[配电系统]

35 kV配电网小电阻接地系统的设计与应用

文/王明康
伊犁新天煤化有限责任公司

大型化工企业的系统庞大，用电负荷多，电缆数量多，产生的容性电流大。单相接地故障引发过电压，导致电气设备损坏，从而引发化工装置停运，严重威胁生产系统及设备安全。配电网的中性点接地方法是一个多因素的技术问题，一直是国内外研究的热点。根据新天公司35 kV配电网接地方式改造，分析各种不同接地方式的优劣，做出最佳接地方式的选择。

总降压变电站35 kV系统是公司动力中心，为10个化工装置区负荷提供电源。总降压变电站从巴彦岱变电所引入两回110 kV进线，经过1#、2#主变压器接入总降压变电站35 kV Ⅰ、Ⅲ段母线；热电厂3台50 MW发电机组经过1#、2#、3#升压变压器分别接入总降压变电站的35 kV Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ段母线，化工用电负荷分别挂在35 kV Ⅰ和Ⅲ段母线上，因此35 kV系统供电可靠性直接影响化工负荷供电可靠性；近年来多次发生因35 kV系统电缆或母线单相接地故障引发过电压导致电气设备损坏，造成化工双系列停运事故。

现状问题

新天公司35 kV系统出线间隔多，负荷电缆长，系统电容电流较大，将近80 A。在2020年6月前，35 kV系统为不接地系统，在35 kV系统发生多起单相接地故障中，系统均出现过电压，在短时间内引发多点故障，造成化工双系列停运事故，如2018年4月发生“3#升压变压器35 kV管母软连接B相故障”；2019年2月发生“35 kV Ⅱ段母线B相故障”；2019年10月发生“空分循环水2#油变压器A相故障”。2020年6月—2021年6月，35 kV系统由不接地系统改造为中性点经消弧线圈接地，目的是当35 kV系统发生单相接地故障时，消弧线圈实现自动跟踪补偿，保证故障负荷在2 h之内不断电。但在2020年8月“2#升压变压器35 kV电缆单相接故障”、2021年2月“三级泵站2#线路单相故障”两起事故中，仍然引发多点故障，造成化工装置停运和降负荷的后果。

原因分析

35 kV系统原设计为不接地系统，出线间隔多，负荷电缆长，存在电容电流严重超标的重大设计缺陷。当系统发生单相接地故障时，电容电流过大，接地点电弧不能自行熄灭。特别是当出现间歇性弧光接地过电压且可达3～5倍甚至更高时，非常容易击穿系统中绝缘薄弱设备，瞬间发生多点击穿转换性故障，同时系统遭受巨大短路电流冲击，造成大面积停电，最终导致化工装置停运。

2020年6月。35 kV系统安装消弧线圈后，发生单相接地故障，消弧线圈产生电感电流，该电感电流补偿是由单相接地形成的电容电流，使得故障相恢复电压速度减小，同时由于消弧线圈的嵌位作用，可以有效防止铁磁谐振过电压产生的概率。但在上述两起单相接地故障事故中仍出现多点故障，

扩大了故障范围；分析原因可知，消弧线圈以感性电流补偿容性电流来熄弧，在单相接地故障中能发挥一定的作用，但在35 kV配电网系统使用中也暴露出一些问题，如不能限制间歇性弧光过电压、不能补偿高频电流及接地选线不准，则容易导致运行人员在查找故障点时误拉正常负荷。针对上述存在的问题，专业组分析认为本厂35 kV系统供电线路以电缆线路为主，电缆受外界环境影响小，电缆发生的故障大多为永久性故障。电缆发生接地故障时，接地电弧为封闭性电弧，不易自行熄灭，若不及时跳闸，将造成相间故障，扩大事故范围；再者经消弧线圈补偿后，仅能降低故障点的残流，不能消除故障；因此分析认为纯电缆网络的配电系统采用小电阻接地方式可有效限制配电故障时过电压，且能及时切断故障线路。因而在2021年6月，对35 kV系统中性点进行小电阻接地改造。

设计思路

35 kV系统主接线方式为单母三分段，化工用电负荷分别挂在35 kV Ⅰ段和Ⅱ段母线上，35 kV Ⅱ段不存在独立分段运行方式，选择在35 kV Ⅰ和Ⅱ段母线上各加装一套小电阻接地成套装置，满足35 kV母线并列运行和分列运行的要求。35 kV系统接地方式如图1所示。

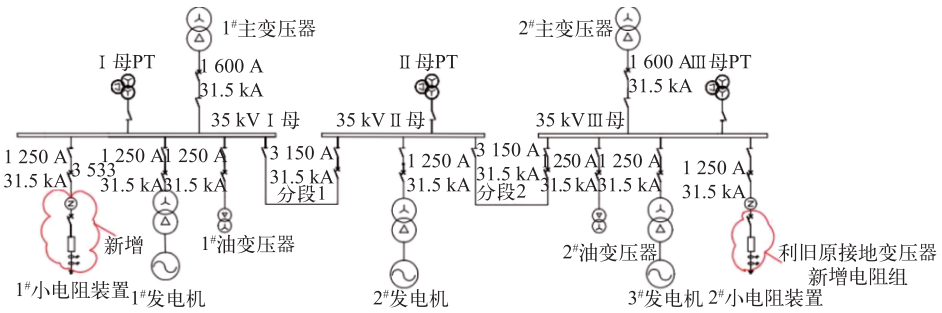

图1　35 kV系统接线方式

具体设计

1）由于35 kV系统中性点没有可以引出的设备，因此选用Z型三相接地变压器实现系统对中性点的接地要求。接地变压器没有带负荷的需求，选用的接地不配置二次绕组。新增两套小电阻接地成套装置分别接于35 kV母线Ⅰ段备用间隔1AH18和35 kVⅡ段原消弧线圈接地变压器间隔31AH19。

2）当35 kVⅠ、Ⅱ、Ⅲ段母线采用并列运行方式时，仅投入其中一套小电阻接地成套装置。当35 kVⅠ、Ⅱ段母线分列运行时，同时投入两套小电阻接地成套装置。

3）根据国家和行业规范，要求小电阻接地的配电网系统运行方式采用单母或双母分段分列运行，而新天公司35 kV主接线为三分段，正常状态下不允许分列运行，这样在设计中要解决运行母线防“失地”问题。如在运行中运行母线一旦“失地”，又恢复成改造前电容电流严重超标系统，因此，母线防“失地”设计成为本项目设计中的关键点之一，而且没有国家和行业规范做支撑。母线防“失地”设计成为本项目设计中的难点之一，设计小组大胆创新，提出了加装自投装置，配置合适的逻辑功能和整定合适的继电保护定值，相互配合，保证任何一种运行方式下或事故状态下，运行中母线不会“失地”。

4）35 kV系统电气设备配置零序保护并投入跳闸。保护整定与运行同时兼顾灵敏性、速动性和选择性。遵循原则为：系统设备发生单相接地故障，本设备保护可靠切除故障，允许短延时动作，但保护动作时间必须满足有关设备热稳定要求。只有当本设备保护或断路器拒动作时，允许由相邻设备的保护切除故障。

5）小电阻接地成套装置采用户外布置，其中原消弧线圈用的接地变压器和预制舱保留利旧。

主要设备选择

接地变压器小电阻接地系统成套装置主要由接地变压器、接地电阻器、电流互感器、单极断路器、电阻智能监控器及户外防护箱体等组成。

1. 接地电阻参数计算

中性点电阻接地网络中，暂态过电压的倍数k与系统单相接地电流I_R和单相接地电容电流I_C的比值

关系：当I_R=I_C时，可将健全相的过电压限制在2.5倍的相电压以下；当I_R=1.5I_C时，可将健全相的过电压限制在2.26倍相电压以下；当I_R=2I_C时，可将健全相的过电压限制在2.2倍；当R=3I_C时，可将健全相的过电压限制在2.0倍；当I_R>4I_C时，限制过电压效果不明显，中性点接地电阻值的选取主要依据系统总电容电流，综合考虑限制过电压倍数、继电保护的灵敏度等因素进行选取。

1）在限制暂态过电压水平方面，参考DL/T 620—2016《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》4.2.8要求，按系统发生单相间歇性电弧接地故障时小电阻接地系统不超过2.5U设计。

2）在保证继电保护的灵敏度方面，参考SH/T 3208—2020《石油化工电气系统电阻接地设计规范》5.1.4.1要求，电阻值的选择宜保证金属性单相接地短路电流在200～600 A范围内。

3）考虑故障电流选择过大，虽然提高了保护灵敏度，但接地变压器容量和电阻器的功率也会增大，设备越笨重，同时引起的地电位升高越严重。综合考虑，接地电流按I_R=4I_C设计，通过计算接地电流取400 A。

2. 接地变压器参数选择

（1）接地变压器额定电压U_{rt}

根据DL/T 5222—2021《导体和电器选择设计技术规定》要求：接于系统母线的三相接地变压器额定一次电压应与系统额定电压一致，即U_{rt}=U_n=38.5 kV

（2）接地变压器的容量

1）长期运行容量计算。电阻器连接在接地变压器形成的中性点上，其电流为接地变压器相电流的3倍，即$\sqrt{3}U_nI_n/3=\sqrt{3}\times38.5\ \text{kV}\times400\text{A}/3=8\ 891\ \text{kV}\cdot\text{A}$。

2）根据SH/T 3208—2020《石油化工电气系统电阻接地设计规范》，接地变压器10 s过负荷系数为额定容量的10.5倍，则取K值为10.5计算，即$S_{rN}=\frac{Sn}{K}=8\ 8910\ \text{kV}\cdot\text{A}/10.5=847\ \text{kV}\cdot\text{A}$。

3）本站接地变压器为不带站用变压器，可取接地变压器标准容量为1 000 kV·A。

现场实施

在总降压变电站内，原消弧线圈接地变压器预制舱西侧间隔8 m平行，安装1#小电阻接地成套装置，电缆敷设路径借助原消弧线圈接地变压器电缆沟，局部新增15 m连接至新增1#小电阻接地成套装置，总占地面积约40 m^2。2021年6月15日，1#小电阻接地成套装置安装、调试完成，并投入运行，原消弧线圈成套设备退出运行；2021年7月27日，2#小电阻接地套装置完成安装、调试完成，投入运行，同时1#小电阻接地成套装置改热备状态。此时35 kV系统中性点小电阻接地改造已完成。

运行评估

自35 kV系统中性点经小电阻接地改造后，系统共发生四起单相接地故障。

1）2021年7月22日发生1#降压变压器B相电缆终端头接地故障事件，1#降压变压器本柜保护装置RCS9681CS零序动作，105 ms切除故障，35 kV系统恢复正常。

2）2021年9月27日1#污水油变压器35 kV侧C相电缆发生接地故障事件，1#污水油变压器差动保护动作，105 ms切除故障，35 kV系统恢复正常。

3）2021年11月29日1#空分循环水油变压器35 kV侧C相电缆发生接地故障事件，1#空分循环水油变压器差动保护动作，105 ms故障切除，35 kV系统恢复正常。

4）2021年12月29日1#空分循环水油变压器35 kV电缆B相发生接地故障事件，继而发生AB相故障，1#空分循环水油变压器差动保护动作，106 ms故障切除，35 kV系统恢复正常。

上述四起单相接地故障保护均能正确切除故障，系统迅速恢复正常，完全符合小电阻接地系统的设计意图，有效防止了单相接地故障发展为多点故障，避免造成母线短路甚至全厂停运的事故。

结束语

对于新天公司的中压配电网电缆故障率较高现象，电缆故障多为永久性故障且电容电流大，为避免单根电缆故障引发多点故障，能够快速切除接地故障电流的小电阻接地方式无疑是最佳选择。采用小电阻接地方式后，接地电流增大，同时单相接地故障无论是永久性还是瞬时性，均作用跳闸，使得线路跳闸次数增加，影响供电负荷，因此还需从根本上解决电缆故障率高的问题，从提高电缆终端制作质量及改善电缆沟环境着手，降低电缆故障率。EA

（收稿日期：2022-10-21）