

中央精簡科技系列

電子電路

原理及題解

葛丕昌 編譯

EDWIN C. LOWENBERG 原著

THEORY AND PROBLEMS

OF

**ELECTRONIC
CIRCUITS**

中央圖書出版社出版

電子電路

原理及題解

葛丕昌 編譯

EDWIN C. LOWENBERG 原著

THEORY AND PROBLEMS

OF

**ELECTRONIC
CIRCUITS**

路 電 子 電
(ELECTRONIC CIRCUITS)

究必印翻◆有所權版

整元拾陸幣台新價實

行政院新聞局出版事業登記證
局版台業字第〇九二〇號

譯著者：葛

校訂者：崔

發行者：林

出版者：中

發行所：中

電 話：三三一五七二六
三七一八九九三

郵政劃撥帳戶：九一四號

印刷所：聯和印製廠有限公司

台北市寶興街二十一號

中華民國六十七年三月初版

台北市重慶南路一段一四一號

台北市重慶南路一段一四一號

在 承 五

中央圖書出版社

中央圖書供應社

高 慰 昌

編號：2557

原序

電子學可廣義地分成兩大類：在電子控制元件發展中各材料的物理性質之應用，及在電路應用中電子控制元件的利用。第二類通常稱為電子電路理論。

本書編寫之目的乃作為工程師們學習電子電路的初級課程，亦可供已學習電子課程及自修電子儀器裝備之其他人士研讀用。它是基於教學電子學課程中的廣泛經驗而編寫，其範圍包括日常生活及電機工程師們所需要的課程。

本書於基本電路扼要複習以後，隨即介紹單端口電子控制元件。以二極體為例，理想二極體為模型。包括非線性電阻的電路是以圖解來分析，因需要來代表電子控制元件故電阻觀念均已一般化。有關二極體的一些應用已包括在內，以說明分析的方法。但是並不包括所有的普通電路，因為市面上已有無數這方面的書籍。

雙端口網路於第四章中介紹。第五章所介紹的雙端口電子控制元件，其輸入端口並非閉路，最普通的例子是電晶體；這是目前用作電子控制元件中最常用的雙端口型式。

第六章討論線性放大器，包括頻率響應問題及一使用雙端口網路型式的完整放大電路的表示法。

第七章介紹較高深的題目且藉此提供對高深程度書籍的一種移轉。而對放大器各課題的討論說明了各分析方法如何應用於電子系統分析中。

本書特別強調不隨時間改變的基本原理。此種分析方法在將來對新電路及具有新元件的電路中將繼續使用。且特別着重雙端口表示法，因為它們對代表整個線性放大器，不論為慣用的或將來的積體電路模組，均很有用。

EPWIN C. LOWENBERG

Amc

目 錄

序

第 一 章 概 論

1-1	歷史簡介	1
1-2	電子模型	2
1-3	克希荷夫定律	3
1-4	網路理論	4
1-5	電壓與電流表示法	4

第 二 章 單端口電子控制元件

2-1	線性電阻器	11
2-2	理想二極體	12
2-3	二極體記號	12
2-4	實用二極體	13
2-5	電阻的定義	14
2-6	串聯二極體	15
2-7	並聯二極體	16
2-8	串—並聯組合的二極體	17
2-9	負載線	18
2-10	具有變量產生器的二極體電路	19
2-11	等效電路	21
2-12	等效二極體電路	24
2-13	負變電阻	25

第 三 章 二極體的應用

3-1	串聯半波整流器	33
3-2	電容濾波器	34
3-3	串聯全波整流器	36
3-4	分路整流器	37
3-5	倍壓整流器	38
3-6	二極體截波電路	39

3-7	二極體定位電路	41
第 四 章 一般雙端口網路		
4-1	雙端口 r 參數	55
4-2	受制產生器	58
4-3	輸出阻抗	59
4-4	電壓受制的電壓產生器的雙端口表示法	61
4-5	雙端口 g 參數	62
4-6	電流受制的電流產生器雙端口表示法	63
4-7	雙端口 h 參數	64
4-8	幾何表示法	65
4-9	等效 T 及 π 電路	66
4-10	傳輸參數	66
4-11	矩陣表示法	68
第 五 章 雙端口電子控制元件		
5-1	電晶體符號	75
5-2	電晶體等效電路	76
5-3	共射極放大器	80
5-4	共基極放大器	84
5-5	工作點的穩定度	89
5-6	共射極放大器轉移函數	94
5-7	共基極放大器轉移函數	97
5-8	射極耦合放大器	99
5-9	等效 T 電路	101
5-10	拼合轉換分式	104
第 六 章 線性放大器		
6-1	緒 論	125
6-2	簡單 RC 濾波器	125
6-3	單級電晶體放大器的頻率響應	129
6-4	增益及帶寬乘積	133
6-5	分 貝	134
6-6	電晶體高頻響應	137
6-7	放大器輸入導納	138
6-8	雙端口放大器表示法	139

6-9	單端口放大器表示法	142
6-10	串接放大器級	146

第 七 章 放大器總論

7-1	緒 論	165
7-2	放大器分類	165
7-3	非調諧功率放大器	167
7-4	非線性失真	170
7-5	雜訊	173
7-6	簡單的反電壓回授	175
7-7	反電壓回授對放大器頻帶寬度(帶寬)的效應	178
7-8	反電壓回授對放大器輸出阻抗的效應	179
7-9	反電壓回授對放大器輸入阻抗的效應	180
7-10	反電壓回授對放大器雜訊及非線性失真的效應	181
7-11	回授放大器的穩定度	183
7-12	簡單電壓—電流回授	185
7-13	運算放大器	187

索 引

第一章 概 論

1-1 歷史簡介

電子學的領域可能是從1888年赫芝(Hertz)發現電磁能量可以傳播及檢波而開始的。由於佛來明(Fleming)於1903年發明真空二極管(Vacuum tube diode), 畢克德(Pickard)於1906年發明晶體檢波器(Crystal detector), 唐傳瑞斯特(De Forest)於1907年發明真空三極管, 電子學和電子電路進入一快速擴展的時期。電子學在傳統上包括發展及製造電子控制元件的問題, 以及它們在電子電路和系統中的應用。

電子控制元件的特性常是達成所希望的電子系統性能的限制因素。某些問題用發展新型電子控制元件或發展新電路來解決。例如四極管與五極管解決了某些三極管使用於無線電接收機的調諧放大電路所遭遇的問題。某些線性放大器的工作特性則由連接負回授電路(Negative or inverse feedback)來改進。

1948年巴登(Bardeen)和布雷登(Brattain)發明了電晶體, 接着1949年蕭克萊(Shockley)等人發展成 $P-N$ 接合($P-N$ junction)的理論, 使得電子學開始了另一飛躍發展的時期。熟悉真空管的電子工程師們發現他們正遭遇一個新的觀念; 除了新的物理原理外, 需要更多的電路表示法來代表電晶體為線路元件。電晶體的第一個等效電路(Equivalent circuit)和用來代表真空管的十分類似。

當固態電子元件(Solid state electronic device)的類別日益擴大, 很明顯的有兩大類密切相關的問題。其中之一是關於物理原理及其在發展與改進電子控制元件的應用。這個領域有時變化十分快速, 以致在技術方面很難配合得上。另一類問題是有關於電路模式(Circuit model)與觀念的發展, 以及關於電子控制元件的電路應用。

真空管、電晶體、透納二極體(Tunnel diode)及其他電子控制元件在系統應用中都有相同的電路表示。這項事實指出發展一般性研究的需要。這導致了對真空管和電晶體的相同處置。本書將繼續這種趨勢, 集中於電阻類(Resistive class)的電子控制元件而較少提到電抗類(Reactive class)。當控制元件的參數是電阻性時(在一般狀態, 容後解釋), 不管何種型式的元件, 發展電路表示及電路應用的程序是相同的。當然, 利用特定例子以發展一般觀念也是必要的。因此真空管和電晶體將被用來發展一般觀念。只要是屬於電阻類的電子控制元件, 任何革命性的新的元件都可應用而不會引起麻煩。用電子電路

來討論標準材料終將包括在電子電路課程中。

本書假定讀者已唸完微積分及電子電路基本課程，但一些不是唸工程的讀者可能沒有這種基礎，因此某些推導將省略而將重點放在電路模式及觀念上。

1-2 電路模型

三個線性無源 (Passive) 電路模式如圖 1-1 所示讀者都已熟悉。為了方便起見，本書中電壓的極性將如圖 1-1 用一箭頭表示。箭頭指示電壓上升的方向，因此和箭頭相反的方向就是電壓降。電位差是純量而箭頭是用來表示極性。

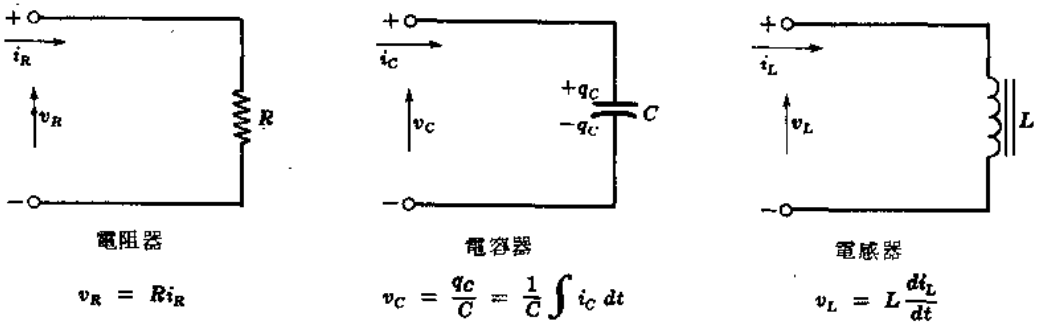


圖 1-1. 無源電路模式

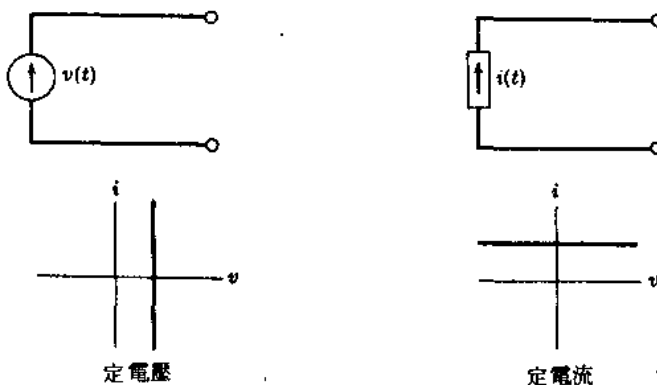


圖 1-2. 有功電路模式

電流的方向也同樣用箭頭標示。強調總瞬時電流是一純量可能是適切的。但表示電流的方向已成為習慣，因為指明電流密度的方向是必要的，它是向量。本書中電流所指示的

箭頭是電流密度的方向(亦即正電荷漂移速度的方向),稱此為電流的方向是很方便的。我們將盡可能避免使用“電流流動”因為這可能引起混淆。僅電荷在流動而電流是電荷流動的速率。

兩個有功元件(Active element)電路模式是定電流產生器(Constant current generator)及定電壓產生器(Constant voltage generator),如圖 1-2 所示。定電壓產生器的符號是一個圓及一個表示電壓極性的箭頭。定電流產生器是用一矩形及指示電流方向的箭頭來表示。在二個模式中“定”字的意思表示與時間無關。以電壓產生器為例,產生的電壓與產生器電流無關;而在電流產生器中所產生的電流與產生器端電壓(Terminal voltage)無關,如圖 1-2 所示。這些圖形是對一已知時間而言。一個與時間無關的定電壓產生器,通常用一電池的符號來表示,如圖 1-3 所示。電池是圖 1-2 的定電壓產生器的特別情形,其中 $v(t) = V$ (為常數)。

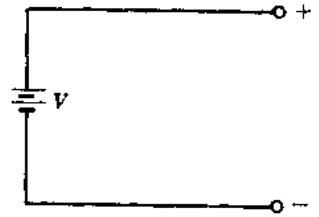


圖 1-3. 與時間無關的定電壓產生器

實用的電路元件通常用一個以上的線性模式來代表。能適用於特殊問題的最簡單表示法常被採用。

1-3 克希荷夫定律

克希荷夫電壓定律(Kirchhoff's Voltage Law)敘述沿著任何電路通路的瞬時電壓降的代數和為零。本書中不論其跨越有功或無源元件,電壓降均以正號表示而電壓升則以負號表示。

迴路方程式(Loop equation)通常是從迴路的某一點開始寫起,然後沿著迴路電流的參考方向,寫出電壓降的代數和。電壓降的代數和假設等於零。當迴路的產生器電壓亦併入考慮時,符號的錯誤是常會發生的。

當解一組聯立方程式時通常用克萊法則(Cramer's rule)及行列式。這是最便捷的方法,尤其是三個方程式以上時特別方便。當需要時則這些方程式很容易寫成矩陣形式。

克希荷夫電流定律(Kirchhoff's Current Law)敘述從任一接合點流出的瞬時電流的代數和為零。從一接合點流出的電流以正號表示而流向接合點的電流以負號表示。

節點方程式(Node equation)也同樣假定電流的代數和等於零。

通常當有許多電路元件串聯時用電壓產生器代表電源且寫出迴路方程式。當有許多電路元件並聯時則使用電流產生器代表電源且寫出節點方程式。在某些電路中同時用電壓和電流產生器則更方便;則所得方程式集合包括迴路與節點方程式兩者。

方程式通常是以電壓及電流的瞬時值來寫出。當一個只含線性無源元件的電路被一正弦電源所激勵時則定態 (Steady-state) 電壓與電流亦是正弦的，而頻率與電源頻率相同。電壓與電流則以其大小及關於參考點 (通常是電源) 的相角來表示。

1-4 網路理論

下列網路理論 (Network theorem) 在電子電路問題裡經常被用到。

重疊定理 (Superposition theorem) 敘述為：已知僅含線性元件及一個以上產生器的網路，任一支路 (Branch) 中的電流等於存在於此支路中各電流的代數和，如每一產生器單獨的來考慮而所有其餘的產生器都以其內部阻抗來代替。

重疊定理常應用於含有幾個迴路的電路。在電子電路中，此定理也應用於同時包含“變量”與“定值” (與時間無關) 電源的電路。這是只考慮電子電路中的信號電壓及電流的基礎。

戴維寧定理 (Thévenin's theorem) 可敘述如下：已知一兩端點網路包含線性元件及任意數目的產生器。其網路的端點特性與一電壓產生器及一阻抗的串聯組合相同。假若此等效電路元件能滿足下列條件：

- (a) 等效電壓產生器的瞬時值與網路的瞬時斷路端電壓相同。
- (b) 等效電路的阻抗等於每一產生器以其等效內阻抗代替時的網路阻抗。

諾頓定理 (Norton's theorem) 是戴維寧定理的對偶可敘述如下：已知一兩端點網路包含線性元件及任意數目的產生器，其網路的端點特性與一電流產生器及一導納 (Admittance) 的並聯組合相同。假若此等效電路元件能滿足下列條件：

- (a) 等效電流產生器的瞬時值與網路的瞬時短路端點電流相同。
- (b) 導納等於每一產生器均以其阻抗代替時的網路導納。

必須瞭解一網路的端點特性與其等效電路是相同的。換句話說，沒有一個包含網路端點的實驗能辨別戴維寧或諾頓等值。

1-5 電壓與電流表示法

一網路的電壓與電流可將其瞬時值寫為時間的函數至以此來說明其在時域 (Time domain) 的情形。這些表示法在電子電路問題中用起來十分方便。電子電路問題用圖解法一點一點來解答時必需使用電壓與電流的瞬時值。

當電路中含有電容器或電感器時，其時域方程式為微分或積分方程式。這樣使某些較簡單的問題變成不必要的複雜。在電子電路初級課程中通常介紹頻域 (Frequency domain) 表示法。重點往往是在定態中解答被正弦驅動函數所激勵的線性電路問題。在此類問題

中最方便的是相量表示法，因為只需決定每一電壓與電流的大小及其對一參考相量 (Reference phasor) 的相角。

當使用相量表示法且只有單一頻率時，一電路元件或一兩端點電路的阻抗或導納就很容易確定。則阻抗為相量電壓對相量電流的比。阻抗是有向度的電阻；且可能是複數。阻抗的實數部分是電阻而虛數部分是電抗 (Reactance)。阻抗不是相量。一兩端點電路的導納是阻抗的倒數；即相量電流對相量電壓的比。導納的實數部分是電導 (Conductance) 而虛數部分是電納 (Susceptance)。

用拉卜拉士轉換 (Laplace transform) 很容易將頻域表示法一般化。包括非正弦驅動函數的通解 (包括暫態解) 可以求出。阻抗與導納的觀念可以電壓與電流的拉卜拉士轉換的比率來定義而一般化。然而，因為本書為電子電路的初級課程，所以我們假定讀者對拉卜拉士轉換並不熟悉。

為避免用微分及積分方程式，在寫時域的電路方程式時採用阻抗與導納的觀念。因此導致了一種混合記號 (Hybrid notation)。然而，與阻抗及導納的頻域定義並無不一致的地方。事實上，這種方法對初學者來說似乎比相量表示法要方便。

考慮包含正弦激發的定態求解的特別情況，電流全是正弦波。若電流是 $i(t) = I \sin \omega t$ 則跨越於電感器的電壓降是

$$v_L = L di/dt = L \omega I \cos \omega t = L \omega I \sin (\omega t + \pi/2) \quad (1.1)$$

當使用阻抗記號時，跨越電感器的電壓是

$$v_L = Z_L i = j \omega L I \sin \omega t \quad (1.2)$$

其中旋轉算子 (Rotational operator) j 指示電壓領先電流 $\pi/2$ 弧度。(1.2) 式的 v_L 與 (1.1) 式的 v_L 是相同的。

當在一電容器中的電流是 $i(t) = I \sin \omega t$ ，其定態電壓降是

$$v_C = Z_C i = -j(I/\omega C) \sin \omega t \quad \text{或} \quad v_C = (I/\omega C) \sin (\omega t - \pi/2) \quad (1.3)$$

當時域方程式以此方式寫出時，必須瞭解只考慮正弦激發的定態響應 (Steady state response)。這使在剛開始的課程中已推導出的阻抗與導納觀念能被應用於時域表示法中。

習題詳解

- 1.1. 已知電路如圖 1-4，求流經產生器 V_3 的電流。
 設 $V_1 = 4$ 伏， $V_2 = 1$ 伏， $V_3 = 6$ 伏。

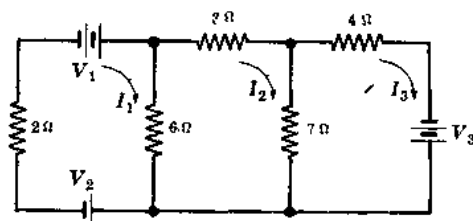


圖 1-4

解：三迴路電流表明如圖 1-4 所示。三個從共節點 (Common node) 開始寫起的迴路方程式如下：

以數字代入產生器，方程式可以因變數 (Dependent variable) 組成左邊各行，獨立變數 (Independent variable) 列於右邊一行而寫成。

$$\begin{aligned} 8I_1 - 6I_2 &= 3 \\ -6I_1 + 16I_2 - 7I_3 &= 0 \\ -7I_2 + 11I_3 &= 6 \end{aligned}$$

利用行列式及克萊法則解 I_3 ，

$$I_3 = \frac{\begin{vmatrix} 8 & -6 & 3 \\ -6 & 16 & 0 \\ 0 & -7 & 6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 8 & -6 & 0 \\ -6 & 16 & -7 \\ 0 & -7 & 11 \end{vmatrix}} = \frac{894 - 216}{1408 - 392 - 396} = \frac{678}{620} = 1.094 \text{ amps}$$

- 1.2. 已知電路如圖 1-5，求電壓降 V_{AO} 。

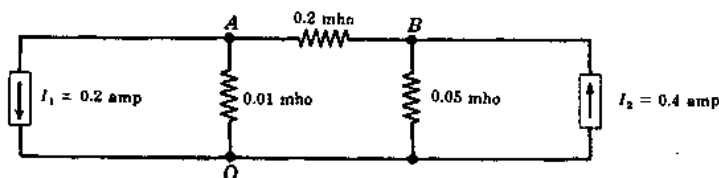


圖 1-5

解：節點 A 及 B 的方程式為

$$+0.2 + 0.01V_{AO} + 0.2(V_{AO} - V_{BO}) = 0$$

$$+0.2(V_{BO} - V_{AO}) + 0.05V_{BO} - 0.4 = 0$$

簡化為

$$0.21V_{AO} - 0.2V_{BO} = -0.2$$

$$-0.2V_{AO} + 0.25V_{BO} = 0.4$$

稱 V_{AO} 。

$$V_{AO} = \frac{\begin{vmatrix} -0.2 & -0.2 \\ 0.4 & 0.25 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.21 & -0.2 \\ -0.2 & 0.25 \end{vmatrix}} = \frac{-0.05 + 0.08}{0.0525 - 0.04} = 2.4 \text{ v}$$

1.3. 參照圖 1-6 的電路，假設 $i = 0.01 \sin 400 \pi t \text{ A}$ ，計算定態電壓降 v 。

解：節點 A 的方程式為

$$-i + Gv + j\omega Cv = 0$$

從上式得

$$\begin{aligned} v &= \frac{i}{G + j\omega C} = \frac{0.01 \sin 4000\pi t}{0.0001 + j(4000\pi)(0.01 \times 10^{-6})} \\ &= \frac{0.01}{0.000161/51.6^\circ} \sin 4000\pi t \\ &= 62.1 \sin(4000\pi t - 0.9) \text{ volts} \end{aligned}$$

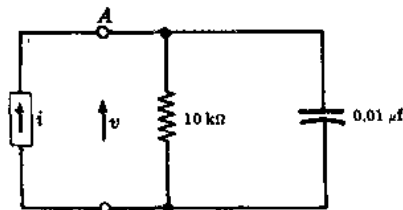


圖 1-6

1.4. 就圖 1-7 的網路，求 (a) 戴維寧等效電路 (b) 諾頓等效電路。

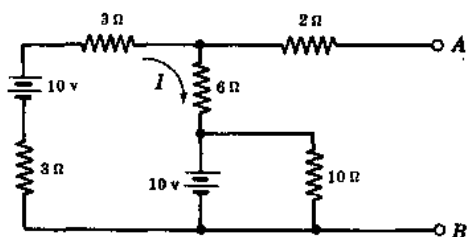


圖 1-7

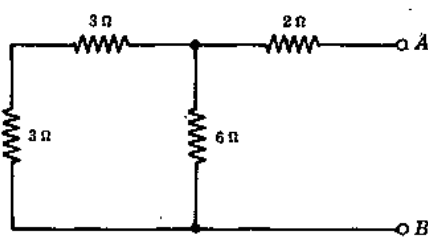


圖 1-8

解：(a) 閉合迴路的方程式是

$$3I - 10 + 3I + 6I + 10 = 0 \quad \text{或} \quad I = 0$$

斷路電壓 $V_{AB} = 2(0) + 6(0) + 10 = 10$ 伏。跨越 2 歐與 6 歐電阻的電壓降為零。

當各電池皆用零電阻替代時，圖 1-7 的電路可繪成如圖 1-8。包含兩個 3 歐電阻器的支路電阻為 6 歐。包含 6 歐電阻器的兩個支路的並聯組合其電阻為 3 歐。因此 $R_{AB} = 2 + 3 = 5$ 歐，戴維寧等效電路如圖 1-9 所示。

戴維寧定理能應用於 10 伏電池與 10 歐電阻器的並聯組合。當做成這樣時組合是以 -10 伏電池取代。當此 10 伏電池為理想電池時，不管電流的大小端電壓仍為 10 伏。

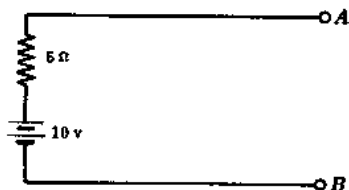


圖 1-9

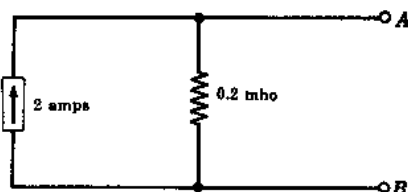


圖 1-10

(b) 諾頓等效電路可由戴維寧等效電路得出。短路電流可將端點 A, B 短路而求出為 $I_{AB} = 10/5 = 2$ 安。諾頓等效電路如圖 1-10 所示。

1.5. 圖 1-11 的電路中，每一阻抗的電抗由產生器頻率來限定。求此網路的戴維寧及諾頓等效電路。

解：閉合迴路的方程式為

$$-100 \sin \omega t + j200i + j300i = 0$$

從上式

$$i = \frac{100}{j500} \sin \omega t = 0.2 \sin (\omega t - \pi/2) \text{ amp}$$

斷路電壓 v_{AB} 為

$$\begin{aligned} v_{AB} &= -j120(0) + j300[0.2 \sin (\omega t - \pi/2)] \\ &= 60 \sin \omega t \text{ volts} \end{aligned}$$

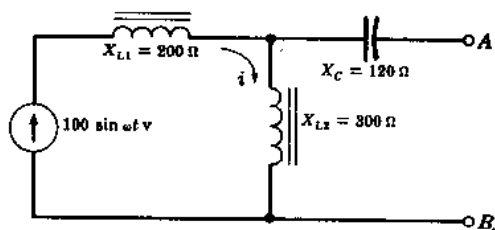


圖 1-11

產生器由其內阻抗替代的網路繪於圖 1-12。兩個電感器所並聯組合的阻抗為

$$Z = \frac{(j200)(j300)}{j200 + j300} = j120 \text{ 歐}, \text{ 阻抗 } Z_{AB} = -j120 + j120 = 0 \text{ 歐}, \text{ 戴維寧等效電路如圖}$$

1-13 所示。

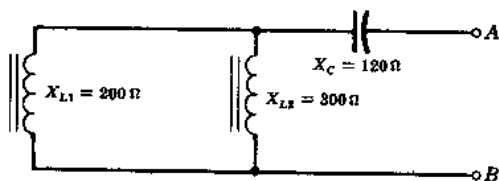


圖 1-12

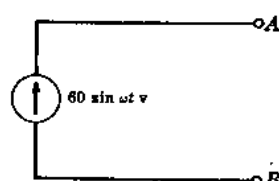


圖 1-13

圖 1-11 的網路不能用諾頓等效電路代替，因為有效內導納為無限大。在實際問題中，圖 1-11 的電感器的阻抗必有一有限實數部分，因此諾頓等效電路是有意義的。

1.6. 已知圖 1-14 的電路。阻抗的電抗由產生器頻率限定。電壓與電流產生器工作於同一頻率，其相位關係如圖所示。用重疊法求電流 i 。

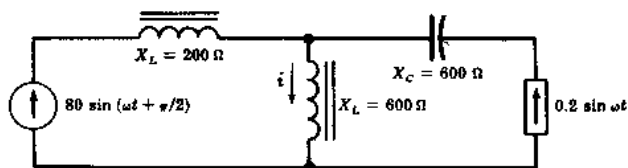


圖 1-14

解：首先求僅有電壓產生器時的電流成分 i_V 。電流產生器由無限大的內阻抗來代替，而電路圖變成圖 1-15。迴路方程式為

$$-80 \sin(\omega t + \pi/2) + j200i_V + j600i_V = 0$$

從上式 $i_V = 800 \sin(\omega t + \pi/2) / j800 = 0.1 \sin \omega t$ 安。

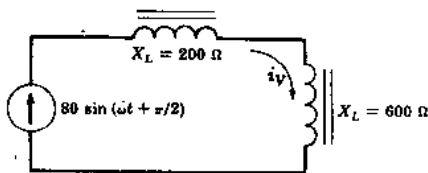


圖 1-15

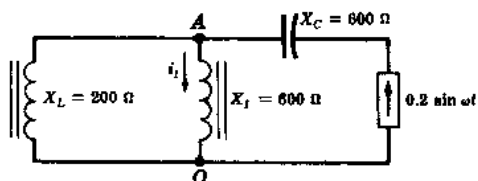


圖 1-16

其次求僅因電流產生器所生的電流成分 i_I 。電壓產生器由其內阻抗(零)代替如圖 1-16 所示。節點 A 的方程式為

$$-0.2 \sin \omega t + \frac{1}{j600} v_{AO} + \frac{1}{j200} v_{AO} = 0$$

或 $v_{AO} = 30 \sin(\omega t + \pi/2)$ 。則 $i_I = v_{AO} / j600 = 0.05 \sin \omega t$ amp.

電流 $i = i_V + i_I = 0.15 \sin \omega t$ amp.

1.7. 就圖 1-17 的電路用重疊法求瞬時電壓

v_{AB} 。

解：首先將交變的產生器用其等效內阻抗代替，得圖 1-18 的電路。因為網路只含一定電源，所以電流是常數可用一大寫字母表示。迴路方程式為

$$-10 + 1000I_1 + 9000I_1 = 0 \quad \text{或} \quad I_1 = 1 \text{ ma}$$

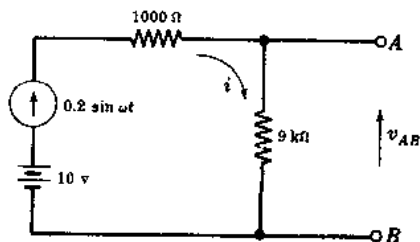


圖 1-17

由電池產生的跨越端點 A 與 B 的電壓是一常數為 V_{AB}
 $= 9000 I_1 = 9$ 伏。

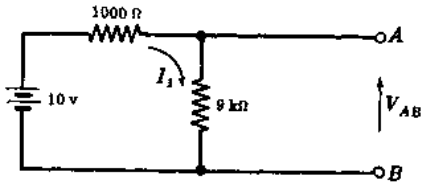


圖 1-18

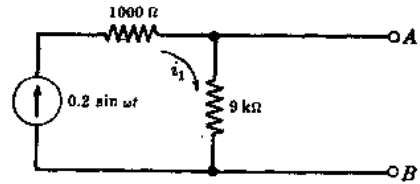


圖 1-19

其次將電池以其等效內阻抗代替，得圖 1-19 的電路。此網路的電流是交變的，可用一小寫字母表示。迴路方程式為

$$-0.2 \sin \omega t + 1000i_1 + 9000i_1 = 0 \quad \text{或} \quad i_1 = 20 \times 10^{-6} \sin \omega t \text{ amp}$$

由變量產生器所產生而跨越端點 A 與 B 的電壓為 $v_{ab} = 9000 i_1 = 0.18 \sin \omega t$ V。

跨越圖 1-17 端點 A 與 B 的總合或瞬時電壓降為

$$v_{AB} = V_{AB} + v_{ab} = 9 + 0.18 \sin \omega t \text{ V}$$

這說明在線性電子電路中，如何使用重疊法來將瞬時值分成平均值與僅有變量的瞬時值。