

# 带制动特性的母线保护

华东电力设计院 王春生

随着社会主义建设的飞跃发展,接入电力系统的发电厂和变电所越来越多,在发电厂和变电所母线上发生故障的次数也相应地增加了。对于母线上发生的故障,如果不能快速和有选择性地切除时,将使电力系统的稳定运行和可靠供电带来严重的后果,甚至可能造成大面积停电的事故。因此,对于35KV及以上的母线,都规定装设快速和有选择性的母线保护装置。

在电力系统中已采用了一些型式的母线保护装置,但从运行实践情况来看,有些母线保护装置的性能还不能满足运行的要求。例如对于元件固定连接电流差动母线保护装置,在小的运行方式下保护装置的灵敏度可能不够,此外各母线元件进行切换时,由于破坏了固定连接的方式,选择元件将失去选择作用。比较电流相位的母线保护装置虽然可有较高的灵敏度,但由于采用了数量较多的中间变流器,接线和结构比较复杂,各母线元件进行切换时,中间变流器的次级侧需进行相应的切换,使保护装置的可靠性受到一定的影响。因此,在保证高的可靠性条件下使母线保护装置具有足够的灵敏度,是一个重要的课题。本文介绍一种带有制动特性的母线保护方式,作为实现上述要求的一种尝试。由于我们仅做了初步的工作,母线保护装置中可能存在着不少问题和缺点,有待于进一步研究改进。为减少篇幅起见,仅介绍其中的主要组成部分,即电流起动元件和选择元件的工作原理和接线。

## 一、电流起动元件

### 1、电流起动元件的制动作用

母线保护装置中电流起动元件的作用是正确区分出母线的内部和外部故障。为达到瞬时动作和正确区分内外部故障的目的,一般可采用电流差动的原理,将起动元件接在各母线元件的电流之和。在正常运行和外部短路时,流入母线和流出母线的电流相等,而在发生母线内部短路时全部故障电流都流入起动元件中。但由于电流互感器存在着误差,在发生外部短路时,由电流互感器误差所产生的不平衡电流 $I_b$ 将流入起动元件中。不平衡电流 $I_b$ 可由下式计算:

$$I_b = K_f f_i I_{k.max} \quad (1)$$

式中:  $K_t$ ——短路电流的非周期分量系数, 根据接线方式的不同可取为 1 或大于 1;  
 $f_i$ ——电流互感器的误差, 取为 0.1;  
 $I_{k \cdot \max}$ ——发生外部短路时的最大短路电流。

为避越上述不平衡电流的影响, 接入差动回路的电流起动元件的动作电流  $I_p$  可由下式计算:

$$I_p = K_k I_b = K_k K_t f_i I_{k \cdot \max} \quad (2)$$

式中:  $K_k$ ——可靠系数, 取为 1.3

电流起动元件的灵敏度  $K_L$  可按下式校验:

$$K_L = \frac{I_{k \cdot \min}}{I_p} \quad (3)$$

式中:  $I_{k \cdot \min}$ ——母线内部短路时的最小短路电流,

根据继电保护规程的要求, 最小灵敏度应不小于 2。因此从式(2)、(3)可知, 为使  $K_L \geq 2$ , 最大和最小短路电流的比值应满足下列要求

$$\frac{I_{k \cdot \max}}{I_{k \cdot \min}} \leq 3.8 \quad (4)$$

当电力系统的运行方式变化很大, 最大和最小短路电流的比值不能满足式(4)的要求时, 保护装置即不能可靠的工作。为克服上述缺点, 采用了带制动特性的电流起动元件方式。

电流起动元件的电流回路由工作电流  $\dot{I}_p$  和制动电流  $\dot{I}_T$  两部分组成, 其中工作电流  $\dot{I}_p$  接在各母线元件的电流之和, 即

$$\dot{I}_p = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n \quad (5)$$

其中  $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_n$ ——相应为各母线元件的电流。

制动电流  $I_T$  接在各母线元件的电流绝对值之和, 即

$$I_T = |\dot{I}_1| + |\dot{I}_2| + \dots + |\dot{I}_n| \quad (6)$$

由于制动回路接在电流  $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_n$  的整流桥并联回路中, 当某一母线元件的电流  $\dot{I}_i$  值最大时,  $I_T$  主要决定于  $|\dot{I}_i|$  值。

在发生外部短路时, 工作和制动回路的电流相应为:

$$\left. \begin{aligned} I_p &= f_i I_k \\ I_T &= I_k \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在母线内部短路时

$$\left. \begin{aligned} I_p &= I_k \\ I_T &= I_k \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

从式(7)、(8)可知, 在同一制动电流  $I_T$  值下, 发生外部和内部短路时工作电流  $I_p$  有很大的差别。图 1 示出带和不带制动特性时起动元件的特性比较。对于不带制动特性的电流起动元件, 动作电流与制动电流无关, 动作特性可用图 1 中直线 1 表示。带制动特性时的动作特性可用曲线 2 表示。

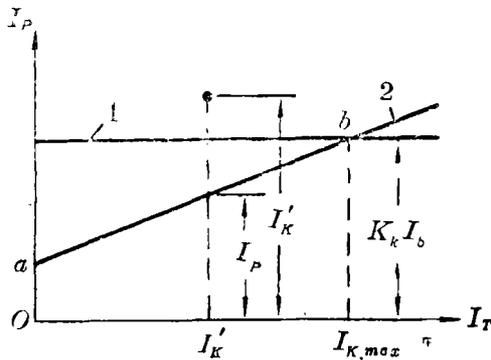


图1 起动元件的特性比较

在不带制动特性时，起动元件的动作电流可按式(2)计算。在带制动特性时，在外部短路电流为 $I_{k,max}$ 时起动元件应不动作，因此在 $I_T = I_{k,max}$ 时曲线2与直线1相交于b点。但大部分运行情况下短路电流都小于 $I_{k,max}$ ，例如短路电流为 $I'_k$ 时起动元件的工作电流减小为 $I'_p$ 。因此在小运行方式下，带制动特性的电流起动元件可保持高的灵敏度。

## 2、电流起动元件的动作特性

实际的动作特性作成图2所示的形状。正常运行时各母线元件都流有负荷电流，设某一元件的负荷电流 $I_{L1}$ 最大，该元件将提供最大制动电流 $I_{T1}$ ，即 $I_{T1} = |I_{L1}|$ 。该元件的电流互感器所产生的不平衡电流为 $I_{b1}$ 。为使起动元件不动作，在制动电流 $I_{T1}$ 时的工作电流 $I_{p1}$ 应满足下列条件：

$$I_{p1} = K_k I_{b1} = K_k f_i I_{L1}, \quad (9)$$

式中： $K_k$ ——可靠系数，可取为2。

由此可得出特性曲线的AB段。

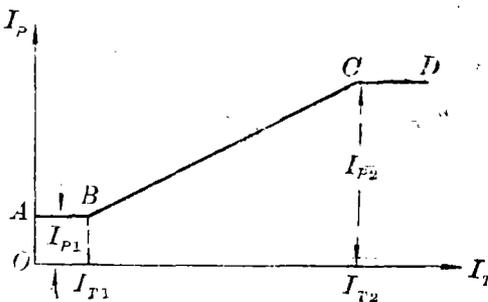


图2 电流起动元件的动作特性

在外部短路的最大短路电流 $I_{k,max}$ 时，制动电流 $I_{T2} = |I_{k,max}|$ ，此时工作电流 $I_{p2}$ 应满足下列条件，

$$I_{p2} = K_k f_i I_{k,max}, \quad (10)$$

式中： $K_k$ ——可靠系数，可取为1.5或以上。

由此求得C点后可作出特性曲线的BC段，或者可在给定制动电流 $I_{T2}$ 和制动系数 $K_T$ 值后作出，此时

$$I_{p2} = K_T I_{T2} \quad (11)$$

制动系数 $K_T = \frac{I_p}{I_T}$ 值小于1，一般可在0.1~0.8范围内调整。

当 $I_T > I_{T2}$ 时特性曲线为直线段CD。这是考虑随着短路电流的增大，制动变压器 $B_T$ 和工作变压器 $B_p$ 的铁心将趋于饱和，如二者的饱和程度不一致，并且 $B_p$ 的饱和早于 $B_T$ 时，起动元件的特性曲线将向上弯曲，如图3所示。如发生内部短路而工作点位于特性曲线之下（图3中 $K_1$ 点）时，起动元件将拒绝动作。为提高可靠性起见，在 $I_T$ 大于最大制动电流 $I_{T2}$ 时，使制动量趋于饱和，形成图2的直线段CD。此外可防止 $B_T$ 的输出电压过高，使触发电路的工作可靠性受到影响。

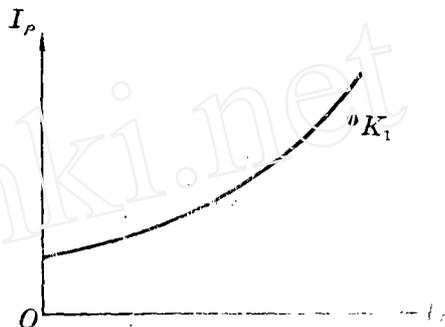


图3 特性曲线的畸变

### 3、电流起动元件的接线

电流起动元件的接线如图4所示。

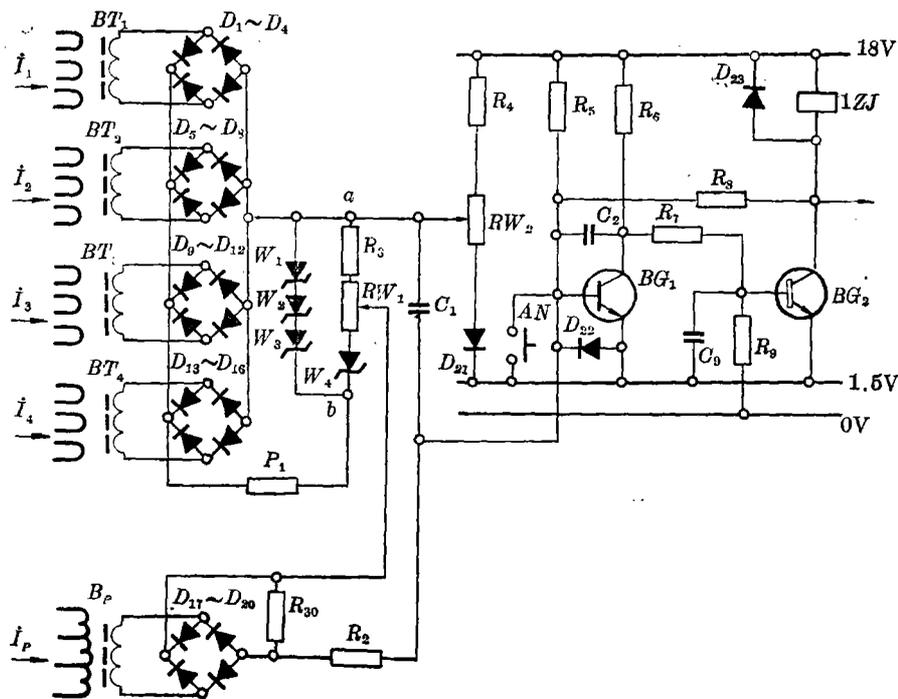


图4 电流起动元件的接线

图中 $B_p$ 为工作变压器，初级侧接入除母联断路器以外各母线元件的各相电流之和，即

$$\dot{I}_p \equiv m_1 \Sigma \dot{I}_A + m_2 \Sigma \dot{I}_B + m_3 \Sigma \dot{I}_C \quad (12)$$

式中： $m_1, m_2, m_3$ ——相应为BP初级侧A、B、C相线圈的匝数。

变压器 $B_p$ 的次级侧接到整流桥 $D_{17} \sim D_{20}$ ，因此经整流后的工作电压 $U_p$ 与电流 $\dot{I}_p$ 成正比，即

$$U_p \equiv |\dot{I}_p| \quad (13)$$

变压器 $B_{T1} \sim B_{T4}$ 为制动变压器，初级侧接到起制动作用的各母线元件的电流回路中，次级侧分别接在整流桥 $D_1 \sim D_4$ 上。整流后的制动电压 $U_T$ 为

$$U_T \equiv |\dot{I}_1| + |\dot{I}_2| + |\dot{I}_3| + |\dot{I}_4| \quad (14)$$

由于各整流桥并联后接到负载电阻 $R_s, RW_1$ 上，如制动电流之一 $\dot{I}_1$ 大于其他电流时，由整流桥 $D_1 \sim D_4$ 输出的电压大于其他整流桥，使其他二极管处于截止状态，因此制动电压 $U_T$ 取决于电流 $\dot{I}_1$ 。

图2中斜线段BC可用下式表示：

$$U_p - K_T U_T = 0 \quad (15)$$

图4中利用电位器 $RW_1$ 将制动电压 $U_T$ 取出 $K_T U_T$ 部分，再与电压 $U_p$ 相减后接到触发电路，即可实现式(15)。改变电位器 $RW_1$ 的位置可改变制动系数 $K_T$ 值。

图2中直线段AB可用电位器 $RW_2$ 和稳压管 $W_4$ 来实现。改变 $RW_2$ 的位置可改变触发电路的起动电压，即可改变工作电流 $I_{p1}$ 值。当同时通入电流 $I_p$ 和 $I_T$ 时，当 $I_T$ 值较小时稳压管 $W_4$ 未击穿， $I_p$ 的动作与 $I_T$ 无关，在特性曲线上表现为AB段。

当电流 $I_T > I_{T1}$ 时稳压管 $W_4$ 击穿，制动电压 $U_T$ 引入电路， $I_T$ 增大时必须相应地增大 $I_p$ ，触发电路才能翻转，也即是实现了式(15)，在特性曲线上表现为BC段。当 $I_T$ 进一步增大到 $I_T > I_{T2}$ 时，稳压管 $W_1 \sim W_3$ 击穿，制动电压限制为 $U_{T2}$ ，动作电流保持为 $I_{p2}$ 并不受 $I_T$ 的影响，特性曲线上表现为直线段CD。

图4中正常情况下三极管 $BG_1$ 由电阻 $R_5$ 取得基极电流而导通， $BG_2$ 截止。当电流起动元件动作时 $BG_1$ 截止， $BG_2$ 导通，继电器1ZJ动作。 $BG_2$ 导通后可起动相应的逻辑电路，继电器1ZJ的接点闭合后起动信号回路。AN为检测按钮，按下按钮时可使触发电路翻转。

#### 4. 综合变流器

对于起动元件，如将A、B、C三相的电压 $U_T$ 和 $U_p$ 分别比较时，考虑到母线各元件的电流都须接入制动变压器、制动变压器的数量将较多，接线也将复杂。为了简化接线和减少铁心数量起见，利用综合变流器将三相电流变换为单相输出电压来进行比较。综合变流器的初级侧，对应于A、B、C相为8、6、4匝。由于综合变流器的初级侧对各相来说具有不同的匝数，在发生不同相别的短路时，如通入相同值的电流，次级侧的电压值是不同的，也即在不同短路时具有不同的相对灵敏度。众所周知，在三相电流互感器和各种短路情况下的相对灵敏度可用下表表示：

故障类型	A O	B O	C O	A B	B C	C A	A B C
相对灵敏度	4	3	2	1	1	2	$\sqrt{3}$

对于中性点不直接接地系统，如改变接入综合变流器的方式时，最大和最小相对灵敏度之比可以进一步降低。

对于不带制动特性的起动元件，采用综合变流器后在发生不同短路情况下，相对灵敏度将有变化，这是一个缺点。但对于带制动特性的起动元件，反应的是在发生短路情况下电流 $I_p$ 和 $I_T$ 所确定的工作点，如工作点位于特性曲线之上时起动元件动作，在特性曲线之下时则不动作。在不同的短路方式下， $B_T$ 和 $B_T$ 中通入电流的初级侧匝数是相同的，对动作特性不带来什么影响，也即动作特性与短路的方式无关。但采用综合变流器后，可只采用一个电流起动元件，对简化接线和减少铁心数量带来很多好处。

电流起动元件带有制动特性后，可在各种运行方式和各种短路时保证足够和稳定的灵敏度。如图2所示，在母线内部短路时短路电流为 $I_k'$ ，此时 $I_T = |I_k'|$ ，特性曲线上工作电流 $I_p' = K_T I_k'$ 。如起动元件的灵敏度 $K_L$ 可定义为

$$K_L = \frac{I_k'}{I_p'} = \frac{I}{K_T} = \frac{I}{K_k f_i} \quad (16)$$

由式(16)可知，如 $f_i$ 取为0.1， $K_k$ 取为1.5，在各种短路情况下 $K_L$ 可保持为6.6。也即是起动元件可在不同短路电流的情况下，自动调整工作点的位置，以保证足够的灵敏度。

### 5、电流起动元件的整定

为使在发生外部短路时能有足够的制动，表面上看每一母线元件的电流应接到单独的制动变压器，如母线元件数较多时制动变压器的数量也较多。为简化接线和减少铁心数量起见，制动变压器的数量 $m$ 可以少于母线元件的数量 $n$ 。为使在外部短路时电流起动元件仍能可靠地制动，可将两或三个母线元件的电流并联后接入一个制动变压器中，一般可将供电元件和负荷元件的电流并接在一起，如图5所示。此时在外部短路时制动电流 $I_T = I_k - I_1$ ，其中 $I_1$ 为供电元件的电流。因此在 $m < n$ 条件下整定特性曲线时， $I_{p2}$ 值仍按式(10)计算， $I_{T2}$ 值应选用在外部短路时 $I_k - I_1$ 值中较小的一个，或者可选用较大的制动系数 $K_T$ 值。通常电流 $I_1$ 在 $I_k$ 中所占的比例不会很大，这样整定时电流起动元件的灵敏度不会受到很大影响。

前面已谈过，电流起动元件的动作与否决定于短路情况下电流 $I_p$ 和 $I_T$ 所确定的位置，起动元件的灵敏度与短路的方式无关。但由于图4的电路中包

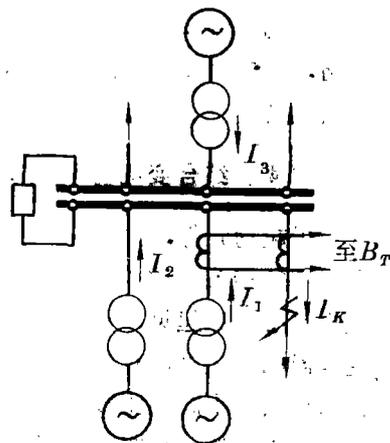


图5 制动电流的分布

含了非线性元件（稳压管），在实际通电流整定时，为保证工作的可靠性还应计及相对灵敏度的影响。

如设最大和最小灵敏度之比为2（如中性点不接地系统）则在动作特性为一斜线时（图6），在初级侧的不同匝数通入电流时特性曲线是相同的，只是坐标轴的比例不同。

但如动作特性为一折线时（图7），如按相对灵敏度为1来整定曲线，则在外短路时设 $I_{L,max} = 60A$ ，在 $I_{T2} \geq 60A$ 时应使稳压管 $W_1 \sim W_3$ 击穿，斜线被削平。但在发生相对灵敏度为2时的外部短路时， $I_T = 30A$ 时斜线即被削平，而在 $I_T > 30A$ 时，由 $I_p$ 和 $I_T$ 确定的位置可能在特性曲线之上，导致电流起动元件的误动作。如按相对灵敏度为2的短路方式整定时，在 $I_{T2} \geq 60A$ 时斜线开始削平，如图7中实线所示。而在相对灵敏度为1时，最大制动电流相当于相对灵敏度为2时的30A，如图7中虚线所示。在发生外部短路时工作点位于特性曲线之下，起动元件能可靠地不动作。

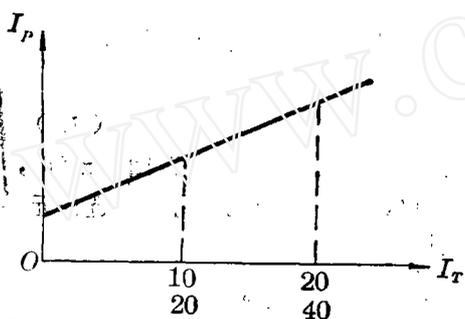


图6 特性曲线的比例

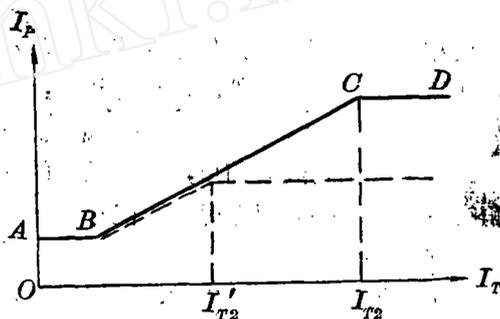


图7 特性曲线的整定

上述现象是由于综合变流器具有不同的相对灵敏度所引起的，但考虑到为使接线简化和铁心数量减少，电流起动元件的实际灵敏度不受短路方式而变化，按图7方式整定时起动元件的工作是可靠的。

## 二、选择元件

### 1、选择元件的方式

选择元件的作用是正确地区分出发生短路的母线是正母线还是付母线。考虑到母线元件可能经常切换操作，同时又不希望将电流互感器的二次回路进行相应的切换，目前采用的选择元件方式是比较母线故障电流 $\dot{I}_L$ 与母联断路器电流 $\dot{I}_M$ 的相位。

如图8所示，在正母线发生短路时电流 $\dot{I}_L$ 与 $\dot{I}_M$ 同相，正母线选择元件动作；对于付母线选择元件来说，电流 $\dot{I}_L$ 与 $\dot{I}_M$ 反相，因此不动作。当母线元件在母线间任意切换时，由于由该元件供给的故障电流 $\dot{I}_1$ 并不影响总故障电流 $\dot{I}_L$ 的相位，利用 $\dot{I}_L$ 与 $\dot{I}_M$ 的相位可区分出发生故障的母线段。但是如将母线元件自正母线切换到付母线时，应将该

元件的跳闸回路也自正母线切换到付母线侧，即可实现有选择性的跳闸。这种方式的缺点是母联断路器处在断开状态时，选择元件不能工作。

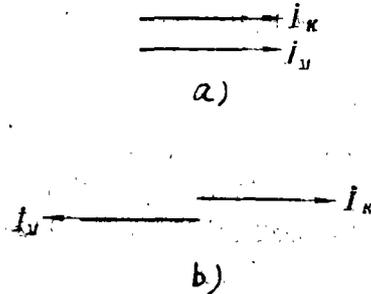


图8 故障电流的向量  
a—内部故障； b—外部故障。

比相元件通常可按比较绝对值或比较相位的方式来组成。按比较绝对值原理组成时，相当于一个方向元件，动作方程为：

$$|\dot{I}_k + \dot{I}_M| = |\dot{I}_k - \dot{I}_M| \quad (17)$$

这种方式的接线较简单，方向元件的动作范围为 $\pm 90^\circ$ 。由于动作范围为 $\pm 90^\circ$ ，当相角在 $\pm 90^\circ$ 或 $-90^\circ$ 附近时，可能存在着重复动作区，或在拉合电流时两个选择元件可能产生交替动作现象。

按比较相位的原理组成时，可按需要来调整相角的动作范围。

如在母联断路器断开情况下仍需要有选择性地切除故障母线段，可附加一个反应电压差值的选择元件，动作方程为

$$|\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}| \geq A \quad (18)$$

式中： $\dot{U}_I, \dot{U}_{II}$ ——相应为正、付母线的电压，可由负序电压或相电压等来组成；  
A——选择元件的动作值，由整定计算确定。

## 2、比相元件的接线

比相元件的接线方式很多，下面介绍一种类似于JMC型保护装置中采用的积分原理的接线方式，接线如图9所示。

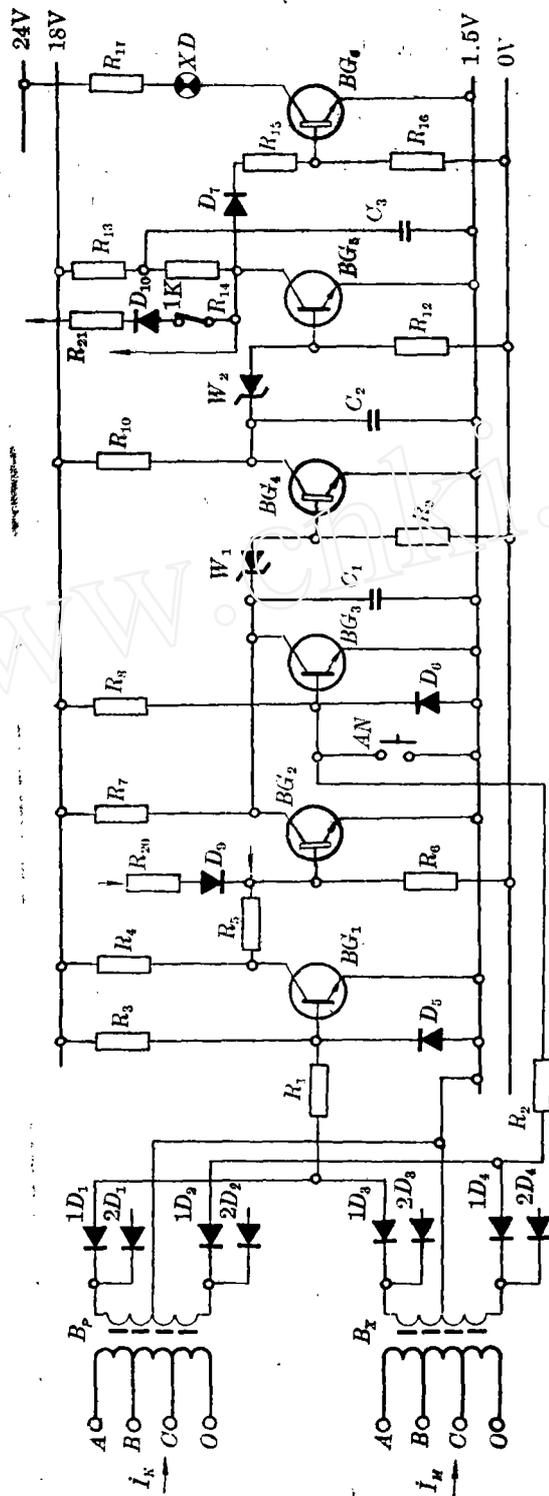


图 9 比相元件的接线

变压器 $B_p$ 和 $B_x$ 中相应地通入电流 $I_k$ 和 $I_M$ 。正常情况下三极管 $BG_1$ 和 $BG_3$ 分别由电阻 $R_3$ 和 $R_4$ 取得基极电流而导通，电容 $C_1$ 被 $BG_3$ 短接，比相元件不动作。

在被保护母线段外部短路时，电流 $I_k$ 与 $I_M$ 间相角为 $180^\circ$ ，电流波形如图10所示。变压器 $B_p$ 和 $B_x$ 的次级电压由二极管 $1D_1 \sim 1D_4$ 检波。 $1D_1$ 和 $1D_3$ 并联后接到 $BG_1$ 的基极， $1D_2$ 和 $1D_4$ 并联后接到 $BG_3$ 的基极，检波后的电压为连续的负电压。在连续负电压的作用下， $BG_1$ 截止，使 $BG_2$ 导通。 $BG_3$ 转为截止，但由于 $BG_2$ 和 $BG_3$ 的集电极并联后接到电容 $C_1$ ， $C_1$ 仍被短接，比相元件不动作。

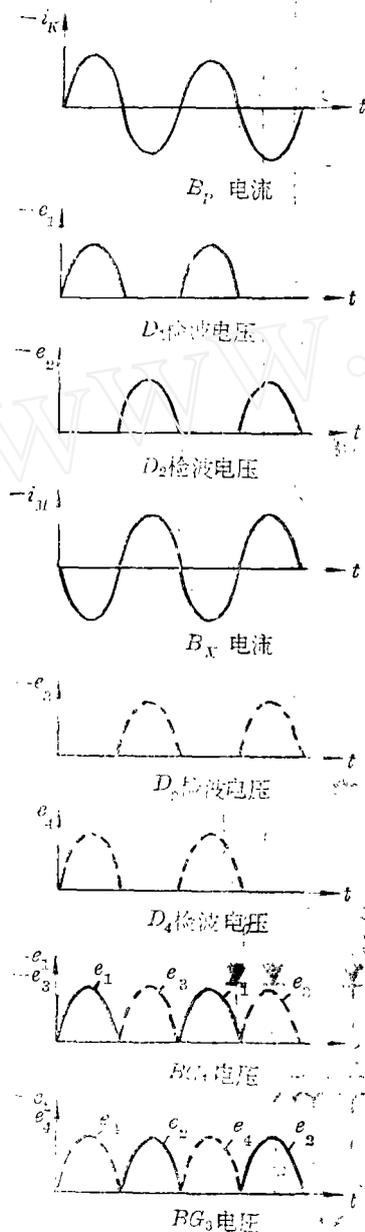


图10 外部短路时电流和电压波形

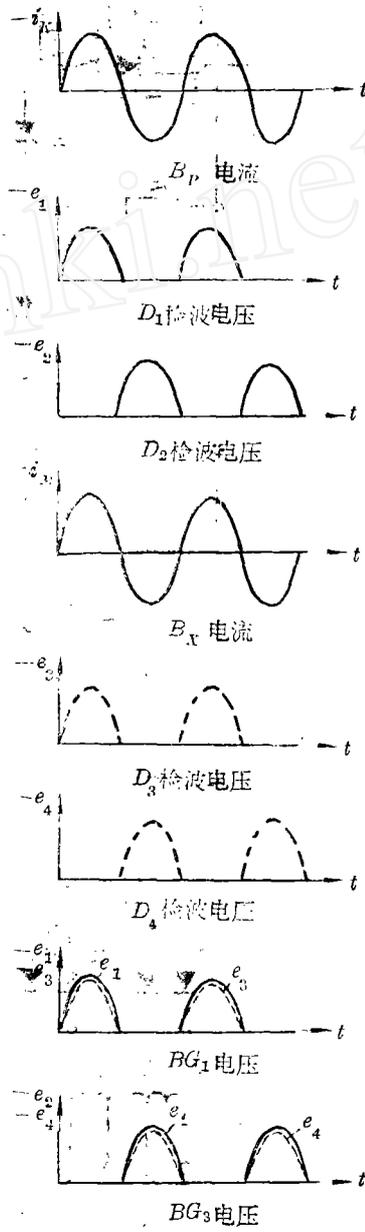


图11 内部短路时电流和电压波形

在被保护母线段内部短路时，电流  $\dot{I}_k$  与  $\dot{I}_M$  间相角为  $0^\circ$ ，电流波形如图 11 所示。加在  $BG_1$  和  $BG_3$  基极上的电压为断续的间断波。

在第一个半周时加在  $BG_1$  基极上电压为一负电压， $BG_1$  转为截止， $BG_2$  导通。加在  $BG_3$  基极上电压为零电位， $BG_3$  仍由电阻  $R_6$  取得基极电流而导通， $C_1$  被短接，比相元件不动作。在第二个半周时加在  $BG_1$  基极上电压为零电位， $BG_1$  导通， $BG_2$  截止。加在  $BG_3$  基极上电压为负电压， $BG_3$  截止。 $BG_2$  和  $BG_3$  截止后，电容  $C_1$  经电阻  $R_7$  充电， $C_1$  上电压波形如图 12 所示。

当  $C_1$  上电压达到一定值  $E_1$  时，下面的电路翻转。图 9 中三极管  $BG_4 \sim BG_6$  构成展宽电路，可将  $C_1$  上输出的间断脉冲转换为一个持续的输出电压，使保护装置可靠地动作于跳闸。比相元件动作后起动相应的逻辑电路和点亮信号灯  $XD$ 。

比相元件的动作范围为  $\pm 60^\circ$ ，如图 13 所示。

在母线发生故障而母联断路器又先断开时，电流  $\dot{I}_M = 0$ ，在电流  $\dot{I}_k$  的作用下，经二极管检波后的电压又出现了间断波，两组母线的选择元件都可能动作。为防止上述情况，两个比相元件的出口采取了相互否定的方式。当正母线比相元件动作后，三极管  $BG_6$  截止，通过开关  $1K$ 、二极管  $D_{1c}$  和电阻  $R_{21}$ ，向付母线比相元件的三极管  $BG_2$  供给基极电流，使付母线比相元件不动作。此外为使比相元件可靠工作，使仅在起动元件动作后再行选择故障的母线段。当起动元件不动作时，由截止三极管经电阻  $R_{20}$  和二极管  $D_9$  向比相元件三极管  $BG_2$  供给基极电流，使比相元件不动作。此外，当起动元件动作后，比相元件须经一定的积分时间后才动作，可增加保护装置的抗干扰能力。

当双母线转为单母线方式运行时，母线发生短路时应将连接在母线上的所有元件都断开，正付母线的比相元件不需要相互闭锁。此时可将开关  $1K$  打开，解除相互闭锁回路，母线发生短路时在电流  $\dot{I}_k$  的作用下，两个比相元件都能动作。

当双母线运行、母线发生短路而母联断路器又首先断开情况下，前已谈过，在电流  $\dot{I}_k$  的作用下比相元件能够动作，因此不需要再采取其他的自保持措施。

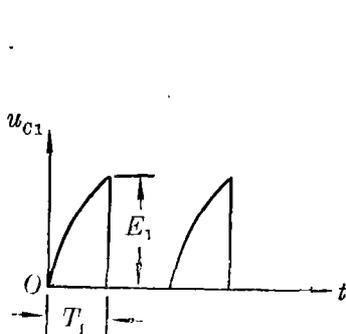


图 12 电容器充电电压波形

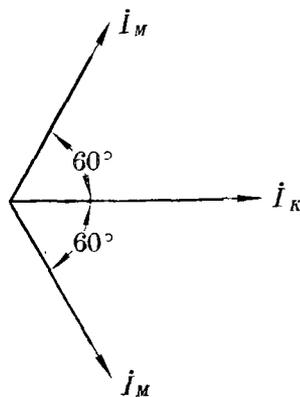


图 13 比相元件的动作范围