

國內電機電子產品「功因」一詞重新定義 及管制的重要性論述

林昆平/經濟部標準檢驗局技正

前言

本研究涉國家能源損耗問題。國內目前應施電機電子產品安規以下列標準列檢：CNS3765 家用和類似用途電器產品的安全通則(管制家電產品)，CNS14408 影音及其類似電子產品安全規定(管制影音設備、影像監視設備、遊樂器)，CNS14336 資訊技術設備安全通則(管制辦公室事務機器、網路設備、電信設備)；燈具類則有 CNS13755 電子式安定器、CNS14125 省電燈泡及 CNS14335 燈具安全通則，這其中只有電子式安定器對功因進行管制，其它產品卻沒有，筆者推論：「可能大量應用在居家辦公大樓燈具，且功因甚低，有線路損耗問題」[5]。

功因有兩種，一種為基頻功因或稱相移功因 PF_I ，主要在 60Hz 電源供應下，由產品內部鐵芯結構、電感組件及配線感抗等消耗虛功產生；另一種稱為諧波功因或稱失真功因 PF_H ，主要由產品使用具二極體、電晶體及 MOSFET 等非線性元件組成的電子控制基板，衍生大量諧波電流，流竄線路引起[1][3]。前者功因 0.85 左右，後者使產品綜合功因 $PF(PF_I \times PF_H)$ 降得更低，由於一般電力儀表只測得 PF_I ，測不出 PF_H 值，因此國家標準「功因一詞」，到底指的是基頻功因？還是綜合功因？實有爭議，如果是前者，無法反應產品實際功因更低，線路損耗更大現象，與經濟部能源局及台電公司節能政策背道而馳。

本文以電子式安定器燈具為例，以實驗證實基頻功因與綜合功因的差異性，強調電機電子產品應以綜合功因加以管制；量測需採用諧波分析儀而非一般電表；對於功因偏低之其它電機電子產品，政府應鼓勵廠商於控制基板電源部份，加裝主動式功因校正積體電路 (APFC IC)，以提升功因及抑制諧波，減少電器線路損耗。

關鍵詞 (Key Words)：功因(Power Factor)、相移功因(Displacement Factor)、失真功因(Distortion Factor)、主動式功因校正積體電路 APFC IC(Active Power Factor Correction IC)、綜合諧波電流失真率 THD_i (Total Harmonic Current Distortion)、綜合諧波電壓失真率 THD_v (Total Harmonic Voltage Distortion)、電子式安定器 (Electronic Ballasts)

一、基頻功因、諧波功因、綜合功因[3]

就字義而言，「基頻功因」是 60Hz 正弦電源下產品產生的功因，「諧波功因」則是由於產品應用電子控制基板，衍生諧波電流(雜訊)所造成，至於「綜合功因」則是基頻功因與諧波功因的綜合效應。電機電子產品衍生諧波電流是近幾年被重視，目前國際以 IEEE 1459-2000 試用規範作為參考。照規範所言，綜合功因可以(式 1)表示，而具電子控制基板的電機電

子產品運作，下面兩個條件通常會成立(量測點為產品電源端)，這使得(式 1)可再改寫成(式 2)。

· **條件 1** 產品基頻實功遠大於諧波實功 (即 $P_i \gg P_H$)

· **條件 2** 產品 $THD_V < 5\%$ 且 $THD_i > 40\%$

$$PF = \frac{PF_1 \times [1 + (\frac{P_H}{P_1})]}{\sqrt{1 + THD_i^2 + THD_V^2 + (THD_i \times THD_V)^2}} \quad (式 1)$$

$$PF \approx PF_1 \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (式 2)$$

註：PF : 綜合功因 ($PF_1 \times PF_H$)

PF_1 : 60Hz 基頻的功因 ($PF_1 = \cos \theta_1$)

P_H : 諧波消耗實功

P_1 : 60Hz 產品基頻實功

THD_i : 綜合諧波電流失真率 ; $THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^N I_N^2}}{I_1}$, I_N 各次諧波電流

THD_V : 綜合諧波電壓失真率 ; $THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^N V_N^2}}{V_1}$, V_N 各次諧波電壓

上述公式，對於電機電子產品功因重新定義是重要的。(式 2)已明確告訴讀者，除非電機電子產品不會在電源線上產生諧波電流(即 $THD_i=0$)，否則實際產品表現的功因值(即綜合功因)，都會比基頻功因值來得低。電機電子產品要找到沒有諧波電流不是沒有，卻真的很少，尤其像這種操作在 20KHz~40KHz 電子式安定器電路，就算代以起動較慢感抗式安定器，其鐵芯磁滯現象也仍有三次諧波電流存在[5]。

二、基頻功因與諧波功因的物理含意[2]

圖 1 解釋基頻功因與諧波功因的物理含意。在週期 T 內，如果電流波形不是弦波波形就一定有諧波成份，所以(b)(c)(d)都產生了諧波功因 PF_H ，其值小於 1，波形畸變嚴重者， PF_H 值越小；至於基頻功因 PF_1 ，下列任一條件不成立即會產生，其值也小於 1。

1. 週期內電壓波形可以包住電流波形(不限弦波)。
2. 週期內電壓波形起點終點波幅為 0 時，對應的電流波形亦需為 0(不限弦波)。
3. 週期內電壓電流波幅達最高點時，需發生在同一時刻。

因此(b)(d)基頻功因 PF_1 都等於 1，(a)(c)則 $PF_1 < 1$ 。為了解釋這種現象，筆者以一辦公室用 T-BAR 電子式安定器燈具(T5 14wx4)為例，分別就裝置 APFC IC 與否，量測其週期內電壓與

電流波形相對關係。圖 2 顯示未安裝 APFC IC 時，電壓電流波形對應關係無法滿足上述條件 1, 2, 3，會有基頻功因 PF_{θ} 產生；而電流波形完全不像弦波，含有諧波成份，會有諧波功因 PF_H 產生。圖 3 安裝 APFC IC 後，電壓電流波形對應位置關係已大幅改善(類似圖 1b)，且電流波形由鋸齒波被重塑成弦波， PF_{θ} 與 PF_H 值均會提升，因此 APFC IC 確實具有調變畸形波成弦波(降低諧波含量)，並拉近電壓電流相角能力(提升基頻功因)，其技術門檻甚高。

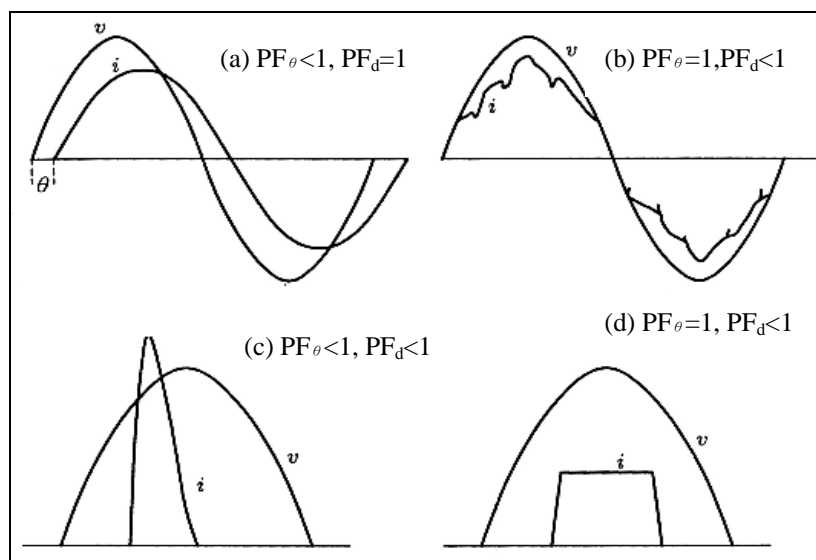


圖 1 基頻功因與諧波功因的物理含意

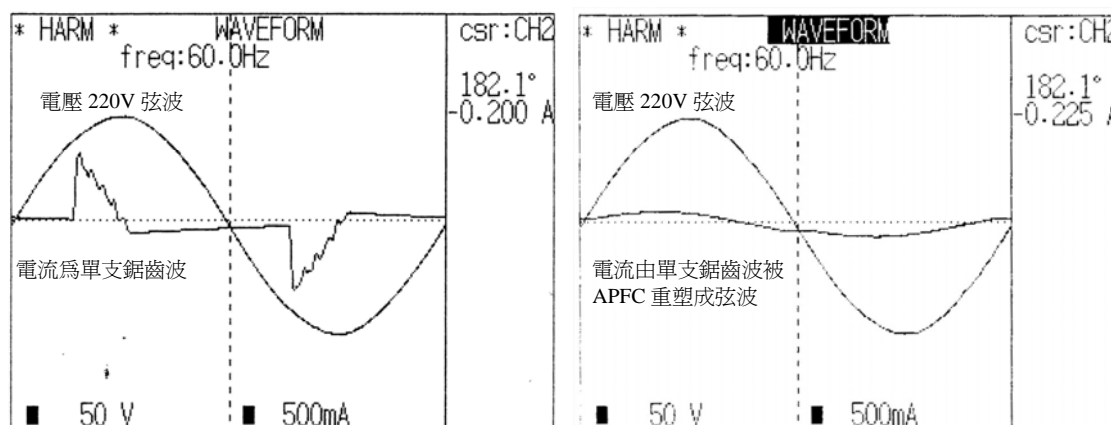


圖 2 未安裝 APFC IC (T-BAR 56W 燈具) 圖 3 安裝 APFC IC (T-BAR 56W 燈具)

三、一般電力儀表及諧波分析儀的量測結果比較

正如前言，一般電力儀表只能量測基頻 60Hz 的電壓、電流、功率、功因；而諧波分析儀卻可測得各種頻率(含 60Hz)的個別及綜合雜訊電壓、電流、功率、功因。本節以 27W 電子式安定器檯燈為例，以一般電力儀表(型號 2406B)及諧波分析儀(HIOKI 8806)分別在電源端進行量測(圖 4)，結果如表 1~表 4，顯示下列事實的存在：

1. IEEE1459-2000 試用規範的適用性驗證 (表 1~表 3)

諧波分析儀所量測： $P_i(22.75W) \gg P_H(125mW、125mW\cdots)$ 、 $THD_v(1.83\%)$ 、 $THD_i(132.93\%)$ ，均符合(式 2)成立的假設條件，可直接套用(式 2)計算出綜合功因理論值為 0.36，此值與實測值 0.33 非常接近，驗證規範的適用性。

$$PF \approx 0.598 \times \frac{1}{\sqrt{1+(132.93\%)^2}} = 0.598 \times \frac{1}{1.66344} = 0.36$$

2. 電壓、電流、功率(取絕對值)量測 (圖 4, 表 1~表 3)

一般電表量測結果均較諧波分析儀來得小，尤其產品本身製造大量雜訊電流者差距更大，以本例而言，一般電表 0.345A，諧波分析儀 0.61A，一般電表由於測不到雜訊電流，量測值確實比諧波分析儀量測值少很多。

3. 功因量測 (圖 4, 表 1)

一般電表 0.598，諧波分析儀 0.33，若依標檢 90 三字第 300788 號令規定：「檯燈功因限制值需達 0.5 以上」，用一般電力儀表量測合格，用諧波分析儀量測卻不合格，那到底要以何者作判定？此不明分際將導致下列電力損耗結果。

4. 電力伏安 VA 量測 (圖 4 計算 VI，表 1)

一般電表 37.95VA，諧波分析儀 68.13VA，一般電表隱藏實際耗電力 1 倍，若改採諧波分析儀量測，就有辦法揭發隱藏的電力消耗，督促廠商降低其產品諧波含量，以提升綜合功因。

5. 虛功 var 量測 (圖 4 計算 var，表 1)

一般電表 30.41var，諧波分析儀 64.31var，實際線路虛功損耗為一般電表量測值的兩倍多。

6. 線路損失 (圖 4 及表 1)

一般電表量測值：電力伏安 37.95VA(計算)，實功 22.7W(量測)，虛功 30.41VAR(計算)。

諧波分析儀量測值：電力伏安 68.13VA，實功 22.5W，虛功 64.31VAR。

兩者雖都測得線路損耗，但實際情形，實功 22.5W 對應虛功 64.31VAR 差距加大，說明線路損失比想像中嚴重，只是大家都被一般電表量測值矇騙了。

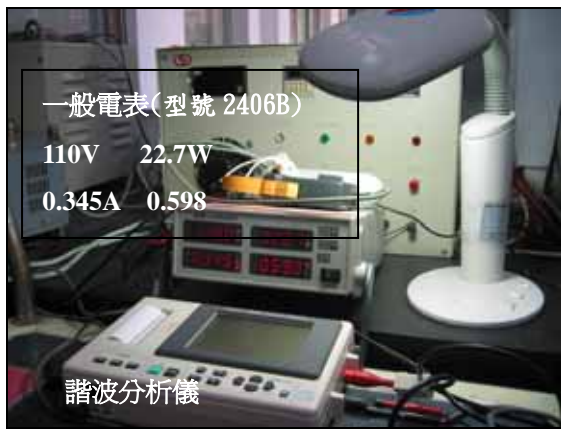


圖 4 一般電表及諧波分析儀同時量測

* HARM *					POWER		VALUE
x10					freq:60.0Hz		
N	N	N	N	N	N	N	N
1	+22.75	W11+0.000	W21+0.000	W31+0.000	W		
2	-0.000	W12+0.000	W22+0.000	W32+0.000	W		
3	-125.0m	W13+0.000	W23+0.000	W33+0.000	W		
4	+0.000	W14+0.000	W24+0.000	W34+0.000	W		
5	-125.0m	W15+0.000	W25+0.000	W35+0.000	W		
6	+0.000	W16+0.000	W26+0.000	W36+0.000	W		
7	+0.000	W17+0.000	W27+0.000	W37+0.000	W		
8	+0.000	W18+0.000	W28+0.000	W38+0.000	W		
9	+0.000	W19+0.000	W29+0.000	W39+0.000	W		
10	+0.000	W20+0.000	W30+0.000	W40+0.000	W		
WATT					VA	VAR	PF
+22.50 W					+68.13 VA	+64.31 var	0.330

表 1 實功、虛功、綜合功因(HIOKI)

* HARM *					RMS		CH1	VALUE
x10					freq:60.0Hz			
N	N	N	N	N	N	N	N	
1	111.0	V11	0.5	V21	0.1	V31	0.1 V	
2	0.2	V12	0.0	V22	0.0	V32	0.0 V	
3	0.8	V13	0.3	V23	0.0	V33	0.0 V	
4	0.1	V14	0.0	V24	0.0	V34	0.0 V	
5	1.6	V15	0.3	V25	0.0	V35	0.0 V	
6	0.0	V16	0.0	V26	0.0	V36	0.0 V	
7	0.5	V17	0.1	V27	0.0	V37	0.0 V	
8	0.0	V18	0.0	V28	0.0	V38	0.0 V	
9	0.4	V19	0.1	V29	0.0	V39	0.0 V	
10	0.0	V20	0.0	V30	0.0	V40	0.0 V	
T-RMS		THD-F		THD-R				
111.0 V		1.83%		1.83%				

表 2 60Hz~2400Hz 電壓及 THD_v (HIOKI)

* HARM *					RMS		CH2	VALUE
x10					freq:60.0Hz			
N	N	N	N	N	N	N	N	
1	0.37	A11	0.09	A21	0.01	A31	0.00 A	
2	0.00	A12	0.00	A22	0.00	A32	0.00 A	
3	0.37	A13	0.07	A23	0.01	A33	0.00 A	
4	0.00	A14	0.00	A24	0.00	A34	0.00 A	
5	0.25	A15	0.04	A25	0.01	A35	0.01 A	
6	0.00	A16	0.00	A26	0.00	A36	0.00 A	
7	0.13	A17	0.02	A27	0.01	A37	0.00 A	
8	0.00	A18	0.00	A28	0.00	A38	0.00 A	
9	0.09	A19	0.02	A29	0.00	A39	0.00 A	
10	0.00	A20	0.00	A30	0.00	A40	0.00 A	
T-RMS		THD-F		THD-R				
0.61 A		132.93%		79.93%				

表 3 60Hz~2400Hz 電流及 THD_i (HIOKI)

項目	一般電表 (型號 2406B)	諧波分析電表(HIOKI 8806)
電壓	V ₁ =110V	Σ V=111V (V ₁ =111V, V ₂ =0.2V, V ₃ =0.8V...)
電流	I ₁ =0.345A	Σ I=0.61A (I ₁ =0.37A, I ₃ =0.37A, I ₅ =0.25A...)
實功	P ₁ =22.7W	Σ P=22.5W (P ₁ =+22.75W, P ₃ =-125mW, P ₅ =-125mW...)
功因	PF ₁ =0.598	PF=0.330 (PF ₁ , PF ₂ , PF ₃ , ...PF _n)
伏安	S ₁ =V ₁ ×I ₁ =37.95VA	Σ S=68.13VA (S ₁ , S ₂ , S ₃ , ...S _n)
虛功	$VAR_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = 30.41 \text{ var}$	Σ VAR=64.31var (var ₁ , var ₂ , var ₃ , ...var _n)
諧波 v	無法偵測	THD _v =1.83%
諧波 I	無法偵測	THD _i =132.93%

表 4 一般電表與諧波分析儀之量測值比較(27W 檯燈為例)

四、主動式功因校正電路介紹[2]

主動式功因校正電路原理，就是調變被畸變負載電流相位去追趕電壓相位，以縮小相位移角 θ ，使 PF_1 值接近 1；另控制負載電流波形趨向弦波，逼使諧波成份消失，即 PF_H 值接近 1。這種能同時縮小相位移角 θ 兼諧波抑制的技術，便稱為主動式功因校正電路 APFC (Active Power Factor Correction)，目前已被研製成八腳 IC，國際單價約 1.2~3.5 塊美金，美國、日本、韓國及歐盟均有量產，國內燈具大廠常採用 APFC IC 型號有：TI 的 UC3852 及 UC3853、Motorola 的 MC34262、ST 的 L6561 及 L6560，IC 表面通常刻有型號及製造公司，於 Google 網站輸入 APFC+型號，即可發現其技術資料(包含電路圖、IC 尺寸規格、偏壓電路)，圖 5 與圖 6 德州儀器開發的 APFC IC 外觀與電路架構，標榜功因可提升至 0.995，總諧波失真 <10%，應用範圍包括電子式安定器、交換式電源供應器、變頻器等控制基板等，可提升應用產品的功因及減少諧波污染。



圖 5 德州儀器開發的 APFC IC

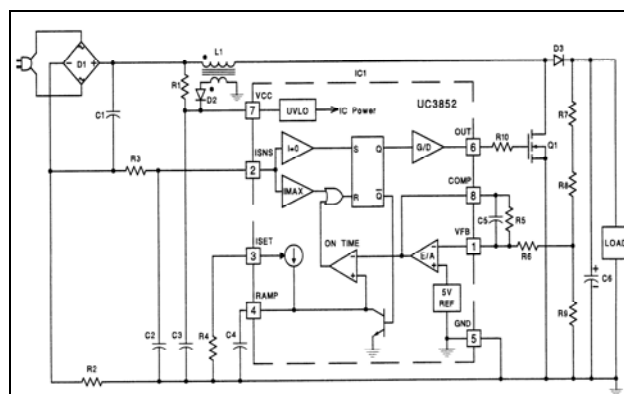
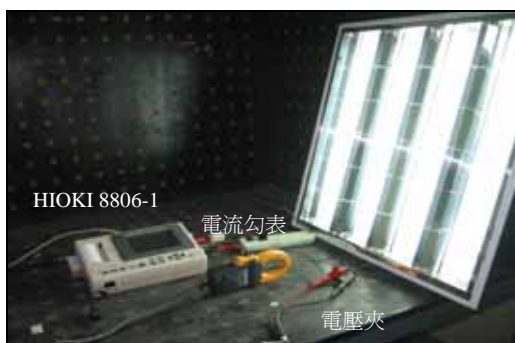


圖 6 APFC IC 內部電路架構

五、APFC IC 裝置與否的電性量測[2]~[5]

續第 2 節，對 APFC IC 裝置與否以諧波分析儀進行電性量測，包括功率、功因、諧波。圖 7 顯示量測情形，圖 8 顯示安裝於基板上的 APFC IC 實體。量測時，先將市電透過自耦穩壓器穩壓在 220V，以確保燈具輸入電源乾淨，其次，將 HIOKI8806-1 電力諧波分析儀電壓夾表夾住燈具電源引線的 LN 相，電流表則勾住 L 相，表 5~表 8 為量測數據，表 9 為兩種狀況差異性比較，結果發現：

1. 裝置後，電壓電流相角由 53° 拉近為 32.5° ，基頻功因由 0.602 提高至 0.843。
2. 裝置後，電流波形被重塑成弦波，諧波成份銳減，綜合諧波電流失真 THDi 由 137.66% 被抑制到 10.88%，使諧波功因由 0.588 改善至 0.994。
3. 裝置後，燈具總功因由低功 0.352 被改善至高功 0.836，但此顆韓製 APFC IC 並未改善至 0.95 \uparrow 。
4. 裝置後，由於電流波形被重塑，基頻電流比原先 0.336A 還低，僅為 0.239A，綜合電流也由 0.571A 下降至 0.24A，線材可因此再節省。
5. 裝置後，負載實功沒變，但虛功大幅下降，由 117.9VAR 降到 29.0VAR，導致實際用電量由 125.90VA 降至 52.91VA，說明了：「APFC IC 安裝於電機電子產品控制基板上，具有節省大量能源功效」。



HIOKI 8806-1

電流勾表

電壓夾



圖 7 T5 14Wx4 辦公室燈具量測 圖 8 電子安定器的 APFC IC(KOREA IP3102L)

* HARM *		POW-PHASE				VALUE	
x10		freq:60.0Hz					
N	N	N	N	N	N	N	
1	53.0°	11	0.0°	21	0.0°	31	0.0°
2	0.0°	12	0.0°	22	0.0°	32	0.0°
3	0.0°	13	0.0°	23	0.0°	33	0.0°
4	0.0°	14	0.0°	24	0.0°	34	0.0°
5	0.0°	15	0.0°	25	0.0°	35	0.0°
6	0.0°	16	0.0°	26	0.0°	36	0.0°
7	0.0°	17	0.0°	27	0.0°	37	0.0°
8	0.0°	18	0.0°	28	0.0°	38	0.0°
9	0.0°	19	0.0°	29	0.0°	39	0.0°
10	0.0°	20	0.0°	30	0.0°	40	0.0°
WATT		VA	VAR	PF			
+44.38 W		+125.9 VA	+117.9 var	0.352			

表 5 綜合實功率、視在功率、虛功、功因
(未加裝 APFC IC)

* HARM *		POW-PHASE				VALUE	
x10		freq:60.0Hz					
N	N	N	N	N	N	N	
1	32.5°	11	0.0°	21	0.0°	31	0.0°
2	0.0°	12	0.0°	22	0.0°	32	0.0°
3	0.0°	13	0.0°	23	0.0°	33	0.0°
4	0.0°	14	0.0°	24	0.0°	34	0.0°
5	0.0°	15	0.0°	25	0.0°	35	0.0°
6	0.0°	16	0.0°	26	0.0°	36	0.0°
7	0.0°	17	0.0°	27	0.0°	37	0.0°
8	0.0°	18	0.0°	28	0.0°	38	0.0°
9	0.0°	19	0.0°	29	0.0°	39	0.0°
10	0.0°	20	0.0°	30	0.0°	40	0.0°
WATT		VA	VAR	PF			
+44.25 W		+52.91 VA	+29.00 var	0.836			

表 6 綜合實功率、視在功率、虛功、功因
(加裝 APFC IC)

* HARM *		RMS				CH2	VALUE
x10		freq:60.0Hz					
N	N	N	N	N	N	N	N
1	0.336	A11	0.065	A21	0.037	A31	0.030
2	0.001	A12	0.001	A22	0.001	A32	0.006
3	0.326	A13	0.063	A23	0.035	A33	0.026
4	0.002	A14	0.000	A24	0.002	A34	0.006
5	0.238	A15	0.057	A25	0.037	A35	0.017
6	0.002	A16	0.000	A26	0.000	A36	0.008
7	0.139	A17	0.050	A27	0.037	A37	0.007
8	0.000	A18	0.000	A28	0.001	A38	0.008
9	0.079	A19	0.046	A29	0.033	A39	0.007
10	0.002	A20	0.000	A30	0.002	A40	0.008
T-RMS		THD-F	THD-R				
0.571 A		137.66%	80.91%				

表 7 諧波電流、綜合諧波失真 THD-F
(未加裝 APFC IC)

* HARM *		RMS				CH2	VALUE
x10		freq:60.0Hz					
N	N	N	N	N	N	N	N
1	0.239	A11	0.002	A21	0.000	A31	0.000
2	0.000	A12	0.000	A22	0.000	A32	0.000
3	0.024	A13	0.000	A23	0.000	A33	0.000
4	0.000	A14	0.000	A24	0.000	A34	0.000
5	0.007	A15	0.000	A25	0.000	A35	0.000
6	0.000	A16	0.000	A26	0.000	A36	0.000
7	0.006	A17	0.000	A27	0.000	A37	0.000
8	0.000	A18	0.000	A28	0.000	A38	0.000
9	0.002	A19	0.000	A29	0.000	A39	0.001
10	0.000	A20	0.000	A30	0.000	A40	0.000
T-RMS		THD-F	THD-R				
0.240 A		10.88%	10.82%				

表 8 諧波電流、綜合諧波失真 THD-F
(加裝 APFC IC)

T-BAR T5 燈管 14Wx4 電子式安定器 燈具	$PF_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_F^2}}$ (式3)失真功因	$PF_{\theta} = \cos\theta$ (式4)相移功因	$PF = PF_{\theta} \times PF_F$ (式5)綜合功因	綜合功因 (實測)	I_1 (基頻電流 A)	$I_{2\sim 5} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2}$ (綜合電流 A)
未裝置 APFC IC	$\frac{1}{\sqrt{1+(137.11\%)^2}} = 0.588$	$\cos 53^\circ = 0.602$	計算值: 0.354	0.352	0.336A	0.571A
裝置 APFC IC	$\frac{1}{\sqrt{1+(10.88\%)^2}} = 0.994$	$\cos 32.5^\circ = 0.843$	計算值: 0.837	0.836	0.239A	0.240A

T-BAR T5 燈管14Wx4電子式安定器燈具	$P = \sqrt{P_0^2 + P_2^2 + P_3^2 + \dots + P_n^2}$ (綜合實功W)	$S = \sqrt{S_0^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_n^2}$ (綜合視在功率VA)	$Q = \sqrt{Q_1 + Q_3 + Q_5 + \dots + Q_n}$ (綜合虛功VAR)
未裝置 APFC IC	44.38 W	125.9 VA	117.9 VAR
裝置 APFC IC	44.25 W	52.91 VA	29.0 VAR

表 9 主動功因校正電路裝置前後的燈具電性特性差異

結論

目前實驗室測試電子式安定器功因值大都在 0.95 以上，究其因不外使用一般電表進行量測；有的雖採用更高等級的電力分析儀，但查其規格書，功因偵測能力也僅限於基頻；有些採用正確諧波分析儀，但發現量測功因值偏低，懷疑是電壓夾表或電流鉤表引進諧波干擾，而自行開啟儀器內部低通濾波器，此等操作方式都會錯失產品實際功因電性的偵測。

另一方面，國家標準沒釐清功因定義也是個盲點，但這是電機電子產品日新月異演進，產生新問題的結果[3]~[5]，最後想想！國家能源每一電力伏安都是電廠花錢買煤製成的，也只有以綜合功因對產品進行管制，廠商才會正確使用諧波分析儀進行量測，並對低功因產品裝置 APFC IC，以減少產品功因過低所引發的能源損耗問題。

至於台灣 APFC IC 的研發能力，仍侷限 200W 以上商品；對於更低瓦數 100W 以下商品，仍需產官學合作開發，尤其 APFC IC 抑制諧波兼改善功因的精確度，更應重視，以在未來降低電機電子產品電力耗損上，取得領導地位。

參考文獻

1. 曾國憲、蘇明所、蘇政賢，”現行電度表之功率因數探討”，標準與檢驗雜誌 114 期, 2008.
2. 張英彬，柯聖浩 著，”電子安定器之實作技術”，2006，新文京開發出版股份有限公司。(筆者推薦必讀聖經)
3. IEEE Std 1459-2000, IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, New York, 2000.
4. Lin, Kun-Ping, "An Advanced Computer Code For Single-Tuned Harmonic Filter Design", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.34, No.4, July/Aug, 1998, PP.640-648.