

直流支撑电容器中的电动力危害分析及验证

左强林^{1,2}, 吴锦鹏²

(1. 无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177; 2. 嘉善赛晶电容器有限公司, 浙江 嘉善 314112)

摘要: 本文根据镜像原理和洛伦兹定律分析了直流支撑电容器中的汇流排在大电流通过时, 会同时受到镜像力和相斥力的作用。依据上述原理建立的汇流排镜像力计算模型基本正确, 镜像力虽然是一个振荡衰减力, 但实际上没有负向力。本文建立的分段式多节点汇流排受力计算模型, 将相邻两个汇流点之间的汇流排作为固定梁均布受力模型, 成功解决了汇流排的受力计算问题。计算结果与试验结果基本吻合, 说明受力计算模型基本正确, 可以推广。计算和试验结果表明, 增加汇流点的数量和增加汇流排的截面惯性矩, 对于减小汇流排的变形, 具有决定性意义; 汇流排的间距及其与盖子间的距离, 对汇流排受到的镜像力和相斥力的比值, 具有决定性的影响。汇流排上汇流片的焊接点受到的反力达到数十甚至数百千牛, 汇流排的钎焊点难以承受这么大的电动力; 电容器的冲击放电试验表明, 汇流排受到的电动力很大, 对汇流排和汇流片都具有极大的破坏性, 甚至把汇流片撕裂, 要引起高度重视。

关键词: 直流支撑电容器; 电动力; 汇流排; 危害; 验证

Analysis and Verification of Electrodynmic Hazards in DC-link Capacitors

ZUO Qianglin^{1,2}, WU Jinpeng²

(1. Wuxi Sinking Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177, China; 2. Jiashan Sinking Power Electronic Capacitor Co., Ltd., Zhejiang Jiashan 314112, China)

Abstract: In this paper, the mirror principle and Lorentz's law are used to analyze that the busbar in the DC-link capacitor simultaneously experiences both the mirror force and the repulsive force when subjected to high current flow. The calculation model of the bus mirror force, which is set up based on the above principle, is basically correct. Although the mirror force is an oscillating attenuation force, in fact, there is no negative force. The segmented multi-node busbar force calculation model set up in this paper takes the busbars between two adjacent convergence points as the uniform force model of fixed beams, successfully solving the force calculation problem of the busbars. The calculation results are basically consistent with the test results, indicating that the force calculation model is basically correct and can be widely applied. The calculation and test results show that increasing the number of convergence points and the cross-sectional moment of inertia of the busbar are decisive for reducing the deformation of the busbar. The spacing of the busbars and their distance to the cover have a decisive influence on the ratio of the mirror force to the repulsive force acting on the busbars. The reaction force at the welding points of the busbars on the busbars can reach tens or even hundreds of kN, and the brazing points of the busbars are difficult to withstand such a large electromagnetic force. The impulse discharge test of capacitors shows that the busbar is subjected to a substantial electrodynamic force, posing significant destructive risks to both the busbar and the busbar laminations. In extreme cases, the laminations can even be torn a part, necessitating high attention to this issue.

Keywords: DC-link capacitor; electrodynamic force; convergence; hazard; verification

收稿日期:2025-11-14; 修回日期:2025-12-09

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

Project Supported by National Key R & D Program of China(2021YFB 2401504)。

0 引言

随着柔性直流输电技术的发展,作为柔直工程关键器件之一的直流支撑电容器(以下简称电容器),其技术水平备受关注。首先是自愈性能和寿命研究^[1-5],其次是元件中膜层间压强研究^[6-9],最后是热性能及温度仿真^[10-17]等。由于电容器的体积比较大,电容器中导线的载流量较大,导线的电动力问题就不可避免,特别是与电容器接线端子相连接的部分。根据标准 GB/T 17702^[18](等同采用 IEC 61071^[19])的规定,电容器需要通过 1.1 倍最大冲击电流的放电试验考验。这就是直流支撑电容器中最为突出的电动力问题。关于电动力的研究,文献[20]分析了电容器接线端子在冲击放电过程中受到的机械力问题;文献[21]研究了电容器中的电场力的阶跃响应问题;文献[22]研究了双向线性力马达力阶跃响应;电水锤效应^[23-26]也属于电动力。但由于干式电容器中没有油,不存在电水锤效应。

电容器心子的典型结构之一如图 1 所示。图 1 中,心子侧面(对应着元件端面)的导流导体,将元件的电流汇集到心子顶部的汇流排,这部分汇流导体称为纵向汇流片(以下简称汇流片)。汇流片每侧共有 N 片,从右到左分别为 1 到 N 。心子顶部有 2 根汇流排, N 片汇流片将元件流过的电流,分别汇流到两根汇流排,通过端子将电流引出。因此,汇流排上的电流,经过端子引出后,就不再有汇流问题。汇流片的汇流分析,参见文献[17],本文不再分析。本文分析心子顶部的汇流排的电动力危害,提出解决办法。

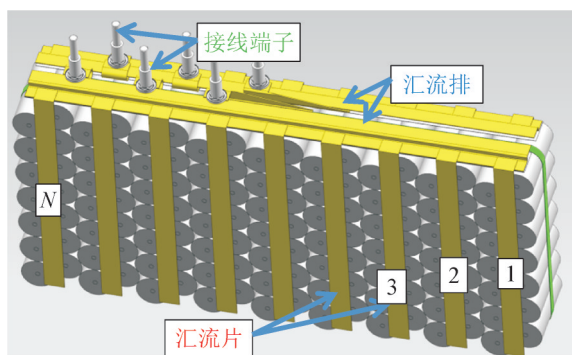


图1 电容器心子的典型结构
Fig. 1 Typical structure of capacitor core

图 1 中,心子的上方有一个用非导磁金属制成的盖。根据电磁场理论^[27],汇流排受到的电动力有两个:一个是汇流排与其通过金属盖子产生的镜像电流之间的电动力(以下简称镜像力)。由于是镜

像,两者的电流大小相等,方向相同。根据左手定则,两根平行导线受到的电动力为同向相吸,汇流排受到向盖子方向的力;另一个是分别与电容器两个极板连接的两根平行汇流排之间的电动力,两根汇流排的电流异向,异向相斥(以下简称相斥力)。也就是说,两根汇流排还同时受到推向箱壳的相斥力。汇流排受到的镜像力和相斥力,就是本文的研究对象。下文将对这两个力做具体的计算分析。

1 汇流排上的电动力分析

1.1 汇流排的镜像力分析

根据电容器的基本结构,可以得到图 1 中汇流排的镜像力模型,如图 2 所示。图 2 中,虚线部分为汇流排的镜像。根据镜像原理,汇流排的镜像电流与汇流排电流大小相等,方向相同。汇流排的镜像力方向向上。

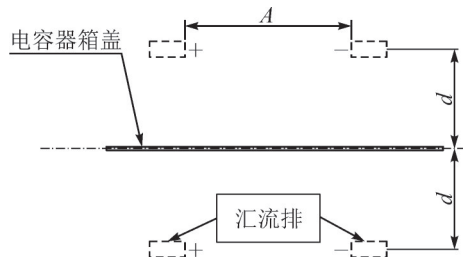


图2 汇流排的镜像力模型
Fig. 2 Mirror force model of busbar

从图 2 可以看到,汇流排与其镜像之间的距离为汇流排与盖子的距离的 2 倍,相当于两根平行导线的距离为 $2d$ 。

根据前文的分析,汇流排受到的镜像力是因为汇流排上有电流通过引起的。汇流排受到的能够产生危害的电动力,就是根据标准 GB/T 17702^[18]中的冲击放电试验。根据电路^[28]相关理论,电容器的短路放电电流波形如图 3 所示。

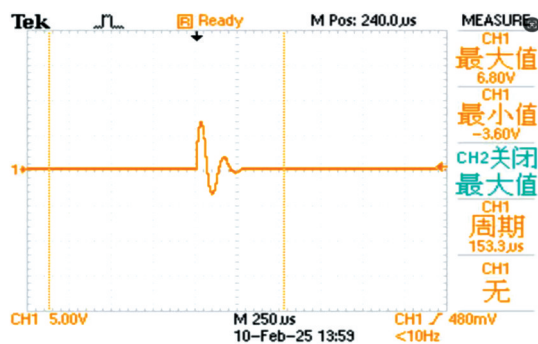


图3 电容器的冲击放电电流波形
Fig. 3 The impulse discharge current waveform of capacitor

图 3 中的放电电流波形公式为

$$i = I_0 e^{-\delta t} \sin \omega t \quad (1)$$

式中: i 为电容器的冲击放电电流, kA; I_0 为放电电流的极限值, kA; δ 为放电回路的阻尼系数; ω 为冲击放电电流的角频率, rad/s。

根据电磁场^[27]相关理论, 在平行导线中通过电流 i , 会产生一个安培力, 也就是本文说的电动力。安培力与电流的关系公式为

$$F = \frac{\mu_0 i^2 L}{2\pi(2d)} = \frac{\mu_0 i^2 L}{4\pi d} \quad (2)$$

式中: F 为通流导线受到的电动力, kN; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, 为真空中的磁导率, H/m; i 为导线中的电流, kA; $2d$ 为平行导线的间距, m; d 为通电导线与镜子间的距离, m; L 为导线长度, m。

从式(2)可以看出, 导线受到的力与电流的平方成正比, 与导线间的距离 $2d$ 成反比, 与导线的长度 L 成正比。也可以看出, 由于汇流排与其镜像之间的距离 2 倍于汇流排到盖子的距离, 所以镜像力的大小相当于两根平行导体电动力的一半。

1.2 汇流排的受力模型分析

汇流排受到的电动力, 与汇流有关, 其汇流模型如图 4 所示。图 4 中, 从下到上将元件电流汇集到一起的导体, 本文将其定义为汇流片; 汇流片将电流汇集到上面的导体, 本文将其定义为汇流排; 汇流片与汇流排的连接点本文称之为汇流点; 两个汇流点之间的汇流排, 本文称之为汇流段。

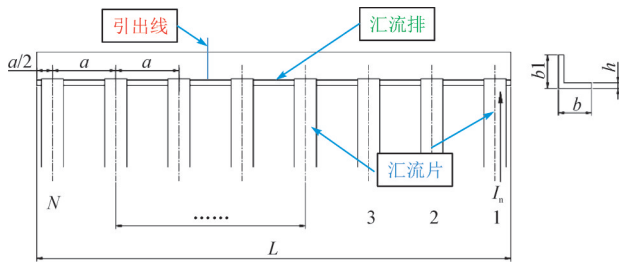


图4 汇流排的汇流模型

Fig. 4 Convergence model of busbar

从图 4 可以看出, 假设电容器引出线位于第 n 个汇流段上, 则汇流排上电流最大值位于第 n 和 $n+1$ 之间, 即第 n 个汇流段上, 其流过电流公式为

$$I_n = \frac{n}{N} I_0 \quad (3)$$

式中: $I_0 = 1.1 \hat{I}_s$ 为电容器冲击电流试验电流值, kA; I_n 为第 n 个汇流段上的电流, kA; N 为汇流片的数量。

从图 4 可以看到, 假设汇流排的长度为 L , 有 N 个汇流片汇流, 则两个汇流片之间的距离公式为

$$a = \frac{L}{N} \quad (4)$$

式中, a 为两个汇流片之间的距离, m。

关于汇流的计算, 可以参见文献[17], 本文不再进行详细的分析。

根据图 4, 可以得到汇流排的汇流点 n 和 $n+1$ 之间的受力模型, 为两端固定受到均布载荷作用的等强度固定梁, 如图 5 所示。每个汇流点作为梁的固定点, 实际上汇流点比固定点差一点, 但比简支要好很多。

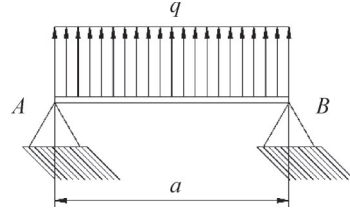


图5 两个汇流点之间的汇流排受力模型

Fig. 5 Force model of the manifold between the two convergence points

第 n 个汇流段的两个节点分别为 A 、 B , 第 n 汇流段可以看作是固定梁。根据文献[28], 梁的挠度公式为

$$f_n = \frac{5q_n a^4}{384EI} \quad (5)$$

梁两个固定点的受力为: 汇流点 A 受到第 n 汇流段和第 $n+1$ 汇流段的电动力共同作用, 汇流点 B 则同时受到第 $n-1$ 汇流段和第 n 汇流段的电动力作用。即

$$R_{Bn} = \frac{1}{2} q_n a + \frac{1}{2} q_{(n-1)} a = \frac{F_n + F_{n-1}}{2} \quad (6)$$

$$R_{An} = \frac{1}{2} q_n a + \frac{1}{2} q_{(n+1)} a = \frac{F_n + F_{n+1}}{2} \quad (7)$$

式(5)-(7)中: f_n 为第 n 汇流段的挠度, mm; E 为紫铜的弹性模量, GPa; I 为汇流排的惯性矩, m^4 ; q_n 为第 n 汇流段的镜像力密度, N/m。

电容器内部导体, 一般都是矩形结构。对于矩形导体, 根据文献[28], 其惯性矩公式为

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (8)$$

式中: b 为汇流排宽度, m; h 为汇流排厚度, m。

从式(8)可以看出, 对于矩形导体而言, 由于厚度 h 很小, 其惯性矩很小, 很容易变形。这样的汇流排是没有什么强度可言的。为了增加汇流排的强度, 可以将其折弯成 L 形, 汇流排的截面尺寸不变, 但截面惯性矩大幅度增加。折弯后汇流排的惯性矩公式为

$$I' = \frac{(b-b_1)h^3}{12} + \frac{hb_1^3}{12} \approx \frac{hb_1^3}{12} \quad (9)$$

1.3 镜像力的计算分析

根据汇流排的受力模型, 汇流排第 n 汇流段受

到的镜像力公式为

$$F_n = \frac{\mu_0 i^2 a}{4\pi d} \quad (10)$$

将式(1)、式(3)代入式(10),可以得到

$$F_n = \frac{\mu_0 i^2 a}{4\pi d} = \frac{\mu_0 n^2 I_0^2 a}{4\pi N^2 d} e^{-2\delta t} \sin^2(\omega t) \quad (11)$$

式中, F_n 为汇流排第 n 汇流段受到的镜像力, N。

从式(11)可以看到, $F \geq 0$, 也就是说, 汇流排受到的力虽然是振荡的, 但只是正向振荡。

考虑到 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, I_0 的单位为 kA, $\sin^2(\omega t) = (1 - \cos 2\omega t)/2$, 代入式(11)并化简, 可以得到

$$F_n = F_0 e^{-2\delta t} [1 - \cos(2\omega t)] \quad (12)$$

式中, $F_0 = \frac{n^2 I_0^2 a}{20N^2 d}$ 为汇流排第 n 段镜像力的极限值。

从式(12)可以看到, 汇流排受到的镜像力是一个振荡衰减函数, 由 2 部分组成。一部分是非振荡衰减曲线, 另一部分为非衰减振荡曲线。后者的频率是电容器放电频率的 2 倍。曲线如图 6 所示。图 6 中, $I_0 = 660$ kA, 周期 $T = 206.7 \mu\text{s}$, $d = 50$ mm, $a = 0.1$ m, 同向峰值比 $\alpha = 3$ 。

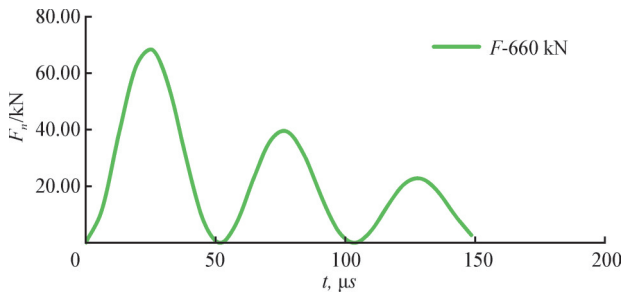


图6 电容器冲击放电产生的电动力与时间的关系曲线
Fig. 6 Relationship curve between the electrodynamic force generated by the impulse discharge of the capacitor and time

从图 6 可以看到, 汇流排受到的镜像力都是正向的。也就是说, 汇流排受到的力都是向上的, 没有向下的力, 元件的焊点受到向上的拉力, 不会受到向下的压力。这个结论对于解决电动力的危害问题很重要。

根据电容器的基本结构, 盖子下面是空腔, 空腔下面是胶, 胶下面是心子, 心子顶部是汇流排, 汇流排与盖子的距离为 d 。根据图 2 和式(12), 两个汇流点间的汇流排上电流是一样的, 其上受到的电场力也是一样的。相邻两个汇流点之间的汇流排受到的电动力为均布力, 其值为 $q = F_n/a$ 。即:

$$q_n = \frac{F_n}{a} = \frac{n^2 I_n^2}{20N^2 d} e^{-2\delta t} [1 - \cos(2\omega t)] \quad (13)$$

令 $q_{n0} = \frac{n^2 I_n^2}{20N^2 d}$, 则式(13)可以改写为

$$q_n = q_{n0} e^{-2\delta t} [1 - \cos(2\omega t)] \quad (14)$$

结合式(14)和式(5), 可以得到

$$f_{n0} = \frac{5q_{n0} a^4}{384EI} \quad (15)$$

式中: f_{n0} 为第 n 汇流段的最大挠度; q_{n0} 为第 n 汇流段的最大均布力。

根据梁的受力分析, 相邻两个汇流点受到的反力为本节点受到的反力与上一个或下一个受力段的反力之和。这样有

$$R_{Bn} = \frac{1}{2} q_{n0} a + \frac{1}{2} q_{(n-1)0} a = \frac{F_{n0} + F_{(n-1)0}}{2} \quad (16)$$

$$R_{An} = \frac{1}{2} q_{n0} a + \frac{1}{2} q_{(n+1)0} a = \frac{F_{n0} + F_{(n+1)0}}{2} \quad (17)$$

将式(12)代入式(16)–(17), 可以得到第 n 段汇流排反力的最大值, 公式为

$$R_{Bn} = \frac{F_{n0} + F_{(n-1)0}}{2} = \frac{[n^2 + (n-1)^2] I_0^2 a}{40N^2 d} \quad (18)$$

$$R_{An} = \frac{F_{n0} + F_{(n+1)0}}{2} = \frac{[n^2 + (n+1)^2] I_0^2 a}{40N^2 d} \quad (19)$$

将相关数据代入式(18)–(19), 可以得到表 1 的计算结果。表 1 中, $N=9$, $d=0.05$ m。

表1 汇流点反力计算结果
Table 1 Calculation results of reaction force at the convergence point

n	1	2	3	4	5	6
R_{An}/kN	13.4	35.0	67.2	110.2	164.0	228.6
R_{Bn}/kN	2.7	13.4	35.0	67.2	110.2	164.0
R_{An}/R_{Bn}	5.00	2.60	1.92	1.64	1.49	1.39

从表 1 可以看出, 汇流数 n 越大, 固定点反力就越大; 汇流排的总电流越大, 反力越大。上固定点受到的反力大于下固定点, 汇流数越大, 两端的力差别越小。汇流点受到的反力达到数十甚至数百千牛, 这么大的力, 其破坏性是难以想象的。

正常的电容器, 内部不会存在汇流或汇流很小, 也就不会产生危害电容器的电动力。内部存在汇流的电容器, 其冲击放电电流的波形会产生畸变, 如图 7 所示。

对比图 2 和图 7 可以看出:

1) 内部有汇流结构的电容器, 其冲击放电试验波形在第 1 个峰值电流下降沿出现一个拐点, 正常结构的电容器则没有。这个拐点相当于把放电电流的周期拉长了。试验做了无数次, 都是这样的波形。这个波形应该是由 2 个及以上频率不相同的波形合成的。

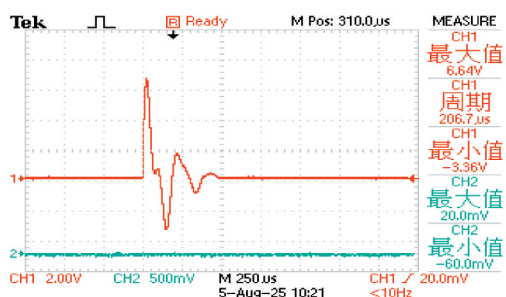


图7 内部有汇流电容器的冲击放电电流波形
Fig. 7 The impulse discharge current waveform of the capacitor with internal busbar

2)有汇流结构的电容器,放电电流波形的周期长一点。对比图2和图7可以看到,正常结构的电容器,放电周期为153.3 μs,有汇流结构的电容器,放电周期为206.7 μs,增加了34.8%。由于电容 C 是一样的,说明这种结构的内部杂散电感偏大。电感的实际测试结果也证实了这一点。

$$\text{将 } q_{n0} = \frac{n^2 I_0^2}{20N^2 d} \text{ 代入式(5),可以得到}$$

$$f_{n0} = \frac{5q_{n0}a^4}{384EI} = \frac{n^2 I_0^2 a^4}{1536N^2 dEI} \quad (20)$$

假设汇流排允许的最大挠度为 f_0 ,则有 $f_{n0} \leq f_0$,代入式(20)可以得到汇流排允许的汇流数与允许挠度的关系,公式为

$$n \leq \frac{16N}{I_0 a^2} \sqrt{6dEI f_0} \quad (21)$$

从式(21)可以看到,汇流排允许的汇流点数,与其允许的挠度的开平方成正比。从式(21)可以得到汇流排电流与允许挠度的关系,公式为

$$I_n = \frac{nI_0}{N} \leq \frac{16}{a^2} \sqrt{6dEI f_0} \quad (22)$$

从式(22)可以看到,汇流排允许通过的电流与其惯性矩及允许挠度的开平方成正比。

1.4 汇流排间的相斥力

电容器心子顶部的两个汇流排之间的电流方向是相反的,异向相斥。两个汇流排之间存在的这个力,就是本文说的相斥力,参见图1。根据式(2)可以得到汇流排相斥力的计算公式为

$$F_c = \frac{\mu_0 i^2 a}{2\pi A} \quad (23)$$

式中, A 为两根汇流排的间距,m。

根据式(12)和式(23),同理可以得到第 n 个汇流段间的相斥力为

$$F_c = \frac{n^2 I_0^2 a}{10N^2 A} e^{-2\delta t} [1 - \cos(2\omega t)] \quad (24)$$

对比式(12)和式(24)可以得到

$$\beta = F_c / F_n = \frac{2d}{A} \quad (25)$$

从式(25)可以看到,相斥力与镜像力的比值由汇流排与盖子间的距离,与两根汇流排的间距的2倍决定。两根汇流排间的距离越小,比值越大。式(25)的计算结果如表2所示。

表2 相斥力与镜像力的比值

Table 2 The ratio of repulsive force to mirror force

d/A	0.25	0.5	1.0	1.5	2
F_c/F_n	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0

从表2可以看出, d/A 的比值,决定了相斥力与镜像力的比值 β 。减小 d/A 的比值,有利于降低相斥力的危害。

2 计算实例及试验验证

2.1 计算实例

对于一台内部含有汇流结构的电容器,汇流片数 $N=9$ 。矩形汇流排尺寸如下:长度 $L=1$ m;宽度 $b=60$ mm;厚度 $h=2.5$ mm。L形折弯汇流排尺寸为: $b_1=45$ mm。矩形汇流排和L形汇流排的惯性矩计算结果如表3所示。

表3 汇流排的惯性矩计算结果

Table 3 Calculation results of the moment of inertia of the busbar

方案	宽度 b/mm	厚度 h/mm	折弯尺寸 b_1/mm	惯性矩 $I/10^{-10} \text{ m}^4$	系数
矩形汇流排	60	2.5	—	0.78	1.0
L形汇流排	45	2.5	15	7.62	9.8

从表3可以看出,汇流排的尺寸不变,只是简单折弯,其截面惯性矩就增加了近10倍,这意味着,在冲击放电电流不变的情况下,汇流排的刚度增加到折弯前的10倍,挠度降低到原来的10%。将相关数据代入式(12),得到图8所示的最大挠度随汇流数 n 的关系曲线。

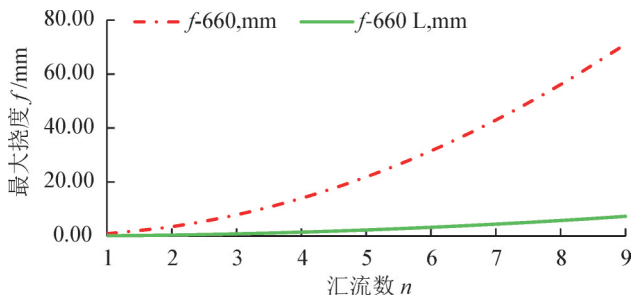


图8 汇流排挠度与汇流数的关系
Fig. 8 Relationship between the deflections and the number of the busbar

从图8可以看出,常规矩形汇流排的最大挠度

远远大于L形汇流排的最大挠度;汇流数越大,汇流排的挠度越大;冲击电流越大,汇流排的挠度也越大。

实际上,虽然汇流片有 N 片,但是由于有引出线问题,实际汇流数最大也就总汇流片数的一半多。对于汇流片数为9的电容器,最大汇流片数为5左右。在实际试验过程中,电容器套管上有测试排,测试排上的电流方向与汇流排是相反的,异向相斥。这个相斥力可以削减甚至去除汇流排的镜像力,使左半段汇流排上几乎不受到镜像力的作用。

为了验证上述计算分析的正确性,笔者对2台试品进行了冲击放电试验,其中1台采用矩形汇流排(1号试品),1台采用L形汇流排(2号试品)。试验结果如表4所示。对试品进行解剖,观察到汇流排的状况如图9-10所示。

表4 冲击放电试验结果
Table 4 Impulse discharge test results

试品编号	1号	2号
汇流排结构	矩形	L形
试验结果	660 kA 未通过	660 kA 通过

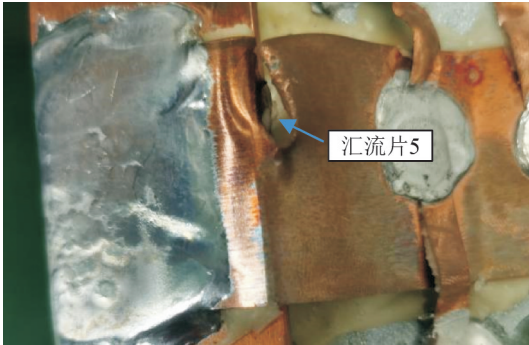


图9 1号试品的汇流排状况
Fig. 9 Busbar condition of No. 1# capacitor



图10 2号试品的汇流排状况
Fig. 10 Busbar condition of No. 2# capacitor

解剖情况表明,汇流点5和汇流点6的状况最差,这与前面的分析是一致的。因为汇流点5和汇流点6之间的电流最大,这两个点受到的电动力最大。另外,当冲击放电电流大到一定程度后,

增大汇流排截面惯性矩,虽然可以减小汇流排变形,但是汇流排的刚性太强,导致相斥力的作用加强,引发了其他问题,导致电容器的元件受到其他因素的伤害。

2.2 降低电动力危害的办法

从前文分析可知,只要电容器内部存在汇流,就会存在幅值较大的电动力,这个电动力对电容器的内部结构具有很大的破坏作用。要降低汇流排电动力的危害,有以下几个措施:

1)减小或消除电容器内部的汇流结构。目前绝大多数电容器都采用对称结构,不存在多次汇流问题,汇流排上通过的电流较小,汇流排受到的镜像力和相斥力较小,电动力的危害不大。

2)增加汇流片的数量,减小汇流片之间的距离 a 。从式(4)可以看出,汇流片的数量越多,相邻两个汇流点的间距越小,汇流排的挠度越小,汇流排受到的镜像力和相斥力也越小,电动力的危害也会越小。

3)增加汇流排的数量,降低汇流排的电流。从式(10)和式(23)可以看出,电动力与电流的平方成正比,电流越大,电动力越大。增加汇流排的数量,可以降低每个汇流排的电流,这样汇流排受到的电动力就会大幅度减小。而且根据前面的分析,增加汇流排数量,还会改善放电电流波形。

4)增加汇流排的惯性矩,加强汇流排的刚度。从式(15)可以看出,汇流排的截面惯性矩与电动力成反比,汇流排的惯性矩越大,其挠度越小。汇流排折弯,可以大幅度增加惯性矩,减小汇流排的挠度。

5)增加汇流排的间距。从式(10)和式(23)可以看到,增加汇流排受到的电动力,与汇流排的间距成反比,距离越大,电动力越小。从式(25)可以看到,汇流排的相斥力与其镜像力的比值,与其间距的比值成反比,适当调整两者的间距比,可以综合考虑镜像力和相斥力的危害。

3 结语

1)直流支撑电容器中的汇流排在大电流通过时,会同时受到镜像力和相斥力的作用。试验表明,汇流排和汇流片的受力变形情况与理论分析基本一致。

2)本文结合洛伦兹定律和镜像原理建立的汇流排镜像力计算模型基本正确,镜像力模型的计算结果表明,汇流排上的电流对于电动力具有决定性作用,汇流排与电容器盖板的距离,对于汇流排的受力影响极大。

3) 汇流排的受力计算模型为多节点固定梁均布受力模型,从理论上说,增加汇流点的间距,对于减小汇流排的变形,具有决定性意义。增加汇流排的截面惯性矩对其受力变形的影响极大。汇流排的间距及其与盖子间的距离,对汇流排受到的镜像力和相斥力的比值,具有决定性的影响。

4) 计算表明,汇流排上汇流片的焊接点受到的反力达到数十甚至数百千牛,汇流排的钎焊点难以承受这么大的电动力。要解决这个问题,需要在结构上创新。

5) 电容器的冲击放电试验表明,汇流排受到的电动力很大,对汇流排上的钎焊点具有极大的破坏性,甚至把汇流片撕裂。

6) 建议摒弃具有汇流排结构的电容器设计,这种结构的电容器具有较大的隐患,运行时间较长后,可能会影响电容器的安全运行。

参考文献

- [1] 张国豪,李化,黄子钦,等. 交直流电压比例对金属化膜击穿特性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 55-60.
ZHANG Guohao, LI Hua, HUANG Ziqin, et al. Study on the effect of AC/DC voltage ratio on breakdown characteristics of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 55-60.
- [2] 陈耀红,林福昌,李化,等. 金属化膜电容器击穿机理及自愈模拟试验研究[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会2009年学术年会, 2009.
- [3] 王健涛,吴致远,王昕劼,等. 金属化膜击穿与自愈性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 102-107.
WANG Jiantao, WU Zhiyuan, WANG Xinjie, et al. Study on breakdown and self-healing performance of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 102-107.
- [4] 程璐,李志元,王镜然,等. 高压直流电场与谐波耦合作用下金属化膜电容器失效研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8955-8964.
CHENG Lu, LI Zhiyuan, WANG Jingran, et al. Mechanism study on the failure of metalized film capacitor under HVDC field superimposed harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8955-8964.
- [5] 徐哲,程璐,刘宏博,等. 超高直流电场作用下金属化膜电容器的老化特性[J]. 绝缘材料, 2023, 56(5): 55-62.
XU Zhe, CHENG Lu, LIU Hongbo, et al. Ageing characteristics of metallized film capacitor under ultra-high DC field[J]. Insulating Materials, 2023, 56(5): 55-62.
- [6] 孔中华,林福昌,戴玲,等. 金属化膜电容器层间压强计算[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 348-350.
KONG Zhonghua, LIN Fuchang, DAI Ling, et al. Calculation of the pressure intensity between layers of a metallized film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 348-350.
- [7] 王文娟,李化,李智威,等. 通过电容器层间压强的增强提高电容器寿命[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4): 124-128.
WANG Wenjuan, LI Hua, LI Zhiwei, et al. Lifetime improvement of metallized film capacitors by inner pressure strengthening[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4): 124-128.
- [8] 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.
- [9] 赵子轩,左强林,雷乔舒,等. 直流支撑电容器圆元件膜层间压强在线测试与改进计算模型[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2268-2273.
ZHAO Zixuan, ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, et al. Online testing and improved calculation model for inter-layer pressure of circular elements in DC-link capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2268-2273.
- [10] 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.
- [11] 何樱,王子建,侯智剑,等. 环境温度及施加电压对自愈式电力电容器温升和温度场分布的影响[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(1): 193-199.
HE Ying, WANG Zi Jian, HOU Zhijian, et al. Influence of ambient temperature and applied voltage on the temperature rise and temperature distribution of self-healing power capacitor[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(1): 193-199.
- [12] 岳国华,杜志叶,孟圣淳,等. 基于电热耦合的干式直流电容器温升分布不均匀特性分析及优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4915-4924.
YUE Guohua, DU Zhiye, MENG Shengchun, et al. Analysis and optimization of non-uniform temperature rise distribution of dry-type DC capacitor based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4915-4924.
- [13] 孙晓武. 直流支撑电容器的纹波电流影响其温升的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 76-80.
SUN Xiaowu. Study on the influence of ripple current on

- temperature rise of DC support capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 76-80.
- [14] 葛雪峰,姜佳宝,赵耀. 金属化膜电容器电热仿真分析[J]. 电气工程学报, 2023, 18(3): 224-231.
- GE Xuefeng, JIANG Jiabao, ZHAO Yao. Electrothermal simulation analysis of metallized film capacitor[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(3): 224-231.
- [15] 孙晓武. 环境温度对直流支撑电容器温升影响的研究[J]. 电工电气, 2020(2): 51-53.
- SUN Xiaowu. Study on influence of ambient temperature on temperature rise of DC link capacitor[J]. Electrotechnics Electric (Jiangsu Electrical Apparatus), 2020(2): 51-53.
- [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] 左强林,雷乔舒. 柔性直流输电用直流支撑电容器的关键技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 108-115.
- ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Study on key technology of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 108-115.
- [18] 电力电子电容器:GB/T 17702—2021 [S]. 2021.
- Power electronic capacitors:GB/T 17702—2021 [S]. 2021.
- [19] 黎鹏,邱雨,岳国华,等. 基于磁—结构场耦合的干式直流电容器短路特性分析[J/OL]. 高压电器, 1-9[2024-03-28]. <https://kns.cnki.net/10.13296/j1001-1609.hva.2024>.
- LI Peng, QIU Yu, YUE Guohua, et al. Short-circuit characteristics analysis of dry DC vessels based on magnetic-structural field coupling[J/OL]. High Voltage Electrical Appliances, 1-9[2024-03-28]. <https://kns.cnki.net/10.13296/j1001-1609.hva.2024>.
- [20] ZUO Qianglin, DENG Guangzhao, LEI Qiaoshu. Study on step response of electric field force during charging of DC-link capacitor[C]//International Conference on Renewable Energy and Power Engineering(REPE), 2025.
- [21] 李勇,成泰洪,申允德. 双向线性力马达力阶跃响应特性的研究[J]. 液压与气动, 2014(3): 31-34.
- LI Yong, CHENG Taihong, SHEN Yunde. Research on force step response characteristics of a bi-directional linear force motor[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014(3): 31-34.
- [22] 解广润. 电水锤效应[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1962.
- [23] 颜怀梁,刘明光. 电水锤效应的能量传播及聚焦探讨[J]. 四川工业学院学报, 1987, 6(2): 5-10.
- YAN Huailiang, LIU Mingguang. Discussion on energy propagation and focusing of electro-water hammer effect[J]. Journal Of Sichuan Institute of Technology, 1987, 6(2): 5-10.
- [24] 荀涛,杨汉武,张建德,等. 加速器电水锤数值模拟与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 425-429.
- XUN Tao, YANG Hanwu, ZHANG Jiande, et al. Numerical and experimental investigation on water shocks due to pulsed discharge in accelerators[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(2): 425-429.
- [25] ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, WANG Shuhong. Study on the electric water shock effects in the bursting energy tests on the capacitor case for HVDC[C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). [S. l.]: IEEE, 2022: 1619-1625.
- [26] 冯慈璋. 电磁场[M]. 第2版. 北京:高等教育出版社, 1983.
- [27] 邱关源(原),罗先觉(修订). 电路[M]. 第5版. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [28] 沈鸿,等. 电机工程手册[M]. 机械工业出版社.
- 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。