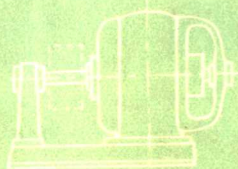


电机工人适用

电 工 学

第四分册 交流电路

章 炎 福 著



水利电力出版社

內 容 提 要

电机工人适用“电工学”，是專为具有高小至初中文化程度的电机技术工人編写的电工学的基础讀物，也可供非电机專業人員和轉业工作人員作为学习电工学的参考資料。內容由淺入深，从一般到具体，沒有高深的数学和理論，文字通俗易懂。

这一分册講解了交流电的基本特性，电阻、电感和电容电路的計算方法，并敘述了三相交流电路中星形联結和三角形联結时电功率的計算方法，使讀者在学习了第一分册后，了解交流电的原理，并給繼續学习以下各分册打下基础。

电 工 学 第四分册 交流电路 章 炎 福 著

*

279D103

水利电力出版社出版(北京西郊科學路二里溝)

北京市書刊出版業營業許可證出字第105号

水利电力出版社印刷厂印刷 新华書店发行

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 开本 * 1 $\frac{1}{2}$ 印張 * 44千字

1955年12月北京第1版

1958年10月北京第8次印刷(134,216—164,235册)

統一書号: : T15143·15 定价(第7类)0.23元

目 錄

第九章 單相交流電	3
一、交流電和直流電	3
二、交變電動勢的產生	4
三、交變電流的頻率	6
四、頻率和週期的關係	7
五、交流發電機頻率和轉速的關係	7
六、正弦波的圖示法	9
七、正弦波的相加	11
八、交變電流的有效值和平均值	14
九、有效值與平均值的計算	16
十、純電路	18
十一、純電阻的電路	18
十二、純電阻電路的功率	19
十三、電磁感應和自感係數	20
十四、純電感的電路	22
十五、純電感電路的功率	25
十六、感抗和電阻的串聯電路	26
十七、阻抗三角形	27
十八、感抗和電阻串聯電路的功率	30
十九、功率因數	31
二十、電容器	33
二十一、純電容的電路	36
二十二、容抗和電阻的串聯電路	38

二十三、感抗、容抗和电阻的串联电路.....	...40
二十四、並联电路.....	...42
二十五、提高功率因數.....	...42
第十章 三相交流电	...46
一、三相交流电的產生.....	46
二、星形接法.....	47
三、星形連接時的电压.....	49
四、三角形接法.....	50
五、三相电功率和單相电功率的比較.....	52
六、三相电功率的計算.....	54
七、三相負荷不平衡時的一些性質.....	56
八、三相电功率的測定.....	58

第九章 單相交流电

一、交流电和直流电

直流电和交流电的基本區別在於直流电的方向是始終不變的；交流电的方向則是不斷改變的。根據歐姆定律，直流電路中電流值等於電壓被電阻除，但在交流電路中有時却不能這樣計

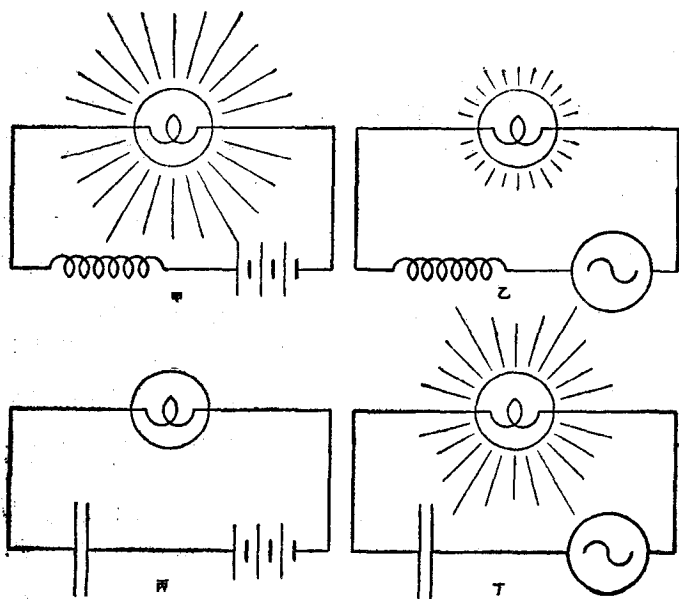


圖 1 通過線圈和電容器的直流電與交流電

甲—通過線圈的直流電； 乙—通過線圈的交流電；

丙—通過電容器的直流電； 丁—通過電容器的交流電。

算。譬如將 220 伏的交流電接通只有 1 歐電阻的線圈，可能只會通過很小的電流；但是如果把交流電接通容電器的兩塊金屬片，雖然金屬片之間隔有良好的絕緣材料，卻能通過很大的電流。圖 1 表示交流電和直流電在線圈和電容器中通過的情形。

二、交變電動勢的產生

交變電動勢，如圖 2 所示，是用一根直導線在均勻磁場中作等速旋轉時所產生的。

我們已經知道，感應電動勢的大小，是決定於磁場的感應量，導線的長度，導線切割磁力線的速度和角度的；感應電動勢的方向，則決定於導線切割磁場的方向（或磁場切割導線的方向）。那末，當長度固定的導線在均勻磁場中以一定方向作等速度旋轉時，所產生的感應電動勢就只和導線切割磁力線的角度有關。

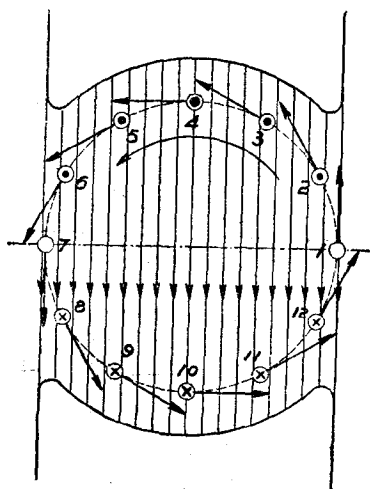


圖 2 旋轉導線所產生的交變電動勢

在圖 2 中可以看到，當導線位置在 1 時，因為導線運動的方向與磁力線平行，恰好是沿着磁力線滑過去，並不切割磁力線，所以不產生感應電動勢。

當導線位置在 2 時，導線以非常偏斜的方向切割磁力線，導線切割磁力線的角度很小，所以產生的感應電動勢也很小。

導線位置在 3 時，導線

切割磁力線的斜度比較小，產生的感應電動勢就比較大些。

導線位置在 4 時，導線旋轉到磁極中央，導線運動的方向和磁力線垂直，產生的感應電動勢最大。經過位置 4 後，導線切割磁力線的方向又逐漸偏斜，因此產生的感應電動勢也逐漸減小。到位置 7 時，導線的感應電動勢又減到零。

導線經過位置 7 後，便轉入另一個磁極下。因為切割磁力線的方向與前半轉的方向相反，所以感應電動勢的方向也相反。這時感應電動勢跟着導線切割磁力線的角度又逐漸增大，到位置 10 時，產生反方向感應電動勢的最大值。此後電動勢又逐漸減小，當導線移動到原來的起點時，感應電動勢又減到零。

如果我們把導線在圓周上旋轉的位置展開，用一根直線來表示導線在圓周上移動的位置，在垂直的方向按比例畫出導線在這些位置上所產生的感應電動勢，規定一個方向的電動勢為正（譬如向左的一個方向），相反方向的電動勢為負（譬如向右的方向）。我們可以按照這些感應電動勢的大小畫出一條具有規律性變動的曲線，如圖 3 所示。這一條起伏波動的線，叫做正弦曲線。

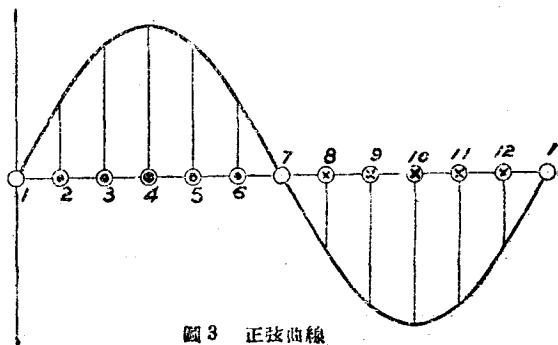


圖 3 正弦曲線

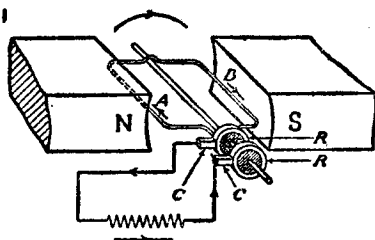


圖 4 最簡單的交流發電機

在 N 極切割磁力線時，另一邊 B 同時在 S 極切割磁力線。根據發電機右手定則，我們知道線圈兩邊感應電動勢的方向總是相反的。這樣，就可以在電刷上引出由交變電動勢所推動的交變電流。

導線在兩極間旋轉一整圈，交變電動勢（或交變電流）完成一次正負變化，就叫做一週。

三、交變電流的頻率

在單位時間（1 秒）內，交變電流變動的週數叫做交變電流的頻率，常用字母 f 來代表，單位是赫芝^①（簡稱赫）。有時也用交流符號 $[\sim]$ 來表示頻率的赫芝數。例如：每秒 50 週的交流電可以簡寫為： $f=50\sim$ 。

在我國和其他歐亞國家的供電系統中，標準頻率大都是每秒 50 週。

無線電中常應用頻率很高的交流電，大約在 15000—60000 000 週/秒之間。此外，高頻率交流電也用於煉鋼和金屬的熱處理等；在醫學上可用來治療人體內部的病症。這些高頻率常用 $[k\text{週}]$ 作為單位，即 $1000 \text{ 週} = 1 \text{ 仟週}$ 。

① 赫芝——1 赫芝就是每秒變動 1 週。

四、頻率和週期的關係

交流電的頻率表示每秒完成的週數。頻率的倒數表示每週所需的時間，叫做週期，用字母 T 來代表。例如，50 週/秒的頻率，每一個週期就祇有 $1/50$ 秒；頻率與週期的關係如下：

$$\text{週期} = 1/\text{頻率} \quad \text{或} \quad T = 1/f \quad (\text{公式 1})$$

$$\text{頻率} = 1/\text{週期} \quad \text{或} \quad f = 1/T \quad (\text{公式 1 甲})$$

式中 f = 頻率，以赫芝或週/秒為單位；

T = 週期，以秒為單位。

例 1 已知交流發電機的頻率為 50 週/秒，計算每週所需的時間。

解： $T = 1/f = 1/50 = 0.02$ 秒。

例 2 已知交流電的週期為 0.04 秒，計算它的頻率。

解： $f = 1/T = 1/0.04 = 25$ 週/秒 (25 赫芝)。

五、交流發電機頻率和轉速的關係

前面所說的交變電流，都是由只有一對磁極的交流發電機產生的，轉子每旋轉一轉，導線中產生一週的交變電動勢。這樣，交流發電機必須每秒鐘旋轉 50 次，才能產生 50 週/秒的標準頻率。

在實用上都拿每分鐘的轉數來說明各種機器的轉速，用字母 n 來代表。例如發電機的銘牌上寫着 $n = 1500$ ，就表示轉子每分鐘旋轉 1500 次。

如果電機的轉速是 n 轉/分，那末每秒的轉速應該是 $n/60$ 。所以對於兩極交流發電機來說，頻率與轉速的關係是：

$$f = n/60 \quad \text{或} \quad n = 60f \quad (\text{公式 2})$$

因此由兩種交流發電機來產生每秒 50 週的標準頻率，發電機每分鐘的轉數應該是：

$$n = 60f = 60 \times 50 = 3000 \text{ 轉/分。}$$

但是在四極（兩對磁極）交流發電機中，如圖 5 所示，轉子每

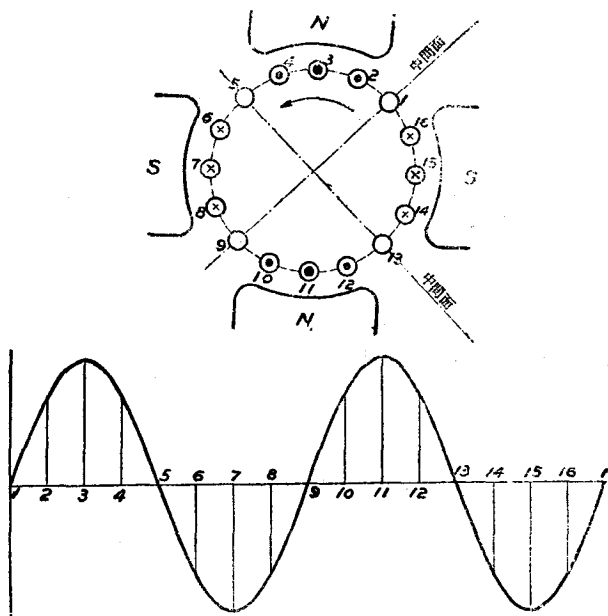


圖 5 四極交流發電機所產生的交变电動勢

旋轉半轉就可以產生一週，在第二個半轉中又可以產生一週。這樣，轉子每旋轉一轉就可以產生兩週。同樣在六極交流發電機中，轉子每旋轉一轉，可以產生三週。在多極交流發電機中，如果我們以字母 p 來代表交流發電機磁極的對數，那末交变電流的頻率應該是每秒鐘轉數的 p 倍，即

$$f = p \times n / 60 \quad (\text{公式 3})$$

例 1 已知 10 極交流發電機的轉速為 720 轉/分，試求交变電流的頻率。

解： $f = Pn/60 = 5 \times 720/60 = 60$ 。

如果已知交变電流的頻率和磁極對數，轉速可以用以下公式求得，即：

$$n = 60 f / p \quad (\text{公式 3 甲})$$

例 2 已知六極交流發電機的頻率為 50 週/秒，試求發電機的轉速。

解： $P = 6/2 = 3$,

$$n = 60 f / 3 = 60 \times 50 / 3 = 1000 \text{ 轉/分}。$$

同樣，已知交流發電機的頻率和轉速，也可以算出磁極的對數，即：

$$p = 60 f / n \quad (\text{公式 3 乙})$$

例 3 已知交流發電機的轉速為 125 轉/分，產生的頻率為 25 週/秒。試計算交流發電機的磁極數。

解： $P = 60 f / n = 60 \times 25 / 125 = 12$,

發電機有 24 個(或 12 對)磁極。

六、正弦波的圖示法

1、正弦曲線

前面談到的交变电動勢或交变电流都是用一根水平方向的直線表示時間，由這根直線上引出垂直線的高度，表示电压或电流的瞬時值。這一種方法可以把交流電在一週內的變動都表示出來，如圖 3 所示。

實際上，正弦波电压或电流的變動，是連續起伏的波動，並沒有肯定的起點或終點。我們所以要選定一個起點，不過是為了便於說明正弦波變動的情形。正弦波的起點與它由零值開始上昇時所成的角度稱為相角，或起始相位。見圖 6 乙。

2、向量圖

正弦波也可以用旋轉向量來表示。向量的長度表示正弦波电压或电流的最大值；旋轉向量與水平線的夾角表示相角。相角的計算，規定反時針旋轉的方向為相角的正方向。順時針的方向為負方向。大於 180° 的相角可改用較小的負值相角來代

替較大的正值相角。向量旋轉的速度称为正弦波的角速度^①。旋轉向量在各个不同位置上对水平線間的高度（就是向量在垂直線上的投影），表示正弦波的瞬時值。

例如在圖 6 中，交变电動势是由導線在均匀磁場中旋轉時所產生，这样，交变电動势的高低便決定於導線切割磁力線的速度。圖 6 甲表示導線已轉過中間面 θ 角時的位置。現在就把这个位置作为計算交变电動势的起點，根据導線在各个位置上所產生的感应電動势，可以用正弦曲線來表示交变电動势的正弦波，如圖 6 乙所示；同時也可以用旋轉向量來表示这正弦波，如圖 6 丙所示。

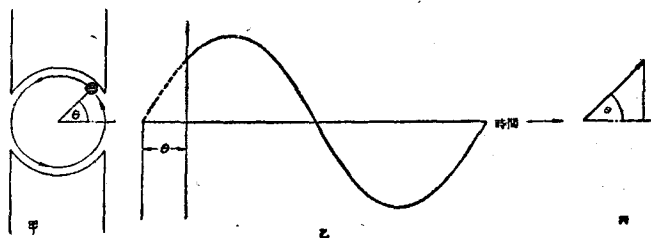


圖 6 向 量 圖

旋轉向量常用來表示幾個同頻率不同相位的电压或电流，指出它們相互間的各种關係。如圖 7 甲所示，在發電機轉子上繞着相差 90° 的兩個線圈 I 和 II 。根据旋轉的方向，我們可看到線圈 I 的位置比線圈 II 越前 90° 。圖 7 乙表示這兩個線圈中感应電動势的正弦曲線。現在把線圈 II 在圖 7 甲的位置作为正弦波的起點，那末線圈 I 的相角是 90° ，線圈 II 的相角是 0° 。圖 7 丙表示這兩個交变电動势的向量圖。因为這兩個線圈

① 角速度就是在單位時間（一秒鐘）內旋轉了多少角度或弧度。1 弧度等於 57.29° 。一弧度所包括的圓周上一段弧的長度等於這圓的半徑的長度。

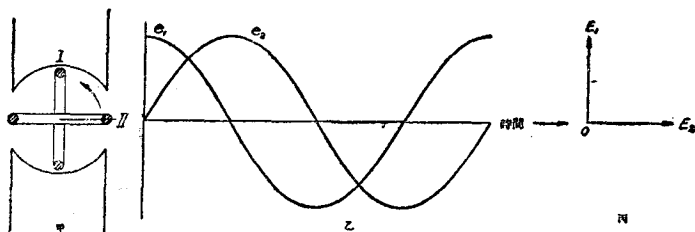


圖 7 由兩個互相垂直的線圈所產生的交变电動勢(一)

用同样的角速度旋轉,所以旋轉向量間的相对位置始終保持不變。

在画向量圖時,可选定適當的起點,先決定一个向量的位置,其他向量的位置必須和这一个向量保持適當的相位差。例如在圖 7 中,我們也可以用線圈 I 的電動勢由零值上昇時作为計算時間的起點,如圖 8 甲所示。這時線圈 I 的相角是 0° ,線圈 II 的相角是 -90° 。圖 8 乙表示這兩個交变电動勢的正弦曲線。圖 8 丙是這兩個交变电動勢的向量圖,基本上与圖 7 丙沒有什麼差別。

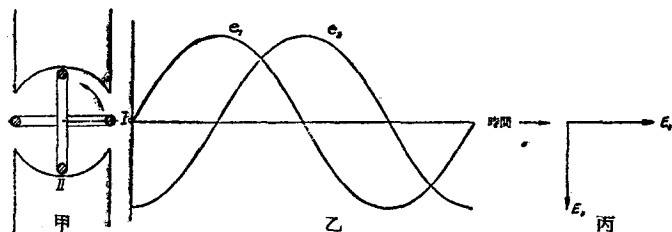


圖 8 由兩個互相垂直的線圈所產生的交变电動勢(二)

七、正弦波的相加

正弦波的相加可以把代表正弦波的正弦曲線來相加;也可

以把代表正弦波的向量來相加。

正弦曲線的相加，必須在每一個時刻，把曲線的高度相加在一起。如圖 9 甲所示， e_1 、 e_2 是兩條相位不同的正弦波電壓的曲線； e_3 是這兩條曲線相加後所得的另一條曲線，表示兩正弦波電壓的總值。

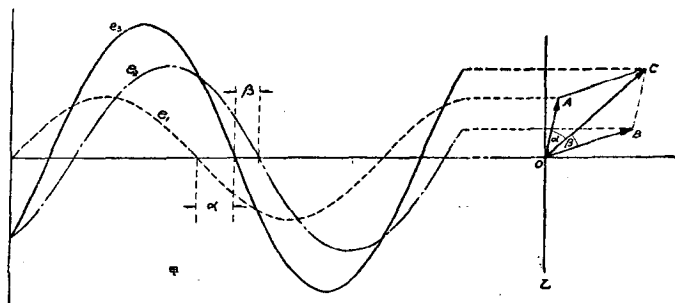


圖 9 正弦波的相加

向量的相加比正弦波曲線的加法方便得多。圖 9 乙中， OA 、 OB 是正弦波電壓的兩個向量。要把這兩個向量相加，可先將向量 OB 平推，使它的起點與向量 OA 的終點相接；然後聯接向量 OA 的起點和 OB 的終點。這樣所得的向量 OC ，就表示正弦波電壓的總值。我們可以由圖 9 中看到， A 點的高度表示正弦波電壓 e_1 的瞬時值， B 點的高度，表示正弦波電壓 e_2 的瞬時值。 C 點的高度等於 A 點和 B 點高度的和，因此向量 OC 表示這兩個正弦波電壓的總值。

兩個向量相差 90° 時，合成向量的總值，可根據商高定理^①來求得。如圖 10 所示，在表示正弦波電壓的直角三角形中：

① 商高定理：在任何直角三角形中，兩直角邊的平方之和等於斜邊的平方。例如在圖 10 中， OAC 是直角三角形，因此， $OA^2 + AC^2 = OC^2$ ， $OC = \sqrt{OA^2 + AC^2}$ ， $AC = \sqrt{OC^2 - OA^2}$ ， $OA = \sqrt{OC^2 - AC^2}$ 。

$$E_m^2 = E_{1m}^2 + E_{2m}^2,$$

或 $E_m = \sqrt{E_{1m}^2 + E_{2m}^2};$

式中 $E_m =$ 合成电压 e 的最大值,

$E_{1m} =$ 电压 e_1 的最大值,

$E_{2m} =$ 电压 e_2 的最大值。

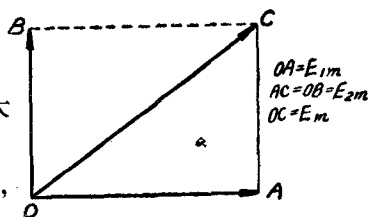


圖 10 兩垂直向量的相加

從圖中可以看到：合成向量總是接近其中較大的一个向量。例如在圖 10 中，由於向量 OA 大於向量 OB ，所以 OC 接近 OA 。又如在圖 9 中，由於向量 OB 大於向量 OA ，所以 OC 接近 OB 。

兩個同相的正弦波相加，方法与上述相同（圖 11 甲）。此時合成向量的總值，等於把兩個向量直接相加（圖 11 乙），即 $E_m = E_{1m} + E_{2m}$ 。各組成部分的相位，也就是合成向量的相位。

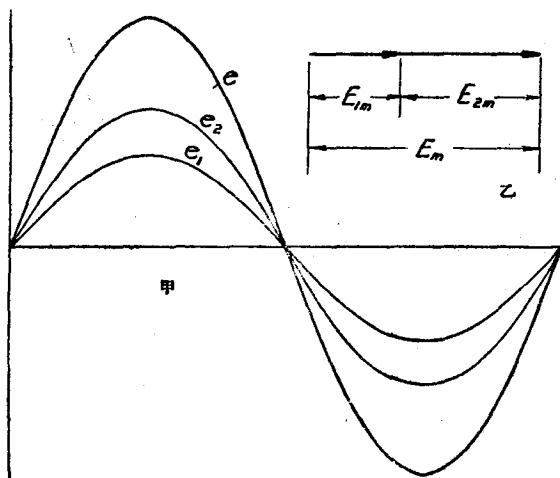


圖 11 同相正弦波的相加

兩個正弦波的相減，可以用加法來代替，我們知道，在代數

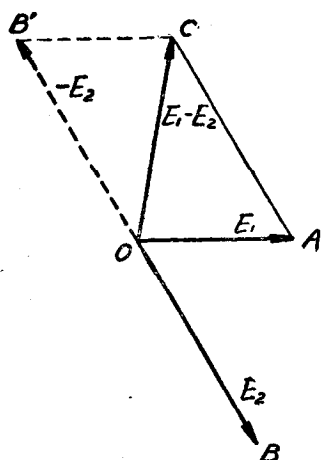


圖 12 向量的相減

裏，一個數減去另一個數，跟一個數加上另一個數的負數的結果是一樣的，例如 $5-2$ 也可以寫成 $5+(-2)$ ，所以，在圖 12 的例子中， E_1-E_2 可以寫成 $E_1+(-E_2)$ ，我們只要用 E_1 的向量 OA 和 E_2 的反方向向量 OB' 相加，就可以得到由 E_1 減 E_2 的向量 OC 。

八、交變電流的有效值和平均值

圖 13 表示電源產生一按照正弦波變動的交流電壓。假定在這樣一個電源上連接一電阻為 100 歐的燈泡，在位置 1 時，根據歐姆定律， $I=U/R=0/100=0$ ，燈泡中通過的電流為零。在位置 2 時， $I=U/R=85/100=0.85$ 安。在位置 4 時， $I=U/R=170/100=1.7$ 安，達到交變電流的最大值。從位置 1 到位置 4，電壓由零增加到 170 伏；同時電流也由零增加到 1.7 安，達到交變電流的最大值。此後電壓與電流都開始下降。在位置 7 時電壓和電流都等於零，然後在

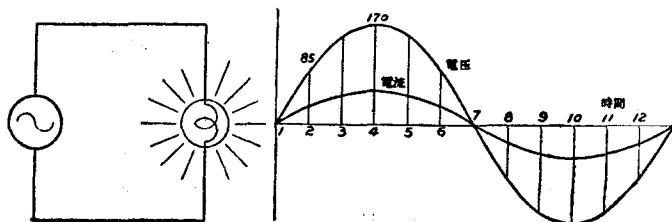


圖 13 交流電的負荷

位置 10 時產生相反方向的最大值。可知正弦波电压的前半週为正，後半週为負（所謂交变电压与电流的正負，不过是表示电压与电流的方向，如果我們已規定一个方向是正，那末另个方向是負）。至於直流电，如圖 14 所示，則具有一定的方向和大小，並不隨時間而變動。

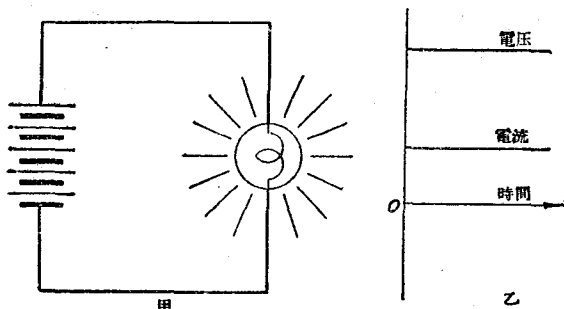


圖 14 直流电的負荷

因為我們不備用幾千次歐姆定律來計算每一個瞬間的交变电压或电流，同時交变电流的最大值又只有兩個很短促的時間，並不能代表整個週期中电压或电流的大小，所以在實用上常用熱效应相等的直流电來表示交变电流的大小，称为交变电流的有效值。換一句話說，在兩個同樣的电阻內，分別通以交流电和直流电，如果它們產生的熱量相等，就認為这交流电和直流电具有相等的电流值。

正弦波交流电的有效值等於最大值的 $1/\sqrt{2}$ 或 0.707；最大值則等於有效值的 $\sqrt{2}$ 或 1.414 倍，即

$$U_{\text{有效}} = 0.707 U_{\text{最大}}, \quad I_{\text{有效}} = 0.707 I_{\text{最大}};$$

$$U_{\text{最大}} = 1.414 U_{\text{有效}}, \quad I_{\text{最大}} = 1.414 I_{\text{有效}};$$

此後表示电压或电流的有效值時，將不再附註小字。