

一起干式空心电抗器匝间短路故障仿真分析

邓志斌¹, 曾磊磊², 万华², 吴朝晖³

(1. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077; 2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 3. 国网江西省电力有限公司鹰潭分公司, 江西 鹰潭 335000)

摘要: 针对一起干式空心电抗器匝间短路故障, 开展现场检查及保护录波分析, 确定了故障过程为C相电抗器匝间短路, 导致温度急剧上升, 内部绕组熔融下滴引发单相接地, 并逐步发展至B、C相间短路故障; 基于ATP软件搭建电容器组投切模型, 仿真分析确定故障原因为电容器组投入时, 串联电抗器两端产生6.25倍的过电压, 在其作用下, 电抗器匝间绝缘薄弱点发生击穿, 引发匝间短路; 再基于ATP软件, 模拟匝间短路的故障发展过程, 其仿真结果与录波的电压、电流波形基本一致, 复现了匝间短路发展至相间短路故障整体过程, 验证了分析的准确性。

关键词: 干式空心电抗器; 匝间短路; 仿真分析

中图分类号: TM 412 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-348X(2024)06-0021-04

0 引言

干式空心电抗器具有重量轻、安装简单、电感器值稳定和价格低廉等优点, 在电力系统中应用日益广泛^[1-2]。近年来, 随着运行年限和数量的增加, 干式空心电抗器故障频发, 其中匝间短路故障占比达90%以上, 严重威胁了电力系统的安全稳定运行^[3]。

干式空心电抗器包封由环氧树脂作为基体, 玻璃纤维作为增强材料包绕而成, 绕组由多层并联的螺旋式铝线构成, 铝线表面缠绕薄膜材料构成了绕组的匝间绝缘。运行经验表明, 在湿热、紫外光、运行振动和投切热胀冷缩等多种因素作用下, 干式空心电抗器匝间绝缘会加速老化乃至失效, 引发匝间短路故障。研究表明, 干式空心电抗器由于漏磁严重, 当其发生匝间短路故障时, 短路匝将流过数百倍大小的额定电流, 产生的热量在极短的时间内导致温度急剧上升, 引发起火等严重故障^[4]。因此, 研究干式空心电抗器匝间短路故障起因及发展过程具有重要意义。

文中针对一起干式空心电抗器匝间短路故障, 开展现场检查及保护录波分析, 确定了故障过程; 基于ATP软件搭建电容器组投切模型, 仿真分析确定故障原因; 基于ATP软件, 模拟匝间短路的故障发

展过程, 其仿真结果与录波的电压、电流波形基本一致, 复现了匝间短路发展至相间短路故障整体过程。

1 事件概况

2023年2月10日11时30分43秒, 某变电站35 kV 1-1C电容器组过流I段保护动作, 314断路器跳闸。运维人员现场检查发现, 该电容器组串联电抗器C相着火。故障电抗器为干式空心结构, 型号为CKGKL-2400/35-12 W, 绝缘耐热等级为F级, 投运时间为2013年06月。上次停电进行例行试验时间为2020年06月22日, 例行试验项目数据均合格。

调阅故障当日视频监控发现, 11时12分, AVC系统自动投入35 kV 1-1C电容器, 11时13分10秒, 35 kV 1-1C电容器C相串抗左上方有轻微烟雾出现; 11时21分38秒, C相串抗下方有星点落地; 11时30分35秒, C相串抗靠电容器侧连接线脱落, 且有强光出现。

2 检查及试验情况

2.1 现场设备检查及试验情况

现场对35 kV 1-1C电容器组串联电抗器进行检

收稿日期: 2024-07-29

作者简介: 邓志斌(1973), 男, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析。

查,发现C相串联电抗器包封层严重烧损,电抗器下表面有环氧残渣,支柱瓷瓶破损并有熔铝凝渣,C相串抗与电容器连接引线脱落,B相线圈最外层包封靠C相侧局部呈黑色;对35 kV 1-1C电容器组等设备进行检查,无异常。

对35 kV 1-1C电容器组串联电抗器进行绝缘电阻测量,A、B相串抗绝缘电阻合格,C相串抗一次对地绝缘电阻为0,表明C相串抗的支柱绝缘子已被铝水短接,测试数据如表1所示。

表1 35 kV 1-1C 电容器串联电抗器绕组绝缘电阻测试数据

相别	A相	B相	C相	要求
一次对地/MΩ	29 700	21 200	0	≥1 000
测试结论	合格	合格	不合格	

2.2 故障录波检查情况

11时12分,35 kV 1-1C电容器投入,查阅1号主变录波文件(见图1),发现1号主变低压侧电流在投入时发生振荡,三相电流振荡衰减速度不一致,其中C相电流在投入348 ms后衰减结束,A相和B相电流至录波结束(505 ms)仍未衰减结束。

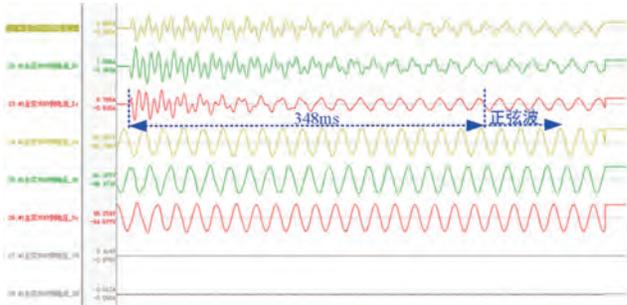


图1 电容器组投入录波

检查录波文件,1号主变故障录波器在11时22分至30分有两段录波,第一段录波时间从11:22:05:890至11:22:13:465,持续时间7 s 575 ms,如图2所示。

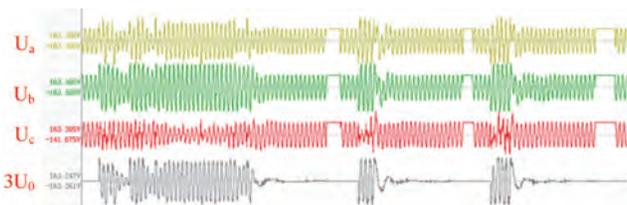


图2 主变故障录波第一段

由图2可知,主变故障录波启动是由于35 kV侧零序电压抬升,在故障录波时间段内(7 s 655 ms),出现4次低压侧C相电压降低,A相、B相和零序电压抬升。零序电压间断抬升,C相电压未降低至0,结合视频监控发现此时C相串抗下方有星点状物落地,说明

此时C相串抗已有绕组或星形架熔融下滴,并形成间断弧光接地。

第二段录波从11:30:37:392至11:30:45:237,持续时间7 s 845 ms,如图3所示。

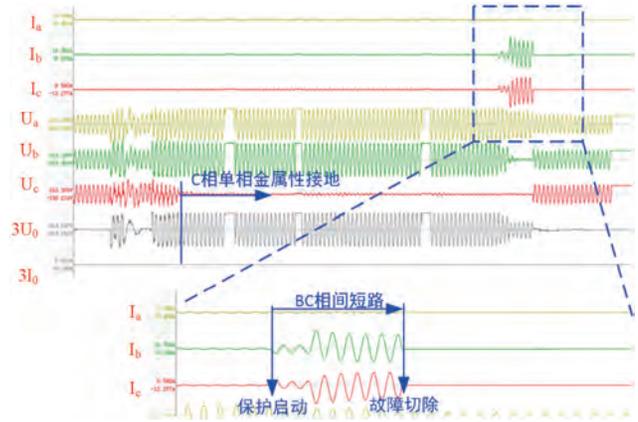


图3 主变故障录波第二段

由图3可知:1) 11时30分39秒623毫秒,主变低压C相电压下降至0并保持稳定,说明C相串抗由单相不完全接地发展为单相金属性接地故障,结合现场检查发现C相串抗支柱绝缘子上有熔铝痕迹,判断绕组或下星形架在高温下熔融,形成铝水流过支柱绝缘子表面与地短接,导致C相串抗发生单相金属性接地故障。2) 11时30分43秒837毫秒,B相和C相低压侧电流陡增,大小相等、相位相反,并达到过流I段保护动作定值,保护启动,105 ms后过流I段保护动作,跳开314断路器,1号主变低压侧电流电压均恢复正常。由B相和C相电流特征,判断B相和C相发生相间短路故障。

3 仿真分析

3.1 电容器组投入过电压仿真

基于ATP开展1号主变35 kV 1-1C电容器组投入暂态过程仿真分析,搭建仿真模型如图4所示。

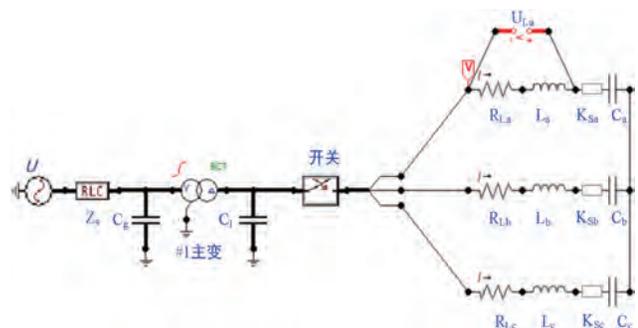


图4 1-1C 电容器组投切仿真模型

图4中, Z_s 为系统阻抗,根据GB 1094.5—2008《电力变压器 第5部分:承受短路的能力》, Z_s 取4.17 Ω ; C_g 、 C_1 分别为1号主变高压绕组、低压绕组对地电容,分别取0.023 5 μF 、0.031 6 μF ;1-1C电容器组的相关参数按铭牌值赋值,如表2所示。

表2 1-1C电容器组仿真计算参数

$R_{La}/R_{Lb}/R_{Lc}/(\text{m}\Omega)$	$L_{La}/L_{Lb}/L_{Lc}/(\text{mH})$	$K_{Sa}/K_{Sb}/K_{Sc}/\Omega$	$C_a/C_b/C_c/(\mu\text{F})$
15.63	11.27	0.2	107.76

令0.1 s后314断路器合闸,测量串联电抗器两端的电压波形,如图5所示。

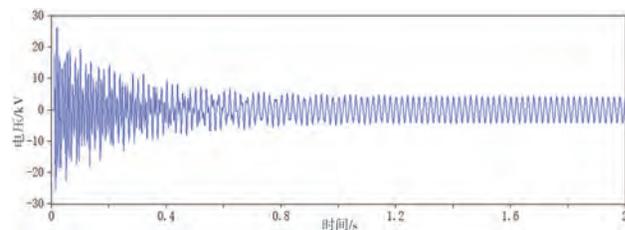


图5 串抗电压仿真结果

由图5可知,电容器组投入时,会在串抗两端产生过电压,提取的过电压参数如表3所示。

表3 电容器组投入过电压参数

过电压幅值/kV	稳态电压幅值/kV	过电压倍数	额定电压幅值/kV	偏差/%
26.25	4.17	6.29	4.07	2.46

由表3可知,电容器组投入时串抗承担的过电压幅值达26.25 kV,远高于稳态电压幅值4.17 kV,过电压倍数达6.29。仿真计算的稳态电压与额定电压偏差为2.46%,说明仿真与实际情况接近,仿真精度较高。根据DL/T 1535—2016《10 kV~35 kV干式空心限流电抗器使用导则》中的“表1 绝缘水平”规定:35 kV电抗器匝间试验耐受电压峰值为160 kV,远高于投入过电压幅值26.25 kV,也即匝间绝缘设计对于投切过电压的裕度很高,但当匝间绝缘存在严重缺陷时,投切过电压可能击穿绝缘导致匝间短路。

3.2 故障起始时刻仿真

由图1可知,1-1C电容器组投入时,1号主变低压侧C相电流振荡过程衰减速度大于A、B相,查看监控视频发现,电容器组投入1 min后出现轻微烟雾;此外,电容器组投入时会在串抗两端产生6.29倍的过电压。综上所述,初步怀疑C相串抗在此次投入前已存在匝间绝缘缺陷,电容器组投入时在C相串抗产生的过电压击穿了绝缘薄弱点(缺陷),造

成匝间短路,并进一步引发后续单相接地及相间短路故障。

串联电抗器由多层包封并联组成,每个包封并联有数层线圈,当串抗发生匝间短路,即在绕组中构成了短路匝闭合回路,将会引起如下变化^[5]:

1) 短路匝引起电抗器有效匝数减少,导致电抗器整体电感量减小;

2) 其他线圈产生的磁通通过短路匝闭合回路,产生感应电动势,并由于短路匝阻抗很低,感应电动势将产生数十倍额定电流大小的环流,环流在线圈中产生方向相反的磁场,削弱整个电抗器的总磁场,进一步减小串抗的电感量;

3) 短路匝内的环流会引起电抗器的损耗增加,对外等效为直阻增大。

综上所述,当串抗发生匝间短路,可等效为电感减小和直阻增大。根据3.1节中的电容器组投切仿真模型,改变C相串抗电感与直阻取值,当电感减小,直阻增大时,仿真计算的1号主变低压侧三相电流的波形特征(见图6)与录波文件(见图1)基本吻合,其中C相电流分别在投入后的348 ms和355 ms时刻完成衰减,说明两者的衰减时间常数基本一致。由此,确定C相串抗在电容器组投入瞬间即发生匝间短路。

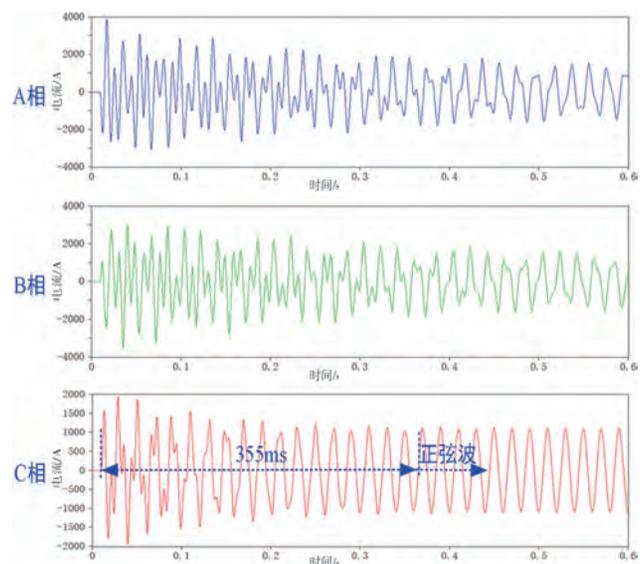


图6 1号主变低压侧电流仿真结果

3.3 故障发展过程仿真

搭建C相单相接地故障和B、C相间短路故障

模型,如图7所示。 S_1 断路器模拟C相串抗单相金属性接地故障,令 S_1 断路器0.1 s闭合, S_2 断路器及 R_d 模拟B、C串抗在进线侧发生相间短路,令 S_2 断路器4.314 s闭合, R_d 为 $1\ \Omega$,令314断路器4.474 s断开,模拟差动保护动作切除314断路器。

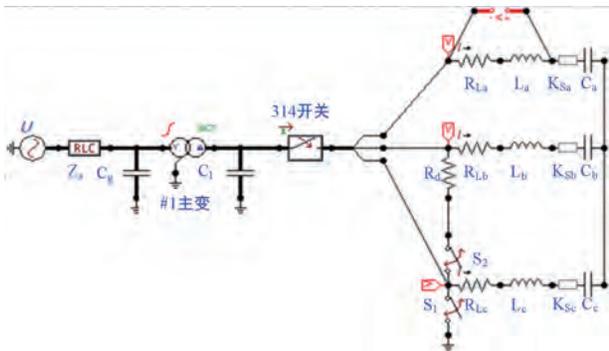


图7 单相接地及相间短路故障仿真

仿真计算B、C相间短路的电流,如图8所示,其波形特征与录波文件(见图3)一致。

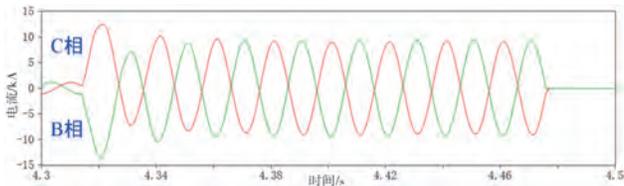


图8 B、C相间短路电流

4 结语

文中针对一起干式空心电抗器匝间短路故障,开展检查试验及录波分析,确定了故障过程为C相电抗器匝间短路导致温度急剧上升,内部绕组熔融下滴引发单相接地,并逐步发展至B、C相间短路故障;基于ATP软件搭建电抗器投切及匝间短路模型,仿真分析确定了故障原因并复现了故障发展过程。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 祝令瑜,杜一鸣,高璐,等.不同频率激励下干式空心电抗器匝间绝缘缺陷振动分布特性[J].高电压技术,2022,48(8):3201-3209.
- [3] 王瑞科,郭香福.干式空心电抗器匝间绝缘故障对总体特性的影响及检测方法[J].变压器,2000(9):32-35.
- [4] 甘源,白锐,张琪.基于场路耦合的干式空心电抗器稳态电磁场及电动力分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(21):144-149.
- [5] 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.

(上接第16页)

- [10] 胡焯红.电晕放电臭氧的产生机理与监测研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
- [11] 刘源.差分吸收光谱法测量臭氧浓度的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [12] 张伟,吕泽承,樊宇璐,等.基于紫外吸收光谱检测开关柜局部放电的方法[J].绝缘材料,2017,50(3):57-61.

- [13] 环境保护部.环境空气臭氧的测定靛蓝二磺酸钠分光光度法:HJ 504-2009[S].北京:中国环境科学出版社,2009:1-6.
- [14] 张月琴,汪燮抑,杨海鹰.气体中氮氧化物分析方法进展[J].现代科学仪器,2009,3:109-111.
- [15] 环境保护部.环境空气氮氧化物(一氧化氮和二氧化氮)的测定盐酸萘乙二胺分光光度法:HJ 479-2009[S].北京:中国环境科学出版社,2009.