

用相位比较原理构成双回线路横差动保护的新元件*

天津大学 宋从矩 王笑然

内容提要

本文论述用相位比较原理构成的电流平衡保护和用于受电侧的电流相位差动保护。前者以 $(\dot{I}_I + \dot{I}_{II})$ 为极化量来判别差电流 $(\dot{I}_I - \dot{I}_{II})$ 的相位,并可以对起动电流进行整定,取消了原有的电压制动回路,简化了接线。后者以母线电压为极化量来判别 \dot{I}_I 和 \dot{I}_{II} 的相位变化,利用三个电量的相位比较来确定双回线路的内部故障,保护装置无需进行整定计算,无需操作电源闭锁,相继动作区极小且无电压死区,用于双回线路的受电侧或小电源侧,具有显著的优点。

现有的双回线路横差保护,广泛采用电流平衡或横差动方向的保护方式。前者利用电流平衡继电器比较两回线中电流的绝对值,并利用电压制动元件来防止单回线运行时的误动作,继电器构造比较复杂,动作特性受电压制动的影响,不便于整定计算。后者以母线电压为基准,来判别两回线中差电流的方向,一般具有差电流起动元件和方向元件,由于起动电流需要躲开单回线运行时的最大负荷电流,因此具有较大的相继动作区,此外,当出口附近三相短路时,还具有电压的死区。为防止单回线运行时保护范围外部故障引起误动作,两种保护方式均需采用操作电源的闭锁,从而复杂了保护的接线,降低了可靠性。

本文试图利用晶体管相位比较原理所提供的便利条件,研制用于横差动保护中的新元件,以尽量克服原有保护中存在的问题,提高其动作的可靠性和灵敏度,减小和消除保护的相继动作区和死区。必要时,还可实现保护具有按相跳闸的功能。现将试验研究的结果报告如下。

一、用于电源端的电流平衡保护

设双回线路中的电流分别为 \dot{I}_I 和 \dot{I}_{II} ,则比较 $|\dot{I}_I|$ 和 $|\dot{I}_{II}|$ 的绝对值可以判断任一线路内部所发生的故障,并实现有选择性的跳闸。根据绝对值比较和相位比较之间的转换关系^{〔1〕},对 $|\dot{I}_I| \geq |\dot{I}_{II}|$ 动作的条件,可转化为以下条件动作:

* 参加此项研究试验工作的还有发电专业75级学生杨玉光、李丰谨、麻世俊、张文龙。

$$-90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{I}_I + \dot{I}_I}{\dot{I}_I - \dot{I}_I} \leq 90^\circ \quad (1)$$

这是实现线路工内部故障时保护动作的基本条件。同理，对线路II应要求 $|\dot{I}_I| \geq |\dot{I}_I|$ 时动作，则相应的动作条件为：

$$-90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{I}_I + \dot{I}_I}{\dot{I}_I - \dot{I}_I} \leq 90^\circ \quad (2)$$

这实质上是以 $(\dot{I}_I + \dot{I}_I)$ 作为极化量，来判断差电流的相位。在理想情况下， \dot{I}_I 和 \dot{I}_I 同相位，继电器的动作只决定于 I_I 和 I_I 数值的比较，根据不同线路上的故障而满足公式(1)或(2)。

实际上，当双回线外部故障时，由于电流互感器的误差，反应到二次侧的电流 $\dot{I}_I \neq \dot{I}_I$ ，因而产生一个不平衡电流 I_{bP} ，按(1)和(2)式构成的继电器应躲开此不平衡电流的最大值。(以下为简单起见，设所有电流互感器的变化均等于1)。

为此，在构成继电器的比相回路时(见图1)，对 $(\dot{I}_I - \dot{I}_I)$ 的输入信号设置了

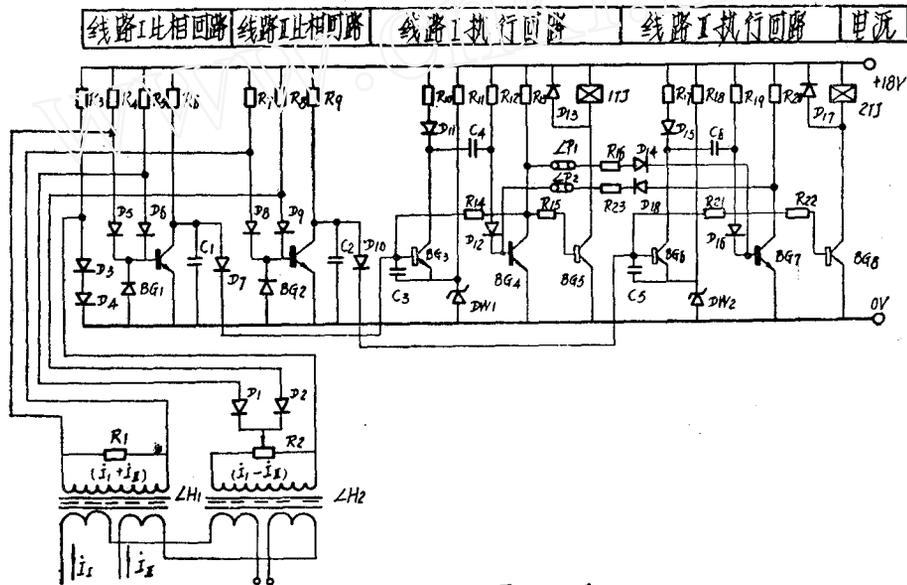


图 1

门槛电压，此电压由 R_3 、 D_3 、 D_4 组成的分压回路上取得。设对应此时的继电器起动作电流为 $I_{dx.1}$ ，则继电器能够动作的必要条件是：

$$|\dot{I}_I - \dot{I}_I| \geq I_{dx.1} \quad (3)$$

由于 $(\dot{I}_I + \dot{I}_I)$ 的输入信号是作为极化电压使用的，其动作的灵敏度原则上是越高越

好,因此回路中不应设置门槛电压。在现有参数的条件下, $|\dot{I}_I + \dot{I}_{II}| \geq 0.2$ 安即可动作。

就一般情况而言,当 \dot{I}_I 和 \dot{I}_{II} 具有不同相位角时,即使两电流的数值相等,其差电流 $(\dot{I}_I - \dot{I}_{II})$ 也可能很大,从而引起继电器的动作,这是不能允许的。为解决这个问题,确保继电器必须在 $|\dot{I}_I| - |\dot{I}_{II}| \geq I_{dz.J}$ 时才动作,则需要改变比相回路的作用角度范围。经大量分析和实验表明,此角度范围在 $\pm(85^\circ \sim 80^\circ)$ 之间较为合适。

综合以上两种情况,在两回线路的电流平衡继电器中,必须分别满足以下条件,继电器才能动作:

$$\left. \begin{aligned} \text{线路 I} \quad & |\dot{I}_I - \dot{I}_{II}| \geq I_{dz.J} \\ & -85^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{I}_I + \dot{I}_{II}}{\dot{I}_I - \dot{I}_{II}} \leq 85^\circ \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{线路 II} \quad & |\dot{I}_I - \dot{I}_{II}| \geq I_{dz.J} \\ & -85^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{I}_I + \dot{I}_{II}}{\dot{I}_I - \dot{I}_{II}} \leq 85^\circ \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

按以上条件构成的电流平衡继电器的单相原理接线如图 1 所示,现分析说明如下。

交流回路接线采用两个完全相同的中间变流器 LH_1 和 LH_2 。 LH_1 的原边反应和电流 $(\dot{I}_I + \dot{I}_{II})$, 付边输出电压 $(\dot{I}_I + \dot{I}_{II}) R_1$, 直接接入比相回路,作为极化电压。 LH_2 的原边反应差电流 $(\dot{I}_I - \dot{I}_{II})$, 付边输出电压 $(\dot{I}_I - \dot{I}_{II}) R_2$, 经门槛电压后接入比相回路,改变 R_2 活动头的位置可以调节 $I_{dz.J}$ 。

相位比较回路仍采用三级管放大比相的方式〔2〕,同时进行正、负半周的比相。其中负半周比相的输出用于反应线路 I 的故障,而正半周比相的输出则反应线路 II 的故障。两个继电器共用一个交流回路和比相回路,每个继电器均利用半周比相进行工作,从而简化了接线,降低了功率消耗。调节 $R_0 - C_1$ 和 $R_0 - C_2$ 的时间常数,即可满足角度动作范围的要求。

线路 I 和线路 II 保护的执行回路采用具有 0.2 秒记忆时间的单稳态触发器,分别起动跳闸继电器 1 TJ 和 2 TJ,动作于跳闸。这一执行回路可为三相继电器所共用。当要求按相动作跳闸时,则应分相装设相同的执行回路。

为了提高保护动作的可靠性,采取了两个执行回路互相闭锁的措施。例如,当线路 I 执行回路动作后,可通过 $L P_1 - R_{16} - D_{14}$ 支路对 $B G_7$ 提供基极电流,即闭锁了线路 II 的执行回路。反之,当线路 II 的执行回路动作后,也可通过 $L R_2 - R_{23} - D_{18}$ 支路去闭锁线路 I 的执行回路。

关于继电器的动作特性,由于继电器同时反应于 \dot{I}_I 、 \dot{I}_{II} 以及它们之间的相位角 ϕ 而动作,因此完整地表示继电器的动作特性,需采用两种特性曲线,现以线路 I 的继电器为例说明为下:

1、设差电流回路的起动电流整定为 $I_{dz \cdot J}$ ，固定 I_{II} 不变，求线路 I 起动电流 $I_{1dz} = f(\phi)$ 的关系。实测的结果如表 1 和 2 表所示。表 1 所示为 $I_{dz \cdot J} = 1$ 安，分别固定 I_{II} 为 5、10、20、30 安时，所对应的 I_{1dz} 的数值。表 2 则为 $I_{dz \cdot J} = 3$ 安时，所对应的 I_{1dz} 的数值。作出相应的动作特性曲线，如图 2 和图 3 所示。

表 1 $I_{dz \cdot J} = 1$ 安时，线路 I 的起动电流

I_{II} (安)	ϕ I_{1dz} (安)	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
		5	6	5.7	5.7	5.8	5.8	5.4	5.2	5.4	5.7	6	6.1
10		11	11	11	11.4	11	10.2	10.2	10.2	11.4	11	10.7	11
20		21	21.5	22	21.3	21	20.5	20.2	20.5	21.5	21	21.2	20.7
30		31	31.5	31.4	31	30.5	30.7	30.2	31.2	31.5	31.5	32	31.3

表 2 $I_{dz \cdot J} = 3$ 安时，线路 I 的起动电流

I_{II} (安)	ϕ I_{1dz} (安)	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
		5	7.85	7	7	6.6	6.1	5.7	5.2	5.8	6.2	6.6	7
10		12.6	12.4	12.2	11.7	11.7	11	10.4	10.7	11.5	11.7	12.2	12.4
20		22.5	22.7	22.7	22.2	21	21	20.4	21.2	22.5	22.3	22	22.5
30		32.5	33	33.4	32	30.7	30.7	30.3	32.7	33.5	32.6	32.4	32.3

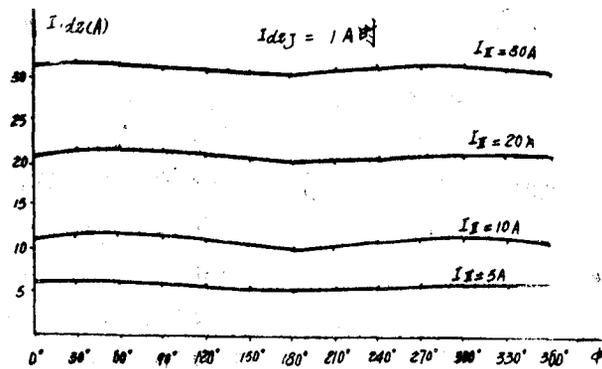


图 2

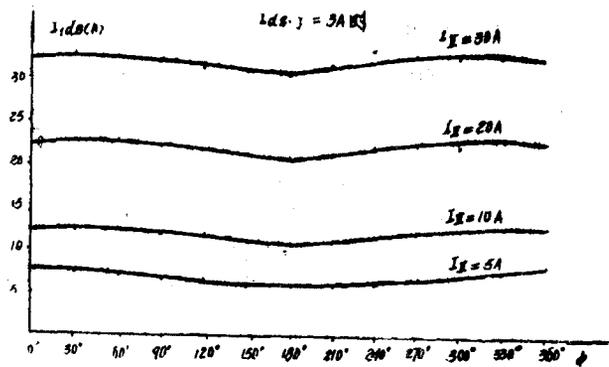


图 3

2、设差电流回路的起动电流整定为 I_{dz} ，固定 ϕ 不变，求 $I_{1dz} = f(I_{II})$ 的关系。实测的结果也可以由表 1 ~ 表 2 中示出。作出相应的动作特性曲线如图 4 和图 5 所示。

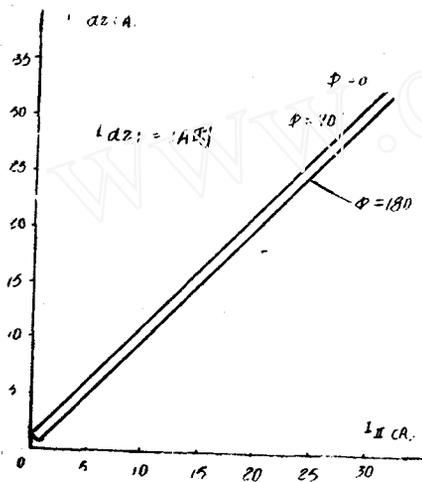


图 4

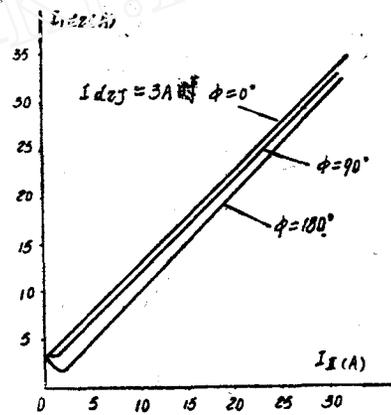


图 5

由以上实验结果可见：

1、除 $\phi = 180^\circ$ 附近以外，当线路 II 电流一定时，线路 I 继电器的起动电流 I_{1dz} 基本上与 ϕ 角无关，误差在 $\pm 5\%$ 以内，满足了对起动特性的要求。

2、当 $\phi = 180^\circ$ 时，由于差电流回路实质上是两个电流相加，其值远大于 I_{dz} ，而和电流回路变成两个电流相减，其值较小。根据原来的考虑， $(\dot{I}_I + \dot{I}_I)$ 系用作为极化电压之用，其最小起动电流约为 0.2 安，因此只要 I_I 比 I_{II} 大过 0.2 安以后，继电器便可以动作，故此时继电器的起动电流 I_{1dz} 较其他角度的为小，这一特性在图 4 和图 5 中表示的特别清楚。

在 $\phi = 180^\circ$ 附近时, 继电器起动电流的减小对保护的动是有利的。例如在图 6 所示的双侧电源网络中, 当 A 侧线路 I 出口附近 d 点短路时, 如 A 侧为最小运行方式, B 侧为最大运行方式, 则 \dot{I}_I 和 \dot{I}_{II} 就会反相位, 此时继电器起动电流的减小, 就可以提高 A 侧电流平衡保护的灵敏度。

就一般情况而言, 如欲做到继电器的起动电流与角度 ϕ 基本无关, 则对 $(\dot{I}_I + \dot{I}_{II})$ 的输入信号也应加相同的门槛电压。显然对本继电器是无需采取这一措施的。

3、对横差保护来看, 当保护范围外部故障时, 两回线中的电流相同, $\dot{I}_I = \dot{I}_{II}$ 。当电流互感器的容量满足 10% 误差曲线的要求时, 其二次电流的误差不大于 10%, 角度误差不大于 7° , 因此保护装置工作于 $-7^\circ \leq \phi \leq 7^\circ$ 的范围以内, 实际上不可能出现很大的差电流。前已述及, 继电器的差电流回路应按避开此最大的不平衡电流来整定, 因此继电器能可靠不动作。

4、当保护范围内部故障时, 考虑到如图 6 所示的双侧电源供电情况, 一般 A、B 两侧的电势不同相位, 再计及各元件阻抗角的差别和故障点过渡电阻的影响, 则 \dot{I}_I 和 \dot{I}_{II} 之间的相位是不固定的。因此分析并检验在各种 ϕ 角时继电器的动作特性是完全必要的。

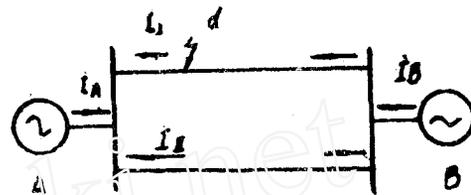


图 6

利用上述继电器构成中性点直接接地电网中双回线横差保护的方框结构图如图 7 所示。相间保护接于 A、C 相, 接地保护接于零序电流回路。当在某些情况下, 位于相继动作区内的单相接地故障可能引起非故障相的相间保护误动作时, 可以采取出现零序电压来闭锁相间保护的措施。当保护为按相切除时, 则不存在这一问题。

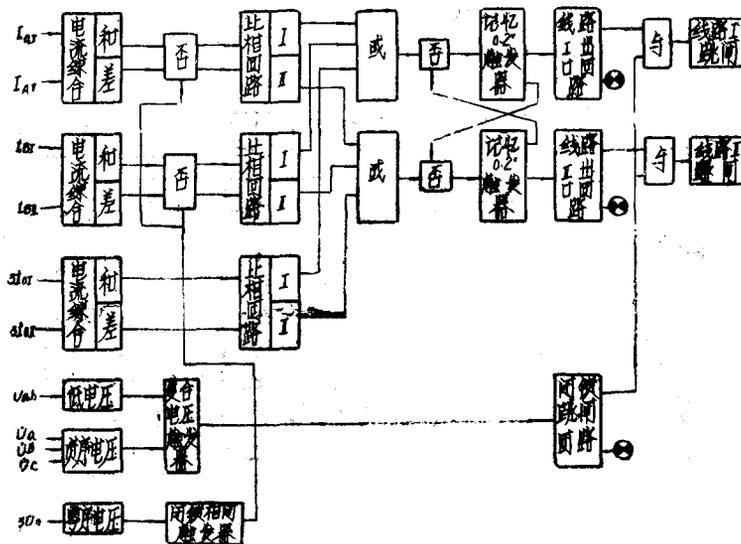


图 7

保护装置中设有复合电压的闭锁回路，其主要作用是为了提高可靠性，防止在正常情况下，由于元件损坏等原因所造成的误动作。另一方面也可以减小差动回路的起动电流，可以不考虑正常运行情况下，一回线突然断开时的负荷电流。

保护装置仍然需要采用操作电源的闭锁。

如果将本保护装置和一般的横差动方向保护作一比较，即相当于用 $(\dot{I}_I + \dot{I}_{II})$ 代替了母线电压 \dot{U}_J ，来判别差电流的方向，同时将差电流元件和方向元件合在一起，简化了回路的接线。

二、用于受电端的电流相位差动保护

在单侧电源双回线路的受电端以及双侧电源双回线路位于小电源的一端，当保护范围内部故障时，如图8所示，故障线路的电流要改变方向。因此利用两回线中电流相位的比较，可以判断保护范围内的故障。而要进一步确定故障发生在哪一回线路上，就还需要引入母线电压 \dot{U}_J ，来作为判断的基准。

根据以上原理构成的电流相位差动保护的单相原理接线如图9所示。

参照功率方向元件所采用的 90° 接线方式，本继电器在电流、电压之间采用同上的接线，因此继电器的最灵敏角按 $\phi_{Lm} = -45^\circ$ 考虑^[3]，（必要时，调节 C_2 和 R_2 以及 C_3 和 R_3 之间的比例关系，可以

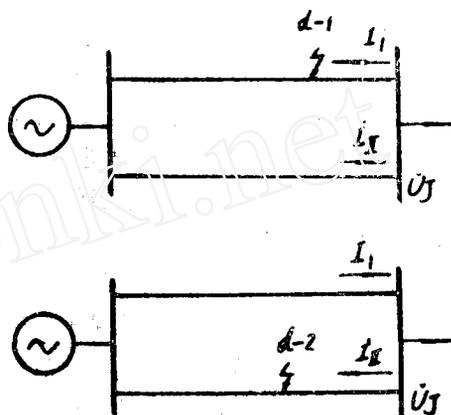


图 8

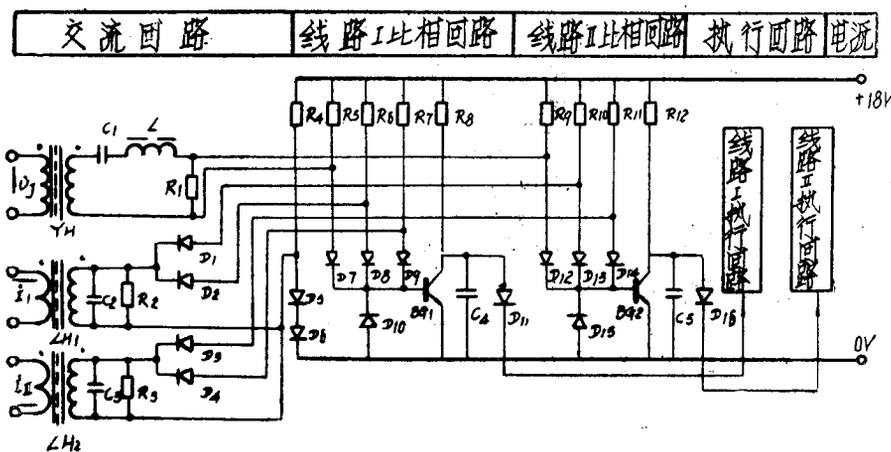


图 9

改变 ϕ_{L_m} 的数值)。此时反应线路 I 和线路 II 内部故障而动作的继电器，应分别满足以下条件：

$$\left. \begin{aligned} \text{线路 I} \quad & -90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{I}_I}{(-\dot{I}_I)} \leq 90^\circ \\ & -135^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}_J}{\dot{I}_I} \leq 45^\circ \\ & -135^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}_J}{(-\dot{I}_I)} \leq 45^\circ \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{线路 II} \quad & -90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{I}_I}{(-\dot{I}_I)} \leq 90^\circ \\ & -135^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}_J}{\dot{I}_I} \leq 45^\circ \\ & -130^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}_J}{(-\dot{I}_I)} \leq 45^\circ \end{aligned} \right\} (7)$$

也就是当 \dot{U}_J 、 $\dot{I}_I \angle -45^\circ$ 和 $(-\dot{I}_I) \angle -45^\circ$ 三个电量的瞬时值同时为正（或同时为负）的时间 ≥ 5 毫秒时，线路 I 的继电器动作。同理，当 \dot{U}_J 、 $\dot{I}_I \angle -45^\circ$ 和 $(-\dot{I}_I) \angle -45^\circ$ 符合以上条件时，线路 II 的继电器动作。

继电器完全根据相位比较的原理工作。在双回线正常运行以及外部故障时， \dot{I}_I 和 \dot{I}_I 同相位，即使考虑电流互感器的角误差以后，继电器也不可能动作。当一回线切除时，该线路的电流为零，相位比较回路无从进行比相，因此也不可能动作。继电器无需进行电流定值的整定，灵敏度很高，相继动作区很小，不怕电压回路断线引起误动作，同时也不需要操作电源闭锁的措施，因此具有十分显著的优点。

继电器的交流电压回路采用隔离变压器 YH，其付边接入由 R_1 、 C_1 和 L 组成的对 50 周工频串联谐振的记忆回路，以消除继电器的电压死区，由 R_1 两端取得与 \dot{U}_J 同相位的电压，用作为比相回路的输入。继电器的交流电流回路采用两个完全相同的中间变流器 LH_1 和 LH_2 ，分别接入电流 \dot{I}_I 和 $(-\dot{I}_I)$ ，其付边分别接有 $C_2 // R_2$ 和 $C_3 // R_3$ 的负载，用以取得 $\dot{I}_I \angle -45^\circ$ 和 $(-\dot{I}_I) \angle -45^\circ$ 的电压，以输入比相回路。这样构成的继电器，以电压和电流之间的关系而言，其灵敏角为 $\phi_{L_m} = -45^\circ$ 。

相位比较回路仍为三极管放大比相的方式，同时进行正、负半周的比相。但由于要进行三个电量的比相，因此在基极回路的输入端设有三个支路，必须三个输入信号同时为负时，三极管 BG_1 和 BG_2 才能截止。

执行回路的接线与图 1 相同。也采用了两个出口回路互相关锁的措施，以提高可靠性。

关于继电器的动作特性，考虑到实际上发生内部故障时， \dot{I}_I 和 $(-\dot{I}_I)$ 为同相位，因此就可以仿效功率方向元件，用角度特性和伏安特性来表示。现仍以线路 I 为例，说明如下：

1、角度特性：固定 $\dot{I}_I = -\dot{I}_I$ 不变，求继电器起动电压与角度之间，即 $U_{dz.I} = f(\phi_I)$ 的关系。当固定电流为 5 安时，实测的数据如表 3 所示。

表 3

ϕ_I	45°	30°	15°	0°	-15°	-30°	-45°	-60°	-75°	-90°	-105°	-120°	-135°
$U_{dz.I} (V)$	/	4.1	2.2	1.3	0.95	0.75	0.65	0.65	0.65	0.7	0.75	0.8	/

2、伏安特性：固定 $\phi_I = \phi_{Lm} = -45^\circ$ ，求继电器起动电压与电流之间，即 $U_{dz.I} = f(I_I)$ 的关系。实测数据如表 4 所示。

3、由以上实验可见，继电器的最小起动电压（稳态值）为 0.65 伏，最小起动电流为 0.5 安。

表 4

$I_I (A)$	0.47	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	2	3	4	5	10
$U_{dz.I} (V)$	1.0	1.1	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

利用以上继电器构成中性点非直接接地电网中双回线横差保护的方框结构图如图 10 所示。保护装置接于 A、C 相上，电流与电压的组合满足 90° 接线方式的要求。除比相回路具有三个输入信号外，其余部分的接线均与图 7 的接线相同。保护装置也设有复

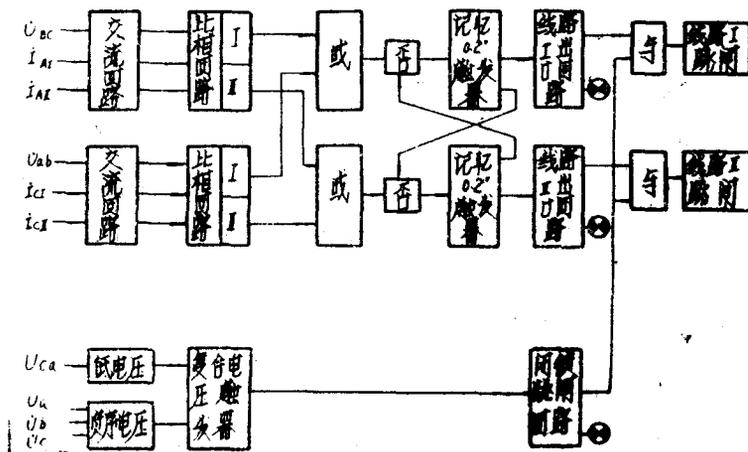


图 10

合电压的闭锁回路，以提高动作的可靠性。由于单回线运行时，保护装置不可能误动作，因此不需要操作电源的闭锁。

参 考 文 献

- [1]、高压电网继电保护原理与技术
朱声石著 电力工业出版社
- [2]、晶体管相位比较式三段距离保护
宋从矩 《继电器》79年第3期
- [3]、电力系统继电保护原理
天津大学编 电力工业出版社

《继电器》征稿启事

《继电器》系继电器行业的专业性刊物，由机械工业部许昌继电器研究所主办。本刊主要刊登与电力系统保护继电器及继电自动装置的科研、生产、运行等方面有关的论文，报告以及应用技术与经验，国外发展动态等。欢迎就上述范围投稿，以促进技术交流，为实现四个现代化做出贡献。

来稿请用钢笔在方格纸上书写，每格一字，字迹图样准确清晰、文字力求简洁通顺，图表只附最必要的，力求精练，符号及单位按一般出版要求书写清楚，每篇文章以2~5千字为宜，并须于正文前附加200字左右的内容提要。来稿到定稿时间保留期限为三个月，有特殊情况延至半年。未被采用稿届时退回。

来稿一经采用，除赠送本刊一年外，并酌付稿酬。

稿末请注明作者详细通讯地址、姓名，以便联系。

来稿请寄：河南省许昌市、许昌继电器研究所《继电器》编辑部。