

电流互感器二次负荷值计算公式的推导

陕西省送变电工程公司设计队 张孝扬

电流互感器的变比 nI 选择的正确与否,直接影响着带有电流元件的继电保护装置的可靠性,用于继电保护装置的电流互感器,其误差不应超过一次电流最大值时所容许的误差范围,在按继电保护的要求选择电流互感器的型式与变比时,其一次电流与二次负荷的关系须不超10%误差特性曲线,以保证继电保护装置动作的准确性。

实用中须经常计算电流互感器的二次负荷,一些参考书中也已经列出了,电流互感器的各种接线方式下的各种短路故障下的计算公式,便利了计算的进行,但这些公式的推导至今还未有过详细的介绍,本文针对各种接线在各种短路故障下的公式作一番分析及推导。以便于概念的明确。

1. 线卷联结成Y/Δ-11的变压器两侧短路的分析

分析电流互感器在一次侧发生故障的情况下,二次侧电流的情况,可以把它看作是某一种线卷联结方式的变压器一侧发生故障,另一侧电流变化的情况,对于线卷联结成Y/Y,或Δ/Δ的变压器,问题较为简单,在任一侧发生短路时,两侧电流和电压的相位是相同的,而对于线卷联结成Y/Δ-11的变压器,不论在正常运行情况下或在短路情况下,变压器两侧电流,电压的数值和相位都须满足一定关系的要求,对于电流互感器二次侧电流的分析,完全可借助于对Y/Δ-11变压器任一侧短路另一侧电流数值和相位的分析,因此在讨论二次负值的计算公式之前,介绍一下在正常运行情况下,短路情况下接成Y/Δ-11的变压器两侧电流的相位和数值的关系是必要的。

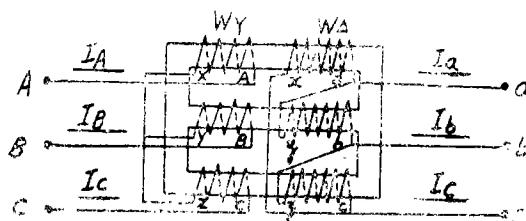


图1. 线卷联结成Y/Δ-11的变压器的接线说明图

图1中A、B、C, a、b、c分别表示变压器一次线卷和二次线卷的首端; X、Y、Z, x、y、z分别表示变压器一次和二次线卷的尾端; I_A 、 I_B 、 I_C 和 I_a 、 I_b 、 I_c 分别表示变压

器Y侧和△侧各相的线电流

图2为图1所示变压器的原理接线图，图中箭头所示方向选定为电流的正方向。为简单起见，假设变压比等于1，这相当于△侧线卷匝数 W_{Δ} 为Y侧线卷匝数的 $\sqrt{3}$ 倍即

$$W_{\Delta} = \sqrt{3}W_Y$$

(1) 求变压器两侧电流间的关系:

$$\text{由于 } \frac{W_Y}{W_{\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\therefore \dot{i}_{\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_A$$

$$\dot{i}_{\beta} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_B \quad (1)$$

$$\dot{i}_r = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_C$$

△侧的线电流 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 可求得为

$$\dot{I}_a = \dot{i}_{\alpha} - \dot{i}_{\beta}$$

$$\dot{I}_b = \dot{i}_{\beta} - \dot{i}_r$$

$$\dot{I}_c = \dot{i}_r - \dot{i}_{\alpha}$$

即相电流之差，将式(1)代入其中各项则得

$$\dot{I}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_A - \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_B = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B)$$

$$\dot{I}_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_B - \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_C = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_B - \dot{I}_C)$$

$$\dot{I}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_C - \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_A = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_C - \dot{I}_A)$$

如果已知 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c ，则同理可求得 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C

$$\dot{I}_a - \dot{I}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B) - \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_C - \dot{I}_A) = \frac{1}{\sqrt{3}} (2\dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} (3\dot{I}_A - \dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C)$$

$$\dot{I}_b - \dot{I}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_B - \dot{I}_C) - \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B) = \frac{1}{\sqrt{3}} (2\dot{I}_B - \dot{I}_A - \dot{I}_C)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} (3\dot{I}_B - \dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C)$$

$$\dot{I}_c - \dot{I}_b = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_C - \dot{I}_A) - \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_B - \dot{I}_C) = \frac{1}{\sqrt{3}} (2\dot{I}_C - \dot{I}_A - \dot{I}_B)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} (3\dot{I}_C - \dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C)$$

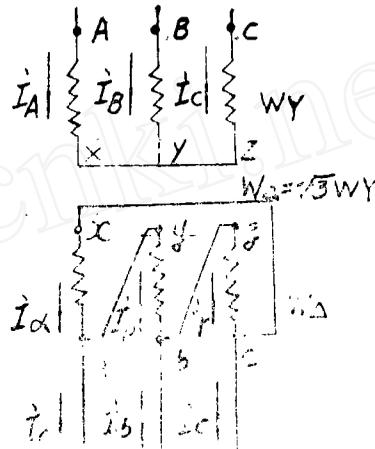


图2. 图1所示变压器的线卷的原理接线图

(2)

平衡系统中 $\dot{i}_A + \dot{i}_B + \dot{i}_C = 0$

$$\therefore \text{得 } \dot{i}_a - \dot{i}_c = \frac{3\dot{i}_A}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{i}_b - \dot{i}_a = \frac{3\dot{i}_B}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{i}_c - \dot{i}_b = \frac{3\dot{i}_C}{\sqrt{3}}$$

从而得到:

$$\dot{i}_A = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{i}_a - \dot{i}_c)$$

$$\dot{i}_B = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{i}_b - \dot{i}_a)$$

$$\dot{i}_C = -\frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{i}_c - \dot{i}_b)$$

(3)

(2) 当Y侧发生短路故障时求△侧的电流

a. 当Y侧发生三相短路时

Y侧的短路电流为: $\dot{I}_{KA}^{(3)}$ 、 $\dot{I}_{KB}^{(3)}$ 、 $\dot{I}_{KC}^{(3)}$

△侧的短路电流为

$$\dot{I}_{Ka}^{(3)} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{KA}^{(3)} - \dot{I}_{KB}^{(3)})$$

$$\dot{I}_{Kb}^{(3)} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{KB}^{(3)} - \dot{I}_{KC}^{(3)})$$

$$\dot{I}_{Kc}^{(3)} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{KC}^{(3)} - \dot{I}_{KA}^{(3)})$$

(4)

与正常运行的情况相同。

b. 当Y侧发生二相短路时, 求△侧的电流

当B、C二相发生短路, 这时。

$$\dot{I}_{KA}^{(2)} = 0 \quad \dot{I}_{KB}^{(2)} = -\dot{I}_{KC}^{(2)} \quad \text{代入式(2)}$$

$$\dot{I}_{Ka}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{KA}^{(2)} - \dot{I}_{KB}^{(2)}) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{KB}^{(2)}$$

$$\dot{I}_{Kb}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{KB}^{(2)} - \dot{I}_{KC}^{(2)}) = -\frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{KB}^{(2)}$$

$$\dot{I}_{Kc}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{KC}^{(2)} - \dot{I}_{KA}^{(2)}) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{KB}^{(2)}$$

(5)

根据式(5)求得的电流示于图3上。

当A、B二相发生短路时 $\dot{I}_{KB}^{(2)} = -\dot{I}_{KA}^{(2)}$ $\dot{I}_{KC}^{(2)} = 0$

同理可求得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{Ka}^{(2)} &= -\frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Kb}^{(2)} \\ \dot{I}_{Kb}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Kb}^{(2)} \\ \dot{I}_{Kc}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Kb}^{(2)} \end{aligned} \right\} (6)$$

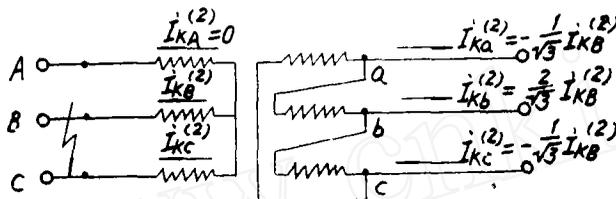


图3 Y侧BC二相短路, Δ侧电流分布图

当A、C二相发生短路时, $\dot{I}_{Kb}^{(2)} = 0$, $\dot{I}_{Ka}^{(2)} = -\dot{I}_{Kc}^{(2)}$
同理可求得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{Ka}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Ka}^{(2)} \\ \dot{I}_{Kb}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Ka}^{(2)} \\ \dot{I}_{Kc}^{(2)} &= -\frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Ka}^{(2)} \end{aligned} \right\} (7)$$

(3) 当Δ侧发生短路时, 求Y侧的电流

a. 当Δ侧发生三相短路时

Δ侧的电流为 $\dot{I}_{Ka}^{(3)}, \dot{I}_{Kb}^{(3)}, \dot{I}_{Kc}^{(3)}$

Y侧的电流为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{Ka}^{(3)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{Ka}^{(3)} - \dot{I}_{Kc}^{(3)}) \\ \dot{I}_{Kb}^{(3)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{Kb}^{(3)} - \dot{I}_{Ka}^{(3)}) \\ \dot{I}_{Kc}^{(3)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{Kc}^{(3)} - \dot{I}_{Kb}^{(3)}) \end{aligned} \right\} (8)$$

b. 当Δ侧发生二相短路时

当b、c二相发生短路时 $\dot{I}_{Kb}^{(2)} = -\dot{I}_{Kc}^{(2)}$, $\dot{I}_{Ka}^{(2)} = 0$ 代入式(3)

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{Ka}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{Ka}^{(2)} - \dot{I}_{Kc}^{(2)}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Kb}^{(2)} \\ \dot{I}_{Kb}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{Kb}^{(2)} - \dot{I}_{Ka}^{(2)}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Kb}^{(2)} \\ \dot{I}_{Kc}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{Kc}^{(2)} - \dot{I}_{Kb}^{(2)}) = -\frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Kb}^{(2)} \end{aligned} \right\} (9)$$

根据式(10)将求得的电流示于图4中

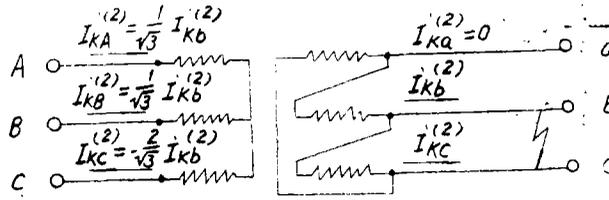


图4 Δ 侧bc二相短路, Y侧电流分布图

当a、b二相发生短路时, $\dot{I}_{Kb}^{(2)} = -\dot{I}_{Ka}^{(2)}$ $\dot{I}_{Kc}^{(2)} = 0$

按照同样的方法可得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{KA}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{Ka}^{(2)} - \dot{I}_{Kc}^{(2)}) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Kb}^{(2)} \\ \dot{I}_{KB}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{Kb}^{(2)} - \dot{I}_{Ka}^{(2)}) = \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Kb}^{(2)} \\ \dot{I}_{KC}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_{Kc}^{(2)} - \dot{I}_{Kb}^{(2)}) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Kb}^{(2)} \end{aligned} \right\} (10)$$

当a、c二相发生短路时 $\dot{I}_{Ka}^{(2)} = -\dot{I}_{Kc}^{(2)}$ $\dot{I}_{Kb}^{(2)} = 0$

按照同样的方法可得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{KA}^{(2)} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Ka}^{(2)} \\ \dot{I}_{KB}^{(2)} &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Ka}^{(2)} \\ \dot{I}_{KC}^{(2)} &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{Ka}^{(2)} \end{aligned} \right\} (11)$$

2. 电流互感器二次负担计算公式的推导

电流互感器的二次负担应考虑二次线卷本身的阻抗 $Z_{\Gamma H}$, 继电器电流线圈阻抗 R_P , 连接线的电阻 R_n , 及接触电阻 R_{ncP} (≈ 0.1 欧) 二次负担的计算应根据最大负荷相来进行, 并应考虑电流互感器的接线方式及短路类别。

$$\text{二次负担 } Z_{Hq\Gamma P} = \frac{U_{\Gamma}}{I_{\Gamma}}$$

其中 I_{Γ} : 为二次电流。

U_{Γ} : 为二次线卷端电压, 也等于二次电流流过负载时的回路总压降。

(1) 完全星形接线:

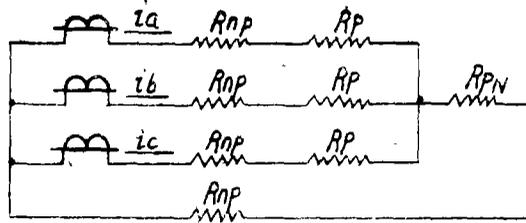


图 5

当一次侧发生三相短路二次侧电流是平衡的，每相电流互感器的负担为：

$$Z_{H\alpha TP} = \frac{U_T}{i_T}$$

$$U_T = i_T \cdot Z_{H\alpha TP} = i_T \cdot (R_{nP} + R_P)$$

$$\therefore Z_{H\alpha TP} = R_{nP} + R_P \quad \text{考虑接触电阻}$$

$$Z_{H\alpha TP} = R_{nP} + R_P + R_{\alpha TP}$$

当一次侧发生二相短路时，二次侧电流同于一次侧电流的变化，如果当 B、C 二相发生短路，在二次侧同样 $i_{2a}^{(2)} = 0$ 、 $i_{2b}^{(2)} = -i_{2c}^{(2)}$ 在 b、c 二相中电流大小相等，方向相反，对每相的电流互感器来讲它的二次负担，仍为

$$Z_{H\alpha TP} = R_{nP} + R_P + R_{\alpha TP}$$

无零序电流通过中线。

当一次侧发生单相接地时，二次电流变化仍同于一次，其中相应的一相有另序电流流经中线，这时该相电流互感器的二次负担为

$$Z_{H\alpha TP} = R_{nP} + R_P + R_{PN} + R_{\alpha TP} = 2R_{nP} + R_T + R_{PN}$$

考虑接触电阻， $Z_{H\alpha TP} = 2R_{\alpha TP} + R_P + R_{PN} + R_{\alpha TP}$

(2) 电流互感器的三角形接线

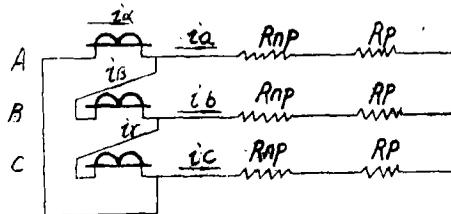


图 6

a. 当一次侧发生三相短路时，电流系统仍是平衡的，无零序分量通过，同于正常运行情况，以 a 相为例说明之：

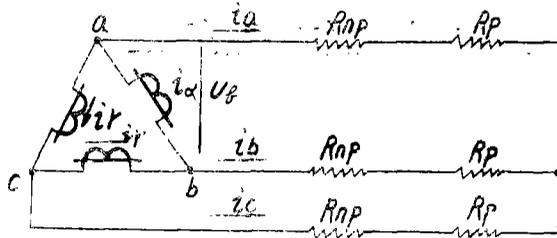


图 7

$$U_f = ia(R_{np} + R_p) - ib(R_{np} + R_p) = (ia - ib)(R_{np} + R_p)$$

$$= \sqrt{3} ia(R_{np} + R_p)$$

$$\text{又 } ia = \sqrt{3} ia$$

$$\therefore U_f = \sqrt{3} (\sqrt{3} ia) (R_{np} + R_p)$$

$$= 3 ia (R_{np} + R_p)$$

$$Z_{H_{aTP}} = \frac{U_f}{ia} = 3 (R_{np} + R_p)$$

考虑接触电阻 $Z_{H_{aTP}} = 3 (R_{np} + R_p) + R_{ncP}$

b. 一次侧发生两相短路：假设 B、C 二相短路。我们可借助前面第 1 节的分析可知，

$$\dot{I}_{KA}^{(2)} = 0, \dot{I}_{KB}^{(2)} = -\dot{I}_{KC}^{(2)}, \Delta \text{ 结线的电流互感器二次侧的线电流为式 (5)}$$

$$\dot{I}_{Ka}^{(2)} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{KB}^{(2)}$$

$$\dot{I}_{Kb}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{KB}^{(2)}$$

$$\dot{I}_{Kc}^{(2)} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{KB}^{(2)}$$

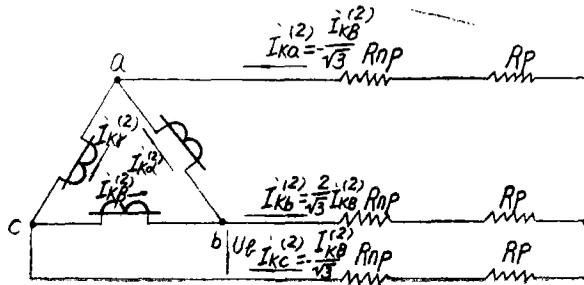


图 8

$$U_f = \dot{I}_{Kb}^{(2)} (R_{np} + R_p) - \dot{I}_{Kc}^{(2)} (R_{np} + R_p)$$

$$= \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{KB}^{(2)} + \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{KB}^{(2)} \right) (R_{np} + R_p)$$

$$= \sqrt{3} \cdot \frac{\dot{I}_{K\beta}^{(2)}}{I_{K\beta}} (R_{nP} + R_P)$$

由前面分析可知

$$\sqrt{3} \cdot \frac{\dot{I}_{K\beta}^{(2)}}{I_{K\beta}} = \frac{\dot{I}_{K\beta}^{(2)}}{I_{K\beta}}$$

$$\therefore U_F = \sqrt{3} \times \sqrt{3} \cdot \frac{\dot{I}_{K\beta}^{(2)}}{I_{K\beta}} (R_{nP} + R_P)$$

$$= 3 \cdot \frac{\dot{I}_{K\beta}^{(2)}}{I_{K\beta}} (R_{nP} + R_P)$$

$$\therefore Z_{H\alpha GP} = \frac{U_F}{\frac{\dot{I}_{K\beta}^{(2)}}{I_{K\beta}}} = 3 (R_{nP} + R_P)$$

考虑接触电阻

$$Z_{H\alpha GP} = 3 (R_{nP} + R_P) + R_{neP}$$

(3) 两相式电流互感器的不完全星形接线

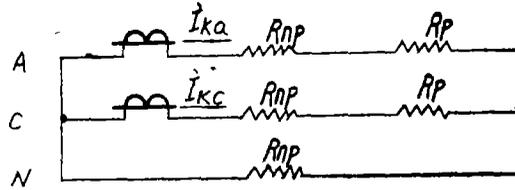


图 9

a. 一次侧发生三相短路, 二次侧电流仍是平衡的, 通过中性线的电流为 $\dot{I}_{Ka} + \dot{I}_{Kc}$

$$\therefore U_F = \dot{I}_{Ka} (R_{nP} + R_P) + (\dot{I}_{Ka} + \dot{I}_{Kc}) R_{nP}$$

$$= \dot{I}_{Ka} (R_{nP} + R_P) - \dot{I}_{Kb} (R_{nP})$$

$$= \dot{I}_{Ka} (R_{nP} + R_P) - I_{Ka} e^{j120^\circ} R_{nP}$$

$$= \left(\frac{3}{2} - j0.866 \right) \dot{I}_{Kb} R_{nP} + \dot{I}_{Ka} R_P$$

$$\therefore Z_{H\alpha GP} = \frac{U_F}{\dot{I}_{Ka}} = (1.5 - j0.866) R_{nP} + R_P$$

考虑接触电阻

$$Z_{H\alpha GP} = (1.5 - j0.866) R_{nP} + R_P + R_{neP}$$

b. 一次侧发生二相短路: 当一次侧 A、C 二相发生短路

$$\text{二次侧电流 } \frac{\dot{I}_{Ka}^{(2)}}{I_{Ka}} = - \frac{\dot{I}_{Kc}^{(2)}}{I_{Kc}}$$

中性线上无电流流过, 每相电流互感器流过同一电流

$$\therefore U_F = \frac{\dot{I}_{Ka}^{(2)}}{I_{Ka}} (R_{nP} + R_P)$$

$$\therefore Z_{H\alpha GP} = \frac{U_f}{I_{Ka}(2)} = R_{n1} + R_p$$

当一次侧发生 A、B 或 B、C 二相短路，中性线上有电流流过，其大小等于故障电

$$U_f = \dot{I}_{Kb}(2)(R_{n1} + R_p) + \dot{I}_{Kb}(2)R_{n1} = \dot{I}_{Kb}(2)(2R_{n1} + R_p)$$

$$\therefore Z_{H\alpha GP} = \frac{U_f}{\dot{I}_{Kb}(2)} = 2R_{n1} + R_p$$

考虑接触电阻

$$Z_{H\alpha GP} = 2R_{n1} + R_p + R_{ne1}$$

C. 当一次侧发生单相接地短路，在电流互感器二次侧故障相电流将流经中性线构成环路，这样

$$Z_{H\alpha GP} = 2R_{n1} + R_p + R_{ne1}$$

(4) 两相电流互感器的差接线

a. 一次侧发生三相短路

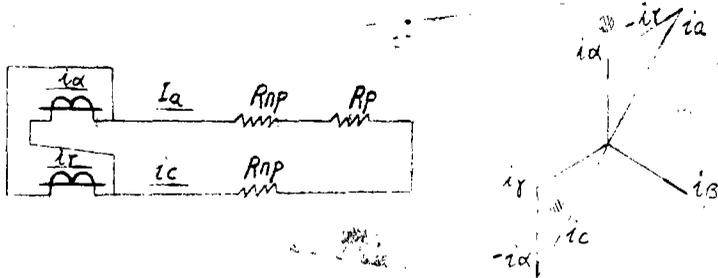


图 10

$$U_f = ia(R_{n1} + R_p + R_{n1})$$

$$ia = \sqrt{3}ir$$

$$U_f = \sqrt{3}ir(2R_{n1} + R_p)$$

$$Z_{H\alpha GP} = \frac{U_f}{ir} = \sqrt{3}(2R_{n1} + R_p)$$

考虑接触电阻

$$Z_{H\alpha GP} = \sqrt{3}(2R_{n1} + R_p) + R_{ne1}$$

b. 二相短路，若一次侧 A、C 两相短路，二次侧电流

$$ia = -ir$$

$$U_f = ia(2R_{n1} + R_p)$$

$$ia = ia - ir$$

$$\therefore ia = 2ia$$

$$\therefore U_f = 2ia(2R_{n1} + R_p)$$

$$Z_{H_{aGP}} = \frac{U_P}{i_a} = 4R_{nP} + 2R_P$$

考虑接触电阻 $Z_{H_{aGP}} = 4R_{nP} + 2R_P + R_{ncP}$

C. 二相短路若一次侧 B、C 或 A、B 两相短路则根据第 1 节分析可知，两只差接的电流互感器中有一相电流为 0

$$\therefore Z_{H_{aGP}} = 2R_{nP} + R_P + R_{ncP}$$

(5) 二只电流互感器的串联接线，每只电流互感器的二次端电压为

$$U_{P'} = \frac{1}{2} U_G = \frac{1}{2} i_G (2R_{nP} + R_P)$$

$$Z_{H_{aGP}} = \frac{U_{P'}}{i_G} = \frac{1}{2} (2R_{nP} + R_P)$$

考虑接触电阻 $Z_{H_{aGP}} = \frac{1}{2} (2R_{nP} +$

$R_P) + R_{ncP}$ 阻抗减少一半。

(6) 二只电流互感器的并联接线，

每只电流互感器的二次端电压为

$$U_G = 2i_G (2R_{nP} + R_P)$$

$$Z_{H_{aGP}} = \frac{U_G}{i_G} = 4R_{nP} + 2R_P$$

考虑接触电阻 $Z_{H_{aGP}} = 4R_{nP} + 2R_P + R_{ncP}$ 阻抗增大一倍。

(7) 电流互感器的差动接线

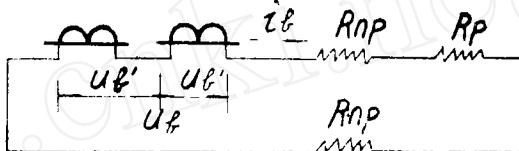


图 11

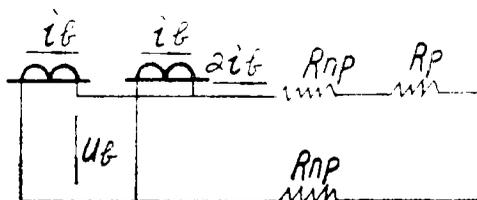


图 12

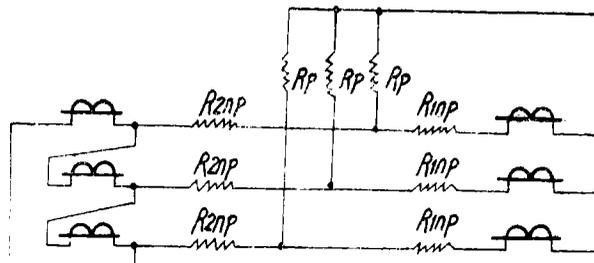


图 13

星形接线的电流互感器的二次负担根据前面分析可知为

$$Z_{H_{aGP}} = R_{nP} + R_P + R_{ncP}$$

三角形接线的电流互感器的二次负担，根据前面分析可知为

$$Z_{H_{aGP}} = 3(R_{nP} + R_P) + R_{ncP}$$