

# 间断角原理变压器差动保护 定值变化问题初探

杨宛辉 刘宝仁 刘宪林  
(电机系)

## 提 要

间断角原理变压器差动保护装置的动作值变化较大,使其整定困难,运行不稳定,降低了供电可靠性。本文根据实验结果,认为造成定值变化的原因是环境温度变化和整定电源的波形畸变等,并相应提出了解决方法。

我国首先提出的间断角原理变压器差动保护发展较快。实践证明,这种保护设计思想合理,适用性强,它以灵敏度高,动作速度快,体积小等优点长于其他类型的变压器差动保护。但是,我们发现,在有的电站特别是中小电站,这类保护定值变化较大,整定困难,给运行造成隐患。本文拟将就此问题作一初步探讨。

## 一、 间断角原理变压器差动保护的基本原理

为后边分析方便起见,先简要介绍一下间断角原理变压器差动保护的基本原理。图1是这类保护的一种典型电路。

由原理图可知,制动整流和滤波电路输出的制动电压 $U_{zd}$ 是一平稳的直流电压,它和比较

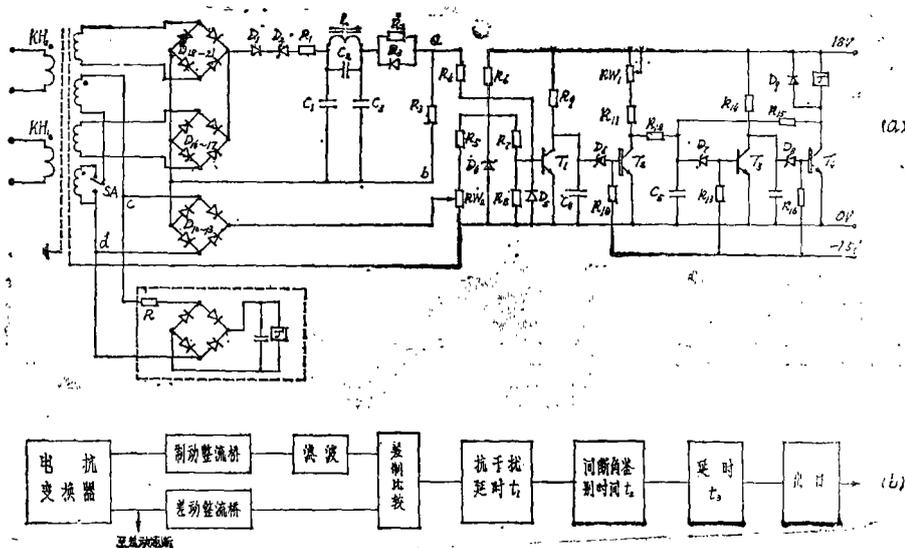


图 1. 间断角原理变压器差动保护原理图  
(a) 原理图 (b) 方框图

回路的等值门坎电压 $U_0$ 。(这里认为 $U_0$ 是由 $RW_2$ 所取得的门坎电压 $U_0'$ 和为抵消 $T_1$ 基极电流所需要的电压共同决定的等值直流电压)方向一致,力图保持 $T_1$ 的导通状态即电路的常态;差动整流回路输出的差动电压 $U_{cd}$ 是脉动的,力图使 $T_1$ 截止以致电路翻转。相应于变压器的不同运行状态, $U_{zd}$ 的大小是不同的, $U_{cd}$ 的幅值和波形也是不同的,二者相比较的结果决定最后一级电路( $T_4$ )是否翻转,即继电器J是否动作。

我们把制动电压大于差动电压的角度称之为这一差动电压的间断角 $\theta_{jd}$ ,它决定于制动电压和差动电压,参看图2(d)。间断角的整定值称为闭锁角 $\theta_b$ ,通常为 $60^\circ \sim 70^\circ$ ,其相应时间叫做闭锁时间 $t_b$ ,一般地,二者是由电路参数所决定的。当 $U_{cd} > U_{zd} + U_0$ 时, $T_1$ 截止,经时间 $t_1$ 后, $T_2$ 导通, $C_5$ 迅速放电, $T_3$ 随之截止, $C_6$ 开始充电。当 $U_{cd} < U_{zd} + U_0$ 后, $T_1$ 又复导通, $T_2$ 截止, $C_5$ 开始充电。如果 $\theta_{jb} > \theta_b$ ,则 $C_5$ 之端电压足以充至使 $T_3$ 导通, $C_6$ 放电,从而保持 $T_4$ 的截止状态,继电器J不动作;如果 $\theta_{jd} < \theta_b$ ,则 $C_5$ 的充电电压终不会使 $T_3$ 导通,从而使 $T_6$ 持续充电,最后使 $D_8$ 击穿, $T_4$ 导通,继电器动作。

在正常情况下, $U_{cd} < U_{zd} + U_0$ ,电路保持常态;在励磁涌流的情况下,整流后的差电压一般具有不小于 $110^\circ$ 的间断角, $\theta_{jd} > \theta_b$ ,继电器不动作;在外部故障的情况下,制动电压较大,差动压较小, $\theta_{jb} > \theta_b$ ,继电器不动作;只有在内部故障的情况下, $U_{cd} \gg U_{zd} + U_0$ , $\theta_{jb} < \theta_b$ ,继电器方才动作,以上四种情况可用图2说明之。

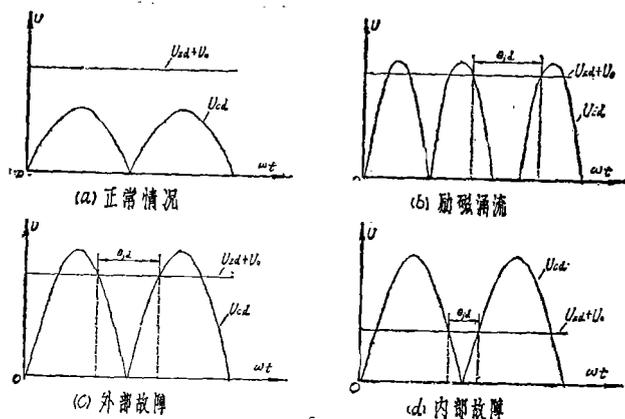


图 2 不同运行情况下差动电压 $U_{cd}$ 和制动电压 $U_{zd}$ 波形图

## 二. 定值变化的原因

对间断角原理变压器差动保护的运行情况所作的调查表明,这种保护中有的装置动作值严重波动,例如,某水电站的此类装置在不同季节检修调试时发现动作值相差达 $20\% \sim 30\%$ ,个别的甚至为 $50\%$ 。这直接威胁到变压器的安全运行。为了分析保护定值变化的原因,我们焊装了图1所示的电路(为突出矛盾,我们采用的元件未经老化筛选)进行实验分析,得出了以下初步结论。

### (一) 温度变化的影响

间断角原理变压器差动保护由于电子元件的温度特性,其闭锁角和动作值必然要受到温度的影响。如果元件未经严格的老化筛选,这种影响将更大。

我们在 $5^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 的温度范围内对实验电路作了温度实验。实验方法是:参看图1。在 $\alpha$ 、 $b$ 两点间用直流稳压电源加恒定制动电压,在 $c$ 、 $d$ 之间用音频信号发生器加 $50\text{Hz}$ 正弦交流电压,将电路极置于恒温箱中调节温度,对应于某一温度,逐步升高 $c$ 、 $d$ 间交流电压使电路临界翻转(用万用表观测 $T_4$ 管集电极电压判断),此交流电压值可认为是与电路在这一温度下的动作值成正比的(设电抗变换器工作在线性段),这时,用示波器读出图3所示

表 1. 温度对闭锁角和动作值的影响

温度T(°C)	动作电压U <sub>d</sub> (V)	闭锁角θ <sub>b</sub> (°)	备注
5	17.3	64	频率f=50Hz 门坎电压 V <sub>0'</sub> =5v 制动电压 U <sub>zd</sub> =8V 动作电压 U <sub>d</sub> 是自图 1中c、d两 点间测得的 值。
12	17	63	
16	20	64.8	
20	20.2	63	
25	21	63	
30	21.5	61.6	
33	21.7	61.6	
38	22	61.2	
40	22	60.8	
45	23	57.6	
50	25	50.4	

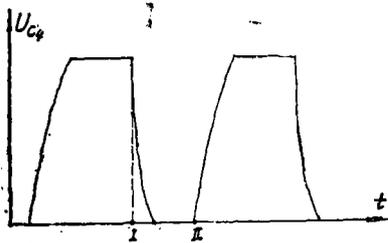


图 3 电容器C<sub>4</sub>充放电波形图

的电容器C<sub>4</sub>充放电波形图中的I、II两点间的时间值，此值就是闭锁时间t<sub>b</sub>，再由关系式θ<sub>b</sub>≐ωt<sub>b</sub>（ω是实验交流电压频率）求出闭锁角，其理由后边将会谈到。

表1是温度实验的结果。

图4、图5是根据上表作出的曲线。

从实验结果可以看出，对于本实验电路，随着温度的增加，闭锁角逐渐减小，而动作电压逐渐增大。

1. 闭锁角θ<sub>b</sub>变化的原因

分析图1可以知道，闭锁时间不仅与间断角鉴别时间电路有关，而且还与其他元件参数以及其他时间电路的状态（例如C<sub>5</sub>开始充电时其残余电压）有关。温度的升高，必然使构成各个时间电路的电阻，电容值的改变；使稳压管的反向击穿电压变化。亦即温度的变化将

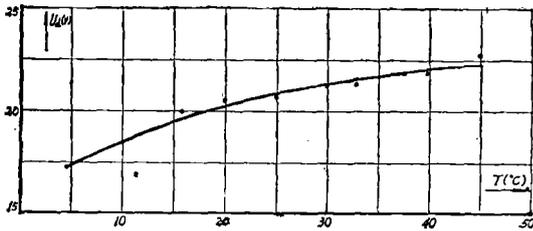


图 4 动作电压与温度的关系曲线

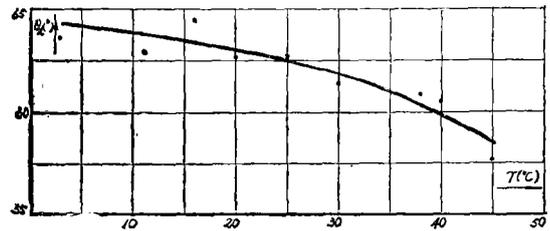


图 5 间断角与温度的关系曲线

影响于各时间电路的充放电速度和有关电容器的最终的充电电压（使后一级三极管翻转的电压），而间断角鉴别时间电路除本身受温度变化影响外，还受到其他时间电路变化的影响，这就造成了闭锁时间从而闭锁角的变化。

2. 动作值升高的原因

a). 闭锁角θ<sub>b</sub>的减小使动作值升高。由图b可以看出，在制动电压一定的情况下，θ<sub>b</sub>越小，则使波形的θ<sub>jd</sub> = θ<sub>b</sub>所需的差动电压值就越高，亦即动作值越高。

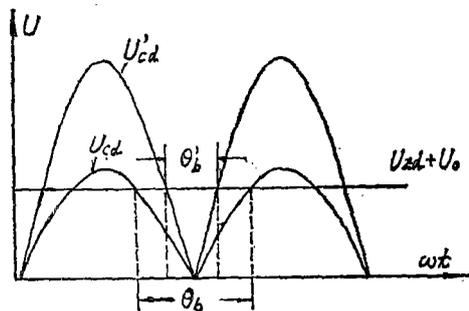


图 6 不同闭锁角时临界动作波形图  
 $\theta_b > \theta_b'$

内，定值波动达30%左右，由此足以见温度变化对其影响的严重性。因此某些电站不同季节检修时发现定值变化的原因就显而易见了。

(二) 波形畸变的影响

在进行间断角原理变压器差动保护的基本原理分析时，我们认为故障电流是正弦量，且电流互感器、电抗变换器运行在线性段，因此所得到的差动电压是正弦波。事实上并不完全如此。我们知道，在铁芯饱和的情况下，电流互感器和电抗变换器对电流、电压的传变是畸变性的，即使铁芯在线性段工作，电抗变换器对高次谐波也具有相对放大作用。差动电压是线路电流经电流互感器和电抗变换器(KH)传变得到的。一般说来，系统电压中含有一定的谐波分量。无论是变压器内部还是外部发生短路故障，起限流作用的主要为电抗，其结果使n次谐波电流减小n倍，而由于电抗变换器对n次谐波的相对放大作用，使其输出电压即差动电压的波形与系统电压的波形基本相同。在系统电压含谐波分量很少的情况下，如果调试整定方法合理，保护的動作值与整定值是基本相同的。但在实际的调试整定中，特别是在中小电站，由于调试设备不良和调试方法不当等原因，致使整定值与動作值不一致，这个问题下面将要详细分析。对大容量变压器发生严重故障短路电流很大时，电流互感器和电抗变换器饱和，波形严重畸变，将对動作值产生更大影响。因此对大容量变压器的差动保护常加速动部分，即短路电流大到一定值时，差动保护躲开间断角鉴别回路立即起动作跳闸，如图1所示。此问题在有关文献中已有详细介绍，本文不再叙及。

在现场进行整定的交流电源大都是经自耦调压器(ZB)取得的。自耦调压器的输出电压经过电阻降压后，送至电抗变换器，如图7所示。这种整定方法，起限流作用的主要是电阻，而不是电感，与差动保护在短路故障时的情况不一致，因此用自耦调压器做调试电源是很不理想的，但是一些中小电站缺少设备，采用自耦调压器时又使用不当，使自耦调压器付边输出电压对于原边电源电压畸变很大。对波形的观测结果说明，其畸变的程度依是三相调压器，还是单相调压器以及具体接线方式而异。这种畸变的波形经过电抗变换器后畸变更严重。图8是其中的两种情况，即三相调压器输出的线电压和单相调压器的输出电压经过电抗变换器后的波形。它们是在实验电路中用示波器观测c、d两点间的电压波形得到的。为便于比较，图中还用虚

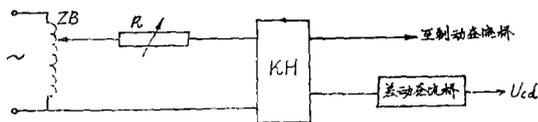


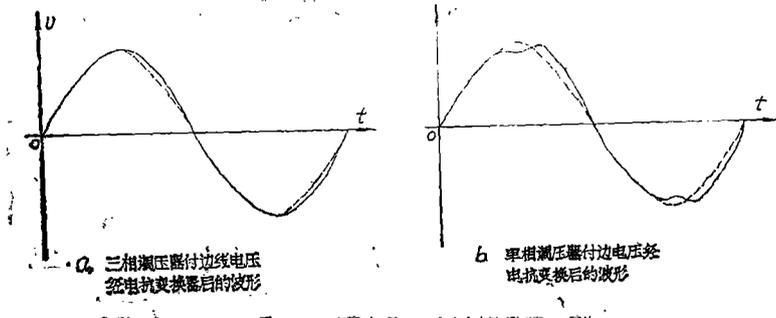
图 7 整定交流电源接线图

一些中小电站缺少设备，采用自耦调压器时又使用不当，使自耦调压器付边输出电压对于原边电源电压畸变很大。对波形的观测结果说明，其畸变的程度依是三相调压器，还是单相调压器以及具体接线方式而异。这种畸变的波形经过电抗变换器后畸变更严重。图8是其中的两种情况，即三相调压器输出的线电压和单相调压器的输出电压经过电抗变换器后的波形。它们是在实验电路中用示波器观测c、d两点间的电压波形得到的。为便于比较，图中还用虚

b). 等值门坎电压 $U_0^*$ 的升高使动作值升高。由于提供门坎电压的电位器 $RW_2$ 和其他固定电阻的温度特性不一致，致使门坎电压随温度的升高略有升高；同时，由于 $T_1$ 的温度补偿不可能完全， $T_1$ 管的基极电流 $I_b$ 以至 $I_c$ 随温度的升高而增大，使其饱和深度增加。这就造成了等值门坎电压 $U_0$ 的升高，因此 $U_{z'} + U_0$ 和波形间断角 $\theta_{id}$ 也增大，最终引起动作值升高。

实验结果说明，在 $5^{\circ}C \sim 45^{\circ}C$ 温度范围内，

线画出了正弦波。由图可见, 单相调压器的输出电压由于三次谐波分量较高, 经电抗变换器后波形畸变较严重。图8 (a)、(b) 所示两种情况的共同点是畸变作用使波形变“宽”, 这就意味着它们经过差动整流桥整流后, 在电压有效值和制动电压相同时, 间断角将小于正弦波时的间断角。一般说来, 差动保护在正常运行时, 差动电压的波形是接近正弦波的。因



(a) 三相调压器付边线电压经电抗变换器后的波形

(b) 单相调压器付边电压经电抗变换器后的波形

图8 自耦调压器, 电抗变换器对电源电压的畸变作用

此, 用上述两种方法进行整定时产生的波形畸变, 可能使保护的实际行动值高于整定值。

我们分别用三相自耦调压器(几种不同的接线方式)和单相自耦调压器作为整定电源进行了实验。表2是实验结果。其中标准正弦波电压是用音频信号发生器加在差动整流桥前的。其他电压值也是在差动整流桥前测取的。电流是指电抗变换器原边的输入电流。

图9是相应于表2的各种情况在电路翻转时, 差动整流桥输出电压的波形。

实验结果表明, 与正弦信号下的动作值相比较, 和图8相应的两种整定方式得到的动作值分别低10%左右(三相自耦调压器的线电压作整定电源)和20%左右(单相调压器作整定

表 2 整定电源对动作值的影响

整定电源方式	动作电压 $U_d(V)$	动作电流 $I_d(A)$	备注
音频信号发生器	9.9	—	频率 $f = 50\text{Hz}$
三相调压器	原边无中线付边线电压	9.2	门坎电压
	原边加中线付边线电压	9.2	$U_0 = 6.25V$
	原边无中线付边相电压	*	制动电压
	原边加中线付边相电压	7.9	2.4
单相调压器	8.2	2.35	$U_{zd} = 0V$

电源)。当然, 这与实际情况不可能完全吻合, 因为在变压器内部故障时, 差动电压不会是无畸变的正弦波, 且保护动作时的故障电流波形与整定时的电源波形不尽相同。

由实验结果还可看出, 用三相调压器付边线电压作为整定电源, 无论其原边有无中线, 对

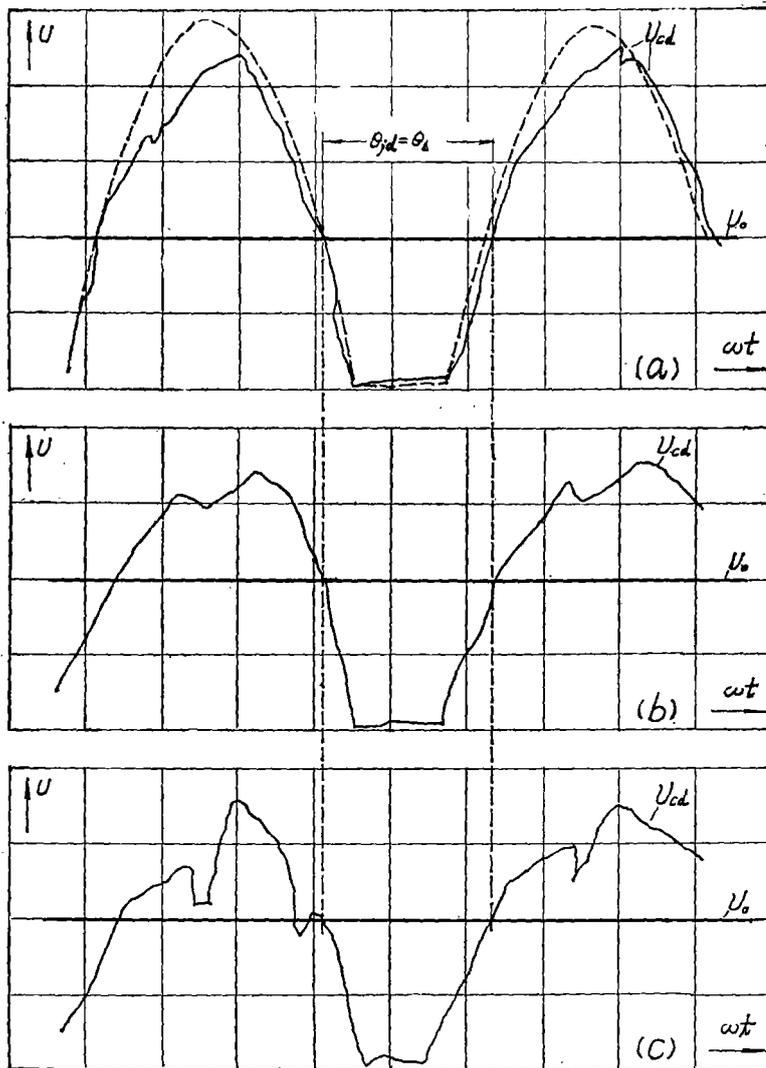


图9. 电路临界翻转时差动整流桥输出电压波形图

- (a). ---- 音频信号发生器作整定电流  
 —— 三相调压器付边线电压作整定电流(包括原边有无中线两种情况)  
 (b). 三相调压器原边有中线付边相电压作整定电流  
 (c). 单相调压器作整定电流

动作值的影响程度是基本相同的。应特别说明的是，当三相调压器原边不加中线时，付边相电压畸变非常严重，如图10所示。若以这种方式取用整定电源，就会使整定误差难以估计，甚至使整定无法进行，故表2及图9中没有示出这种情况。

由上可知，畸变的波形对动作值是颇有影响的，较理想的整定电源波形是改善整定结果的先决条件。

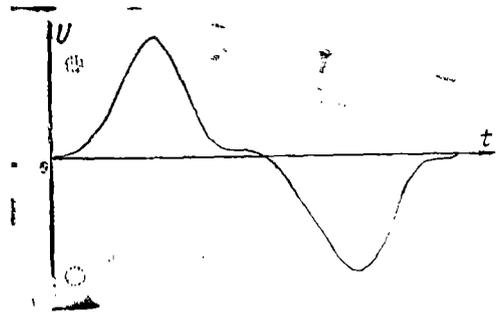
**(三) 电源频率的影响**

图11表示的是电路在临界状态下的有关电压波形。由此图可以得出，闭锁时间

$$t_b = t_5 + t_f - t_4 - t_s$$

式中  $t_4$  —— 电容  $C_4$  的电压由  $0V$  充至  $D_6$  击穿所需的时间；

$t_5$  —— 电容  $C_5$  的电压由  $0V$  充至  $D_7$  击穿所需的时间；



10 三相自耦调压器原边无中线时付边电相电压波形

$t_s$  —— 因  $C_5$  放电的残余电压使  $t_5$  缩短的时间；

$t_f$  —— 电路在临界状态下， $T_3$  导通的一段时间；

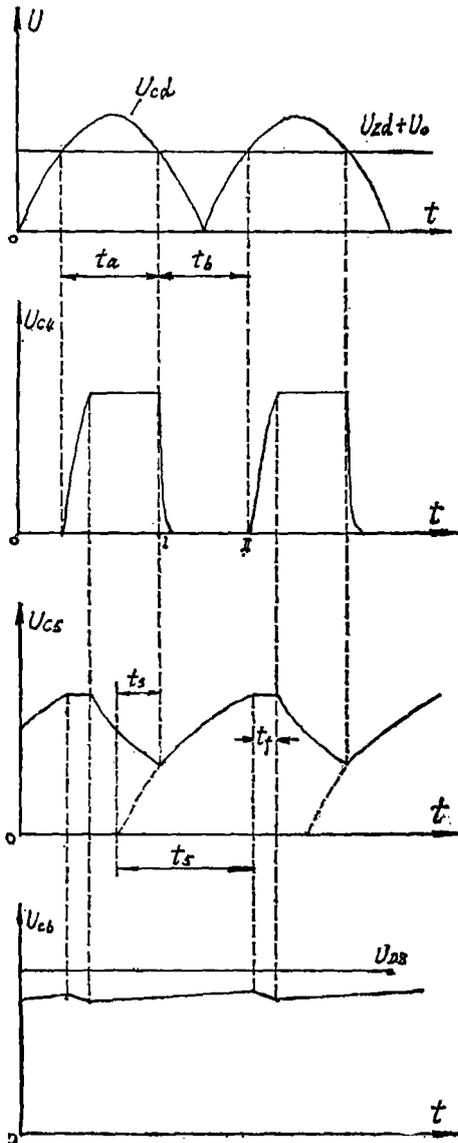


图 11 临界状态下各级电压波形图

由上式可知，当系统的频率改变时，欲使闭锁角  $\theta_b$  不变，就必须使闭锁时间  $t_b$  作相应的改变， $t_b$  的改变可通过  $t_s$  的变化来实现。一般地是通过电路参数的配合进行频率补偿，以保持间断角的基本稳定。例如，当系统频率升高时，如要间断角不变，则闭锁时间  $t_b$  必须相应减小。此时  $t_s$  相应于频率升高减小，于是  $C_5$  的放电时间 ( $t_s - t_f$ ) 减小， $C_5$  又开始充电时的残余电压升高，即  $t_s$  增大，合理的参数选择，将使  $t_s$  的增大量恰等于所需  $t_b$  的减小量，从而闭锁角可保持不变。

但是，由于以下两个原因，使得这种补偿不可能达到完善。第一，元件参数的误差和温度特性不一致；其次，电抗变换器的输出电压正比于输入电流的频率，有效值相同频率不同的输入电流得到的输出电压幅值却不相等，输出电压频率和幅值的改变，引起  $t_a$  的改变，并且  $t_a$  的改变量还与制动电压有关，难以确定。闭锁角的改变就要影响于动作值。一般说来，频率升高时，间断角减小，闭锁角增大，从而动作值降低，频率降低时，结果相反。有关资料表明，图1所示的电路，当电源频率在  $49Hz \sim 51Hz$  范围内变化时，动作值将变化10%。

**(四) 直流电源的影响**

众所周知，直流电源电压的升高，会使

充电时间电路的充电曲线变陡,若认为稳压管的击穿电压一定,则各个时间环节的动作时间就会缩短,闭锁角相应减小,动作值就会升高。直流电源电压降低的情况可用同样方法分析。根据实验结果,直流电源电压(对18V而言)波动1V,动作值将改变3%左右。

综上所述可知,在影响动作值的诸因素中,就严重性而言,温度变化为最,波形畸变和频率变化次之。这些因素综合作用的结果,将使动作值变化更严重。

应说明的是:为了分析影响定值的因素和定值受其影响的严重程度,实验电路所使用的元件都没有经过老化筛选,又由于实验手段的限制,实验结果与实际情况有一定距离,仅可作为定性分析之用。

### 三、提高定值稳定性和准确性的措施

我们已经知道,一般情况下,系统电压波形畸变是轻微的,频率是稳定的,使定值波动的主要原因是温度的变化;由于保护整定时差电压的波形与保护运行时的差电压波形不一致,使得整定值与实际的动作值本来就存在着误差。因此,为提高定值稳定性和准确性应采取以下措施。

#### (一) 提高电路自身质量,削弱定值波动的内在因素

1. 在电路中应选用精度高,特性稳定的元件,如线绕电阻,钽电容等。为此,应特别重视元件的筛选,这里强调的是,有的制造单位对元件筛选重视不够,存在着如下问题:作温度筛选时,仅作高温处理,忽视低温处理;仅作二极管,三极管,稳压管检验筛选,而不注意电阻、电容的检验筛选,这就不能保证所有元件的良好特性。应提高这项工作质量。

2. 注意元件之间的参数配合,以期得到较好的温度补偿和频率补偿。这两种补偿,特别是前者,对电路的定值稳定性颇有影响。温度补偿二极管和三极管的温度系数应力求接近一致;各时间电路有关元件的特性应力求一致,尽管这项工作在目前条件下做起来还相当麻烦。

3. 使用单位在调换元件时也应注意上述两点。

#### (二) 合理的整定方法

为了得到准确的整定值,首先需要整定闭锁角,其次要用较好的波形进行动作值整定。

##### 1. 闭锁角的整定

闭锁角的整定一般采用万用表法和示波器法。

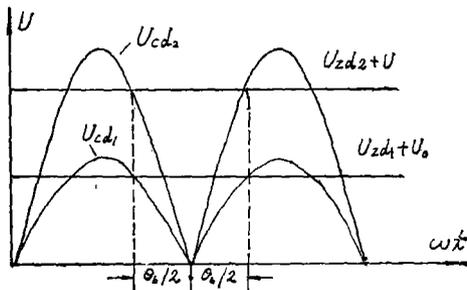


图 12 万用表法原理说明图

万用表法。其原理可用图12来说明。分别加制动电压 $U_{zd1}$ ,  $U_{zd2}$ , 测出动作值 $U_{cd1}$ ,  $U_{cd2}$ , 联立求解下列公式:

$$\sin \frac{\theta_b}{2} = \frac{U_{zd1} + U_0}{\sqrt{2} U_{cd1}},$$

$$\sin \frac{\theta_b}{2} = \frac{U_{zd2} + U_0}{\sqrt{2} U_{cd2}},$$

得

$$\theta_b = 2 \arcsin \frac{U_{zd1} - U_{zd2}}{\sqrt{2} (U_{cd1} - U_{cd2})}$$

图13和图14所示的是两种不同的接线方式的略图。

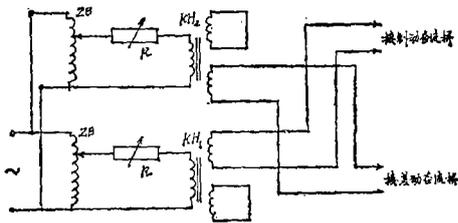


图13 闭锁角整定接线方式之一

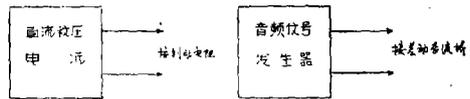


图 14 闭锁角整定的接线方式之二

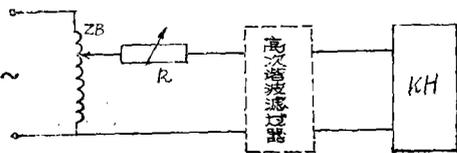


图 15 用自耦调压器作整定电源的接线图

度要高,如MF-18型。同时要注意 $U_{zd1}$ 、 $U_{zd2}$ 不能过小且要有一定差值。若整定电源频率为 $f$ 时,求得闭锁角为 $\theta'_b$ ,则相当于50Hz时的闭锁角 $\theta_b = 50/f\theta'_b$ 。

示波器法。其原理可以从图11中的U和 $U_{c4}$ 两个波形直接解释:在电路临界动作的情况下,电容器 $C_4$ 从放电到再次充电的时间间隔恰巧等于闭锁角(此时亦即间断角),于是,可以从示波器上观察电路临界动作时 $C_4$ 上的电压波形上I、II两点之间的时差来确定 $t_b$ ,并用整定时的电源频率求出 $\theta_b$ 。这种方法对差动电压波形要求不严格,方便准确,一般可采用SB-14,SR8等型号的示波器,其具体的接线方式与万用表法的相同。

## 2. 动作值整定方法

①用自耦调压器作整定电源。其接线如图15所示,电抗变换器右边线路不变。

用这种方法得到的定值因电源的取法不同所形成的波形畸变程度相差很大。对于整定电源,我们建议采用三相自耦调压器取其线电压,它较采用单相调压器(接零线的)为优。绝不能采用三相自耦调整器付边的相电压。其理由前已叙及。

②为了进一步改善整定电源波形,可在接线中再加入高次谐波滤波器,如图15中虚线框所示。

③采用大电流发生器作为整定电源。它的特点就是可无畸变地传变电流在付边得到较理想的波形。这种方法效果较好。

另外,应注意每次整定的接线方式要相同(指合理的接线方式),直流电源电压值要相等,并且待电路接通直流电源一段时间后再进行整定,避免人为地造成误差。

由本文的分析可知,间断角原理变压器差动保护定值变化的问题,只要制造单位进一步提高产品质量,运行单位注意采用合理的整定调试和维护方法,是可以得到解决的。

## 参 考 文 献

- [1] 清华大学,许昌继电器研究所,阿城电站设备自动化设计研究所编 发电机、变压器晶体管保护继电保护原理
- [2] 北京电力器材二厂,北京电力学校编 晶体管继电保护基础
- [3] 郑州工学院电机系编 晶体管保护与逻辑控制,