

配电变压器

冲击試驗的几个問題

武汉水利电力学院 黄齐嵩 刘伯涛
北京中电试验所 冯树人

武漢水利電力學院印

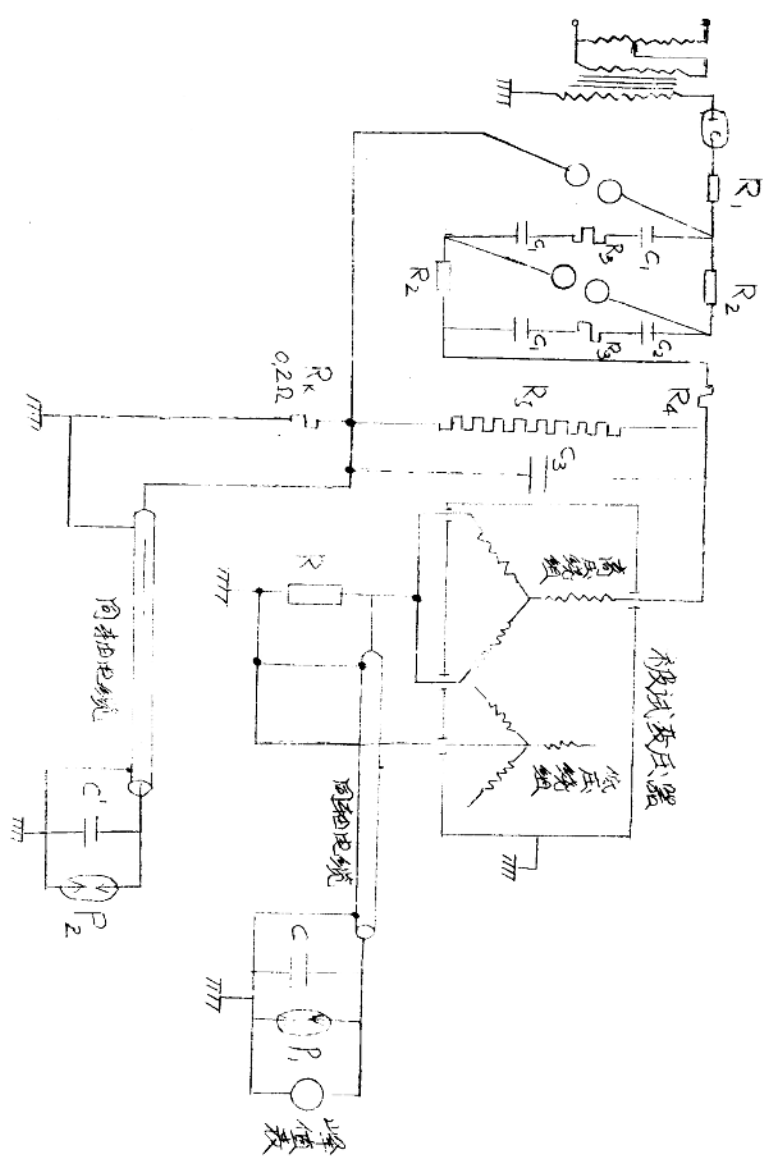
1965·9

配电变压器冲击试验的几个问题☆

配电变压器在运行中由于雷害引起匝间绝缘损坏，在雷冲中佔很大的比例。因此提出了采用冲击试验以提高匝间绝缘的可靠性。上海中试所曾采用脉冲峰值电压表代替一次现象示波器作为测量仪表〔文献1〕，使试验大为简便。因此很多地区广泛开展了配电变压器的冲击试验工作。但由于变压器冲击试验在国外有一些问题也还没有得到明确的解决。采用峰值电压表作为测量仪表时，在发现缺陷的灵敏度等方面还存在问题。我们与北京中试所及北京供电局修配厂合作，对配电变压器冲击试验问题进行了试验分析。

试验系采用 $1.5/40$ 微秒负极性冲击波，所用电压：满压为 72 千伏，半压为 36 千伏（ 10 千伏高压室），脉冲峰值表及其他试验条件为与上海中试所提出的相同。被试变压器一次绕组开路。图1为其试验线路简图。

☆〔注〕参考资料有 []、王一萍和曹桂芳同志。



R. C — 分压器之电阻及电容；
 P_1, P_2 — 放电管 VR 150。

关于分流器参数的选定

利用峰值表进行冲击试验时，判断变压器是否有匝间绝缘缺陷，系采用所谓“中性点电流法”。即在中性点接一分流器，在冲击电压作用下所形成的电流在分流器上产生电压差，以峰值表记录此电压差作为判断的根据。其基本原理是，当冲击电压作用于变压器绕组上时，将产生三部份电流：充磁电流、振透电流及电感电流。如变压器绕组有匝间或层间短路时，由于去磁作用使电感电流增大；因此在变压器绕组有缺陷和无缺陷时，分流器上的电压就出现差别。从图2可以看出：a) 为变压器没有匝间缺陷，

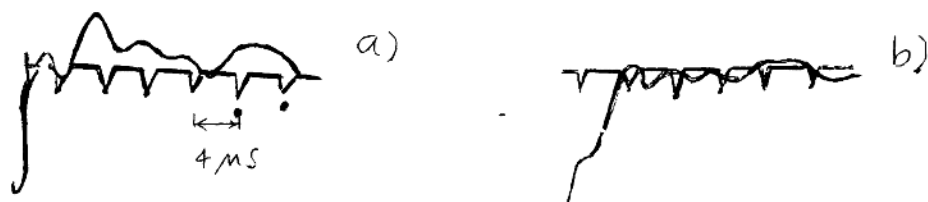


图2, 10/0.4 千伏, 10 千伏安单相变压器之中性点电流示波器。
分流器 $R = 2$ 千欧。

a) 为无匝间短路； b) 首端器匝短路。

b) 为有短路的。因电感电流增加，故使波形移向坐标轴之下（电压系负极性）。因此在进行冲击试验时，判断变压器有无匝间缺陷的关键问题是要正确地将此电流反映出来。故分流器的参数，就直接影响测量效果及灵敏度。

关于分流器参数的选定，在采用示波器作为测量仪表时，也有不同意见。有人认为其时间常数应取 50 微秒 [文献2]，有人则只采用 5~15 微秒 [文献3]，上海中试所建议时间常数采用 150~250 微秒，虽认为此时灵敏度最高。但我们认为，仅从满足一定时间常数的观点，选择分流器是不全面的。它没有反映出分流器

中电阻及电容对记录中性点电流的作用。当采用峰值表作为测量仪表时，它只测量的电流的一次最高幅值，更是如此。因此在试验中必须将三种电流区分开来，并应突出地反映出电容电流。这样才能有效地判断变压器绕组是否有匝间绝缘缺陷。

我们知道，当采用纯电阻作为分流器时，从示波器上可以清楚地看出中性点电流的变化过程。图3为 $10/0.4$ 千伏， 100 千伏安，采用 $R=1$ 千欧之纯电阻分流器所拍摄的示波图。从图中可以看出，有明显的充电电流和振荡电流（因无匝间缺陷的变压器在冲击电压下阻抗很大，故电容电流不明显）。由于充电电流幅值

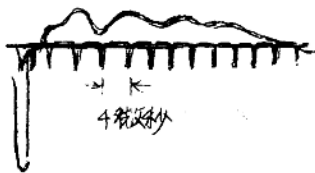


图3、 $10/0.4$ 伏， 100 伏安
三相变压器之中性点
电流示波图；
分流器： $R=1$ 千欧。
（无匝间短路电压 36 伏）

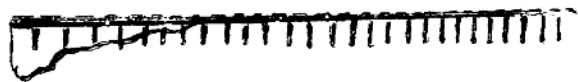


图4、 $10/0.4$ 千伏， 10 千伏安，
单相变压器无匝间短
路之示波图。
分流器： $R=1$ 千欧，
 $C=0.02$ 微法电压
 $=36$ 伏。

很高，会造成测量仪表的损坏。而且用峰值表作为测量仪表时，就只记录此充电电流值。这样对变压器有无匝间缺陷，则无法判断。因此需要并联一电容以降低此幅值。这样可以加大电阻，以提高测量的灵敏度。故一般在进行变压器冲击试验时，均采用 $R-C$ 混合分流器。图4为采用混合分流器时之示波图。从图中可以看出充电电流所产生之电压值的幅值已大为降低。

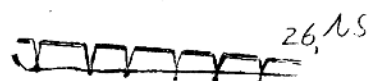
1) 混合分流器电容的确定

混合分流器的电容值，一般认为对配电压变压器应稍较大^[文献4]。有人选用高达 3 微法^[文献3]，这与中试所推荐值为 $0.05 \sim 0.5$ 微法相差很大。为了正确地选定电容值，我们必须分析。电容对测

量所起的影响。当分流器并联电容时，冲击电流作用于变压器瞬间所产生的充电电荷作用于电容上而形成电压。对于结构一定的变压器，此电荷量也一定。此时电压的大小在电阻达一定值时，则由分流器之电容值的决定。图5为100千伏安 $10/0.4$ 千伏三相变压器的中性点电流示波图。两者波形和幅值完全是一致的。这



a) 分流器, $C = 0.1$ 微法。

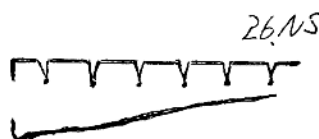


a) 交流器, $R = 1$ 千欧,
 $C = 0.25$ 微法。



b) 分流器 $R = 1$ 千欧,
 $C = 0.1$ 微法 (无匝间短路)。

图5. 100千伏安 $10/0.4$ 千伏三相变压器(波变)之示波图。



b) 分流器 $R = 1$ 千欧,
 $C = 0.1$ 微法 (无匝间短路)。

图6. 100千伏安 $10/0.4$ 千伏三相变压器(供修)之示波图。

说明此时电阻对波形无影响。图6为另一台100千伏安 $10/0.4$ 千伏变压器中性点电流示波图。

由图中可以看出：电容愈增加，幅值愈降低；图b系分流器之电容较图a大2.5倍，而波形幅值则小2.5倍。因此充电电流在分流器上所引起的电压只与电容有关。

当采用峰值表作为测量仪表时，为了读峰值表能明显地指示出冲击电流所产生的电压差，我们希望采用较大的电容，使充电电流所产生的电压很低。但是电容取值太大，又会使由冲击电流所产生的电压差减低。

图7为 $10/0.4$ 千伏三相变压器匝间短路，采用不同 C 值时之中性点电流示波图。图8为100千伏安 $10/0.4$ 千伏三相变压器有

~6~

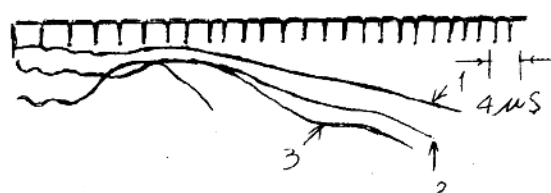


图7. 10/4 千伏单相变压器有电压短路时示波图

波形1. 分流器, $R=1$ 千欧, 电容 $=0.1$ 微法;

" " 2. 分流器, " " , " $=0.05$ " ;

" " 3. 分流器, " " , " $=0.02$ " .

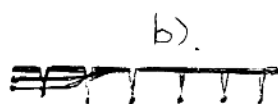
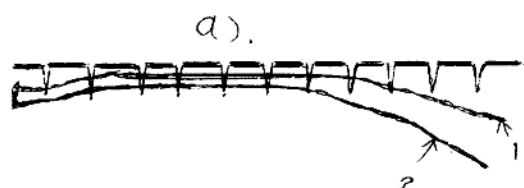


图8. 75 千伏安, 10/4 千伏三相变压器两匝短路之示波图。

a). 分流器 $R=1$ 千欧, $C=0.01$ 微法;

b). $R=14$ 欧 $C=0.1$ 微法; 波形1—电压36 伏; 波形2—电压72 伏。

两匝短路, 分流器有不同电容值时 (a 及 b) 之示波图, 由两图可以看出: 当分流器之电容增大时, 由电容流所产生电压差 (波形后半部) 亦降低, 故为了提高测量的灵敏度, 又应采用较小的电容值。但电容太少又不能使充电^流所产生的电压降低, 由图9 及 10 中可以看出, 只有当电容达到一定数值时, 才能使充电电流所

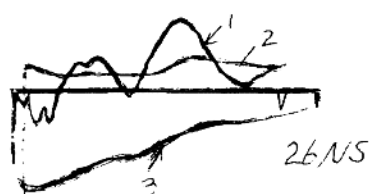


图9. 100 千伏三相变压器之示波图 (无匝短路)。

波形1 分流器 $R=1$ 千欧;

" " 2. " " $C=0.02$ 微法;

" " 3. " " $C=0.03$ " .

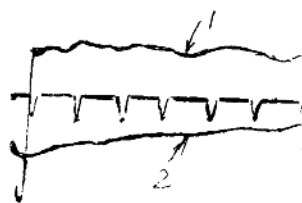


图10. 10/4 1320 伏安, 三相

变压器之示波图 (无匝短路)。

波形1. 分流器 $R=1$ 千欧 $C=0.05$ 微法

" " 2. " " $C=0.1$ " .

产电压的幅值降低。我们根据不同容量单相及三相配电变压器试验结果，建议对不同容量的配电变压器进行冲击试验时，分流器之电容取 $0.02 \sim 0.2$ 微法。

2) 混合分流器电阻值的选定。

混合分流器电阻值的大小对充电电压所产生的电压是无影响的。但这只有在电阻达到一定值时才成立。这是因为电阻太低，时

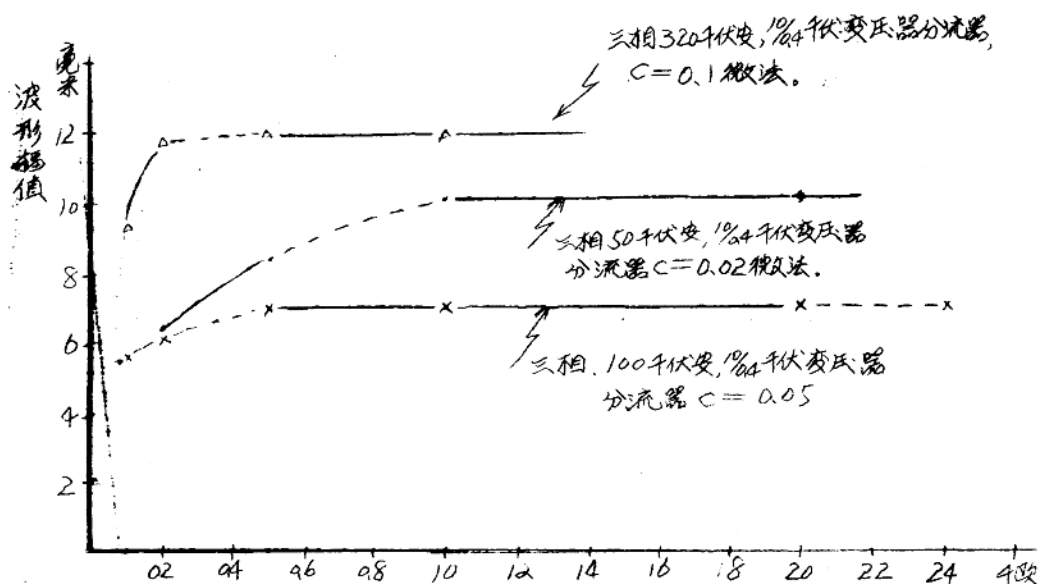


图11. 不同容量之变压器与电容一定时波形幅值与分流电阻之关系。(12毫米=300伏)。

间波动太小而影响幅值。图11表示分流器电容一定时，示波器幅值与电阻值的关系，曲线(300伏=12毫米)。由图中可以看出，当电阻分别大于500欧及1000欧时电阻值对波形幅值即无影响。当然这还随电容大小及变压器结构不同会有所改变。

对总电流来说，电阻改变对波形幅值将起很大的影响，由图12中可以看出，当电容一定时，电阻增大(曲线2)波形升高(总电流所产生的电压差增大)一倍，所以从提高测量灵敏度出发，

~8~

应采用较大的电阻。但太大又会影响伏表的安全，特别是出现层间短路时，电流的峰值将很大，如图13所示，故亦不宜过高。

根据我们的试验结果，建议电阻的取值取 $5000 \sim 500$ 欧。

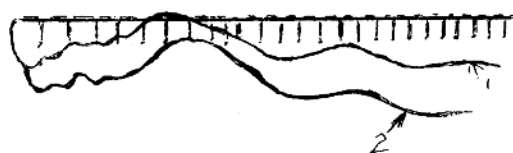


图12. $10/4$ 千伏三相变压器七匝
短路时示波图。

波形1. 分流器, $R=0.2$ 千欧, $C=0.02$ 微法;
" 2. " " $R=0.5$ " " " "。



图13. 100 千伏安, $10/4$ 千伏三相
变压器有层间短路时之
示波图。分流器, $R=14$ 欧
电压 < 20 千伏。

3) 混合分流器时间常数

上面谈到分流器必须首先满足一定的电容值和电阻值。但为了进一步提高测量灵敏度，也需要保证一定的时间常数。因为时间常数太小，充电电流所形成的电压会很快下降。图14为两种不同时间常数之示波图。由图可以看出，时间常数 ($RC=10$ 微秒) 较小时，载预磁线至零 (曲线1) 时间常数较大 ($RC=50$ 微秒) 时，波形则缓慢下降。这样电压电流在分流器上的峰值误差



图14 $10/4$ 千伏, 320 千伏安, 三相变压器示波图。(无层间短路)

波形1. 分流器, 电阻 $= 0.5$ 千欧, $C=0.1$ 微法;

" 2. " " $R=0.1$ 千欧, $C=0.1$ " "。

以叠加在上面，容易显示出来。当用峰值表测量时，可提高灵敏度。这一点可由图15 (具有层间短路之变压器) 的示波图看出。该图波形3的时间常数较小 ($RC=20$ 微秒)，故电压很快降低，然后才缓慢上升，而波形1则时间常数较大 ($RC=100$ 微秒) 其

波形即无下凹现象，因此分流器的时间常数取100微秒左右较为适合。如太大则会因电容值太高而降低灵敏度，或因增大电阻而危及测量设备。

从以上分析可知，当选定分流器的参数时，应首先满足一定的电容值，然后确定电阻，并保证一定的时间常数。这样才能保证在测量中有较高的灵敏度。根据我们试验的结果，对各种不同容量配电变压器进行冲击试验时，分流器之参数可按表一选定。

表一. 不同容量配电变压器分流器之参数

变压器容量 千伏安	电容值 微法	电阻值 欧	时间常数 微秒
50及以下	0.02~0.03	5000~3000	100~90
100~180	0.05~0.08	2000~1200	100~96
320以上	0.1~0.2	1000~500	100

层间绝缘短路的判断

目前在配电变压器冲击试验中，判断有无层间绝缘损坏的依据，系根据在满压与半压下峰值表读数的比值及霓虹灯是否亮，如满压与半压下的比值超过2~3倍，同时霓虹灯亮则认为变压器有层间或匝间短路。但在试验中时常出现同一台变压器在改变分流回的电阻电容值时（保证一定的时间常数）此比值即改变。甚至对本来被判断为无层间缺陷之变压器，改变分流回之电阻电容后进行试验，满压与半压之比值都超过2~3倍，被判断为有层间绝缘缺陷，因此需要对此判断标准进行分析。

有人曾提出，因为磁饱和现象使满压与半压下电流不是两倍关系。（文献6），但根据我们试验结果，在有匝间短路的情况时，由于感抗大，故在满压与半压下其电流的差别并不明显（图8a，特别是无匝间短路之变压器，其中性点电流中的电容电流（没有显示出来）故所测得的主要是充电电流。此电流峰值在满压与半压时之比值完全是两倍关系，如图15所示。可以用峰值表

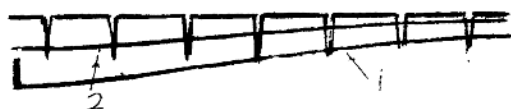


图 15

10/0.4千伏、180千伏安三相变压器在72千伏（波形1）及36千伏（波形2）之示波图，无匝间短路。

分流回， $R=1$ 千欧， $C=15$ 微法

测量时出现的2~3倍现象不是变压器的本身所引起的。为此我们对峰值表进行了校验，图16为 $3/40$ 微秒冲击电压（0.5/40及1.5/40冲击波亦相同，因幅值未校正故未标示）时不同电压与峰值表指示之关系，表二为峰值表在不同指示范围满压与半压

表二 冲击电压下峰值表在不同测量范围时满压与半压
之比值

读数范围		0~50格	0~100格	0~150格	0~200格	0~250格
比 值	一档	2.60	2.33	2.15	2.12	2.10
	二档	2.25	2.11	2.07	2.06	2.05
	三档	2.34	2.16	2.11	2.10	2.06

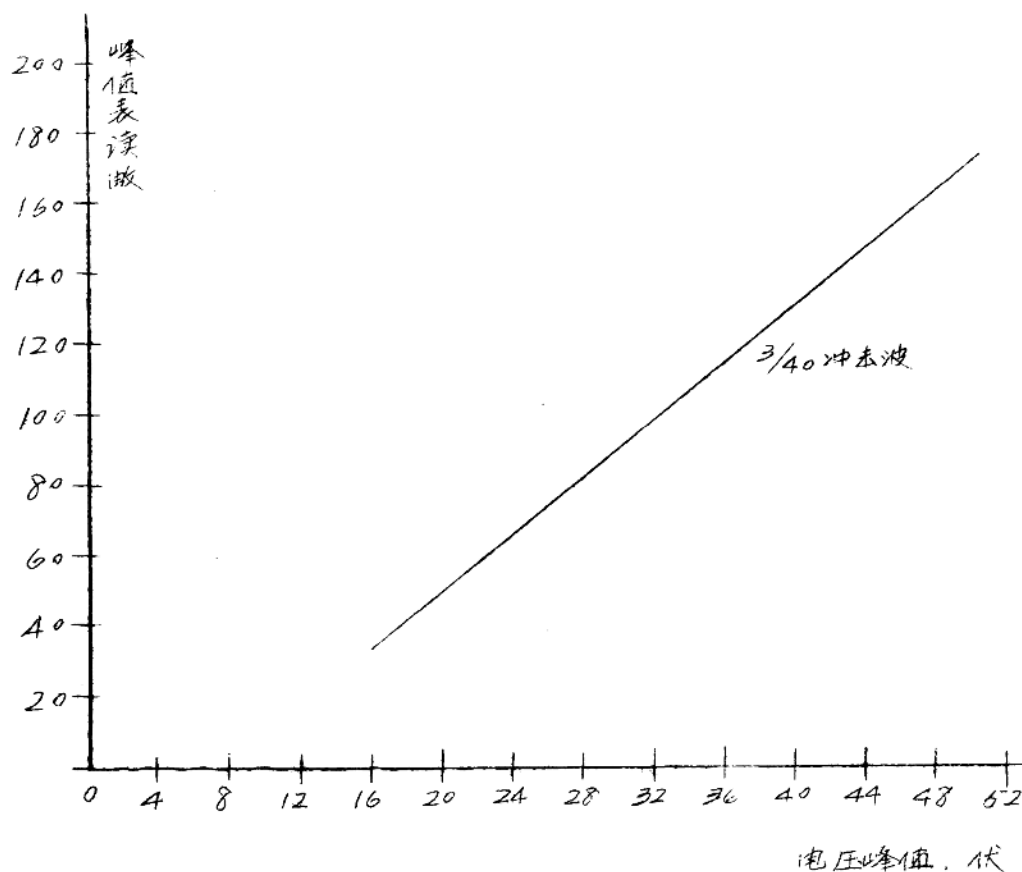


图 16 频及冲击电压下电压峰值与表的读数关系

的比值。由此可以看出，满压与半压之比值不等于2，是由峰值
误差不均匀所引起的。而且电压不同其比值即改变。

为了在冲击试验中使峰值表能更明确判断变压器内有无匝间绝缘缺陷，故应改进现有峰值表，使其读数与电压成正比关系。此外由于目前试验中时常在半压下即出现层匝绝缘损坏现象，故为了有利于判断缺陷，其校准值不应采用半压，最好采用 $\frac{1}{3}$ 满压或更低的电压与满压之间的比值来确定作为判断标准。这样在校准电压时，将保证没有层匝绝缘击穿现象。当变压器内部有缺陷时在满压下即发生击穿，峰值表^在两种电压下读数的比值也就必然超过两种电压的比值。这样会更有利于判断。

峰值表发现匝绝缘缺陷的灵敏度

利用峰值表进行冲击试验，其发现缺陷的灵敏度如^何能^不发现一匝短路，目前均未明确。国内外资料均认为，用示波仪作为指示仪表时，发现缺陷的灵敏度可达 0.03%。但这些试验都是在单相变压器上所测得的结果。当三相变压器中性点不能引出，而需用图 17 之接线方式（目前多用这种接线）时，其灵敏度如何？

需进一步明确。

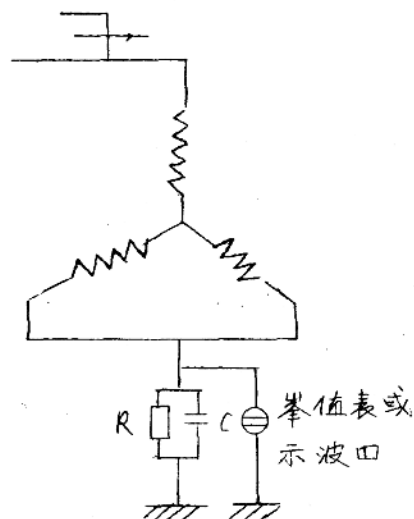


图 17. 三相变压器中性点不能引出时进行冲击试验的接线图。

~13~

图18为10/0.4千伏单相变压器一匝短路之示波图(匝数=3400)。将此图与图4比较,可以看出,有一匝短路时,因电感电流增大使波形明显升高。故发现缺陷的灵敏度为0.029%,即高于0.03%。对于三相75千伏至10/0.4千伏变压器(匝数=1700),有一匝短路(a)及无匝间短路(b)之示波图,如图

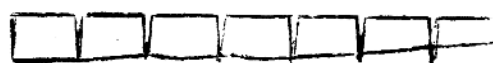


图18. 10/0.4千伏单相变压器一匝短路时之示波图,
分流匝, $R=2$ 千欧, $C=0.05$ 微法,
电压=36千伏。

19所示。由图中可以看出两者没有区别(图19b之右半部份与a相同)当有两匝短路时,则示波图出现明显改变(图8a)。

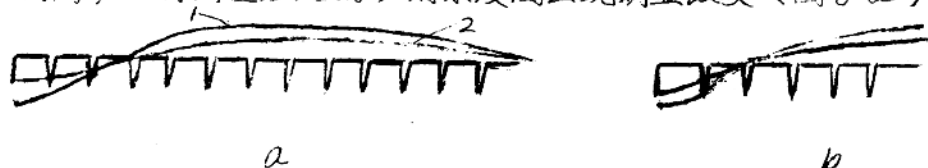


图19. 10/0.4千伏, 75千伏至三相变压器有一匝短路
(a)及无匝间短路(b)时之示波图, 分流匝,
 $R=14$ 欧, $C=0.01$ 微法。 waveform 1, 电压
72千伏; waveform 2 电压 36 千伏。

此时发现缺陷的灵敏度仅0.118%, 大大低于上述灵敏度。因此不能认为采用示波图时, 在任何情况下, 灵敏度均很高。

采用峰值表时, 因它只能指示一次最高幅值。故当变压器短路匝数占总匝数之比很小, 其电感电流在分流匝上所产生的电位差不超过电容电流所产生之电位的幅值(如图18), 这样就利用峰值表之法来发现。因此其灵敏度必然较低。表三为利用峰值表对10/0.4千伏单相变压器进行冲击试验之测量结果。

参考文献

1. 技术资料选集, 高压部份 I. 华东电管局中试所.
2. E. C. Rippen the detection by oscillographic of winding failures during impulse tests on transformers Proc IEE. 1949. par I II № 53
3. Л. И. Сиротинский. Техника Высоких Напряжений Том III G192 1959
4. J. H. Hogenguth. Stoppprüfung von Transformatoren nach amerikanischer Praxis ETEA 1955 S. 888
5. Nichtlineares Verhalten des Sternpunktstromes bei der Stosspannungsprüfung von Transformatoren ETZA 1965 S. 56.
6. Углубленные испытания силовых и измерительных трансформаторов. Экспр-имф. Эл. машин. 1963. № 7.