

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.01.005

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

左强林, 雷乔舒
(无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177)

摘要: 本文从电容器介质结构的等效模型出发,利用交流电压和直流电压在复合介质结构中不同分配原理,推导出油浸式全膜电容器、膜纸复合电容器、干式金属化膜电容器的直交比,代入典型参数,得到了3种介质结构的直交比典型值及其与电容器压紧系数的关系,从理论上验证了膜纸复合电容器采用直交比为2及干式金属化膜电容器采用直交比为 $\sqrt{2}$ 的合理性,并提出了调整全膜电容器端子间交直流耐受电压的建议。
关键词: 介质结构;交流击穿电压;直流击穿电压;直交比;压紧系数

Theoretical Study on DC-AC Test Voltage Ratio of Different Dielectric Systems in Capacitor

ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu
(Wuxi Sun King Power Capacitor Co., Ltd, Jiangsu Wuxi 214177, China)

Abstract: Based on the equivalent model of dielectric structure and the voltage distribution principle of AC and DC voltage in composite dielectric structure, the DC/AC ratio of oil-immersed all-film capacitor, film-paper composite capacitor and dry metallized film capacitor is deduced. The typical value of the DC/AC ratio of the three dielectric structures and their relationship with compaction coefficient of capacitor are obtained by substituting the typical parameters. The rationality of using DC/AC ratio of 2 for all -film capacitor and DC/AC ratio of $\sqrt{2}$ for dry metallized film capacitor is verified theoretically, and the suggestion of adjusting AC/DC withstanding voltage between terminals of all-film capacitors is proposed.
Keywords: dielectric structure; AC breakdown voltage; DC breakdown voltage; DC/AC ratio; compaction coefficient

0 引言

关于电容器的交直流耐受电压问题,在世界范围内一直存在争议。电容器的主要标准对于端子间的交直流耐受电压规定都各不相同。为了叙述方便,本文把同一电介质结构电容器端子间要求的直流耐受电压与交流耐受电压的比值定义为直交比。并联电容器的国际标准^[1-2]IEC 60871—1 和国家标准 GB/T 11024.1^[3-4]对于端子间耐受电压的直交比一直是2倍,而串联电容器的国际标准^[5-6]IEC 60143—1:2004 和国家标准^[7-8]GB/T 6115.1—2008 在之前,针对不同的保护,直交比不一样,在1.417~1.462之间,从IEC 60143—1:2004^[6]和GB/T 6115.1—2008^[8]开始,取消了端子间交流试验的要求,由此可见一斑。美国标准IEEE 18^[9-10]的直交比达到2.15,是目前为止直交比最大的。国内外主要电容器标准对直交比的规定汇列于表1。

表1 标准对直流试验电压和交流试验电压规定
Table 1 DC and AC test voltage specified by standard

标准	直流试验 电压倍数	交流试验 电压倍数	直交比
IEC 60871: 2005 GB/T 11024.1—2010	4.3 U_N	2.15 U_N	2.0
IEC 60871: 2014 GB/T 11024.1—2019	4.0 U_N	2.0 U_N	2.0
IEC 60143: 1992 GB/T 6115—1998	1.7 U_{lim} (不低于4.3 U_N) 2.0 U_{lim} 1.9 U_{lim}	1.2 U_{lim} 1.4 U_{lim} 1.3 U_{lim}	1.417 1.429 1.462
IEC 61071: 2017 GB/T 17702—2021	2.15	1.5	1.43
IEC 61881—1: 2010 GB/T 25121—2018	2.15	1.5	1.43
IEEE 18—1980 IEEE 18—2012	4.3	2.0	2.15
IEC 63210: 2021	3.04	2.15	$\sqrt{2}$

收稿日期:2024-07-09
基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

并联电容器的端子间耐受电压的直交比为 2, 这个直交比的真正来源已经很难考证了。笔者曾看到相关文献中提到, 2 倍直交比最初来源于油纸绝缘结构的击穿电压统计数据。其他目前正在执行的并联电容器和交流滤波电容器标准^[11-17]中的直交比也都来源于表 1 标准规定。电机工程手册第 29 篇图 29.2-18^[21]从试验的角度列出了油纸绝缘结构的击穿电压统计数据, 显示电容器油浸渍纸短时击穿场强直流电压确实是交流的 2 倍, 但并未给出相关理论分析。

本文将针对目前电容器的 3 种介质结构——全膜电容器、膜纸复合电容器、干式金属化膜自愈式电容器, 从介质结构的交直流电压分配来分析论证不同介质结构的直交比, 希望引起业内有识之士对直交比这个问题的关注, 从试验上进一步论证本文分析的正确性和合理性。

1 直交比计算的相关参数

这里需要明确的是, 直交比是针对复合介质结构的, 单一介质结构不适用。单一介质直交比的研究相对比较简单, 如空气中的直交比为 $\sqrt{2}$, 这里不做讨论。

油浸式全膜电容器的介质结构可以看作是油-膜串联复合介质结构, 把多层一样材料的薄膜介质归算为同一介质。

膜纸复合电容器的介质结构相对比较复杂, 有 3 种电介质, 液体介质、电容器纸和聚丙烯薄膜。电容器纸在电容器内部是不能单独存在的, 其中的水分会被脱掉变成纤维素, 绝缘油会渗透到纤维素中, 形成油纸复合介质结构。膜纸复合电容器有 2 种介质结构等效模型: 模型 I, 2 种介质结构串联等效模型, 按照油纸复合介质+聚丙烯薄膜; 模型 II, 3 种介质结构串联等效模型, 油纸复合介质+绝缘油+聚丙烯薄膜。模型 I 是把油纸介质和绝缘油介质放在一起, 等效成油纸复合介质, 再与聚丙烯薄膜介质串联形成复合介质。这个等效模型的优点是计算简单, 容易理解。缺点是准确性差一点; 模型 II 是把油、油纸复合和聚丙烯薄膜等效成 3 种介质串联, 这个方法的优点是准确性高一点, 但是计算和推导比较复杂。本文按模型 I 来分析, 这样推导计算相对简单。

干式金属化膜电容器, 极间电介质主要是聚丙烯薄膜。对于这种介质结构来说, 如果不考虑聚丙烯薄膜的空隙率, 就是单一介质。考虑到聚丙烯薄膜会有空隙率的存在, 可以把基膜的空隙间隙作为其中的一种介质。

由此, 这 3 种不同的电容器介质结构的等效示意图可用图 1 来等效计算。

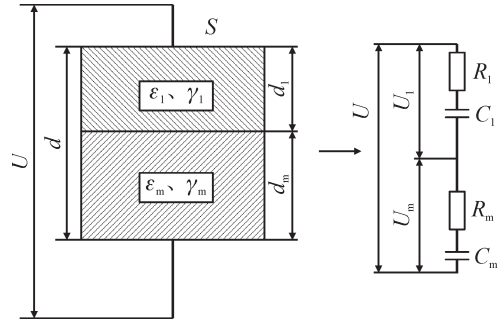


图1 电容器介质结构的等效示意图
Fig. 1 Equivalent schematic diagram of dielectric structure of capacitor

为便于理解 and 对比计算, 3 种介质结构直交比计算所涉及到的相关参数含义说明见表 2。

表2 直交比计算相关参数及含义
Table 2 Related parameters and meaning of DC/AC ratio calculation

参数符号	符号含义
U_a	施加在总的介质厚度上的交流电压
U_d	施加在总的介质厚度上的直流电压
U_{ay}	施加在绝缘油介质上的交流电压
U_{am}	施加在聚丙烯薄膜上的交流电压
U_{ayz}	施加在油纸复合介质上的交流电压
U_{dy}	施加在绝缘油介质上的直流电压
U_{dm}	施加在聚丙烯薄膜上的直流电压
U_{al}	施加在金属化膜空气间隙上的交流电压
ϵ_0	真空下的介电常数
ϵ_y	绝缘油的相对介电常数
ϵ_m	聚丙烯薄膜的相对介电常数
ϵ_{yz}	油纸复合绝缘的相对介电常数
ϵ_x	纤维素的相对介电常数, $\epsilon_x=6.8$
ϵ_r	膜纸复合相对介电常数
S	铝箔有效面积
d	极间介质的总厚度
d_y	绝缘油的等效厚度
d_m	聚丙烯薄膜的等效厚度
d_l	金属化膜空气间隙厚度
k	电容器设计的压紧系数
α_0	空隙率, $\alpha_0=d_l/d_m$
C_y	绝缘油上的等效电容, $C_y=\epsilon_0\epsilon_y S/d_y$
C_m	聚丙烯薄膜的等效电容, $C_m=\epsilon_0\epsilon_m S/d_m$
C_l	金属化膜中空气间隙等效电容
R_y	绝缘油的并联等效电阻
R_m	聚丙烯薄膜的并联等效电阻
γ_y	绝缘油的体积电阻率
γ_m	聚丙烯薄膜的体积电导率
γ_l	金属化膜空气间隙体积电阻率
$\tan \delta_y$	液体介质损耗角正切
$\tan \delta_m$	聚丙烯薄膜的损耗角正切
ω	测试角频率
ρ_x	纤维素的密度, $\rho_x=1.53 \text{ g/cm}^3$
ρ_z	电容器纸的密度, $\rho_z=1.2 \text{ g/cm}^3$
g	去水后的干纸重量与未干燥纸的重量之比, 约为 0.90~0.93

下文将针对全膜电容器、膜纸复合电容器、干式电容器的直交比进行推导计算和分析。

2 不同介质结构的直交比分析

2.1 全膜电容器介质结构

在交流电压下,对于全膜电容器,可以把端子间介质结构等效为绝缘油和聚丙烯薄膜两种介质串联,如图1所示。在图1中,把介质1看成绝缘油,相关下标用 y 代替,聚丙烯薄膜下标为 m 。根据电工原理^[21],介质结构的交流电压按电容反比例分配。由图1可得

$$U_{ay} = \frac{C_m}{C_y + C_m} U_a = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_y d_m}{\varepsilon_m d_y}} U_a \quad (1)$$

$$U_{am} = \frac{C_y}{C_y + C_m} U_a = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_m d_y}{\varepsilon_y d_m}} U_a \quad (2)$$

假设 k 为电容器设计的压紧系数,则有 $d_m/d=k$ 。考虑到 $d_y + d_m = d$,则 $d_y/d_m = (1-k)/k$ 。代入式(1)-(2)可得

$$U_{ay} = \frac{U_a}{1 + \frac{\varepsilon_y k}{\varepsilon_m (1-k)}} = \frac{U_a}{1 + \alpha_1} \quad (3)$$

$$U_{am} = \frac{U_a}{1 + \frac{\varepsilon_m (1-k)}{\varepsilon_y k}} = \frac{U_a}{1 + 1/\alpha_1} \quad (4)$$

式(3)-(4)中, $\alpha_1 = \frac{\varepsilon_y k}{\varepsilon_m (1-k)}$ 。在直流电压下,电导电流连续, $\gamma_m E_m = \gamma_y E_y$,电压按介质的等效并联电阻正比例分配。同理可得

$$U_{dy} = \frac{R_y}{R_y + R_m} U_d = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_y d_m}{\gamma_m d_y}} \quad (5)$$

$$U_{dm} = \frac{R_m}{R_y + R_m} U_d = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_m d_y}{\gamma_y d_m}} \quad (6)$$

根据式(5)-(6),令 $\alpha_2 = \frac{\gamma_y k}{\gamma_m (1-k)}$ 可得

$$U_{dy} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_y k}{\gamma_m (1-k)}} = \frac{U_d}{1 + \alpha_2} \quad (7)$$

$$U_{dm} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_m (1-k)}{\gamma_y k}} = \frac{U_d}{1 + 1/\alpha_2} \quad (8)$$

纯净的苝基甲苯等绝缘油,损耗角正切在 10^{-6} 数量级,电导率是很小的。但是由于生产过程中不

可避免会混入杂质,液体介质的损耗角正切一般在 10^{-3} 左右,下降了3个数量级。即使是聚丙烯薄膜,浸渍绝缘油后,其体积电阻率也会下降一个数量级,相当于其电导率上升了一个数量级。

根据电介质物理^[22],介质材料的损耗可以按下式计算:

$$\tan \delta_y = \frac{\gamma_y}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_y}, \quad \tan \delta_m = \frac{\gamma_m}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_m} \quad (9)$$

由式(9)可以得到: $\gamma_y = \omega \tan \delta_y \varepsilon_0 \varepsilon_y$, $\gamma_m = \omega \tan \delta_m \varepsilon_0 \varepsilon_m$,即

$$\frac{\gamma_y}{\gamma_m} = \frac{\varepsilon_y \tan \delta_y}{\varepsilon_m \tan \delta_m} \quad (10)$$

将式(10)代入式(7)-(8)可得

$$U_{dy} = \frac{U_d}{1 + \frac{\varepsilon_y \tan \delta_y k}{\varepsilon_m \tan \delta_m (1-k)}} = \frac{U_d}{1 + \frac{\alpha_1 \tan \delta_y}{\tan \delta_m}} \quad (11)$$

$$U_{dm} = \frac{U_d}{1 + \frac{\varepsilon_m \tan \delta_m (1-k)}{\varepsilon_y \tan \delta_y k}} = \frac{U_d}{1 + \frac{\tan \delta_m}{\alpha_1 \tan \delta_y}} \quad (12)$$

对比式(5)-(8)和式(11)-(12)可以得到聚丙烯薄膜和绝缘油的直交比分别为

$$\beta_y = \frac{U_{dy}}{U_{ay}} = \frac{1 + \alpha_1}{1 + \alpha_2} \times \frac{U_d}{U_a} = \frac{1 + \alpha_1}{\alpha_1 \tan \delta_y} \times \frac{U_d}{U_a} \quad (13)$$

$$\beta_m = \frac{U_{dm}}{U_{am}} = \frac{1 + 1/\alpha_1}{1 + 1/\alpha_2} \times \frac{U_d}{U_a} = \frac{1 + \alpha_1}{\alpha_1 + \tan \delta_y} \times \frac{U_d}{U_a} \quad (14)$$

代入相关数据,式(13)-(14)的计算结果见图2所示。图2中: $U_d = \sqrt{2} U_a$; $\tan \delta_m = 0.02\%$; $\tan \delta_y = 0.2\%$ 。

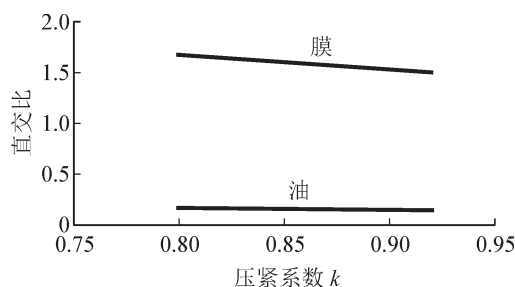


图2 全膜介质结构的直交比与压紧系数的关系
Fig. 2 Relationship between DC/AC ratio and compaction coefficient of all-film dielectric structure

从图2可以看出:

1)全膜电容器的介质结构中聚丙烯薄膜的直交比在1.5~1.7倍左右,这与文献[23]的试验结果基本吻合。绝缘油的直交比是聚丙烯薄膜的1/10左右。也就是说,在全膜电容器中,聚丙烯薄膜的耐受电压起主导作用;

2)聚丙烯薄膜和绝缘油的直交比随着压紧系数的增大呈下降趋势,但下降幅度不大。压紧系数越大,聚丙烯薄膜上分担的交流电压越大,直交比越小;

3)对于全膜电容器,如果直交比采用2倍,出厂试验时端子间试验采用直流电压可能会导致较高的击穿率。

2.2 膜纸复合介质结构

膜纸复合电容器可以用绝缘油和纸作为复合介质+聚丙烯薄膜的方式,等效示意图依然可以采用图1。其中介质1用油纸复合代替,相关下标用yz代替,介质2就是聚丙烯薄膜,下标带m, x_m 为膜占比, $x_m = d_m / (d_m + d_{yz})$,可得

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\varepsilon_x}{\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} - k \frac{\rho_z}{\rho_x} \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} - 1 \right)} \quad (15)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{yz} \varepsilon_m}{\varepsilon_{yz} x_m + \varepsilon_m (1 - x_m)} \quad (16)$$

$$U_{ayz} = \frac{C_m}{C_{yz} + C_m} U_a = \frac{U_a}{1 + \frac{\varepsilon_{yz} d_m}{\varepsilon_m d_{yz}}} \quad (17)$$

$$U_{am} = \frac{C_{yz}}{C_{yz} + C_m} U_a = \frac{U_a}{1 + \frac{\varepsilon_m d_{yz}}{\varepsilon_{yz} d_m}} \quad (18)$$

推导过程与全膜电容器相似,最终可得

$$U_{dyz} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_{yz} d_m}{\gamma_m d_{yz}}} \quad (19)$$

$$U_{dm} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_m d_{yz}}{\gamma_{yz} d_m}} \quad (20)$$

根据 $d_m / d_{yz} = \frac{k x_m}{1 - k x_m}$, 令 $\alpha_4 = \frac{\varepsilon_{yz} k x_m}{\varepsilon_m (1 - k x_m)}$,

$\alpha_5 = \frac{\gamma_{yz} k x_m}{\gamma_m (1 - k x_m)}$, 则

$$U_{dyz} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_{yz} d_m}{\gamma_m d_{yz}}} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_{yz} k x_m}{\gamma_m (1 - k x_m)}} = \frac{U_d}{1 + \alpha_5} \quad (21)$$

$$U_{dm} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_m d_{yz}}{\gamma_{yz} d_m}} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_m (1 - k x_m)}{\gamma_{yz} k x_m}} = \frac{U_d}{1 + 1/\alpha_4} \quad (22)$$

最终可得膜纸复合直交比公式为

$$\beta_{yz} = \frac{U_{dyz}}{U_{ayz}} = \frac{1 + \alpha_4}{1 + \alpha_5} \times \frac{U_d}{U_a} \quad (23)$$

$$\beta_m = \frac{U_{dm}}{U_{am}} = \frac{1 + \frac{1}{\alpha_5}}{1 + \frac{1}{\alpha_4}} \times \frac{U_d}{U_a} = \frac{\alpha_5}{\alpha_4} \beta_{yz} \quad (24)$$

将相关参数代入式(23)-(24)可以得到图3所示的曲线。

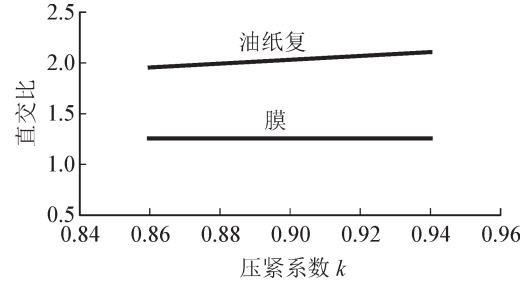


图3 膜纸复合介质结构直交比与压紧系数的关系
Fig. 3 Relationship between DC/AC ratio and compaction coefficient of film-paper dielectric structure

从图3可以看出,对于膜纸复合介质结构,油纸复合介质的直交比在2倍左右,与并联电容器标准规定的耐受电压直交比相当。说明对于膜纸复合电容器而言,端子间的直流试验电压,按照交流试验电压的2倍选取是合理的。随着压紧系数增大,油纸符合介质的直交比缓慢增大;在膜纸复合介质结构中,聚丙烯薄膜的直交比较小,在1.25倍左右,膜纸复合电容器的短时试验电压中,油纸复合介质起主导作用。

2.3 干式金属化膜介质结构

干式金属化膜电容器,极间电介质主要就是聚丙烯薄膜。对于这种介质结构来说,如果不考虑聚丙烯薄膜的空隙率,就是单一介质。考虑聚丙烯薄膜空隙率的存在,可以把基膜间的空隙作为介质1,这样 $\varepsilon_1 = 1$ 。介质2就是聚丙烯薄膜。参照图1,可得

$$U_{a1} = \frac{C_m}{C_1 + C_m} U_a = \frac{U_a}{C_1/C_m + 1} \quad (25)$$

$$U_{am} = \frac{C_1}{C_1 + C_m} U_a = \frac{U_a}{1 + C_m/C_1} \quad (26)$$

按照空隙率的定义,空隙率 $\alpha_0 = d_1/d_m$,代入式(25)-(26)可得

$$U_{a1} = \frac{U_a}{1 + \frac{d_m}{\varepsilon_m d_1}} = \frac{U_a}{1 + \frac{1}{\alpha_0 \varepsilon_m}} = \frac{\alpha_0 \varepsilon_m U_a}{1 + \alpha_0 \varepsilon_m} \quad (27)$$

$$U_{am} = \frac{U_a}{1 + \frac{\varepsilon_m d_1}{\varepsilon_1 d_m}} = \frac{U_a}{1 + \alpha_0 \varepsilon_m} \quad (28)$$

考虑到: $\gamma_1 = \omega \tan \delta_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1$, $\gamma_m = \omega \tan \delta_m \varepsilon_0 \varepsilon_m$, 则

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_m} = \frac{\varepsilon_1 \tan \delta_1}{\varepsilon_m \tan \delta_m} = \frac{\tan \delta_1}{\varepsilon_m \tan \delta_m} \quad (29)$$

通过推导可得

$$U_{d1} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_1 d_m}{\gamma_m d_1}} = \frac{U_d}{1 + \frac{\tan \delta_1}{\epsilon_m \tan \delta_m \alpha_0}} \quad (30)$$

$$U_{dm} = \frac{U_d}{1 + \frac{\gamma_m d_1}{\gamma_1 d_m}} = \frac{U_d}{1 + \frac{\alpha_0 \epsilon_m \tan \delta_1}{\tan \delta_m}} \quad (31)$$

对比式(27)–(28)和式(30)–(31)可得

$$\beta_1 = U_{d1}/U_{a1} = \frac{\alpha_0 \epsilon_m + 1}{\alpha_0 \epsilon_m + \frac{\tan \delta_1}{\tan \delta_m}} \times \frac{U_d}{U_a} \quad (32)$$

$$\beta_m = U_{dm}/U_{am} = \frac{1 + \alpha_0 \epsilon_m}{1 + \frac{\alpha_0 \epsilon_m \tan \delta_m}{\tan \delta_1}} \times \frac{U_d}{U_a} \quad (33)$$

将相关参数代入式(32)–(33)可以得到干式结构金属化膜介质结构的直交比见图4。其中, $U_d/U_a = \sqrt{2}$ 。

表3 不同介质结构的直交比计算公式汇总

Table 3 Summary of DC/AC ratio calculation formula of different dielectric structures

电容器介质结构	直交比	直交比典型值
全膜电容器	绝缘油: $\beta_y = \frac{U_{dy}}{U_{ay}} = \frac{1 + \alpha_1}{\alpha_1 \tan \delta_y} \times \frac{U_d}{U_a}$	0.16,
	聚丙烯薄膜: $\beta_m = \frac{U_{dm}}{U_{am}} = \frac{1 + \alpha_1}{\alpha_1 + \frac{\tan \delta_m}{\tan \delta_y}} \times \frac{U_d}{U_a}$	$\alpha_1 = \frac{\epsilon_y k}{\epsilon_m (1-k)}$, $k=0.8\sim 0.92$ 1.62, 薄膜耐压起主导作用
膜纸复合电容器	油纸复合: $\beta_{yz} = \frac{U_{dyz}}{U_{ayz}} = \frac{1 + \alpha_4}{1 + \alpha_5} \frac{U_d}{U_a}$	2.05, 油纸复合耐压起主导作用, $k=0.85\sim 0.94$
	聚丙烯薄膜: $\beta_m = \frac{U_{dm}}{U_{am}} = \frac{\alpha_5}{\alpha_4} \beta_{yz}$	$\alpha_4 = \frac{\epsilon_{yz} k x_m}{\epsilon_m (1 - k x_m)}$, $\alpha_5 = \frac{\gamma_{yz} k x_m}{\gamma_m (1 - k x_m)}$ 1.38
干式金属化膜电容器	气隙: $\beta_1 = \frac{\alpha_0 \epsilon_m + 1}{\alpha_0 \epsilon_m + \frac{\tan \delta_1}{\tan \delta_m}} \times \frac{U_d}{U_a}$	1.29 $\alpha_0 = 0.01\sim 0.09$
	聚丙烯薄膜: $\beta_m = U_{dm}/U_{am} = \frac{1 + \alpha_0 \epsilon_m}{1 + \frac{\alpha_0 \epsilon_m \tan \delta_m}{\tan \delta_1}} \times \frac{U_d}{U_a}$	1.42, 薄膜耐压主导作用

3 结语

1)全膜电容器的介质结构可以采用油+膜串联模型,聚丙烯薄膜和绝缘油上的直交比典型值分别是1.62和0.16,聚丙烯薄膜在油膜串联复合介质的电压耐受中起主导作用。全膜电容器端子间电压试验直交比采用2倍偏高,建议全膜电容器直交比按1.5~1.7倍选取。

2)对于膜纸复合电容器,也可以采用两种介质串联模型,即油纸复合介质+聚丙烯薄膜,理论计算

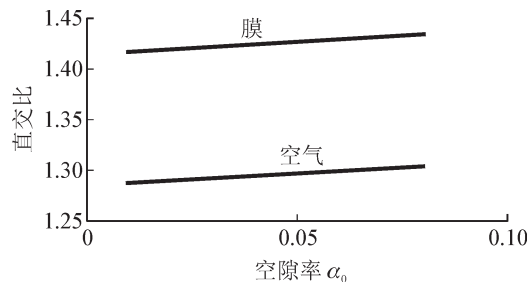


图4 干式金属化膜介质结构的直交比
Fig. 4 DC/AC ratio of dry metallized film dielectric structure

从图4可以看出,干式金属化膜介质结构中,聚丙烯薄膜的直交比在 $\sqrt{2}$ 左右,这与标准^[11-17]规定的交直流耐受电压倍数是一致的。在干式金属化膜介质结构中,聚丙烯薄膜起主导作用。随着空隙率增加,聚丙烯薄膜和气隙的直交比均呈轻微的上升趋势。

2.4 小结

不同介质结构的直交比计算公式及典型值汇列于表3。

的直交比分别是:油纸复合介质2.05和聚丙烯薄膜1.38,油纸复合介质对复合介质结构的电压耐受中起主导作用。

3)对于干式金属化膜电容器,可以采用空气+聚丙烯薄膜的等效串联模型,聚丙烯薄膜的直交比为1.42倍,与IEC 63210标准采用的 $\sqrt{2}$ 基本一致。聚丙烯薄膜在极间介质结构电压耐受中起主导作用。

参考文献

- [1] Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General: IEC 60871: 2005[S].2005.

- [2] Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General; IEC 60871: 2014[S]. 2014.
- [3] 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—2010[S]. 2010.
Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General;GB/T 11024. 1—2010[S]. 2010.
- [4] 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 1000 V—Part 1: General;GB/T 11024. 1—2019[S]. 2019.
- [5] Series capacitors for power systems — Part 1: General; IEC 60143: 1992[S]. 1992.
- [6] Series capacitors for power systems— Part 1: General; IEC 60143: 2004[S]. 2004.
- [7] 电力系统用串联电容器第1部分:GB/T 6115. 1—1998[S]. 1998.
Series capacitors for power systems — Part 1: General;GB/T 6115. 1—1998[S]. 1998.
- [8] 电力系统用串联电容器第1部分:GB/T 6115. 1—2008[S]. 2008.
Series capacitors for power systems—Part 1: General; GB/T 6115. 1—2008[S]. 2008.
- [9] IEEE standard for power capacitor: IEEE 18—1980[S]. 1980.
- [10] IEEE Standard for Power Capacitor: IEEE 18—2012[S]. 2012.
- [11] Capacitors for power electronics; IEC 61071: 2007[S]. 2007.
- [12] Capacitors for power electronics; IEC 61071: 2017[S]. 2017.
- [13] Railway applications—Rolling stock equipment—Capacitors for power electronics—Part 1: Paper/plastic film capacitors IEC 61881: 2010[S]. 2010.
- [14] 电力电子电容器:GB/T 17702—2013[S]. 2013.
Capacitors for electronics:GB/T 17702—2013[S]. 2013.
- [15] 电力电子电容器:GB/T 17702—2021[S]. 2021.
Capacitors for electronics:GB/T 17702—2021[S]. 2021.
- [16] 轨道交通机车车辆设备电力电子电容器第1部分:纸/塑料薄膜电容器:GB/T 25121—2018[S]. 2018.
Railway applications—Rolling stock equipment—Capacitors for power electronics—Part 1: Paper/plastic film capacitors GB/T 25121—2018[S]. 2018.
- [17] Shunt power capacitors of self-healing type for AC systems having a rated voltage above 1 000 V: IEC 63210: 2021[S]. 2021.
- [18] 高压电力系统用并联电容器及交流滤波电容器:GB/T 20994—2007[S]. 2007.
Shunt capacitors and AC filter capacitors for HVDC transmission systems:GB/T 20994—2007[S]. 2007.
- [19] 高压并联电容器使用技术条件:DL/T 840—2003[S]. 2003.
Specification of high-voltage shunt capacitors for service: DL/T 840—2003[S]. 2003.
- [20] 高压并联电容器使用技术条件:DL/T 840—2016[S]. 2016.
Specification of high-voltage shunt capacitors for service: DL/T 840—2016[S]. 2016.
- [21] 电机工程手册 第29篇 电力电容器(试用本)[M]. 机械工业出版社, 1980.
- [22] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [23] 李兆林, 陈松, 冯春林. 电容器介质直流、交流击穿电压值的对比研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(2): 38-42.
LI Zhaolin, CHEN Song, FENG Chunlin. Comparison study on AC and DC breakdown voltage ratio of power capacitor dielectric[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation. 2011, 32(2): 38-42.

作者简介:

左强林(1967—),男,正高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail:zuoql@sunking-tech.com。

雷乔舒(1979—),女,高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail:leiqs@sunking-tech.com。