

当前高压线路保护中的几个焦点问题

电力部南京自动化研究所 朱声石

1 关于测距式的距离保护

微机保护可以进行数值计算, 不仅计算出电流、电压还可算出阻抗。因此很自然想到把测距功能和保护功能合在一起, 这就是测距式的距离保护, 但是测距属于仪表的功能, 保护属于继电器的功能。众所周知仪表和继电器的输出对输入关系曲线和图 1 所示, 两者完全不同。为了测距准确, 不论故障点的远近, 在故障发生后都要精确计算, 因而不能以特高速切除出口故障。如果采用继电器特性, 在大容量电站出口故障时继电器的动作判据很容易得到满足, 从而可以特高速切除出口故障, 也就是说可以得到如图 2 所示的理想轻微反时限特性。这种特性既能快速切除近处故障, 又能有效地避免超越。目前测距原理的距离保护一般都采用缩短保护范围和简化数字滤波的方法(称为 0 段和 I 段)快速切除故障。这种方法虽然改善了保护的性能但却降低了测距的精度, 仍然未能将两者圆满地结合起来。因此微机保护的主程序应当优先实现保护功能, 仅在发出跳闸命令后才转入测距程序, 由于测距无需快速, 完全可以采用精确算法以保证测距的精度。

$$\begin{aligned} -Z_{0M\Sigma} &= 2X_{0M\Sigma} / \sqrt{(2+6K+Y_1-Y_2)^2 + 3(Y_1+Y_2)^2} \\ &= 2 \times (-27.4\Omega) / \sqrt{(2+6 \times 0.536+2.23-1.3)^2 + 3(2.23+1.3)^2} \\ &= -6.32\Omega \end{aligned}$$

取: $-Z_{0M\Sigma} = -6\Omega$

5.2 接地距离保护 I 段整定:

$$Z_{Ij} = K_k (Z_{\text{①}1} - Z_{0M\Sigma})$$

当取 $K_k = 0.75$, 则:

$$\begin{aligned} Z_{Ij} &= 0.75 \times (8.19 - 6) \\ &= 1.64\Omega \end{aligned}$$

$$\varphi_j = \varphi_i = 76^\circ$$

结论:

a) 接地距离保护 I 段整定值为 1.64Ω , 其动作灵敏角为 76° 。

b) 线路①P 侧接地距离保护, 在最严重的运行方式下线末 P' 母线上发生单相接地故障, 由于受②~①回输电线路零序互感的影响较强, 该保护 I 段要保证不发生超越误动, 其保护 I 段的整定值几乎无保护范围。

c) 线路①P 侧接地距离保护 I 段, 若按目前部颁“条例”要求来整定: $Z_{Ij} = K_k Z_{\text{①}1} = (0.7 \sim 0.8) Z_{\text{①}1} = 5.733 \sim 6.552\Omega$, 在相邻线路出口发生接地故障时, 本线路均有越级误动的可能。

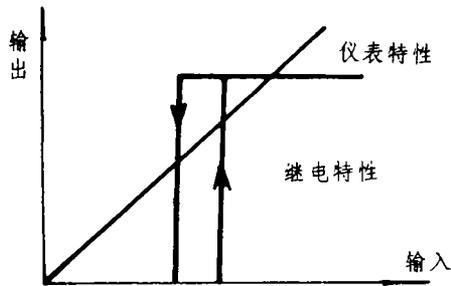


图 1

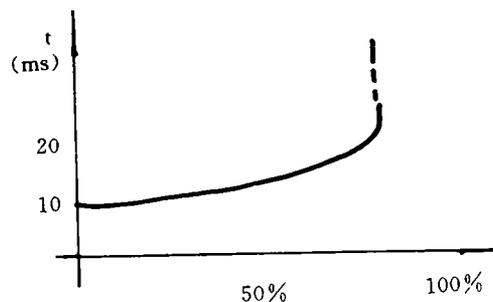


图 2

2 关于数字滤波和数字式继电器（指进行数值计算的继电器，非利用数字电路实现的模拟式继电器）

微机保护可以采用性能优越的数字滤波，但数字式继电器对输入波形的要求也更严格。当输入量中含有各种成份的暂态分量时需要滤出其中的工频分量，而完善的滤波一般都要求有较长的数据窗，即需要时间。需要指出，若暂态分量并非谐波时即使全波付氏滤波也不能正确得到其中的工频正弦量。在故障开始的最初时间（如 5ms）内工频正弦量的信息很少，而各种暂态分量却很丰富，还由于受采样频率的限制，要通过数字滤波得到工频正弦量的数学表达式是不可能的。因此仅仅依靠改善数字滤波保护难以达到特高速。

3 特高速保护

保护能否快速与保护原理的关系极大。纵联保护一般有较快的速度，但由于信号沿通道的传输需要时间，因此不可能达到特高速。不需要交换信号的保护可以达到特高速，当然这种保护只能保护线路的一部份。

继电器一般分为比幅式和比相式两种，比幅式继电器的动作判据一般为

$$\text{动作量} > \text{制动量}$$

理想的情况是在正常和区外故障时动作量为零，制动量很大，而在区内故障时则反之。反应单一量的继电器的动作判据一般为：

$$\text{动作量} > \text{固定门坎}$$

理想的情况也是正常时动作量为零，但实际上往往会有杂散的动作量又称为不平衡输出。为了保证安全性可采取浮动门坎，即：

$$\text{动作量} > \text{固定门坎} + \text{浮动门坎}$$

所谓浮动门坎是延时后的动作量，它可抵消缓慢出现的不平衡。或者说有了浮动门坎就可降低固定门坎，而在故障时浮动门坎不立即起作用，所以灵敏度得到提高。需要指出，浮动门坎的退出也是缓慢的，若紧接着发生故障，继电器的灵敏度会有所下降。

比相式继电器有两种，即余弦型比相器和正弦型比相器。这里仅讨论余弦型比相器。一般余弦型比相器测量两个量的同极性或反极性时间。理想的情况是在区外和区内两种情况下两个量的相角差在 0° 和 180° 之间跃变，也就是说比相器永远工作在最灵敏角下。此时继电器具有最大的信赖性和安全性，且动作速度最快。

如果保护原理能适应比幅式和比相器的理想要求，就可减少暂态分量的影响。对于数字继电器就可降低对数字滤波的要求，采取简单的算法，达到高速动作。保护原理符合理想条

件时比幅器的算法可采用半波积分法。这种算法在数据窗满半波,即在故障后 10ms 时半波积分即可正确反映动作量的幅值,受高频暂态分量的影响小(有滤波能力)。在严重故障时动作量很大,即使数据窗未充满(故障前动作量为零)也能动作,快速切除故障。符合理想条件的比相器可以模仿模拟式比相器的原理,即计数半个周期内两个输入量同极性(或异极性,以下同)的累计次数。如果在故障前输入量为零,则比相器的动作就不受故障前相位的影响。又如果二个量的相位差为 0° (或 180°),则即使数据窗未充满也可动作(因为动作条件一般为累计数等于或大于半波采样次数)。模拟式比相器一般采用电容积分电路测量同极性,如果同极性时间不连续(极性可能被高频暂态分量改变)就会造成拒动。数字式比相器是累计半周内两个量符号相同的次数,其动作判据可表达为:

$$G = \sum [SIGA(K) SIGB(K)] > \frac{N}{2}$$

式中: G —符号相同次数;

SIG —表示取数值的符号;

$A(K), B(K)$ —输入量 A 和 B 的 K 点采样值;

N —每周采样次数。

这种比相器不要求同极性的时间是连续的,所以高频暂态分量的影响较小,由于受采样频率的限制,半周内进行同极性比较的次数有限,是一个缺点。但在理想条件下二个量的相位为 0° ,这个缺点就不重要了。和进行数值计算的数字式继电器一样,只要二个量的相位差满足动作条件,这种比相器每一步的计算结果都会满足 $G > N/4$ 。它的输出信号将是连续的,动作速度可以小于半个周期。它不需要象模拟式比相器中的脉冲展宽回路。

4 突变量的应用

近半个世纪以来继电保护技术的最重大的进展莫过于突变量的应用。以电流为例,突变量电流 $\Delta I = I - I_{01}$ 。在应用叠加原理计算短路故障时把故障网络(若为不对称故障则是复合序网图)分解为故障前网络和故障后网络。故障前网络一般为负荷状态,也可以是振荡状态, I_{01} 即该状态下的电流,为负荷分量。故障后网络中只有一个电势 E ,它等于故障点 F 在故障前的电压 U_{F101} ,但符号相反,即 $E = -U_{F101}$,此电势加在故障点。故障后网络中的各个量都是故障分量,以电流为例包括 I_2, I_0 和 ΔI ,它们都是仅在故障后才出现的。所以突变量电流 ΔI 是一种故障分量。将两种分量叠加起来就得到实际的故障电流 $I = I_{01} + \Delta I$,最初这些量是为了进行计算被分解出来的,实际上它们都是可以被测量的,也是实际存在的。但为了测量 ΔI 必须能记忆 I_{01} ,从一定意义上说只有应用微处理器才能实现。集成电路保护虽然也可以做成突变量原理的保护,但微机保护实现起来更方便、更精确。需要指出的是微机虽有很强的记忆能力,但利用突变量构成后备保护是不恰当的。因为如果故障未被切除,随着时间的推移,“负荷状态”将发生变化,微机所储存的 I_{01} 值将变得失去意义。从这个意义上说为 ΔI 只可能短时存在。所以 ΔI 只能用来实现需要快速动作的主保护。

短路电流中的各种暂态分量都是故障分量, $\Delta I = \Delta I_{\text{工频}} + \Delta I_{\text{非工频}}$ 。反应短路初期 ΔI 的保护称为行波保护。由于非工频分量与干扰信号相似,为了提高安全性还是以滤除非工频分量较为稳妥。仅反应工频变化量的保护其安全性和常规保护相同,目前得到广泛应用的突变量保护都是仅反应其中的工频分量,习惯上仍称突变量,并用 ΔI 表示。目前反应突变量的各种继电器如电流、方向及阻抗都已开发完成,并得到实际应用。用集成电路实现的这种保护已证

明其性能的优越。现已在我国开发的多套微机保护中得到广泛的应用。

反应故障分量的保护有下列优点。在正常时故障分量为零，因此反应故障分量幅值的保护动作速度快，灵敏度高。全网各种故障分量都由在故障点引入的一个电势产生的。反应故障分量的方向元件所测量的相角决定保护安装处背后的等值电源的阻抗而与故障点的过渡电阻无关，因而可永远工作在最灵敏角，其动作速度也很快。故障分量又有突变量和零（负）序分量两类，它们的优缺点如下。突变量可以反应各种类型故障，包括三相同时性的对称故障。在两相运行的稳态下突变量为零，因而仍保留故障分量的优点，尤其是反应运行中两相电流差和电压差突变量的继电器既适应于母线 PT 也适应于线路 PT，而且在断开相重合时不论合闸于何种状态，即不论合闸时该相电流有多大变化都不会有任何反应（因为 $\Delta U_{\infty}=0$ ， $\Delta I_{\infty}=0$ ）。零序分量保护不反应相间故障，但在两相运行时若负荷电流较大就失去为故障分量的优点。由于只要故障存在零序分量就会持续存在，所以零序保护可作为突变量保护的补充。突变量保护仅在每次故障后 30~40ms 内起作用，如果是区内故障这个时间足够保护跳闸，这样突变量保护更加安全可靠。有人会担心在振荡中发生故障时突变量可能不出现（实际上极少可能），有了零序保护绝大多数接地故障就无担心之必要了。另外当断路器失灵时由零序保护启动断路器失灵保护更加安全可靠。在两相运行时零序保护应退出，有突变量保护就足够了。负序保护虽较零序保护有能反应两相短路不接地故障的优点，但负序分量要通过移相才能取得，受暂态分量的影响大，难实现加速。鉴于零（负）序保护只是作为突变量保护的补充，两相短路不接地故障的几率很小，所以用零序而不用负序在实用上是可行的。突变量方向元件和阻抗元件在电压回路断线时不会误动，但在电压断线后，故障时方向元件将不能动作，阻抗元件蜕化为电流元件，灵敏度下降。

5 距离保护的“切换”与选相

最初由于距离继电器构造复杂，价格较贵，在成套保护装置中仅采用一个距离继电器，而由电流元件选出故障相别后引入故障环路的电流和电压，称为单系统切换式。后来由于切换式动作速度慢，触点切换不够可靠，就发展为不切换式。因此不切换式具有三段相间和三段接地的距离保护，总共要用 18 个距离继电器。

微机保护希望节省运算量。在微机保护中“切换”是由程序决定的，不会降低可靠性。实际上除了三相短路外，对每一种类型的故障只有一个继电器能正确测量距离，先选相再测量是合理的。除少数产品（采用高速 CPU）是同时算六个阻抗外，大多数产品都是先选相后测量。

在高压电网中广泛应用单相自动重合闸。单相故障时的选相跳闸问题现在国内外都是由各套保护装置自行解决。距离继电器本身就有一定的选相能力。距离保护实现单相故障选相跳闸并不困难。一般情况下只有故障相继电器最灵敏（正确测量），但在整定阻抗很大的情况下，在大电源出口单相故障时，与故障相相关的二个相间距离继电器也会动作，这个问题解决了就可实现接地距离继电器动作跳单相，相间距离继电器动作跳三相。当采取计算六个阻抗的方式时，测量阻抗最小的为故障相，测量阻抗小于 1.5 倍最小测量阻抗者亦应视为故障相。例如 BC 两相经电阻接地时可能是测量阻抗 Z_{bc} 为最小，而正确测量距离的则是 Z_{bc} 。同时计算六个阻抗在同杆并架双回线上应用时能在跨线故障时正确选出故障相。计算测量阻抗（包括所有测距离原理）的好处是一旦算出阻抗就可确定故障在那一段范围内。按照短路边界条件得到的动作判据计算时则需对每段的动作判据进行计算。

采用先选相后测量的方式时选相必须正确。选相的原理很多。最新的选相原理是突变量电流选相，但是突变量不能长时存在，如果在距离Ⅰ段也要先选相再测量的话，就要注意解决好两个问题：(1) 故障转换问题，(2) 线路末端即Ⅱ范围内单相故障时对侧保护Ⅰ段动作跳三相的问题。利用测量 $\text{Arg}(I_2/I_0)$ 的相位可以在单相故障时准确选出故障相，但是它在两相接地故障时也要动作。所以 $\text{Arg}(I_2/I_0)$ 动作后既要进行接地距离也要进行相间距离的计算，但毕竟能使计算量得到一定程度的减少。因为 I_2 和 I_0 可以长时存在，所以能适应转换性故障，也可为延时动作段选相。

6 关于零序电抗继电器

零序电抗继电器是指以零序电流 I_0 为极化量测量补偿电压 $U'_\varphi = U_\varphi - Z_Y(I_\varphi + KI_0)$ 的相位的一种接地距离继电器，其动作判据为

$$360^\circ > \text{Arg} \frac{U'_\varphi}{I_0} > 180^\circ$$

经推导可得

$360^\circ + \text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0} > \text{Arg}(Z - Z_Y) > 180^\circ + \text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0}$ 式中 $Z = U_\varphi / (I_\varphi + kI_0)$ 为继电器的测量阻抗。它在测量阻抗的平面上的动作特性是与 R 轴夹角为 $\text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0}$ 的直线 (见图 3)。由于 $\text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0}$ 不是常数，此直线的斜率是变化的，如果 I_0 与接地电阻 R_g 中的电流 I_F 同相位，则此直线的角度正好与 R_g 在测量阻抗产生的附加分量 $\Delta Z_R = \frac{I_F}{I_\varphi + kI_0} R_g$ 的阻抗角相等。因此，此特性对接地电阻的影响有自适应能力。但是 $\text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0}$ 必须满足

$$\Phi_1 > \text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0} > \Phi_1 - 180^\circ$$

否则区内故障要拒动、区外故障要误动。在送电侧 I_0 和 $I_\varphi + kI_0$ 都落后于 U_φ ，所以 $|\text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0}|$ 不可能很大，零序电抗继电器的测量都是正确的。在受电侧 $\text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0}$ 可能很大。当 R_g 增大到“同相问题”时， I_F 、 I_0 (假设与 I_F 同相)、 U_F 、 U'_φ 、 U_φ 、 E' (受电侧等效电势) 都同相 (见图 4)。此时 $\text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0} = \text{Arg} \frac{I_0}{I_\varphi + kI_0} = \varphi_L$ 。如果 R_g 进一步增大，则 I_0 超前于 U_φ 。于是零序电抗继电器将不正确动作。

近来为了解决这一缺点提出下列解决办法：当出现 I_0 超前于 U_φ 时将动作判据改为 $180^\circ > \text{Arg} \frac{U'_\varphi}{I_0} > 0^\circ$ 。但需要指出零序电抗继电器是不能单独使用的。它必需配置方向元件，选相元件和避开负荷电流的元件。由于在正常情况下 $I_0 = 0$ ，零序电抗继电器不会动作，因此必需配置避开负荷电流的元件这一点就被忽视了。需知如果相邻线路两相运行，则保护中会出现 I_0 ，在这种情况下零序电抗继电器是难免要误动作的。所以必需设置零序电流元件，或电流元件避开负荷状态。故障前的负荷电流与故障后的故障电流的幅值之比等于图 4 中 $(E' - U_{\varphi(1)}) : (E' - U_\varphi)$ 。由图可见故障电流小于负荷电流。因此若配置了避开负荷电流的元件后，在 R_g 大到出现“同相问题”时保护就不可能动作了。将判据改为 $180^\circ > \text{Arg} \frac{U'_\varphi}{I_0} > 0^\circ$ ，已无意义。由于送电侧零序电抗继电器能动作，在送电侧跳闸后受电侧就可以动作。此时接地电

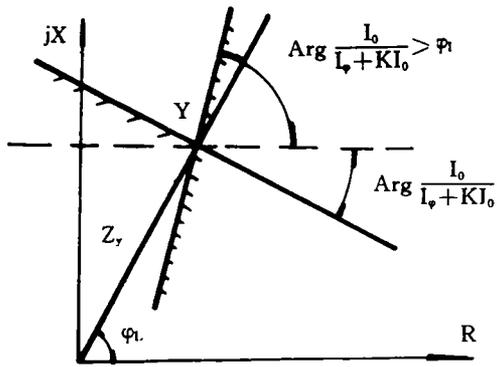


图 3

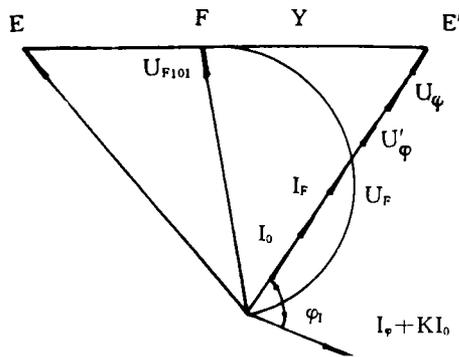


图 4

阻值已较大，由纵续动作切除故障应当是允许的。

7 四边形特性的距离继电器

为了便于整定和简化接线，实用的四边形特性一般都由电抗线、电阻线和方向线（后者通常为折线）三部份组成。如果三部份都反应相同的电压和电流，例如接地距离继电器为 U_ϕ 和 $I_\phi + kI_0$ ，则此四边形特性可在阻抗平面上与其它阻抗继电器相比较。但是要注意以下两个问题：一是接地电阻引起电抗特性的超越，二是单相接地故障时落后相继电器可能动作。假设为 A 相故障，在送电侧 B 相负荷电流和零序电流相位接近， $I_b + kI_0$ 可能很大，电阻线应避免开这种情况。

采用四边形特性的重要目的就是要提高对接地电阻的反应能力。因此电抗线都采用零序电抗继电器或者采用测距的算法，从而避免接地电阻造成的超越和拒动。但都必须以正确选相为前提。接地距离继电器为了保证正确测量在电流中引入零序电流补偿，即 $I_\phi + kI_0$ ，但是对于电阻线的测量引入 kI_0 是没有物理意义的。所以电阻线的测量和整定应是最低限度地避开负荷包括相邻线两相运行状态。同样，方向线也可独自选择最佳的接线，如以健全相相间电压或正序电压为极化量等。由于方向线一般避不开负荷电流的影响，健全相方向继电器难免在负荷电流作用下动作，所以接地距离中的方向元件不如采用零序方向元件，它永远工作在最灵敏角，而且三相可以共用。测距算法在理论上是有方向性的，但当故障距离很小时难免有计算误差，所以仍需加方向元件。

当这种四边形特性的继电器由集成电路构成时要注意电抗元件、电阻元件和方向元件的触点竞赛，而用微机实现时则基本上没有竞赛问题。首先在微机保护中各项功能的计算是由规定程序按顺序进行的，其次每项功能的判据在每一步计算的结果都相等，没有类似集成电路继电器中的动作脉冲展宽回路，只有按程序对各项功能计算判据都成立时，且连续几次都正确之后，才输出动作脉冲。