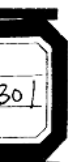


电机原理同步电机部分

(下 册)



清华大学电力系电机教研组

1973. 1.

第四章 同步发电机的基本电磁关系

第一节 同步发电机的无载特性及负载电流对端电压的影响

前边各章中，我们已经分别讨论了同步发电机的基本结构、磁路、电枢绕组的电势及磁势等。在这一基础上，我们就可进一步讨论发电机在运行中的问题。制造发电机的目的是为了供给运行部门发电，因此，制造发电机时，必须充分了解和满足发电运行的要求，以便给发电部门提供技术经济指标均较良好的发电机。

发电机的电磁关系是了解发电机制造和运行要求的理论基础。因此，学习发电机的基本电磁关系，解决同步电机制造和运行上的许多问题，有着重要的意义。

(一) 同步发电机的无载特性

当原动机把同步发电机拖动到额定转速后，如果在发电机转子上加上励磁电流时，就会在气隙中产生磁通，电枢绕组切割气隙磁通，就会在三相电枢绕组里产生对称的三相电势。这时发电机还没有带上负载，我们用电压表去量绕组的出线端，就得到这个电势的数值，这个电势称为发电机的无载电势，用 E_0 来表示。增加励磁电流 i_f (它的数值可用电流表量得)，无载电势 E_0 也会增加，它们的关系如图 4-1 所示。

这条曲线称为发电机的无载特性曲线，它反映了无载电势 E_0 和励磁电流 i_f 的关系。这条曲线与第二章中图 2-10 所示的磁化特性曲线相比较时，可以看出，它们具有完全相似的形状，这是必然的。因为： $E_0 = 4.44 f W_1 k_{d1} \phi_0$

[参阅第二章第五节，三相双层短距、分布绕组基波相电势]

$$E_{\phi 1} = \frac{2p\tau}{c} \times 4.44 f W_1 \phi_1 k_{d1} p_1, \text{ 当发电机空}$$



载时，基波相电势 $E_{\phi 1}$ 就是 E_0 ，

基波磁通 ϕ_1 就是 ϕ_0 ，每相绕

组串联匝数 $W_1 = \frac{2pq}{a} W_k$)

$$E_0 = W_f i_f$$

在已经制造好的电机里，频

率 f 、每相串联匝数 W_1 、绕组

系数 k_{dp1} 和激磁绕组匝数

W_f 等都是常数，因此：

$$E_0 \propto \phi_0, i_f \propto F_0$$

由于 F_0 与 i_f 成正比，只差一个激磁绕组的匝数 W_f 倍，因此无载特性曲线的横座标可以用 F_0 代替 i_f 。

从上面的分析知道，无载特性反映了发电机的磁化特性，而磁化特性不管无载或是负载都能用，所以从这个意义上看，无载特性就不仅用在无载的情况了，而且也可以用于发电机在其他运行条件下，因此，无载特性是一条很重要的特性。

(二) 负载电流对端电压的影响

调节发电机的激磁电流，使其无载电压为额定值，然后保持激磁电流不变，给发电机分别加上可变的电阻负载，电感负载或电容负载，同时观察发电机端电压和负载电流变化的情况。下表是某一小发电机实际量测的数。

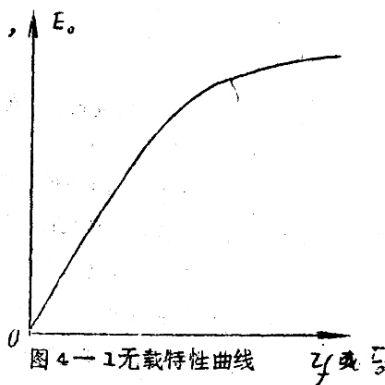


图 4-1 无载特性曲线

电阻负载		电感负载		电容负载	
电压	电流	电压	电流	电压	电流
伏	安	伏	安	伏	安
220	0	220	0	220	0
203	2.23	175	1.68	240	1.14
167	4.18	138	3.00	245	1.72
136	5.07	106	3.82	258	2.59
106	5.47	50	5.13	268	3.47
				277	4.74
				285	5.71

为了便于比较，我们再把这三种不同负载情况下的电压和电流画成曲线，如图4-2所示，根据这些曲线或数据，可以看出，发电机的端电压随着负载电流的变化而变化，而且在三种不同负载的情况下，其变化的规律也是不同的：

(1)在电阻负载时，负载电流增大，端电压下降；(2)在电感负载时，负载电流增大，端电压下降更严重；(3)在电容负载时，负载电流增大，端电压不但下降，反而上升。这说明了，即便是同一台发电机，激磁电流一样，负载电流也一样，由于负载的性质不同，端电压就不同。也就是说，发电机端电压的变化，不仅与负载电流的大小有关，还与负载的性质有关。为什么会发生这种现象呢？只有进一步研究发电机的内部电磁关系，才能了解这个问题的物理本质。

第二节 隐极同步发电机的负载运行——磁势电势向量图

前面我们讨论了发电机的无载运行，并初步观察了发电机在不同性质的负载下端电压的变化。同步发电机带上负载后，与无载情况不

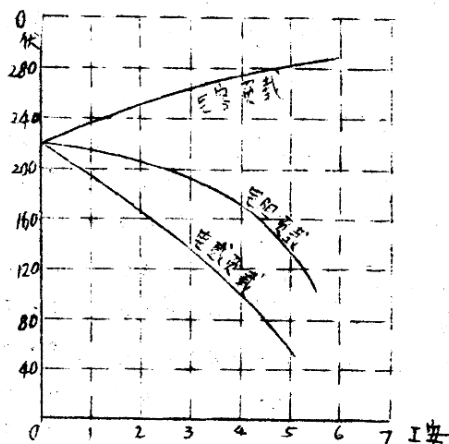


图 4-2

同了，这时电枢绕组里有了电流，这个电流在电枢绕组里产生磁势，改变了同步发电机在无载时的电磁关系。因此，要分析发电机的负载运行，就是要抓住电流在电枢绕组里对电机内部电磁关系所产生的影响，从而认识在负载时的整个电磁关系。只有了解了这个电磁关系，才能解释上节从试验中观察到的现象。

在分析负载运行之前，系统地把同步发电机的无载运行情况整理一下，以便在这个基础上，考虑负载运行时，电枢电流的影响。

(一) 无载时的电磁关系

无载时的电磁关系是这样的：发电机的转子由原动机拖动，以同步速旋转；在转子的激磁绕组里加入激磁电流 i_f ，产生激磁磁势 F_f ，因而在气隙中产生旋转磁通（它的磁密分布波形有待讨论），于是在三相定子电枢绕组里产生了对称的三相电势 E 。

无载时，发电机的无载电势 E 。基本上是随着时间增加而按正弦

规律交变的。这是因为，我们在设计制造电机时，已尽量使激磁电流产生的气隙磁密，沿电枢圆周的空间分布接近正弦形，同时，又通过电枢绕组的分布和短距，以及三相联接等措施，使气隙磁密中的高次谐波产生的高次谐波电势大大削弱的缘故。

由于无载电势只是它的基波才是有用的，因此，在气隙磁密和激磁磁势中，也只有基波磁密和基波激磁磁势才是有用的。为了分析简单些，在激磁磁势中就取它的基波值。

隐极式汽轮发电机转子激磁绕组的安排如图4—3。激磁绕组放

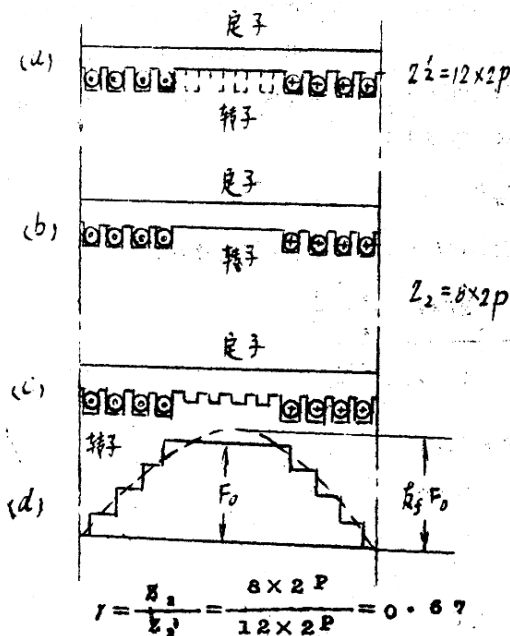


图4—3

在磁极两边的槽内，为了使得激磁磁势的波形能够接近正弦形，磁极中间部分不放激磁绕组。在实际的电机中，中间这部分或者不开槽，形成了所谓的大齿如图4—3 (b)所示，或者开成小槽如图4—3 (c)所示，以便改善发电机的冷却性能。

激磁绕组这样安排后，激磁磁势的分布波形是图4—3 (d)所示的阶梯形波形，它的最大值 F_0 为：

$$F_0 = \sqrt{f} i_f \quad \text{安匝/极}$$

其中： W_f 为每极激磁绕组的匝数；

i_f 为激磁电流的安培数。

利用付氏级数，把这个阶梯形磁势的基波分出来，其幅值为 $k_f F_0$ ，系数 k_f 称为电机的激磁波形系数，它代表了激磁磁势中基波幅值与实际磁势的最大值之比。在均匀气隙并且不考虑饱和的情况下，实际上它也是激磁磁势产生的气隙磁密中基波幅值与实际气隙磁密的最大值之比。 k_f 的数值可按下式计算（推导过程不介绍了，可参考电机设计书籍）：

$$k_f = \frac{4}{\pi} k_{w2}$$

k_{w2} 为激磁绕组的分布系数，它的值为：

$$k_{w2} = \frac{2p \sin \frac{Z_2}{Z_2'} \frac{\pi}{2}}{Z_2 \sin \frac{p\pi}{Z_2'}}$$

p 是同步电机的极对数

Z_2' 是同步电机转子槽的分度数（图4—3 a）

Z_2 总槽数。

以图 4—3 的这个实际例子来看：

$$k_{w2} = \frac{2p \sin \frac{8 \times 2p}{12 \times 2p} \times \frac{\pi}{2}}{8 \times 2p \sin \frac{p\pi}{12 \times 2p}} = \frac{\sin 60^\circ}{8 \sin 7.5^\circ} = 0.822$$

$$k_f = \frac{4}{\pi} \times 0.822 = 1.05$$

k_f 值与转子槽数有关，但实际上与比值 $\gamma = Z_2 / Z_1$ 的关系更密切。当这个比值 γ 给定后， k_f 的近似数值就可以从下表中找出。

$\gamma = \frac{Z_2}{Z_1}$	0.6	0.66	0.7	0.75	0.8
k_f^*	1.09	1.06	1.03	1	0.965

*表中列的数为近似值。

从表中可以看出，当 $\gamma = 0.75$ 时， k_f 的数值近于 1，也就是说，激磁磁势波形是比较接近于正弦波的。汽轮发电机的激磁绕组一般也就按 $\gamma = 0.6 \sim 0.8$ 这比值范围来设计的。如北重厂生产的五万千瓦双水内冷汽轮发电机，其 $\gamma = 28 / 42 = 0.665$ 。

当把激磁波形系数 k_f 找出后，激磁磁势 F_0 乘以 k_f ，即 $k_f F_0$ ，就是激磁磁势中的基波分量的幅值，它在电机里的空间分布已是正弦形的了（见图 4—3）。

现在再回过头来看隐极同步发电机的无载运行，见图 4—4。图 4—4 (a) 是一个用等值绕组来画的发电机的原理图。图中无论是电枢绕组或激磁绕组都用等值的集中整距线圈来代替（定子每相等值线圈的匝数为 $W_1 k_{dp1}$ ，转子为 $k_f W_f$ 匝）。作图的那一瞬间

N极正对着A相线圈边A。激磁磁势是 f^F_0 和由 f^F_0 产生的气隙磁密 B_0 ，都用空间向量表示（由于是均匀气隙，所以 B_0 与 f^F_0 同相位）。

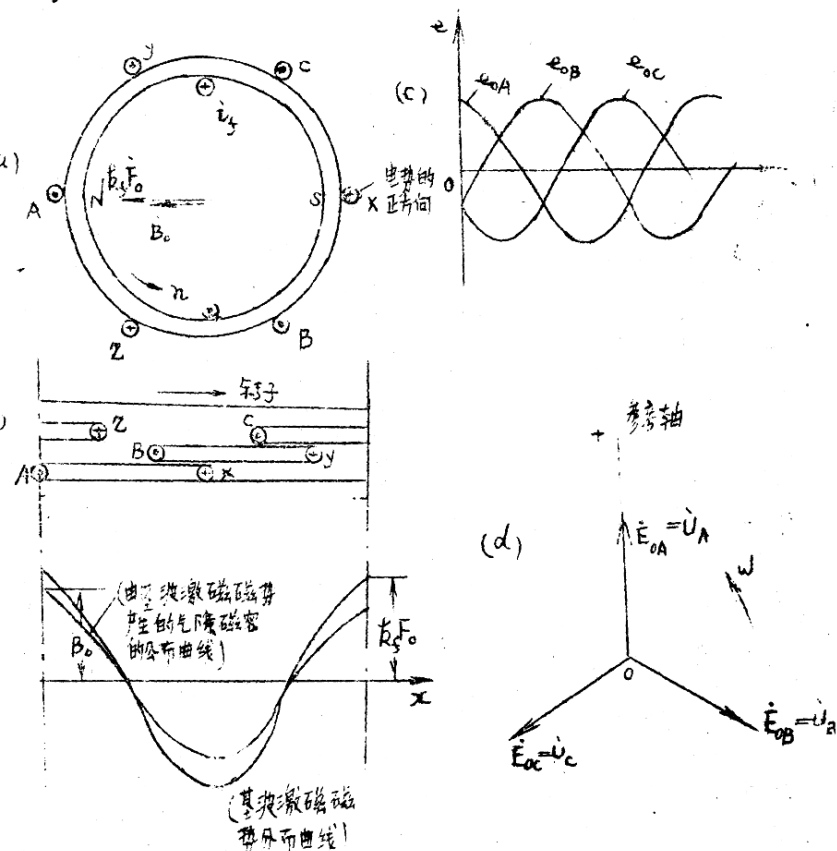


图 4—4

图 4—4 (b) 是它的展开图，激磁磁势 $f F_0$ 和气隙磁密 B_0 。以空间分布图画出，目的使我们能形象地用右手定则找出在电极绕组里感应的各相电势。

图 4—4 (c) 是各相感应电势的瞬时值， $t = 0$ 就是对应于作图 4—4 (a) 和 (b) 的那一瞬间。

图 4—4 (d) 是把各相的电势用时间向量表示，各相电势的瞬时值，就是各相电势向量分别在参考轴上的投影值。图 4—4 (d) 中电势向量取 $t = 0$ 瞬间的位置，也就是对应于图 4—4 (a) (b) 所示的空间位置。

无载时，端电压 U 就等于无载激磁电势 E_0 。

需要指出，在研究和分析发电机的许多问题时，有时需要用空间向量来代表在空间正弦分布的量，有时需要用时间向量来代表随时间而正弦交变的量，有时又需要同时利用这两种向量。过去我们在分析随时间按正弦规律变化的交流电流、电压等时，用时间向量的办法，有许多优点。同样，我们在分析电机的许多问题中，也会进一步体会到，同时利用时间向量和空间向量的好处。但同时也带来了新的问题，那就是，我们在研究电机的问题时，必须注意和区别那些是随时间按正弦变化的时间向量，那些是在空间正弦分布的空间向量，以免引起误解，造成错误。

(二) 负载时的电磁关系

当发电机带上对称的负载后，在电极绕组里将有三相对称的电流 I_A ， I_B 及 I_C 。由于这些电流的存在，发电机的端电压 U 将不再等于无载电势 E_0 了。

为什么不相等了昵？有两方面的原因：第一，由于电极绕组有电流，电流在电极绕组里产生了电阻和漏电抗的压降。电阻压降大家是

比较熟悉的；漏电抗压降是怎么引起的呢？这主要是由槽部和端接部分的交变漏磁通所感应的。电阻和漏电抗压降的存在，使得端电压不等于气隙旋转磁通在电枢绕组里感应的气隙电势。第二，由于电枢绕组有电流，电流在电枢绕组里产生了电枢磁势，改变了无载时由激磁磁势产生的气隙磁通（电枢磁势的这种影响称为“电枢反应”）。因此，加负载后，尽管激磁电流（它产生激磁磁势）没有变，气隙旋转磁通也改变了，在电枢绕组里感应的电势也不是无载时的数值 E_0 了。这两个原因加在一起，使负载时的端电压不再等于无载时的电势 E_0 。下面我们分别详细地分析引起端电压变化的这两个因素。在一般情况下，同步发电机电枢端点情况（即端电压 U ，电流 I 和功率因数 $\cos\varphi$ ）是比较容易知道的。我们就从这里出发（寻找激磁电流的大小），来讨论这个问题。当我们掌握了同步发电机的电磁关系后，不从电枢端点出发，而从激磁电流出发，在给定负载阻抗下，寻找负载电流和端电压的大小，即电枢端点的情况，也是可以的。在实际工作中，这两种计算情况，我们都会经常碰到。

第一个原因：

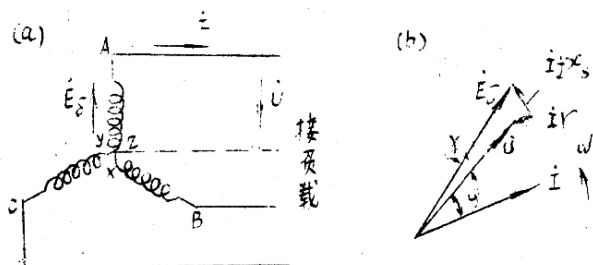


图 4—5
4—10

在负载时，定子联接图如图4—5(a)。根据这个电路图，端电压 $\dot{U}$ 等于感应的气隙电势 $\dot{E}_g$ 减去电阻压降 $\dot{I}r$ 和漏电抗压降 $\dot{I}jx_s$ ，即：

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{E}_g - \dot{I}r - \dot{I}jx_s = \dot{E}_g - \dot{I}(r + jx_s) \\ &= \dot{E}_g - \dot{I}Z_s\end{aligned}$$

式中： $Z_s = r + jx_s$ 称为同步电机的电枢漏阻抗

r 为电枢绕组交流电阻， x_s 为电枢绕组漏电抗。

以上均按每相值计算，因为发电机带有对称的三相负载，因此，只研究一相即可，一般选A相而言。

如果给定负载情况 U 、 I 、 $\cos\varphi$ ，电枢漏阻抗也知道的话，气隙电势 $\dot{E}_g$ 可从下式算出，即 $\dot{E}_g = \dot{U} + \dot{I}Z_s$ ，它的向量图如图4—5(b)。显然，这是一个时间向量图。

第二个原因：

在这里，关键是看电枢磁势对激磁磁势产生什么影响，即“电枢反应”是什么性质。

从对电枢磁势的分析知道，电枢磁势是分为基波和许多高次谐波的。它们不但极数不同，转速、转向也都各不相同。基波电枢磁势与转子激磁磁势同极数，同转向，同速度，也就是说，它们之间没有相对运动，因此电枢基波磁势对激磁磁势产生着固定的作用。高次谐波电枢磁势比转子激磁磁势的极数多（为 p ），转速低（为 n_1/p ），转向与转子的转向有同有异。因此它们与转子激磁磁势有相对运动，又有固定的作用。更重要的，由于高次谐波电枢磁势极数多，与激磁磁势走的不是同一条路径，因此，我们不能把高次谐波电枢磁势加到激磁磁势上去。对高次谐波电枢磁势所产生的磁通怎样处理呢？因为它

能在电枢绕组里感应基波频率的电势（极数为 νp ，转速为 n_1 / ν

所以电势频率 $f_p = \frac{\nu p \cdot \frac{n}{\nu}}{60} = \frac{p n}{60} = f$ ），而且这个电势

又与电枢电流成正比，我们仍把它算在漏磁通之列，称为差漏磁通，它所表现的电抗叫差漏抗。槽漏磁通和端部漏磁通只局限在定子槽和端部的附近，这些磁通不越过气隙，当然更谈不上进入转子的问題。但是差漏磁通却是通过气隙，甚至有些已跨过气隙进入转子，因此，差漏抗和槽漏抗、端接漏抗的性质是不一样的。虽然它们的性质彼此不一样，但是，它们都在电枢绕组里感应基波频率的电势，而且这些电势的大小又都和电枢绕组的电流成正比。根据这个理由，把槽漏抗、端接漏抗和差漏抗三者加在一起，叫同步机定子绕组的漏电抗，用 x_s 表示（其中槽漏抗和端接漏抗是主要的）。

高次谐波电枢磁势的作用既然已考虑到漏电抗里，剩下来的就只要研究电枢基波磁势对激磁磁势的作用，即“电枢反应”了。由于这个缘故，电枢基波磁势又常叫“电枢反应磁势”。

要研究电枢基波磁势对激磁磁势的作用，首先要弄清它们的情况，即不仅是它们的波形、幅值，还有它们在空间的位置。推而广之，要把同步发电机在负载时的整个空间气隙量，包括气隙磁密在内，都弄清楚。

上面说到，电枢基波磁势与激磁磁势没有相对运动，发生着固定的关系。我们应该研究一下是什么样的关系。要摸清整个空间气隙量的情况，必须先知道它们之间存在的关系。

从电机主磁路的情况来看，跨过气隙的气隙磁通，它既链上激磁绕组，也链上电枢绕组。根据磁路的全电流定律来看，气隙磁通 B 应由激磁磁势 $f F$ 加上电枢基波磁势 F_a ，或称合成磁势 R 产生。

这就是各空间气隙量存在的关系。

各个气隙量在气隙空间上都以正弦分布，极数又相同，在这种情况下，用空间向量来表示，会使分析工作大大简化。如果以 $\dot{E}_f$ 代表正弦波激磁磁势的空间向量，以 $\dot{F}_a$ 代表电枢基波磁势空间向量，以 $\dot{R}$ 代表合成磁势空间向量，以 $\dot{B}_\delta$ 代表气隙磁密空间向量，那么各气隙量的关系可以写成下列空间向量等式：

$$\dot{E}_f + \dot{F}_a = \dot{R}$$

而 $\dot{R}$ 产生 $\dot{B}_\delta$ 的关系，就象无载时 $\dot{E}_f$ 产生 $\dot{B}_0$ 的关系一样，即满足电机磁化特性的关系，而且 $\dot{B}_\delta$ 在电枢绕组感应的电势 $\dot{E}_\delta$ ，它与 $\dot{R}$ 的关系，也满足电机无载特性的关系。

各气隙量间的关系是知道了。但它们的大小和在空间上的位置怎么能够知道呢？

空间上的气隙量与电枢绕组和激磁绕组上的电量有一定的联系。例如电枢绕组上的气隙电势 $\dot{E}_\delta$ 是由气隙磁密 $\dot{B}_\delta$ 产生的；电枢基波磁势 $\dot{F}_a$ 是由电枢电流 I 产生的，激磁绕组的电流 i_f 产生激磁磁势 $\dot{E}_f$ 等。这些气隙量和与之对应的电量都通过一定的规律联系着的。因此，根据已知的电枢绕组的电量，便能寻找出气隙量的大小和位置来。

寻找的方法和步骤参看图 4—6。出发点根据由电枢端点情况找出来的电枢电量向量图，见图 4—6 (a)，即图 4—5 (b) 所示的向量图。不过在这里，使 $\dot{E}_\delta$ 与参考轴重合，即选定 A 相气隙电势 $\dot{E}_\delta$ 为最大值的那一瞬间来寻找气隙量。由于各气隙量没有相对运动，无论选取那一个瞬间来寻找气隙量，对于气隙量的相对位置来说，都不会有影响。

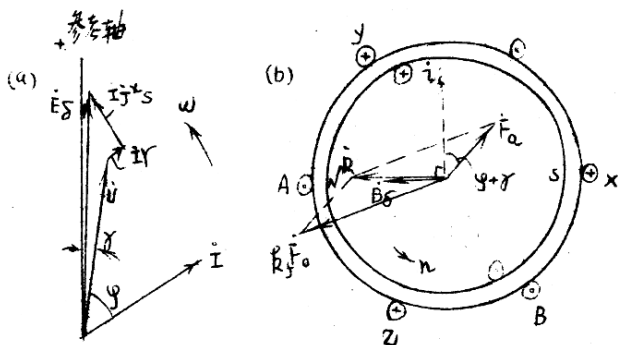


图 4—6

然后，我们来寻找气隙量的大小和位置：

(1) 产生气隙电势 E_s 的气隙磁密 B_s ，其大小为：

$$\phi_s = \frac{E_s}{4.44 f W_1 k_{dp1}} \quad B_s = \frac{\phi_s}{\frac{2}{\pi} l \tau}$$

B_s 的空间位置（正幅值所在位置）这时正对 A 相绕组圈边 A，因为 B_s 在这个位置上，A 相正好感应最大的气隙电势值，符合图 4—6 (a) 给定的情况。

这样，就把空间向量 B_s 画在圈边 A 的位置上，如图 4—6 (b) 所示。

(2) 根据主磁路的磁化特性，由 B_s 找出 R 的数值。产生气隙磁密 B_s 的合成磁密 R 在空间上应该有相同的位置，因此在空间向量图上 R 与 B_s 同相，如图 4—6 (b) 所示。

(3) 由电枢电流 I 产生的电枢基波磁势 F_a ，其大小为：

$$F_a = 1.35 \frac{W_1 k_{dp1}}{p} I$$

上式在电枢磁势里介绍过。

F_a 的位置决定于电流 I 的相位。我们知道，当某相电流 I 达最大值时，磁势 F_a 就正在该相绕组轴线上。从图 4—6 (a) 看出，A 相电流 I 再过时间相角 $(\gamma + \varphi)$ 后，就达最大值，那么，这就是说，磁势 F_a 离开 A 相绕组轴线尚有空间相角 $(\gamma + \varphi)$ 的距离。

F_a 的位置如图 4—6 (b) 所示。

(4) 激磁磁势 F_f 。可以根据下式得到：

$$F_f + F_a = R$$

F_f 的空间向量如图 4—6 (b) 所示。

最后，我们根据气隙量来寻找转子的电量，找到激磁电流 $i_f = F_f / W_f$ 。如果保持这个激磁电流 i_f 不变，在无载特性上找到的无载电势 E_0 ，就是无载运行时的端电压，它不同于负载时的端电压 U ，同样说明了加负载后端电压的变化。

这样，就完成了从给定电枢端点各电量找出激磁电流以及电枢端电压变化的全部过程。

把这些关系归纳起来，隐极式同步发电机的电磁关系可以表达如下：

$$i_f \rightarrow F_f \xrightarrow{R} \dot{B}_0 \rightarrow \dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} Z_s$$

$$\text{而无载时为 } i_f \rightarrow F_f \rightarrow \dot{B}_0 \rightarrow \dot{E}_0$$

(三) 磁势电势向量图

上述的同步电机负载运行时电磁关系的全过程，过于复杂，应用起来不方便，因此有必要弄得简单些，这里有两个措施：

1、图 4—6 (a) 是同步电机带负载时的时间向量图，图 4—6

(b) 是它的空间向量图，他们是两种不同性质的向量图。但是，这两个向量图之间还是有很密切的关系的，例如，图 4—6 (a) 里的气隙电势 E_g 是由图 4—6 (b) 里的气隙磁密 B_g 所感应的；图 4—6 (b) 里的电枢基波磁势 F_a 又是由图 4—6 (a) 里的电枢电流 I 产生的。再看图 4—6 (b) 知道，合成磁势 R 和电枢基波磁势 F_a 之间的夹角为 $(90^\circ + \gamma + \varphi)$ ；图 4—6 (a) 知道， E_g 和 I 之间的夹角为 $(\gamma + \varphi)$ 。这样，我们可以把图 4—6 (a) 和图 4—6 (b) 两种性质不同的向量图画在一起，如图 4—7 所示。把图 4—6 (a) 和 (b) 画在一起的时候，应让电流 I 和磁势 F_a 同方向；气隙磁密 B_g 产生的气隙电势 E_g 画在磁密 B_g 的 90° 后面。图 4—7 同时表明了同步电机的电磁关系，所以叫隐极式发电机磁势电势向量图。

我们虽然把图 4—6 (a) 和 (b) 两个向量图画在一起，但物理意义是没有什么改变的，它们各自还是各自的量，仅在作图上方便了一些。但是，这样做容易使时间量与空间量混淆不清，造成错误，所以应该提起我们注意。只要注意了时间量和空间量的区分是并不困难的。

2、直接用无载特性从合成磁势 R 求气隙电势 E_g ，代替上述的用磁化特性从 R 求 B_g ，再从 B_g 计算 E_g 的做法，见图 4—7。

无载时，发电机的激磁磁势在气隙中产生了气隙磁密，因而在电枢绕组中感应出无载电势，它们之间的关系就是无载特性曲线。发电机带上负载后，气隙磁密则是由合成磁密 R 产生的，这时在电枢绕组中感应的电势是气隙电势 E_g 。由于在这两种情况下，主磁通所走的磁路并没有改变，因此，气隙电势 E_g 和合成磁势 R 的关系也应符合无载特性曲线的关系，也就是说，如果已知合成磁势 R 时，从无载特