

# 我国高压电容器几个关键问题的研究

倪学锋<sup>1</sup>, 贾华<sup>2</sup>, 赵倩<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074; 2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

**摘要:** 经过近 30 年的发展,我国高压电容器的设计研发、生产工艺和技术装备都已处于国际先进水平,其产能及年销售量更是多年来雄踞世界第一。然而,在此背景下仍有几个关键问题,如设计场强限值、内部熔丝下限试验电压、极间局部放电等,长期处于争论不休的状态。本文通过对聚丙烯薄膜电气强度试验、电容器内部熔丝的隔离试验和极间局部放电的研究分析得出:不同运行工况及种类的电容器应有不同的场强设计限值,对于高压并联电容器,57 kV/mm 的场强限值目前来看是适宜的;内部熔丝选取过低的下限电压值对电容器安全可靠运行不利,内部熔丝隔离试验的下限电压值以不低于  $0.6U_{Nc}$  为宜;电容器绝缘介质的缺陷可以通过极间耐压试验检出,局部放电试验并不能起到提高电容器运行可靠性的作用等结论,供业内技术人员参考,以促进高压电容器的发展。

**关键词:** 高压电容器;聚丙烯薄膜;场强限值;内部熔丝;局部放电;分子键能

## Research on Several Key Issues of High-voltage Capacitors in China

NI Xuefeng<sup>1</sup>, JIA Hua<sup>2</sup>, ZHAO Qian<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** After nearly 30 years of development, the design, development, production technology and technical facilities of high-voltage capacitors in China have been at the international advanced level, and its production capacity and annual sales have ranked first in the world for years. However, in this context, still several such key issues as the design field strength limit, the lower limit of the internal fuse test voltage and the partial discharge between the capacitor electrodes have been in a state of debate for a long time. In this paper, it is concluded through the research and analysis of the electrical strength test of polypropylene film, the disconnecting test on internal fuses of the capacitor and the partial discharge between the electrodes that capacitors with different operating conditions and types shall have different field strength design limits. And for high-voltage shunt capacitors, the field strength limit of 57 kV/mm is currently appropriate; the selection of the lower voltage limit of the internal fuse is not conducive to the safe and reliable operation of the capacitor, the lower voltage limit of the internal fuse disconnecting testis is suggested not less than  $0.6U_{Nc}$ ; the defect of the capacitor insulation dielectric can be detected by the voltage test between electrodes, and the partial discharge test can not play a role in improving the operational reliability of the capacitor. The conclusion is used for the reference of technical persons in the industry to promote the development of high-voltage capacitors.

**Keywords:** high-voltage capacitor; polypropylene film; field strength limit; internal fuse; partial discharge; molecular bond energy

## 0 引言

1996 年起我国开展了城网和农网改造项目,形

成了巨大的输变电设备市场,从此输变电设备的制造技术进入了快速发展阶段。到本世纪初,生产装备及生产技术进一步更新换代,高压电容器行业亦

是如此,一直保持国际领先水平,年生产容量和销售量已雄踞世界第一近 20 年了<sup>[1]</sup>。但也正因为行业发展迅猛,致使一些问题的研究没有及时跟进,如电容器的设计场强限值问题、电容器的极间局部放电问题等等,从而困扰着行业技术的发展。本文就这些问题进行了针对性的研究,并在此基础上提出了一些观点,或对电力电容器行业的发展有一定的参考价值。

1 高压电容器的场强限值问题

20 世纪 90 年代初,我国开始了全膜高压电容器的研制和生产,但当时的市场上,膜纸复合绝缘的电容器仍占绝大多数。1996 年我国启动城市电网和农网改造工程,电容器市场迅速扩大,产品也迅速由膜纸复合绝缘转变为以全膜为主,这种快速转换使生产的各个环节出现研究不足的情况,其结果是产品故障率居高不下<sup>[1]</sup>。

鉴于彼时产品质量不佳的情况,电力系统于 1997 年成立了“全国无功补偿装置专家工作组”,在工作组的领导下开始有针对性地展开研究工作。其中控制电容器故障率的主要措施之一就是限制电容器的设计场强,提出全膜电容器的设计场强(压紧系数  $k=1$  时)不超过 57 kV/mm。采取此措施后,经过生产企业对全膜电容器的设计生产不断改进完善,产品质量得到了大幅度的提高,使我国电容器的运行可靠性在较短时间内达到了国际先进水平。

目前高压电容器运行可靠性普遍很高,许多生产企业及用户认为电容器设计场强限值 57 kV/mm 偏低,过度牺牲了经济性,要求提高场强限值。这一诉求是否合理,本文从试验和应用两个方面进行了研究。

1.1 击穿场强试验验证

设计场强限值( $E_j$ )不超过 57 kV/mm 是依据我国高压并联电容器的使用条件和国内的生产条件确定的。高压并联电容器的工作条件是能够在  $1.0 U_N \sim 1.1 U_N$  下连续运行<sup>[2]</sup>,在运行中可能出现的最高过电压(不含多相开关重燃)一般不超过  $2.0 U_N$ ,故标准中规定的电容器端子间绝缘耐受电压为  $2.15 U_N$ ,此时对应的最高许用场强( $E_s$ )为 122.55 kV/mm。

本文采用 50 点电极法并施加交流电压击穿的方式,对国内和国外不同厂家的电容器用聚丙烯薄膜进行电气强度试验<sup>[3]</sup>,除去最大值和最小值各 5 个点后,统计剩余 40 点的击穿场强均值( $E_1$ ),以及接近最低值的 20 个点的次低击穿场强均值( $E_2$ ),分

别计算  $E_1$ 、 $E_2$  与  $2.15 U_N$  对应场强( $E_s$ )的比值,试验结果见表 1。

表 1 元件法施加交流电压的薄膜介电强度试验结果  
Table 1 Dielectric strength test results of film applying AC voltage by the element method

| 薄膜<br>厂家 | 膜厚/<br>$\mu\text{m}$ | 40 点击穿场<br>强均值       | 次低击穿场<br>强均值         | $(E_s/E_1)/(E_s/E_2)/$ |      |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------|
|          |                      | $E_1/(\text{kV/mm})$ | $E_2/(\text{kV/mm})$ | %                      | %    |
| 1*(国外)   | 12                   | 225                  | 190                  | 54.5                   | 64.5 |
| 2*(国内)   | 12                   | 198                  | 170                  | 61.9                   | 72.1 |
| 3*(国内)   | 14                   | 194                  | 169                  | 63.2                   | 72.5 |

从表 1 中不难看出,如果以  $E_1$  为依据去评估目前的设计场强限值( $E_j$ ), $E_j$  是明显偏低的,但以  $E_2$  为依据去评估  $E_j$ ,则  $E_j$  偏低幅度并不大。若电容器的最高许用场强限制在不超过击穿场强的 80%,此时  $E_j$  与  $E_2$  间的裕度国产薄膜小于 10%,国外薄膜在 15%左右,绝缘裕度已接近极限<sup>[4]</sup>。

笔者认为,以薄膜的次低击穿场强均值为依据进行比较是合理的,因为最低击穿值通常由薄膜缺陷重合造成,这部分元件可通过元件耐压筛除掉,但次低击穿值这部分元件既无法通过元件耐压筛除,也很难通过  $2.15 U_N$  的电容器极间电压试验筛除。根据前面的分析,这部分产品进入电力系统后,由于绝缘裕度并不大,运行过程中存在击穿的风险,将给设备的正常工作带来隐患。

1.2 涉及场强限值的高压电容器应用分析

经调研,目前涉及 57 kV/mm 场强限值的高压电容器主要包括并联电容器、交流滤波电容器和串联电容器这 3 种类型。

在我国,并联电容器的额定电压是以系统标称电压的 1.05 倍为基准的,而持续运行最高电压却是 1.1 倍的标称电压,持续运行最高电压比电容器的额定电压高 4.76%,即运行还将占据电容器 4.76% 的绝缘裕度,因此,对并联电容器规定 57 kV/mm 的场强限值是适宜的。

虽然交流滤波电容器也是并联在电力系统中,并能部分地起到无功补偿的作用,但其额定电压取值和使用工况与并联电容器完全不同。交流滤波电容器的额定电压通常是基波与各次谐波峰值之和<sup>[5]</sup>,即:

$$u_N = u_1 + \sum_{i=2}^N u_i$$

(1)

由于不可能发生各次谐波峰值重合的现象,因此交流滤波电容器的持续运行电压总是低于电容器的额定电压,可以说滤波电容器额定电压选择上

为电容器绝缘留有一定的裕度。

对于串联电容器,在设计时需要元件的冗余配置,即电容器内部的一个或几个元件损坏,整个电容器组仍然可以正常运行,因此正常状态下电容器的绝缘裕度是足够高的。另外,串联电容器装置配备有较为齐全的保护措施,可以保证电容器在运行过程中避免遭受系统不同类型过电压的损害。鉴于串联电容器不同厂家绝缘薄膜性能有所差异,不宜对电容器的设计场强做出具体数值的限制<sup>[6]</sup>。

综上,笔者认为 57 kV/mm 的设计场强限值对并联电容器是适用的,而对于交流滤波或串联电容器上则偏保守。从上面的分析也可看出,电力电容器的场强值选择与产品的运行工况、过电压特征及参数选择方式密切相关,以某个场强限值要求不同类型的高压电容器并不是科学的做法,如其它类型的电容器需提出场强限值,应在系统试验验证条件下给出,以保证电容器的运行可靠性。

## 2 内部熔丝熔断特性的选择

内部熔丝是油浸式电容器内部故障的主要保护措施,对电容器的安全运行至关重要。其性能考核分内部熔丝放电试验、短路放电试验和隔离试验<sup>[2,7]</sup>。

### 2.1 内部熔丝的放电试验

该试验为例行试验,在  $1.7 U_N$  的直流电压下进行短路放电<sup>[7]</sup>。大量的试验研究表明,在此电压下的放电不会对内部熔丝本体造成损伤,只是偶见焊接部位有变化。这个电压对应于  $1.2 U_N$  交流电压的峰值,因此笔者认为该试验是以检查内部熔丝的焊接质量而设计的。而型式试验中的短路放电在  $2.5 U_N$  电压下进行,并且是 10 min 内进行 5 次<sup>[2]</sup>,要求内部熔丝应无损伤,这个试验显然有热因素影响的考虑。如果在  $2.5 U_N$  下 5 次放电内部熔丝不损坏,则更不会对  $1.7 U_N$  下的 1 次放电损伤,这也进一步验证了前面的观点。显然在例行试验的  $1.7 U_N$  放电后不应只测量电容值,还应该测量全电压下损耗角正切值  $\tan\delta$ ,因为内部熔丝焊接质量的不佳可以通过测量  $\tan\delta$  反映出来。因此例行试验中内部熔丝放电试验点位的设计,是应放在电容值和损耗正切值测量之前的。

### 2.2 内部熔丝的隔离试验

近几年来发生过多次电容器在运行中发生元件击穿,内部熔丝却未动作的情况,而内部熔丝的

试验结果却满足标准及技术规范要求,甚至下限试验电压还比标准要求值低。更有甚者,有的生产厂家将内部熔丝的下限隔离试验电压做到  $0.3 U_{Ne}$ ,这样的做法会对行业的技术发展带来不利影响,应该予以分析和纠正。

GB/T11024.4—2019 规定:当元件在  $u_1$  至  $u_2$  电压范围内发生电击穿时,熔丝应能隔离故障元件,其中  $u_1=0.9 \times \sqrt{2} U_{Ne}$ ,  $u_2=2.5 \times \sqrt{2} U_{Ne}$  (对于交流滤波电容器,  $u_2=2.2 \times \sqrt{2} U_{Ne}$ ) 分别为故障瞬间元件电压的最低与最高(瞬间)值。其中,电压最高值是防止内部熔丝接受能量过大不能及时熄弧而对电容器造成破坏,最低值是防止电压过低而熔丝不能熔断。标准中对交流滤波电容器的最高电压做了调整而未调整最低电压,导致生产厂家自行规定最低值,甚至于下调到了  $0.3 U_{Ne}$  就是典型的例子。

理论上,要保证内部熔丝良好开断,注入的能量  $W_1$  必须满足以下条件:

$$W_1 \geq Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (2)$$

式中:  $Q_1$  为内部熔丝由试验室温上升到其液化所需能量;  $Q_2$  为内部熔丝液化到汽化所需能量;  $Q_3$  为内部熔丝汽化所需能量;  $Q_4$  为内部熔丝周围物质所吸收的能量。

而要保证电容器非隔离元件的内部熔丝不发生熔断,则元件注入的能量  $W_2$  应不超过内部熔丝液化所需的能量  $Q_1$  与周围物质吸收能量  $Q_4$  之和,即满足

$$W_2 = \frac{1}{2} C_{Ne} \cdot u_{e \max}^2 \leq Q_1 + Q_4 < W_1 \quad (3)$$

式中:  $C_{Ne}$  为元件的额定电容;  $u_{e \max}$  为元件上可能出现的最高电压值。

对于标准规定的隔离试验,如果记元件的并联数为  $M$ ,隔离元件下限电压时注入的能量为  $W_3$ ,则有:

$$W_3 = \frac{1}{2} (M-1) C_{Ne} u_1^2 > W_1 \quad (4)$$

当  $u_1$  调低至  $0.3 U_{Ne}$  时仍要保证内部熔丝熔断,则有

$$W_3 = \frac{1}{2} (M-1) C_{Ne} (0.3 \sqrt{2} U_{Ne})^2 = 0.18 \times \left[ \frac{1}{2} (M-1) C_{Ne} \cdot U_{Ne}^2 \right] > W_1 \quad (5)$$

而对于非隔离元件的内部熔丝,应能承受在  $2.5 U_N$  的峰值电压下发生电容器组外部对单元的短

路故障引起的电流,此时元件注入的能量  $W_4$  应满足:

$$W_4 = \frac{1}{2} C_{Ne} (2.5\sqrt{2}U_{Ne})^2 = 12.5 \times \left( \frac{1}{2} C_{Ne} U_{Ne}^2 \right) < W_1 \quad (6)$$

比较(5)和(6)两式,不难得出

$$0.18(M-1) > 12.5 \quad (7)$$

这样可以计算出  $M \geq 70$ ,即在  $0.3 U_{Ne}$  下内部熔丝要完成熔断,则电容器一个串段至少需要 70 个元件并联,这显然是不现实的。

由此方法可计算出隔离试验不同下限电压与单个串联段元件并联要求数之间的关系,具体见表 2。

表 2 不同下限电压与元件并联要求数的关系  
Table 2 Relationship between different lower limit voltages and the parallel requirement number of elements

| 下限电压  | 0.3              | 0.4              | 0.5              | 0.6              | 0.7              |
|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|       | $\sqrt{2}U_{Ne}$ | $\sqrt{2}U_{Ne}$ | $\sqrt{2}U_{Ne}$ | $\sqrt{2}U_{Ne}$ | $\sqrt{2}U_{Ne}$ |
| 元件并联数 | 70               | 40               | 26               | 19               | 14               |

由表 2 不难看出,在没有特殊设计及工艺保障,并且认为 GB11024.4 规定的隔离试验上限电压值合适的条件下,隔离试验电压下限值不应低于  $0.6\sqrt{2}U_{Ne}$ ,能将此条件下的内部熔丝做好,也就足够用了。

### 3 高压电容器极间局部放电问题

高压电容器的极间局部放电一直是业内关注和争论较多的问题,通常认为,电容器中的局部放电是使工作在交流和脉冲电压下的电气绝缘破坏的主要因素之一,可能发生在介质中的微小气隙中或发生在极板边缘<sup>[8-9]</sup>。这一理论被广泛应用于局部放电的分析和试验中,但本文另辟蹊径,尝试从分子键能的角度对电容器局部放电的问题进行分析。

等规立体结构的聚丙烯薄膜是高压电容器极间绝缘的主要介质材料。聚丙烯的分子简式见图 1<sup>[8]</sup>,可见在甲基及亚甲基为 C—H 键,这两种 C—H 键的断键能分别为 441 kJ/mol 和 445 kJ/mol,其 C—C 键的断键能为 354 kJ/mol<sup>[10-11]</sup>。

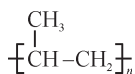


图 1 聚丙烯的分子结构简式

Fig. 1 Molecular structure skeleton symbol of polypropylene

电容器极间产生导电粒子时,在电场的作用下导电粒子将会被加速并获得能量,当这个能量足够大时就会切断绝缘材料的键链,使绝缘发生破坏,随之产生氢或者其他气体,以及各种碳化物<sup>[8]</sup>。以

聚丙烯中最多的电离产物氢离子  $H^+$  为例,则在电场作用下的迁移速度  $V_{dr}$  满足<sup>[12]</sup>:

$$V_{dr} = \mu E \quad (8)$$

式中:  $\mu$  为离子迁移率 ( $m^2/V \cdot s$ );  $E$  为离子所处电场 ( $V/m$ )。

文献[12]给出的氢离子  $H^+$  的迁移率为  $5.7 \times 10^{-2} m^2/V \cdot s$ ,为便于计算,取电容器工作场强为 50 MV/m。在该场强下,计算出  $H^+$  迁移速度为  $V_{dr} = 2.85 \times 10^6 m/s$ 。

单个氢离子  $H^+$  的质量  $m = 1.673 \times 10^{-27} kg$ ,则  $H^+$  在电场作用下获得的动能  $E_1$  为<sup>[13]</sup>:

$$E_1 = \frac{1}{2} m V_{dr}^2 = 6.795 \times 10^{-14} J \quad (9)$$

氢离子  $H^+$  的摩尔质量为  $1.008 \times 10^{-3} kg/mol$ ,则每摩尔  $H^+$  的能量  $E_2$  为:

$$E_2 = 4.091 \times 10^7 kJ/mol \quad (10)$$

将式(10)的  $E_2$  与 C—H 键的断键能比较后不难发现,在电容器工作场强下,导电粒子在电容器设计场强中所获得的动能远大于聚丙烯分子键的断键能量。这表明如果电容器极间形成局部放电产生导电粒子,这些导电粒子会在瞬间造成绝缘体键链的断裂瓦解——击穿<sup>[4]</sup>。这也是高压电容器的绝缘耐受试验的持续时间为 10 s 的原因所在。因为一旦有绝缘缺陷,10 s 就足以发展成击穿而检出有缺陷的电容器。目前电容器运行可靠率仍很高的事实,也说明在运行过电压作用下端部并无局部放电产生,因此笔者认为高压电容器进行极间局部放电试验是无意义的。

### 4 结语

1) 高压电容器的设计场强限值是与运行工况及种类相关联的,不同的电容器应有不同的场强设计限值。

2) 对于高压并联电容器,运行条件下绝缘裕度并不大,57 kV/mm 的场强限值目前来看是适宜的。

3) 内部熔丝选取过低的下限电压值对电容器安全可靠运行不利,内部熔丝隔离试验的下限电压值以不低于  $0.6U_{Ne}$  为宜。

4) 电容器一旦出现局部放电将很快发展为击穿,其绝缘介质的缺陷可以通过极间耐压试验检出,极间局部放电试验并不能起到提高电容器的运行可靠性的作用。

### 参考文献

- [1] 宋森,电力行业电力电容器标准化技术委员会. 并联电容器装置技术及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2011.

[2] 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.

[3] 电气绝缘用薄膜第2部分:试验方法:GB/T 13542. 2—2009[S]. 2009.  
Film for electrical insulation-Part 2: Methods of test:GB/T 13542. 2—2009[S]. 2009.

[4] 周泽存. 高电压技术[M]. 第3版. 北京:水利电力出版社, 1988.

[5] 高压直流输电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.

[6] 戴朝波,王崇祐. 串联电容补偿装置技术与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2019.

[7] 标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器第4部分:内部熔丝:GB/T 11024. 4—2019[S]. 2019.  
Shunt capacitors for a. c power systems having a rated voltage above 1 000 V- Part 4: Internal fuses:GB/T 11024. 4—2019[S]. 2019.

[8] (美)Ramasamy Natarajan,徐政译. 电力电容器[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[9] 谢恒堃. 电气绝缘结构设计原理(下)[M]. 北京:机械工业出版社,1993.

[10] 乔金樑,张师军. 聚丙烯和聚丁烯树脂及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

[11] 王维,王琦. 聚丙烯防老化编织布之人工老化和大气老化性能对比研究[J]. 土工基础,2018,32(4):440-444.  
WANG Wei, WANG Qi. Comparison the artificial and natural aging tests of woven polypropylene[J]. Soil Engineering and Foundation, 2018, 32(4): 440-444.

[12] HorstStöcker. 物理手册[M]. 吴锡真译. 北京:北京大学出版社,2004.

[13] 杨尔滨. 工程电磁场基础与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

作者简介:

倪学锋(1960—),男,正高级工程师,主要从事高电压工程、无功补偿技术专业研究和技术管理工作。

贾华(1975—),男,正高级工程师,主要从事电容器的设计、工艺、试验研究和行业管理工作。

《电力电容器与无功补偿》2024 年 4 期广告单位

|                 |      |                        |       |
|-----------------|------|------------------------|-------|
| 1 上海思源电力电容器有限公司 | 封面   | 11 安徽广正电气科技有限公司        | 前插 7  |
| 2 合容电气股份有限公司    | 封二   | 12 深圳市三和电力科技有限公司       | 前插 8  |
| 3 温州市凯泰特种电器有限公司 | 封三   | 13 杭州精诚电力设备有限公司        | 前插 9  |
| 4 山东哈大电气有限公司    | 封底   | 14 新程(辽宁)电力电容器科技有限公司   | 前插 10 |
| 5 深圳市紫宸激光设备有限公司 | 前插 1 | 15 陕西凯瑞宏星电器有限公司        | 前插 11 |
| 6 日新电机(无锡)有限公司  | 前插 2 | 16 西安金叶电力科技有限公司        | 前插 12 |
| 7 桂林明富金属股份有限公司  | 前插 3 | 17 山东海源泰和电气有限公司        | 前插 13 |
| 8 陕西泰普瑞电工技术有限公司 | 前插 4 | 18 7月6日国际合作节           | 前插 14 |
| 9 赛晶科技集团有限公司    | 前插 5 | 19 西安高压电器研究院股份有限公司(业务) | 前插 15 |
| 10 辽宁芯峻电气有限公司   | 前插 6 | 20 西安唯实输配电技术有限公司       | 前插 16 |