

110 kV单芯电缆感应电压计算浅析

随着石油化工装置中110 kV变电站的增多, 110 kV单芯电缆应用也相继增多。为了减少电缆线路的损耗、提高电缆的输送容量, 一般采用单点接地或交叉互联接地的方式, 这样就在金属护套上产生了感应电压。感应电压有时不仅会危害人身安全, 同时还会击穿金属护套的外护层。感应电压与110 kV电缆线路的排列方式、长度、临近线路的排列方式、有无回流线及根数都有关系。经过公式推导与国标公式结果相比对, 依据相关国家标准规范选取实际工程项目中合适的接地方式。

张嘉嘉/中国石化工程建设有限公司

随着石油化工装置中110 kV变电站的增多, 110 kV单芯电缆也会经常使用。110 kV单芯电缆金属护套带来的感应电压也随之产生。

在电缆金属护套中产生的感应电压会提高电缆运行温度, 有时会危及人身安全, 同时还会击穿金属护套的外护层。当需要保护器来保护外护层时, 感应电压也是制定保护器参数的决定因素之一。目前, 国家相关标准规范GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》第4.1.10条规定: 未采取能有效防止人员任意解除金属层的安全措施时, 感应电压不得大于50 V; 除上述情况外, 不得大于300 V^[1]。为保证人身安全且不能确定在附近活动的人员都具备相关常识, 选取50 V作为感应电压的上限值。

如果感应电压的数值超过或接近上限值时, 通常可采取的措施为电缆线路金属护套一端或中央部位单点直接接地、两端直接接地及交叉互联接地或设置电压限制器、电容器。本文将选取合适的接地方式以限制感应电压。

等效电路与公式推导

1. 电缆等效电路与公式

在图1中, p为单芯电缆的金属护套, 将其看成一根与三相线芯A、B和C平行的导体。这四根导体相互间的中心距离以比率来表示, 即线芯AB、BC和CA之间的中心距分别为S、mS、nS; 导体p与线芯A、B、C之间的中心距分别为D、βD、γD。

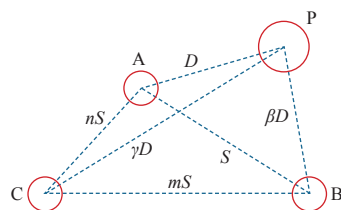


图1 单芯电缆金属护套至各相线芯之间的中心距离表示

导体p与线芯电流 I_A 间的磁通为

$$\varphi_{pA} = 2 \times 10^{-4} I_A \ln \frac{D}{\text{GMR}_p} \text{ Wb/km} \quad (1)$$

式中, GMR_p 为导体的几何平均半径。

由式(1)可得出导体p与线芯电流 I_B 间的磁通、导体p与线芯电流 I_C 间的磁通为

$$\varphi_{pB} = 2 \times 10^{-4} I_B \ln \frac{\beta D}{\text{GMR}_p} \text{ Wb/km} \quad (2)$$

$$\varphi_{pC} = 2 \times 10^{-4} I_C \ln \frac{\gamma D}{\text{GMR}_p} \text{ Wb/km} \quad (3)$$

因此, 导体p与线芯A、B、C之间的磁通总和为

$$\varphi_p = 2 \times 10^{-4} \left(I_A \ln \frac{D}{\text{GMR}_p} + I_B \ln \frac{\beta D}{\text{GMR}_p} + I_C \ln \frac{\gamma D}{\text{GMR}_p} \right) \text{ Wb/km} \quad (4)$$



张嘉嘉/工程师

关键词/Keywords

110 kV变电站·
单芯电缆·
感应电压·

现假想导体p与线芯A圆心重合,即成为A相电缆的金属护套。此时 $\beta D = S$, $\gamma d = nS$, $D = \text{GMR}_p = \text{GMR}_s$, 于是式(4)简化为

$$\varphi_p = 2 \times 10^{-4} (I_B \ln \frac{S}{GMR_p} + I_C \ln \frac{S}{GMR_p}) \text{ Wb/km} \quad (5)$$

式中, GMR_s 为金属护套的几何平均半径。

现假想三相线芯电流是平衡的, 即

$$\begin{aligned} I_A &= I \\ I_B &= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)I \\ I_C &= \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)I \end{aligned} \quad (6)$$

将三相电流带入上述A相线芯磁通公式得

$$\begin{aligned}\varphi_p &= 2 \times 10^{-4} \left[\left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I \times \ln \frac{S}{\text{GMR}_s} + \right. \\ &\quad \left. \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I \times \ln \frac{nS}{\text{GMR}_s} \right] \\ &= 2 \times 10^{-4} \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{nS^2}{\text{GMR}_s} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln n \right) \quad (7)\end{aligned}$$

由此得出A相、B相、C相金属护套上的纵向感应电压为

$$E_{\text{SA}} = -j\omega\varphi_{\text{P}} = 2\omega I \times 10^{-4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln n + j\frac{1}{2} \ln \frac{nS^2}{\text{GMR}_s^2} \right) \text{ V/km} \quad (8)$$

$$E_{\text{SB}} = 2\omega I \times 10^{-4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{ms}{\text{GMR}_s} - j \frac{1}{2} \ln \frac{S}{m \times \text{GMR}_s} \right) \text{ V/km} \quad (9)$$

$$E_{sc} = 2\omega I \times 10^{-4} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{ms}{GMR_s} - j \frac{1}{2} \ln \frac{n^2 S}{m \times GMR_s} \right) \text{ V/km} \quad (10)$$

2. 回流线计算公式

如一回路线缆附近有一平行导体p，它与各相电缆的距离如图2所示，当其只在一端接地时，其感应电压为

$$E_p = 2\omega I \times 10^{-4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{\gamma}{\beta} + j \frac{1}{2} \ln \beta \gamma \right) \text{ V/km} \quad (11)$$

当平行导体的另一端也接地时称为回流线，这时平行导体上的纵向感应电动势就产生一个以

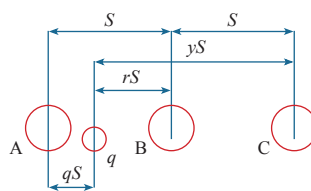


图2 回流线的布置方式

大地为回路的电流 I_p ，这个电流也对A、B和C相护套感应出电压，如将回流线以大地为回路的自感抗称为 X_{pp} ，并不计回流线的接地电阻时，回流线上的电流为

$$I_p = \frac{E_p}{R_p + R_g + jx_{pp}} \quad (12)$$

式中, R_p 为回流线的电阻; R_g 为大地漏电电阻, $R_g =$

$$\pi^2 f \times 10^{-4}, \quad \Omega/\text{km}; \quad x_{\text{pp}} = 2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_e}{\text{GMR}_p}, \quad \Omega/\text{km},$$

D_e 为 I_p 以大地为回路的深度,按式(13)计算,
 m ; GMR_p 为回流线的几何平均半径。

其中

$$D_e = 93.18\sqrt{\rho} \quad (13)$$

可以得出 I_p 对A、B和C三相护套形成的感应电压分别为

$$E_{\text{pA}} = -j\omega I_{\text{p}} 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{\text{e}}}{D} \text{ V/km} \quad (14)$$

$$E_{\text{pB}} = -j\omega I_{\text{p}} 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{\text{e}}}{\beta D} \text{ V/km} \quad (15)$$

$$E_{\text{pC}} = -j\omega I_{\text{p}} 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{\text{e}}}{\gamma D} \text{ V/km} \quad (16)$$

工程实例计算

现110 kV变电站有一回110 kV电缆出线,电压等级为110 kV,该线路额定电流为139 A,供电线路长度为1.5 km,水平排列敷设于电缆桥架中,电缆中心间距为 $S=0.2$ m,电缆金属层平均半径 $r=0.044$ m,假设电缆金属护套采用一端接地,另一端设置电压限制器。该项目所在位置土壤电阻率为 $500 \Omega \cdot \text{m}$ 。

1. 使用推导公式计算

相间距离的比率,当电缆排列方式为水平时, $n=2$, $m=1$, 此时A相公式可简化为

$$E_{SA} = 2\omega I \times 10^{-4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln 2 + j \ln \frac{\sqrt{2}S}{GMR_s} \right) \text{ V/km} \quad (17)$$

B相公式可简化为

$$E_{SB} = 2\omega I \times 10^{-4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{S}{GMR_s} - j \frac{1}{2} \ln \frac{S}{GMR_s} \right) \text{ V/km} \quad (18)$$

式中, I 为电缆导体正常工作电流, A。

因A、C相感应电压绝对值相同, 故使用式(17)计算得A、C相单位长度的正常感应电动势为17.065 36 V/km。使用式(18)计算得B相单位长度的正常感应电动势为13.215 53 V/km。

2. 使用国标公式计算

选取国标GB 50217《电力工程电缆设计规范》附录F中表F.0.2中公式^[1]

$$E = \frac{1}{2} \times \sqrt{3Y^2 + (X_s - a)^2} \text{ V/km} \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned} Y &= X_s + a \\ a &= (2\omega \ln 2) \times 10^{-4} \\ X_s &= (2\omega \ln \frac{S}{r}) \times 10^{-4} \\ \omega &= 2\pi f \end{aligned} \quad (20)$$

式中, r 为电缆金属层的平均半径, m; f 为工作频率, Hz; S 为各电缆相邻之间中心距, m。回路电缆情况, 假定其每回 I 、 r 均等。

使用式(18)计算得单位长度的正常感应电动势为17.063 67 V/km。

3. 推导公式与国标中公式比较

如下表所示, 推导公式与国标计算结果误差几乎可以忽略, 两个公式的单位长度正常感应电动势实为不同表达形式的公式, 但其原理均如下述推导过程所述。

表 国标中公式与推导公式比对

出处	国标	推导公式
A相和C相公式	$E = \frac{1}{2} \times \sqrt{3Y^2 + (X_s - a)^2}$	$E_{SA} = 2\omega I \times 10^{-4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln 2 + j \ln \frac{\sqrt{2}S}{GMR_s} \right)$ $E_{SC} = 2\omega I \times 10^{-4} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{S}{GMR_s} - j \frac{1}{2} \ln \frac{4S}{GMR_s} \right)$
计算结果/(V/km)	17.063 67	17.065 36
误差	误差基准值	0.009 9%
B相公式	$E = IX_s$	$E_{SB} = 2\omega I \times 10^{-4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{S}{GMR_s} - j \frac{1}{2} \ln \frac{S}{GMR_s} \right) \text{ V/km}$
计算结果/(V/km)	13.216 00	13.215 53
误差	误差基准值	0.003 6%

4. 回流线计算

假设设置一条回流线, 回流线距A、B相之间距离按照距离A相0.3 S 、距离B相0.7 S 的距离布置。

计算感应电压时, 取电压的绝对值。如需要计算回流线的感应电压值, 应使用复数计算。使用复数计算后的A、B和C, 三相护套单位长度的感应电压分别为 $E_{SA} = 5.237 52 + j16.242 4$, $E_{SB} = 11.444 85 - j6.608 0$, $E_{SC} = -11.445 7 - j1.450 2$ 。

根据式(11)~式(16)计算回流线产生的感应电压。计算得 $D_e = 2 083.568 \text{ m}$ 。

如图2所示, 计算左半侧, 其中, $D = qS = 0.06 \text{ m}$; $\beta = rS/(qS) = 2.333$; $\gamma = yS/(qS) = 5.667$; $E_{p1} = 6.709 26 + j11.268 52$ 。计算右半侧, 其中, $D = qS = 0.34 \text{ m}$; $\beta = rS/(qS) = 0.412$; $\gamma = yS/(qS) = 0.176$; $E_{p2} = -6.429 84 - j11.452 71$ 。

故整条回流线上的感应电压为: $E_p = E_{p1} + E_{p2} = 0.279 42 - j0.184 19$ 。算得回流线上的电流 $I_p = -0.212 98 - j0.372 35$ 。继续算出回流线对A、B和C三相护套形成的感应电压分别为 $E_{PA} = E_{PC} = -0.224 2 + j0.128 2$, $E_{PB} = -0.224 67 + j0.128 5$ 。由

上述计算可得出,有回流线之后的A、B和C,三相护套的单位长度的感应电压分别为: $E'_{SA}=E_{SA}+E_{PA}=5.013\ 32+j16.370\ 64=17.121\angle 72.97^\circ$; $E'_{SB}=E_{SB}+E_{PB}=11.220\ 18-j6.479\ 5=12.957\angle -30^\circ$; $E'_{SC}=E_{SC}+E_{PC}=-11.669\ 9-j1.321\ 96=11.745\angle -173.54^\circ$ 。

算例小结与降低感应电压措施

依照国标GB 50217《电力工程电缆设计规范》附录F中公式F.0.1,即

$$E_s = LE \quad (20)$$

式中, L 为电缆金属层的电气通路中任一部位与其直接接地处的距离,km。长度为1.5 km的110 kV电缆线路的感应电压最大为25.595 5 V,满足国标50 V的要求。上述回流线的计算仅为了表明回流线对感应电压的影响。在电缆交叉互联后的护套可以起到回流线的作用(单点接地的电缆的金属护套不允许作为短路电流的回路^[2]),且回流线与相线之间的几何距离也会影响感应电压的值。通常做法如本文中假设方式:敷设的回流线与中心电缆的距离为 $0.7S$ (S 为相邻电缆轴间距离),并在电缆线路1/2处换位,但电缆不换位。本文项目中未采用设置回流线的方法。

目前,常用的降低感应电压的措施是较短的电缆线路敷设采用一端接地,另一端设置电压限制器或线路中间直接接地,两端设置电压限制器。当电缆线路较长、电力负荷大和线芯电流大的情况下,金属护套只一端接地时的感应电压会非常高,甚至可达数百伏,会危及人身和设备的安全。这时可以采用交叉互联接地的方式,即每分段长度内采用一端接地,另一端设置电压限制

器;各分段长度之间采用电缆交叉互联接地箱连接。在敷设110 kV单芯电缆线路的过程中还应注意穿越的保护管等环形物体和电缆桥架不应形成闭合的电磁环路以及敷设温度限制。

结束语

本文中推导公式的计算数值与国标GB 50217《电力工程电缆设计规范》中公式的计算数值误差很小,故利用推导公式进行计算可以满足工程中电缆感应电压的计算需求。

经计算,在本文工程实例中假设的电缆采用金属护套一端接地,另一端设置电压限制器的方式可以满足国家标准规范的要求。但为了使电缆线路周围环境和人员更加安全,最终选取了线路中间直接接地、两端设置电压限制器的方式。该方式可使电缆线路的感应电压降为前述方法的1/2,更能保证人身安全。

在工程项目中进行电缆金属护套接地方式选择前,需先进行电缆感应电压计算。然后通过感应电压的计算数值选取合理的接地方式,以保证工程项目安全稳定运行。

参考文献

- [1] 中国电力企业联合会. GB/T 50217—2007 电力工程电缆设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2008.
- [2] 王春江. 电线电缆手册1[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.

(收稿日期:2015-05-01) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告