

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.04.009

# 一起 35 kV 干式空心串联电抗器故障原因分析

廖斌, 冯春林, 陈松, 黄桂发

(桂林电力电容器有限责任公司, 广西 桂林 541004)

**摘要:**目前电力系统中户外型并联无功补偿装置的电抗器大多数采用干式空心串联电抗器,在运行过程中,电抗器常因绝缘老化、局部温升过高、过电压、谐波以及环境等因素影响,导致电抗器匝间绝缘损坏击穿、线圈被雨淋时包封表面爬电,甚至局部放电电弧烧毁现象发生。为此本文介绍了某 500 kV 变电站 35 kV 并联电容器组的干式空心串联电抗器故障烧毁情况,进行了现场检查和返厂试验;对烧损相和非烧损相均进行了由外向内的包封层解体分析,推断出故障原因为:由于电抗器本体运行了近十年后,电抗器本体包封层的环氧材料劣化开裂,遇雨水天气时潮气浸入包封层内部,长期运行导线绝缘薄膜加速老化,在电容器组多次投切产生过电压,造成电抗器匝间绝缘损坏,最终导致电抗器绝缘击穿、起火烧毁。针对本次事故电抗器损坏情况,提出了相应的预防和处理措施。

**关键词:**干式空心串联电抗器;解体;开裂;过电压;绝缘击穿;措施

## Fault Analysis of a 35 kV Dry Type Air-core Series Reactor

LIAO Bin, FENG Chunlin, CHEN Song, HUANG Guifa

(Guilin Power Capacitor Co., Ltd., Guangxi Guilin 541004, China)

**Abstract:** For the reactor of outdoor shunt reactive power compensation device of present power system, the dry-type air-core series reactor is mostly adopted. During operation period, the influence of such factors of reactor as insulation aging, excessive partial temperature rise, over-voltage, harmonics and environment leads to inter-turn insulation breakdown of reactor, surface creepage of envelope due to rainfall of coil and even arc burning due to partial discharge. For this purpose, the burning of dry type air core series reactor of 35 kV shunt capacitor bank at a 500 kV substation is introduced. Inspection at site and test after returning to the factory are performed. The burned phase and non-burned phase are analyzed from the outside to the inside of the envelope layer disintegration and the reason of the failure is deduced as follows: After nearly ten years of operation of the reactor proper, the epoxy material in the envelope layer of the reactor proper deteriorates and cracks. Moisture immerses into the envelope layer in case of rainy weather, and the insulation film of the wire in long-term operation is accelerated to age. The over-voltage due to multiple switching of the capacitor bank causes inter-turn insulation damage of the reactor and finally leads to insulation breakdown and burning of the reactor. As for the damage of reactor in this accident, the corresponding preventive and treatment measures are proposed.

**Keywords:** dry-type air-core series reactor; disintegration; crack; over-voltage; insulation breakdown; measures

## 0 引言

目前电力系统中户外型并联无功补偿装置的电抗器大多数采用干式空心串联电抗器,因为干式空心串联电抗器没有铁心,磁路由空气构成,不存在磁

饱和问题,电抗值总是保持不变。每台电抗器由多个并联的线圈包封组成,每个包封由环氧树脂浸渍过的玻璃纤维对线圈进行包封绝缘并固化成一体,结构整体性强,机械强度高,因此在电力系统中广泛应用。在并联无功补偿装置中电抗器与电容器

收稿日期:2023-05-15

基金项目:桂林市重点研发计划项目(20210209-1)。

组串联,组成串联谐振回路,不仅可以抑制电力系统电压波形畸变和控制流过电容器组的谐波分量,还能限制电容器组合闸涌流,从而达到保护电容器组的作用。在运行过程中,常因受电抗器绝缘老化、局部温升过高、过电压、谐波以及环境等因素影响,导致电抗器匝间绝缘损坏击穿、线圈被雨淋时包封表面爬电,甚至局部放电电弧烧毁现象发生<sup>[1-13]</sup>。

## 1 故障概况

### 1.1 故障情况

2023年2月10日13时,某500 kV变电站1号主变35 kV I段母线侧1-1C并联电容器装置支路过流I段保护动作跳开该支路上的314断路器,运维人员检查发现1-1C支路并联电容器装置配套用35 kV干式空心串联电抗器C相本体发生起火燃

烧,起火面积超过1/2。由于C相电抗器烧毁严重,现场已经无法对该相电抗器进行相关电气试验。

### 1.2 现场检查

该电抗器于2012年10月投入运行,至今已运行十几年。事故发生后,组织专业技术人员到现场检查,发现C相电抗器顶部包封和环氧树脂支撑条(聚酯条)全部烧毁、碳化且顶部固定星型架7个脚已被烧熔,电抗器烧毁情况见图1。电抗器主要技术参数见表1。



图1 C相电抗器烧毁情况  
Fig. 1 Burnt-out condition of reactor of phase C

表1 电抗器组主要技术参数  
Table 1 Main technical parameter of reactor bank

| 参数             | 数值               | 参数       | 数值        |
|----------------|------------------|----------|-----------|
| 产品型号           | CKGKL-2400/35-12 | 额定电流/A   | 833       |
| 系统额定电压/kV      | 35               | 最大连续电流/A | 1 125     |
| 额定电抗率/%        | 12               | 绝缘耐热等级   | F级        |
| 额定容量/kvar      | 2 400            | 冷却方式     | AN        |
| 额定频率/Hz        | 50               | 安装方式     | 三相水平一字形布置 |
| 额定电抗/ $\Omega$ | 3.456            | 进出线方式    | 低进高出      |

1)对站内相关电容器按国标 GB/T 11024.1—2019、避雷器按国标 GB 11032—2010 要求做了相关检查和试验,结果显示电容器和避雷器外观完好、试验数据全部符合国标要求,且故障期间站内没有进行操作记录,可以判断电抗器组起火之前系统未出现操作过电压情况。

2)35 kV 并联电容器装置过流II段保护整定值为0.48 A(二次值)、延时为0.2 s;电抗器C相本体发生匝间短路故障后,故障电流为2 461 A(一次值),达到过流I段保护动作整定值1.25 A(二次值),经延时837 ms跳闸,105 ms切除故障。

3)电抗器安装在电容器组的电源侧,安装方式采用三相水平一字形安装布置,进出线方式采用低进高出,相间距离较大。现场没有发现飘挂物的痕迹,可排除发生相间绝缘击穿故障。电抗器组底座支柱绝缘子良好,电抗器组C相本体与地面之间没有放电痕迹,且最早起火燃烧位置在顶部,可排除该相电抗器发生直接接地故障。

## 2 故障原因分析

### 2.1 设备解体检查

#### 2.1.1 C相电抗器包封解体情况

C相电抗器包封编号由外向内依次编号:

第1-12包封,包封解体情况见图2-5。

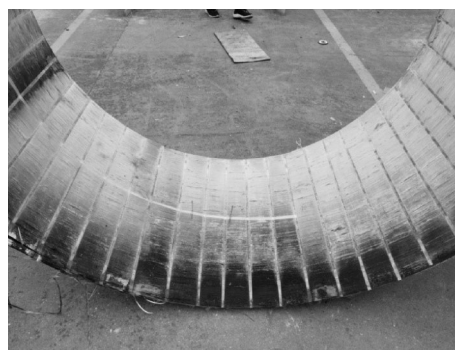


图2 C相电抗器第1包封  
Fig. 2 The 1st envelope of reactor of phase C



图3 C相电抗器第3包封  
Fig. 3 The 3rd envelope of reactor of phase C



图4 C相电抗器第11包封  
Fig. 4 The 11th envelope of reactor of phase C



图5 C相电抗器第12包封  
Fig. 5 The 12th envelope of reactor of phase C

从图2可知:C相电抗器第1包封上端明显燃烧后的现象,下部基本完好,包封中下部的导线绝缘薄膜完好,无老化。

从图3可知:C相电抗器第3包封上半部烧毁,下半部大部分完好,包封中下部未烧黑的导线绝缘薄膜完好,无老化。

从图4-5可知:C相电抗器第11、12包封整体烧毁,环氧层玻璃纤维粉化,导线大面积烧熔板结,下星型架进线端(面向进行端)左侧处上、中、下包封有明显匝间烧熔击穿现象。

#### 2.1.2 B相电抗器解体情况

B相电抗器包封编号由外向内依次编号:第1-12包封,包封解体情况见图6-9。

从图6可知:B相电抗器第1包封基本完好,导线绝缘薄膜完好,无老化,环氧层颜色较浅、均匀。

从图7可知:B相电抗器第10包封基本完好,导线绝缘薄膜完好,无老化,环氧层颜色上半部较深、下半部较浅。

从图8可知:B相电抗器第11包封基本完好,导线绝缘薄膜完好,无老化,环氧层颜色上半部较

深、下半部较浅,包封整体颜色较其它包封偏深、颜色偏淡黄色。

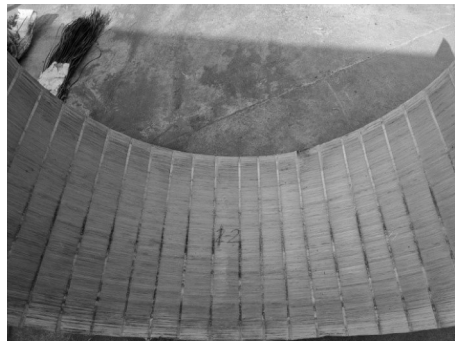


图6 B相电抗器第1包封  
Fig. 6 The 1st envelope of reactor of phase B



图7 B相电抗器第10包封  
Fig. 7 The 10th envelope of reactor of phase B



图8 B相电抗器第11包封  
Fig. 8 The 11th envelope of reactor of phase B



图9 B相电抗器第12包封  
Fig. 9 The 12th envelope of reactor of phase B

从图9可知:B相电抗器第12包封基本完好,包封整体颜色偏淡黄色,有轻微粘手;导线绝缘薄膜变黄、脆化,老化,环氧层颜色整体偏深,较其它包封更黄。

在对B相电抗器解体过程中发现各包封环氧层均有不同程度的鼓包、裂纹,裂纹大部分处于包封内侧,见图10。

当解体到B相电抗器第12层包封时,发现包封内部线圈间有较多液体流出,应是遇雨水天气时潮气从包封内侧裂纹浸入到导线与玻璃纤维之间的空隙,长期运行导线绝缘薄膜加速老化、环氧发黄严重,见图11。

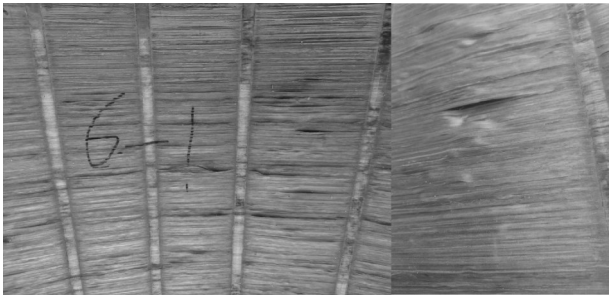


图10 B相电抗器各包封环氧层均有不同程度的鼓包、裂纹情况  
Fig. 10 Various degrees of bulging and cracking in each envelope epoxy layer of reactor of phase B

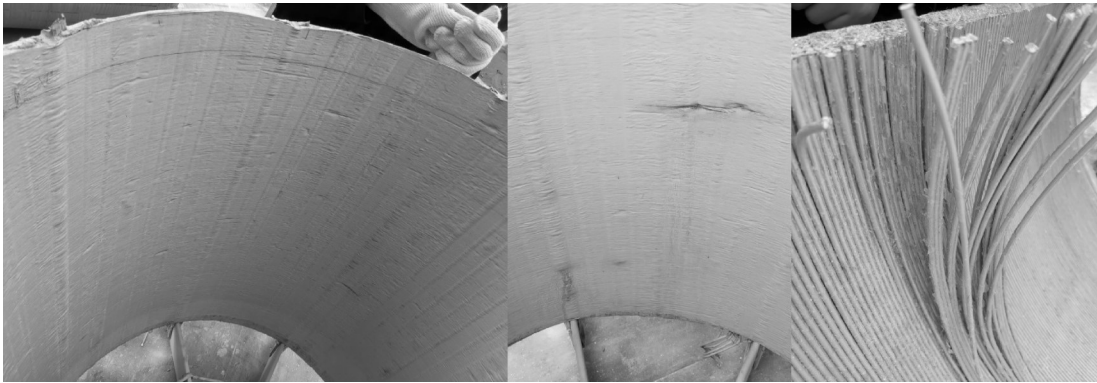


图11 B相电抗器第12层包封内侧裂纹、导线绝缘薄膜老化情况

Fig. 11 Cracks on the inner side of the 12th envelope, aging of the wire insulation film of reactor of phase B

2.2 试验分析

由于C相电抗器已经烧毁,已无法进行相关性能试验,为进一步验证C相电抗器故障情况分析的准确性,对未烧毁的B相电抗器进行了直流电阻测量、电抗值测量、损耗测量、电感测量、温升试验和高频脉冲振荡试验,试验情况如下:

1)直流电阻测量:在环境温度20.3℃的情况下,对B相电抗器进行直流电阻测量,测试数据见表2。

| 表2 B相电抗器直流电阻测量情况                                        |                   |                     |            |    |
|---------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|------------|----|
| Table 2 DC resistance measurement of reactor of phase B |                   |                     |            |    |
| 参数                                                      | 出厂值<br>(23.8℃)/mΩ | 回厂实测值<br>(20.3℃)/mΩ | 两者偏差<br>/% | 结论 |
| B相                                                      | 16.080            | 15.630              | -2.80      | 正常 |
| C相                                                      | 16.091            | 烧毁,无测量              | —          | 烧毁 |

2)电抗值测量:在环境温度20.3℃的情况下,对B相电抗器进行电抗值测量,试验电压293.47V,试验电流82.04A,测试数据见表3。

| 表3 B相电抗器电抗值测量情况                                            |       |             |            |    |
|------------------------------------------------------------|-------|-------------|------------|----|
| Table 3 Measurement of reactance values reactor of phase B |       |             |            |    |
| 参数                                                         | 出厂值/Ω | 回厂<br>实测值/Ω | 两者<br>偏差/% | 结论 |
| B相                                                         | 3.542 | 3.577       | +0.99      | 正常 |
| C相                                                         | 3.547 | 烧毁,无测量      | —          | 烧毁 |

3)损耗测量:在环境温度20.3℃的情况下,对B相电抗器进行损耗测量<sup>[14]</sup>,试验电压293.47V,试验电流82.04A,测试数据(损耗值折算到75℃)见表4。

| 表4 B相电抗器损耗测量情况                                 |                 |                   |            |    |
|------------------------------------------------|-----------------|-------------------|------------|----|
| Table 4 Loss measurement of reactor of phase B |                 |                   |            |    |
| 参数                                             | 出厂值<br>(75℃)/kW | 回厂实测值<br>(75℃)/kW | 两者<br>偏差/% | 结论 |
| B相                                             | 15.830          | 16.422            | +3.74      | 正常 |
| C相                                             | 15.902          | 烧毁,无测量            | —          | 烧毁 |

4)电感测量:在环境温度20.3℃下的情况下,对B相电抗器进行电感测量<sup>[15]</sup>,测量结果为11.275mH。

5)温升试验:在额定工作电压、电流及环境温度20.3℃的情况下,对B相电抗器持续运行8h,待线圈温度稳定后,测试各点温度,温升正常,按F级未超标。整体温度为49.4℃,最高温度为上星型架中心84.6℃,4个底脚温度最高为58.7℃,包封最高温度为79.7℃,详见图12<sup>[16-18]</sup>。

6)高频脉冲振荡试验:在环境温度20.3℃及试验电压峰值179kV的情况下,对B相电抗器进行高频脉冲振荡试验<sup>[19-20]</sup>,检查匝间绝缘情况,当试验电压达到耐压峰值的60%时,匝间绝缘

开始下降,当试验电压达到耐压峰值的 70%时,匝间出现击穿。测试数据见表 5,试验波形图见图 13-15。

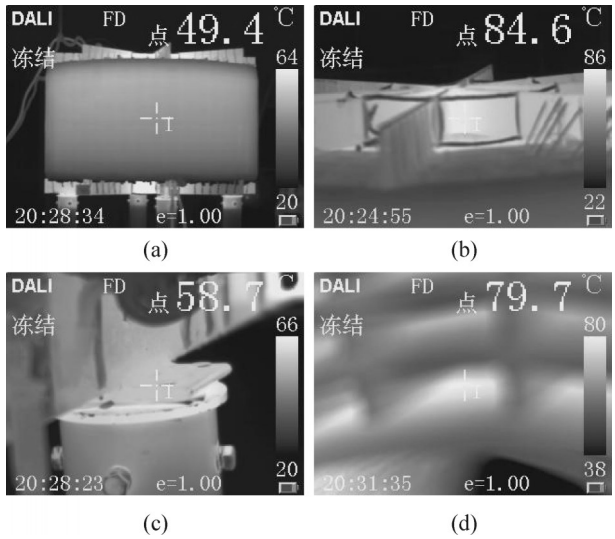


图 12 B 相电抗器温升试验情况  
Fig. 12 Temperature rise test of reactor of phase B

| 表 5 B 相电抗器高频脉冲振荡试验测试数据                                                           |                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----|
| Table 5 Test data of high frequency pulse oscillation test of reactor of phase B |                          |    |
| 施加电压/kV                                                                          | 波形情况                     | 结论 |
| 108                                                                              | 60% 耐压峰值,波形无异常           | 正常 |
| 108                                                                              | 60% 耐压峰值,持续时间 1 min,波形变化 | 变化 |
| 126                                                                              | 70% 耐压峰值,波形异常            | 异常 |
| 144                                                                              | 80% 耐压峰值,波形异常            | 异常 |
| 144                                                                              | 80% 耐压峰值,持续时间 1 min,波形异常 | 异常 |
| 180                                                                              | 100% 耐压峰值,波形异常           | 异常 |

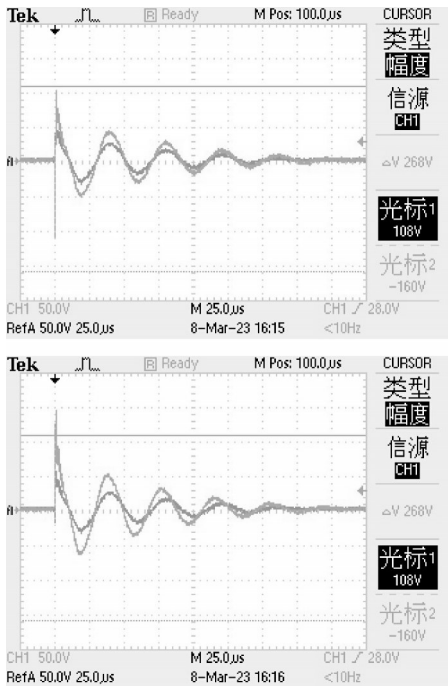


图 13 B 相电抗器高频脉冲振荡试验波形(60%耐压峰值及持续时间 1 min 波形)  
Fig. 13 High-frequency pulse oscillation test waveform of reactor of phase B ( waveform of 60% peak of withstanding voltage and 1 min duration )

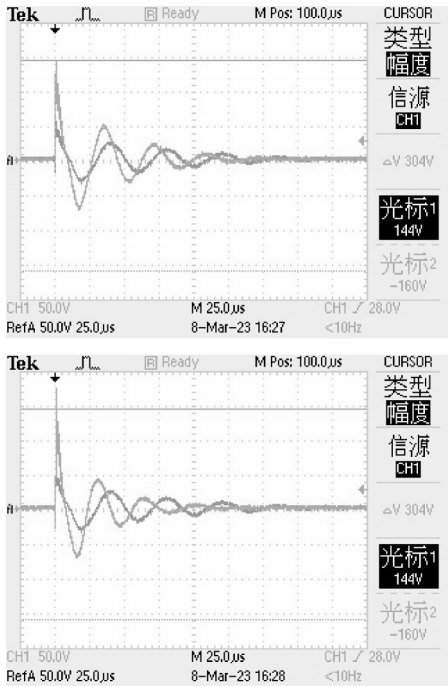


图 14 B 相电抗器高频脉冲振荡试验波形(80%耐压峰值及持续时间 1 min 波形)  
Fig. 14 High-frequency pulse oscillation test waveform of reactor of phase B ( waveform of 80% peak of withstanding voltage and 1 min duration )

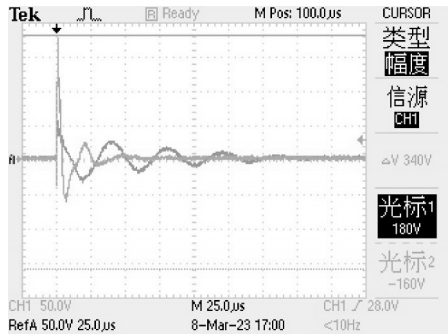


图 15 B 相电抗器高频脉冲振荡试验波形(100%耐压峰值及持续时间 1 min 波形)  
Fig. 15 High-frequency pulse oscillation test waveform of reactor of phase B ( waveform of 100% peak of withstanding voltage and 1 min duration )

2.3 故障情况分析

2.3.1 B 相电抗器故障过程分析

B 相电抗器第 1 次在工频额定电压、额定电流下温升试验,无异常;在进行高频脉冲振荡试验时,试验电压加到 108 kV(60% 耐压峰值)持续 1 min,匝间绝缘开始下降,当电压加到 126 kV(70% 耐压峰值)时,匝间出现了击穿。

从上述情况可以得到,B 相电抗器在工频额定电压、额定电流下,是能够正常运行,本身绝缘水平因老化下降,在受到过电压的冲击后,马上出现了匝间击穿的情况;同时,通过解剖情况来看,B 相第 12 层的导线薄膜绝大部分已受潮、劣化<sup>[13]</sup>,其击穿

点可能出现在任何地方。

### 2.3.2 C相电抗器故障原因分析

C相电抗器解剖时发现第11-12包封(由外向内)下星型架进线端(面向进线端)左侧处上、中、下包封有明显匝间烧熔击穿现象,损坏最严重,其他包封损坏基本均处于包封上端;各包封下部的导线绝缘薄膜完好,无老化、过热情况。可以说明产品匝间短路点应是在第11或12包封上、中、下三处,参见图4-5中的一处(因两层损毁严重,无法判定准确故障点),其余包封受该点影响且受长时间的灼烧(现场故障后持续运行了近2h),故障扩大,各包封上部均有不同程度损坏情况;各包封下部的导线绝缘薄膜完好,说明产品设计符合要求,产品运行了近十年后,环氧劣化开裂,遇雨水天气时潮气浸入包封层内部,导致导线绝缘薄膜加速老化,在电容器组投运时,受过电压影响,电抗器绝缘击穿、起火<sup>[21-23]</sup>。

从上述情况分析可知,造成C相电抗器烧毁故障原因为:当电容器组投运时,电抗器会承受合闸涌流和投切过电压,此时电抗器匝间电压会很高,就会在导线绝缘薄膜薄弱点处造成电压击穿,随着产品继续运行,在击穿点处会不时的出现重击穿,久而久之,使相连两匝导线绝缘完全破坏,相连两匝导线连通,造成匝间短路,短路电流促使产品急剧发热,最终导致产品起火烧坏。

## 3 预防措施

针对本次电抗器组故障,需采取相应的预防措施,提高设备运行的安全可靠性和。

### 3.1 选用高质量产品和采用合理安装方式

1)选用制造工艺水平高,散热效果好,材料绝缘耐热等级高(绝缘耐热等级F级),符合相关标准的电抗器品牌产品。

2)干式空心串联电抗器宜采用分相布置的水平一字形排列或三角形排列结构安装,可有效防止电抗器由单相故障发展至相间故障。

### 3.2 加强现场运行试验、监测和巡视

1)加强对设备检测和试验。可采用局部放电检测法诊断干式空心电抗器匝间绝缘老化情况,也可以利用匝间过电压试验法对电抗器的匝间绝缘进行监测,通过波形对比方法判断电抗器是否存在绝缘故障<sup>[24-25]</sup>。

2)加强对设备监测和巡视。检查电抗器包封顶端和底部绕组表面,是否有开裂、碳化、放电痕迹等异常情况,发现设备存在缺陷应及时处理和维修。

3)加强定期对设备维护保养。定期检查电抗器本体内外表面和底座绝缘子法兰胶装部位,是否有劣化开裂现象,如有应及时进行更换处理。特别是对运行时间为5年左右的电抗器本体表面绝缘漆进行维护保养,应进行重新喷涂表面绝缘防护层。

4)加强红外测温检查。定期对无功补偿装置设备进行红外测温检查,特别是迎峰度夏用电高峰期间,对电容器组频繁投入运行30min内进行红外测温检查。

### 3.3 电抗器顶部加装防雨罩

1)建议考虑对现行执行的合同及即将投运而未加装防雨罩的35kV户外干式空心串联电抗器顶部加装防雨罩。

2)建议对已运行10年左右、未加装防雨罩的35kV户外干式空心串联电抗器进行排查,如出现包封开裂、鼓包、流水、流黄的情况,应及时进行更换。

### 3.4 电抗器加装过电压阻尼装置,抑制操作过电压危害

可以考虑在干式空心串联电抗器上加装过电压阻尼装置,抑制操作过电压的危害。

## 4 结语

1)通过本次对干式空心串联电抗器故障的检查、解体及试验,造成C相电抗器烧毁故障原因为:当产品投运时,电抗器会承受合闸涌流和投切过电压,此时电抗器匝间电压会很高,就会在导线绝缘薄膜薄弱点处造成电压击穿,随着产品继续运行,在击穿点处会不时的出现重击穿,久而久之,使相连两匝导线绝缘完全破坏,相连两匝导线连通,造成匝间短路,短路电流促使产品急剧发热,最终导致产品起火烧坏。

2)通过本次对干式空心串联电抗器故障的原因分析,本文提出了相应的预防和处理措施:①选用高质量产品,采用合理安装方式;②加强现场运行试验、监测和巡视;③电抗器顶部加装防雨罩;④电抗器加装过电压阻尼装置,抑制操作过电压危害等预防和处理措施。通过以上措施,能够保证电抗器安全可靠运行,从而确保电网安全可靠运行要求。

### 参考文献

[1] 安海清,李振动,和立伟,等.一起66kV串联电抗器起火事故分析及预防措施[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(2):93-98.

AN Haiqing, LI Zhendong, HE Liwei, et al. Analysis and prevention measures of a fire accident of 66 kV series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,

- 2020,41(2):93-98
- [2] 李威,张文明,董泉,等.66 kV干式空心电抗器短路故障的分析与处理[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(3):50-55.
- LI Wei, ZHANG Wenming, DONG Quan, et al. Analysis and treatment on short circuit fault of 66 kV dry-type air-core re-actor[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2021,42(3):50-55.
- [3] 张文明,李威,刘亚林,等.35 kV干式空心串联电抗器烧毁原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(5):57-63.
- ZHANG Wenming, LI Wei, LIU Yalin, et al. Analysis cause burn-out of 35 kV dry-type air-core series reactor[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2022,43(5):57-63.
- [4] 周明,曹伟,陈文涛,等.串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(11):147-153.
- ZHOU Ming, CAO Wei, CHEN Wentao, et al. Study on influence of series reactor on power system short-circuit current characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(11):147-153.
- [5] 鲁尧,咸日常,王立权,等.干式空心串联电抗器绕组匝间短路电磁特性研究[J]. 高压电器,2021,57(11):116-123.
- LU Yao, XIAN Richang, WANG Liquan, et al. Study on electromagnetic characteristics of winding inter-turn short circuit of dry-type air-core series reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(11):116-123.
- [6] 彭翔,刘青松,邓军,等.干式空心电抗器匝间绝缘热老化特性研究[J]. 变压器,2021,58(12):55-58.
- PENG Xiang, LIU Qingsong, DENG Jun, et al. Research on thermal aging of turn-to-turn insulation for dry-type air-core reactors[J]. Transformer, 2021,58(12):55-58.
- [7] 古亮,刘肖光,贺娟,等.基于ANSYS的干式空心电抗器股间短路磁场分析[J]. 计算机仿真,2019,36(9):103-108.
- GU Liang, LIU Xiaoguang, HE Juan, et al. Analysis of strand-to-strand short circuit magnetic field of dry hollow reactor unit based on ANSYS[J]. Computer Simulation, 2019,36(9):103-108.
- [8] 黄斌,徐姗姗,田国稳,等.干式空心并联电抗器故障原因分析及防范措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(4):76-79.
- HUANG Bin, XU Shanshan, TIAN Guowen, et al. Fault analysis and precautions on dry-type air-core shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019,40(4):76-79.
- [9] 霍峰,段长君,周广东,等.基于无线热点测温法的干式空心电抗器匝间绝缘状态带电诊断方法应用研究[J]. 高压电器,2020,56(2):215-220.
- HUO Feng, DUAN Changjun, ZHOU Guangdong, et al. Study on the application of on-line diagnosis method for inter-turn insulation of dry-type air-core reactor based on wireless hot spot temperature measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(2):215-220.
- [10] 袁文迁,张超,马鑫晟,等.金属异物及防护措施对干式空心电抗器温升影响的试验研究[J]. 变压器,2021,58(8):73-76.
- YUAN Wenqian, ZHANG Chao, MA Xinsheng, et al. Experimental study on influence of metal foreign bodies and protective measures on temperature rise of dry-type air-core reactors[J]. Transformer, 2021,58(8):73-76.
- [11] 郑玉洁. 温湿度作用下的干式空心电抗器绝缘损坏分析研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.
- [12] 徐光盐. 干式空心电抗器匝间绝缘击穿电压温度特性[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [13] 李文杰,许国龙,罗光鸿. 干式空心电抗器故障类型及成因研究[J]. 电力设备管理,2020(8):63-64.
- LI Wenjie, XU Guolong, LUO Guanghong. Research on failure types and causes of dry-type air-core reactors[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(8):63-64.
- [14] 葛计彬,杜宗斌,赵鑫,等.空心电抗器用低损耗导线探讨[J]. 变压器,2020,57(4):39-42.
- GE Jibin, DU Zongbin, ZHAO Xin, et al. Discussion on low-loss cable for air core reactor [J]. Transformer, 2020,57(4):39-42.
- [15] 黄永刚. 基于RLC串联谐振实现交流电力电抗器电感量的测量[J]. 电器与能效管理技术,2017(14):42-45.
- HUANG Yonggang. Measurement of inductance of ac power reactor based on RLC series resonance[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(14):42-45.
- [16] 王梓,刘溟,邹建明,等.基于TVOC检测的干式空心电抗器过热故障诊断方法[J]. 高电压技术,2017,43(11):3756-3762.
- WANG Zi, LIU Ming, ZOU Jianming, et al. Diagnostic method of dry-type air-core reactors overheating fault based on monitoring TVOC[J]. High Voltage Engineering, 2017,43(11):3756-3762.
- [17] 董建新,舒乃秋,闫强强,等.干式空心并联电抗器过热性故障温度场耦合计算与分析[J]. 武汉大学学报:工学版,2018,51(5):437-442.
- DONG Jianxin, SHU Naiqiu, YAN Qiangqiang, et al. Coupling calculation and analysis of temperature field of dry-type air-core shunt reactor during overheat fault[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018,51(5):437-442.
- [18] 李艳鹏,杨冬冬,陈昱同. 电力设备缺陷红外热像特征研究与应用[J]. 绝缘材料,2015,48(9):38-41.

- LI Yanpeng, YANG Dongdong, CHEN Yutong. Research and application of infrared thermal image characteristics of power equipment defects[J]. *Insulation Materials*, 2015, 48(9): 38-41.
- [19] 廖敏夫, 程显, 翟云飞. 干式空心电抗器脉冲振荡匝间绝缘检测系统的仿真与试验[J]. *高电压技术*, 2011, 37(6): 1343-1347.
- LIAO Minfu, CHENG Xian, ZHAI Yunfei. Simulation and test of pulse oscillation interturn insulation detection system for dry hollow reactor[J]. *High Voltage Technology*, 2011, 37(6): 1343-1347.
- [20] 赵荣普, 李梦滔, 陈井锐, 等. 高频脉冲振荡法在电抗器检测中的应用[J]. *电工技术*, 2020(2): 37-38.
- ZHAO Rongpu, LI Mengtao, CHEN Jingrui, et al. Application of high frequency impulse oscillating method in reactor detection[J]. *Electric Engineering*, 2020(2): 37-38.
- [21] 李浩, 晏年平, 贾志东. 干式空心电抗器包封受潮对绝缘的影响研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(5): 55-61.
- LI Hao, YAN Nianping, JIA Zhidong. Influence of moisture in dry-type air-core reactor package on its insulation[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(5): 55-61.
- [22] 王硕, 张轶珠, 王昕. 干式空心电抗器匝间短路故障投切过电压有限元分析[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(6): 63-70.
- WANG Shuo, ZHANG Yizhu, WANG Xin. Finite element analysis of switching overvoltage of dry-type air-core reactor[J]. *Power Capacitors & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(6): 63-70.
- [23] 聂洪岩, 魏新劳, 姚远航, 等. 热老化对干式空心电力电抗器匝间绝缘操作过电压耐受特性的影响[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(24): 5096-5104.
- NIE Hongyan, WEI Xinlao, YAO Yuanhang, et al. Effect of thermal aging on the characteristic to withstand switching overvoltage of interturn insulation of dry-type air-core power reactor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(24): 5096-5104.
- [24] 聂洪岩, 张潮海, 顾哲屹. 局部放电条件下干式空心电抗器匝间绝缘的电老化特性研究[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(13): 3071-3079.
- NIE Hongyan, ZHANG Chaohai, GU Zheyi. The research on electrical aging characteristics of turn-to-turn insulation of dry-type air-core reactor under partial discharge[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(13): 3071-3079.
- [25] 张大宝, 吴治勇, 张康. 基于局部放电检测的干式电抗器匝间绝缘老化特性研究[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(11): 43-49.
- ZHANG Dabao, WU Zhiyong, ZHANG Kang. A study on the aging characteristics of interturn insulation of the dry-type reactor based on partial discharge detection [J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(11): 43-49.

#### 作者简介:

廖斌(1978—),男,高级工程师,主要从事电力电容器技术研究工作。E-mail:liaobin\_0890@126.com。

冯春林(1982—),男,高级工程师,主要从事电力电容器试验研究工作。

陈松(1979—),男,高级工程师,主要从事电力电容器的介质材料测试及应用性研究工作。

黄桂发(1976—),男,工程师,主要从事电力电容器技术研究工作。