

熱軋鋼廠電力諧波分析與改善

Harmonic Analysis and Improvement for a Hot Strip Mill

許振廷¹ 陳朝順² 李奕德² 黃建銘² 丁德樹³ 沈正杰³ 林君豪³
C. T. Hsu C. S. Chen Y. D. Lee J. M. Huang D. S. Ding C. J. Shen C. H. Lin

南台科技大學電機工程學系¹
Department of Electrical Engineering
Southern Taiwan University
Tainan, Taiwan

國立中山大學電機工程學系²
Department of Electrical Engineering
National Sun Yat-Sen University
Kaohsiung, Taiwan

中國鋼鐵公司³
公用設施處
Kaohsiung, Taiwan

摘要

本論文主要在分析鋼鐵廠之電力諧波污染嚴重性，並提出合理的濾波器改善措施。文中選擇國內某一貫作業鋼鐵廠為研究對象，首先探討其電力系統架構並收集各電力元件之相關數據，詳細調查各變電所負載之電特性，並建立其諧波等效模型，然後對工廠中如整流器、變週器與變頻器等主要諧波產生設備進行理論推導與實際量測的工作，最後使用諧波負載潮流程式計算熱軋鋼廠的等效阻抗、各級諧波電壓電流的大小與總諧波失真率百分比，據此判斷工廠現有系統諧波污染的嚴重性，比較裝設不同型式之被動式濾波器組對工廠諧波的改善效益，以提高整個電力系統的供電品質。

關鍵詞：熱軋鋼廠、諧波分析、變週器。

Abstract

The objective of this paper is to analyze the power harmonic distortion of a steel factory and to mitigate the distortion by passive filters. The mathematical harmonic model of the industrial power system is built according to the power system network and the substation load characteristics of the steel factory. The substation load is converted as equivalent impedance, the harmonic voltage and harmonic current, and the total harmonic distortion of bus voltages and currents are then derived by the harmonic load flow analysis with the actual and predictive harmonic current data of the converters, cycloconverters, and VVVF inverters in the plant. According to the simulation results under various combinations of passive filters, the harmonic pollution can be greatly reduced and each filter is confirmed to be operated under its capacity.

Keywords: Hot Strip Mill, Harmonic Analysis, Cycloconverter

I. 前言

一個理想的電力系統在不同供電電壓等級皆會有固定頻率的正弦波形，然而當系統存在有非線性負載時，將會產生諧波電流注入電力系統，造成各處供電電壓波形的失真，此諧波所造成的電力品質污染會降低發電機組、馬達、輸電線與變壓器的效率與額定容量，造成保護電驛的誤動作，當系統發生串並聯共振時，甚至會因過高的諧波電壓而引起電容器等不同設備的損壞，嚴重影響工廠之供電品質，除了設備的維修外，且會導致全廠功率因數降低，而增加電費的支出[1]。

隨著科技的日益進步，工業自動化的設備也越來越

多，這些使用電力電子設計的控制設備雖然可以提高生產效率，但卻也是造成諧波污染的最大來源，一般鋼鐵廠的電弧爐與冷、熱軋鋼廠即是重要的諧波源。此外，為提高整廠之功效，工廠會在許多地方裝有虛功補償電容器，如此極易造成諧波共振的現象，除了會使得責任分界點的諧波電壓與電流大小超出電力公司的管制標準外，工廠許多設備也容易受到諧波的影響而損壞。故對新設之工廠及對舊工廠但網路架構有變更或有新的大型負載與諧波源加入時，皆有必要對整個工廠之電力系統進行諧波分析與改善的工作。

本文選擇國內最大之一貫作業鋼鐵廠為研究對象，由於廠中有許多控制馬達運轉的整流器、VVVF變頻器與變週器等諧波負載，故工廠中裝設有許多被動式濾波器組，但濾波器組中之電阻器、電感器與電容器皆會有老化之問題，長期運轉下來會有共振點偏移的現象發生，導致濾波效果不佳；另一方面，由於工廠有網路架構變更的工程與控制設備的更新，故諧波分析的工作更為重要，本文針對其中之熱軋鋼廠諧波源進行量測工作，在考慮幾種不同被動式濾波器的組合架構下，採用諧波潮流程式進行模擬分析，在確認不會超過現有電抗器、電阻器與電容器元件的額定值下，提出具體可行的濾波器設計，以提升工廠之電力品質。

II. 鋼鐵廠諧波源分析

一般鋼鐵廠較為重要的諧波污染源有：

(a) 三相整流器

一般三相整流器應用範圍相當廣泛，由於二極體或矽控整流器的非線性特性，使整流器有嚴重的諧波產生。此型整流器所產生之各級諧波頻率如下式所示

$$h = pn \pm 1 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

其中 p 為整流器脈波數，對 6 步脈波整流器而言，其主要特性諧波為固定的 5、7、11 與 13 級，至於各級諧波的大小，理論上可以下式表示

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (2)$$

其中 I_1 為基頻電流大小。

(b) 變週器(Cycloconverter)[2-4]

變週器可將輸入電源頻率轉換至較低之輸出頻率，常見於驅動軋鋼所需之高電力、低轉速馬達負載，此轉換器之運轉電流包含兩種：循環電流及非循環電流

(亦即負載電流)。圖1為一6脈波3Φ/3Φ變週器系統架構，分別利用P電橋及N電橋控制負載正半波與負半波導通週數，使單一相電源輸出波形如圖2所示，如此改變負載端用電頻率。當輸入端電源經Δ-Δ及Δ-Y變壓器轉換產生30度電壓相角差，變壓器二次側(變週器輸入側)將會輸出六相電源，且可提供6組PN電橋之變週器以驅動三相或六相馬達負載，若馬達定子為如圖3示之三相單繞組[2]，則兩組變週器串聯供應馬達之單一繞組電源，此為12脈波3Φ/3Φ之變週器系統。

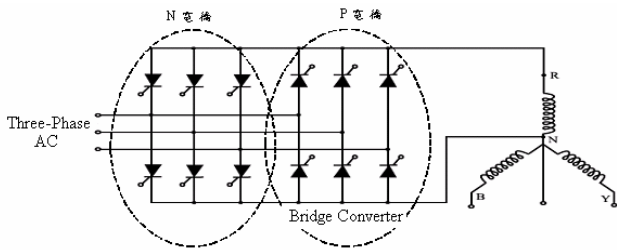


圖1 典型3Φ/3Φ 6脈波變週器系統架構

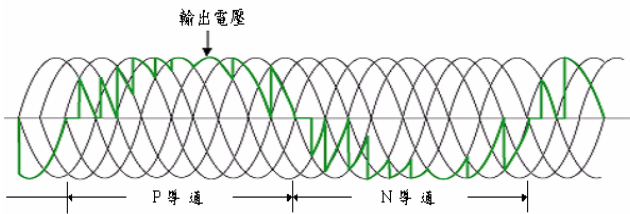


圖2 變週器輸出電壓

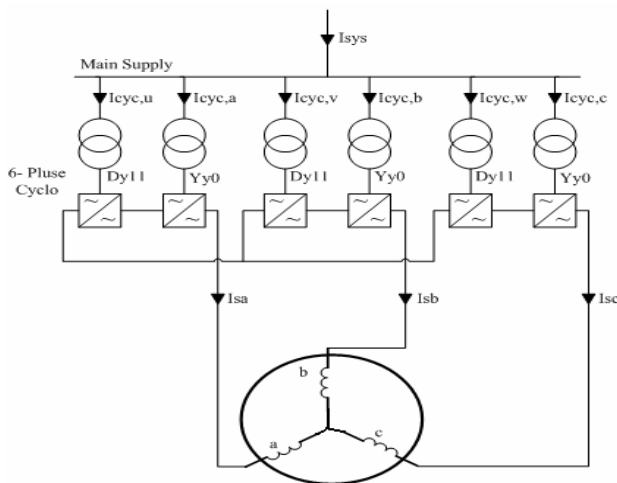


圖3 典型12脈波3Φ/3Φ變週器系統

對一3Φ/1Φ的6脈波變週器而言，其輸入端電流諧波成份與輸入頻率(f_i)及輸出頻率(f_o)有關，如下式所示

$$f_{hi1} = |f_i \pm 2mf_0|, \quad f_{hi2} = |(6p \pm 1)f_i \pm 2mf_0| \quad (3)$$

其中 $2mf_0$ 稱為sideband頻率。若變週器為3Φ/3Φ，則 $m = 3k$ ， $k = 0, 1, 2, \dots$ 為sideband頻率數，因此6脈波及12脈波3Φ/3Φ變週器之輸入端電流諧波頻率分別為

$$f_{6-pulse} = |(6n \pm 1)f_i \pm 6kf_0| \quad (4)$$

$$f_{12-pulse} = |(12n \pm 1)f_i \pm 6kf_0| \quad (5)$$

圖4所示為12脈波3Φ/3Φ變週器系統所產生之諧波成份[2]。

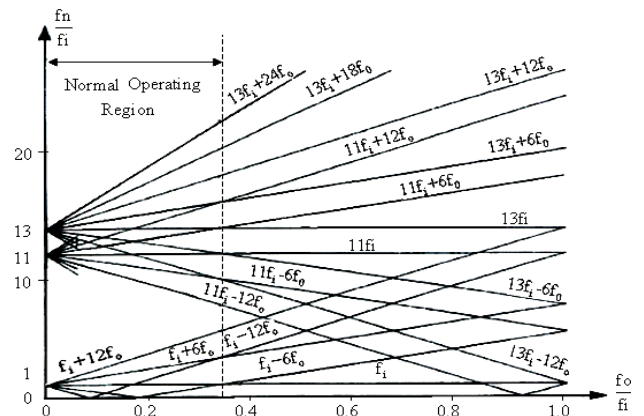


圖4 典型12脈波3Φ/3Φ變週器輸入端諧波電流成份

III. 鋼鐵廠諧波失真分析與改善

3.1 電力系統架構[5]

此鋼鐵廠電力系統共有三個161kV之主變電站，工廠由台電接引雙回路161kV電源至廠區第二主變電站(MS2)，此主變電站包含兩台70MVA及兩台100MVA之161kV/33kV變壓器，其中之第二熱軋工廠(#2HSM)即由兩台100MVA之161kV/33kV變壓器供電，因為該熱軋工廠使用許多整流器與變週器等設備來控制馬達，故在33kV匯流排(900C/D)裝設有五組不同共振點之濾波器，其中有三組高通濾波器(共振級數為3.5、4.8與6.8)與二組單調帶通濾波器(共振級數為11與13)，以減少諧波污染及提高功率因數，如表1所示，另外，變壓器9KC與9KD將電壓由33kV降至11.5kV供電給輔機等負載，在9KC與9KD工場中亦各自有裝設被動式濾波器，圖5所示為熱軋二廠系統架構與量測位置圖。

表1 熱軋二廠濾波器組

電壓等級	型式	共振級數	R(Ω)	L(mH)	C(μF)
33kV	HP	3.5	108.9	16.5	34.95
33kV	HP	4.8	108.3	8.74	34.92
33kV	HP	6.8	81.6	6.32	24
33kV	ST	11	0	2.41	24.195
33kV	ST	13	0	1.72	24.195

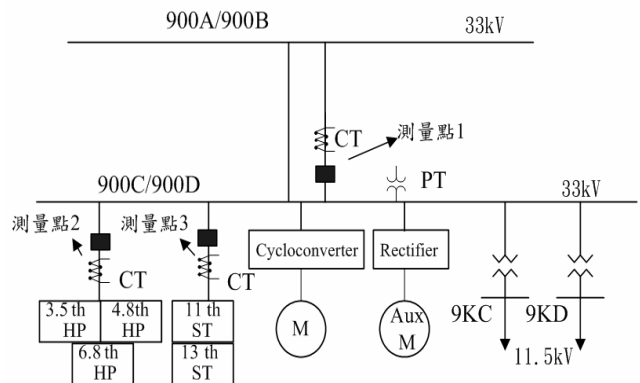


圖5 熱軋二廠系統架構與量測位置圖

3.2 熱軋二廠最大諧波電流預估 [5]

熱軋二廠主要負載為同步馬達，11 組變週器利用低頻的交流輸出來控制同步馬達進行軋鋼的動作；另外，有以 6 脈波整流器(約為 4MVA)及 12 脈波整流器(約為 6MVA)供電之 33kV 輔助設備，變週器所產生的諧波除了有整數級諧波外，亦會產生非整數級諧波，且所產生之諧波級數與大小除了與變週器之輸出頻率有關外，亦會受到負載大小的影響。圖 6 與圖 7 為熱軋二廠在某較大負載之軋鋼過程所需消耗之實功率與虛功率大小，一個完整的軋鋼過程大約需要 113.3 秒，過程中所消耗之電力變化極大，實功率的變化範圍約為 0~111.5MW，而虛功率的變化範圍約為 0~97.9Mvar。在執行濾波器設計時，須考慮最大軋鋼負載狀況下所產生之諧波大小，所以本論文選擇在軋鋼過程約 87 秒處的最大負載狀況進行分析，此時軋鋼所須之實、虛功率分別為 111.5MW 與 97.9Mvar，而當時包含 7 個尾部精軋(F1~F7)與 2 個粗軋(R1-3R 與 R2-7R)的同步馬達負載，其詳細資料如表 2 所示，這些執行軋鋼的同步馬達分別由不同的變週器控制，因其工作頻率與負載大小不同，所以產生的各級諧波次數與大小亦不相同，其中包含許多非整數級諧波，本文以該處之等效阻抗為參考依據，選擇影響較大的諧波級數，並將這些變週器產生之諧波相加，其中由變週器所供應的實、虛功率分別為 111.5MW 與 97.9Mvar，換算出之基頻電流約為 2596A，11 與 13 級有較大的諧波產生量。然後將熱軋二廠由 6 脈波整流器、12 脈波整流器與變週器所產生之預估諧波大小相加，可得到如表 3 所示之熱軋二廠各級預估最大諧波產生量，此數據將用以執行濾波器設計與諧波分析之參考。

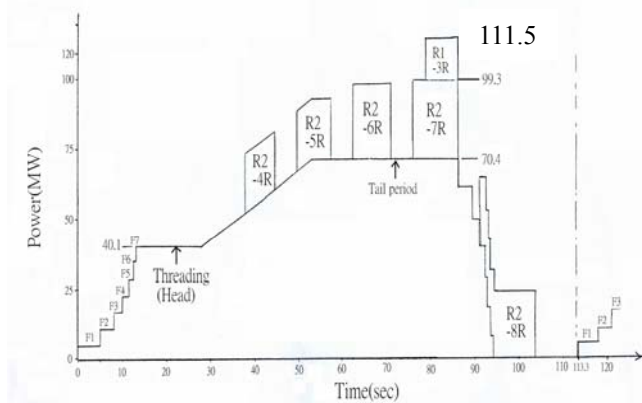


圖 6 熱軋二廠在軋鋼過程所消耗之實功率大小

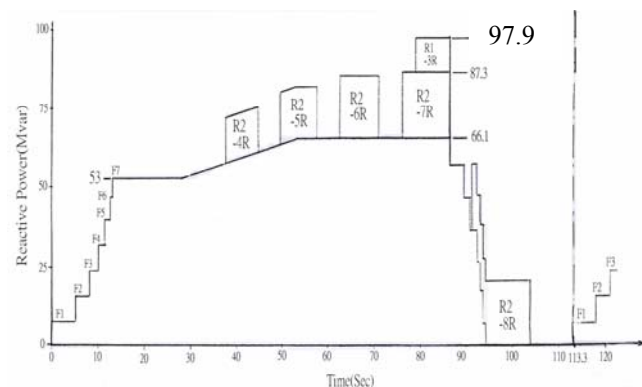


圖 7 熱軋二廠在軋鋼過程所消耗之虛功率大小

表 2 熱軋過程最大負載狀況

ST	Pass	Cyclo-converter	同步馬達				數目
			工作電壓 (kV)	工作頻率 (Hz)	消耗功率 (kW)	消耗虛功率 (kvar)	
R-1	3R	非循環電流型	1.65	2.2	6120	5340	2
R-2	7R	非循環電流型	3.3	8	14440	10570	2
F1	Tail	循環電流型	3.3	13.98	9490	8760	1
F2	Tail	循環電流型	3.3	13.19	11290	10460	1
F3	Tail	循環電流型	3.3	13.48	10460	9870	1
F4	Tail	循環電流型	3.3	13.68	10550	9960	1
F5	Tail	循環電流型	3.3	14.03	10610	10040	1
F6	Tail	循環電流型	3.3	15.12	10650	10040	1
F7	Tail	循環電流型	3.3	18.39	7350	6980	1

表 3 熱軋二廠各諧波源諧波電流預估

諧波級數	1	2.8	3.8	4.2	4.3	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.5
變週器 (A)	2596	20	6.7	5.2	20	5.98	11	22.81	46	16.54	12.25	21.2
整流器 (A)	175	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-
Total	2771	20	6.7	5.2	20	5.98	11	22.81	60	16.54	12.25	21.2
諧波級數	5.8	6	6.2	6.4	6.42	6.8	7	7.2	7.4	7.6	7.8	8.2
變週器 (A)	9.81	10	12.2	40.8	2.83	15.03	29	13.74	7.03	8.64	9.09	3.09
整流器 (A)	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-
Total	9.81	10	12.2	40.8	2.83	15.03	39	13.74	7.03	8.64	9.09	3.09
諧波級數	8.4	8.6	8.8	9	9.6	11	13	17	19	23	25	
變週器 (A)	10.93	11.5	5.8	10	1.3	159	116	8	6	8	5	
整流器 (A)	-	-	-	-	-	16	13.5	4.1	3.7	7.6	7	
Total	10.93	3.06	5.8	10	1.3	175	130	12.1	9.7	15.6	12	

IV. 熱軋二廠諧波量測

(1) 濾波器切除

由於熱軋二廠有 11 組變週器，欲同時量測各組變週器所產生之諧波電流實屬不易，故本文先將所有濾波器組切離，量測熱軋二廠匯流排(900C/D)的電壓與流經聯結線的電流(900B 至 900D)，熱軋二廠尚有二迴路接至 11.4kV 的線路(9KC 與 9KD)，雖然 9KC 與 9KD 也有諧波源存在，但該二匯流排分別有裝設三組單調帶通濾波器，故該處產生的諧波應不致流出，但變週器所產生的諧波有部分會流入 9KC 與 9KD，故量測所得的諧波源電流應較實際值為小。圖 8 為 Bus 900D 三相電壓大小與總諧波電壓失真實測波形圖，圖 9 為 Bus 900D 至 900B 的 ab 相電流大小與總諧波電流失真實測波形圖，此次測量約有三天的時間，每五分鐘記錄一筆數據，其中包含五分鐘內所量測到的最大值、最小值與平均值。

受限於儀器只能量測介於某二整數級諧波間之非整數級諧波，而無法精確量測非整數級諧波的級數，故在此不多說明。由上面的量測結果可以知道，由於變週器控制的負載變化劇烈，所以其電壓電流的變化差異相當大，總諧波電流與電壓失真度亦是變化劇烈，最大諧波電壓失真達 5.6%，不過三相不平衡似乎不嚴重，表 4 為從最大負載時間點所選定之各級諧波電流資料。

表 4 實際量測之諧波電流含量

級數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	17	19	23	25
最大值(A)	2720	11	7	5	18	4	9	9	8	8.4	72	6.8	46	2	1.7	22	10.4
平均值(A)	1600	6.8	4.6	3	12	2.2	7.1	3	3.1	3	40	2.98	22	1.18	2.1	10	5.1

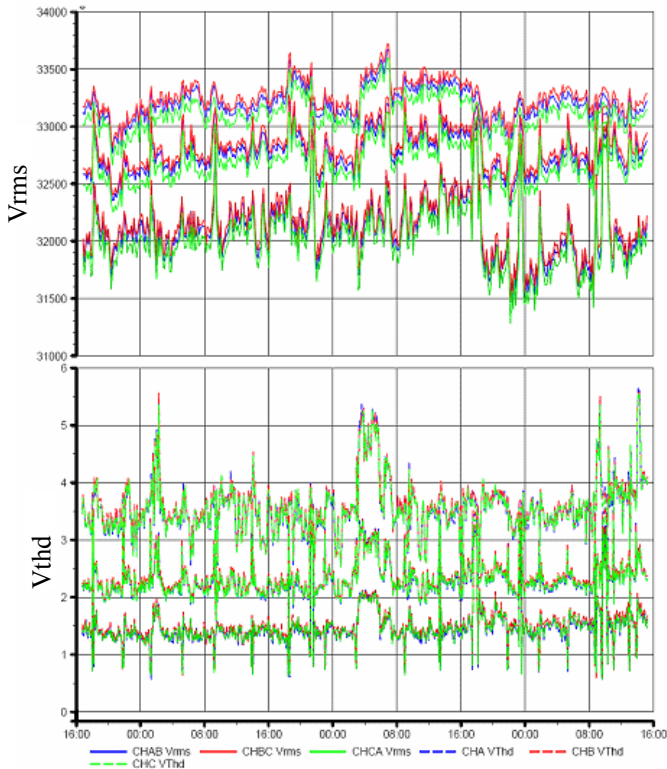


圖 8 Bus 900D 三相電壓大小與總諧波電壓失真

(2) 濾波器併聯

此事例之濾波器組合狀況為二組高通濾波器(共振級數為 3.5 與 4.8)與三組單調帶通濾波器(共振級數為 6.8、11 與 13)，其中原為 6.8 級之高通濾波器因電阻器毀損，故改為單調帶通濾波器運轉，經過 8 天的量測，圖 10 所示為匯流排 900D 之 a 相電壓大小，圖 11 為匯流排 900D 之 a 相總諧波電壓失真，其值介於 0.8%~1.6% 之間，在濾波器併聯運轉後，諧波污染獲得明顯的改善。

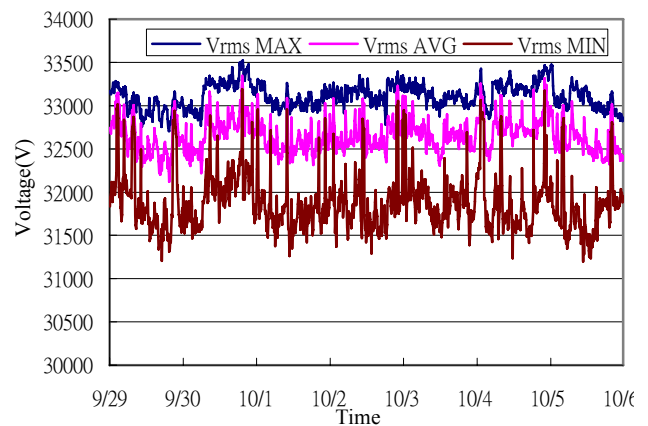


圖 10 Bus 900D 電壓大小

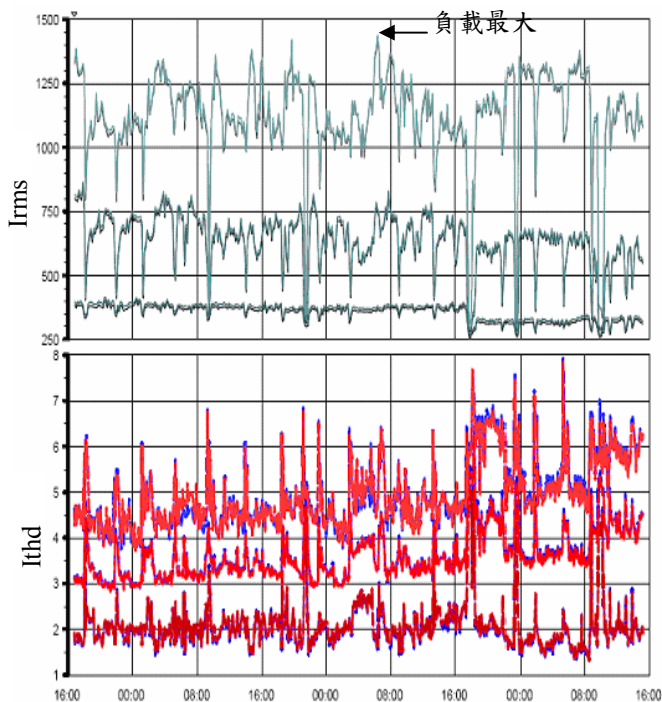


圖 9 Bus 900D 至 900B 的 ab 相電流大小與總諧波電流失真

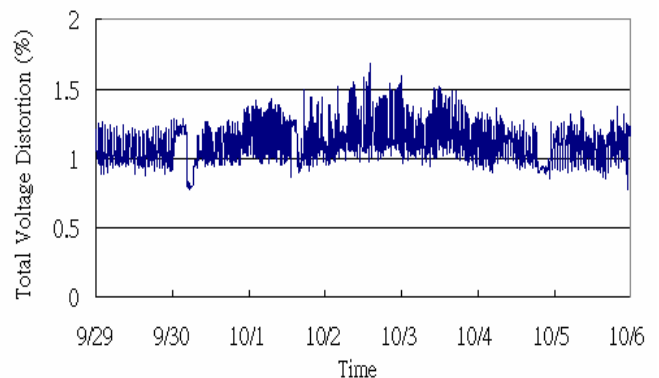


圖 11 Bus 900D 之總諧波電壓失真

V. 鋼鐵廠諧波失真分析與改善

除了執行原有濾波器組合下的諧波分析外，更探討在不同型式濾波器組合下，熱軋二廠之諧波電壓大小及流入系統與各濾波器組之諧波電流大小，如此若有某濾波器組之元件故障時，可以考慮不同濾波器組合之運轉模式，以提高工廠電力品質與功率因數。在使用預估最大諧波產生量與實際測量值下，模擬如表 5 所示幾種不同濾波器組合的事例。

