

方向阻抗继电器的暂态特性

江苏省电力试验研究所 蔡柏文

前言

目前,将方向圆阻抗继电器的两种动作条件表示方式相互间进行转换时,均采用平行四边形法。这样做的缺陷是:无法体现记忆回路电压矢量 \dot{U} 的作用。若仍按照平行四边形扩展来表达 \dot{U} 的作用,会得出一个梯形。不但复杂,而且仍然没有能解决问题,并且还容易导致推导中的失误。为此,就有必要寻找一种简便、明确的方法,将带有记忆回路的方向圆阻抗继电器的绝对值比较和相位比较这两种动作条件表达方式相互转换。这样,在用相位比较表达的动作条件中,可直观地看到记忆电压 \dot{U} 在暂态过程中对动作特性的影响。

一、不带记忆回路的方向圆阻抗继电器的三角形法

1. 用阻抗三角形代替平行四边形

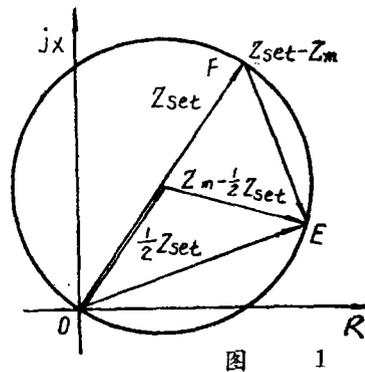
不带记忆回路的方向圆特性阻抗继电器的动作方程很简单,设其动作特性如图1所示。

若用绝对值比较表示其动作条件为:

$$|A| \geq |B| \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{2} Z_{set} \quad (2)$$

$$B = Z_m - \frac{1}{2} Z_{set} \quad (3)$$



次侧仍然流过 \dot{I}_{CY} 。在振荡电源工作期间,只有此时才出现 I_{FI} ,其二次谐波分量即 $0.39I_{FI}$ 供保护动作,高次谐波分量由 C_1 滤掉(参看图1)当 $R \neq 0$ 时,流过故障线路的为 βI_{FI} ,其二次谐波分量为 $0.39\beta I_{FI}$ 。

七、结论

利用人工二次谐波分量在中性点经消弧线圈接地系统中实现单相稳态接地短路保护,设备简单,接线简单,动作可靠,灵敏度高,保护的整定计算大为简化,是其它任何接地保护所不能比拟的,很有应用价值,前景广阔。

对于双回线路,当发生接地故障时,如何选择出其中的故障线路,这需要人工二次谐波功率方向保护,如何实现?这是一个复杂的有趣的技术课题,也是一个很有效益的问题,待有机会再去研讨。

若用相位比较表示其动作条件,则为:

$$-90^\circ \leq \arg \frac{C}{D} \leq 90^\circ$$

$$C = Z_{set} - Z_m$$

$$D = Z_m$$

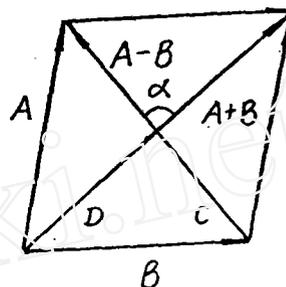
为说明这两种动作条件是相同的。

一般采用平行四边形法,即利用:

$$C = A - B$$

$$D = A + B$$

则两种条件的转换可用图2实现。



$$\alpha = \arg (C/D)$$

图2

实际上,可进一步简化为一个三角形,作法是:将(1)式两边均乘上2则得动作条件为: $|2A| \geq |2B|$ 。再将(2)式、(3)式分别代入得:

$$|Z_{set}| \geq |2Z_m - Z_{set}|$$

也就是将图1中的三角形OEF扩展成图3中所示的三角形OFO',如果 Z_m 落在特性边界上,则得一个等腰三角形。

$$\text{令 } A' = 2A \quad B' = 2B$$

$$\text{则 } C' = A' - B' = 2(A - B)$$

$$= 2C$$

$$D' = A + B' = 2(A + B) = 2D$$

显然,动作条件 $-90^\circ \leq \arg (C'/D') \leq 90^\circ$ 和 $-90^\circ \leq \arg (C/D) \leq 90^\circ$ 是完全相同的。

至此,便已证明,完全可以用阻抗三角形OFO'代替阻抗平行四边形来进行绝对值比较和相位比较这两种表达方式之间的转换。

2. 用电压三角形代替阻抗三角形

将图3中的阻抗三角形OFO'的三条边及一条中线 $Z_{set} - Z_m$ 乘上电流 \dot{I}_m , 则可得电压三角形如图4所示,由于各边乘上同一个复数的模值且移同一个相位,相互之间的相对大小和相角均不变,仅只图形整个地旋转了一个角度,因此无须再作证明,便可直接引用电压三角形写出以电压为变量的绝对值动作条件和相位比较动作条件,分别为:

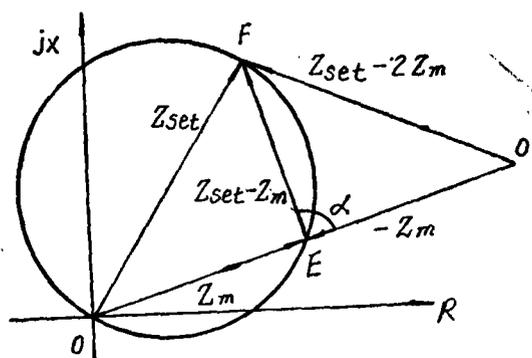


图3

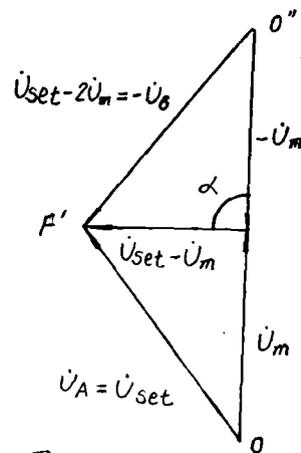


图4

$$|\dot{U}_{set}| \geq |2\dot{U}_m - \dot{U}_{set}|$$

$$\text{和 } -90^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_{set} - \dot{U}_m}{\dot{U}_m} \leq 90^\circ$$

图 5 a 为满足动作条件, 图 5 b 为不满足动作条件。图中的 $\dot{U}_A = \dot{U}_{set}$

$$\dot{U}_B = 2\dot{U}_m - \dot{U}_{set}$$

一旦采用了电压三角形, 记忆回路的电压 \dot{U}_j 便可直接引入, 这样, \dot{U}_j 对动作特性的影响就可直观地表达出来。

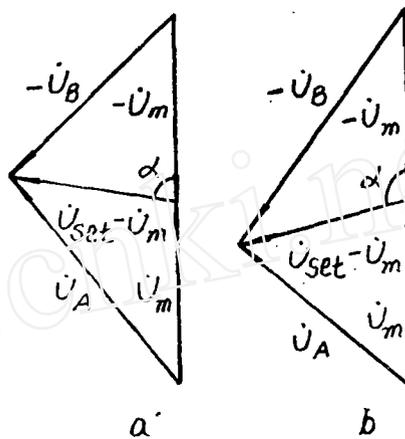


图 5

二、带有记忆回路的方向圆阻抗继电器的三角形法

加上记忆回路后的方向圆阻抗继电器的动作方程, 由于各厂产品接线不同而略有不同。

先分析上继、许继、阿继厂的产品, 动作条件为:

$$|\dot{U}_1| \geq |\dot{U}_2|$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_j - (\dot{U}_m - \dot{U}_{set})$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_j + (\dot{U}_m - \dot{U}_{set})$$

其中 \dot{U}_j 为记忆回路中的记忆电压。

阿继、许继的产品均采用相灵敏接线, 因此又可直接写为:

$$-90^\circ \leq \arg [(\dot{U}_{set} - \dot{U}_m) / \dot{U}_j] \leq 90^\circ$$

当然, 通过电压三角形转换, 上继厂产品用相位比较表达的动作条件和阿继、许继厂的一样。

图 6 a、b、c、分别给出了满足动作条件, 在临界状况和不满足动作条件时电压三角形的情况, 此时, 假定 \dot{U}_j 均和 \dot{U}_m 同相位。

再分析南京电力自动化设备厂的产品, 动作条件为:

$$|\dot{U}_1| \geq |\dot{U}_2|$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{set} + \dot{U}_j$$

$$\dot{U}_2 = 2\dot{U}_m - \dot{U}_{set} + \dot{U}_j$$

同样, 可在电压三角形上找出 α 角, 将动作

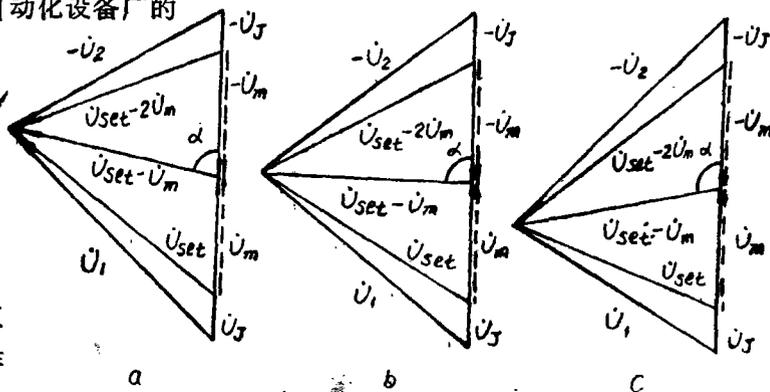


图 6

条件改为相位比较表示, $-90^\circ \leq \arg \{ (\dot{U}_{set} - \dot{U}_m) / (\dot{U}_m + \dot{U}_j) \} \leq 90^\circ$

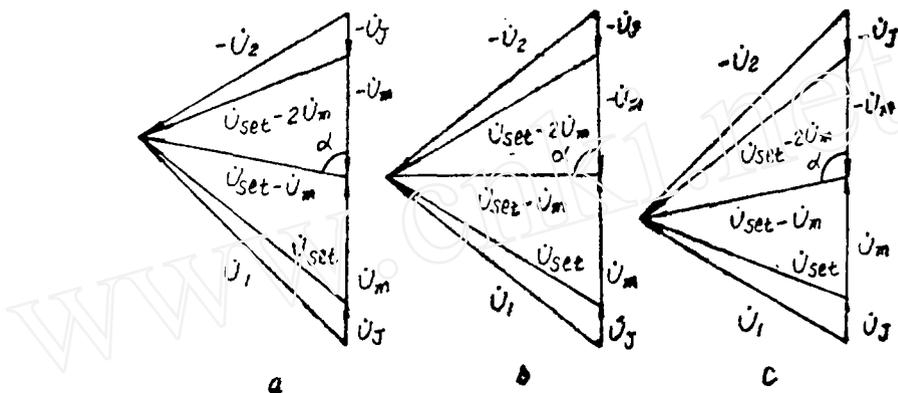


图 7

区内故障, 恰在特性边界上以及区外正向故障时电压三角形的情况分别如图7a、b、c、所示, 此时均假设 \dot{U}_j 与 \dot{U}_m 同相位。

在暂态初开始, 如果 \dot{U}_j 就和 \dot{U}_m 同相位, 显然可从比相动作条件直观地看出, 动作特性不会有变化。但是, 运行中 \dot{U}_j 和 \dot{U}_m 有可能相位不同, 这就有必要分析此时动作特性如何变化。

三、用电压三角形分析带记忆回路方向圆阻抗继电器的暂态特性

先假定在暂态过程中 \dot{U}_j 和 \dot{U}_m 的频率相同。

设 \dot{U}_j 滞后于 \dot{U}_m , 滞后相角为 δ , 如图 8 a 所示, 则原先的相位比较动作条件,

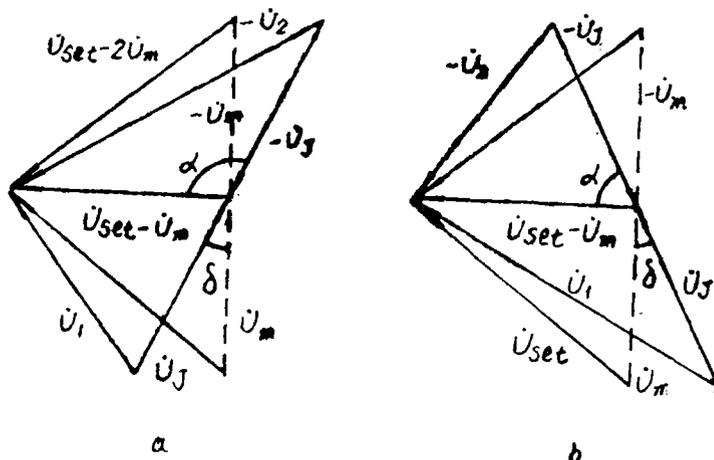


图 8

$-90^\circ \leq \arg \{ (\dot{U}_{set} - \dot{U}_m) / \dot{U}_j \} \leq 90^\circ$ 可改写为,

$$-90^\circ - \delta \leq \arg \{ (\dot{U}_{set} - \dot{U}_m) / \dot{U}_m \} \leq 90^\circ - \delta$$

特性圆将改变为如图9所示。当然，暂态动作特性（在图9中用实线圆表示）随着过渡过程结束会过渡到稳态圆（在图9中用虚线圆表示）。

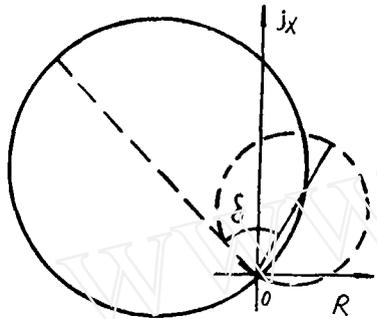


图 9

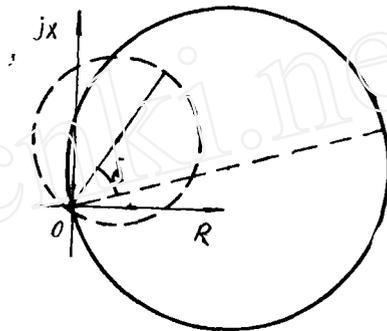


图 10

同样，若 \dot{U}_1 超前于 \dot{U}_m ，超前相角为 δ ，如图8 b所示，原先的相位比较动作条件可改写为：

$$-90^\circ + \delta \leq \arg[(\dot{U}_{set} - \dot{U}_m) / \dot{U}_m] \leq 90^\circ + \delta$$

特性圆将改变为图10所示。

以上是基于阿继、许继、上继厂的产品进行分析的。

在南京厂的产品中，相位比较中的分母是 $\dot{U}_1 + \dot{U}_m$ ，这样，由图11可见，真正影响比相动作条件的是 $\dot{U}_1 + \dot{U}_m$ 和 \dot{U}_m 之间的相角差 δ' 。保留 \dot{U}_m ，可以使 \dot{U}_1 和 \dot{U}_m 的相位差 δ 对动作特性的影响削弱。

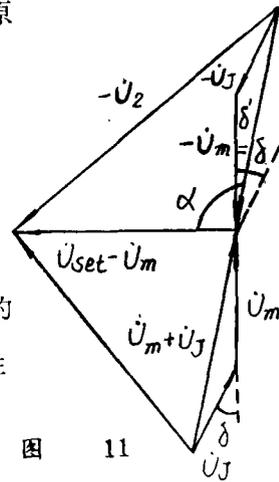


图 11

四、以往推导中的失误之处

显然，带有记忆回路后的 \dot{U}_1 和不带记忆回路时的 \dot{U}_1 是不同的，一旦混淆，实际上就是将 \dot{U}_1 看作 \dot{U}_{set} ，这就得出了目前对方向圆阻抗继电器暂态特性的一般看法。

以南京厂的产品为例对此失误作一分析：为简单起见，设 \dot{U}_1 和 \dot{U}_m 的相位大致相同，则 $|\dot{U}_1| > |\dot{U}_{set}|$ 。令 $Z_1 = \dot{U}_1 / \dot{I}_m$ ， $Z_2 = \dot{U}_2 / \dot{I}_m$ 。若误将 \dot{U}_1 误作为 \dot{U}_{set} ，则实质上误将 Z_1 作 Z_{set} ，显然， $|Z_1| > |Z_{set}|$ 。

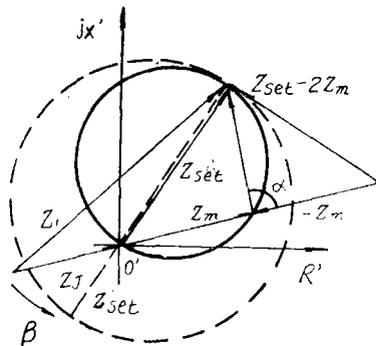


图 12

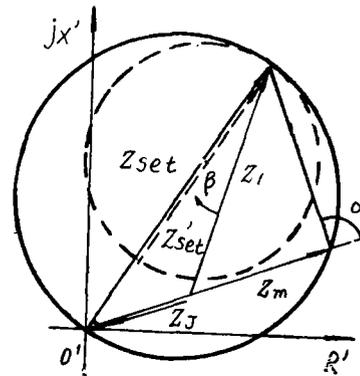


图 13

如果进一步，将 Z_1 矢量的末端固定，起点移动 β 角到 Z_{set} 的位置，如图12所示，这就得到了以往推导中正向短路故障下动作圆扩大将原点包括进去的结论。

反之，若 \dot{U}_1 和 \dot{U}_m 的相位差在 180° 左右，这就意味着 $|\dot{U}_1| < |\dot{U}_{set}|$ ，也即 $|Z_1| < |Z_{set}|$ ，再继仿照图12办理，得图13。这就得到以往推导中反向短路故障下动作因缩小将原点排斥在外的结论。

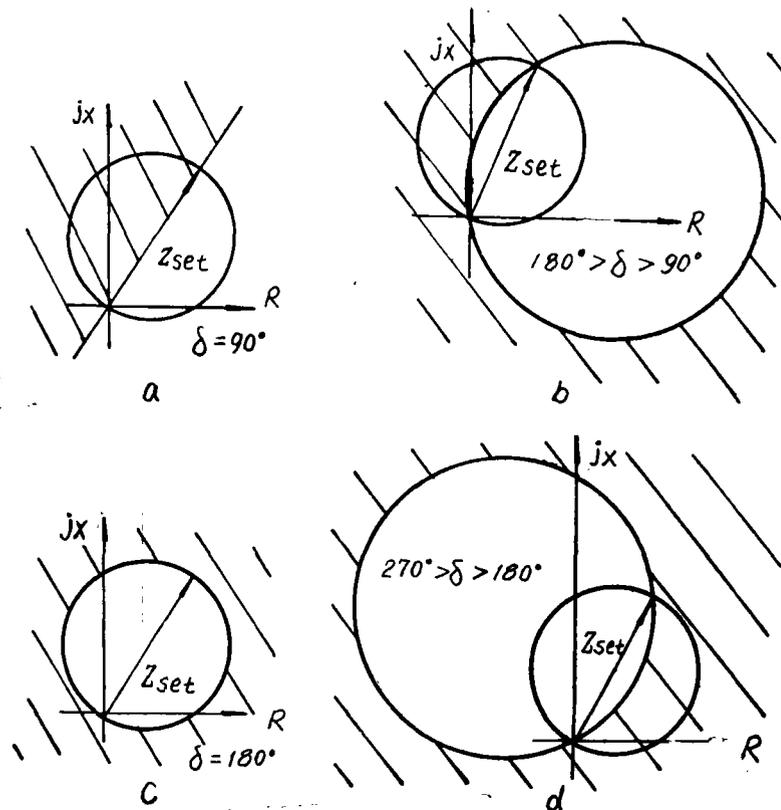
由于各本教科书、各本专著以及各论文中的具体论述方法不一样，具体推导过程也不尽相同，再加所用的符号也不尽相同，因此，具体在哪一步上将 \dot{U}_1 和 \dot{U}_{set} 或是将 Z_1 和 Z_{set} 混淆了起来，此处不可能一一赘述。但就所查阅到的来说，均是由于将 \dot{U}_1 和 \dot{U}_{set} 或是 Z_1 和 Z_{set} 混淆导致了失误。

五、暂态过程中特性圆的变化对继电器可靠性的影响

这一问题牵涉到两个方面，一是暂态过程中相位的变化会使继电器的动作特性究竟会变到何种程度，二是运行中是否会存在 \dot{U}_1 和 \dot{U}_m 在暂态过程中相位不一致的情况。

图14给出了 \dot{U}_1 滞后 \dot{U}_m 相位 δ 在 $0 \sim 360^\circ$ 各个范围内阻抗继电器动作特性的变化。

图中阴影部份为暂态特性动作区域，非阴影部份为不动作区域。当 $\delta = 180^\circ$ 时，则暂态动作区域恰好和稳态动作区域相反，也即该动作的区域不动作，不该动作的区域动作了，从电压三角形上看，这一结果是合乎逻辑的。



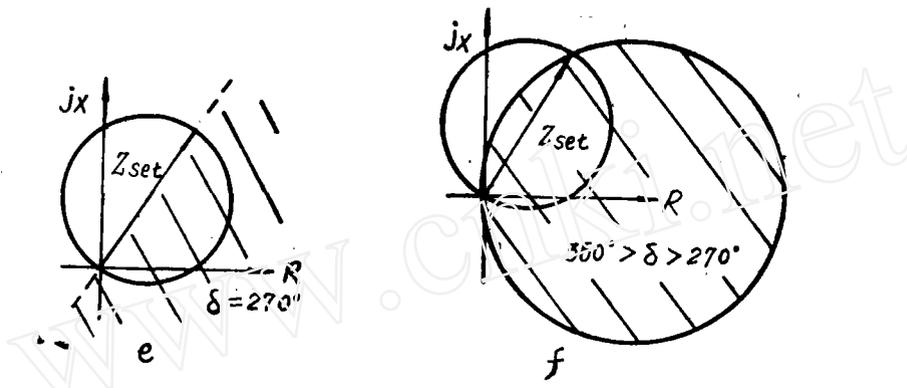


图 14

当然，若是南京自动化设备厂的产品，则动作特性的变化就得依据 $\dot{U}_r + \dot{U}_m$ 和 U_m 之间的相位差 δ' 。

运行中，是否会存在 \dot{U}_r 和 \dot{U}_m 在暂态过程中相位不一致的情况呢？现举一具体例子作一说明。

设有运行线路如图15所示，

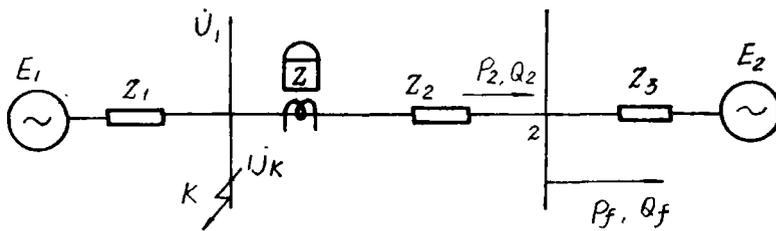


图 15

在正常运行时，母线 1 上的电压 \dot{U}_1 和系统电势 \dot{E}_1 的幅值相差不大，相位相差也不大。为分析简便，系统的内阻抗 Z_1 可以假设为纯感性的。则 \dot{U}_1 和短路时 \dot{U}_K 的相位差可从图16上求得。

为作图方便，假设 \dot{U}_1 略超前 \dot{E}_1 ，也即 \dot{E}_2 提供的无功功率略超过线路和负荷的无功功率需求。

\dot{U}_K 和 \dot{I}_K 同相位，因为短路时往往会有电弧电阻存在。由于电弧电阻和系统内阻抗 Z_1 相比，绝对值要小得多，所以 \dot{I}_K 和 \dot{E}_1 相位差接近 90° ， \dot{I}_K 滞后于 \dot{E}_1 。显然，由图16可见，相位相差近 90° 的情况是有可能存在的。

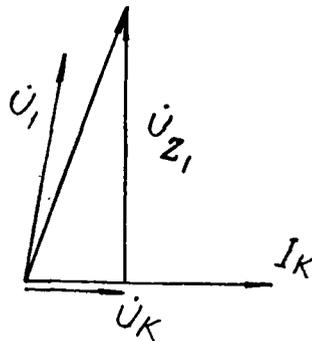


图 16

在线路上短路，越接近阻抗继电器，有可能存在的相位差越大。

运行方式的各种变化是不可尽数的。本文对此分析的主要目的，仅是指出运行中完全有可能存在记忆电压和测量电压相位相差较大这样一种情况。

六、记忆电压对扩大动作区域的作用

阻抗继电器若不引入记忆电压，由于装置中存在门坎动作电压，必然在阻抗平面的原点周围形成动作死区，本文暂称这一区域为阻抗零点区域。由于门坎电压较小，零点区域在阻抗平面上不容易表示，因此，采用导纳平面来分析记忆电压对阻抗继电器动作特性的影响。

将圆阻抗特性反演到导纳平面上是极其容易的。在导纳平面上取 $Y_{set} = \frac{1}{Z_{set}}$ ，过 Y_{set} 端点取直线 1 垂直于 Y_{set} ，则 Y_{set} 所不在的半边则为动作区域。如图 17 所示。此时，阻抗平面上的零点区域映射为导纳平面上虚线以外的区域。显然，如果没有记忆电压，则动作区域是有限的，加了记忆电压，则动作区域是无限的。

同样，在导纳平面上也可以很方便地表示记忆电压 \dot{U} 和测量电压 \dot{U}_m 之间有相位差 δ 时动作特性的变化情况，其变化如图 18 所示。即动作特性 1 以 Y_{set} 端点为支撑点旋转。如果记忆电压 \dot{U} 滞后于测量电压 \dot{U}_m ，且滞后相角为 δ ，则暂态动作特性 1' 顺时针旋转 δ 角。

七、结 论

方向阻抗继电器不引入记忆电压，则存在动作死区，若引入记忆电压，则记忆电压和测量电压的相位差会使动作特性发生较大变化。

以 $\dot{U}_m + \dot{U}$ 作为相位比较的分母，可以削弱在近处短路时， \dot{U}_r 和 \dot{U}_m 相位差 δ 的影响，但在出口短路且电弧电阻又比较小的情况下，削弱的程度不大。总而言之，这是目前阻抗继电器的固有弊病，除非用集成电路构成记忆分析，否则无法解决。

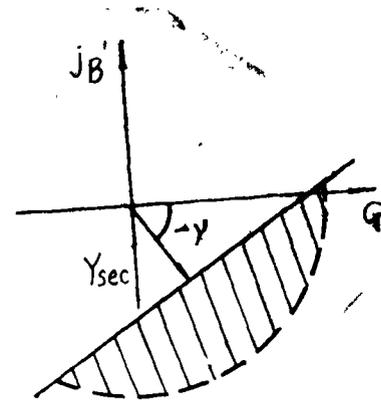
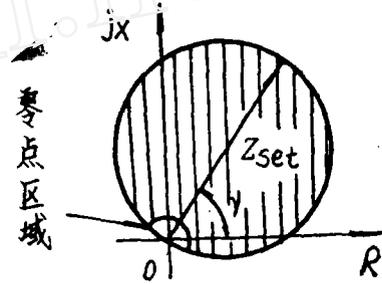


图 17

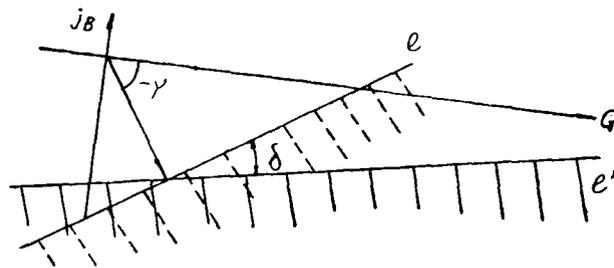


图 18