

柔直用直流支撑电容器不同镀层结构 极板损耗计算

左强林, 雷乔舒

(无锡赛晶电力电容器有限公司)

Calculation of Plate Loss of Flexible DC Transmission Projects DC-Link Capacitor with different Coating structures

ZUO Qiang-lin, LEI Qiao-shu

(Wuxi SUNKING Power Capacitor Co., Ltd)

Abstract: The loss of DC-Link capacitor used in Flexible DC transmission projects has a great influence on their performance. The loss of DC-Link capacitor is mainly the loss of metallized film, which is determined by square resistance and structure. Different square resistance, plate loss is different, plating structure is different, plate loss is different. In this paper, the influence factors of different structural designs on the loss are analyzed by comparing the polar hardening of different coatings of DC-Link capacitor used in flexible DC transmission projects, including uniform type, thickened uniform type, step type, thickened step type, gradient type and thickened gradient type. Under the condition of the same square resistance value, the loss calculation results of different plating structure types are compared, and it is concluded that the gradient structure has the best effect. It provides reference for loss design of DC-Link capacitor.

Key words: Plate loss, coating, square resistance value, structure design, type, DC-Link capacitor

摘要: 柔性直流输电工程用直流支撑电容器的损耗对其性能影响极大, 直流支撑电容器的损耗, 主要是金属化膜的极板损耗, 金属化膜的损耗由方阻、结构决定。方阻不同, 极板损耗不同, 镀层结构不同, 极板损耗各异。本文通过对比柔性直流输电工程用直流支撑电容器不同镀层的极板结构, 包括均匀型、加厚均匀型、阶梯型、加厚阶梯型、渐变型、加厚渐变型 6 种类型的损耗公式推算, 分析不同结构设计对损耗的影响因素; 在相同方阻阻值条件下, 进行不同镀层结构类型极板损耗计算结果对比, 得出渐变型结构效果最佳的结论。为直流支撑电容器损耗设计提供参考。

关键词: 极板损耗, 镀层, 方阻值, 结构设计, 类型, 直

流支撑电容器

1 引言

金属化薄膜电容器的损耗对其运行温升有重大影响^[1-5], 而金属化膜金属镀层的极板损耗为产品损耗的一部分^[6], 其损耗大小也直接影响到电容器运行温升。近几年, 国家开始大力发展柔性直流输电技术, 用于柔直项目的金属化薄膜—直流支撑电容器, 具有耐电压高、耐大电流、低电感、损耗小、温升低的特点^[7], 其可靠性对柔直系统安全运行有及其重要作用。金属化膜的极板损耗由其方阻和结构设计决定。一般而言, 金膜的方阻越大, 意味着镀层越薄, 所以这部分损耗也越大; 反之, 金膜的方阻越小, 镀层越厚, 这部分损耗也越小。从这个意义上说, 方阻越小越好。方阻越小, 虽然通流能力越强, 但是薄膜的耐电压能力越低; 另外, 方阻越小, 自愈能量就越大, 电容损失也可能越大, 自愈不彻底的概率也会增加, 这在相关文献中^[8-9]已有论述。合理的镀层结构设计, 可以兼顾极板损耗和活动区的自愈性能。活动区的自愈性能对产品的耐久性能极为重要。

另外, 不同的结构设计, 即使方阻差不多, 也可能导致金膜的损耗、温升不一样, 这需要根据研究结果确定。1) 采用加厚边设计是最常用的方法, 也就是说金膜的边缘镀层加厚; 2) 边缘镀层的材质问题, 选择导电率较好的材质也是一个影响因素; 3) 优化镀层结构设计, 对于减小因方阻造成的损

耗也是需要考虑的, 这需要经过大量的试验来确定, 也需要兼顾电容器的耐久性性能。

本文通过研究分析直流支撑电容器镀层极板损耗的理论计算公式, 对不同镀层结构公式进行过程推导, 以实例进行不同镀层结构极板的损耗计算结果对比, 为柔直工程用直流支撑电容器不同镀层结构设计的极板损耗提供理论计算依据, 为直流支撑电容器镀层结构设计的安全性、可靠性提供参考。

2 极板的镀层损耗计算

根据相关资料^[10], 镀层损耗可以按下式计算:

$$\tan\delta_e = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r\omega R_{\square}b^2}{3d} = \frac{4\varepsilon_0\varepsilon_r\pi f R_{\square}b^2}{3d} \quad (1)$$

式(1)中: $\tan\delta_e$ ——镀层损耗角正切; ε_0 ——真空介电常数, F/m; ε_r ——薄膜的相对介电常数, 对于聚丙烯薄膜, $\varepsilon_r = 2.2$; f ——测量频率, Hz; R_{\square} ——金膜的方阻, Ω ; b ——极板的有效宽度, mm; d ——金膜的厚度, μm 。

从式(1)可以看出, 镀层损耗与测试频率、镀层方阻成正比, 与薄膜的厚度成反比, 与薄膜有效宽度的平方成正比。也就是说, 采用厚度大的膜, 有利于降低镀层损耗, 采用宽度小的膜, 镀层损耗降低更明显。

式(1)是从 $\tan\delta = R\omega C$ 变形而来的。对于镀层电阻, $R = \beta\rho b/d_{jb}L$, 元件电容 $C = \varepsilon S/d = \varepsilon bL/d$, 代入化简得:

$$\tan\delta_e = \frac{\rho\beta b}{d_{jb}L} * \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r bL}{d} \omega = \frac{\rho}{d_{jb}} * \frac{2\beta\varepsilon_0\varepsilon_r\pi f b^2}{d} \quad (2)$$

实际上, 对于单位面积 $R_{\square} = \rho/d_{jb}$, 式(2)可以写成:

$$\tan\delta_e = \frac{2\beta\varepsilon_0\varepsilon_r\pi f R_{\square}b^2}{d} \quad (3)$$

这就是(1)式。式(1)中: β ——分布系数, 与极板结构有关, 可以通过分布电流积分得到。对于均匀极板, $\beta=2/3$, 就是式(1); ρ ——镀层材料的电阻率, 铝为

26.548 n Ω /m, 锌为 51.96n Ω /m; d_{jb} ——极板厚度, μm ; L ——极板长度, m。

考虑到 $R_{\square} = \rho/d_{jb}$, 可以得到: $d_{jb} = \rho/R_{\square}$, 计算不同的镀层厚度如表 1 所示。

表 1 不同方阻、不同材质镀层的厚度

方阻, Ω	镀层厚度, mm			
	铝	锌	锌 5%铝合金	铝+锌
2	13.27	25.98	13.91	0.53+24.94
20	1.33	2.6	1.39	0.53+0.83
50	0.53	1.04	0.56	0.53

从表 1 可以看出, 对于高方阻 50 金属化膜, 极板的厚度是纳米级的。极板越薄, 单位膜的金属含量越小, 自愈后对元件的绝缘电阻影响越小。

3 不同镀层结构的极板损耗计算

极板镀层电流示意如下图 1 所示:

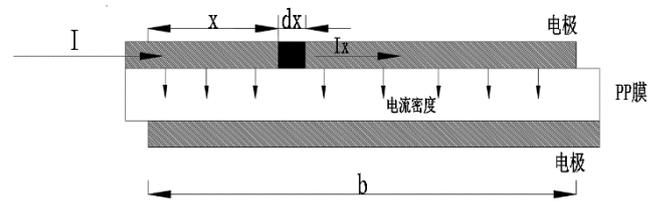


图 1 极板镀层电流示意图

从图 1 可以看出, 元件两个电极之间的绝缘厚度可以认为是一样的, 流经绝缘的电流是均匀分布的, 金属化膜镀层流过的电流沿镀层宽度方向线性减小。

极板损耗计算的推导如下。对于任意位置 x 极板宽度, 极板元 dx 的损耗为:

$$dP = I_x^2(\rho \cdot \frac{dx}{d_{jb}L}) \quad (4)$$

由于极板的电流分布是由电容器电容分布决定的, 而电容是按极板面积分布的, 与极板厚度无关。所以有 $I_x = I * \frac{b-x}{b}$, 考虑极板有两个, 代入(4)

式得:

$$dP = \frac{2\rho}{d_{jb}} \cdot \frac{I^2}{b^2L} (x^2 - 2bx + b^2) dx \quad (5)$$

由于极板厚度会根据需要设计成不同的结构, d_{jb} 与 x 可能是函数关系, 所以式(5)要分几种情况讨论。

3.1 均匀极板结构

对于均匀极板结构, $R_{\square} = \frac{\rho}{d_{jb}}$, 代入(2-39)(5)

式并对等式两边积分得:

$$P = \int_0^b \frac{2R_{\square}I^2}{b^2L} (x^2 - 2bx - b^2) dx = \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{\square}I^2b}{L} \quad (6)$$

考虑到 $P = \frac{I^2}{\omega C} \tan \delta$ ，代入 (6) 式，不难得到式

(3)。这就是均匀极板两个极板的功率损耗。实际上，由于有留边的存在，会有一个附加损耗，大小与留边宽度有关，约为 $\Delta b/b$ 的 3 倍 (Δb 为留边宽度)。

3.2 有加厚边的均匀极板结构

令加厚边的宽度为 b_0 ，方阻为 $R_{\square 0}$ ，则式 (6) 变为：

$$P = \int_0^{b_0} \frac{2R_{\square 0} I^2}{b^2 L} (x^2 - 2bx + b^2) dx + \int_{b_0}^b \frac{2R_{\square} I^2}{b^2 L} (x^2 - 2bx + b^2) dx \quad (7)$$

计算并化简得：

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{\square} I^2 b}{L} \left(1 - \left(\frac{b_0^3}{b^3} - \frac{3b_0^2}{b^2} + \frac{3b_0}{b} \right) \left(1 - \frac{R_{\square 0}}{R_{\square}} \right) \right) \quad (8)$$

即：

$$\tan \delta_e = \frac{4\varepsilon_0 \varepsilon_r \pi f R_{\square} b^2}{3d} \beta_1 \quad (9-1)$$

$$\beta_1 = 1 - \alpha_1 \left(1 - \frac{R_{\square 0}}{R_{\square}} \right) \quad (9-2)$$

$$\alpha_1 = \frac{b_0^3}{b^3} - \frac{3b_0^2}{b^2} + \frac{3b_0}{b} \quad (9-3)$$

从式(8)可以看出，加厚边越宽，镀层损耗越小，加厚边方阻与镀层方阻的比值越小，镀层损耗越大。以 $b_0/b=1/15$, $R_{\square 0}/R_{\square}=1/15$ 为例，影响量达到 18.7%。从这可以看出，虽然加厚边的尺寸很小，但加厚边对损耗的影响很大。这个影响量大小与加厚边的尺寸比例和极板的方阻大小有关。

3.3 阶梯型极板结构

目前最常用的是两个阶梯结构，令第一阶梯的宽度为 b_1 ，方阻为 $R_{\square 1}$ ，根据式(8)不难得到：

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{\square} I^2 b}{L} \beta_2 \quad (10)$$

$$\tan \delta_e = \frac{4\varepsilon_0 \varepsilon_r \pi f R_{\square} b^2}{3d} \beta_2 \quad (11-1)$$

$$\beta_2 = 1 + \frac{R_{\square 1} - R_{\square}}{R_{\square}} \alpha_2 \quad (11-2)$$

$$\alpha_2 = \frac{b_1^3}{b^3} - \frac{3b_1^2}{b^2} + \frac{3b_1}{b} \quad (11-3)$$

3.4 渐变型极板结构

根据文献^[12]，极板电流分布如下图所示。假设极板为直线渐变式结构，最大厚度为 d_{jb1} ，最小厚度为 d_{jb2} 。如图 2 所示。则极板厚度随宽度变化的关系为：

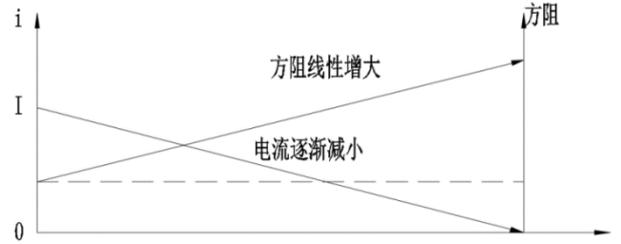


图 2 渐变型方阻电流分布示意

$$d_{jb}(x) = \frac{d_{jb2} - d_{jb1}}{b} x + d_{jb1} = k(x + a) \quad (12)$$

$$\text{式中: } k = \frac{d_{jb2} - d_{jb1}}{b} = \rho \frac{R_{\square 1} - R_{\square}}{b R_{\square 1} R_{\square}},$$

$$a = \frac{b d_{jb1}}{d_{jb2} - d_{jb1}} = \frac{b R_{\square}}{R_{\square 1} - R_{\square}}.$$

将式(12)代入式(8)并在区间 $[0, b]$ 内对两边积分，可以得到：

$$P = \int_0^b \frac{2\rho I^2}{b^2 L} \cdot \frac{x^2 - 2bx + b^2}{k(x+a)} dx = \frac{2\rho I^2}{b^2 L k} \cdot \left(\frac{1}{2} b^2 - (a + 2b)x + (a + b)^2 \ln \frac{a+b}{a} \right) \quad (13)$$

化简后，得：

$$P = \frac{2I^2 b R_{\square 2}}{3L} \beta_3 \quad (14-1)$$

$$\beta_3 = \frac{3}{2} \cdot \frac{R_{\square 1}}{R_{\square 1} - R_{\square}} \left(1 - \frac{2(2R_{\square 1} - R_{\square})}{R_{\square 1} - R_{\square}} + 2 * \left(\frac{R_{\square 1}}{R_{\square 1} - R_{\square}} \right)^2 \ln \frac{R_{\square 1}}{R_{\square}} \right) \quad (14-2)$$

$$\tan \delta_e = \frac{4\varepsilon_0 \varepsilon_r \pi f R_{\square} b^2}{3d} \beta_3 \quad (14-3)$$

不同极板结构的损耗计算公式汇列于表 2。

表 2 不同镀层结构的极板损耗计算公式

序号	镀层类型	计算公式	备注
1	均匀极板	$\tan\delta_e = \frac{2\beta\varepsilon_0\varepsilon_r\pi f R_{\square} b^2}{d}$ $\beta = 2/3$	b ——极板有效宽度, mm; b_0 ——为加厚边的宽度, mm;
2	加厚边均匀型	$\tan\delta_e = \frac{4\varepsilon_0\varepsilon_r\pi f R_{\square} b^2}{3d} \beta_1$ $\beta_1 = 1 - \alpha_1 \left(1 - \frac{R_{\square 0}}{R_{\square}}\right)$ $\alpha_1 = \frac{b_0^3}{b^3} - \frac{3b_0^2}{b^2} + \frac{3b_0}{b}$	b_1 ——阶梯一极板有效宽度, mm; f ——为测试频率, Hz; R_{\square} ——为均匀极板的方阻, Ω ;
3	阶梯型	$\tan\delta_e = \frac{4\varepsilon_0\varepsilon_r\pi f R_{\square} b^2}{3d} \beta_2$ $\beta_2 = 1 + \frac{R_{\square 1} - R_{\square}}{R_{\square}} \alpha_2$ $\alpha_2 = \frac{b_1^3}{b^3} - \frac{3b_1^2}{b^2} + \frac{3b_1}{b}$	$R_{\square 0}$ ——为加厚边方阻, Ω ; $R_{\square 1}$ ——阶梯一方阻, Ω ;
4	渐变型	$\tan\delta_e = \frac{4\varepsilon_0\varepsilon_r\pi f R_{\square} b^2}{3d} \beta_3$ $\beta_3 = \frac{3}{2} \cdot \frac{R_1}{R_1 - R} \left(1 - \frac{2(2R_{\square 1} - R_{\square})}{R_{\square 1} - R_{\square}} + 2 \cdot \left(\frac{R_{\square 1}}{R_{\square 1} - R_{\square}}\right)^2 \ln \frac{R_{\square 1}}{R_{\square}}\right)$	d ——介质厚度, μm 。

4 不同镀层结构对极板损耗的影响分析

对于不同的极板镀层类型, 可以计算得到相应的损耗系数和损耗角正切。以 $R_{\square}=50\Omega$, $d=6\mu\text{m}$, $b_0/b=0.07$, $R_{\square 0}/R_{\square}=0.06$, $b_1/b=0.48$, $R_{\square 1}/R_{\square}=0.2$ 为例, 在 50Hz 的频率下, 计算得到各类型极板的损耗系数和损耗角正切如表 3 所示。损耗减小比例以均匀极板作为基数 1。

表 3 极板类型与损耗的关系

序号	镀层类型	损耗系数 β	$\tan\delta$, %	损耗减小比例
1	均匀极板	1	0.011	1.00
2	加厚均匀型	0.816	0.0887	-18.40%
3	阶梯型	0.34	0.00369	-66%
4	渐变型	0.263	0.00287	-73.70%

从表 3 可以看出:

1) 对于方阻为 50Ω 的均匀极板, 极板损耗达

到 0.011%, 这个数字很大, 超过聚丙烯基膜损耗的一半;

2) 简单进行极板边缘加厚, 就可以使极板损耗下降 18.4%, 非常可观。

3) 采用简单阶梯型结构, 极板损耗可以下降 66%, 更加可观。

4) 采用渐变型结构, 极板损耗可以下降 73.7%, 更切合金属化膜的电流沿极板宽度方向均匀分布的特点, 优于采用阶梯型镀层结构。

对于内串膜, 由于中间还有一个过渡镀层, 会增加一个附加损耗, 但这部分损耗很小, 约为 $\Delta b/b$ 的 1.5 倍 (Δb 为空边尺寸), 应该比喷金层的损耗还小, 所以可以忽略。

柔性直流输电工程用直流支撑式对安全性、可靠性有极高要求, 因此在极板结构设计上尽可能采用损耗小的镀层结构设计, 对电容器的损耗水平进行设计、预判, 以达到减小损耗、降低温升目的。

5 结论及建议

5.1 电容器的损耗对柔性直流输电工程用直流支撑电容器的性能有重大影响。金属化膜的极板中的电流沿极板宽度方向均匀分布, 极板损耗主要由其方阻和镀层结构决定。

5.2 金属化膜的镀层厚度与方阻有关, 方阻越大镀层越薄, 对于方阻 50 的金属化膜来说, 镀层厚度不到 1nm。镀层厚度越小, 自愈性能越好。

5.3 镀层损耗与测试频率、镀层方阻成正比, 与薄膜的厚度成反比, 与薄膜有效宽度的平方成正比。采用厚度大的膜, 有利于降低镀层损耗, 采用宽度小的膜, 镀层损耗降低更明显。

5.4 通过对均匀极板、加厚均匀型、阶梯型、渐变型四种不同极板镀层结构的极板损耗计算表明, 渐变型结构更切合金属化膜的电流分布特点, 极板镀层结构的损耗值最小、结构最优。

参考文献:

- [1] 冯申荣, 吴浩波. SF₆和植物油浸自愈式低电压并联电容器[J]. 电力电容器, 1992(4): 27-36
- [2] 周存和. 高压金属化膜并联电容器[J]. 电力电容器, 2004, 2(3): 1-5
- [3] 刘文泽, 高压电力电容器内部最热点温度的计算模型[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 82-84
- [4] 李浩原, 尹婷等. 金属化膜电容器极板发热计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 第 5 期: 37-40

- [5] 陈温良. 金属化电力电容器的热计算问题[J]. 电力电容器, 2003(s): 53-57
- [6] 李化, 陈麒任. 交流高压金属化膜电容器温升特性和优化设计[J]. 高压电器, 2018, 第1期: 1-8
- [7] 李维维, 高琪等. 柔性直流输电工程用直流支撑电容器的开发探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 第3期: 95-98
- [8] 李化, 章妙等. 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
- [9] 王振东, 金属化膜电容器损耗的工艺研究[D], 第2.1条目录
- [10] 尹婷, 严飞等. 金属化安全膜电容器 ESR 计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 第3期: 41-44
- [11] 华中科技大学数学系. 微积分学. 高等教育出版社
- [12] HVDC 用干式直流滤波电容器通流性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 第4期: 36-40

作者简介:



左强林(1967), 男(汉族), 硕士学位、毕业于华中科技大学, 就职于无锡赛晶电力电容器有限公司, 教授级高级工程师, 长期从事电力电容器技术研究工作。

雷乔舒(1979), 女(壮族), 学士学位, 毕业于广西大学, 就职于无锡赛晶电力电容器有限公司, 高级工程师, 长期从事电力电容器的产品设计研发工作。