

三次谐波励磁同步发电机 知 识 问 答

台立天 编

水利电力出版社

目 录

1. 什么叫三次谐波励磁同步发电机? 1
2. 三次谐波是怎么回事? 1
3. 谐波励磁发电机的励磁系统由哪几部分组成? 6
4. 为什么谐波绕组能产生三次谐波电势? 8
5. 谐波绕组的结构是怎样的? 10
6. 谐波励磁发电机是怎样自励建压的? 12
7. 什么是同步发电机的电枢反应? 电枢反应对气
隙磁场有什么影响? 14
8. 为什么谐波励磁发电机具有复励作用? 19
9. 谐波电压是怎样变为直流供给磁极线圈的? 22
10. 接在励磁回路内的阻容电路有何作用? 25
11. 怎样进行谐波励磁发电机的试车? 26
12. 怎样做好谐波励磁发电机的维护保养工作? 28
13. 什么是发电机的并联运行? 谐波励磁发电
机并联运行需要满足哪些条件? 30
14. 什么是并车? 怎样进行谐波励磁发电机的并
车? 31
15. 谐波励磁发电机并联运行时为什么要接均衡
线? 怎么接法? 36
16. 谐波励磁发电机手动并车时怎样操作? 需
注意什么问题? 38
17. 谐波励磁发电机的中线电流大是怎么回事? 39

18. 谐波励磁发电机的中线电流对运行有什么影响? 怎样限制中线电流?	43
19. 什么叫功率角和功角特性? 它们与发电机的运行稳定性有什么关系?	47
20. 为什么调无功必须调励磁? 为什么调励磁与提高发电机静态稳定性有密切关系?	50
21. 发电机并车后怎样分配和转移负载?	53
22. 为什么谐波励磁发电机在并联运行中有时会发生振荡? 怎样预防和抑制这种振荡?	55
23. 怎样进行发电机的解列与停车?	57
24. 谐波励磁发电机可控硅自动励磁调节器是个什么样的装置? 它有什么特点?	57
25. 什么是可控硅? 它是怎样工作的? 在自动励磁调节器中它起什么作用?	59
26. 什么是单结晶体管脉冲触发器? 它是怎样产生脉冲电压的?	63
27. 谐波励磁发电机可控硅自动励磁调节器是怎样工作的? 它有什么优缺点?	67
28. 谐波励磁发电机采用可控硅自动励磁调节器时, 如果发电机发不出电或者电压不能调整是何原因? 应采取什么应急措施?	72
29. 怎样正确地使用和保护可控硅?	74
后记	76

1. 什么叫三次谐波励磁同步发电机？

三次谐波励磁同步发电机(以下简称谐波励磁发电机)，是一种新型的采用谐波励磁方式的发电机。这种电机和普通同步发电机基本相似。在它的定子铁心槽里多加了一套谐波绕组。当磁极被原动机带动旋转时，这套绕组把气隙磁场中的三次谐波能量引出来，经过整流供给本机励磁。这种励磁方式，不仅省去了励磁机等附加的励磁装置，而且具有一定程度的自动稳定电压的可贵特性。由于这种电机主要是利用磁场中的三次谐波分量做励磁电源，所以叫三次谐波励磁同步发电机。

多年来的实践证明，谐波励磁发电机运行可靠，维护简单，通用性强，制造方便。同直流励磁系统相比，约可节约原材料百分之二十左右，因此比较经济，适合于农村小水电站使用。

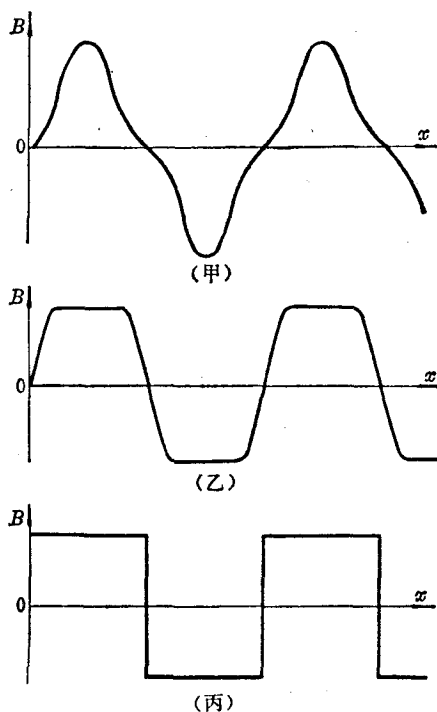
当然，任何事物都有一个发展的过程，谐波励磁也不例外。对于这种发电机，目前还正在围绕设计、工艺、运行诸方面的问题进行改进提高。

2. 三次谐波是怎么回事？

我们在前面提到，谐波励磁发电机是利用三次谐波励磁的。那么，三次谐波究竟是怎么回事？这里做点简要的说明。

电机知识告诉我们，发电机的实际电势波形或磁通密度波形，由于电机结构等原因，并不完全是正弦形的。但是，

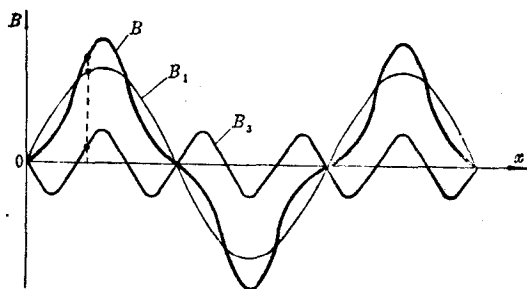
这些波形在经过一定的时间（即一个周期）后，仍重复以前的变化规律，这样的波形，我们叫它非正弦周期波形。象图一（甲）、（乙）、（丙）所示的波形都属这一类。



图一 非正弦周期波形示意图
（甲）尖顶波；（乙）平顶波；（丙）矩形波

图一（甲）表示的磁通密度 B 在空间的分布波形（简称磁密波）是个尖顶波。图一（乙）为平顶波。图一（丙）则是一个矩形波。

这些非正弦的周期波，借助数学分析或者用专门仪器测绘，都可以分解为一系列频率为整数倍的正弦成分，我们把这一工作称为谐波分析。非正弦波的每一正弦成分，即称为它的一个谐波分量。也就是说，我们在实际工作中所遇到的各种周期性非正弦波信号，都可以认为是由许多不同频率的正弦波所合成的。例如图一（甲）中的磁密波 B 曲线，可认为主要是由 B_1 、 B_3 合成的（参看图二）。我们可以用逐点描图的方法，将对应同一横坐标的 B_1 、 B_3 值相加，就得到 B 的纵坐标值，然后将各点连起来，就得到磁密波 B 的曲线，如图二表示的那样。 B_1 、 B_3 则是两个正弦成分的谐波分量。而 B_1 是谐波分量中的基本成份，称为基波（又称第一次谐波）， B_1 的频率（又称周波） f_1 同 B 的频率 f 相同（ $f_1 = f$ ）。 B_3 的频率是基波的三倍（ $3f_1$ ），我们称为三次谐波。凡某一谐波分量的频率是基波的几倍，我们就称它为几次谐波。例如，谐波分量的频率是基波的三倍、五倍、七倍，就分别称为三次谐波、五次谐波、七次谐波等等。它们的频率分别为 $3 \times 50 = 150$ 周/秒（即赫芝，简称赫，符号为



图二 非正弦周期波分解为谐波的示意图

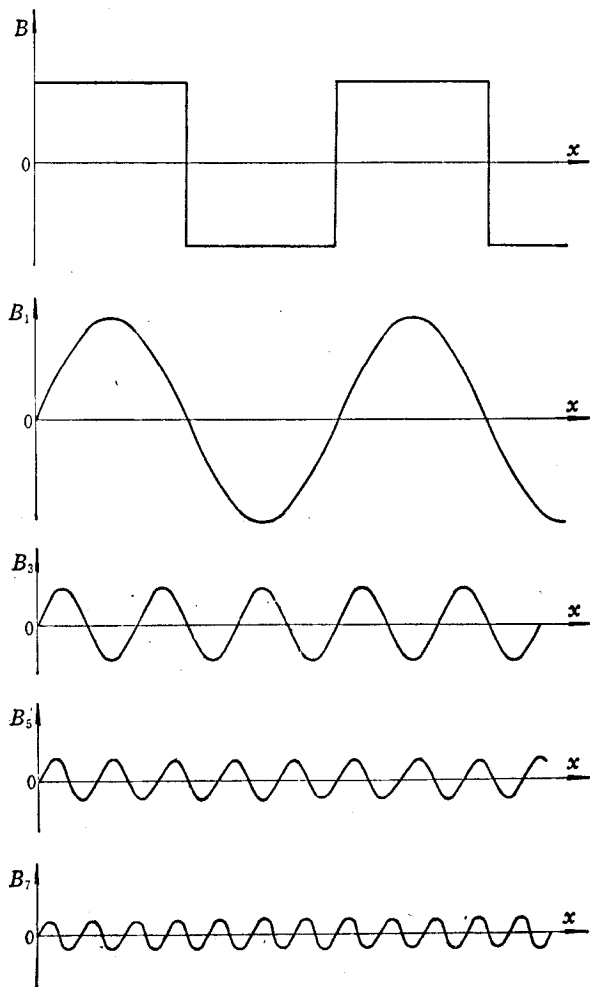


图 三 矩形波分解为一系列谐波示意图

Hz)、 $5 \times 50 = 250$ 周/秒、 $7 \times 50 = 350$ 周/秒等。凡频率比基波高的波都称为高次谐波。例如，图一（丙）的矩形波可分解为一、三、五、七等次谐波，如图三所示（图上仅画到七次）。

图四为图一（乙）的平顶波的谐波合成示意图，图上仅画出基波和三次谐波，因此总波形中部有凹陷，当谐波次数适当取多时，总波形就十分接近平顶波了（如图上用虚线补齐后的波形）。

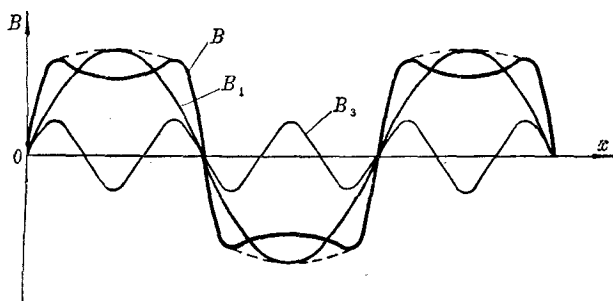
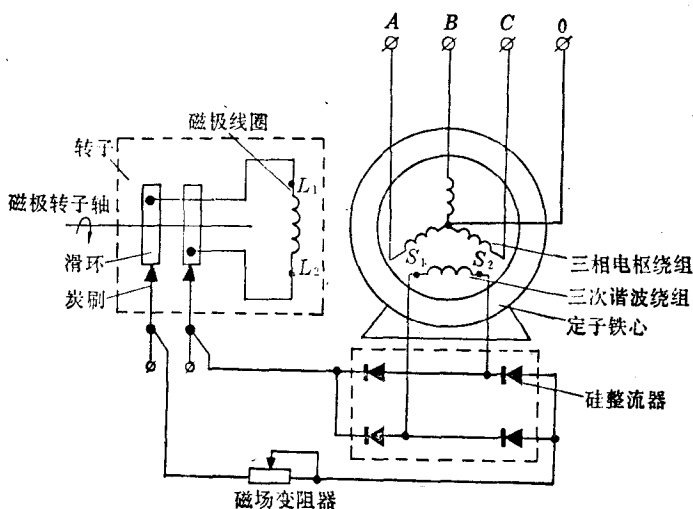


图 四 非正弦周期波分解为谐波示意图

一个非正弦周期波（经谐波分析），可以分解出许许多多的谐波，但是对波形畸变起主要影响的，或者说在谐波分量中除基波外能量较大的，还是头几个高次谐波如三次、五次谐波等，其中以三次谐波为最强。因为谐波的次数愈高，它的幅值愈小，因此影响就愈小。在实际的交流电路里，常见的交流发电机的电压、电流波形，根据它们的变化规律，一般只能分解出三次、五次、七次等奇数次谐波，而没有偶数次谐波。

3. 谐波励磁发电机的励磁系统由哪几部分组成？

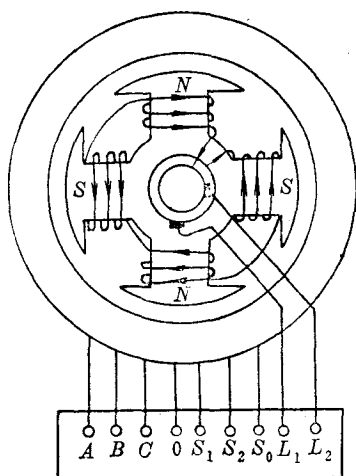
谐波励磁发电机通常仍采用旋转磁极式（又称转场式）结构。转子磁极为凸极式。励磁电路主要由三次谐波绕组 S_1-S_2 、励磁绕组（又称磁极线圈） L_1-L_2 、磁场变阻器（又称励磁调节电阻）及硅整流器组成，如图五所示。



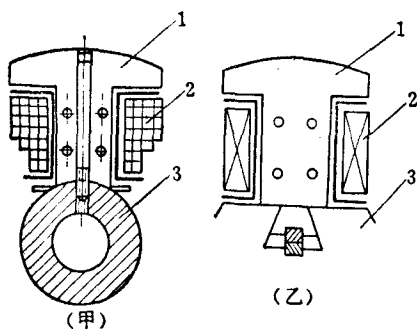
图五 谐波励磁发电机原理接线图

当磁极的励磁绕组通入直流电时，磁极便具有几个固定的极性，如图六所示。图七是磁极的安装示意图。图七(甲)为用螺钉固定磁极。图七(乙)为用鸽尾榫固定磁极。

在定子槽内通常嵌有两套绕组：一套是电枢绕组（又称主绕组）输出三相交流电能。另一套是附加的独立的谐波绕组，用作交流励磁电源。谐波绕组在定子槽内的放置如图八所示。三次谐波绕组感应产生的三次谐波电势经硅整流器整



图六 凸极式发电机四极转子示意图
(图内电枢绕组未示出)

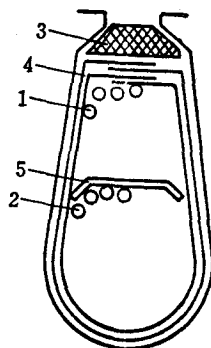


图七 磁极安装示意图

(甲)磁极用螺钉固定;

(乙)磁极用鸽尾棒固定

1—磁极; 2—磁极线圈; 3—主轴



图八 谐波绕组在槽内的
放置示意图

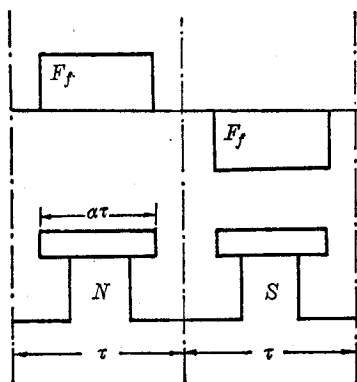
1—谐波绕组; 2—电枢绕组; 3—槽楔; 4—槽绝缘; 5—层间绝缘

流后供给励磁绕组励磁。三次谐波电势随负载增加而增加，因此当负载增加时，励磁电流也有相应的增加，从而使发电机输出电压稳定。

4. 为什么谐波绕组能产生三次谐波电势？

要了解这个问题，需从发电机的磁极磁场和谐波绕组两方面来说明。

我们知道，磁极线圈在通电流后就会产生磁通，如同有了电动势才会产生电流一样，这个磁通是由磁动势产生的。线圈中的电流值 I_f 和线圈匝数 W_f 的乘积 $I_f W_f$ 叫做磁动势（简称磁势）用字母 F_f 表示，即 $F_f = I_f W_f$ ，单位是安匝。在磁极的范围 $\alpha\tau$ （ τ 为极距， $\alpha < 1$ ）内，这个磁动势在空间呈矩形分布，就是说是一个矩形波，如图九所示。在两极之间（即极间区）磁势为零。这个励磁磁势 F_f 在定子与转子

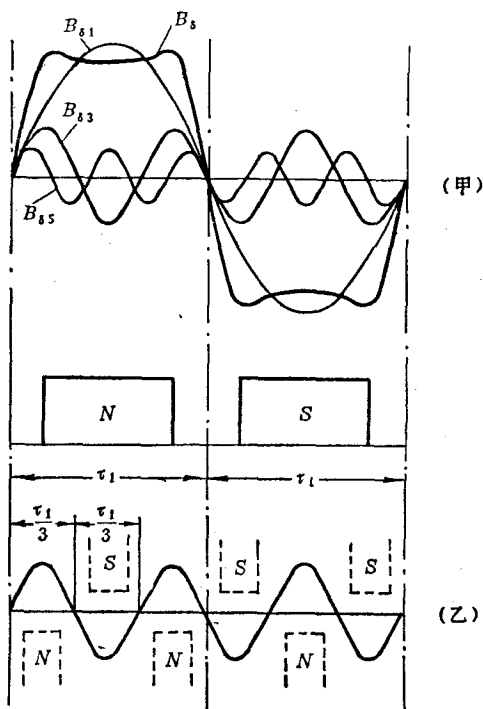


图九 磁极磁势波示意图
(图上只示出两极， $\alpha < 1$)

铁心间的空气隙里产生磁通，大部分磁通经气隙与电枢（定子）绕组相交链，这就是主磁通 ϕ_f 。由于电枢和磁极间气隙的不均匀性，磁势波在气隙中遇到的磁导各处有差异，因此，它所产生的磁密波实际上就成了一个平顶波 B_s ，如图十（甲）粗线所示。根据前面所述谐波分析的道理，这样的平顶波可以分解成频率为

50赫的基波 $B_{\delta 1}$ 和一系列高次谐波 $B_{\delta 3}$ 、 $B_{\delta 5}$ 等。高次谐波中能量最大的是150赫的三次谐波 $B_{\delta 3}$ ，这就是磁极磁势产生的三次谐波磁场。

三次谐波磁场的磁极对数相当于基波磁场磁极对数 p 的三倍即 $3p$ 。而极距 τ_3 是基波磁场磁极极距 τ_1 的 $1/3$ 即 $\tau_3 = \tau_1/3$ ，如图十(乙)所示。由此可以看出，要使谐波绕组得到三次谐波电势，必须使谐波绕组的布置与三次谐波磁场对应。也就是说，当磁极(转子)按同步转速 n_1 旋转时，三次谐波



图十 磁极磁密波分解为基波和三次谐波磁场示意图
(甲)磁极磁密波；(乙)三次谐波磁场的等效磁极

绕组必须能切割足够多的三次谐波磁场磁力线，从而感应出足够大的三次谐波电势来。由于三次谐波的极数是基波极数的三倍，因此，谐波绕组的节距 y_3 应取基波节距的 $1/3$ 。谐波绕组可以接成单相或三相，通常小容量发电机多取单相。

因为发电机转子按一定的转速（同步速） n_1 转动，每一谐波磁通也按同样的速度 n_1 转动，但因它们具有不同于基波的极对数，所以切割绕组导体后所得到的感应电势就有不同的频率。在主绕组中感应出基波电势，而在三次谐波绕组内就能感应出具有三倍于基波频率的三次谐波电势。

另外我们从电工原理已经知道，导体内感应电势 e 的大小，是由下式决定的：

$$e = v l B$$

式中 v —— 导体相对于磁场的运动速度；

l —— 导体的有效长度；

B —— 气隙中磁场的磁通密度。

因为 v 、 l 是不变的，所以导体感应电势 e 的大小和变化波形就决定于气隙中磁密波的分布状况。也就是说磁密波的波形与电势波形是相似的。

5. 谐波绕组的结构是怎样的？

谐波绕组按排列方法，可分为集中型、分布型两种。

集中型绕组可采用整距，如图十一所示，但槽利用率低，通常在槽满率低、分数槽（即每极每相槽数 q 不等于整数）的发电机中采用。

分布型绕组常用短距，如图十二所示，槽利用率较高，因此被广泛采用。它的槽利用率虽较集中型绕组高，但就整个电机来看，仍存在着有的槽松、有的槽紧的现象。嵌谐波

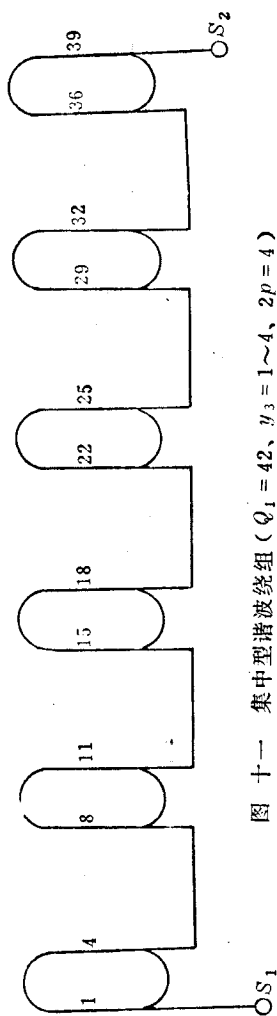


图 十一 集中型谐波绕组 ($Q_1 = 42$, $p_3 = 1 \sim 4$, $2p = 4$)

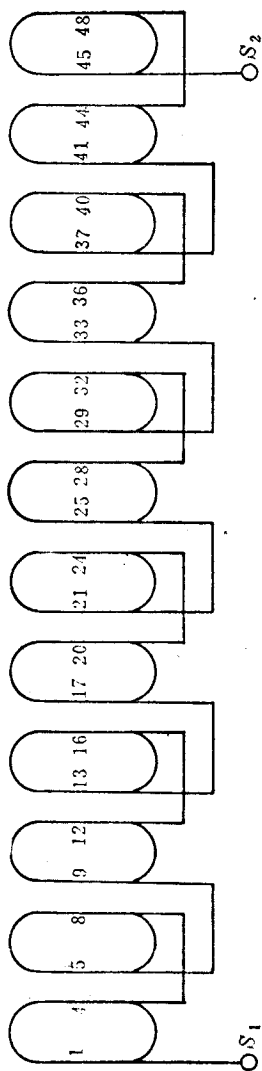


图 十二 分布型谐波绕组 ($Q_1 = 48$, $p_3 = 1 \sim 4$, $2p = 4$)

绕组的槽，槽满率高，不嵌谐波绕组的槽则槽利用率低。为了充分利用所有的定子槽空间，可将主绕组改成单双层绕组，并适当减少单层绕组的匝数，增加双层绕组的匝数，使总匝数基本上保持不变。这样一来，就可以在单层绕组中嵌放谐波绕组，提高整个电机槽的利用率。常用的 $q = 3$ 的绕组安排方式，如图十三所示（图上仅示出局部）。

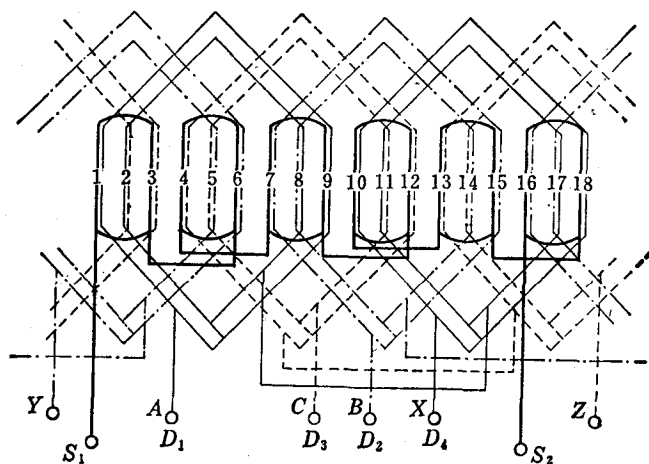


图 十三 单双层绕组、谐波绕组布置图

($Q_1 = 36$ 、 $q = 3$ 、 $2p = 4$)

6. 谐波励磁发电机是怎样自励建压的？

自励就是发电机自己供给本身所需的励磁能量。而谐波励磁发电机主要是靠附加的谐波绕组切割气隙磁场磁力线产生励磁电势。所以，谐波绕组和气隙中的三次谐波磁场合起来，可以看成是一台能发出三次谐波电势的隐极式发电机。它本身具有一定的内阻抗值，原来的励磁绕组则相当于这台

发电机的负载。

下面结合图五、图十四说明空载时发电机自励建压的过程。图十四上共有三条曲线，曲线 1、2 分别表示发电机的和谐波绕组的空载特性曲线（即磁化曲线）。它们是当发电机转速为常数、负载电流为零时，电动势 E_0 同励磁电流 I_f 间的关系曲线。而直线 3 则表示励磁回路的外加电压 E_{03} 与励磁电流 I_f 的关系，称为励磁特性。

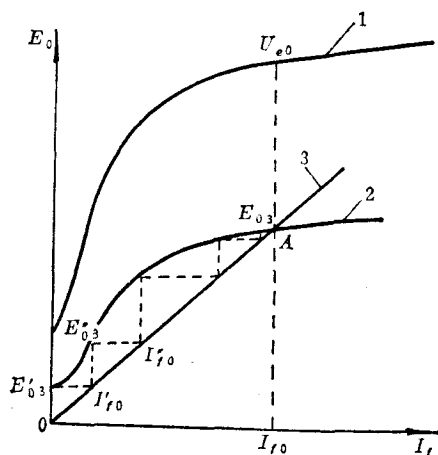


图 十四 自励过程示意图

通常，使用过的发电机，它的磁极总是存在一定的剩磁的。当发电机转子被水轮机拖动开始旋转时，在谐波绕组中便感应出一个比较小的三次谐波电势 E'_{03} ，如图十四上谐波绕组空载特性曲线 2 对应 $I_f = 0$ 时的电势值。这个电势经过整流后，在磁极线圈（转子励磁绕组）中产生直流励磁电流 I'_{f0} 。这一电流加强了转子磁极磁场，也就是同时加强了基波和三次谐波两个磁场。于是在谐波绕组中又感应出较大的

谐波电势 E''_3 ，这个谐波电势产生的励磁电流 I'_3 。又进一步加强了磁极磁场，如此循环升压，随着励磁电流的增大，磁路趋向饱和，于是发电机三次谐波电势和励磁电流增长的速度大大减小。最后电压和励磁电流均达到一个稳定数值，也就是图十四上曲线2、3的交点A所对应的 E_{e0} 和 I_{f0} ，所以这个交点称为稳定运行点。与此同时，在励磁电流增长过程中，发电机的空载电压也按照曲线1的变化规律相应地增长起来。对应稳定运行点时的励磁电流为 I_{f0} ，这时发电机的端电压为 U_{e0} 。改变励磁回路电阻或是调节自动励磁调节器的控制信号，就可以改变直线3的斜率，这时它与曲线2的交点就会改变，也就是改变了发电机的运行电压。

7. 什么是同步发电机的电枢反应？电枢反应对气隙磁场有什么影响？

要了解谐波励磁发电机在负载下的工作状况，必须先复习一下电机的电枢反应。

电机原理告诉我们，发电机带上负载后，在电枢绕组中，就有负载电流流过，这个电流将产生电枢磁势。电枢磁势对磁极磁势（即转子磁势）所起的作用称为同步发电机的电枢反应。通常将电枢磁势称做电枢反应磁势。电枢反应磁势在一般情况下是一个接近正弦分布的波形。下面再简要回顾一下在不同性质负载下电枢反应的情况。

我们知道，一般所谓负载（又称负荷）就是指从发电机或电网获得电能而工作的用电设备。根据用电的性质，负载可分为三类，即电阻性负载、电感性负载和电容性负载。有的用电设备是只具有一种性质的负载，例如白炽灯（常称钨丝灯泡）和电热设备是电阻性负载，有的是具有两种性质的