

增强型薄膜电容器在智能电能表阻容降压方案中的应用

匡达国际贸易（上海）有限公司.

概述

随着机械电能表向电子智能化电表的转变，为智能电能表内部电路供电的电源方案也在不断的完善。目前各电能表的研发/生产企业的电源方案，一般仍是传统的变压器方案，开关电源方案和阻容降压方案。虽然，变压器方案中，变压器的自重较重，自身功耗大，发热等缺点。但其工作稳定可靠，仍为各电能表企业广泛采用。开关电源则在要求输出功率较大且对电源要求较高的场合应用。而阻容降压方案，因其电路结构简单，本身耗能极少，成本低廉，占用 PCB 板面积少且布板容易，在功能不太多的出口型智能电能表中被较多的选用。

在上述的三个电能表电源方案中，为何电路结构简单，本身耗能少布板简单的阻容降压方案，没有得到广泛的应用呢？这牵涉到电能表的工作环境和对电子元器件的要求。通常电能表都是安装在户外，暴露在恶劣的自然环境中（温度高，湿度大，而且温湿度变化频繁）。因此要求电能表中使用的元器件必须有很高的可靠性和长的使用寿命，以保证电能表在整个使用周期中无须更换维护。在阻容降压的电表电路中，电容器串联在电网中，用于阻容降压的金属化薄膜电容属于关键元器件之一。电容器在恶劣的自然条件下的可靠性将直接影响着电能表使用寿命。

阻容降压电容器的要求

用于阻容降压回路的电容器需要满足：1. 电气参数稳定（包括电容量，损耗等）；2. 需通过安规认证 (UL, ENEC) 3. 性价格比高。过去通常会选择 EMI X2 安规电容器来充当阻容降压方案中的降压电容。然而普通的安规电容器并不是针对该种应用特点来设计的，它在电路中的连接方式和作用与阻容降压不同，也不要满足长期在高温高湿，温差变化大的条件下使用的特性。

阻容降压电容在电能表应用上通常是与电网串联，而 X2 电容的常规应用是与电网并联用于抑制干扰，而不是阻容降压方案中的和电网串联使用，如下是它们的实际应用对比（如图 1）

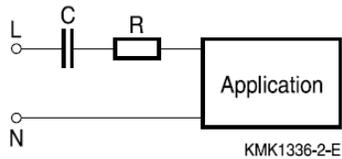
阻容降压典型应用：

电能表，小功率白色家电和及各种传感器电源在恶劣环境的应用。

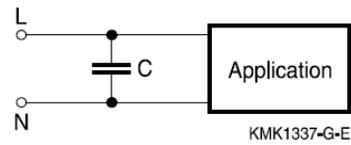
EMI 安规电容典型应用：

标准的 EMI X2 电容，用于电器设备减少或消除与电网间电磁干扰

电路示意图：



Basic circuit



性能要求：

电容容量的稳定性，耐高温高湿；低的容值偏差，以保证稳定的电流。

安规认证（ENEC，UL，CSA，CQC）耐高压冲击和耐浪涌电压的能力。

图 1：两种电容器的使用位置

图 2 是在智能化电能表上具有代表性的阻容降压应用电路。

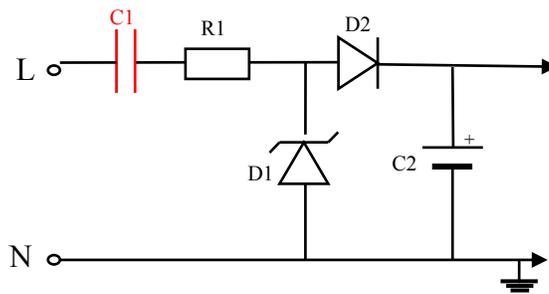


图 2：典型的阻容降压电路

由于目前有相当比例的智能电能表是安装在室外，其所处的特殊工作环境和长时间连续工作的要求，对电容容量稳定性和耐高温高湿性，及低容值偏差的要求与普通的 EMI 安规电容的要求不同。

电容器失效模式分析

为了能满足用于电能表阻容降压方案的电容器，有关电容器厂商首先做了相关的实验分析，金属化薄膜电容在潮湿的环境下工作时（如果同时存在高温情况就更加恶劣），最容易出现问题的地方是电容的电极（蒸镀在基膜上的金属层）。在交流状态下工作的电容器，处于高温高湿的环境下时，其薄膜电极上的金属层在高温高湿的环境下受到电晕放电侵蚀而逐步消失，引起电极板的面积不断缩小，这是最终导致电容值衰减的主要原因。图 3 是薄膜电容的结构，图 4 是金属层消失后的薄膜。

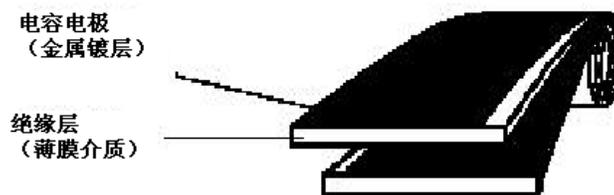


图 3：薄膜电容的基本结构

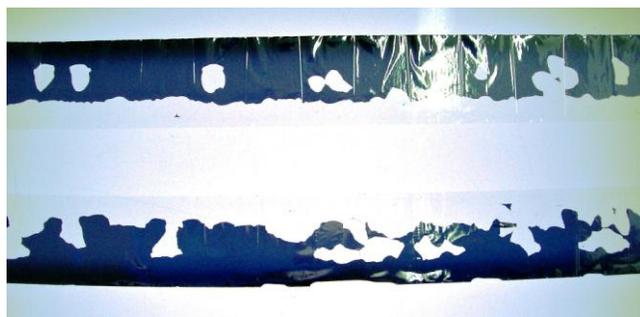


图 4：镀层消失后的薄膜

为了再现电容器的失效机制以及确定每一个参数的影响，进行了电容器在不同工作条件下的实验

- 测试 A: 高温 (70 ℃)，高压 (1.5 倍额定电压) 测试
- 测试 B: 高温 (120 ℃)，高压 (320Vac) 测试
- 测试 C: 高温 (80 ℃) 高压 (265Vac) 高湿 (85%相对湿度) 测试

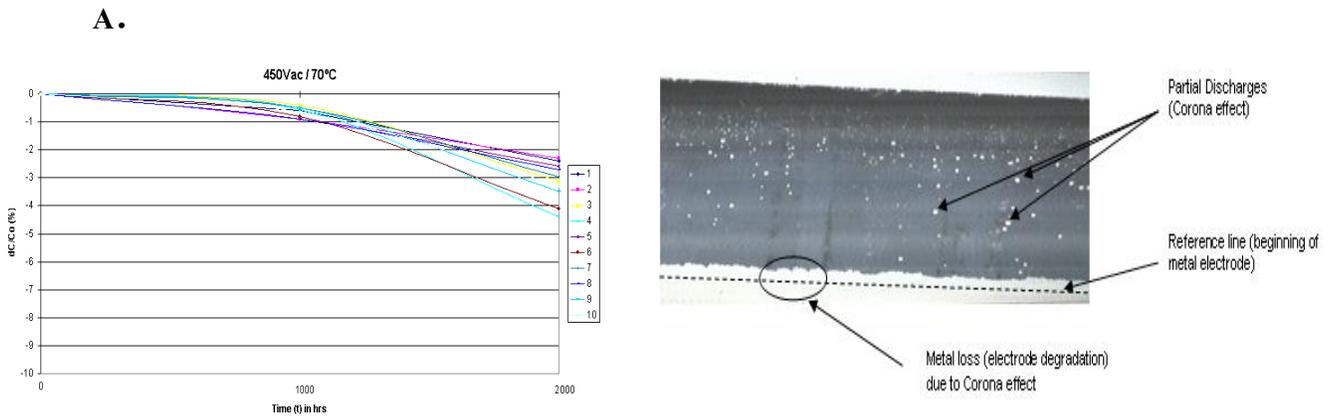


图 5：2000 小时高压测试后电容容值的变化(左图) 和电晕局部放电引起的金属层变化(右图)

从图 5 中看出电极局部由于 AC 高电压引起的放电（即电晕放电）导致镀层消减是电容容值损失的主要原因。

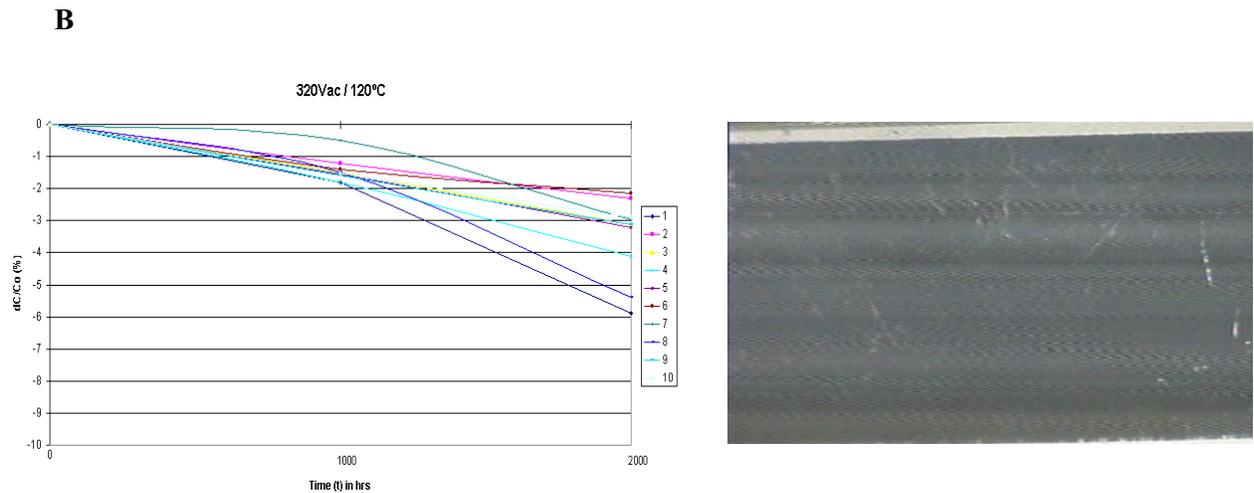


图 6：2000 小时高温测试后电容容值的变化（左）和电极的变化（右）

从图 6 中可以看出，电极上的金属镀层并没有任何变化。电容量的下降主要是由于薄膜在高温下产生收缩，导致金属化薄膜的镀层边和侧边的喷涂层脱离引起的。

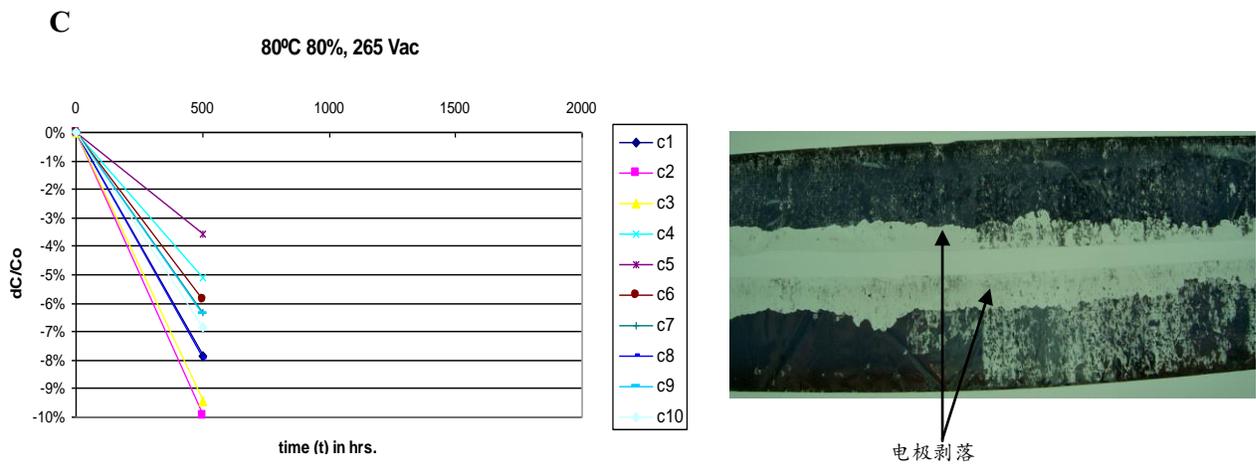


图 7: 500 小时高温高湿带 AC 负载测试后电容容值的变化 (左) 和电极的变化 (右)

从图 7 中可以看出, 当存在有一定的湿度是, 电极上的金属镀层将会从边缘开始迅速消失, 从而导致极板面积缩小, 容量下降。

综合图 5 和图 6 可以看到, 无论是在高温还是高压的测试, 2000 小时后普通安规电容的容量都下降了大约 6%, 而且在 1000 小时后下降的趋势加快。

然而, 当高温和高压加上潮湿后, 电容容量值的下降趋势明显加快。从图 7 中可以看到 500 小时后, 容量值得下降已经达到 10%

这里必须指出的一点(但却常被忽略的)是: 失效(电极上的金属镀层消失)一旦开始发生就不会停止, 即使是去除了潮湿, 它仍会继续扩大。从图 8 中, 我们可以看出这一点。

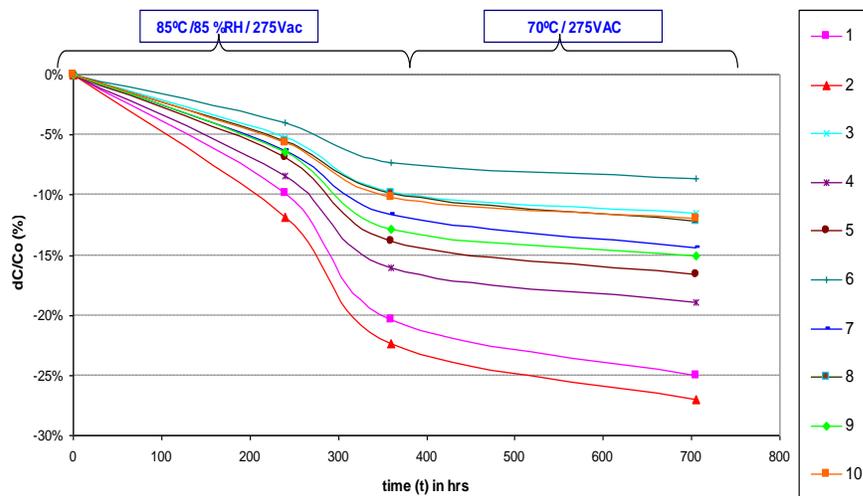


图 8: 电容量在潮湿 (左) 和去除潮湿 (右) 后的变化

下表列出了各因素对电容容值下降的影响

测试	容值下降	原因	现象
A	Yes	AC 电压过电压	电晕放电导致电极镀层消减
B	Yes	温度	电极镀层无变化，由于基膜的收缩导致接触面减少
C	Yes	湿度	电极镀层消失导致接触面减少

针对降压电容器的工艺改进

为了满足电能表对阻容降压电容的可靠性要求，有关电容器厂商针对性地研发了适用于交流应用新的增强型聚酯(MKT)薄膜电容系列(B3293*系列)。该系列电容具有更加优秀的耐久性和更低的容量变化。为了提高电容器的耐过压能力，新系列电容器采用两串联的结构设计，这样每部分的电容所承受电压是总电压的一半。这样显著地减缓了电容量的衰减(如下图)。

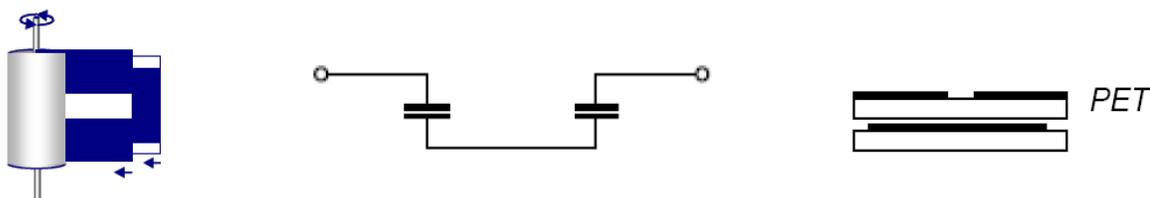


图 9：增强型新系列内部结构图

由于采用了聚酯薄膜(PET)作为介质，因其介电常数(3.3)高于聚丙烯薄膜(2.2)，所以它比相同规格的安规电容器的体积来得小。聚丙烯薄膜是目前 EMI 安规电容器常用的介电材料。与之相比，聚酯薄膜电容器具有更高的温度特性，能允许电容器在 125 °C 的环境温度下工作。B3293*系列电容器还通过对电容外壳材料，填充树脂，端面喷涂材质，工艺参数等进行了一系列的优化设计，以保证电容器对潮湿气体具有很好的抵抗耐受性。在 85 °C 和 85% 相对湿度的条件下，经过 1000 小时 240Vac 的加速测试后，电容容值的变化率小于 10%。B3293*系列电容的额定电压值为 305Vac，可选容量值从 0.047 μF 到 10 μF。最大工作温度为 105 °C。此外 2.2 μF (包括 2.2 μF) 以下的电容符合并通过 X2 安规电容的认证。

新系列的电容以满足：1) 适合 AC 负载的应用，2) 能在恶劣的自然环境下保持电容容量长时间的稳定，3) 体积小并能符合安规 X2 的认证要求。

新系列电容可靠性和稳定性测试

为了模拟电容器安装在电能表上后有可能遇到的恶劣条件，特设定了以下的测试条件：

- 相对湿度：85%RH
- 温度：85 °C
- 负载 240 VAC
- 测试时间：1000hrs
- 评判标准：最大电容变化量 ($\Delta C/C_0$)：< $\pm 10\%$

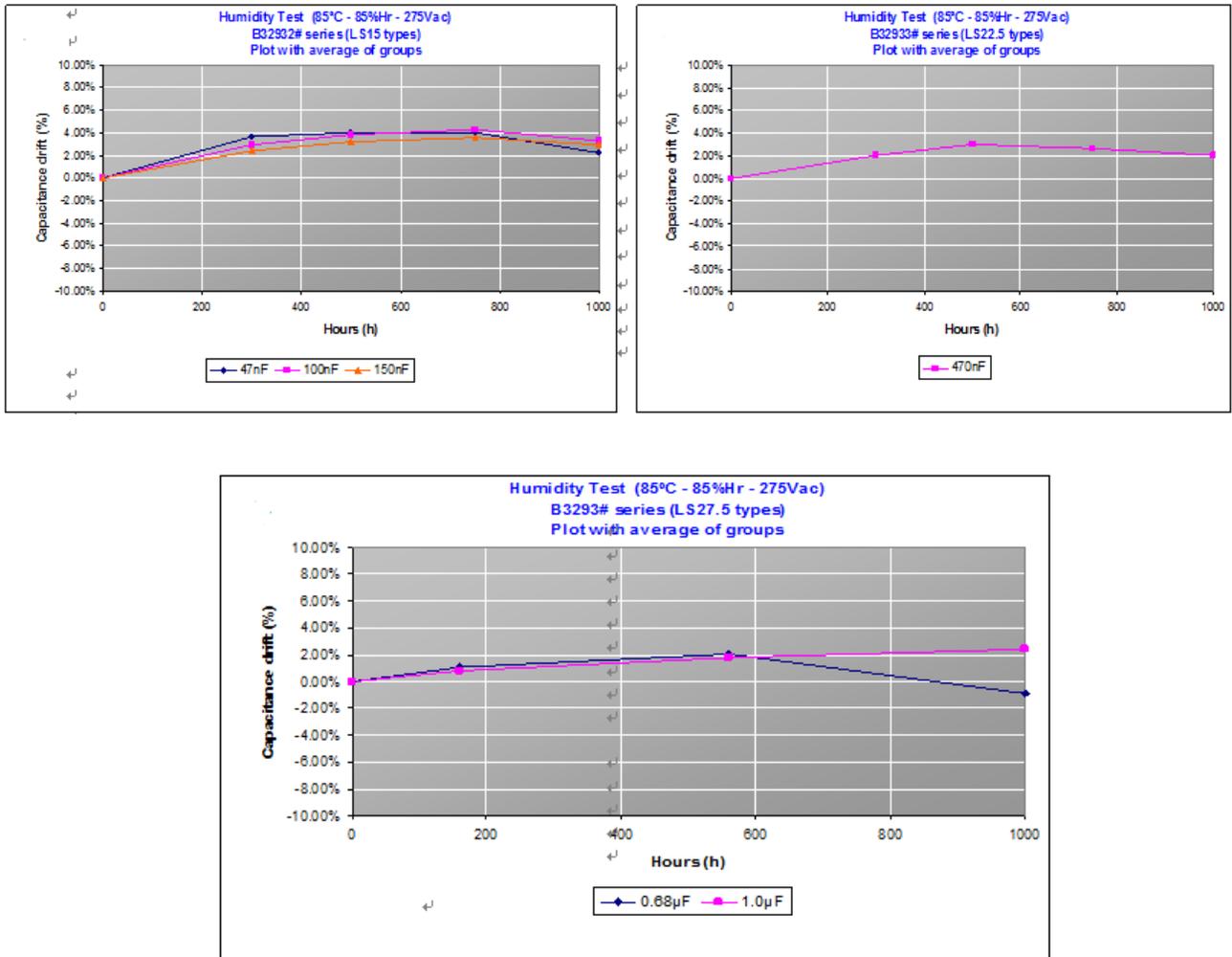


图 10:新系列增强型电容的测试结果

这些苛刻的测试表明新系列增强型的电容能很好的满足电能表应用的要求，同时也得到有关电能表客户的认可。

为了直观地反映增强型薄膜电容与普通的 X2 安规电容的特性对比，按 275Vac-850C-85% Hr 的条件，将两种电容器放在同样的环境中。从图 10 中，我们可以看到增加强型新系列电容器在 1000 小时的测试后容值的减少小于 2%。普通 X2 电容器在 500 小时后的容值减少超过 10%（如图 11 所示）。这说明了与普通 X2 电容相比，新系列电容器的性能有了显著的提高。

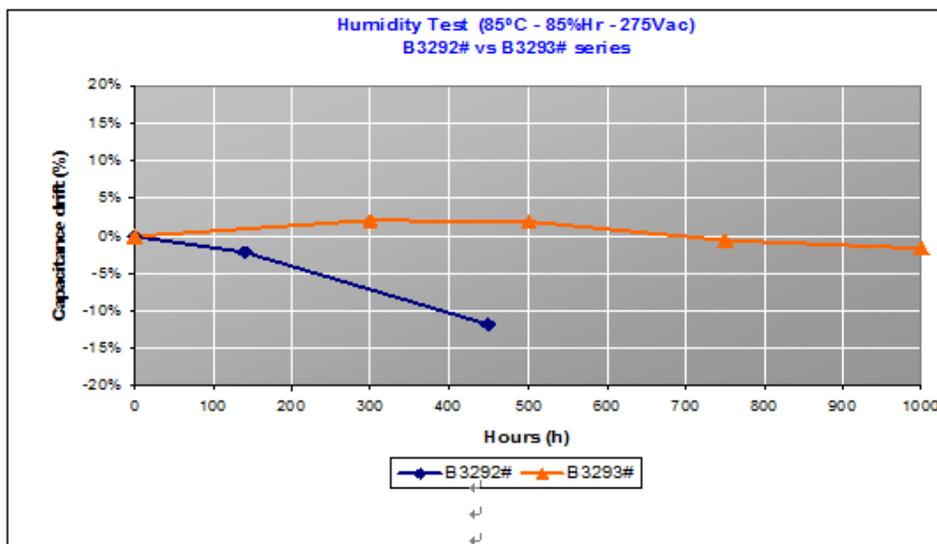


图 11: 增强型电容和普通安规电容测试对比

新系列电容同时也根据 IEC60384-14 进行了可靠性测试。根据标准的要求，电容须在气候类别定义最大工作温度下，施加 1.25 倍的额定电压测试 1000 小时后容值的变化不超过 10%。

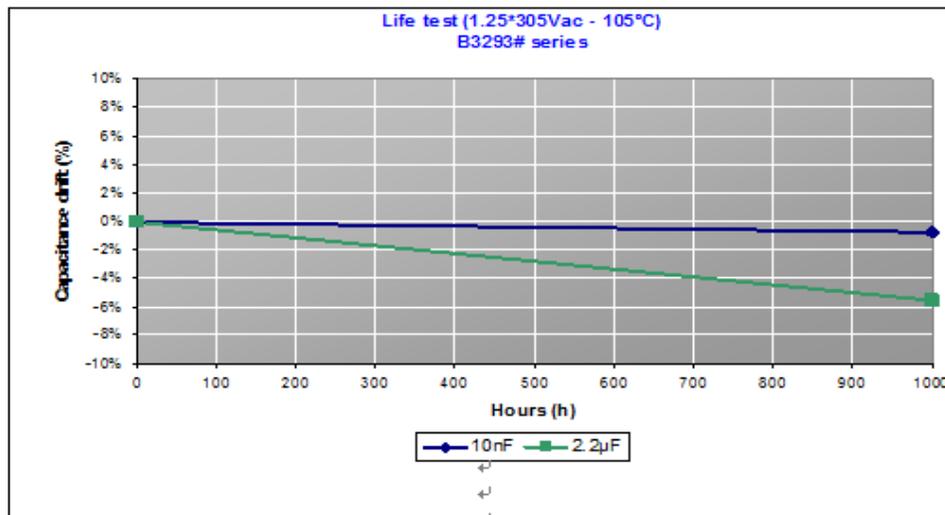


图 11: 可靠性测试

从上面一系列的试验测试中可看出，B3293* 系列增强型薄膜电容器具有很高的稳定性。即使在 85 °C / 85%相对湿度，240Vac 负载的条件下测试 1000 小时，最大的电容值变化率不超过 10%。该系列能很好的满足如下电能表的要求，

- 适合在潮湿的环境中使用
- 在恶劣自然环境下的保持容值稳定性
- 具有较强的抗过压，浪涌能力
- 对元器件有小型化的需求
- 通过了 UL60384 和 IEC60384 认证，可靠性和安全性得到了保证

新系列产品性能

增强型 MKT 薄膜电容 B3293# 系列电容的主要特性如下：

Heavy duty MKT AC capacitors (with X2 safety approval up to 2.2 μF) B3293#	
工艺	MKT 卷绕式, 内串结构
气候类别	40/105/56
阻燃等级	B
容值范围	0.047 to 10 μF
交流额定电压 (IEC 60384-14)	305 V (50/60 Hz)
最大工作温度	105 °C
引脚间距	15 to 37.5 mm
安规认证 (2.2μF 以下)	IEC 60384-14 / EN 60384-14 UL60384-14
湿热试验	温度 + 85 °C ± 2 °C 相对湿度: 85% ± 2% 测试时间: 1000 hours 测试电压: 240 V AC, 50 Hz
湿热试验评判标准	容值变化(ΔC/C) ≤ 10% 损耗角变化(Δ tanδ) ≤ 5.10 ⁻³ (at 1 kHz) 绝缘阻抗 R _{ins} ≥ 50% of minimum 或 时间常数τ = C _R · R _{ins} as-delivered values

结论

综上所述， B3293#系列是针对阻容降压方案而设计开发的增强型薄膜电容器，完全能满足智能化电能表用元件的特殊要求。有效解决了普通薄膜电容器在过电压冲击，高温高湿等不良环境下失效的问题。随着智能电表的发展，其要求相关的元器件具有高的可靠性，稳定性和长寿命，需要能耐受恶劣的自然环境（随时变化的高温高湿），在与电网直接相连，用于阻容降压的薄膜电容必须在电表的整个使用周期中保持容值的稳定。B3293#系列的新薄膜电容器显然已具备了这些条件，同时它已通过了 UL60384-14 的安全认证。EPCOS 是第一家取得 UL 新标准 60384-14 安全认证的薄膜电容厂家。因此 EPCOS B3293#系列电容器可作为智能化电能表阻容降压方案的首选降压电容器。

参考文献

- [1] IEC 61000-3-4 3rd Edition: Electromagnetic compatibility
- [2] IEC 60384-14, 3rd Edition: Fixed capacitors for use in electronic equipments.
- [3] EPCOS Film Capacitor Data Book. Edition 04/2009
- [4] UL 60384-14, 1st Edition: Fixed capacitors for use in electronic equipments.
- [5] 《增强型薄膜电容在高湿环境中应用》