

文章编号: 1001-1609(2007)02-0143-03

雷击造成主变压器中性点击穿的原因分析及建议

胡晶晶¹, 曾丽², 饶林²

(1. 重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 德阳电业局, 四川 德阳 618000)

Analysis and Suggestions on the Neutral Point Breakdown of 7 Main Transformers Due to Lightning Stroke

HU Jingjing¹, ZENG Li², RAO Lin²

(1. The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 40044, China; 2. Sichuan Deyang Electric Power Bureau, Deyang 618000, China)

摘要: 介绍了德阳绵竹地区因雷击而造成的7台110 kV主变中性点间隙击穿并使其中5台跳闸的情况。详细分析了保护动作行为,并指出了主变压器跳闸的原因。校验了中性点间隙与避雷器之间的配合,提出了增大间隙并延长间隙过流保护动作时限以躲开线路重合闸的方法,以减少停电时间并避免主变压器不必要的跳闸。

关键词: 变压器; 中性点; 间隙; 过电压

中图分类号: TM86

文献标识码: B

Abstract: In terms of the tripping cases resulted from the neutral point breakdowns of seven 110 kV transformers due to lightning stroke in Deyang city, this paper analyses the protection action in detail, checks the coordinations between the neutral gap and the surge arrester protection level, and suggests that the line re-energization can be dodged through prolonging the gap overcurrent protection time and increasing the gap clearance.

Key words: transformer; neutral point; gap; overvoltage

0 引言

2005年7月1日凌晨,德阳绵竹地区遭受了近十年来最强烈的雷暴天气,几小时内落雷达上百次,发生了因雷击线路而造成绵竹地区共7个110 kV变电站7台主变压器的中性点间隙放电,其中的5台主变压器保护间隙过流保护动作并相继跳闸的电网事故。通过对这次事故中主变压器跳闸情况进行具体分析,指出主变压器中性点避雷器、保护间隙和保护跳闸时限配合存在的问题并提出初步的建议。

1 运行方式和事故经过

故障时220 kV新市变电站为主供电源,110 kV

双母线并列运行。110、35及10 kV侧均没有电源供电。七个110 kV变电站的主变压器均不接地。由新市变电站1号主变压器中性点直接接地运行,2号主变压器中性点不接地运行。

2005年7月1日,由于雷击造成了如下电网事故:龙桥变电站1号主变压器中性点间隙击穿,主变压器保护装置动作,两侧开关跳闸,110 kV龙东线171号开关两次跳闸并两次重合成功;孝泉变电站2号主变压器中性点间隙击穿,主变压器保护装置动作,三侧开关跳闸,110 kV孝东线143号开关跳闸并重合成功;白庙变电站1号主变压器中性点间隙击穿,主变压器保护装置动作,两侧开关跳闸;圣母泉变电站1号主变压器中性点间隙击穿,主变压器保护装置动作,两侧开关跳闸;林辰变电站(用户)1号主变压器中性点间隙击穿,主变压器保护装置动作,两侧开关跳闸;绵竹变电站1号主变压器中性点间隙击穿,绵竹站110 kV龙竹线162号开关跳闸;东北变电站1号主变压器中性点间隙击穿;新市站110 kV新孝线136号开关跳闸并重合成功。

2 故障描述

2.1 事故过程

事故后通过对各站保护装置动作报告和故障录波综合分析,发现造成这次事故是分别由两次雷击引起的。故障时系统接线方式见图1。

第1次雷击引发的故障发生在2005年7月1日3时42分,造成孝东线AC两相接地短路,龙东线AB两相接地短路。龙桥站110 kV龙东线171号开关保护装置接地距离一段31 ms出口动作,重合闸

收稿日期: 2006-12-19

作者简介: 胡晶晶(1979-),男,硕士研究生,研究方向为变压器绝缘配合和局部放电在线监测。

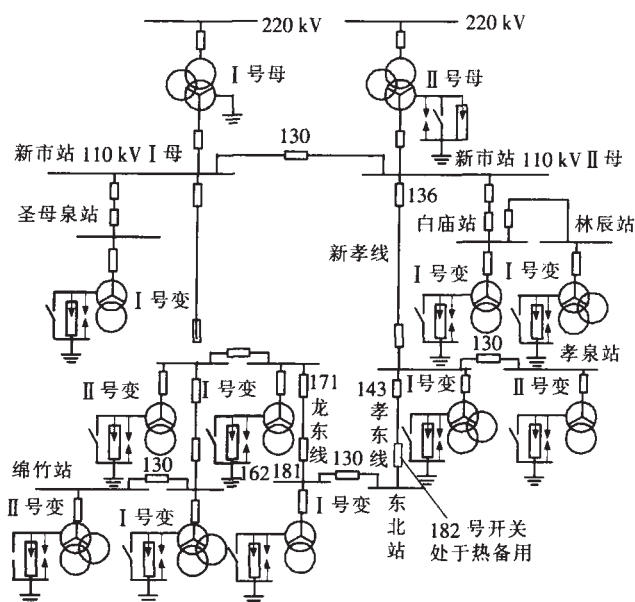


图 1 故障时系统接线方式

1 088 ms 动作, 开关重合成功; 孝泉站 110kV 孝东线 143 号开关保护装置零序二段、接地距离二段 1016ms 出口动作, 于 2 081 ms 重合。在故障瞬间, 龙桥站 1 号主变压器、孝泉站 2 号主变压器、圣母泉站 1 号主变压器、白庙站 1 号主变压器、林辰站 1 号主变压器共 5 台主变压器中性点间隙被击穿, 主变压器中性点间隙过流保护经 0.5 s 延时在孝东 143 号开关跳闸隔离故障前动作, 跳开这 5 台主变压器各侧开关。第 1 次故障的动作时序图见图 2。

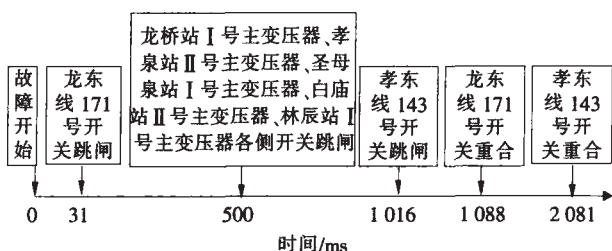


图 2 第 1 次故障的动作时序图

第 2 次雷击发生在 3 时 47 分, 造成了龙东线 B 相接地和孝东线 B 相接地。龙竹线 162 号开关保护装置零序过流一段 53 ms 出口动作, 开关跳闸, 未投重合闸。龙东线 181 号开关保护装置接地距离一段 98 ms 出口, 按调度要求未投保护压板, 保护没有跳闸。龙东线 171 号开关保护装置零序二段 405 ms 出口动作跳闸, 并于 1 508 ms 重合。在线路接地瞬间绵竹站 1 号主变压器、东北站 1 号主变压器中性点间隙被击穿, 由故障动作时序图可以看出龙桥站 110kV 龙东线 171 号和绵竹站 110kV 龙竹线 162 号先于这两台主变压器中性点间隙过流保护整定时间 (0.5 s) 跳闸, 将故障隔离, 所以这两台主变压器未跳闸。但是由于在孝东线上还有故障存在, 因此新市站 110 kV 新孝线 136 号开关保护装置零序 I 段

经 600 ms 延时出口动作, 1 s 后重合成功。第 2 次故障的动作时序图见图 3。

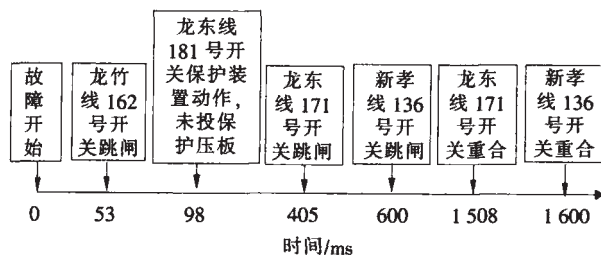


图 3 第 2 次故障的动作时序图

2.2 中性点保护方式

这 7 台 110 kV 变压器中性点绝缘水平均为 44kV (即 LI250AC95), 中性点的保护采用避雷器并联间隙的方式。间隙水平布置, 距离均为 115 mm, 避雷器主要采用的型号为 Y₁W-60/144; 中性点间隙过流保护整定时间均为 0.5 s。

3 中性点间隙击穿原因分析

事故后立即对新市站 1 号主变压器 110 kV 侧中性点接地电阻和这 7 台主变压器的中性点避雷器进行了测试, 结果完全合格。由故障运行方式和前面的分析可知, 220 kV 新市变电站 1 号主变压器中性点在故障前后始终接地, 因此故障前后系统均为有效接地系统。这 7 个 110 kV 变电站通过新市变电站供电, 跳闸是由于龙东线、孝东线同杆架设段遭受雷击, 造成线路接地故障, 导致 110 kV 不接地变压器中性点间隙放电而误跳变压器的事故。由于主变压器中性点是避雷器并联间隙的方式, 所以线路闪络时雷电入侵波的影响不大, 主变压器绕组进波致中性点间隙放电的可能性极小。

由故障录波图分析可知, 两次雷击造成的主变压器中性点间隙击穿均发生在线路接地故障时, 在故障中系统是有效接地系统带两相接地故障运行。虽然是两相接地运行, 但一般两相接地不是同时发生的, 所以用单相接地故障来效验工频放电电压。当发生单相接地故障时, 变压器中性点上的稳态过电压值为^[1]: $U_{gr} = [k / (2+k)] \times U_{x0} = [3 / (2+3)] \times 73 = 43.8 \text{ kV}$, 其中: $k = X_0 / X_1$, X_0, X_1 分别为系统的零序、正序阻抗参数, 取极限情况 $X_0 / X_1 = 3$; U_{x0} 为系统最高运行相电压, 取为 $126 / \sqrt{3} = 73 \text{ kV}$ 。而这次中性点间隙击穿的 7 台主变压器中性点间隙距离均为 115 mm, 考虑 3 倍标准偏差的间隙工频放电电压区间为 $[44.8 \text{ kV}, 60.5 \text{ kV}]$ ^[2]。因此, 有效接地系统在两相短路故障运行中性点稳态电压作用下间隙不会击穿。

在系统发生单相接地故障时, 中性点的工频暂态过电压最大值 $U_{om} = [k / (2+k)] \times (1 +) \times \sqrt{2} U_{x0}$, 式中: $k = X_0 / X_1 = 3$; 为过电压振荡系数, 连续绕组取 0.8, 纠结绕组取 0.6; U_{x0} 为系统最大运行相电压, 取

$U_{xp}=73\text{ kV}$, $U_{om}=[3/(2+3)] \times 1+0.6) \times \sqrt{2} \times 73=99\text{ kV}$ 。

分析发现间隙击穿是由系统接地时产生的类似“操作性质”的过电压作用于主变压器中性点造成的间隙放电。避雷器并联间隙的保护分工是:工频、操作过电压由间隙承担,雷电过电压由避雷器承担,同时又用间隙来限制避雷器上可能出现的过高幅值的工频过电压和过高的残压。此次事故中所用 Y₁W-60/144 型避雷器,其工频参考电压不小于 60 kV,残压 $U_c=144\text{ kV}$,小于变压器中性点的雷电耐受值 250 kV,有一定裕度。变压器的工频耐受电压值 $U_{gp}=95\text{ kV}$, $\min[U_k, U_{gn}]=\min[60, 95]=60\text{ kV}$,由 $U_{gp}=43.8\text{ kV}$,应选择满足 $43.8\text{ kV}<U_{gp}<60\text{ kV}$ 的间隙,查资料可知,100~140 mm 的间隙均满足要求,115 mm 间隙其工频放电电压为 53.3 kV,正负 50%冲击放电电压分别为:102.6 kV 和 99.8 kV,但由于 115 mm 间隙的工放和冲放参数与 Y₁W-60/144 型避雷器配合在实际运行经验中偏低,故在遇单相接地故障时间隙的误动机率较高。由故障录波分析发现,这次中性点间隙击穿的 7 台主变压器在线路接地时,中性点零序电压 $3U_0$ 均已达到或超过中性点间隙的击穿电压。被短时工频过电压击穿(间隙击穿后基本不能自行灭弧),间隙零序电流保护启动,0.5 s 后切除变压器。对照其他省的 110 kV 间隙距离都在 130~140 mm 之间,115 mm 的距离虽然满足要求,但明显偏低,误动机率也就增大了。

4 存在的问题和建议

主变压器中性点由避雷器并联间隙保护时,间隙主要用于保护分级绝缘变压器不接地运行的中性点,当中性点出现危险的工频过电压或谐振过电压时,间隙应动作,避雷器则承担雷电过电压。同时,间隙还可以限制避雷器上可能出现的过高幅值的工频过电压和过高的残压。这种方式既对变压器中性点进行保护,又起到互为保护的目,但间隙与避雷器配合时,间隙的距离大小较难掌握。间隙小了,可能引起保护不必要和过多的动作;间隙大了,起不到限制工频过电压与避雷器可能出现的过高的残压,保护不了避雷器。由于目前采用的间隙的放电分散性大,这个矛盾不好克服。

设计单位提供的中性点间隙尺寸,在现场安装后,并不要求再做试验。而试验室提供的数据是分别在施加工频电压和雷电波的情况下测试的,与实际运行情况相差很大。在雷击造成线路单相接地时,大气与内部过电压往往同时出现,叠加后传递到并有间隙的中性点,此时的过电压既不是纯工频的过电压也不是标准雷电波,在实验室得出的两项独立的数据很难代表所遇到的真实情况。通过对这 7 台变压器间隙的核算可知,它们均满足规程规定的间

隙^[3]在有效接地系统单相接地故障时,间隙在稳态电压下不动作,但在单相接地时出现的各种暂态或稳态电压较高时仍有较大的动作几率。选择保护间隙的原则之一就是要求其当系统以有效接地方式运行发生单相接地故障时间隙不应动作,以免继电保护不正确动作。虽然增大间隙距离可以减小间隙击穿主变压器不必要跳闸的概率,但这不能完全解决主变压器不必要跳闸的问题。间隙距离超出整定范围对主变压器中性点绝缘本身不利,不能保证系统单相接地故障局部失地时间隙可靠动作,中性点绝缘缺陷或线路保护拒动时主变压器可能损坏。间隙增大其动作电压提高,一旦击穿还使产生高幅值有害截波的可能性增大,且间隙灭弧能力差,不能自行灭弧。应严格按照上述的范围整定间隙保护距离,主变压器中性点间隙保护一次配合方面的困难可在二次采取措施解决。

线路的接地故障一般为瞬时性故障,重合的成功率极高(这次跳闸的几条线路按调度整定投了重合闸的都重合成功了)。并且变压器中性点间隙零序保护主要保护变压器,本身不存在和线路保护配合的问题,其动作时限对线路继电保护没有影响,按照继电保护整定规程,中性点间隙零序保护一般情况下按 40~100 A,0.3~0.5 s 整定^[4]。这个时间一般躲不过上一级线路保护的零序二段整定时间,应把间隙的动作时间延长到大于上一级零序二段整定时间,可避免主变压器先于上一级线路保护跳闸。这样则可消除因主变压器跳闸而线路故障保护动作跳闸后重合闸动作仍无法及时恢复供电的情况,也减少了主变压器的不必要的跳闸。

参照变压器的整定情况,零序二段保护时限一般是在 1 s 以内,考虑继电保护装置固有延时和开关跳闸延时,可将间隙零序保护动作时限整定在 0.8~1.2 s 内。

5 结论

(1) 绵竹地区 7 个 110 kV 变电站的 7 台主变压器不接地中性点间隙动作导致主变压器跳闸,由有效接地系统 110 kV 线路雷击接地故障引起,故障时中性点出现的稳态工频电压不高,中心点间隙在系统接地故障瞬间较高的暂态过电压作用下击穿,间隙零序过流保护动作造成线路跳闸前主变压器不必要的跳闸。

(2) 将中性点间隙零序保护动作时限整定为 1.2 s,同时将中性点间隙距离提高到 130~140 mm 之间。

(3) 由于变压器中性点间隙是变压器的核心设备,应加强保护装置动作监视,定期检查间隙是否动作、是否有放电痕迹。如发现间隙(下转第 148 页)

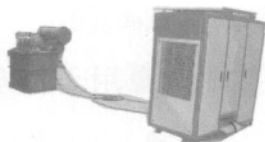


图 2 黄磷 1 号主变压器局放试验现场

4 BPD 型变频电源用于 GIS 耐压试验

2004 年 8 月, 我供电公司对 220 kV 某变电所 16 个 126 kV GIS 间隔进行了交接耐压试验, 加压过程为 73 kV 停留 10 min, 升至 126 kV 老练 5 min, 最后升至 184 kV 耐压 1 min。耐压试验共进行了 3 次, 加压过程中多次击穿, 陆续发现 4 处缺陷: F₁₅ 桔 351 刀闸 C 相电联接屏蔽罩脱落, 5 号母线管母内备用间隔 F₁₃ A 相静触头上缠有铜丝, F₃ 夜明珠线 5 号母线桔 231 刀闸 C 相遗留有吸附剂, F₃ 夜明珠线 5 号母线桔 231 刀闸 A 相遗留有吸附剂。

图 3~图 5 分别为在 GIS 罐体内部找到的遗留物和解体后的实物。经过处理, GIS 本体及各断口耐压试验通过。试验时正值夏季, 气温较高, 试验过程中试品多次击穿未造成变频电源晶体管损坏, 证实了变频电源的选型是正确的, 完全可以满足现场恶劣试验环境的需要。

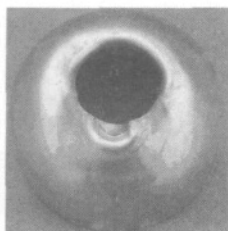


图 3 已变形脱落的屏蔽罩

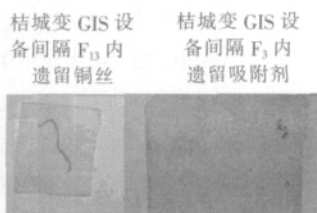


图 4 解体后发现的遗留物

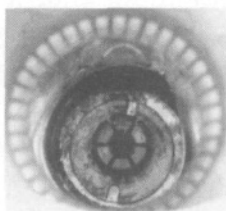


图 5 有放电痕迹的触头

5 BPD 型变频电源用于交联电缆耐压试验

2004 年 12 月, 对得胜街至西陵变电站 XLPE

电缆进行交流耐压试验, 电缆型号为 YJLW03 ($\phi 400$), 电缆总长 2.147 km。试验原理见图 6。

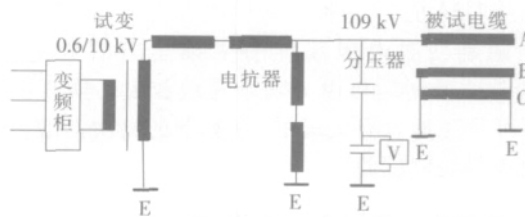


图 6 电缆交流耐压原理图

图中: 试验变压器: ZJB-150, 预选 600 V/10 kV 档, 谐振电抗器: KZZ-55, 额定电感 45 H, 两串两并。试验容量估算: 电缆单相-地电容为 $C=0.16 \mu\text{F}/\text{km} \times 2.147 \text{ km}=0.344 \mu\text{F}$ 。串联回路的谐振频率估算: $f=1/(2 \sqrt{LC})=40 \text{ Hz}$ 。试验电压 $U_s=1.7U_0=109 \text{ kV}$, 则被试电缆容性电流约为: $I=U_s C=9.4 \text{ A}$ 。每节电抗器电流约为 4.7 A, 小于额定电流 6.5 A。试验容量要求: $P_s=U_s I U_c \times 1024.6 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。调频电源柜所需电源容量: $P_L=P_s/30=34 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。变频柜输入电流: $I_L=P_L/(380\sqrt{3})=51.7 \text{ A}$ 。

西陵变电站 10 kV 所变容量 50 kV·A, 可以满足试验要求。

实际试验频率为 41 Hz, 与试验方案中理论计算完全吻合。此次试验后, 用该装置陆续对多根 110 kV XLPE 电缆成功进行了交流耐压试验。

6 结论

(1) BPD 型变频电源一物多用, 既能进行电缆、GIS 耐压, 又能进行变压器局部放电试验。

(2) 用于变压器局部放电的 BPD 型变频电源装置新颖, 设备小巧, 使用新型线性放大技术, 克服了发电机组体积庞大, 维护困难的缺点, 电源本体不含高次谐波, 本体局放量小, 是老式发电机电源的理想替代品。

参考文献:

[1] GB 1094.3-2003. 电力变压器 第 3 部分 绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙[S].
[2] Q/ED 116 501-2004. 橡塑绝缘电力电缆交接和预防性试验规程[S].

(上接第 145 页) 头部有明显烧损痕迹, 应及时打磨, 严重时应更换。每年应核对一次间隙距离, 对新安装的变压器应进行加电技术老练, 提高运行后数据的准确性。

参考文献:

[1] 傅知兰. 电力系统电气设备选择与实用计算[M]. 北京: 中国

电力出版社, 2004.
[2] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
[3] DL/T 620-1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
[4] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.