

LZ—2型失磁阻抗继电器特性分析

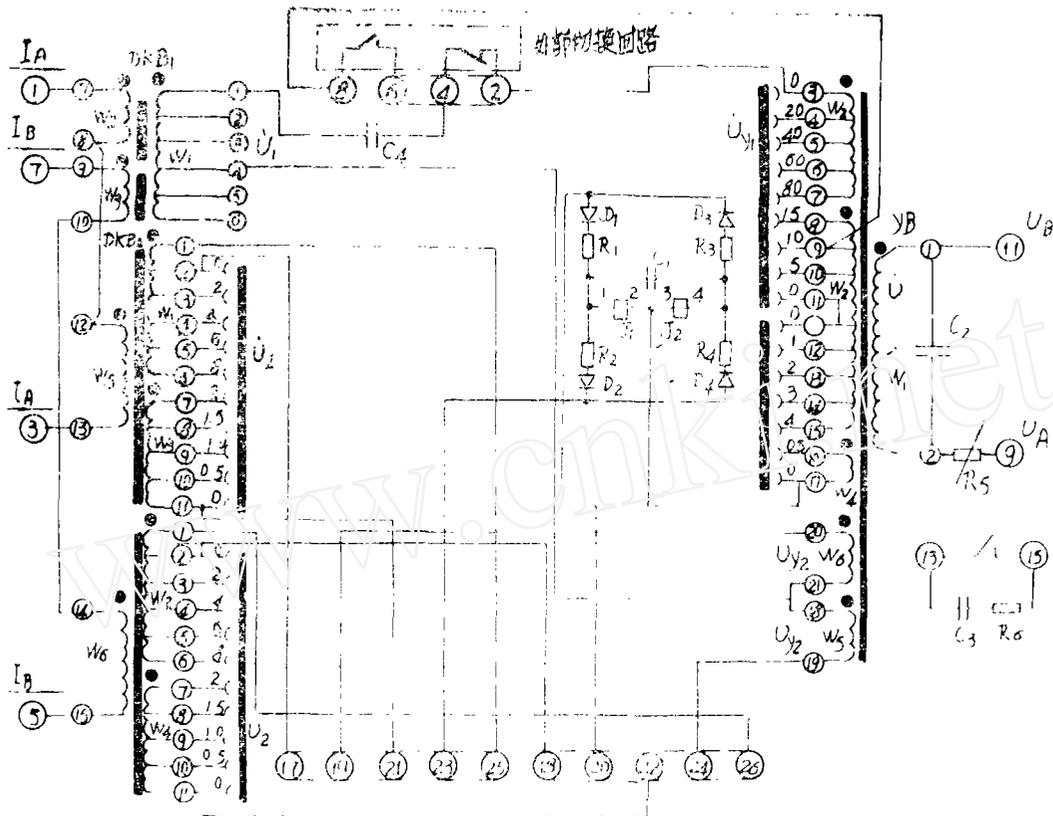
河南省电力科学试验所 周恭夫

几年前,为了满足我省一台30万千瓦双水内冷汽轮发电机组失励磁保护的需要,有关单位协同许昌继电器研究所一起研制,并由许继厂生产出了LZ—2型失磁阻抗继电器。该型继电器的特点是:经过简单地切换,在阻抗复平面上的特性,既可表现为最大灵敏角度 270° 的失磁阻抗圆,又可表现为隔界失步阻抗圆,阻抗圆的直径比较大,精确工作电流相对地比较小,满足了该台发电机组的特定要求。该型继电器问世后,我省陆续投产的10万千瓦及以上的汉水内冷汽轮发电机组的失磁保护也多采用。

LZ—2型失磁阻抗继电器,尽管也属于阻抗继电器,但与高压输电线路距离保护中使用的阻抗继电器比较,有着一些不同之处。生产现场的继电保护调试人员,对输电线路上使用的距离继电器比较熟悉,而对LZ—2则比较生疏。到目前为止,详细介绍LZ—2主要电气特性的文字尚未见到。制造厂提供的技术资料中,关于LZ—2电气性能的介绍,系采用几何作图的方法。这种方法比较简单易懂,但却不能完好地揭示LZ—2的主要电气特性,同时也不能对某些概念给以确切地描述。因此,不能完全满足使用者的需要。本文拟对LZ—2的工作原理给以比较详细地阐述,推导出它的主要电气特性的数学表达式,并根据这些表达式谈及一些调整试验中应该注意的问题,冀对现场专业人员在调整试验该型继电器时有所帮助。

LZ—2型继电器的实际接线如图1所示。继电器的接线可以进行切换:当切换片在实际位置时,得到的是失磁阻抗圆;切换片在虚线位置时,得到的是临界失步阻抗圆或称为静稳极限阻抗圆。

从图1看出,接入继电器的电气量是发电机定子相电流之差和机端同名相相间电压的负值,例如 \dot{I}_{AB} 和 \dot{U}_{BA} (\dot{U}_{AB} 的负值)。这种接线方向可以称为 180° 接线。 DKB_1 、 DKB_2 是铁芯带有气隙的电抗变压器,气隙中装有磁分路片和薄膜合金片,供细调电抗变压器一、二次间的互感之用。如果有电流通过 DKB_1 、 DKB_2 的一次线圈,在其二次侧分别形成电压 \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 。 \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 同相位且超前于一次电流的角度为 φ_K 。 φ_K 的理论值为 90° ,实际值略小于 90° , DKB_2 有两组完全相同(包括匝数和抽头位置)的二次线圈,用以得到两个 \dot{U}_2 ,分别接近动作臂和制动臂内。 DKB_2 的两组二次线圈有相同的抽头,选用不同的抽头可以得到不同的 \dot{U}_2 值。 YB 是一只变压器,其一次线圈 W_1 本可



以直接接在机端相间电压上，但因 φ_K 略小于 90° ，为了补偿这一不大的差值给继电器的特性带来的不良影响， W_1 实际上是经过由电容器 C_2 和可变电阻 R_5 串联组成的移相回路接在发电机机端相间电压上，即加入 YB 的一次电压就是 C_2 上的电压。实际上由于 R_5 的应用部分很少，在分析继电器的特性时，完全可以认为 φ_K 等于 90° ，而把 C_2 上的电压看作就是机端相间电压。 YB 有五个二次线圈 $W_2 \sim W_6$ 。 W_2 、 W_3 、 W_4 组成一组。当 W_1 上作用有电压 \dot{U} 时， W_2 、 W_3 、 W_4 上的电压和为 $\dot{U}_{Y1} = K_Y \dot{U}$ ， K_Y 为一实数。改变 W_2 、 W_3 、 W_4 上的抽头位置可以改变 K_Y 的大小， \dot{U}_{Y1} 与 \dot{U} 同相位。 YB 的另两个二次线圈 W_5 、 W_6 匝数相等，其上的电压都为 $\dot{U}_{Y2} = \beta \dot{U}$ ， β 为一实数， \dot{U}_{Y2} 与 \dot{U} 同相位。根据图1中切换片在实线位置时，把电压 $(\dot{U}_1 - \dot{U}_{Y1} + \dot{U}_{Y2} - \dot{U}_2)$ 作为继电器的动作量，电压 $(\dot{U}_1 - \dot{U}_{Y1} - \dot{U}_{Y2} + \dot{U}_2)$ 作为制动量。把这两组电压量进行整流后加以比较（采用极化继电器 J 作为执行元件）以决定继电器动作与后。如果不计继电器的机械阻

力（如极化继电器的簧片扭力等），继电器的动作条件为：

$$|\dot{U}_1 - \dot{U}_{Y1} + \dot{U}_{Y2} - \dot{U}_2| \geq |\dot{U}_1 - \dot{U}_{Y1} - \dot{U}_{Y2} + \dot{U}_2| \dots\dots\dots(1)$$

设 \dot{U} 代表加入继电器的电压， \dot{I} 为加入继电器的电流，根据上述 130° 接线的特点，则 $-\dot{U}$ 是与 \dot{I} 同名相的机端相间电压，根据以上所述并参照图 2，可以列出以下表达式。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \alpha I e^{j(\varphi_K - \varphi)} \\ \dot{U}_2 &= K_I I e^{j(\varphi_K - \varphi)} \\ \dot{U}_{Y1} &= K_Y \dot{U} \\ \dot{U}_{Y2} &= \beta \dot{U} \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

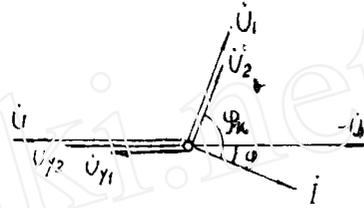


图 2

式中： α ——比例系数，其因次为欧姆，当 DKB_1 的二次线圈抽头选定后为一常数；

K_I ——意义同 α ，但不是常数，其值随整定用的 DKB_2 的二次整定抽头而改变；

K_Y ——比例系数，无因次，其值随整定用的 YB 的二次整定抽头而改变；

β ——意义同 K_Y ，但为一常数；

φ —— \dot{I} 与同名相机端相间电压间的夹角，发电机在正常运行时即为负阻抗角。

把(2)式代入(1)式，经过整理可得：

$$\begin{aligned} \text{动作量的平方 } |\dot{U}_1 - \dot{U}_{Y1} + \dot{U}_{Y2} - \dot{U}_2|^2 &= |(\alpha - K_I) I e^{j(\varphi_K - \varphi)} + (\beta - K_Y) \dot{U}|^2 \\ &= (\alpha - K_I)^2 I^2 + (\beta - K_Y)^2 U^2 - 2(\alpha - K_I)(\beta - K_Y) I U \cos(\varphi_K - \varphi) \\ &\dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{制动量的平方 } |\dot{U}_1 - \dot{U}_{Y1} - \dot{U}_{Y2} + \dot{U}_2|^2 &= |(\alpha + K_I) I e^{j(\varphi_K - \varphi)} \\ &\quad - (\beta + K_Y) \dot{U}|^2 \\ &= (\alpha + K_I)^2 I^2 + (\beta + K_Y)^2 U^2 + 2(\alpha + K_I)(\beta + K_Y) I U \cos(\varphi_K - \varphi) \\ &\dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

首先，只考虑继电器处于动作与不动作的条界状态，即只考虑动作量等于制动量的情况，此时，式(3)-(4)=0，于是可得：

$$\alpha K_I I^2 + \beta K_Y U^2 + (\alpha\beta + K_I K_Y) I U \cos(\varphi_K - \varphi) = 0 \dots\dots\dots(5)$$

把式(5)除以 I^2 ，并令 $Z = \frac{U}{I}$ 代表继电器的感受阻抗，于是式(5)变为

$$\beta K_Y Z^2 + (\alpha\beta) + K_I K_Y \cos(\varphi_K - \varphi) Z + \alpha K_I = 0$$

$$\text{或者 } Z^2 + 2 \frac{\alpha\beta + K_I K_Y \cos(\varphi_K - \varphi)}{2\beta K_Y} Z + \frac{\alpha K_I}{\beta K_Y} = 0 \dots\dots\dots(6)$$

式(6)所代表的几何图形是一个圆，该圆的半径为

$$r = \sqrt{\left(\frac{\alpha\beta + K_I K_Y}{2\beta K_Y}\right)^2 - \frac{\alpha K_I}{\beta K_Y}} = \frac{\alpha\beta - K_I K_Y}{2\beta K_Y}, \dots\dots\dots(7)$$

圆心到坐标原点的距离为

$$\rho_0 = -\frac{\alpha\beta + K_I K_Y}{2\beta K_Y}. \dots\dots\dots(8)$$

式(8)中的负号,表示圆心位于 $-jx$ 轴上。式(6)所代表的圆在阻抗复平面上的位置如图3所示。该圆与 $-jx$ 轴有两个交点,这两个交点至坐标原点的距离分别为:

$$\left. \begin{aligned} x_A &= \rho_0 + r = -\frac{K_I}{\beta} \\ x_B &= \rho_0 - r = -\frac{\alpha}{K_Y} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

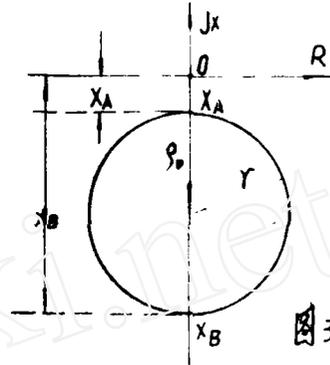


图3就是我们所得到的失磁阻抗圆,园内为继电器的动作区。式(9)表明整个圆都位在第三、四象限。很明显,该失磁阻抗圆的最大灵敏角为 270° ,当 x_A 、 x_B 的值给完后,失磁阻抗圆就一定了。在 x_A 的表达式中, β 为一常数(因为 YB 的二次线圈 W_5 、 W_6 没有供调节用的抽头),而要改变 x_A 值就只有改变 K_I 了。所以 DKB_2 的二次线圈上设有抽头,可以阶梯式调节 K_I 值。 $LZ-2$ 中关于 x_A 的整定范围为 $x_A = 0 \sim -10$ 欧,因为 x_A 值与 K_I 成正比(参见式(9)),为了方便和直观起见, DKB_2 的二次线圈上的抽头标号就直接标成 x_A 的欧姆值,例如: DKB_2 的二次线圈用“ $0+0$ ”=0抽头位置时,表示 $x_A = 0$ 欧;用“ $8+2$ ”=10抽头位置时,表示 $x_A = -10$ 欧。另外,制造厂规定的 x_A 的整完误差为:“ $x_A = -2 \sim -6$ 欧或 $x_A = +2 \sim +6$ 欧时误差为 ± 0.6 欧。”这个误差值看来是比较大的,如果 x_A 为 ± 2 欧时误差达 ± 0.6 欧,即误差约高达30%。假如 β 值可以调节,即在 YB 的二次线圈 W_5 、 W_6 上也设有调节抽头,则 x_A 的误差值就可以降下来。从另一方面看,由于 x_A 的定值都比较小(与 x_B 相比较),即使误差大些,对整个失磁阻抗圆并无很大的影响。权衡利弊得失,从简化制造工艺出发,在 YB 的二次线圈 W_5 、 W_6 上就不设抽头了。 α 值(即选用的 DKB_1 的二次抽头位置)在继电器出厂时已由制造厂选定。径 x_B 的表达式可以看出, x_B 值与 K_Y 成反比。 $LZ-2$ 中关于 x_B 的整定范围为 $x_B = -15$ 欧 ~ -150 欧,这表示当 YB 的二次线圈用“ $80+15+4+0.5$ ”=99.5%抽头位置时 $x_B = -15$ 欧,用“ $0+10+0+0$ ”=10%抽头位置时,由于 K_Y 值缩小了10倍,所以 $x_B = -150$ 欧。如果使用时发现 α 值选用的不合适(即 x_B 的误差较大),可以改变 DKB_1 的二次抽头位置,(在其②、③、④、⑤、⑥诸抽头间每隔50匝引出一个抽头)。

从图3还可看出,某一特定的阻抗值与失磁阻抗圆有两个交点,即在某一个 φ 角下可以有 x_A 、 x_B 两个动作阻抗。由于继电器的劝回系数不等于1,所以在试验录制失磁阻抗特性圆时,在某一电流值下,应该采用从零伏逐渐升高电压使继电器动作的方法求得 x_A 值,再用从100伏逐渐降低电压使继电器动作的方法求得 x_B 值,这样作出的特性

园就比较精确。

上面的讨论是在不计继电器的阻力(如极化继电器簧片的阻力等)的情况下得出的,如果计及阻力的影响,则可引入一个电气量 A 来代表这种影响。此时式(3)~(4) = A , 则式(5)变为

$$\alpha K_I I^2 + \beta K_Y U^2 + (\alpha\beta + K_I K_Y) I U \cos(\varphi_K - \varphi) = A \dots\dots\dots(10)$$

仿照以上的运算方法并计及式(8), 则式(10)可改写为

$$Z^2 - 2\rho_0 \cos(\varphi_K - \varphi) Z + \frac{\alpha K_I}{\beta K_Y} = \frac{A}{\beta K_Y I^2}$$

$$\text{或者 } Z^2 - 2\delta_0 \cos(\varphi_K - \varphi) Z = \frac{A}{\beta K_Y I^2} - \frac{\alpha K_I}{\beta K_Y} \dots\dots\dots(11)$$

当 $\varphi = 90^\circ$ (此时加入继电器的电压超前电流的角度为 270° , 即为继电器的最大灵敏角——参阅图1电压端子的极性关系和图2) 时, $\cos(\varphi_K - \varphi) = \cos 0^\circ = 1$, 则式(11)变为

$$Z^2 - 2\rho_0 Z = \frac{A}{\beta K_Y I^2} - \frac{\alpha K_I}{\beta K_Y}$$

$$\text{或者 } (Z - \rho_0)^2 = \frac{A}{\beta K_Y I^2} - \frac{\alpha K_I}{\beta K_Y} + \rho_0^2 \dots\dots\dots(12)$$

考虑到式(7), 则式(12)又可改写为

$$Z = \rho_0 \pm \sqrt{\frac{A}{\beta K_Y I^2} + r^2} \dots\dots\dots(13)$$

式(13)表示出在最大灵敏角下, 继电器的感受阻抗 Z 与通入继电器的电流 I 之间的关系, 称为继电器的精确工作电流曲线。

下面对式(13)进行讨论。

$$1. \text{ 取 } Z = \rho_0 + \sqrt{\frac{A}{\beta K_Y I^2} + r^2} \dots\dots\dots(14)$$

当电流 I 增大到一定程度后, $\frac{A}{\beta K_Y I^2} \approx 0$, 这时式(14)变为 $Z = \rho_0 + r = -\frac{K_I^2}{\beta}$

$= x_A$, 即式(14)所代表的是一条以 x_A 为渐近线的曲线, 其形状如图4所示, 这就是 x_A 为负值(即切换片在实线位置)时的精确工作电流曲线。规定比 x_A 大10%的阻抗值(即110% x_A) 所对应的电流作为 x_A 为负值时的最小精确工作电流 $I_{IG.ZX}$ 。

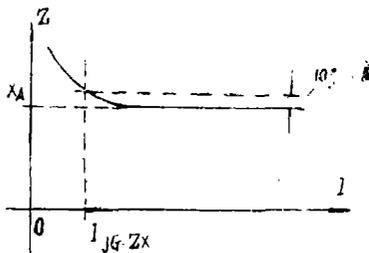


图4

图4所示的精确工作电流曲线, 与高压输电线路使用的具有园特性的距离继电器的精

确工作电流曲线不同, 这点需要特别注意。

$$2. \text{ 取 } Z = \rho_0 - \sqrt{\frac{A}{\beta K_Y I^2} + r^2} \dots\dots\dots(15)$$

同样地, 当 I 增加到一定程度后, $\frac{A}{\beta K_Y I^2} \approx 0$, 这时式 (15) 变为 $Z = p_0 - r = -\frac{\alpha}{K_Y} = x_B$, 所以式 (15) 所代表的是一条以 x_B 为渐近线的曲线, 其形状如图 5 所示。这就是 x_B 为负值 (即切换片在实线位置) 时的精确工作电流曲线。规定比 x_B 小 10% 的阻抗值 (即 90% x_B) 所对应的电流, 作为 x_B 是负值时的最小精确工作电流 $I_{jg.zx}$

由于精确工作电流曲线 (图 4 和图 5) 不是一条直线, 所以在通电整定 x_A 和 x_B 时, 加入继电器的电流不能小于 $I_{jg.zx}$, 否则将会引起较大的误差, 一般加入的电流为 $(1.5 \sim 2) I_{jg.zx}$ 即可。

上面关于失磁阻抗特性园和精确工作电流曲线的分析、讨论都是在切换片于实线位置情况下得出的。当把切换片置于图 1 所示的虚线位置时, \dot{U}_2 的方向 (与切换片在实线位置时比较) 相反, 按照与前面相同的推导, 可以证明这时继电器的特性是图 6 所示的园, 园内为继电器的动作区, 我们称这个园为临界失步阻抗园或静稳极限阻抗园。该园的半径为 $r = \frac{\alpha\beta + K_I K_Y}{2\beta K_Y}$, (16)

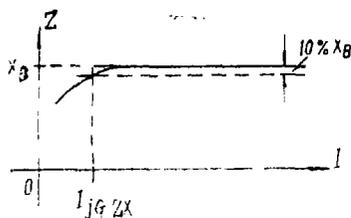


图 5

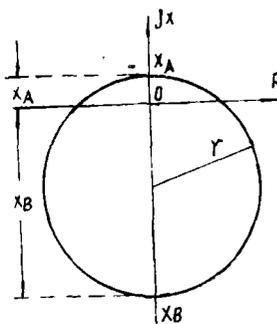


图 6

$$\text{园心距坐标原点的距离为 } p_0 = -\frac{\alpha\beta - K_I K_Y}{2\beta K_Y} \text{ (17)}$$

x_A 和 x_B 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} x_A &= p_0 + r = \frac{K_I}{\beta} \\ x_B &= p_0 - r = -\frac{\alpha}{K_Y} \end{aligned} \right\} \text{ (18)}$$

从图 6 看出, 坐标原点位于临界失步园内, 所以 x_A 为正, 而 x_B 仍为负。这时 x_A 的整完范围为 $x_A = 0 \sim +10$ 欧, x_B 的整完范围不变, 仍为 $x_B = -15 \sim -150$ 欧。

根据以上分析, LZ-2 型失磁继电器经过简单的切换, 其在阻抗复平面上的特性可以由失磁阻抗园变为临界失步阻抗园。它的整定范围也很宽广, 可以满足 10 万千瓦及以上汽轮发电机的需要。另外, x_A 、 x_B 又是两个互无联系彼此独立的量, 可以把它们分开进行单独整定, 这就给调整试验工作带来很大方便。 x_A 可正可负, 为负值时继电器表现为失磁阻抗园, 为正值时, 表现为临界失步园, x_B 值永远为负。