

# 宜宾换流站电容器隐患分析与改进建议

禹佳 孙文 王鑫

(国家电网公司运行分公司宜宾管理处 四川 宜宾 644000)

**摘要:** 交流滤波器有滤除换流器产生的谐波和向换流器提供无功补偿两个任务,电容器作为滤波器组内最重要的无功设备,其运行情况直接关系着换流站的安全稳定运行。针对宜宾换流站电容器的实际情况,结合其他已投运换流站的运行经验,对宜宾换流站电容器存在的问题进行了全面、系统的分析,对电容器的安全隐患提出了相应的改进措施,对新建换流站提出建议。

**关键词:** 电容器; 隐患; 发热; 建议

**Abstract:** AC filters have two tasks in converter station which filter out harmonic and provide reactive power for converter. As the capacitor is the most important equipment of reactive group, it is directly related to the safe and stable operation of converter station. Aiming at the actual situation of capacitors in Yibin converter station, the existing problems are analyzed comprehensively and systematically along with the operation experiences of other running converter stations. And then, the improvement measures are proposed for the security risks of capacitors and the suggestions are put forward for the newly-built converter stations.

**Key words:** capacitor; risk; heating; suggestion

中图分类号: TM53 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2015)03-0033-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.008

## 0 引言

换流站电容器的故障率较高,而电容器故障中由于电容器接头和引线导致的事故又占有相当大的比重。因此需要总结换流站电容器接头发热故障治理经验,探讨解决办法<sup>[1]</sup>。

宜宾换流站交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器全部采用国产设备,电容器接头及引线的设计、工艺方面仍然存在问题,这些问题如不及时解决,将可能导致交流滤波器跳闸,情况严重时可能导致系统降功率甚至引起直流停运,其影响不容忽视。为防止由于电容器接头及引线等问题导致的跳闸事故的发生,结合宜宾换流站现场的实际情况,对电容器存在的安全隐患进行了分析研究<sup>[2]</sup>。

## 2 电容器安全隐患问题分析

### 2.1 电容器接头隐患

#### 2.1.1 导电夹板无内螺纹

电容器导电夹板的夹紧效果不好,是导致运行

中电容器接头过热的主要原因。经初步分析,夹紧效果不好的原因为导电夹板无内螺纹,经改造采用带有内螺纹的导电夹板后,发热情况明显减少,且目前运行情况良好。对电容器导电夹板进行改造后,下片夹板采用了带有内螺纹的结构。

若下夹板采用螺纹结构,当紧固电容器接头引线时,下夹板可以固定于电容器穿芯螺杆上,这样上夹板的受力就可以完全作用于导线和下夹板上,使导线能够被上、下两夹板可靠地夹紧,且可减小电容器瓷套管的受力。而如果下夹板无内螺纹,则当紧固电容器引线时,下夹板会随之压在电容器瓷套管上,若紧固力矩过大,会损坏电容器穿芯螺杆,此时,电容器引线的夹紧力大部分来自于上夹板的作用力,而为了不损坏电容器的穿芯螺杆,电容器螺母的力矩不宜过大,因此不能保证电容器引线被可靠夹紧,长时间运行后,容易造成接头引线松动,导致电容器接头发热。

#### 2.1.2 电容器接头无弹性垫片

宜宾换流站交流滤波器场电容器的上、下两片导电夹板各配有一个弹性垫片,在热胀冷缩时很容易造成电容器接头松动而导致接点发热。实践证

明,当接头处的运行工作温度超过 80 ℃ 时,接头金属将因过热而膨胀,使接触表面位置错开,形成微小空隙而氧化。当负荷电流减少温度降低回到原来接触位置时,由于接触面氧化膜的覆盖,不可能是原安装时金属间的直接接触。每次温度变化的循环所增加的接触电阻,将会使下一次循环的热量增加,所增加的较高温度又使接头的工作状况进一步变坏,因而形成恶性循环。

电容器接头下夹板的弹性垫片的另外一个作用,就是用于微调导电夹板的角度,使每个电容器夹板的接线孔能够与地面平行,避免由于接线孔角度不同造成接头引线弯曲。但由于安装工艺较差,导致部分电容器下夹板的弹性垫片并未压紧,容易造成接头松动。

正常情况下,电容器接头的电流方向为:电流自导线经过导电夹板下部,沿着端子螺纹向上,再经端子内部导线流向端子内部;而如果下夹板的弹性垫片未可靠压紧,那么将导致下夹板与端子帽接触不严密,其接触电阻将变大,电流大部分会从端子螺纹直接向上经过端子内部导线流向端子内部。考虑到螺杆和螺母的制作工艺的限制,螺纹之间必然存在一定的缝隙,下夹板与螺杆之间不能良好接触,从而导致其接触面积进一步减小,接触电阻进一步增大,长时间运行后,将可能导致电容器接头发热。

### 2.1.3 引线接头松动

交流滤波器场部分电容器的引线存在松动现象。通过分析,发现电容器接头引线直径相对导电夹板的夹线孔内径较小,当上、下两片导电夹板接触后,夹板的夹线孔与引线之间仍存在缝隙,且现场晃动引线时有明显的松动现象。而且当导线与夹板连接后,上、下夹板之间无缝隙,导致无法判断引线是否已被可靠夹紧。由于电容器引线采用的是多股软铜线,每股软铜线之间必然存在缝隙,若导电夹板与引线不能可靠夹紧,那么在风霜雨雪、日照、日夜温差以及自身磁场的共同作用下,则会加速各接触面的氧化和结垢程度而导致接头发热。通过对比,发现电容器引线与夹板连接后,上、下夹板之间有一定缝隙,容易判断引线是否已被可靠夹紧,且现场观察发现电容器引线连接无松动现象,导线与夹板之间连接效果较好。

### 2.1.4 防鸟帽问题

宜宾换流站电容器接头全部安装了防鸟帽,通

过分析和试验,发现防鸟帽安装后将存在较大的安全隐患。

电容器在日常维护过程中需要对其进行红外测温,而使用防鸟帽后将影响红外测温的效果。红外测温的原理是利用物体辐射出的红外线来测量物体表面的温度,红外线的波长在 0.76 ~ 100 μm 之间,按波长的范围可分为近红外、中红外、远红外、极远红外 4 类,红外线辐射是自然界存在的一种最为广泛的电磁波辐射,温度在绝对零度以上的物体,都会因自身的分子运动而辐射出红外线。红外测温仪利用红外探测器、光学成像物镜和光机扫描系统接受被测目标表面的红外辐射能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上,对被测物体的表面红外热像进行扫描,并聚焦在单元或分光探测器上,由探测器将物体辐射的功率信号转换成电信号后,成像装置的输出信号就可以完全一一对应地模拟扫描物体表面温度的空间分布,经电子系统处理,传至显示屏上,得到与物体表面热分布相应的热像图<sup>[3]</sup>。

通过试验,证实了红外测温仪只能测量防鸟帽外表面的温度,而无法测量到防鸟帽内部电容器接头的温度。只有当防鸟帽的温度与电容器接头温度相同时,红外测温仪才能如实地反映出电容器接头的实际温度。因此,红外测温仪也将无法准确地测量到电容器接头的实际温度,这将导致运行人员无法提前预判电容器接头的发热异常,只有等到设备损坏后才能发现故障,给系统的安全稳定运行带来了极大的隐患。

### 2.1.5 导电夹板歪斜

交流滤波器场电容器在安装过程中,导电夹板出现了歪斜现象,当紧固右侧电容器螺母时,由于紧固力矩为顺时针方向,导致电容器引线被严重拉伸。

导线热胀冷缩的伸缩量可由式(1)计算得出:

$$\Delta L = \Delta T \times L \times C \quad (1)$$

式中  $\Delta L$  为导线长度的变化;  $L$  为导线原来的长度;  $C$  为热膨胀系数;  $\Delta T$  为系统温度变化。

由此可得出导线的长度变化与系统温度变化成正比,电容器温度变化越大,导线的伸缩量也越大。由于热胀冷缩的作用,电容器接头将承受更大的拉力,可能会对电容器瓷瓶两端的连接处造成隐形伤害,当电容器再次投入运行时,由于电容器油受热膨胀,将可能导致电容器漏油。

### 2.2 电容器引线隐患

### 2.2.1 毛刺现象

交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器的接头引线采用了带有绝缘皮的多股软铜线,在切割绝缘皮的过程中,由于用力过大,导致引线的最外层软铜线大部分被割断,产生了毛刺现象。如果毛刺过多或过长,将会产生电晕现象,为电容器带来较大的安全隐患。

电晕是高压带电体表面向空气游离放电的现象,在强电场的作用下导线周围的空气会产生电离现象,它的产生与导线本身和导线周围空气的条件有关。导线周围空气之所以会电离,是由于导线表面的电场强度超过了某一临界值,以致空气中原有离子具备了足够的动能,撞击其他不带电分子,使后者也离子化,最后形成空气的部分导电。电晕的产生是因为不平滑的导体产生不均匀的电场,在不均匀的电场周围曲率半径小的电极附近当电压升高到一定值时,由于空气游离就会发生放电,形成电晕。简单地说,曲率半径小的导体电极对空气放电,便产生了电晕<sup>[4]</sup>。

电晕起始电压指开始发生电晕放电时的电压,也称临界电压,与之相应的场强称为电晕起始场强或临界场强,如式(2):

$$E_r = \frac{\lambda}{2\pi\xi_0 r} \quad (2)$$

式中  $\xi_0$  为真空中的介电系数,  $\xi_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ ,  $c^2/N \cdot m^2$ 。

而任一点的场强等于该点的电位梯度的负值,如式(3):

$$E_r = -\frac{dV}{dr} \quad (3)$$

通过积分变换得

$$E_r = \frac{V}{r \ln(b/a)} \quad (4)$$

此时为任一点场强与电压的关系,式中  $V$  为电压; $r$  为距电晕线的距离; $a$  为导线毛刺半径; $b$  为导线半径。式(4)表明在电晕开始发生之前,任一点的场强  $E_r$  随距电晕线的距离的减小而增大。当  $r = a$  在电晕线表面上时,  $E_r$  达最大。

电晕开始发生所需的场强取决于几何因素及气体的性质。皮克(peek)通过大量实验研究,提出了计算在空气中电晕起始场强的经验公式。

$$E_r = \pm 3 \times 10^6 f \left( \frac{T_0 P}{TP_0} + 0.03 \sqrt{\frac{T_0 P}{TP_0 a}} \right) \quad (V/m) \quad (5)$$

式中  $P_0$ 、 $T_0$  为标况下的大气压和温度(298 K);  $T$ 、 $P$  为运行状况的温度和空气压力; $f$  为导线光滑修正系数,一般  $0.5 < f \leq 1$ , 清洁的光滑导线  $f = 1$ , 实际中所遇到的导线可取  $f = 0.6 \sim 0.7$ ; 正负号视电晕极性而定,正电晕取正号,负电晕取负号。

当  $r = a$  时,由式(4)得  $V = E_r a \ln(b/a)$  代入式(5)得电晕起始电压计算式如式(6):

$$V = \pm 3 \times 10^6 f a \left( \frac{T_0 P}{TP_0} + 0.03 \sqrt{\frac{T_0 P}{TP_0 a}} \right) \ln(b/a) \quad (V) \quad (6)$$

由式(6)可以得出,电晕起始电压随电极的几何形状而变化,线越细,即毛刺越尖锐,电晕的起始电压越低,越容易产生电晕现象。

由于电容器的运行电压较高,而且毛刺末端较尖锐,因此极易产生电晕。在正常运行过程中,电晕现象并不容易被发现,如遇雷雨天气或周围空气湿度较大时,由于电晕现象,将可能导致毛刺对其他电容器或构架放电,造成电容器短路击穿而导致电容器跳闸<sup>[5]</sup>。

### 2.2.2 引线连接工艺问题

电容器采用单引线连接,导线材质为多股软铜线,在安装过程中,由于安装工艺问题,导致很多引线的连接出现了多股软铜线未夹在接线孔中的情况。若导线有1/2未夹入接线孔中,那么导线与夹板的面积将减小1/4。

$$R = \rho L/S \quad (7)$$

式中  $R$  为导线电阻; $\rho$  为电阻率; $L$  为导线长度; $S$  为导线横截面积。

由式(7)可得出,若导线的接触面积减小1/4,那么导线的接触电阻将增大4倍。由于电容器接头引线采用单引线连接,通流能力与双线连接的电容器相比已经有所下降,如果连接线有多股未能与导电夹板可靠连接,那么电流会经过夹在接线孔外部的软铜线直接进入电容器,导致通流能力大大降低,投运后将会导致电容器接头发热<sup>[6]</sup>。

### 2.2.3 电容器引线绝缘问题

交流滤波器场电容器塔引出线采用软铜线连接,在雷雨或大风天气时,容易使连接线摆动或下垂,造成连接线与均压环的绝缘距离不足而导致闪络放电事故。由于导线与均压环的距离过近,导致导线与均压环闪络放电,造成4只电容器被击穿。

根据中华人民共和国电力行业标准 DL/T 620

-1997中第10.2.3条规定,变电站导线对构架的空气间隙的计算,变电所导线对构架的受风偏及不受风偏影响的空气间隙应符合式(8)要求。

$$U_{i.s} \geq K_2 U_m / \sqrt{3} \quad (8)$$

式中  $K_2$  为线路空气间隙工频电压统计配合系数,对范围 II 取 1.40;  $U_m$  为系统最高电压, kV; 对 110 kV 及 220 kV 取 1.35, 对 66 kV 及以下取 1.20。

在海拔不超过 1 000 m 的地区, 3 ~ 20 kV 高压配电装置的最小户外、户内空气间隙如表 1 所示。

表 1 3 ~ 20 kV 高压配电装置的空气间隙

| 系统标称电压 /kV | 户外空气间隙 /cm | 户内空气间隙 /cm |
|------------|------------|------------|
| 3          | 20         | 7.5        |
| 6          | 20         | 10         |
| 10         | 20         | 12.5       |
| 15         | 30         | 15         |
| 20         | 30         | 18         |

### 3 相应的改进措施

为确保直流系统投运后的安全稳定运行,提高电容器设备的可用率,结合宜宾换流站电容器存在的问题,与厂家进行了协商、探讨,最终针对以上问题提出了如下解决方案,希望能在系统投运前消除所有缺陷,努力实现电容器“零缺陷”投运的目标。

1) 对交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器的导电夹板和垫片进行全部更换,采用下片带有内螺纹的导电夹板。在夹板的选型时,要充分考虑夹板接线孔直径与电容器引线直径的关系,导电夹板接线孔的直径要略小于电容器引线的直径,保证电容器引线连接后,上、下两片导电夹板之间能够留有一定的缝隙,以便判断导线是否已被可靠夹紧<sup>[7]</sup>。

2) 在交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器的上、下两片导电夹板上各配置一个弹性垫片,确保当环境温度变化时导电夹板与引线之间一直是紧固的。在选择弹性垫片时要使用横截面积较大的弹性垫片,并且在安装时尽量将弹性垫片压紧,保证下片夹板与电容器接头有较大的接触面积,避免由于接触面积减小,接触电阻增大而造成电容器接头发热。

3) 对电容器接头涂刷 RTV 涂料用以代替安装防鸟帽。红外测温是换流站重要的定期工作之一,红外测温的质量将对事故的提前预判起到至关重要

的作用,用 RTV 涂料代替防鸟帽,可以实时、准确地观察电容器的运行情况,避免由于无法准确测量电容器接头温度,导致延误检修时机而造成的事故。

4) 全面检查电容器导电夹板的位置,对所有歪斜的导电夹板进行校正,使其与地面方向垂直。检查所有引线的弯曲程度,对于已完全拉直的引线进行重新连接,并留有一定的裕度,避免由于热胀冷缩的原因使电容器接头承受过大的应力。

5) 对交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器存在毛刺现象的引线进行全部更换,防止电晕的产生。由于电晕现象在正常运行时很难被发现,因此,防止电晕现象的发生尤为重要,更换带有毛刺的导线可以有效地防止电晕的产生,避免由于电晕现象导致电容器放电或短路情况的发生。

6) 对电容器引线进行全面检查,对于未完全夹在夹线孔中的引线全部进行重新连接,将引线全部夹在夹线孔中,保证引线与导电夹板之间有最大的接触面积,避免由于通流能力不足而导致电容器接头发热。

7) 为防止由于引线摆动或下垂造成的闪络放电事故,将交流滤波器场电容器跨越均压环的引出线全部由软连接改为硬连接。考虑到热胀冷缩的影响,此硬铜导线可由 3 节组成,中间一节为软铜导线,在导线跨越构架或均压环时,中间一节软铜导线向上弯曲呈弧形,以满足绝缘距离的要求<sup>[8]</sup>。

### 4 结 语

电容器是换流站的重要设备之一,它的运行情况对直流系统运行的可靠性至关重要。电容器在换流站中的数量众多,电容器故障在换流站日常缺陷中占有较大比重。因此,保证电容器的可靠运行对换流站的安全稳定运行意义十分重大。一方面从宜宾换流站电容器存在的安全隐患着手,分析了电容器接头、引线在设计、工艺及安装上存在的缺陷对电容器设备及系统运行的影响;另一方面对相应的安全隐患提出了改进措施及处理建议,为新建换流站提供参考。

#### 参考文献

[1] DL/T 620 - 1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. (下转第 72 页)

确定性潮流计算所得适应值作为目标函数,得到各场景下的最优无功控制策略。

由于在实际电网运行过程中,风电出力 and 负荷不可能固定不变,故将方法 2 所得到的最优控制策略代入方法 1 考虑随机因素的目标函数中,将所得各场景下的适应值与方法 1 的结果相对比。

表 3 为方法 2 各场景最优无功控制策略;表 4 为两种方法对比结果。

对比表 3 和表 4 可以看出:在最优控制策略下方法 1 和方法 2 在各场景中的加权目标函数值相差都很小,个别场景方法 2 甚至优于方法 1。从表 4 可以看出,在考虑风电出力随机变化时,虽然两种方法都能较大程度上实现对系统的优化,但在方法 1 的最优控制策略下,系统的各项指标明显优于方法 2,说明方法 1 能够考虑系统中存在的随机变量,得到更可靠的无功优化策略。

#### 4 总 结

将场景概率潮流计算方法应用到电力系统无功优化研究中。充分考虑了系统中负荷、风电出力的随机性和相关性,从概率的角度得到了各场景下的最优无功控制策略。与传统的确定性无功优化方法相比,所提方法在含不确定性因素的系统中表现更优,所得到的无功配置方案能够适应随机因素的变化,为运行与规划人员提供更可靠、更全面、更经济的控制策略。

#### 参考文献

[1] 潘雄,周明,孔晓民,等. 风速相关性对最优潮流的  
 =====  
 (上接第 36 页)

[2] 冯建清,唐明晓. 电容器发热问题分析及解决措施 [J]. 电力电子技术, 2007, 41(5): 1-6.

[3] DL/T 664-2008, 带电设备红外诊断应用规范 [S].

[4] 李澍森,陈晓燕. 试验线段电晕测量技术及结果 [J]. 高电压技术, 2006, 12(7): 32-36.

[5] 徐玲玲,张国威,王世民,等. 直流输电换流站电容器运行情况分析 & 改进措施 [J]. 电力电容器, 2007(1): 11-16.

[6] 孙翠平,关素娇,李晓军,等. 青藏换流站电容器成套装置外绝缘的设计总结 [C]. 2012 输变电年会论文集, 2012.

影响 [J]. 电力系统自动化, 2013(6): 37-41.

[2] 柳杰,刘志刚,孙婉璐,等. 含风电场电力系统电压稳定性概率评估及其在无功优化中的应用 [J]. 电网技术, 2012(11): 134-139.

[3] 李鸿鑫. 考虑不确定性因素的电力系统电压稳定与无功优化问题研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

[4] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述 [J]. 电工技术学报, 2013(10): 257-270.

[5] 陈雁,文劲宇,程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011(22): 80-87.

[6] Nelsen R B. An Introduction to Copulas [M]. Springer Science & Business Media, 2007.

[7] 黎静华,韦化. 基于内点法的机组组合模型 [J]. 电网技术, 2007(24): 28-34.

[8] 秦志龙. 计及相关性的含风电场和光伏电站电力系统可靠性评估 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

[9] 梁艳春. 群智能优化算法理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[10] 陈前宇,陈维荣,戴朝华,等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 8-13.

[11] Shi Y, Eberhart R. A Modified Particle Swarm Optimizer [C]. IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1998.

#### 作者简介:

熊 强(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化;

郑永康(1977), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护。

(收稿日期: 2015-04-07)

[7] 周承刚,赵宁. 换流站电容器组安装的施工方案及注意事项 [J]. 科学之友, 2012(15): 33-38.

[8] 李靖翔. 宝安换流站低压电容器多起跳闸情况分析 [J]. 中国科技信息, 2011, 22(4): 67-71.

#### 作者简介:

禹 佳(1983), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

孙 文(1981), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

王 鑫(1987), 研究生, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期: 2015-01-06)