

负序功率方向元件最大灵敏角现场调试 中的向量分析

新安江水电厂 林甘川

负序功率方向元件随着电力系统的发展,越来越广泛地应用于大型发电机、变压器及超高压线路的保护装置,目前我国有些地区采用的BFG型方向高频保护就是利用比较负序功率方向的原理构成。因此负序功率方向元件的调试正确与否是保护装置中一个重要问题,在现场的调试中,对于负序功率方向元件的方向性及最大灵敏角是经常要碰到而又容易搞错的;或概念容易混淆不清的项目,对于负序功率方向元件的方向试验“继电器”曾先后发表一些文章,对从事现场工作的同志确有帮助,面对最大灵敏角,在说明这个问题时,有关厂家说明书,或教科书,各从不同的角度说明这个问题的概念,但在现场调试中现场人员碰到的都是另一种情况,本文拟对BFG型负序方向元件最大灵敏角的几种提法做一粗浅分析使现场工作人员有一完整概念,以供现场调试参考。

一般方向元件的最大灵敏角,是指装置的电压矢量与电流矢量在那个好定的相位下,方向元件的驱动力矩或输出值为最大,但在负序功率元件的说明资料和调试说明中最大灵敏角都有三种不同提法,而其本质是一个问题的三种不同角度的说明,他们之间既有连系又有不同的含义,如果没有完整的认识,在现场中容易误解或搞错,现就三种提法简介如下:

(一)第一种提法也就是一般厂家所提的装置的最大灵敏角,即 E_u 与 E_I 的夹角 $\varphi = 0$ 时,输出电压 U_{ab} 为最大值的角度,也就是最大灵敏角,如图1所示。

图中: E_u —由负序电压过滤器在综合变压器SB的一个柱子中磁通所产生的感应电势,

E_I —由负序电流过滤器在综合变压器SB的一个柱子中的磁通所产生的感应电势,其方向元件输出

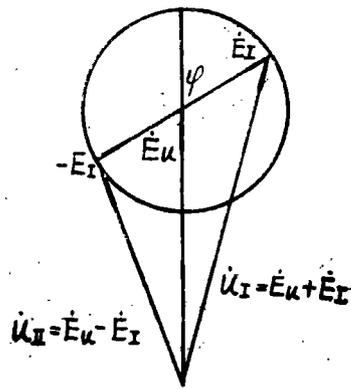
$$U_{ab} = |U_I| - |U| = |\dot{E}_u + \dot{E}_I| - |\dot{E}_u - \dot{E}_I| \quad \text{图1 } \dot{E}_u, \dot{E}_I \text{ 向量图}$$

$$= \sqrt{E_u^2 + 2E_u E_I \cos\varphi + E_I^2} - \sqrt{E_u^2 - 2E_u E_I \cos\varphi + E_I^2}$$

在一般情况下 $E_u > E_I$ $\varphi = 0$ 时,

$U_{ab} = 2E_I$ 输出最大,此时方向元件处于最灵敏状态。

这种提法中最大灵敏角对于现场人员理解,掌握装置的原理是有用的,但在实际调



试的接线中，并不测量这个角度，而且电力调度部门所给予的正定书中最大灵敏角整定值也不是指的这个角度，含义也不一样，因此单是理解这种提法，在现场调试中还不够。

(二) 第二种提法，也就是电力系统调度部门整定书中提出的最大灵敏角的整定值，指的是当负序电压 \dot{U}_2 与负序电流 \dot{I}_2 处于某个相位时，方向元件应处于最灵敏，也就是装置输出电压 U_{ab} 最大。最大灵敏角的整定值与系统阻抗角有关，现场调试的任务就是要把装置的最大灵敏角调整到符合整定书的要求，例如当系统阻抗角为 75° 时，则要求最大灵敏角整定为 105° (即 $Z_{A2} \sim U_{A2} = 105^\circ$) 但问题在于现场调试人员在实际的整定调试时，从试验结线的相角表中没有办法直接读出 \dot{U}_2 与 \dot{I}_2 的相角，做为正定的依据。而应该根据相应的向量图进行分析，从而得出要达到 $\dot{I}_2 \dot{U}_2$ 相角符合整定要求，盘入口电压与盘入口电流应该是多少度。

当系统发生不对称故障时，由向量分析可得知 \dot{I}_2, \dot{U}_2 存在一定的相角，应该使装置的最大灵敏角符合此相角。以下三种故障形式进行分析。

(1) 二相短路 (以 B C 相短路为例)

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= 0 \quad \dot{U}_{KB} = \dot{U}_{KC} = 0 \quad \dot{I}_B = -\dot{I}_C \\ \dot{I}_{KA2} &= \frac{1}{3} [\dot{I}_{KA} + a^2 \dot{I}_{KB} + a \dot{I}_{KC}] \\ &= \frac{1}{3} [a^2 \dot{I}_{KB} - a \dot{I}_{KB}] = \frac{1}{3} [a^2 - a] \dot{I}_{KB} \\ &= -\dot{I}_{KA1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KA2} &= \frac{1}{3} [\dot{U}_{KA} + a^2 \dot{U}_{KB} + a \dot{U}_{KC}] \\ \dot{U}_{KA1} &= \frac{1}{3} [\dot{U}_{KA} + a \dot{U}_{KB} + a^2 \dot{U}_{KC}] \quad \because \dot{U}_{KB} = \dot{U}_{KC} = 0 \end{aligned}$$

$$\therefore \dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2} \quad \text{并与 } \dot{U}_A \text{ 同相}$$

$$\dot{U}_{KA2} = 0 - \dot{I}_{KA2} \cdot \dot{Z}_2$$

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_A - \dot{I}_{KA1} \cdot \dot{Z}_1$$

$$\therefore \dot{E}_A - \dot{I}_{KA1} \dot{Z}_1 = -\dot{I}_{KA2} \cdot \dot{Z}_2$$

如取 $Z_1 = Z_2$

$$\text{则 } \dot{I}_{KA1} = \frac{\dot{E}_A}{2Z_1} \quad \dot{Z} = Z < \varphi_D$$

可知 \dot{I}_{KA1} 落后于电势 E_A 一个线路阻抗角 φ_D 如 $\varphi_D = 75^\circ$ 其向量如图：

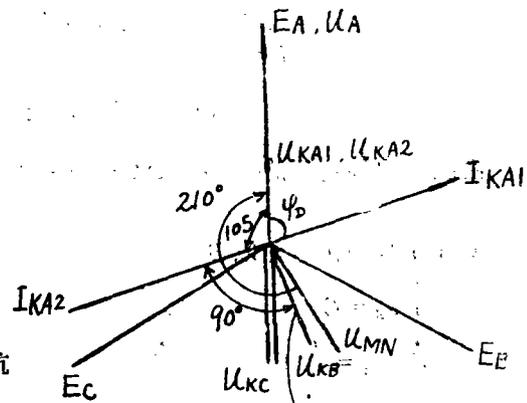


图2 二相故障电压电流向量图

图二中 \dot{U}_{MN} 为负序电压滤过器输出电压，其幅值与 E_2 成正比， \dot{U}_{KL} 为负序电流滤过器输出电压，其幅值与 E_1 成正比，由负序电压

滤过器和负序电流滤过器向量分析可知 U_{ML} 超前 U_{A2} 210° 、 U_{KL} 超前 I_{A2} 90° ，由图中可知 U_{MN} 与 U_{KL} 间夹角为 15° 、 I_{KA2} 超前 U_{KA2} 为 $180 - \varphi_D = 105^\circ$

(2) 单相接地故障 (A相接地为例)

$$\begin{aligned}
 I_B = I_C &= 0 & U_{KA} &= 0 \\
 I_{KA2} &= \frac{1}{3} [I_{KA} + a^2 \dot{I}_{KB} + a \dot{I}_{KC}] \\
 &= \frac{1}{3} [\dot{I}_{KA}] = \dot{I}_{KA1} \\
 U_{KA2} &= \frac{1}{3} [\dot{U}_{KA} + a^2 \dot{U}_{KB} + a \dot{U}_{KC}] \\
 &= \frac{1}{3} [a^2 \dot{U}_{KB} + a \dot{U}_{KC}] \\
 \dot{U}_{KA1} &= \frac{1}{3} [a \dot{U}_{KB} + a^2 \dot{U}_{KC}]
 \end{aligned}$$

即： $I_{KA1} = I_{KA2}$ ，其相位与 I_{KA} 同相，在故障时 I_{KA} 落后于 E_A 一个线路阻抗角 φ_D ，其向量图如图三。

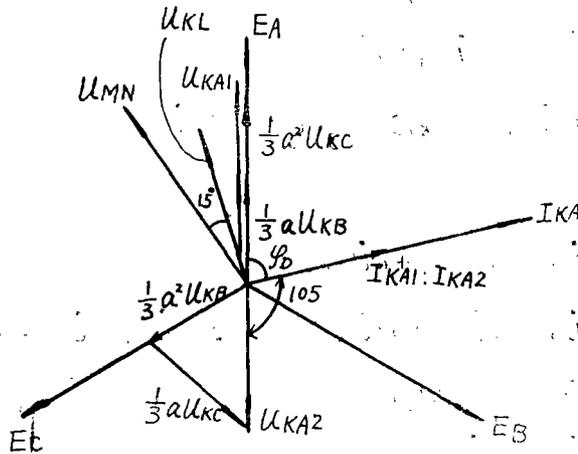


图3 单相接地电压、电流向量图

由图可知 I_{KA2} 超前 U_{KA2} 为 $180 - \varphi_D = 105^\circ$ 、 U_{MN} 与 U_{KL} 夹角为 15° ，与两相故障时一样。

(3) 两相接地 (以BC相接地为例)

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{KA} &= 0 & \dot{U}_{KB} &= 0 & \dot{U}_{KC} &= 0 \\
 \dot{U}_{KA1} &= \frac{1}{3} [\dot{U}_{KA} + a \dot{U}_{KB} + a^2 \dot{U}_{KC}] = \frac{1}{3} [\dot{U}_{KA}] \\
 \dot{U}_{KA2} &= \frac{1}{3} [\dot{U}_{KA}] \\
 \dot{U}_{KO} &= \frac{1}{3} \dot{U}_{KA}
 \end{aligned}$$

即: $U_{KA1} \quad U_{KA2} \quad U_{KA0}$
 即: U_{KA} 同相
 $\therefore \dot{U}_{KA2} = 0 - \dot{I}_{KA2} \cdot Z$
 $\dot{I}_{KA1} = -(\dot{I}_{KA2} + \dot{I}_{KA0})$
 $\therefore \dot{I}_{KA2} = -\frac{\dot{U}_{KA2}}{Z}$
 $Z = Z < \varphi_D$
 即 I_{KA2} 超前 U_{KA} 的角度为 $180 - \varphi_D$

其向量图如图四。
 由图四, 可知当两相接地时 \dot{I}_{KA2} 超前 $\dot{U}_{KA2} 180 - \varphi_D = 105^\circ$ \dot{U}_{MN} 与 \dot{U}_{KL} 夹角为 15° 。

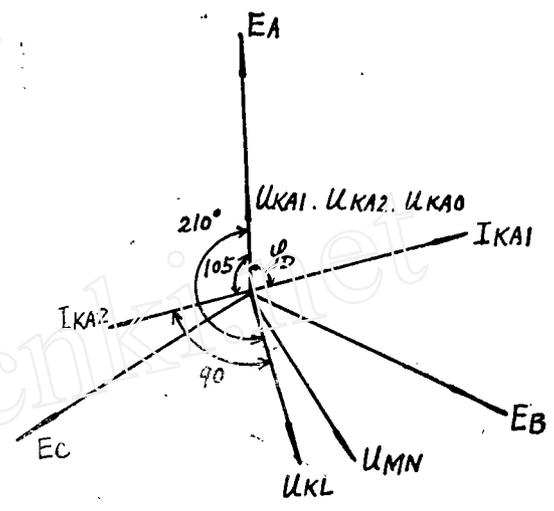


图4 两相接地故障电压、电流向量图

由上述三种故障情况分析, 可知故障时负序电流 I_{KA2} 均超前负序电压 U_{KA2} 一个角度: $180 - \varphi_D = 105^\circ$ 所以整定要求中最大灵敏角整定 105° 即为的是在故障时负序功率方向输出为最大值, 处于最灵敏情况。但从分析中也可知区内故障时, 负序电压滤过器的输出电压 \dot{U}_{MN} 与负序电流滤过器的输出电压 \dot{U}_{KL} 两者之间夹角为 15° 。从上面第一种提法的分析中装置只有当 E_1 与 E_2 夹角 $\varphi = 0$, 装置才是最灵敏状态, 也就是对应于 U_{MN} 与 U_{KL} 之间夹角也应为 0° 时, 装置才是最灵敏状态, 为此, 当 $\varphi_D = 75^\circ$, 正是要求最大灵敏角为 105° 时, 必须改变综合变压器SB的中柱绕组的抽头, 以改变 \dot{U}_{MN} 、 \dot{U}_{KL} 间夹角, 使之达到接近 0° 以满足整定要求。

但问题在于现场最大灵敏角的调试中, 相角表反映的读数一般不是 \dot{U}_{MN} 与 \dot{U}_{KL} 间夹角, 所以理解了 \dot{U}_{MN} 与 \dot{U}_{KL} 之夹角与最大灵敏角间关系在现场调试还是不够, 还要掌握下面第三种提法的关系。

(三) 上述两种最大灵敏角提法的概念, 在现场调试接线中, 并没有得到指示仪表的直接反应无论是 $\dot{E}_1 \wedge \dot{E}_2$, $\dot{U}_{MN} \wedge \dot{U}_{KL}$, 或 $\dot{I}_{KA2} \wedge \dot{U}_{KA2}$ 等的相角关系, 都没有能直接读出, 作为调整最大灵敏角的依据, 而是需要依据线路阻抗角 φ_D 和向量分析, 然后换算成为盘入口的试验电压和电流之间相角做为依据, 从而调整最大灵敏角。

下面以当整定要求 105° , 线路阻抗角为 75° 为例: 在一般的调试中, 当模拟两相短路(B、C相)在盘入口加 $U_{A-BC} = 50$ 伏(即BC相短接, A—BC相加电压) $I_{BC} = 1A$, 此时试验接线中的相角表所测得的角度为 U_{A-BC} 与 I_{BC} 的电压电流向量, 既不是 E_1 、 E_2 的角度, 也不是 \dot{U}_{MN} 、 \dot{U}_{KL} 角度, 也不是整定书中要求 I_{KA2} 与 U_{KA2} 的角度。如果整定要求 105° , 则根据两相故障的向量图分析, 盘入口的 U_{A-BC} 与 I_{BC} 的夹角应调整在 $90 + \varphi_D = 165^\circ$ 时, 其最大灵敏角才是 105° , 其向量图如图五。



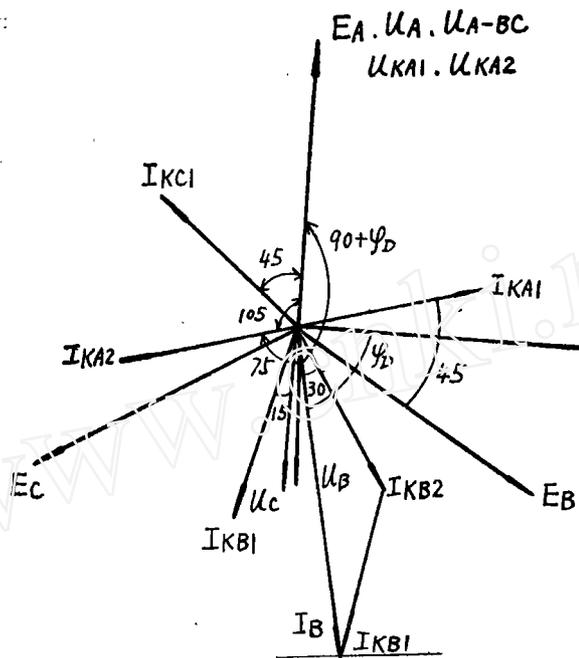


图5 模拟二相短路、电压、电流向量图

上述向量图如此作出的：

根据二相短路向量分析可知 \dot{I}_{KA1} 落后于 $E_A (U_A) = \varphi_D = 75^\circ$ ，则 $\dot{I}_{KA2} \wedge U_{KA2} = 105^\circ$ 即为最大灵敏角，已知 \dot{I}_{KA1} 、 \dot{I}_{KA2} 之相位，随之即可定出 \dot{I}_{KB1} 及 \dot{I}_{KB2} 之相位；即 \dot{I}_{KB1} 落后 \dot{I}_{KA1} 120° \dot{I}_{KB2} 超前 \dot{I}_{KA2} 120° ，由向量图可知 \dot{I}_{KB1} 落后 $\dot{U}_C (\dot{U}_B)$ 15° \dot{I}_{KB2} 超前 $\dot{U}_C (\dot{U}_B)$ 45° ，则 \dot{I}_{KB1} 与 \dot{I}_{KB2} 间夹角为 60° ， \dot{I}_B 落后 \dot{I}_{KB2} 30° 超前 $\dot{U}_C (U_B)$ 15° ，所以 \dot{I}_B 落后于 \dot{U}_{BC} 为 $90^\circ - 15^\circ = 75^\circ = \varphi_D$

在盘入口，我们所加的电压为 U_{A-BC} 其相位同于 U_A ，因此为要满在试验电流中得到 \dot{I}_{KA2} 超前 \dot{U}_{KA2} 105° ，以调整最大灵敏角，就必须调整使 U_{A-BC} 电压超前 \dot{I}_B 为 $90^\circ + \varphi_D = 165^\circ$ 现场调试人员从试验结线中相角表所直读出的角度即为此角度在此角度数值，调正综合变压器 SB 中柱绕组的抽头，调整 U_{MN} U_{KL} 之角度，即可达到所要求的整定角度（实际调试中为准确故，角度是调整在 φ_D ，然后读出输出值最小为准）

对于负序功率方向的最大灵敏角概念，有关说明资料偏重于从本文第一种提法和第二种提法说明问题，而对第三种提法分析较少，而现场工人同志和技术人员实际所碰到是第三种情况，如果没有对装置的原理和向量关系有一完整概念，常在调试中容易产生误解或混淆，因此对这三种提法应有一完整概念，才能正确地进行调试。