

110kV GIS变电所进线电缆末端雷电过电压研究

谢伟东 陈凯伦

浙江雷博人力资源开发有限公司余杭分公司 浙江杭州 311100

【摘要】气体绝缘金属封闭输配电设备(GIS)广泛应用于现代城市配电系统,因其体积小、安全可靠等优点备受青睐。然而,由于GIS内部构造的特殊性,当雷击附近时可能会产生严重的过电压,损坏设备绝缘并引发故障。本研究聚焦于110kV GIS变电所进线电缆末端的雷电过电压问题,通过建模仿真和理论分析,探究了进线电缆末端雷电过电压的保护技术及其应用效果。

【关键词】110kV GIS变电所; 进线电缆; 雷电过电压实验

前言

随着城市化进程的加快,配电系统的供电可靠性和安全性要求日益提高。GIS不仅具备体积小、土地占用少、免维护等优点,而且绝缘介质和封闭式金属外壳使其能够有效隔离外部环境,避免受潮、污秽、动物侵扰等因素的影响,是现代城市配电系统的理想选择。然而,由于GIS内部构造的金属性和分隔间隔结构,一旦遭受雷击,其内部可能会产生严重的过电压,损坏绝缘介质甚至击穿整个绝缘间隔,引发故障和安全事故。因此,研究GIS在雷击条件下的过电压特性,分析过电压传播规律并提出必要的防护措施,对于确保GIS变电所的安全可靠运行至关重要。

1 GIS变电所进线电缆雷电过电压现象与防雷要求

GIS变电所进线电缆由于直接暴露在雷电环境中,极易遭受雷电过电压的侵袭。根据相关研究表明,雷电过电压可对GIS设备绝缘、二次设备及控制电缆等造成严重损伤,是导致GIS变电所事故的主要原因之一。雷电过电压主要包括感应雷电过电压和直击雷电过电压两种类型。其中,感应雷电过电压是由于雷电在GIS变电所附近的地面或架空导线上产生感应电荷,经电容耦合作用感应到GIS进线电缆上,使电缆对地电位急剧升高,当电位差超过绝缘水平时,则会引起绝缘击穿。根据仿真分析,当雷电流幅值为200kA、上升时间为8 μ s时,110kV电缆终端处感应电压可高达1600kV,严重威胁设备安全。直击雷电过电压是由于雷电直接击中GIS进线电缆或其避雷针引下线,使电缆芯线与屏蔽层之间、屏蔽层与接地网之间产生高电位差,进而引起绝缘击穿。有学者通过模型试验发现,在110kV电缆线路上的雷电流幅值可达250kA,电缆终端处感应电压峰值超过2000kV,远超过常规避雷器的保护水平。

为了有效抑制雷电过电压危害,GIS变电所进线电缆

防雷设计应包含以下措施:首先应合理布置接地网,降低接地电阻,并与主变压器中性点就地连接,减小地电位升。通常要求GIS变电所接地网电阻不大于0.5 Ω ;在GIS进线电缆两端及中间接头处安装金属氧化物避雷器,避雷器的额定电压和放电电流需匹配系统电压等级及预期雷电流参数,如110kV系统常采用108kV避雷器,标称放电电流10kA。同时应在GIS进线构架附近设置独立避雷针,利用避雷针的屏蔽作用降低雷电直击概率。避雷针塔高一般不低于GIS构架2m^[1]。

2 雷电波侵入下电缆各段的波过程分析

当雷电波侵入GIS变电所时,进线电缆内部产生的波过程涉及多种物理机制和影响因素,是一种复杂的电磁过渡现象。当雷击附近架空线路或大地时,会在雷击点处激发出双极性快前冲电磁脉冲,这种脉冲信号以两种传播模式在线路两端蔓延开去。其一为电磁辐射模式,即脉冲沿径向方向向外辐射,另一种则为电磁行波模式,沿线路电缆向两端传播。在进入电缆外导体层后,电磁辐射模式被严重衰减,因此电缆线路入口主要存在电磁行波模式。在雷击点较近区域,行波有强的非线性失真特性,耦合效应显著;当行波传播距离较远后,失真和耦合效应减弱,呈准周期性振荡衰减。而电缆的外导体层和内导体层之间存在电容和电感性质的二层并联结构,形成一个传输线路。当电磁行波到达电缆端部时,由于电缆与接地网阻抗不匹配,会产生反射和透射现象^[2]。

传播到电缆终端的行波分为三种情况:一是在匹配负荷下全部透射进入GIS内部;二是在短路情况下全部反射回外部;三是在电缆端部开路情况下,行波在端部反射,并与入射波干扰产生驻波。后两种情况都会在电缆端部聚集高能量电磁脉冲,危害内部GIS绝缘安全。实验测量表明,当

10/350 μ s 雷电流波作用于110kV电缆时,在100m处可产生约60kV的过电压。另一方面,电缆中传输的雷电波在高频段可激发出各种电磁振荡模式,包括传输线电磁振荡(风箱振荡)、绝缘介质极化振荡、屏蔽层环向电流振荡等,它们相互耦合形成复杂的波形,频率可达MHz量级。这些高频振荡信号若传输至敏感电子设备,可诱发二次放电和电磁干扰,甚至造成设备损毁^[3]。

3 GIS变电所进线电缆末端雷电过电压的常用保护方式

3.1 安装金属氧化物避雷器

避雷器可在雷电过电压侵袭时迅速做出反应,将过电压限制在安全范围内,从而保护电缆绝缘。避雷器的选型需综合考虑系统电压等级、预期雷电流参数、保护裕度等因素。根据安装位置的不同,可将避雷器并联安装在电缆终端附近的母线或变压器绕组旁路,或者串联安装在进线部分作为前置限流装置。并联型避雷器可有效防止雷电浪涌经电缆侵入变电所,影响到电力系统的正常运行;串联型避雷器则可吸收脉冲电流的大部分能量,防止对绝缘件造成损害。以110kV电缆为例,宜选用108kV避雷器,标称放电电流不低于10kA,保护水平不高于250kV。同时,还应优化避雷器接地引线布置,尽量缩短引线长度,减小电感电压降^[4]。

3.2 加强电缆末端外护层接地

通过在电缆终端附近增设辐射状接地极,并与站内接地网可靠连接,可有效降低接地电阻,抑制过电压幅值。同时,接地装置可提供雷电流的流通过径,降低过电压持续时间。根据IEEE Std 575-2014标准,电缆终端的外护层接地电阻应不大于1 Ω ,接地线截面积不小于95mm²。为了进一步提高接地性能,可采用高频接地装置,如应用非线性磁合金材料制作的环形磁滞金属氧化物避雷器(MOV),其高频接地电阻可低至0.1 Ω 以下。合理设置电缆终端接地参数,可使雷电过电压峰值降低20%-30%。相关研究显示,电缆末端MOA和外护层接地的协同作用可显著提升雷电过电压保护效果。仿真分析表明,当110kV电缆终端同时采用108kV MOA和接地电阻为1 Ω 的外护层接地时,雷电流峰值为150kA(10/350 μ s)的情况下,过电压峰值可从275kV降低至130kV,满足220kV GIS设备的基本绝缘水平(BIL)要求。因此,在GIS变电所进线电缆的防雷设计中,宜综合考虑MOA保护和电缆终端接地的配合,优化各项参数,实现雷电过电压的可靠抑制。

3.3 安装过电压保护器

过电压保护器(SVL)由串联气隙和非线性压敏电阻

并联构成,具有响应速度快、残压低、能量吸收能力强等优点。当雷电过电压超过SVL的触发电压时,气隙击穿导通,将过电压能量释放至压敏电阻和接地网,从而实现过电压钳制。根据IEC 60099-4标准,110kV及以上电压等级电缆线路的过电压保护,宜采用金属氧化物避雷器(MOA)。MOA采用高非线性的金属氧化物压敏电阻元件,具有残压低、能量吸收能力强、动作迅速等优点。选择MOA时,应综合考虑系统运行电压、雷电过电压水平、电缆参数等因素。以110kV电缆为例,若雷电过电压幅值为300kV(2.6/50 μ s),可选用额定电压为108kV、标称放电电流为10kA(8/20 μ s)的MOA。该MOA的持续运行电压(MCOV)为86kV,能可靠地限制过电压幅值在200kV以下,满足GIS设备的绝缘配合要求。为了充分发挥MOA的保护作用,其安装位置和接地方式至关重要。理想情况下,MOA应安装在电缆终端处,尽可能靠近GIS设备,以缩短过电压传播距离。同时,MOA的接地线应尽可能短而直,并与GIS设备或变电所公共接地网可靠连接,降低接地电阻和感应电压。根据IEEE Std 142-2007标准,MOA接地线的截面积不宜小于95mm²,接地电阻应不大于1 Ω 。若条件许可,可采用双重接地或环形接地方式,进一步提高接地可靠性和均匀性。

4 110kV GIS变电所进线电缆末端雷电过电压技术的实践应用——以某变电所为例

4.1 实验参数(导线参数、雷电侵入波模型、电气设备参数)

以国内某110kV GIS变电所为例,该变电所采用全户内布置,共有4回110kV出线,电缆选用YJLW03-64/110-1 \times 400mm²单芯交联聚乙烯绝缘铜导体电力电缆,长度均为500m左右。电缆采用干式终端,型号为YFGW-110/1.2,避雷器选用YH5WZ-108/281型氧化锌避雷器,额定放电电流为10kA。GIS设备额定雷电冲击耐受电压为550kV,工频耐受电压为230kV。为深入研究该变电所进线电缆雷电过电压特性,实验人员首先对雷电参数进行了统计分析。通过查阅当地气象部门提供的近10年雷电数据,发现雷电流幅值的中位值为32kA,算数平均值为45kA,最大值高达180kA。考虑到雷电流幅值服从对数正态分布,课题组选取了三种典型雷电流(50%、10%和1%)作为模拟对象,对应的雷电流参数如表1所示。

表1: 变电所所在地区典型雷电流参数

| 概率 | 峰值电流 (kA) | 波头时间 (μ s) | 波尾时间 (μ s) |
|----|--------------|--------------------|--------------------|
| | | | |

| | | | |
|-----|-----|-----|----|
| 50% | 32 | 3.5 | 70 |
| 10% | 80 | 1.8 | 40 |
| 1% | 180 | 1.2 | 30 |

在雷电侵入波模型方面，课题组选用Heidler模型对雷电电流进行描述，通过调整模型参数，模拟出了表1中三种典型雷电电流波形，为后续过电压计算奠定了基础。

4.2 模拟实验与结果分析

在模拟雷电过电压实验阶段，试验人员搭建了一套试验平台，包括1.6MV雷电冲击发生器、500m长的110kV电缆样品、YH5WZ-108/281避雷器以及高压分压器等。实验中，首先在电缆终端注入表1中三种典型雷电电流，测量电缆终端和避雷器两端的过电压响应，并评估避雷器的保护效果。实验结果如表2所示。

表2: 电缆终端过电压实测值

| 雷电流概率 | 未加避雷器 (kV) | 加装避雷器 (kV) |
|-------|------------|------------|
| 50% | 835 | 226 |
| 10% | 1430 | 248 |
| 1% | 2050 | 279 |

从表2可以看出，在未安装避雷器时，50%、10%和1%雷电电流下的电缆终端过电压分别高达835kV、1430kV和2050kV，均超过了GIS设备的LIWV（550kV），极易引发设备绝缘击穿。安装YH5WZ-108/281避雷器后，电缆终端过电压显著降低，分别限制在226kV、248kV和279kV以内，避雷器表现出了良好的保护效果。为进一步分析电缆过电压特性，课题组还利用PSCAD/EMTDC软件对电缆及其防雷系统进行了建模仿真。通过改变电缆长度、雷电参数、接地电阻等因素，系统研究了各因素对过电压的影响规律。仿真结果表明，电缆长度越长，雷电感应过电压衰减越严重；雷电峰值电流越大、前沿时间越短，过电压幅值越高；接地电阻越大，过电压越高。最后，实验人员还对电缆接头的雷电耐受特性进行了测试。通过在预制棒型接头和热缩式接头两端分别施加雷电冲击电压，测得其LIWV分别为680kV和570kV，表明预制棒型接头的耐雷性能更优。在接头两端加装避雷器后，过电压均可控制在300kV以内。

4.3 改进意见和雷电过电压优化措施

针对110kV GIS变电所进线电缆雷电过电压问题，实验人员在已有研究基础上提出了若干优化措施。首先应合理选择电缆及其附件。电缆应采用交联聚乙烯绝缘材料，导体截面积不小于400mm²，长度控制在500m以内。电缆金属

屏蔽层接地电阻应小于1Ω，接地点间距不超过200m。电缆终端可选用预制棒型、热缩型等多种形式，建议采用LIWV不低于680kV的预制棒型终端。其次，避雷器的优化配置可显著改善防雷效果。宜在电缆终端两侧就近安装氧化锌避雷器，并与GIS设备之间保持适当距离。避雷器应满足额定放电电流大于10kA、持续运行电压不低于108kV的要求，如采用YH5WZ-108/281型避雷器。避雷器接地引下线应尽量短而直，接地电阻控制在4Ω以内。

另一方面，应统筹考虑变电所的总图布置和接地系统设计。电缆沟道应避开雷电易击区域，宜与构架、建筑物保持2m以上距离。变电所四周应设置环形接地网，并与主接地网可靠连接，垂直接地体应深入低阻土层。合理规划接地网的均压区和防雷区，重要设备单独接地并连接至均压环，提升接地系统的散流能力。在过电压仿真计算方面，可采用EMTP-RV、PSCAD等软件，结合实测雷电参数，对电缆及其防雷系统进行建模，分析接地电阻、电缆长度等关键参数的影响。仿真中应考虑雷电流的随机性，通过蒙特卡洛法等手段获得过电压统计分布规律。现场防雷试验是检验防雷措施可靠性的有效手段。试验中通常采用大电流发生器模拟雷电流，在电缆终端和避雷器两端测量过电压、过电流等量。结合仿真分析结果，评估电缆绝缘、避雷器的实际防护水平。例如，某110kV变电所在模拟50%、10%、1%雷电流后，电缆终端过电压分别为226kV、248kV、279kV，均低于相应绝缘等级

5 结论

综上所述，针对电缆末端的雷电过电压问题，可采取以下防护措施：首先应严格按照规范要求做好电缆外护层接地，控制接地阻抗在合理范围内；其次可在电缆末端增设额外的接地装置，形成均压环路；最后可安装合适的过电压限制器，有效限制过电压传播和幅值。

参考文献:

- [1] 丁晨, 郑建勇, 项玲. 110kV GIS变电所进线电缆末端雷电过电压研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(2): 55-58.
- [2] 陶继勇. 500kV长电缆GIS变电所雷过电压防护研究[J]. 中国设备工程, 2017(7): 106-109.
- [3] 何哲, 朱斌, 梁晖, 汪璐悦. GIS变电站进线电缆雷电过电压影响因素分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 84-88.
- [4] 杨帅, 洪煜坤, 刘尉, 王航, 肖集雄. 架空线路转接电缆进线对GIS变电站雷电侵入波过电压的影响[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 8-14.