

替代电解电容的膜电容技术

Gilles Terzulli

Billy W. Peace

摘要

从1980年开始，使用金属化膜以及膜上金属分割技术的DC滤波电容得到了长足的发展。在过去多年的发展中，电容的体积和重量减小了3到4倍。现在薄膜生产商开发出了更薄的膜，同时改进了金属化的分割技术极大的帮助了这种电容的发展。用干式设计，使膜电容能够比电解电容更加经济地覆盖600VDC到1200VDC之间的电压范围。根据应用，在电压超过1200VDC时，填充菜籽油的电容被推荐使用。

膜电容具有的许多优势，使膜电容替代电解电容成为了工业和机车功率变换市场的趋势。这些优势包括了：

- 承受高有效值电流的能力，可达1Arms/uF
- 能承受两倍于额定电压的过压
- 能承受反向电压
- 承受高峰值电流的能力
- 没有酸污染
- 长寿命
- 可长时间存储

但是，这种替代并非“微法对微法”的替代，而是功能上的替代。

当然，尽管膜电容技术有了长足的进展，但不是所有的应用领域都能替代电解电容。为了帮助使用者理解，我们将介绍一些具体的例子，在这些例子里，显示了膜电容的优势。

EACO

金属化技术

原理

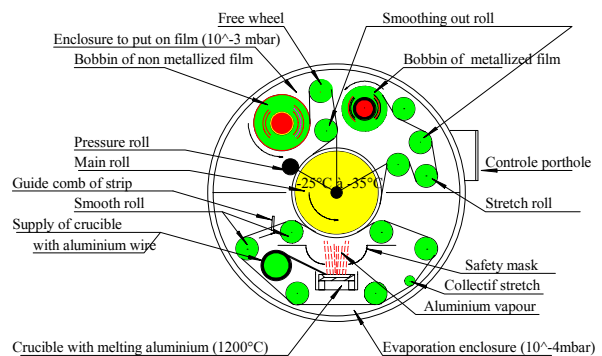
在电介质膜上，镀上很薄的金属层，如果电介质出现短路，金属镀层会因此而挥发并将短路的地方隔离开来。这种现象称为自愈效应。

金属化工艺

首先，对聚合物膜（聚丙烯）进行处理，使金属原子能够附着在膜上。

金属在真空下蒸发（对铝 1200°C）浓缩到被处理过的膜表面（膜被冷却到 -25 °C 至 -35°C）形成金属层。

生产设备的图示



金属化膜的自愈效应是提高电压梯度的主要因素。即使聚合物膜的质量得到很大的改善，主要的发展还是在金属化上。

今天，对于干式技术，在脉冲应用中，电压梯度能够达到 500 V/μm 以上，在 DC 滤波的应用中，电压梯度能够达到 250 V/μm。

由于电容是按照 CEI 1071 标准进行的设计，电容能够承受几次达两倍于额定电压的浪涌电压的冲击而不会有明显的寿命缩短现象。所以，用户只需考虑应用中所需要的标称电压。

电解电容技术

电解电容使用氧化铝的电介质属性。铝的电介质常数介于 8 到 8.5 之间，工作电压梯度大约为 $0.07\text{V}/\text{\AA}$ 。因此，对于 900 V_{DC} ，需要 $12000\text{ \AA}$ 或 $1.2\mu\text{m}$ 的铝的厚度。

然而，这个厚度是不可能达到的，因为为了具有很好的能量密度，铝箔表面必须有凹槽。显然，在铝箔凹槽与厚度之间有一个比率。铝的厚度减少了铝箔凹槽的容值系数。例如，与低电压电容相比， 500V 的容值系数降为原来的一半。

另外，与低电压电解电容的电解液传导率 $150\Omega\text{cm}$ 相比，高电压电解电容（ 500V ）的电解液传导率达到了 $5\text{ k}\Omega\text{cm}$ ，它的有效值电流被限制在大约 20mA 每 μF 。

由于上述原因，典型的电解电容的最大标称电压为 500 到 600V 。所以在要求更高电压的情况下，使用者必须将多只电容串联使用。同时，由于各电容的绝缘电阻不同，使用者必须在每个电容上连接电阻以平衡电压。

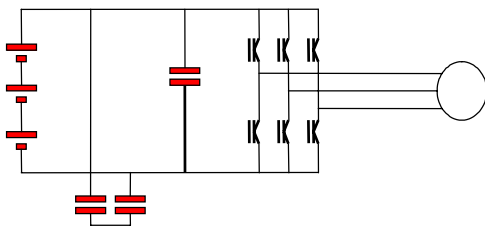
此外，如果超过额定电压 1.5 倍的反向电压被加在电容上时，会引起电容内部化学反应的发生。如果这种电压持续足够长的时间，电容会发生爆炸，或者随着电容内部压力的释放电解液会流出。为了避免这种危险，使用者必须给每个电容并联一个二极管。

最后，在特定应用中电容的抗浪涌能力也是考察电容的重要指标。实际上，对电解电容而言，允许承受的最大浪涌电压是 V_{NDC} 的 1.15 或 1.2 倍（更好的电解电容）。这种情况迫使使用者不得不考虑浪涌电压而非标称电压。

直流支撑滤波：高电流设计和容值设计

a) 使用电池供电的情况

应用为电车或电叉车



在这种情况下，电容被用来退耦。膜电容特别适合这种应用。因为直流支撑电容的主要标准是有效值电流的承受能力。这意味着直流支撑电容能够以有效值电流来设计。

以电车为例：

要求的数据：

工作电压：	120V_{DC}
允许的纹波电压：	4V_{RMS}
有效值电流：	$80\text{ A}_{\text{RMS}} @ 20\text{ kHz}$

最小容值为

$$C = \frac{I_{\text{rms}}}{U_{\text{ripple}} \times 2 \times \pi \times f} = 159\mu\text{F}$$

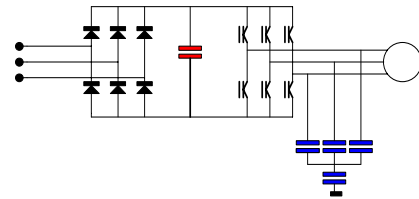
在膜电容中，很容易找到接近的容值。

与电解电容比较：

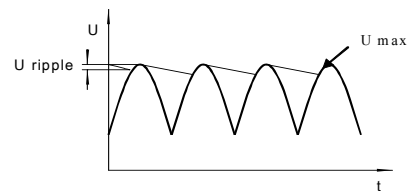
以每 μF 20 mA 为例，为了承受 80A 有效值电流，最小容值为：

$$C = \frac{80}{0.02} = 4000\mu\text{F}$$

b) 电网供电的电机驱动



直流母线电压波形：



容值的确定应从电网频率比逆变器频率低入手。

我们使用下述等式确定容值：

$$C = \frac{P_{\text{load}}}{U_{\text{ripple}} \times \left[U_{\text{max}} - \frac{U_{\text{ripple}}}{2} \right] \times F_{\text{rectifier}}}$$

流过电容的有效值电流为（近似表示式），
该电流没有考虑逆变器侧的电流

$$I_{rms} = \frac{U_{ripple}}{2 \times \sqrt{2}} \times C \times 2 \times \pi \times F_{rectifier}$$

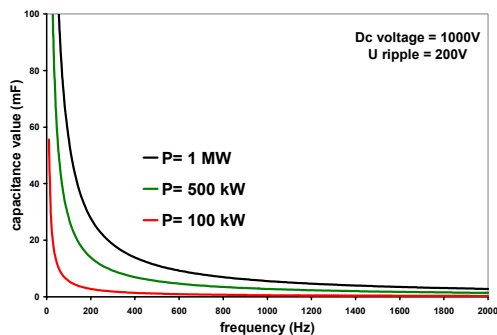
$$I_{rms} = \frac{P_{load} \times \pi}{\left[U_{max} - \frac{U_{ripple}}{2} \right] \sqrt{2}}$$

通过上述近似式，我们能看出通过电容的有效值
电流由负载功率，U_{max} 和 U_{ripple} 决定。

我们用一个具体的例子作解释

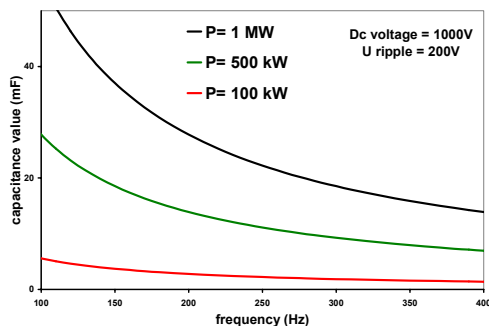
直流电压 1000V

纹波电压 200V



I_{rms} : (P=1MW) = 2468Arms
(P=500kW) = 1234Arms
(P=100kW) = 247Arms

将低频部分放大：



为了方便比较，我们选择电流承受能力为 20mA
每μF 的电解电容。

情况一，功率 1MW 的情况：

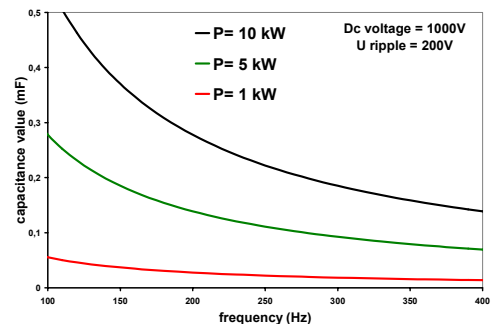
考虑到 0.2Arms/μF, 有效值电流为 2468A 时，需要
的最小容值为 123.4mF。

对应图中曲线的值，我们可以看到对频率低于
100Hz 的整流器，使用膜电容，该容值同样是需
要的。

因此，对于三相，六整流管的整流器，频率为
300Hz。我们可以看到对应 1MW 的曲线，需要
18.5mF 的容值。与电解电容相比，如使用膜电容
方案，体积几乎可以缩小 4 倍，同时有更高的可
靠型。

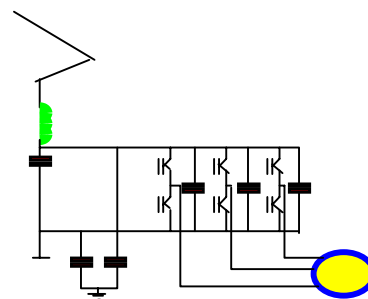
在更低功率的情况下，同样能够给出相同的结果，
对于 10kW 的功率，虽然容值变得很小，但是膜
电容仍然是最好的解决方案。

甚至在 100Hz 整流器频率，只需要 555μF 的电
容，供电电压与纹波电压仍然与前面相同。

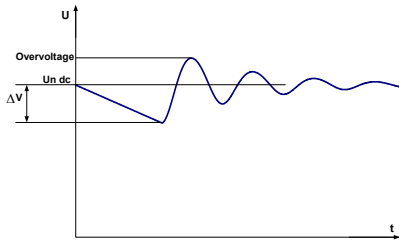


过压设计：

现在我们来看轻型牵引的应用，如：地铁，轻
轨，电车等。



直流支撑电压波形:



由于电能由吊线提供给机车，在集电弓架与吊线间会出现接触间断的现象。
在接触断开时，能量来自直流支撑电容，结果，电压降低。因此，只要接触重新被建立，过压将出现。

$$V(t) = U_{ndc} - \Delta V \times e^{-\alpha t} \times (\cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t)$$

$$\text{其中 } \omega = \sqrt{\beta_0^2 - \alpha^2}$$

$$\beta_0 = \frac{1}{\sqrt{L \times C}}$$

$$\alpha = \frac{R}{2 \times L}$$

更糟的情况是 $\Delta V = \text{吊线电压}$, 因为过压会达到额定电压的几乎 2 倍。
膜电容可以承受这种过压。

与电解电容相比:

电解电容可承受最大 1.2 倍的额定电压:

所以，电解电容可以承受的最低电压为:

$$\frac{2 \times 1000V}{1.2} = 1670V$$

需要四支 450V 的电解电容串联。

考虑部分从网上得到的数据，10mF 的电解电容，
体积为 26 升，最大有效值电流为 220Arms。

而相同容值的膜电容，体积为 25 升，最大有效值
电流可比 500Arms 还高。

另外，由于过压的出现，也出现了流过电容的峰值
电流。

因此，我们必须计算因过压产生的能量

$$I^2 t = \int i^2(t) dt$$

$$i(t) = \frac{C \beta_0^2 V_0}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t$$

$$i^2(t) = \frac{C^2 \beta_0^4 V_0^2}{\omega^2} e^{-2\alpha t} \sin^2 \omega t$$

$$\int_0^\infty i^2(t) dt = \left[\frac{1}{4} \frac{e^{-2\alpha t} C^2 \beta_0^4 V_0^2 (-\alpha^2 - \omega^2 + \alpha^2 \cos 2\omega t - \alpha \omega \sin 2\omega t)}{\alpha \omega^2 (\alpha^2 + \omega^2)} \right]_0^\infty$$

在几个周期后，电流变为零，那么:

$$\int_0^\infty i^2(t) dt = [0] - \left[-\frac{1}{4} \frac{C^2 \beta_0^4 V_0^2}{\alpha (\alpha^2 + \omega^2)} \right] = \frac{1}{4} \frac{C^2 \beta_0^4 V_0^2}{\alpha (\alpha^2 + \omega^2)}$$

$$\text{其中: } \beta_0 = \frac{1}{\sqrt{L \times C}}; \alpha = \frac{R}{2 \times L}; \omega = \sqrt{\beta_0^2 - \alpha^2}$$

这种能量的计算也被用于端间短路放电的过程。
这样的放电会产生非常高的峰值电流与振铃，这是
电解电容不能承受的。

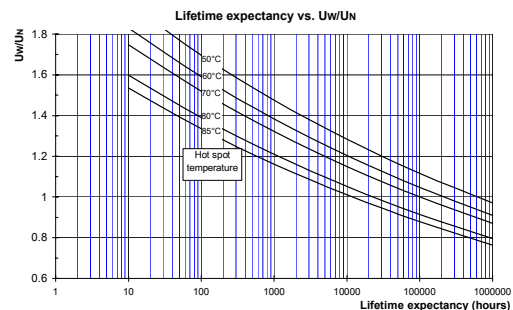
电压的额定

对于要求高额定电压的场合，膜电容的解决方案
无疑很有优势。

但如果要求高容值的场合，膜电容解决方案的竞争力
就会减弱。的确，如果没有过压，有效值电流很低，
同时需要大容值的场合，在 900V 以下的应用中，
膜电容很难与电解电容竞争。

寿命的计算:

膜电容允许有很长的寿命期望，其寿命的长短由
负载电压条件（工作电压）与热点温度决定。
对于直流滤波电容，其寿命符合下面的曲线:



我们可以从这些曲线中看出，在工作电压为额定电压并且热点温度为 70°C 的情况下，膜电容的设计寿命为 100,000 小时。

寿命结束的标准为 2% 的电容容值的减少。然而，这是寿命结束的理论值，因为，在到达该点以后，电容仍然能够使用。如果在应用中允许 5% 的容值减少，寿命将得到显著的增加。

热点温度由下述的表达式决定：

$$\theta_{\max_{\text{hot spot}}} = \theta_{\text{ambient}} + I^2_{\text{rms}} \times \left[r_s + \frac{1}{C \times 2 \times \pi} \times \text{tg} \delta_0 \right] \times R_{\text{th}}$$

其中， $\theta_{\max_{\text{hot spot}}}$ ：最大热点温度

$\text{tg} \delta_0$ ：电介质损耗

R_{th} ：热阻

r_s ：串联电阻

结论：

在介绍中，我们为工程师进行设计优化提供了技术参考。由于实际应用的情况不同，在设计中，仍然需要完整的计算。然而，如果设计要求为低电压，低有效值电流，无反向电压，同时也没有峰值电流，膜电容技术可能是不合适的。但如果应用中需要高电压，高有效值电流，有过压，反向电压，高峰值电流，同时还有长寿命的要求，那么，再没有比膜电容更好的选择了。