

相间距离保护第一段在非金属性 短路情况下超越性能的分析

北京电科院供用电研究所 谢葆英 王大从

众所周知,相间距离保护第一段的动作值,一般是按被保护线路阻抗的80~85%整定,以防止在该保护的対端母线或邻线出口发生各种故障时误动作而造成越级跳闸。一般之所以按 $0.8\sim 0.85Z_L$ 整定,主要是考虑线路参数测定误差和距离元件动作值误差。当动作值整定为 $0.9Z_L$ 时,如果距离元件动作值最大正误差大于 $0.1Z_L$,则难以保证它不发生超越误动作。

关于距离元件的动作值最大正误差,长期以来对其定义没有明确规定,往往用暂态超越误差来代替,但对在什么条件下,用什么方式来测定这一误差,也没有严格要求。这就很难保证距离一段在实际运行中不发生超越误动。近年来一些系统曾发生超越误动情况、但未找到原因,很有可能与上述因素有关。本文试图用最近进行动模试验所获得的数据,谈谈我们的一些看法。

一、距离一段在动模进行超越特性检验的情况

最近我们在动模对“四统一”保护进行特性检验时发现,不论对500千伏或220千伏模拟系统,如果被保护线路有负荷、距离一段在三相金属性短路时的超越范围比非金属性短路时的要小。最典型的是在220千伏长距离双回线上进行试验所获得的结果。装设在送电侧的保护,在对侧母线发生金属性三相短路时,距离一段动作值整定为 $0.97Z_L$,则不论线路是空载或满载,在任何电压相位角下发生短路,都不会误动作,也就是说,最大超越范围不大于3%,但是在线路输送重负荷条件下,当对侧母线发生非金属性三相短路时,在某一电阻值下,距离一段的动作值要降低到 $0.83Z_L$ 时才不致误动作,即超越范围达17%;但在同样条件下,若线路不输送负荷、其超越范围反而小于3%。由上述情况说明,两种短路条件(经或不经电阻)所出现的超越,其性质是不同的。在金属性短路时,因短路点的电压为零,故自保护装设点所测量到的阻抗值等于线路阻抗值,此时距离元件之所以在整定动作值小于线路阻抗值时尚能动作,是由于短路瞬间,一次系统及距离元件本身二次回路暂态过程所造成,按其性质实属“暂态超越”。至于非金属性短路,由于短路点存在残压,故在保护装设点所测量到的阻抗值、除了线路阻抗外、尚要附加一个由短路点残压形成的阻抗,对于双电源系统,送电侧保护所感受到的附加阻抗、其相位角落后于故障点残压,因而有可能使所测量到的阻抗进入距离一段动作区,也就是说这种超越是属于稳态性质,一、二次回路暂态过程所引起的超越范围应与前述相同。关于这种现象在一些专业书籍或资料里做过一般性定性分析,但未定量,

因而在进行保护整定计算时,对这种超越都未认真考虑。从这次动模试验结果看,对这些特殊线路不认真结合距离元件的特点进行分析研究,而是按常规整定是不能保证安全运行的。

二、距离元件在非金属性短路时,端子阻抗的计算公式

采用相间接线方式的距离元件,对于三相短路故障,其端子阻抗可用相电压和相电流表示:

$$\text{即 } Z_T = -\frac{u_P}{I_P}$$

为分析距离一段超越特性,只需考虑线路末端发生非金属性三相短路即可。

$$\begin{aligned} Z_T &= Z_L + \frac{u_R}{I_P} \\ &= Z_L + \frac{I_f R_f}{I_P} \\ &= Z_L + \Delta Z \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u_P 、 I_P 为保护装置点同名相电压和电流

u_R 为短路点残压

I_f 为短路点总电流

R_f 为短路点电阻

Z_L 为被保护线路正序阻抗

以图1所示双电源双回线系统为例,在受电侧(N)发生非金属性三相短路时送电侧(M)保护所感受到的附加阻抗为:

$$\Delta Z = \frac{I_f R_f}{\frac{1}{2}(I_L + C_M I_f)} \quad (2)$$

$$I_f = \frac{u_P}{Z_f + R_f} \quad u_P = u_N = -\frac{Z_N E_M + (Z_M + Z'_L) E_N}{Z_M + Z'_L + Z_N}$$

$$Z_f = \frac{(Z_M + Z'_L) Z_N}{Z_M + Z'_L + Z_N} \quad C_M = \frac{Z_M}{Z_M + Z'_L + Z_N},$$

$$C_N = \frac{Z_M + Z'_L}{Z_M + Z'_L + Z_N}$$

$$I_L = -\frac{E_M - E_N}{Z_M + Z'_L + Z_N} \quad \text{式中 } Z'_L = \frac{Z_L}{2}, Z_M \text{ 为 M 侧电源阻抗, } Z_N \text{ 为 N 侧}$$

电源阻抗

当 $E_N = E_M e^{-j\theta}$ 且 $|E_M| = |E_N|$ 时

$$\Delta Z = \frac{1}{2 R_f} \left[\frac{(1 - e^{-j\theta}) C_M}{\left(\frac{Z_N}{Z'_L + Z_M} + e^{-j\theta} \right)} + \frac{1}{(Z'_L + Z_M) \left(\frac{Z_N}{Z'_L + Z_M} + e^{-j\theta} \right) + C_M} \right]$$

$$= \frac{1}{2(Z_L + Z_M) \left(\frac{Z_N}{Z_L + Z_M} + e^{-j\varphi} \right) + \frac{C_M}{2R_f} \left(\frac{Z_N}{Z_M + Z_L} + e^{-j\varphi} + 1 \right)}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{2} \dot{A} + \frac{1}{2R_f} \dot{B}} \quad (3)$$

式中:

$$\dot{A} = \frac{1 - e^{-j\varphi}}{(Z_L + Z_M) \left(\frac{Z_N}{Z_L + Z_M} + e^{-j\varphi} \right)}$$

$$\dot{B} = \left(\frac{1 - e^{-j\varphi}}{\frac{Z_N}{Z_M + Z_L} + e^{-j\varphi}} + 1 \right) C_M$$

在 φ 为某一定值, 即当线路传输某一负荷条件下, 当 R_f 由 $0 \rightarrow \infty$ 变化时, 向量 $\frac{1}{2}(\dot{A} + \frac{1}{R_f} \dot{B})$ 的端点在复数平面上的轨迹为一直线, 则 ΔZ 向量端点在阻抗复数平面上的轨迹为一通过原点的圆弧, 圆心的坐标为 $\frac{e^{+j(90^\circ - \varphi_B)}}{|A| \cos [90^\circ - (\varphi_B - \varphi_A)]}$ 。

将公式(3)代入公式(1)后, 不难获得保护装设点感受阻抗的公式, 即:

$$Z_T = Z_L + \frac{1}{\frac{1}{2} \dot{A} + \frac{1}{2R_f} \dot{B}}$$

当 R_f 由 $0 \rightarrow \infty$ 变化时, 该向量的端点在阻抗复数平面上的轨迹为一圆弧(图2)

三、距离一段在非金属性短路时超越范围的分析

若220千伏系统的母线都装有母差保护, 线路都装有快速保护, 则在这些设备上发生故障时, 其故障切除时间不会大于0.15秒, 因而可以认为计算超越值所用的两侧电势相位差角与故障发生前的差别不大, 即公式中的 φ 值可用故障发生前的可能最大相位角代入, 考虑到在正常情况下, 线路所传输的最大负荷不致超过线路热稳定电流, 故用与此电流值相对应的相位角来进行计算分析, 可能具有更广泛的意义:

按图1所示的系统参数, 当每回线所通过电流约为5安(二次值)时, 两侧电势相位差角为 60° , 可以认为这是正常运行可能达到的最大相位差角, 将有关参数代入公式(4)可得:

$$Z_T = 72e^{j80} + \frac{2}{0.015e^{j30} + \frac{1}{R_f} 0.198e^{j51}}$$

将端子阻抗 Z_T 与距离一段动作阻抗特性绘在同一阻抗平面图上, 就可以看出动作值应整定多大才有可能不出现超越。

图3示出N侧的继电器内角为零(转移阻抗角与最大灵敏角相等)且转移阻抗角为

80°（与线路阻抗角相等）当动作阻抗按 $0.95Z_L$ 整定时，端子阻抗 Z_T 要进入动作区；当动作阻抗按 $0.9Z_L$ 整定时，才刚进入。因此在动模试验中出现金属热性短路暂态超越仅为3~5%而非金属性短路超越（稳态和暂态）达10%以上的现象。

图4示出的继电器内角为15°，而转移阻抗角与线路阻抗角相同，则最大灵敏角为65°。当动作阻抗按 $0.9Z_L$ 整定时，端子阻抗 Z_T 要进入动作区，当动作阻抗按 $0.8Z_L$ 整定时，就不致进入。相隔最短距离只有 $0.013Z_L$ 。因此当最大灵敏角小于线路阻抗角时，非金属短路将有较大的超越范围。

图5示出继电器的动作阻抗特性为四边形（按ASA型技术说明R轴方向最小整定值为2欧。第二档为4欧，其间不能平滑调整，当R轴选用2欧的定值，而对线路阻抗为5.8欧的保护时，在同样的条件下线路阻抗角方向的动作阻抗要小于 $0.69Z_L$ 时，端子阻抗才不致进入动作区；当R轴选用4欧时，则要整定为 $0.5Z_L$ 以下，才不致进入动作区。

将图5四边形特性（R轴为2欧）与图3方向圆特性（直径为 $0.9Z_L$ ）相比较可以看出，除了在距装设点 $0.08Z_L$ 以内及 $0.7Z_L$ 以外发生非金属性短路时，方向圆特性继电器的保护范围小于四边形特性继电器的以外，其余部分的保护范围都较大；在保证不发生超越误动条件下，对于金属性短路，方向圆特性继电器的保护范围比四边形特性继电器的大 $0.14Z_L$ 。

如果图1所示系统只有单回线运行，当二次负荷电流为5安时，两侧电势相位差角为44度，此时端子阻抗为：

$$Z_T = Z_L + \frac{I_F R_f}{I_L + C_M I_F}$$

$$= 72e^{i80} + \frac{1}{0.007e^{i27} + \frac{1}{R_f} - 0.124e^{i30}}$$

其轨迹如图6所示。可以看出，若方向阻抗继电器的内角为零，转移阻抗角与线路阻抗角相同。当动作阻抗整定为 $0.95Z_L$ 时， Z_T 的轨迹进入其动作特性圆。整定为 $0.9Z_L$ 时，则端子阻抗不致进入动作区，相间最短距离约为 $0.014Z_L$ 。由此可见，在线路输送相同负荷条件，单回线运行时的超越范围要比双回线运行时的略小一些。在单回线运行条件下，具有四边形动作特性的继电器，若R轴按最小值25欧（2欧）整定，则线路阻抗方向的整定值要在 $0.15Z_L$ 以下，才能防止超越误动作。对金属性短路来说其保护范围比方向圆特性继电器的要小15%以上。

四、方向阻抗继电器在线路带负荷条件下，对非金属性短路的动态特性。

众所周知，方向阻抗继电器由于极化回路存在记忆，使得它具有与背后电源阻抗有关的动态特性。这种特性可使保护短路点电阻的能力得到改善，但是否会使超越范围增大值得研究。图7(a)示出电压向量图，故障前两侧电势相位差角 $\widehat{E}_M \widehat{E}_N$ 为60°。保护装置在M点，母线电压为 U_M ， $\widehat{E}_M \widehat{U}_M = 13^\circ$ ，短路点在N母线，故障发生前电压为 U_N ，短路点

经某一电阻值短路时,其残压为 U_F 、自图中不难求出短路发生后、M母线的电压 U_{MF}

继电器的动作特性由 $\widehat{U}_M(U_{MF} - I Z_Y) \geq 90^\circ$ 逐渐过渡到 $\widehat{U}_{MF}(U_{MF} - I Z_Y) \geq 90^\circ$ 。

在线路送负荷状态下,当 R_f 为某些值时, U_{MF} 领先于 U_M ; R_f 为另一些值时,落后于 U_M 但当空载时相比较(U_M 与 E_M 相同)落后角度总要小一些,因此动态特性在R轴方向的保护范围就不再是必然大于稳态特性所具有的保护范围了。当 \widehat{E}_M 、 \widehat{E}_N 值确定后。用电压相量图即可确定 \widehat{E}_M 、 \widehat{U}_N 值(Q_M)。此时继电器的动态特性可用公式 $\widehat{E}_M(U_{MF} - I Z_Y) \geq 90^\circ + Q_M$ 来表达,图7(b)分别示出继电器整定为 $0.9Z_L$ 时的动态特性,空载时的动态特性和负载时, (\widehat{E}_M 、 $\widehat{E}_N=60^\circ$)的动态特性以及该线末端短路时的端子阻抗 Z_f 。由图可见,在线路末端短路时,动态特性在R轴方向的保护范围反而小于稳态值,即在非金属性短路时,继电器本身所具有的动态特性,不致使超越范围增大。

五、结 论

(1) 对距离一段动作值的整定,除了要考虑金属性短路时的暂态超越外,对于长距离输电线路送电侧的保护尚需注意非金属性短路时,可能出现较大的超越。

(2) 宜按线路可能最大输电能力来验算非金属性短路时的最大超越性。

(3) 长距离输电线路的距离一段,若用方向圆特性继电器时,其内角应尽可能减少,以求最大灵敏角不小于或接近于线路阻抗角,否则将要出现较大的超越范围。

(4) 具有四边形特性的距离继电器、对非金属性短路要呈现较大的超越范围,在使用时应引起足够重视。

(5) 单回线上的距离一段,若采用方向圆特性继电器、并且动作值整定为 $0.9Z_L$ 时,在非金属性短路时,在继电器端子上测量到的稳定阻抗值(即端子阻抗)不致进入继电器的动作区。

(6) 在动模上进行继电器的暂态超越性能检验时,除了模拟金属性短路外,尚有必要模拟非金属性短路、以找出可能最大稳态超越范围(接点动作后不返回)及暂态超越范围(接点只抖动合闸后即返回)。后者要较前后略大一些。两者相差的百分值不致大于继电器在金属性短路时可能最大的超越范围。因而继电器在非金属性短路时,可能最大的超越范围,可粗略地按继电器在非金属性短路下的稳态超越百分值与金属短路时的最大暂态超越百分值之和来估算。