

空氣污染與噪音類

## 三相高頻寬電極間距之靜電集塵器

蔡東昇\*、徐榮彬\*\*

### 摘 要

自 1980 年代開始，靜電集塵器（Electrostatic Precipitator, ESP）就是大型工業用戶最主要控制粒狀物排放的主要設備之一，這些用戶包括電力、水泥、煉鋼、紙漿和造紙等產業。現今，隨著空氣中極細粉塵微粒對健康的威脅被逐步證實，各政府迫於民眾對環保意識高漲而逐步修訂更加嚴格的排放標準。因此，對於使用靜電集塵器的用戶而言，其面臨到最緊迫的問題就是對既設靜電集塵器改善以符合更嚴格的排放標準。

目前，新式三相高頻變壓整流器已逐步取代單相傳統變壓整流器而成為新建靜電集塵器的電源供應系統，而排放標準越嚴格的地區，這股更新及改換的趨勢則越明顯。本文除了探討單相傳統變壓整流器與三相高頻變壓整流器的技術差異外，並藉由一燃煤電廠的老舊靜電集塵器（極間距 9 英吋）更新三相高頻變壓整流器的案例來比較更新的效益。最後期能藉由本技術的探討，與其他使用靜電集塵器的同業作經驗之交流。

【關鍵字】靜電集塵器、三相高頻電源

\* 台耘工業股份有限公司

副總經理

\*\* 台耘工業股份有限公司

資深系統 / 製程工程師

## 一、前言

在諸多大型工業用戶中，靜電集塵器 (Electrostatic Precipitator, ESP) 皆是其控制粒狀物排放的主要設備。其工作原理是利用在放電極施加直流高壓形成電暈放電效果，使氣體電離釋放大量游離電子，當含塵煙氣通過靜電集塵器所組成的電場時，煙氣中原本不帶電的粉塵粒子會因此而被荷電。在電場力的作用下，形成一驅進速度 (migration velocity)，向極性相反的極板 ( 接地極 ) 移動，當荷電粉塵到達極板後，荷電電子會被導入大地而粉塵則被吸附在極板上，最後通過敲擊方式使吸附在極板上的粉塵抖落，從而達到煙氣淨化效果。下圖 1 為靜電集塵器工作原理示意圖。

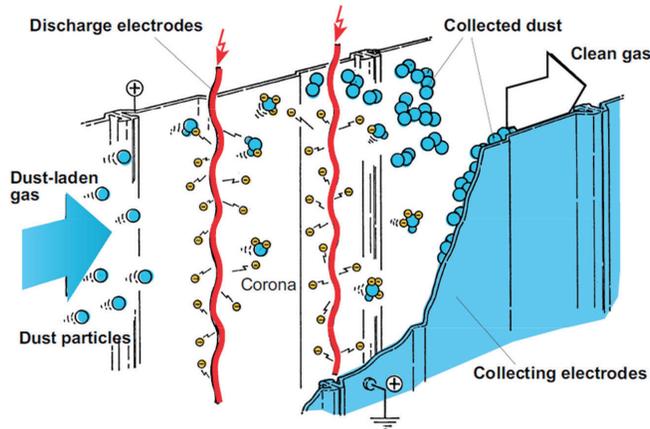


圖 1 靜電集塵器工作原理示意圖 (Alstom, D. Levesque, 2010)

靜電集塵器係由集塵器機械本體 ( 主要包含殼體、極板、極線及除灰機構 )、直流高壓供電系統 ( 變壓整流器 ) 與低壓附屬設備系統等 3 大系統所組成。目前，這些 1970~1980 年代所興建的靜電集塵器，至今仍然有為數眾多的機組仍然還在運轉。然而這些早期設計的靜電集塵器，由於受限當時的技術，其電極間距的設計多為 8 英吋至 10 英吋，而非現今主流的 16 英吋。這些老舊的靜電集塵器，由於本身在設計上的極間距就相對狹窄，且因經年累月的運轉而容易導致內部放電極線與極板產生彎曲變形的狀況，致使實際極間距比設計所需的極間距更為窄小。此情況更容易導致運轉時產生過多的火花及電弧，而抑制變壓整流器的輸出功率，最終影響靜電集塵器的集塵效果。

三相高頻變壓整流器 (switch mode power supply, SMPS) 相較於單相傳統變壓整流器，其不僅具有高功效轉換及低漣波率特性，也由於其使用 IGBT(insulated gate bipolar transistor) 作為觸發控制單元，相較於單相傳統變壓整流器所使用的 SCR(silicon controlled rectifier) 作為觸發控制單元，除了可有效降低二次側輸出的峰值電壓外，更可以在發生火花或電弧後快速消弧並回復輸出功率。而這些特性對於老舊靜電集塵器的改善，尤其在窄小極間距的狀況下，更能發揮提升輸出功率的效用，進而改善收塵效率。

## 二、靜電集塵器效率改善的理論基礎

靜電集塵器的集塵效率可透過 Deutsch-Anderson equation (Paker,1997) 推導而出。

$$\text{Eff} = 1 - \text{Exp}\left[-\left(\frac{K_e \times P_c}{Q_a}\right)\right]$$

其中，

Eff : 靜電集塵器的集塵效率 (%)

A : 靜電集塵器的集塵面積 (m<sup>2</sup>)

$\omega$  : 粉塵驅進速率 (m/sec)

Q<sub>a</sub> : 煙氣真實氣流量 (m<sup>3</sup>/sec, wet basis)

根據 Deutsch-Anderson equation，欲提高靜電集塵器的集塵效率，其一是增加靜電集塵器的集塵面積。在實際應用面上，增加集塵面積即代表必須增加收塵區室，又或是增高或增長極板與極線系統。如此必然牽涉整個靜電集塵器機械構造的改造與改建，因此除必然須投入大量金額以及冗長停機安裝時間外，靜電集塵器安裝現場是否具有足夠空間以及原負重基礎是否足夠承擔等因素更是一大挑戰，因此採用增加集塵面積選項並不符合經濟效益。

而另外方法則是提高粉塵驅進速率，粉塵驅進速率代表被荷電的粉塵粒子在靜電集塵器內，由極線至極板的移動速率，該速度可由以下公式所定義：

$$\omega = \frac{C_0 q E_p}{3\pi\mu d_p}$$

其中，

$\omega$  : 粉塵驅進速率 (m/sec)

$C_0$  : Cunningham 修正係數

$q$  : 飽和充電的粉塵粒子量

$E_p$  : 粉塵粒子被捕集的電場力 (V/m)

$\mu$  : 流體黏度 (Pa·S)

$d_p$  : 粉塵粒子直徑 (m)

根據以上粉塵驅進速度的公式，在煙氣與粉塵條件不變的情況下，施加的電場力與粉塵驅進速度成正比關係，因此當施加的電場力越高，則粉塵驅進速度越快。換句話說，當靜電集塵器的直流高壓供電系統（變壓整流器）施加於電場的功率越高，電場內的粉塵驅進速率越快，則該電場的收塵效率越好。

此外，根據 H.J. White equation，靜電集塵器的集塵效率與其直流高壓供電系統（變壓整流器）所施加功率的關係如下：

$$Eff = 1 - \text{Exp}\left[-\left(\frac{K_e \times P_c}{Q_a}\right)\right]$$

其中，

Eff : 靜電集塵器的集塵效率 (%)

$K_e$  : 修正常數

$P_c$  : 電場 (電量) 功率 (Watts, kVavg x mA)

$Q_a$  : 煙氣真實氣流量 (m<sup>3</sup>/sec, wet basis)

另外，亦有其他研究分析靜電集塵器的集塵效率與電場（電量）功率以及煙氣量相互之間的關係，並繪製出圖 2 的特性曲線。

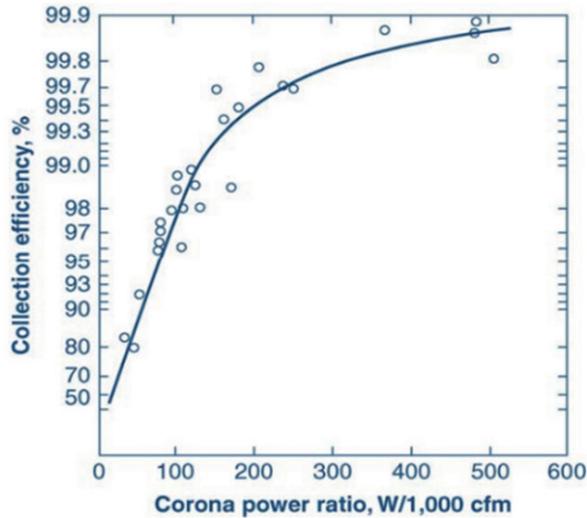


圖 2 靜電集塵器集塵效率與電量功率及煙氣量的特性曲線 (David H. F. Liu, Bela G. Liptak, 1997)

因此，透過對直流高壓供電系統（變壓整流器）的改善，使靜電集塵器內各電場的輸出功率增加，以提升粉塵驅進速率進而提升各電場的集塵效果，就變成提升靜電集塵器效率的方案中，最省時也最符合經濟效益的做法。

### 三、靜電集塵器高壓直流電源系統分析比較

目前在靜電集塵器的市場上，主流的高壓直流電源系統主要可分為 3 類：單相低頻 SCR 觸發供電系統、三相低頻 SCR 觸發供電系統、三相高頻 IGBT 觸發供電系統。

以下將分別介紹這 3 種電源的原理與差異：

#### 1. 單相低頻 SCR 觸發供電系統

此高壓直流電源系統，於輸入端採用單相電源，並以 SCR 作為觸發控制單元，用以調控輸出之高壓直流電壓與電流。其電氣迴路如圖 3 所示：

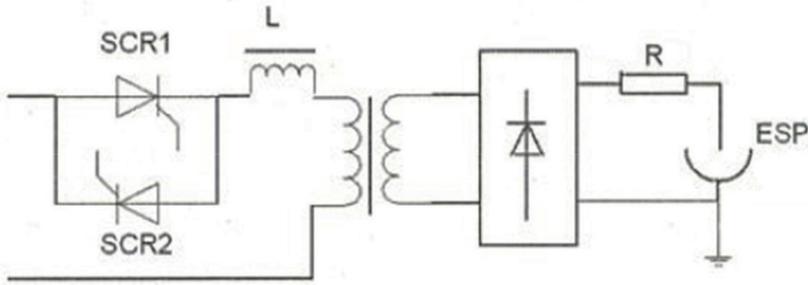


圖 3 單相低頻 SCR 觸發供電系統電氣迴路圖

此電源系統是目前技術最成熟，在靜電集塵器的市場上佔有量最大的供電系統。然由於受控制原理的侷限性，使得單相低頻 SCR 電源具有以下缺點：

- (1) 變壓器體積龐大，重量重，製造須消耗大量銅、鐵、絕緣油等材料，隨著各式材料價格的上揚，價格優勢逐漸消失。
- (2) 使用 SCR 做相位控制方式，易導致電源側嚴重諧波問題。
- (3) 使用單相電源，除導致低功率轉換因數（約 57%），須耗用大量一次側電流外；在以多區室為設計條件的靜電集塵器，亦容易造成電源側相電流不平衡的負載問題。
- (4) 受 SCR 相位控制方式與低單相工作頻率（50/60Hz）影響，火花（Spark）與電弧（Arc）熄滅與再回復時間長，且輸出二次側高壓因受漣波因素過大（約 35~45%）影響，無法達到最佳集塵效果。
- (5) 間歇放電（IE, intermittent energization）的調整受限工作頻率，無法達到最適化的設定，在高濃度與高灰阻的粉塵狀況下，無法達到最佳集塵效果。

隨著現今環保法規日益嚴苛的狀況下，傳統單相低頻 SCR 觸發供電系統已難以滿足靜電集塵器供電的要求。

## 2. 三相低頻 SCR 觸發供電系統

針對傳統單相低頻 SCR 觸發供電系統的缺點，部份靜電集塵器的電源設計與製造商，設計出三相低頻 SCR 觸發供電系統，其輸入端採用三相電源，在控制部分則沿用 SCR 作為控制單元，使用 3 組 SCR 模組控制輸入的三相電源，調控輸出之高壓直流電壓與電流，其電氣迴路如圖 4 所示：

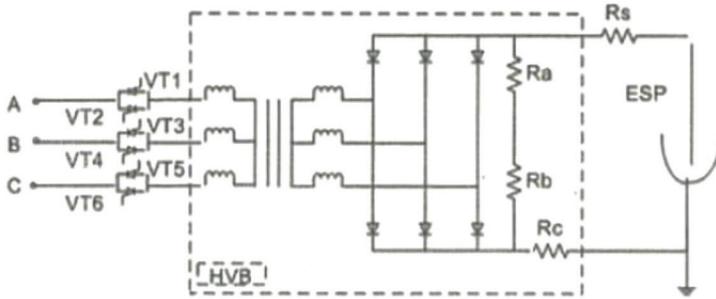


圖 4 三相低頻 SCR 觸發供電系統電氣迴路圖

它的出現，一定程度解決了單相低頻 SCR 觸發供電系統的某些先天設計上問題，例如：

- (1) 使用三相電源，提升轉換功率因數 (約 82%)，降低一次側電流消耗外，亦可解決電源側相電流不平衡負載問題。
- (2) 使用三相 SCR 控制方式，降低二次側漣波因素 (約 8~15%) 影響，提供較穩定及較高的二次輸出電壓，進而提高集塵效果。

經現場應用，三相低頻 SCR 觸發供電系統確實對集塵效率提升有幫助，亦具有一定的節能效果，但三相低頻 SCR 觸發供電系統仍然存在一些問題，例如：

- (1) 變壓器體積較傳統單相 SCR 觸發方式的變壓器更龐大，消耗材料更多，單價昂貴。
- (2) 由於仍然使用 SCR 做相位控制，對電源側諧波問題仍無法改善。
- (3) 火花與電弧控制困難，導致短路電流衝擊問題。
- (4) 間歇放電控制困難，應用於高濃度與高灰阻的粉塵環境有一定難度。

綜合以上所述，三相低頻 SCR 觸發供電系統雖可彌補部份單相低頻 SCR 觸發供電系統的缺點，亦對集塵效率提升與節能有一定的幫助，但由於其價格昂貴，且操控上亦相對困難，故在靜電集塵器的新設或更新市場，其應用實績相對稀少。所以基本上我們可將其視為單相低頻 SCR 觸發系統發展至三相高頻 IGBT 觸發供電系統前的過

渡產品。

### 3. 三相高頻 IGBT 觸發供電系統

現今由於電力電子與數位控制技術的快速發展，靜電集塵器的電源設計與製造商設計出新型三相高頻 IGBT 觸發供電系統，其輸入端採用三相電源，在控制部分則使用 IGBT 作為控制單元，使用 IGBT 模組調控輸出之高壓直流電壓與電流，其電氣迴路如圖 5 所示：

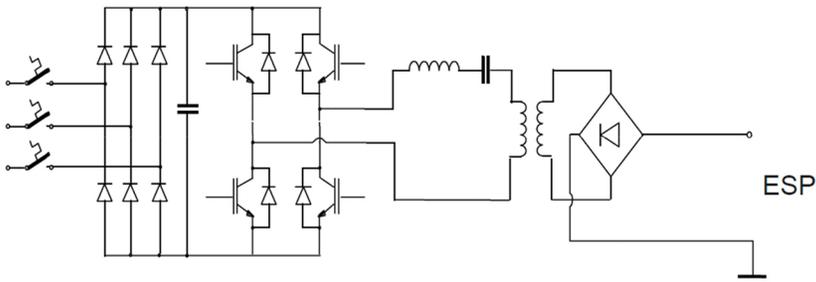


圖 5 三相高頻 IGBT 觸發供電系統電氣迴路圖

上述之電氣迴路可依據功能可分解為下列 4 個區塊來說明：



圖 6 三相高頻 IGBT 觸發供電系統電路分解圖 (NWL)

- (1) AC/DC 區塊：三相 480V 交流電源輸入，並經整流及濾除電源電磁 (EMI) 後，輸出平滑穩定的 650V 單相直流電壓。
- (2) DC/AC 區塊：由 IGBT 全波電橋電路組成，此電路將輸入的 650V 單相直流電壓轉換成高頻 50kHz 交流電壓。
- (3) Resonant Tank：吸收二次側發生火花或電弧的衝擊電流突波以及濾整 IGBT 觸發後輸入的高頻交流電壓與電流波形。
- (4) AC/DC 區塊：將輸入的高頻 50kHz 交流電壓經升壓整流後，轉換成高頻高壓直流電壓輸入靜電集塵器內。

## 4. 比較與分析

表一比較上述 3 種靜電集塵器高壓直流電源供應，當二次側輸出功率設計值 (70kW) 相同時，各設計參數的差異：

表 1 靜電集塵器高壓直流電源供應系統設計比較表

參數	單相低頻	三相低頻	三相高頻
kVdc	70	70	70
mAdc	1,000	1,000	1,000
Output kW	70	70	70
Peak kVdc	108	77	72
Ripple (%)	35-45	8-15	3-5
Line Aac	264	107	94
Heat Loss (kW)	4.5	3.5	2.4
Power Factor (%)	57	82.5	92.6
Input kVA	127	89	78
Operation Frequency (Hz)	50/60	50/60	50kHz
EMI Filter	無	無	有
Spark/Arc Responsible Time	10/8.33 ms	6.7/5.6 ms	30 $\mu$ s
Volume Envelope (ft <sup>3</sup> )	60	68	35
Weight(lb)	3,860	4,350	1,000
Gallons of Insulation Oil	135	152	27
Cooling	自然風冷	自然風冷	強制風冷

由表 1 可歸納出三相高頻電源系統最主要的 3 大優點。首先是三相高頻電源系統的漣波率遠低於其他 2 種系統，這使得三相高頻電源系統在相同平均輸出電壓 (kV) 的

條件下，其峰值電壓遠低於傳統低頻電源的峰值電壓，進而降低火花或電弧的發生率，使二次側可輸出更多功率(kW)進入靜電集塵器內，而達到提升 ESP 集塵效率的效果。其次是三相高頻電源系統在 IGBT 觸發前，先已將三相輸入電源整流輸出單向直流電源，如此能克服傳統單相低頻電源系統先天上受輸入頻率直接影響，導致轉換功率因數低下所引致的電源諧波與耗功問題。另外一個優點是其輸出頻率可高達 50kHz，搭配快速反應的 IGBT 元件與快速偵測的數位電控系統(DSP)，其響應速度較其他兩種傳統低頻電源系統快 100 倍以上，如此可快速偵測到極小的短路電流時，就迅速執行消弧的動作，並再快速回升至火花發生前的電壓與電流輸出準位，以避免如其他兩種傳統低頻電源系統，若遇到連續與大量的火花與電弧時，因需長時間的消弧反應時間，導致需長時間抑制電壓與電流輸出，而影響集塵效率。以下針對該 3 優點作詳盡說明：

### 1. 提高輸出功率

由於靜電集塵器內部火花與電弧的形成與高壓直流電源系統輸入的二次側峰值電壓(kV<sub>peak</sub>)高低有關，而三相直流高頻電源系統輸出的二次側電壓(kV)波形具有極低的漣波率特性，在與傳統低頻直流電源系統輸出相等二次側平均電壓與電流(意即相同輸出功率)的條件下，如圖 7 所示，三相高頻直流電源系統輸出的峰值電壓會遠低於傳統低頻直流電源系統所輸出的峰值電壓。

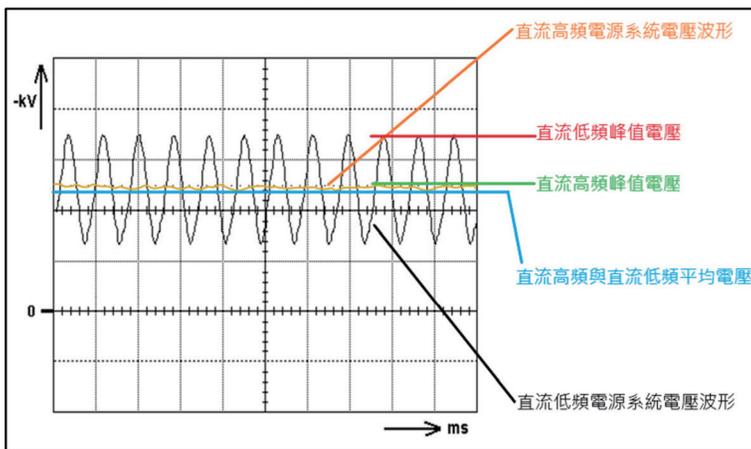


圖 7 直流低頻與直流高頻電源電壓波形比較圖

此低漣波率特性意謂若假設當下靜電集塵器內發生火花或電弧的電壓與傳統直流低頻電源系統的峰值電壓相同時，此時，傳統直流低頻電源系統會為了消弧而降低二次側平均電壓與電流的輸出，因而降低輸入至靜電集塵器內的功率，因此導致靜電集塵器的收塵效果下降；而在與上述相同的製程與煙氣條件下，三相高頻電源系統因為其輸出的峰值電壓相當趨近於輸出的平均電壓，因此其距離發生火花或電弧的電壓仍有一大段距離，故三相高頻電源系統可以在未發生任何火花或電弧的狀況下，提高輸出的二次側平均電壓與電流直至三相高頻電源系統當時輸出的峰值電壓趨近於發生火花或電弧的電壓值，此意即三相高頻電源系統可以輸出更多功率進入靜電集塵器內，以達到提高集塵效率效果。

圖 8 顯示傳統低頻電源系統與三相高頻系統 VI 曲線，假設靜電集塵器內發生火花或電弧的平均電壓為 34 kV( 峰值電壓 44 kV)。此時若使用的是傳統低頻電源系統，則此時輸出的二次平均電流約為 750 mA，輸出至靜電集塵器內的功率約為 25.5 kW。若是在相同條件的情況下使用三相高頻電源系統，因為其低漣波率的特性，因平均電壓可運轉至趨近於峰值電壓，則此時輸出的二次平均電流可達 1,450 mA，輸出至靜電集塵器內的功率可達到 63.8 kW，較傳統低頻電源系統約提高了 2.5 倍。

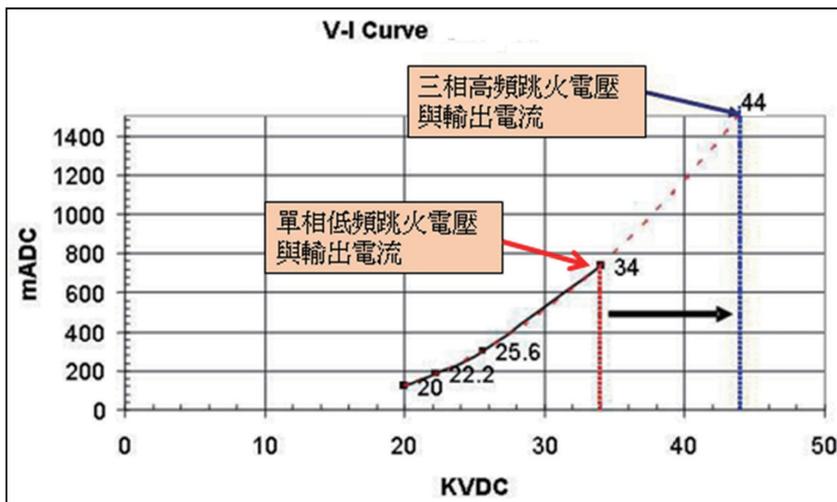


圖 8 傳統低頻電源與三相高頻電源 VI 曲線示意圖 (NWL)

2. 改善功率因素

由表 1 靜電集塵器高壓直流電源供應系統比較表可知，在相同的二次輸出功率 (kW) 下，三相高頻電源系統的輸入功率 (KVA) 是單相低頻電源系統的 61%；是三相低頻電源系統的 87%。而這些低頻供電系統都是使用 SCR 做相角控制，經全波整流後導入靜電集塵器內，故當漣波率越大，則平均輸入的直流電壓 (kV) 越低，意即一次側需提供更多功才能達到所需的平均輸入的直流電壓 (kV)。圖 9 是傳統低頻電源系統與三相高頻電源系統的三角功率因素比較圖。

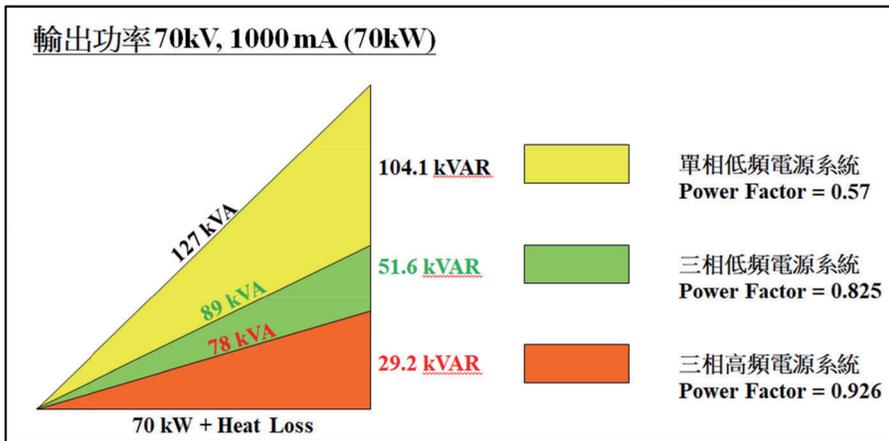


圖 9 傳統低頻電源與三相高頻電源功率因素比較圖

由上圖的三角功率因素比較圖可知，在相同的二次側輸出實功率 (kW) 的條件下，三相高頻電源系統所需耗用的無效功率 (kVAR) 僅是三相低頻電源系統的 56%，更是單相低頻電源系統的 28%。因此，三相高頻電源系統相較於單相或三相低頻電源不僅可降低耗用的無效功率，提高迴路上的功率因素，更可改善單相低頻電源系統所造成的相電流不平衡對前端電源線路損耗以及變壓器的過熱的問題。

3. 快速響應的 IGBT 觸發模組與電控系統 (DSP)

傳統單相或三相低頻電源系統，由於受限輸入頻率以及觸發元件 (SCR) 的反應速度，容易發生電源諧波干擾及火花電弧回饋所產生的短路電流衝擊問題。而三相高頻電源系統使用新式的 IGBT 動力電子元件控制觸發並搭配可快速響應的電控系統，因此可將輸出頻率提升至最高達 50 kHz，當此狀況下偵測到火花或電弧，電控系統最快

可在  $30 \mu\text{s}$  時間內關閉 IGBT 的輸出以達到消弧的效果，因此相較於單相或三相低頻電源系統，電源側並不會因此汲取到火花或電弧的所累積的大量諧波干擾與短路電流能量。此外，三相高頻電源的電控系統 (DSP)，更具備下列特點，可自動對靜電集塵器做適應性的調整：

單相或三相低頻電源系統，其電控系統操作間歇放電 (IE) 模式時，最小時間控制範圍為  $8.33 \text{ ms}$ ；而三相高頻電源系統，其電控系統操作間歇放電 (IE) 模式時，最小時間控制範圍為  $0.1 \text{ ms}$ ，因此其較單相或三相低頻電源系統更可靈活的調控間歇放電 (IE) 模式的運轉參數，使其有更佳的能力去處理高濃度與高灰阻的粉塵所導致的逆電暈現象 (back corona)。

當靜電集塵器內發生火花或電弧時，三相高頻電源系統較單相或三相低頻電源系統可更快消弧並快速提升輸出電壓電流至略低於前一個火花發生點的電壓電流，因此，在相同單位時間，若火花與電弧持續發生，則三相高頻電源系統較單相或三相低頻電源系統可輸出更多功率 (如圖 10 所示，斜線所圍出之面積) 至靜電集塵器內，進而提高集塵效率。

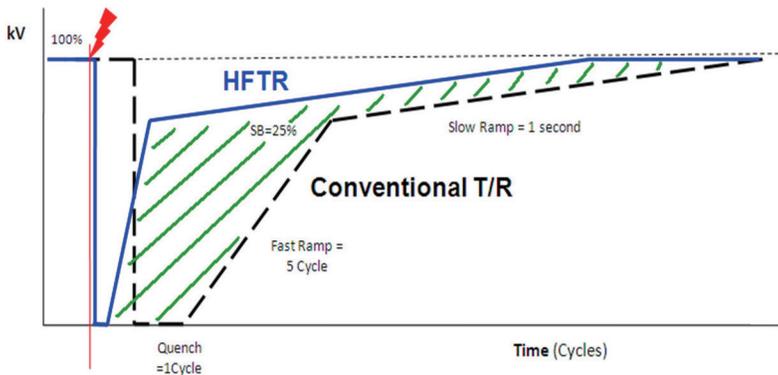


圖 10 三相高頻與單相低頻輸出電壓 / 火花反應示意圖 (NWL)

三相高頻電源的 DSP 電控系統具自動調整 (auto tuning) 模式，此功能可最佳化火花電弧的降載時間、回復電壓與回升速度，並使靜電集塵器在火花發生過程仍可維持較高的輸出功率。

## 四、改善案例

香港某電廠 B2 燃煤發電機組靜電集塵器效能改善案，該廠共設有 8 部燃煤發電機組，其中分為 4 部 350MW 發電機組 (A1-A4) 與 4 部 677 MW 發電機組 (B1-B4)，所有發電機組皆使用靜電集塵器作為空污防治設備以補集煙氣中懸浮粒子。該 B2 發電機組所使用的靜電集塵器，就機械構造而言，由 2 個相同的設計規格與容量的靜電集塵器 Precip. A 與 Precip. B 所組成，每個 Precip. 又依據煙氣方向的左右兩側平分為 A Chamber 與 B Chamber，而每個 Chamber 由煙氣入口至出口再分成相等收塵面積的 6 個區，故以機械結構分區而言，該機組之靜電集塵器共分為 24 個區。而以電氣系統的高壓電源分佈而言，每個 Precip. 的煙氣入口的前 3 區，每區左右 2 個 Chamber 皆共用 1 組高壓電源系統，至於後 3 區，則每個區各自獨立使用 1 個高壓電源系統，因此若以高壓電源分佈來區分，則該機組之靜電集塵器共分為 18 個區。下圖 11 為該機組靜電集塵器的分區架構圖以及其既設高壓電源系統容量。

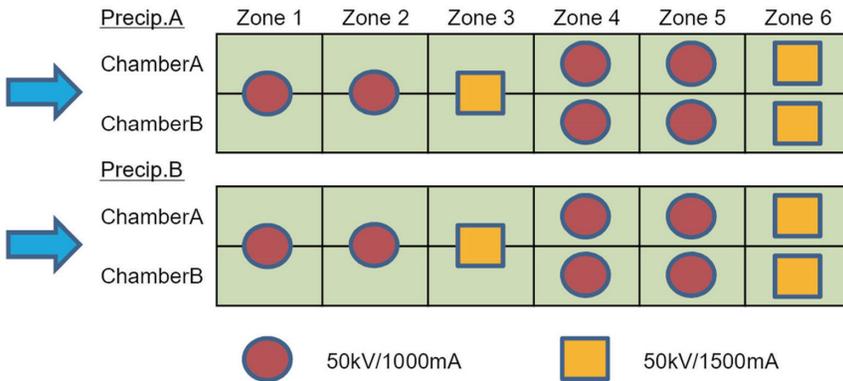


圖 11 B2 機組靜電集塵器分區架構與高壓電源分佈圖

目前該發電機組靜電集塵器所使用的高壓電源系統皆使用傳統單相低頻電源系統，自 1980 年代啟用運轉至今已超過 30 年以上。是故，該客戶在靜電集塵器的操作與保養上，面臨以下幾個問題。靜電集塵器原設計內部電極間距窄小，導致發電機組在高負載時，因負載增加，致使靜電集塵器內部各區火花與電弧頻繁發生，而導致收塵效果下降。靜電集塵器已使用逾 30 年，內部機械因結構老舊，導致內部極

板、極線因而產生彎曲變形現象，使原本已經狹窄的間距又更為狹小，造成部分區室運轉時易發生火花與電弧過多而跳脫狀況。為了彌補靜電集塵器因老舊或異常所降低的收塵效果，致使廠內操作部門必須增加靜電集塵器前的煙氣調質系統 (flue gas conditioning system) 的注射量與濃度，此除了導致增加營運成本外，注射過多的溶劑進煙氣內亦會導致黏漬性粉塵被靜電集塵器內的極板、極線所吸引而造成包灰現象，長時間運轉後反而會導致靜電集塵器收塵效果下降。

由於靜電集塵器的效能下降，導致後端的煙氣脫硫系統 (flue gas desulfurization) 因粉塵而造成經常性的堵塞而影響效能。此外，為了復原效能，必須增加煙氣脫硫系統停機清洗頻率，如此不但造成停機頻率增加，亦會使營運成本大幅上升。既有設備老舊，已超過使用年限，且設備製造商大部分皆以停產，備品取得困難。根據上述所面臨的問題，經廠內評估後，決定將老舊的單相低頻電源系統更新為三相高頻電源系統。此升級改善案的目的除了提升既設靜電集塵器的收塵效率，用以解決或減緩上述運轉之問題外，隨著此電源系統的更新，一併改善或升級靜電集塵器其他老舊附屬系統，以降低未來運轉上的風險，其中包括以下情況。伴隨傳統單相低頻電源系統更新為三相高頻電源系統，更新其老舊且以停產的單相低頻電源系統控制器、操作界面及其附屬控制盤箱。為了獲得更快速穩定的通訊系統，隨著此次系統更新，三相高頻電源系統至現場控制室以及中央控制室之間使用 100 Mbps 速率的光纖以太網路架構取代其既有僅 19.2 kbps 速率的通訊網路架構。為了實現整體靜電集塵器的可靠度與可維護性，依據三相高頻電源系統功能重新設計敲擊控制盤用以取代既設的敲擊控制盤。依據新設三相高頻電源系統的輸出電壓等級，更新其連接至靜電集塵器的高壓纜線。為了提高操作的便利性，於中央控制室 (CCR) 中安裝遠程監控系統，以顯示靜電集塵器的運轉狀態、警報指示與歷史記錄。此外，亦保留通訊渠道，以利未來 B1 至 B4 機組的靜電集塵器更新改善後，整合該遠程監控系統內。

而本案所需的三相高頻電源系統規格與容量，根據電流密度計算以及效能評估後，使用 70 kV/1,430 mA 的三相高頻電源系統取代既有 50 kV/1,000 mA 的單相低頻電源系統，另外，以 70 kV/1,975 mA 的三相高頻電源系統取代既有 50 kV/1,500 mA 的單相低頻電源系統，其新設之三相高頻電源安裝分佈如圖 12 所示。

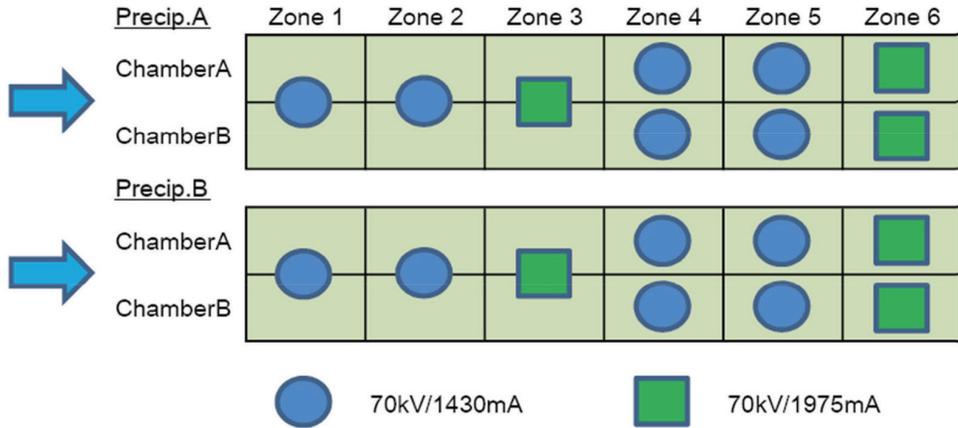


圖 12 2 機組靜電集塵器新設三相高頻電源分佈圖

此 B2 燃煤發電機組靜電集塵器效能改善案，將利用該機組年度大修時程完成既有設備之拆除以及新設設備之安裝、試車與調校。為了比對改善效率，本案於機組年度大修停機前，委託第三方檢測單位量測該 B2 機組靜電集塵器後端之粒狀物排放濃度以作為改善前之基準線測試值；並於新設設備安裝完成以及 B2 發電機組起機後 1 個月及 2 個月後，再同樣委請第三方檢測單位量測該 B2 靜電集塵器後端之粒狀物排放濃度，以做為改善後之驗收測試值。此外，為了使改善前後數值的具可比較性，於執行基準線測試以及驗收測試時，亦將當時燃煤條件以及機組發電量等變因控制在  $\pm 5\%$  內，並停止鍋爐吹灰及煙氣調質系統的運作，用以排除外部設備運轉的干擾。

根據合約之需求，廠內的目標是透過更新三相高頻電源系統後，其既設靜電集塵器後的粒狀物排放濃度可降低 25%(含) 以上，以表 2 至表 4 是本案改善前與改善後，委託第三方檢測單位量測該 B2 機組靜電集塵器後端的粒狀物排放濃度結果。

Baseline			Precip. outlet Particle Emission		
→	Precip.A		ChamberA	405.9*	mg/m <sup>3</sup>
	ChamberB		78.4	mg/m <sup>3</sup>	
→	Precip.B		ChamberA	58.8	mg/m <sup>3</sup>
	ChamberB		68.2	mg/m <sup>3</sup>	
Average :			152.8	mg/m <sup>3</sup>	

表 2 B2 機組靜電集塵器改善前粒狀物排放檢測數據

Performance 1			Precip. outlet Particle Emission		
→	Precip.A		ChamberA	178.8*	mg/m <sup>3</sup>
	ChamberB		53.5	mg/m <sup>3</sup>	
→	Precip.B		ChamberA	22.8	mg/m <sup>3</sup>
	ChamberB		35.1	mg/m <sup>3</sup>	
Average :			72.5	mg/m <sup>3</sup>	

表 3 B2 機組靜電集塵器改善後粒狀物排放第一次檢測數據

Performance 2			Precip. outlet Particle Emission		
→	Precip.A		ChamberA	219.2*	mg/m <sup>3</sup>
	ChamberB		27.8	mg/m <sup>3</sup>	
→	Precip.B		ChamberA	28.6	mg/m <sup>3</sup>
	ChamberB		16.7	mg/m <sup>3</sup>	
Average :			73.1	mg/m <sup>3</sup>	

表 4 B2 機組靜電集塵器改善後粒狀物排放第二次檢測數據

註：Precip.A ChamberA 經檢驗後發現因有殼體破損造成潛流的問題，致使有部分氣流所攜帶之粉塵未經過收塵區域而直接排出，導致排放數據偏高。

依據本文第 2 節所討論的靜電集塵器效能提升理論，當施加的電場 (電量) 功率越高，則靜電集塵器的集塵效率越好。因此，為了比對改善前後靜電集塵器各區電量功率的差異，分別在執行基準線測試以及驗收測試的當下，同步收集該靜電集塵器各區的輸出電量功率，圖 13 與圖 14 比較改善前後靜電集塵器 Precip.A 與 Precip.B 各分區的輸出功率比較圖，圖 15 則為 Precip.A 與 Precip.B 總輸出功率比較圖。

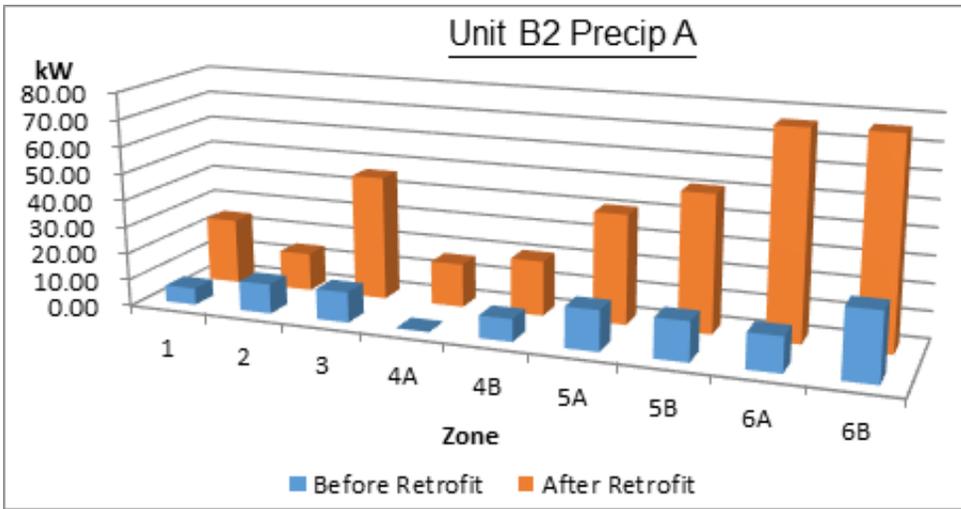


圖 13 B2 機組靜電集塵器 Precip.A 改善前後各區輸出功率比較圖

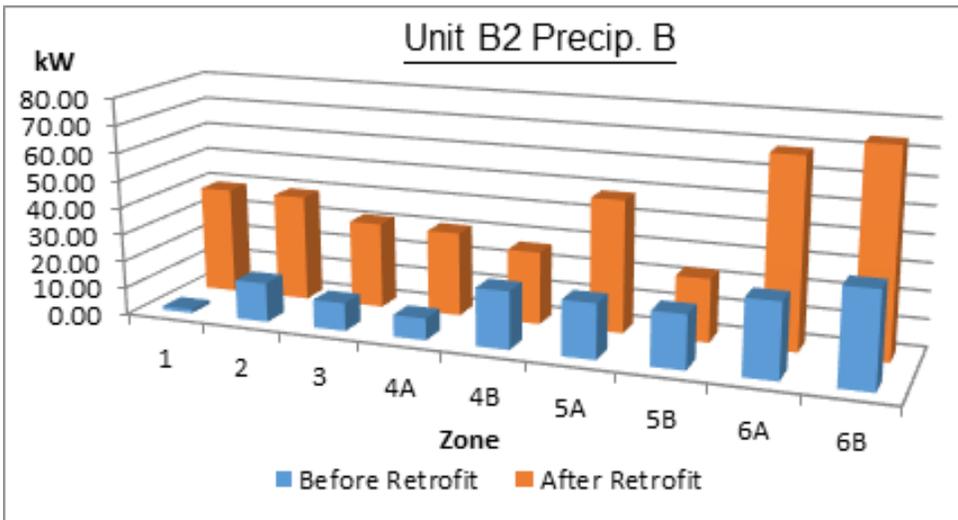


圖 14 B2 機組靜電集塵器 Precip.B 改善前後各區輸出功率比較圖

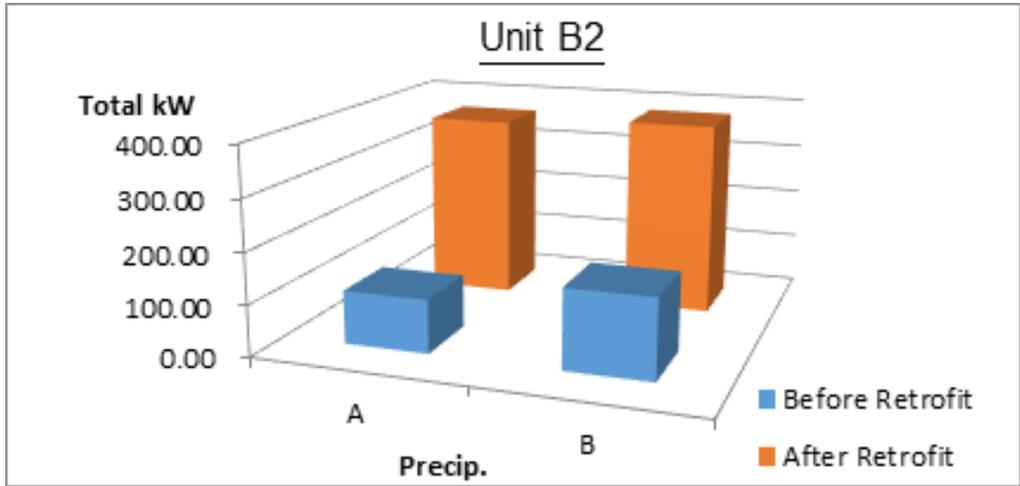


圖 15 B2 機組靜電集塵器改善前後 Precip A & B 總輸出功率比較圖

依據圖 13 至圖 15 之紀錄結果可知，該靜電集塵器更新三相高頻電源系統後，其輸出功率在大部分各區皆有大幅上升，而以各 Precip. 來分，其 Precip.A 的總輸出電量功率由 104.8 kW 上升至 365.4 kW，升幅約為 250%；而 Precip.B 的總輸出電量功率則由 156 kW 上升至 381.3 kW，升幅約為 140%。而根據上述靜電集塵器效能提升理論，輸出電量功率的增加與靜電集塵器的收塵效率成正比，而表 2 至表 4 的第三方檢測公司在改善前後所量測的粒狀物排放濃度亦可證明此次改善成效，根據檢測報告，此次粒狀物排放濃度的平均改善比率如表 5 所示。

表 5 B2 機組靜電集塵器平均改善比率

基準線測試 (Baseline Test) (mg/m <sup>3</sup> , dry basis at 0°C, 1atm & correct to 12% CO <sub>2</sub> )	第一次驗收測試 (Performance Test 1) (mg/m <sup>3</sup> , dry basis at 0°C, 1atm & correct to 12% CO <sub>2</sub> )	改善 比例 (%)
152.8	72.5	52.5
	第二次驗收測試 (Performance Test 2) (mg/m <sup>3</sup> , dry basis at 0°C, 1atm & correct to 12% CO <sub>2</sub> )	改善 比例 (%)
	73.1	52.1

若排除受潛流影響的 Precip.A ChamberA 的部分，則平均改善比率如下表 6 所示：

表 6 B2 機組靜電集塵器平均改善比率 (排除 Precip.A Chamber A)

基準線測試 (Baseline Test) (mg/m <sup>3</sup> , dry basis at 0°C, 1atm & correct to 12% CO <sub>2</sub> )	第一次驗收測試 (Performance Test 1) (mg/m <sup>3</sup> , dry basis at 0°C, 1atm & correct to 12% CO <sub>2</sub> )	改善比例 (%)
152.8	72.5	52.5
	第二次驗收測試 (Performance Test 2) (mg/m <sup>3</sup> , dry basis at 0°C, 1atm & correct to 12% CO <sub>2</sub> )	改善比例 (%)
	73.1	52.1

由表 5 與表 6 得知，此次 B2 燃煤發電機組靜電集塵器更新三相高頻電源系統後，其靜電集塵器後之粒狀物排放濃度平均改善效率可達 52%，若排除受潛流影響的煙道，則平均改善效率可達 55%。此改善效率不僅符合客戶合約所設定的 25% 改善設定，更較原目標大幅擴增約 25% 以上，由此可知悉三相高頻電源系統對老舊靜電集塵器尤其是窄間距靜電集塵器排放改善的效用。

## 五、結論

根據此燃煤發電機組靜電集塵器效能改善案例，並觀察分析該靜電集塵器起機後運轉數值以及後端的排放檢測數據，該 B2 燃煤發電機組靜電集塵器經過更新為三相高頻電源系統後，其靜電集塵器後之粒狀物排放濃度可大幅降低約 50% 以上，因此可以證實即使機組已經運轉超過 30 年，仍然可以於機組年度的大修時程內，透過三相高頻電源系統的更新，達到對老舊靜電集塵器效率改善的成效。

而對於老舊靜電集塵器的效能提升，該三相高頻電源系統不僅可以應用於電力產業用之靜電集塵器，其他例如水泥、煉鋼、紙漿和造紙等產業所使用之靜電集塵器亦可應用此技術而達到靜電集塵器效能提升以及排放粒狀物濃度降低之效果。

## 參考文獻

- Ken Parker (1997), Applied Electrostatic Precipitation, London, UK, Blackie Academic & Professional.
- Ken Parker (2003), Electrical Operation of Electrostatic Precipitators, London, UK, The Institution of Electrical Engineers.
- David Seitz, Helmut Herder (Nov. 2002), Switch Mode Power Supplier for Electrostatic Precipitators Technology and Supplier Capabilities, NWL.com.
- White, H.J. (1977), Electrostatic Precipitation of Fly Ash – Precipitator Design, the journal of the air pollution control association, 27, 214.
- David H. F. Liu, Bela G. Liptak (1997), Environmental Engineers' Handbook – Second Edition, Page 372-380, Fig 5.17.7, Collection efficiency as a function of the corona power ratio.
- NWL, DSP PowerPlus Series 7 Product Manual.
- NWL, Sizing a PowerPlus Unit to replace T/R Sets.
- Gary J. Grieco, SMPS: Present Application & Future Investigation.
- Alstom, D. Levesque , ICRC 2010, Improved Operation of Recovery Boiler Precipitators, Page 8 , picture 1.

