三相电路连接

张一林　编

上海科学技术出版社

三相电路连接

张一林　编

上海科学技术出版社出版

（上海瑞金二路450号）

新华书店上海发行所发行　商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 787×1092　1/32　印张 2.875　字数 59,0000

1993年7月第1版　1993年7月第1次印刷

印数 1—2,600

ISBN 7-5323-3065-6/TM·71

定价：1.80元

（沪）新登字108号

目　　录

第一章　三 相 电 源

第一节　三相交流发电机

三相交流电源是由电厂的三相交流发电机产生的。图1-1是一个三相交流发电机的示意图。在发电机中有转子和定子两个部分。转子是由磁性很强的电磁铁构成的。定子的内槽中嵌有三个结构完全相同的线圈 AX、BY、CZ(A、B、C 分别是三个线圈的三个对称端点,表示线圈的始端；X、Y、Z 分别是三个线圈的另外三个对称端点,表示线圈的末端)。三个线圈的位置彼此相隔 120°,即 $2\pi/3$ 弧度。当磁极匀速旋转时,在线圈AX、BY、CZ中,就会分别产生正弦形变化的三个感应电动势 e_A、e_B、e_C。产生的三个正弦形电动势有相同的地方,也有不同的地方。相同的地方是它们的最大值 E_m 和周期 T 都

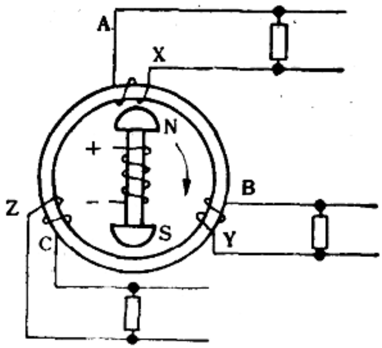


图 1-1　三相交流发电机的示意图

9310296

相等，这是因为三个线圈的结构完全相同，磁极又是匀速旋转的；不同的地方是它们正的最大值出现的时间彼此相差 1/3 周期，这是因为三个线圈的位置彼此相隔 120°，当磁极 N 或 S 正对线圈 AX 时，要再过 1/3 周期的时间，才会正对线圈 BY 的缘故(图 1-2)。

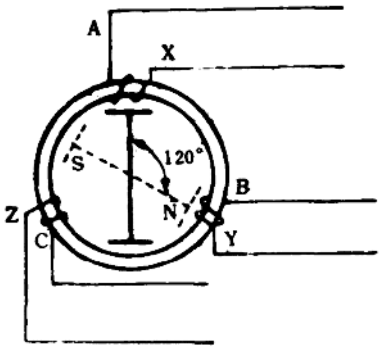


图 1-2　各相电动势的最大值相差 1/3 周期的示意图

三个线圈产生的电动势 e_A、e_B、e_C，既然都是正弦形变化的，而且各自的最大值和周期又相同，所以三个电动势可用三条波形完全相同的正弦曲线来表示。不过，由于三个线圈的位置互相间隔 120° ($1/3\cdot2\pi$ 弧度)，因此三条正弦曲线在时间上也应该相差 1/3 周期，如图 1-3 所示。

这里要声明一下，在作曲线图时，应该首先规定正弦电量的正方向。这是因为正方向规定反了，正值变为负值，负值变为正值，得出的曲线也就相反。三相电动势 e_A、e_B、e_C 的正方向，通常都规定为由各个线圈的末端指向始端，即由 X、Y、Z 指向 A、B、C。在这个正方向规定的前提下，三相电动势 e_A、e_B 和 e_C 的曲线图才会是图 1-3 的形式，也就是他们之间的相位差才会是 120°。

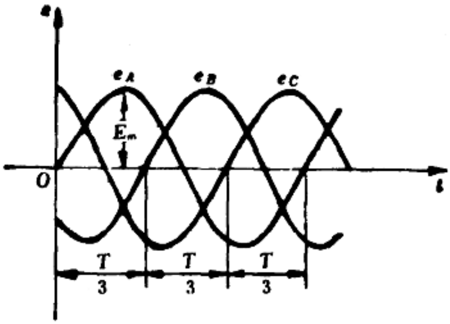


图 1-3 三相电源的电动势波形图

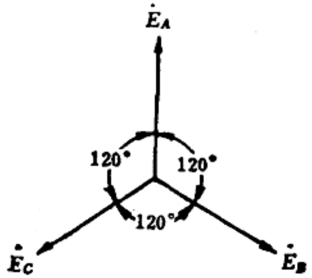


图 1-4 三相电源电动势的矢量图

图 1-4 是图 1-3 的相应矢量图。其中大小相等、互相间隔 120° 的三个矢量$\dot{E}_A$、$\dot{E}_B$、$\dot{E}_C$分别表示三相电动势 e_A、e_B、e_C 的有效值矢量。当然这个矢量图也是在电动势的正方向规定为由各个线圈的末端指向始端的前提下得出的。

除了用正弦曲线和矢量图表示三个线圈产生的三个电动势 e_A、e_B、e_C 以外，还可用相应的三个三角函数来表示：

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120°)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t + 120°)$$

这里要说明一下，电动势、电压和电流都是标量不是矢

量。不过三相电路中各相的电动势、电压和电流都是周期（频率）相同的正弦量。正弦量可以借用旋转矢量来表示，几个频率相同的正弦量还可以组成矢量图，进行矢量的运算（见本章第二节）。用矢量表示时，不但直观，而且计算起来往往很方便，所以三相电路的电动势、电压或电流常用矢量来表示。

用矢量表示时，三个矢量的长度分别表示三个电动势的最大值。因为三个电动势的最大值相同，所以三个矢量的长度也相等。三个矢量间的夹角分别表示三个电动势间的相位差。因为三个电动势间的相位差是 120°，所以三个矢量间的夹角也是 120°，如图 1-4 所示。

在交流电路里，由于交变量的有效值等于其自身最大值的$1/\sqrt{2}$倍（见本章第二节），所以三个电动势的有效值也可以用长度相等、互相间隔120°的三个矢量来表示，只要把矢量的标度单位值缩小 $1/\sqrt{2}$ 一下就可以了。在实际应用中，提到交流电的数值时，总是指的有效值，所以三相交流电的矢量图，如果没有特别指明标度的时候，一般都是表示有效值的大小。

为了区分有效值和瞬时值起见，通常用大写字母表示有效值。例如用 E、U、I 分别表示电动势、电压、电流的有效值；用小写字母表示瞬时值，例如用 e、u、i 分别表示电动势、电压、电流的瞬时值。用字母表示电量的矢量时，为了跟本身既有大小又有方向的矢量加以区别，通常在字母上面加一个圆点“·”。例如，电动势、电压、电流的有效值的矢量分别记作$\dot{E}$、$\dot{U}$、$\dot{I}$ 等。

如果三相电路中各相的电动势、电压或电流大小相等，相互间的相位差也相同，那么就叫做对称三相制。本书以讨论对称三相制为限（超出时将特别说明）。

三相电动势（或电流），出现最大值的次序叫做相序。图

1-1的相序是：

A 相⟶B 相⟶C 相

从图 1-1 中可以看出：当磁极匀速旋转时，三个线圈都可以独立地对外供电，都可以独立地和外线路形成一个闭合回路，好像三个(单相)发电机一样。在习惯上，我们把每一个线圈叫做一个“相”，这种具有三个线圈的发电机，叫做三相交流发电机，它发出来的电就叫做三相交流电。

三相交流发电机中的三个线圈，虽然都可以独立地对外供电，好像三个单相发电机一样，但是，在对外供电时，我们总是把三个线圈连系起来共同对外输电。这样便产生了三个线圈如何相互连接的问题，三相交流电路中电源和负载的连接方法，有星形(Y)和三角形(△)两种。这就是本书要详细讲述的内容。

最后，我们也要说明一下：图 1-1 只是一个三相交流发电机的示意图。实际电机的结构要复杂得多。首先定子中的线圈并不是像图 1-1 那样缠绕在定子的圆周上，而是按照一定

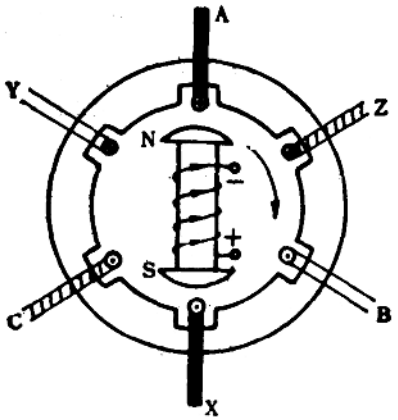


图 1-5 最简单的三相发电机示意图

的要求嵌在定子的凹槽中，如图 1-5 所示，而且每一相的线圈数也不止一个，而是由许多线圈组合而成，通常叫做绕组。关于这方面的内容，可以参看电机及其绕组一类的专门书籍。不过，基本原理是一样的。其次，实际的发电机，通常是把转子磁极做成特殊的形状，使得沿定子圆周上的磁场作正弦形的分布。这样当磁极匀速旋转时，就相当于一个正弦形磁场在定子圆周上匀速转动，从而使嵌在定子内槽中的线圈所产生的感应电动势也是正弦形的。

第二节　有效值、相位与旋转矢量

一、交流电路中交变量的有效值

交流电路中交变量的数值有瞬时值、平均值、极大值和有效值等。计算交流电路时，通常采用的是有效值。有效值是从电流的热效应方面来下定义的。

交流电流在一段时间里，通过某一个固定的电阻 R 时所发出的热量，如果恰好等于另一直流电流在相同时间里通过同一电阻 R 所发出的热量，那么这个直流电流的数值，就叫做这交流电流的有效值。同样，交流电的电动势或电压的有效值，在数值上也等于跟它产生一样热效应的直流电的电动势或电压。正弦形交流电的电流、电压、电动势的有效值，都是他们本身最大值的 $1/\sqrt{2}$ 倍。

即：

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m$$

交流电的有效值虽然是从电流的热效应方面来下定义的，但是考虑了电流的热效应，也就基本上考虑了电流的机械效应。这是因为电流产生的热量是与电流的平方成正比，而在多数情况下，电流产生的机械力也是与电流的平方成正比(例如两根通有同样电流的导线所产生的相互作用力，也是与电流的平方成正比)。正因如此，交流电的有效值有其广泛的用途，通常不特别声明的交流电的数值总是指的有效值。伏特表、安培表等仪表显示出来的数值也是有效值。

现以电流为例，证明正弦交流电的有效值为其本身最大值的 $1/\sqrt{2}$ 倍。

在交流电一个周期 T 内，直流电流 I 通过固定电阻 R 所产生的热量为：

$$Q_{直} = I^2RT\,(\mathrm{J}) \tag{1}$$

在时间 dt 内交流电流 i 通过同一固定电阻 R 产生的热量为：

$$\mathrm{d}Q_{交} = i^2R\mathrm{d}t\,(\mathrm{J}) \tag{2}$$

因为正弦交变电流的瞬时值为：

$$i = I_m \sin wt \tag{3}$$

所以，由式(2)，(3)得：

$$\mathrm{d}Q_{交} = RI_m^2 \sin^2 wt\,dt\,(\mathrm{J})$$

在一个周期 T 里交变电流产生的热量为：

$$Q_{交} = \int_0^T \mathrm{d}Q_{交}$$

$$= RI_m^2 \int_0^T \sin^2 wt\,\mathrm{d}t$$

$$= RI_m^2 \int_0^T \left[\frac{1-\cos 2\,wt}{2}\right]dt$$

$$= RI_m^2\left[\frac{1}{2}\int_0^T dt - \frac{1}{4w}\int_0^T \cos 2wt\,d(2wt)\right]$$

$$= RI_m^2\left[\frac{t}{2} - \frac{1}{4w}\sin 2wt\right]_0^T$$

$$= RI_m^2\left(\frac{T}{2} - 0\right)$$

$$= RI_m^2 \cdot \frac{T}{2} \quad (4)$$

根据定义：

$$Q_{直} = Q_{交}$$

由式(1)，(4)得：

$$I^2RT = \frac{1}{2}RI_m^2T$$

即：

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}}I_m$$

二、相位、相位差

1. 相位、初相

图 1-6 是一个最简单的交流发电机的示意图。当转子电枢以角速度 w 匀速反时针方向旋转时，在电枢的线圈上便会产生一个正弦形变化的感生电动势。如果起始时电枢线圈平面与中性面相重合，初相角为零，如图 1-6(a)，那么在 t 时刻的感生电动势 e 便是：

$$e = E_m \sin wt$$

其中 E_m 表示感生电动势的最大值。如果起始时，电枢线圈的平面不与中性面相重合，而有一个初相角 ϕ_0，如图1-6(b)，那么在 t 时刻的感生电动势 e 便是：

$$e = E_m \sin(wt + \phi_0)$$

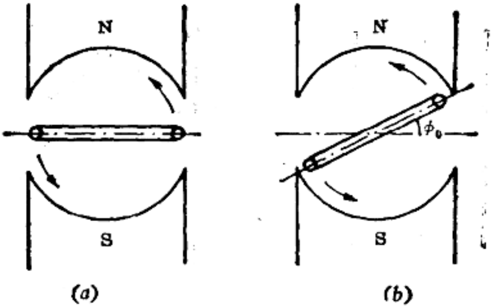


图 1-6　最简单的交流发电机
(a)初相角为零；(b)初相角不为零

通常发电机的最大感生电动势E_m是一个不变的数值，所以实际上决定某一时刻发电机感生电动势的大小和方向的量是电角度"$\omega t+\phi_0$"。电角度"$\omega t+\phi_0$"叫做相位角或相位ϕ。线圈平面与中性面的初始夹角ϕ_0，决定发电机初始感生电动势的大小和方向，所以ϕ_0叫做初相角或初相。

以上是从具体的、但又是比较狭隘的正弦形变化的感生电动势来理解相和初相的概念。"相"的比较全面的含义是这样的：确定随着时间作周期性变化的振动量在某一时刻的状态的一个量叫做相。当时间$t=0$时的相，叫做初相。

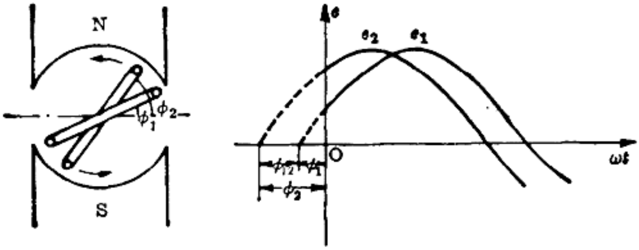
2．相位差

如果发电机的电枢上有两个结构完全相同的线圈，那么电枢以角速度ω匀速反时针方向旋转时，如图 1-7(a)，在两个线圈上将会分别感生出频率和最大值都相同的两个正弦形变化的感生电动势e_1、e_2，如图 1-7(b)所示：

$$e_1=E_m\sin(\omega t+\phi_1)$$

$$e_2=E_m\sin(\omega t+\phi_2)$$

其中ϕ_1、ϕ_2分别表示e_1、e_2的初相角。



(a) (b)

图 1-7 电枢上有两个线圈的交流发电机

(a)两个线圈的发电机；(b)两个线圈内的电动势

当 $\phi_1=\phi_2$ 时，我们说两个感生电动势同相，这是因为 $\phi_1=\phi_2$ 时，同频率的感生电动势 e_1、e_2 同时到达最大值(或零值)，它们的状态始终一致。当 $\phi_1\neq\phi_2$ 时，我们说两个感生电动势有着相位差。这是因为 $\phi_1\neq\phi_2$ 时，一个感生电动势到达最大值(或零值)时，另一个同频率的感生电动势要再过一段时间才能到达最大值(或零值)，他们的状态在时间上始终有着一个不变的差距。这个不变的差距可以用初相差 $\phi_1-\phi_2$ 来表示。两个同频率正弦量的初相差叫做相位差。相位差的定义也有规定为：两个同频率正弦量的相位角的差叫做相位差，即：

$$(\omega t+\phi_1)-(\omega t+\phi_2)=\phi_1-\phi_2$$

所以相位角的差与初相差是一样的。同频率正弦量电动势 e_1、e_2 的相位差 ϕ_{12} 是：

$$\phi_{12}=\phi_1-\phi_2$$

由于三相电动势 e_A、e_B、e_C 的三角函数式通常写作为：

$$e_A=E_m\sin\omega t$$

$$e_B=E_m\sin(\omega t-120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(wt + 120°)$$

所以通常说三相电动势间的相位差是 120°。

相位差不但可以用角度差来表示，还可以用时间差来表示。这是因为角度差 ϕ_{12} 与时间差 t_{12} 有着一定的关系：

$$t_{12} = \frac{\phi_{12}}{w} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{2\pi}T$$

因此，相位差互为 120° 的三相电动势，它们的时间差是 1/3 周期：

$$t_{12} = \frac{120°}{2 \times 180°}T = \frac{1}{3}T$$

时间差表示：在一个周期的时间里，一个正弦量到达最大值(或零值)，比另一个同频率正弦量到达最大值(或零值)要早或迟一段时间。当正弦量 e_1 比同频率正弦量 e_2 早到达零值(或最大值)时，我们说 e_1 超前于 e_2，或说 e_2 滞后于 e_1。通常相位差 $\phi_1 - \phi_2$ 为正值时，表示 e_1 超前于 e_2；为负值时，表示 e_1 滞后于 e_2。三相电动势中 e_B、e_A 的相位差 $\phi_B - \phi_A$ 为"$-120°$"，所以 e_B 滞后于 e_A 1/3 周期；e_C、e_A 的相位差 $\phi_C - \phi_A$ 为"$+120°$"，所以 e_C 超前于 e_A 1/3 周期。

用(旋转)矢量表示几个同频率的正弦量时，矢量与矢量间的夹角表示相应的正弦量与正弦量间的相位差。通常把矢量反时针方向的转角作为正值，表示超前；矢量顺时针方向的转角作为负值，表示滞后。所以作正弦形变化的同频率三相电动势用旋转矢量表示时，就成为图 1-8 的形式。图 1-8 中的 $\dot{E}_B$ 滞后于 $\dot{E}_A$ 120°，$\dot{E}_C$ 超前于 $\dot{E}_A$ 120°。

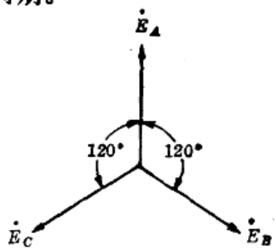


图 1-8 三相电动势的矢量图

三、正弦量和旋转矢量

1．正弦量的图示法

正弦量的图示法有正弦曲线和旋转矢量两种。

（1）正弦曲线　用正弦曲线表示正弦量时，通常以纵坐

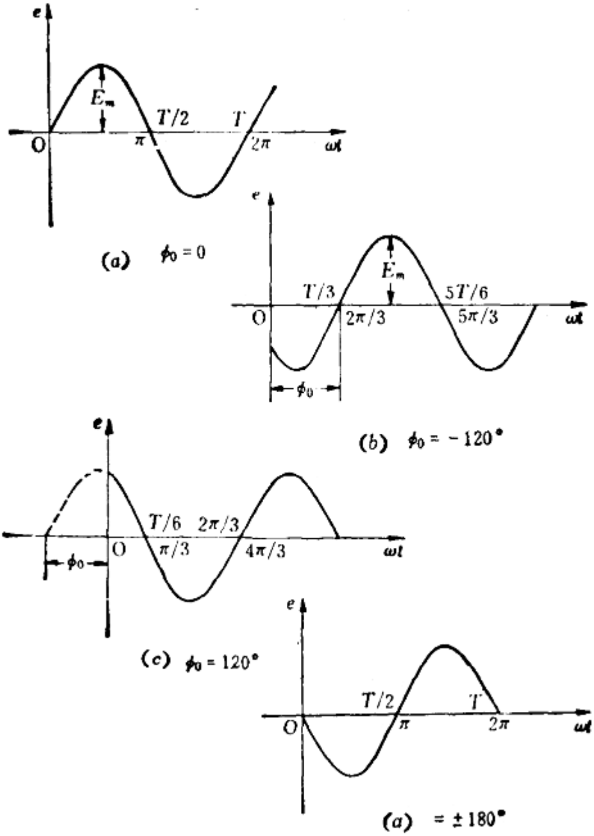


图 1-9　正弦曲线图

标表示正弦量的瞬时值，以横坐标表示时间 t 或角度 ωt。

图 1-9 中的四个分图表示四种不同情况的正弦曲线。图 1-9(a) 正弦曲线的初相为零；图 1-9(b) 正弦曲线的初相在 $-\pi$ 与 0 之间；图 1-9(c)正弦曲线的初相在 0 与 π 之间；图 1-9(d)正弦曲线的初相为 $\pm\pi$。

在三相电路中，当 A 相电动势的初相为零时，图 1-9 的 (a)、(b)、(c)三个分图，实际上分别是三相电动势 e_A、e_B、e_C 的正弦波形图。

(2) 旋转矢量　从图 1-10 中可以看到，当一个矢量反时针方向匀速旋转时，矢量在纵坐标上的投影值随着时间的变化而作正弦形变化，所以，作正弦形变化的量，都可以用旋转矢量来表示。

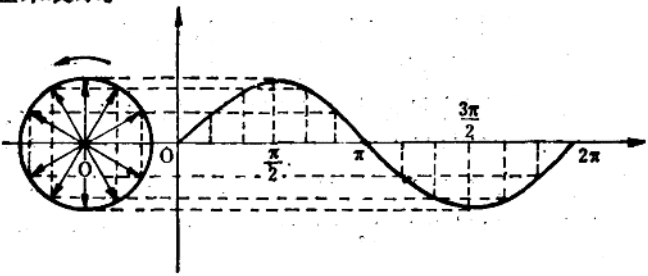


图 1-10　旋转矢量与正弦量

用旋转矢量表示正弦量时，矢量的长度表示正弦量的最大值(振幅)，矢量的位置与横轴的正方向间的夹角表示正弦量的初相，矢量反时针方向旋转的角速度表示正弦量的角频率，矢量在纵轴上的投影表示相应时刻的正弦量的瞬时值。

图 1-11 是表示初相为 ϕ_0，最大值为 E_m，角频率为 ω 匀速反时针方向旋转了 t_1 时刻的旋转矢量图。这个旋转矢量在纵轴上的投影是：