

文章编号: 2095-4980(2018)06-1125-06

## 基于电荷补偿的金属化膜电容器自愈测试方法

毛 伟, 黄素波, 吴鸿兵

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 利用金属化膜电容器发生自愈时会引起电容极板间电压下降, 并使与其并联的储能电容为其充电以补偿电荷这一原理, 设计了一种较为简单、有效的自愈测试方法。该方法利用示波器监测自愈发生时储能电容给被测电容的充电电流作用于采样电阻而形成的脉冲电压信号, 以该信号的出现作为判断自愈发生的依据, 并根据该信号特性计算自愈能量损失。仿真和实验结果证明, 该方法能够较为准确地检测到自愈的发生, 并计算出自愈造成的能量损失, 30 个实际测试样本数据显示, 采用该方法计算的自愈能量损失与实际自愈能量损失相比, 其误差范围在  $-3.83\%$ ~ $5.71\%$  内, 有较高的准确度。

**关键词:** 金属化膜电容器; 自愈; 电荷; 测试

**中图分类号:** TM531.2

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201806.1125

## Test method of self-healing in high voltage metallized film capacitors based on charge compensation

MAO Wei, HUANG Subo, WU Hongbing

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** A simple and effective test method is designed based on the principle that self-healing could cause the voltage falling between the under test capacitor's electrode and makes the parallel capacitor charge up for its charge loss. This method utilizes oscilloscope to monitor the pulse voltage signal produced by the pulse current signal from the charge up operation on the sampling resistance, taking this signal as a symbol of self-healing occurrence and calculating self-healing energy loss according to this signal's character. Simulation result and real test show this method could detect self-healing's occurrence and calculate self-healing energy loss precisely. Data from 30 test samples reveals that, comparing the energy loss given by this method with the real self-healing energy loss, the error is about  $-3.83\%$ ~ $5.71\%$ , and the precision is comparatively good.

**Keywords:** metallized film capacitors; self-healing; charge; test

高压金属化膜电容器体积小, 容量大, 开路失效等优势常用于脉冲功率设备<sup>[1]</sup>。与其他种类电容器不同, 该类电容器在工作时会因自愈造成瞬时的能量损失, 随自愈次数的累积, 电容器容量会逐渐减小。自愈性是决定金属化膜电容器寿命的主要因素<sup>[2]</sup>, 故通常是该类电容器性能的重点考核项目。自愈性的测试方法按原理可分为电压测试法、自愈声测试法<sup>[3]</sup>等。电压测试法较为简单, 但对于工作电压较高的电容器和连续发生、能量损失较低的自愈测试效果不佳; 自愈声测试法较为繁琐且受测试环境影响, 测试成本较高。鉴于现有测试方法存在的问题, 本文利用自愈能够引起被测电容两端电压突变, 导致并联储能电容为其补偿电荷这一原理, 设计了一种新的较为简单、有效的自愈特性测试方法, 实现了金属化膜电容器自愈性能的定量测试。

### 1 自愈特性测试原理设计

#### 1.1 金属化膜电容器的自愈特性

金属化膜电容器是以介质基层(有机薄膜)做绝缘、介质上蒸镀的金属膜做电极的电容器<sup>[4]</sup>。电容器具有当介

质局部发生击穿时,击穿点周围的金属镀层将被蒸发,并在极短的时间内恢复绝缘的性能<sup>[5]</sup>,工程上称为自愈性,简称自愈。自愈过程及其等效电路如图 1 所示<sup>[6]</sup>,自愈过程可分为弱点击穿、电弧产生和绝缘恢复 3 个步骤<sup>[7]</sup>,图 1 中的间隙  $\delta$  模拟的是自愈击穿点的自愈通道及其邻近的 2 个极板上的金属蒸发层区域,  $C,R,L$  代表电容器其他完好部分的等值参数。

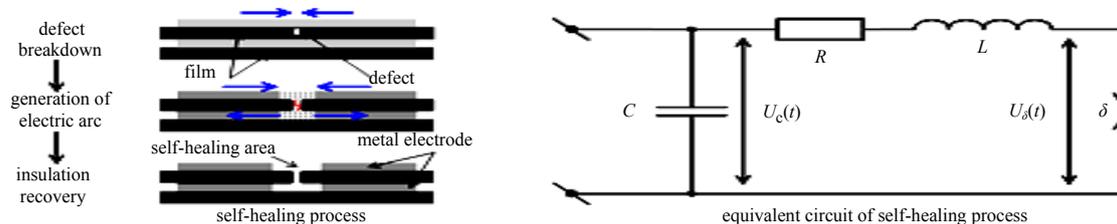


Fig.1 Self-healing process of metalized film capacitor and its equivalent circuit  
图 1 金属化膜电容器自愈过程及其等效电路

图 1 中,  $\delta$  处自愈开始时发生放电现象,  $U_\delta$  由电容器极板上的初始电压很快降至 0, 然后再按指数规律上升直到自愈结束。在这个过程中, 电容器极板上的电压  $U_C$  会迅速下降, 而后缓慢上升直到自愈时, 从自愈电弧形成到消失, 会有能量流经击穿点处的自愈通道<sup>[8]</sup>, 造成电容器储存能量的损失, 能量损失大小与自愈强弱有关。自愈发生的频次和每次自愈所造成的能量损失多少是体现金属化膜电容器性能的重要参数。

### 1.2 自愈测试内容及测试方法局限

#### 1) 测试内容

工程应用中, 金属化膜电容器自愈性能的测试内容包括 2 项: 自愈频次, 指单位时间内发生的自愈次数。工程应用中常在给被测电容器施加规定测试电压条件下, 电容在一定时间内出现的自愈次数; 自愈损失能量, 指单次自愈所导致的电容器瞬时能量损失的大小。

#### 2) 主要测试方法及局限

a) 电压测试法: 主要原理是通过测试电容自愈引起电容器极板电压下降信号, 以电压下降作为自愈发生的依据, 用以统计自愈频次; 以电压下降幅度计算自愈能量  $W_{sh}$ , 计算公式为:

$$W_{sh} = \frac{1}{2} C_s \times (U_{C_{s1}}^2 - U_{C_{s2}}^2) \tag{1}$$

式中:  $C_s$  为被测电容容值(由于单次自愈导致的电容损失极小<sup>[9]</sup>, 这里忽略不计);  $U_{C_{s1}}$  为自愈前  $C_s$  极板两端的电压;  $U_{C_{s2}}$  为自愈后  $C_s$  极板两端的电压最低值。

由式(1)可知, 电压测试法需要捕捉电容器测试电压的下降并测试下降的幅度。对工作电压较高的电容的自愈和能量损失较低的自愈, 电压的下降不易捕获, 下降幅度亦难以准确测试, 此时使用电压测试法将不能准确的测试自愈频次和自愈能量。

b) 自愈声测试法: 主要原理是测试电容器自愈时发出的声音作为电容发生自愈的依据。该方法只能测自愈发生的次数, 对测试环境要求高且需要声波传感器、声信号处理电路、水箱等较为复杂的测试设备, 测试结果人为影响大<sup>[3]</sup>, 测试成本较高。

### 1.3 自愈测试方法改进设计

针对当前测试原理的局限性, 本文在目前较为常见的电测量法<sup>[10]</sup>的基础上, 利用与被测电容并联的储能电容在被测电容发生自愈时会向被测电容补充电荷, 使回路出现电流脉冲这一特性, 来表征自愈的发生并计算自愈造成的能量损失。具体原理如下所述。

自愈测试电路原理如图 2 所示。图 2 中,  $R_1$  为充电电阻, 为  $M\Omega$  级;  $R_2$  为高压分压器, 用于静态高压检测;  $C_1$  为滤波电容;  $C_s$  为被测金属化膜电容器;  $C_2$  为与  $C_s$  并联的储能电容, 主要起稳定输入电压和为  $C_s$  补充电荷的作用( $C_2$  必须是无自愈特性的非金属化膜电容器, 其耐压应大于自愈特性测试电压);  $R_3$

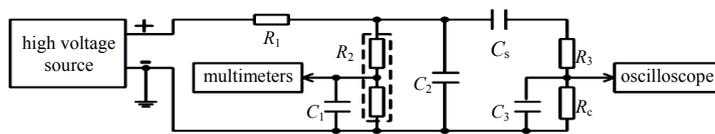


Fig.2 Principle of self-healing test circuit  
图 2 自愈测试电路原理

为限流电阻，起限制  $C_2$  为  $C_s$  注入的电流大小的作用； $R_c$  为采样电阻，采样信号输出至示波器； $C_3$  为采样信号滤波电容。在  $C_s$  发生自愈过程中，电路中的电压电流关系如图 3 所示。

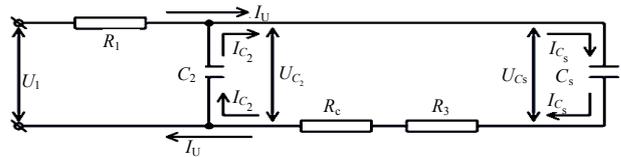


Fig.3 Voltage and current characters of the working self-healing test circuit  
图 3 自愈测试电路工作时的电压和电流特性

图 3 中， $U_1$  为输入电压； $U_{C_2}$  为储能电容  $C_2$  两端电压； $U_{C_s}$  为被测电容  $C_s$  两端电压。自愈发生前后，电路参数特性的变化情况为：

1) 自愈发生前：电路处于稳定状态，回路电流均为很小( $\mu A$  级)的漏电流，可认为  $U_{C_2}=U_{C_s}=U_1$ ；

2) 自愈过程中：因为自愈造成的能量(电荷)损失，导致  $U_{C_s}$  迅速下降至最低点  $U_{C_{s\min}}$ 。 $U_{C_s}$  下降后， $C_2$  开始通过  $R_c, R_3$  向  $C_s$  注入电荷，故  $I_{C_s}$  迅速增大， $U_{C_2}$  开始下降；

3) 自愈完成后： $U_{C_s}$  因  $C_2$  注入的电荷开始上升， $U_{C_2}$  继续减小直到  $U_{C_s}$  和  $U_{C_2}$  重新恢复一致， $I_{C_s}$  也逐渐减小为  $I_U$ 。此时有  $U_{C_s}=U_{C_s}=U_2$ ， $U_2$  为  $U_{C_2}$  的最小值。之后由于高压电源  $U$  的作用， $U_{C_s}$  和  $U_{C_2}$  开始上升，最终恢复至自愈前的电压  $U_1$ 。

从自愈开始到  $U_{C_s}$  和  $U_{C_2}$  重新恢复一致这段时间中，供电电源  $U$  也会向  $C_s$  注入电流  $I_U$ ，但是由于  $R_1$  限制， $I_U$  非常小( $\mu A$  级)，因此可忽略不计。由于自愈过程本身发生很快( $\mu s$  级)，这段时间里  $C_2$  对  $C_s$  补偿的电荷极少，这里也忽略不计。基于上述内容，由式(1)可知，被测电容  $C_s$  在自愈过程中造成的能量损失应为：

$$W_{sh1} = \frac{1}{2} C_s \times (U_1^2 - U_{C_{s\min}}^2) \tag{2}$$

在  $U_{C_s}$  和  $U_{C_2}$  重新恢复一致时，对于整个测试电路而言，在自愈过程中造成的能量损失应为：

$$W_{sh2} = \frac{1}{2} (C_s + C_2) \times (U_1^2 - U_2^2) \tag{3}$$

根据能量守恒定律， $W_{sh2}=W_{sh1}+W_r$ ， $W_r$  为回路电阻  $R_c, R_3$  及其他等效电阻上的能量损失。经估算， $W_r$  远小于  $W_{sh2}$ ，这里也忽略不计，即认为自愈是唯一的能量损失源，视  $W_{sh2}=W_{sh1}$ 。由于  $C_2, C_s$  以及  $U_1$  均为已知，只要知道  $U_{C_2}$  在自愈过程的电压最小值  $U_2$  或者  $U_1$  与  $U_2$  的差值  $\Delta U$ ，而不需直接测试  $U_{C_{s\min}}$  就能算出自愈造成的能量损失。

基于上述理论，单独对于储能电容  $C_2$  而言，它在整个自愈过程中的能量为  $0.5 \times C_2 \times (U_1^2 - U_2^2)$ ，这部分能量以电荷形式注入被测电容  $C_s$  (所以  $I_{sc}$  才会形成脉冲)，注入的电荷量  $Q$  为：

$$Q = C_2(U_1 - U_2) = \int I_{C_s}(t) dt = \int \frac{U_{R_c}(t)}{R_c} dt = \frac{1}{R_c} \int U_{R_c}(t) dt \tag{4}$$

即：

$$U_1 - U_2 = \Delta U = \frac{Q}{C_2} = \frac{1}{C_2 \times R_c} \int U_{R_c}(t) dt \tag{5}$$

式(4)中  $\int U_{R_c}(t) dt$  是采样电阻  $R_c$  上的电压  $U_{R_c}$  对时间  $t$  的积分，即从自愈开始到自愈结束后  $U_{C_s}$  和  $U_{C_2}$  重新恢复一致这段时间内电压  $U_{R_c}$  所包络的面积。只要通过示波器测试出该面积，就能算出差值  $\Delta U$ ，再结合自愈前的被测电容上的电压  $U_1$ ，就可根据式(3)算出自愈能量损失。

## 2 自愈特性测试方法验证

### 2.1 仿真验证及分析

为验证 1.3 节测试电路的设计，以

某型小型高压脉冲电容器(其主要指标如表 1 所示，电容内部由 4 个相同的四内串电容芯子并联组成)为模型，利用 PSPICE 仿真软件搭建了如图 4 所示的仿真验证电路模型。图 4 中，被测电容  $C_s$  总等效电容量为  $0.34 \mu F$ ，限流电阻  $R_3$  为  $3 k\Omega$ ，采样电阻  $R_c$  为  $50 \Omega$ ，储能电容  $C_2$  为  $0.04 \mu F$ 。回路中其他电阻电感为等效参数。

表 1 某型高压脉冲电容器主要技术指标

Table1 Primary parameter of one metallized film capacitor

capacitance/ $\mu F$	capacitance error(%)	working voltage/kV	insulation resistance/ $M\Omega$	leakage current/ $\mu A$
0.34	-15~5	8	$\geq 10\ 000$	ambience: $\leq 5; 70\ ^\circ C: \leq 10$ (10 kV test)

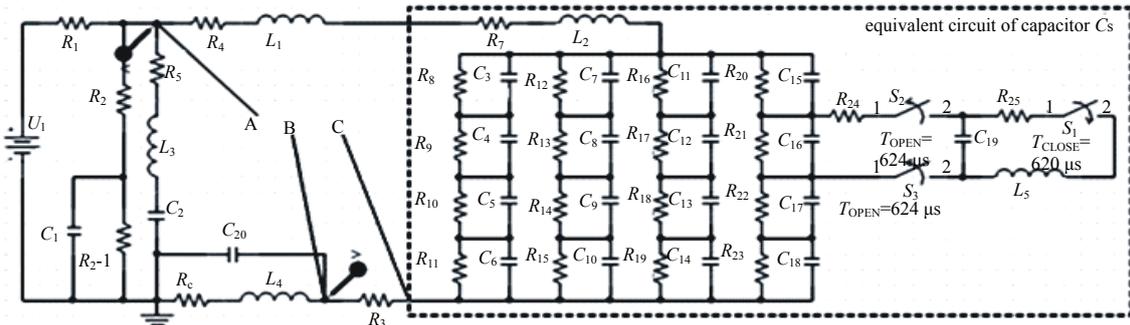


Fig.4 Simulation model of self-healing test circuit  
图 4 自愈测试电路仿真模型

电路模拟了一次自愈发生的过程, 假设因自愈损失的电容  $C_{19}$  为  $0.03 \text{ nF}$  (小于  $C_s$  的  $1/10\ 000$ ), 开关  $S_1$  闭合模拟自愈发生, 开关  $S_2, S_3$  打开模拟自愈恢复。测试 A 点电压、B 点电压以及 A 点和 C 点的压差, 分别为  $U_{C_2}, U_{R_c}, U_{C_s}$  电压。同时, 利用仿真软件的积分测试功能测得  $\int U_{R_c}(t)dt$  的波形, 如图 5 所示。

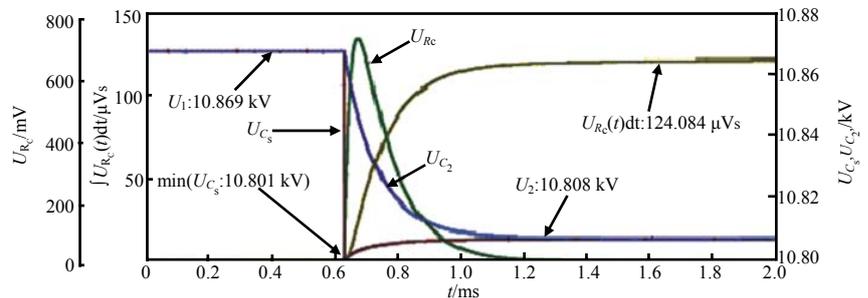


Fig.5 Simulation results of self-healing test circuit  
图 5 自愈测试电路仿真结果

从图 5 可知, 自愈前被测电容电压

$U_1=10.869 \text{ kV}$ , 采样电阻  $R_c$  上电压近似为 0; 自愈开始后  $U_{C_s}$  迅速下降至最小值  $10.801 \text{ kV}$ , 自愈完成后开始上升恢复。 $U_{C_2}$  伴随  $U_{C_s}$  下降, 但由于  $U_{C_2}$  下降速度缓慢, 先有  $U_{C_2} > U_{C_s}$ , 但经过一段时间后 2 个电压最终恢复一致, 为  $U_2=10.808 \text{ kV}$ , 然后再一起缓慢上升。这段时间中, 采样电阻  $R_c$  上的电压  $U_{R_c}$  先增大后减小。由式(2)可知, 电容器  $C_s$  上因自愈损失的实际能量  $W_{sh1}=0.5 \times 0.34 \times 10^{-6} \times (10.869^2 - 10.801^2) \times 10^6 \text{ J} \approx 0.2505 \text{ J}$ 。

由式(3)可知, 通过  $U_1$  和  $U_2$  计算自愈损失的能量  $W_{sh2}=0.5 \times (0.34 + 0.04) \times 10^{-6} \times (10.869^2 - 10.808^2) \times 10^6 \text{ J} \approx 0.2512 \text{ J}$ 。 $W_{sh1}$  与  $W_{sh2}$  基本一致, 与前文分析吻合。

仿真结果显示, 从自愈开始到电容  $C_s$  和  $C_2$  上的电压恢复一致这段时间中, 采样电阻  $R_c$  上的电压积分约为  $124.084 \mu\text{Vs}$ 。按本文所述计算方式, 由式(5)可算出  $U_1$  和  $U_2$  之差  $\Delta U = (0.04 \times 10^{-6} \times 50)^{-1} \times 124.084 \times 10^{-6} \text{ J} = 62.042 \text{ V}$ 。进一步可算出能量损失  $W_{sh3}=0.5 \times (0.34 + 0.04) \times 10^{-6} \times [10.869^2 - (10.869 - 0.062\ 042)^2] \text{ J} \approx 0.2555 \text{ J}$ 。

本文所述测试方式计算的能量损失  $W_{sh3}$  与  $W_{sh1}$  和  $W_{sh2}$  对比如表 2 所示。

表 2 不同方式计算的自愈能量对比  
Table2 Comparison of self-healing energy from different arithmetics

No.	symbol	capacitor/ $\mu\text{F}$	$U_1/\text{kV}$	$U_2/\text{kV}$	$\Delta U/\text{V}$	$U_{C_s}/\text{kV}$	self-healing energy loss/J	error/%
1	$W_{sh1}$	0.34	10.869	—	—	10.801	0.2505	—
2	$W_{sh2}$	0.38	10.869	10.808	—	—	0.2512	—
3	$W_{sh3}$	0.38	10.869	—	62.042	—	0.2555	1.996

由表 2 可以看出, 本文所述测试电路中采用测试采样电阻  $R_c$  上的电压  $U_{R_c}$  对时间的积分来获取自愈前后的电压差值  $\Delta U$ , 再进一步计算出的电容器自愈能量  $W_{sh3}$  与实际自愈能量  $W_{sh1}, W_{sh2}$  基本一致, 误差最大为 1.996%。上述结果从仿真的角度验证了本文所述测试方法的正确性。

## 2.2 实际测试验证及分析

如图 6 所示, 为进一步验证本文所述测试方法的正确性, 按图 2 原理制作了一台自愈测试装置, 与高压电源和示波器组成一套测试系统, 测试表 1 所示某型金属化膜电容器的自愈特性。自愈测试装置中储能电容  $C_2$  为  $0.04 \mu\text{F}$ 、限流电阻  $R_3$  为  $3 \text{ k}\Omega$ 、采样电阻  $R_c$  为  $3 \text{ k}\Omega$ , 但测试时其上电压经同轴电缆和  $50 \Omega$  匹配头输入示波器, 故  $R_c$  等效电阻约为  $49.20 \Omega$ 。

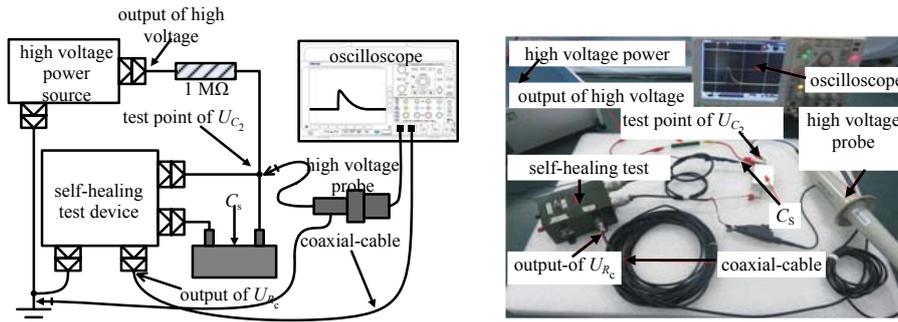


Fig. 6 Self-healing test system based on the circuit in Fig. 2  
图 6 基于图 2 电路原理的金属化膜电容器自愈测试系统

系统捕捉到被测电容发生的 30 次自愈(工程实践中,一般认为样本容量小于 30 为小样本<sup>[11]</sup>)。本文取了采用新方法测得 30 个样本用于分析,这些样本的实际自愈能量损失基本覆盖了被测电容的正常自愈能量范围,因此具有代表性),测得储能电容  $C_2$  上的电压  $U_{C_2}$  和采样电阻上的电压  $U_{R_c}$  的典型波形如图 7 所示,所得数据如表 3 所示。表 3 中,  $U_1$  为自愈前实际初始电压;  $\int U_{R_c}(t)dt$  为示波器自愈计算的采样电阻上电压  $U_{R_c}$  对时间  $t$  的积分;  $\Delta U_R$  为示波器测得的  $U_{C_2}$  在自愈前后实际变化的压差;  $\Delta U_T$  为按公式(5)由  $\int U_{R_c}(t)dt$  计算  $U_{C_2}$  在自愈前后变化的压差;  $W_R$  为按公式(3)由  $U_1, \Delta U_R$  计算得来的实际能量损失;  $W_T$  为按本文所述方式由  $U_1, \Delta U_T$  计算得来的能量损失; 误差为  $W_T$  与  $W_R$  相比的误差。自愈实际造成的能量损失  $W_R$  和按本文所述方式计算得到的能量损失  $W_T$  对比如图 8 所示。

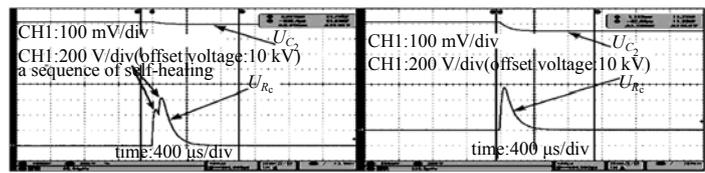


Fig. 7 Typical waveform of  $U_{C_2}$  and  $U_{R_c}$   
图 7 捕获的  $U_{C_2}$  和  $U_{R_c}$  的典型波形

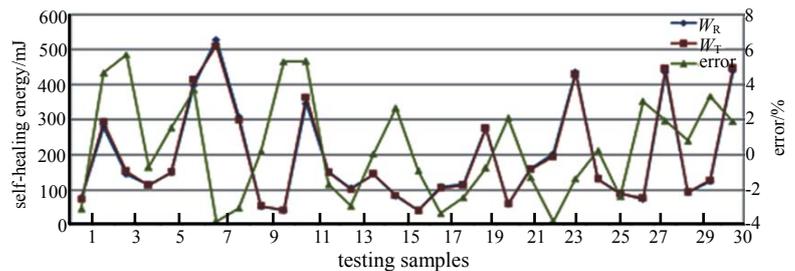


Fig. 8 Comparison of  $W_R$  and  $W_T$   
图 8  $W_R$  和  $W_T$  的对比

表 3 自愈测试系统所测自愈能量数据

Table3 Self-healing energy data from self-healing test system

$U_1/$ kV	$\int U_{R_c}(t)dt/$ $\mu Vs$	$\Delta U_R/$ V	$\Delta U_T/$ V	$W_R/$ mJ	$W_T/$ mJ	error/ %	$U_1/$ kV	$\int U_{R_c}(t)dt/$ $\mu Vs$	$\Delta U_R/$ V	$\Delta U_T/$ V	$W_R/$ mJ	$W_T/$ mJ	error/ %
11.88	32.03	16.78	16.26	75.70	73.35	-3.10	11.82	17.20	8.813	8.73	39.57	39.20	-0.93
11.87	127.8	61.97	64.87	278.79	291.82	4.67	11.82	45.69	24.00	23.19	107.69	104.07	-3.36
11.23	69.96	33.59	35.51	143.13	151.31	5.71	11.83	49.17	25.59	24.96	114.91	112.08	-2.46
11.62	50.05	25.59	25.41	112.87	112.06	-0.72	11.83	120.4	61.59	61.12	276.15	274.03	-0.77
11.85	65.56	32.78	33.28	147.40	149.65	1.52	11.84	25.76	12.81	13.08	57.60	58.80	2.08
11.96	179.8	88.00	91.27	398.47	413.22	3.70	11.53	70.70	36.36	35.89	159.06	157.00	-1.30
11.83	225.3	118.4	114.37	529.59	511.63	-3.83	11.10	90.93	48.00	46.16	202.03	194.29	-3.83
11.73	132.8	69.56	67.41	309.14	299.62	-3.08	11.99	186.5	96.00	94.67	435.64	429.63	-1.38
11.38	23.68	12.00	12.02	51.87	51.95	0.17	11.98	56.28	28.50	28.57	129.59	129.90	0.24
11.86	18.22	8.781	9.25	39.56	41.67	5.32	11.98	38.07	19.80	19.32	90.06	87.90	-2.40
11.56	164.3	79.16	83.40	346.54	365.04	5.34	11.88	32.68	16.10	16.59	72.63	74.84	3.03
11.83	65.04	33.59	33.02	150.79	148.21	-1.71	11.94	193.8	96.50	98.38	436.07	444.51	1.94
11.83	44.34	23.19	22.51	104.15	101.08	-2.94	11.99	39.71	20.00	20.16	91.05	91.76	0.79
11.85	63.07	32.00	32.02	143.90	143.97	0.05	11.50	57.20	28.10	29.04	122.65	126.73	3.33
11.61	37.23	18.41	18.90	81.16	83.31	2.65	12.02	193.7	96.50	98.32	439.00	447.27	1.88

由图 7 可以看出,本文所述测试方法能够捕获自愈发生时与被测电容并联的储能电容为其补偿电荷形成的脉冲电流作用于采样电阻而产生的脉冲电压信号,故可以准确统计出自愈频次;由表 3 和图 8 可以看出,实际测试中,按本文所述方式计算自愈损失的能量与实际自愈损失的能量基本一致,30 次验证试验测试的误差范围为  $-3.83\% \sim 5.71\%$  (负值表示测试结果偏小,正值表示测量结果偏大),准确度较高,实现了自愈能量的定量测试,说明本文所述测试方式在工程上完全可行。

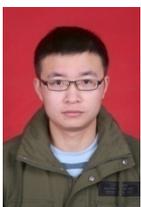
### 3 结论

本文介绍了一种金属化膜电容器自愈特性测试方法,其原理是通过捕捉与被测金属化膜电容并联的储能电容在被测电容发生自愈时,为被测电容补偿电荷而形成的脉冲电流作用于采样电阻而产生的脉冲电压来表征自愈的发生,测试自愈造成的能量损失。在该方法中,通过示波器能够较为容易的捕获表征自愈的脉冲电压信号,信号特征参数测试容易且测试精确度相对较高,故可以准确的记录自愈发生的次数并计算出自愈损失的能量(30个测试样本误差范围为-3.83%~5.71%);该方法所用测试电路也较为简单,测试仪器只需普通的高压电源、示波器即可,不需要复杂的仪器设备和较高的环境要求,较电压测试法和自愈声测试法有一定优势,故该方法可以用于高压金属化膜电容器的自愈性能的定量考核。但是,鉴于试验条件限制,该测试方法对能量损失更低的自愈的测试效果尚不明确;对于间隔时间较短的连续自愈(前一次自愈发生后,系统尚未恢复初始状态时,再次发生自愈),只能测出连续自愈累计的能量损失,难以测出其中单个自愈所造成的能量损失,因此在今后还需在本文基础上进一步开展相关研究工作,完善和优化该测试方法。

#### 参考文献:

- [1] 林福昌,代新,徐智安,等. 高储能密度电容器[J]. 强激光与粒子束, 2003,15(1):94-96. (LIN Fuchang,DAI Xin,XU Zhian,et al. High density capacitors[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003,15(1):94-96.)
- [2] 于成龙,杜涛,李化,等. 基于金属化膜自愈特性的电容器寿命研究[J]. 高压电器, 2015,51(4):124-128. (YU Chenglong,DU Tao,LI Hua,et al. Study on lifetime characteristics of metallized film capacitors based on self-healing property[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(4):124-128.)
- [3] 王永州. 金属化薄膜电容器自愈测试方法[J]. 电子世界, 2016(13):118-119. (WANG Yongzhou. Self-healing test method of metallized film capacitors[J]. Electronics World, 2016(13):118-119.)
- [4] 齐玮,王冰,李振超. 金属化膜脉冲电容器寿命测试方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014,35(1):55-59. (QI Wei, WANG Bing,LI Zhenchao. Life test method of metalized film pulsed capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014,35(1):55-59.)
- [5] 陈耀红,章妙,李化,等. 高场强下金属化膜电容器绝缘电阻特性[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(4):797-800. (CHEN Yaohong,ZHANG Miao,LI Hua,et al. Insulation resistance characteristics of metallized film capacitor under high electric field[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(4):797-800.)
- [6] 陈温良,董燕,贾华. 对金属化膜电容器局部放电和自愈放电性能的初步研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008,29(1):31-36. (CHEN Wenliang,DONG Yan,JIA Hua. Preliminary reearch on partial discharge and self-healing characteristics of metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008,29(1):31-36.)
- [7] 孔中华,林福昌,戴玲,等. 混合电极与全膜电容器的金属化膜自愈特性[J]. 高电压技术, 2008,34(2):385-388. (KONG Zhonghua,LIN Fuchang,DAI Ling,et al. Self-healing characteristics of metallized hybrid electrodes and metallized capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2008,34(2):385-388.)
- [8] 彭波. 金属化膜电容器自愈关键参数研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010. (PENG Bo. Study on the key parameters of self-healing in metallized film capacitor[D]. Wuhan,China:Hua Zhong University of Science and Technology, 2010.)
- [9] 赵建印,彭宝华,孙权,等. 金属化膜脉冲电容器退化失效分析[J]. 高电压技术, 2006,32(3):62-64. (ZHAO Jianyin,PENG Baohua, SUN Quan,et al. Degradation failure analysis of metallized film pulse capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2006,32(3):62-64.)
- [10] 李化,章妙,林福昌,等. 金属化膜电容器自愈理论及规律研究[J]. 电工技术学报, 2012,27(9):218-223. (LI Hua,ZHANG Miao,LIN Fuchang,et al. Study on theory and influence factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,27(9):218-223.)
- [11] 石长伟,刘志明. 小样本评估方法[J]. 质量与可靠性, 2006(6):24-26. (SHI Changwei,LIU Zhiming. Small-sample assessment method[J]. Quality and Reliability, 2006(6):24-26.)

#### 作者简介:



毛伟(1987-),男,四川省绵阳市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为脉冲功率技术等,email:375370145@qq.com.

黄素波(1969-),女,四川省绵阳市人,大专,技师,主要从事无线电装联技术研究.

吴鸿兵(1974-),男,四川省绵阳市人,本科,高级工程师,主要从事脉冲功率技术研究.