

某化工循环水场10 kV系统中性点接地方式选择计算

文/中国石化工程建设有限公司电气室 李东海

以某石化企业循环水场10 kV供电系统为例，主要从供电可靠性、单相接地故障电流和电缆绝缘水平3个方面比较各种中性点接地方式，结合石化装置特点及企业多年运行经验，确定该循环水场10 kV供电系统采用中性点低电阻接地方式为优选方案，并计算接地电阻值和保护整定值，简要分析对通信线路的影响以及对人身安全的影响。

近年来随着石化装置规模不断扩大，装置占地面积和用电容量相应变大，10 kV配电系统中电力电缆使用量大幅上升，电缆长度增加，使系统电容电流越来越大，当配电线路发生单相接地故障时故障电流非常容易超过规范许可值，故障点电弧难以自熄，引起系统过电压，损坏设备绝缘。尤其石化装置大多属于爆炸危险环境，生产流程具有高温高压、易燃易爆特点，生产过程中产生大量有毒有害物料，一旦供电系统出现故障将对工厂和周边环境人群造成极大不利影响，严重威胁安全生产。因此要选择合适的系统中性点接地方式，保证石化装置供电可靠性要求，并且当系统发生故障时能够及时切除故障回路，尽快恢复供电，避免故障进一步扩大化。

中性点接地方式的选择应考虑供电可靠性要求、单相接地电容电流情况和设备绝缘水平，并结合石化装置运行特点及企业运营维护经验。以某化工循环水场10 kV系统

为例，通过比较各种中性点接地方式，选出适合该石化循环水场10 kV配电系统的接地方式。

10 kV配电系统中性点接地方式比较

中性点接地分为有效接地和非有效接地。有效接地指变压器中性点直接接地或经低阻抗接地。非有效接地指变压器中性点不接地、经电阻接地或谐振接地（经消弧线圈接地）。我国110 kV系统和低压380/220 V系统通常采用直接接地方式。35 kV系统目前大多以谐振接地方式为主。6~10 kV系统由于国内供配电系统历史原因，目前石化行业存在不接地方式、谐振接地方式和电阻接地方式。可见石化行业10 kV系统接地方式选择较多，需经过比较后选择合理方案。

1. 中性点不接地方式

中性点不接地系统发生单相接地故障时，系统故障相对地电压为零，中性点和非故障相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，电网中出现零序电压，大

小等于相电压，线电压保持对称。故障点主要流过电容电流，当电容电流不大时（通常小于10 A），故障点电弧有可能自熄或在短时内不至于发展成相间短路故障，系统可带故障运行2 h，供电可靠性较高。但由于中性点和非故障相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，对系统中各用电设备绝缘要求提高。当电网电压波动或发生接地故障时，容易引起电磁式电压互感器的铁磁谐振过电压，导致高压熔断器熔断，甚至烧毁设备。随着系统容量增大，系统总的电容电流往往轻易超过10 A，发生单相接地时故障点电弧难以自熄，其所引起的热效应可能使故障点电缆绝缘无法承受，容易造成电缆过热破坏绝缘发展成两相或三相短路。对于设备较为陈旧，建厂时间早的化工装置，由于电气设备绝缘水平下降，薄弱点较多，如果不及时处理故障点，极易引起大范围事故。

2. 中性点谐振接地方式

中性点谐振接地即消弧线圈接地。当系统单相接地电容电流超

正泰 昆仑系列 万能式断路器

实时温度传感器 持续提示运行状态 洞悉风险更可靠



CHINT



领先 每一步 可靠 新 高度 欢迎关注正泰微信公众号
[广告]

浙江正泰电器股份有限公司

股票代码: 601877 400-817-7777 www.chint.net/kunlun

过10 A时,系统又需要带故障运行时,宜采用中性点谐振接地方式。采用具有自动跟踪补偿功能的消弧线圈补偿故障点电容电流,使故障点残余电流不大于10 A。在系统发生单相接地故障时,接地保护动作于信号,故障线路仍可继续运行一段时间(规范允许运行时间2 h),系统供电可靠性较高。当电网波动或中性点经消弧线圈接地后,能有效抑制因电压互感器线圈铁磁饱和引起的铁磁谐振过电压。然而随着石化装置规模越来越大,中压电动机、馈线数量增多,10 kV系统总的电容电流大幅度增加,通过消弧线圈补偿使故障点残余电流小于10 A以达到消弧目的很难做到。消弧线圈容量也随之增大,不够经济。根据GB 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》第3.1.6条规定,正常运行时,补偿装置应确保中性点的长时间电压位移不超过系统标称相电压的15%,而安装在变压器中性点的消弧线圈应采用过补偿方式,需要在合适的脱谐度下保证过补偿运行。当切合电缆线路或者系统运行方式发生改变时电容电流变化较大,中性点电压位移不超过15%和适当的脱谐度这两个条件很难同时满足。一旦脱谐度控制不当,使消弧线圈运行在欠补偿或全补偿,导致系统出现谐振过电压,谐振过电压持续时间长、幅值高,对设备绝缘产生严重影响,危及整个配电系统安全。大型化工装置往往拥有直配的大型电动机,大容量的变频电动机,这些设备的投入与切除,使接地电容电流中包含高次谐波电流,这部分电流消弧线圈无法补偿,给消弧增加了难度。另外,根据目前市场上的产品,虽然有成熟的小电流接地选线装置,但实际运用准确检测出接地故障线路准确率还较低,并且

保护装置复杂,系统运行维护不方便。

3. 中性点经电阻接地方式

中性点经电阻接地方式又分为高阻接地和低阻接地。中性点经高阻接地方式常用于单相接地故障电容电流不大于7 A的中压系统和发电厂厂用电系统,不在本文所讨论的石化装置10 kV供配电系统范围(即接地故障电流大于10 A)。

中性点经小电阻接地方式,即人为选择合适的接地电阻,引入有功电流,使单相接地电流变大(一般控制在200~1 000 A之间),配合继电保护装置快速切断电源,保护设备和线路。相对于非有效接地系统对故障点的检测选线非常困难,中性点低电阻接地系统当线路发生单相接地故障时短路电流很容易被继电保护装置检测并确定故障线路,采用过流保护或者零序保护即可保护线路。中性点采用低电阻接地,发生接地故障时还可有效降低系统非故障相的工频过电压水平,抑制故障点间歇性弧光接地过电压,消除电压互感器谐振过电压。整个系统的绝缘配置水平可大大降低,节省投资。采用低电阻接地方式,电阻值可按企业最终规模选择,留出20%富裕度,运行中电网参数发生变化,如增加或切除部分负荷,电容电流变化,也不需要调节电阻值,系统运行维护简单。该接地方式在接地故障时引入大的电阻性零序电流,可采用零序保护或过电流保护,两种保护配置均具有较高灵敏度和准确度,故障线路切除迅速,故供电可靠性相对于前两种接地方式较低。但考虑到目前大型化工装置配电系统多采用双回路供电,低电阻接地系统可与备用电源自动投入装置配合,提高系统供电可靠性。

10 kV配电系统各种中性点接地

方式的简要对比如表1所示。

化工循环水场10 kV配电系统中性点接地方式选择

该化工循环水场属于全厂公用工程系统,担负全厂消防水、生活生产用水的供给和处理。循环水场内设一座35/10 kV降压变配电所,给本循环水场和化工火炬单元用电负荷供电。上级化工一区110 kV变电站提供两路35 kV电源,变电所内,设两台35/10.5 kV变压器,采用DYN11接线,10 kV侧单母线分段接线,若一台主变压器故障,另一台主变压器承担所有负荷。配电室内设2台10/0.4 kV干式变压器,380 V低压侧单母线分段接线。低压采用TN-S系统,并且电气设备与建筑物采用保护总等电位接地。

1. 单相接地故障电容电流计算

本循环水场变电所10 kV配电柜47台,其中电动机馈线柜41台,电容器馈线柜4台,变压器馈线柜2台,10kV配电线路均采用电缆线路。10 kV电缆长度分别为:1×630 mm²总长度540 m,3×120 mm²总长度490 m,3×95 mm²总长度1 885 m,3×70 mm²总长度10 455 m。10 kV电缆线路的单相接地电容电流为

$$I_c = \frac{95 + 1.44S}{2 \times 200 + 0.23S} U_0 \quad (1)$$

经计算,10 kV线路总的接地电容电流 $I_c = 14.1$ A。考虑10 kV变电所电气设备增加的电容电流,一循变电所10 kV系统总接地电容电流

$$I_c = 14.1 \times 1.16 = 16.35 \text{ A}$$

根据GB 50064—2014第3.1.3条及第3.1.4条,该10 kV系统可采用中性点谐振接地方式或低电阻接地方式。

2. 石化循环水场10 kV配电系统概况

该企业一期工程已于2008年建成并投入运营。一期工程的35 kV系统采用谐振接地方式,6 kV系统采用中性点低电阻接地方式。经过一段时间的运营,出现系统发生单相故障时故障点附近温升迅速,并很快波及周围正常线路温度升高,工程所在地又常年高温高湿,不利于散热,使线路绝缘加速老化,绝缘一旦出现薄弱点将无法自行恢复,长期积累甚至可能出现击穿绝缘并发展成相间短路的情况,这就要求维护人员必须及时更换故障线路以避免故障扩大。另外35 kV电缆大多数设在电缆沟或桥架中,发生接地故障,电缆长期带故障运行,弧光接地所产生的高温也使故障点和临近线路产生可燃气体,累计到一定程度可能会酿成火灾。需投入大量人力维护检修,增加运营成本。目前其35 kV系统单相接地保护整定时间为10 s,即一旦发生故障并经选线装置确定故障线路后10 s内跳闸切除故障。而6 kV低电阻接地系统总体维护成本低,由于6 kV馈出线多采用双电源带各自投保护,中压电动机负荷多数有备用电动机,采用低电阻接地方式可以保证供电可靠性。

本循环水场装置界区红线内有预留地,用于冷却水塔和消防水罐的扩容,会有新增10 kV用电负荷,今后系统的线路电容电流将进一步增加。

综合以上分析,结合前文所述

石化装置特点,如10 kV线路均为电缆线路,接地电容电流大,发生接地故障如果长时间带故障运行,过电压导致电缆绝缘发生不可逆损坏,甚至击穿扩大事故。另外大型石化装置进口成套机组多,10 kV进口电动机设备给定的额定耐受电压值往往低于国内标准,因此要求选择合适的接地方式降低绝缘水平。对比各类接地方式各自特点,该循环水场10 kV系统采用中性点低电阻接地方式显然更为合理。

3. 中性点接地电阻选型

采用中性点经低电阻接地时,电阻值的选取需根据电网的具体情况,综合考虑限制过电压倍数、继电保护的灵敏度、对通信线路的影响和人身安全等因素。

接地电阻的选择和计算如下。

电阻额定电压为

$$U_R \geq 1.05 \times \frac{U_N}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

当 $U_N = 10$ kV时, $U_R = 6.06$ kV,电阻值为

$$R_N = \frac{U_R}{\sqrt{3} I_d} \quad (3)$$

式中, I_d 为人为选定的接地电流。对于10 kV系统,根据经验其取值范围宜在200~1 000 A之间。本装置可取 $I_d = 200$ A,计算得 $R_N = 30.3 \Omega$ 。即发生单相接地故障时流过变压器中性点接地电阻的额定电流 $I_R = 200$ A。电阻器额定通流时间可取10 s。

4. 10 kV配电网过电压水平

10 kV系统发生单相接地故障时,不同接地方式下系统健全相工频过电压水平比较如表2所示。

表2 不同接地方式下系统健全相工频过电压水平对比

接地方式	工频过电压
中性点不接地	$\leq 1.1\sqrt{3}$ p.u.
中性点谐振接地	$\leq \sqrt{3}$ p.u.
中性点低电阻接地	$\leq \sqrt{3}$ p.u.

注:对于工频过电压,1 p.u. = $U_m/\sqrt{3}$;对于谐振过电压和操作过电压,1 p.u. = $\sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$ 。对于10 kV系统, $U_m = 12$ kV。

表1 10 kV配电系统中性点接地方式对比

接地方式	供电可靠性	接地故障电流	健全相工频过电压	铁磁谐振过电压	间歇性弧光过电压	设备绝缘水平
不接地	高	小于10 A	高, $\sqrt{3}$ 倍相电压	高	可发生	高
谐振接地	较高	补偿后残余电流小于10 A	较高	可控制	可避免	较高
低电阻接地	低	大	低	可消除	可避免	低

对于谐振过电压（如电压互感器线圈饱和发生铁磁谐振），应采取防止措施，避免出现谐振过电压的条件。比如选用饱和点较高的电压互感器；其高压绕组中性点尽可能不接地，或经电阻接地；或在三角形开口绕组装设电阻等方式。

10 kV系统发生单相间歇性电弧接地故障时，可产生操作过电压，过电压水平随接地方式不同而异。一般情况下最大操作过电压不超过表3中的数值，如表3所示。

表3 10 kV系统单相间歇性电弧接地故障时操作过电压值

接地方式	操作过电压
中性点不接地	$\leq 3.5\text{p.u.}$
中性点谐振接地	$\leq 3.2\text{p.u.}$
中性点低电阻接地	$\leq 2.5\text{p.u.}$

从表3可见，对于10 kV系统，采用中性点低电阻接地方式可有效抑制系统各种过电压水平，特别是对间歇性弧光接地过电压水平的限制，从而保证配电系统电气设备的安全运行。

弧光接地多数情况出现在不接地系统中，但是考虑施工水平因素，个别电缆终端头可能虚接，导致相线和绝缘屏蔽层之间出现间歇性弧光接地过电压。根据国内有关机构做的EMTP程序计算、过电压模拟装置的实际模拟及各地区运行经验表明，弧光接地过电压水平随着电阻的额定通流 I_R 增加而降低， I_C 为系统电容电流。

当 $I_R \approx I_C$ 时，过电压水平可降到2.5p.u.以下；

当 $I_R \approx 2I_C$ 时，过电压水平可降到2.2 p.u.以下；

当 $I_R \approx 4I_C$ 时，过电压水平可降到2.0 p.u.以下；

当 $I_R > 4I_C$ 时，降低过电压的作用已不明显。

10 kV电阻接地系统发生间歇性弧光接地故障时，弧光接地过电压由于 R_N 的存在被限制在较低水平。

这是因为电弧燃熄过程中系统的残余电荷通过 R_N 泄入大地，中性点电位很快衰减，重燃过电压幅值较低，一般不大于2.1p.u.。

假设系统A相发生间歇性弧光接地故障，此时健全相电压升高值与故障相电压 U_a 的比值 K_b 、 K_c 为

$$K_b = \frac{U_b}{U_a} = \frac{3}{2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (4)$$

$$K_c = \frac{U_c}{U_a} = \frac{3}{2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (5)$$

式（4）、式（5）均为经验公式。给出不同的 $\beta = I_R/I_C$ 值，即可算出相应的 K_b 或 K_c 的值。针对本变电站10.5 kV系统， $\beta = I_R/I_C = 200 \text{ A}/16.35 \text{ A} \approx 12.23$ ，代入式（4）、式（5）可得

$$K_b = K_c = 1.67$$

综上所述，虽然 I_R 远远大于4倍 I_C 时，降低过电压的作用已不明显，但还是可以将系统的间歇性弧光接地过电压水平限制在2p.u.以内，同时能够将系统的工频过电压水平限制在1.68p.u.以内。满足规范要求。

5. 接地保护整定计算

（1）接地电流水平计算

当10.5 kV配电网某一条线路发生单相接地故障时，接地故障电流为

$$I_{jd} = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_0)^2} \quad (6)$$

I_0 为故障电缆本身的电容电流，与整个系统总的电容电流相比计算时可以忽略不计。故

$$I_{jd} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{200^2 + 13.45^2} = 200.45 \text{ A}$$

从保证继电保护灵敏度考虑，电阻值越小即流过电阻的电流越大越好。目前微机保护一般都具备零序保护功能，且起动电流值小，单相接地故障电流远大于每条线路的对地电容电流，一般都能满足零序保护灵敏度要求。按照式（3）所选的电阻值，当故障点过渡电阻不是

很大时，保护灵敏度完全能够满足要求。

对于低电阻接地系统，采用定时限零序过电流保护或单相接地方向保护，可以准确判断出故障线路，实现有选择性的断开故障线路。

（2）保护的配置和整定

35/10 kV变压器10 kV侧中性点和每条10 kV馈出线首端安装专用的零序电流互感器。馈出线首端配置带时限的零序电流保护；主变压器10 kV侧进线柜内装设反映单相接地故障的零序保护，作为母线单相接地故障的主保护和馈线单相接地的后备保护。

馈电线路单相接地保护的一次动作电流均按躲过被保护线路本身的单相接地电容电流进行整定。

$$I_{dz1} = K_{rel} I_{C1} \quad (7)$$

式中， I_{dz1} 为保护装置的一次动作电流； K_{rel} 为可靠系数； I_{C1} 为被保护线路本身的单相接地电容电流。

变电站10.5 kV系统各条馈线的电容电流一般不超过2 A，因此建议各馈线接地保护动作电流为

$$I_{dz1} = K_{rel} I_{C1} = 25 \text{ A} \quad (8)$$

保护的动作时限建议取0.1 s。

母线单相接地保护装置的一次动作电流按躲过各条馈线中单相接地电容电流最大的馈线的单相接地电容电流值来整定。

$$I_{dz1} = K_{rel} I_{C1max} \quad (9)$$

式中， K_{rel} 为可靠系数； I_{C1max} 为10 kV系统中单相接地电容电流最大值的馈线的单相接地电容电流。

变电站10.5 kV系统的所有馈线中，馈线电容电流最大也仅为2 A左右，因此母线单相接地保护装置的一次动作电流为

$$I_{dz1} = K_{rel} I_{C1max} = 30 \text{ A} \quad (10)$$

保护的动作时限建议取0.5 s。

6. 对通信线路的影响

从降低对通信的干扰考虑，流

过电阻的电流不宜过大。我国四部协议规定,如通信电缆与大地间未装放电器时,危险影响电压不得大于430 V,对高可靠线路不大于630 V。根据上海供电局对10 kV电阻接地系统做的单相接地模拟试验,接地电流达到1 000 A,10 kV电缆和通信电缆平行长度1 km,平行间距50 cm,计算结果显示10 kV电缆对通信线路的感应电压为225 V,其危险影响电压在四部协议规定的范围之内。

从实例看,目前石化行业10 kV系统电阻电流中,镇海炼化取200 A,产品投运后未发现对通信线路造成任何影响。

参考以上模拟实验结果和实际运行经验,可以认为选择电阻电流200 A完全能够避免对通信线路的干扰。

7. 接触电位差和跨步电位差校验

从人身安全考虑,中性点接地电阻的通流越小越好。因为中性点经低电阻接地在发生单相接地故障时,通过故障点的接地短路电流

比较大,引起故障点地电位升高,有可能造成跨步电压,接触电势超过允许值,危及人身安全。因此在选择电阻值时,应根据地网接地电阻,保护动作时间,接地短路电流核算跨步电压和接触电势是否超过规程。

对于该循环水场,取 $\rho_s=1000\ \Omega\cdot\text{m}$,接地干线材质为50×5 mm热镀锌扁钢,假设入地最大故障电流 $I_G=200\ \text{A}$,取故障持续时间1.5 s。通过ETAP软件模拟计算,循环水场接触电位差和跨步电位差允许值分别为 $U_t=320.5\ \text{V}$ 、 $U_s=897.3\ \text{V}$ 。发生接地故障时接地网最大接触电位差和跨步电位差分别为 $U_t=189.3\ \text{V}$ 、 $U_s=190.6\ \text{V}$,地电位升高值为524.7 V。接地网接地电阻 $R=2.6\ \Omega$ 。经比较最大接触电位差和跨步电位差均满足允许值要求。因此选择电阻额定通流200 A是比较合适的。

当然也应考虑到由于10 kV系统和380 V低压配电系统在同一变电所内共用接地网,当10 kV线路发生单相接地故障时,接地电流流经接地网产生电压,并经TN-S系统的

PE线转移到低压用电设备外壳上,对人身安全产生威胁。为此也应尽快切断故障线路,降低触电风险。如前文所述,10 kV馈出线单相接地保护整定值取0.1 s是比较合适的。

结束语

以某石化循环水场为例,经过比较3种中性点接地方式各自特点,可以看到对于石化装置10 kV供配电系统,采用低电阻接地方式可以有效降低系统工频过电压,消除电压互感器铁磁线圈饱和引起的谐振过电压,抑制间歇性弧光过电压,从而降低整个配电系统的绝缘配合要求。中性点接地电阻产品目前较成熟系统容易实现,维护工作量少,对比消弧线圈产品具有较高的经济性。由于人为引入较大接地故障电流,保护配置方便,故障切除灵敏度和准确度较高。目前10 kV系统微机保护装置可靠提高,配合双电源带备自投保护,可以保证供电可靠性。因此,可确定该石化循环水场10 kV配电系统采用中性点低电阻接地方式是比较合理的方案选择。EA

(上接第43页)

2. 最短电缆长度

通过查询相关资料可知,1 mA以上的电流即可点亮LED信号灯。因此可以计算出能使LED信号灯发光的最短电缆长度。还是以KYJV₂₂ 1.5 mm²控制电缆为例。

$$Z=\sqrt{R^2+X_C^2} \quad (5)$$

$$I=220/Z \quad (6)$$

通过式(5)和式(6),可以计算出

$$L=\frac{1}{(2\pi\times 50\times 0.048\times 10^{-6})X_C}=301\ \text{m}$$

由此可知,控制电缆长度越

长,感应电流越大,现场操作柱LED信号灯越亮。

3. 解决方法

在今后的设计工作中,可以提前计算出LED信号灯非正常启辉的最短电缆长度。将该结果和设计长度进行比对,如果设计的长度远远大于 $L_{\min}$,那么在控制电缆长度客观不能改变的情况下,通知厂家考虑更换指示灯。选用启辉电流大的LED信号灯,或改用直接式白炽灯。

结束语

近期在某大型煤化工项目中,

有两台空冷电机距离变电所低压开关柜达到500 m。低压开关柜采用了ABB的A系列接触器,在实际调试中没有发生接触器无法释放的情况。由于厂家提前在信号指示回路并联了电阻,因此也没有出现操作柱“双灯”现象。由此可以认为,此方法可以辅助用于设计时对控制电缆长度的校验,也可以根据控制电缆的长度来选择接触器和LED信号灯的型号。从而避免电气设备在实际使用中发生误动作或者误指示,避免给生产安全和人身安全带来隐患。EA