

電路學

(上冊)

陳建文

編著

電路學

(上冊)

施建文

編著

版權所有・翻印必究

中華民國六十九年三月一版

電 路 學

基價五元

編著者：施 建 文

出版登記行政院版台業字第零肆壹零號

發行者：勝文書局（原中華出版社）

台 南 市 育 樂 街 16 號

總經銷：興業圖書股份有限公司

台 南 市 勝 利 路 一 一 八 號

印刷者：興 業 印 刷 廠

台 南 市 勝 利 路 一 一 八 號

電話：(062) 3 7 3 2 5 3 號

序 文

- 一、本書係遵照教育部民國六十五年六月修訂公佈工業專科學校，電機工程科電路學課程標準編輯而成。
- 二、本書共分十三章，分爲上、下兩冊，可供五專第三學年上、下學期及二專第一學年下學期及第二學年上學期每週授課三小時使用
- 三、本書所用名詞，悉依照教育部公佈之電機工程名詞爲準，並附英文原名，以資對照。
- 四、本書雖悉心校訂，細心校閱，但仍恐有疏漏，尙祈先進惠賜指正，是幸。

編者 謹識

目 錄

第一章 正弦電壓與電流	1
1—1 引言	1
1—2 正弦波	1
1—3 正弦電壓之產生	2
1—4 頻率、角速率、週期及波長	5
1—5 相角及相角差	9
1—6 平均值及有效值	10
1—7 波形因數及波峯因素	19
1—8 正弦波之加減運算	20
第二章 複數和相量	26
2—1 引言	26
2—2 正弦之波表示法	26
2—3 複數和相量	27
2—4 複數型式之表示法及互換	31
2—5 複數之運算	38
2—6 弦波函數之加減與複數量之關係	43
第三章 正弦穩態電路	49
3—2 電路元件	49
3—3 純電阻電路	51
3—4 純電感電路	52
3—5 純電容電路	54
3—6 阻抗與導納	56
3—7 電阻與電感串聯之電路	59

3—8	電阻與電容串聯電路	63
3—9	電阻、電感和電容之串聯電路	66
3—10	電阻及電感並聯電路	69
3—11	電阻與電容並聯電路	72
3—12	電阻、電感及電容之並聯電路	74
3—13	串聯和並聯等值關係	76
3—14	串並聯電路	81

第四章 電功率.....90

4—1	引言	90
4—2	功率之一般式	90
4—3	電阻吸收之功率和能量	92
4—4	電感中之功率和能量	94
4—5	電容器中之功率和能量	97
4—6	一般電路之功率	100
4—7	複功率	106
4—8	複功率之應用	110
4—9	功率因素之提高	114
4—10	有效電阻	120

第五章 網路分析.....127

5—1	引言	127
5—2	電源變換	128
5—3	克希荷夫定律	130
5—4	支路電流法	131
5—5	環路分析法	133
5—6	節點分析法	140
5—7	Y— Δ 及 Δ —Y變換	145
5—8	戴維寧定理	152
5—9	諾頓定理	158
5—10	重疊定理	162

5—11	倒置定理	166
5—12	代換定理	168
5—13	補償定理	170
5—14	朱爾曼定理	176

第六章 耦合電路 193

6—1	引言	193
6—2	自感與互感	194
6—3	互感電路與互感極性	197
6—4	耦合係數	200
6—5	耦合電路之電壓方程式	204
6—6	變壓器	210
6—7	理想變壓器	213
6—8	任意耦合電路之等效電路	221

第七章 諧振電路 236

7—1	引言	236
7—2	頻率變化對RLC串聯電路之影響	236
7—3	串聯諧振	238
7—4	品質因素	241
7—5	串聯電路之電壓提昇	243
7—6	RLC電路之可變電路及可變電感	245
7—7	選擇性、半功率點及頻帶寬度	250
7—8	理想並聯諧振電路	255
7—9	實際並聯諧振電路	261
7—10	並聯電路之分路效應	265

習題 272

第一章 正弦電壓與電流

1-1 引言

現在之大多數企業及工廠，均採用交流電能，因交流電能可使用大型交流發電機產生，使單位功率之成本降低，且交流電力容易變壓，可用高壓輸送，減少線路損失，提高輸送效率，此外，交流感應電動機，成本較直流電動機為低，維護容易，使用方便；在若干電化及電解工業方面，必須使用直流電者，亦往往先供以交流電力，再以整流設備變為直流後予以運用，基於以上原因，故交流電力之應用遠較直流普遍。

直流與交流之主要不同點為，直流電壓極性不變，直流電流方向不變，且大小均為定值；而交流電壓與電流則為週期性函數，電壓極性及電流大小均隨時間而變。在直流電中，若電壓之大小隨時間而變，但極性不變，則稱為脈動電壓 (pulsating voltage)，同理，若僅電流大小隨時間而變而方向不變，則稱為脈動電流 (pulsating current)，脈動電壓及電流常稱為脈動直流。

1-2 正弦波

正弦波為一波形，可用下式予以表示：

$$y = K \sin x \dots\dots\dots (1-1)$$

在實際應用之交流電壓和交流電流波形中，其最主要者即為正弦波，即使並非正弦波，只要是具有週期性之波形，亦可將其化為正弦波予以分析，此種非正弦波之分析將於第十三章中加以討論。

本書所謂之正弦波係包括餘弦波而言，因為這兩種波形之外形相

同，僅是大小之變化，在時間上有所差異而已，實際上，正弦波形之方程式可使用餘弦之方程式表示，餘弦波形之方程式，亦可使用正弦方程式表示，為方便計，不論是正弦波或餘弦波，均稱之為弦波。

在交流電路中，正弦波形之所以重要，其理由如下：

- (1) 正弦變化發生於自然現象中（如鐘擺之擺動、湖面之波紋及聲音之傳遞等）。
- (2) 正弦波為最易產生及使用最方便之波形。
- (3) 所有週期性之波形可用適當振幅（amplitude）、頻率（frequency）和相位關係之正弦波形綜合產生。
- (4) 正弦波之積分和微分仍可寫為正弦波。

居於以上之理由，本書之以後各章中，網路之響應，將以討論對弦波之網路響應為主。

1—3 正弦電壓之產生

在工業上、商業上或家庭用電所使用之電能大多由電磁發電機（electromagnetic generators）所產生，這些發電機之作用係利用電磁感應原理，使線圈之磁通鏈（ $\lambda = N\phi$ ，為線圈匝數和穿過線圈磁通量之乘積）發生變化而感應電壓的，由法拉第定律（Faraday's law）知，線圈之感應電壓大小與磁通鏈之時變率成正比，即

$$e = \frac{\Delta \lambda}{\Delta t} = N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \dots\dots\dots (1-2)$$

式（1-2）係表示在 Δt 時間內， N 匝線圈若有 $\Delta \phi$ 通量變化所感應之平均電壓。若寫為微分式，則為

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (1-3)$$

式（1-3）中，只要磁通 ϕ 為弦波變化，則感應之電壓即為弦波。

圖 1-1 示一基本電磁發電機，由二磁極及在磁場中旋轉之導體迴線所組成，此迴線之邊導體因跨越磁場割切磁通而在迴線端間有電

動勢產生，導體迴線之兩端各接於一金屬滑環 (slip ring)，電刷 (brush) 保持與滑環接觸，而將旋轉迴線在各位置感應之電動勢接至外電路。

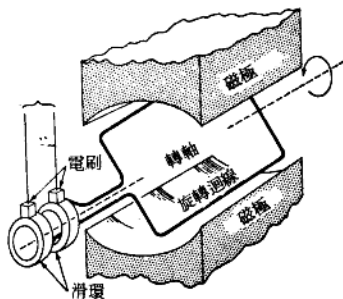
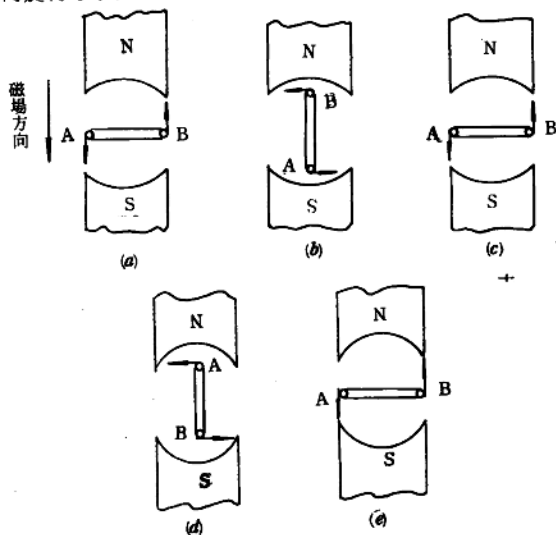


圖 1-1 基本交流發電機

圖 1-2 示迴線旋轉在各間隔 90° 時迴線邊之位置，迴線為反時針方向旋轉，小圓 A 和 B 表示迴線邊之截面。在圖 (a) 中，迴線邊之

圖 1-2 在各間隔 90° 時之迴線邊位置

運動方向和垂直之磁場平行，導體未割切磁場，故迴線無電動勢產生，圖(b)中，迴線邊之運動方向和磁場垂直，有最大之相對運動，故產生最高之感應電壓；圖(c)之情況和圖(a)相同，惟迴線邊A和B之位置互換，此時感應電勢為零；圖(d)亦在感應電動勢最大之位置，和圖(b)同，但此時迴線邊A(B)向左(右)運動，而圖(b)中

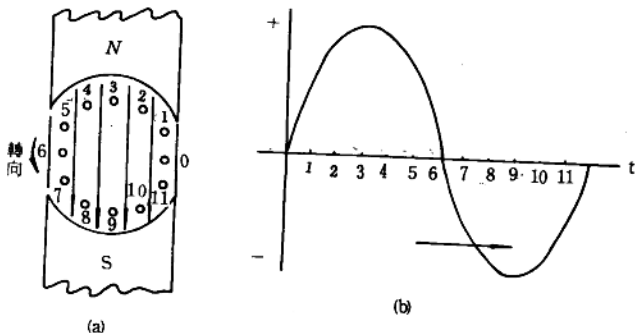


圖 1-3 (a) 迴線之位置；(b) 對應於(a)中各位之感應電壓大小及極性

則為向右(左)運動，由於運動之方向相反，感應電動勢之極性亦相反；圖(e)則又回至圖(a)之情況，週而後始，此時感應電勢為零。

圖1-3示迴線在一週中各位置及其對應之感應電壓。電壓之大小由零至最大，後由最大至零，然後以相反極性至最大，再回至原來之零，恰好完成交流之一週。

設迴線邊之運動半徑為 r ，迴線之旋轉速率為 ω ，在某一瞬間迴線平面(經過迴線邊A和B之線)和水平面夾角為 θ ，迴線邊之瞬時運動方向和旋轉半徑垂直，和垂直線成 θ 角，如圖1-4所示。圖中 v 為迴線邊A和B之瞬時速度， v_p 為 v 為垂直於磁場方向之分速度，故

$$v_p = v \sin \theta$$

因感應電勢和垂直於磁場之導體運動速度分量成正比，故在任意瞬間

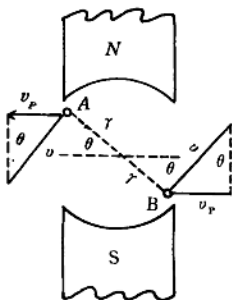


圖 1-4 旋轉迴線決定感應電壓之因素

，感應電動勢 e 和 v_p 成正比，即

$$e \propto v_p = v \sin \theta$$

若迴線之轉速以 ω 徑/秒為單位，則迴線導體 A 和 B 之速度為

$$v = r \omega$$

故感應電動勢和旋轉半徑 r 有下面之關係，即

$$e \propto r \sin \theta \dots\dots\dots (1-4)$$

由式 (1-4) 可知，上述之電磁發電機其感應電動勢之波形係為正弦波。

在許多交流之電子信號產生器中，廣泛使用電感—電容之諧振電路以獲得正弦波，稱為振盪器 (oscillators)，此種弦波振盪器常為無線電發射機 (transmitters) 和接收機 (receivers)，以及若干量度儀表之副系統，對於電路之諧振現象，將在第九章中再予以討論。

1-4 頻率、角速率、週期及波長

依定義，頻率係一週期性電波，在一秒時間內所變化之週數，對一交流發電機 (alternator) 而言，如 1-2 節所述，一導體經一對磁極 (指一南極和一北極) 之下旋轉一週 (等於由一磁北極中心移

經磁南極，復至下一磁北極中心之時間），可得一週正弦波形之感應電勢，對一有兩極之交流電機，導體每旋轉一週，電壓波形恰為一循環，若此一週恰在 1 秒鐘之時間內完成，則其頻率為 1 赫 * (hertz)，若發電機之極數加倍，則導體週轉一週所得電勢波形之變化週數亦加倍，若導體旋轉一週之時間相同，則頻率亦加倍；若極數不變，轉數加倍，則導體在相同時間內所獲得之交變週數亦加倍，由此可知，電勢在 1 秒間完成之週數（即頻率）為發電機之每秒轉數和每轉磁極對數之乘積，即

$$\text{頻率} = \text{每秒轉速} \times \text{磁極對數}$$

設 P = 交流發電機之極數

n = 發電機之每秒轉數 ($r.p.s$)

N = 發電機之每分鐘轉數 ($r.p.m$)

f = 頻率 (每秒變化週數)

則

$$f = \frac{Pn}{2} = \frac{PN}{120} \dots\dots\dots (1-5)$$

由式 (1-5) 知，若已知發電機之極數和轉速，即可求得頻率；反之，若已知頻率和極數，亦可求得速率，即

$$N (r.p.m) = \frac{120f}{P} \dots\dots\dots (1-6)$$

由式 (1-6) 知，發電機之轉速，係與所需頻率成正比，與極數成反比。

茲將發電機之每分鐘轉數、頻率和極數之關係，列於表 1-1 中。

* 赫為頻率之單位，替代以往之週 / 秒，係為紀念 Heinrich Rudolph Hertz (德人，1857 — 1894)，Hertz 先生在電磁波之研究貢獻甚大。

表 1-1 發電機轉速、頻率及極數之關係

$\begin{array}{c} f \\ N \\ P \end{array}$	60 Hz	50 Hz	25 Hz
2	3600	3000	1500
4	1800	1500	750
6	1200	1000	500
8	900	750	375
10	720	600	300
20	360	300	150

導體每旋轉一週，為 360 機工度 (mechanical degree)，而電壓正弦波形每完成一週為 360 電工度 (electrical degree)，如四極發電機之導體每旋轉一週 (360 機工度)，其電壓波形完成二週，即電壓波形完成 $2 \times 360 = 720$ 電工度，由此推論，可知

$$1 \text{ 機工度} = \frac{P}{2} \text{ 電度}$$

如上所述，電壓波形每完成一週為 360 電工度，若以弧表示，則波形之一週相當於 2π 弧，若頻率為 f ，則每秒完成 $2\pi f$ 弧，吾人將此數稱為角速度 (angular velocity) 或角頻率 (angular frequency)，即

$$\omega = 2\pi f$$

式中， ω = 角速度或角頻率，單位為弧/秒

角頻率為每秒所經過之角度，即

$$\omega = \frac{\theta}{t} \text{ 或 } \theta = \omega t \text{ 或 } t = \frac{\theta}{\omega} \dots\dots\dots (1-7)$$

式中， θ = 以弧為單位之角度

t = 時間，單位為秒

如上所述，頻率為波形每秒完成之週數，若頻率為 f 赫，即表示每秒波形完成 f 週，反言之，完成每一週所需要之時間為 $\frac{1}{f}$ ，吾人將此時間稱為該波形之週期 (period)，常以 T 表示之，頻率與週期之關係為

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{或} \quad Tf = 1 \dots\dots\dots (1-8)$$

週期性波在 1 秒鐘內所進行之距離，稱為波速 (wave velocity)，對電波而言，其速度與光速 C 相等，光速為 10^8 公尺/秒，在波之進行過程中，波之一週期所跨越之距離稱為波長 (wave length)，波長常以 λ 表示之，若波速為 v ，頻率為 f ，則波長、頻率及波速之關係為

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{或} \quad v = f\lambda \dots\dots\dots (1-9)$$

例如某電臺之廣播頻率為 1500 仟赫，則其廣播之波長為

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1500 \times 10^3} = 200 \text{ 公尺}$$

例 1-1 有一交流發電機，其頻率為 50 赫，若轉速為 600 rpm ，求此發電機之極數為若干？

解： 由式 (1-6) 得

$$P = \frac{120 f}{N} = \frac{120 \times 50}{600} = 10 \text{ 極}$$

例 1-2 有一 24 極交流發電機，其速率為 250 rpm ，試求其頻率為若干？

解： 由式 (1-5)

$$f = \frac{PN}{120} = \frac{24 \times 250}{120} = 50 \text{ 赫}$$

例 1-3 有一發電機其頻率為 60 赫，求其角頻率為若干？

解：由式 (1-7)

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377 \text{ 徑/秒}$$

1-5 相角及相角差

由式 (1-4) 及式 (1-6) 之關係，吾人可將正弦波形之電壓寫成

$$e = E_m \sin(\omega t + \alpha) \dots\dots\dots (1-10a)$$

式 (1-10a) 中， e 、 E_m 及 α 分別稱為電壓之瞬時值 (instantaneous value)、最大值 (maximum value) 及相角 (phase angle)，因正弦之絕對值小於 1，故 e 之絕對值必小於 E_m ，故 E_m 為 e 之最大值。同理，吾人可將正弦波形之電流表示為

$$i = I_m \sin(\omega t + \beta) \dots\dots\dots (1-10b)$$

式 (1-10b) 中， i 、 I_m 及 β 分別為電流之瞬時值，最大值及相

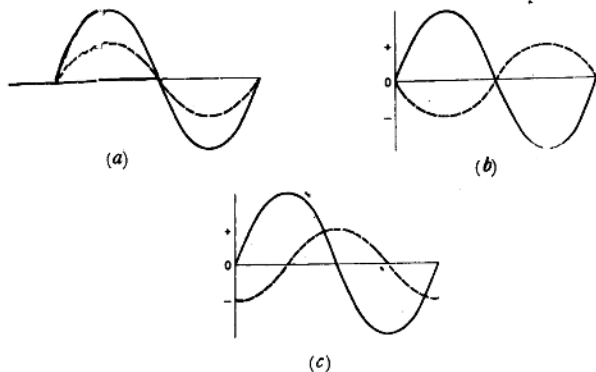


圖 1-5 二正弦波之相位關係。(a) 同相；(b) 反相；(c) 相位差為 90°

例 1-5 有一交流正弦波形電壓，若該電壓往正方向增加
 $\frac{1}{1600}$ 秒後可得一 30 伏之瞬時最大值，求該電壓之頻
 率？

解： 依題意：

$$30 = 30 \sin (2 \pi f / 1600)$$

$$\text{即 } \sin (2 \pi f / 1600) = 1$$

$$2 \pi f / 1600 = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$$

$$\therefore f = 400 \text{ 赫}$$

例 1-6 求圖 1-6 正弦波形間之相位關係為何？

$$i = 15 \sin (\omega t + 60^\circ)$$

$$v = 10 \sin (\omega t - 20^\circ)$$

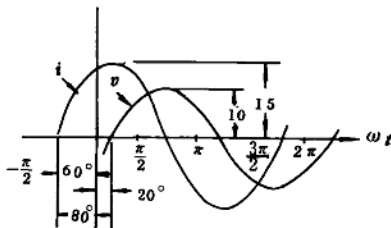


圖 1-6

解： 電流 i 引前電壓 v 80° ，或
 電壓 v 滯後電流 i 80° 。

1-6 平均值及有效值

由於正弦波形之正半週和負半週有相同之形狀及大小，故對全週而言，正弦波形之平均值 (average value) 為零，因此為了分辨不同正弦波形之相對大小，特別規定一正弦波形之平均值係指正半週