

双频式定子接地保护的基本原理和现场试验报告——兼谈有关定子接地保护的几个问题

石景山发电厂 唐山发电厂
北京大栅栏继电器厂 清华大学电力系

内 容 提 要

本文主要讨论了发电机—变压器组的定子接地保护的两个问题：高压侧发生接地故障时的误动作；利用三次谐波电压使定子接地保护没有死区。同时对国内外有关定子接地保护方面的某些意见提出了我们的看法。文中还扼要地介绍了本保护装置样机在三个电厂的现场试验情况。

(一) 引 言

对于发电机—变压器组的定子接地保护，广泛采用另序电压的原理。国内外的运行经验都证明，当高压侧发生接地故障时，发电机的另序电压定子接地保护往往误动作。为了克服这个问题，有用增大另序电压定值的办法，也有用延长动作时限的办法。前者的直接后果是扩大了保护死区，后者有可能使发电机接地故障扩展为严重的相间故障。在不扩大保护死区的前提下有效地防止高压侧接地时误动作的合理措施是利用高压侧另序电压作为保护的制动因素，发电机侧另序电压作为保护的動作因素。

随着机组容量的日益增大，为降低发电机造价而采用了水内冷的新技术，这就改变了过去认为定子绕组中点附近不可能发生接地故障因而不必要求定子接地保护具有100%动作区的看法。为了消灭定子接地保护的動作死区，一部分国家采用了加大接地故障电流的办法，根据我国和其他一些国家的运行经验和实际试验，发现加大接地故障电流将严重地影响铁心的烧损程度，特别是大型机组的定子铁心，结构复杂，修复工作更加困难。美国等国家有用附设直流或交流电源的办法来消灭保护死区的，保护装置过于复杂，体积大，投资高，可靠性也不一定高。经过现场试验和理论分析，我们认为满足定子接地保护具有100%的动作区，采用三次谐波电压原理是可行的。因此我们所研制的定子接地保护是具有两个频率（50周和150周）

下面我们将分别就基本波另序电压和三次谐波另序电压的基本特性进行分析和讨论。

(二) 接地故障时基本波另序电压的分析

(1) 分析计算所用的机组和线路参数

容量 KW	电压 KV	定子每相对地电容 C_r μf	**变压器高低压绕组间耦合电容 C_{TMO} μf
25000	10.5	0.16	0.0030
50000	10.5	0.25	0.0037
100000	15.75	0.39	0.0056
*90000	13.8	0.83	0.0050

*为水轮发电机90000KVA容量的参数

**变压器高压侧额定电压为35KV

线路每相对地电容 $C_{\pi} = 0.008 \mu f / k_M$ (架空线)

(2) 发电机单相接地时高压侧可能出现最大基波另序电压的条件是: 发电机机端发生单相接地, 高压侧电压为35kv, 完全没有高压线路。

发电机机端单相接地时, 基波另序电压为100%, 这时高压侧另序电压为:

机组容量 (KW)	线路长度 (KM)	
	0	5
25000	15.8%	1.1%
50000	15.8%	1.34%
100000	21.8%	2.3%
90000	24.6%	2.9%

对于所讨论的机组情况, 发电机发生接地故障时高压侧另序电压 (只要有5 km以上的高压线路) 不会超过3%; 如果高压侧电压比35kv高, 线路更长, 则高压侧另序电压将比3%更小。至于完全没有高压线路的情况, 发电机发生单相接地时高压侧35kv可能出现25%的另序电压, 这一数值应在调整定子接地保护基波部分的制动特性时予以注意。

(3) 高压侧单相接地时发电机侧的另序电压为:

机组容量 (KW)	高压电压等级	
	35KV	220KV
25000	3.9%	10%
50000	3.1%	8.3%
100000	2.0%	7.7%
90000	0.97%	2.6%

由以上计算结果可见对于所讨论的机组, 当高压侧发生接地故障时, 发电机侧基波另序电压不会大于10%。在石景山发电厂做了现场试验, 并记录了波形, 当35kv侧发生单相接地时, 该侧另序电压约为100伏 (二次值), 在发电机侧的另序电压为1.6~1.8伏。

值得注意的是当发电机从系统断开后, 35kv侧发生单相接地时, 变压器低压侧 (即发电机侧) 将有42伏另序电压; 更为严重的情况是将发电机和厂用负荷都切去, 使变压器低压

侧母线呈空载状态,此时35kV侧发生单相接地,低压侧的另序电压高达135V(二次值),即比低压侧发生单相接地的另序电压(100V)还要高。

从实验的示波图中可以清楚地看到低压侧的另序电压数值虽大,但主要是基本波,因此为保证保护装置在这种情况下不误动,可以适当加强高压侧另序电压的制动作用。

顺便指出,这个很大的另序电压不是由于铁磁谐振引起的过电压,而是因为低压侧对地电容太小(仅变压器低压绕组的对地电容;母线极短,它的对地电容可不计)所致。

(三) 接地故障时发电机三次谐波电压的分析

1. 正常运行时发电机三次谐波电压的大小和分布

在发电机的设计制造中,为了保证相间电压的波形质量,十分注意减小五次、七次谐波电势,而较少注意三次谐波电势,因为后者对相间电压波形没有影响。因此一般发电机的相电压中总含有百分之几的三次谐波成分,通常水轮发电机要比汽轮发电机的三次谐波成分大些,但也不会超过5—10%。

设发电机三次谐波电势为 $E_3\omega$,每相对地电容为 C_r

机端其他元件的每相对地电容为 C_s ,则发电机机端和中点的三次谐波电压 u_s 与 u_n 之比为

$$\frac{u_s}{u_n} = \frac{C_r}{C_r + 2C_s}$$

所以在正常运行时,机端三次谐波电压 u_s 总比中点三次谐波电压 u_n 要小些,极限情况是两者相等。

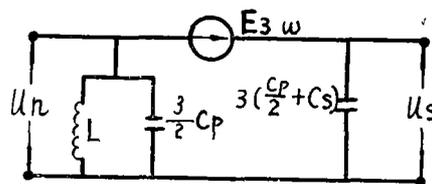
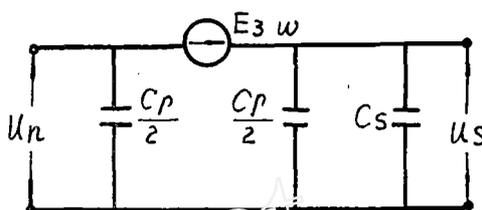
当发电机中点接有消弧电抗时,若为完全补偿,即 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, $C = 3(C_r + C_s)$,则有

$$L = \frac{1}{3\omega^2(C_r + C_s)}$$

对于三次谐波,中点等效电抗为:

$$\frac{3\omega L \cdot \left(\frac{-2}{9\omega C_r}\right)}{3\omega L - \frac{2}{9\omega C_r}} = \frac{-2}{\omega(7C_r - 2C_s)}$$

则
$$\frac{u_s}{u_n} = \frac{7C_r - 2C_s}{18\left(\frac{C_r}{2} + C_s\right)}$$



所以正常运行时,接有消弧电抗的发电机中点三次谐波电压 u_n 比机端三次谐波电压 u_s 更大些,极限情况是 $\frac{u_s}{u_n} = \frac{7}{9}$ 。

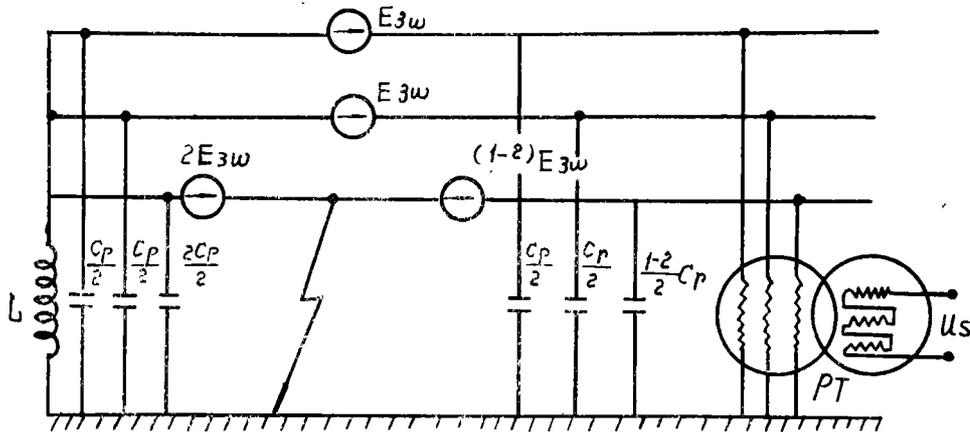
2. 在发电机中点附近发生接地故障时三次谐波电压的大小和分布。

当发电机中点发生接地时,机端三次谐波电压骤增至 $E_3\omega$,即比正常运行时增大一倍以上。

当接地发生在距中点 α 处时,不管发电机中点是否接消弧电抗,恒有

$$u_s = (1 - \alpha) E_{3\omega} \quad u_n = \alpha E_{3\omega}$$

$$\text{即 } \frac{u_s}{u_n} = \frac{1 - \alpha}{\alpha}$$



例如 $\alpha = 10\%$, 则 $\frac{u_s}{u_n} = 9$

$\alpha = 50\%$, 则 $\frac{u_s}{u_n} = 1$

通过上面对三次谐波电压的分析, 可以清楚地看到: 如果利用机端三次谐波电压 u_s 作为动作因素, 中点三次谐波电压 u_n 作为制动因素, 则在正常运行时可以确保保护装置不误动作, 在靠近中点附近发生接地故障时又有很高的动作灵敏度, 因而发电机本身具有的不大的三次谐波电压将是消灭定子接地保护死区的有利条件, 完全不必象通常的接地保护那样把三次谐波电压作为消极因素而被滤去。

电压 u_s 可以方便地从发电机机端的电压互感器开口三角绕组获得; 当发电机接有消弧电抗时, 电压 u_n 也可以方便地从消弧电抗的附加付绕组获得, 如果发电机中点是绝缘的, 则为取得电压 u_n 需要加装中点电压互感器, 这是一个不利条件。针对发电机中点不接地的情况, 为消灭保护死区而仍然利用机端三次谐波电压 u_s 时必须注意到 u_s 的另一个特性: u_s 的大小随负荷大小及负荷性质而改变, 负荷大, u_s 也大, 同一负荷电流下 $\cos\varphi$ 大, u_s 也大。具体数据可参考后面的试验结果。

(四) 双频式定子接地保护样机的现场试验

根据上述原理, 我们试制了几台汽轮发电机定子接地保护的样机, 其中在清华大学试验电站做现场试验的一台技术特性为:

(1) 基波部分

为保证95%的保护范围, 取基波启动电压为5V, 制动特性实测如下:

制动电压(V)	0	10	20	40	50	60	80	100
动作电压(V)	5.2	7.6	10	14	52	57	58	58
返回电压(V)	5.0	7.5	9.5	13	50	55	56	56

(2) 三次谐波部分

根据试验,发电机在空载时的最小 u_s 为0.8V,故取三次谐波启动电压为1.15V。制动特性实测如下:

制动电流(A)	0	1.0	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
动作电压(V)	1.15	1.15	1.15	1.30	1.40	1.80	3.4
返回电压(V)	1.10	1.10	1.10	1.20	1.35	1.70	3.2

试验是在一台汽轮发电机上进行的,汽轮发电机经升压变压器与系统相联。在各种不同负荷大小和负荷性质下,高压侧单相接地时,保护装置能可靠地不误动作,发电机机端单相接地时保护装置正确地动作。

特别值得提出的是三次谐波部分的动作特性试验数据为:

$\cos\varphi$	$I\phi$ (a)	发电机中点接地故障时 $u_s = E_s\omega$ (V)	动作情况
/	0	1.82	正确动作
0.94	0.83	2.25	正确动作
0.40	5.0	1.51	拒绝动作
0.91	2.0	3.80	正确动作
0.85	2.67	4.00	正确动作
0.80	5.0	4.40	正确动作

可见,只要不运行在低功率因数的条件下,简单的相电流制动方法也能使保护装置的三次谐波部分达到消灭接地保护死区的目的。但是当发电机必须考虑在低功率因数条件下运行时,则采用中点电压互感器,以 u_n 为制动电压就成为必要的了。

石景山电站是系统的调频厂,因此它的发电机应该考虑在低功率因数条件下运行的可能性,为此在9#发电机上装设了以 u_s 为动作电压,以 u_n 为制动电压的三次谐波定子接地保护。实测该机的三次谐波电压为:

P(kw)	Q(kw _R)	I(a)	u_n (v)	u_s (v)
0	0	0	1.29	0.32
7500	5500	600	1.51	0.267
7500	12000	900	1.65	0.312
15000	11300	1200	2.18	0.315
15000	25000	1600	2.35	0.379
22500	17000	1600	2.68	0.43
22500	21000	1750	2.57	0.45
30000	16500	1870	3.18	0.483

根据以上数据,取三次谐波最小动作电压为0.9V,分析计算指出,它的保护范围最大接近50%(满负荷运行),最小超过30%(空载运行)。在发电机空载孤立运行时,发电机中点直接发生接地,当定子电压为45%,保护装置已能动作;当发电机中点经1000欧电阻发生接地时,定子电压达80%,保护装置就能正确动作,可见三次谐波部分完全达到了消灭定子接地

保护死区的目的。

唐山发电厂4[#]机三次谐波电压的测试结果

(1) 空载状态

**定子电压 (V)	发电机中点三次谐波电压 u_n (V)	机端三次谐波电压 (V)
(二次值)		
35	0.12	
36	0.14	
37	0.15	
64	0.32	0.25
70	0.34	0.26
82	0.40	0.28
97	0.50	0.35
100	0.50	0.40
102	0.50	0.40
107	0.53	0.46
*118	0.59	0.63
*135	0.71	0.90
*138	0.74	1.12

**PT变比6000/100

* 这时定子电压已超过额定电压颇多, 由于两个PT饱和程度不一致, 机端PT首先饱和, 使 $u_n < u_s$ 了。

(2) 4[#]机与系统并列

P (MW)	Q (MVar)	I (KA)	COSφ	* u_s (V)
25	12	2.9		1.45
25	20	3.2		1.38
20	10	2.35	0.9	1.24
20	20	2.85		1.15
19	18	2.70		0.80
15	18.5	2.5	0.63	0.67
15	15	2.1		0.69
15	8	1.8		0.77
10	10	1.55		0.55
8.5	10.5	1.45		0.48
9	5.5	1.05		0.74
10.5	4.5	1.18		0.90
5	5	0.65		0.54
5	2.5			0.57
5.5	5	0.65		0.51
5	4.5			0.51

* u_s 中不完全是三次谐波电压，这些数值是由仪表直读出的。

(3) 由唐山发电厂试验得出的几点结论

1. 用发电机中点三次谐波电压 u_n 制动的双频式定子接地保护装置在定子过电压颇大时(试验是118%)将会误动作，合理选用机端和中点的PT将改善这一情况。

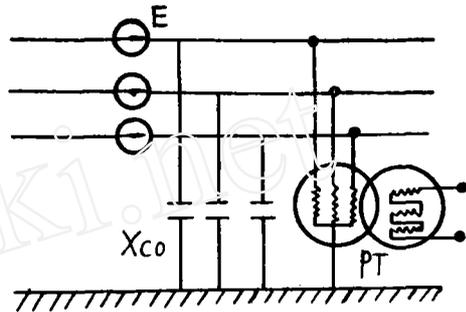
2. 相电流制动的定子接地保护，其三次谐波部分的灵敏度比用发电机中点三次谐波电压制动的要低得多。

3. 在低功率因数运行时(这次试验当 $\cos\varphi = 0.63$)三次谐波部分的制动特性使保护达不到100%的性能。因此建议在有条件装设发电机中点电压互感器(容量可以很小)的地方应用 u_n 制动的保护装置。只是当不可能出现低功率因数运行或不具备取出 u_n 电压的条件时才采用相电流制动的双频式定子接地保护。

(五) 有关定子接地保护的几个问题的讨论

这里主要是针对苏联和瑞士BBC的没有死区的定子接地保护方案提出我们的一些看法。

(1) 苏联《ЭЛЕКТРИЧЕСТВО》1972年第2期提出了一个100%保护区的定子接地保护方案，该方案采用了25周的独立电源，不仅体积庞大，笨重，投资高，而且我们认为选用25周频率的独立电源在技术上也是错误的。根据国内运行经验，发电机电压回路发生参数谐振(电压互感器的感抗与发电机电压回路的对地电容)时，在电压互感器的开口三角绕组将输出异常高电压，其谐振频率可以是 $1/2\omega$ (25周)， 2ω ， 3ω 。另外根据日本的试验资料，在 $E \leq 1.0$ ，电压互感器PT的电阻与励磁电抗 X_{MO} 之比为0.0003的条件下，对于不太饱和的电压互感器具有下述现象：



$$\frac{X_{CO}}{X_{MO}} \leq 0.01 \text{ 不发生异常现象}$$

$$= 0.01 \sim 0.07, \text{ 发生 } \frac{1}{2}\omega \text{ 谐波的过电压}$$

$$= 0.07 \sim 0.55, \text{ 发生 } \omega \text{ 基波的过电压}$$

$$= 0.55 \sim 2.8, \text{ 发生 } 3\omega \text{ 谐波的过电压}$$

对于特性非常饱和的电压互感器，发生参数谐振的范围将增大。

从这个试验资料中，可以清楚地看到发电机越大， X_{CO} 越小，越不容易发生参数谐振；电压互感器越饱和， X_{MO} 越小，越容易发生参数谐振，所以在定子接地保护中不应采用铁心磁密过高的电压互感器。通常的发电机和电压互感器，它们的 $\frac{X_{CO}}{X_{MO}} \ll 0.01$ ，所以一般不会发生参数谐振现象。在一些特殊的情况下，可能出现参数谐振现象，对于大型发电机，由于它的 X_{CO} 小，发生低次谐波过电压的可能性将比高次谐波过电压的大，因此我们认为在定子接地保护中采用外加25周独立电源并不比利用发电机本身具有的150周谐波电压更可靠。

(2) 瑞士BBC在最近几年中停止采用三次谐波的定子接地保护方案，特别在1972年巴黎国际大电网会议上再次提出这种看法，引起了国内很多同志的强烈反映，似乎定子接地保

护不能采用三次谐波电压原理。正如我们在前面所分析并为试验所证实的那样，我们认为利用三次谐波电压来消灭定子接地保护的死区仍然是一种简便而行之有效的办法。我们查阅了69年到72年BBR反对采用三次谐波电压的全部理由，大致有四条：1. BBC认为不是每台发电机都有为保护动作所必需的2.5%的三次谐波电压。

根据我们的试制经验，三次谐波的制动电压可以比2.5%小得多（我们已试制成功的是0.5%，实际上可以进一步减小），而且由于有制动电压（ u_n ）或制动电流，也不会造成误动作。

2. BBC认为三次谐波电压变化无常，无法利用它作为保护的因素。

如前所述，不管发电机运行在何种条件下，恒有 $\frac{u_s}{u_n} < 1$ ，当发电机中点附近发生接地时， $u_n \approx 0$ ， $u_s \approx E_s$ ，这一客观规律是完全确切的，可以十分有效的利用它。

对于发电机中点不接地的情况，不能取得中点三次谐波电压 u_n 时，采用一相电流的制动办法，对于一般汽轮发电机的实际运行条件（ $\cos\varphi$ 在0.8左右），仍然获得了完全令人满意的结果。

3. BBC提出当系统发生难以预料的异常情况可能会影响三次谐波保护的正确工作。

关于发电机电压回路发生三次谐波过电压的可能性已在前面讨论过。至于高压系统中如果发生三次谐波过电压，通过变压器高低压绕组间的耦合电容传到发电机一侧来，这是并不可怕的，因为这时发电机中点同样具有三次谐波电压，它是作为保护的制动因素，因而不会发生高压侧三次谐波过电压而定子接地保护的三次谐波部分误动作。

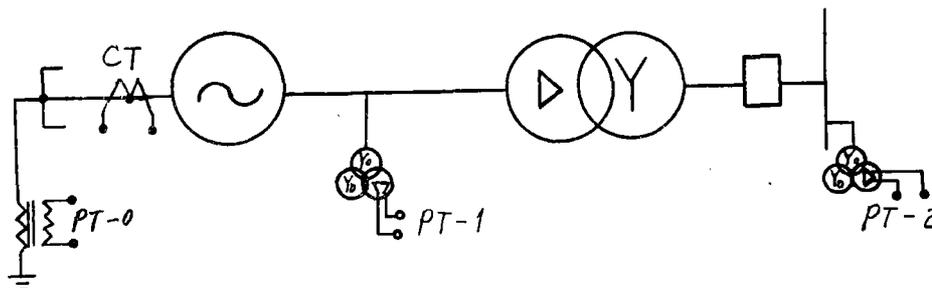
4. BBC还认为在近代大型发电机采用静态励磁后，相电压中的谐波成分可能会有增加，对三次谐波方式的保护有影响。

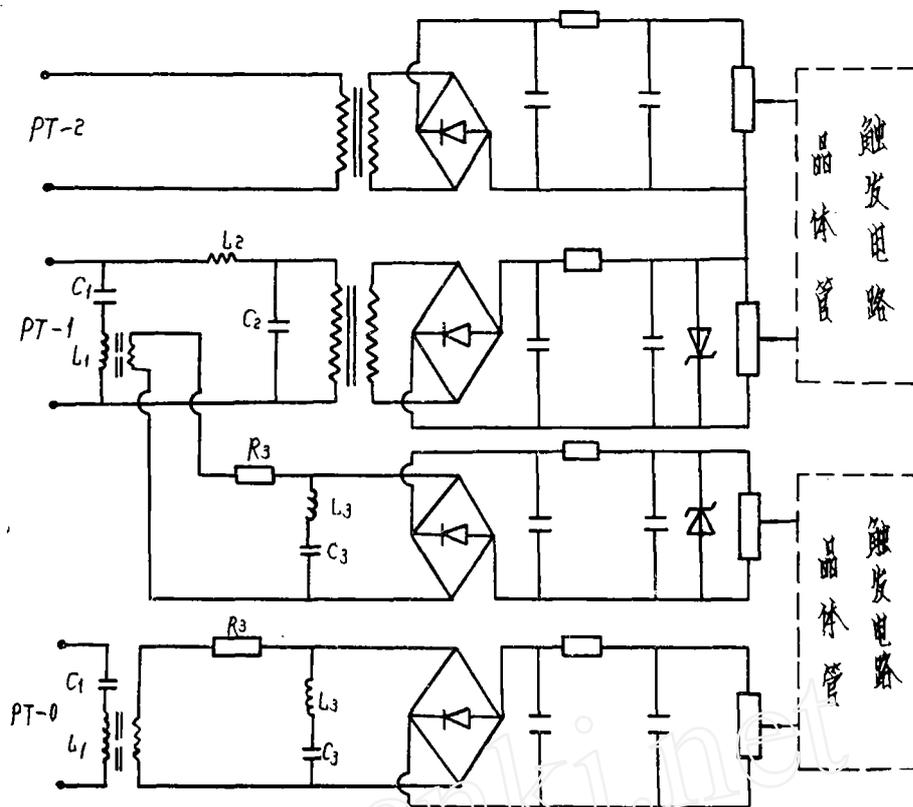
关于这一点，我们认为纵然三次谐波电压的大小可能会增加，但不会改变 $\frac{u_s}{u_n} < 1$ 的规律，最多不过是将三次谐波电压的启动值作相应调整即可。

BBC所提出的定子接地保护方案主要之点是发电机中点经高阻接地，将接地电源增大到20—40a，该公司认为接地电流在这一范围内铁心烧损不算严重，他们公司中有熟练的工人和专用工具，可以较快地修复。这种增大接地电流的方法在我国是行不通的。何况BBC的新方案加用了高压电压互感器两个，大容量接地电阻一个，这些都使保护复杂化，体积大而投资高。

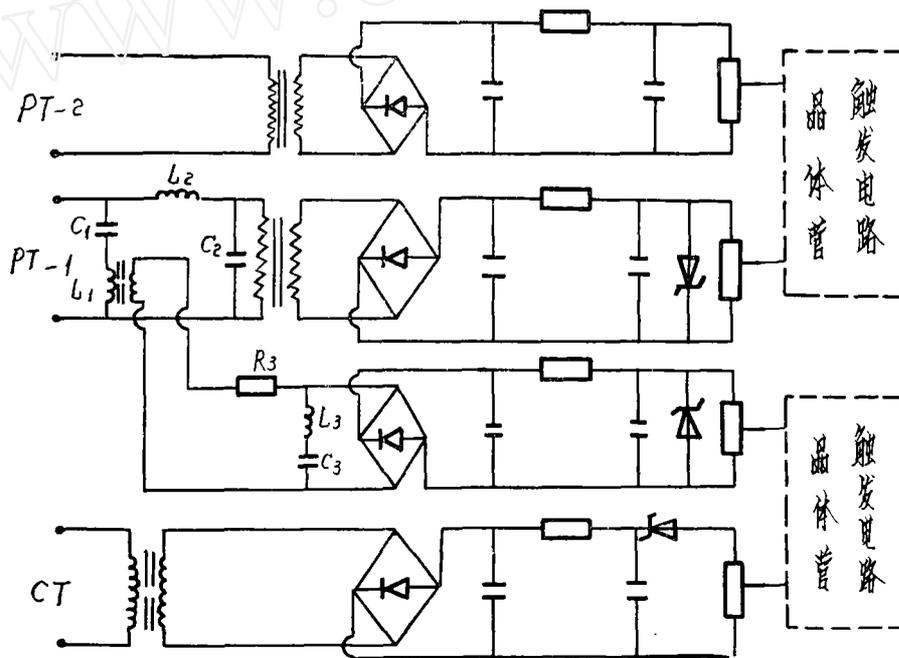
（六）双频式定子接地保护的原理接线图

用于发电机—变压器组的定子接地保护装置构成原理有两种，一种是用发电机中点三次谐波电压作制动，机端三次谐波电压作动作。另一种是用相电流制动的三次谐波电压。两者的基波部分完全相同。





具有中点三次谐波电压制动的双频式100%定子接地保护的交流部分原理图。



具有相电流制动的双频式100%定子接地保护的交流部分原理接线图

上述原理接线图中 C_1, L_1 是150赫串联谐振电路,同时利用 L_1 做成电抗变压器,在付边获得颇高的三次谐波电压。 L_2, C_2 是150赫的阻波电路。 R_3, L_3, C_3 是50赫的阻波电路,其中 L_3, C_3 组成50赫串联谐振电路。

在35kv侧发生单相接地时,由于有高压侧基波另序电压作制动,保护的基波部分不会误动作,但是在这种情况下机端PT-1的基波另序电压也送到三次谐波部分,可能引起误动作,为此加用 R_3, L_3, C_3 的基波阻波电路。

在高压侧发生两相短路时,发电机的电流很大,三次谐波电压也随之增大(特别是水轮发电机),对于按 $\frac{u_n}{u_s}$ 的大小动作的三次谐波部分不会误动作,但 u_s 三次谐波电压也送到基波部分,此时没有基波制动电压,可能引起基波部分的误动作,为此加用 L_2, C_2 的三次谐波阻波电路。

双频式定子接地保护装置虽已初步试制成功,并在石景山发电厂和唐山发电厂投入试运行,但由于我们缺乏经验,装置的线路设计尚待进一步改善提高;在基本原理方面,通过三次现场试验,对利用三次谐波电压消灭定子接地保护死区认为是有效的,但试验还不够多,更没有经过长期运行实践的考验,因此还有待加深认识。错误之处,请各单位指正。

附录:

发电机三次谐波电势的产生和影响因素的分析

(一) 发电机空载时三次谐波电势的产生

发电机空载时三次谐波电势是因为气隙磁密中含有三次谐波磁密分量 B_3 ,它的大小由以下三个因素决定

(1) 转子磁势波中含有三次谐波分量

图1表示汽轮发电机的转子磁势波,当转子槽数 Z_2 与转子槽分度数 Z'_2 之比 γ 愈高,梯形波愈尖,三次谐波含量就愈大,当 $\gamma = \frac{Z_2}{Z'_2} = 0.667$,三次谐波磁势为0。

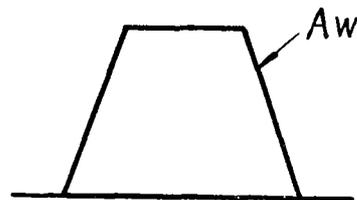


图 1

(2) 转子大齿小齿的气隙磁阻的差别造成三次谐波磁密分量。

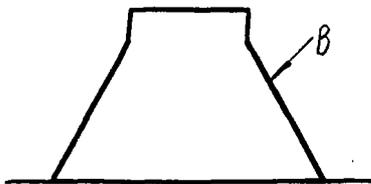


图 2

转子大齿没有开槽,或者虽有通风槽但槽口采用钢槽楔,所以转子大齿部分的等效气隙线仍是治大齿表面的;小齿部分由于槽口的影响,等效气隙线将低于转子表面。这就造成大齿部分的等效气隙长度小于小齿部分的,也就使两部分的磁阻不同,因此空载磁势波为梯形,磁密波却出现一个凸出的台阶,如图2所示,可见磁密波中将比磁势波含有更高的三次谐波成分,即使 $\gamma = 0.667$ 时,磁势三次谐波为0,仍然有三次谐波磁密分量 B_3 。

(3) 饱和现象将改变 B_3 的大小

当励磁电流逐渐增大时，在没有到达饱和以前，三次谐波磁密和电势随着线性增加；当继续增大励磁电流，大齿区域的磁密首先到达饱和程度，如图3所示，当不计饱和时为 B ，计及饱和时为 B_s ；当再进一步增加励磁电流，由于小齿的齿磁密比气隙磁密大得多，而大齿的齿磁密和气隙磁密相差不多，因而小齿区域也呈现饱和现象，如图3的 B_{ss} 。这就清楚地说明了：当励磁电流增加时，起初 B_3 随励磁电流线性增大，此后 B_3 增长变慢，甚至 B_3 反而下降，但当励磁电流很大时， B_3 又增大了。图4表示一台汽轮发电机在空载运行时三次谐波电势 E_3 与励磁电流 I_{f0} 的关系，图中所注数字表示相应的空载端电压大小。

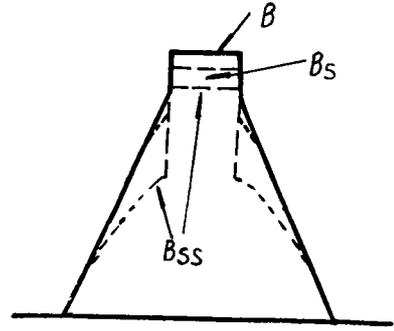


图3

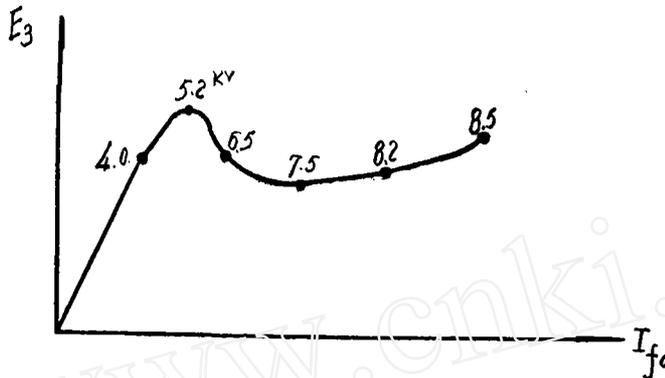


图4 汽轮发电机的三次谐波空载特性之一例

($P_H = 25000 \text{kw}$, $U_H = 6.3 \text{kv}$, $\gamma = 0.667$)

上图中发电机空载三次谐波电势 E_3 在空载端电压为 5.2kV 时最大；此后继续加大励磁， E_3 反而下降，超过额定端电压后 E_3 又随 I_{f0} 上升。

(二) 发电机带无功负荷 ($\cos\varphi = 0$) 时三次谐波电势的分析

发电机端电压维持不变，当带无功负荷时，发电机励磁必须增加，由三次谐波磁势产生的三次谐波磁密相应地增加，但由基波磁势产生的三次谐波磁密却基本不变。因此当发电机作调相运行增大负荷时， E_3 的增加比励磁电流的增加要小。

(三) 发电机带有功负荷时三次谐波电势的分析

发电机带有功负荷时， $\cos\varphi > 0$ ，设转子磁势为 AW_r ，定子磁势为 AW_a ，合成磁势为 AW_i ，图5表示 $\cos\varphi > 0$ 时磁势电势的矢量图， AW 落后 AW_i 的角度为 θ_i ，功率角以 θ 表示。对应图5的气隙磁场如图6

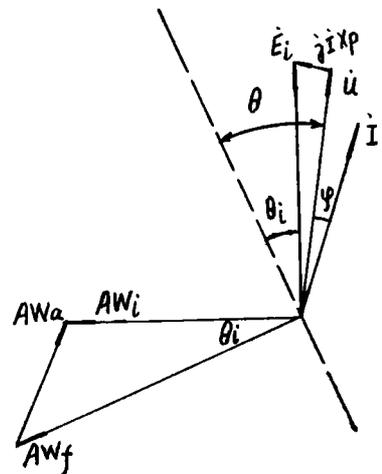


图5

图6中的曲线1为气隙基波磁势，它是 AW 的基本波与 AW_a 合成的结果，由于发电机带有功负荷，出现角度 θ_i 使气隙基波磁势轴线偏离转子直轴 θ 角，我

们已经知道,在同一气隙磁密下,小齿的齿磁密比大齿的高得多,因而小齿磁路比大齿更加饱和,或者说在相同的较高磁势作用下,由于小齿区域更易饱和,使小齿区的气隙磁密显著减小。今气隙磁势基波幅值偏离直轴而移向小齿区,而小齿区的等效气隙较大,且易于饱和;对于大齿区,气隙磁势不太高,它的等效气隙又较小,且不易饱和;这样对应气隙磁势基波的磁密波形将

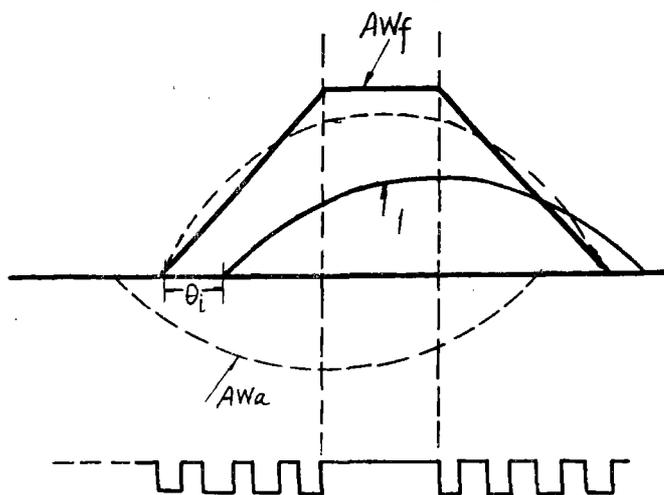


图 6

发生严重畸变,使三次谐波磁密 B_3 较大地增加,加上转子磁势中的三次谐波所产生的 B_3 ,构成了发电机带有功负荷时的总三次谐波磁密和电势。

当增大有功负荷时,功率角 θ 相应增大, θ_i 也随之增大,根据上述分析,三次谐波电势也将显著增大。

当有功负荷维持不变而增加无功负荷时, φ 相应增大而 θ_i 相应减小,励磁电流 I_f 当然增大; θ_i 减小使 E_3 减小, I_f 增大使 E_3 增大,所以当降低功率因数(有功不变)时三次谐波电势不一定因励磁电流的增加而增加,相反地常常因为 θ_i 的减小而使 E_3 少量下降。

(四) 发电机三次谐波电势的变化规律

通过以上分析,可知发电机三次谐波电势受很多因素影响,是比较复杂的,但是仍有一定的变化规律,即:

1. $\gamma = \frac{Z_2}{Z_1}$ 愈大,转子磁势所含三次谐波就大,使 E_3 也大。

2. 大齿小齿的等效气隙差距愈大(如定子采用半闭口槽,转子采用开口槽),则由基波磁势产生的磁密波的波形畸变就严重,也就使 E_3 随之增大。

3. 电机磁路饱和程度愈高,则当发电机空载或带纯感性负荷时 E_3 将降低;但当带有功负荷时,由于合成磁势的轴线偏离直轴而移向小齿区,使饱和更严重,磁密波形畸变更显著,因此 E_3 将随有功负荷的增加而增加,饱和程度越高, E_3 的增加越大。

4. 有功负荷的增加,使 θ 增大,由基波磁势产生的磁密波畸变严重,所以 B_3 、 E_3 增大;无功负荷的增加,使 I_f 增大,由谐波磁势所产生的 B_3 、 E_3 就增大。 θ 对 E_3 的作用比 I_f 对 E_3 的作用大,所以当减小有功而增大无功时,纵然定子电压电流维持不变, E_3 常常是随之减小的,同一有功功率下,改变 $\cos\varphi$ 的大小,往往出现 $\cos\varphi$ 低的 E_3 小,这也是 θ 角对 E_3 起主要作用的反映,但也不是所有的发电机都是这样。为了充分掌握一台发电机的三次谐波电势的特性,应该实验测定在各种不同负荷大小和不同功率因数条件下的三次谐波电势值。