

大型发—变组100%定子接地保护

清华大学电力工程系

许昌继电器研究所

一、综 述

随着我国工农业生产日新月异的飞速发展,大容量的发电机组投产越来越多,对继电保护的研究工作也就提出了新的要求,下面对大型发电机——变压器组的定子绕组接地保护的试制研究作一总结。

由于大型机组广泛采用了水内冷的新技术,发生漏水而接地的可能性增加了;由于大型机组高速旋转振动较大,发生机械损伤接地的可能性也增大了;由于机组体积的加大,定子线卷对地电容电流也相对地增加了;还由于大型机组造价昂贵,工艺复杂而不易修复等等实际情况,产生了新的问题,迫使我们不能再单纯地沿用具有保护动作死区的“基波零序电压”定子接地保护了。因为如果在上述保护死区部份发生一点接地(或绝缘水平下降),而不被发现,若在绕组的另一部份突然又发生一点接地故障,势必造成匝间或严重的相间短路故障(绝缘已损坏的那一点。由于另一点接地而造成中点电位的升高,有被击穿形成匝间或相间短路故障),致使发电机铁心遭受严重损伤。我们曾了解到上海某电厂一台5万瓩的机组,就曾因为两点接地故障,而将铁心烧坏 $30\text{cm} \times 20\text{cm}$ 一个大洞,江苏某电厂10万瓩机组定子烧毁也是由定子接地发展成相间短路的。可见,发电机定子接地保护存在死区是大型发电机的严重隐患。

研制一套可靠性高,并且没有死区的定子接地保护是解决上述问题的一项迫切任务。

保护研制必须适应我国大型机组发展的实际情况。

在发电机中性点经消弧线圈接地,用于补偿接地电容电流,是目前国内外普遍采用的成功措施,可以将接地电容电流限制在 $1.5 \sim 5\text{a}$ 范围内。

下面的讨论,就是基于上述原则和前提而进行的。

二、目前几种构成新型保护的方案

将国内外已实现100%保护区的定子接地保护方案归纳起来,大致可分为,附加直流、附加低频(20~或25~)、引工频偏移电压及利用发电机固有三次谐波等。

(1)在发电机电压回路外加一直流电压(包括交流整流),一旦定子绕组发生接地故障,就产生直流电流。

苏联及南京仪表厂等一些单位，都已根据这一方案研制出100%的定子接地保护，它具有简单，可靠等优点，并具有较高的灵敏度，不受外界电压的影响。

但从另一方面来考虑：此方案迫使发电机出线端PT一次侧中性点和发电机中性点消弧线圈不允许直接接地，造成机端PT不能测量相对地电压，并且接地电容电流在一定范围内得不到补偿等缺陷。又由于这种方案在一次，二次回路存在电气上的直接联系，显然是不太合适的。

(2)在发电机出线端PT上，附加一低频电源电压(为相电压的1~3%)，注入发电机回路，根据接地阻抗所引起的电流变化来判别定子绕组的接地故障。

西德和苏联曾分别采用20~、25~的附加电源，这种方案只需要很低的中点电压就可灵敏地保护中点附近发生的接地故障。但是它不可避免地存在：一定程度上加大了接地电流，增加了受附加电源影响的因素，装置显得复杂化，并且大型机组发生低次谐波谐振的可能性大于高次谐波，对于额定频率为50Hz的发电机采用半基波频率的附加电源保护方案是很不合理的，我国就出现过二分之一谐波谐振。

(3)在发电机中性点引一固定工频偏移电压(约占相电压的10~15%)，由故障后电量的变化来判别定子绕组接地故障。

瑞士“BBC”曾认为：“持续2秒的20至40安培的接地故障电流对静子铁心具有轻微的损坏，甚至更大的电流也不致产生值得重视的损坏。无论如何，在每次故障之后都必须进行检修，至少要清除电弧的残痕，因而它推崇这种人为的加大接地故障电流的保护方式。

关于电容接地电流究竟允许多大的问题，还是个争论的问题。从我国的实际情况看，对于大容量电机原则上应以不损坏铁心并能持续运行来确定所允许的接地电容电流大小。我国已多次发生过接地电容电流小于5a，而烧损定子铁心的严重故障。可见“BBC”方案显然是不适应我国大型机组发展需要的。

(4)利用发电机本身所固有的三次谐波电势作成的定子接地保护。

我国及某些国家现有的定子接地保护都把三次谐波电势当作消极因素而加以限制，现在我们要把它利用来消除保护的死区究竟有没有可能呢？以下我们就着重探讨这个问题。

三、关于发电机的三次谐波电势

(1)三次谐波电势是每台发电机本身所固有的。

一台发电机在设计制造时，为了削弱它的高次谐波，改善输出波形，而在定子绕组的排列上常常采取短距、分布等方法，转子气隙也尽可能地采用正弦形分布的方式，然而，由于定子线卷总是存在一定的间隔，转子气隙也不可能完全呈正弦分布；加之定子铁心的槽口破坏了磁路，必然产生一定量的齿谐波，这都决定了发电机电压的波形不可能是纯粹的正弦波，其中必定含有一定量的高次谐波。又因为三次谐波具有零序性质，对相间电压波形并无影响，在发电机的设计中总是首先注意削弱五次七次谐波，致使在一般发电机中具有百分之几的三次谐波电势。

(2) 三次谐波电压的分布

三次谐波电势随负荷电流的增减会有一定程度的变化，并且还受负荷的功率因数、铁心饱和程度等的影响，企图简单地运用它构成保护是不行的，必须研究一下它在绕组中的分布以及变化的规律。三次谐波电势是由一根根线棒的感应电势串联而组成的，各线棒对地电位的关系即各点对地电压的分布取决于绕组对地等效电容的分布（暂略去对地电导的影响），我们可以把一台发电机绕组中三次谐波电势和对地电容分布看作如图 1 所示，N 表示中性点，S 表示机端。

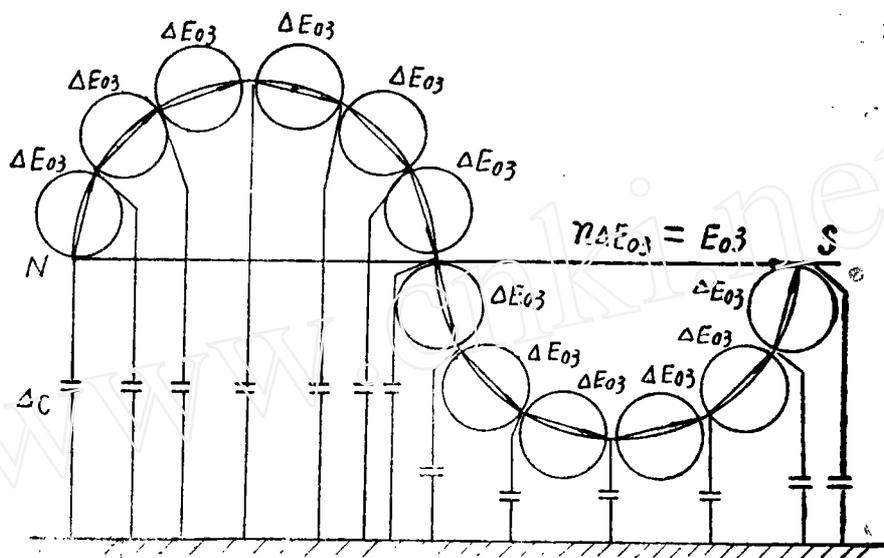


图 1

我们如果把发电机的对地电容等效地看作集中在中性点和机端分别为 $\frac{C_{0f}}{2}$ ($\mu\text{f}/\text{相}$)，并将发电机机端出线升压变压器，厂用变压器等其他元件的每相对地电容 $C_{0'}$ ($\mu\text{f}/\text{相}$) 也等效地放在机端。如图 2 所示。

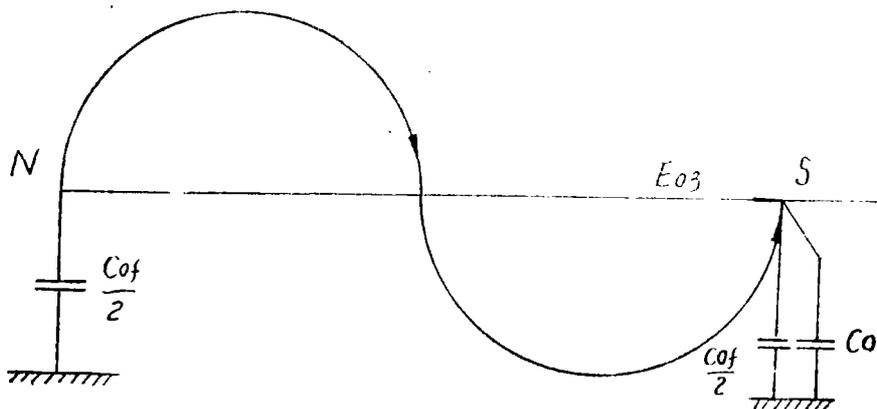


图 2

它的等价图如下(图3):

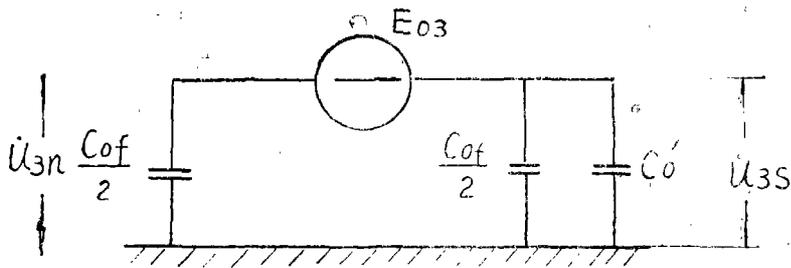


图 3

解上图得

$$u_{3n} = \frac{C_{of}}{2(C_{of} + C_o')} E_{03} \quad (1) \text{ 中性点三次谐波电压}$$

$$u_{3s} = \frac{C_{of} + 2C_o'}{2(C_{of} + C_o')} E_{03} \quad (2) \text{ 机端三次谐波电压}$$

机端电压 u_{3s} 和中性点电压 u_{3n} 的比值为,

$$\frac{u_{3s}}{u_{3n}} = \frac{C_{of} + 2C_o'}{C_{of}} \quad (3)$$

上式说明,在发电机正常运行情况下,中性点的三次谐波电压 u_{3n} 总要大于机端三次谐波电压 u_{3s} , 极限情况是:当发电机出线端开路, $C_o' = 0$, u_{3n} 等于 u_{3s} , 故正常情况下 $u_{3n} \geq u_{3s}$.

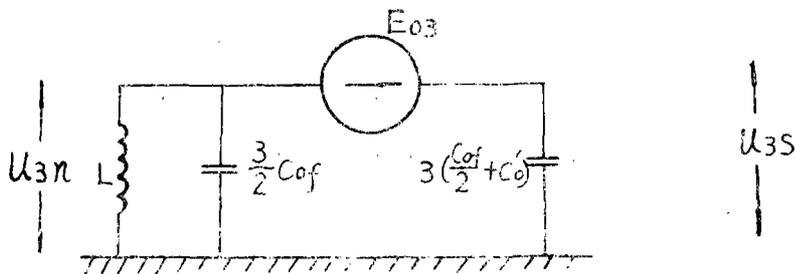


图 4

如果考虑在发电机中性点接入消弧线圈,并且当电容电流完全补偿时由等效图4可求出:

$$\frac{u_{3s}}{u_{3n}} = \frac{7C_{of} - 2C_o'}{18(\frac{C_{of}}{2} + C_o')} \quad (4)$$

上式表示,接入消弧电抗之后,中性点三次谐波电压 u_{3n} 在正常运行时比 u_{3s} 更大,极限值为 $\frac{u_{3s}}{u_{3n}} = \frac{7}{9}$.

无论发电机本身三次谐波电势 \dot{E}_{03} 受何影响而变化, 它中性点和机端三次谐波电压的比值总是符合上述规律的。

(3) 发生经过渡电阻接地故障时的电量分析:

设在 P 点经电阻 R 接地, 如图 5 所示。

暂不考虑集中参数 C'_{0} 。

$$C_n + C_s = C_{0f}$$

$$X_n = -j \frac{1}{\omega_s \frac{C_n}{2}}$$

$$X_s = -j \frac{1}{\omega_s \frac{C_s}{2}}$$

上述情况可用等效电路

图 6 表示。

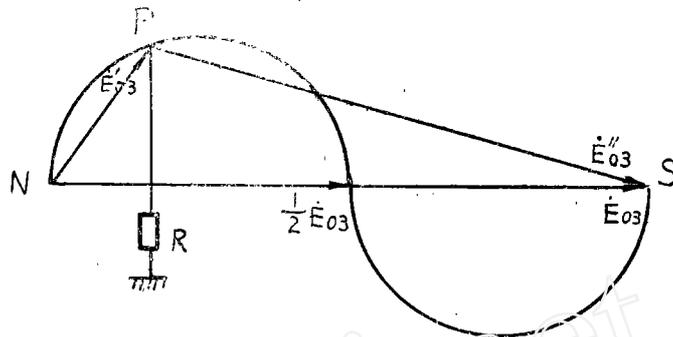


图 5

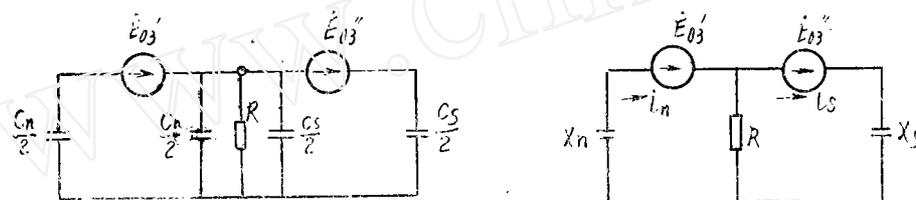


图 6

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{X_n} + \frac{1}{X_s} = \frac{X_n X_s + R(X_n + X_s)}{R X_n X_s}$$

$$i_n = \frac{\dot{E}_{03} R' + \dot{E}_{03}' X_s}{R'(X_n + X_s) + X_n X_s} = \frac{\dot{E}_{03} + \dot{E}_{03}' \left[\frac{X_s}{R} + 1 + \frac{X_s}{X_n} \right]}{X_n \left[\frac{X_s}{R} + \left(1 + \frac{X_s}{X_n} \right)^2 \right]}$$

令 $\frac{X_s}{R} = -jn$, $\frac{X_s}{X_n} = a$, 且有 $\dot{E}_{03}' = \frac{1}{2} \dot{E}_{03} C_{0f} \varphi \cdot \angle \varphi$

$$\dot{E}_{03}'' = \left[1 - \frac{1}{2} C_{0f} \varphi \cdot \angle \varphi \right] \dot{E}_{03}$$

$$\text{则 } i_n = \frac{1 + \frac{1}{2} [1 + a - jn] C_{0f} \varphi \cdot \angle \varphi}{[2(1+a) - jn] X_n} \dot{E}_{03} \quad (5)$$

同理得:

$$i_s = \frac{a \left[1 + \left(1 - \frac{1}{2} C_{0f} \varphi \cdot \angle \varphi \right) (1 + a - j \frac{n}{a}) \right]}{[2(1+a) - jn] X_s} \dot{E}_{03} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1 + \frac{1}{2}(1+a-jn)\cos\varphi \cdot \frac{1}{2}\cos\varphi \cdot [2(1+a)-jn]}{2(1+a)-jn} \cdot E_{0s} \\
&= \frac{1 - (1+a) \cdot \frac{1}{2}\cos\varphi \cdot \frac{1}{2}\cos\varphi}{2(1+a)-jn} \cdot E_{0s} \quad (10)
\end{aligned}$$

由(9)(10)两式,清楚地知道矢量 $\vec{G}_\infty G$ 和矢量 $\vec{G}_0 G$ 是互相垂直的,所以G点必然在以 $G_0 G_\infty$ 为直径的半圆弧上。

以上证明了:当过渡电阻R由 $0 \rightarrow \infty$ 变化时G点轨迹是由 G_0 沿半圆 $\widehat{G_0 G_\infty}$ 移动,对应一定的R值必有相应的G点,从而可得

$$\overline{NG} = i_n x_n = u_{3n}$$

$$\overline{GS} = i_n x_n = u_{3s}$$

当根据比较 U_{3s} 和 U_{3n} 的绝对值大小来构成定子接地保护时,有

$$\frac{u_{3s}}{u_{3n}} = \frac{\overline{GS}}{\overline{NG}} \geq 1 \quad \text{保护动作}$$

在发电机正常运行时, $R = \infty$, G点在 G_∞ 处(一般在定子绕组50%处附近,由于机端存在一定量的其他元件对地电容 C_0' , G_∞ 点要稍偏离50%处而略靠近机端侧)此时有

$$\frac{u_{3s}}{u_{3n}} = \frac{\overline{G_\infty S}}{\overline{NG_\infty}} < 1 \quad \text{保护不动作}$$

当R降低时, G点将沿 $\widehat{G_0 G_\infty}$ 半圆周向 G_0 点移动,在此过程中,必须经过一点,在此点 $U_{3s}/U_{3n} = 1$,使保护处于临界动作状态。过此点后,保护装置便进入动作状态($U_{3s}/U_{3n} > 1$)。当 $R \approx 0$ 时(金属性接地故障)G点即 G_0 点,也即实际接地点P。

由图7我们可以看出,当P点的位置超过定子线圈的 $\frac{1}{2}$ (从中性点起)时,即使 $R = 0$,保护些置也不能动作。

上述利用三次谐波的保护些置在和现有的基波另序保护些置合并,便构成了100%定子接地保护。

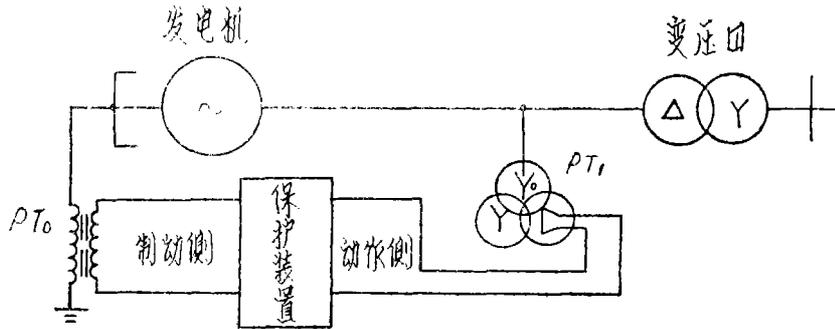
利用三谐波构成定子接地保护的方法很多,我们要求保护些置不仅简单可靠、灵敏,还要求适用范围广。

下面谈谈两种利用三次谐波构成100%的定子接地保护方案。

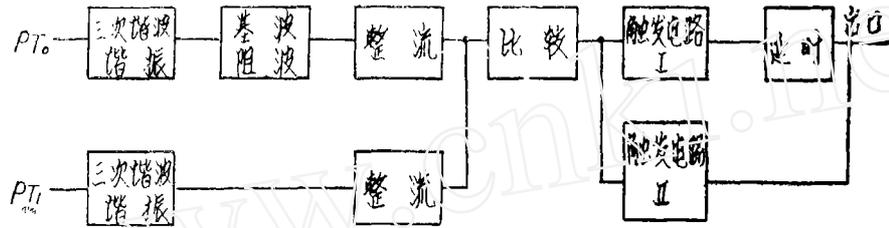
四、介绍两种100%定子接地保护

甲、基波另序电压和三次谐波电压统一作用的方案(BD-10型)

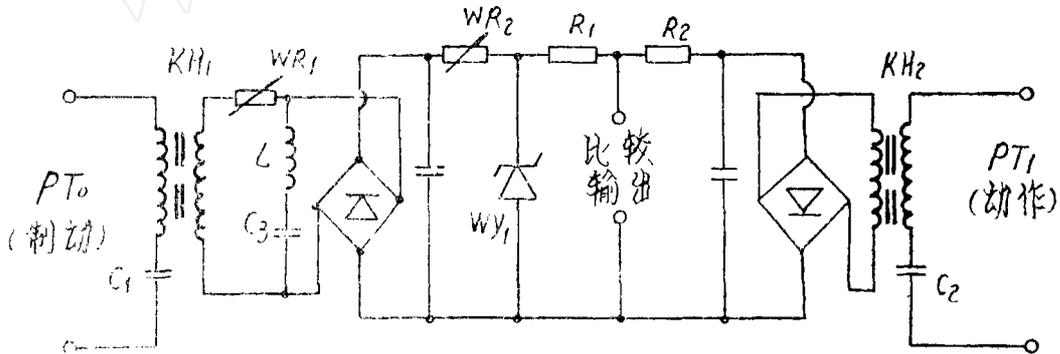
1、一次主结线图



2、保护的原理方框图



3、保护的原理结线图



4、保护的设计思想及几个特性

(1) 采用机端 PT₁ 开口三角输出电压 U_s 为动作量，中性点 PT。二次输出电压 U_n 为制动量构成保护装置。

$$(u_s = u_{o_s} + u_{s_s}, u_n = u_{o_n} + u_{s_n})$$

(2) 可用下述方法对发电机发生接地故障时，保护动作行为进行定性分析。

设发电机中的三次谐波电势 E₃ 是完全均匀分布的，接地点发生在距中性点的 α 处，则：

$$u_{s_s} = (1 - \alpha) E_{3s} \quad u_{s_n} = \alpha E_{3s}$$

即： $U_{s_s} / U_{s_n} = 1 - \alpha / \alpha$

它们随着接地点的不同而变化的规律可用图 8 表示。(图中百分数表示 α)

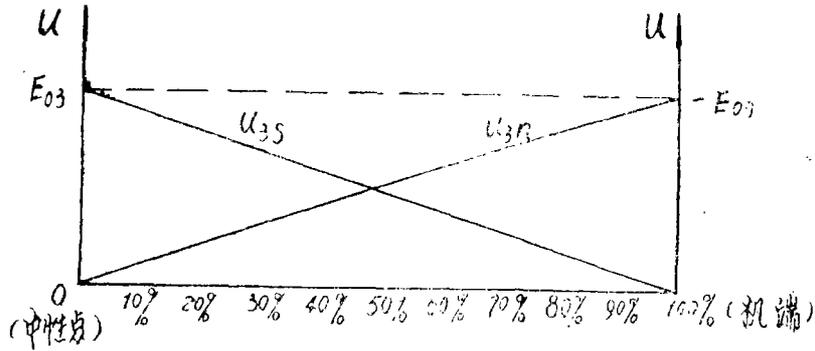


图 8

众所周知,基波另序电压随接地点的不同而变化的规律如图 9 所示。

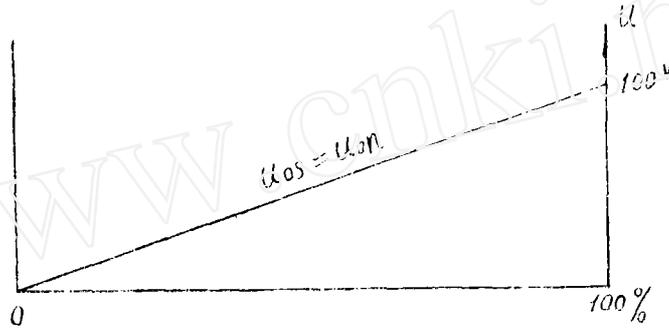


图 9

由于采用基波阻波和限幅等措施,致使 U_{0N} 严重被削弱,因而在我们保护些置中出现的比较电量 $U_S = U_{0S} + U_{3S}$, $U_N = U_{0N} + U_{3N}$ 的关系就可以从图 10 中看出来。

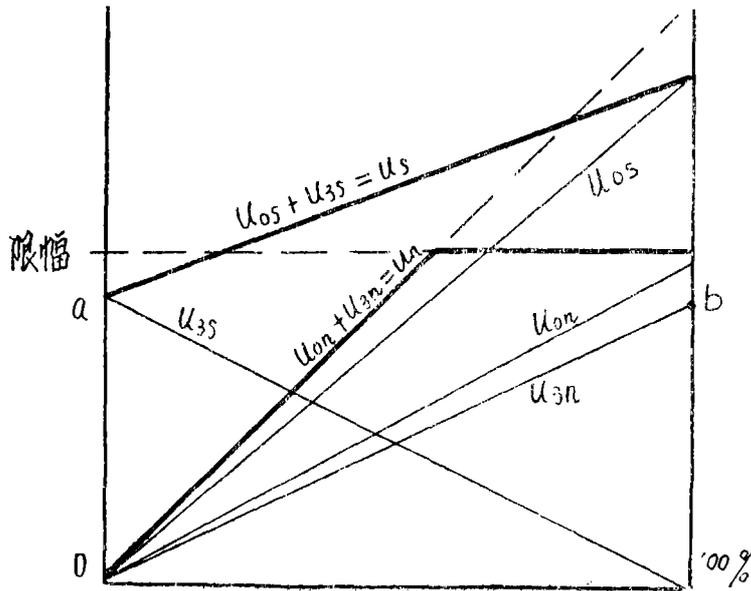


图 10

只要我们选择合适的参数，在发电机任意一点发生接地故障， U_s 总是大于 U_n 的，同时，由定性分析可知，这种保护的灵敏度最低处一般在50%~90%范围内。

实际装置中由于制动边有 WR_1 （调整制动特性用）、基波阻波等元件作用，致使中性点故障时的 U_{3s} 比机端故障时的 U_{3n} 为大，即图10中的a点与b点不在一个位置，a点高b点，那样，保护些置的灵敏度反而高了。

(3) 装置的技术特性

三次谐波制动特性

u_{3n}	0	0.50	1.00	2.00	3.00
u_{3s}	0.32	0.80	1.35	2.30	3.05

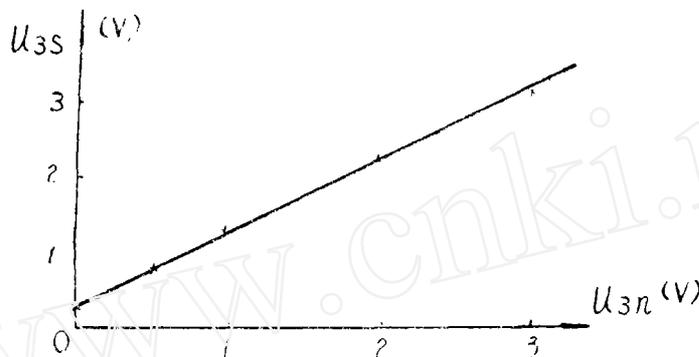


图11a

基波制动特性

u_{0n}	0	10	20	50	100
u_{0s}	11.5	15	19	31	50

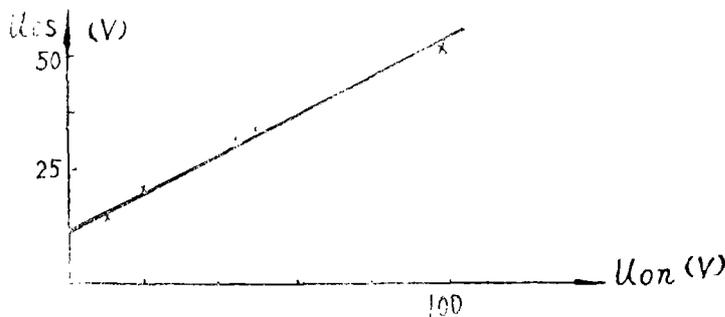


图11b

BD-10型定子接地保护适用于三次谐波电势在0.5V~6V范围内的发电机—变压器组，它不必另加基波另序电压保护。

五、现场试验结果及简略分析

保护些置的样机分别在清华大学动模实验室、清华大学试验电站，北京石景山电厂进行现场试验并投入高井3·机试运行。

2000kW机组试验结果：（满载运行）

故障部位 \ R (KΩ)	0	6	9	12	15	18
中性点	动	动	动	不动	不动	不动
机端	动	未做	未做	未做	动	动

10万KW机组试验结果：（受条件限制，只做了空载中点接地）

R (KΩ)	0	5	8	10
中性点	动	动	不动	不动

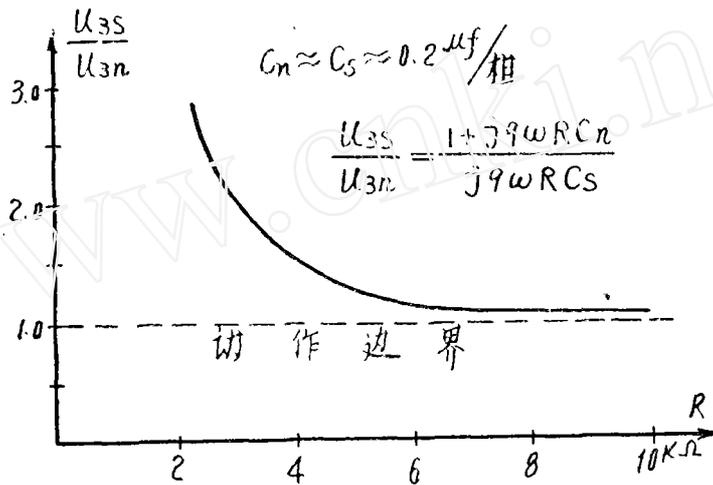


图12

2000KW机组在各种不同负荷状态下装置工作正常，在主变高压侧和厂用变低压侧接地故障时均未误动。

我们用下面的方法分析经过渡电阻R接地故障本保护的动作为。

中性点经R接地， $U_{0s} = U_{0n} = 0$ ， U_{3s} 和 U_{3n} 可由等效图（图13）解出。

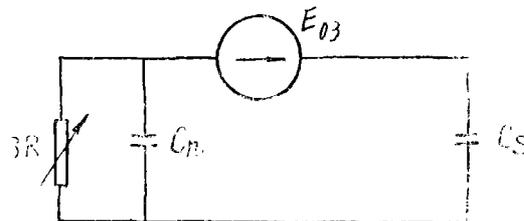


图13

$$\dot{u}_{3s} = \frac{1 + j9\omega RC_n}{1 + j9\omega R(C_n + C_s)} \cdot \dot{E}_{03}$$

$$\dot{u}_{3n} = \frac{j9\omega RC_s}{1 + j9\omega R(C_n + C_s)} \dot{E}_{03}$$

$$\frac{u_{3s}}{u_{3n}} = \frac{1 + j9\omega RC_n}{j9\omega RC_s}$$

上式表示：当 $R \downarrow$ 时， $U_{3s}/U_{3n} \uparrow$ ， $R = 0$ 时， $U_{3s}/U_{3n} = \infty$ 。

当 $R \uparrow$ 时， $U_{3s}/U_{3n} \downarrow$ ， $R = \infty$ 时， $U_{3s}/U_{3n} = 1$ 。

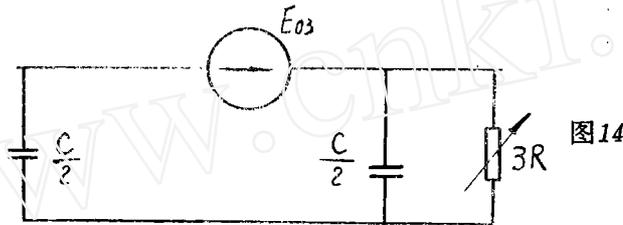
所以，当中性点接地电阻增大时，装置比较快地被制动了。

当机端经 R 接地时， U_{os} 与 R 成反比变化，即： $R \uparrow$ ， $U_{os} \downarrow$ ； $R \downarrow$ ， $U_{os} \uparrow$ 。

U_{3s} 和 U_{3n} 也可由等效图（图14）解出。

$$\dot{u}_{3s} = \frac{j\frac{9}{2}\omega RC}{1 + j9\omega RC} \dot{E}_{os}, \quad \dot{u}_{3n} = \frac{1 + j\frac{9}{2}\omega RC}{1 + j9\omega RC} \dot{E}_{os}$$

$$\frac{u_{3s}}{u_{3n}} = \frac{j\frac{9}{2}\omega RC}{1 + j\frac{9}{2}\omega RC}$$



可以看出：

当 $R \uparrow$ ， $\frac{u_{3s}}{u_{3n}} \uparrow$ ， $R = \infty$ ， $\frac{u_{3s}}{u_{3n}} = 1$ ；

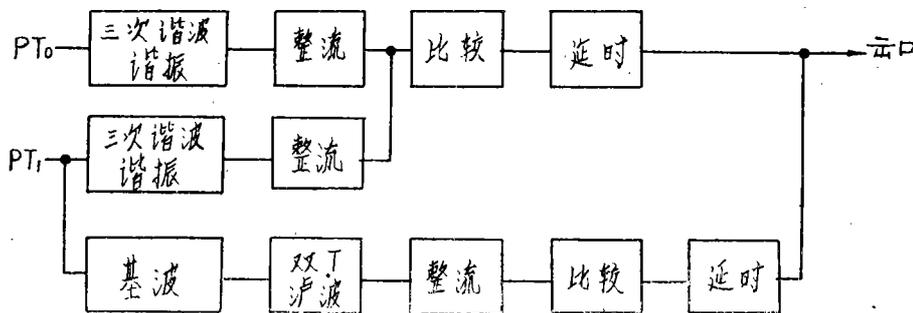
当 $R \downarrow$ ， $\frac{u_{3s}}{u_{3n}} \downarrow$ ， $R = 0$ ， $\frac{u_{3s}}{u_{3n}} = 0$ 。

在机端接地电阻 R 增加时，动作量 U_{os} 随着减小，但同时三次谐波电势在 R 上的压降 U_{3s} 却在增加，它是装置的主要动作因素，所以机端接地的灵敏度比中性点接地时为高。

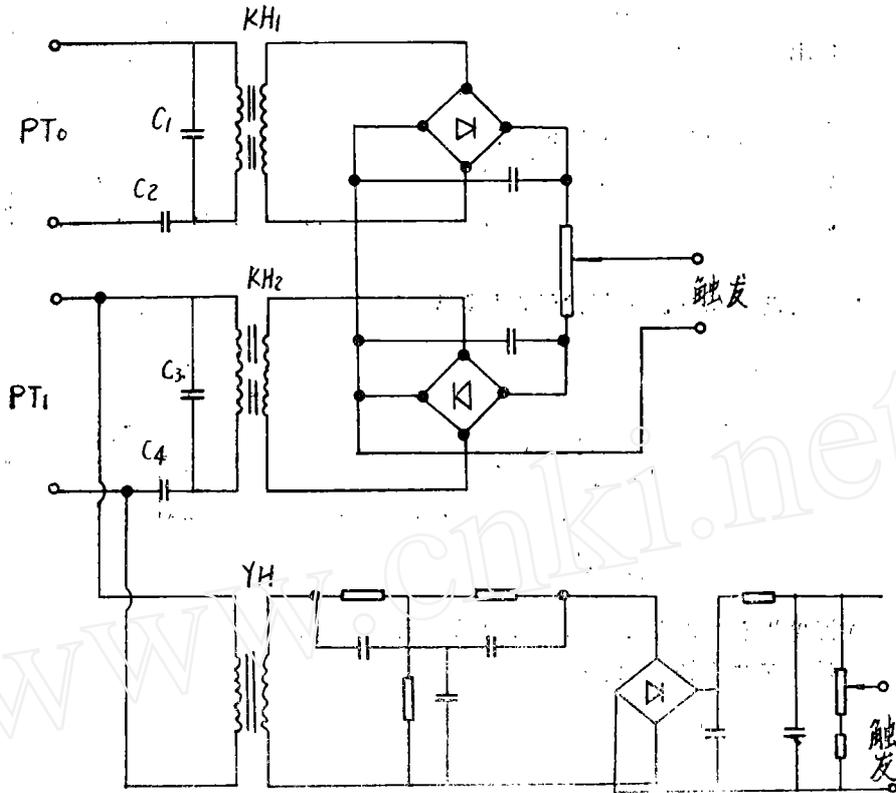
从上述试验结果可知 BD-10 型定子接地保护完全满足没有保护死区而且装置简单的要求。

乙、由基波，三次谐波两部份所组成的 100% 定子接地保护。

1. 原理方框图



2. 原理接线图



3. 设计思想及特点

B D—10型定子接地方案，试验结果说明了它是简单、灵敏、可靠的，但它的适应范围受到限制，因发电机三次谐波电势有超过 6 V 的情况，为扩大适用范围，同时更好地改善频率特性和温度特性，保持简单、灵敏、可靠的特点，考虑了改进方案。

原理接线图中KH₁、KH₂分别与C₁C₃组成三次谐波并联谐振，并用C₂、C₄起基波阻波作用，目的在KH二次侧尽可能地削弱基波的影响。

YH二次侧采用滤去三次谐波的双T回路，它的滤过比可达25。

方案中考虑用变压器高压侧接地保护接点闭锁来防止在高压侧接地故障时保护误动作。

这样，保护装置仍然只用三个铁心元件，采用简单的环流比较回路和标准的触发、延时回路，没有使装置复杂化。

4. 保护装置的特性

(1) KH₁、KH₂变换特性 (R_负 = 15K Ω 时)

150~	(单位: 伏)				
U _入	0.50	1.00	2.00	5.00	10.00
U _出	3.25	6.55	13.20	33.00	64.00

50~ (单位: 伏)

U入 10 100

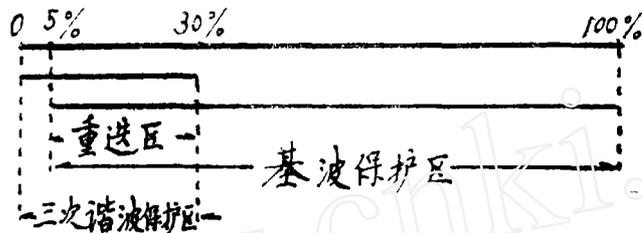
U出 2.3 23

(2) 三次谐波制动特性 (单位: 伏)

U_{3n} 0 0.5 1 2 3 4 5

U_{3s} 0.31 0.78 1.25 2.25 3.30 4.30 5.30

(3) 三次谐波和基波两部份的保护区分。



(4) 温度误差 (20°C ~ -50°C) 在 8% 范围内。

(5) 频率使用范围 48Hz ~ 51Hz 。