

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.04.005

直流支撑电容器元件质量与卷绕张力调控的关联性探讨

董晓亮

(新程(辽宁)电力电容器科技有限公司, 辽宁 营口 115000)

摘要: 由于金属化膜具有自愈性、工作场强和储能密度高等特点,金属化膜电容器被广泛应用于柔性直流输电领域。其元件质量的关键在于卷绕工艺的精密性,尤其是卷绕张力的控制,直接影响薄膜层间接触状态和径向压强分布。张力不足会导致层间松散,引入空气间隙,而张力过大会损伤薄膜,影响自愈性能。本文从卷绕机张力调节入手,分析其对元件结构和自愈特性的影响机理,并引入层间压强概念对自愈性能的影响,为设计优化提供理论依据,设定工艺参数。

关键词: 直流支撑电容器; 卷绕张力; 金属化膜; 层间压强; 元件自愈

Correlation Analysis Between Quality of DC-link Capacitor Element and Winding Tension Control

DONG Xiaoliang

(Xincheng(Liaoning) Power Capacitor Technology Co., Ltd., Liaoning Yingkou 115000, China)

Abstract: Metallized capacitors are widely used in VSC-HVDC transmission field due to such features of the metallized film as self-healing property, high operating field strength and high energy density. The key to the quality of its elements is in the the accuracy of the winding process, with the control of winding tension in particular, which will directly affect the interlayer contact condition and the radial pressure distribution of the film. Insufficient tension can lead to looseness between layers and introduce air gaps, while excessive tension can damage the film and affect the self-healing performance. Staring from the tension adjustment in this paper, the influence mechanism of the winder on the element structure and self-healing characteristics is analyzed, and the concept of interlayer pressure is introduced to explore its influence on self-healing performance, providing theoretical basis for optimizing design and setting process parameters.

Keywords: DC-link capacitor; winding tension; metallized film; interlayer pressure; element self-healing

0 引言

柔性直流输电(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)是基于电压源换流器的直流输电技术,随着柔性直流输电在可再生能源并网、直流电网等领域的拓展,解决了以往常规直流输电存在的诸多问题,是目前智能电网领域的关键技术之一^[1-7]。广泛应用于柔性直流输电技术领域的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC),具有输出波形质量高、电压功率易于扩展等诸多优点^[8-13]。直流支撑电容器是 MMC 系统的“电压锚点”,其性能直接决定系统的稳定性、响应速度和可靠性。直流支撑电容器的优化设计(如高能量密度、低损耗、长寿命)将继续成为技

术研究的重点之一。

直流支撑电容器作为 MMC 系统子模块(submodule, SM)的核心部件,长期工作在交直流和大功率的工作环境中,是 MMC 运行过程中最容易出现质量问题的部件之一。直流支撑电容器内部心子结构是由若干干式金属化元件串并联组成,采用高方阻金属化膜,一般情况下,元件几何尺寸大,卷绕层数多,这对于元件张力的设定和压强的分析严格于一般自愈式元件。

根据以往经验,这种金属化元件的密封性能,以及各层间气隙大小对其质量有较大的影响。在生产过程中,通过卷绕张力、压力及层间压强的科学管控,对元件性能作分析,膜上不同压强做试验验证,实现张力、压强参数的实时优化与有效调

收稿日期:2025-05-26

控。增加层间压强,挤出残留在金属化聚丙烯薄膜之间的空气,提升元件的电气一致性、机械强度及长期可靠性,降低产品不合格率。

1 卷绕张力对元件结构的影响

直流支撑电容器元件是由蒸镀好的金属化膜在全自动卷绕设备上卷绕而成,其元件结构如图1所示。每生产周期放卷、收卷都有一个加速、匀速、减速的过程,卷绕时薄膜的张力取决于膜卷的张力控制系统,要保证张力大小可控,同时要有有效的控制膜卷的加减速度和卷绕速度,减小因速度变化对卷绕张力的影响^[14-18]。卷绕张力直接影响薄膜层间的紧密程度。研究表明,张力过小会导致层间空气滞留,形成不均匀的径向压强分布,降低元件结构的稳定性;张力过大会导致薄膜拉伸变形,甚至断裂,影响电容元件的容量精度及自愈性能。

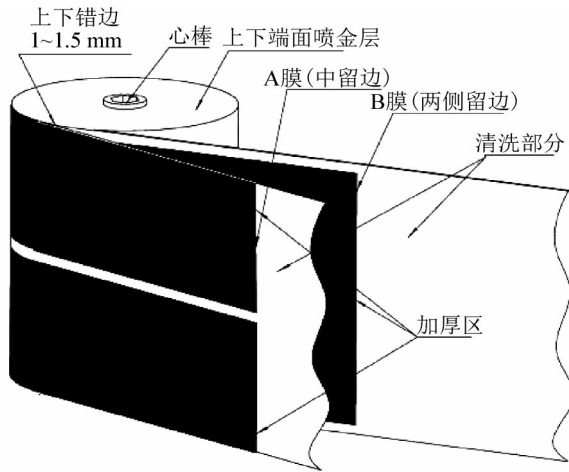


图1 直流支撑电容器元件结构
Fig. 1 Structure of element of DC-link capacitor

直流支撑电容器元件介质及电极,是由纳米级的锌、铝金属蒸镀在数微米的聚丙烯薄膜上,因此分析膜上张力及压强对元件的影响时,可以忽略金属化膜电极厚度对层间空气状态的影响。卷绕时,在电容器元件膜上产生使膜拉伸的卷绕张力 T_d 。

当薄膜通过多个过轴卷绕到心棒上时,在元件的径向上会产生垂直于表面的压力 T_r ,由此产生径向压强。由弯曲液面产生的压强可借鉴到这里,形成由内向外的附加压强^[19]。根据力的作用原理,内部的压力同时会产生反作用力 T_p ^[20],以上受力情况如图2所示。

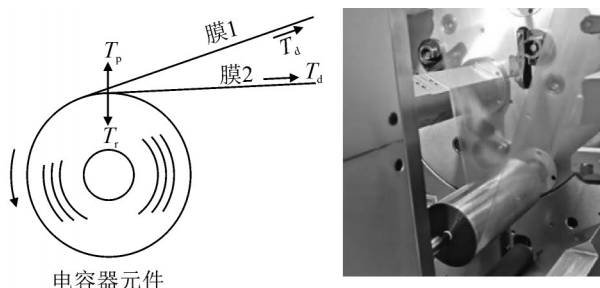


图2 电容器元件卷绕时的拉力示意图和实际作用力
Fig. 2 Schematic diagrams of tension and actual acting force during the winding of capacitor element

在卷绕过程中,元件内层膜受到的叠加压力比外层膜大,相对应所受的压强也大。较大的压强能将层间空气排出,所以随着层数的不断减小,电容器元件的层间气隙厚度呈逐渐减小的趋势。

元件在卷绕过程中,按设计、工艺要求膜层间存在错边和留边,随着元件直径的逐渐加粗,元件各层间会进入少量的空气,元件内部结构如图3所示。

为了提高元件的性能指标,在元件卷绕起始加速后,匀速卷绕过程中,要求金属化膜张力不变。张力过小,会造成元件的各层之间松软散开,诱发局部放电,降低元件性能;张力过大会造成蒸镀金属镀层及薄膜本身因过度拉伸而受损,从而影响到喷金质量甚至元件耐压和寿命。

元件卷绕时,根据聚丙烯膜厂家不同批次金属化膜的应力值、膜宽、膜厚,需设定好合适的张力、压力等,并视元件卷绕的情况进行微调。

直流支撑电容器元件有多种规格,表1是某卷绕装置典型金属化膜厚度值及不同膜宽对应的张力设定值。表2是其对应的外包膜不同厚度张力设定值。

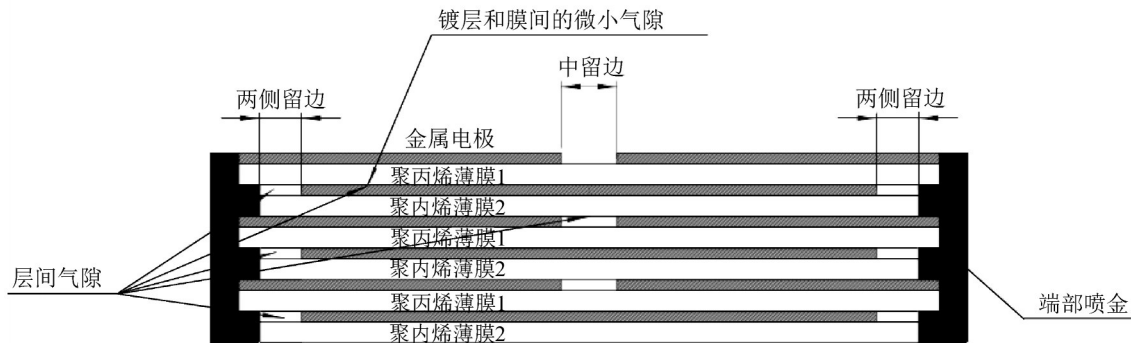


图3 元件内部各层间空气间隙示意图
Fig. 3 Schematic diagram of air gaps between layers within the element

表 1 某型号卷绕装置金属化膜的张力值
Table 1 Tension value of metallized film of a certain type of winding device

元件膜 宽度/mm	膜厚 5.8 μm 最小值/N	膜厚 5.8 μm 最大值/N	膜厚 6 μm 最小值/N	膜厚 6 μm 最大值/N
60	5.02	5.77	5.23	5.94
75	6.12	6.97	6.29	7.17
85	6.80	7.76	7.00	8.00
100	7.82	8.96	8.06	8.23
150	11.23	12.94	11.58	13.35

表 2 外包膜张力值
Table 2 Tension value of outer film

元件外包膜 宽度/mm	膜厚 15 μm 最小值/N	膜厚 15 μm 最大值/N
60	4.53	5.41
75	5.41	6.51
85	6.00	7.25
100	6.88	8.35
150	9.82	12.03

由表 1 可知,卷绕设备张力在卷绕不同的膜宽、膜厚元件时有很大差别。一般情况下,张力值=膜宽×膜厚×张力系数。

卷绕张力与膜宽的关系曲线见图 4,当膜厚一定时,由图 4 可知,其张力大小与膜宽近似线性。

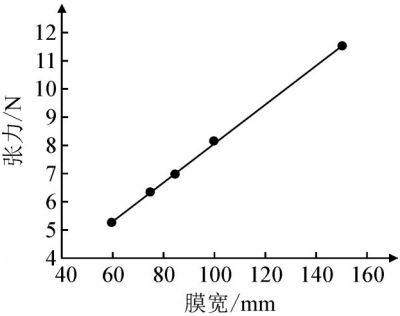


图 4 膜厚 6 μm,膜宽与张力关系
Fig. 4 Relationship among film thickness 6 μm, film width and tension

受基膜生产工艺的影响,电容器元件金属化膜上的参数,各方向的拉伸强度如图 5 所示^[21-22],在经过原料的挤压后,基膜在横向(TD)、纵向(MD)进行拉伸,经过多道工序的处理,提高抗拉强度,使机械性能得到改善^[21]。

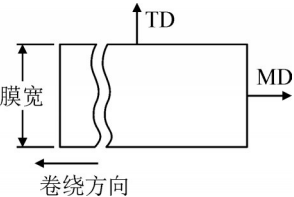


图 5 聚丙烯膜拉伸时纵向、横向方位示意图
Fig. 5 Schematic diagram showing the longitudinal and transverse orientations of polypropylene film during stretching

为了验证卷绕张力是否对膜有损伤,对所使用的金属化电容器膜做双向抗拉强度及弹性模量强度试验,试验线路如图 6。



图 6 金属化膜抗拉强度试验
Fig. 6 Tensile strength test of metallized film

图 7、图 8 为关系曲线,通过曲线得出不同膜厚的金属化膜其纵向和横向抗拉强度和弹性模量数据见表 3。

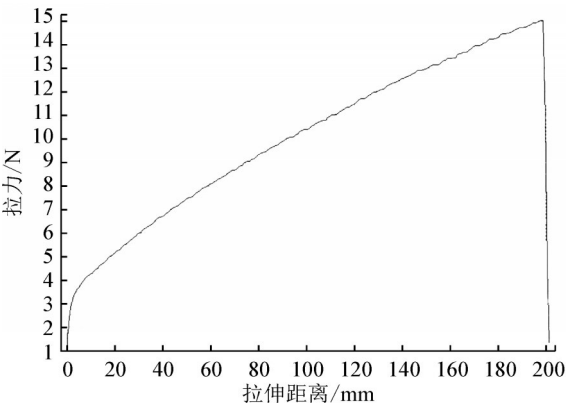


图 7 膜厚 6 μm,膜宽 100 mm 金属化膜纵向拉力与拉伸距离的关系
Fig. 7 Relationship between longitudinal tensile force and stretching distance of metallized film with thickness of 6 μm and width of 100 mm

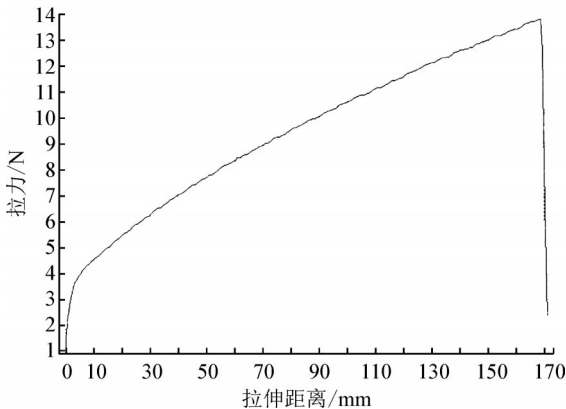


图 8 膜厚 6 μm,膜宽 100 mm 金属化膜横向拉力与拉伸距离的关系
Fig. 8 Relationship between transverse tensile force and stretching distance of metallized film with thickness of 6 μm and width of 100 mm

表3 不同厚度的金属化膜抗拉强度及弹性模量的力学特性
Table 3 Mechanical characteristics of tensile strength and elastic modulus of metallized film with various thickness

基本特性	类型	膜厚 6 μm	膜厚 5.8 μm
弹性模量 N/mm ²	MD	92.439 9	91.883 9
	TD	1 237.919 8	1235.572 7
抗拉强度 N/mm ²	MD	164.268 4	163.706 2
	TD	211.749 2	210.499 6

由上文的图表可以看出,卷绕机在膜上的张力所产生的应力值比聚丙烯薄膜的抗拉强度要小得多,在上述张力的卷绕过程中,聚丙烯薄膜不会受到损伤。

以膜厚 6 μm ,膜宽 100 mm 的聚丙烯薄膜为例,制作电容器元件,当张力范围为 8.06~8.23 N 时,卷绕机卷制的元件端面平整度偏差在 ± 0.1 mm 范围内。而张力超出此范围后,端面菊花纹增多,影响元件喷金质量,导致接触电阻升高。

2 卷绕张力及压强的近似等效计算

在探讨金属化膜所受拉力时,膜上的张力大小与液体表面张力相似,依据其定义及表面张力表达式^[19,22-23],存在表面张力系数 β ,因此也存在界面能量。拉力所做的功为

$$W = f\Delta L \quad (1)$$

式中: W 为膜层张力所做的功,即拉伸薄膜表面能; f 为元件卷绕时的张力; ΔL 为膜的拉伸长度。根据材料力学杨氏模量公式(即弹性模量),对于线性弹性材料有公式^[24]

$$\delta = E\varepsilon = \frac{f}{hd} = E \frac{\Delta L}{2\pi(r+nd)} \quad (2)$$

式中: δ 为正应力作用; ε 表示积极的应变; E 为弹性模量的常数,与材料有关; h 为薄膜的宽度; d 为膜厚度; r 是卷绕心轴半径; n 是卷绕膜的层数。两层界面相互影响,这种收缩倾向使其具有沿界面相切的表面张力,并始终垂直于两条分界线,其大小与分界线长度成正比,表面张力表达式为^[24]

$$f = \alpha L \quad (3)$$

式中: f 为液体表面张力; α 为表面张力系数; L 为液面分界线长度。

α 表达式如(4)所示^[22],对于单位面积液体的表面能量可称为液体表面张力系数。

$$\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta S} \quad (4)$$

式中: ΔE 是单位液体面积增大的表面能量; ΔS 为单位面积的液体。

液体表面张力在弯曲的液面上可以产生额外的压强,对圆柱形状的液体表面,其产生的附加压强公式为

$$P = \frac{\alpha}{R} \quad (5)$$

式中: P 为附加压强; R 为圆柱液面半径; α 为液体表面张力系数。

根据液态表面张力系数定义式和上文的式(5),可以类似地得到电容器元件内部每一层的膜张力系数 β ,即每一层的单位面积拉力所做的功,其表达式为

$$\beta = \frac{W}{S} = \frac{f\Delta L}{2\pi(r+nd)h} \quad (6)$$

根据圆柱形状的液面产生附加压强式(5),可以得到类似的压强公式,即卷绕元件薄膜上的压强公式为

$$P = \frac{\beta}{r+nd} = \frac{f\Delta L}{2\pi h(r+nd)^2} = \frac{f}{dE(r+nd)h^2} \quad (7)$$

由以上元件各膜层的压强公式可知,直流支撑电容器元件内部层间压强不仅与膜上的张力有关,而且与膜的宽度、厚度及卷绕的直径都有关。

以实际电容器元件来计算其内部各层间的压强大小,材料选用厚度为 6 μm ,宽度为 100 mm 的金属化聚丙烯膜,心轴半径为 4.5 mm,计算时张力选 8.1 N,元件有效圈数为 2 500,自心轴由内向外确定为第 1 层。由图 7 膜厚 6 μm ,膜宽 100 mm 的聚丙烯膜纵向抗拉强度曲线,可知其拉力和伸长量之间的关系,在膜未发生变形时,拉力 f 与伸长量 ΔL 之间的关系为

$$f = 1.81\Delta L \quad (8)$$

在以上的压力及层间压强作用下,聚丙烯膜不发生变形,由式(7)可得元件卷绕后任一层的压强公式为

$$P(n) = \frac{f^2}{dEh^2} \sum_{n=1}^{2500} \frac{1}{r+nd} \quad (9)$$

式中, n 为元件内的任意圈数。

例如计算该元件内第 1 000 圈所在层的压强,根据文献^[25]与材料有关的弹性模量常数 E 取 18,并利用软件进行计算得

$$\begin{aligned} P(1\ 000) &= \frac{8.1 \times 8.1}{0.006 \times 18 \times 100^2} \sum_{n=1000}^{2500} \frac{1}{4.5 + 1\ 000 \times 0.006} \\ &= 0.626\ 8 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (10)$$

进一步通过计算第 1 层到 2 500 层之间每间隔 100 层为一个节点的压强值,绘制曲线见图 9。

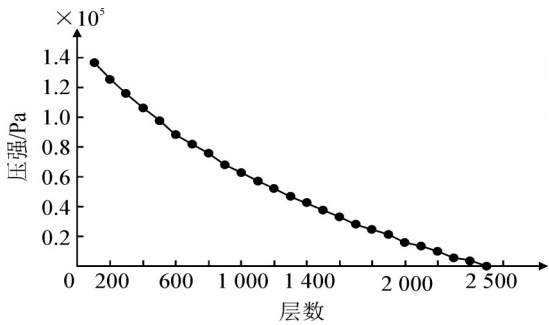


图9 元件层间压强与层数关系曲线
Fig. 9 Relationship curve between interlayer pressure and layer number in elements

由图9曲线可知,随着元件层数的增加,压强由内向外递减。

3 径向压强对自愈性能的关联性影响

在卷绕过程中,元件每卷一圈时会形成以心轴为中心的径向压力 T_r ,如图2所示。压力产生的压强 P 垂直于元件表面。由图9可知,靠近心轴内层的部分,压强最大,随着层数的增加,压强逐渐减小,实际压力如图10所示。通过对C.W.Reed和J.H.Tortai等人的文献了解到,自愈能量随着各层间压强增加而减小^[26-27]。自愈性是金属化膜电容器重要特征^[28],在运行时,电容器自愈性受其层间压强的影响最明显,如果自愈不彻底或自愈失败,就会造成电容器故障。

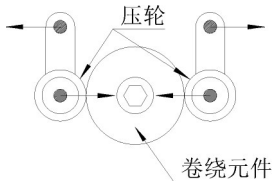


图10 卷绕时,金属化元件实际压力示意图
Fig. 10 Actual pressure schematic diagram of metallized elements during winding process

在研究金属化电容器薄膜内部压强对自愈性影响试验过程中,Bell Ko V O等人利用将电极压装 in 单层金属化膜上,通过实验与理论结合,深入揭示了极性对自愈电流清除电极的作用规律,为优化自愈材料设计提供依据。但该实验装置不能很好地反映层间压强对金属化膜实际击穿过程的影响^[29]。

Sassoulas P-O等人通过结合人工电弱点法与多尺度表征,系统性解码极性在自愈过程中的“开关”作用,为工程化自愈材料提供定向调控策略^[30],这种实验方法提高了产品的自愈概率,简化了试验过程,但机械损伤可能引入残余应力,干扰自愈机制,与产品的实际自愈过程有比较大的区别。Tortai等人采用在单层金属化膜上压装金属电极的

方法,并利用金属化膜自身的缺陷实现自我修复。在测试方法方面,Tortai等人运用了光测量技术,显著提高了对自愈持续时间的测量精度,这一方法适用于极性效应研究中的快速动态过程捕捉,但是不能精准地测量出自愈的持续时间^[31]。代新、孔中华等研究了通过人工电弱点法展示压力与电压对金属化膜自愈的协同作用机制,结合原位表征与多尺度建模,对于高性能自愈薄膜电容器的设计具有充分的指导意义。对于试验过程给予了简化,同时有效地提高了元件自愈概率^[32-33]。

根据上述文献分析,采用电测量法,通过直流电源对试品膜组成的电容器进行耐压试验,对试品膜上的电压、电流波形进行测量,根据膜上的压力变化,分析不同压强作用于膜上对其自愈性的影响,具体试验回路如图11所示。

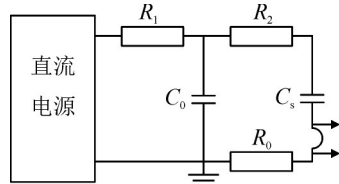


图11 不同压强作用下金属化膜自愈特性试验线路图
Fig. 11 Self-healing characteristic test circuit diagram of metallized film under different pressures

图11中 R_1 为充电电阻280 k Ω , R_2 为稳压限流电阻280 k Ω , R_0 为测量电阻100 Ω , C_0 为滤波电容1.68 nF, C_s 为试品电容。实际测试线路布置如图12所示,不同压力下金属化膜的试验布置见图13。



图12 自愈特性试验线路图
Fig. 12 Self-healing characteristic test circuit diagram

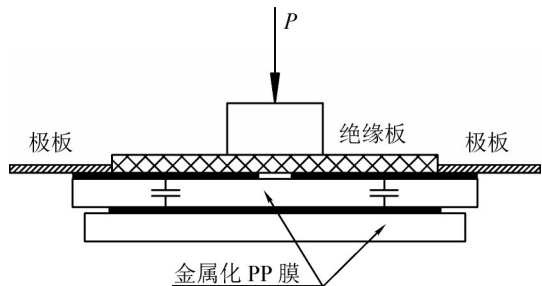


图13 不同压力下金属化膜的试验布置
Fig. 13 Test layout of metallized film under different pressures

如图13所示,试品金属化膜厚 $6\mu\text{m}$,有效电极面积 50cm^2 ,在试品电容上分别加上重为 0kg 、 4kg 、 8kg 的重物,通过改变物体重量来实现电容器膜上的不同压强值。对比3种情况下金属化膜自愈情况。为确保试验具有可对比性,均取击穿电压为 5kV 。图14所示为金属化膜自愈时的状态。

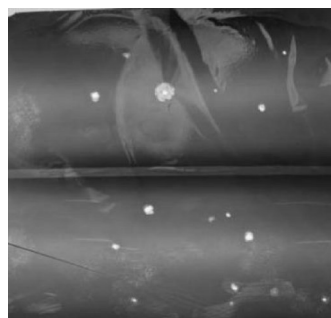
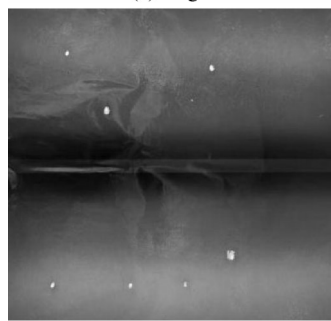
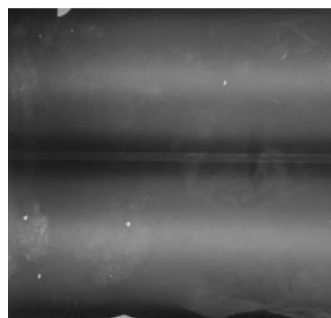
(a) 0kg (b) 4kg (c) 8kg

图14 金属化膜上不同压强下的自愈图谱

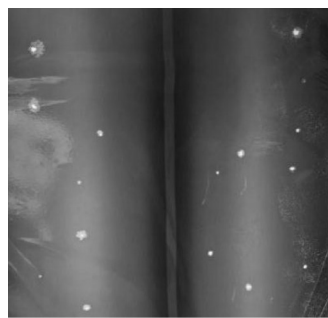
Fig. 14 Self-healing patterns on the metallized film under different pressures

由图14试验发现,随着压强的增加,金属化膜的自愈点面积逐渐减小,最后处于一个稳定状态。通过示波器记录的自愈点波形分析可知,电流脉宽在压强增加时会变窄,同时自愈过程中的峰值电流也会随着压强的升高而降低,电容器层间压强大小与局部放电有密切联系,局部放电会造成膜老化和电极破损,使电容器的自愈点增多^[28,34]。Torhi.H. DenatA.通过实验研究了金属化产品自愈性能在各种压强下的变化,结果表明在金属化膜击穿时,等离子电弧的产生和发展过程与压强有很大的关系,金属化膜击穿过程中,电弧熄灭是随着电弧电流功

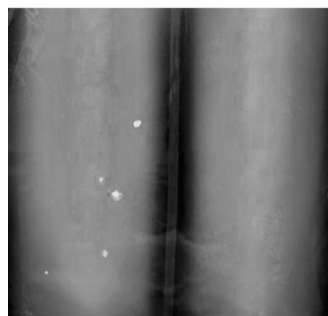
率密度低于该临界值而熄灭的。其原因是:当电弧的电流功率密度低于这个临界值时,自愈产生的等离子临界功率密度会随着压强的增加而增大,此时电弧就会变得更易熄灭^[35-36]。

4 试验验证压强对元件自愈性能的影响

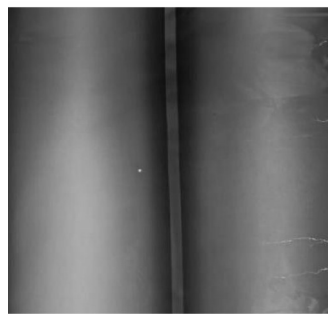
为了更进一步地验证直流支撑电容器元件内部不同压强对其自愈性能的影响,对某产品的内两串结构元件进行充放电试验。在充放电次数超过 $5\,000$ 次时,试品电容量明显下降,降到小于 95% 时,结束试验。自外向内逐层解剖电容器试验元件,观察并分析元件内部膜中自愈点形态及面积,找到自愈点规律。元件内部不同位置解剖图见图15。由图15可见,从外层到内层膜表面,电容器的自愈形态差异明显。具体表现为外层膜自愈点多、自愈面积大;中层膜的自愈点数量较多,自愈面积较大;内层膜的自愈点较少,自愈面积较小。



(a) 外层膜



(b) 中层膜



(c) 内层膜

图15 元件内部不同位置解剖图

Fig. 15 Cross-sectional views at different locations inside the element

通过以上试验和解剖分析:自愈点所需能量随压强增大而减少。在电容器元件的内层区域,自愈能量逐渐趋于稳定,自愈面积也基本保持不变。从分析结果来看,电容器元件在自愈过程中,层间空气对自愈电流的影响会导致金属化膜上的自愈点面积变大。外层膜自愈电弧覆盖面积较大,同时由于自愈电流在发展过程中,受到气体分子和带电粒子的碰撞,导致自愈电流持续时间延长,电弧长时间运行,消耗的能量随之增加,因此,自愈电弧的覆盖面积会增加。从内部看,自愈电弧由于层间气体排出而覆盖的气体分子数量减少,自愈能量比较小。当元件最内层的内部压强达到一定值时,两层膜贴合得比较紧密,因此可以忽略自愈过程受到空气间隙的影响,所以自愈面积趋于平稳,自愈过程中受到空气的间隙影响而产生的自愈电弧覆盖面积相对较小。在对元件进行大量充放电试验后,通过解剖分析,验证了这一结论。

5 卷绕设备张力调控与改变元件内部压强分布的优化

利用调节卷绕设备张力,以及对设备压轴压力的调节,实现元件径向均匀的压强分布,将张力波动控制在 $\pm 5\%$ 以内,这样可以有效提升元件的自愈稳定性。

1) 工艺参数综合优化策略

张力梯度是根据PP薄膜材料的弹性模量及热收缩率来设置的,以保证元件膜层间压强的稳定性。在元件卷绕过程中,卷绕设备通过伺服电机来实现线速度恒定。外包聚丙烯薄膜(收缩率 $0.5\% \sim 1.2\%$)需在卷绕后期逐步降低张力,以补偿热压后的收缩应力,避免内层过紧导致压强不均。

2) 外包膜圈数及优化外包膜的连接方式

通过增加外包膜圈数来改善元件内部压强。当元件卷绕达到规定的圈数后,完成收尾清洗,将外包膜插入元件的收尾部位。此时,可以在接头处采用烫封工艺进行固定,随后进行外包膜的包裹,并适当增加外包膜的圈数。这样可以使元件卷绕更加紧实,尤其增加外层薄膜的层间压强,从而尽可能地排出层间的空气。

3) 对元件进行适当的热处理并同时抽真空

热处理过程能很大程度上改变金属化电容器元件的内部压强,进而能有效地提升元件自愈特性。元件在热定型设备中加热后,聚丙烯薄膜受热会发生横向和纵向收缩,元件收缩会改变其内部的压强分布,从而排出内部空气和水分,提高元件局

部放电起始场强^[28,37],同时也可以提高元件自愈击穿场强^[38-39]。在热处理过程中,对温度的控制应与不同元件的要求相适应,若温度过低,使介质膜收缩时所需温度达不到,则热处理的效果就会差强人意;但过高的温度会造成介质膜过度收缩,使其原有的物理、电气特性等发生变化,从而引起金属蒸镀层的破坏,使元件的质量受到影响。在热处理工艺中,对加温过程中的元件进行抽真空处理,能更好的排除元件中的空气和水分。

6 结语

通过对卷绕元件时膜上所受张力的理论和试验分析表明:不同膜宽、不同膜厚对应于元件的卷绕设备,张力是不一样的,其张力值与膜宽近似成线性关系。对于不同的元件尺寸,应根据设备参数及材料的尺寸,设定不同的卷绕张力,而且要保证张力的数值在电容器膜的抗拉强度之内,以保证元件的端面及结构满足设计、工艺要求。

在直流支撑电容器元件的卷绕过程中,由于张力的作用,会在元件的不同层间产生不同压强。经理论推导出元件内部压强的计算方法,并进行了不同圈数压强的计算,可知随着元件层数的增加,压强由内向外递减。并经过不同压强作用在两层金属化膜的电容模拟试验验证,得出随着压强的增加,电容器的自愈点面积会逐渐减小,最后会稳定在一个状态。

元件经过充放电试验表明:元件外层的自愈点面积会随着压强的减小而增大,外层所需的自愈能量较高,从而导致电容量损失较大;而元件内层的自愈点面积则随着压强的增加逐渐减小,电容量损失也随之减少。在靠近心轴的内层处,由于压强已经很大,自愈能量趋于稳定,基本保持自愈面积不变。

直流支撑电容器元件卷绕张力及压强,通过影响元件层间接触状态和径向压强分布,成为金属化电容器质量优化的核心环节。可以通过张力的适当调节、增加外包的层数及外包卷绕方式、在热定型工艺中设定适当的温度及真空度、结合工艺参数优化及设备调节,可显著提升自愈性能及产品可靠性。未来需进一步融合智能控制与新工艺、新技术,推动直流支撑电容器制造向高精度、长寿命方向发展。

参考文献

- [1] 张文亮,汤广福,查鲲鹏,等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(4):1-7.

- ZHANG Wenliang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Application of advanced power electronics in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 1-7.
- [2] 熊俊, 甘文风, 陈愚, 等. 受端电网故障下真双极柔性直流输电系统电压协同控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(5): 32-41.
- XIONG Jun, GAN Wenfeng, CHEN Yu, et al. A voltage collaborative control method for symmetrical bipolar MMC-HVDC under the receiving-end grid fault[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5): 32-41.
- [3] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
- CHEN Shuyong, SONG Shufang, LI Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [4] 朱博, 徐攀腾, 崔远卓, 等. 连接无源网络的LCC-FHMMC混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 151-160.
- ZHU Bo, XU Panteng, CUI Yuanzhuo, et al. AC fault ride-through control strategy for LCC-FHMMC hybrid HVDC system with passive network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 151-160.
- [5] 陶亚光, 刘泽辉, 张力, 等. 特高压直流输电线路短路工况下间隔棒向心力动态仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(4): 17-24.
- TAO Yaguang, LIU Zehui, ZHANG Li, et al. A study on dynamic simulation of spacers centripetal force under UHVDC short circuit condition[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 17-24.
- [6] 陆书豪, 贾秀芳. LCC-MMC混合直流输电系统单阀投入过程中有功MMC站电压平衡策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 111-116.
- LU Shuhao, JIA Xiufang. Voltage balance strategy for constant active power MMC station in the process of valve de-block in LCC-MMC hybrid DC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 111-116.
- [7] 张潮, 顾卫祥, 雍康倩. 考虑特高压直流输电影响的省间电力现货市场协调交易方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(5): 83-90.
- ZHANG Chao, GU Weixiang, YONG Kangqian. A coordinated trading method for the inter-provincial electricity spot market considering the impact of UHVDC transmission systems[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(5): 83-90.
- [8] BAHRMAN M P, JOHANSSON J G, NILSSON B A. Voltage source converter transmission technologies: the right fit for the application[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Canada; 2003.
- [9] 宋延涛, 范雪峰, 吴庆范, 等. 基于MMC的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 63-74.
- SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 63-74.
- [10] 李征南, 唐忠, 史晨豪, 等. 基于PCHD模型的MMC-APF无源控制策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 173-178.
- LI Zhengnan, TANG Zhong, SHI Chenhao, et al. Passivity-based control strategy of MMC-APF based on PCHD model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 173-178.
- [11] 华文, 董炜, 叶琳. PLL-GFC型MMC-HVDC暂态同步稳定性研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(1): 13-22.
- HUA Wen, DONG Wei, YE Lin. A study of the transient synchronization stability of PLL-GFC-based MMC-HVDC systems[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1): 13-22.
- [12] 荣飞, 孙宗卿, 徐爽, 等. 基于辅助子模块的MMC输出电流谐波优化控制方法[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 154-162.
- RONG Fei, SUN Zongqing, XU Shuang, et al. Harmonic optimization control method of MMC output current based on auxiliary sub-module[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 154-162.
- [13] ALLEBRODS, HAMERSKI R, MARQUARDT R. New transformer-less, scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece; 2008.
- [14] 左强林, 葛昌晶, 雷乔舒. 卷绕工艺对直流支撑电容器圆元件膜层间压强的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 66-71.
- ZUO Qianglin, GE Changjing, LEI Qiaoshu. Study on influence of winding process on inter-layer pressure of cylindrical element film in DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 66-71.
- [15] 李梓玮, 许丽娟. 基于概率神经网络的直流滤波器电容器开路故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 48-56.
- LI Ziwei, XU Lijuan. Open-circuit fault location method of DC filter capacitor based on probabilistic neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 48-56.
- [16] 刘天宇, 车传强, 赵磊, 等. 35 kV真空断路器开断并联电容器过电压分析[J]. 东北电力技术, 2024, 45(5): 34-36.
- LIU Tianyu, CHE Chuanqiang, ZHAO Lei, et al. Analysis of overvoltage of 35 kV vacuum circuit breaker breaking parallel capacitors[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(5): 34-36.
- [17] 柴斌, 史磊, 韦鹏, 等. 油浸电容器元件损耗频率特性计算参数的修正[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 211-216.
- CHAI Bin, SHI Lei, WEI Peng, et al. Correction on power loss characteristic calculation parameters of oil immersed

- capacitor elements[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11):211-216.
- [18]周晨,张翔,刘磊,等. 换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J]. 电力工程技术,2022,41(5):149-155.
ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 149-155.
- [19]雷晓燕,隆礼,李金宇,等. 缩比电容器装置噪声特性及其影响因素研究[J]. 高压电器,2024,60(11):131-139.
LEI Xiaoyan, LONG Li, LI Jinyu, et al. Study on noise characteristics and its influencing factors of scaled capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 131-139.
- [20]纪明嵩,李涛,王磊,等. 基于冲击发电机系统的中压断路器背对背电容器组开合试验技术[J]. 高压电器,2024,60(8):252-258.
JI Mingsong, LI Tao, WANG Lei, et al. Back-to-back capacitor bank switching test technology for medium voltage circuit breakers based on impulse generator system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 252-258.
- [21]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.
- [22]FAB. R., KOCHER K. New BOPP capacitor film for metallization with improved performance at higher temperatures [J]. European Passive Components Symposium, 2000(14): 195-203.
- [23]MACDOUGALL F., ENNIS J. AND YANG X. H. et al. The development and performance of high energy density capacitors[C]// 2007 16th IEEE International, 2007.
- [24]黄淑清,聂宜如,申先甲. 热学教程[M]. 北京:高等教育出版机构,1985.
- [25]杜庆华. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,1957.
- [26]曲新喜. 现代有机介质薄膜 [J]. 电子元件与材料,1993, 12(1):1-10.
- [27]REED C. W., CICHANOWSKI S. W. The basics of aging in HV polymer-film capacitors [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5):904~922.
- [28]TORTAI H J, DENAT A, BONIFACI N. Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(1):159-169.
- [29]AGARWAL V K. Aging of multistressed polymeric insulators[J]. IEEE Trans. Electr. Insul, 1989(24):741-764.
- [30]BELKO V. O., BONDARENKO P. N, EMEL'YANOV O. A. The dynamic characteristics of self-healing processes in metal film capacitors [J]. Russian Electrical Engineering, 2007. 78:138-142.
- [31]SASSOULAS P O, GOSSE B, GOSSE J P. Self-healing breakdown of metallized polypropylene [C]//Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, Eindhoven, Netherlands, 2001:275-278.
- [32]TORTAI H J, DENAT A, BONIFACI N, Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53:159-169.
- [33]DAI Xin, LIN Fuchang, LI Jin, et al. Influence factors for the self-healing of metalized polypropylene capacitors[C]// 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [s.l.] 2000:461-465.
- [34]KONG Zhonghua, LIN Fuchang, DAI Ling. Study on uncoupling characteristics of foil wire in metallized capacitors [C]//2007 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Canada, 2007:699-702.
- [35]H. J. ORTAI, A. DENAT, N. BONIFACI. Annual report on electrical insulation and dielectric phenomena[C]//2000 IEEE Conference on Insulation and Dielectric Phenomena, BC, Canada, 2000.
- [36]TORTAI J. H., DENAT A. BONIFACI N. Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 25: 159-169.
- [37]吕霏,自愈金属化膜电容器关键参数研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [38]赵素英,金属化聚丙烯膜交流电容器热定型工艺的分析 [J]. 电力电容器,1991(4):21-28.
- [39]徐明忠,聚丙烯的晶型对电性能的影响[D],哈尔滨:哈尔滨理工大学,2006.
- 作者简介:
董晓亮(1975—),女,工程师,主要从事油浸电容器及金属化电容器的设计与开发工作。E-mail:452767678@qq.com。