

提升靜電集塵器效率達到粒狀污染物個位數排放

蔡東昇¹ 徐榮彬² 許文馨^{3*}

摘 要

在目前臺灣普遍關注空污議題的社會氛圍下，火力發電廠不僅須符合法令規定，更需進一步自我要求降低各項排放指標數值，大型電廠如臺中火力發電廠即著手升級「空氣品質控制系統」(Air Quality Control System, AQCS)。AQCS改善計畫的範圍較廣含括脫硝、除塵及除硫等相關設備，因此金額龐大，從規劃到完成改善至少需2至3年。本文則針對在AQCS執行完成前及機組除役前的過渡期裡，適合作為電廠自主持續改善排放的措施：提升既有靜電集塵器之集塵效率。其針對單一設備做改善，具有投資金額較低且工期較短的優點。本文將介紹常見的ESP (Electrostatic Precipitator, ESP)改善策略：一、三相高頻變壓整流器(High Frequency Transformer and Rectifier, HFTR)。二、硬管式極線(Rigid Discharge Electrode, RDE)，並提供兩個改善實例採用不同改善方式之評估考量及改善成果。協和電廠3、4號機採用方式一，在ESP的所有區室更換高頻變壓整流器後，ESP出口粒狀污染物排放小於10 mg/Nm³。而在PM_{2.5}濃度也降低六成以上。臺中電廠5到8號機則是採用方式一和二，在ESP的第一、二區更換RDE與HFTR，改善後其ESP出口粒狀污染物排放亦小於10 mg/Nm³。

關鍵詞：靜電集塵器，細懸浮微粒，粒狀物排放，高頻變壓器

1. 前 言

行政院環境保護署於民國103年12月1日新發布之電力設施空氣污染物排放標準中說明，自民國105年12月1日起，粒狀物之排放量必須小於20 mg/Nm³。國營企業的台電做為全國產業的領頭羊，在目前臺灣普遍關注空污議題的社會氛圍下，不僅須符合法令規定，更需更進一步自我要求盡可能降低各項排放指標數值。其中臺中電廠於民國104年起決定投入92億，升級「空氣品質控制系統」(Air Quality Control

System, AQCS)進行一至四號機的空污排放改善，並於民國109年完成改善，其中針對ESP出口粒狀污染物的排放濃度可成功降低至15 mg/Nm³以下。

AQCS改善計畫的範圍較廣含括脫硝、除塵及除硫等相關設備，因此金額龐大，包括申請政府預算、可行性評估、改善整體效益評估等等，過程繁瑣費時，從規劃到發包完成至少需2至3年，過程中電廠固定污染源仍持續影響周邊環境之空氣品質，且單一機組的施工工期長達4個月，在電力備用不足的情況下，機組調

¹台耘工業股份有限公司 副總經理

²台耘工業股份有限公司 資深系統/製程工程師

³台耘工業股份有限公司 專案管理專員

*通訊作者，電話: 02-81783378, E-mail: wendy.hsu@taichyun.com.tw

收到日期: 2021年09月27日

修正日期: 2022年03月21日

接受日期: 2022年04月19日

度較為困難。另有屆臨除役之發電機組，如協和電廠、興達電廠，剩餘運轉年限較短，若投入高額費用執行AQCS改善不符合效益，但在退役前同樣持續對周遭環境造成衝擊。

靜電集塵器(Electrostatic Precipitator, ESP)是原始系統配置裡最主要去除煙氣中懸浮粒狀物的污染防治設備。目前多數老舊電廠經歷2、30年的長期營運迄今，ESP在使用20年以上後，經常會產生極板、極線等內部件彎曲變形、鏽蝕、破損，敲擊不當，或是控制器及變壓器系統老舊失效之現象，導致除塵率低於原廠設計之效率。此外隨著排放標準越加嚴格，原廠原始設計的效率已不符現今環保需求。直接改善ESP除了可以提升ESP效能，等於在原有基礎上再加強，且針對ESP的改善由於範圍較小，不論在預算申請或實際執行的時程上都遠比AQCS來的更為彈性，在AQCS執行完之前過渡期以及除役前的過渡期裡，適合作為電廠自主持續改善粒狀物排放的措施之一。目前最為普遍且經實際驗證的技術有以下兩種：一、將變壓器升級三相高頻變壓整流器(High Frequency Transformer and Rectifier, HFTR)。二、改變極線為硬管式極線(Rigid Discharge Electrode, RDE)。本文將先說明此兩種技術並闡述臺中電廠和協和電廠數部老舊機組ESP採

用不同改善方式之評估考量及改善成果。兩座大型電廠之改善機組ESP皆在ESP改善後達到了ESP出口粒狀污染物小於 10 mg/Nm^3 的目標，業已達成與AQCS計畫相近之成果。

2. ESP效能提升技術

2.1 三相高頻變壓整流器

現今由於電力電子與數位控制技術的快速發展，靜電集塵器電源設計與製造商設計出一新型三相高頻IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)觸發供電系統，其原理如圖1所示：

一般來說，上述之圖形可分解為下列圖2中的四個區塊：

1. AC/DC區塊：

三相480 V交流電源輸入，並經整流及濾除脈波干擾後，輸出平滑穩定約650 V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650 V單相直流電壓轉換成高頻50 kHz交流電壓。

3. Series Resonant Tank與AC/DC區塊：

將輸入的高頻50 kHz交流電壓經升壓整

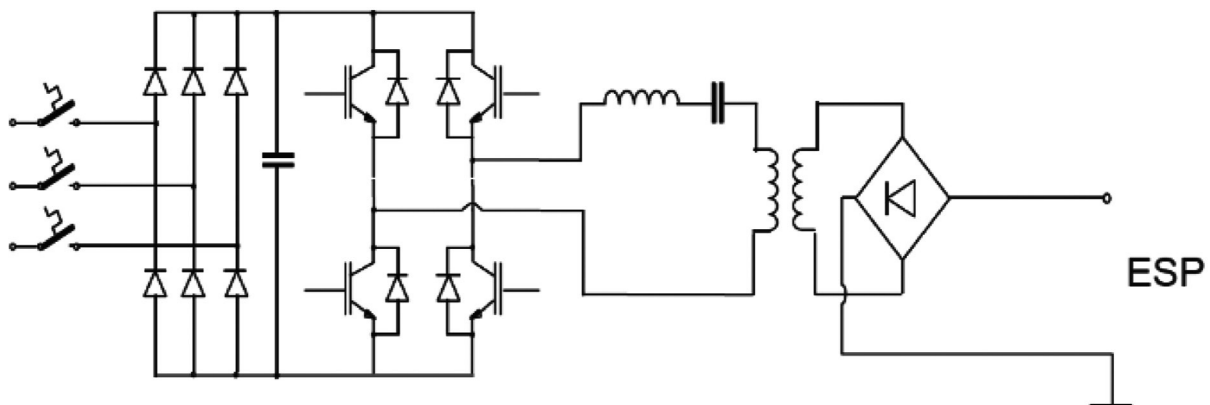


圖1 三相高頻IGBT觸發供電系統原理

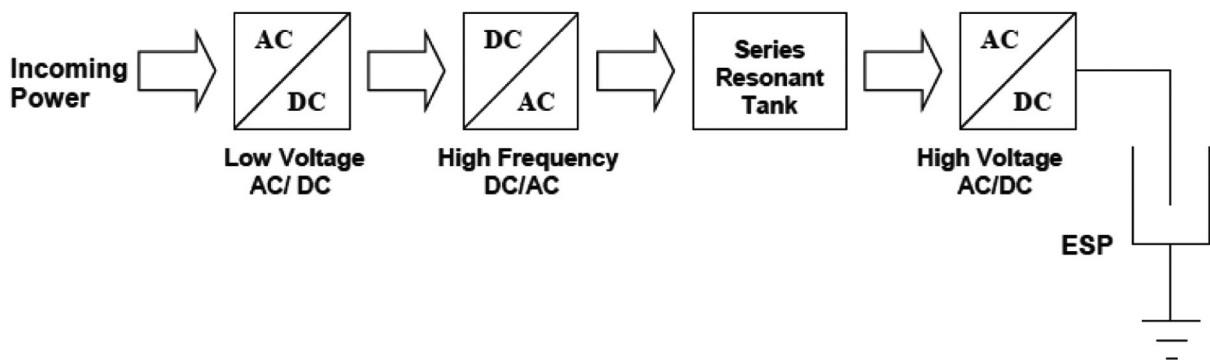


圖2 三相高頻IGBT觸發供電系統分解圖(NWL, 2017)

流後，轉換成高頻直流電壓輸入靜電集塵器內。

此系統其優點主要有三項。第一優點是三相高頻IGBT觸發供電系統相較傳統單相低頻SCR (Silicon Controlled Rectifier, SCR)觸發供電系統，可有效降低輸入之無效功率(KVAr)以提高功率因素並改善耗功之問題(NWL, 2017)。第二優點是三相高頻電源系統因極低的漣波率，故其平均輸出二次側電壓(kV)幾乎趨近於峰值電壓，與傳統低頻電源峰值電壓相較之下低很多，故可輸出更多功率進入靜電集塵器內，進而提升集塵效率。第三優點是其運轉頻率高達 50 kHz，搭配快速反應的IGBT元件與電控系統 (Digital Signal Processing, DSP)，其響應速度較其他兩種傳統低頻SCR供電系統快150倍以上，

可快速抑制火花的短路電流，並快速回升至之前火花發生點，以提升集塵效率。以下針對該三大優點作詳盡說明：

1. 改善功率因數：

在相同的二次輸出功率(kW)下，三相高頻IGBT觸發供電系統的輸入功率(KVA)約是單相低頻SCR觸發供電系統的60%。而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)則越低，意即一次側需汲取更多功才能達到所需的平均輸入的直流電壓，進而導致無效功率(KVAr)大幅增加。下圖4是傳統單向低頻SCR電源系統與三相高頻IGBT電源系統功率因數比較示意圖3。

由圖3可知，在相同輸出功率時，三相高

If Output Limit at 80kV, 1000 mA (80kW)

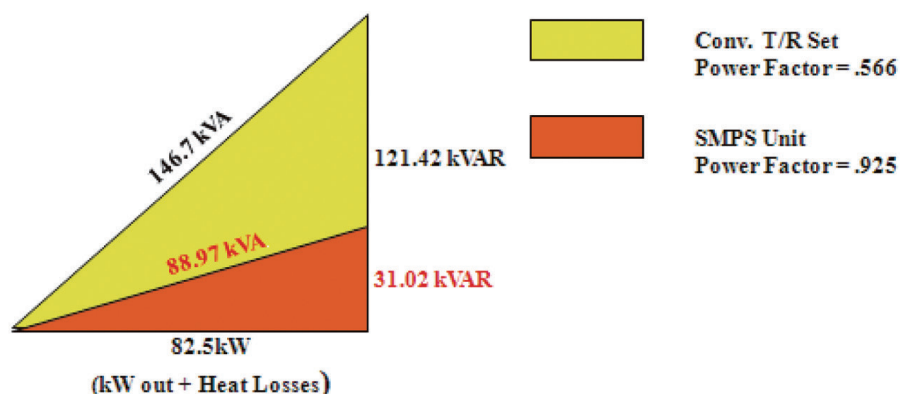


圖3 三相高頻與單相低頻功率因數比較圖

頻電源系統的直流電壓由於僅有極低的漣波成分，可有效降低無效功率而提升功率因數，使輸入的功率可極大部份輸出至靜電集塵器內；而傳統單相電源系統則因過大的漣波成分，導致低功率因數，而需耗用更多能源，才能達到與三相高頻電源系統相同的效果。

2. 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_{peak})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4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。在相同製程與煙氣條件下，當發生火花電弧的電壓等於傳統低頻電源系統的峰值電壓時，傳統低頻電源系統之控制器會為了保護電源系統進行消弧而降低二次側平均電壓電流，導致ESP收塵效率下降。若是使用三相高頻電源系統，因其峰值電壓與平均電壓相近，因此其輸出之峰值電壓仍遠低於發生火

花之電壓，在不產生火花或電弧情況下，可再持續增加輸出至其峰值電壓接近火花或電弧發生的電壓值。因此得以輸出更多功率進入ESP進而提升收塵效率。

3. 快速響應的IGBT元件與電控系統：

傳統低頻SCR電源系統，由於受限頻率以及SCR反應速度，容易發生電源諧波及電流衝擊等問題。而三相高頻電源系統使用快速響應的IGBT元件與電控系統，並運轉在高頻率範圍，使它在偵測到火花或電弧後，可在30 μ s時間內快速關閉IGBT的輸出，因此電源側僅會汲取到極小的火花或電弧的能量；對比於傳統低頻SCR控制系統，於受限於使用頻率，其最快反應時間為8.33 ms (60 Hz)，因此電源側會汲取到較大的火花或電弧的能量，使得電源側需設計更大的電容器及絕緣油量以吸收這些能量所產生的熱量。此外，高頻電源的電控系統，更具備下列特點，可自動對靜電集塵器做適應性的調整：

1. 與IGBT組合後，允許間歇放電(Intermittent Energization, IE)的時間控制在0.1 ms內，使其可有更佳的能力去處理高濃度與高灰阻的

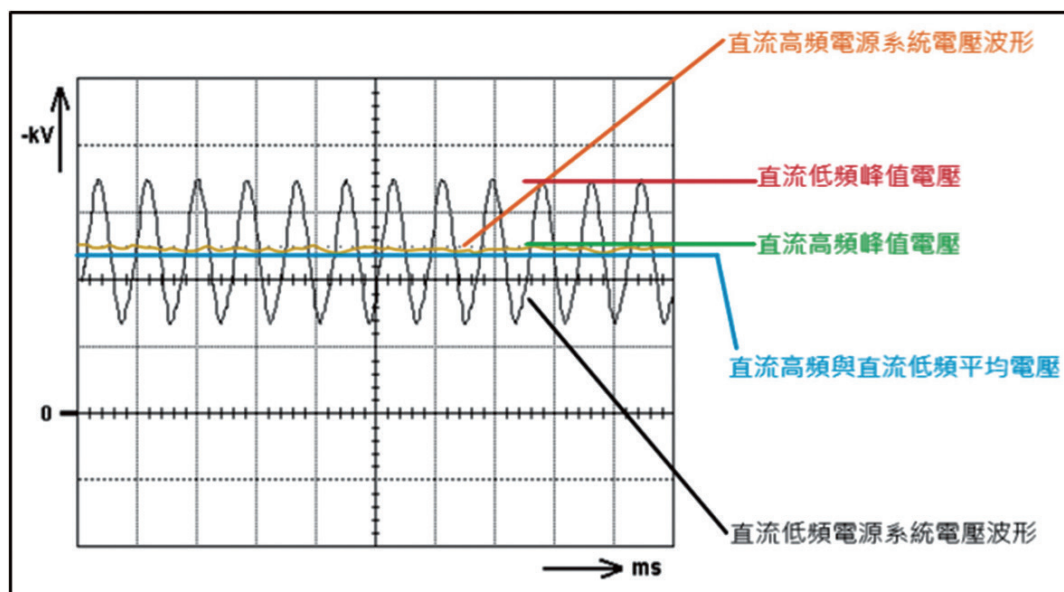


圖4 三相高頻與單相低頻輸出電壓峰值/平均值示意圖

粉塵所導致的逆電量現象(Back Corona)。

2. 當火花及電弧結束後，較傳統低頻SCR電源系統更快速提升輸出電壓至額定值，因此在單位時間內，能輸出更多功率(如圖5所示，綠色斜線之面積)至靜電集塵器內，以提高集塵效率。

在鄰近國家韓國截至2018年已有10多座500 MW以上大型發電機組採用此技術(NWL, 2019)，近期則是2020年在香港某發電廠670 MW機組，其ESP之變壓器全數升級為三相高頻變壓整流器後，在相同的機組負載下，粒狀物由 152 mg/Nm^3 降為 72.6 mg/Nm^3 。三相高頻變壓整流器全球安裝數量逾5,000台，其效能已獲得諸多驗證。

2.2 硬管式極線

ESP所使用的放電極線，其目的是當極線被通電時，隨著極線的電場強度增強，使得相鄰煙氣內的分子被離子化，同時釋放輻射電子形成電暈場。傳統常見的極線有以下幾種形式：彈簧、鋸齒，或針刺型極線(圖6)。然而，這些極線都有幾個主要問題。其一是由於製程所引起的空間電荷問題，當入口粉塵濃度增

高，它將形成一個高電阻雲圍繞放電電極，而抑制極線建立電暈場，特別是沒有尖銳面的極線型式，如螺旋、圓形或方形線(圖6)。亦可能因粉塵黏度較高在長時間使用下包覆極線，導致極線的電暈放電減少，最終將導致集塵效率降低。

另一個問題是機械可靠性，由於極線由細鋼條或薄鋼帶製成，長期使用下，將可能因為遭受含硫煙氣的酸性腐蝕、煙氣中高濃度粉塵磨損、或是不正確的維修方法造成極線鬆動、彎曲或斷裂的問題。

這些諸如極線鬆動、彎曲、或斷裂的問題，最終將在靜電集塵器運轉時產生高火花和電弧，從而導致低電流和電壓影響靜電集塵器的效能。

因此為了克服這些問題，70年代末到80年代初，硬管式極線(Rigid Discharge Electrodes, RDE)開始被研究開發。各式各樣的硬管式極線在歐洲被證實應用成功，然後在美國亦取得實績印證。從90年代末2000年初，各種定制型的硬管式極線開始應用於各產業所新建的靜電集塵器(圖7)。

經實際的應用，硬管式極線除了本身結構

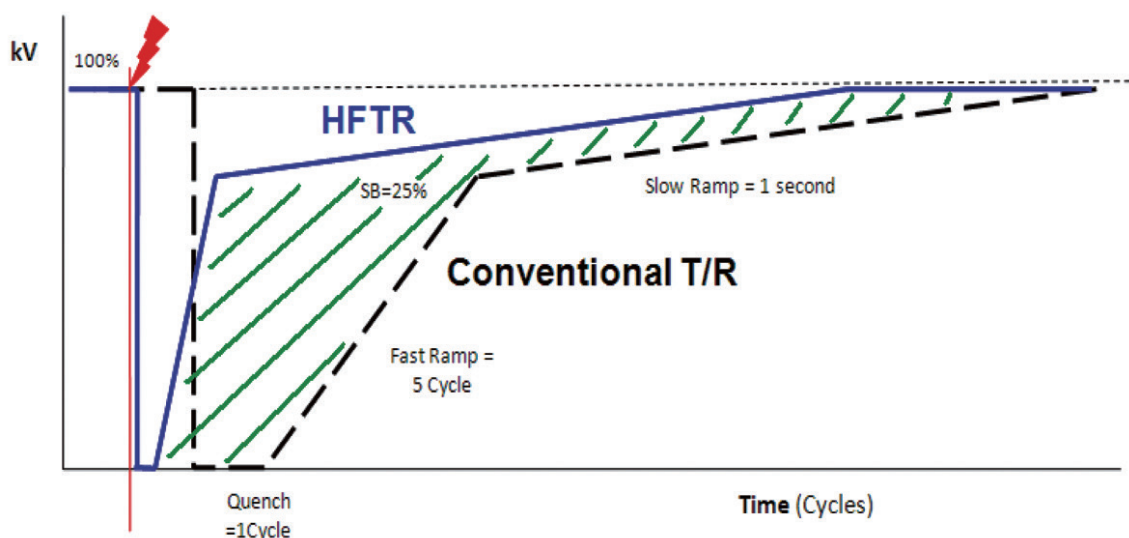


圖5 三相高頻與單相低頻輸出電壓/火花反應示意圖

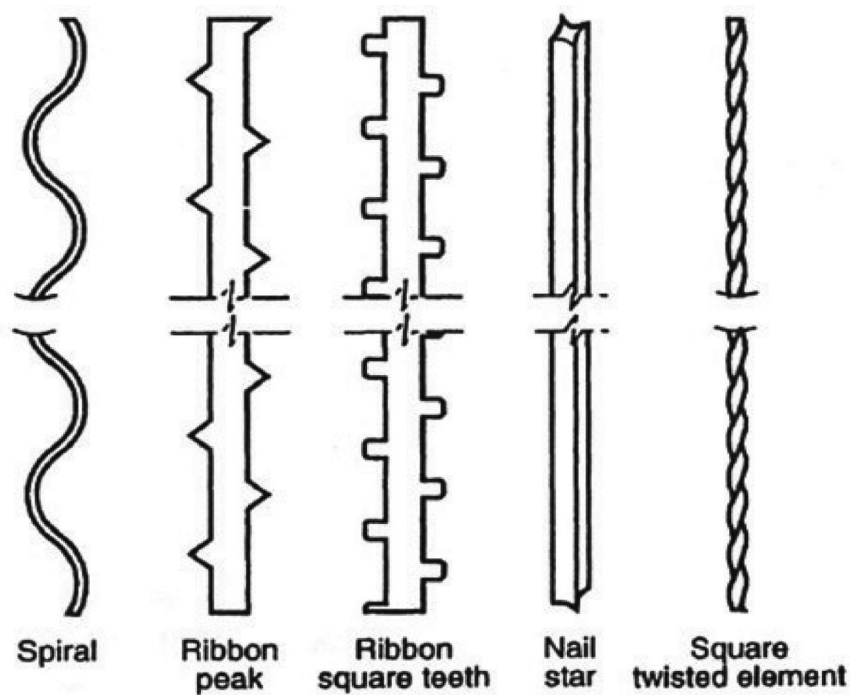


圖6 傳統常見極線型式(Parker, 1997)

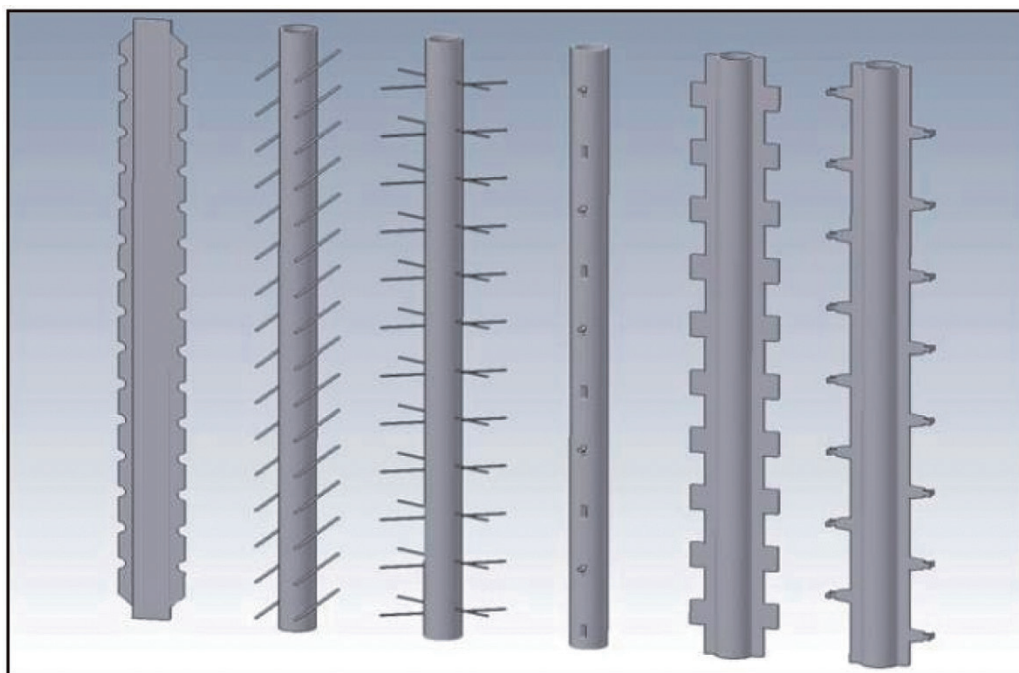


圖7 不同形式之硬管式極線(Mischkulnig and Bento, 2004)

強度穩定以及可有效提高電流密度的優勢外，對於靜電集塵器入口側高粉塵濃度的電場，更可有效提高靜電集塵器輸出電壓與電流，進而提高整體性能。總體來說，相較於傳統極線，

硬管式極線具有以下特點(Chambers *et al.*, 2009) (Chambers & Grieco, 2001)：

1. 分岔尖刺的設計可得到較低的起暈電壓；在相同的二次側電壓之下，會有比較高的電流

輸出，進而提高收塵效率。

2. 使用1.2 mm冷軋式鋼板，不易斷裂，使用年限長。
3. 二側針刺與極線本體為一體成型，無另外焊接，極線牢固不易斷裂、脫落。
4. 極線本體上方開口處另加上密封設計，避免粉塵進入極線本體造成極線彎曲變形。
5. 分叉尖刺設計可延遲極線包灰、鋼管傳遞敲擊力的效果良好，皆可減少極線因積灰而降低放電效果的問題。

三相高頻變壓整流器與硬管式極線兩項技術，除了可以根據機組不同情況分別應用，亦可兩者搭配同時使用，具有加乘效果，在國外已有安裝實例。在印尼蘇門答臘島某電廠小型65 MW機組建於1993年，在執行改善前已運轉逾20年。內部機械件老舊已造成運轉數值不佳，煙囪出口排放明顯，於2018年所有區室更換硬管式極線與三相高頻變壓整流器。改善後，運轉數值大幅提升，使ESP集塵效率獲得改善，ESP出口粒狀物排放則減少51.7%。

改善前後運轉數值如下：

改善前：2017年9月14日、15日

機組負載：37~40 MW

ESP出口粒狀物：273.7 mg/Nm³

變壓器額定值：78 kV, 800 mA

ESP 運轉數值	第一室	第二室
	kV: NA, 110 mA	kV: NA, 80 mA

改善後：2018年3月3日、4日

機組負載：46~50 MW

ESP出口粒狀物：132.3 mg/Nm³

變壓器額定值：70 kV, 1,370 mA

ESP 運轉數值	第一室	第二室
	43 kV, 1,296 mA	41 kV, 1,358 mA

以下將分享在國內的臺中電廠和協和電廠

數部老舊機組ESP如何評估考量採用上述的兩個主要改善策略：三相高頻變壓整流及RDE，及其改善成效。

3. ESP效能改善實例

3.1 臺中電廠自主改善計畫及成果

臺中電廠經歷2、30年的長期營運迄今，靜電集塵器同樣面臨機組老舊而效率低落的問題。一般而言燃煤機組運轉40年除役，按照商轉起始時間及運轉年限計算，各機組預計陸續於民國120年至民國135年間除役(台灣電力公司，民國108年)，尚需運轉10餘年以上。因此對於一至四號機的空污排放改善，臺中電廠採用升級「空氣品質控制系統」(Air Quality Control System, AQCS)，並於民國109年完成改善，其中針對ESP出口粒狀污染物的排放濃度可成功降低至15 mg/Nm³。針對五至八號機的AQCS計畫則預計陸續於民國112年與民國113年間完工。在AQCS計畫完成之前的過渡期中則採用針對單一環保設備的自主改善計畫，利用每年各機組固定歲修期間，分階段逐步改善各機組ESP出口排放，在民國106年開始規劃ESP升級更新工程。

臺中電廠五至八號機靜電集塵系統，原始設計廠商為Walther，共分為Casing 1、Casing 2兩側，每側分為六排共裝設有12個電場，各自由12台獨立變壓整流器供電。改善範圍包括五至八號機兩側前兩排共8區電場，將內部傳統鋸齒型極線升級為硬管式分叉針刺型極線，並將8台變壓器皆更新為三相高頻變壓器。

由於第一排為煙氣進來最先收塵的區域，一般ESP設計收塵量皆由前排往後排遞減，但因應目前操作狀況，前兩排非常容易因為前端注氨關係導致極線容易包灰，故改為新款的硬管

式極線，其不但可延遲產生極線包灰之問題，更可以減少因極線斷裂導致異常跳機所造成的損失。硬管式極線的另一個特徵是針刺放電強度高，擁有較低的起暈電壓；在相同的二次側電壓之下，會有比較高的電流輸出。搭配高頻變壓器使用，可以有效增加靜電集塵器的效能。且高頻變壓器對火花及電弧反應靈敏，藉由快速將電流、電壓回升，亦能縮短火花及電弧的輸出擴散(Quench Down)時間，亦可將集塵效率大幅提升，超越設備的原有設計值。

五至八號機第一階段改善從民國106年起至民國108年完成。為了評估改善成效，皆於改善前執行基準線測試以及改善後執行驗收測試。由於不同燃料特性不僅影響鍋爐操作條件、煙氣性質等條件，亦會直接影響ESP入口粉塵濃度，進而影響靜電集塵器效率。故為使基準線與驗收測試具有可比對性，在兩次測

試時，所使用燃料需使用相同或相近之燃料，使鍋爐負載量或發電量控制在 $\pm 5\%$ 以降低差異性。工程後於ESP出口量測粒狀物排放結果如表1所列，除六號機當時配煤品質較差，雖改善成效達43%，出口排放控制在 11 mg/Nm^3 以下，其餘機組均成功將ESP平均出口排放皆可降至 10 mg/Nm^3 以下，達到個位數排放的目標，已達成與AQCS相近之程度。

民國108年12月臺中電廠遭臺中市環保局開罰，理由是生煤使用量超過核定全年許可量，雖後經環保署認定裁處無效，但減煤已然成為未來不可避免之趨勢，臺中電廠肩負維持基載發電量之重責大任，若因此影響發電量將後患無窮，故當下權宜之計為調整配煤提高熱值較高的澳洲煤比例，從原先兩澳洲煤配三印尼煤的比例調整為三澳洲煤配兩印尼煤，由於澳洲煤雖熱值高但灰分也相對較高，連帶會增

表1 臺中五至八號機第一階段改善成果

中五機	機組負載(MW)	煤種灰份(%)	煤種硫份(%)	粒狀物排放(mg/Nm^3)
改善前	549.2	7.44	0.406	11
改善後	547.5	7.05	0.442	9.77

中六機	機組負載(MW)	煤種灰份(%)	煤種硫份(%)	粒狀物排放(mg/Nm^3)
改善前	550	8.56	0.65	19.38
改善後	550	9.8	0.59	10.98

中七機	機組負載(MW)	煤種灰份(%)	煤種硫份(%)	粒狀物排放(mg/Nm^3)
改善前	548.1	8.36	0.46	10.4
改善後	551.4	8.9	0.51	9.28

中八機	機組負載(MW)	煤種灰份(%)	煤種硫份(%)	粒狀物排放(mg/Nm^3)
改善前	508.5	7.98	0.502	10.86
改善後	509.7	8.42	0.456	9.55

加粒狀污染物的排放濃度。由民國109年在八號機ESP出口採樣的測試結果也可發現，調整配煤比例後從原先改善後的個位數排放增加至 11.56 mg/Nm^3 ，為兼顧減煤政策及環保排放兩大需求，臺中電廠規劃第二階段改善工程，以八號機作為先期測試機組，沿用先前改善已驗證過的可靠技術，更換第三、四排的傳統鋸齒型極線為硬管式極線及將三、四排的傳統變壓器升級為三相高頻變壓器。

臺中電廠自主改善計畫第二階段，以八號機作為示範機組已順利於民國109年完成，兩階段驗收時的粒狀物測試結果比較如表2所列，在配煤比例改變導致入口粉塵量增加的情況下，成功再次將ESP平均出口排放降至 10 mg/Nm^3 以下，達到個位數排放的目標。

3.2 協和電廠ESP改善計畫與成果

協和火力發電廠位於基隆市，建置有4部全燃重油機組，每部機組之裝置容量為50萬瓩，合計共200萬瓩。其中三號機、四號機自八零年代開始運轉以來已近30年，ESP內部機械件可靠度及集塵效率均已不如當時設計時的狀態，且3、40年前的原始設計與現今需求已有相當落差急需改善。協和電廠在民國105年即開始規劃分階段機械及電氣更新工程。

規劃當時考量到一、二號機即將除役(兩部機組已於民國108年底除役)，各選擇內部機械狀況最不理想的兩區進行更新，而三、四號機

亦預期僅再運轉8至10年，因此第一階段的機械更新皆是使用原始設計的極板極線形式做更新，實際改善工程之範圍與順序如表3。更新後重新調整極板極線至適合間距，降低火花、電弧的發生機率，同時藉由妥善的施工安裝提升機械可靠度，避免ESP臨時跳機而停止運轉的狀況。第二階段則是規劃將傳統變壓器全更新為高頻變壓器，利用高頻變壓器可有效幫助粉塵收集的特性，讓ESP出口排放粉塵濃度降至 10 mg/Nm^3 以下。另外值得一提的是協和電廠特地在這次改善工程中針對 $\text{PM}_{2.5}$ 的改善進行評估，在改善前的基準點測試就有特別測量 $\text{PM}_{2.5}$ 的粉塵濃度，而改善後的結果也顯示此次工程的確能有效降低 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放。這是臺灣電廠的首次創舉，也將為未來其他改善案樹立一個典範。

協三、四機於高頻變壓器改善前，已藉助於機械更新將效率重新回復至原始設計值。而改善最終目標則是經過電源系統更新，改善後三、四號機靜電集塵器出口側之總體粒狀物排放須降低至 10 mg/Nm^3 以下，另外，預期內含之 $\text{PM}_{2.5}$ 亦隨總體粒狀物之下降而降低。如前述，為比對此案之改善效率，於改善前後必須進行基準線與驗收測試，用以評估改善之效果。在兩次測試時所使用燃料需使用相同或相近之燃料，並使鍋爐負載量或負載控制在 $\pm 5\%$ 以降低差異性，才能客觀比較兩次測試結果。改善前後所記錄以及測試之數據羅列於表4~表

表2 臺中八號機第二階段改善成果

施工日期 (民國年)	燃煤配比	粒狀物排放(mg/Nm^3)		改善成效
		改善前	改善後	
107年	2澳 3印	10.86	9.55	12%
109年	3澳 2印	11.56	9.47	18%

表3 協和電廠各機組大修改善順序一覽表

內部機械件更新

施工工期(民國年)	停機機組	改善區室
105.02~105.04	協三機 協四機	HQA10、20 HQB10、20 HQA10、20
105.12~106.01	協四機	HQB20、30
106.02~106.03	協二機	HQA10、HQB10
106.03~106.04	協一機	HQA20、HQB20
107.02~107.03	協三機	HQA30、HQB30
107.12~108.01	協四機	HQA30、HQB10

高頻變壓器更新

施工工期(民國年)	停機機組	改善區室
107.02~107.03	協三機	HQA全3區 HQB全3區
107.12~108.01	協四機	HQA全3區 HQB全3區

表4 三號機靜電集塵器出口側之排放測試結果

基準線測試(第二階段改善前)

機組負載：501 MW

O ₂ 參考標準6%	排放實測值 (mg/Nm ³)	排放校正值 (mg/Nm ³)	空氣污染物排放量 (kg/hr)
總粒狀物濃度	33	29	47.1
PM _{2.5} 濃度	8.04	7	11.26

表5 三號機靜電集塵器出口側之排放測試結果

民國107年4月驗收測試(第二階段改善後)

機組負載：500 MW

O ₂ 參考標準6%	排放實測值 (mg/Nm ³)	排放校正值 (mg/Nm ³)	空氣污染物排放量 (kg/hr)
總粒狀物濃度	8.2	8	9.82
PM _{2.5} 濃度	1.8	2	3.48

表6 四號機靜電集塵器出口側之排放測試結果

基準線測試：(第二階段改善前)
 總粒狀物濃度測試時機組負載：443 MW
 PM_{2.5}濃度測試機組負載：451 MW

O ₂ 參考標準6%	排放實測值 (mg/Nm ³)	排放校正值 (mg/Nm ³)	空氣污染物排放量 (kg/hr)
總粒狀物濃度	36	33	49.97
PM _{2.5} 濃度	5.29	5	5.33

表7 四號機靜電集塵器出口側之排放測試結果

民國108年4月驗收測試(第二階段改善後)
 機組負載：440 MW

O ₂ 參考標準6%	排放實測值 (mg/Nm ³)	排放校正值 (mg/Nm ³)	空氣污染物排放量 (kg/hr)
總粒狀物濃度	5.4	5	6.11
PM _{2.5} 濃度	2.45	2	2.93

表8 三、四號機第二階段改善前後排放比較

		改善前	改善後	濃度削減率
總體粒狀物濃度 (mg/Nm ³)	三號機	29	8	55.6%
	四號機	33	5	75%
PM _{2.5} 濃度 (mg/Nm ³)	三號機	7	2	71.4%
	四號機	5	2	60%

8，三、四號機改善前後之負載偏差均在容許範圍，所以可視為定值；且協和電廠所使用之燃料皆為六號重油，故燃料部分亦可視為定值。因此，根據這兩次測試的先決條件皆可視為定值的狀況下，雖然兩次的測試時間不同，但在主要變因皆控制在趨於一致的狀況下，代表排放之結果是具有可比對性。改善成果則依據環保署規範之粒狀污染物採樣及其濃度之測定方法(NIEA A101.75C)、排放管道中細懸浮微粒檢測方法(NIEA A212.10B)，量測ESP出口排放之

總粒狀物濃度(mg/Nm³)以及FPM PM_{2.5}濃度(mg/Nm³)。

改善結果分析：

表4、5為改善前後的煙囪總粒狀物、PM_{2.5}排放濃度比較(O₂校正後數值)，其中四號機改善前因一室異常無法收塵導致粒狀物排放偏高，若以損失一室減少整體六分之一效率來估算，運轉正常時實際削減率應亦至少可達五成以上。

協和電廠ESP出口後端即接續煙囪，因此

ESP的排放直接影響了煙囪的排放。三、四號機之靜電集塵器經由內部機械更新及升級電源系統後，對後端煙囪排放的總粒狀物濃度而言，其削減率至少可達五成以上，且該削減率不僅對於 PM_{10} 或粒徑更大的粒狀物有效果，即使是 $PM_{2.5}$ 這類的極微小粉塵，亦具有相同效果。檢測結果顯示針對 $PM_{2.5}$ 的排放亦可達至少六成的削減率。若根據實際發電量計算實際粒狀物排放削減量，由表4可得知三號機改善前負載為501 MW時，粒狀物排放為47.1 kg/hr，排放量為0.094 kg/MWh。由表5可得知三號機改善後負載為500 MW時，粒狀物排放為9.82 kg/hr，排放量為0.0196 kg/MWh。若以三號機107年毛發電量1,206,444,000度(台灣電力公司，民國108年)(等於1,206,444 MWh)做計算，則總粒狀物排放改善後減少了89.7公噸/年。若以4號機108年毛發電量1,263,681,000度(台灣電力公司，民國109年)(等於1,263,681 MWh)來看，則總粒狀物排放減少121公噸/年。

4. 結 論

老舊機組ESP可藉由更換為三相高頻變壓整流器以及硬管式極線來大幅提升集塵效率，而後續則仍需搭配日常操作調校及大修維護才能維持ESP高效率運轉。通常可透過以下幾種方式：一、在機組運轉期間，微調ESP運轉的二次側電壓、電流、火花值設定，使ESP輸出功率最大化。在灰電阻或煤炭灰份變動大時亦可調整敲擊行程，避免敲擊行程過短產生再揚塵，亦或敲擊行程過長而產生極板極線積灰，抑制運轉電流電壓。二、大修期間進行詳盡的ESP檢驗及維護，殼體或煙道的鏽蝕破洞、灰斗或懸吊系統積灰皆可能導致再揚塵而增加ESP粒狀物排放。須確保極板極線間距，避免運轉中過多火花，敲擊系統若失效亦將導致極

板極線積灰，需在大修期間內盡修復。

本研究旨在分享針對即將除役的老舊發電機組，或是規劃投入巨額改善空污排放之機組，由於其運轉一天便會污染環境一天，老舊靜電除塵器做為主要集塵設備，並且提升集塵效率之方式已於國內外實例驗證確實可靠且有效，施工天數相對較短，針對此單一設備進行效率提升，是在短期內能有立竿見影成效的最佳手段，盡力降低轉嫁給民眾的外部成本，也使民眾能擁有更乾淨的天空。期望本改善案例也能提供給諸多私人企業小型燃煤汽電共生鍋爐做為改善粒狀物排放的參考。

參考文獻

- 台灣電力公司，民國108年。107年電業年報。
- 台灣電力公司，民國109年。108年電業年報。
- Chambers, Mick and Gary J. Grieco, 2001. Customized Rigid Discharge Electrodes Show Superior Performance on Utility Fly Ash Applications, 8th International Conference on Electrostatic Precipitation (ICESP), USA.
- Chambers, Mick, James R. Chaney and Gary J. Grieco, 2009. 21st Century ESP Design Synergism of Old and New Concepts, Southern Environmental Inc., FL, USA.
- Mischkulnig, Gustl and Porfirio Bento, 2004. Enhanced Corona Discharge Using Innovative Rigid Discharge Electrodes (RDE), 9th International Conference on Electrostatic Precipitation (ICESP), South Africa.
- NWL, 2017. DSP PowerPlus Series 7 Product Manual.
- NWL, 2019. Pacific, Power Plant Projects http://nwlpacific.co.kr/?page_id=2887.

Parker, K. R., 1997. Applied Electrostatic Precipitation, Blackie Academic & Professional, London, UK.

Upgrading ESP Efficiency to Reach Single Digit Particulate Emission

Tung-Sheng Tsai¹ Jung-Pin Hsu² Wen-Hsin Hsu^{3*}

ABSTRACT

People's growing concern of air quality has led coal-fired power plants in Taiwan to strive for lower air pollutant emission, in addition to comply with stringent air pollution regulation. For example, Taichung Power Plant, with 10 units totaling up to 5,500MW capacity, has set forth to improve the Air Quality Control System (AQCS). The plan involves a wide scope from de-NO_x, de-SO_x, to dedusting related systems and demands astronomical investment, therefore, taking as long as up to 2 to 3 years to complete feasibility study, budget application, and bidding processes. This study introduces a relatively small-scale and economical strategy, focusing on improving the particle emission by upgrading electrostatic precipitator (ESP) with 1. High frequency transformer and rectifier (HFTR) and 2. Rigid discharge electrode (RDE). It requires smaller investment, shorter installation time and provides instant improvement, which is recommended for large units undergoing the long process of AQCS plan, or for aging units to be decommissioned in the upcoming years with few disposable fund for equipment upgrade. 2 case studies were presented in this study. Unit 3 and 4 in Hsieh-Ho Power Plant underwent the upgrade of HFTR in all ESP fields. Its particle emission at ESP outlet was reduced to below 10 mg/Nm³, while PM_{2.5} was measured 60% less than before. Taichung Power Plant executed ESP upgrade in 1st and 2nd rows of ESP fields with RDE and HFTR. Its emission also achieved below 10 mg/Nm³ at ESP outlet.

Keywords: Electrostatic Precipitator, PM_{2.5}, Particle emission, High Frequency Transformer and Rectifier.

¹ Vice President, Tai & Chyun Associates Industries, Inc.

² Senior System/Process Engineer, Tai & Chyun Associates Industries, Inc.

³ Project Coordinator, Tai & Chyun Associates Industries, Inc.

* Corresponding Author, Phone: +886-2-81783378, E-mail: wendy.hsu@taichyun.com.tw

Received Date: September 27, 2021

Revised Date: March 21, 2022

Accepted Date: April 19, 2022