一起500 kV电流互感器爆炸导致的复杂事故分析

介绍了一起500 kV电流互感器爆炸事件引起的多回线路跳闸和主变压器越级跳闸的复杂事故。通过对故障录波文件中开关量、模拟量等数据的分析，验证了继电保护动作和断路器动作的行为，分析了事故发生的原因和经过。分析结果指出，现有继电保护二次回路下，合闸令与跳闸令同时存在时，跳位返回的及时性对断路器跳闸结果具有重要意义，指出了断路器储能机构在小概率跳闸行为下的不足之处，为今后分析和防范同类事故提供了参考。

俞 斌[1] 张 理[2] 高 博[1] 丁津津[1] 汪 玉[1]/1.国网安徽省电力公司电力科学研究院 2.国网安徽省电力公司经济技术研究院

俞 斌/工程师

关键词/Keywords
电流互感器·
爆炸·
重合闸·
拒动·
主变压器跳闸·

0 引言

电流互感器是重要的电气一次设备，电流互感器的故障将直接影响到计量和继电保护等系统的正常运行[1]。近年来，由于工艺等问题造成电流互感器爆炸的事件也时有发生[2-5]。爆炸引起的事故发展过程往往迅速、复杂，期间保护装置、断路器结构如果不能及时、准确动作，极可能造成事故范围扩大[6-7]。

2015年8月9日06点33分04秒，某500 kV变电站在正常运行时，发生电流互感器爆炸着火事故。下图为该变电站及相邻厂站中与本次事故相关的一次系统接线示意图，发生爆炸着火事故的电流互感器为乙变电站5032中断路器电流互感器，如图2中虚线圆圈所示。事故造成乙变电站5032断路器所连接的甲乙线、乙丙线和丙变电站1#主变压器停运。爆炸现场碎片分布广，一次设备放电点较多，保护动作较为复杂且存在断路器拒动情况。

本次事故保护动作存在诸多偶然性，特别是断路器跳闸行为具有稀缺性和代表性。本文从保护动作行为、断路器动作行为及故障录波数据出发，结合一次设备损毁和放电情况，对事故的原因、经过进行了分析，以期对今后分析和防范同类事故提供参考。

1 事故前运行方式

1.1 一次系统运行方式

甲发电厂：第一串断路器5011、5012和5013均运行，5012、5013断路器带甲乙线路运行，5011、5012断路器带甲发电厂1#主变压器、1#发电机运行。

乙变电站：第三串断路器5031、5032和5033均运行，5031、5032断路器带乙、丙线路运行，5032、5033断路器带甲乙线路运行。

丙变电站：第一串断路器5011、5012和5013均运行，5012、5013断路器带乙丙线路运行，5011、5012断路器带1#主变压器运行，1#主变压器三侧断路器

图 一次系统接线示意图

均在运行状态。

1.2 二次设备运行方式

本次事故涉及的三个厂站线路保护主保护均为纵联差动保护，自动重合闸配置在断路器保护中，重合闸方式为单重单跳方式，所有保护均为微机保护，双套配置，并均正常投入运行。

2 保护动作及断路器跳闸情况

2.1 乙变电站保护动作及断路器跳闸情况

2015年8月9日06时33分04秒430毫秒起，甲乙线路保护动作情况如下：11 ms时，差动保护动作跳5032、5033断路器B相；709 ms时，距离加速；1 143 ms时，差动保护动作；1 165 ms时，距离加速；1 661 ms时，差动保护动作；1 680 ms时，距离加速；1 684 ms时，距离I段动作；1 746 ms时，零序加速；1 847 ms时，单相运行三跳。

乙丙线路保护动作情况如下：23 ms时，差动保护动作跳5031、5032断路器B相；27 ms时，距离I段动作；268 ms时，差动保护动作；360 ms时，差动保护动作；1 142 ms时，差动保护动作。

5031断路器保护在25 ms时B相失灵重跳出口，B相在44 ms时跳开，863 ms时自动重合闸出口，975 ms时B相断路器合上。1 142 ms时乙丙5392线路差动保护再次动作，随后5031断路器三相均跳开。

5032断路器保护在26 ms时三相失灵重跳出口，B相在35 ms时跳开，C相在59 ms时跳开，A相在62 ms时跳开。1 154 ms时，三相失灵重跳再次出口，断路器位置无变化。

5033断路器保护在26 ms时B相跟跳，B相在46 ms时跳开；722 ms时5033断路器保护沟通三跳，在750 ms时A、C相跳开。

2.2 丙变电站保护动作及断路器跳闸情况

乙丙线路保护动作情况如下：23 ms时，差动保护动作跳5031、5032断路器B相；1 142 ms时，差动保护动作；1 187 ms时，差动保护动作；1 258 ms时，距离加速；1 658 ms时，差动保护动作；1 688 ms时，距离加速；1 747 ms时，零序加速；

5012断路器B相在61 ms时跳开后，5012断路器保护动作如下：1 116 ms时自动重合闸动作，1 171 ms时沟通三跳，1 193 ms时B相跟跳，三相跟跳；1 688 ms沟通三跳，A相跟跳，三相跟跳；1 888 ms时失灵跳本开关，失灵保护动作联跳1#主变压器三侧断路器。断路器动作如下：5012断路器B相在1 184 ms重合成功，1 260 ms时B相再次跳开。A、C相在1 180 ms跳开，1 293 ms合上，15 s跳开。

5013断路器B相61 ms跳开后，5013断路器保护动作如下：821 ms时自动重合闸动作，1 173 ms时沟通三跳，B相跟跳，三相跟跳。断路器动作如下：890 ms时5013断路器B相合上；1 180 ms时5013断路器三相跳开。

2.3 甲发电厂保护动作及断路器跳闸情况

甲乙线路甲发电厂侧5012、5013断路器B相40 ms时跳闸后，在重合闸动作之前，保护再次感受到故障电流，差动保护动作，断路器三相均跳开，事故持续期间一直保持分闸状态。

3 跳闸原因分析

3.1 乙变电站跳闸原因分析

根据不同时间不同电气量的表现形式，对乙变电站内保护动作及断路器动作情况进行分析。

（1）0～62 ms

乙丙线、甲乙线B相电压均大幅降低，B相电流明显增大，并出现零序电流和零序电压。5031断路器、5032断路器的录波图电气量变化线路保护录波一致。由上述电气量可以表明，在此时间段内，乙丙线、甲乙线均发生了B相接地短路故障。

因此甲乙线路差动保护在11 ms时跳5032、5033断路器B相；乙丙线路差动保护在23 ms时跳5031、5032断路器B相；5031断路器B相在44 ms跳开，A、C相保持合位运行；均属于正确动作。

5032断路器B相在35 ms跳开，之后在59 ms时C相跳开，在62 ms时A相跳开，几乎同时三相出口跳闸。此处一般情况下本应该B相单跳，实际却是三相均跳闸，经分析，该断路器保护装置跳闸

逻辑中设定为“对于中间断路器，在重合闸起动过程中，同时或者先后有两侧起动重合闸开入的情况下，重合闸充电计数器清零，模拟重合闸放电”，从而直接三相跳闸。此次事件中，5032断路器保护几乎同时收到乙丙线、甲乙线动作跳闸开入，保护装置直接闭重三跳。因此，5032断路器动作行为符合保护逻辑设置，属于正确动作。

5033断路器B相在46 ms时跳开，属于正确动作。

经以上分析，此阶段乙丙线、甲乙线发生B相接地故障，乙变电站内保护与断路器均正确动作。

（2）62～975 ms

5031断路器保护B相在863 ms自动重合闸出口，975 ms时B相合上，属于正确动作。

5032断路器在上一时间已经闭重三跳，在此时间段内保持三相分位。

5033断路器在接到甲乙线路差动保护三跳命令后，于722 ms沟通三跳，750 ms时A、C相跳开。正常情况下5033断路器只需要跳开B相就能切除故障。造成三跳的原因是甲乙线差动保护在709 ms，距离加速动作，向5033断路器保护发送三跳命令并闭锁重合闸。对甲乙线路保护原理进行分析得知，差动保护动作后如果接地距离II段或者相间距离II段动作时，将直接距离加速动作跳断路器三相，并闭锁重合闸。可见甲乙线在重合闸过程中再次感受到了故障，从而距离加速段出口，由5033断路器录波图可知，时间约为620 ms，而5033断路器重合闸整定时间为700 ms，因此以上保护动作均正确。

（3）975～1 174 ms

5031断路器重合后200 ms左右，1 142 ms时乙丙线路保护再次感受A、B相故障电流，差动保护再次出口，于1 178 ms三跳5031断路器。在重合后B相电压短暂正常，但约200 ms后，B相电压继续降低，可见乙丙线B相单相接地故障只是短暂消除，这可能是互感器燃烧爆炸后电弧短暂熄灭，而后再次复燃造成B相接地。

5032断路器在此段时间内保持三相分位。此段时间5032断路器保护装置失灵保护再次出口，说明此时互感器爆炸的油气通道使乙丙线电流互感器有残余电流，从而造成失灵保护动作。

5033断路器在此段时间内保持三相分位。

3.2 丙变电站跳闸原因分析

（1）0～61 ms

乙丙线B相电压降低接近于零，B相电流增大，并出现零序电流，电气量表现与对侧乙变电站一致。由此验证乙丙线发生了B相接地短路故障，乙丙线差动保护、5012断路器保护和5013断路保护都属于正确动作。

（2）61～890 ms

5013断路器保护在821 ms自动重合闸动作，并在890 ms合上B相，此时5012断路器重合闸并未动作，符合边断路器重合闸先动作的逻辑。

（3）890～1 184 ms

5013断路器B相合上以后，正常运行了200 ms左右，A、B相出现故障电流，乙丙线差动保护动作，动作相对时间为1 142 ms，发出三相跳闸命令，5013断路器于1 180 ms三相跳开。此动作与对侧5031断路器重合再跳开基本属于同一时间，属于正确动作。

5012断路器B相跳开后，经1 000 ms重合闸延时（中断路器在边断路器重合后延时重合），1 116 ms左右5012断路器保护重合闸动作，5012断路器B相在1 184 ms时重合成功。由于5012断路器在重合后200 ms后才出现故障电流，5012断路器保护收到闭锁重合闸信号的时间为1 175 ms，此时5012断路器保护的重合闸逻辑已经完成，即重合闸脉冲已发出，所以5012断路器B相重合不受影响，5012断路器B相于1 184 ms合上属于正常动作。

但是，在1 142 ms时，乙丙线差动保护动作后，跳5012断路器三相，而此时B相断路器还未合上（1 116 ms时重合闸脉冲已经发出，而5012断路器收到闭锁重合闸信号的时间为1 175 ms），B相跳闸回路不通，因此差动保护动作的结果为在1 180 ms仅5012断路器A、C跳开，而B相被重合闸信号合上。

(4) 1 184～1 293 ms

5012断路器B相合上、A、C相跳开，故障不能被切除，此时5012断路器的跳闸命令、合闸命令都未消失。在5012断路器B相合上后，B相断路器由于跳令的存在于1 260 ms跳开，而A、C相断路器在跳开后因合闸命令还在，于1 293 ms左右合上，在A、C相合上后，跳令消失，所以5012断路器保持A、C相合位，B相跳位状态。

(5) 1 293～1 658 ms

在1 658 ms，乙丙线再次发生A相单相接地故障，乙变电站5031、5032断路器在分位，故障电流是由乙变电站乙丙线A相导线经电流互感器爆炸时形成的油气通道放电所致。由于断路器保护充电未完成，乙丙线线路差动保护动作，直接跳5012、5013断路器三相，但是A、C相出现拒动，满足失灵保护动作条件，5012断路器失灵保护动作，跳开相邻5011断路器以及主变压器各侧断路器，造成事故的扩大。

4 故障点查验与分析

4.1 现场故障点情况

在对现场进行详细检查后，主要损坏设备如下。乙变电站5032断路器B相电流互感器顶部膨胀器爆炸着火，现场存在大量金属碎件；甲乙线乙变电站侧B相悬挂绝缘子有破损；乙丙线乙变电站侧接地开关A相支柱瓷瓶存在破损；乙丙线乙变电站侧A相电流互感器及A、B相线路侧导线、均压环均有放电痕迹。

依据现有资料、现场排查情况及以上分析，可以判断故障是由于乙丙线乙变电站侧5032断路器B相电流互感器本体发生爆炸引起的，随后又发生两次油气通道的放电，故障点大致如下。①乙变电站5032断路器B相电流互感器本体；②乙丙线乙变电站侧B相悬瓶及横担。③乙丙线乙变电站侧A相导线端。

4.2 几个故障关键点分析

本次故障事件后果较为严重，对其中几个故障关键点分析如下。

1）乙变电站5032断路器B相电流互感器爆炸原因分析。

事故后，对乙变电站5032断路器B相电流互感器进行解体检查发现二次屏蔽罩严重变形、二次屏蔽罩外表面有放电痕迹；顶部储油柜内壁有多处放电点；高压屏等电位线烧毁；直线部分从外至内第四屏至第三屏之间有烧蚀痕迹，电缆纸崩开；末屏接地线脱落。进一步解体发现第四主屏向内第八端屏半导体纸存在破损、折叠，一次导电杆对二次屏蔽罩未见放电痕迹。

根据解体检查结果，并结合现场故障情况，分析故障起因是由于第四主屏向内第八端屏半导体纸存在破损、折叠，产生局部放电造成几个端屏间爬电，形成大量气体，气体扩散至顶部并浸入油纸绝缘，造成主绝缘强度下降，导致二次屏蔽罩对最外层高压屏放电，高压屏等电位线烧断，造成高压屏电位悬浮，之后二次屏蔽罩对储油柜间放电，压力剧增，最终使储油柜炸开并着火。因此，可以认定本次故障的直接原因为该电流互感器器身直线段包扎工艺质量控制不到位造成的。

2）丙变电站5012断路器在B相重合闸动作后，A、C两相为何也被重合。

在1 184 ms左右，丙站5012断路器同时收到合闸命令和跳闸命令，A、C相断路器在跳开后因合闸命令还在于1 293 ms左右合上。断路器重合闸方式为“单重方式”，A、C两相正常情况下不应合闸。

自动重合闸继电器ZHJ串接于A、B、C三相合闸回路中。当B相断路器重合时，自动重合闸继电器ZHJ动作，A、B、C三相合闸回路都将被接通，但由于A、C相本来处于合位，其防跳回路断路器常开辅助触点处于闭合位置，常闭辅助触点处于断开状态，因此A、C防跳回路直接导通，合闸线圈被短路，因此只有B相合闸。

此后，5012断路器收到三相跳闸命令，此时合闸令与跳闸令同时存在。B相被合上以后，其断路器常开辅助触点被闭合，在接收到跳闸令后，其防跳回路被接通，因此直接跳闸。A、C相跳闸后，跳位开入返回较快，使A、C相防跳回路被断

开，而此时A、C相重合闸令依然在，因此A、C相被重合。

3）1 658 ms时丙变电站5012断路器A、C相未跳开原因分析。

在本次事故中，丙变电站5012断路器跳闸事件如下。61 ms时，B相跳闸；1 180 ms时，A、C两相跳闸；1 184 ms时，B相重合闸；1 293 ms时，A、C两相合闸；1 658 ms时，保护跳A、C相，但是跳闸未成功。

最后A、C相拒动，起动了失灵保护，跳开丙变电站5011断路器及主变压器各侧断路器，造成了主变压器停运，扩大了事故范围。

事故中，5012断路器跳闸机构采用三相联动液压储能机构，三相断路器分合闸能量都取自同一液压机构。由以上分析可以看出，整个过程中储能机构经历了“跳－跳－合－合”四次能量释放，即合闸机构和分闸机构分别进行了两次能量释放。液压机构额定压力为32.6 MPa，分闸闭锁压力为25.8 MPa，即一次事故中约有6.8 MPa的压力可用于跳合闸。断路器一次跳闸或者合闸消耗压力约为2 MPa，即最多支持三次跳合闸，与普通事故中满足“跳－重合－跳”三次能量释放相对应。而在本次事故整个过程中，液压机构进行了四次能量释放，且没有足够时间进行重新储能，因此不能满足第五次A、C相的跳闸动作，故出现拒动。

5 结束语

介绍了一起500 kV电流互感器爆炸事件引起的多回线路跳闸和断路器拒动造成越级主变压器三侧跳闸的事故，分析验证了保护动作行为、断路器跳闸情况，具有工程现场实际的借鉴意义。根据分析结果，建议进一步加强一次设备工艺质量把控，改进二次回路和跳闸逻辑，防范特殊事件点上重合令和跳闸令同时存在时可能引起的断路器不确定动作的情况。

参考文献

[1] 何清，罗维，王玮，等．一种仅由绝缘油气相色谱分析发现的电流互感器缺陷 [J]．电力自动化设备，2011，31 (6)：150-153．

[2] 张芳．500 kV电流互感器爆炸事故分析 [J]．电力建设，2006，27 (11)：66-68．

[3] 王学锦，蔡建辉，戴瑞海，等．一起干式电流互感器的爆炸原因分析 [J]．高压电器，2008，44 (6)：587-588．

[4] 林晓宇，陈荣柱，龚列谦，等．一起干式高压电流互感器爆炸事故原因分析 [J]．高压电器，2008，45 (3)：151-153．

[5] 谢海，姚强．一起35 kV电流互感器爆炸事故原因 [J]．中国电力，2011，44 (6)：78-82．

[6] 黄乐，陈亦平，舒双焰．电流互感器故障所致电网事故及其处置的分析 [J]．南方电网技术，2011，5 (4)：68-70．

[7] 晏年平，张宇，邹晓兵．雷电诱发500 kV变电站5台电流互感器故障分析 [J]．高电压技术，2015，41 (5)：1558-1565．

[8] 黄敏，黄淼，彭晓亮，等．一起线路复杂故障引起越级跳闸的事故分析 [J]．电力系统自动化，2014，38 (5)：131-135．

（收稿日期：2016－09－10）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告