

工業配電諧波問題之改善

Improvement of Harmonic Problem in the Industrial Distribution System

經濟部標準檢驗局 台南分局

技正 林昆平

摘 要

目前解決鋼鐵廠、造紙廠、電化學、石化業等用戶所產生之諧波問題幾乎由國外公司包辦。國內學術界也有不少篇諧波研究論文^(2,3)，可惜對問題的核心—濾波器兼功因改善設計及規格品的決定等實務上問題交待不清。台電公司的諧波程式⁽¹⁾，只供設計好的濾波器做模擬演算，若設計錯誤必需藉由無數次數校正及嘗試錯誤法才能確定設計值（可能非最佳值）。本研究係針對上述困境設法改善嘗試錯誤式的重大缺點，建立非線性最佳模式，以 S.U.M.T. 法求解，來幫助工程從業人員能輕易地自動設計出濾波器及選定適當的規格品。

Abstract

Nowadays, the harmonic problems happened in Taipower system which was caused by users of steel, paper, electrochemical and petrochemical industries are almost solved by foreign companies. Although there are some domestic research papers published on harmonic topics, however, no one is very clear to talk about the filter design in case reactive compensation is also needed. The harmonic program used at TPC is also not for filter design. In case the filter is not designed correctly, the engineer have to renew the design with trial on error and run the program many times until the right answer comes out. In this paper, we built a non-linear optional model with numerical method S.U.M.T to directly design the filter without using tedious labor of trial on error. According to this paper, engineers using this powerful tool can easily design filters and choose the right specification of components.

關鍵詞 Keywords

序列無限制
最小化技術 Sequential Unconstrained
Minimization Technique
(S.U.N.T)
綜合諧波
電流失真率 Total Harmonic Current
Distortion Factor (THDi)
各次諧波
電流失真率 Current Distortion Factor
(Dn)

一、前言

近年來諧波問題亦日益嚴重，除了威脅到供電品質外，用以改善功率因數的電容器組損壞的案例，時有所聞。台灣電力公司有鑑於此，特別成立「諧波改善小組」於76年5月4日訂定諧波電壓限制暫定標準，又於81年11月25日依據IEEE/519-1989所建議的諧波電流抑制值⁽¹⁾，

配合台電系統環境修訂成「電力系統諧波管制標準」〔附錄A〕，作為其限制用戶諧波確保供電品質之依據，復於82年6月4日加以訂定只規定諧波電流管制，83年12月2日發函電機技師公會、電氣公會、設備檢驗公會、經濟部國營事業委員會、工業局、能源委員會和台電各營運處等機構。其內容規定一般高壓用戶經省市府建設廳(局)核准設有電弧爐、變頻器、整流器等用電容量達300kVA以上者，其送審圖面需檢附改善諧波相關資料，並於84年元月1日起嚴格執行使諧波改善檢討，正式成為工廠配電設計的一環。由於2至50次各次諧波電流均不同，加上阻抗計算、PU值換算、電源、變壓器、線徑資料查詢手續至為繁雜，要以手工方式評估系統進而設計兼具改善功用用途之濾波器，幾乎不可能，因此開發一套務實、好用、配合政策的應用軟體，便成為當務之急。

本文內容依次為第二節，對配電系統三個諧

波源產生諧波過程加以分析，並以兩個例子說明諧波對工廠用電的弊害，最後介紹抑制諧波濾波器的種類以期建立諧波相關背景與知識。

第三節，將抑制諧波兼改善功因之規劃建立成一單目標函數 (single objective) 最佳化問題。先選取工業配電高壓工程配電模式，再由公式推導將整個問題浮現出來，其間考慮了各種限制因素，包括虛功補償限制、濾波器調諧點安全設計範圍，並避開與系統發生串聯共振與並聯共振的可能。

第四節，介紹費曼定理 (Fermat Theorem) 及序列無限制最小化技術 (Sequential Unconstrained Minimization Technique) 並說明如何應用在本文所提出的規劃問題。

第五節，以設計實例進行測試並比較設計結果。

第六節，結論。

二、諧波源、弊害、對策

2.1 前言

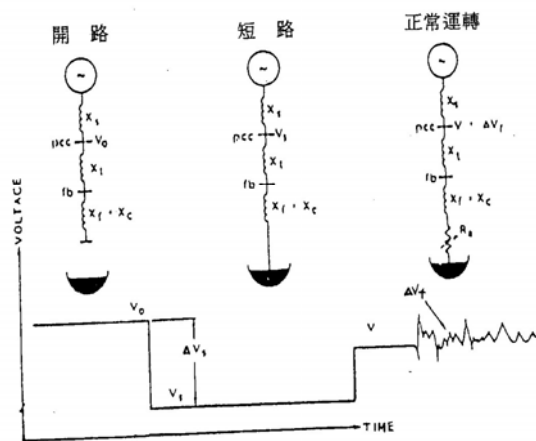
依台灣電力公司現行規定高壓用戶初期以電弧爐、電力用整流器、變頻器、容量大於 300kVA 以上，才加以檢討，往後逐年提高標準，希望五年後諧波負載 100kVA 以上就需檢討。故本章先對這三類諧波源加以說明，另外諧波對工廠用電最大的危害莫過於燒損功因改善電容器組造成運轉停擺。茲就兩種擴大諧波現象加以說明。最後我們介紹一下抑制諧波濾波器的特性。

2.2 諧波源

2.2.1 電弧爐 (Electric Arc Furnace)

電弧爐一般用在煉鋼，圖 2.1 所示為爐體構造及電弧運轉過程中、短路期、熔解期、精煉期

極棒電壓振盪情形。一開始三根極棒往下降與廢鐵接觸形成 3 ϕ 不平衡短路，此時電壓往下降波形仍維持弦波，當廢鐵有的溶解，有的快要熔解，有的還沒有熔解，因此負載電阻並非定值，弧光電流忽大忽小，極棒端電壓也隨著劇烈跳動就在這個時期對電力系統注入諧波成份，因此對於長達 70 分鐘的熔解期，對供電品質可說危害很大^(5,6)。經統計結果電弧爐熔解初期以偶次、奇次諧波同時出現，熔解末期以奇次最多。表 2.1 為其諧波電流含量概略值⁽⁷⁾。



電弧爐的電壓變動

圖 2.1 電弧爐運轉示意圖

表 2.1 電弧爐熔解期產生之諧波失真率

2nd Harmonic 3-5% of I_1	8nd Harmonic 1% of I_1
3nd Harmonic 3-6% of I_1	9nd Harmonic 1% of I_1
4nd Harmonic 3% of I_1	10nd Harmonic 0.5% of I_1
5nd Harmonic 3-4% of I_1	11nd Harmonic 0.5% of I_1
6nd Harmonic 2% of I_1	12nd Harmonic 0.5% of I_1
7nd Harmonic 2% of I_1	13nd Harmonic 0.5% of I_1

波源產生諧波過程加以分析，並以兩個例子說明諧波對工廠用電的弊害，最後介紹抑制諧波濾波器的種類以期建立諧波相關背景與知識。

第三節，將抑制諧波兼改善功因之規劃建立成一單目標函數 (single objective) 最佳化問題。先選取工業配電高壓工程配電模式，再由公式推導將整個問題浮現出來，其間考慮了各種限制因素，包括虛功補償限制、濾波器調諧點安全設計範圍，並避開與系統發生串聯共振與並聯共振的可能。

第四節，介紹費曼定理 (Fermat Theorem) 及序列無限制最小化技術 (Sequential Unconstrained Minimization Technique) 並說明如何應用在本文所提出的規劃問題。

第五節，以設計實例進行測試並比較設計結果。

第六節，結論。

二、諧波源、弊害、對策

2.1 前言

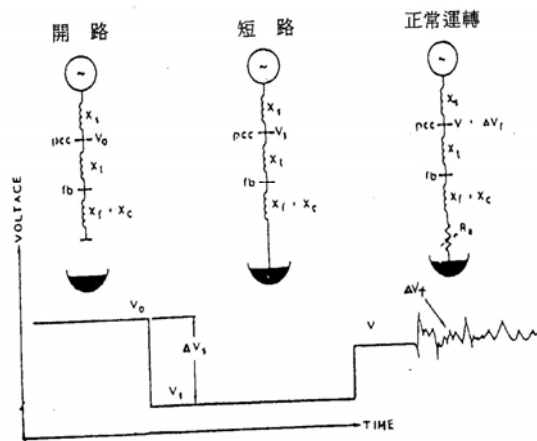
依台灣電力公司現行規定高壓用戶初期以電弧爐、電力用整流器、變頻器、容量大於 300kVA 以上，才加以檢討，往後逐年提高標準，希望五年後諧波負載 100kVA 以上就需檢討。故本章先對這三類諧波源加以說明，另外諧波對工廠用電最大的危害莫過於燒損功因改善電容器組造成運轉停擺。茲就兩種擴大諧波現象加以說明。最後我們介紹一下抑制諧波濾波器的特性。

2.2 諧波源

2.2.1 電弧爐 (Electric Arc Furnace)

電弧爐一般用在煉鋼，圖 2.1 所示為爐體構造及電弧運轉過程中、短路期、熔解期、精煉期

極棒電壓振盪情形。一開始三根極棒往下降與廢鐵接觸形成 3 ϕ 不平衡短路，此時電壓往下降波形仍維持弦波，當廢鐵有的溶解，有的快要熔解，有的還沒有熔解，因此負載電阻並非定值，弧光電流忽大忽小，極棒端電壓也隨著劇烈跳動就在這個時期對電力系統注入諧波成份，因此對於長達 70 分鐘的熔解期，對供電品質可說危害很大^(5,6)。經統計結果電弧爐熔解初期以偶次、奇次諧波同時出現，熔解末期以奇次最多。表 2.1 為其諧波電流含量概略值⁽⁷⁾。



電弧爐的電壓變動

圖 2.1 電弧爐運轉示意圖

表 2.1 電弧爐熔解期產生之諧波失真率

2nd Harmonic 3-5% of I ₁	8nd Harmonic 1% of I ₁
3nd Harmonic 3-6% of I ₁	9nd Harmonic 1% of I ₁
4nd Harmonic 3% of I ₁	10nd Harmonic 0.5% of I ₁
5nd Harmonic 3-4% of I ₁	11nd Harmonic 0.5% of I ₁
6nd Harmonic 2% of I ₁	12nd Harmonic 0.5% of I ₁
7nd Harmonic 2% of I ₁	13nd Harmonic 0.5% of I ₁

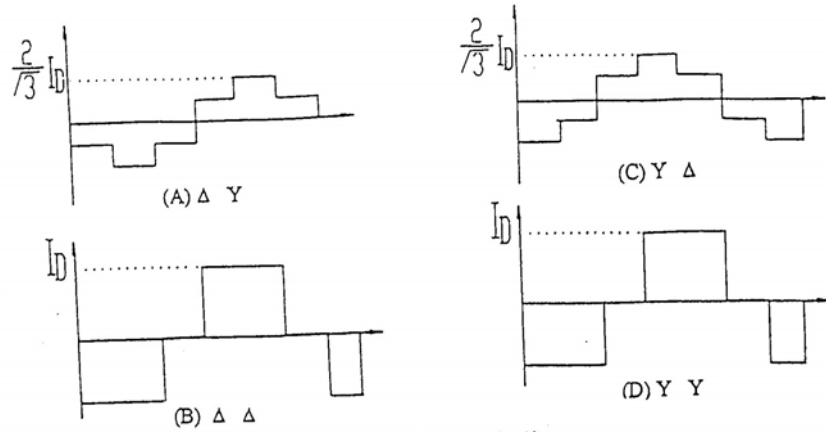


圖 2.7 R 相線電流

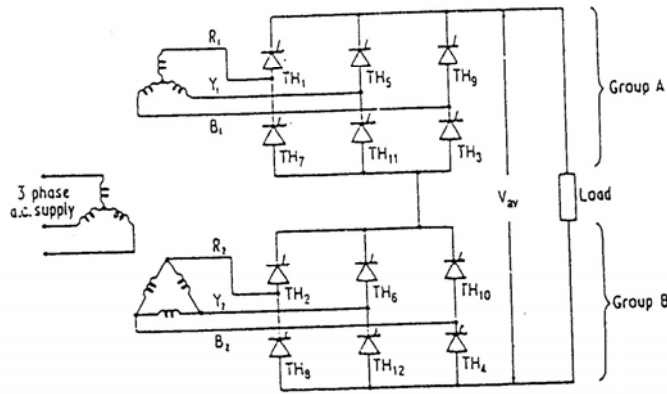


圖 2.8 12 pulse 整流器及其前置變壓器

$$\begin{aligned}
 I_{R1} = I_1 & (\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5 \omega t \\
 & + \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t \\
 & + \frac{1}{13} \cos 13 \omega t - \frac{1}{17} \cos 17 \omega t \\
 & + \frac{1}{19} \cos 19 \omega t \dots) \quad (2-6)
 \end{aligned}$$

其中 $I_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_D$ ，產生各次諧波電流波幅可以 (2-7 式) 表示：

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (2-7)$$

由 (2-5 式)、(2-6 式) 可發現若工廠有偶數台直流負載則其前置變壓器不妨接成 ΔY 、 $\Delta \Delta$ 、 ΔY 、 $\Delta \Delta$... 依序並聯起來則 5, 7, 17, 19, 29, 31... 次諧波電流會在匯流排上 (並聯點) 完全抵消，這種利用變壓器相位操作 (Phase multiplication) 的方法可大大抑制諧波對電源端的污染⁽⁹⁾。在技術層面上更可在變壓器一次側及二次側間放入阻隔板，利用高次諧波阻隔板呈現高

電抗的特性，將諧波堵死在負載側使其無法進入電源端⁽¹⁰⁾；若工廠有奇數台直流負載則最後一台可採可12pulse整流器，並配置三繞組變壓器點2.8。其原理和相位操作一樣，可抵消部分諧波圖2.9⁽¹¹⁾。但實際上由於直流負載不盡相同，SCR激發角非0°，變壓器繞匝比不盡合乎點2.6所示，故諧波不會完全抵消，另外整流器產生的各次諧波電流實際比理論值（2-7式）來得小，因此作諧波模擬所需的諧波電流資料應向廠商索取，而不該用理論值作為模擬系統所需的資料；若廠商不提供則需以諧波分析儀實測責任分界點之諧波電流的統計資料作為模擬資料。

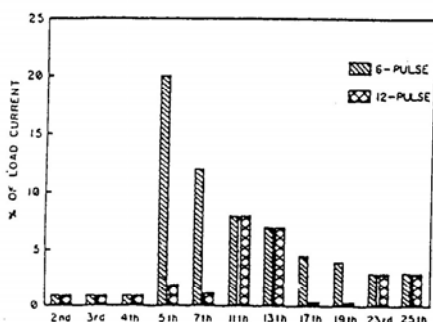


圖2.9 6 pulse與12 pulse整流器產生諧波電流情形

2.2.3 變頻器(Cycloconverter)

變頻器大多用在隧道換氣扇或泵用的同步馬達上，藉由改變供電頻率作速度控制的電子設備，圖2.10所示為一典型變頻器主要是由3組反相並聯的開流體構成故又稱為3φ循環式整流器。其產生何種諧波成份的實驗公式可以（2-8式）表示：

$$N = (K \times P \pm 1) \pm 6 \times m \times \frac{f_2}{f_1} \quad (2-8)$$

其中 N：諧波次數

K：1, 2, 3...

P：脈波數

m：0, 1, 2

f₁：供電網路頻率

f₂：循環式——整流器輸出頻率

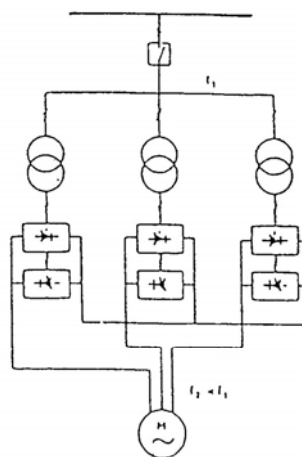


圖2.10 三相變頻器

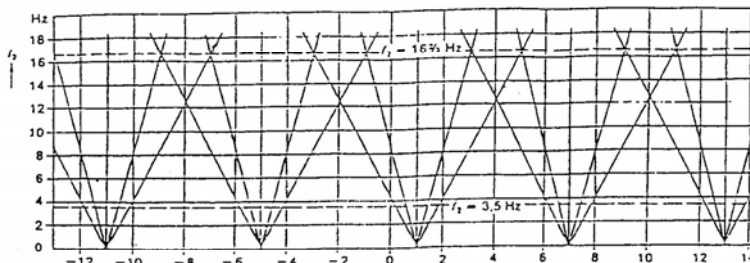


圖2.11 6 pulse cycloconverter 所產生之諧波成分

利用 (2-8 式) 作 f_2-N 圖可得圖 2.11, 例如當變頻器輸出頻率 $f_2 = 3.5\text{Hz}$ 時, 其生 1.1, 1.7, 6.88, 6.94, 7, 7.058, 7.12... 次等整數次或非整數次諧波, 輸出頻率改變時, 產生之諧波成分會立即改變, 至於該諧波失真多少, 則完全取決負載本身、負載功因、SCR 激發角及輸出頻率而定 (12)。

2.3 諧波對工廠用電的危害

2.3.1 並聯共振

某鋼鐵廠是專門製造建築用鋼筋, 82年2月其功因改善電容器組爆炸, 廠方停擺半年, 損失嚴重。圖 2.12 所示為其軋鋼機供電迴路, 軋鋼機是由六台直流馬達構成, 其前面置有 6pulse 整流器, 一塊熱鋼板經由滾輪速度控制, 輾壓成我們要的尺吋。但整流器會產生諧波電流, 以 5 次諧波為例等效電路如圖 2.13, I_5 代表四台等效成一台的諧波電流, X_{L1} 由電源阻抗與變壓器阻抗組成, X_{C5} 為功因改善電容器組容抗。因此若有那麼個機會使 $X_{L1} =$ 諧波次數平方分之一容抗 (2-8 式), 這時候 I_{S5} 、 I_{C5} 分別擴大五次諧波電流成無限大 (2-9 式)、(2-10 式), 因而使電容器燒損並因而耐壓不足 (2-11 式) 而炸掉。(13)

$$X_{L1} = \frac{1}{5^2} \times X_{C1} \quad (2-8)$$

$$I_{S5} = \frac{-j \frac{X_{C1}}{5}}{j(5X_{L1} - \frac{X_{C1}}{5})} \quad I_5 = -\infty \quad (2-9)$$

$$I_{C5} = \frac{j5 X_{L1}}{j(5X_{L1} - \frac{X_{C1}}{5})} \quad I_5 = \infty \quad (2-10)$$

$$V_{C5} = I_{C5} \times \frac{X_{C1}}{5} = \infty \quad (2-11)$$

換句話說, 若廠內有諧波負載與電容性負載並聯, 就有機會產生並聯共振現象, 擴大某次諧波電流。那麼沒使用諧波負載的工廠是否就沒事呢? 請再看看另一種現象。

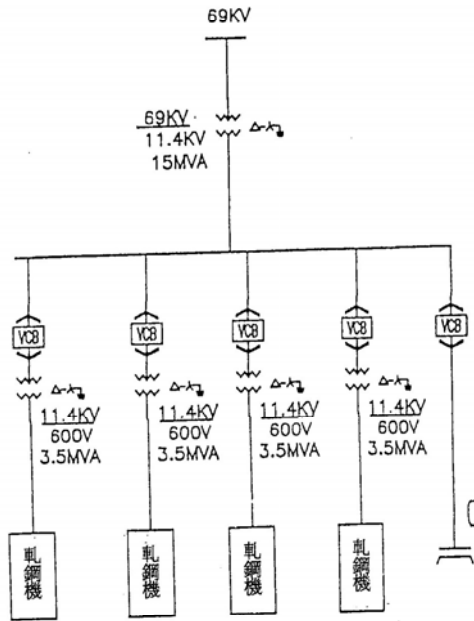


圖 2.12 配電迴路

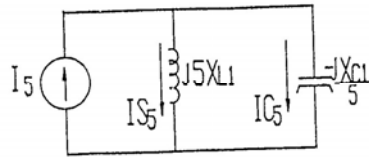


圖 2.13 等效電路

2.3.2 串聯共振

在台電「電力系統研究 (1983)」報告指出, 聯亞塑膠電容器組端電壓過高, 因該廠無使用諧波負載, 不可能發生並聯共振, 我們認定是串聯共振現象造成。圖 2.14 為簡化受電迴路, 由於鄰近有不少鋼鐵廠, 對電力系統注入七次諧波電

流，電容器因高諧波呈低阻抗而引來該次諧波，其等效電路如圖 2.15 所示，因此有機會使變壓器阻抗為容抗除以諧波次數平方（2-12 式），則電容器端電壓將擴大七次諧波電壓呈 Q 倍（2-13 式），因 R 很小 Q 很大，將有可能使電器耐壓超出 ANSI 所規定的標準而毀損見（2-14 式）。

$$X_{T1} = \frac{1}{7^2} \times X_{C1} \quad (2-12)$$

$$V_{C7} = V_7 \times \frac{-j \frac{X_{C1}}{7}}{R + j(7X_{T1} - \frac{X_{C1}}{7})}$$

$$= \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} V_7 = QV_7 \quad (2-13)$$

$$VC = \sqrt{VC_1^2 + VC_2^2 + \dots + VC_n^2} > 1.1VC_1 \quad (2-14)$$

換言之，若自己不產生諧波源，但由於有電容性負載引來電力系統諧波電流進而發生串聯共振的機會，將擴大諧波電壓而毀損電容器。我們的結論是在一個含諧波的系統中作功因改善不能使用電容器而是濾波器。

2.4 濾波器簡介

濾波器有主動型與被動型兩種，用途上主動型濾波器用在變動的諧波源，如電弧爐、變頻機效果較好、被動型則用在整流器諧波的抑制效果較好。由於主動型相當昂貴工業界還未廣泛使用，本文仍以被動無濾波器（passive filter）作為主要訴求。圖 2.17 所示為單調式濾波器阻抗與諧波頻率的關係，在共振點阻抗呈最低可完全吸收該共振頻率 ω_0 之諧波，當此共振點頻率 ω_0 高的諧波來臨時（ $\omega > \omega_0$ ），此濾波器呈電抗性亦會承擔部分分流，但當比共振點頻率 ω_0 低次

的諧波來臨時，（ $\omega < \omega_0$ ）濾波器阻抗呈電容性有可能與系統阻抗發生並聯共振或擴大低次諧波源⁽¹⁸⁾。高通式濾波器如圖 2.18 所示，在高次諧波下電抗器阻抗比電阻器大很多，使高次諧波電流大都流過電阻器，以致濾波器對調諧頻率以上的高諧波呈低阻抗 R，故可作某特定高諧波以上的吸收，避免使用過多單調式濾波器。另一方面高通式濾波器大部分用在 11 次以上之諧波抑制，以避免低次諧波時阻抗和電源阻抗不相上下，使抑制低諧波效果大打折扣。

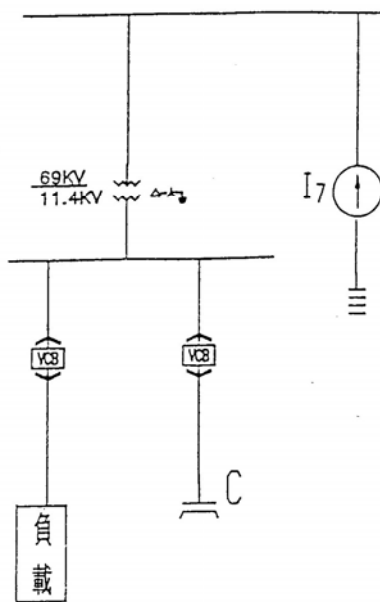


圖 2.14 配電簡化迴路

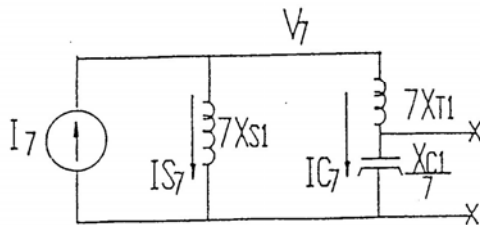


圖 2.15 等效電路

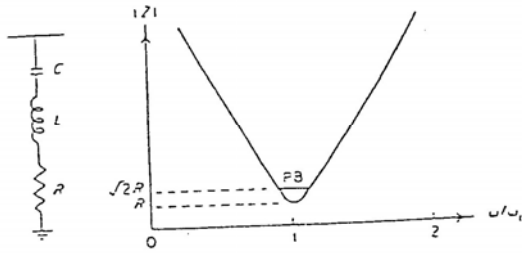


圖 2.17 單調式濾波器阻抗與頻率的關係

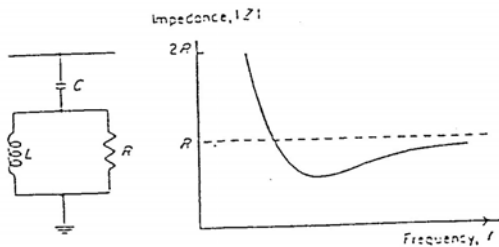


圖 2.18 高通式濾波器阻抗與頻率的關係

2.5 本節結論

本節首先就台電公司規定附加檢討的三類諧波源加以解析，以了解其諧波特性，有助於問題的解決。例如電弧爐、變頻器應屬於不規則諧波負載，隨著輸出條件的不同其諧波含量無規則可循，廠商提供給我們的資料，應以統計模式 (Statistical Model)，由多次的量測來取得概略值⁽¹¹⁾，這類問題應由高通式濾波器設計來解決，至於電力整流器的諧波特性應屬於規則性諧波負載，以單調式濾波器來抑制即可。有大部分的實務設計則是採兩種濾波器混合設計效果較佳。本節另一個重點闡明了在一個含有諧波源的系統應避免使負載呈電容性，否則有機會因串聯共振或並聯共振而燒掉電容性負載，縱使未發生共振亦會擴大諧波電流或電壓，對受電系統均屬不利。

三、抑制諧波兼功因改善非線性規劃問題的形成

3.1 前言

本節擬先建立一般工廠用電的配電模式，再經由公式的推導，將抑制諧波兼功改善濾波器設計值 Q_n (濾波器容量) 及 n_h (調諧點) 放入模式中，以建立一個適合探討責任分界點各次諧波電流失真及綜合電流失真的通用電路，再者本文考慮了影響調諧點漂移因素，如溫度變動、製作誤差及頻率跳動，以限制調諧點的設計範圍，最後分析電路將問題描述出來以期將濾波器的 Q_n 及 n_h 設計值利用系統的數學規劃解出，除了有異於 IEEE 上關於濾波器設計的文獻⁽¹¹⁾，也解決長久以來工程人員盲目使用嘗試錯誤方式設計耗時的缺點。整個系統是採單位電壓輸出法理論避免一般繁鎖之串並聯等值電路簡化⁽¹²⁾，其間除了避開濾波器本身的串聯共振，也考慮了與系統阻抗產生的並聯共振現象，並兼虛功補償的效果，為本文作者認為對工程界最大的貢獻。

3.2 高壓配電模式

目前台灣工廠配電設計有 95% 以上是屬於高壓工程，也就是與台電契約容量在 100~4500kVA 之間者，圖 3.1 就是一個通用的配電模式，每一迴路可直接接負載或再輻射出去，例如第一迴路的負載可視為第二迴路輻射的一支，因此我們選取第二迴路作為諧波模擬的配電模式。

3.3 公式推導及通用電路的建立

假設一工廠有 2 台諧波負載及其它交流負載圖 3.2，在未裝濾波器前，利用廠商所給的諧波負載各次諧波電流算出責任分界點諧波含率，發現 5 次、7 次、11 次、13 次不台電管制標準，

於是我們準備設計三個單調式濾波器及一個高通式濾波器爲了簡化問題，可把高通式濾波器先設定爲單調式濾波器，因爲我所關心的是這些濾波器在60Hz基諧波時所呈現的虛功率 Q_n ，其總合

需等於虛功補償值 ΔQ_c ，而在各次諧波來臨時又能與其專司濾去的諧波產生諧振，以導引該次諧波電流並分擔部分不同次諧波的分流，以達到抑制諧波兼功因改善。問題是各濾波器在60Hz

$3\phi 3W 11.4KV$

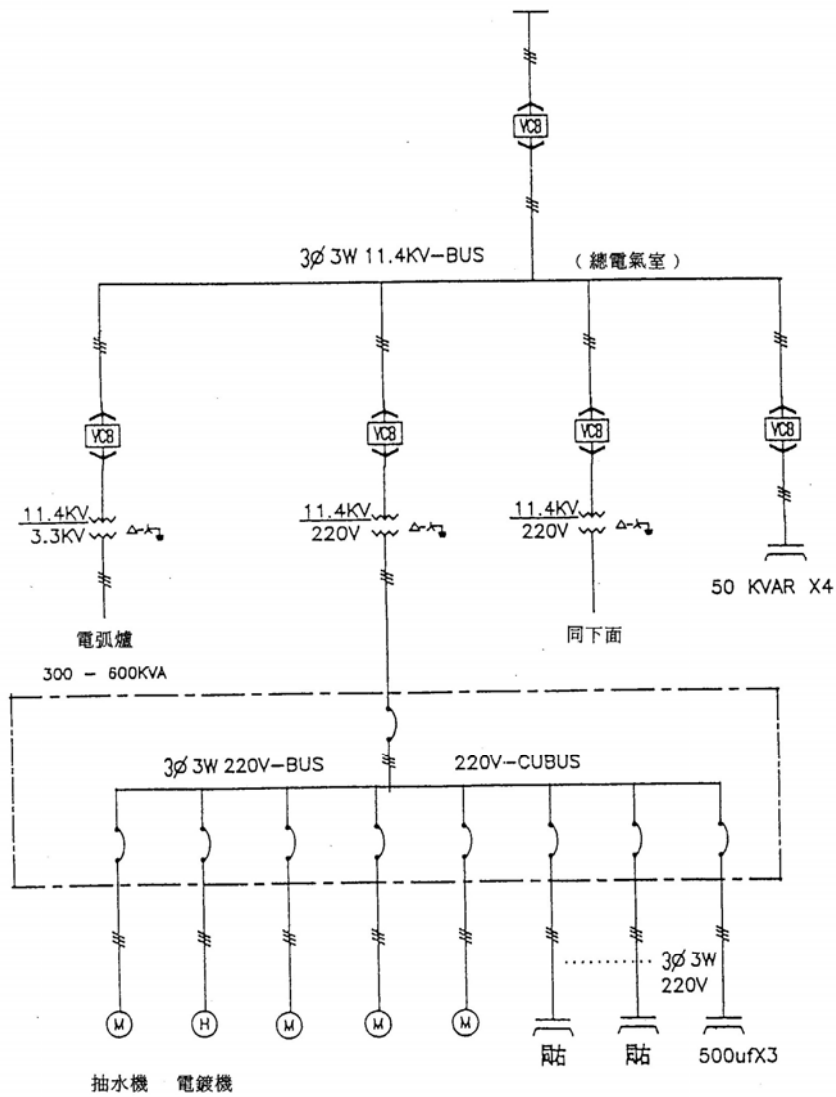


圖3.1 配電模式

基波所呈現的虛功率 Q_{n_b} 要分派多少？其諧振點 n_b 值又要設計多少？爲了把問題具體的描述出來，現在我們由電路來著手：在 60Hz 基波下，假設每個電路元件上頭均有個獨立匯流排，元件末端短路則匯流排短路容量 (pu) 的倒數值即爲該元件的阻抗，因此電源、變壓器、馬達、電容器阻抗可以 (3-1 式) ~ (3-8 式) 表示：(詳細說明見附錄 B)。

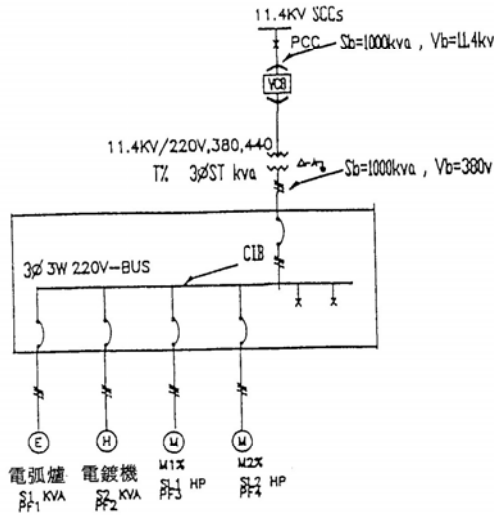


圖 3.2 含諧波負載的配電系統

$$X_s = \frac{1}{SCC_s} \quad \text{其中}$$

$$SCC_s = \frac{SCC_{min}}{S_b} \quad (3-1)$$

$$X_t = \frac{1}{SCC_t} \quad \text{其中}$$

$$SCC_t = \left(\frac{100}{T}\right) \times \left(\frac{S_r}{S_b}\right) \quad (3-2)$$

$$X_{M1} = \frac{1}{SCC_{M1}} \quad \text{其中}$$

$$SCC_{M1} = \left(\frac{100}{M1}\right) \times \left(\frac{SL_1}{S_b}\right) \quad (3-3)$$

$$X_{M2} = \frac{1}{SCC_{M2}} \quad \text{其中}$$

$$SCC_{M2} = \left(\frac{100}{M2}\right) \times \left(\frac{SL_2}{S_b}\right) \quad (3-4)$$

$$X_{C5} = \frac{1}{SCC_5} \quad \text{其中}$$

$$SCC_5 = \left(\frac{Q_5}{S_b}\right) \times \left(1 - \frac{1}{n_5^2}\right) \quad (3-5)$$

$$X_{C7} = \frac{1}{SCC_7} \quad \text{其中}$$

$$SCC_7 = \left(\frac{Q_7}{S_b}\right) \times \left(1 - \frac{1}{n_7^2}\right) \quad (3-6)$$

$$X_{C11} = \frac{1}{SCC_{11}} \quad \text{其中}$$

$$SCC_{11} = \left(\frac{Q_{n11}}{S_b}\right) \times \left(1 - \frac{1}{n_{11}^2}\right) \quad (3-7)$$

$$X_{C13} = \frac{1}{SCC_{13}} \quad \text{其中}$$

$$SCC_{13} = \left(\frac{Q_{n13}}{S_b}\right) \times \left(1 - \frac{1}{n_{13}^2}\right) \quad (3-8)$$

而電弧爐、電鍍機可等效成一個諧波電流源 I_h ，至於濾波器方面感抗值是容抗值的該濾去諧波次數平方之一，才能濾去該次諧波，但是諧振點不能設計等於該諧波次數，否則會造成該濾波器發生串聯共振而燒毀電容器，以抑制五次諧波濾波器而言 n_5 不能設計 5， n_5 是接近 5 的一個變數，其他濾波器依此類推，圖 3.2 即可描述如圖 3.3 的等效電路；接著我們把 X_{C5} 、 X_{C7} 、 X_{C11} 、 X_{C13} 以 (3-5 式) ~ (3-8 式) 代換掉則對於 h 次諧波來臨時，整個電路感抗乘 h 容抗除以 h ，可將其整理成符合圖 3.3 各次諧波的通用電路如圖 3.4 所示。

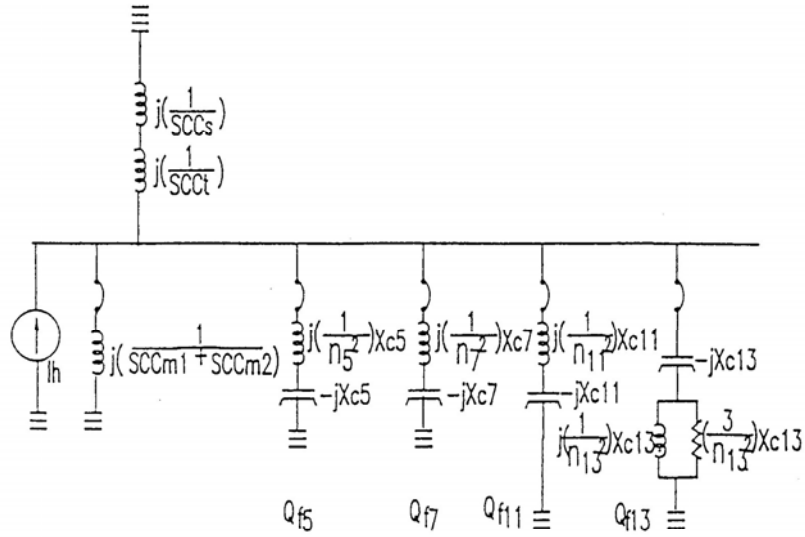


圖 3.3 60Hz 基波時的等效電路

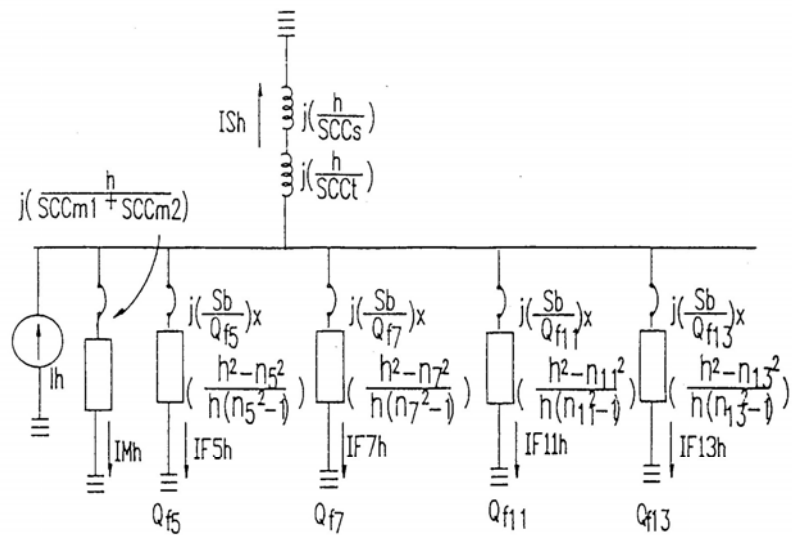


圖 3.4 適合各次諧波的通用電路

仔細觀察這個電路對抑制 h 次諧波濾波器似乎透露兩個重要訊息：

〔訊息一〕

若該濾波器基波容量 Q_{fb} 已決定則調諧點 $n_b \downarrow \rightarrow$ 濾波器阻抗 $ZF_b \uparrow$ 抑制效果漸差。

$$\begin{aligned} \text{例 } h=5 \quad n_s=4.8 \quad ZF_s &= 0.0178 \left(\frac{S_b}{Q_b} \right) \\ n_s=4.5 \quad ZF_s &= 0.049 \left(\frac{S_b}{Q_b} \right) \\ n_s=4.3 \quad ZF_s &= 0.012 \left(\frac{S_b}{Q_b} \right) \end{aligned}$$

〔訊息二〕

若該濾波器諧振點 n_b 已決定則基波容量 $Q_b \downarrow \rightarrow$ 濾波器阻抗 $ZF_b \uparrow$ 抑制效果漸差。

$$\begin{aligned} Q_b \downarrow \rightarrow ZF_b \uparrow &\rightarrow \text{設計的}(L \uparrow, C \downarrow) \\ Q_b \downarrow \rightarrow ZF_b \uparrow &\rightarrow \text{設計的}(L \uparrow, C \downarrow) \end{aligned}$$

此兩項訊息可作為設計濾波器的參考，另外在 3.4 節裡我們將論述這通用電路的受限因素。

3.4 受限因素

有幾項因素會影響我們抑制諧波的結果，茲說明如下並提出策略：

3.4.1 虛功補償(Reactive Compensation)

各濾波器在基諧波時需滿足虛功補償值，因此：

$$Q_b + Q_r + Q_{m1} + Q_{n3} = \Delta Q_c \quad (3-9)$$

3.4.2 系統變動(system variations)

台電電源端電壓約有 $\pm 5\%$ 的變動情形，因

此電源短路容量並非定值而是在最大短路容量 SCC_{max} 及最小短路容量 SCC_{min} 間變動，這將造成電源阻抗的變動深深影響模擬的結果，解決的方法就是取最小短路容量作為電源阻抗換算的資料(3-1式)，我們的想法是最小的電源短路容量，將產生最小的電源短路電流 I_{sc} ，結果將使得諧波抑制表中(附錄 A)。 I_{sc}/I_L 值愈小，審核抑制值往愈上列移使得責任分界點的諧波管制愈嚴格，若我們設計的結果均能合乎愈嚴酷的抑制值，那麼當電源短路容量比最小短路容量大時，其抑制效果仍會在這個抑制值內。另一方面電源頻率約有 $\pm 1\%$ 的變動可以(3-10式)表示。

$$-1\% < \frac{\Delta f}{f} < 1\% \quad (3-10)$$

3.4.3 諧振點的漂移現象(detuning)

電容器的 C 值隨著溫度的變化，冬天夏天均不同約有 $\pm 2\%$ 的誤差，另外製造時也有 $-5\% \sim 10\%$ 的誤差，因此電容值總誤差可以(3-11)式表示：

$$-7\% < \frac{\Delta C}{C} < 12\% \quad (3-11)$$

至於電抗器大部分使用氣心式、電感值 L 不受溫度影響主要的誤差來自製造上

$$-3\% < \frac{\Delta L}{L} < 3\% \quad (3-12)$$

從上面的探討我們斷定溫度效應(Temperature Variations)，製作誤差(Manufacturing Tolerances)及頻率變動必會造成濾波器諧振點的漂移⁽¹¹⁾，有可能使我們設計的 n_b 值落在抑制 h 次諧波的諧振點上產生串聯共振，炸掉電容器務必加以避免，到底諧振點合理的設計安全範圍應落於何處呢？(3-13式)表示抑制 h 次諧波的單調式濾波器諧振點：

$$n_h = \frac{1}{2\pi f \sqrt{LC}} \quad (3-13)$$

將(3-10式)~(3-12式)代入(3-13式)可得(3-14式), 諧振點的範圍值:

$$\begin{aligned} h \times \frac{1}{1.01 \times \sqrt{1.03 \times 1.12}} < n_h < h \\ \times \frac{1}{0.99 \times \sqrt{1.97 \times 0.93}} \\ 0.92 \times h < n_h < 1.06 \times h \end{aligned} \quad (3-14)$$

設計時必需避開這個範圍以抑制五次諧波濾波器而言, $h=5$ 代入(3-14式), 可發現共振範圍在4.6~5.3之間, 若設計諧振點為4.6時諧振點會在4.23~4.87間搖擺怎麼擺都不會擺到5, 換句話說我們已使抑制五次諧波濾波器避開了五次諧波串聯共振的機會, 參考圖3.5, 因此合理的諧振點值應設計在抑制諧波次數的92%以下, (3-15式)所示

$$(h-1) < n_h < 0.92 \times h \quad (3-15)$$

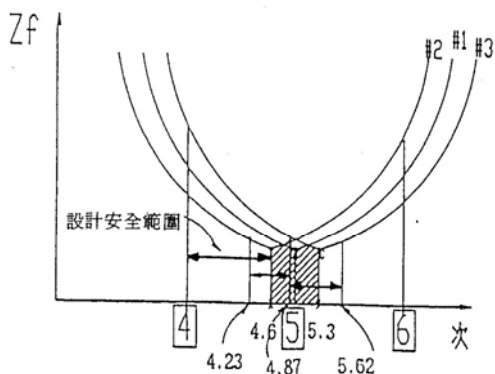


圖3.5 諧振點的設計範圍
(以抑制五次諧波濾波器為例)

3.5 問題描述

延續3.3節以來的內容, 我們所關心的是在加入這些濾波器後, 各次諧波在責任分界點的失

真率需合乎台電管制標準, 並且綜合電流失真率最小所以目標函數是THD_i, 構成元素是各次諧波電流失真率D_h, 爲了成就問題必需先把D_h出來(參考點3.4)。

令匯流排電壓爲V_{bus}

流往電源端各次諧波電流通式爲:

$$I_{sh} = \frac{V_{bus}}{Z_{sh} + Z_{th}} \text{ (pu)} \quad (3-16)$$

流往交流負載各次諧波電流通式爲:

$$I_{Mh} = \frac{V_{bus}}{Z_{Mh}} \text{ (pu)} \quad (3-17)$$

流往濾波器的各次諧波電流通式爲:

$$\begin{aligned} IF_{ih} &= \frac{V_{bus}}{ZF_{ih}} \text{ (pu)} \\ i &= 5, 7, 11, 13, h = 25 \dots 0 \end{aligned} \quad (3-18)$$

所以由諧波源流出來的各次諧波電流通式爲:

$$I_{thh} = I_{sh} + I_{Mh} + IF_{5h} + IF_{7h} + IF_{11h} + IF_{13h} \quad (3-19)$$

但實際上廠商所給的諧波源各次諧波電流爲I_h, 因此所有分支各次諧波電流需縮小(I_h/I_{thh})倍, 實際上流往責任分界點的各次諧波電流爲:

$$I'_{sh} = I_{sh} \times (I_h / I_{thh}) \quad (3-20)$$

因此其失真率爲:

$$D_h = \frac{I'_{sh}}{I_{L1}} \times 100\% \quad (3-21)$$

其中I_{L1}爲責任分界點上基諧波電流pu值, 而責任分界點上綜合諧波電流失真率爲:

$$\sqrt{\sum_{h=2}^{50} D_h^2} \quad (3-22)$$

上述資料不管是電流、阻抗均是以對系統基準容量 \$S_b\$ 及各線路基準電壓 \$V_b\$ 作 pu 換算，使各元件並入系統。現在我們忽略流往非諧波負載的

分流為零，也就是 \$I_{Mh} = 0\$，這個措施除了簡化計算外，也使實際抑制諧波值更低。其次將 (3-1 式) ~ (3-9 式) 代入 (3-16 式) ~ (3-21 式) 可以導出：

$$D_h = \frac{\left(\frac{1}{X_{sh} + X_{th}}\right) \times \left(\frac{I_h}{I_{L1}}\right)}{\left(\frac{1}{X_{sh} + X_{th}}\right) + \left(\frac{h^2}{S_b}\right) \left[-\Delta Q_c + (h^2 - 1) \left(\frac{Q_{n5}}{h^2 - n_5^2} + \frac{Q_{n7}}{h^2 - n_7^2} + \frac{Q_{n11}}{h^2 - n_{11}^2} + \frac{Q_{n13}}{h^2 - n_{13}^2}\right)\right]} \quad (3-23)$$

上述讓我們感到可喜的是具備擴充性，例如若增設一組抑制 \$m\$ 次諧波之濾波器只須在分母

項中添入 \$\frac{Q_{ni}}{h^2 - n_i^2}\$ 項，因此 (3-23) 式可簡化人如下

$$D_h = \frac{\left(\frac{1}{X_{sh} + X_{th}}\right) \times \left(\frac{I_h}{I_{L1}}\right)}{\left(\frac{1}{X_{sh} + X_{th}}\right) + \left(\frac{h^2}{S_b}\right) \left[-\Delta Q_c + (h^2 - 1) \left(\sum_{i=m}^{m_f} \frac{Q_{ni}}{h^2 - n_i^2}\right)\right]} \quad (3-24)$$

其中 \$i = m_1, \dots, m_f\$ 代表設計抑制 \$i\$ 次諧波的濾波器故對於圖 3.2 含諧波負載的配電案例，其抑制 5, 7, 11, 13 次諧波兼功因改善的問題配合 (3-9 式)、(3-15 式)、(3-24 式)、及附錄 A 中抑制表可描述如下：

- \$0 < D_5 < 4\%\$
- \$0 < D_7 < 4\%\$
- \$0 < D_{11} < 2\%\$
- \$0 < D_{13} < 2\%\$

(三) 虛功補償

- \$Q_{n5} + Q_{n7} + Q_{n11} + Q_{n13} = \Delta Q_c\$
- \$Q_{n5} > 0\$
- \$Q_{n7} > 0\$
- \$Q_{n11} > 0\$
- \$Q_{n13} > 0\$

Min THD,

求 \$(Q_{n5}, n_5), (Q_{n7}, n_7), (Q_{n11}, n_{11}), (Q_{n13}, n_{13})\$

s.t

(一) 避開串聯共振點

- \$4 < n_5 < 5 \times 0.92\$
- \$6 < n_7 < 7 \times 0.92\$
- \$10 < n_{11} < 11 \times 0.92\$
- \$12 < n_{13} < 13 \times 0.92\$

(二) 限制超出抑制標準之諧波失真率

從這案例的問題描述經過，我們將在 3.6 節裡將問題規劃成一般化。

3.6 問題規劃

首先利用廠商所給諧波源各次諧波電流，在

未裝設任何濾波器前，模擬出責任分界點上各次諧波流失真率，並與抑制表內抑制值 $M_{cr}\%$ 作比對；發現 $m_{[1]}, m_{[2]} \dots m_{[p]}$ 次諧波不合台電管制標準，準備設計 P 組濾波器來抑制諧波，使其責任分界點上各次諧波電流失真率均合乎管制標準綜合失真率最小，並兼基波時的虛功補償。其次，我們考慮問題限制包括濾波器調諧點的安全設計範圍（3-15式），基波時的虛功補償限制（3-9式）及將不合抑制值的諧波電流失真率 D_h 拉回合格的範圍內，因此整個問題可規劃如下：

Program

$$\text{Min} \quad \text{THD}_i = f(Q_{fm[i]}, n_{fm[i]}) = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} D_h^2} \quad (3-25)$$

Subject to

$$m[i] - 1 < n_{m[i]} \leq m[i] \times 92\% \quad (3-26)$$

$$0 < D_{m[i]} < M_{cr}\% \quad (3-27)$$

$$\sum_{i=2}^p Q_{fm[i]} = \Delta Q_c \quad (3-28)$$

$$\forall Q_{fm[i]} > 0 \quad (3-29)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, P$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, f$$

$$p \leq f$$

其中

$m_{[i]}$ ：濾波器的抑制諧波次

$n_{m[i]}$ ：抑制 $m[i]$ 次諧波濾波器的諧振點設計值

$D_{m[i]}$ ：責任分界點上所有不合台電管制標準的各次諧波電流失真值

$Q_{fm[i]}$ ：抑制 $m[i]$ 次諧波濾波器在基波時呈現的乏功率

ΔQ_c ：系統基波時的虛功補償值

$M_{cr}\%$ ：附錄 A 中抑制表內諧波電流失真標準值

$$C = 1 \dots 5, r = 1 \dots 5$$

整個問題似乎沒有考慮到與系統可能發生的並聯共振現象，正如 2.4.2 節提到抑制 m 次諧波之濾波器在 i 次諧波來臨時（其中 $i < m$ ），其阻抗會呈電容性，有機會與系統阻抗發生並聯共振將低次諧波電流擴大，雖然不一定發生但不能不防。我們提出的策略是在問題被解出後重新檢視責任分界點上 i 次諧波電流失真率，若發現比未裝設濾波器組的等效阻抗與系統阻抗產生並聯共振，解決之道即再加裝一組抑制 i 次諧波濾波器並重新形成問題，依此類推直到各次諧波電流均在抑制值內，我們將在 4.4 節把這個策略加入 S.U.M.T. 解此規劃問題的流程內。

四、Fermat 定理及序列無限制最小化技術

4.1 前言

本節介紹 Fermat 定理及序列無限最小化技術，可用來減少目標函數中可行解個數並求此非線性最佳化問題。

4.2 Fermat 定理

極小值所在乃是在邊界上或導函數（梯度）為零處。

觀察（3-25式）目標函數是由濾波器容量 Q_n 調諧點 n_i 所構成一組可行解空間，其中調諧點設計值若取在邊界上（ie $n_{m[i]} = m[i] \times 93\%$ ）則各次諧波電流失真 D_h 將會相對最小，此結果亦造成目標函數相對最小，因此將調諧點設計在該抑制諧波次數的 92%，是目標函數最小化的最佳狀況，此一措施使得調諧點由解空間消失，大大降低問題求解的難度，我們將在實例分析中證明此一論點。

4.3 序列無限制最小化技術^(18, 19, 20)

使用 Fermat 定理後可從規劃問題中移去 (3-28 式) 代入目標函數中, 以減少一個維度, 因此限制條件只剩下 (3-27 式) 及 (3-29 式) 可把問題重新整理如下:

$$\text{目標函數 } \text{Min } f(x) \quad (4-1)$$

$$\text{限制條件 } g_i(x) > 0 \quad i=1, 2, 3 \dots (f+p)-1 \quad (4-2)$$

$$\text{其中 } \{x | \forall g_i(x) > 0\}$$

本節介紹求解非線性規劃問題的制約函數法。使用這種方法, 可將非線性規劃問題的求解, 轉化為求解一系列無限極值問題, 因而也稱這種方法為序列無限制最小化技術, 簡記為 SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique)。其又分為內點法和外點法。本文採用的是內點法, 它要求疊代過程始終在可行區間內部進行, 因此起始點需取在可行區間內部, 並在可行區間的邊界上設置一道“障礙”, 使疊代點靠近可行區間的邊界時, 寫出的新目標函數值迅速增大, 從而使疊代點始終留在可行區間內部。更詳細內容說明如下:

首先透過函數疊加的辦法來改造原目標函數, 使得改造後的目標函數 (又稱障礙函數) 具有這種性質: 在可行區間 R 的內部, 離邊界面較遠的地方障礙函數 $\bar{P}(x, r_k)$ 與原目標函數 $f(x)$ 儘可能相近; 而在接近邊界面時可以有任意大的值。可以預見, 滿足這種要求的障礙函數, 其極小值自然不會在 R 的邊界上達到。這就是說, 用障礙函數來代替 (近似) 原目標函數, 並在可行區間 R 內部使其極小化, 雖然 R 是一個關閉集合, 但因極小點不在關閉集合的邊界上, 因而實際上是具有無限制性質的極值問題, 可借助於無限制最佳化的方法進行計算。其次根據上述分析, 即可將非線性規劃 (4-1 式) ~ (4-2 式) 轉化為下述一系列無限制性質的極小化問題:

新目標函數

$$\text{Min}_{x \in R} \bar{P}(x, r_k) \quad (4-3)$$

其中

$$\bar{P}(x, r_k) = f(x) + r_k \sum_{i=1}^{p+q-1} \frac{1}{g_i(x)} \quad (r_k > 0) \quad (4-4)$$

式 (4-4) 右端第二項稱為邊界驅逐項 (boundary repulsion term, 亦稱為懲罰函數 (penalty function)), 用以防止梯度搜尋程序中一個或數個 $g_i(x) = 0$ 時超越可行區域的邊界, 使 $\bar{P}(x, r_k)$ 為無窮大。再者, 從可行區間內部的某一點 $x^{(0)}$ 出發, 按無限制最小化方法對 (4-4 式) 進行疊代 (在進行一維搜尋時要適當控制步長, 以免疊代點跑到 R_0 之外), 則隨著障礙因子 r_k 的逐步減小即 $r_1 > r_2 > r_3 \dots > r_k \dots > 0$ 邊界驅逐項所起的作用也是越來越小, 因而求出的 $\text{Min } \bar{P}(x, r_k)$ 之解 $x(r_k)$ 也逐步逼近問題 (4-1) 的極小解 x_{\min} 。若原來問題的極小解在可行區間的邊界附近亦能隨著 r_k 的減小, 障礙作用逐步降低, 所求出的新目標函數的極小解不斷靠近邊界 (但不會穿越邊界), 直至滿足某一精度要求為止。現在把 S.U.M.T 內點法疊代步驟描述如下:

1. 取 $r_1 > 0$ (如取 $r_1 = 1$), 允許誤差 $\epsilon > 0$ (如 ϵ 取 0.001)。
2. 找出一可行內點 $x^{(0)} \in R_0$, 並令 $K = 1$
3. 建造障礙函數, 懲罰函數取各限制條件的倒函數和。
4. 以 $x^{(k-1)} \in R_0$ 為起始點, 對障礙函數進行無限制極小化 (在 R_0 內)。

$$\text{Min}_{x \in R_0} \bar{P}(x, r_k) = \bar{P}(x^{(k)}, r_k)$$

$$x^{(k)} = x(r_k) \in R_0$$

5. 檢驗是否滿足收斂準則

$$r_k \sum_{i=1}^{p+q-1} \frac{1}{g_i(x)} \leq \epsilon$$

如滿足上述準則則以 $x^{(k)}$ 為原問題的近似極

小解 x_{min} ；否則取 $r_{k+1} < r_k$ (如取 $r_{k+1} = 0.01r_k$)，令 $k = k + 1$ 轉向第 3 步繼續進行疊代。

4.4 濾波器兼改善功因設計流程

圖 4.1 為 IEEE 設計濾波器兼功因改善的流程圖，在系統尚未評估前，試問電容器容量、電抗器阻抗如何決定？是故這是典型的嗜誤法。當投入多組濾波器時將使問題更難猜解，何況緊接著幾個限制步驟，將使任一組猜解跳回起點。這正是抑制諧波兼改善功因設計困難的地方，也是 IEEE 文獻到目前為止解決這類問題唯一的流程⁽¹¹⁾。

圖 4.2 則是我們提出新的設計濾波器兼功因改善流程圖，藉由問題規劃直接以 S.U.M.T 求解以決定各組濾波器 L、C 值及規格品選定，沒有嗜誤法的耗時與盲目猜解程序，大大提升設計人員作業能力。

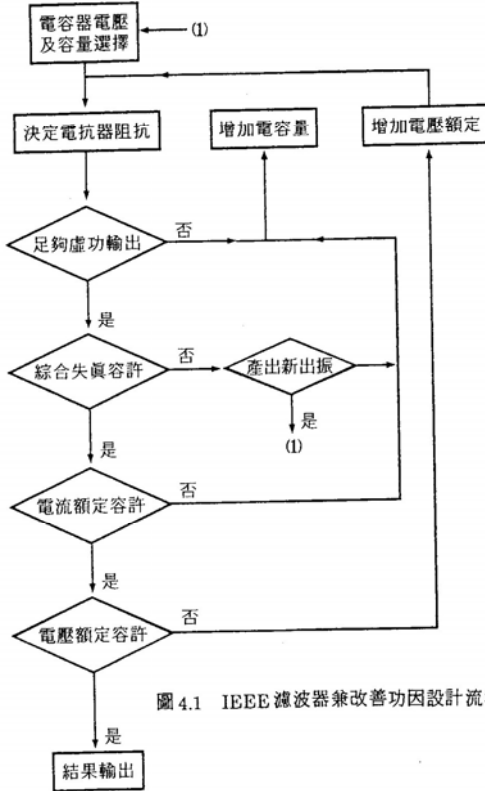


圖 4.1 IEEE 濾波器兼改善功因設計流程

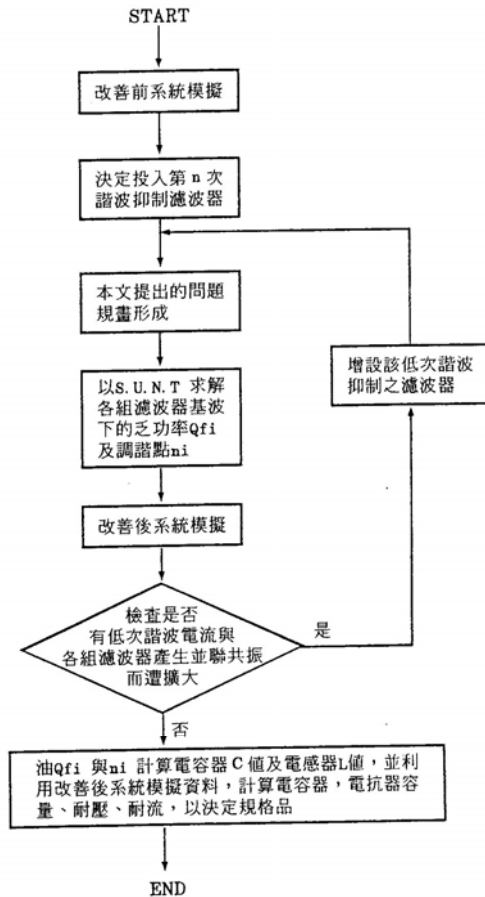


圖 4.2 本文所提新的濾波器兼改善功因設計流程

4.5 規格品選定

延續 3.5 節的問題描述，假設 $\Delta Q_c = 10\text{MV AR}$ ，引用 S.U.M.T 找到一組最佳解 (Q_n, n_s) ， (Q_n, n_7) ， $(Q_{n1}, n_{11}) = (2.37, 4.6)$ ， $(1.69, 6.44)$ ， $(3.2, 10.12)$ 則 $Q_{n3} = 10 - 7.26 = 2.74$ ， $n_{13} = 13 \times 0.92$ 。代入 (3-5 式) ~ (3-8 式) 算出各組濾波器中電容器容抗值 X_c ，進而求出電容器 C 值；將 C 值代入 (3-13 式) 算出電抗器

L 值，緊接著決定規格品的耐壓，耐流。將 (3-18 式) 乘上 (Z_b/Z_{ibh}) 倍，得流往抑制 i 次諧波濾波器端各次諧波電流通式得 (4-5 式)

$$IF'_{ih} = IF_{ih} \times (Z_b/Z_{ibh}) \quad (4-5)$$

電抗器耐流

$$IF_i = \sqrt{\sum_{h=1}^{50} IF'_{ih}{}^2} \times 130\% \quad (4-6)$$

電容器耐壓

$$V_{ci} = \sqrt{\sum_{h=1}^{50} (IF'_{ih} \times V_{ci} \times \frac{1}{h})^2} \times 110\% \quad (4-7)$$

即可向廠商訂購電抗器並從規格品中選擇電容器；通常的問題是電容器找不到規格品，可考慮不同等級的串並聯。

4.6 改善後系統模擬

既然已解出各組濾波器的設計值 (Q_m, n_r) 代入 (3-22 式) 及 (3-23 式) 即可模擬出改善後責任分界點上各次諧波電流失真及 THD_i。有時候低次諧波電流會被抑制高次諧波之濾波器擴大，反而在加裝濾波器後，失真率超出台電階段管制值，解決方法是濾波器設計最好由抑制低次諧波逐次投入。

五、實例分析

我們以圖 4.2 設計流程對圖 5.1 案例進行實例分析。

1. 改善前系統模擬

根據資料描述，可算出虛功補償值 $\Delta Q_c = 2875 \text{ MVAR}$ 。表 5.1~表 5.3 則為未投入濾波器前，責任分界點上不合附錄 A 管制表之各次諧波電流檢測計算；可發現 5, 11, 23, 25 次已超限值。現在為了避免低次諧波電流被抑制高次諧波濾波器擴大，我們由低次逐次投入二個單調式濾波器，分別為抑制 5, 7 次諧波。

2. 問題規劃形成

應用本文將此案例規劃如下：

$$\begin{aligned} & \text{Min THD}_i \\ & \text{求 } (Q_5, n_5), (Q_7, n_7) \\ & \text{s.t} \\ & 0 < D_5 < 5\% \\ & 0 < D_{11} < 2.25\% \\ & 0 < D_{23} < 0.75\% \\ & 0 < D_{25} < 0.75\% \\ & Q_5 > 0 \\ & Q_7 > 0 \end{aligned}$$

其中

$$D_h = \frac{\left(\frac{1}{0.0156h + 0.0804h}\right) \times \left(\frac{I_h}{72.8}\right)}{\left(\frac{1}{0.0156h + 0.0804h}\right) + \frac{h^2}{10} \left[-2.875 + (h^2 - 1) \left(\frac{Q_5}{h^2 - n_5^2} + \frac{Q_7}{h^2 - n_7^2}\right)\right]} \quad (4-8)$$

$$n_5 = 5 \times 0.92, n_7 = 7 \times 0.92, Q_{7h} = 2.875 - Q_5$$

3. S.U.M.T 解問題規劃

引用(4-4式)，把上述目標函數加上所有制條件倒數和再乘上一組序列 r 形成如下：

$$P(Q_n, r) = \text{THD}_i + r \left(\frac{1}{D_5 - 0.05} + \frac{1}{D_{11} - 0.0225} + \frac{1}{D_{23} - 0.0075} + \frac{1}{D_{25} - 0.0075} + \frac{1}{Q_n} + \frac{1}{2.875 - Q_n} \right)$$

接著根據點 5.2 尋解流程方式，寫一個電腦程式，可在 17.6sec 找到一組最佳解 $Q_n = 1.615\text{MVAR}$ ($Q_n = 2.875 - Q_n = 1.26$) 使 THD_i 最小。

4. 改善後系統模擬

將 (Q_n, n_5) 、 (Q_n, n_7) 代回(4-8式)及(3-22式)可求得改善後責任分界點上各次諧波電流及 THD_i 失真情形。將(4-8式)乘上 X_{sh} 可得責任分界點上各次諧波電壓失真。(4-8式)乘上 $(X_{sh} + X_{th})$ 得匯流排上各次諧波電壓失真，所有模擬數據如表 5.3.2 所示。5, 11, 23, 25 次諧波電流已被抑制在限制值內並且其它次諧波電流亦無被擴大現象，改善得相當不錯。圖 5.3.2A 及圖 5.3.2B 則顯示其改善前後各次諧波電流、電壓失真對照圖。

5. 規格品選定

將 (Q_n, n_5) 、 (Q_n, n_7) 代回(3-5式)及(3-6式)以求出電容器 C，並將 C 值代入(3-13式)求得電抗器 L 值。見表 5.3.2 設計結果。引用(4-6式)及(4-7式)得抑制五

次諧波濾波器耐流為 325.9amp，電容器耐壓 3.98kv；抑制七次諧波濾波器耐流為 231.5amp，電容器耐壓 3.96kv。

6. 其它投入濾波器情形

表 5.3.3 為投入三組濾波時設計結果及改善後模擬數據，圖 5.3.3A 及圖 5.3.3B 則顯示其改善前後失真對照圖。表 5.3.4 為投入四組濾波時設計結果及改善後模擬資料，圖 5.3.4A 及圖 5.3.4B 為其抑制前後情形。也許讀者已發現並非投入愈多組濾波器其抑制效果愈好，理由何在？不妨想一想。表 5.3.5 為投入二組抑制五、七次諧波濾波器下，改變調諧點設計值分別為 92%，91%，90%，88% 之設計結果。圖 5.3.5 為其抑制後之比照圖，證明了 4.2 節所談 Fermat 定理應用的相當正確，只有取濾波器調諧點設計值在邊界上 (ie 92%) 其 THD_i 是最小的狀況。

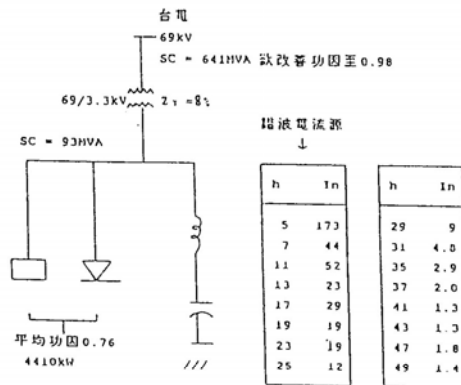


圖 5-1

表 5.1
[設計者：林昆平 94/ver1.0]

- (1) 基本資料描述
 (1) 供電壓 $V_1 = 69.0KV$ ，基準容量 $SB = 10.0MVA$ ，主 TR 容量 $ST = 8705.0KVA$ 。
 (2) 台電公司提供責任分界點電源最小短路容量 $SCC = 641.0KVA$ ，因此短路電流 $ISC = (641.0 \times 1000) / (\sqrt{3} \times 69.0) = 5363.7A$
 (3) 另本工程為〔新/增設工程〕其負載電流取主變壓器一次側額定電流 $IL = 8705.0 / (\sqrt{3} \times 69.0) = 72.8A$
 (4) 本工程：馬達負載：0.0HP，電熱負載：0.0KW，電燈負載：0.0KVA
 (5) $I_{sc}/IL = 5363.66/72.84 = 73.64$ 應查〔諧波管制暫行標準審核表中〕第 3 列限制值作為審核依據，該審核表描述如下：

(台電公司 諧波管制暫行標準)
 81年11月25日制定 / 82年01月14日修定

Inc / IL	諧波電流失真率(%)限制值					總合諧波 TTHD%
	各次諧波限制值(奇次諧波)					
	<11	11 ≤ N < 17	17 ≤ N < 23	23 ≤ N < 35	35 ≤ N	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.0	0.3	6.0
20~50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50~100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100~1000	12.0	6.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

- 註：a. 偶次諧波為上述限制值之 25%
 b. 自備發電設之用戶，一律採用 I_{sc}/IL 小於 20 之列的限制值為標準
 c. $IL(rms)$ ：對既設用戶取 12 個月最大負載電流平均值，對新設或增設用戶，取主變壓器一次側額定電流
 d. 若供電系統為 34.5~161KV 則為上述限制值之 50%

表 5.2
[設計者：林昆平 94/ver1.0]

- (II) 相關用電資料
 (1) 電源阻抗 Z_s 之 PU 值換算
 系統基準容量 = 10.0MVA，接戶點短路容量 = 641.0MVA
 $XZ_s = (1pu) \times (10.0MVA) / (1000 \times 641.0MVA) = j0.015601pu$
 (2) 變壓器阻抗 Z_t 之 PU 值換算
 基準容量 = 10.0MVA，TR 淨容量 = 8705.0KVA，查表知阻抗為：0.0700pu

$$XZ_t = 0.0700 \times (10.0 \times 1000KVA) / (8705.0KVA) = j0.08414pu$$

- (4) 廠商所給〔諧波清單〕及 1h 並入系統之 PU 值轉換
 [NO.1] 設備名稱：×××，容量：5800.KVA，台數：1 台，注入處電壓：3.3KV

1 次 1014.8A	5 次 173.00A	7 次 44.000A	11 次 52.000A
13 次 23.000A	17 次 20.000A	19 次 10.000A	23 次 10.000A
25 次 12.000A	29 次 0.0000A	31 次 4.8000A	35 次 2.0000A
37 次 2.0000A	41 次 1.3000A	43 次 1.3000A	47 次 1.8000A
49 次 1.4000A			

上述 2-50 次諧波電流為 MP 值，但系統基準容量 1.000MVA，故並入系統需除上 $(10 \times 1000KVA) / (\sqrt{3} \times 3.30KV)$ ，也就是乘上 0.00057，所以上述並入系統之諧波電流 PU 值轉換如下：

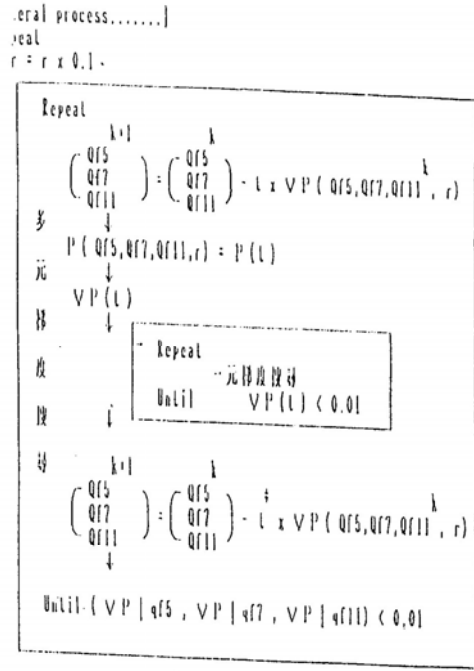
1 次 0.5800PU	5 次 0.0980PU	7 次 0.0251PU	11 次 0.0207PU
13 次 0.0131PU	17 次 0.0100PU	19 次 0.0100PU	23 次 0.0100PU
25 次 0.0009PU	29 次 0.0051PU	31 次 0.0027PU	35 次 0.0017PU
37 次 0.0011PU	41 次 0.0007PU	43 次 0.0007PU	47 次 0.0010PU
49 次 0.0008PU			

表 5.3
[設計者：林昆平 94/ver1.0]

- (IV) 改善前注入〔責任分界點〕之各次及總和諧波電流失真率檢討
 將(II)中(4)內各諧波源併入系統之各次(轉換 PU 值) × (台數)再對應相加，得〔前欄數值〕如下：
 又責任分界點基波電流 $IL_1 = 72.84Amp$ 以 S_b 併入系統後為：0.87PU，除此值，得〔後欄失真〕如下：

次 前欄數值	後欄失真率(%)	次 前欄數值(%)	後欄失真率(%)
2 0.0000PU	0.000%	2 0.000%	0.000%
3 0.0000PU	0.000%	3 0.000%	0.000%
4 0.0000PU	0.000%	4 0.000%	0.000%
5 0.0980PU	11.361%	5 0.0980%	2.833%
6 0.0000PU	0.000%	6 0.000%	0.000%
7 0.0251PU	2.833%	7 0.0251%	0.000%
8 0.0000PU	0.000%	8 0.000%	0.000%
9 0.0000PU	0.000%	9 0.000%	0.000%
10 0.0000PU	0.000%	10 0.000%	0.000%
11 0.0207PU	2.412%	11 0.0207%	0.000%
12 0.0000PU	0.000%	12 0.000%	0.000%
13 0.0131PU	1.555%	13 0.0131%	0.000%
14 0.0000PU	0.000%	14 0.000%	0.000%
15 0.0000PU	0.000%	15 0.000%	0.000%
16 0.0000PU	0.000%	16 0.000%	0.000%
17 0.0100PU	1.007%	17 0.0100%	0.000%
18 0.0000PU	0.000%	18 0.000%	0.000%
19 0.0100PU	1.237%	19 0.0100%	0.000%
20 0.0000PU	0.000%	20 0.000%	0.000%
21 0.0000PU	0.000%	21 0.000%	0.000%
22 0.0000PU	0.000%	22 0.000%	0.000%
23 0.0100PU	1.237%	23 0.0100%	0.000%
24 0.0000PU	0.000%	24 0.000%	0.000%
25 0.0059PU	0.703%	25 0.0059%	0.000%
26 0.0000PU	0.000%	26 0.000%	0.000%
27 0.0000PU	0.000%	27 0.000%	0.000%
28 0.0000PU	0.000%	28 0.000%	0.000%
29 0.0051PU	0.580%	29 0.0051%	0.000%
30 0.0000PU	0.000%	30 0.000%	0.000%
31 0.0027PU	0.310%	31 0.0027%	0.000%
32 0.0000PU	0.000%	32 0.000%	0.000%
33 0.0000PU	0.000%	33 0.000%	0.000%
34 0.0000PU	0.000%	34 0.000%	0.000%
35 0.0017PU	0.155%	35 0.0017%	0.000%
36 0.0000PU	0.000%	36 0.000%	0.000%
37 0.0007PU	0.120%	37 0.0007%	0.000%
38 0.0000PU	0.000%	38 0.000%	0.000%
39 0.0000PU	0.000%	39 0.000%	0.000%
40 0.0000PU	0.000%	40 0.000%	0.000%
41 0.0007PU	0.080%	41 0.0007%	0.000%
42 0.0000PU	0.000%	42 0.000%	0.000%
43 0.0007PU	0.080%	43 0.0007%	0.000%
44 0.0000PU	0.000%	44 0.000%	0.000%
45 0.0000PU	0.000%	45 0.000%	0.000%
46 0.0000PU	0.000%	46 0.000%	0.000%
47 0.0010PU	0.115%	47 0.0010%	0.000%
48 0.0000PU	0.000%	48 0.000%	0.000%
49 0.0008PU	0.092%	49 0.0008%	0.000%

最後欄的總失真率 TTHD = $\sqrt{\sum_{n=2}^{50} (I_n / I_1)^2} = 12.61\%$ 註：I 為各次電流



$$\text{Until } \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i(x)} < 0.001$$

圖 5.2 投入四組濾波器尋解過程

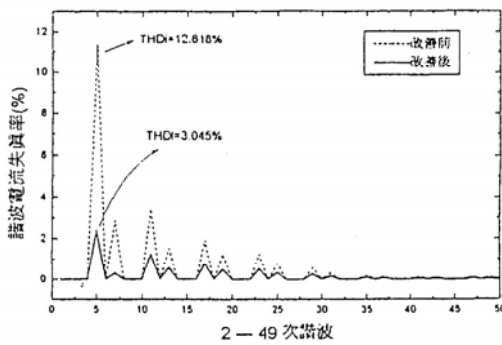


圖 5.3.2A 投入二組抑制五、七次諧波濾波器前後諧波電流失真對照圖

表 5.3.2 投入二組抑制五、七次諧波濾波器後諧波電流電壓失真情形

次	D.P點電壓失真	D.P點電壓失真	CIB點電壓失真	
5	2.422%	0.189%	1.303%	
7	0.326%	0.036%	0.245%	
11	1.246%	0.214%	1.475%	
13	0.580%	0.110%	0.823%	
17	0.787%	0.209%	1.438%	
19	0.525%	0.158%	1.073%	
23	0.534%	0.192%	1.322%	
25	0.337%	0.131%	0.900%	
29	0.255%	0.115%	0.794%	
31	0.135%	0.005%	0.451%	
35	0.083%	0.045%	0.312%	
37	0.070%	0.041%	0.281%	
41	0.037%	0.024%	0.105%	
43	0.037%	0.025%	0.173%	
47	0.052%	0.038%	0.263%	
49	0.041%	0.031%	0.213%	
THDi = 3.045%			THDv = 0.494%	THDv = 3.402%

設計結果：

濾波器	F#5	F#7
調諧頻率	4.6	6.44
輸出成功 (kvar)	1615	1260
電容器C值 (uf)	375	300
電抗器L值 (mh)	0.887	0.566
S.U.N.T 尋解時間	17.6 SEC	

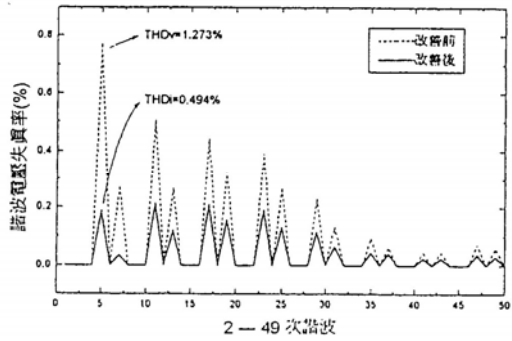


圖 5.3.2B 投入二組抑制五、七次諧波濾波器前後諧波電流失真對照圖

表 5.3.3 投入三組抑制五、七、十一、二十五次諧波
濾波器後諧波電流電壓失真情形

次	D.P點電壓失真	D.P點電壓失真	CIB點電壓失真
5	2.757%	0.215%	1.423%
7	1.073%	0.117%	0.303%
11	0.512%	0.105%	0.724%
13	0.449%	0.091%	0.523%
17	0.682%	0.182%	1.259%
19	0.469%	0.159%	0.959%
23	0.483%	0.175%	1.202%
25	0.310%	0.121%	0.833%
29	0.235%	0.107%	0.735%
31	0.125%	0.061%	0.419%
35	0.077%	0.042%	0.291%
37	0.065%	0.023%	0.262%
41	0.035%	0.022%	0.154%
43	0.035%	0.022%	0.152%
47	0.049%	0.039%	0.247%
49	0.936%	0.029%	0.200%

THDi = 3.232% THDv = 0.445% THDv = 3.074%

設計結果：

濾波器	F#5	F#7	F#11
調諧頻率 (92%)	4.50	5.44	10.12
輸出有功 (KVAR)	2099	343	433
電容容C值 (uf)	437	82	105
電抗器L值 (ah)	0.584	2.071	0.549
S.U.N.T 壽 命 時 間 :	5.2 SEC		

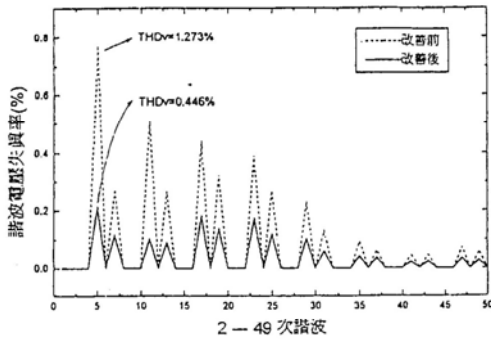


圖 5.3.3A 投入三組抑制五、七、十一、二十五次諧波
濾波器前後諧波電流失真對照圖

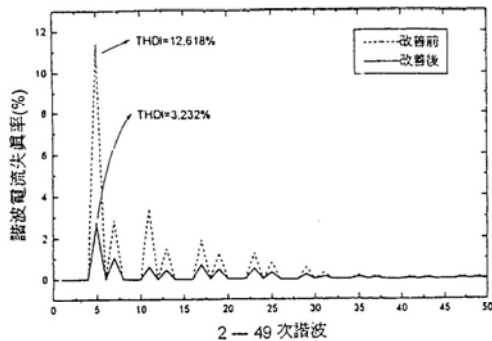


圖 5.3.3B 投入三組抑制五、七、十一、二十五次諧波
濾波器前後諧波電流失真對照圖

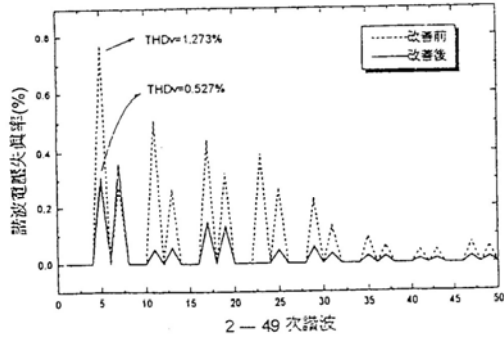


圖 5.3.4A 投入三組抑制五、七、十一、二十五次諧波
濾波器前後諧波電流失真對照圖

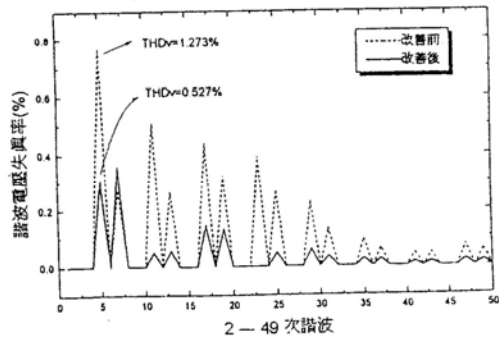


圖 5.3.4B 投入三組抑制五、七、十一、二十五次諧波
濾波器前後諧波電流失真對照圖

表 5.3.4 投入三組抑制五、七、十一、二十五次諧波
濾波器後諧波電流電壓失真情形

次	D.P點電壓失真	D.P點電壓失真	CIB點電壓失真
5	3.942%	0.308%	2.120%
7	3.280%	0.358%	2.469%
11	0.301%	0.052%	0.350%
13	0.285%	0.058%	0.309%
17	0.551%	0.148%	1.008%
19	0.440%	0.122%	0.912%
23	0.000%	0.000%	0.000%
25	0.126%	0.049%	0.338%
29	0.131%	0.059%	0.400%
31	0.073%	0.035%	0.244%
35	0.047%	0.026%	0.170%
37	0.041%	0.024%	0.163%
41	0.022%	0.014%	0.098%
43	0.022%	0.015%	0.104%
47	0.032%	0.023%	0.180%
49	0.025%	0.019%	0.130%

THDi = 5.198% THDv = 0.527% THDv = 3.631%

設計結果：

濾波器	F#5	F#7	F#11	F#25
調諧頻率 (92%)	4.60	6.44	10.12	23
輸出有功 (KVAR)	1453	158	1108	66
電容容C值 (uf)	337	37.5	280	16
電抗器L值 (ah)	0.986	4.524	0.238	0.829
S.U.N.T 壽 命 時 間 :	3分 5.3 SEC			

表 5.3.5 投入二組抑制五、七次諧波濾波器下變更調諧點設計值分別為 92%、91%、90%、88% 之諧波電流失真情形

次	n5, n7 (92%) 電流失真	n5, n7 (91%) 電流失真	n5, n7 (90%) 電流失真	n5, n7 (88%) 電流失真
5	2.422%	4.640%	5.292%	6.831%
7	0.326%	0.533%	0.580%	0.670%
11	1.246%	1.338%	1.362%	1.409%
13	0.589%	0.625%	0.634%	0.653%
17	0.787%	0.828%	0.839%	0.880%
19	0.525%	0.552%	0.558%	0.572%
23	0.534%	0.560%	0.567%	0.580%
25	0.337%	0.353%	0.357%	0.365%
29	0.255%	0.266%	0.269%	0.276%
31	0.135%	0.141%	0.143%	0.146%
35	0.083%	0.087%	0.088%	0.090%
37	0.070%	0.074%	0.074%	0.076%
41	0.037%	0.039%	0.039%	0.040%
43	0.037%	0.039%	0.039%	0.040%
47	0.052%	0.054%	0.055%	0.056%
49	0.041%	0.042%	0.043%	0.044%
THDi:	3.045%	5.053%	5.672%	7.154%

設計結果:

濾波器	F#5	F#7
調諧頻率 (92%)	4.60	6.44
調諧頻率 (91%)	4.55	6.37
調諧頻率 (90%)	4.50	6.30
調諧頻率 (88%)	4.40	6.16
輸出成功 (kvar)	1615	1260

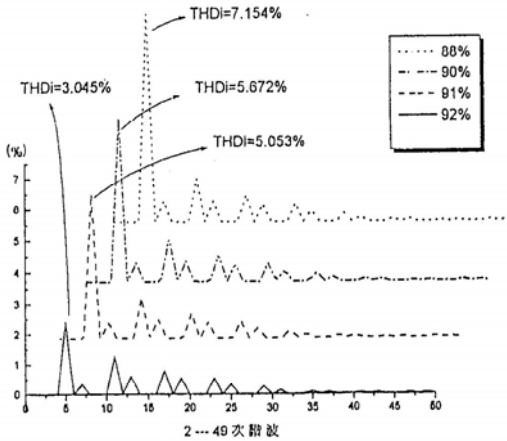


圖 5.3.5 投入二組抑制五、七次諧波濾波器下變更調諧點設計值分別為 92%、91%、90%、88% 之諧波電流失真對照圖

六、結 論

本文針對實例以作者提出的問題規劃及 S.U.M.T 求解，分別進行投入二組、投入三組、投入四組濾波器測試。除了印證 (3-1 式) ~ (3-2 式) 公式推導及 (3-25 式) ~ (3-29 式) 問題規劃均為正確外也把 S.U.M.T 實行得相當不錯。設計結果均把諧波抑制到標準值內，另外逐漸降低調諧點設計值，可發現抑制效果漸差，也證實了 4.2 節 Fermat 定理之應用亦相當正確。並非投入多組濾波器，抑制效果就會更好；因為抑制高次諧波之濾波器，往往擴大低次諧波電流而使抑制效果大打折扣。故投入濾波器時，應由抑制低次諧波之濾波器逐次投入。

諧波抑制，需經百次以上模擬才能找到濾波器之設計值。這種嘗試錯誤，不但費時而且往往帶給從業人員身心嚴重的打擊。本研究試著從另一個觀點，利用公式推導將濾波器設計放入配電模式中；再由受限因素，將濾波器設計值經由問題規劃求解出來；不但顯著提高時效，也解決了長久以來國內外設計人員無從下手的難題。並且在實例分析中證實了作者論點、公式推導均沒有錯而且把 S.U.M.T 實行得相當不錯，責任分界點上不合格的諧波失真均被抑制到標準值內。

附 錄 A

台灣電力系統諧波管制暫行標準 (參照 1989 年 IEEE-519 諧波標準編訂)

(1) 用戶住入其責任分界點之諧波電流

A. 33~22.8KV 系統

I _{sc} /IL	諧波電流失真率(%)限制值					總合諧波 THD%
	諧波次數(奇次)					
	<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	35≤n	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	4.5	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

- 註：1. 偶次諧波為上述限制值之 25%
 2. 自備發電設備之用戶，一律採用 I_{sc}/IL 小於 20 之限制值
 3. I_{sc}：用戶責任分界點短路電流
 4. IL(rms)：對既設用戶取 12 個月最大負載電流平均值

B. 對於 34.5~161KV 系統為上述限制值之 50%

(2) 用戶責任分界點之諧波電壓

	諧波電壓失真率(%)目標值		
	3.3~22.8KV	34.5~69KV	161KV
各次諧波	3.0	1.5	1.0
總合諧波	5.0	2.5	1.5

- 註：用戶諧波電壓失真率容許值 = 表內標準值 - 系統背景值
 對於 161KV 用戶若容許值 ≤ 0.1%，則一律核給容許值 0.1%
 對於 34.5~69KV 用戶若容許值 ≤ 0.15%，則一律核給容許值 0.15%
 對於 3.3~22.8KV 用戶若容許值 ≤ 0.3%，則一律核給容許值 0.3%

(3) 用戶須同時符合諧波電流失真率限制值及總合諧波電壓失真率容許值。

(4) 本管制暫行標準得定期及視需要檢討修正。

附 錄 B

系統變數說明：

(1) 電源部份

- X_a：並入系統電源阻抗 pu 值
 SCC_a：並入系統電源最小短路容量 pu 值
 SCC_{min}：電源端最小短路容量值 (MVA)
 S_b：系統基準容量 (MVA)。通常取 10MVA

(2) 主變壓器部份

- X_i：並入系統變壓器阻抗 pu 值
 SCC_i：並入系統變壓器匯流排短路容量 pu 值
 S_T：變壓器三相總容量 (MVA)
 T：變壓器阻抗百分比值

(3) 馬達負載部份

- X_{Mi}：第 i 台馬達並入系統阻抗 pu 值
 SCC_{min}：並入系統第 i 台馬達匯流排上短路容量 pu 值
 SL_i：第 i 台馬達容量 (KHP)
 M_i：第 i 台馬達阻抗百分比值

(4) 濾波部份 (60Hz 基波下)

- X_{ci}：第 i 台單調式濾波器中電容器並入系統阻抗 pu 值
 SCC_i：並入系統第 i 台單調式濾波器中電器匯流排上短路容量 pu 值
 Q_n：第 i 台單調式濾波器之容量 (MVAR)
 n_i：第 i 台單調式濾波調諧點設計值

公式證明：

1. 令尚未並入系統第 i 台濾波器阻抗 pu 值為 1

$$Z_{fi(oid)} = X_{Li(oid)} - X_{ci(oid)}$$

$$= -j\left(1 - \frac{1}{n_i^2}\right)X_{ci(oid)} = 1pu$$

$$X_{ci(oid)} = \frac{1}{1 - \frac{1}{n_i^2}} pu$$

2. 並入系統濾波器阻抗 pu 值

$$X_{ci} = X_{ci(oid)} \times \frac{S_b}{Q_n}$$

3. 並入系統後濾波器中電容器匯流排上短路容量 pu 值

$$SCC_i = \frac{1}{X_{ci}} = \left(\frac{Q_n}{S_b} \right) \times \left(1 - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

參 考 文 獻

1. C. K. Duffey, and R. P. Stratford. "Update of Harmonic Standard IEEE-519; IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic control in Electric Power Systems", IEEE Trans, Vol IA-25, No.6, pp. 1025-1034, Nov/Dec 1989.
2. 顏義和等著: "諧波污染之配電系統的虛功補償設計", 中華民國第十四屆電力工程研討會論文集, pp. 364-370。
3. 胡忠興著: "小型工業配電系統諧波分析與抑制的實驗研究", 中華民國第十四屆電力工程研討會論文集, pp. 332-370。
4. 郭麟英著: "電力諧波計算及書審作業之OA化", 第533期台電工程期刊, Jan. 1993, pp. 36-47。
5. G. Manchur, C.C. Erven, "Development of a Model for Predicting Flicker from Electric Arc Furnaces", IEEE Trans. On Power Delivery Vol.7, No.1 (Jan. 1992), pp. 416-426.
6. Oltrogge. A.R., "Fundamental Criteria for Large Arc Furnace Power System", Journal of Metals, Jan. 1971, pp. 53-64.
7. U.L.E. "ARC FURNACE DISTURBANCES", Disturbances study committee 1980.
8. L. Gyugyi and E. R. Taylor, "Character of static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators for Powersystem, Applications", IEEE TRANS. Vol. PAS-99 No.5 Sept/Oct 1980, pp. 1795-1804.
9. Allan Ludbrook, B.S.C., P. Engo., "Rectifier Harmonics in Small Power Systems", pp. 31-40.
10. K. Benson, S. Wallace, "Harmonic Analysis of the A. B. Chance Power System", 1992 IEEE Industry Application Meeting Vol.1, pp. 844-849.
11. A. Gonzalez and C. McCall, "Design of filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems", IEEE Trans. Vol. IA-23, No.3, May/June 1987.
12. R. Bala, V. I. John and J. P. Tamby, "Harmonic Performance of a Cycloconverter Synchronous-Motor Marine Propulsion Systems", 1993 IEEE Industry Applications Meeting Vol.1, pp. 496-502.
13. G. Lemieux, "Power system farmonic resonance - adocumented case", IEEE Trans. Vol. IA-26, No. 3, May/June 1990, pp.483-488.
14. 日本電氣協同研究: "電力系統における高調波とその対策", Vol. 46, No.2, 1990, p.68。
15. F. Peng, H. Akagi and A. Nabae, "Compensation Characteristic of a Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters", IEEE Trans. Vol. IA-29, No. 1, 1993, pp. 144-152.
16. M. F. McGranaghan, "X, EXAMPLE Cases Illustrating Harmonic Analysis Procedures", IEEE Tutorial Course, Power System Harmonic, 84 EH0221-2-PWR, 1984, pp. 134-138.
17. Peter E., "Harmonic Measurements in Industrial Power System", IEEE 1994