

线路测量阻抗与距离保护的关系

赵镇¹, 周红², 欧居勇³

(1. 四川省电力公司培训中心, 四川 成都 610072; 2. 广元电业局, 四川 广元 628000;

3. 四川省电力公司资阳公司, 四川 成都 641300)

摘要:距离保护中阻抗继电器的测量阻抗值与短路类型无关,均等于正序阻抗。对架空线路的正序阻抗参数计算,通常有理论计算、工程查表及工程实际测量三种方法。

关键词:测量阻抗;短路类型;正序阻抗;分裂导线;理论计算值;工程实际测量值;查表值;误差

Abstract: The measurement impedance values of impedance relay in distance protection has nothing to do with the type of short circuit. They are all equal to positive-sequence impedance. Usually, there are three methods to calculate the positive-sequence impedance parameters: the theoretical calculation, looking up the engineering table and the actual measurement in the engineering.

Key words: measurement impedance; type of short circuit; positive-sequence impedance; bundle-conductor spacer; value of theoretical calculation; value of actual measurement; value of the table; error

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)01-0034-04

随着电力系统的不断发展,原来简单、可靠的电流保护已经难于满足电网安全运行的要求;如对于高压长距离重负荷线路,由于负荷电流大,在线路末端短路时,短路电流与负荷电流相差不大,过电流保护往往不能满足灵敏度的要求;对于电流速断保护,其保护范围易受电网运行方式的影响,保护范围不稳定,某些情况下甚至无保护区;另外对于多电源复杂网络,方向过电流保护的动作时限往往不能按选择性的要求整定,且动作时限长,难于满足系统对保护快速动作的要求^[5]。

而距离保护装置在任何形式的电网中均能有选择性地切除故障,并且有足够的快速性和灵敏性,在高压和超高压电网中,得到了广泛的运用。下面就距离保护中的测量阻抗数值问题作一探讨。

1 距离保护的基本原理

距离保护是测量保护安装处至故障点的距离,并根据距离的远近而确定动作时限的一种保护装置。距离保护的实质是用整定阻抗与被保护线路的测量阻抗 Z_{CL} 比较。当短路点在保护范围以内时,保护动作;反之,则不动作。因此,距离保护又称为低阻抗保护^[7]。

距离保护装置一般由起动元件、测量元件、时间元件、振荡闭锁元件、电压回路断线失压闭锁元件共五个主要部分组成。而阻抗继电器是距离保护装置

的核心元件,它主要用来作测量元件、作功率方向起动元件。

当发生线路故障时,阻抗继电器测得的测量阻抗 Z_{CL} 为保护安装处到短路点的短路阻抗,即: $Z_{CL} = \frac{U_M}{I_M} = Z_1 \times L$ 。式中: U_M 为测量电压; I_M 为测量电流; Z_1 为线路单位长度阻抗; L 为故障点到保护安装处的距离。

在短路时,母线电压下降,导致流经保护安装处的电流增大,即短路时的测量阻抗 Z_{CL} 比正常时测量到的阻抗值大大降低,所以距离保护所反应的信息量在故障前后的变化值比单一电流变化值要大,即比反应单一物理量的电流保护灵敏度要高得多。

2 不同接线方式下的测量阻抗值

前面讨论了距离保护是通过测量被保护线路始端电压和线路电流的比值而动作的一种保护,这个比值就是测量阻抗 Z_{CL} ,用来完成这一测量任务的元件称为阻抗继电器。

2.1 对阻抗继电器不同接线方式的基本要求

阻抗继电器的接线方式是指接入阻抗继电器的相别电压和相别电流的组合方式。对不同类型的故障,要保证保护的正确动作,必须确保测量到的测量阻抗 Z_{CL} 是保护安装处到故障点的距离。因此接入继电器的电压 U_M 和 I_M 电流应满足以下两点要求:

(1) 阻抗继电器的测量阻抗必须正比于保护安装处到故障点的距离, 即 $Z_{CL} \propto L$, 与电网运行方式无关。

(2) 阻抗继电器的测量阻抗与短路类型无关, 保护范围不随故障类型而变。

2.2 反映相间短路的阻抗继电器 0° 接线方式下的测量阻抗

当 $\cos \varphi = 1$ 时, 接入继电器的电压和电流之间的夹角为 0° , 称为 0° 接线方式, 是距离保护中最常用的一种接线方式, 一般由三只单相阻抗继电器分接于三相的接线形式组成, 反映相间故障类型, 不考虑零序分量的影响 (但要注意实际系统的 $\cos \varphi \neq 1$, 因为 $\cos \varphi = 1$ 时, 由于电压电流同相位, 则系统处于谐振状态而无法正常运行) 分析如下。

2.2.1 三相短路

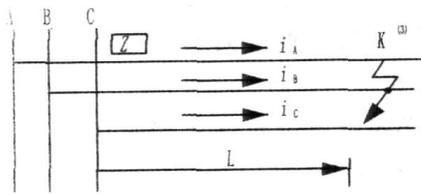


图1 三相短路

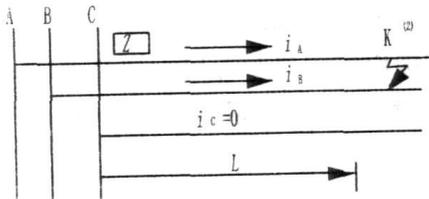


图2 相间短路

见图1, 设每1 km的正序电抗为 $Z_1 \Omega$, 设短路点至保护安装地点之间的距离为 L km, 短路点发生三相短路故障时, 由于三相对称, 三个阻抗继电器 $K1 \sim K3$ 的工作情况完全相同, 故仅以 $K1$ 为例分析之。有保护安装地点的电压:

$$U_{AB} = U_A - U_B = I_A Z_1 L - I_B Z_1 L = (I_A - I_B) Z_1 L$$

则阻抗继电器的测量阻抗为:

$$Z_{CL}^{(3)} = \frac{U_{AB}}{I_A - I_B} = Z_1 L$$

可见, 在三相短路时, 三个继电器的测量阻抗均等于短路点到保护安装地点之间的正序阻抗 $Z_1 L$, 三个继电器均能正确动作。

2.2.2 两相短路

以 AB 两相短路为例, 见图2。分析此时三个阻抗继电器的测量阻抗, 计入输电线路的正序阻抗 $Z_1 =$ 负序阻抗 Z_2 , 相间短路 I_A, I_B 均含有正序 I_1 和负序 I_2 分量; 对阻抗继电器 $K1$ 而言:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A - U_B = (I_{A1} Z_1 L + I_{A2} Z_2 L) - (I_{B1} Z_1 L + I_{B2} Z_2 L) \\ &= (I_{A1} + I_{A2}) Z_1 L - (I_{B1} + I_{B2}) Z_1 L = (I_A - I_B) Z_1 L \end{aligned}$$

则此时, 阻抗继电器的测量阻抗亦为:

$$Z_{CL}^{(2)} = \frac{U_{AB}}{I_A - I_B} = Z_1 L$$

即与三相短路时的测量阻抗 $Z_1 L$ 相同。因此, $K1$ 能正确动作。

但对 $K2$ 和 $K3$ 由于所加电压为故障相与非故障相间的电压, 其值较 U_{AB} 高, 而电流又只有一个故障相的电流, 数值较 $(I_A - I_B)$ 小, 因此, 其测量阻抗必然大于 $Z_1 L$, 不能动作。但由于 $K1$ 能正确动作, 所以 $K2$ 和 $K3$ 拒动不会影响整套保护的動作。同理, 在 BC 或 CA 两相短路时, 相应地分别有 $K2$ 和 $K3$ 能准确测量出 $Z_1 L$ 而正确动作。

2.2.3 中性点直接接地电网中两相接地短路

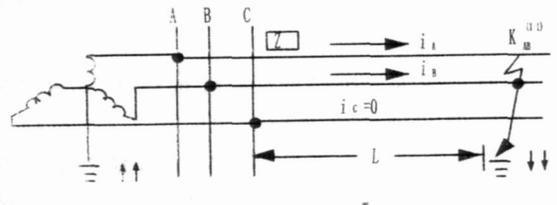


图3 两相接地短路

如图3所示, 设故障发生在 AB 相, 它与两相短路不同之处是地中有零序电流流回, 因此 $I_A \neq I_B$ 。

可以把 A 相和 B 相看成两个“导线一地”的送电路并互感耦合在一起, 设 Z_L 表示每千米的自感阻抗, Z_M 表示每千米的互感阻抗, 则保护安装地点的故障相电压应为:

$$U_A = I_A Z_L L + I_B Z_M L, \quad U_B = I_B Z_L L + I_A Z_M L$$

仿照相间短路, 有继电器 $K1$ 的测量阻抗为:

$$Z_{CL}^{1.1} = \frac{U_{AB}}{I_A - I_B} = \frac{(I_A - I_B)(Z_L - Z_M)L}{I_A - I_B} = (Z_L - Z_M)L = Z_1 L$$

可见其测量阻抗值仍与三相短路时的测量阻抗 Z_{1L} 相同, 保护能够正确动作。

综上所述, 无论是两相短路、三相短路和两相短路接地的故障类型, 采用 0° 接线方式都能满足基本要求。即阻抗继电器的测量阻抗与短路类型无关, 均等于正序阻抗。

2.3 反映单相接地短路的阻抗继电器接线方式下的测量阻抗

大接地电流系统中, 在零序电流保护不能满足要求时, 一般采用接地距离保护。阻抗继电器要反映接地故障, 就不能接线电压和线电流。现分析如下:

设 A 相发生单相接地故障, 对 A 相阻抗继电器, 接入继电器的电压为:

$$U_A = Z_1 I_1 + Z_2 I_2 + Z_0 I_0 = Z_1 L (I_A + I_0) \frac{(Z_0 - Z_1)}{Z_1} = Z_1 L (I_A + 3KI_0)$$

式中: U_1 、 U_2 、 U_0 ——正序、负序、零序电压; I_1 、 I_2 、 I_0 ——正序、负序、零序电流; Z_1 、 Z_2 、 Z_0 ——正序、负序、零序的单位长度序阻抗; 输电线路的 $Z_1 = Z_2$; $K = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$; 只要取: $U_M = U_A = Z_1 L (I_A + 3KI_0)$ 、 $I_M =$

$$(I_A + 3KI_0) \text{ 则: } Z_{CL}^{(1)} = \frac{U_M}{I_M} = Z_1 L。$$

可见其测量阻抗值仍可保证与三相短路时相同, 也等于正序阻抗 $Z_1 L$ 。此时测量阻抗已不再受零序电流分布的影响。

也就是说为了准确地反映接地短路, 如果测量电压取为保护安装处故障相对地电压 $U_A = Z_1 L (I_A + 3KI_0)$, 测量电流取为带有零序电流补偿的故障相电流 $(I_A + 3KI_0)$, 则由它们计算出的测量阻抗 Z_{CL} 值能够准确地反映单相接地故障短路情况下的故障距离。

2.4 反映相间短路的阻抗继电器 30° 接线方式下的测量阻抗

这类接线方式有 $\pm 30^\circ$ 接线两种, 特点是阻抗继电器在不同的故障类型下, 其测量阻抗的数值与相位均不相同, 但实际上仍可以做到三相短路与两相短路时的保护范围一样^[6]。随着数字保护的广泛运用, 这类接线方式正逐渐被淘汰, 更进一步的讨论可参考相关文献^[7]。

3 输电线路的正序阻抗参数分析

由前面分析可见: 只要采用特定的接线形式, 就

可保证阻抗继电器的测量阻抗 Z_{CL} 与短路类型无关, 并可保证测量阻抗 Z_{CL} 就等于线路的正序阻抗 $Z_1 L$ 。

距离保护的实质是根据已知的各段线路的正序阻抗 $Z_1 L_i$ (Z_1 ——第 i 段线路单位长度正序阻抗, L_i ——第 i 段线路的长度) 值所确定的整定阻抗与被保护线路的测量阻抗 Z_{CL} 比较。当短路点在保护范围以内时, 保护动作; 反之, 则不动作。就保护范围来讲: 距离保护的第 I 段只能保护本线路全长的 80%~85%; 第 II 段的保护范围为本线路的全长并延伸至下一段线路的一部分 (约 30%~40%), 它是第 I 段保护的后备段; 第 III 段为 I、II 段保护的后备段, 它能保护本线路和下一段线路的全长并延伸至再下一段线路的一部分。另一方面, 各段线路的正序阻抗 $Z_1 L_i$ 可通过理论计算、工程查表及工程实际测量三种方法来获得, 因此, 正序阻抗 $Z_1 L_i$ 的数值精度如何, 将直接关系到距离保护各段在实际动作时能否达到整定的保护范围, 即直接关系到距离保护能否准确动作。

因此, 有必要就单位长度正序阻抗 Z_1 的计算精度问题作进一步讨论。

3.1 输电线路的正序阻抗参数理论计算公式

一般高压与超高压线路均以架空线为主。由《电力系统分析》可知: 对架空线路, 长度在 300 km 以内 (中等及中等以下长度线路) 时, 可不考虑它们的分布参数特性, 直接用集中参数等值电路来表示。其单位长度的正序参数表示为电阻 R_1 、电抗 X_1 、电导 G_1 及电纳 B_1 。

这里只讨论架空线路的阻抗参数 (电阻 R_1 、电抗 X_1) 计算。而对架空线路的导纳 (电导 G_1 及电纳 B_1) 的讨论分析可参考相关文献。

据上假设, 得测量阻抗中的单位长度的正序阻抗值为: $Z_1 = R_1 + jX_1$; 电阻 R_1 、电抗 X_1 的具体计算公式如下 (推导略去):

$$(1) \text{ 在温度为 } 20^\circ\text{C} \text{ 时的每 km 单位长度正序电阻为: } R_1 = \rho \frac{L}{S} (\Omega/\text{km})$$

式中, ρ 为导线材料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$); L 为导线长度 (km); S 为导线载流部分的标称截面 (mm^2 , 钢芯铝线是铝线部分的截面积); 上式中, 铜的 $\rho = 18.80 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$, 铝的 $\rho = 31.50 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ 。

当计算精度要求较高时, 如果环境温度不等于 20°C , 则 $t^\circ\text{C}$ 时的单位长度正序电阻需按下式修正:

$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20)]$, α 为电阻的温度系数, 铝的 α 为 0.003 6, 铜的 α 为 0.0038 2。

(2) 不分裂导线线路电抗:

输电线路的电抗是由各相导线自身的自感以及导线与导线之间的互感产生的。即当交流电通过导线时, 在导线内及周围空间产生交变电磁场而引起的。当三相线路对称排列, 或不对称排列但经整循环换位后, 每相导线单位长度电抗为: $X_1 = 0.144 5 \lg$

$\frac{D_M}{r} + 0.015 7$ (Ω/km), 式中: r 为导线的半径, 单位 m。在三相导线间的距离分别为 D_{ab} 、 D_{bc} 、 D_{ca} 时的几何均距 $D_M = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}}$, 单位 m。

(3) 分裂导线线路电抗:

对于高压及超高压远距离输电线路, 为减小线路的电晕损耗及线路电抗, 以增加输电线路的输送能力, 常采用分裂导线。普通分裂导线的分裂根数一般不超过 4 根, 而且布置在正多边形的顶点上, 这样就等效地增大了导线半径。

分裂导线每相单位长度的电抗为: $X_1 = 0.144 5 \lg$
 $\frac{D_M}{r_{eq}} + \frac{0.015 7}{n}$ (Ω/km)

式中: n 为每相分裂根数; 每相分裂导线的等值半径 $r_{eq} = n \sqrt{ra_m^{n-1}}$, 单位 m; r 为分裂导线中每一根导线的半径, 单位 m; a_m 为每相分裂导线中相邻两导线间的距离, 单位 m。

由于 r_{eq} 比 r 大得多, 因此分裂导线的等值电抗较小, 在分裂根数为 2、3、4 时, 每公里的电抗分别在 0.30~0.33、0.30、0.29 左右。当分裂根数超过 4 根时, 电抗下降已不多, 线路结构反而变得复杂, 所以工程运用中, 分裂根数一般不超过 4 根。但在特高压输电线路中, 分裂根数竟达到 6~12 根。

3.2 工程查表法以及工程实际测量法

工程查表法是根据线路的具体型号和几何均距 D_M 直接去查手册, 得到单位长度正序参数电阻 R_1 、电抗 X_1 的值。如要求更高的数值精度可再根据环境温度进行修正。对此更进一步的分析可参考相关文献。

工程实际测量法就是使用特定的仪器在现场对输电线路进行实际测量, 经换算后得到的单位长度正序参数。

这三种方法获得的正序阻抗参数数值精度如何, 下面作进一步讨论。

3.3 输电线路正序阻抗参数值的三种求取方法精度比较

3.3.1 不分裂导线线路

1) 测量值: 以四川电力试验研究院和绵阳三恒电力工程有限公司共同测量完成的绵阳电业局范围内的线路实测数据为例, 具体如下。

试验日期: 2004 年 7 月 29 日, 线路电压: 220 kV, 长度: 124 km, 试验环境: 26°C, 型号: LGJ-400 不分裂, 三角形布置, 相间距 8.5 m (覆冰区, 平武境内)。

测得正序阻抗见表 1。

表 1 正序阻抗

阻抗	电阻	电抗	电感
53.7 Ω	9.3 Ω	52.91 Ω	0.168 H
0.433 Ω/km	0.075 Ω/km	0.427 Ω/km	0.001 H/km

2) 理论计算值: 仿照上述实测数据, 即一回 220 kV 输电线路, 导线在杆塔上为三角形布置, 三相导线间的距离分别为 $D_{ab} = 8.5 \text{ m}$ 、 $D_{bc} = 8.5 \text{ m}$ 、 $D_{ca} = 8.5 \text{ m}$ 。使用 LGJQ-400 型导线, 试计算该线路单位长度的电阻和电抗。

解: 由手册查出 LGJQ-400 型导线的直径为 27.4 mm, 则半径为 $r = 13.7 \text{ mm}$, 每公里单位长度正序电阻: $R_1 = 0.078 7 \Omega/\text{km}$, 几何均距 $D_M = 8.5 \text{ m}$, 每公里单位长度导线线路电抗: $X_1 = 0.419 \Omega/\text{km}$ 。

3) 工程查表值。查手册有: LGJQ-400 的 $R_1 = 0.08$; $X_1 = 0.412$ (几何均距 $D_M = 8.5 \text{ m}$);

4) 相对于计算值的误差见表 2。

表 2 相对计算值误差

方式	电阻	相对计算误差	电抗	相对计算误差
计算 (Ω/km)	0.078 7		0.419	
实测 (Ω/km)	0.075	-0.003 7	0.427	+0.008
查手册 (Ω/km)	0.080	+0.001 3	0.412	-0.007

3.3.2 双分裂导线线路

1) 测量值: 以四川电力试验研究院和绵阳三恒电力工程有限公司共同测量完成的绵阳电业局范围内的线路实测数据为例, 具体如下。

试验日期: 2004 年 6 月 25 日, 线路名称: 220 kV 金茂线, 长度: 27.414 km, 试验环境: 25°C, 型号: LGJ-400 双分裂, 三角形布置, 相间距 8.5 m (覆冰区, 茂县境内), 测得正序阻抗见表 3。

表3 正序阻抗

阻抗	电阻	电抗	电感
8.68 Ω	1.024 Ω	8.62 Ω	0.027 H
0.317 Ω/km	0.037 Ω/km	0.314 Ω/km	0.001 H/km

2)理论计算值:仿照上述实测数据,即一回220 kV 输电线路,导线在杆塔上为三角形布置,三相导线间的距离分别为 $D_{ab}=8.5\text{ m}$ 、 $D_{bc}=8.5\text{ m}$ 、 $D_{ca}=8.5\text{ m}$ 。使用 LGJQ-400×2 双分裂导线,分裂间距0.4 m,试计算该线路单位长度的电阻和电抗。

解:由手册查出 LGJQ-400 型导线的直径为27.4 mm,则半径为 $r=13.7\text{ mm}$,每公里单位长度正序电阻; $R_1=0.0384\text{ Ω/km}$,几何均距 $D_M=8.5\text{ m}$,每相分裂导线等值半径; $r_{eq}=0.074\text{ m}$,每公里单位长度导线线路电抗; $X_1=0.306\text{ Ω/km}$ 。

3)工程查表值。查手册有:LGJQ-400×2 双分裂型导线,220 kV, $R_1=0.04$; $X_1=0.309$;几何均距 $D_M=8.5\text{ m}$,分裂间距0.4 m。

4)相对于计算值的误差见表4。

表4 相对计算值误差

方式	电阻	相对计算误差	电抗	相对计算误差
计算(Ω/km)	0.0384		0.306	
实测(Ω/km)	0.037	-0.0014	0.314	+0.008
查手册(Ω/km)	0.040	+0.0016	0.309	+0.003

分析以上两例中通过三种方法获得的每公里单位长度正序电阻、电抗值,发现数值误差出现在千分位上,这样的数值精度对工程实际运用来讲,一般可满足要求。

3.3.3 误差的原因分析

进一步,对理论计算与实测数据中在千分位上出现一定误差的原因分析如下:

1)交流电路中,受集肤效应和邻近效应的影响,交流电阻与直流电阻略有不同。

2)输电线路大多是绞线,每股导线的实际长度要比导线标称长度略长2%~3%;工厂制造绞制过程中,导线的标称截面会比实际截面略大;

3)计算值是20℃标准温度,而实际测量时环境温度在25℃~26℃。

4)由于线路沿地表架设,各个耐张段之间受地磁的影响、受相邻强弱电线路的影响不同;各个耐张段

之间也可能由于海拔高度、河流山涧跨越、山区地形的不同,导致全线相间距不会完全均等。

5)实际测量用仪器存在工程误差;理论计算公式以满足工程需要为目的,有近似。

6)经现场多方了解核实,一般输电线路在架设过程中,会根据地形地貌、地理位置、杆塔结构和档距的不同,同一条线路可能存在三角形排列、水平排列(进出站)及垂直排列方式(同杆架设)互换的情况;且三相之间有可能不完全对称排列(换位杆塔);这也会造成一定数值误差。

4 总结

1)反映相间故障的阻抗继电器接线采用线电压与两相电流差(也可理解为线电流)的 0° 接线方式,即取测量电压为保护安装处两故障相的电压差,测量电流为两故障相的电流差,由它们算出的测量阻抗能够准确反映两相短路、三相短路和两相短路接地情况下的故障距离,其测量阻抗值等于正序阻抗。

2)为了准确地反映单相接地短路,如果测量电压取为保护安装处故障相对地电压,测量电流取为带有零序电流补偿的故障相电流,则由它们算出的测量阻抗仍然能够准确地反映单相接地故障短路情况下的故障距离,此时测量阻抗不受零序电流分布的影响,其测量阻抗值仍可保证与三相短路时相同,等于正序阻抗。

3)对架空线路的正序阻抗参数的求取,通常有理论计算、工程查表及工程实际测量三种方法。获得的数值之间存在较小的误差。

参考文献

- [1] 张炜主编. 电力系统分析[M]. 中国水利水电出版社.
- [2] 何仰赞主编. 电力系统分析[M]. 华中工学院出版社.
- [3] 杨以涵主编. 电力系统基础[M]. 水利电力出版社.
- [4] 马永翔主编. 电力系统继电保护[M]. 重庆大学出版社.
- [5] 孙国凯主编. 电力系统继电保护原理[M]. 中国水利水电出版社.
- [6] 李火元主编. 电力系统继电保护与自动装置[M]. 中国电力出版社.
- [7] 尹克宁主编. 电力工程[M]. 中国电力出版社.

(收稿日期:2007-12-05)