[电缆故障]

35 kV单芯电缆铠装层两端接地引发电缆故障分析和处理

文/贲国平
扬子石化-巴斯夫有限责任公司

以两起35 kV单芯电力电缆故障为索引，解读最新国标关于单芯电力电缆金属护层接地的规定和要求，通过计算确认金属套接地方式的正确性，通过分析确认造成电缆故障的直接原因在于施工不当导致电缆铠装层两端接地。因感应电压的存在形成环流，从而在回路中接触不良处产生过热，而根本原因在于设计文件和施工验收规范中对相关专业要求说明不到位，并在文末阐述改进和防范措施，为同类电缆故障分析提供借鉴。

两起35 kV电缆故障和检查发现

某大型化工公司35 kV供电系统采用线路变压器组结线方式，来自110 kV/35 kV区域变电所的35 kV配出电缆进入各装置变电所后直接与35 kV变压器相连，35 kV电缆采用单芯电缆。2018年发生两起由于35 kV铠装层两端接地导致35 kV电缆故障。

1）案例1。2018年8月27日，维护人员巡视中发现110 kV/35 kV区域变电站35 kV出线H20柜C相出线电缆外护套碳化脱落。某甲装置35 kV/6 kV变压器B450-TR002停运后，检查发现变压器侧35 kV电缆的屏蔽层经过电压保护器接地，铠装层通过电缆格兰接地，无过热现象；35 kV GIS出线开关侧屏蔽层和铠装层并接后直接接地，GIS侧屏蔽层与铠装层几乎粘连，且该侧电缆主绝缘有损伤。

2）案例2。2018年9月25日，维护人员巡视中发现区域变电所110 kV/35 kV主变压器U2-TR002的35 kV侧A2电缆外绝缘层受热变形（回路数为3，即每相3根单芯电缆，停运后发现变压器侧铝丝铠装与电缆格兰有触碰现象，电缆外护套过热融化，铝波纹管以及内部铜屏蔽层均有过热现象。

原因分析

1. GB标准对电力电缆金属套接地的要求

GB 50217—2018《电力工程电缆设计标准》对电力电缆的接地做了明确规定。

1）电力电缆金属套应直接接地。交流系统中3芯电缆的金属套应在电缆线路两终端和接头等部位实施直接接地。

2）规定交流单芯电缆金属套应至少在一端直接接地，在任一非直接接地端的正常感应电势最大值，未采取能有效防止人员任意接触金属套的安全措施时，不得大于50 V，除此之外不得大于300 V。

3）规定交流系统单芯电力电缆金属套接地方式，在线路不长且能满足标准4.1.11条要求时，应采取在线路一端或中央部位单点直接接地。

4）规定35 kV及以下单芯电力电缆金属套单点直接接地，且有增强护层绝缘保护需要时，可在线路未接地的终端设置护层电压限制器。

GB 5021—2018《电力工程电缆设计标准》条文上明确说明，电力电缆的金属套为金属屏蔽层、金属套和金属铠装层的总称，对于既有金属屏蔽层又有金属套的单芯电缆，金属套的接地方式是指二者均连通后的接地方式。

2. 金属套接地的原理分析

对于交流3芯电缆，在正常运行时流过三个线芯的电流总和为零，在电缆的金属套外基本上没有磁链，因此在金属套两端就基本上没有感应电压，所以3芯电缆金属套两端接地后不会在金属套上因电位差而产生环流。

对于单芯电缆，其导体线芯与金属套的关系，可看作一个变压器的初级绕组与次级绕组的关系。当单芯电缆线芯上有电流通过时所产生的磁力线交链金属套，使金属套两端出现感应电压。 感应电压的大小与电缆线路的长度、流过导体的电流以及电缆排列方式有关。当电缆较长时，金属套上的感应电压叠加起来可达到危及人身安全的程度，在线路发生短路故障、操作过电压或雷电冲击时，金属套上会形成很高的感应电压，甚至击穿护套绝缘。此时，如果金属护套两端接地使其形成闭合回路，金属护套中将产生环流，其值可达导体电流的45%甚至更大，形成损耗，使金属套发热，不仅浪费大量电能，降低电缆的载流量，而且加速电缆绝缘老化，甚至引发电缆故障。

与此同时，如果电缆金属套一端接地另一端不接地，当雷电流或过电压波流过电缆导体线芯时，金属套不接地端会出现很高的冲击电压。在系统发生短路时，导体中的短路电流也会在电缆金属套不接地端感应出较高的电压。当电缆外护层绝缘不能承受这种过电压的作用而损坏时，将会出现多点接地，从而形成环流，产生前述环流带来的不利影响。因此，GB 50217—2018《电力工程电缆设计标准》规定交流系统单芯电力电缆及其附件的外护层绝缘等部位应设置过电压保护。

综上所述，对于35 kV交流系统单芯电力电缆，金属套上应至少一端直接接地，非直接接地端可根据需要设置护层电压限制器。线路不长，且满足非直接接地端感应电势最大值规定的，可在线路一端或中央部位单点直接接地；线路较长，且单点直接接地不能满足非直接接地端感应电势最大值规定的水下电缆、35 kV及以下电缆或输送容量较小的35 kV以上电缆，可采取线路两端直接接地的方式；除此以外的较长线路，应尽可能将长电缆回路均等划分区段实施交叉互联接地。

3. 35 kV单芯电缆金属套感应电势计算和接地方式

根据GB 50217—2018《电力工程电缆设计标准》附录F，对案例1中H20回路35 kV单芯电缆正常运行时非直接接地的金属套工频感应电压进行计算。

根据设计文件，35 kV电缆截面为积1×400 mm^2，三根电缆呈直线排列，电缆长度515 m，电缆金属套外径64.2 mm，回路连续3个月最大负荷电流147.69 A，按其最大负荷电流150 A计算。根据GB 50217—2018《电力工程电缆设计标准》附录F提供的直线排列计算公式

$$E_s=L\times E_{s0} \tag{1}$$

式中，E_s为感应电势，V；L为电缆金属套的电气通路上任一部位与其直接接地处的距离，km；E_{s0}为单位长度的正常感应电势，V/km。

A相或C相（边相）

$$E_{s0}=\frac{I}{2}\sqrt{3Y^2+(Xs-a)^2} \tag{2}$$

B相（中间相）

$$E_{s0}=I\times Xs \tag{3}$$

其中 $Y=Xs+a$

$$a=(2\omega\ln 2)\times 10^{-4}\ (\Omega/\mathrm{km})$$

$$Xs=(2\omega\ln\frac{S}{r})\times 10^{-4}\ (\Omega/\mathrm{km})$$

式中，$\omega=2\pi f$；r为电缆金属套的平均半径，m；I为电缆导体正常工作电流A；f为工作频率Hz；S为各电缆相邻之间中心距，m；假定每回I、r均相等。

计算得边相电缆金属屏蔽层正常运行时工频感应电压最大为12.9 V，中相电缆金属屏蔽层正常运行时工频感应电压最大为10.8 V。

根据GB 50217—2018的规定，案例1中35 kV单芯电缆金属套正常运行时感应电势低于50 V，35 kV电缆金属套仅需在线路一端或中央部位单点直接接地，为了增强对护层绝缘的保护，可在线路未接地端的终端设置护层电压限制器。实际上区域变电站H20回路护层接地方式与此相符，GIS开关侧直接接地，变压器侧经过电压保护器接地。

区域变电所110 kV/35 kV变压器U2-TR002的35 kV侧电缆回路数3，GB 50217—2018未标明3回路电缆感应电势计算公式，最初的设计文件中亦未查到相关感应电势数据。该电缆长度50 m，连续3个月内该35 kV进线回路电流最大1 175 A。根据GB 50217—2018附录可知，感应电压与电流和长度均成正比，结合该35 kV进线电流和电缆长度与案例1和案例2中负荷电流和电缆长度的倍数关系，可近

似推断35 kV进线电缆金属套感应电势值应处于与案例1相近的数量值甚至更低，推断35 kV电缆感应电势小于规范规定的50 V，符合GB 50217—2018中金属套单端接地的要求。该35 kV进线电缆护层接地方式为GIS侧电缆终端护层直接接地，变压器侧护层悬空。

综上，认为两起起案例中电缆金属套接地方式的选择符合GB 50217—2018规范要求。

4. 未接地端护层处理剖析及电缆故障案例分析

如GB 50217—2018的条文说明，35 kV及以下单芯电缆以往多未装设护层电压限制器，经多年运行尚未反映有过电压问题；而实测U_s（金属套未接地端的冲击过电压）随额定电压由高至低有较大幅度变小的趋势，况且设置后若选用不当（如工频过电压的热损坏）也会带来弊病，故与35 kV以上未接地端护层的处理对策宜有所区分。故而GB 50217—2018规定，35 kV及以下单芯电缆金属套单点直接接地，且有增强护层绝缘保护时，可在线路未接地的终端设置护层电压限制器。

1）案例1。35 kV电缆在35 kV出线开关侧铠装层与屏蔽层连通后直接接地，变压器侧屏蔽层经过电压保护器接地，但铠装层未经过电压保护器接地，考虑到经屏蔽层屏蔽后，交链到铠装层的磁力线已相对较少，对铠装层绝缘产生影响的感应电压也相对较小，因此铠装层可不经过电压保护器接地，这也符合国家标准规定。但是，铠装层不能直接接地，否则铠装层中产生的少量感应电压会通过两端接地形成闭合回路产生环流，如此在闭合回路中任何一个接触不良点都会过热。在检查过程中还发现该回路C相电缆屏蔽层与铠装层之间绝缘电阻较小，500 V摇表检查相互间绝缘为零，万用表检查屏蔽层与铠装层间电阻为248 Ω，但铠装层对地绝缘良好。经护层故障检测仪测距故障点距离GIS开关30 m，挖开该处前后近10 m范围的电缆未发现明显电缆外伤。在后续的反方向故障测距过程中，该电缆屏蔽层与铠装层之间的绝缘薄弱点在故障检测仪的6 000 V脉冲高压作用下相互间绝缘恢复正常，然而导致铠装层与屏蔽层间绝缘降低的确切原因已无法查证，但可以肯定的是，铠装层两端接地引起环流导致的铠装层发热加剧了铠装层与屏蔽层之间的绝缘降低。

该案例中，一方面由于铠装层两端接地导致铠装层中有接地环流存在；另一方面由于距离GIS开关侧30 m处屏蔽层与铠装层间绝缘降低，导致从GIS开关侧电缆终端直到屏蔽层与铠装层间绝缘降低处形成了另一个环流通路，由于同一位置的屏蔽层感应电压要大于铠装层感应电压，因此屏蔽层与铠装层间环流不可忽视。

图1为案例1流过电缆护层的环流示意图。其中铠装层在A点与B点区段分别流过因铠装层两端接地引起的环流以及因屏蔽层和铠装层间绝缘降低引起的环流。该电缆头的制作工艺是，屏蔽层在电缆终端折返后编织成接地带，铠装层与屏蔽层相隔一定间隔截断后包绕专门接地带后经恒力弹簧引出，屏蔽层接地带和铠装层接地带经PVC胶带绝缘包扎处理并联后经由一段接地线引至接地铜排。上述AB区间叠加的环流在铠装层中长时间发热，表现在包裹铠装层引出线以及临近屏蔽层引出线的PVC绝缘带受热熔化（PVC材料易受热熔化），最终出现电缆终端铠装层和屏蔽层粘连在一起。

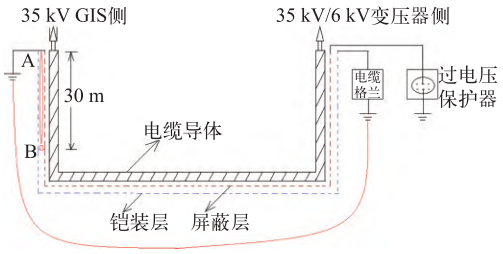

图1　环流示意图

2）案例2。区域变35 kV进线电缆在GIS开关侧铠装层按要求与屏蔽层连通后直接接地，在110 kV/35 kV变压器侧屏蔽层悬空，铠装层与电缆格兰相接触从而通过变压器接线箱接地。考虑到该段电缆仅50 m，且非接地端金属层感应电压小于50 V，因此屏蔽层在变压器侧悬空符合国家标准要求，但电缆铠装层由于两端接地形成了环流通路，形成环流。变压器停运后检查发现铠装层在变压器侧电缆格兰处连接松散，有明显过热痕迹。

图2为铠装层两侧同时接地形成闭合回路的示意图。图2中蓝色虚线表示铠装层，在GIS开关侧屏蔽层与铠装层并接后直接介入接地铜排（图2中屏蔽层未画出），在变压器侧屏蔽层悬空，铠装层经电缆格兰和变压器箱体接地线接地，从而导致铠装层形成了接地闭合回路，产生接地环流。

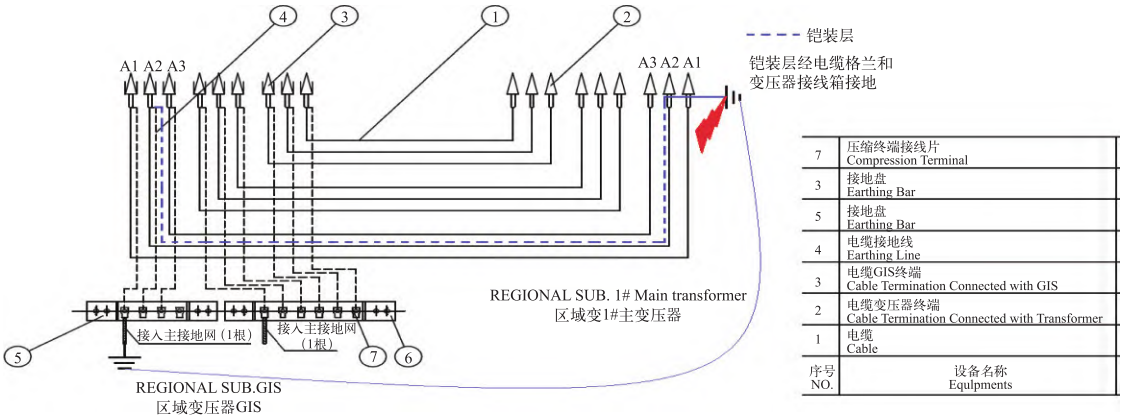

图2　形成闭合回路的示意图

综上所述，导致两起35 kV单芯电力电缆外护层故障的主要原因是铠装层两端接地。表面上看非直接接地端铠装层与电缆格兰相碰是施工不当造成的，但设计图样对金属护层的说明不到位是造成施工不当的原因。从图2上可以看出，图上仅示出对电缆接地线的处理方式，未区分屏蔽层接地和铠装层接地的处理方式，在工程阶段无法对铠装层接地的正确施工和验收提供准确的指导。

改进措施和效果验证

上述两起故障发生后，均根据不同情况迅速采取对应措施，修复电缆，纠正不当施工，并举一反三，逐步对该公司全部35 kV单芯电缆回路进行检查。

1. 解除变压器侧铠装层与电缆格兰的直接相连

变压器侧铠装层在进入电缆格兰前予以切除并绝缘处理，解除与电缆格兰的直接相连，确保铠装层不会两端接地。铠装层主要作用是对电缆实施机械防护，切除格兰处铠装层不会影响电缆的机械防护。同时逐回路检查35 kV GIS开关侧电缆头安装情况以及屏蔽层与铠装层间的绝缘处理是否良好。

2. 应用红外测温检测运行中电缆终端温度

应用红外测温技术对未检查处理的回路定期检测35 kV出线侧电缆根部温度和变压器接线箱端部电缆温度，发现异常温度及时停运处理。

3. 加强对运行中单芯电缆金属套监测数据的分析

按照维修策略定期检测非接地端感应电压和接地端接地电流，并对检测数据进行分析比对，不仅重视感应电压的高低，更要重视接地电流，实际上金属套（如屏蔽层和铠装层）回路中如果存在回路电流，则说明回路中有两点甚至多点接地，不仅会造成回路热损耗，减少电缆寿命，更为重要的是一旦回路中出现接触不良将会导致该点温度迅速升高，从而导致电缆故障。因此，一旦检测到金属套回路中有较大电流存在必须引起足够重视。

4. 完善相关设计和施工规范

完善相关设计规范，明确要求在35 kV电缆接地系统图上载明电缆两端对屏蔽层和铠装层的接地处理方式，给工程施工和验收明确的指导。完善35 kV电缆施工规范，将35 kV电缆金属套（包括铠装层）非接地端不得与电缆格兰或其他接地的金属体相触碰写进电缆施工和验收规范，避免铠装层两端接地。

5. 效果验证

2019年起到现在，该公司利用预防性维护和停车大修的机会，逐步对相关回路按照上述纠正措施进行完善改进，未再发生类似的35 kV电缆故障，运行正常。

结束语

35 kV单芯电缆两端接地感应电压与环流导致电缆故障，一直是困扰电力电缆安全运行的问题。本文通过计算确认几起故障电缆的接地方式选择的正确性，分析并确认其故障原因所在，直接原因在于不当施工引起铠装层和屏蔽层中形成环流，而根本原因在于设计文件和施工验收规范中没有明确指出对非接地端电缆铠装层的处理方式，这需要在今后的工作中引起足够的重视，尤其对新建项目的施工和验收。EA

（收稿日期：2024-06-11）