

小电阻接地系统中零序保护的缺陷及预防措施

刘 飞

中国电力科学研究院, 北京 102208

[摘要] 本文分析了配电网中性点经电阻接地的接线方式、零序保护的原理和零序保护在各种方式下存在的误动拒动的情况, 结合实例对小电阻接地系统下电缆出线零序保护存在的死区进行分析并提出有效的补救措施。

[关键词] 电阻接地; 零序保护; 死区

DOI: 10.33142/hst.v5i3.6227

中图分类号: TM77

文献标识码: A

Defects and Preventive Measures of Zero Sequence Protection in Small Resistance Grounding System

LIU Fei

China Electric Power Research Institute, Beijing, 102208, China

Abstract: This paper analyzes the connection mode of neutral point grounding through resistance, the principle of zero sequence protection and the misoperation and refusal of zero sequence protection in various modes. Combined with examples, this paper analyzes the dead zone of cable outgoing zero sequence protection in small resistance grounding system, and puts forward effective remedial measures.

Keywords: resistance grounding; zero sequence protection; dead zone

引言

近年来,随着工厂建设规模扩大和供电业务的迅速发展,35kV和10kV配电网基本使用电缆线路,这导致系统中的电容电流逐步增加。如果系统采用消弧线圈接地,需要的补偿容量较大,过电压水平较高,容易出现谐振过电压的现象。而采用电阻接地方式,有效限制过电压水平,不易损坏绝缘,可以实现零序电流速断保护功能,使接地故障快速跳闸,保证了供电的可靠性。对于中压电网来说,中性点经电阻接地的最初出发点,主要是为了限制电弧接地过电压。在小电流接地系统的继电保护选择性获得解决之前,也曾借此来实现故障线路的自动跳闸。本文从小电阻接地方式下零序保护原理出发,分析一起小电阻接地系统电缆线路零序保护因为存在保护死区导致扩大故障范围事例,并提出了配电网中如何消除零序保护死区避免出现误动和拒动的措施。

1 电力系统中性点经电阻接地

在不接地系统中即使电容电流很小,在发生单相接地故障时还是会有间歇性的弧光过电压在中性点产生,导致非故障相的电压迅速增加到破坏绝缘的水平,严重时发展成相间故障。在中性点采用通过电阻接地把弧光过电压产生的电磁能经大地释放掉,使中性点电位下降,故障相恢复电压上升速度也变慢,抑制了电弧重燃,减小电网过电压的幅值,还能为零序保护跳闸创造可靠判据。电阻接地正常分为高电阻接地和低电阻接地。高电阻接地:接地电阻 $R_n = U_p / (0.5 \sim 1) I_C$,多用在要求零序电流不超过10A的系统。低电阻接地:接地电阻 $R_n = U_p / (2 \sim 3) I_C$,零序保护要求要有很高的灵敏度。

1.1 中性点经电阻接地的接地方式的接线

接线方式如图1(a)所示,把电阻器加装在系统的中性点和大地之间。单相接地故障的复合序网如图1(b)所示,零序等值阻抗等于电阻(接入电阻 R_n 与泄漏电阻

R_g 的并联)和各相对地电容的容抗 $1/\omega C_0$ 的并联。如果考虑接地的过渡电阻 R_d ,则零序等值阻抗 $Z_0 = 3R_d + 3R_n/X_c$,零序电压等于零序电流 I_0 在零序等值阻抗上形成的压降 $U_0 = -I_0 Z_0$ 。由于正序等值阻抗加负序等值阻抗比零序等值阻抗小很多,可忽略不计,则复合序网如图1(c)所示。从复合序网可知,由于有接地电阻,系统不会发生工频谐振。

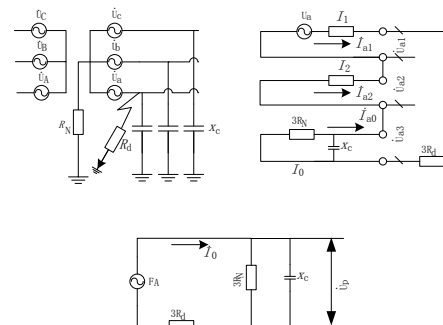


图1 中性点经电阻接地系统

(a) 接线图 (b) 单相接地复合序网图 (c) 简化复合序网图

1.2 高电阻接地方式

依据 DL/T620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》对高电阻定义如下:“高电阻接地的系统设计应符合 $R_0 \leq X_{c0}$ 的准则,以限制由于电弧接地故障产生的瞬态过电压。一般采用接地故障电流小于10A。 R_0 是系统等值零序电阻, X_{c0} 是系统每相对地分布容抗”。这种接地方式多用在系统电容电流小于10A、电压等级为10kV及以下中低压的系统中。在系统的实际电压很高时,接地电容电流超过规定值后,这种接地方式也就不满足运行要求了,此时必须要改造接地方式。想要把非接地相过电压钳

制在 2.6 倍相电压, 需 $R_0 \leq X_{C0}$ 。如果要接地电流不超过 10A 时, 最大的接地电阻为: $R_n = U_p / (0.5 \square 1) I_C$ 。

1.3 中电阻接地方式

中性点接地电阻小于 $R_n = U_p / (2 \square 3) I_C$, 零序保护要求有很高的灵敏度。5 次谐波不能被消弧线圈消除, 经实测, 接地电容电流中 5 次谐波电流的含量很高是基波分量的十分之一多, 这些谐波电流加快了故障点绝缘的损坏。电缆线路接地故障绝大部分是永久性接地, 绝缘自然恢复的可能性小, 因此不允许电缆线长时间处于故障状态运行。过电压最大值小于 2.6 倍相电压, 不会对高压电动机绝缘造成损坏, 而通过消弧线圈接地时系统过电压水平会维持在 3.2 倍相电压。中电阻接地下的接地保护能准确选出故障点切除故障, 让系统供电安全可靠。在中压配电系统中, 通过电阻接地的接地方式主要是用来钳制弧光过电压的。也在继电保护自动化装置中得到应用, 用以实现故障线路的自动跳闸功能。

2 电阻接地系统零序保护

2.1 零序保护原理

零序保护的基本原理是基尔霍夫电流定律的一种表现形式, 流入互感器电流等于流出的电流, 可以把零序互感器看作一个节点, 用它来采集变量。在正常运行的情况下, 各相电流处于平衡状态三相电流矢量和为零, 因此零序电流互感器不会采集到变量, 二次绕组无信号输出。在出现单相接地故障时三相电流的矢量和不等于零, 单相接地电流在零序互感器的环形铁芯中感应出磁通, 互感器的二次绕组中产生感应电流流入继电器中, 微机综保采集到变量经过比较判断发信给动作继电器, 带动脱扣装置跳开故障线路的开关, 从而切除故障。

在电缆线路和架空线路发生单相接地故障概率性高, 因此在能够安装零序 CT 的条件下, 尽可能地配置零序保护, 由零序保护可靠的反应线路的单相接地故障。当零序电流互感器 CT 安装在电缆出线上时, 其一次绕组安装在被保护电缆的导体上, 其二次绕组通过线路连接保护继电器。在正常运行或发生相间短路时, 一次绕组无电流通过, 因导线排列不对称二次绕组会产生的不平衡电流。在发生单相接地故障时, 一次绕组流过的电流反映至二次绕组, 通过导线流入继电器中, 微机综保把采集到的电流值与保护动作值比较, 大于动作值经延时出口继电器动作并发出报警信号。

2.2 零序保护所存在的隐患分析

根据电力设计标准, 35kV 及以下电缆的接地方式都采用两端接地, 这是因为中低压设备基本用的是三芯电缆, 正常情况下流过三芯电缆矢量和等于零。由于在铝包或金属层内无磁通链接几乎无感应电压在铝包和金属层中产生, 所以在电缆两端单相接地后铝包或金属屏蔽层中无感应电流流过。三芯电力电缆钢铠接地线在通过零序互感器的接地方式有两种: 第一种是零序互感器位于电缆头的上部时, 接地线需在穿过互感器之前在互感器下部接地。第二种是零序电流互感器位于电缆头的下部时, 接地线穿过零序电流互感器后再接地, 保证接地线只有一次穿过 CT。针对这两种情况没有太大区别, 都是为了接地时零序电流能够流过零序电流互感器。也就是说电缆头位于零序互感

器上面时, 接地线必须先通过零序互感器后再接地, 电缆头位于零序互感器下面时, 接地线先接地后通过零序互感器。在屏蔽层穿过零序互感器时, 碰上闪电或很强的电磁场时, 感应电流会流过屏蔽层, 这样会使零序保护有误启动的风险。零序电流互感器测的是三相电流的矢量和, 正常情况下零序电流只是线路中的不平衡电流。在出现单相接地短路时, 非故障相的电容电流总和流过电缆屏蔽层。此时屏蔽层在零序 CT 上面接地的话, 那么流过 CT 的综合电流等于零, CT 不能检测出零序电流。

零序保护在实际设备实施中, 可以在三相线路上分别安装一组 CT, 或把零序 CT 直接套在三相线路上, 再或者在中性点引出线上加一组零序 CT, 根据基尔霍夫原理正常情况下 CT 采集到的电流矢量和等于零, 在线路上带的三相负荷相同时, 回路中没有零序电流; 在线路所带的设备由于断相或启动大电机时三相负荷不相等, 这种情况下回路中会产生不平衡电流; 在某一相出现单相短路故障时, 回路中肯定会有零序故障电流, 这时 CT 采集到零序电流为三相不平衡电流和零序故障电流的矢量和。

在小电阻接地系统中, 当出线电缆发生单相接地故障时应由该线路的零序保护动作, 出口跳开故障线路的断路器。当线路的零序保护拒动时, 应由上级接地变压器的零序保护动作跳开接地变压器的高压开关, 对于个别的运行情况还需跳开主变压器低压侧开关。零序保护配置的合理性与系统的安全运行息息相关。根据运行经验, 电缆线路的零序保护采用专用外接零序电流互感器存在一些隐患: ①外接零序 CT 安装在线路电缆接头下方, 在电缆头发生故障时, 零序互感器无法检测出故障电流, 导致保护不能正确动作。②由于电缆出线外屏蔽层接线穿过零序 CT 的接线方式未按照标准规范要求去做, 致使电缆屏蔽层中的电流没有抵消掉, 进而被零序 CT 采集到, 导致保护误动作。

此外零序电流保护在运行中可能还存在以下问题: (1) 在 CT 二次回路断线时, 会增加保护误动作的风险。灵敏度较高的保护都会出现这种情况, 这需要现场在实际运行维护中及时发现整改。根据运行经验电压互感器二次回路断线的概率要比电流互感器二次回路断线的概率大的多。现在大部分综保装置中都有二次回路断线闭锁功能, 可有效防止这种情况发生。(2) 在系统带不对称负载运行时, 会产生不平衡电流, 例如变压器出厂制造时三相绕组参数不一样导致的不对称运行, 在单相重合闸时出现的两相运行, 三相重合闸和手动重合闸时的三相断路器不同期, 母线倒闸操作时断路器和隔离开关并联过程或断路器环并运行情况下, 由于断路器或隔离开关接触电阻三相不一致而出现零序环流, 以及空投变压器时产生的不平衡励磁涌流, 特别是在空投变压器所在母线有中性点接地变压器在运行中的情况下, 可能出现较长时间的不平衡励磁涌流和直流分量, 都可能使零序保护误动作。

3 线路电缆故障案例分析

3.1 案例背景

某 220kV 总变电站, 由 2 台 180MVA 三绕组变压器、2 两台 120MVA 三绕组变压器和 1 台 80MVA 三绕组变压器组

成。220kV 母线采用双母线分段接线，由两路电源供电。全厂系统由 220kV 降为 35kV 和 10kV，35kV 和 10kV 系统均采用单母线分段接线，35kV 系统采用消弧线圈并中阻选线装置，正常运行时中阻接地运行，发生单相接地故障时由选线装置选出故障线路，并切换至消弧线圈接地。电缆采用中间点直接接地，两端采用加保护器接地。35kV 所有出线都配置了零序保护，采用外接零序互感器，动作于跳闸，主变中性点零序保护动作于报警。

3.2 事故经过

某日凌晨 1 点 4#180MVA 主变跳电，保安电源处于无电状态，导致全厂失电。巡检人员对全站进行拉网式巡查，经检查发现是 4#主变中 35kV 3 母之下编号 338 出线柜下部母线室散发出的味道，并有微微烟气冒出，经过检查发现 A 相电缆头已经完全损坏，B 相在 A 相的燃弧放电中损坏不能用。



图 2 现场电缆头故障图

检查在主控室的主变保护有报文显示记录，最大纵差电流 3.86Ie 的一次电流。编号 338 出线柜微机综保报警显示保护启动，保护启动动作，高压真空断路器没有跳闸。4M 母线保护屏显示母线差动电压动作：AB 线电压 25.076V、BC 线电压 94.672V、CA 线电压 82.496V、零序电压 0.000V、负序电压 40.284V，A 相明显已经处于接地状态，相电压下降。4M 消弧线圈选线控制单元显示，连续接地时间超过 0.5 小时。



主变名称	通信地址	报警发生时间	报警清除时间	报警清除人
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞
4#主变	192.168.1.100	2021-09-05 10:04:00	2021-09-05 10:04:00	刘飞

图 3 接地选线装置动作数据记录图

3.3 事故分析

此次事故是单回路接地引起两相短路故障造成主变跳闸引起全站失电。直接跳闸原因 1：电缆头制作工艺精细程度不符合规范要求，从而引起绝缘层对屏蔽层放电，放电时间过长造成相间燃弧直接弧光及金属射流引起相间短路是引起事故的主要原因。此处事故 338 柜不跳闸原因 2：消弧线圈选线装置没有选出对应线路回路进行预警也没有切换至消弧线圈接地方式下，本次事故开始处于单相燃弧接地，弧光对地位置位于零序电流互感器上方，分析不出零序电流的变化，弧光接地电流及两相短路电流均无法进行准确选线，故没有及时跳闸。中后备零序保护出口报警，多次启动但未起到切除故障的作用，从而引起相间故障导致主变差动保护动作，扩大故障范围。

3.4 解决措施

为了消除线路出线零序保护死区，避免线路单相接地故障频发下无保护预警及切除故障，扩大故障范围。对于这种零序互感器安装在电缆头上方的线缆回路建议电缆出线设计和保护配置两段零序保护，零序 I 段保护采用外接的零序电流互感器，零序 II 段保护采用三相 CT 合成零序作为后备保护。零序 I 段保护按躲过与馈线电源侧相连的设备发生单相接地时，流过保护安装处的单相接地电流并可靠躲过最大负荷时的不平衡电流整定，动作时间与下级设备的零序保护配合，在发生单相故障时能可靠动作。零序 II 段保护可按线路单相接地时有足够的灵敏度整定，动作时间可与零序 I 段保护一致或多一个时间级差。这样的话在线路单相接地故障点发生在线路到零序电流互感器的范围能由零序 I 段保护检测动作，当单相接地故障点发生在零序电流互感器下方的电缆头位置由零序 II 段保护通过三相 CT 合成零序检测动作。从而能够保护线路全长，消除零序保护死区。另外在主变中性点零序保护应该出口跳闸切除故障，动作值和动作时间都与各出线线路的零序保护配合，作为所有线路零序保护的总后备，保证在线路单相接地故障时本保护没有动的情况下，由主变中性点零序保护跳开主变低压侧开关，缩小故障范围，保证供电可靠性。避免高压电缆零序保护出现误动作的情况，需在电缆施工放线时把电缆钢铠层两端可靠接地。电缆大部分在高压设备周围，这样的高压环境会产生很强的电磁场，长期处于复杂的强磁场中会在电缆中感应出些许电流。把电缆的钢铠层两端接地，可以有效的在电缆的芯线外面形成屏蔽层，消除感应电流对高压电缆零序保护的影响。

4 结语

在小电阻接地系统，电缆线路出线的零序保护的设计和保护的整定中零序电流互感器多安装在电缆接线头的下方，电缆头故障时，零序电流互感器无法检测故障电流，此时零序保护存在死区。而电缆头由于制作工艺和规范的不同多为故障频发的位置。针对这种情况建议电缆出线设计和保护配置两段零序保护，一段零序保护采用外接的零序电流互感器，二段零序保护采用三相 CT 合成零序作为后备保护，从而消除零序保护死区，增加可靠性，避免事故范围扩大。同时在现场运维过程中要重点关注是否有电缆出线外屏蔽层接地线在穿过零序互感器的接地方式不符合规范要求，保证零序保护的可靠性和选择性。

[参考文献]

[1] 杨健康. 小电阻接地系统单相接地故障下零序保护分析[J]. 农村电气化, 2021(10): 69-70.
[2] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148.
[3] 马珂, 张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J]. 继电器, 2003(5): 65-70.
[4] 王英民. 10kV 小电阻接地系统接地变压器零序保护误动原因分析[J]. 华北电力技术, 2009(1): 24-26.
作者简介: 刘飞 (1994.3-) 男, 石家庄铁道大学四方学院, 电气工程及其自动化, 中国电力科学研究院, 工程师, 初级职称。