

避免大型UPS系统中的 交流电容器故障

第 60 号白皮书

版本 2

作者：Victor Avelar

摘要

大型不间断电源（UPS）中发生的大多数交流电容器故障都是可以避免的。电容器故障会导致 UPS 故障，在某些情况下还会造成单机系统和并机系统的关键负载断电。曾经交流电容器故障被归因于不可避免的随机故障或产品固有缺陷。然而最新电容器可靠性分析研究表明，电容器故障可以通过系统设计得到控制。此白皮书解释了交流电容器故障机理，并阐述了 UPS 设计人员和技术人员如何能够避免多数常见交流电容器故障及其相关其他事项。

简介

曾经交流电容器故障是导致 UPS 现场故障的最主要原因。即使在今天，虽然电容器的制造工艺和产品质量都得到了改善，但在某些设计中，电容器依旧会引发 UPS 故障。此外，交流电容器故障会造成 UPS 故障，导致不可预料的也不希望的冗余丢失或关键负载断电，即使 UPS 系统设计具有容错或并联运行能力。因此，UPS 设计人员必须尽可能减少电容器在系统使用寿命期间的预估总故障次数并制定一个可靠的策略，用以对电源保护系统进行管理，无论内部故障何时发生都能耐受。

电容器使用寿命是可以通过数理统计进行预估的，并且受到电压、电流及其所承受的温度影响。因此，UPS 的设计可能且已经对电容器的故障频率带来巨大影响。UPS 设计在电容器的使用和运行参数等方面有了巨大改变。通过了解电容器的故障机理，UPS 设计人员和供应商能够利用数理统计模型来预测电容器使用寿命，并通过特定运行指标来降低电容器故障率，大幅延长其使用寿命。

此白皮书对电容器在 UPS 中的应用进行了概述，并对电容器的故障机理进行阐释。最后提供了有关适当设计 UPS 规格来避免电容器故障的指导性建议。

交流电力电容器在 UPS 中的应用

目前，交流电容器在大多数 UPS 中有两种主要应用。采用金属化薄膜结构的交流电容器用于输入和输出滤波以及功率因数控制。一台 UPS 中可能会有数百个交流和直流电容器被用于各种内部应用，例如吸收电路和直流电解电容器。仅就本白皮书而言，讨论范围仅限于对系统可用性影响最大、故障后果严重的高功率交流电容器应用。这些应用汇总于表 1 之中：

表 1

交流电容器应用

电力电容器应用	用途
交流输入电容器	输入谐波过滤和功率因数控制
交流输出电容器	逆变器高频开关和谐波失真的输出过滤 向非线性负载提供无功功率

电力电容器的故障机理

曾经一段时间，UPS 输入和输出滤波中使用的电力电容器存在故障率大幅上升的现象。在过去，这样的故障率通常被归因于介电或电极材料品质控制不良、制造期间未清除杂质或是设计疏忽造成的缺陷。然而在过去的数年里，电容器的材料和结构均已得到可靠的改善，生产工厂也对自身的内部工艺进行了优化。当前，归档完善且成熟的性能应用信息能够帮助设计人员对 UPS 的设计进行优化，实现更长的电容器使用寿命并最小化故障率。电容器技术已经发展到能够通过正确的 UPS 设计来避免大多数电容器故障的程度。

电容器故障的定义十分简单：未能满足所指定的性能。然而对于电力电容器来说，未能满足性能要求往往会造成极其严重的后果。表 2 中给出了与电力电容器相关的主要故障及其后果。

表 2 中的总结表明：承受的电压、温度和电流是电容器故障的诱因。当前，电容器的设计和制造工艺已经足够成熟，电容器供应商能够建立可靠的数学模型，能够对电容器在不同工作电压、温度和电流下的故障率进行预估。这些模型表明，现场的高故障率与低故障率之间存在着某种关联。从模型中得出的 4 个关键要素如表 3 中所示。

表 2

电容器故障

故障	应用	原因	结果	预防措施
介电薄膜击穿	交流输入或输出滤波	高工作电压 过压和/或温度过高	电容器内部击穿导致爆炸或起火；硬短路或开路状况	降低承受电压 降低周围环境温度
薄膜端电极失效	交流输入或输出滤波	峰值电流	串联电阻增大导致局部过热，进而导致局部电弧。最终会导致金属化薄膜介电击穿，与前述结果相同。	通过设计正确的电容器应用来限制峰值电流

表 3

电容器故障率模型

因素	影响	影响举例（标准 UPS）
温度	电力电容器外壳温度每升高 10 摄氏度（18 华氏度），其使用寿命缩短一半。外壳温度指的是外部电容器外壳的温度。温度上升是由交流电流所导致的过热造成的。当温度降至 50 摄氏度（122 华氏度）以下时，此关系会变得不准确。	将电容器外壳温度从 70 摄氏度降至 60 摄氏度，其使用寿命会延长 2 倍。
电压	当电力电容器工作电压接近设计值时，其使用寿命会随电压的 N 次方而变化。根据不同的供应商，此乘方值可能会从 7 到 9.4 不等。当工作电压降至设计数值的一半以下时，此关系不再成立。	对于一台使用 6.8 μm 薄膜的 440V 电容器，如果其工作电压降低 30%，那么其使用寿命会延长 17.3 倍。
脉冲电流	只要不超过额定峰值电流，就不会发生端电极失效。当电容器承受脉冲电流时，电流连接接口的性能会逐渐退化，直至最终导致开路或严重故障。	电容器承受约 1000 次脉冲电流冲击，或承受 200 次铭牌额定电流后会发生故障开路。
峰值电压	与电压有效值不同，电容器上的峰值电压通常表现为高频尖峰，它是由市电故障或 UPS 状态变化造成的。这些尖峰会损坏电容器薄膜，并最终导致电容器过早老化出现故障。	高于设计交流电压 1.8-2.1 倍的峰值交流电压可等同于能够导致电容器短路故障的直流电压。

表 3 表明：与其它因素相比，很小的承受电压变化就能够对电力电容器的使用寿命造成巨大影响。需注意，交流电容器上的稳态电压是完全独立于 UPS 的，因此，减小 UPS 的负载不会降低电容器上的承受电压。这对电容器上的瞬态电压可能适用，也可能不适用，因为它取决于 UPS 设计。

UPS 在承受温度和电流方面的设计差别也可能会对电力电容器的使用寿命产生巨大影响，但其影响程度小于承受电压变化。

图 1 所示为一个标准交流电容器组，亦称为电容器机架。

图 1

UPS 输出交流电容器组



电力电容器 故障预防

完善的 UPS 设计能够大幅减少因交流电容器故障造成的 UPS 负载断电。通过分析电容器为何及如何发生故障——也就是分析故障原理，我们能够了解如何延长电容器的使用寿命。

电容器是如何发生故障的？

交流电力电容器薄膜的作用是隔离正电荷和负电荷，进而使电容器能够存储电能。随着介电薄膜两边的电压不断增大，所存储的电能也越来越多。电压达到薄膜的介电耐受电压时即为电容器的电能存储容量上限。当超过薄膜的介电耐受电压时（伏/微米薄膜厚度），薄膜将无法继续承受所施加的电压。最终，电容器的自恢复特性失效，电容器造成相间短路或相线与中性线之间短路——取决于特定 UPS 设计中的电容器连接方式。此外，被施加较高的电压之后，薄膜的性能和介电耐受电压都会随着时间的推移而逐渐降低。

温度也会使薄膜的性能逐渐降低，但正如前文中所述，与电压相比，其影响程度小很多。

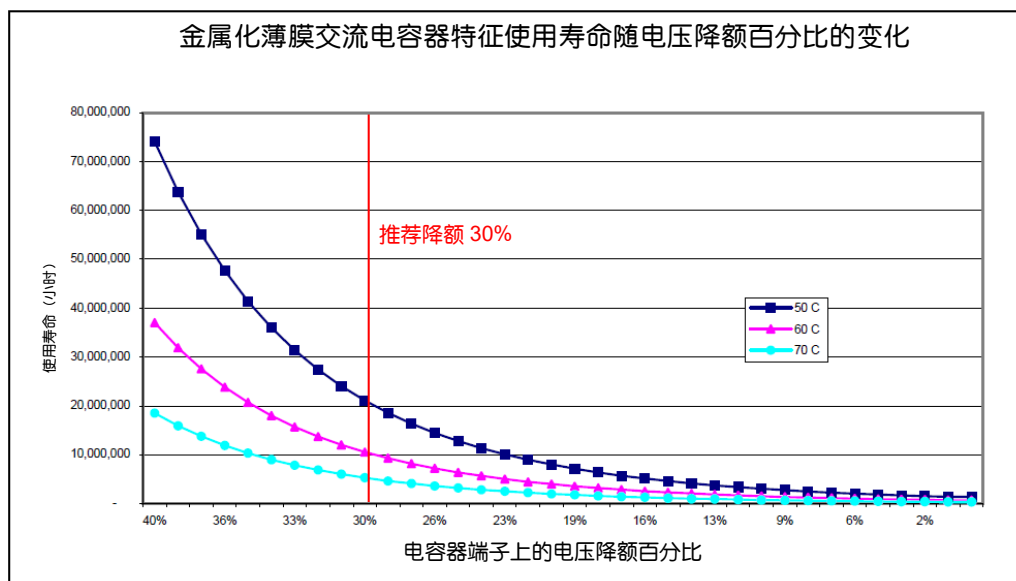
由电流引起的故障模式有两种。一种是端电极失效，另一种是介电击穿。电容器在正常供电时不会发生端电极失效。虽然如此，电流会使温度上升，进而对介电造成温度影响。

承受的电压和温度对特定电容器预期使用寿命的影响可利用数学模型计算得出，此数学模型由电容器制造商提供。附录中提供了对此模型的解释说明。

交流电力电容器的故障率受任意承受的持续电压和温度的影响，不会为零，因此任何 UPS 设计都不可能完全避免电力电容器故障。但是，UPS 设计可以简单地通过降低施加给电容器的电压和温度来延长电容器组的使用寿命。图 2 通过特征使用寿命随电压降额百分比的变化曲线，来说明其中的原理。特征使用寿命的定义：总数的 63.2% 发生故障的时间点。通过使电容器在较低的电压和温度下运行，电容器组的常规使用寿命能够得到大幅延长。使用额定电压远高于通常 UPS 运行电压的电容器，以及增大电容器组的有效冷却气流量，这两个设计参数能够大幅延长电容器使用寿命。但是，鉴于电容器使用寿命受电压的影响最大，并且电容器上的稳态电压完全独立于 UPS 负载，因此首要的考虑因素应该是电压。在当前市场销售 UPS 产品中，交流电容器的设计使用寿命为 3 年到 15 年不等。这样的电容寿命差别会对电力系统的整体可靠性造成非常大的影响，因为电容器故障的后果可能是负载断电，即使是在冗余系统中。

图 2

交流电力电容器特征使用寿命随电压降额百分比的变化



UPS 设计变动对交流电容器使用寿命的影响示例

下例中对两台来自不同制造商但实际尺寸接近的 3 相 UPS 设计进行了对比，用以给出电容器预期使用寿命的变化情况。在 UPS 设计“A”中，输出电容器采用位于相线与中性线之间的配置方式，而在 UPS 设计“B”中，输出电容器采用位于相间的配置方式。两台 UPS 的电容器数据均来自电容器标签。两种 UPS 设计都是同一家交流电容器制造商。电容器上的电压通过测量实际 UPS 系统半载状态下获取。两台 UPS 的温度保持一致，进而能够仅对电压降额的影响进行对比。使用寿命影响是利用电容器制造商提供的标准公式（附录 A 中所述）计算得出的。设计相关数据汇总于表 4。

在对这样对比的结果进行讨论之前，必须要说明的是，每个电容器组的结果都是基于数理统计方法和计算得出的，这些数理统计方法和计算可能会导致一定程度的不确定性。但是，对两个或更多电容器组之间的相对差别进行对比可以为最佳设计的选择提供更大信心。前提条件是，当 UPS 在正常运行时，其电容器组中的所有电容器都必须正常工作。

对比表明，市场上销售的 UPS 产品中，电容器组的使用寿命可能会相差 60 倍。这会极大影响客户在 UPS 使用寿命期间遭遇电容器故障的可能性。

需注意的是，尽管“A”UPS 设计多用了 6 个电容器，但其展现了比“B”UPS 设计高出 55 倍的电容可靠性。根本原因在于 37% 的电压降额因数。

为了更好地了解温度会对电容器的使用寿命造成怎样的影响，表 5 中保持降额百分比不变，只改变温度。温度是纯假定值，仅出于此对比目的。

将降额百分比固定为 37%，此第二个对比表明电容器组的预期使用寿命仅相差 6 倍，而不同于电压降额变化时电容寿命能相差 60 倍。并不能说在不同 UPS 进行对比评估时电容器制冷因素无关。只是对电容器使用寿命影响程度上，电压降额的影响是第一位，而温度的影响应排在第二位。

表 4

UPS 电容器设计对比

	UPS 设计 A	UPS 设计 B
UPS 额定功率容量	320 kVA / 320 kW	400 kVA / 320 kW
UPS 生产年份	2000	2000
电容值	56 F	92 F
电容器额定电压	440 V	535 V
电容器额定温度	70°C	70°C
施加给电容器的 UPS 电压 (测量值)	277 V (相线与中性线之间)	480 V (相线与相线间)
稳态运行时的外壳温度	60°C (假设)	60°C (假设)
电压比例因数	8	8
温度比例因数	2	2
β (形状参数)	1.6	1.6
电容器组中的电容器数量	24	18
电容器电压降额因数	37%	10%
额定条件下每台电容器的特征使用寿命	350,000 小时	350,000 小时
使用条件下每台电容器的特征使用寿命	28,371,435 小时	1,667,241 小时
电容器组在 20 年中的平均无故障时间 (MTTF)	15,637,178 小时	223,710 小时
电容器组在 20 年 UPS 寿命中的故障可能性	0.70%	38.71%

表 5

UPS 电容器设计对比 (不同温度)

	UPS 设计 A	UPS 设计 B
UPS 额定功率容量	320 kVA / 320 kW	400 kVA / 320 kW
UPS 生产年份	2000	2000
电容值	56 F	92 F
电容器额定电压	440 V	535 V
电容器额定温度	70°C	70°C
施加给电容器的 UPS 电压 (测量值)	277 V	337 V (假设)
稳态运行时的外壳温度	50°C (假设)	70°C (假设)
电压比例因数	8	8
温度比例因数	2	2
β (形状参数)	1.6	1.6
电容器组中的电容器数量	24	18
电容器电压降额因数	37%	37% (假设)
额定条件下每台电容器的特征使用寿命	350,000 小时	350,000 小时
使用条件下每台电容器的特征使用寿命	56,742,870 小时	14,185,717 小时
电容器组在 20 年中的平均无故障时间 (MTTF)	47,403,061 小时	6,877,794 小时
电容器组在 20 年 UPS 寿命中的故障可能性	0.23%	1.58%

设计人员和技术人员指南

UPS 设计人员可以通过保守的设计方法来延长电力电容器的使用寿命。以下设计指南是可以量化的，因此能够帮助 UPS 设计人员和技术人员等轻松做出与电容器组可靠性有关的决策。

- 将交流电容器的电压降低至少 30%，进而能够将特征使用寿命延长 17.3 倍。电容器薄膜上的承受电压也是类似降压方法。电容器每微米薄膜厚度所承受的电压应低于 45 伏。需要注意的是，交流电容器上的稳态电压是与 UPS 负载完全无关的。降额因数高于 30% 以后 UPS 的占地面积和成本会快速增加，因此 30% 的降额因数是较佳的推荐数值。
- 将电容器组置于直接冷却气流之中——将电容器外壳温度降低 10°C 能够将使用寿命延长 2 倍。
- 根据交流电容器的规格对瞬态电压和电流进行限制。

通过遵循和按照这些设计指南规范参数，电容器的更换频率会得到大幅降低，甚至完全去除。降低电容器的更换频率还会带来额外的益处。电容器的更换过程会带来停机的风险。根据 Uptime 的调查，超过 50% 的数据中心基础设施故障与人为失误有关。因此，考虑人为因素应在 UPS 的设计中起重要作用，特别是在 UPS 的维护和维修方面。

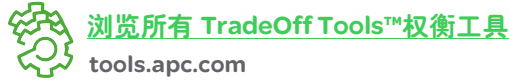
UPS 应拥有易于操作、标准化且模块化的部件，进而降低维护期间发生人为失误的可能性。电容器组在设计上应给维护技术人员留有足够的工作空间。电容器组还应易于维护操作，以避免人员碰触到任何其它 UPS 部件。在理想情况下，电容器应置于可互换、可插拔的模块之中，进而免去维护时的接线和紧固程序。

结论

在选择和制定 UPS 规格指标时，大多数用户都未专门考虑交流电容器的故障率问题，尽管曾经这些故障是 UPS 故障的最主要诱因。电力电容器可靠性方面的研究已经得到长足发展，现在，用户能够对电容使用寿命进行预测，甚至能够制定设计参数大幅提高电容器可靠性。电容器额定电压和运行电压之间安全裕度百分比的微小提升能够使电容器的预期使用寿命发生巨大变化。在选择 UPS 时，可以对此参数进行指定，或者进行对比。除上述电容器的可靠性外，通过易于维护、标准化、模块化的部件来减少人为失误的设计特性也是技术人员需要考虑的因素。

关于作者

Victor Avelar 是施耐德电气数据中心研究中心总监及高级研究员。Victor 致力于数据中心设计与运营方面的研究，并且通过向客户提供风险评估和设计实践方面的咨询，来优化数据中心环境的可用性和能效。Victor 于 1995 年从伦斯勒理工学院（Rensselaer Polytechnic Institute）获得了机械工程学的学士学位，而后在巴布森学院（Babson College）获得 MBA 工商管理硕士学位。他是 AFCOM 成员。



参考文献

1. Moynihan, John D., *Selection and Application of Capacitors*, Second Edition. Huntsville: Components Technology Institute, 1993, pp. 69-81.
2. Tortai, J. H., Denat, A., Bonifaci, N., Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model, *Journal of Electrostatics*, vol. 53, pp. 159-169, 2001.
3. Fuchang, L., Xin, D., Zonggan, Y., Nanyan, W., *On the Failure Mechanism of Metallized Pulse Capacitors*, 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria, British Columbia, Canada, Oct 2000, pp. 592-595
4. Dodson, B., Nolan, D., *Reliability Engineering Handbook*, New York: Marcel Dekker, Inc., 1999, pp. 49-53, 141-142.
5. Dialogue between Dr. Martin Hudis at Aerovox, New Bedford, MA

联系我们

关于本白皮书内容的反馈和建议请联系：

数据中心科研中心
dcsc@schneider-electric.com

如果您作为我们的客户需要咨询数据中心项目相关信息：

请与所在地区或行业的施耐德电气销售代表联系，或登陆：
www.apc.com/support/contact/index.cfm

附录：电容器使用寿命数学模型

经过 25 年左右的研究，电容器制造商现已能够利用数学模型来准确预估交流电容器的预期使用寿命。这些模型的精确度得到了实际现场数据的验证。此处讨论的数学模型专门用于薄膜电容器，并且主要是通过通过对大量电容器进行加速寿命测试得出的。由于交流电容器的故障率不固定但会随着时间的推移而增大，因而利用韦布尔分布对其进行建模的效果最好，进而能够对随时间变化的故障率进行概略估算。韦布尔分布可靠性方程为：

算式 1：

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]$$

其中：

$R(t)$ 是某单一电容器在时间 t 之后能够运行的可能性。

θ 是电容器的特征使用寿命，单位为小时。特征使用寿命的定义为：总数的 63.2% 发生故障的时间点。

β 是形状参数，此处假设与电压或温度无关，因此它保持恒定。

θ 和 β 参数是数理统计变量，取决于变化。

韦布尔分布危险性方程，或瞬时故障率为：

算式 2：

$$h(t) = \frac{\beta t^{(\beta-1)}}{\theta^\beta}$$

其中：

$h(t)$ 是某单一电容器在其使用寿命中时间 t 的故障率。

对于此特别的电容器制造商，参数 β 是由加速寿命测试和现场故障数据确定的，针对标准交流金属化薄膜电容器确定为 1.6。参数 θ ，即稳态运行应力下的特征使用寿命，是电容器上电压和温度应力的函数，以下述公式表示：

算式 3：

$$\theta = \text{铭牌额定使用寿命} \times \left(\frac{\text{电容器额定电压}}{\text{UPS 施加的电容器电压}}\right)^{V_{scale}} \times 2^{\left(\frac{\text{Rated Temp} - \text{Temp at steady state}}{10}\right)}$$

其中：

铭牌额定使用寿命 是电容器在额定电压和温度应力下的特征使用寿命。此数值因薄膜厚度而异。

V_{scale} 是为电压应力分配的比例因数。

Rated Temp 是电容器的额定外壳温度。大多数此类型电容器的额定温度为 70°C。

Temp at steady state 是电容器在 UPS 应用中的稳态外壳温度。

表 4 和表 5 中的计算所使用的“铭牌额定使用寿命”为 350,000 小时。因为电容器是批量生产的，所以此数值因批次而异。此差异的原因源于材料和工艺的差别，例如薄膜厚度、金属化、湿度等。最重要的是，交流电力电容器对稳态电压极其敏感，并且此敏感性与“铭牌额定使用寿命”数值完全无关。

电压比例因数因电容器制造商而异，浮动范围为 7 到 9.4。需要注意的是，当所施加的电压小于电容器额定电压的 $\frac{1}{2}$ 时，此针对特征使用寿命的比例关系将会失效。当外壳温度降至 50°C (122°F) 以下时，温度比例关系会变得不准确。

假定正常运行需要使用电容器组中的所有电容器，如果要计算电容器组中所有电容器的可靠性，可以使用等式 4。此处假设每台电容器之间相互独立并且无外部故障发生。

算式 4:

$$R_{Bank}(t) = \prod_{i=1}^{Qty\ Caps\ in\ bank} R_i = \left(R_{SingleCap} \right)^{Qty\ Caps\ in\ bank}$$

其中:

$R_{SingleCap}$ 是利用“算式 1”计算得出的。

假定正常运行需要使用电容器组中的所有电容器，如果要计算整个电容器组的故障率，可以使用算式 5。此处同样假设每台电容器之间相互独立并且无外部故障发生。

算式 5:

$$h_{Bank}(t) = \sum_{i=1}^{Qty\ Caps\ in\ bank} h_i = h_{SingleCap} \times Quantity\ of\ Caps\ in\ the\ bank$$

其中:

$h_{SingleCap}$ 是利用“算式 2”计算得出的。