

# 改进的整流型方向阻抗元件的电路分析

黑龙江省电力局 赵希正

目前整流型距离保护在110KV—220KV系统中得到广泛应用。整流型阻抗元件具有体积小，调试简单，维护方便，可靠性高等优点。而缺点集中到为提高灵敏度所加的直流助磁回路，降低了可靠性，增加了运行人员的维护工作。制造厂与运行部门研制出取消助磁回路的整流型阻抗元件，并分别在许继厂，阿继厂成套线路保护中得到广泛的应用。东北系统亦把原LH—11中代助磁回路的阻抗元件改制，取消直流助磁回路而不降低灵敏度，对这种阻抗继电器已有专门文章分析过。本文拟在从绝对值比较的角度，对相敏电路进行初步分析目的在于为现场人员提供一种简单易懂的分析方法。不当之处，请批评指正。

## 一、分析的数学基础

1. 尤拉公式： $e^{j\varphi} = \cos \varphi + j\sin \varphi$

2. 复数变换：

$$A + jB = \sqrt{A^2 + B^2} \cdot e^{j\varphi} \\ = \sqrt{A^2 + B^2} (\cos \varphi + j\sin \varphi)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B}{A}$$

3.  $\frac{|A + jB|}{|C + jD|} = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{\sqrt{C^2 + D^2}}$

4.  $|A + jB| \geq |C + jD| \Leftrightarrow \sqrt{A^2 + B^2} \geq \sqrt{C^2 + D^2}$

## 二、整流型相位比较阻抗元件分析

改制后的方向阻抗元件原理接线图如下：

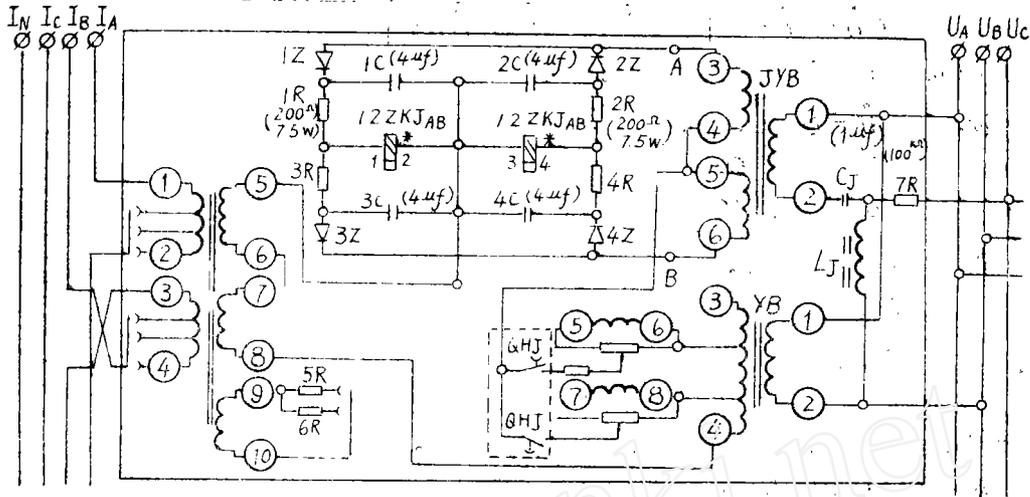


图 1

图中:  $YB$  为测量变压器, 原边接相间电压  $U_{AB}$ , 付边获得测量电压  $\dot{U}_Y$ ,  $\dot{U}_Y$  与  $U_{AB}$  保持相位一致, 根据整定值的要求,  $U_Y$  可由抽头调正在  $10 \sim 100\% U_{AB}$ , 因此有:

$$\dot{U}_Y = K_Y \dot{U}_{AB}$$

$K_Y$  为实数。

$DKB$ : 电抗变压器, 原边通入  $\dot{I} = \dot{I}_A - \dot{I}_B$ , 付边取出短路电压  $\dot{U}_K$ , 理论上要求  $\dot{U}_K$  在数值上与  $\dot{I}$  保持线性关系, 其角度在  $70^\circ \sim 80^\circ$  可调,  $DKB$  铁心有  $4mm$  气隙, 并设有第三个次级绕组接  $R\phi$ , 供调正角度用, 因此:

$$\dot{U}_K = \dot{K}_I \cdot (\dot{I}_A - \dot{I}_B)$$

$\dot{K}_I$  称为模拟阻抗。

$J, Y, B$ : 极化变压器, 原边接  $C, L$  组成的  $50$  周谐振回路上, 付边  $U_J$  为极化电压其二个绕组制造厂采用同一线径, 同一匝数并绕而成, 因此, 可以认为:

$$U_J = U_{J1} = U_{J2} = K_J \dot{U}_{AB}$$

$K_J$  为实数。

$J_1$ : 为极化继电器, 二个线圈的极性按图示接入电路。

$D_1 - D_4, R_1 - R_4, C_1 - C_4$ : 整流滤波电路, 在继电器中形成绝对值比较电路。

如所周知, 利用绝对值比较原理构成方向阻抗继电器时:

$$\text{动作量} \quad \dot{E}_1 = \dot{U}_J + (\dot{U}_K - \dot{U}_Y) \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{制动量} \quad \dot{E}_2 = \dot{U}_J - (\dot{U}_K - \dot{U}_Y) \quad \dots\dots (2)$$

继电器动作条件为:  $|E_1| \geq |E_2|$ , 即

$$|\dot{U}_I + (\dot{U}_K - \dot{U}_Y)| \geq |\dot{U}_I - (\dot{U}_K - \dot{U}_Y)| \quad \dots\dots (3)$$

下面利用数学公式推导继电器的特性

设:  $\dot{U} = U \angle 0$ , 则:

$$U_I = K_I U \angle 0,$$

$$U_Y = K_Y U \angle 0$$

设  $\dot{I} = I \angle -\varphi$ ,  $\dot{K}_I = K_I \angle -\theta$  则

$$\dot{U}_K = K_I I e^{j(\theta - \varphi)}$$

代入(3)式得:

$$|(K_I - K_Y)U + K_I I e^{j(\theta - \varphi)}| \geq |(K_I + K_Y)U - K_I I e^{j(\theta - \varphi)}|$$

复数绝对值之大小, 其数学意义是模的大小相比较, 所以得:

$$[(K_I - K_Y)U + K_I I \cos(\theta - \varphi)]^2 + [K_I I \sin(\theta - \varphi)]^2 \geq$$

$$[(K_I + K_Y)U - K_I I \cos(\theta - \varphi)]^2 + [-K_I I \sin(\theta - \varphi)]^2$$

经化简计算得下式:

$$\frac{U}{I} \leq \frac{K_I}{K_Y} \cos(\theta - \varphi) \quad \dots\dots (4)$$

如所周知, 式子左边为继电器的感受阻抗 $Z_p$ , 即是短路点到保护安装处线路的正序阻抗。右式 $\frac{K_I}{K_Y} = Z_Y$ 为继电器的整定阻抗, 角度 $\theta$ 为继电器的内角。当 $\varphi = \theta$ 时, 继电器感受阻抗最大。则:

$$Z_p = Z_Y \cos(\theta - \varphi) \quad \dots\dots (5)$$

从(5)式可得如下结论: 当按绝对值原理构成阻抗继电器时, 满足

$|E_1| = |\dot{U}_I + (\dot{U}_K - \dot{U}_Y)| \geq E_2 = |\dot{U}_I - (\dot{U}_K - \dot{U}_Y)|$  时, 继电器特性为一过原点的圆。圆的直径为 $\frac{K_I}{K_Y}$ , 与 $K_I$ 成正比而与 $K_Y$ 成反比, 圆的直径与槽轴的角度为继电器的内角 $\theta$ 。当 $\varphi = \theta$ 时, 阻抗继电器感受阻抗最大。

### 三、相敏回路的电路分析

为进一步分析继电器的性能, 如图虚线处A、B、C处向交流回路看为一个三端有源网络, 其电压分别为:

$$\dot{U}_{AB} = 2 \dot{U}_I \quad \dots\dots (6)$$

$$\dot{U}_{AC} = \dot{U}_I - (\dot{U}_K - \dot{U}_Y) \quad \dots\dots (7)$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_I + (\dot{U}_K - \dot{U}_Y) \quad \dots\dots (8)$$

这三个电压分别加入绝对值比较电路, 进行绝对值比较。从A、B、C向右看仍是一个有源三端网络, 由于网络中二极管的存在, 不能简单地用迭加原理进行分析, 而只能应

用逐点算法，将计算结果积分起来。为简便分析，可将三个电压 $U_{AB}$ 、 $U_{AC}$ 、 $U_{BC}$ 做为电压源处理，并且三个电压作用的结果与6个电压即 $(+U_{AB})$ 、 $(-U_{AB})$ 、 $(+U_{AC})$ 、 $(-U_{AC})$ 、 $(+U_{BC})$ 、 $(-U_{BC})$ 的作用等效，然后将每个电压作用的结果迭加起来。

为分析方便，规定极化继电器内的电流 $I_p$ 的正方向由极性流入为正，反之为负。并设： $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$

二极管的正向电阻 $R_D$ ，反向电阻为 $\infty$ 。

极化继电器每个线圈的电阻

$$R_{12} = R_{34} = R_{JP}$$

1.  $U_{BC}$ 单独作用（A相当于开路）：

$$\text{由式(8): } U_{BC} = E_1 = \dot{U}_1 + (\dot{U}_K - \dot{U}_Y) \dots\dots (8)$$

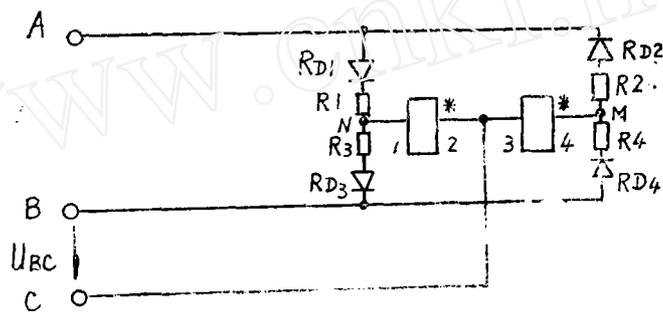


图 2

当 $U_{BC}$ 为正半波时（即 $+U_{BC}$ ），电路简化如下：

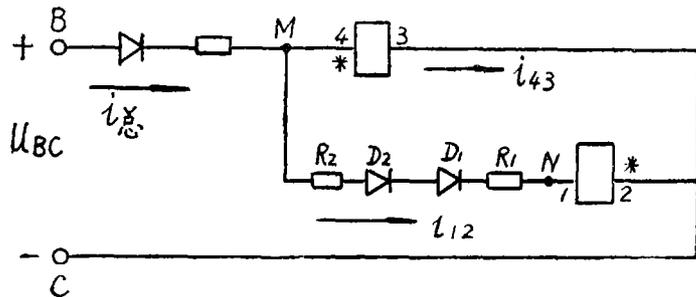


图 3

从电路很容易看出 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_4$ 导通， $D_3$ 截止。 $i_{43}$ 从极化继电器34线圈的正极性流入， $i_{12}$ 是从极化继电器12线圈反极性流入，并且 $i_{43} > i_{12}$ ，即 $(+U_{BC})$ 任一瞬时都满足于 $i_{43} > i_{12}$ ，因此，在极化继电器的磁路中将产生正向磁通，使继电器动作（假定忽略继电器的机械力矩）。

通过电路计算，很容易算出：

$$i_{\text{总}} = (+U_{TC}) \cdot \frac{I}{(R_D + R) + \frac{R_{JP} (2R_D + 2R + R_{JP})}{2(R_D + R + R_{JP})}} \quad \dots\dots (9)$$

$$i_{43} = i_{\text{总}} \cdot \frac{2R_D + 2R + R_{JP}}{2(R_D + R + R_{JP})}$$

$$i_{12} = i_{\text{总}} \cdot \frac{R_{JP}}{2(R_D + R + R_{JP})}$$

$$\therefore i_P = i_{43} - i_{12} = i_{\text{总}} \cdot \frac{R_D + R}{R_D + R + R_{JP}} \quad \dots\dots (10)$$

我们可以这样认为， $i_{43}$ 与 $i_{12}$ 在极化继电器磁路中产生的全磁通，就相当于 $i_P$ 一个电流在极化继电器磁路中产生的磁通等效，这个电流大于0，在极化继电器磁路中产生正向磁通，使继电器动作。这里的 $i_P$ 实际上是一个假想的等效电流，并不是实际电流。（注一）

当 $U_{TC}$ 为负半周（即 $-U_{TC}$ 作用）时：  
很容易分析， $D_1 D_2 D_3$ 导通， $D_4$ 截止，电路图如下：

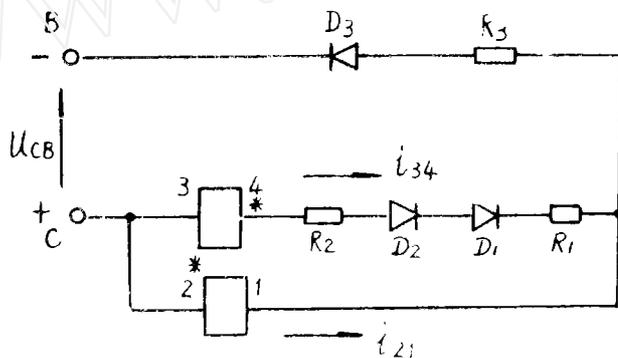


图 4

同样可以看出：与 $+U_{TC}$ 不同的是（ $-U_{TC}$ ）将产生 $i_{21} > i_{34}$ ，即极化继电器中12线圈电流 $i_{21}$ 正极性流入，且大于34线圈中反极性流入的电流 $i_{34}$ ，继电器亦将动作。

同样可以算出：

$$i_{\text{总}} = U_{TC} \cdot \frac{I}{(R_D + R) + \frac{R_{JP} (2R_D + 2R + R_{JP})}{2(R_D + R + R_{JP})}}$$

$$= -U_{TC} \cdot \frac{I}{(R_D + R) + \frac{R_{JP} (2R_D + 2R + R_{JP})}{2(R_D + R + R_{JP})}} \quad \dots\dots (11)$$

等效电流 $i_P = i_{21} - i_{34}$

$$= |i_{\text{总}}| \cdot \frac{R_D + R}{R_{JP} + R + R_D} \quad \dots\dots (12)$$

从整个电路分析来看，在每一个半波中均有三个二极管导通，一个二极管截止， $D_3$ 、 $D_4$ 导通起到动作的作用，而 $D_1 D_2$ 导通将起制动作用。对 $U_{TC}$ 而言，无论正半波

与负半波，假想的等效电流 $i_p$ 总是为正，产生正向磁通，使继电器动作，因此， $i_p$ 的大小（也即在磁路中产生正向磁通的大小）正比于 $U_{BC}$ 的大小，而与 $U_{BC}$ 的方向无关。当然，很容易看出，当 $U_{BC}=0$ 时， $i_p=0$ ，继电器不动作。

2.看 $U_{AC}$ 的作用（ $B$ 相当于开路）：由式（9）： $U_{AC}=E_2=\dot{U}_1-(\dot{U}_K-\dot{U}_Y)$ 分析方法与1完全一样。 $U_{AC}$ 为正半波（即 $+U_{AC}$ ）时，电路简化如下：

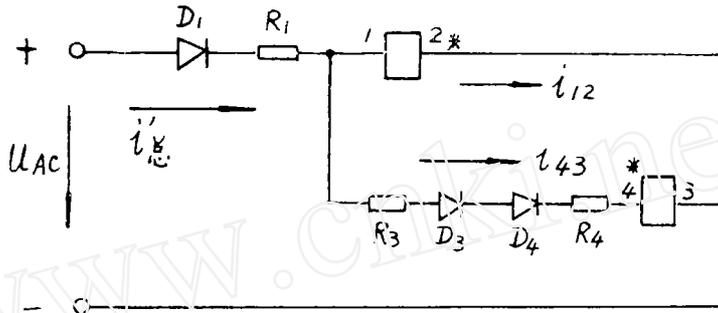


图 5

很容易看出 $D_1 D_3 D_4$ 导通， $D_2$ 截止。并且在1.2线圈中反极性流入的电流 $i_{12}$ 大于34线圈中正极性流入的电流 $i_{43}$ ，即在磁路中产生反向磁通，继电器制动。

通过电路计算并利用假想的等效电流的概念，很容易得到：

$$i'_{总} = U_{AC} \cdot \frac{1}{(R_D + R) + \frac{R_{JP} \cdot (2R_D + 2R + R_{JP})}{2(R_D + R + R_{JP})}} \quad \dots\dots (13)$$

$$i_p = -i'_{总} \cdot \frac{R_D + R}{R_{JP} + R + R_D} \quad \dots\dots (14)$$

当 $U_{AC}$ 为负半波（即 $-U_{AC}$ ）时、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 导通， $D_1$ 截止。

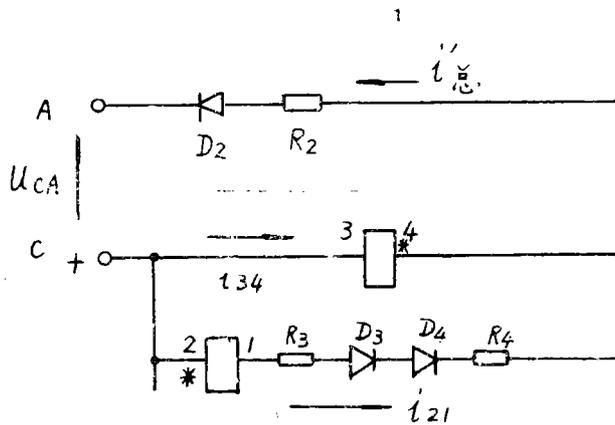


图 6

$$i_{\text{总}} = -U_{AC} \cdot \frac{I}{(R_D + R) + \frac{R_{JP} \cdot (2R_D + 2R + R_{JP})}{2(R_D + R + R_{JP})}} \quad \dots\dots (15)$$

$$i_f = i_{\text{总}} \cdot \frac{R_D + R}{R_{JP} + R + R_D} \quad \dots\dots (16)$$

$$\therefore i_{PC} = - |i_{\text{总}}| \cdot \frac{R_D + R}{R_{JP} + R + R_D} \quad \dots\dots (17)$$

综上分析,  $U_{AC}$ 单独作用时, 每一个半波亦是三个二极管导通, 一个二极管截止,  $D_1$ ,  $D_2$ 导通起制动作用,  $D_3$ ,  $D_4$ 导通起动作作用。对 $U_{AC}$ 而言, 无论是正半波还是负半波等效电流 $i_{PAC}$ 总是为负值, 产生反方向磁通, 继电器制动,  $i_{PC}$ 的大小正比于 $U_{AC}$ 的大小, 其方向与 $U_{AC}$ 的正, 负无关。

### 3. $U_{AB}$ 的作用 (C 相当于开路)

$$U_{AB} = 2 \dot{U}_J \quad \dots\dots (18)$$

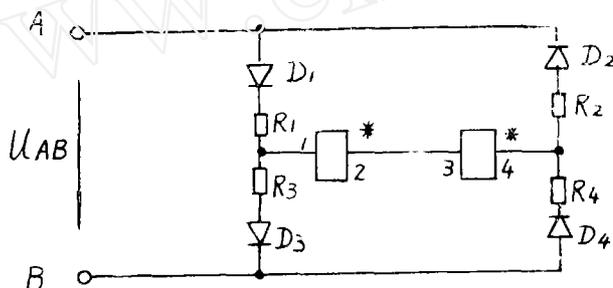


图 7

由于电路完全对称, 无论 $U_{AB}$ 正半波还是负半波, 只有二个二极管导通, 二个二极管截止, 在继电器中均不产生电流。由此也可以看出极化电压 $U_J$ 只起判别故障方向的参考向量作用, 在只有极化电压的情况下, 无论其值大小, 均不会使继电器动作。

### 4. 综合分析:

综上所述, 在三个电压的共同作用下, 极化继电器中等效电流 $i_f$ 为三个电压分别作用的等效电流的代数和:

$$\text{令: } g = \frac{1}{(R_D + R) + \frac{2R_{JP} \cdot (2R_D + 2R + R_{JP})}{2(R_D + R + R_{JP})}}$$

$$\text{代入式 (9): } i_{\text{总}} = U_{BC} \cdot g \quad \dots\dots (19)$$

$$\text{代入式 (12) } i_{PBC} = |U_{BC}| \cdot g \cdot \frac{R_D + R}{R_{JP} + R + R_D} \quad \dots\dots (20)$$

$$\text{代入式 (17): } i_{PAC} = - |U_{AC}| \cdot g \cdot \frac{R_D + R}{R_{JP} + R + R_D} \quad \dots\dots (21)$$

$$\therefore \text{等效电流 } i_f = i_{PBC} + i_{PAC} \\ = [ |U_{BC}| - |U_{AC}| ] \cdot g \cdot \frac{R_D + R}{R_{JP} + R + R_D} \quad \dots\dots (22)$$

若忽略极化继电器的机械力矩, 则  $i_p > 0$  时继电器动作,  $i_p < 0$  时, 继电器制动,  $i_p = 0$  时, 继电器处于边缘状态。所以继电器动作条件为:  $i_l \geq 0$  即是

$$|U_{BC}| - U_{AC} \geq 0 \text{ 即是式 (3)}$$

$$|\dot{U}_I + (\dot{U}_K - \dot{U}_Y)| \geq |\dot{U}_I - (\dot{U}_K - \dot{U}_Y)|$$

因此如图的相敏回路, 体现了绝对值比较原理, 当满足式 (3) 时, 继电器的特性为一过园点的园。从原理上就构成了方向阻抗继电器。

系数:  $g \cdot \frac{R_D + R}{R_{JP} + R + R_D}$ , 将决定  $i_p$  的大小, 直接影响阻抗元件的灵敏度, 在  $R_D$  及  $R_{JP}$  一定的条件下, 适当的选择  $R$  值, 可以提高灵敏度就是这个道理。

#### 四、总 结

1. 相敏回路实质上是一个整流型的绝对值比较电路, 由四个二极管及相应的电阻电容组成对称电路代替原来八个二极管组成的全波整流桥,  $D_3, D_4$  相当于动作臂,  $C_3, C_4$  是动作量的滤波电容,  $D_1, D_2$  是制动臂,  $C_1, C_2$  是制动量的滤波电容。

2. 与原 LH-11 测量元件比较, 该继电器接线简单, 取消了直流助磁回路, 提高了灵敏度, 其原因一方面是由于改制的继电器的电流只要克服一个二极管的管压降, 这在小电流时具有很大的实际意义, 另一方面, 做为执行元件的极化继电器的二个线圈, 同时兼作动作线圈和制动线圈, 提高了效率, 继电器性能变好。

3.  $R_1 - R_4$  阻值的选择问题, 从数学角度看应使系数  $g \cdot \frac{R + R_D}{R_{JP} + R_D + R}$  为最大, 在满足热稳定的条件下, 该值可由试验求出。当然也可以由数学计算得出。

4. 实验证明,  $R_1 - R_4$  可以补偿  $D_1 - D_4$  二极管的不平衡, 这对消除电流潜动, 电压潜动具有实际意义, 因而放宽了  $D_1 - D_4$  四支二极管的选择条件。

注一: 假想等效电流  $i_p$  实际是这样一个概念, 极化继电器二个线圈中的电流  $i_{34}$ ,  $i_{12}$  在磁路中产生的全磁通, 等效于一个线圈通入  $i_p$  时产生的磁通。