

平行线路的特点及保护选择

河南安阳供电局 罗承廉

由于我局平行线路较多（指110^{kV} 35^{kV}电网）通过较长时间的运行证明，这种线路给保护的选择和运行带来较多的麻烦和不利因素，下面仅针对我局的具体情况作一些分析，不一定正确，希望得到有这方面经验的同志的帮助。

一、平行线路的特点

平行线路即同杆架设或走径相同的二条毗邻的三相输电线。平行线路在完全换位的情况下（为了使三相电抗值相等，换位的次数必须为3的倍数）当两线路通过正序（或负序）电流时，由于每回线三相电流大小相等，相位互差120°，其和为零，从而任一线路的正序（或负序）电流切割相邻线路产生的有效磁通很小很小，两回线路之间的正序（或负序）的平均互阻抗系数基本为零，这样便可以认为每回线路的正序（或负序）阻抗与单回线时的正序（或负序）阻抗基本相等。即使对于不换位的线路互感阻抗也小于线路自感阻抗的10%（通常不超过3—7%）而对换位线路还能减少50%或者更多，也就是2—3%，从而可以忽略不计。而当平行双回线中的一回发生接地短路，并且双回线中都有零序电流通过时，因每回线的三相零序电流大小相等，相位相同，其和不为零。从而使两回线路的零序磁场相互助增而产生互感作用，零序互感阻抗可高达自感阻抗的50~70%，使每回线路的零序阻抗都要增大。所以在继电保护系统的设计和故障计算时必须计及平行线路的零序互感阻抗。同理，架空地线的存在也不影响线路的正序和负序阻抗。当导线中通过零序电流时，零序磁通将穿链地线而在地线和地所组成的闭合回路内产生感应电流其相位几乎和线路中电流的相位相反，因此，该感应电流产生的零序磁通将削弱导线的磁通，所以地线的存在将减小线路零序电抗的数值。由于钢质架空地线的电阻较大，对线路零序电抗的数值减小不多（约为10—15%）所以，一般忽略不计。但对于和输电线路导线相同的地线（即为良导体时）则必须计及其对零序电抗的影响。

二、具有两根地线的平行线路零序电抗的计算（以I、II A化为例）

线路参数：导线LGJ—185，水平排列，线间距离4米，全双地线GJ—50

按I、II A化双回间距分，可分为四段：

- 第 I 段: 出 A 电厂, 两回线间距 20 米, 长约 4 公里
- 第 II 段: 两回线中心间距 300 米, 长约 9 公里
- 第 III 段: 两回线中心间距 100 米, 长约 1 公里
- 第 IV 段: 进 B 变电站 (化肥厂站) 间距 20 米, 长约 1 公里

1. 每一回线的正序电抗

$$X_1 = 0.145 \lg \frac{D_{PI}}{r_s} (\Omega / KM)$$

式中: D_{PI} : 三相导线的几何均距

r_s : 导线的等值半径, 对钢芯铝线而言

$$r_s = 0.95r \quad (r \text{ 为导线的计算半径})$$

将数据代入则

$$X_1 = 0.398 (\Omega / KM)$$

∴ 双回线的正序电抗

$$X_{1''} = \frac{X_1}{2} = 0.199 (\Omega / KM)$$

2. 不计地线影响的零序电抗

根据卡尔逊 (carson) 关于求取“导线一地”回路电抗的经验公式:

$$X_0 = 0.145 \lg \frac{0.2085}{r_{PI} \sqrt{f \lambda 10^{-9}}} (\Omega / KM)$$

式中: r_{PI} : 为导线的等值半径 (单位为 M)

f : 为电源的频率 (单位为 Hz)

λ : 为地的导电率 (单位为 $1/\Omega \cdot cm$)

$$\text{若令 } D_{aa'} = \frac{0.2085}{\sqrt{f \lambda 10^{-9}}}$$

$D_{aa'}$ 称之为导线 a 与等值地回路 a' 的等值距离, 也可称为假想返回导线在地中的等效深度。当 $f = 50Hz$ 时, 在短路计算时可取 $D_{aa'} = 1000$ 米

① 任一回路中三根导线的几何平均半径为:

$$r_{PI} = \sqrt{r_s \cdot D_{PI}^2} = 0.479 (M)$$

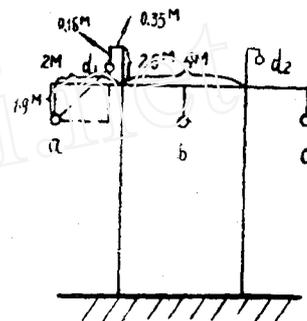
② 当另一回线及地线的影响略去不计时, 每一回的零序电抗为:

$$\begin{aligned} X_{I_0} &= 3 \times 0.145 \lg \frac{D_{aa'}}{r_{PI}} (\Omega / KM) \\ &= 0.435 \lg \frac{1000}{0.479} = 1.444 (\Omega / KM) \end{aligned}$$

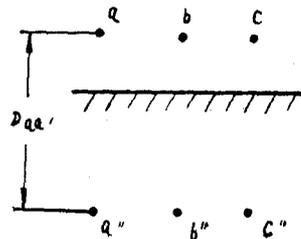
$$\therefore \frac{X_{I_0}}{X_1} = \frac{1.444}{0.398} = 3.63$$

③ 两回线路间的几何平均距离为:

$$D_{I-I} = \sqrt[3]{d_{aa'} \cdot d_{ab'} \cdot d_{ac'} \cdot d_{ba''} \cdot d_{bb''} \cdot d_{bc''} \cdot d_{ca''} \cdot d_{cb''} \cdot d_{cc''}}$$



图一



图二

即线路 I 每一导线至线路 II 每一导线九个轴间距离连乘积的九次方根。

i) 若按间距 20 米计算 $D_{I-I} = 23.5$ 米

ii) 若按中心间距 300 米计算: $D_{I-I} = 299.96$ 米

iii) 若按中心间距 100 米计算: $D_{I-I} = 99.89$ 米

④ 两回路之间的零序互感抗为:

$$X_{I-I_0} = 3 \times 0.145 \lg \frac{D_{aa'}}{D_{I-I}}$$

注意: 此公式在三相导线的间距相等时才成立, 对于水平排列的三相导线, 经过换位后, 可以利用此公式。

i) 若按 20 米计算 $X_{I-I_0} = 0.71 (\Omega/KM)$

ii) 若按 300 米计算 $X_{I-I_0} = 0.227 (\Omega/KM)$

iii) 若按 100 米计算 $X_{I-I_0} = 0.435 (\Omega/KM)$

⑤ 考虑另一回路的影响后, 双回线的零序电抗为:

$$X_0'' = \frac{1}{2} (X_0 + X_{I-I_0})$$

i) 按 20 米计算 $X_0'' = 1.08 (\Omega/KM)$, $\frac{X_0''}{X_1''} = 5.4$

ii) 按 300 米计算 $X_0'' = 0.835 (\Omega/KM)$ $\frac{X_0''}{X_1''} = 4.2$

iii) 按 100 米计算 $X_0'' = 0.94 (\Omega/KM)$ $\frac{X_0''}{X_1''} = 4.72$

⑥ 若考虑地线为良好导线时的影响则

地线的等值半径 $r_{sd} = 0.95 \times \frac{d}{2} = 0.44 \times 10^{-2}$ 米

等值地线的几何平均半径为: $r_{p1d} = \sqrt{r_{sd} \cdot D_{p1d}} = 0.144$ 米

架空地线的零序电抗为:

$$X_{d0} = 0.435 \lg \frac{D_{aa'}}{r_{p1d}} = 1.67 (\Omega/KM)$$

线路导线和架空地线间轴间的几何均距为: (见图一)

$$D_{p11-d} = \sqrt[6]{D_{ad1} \cdot D_{bd1} \cdot D_{cd1} \cdot D_{ad2} \cdot D_{bd2} \cdot D_{cd2}} \\ = 5.1 \text{ 米}$$

I 回线与地线间的零序互感抗为:

$$X_{I-d0} = 0.435 \lg \frac{D_{aa'}}{D_{p11-d}} = 0.997 (\Omega/KM)$$

仅考虑地线的影响, 但不计另一回的影响时, 每回的零序电抗为:

$$X_0^{(d)} = X_0 - \frac{X_{I-d0}^2}{X_{d0}} = 0.85 (\Omega/KM)$$

$$\frac{X_0^{(d)}}{X_1} = 2.13$$

如果按钢质地线减少10~15%计算可得

$$X_0^{(d)} = 1.23 (\Omega/KM)$$

$$\frac{X_0^{(d)}}{X_1} = 3.08$$

若同时考虑地线和另一回路的影响时，双回线的零序电抗为：

若按间距20米计算：

$$X_0^{(d)} = \frac{1}{2}(X_{10} + X_{1-10}) - \frac{X_1^2 - d_0^2}{X_{d0}} = 0.482 (\Omega/KM)$$

$$\frac{X_0^{(d)}}{X_1} = 2.42 (\text{地线为良导体时})$$

若按钢质地线减小10~15%计算可得(取15%)

$$X_0^{(d)} = 0.336 (\Omega/KM)$$

$$\frac{X_0^{(d)}}{X_1} = 4.34$$

《间距为300米和100米时的计算从略》

由上面的分析和计算可以看出，平行线路由于零序互感的影响使零序电抗增大很多，架空地线的存在又使零序电抗有所减小，所以在保护的选择和计算时，必须计及零序互感的影响。

三、平行线路不平衡电压的产生与计算(以I、II A化为例)

如果平行线路中两条线路的导线关于纵轴对称地排列(即排列为 $\begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ a & b & c \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{matrix}$ 或 $\begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ a' & b' & c' \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{matrix}$)则两线路中的相互感应电压相等，而当导线不对称排列时，则线路I的电流在线路II中感应的电压和线路II中的电流在线路I中感应的电压不同，这一电压差的存在将使两线路间产生环流，由于正序和负序电流的影响很小故可忽略不计，有影响的仍是接地故障时的 V_0' ，下面以A化线为例进行计算：

假如一条线路为 a 、 b 、 c ，另一条线路为 a' 、 b' 、 c' ，如果各导线间的距离以 $d_{aa'}$ 、 $d_{ab'}$ 、 $d_{ac'}$ 等表示，阻抗用 $Z_{aa'}$ 、 $Z_{ac'}$ 等表示，则通过导体 a 、 b 、 c 的电流在导体 a' 中感应的电压为

$$V_{a'} = I_a Z_{aa'} + I_b Z_{ba'} + I_c Z_{ca'} \quad \dots\dots\dots ①$$

$$\text{同理 } V_{b'} = I_a Z_{ab'} + I_b Z_{bb'} + I_c Z_{cb'} \quad \dots\dots\dots ②$$

$$V_{c'} = I_a Z_{ac'} + I_b Z_{bc'} + I_c Z_{cc'} \quad \dots\dots\dots ③$$

$$\text{则 } V_0' = \frac{1}{3} (V_a' + V_b' + V_c')$$

$$= \frac{1}{3} [I_a (Z_{aa'} + Z_{ab'} + Z_{ac'}) + I_b (Z_{ba'} + Z_{bb'} + Z_{bc'}) + I_c (Z_{ca'} + Z_{cb'} + Z_{cc'})] \quad \dots\dots\dots ④$$

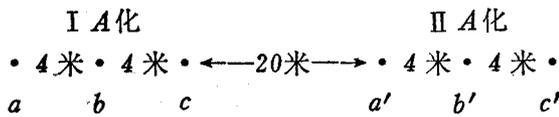
由对称分量法知:

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 \\ \dot{I}_b = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0 \\ \dot{I}_c = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0 \end{cases}$$

以此代入④式并以卡尔逊公式代入后加以简化可得

$$\begin{aligned} V_0' = & 0.0483 I_1 \left(0.866 \lg \frac{d_{ca'} \cdot d_{cb'} \cdot d_{cc'}}{d_{ba'} \cdot d_{bb'} \cdot d_{bc'}} - \right. \\ & \left. - j \lg \frac{d_{aa'} \cdot d_{ab'} \cdot d_{ac'}}{\sqrt{d_{ba'} \cdot d_{bb'} \cdot d_{bc'} \cdot d_{ca'} \cdot d_{cb'} \cdot d_{cc'}}} \right) + \\ & + 0.9453 I_2 \left(0.866 \lg \frac{d_{ba'} \cdot d_{bb'} \cdot d_{bc'}}{d_{ca'} \cdot d_{cb'} \cdot d_{cc'}} - \right. \\ & \left. - j \lg \frac{d_{aa'} \cdot d_{ab'} \cdot d_{ac'}}{\sqrt{d_{ba'} \cdot d_{bb'} \cdot d_{bc'} \cdot d_{ca'} \cdot d_{cb'} \cdot d_{cc'}}} \right) + \\ & + I_0 \left(0.1773 + j 0.435 \times \right. \\ & \left. \times \lg \frac{D_{aa'}}{\sqrt{d_{aa'} \cdot d_{ab'} \cdot d_{ac'} \cdot d_{ba'} \cdot d_{bb'} \cdot d_{bc'} \cdot d_{ca'} \cdot d_{cb'} \cdot d_{cc'}}} \right) \end{aligned}$$

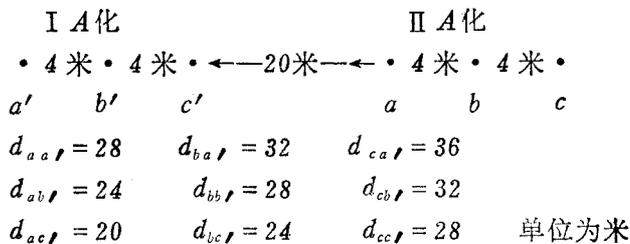
以间距20米段计算:



如图 $d_{aa'} = 28$ $d_{ba'} = 24$ $d_{ca'} = 20$
 $d_{ab'} = 32$ $d_{bb'} = 28$ $d_{cb'} = 24$
 $d_{ac'} = 36$ $d_{bc'} = 32$ $d_{cc'} = 28$ 单位为米

由上面的公式可求出 I A化中的电流在 II A化中感应的零序电压为:

$$V_0' = (-0.0085 - j 0.0134) I_1 + (0.0085 - j 0.0134) I_2 + (0.1773 + j 0.678) I_0$$



II A化中的电流在 I A化中感应的零序电压为: (代入前公式)

$$V_0' = (0.0074 + j 0.014) I_1 + (-0.0074 + j 0.014) I_2 + (0.1773 + j 0.678) I_0$$

∴ 零序电压差 $V_0' = (-0.0159 - j0.0274)I_1 + (0.0159 - j0.00274)I_0$

当 $I_1 = I_2$ 时 $V_0' = j0.0548I_1$

由上面的计算结果可以看出零序电压差的存在。由于零序电压差仅仅是 I_1 和 I_2 的函数，所以零序环流在相间故障时才出现。虽然这一不平衡影响不会造成事故，但当一条线路内部相间故障时，采用零序电流闭锁的保护装置灵敏度将降低，因此，平行线路的导线排列应该关于纵轴对称，而实际上却不可能。I、II A 化便是非对称排列，所以这一不利影响在保护的配置与计算中必须加以考虑。

四、平行线路保护的选择

由于电流电压保护在系统运行方式变化时可能缩短保护范围，甚至没有保护区，从而满足不了速动性、选择性和灵敏性的要求。若采用距离保护作为平行线路的主保护也有很多缺点：

①为了保证选择性，距离保护装置应分别装设在每一回线上。当被保护的平行线路发生相间短路时，故障线路保护装置的感受阻抗值与平行线路投入一回或二回无关。从而第一段的动作范围不变而且只跳开故障一回线的开关。但在两回线运行时，流入保护装置的电流只有 $1/2$ ，而其动作值与接在和电流上的连接方式时相同，所以使起动元件的灵敏度降低。

②在平行线路外部短路时，保护装置的感受阻抗较大，从而对相邻元件所起的后备作用变坏。

③无时限动作范围不能伸至被保护线路的对侧母线（最好的情况下只能保护线路全长的80%左右），剩余部分内发生故障时，将由带时限的保护装置切除。这样，对自发电厂引出的短线路很不合适（I、II A 化便是如此，而且目前全线无速动保护）容易造成系统振荡或事故扩大。所以在平行线路上宜采用动作迅速，不反应外部短路，能瞬时切除被保护元件上任一点故障不受系统振荡影响，与相邻保护无配合问题的电流横差保护作为主保护，对单侧电源而言，在电源侧采用电流平衡保护，线路末端则采用电流横差方向保护作为相间短路的主保护，距离保护作其后备。线路末端的母联开关则采用过流和零序解列与之配合。

由于电力系统故障的概率，单相接地约占65%以上。零序电流保护装置又具有以下优点：动作原理和结构都很简单，动作十分可靠，不反应于正常的负荷电流和系统的振荡，所以被广泛采用作为防止接地故障的保护装置，在平行线路中，由于零序互感的影响，给零序保护带来很多问题：当平行线路间的 X_{M0} 很大，而保护安装处对侧系统的综合零序电抗较小时，可能产生短路点越远，非故障线路中的电流可能反而逐渐增加的现象给整定计算带来麻烦，如果采用零序保护装置作为平行线路单回线运行的主保护时，因不宜增大第II段的动作时限来增大II段的保护范围，则需在平行线路上装设零序横差方向保护装置使保护复杂化，为了提高零序保护装置的灵敏度，零序III段应接在平行线路和电流上，从而使接线复杂和不易维护。

通过上面的简单分析和比较,可见平行线路保护的选择为之不易。即使是采用电流横差方向保护和电流平衡保护也存在不少问题:当平行线路末端母线附近或线路电源侧的母线附近发生短路时将产生一侧开关先跳,另侧开关后跳的所谓“相继动作区”,这对迅速切除故障来说是很不利的(切除故障时间增加一倍)。由于方向元件采用 90° 接线,在保护安装处附近三相短路时,方向元件将出现“电压死区”,而使保护拒动,而且目前规定死区长度可小于线路全长的10%,从而使保护范围相应缩短。由于方向元件采用 90° 接线,当Y/ Δ -11接线变压器后二相短路时,接入原边的方向继电器有反向动作的可能,从而造成保护误动。当线路断线并故障时可能失去双回线。当电厂侧的双母线采用固定连接的母差保护时(A电厂便是如此)通常都将平行线路的双回线分别接在不同的母线上来保证供电的可靠性,但若在母线上发生短路并且母线保护装置动作时,电源侧的横差保护可能误动而将双回线全切断。因为它不反应外部故障,所以不能作为相邻元件的后备,也不能作为单回线运行时的主保护。现场调试时,稍有不慎便可能引起双回线全跳,现场维护人员不愿意采用这些保护,因此定期检验时往往要求双回线全停电,从而造成用户供电中断,如果停不下来则往往延长调试周期而使保护的可靠性变差,也就是供电的可靠性差,所以对平行线路而言,很难选择合适如意的保护(对 220^{kV} 线路可以选择高频保护)。

从经济角度来看,平行线路采用同杆架设还能节省部分投资,但按双回架设时,此项投资不能节省,而且和环网相比,需多占电厂的出线间隔,每个间隔造价约10万元(指 110^{kV})所以增加了投资和年运行费用。总而言之,通过上面的分析、比较和计算,可以看出平行线路由于不易测试和计算误差大的零序互感的影响,给保护的选择和运行带来很多麻烦和不利因素,非同杆架设的平行线路也很不经济,而且只有当两回线间的距离大于或等于1000米时零序互感才能消除。所以,今后 110^{kV} 、 35^{kV} 电网的建设不宜采用平行双回线,究竟采用何种接线为宜,本文不再赘述。