

# 变压器过激磁保护

华中电管局 陈学道

## 1 概述

变压器过激磁时，主磁通增加使铁芯饱和，引起漏磁通急剧增加。漏磁通穿过铁芯表面和结构件时，在它们中引起很大的漏流损耗。当这些损耗引起的温升过高时会使变压器绝缘损坏。近年来，随着变压器容量的增大和电压等级的增高，为了减小变压器体积，节省钢材和铁材等，变压器制造采用的铁芯材料导磁率较高，磁化曲线的特点较为明显（即磁化曲线更近似于折线）且额定磁通密度取得较高，裕度较小。铁芯材料特性的这些变更使得变压器过激磁的后果趋于严重。因此，对大容量变压器过激磁现象的研究引起了国内外的注意。并在容易出现过激磁的发电机变压器组中广泛加用了过激磁保护，而对系统中的联络变压器加用过电压保护就可以避免不可允许的过激磁，因这种情况下的过激磁往往都是由于过电压所造成〔1〕。

## 2 变压器过激磁损耗分析

可以认为，变压器过激磁损耗主要有以下四种

- (1) 漏磁通在铁芯表面引起的涡流损耗；
- (2) 过激磁电流在绕组导体电阻中引起的损耗；
- (3) 漏磁通在绕组导线中引起的涡流损耗；
- (4) 主磁通在铁芯中引起的损耗。

### 2.1 漏磁通在铁芯表面造成的涡流损耗

由试验得到过激磁1.25倍时漏磁通密度在铁柱各方向（见图1）的分布如图2所示。为了便于计算，在图2中均以直线代替实际的分布曲线。

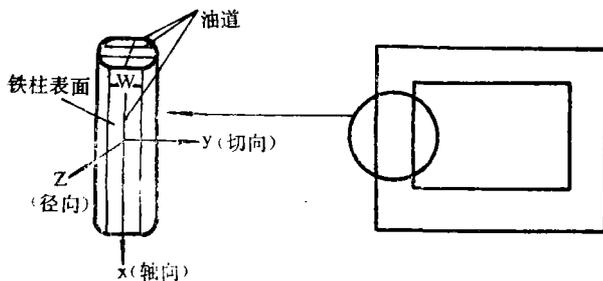
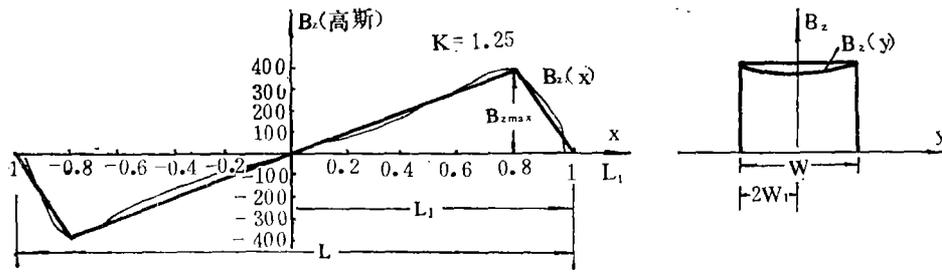


图1 铁柱

我们可近似用下列方程来表示在我国大容量变压器中采用得较多的冷轧硅钢片  $Z_{10}$  激磁曲线。

$B = a \ln(bH + 1)$  (1) 式中  $a, b$  与硅钢片材料特性有关的系数。铁柱表面漏磁最大点的漏磁密可写成

$$B_{Z_{max}} = \frac{m}{ab} e^{\frac{1}{a} B} = de^{k B} = de^{k k B N} \quad (2)$$



(a) 漏磁通的轴向分布

(b) 漏磁通的切向分布

L—铁柱长度,  $L_1 = \frac{L}{2}$

W—铁柱最外一阶层的宽度,  $2W_1$ —最外一阶层的叠片的宽度最外层由两块叠片拼成, 中间面有油道〔(图1)〕

图2 漏磁通的分布

上式中  $d, g$  可从实验得到的漏磁密与过激倍数关系 (图3) 得到  $d = 1.21 \times 10^{-2}$ ,  $g = 4.9 \times 10^{-4}$ 。

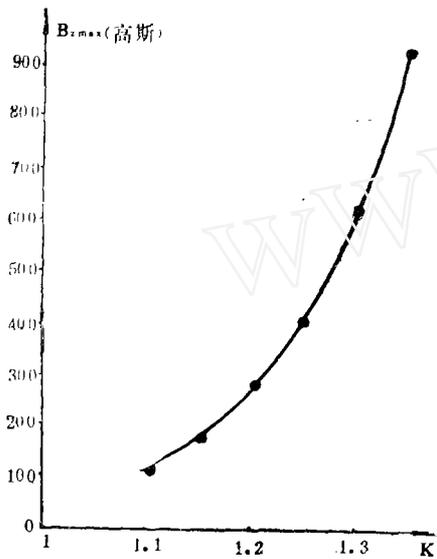


图3 实验得到的漏磁密与过激磁倍数关系

下面计算由漏磁通在铁柱表面产生的涡流。涡流密度有效值 (参见图4) 为

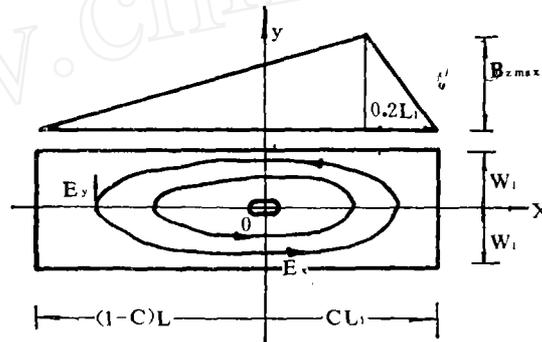


图4 铁柱表面涡流分布示意图

$$\begin{aligned} \delta_{z, \max} &= \frac{\gamma E_{z, \max}}{\sqrt{2}} = \frac{\gamma \omega}{\sqrt{2}} \int_0^{W_1} \frac{1-c}{0.8} B_{z, \max} dx \\ &= 3.44 \gamma f W_1 B_{z, \max} \times 10^{-4} \text{ (a/cm}^2 \text{)} \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $c = 0.381$  可由图4的漏磁分布按麦克斯威方程求得。

最大损耗密度为

$$P_{m, z} = \frac{\delta_{z, \max}^2}{\gamma} = 11.83 \gamma f^2 W_1^2 B_{z, \max}^2 \times 10^{-16} \text{ (W/cm}^3 \text{)} \quad (4)$$

Z<sub>10</sub>型硅钢片的密度 $\rho = 7.6 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ , 导电率 $\gamma = 2 \times 10^4 \frac{1}{\text{cm} \cdot \Omega}$ 。取 $W_1 = 15 \text{ cm}$ 。  
 则当过激磁1.4倍时, 由式2和4可算出每公斤的最大损耗为

$$P_{m,r} = 3500 \text{ (W/kg)}$$

### 2.2 过激磁电流在原边绕组电阻上的损耗

设变压器的铁芯为理想的磁化特性曲线如图5所示。可得过激磁电流波形如图6所示。有效值为

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} (I_m \sin \omega t - \frac{K_s}{K} I_m)^2 dt}$$

$$= \frac{\sqrt{2} K}{x} \sqrt{\frac{2}{T} \left[ \left( \frac{1}{2} + \frac{K_s^2}{K^2} \right) t - \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t + \frac{2K_s}{\omega K} \cos \omega t \right]_{t_1}^{t_2}}$$

其中 $t_1, t_2$ 可由图6求得

$$t_1 = \sin^{-1} \frac{K_s}{K} / \omega \quad t_2 = \frac{\pi}{\omega} - t_1$$

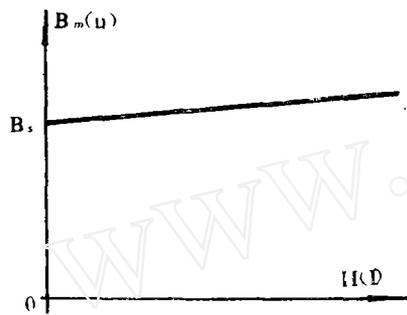


图5 理想磁化曲线

由文献[3]取 $x = 0.2$ 。可算出过激磁倍数 $K = 1.4$ 时,  $I \approx 0.9$

3和4两种损耗可由文献[1,8]查得: 过激磁1.4倍时分别为额定情况下的7倍和5.7倍左右。比较这四种损耗可知漏磁通在铁芯表面产生的涡流损耗是过激磁损耗的主要部分。其损耗密度最大值高达 $3500 \text{ W/kg}$ , 是额定情况下铁损 $1.5 \sim 1.8 \text{ W/kg}$ 的几千倍, 是引起变压器局部过热的主要因素。故以下建立判据时, 把它作为控制条件。

### 3 变压器过激磁判据的建立

对夹板中点损耗密度最大处, 不考虑沿平面

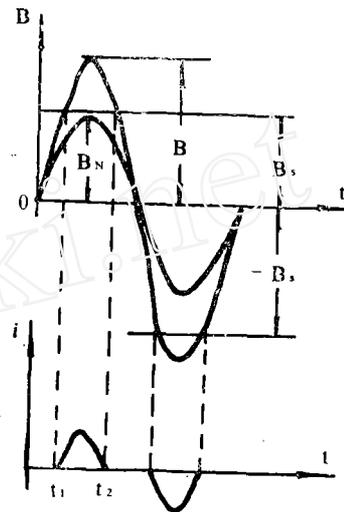


图6 过激磁电流波形

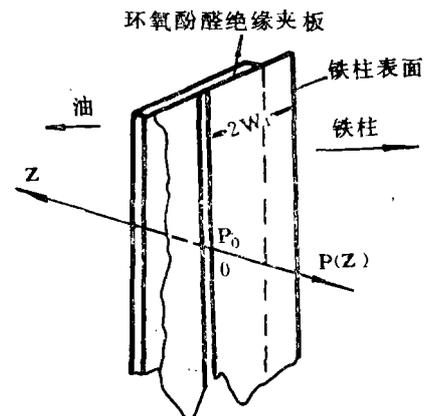


图7 铁芯局部温升计算用图

方向的散热，可写出下列一维热传导方程

$$C_U \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + P_{m \cdot x} e^{\beta z} \quad (5)$$

式中  $\lambda$ —叠片间的导热系数  $W/cm \cdot ^\circ C$

$C_U$ —铁芯材料的比热  $W/cm^3 \cdot ^\circ C$

根据铁芯过激磁前的温升为零，由于绝缘夹板的存在，不计铁芯表面对油的散热而只考虑对铁柱内的散热，认为铁柱直径相对铁柱表面薄层为 $\infty$ ，可写出式5的初始条件和边界条件。

$$\theta(z, 0) = 0, \quad \lambda \frac{\partial \theta(0, t)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \theta(-\infty, t)}{\partial z} = 0$$

解得铁柱表面 ( $z=0$ ) 的温升为

$$\theta(0, t) = \frac{h}{a^2 \beta^2} \left[ e^{a^2 \beta^2 t} \operatorname{erfc} \sqrt{a^2 \beta^2 t} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{a^2 \beta^2 t} - 1 \right] \quad (6)$$

$$\text{式中 } a^2 = \frac{\lambda}{C_U}, \quad h = \frac{P_{m \cdot x}}{C_U}$$

$\beta$ —率透系数，由试验定出  $\beta = 2.2 \frac{1}{C_m}$

在  $t > 5$  s 后，式6中  $e^{a^2 \beta^2 t} \operatorname{erfc}(\sqrt{a^2 \beta^2 t})$  已不到  $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{a^2 \beta^2 t}$  的10%。在时间稍长时不计该项的影响，为简化计算。将  $-1$  这项也略去。将  $\theta(0, t) = \theta_m$  (变压器铁芯允许温升)  $a^2 = \frac{\lambda}{C_U}$ ,  $h = \frac{P_{m \cdot x}}{C_U}$  代入上式，整理后得过激磁判据

$$K\% = \frac{B \times 100}{B_N} = - \frac{100}{2gB_N} \ln \frac{23.66 \sqrt{t} r i^2 W_1^2 d^2 \times 10^{-16}}{\sqrt{\pi C_U \lambda \theta_m \beta}} \quad (7)$$

频率高时的过激磁比频率低时更严重，故取  $f = 70$  Hz,  $W_1$  取平均值15cm,  $B_N = 17000$  高斯，由《电机工程手册》，可查得  $\lambda = 0.012$  w/cm $\cdot$ °C

$C_U = 3.8$  Ws/cm $^3$ °C,  $\gamma = 2 \times 10^4 \frac{1}{C_m \cdot \Omega}$  代入上式得

$$K\% = -3 \ln t + 136.6 \quad (8)$$

对  $t$  较小时，把铁柱表面的发热看成绝热过程，则

$$P_{m \cdot x} t = \theta C_U \quad (9)$$

由此可得出与上面相似的过激磁判据。

$$K\% = - \frac{100}{2gB_N} C_U \frac{11.83 t \gamma f^2 W_1^2 d^2 \times 10^{-16}}{\theta_m C_U} \quad (10)$$

代入数值后

$$K\% = -6 \ln t + 149.8 \quad (11)$$

图8中的判据①是按式8和11两式作出的。时间较长时按式8作出。时间较短时按式11作出。作为比较，图8中还绘出了其他国家和公司的过激磁判据。图中的曲线②和③分别为美国和原西德作为国家标准的判据<sup>[1]</sup>。④由西屋公司给出<sup>[6]</sup>。

## 4 反时限过激磁保护方案

### 4.1 对反时限过激磁继电器的基本要求

反时限过激磁继电器与通常的反时限过流继电器在特性上有很大的差别。对于反时限

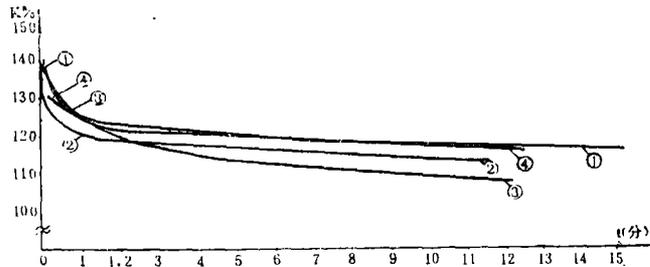


图8 变压器过激磁判据

过流继电器,过流倍数与动作时间通常为平方关系。而对于反时限过激磁继电器,如果要求其反时限特性与变压器的过激磁判据一致,则其特性为指数关系。从图8可见,当过激磁倍数在1.16~1.5倍这样一个小的范围内变化的,动作时限范围竟宽达1~900秒。保护继电器的反时限特性稍有偏移,动作时间就会偏离所需值很远。

### 4.2 反时限过激磁继电器方框图

$u/f$ 电压形成回路的输出电压正比于被保护变压器的端电压与频率之比 $u/f$ ,即过激磁倍数。启动回路在过激磁1.12倍时动作,1.10倍返回。返回系数约为0.98。启动回路动作后经0.5s延时,发出过激磁信号,同时解除对积分器和出口回路的闭锁。启动回路返回时,积分回路被闭锁,积分电容放电,但不是马上被放电到零。

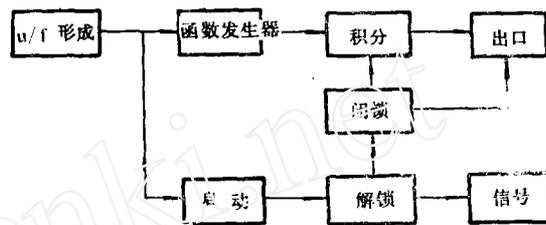


图9 反时限过激磁继电器方框图

其放电速度由积分电容 $C_s$ 和放电阻 $R$ 所决定。其中 $R$ 可调,以模拟不同变压器的放热规律。不让积分电容立刻放电到零主要是避免变压器反复过激磁的热量积累。积分量受函数发生器的控制,构成继电器的反时限特性。以下详述构成反时限特性的函数发生器和积分回路。

### 4.3 函数发生器和积分回路

函数发生器由5段组成。图10为其中的一段。其他各段的工作原理与此段相同。由图10可看出第K段的输出电压

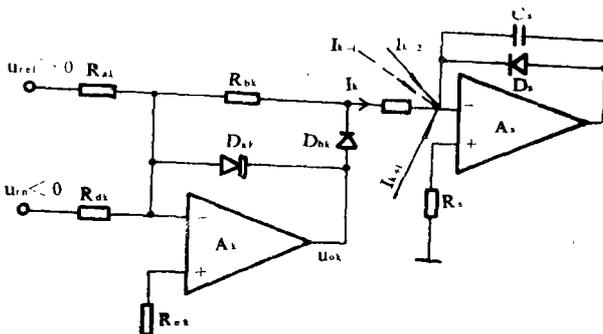


图10 函数发生器和积分器

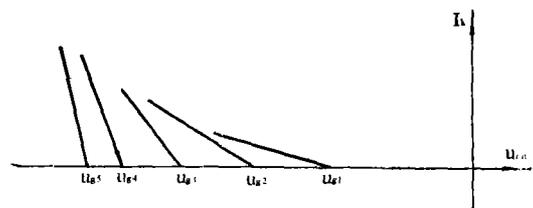


图11 函数发生器各段输出电流 $I_K$ 与输入电压 $U_{i,K}$ 的关系

$$U_{OK} = \begin{cases} 0 & U_{in} > -\frac{R_{dK}}{R_{aK}} U_{ref} \\ -\frac{R_{bK}}{R_{dK}} U_{in} & U_{in} < -\frac{R_{dK}}{R_{aK}} U_{ref} \end{cases} \quad (12)$$

设  $U_{gK} = -\frac{R_{dK}}{R_{aK}} U_{ref}$  称之为扬点电压。

由于电阻  $R_{cK}$  取得远大于运放的输出电阻，故第  $K$  段的输出电流为

$$I_K = \begin{cases} 0 & U_{in} > -U_{gK} \\ -\frac{R_{bK}}{R_{dK} R_{cK}} U_{in} & U_{in} < -U_{gK} \end{cases} \quad (13)$$

图11示出了各段输出电流  $I_K$  与输入电压  $U_{in}$  的关系。

积分器  $A_s$  的输入电流  $I_s$  为函数发生器各段输出电流之和，即

$$I_s = \begin{cases} 0 & U_{in} > U_{g1} \\ \sum_{K=1}^n I_K = -U_{in} \sum_{K=1}^{n-1} \frac{R_{bK}}{R_{dK} R_{cK}} & U_{g1} > U_{in} \geq U_{gn} \end{cases} \quad (14)$$

积分器的输出电压为

$$U_{os} = \frac{U_{in} t^{n-1}}{C_s} \sum_{K=1}^{n-1} \frac{R_{bK}}{R_{dK} R_{cK}} \quad U_{g1} > U_{in} \geq U_{gn} \quad (15)$$

设积分器后面的电平检测器的触发电压为  $U_{tr3}$

以  $U_{tr3}$  代上式中的  $U_{os}$ ，延时则为

$$t = \frac{C_s U_{tr3}}{U_{in}} \frac{1}{\sum_{K=1}^{n-1} \frac{R_{bK}}{R_{dK} R_{cK}}} = \frac{A_n}{U_{in}} \quad U_{g1} > U_{in} \geq U_{gn} \quad (16)$$

当  $A_n$  一定时，式16代表的是一段双曲线。故当  $A_n$  随  $U_{in}$  变化时式16代表一条由5段双曲线连成的曲线。如图12所示。

#### 4.4 试验结果

对较严重的过激磁，继电器的特性与所要求的反时限特性接近，而在低过激磁倍数时，长延时的误差仍然较大。但变压器处于长时间经过激磁的态况下要求继电器严格地按变压器过激磁判据的时间切除变压器实用意义已不大。

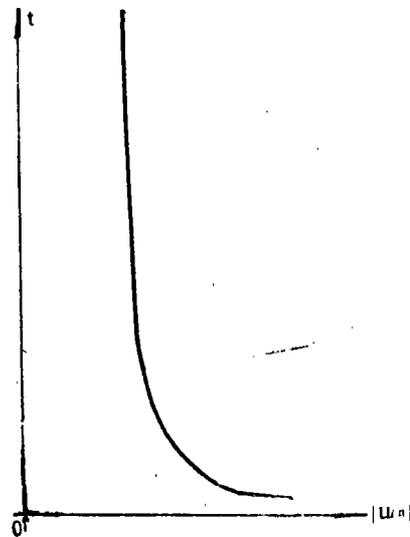


图12 延时  $t$  与  $|U_{in}|$  的关系曲线

#### 参考文献

- [1] Report by working group 01 of Study committee No 34, Transformer overfluxing Protection, Electra (1973) No 31, December CIGRE Reports, pp 65 to 73. (下转14页)

