

电磁型差动继电器的设计和计算

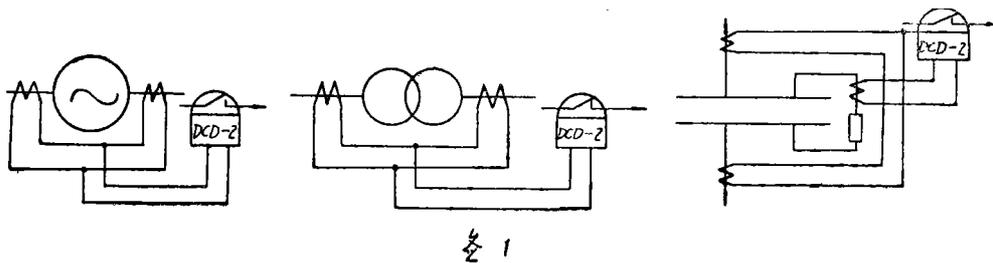
许昌继电器研究所 沈学斌

一、前言

电磁型差动继电器是我国目前广泛使用和大量生产的一种产品,经过长期的运行和生产实践,人们对它有所了解和认识。但是近几年来,由于材料、工艺的不稳定导致有些技术指标偏离要求。本文试图从设计制造角度,对导磁体、线圈参数、双重磁化曲线提供一些理论计算数据,以便制造厂对生产过程中出现的一些问题,有的放矢的给予解决,也为运行单位在使用过程中,分析和处理问题提供一些基本线索。由于作者水平有限,文中有不当和错误之处,望指教。

二、作用和要求

差动继电器用来保护二绕组和三绕组变压器、发电机、母线,作为差动保护的主要元件〔图1〕。



众所周知,在电力系统中,发电机是电能的生产者,而变压器是能量转换器,母线是进线和出线的汇集地,这些设备当绝缘老化、外界雷击、落物及误操作等原因,造成接地、相间故障,这些故障将危及发电机、变压器和母线,使之损坏并导致大面积的停电,为了保护上述设备,装设差动保护。

然而,变压器、发电机、母线这些设备,尤其是变压器具有一些固有特性,即:

1. 当变压器空载投入和外部故障切除后电压恢复时,在差动继电器工作回路中有由励磁涌流产生的不平衡电流;
2. 由于变压器具有分接头,但是变压比只能在一个接头位置与 G 、 T 的变流比相匹配,在其他分接头位置 C 、 T 二次电流中有不平衡电流,此电流将流入继电器的工作回路,

3. 变压器高、中、低压各侧的C、T，在设计制造上特性是有差异的，这种差异在穿越性故障时将引起较大的不平衡电流，此电流将流入继电器工作回路。

这些不平衡电流流入继电器，将引起继电器误动，为此在设计差动继电器时要求能躲过励磁涌流和穿越性故障造成的不平衡电流。目前我国生产和广泛在电力系统运用的为带速饱和变流器的差动继电器，此继电器用平衡绕组来平衡正常运行时产生的不平衡电流，用速饱和变流器的双重变换来消除励磁涌流和穿越性故障造成的不平衡电流。

三、动作原理

带速饱和变流器的差动继电器具有双重变换作用，当继电器中流过具有非周期分量的不平衡电流时，能自动地降低保护的灵敏度。差动继电器原理接线示于图2。

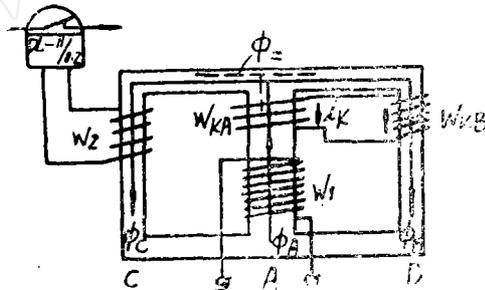


图2

它由两部分组成：

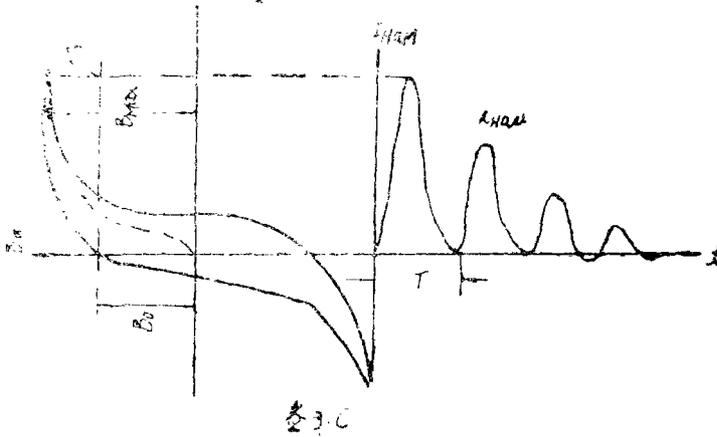
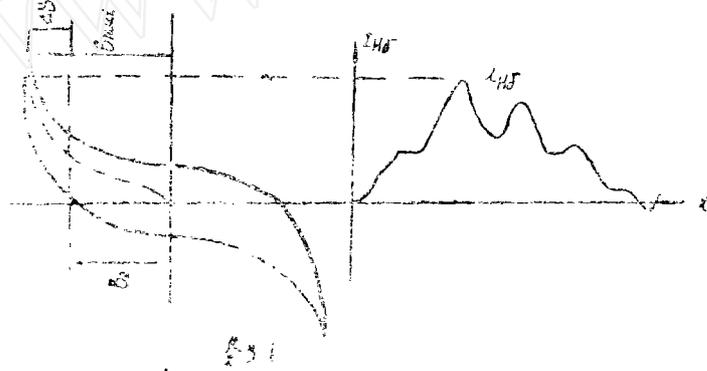
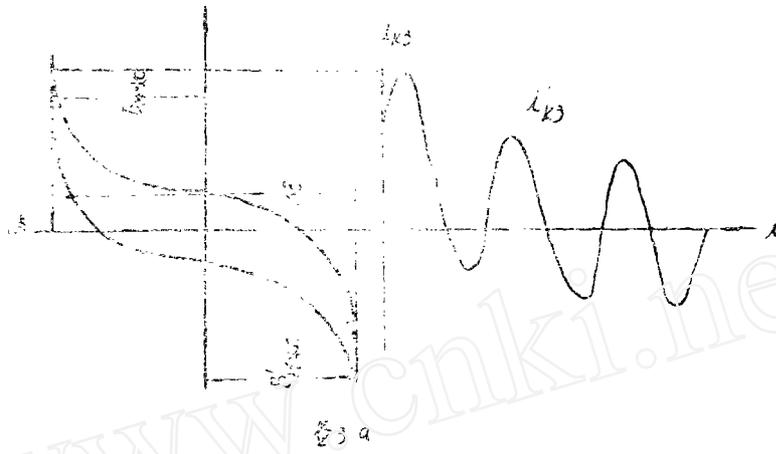
1. DL-10/0.2型继电器；
2. 速饱和变流器

前者作为执行机构，后者由三个臂的导磁体构成，中间臂(A)截面比旁边两个臂截面(B、C)大2倍。在中间臂A上装有一次绕组 W_1 ，平衡绕组 W_{YI} 、 W_{YII} （图2未示出），短路绕组 W_{KA} ，臂B上装有短路绕组 W_{KB} ，臂C上装有二次绕组 W_2 ，其负载为电流继电器DL-10/0.2。

图3、a示内部故障；图3、b示外部故障时不平衡电流；图3、c示变压器空载投入时励磁涌流情况，其输出示于表1。从表1可知，在内部故障时输出大于励磁涌流和不平衡电流时输出。

表1

图3 a	图3 b	图3 c
$\Delta B = 4 B'_{max}$	$\Delta B = B'_{max} - B_0$	$\Delta B = B_{max} - B_0$
$e \equiv -\frac{\Delta B}{\Delta t} > u_{cp}$	$e \equiv -\frac{\Delta B}{\Delta t} < u_{cp}$	$e = -\frac{\Delta B}{\Delta t} < u_{cp}$



四、速饱和变流器的设计和计算

速饱和变流器是差动继电器的一个主要组成部分，如何使其设计得理想，设计中应考虑那些因素，下面给予分析。

1. 进行饱和变流器设计时，需要考虑那些因素：

设计差动继电器的饱和交流器，第一个需要考虑的问题即工作点如何选取，也就是工作磁密 B_{CP} 如何选取，为了保证穿越性故障和励磁涌流时，饱和交流器能够迅速饱和，导磁体使继电器DL-10/0.2能动作磁密 B_{CF} 要选择足够大，使它接近开始饱和值；其次要使继电器动作电流有足够地余度，继电器的可靠系数应不小于1.35，即：

$$K_H = \frac{I_P}{I_{CP}} = \frac{B_m}{B_{CP}} \geq 1.35$$

考虑到上述二个因素，我们就能够选取最佳的 B_{CP} 值，目前所生产的差动继电器所用硅钢片型号为D41，片厚 $b = 0.35\text{mm}$ ，其最大饱和磁密：

$$B_m = 20000 \text{高斯}$$

$$B_{CP} = 12000 \sim 14000 \text{高斯。}$$

2. 差动继电器的基本方程和等值结线：

为了便于分析计算，给出等值结线图4和基本方程，可以确定绕组中电流和铁芯中磁通关系。

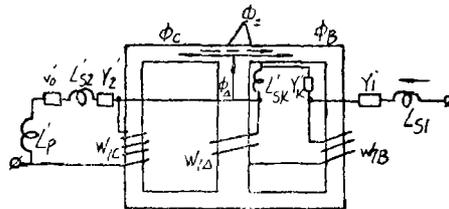


图 4

把工作绕组 W_1 分为两部分，即：

$$W_1 = \frac{W_{KA}}{W_{KA} + W_{KB}} W_1 + \frac{W_{KB}}{W_{KA} + W_{KB}} W_1 \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{令 } W_{1A} = W_1 \frac{W_{KA}}{W_{KA} + W_{KB}}, \quad W_{1B} = W_1 \frac{W_{KB}}{W_{KA} + W_{KB}} = W_{1C}$$

$$\therefore W_1 = W_{1A} + W_{1B}$$

短路绕组微分方程：

$$r_{K1} i_{K1} + L_{SK} \frac{di_{K1}}{dt} - W_{KA} \frac{d\phi_A}{dt} + W_{KB} \frac{d\phi_B}{dt} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

假定A、B两臂磁密比是稳定的，理想情况 $r_K = 0$ ， $L_{SK} = 0$ 即该回路不具有电阻，那么，

$$\frac{d\phi_A}{d\phi_B} = \frac{W_{KB}}{W_{KA}}$$

$$\therefore \phi_A = \frac{W_{KB}}{W_{KA}} \phi_B + \phi_0 \dots \dots \dots (3)$$

令 $\phi_0 = 0$ ，则有：

$$\frac{\phi_A}{\phi_B} = \frac{B_A S_A}{B_B S_B} = \frac{W_{KB}}{W_{KA}}$$

$$\text{即 } \frac{B_A}{B_B} = \frac{W_{KB} \cdot S_B}{W_{KA} \cdot S_A} \dots\dots (4)$$

其中： S_A 、 S_B —为A、B臂截面积，
 B_A 、 B_B —为A、B臂磁密。

由于A柱截面为B柱或C柱两倍，即 $S_A = 2S_B = 2S_C$ ，最合理地利用铁芯截面积是使A、B臂内磁密相等，同时这种场合铁芯损耗最小，故有：

$$\frac{W_{KB}}{W_{KA}} = \frac{B_A \cdot S_A}{B_B \cdot S_B} = 2$$

磁通瞬时值的方程为：

$$\phi_C = \phi_A + \phi_B = \phi_A + \phi_A \frac{W_{KA}}{W_{KB}} = W_{KA} + W_{KB} \phi_A \dots\dots (5)$$

由于B臂磁通相对值为：

$$\frac{\phi_B}{\phi_C} = \frac{W_{KA}}{W_{KA} + W_{KB}} = 0.33$$

因此，对于差动继电器在三个臂内磁密不相等，具有下列关系：

$$B_C = 3B_A = 3B_B \dots\dots (6)$$

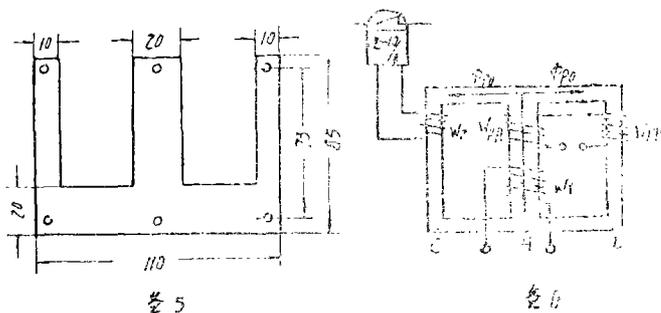
由等值结线可知，差动继电器基本方程式为：

$$\dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_K W_{KA} - \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_0 W_1 \dots\dots (7)$$

其中 $\dot{I}_0 W_1 = H_A l_A + H_C l_C$ ——通过臂A和C回路励磁磁势分量，臂B的励磁磁势接入短路绕组磁势中： $\dot{E}_{KA} = r_K \dot{I}_K + \dot{E}_{KB} \dots\dots (8)$

3. 在不计及短路绕组时饱和变流器的计算：

假定短路绕组开路时，这时磁通分布示于图5，硅钢片的尺寸示于图6；



a. 录取磁化曲线 $B = f(H_0)$ ；

假定差动继电器工作安匝 $I_1 W_1 = 60$ 安匝；执行元件选取：DL-11/0.2，其动作电

压 $U_{P2} = 1.56V$ ，动作电流 $I_{P2} = 0.23A$ 。

另外，我们可以依据下列公式，近似地用解析法获得磁化曲线 $B = f(H)$ ，

$$B = \frac{2}{\pi} B_m \operatorname{tg}^{-1} \frac{H}{H\delta} \dots\dots (9)$$

取其标么值，令 $H_* = \frac{H}{H\delta}$ ， $B_* = \frac{B}{B_m}$ ，

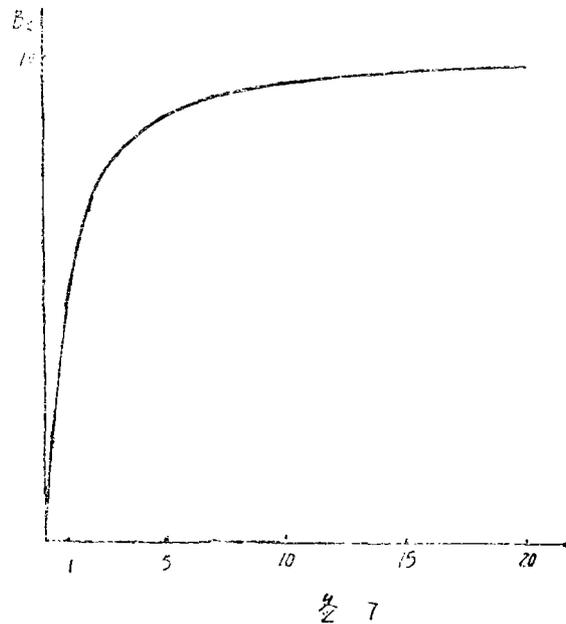
其中： B_m —饱和磁密，通常 $B_m = 20000$ 高斯；

$H\delta$ —在 $B = \frac{1}{2} B_m$ (即 $B = 10000$ 高斯) 时磁场强度。

因此，方程式 (9) 可得到：

$$B_* = \frac{2}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} H_* \dots\dots (10)$$

根据方程式 (10) 就获得图 7 的磁化曲线 $B_* = f(H_*)$ 。



由图 5 可知，工作磁通 ϕ_p 的磁路径可以认为通过 B、C 两臂闭合，故其平均磁路径可取：

$$l_p = 2 \times (11 - 2 \times 0.5) + 2 \times (8.5 - 2 \times 1.0) = 33 \text{ cm}$$

$$H_{p0} = \frac{0.4\pi I_{p0} (1 - \alpha_r) W_1}{l_p} \dots\dots (11)$$

式中： α_r —功率分配系数；对于电磁型继电器， $\alpha_r = 0.1 \sim 0.2$ ，取 $\alpha_r = 0.15$ 。

$$\therefore H_{p0} = 1.91 \text{ 奥}$$

取 $B_r = 12000$ 高斯，代入 (9) 式可求得 $H\delta$ ：

$$H_0 = H_{FO} / 1g \frac{B_F \pi}{2 B_m} = 1.38 \text{奥}$$

那么我们就可以把 $B_* = f(H_*)$ 曲线, 换算为 $B = f(H)$ 曲线, 其结果示于表 2 ,

表 2

H_*	0	0.5	1	1.5	2	3	4	5	10	15	20
B_*	0	0.294	0.5	0.626	0.704	0.796	0.843	0.872	0.936	0.958	0.974
H (奥)	0	0.69	1.38	2.07	2.76	4.14	5.52	6.9	13.8	20.7	27.6
B (高斯)	0	5880	10000	12520	14080	15920	16860	17440	18720	19160	19480

b. 计算导磁体

导磁体的计算以功率为基础进行, 设饱和变压器的功率为 P_T

$$P_T = P_H + P_P \dots \dots (12)$$

$$\therefore P_H = \left(\frac{1 - \alpha_P}{\alpha_P} \right) \cdot P_P \dots \dots (13)$$

式中: P_H ——励磁功率;

P_P ——继电器动作功率;

$$\alpha_P = \frac{P_P}{P_T} \text{——功率分配系数;}$$

设导磁体体积:

$$V = S l_p \dots \dots (14)$$

其中 S ——铁心截面积;

l_p ——平均磁路长;

$$\therefore P_H = I_H' U_P$$

$$I_H' = \frac{H_{FO} \cdot l_p}{W_2}$$

$$U_P = 4.44 f \cdot W_2 \cdot B_P S \times 10^{-8}$$

$$\therefore V = \frac{P_H \times 10^8}{4.44 f B_P \cdot H_{FO}} = \frac{1 - \alpha_P}{\alpha_P} \frac{P_P \times 10^8}{4.44 f B_P \cdot H_{FO}} \dots \dots (15)$$

根据 (15) 式就能计算出导磁体体积, 那么导磁体两边臂截面积:

$$S = \frac{V}{l_p}$$

c. 计算次级绕组 W_2 :

$$W_2 = \frac{U_{P2} \times 10^8}{4.44 f \cdot B_P \cdot S} \dots \dots (16)$$

d. 计算一次绕组 W_1

$$W_1 = \frac{H_{FO} \cdot l_p}{(1 - \alpha_P) \cdot I_{FO} \cdot 0.4 \pi} \dots \dots (17)$$

4. 在不计及短路绕组时饱和变流器计算举例,

a. 导磁体计算

已知: $U_{P2} = 1.56$ 伏, $I_{P2} = 0.23^A$, $B_P = 12000$ 高斯, $H_{PO} = 1.91$ 奥, $l_P = 33^{\text{cm}}$,
 $\alpha_P = 0.15$, $I_{PO} = 3^A$, $P_P = U_{P2} \cdot I_{P2} = 0.359^{\text{VA}}$

依公式 (15) 可得:

$$V = \frac{1 - \alpha_P}{\alpha_P} \frac{P_P \times 10^8}{4.44f \cdot B_P \cdot H_{PO}} = 40.3 \text{ cm}^3$$

两边臂截面积:

$$S = \frac{V}{l_P} = \frac{40.3}{33} \approx 1.22 \text{ cm}^2$$

b. 求 W_2 :

$$W_2 = \frac{U_{P2} \times 10^8}{4.44f B_P S} = \frac{1.56 \times 10^8}{4.44 \times 50 \times 12000 \times 1.22} \approx 48 \text{ 匝}$$

c. 计算 W_1 :

$$W_1 = \frac{H_{PO} l_P}{(1 - \alpha_P) I_{PO} \cdot 0.4 \pi} = \frac{1.91 \times 33}{(1 - 0.15) \times 3 \times 0.4 \pi} = 19.6 \text{ 匝}$$

取 $W_1 = 20$ 匝

5. 计及短路绕组时饱和变流器计算:

速饱和变流器当考虑短路绕组时, 其等值图示于图 4, 其中

$$W_{1B} = W_{1C} = W_1 \frac{W_{KB}}{W_{KA} + W_{KB}} = \frac{2}{3} W_1$$

$$W_{1A} = W_1 \frac{W_{KA}}{W_{KA} + W_{KB}} = \frac{W_1}{3}$$

依据等值图 4, 我们可假设工作磁通 ϕ_P , 由 W_{1B} 、 W_{1C} 产生, 励磁磁通 ϕ_m 由 W_{1A} 产生, 故可视为周期分量电流 I_P 加入在 W_{1B} 和 W_{1C} 绕组上, 产生工作磁通, 非周期分量电流 I_a 加入在绕组 W_{1A} 上。

因此励磁磁场强度 H_P :

$$H_P = \frac{0.4 \pi I_P (W_{1B} + W_{1C})}{l_P} = \frac{0.4 \pi (I_P - \alpha_P I_{PO}) \cdot \frac{4}{3} W_1}{l_P} = \frac{0.4 \pi I_{PO} \cdot \frac{4}{3} W_1}{l_P}$$

$$\left[\frac{I_P}{I_{PO}} - \alpha_P \right] = \frac{0.4 \pi I_{PO} \cdot \frac{4}{3} W_1}{l_P} (\xi - \alpha_P) \dots \dots (18)$$

式中: $\xi = \frac{I_P}{I_{PO}}$ —动作电流倍数

l_P —平均磁路径。

励磁磁场强度 H_K 可按式计算:

$$H_K = \frac{0.4 \pi I_a \cdot \frac{1}{3} W_1}{l_K} \dots \dots (19)$$

或者:

$$H_K = \frac{0.4 \pi K I_P \cdot \frac{1}{3} W_1}{l_K} = \frac{0.4 \pi K \xi I_{PO} \cdot \frac{1}{3} W_1}{l_K} \dots \dots (20)$$

式中： $K = I_a / I_p$ ——偏移系数

$l_k = 23 \text{ cm}$ ——助磁磁通平均磁路径。

仅仅依据公式(18)、(20)，无法录取 $H_p = f(H_k)$ 双重磁化曲线，因为 K 和 ζ 依然是未知数，需要寻找 k 、 ζ 之间内在关系，可采用经验公式：

a. 当短路匝数较多时， k 值在0.3以上时，用下列公式描述：

$$\zeta = \text{tg} \frac{K \pi}{a + (K - 0.3) b} \dots\dots (21)$$

在D—D偏磁特性时， $a = 0.96$ ， $b = 1$ ；在 $K \geq 0.6$ 时， $b = 1.5$ ；

在C—C磁处特性时， $a = 0.96 + \frac{W_{KA} \alpha_p}{W_{KB}}$ ， $b = 1$ ；在 $K \geq 0.5$ 时， $b = 1.2$

b. 当短路匝数较少时， k 值在0.3以上时，可用下述公式描述

$$\zeta = \text{tg} \frac{K \pi}{a + (K - 0.3) b}$$

在B—B偏磁特性时， $a = 1.05$ ， $b = 1.5$ ；

在A—A偏磁特性时， $a = 1.05 + \frac{W_{KA} \alpha_p}{W_{KB}}$ ， $b = 2.5$ ；

依据公式(18)、(19)、(20)和经验公式(21)、(22)，可以获得双重磁化曲线 $H_p = f(H_k)$ ，示于图8，其计算结果列于表3。

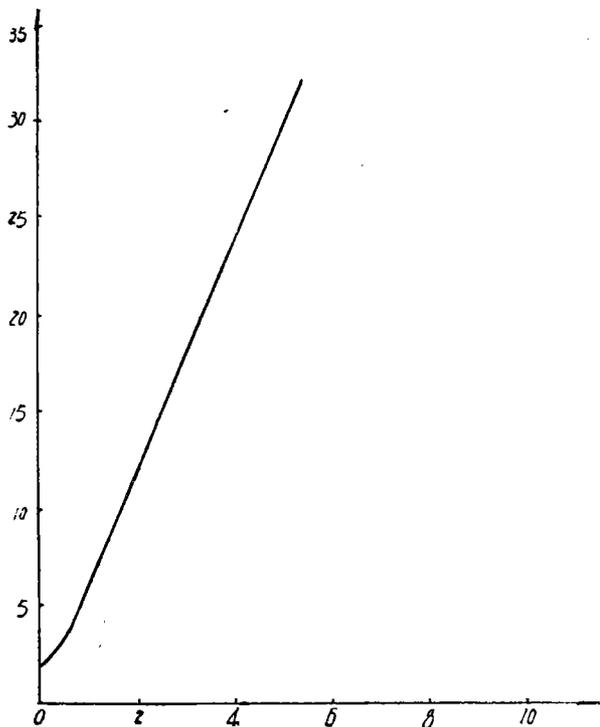


图 8

表3

参数	28/56						16/32						8/16						3/6					
	0	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6		
K	0	1.51	2.45	4.45	7.2	1.26	2.05	3.3	4.85	1.26	1.8	2.3	3.05	1.67	1.26	1.41	1.64							
ζ	0	4.53	7.35	13.35	21.6	3.78	6.15	9.9	14.45	3.78	5.4	6.9	9.15	3.21	3.78	4.23	4.92							
$I_p(A)$	0	1.36	2.94	6.67	12.9	1.135	2.46	4.95	8.66	1.135	2.16	3.45	5.5	0.963	1.51	2.11	2.95							
$I_a(A)$	1.91	4.16	9	20.4	39.5	3.46	7.54	15.1	26.7	3.46	6.6	10.55	16.8	2.95	4.61	6.45	9.05							
H ρ	0	0.695	1.51	3.4	6.7	0.58	1.25	2.52	4.41	0.58	1.1	1.76	2.8	0.493	0.77	1.075	1.505							
HK	0	0.695	1.51	3.4	6.7	0.58	1.25	2.52	4.41	0.58	1.1	1.76	2.8	0.493	0.77	1.075	1.505							

五、结 论

1. 在设计带有速饱和变流器的差动继电器时,首先在考虑可靠系数 $K_R \geq 1.35$ 时,选取合适的工作磁密 B_P ,然后依据 $B = f(H_P)$ 磁化曲线及 $H_P = f(H_K)$ 双重磁化曲线,在功率分配的基础上,计算出导磁体体积 V 、截面积 S 、一次绕组匝数 W_1 、二次绕组匝数 W_2 。

2. 由于饱和变流器带有短路绕组,在它的作用下使穿越故障不平衡电流和励磁涌流流入继电器时,继电器灵敏度自动地降低,达到躲开穿越故障的不平衡电流和励磁涌流的目的,表征其特性用 $\xi = f(K)$ 。

3. 双重磁化曲线 $H_P = f(H_K)$,在 B_P 一定时,在 $\frac{W_{KA}}{W_{KB}} = \text{常数}$ 时,其磁化曲线不随短路绕组匝数多少变化。