

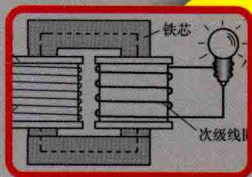
XIN NONGCUN SHIYONG
DIANGONG CONGSHU



农村实用电工丛书

农村电工 实用技术 入门 (二)

龚华生 邓迎春 黄正轴 龚叶 杨小琼 编著



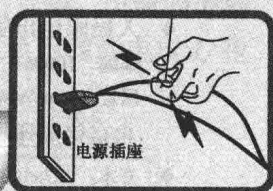
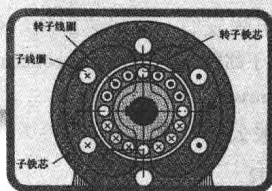
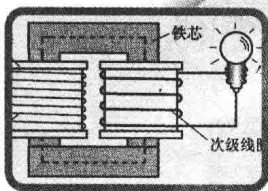
XIN NONGCUN SHIYONG
DIANGONG CONGSHU



农村实用电工丛书

农村电工 实用技术 入门 (二)

龚华生 邓迎春 黄正轴 龚叶 杨小琼 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

农村电工实用技术入门. 2 / 龚华生等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2011. 11
新农村实用电工丛书
ISBN 978-7-115-26608-8

I. ①农… II. ①龚… III. ①农村—电工技术—基本知识 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第204452号

新农村实用电工丛书

农村电工实用技术入门 (二)

-
- ◆ 编 著 龚华生 邓迎春 黄正轴 龚 叶 杨小琼
责任编辑 刘 朋
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/32
印张: 6.375 2011 年 11 月第 1 版
字数: 147 千字 2011 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-26608-8

定价: 9.00 元

读者服务热线: (010) 67129264 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

第 6 章 单相交流电及其电路

在日常生活与工农业生产中，除了必须使用直流电的特殊情况外，绝大多数是应用交流电。交流电有单相和三相之分，本章先讲解单相交流电及单相交流电路的知识。

6.1 交流电的基础知识

6.1.1 交流电的概念与描述

1. 认识交流电

我们已知，直流电流的大小和方向不随时间变化。图 6-1 (a) 所示是手电筒的直流电路，电流 I 总是从直流 (DC) 电源的正极流出，流经小灯泡后又流回到电源的负极，电流的方向不变，大小也不变，常称之为恒定电流。直流电源的电压 U 也

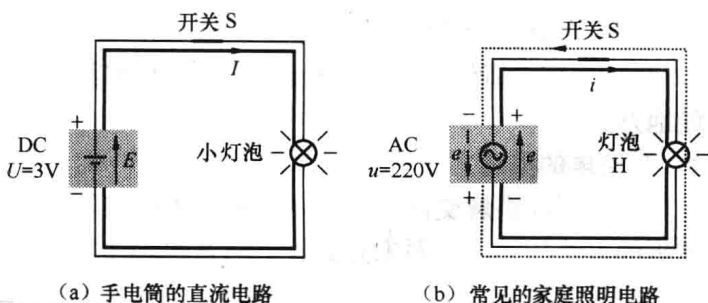


图 6-1 比较直流电路与交流电路中的电流

是恒定电压，如图中阴影部分所示。

在应用交流（AC）电源的闭合电路中，交流电压 u 或交流电流 i 的大小和方向总是不断地随时间变化。

图 6-1（b）所示是家庭照明电路，应用的 220V 交流电源。当交流电压 u 为上正下负时，电流 i 是从电源的上端流出，流经灯泡后又流回电源的下端；当交流电压 u 为下正上负时，电流 i 是从电源的下端流出，流经灯泡后又流回电源的上端。不仅交流电压 u 和交流电流 i 的方向不断改变，而且交流电压 u 和交流电流 i 的大小也随时间变化。

这种方向和大小随时间按一定规律作周期性变化的电压或电流，称为交流电。

2. 交流电的优点

我们生活中应用得更多的电源是交流电，因为它具有以下优点：

① 交流电可以采用变压器很方便地改变电压，实现高压输电和低压用电。高压输电可以减少线路上的电能损失，以节省电力，有利于远距离输送；低压用电可以更好地确保用电安全。

② 交流电动机的结构比相同功率的直流电动机简单，成本低，维护方便，有利于广泛使用。

③ 交流电变成直流电也比较容易，只要应用整流设备就能很方便地办到。

3. 交流电的描述方法

在实际应用和讲解交流电时，常要对交流电进行描述。描述交流电的方法较多，下面先介绍其中的几种。

（1）电路标示法

在图 6-1（b）中，应用电路标示方法对交流电进行了描述，

它是分别用两个方向的箭头线表示交流电流的方向在不断地改变，但这种描述方法不能反映出交流电流随时间变化的关系。

(2) 文字表示法

对图 6-1 (b) 所示交流电流的方向还可文字来描述。比如交流电源的极性为上正下负时，电流是沿电源上端（正极）→开关 S→灯泡 H→电源下端（负极）形成电流回路；当交流电源为上负下正时，电流是沿电源下端（正极）→灯泡 H→开关 S→电源上端（负极）形成电流回路。这表明交流电流时而顺向沿闭合电路流动，时而又逆向流动。如果要综合表达交流电流的双方向流动特性，还可写成：电源上端 $\rightleftharpoons$ 开关 S $\rightleftharpoons$ 灯泡 H $\rightleftharpoons$ 电源下端，形成双向电流回路。

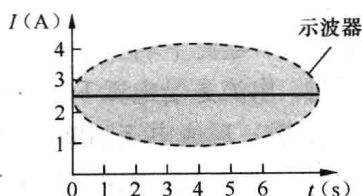
(3) 坐标分析法

还可以用坐标分析法来描述交流电流，这是分析交流电时应用得最多、最普遍的一种方法。这里先回忆直流电流的坐标表示方法，然后再认识交流电流的坐标分析法。

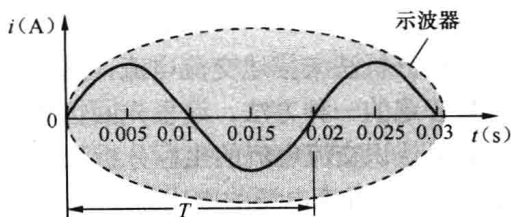
在图 6-1 (a) 中，直流电源的电压为 3V，小灯泡的电阻为 1.2Ω ，那么闭合电路导通的直流电流就为 2.5A，并且不随时间变化。如果把直流电流这一特点描述在坐标中，就成为一条直流电流 I 与时间 t 对应关系的直线，如图 6-2 (a) 中粗直线所示，常称之为直流电流的图形，也叫直流电流的波形，通常用示波器能显示出来。由 $I=2.5\text{A}$ 的直流电流波形可知，图 6-1 (a) 所示电路在第 1s 时的导通电流为 2.5A，在第 2s 时的导通电流也是 2.5A……即在任何时刻直流电流值都相等，并不随时间发生改变。

图 6-2 (b) 所示的则是图 6-1 (b) 中交流电路导通电流时，电流 i 随时间 t 变化的图形，称之为交流电流的波形。该波形表明：当图 6-1 (b) 所示电路导通交流电时，在 $0\sim 0.01\text{s}$ ，波

形对应电流坐标 i 的正值，为交流电正半周。在正半周内，随着时间由 0 向 0.005s 延长，正向电流逐渐增大；当时间继续由 0.005s 向 0.01s 延长时，正向电流则逐渐减小。该曲线较细致地表现出了电流大小随时间变化的规律。



(a) 直流电流图形



(b) 50Hz 正弦交流电的变化曲线

图 6-2 直流电流与交流电流波形比较

当图 6-1 (b) 所示电路在 0.01~0.02s 导通交流电时，波形对应电流坐标 i 的负值，为交流电的负半周。在负半周内，随着时间由 0.01s 向 0.015s 延长，负向电流逐渐增大；当时间继续由 0.015s 向 0.02s 延长时，负向电流则逐渐减小。这又阐明了负向电流大小随时间变化的情况。

图 6-1 (b) 所示电路在交流电流的 0.01s、0.02s 时刻，电流为零，灯泡中无电流通过，此时灯泡熄灭。但由于交流电每秒变化 50 次，加之灯泡点亮的时间大于熄灭的时间，视觉又有

暂停效应，我们就感觉不到灯泡熄灭，而是始终亮着。

综上所述，就更清楚了电流为正值时交流电源的电压必然为正，电流为负值时电压必然为负。因此也就有了“方向和大小不断随时间变化的电压或电流是交流电”的结论。一般交流电的波形可通过示波器测量显示出来，如图 6-2 所示。

4. 正弦交流电

在图 6-2 (b) 中，交流电流 i 随时间 t 变化形成的电流波形，与数学中正弦曲线的形状相同，表明这种电流是按正弦规律变化的，所以称之为正弦交流电。由于它变化一周的时间为 0.02s (周期)，换算得变化频率为 50Hz ，故又称为 50Hz 正弦交流电。我们应用的 220V 交流电源就是 50Hz 正弦交流电。

6.1.2 交流电的产生

1. 正弦交流电动势的产生

要得到正弦交流电流，先必须有按正弦规律变化的电动势。交流发电机就是能产生这种电动势的电源。

图 6-3 (a) 为最简单的交流发电机的结构示意图。N、S 为发电机中两个特定形状的永久性磁极，为固定不动部件，称为定子。两磁极中间的圆柱体表示电枢，它由许多匝线圈构成，图中只画了 $abcd$ 一匝线圈作为代表。电枢在发电机中为转动部件，称为转子线圈绕组，简称转子绕组或转子线圈。转子线圈的两端分别接到两个互相绝缘的铜滑环上，铜滑环可随转子转动。再通过电刷把铜环和外电路连接起来，电刷不转动。下面就只讨论一匝线圈在磁场中转动产生电动势的情况。

当有外力使转子线圈在磁场中转动时，线圈将切割磁力线，

在转子线圈两端产生感应电动势 e ，其大小由公式 $e=Blv$ 确定。这里 B 为电枢表面的磁感应强度， l 为线圈一个边的有效长度， v 为转子线圈在磁场中作圆周运动的切线速度。

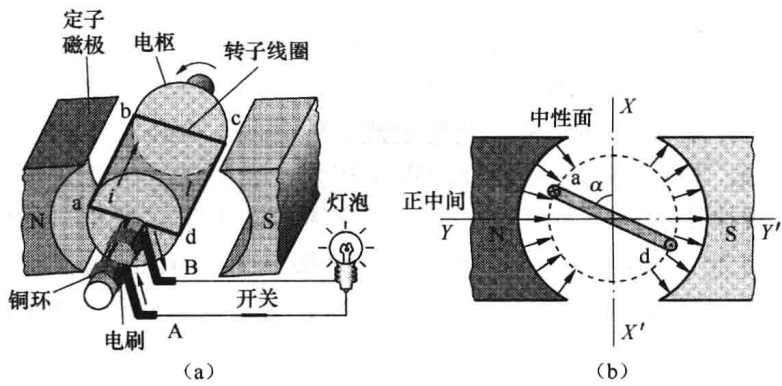


图 6-3 交流发电机原理图

从公式 $e=Blv$ 中可以看出，要使产生的感应电动势 e 按正弦规律变化，必须使 Blv 中有一个量按正弦规律变化。 l 在发电机中是个不可能变化的量，要使 v 按正弦规律变化也不太方便，因此只能使 B 按正弦规律变化。为了达到这一目的，可将发电机中的磁极有意制作成弯月形，这样的磁极形成的磁场作用在电枢表面上，其磁感应强度 B 就会因气隙的变化作正弦分布，如图 6-3 (b) 所示。两磁极中间的 B 最大 ($B=B_m$)，两磁极交界处的 B 最小 ($B=0$)，形成中性磁面。当线圈 $abcd$ 的平面与中性面 XX' 成 α 夹角时，作用在线圈上的磁感应强度 B 将按 α 角作正弦变化，如图 6-4 中磁感应强度

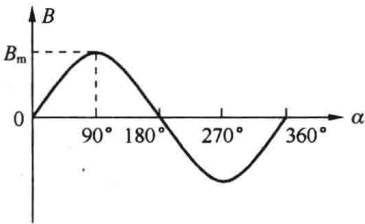


图 6-4 磁感应强度 B 的变化曲线

B 与夹角 α 的关系曲线所示，用公式表示就为

$$B=B_m\sin\alpha$$

式中： B_m 为磁感应强度的最大值。

当外动力带动电枢按逆时针方向开始转动时，将在线圈的两个边内产生感应电动势，并经两铜环、电刷把感生电动势 e 送到外电路的 A、B 两端。由于是研究转子线圈在旋转中产生的感应电动势，所以其旋转速度就与夹角 α 有关，为 $v\sin\alpha$ 。这样发电机输送到 A、B 两端的电动势就为

$$e=B_mlv\sin\alpha$$

上式是发电机任一时刻 t ，或说转子线圈处于任一角度 α 时输出的电动势，属于发电机的瞬时电动势。

2. 正弦交流电动势的大小

由公式 $e=B_mlv\sin\alpha$ 可知，当 $\alpha=0$ 时， $\sin\alpha=0$ ，所以 $e=0$ 。因为这时线圈平面与磁场中性面 XX' 重合，线圈不切割磁力线，故此时发电机输出到外电路 A、B 两端的电动势为零。

当 $\alpha=90^\circ$ 时， $\sin\alpha=1$ ，这时 $e=B_mlv\sin\alpha=B_mlv=E_m$ ，其中 E_m 称为电动势的最大值。因这一瞬间线圈正处于 $\alpha=90^\circ$ 位置，通过磁极的正中间 YY' ，磁感应强度 B 最大，所以感应电动势也最大。这样，发电机任一时刻产生的电动势 e 将只随夹角 α 在最大电动势 E_m 内变化，于是公式 $e=B_mlv\sin\alpha$ 就可改写成：

$$e=E_m\sin\alpha$$

上式表明，发电机产生的感应电动势 e 随角度 α 成正弦规律变化。由此可求出转子线圈 $abcd$ 在任意位置时的感应电动势。如果使线圈从中性面开始以角速度 ω 作等速运转，则公式 $e=E_m\sin\alpha$ 又可写成：

$$e=E_m\sin\omega t$$

式中:角速度 ω 是线圈旋转的角度 α 除以所用的时间 t 所得结果,即 $\omega = \frac{\alpha}{t}$,也可写成 $\alpha = \omega t$ 。在讨论中,通常用 ωt 来代表 α 。

3. 正弦交流电动势的波形图

由上面讨论可知,发电机转子线圈在转动过程中,线圈转动的角度 α 与时间 t 是对应的。因此,可根据公式 $e = E_m \sin \omega t$ 来描述感应电动势随时间按正弦规律变化的关系,并可在坐标中用曲线把它表示出来。比如我们应用的 220V 交流电源,其最高电压为 $E_m = 311\text{V}$,就可在坐标中描出交流电动势的波形来。

当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $e = E_m \sin \omega t = 311 \times \sin 0^\circ = 311 \times 0 = 0(\text{V})$

当 $\alpha = 45^\circ$ 时, $e = E_m \sin \omega t = 311 \times \sin 45^\circ \approx 311 \times 0.707 \approx +220(\text{V})$

当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $e = E_m \sin \omega t = 311 \times \sin 90^\circ = 311 \times 1 = +311(\text{V})$

当 $\alpha = 135^\circ$ 时, $e = E_m \sin \omega t = 311 \times \sin 135^\circ \approx 311 \times 0.707 \approx +220(\text{V})$

当 $\alpha = 180^\circ$ 时, $e = E_m \sin \omega t = 311 \times \sin 180^\circ = 311 \times 0 = 0(\text{V})$

当 $\alpha = 225^\circ$ 时, $e = E_m \sin \omega t = 311 \sin 225^\circ \approx 311 \times (-0.707) \approx -220(\text{V})$

当 $\alpha = 270^\circ$ 时, $e = E_m \sin \omega t = 311 \times \sin 270^\circ = 311 \times (-1) = -311(\text{V})$

当 $\alpha = 315^\circ$ 时, $e = E_m \sin \omega t = 311 \times \sin 315^\circ \approx 311 \times (-0.707) \approx -220(\text{V})$

当 $\alpha = 360^\circ$ 时, $e = E_m \sin \omega t = 311 \times \sin 360^\circ = 311 \times 0 = 0(\text{V})$

将计算出的 e 与对应的 α 值描在坐标中,再把各点连接成平滑的曲线,就得出了正弦感应电动势的曲线图,如图 6-5 所示。它是发电机转子线圈从 0° 到 360° 转动一周形成的曲线,当转子线圈继续转动时,曲线将按原样重复延伸。这也是描述正弦感应电动势的方法之一,具有简单、明了、直观的特点。这种曲线图形叫做正弦感应电动势的波形图。

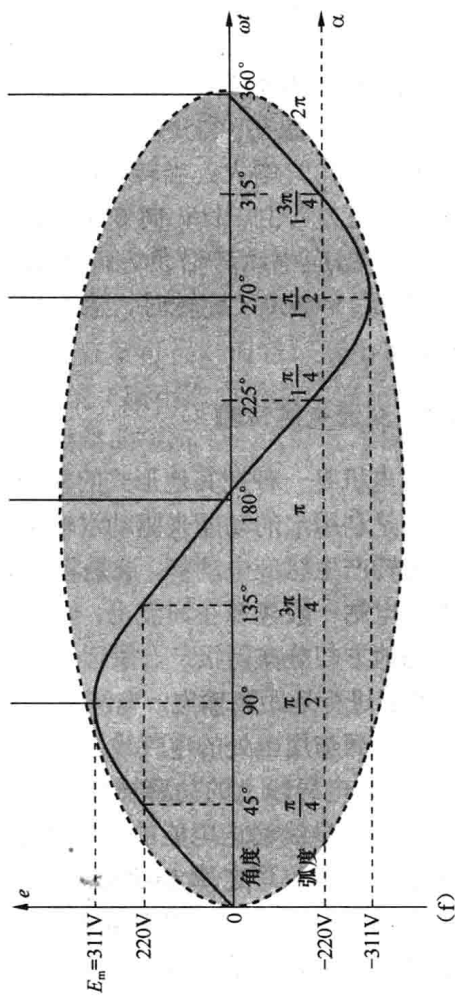
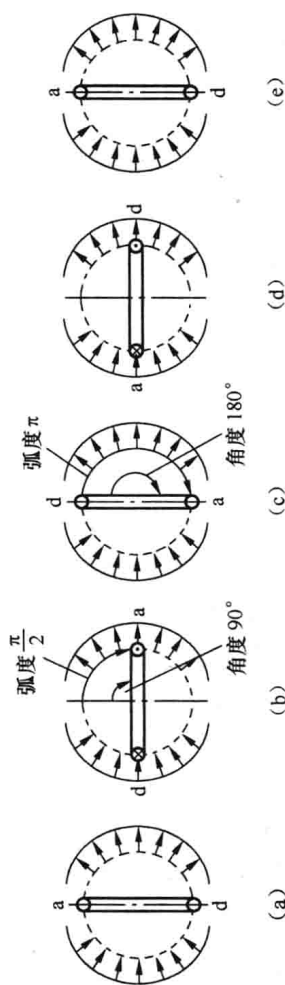


图 6-5 正弦感应电动势的波形图

4. 正弦交流电动势的方向与大小分析

由电动势波形图可以看出,感应电动势的方向是随时间作周期性变化的。当转子线圈在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 旋转时,感应电动势为正值;当转子线圈在 $180^\circ \sim 360^\circ$ 旋转时,感应电动势为负值。

从电动势波形图还可看出,感应电动势的大小也随时间改变。当转子线圈在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 旋转时,感应电动势沿正方向由 0 向 $+311\text{V}$ (E_m) 增大;当转子线圈在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 旋转时,感应电动势沿正方向由 $+311\text{V}$ 向 0 减小;当转子线圈在 $180^\circ \sim 270^\circ$ 旋转时,感应电动势沿负方向由 0 向 -311V 变化;当转子线圈在 $270^\circ \sim 360^\circ$ 旋转时,感应电动势沿负方向由 -311V 向 0 变化。

6.1.3 交流电的传输

发电机是一种把其他形式的能转变为电能的设备。比如水力发电站是利用水的动能来驱动水轮机转动,再带动发电机的转子线圈旋转产生感应电动势,这是将水的动能转化成为电能。由于水力发电站一般建筑在河流上,如三峡水电站建筑在长江上,而用电的地方却分布得很广、很远,如果三峡电站向上海、南京供电,就要进行远距离输电。电能易于输送,只要用输电导线把发电站的电源与用电处的电气设备连接起来,就可以输送电能了。

1. 输电导线上的功率损耗

有了用导线输送电能的办法后,还要解决输电中的功率损耗问题。根据焦耳定律 $Q=I^2Rt$ 可知,由于输电导线具有电阻,在输电过程中必然要产生热量散发到空气中,把一部分电能转化成热能损失掉。显然这是一种浪费,因此,应该尽量减少它。在一般情况下,要求这种损失不超过输送功率的 10%。

如何减少输电过程中的损耗,曾经有过许多方案。比如根

据 $Q=I^2Rt$ 来减小输电线的电阻 R ，但根据电阻定律 $R=\rho \cdot \frac{l}{S}$ 又

知，在输电线长度 l 一定时，要减小电阻，就应选用电阻率小、横截面积大的导线，所以目前采用电阻率小的铜、铝线材。增大导线的横截面积 S ，将会导致导线过粗、过重，既多耗费金属材料，又给架线带来困难。因此，通过减小电阻来降低损耗这一方案不可采用。

继续分析 $Q=I^2Rt$ ，还可考虑减小输电电流 I ，这样也能降低输电线路的损耗。理论与实践都证明，在导线电阻不变的条件下，如果电流减小到原来的百分之一，这时的损失就减少到原来的万分之一，表明这种降耗方案可行，但它却减小了电力线上传输的电功率。为了弥补电流 I 减小造成的功率输出不足，又根据公式 $P=I^2U$ 来提高输送线路的电压 U ，这样既可保证传输电功率，又可把线路的损耗降低。

目前我国远距离输电采用的电压有 110kV、220kV、330kV，在少数地区采用 500kV 的超高压送电。

2. 高压输电的原理图

大型发电机输出的电压，其等级有 10.5kV、13.8kV、15.75kV、18.0kV，都不符合远距离输电的要求。因此，要在发电站内用升压变压器升压后再向远方送电。如果输电电压为 220kV 或 330kV，到了用电区，先在一次高压变电站降为 110kV，再由二次高压变电站降到 10kV，其中一部分送往需要高电压的工厂，另一部分送到低压变电站降到 220V/380V，送给一般用户。图 6-6 表示出了从发电站到用户的输电线路。

输送电能的基本要求是：可靠、保质、经济。可靠是指保证供电线路可靠地工作，少出故障或停电；保质就是保证输送电能的质量，主要是要求电压与频率稳定，否则将会损坏用电设备；

经济是指输电线路建造和运行的费用低、电能损耗少、电价低。

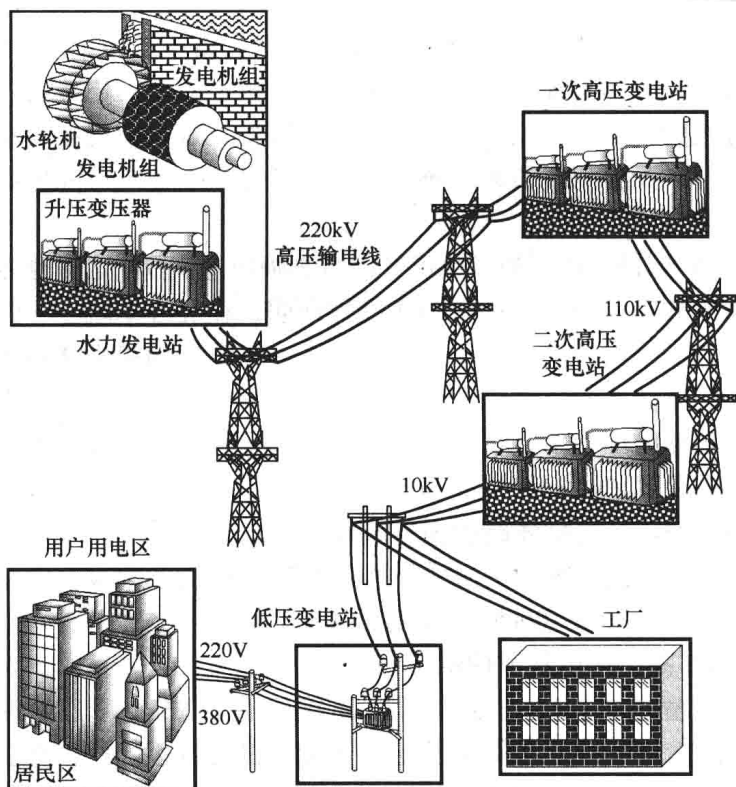


图 6-6 交流电输电线路图

6.2 交流电的特点

6.2.1 交流电的三要素与基本物理量

我们学习交流电,不仅要了解它的方向随时间变化的规律,

还应分析它的大小、变化快慢、变化先后等，如图 6-7 所示。

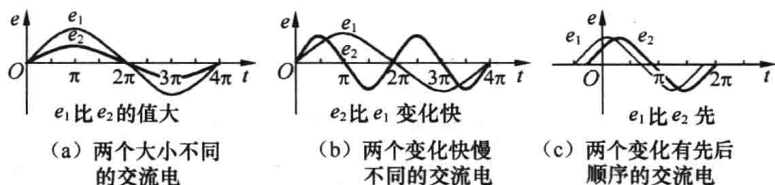


图 6-7 交流电的三要素

交流电的大小、变化快慢、变化先后分别对应地由有效值（或最大值）、频率（或周期、角频率）、初相角三个基本物理量来确定。交流电的特点主要表现在这三个方面，我们把有效值、频率和初相角称为交流电的三要素。下面就分别讨论这三要素。

6.2.2 表示交流电变化快慢的物理量

交流电变化的快慢通常用周期、频率、角频率来表示。

1. 交流电的周期

在图 6-5 中讨论了交流发电机转子线圈匀速旋转一周(360°)，产生的电动势 e 也是变化一周。如果转子线圈继续旋转，电动势 e 的正弦曲线将继续延续。

我们把交流电每变化一周所需要的时间称为交流电的周期，用字母 T 表示，如图 6-2 (b) 所示。周期的基本单位为秒，用符号 s 表示。比 s 小的单位还有 ms 、 μs 。

回头看图 6-2 (b)，该交流电变化一周所需的时间为 $0.02s$ ，即它的周期 $T=0.02s$ 。

2. 交流电的频率

交流电在 $1s$ 内变化的周数叫做交流电的频率，用字母 f 表

示。频率的单位为赫兹，简称赫，用符号 Hz 表示。比 Hz 大的单位还有 kHz 和 MHz。周期与频率互为倒数，即

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{或} \quad f = \frac{1}{T}$$

可见周期越短，频率越高，交流电变化越快。在我国的电力系统中，国家规定动力和照明用电的频率为 50Hz，习惯上称为工频，对应的周期 T 就为 0.02s。

3. 交流电的角频率

交流电变化的快慢，除了可用周期 T 和频率 f 两个物理量来表示外，还可用角频率来表示。要理解角频率，先得了解交流电的角度（电角度）和弧度的含义。

我们知道，旋转物体转动一周将构成一个圆，圆又有它对应的角度与弧度。一个圆周对应的角度是 360° ，对应的弧度为 2π 。如果线圈旋转 90° ，对应的弧度数就为 $\frac{\pi}{2}$ 。

在讨论交流电时，发电机转子线圈旋转一周对应的 360° 角称为线圈旋转的空间几何角度。转子线圈旋转一周形成的 2π 弧度角称为电角度。为了便于交流电的有关计量，通常使用电角度对角频率进行定义。在单位时间（1s）内交流电变化的弧度数称为角速度，也称为角频率，用字母 ω 表示。角频率的单位为弧度/秒，读作“弧度每秒”，用符号 rad/s 表示。这样角频率、周期、频率就有如下关系：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

频率、周期、角频率都是反映交流电变化快慢的三种表示方式。平时频率的概念用得最多，比如我国电力工业的交流电的频率 f 为 50Hz，其角频率 ω 就为 314rad/s。