

高压自愈式电容器及其装置性能、故障与应用的 关键问题研究

赵彦军, 左强林

(无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177)

摘要: 围绕干式自愈式电容器展开研究。从其关键特性出发, 剖析击穿机理变化引发的问题, 简述基膜与粗化膜粒料差异。基于金属化膜圆元件特性, 分析卷绕张力对自愈能量影响, 得出膜层间最大压强与元件直径成正比结论。针对导电板薄致损耗大的特点, 探讨成因, 介绍油浸式全膜电容器“净化”位垒效应, 分析其外壳温升高于油浸式的原因。依据热传导理论, 分析干式电容器对壳绝缘及散热难题, 建议降低对壳绝缘电压, 对 10 kV 级电容器装置提出分级绝缘设计, 由绝缘平台承担系统绝缘水平。此外, 分析温度、过压力等非电保护现存问题并提建议。针对电容无级变化特性, 探讨内部故障保护问题, 提出容衰与故障保护协同及安全容衰概念, 依据 IEC 63210 标准, 建议以破坏性试验验证安全容衰可靠性。

关键词: 干式电容器; 自愈式; 高电压电容器装置; 分级绝缘; 安全容衰

Research on Key Issues of Performance, Faults and Applications of High - voltage Self - healing Capacitor and Its Device

ZHAO Yanjun, ZUO Qianglin

(Wuxi Sunking Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177, China)

Abstract: The research on dry - type self - healing capacitor is performed. Starting from its characteristics, the issues due to breakdown mechanism variation is analyzed, and the differences between base-film and roughened-film polypropylene granules is briefly described. Based on the characteristics of metallized film circular elements, the influence of winding tension on self-healing energy is analyzed, and the conclusion that the maximum pressure between the film layers is directly proportional to the element diameter is made. The causes of large losses due to thin conductive plate of self - healing capacitor are discussed. The “purification” barrier effect of oil-immersed all-film capacitor is introduced and the reason that the temperature rise of shell of the self-healing capacitor is higher than that of oil-immersed one is analyzed. Based on the theory of heat conduction, an analysis on the insulation and heat dissipation problems of dry - type capacitors is conducted and the reduction of the insulation voltage to the shell is suggested. For 10 kV capacitor device, a graded insulation design is proposed and the insulation level of the system is undertaken by the insulation platform. Furthermore, the existing problems of such non - electrical protection as temperature protection and over - pressure protection are analyzed and suggestions are proposed. As for the stepless capacitance variation of self - healing capacitor, the internal fault protection issues are discussed, and the concept of coordination between capacitance decay and fault protection, as well as the concept of safe capacitance decay are proposed. Based on the IEC 63210 standard, it is recommended to verify the reliability of safe capacitance decay through destructive tests.

Keywords: dry type capacitor; self-healing; high voltage capacitor bank; graded insulation; safety capacitance attenuation

0 引言

随着柔性直流输电在我国的应用和发展^[1],干式自愈式电容器的发展^[2-10]推到了一个新的高度。国内越来越多的科研单位、企业和电容器行业精英,开展干式自愈式电容器的研究。原来处于主流高压电容器厂家相对重视度较低的自愈式电容器,被推到了电容器技术发展的前沿。轨道交通用直流支撑电容器、柔直用直流支撑电容器^[11-12]和新能源汽车用薄膜电容器,走到了电容器技术发展的前台。就在几年前,多数主流高电压电容器制造商对自愈式电容器的市场前景仍持保守态度。但是几年后干式自愈式电容器的发展,特别是在直流电容器上的发展,已经有力地证明,自愈式电容器已经走到了电容器技术发展的前沿。

正当干式自愈式直流电容器发展如火如荼之际,IEC 63210: 2021^[13]标准颁布,标志着国际上交流自愈式高压电容器技术已经走向成熟。从直流电容器到交流电容器,需要在技术上有重大突破。首先,在直流电压下,介质的电导电流连续,即 $\gamma_1 E_1 = \gamma_m E_m$,直流电压按介质的体积电导率分配,而在交流电压下,电通量连续,即 $\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_m E_m$,电压按介质的介电常数分配;其次,在直流电压下,电容器元件中残存的空气间隙的放电不是持续的,而是脉冲形式的,脉冲间隔与介质材料的松弛时间有关。而在交流电压下,气隙的放电是持续性的,对聚丙烯薄膜的危害较大;第三,在直流电压下,由于损耗小,金属化膜的方阻可以大一点,也就是镀层厚度可以更薄一些,有利于金属化膜自愈。但是在交流电压下,镀层要厚一点,否则元件的损耗增加,温升增加,对电容器的安全运行危害较大。

本文结合干式自愈式电容器的特点,对干式高压自愈式交流电容器及其成套装置的几个关键技术问题进行分析,希望引起更多的有识之士对干式高压自愈式交流电容器思考和研究,尽快完善相关技术。

1 电容器单元的设计问题

1.1 击穿机理与油浸式电容器不一样

聚丙烯薄膜在制造过程中不可避免地会产生微观薄弱点,如何有效解决这一结构缺陷成为提升电容器性能的核心技术难题。油浸式电容器是通过油渗透到膜分子之间来弥补薄膜薄弱点的,而金属化膜干式电容器靠自愈来剔除薄弱点对元件电气强度的影响。由于金属化膜的镀层很薄,nm级,

不到油浸式电容器极板厚度的千分之一,在聚丙烯薄膜击穿后,镀层金属很快蒸发,击穿点绝缘强度迅速恢复,这就是金属化膜的“自愈”。油浸式电容器靠绝缘油弥补薄膜上的电弱点,而金属化膜靠自愈来剔除薄膜上的电弱点,是完全不同的技术路线。

自愈式电容器的固体介质和油浸式电容器的固体介质都是聚丙烯薄膜,但是这两种薄膜是有区别的。自愈式电容器用的是电晕处理的基膜,油浸式电容器用的是粗化膜,两者用的聚丙烯粒料也不一样。主要区别有3点:

1)等规度不同。粗化膜用的聚丙烯粒料的等规度要求达到96%以上就可以,而自愈式电容器的金属化膜的基膜,要求等规度达到98%以上;

2)结晶度要求不同。粗化膜的聚丙烯粒料结晶度一般要求在40%以上就可以了;而基膜聚丙烯粒料的结晶度一般要求在55%以上;

3)耐温性能要求不同。粗化膜的耐温性能要求不高,文献表明^[14-15],高温粗化膜的电气性能不好,场强只有正常的一半左右。而基膜的耐温性能要求比较高,目前主要有3档:85℃、105℃和125℃。目前125℃档在国内还没有。当然基膜和粗化膜的粒料在熔融指数、与苣基甲苯的相容性要求也不一样。

金属化膜是在真空状态下在基膜上蒸镀一层纳米级厚度的金属层作为极板,最大特点就是极间绝缘击穿后,这层纳米级的镀层会在击穿点形成碳化通道前蒸发掉,薄膜的绝缘性能得以恢复,这就是自愈功能^[9]。这意味着,每次自愈都会使极间绝缘电阻微量下降,下降的幅度与自愈能量有关。金属化膜的自愈能量估算^[9]公式为

$$W_{sh} = \frac{k_1 U_d^{4.7} C_s}{R_{\square}^{1.8} \alpha(P)} \quad (1)$$

式中: W_{sh} 为自愈能量, μJ ; k_1 为系数; U_d 为介质的击穿电压,kV; C_s 为试品的电容, μF ; $R_{\square}$ 为金属化膜的方阻, Ω ; $\alpha(P)$ 为与清除能量有关的层间压强函数。

从式(1)可以看出,对自愈能量影响最大的是电压。自愈能量与电容和薄膜层间压强系数成正比。赋能工序的目的之一,就是要清除金属化膜的电介质薄弱点,避免在心子组装成型后,由于电容大,导致自愈能量大,造成自愈失效的概率增加。

1.2 膜层间压强对自愈的影响

从式(1)可以看出,膜层间压强增加,有利于减小自愈能量。但是压强增大会导致同一点自愈的概率(即重合率)增加。文献表明^[16],当膜层间压强

增大到 103 kPa 后,自愈点重合率达到 80% 以上,这会导致自愈失效的概率大大增加。我们在解剖耐久性试验后的元件,看到外圈上的自愈点很多,越往里自愈点越少。在自愈失效点附近,基本看不到自愈点。这个结果与文献^[16]是吻合的。

实际上,元件膜层间压强可能远大于 103 kPa。文献^[16]表明,圆元件的膜层间压强与元件圈数的关系式为

$$P_{nN} = 20(N-n) \frac{T_d}{b_p[r_0 + (n-1)2d_p/10^3]} \quad (2)$$

式中: P_{nN} 为第 n 层膜上的压强,kPa; T_d 为卷绕张力,cN; N 为总圈数; r_0 为芯棒半径,mm; b_p 为膜宽,mm; d_p 为膜厚, μm 。

从式(2)可以看出, n 越小膜层间压强越大,也就是说,越靠近内圈,膜层间压强就越大。

实际上卷绕张力 T_d 与 b_p 、 d_p 有关,令 $T_d = k_2 b_p d_p / 10^3$,则式(2)可以简化为

$$P_{nN} = \frac{2k_2(N-n)}{r_0/d_p \times 10^3 + 2(n-1)} \quad (3)$$

在较内层, $n \ll N$, $r_0/d_p \times 10^3 \gg 2(n-1)$, 即 $N-n \approx N$, $r_0/d_p \times 10^3 + 2(n-1) \approx r_0/d_p \times 10^3$, 代入式(3)可以得到

$$P_m \approx \frac{2k_2 N}{r_0/d_p \times 10^3} = \frac{k_2 D}{d_0} \quad (4)$$

式(3)-(4)中, k_2 为根据卷绕设备和材料规格确定的工艺参数; D 为元件外径, $D = 2r_0 + 4d_p N / 10^3 \approx 2R_N = 2 \times 2Nd_p / 10^3$ 。其中 R_N 为元件半径; d_0 为芯棒直径,mm;其余同式(2)-(3)。

从式(4)可以看出,在较内层,膜层间压强与元件外径和张系数 k_2 成正比,与芯棒直径成反比。也就是说,元件中膜层间压强最大值与膜宽和膜厚都没有直接关系。实际上,由于芯棒直径基本不变,所以在圆元件中,膜层间最大压强只与元件外径有关,与膜的规格无关。膜层间的最大压强与外径的关系见图 1。

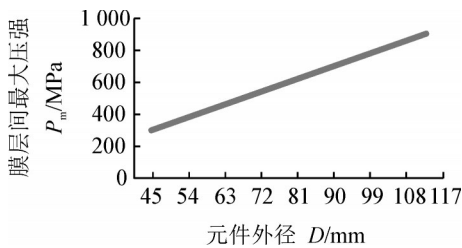


图1 膜层间压强与元件直径的关系

Fig. 1 Relationship between membrane pressure and element diameters

1.3 损耗和散热问题相对突出

1.3.1 自愈式电容器的损耗相对较大

电容器的介质结构,包括油浸式电容器和干式自愈式电容器等,均可等效成图 2 所示的复合介质结构。

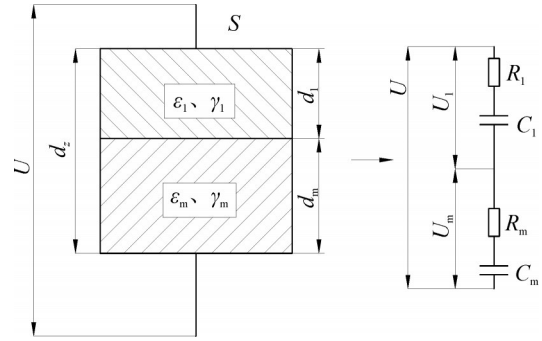


图2 电容器介质结构的等效示意图

Fig. 2 Equivalent schematic diagram of dielectric structure of capacitor

图 2 中, ε_1 、 γ_1 、 d_1 分别为介质 1 的相对介电常数、体积电导率和介质厚度; ε_m 、 γ_m 、 d_m 分别为介质 2 (聚丙烯薄膜) 的相对介电常数、电导率和介质厚度。

图 2 所示的电容器的复合电介质损耗角正切 $\tan \delta_f$ 可按下列方法计算: $P = P_1 + P_m$, 把 $P = \omega C U^2 \tan \delta$ 代入, 可以得到

$$\omega C U^2 \tan \delta_f = \omega C_1 U_1^2 \tan \delta_1 + \omega C_m U_m^2 \tan \delta_m \quad (5)$$

由图 2 可知, $C = \frac{C_1 C_m}{C_1 + C_m}$, $U_1 = \frac{C_m}{C_1 + C_m} U$, $U_m = \frac{C_1}{C_1 + C_m} U$, 代入式(5)并化简可以得到

$$\tan \delta_f = \frac{\tan \delta_1}{1 + C_1/C_m} + \frac{\tan \delta_m}{1 + C_m/C_1} \quad (6)$$

考虑到 $C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{d_1}$ 、 $C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_m S}{d_m}$, 代入式(6)并

化简得

$$\tan \delta_f = \frac{\tan \delta_1}{1 + \frac{\varepsilon_1 d_m}{\varepsilon_m d_1}} + \frac{\tan \delta_m}{1 + \frac{\varepsilon_m d_1}{\varepsilon_1 d_m}} \quad (7)$$

令 $d_m/d_1 = k_3$, 则有: $d_m/d_1 = k_3/(1 - k_3)$, $d_1/d_m = (1 - k_3)/k_3$ 。代入式(7)可以得到

$$\tan \delta_f = \frac{\tan \delta_1}{1 + \frac{k_3 \varepsilon_1}{(1 - k_3) \varepsilon_m}} + \frac{\tan \delta_m}{1 + \frac{(1 - k_3) \varepsilon_m}{k_3 \varepsilon_1}} \quad (8)$$

式中: $\tan \delta_1$ 为介质 1 的损耗角正切; $\tan \delta_m$ 为聚丙烯薄膜的损耗角正切; ε_0 为真空介电常数; ε_m 为聚丙烯薄膜的相对介电常数; ε_1 为介质 1 的相对介电常数; d_m 为聚丙烯薄膜的厚度; d_1 为介质 1 的厚

度; d_z 为极间介质总厚度, $d_m + d_1 = d_z$; S 为极板面积。其余同上。

从式(8)可以看出,电容器的复合电介质损耗角正切应该处于 $\tan \delta_1$ 和 $\tan \delta_m$ 之间。对于全膜电

容器,介质 1 为浸渍剂苝基甲苯, $\varepsilon_1 \approx 2.6, \varepsilon_m \approx 2.2$ 。假设 $\tan \delta_1 = 0.2\%$, $\tan \delta_m = 0.02\%$ 。式(8)的计算结果如表 1 所示,复合介质的损耗角正切与压紧系数 k_3 的关系如图 3 所示。

表 1 全膜电容器介质损耗与压紧系数的关系
Table 1 Relationship between $\tan \delta$ and compaction coefficient of all-film capacitor

参数	压紧系数 k_3						
	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94
介质损耗角正切 $\tan \delta_f / \%$	0.048 2	0.045 0	0.041 8	0.038 6	0.035 5	0.032 3	0.029 2
$\tan \delta_f / \tan \delta_m$	2.41	2.25	2.09	1.93	1.77	1.62	1.46

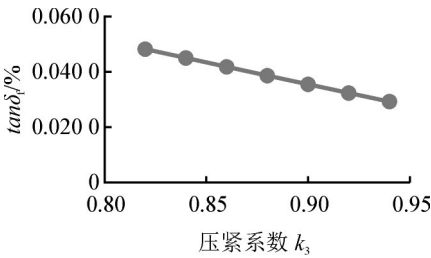


图 3 电容器损耗角正切与压紧系数的关系
Fig. 3 Relationship between $\tan \delta$ and compaction coefficient of capacitor

从表 1 和图 3 可以看出,对于全膜电容器,随着压紧系数增大,电容器的介质损耗减小。复合介质损耗的计算值,都大于聚丙烯薄膜的损耗,比值在 1.46~2.41 之间。但是实际上,全膜电容器的损

耗实测值基本上都小于聚丙烯薄膜的损耗 0.02%,这就是全膜电容器的“净化”作用。

对于干式金属化膜电容器,介质 1 为空隙率等效的空气介质。根据标准^[17-18],空隙率 $\alpha = (d_z - d_m) / d_m = d_1 / d_m = (1 - k_3) / k_3$, 这样 $k_3 = 1 / (1 + \alpha)$ 。考虑到空气的损耗很小,且 $\varepsilon_1 \approx 1$,代入式(8)可以得到

$$\tan \delta_f = \frac{\tan \delta_1}{1 + \frac{1}{\alpha \varepsilon_m}} + \frac{\tan \delta_m}{1 + \alpha \varepsilon_m} \approx \frac{\tan \delta_m}{1 + \alpha \varepsilon_m} \quad (9)$$

从式(9)可以看出,金属化膜电容器的介质损耗与聚丙烯薄膜的介质损耗很接近。根据标准 JB/T 11051 的规定,对于光膜(即基膜),空隙率 $\alpha < 5\%$ 。式(9)的计算结果如表 2 和图 4 所示。

表 2 自愈式电容器介质损耗与聚丙烯薄膜空隙率的关系
Table 2 Relationship between $\tan \delta$ of self-healing capacitor and porosity of PP- film

参数	空隙率 α						
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
介质损耗角正切 $\tan \delta_f / \%$	0.019 6	0.019 2	0.018 8	0.018 4	0.018 0	0.017 7	0.017 3
$\tan \delta_f / \tan \delta_m$	0.98	0.96	0.94	0.92	0.9	0.884	0.867

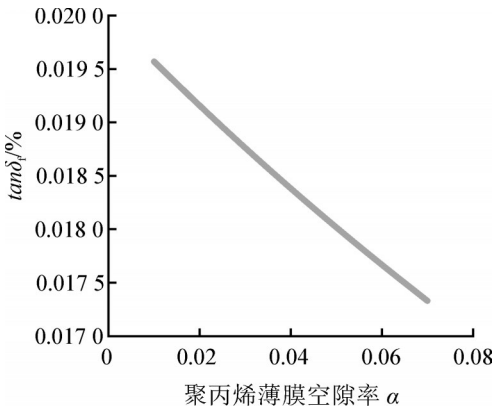


图 4 金属化膜的介质损耗与空隙率的关系
Fig. 4 Relationship between $\tan \delta$ of metallized film and its porosity

从表 2 和图 4 可以看出,随着聚丙烯薄膜空隙率增加,电容器的介质损耗小幅度降低。对自愈式

电容器而言,影响较大的还是电极结构设计和方阻的选取^[16]。相对于全膜电容器来说,自愈式电容器的损耗具有更好的可计算性,其损耗参数在设计阶段即可基本确定。

1.3.2 自愈式电容器的散热问题相对突出

高压自愈式电容器除了损耗大之外,散热也很困难。由于电容器内部只有固体材料,元件的发热基本上只有通过热传导传递到电容器外壳上,最终通过外壳与空气的对流换热以及热辐射散失到空气当中^[19-20]。

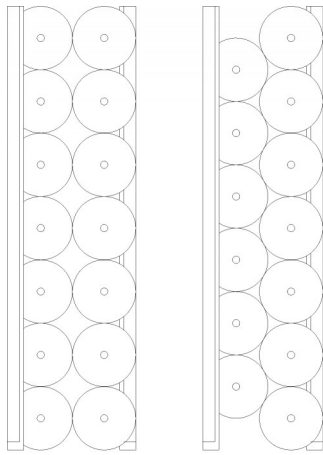
首先,根据前面的分析,自愈式电容器的损耗比油浸式全膜电容器增加 50% 左右,即使其外壳面积一样,自愈式电容器的外壳温升也会增加 50% 左右。电容器外壳温升可按式^[21]计算:

$$\Delta T = \frac{P_c}{k_r S_r} = \frac{\Phi}{k_r} \quad (10)$$

式中: ΔT 为电容器外壳的温升, K; P_c 为电容器的损耗, W; S_r 为电容器外壳的散热面积, cm^2 ; k_r 为电容器外壳对空气的散热系数, $\text{W/K} \cdot \text{cm}^2$ 。一般 $k_r = (1.2 \sim 1.3) \times 10^{-3}$; $\Phi = \frac{P_c}{S_r}$ 为电容器外壳的热流密度, W/cm^2 。

从式(10)可以看出, 电容器外壳的温升与其热流密度 Φ 成正比, 热流密度越大, 外壳温升就越高。

其次, 自愈式电容器的主要原材料金属化聚丙烯薄膜和胶体都是热的不良导体, 这样干式电容器的散热基本上就不能考虑胶体的横向导热, 相当于减小了导热面积, 增加了热流密度。高压干式自愈式电容器的圆元件布置如图5所示。



(a) 并列布置 (b) 错位布置

图5 圆元件在电容器内部的布置示意

Fig. 5 Layout schematic of circular element inside the capacitor

从图5可以看出, 即使采用错位布置, 元件对外壳的热传导面积也减小了20%以上。元件端面对电容器外壳的温升公式为

$$\Delta T_1 = k_i P R_T = \frac{k_i P d_j}{\lambda S_j} \quad (11)$$

式中: ΔT_1 为元件端面对外壳的温升, K; k_i 为元件端面面积之和与外壳面积相关的系数; $R_T = \frac{d_j}{\lambda S_j}$ 为电容器心子与外壳间的热阻; d_j 为心子与外壳间的胶体平均厚度; λ 为胶体的导热系数; S_j 为元件端面的总面积; P 为电容器的有功损耗。

从式(11)可以看出, 电容器心子与外壳间的热阻越大, 温升越高。热阻与心子和外壳间的胶体平均厚度成正比, 与胶体的导热系数成反比。胶体的厚度需要根据电容器与外壳的绝缘水平来确定, 绝

缘水平越高, 胶体的厚度就需要越厚, 这样电容器心子与外壳间的温升越高。当然, 胶体的导热系数越大, 对应的温升也会越低, 但是胶体的导热系数越大, 绝缘性能就越差, 需要综合考虑。

2 装置设计结构需要有所突破

2.1 对壳绝缘相对困难

油浸式电容器端子对壳采用油纸复合绝缘, 其耐压能达到 $50 \text{ kV/mm}^{[21]}$ 左右, 而干式电容器的对壳绝缘采用固化胶体, 由于电容器对壳绝缘结构复杂, 即使采用真空浇注工艺, 胶体中的气泡也不可能完全排除, 胶体的击穿场强难以达到 20 kV/mm 以上。考虑到固体绝缘材料会存在一定的弱点, 使用场强就更低。这样干式电容器的对壳绝缘问题就会非常突出, 同样的电压下, 干式电容器的对壳绝缘厚度基本上要达到油浸式电容器的2~3倍, 电容器内部温升就更高。这不仅会带来对壳绝缘成本的增加, 还会带来电容器寿命缩短, 运行可靠性大幅度降低。同时, 干式电容器的元件串联段间的绝缘也很困难, 可靠性较差。解决的方法只有一个, 那就是降低单元的额定电压和绝缘水平。为此, 需要采取以下措施:

1) 采用分级绝缘, 将外壳绝缘与系统的绝缘水平分开。也就是说电容器单元外壳不接地。这是最重要的, 用绝缘子来代替电容器单元的对地绝缘, 可以极大地降低对壳绝缘要求, 减小对壳绝缘厚度, 降低心子对壳的温升。把6~10 kV电容器装置也采用35 kV以上的绝缘平台方式, 是解决干式电容器对壳绝缘问题的最优方案, 这种方式也有大量的运行经验可以借鉴。

2) 尽可能降低电容器单元的对壳绝缘电压。标准 GB/T 11024.1^[24]、IEC 63210:2021^[13]规定, 对于外壳不接地电容器, 对壳绝缘按下式确定:

$$U_i = 2.5 U_N \beta \quad (12)$$

式中: U_i 为对壳绝缘短时工频试验电压; U_N 为电容器单元的额定电压; β 为相对于电容器外壳与框架连接的单元串联数。

从式(12)可以看出, 电容器单元的额定电压越低, 对壳试验电压就越低; β 越小, 对壳试验电压就越低。对于干式高压电容器, 要想办法让 $\beta = 1$, 把对壳绝缘试验电压降到最低。

2.2 装置的设计结构优化

高压自愈式电容器装置的设计结构, 最为关键的变化就在于降低电容器单元的对壳绝缘要求。

为了达到这个目的,原来 6~10 kV 等级的电容器装置,从落地式改成增加绝缘平台结构,每相单元串

联数由 1 改为 2。除了电容器单元外,装置的其它配套件的绝缘水平不变。典型的布置如图 6 所示。

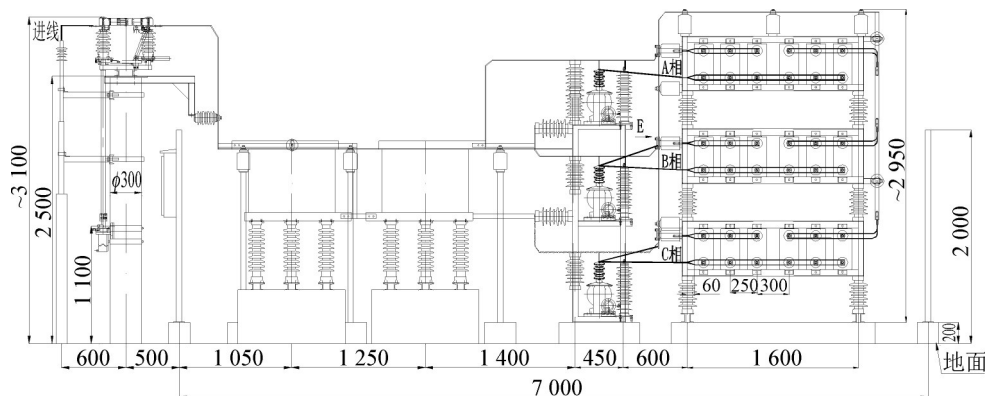


图6 10kV级高压自愈式电容器装置典型布置

Fig. 6 Typical layout of 10kV high voltage self-healing capacitor device

从图 6 可以看出,增加绝缘平台后,电容器单元的绝缘水平从 42/75 kV 降低到 8/20 kV 左右,电容器单元的对壳绝缘厚度可以大幅度减小,电容器单元的内部温升可以大幅度降低,干式电容器的制造成本可以大幅度降低,装置的成本增加不多,就一个绝缘平台的成本。这一方面减小了对壳绝缘的成本,更重要的是降低电容器单元的内部温升,增加了电容器的寿命预期,这对于提高干式自愈式电容器的运行可靠性极其重要。

为了降低电容器装置相间短路的风险,在场地允许的情况下,可以采用水平分相布置。

对于 35 kV 以上电压等级,高压自愈式电容器装置的设计要点,就是尽可能降低电容器单元的额定电压,增加单元串联数和绝缘平台数。这样做虽然装置的成本有所增加,但是电容器单元的运行可靠性和寿命会大幅度增加。

3 保护问题突出

3.1 非电保护特点显著

按照标准 IEC 63210^[17],干式高压电容器有两种类型:一是受保护电容器,这类电容器必须通过破坏试验,包括无主动监控安全装置和有主动监控安全装置;二是无保护电容器,这类不需要通过破坏试验。

所谓“无主动监控安装装置”电容器,就是采用隔离金属化设计或者特殊非隔离金属化设计的电容器。这类电容器的保护是自动实现的,不需要人工介入。“主动监控安全装置”的自愈式电容器,必须通过信号触发才能实现的安全保护,包括过压力检测器、压力隔离开关或过热检测器、过热隔离开关等。

3.1.1 过压力保护需要设计气流通道

过压力检测器就是安装在电容器上,在电容器内部压力达到设定值时,能够输出信号,启动报警等信号的装置。看起来很简单,但是对于干式电容器而言,实现起来颇不容易,没有畅通的气道,压力没办法传递到压力检测器,这样的保护也就形同虚设。因此要解决这个问题,就需要考虑在任何情况下,压力都能传递到压力检测器的结构,并经过试验验证方可。

压力泄放开关就是在电容器单元内部压力超过设定值时,保护装置自动启动,泄放掉电容器内部压力,避免故障扩大。同样,这种保护方式也要求单元内部有可靠的气道。由于电容器尺寸方面的原因,目前还没有适合于单台电容器尺寸的二合一压力保护器,即既可以检测压力,又可以泄放压力的装置或器件。

另外,为了适应高电压环境,过压力切断保护装置可能需要更复杂的设计和制造工艺,这会增加成本和技术难度。老一代干式无油高电压电容器的运行情况说明,在低电压下成熟的技术,在高电压下不一定适用,需要论证、试验验证后才能使用。

3.1.2 温度保护问题突出

安装于干式自愈式电容器单元内部的温度检测器、温度隔离开关,特别是安装在元件上的温度检测器和温度隔离开关,技术要求很高,难度很大。主要表现在以下几个方面:

1) 单元内部的温度分布不均匀导致温度保护设定值很难确定。对于干式自愈式电容器而言,电容器内部只有传导散热,且固化后的胶体和元件都是热的不良导体,加上自愈式电容器的损耗相对大一些,单元内部的温升相对高而且不均匀,给电容

器内部温度保护带来了难以解决的困难。按心子最热点设定保护温度,很可能会导致一般区域的元件温度保护拒动;如果按一般区域的温度来设定温度保护值,最热点的温度过高,可能会导致温度保护误动。这两种情况在老一代的干式电容器中已经屡见不鲜了,有因设定温度过高保护拒动起火的,也有因设定温度过低保护频繁动作跳闸的。要解决这个问题,就需要针对各种工况对电容器单元的温度分布进行精确的仿真,看看有没有办法解决这个问题。

2)元件内部最热点比油浸式电容器高很多。圆元件的散热模型,文献[25]已经做了详细的分析。直径为 $\Phi 75$ 左右的圆元件很正常,而油浸式电容器元件厚度达到15 mm左右就不多见了,相当于自愈式元件的径向热传导路径增加了4倍,加上极板厚度的差异很大,使圆元件的最热点温升更高,而且最热点温度无法在线检测。这导致元件内部绝缘的运行状况更加恶化。

3.2 故障保护问题特殊

电容器装置的内部故障保护问题是自愈式电容器装置与非自愈式电容器装置最为关键的差别之一。首先,自愈式电容器的电容变化是由于元件自愈引起的,由于自愈带来的电容衰减很小,可以看成是无级变化,这与油浸式电容器是完全不一样的;其次,高压自愈式干式电容器装置保护的可靠性由安全容衰决定。

3.2.1 电容无级变化带来的问题分析

自愈式电容器在自愈过程中电容会不断变小,由于单次自愈导致的电容变化很小,可能会小到难以识别的程度,这对保护动作的可靠性有很大影响^[26-31]。首先,由于单次自愈电容变化很小,在整定值附近可能会停留很长时间,相当于电容器需要在保护整定对应的过电压下运行很长时间,几乎是长期的;其次,受保护回路电容出现对称故障的可能性比油浸式电容器大得多,这是因为单次自愈的电容变化很小,故障串段电压变化很小,再次绝缘击穿发生同一串联的概率很小,绝缘击穿的随机性远大于油浸式电容器。研究表明,第1个元件击穿后,故障串联段再次击穿的概率有较大幅度的增加,这对不平衡保护是极其有利的。对于自愈式电容器的保护,需要考虑因此带来的问题,比较可行的办法是增加绝缘裕度,增加多少,需要试验研究确定。

3.2.2 由电容器装置故障保护带来的安全容衰问题

继电保护需要靠电容器的电容变化来实现,自愈式电容器的电容衰减具有无级变化的特点,要达到继电保护动作值,可能需要较长时间。电容器组的保护整定值要根据元件允许的过电压来确定,允许的元件过电压对应一定的电容器单元的电容衰减(以下简称容衰)。在保护动作前电容器单元的容衰,就是安全容衰,安全容衰与电容器组的电气联接有关。典型的10 kV级开口三角电压保护和相电压差动保护需要的电容变化(容衰)见表3。

表3 10kV级电容器装置不平衡电压保护整定值计算
Table 3 Calculation of unbalanced voltage protection setting for 10kV capacitor device

装置型号	每相串并数	保护整定值同油浸式电容器	
		二次不平衡电压/V	电容器单元容衰/%
TBB10-1000/167-AKW	2串1并	8.0	15
TBB10-2000/334-AKW	2串1并	5.7	11
TBB10-3000/250-AKW	2串2并	3.8	15
TBB10-4000/334-AKW	2串2并	2.8	11
TBB10-5000/417-ACW	2串2并	8.0	15
TBB10-6000/334-ACW	2串3并	8.0	15
TBB10-8000/334-ACW	2串4并	6.0	23
TBB10-10000/417-ACW	2串4并	5.5	21

从表3可以看出,保护动作前最大的单元容衰需要在23%左右,考虑到安全系数1.5,电容器单元的安全容衰要求达到34.5%。也就是说,在破坏试验中,电容器单元的容衰要求达到34.5%以上且不能出现恶性故障。

4 结语

1)干式自愈式高电压电容器聚丙烯薄膜的电弱点通过自愈来剔除,而油浸式电容器聚丙烯薄膜

的电弱点通过浸油来弥补,这个技术路线的变化,是干式自愈式高电压电容器有别于油浸式电容器的主要特点。

2)相比油浸式电容器单元,自愈式电容器单元有以下技术特点:①损耗大,散热难;②对壳绝缘和层间绝缘相对困难;③电容器损耗可以预设。

3)元件膜层间的压强与圈数和卷绕张力成正比,在较内层,膜层间最大压强与元件外径和卷绕张力系数 k_2 成正比,与芯棒直径成反比。

4)建议 10 kV 级干式自愈式电容器装置采用分级绝缘,在设计结构上将系统绝缘水平交给绝缘平台。

5)干式自愈式高压电容器装置的内部故障保护困难。温度保护不可靠,过压力保护需要设计气道,难度很大;自愈式电容器的电容是无级变化的,电容器内部故障保护需要深入研究。容衰应与电容器内部故障保护配合,这就是高压自愈式电容器的安全容衰,通过破坏性试验验证安全容衰对电容器运行的安全性是否有足够的保障。

参考文献

- [1] 饶宏,周月宾,李巍巍,等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(1):1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [2] 李云丰,汤广福,贺之渊,等. 柔性直流输电系统高频稳定性分析及抑制策略(三):有源阻尼分频协调抑制策略[J]. 中国电机工程学报,2024,44(23):9392-9408.
LI Yunfeng, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Engineering high frequency stability analysis and suppression strategy of MMC-HVDC systems (Part III): Frequency division damping control coordinated suppression strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9392-9408.
- [3] 左强林,雷乔舒,严浩,等. 浅议直流支撑电容器中的空间电荷问题[J]. 电力电容器与无功补偿,2025,46(1):23-28.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, YAN Hao, et al. Discussion on space charge in DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 23-28.
- [4] 左强林,雷乔舒. 电容器不同介质结构直流和交流试验电压比值的理论研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2025,46(1):29-34.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Theoretical study on DC/AC test voltage ratio of different dielectric systems in capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 29-34.
- [5] 熊诗成,鲁军勇,郑宇锋,等. 金属化膜电容器寿命预测方法[J]. 高电压技术,2018,44(7):2378-2384.
XIONG Shicheng, LU Junyong, ZHENG Yufeng, et al. Lifetime prediction of metallized film capacitor based on particle filter[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2378-2384.
- [6] 唐庆祝,陈松,郭德良,等. 基于国产金属化膜的高储能密度脉冲电容器研制[J]. 电力电容器与无功补偿,2025,46(1):52-58.
TANG Qingzhu, CHEN Song, GUO Deliang, et al. Development of high energy storage density pulse capacitor based on localized metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 52-58.
- [7] 杜一鸣,潘亮,祝令瑜,等. 金属化膜电容器交流和直流电压劣化特性分析[J]. 电力工程技术,2020,39(6):151-157.
DU Yiming, PAN Liang, ZHU Lingyu, et al. Analysis of characteristics degraded of metallized film capacitors under AC/DC voltages[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 151-157.
- [8] 尹婷,严飞,王子建,等. 高压自愈式电容器典型交流工况下温度场分析及优化设计[J]. 高电压技术,2016,42(12):3996-4004.
YIN Ting, YAN Fei, WANG Zijian, etc. Temperature field analysis and optimization design of high-voltage self-healing capacitor at typical operating conditions in power system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3996-4004.
- [9] 李化,章妙. 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.
LI Hua, Zhang Miao. Study on theory and influence Factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 218-223.
- [10] VUILLERMET Y, CHADEBEC O, LUPIN J M, et al. Optimization of low - voltage metallized film capacitor geometry[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1569-1572.
- [11] 何晓靓,高琪,刘水平,等. 大容量柔性直流输电工程用直流支撑电容器技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(4):81-85.
HE Xiaoliang, GAO Qi, LIU Shuiping, et al. Study on DC support capacitor technology for high power flexible DC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 81-85.
- [12] 李化,易博思,李露,等. 直流支撑电容器用聚丙烯膜击穿和自愈特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(3):79-83.
LI Hua, YI Bosi, LI Lu, et al. Study on breakdown and self-healing properties of polypropylene film for DC-link capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 79-83.
- [13] Shunt power capacitors of the self-healing type for AC systems having a rated voltage above 1 000 V: IEC 63210—2021[S]. 2021.
- [14] KONG Z, DAI L, LIN F, et al. Study of temperature rise of metallized capacitors applied in repetitive pulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(4): 1100-1105.
- [15] EL-HUSSEINI M H, PASCAL V, GÉRARD R, et al. Thermal simulation for geometric optimization of metallized polypropylene film capacitors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(3): 713-718.

- [16]章妙. 金属化膜电容器自愈特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [17]电气绝缘用薄膜第2部分:试验方法:GB/T 13542. 2—2021[S]. 2021.
Plastic films for electrical purposes — Part 2: Methods of test:GB/T 13542. 2—2021[S]. 2021.
- [18]电气绝缘用薄膜第3部分:电容器用双轴定向聚丙烯薄膜:GB/T 13542. 3—2006[S]. 2006.
Film for electrical insulation — Part 3: Biaxially oriented poly-propylene films for capacitors:GB/T 13542. 3—2006[S]. 2006.
- [19]SE-HEE L, BYEONG-YOON L, HONG-KYU K, et al. Local heat source approximation technique for predicting temperature rise in power capacitors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1250-1253.
- [20]SARJEANT W J. Capacitors[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(5): 861-922.
- [21]电机工程手册 第29篇 电力电容器[M]. 北京:机械工业出版社,1978.
- [22]MACDONALD J R, SCHNEIDER M A, SCHALNAT M C, et al. Thermal modeling of high temperature power conversion capacitors[C]//2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). [S.l.]: IEEE, 2012: 256-259.
- [23]PENG B, LIN F C, LI H, et al. Calculation of electric field in safety film capacitors[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 2009, 16(3): 882-886.
- [24]标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器第1部分:总则:GB/T 11024. 1—2019[S]. 2019.
Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General:GB/T 11024. 1—2019[S]. 2019.
- [25]左强林,雷乔舒,钟少龙,等. 直流支撑电容器圆元件的散热模型与仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1):121-127.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, ZHONG Shaolong, et al. Study on heat dissipation model and simulation of circular element for DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 121-127.
- [26]陈磊,吴诚威,李澳,等. 基于电流监测和动态电阻分析的电容器组SF6断路器电寿命评估系统[J]. 高压电器, 2024, 60(1):55-62.
CHEN Lei, WU Chengwei, LI Ao, et al. Electrical endurance assessment system of SF6 circuit breaker for switching capacitor bank based on current monitoring and dynamic resistance analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1):55-62.
- [27]赵峰,杨和,李玲. 关合电容器组高频涌流对真空灭弧室绝缘特性的影响研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 169-176.
ZHAO Feng, YANG He, LI Ling. Research on impact of high frequency inrush current when making capacitor bank on insulation characteristic of vacuum interrupted[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 169-176.
- [28]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.
- [29]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.
- [30]刘斌,岳永刚,张庆如,等. 基于串联非线性电阻组合开关的补偿电容器组投切重燃过电压研究[J]. 高压电器, 2024, 60(8):183-192.
LIU Bin, YUE Yonggang, ZHANG Qingru, et al. Research on switching reignition over-voltage of compensation capacitor bank based on series nonlinear resistor combination switch[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 183-192.
- [31]张国豪,李化,林福昌,等. 金属化聚丙烯膜电容器自愈产气特性与保护技术[J]. 高压电器, 2024, 60(6):197-202.
ZHANG Guohao, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on self-healing gas generation characteristics and protection technology of metallized polypropylene film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 197-202.

作者简介:

赵彦军(1981—),男,高级工程师,长期从事电力电容器装置的技术工作。E-mail: 93434614@qq.com。

左强林(1967—),男,正高级工程师,长期从事电力电容器的技术工作。