

低壓供電系統抑制諧波兼功因改善濾波器 設計程序之建立

Procedure of Filter Design for Limiting Harmonic and Improving Reactive
Compensation in Low Voltage Power System

經濟部標準檢驗局 台南分局

技正 林昆平

摘 要

低壓濾波器設計，由於事關商業機密，國外知名廠商如 NOKIA 及 ABB 均不願透露詳細的設計流程，許多安裝的工廠大樓，也只能獲得最後設計的數據。諧波問題，不是猜測電容器組串百分之幾電抗，也不是拆除抑制高次諧波濾波器以防止低次諧波擴大，更不是拔掉部份電容器以增加諧波吸收率就能解決的。濾波器元件是否承受得了諧波的衝擊？對諧波抑制有無進行全系統的規劃？有無達成功因改善的目標？有無進行評估方案？投入後抑制成效有無符合 IEEE 519 標準？如何適應負載變動？如何進行濾波器分組？有無考慮系統參數變動？有那些其它方法可用來抑制？如何設置應用？這幾個問題，才是整個諧波問題的關鍵。本文以一案例架構起濾波器設計程序，希望對國內低壓供電系統電力品質的改善有所助益。

Abstract

The filter design in low voltage is closely related to commercial top secrets. Some famous foreign manufacturers, like Nokia and ABB have

never revealed the detail design processes. Many factory buildings which have installed the filters can only obtain the final design data. The filter design can not be successfully achieved by only applying some percents of reactor in series with capacitor, by only deleting higher order harmonics filters to prevents from amplification of lower order harmonics, or by only deleting some capacitors to reduce harmonics. The key factors of harmonic filter design are included. Protecting from harmonic current and protect voltage should be considered and analyzed. The limiting harmonic should be laid out concerning with the whole system. The success in power factor achievement and the evaluation of the whole scheme are very important. After the filter is applied to the system, the suppression effect should satisfy IEEE 519 standards. Furthermore, the filters should be adaptable to variation of load and should be appropriately categorized. The design factors also include the variation of system parameters. Besides, there may be other methods for harmonic suppression. Finally, the application and settlement of the design solutions are executed. A design case is illustrated in this article to demonstrate the design process. The authors hope that this research may contribute to the power quality in Taiwan.

關鍵詞 Keywords

各次諧波 電流失真	Harmonic Current Distortion (Dm)
綜合諧波 電流失真	Total Harmonic Current Distortion (THDi)
濾波器共振點	Filter Resonant Point (ni)
濾波器容量	Filter Reactive Power (Qfi)
自動功因 調整器	Auto Power Factor Regulator (APFR)

壹、前言

台南市政府及成大醫院低壓電容器燃燒，相繼引起火災全面停電，加上工廠低壓電容器組炸

掉事件頻傳，原因何在？過去少有電容器引起火災事故，近來由於工廠大樓使用大量電子設備，當投入功因改善電容器組時，往往造成並聯共振，放大諧波電流，燒毀盤體，引起火災。

事實上擁有諧波負載的低壓配電系統是要經過特別的電力規劃及評估，以避免完工後發生不明原因跳電，電驛誤動作、電容器燒毀引起火災、電線發燙、共振弧光燒毀配電盤、電力額外損失導致電費偏高及變壓器燒損等事件，除了影響公司競爭力外、設備燒毀，電容器拆除，恐將花費更多的費用進行改善。因此從事配電規劃時，務必作好功因改善及諧波分析工作。功因改善需分析激發角及重疊角⁽¹⁾，諧波抑制則要事先模擬演算、預測及解析^(2~4)，欲達此目的，低壓配電系統濾波器設計便成為當務之急。

貳、案 例

某工廠擁有六台大型諧波負載共 2150KVA；如圖 2.1 所示。考慮諧波及功因改善問題，擬設計低壓濾波器組來解決。該盤負載設定在 3/5 載下，可發揮其最佳效能，在 3/5 載下其總電流為 2192A、功因 0.52。底下進行之分析期以找出最有效率之濾波器組合。

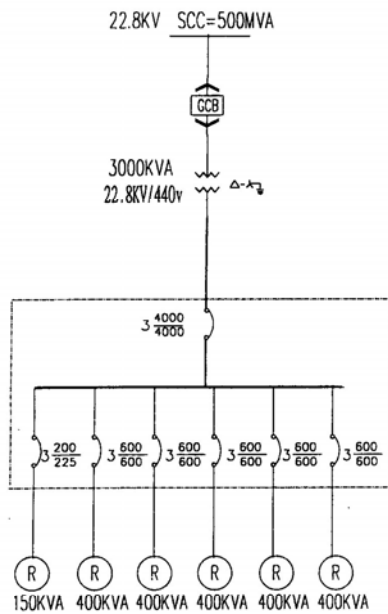


圖 2.1 諧波負載供電圖

參、功因改善探討

3/5 載下基本資料：

$$V_{bus} = 420V \text{ (考慮壓降)}$$

$$I = 2192A, PF_1 = 0.52, \theta_1 = 58.7^\circ$$

計算滿載下：

$$S = \sqrt{3} \times 420 \times 2192 \times (5/3) = 2658kva$$

$$P = 2658 \times 0.52 = 1382kw$$

欲改善功因至

$$PF_2 = 0.95, \theta_2 = 18.2^\circ$$

虛功補償

$$Q_c = 1382 \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) = 1819kvar$$

另 3 ϕ 3000KVA 變壓器，Z%=3%

虛功補償

$$Q_r = 3000 \times 0.03 = 90kvar$$

所以 MPA 盤虛功補償量共

$$1819kvar + 90kvar = 1909kvar$$

取 3 ϕ 電容器總容量 $\Delta Q_c = 2000KVAR$ ，足以改善功因至 0.97。

肆、改善前諧波分析 (2~4)

一、基本資料描述

1. 供電電壓 $V_1 = 22.8KV$ ，
基準容量 $S_b = 10MVA$ ，
主變壓器容量 $S_T = 3000KVA$
2. 台電公司提供責任分界點電源短路容量
 $S_{CC} = 500MVA$
因此短路電流
 $I_{sc} = (500 \times 1000) / (\sqrt{3} \times 22.8) = 12661A$
3. 本工程為 [新設/增設] 工程，負載電流取
主變壓器一次側或電源側額定電流
 $I_{L1} = 76A = 0.3pu$
4. $I_{sc}/I_L = 12661/76 = 166$ 應查 [諧波管制暫行標

准審核表] 第 #4 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26日暫定/82年6月4日修訂)

諧波電流失真率 (%) 限制值						
I _{sc} /I _L	各次諧波限制值 (奇次諧波)					綜合諧波 THD %
	<11	11≤N<17	17≤N<23	23≤N<35	35≤N	
#1 <20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
#2 20~50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
#3 50~100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
#4 100~1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
#5 >1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

- 註：1. 上表適用於 3.3~22.8KV 系統
2. 偶次諧波為上述限制值之 25%
3. 自備發電設備用戶，一律採用 I_{sc}/I_L 小於 20 之列的限制值為標準
4. I_L(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值
5. 若供電系統為 34.5~161KV 則為上述限制值之 50%

二、相關用電資料

- 電源阻抗 X_s 之 PU 值換算
最小短路容量 = 500 MVA，
系統基準容量 = 10 MVA
$$X_s = (1PU) \times (10 \text{ MVA}) / (500 \text{ MVA})$$
$$= j0.0200PU$$
- 變壓器阻抗 X_t 之 PU 值換算
P_{HASE} = 3φ，變壓器容量 = 3000 KVA，
個數 = 1 具，淨容量 = 3000 KVA
查表知阻抗為：j 0.07500PU
$$X_t = 0.07500PU \times (10 \text{ MVA} \times 1000) / (3000 \text{ KVA})$$
$$= j0.2500PU$$
- 廠商所給 [諧波源清單] 及 I_h 並入系統之 PU 值轉換

[NO.1] 設備名稱：DC400，容量：400.0 KVA，
台數：5

注入處電壓：0.42 KV，操作在 3/5 負載

[NO.2] 設備名稱：DC150，容量：150.0 KVA，
台數：1

注入處電壓：0.42 KV，操作在 3/5 負載

$$I_b = (10 \times 1000) / (\sqrt{3} \times 0.42 \text{ KV}) \text{ A/PU}$$

$$I_h(\text{PU}) = I_h(\text{A}) / I_b$$

DC400 及 DC150 諧波源清單 I_h(A) 作 PU 轉換成 I_h(PU) 並推算滿載之諧波電流：

諧波次	400KVA I _h (A)			150KVA I _h (A)		
	3/5 LOAD	3/5 LOAD	FULL LOAD	3/5 LOAD	3/5 LOAD	FULL LOAD
3	2.31 A	0.00017	0.00028	1.53 A	0.00011	0.00018
5	102.35 A	0.00745	0.01242	40.66 A	0.00296	0.00493
7	45.84 A	0.00333	0.00555	16.64 A	0.00121	0.00202
9	2.08 A	0.00015	0.00025	1.20 A	0.00009	0.00015
11	38.60 A	0.00281	0.00468	14.15 A	0.00103	0.00172
13	25.12 A	0.00183	0.00305	9.97 A	0.00073	0.00122
15	2.09 A	0.00015	0.00025	1.20 A	0.00009	0.00015
17	22.30 A	0.00162	0.00270	7.88 A	0.00057	0.00095
19	16.05 A	0.00117	0.00195	6.91 A	0.0005	0.00083
21	2.09 A	0.00015	0.00025	1.10 A	0.00008	0.00013
23	14.70 A	0.00107	0.00178	5.04 A	0.00037	0.00062
25	10.90 A	0.00079	0.00132	5.15 A	0.00037	0.00062
29	7.44 A	0.00054	0.00090	2.82 A	0.00021	0.00035
31	5.67 A	0.00041	0.00068	2.15 A	0.00016	0.00027
35	3.92 A	0.00029	0.00048	1.48 A	0.00011	0.00018
37	2.64 A	0.00019	0.00032	1.00 A	0.00007	0.00012
41	1.44 A	0.0001	0.00017	0.54 A	0.00004	0.00007
43	0.51 A	0.00004	0.00007	0.19 A	0.00001	0.00002
47	0.12 A	0.00001	0.00002	0.05 A	0	0.00000
49	0.11 A	0.00001	0.00002	0.04 A	0	0.00000

4. 串 6%電抗之電容器投入後與系統產生的諧振點

$$n_{sys} = \sqrt{X_c / (X_s + X_l + X_l)}$$

註：X_c：電容器阻抗，X_l：電抗器阻抗

三、DP 點諧波失真計算

將二、中 3. 內滿載 (Full Load) 諧波源之 I_h(PU) × 台數，再對應相同次數相加得 I_{h total}，再除以 D.P 點基波負載電流 I_{L1} = 0.3PU，得諧波失真率 D_m，整理如下：

諧波 (次)	I _{h total}	I _{h total} / I _{L1}	管制標準值 (%)
	full load	改善前諧波失真 (D _m)	
3	0.00158	0.528%	12.00%
*5	0.06697	22.322%	12.00%
7	0.02980	9.933%	12.00%
9	0.00140	0.467%	12.00%
*11	0.02512	8.372%	5.50%
*13	0.01643	5.478%	5.50%
15	0.00142	0.472%	5.50%
17	0.01447	4.822%	5.00%
19	0.01057	3.522%	5.00%
21	0.00140	0.467%	5.00%
*23	0.00952	3.172%	2.00%
*25	0.00723	2.411%	2.00%
29	0.00485	1.617%	2.00%
31	0.00370	1.233%	2.00%
35	0.00255	0.850%	1.00%
37	0.00172	0.572%	1.00%
41	0.00093	0.311%	1.00%
43	0.00033	0.111%	1.00%
47	0.00008	0.028%	1.00%
49	0.00007	0.022%	1.00%
THDi		27.50%	15%

註：* 表示不合格

伍、諧波改善工程

底下進行低壓濾波器設計之程序建立，期以最有系統的方式規劃本工程諧波案，並架構起濾波器設計元件之規格。

一、設計流程

STEP 1. 計算系統於滿載下之虛功補償量 ΔQ_c，如第參節所示。

STEP 2. 計算改善前 PCC 點諧波失真值 D_m，如第肆節所示。

STEP 3. 使用 [2] 之理論作為作為系統諧波抑制兼功因改善的規劃工具，簡述如表 5.1 所示。

STEP 4. 依諧波負載種類決定濾波器設計參數

1. 6 PLUSE 電力整流器驅動之負載

- (1) 設計抑制五次及七次諧波電流濾波器，其設計值分別為 (Q_{f5}, n₅)、(Q_{f7}, n₇) (本案暫訂取此狀況)。
 - (2) 設計抑制五次、七次、十一次諧波電流濾波器，其設計值分別為 (Q_{f5}, n₅)、(Q_{f7}, n₇)、(Q_{f11}, n₁₁)。
 - (3) 設計抑制五次、七次、十一次及十三次諧波電流濾波器，其設計值分別為 (Q_{f5}, n₅)、(Q_{f7}, n₇)、(Q_{f11}, n₁₁)、(Q_{f13}, n₁₃)。
- 唯就成本及抑制效果可選擇 (1) (2) (3) 任一狀況。

2. 變頻負載及交流電弧爐

- (1) 設計抑制二次及三次諧波電流濾波器，其設計值分別為 (Q_{f2}, n₂)、

(Q_{f3}, n_3) 。

(2) 設計抑制二次、三次、四次諧波電流濾波器，其設計值分別為 (Q_{f2}, n_2) 、 (Q_{f3}, n_3) 、 (Q_{f4}, n_4) 。

(3) 設計抑制二次、三次、四次及五次諧波電流濾波器，其設計值分別為 (Q_{f2}, n_2) 、 (Q_{f3}, n_3) 、 (Q_{f4}, n_4) 、 (Q_{f5}, n_5) 。

唯就成本及抑制效果可選擇 (1) (2) (3) 任一種狀況。

STEP 6. 利用 Step 1 功因改善計算虛功補償值 ΔQ_c 及 STEP 2 改善前諧波失真值 D_m ，快速規劃問題如表 5.2⁽²⁾。

STEP 7. 使用 S.U.M.T 數值分析法求解問題 [3]，此法可在短時間內找到最佳解 (Q_{fh}, n_h) ，使諧波抑制符合 IEEE-519 標準並達成功因改善的效果。

STEP 8. 使用解出的設計值 (Q_{fh}, n_h) 計算濾波器元件電容器及電抗器六個重要數據，電容器等效電容值 (Y 接) C_{yeq} 、等效額定電壓值 V_{ceq} 、等效額定電流值 I_{ceq} 、電抗器等效電感值 L_{eq} 、等效額定電壓值 V_{leq} 、等效額定電流值 I_{leq} ⁽²⁾。

STEP 9. 根據電容器及電抗器等效電流值 I_{ceq} 、 I_{leq} 分成 n 段濾波器，以便引入 $A_{PFR}(n \leq 12)$ ，分段原則儘量將每段濾波器電流 (I_{ceq}/n) 限制在 200A 以下，以便使用一般 X_{LPE} 電纜線施工，若無法達成目標，連接元件線路應改銅排施作。

STEP10. 完成濾波器分段後，開始計算每段電容器的電容值 C 、額定電壓 V_c 及額定電流 I_c ，電抗器的電感值 L 、額定電壓值 V_L 及額定電流值 I_L 。

$$C_y = C_{yeq} / n$$

$$V_c = V_{ceq}$$

$$I_c = I_{ceq}/n$$

$$L = L_{eq} \times n$$

$$V_L = V_{leq}$$

$$I_L = I_c$$

其中

C_y 為電容器採 Y 接時之電容值。

STEP11. 根據每段電容器的 C_y 、 V_c 、 I_c 及電抗器的 L 、 V_L 、 I_L 制訂規格品。

$$\text{電容器規格電壓 } V_{c \text{ spec}} \geq V_c \times 1.1$$

$$\text{電容器規格電流 } I_{c \text{ spec}} \geq I_c \times 1.3$$

$$\text{電容器規格容量 } Q_{c \text{ spec}}$$

$$\text{電抗器規格電壓 } V_{L \text{ spec}} = V_L \times 1.1$$

$$\text{電抗器規格電流 } I_{L \text{ spec}} = I_L \text{ spec}$$

$$\text{電抗器規格容量 } Q_{L \text{ spec}}$$

註：考慮規格品跨入系統電壓後，引起的虛功補償量下降效應，調整 $Q_{c \text{ spec}}$ 及 $Q_{L \text{ spec}}$ ，使其在 60Hz 能表現出應有的虛功補償量。並維持濾波器的諧振點 n_h 值不受改變（要有點技術！）

STEP12. 根據每段耐流值 $I_{c \text{ spec}}$ 決定濾波器相關元件：

無熔絲開關，保護熔絲鍊，電磁開關，過電流電驛，及配線銅排或電纜線。

STEP13. 繪製濾波器配電系統圖，如圖 5.1。

STEP14. 進行每段投入後之功因及諧波改善情形分析，以確定改善成效如表 5.3。

STEP15. 與電容器、電抗器製造廠商及配電盤商進行合作，依設計圖進行施作。

表 5.1 LIN's 理論 [2]

對於投入m組單調式濾波器,若諧波系統配電模式能符合下列模型

則PCC點諧波電流失真可表示為 $D_h = \frac{I_h}{(IL)}$

$$1 + (X_{sh} + X_{lh}) \left(\frac{h^2}{S_b} \right) \left[-Q_c + (h^2 - 1) \left(\sum_{l=1}^m \frac{Q_l h}{h^2 - n_l h^2} \right) \right]$$

其中 Q_c 虛功補償值 $Q_l h$ 濾波器基波容量 $n_l h$ 濾波器諧振點
 S_b 基準容量 h 各次諧波
 $\sum_{l=1}^m Q_l h = Q_c, h < n_l h < 92\%$

二、評 論

滿載下設計的二套濾波器 #5 filter 分成六段及 #7 filter 分成二段,依然可以解決系統變動在 0.4~1.0 負載下的功因改善及諧波抑制,使其完全合格。因此投入期間,安全絕對可靠,效果亦不差。APFR 則宜採用 12 段堆疊式,以應付未來擴充用。

陸、結 論

最後總結低壓系統濾波器設計困難的關鍵,並提醒台電圖審人員對一些電力規劃案,應予特

表 5.2 問題 規 劃

Program THDi = $\min \sqrt{\sum_{h=2}^{50} D_h^2}$ 求(Qf5,n5) (Qf7,n7)

(一) 避開串聯共振點 (二) 虛功補償
 $5 < n_5 < 5 \times 0.92$ $Qf5 + Qf7 = Q_c$
 $7 < n_7 < 7 \times 0.92$ $Qf5 > 0, Qf7 > 0$

(三) 限制超出抑制標準之諧波失真率
 $D_5 < 12\%$ $D_{23} < 2\%$
 $D_{11} < 5.5\%$ $D_{25} < 2\%$

別重視電力品質的計算及評估,以免因濾波器造成火災與停電事故。

一、低壓濾波器設計困難的原因有以下七點

1. 濾波器需負擔功因改善功能,因此容量受限虛功補償,無法無限加大。
2. 濾波器的諧振點很難固定,由於電容器、電抗器製造上的誤差及春夏秋冬溫度不同、供電系統頻率變動、往往造成設計的諧振點產生漂移現象⁽²⁾,有可能移近諧波共振點炸掉電容器引起火災,亦有可能漂離設計點失去抑制成效。
3. 設計好的濾波器需將 50 種諧波,同時抑制到合乎 IEEE 519 標準內,相當難達成。
4. 設計好的濾波器需承擔得了諧波的增流增壓效應,如同瓶子要作得相當厚且容積夠,材質則要恰到好處。
5. 設計好的濾波器需承擔切入時之突波衝擊。
6. 設計好的濾波器需考慮 APFR 引入時,各段投入之效應,以滿足系統變動的各種狀況。
7. 濾波器仍停留在盲目猜解的設計方式,其成效如何?值得懷疑。

表 5.3 濾波器各段投入後諧波失真及功因改善情形

諧波次	負 載 變 動							備 註
	0.4 LOAD	0.5 LOAD	0.6 LOAD	0.7 LOAD	0.8 LOAD	0.9 LOAD	Full LOAD	
#5 FILTER	投入四段	投入四段	投入六段	投入六段	投入六段	投入六段	投入六段	管制標準值 (%)
#7 FILTER	投入 0 段	投入 0 段	投入 0 段	投入 0 段	投入一段	投入一段	投入二段	
3	1.759%	1.759%	1.471%	1.471%	3.031%	3.031%	3.919%	12.00%
5	4.940%	4.940%	3.692%	3.692%	4.144%	4.144%	4.427%	12.00%
7	4.885%	4.885%	4.282%	4.282%	2.487%	2.487%	1.775%	12.00%
9	0.401%	0.401%	0.233%	0.233%	0.280%	0.280%	0.234%	12.00%
11	4.960%	4.960%	4.430%	4.430%	3.635%	3.635%	3.130%	5.50%
13	3.585%	3.585%	2.984%	2.984%	2.683%	2.683%	2.339%	5.50%
15	0.439%	0.439%	0.262%	0.262%	0.332%	0.332%	0.291%	5.50%
17	2.900%	2.900%	2.701%	2.701%	2.210%	2.210%	1.947%	5.00%
19	2.560%	2.560%	1.987%	1.987%	1.960%	1.960%	1.731%	5.00%
21	0.409%	0.409%	0.265%	0.265%	0.314%	0.314%	0.278%	5.00%
23	1.882%	1.882%	1.806%	1.806%	1.449%	1.449%	1.283%	2.00%
25	1.929%	1.929%	1.377%	1.377%	1.488%	1.488%	1.319%	2.00%
29	1.059%	1.059%	0.927%	0.927%	0.819%	0.819%	0.727%	2.00%
31	0.807%	0.807%	0.708%	0.708%	0.624%	0.624%	0.555%	2.00%
35	0.559%	0.559%	0.489%	0.489%	0.433%	0.433%	0.385%	1.00%
37	0.337%	0.337%	0.330%	0.330%	0.293%	0.293%	0.260%	1.00%
41	0.204%	0.204%	0.179%	0.179%	0.158%	0.158%	0.141%	1.00%
43	0.074%	0.074%	0.064%	0.064%	0.057%	0.057%	0.051%	1.00%
47	0.017%	0.017%	0.016%	0.016%	0.014%	0.014%	0.012%	1.00%
49	0.015%	0.015%	0.013%	0.013%	0.012%	0.012%	0.011%	1.00%
THDi	10.669%	10.669%	9.000%	9.000%	8.225%	8.225%	8.052%	15%
O _r (Kvar):	1024	1024	1536	1536	1769	1769	2000	
PF:	0.975	0.975	0.995	0.995	0.991	0.991	0.970	

註：I_b 及 I_L 隨負載變動成線性倍率

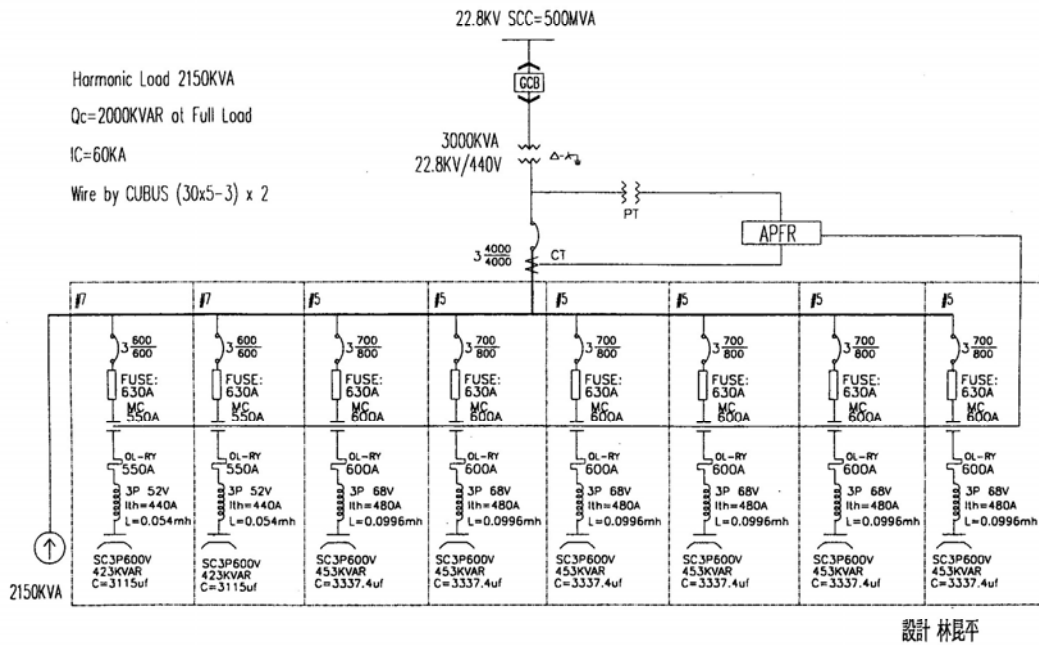


圖 5.1 諧波改善工程

二、應注意下列電力規劃案之圖審諧波計算

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 五吋、六吋、八吋、十二吋晶元材料製造電子廠 2. 晶元製程電子廠 3. IC 封裝電子廠 4. IC 導線架製程電子廠 5. 印刷電路板製程電子廠 6. IC 測試電子廠 7. 化工廠 8. 鋼鐵廠 | <ol style="list-style-type: none"> 9. 造紙廠 10. 電鍍廠 11. 鋼板電鍍廠 12. 紡織廠 13. 電弧爐廠 14. 大樓變頻負載 (如電梯) 15. 大容量 UPS 16. 印刷機負載 17. 醫院磁核共振機 18. 醫院 X 光機 19. 高低週波爐廠 |
|---|---|

柒、參考文獻

1. C.K. Duffey, and R.P. Stratford. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE Std 519-1992.
2. 林昆平著：“An Advanced Computer Code For Single-Tuned Harmonic Filter Design”, IEEE Transation on Industry Application, Vol.34, No.4, PP. 640-648, July/Aug. 1998.
3. 郭麟英著：“電力諧波計算及書審作業之 OA 化”，台電工程期刊第 533 期，Jan. 1993。
4. Benson S. Wallace, "Harmonic Analysis of the A.B. Chance Power System", 1992 IEEE Industry Application Meeting, Vol.1, pp.844-849.
5. Anthony V. Fiacco, "Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques", George Washington University, 1993.