

农村电站 发电机组的并列

潘 長 濤編著

水利电力出版社

第一章 发电机为什么要并列运行

第一节 什么叫发电机的并列

凡是在一个发电站中，若安装着两台以上的发电机，要把其中某一台发电机发出来的电与另一台或几台发电机发出来的电并在一起；或者是在一个地区里，把某一个发电站发出来的电和另一个或几个发电站发出来的电并列在一起，然后再通过共同的输电线路把电力输送到用电户去，共同地来担任这些负荷。这种使发电机连接起来联合运行的操作，叫做并列（也称为并车）。

第二节 农村发电站单独运行的缺点

我們知道，在现代化的較大型的发电站里通常总是裝設有好几台发电机，并连接起来共同运行在总的母綫上。为了使电站能够做出有着最高效率的发电站负荷曲綫（又称負載曲綫）；同时，还要使发电站的儲备容量达到最小。因此，在一般規模較小的发电站里，也往往有兩台以上的发电机同时运转。所以，发电机并列的操作在发电站中是势必不可避免的，同时也是一个发电站通常运行操作中的一个十分必要的和重要的环节。对于农村发电站來說当然也是一样的道理。

农村发电站单独运行有下列几个缺点：

第一、因为电站容量小，若单独运行，一般仅能供照明电（即电灯）而担任不了动力生产负荷。例如电力灌溉、电力加工、电力耕作及其他小型地方工业等的用电。因为电动机通常在起动的起动力是很大的，約为額定电流的3~7倍，起

47137/07

动时的电压又不能低于额定电压的60%，因为电压过低电动机就不能停止运转了发电机单独运行来带动电动机，在起动时，一般不太顺利。

由于它担任不了什么电力负荷，只能供电照明，所以这样的发电站一般每天只是在晚上发电五、六个小时，发电设备利用率很低，电能成本也相对地提高了，这是一个主要的缺点。

第二、由于农村电站的负荷与水能条件具有季节性变化，故单机组运行电站效率很低。

特别是水力发电站和潮力发电站，如果它是仅装有一台水轮机发电机，那么在天然水量变化时或者是负荷变化时，水轮机、发电机效率也随着变化。当水量充足时，负荷小则效率仍低，水量浪费。但是装机容量过大，在枯水期间水量少，水轮机仍然不能在高效率的特性下运转。由此可见，电站的容量和机组数目的选择是十分重要的，在一般情况下单机组运行是不利的。

第三、单机组单独运行供电的可靠性较差。

一个发电站里若安装一台发电机单独运行来供电负荷，当这台发电机发生了故障或者需要修理的时候，那末它所担任的全部负荷就不得不停电，这样就影响了生产和工作。同时对电站本身来说也是不好的，因为只有唯一的一台发电机，如果要保证连续供电，那么机器的维护检修工作就不能照常进行，机器如果得不到定期检修反过来又是容易出事故，因此，农村发电站中发电机组的并列，不但不可避免而且也是相当必要的。

第二章 交流发电机并列运行的基本原理

第一节 稳定并列运行时内在的同期作用

我們設想有兩台完全相等的同期发电机并列連接，且供給相等的負荷。那么這兩台同期发电机的激磁电压將互相相等且相反，二轉子的位移角度 δ 也必相等。

現在，假想由于某种外面加上的扰乱，电机1得到加速，在图1-(a)中可由向量 E_{D1} 的逆时针方向旋轉来代表。因为激磁电流沒有变化，所以向量 E_{D1} 的長度不变。但現在 E_{D1} 和 E_{D2} 二向量不再相反，它們的向量和不再为零而为 E_R ，这合成电压 E_R 要在这二台电机中，送一环流 I_L 。因为电枢綫卷的电抗远較电阻为大，所以这环流 I_L 較 E_R 滯后一角度近于 90° （电气角）如图1-a所示。这环流可以代表在这二电机中的一种功率轉換。在图1-a中，电机1送出功率而电机2吸收功率。因为电机1的功率輸出增加，而同时它的功率輸入沒有改变，电机1必需減速。由于同一理由，电机2必需加速。这內在的力量，傾向于制止由于外力扰乱所生的影响，因此傾向于保持这二电机的同期性。

在另一种情形下，設电机1受到了外力的扰乱，得到了減

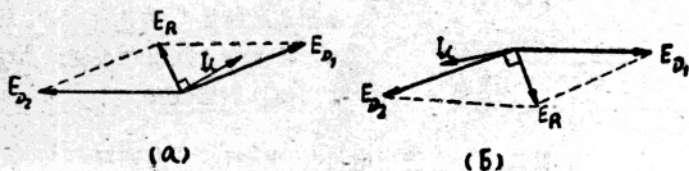


图1-表示內在的同期作用

速，如在图 1-(6)中，由向 E_{D1} 向顺时针方向旋转来代表。这样所得的合成电压 E_R 便可送一环流，这环流代表对于电机 1 的功率输入和对于电机 2 的功率输出。这环流 I_c 对于电机 1 是电动作用而对电机 2 则是负荷作用。因此电机 1 必需加速，电机 2 必需减速。这种倾向恰好又能制止外力扰乱所生的影响，而把二台并列的电机保持同期。

由此可见，故若二交流发电机有同期的企图，恆产生一环流于二机之间，以阻止其失去同期的趋向，也就是说二机一經并車即可同期运用，这是交流发电机能够同期的本能。

同期发电机的并列运行，各电机机械都必须以同期速率运转。除非把整个系统的周率改变，各单独电机的速率才能改变。磁场激磁电流的任何变化，对于同期电机来说仅不过产生一无功的环流，并不能代表任何功率的传递。假想只有二台电机的情形，激磁电压 E_{D1} 和 E_{D2} ，原先互相反向且相等（如图 2），因此没有合成电压。现在如果由于增加它的磁场激磁，向量 E_{D1} 的长度增加，那么 E_{D1} 和 E_{D2} 相加便产生一合成电压 E_R ， E_R 和 E_{D1} 同相， E_R 要送一环流 I_c ，较 E_R 滞后一

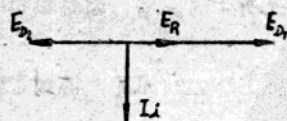


图 2 表示无功部分的环流的向量图

角度近似 90° （电气角度），这时的向量图如图 2 所示。既然 I_c 和 E_{D1} 和 E_{D2} 都系垂直的，这是无功的环流。原动机依然在它的速率负载特性上原来那一点运用，功率输入既没有改变，功率输出便也不能改变。

第二节 交流发电机并列运行的基本情况

如上所述，有两台发电机在并列运行，并且发电机 2 的运

运行情况可以任意改变，而发电机 1 的运行情况却是不变的，就是说后一台发电机的电压 U 和周率 f 在任何时间都是不变的。事实上，任一台发电机的运行情况，总是要受到其他发电机的运行情况的影响，但是为了使得接近于上面所说的条件，我们设想发电机 1 的容量对于发电机 2 来说是无穷大的。

在发电机并列运行时，有两个基本情况：

(a) 当我们改变原动机的输入（如蒸汽、水量等输入），也即变更发电机轴上的转矩 M_1 ，而让发电机的激磁电流 i_B 维持不变。这样，

$$M_1 = \text{常数和 } i_B = \text{常数}$$

(b) 当我们让原动机的输入，也即在轴上的转矩 M_1 维持不变，而变更激磁电流 i_B 。这样，

$$M_1 = \text{常数和 } i_B = \text{变数。}$$

从下面的叙述里我们可看到，在两种情况里都发生功率的变化，在第一种情况主要是有功功率的变化，而在第二种情况是无功功率的变化，无功功率的互相交流是一般同期发电机联合运行的特性。利用这个特性，我们可以把同期电机作为补偿作用，即作为一个无功功率的发电机使用。

第三章 交流发电机并列的基本条件

第一节 完满的并列运行所需的条件

同期发电机完满的并列运行所需的条件如下：

(一) 发电机方面：

(1) 相同的定额电压；(2) 相同的频率（即周率）；(3) 相同的波形。

(二)原动机方面:

- (1)相同的速率負載特性;(2)下降的速率負載特性;
(3)沒有或少有循环的速率不規則性,即要求原动机的速度均匀。

发电机的并列运行是很通常的事,但是发电机并列的操作却是一个发电厂中运行操作的一件大事。在并列时,兩发电机更具体的必要条件有三:(1)电压相等;(2)周率相同;(3)相序相同,相位一致。

第二节 單相交流发电机并列的基本条件

兩台單相发电机,如图3所示,其中一台例如机1已經在运行,我們要把第二台即发电机2,并列到第一台去。发电机1的端电压,即母綫电压等于 U_1 。單相同期发电机并列的条件在本質上和直流发电机是一样的,只是在这里我們遇到的是交流电压。所以必須使:发电机2接到母綫的瞬間和接上去以后,

发电机2电压的瞬时值的大小等于母綫电压的瞬时值,但方向与它相反,如图4。

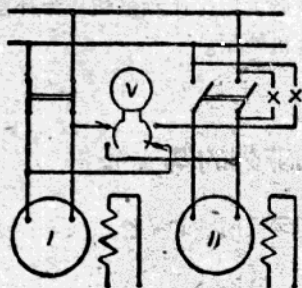


图3 單相同期发电机在電網上的連接圖

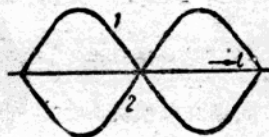


图4 在相位相反时电动势和電網电压的曲綫1和2

从这里得出下面单相发电机并列的条件:

(1) 两个发电机的电动势的瞬时值, 在大小上必须相等但其符号必须相反。因此, 它们的有效值也必须相等, 即

$$\dot{U}_2 = E_2 = -\dot{U}_1$$

(2) 被并列的发电机的周率必须等于已经在运行的发电机的周率, 即

$$f_2 = f_1$$

(3) 电压 U_1 和 U_2 的波形必须是一样的。

以上三个条件中, 后一条件通常不特表述, 因为同期发电机的电动势曲线都是正弦的曲线, 电机制造上保证了这曲线的一致。要满足发电机并列的前两个条件, 我们必须并列的时候采用一定的操作方法。

为了判断电压 U_1 和 U_2 是否相等, 通常利用一个电压表 V , 通过换接开关接到任一个或其他一个发电机的线端上如图 3 所示。

为了判断周率是否相等, 通常利用同期指示器, 它由两个相灯所构成, 其连接如图 5-(a) 或图 5-(b) 所示。第一种接法称为熄灭(暗)的接法, 而第二种称为燃点(亮)的接法。这两个名称的意义是: 当电压 U_1 和 U_2 相等时,

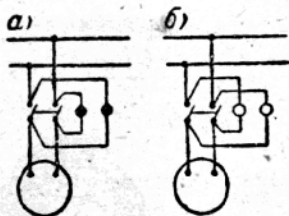


图 5 相灯暗的和亮的连接法图

在第一种接法下相灯两端的电压等于零, 因此灯是熄灭(暗)的。但在第二种接法下它等于 $U_1 + U_2$, 因此灯燃得最亮。

如果周率 f_1 与 f_2 不相等 (如图 6-(a) 示), 那就会发生所谓电压的脉振 (如图 6-(b) 示)。周率差愈小, 则脉振的周期就愈长如图 6-(b) 的虚线所示, 而灯的发亮和熄灭也愈缓慢。

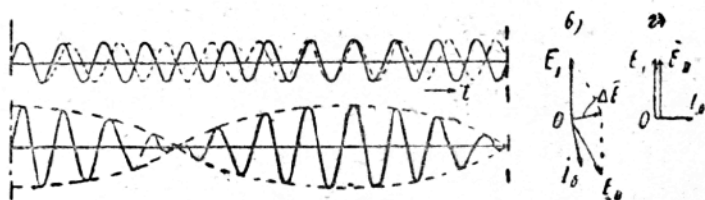


图6 电压的脉振: a) 当 $f_1 \neq f_2$ 时的 u_1 和 e 曲线;
b) 总电动势; c) 和 i_2 在不同瞬时的电流 i_1 。

从上面知道, 如果我们要将发电机2并列到发电机1上去, 我们必须调节发电机2的速率, 使得周率的相差, 也就是灯发亮和熄灭的速度达到最小。同时, 我们调节发电机2的端电压, 使得 $U_2 = U_1$ 。如果同步指示器按照图5-(a)来连接, 那么应当在灯熄灭的时候将发电机2接到汇流条上去。如需要更准确的决定合闸的时间, 通常利用有正负读数的电压表, 因为当电压低到±的额定值时, 灯已经不发亮了。

如果不满足发电机并列的第一个条件, 即 $U_2 \neq U_1$, 但 $f_2 = f_1$, 那么就在发电机接到母线后的最初一瞬间会有最大的危险。因为在合闸的那瞬间有电流冲击, 在发电机1和发电机2的电路中, 突然加进电动势 $U_0 = U_1 - U_2$, 这样构成了两个发电机突然短路的情况, 并引起由此而发生的效应。但是在瞬变过程的終了, 即在进入稳定情况后, 发电机的运行可以恢复正常。甚至在两个发电机的电动势相差很大时, 也还是可能的。不过, 从这些方面我们就可以看出, 两台发电机的电动势的瞬时值在大小上必须相等, 但其符号必须相反, 因此它们的有效值也必须相等(即 $U_2 = -U_1$), 确是同期发电机并列运行的一个最基本的和必须的条件之一。这里我们谈的是单相发电机的并列条件, 虽然单相发电机在发电站里通常极少应用而多为三

相发电机，但是因为并列的条件中凡單相发电机所必須的条件在三相发电机并列中也是必須的，而在原理上是一致的。

如果不滿足发电机并列的第二个条件，即 $v_2 = v_1$ ，但 $f_2 \neq f_1$ ，会发生严重的危險額定周率不相同的发电机不能并列，即使額定周率相等的发电机，也必須將各机的周率調节到相等才能并列，否則会使发电机全机組損坏。因为在周率不相等时，我們可以想象电动势向量 E_1 是不动的，而电动势向量 E_2 对它以差角速度旋轉，如图 6-(B) 所示。在图 6-(B) 中的向量 E_2 的位置时，总电动势是 ΔE ，它产生脉振电流 I_0 ，差不多落后 ΔE 为 90° 。我們看到，电流 I_0 差不多和电动势 E_2 同相而和电动势 E_1 相位相反；因此电流 I_0 事实上是一个有功的电流——在发电机 2 产生发电机作用而在发电机 1 产生电动机作用。另一方面，如当电动势向量重合时，如图 6-(r) 所示， I_0 將仅是感应电流。电流 I_0 的这种特性使得在发电机 1 和 2 的軸上发生很厉害的机械震动，在很不利的条件下，它可能使整个电力系統的运行发生扰乱。

第三节 三相同期发电机并列的基本条件

三相同期发电机并列的条件是和第一节單相的一样，不过三相发电机并列的条件，除了在單相中所列三个条件以外，还必須滿足第四条件，即运行的发电机和被并的发电机的相序必須相同和相位必須一致。例如前者的相序为順时向 $A_1-B_1-C_1$ ，后者的相序則必須也是順时向 $A_2-B_2-C_2$ 。但如果相位不一致，仍然无法并列。为了檢查被并发电机的相序是否对，可以采用有三个相灯的同期指示器。和單相发电机类似，也有两种接法：a) 熄灭接法，如图 7-(a) 所示。b) 灯光旋轉法，如图 7-(b) 所示。在第一种接法中，每盞灯接到同一刀开关的兩端，

在第二种接法中，其中有兩盞是交叉連接的，有一盞是接到同一刀开关的兩端。

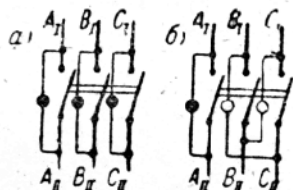


图7 三相发电机相灯的熄灭接法和灯光旋轉法

当相序一致时，兩台发电机的电动势可以用兩個相序相同的电动势星形来表示图8-(a)所示。为了簡單起见，我們將它們的零点連在一起并認為其中一个星形是不动的，而另一个則以它們相互間的差角速度在旋轉。

如果指示灯是按图7-(a)的接法，那么从图8-(a)的电动势向量来看，我們知道所有的指示灯將同时发亮和同时熄灭，当指示灯熄灭的时候，我們可以將被并发电机并列上去，因为这时每一盞灯的端电压都等于零。这种連接方法称为熄灭連接。又称直接連接法。

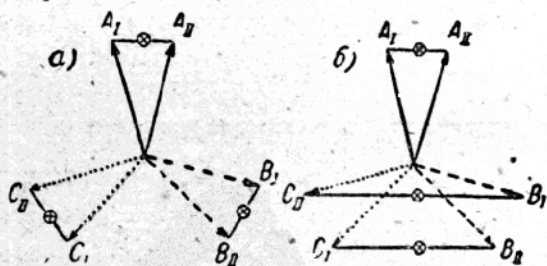


图8 当相序相同时的电动势向量图和指示灯在熄灭和在灯光旋轉的接法

如果指示灯按图7-(b)連接，那么在相同的相序时得到在图8-(b)上的电动势向量图。从图上可以知道，各盞灯的亮度都不一样并且各盞灯发亮和熄灭的次序决定于电动势星形的相对轉速，也就是发电机的相对轉速，如果指示灯安置在一个圓

周上如图9所示，我們將會观察到灯光有时顺一个方向、有时顺另一个方向旋轉。旋轉的速度决定于两个发电机的周率差。合閘的时應該是当指示灯 A_1-A_1 熄灭的时候。这种連接方法称为灯光旋轉連接。又称交叉連接法。

如果相序不相同，例如在发电机1为 $A_1-B_1-C_1$ ，而在发电机2为 $A_1-C_1-B_1$ ，那么这情况就好像在图10-(a)中把灯接成交叉的，即灯光旋轉接法，而在图10-(a)中則成为熄灭接法。相序的准确与否，由向量图10-(b)来解釋。



图9 在“灯光旋轉”連接时相灯的安置

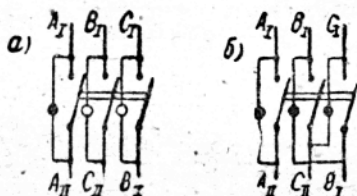


图10 在相序不同时相灯的連接图

如果相序不相同同时并列，那么在那台并列的发电机中， B 、 C 二相就各相差120度，这样就发生了很大的电压差，产生了大量的循环电流，这电流可以达到发电机額定电流的几十倍，电流可以使发电机綫卷燒燬，甚至会使整个发电機組損坏。因此，在并列时一定要注意相序是否相同。相序的錯誤或

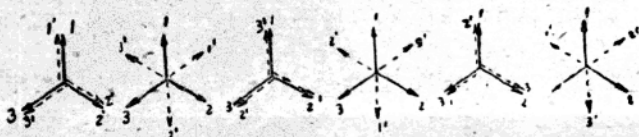


图11 用整步灯指示相序的錯誤或准确，由向量图来解釋

准确可由图11来解释。从以上我们就可以作出下面的结论：

a) 当指示灯按图 7-(a) 连接，即用灯光熄灭接法又称直接接法时，如果所有的指示灯同时发亮同时熄灭，那么相序是相同的；反之，如果得到的灯光是旋转的，那么相序就不相同了（如图 10-(a)）。

6) 当指示灯按图 7-(6) 连接，即用灯光旋转接法，又称交叉接法时，如果得到灯光的旋转，那么相序是相同的；反之，如果指示灯同时发亮同时熄灭，那么相序是不同的（图 10-(6)）。

e) 为了使不同的相序变成相同，只要将发电机 1 或发电机 2 的接到刀开关的任意两相的导线对换一下位置就解决了。这从图 8-(a 与 6) 的电动势向量图上，就可以明了了。

1) 要将发电机并列时，如果同期指示灯连接成熄灭接法，应该使灯发亮和熄灭的速度尽可能的慢，然后当所有的灯全熄灭时，可以把闸合上。或者如果同期指示灯接成灯光旋转接法，那么应该使灯光的旋转尽量慢，而当那盏不接成交叉的灯全熄灭的时候将刀开关合上。在并列高压的同期发电机时，指示灯经过电压互感器接到线上，为了避免错误的连接，互感器必须是属于同组别的。

第四节 感应发电机和同期发电机并列运行的基本条件

感应发电机就是三相感应电动机没有经过任何改装拿来与同期发电机并列运行即可发电。这又称外激感应发电机。

如果我们用一部原动机（无论是水轮机或其他动力机）来拖动感应电动机，并使它以高于同期速率即 $n = \frac{60f}{P} \cdot \frac{2}{2}$ （式中 f

为周率 50， P 为极个数）的转速运转，则这时感应电动机将

发生反向的电流,由原动机接受动能,而向电力系统输出电能,轉速越高,則输出的功率越大;这时这台感应电动机就发挥发电机的效果,故我們称它为感应发电机(或异步发电机)。发电的方式,是由轉子接受动能,使轉子繞組切割磁通而发出电能,再感应到定子繞組,向电力系统输出;而磁通 Φ 的生成,則是由于定子繞組接在电力系统上而产生的旋轉磁場。所以也和感应电动机一样,它須由电力系统供給激磁电流 I_0 ,因此,这种感应发电机叫做外激感应发电机,它必須和另外的同期发电机并列运行。另一种是在感应电动机的定子結綫扭上接上三組电容器,以容电流作为激磁电流来发电的,它不需与其他同步发电机并列即可发电,故叫它为自激感应发电机。本节所述感应发电机与同期发电机并列运行的条件是指外激式的,它不需要电容器而只需由原动机拖动后与同期发电机并列运行即可发电。它与同期发电机并列的基本条件有三个:

a)因为感应发电机的激磁电流 I_0 是由另一台同期发电机供給的,所以它必須与同期发电机并列运行。同时,因为激磁电流約为額定电流的 $20\sim 25\%$,即 $I_0 = 20\sim 25\% I_H$ 并且在电網的电压下送到感应发电机里,因此激磁容量(千伏安)也达到发电机容量的 $20\sim 25\%$ 。就是說在一个发电站里感应发电机的容量不能大于同期电机容量的 $4\sim 5$ 倍,或者說是同期发电机的容量不能小于感应发电机的 $\frac{1}{4}\sim \frac{1}{5}$ 。

6)由原动机將感应发电机的轉子帶动,其方向必須与定子旋轉磁場的旋轉方向相同。为了做到这一个条件,我們可以在沒有与同期发电机进行并列发电以前,先当作电动机試运转,并把轉向作一記号。如果它的运转方向与被原动机帶动是一致的就行了。如果不一致,那么只要將定子三相結綫头取任意兩根对换一下位置即解决了。

應該指出，如果原动机拖动方向不是和定子旋轉磁場的方向相同时，那么此时接上電網运行就成为制動情况。此时，它并不能向電網輸出功率，而是吸收功率，其速度將减少，当原动机的力矩超过电动机力矩时，电动机就会停下来，这种情况應該避免。

6) 原动机帶動感应发电机的轉子，必須尽可能地接近同期轉速，即 $n \approx n_s = \frac{120f}{P}$ 。式中 $f=50$ 周波， P = 磁极个数。在感应发电机的轉子上可以用轉速表測量其轉速，当它接近同期轉速时合上閘刀开关，即被拉入同期运行。

7) 感应发电机的額定电压与同期发电机的額定电压应接近相等，不应超过 $\pm 5\%$ 。

第四章 交流发电机並列的方法和操作过程

第一节 准同期並列的方法及其操作过程

同期发电机並列的方法，以往大多都采用准同期法，这是最普通的一种方法。但它要求很严格的条件，在第三章中我們已講过即在电压相等、周率相等和相序相同 相位一致 的条件下，兩机在准确的同期情况下，才可以合閘並列。如果稍有疏忽就会造成严重的設備事故，因而需要有高度熟練的技术和經驗的运行人員，或者有精确的自动設備，才能可靠地完成並列任务。这是采用准同期法並列方法的主要缺点。

准同期並列的操作，按其工作性質，可以分为手动操作和自动操作兩種，但考慮到目前农村电站一般設備較簡單，自动化並列的方法不作介紹。

手动准同期操作：这种操作方法是利用同期指示设备的指示，在已知二机的相序相同的条件下，用人工手动调整周波和电压以使被并发电机的周波、电压与母线（即是已在运行的发电机）接近一致。并在同期指示器指示两机已在准确的同期状况下，合上油开关刀闸，完成并列任务，这叫手动操作。

致于同期指示设备通常有同期指示器和同期指示灯。同期指示器的构造原理如图12所示，这种指示器只能用在—相上，如果相序已经核对了，那末也只需要—相，有这种设备就能代表三相都有了。同期指示器里有一个固定的铁芯（磁场） F ，绕有一线圈 W ，经过—高电阻接在母线上或母线的电压互感器的二次回路中。此外还有一个绕有两个互相垂直的线圈的电枢，该电枢上两个线圈的出线端，其中一个串联一个电阻 R ，另一个串联一个电感 X （或电容 C ），然后将两个线圈电路并联，再共同接到被并发电机上或被并发电机的电压互感器的二次回路中。在电压相同的情况下，电枢线圈 R 所产生的磁场和固定磁场 W 是相符合而不转动的，因而同期指示器的指针指在零上。如果两台发电机（即母线与被并机）的电压相差90度时，电枢 X 所产生的

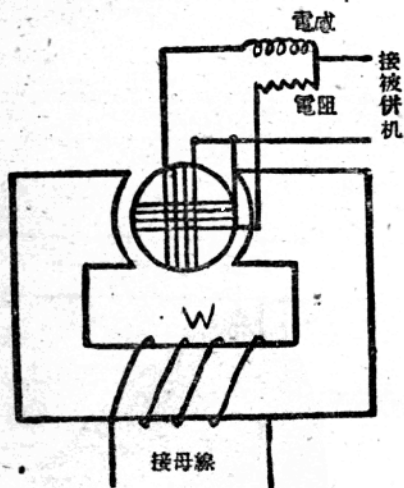


图 12 同期指示器

磁场，就要使电枢转动90度才能和固定磁场相符合，这样同期