

如何判定 LFL—5 型负序电流继电器接线的正确性

李仲明 宁夏电力局中心调度所 (750001)

摘要 在高压电网的线路继电保护装置中的方向元件(即负序功率方向继电器)和起动元件以及目前大部分的发电机、变压器保护中都采用了两电流互感器式负序电流继电器,其交流电流回路接线的正确与否对保护装置可靠性和正确动作至关重要,本文仅对电流回路发生反极性、倒相序和缺相运行以及不论何种类型故障等不正常情况予以归纳分类,并进行理论上的分析,由此得知在发生上述错误接线等情况时,所造成的严重危害,并提出纠正的方法,以免类似的错误再次发生,起到借鉴的作用。

关键词 负序电流 负序电流继电器 断线 短路 反极性 空载输出电压

前言

当系统发生不对称短路或非全相运行时,在发电机定子线圈中将流过负序电流,负序电流产生的旋转磁场和正序旋转磁场的方向相反,以两倍同步转速切割转子,在发电机转子中产生两倍额定频率的感应电流,并沿转子表面、楔条、套箍中流过这一感应电流,造成转子表面附加发热、转子端局部高温、以致损坏发电机转子甚至整个发电机。此类事故,已在全国屡见不鲜,由此可见负序电流保护在电力系统中是何等的重要。在一次电力系统中,特别是在负载端的不对称负荷一次电流中总含有一些高次谐波;变压器空载投入励磁涌流中含有较大的高次谐波分量,以及负序电流继电器中互感器励磁电流、铁芯损耗等的影响,为了分析高次谐波电流对负序电流保护的影响,我们先看看三相电流中各相的高次谐波的相位关系,设 A 相电流为: $i_A = f(\omega t) = I_{1m}\sin\omega t + I_{2m}\sin 2\omega t + I_{3m}\sin 3\omega t + \dots$ 因为 B 相电流开始周期比 i_A 滞后 $1/3$ 个周期($T = \frac{2\pi}{\omega}$)的时间,所以

$$\begin{aligned} i_B &= f\left[\omega\left(t - \frac{T}{3}\right)\right] \\ &= I_{1m}\sin\omega\left(t - \frac{T}{3}\right) + I_{2m}\sin 2\omega\left(t - \frac{T}{3}\right) + I_{3m}\sin 3\omega\left(t - \frac{T}{3}\right) + \dots \\ &= I_{1m}\sin(\omega t - 120^\circ) + I_{2m}\sin(2\omega t - 240^\circ) + I_{3m}\sin(3\omega t) + \dots \end{aligned}$$

C 相电流开始周期比 i_A 滞后 $2/3T$ 的时间,故

$$\begin{aligned} i_C &= f\left[\omega\left(t - \frac{2T}{3}\right)\right] \\ &= I_{1m}\sin\omega\left(t - \frac{2T}{3}\right) + I_{2m}\sin 2\omega\left(t - \frac{2T}{3}\right) + I_{3m}\sin 3\omega\left(t - \frac{2T}{3}\right) + \dots \\ &= I_{1m}\sin(\omega t - 240^\circ) + I_{2m}\sin(2\omega t - 120^\circ) + I_{3m}\sin(3\omega t) + \dots \end{aligned}$$

从上所得可知,分解出来的各次谐波电流中 $1, 4, 7, \dots (1 + 3n)$ 等次谐波为正序分量, $2, 5, 8, \dots (2 + 3n)$ 等次谐波为负序分量, $3, 6, 9, \dots 3n$ 等次谐波为零序分量。

对负序性质的谐波,其幅值较大的为二次、五次谐波的影响为最甚,曾因引起变压器负序电流保护误动作过,故须在负序电流继电器上加装二次或五次谐波滤过器,即使如此,在正常运行时负序电流继电器仍有一定的输出电压,即称之为不平衡电压;为了提高保护装置的灵敏度和可靠性,必须尽量减小其不平衡电压。

收稿日期:1995 - 01 - 02

1 工作原理概况

这种两电流互感器式负序电流继电器是利用电阻—电容移相原理构成的,中间变流器 LH_A 原边有两个一次绕组 W_A 和 W_0 ,分别通入电流 I_A 和 $-3I_0$ (特别注意零相线圈的极性),二次绕组 W_{A0} 上并联电阻 R ,则电阻 R 上的电压可写为

$$\dot{U}_R = (I_A - W_0/W_A \times 3I_0)R/n_a$$

式中 $n_a = W_{A0}/W_A$ ——中间变流器 LH_A 的变比。

中间变流器 LH_{BC} 有两个一次绕组 W_B 和 W_C ,分别通入电流 I_B 和 $-I_C$,则二次电流 I_{BC} 与一次 $(I_B - I_C)$ 同相位,并联在二次绕组 W_{BC} 上的电容 C 上的电压可写为

$$\dot{U}_C = -jX_C/n_{BC}(I_B - I_C)$$

式中 $n_{bc} = W_{BC}/W_B = W_{BC}/W_C$ ——中间变流器 LH_{BC} 变比。其负序电流继电器的原理接线图如图 1 所示,由图 1 所示的极性关系,输出电压为 $\dot{U}_{mn} = \dot{U}_R + \dot{U}_C$,由于要求负序电流继电器只反映负序电流分量,不反映正序及零序电流分量,因此要求实现负序电流继电器的条件为:

当分别通入正序、负序、零序电流分量时,负序电流继电器的输出电压为

$$\dot{U}_{mn1} = I_{A1}(R/n_a - \sqrt{3}X_C/n_{bc}) = 0$$

$$\dot{U}_{mn2} = I_{A2}(R/n_a + \sqrt{3}X_C/n_{bc}) = I_{A2}(R/n_a + \sqrt{3}R/\sqrt{3}n_{bc})$$

$$\dot{U}_{mn0} = I_0(R/n_a)(1 - 3W_0/W_A) = 0$$

即 $X_C = n_{bc}/n_a \cdot R/\sqrt{3}$, $W_0/W_A = 1/3$ 继电器 $W_A = W_B = W_C, W_{A0} = W_{BC}$

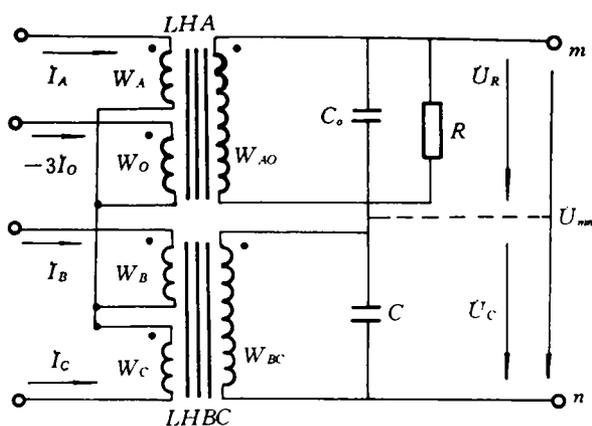
则有 $n_a = n_{bc}$, $X_C = R/\sqrt{3}$

满足上述条件,故得加入负序电流时输出电压为 $\dot{U}_{mn2} = 2RI_{A2}/n_a$

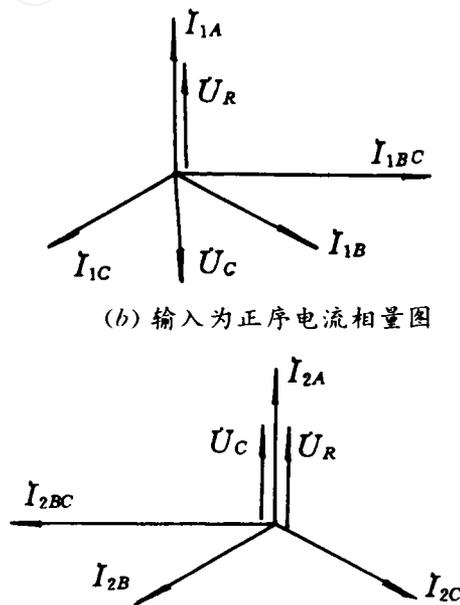
为以后分析问题书写方便起见,假定 $n_a = n_{bc} = 1$,

即可得 $\dot{U}_{mn} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = [I_A - \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)]R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(I_B - I_C)$

$$\dot{U}_{mn2} = 2RI_{A2}$$



(a) 原理接线图



(b) 输入为正序电流相量图

(c) 输入为负序电流相量图

图 1 负序电流继电器的原理接线图

表1 CT二次回路断线时,负序电流继电器输出端空载电压和相量图

断线相别		A	B	C
关系式		$I_A = 0$	$I_B = 0$	$I_C = 0$
负序分量 $I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + a^2 I_B + a I_C)$		$I_{2A} = \frac{1}{3}(0 + a^2 I_B + a I_C)$ $= \frac{1}{3}(a I_A + a^2 I_A)$ $= -\frac{1}{3} I_A$	$I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + 0 + a I_C)$ $= \frac{1}{3} I_A(1 + a^2)$ $= \frac{1}{3} I_A e^{-j60^\circ}$	$I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + a I_B)$ $= \frac{1}{3} I_A(1 + a)$ $= \frac{1}{3} I_A e^{j60^\circ}$
输出空载电压 $\dot{U}_{mn} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = (I_A - \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C))R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(I_B - I_C)$		$\dot{U}_{mn} = \left[\frac{-1}{3}(I_B + I_C) \right] R - \frac{R}{\sqrt{3}}(I_B - I_C)$ $= \frac{1}{3} I_A R - I_A R$ $= -\frac{2}{3} I_A R$	$\dot{U}_{mn} = \left(I_A + \frac{1}{3} I_B \right) R + j\frac{R}{\sqrt{3}} I_C$ $= \frac{1}{3} I_A R(3 + a^2 + ja\sqrt{3})$ $= \frac{1}{3} I_A R(1 - j\sqrt{3})$ $= \frac{2}{3} I_A R e^{-j60^\circ}$	$\dot{U}_{mn} = \left(I_A + \frac{1}{3} I_C \right) R - j\frac{R}{\sqrt{3}} I_B = \frac{1}{3} I_A R(3 + a - \sqrt{3} e^{-j30^\circ})$ $= \frac{1}{3} I_A R(1 + j\sqrt{3})$ $= \frac{2}{3} I_A R e^{j60^\circ}$
化成负序分量输出空载电压	相量值	$\dot{U}_{mn} = -\frac{2}{3} R(-3)$ $I_{2A} = 2I_{2A} R$	$\dot{U}_{mn} = \frac{2}{3} R e^{-j60^\circ} \cdot 3 e^{j60^\circ} I_{2A}$ $= 2I_{2A} R$	$\dot{U}_{mn} = \frac{2}{3} R e^{j60^\circ} \cdot 3 I_{2A} e^{-j60^\circ}$ $= 2I_{2A} R$
	绝对值	$U_{mn} = 2I_2 R$	$U_{mn} = 2I_2 R$	$U_{mn} = 2I_2 R$
相量图	负序电流分量			
	负序电压输出			

2 误动作原因的分析

负序电流保护不正确动作的原因在实际运行中很多,据统计误动作机会最多的是电流互感器二次回路断线、其次为电流回路反极性、倒相序等不正常情况所引起的,现分别叙述如下:

2.1 CT 二次回路开路

由于CT端子箱内,保护屏端子排接线螺丝松动、连接导线断线或磨损断股等而造成CT二次开路,在运行中CT开路时,其二次侧将产生高电压危及设备和人身安全。当CT二次侧任何一相、二相或三相(机会极小)发生开路时,负序电流继电器的输出端电压 U_{mn} 的大小随着负荷按正比例而增大,可能造成负序电流元件误动作跳开关,然而在系统发生某相接地故障而恰遇为负序电流继电器缺该相运行时,保护装置可能拒动,在正常运行情况 I_A, I_B, I_C 三相电流为正序,当A相CT二次侧开路时即为不对称的三相电路,用对称分量法将任何不对称三相量分解成为相对应的各序对称分量,以A相为特殊相, $I_{1A} = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C) = \frac{2}{3}I_A$

$I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C) = -\frac{1}{3}I_A$ $I_{0A} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) = -\frac{1}{3}I_A$ 对负序分量来说,A相CT断线相当于B、C两相CT断线后再在A相CT加入反极性的A相电流为等效,其计算表达式为: $I_B + I_C = -I_A$ 。负序电流继电器输出端空载电压计算式为:

$$\begin{aligned} U_{mn} &= \left[0 - \frac{1}{3}(0 + I_B + I_C) \right] R - j(I_B - I_C) X_C \\ &= \left[\frac{1}{3}I_A \right] R - j \frac{R}{\sqrt{3}} I_{R2} = \frac{1}{3}I_A R - jI_A \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} R e^{-j90^\circ} \\ &= \frac{1}{3}I_A R - I_A R = -\frac{2}{3}I_A R = -\frac{2}{3}R(-3I_{2A}) \\ &= 2I_{2A} R \quad |U_{mn}| = |2I_{2A} R| \end{aligned}$$

同样理由,当B相或C相CT二次回路断线时其分析结果见表1。

有关AB相、BC相或CA相的CT二次回路断线时的情况请自行分析。

由上述分析可得出如下的结论:任何一相或两相CT二次回路断线负序电流继电器输出负序电压为 U'_{mn} ,在负序电流继电器的输入端加入相对应的三相对称负序电流值为断线相所对应的电流值,其输出的负序电压为 U_{mn} ,其两输出的负序电压之比为: $U'_{mn}/U_{mn} = 1/3$ 。纠正这种结线的错误,该检查CT二次侧在带负荷情况下测试出六角图和输出端的负序电压 U_{mn} 的大小,并认真细致查清盘内、外的每一根导线的来龙去脉,应很容易发现错误所在之处。

2.2 CT 极性接反

当CT任何的一相、二相或三相(机会极少)的极性颠倒接反,这种结线错误的本质是在正常运行条件下,负序电流继电器输出端的负序电压 U_{mn} 的大小随负荷按正比例而增大,从而在正常运行情况下会造成负序电流继电器误动,有时可能会误跳开关。在正常运行情况下, I_A, I_B, I_C 三相电流为正序,当A相极性接反时,即为不对称的三相电路,用对称分量法将任何不对称的三相电路分解成为相对应的各序对称分量,以A相为特殊相即可得:

$$\begin{aligned} I_{1A} &= \frac{1}{3}(-I_A + aI_B + a^2I_C) = -\frac{1}{3}I_A \\ I_{2A} &= \frac{1}{3}(-I_A + a^2I_B + aI_C) = -\frac{2}{3}I_A \\ I_{0A} &= \frac{1}{3}(-I_A + I_B + I_C) = -\frac{2}{3}I_A \end{aligned}$$

对负序电流分量来说,A相极性接反,相当于B、C两相CT断线后再在A相CT加入反极

性的 2 倍电流为等效,其计算表达式为:

$$-I_A + I_B + I_C = (I_A + I_B + I_C) - 2I_A = -2I_A$$

负序电流继电器输出端空载电压计算式为:

$$\begin{aligned} U_{mn} &= \left[-I_A - \frac{1}{3}(-I_A + I_B + I_C) \right] R - j(I_B - I_C) X_C \\ &= \left(-I_A + \frac{2}{3}I_A \right) R - jI_{BC} \frac{R}{\sqrt{3}} = -\frac{1}{3}I_A R - jI_A R e^{-j90^\circ} \\ &= -\frac{3}{4}I_A R = -\frac{4}{3}I_{2A} \left(-\frac{3}{2} \right) R = 2I_{2A} R \\ |U_{mn}| &= |2I_2 R| \end{aligned}$$

同样理由,当 B 相、C 相、或 AB、BC、CA 两相分别为 CT 二次回路的极性接反时,分析结果见表 2 和表 3。

其负序电流继电器输出负序电压相量图如表 2 和表 3 所示。显而易见,任何一相或两相 CT 二次回路极性接反,负序电流继电器输出负序电压为 U_{mn}' ,在负序电流继电器的输入端加入相对应的三相对称负序电流值为极性接反所对应的电流值其输出的负序电压为 U_{mn} ,其两输出的负序电压之比为: $U_{mn}'/U_{mn} = 2/3$,纠正这种结线的错误在此不叙,自行分析。

2.3 其它错误

在电缆芯对线时,两根线之间两端的号牌可能标错,这样就会导致盘内外相别的错误,其正确的接线是 CT 二次侧 a, b, c, N 与负序电流继电器的 A、B、C、N 相对应接入;现误将 CT 二次侧的 c, a, b 或 b, c, a 分别与负序电流继电器的 A、B、C 相对应接入,由相量图分析显而易见,输出负序电压 $U_{mn} = 0$;若 CT 的二次侧的 $a, c, b; b, a, c; c, b, a$ 分别与负序电流继电器的 A、B、C 相对应接入,即相当于通入负序电流继电器为三相对称的负序电流,此时输出的负序电压为 $U_{mn} = 2I_A R$,运行经验证明,负序电流元件不正确动作,大多数发生在新设备投运后或二次回路变更后,核相、相序、恢复接线头时有误;因此必须认真验收、详细试验、项目齐全、回路正确,完整无误,使设备处于健康状态下投入运行。

3 两相短路及接地时、负序电流继电器的动作

在发电机、变压器或发电机—变压器组,不论何种类型故障(两相短路或接地)或故障相别,对负序电流继电器来说,其输出端的空载电压总是为 $U_{mn} = 2I_2 R$,即负序电流继电器其灵敏度不随各种类型的故障及接线方式而变。

对于中性点不接地的发电机或发电机—变压器组,不论在发电机侧或主变侧两相短路,皆不会出现零序电流,并且有同样数值的负序输出,现分析如下:

3.1 发电机侧两相短路如图 2 所示。当 AB 相短路时有如下关系式: $I_A = -I_B, I_C = 0$ 假定电流互感器的变比 $K_L = 1$,即可得 $I_A = I_a, I_B = I_b, I_C = I_c$,从对称分量基本关系式中得知:

$$I_{2a} = I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + a^2 I_B + a I_C) = \frac{1}{3}(I_A - a^2 I_A + 0) = \frac{1}{\sqrt{3}} I_A e^{j30^\circ}$$

此时负序电流继电器的输出端空载电压为:

$$\begin{aligned} U_{mn} &= U_R + U_C = \left[I_A - \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \right] R - j \frac{R}{\sqrt{3}} (I_B - I_C) \\ &= I_A R + j \frac{R}{\sqrt{3}} I_A = \frac{1}{\sqrt{3}} I_A R (\sqrt{3} + j) = \frac{2}{\sqrt{3}} I_A R e^{j30^\circ} = 2I_{2A} R \end{aligned}$$

此时绝对值即 $|U_{mn}| = |2I_2 R|$

同样理由,当 BC 相或 CA 相短路时,其分析结果见表 4。

表 2 CT 二次回路极性接反时, 负序电流继电器输出端空载电压和相量图

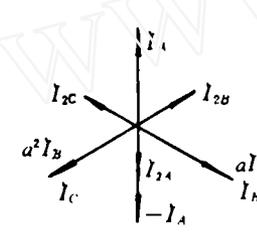
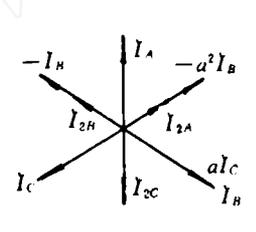
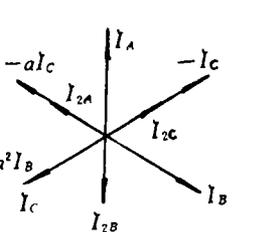
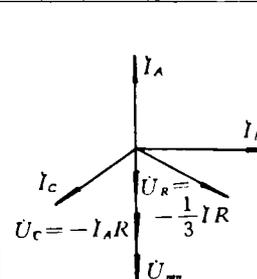
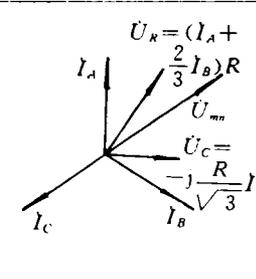
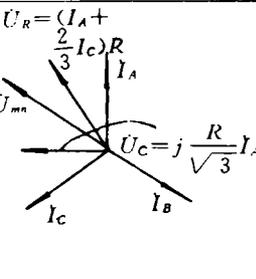
极性接反相别		A	B	C
负序分量 $I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + a^2 I_B + a I_C)$		$I_{2A} = \frac{1}{3}(-I_A + a^2 I_B + a I_C)$ $a I_C = \frac{1}{3} I_A(-1 + a^1 + a^2) = -\frac{2}{3} I_A$	$I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A - a^2 I_B + a I_C)$ $a I_C = \frac{1}{3}(1 + a^2 e^{j60^\circ} + a^2) I_A = \frac{2}{3} I_A e^{-j60^\circ}$	$I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + a^2 I_B - a I_C)$ $a I_C = \frac{1}{3} I_A(1 + a + e^{j60^\circ}) = \frac{2}{3} I_A e^{j60^\circ}$
输出空载电压 $U_{mn} = U_R + U_C$ $= (-I_A - \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C))R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(I_B - I_C)$		$U_{mn} = (-I_A + \frac{2}{3} I_A)R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(I_B - I_C)$ $= -\frac{1}{3} I_A R - j\frac{R}{\sqrt{3}} I_A \sqrt{3} e^{-j90^\circ}$ $= -\frac{4}{3} I_A R$	$U_{mn} = (I_A + \frac{2}{3} a^2 I_A)R - j\frac{R}{\sqrt{3}} I_A = \frac{1}{3} I_A R(3 + 2a^2 - j\sqrt{3})$ $= \frac{2}{3} R I_A R(1 - j\sqrt{3})$ $= \frac{4}{3} I_A R e^{-j60^\circ}$	$U_{mn} = (I_A + \frac{2}{3} I_C)R + j\frac{R}{\sqrt{3}} I_A = \frac{1}{3} R I_A(3 + 2a + j\sqrt{3}) = \frac{2}{3} R I_A(1 + j\sqrt{3}) = \frac{4}{3} I_A R e^{j60^\circ}$
化成负序分量输出空载电压	相量值	$U_{mn} = -\frac{4}{3} R \cdot (-\frac{3}{2} I_{2A}) = -\frac{4}{3} R I_{2A}$	$U_{mn} = \frac{4}{3} R e^{-j68^\circ} \cdot \frac{3}{2} I_{2A} e^{+j60^\circ} = 2 R I_{2A}$	$U_{mn} = \frac{4}{3} R e^{j60^\circ} \cdot \frac{3}{2} I_{2A} e^{-j60^\circ} = 2 R I_{2A}$
	绝对值	$U_{mn} = 2 I_2 R$	$U_{mn} = 2 I_2 R$	$U_{mn} = 2 I_2 R$
相量图	负序电流分量			
	负序电压输出			

表 3 CT 二次回路极性接反时, 负序电流继电器输出端空载电压和相量图

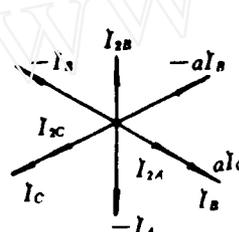
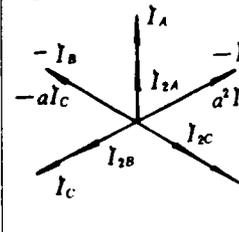
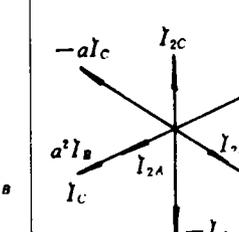
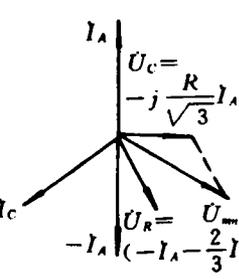
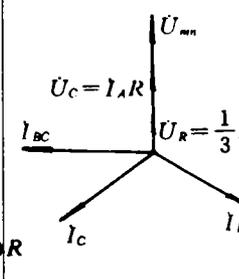
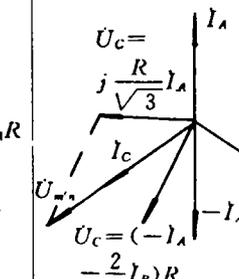
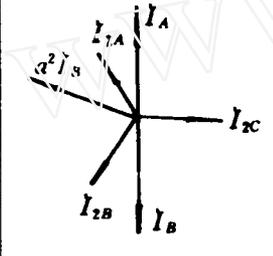
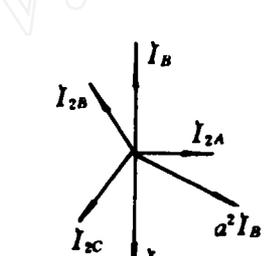
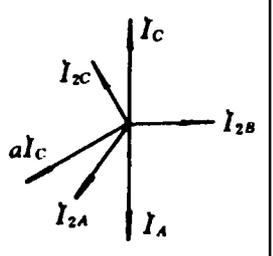
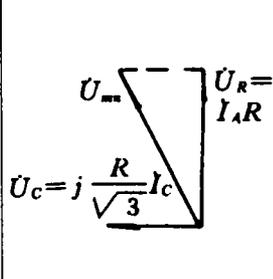
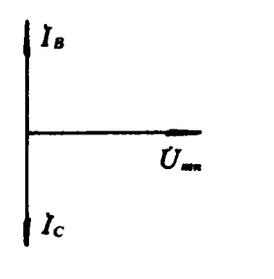
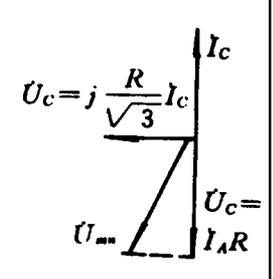
极性接反相别		AB	BC	CA
负序分量 $I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + a^2 I_B + a I_C)$		$I_{2A} = \frac{1}{3}(-I_A - a^2 I_B + a I_C) = \frac{1}{3} I_A (-1 + e^{-j60^\circ} + a^2) = \frac{2}{3} I_A e^{j240^\circ}$	$I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A - a^2 I_B - a I_C) = \frac{1}{3} I_A (1 + e^{-j60^\circ} + e^{j60^\circ}) = \frac{2}{3} I_A$	$I_{2A} = \frac{1}{3}(-I_A + a^2 I_B - a I_C) = \frac{1}{3} I_A (-1 + a + e^{j60^\circ}) = \frac{2}{3} I_A e^{j120^\circ}$
输出空载电压 $U_{mn} = U_R + U_C = [I_A - \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)]R - j \frac{R}{\sqrt{3}}(I_B - I_C)$		$U_{mn} = [-I_A - \frac{2}{3} I_C]R - j \frac{R}{\sqrt{3}} I_A = \frac{1}{3} R I_A (-3 - 2a - j\sqrt{3}) = \frac{2}{3} R I_A (-1 - j\sqrt{3}) = \frac{4}{3} R I_A e^{j240^\circ}$	$U_{mn} = [I_A - \frac{2}{3} I_A]R - j \frac{R}{\sqrt{3}} I_C = \frac{1}{3} I_A R (1 - j3e^{j90^\circ}) = \frac{1}{3} I_A R (1 + 3j) = \frac{4}{3} I_A R$	$U_{mn} = [-I_A - \frac{2}{3} I_B]R + j \frac{R}{\sqrt{3}} I_A = \frac{1}{3} I_A R (-3 + 2a + j\sqrt{3}) = \frac{2}{3} I_A R (-1 + j\sqrt{3}) = \frac{4}{3} R I_A e^{j120^\circ}$
化成负序分量输出空载电压	相量值	$U_{mn} = \frac{4}{3} R e^{j240^\circ} \cdot \frac{3}{2} I_{2A} e^{-j240^\circ} = 2 R I_{2A}$	$U_{mn} = \frac{4}{3} R \cdot \frac{3}{2} I_{2A} = 2 R I_{2A}$	$U_{mn} = \frac{4}{3} R e^{j120^\circ} \cdot \frac{3}{2} I_{2A} e^{-j120^\circ} = 2 R I_{2A}$
	绝对值	$U_{mn} = 2 I_2 R$	$U_{mn} = 2 I_2 R$	$U_{mn} = 2 I_2 R$
相量图	负序电流分量			
	负序电压输出			

表 4 发电机侧两相短路时负序电流继电器输出端空载电压和相量图

短路相别		AB	BC	CA
关系式		$I_A = -I_B, I_C = 0$	$I_B = -I_C, I_A = 0$	$I_C = -I_A, I_B = 0$
负序分量 $I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A - aI_B - a^2I_C)$		$I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + 0) = \frac{1}{\sqrt{3}}I_A e^{j30^\circ}$	$I_{2A} = \frac{1}{3}(0 + a^2I_B - aI_C) = \frac{1}{\sqrt{3}}I_B e^{-j90^\circ}$	$I_{2A} = \frac{1}{3}(-I_C + 0 - aI_A) = \frac{1}{\sqrt{3}}I_C e^{j150^\circ}$
输出空载电压 $U_{mn} = U_R + U_C = (I_A - \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C))R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(I_B - I_C)$		$U_{mn} = I_A R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(-I_A) = I_A(R + j\frac{1}{\sqrt{3}}R) = \frac{2}{\sqrt{3}}I_A e^{j30^\circ}$	$U_{mn} = -\frac{R}{\sqrt{3}}(I_B - I_C) = -j\frac{2}{\sqrt{3}}I_B R = \frac{2}{\sqrt{3}}I_B R e^{-j90^\circ}$	$U_{mn} = (-I_C)R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(-I_C) = -I_C R + j\frac{R}{\sqrt{3}}I_C = \frac{2}{\sqrt{3}}I_C R e^{j150^\circ}$
化成负序分量 输出空载电压	相量值	$U_{mn} = \frac{2}{\sqrt{3}}I_{2A} R e^{j30^\circ} \cdot \sqrt{3} e^{-j30^\circ} = 2I_{2A} R$	$U_{mn} = \frac{2}{\sqrt{3}}R e^{-j90^\circ} \cdot \sqrt{3} e^{j90^\circ} I_{2A} = 2I_{2A} R$	$U_{mn} = \frac{2}{\sqrt{3}}R e^{j150^\circ} \cdot \sqrt{3} I_{2A} e^{-j150^\circ} = 2I_{2A} R$
	绝对值	$U_{mn} = 2I_2 R$	$U_{mn} = 2I_2 R$	$U_{mn} = 2I_2 R$
相量图	负序电流分量			
	负序电压输出			

3.2 变压器高压侧两相短路

如图 3 所示, 变压器结线组别为 $\Delta/\Delta-11$, 变压器的变比 $K_T = 1$, 即 $W_\Delta/W_\lambda = \sqrt{3}$ 。装于发电机的电流互感器的变比 $K_L = 1$, 假定 AB 相短路, 则 $I_A = -I_B$, $I_C = 0$, 由于 $W_\Delta/W_\lambda = \sqrt{3}$, 所以 $I'_A = I_A/\sqrt{3}$, $I_a = \frac{2}{\sqrt{3}}I_A$,

$$I_b = -\frac{1}{\sqrt{3}}I_A, I_c = -\frac{1}{\sqrt{3}}I_A$$

从对称分量基本关系式中得知:

$$I_{2a} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)$$

$$= \frac{1}{3}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}I_A - a^2\frac{1}{\sqrt{3}}I_A - a\frac{1}{\sqrt{3}}I_A\right)$$

$$= \frac{1}{3}\frac{1}{\sqrt{3}}I_A(2 - a^2 - a) = \frac{1}{\sqrt{3}}I_A$$

此时负序电流继电器的输出端空载电压为:

$$\dot{U}_{mn} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = \left[\frac{2}{\sqrt{3}}I_A - \frac{1}{3}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}I_A - \frac{1}{\sqrt{3}}I_A - \frac{1}{\sqrt{3}}I_A\right)\right]R$$

$$= j\frac{R}{\sqrt{3}}\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}I_A + \frac{1}{\sqrt{3}}I_A\right) = \frac{2}{\sqrt{3}}I_A R = \frac{2}{\sqrt{3}}R\sqrt{3}I_{2a} = 2I_{2a}R$$

R 取绝对值 $|U_{mn}| = |2I_{2a}R|$

同样理由, 当 BC 相或 CA 相短路时, 其分析结果见表 5

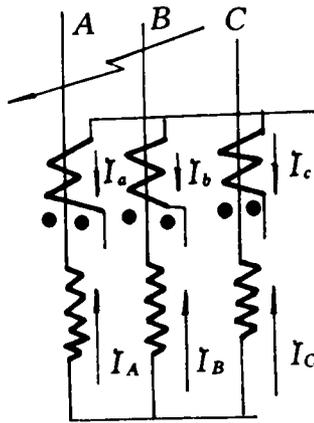


图 2 发电机侧两相短路

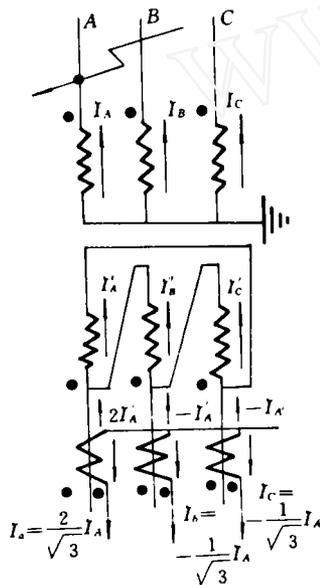


图 3 变压器高压侧两相短路

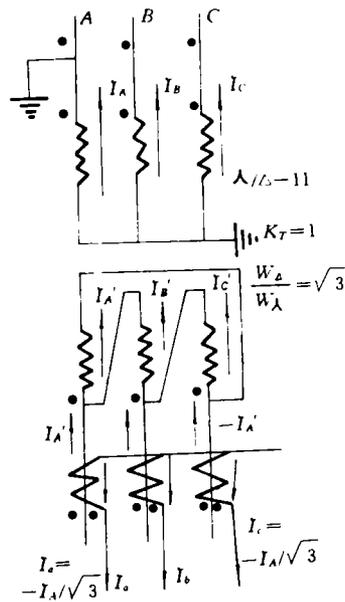


图 4 变压器高压侧 A 相接地

表 5 变压器高压侧两相短路时,负序电流继电器输出端空载电压和相量图

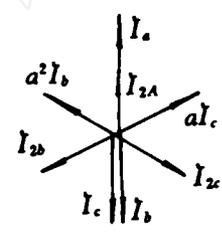
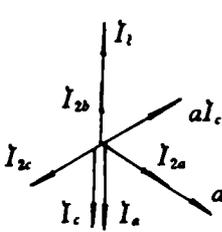
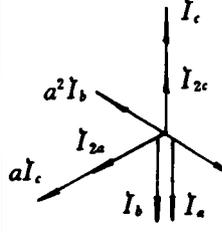
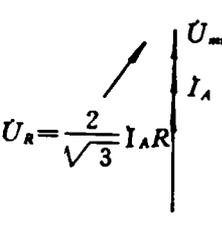
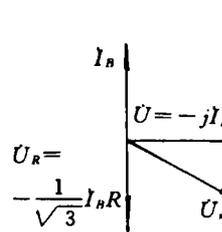
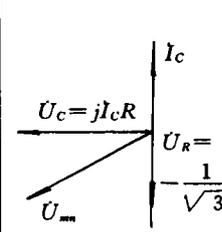
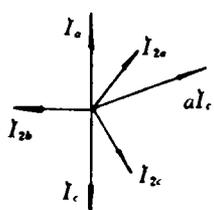
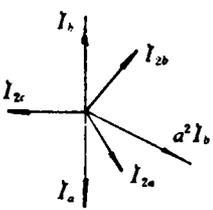
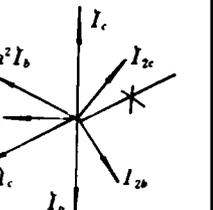
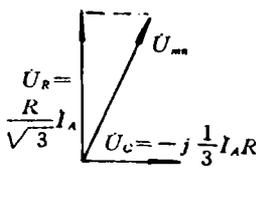
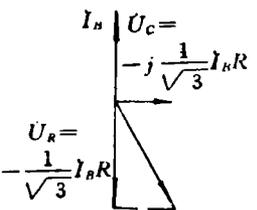
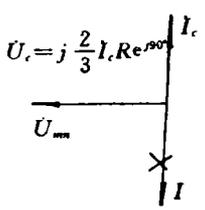
短路相别		AB	BC	CA
关系式		$I_A = -I_B, I_C = 0,$ $I_a = \frac{2}{\sqrt{3}}I_A, I_b = I_c$ $= \frac{-1}{\sqrt{3}}I_A$	$I_B = -I_C, I_A = 0,$ $I_b = \frac{2}{\sqrt{3}}I_B, I_a = I_c$ $= -\frac{1}{\sqrt{3}}I_B$	$I_C = -I_A, I_B = 0,$ $I_c = \frac{2}{\sqrt{3}}I_C, I_a = I_b$ $= -\frac{1}{\sqrt{3}}I_C$
负序分量 $I_{2a} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)$		$I_{2a} = \frac{1}{3}I_A \frac{1}{\sqrt{3}}(2 - a^2 - a)$ $= \frac{1}{3\sqrt{3}}I_A[3 - (1 + a^2 + a)] = \frac{1}{\sqrt{3}}I_A$	$I_{2a} = \frac{1}{3}I_B \frac{1}{\sqrt{3}}(-1 + 2a^2 - a)$ $= -\frac{1}{\sqrt{3}}I_B(1 + a)$ $= \frac{1}{\sqrt{3}}I_B e^{-j120^\circ}$	$I_{2a} = \frac{1}{3}I_C \frac{1}{\sqrt{3}}[-1 - a^2 + 2a]$ $= \frac{1}{3}I_C \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 3a$ $= \frac{1}{\sqrt{3}}I_C e^{j120^\circ}$
输出空载电压 $U_{mn} = U_R + U_C = [I_a + \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)]R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(I_b - I_c)$		$U_{mn} = [\frac{2}{\sqrt{3}}I_A]R$ $= \frac{2}{\sqrt{3}}I_A R$	$U_{mn} = [-\frac{1}{\sqrt{3}}I_B]R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(\frac{3}{\sqrt{3}}I_B)$ $= -\frac{R}{\sqrt{3}}I_B R(1 + j\sqrt{3})$ $= \frac{2}{\sqrt{3}}I_B R e^{-j120^\circ}$	$U_{mn} = [-\frac{1}{\sqrt{3}}I_C]R - j\frac{R}{\sqrt{3}}(-\frac{3}{\sqrt{3}}I_C)$ $= \frac{R}{\sqrt{3}}I_C(-1 + j\sqrt{3})$ $= \frac{2}{\sqrt{3}}I_C R e^{j120^\circ}$
化成负序分量 输出空载电压	相量值	$U_{mn} = \frac{2}{\sqrt{3}}R \cdot \sqrt{3}I_{2a}$ $= 2RI_{2a}$	$U_{mn} = \frac{2}{\sqrt{3}}R e^{-j120^\circ} \cdot \sqrt{3}I_{2a} e^{j120^\circ} = 2RI_{2a}$	$U_{mn} = \frac{2}{\sqrt{3}}R e^{j120^\circ} \cdot \sqrt{3}I_{2a} e^{-j120^\circ} = 2RI_{2a}$
	绝对值	$U_{mn} = 2I_2 R$	$U_{mn} = 2I_2 R$	$U_{mn} = 2I_2 R$
相量图	负序电流分量			
	负序电压输出			

表 6 变压器高压侧单相接地时,负序电流继电器输出端空载电压和相量图

短路相别		A	B	C
关系式		$I_A = I_K, I_B = I_C = 0,$ $I_a = I_A / \sqrt{3},$ $I_c = -I_A / \sqrt{3}, I_c = 0$	$I_B = I_K, I_A = I_C = 0,$ $I_a = -I_B / \sqrt{3},$ $I_c = I_B / \sqrt{3}, I_c = 0$	$I_c = I_K, I_A = I_B = 0,$ $I_b = -I_C / \sqrt{3},$ $I_a = I_C / \sqrt{3}, I_a = 0$
负序分量 $I_{2a} = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c)$		$I_{2a} = \frac{1}{3}(I_A / \sqrt{3} - a I_A / \sqrt{3}) = \frac{1}{3} \frac{I_A}{\sqrt{3}} (1 - a)$ $= \frac{1}{3} I_A e^{-j30^\circ}$	$I_{2a} = \frac{1}{3}(-I_B / \sqrt{3} - a^2 I_B / \sqrt{3})$ $= \frac{1}{3} \frac{I_B}{\sqrt{3}} (-1 - a^2)$ $= \frac{1}{3} I_B e^{-j150^\circ}$	$I_{2a} = \frac{1}{3}(-a^2 I_C / \sqrt{3} + a I_C / \sqrt{3})$ $= \frac{1}{3} I_C / \sqrt{3} (a - a^2)$ $= \frac{1}{3} I_C e^{j90^\circ}$
输出空载电压 $U_{mn} = U_R + U_C$ $= (I_a - \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c))R - j \frac{R}{\sqrt{3}}(I_b - I_c)$		$U_{mn} = (I_A / \sqrt{3})R - j \frac{R}{\sqrt{3}} \frac{I_A}{\sqrt{3}}$ $= \frac{I_A}{\sqrt{3}} \frac{R}{\sqrt{3}} (\sqrt{3} - j)$ $= \frac{2}{3} I_A R e^{-j30^\circ}$	$U_{mn} = (-I_B / \sqrt{3})R - j \frac{R}{\sqrt{3}} \frac{I_B}{\sqrt{3}}$ $= \frac{1}{3} I_B R (-\sqrt{3} - j)$ $= \frac{2}{3} I_B R e^{-j150^\circ}$	$U_{mn} = 0 - j \frac{R}{\sqrt{3}}(-I_C / \sqrt{3} - I_C / \sqrt{3})$ $= j \frac{R}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_C}{\sqrt{3}} (+2)$ $= \frac{2}{3} I_C R e^{-j90^\circ}$
完成负序分量输出空载电压	相量值	$U_{mn} = \frac{2}{3} I_A R e^{-j30^\circ}$ $\cdot 3e^{j30^\circ} I_{2a} = 2 I_{2a} R$	$U_{mn} = \frac{2}{3} R e^{-j150^\circ}$ $\cdot 3 I_{2a} e^{j150^\circ} = 2 I_{2a} R$	$U_{mn} = \frac{2}{3} R e^{j90^\circ} \cdot 3 I_{2a} e^{-j90^\circ}$ $= 2 I_{2a} R$
	绝对值	$U_{mn} = 2 I_{2a} R$	$U_{mn} = 2 I_{2a} R$	$U_{mn} = 2 I_{2a} R$
相量图	负序电流分量			
	负序电压输出			

3.3 变压器高压侧单相接地

变压器高压侧中性点如是接地的,当发生单相接地时,一相线圈就有电流通过。当 A 相接地时,电流分布如图 4 所示。此时有下述关系式:

$$I_A = I_k, I_B = I_C = 0$$

$$I'_A = I_A / \sqrt{3}, I'_B = I_A / \sqrt{3}, I'_C = -I_A / \sqrt{3}, I'_D = 0$$

$$I_{2a} = \frac{1}{3} (I_A / \sqrt{3} - a I_A / \sqrt{3}) = \frac{1}{3} I_A / \sqrt{3} (1 - a) = \frac{1}{3} I_A e^{-j30^\circ}$$

$$\begin{aligned} U_{mn} &= \left[I_A / \sqrt{3} - \frac{1}{3} (I_A / \sqrt{3} - I_A / \sqrt{3}) \right] R - j \frac{R}{\sqrt{3}} I_A / \sqrt{3} \\ &= \frac{R}{\sqrt{3}} I_A \left(1 - j \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = \frac{R}{3} I_A (\sqrt{3} - j) = \frac{2}{3} I_A \operatorname{Re}^{-j30^\circ} = 2 I_{2a} R \end{aligned}$$

取绝对值: $|U_{mn}| = |2 I_{2a} R|$ 对于 B 相或 C 相接地其分析结果示于表 6。

综合上述分析可知,负序电流继电器的灵敏度不随故障类型及接线方式而变。

由于负序电流继电器并不反应对称短路,因此,实际保护接线中,往往备有低压闭锁的过电流保护,以保护三相短路故障。可用一个电流继电器接于任何一相,使设备处于健康状态下投入运行。

4 防止误动的对策

为了避免因负序电流继电器的错误接线所带来的危险和隐患,要求继电保护现场工作人员还应着重以下几项电气试验方面进行检验,

4.1 CT 极性、变比、相序的校验应做到准确无误,标志清楚,并要求三相均一致。

4.2 平衡度的检查

利用试验设备从保护屏端子排处分别通入三相正序电流和三相负序电流,以检查装置内的接线有无错误及负序电流元件的平衡度和测试数据是否符合要求。

4.3 模拟不同相别故障时,负序电流继电器输出的电压:

由短路相量图分析得知,任意二相短路时, $I_k^{(2)} = \sqrt{3} I_2$ (通入的短路电流 $I_k^{(2)}$, 负序电流为 I_2) 任意单相接地短路时, $I_k^{(1)} = 3 I_2$, 不同相别单相接地时,理论分析空载输出电压 $U_{mn} = \frac{2}{3} I_k^{(1)} R = 2 I_2 R$, 而对不同相别两相故障短路时,空载输出电压 $U_{mn} = \frac{2\sqrt{3}}{3} I_k^{(2)} R = \frac{2\sqrt{3}}{3}$

$\sqrt{3} I_2 R = 2 I_2 R$, 由此可见,不同类别的相故障时,负序电流继电器稳态空载输出电压是一致的,详见表 4 与表 6 所示。仅测其有效值或平均值,并不涉及输出电压的相位关系,定值的离散率应是很小的,但考虑到暂态过程中的复杂影响及 L、H、R、C 参数的离散性,通常规定输出电压有一定的误差范围为 $\pm 5\%$ 。

4.4 对运行中的装置应定期利用负荷电流的大小,测试其负序电流继电器输出端所测出的不平衡电压大小的关系来正确判断出装置错误接线的性质,并找出错误的所在之处。