

220kV 变压器低压侧 10kV 无功补偿装置电容器绝缘故障分析

李超超 胡记伟

长兴华强电子股份有限公司 浙江湖州 313000

【摘要】在电力系统中，电容器的无功补偿能够有效提高系统电压的稳定性，降低电容系统在输电过程中的损耗以及变电损耗。无功补偿装置的故障会严重影响电容系统的正常工作，通过分析220千伏变压器低压侧10千伏无功补偿装置电容器绝缘故障，主要针对电容器外熔断器保护全部熔断以及本体烧毁事故展开讨论，基于无功补偿装置的常见故障。具体分析事故情况以及设备的基本情况，从电容器绝缘以及故障的发展过程等角度探讨内部元件故障的原因以及不平衡保护未动作的原因。

【关键词】无功补偿装置；电容器；绝缘故障

Analysis of insulation fault of capacitors in 10kV reactive power compensation device on low-voltage side of 220kV transformer

Li Chaochao Hu Jiwei

Changxing Huaqiang Electronics Co., LTD. Zhejiang Huzhou 313000

【Abstract】In power systems, reactive power compensation using capacitors can effectively enhance voltage stability, reduce losses in the transmission process of capacitor systems, and minimize transformer losses. Faults in reactive power compensation devices can severely impact the normal operation of capacitor systems. This paper analyzes the insulation fault of a 10 kV reactive power compensation device on the low-voltage side of a 220 kV transformer, focusing specifically on the complete melting of external fuses and the burning out of the main body. Based on common faults in reactive power compensation devices, it provides a detailed analysis of the accident circumstances and basic equipment conditions, exploring the causes of internal component failures and the reasons for the failure of imbalance protection from the perspectives of capacitor insulation and the development of the fault.

【Key words】reactive power compensation device; capacitor; insulation fault

近年来我国电网容量也不断增加,这对电力系统的无功补偿功能提出了更高的要求无功补偿可以对电网的功率因数进行改善,提高电压的稳定性。我国的变电站大多采取集中补偿方式,通常采用并联电容器、同步调相机、静止无功补偿装置等进行无功补偿,高压并联电容器作为我国无功补偿系统中的关键设备,接线较为简单,并且具有较为突出的经济性和灵活性,所以高压并联电容器的安全运行直接影响了电力系统运行的稳定性和电能质量。近年来我国电容器可靠性已经得到了一定的提高随着电容器生产工艺和生产材料的改进,电容器故障事故越来越少,但是,近年来较为严重的电容器爆炸事故仍然时有发生,对电网系统的正常生产运营造成了严重的影响。

一、常见的无功补偿装置故障处理方法

(一) 电容器方面的故障

通常造成电容器损坏的原因包括过电压过电流以及电网谐波电网老化等,针对电容器损坏,通常需要更换新的电容器并且保证电容器的各项参数匹配,同时在更换电容器时应当采用正确的操作程序,避免更换过程中出现电击等风险。如果电容器存在渗漏油的问题,则应降低周围环境温度或者减轻电容器的负载,尽可能避免电容器长期运行。除此之外,造成鼓肚变形的原因大多是由于油箱内部故障导致绝缘油被分解成气体,最后随着电容器的长期使用以及运行时间和周围环境的影响,电容器容量会逐渐下降,可以对电容器的电流进行实时测量在电流下降过大时及时更换电容器。

(二) 接触器方面的故障

接触器方面的故障主要包括接触器接触不良和接触器线圈烧坏,如果接触器接触不良则应对接触器的触点进行检查和清洁判断是否因电气连接问题或机械故障导致 或者对接触器

进行维修或更换 如果接触器线圈烧坏则需要选择电流大于电容器电流并且专用切换电容器的接触器 通常造成接触器线圈烧坏的原因是电流小于电容器的电流或者谐波时接触器电流过小 除此之外在选择线圈电压时最好选择 220 伏电压的接触器避免电容器与接触器串联时出现自由振荡的问题。

（三）其他方面的故障

除此之外还存在其他方面的故障，比如控制器无显示，此时应当检查是否存在电源未引入到控制器的问题，可以采用万用表进行检测，同时判断控制器本身是否损坏如果控制器损坏则应立刻更换。无功补偿装置还可能存在电路板故障比如电路板元件损坏或焊接出现问题等，可以对故障电路板元件进行更换或对电路板进行整体更换，此外如果接线端未接紧也会导致电容器连接回路导线严重，发热或烧焦应当对电容支路的相关接头进行检查判断其是否接紧，同时对接头进行工艺处理检查导线设计是否符合标准。

二、220kV 变压器低压侧 10kV 无功补偿装置电容器绝缘故障分析及设备情况

（一）故障情况

本文针对某一 220kV 变压器低压侧 10kV 无功补偿装置电容器绝缘故障展开分析，多个电容器外熔断器以及不平衡保护电流互感器烧毁，经调查发现这些电容器分别存在过渡现象电容值不合格以及电容器损坏等问题。

（二）设备基本情况

本文所分析的 变电站电容器组配置采用过电流保护和不平衡保护以及外熔丝保护三种方式，其中不平衡电流互感器采用变比 15/5 的 ZJG-10 型。过流保护中采用不同的保护定值，电容器不平衡保护采用 CT 电流保护。

三、故障分析

（一）电容器绝缘分析

本文所分析的故障一定是过电流造成的熔断器烧毁和爆炸以及过电压造成的电容器鼓肚和爆炸，本次研究在现场分别选择鼓肚和爆炸的两只电容器进行解剖。事故中发生爆炸的电容器位于高电位端通过对电容器解剖发现每一串都有一个发生贯穿性放电的芯子 并且绝缘处存在其穿孔和击

穿痕迹连接片出现烧熔的现象。心子绝缘纸出现发黄变脆的问题并且绝缘老化十分严重，有心子发生贯穿性放电，大部分击穿孔都位于侧面小圆弧处。

（二）故障的发展过程

通过对现场故障现象、录波数据以及电容器解体检查结果的综合分析，可以系统性地还原故障发展全过程：在正常运行状态下，电容器组受到开关合闸操作产生的暂态冲击影响，其中一相电容器内部元件首先出现绝缘劣化并发生故障。熔断过程中产生的强烈电弧放电现象引发系统电压显著波动。由于不平衡保护装置存在动作延时或灵敏度不足等问题，未能及时切除故障点，导致故障持续恶化，最终造成电容器心子与金属外壳之间形成贯穿性击穿，发展为单相接地故障。接地故障发生后，系统电压分布发生严重畸变，非故障相电压瞬时升高至额定电压的 2.5-3 倍。在此极端过电压工况下，部分电容器因绝缘强度不足而发生爆炸和鼓胀等严重损坏。短路电流瞬时峰值达到 4500-6000 安培量级，但由于故障发展迅速，持续时间仅维持 12-15 毫秒。由于过流保护装置整定值偏高且动作时限设置不合理，未能及时切断故障回路，导致外熔断器在短路电流的持续作用下发生连锁性熔断事故，造成设备严重损毁。

（三）内部元件故障原因

该故障的诱因主要包括电容器投切过程中产生的冲击导致三相电压波动。通过解剖检查发现该故障的主要诱因在于电容器投切过程中产生的冲击电流引发三相电压波动。经解体检查发现，电容器内部芯子存在显著的绝缘老化现象，具体表现为绝缘纸呈现明显黄变、脆化等特征。造成绝缘加速老化的根本原因可能涉及两方面：一是生产过程中真空浸渍工艺执行不彻底，导致绝缘介质存在缺陷；二是选用的绝缘纸材质不符合标准要求。上述质量问题显著降低了电容器的内部绝缘性能，在长期运行过程中，过电压的累积效应最终导致内部元件发生击穿事故。值得注意的是，该电容器采用传统的膜纸复合结构设计，存在多处设计缺陷。具体表现为内熔丝布置在元件端部且相互隔离间距不足，更为严重的是，在此类极端工况下，外熔断器可能出现熔断或炸裂现象，这将进一步扩大事故的影响范围。

（四）不平衡保护未动作原因

本文研究的电容器采用内熔丝保护和双星型不平衡电流保护的模

达到整定值不平衡,电流保护模式会使中性线电流互感器二次侧的电流继电器跳开开关,避免故障进一步发展,通过此次故障的核实可以发现,双星型不平衡电流保护并没有起到作用导致电容器烧毁,根据各项参数以及我国高压并联电容器装置保护导则,双星型不平衡电流保护计算公式可以得出该型号电容器的保护整定值并不合理,计算公式如下

$$k = \frac{3MNmn(K_v - 1)}{K_v(3MNn - 3MN + 6N - 5)}$$

四、仿真分析及结果分析

本研究通过电磁暂态仿真软件对故障现象进行了系统性复现验证。为精确模拟故障发展全过程,建立了包含理想电源、串联电抗器、电容器组及开关元件的高精度等效分析模型。故障发展过程可分为三个主要阶段:第一阶段为初始故障发展阶段。此阶段主要表现为 A 相发生接地故障,导致 B、C 相电压波形出现严重畸变现象。故障初期虽然尚未引发保护装置动作,但已对系统电压质量产生明显影响。第二阶段为故障扩展阶段。过电压状态一直持续到右侧 A 相外熔断器完全熔断为止。第三阶段为故障最终隔离阶段。最终在阶段末期出现 A、B 相间短路故障,导致外熔丝因过电流全部动作,从而完成整组电容器的最终隔离,系统电压得以恢复正常运行状态。仿真结果与现场故障录波数据在波形特征、时间序列及幅值变化等方面均表现出高度一致性,充分验证了故障原因分析的正确性和可靠性。由于外熔断器阻抗极低,无法有效抑制涌流幅值,最终导致不平衡 CT 及一次侧低压避雷器烧损。仿真数据显示: A 相短路故障时,流经不平衡 CT 的涌流峰值达到 3.535kA,显著超过该 CT 的额定短时热电流(1.125kA)和额定动稳定电流(2.25kA)限值,这是造成设备损毁的根本原因。

针对电容器故障问题,根据仿真分析提出以下改善建议:第一,加强绝缘状况监测。电容器组在长期运行后可能出现绝缘老化问题,特别是在过电压条件下容易引发故障。建议对运行时间较长的电容器组加强绝缘监测,及时更换存

在绝缘缺陷的设备,防止带病运行。第二,改进不平衡 CT 选型。针对故障时放电电流过大导致 CT 损坏的问题,建议选用加强绝缘型 CT,或在满足保护灵敏度要求的前提下适当提高变比,确保设备能够耐受故障状态时的涌流冲击。

五、220kV 变压器低压侧 10kV 无功补偿装置改造方案

(一)对喷逐式熔断器安装方式进行改造

喷逐熔断器的安装位置选择在电容器与电流互感器(CT)之间的放电区间前端。基于现场实际运行条件和试验验证结果,对喷逐式熔断器的安装方式进行了优化调整:采用 45° 倾斜角安装方式,并将尾线回收方向朝向外侧。这种改进设计能够确保在熔断器动作时,尾线能够迅速甩出并实现可靠回收。

(二)重新设置 RVC 控制器

第一,提升 RVC 控制器的功率因数目标设定值,由原设定值调高至 0.97。实测数据表明,当 4 组电容器全部投入运行时,系统功率因数稳定在 0.96 左右,适当提高目标值可显著改善运行稳定性。第二,取消 RVC 控制器的功率因数报警切除功能。考虑到该信号仅具有报警功能而无实际保护作用,且会导致系统运行波动,为保障供电连续性,决定取消该报警切除功能。第三,延长电容器组的投切时间间隔,将原有的 450 秒切换周期调整为 600 秒。这一改进措施确保了电容器在切除后能够获得充分的放电时间,有效降低了再次投入时可能产生的冲击电流,从而提高了设备运行可靠性。

总结

总而言之,变电站无功补偿作用直接受到电容器绝缘状态的影响,在绝缘工作场强的设计中,应当结合变电站现场运行的条件以及相应的标准确保电容器能够稳定运行。作为电力系统功补偿的核心设备,电容器故障会严重影响电力系统的正常运行,所以应通过分析提高电容器工作质量,保障电力系统运行的稳定性。

参考文献

- [1]李凯宇.某变电站 10kV 集合式电容器故障分析[J].电力电容器与无功补偿, 2010(2).
- [2]廖斌,梁晨,陈松,冯春林,黄楚秋.一起 35 kV 并联电容器装置故障原因分析[J].电力电容器与无功补偿, 2022(5).
- [3]李凯宇,李劲彬.35kV 断路器切电容器组引起三相短路故障的分析[J].电力电容器与无功补偿, 2014(1).