

整流式负序电流延时继电器

许昌继电器研究所 张鸿仪

当电力系统发生不对称短路或非全相动作时,在发电机定子绕组中将流过负序电流。负序电流产生的旋转磁场和正序旋转磁场的方向相反,以两倍同步转速切割转子,在其中产生两倍额定周率的感应电流。此感应电流沿转子表面、楔条和套箍中流过,使这些部位过热,甚至使金属熔化,造成发电机损坏。为了防止损坏发电机,对于较大容量的发电机,必须安装负序电流保护。以往苏联和我国多采用两段时限负序电流保护,这种保护不是严格按发电机发热特性整定动作时间,因此只能在系统发生不对称短路,负序电流相当大时使发电机退出工作。而负序电流较小时,发电机则得不到理想的保护。随着单机容量10万KW以上的大型发电机大量投入系统运行,原来的负序电流保护已不能满足运行要求,因而世界各主要工业国都竞相研制模拟发电机发热特性的负序电流保护,即所谓反时限负序电流继电器,例如,美国G、E公司和瑞士B、B、C公司都研制、生产了数字电路式的,苏联威波克沙尔电器厂研制生产了晶体管式的,英国E、C公司和日本日立公司也都生产了机电式的。国内已有几个单位研制成功了晶体管式,还有一些单位研制成功了整流式的及时限负序电流继电器。许昌继电器研究所研制成功的LFL—40系列负序电流延时继电器具有线路简单,性能可靠,抗干扰能力强,不需另接直流稳压电源等特点,已在我国电力系统中相当大量地使用,主要用于5~12.5万KW发电机的保护线路中,运行情况良好。但是LFL—40系列继电器的灵敏度不够高(信号回路最低负序动作电流为0.5A,反时限部分最低负序动作电流为1A,相应于5A额定电流的标么值分别为0.1和0.2),不能适应20万KW以上发电机组的保护要求;另外在较小的负序电流下反时限特性偏离理论值较大,延时较长,这给继电器的延时整定带来一些困难。有鉴于此,我们对该继电器进行了改进,提高了继电器的动作灵敏度,信号回路和反时限部分的最低负序动作电流的标么值分别降到0.05和0.1;并采取措施使继电器的反时限特性接近理论值。改进后的继电器系列号为LFL—40A。

如果将发电机转子的发热过程看成是绝热的(即不考虑散热),则发电机能够承受负序电流的时间

$$t = \frac{K}{\left(\frac{I_2}{I_r}\right)^2} \quad \dots\dots (1)$$

式中, I_2 ——负序电流分量

I_e —— 发电机定子额定电流
 K —— 常数

对于5万KW以下的汽轮发电机, K 值一般为30, 对于10~12.5万KW的汽轮发电机, K 值一般在10左右, 对于20万KW以上的汽轮发电机, K 值为2~8。对于5万KW以下的水轮发电机, K 值一般为40, 对于10万KW以上的水轮发电机, K 值可能小一点, 但不像汽轮发电机变化得那样大。

但实际上发电机的转子不是绝热的, 它通过不同的介质进行冷却, 如空气冷却, 氢冷, 水冷等, 为了反映这个情况, 可以在发热特性中引入修正值 k , 于是

$$t = \frac{K}{\left(\frac{I_2}{I_e}\right)^2 - k^2} \quad \dots\dots (2)$$

瑞士B、B、C公司的IP×146型继电器, k 可以在0.02~0.2范围内调整。

LFL—40A系列继电器出厂时, 反时限延时特性接近公式(1), 采用此特性, 可以确保发电机的安全。如果考虑提高系统的稳定性, 也可采用公式(2), 但须适当选择 k , 由用户对继电器进行适当调整。

LFL—40A系列继电器有三种型号, 适用于不同容量的发电机组, 其动作值和整定范围列于下表

型 号	负序动作电流(A)		K 值整定范围	信号延时范围 (S)
	信 号	反时限		
LFL—41A	0.25—0.5	0.5	2—6	2—10
LFL—42A	0.5—1	1	5—15	
LFL—43A	0.75—1.5	1.5	10—40	

LFL—40A系列继电器可以模拟转子的散热特性, 这样在间歇出现不平衡电流时, 虽然反时限起动元件间歇动作, 仍能避免继电器误动作, 同时又可避免因转子过热而损坏发电机。制造厂按用户提供的转子散热特性时间常数 T 选择 R_{14} , 用户也可自行更换。因充电电容 C_7 的电容量为100 μ F, 所以

$$T = R_{14} \cdot 100 \cdot 10^{-6}$$

$$R_{14} = T \cdot 10^4 \quad \dots\dots (3)$$

继电器的方框图如图1所示

在我国, 同步发电机的中性点一般是对地绝缘或通过消弧线圈接地, 零序电流很小。如继电器接在发电机输出端或靠近中性点的电流互感器(C·T)上, 可以不加零序补偿。LFL—40A继电器的负序电流过滤器是不带零序补偿的, 而原来的LFL—40继电器则带零序补偿。

LFL—40A继电器的原理接线图如图2所示。

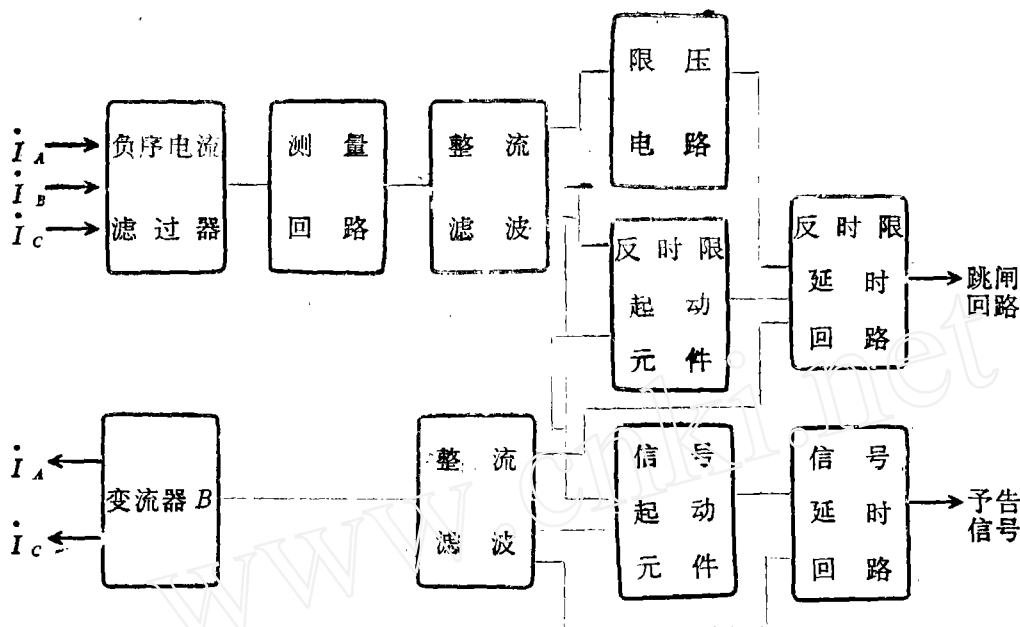


图 1、LFL—40A 继电器方框图

继电器的负序电流滤过器由 LH 、 KH 、 R_A 和 C_1 组成。 LH 为铁心不带气隙的电流互感器，其电流绕组与可调低阻值电阻 R_A 并联，大部分 A 相电流流经 R_A 。 KH 为铁心带气隙的电抗互感器，在铁心没有饱和时，其二次电势 E_{KH} 与一次电流 $I_B - I_C$ 成正比，并且相位超前 90° 。 C_1 用于补偿相角差，使 $\dot{E}_{LH}$ 与 $\dot{I}_A$ 同相，这样可以使滤序器输出的不平衡电压最小。此种滤序器的特点是二次输出电压较高，达到二百多伏时仍能保持一定线性，因而适用于整流式的负序电流延时继电器。

当继电器通正序电流时，滤序器的向量图如图 3 所示。

从图 3 可知， $\dot{I}_B - \dot{I}_C$ 的绝对值 $\sqrt{3}I_\varphi$ ，所以通单相电流时 $I_B = -I_C = \frac{\sqrt{3}}{2}I_\varphi = 0.866I_\varphi$ 。

如 $I_\varphi = 5\text{ A}$ ，

则 $I_B = -I_C = 4.33\text{ A}$ 。

$\dot{E}_{KH} = jX_M (\dot{I}_B - \dot{I}_C)$ ，与 $\dot{I}_A$ 同相，即与 $\dot{E}_{LH}$ 同相。适当调整 R_A ，使 $I_A = 5\text{ A}$ 时 LH 的二次电势 E_{LH} 等于 $I_B = -I_C = 4.33\text{ A}$ 时 KH 的二次绕组电势 E_{KH} 。于是

$$\dot{E}_{LH} - \dot{E}_{KH} = 0$$

滤序器无电压输出

当滤序器通负序电流时，其向量图如图 4 所示， $\dot{E}_{KH}$ 与 $\dot{E}_{LH}$ 相位相差 180° ，

$$|\dot{E}_{LH} - \dot{E}_{KH}| = 2E_{LH}$$

滤波器有电压输出。

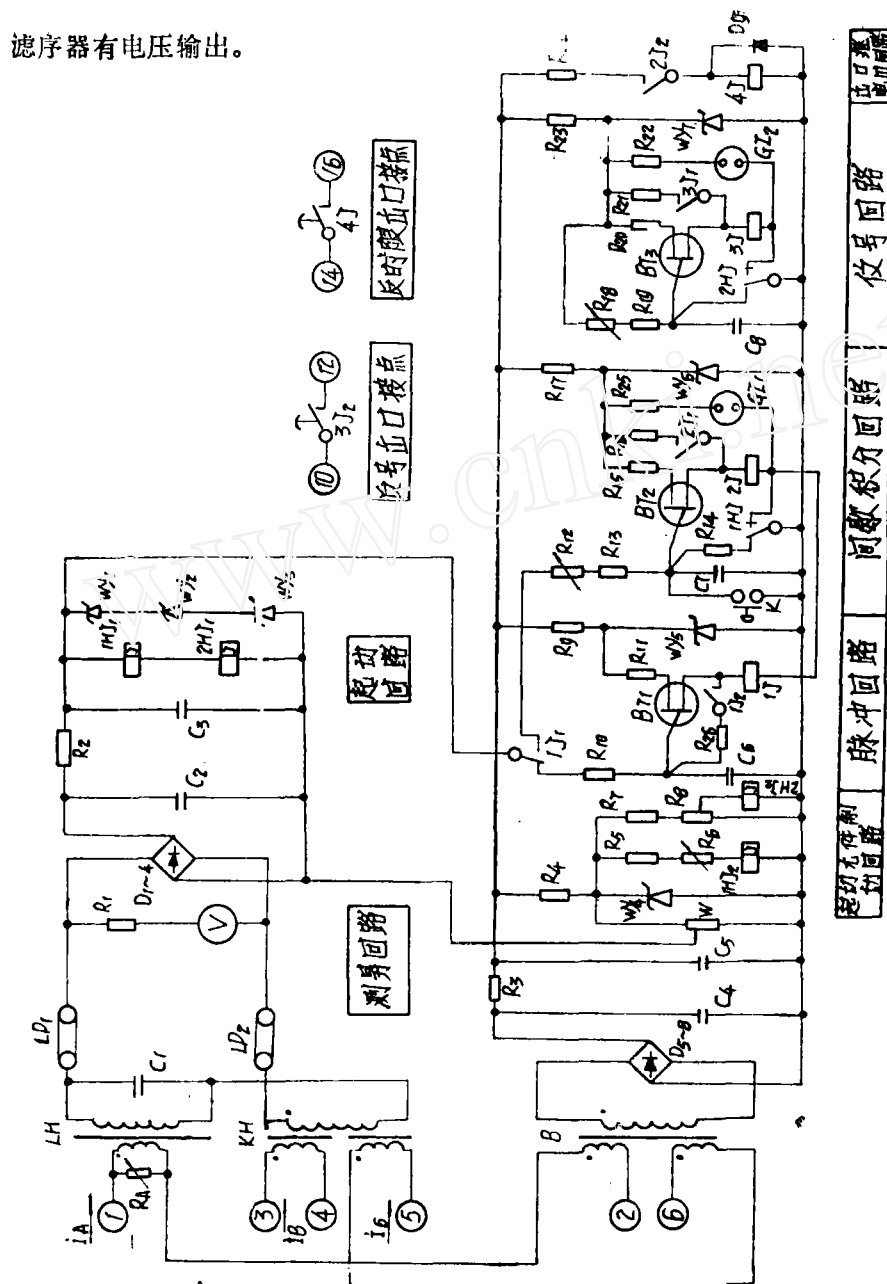


图 1 原理接线图

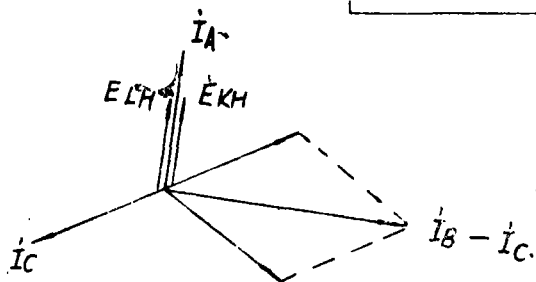


图 3 正常情况下滤波器向量图

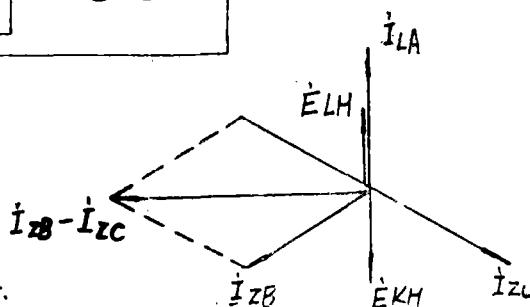


图 4 通负序电流时滤波器何量图

滤序器的输出电压经连接片 LP_1 和 LP_2 接到电压表测量回路,用以监视负序电流量。

滤序器的输出电压经整流、滤波后加到由极化继电器 $1HJ$ 和 $2HJ$ 的工作绕组 $1HJ_1$ 和 $2HJ_1$ 组成的起动回路上及由高压稳压管 WY_1 、 WY_2 和 WY_3 组成的限压电路上,并经过小型密封继电器 $1J$ 的接点 $1J_1$ 加到脉冲回路和间歇积分回路的 RC 充电电路上。

为了提高继电器的抗干扰能力,继电器工作回路不用外加的直流电源供电,而用变流器 B 供电。变流器 B 的 A 相电流绕组和 C 相电流绕组的匝数相等(设为 W),当继电器通对称电流时,变流器 B 的电流绕组总磁势为 $W(\dot{I}_A - \dot{I}_C)$,数值为 $\sqrt{3}WI_0$ (I_0 为相电流);当模拟相间短路时,在模拟 AB 和 BC 相短路时,磁势数值等于 WI_0 ,而在模拟 CA 相短路时,磁势数值为 $2WI_0$ 。由于变流器 B 具有饱和特性及各工作回路均采用稳压管稳压,因而不同工作情况下磁势相差虽然较大,但对稳压效果无明显影响。

为了提高起动元件 $1HJ$ 和 $2HJ$ 的返回系数及进行动作电流调整,经整流、滤波后的变流器 B 的电压 U_B 加到起动元件的制动回路上。由于采用了稳压电路, $1HJ$ 和 $2HJ$ 的制动绕组 $1HJ_2$ 和 $2HJ_2$ 中的电流基本上不受变流器 B 初级电流的影响。 $1HJ$ 为继电器反时限部分的起动元件,电阻 R_6 用作反时限部分负序动作电流的微调。 $2HJ$ 为继电器信号回路的起动元件,分压电阻 R_8 可以在一定范围内调整信号回路的负序动作电流。

起动元件 $2HJ$ 动作后,信号回路的双基极二极管 BT_3 的两基极上加上稳定电压,其 RC 电路开始充电,当电容 C_8 上的电压升到 BT_3 的触发电压时, BT_3 呈现负阻特性, C_8 经 BT_3 的发射极 e 和第一基极 b_1 及小型密封继电器 $3J$ 的线圈放电, $3J$ 动作,其一付常开接点 $3J_1$ 用于自保持,另一付常开接点 $3J_2$ 用于控制外部信号电路。调整 R_{18} 可以进行信号延时整定。

从图2看出,在起动元件 $2HJ$ 没有动作时,双基极二极管 BT_3 的第一基极 b_1 没加电压, BT_3 不可能误触发,其第二基极 b_2 与发射极 e 之间有一反向电压,其数值与稳压管 WY_7 的稳压电压相当,约为 $10V$,但双基极二极管能耐受的反向电压为 $60V$,远大于 $10V$,因而此电路的可靠性是相当高的。

测试插座 GZ_2 在继电器调试时,用于观测起动元件 $2HJ$ 是否动作。当 $2HJ$ 动作时, GZ_2 上有电压, $2HJ$ 返回时, GZ_2 上电压消失,可以借助于高内阻直流电压表进行观测。

继电器的反时限部分由脉冲回路和间歇积分回路组成,其每个回路的工作原理与信号回路相似,这里不重述。

当反时限延时回路的起动元件 $1HJ$ 没有动作时, BT_1 和 BT_2 的第一基极 b_1 没加电压, BT_1 和 BT_2 不可能误触发;发射极 e 和第三基极 b_2 之间的反向电压也不会超过稳压管上的电压(约 $10V$),远低于双基极二极管所能承受的反向电压。当充电电压较高时, e 和 b_2 之间可能流过不大的正向电流,但受充电电阻限制,数值不大,对 BT_1 和 BT_2 影响不大。

R_{20} 和接点 $1J_2$ 用于温度补偿,以减轻温度变化对脉冲间隔时间的影响。

测试插座 GZ_1 在继电器调试时,用于观测起动元件 $1HJ$ 是否动作。当 $1HJ$ 动作时, GZ_1 上有电压, $1HJ$ 返回时, GZ_1 上电压消失,可借助于高内阻直流电压表进行观测。在调试时,小型按钮 K 用于使电容 C_7 的电荷放净,以便测出准确的继电器反时限动作时间。

间歇积分回路的小型密封继电器 $2J$ 动作后,其一付常开点 $2J_1$ 用于自保持,另一付常开接点 $2J_2$ 使出口继电器 $4J$ 动作, $4J$ 的接点用于控制继电器外部电路。

设经整流、滤波后的滤序器输出电压为 U ,电位器 W 上的分压电压为 U_w ,脉冲回路的双基极二极管 BT_1 的触发电压为 U_{d1} 。此时电容 C_6 上的电压建立过程为

$$U_{C6} = (U + U_w) \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{10}C_6}} \right) U_{C6} \text{ 升 到 } U_{d1} \text{ 所需时间}$$

$$t_1 = -R_{10}C_6 \ln \left(1 - \frac{U_{d1}}{U + U_w} \right)$$

但是,当 BT_1 触发时,电容器 C_6 经 BT_1 的发射极 e 和第一基极 b_1 及小型密封继电器 $1J$ 的线圈放电,使 $1J$ 动作,当 C_6 上的电压降到 U_c 时, $1J$ 返回, C_6 重新开始充电。 U_{C6} 升到 U_c 所需时间

$$t_2 = -R_{10}C_6 \ln \left(1 - \frac{U_c}{U + U_w} \right)$$

于是脉冲间隔时间

$$t_0 = t_1 - t_2 = R_{10}C_6 \left[-\ln \left(1 - \frac{U_{d1}}{U + U_w} \right) + \ln \left(1 - \frac{U_c}{U + U_w} \right) \right]$$

我们知道,当 $|x| < 1$ 时

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$$

$$t_0 = R_{10}C_6 \left[\frac{ud_1 - u_c}{u + u_w} + \frac{1}{2} \frac{ud_1^2 - u_c^2}{(u + u_w)^2} + \frac{1}{3} \frac{ud_1^3 - u_c^3}{(u + u_w)^3} + \dots \right] \quad \dots (4)$$

因 R_{10} , C_6 为常数, ud_1 和 u_c 也可视为常数,适当选择 u_w ,可以使

$$t_0 \approx \frac{R_{10}C_6 (ud_1 - u_c)}{u} \quad \dots (5)$$

在一定的负序电流范围内,滤序器输出电压 u 与负序电流分量成正比,所以脉冲间隔时间 $tb \approx \frac{K_b}{I_{2*}} \quad \dots (6)$

式中, I_{2*} 为负序电流分量的标么值。

$1J$ 处于返回位置时,充电电压 $(u + u_w)$ 使脉冲回路 C_6 充电, $1J$ 处于动作位置时,电压 $(u + u_w)$ 使间歇积分回路的电容 C_7 充电。

如果电压 $(u + u_w)$ 不间断地加于 $R_{12} + R_{13}$ 和 C_7 组成的充电电路上,则 C_7 上的电压升到双基极二极管 BT_2 的触发电压 ud_2 所需的时间

$$t' = RC_7 \ln \left(\frac{u + u_w}{u + u_w - ud_2} \right) = -RC_7 \ln \left(1 - \frac{ud_2}{u + u_w} \right)$$

式中, $R = R_{12} + R_{13}$

在适当的 u_w 下

$$t' \approx \frac{RC_7 u_{d2}}{u} \approx \frac{K_4}{I_{2*}}$$

但实际上, C_7 是间歇充电的, 即当电容 C_6 通过 BT_1 的 e 和 b_1 及 $1J$ 线圈放电, $1J$ 动作时其接点 $1J_1$ 的常开接点闭合瞬间 t_a 时才能充电。 t_a 的大小由 BT_1 和 $1J_1$ 的工作参数及 C_6 电容量决定, 一般为 $10 \sim 20 \text{ ms}$, 可以视为常数, 因而 C_7 的实际充电时间

$$t = \frac{t_a + t_b}{t_a} \cdot t' = \left(1 + \frac{t_b}{t_a} \right) t' \quad (7)$$

当负序电流较小时 $t_b \gg t_a$, 则

$$t \approx \frac{t_b}{t_a} t' \approx \frac{k_b}{t_a \cdot I_{2*}} \cdot \frac{k_a}{I_{2*}} \approx \frac{k_a k_b}{t_a} \cdot \frac{1}{I_{2*}^2} \approx \frac{k}{I_{2*}^2} \quad (8)$$

设 $R_{10} = 150 \text{ k}\Omega$, $C_6 = 47 \mu\text{F}$, $u_w = 4.5 \text{ V}$, $u_{d1} = 7 \text{ V}$, $u_c = 3 \text{ V}$, $u_{d2} = 7 \text{ V}$, 当 $u = 15 \text{ V}$ 时,

由公式 (8) 算出 $t = 58.49 RC_7$,

由公式 (7) 算出 $t = 56.52 RC_7$,

当 $u = 75 \text{ V}$ 时,

由公式 (8) 算出 $t = 2.3396 RC_7$,

由公式 (7) 算出 $t = 2.4175 RC_7$,

当 $u = 150 \text{ V}$ 时,

由公式 (8) 算出 $t = 0.5849 RC_7$,

由公式 (7) 算出 $t = 0.6294 RC_7$,

从以上计算结果可以看出, t_a 比 t_b 小的倍数不是很大时, 即负序电流较大时, 按公式 (7) 计算出的时间较长, 即实际的动作时间比按公式 $\frac{k}{I_{2*}^2}$ 计算的时间长一些。

当负电流大到一定程度, 稳压管 WY_1 、 WY_2 和 WY_3 开始工作, 电压 u 不再升高, 继电器的动作时间趋于稳定。

将 u_w 适当减小, 继电器的反时限特性将符合下式

$$t = \frac{k}{I_{2*}^2 - k^2}$$

不同的 u_w 值, 将得到不同的 k 值。

$LFL-41A$ 型继电器的反时限特性曲线示于图 5 中, $LFL-42A$ 型继电器的反时限特性曲线示于图 6 中, $LFL-43A$ 型继电器的反时限特性曲线示于图 7 中。

按照继电器的负序动作电流大小和 K 值, 对于汽轮发电机组, $LFL-43A$ 型继电器一般适用于 5 万 KW 以下的机组, $LFL-42A$ 型继电器一般适用于 10 万—12.5 万 KW 的机组, $LFL-41A$ 型继电器适用于 20 万 KW 以上机组。对于水轮发电机组, 因 K 值一般都比较大, 所以 $LFL-42A$ 和 $LFL-43A$ 型继电器是比较适用的。

$LFL-40A$ 系列继电器原理接线简单, 性能可靠, 特性曲线准确而且可以调整, 型

号规格齐全，维修方便，对于我国电力系统中的大型发电机保护是适用的。

参 考 文 献

1. 《大型机组晶体管继电保护》上册

许昌继电器研究所

清华大学电力系 1977年6月

2. 《大容量发电机组整流式成套继电保护装置技术报告》① 内蒙古自治区

电力勘测设计院

1975年

呼和浩特

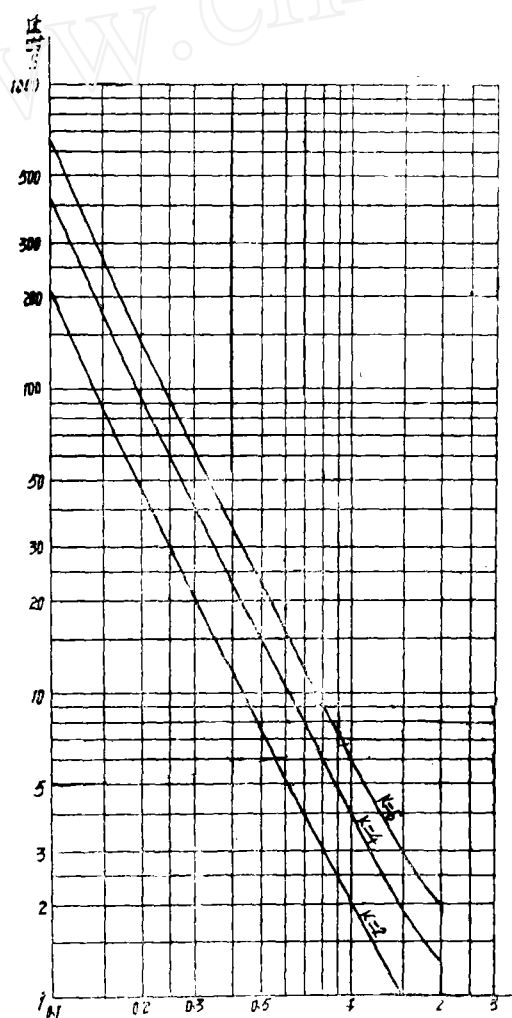


图 2、LFL—41A反时限特性

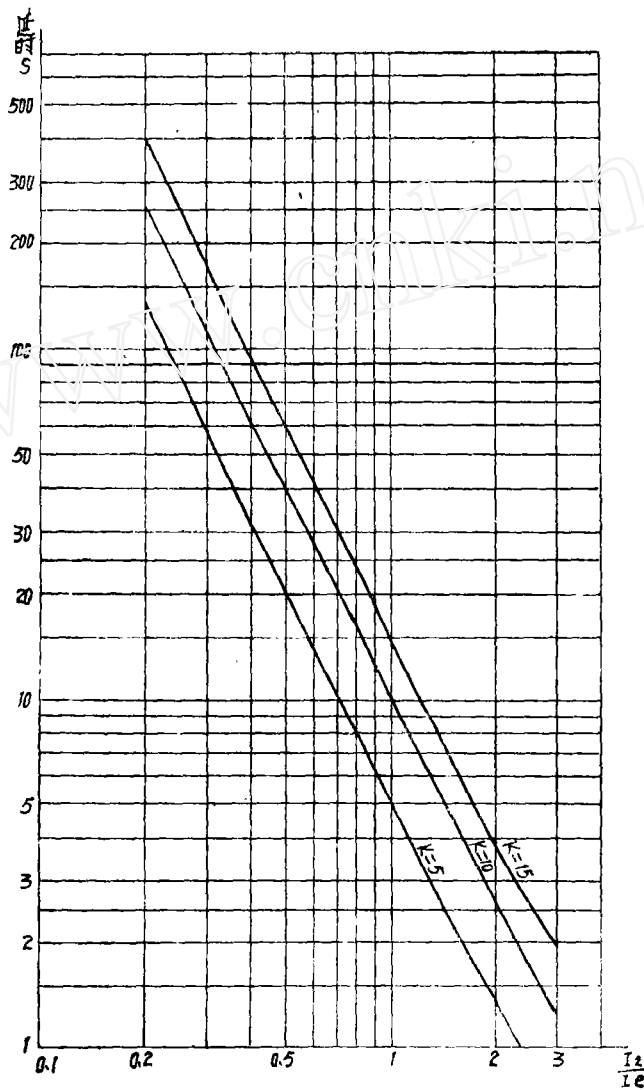


图 3、LFL—42A反时限特性

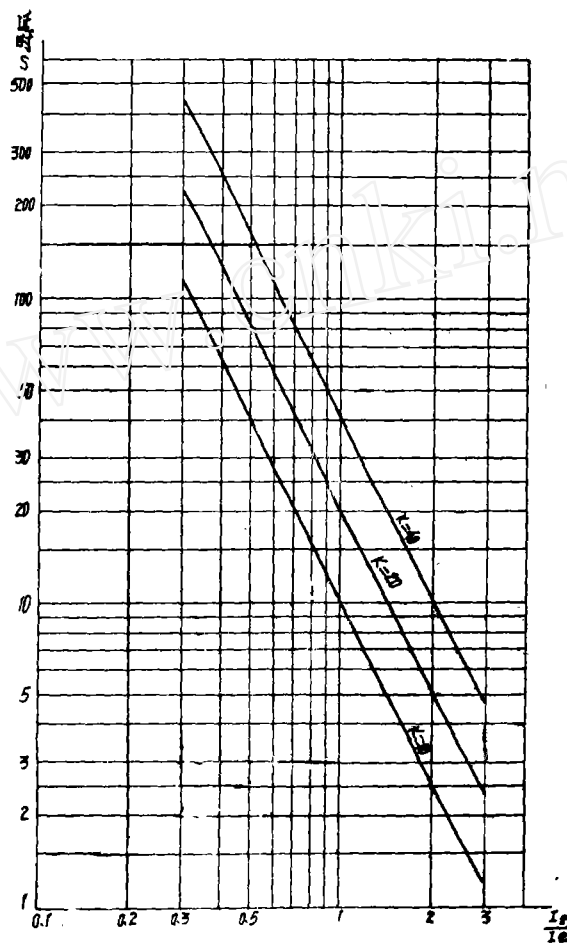


图 4、LFL-43A反时限特性