

3.截止管正常时不处于完全截止状态而是处于放大状态,是引起保护整定值飘移、造成误动的重要原因之一。为了保证截止管可靠截止,必须在其发射结加入一适当的反向电压(即偏置电压),此偏压值一般为1.6~2 V左右,可用两个硅二极管的正向压降构成,亦可用适当的稳压管构成。

4.乙变的运行经验证明,在保护装置的逻辑电路中加装闭锁装置,对防止保护误动效果很好。

5.执行电路的三极管加抗干扰电容(延时电容),经常导通的三极管加在集一基之间,经常截止的三极管加在射一基之间。

6.为防止断路器跳、合闸瞬间产生的反电势进入保护装置造成误动,在跳闸线圈及合闸接触器两端并联接入二极管,使切、合电感电流形成的反电势经由二极管形成闭路,以削弱反电势的影响。

7.对于两相式结构的保护装置最好各相分别采用单独的测量电路和各自的执行电路,然后经或元件进行逻辑连接,这样的电路结构容易实现,并且相间互不影响。如果两相的执行电路合并,相间影响往往甚大,容易造成误动。如果为了减少相间影响而增加一射极输出电路(利用其输入阻抗高、输出阻抗低的特点),则整个电路结构也并不简化,而且相间影响并不能完全消除。若用加大滤波电容、降低脉动系数的办法来减少相间影响,效果并不理想,而且造成保护复归时间增长,都不太合适。

以上意见,均很不成熟。由于我们水平有限,了解的面也很狭窄,电路参数又未经复核验算,不能充分反映我省晶体管保护的全貌,更谈不上对工人群众技术革新成果进行总结。即使提到的一些单位,也是挂一漏万,七四年以后的情况未能包括,甚至有歪曲之处,诚恳地期待同志们批评指正。

## 发电机——变压器组定子接地保护 三次谐波电压的利用问题

清华大学电力工程系

### 一、基本情况:

对于“利用发电机本身固有的三次谐波电压能够作成100%定子接地保护”这一点,于一九七二年底还曾经是国内外争论的一个问题,现在在国内已很少有人再怀疑了。但是对于如何利用三次谐波电压来构成100%定子接地保护还是有各种不同意见。目前我国已经研制了几套不同方案的利用三次谐波电压的100%定子接地保护装置,有的已经试运行近两年,现场试验和试运行结果,初步证明是可行的。现在的问题是如何进一步提高灵敏度和可靠性。

匈牙利作者L·PAZMANDI在一九七二年国际大电网会议上的论文报告“大型发电机静子对地漏电保护”,普遍地引起人们的重视,因为该报告指出“这种保护用敏感元件甚至

能检测出发电机中性点附近绝缘强度的早期恶化”，具体说来，“在中性点上（着重号是我们加的，因为只能在中性点而不是定子绕组回路中任意点）的最高可检测故障电阻大约为20~30千欧。在发电机中性点上发生金属性接地故障时，最低工作电压与最高干扰电压之比（即灵敏度）大约为10比1”。从以上一些数据可知其灵敏度确实不低，但是这些数据是在发电机的什么运行情况下取得的（空载或满载？）？该发电机的三次谐波电势多大？因为不同的发电机，三次谐波电势可能相差很大，同一台发电机的三次谐波电势大小又随运行情况而在相当大的范围内变化。经过分析，我们相信，对具有相当大的三次谐波电势的发电机，在中性点接地故障是可能取得上述较高灵敏度的，但是在许多场合下，这种方案的三次谐波电压将出现拒绝动作的保护死区，也就是说这种方案对三次谐波电压的利用不是最理想的。

## 二、匈牙利L·PAZMANDI定子接地保护的灵敏度分析

按照原作者的意见，灵敏度是以反映三次谐波电压比值变化的敏感元件刚能起动的故障电阻值表示。

分析是根据600MW机组的一些估算参数进行的，因此得到的结果可直接供600MW机组保护选型作参考。对于其他机组，虽然参数不同，但很少可能改变本节分析所得结论的性质。

发电机定子绕组三相对地电容  $C_G = 0.75 \mu\text{f}$

发电机定子绕组的绝缘电阻  $R_G = 0.5 \text{M}\Omega$

发电机机端电压互感器开口三角付绕组接有等效电阻为  $100 \Omega$ ，此电阻折合到原边为

$$R_T = 100 \times \frac{1}{3} \times \left( \frac{2000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3} \right)^2 \times \frac{1}{3} = 1.33 \text{M}\Omega$$

发电机中性点电压互感器付绕组同样接有等效电阻  $100 \Omega$ ，折合原边为

$$R_N = 100 \times \left( \frac{2000}{\sqrt{3}} / 100 \right)^2 = 1.33 \text{M}\Omega$$

为计算简便起见，取  $R_T = R_N = 1 \text{M}\Omega$

先假定发电机三次谐波电势  $E_3 \omega = 3 \text{V}$ ，即图一~四中  $N_T = 3 \text{V}$ ， $C_G$ 、 $C_T$ 、 $R_G$ 、 $R_T$  分别等效地接于图一的 N、O、T 诸点。

根据在发电机定子回路对地之间的三次谐波电势作用下三相对地电流矢量之和必须为零的原则，用相似找重心的方法，求得考虑所有电容作用的等效地电位点为  $O'$ ，所有电导的等效地电位点  $O''$ （ $R_G // R_T // R_N = 0.25 \text{M}\Omega$ ）。

今设在发电机中性点发生经故障电阻  $R_F = 20 \text{k}\Omega$  的接地，用同样方法找出包括故障电阻  $R_F$  在内的所有电导的等效地电位点  $O'''$ （ $R_\Sigma = 0.0185 \text{M}\Omega$ ）。

按正常运行条件下，考虑到三相对地电容电流与三相对地电导电流的矢量和应为零，可定出正常运行时的等效地电位点  $e$ 。由于

$$3\omega CR = 3 \times 314 \times 0.87 \times 10^{-6} \times 0.25 \times 10^6 = 206 = \frac{O''e}{O'e}$$

因此  $e$  点几乎与  $O'$  点重合（图二）

在中性点经  $R_F = 20 \text{k}\Omega$  的接地故障条件下，将由下式决定等效地电位点  $E$ （图二）。

$$3\omega CR' = 3 \times 314 \times 0.87 \times 10^{-6} \times 0.0185 \times 10^6 = 15.2 = \frac{O''E}{O'E}$$

$eE$  两点之间的电位差表示了中性点经  $20k\Omega$  故障电阻接地时加于保护装置敏感元件上的讯号电压, 本例中  $U_{eE} \approx 0.1V$ , 可见如果敏感元件的死区电压  $U_{min} \leq 0.1V$  时能反应这一故障。

这里必然要提出这样一个问题:  $U_{min} \leq 0.1V$  的现实可能性。下面专门分析这个问题。

根据国内外的试验资料, 证明在正常运行条件下, 三次谐波电势在机端和中性点间的分配并非完全取决于定子回路的电容电阻参数, 它还随运行情况而变化。以捷克  $125MV$  A 汽轮发电机为例, 从空载到满载, 中性点对地三次谐波电压  $U_{eN}$  与机端对地三次谐波电压  $U_{eT}$  之比从  $1.13$  变化到  $1.76$ 。在图三中我们对两种正常运行情况找出它们的等效地电位点  $e$ , 一种是发电机满载运行,  $E_3\omega = 3V$ , 电容电阻参数同前, 得等效地电位点  $e_1$ ; 另一种是发电机空载运行,  $E_3\omega = 1V$ , 假定这时发电机尚未与主变相联,  $C_T \approx 0$ , 则等效地电位点  $e_2$  接近于  $O$  点; 在所讨论的情况下, 发电机正常运行时等效地电位点可由  $e_1$  改变到  $e_2$  点, 变动了近  $0.2V$ , 如果取敏感元件的死区电压为以  $e_1$  为圆心, 半径  $U_{min} \leq 0.1V$ , 则势必在某种正常运行情况下发生误动作。

我们调查了几台水内冷发电机的定子绕组绝缘电阻数据, 发现分散性很大。不过决定正常运行时等效地电位  $e$  点的主要因素是电容及由电容决定的  $O'$  点, 通常发电机—变压器组的  $C_T$  不大, 故  $O'$  与  $O$  点很接近, 当把定子绕组绝缘电阻看作是均匀分布, 从而等效地以  $R_G$  集中于  $O$  点时,  $R_G$  的变化几乎不改变  $e$  点位置。但是实际上水内冷定子绕组的泄漏部位主要是冷却水进口和出口的接头处, 即并非均匀分布, 这时  $R_G$  数值的变化也将在较小程度上改变  $e$  点位置。

由此可见, 对  $E_3\omega = 3V$  的发电机, 取敏感元件的死区电压  $U_{min} \leq 0.1V$  是太小了。扩大死区电压, 就必然导致灵敏度降低。

不难看出, 这种保护方案(对三次谐波电压言)在下列情况下存在死区:

1. 当  $C_T \approx 0$ , 正常时的等效地电位点  $e$  靠近  $O$  点, 则在定子绕组的  $50\%$  处附近存在动作死区; 死区大小由  $U_{min}$  决定。

2. 随着运行情况的变化, 三次谐波电势改变越大, 就越发生动作死区; 死区大小由发电机空载最小三次谐波电势  $E_3\omega_{min}$  和死区电压  $U_{min}$  决定。图三中画出了  $E_3\omega_{min} = 1.0V$  和  $U_{min} = 0.2V$  的死区大小。

为了具体地了解在定子绕组某点发生经故障电阻  $R_f$  接地的灵敏度, 在图四中仍以  $E_3\omega = 3V$ , 电容电阻参数不变, 唯  $U_{min}$  改为  $0.2V$ , 这时有:

$R_f = 0$ ,  $3\omega CR = 0$ , 等效地电位点  $E_1$ , 保护装置正确动作, 灵敏度约为  $3$ 。

$R_f = 2.5k\Omega$ ,  $3\omega CR = 2.06$ ,  $E_2$  点, 装置接近临界动作状态。

$R_f = 5.0k\Omega$ ,  $3\omega CR = 5.12$ ,  $E_3$  点, 装置拒绝动作。

当中性点金属性接地时, 若  $E_3\omega = 3V$ ,  $U_{min} = 0.1V$ , 则灵敏度约为  $17$ ; 若  $U_{mv} = 0.2V$ , 则灵敏度约为  $8.5$ 。(见图二, 在中性点金属性接地时,  $E$  点即  $N$  点)

根据现在所用的参数, 经过上面的分析, 可清楚地发现匈牙利提出的定子接地保护方案并不是非常灵敏的装置, 恰恰相反, 在许多情况下存在着保护的死区, 死区位于定子绕组的  $50\%$  处附近,  $E_3\omega_{min}$  越小,  $U_{min}$  越大, 则死区越大。如能极大地增大  $C_T$  或减小  $R_N$ ,

将有助于缩小或消灭死区，但是这在实际上是不可能的事。

所有以上谈到的死区均指三次谐波电压说的，实际上，匈牙利的定子接地保护装置中，敏感元件除反应三次谐波电压外，在基波另序电压超过15V时也动作，因此上述死区实际上是由基波另序电压补救的，这里着重说明的是匈牙利方案在三次谐波方面的保护灵敏度并不像原作者所介绍的那样高，特别是该方案的三次谐波敏感元件是存在动作死区的，不过死区不是象国内的三次谐波定子接地保护那样靠近机端，而是位于定子绕组中间部分，该区域的接地故障完全靠基波另序电压动作。

匈牙利方案在利用三次谐波方面是有其特点的，即不仅注意 $U_{NF}/U_{TE}$ 比值的大小，而且还利用发生接地故障时 $U_{NF}/U_{TE}$ 方向的变化，从而使该方案三次谐波电压能在靠近机端发生接地故障时也发挥作用。图五中接地故障点 $E_1$ ， $U_{cE_1}$ 足够大，保护动作；对于同样的 $E_1$ 点接地故障，国内采用单纯比较 $U_{NE_1}$ (制动量)与 $U_{TE_1}$ (动作量)大小的办法，保护装置就不能动作，这是匈牙利方案的优点。但是当接地故障发生在 $E_2$ 点， $U_{cE_2} < |U_{TE_2}| - |U_{NE_2}|$ 也就是说，位于靠近中性点侧50%范围内，匈牙利方案的灵敏度比通常单纯比较绝对值大小的三次谐波保护灵敏度要低。我们认为三次谐波电压的首要任务是消除定子接地保护在中性点附近的死区，其次才是尽可能扩大其作用范围，因此匈牙利方案中对三次谐波电压的利用并非是最合理的。

### 三、利用三次谐波电压的定子接地保护装置的简化问题

一种新的定子接地保护将把基波电压和三次谐波电压合并起来，即不再分基波部分和三次谐波部分。机端的取自电压互感器开口三角形绕组的电压 $U_s$ 仍为动作量，中性点的取自单相电压互感器绕组的电压 $U_n$ 仍为制动量。

今以 $U_s =$ 表示动作量 $U_s$ 经装置的谐振回路，整流，滤波等环节后的直流电压；同样以 $U_n =$ 表示制动量 $U_n$ 的直流电压。基波另序电压为 $E_{1\omega}$ ，三次谐波电势为 $E_{3\omega}$ ， $\alpha$ 表示接地点距发电机中性点的距离（以百分数计），则有

$$U_s = K_1 [aE_{1\omega} + b(1-\alpha)E_{3\omega}]$$

$$U_n = K_2 [caE_{1\omega} + d\alpha E_{3\omega}]$$

考虑到装置中采用三次谐波谐振回路，故 $b > 1$ ， $\alpha > 1$ ，而 $\alpha * < 1$ 。由于在制动侧加用基波阻波回路，故 $c \ll 1$ ，且 $b > \alpha$ 。

$K_1, K_2$ 为可调常数。

在正常运行时，发电机没有基波另序电压，故 $E_{1\omega} = 0$ （机端电压互感器由于三相不完全平衡，会在开口三角绕组产生一个不大的基波另序不平衡电压，这在装置调试平衡定值时应予注意。）此时应保证装置可靠不误动，即应有：

$$U_s = 0.5K_1 b E_{3\omega} < U_n = 0.5K_2 d E_{3\omega}$$

$$\text{或 } K_1 b = k_H \cdot K_2 d \quad k_H < 1 \quad (3)$$

(3)式即保证装置在正常运行情况下不误动的条件，这是装置设计调试必须遵守的条件之一。同时装置还必须保证在保护区内发生接地故障时灵敏地动作，为此应有：

$$K_1 [aE_{1\omega} + b(1-\alpha)E_{3\omega}] > K_2 [caE_{1\omega} + d\alpha E_{3\omega}]$$

(※由于三次谐波谐振， $\omega^2 LC = 1/9$ ，当加基波电压 $E_{1\omega}$ 时在L上将会有基波电压

$E_{1\omega} \cdot \omega L / \omega L - \frac{1}{\omega c} = E_{1\omega} \cdot \omega^2 LC / \omega^2 LC - 1 = -E_{1\omega} / 8$ , 所以在不计L的电阻时

$$a = \frac{1}{8} = 0.125。$$

将(3)式代入上式, 经整理后得

$$\frac{E_{3\omega}}{E_{1\omega}} < \frac{a(k_H d - bc)}{bd[\alpha - (1-\alpha)k_H]} \quad (4)$$

(4)式是保证装置正确工作的全部条件。这里我们没有把区分外部接地故障时装置不应误动列为另一必要条件, 因为对于区外接地故障已作如下安排:

1. 若主变高压侧为中性点接地系统。当高压侧发生接地故障时, 定子接地保护将以时限与高压系统接地保护取得配合。

2. 若主变高压侧为中性点不接地系统, 则定子接地保护的组成分两种情况: ①主变为三绕组变压器, 或主变虽为两绕组变压器, 但发电机停机时主变仍可能运行者, 定子接地保护应增设高压侧另序电压的闭锁元件。②主变为两绕组变压器, 且发电机与主变为死联接, 即同时运行或同时停止, 则定子接地保护一般可用基波最小动作电压来躲过高压侧的接地故障, 如果这样做使基波最小动作电压过大以致严重影响灵敏度, 则仍然增设高压侧另序电压的闭锁元件, 这主要取决于主变耦合电容的大小。

3. 对于厂用变压器低压侧接地故障, 分析和试验表明, 由于厂用变的耦合电容极小, 不会引起定子接地保护的误动作。

现在我们着手分析为保证装置正确工作的条件(4), 设选定  $a=0.2$   $b=10$   $c=0.1$   $d=5$   $k_H=0.8$ , 则由(4)式得  $\frac{E_{1\omega}}{E_{3\omega}} > \frac{50[\alpha - (1-\alpha)0.8]}{0.6} = 83.3[\alpha - (1-\alpha)0.8]$

当  $\alpha < 0.5$  时, 上式右端恒负, 故不管  $E_{1\omega}$  和  $E_{3\omega}$  是多大, 上式总是满足的, 这就告诉我们, 这种装置对于在定子绕组靠中性点侧的近一半范围内发生接地故障时能保证正确动作(同时也不会正常运行时误动)。

当  $\alpha \geq 0.5$  时, 根据(4)式及选定的  $a$   $b$   $c$   $d$   $k_H$  值得到

$$a = 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0$$

$$\frac{E_{3\omega}}{E_{1\omega}} < 0.12; 0.043; 0.026; 0.018; 0.0144; 0.012$$

$$\text{即 } E_{3\omega} < 6V; 2.56V; 1.83V; 1.50V; 1.32V; 1.2V$$

$$(E_{1\omega} = \alpha \cdot 100V)$$

由此可见, 在选定的  $a$   $b$   $c$   $d$   $k_H$  参数下, 为保证装置的正确工作,  $E_{3\omega}$  不得大于  $1.2V$ , 这就十分清楚地揭示了这种装置的适用范围是很受限制的。为了扩大适用范围必须仔细地选择  $a$   $b$   $c$   $d$  等参数。

考虑到发电机三次谐波电势最大可能达  $10V$ , 上述  $a$   $b$   $c$   $d$  参数大小不能满足需要。分析(4)式,  $k_H=0.8$  不能选得再大了, 这是由正常运行时不误动所必要的。改变参数  $d$  对(4)式的影响不大; 减小  $b$  有助于扩大适用范围, 但是过份减小  $b$ , 将显著地降低装置的灵敏度, 使三次谐波电压能起作用的保护范围变小了, 甚至在最小三次谐波电势下, 达不到  $100\%$  的

保护区，同时考虑到制动闸加基波阻波回路，后者对三次谐波电压也有损失，因此我们仍然采用 $b > \alpha$ 的基本关系。比较有效地扩大适用范围是这样的方法，即增大 $a$ 值和减小 $c$ 值，下面分别讨论这两个问题。

目前这类装置普遍应用三次谐波谐振回路，因此存在 $3\omega L = \frac{1}{3\omega c}$ 的关系，适当选取较小的电容值，相应的 $L$ 值必较大，就能在 $k_H$ 的付边得到较大的基波值，即增大了 $a$ 值。由于制动侧和动作侧用同一种参数的三次谐波谐振回路，增大 $a$ 值就要求有更小的 $c$ 值。

减小 $c$ 值的简易办法就是在制动侧增设基波阻波回路，阻波特性越好， $c$ 值越小。值得提出的是在增设基波阻波回路时也将损失一些制动侧的三次谐波电压作用，即减小 $c$ 值的同时也将减小一些 $d$ 值，但是如前所述 $d$ 值的减小对(4)式影响不大，所以减小 $c$ 值是最有效的办法。例如设 $c \approx 0$ ， $a, b, d, k_H$ 均不变，则

$$\frac{E_{3\omega}}{E_{1\omega}} = \frac{ak_H d}{bd[\alpha - (1-\alpha)k_H]} = 50[\alpha - (1-\alpha)0.8]$$

比 $c = 0.1$ 时的 $\frac{E_{3\omega}}{E_{1\omega}}$ 扩大了 $\frac{0.8}{0.6} = 1.33$ 倍，不同接地点 $\alpha$ 所允许的 $E_{3\omega}$ 值如下：

$$\alpha = 0.5 \quad 0.6 \quad 0.7 \quad 0.8 \quad 0.9 \quad 1.0$$

$$E_{3\omega} < 8V \quad 3.4V \quad 2.44V \quad 2.0V \quad 1.7V \quad 1.6V$$

如将 $a$ 由0.2增大到0.50， $c$ 由0.1减小到近于0，则

$$\alpha = 0.5 \quad 0.6 \quad 0.7 \quad 0.8 \quad 0.9 \quad 1.0$$

$$E_{3\omega} < 20V \quad 8.55V \quad 6.05V \quad 5.0V \quad 4.25V \quad 4.0V$$

如进一步改用 $a = 0.5$ ， $b = 4$ ， $c \approx 0$ ， $d = 3$ ， $k_H = 0.8$ 则

$$\alpha = 0.5 \quad 0.6 \quad 0.7 \quad 0.8 \quad 0.9 \quad 1.0$$

$$E_{3\omega} < 50V \quad 21.3V \quad 15.3V \quad 12.6V \quad 10.8V \quad 10V$$

至此，有希望把装置的适用范围达到最大三次谐波电势为 $10V$ 。对于最大三次谐波电势比 $10V$ 小的发电机，应将 $b$ 增大，这有助于提高灵敏度。还应该指出：在所选 $a, b, c, d, k_H$ 参数情况下，对于 $E_{3\omega} = 10V$ 的机端金属性接地故障的灵敏度是不高的（理论上灵敏度为1.7，见图六， $U_s = U_n = 50/30 = 1.7$ ），因此在制动侧加用稳压限幅的措施，使机端接地故障的灵敏度非线性地大大提高（图六，理论上达2.8），为了防止在正常运行时的误动作，稳压限幅值应大于 $d \cdot \frac{1}{2} E_{3\omega \max} = 3 \times \frac{1}{2} \times 10 = 15V$ 。

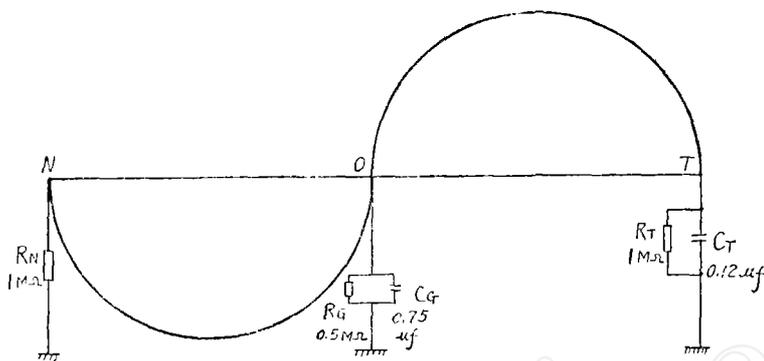
这种设计方案，当机端发生经故障电阻的接地时灵敏度很高，这已为试验所证实，因为由于存在故障电阻，使动作量中出现三次谐波电压成分，因 $a \ll b$ ，所以故障电阻虽使基波电压减小，但三次谐波动作电压的增大完全抵偿且超过了基波电压减小的作用。

## 四、结 论

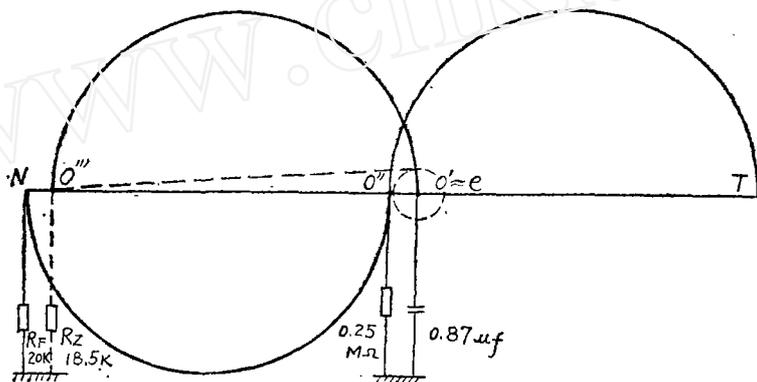
1. 匈牙利提出的定子接地保护方案中，以 $U_{NE}/U_{TE}$ 的大小和方向为判据的三次谐波部分并非具有100%保护区域，它的灵敏度也不是象原著者介绍的那样高。作为100%定子接地保护，它不是利用三次谐波电压的最佳方案。

2. 为简化保护装置，将基波电压部分与三次谐波部分合并是可能的，但装置的灵敏度受些影响。

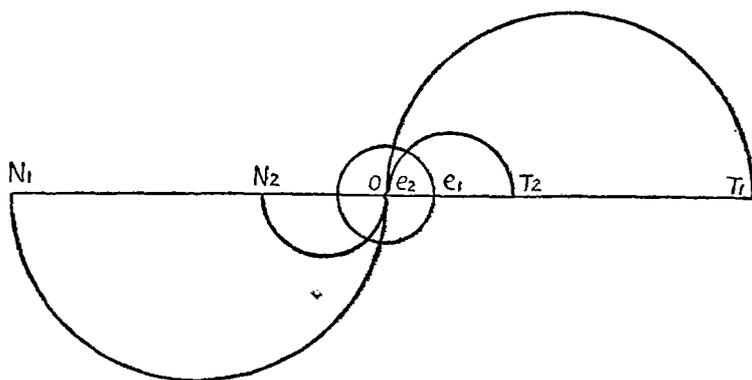
3. 为适应发电机三次谐波电势在 $0.5V \sim 10V$ 的范围内变化，上述两部分合并的做法需要十分谨慎地设计和调整a、b、c、d诸参数。比较完善的做法是根据发电机最大谐波电势的大小选择最合理的a、b、c、d参数，但这样做使设计和调试工作复杂化。



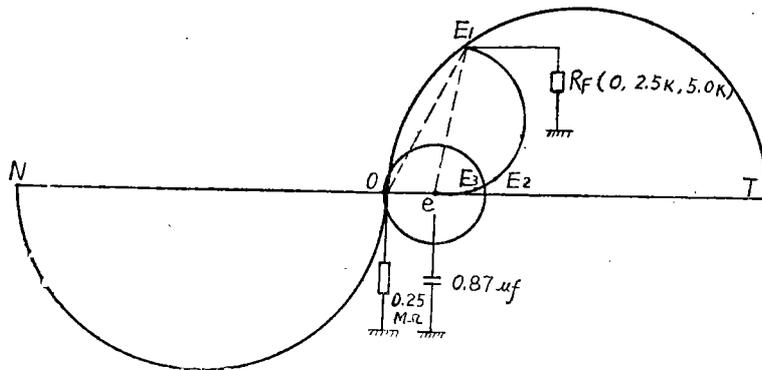
图一



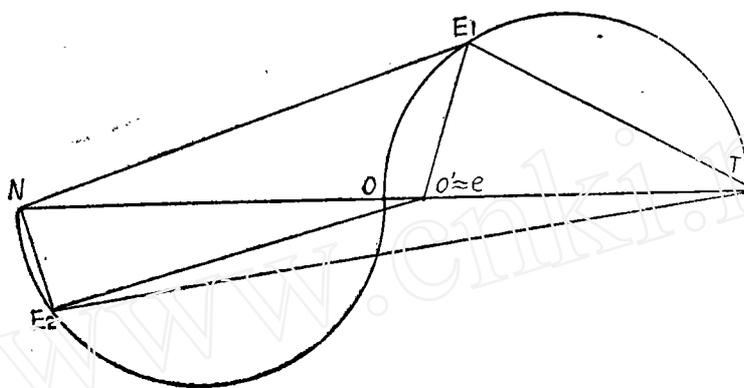
图二



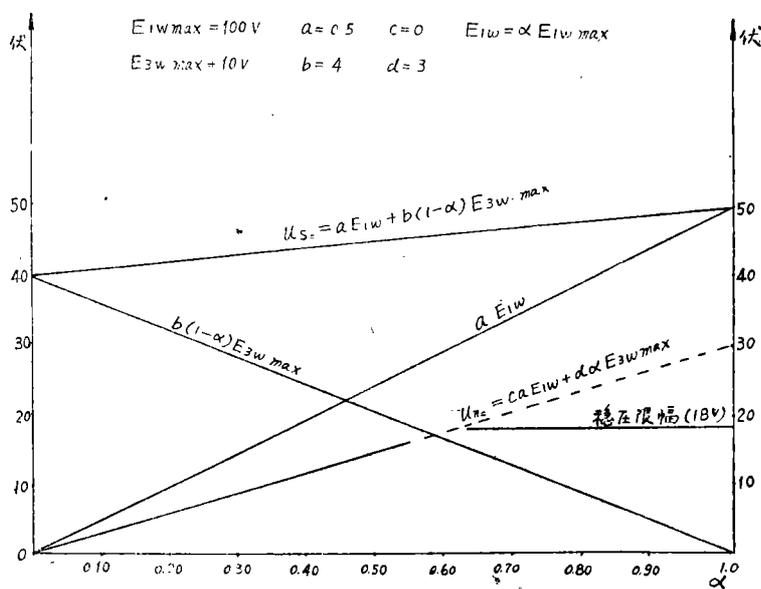
图三



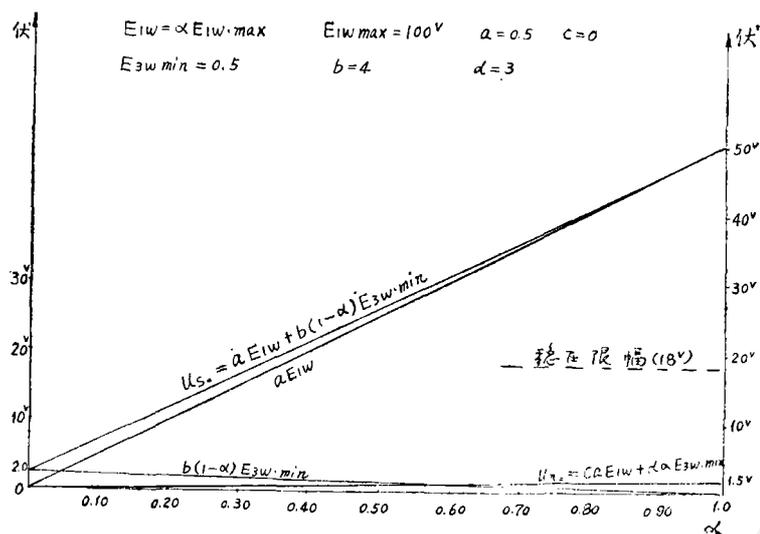
图四



图五



图六



图七

## 提高元件保护可靠性的几点体会

刘家峡电厂 曾令润

我厂发电机、变压器保护，全部采用了晶体管型式。从69年4月投入运行以来，曾多次正确跳闸，减少了事故损失。但是，也发生过几次拒动和误动。74年初，在陕甘青联调、阿城继电器厂的帮助下，我们对一台机组的元件保护作了极大改进。74年3月投入运行后，曾发生过各种形式的外部故障15次，保护装置没有误动作。模拟内部故障能够正确跳闸。

74年6月1日和7月17日B相差动继电器两个三极管先后损坏，由于加了闭锁，避免了两次停机事故。

六年多的运行经验证明：晶体管保护具有许多优越性，应该普遍推广。可是需要根据具体情况改进，否则也会发生问题。现就我们改进情况和怎样提高元件保护的可靠性，提出自己一些非常肤浅的看法，错误的地方，请同志们指正。

### 一、关于保护加闭锁问题

保护加闭锁是防止误动的有效措施之一。特别是误动频繁的保护，可以立即看到效果。但是，加闭锁以后，拒动的机会就增加了。而拒动的危害性，大大超过误动所产生的后果。特别是用一套装置将整套保护闭锁起来，就更要注意拒动。因此闭锁装置必须简单可靠，不限制被闭锁保护的技术性能。根本措施则是提高保护装置的可靠性，不加任何闭锁。我们就是本着这个原则改进的。