

第六章 同步电动机

第一节 概 述

(一) 同步电动机有二个独特的性质：1) 在正常运行时功率因数高， $\cos \varphi$ 可为 1；过激状态下可以在领先的功率因数下工作，对电网来说它是一个电容性的负载。2) 它的转速与电网频率有严格的同步关系，不随机械负载的变化而变化。由于这两个独特的优点，使同步电动机在现代化工业企业中被广泛采用。特别是那些单机容量较大的生产机械中，如化肥厂拖动压缩机的原动机，功率大到数千瓩，多采用同步电动机。在生产自动化的某些装置和仪表中，往往对速度有严格要求，在这种情况下，也多采用小型同步电动机作为拖动动力。

由于同步电动机有上述优点，为了提高电网的供电质量和降低线路损耗，我国一些地区已在着手进行“异步电动机同步化”的工作（如北京现在正在实行）。所谓“同步化”，就是在大型绕线式异步电动机的滑环上，通入直流激磁电流，使它变成同步电动机。这样不仅提高了电网的供电质量，而且由于 $\cos \varphi$ 的提高，电动机的出力也提高了（在同样的定子电流下）。

在电力系统中，为了调节电网的尖峰负荷，近年来在某些有水库的水电站用了“蓄能机机组”。这种机组，在尖峰负荷期间放水发电，同步机作发电机运行；在低负荷期间，同步机作电动机运行，将下游的水抽回到水库去。这种同步电动机的单机容量往往在一万瓩以上，现在我国已有这种机组。

(二) 同步电动机的结构与同步发电机基本相同。但同步电动机多采用凸极式的，并且为了能自启动，在转子磁极铁轭上开槽，里面装了导条，导条的两端再用端环联接起来，构成一个与异步电机的鼠笼

相类似的启动绕组（也称阻尼绕组）。

第二节 同步电动机的运行原理

作为一个电动机，它有一个合闸到电源，从静止到旋转的启动过程。当转速达到稳定后，而又没有加上机械负载。这是一个无载的运行状态。及至带上了机械负载，这就是负载的运行了。在负载运行中，我们应该了解它的力矩平衡关系，能量转换关系，和在不同的激磁下输入电流与负载大小的关系等。对别的电动机，我们还应该知道转速与负载的关系，但对同步电动机来说，转速是不变的，倒是应该了解一下它的过载能力，看究竟超过多少额定负载，电动机就会被拉出同步，因而无法运行。

上面是分析一个电动机的一般程序，但是对同步电动机来说，有点例外。由于它本身没有启动转矩，于是启动就成了一个专门的问题，我们把这个问题的放到后面去。现在，就从一个同步电机并联到电网后说起，看它究竟能不能作同步电动机运行，怎样就会成为同步电动机运行。

（一）同步电动机运行的可逆原理

在上一章，我们曾详细分析过，一个同步发电机在理想条件下并联到无限大电网后，是怎样带上电的负载，成为发电机运行的。在这里，不妨简单地复习一下，参看第五章第三节图 5—5（a）、（b）、（c）。（a）是在理想条件下，并联到电网后的向量图，（b）和（c）是在理想条件下并联到电网后，调节了一下同步发电机的激磁的向量图。在这里， E_{fd}' 都和 B_0 同相，即角度 $\theta' = 0$ ，皆属无载状态。

后来怎样成了发电机运行的呢？参看图 5—6，成为发电机运行的根本原因，是原动机开大了汽门（水门、油门），增加了驱动力矩

M_1 ，使转子（ $\dot{B}_0$ 标志转子位置）比气隙磁密 $\dot{B}_\delta$ 走前了一个角度 θ' 。 θ' 的出现，导致了一系列的变化，出现了一个电磁功率 P_M 将机械功率转变成了电功率，然后从电枢绕组输送出去。

并联到电网上的同步发电机能不能成为电动机呢？关键的问题就在于如果我们把一个机械负载加到这个同步电机上，这个电机能不能产生一个电磁力矩拖着这个机械负载转动，还是说，被机械负载一制动，电机也就停下来了。

那么，我们就将一个机械负载加到这个已经并联到电网上的同步电机去看一看（这时原动机或者让它空转，或者摘去。总之，原动机不起作用了）。由于机械负载一制动，同步电机的转子比气隙磁密 $\dot{B}_\delta$ 立刻就落后一个角度 θ' 。对比于图 5—6 发电机的向量图，出现了另外一种形式的向量图，如图 6—1 所示。

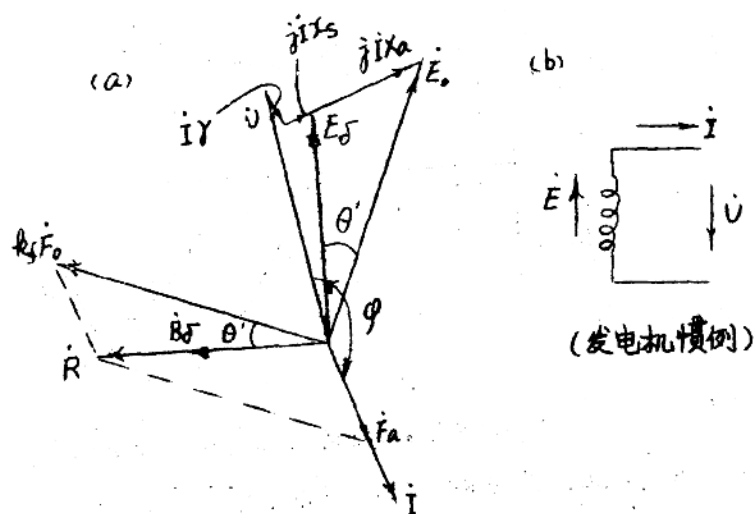


图 6—1

从这个向量图出发，我们将要分析几个判断同步电机是不是作为电动机运行的问题。

1) 产生的电磁力矩 M ，是不是拖动的力矩。

依据这个向量图，同步电机会不会产生电磁力矩，能够产生的话，它是什么性质的？

我们将空间向量画成实际的空间分布图，如图 6-2 对比于图 5-7。然后，根据左手定则，很容易就找出来，它能够产生电磁力矩，而且是一个拖动的力矩，也就是一个电动机的力矩。

无需再作证明，电磁力矩公式必然仍是：

$$\Delta l = \frac{\pi p^2}{2} \Phi_B k_f \dot{F}_0 \sin \theta'$$

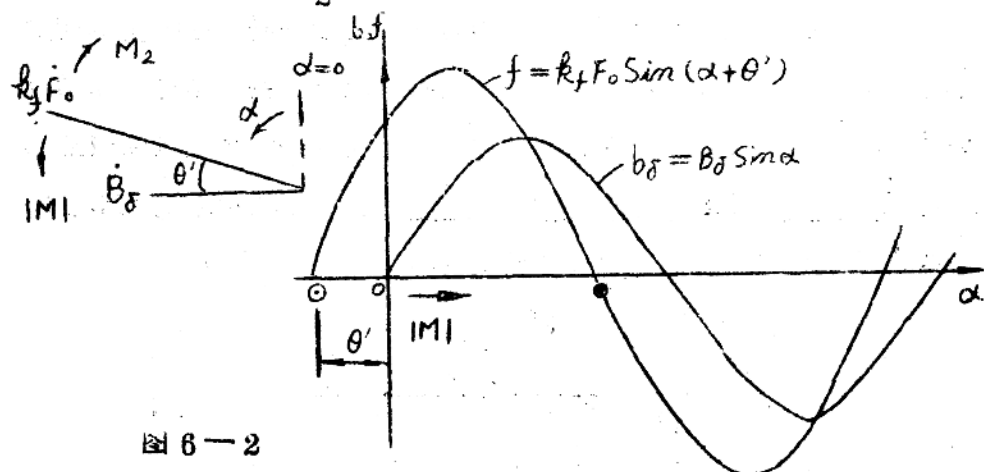


图 6-2

因为 θ' 本来是一个连续变量，在发电机情况， $k_f \dot{F}_0$ 领先 B_δ ，若认为这时的 θ' 为正，产生的制动电磁力矩亦为正的话，那么，在电动机情况， $k_f \dot{F}_0$ 落后 B_δ ， θ' 就应为负值，代入上式，得到的 Δl 亦为负值，负值的 Δl 自然就是拖动力矩了。在这种情况下，力矩平衡如下式：

$$|\Delta l| = \Delta l_2 + \Delta l_0$$

式中 Δl_2 是机械负载的制动力矩。

Δl_0 是无载损耗（包括风阻摩擦损耗和铁损耗）力矩。

2. 经过电磁功率 P_M 的功率转变是不是产生了机械功率。

在发电机运行中证明过的公式，在电动机运行都可以应用，只需将 θ' 令为负值，因此电磁功率公式仍为：

$$P_M = M \Omega = m \frac{E_0 B_g}{X_c} \sin \theta'$$

若以功率角 θ 和端电压 U 表示，在忽略定子电阻 r 的情况下，在隐极机为

$$P_M \approx m \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta$$

在凸极机为

$$P_M = m \left[\frac{E_0 U}{X_d} \sin \theta + U^2 \frac{(X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\theta \right]$$

负值的 θ' 或 θ ，算得的 P_M 值亦为负值，负值 P_M 表示电磁功率 P_M 是将电功率转变成了机械功率。在这种情况下，电磁功率 $|P_M|$

$$= |M| \Omega = M_s \Omega + M_0 \Omega = P_s + P_0$$

式中 $|M| \Omega$ 为产生的机械功率。

3) 经过电枢绕组出线端的电功率是不是一个输入功率。

图6-1的向量图是按发电机的习惯正方向画的，这个正方向如图6-1(b)所示。在这个正方向下， $\dot{U}$ 和 $\dot{I}$ 间的功率因数角 φ ，如果小于 90° ，电功率 $P = m U I \cos \varphi$ 是正值，这表示将电功率从同步电机的电枢绕组送出。

从图6-1看出，在这 φ 是大于 90° 的，因此，电功率 $P = m U I \cos \varphi$ 是一个负值。

这意味着电功率不是从电枢绕组输出到电网，而是从电网输入到电枢绕组。这个结果并不意外，从能量守恒来看，还非是这样不可，否则通过电磁功率转变为机械功率的那个功率就没有来源了。

在电路分析中，看惯了 $\varphi < 90^\circ$ 的情况。所以按发电机的习惯正方向来表示电动机运行，就看不惯了。这个问题是好解决的。把电流的规定正方向倒一下就是了，如图 6-3 (b) 正方向的改变，并不会影响事物的本质。

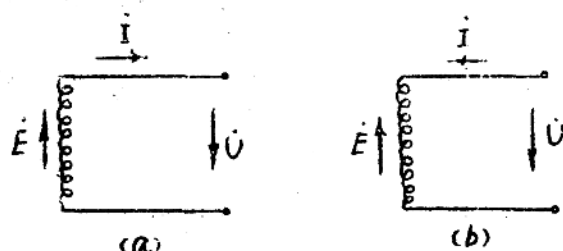


图 6-3

根据图 6-3 (b) 的正方向，图 6-1 的同量图将变成如图 6-4 的样子。在这里：

$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}(\gamma + jX_s + jX_a) = \dot{E}_0 + \dot{I}(\gamma + jX_c) = \dot{E}_0 + \dot{I}Z_c$ ，但是要注意，由于 $\dot{I}$ 和 $\dot{E}$ 的正方向不同， $\dot{I}$ 和 $\dot{E}_a$ 也不同向了。

电流的正方向改变后， φ 角就小于 90° 了。并且很容易看出来，在图 6-4 的情况下，这个电流还是容性的呢。

这时的电功率也就是正值了，正值电功率就表示从电网输入到电机的意思。我们把输入功率

用 P_1 来表示，因此 $P_1 = m U I \cos \varphi$

在这种情况下，根据能量守恒（不必另外再从同量图出发来证明了）。也知：

$$P_1 - m I^2 \gamma = |P_M|$$

综合上述情况，证明图 6-4 的运行情况确实就是电动机的

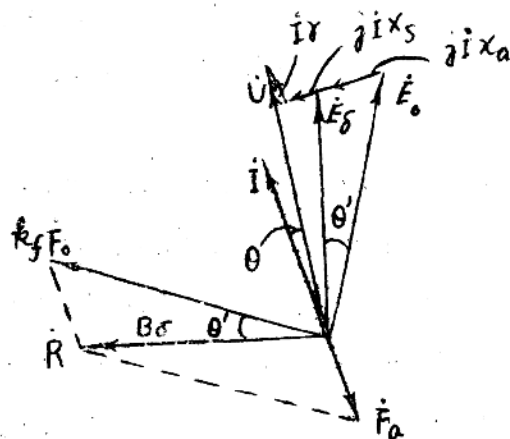
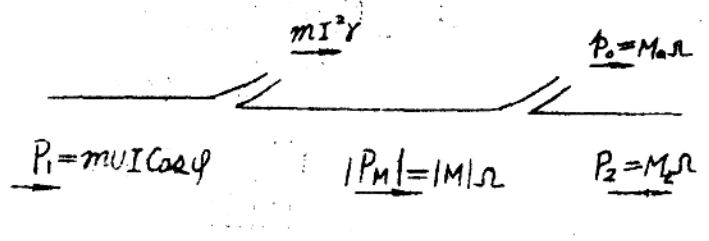


图 6-4

运行情况。

这个电动机的功率流程示意图如下：



● 用电动机正方向的功率因数角

从上面的叙述，知道同步电机并联到电网上，如果用原动机去拖它，它就成为发电机运行；如果让宅去拖一个机械负载，它就成为电动机运行。同步电机的这种运行性质，我们就称为运行的可逆原理。直流电机和异步电机也有这种性质。

作为发电机或作为电动机运行，关键在于转子磁势 $\dot{B}_f$ 是领先气隙磁密 $\dot{B}_\delta$ 呢还是落后于宅。

气隙磁密 $\dot{B}_\delta$ 产生气隙电势 $\dot{E}_\delta$ ，而 $\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}Z_s \approx \dot{U}$ 。因此，在电网的 $U = \text{常数}$ 和 $f = \text{常数}$ 的情况下，气隙磁密 $\dot{B}_\delta$ 的大小和转速基本上是恒定的。因为它受到定子电枢绕组端电压的约束。我们可以形象地把 $\dot{B}_\delta$ 看成是由定子边决定的一个等效磁极。

在发电机运行， $\dot{B}_f$ 领先 $\dot{B}_\delta$ 一个 θ' 角，就好像是由转子 ($\dot{B}_f$ 代表转子位置) 拖着等效磁极以同步转速旋转一样。

如图 6—5 (a) 所示，这时，发电机产生了电磁制动力矩，由机械功率转变成电功率，发出了电功率送到电网。

原动机不拖动了， $\theta' = 0$ ，这就是无载运行，如图 6—5 (b) 转子在空转，这时的损耗或者由原动机供给或者由电网供给，数量很小，这个过渡过程就不分析了。

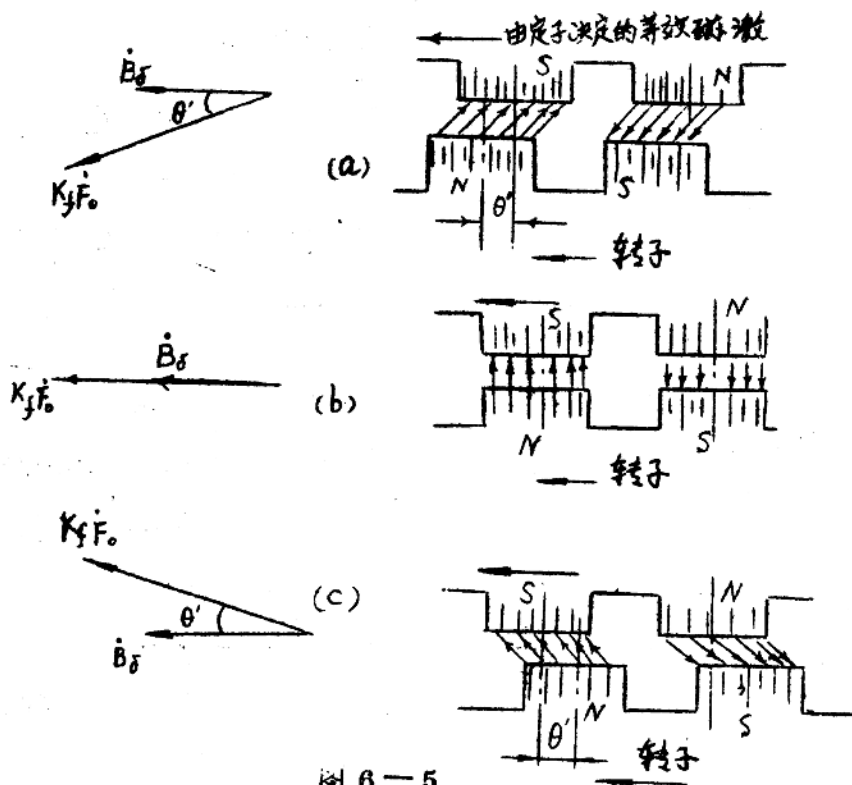


图 6-5

在电动机运行， $K_f \dot{F}_0$ 落后 $\dot{B}_\delta$ 一个 θ' 角，好像是等效磁极带着转子以同步转速旋转一样，如图 6-5 (c) 所示，这时，产生的电磁力矩是一个拖动力矩，由电网取得电功率，转变成机械功率，拖动生产机械进行生产。

这种形象看法，可以帮助我们了解同步电机的可逆原理大致上是个什么情况，但严格说来，这些形象并不十分反映实际情况，因此在分析时，还是应该依照根据电磁定律分析出来的结果，特别是在定量的计算上，更是这样。

(二) 同步电动机运行的稳定性及过载能力

电动机运行的稳定性概念，与发电机类似，就是当负载有少许增加，因而功率角也有少许增加时，电动机拖动力矩是增加还是减少。

如果是增加，就还能再次得到力矩平衡，如果是减少，力矩就不能再平衡了，所以前者是稳定的，后者就不能稳定了，将上面的条件写成数学表示形式，就是

$$\frac{d\Delta l}{d\theta} > 0 \quad \text{稳定}$$

$$\frac{d\Delta l}{d\theta} < 0 \quad \text{不稳定}$$

电动机的力矩 Δl 与功率角 θ 的关系，和发电机的 Δl 与 θ 关系一样，都以下式来表示

$$\Delta l = \frac{P_M}{\omega} = \frac{\Delta l}{\omega} \left\{ \frac{E_0 U}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\theta \right\}$$

只不过电动机是运行在负值的 θ 角上。将激磁一定时 Δl 与 θ 关系画成曲线，如图 6-6 所示。

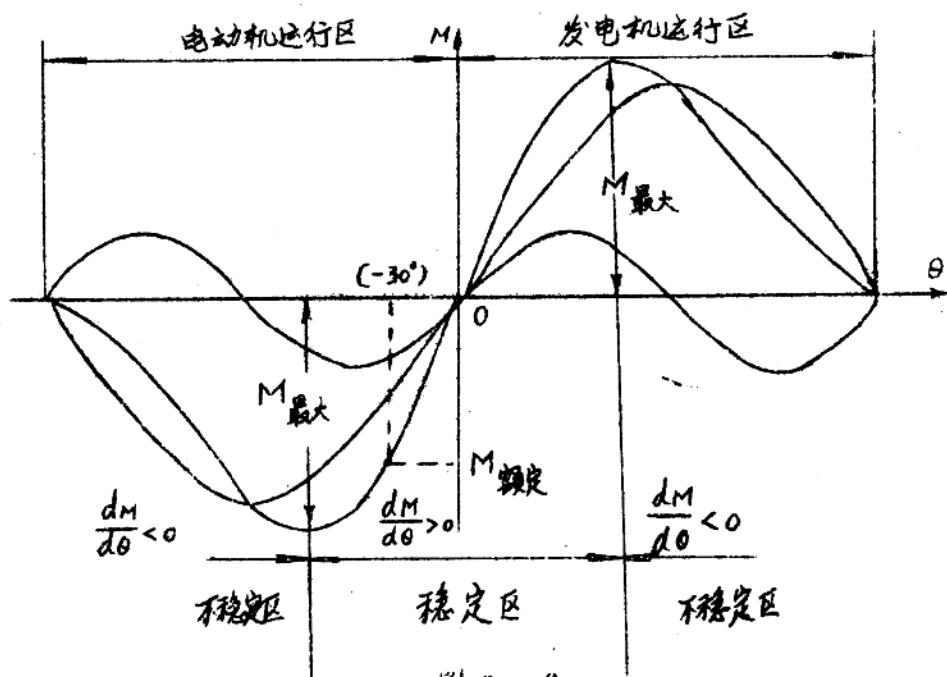


图 6-6

从图上看，功率角从 0° 到发生 M 最大的 θ 角内运行都是稳定的，不过 $|\theta|$ 愈大， $\frac{dM}{d\theta}$ 的数值愈小，稳定度愈低，为了留有余地，所以一般同步电动机额定运行在 $\theta = -30^\circ$ 左右，也就是使最大力矩 $M_{\text{最大}}$ 比额定力矩 $M_{\text{额定}}$ 大许多，以保证电动机的可靠运行，不致使负载的波动将电动机牵出同步。我们就将 $M_{\text{最大}}$ 比 $M_{\text{额定}}$ 大的倍数，称为同步电机的过载能力 k_M ，即：

$$k_M = \frac{M_{\text{最大}}}{M_{\text{额定}}}$$

额定运行的 θ 角愈大， $M_{\text{额定}}$ 愈接近于 $M_{\text{最大}}$ ，过载能力 k_M 就较小，相应于额定运行在 $\theta \approx -30^\circ$ 的情况，过载能力 $k_M \approx 2$ 。

(三) 同步电动机的运行特性 U 形曲线

与发电机一样，同步电动机的值班人员对于一台电动机在运行时，调节它的激磁，电枢电流会怎样变化，功率因数会怎样变化，不同的负载下，电流和功率因数的变化又会有什么不同等等是很需要掌握的。为此，我们只要将接到电网上（电压 U 和频率 f 都不变）的电动机，在某一定负载下，改变它的激磁，找出它的电枢电流的变化曲线，便能满足上述的要求。

为了找电枢电流的变化曲线，我们可以利用同步电动机的电势图，在这里要求得出曲线的大致形状，所以就采用隐极机的电势图，并且忽略掉电枢电阻。

同步电动机的负载不变，也就是负载力矩 M_2 不变，因为同步电动机的转速是不变的。为了使分析简单些，我们忽略转动损耗力矩 M_0 ，这样 $M = M_2 + M_0 \approx M_2$ ，即认为当负载不变时，电磁力矩 M 也就不变。

在负载不变的条件下，同步电动机的电势图如图 6—7，这里画出了在三个不同的激磁电流数值下的三个电枢电流的大小，由于电磁力矩 M 不变，三种激磁情况必然都满足下列条件：

$$M = \frac{m}{\Omega} \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta = \text{常数}$$

$$\text{即 } E_0 \sin \theta = \text{常数}$$

还由于负载不变，电功率输入 P_1 也近似地不变，（因为转动损耗 P_0 和电枢绕组铜耗 $m I^2 r$ 都忽略了）三种激磁情况必然还得满足另一个条件：

$$P_1 = m U I \cos \varphi = \text{常数}$$

$$\text{即 } I \cos \varphi = \text{常数}$$

图 6—7 就是按照这两个条件画出来的。

从图 6—7，我们就可以画出电枢电流 I 和激磁电流 I_f （知道了激磁电势 E_0 后，根据无载特性的气隙线找出激磁电流 I_f ）的关系，如图 6—8 最小电流对应于 $\cos \varphi = 1$ 的点，在 $\cos \varphi < 1$ 时，电枢电流 I 都增大，因而形成 U 字形状，所以这条特性被称为 U 形曲线，从电势图上看，对应于小的激磁电流，功率因数是落后的，对应于大的激磁电流，功率因数是领先的。

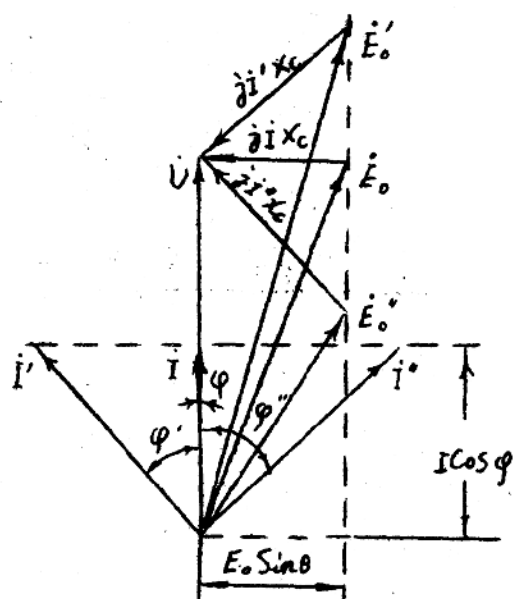


图 6—7

如果一台同步电机没有原动机拖动，直接接到电源它会转起来吗？这显然是不会的。所以我们还必须来讨论同步电动机的起动问题。

在同步电动机使用的历史上，曾经用过“辅助动力机启动法”，就是用一台小型动力机（可以是直流电动机，也可以是内燃机或其它动力机）把同步电机拖到同步速后，经过整步与电网并联，来完成启动过程。这种方法需要设备多，操作复杂。

随着生产的发展和同步电动机应用的推广，推动着科学技术前进，于是努力寻求同步电动机比较简单的启动方法。人们研究了异步电动机是能够自启动的，那么，能不能将异步电动机的自启动应用于同步电动机呢？但是有一个问题，异步电动机是达不到同步速的，不过离同步速很近了，能不能在这时在转子加入激磁，使它牵入同步速，就是同步电动机异步启动的关键。

于是，同步电动机在结构上就采取了一些变革，把异步电动机的鼠笼绕组装到了极靴上。鼠笼绕组的导条是由电阻率高的黄铜或铝青铜做，在转子两端用端环联为一体，这个鼠笼绕组在同步电动机被称为启动绕组，与上一章谈到的阻尼绕组一样，所以又称阻尼绕组。有了启动绕组，当定子接上电源，便产生异步力矩，驱使电机转动起来，这个过程与鼠笼式异步电动机是一样的。

当异步启动到一定速度，转速不再上升（这时转速已很接近同步速）就将激磁绕组接到励磁电源，使转子产生激磁磁势，以与气隙磁通相互作用产生力矩，拉着转子与气隙磁通一道以同步速旋转，这个过程就叫牵入同步过程。

牵入同步是一个很复杂的过渡过程，如果条件不合适，还不一定能成功。一般说，在牵入同步前的转差愈小，加上激磁后产生的同步力矩愈大，同步电动机的惯量愈小，负载愈轻（一般是无载启动），

牵入同步就愈容易。

但是,也有不相同的地方,①转子的磁路与异步电动机不同。异步电动机是一个圆转子,而凸极同步机转子有明显的磁极,气隙也就不均匀了,这样当定子磁势是正弦时,气隙磁密就不是正弦分布了。除基波外还有一系列谐波,这些谐波将在转子的“启动绕组”中产生谐波力矩。在设计时要考虑这些问题,另外,异步电动机的鼠笼导条是均匀分布的,因此,力矩的计算也有所不同。②转子上除“启动绕组”外,还有励磁绕组,在启动时,励磁绕组不能开路,否则旋转磁场将对它感应一个较高的电势,使它的绝缘有遭到击穿的危险。但是如果短路的话,在励磁绕组内就将产生电流。

这个电流与气隙磁场作用将产生单轴力矩。使同步电动机的 $M-s$ 曲线上发生凹坑,如图 6-9a 所示,解决问题的办法是在励磁绕组

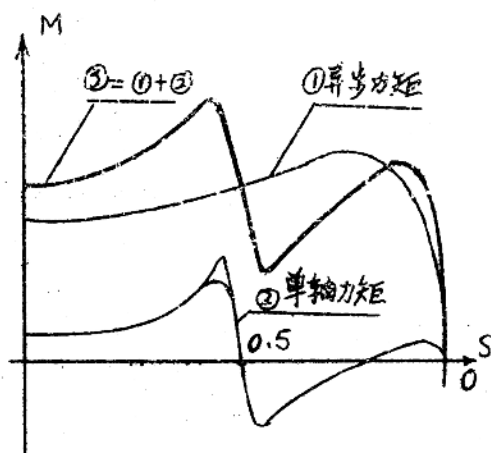


图 6-9a 同步电动机异步启动过程中的 $M-s$ 曲线

- ①异步力矩 $M-s$ 曲线
- ②单轴力矩 $M-s$ 曲线
- ③为①与②之合成

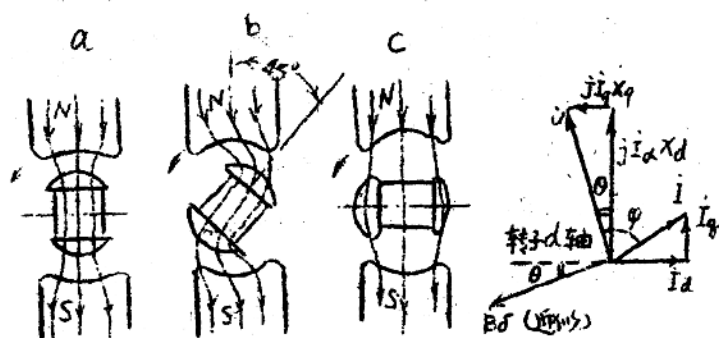
组迴路串上一个附加电阻 R 才短路。图 6-9b 表示出与转子相串接的附加电阻的大小对 $\Delta I - \delta$ 曲线的影响，一般串电阻 $R = 10R_f$ ， R_f 为激磁绕组电阻。

第四节 反应式同步电动机与同步补偿器

(一) 在容量很小的同步电动机中不必装设激磁绕组，只要使 X_d 中 X_q ，就会出现凸极电磁功率 $\frac{m U^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2\theta$ 。这种电

机叫做反应式同步电机，多作同步电动机（微型）使用，它的功率从几分之一瓦到数百瓦。反应式同步电动机常用在自动装置中以及物理仪表、有声电影、录音机和电钟里。

如下图所示，当凸极转子放在旋转磁场里，如果转子凸极正对着定子磁场磁极时，气隙磁场没有扭歪现象，这时转子被磁化但却不产生力矩。转子如果没有负载，它能随着旋转磁场以同步速旋转，不会停止（因为如要停止，立刻就会出现图 6-10b 的情况），如图 6-10a 所示。当转子带上负载之后，转子凸极与定子磁极就不重合了。这时气隙磁场被扭歪了，便产生拖动力矩与负载力矩相平衡，如图 6-10c，这时转子仍然按同步速旋转。



于是电动机又不产生力矩。从反应式电磁力矩的公式

$$M_M = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{m U^2 (X_d - X_q)}{\Omega \cdot 2 \cdot X_d X_q} \sin 2\theta$$

可以看出当 $\theta = 45^\circ$ 时, $\sin 2\theta = 1$, 因而 $M_M = M_{M \max}$

当 $\theta = 90^\circ$ 时 $\sin 2\theta = 0$, 所以 $M_M = 0$ 。图 6-103

的向量图表示在图 6-104 上。

反应式同步电动机是由电网供给激磁的, 所以功率因数 $\cos \varphi$ 非常低 (小于 0.5), 效率也较低, 因此一般只用在微电机中。

为了提高反应式电动机的力矩, 应当提高 X_d / X_q 的比值。目前可以做到 $X_d / X_q = 5$, 其办法是钢片之间加非磁性金属 (如铝)。

(二) 同步补偿机

上面几节分析了同步电动机在过激状态下运行时可以有领先的电流 (电容性电流), 因此同步电动机在过激下运行时相当于一个电容性负载接在电

为了适应这种新的形势，我们必须提高供电的质量，降低线路的消耗。在我国上海和北京地区正在开展“异步电动机同步化”的工作，而且取得了显著的成绩。以上海为例至71年5~6月分已有127台电动机改造成功，挖掘了无功功率17868千乏。相当于建设一个2.5万千瓦发电站发出的无功功率，真是做到了多快好省地建设社会主义。

(二) 绕线式异步电动机同步化的原理

绕线式异步电动机的转子绕组是三相交流绕组，一般接成 Δ 接，通过滑环引出，作异步电动机运行时本来是为了在启动时接入电阻，启动后将三个电刷短接以便把电阻除去。在作同步电动机运行时，将直流电流经过滑环电刷通入转子（接法如下图），这样通入直流电流能不能产生激磁磁势呢？

