

AT供电区段“十字交叉接线”变压器保护方式

铁道部电气化工程局设计院 杨建国

摘要

本文根据电气化铁道供电及“十字交叉接线变压器”的特点，提出并验证了主变压器差动保护接线方式、整定计算方法、电流互感器变比选择原则。

本文还对“十字交叉变压器”的过电流及过负荷保护设置、整定特点进行了分析。

本文的保护方式，系国内外首次提出，已被模拟试验，大秦西段电气化铁道的运行实践所证实。

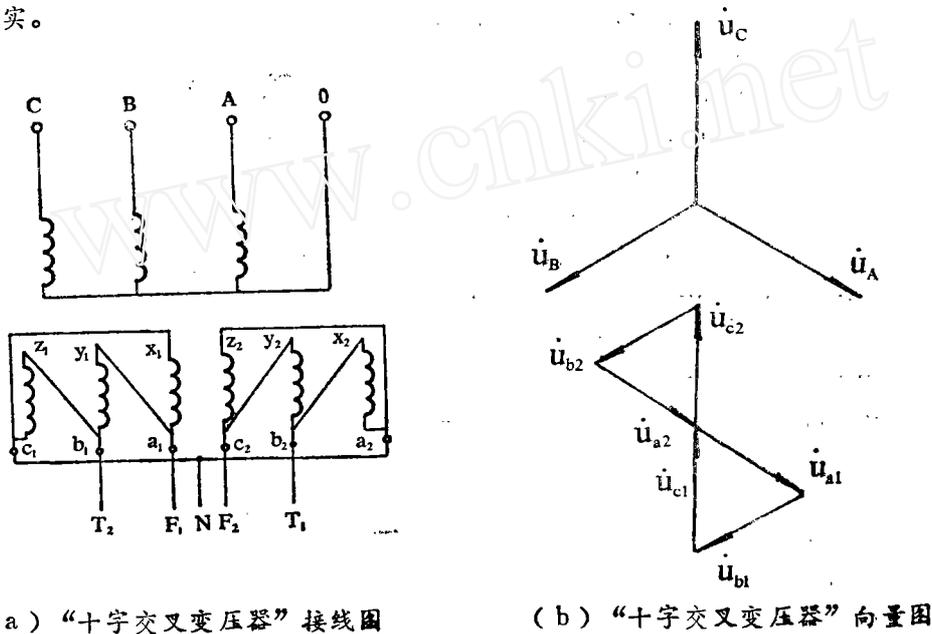


图1 “十字交叉变压器”接线图向量图

前 言

电气化铁道采用“十字交叉接线变压器”，在国内外系首创。为解决其保护方式，笔者进行了一系列分析研究，于1986年提出了具体方案，1987年据此进行了大同——秦皇岛电气化铁道两变电所的施工设计。1988年初，我和有关同志对差动保护进行了模拟试验，同年12月，两变电所投入运行，至今运行正常。理论分析、模拟试验、实际运行都

证明该方案是切实可行的。

“十字交叉变压器”是把一台 $\gamma/\Delta-11$ 、 $\Delta-1$ 三绕组变压器（变比为 $110\text{kV}/27.5\text{kV}$ 、 27.5kV ）的两个角接的低压绕组对顶连接而成，图1为其接线与向量图。

根据继电保护规程要求，变压器设有差动过电流，过负荷等保护。

一 差动保护方式

（一）保护接线方式

差动保护是变压器的主保护。其保护范围是变压器绕组及引线的多相短路、高压侧单相接地短路、绕组的匝间短路等。

“十字交叉变压器”是三绕组变压器，不同于 γ/Δ 及斯科特变压器。因此差动保护接线与以往的接线也不同。

该变压器与电力系统用三绕组变压器接线有两点不同。其一，电力变压器三个绕组彼此独立，而该变压器两个低压绕组有一个公共点和引线。因而该变压器在不同运行或事故状态，其电流分布情况要复杂的多，怎样取出各侧电流构成差动回路，也困难的多。其二，该变压器的三侧电流相位各不相同，如何补偿相位不同引起的不平衡电流，也困难的多。因而也不能采用电力系统三绕组变压器的保护接线。针对上述问题，经比较选择确定了图2所示的保护接线。其特点是，变压器高压侧（星形侧）电流互感器采用三

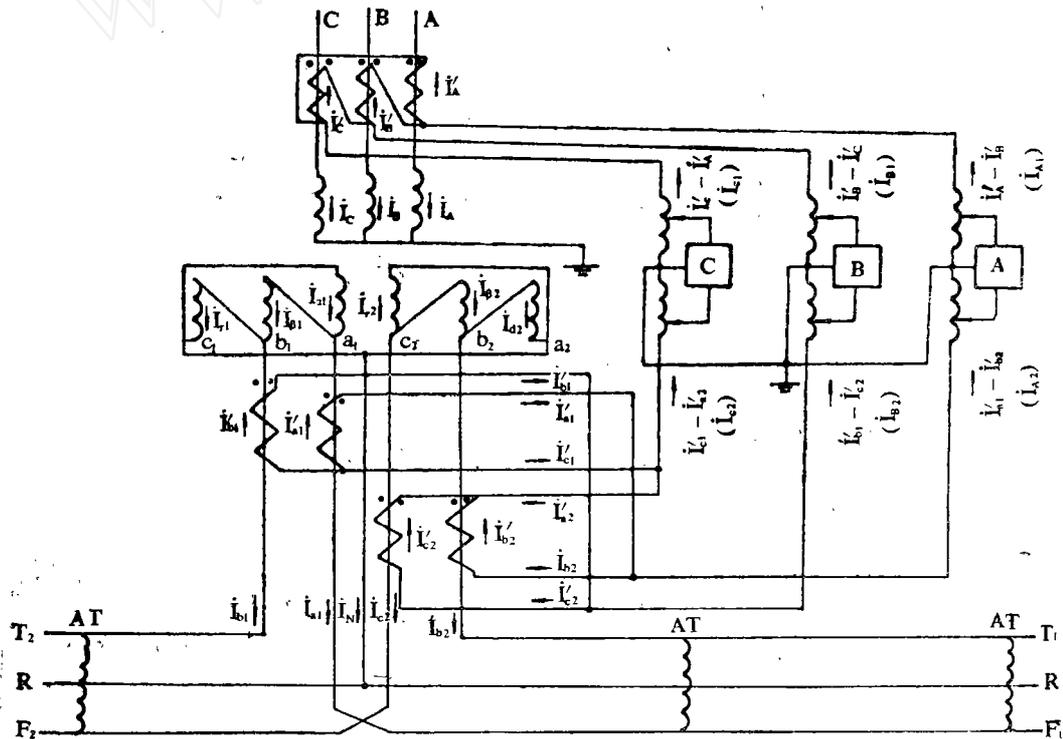


图2 差动保护接线及平衡负荷时电流分布图

角形接线，低压侧（三角形侧）采用二相不完全星形联接，（公共线上不设电流互感器）。这样既妥善解决了各侧电流取出及相位补偿问题，也可避免高压侧区外单相接地短路时，差动继电器因零序电流而误动。

（二）相位分析

为便于分析，设：

变压器的励磁电流为零。

变压器的一、二次变压比 $\frac{V_1}{V_2} = 1$ 。

高压侧电流互感器一、二次变比为 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 。

低压侧电流互感器一、二次变比为 1。

则 变压器绕组的匝数比 $\frac{W_\Delta}{W_Y} = \sqrt{3}$ 。

变压器各侧相电流比 $\frac{I_Y}{I_\Delta} = \sqrt{3}$

高压侧互感器一、二次电流比为 $\sqrt{3}$ 。

低压侧电流互感器一、二次电流比为 1。

在三相平衡负载下，变压器、互感器、继电器中的电流分布及向量图见图 3、3。

且有：

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}'_A - \dot{I}'_B = \frac{\dot{I}_A}{\sqrt{3}} - \frac{\dot{I}_B}{\sqrt{3}} = \dot{I}_A \angle 30^\circ \quad (1-1)$$

$$\dot{I}_{B1} = \dot{I}'_B - \dot{I}'_C = \frac{\dot{I}_B}{\sqrt{3}} - \frac{\dot{I}_C}{\sqrt{3}} = \dot{I}_B \angle 30^\circ \quad (1-2)$$

$$\dot{I}_{C1} = \dot{I}'_C - \dot{I}'_A = \frac{\dot{I}_C}{\sqrt{3}} - \frac{\dot{I}_A}{\sqrt{3}} = \dot{I}_C \angle 30^\circ \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A2} &= \dot{I}'_{a1} - \dot{I}'_{a2} = \dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1} = (\dot{I}_{a1} - \dot{I}_{b1}) - (\dot{I}_{b2} - \dot{I}_{a2}) \\ &= \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\sqrt{3}} + \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\sqrt{3}} = 2 \dot{I}_A \angle 30^\circ \quad (1-4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{B2} &= \dot{I}'_{b1} - \dot{I}'_{c2} = \dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c2} = (\dot{I}_{b1} - \dot{I}_{r1}) - (\dot{I}_{r2} - \dot{I}_{b2}) \\ &= \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_C}{\sqrt{3}} + \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_C}{\sqrt{3}} = 2 \dot{I}_B \angle 30^\circ \quad (1-5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{C2} &= \dot{I}'_{c1} - \dot{I}'_{a2} = \dot{I}_{c1} - \dot{I}_{a2} = (\dot{I}_{r1} - \dot{I}_{a1}) - (\dot{I}_{a2} - \dot{I}_{r2}) \\ &= \frac{\dot{I}_C - \dot{I}_A}{\sqrt{3}} + \frac{\dot{I}_C - \dot{I}_A}{\sqrt{3}} = 2 \dot{I}_C \angle 30^\circ \quad (1-6) \end{aligned}$$

式中 \dot{I}_{A1} 、 \dot{I}_{B1} 、 \dot{I}_{C1} ——分别为变压器高压侧互感器 流进 A、B、C 相继电器

的电流。

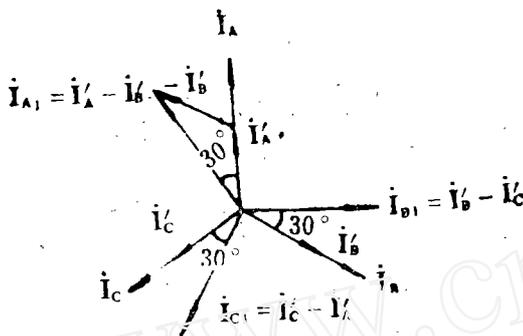
$\dot{I}_{A2}, \dot{I}_{B2}, \dot{I}_{C2}$ ——分别为变压器低压侧互感器流进A、B、C相继电器的电流。

$\dot{I}'_A, \dot{I}'_B, \dot{I}'_C$ ——分别为变压器高压侧A、B、C相互感器二次侧电流。

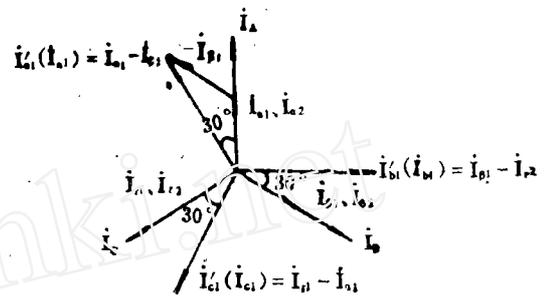
$\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{a2}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{b2}, \dot{I}_{c1}, \dot{I}_{c2}$ ——分别为变压器低压侧线电流。

$\dot{I}'_{a1}, \dot{I}'_{b2}, \dot{I}'_{b1}, \dot{I}'_{c2}, \dot{I}'_{c1}, \dot{I}'_{c2}$ ——分别为变压器低压侧互感器二次电流。

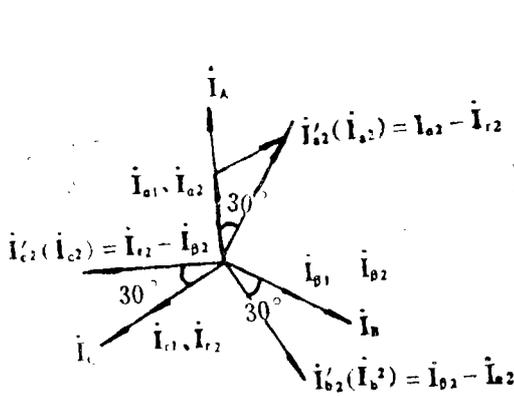
$\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{a2}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{b2}, \dot{I}_{r1}, \dot{I}_{r2}$ ——分别为变压器低压绕组相电流。



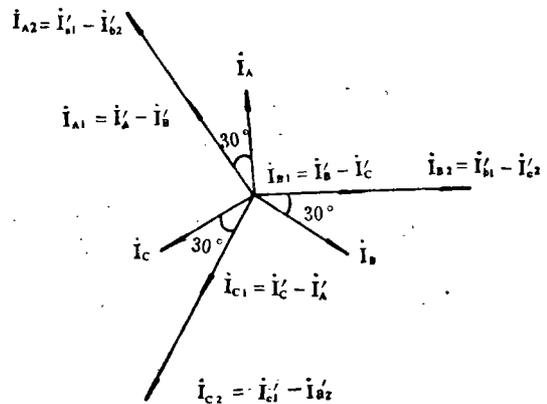
(a) 110kV侧电流向量图



(b) 2 x 27.5kV Δ-11侧电流向量图



(c) 2 x 27.5kV Δ-1侧电流向量图



(d) 各侧继电器电流向量图

图3 平衡负载时变压器、互感器、继电器电流向量图

由上述分析并结合图2、图3可知，该种接线，对于每相继电器来说，各侧电流的相位相同，且电流有“进”有“出”，完全满足差动保护的相位要求。

(三) 电流互感器变比选择

众所周知，差动保护除了对各侧电流有相位要求之外，还必须满足在正常运行或区外故障时，继电器差动绕组中的不平衡电流应基本为零。（注：这是假设继电器两侧配合抽头值相等，按电流平衡原则进行分析的，下同。若不等，则差动绕组中会有电流，此时应按磁势平衡的原则，判断继电器是否会动作。）这要靠正确选择各侧互感器的变比及正确进行继电器整定实现。

“十字交叉变压器”差动保护用电流互感器变比选择，和一般三绕组变压器一样，不能按变压器各侧自己的容量计算，而按变压器的最大侧容量计算(110kV侧容量 Se)。

$$110\text{kV侧 } n_{\gamma} = \frac{\sqrt{3}Se(\text{kVA})}{\sqrt{3} \times 110(\text{kV})} / 5 (\text{A}) = \frac{Se}{110} / 5 \quad (1-7)$$

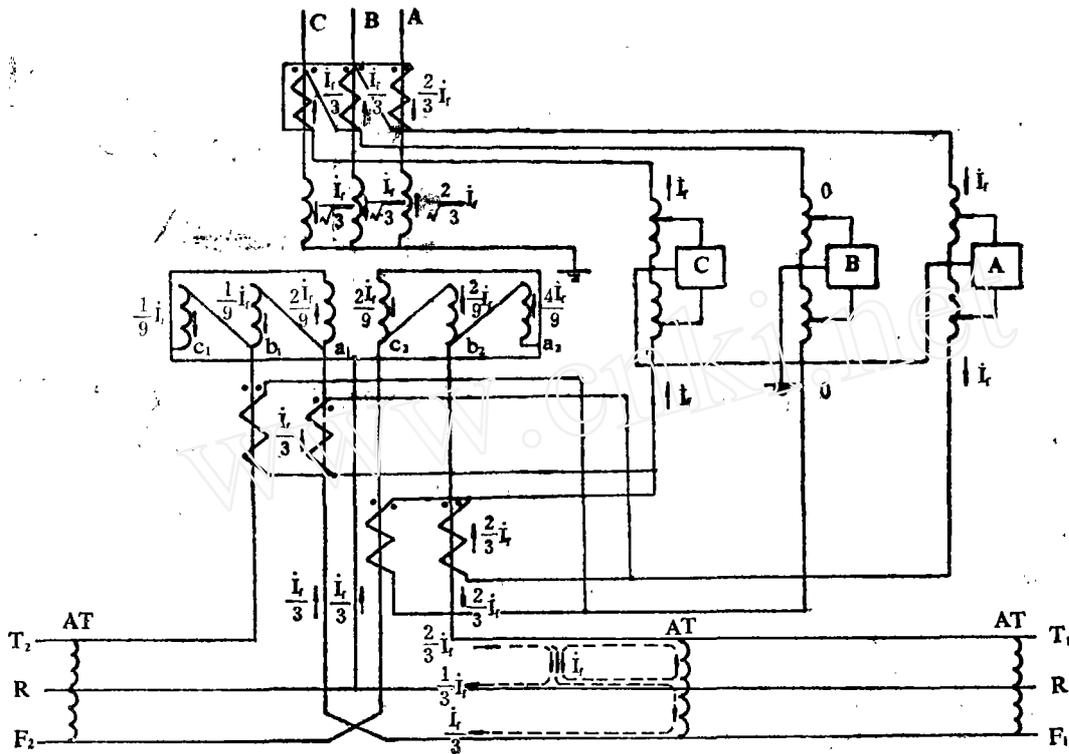


图4 在第一AT段内有负荷(短路)时的电流分布

$$2 \times 25\text{kV侧 } n_{\Delta} = \frac{Se(\text{kVA})}{\sqrt{3} \times 27.5(\text{kV})} / 5 (\text{A}) = \frac{Se}{\sqrt{3} \times 27.5} / 5 \quad (1-8)$$

式中： n_{γ} 、 n_{Δ} ——分别为110kV、 $2 \times 25\text{kV}$ 侧电流互感器变比。

选择大于且接近上述计算值的互感器的标准变比即可。

(四) 差动保护动作行为分析

理想的差动保护，应能在保护区内故障时可靠、灵敏地动作，在正常运行或保护区

外故障时，保护应可靠地不动作。

1. 正常运行及区外故障时动作行为分析

(1) 负荷在第一个AT段内（或第一AT段内发生T—R短路）时。

此时负荷或事故电流由二部分组成——55kV及27.5kV部分电流。55kV部分电流，由两个角接的变压器低压绕组供给，按AT供电方式工作，另一部分按直供方式，由一个低压绕组供给。参见图4。负荷或故障点离变电所越近，27.5kV部分电流比例就越大。但无论怎样移动，一相继电器中始终无电流，另二继电器中，仅制动绕组中有电流，三相继电器都不会误动作。段内其它类型的故障情况相同。（注：图中 i_f 在 T_1 、R、F上的分配比例系段内特定点的值得。不同点短路或有负荷，图中数值都变化，但结论都是一样的。

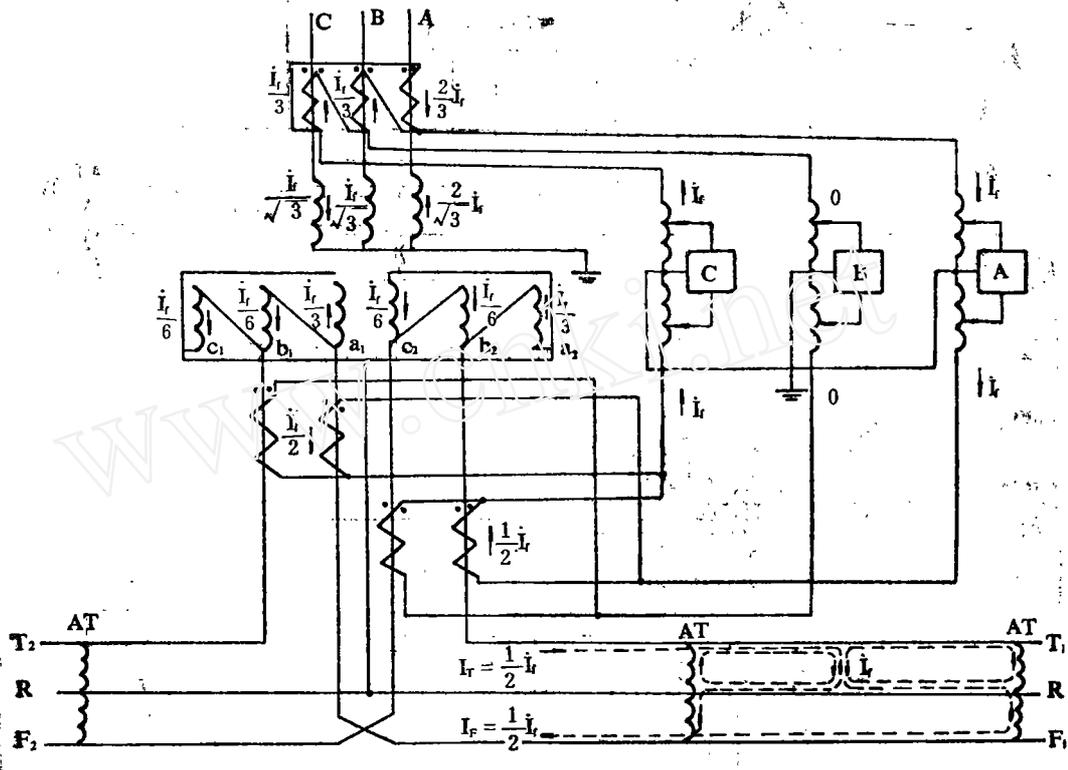


图5 在第一AT段外的其它AT段内有负荷（短路）时的电流分布

(2) 负荷（或T—R短路）在其它段内。

见图5，此时T、F线电流相等，为负荷或故障电流的一半。三相继电器都不会误动作。段内其它类型故障情况相同。

(3) 两供电臂同时有负荷或故障

两臂同时有负荷、故障及他们的各种组合时，对每一个负荷或故障电流，反映到继电器差动绕组中都为零，各电流迭加后的总电流，反映到差动绕组中也必然是零。所以继电器不会误动。参见图6。

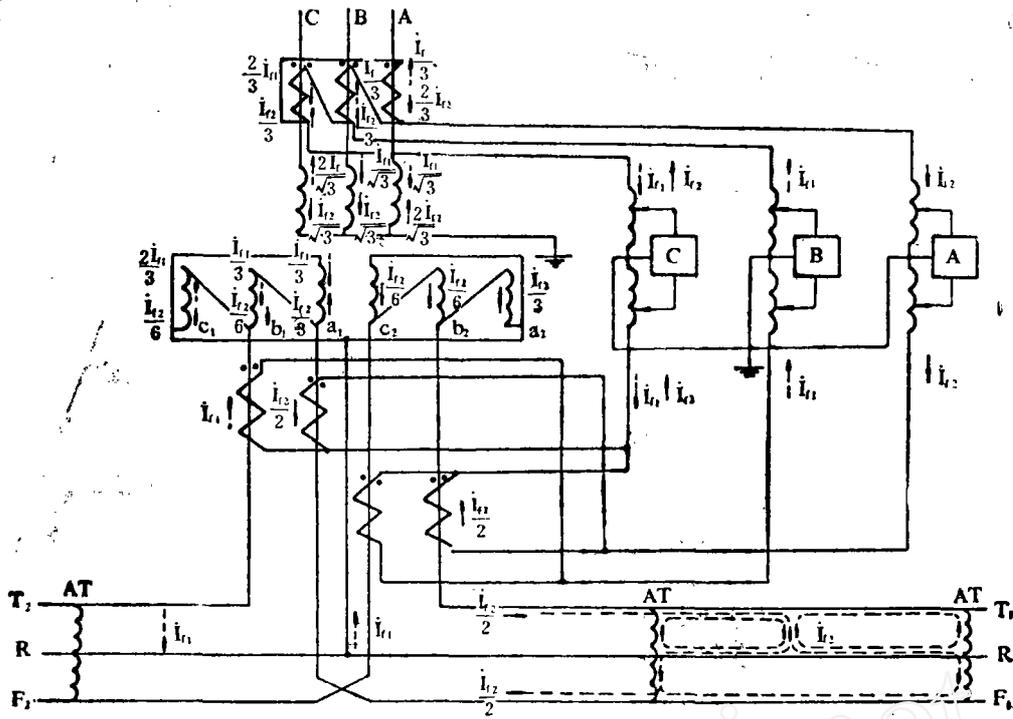


图6 两供电臂都有负荷或短路时的电流分布

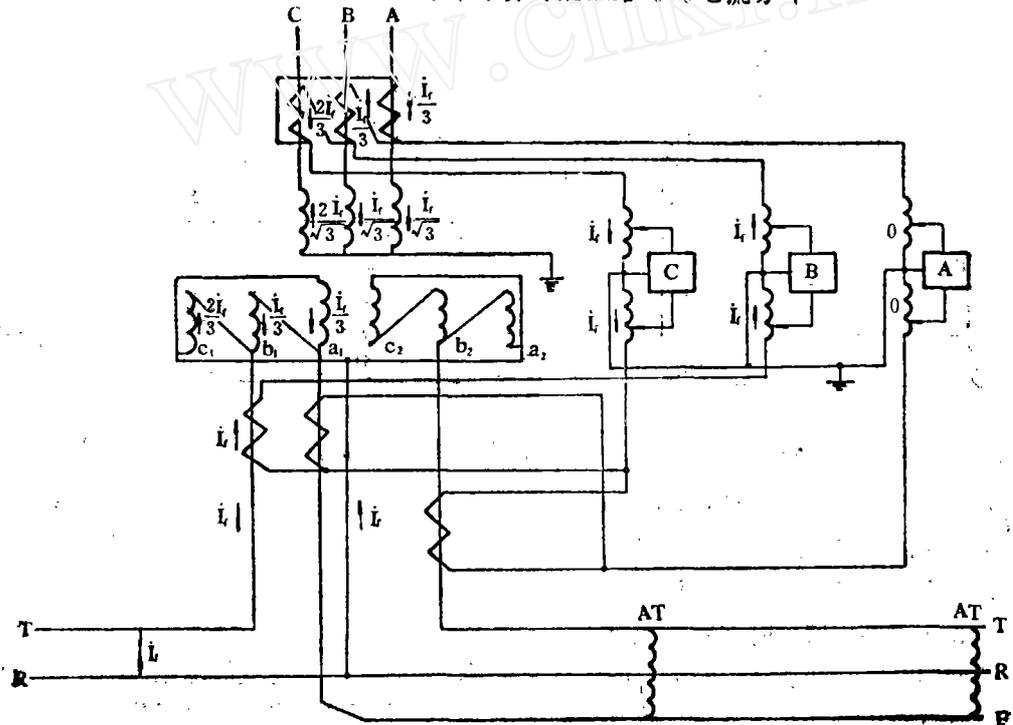


图7 一供电臂按BT(直供方式运行时保护接线及电流分布

(4) 一供电臂按BT(直供)方式接线,该臂有负荷或故障时。

有时为了和既有电气化铁路协调,在AT变电所中,可能把一供电臂按BT(直供)方式接线。此时保护接线有所不同,其电流分布也有不同,但本保护方式仍能正常工作。区外故障及正常运行时保护不会误动作。见图7所示。

总之,该差动接线方式,不管两臂负荷如何变化,区外发生何种故障,差动保护都不会误动作。

2. 差动保护区内发生故障时

差动保护区内故障,包括变压器高、低压侧的多相短路,单相接地短路,绕组匝间短路等。现分别作以分析。

(1) 变压器高压侧发生三相短路

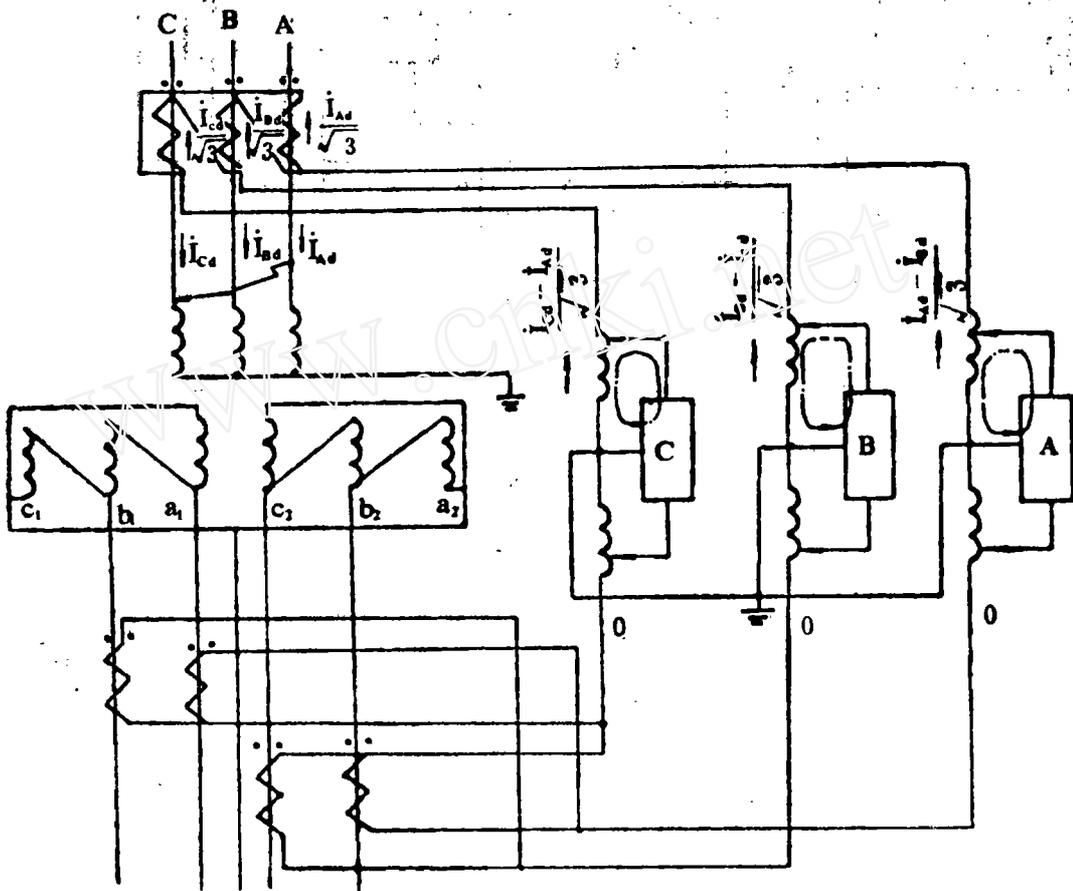


图8 高压侧发生三相短路时电流分布图

高压侧三相短路,电流仅通过高压侧互感器,继电器的一半制动绕组及差动绕组,三相继电器以相同的动作灵敏度同时动作。(电流分布推导方法其它书中多有介绍,在此不再赘述。下同)。参见图8所示。

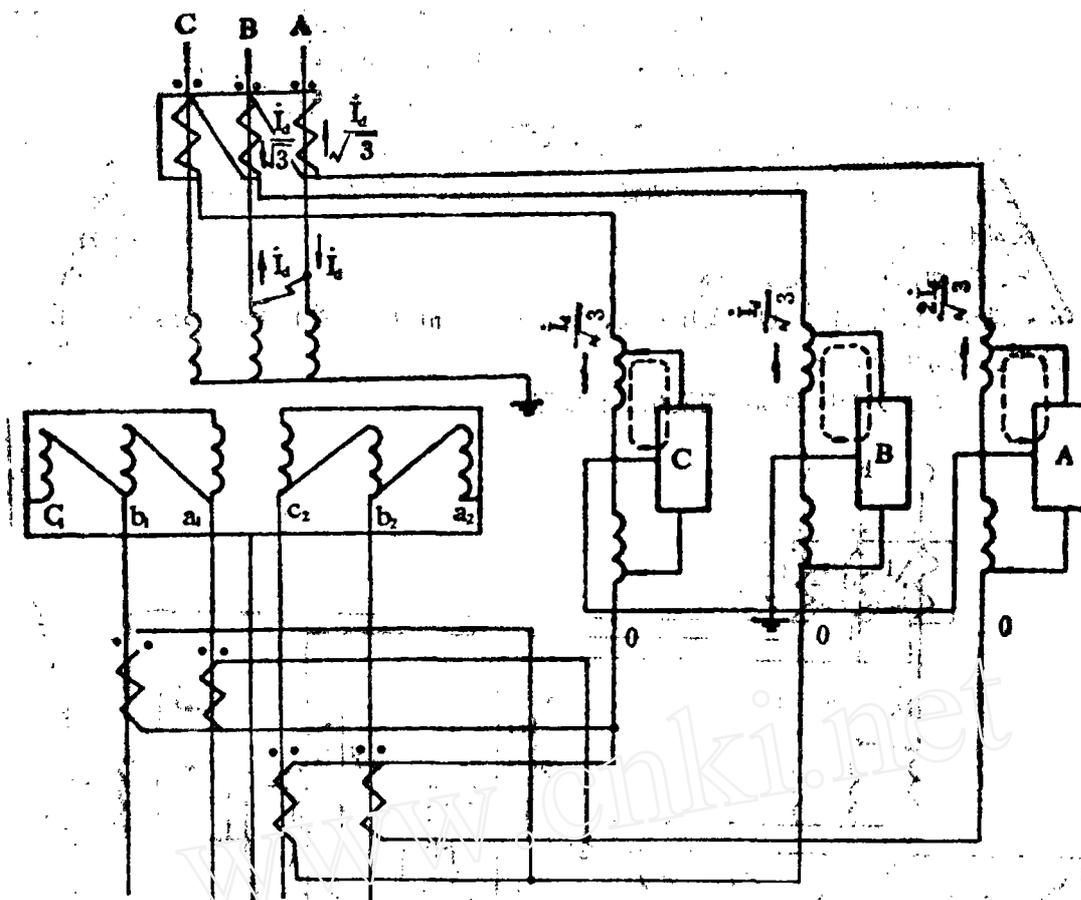


图9 变压器高压侧A—B相短路时电流分布图

(2) 变压器高压侧两相短路

此时，电流仅通过高压侧两相电流互感器及继电器的一半制动绕组和差动绕组，三相继电器均动作，但一相继电器动作灵敏度是另两相的两倍。参见图9。

$$\text{A、B相短路 } K_{LmA} = 2K_{LmB} = 2K_{LmC} \quad (1-9)$$

$$\text{B、C相短路 } K_{LmB} = 2K_{LmA} = 2K_{LmC} \quad (1-10)$$

$$\text{C、A相短路 } K_{LmC} = 2K_{LmA} = 2K_{LmB} \quad (1-11)$$

式中 K_{LmA} 、 K_{LmB} 、 K_{LmC} ——分别为A、B、C相继电器动作的灵敏度。

(3) 高压侧单相接地

因变压器高压侧有中性点不接地运行（经常运行方式）和接地运行（不常用方式）之分，两种运行方式，单相接地时，变压器内电流分布情况不同，故在图10、11中分别

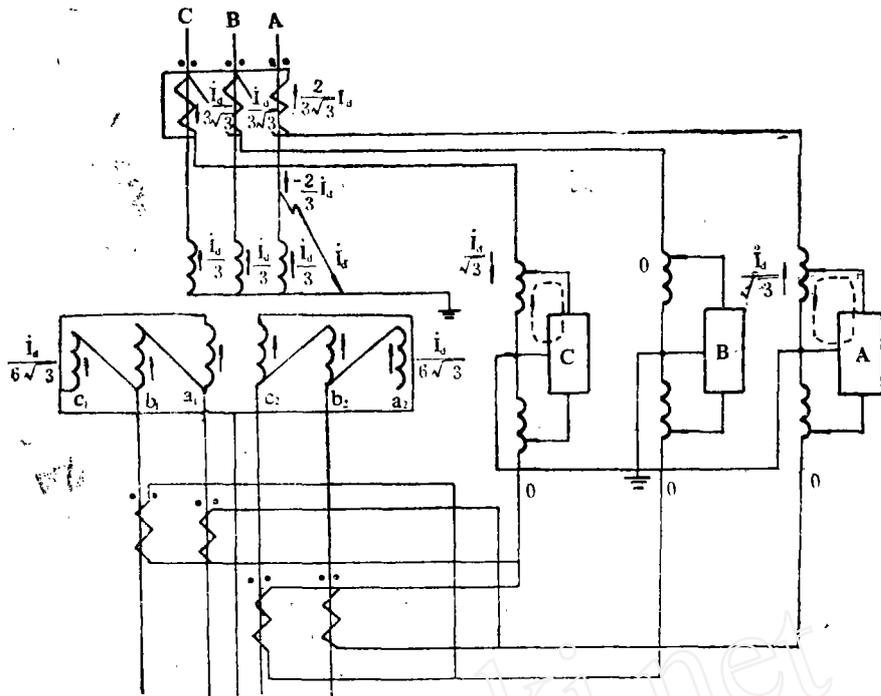


图10 变压器高压侧单相接地(变压器中性点接地)时电流分布

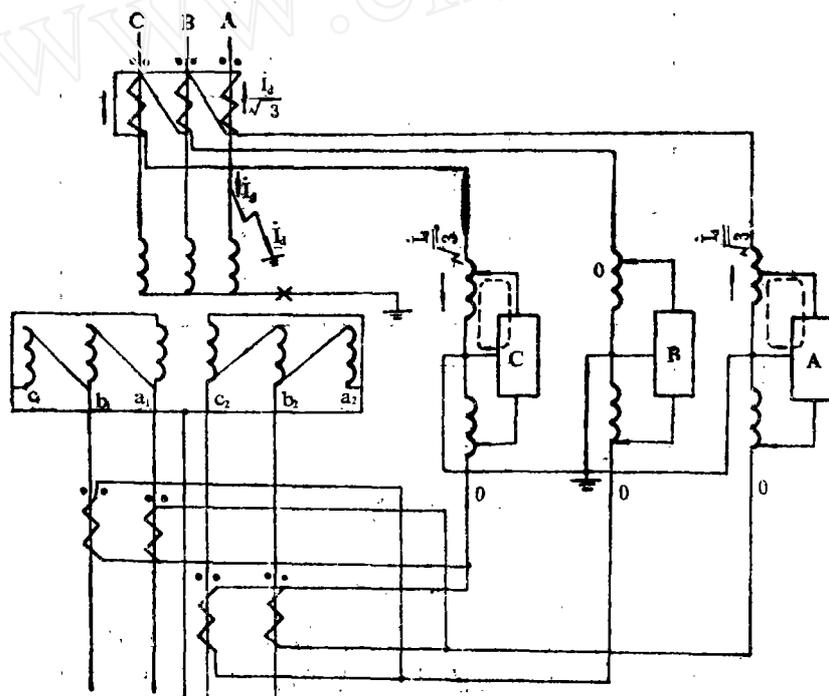


图11 变压器高压侧单相接地(变压器中性点不接地)时电流分布

示出。但两种情况动作的继电器及动作灵敏度相同。

A相接地 A、C相继电器动作。

B相接地 A、B相继电器动作。

C相接地 B、C相继电器动作。

(4) 变压器绕组匝间短路

变压器高压侧及低压侧绕组匝间短路时，都“可能”有两相继电器动作，动作灵敏度两继电器相同。高压侧C相绕组匝间短路时，电流分布见图12所示。

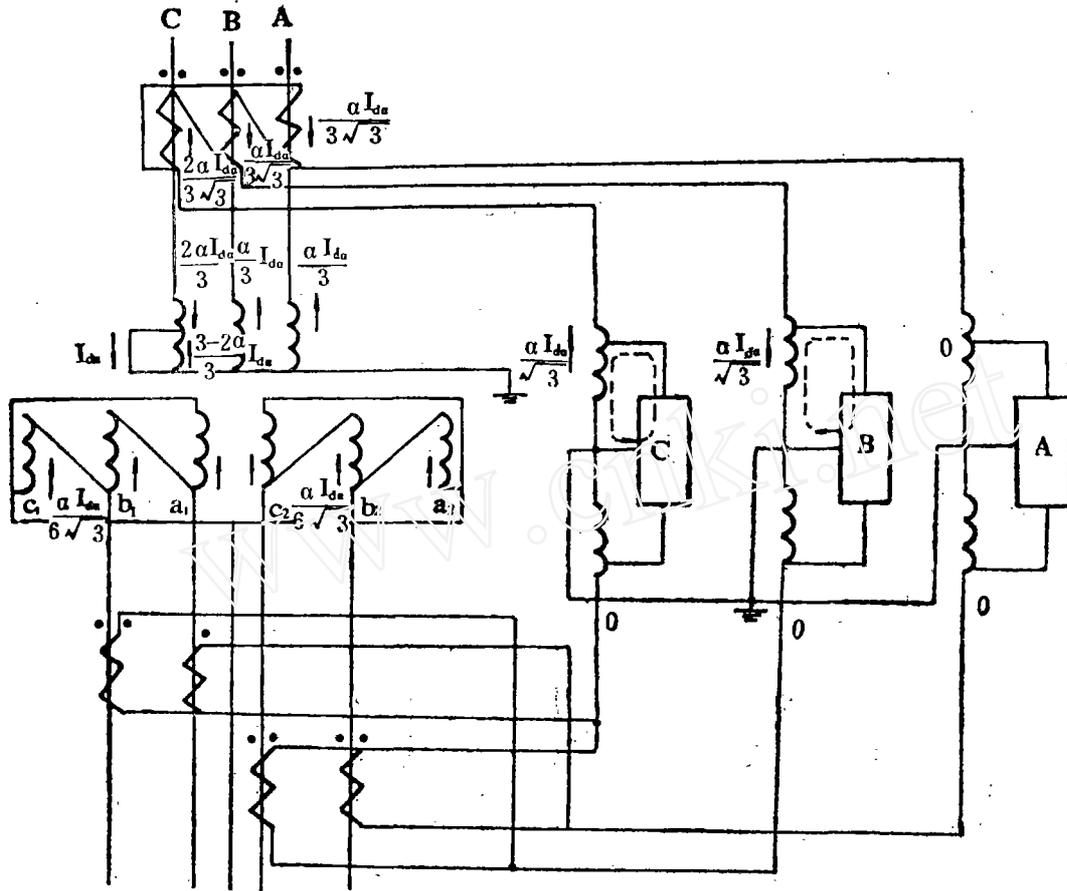


图12 变压器发生高压侧匝间短路时电流分布图

A、a₁、a₂相匝间短路 A、C相继电器“可能”动作。

B、b₁、b₂相匝间短路 A、B相继电器“可能”动作。

C、c₁、c₂相匝间短路 B、C相继电器“可能”动作。

“可能”——若绕组的短路匝数和总匝数之比很小时，即使短路匝数内的短路电流很大，但电源流入变压器的短路电流仍然可能很小，保护动作的灵敏度就很低，甚至不能动作。（事故扩大到一定程度仍能动作）。反之，保护就能动作。为防止上述情况发

生，应尽可能选用动作灵敏度高的继电器，具有谐波制动的比率差动继电器，是比较理想的。尽管如此，反映非电气量的瓦斯（压力）保护仍是不可缺少的。

(5) 变压器低压侧三相短路

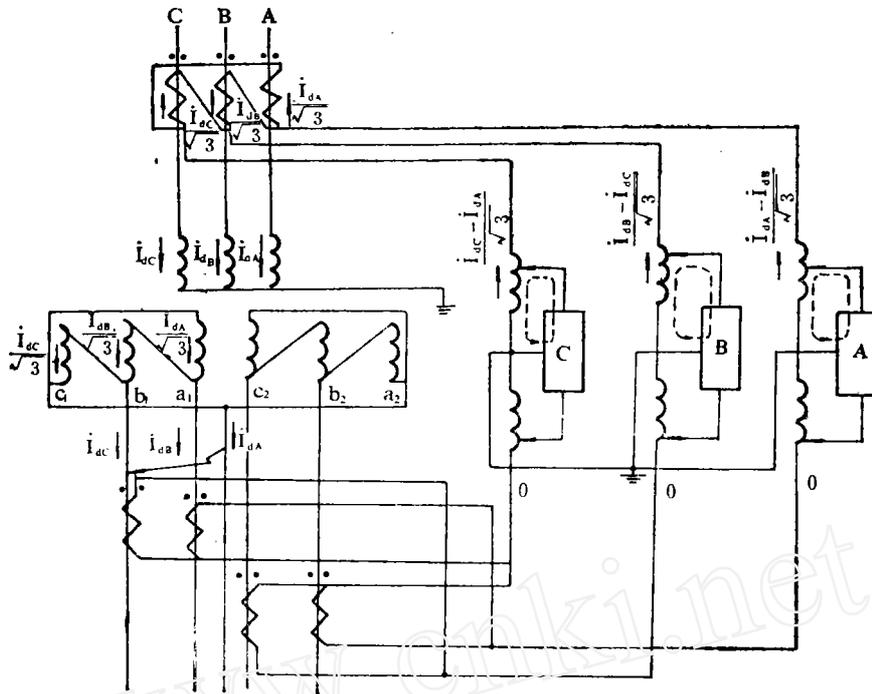


图13 变压器低压侧发生 $a_1 - b_1 - c_1$ 短路时电流分布图

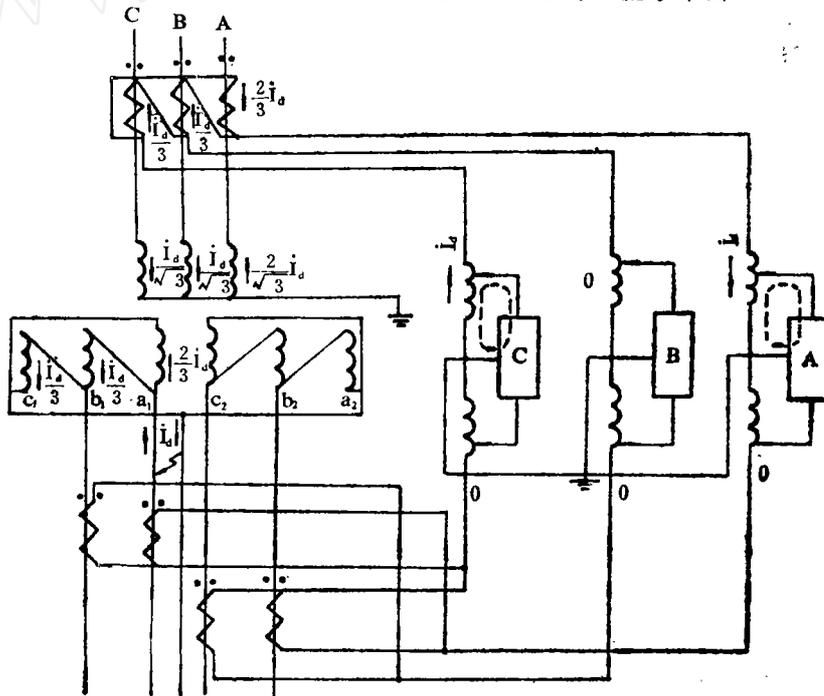


图14 变压器低压侧发生 $a_1 - c_1$ 短路时电流分布图

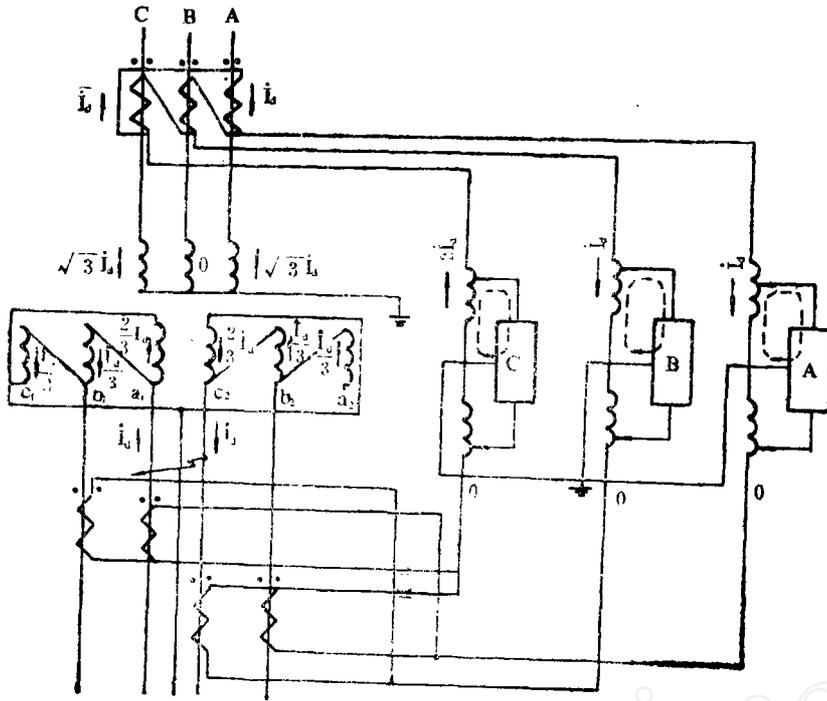
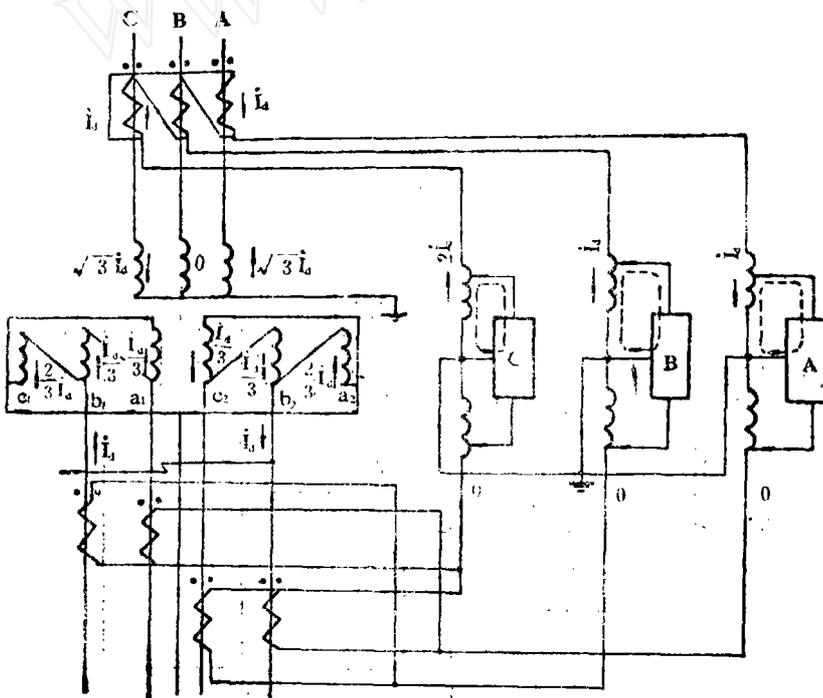


图15 变压器低压侧发生 $a_1 - c_2$ (异相)短路时电流分布图



14

图16 变压器低压侧发生 $b_1 - b_2$ (异相)短路时电流分布图

此时，三相继电器都能以相同的灵敏度动作，短路电流分布见图13所示。

(6) 低压侧二相短路

低压侧二相短路有多种类型，但可概括为两种情况。第一种情况，故障时有两相继电器动作，动作灵敏度相同。

a_1 、 c_1 或 a_2 、 b_2 相短路 A、C相继电器动作。

a_1 、 b_1 或 b_2 、 c_2 相短路 A、B相继电器动作。

b_1 、 c_1 或 a_2 、 c_2 相短路 B、C相继电器动作。

a_1 、 c_1 相短路电流分布见图14所示。

第二种情况，故障时三相继电器动作，灵敏度一相是另二相的二倍。见图15、16所示。

b_1 、 b_2 或 a_1 、 c_2 相短路 $K_{LmC} = 2K_{LmA} = 2K_{LmB}$

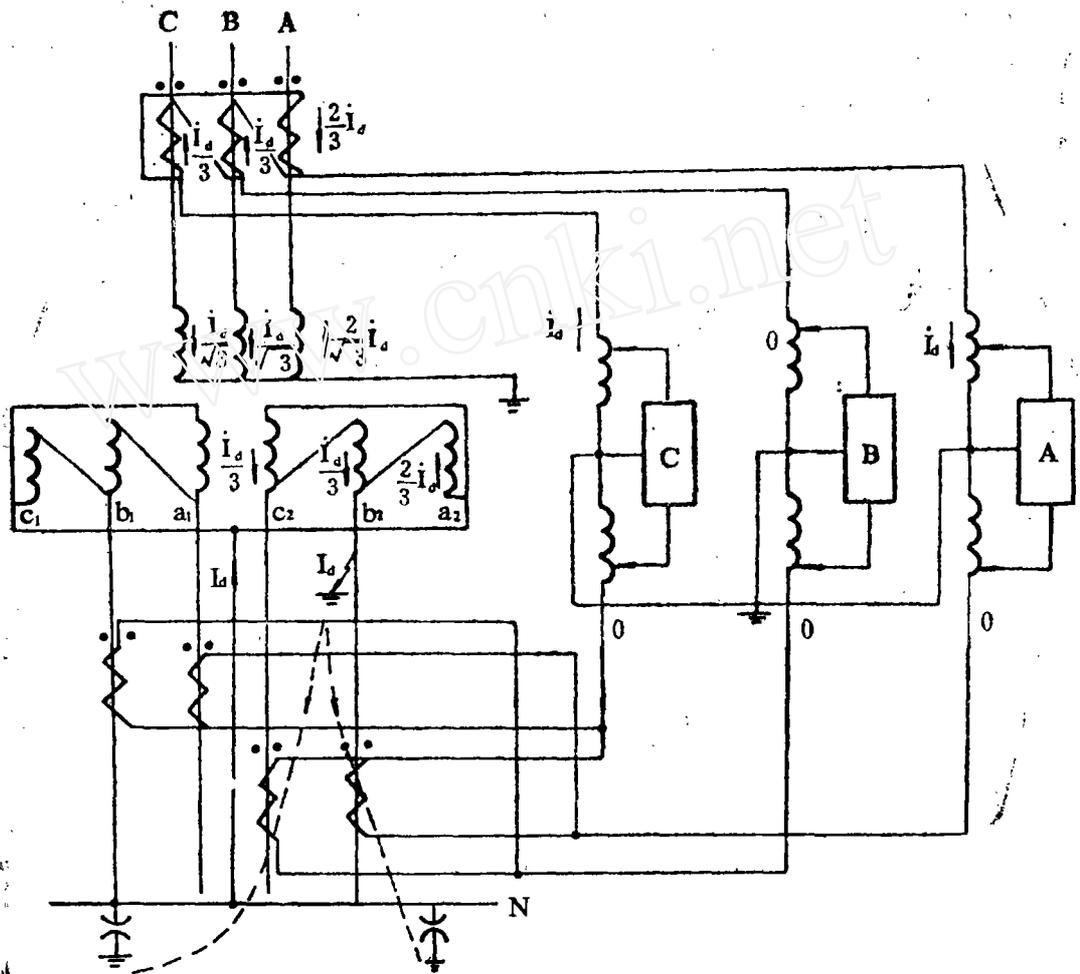


图17 低压侧单相接地时电流分布图

(7) 低压侧单相接地

此时, 接在变电所N线上的接地保安器会被击穿动作, 两相继电器将以相同的灵敏度动作。 b_2 相接地时, 电流分布见图17所示。

a_1 相及 b_2 相接地 A、C相继电器动作。

b_1 相及 c_2 相接地 B、C相继电器动作。

因 a_2 、 c_1 连接后, 通过保安器接地, 故 a_2 或 c_1 接地时, 不会有短路电流, 保护不会动作, 系统仍能正常工作, 只是地网会有回流, 地电位会相应变化。

(8) 一供电臂按BT(直供)方式接线, 保护区内发生各种故障时, 保护能可靠动作, 此处不再赘述。

总之, 在保护区内不管发生何种故障, 都至少有两相继电器动作, 完全满足保护可靠性的要求。

(五) 差动保护的整定计算

差动保护的整定计算方法, 与变压器的参数及继电器的性能有关。如继电器及变压器允许过负荷能力, 变压器调压分接头值; 继电器的调平衡方式、调节与整定范围; 继电器防涌流的措施等等都直接影响差动继电器整定、计算方法。不同变压器参数、不同继电器整定计算方法不同。

本文仅就大秦铁路用的“交叉交叉变压器”及继电器说明差动保护的整定方法步骤。首先介绍变压器、继电器的有关性能。

变压器 型号: SFS7—□型; 变比: $\frac{110 \pm 2 \times 2.5\%}{27.5、27.5}$ 接线组别: Y/△-1、△-11;
过负荷能力: 300%允许二分钟。

继电器 型号: GBT_{11B}—BT₂ (日本东芝产)。具有二次谐波制动、比率制动特性, 其连续过负荷的能力为抽头值的二倍; 一秒钟过负荷能小于抽头值的50倍及220安; 变压器额定运行时, 如果继电器电流小于整定的抽头值, 差动速断元件不会因涌流误动。

差动保护整定计算方法、步骤:

1. 按下式计算出变压器2分钟允许的过负荷值:

$$110\text{kV侧 } I_{1B} = K_B \cdot \frac{S_e}{\sqrt{3} \cdot U_1} \quad (1-12)$$

$$2 \times 27.5\text{kV侧 } I_{2B} = K_B \cdot \frac{S_e/2}{\sqrt{3} U_2} = \frac{S_e}{2\sqrt{3} U_2} \quad (1-13)$$

式中 U_1 、 U_2 ——分别为变压器高低压侧线电压。 $U_1 = 110\text{kV}$ 、 $U_2 = 27.5\text{kV}$

I_{1B} 、 I_{2B} ——变压器高、低压侧允许的2分钟过负荷电流(A)。

S_e ——变压器110kV侧额定容量(kVA)。

K_B ——变压器允许的2分钟过负荷倍数, 取 $K_B = 3$ 。

2. 计算继电器允许的最小抽头值

根据继电器允许的连续过负荷能力, 用下式计算出继电器允许的最小配合抽头值。

$$110\text{kV侧 } I_{1j} = \frac{\sqrt{3} I_{1B}}{n_1 \cdot k_j} \quad (1-14)$$

$$2 \times 27.5 \text{ kV 侧 } I_{2j} = \frac{2 \cdot I_{2B}}{n_2 \cdot k_j} \quad (1-15)$$

式中 I_{1j} 、 I_{2j} ——适应变压器过负荷能力，继电器允许的最小抽头计算值。

n_1 、 n_2 ——按(1-7)、(1-8)式计算后实际选择的高、低压侧互感器的变化。

k_j ——继电器允许的连续过负荷倍数，此处取 $k_j = 2$

3. 确定继电器配合抽头值

先选取比计算值 I_{1j} 、 I_{2j} 稍大且接近的配合抽头值 T_{1j} 、 T_{2j} ，然后按下式计算失配率。

$$\text{若 } \frac{I_{1j}}{I_{2j}} > \frac{T_{1j}}{T_{2j}} \quad \text{则} \quad \eta = \frac{\frac{I_{1j}}{I_{2j}} - \frac{T_{1j}}{T_{2j}}}{\frac{T_{1j}}{T_{2j}}} \quad (1-16)$$

$$\text{若 } \frac{T_{1j}}{T_{2j}} > \frac{I_{1j}}{I_{2j}} \quad \text{则} \quad \eta = \frac{\frac{T_{1j}}{T_{2j}} - \frac{I_{1j}}{I_{2j}}}{\frac{I_{1j}}{I_{2j}}} \quad (1-17)$$

式中 T_{1j} 、 T_{2j} ——分别为110kV及 $2 \times 27.5 \text{ kV}$ 侧选取的配合抽头值

η ——失配率

一般要求算出的 $\eta \leq 0.05$ 。若 $\eta > 0.05$ ，则需要重新选择 T_{1j} 、 T_{2j} 的值，到 $\eta \leq 0.05$ 为止，若无法满足此要求，则需要互感器与继电器间插入中间变流器，适当选择变比，使流进继电器各侧的电流相等或接近相等，再重新选择继电器的配合抽头、计算失配率，以满足 $\eta \leq 0.05$ 。

4. 确定继电器的比率抽头

确定比率抽头，是为了选择适当的制动比，在防止区外故障时的穿越电流引起保护误动的前提下，保证差动保护的灵敏度。主要考虑以下三个因素。

(1) 被保护变压器的调压分接头改变引起的相对误差。一般按最大调压范围的一半选择。本变压器的调压范围为 $\pm 2 \times 2.5\%$ ，故可选 5% 。

(2) 继电器实际选择配合抽头和计算配合抽头值的不同，引起的相对误差。由于抽头选择时，把失配率都控制在 5% 以内，故选 5% 为宜。

(3) 区外故障时，因各侧互感器饱和特性不同，实际选择变比和计算变比不同引起的相对误差。如果知道互感器的励磁特性和最大短路电流，各侧互感器的最大相对误差可以算出来。因为互感器按不超过 10% 的负误差选取，所以各侧互感器的相对误差必定小于 10% ，所以在不知道互感器励磁特性及最大短路电流的情况下，可选取 10% 。

在采用中间变流器时，变流器引起的误差可以按电流互感器类似考虑。其误差应算到总误差中。

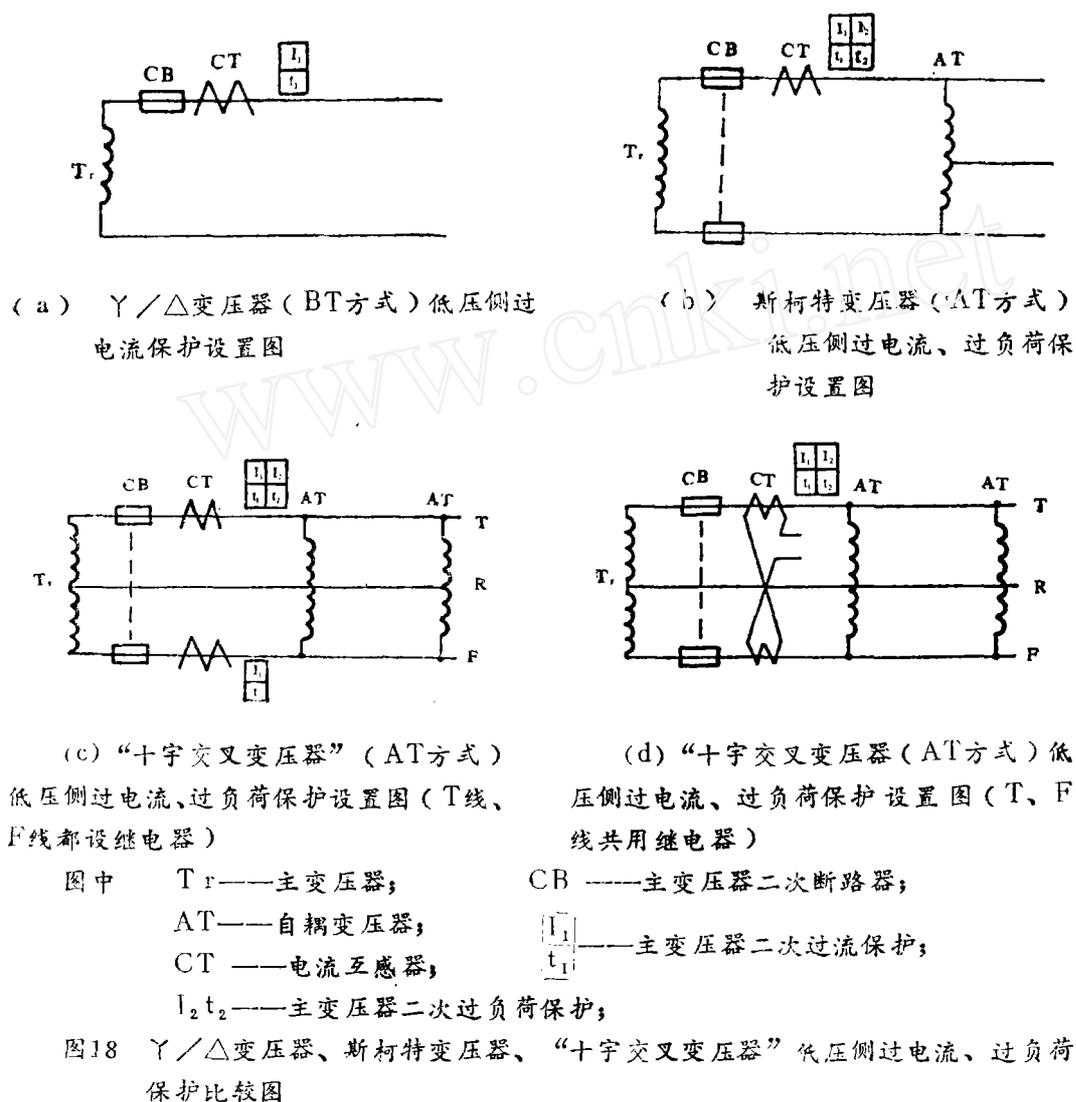
通常比率抽头值按不小于以上几项之和乘以 1.3 的可靠系数来选取。本例选用 25% 的

抽头为宜。

二 过电流、过负荷保护

为了防止外部短路引起变压器过电流和作为瓦斯、差动等主保护的后备，（低压侧过流为低压母线主保护、馈线保护后备保护），该变压器应装设过电流保护。为防止变压器过负荷，亦应装设过负荷保护。由于电铁负荷的特殊性和变压器接线的特殊性，所以这两种保护的设置与整定也各具特色。

1. 保护设置的特点



(1) 变压器三侧都应装设过电流保护。高压侧应装设三相过电流保护, 低压侧应装设能同时反映T线及F线电流的过电流保护。

该变压器低压侧保护与Y/△及斯科特变压器不同。后者, 只要在与接触导线连接的变压器输出侧装设一个单相继电器, 就能实现过流保护, 而“十字交叉变压器”, 在变电所低压母线发生T—N线或F—N线短路时, 短路电流基本上仅通过T—N线或F—N线, 如仅在F或N线上设保护, 显然有一半情况下保护不能起作用。故必须在T线及F线上各设一套电流保护, 或把T线、F线电流互感器二次侧差接后接一套电流保护。以上几种保护接线的比较见图18所示。

(2) 对三绕组变压器过负荷保护的基本要求是: 过负荷保护必须能反映所有绕组的过负荷状况。象“十字交叉变压器”这样, 两低压绕组容量相同, 而与高压侧容量不同的变压器, 在三侧都装设过负荷保护是适宜的。高压侧设两相过负荷, 而在低压侧, 因T线电流反映变压器过负荷情况最灵敏, 故只要在T线上装设过负荷保护即可。

2. 保护整定的特点

过电流与过负荷保护的整定与变压器的允许过负荷能力及负荷的性质密切相关。

“十字交叉接线变压器”允许200%十分钟过负荷, 300%二分钟过负荷, 比一般变压器高; 牵引负荷电流是断续变化的, 其负荷率远低于1, 有的甚至达百分之十、百分之二十。为了充分发挥变压器的效率, 同时又保证变压器安全运行, 故保护整定值应比一般电力变压器(允许过负荷能力低, 负荷率高, 经常工作在接近于1的状态)高些。参考京秦线、大秦线的整定值, 笔者认为保护按下式整定是适宜的。

过电流保护:

$$\text{有低电压起动作时 } I_{zd} = 2I_e \quad (2-1)$$

$$\text{无低电压起动作时 } I_{zd} = 2.5I_e \quad (2-2)$$

动作时间应与下一级保护相配合。

$$\text{过负荷保护 } I_{zd} = 1.5I_e \quad (2-3)$$

动作时间: 延时60秒发预告信号; 延时90秒动作于跳闸。

式中 I_{zd} ——保护的整定电流。

I_e ——变压器的额定电流。

后记

本方案研究过程中, 曾得到缪耀珊、李清超、张建根、赵嗣良、李继胜、郭庆凯、吴怀明、杨雅娟、李建国等同志帮助, 深表谢意。

参考文献

1. 《AT变电所采用Y/△/△“十字交叉”供电方式的电气计算问题》缪耀珊著
2. 《电力系统继电保护》天津大学编
3. 《电力工程设计手册》电西北电力设计院, 东北电力设计院编
4. 《电力变压器计算》陈琴生编译