密度也提高到 500 J/L 以上。其中,聚丙烯膜作为一种无极性高分子材料膜,耐受电场强度高,可达 1 000 V/ μm ^[1],介电常数稳定,损耗低,非常适合于金属化蒸镀技术用膜。笔者采用聚丙烯薄膜材料,研制了一种高储能密度脉冲电容器,并对其进行了寿命试验。

2 电容器设计分析

2.1 元件结构的设计

由于金属膜厚度的限制造成单个元件的耐压及容量不能满足高电压大容量脉冲电容器的要求,因而要通过单支元件的串并联来满足实际要求。

自愈点的放电能量公式^[4]为:

$$E_{\text{discharge}} = \frac{k \cdot U^{4.7} \cdot C}{(\text{ohm/sq})^{1.8} \cdot \alpha(P)}$$

式中: $\alpha(P)$, ohm/sq 分别为与自愈点处的层压有关的常数和金属膜方阻值; k 为关联系数,随 C 与 U 单位的不同而变化, C 为电容量,而 U 为单个元件所加的有效电压(内两串结构元件有效电压为元件上所加电压的 1/2,内三串的为所加电压的 1/3)。

由于元件在自愈点处的放电能量与所加电压的 4.7 次方成正比,放电能量过大会造成自愈点处薄膜的损坏。因此,要设法控制自愈点处的放电能量。

相同尺寸的元件在采用内两串结构时有效电压下降一半,从而使得自愈点处的放电能量极大的减小。而在同一尺寸下采用两外串结构时,由于元件喷金端面、引线焊点及相互间的连接,而造成元件储能体积利用率下降(在 7%~10%之间),进而导致电容

收稿日期:2005-06-07; 修回日期:2005-08-13

作者简介:王科(1982-),男,在读硕士,研究方向为金属化膜电容器特性分析。

器储能密度下降。同时,外串结构使得元件数目相应地成倍增加,加大了电容器焊接劳动量及元件排线布置难度。

可见采用内串结构能够大大减小元件的串联数目,减小焊接劳动量,一定程度上提高电容器的储能密度。图1为内串结构示意图。

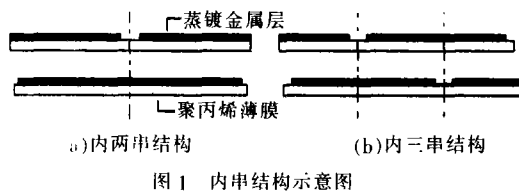


图1 内串结构示意图

2.2 金属膜方阻值的分析

方阻值是指蒸镀金属膜上单位面积的电阻数值,它与镀膜金属层的厚度成反比。在镀膜金属电阻率一定的情况下,金属层越薄,方阻值越大^[5]。方阻值单位 Ω/\square 中的“ \square ”并非表示面积,实质上为与元件尺寸有关的余数,而有别于电阻单位^[5-6]。提高脉冲电容器储能密度的途径在于提高绝缘材料的工作场强^[7],因而有必要讨论方阻值与金属膜耐电强度的关系。

金属化膜电容器的自愈特性与金属膜的厚度关系极大,而金属膜的厚度又与其方阻值成反比,故方阻的大小会极大地影响绝缘材料的工作场强,进而影响绝缘材料的储能密度。

通过对元件的耐压实验得出金属膜方阻值与聚丙烯膜耐电强度的关系见图2。实验采用直流电压源,进行耐压实验的电容器元件其金属膜厚度一定,而方阻值不同。

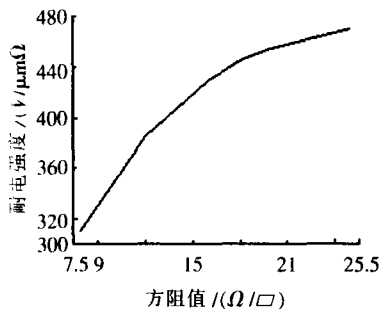


图2 方阻值与薄膜耐电强度的关系

实际设计的电容器要接受高于额定电压一定倍数的耐压试验(型式试验和出厂试验),即设计的电容器其实际应用(额定电压下)的膜的工作场强要低于膜所能耐受的电场强度。当膜的耐电强度约在 $400\text{ V}/\mu\text{m}$ 时,设计的脉冲电容器的储能密度为 600 J/L ,而当膜的耐电强度到 $450\text{ V}/\mu\text{m}$ 时,其储能密度可达 800 J/L 。计算表明,高方阻值所对应材料的高耐电强度是提高脉冲电容器储能密度的关键。

可见方阻的大小直接决定着金属膜的耐电强度,而金属膜的高耐电强度是实现脉冲电容器高储能密度的关键,可以说方阻值的大小对脉冲电容器储能密度大小起决定作用。

2.3 薄膜表面电极端部的加厚处理

金属化膜电容器由于其蒸镀到薄膜上的金属层厚度仅 $20\sim 100\text{ nm}$,其电极的引出靠端部金属层与喷金层的接触(存在接触电阻)来实现。由于喷金层与金属层的接触面积很小,限制了电容器的通流能力,使其很难应用于大电流陡脉冲放电($\text{ns}\sim\mu\text{s}$ 级)领域。

实际设计的电容器的放电时间在数百 μs ,其放电等效波长远大于元件尺寸,故其薄膜表面电极流过电流时的电路模型可按照集中参数处理。这样元件流过电流的电路模型实际上可以用3个串联的电阻等效,分别为膜上金属层电极的电阻、接触电阻和引线电阻。

由于引线电阻相对于膜上金属层的电极电阻及端部的接触电阻来说很小,可以忽略。而一般情况下,因金属膜的方阻引起电极表面的发热要远小于电弱点在自愈时的发热,即电流流动时不会因为发热的原因造成金属层的蒸发。这样就只剩下端部接触电阻要考虑。

金属化膜脉冲电容器放电时,端部会通过很大的脉冲电流。由于端部接触电阻的存在,会导致端部接触区域薄膜的温度因为电流的热效应而升高。当温升达到一定值时,薄膜便会产生收缩,而使喷金层与电极端部的接触变差,导致端部接触电阻增加,使端部的发热更为严重,薄膜会进一步收缩或引起薄膜的炭化,从而形成恶性循环,情况严重时甚至会导致整个喷金层与电容器芯子完全分离(后面的寿命试验也证实了这点)。

可见,端部接触电阻的大小对电容器的寿命影响很大。当对金属膜电极端部进行加厚处理(使其蒸镀金属层较内部变厚)后,加厚的端部电极与喷金端面的接触面积变大,使得其间的接触电阻减小,同时使端部喷金过程中对金属膜边缘的烫蚀减小。这样在大的脉冲电流通过接触电阻时的发热会减小,从而减小了热应力对端部喷金面的影响。

3 电容器的寿命试验

由于金属化膜电容器的自愈特性使其工作时电容量会逐渐下降,当电容量下降超过5%后,下降速度骤增,且电容器绝缘电阻骤减,故将电容量下降5%作为电容器寿命终结的指标^[1]。其中的电容器寿命试验原理见图3。

通过对金属膜方阻值大小调整,及其金属膜电极边缘加厚的进一步改进,对前后两台电容器的寿命试验所得的电容量变化曲线见图4,图5为图4对应电容器损耗值的变化曲线。

由图4可以看到,通过对金属膜方阻值大小进行调整,金属膜电极边缘厚度的进一步增加,电容器的寿命增加近1/3。由于图4(a)所示电容器在试验

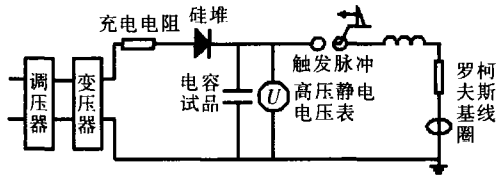


图3 试验装置原理图

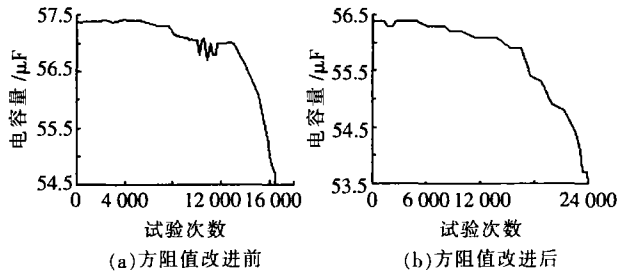


图4 电容器容量变化图

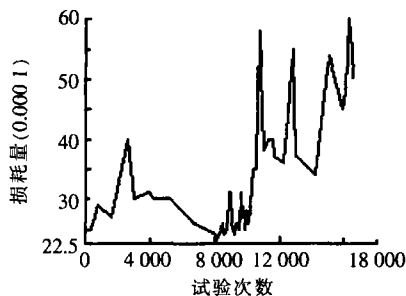


图5 电容器的损耗变化图

进行到10000次时,进行了短路放电试验,后续试验的电容量下降加速明显,说明了短路放电对电容器的寿命亦有很大影响。

图5所示电容器的损耗基本随试验次数的增加而增加。但是电容器的最大损耗值仅仅0.006(1kHz),完全满足脉冲电容器的低损耗要求。

4 失效电容器分析研究

通过对两台失效电容器的拆解发现,寿命较短的一台电容器其串并结构的元件中有一支(表1中的4号元件)喷金层发生脱落,其电容量从23.9 μF降至6.1 μF,而其它无明显缺陷元件的电容量下降幅度也有所不同。其中6支元件的电容量数据见表1。

由表1中所列的单支元件电容量的变化情况可见,元件电容量的变化范围较大,整台电容器的电容量下降5%,不一定单支元件的电容量变化是稳定的,除喷金层发生脱落的元件外,亦有电容量下降达10%的元件(表1中的6号元件)。

表1 试验前后单支元件电容量变化数据

元件编号	初始值/μF	失效值/μF	变化率/%
1	23.9	22.1	7.50
2	23.9	23.5	1.70
3	23.9	23.4	2.10
4	23.9	6.10	74.5
5	23.9	22.6	5.40
6	23.9	21.4	10.5

通过对无明显缺陷元件的拆解,发现其中金属膜的自愈特性随元件直径变化而有不同的表现形式,可分为:近芯子的最内层、中间层、元件最外层及贯通整个元件的金属膜中轴附近4种情况,其中膜的自愈情况在内层和外层有明显的不同,见图6。在中间层薄膜大部分自愈点小,而且很少,但仍间或有图7所示的较为密集自愈点。同时在中间层发现两种特殊的自愈情况,见图8。图9所示为贯通整个元件的金属膜中轴附近薄膜的自愈情况。

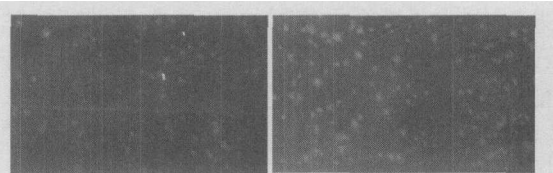


图6 内外层薄膜自愈图片比较

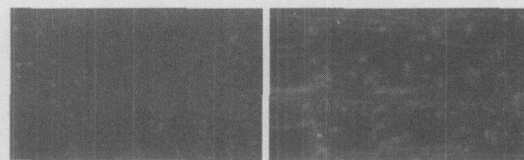


图7 中间层薄膜间或出现的密集自愈点

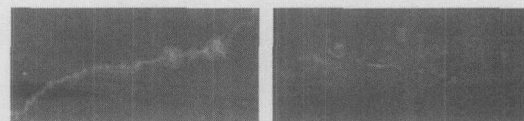


图8 因薄膜褶皱引起特殊的自愈形式

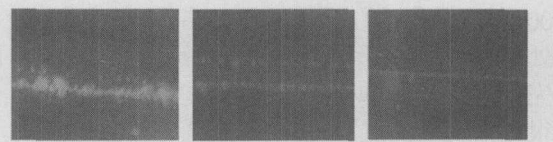


图9 中轴处的横贯内外层的自愈

图6(a)所示的内层薄膜自愈图片中,自愈点很多,但很小,原因可归结为绕制机在起步阶段处于加速状态,其绕制速度不稳定,造成对金属膜的张力变化,影响膜的自愈。若膜的质量欠缺,会在芯子附近十几层某些点处出现集中性的贯穿现象。芯子附近几层的膜其自愈点多,但点很小,这不是影响元件电容值下降的主要原因。

图6(b)所示的外层薄膜自愈图片中,薄膜在中间部位自愈现象非常严重,自愈点之间几乎串联起来,同时图9所示的中轴处横贯内外层的自愈,这两者综合应该是造成单支元件电容量下降的一个主要原因。出现这种情况的原因可以从元件外层绕制紧密度不高,及其中轴附近电场畸变而造成自愈较严重入手查找。

通过对两台电容器的不同电容量下降元件的拆解发现,外层总是存在有图6(b)所示的情况,其最终原因可归结为元件绕制紧密度及中轴附近的电场畸变。由于元件内层绕制紧密度高,中轴附近气隙小,不均匀电场引起的局部放电影响要小一些,而外层由于

元件绕制紧密度较低,中轴附近不可避免存在气隙,畸变的电场引起的局部放电形成一种沿自愈点边沿扩大的串联形的自愈形状,图6(b)很明显地表明了这种情况。虽然其只占外面几十层,但由于其自愈严重,应该也是元件电容量下降的不可忽视的因素。

图8所示的两种现象其原因可归结为膜在绕制过程中出现褶皱,前者形成了贯穿整个电极的自愈形式,而后者在褶皱处出现了大块的片状自愈点。

由以上分析可知,单个元件的损坏引起了电容器失效,减少了整台电容器的寿命。由于端部接触不良,造成热应力增大而引起元件喷金层的脱落,进一步增大金属膜电极边缘的喷金厚度能有效解决这个问题。改进后的电容器寿命延长,且没有再出现元件喷金层脱落。

5 结语

通过设计研制一种自愈式高储能密度脉冲电容器,并对其进行寿命试验及失效分析。结果表明,元件采用内串结构、金属膜取较高的方阻值是提高金属化膜脉冲电容器储能密度的关键;而金属膜电极

(上接第444页)

6 结语

(1)对分接开关传动机构的结构原理进行了理论上的分析。通过应用数学软件(SIGMAPLOT 2000)对已采集的数据进行零点漂移、限幅及数字滤波处理,在较好地保留采样信号局部特性的前提下,可完全解决现场采集数据存在的噪声污染问题,具有很好的实用价值。可离线和在线检测扭矩曲线,可预防和检测到扭矩异常,能详细了解分接开关的储能过程。

(2)正常的测量原始数据中包含有一定的干扰成分,在经过数字处理后得到的扭矩曲线与推导出的理论曲线很好地相符合。

(3)正常的分接开关操作时,获得的扭矩波形仅为图中的一个周期,但图8已表明,测量系统能很好地监测到图中的连动现象。

(4)实测数据显示,标准^[6]中所写的扭矩为最大值,而现场实测数据通常只有15 N·m,新型的更小;如何评估这些曲线,可使用力矩指纹图技术。通过周期性获得的实际曲线和指纹图相比较,关键是有多少偏差是危险的,这一问题可通过积累现场数据解决。

(上接第442页)

参考文献:

- [1] Lammers A J W, Leufkens P P, Shoonenbery G C. MV Vacuum Switchgear Based on Magnetic Actuators [A]. IEE Conference Publication[C], No. 459, London, 1998.
- [2] 林 莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京:机械工业出版社,

端部的加厚处理是提高电容器通流能力、改善电极端部与喷金层接触的有效途径;电容器元件外层薄膜自愈严重及其薄膜中轴附近的贯通性自愈是造成单支元件电容量下降的主要原因。

参考文献:

- [1] Sarjeant W J, Zirnheld J, MacDougall F W. Capacitors[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1998, 26(5): 1368-1392.
- [2] Bramoull M. Evolution of the DC Capacitors [A]. 12th IEEE International Pulsed Power Conference [C], Monterey (USA), 1999: 106.
- [3] 林福昌. 高储能密度脉冲电容器的研究 [J]. 高电压技术, 2002, 28(7): 34-37.
- [4] Maurizio Rabuffi, Guido Picci. Status Quo and Future Prospects for Metallized Polypropylene Energy Storage Capacitors[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2002, 30(2): 1939-1942.
- [5] 马 野. 从方阻值谈自愈式低压并联电容器元件的设计和改进行[J]. 电力电容器, 1996(4): 8-10.
- [6] 冯锦华. 如何选择金属化铝膜方阻值[J]. 电子元件与材料, 1997, 16(2): 53-55.
- [7] 林福昌, 李 劲, 姚宗干. 电磁发射兵器用电容器的选取[J]. 兵工学报, 2003, 24(3): 416-418.

(5)传动过程发生异常时,可通过安装在传动轴上的力矩传感器来检测。该结果是在复合式V型分接开关上获得的,但也可应用到电网中其它电压等级和类型的分接开关。

参考文献:

- [1] 张德明. 变压器有载分接开关 [M]. 辽宁科学技术出版社, 1998.
- [2] 李赞群, 赵支列. 有载分接开关电动机常见故障的诊断及处理[J]. 变压器, 1999, 36(10): 32-38.
- [3] Naoki Amano. Recent Trends in Ultralarge-capacity Three-phase Transformer Technology [J]. Hitachi Review, 2002, 51(5): 164-168.
- [4] La M L, Park S Y, Lin C C. Mechanical Failure Detection of Circuit Breakers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(4): 1724-1731.
- [5] MR公司. V型有载分接开关使用说明书[K]. 2002.
- [6] DL/T 574-1995. 有载分接开关运行维修导则[S].
- [7] 孟 臣. JN338智能数字式转矩转速传感器及其应用 [J]. 国外电子元器件, 2003(11): 56-58.
- [8] 刘广臣, 张惠安, 贾爱宾. 数字信号处理中的加窗问题研究 [J]. 湖南:长沙大学学报, 2003, 17(4): 59-62.
- [9] 瞿潮庆. 扭矩传感器的测量结果不确定度评定 [J]. 上海计量测试, 1988, 3(4): 1724-1731.

2002.

- [3] 游一民, 陈德桂, 候建新, 等. 永磁操动机构的发展和应[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 54-56.
- [4] 张俊民, 徐国政, 钱家骊, 等. 一种永磁操动机构的智能控制与电子驱动装置的研制[J]. 高压电器, 2003, 39(1): 27-33.