整流型阻抗继电器特性研究

武汉供电局　严进之

早期的整流型阻抗继电器是根据比较电气量绝对值原理构成的，为了消除靠近母线处短路时，由于电压为零而出现死区，故在工作和制动两回路中，分别引入插入电压，利用短路开始时，谐振回路电压不能突变，记忆了故障前的电压，使继电器不致拒动，这种继电器如当电抗变压器DKB及插入电压变电器JYB在工作、制动两回路中参数不同，以及JYB的电压U_J与外施电压U_Y的角度β变化时，其阻抗特性圆的普遍公式，作者曾经导出。现利用作图法绘出其圆图，由后文可知，这时阻抗圆的圆心，乃一双曲线，这在其它文献中尚未见报导，现将论证过程写成此文。

一、整流型阻抗继电器动作特性普遍公式

$$Z_{CL}^2-2\frac{[-(K_{K1}-K_{K2})K_Y\cos(\varphi_K-\varphi)+(K_{K2}K_{J2}+K_{K1}K_{J1})\cos(\varphi_K-\varphi-\beta)]}{(K_{J2}^2-K_{J1}^2)+2(K_{J1}+K_{J2})K_Y\cos\beta}Z_{CL}$$
$$=\frac{K_{K1}^2-K_{K2}^2}{(K_{J2}^2-K_{J1}^2)+2K_Y(K_{J1}+K_{J2})\cos\beta}\quad\cdots\cdots\cdots(1\cdot1)$$

二、$K_{J1}\neq K_{J2}$，$K_{K1}\neq K_{K2}$　$\beta\neq0$的圆图

1.列出简化方程

为了便于分析，可令，

$$\left.\begin{aligned}
&a=\frac{K_{K1}-K_{K2}}{2(K_{J2}+K_{J1})},\quad b=\frac{K_{K2}K_{J2}+K_{K1}K_{J1}}{2(K_{J2}+K_{J1})K_Y},\quad c=\frac{K_{J2}^2-K_{J1}^2}{2(K_{J1}+K_{J2})K_Y}\\
&=\frac{K_{J2}-K_{J1}}{2K_Y},\quad d=\frac{K_{K1}^2-K_{K2}^2}{2(K_{J1}+K_{J2})K_Y},\quad e=\frac{1}{c}=\frac{2K_Y}{K_{J2}-K_{J1}},\\
&\text{及}\quad f=\sqrt{b^2+cd}=\frac{d}{2a}-b=-\frac{K_{K2}K_{J1}+K_{K1}K_{J2}}{2(K_{J2}+K_{J1})K_Y}
\end{aligned}\right\}\quad(2\cdot1)$$

则(1.1)式可简写为：

$$Z_{CL}^2-2\left\{\left(\frac{-a\cos\theta}{c+\cos\beta}\right)+\left(\frac{b\cos(\theta-\beta)}{c+\cos\beta}\right)\right\}Z_{CL}=\frac{d}{c+\cos\beta}$$
式中$\theta=\varphi_K-\varphi$写成直角座标，$x^2-y^2-2\frac{-a+b\cos\beta}{c+\cos\beta}x-2\frac{b\sin\beta}{c+\cos\beta}y=\frac{d}{c+\cos\beta}$

配方可得：$\left(x-\frac{-a+b\cos\beta}{c+\cos\beta}\right)^2+\left(y-\frac{b\sin\beta}{c+\cos\beta}\right)^2$

$$=\frac{d}{c+\cos\beta}+\left(\frac{-a+b\cos\beta}{c+\cos\beta}\right)^2+\left(\frac{b\sin\beta}{c+\cos\beta}\right)^2 \quad \cdots\cdots\cdots(2\cdot2)$$

由（2·2）式可看出乃一园的方程

圆 心：
$$\left.\begin{aligned} x_0&=\frac{-a+b\cos\beta}{c+\cos\beta}\\ y_0&=\frac{b\sin\beta}{c+\cos\beta}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots(2\cdot3)$$

$$z_0=\frac{\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\beta}}{c+\cos\beta} \quad \cdots\cdots\cdots(2\cdot4)$$

半径：
$$z_r=\frac{\sqrt{cd+d\cos\beta+a^2+b^2-2ab\cos\beta}}{c+\cos\beta}$$
$$=\frac{\sqrt{a^2+(b^2+cd)+(d-2ab)\mathrm{co}\beta}}{c+\cos\beta}$$
$$=\frac{\sqrt{a^2+f^2+2af\cos\beta}}{c+\cos\beta} \quad \cdots\cdots\cdots(2\cdot5)$$

2.将参数方程化为直角座标求圆心曲线。

圆心参数方程，可化为直角座标方程，以求得某些作图所需的参数。

因$x_0=\dfrac{-a+b\cos\beta}{c+\cos\beta}$　　$y_0=\dfrac{b\sin\beta}{c+\cos\beta}$，（以下略写$x_0$，$y_0$的下角0）

解得$\cos\beta=\dfrac{-(a+cx)}{x-b}$

代入$y=\dfrac{b\sqrt{1-\cos^2\beta}}{c+\cos\beta}=\dfrac{b}{a+cb}\times\sqrt{(x-b)^2-(a+cx)^2}$

平方得$\dfrac{(a+bc)^2}{b^2}y^2=(x-b)^2-(a+cx)^2=(1-c^2)x^2-2(b+ac)x+(b^2-a^2)$

$$\frac{(a+bc)^2}{(1-c^2)b^2}y^2=x^2-\frac{2(b+ac)}{(1-c^2)}x+\frac{(b^2-a^2)}{(1-c^2)}$$

配方
$$\frac{(a+bc)^2}{(1-c^2)b^2}y^2=x^2-2\frac{(b+ac)}{(1-c^2)}x+\frac{(b+ac)^2}{(1-c^2)^2}+\frac{b^2-a^2}{(1-c^2)}-\frac{(b+ac)^2}{(1-c^2)^2}$$
$$=\left[x-\frac{(b+ac)}{(1-c^2)}\right]^2-\frac{(a+bc)^2}{(1-c^2)^2}$$

$$\therefore\quad \frac{\left[x-\dfrac{(b+ac)}{(1-c^2)}\right]^2}{\dfrac{(a+bc)^2}{(1-c^2)^2}}-\frac{y^2}{\dfrac{b^2}{1-c^2}}=1 \quad \cdots\cdots\cdots(2\cdot6)$$

式（2·6）乃一双曲线方程（当$c<1$时）

实半轴$A=\dfrac{a+bc}{(1-c^2)}$虚半轴$B=\dfrac{b}{\sqrt{1-c^2}}$ $\cdots\cdots\cdots(2\cdot7)$

$$C=\sqrt{A^2+B^2}=\frac{\sqrt{a^2+b^2+2abc}}{(1-c^2)} \quad \cdots\cdots\cdots(2\cdot8)$$

三、当$K_{K1} \neq K_{K2}$，$K_{Y1}=K_{Y2}=K_Y$，$\beta \neq 0$时的特性圆图

当$K_{Y1}=K_{Y2}=K_Y$时，

在此情况下：

$$a=\frac{K_{K1}-K_{K2}}{4K_Y},\quad b=\frac{K_{K1}+K_{K2}}{4K_Y},\quad c=0,\quad f=b,\quad d=\frac{K_{K1}^2-K_{K2}^2}{4K_YK_Y},$$

$e=\infty$则简化方程为：

$$x_0=\frac{-a+b\cos\beta}{\cos\beta}=-\frac{a}{\cos\beta}+b \quad \cdots\cdots\cdots(3\cdot1)$$

$$y_0=\frac{b\sin\beta}{\cos\beta} \quad \cdots\cdots\cdots(3\cdot2)$$

$$z_0=\frac{\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\beta}}{\cos\beta} \quad \cdots\cdots\cdots(3\cdot3)$$

$$z_r=\frac{\sqrt{a^2+b^2+2ab\cos\beta}}{\cos\beta} \quad \cdots\cdots\cdots(3\cdot4)$$

将参数方程化为直角坐标方程，可求得双曲线有关参数

因　$x=\dfrac{-a+b\cos\beta}{\cos\beta}$，$y=b\ \mathrm{tg}\beta$则$\cos\beta=\dfrac{-a}{x-b}$

代入　$y=b\dfrac{\sqrt{1-\cos^2\beta}}{\cos\beta}=b\dfrac{\sqrt{(x-b)^2-a^2}}{-a}$

平 方：$y^2=\dfrac{b^2}{a^2}\left[(x-b)^2-a^2\right]$

$$\therefore\quad \frac{(x-b)^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}=1 \quad \cdots\cdots\cdots(3\cdot5)$$

实半轴a，虚半轴b，$c=\sqrt{a^2+b^2}$，焦距＝2c，离心率$=\dfrac{c}{a}=\dfrac{\sqrt{a^2+b^2}}{a}$中心在（b，0），焦点F（$b\pm c$，0），顶点：$y=0$，$x=b\pm a$

四、当$K_{K1}=K_{K2}$，$K_{Y1} \neq K_{Y2}$，$\beta \neq 0$时的阻抗特性圆

在此情况下：$a=0$；　$c=\dfrac{K_{YP}}{K_Y}$　$e=\dfrac{1}{c}$为离心率，$p=b=\dfrac{K_K}{2K_Y}$为准线

圆心：

$$\left.\begin{aligned} x_0&=\frac{b\cos\beta}{c+\cos\beta}\\ y_0&=\frac{b\sin\beta}{c+\cos\beta}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots(4\cdot1)$$

$$z_r=z_0=\frac{\beta}{c+\cos\beta}=\frac{ep}{1+e\cos\beta} \quad \cdots\cdots\cdots(4\cdot2)$$

（4·2）式乃一极座标表示的圆锥曲线，当$e=1$时为抛物线，$e>1$时为双曲线，$e<1$时为椭圆，由于$K_{YP}=\dfrac{K_{Y2}-K_{Y1}}{2}<K_Y$，故实际上$e>1$，因此当β变化时，$z_0$的轨

迹是以焦点为原点的双曲线

在图Ⅰ（a）中作准线$x=p$，$\overline{on_1}=z_0$，使存在$\overline{on_1}=e\,\overline{n_1m_1}$的关系，则$\overline{on_1}\cos\beta+\overline{n_1m_1}=p$，即$z_0\cos\beta+\frac{z^0}{e}=p$，解$z_0$即为（4，2）式表示的双曲线

依次可求得其它β角时$\overline{on}$值，z_0的轨迹即可求得

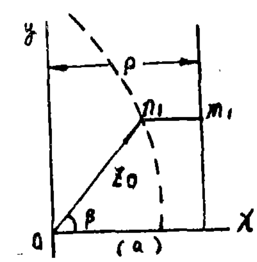
将极座标化为直角坐标，可求得有关各量。

因$z_0=\frac{ep}{1+e\cos\beta}$，又在图中$\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{e}=p-x$

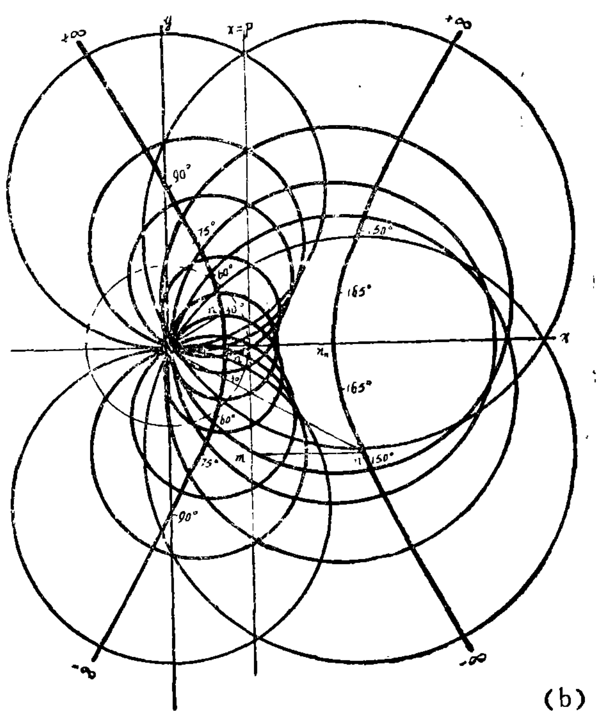
$x^2+y^2=e^2(p^2-2px+x^2)$

配方后可得 $\left(x+\frac{pe^2}{1-e^2}\right)^2+\frac{y^2}{1-e^2}=\frac{e^2p^2}{(1-e)^2}$

即$$\frac{\left\{x-\left(\frac{\beta e^2}{e^2-1}\right)\right\}^2}{\frac{e^2p^2}{(e^2-1)^2}}-\frac{y^2}{\frac{e^2p^2}{(e^2-1)}}=1 \qquad \cdots\cdots\cdots(4\cdot10)$$



(a)



(b)

图1

故$A=\frac{ep}{e^2-1}$　$B=\frac{e\beta}{\sqrt{e^2-1}}$　$C=\frac{e^2p}{e^2-1}$　$\frac{C}{A}=e$，$h=\frac{pe^2}{e^2-1}$

由$Z_r=z_0$，故只要求圆心，半径也就知道了，对应不同的β角，阻抗圆就可作出，

图1(b)中画出了$\beta=0$，$\pm30°$，$\pm45°$，$\pm60°$，$\pm90°$，及$\beta=\pi$，$\pm105°$，$\pm150°$，$\pm165°$的阻抗圆。

五、当$\beta\neq0$，$K_{K1}=K_{K2}$，$K_{Y1}\neq K_{Y2}$时的特性圆图

在此情况下，由于离心率$e=\frac{K_Y}{K_{YP}}=\infty\left(\because\quad K_{YP}=\frac{K_{Y2}-K_{Y1}}{2}=0\right)$

$$z_0=\frac{p}{\frac{1}{e}+\cos\beta}=\frac{p}{\cos\beta}=\frac{1}{2}\frac{K_K}{K_Y\cos\beta} \qquad \cdots\cdots(5\cdot1)$$

因此双曲线的两分支，与准线重合，当β变化时，阻抗圆的圆心即在准线上变动。当$\beta=\frac{\pi}{2}$时，$z_0=\infty$，当β稍大于$\frac{\pi}{2}$时，$\cos\beta$由$+0$变为-0，$z_0=-\infty$。当$\frac{\pi}{2}<\beta<\pi$时，

$-z_0=\frac{p}{\cos(\pi-\beta)}$，取$z_0$的反向，此时圆心由$-\infty$回到$n_0$($n\pi$)点。

当$\pi<\beta<\frac{3}{2}\pi$时，圆心又向$-\infty$移动，β过$\frac{3}{2}\pi$后，圆心又从$+\infty$跃向$-\infty$，再从$-\infty$回到n_0

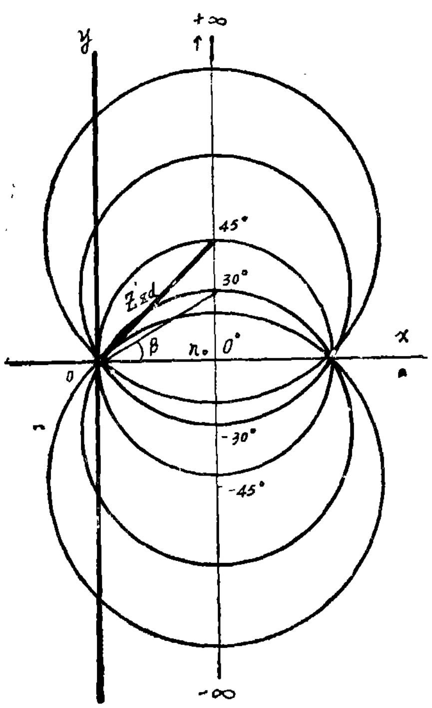


图 2

由以上讨论可知，直线是双曲线的离心率$e=\infty$的特例。

一般正流型方向阻抗继电器即按$K_{K1}=K_{K2}$，$K_{Y1}=K_{Y2}$ $\beta=0$的条件设计，当系统周波不按50周波供电时，$\beta\neq0$，阻抗圆将按本节所述方式畸变。

结　语

1. 整流型阻抗继电器在参数变化时，阻抗圆圆心轨迹无论是极座标，还是直角座标的表达式，均呈现为双曲线。

2. 在K_K、K_Y不等，$\beta\neq0$的情况下圆心轨迹方程为$Z_0=\frac{\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\beta}}{c+\cos\beta}$通过转换到直角座标，可以证明为双曲线，其焦点不在坐标原点。

3. 在$K_{K1}=K_{K2}$，$K_{Y1}\neq K_{Y2}$，$\beta\neq0$时，$Z_0=\frac{ep}{1+e\cos\beta}$，其轨迹为焦点在座标原点的双曲线，并且阻抗圆半径等于圆心，故为方向阻抗继电器特性，因而在β变化时，可作出一族阻抗圆，圆心均在双曲线的各分支上。

电力系统接地短路故障点的分析计算方法

湖北省电力中心调度所　　王广学

提　要

本文主要论述了在已知电力系统中接地故障元件两侧或单侧零序电流时，分析计算故障点的位置。尤其对有互感耦合的元件，进行了详尽的分析。

通过计算机编程计算，证明本方法精确度高、简单，使用方便、灵活可靠。

一、问题的提出

电力系统的故障绝大部分是接地短路故障，如果是永久性故障，需尽快排除故障点，恢复供电，即使是瞬间故障，故障线路也可能带着创伤。对电力系统安全运行有一定的威胁。远距离输电线路，往往要经过地形较复杂的地区，找到并排除故障点是很困难的，也给巡线工人带来了不少困难，尤其是要耗费大量的时间，对电力系统经济运行有一定的影响。故应解决这一课题，减轻巡线工人的负担，提高电力系统的运行水平。

目前国内高压电网均装设有故障录波器，可给我们提供足够的运算数据。由于电力系统零序网络运行方式变化较小，故采用零序电流对故障点的位置进行分析计算。

以下对已知故障线路两侧或单侧零序电流分别进行分析。

4． 生产厂家和教科书上，论述系统参数频率变化对继电保护的影响时，常给出最简单的公式 $Z_0=\frac{Z_{Zd}}{\cos\beta}$。从本文可知，这只是假定 $K_{K1}=K_{K2}$，$K_{Y1}=K_{Y2}$ 时的特例。从本文分析可知，此时圆心轨迹双曲线两分支合拢为一直线，且正好是准线，实际上由于继电器制造误差，理论上不可能全等，故准确分析应为本文（4—2）式所述。

5． 生产上需要的继电器特性是多种多样的，例如为了躲避负荷电流，可利用本文图1（b）的 $\beta=0\sim90°$ 的双曲线左上分支的阻抗特性圆，因其特性向左上倾斜。又如发电机失磁保护需要第三，四象限内的阻抗特性圆，也可用变参数来实现。

6． 本文分析仍采用经典理论来论证，因为这样才能获得特性的全部轨迹圆形，其它分析方法是无能为力的，虽然这样，对于 $Z_0=\frac{\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\beta}}{c+\cos\beta}$ 的作图，还是比较困难的，欢迎有兴趣的同志，共同来参加研究，以取得更简洁明瞭的公式和作图方法，这是作者所万分企望的。