

晶体管负序功率方向继电器

许昌继电器研究所 张鸿仪

对于大型发电机、变压器或发电机变压器组，为了提高保护的选择性和灵敏度，装设负序电流起动、负序功率方向判断故障方向的后备保护，在发生非对称故障时起保护作用。

负序功率方向继电器（以下简称继电器）仅当保护安装处既存在负序电流分量，又存在负序电压分量，且故障点在预定的方向上才能动作，因而它的选择性比较强，这对于多端供电的电力系统是相当适用的。

一、继电器动作条件

1. 相间短路故障

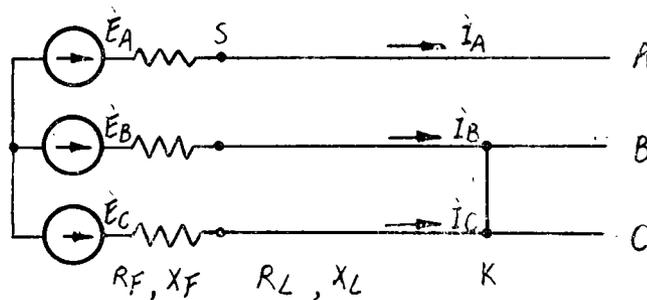


图1 B、C相短路时的系统图

以B、C相短路为例，故障点处的电流和电压的向量图示于图2中。图中将非故障相的电流（ i_A ）略而不计。

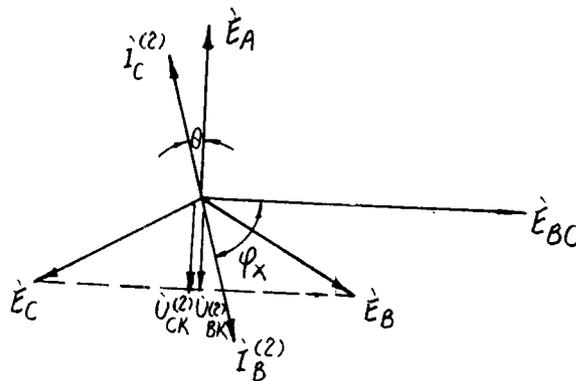


图2 B、C相短路时的电流、电压向量图

从图 2 中可以看出:

$$\dot{I}_C^{(2)} = -\dot{I}_B^{(2)}$$

$$\dot{U}_{BK}^{(2)} = \dot{U}_{CK}^{(2)}$$

故障点处的线电压

$$\dot{U}_{ACK}^{(2)} = \dot{U}_{ABK}^{(2)}$$

$$\dot{U}_{BCK}^{(2)} = 0$$

φ_x 为系统阻抗角, 在一般系统中约为 75° 。

用对称分量法求出:

$$\dot{I}_{1A}^{(2)} = \frac{1}{3} [a \dot{I}_B^{(2)} + a^2 \dot{I}_C^{(2)}] = j \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_B^{(2)} = -j \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_C^{(2)}$$

$$\dot{I}_{2A}^{(2)} = \frac{1}{3} [a^2 \dot{I}_B^{(2)} + a \dot{I}_C^{(2)}] = -j \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_B^{(2)} = j \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_C^{(2)}$$

$$\dot{U}_{1AK}^{(2)} = \frac{1}{3} [\dot{E}_A + a \dot{U}_{BK}^{(2)} + a^2 \dot{U}_{CK}^{(2)}] = \frac{1}{3} [\dot{E}_A + 0.5 \dot{E}_A] = \frac{1}{2} \dot{E}_A$$

$$\dot{U}_{2AK}^{(2)} = \frac{1}{3} [\dot{E}_A + a^2 \dot{U}_{BK}^{(2)} + a \dot{U}_{CK}^{(2)}] = \frac{1}{3} [\dot{E}_A + 0.5 \dot{E}_A] = \frac{1}{2} \dot{E}_A$$

用对称分量表示的电流向量图示于图 3 中, 电压向量图示于图 4 中。

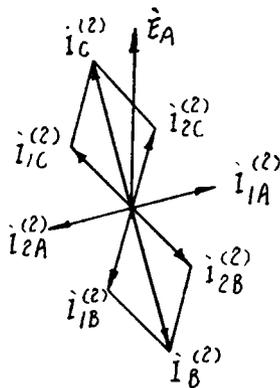


图 3 B、C 相短路时电流向量图

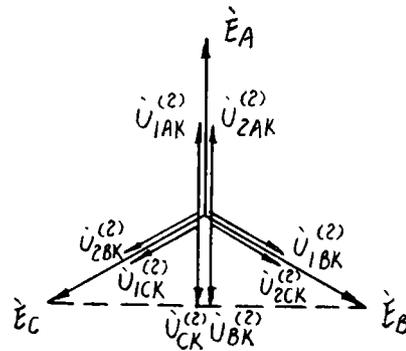


图 4 B、C 相短路时电压向量图

负序电流的绝对值

$$I_{2A}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_C^{(2)}$$

$$I_C = -I_B = \sqrt{3} I_{2A}^{(2)}$$

负序电压的绝对值

$$U_{2AK}^{(2)} = \frac{1}{2} E_A = \frac{1}{3} U_{ACK}^{(2)} = \frac{1}{3} U_{ABK}^{(2)}$$

$$U_{2ABK}^{(2)} = \sqrt{3} U_{2AK}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{ACK}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{ABK}^{(2)}$$

$$U_{ACK}^{(2)} = U_{ABK}^{(2)} = \sqrt{3} U_{2ABK}^{(2)}$$

由上可知，在发生相间短路时，故障电流为负序分量电流的 $\sqrt{3}$ 倍，非故障相对于故障点的电压降为故障处负序线电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

如 $\varphi_x = 75^\circ$ ，则

$$\theta = 180^\circ - 90^\circ - \varphi_x = 90^\circ - 75^\circ = 15^\circ$$

则 $\dot{I}_{2A}^{(2)}$ 超前 $\dot{U}_{2AK}^{(2)}$ 的角度

$$\psi = -(90^\circ + 15^\circ) = -105^\circ$$

因为电流超前于电压，所以 ψ 应为负值。

2. 大电流接地系统的单相接地故障

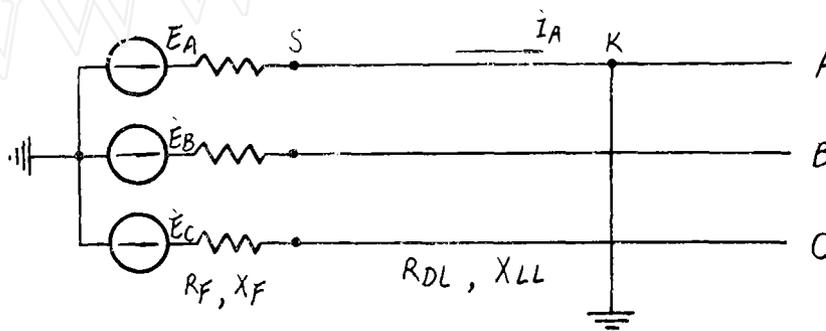


图5 A相接地时的系统图

以A相接地为例，并将非故障相电流略去不计，则在故障点K处，线路对地的电压

$$\dot{U}_{AK}^{(1)} = 0$$

$$\dot{U}_{BK}^{(1)} = \dot{E}_B$$

$$\dot{U}_{CK}^{(1)} = \dot{E}_C$$

故障电流为 $\dot{I}_A^{(1)}$

用对称分量分析法，求出

$$\dot{I}_{1A}^{(1)} = \frac{1}{3} \dot{I}_A^{(1)}$$

$$\dot{I}_{2A}^{(1)} = -\frac{1}{3} \dot{I}_A^{(1)}$$

$$\dot{I}_{0A}^{(1)} = \frac{1}{3} \dot{I}_A^{(1)}$$

$$\dot{U}_{1AK}^{(1)} = \frac{1}{3} (a \dot{E}_B + a^2 \dot{E}_C) = \frac{2}{3} \dot{E}_A$$

$$\dot{U}_{2AK}^{(1)} = \frac{1}{3} (a^2 \dot{E}_B + a \dot{E}_C) = -\frac{1}{3} \dot{E}_A$$

$$\dot{U}_{0AK}^{(1)} = \frac{1}{3} (\dot{E}_B + \dot{E}_C) = -\frac{1}{3} \dot{E}_A$$

用对称分量表示的电流向量图示于图 6 中, 电压向量图示于图 7 中。

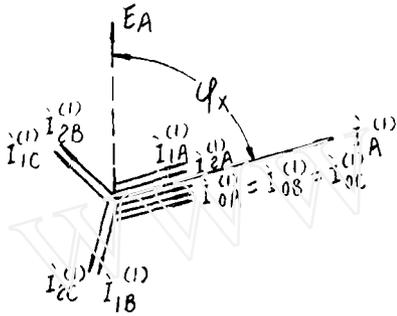


图 6 A 相接地时电流向量图

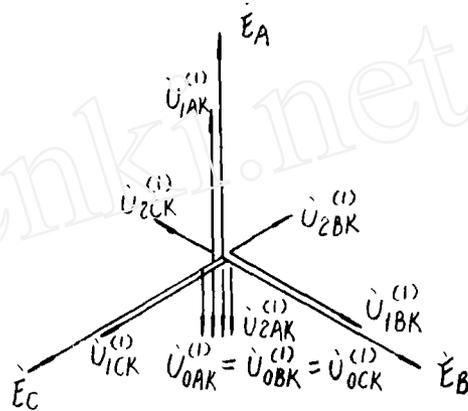


图 7 A 相接地时电压向量图

负序电流的绝对值

$$I_{2A}^{(1)} = \frac{1}{3} I_A^{(1)}$$

$$I_A^{(1)} = 3 I_{2A}^{(1)}$$

负序电压的绝对值

$$U_{2AK}^{(1)} = \frac{1}{3} E_A$$

$$U_{2BCK}^{(1)} = \sqrt{3} U_{2AK}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}}{3} E_A$$

$$U_{BCK}^{(1)} = E_{BC} = \sqrt{3} E_A$$

$$U_{BCK}^{(1)} = 3 U_{2BCK}^{(1)}$$

由上可知, 对于大电流接地系统, 在发生单相接地时, 故障电流为负序电流的 3 倍; 在故障处, 非故障相的线电压为负序线电压的 3 倍。

如果 $\varphi_x = 75^\circ$, 则 $I_{2A}^{(1)}$ 超前 $U_{2AK}^{(1)}$ 的角度

$$\psi = -(180^\circ - 75^\circ) = -105^\circ$$

因为电流超前于电压, 所以 ψ 为负值。

$I_A^{(1)}$ 超前于 $U_{BCK}^{(1)}$ 的角度

$$\theta = 90^\circ - \varphi_x = 90^\circ - 75^\circ = 15^\circ$$

以上分析只是简略的，实际上在高压线路中，非故障相中的电容电流及由此产生的电压降是相当大的，对于负序电流、负序电压的数值和相位均有一定的影响。

从以上对于相间短路故障和大电流接地系统单相接地故障的初步分析，可以得出以下结论：

1、当系统阻抗角 $\varphi_x = 75^\circ$ 时，负序功率方向继电器的最大灵敏角应当为 -105° 。

2、继电器可以用模拟相间短路的方法试验，模拟B、C相短路时，通 $\dot{I}_C = -\dot{I}_B$ 电流，加 $\dot{U}_{AC} = \dot{U}_{AB}$ 电压；模拟A、B相短路时，通 $\dot{I}_B = -\dot{I}_A$ ，加 $\dot{U}_{CB} = \dot{U}_{CA}$ ；模拟C、A相短路时，通 $\dot{I}_A = -\dot{I}_C$ ，加 $\dot{U}_{BA} = \dot{U}_{BC}$ ；按上述电流、电压，继电器的最大灵敏角均为 -15° ，而且电流和电压均为负序值的 $\sqrt{3}$ 倍。

3、继电器也可以用模拟大电流接地系统单相接地的方法试验，此时需要用移相器的中性点（次级绕组接Y形接线）。模拟A相接地时，在负序电流滤过器的A相和 $3I_0$ 绕组中通 \dot{I}_A 电流，移相器次级绕组的中性点接于负序电压滤过器的A相端子，B、C相电压分别加于负序电压滤过器的B、C相端子；按照 \dot{I}_A 和 \dot{U}_{BC} ，继电器的最大灵敏角应为 -15° ，而且电流和电压均为负序值的3倍。模拟B相接地和C相接地的情况依此类推，最大灵敏角及电流、电压的倍数（对于负序值）同上。

二、继电器结构原理

继电器由负序电流滤过器、负序电压滤过器、隔离变压器、晶体管回路和出口继电器组成，原理接线图如图8所示。

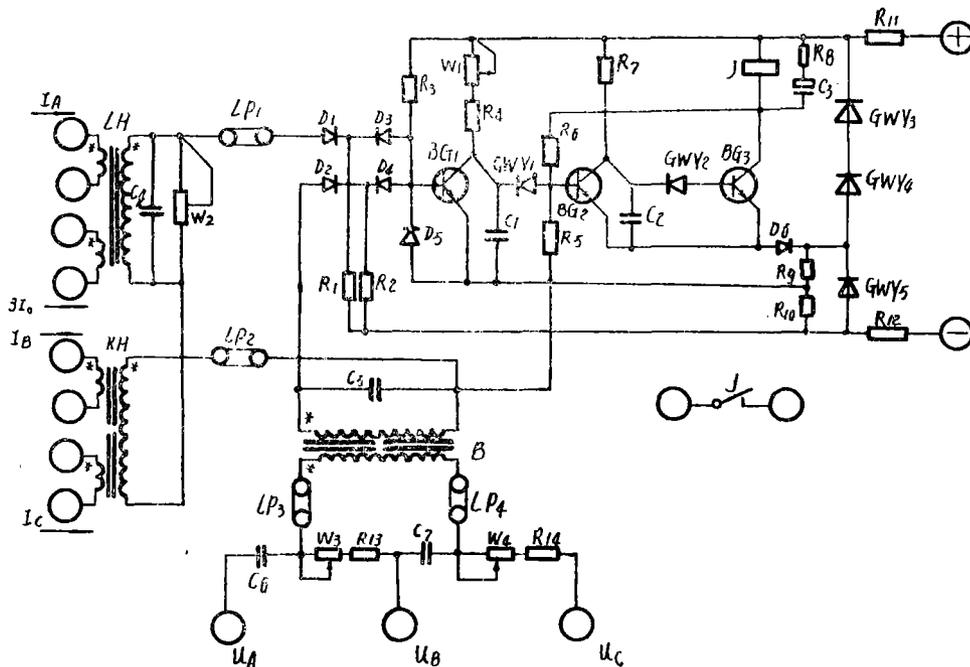


图8 原理接线图

1、负序电流滤过器由电流互感器LH、电容器C₄、电位器W₂和电抗互感器KH组成。LH的铁心无气隙，A相电流绕组的匝数为3I₀。绕组匝数的3倍，因此在LH中没有零序电流的磁势。在铁心没有饱和时，LH的二次电流正比于一次电流；依靠电容C₄对于损耗的补偿作用，使电位器W₂上的电压正比于一次电流并且同相。KH的铁心带气隙，在铁心没有饱和时，其二次电势与一次电流 $\dot{I}_B - \dot{I}_C$ 成正比并且相位超前90°。调整电位器W₂，使滤过器在通正序对称电流时，W₂上的电压和KH的二次电势恰巧抵消，这样滤过器就无电压输出，此时的向量图如图9所示。

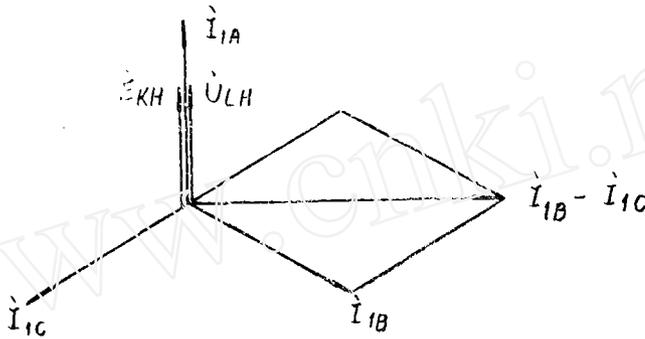


图9 通正序电流时滤过器的电流、电压向量图

从图9向量图上看， \dot{U}_{LH} 和 \dot{E}_{KH} 同相；但因LH和KH二次绕组连接时极性相反，两电压抵消，滤过器无输出电压。当滤过器通负序电流时， \dot{U}_{LH} 和 \dot{E}_{KH} 大小相等，方向相反，两者相加，滤过器有相当大的输出电压，此时的向量图如图10所示。

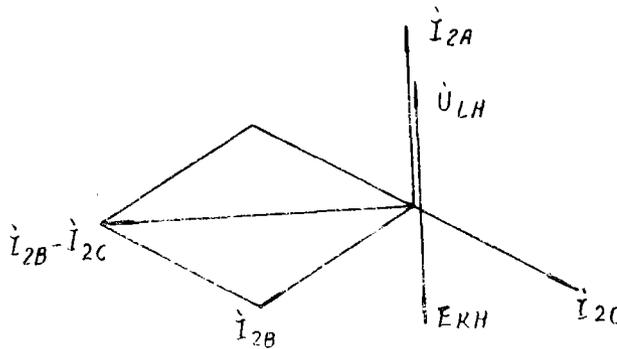


图10 通负序电流时滤过器的电流、电压相量图

当滤过器通零序电流时，由于KH的B相和C相电流绕组输入端极性相反，绕组匝数相等，零序电流磁势抵消，前面已谈过LH中无零序电流磁势，因此滤过器无输出电压。

综上所述，在一定条件下，仅在所通的电流中存在负序分量时，负序电流滤过器二次回路才有输出电压。

2、负序电压滤过器为一般通用的阻容式滤过器；调整W₃，使A、B相端子间的总电阻 $R_{AB} = \sqrt{3} X_{C6}$ ，调整W₄，使B、C相端子间的总电阻 $R_{BC} = \frac{1}{\sqrt{3}} X_{C7}$ 。

加正序电压时，滤过器输出端上的电压

$$\dot{U}_{mn} = \dot{U}_{RAB} + \dot{U}_{XC7} = \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{U}_{1AB} / 30^\circ - \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{U}_{1AB} / 30^\circ = 0$$

此时的电压向量图如图11所示。

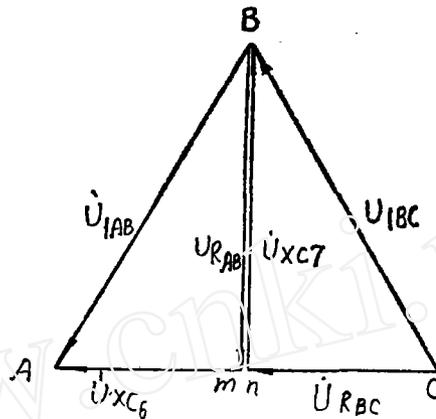


图11 加正序电压时滤过器的电压向量图

加负序电压时，滤过器空载时的电压向量图如图12所示。

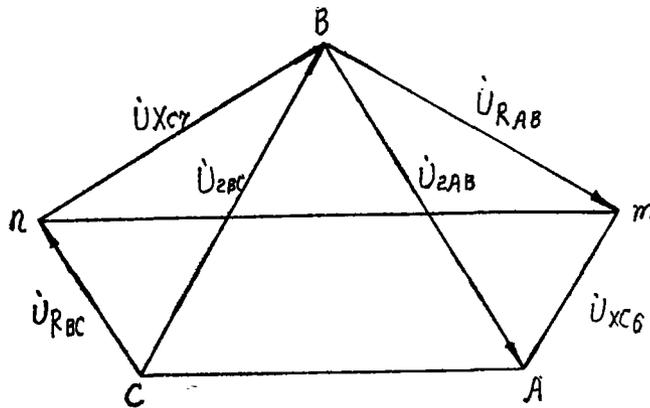


图12 加负序电压时滤过器的电压向量图

输出端上的电压

$$\dot{U}_{mn} = \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{U}_{2AB} / 30^\circ + \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{U}_{2AB} / 90^\circ = 1.5 \dot{U}_{2AB} / 60^\circ$$

负序电压滤过器加的是线电压，而线电压中不存在零序分量，因此滤过器只在所加电压中存在负序分量时才有输出电压。

3、隔离变压器B为带气隙的电抗互感器，其二次回路中的电容器C₂用于使继电器的最大灵敏角符合规定的要求。

4、晶体管回路包括相位比较回路、确定动作区大小的记忆回路和消除暂态过程引起误动作的延时回路等部分。晶体管回路的波形图如图13所示。

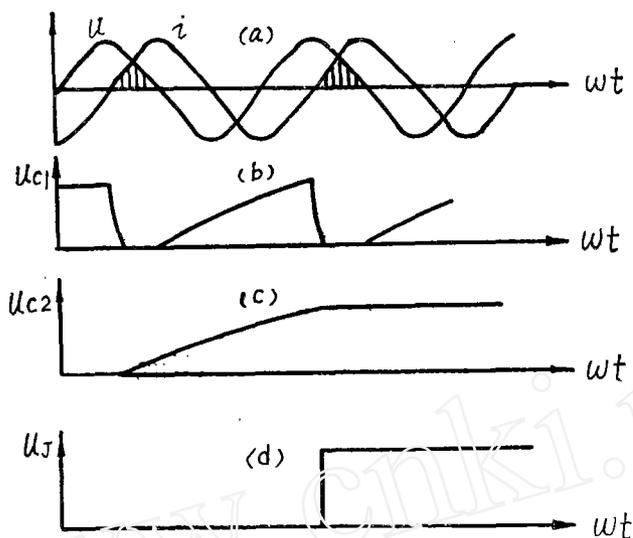


图13 边界动作条件下的波形图

相位比较回路由二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 和电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 组成。 D_1 和 D_2 将负序电流滤过器及经过隔离变压器的负序电压滤过器的输出信号电压进行半波整流。 R_1 、 R_2 、 D_3 、 D_4 和 R_3 构成与门；当无信号电压时，经 R_3 、 D_3 和 R_1 、 D_4 和 R_2 流过电流，于是三极管 BG_1 截止；只有当同时存在两足够大的输入信号电压并且在一定时间均为正方向时，才能使与门关闭，电流经 R_3 流入 BG_1 ，使 BG_1 导通。由于采用此种直接相位比较回路，继电器不存在潜动问题。

记忆回路由 W_1 、 R_4 、 C_1 、 GWY_1 等组成，其时限约为 15ms ；这样，当两信号电压相位相差 90° 时，在正半周同方向的 5ms 时间内， BG_1 由截止转为导通，电容 C_1 放电，三极管 BG_2 由导通转为截止，电容 C_2 开始充电，三极管 BG_3 仍保持截止状态。 R_7 、 C_2 、 GWY_2 等组成的延时回路的时限稍大于 20ms ，因而在 BG_1 第一次导通后， BG_3 不会导通；当与门再次关闭， BG_1 再次导通且导通时间足够时， BG_3 方能导通，使出口继电器 J 动作。如果两信号电压使与门关闭的时间小于 5ms ，则 BG_2 在与门第二次关闭前就导通了，因而继电器不动作，这样就保证了继电器的动作区接近 180° ，调整 W_1 可以适当改变动作区的大小。当两信号电压同相时，就是继电器处于最大灵敏角时的工作条件。

5、出口继电器为一小型密封继电器；接点容量能够满足组合继电器方案的要求。

继电器的技术数据详见许昌继电器厂组合继电器产品介绍第31页。

三、影响继电器工作的外界条件

1. 电源波形的影响

当继电器的负序电流滤过器通过含有高次谐波的电流时，负序电压滤过器加含有高次谐波的电压时，均产生附加的不平衡电压。此不平衡电压对于继电器的工作特性有一定的影响，因此，在调试继电器时应当对电流和电压的波形进行检查，特别是对移相器的输出电压

更应当注意。在实际应用上，由于继电器用作发电机和变压器的后备保护，短路电流倍数有一定限度，系统的电流互感器波形畸变不大，另外在短路故障时一般不产生大的过电压，电压互感器输出电压的波形畸变也不大，因而电源波形不是突出的问题。

2. 电源周率的影响

由于电源周率的变化，负序电流滤过器和负序电压滤过器均将产生附加的不平衡输出电压，这对继电器的动作区和最大灵敏度都有一定的影响；此外，晶体管回路中记忆回路的时间是不随电源周率改变的，例如记忆时间为15ms，由此确定的继电器在额定周率50Hz时的动作区为180°，但当周率变化时，每个周波的周期也变化了，于是继电器的动作区也随之改变。例如，电源周率降到48Hz，每个周波的周期由20ms增大到约20.8ms，这时 $\frac{1}{4}$ 周波的时间为5.2ms，而此时继电器动作所需的与门关闭时间为20.8-15=5.8ms，于是继电器的动作区

$$\theta_D = (180^\circ - \frac{5.8}{5.2} \times 90^\circ) \times 2 = (180^\circ - 100.4^\circ) \times 2 = 159.2^\circ$$

动作区减小了20.8°。当然，这仅是粗略的计算，因为没有将滤过器因周率降低产生的附加不平衡电压考虑在内。反之，当周率升高时，继电器的动作区将变大。考虑到周率影响，调试继电器应当在额定周率下进行，以保证继电器特性的准确性。

四、简短结论

上述晶体管负序功率方向继电器，具有一些明显的优点，如不存在潜动问题，抗干扰能力强，躲过系统过渡过程性能较好等。但还存在一些不足处，如动作时间稍长（比不加延时回路长20ms左右），周率变化对性能影响较大等。这些问题还有待作进一步的研究。