

# 解析同步發電機並聯條件及案例研討

台電綜合研究所 鄭強  
石門電廠 李重億  
台電綜合研究所 范振理  
國立台灣科技大學 蕭弘清

## 摘要

過去發電機以手動方式進行整步，而同步指示燈為簡單易行的整步技術，同步燈係以交錯方式，跨接於啟斷中的斷路器兩側，藉由同步燈明滅順序與速度，了解機組與系統間的電壓、頻率差；今日機組併入系統之整步程序，多以藉由電力電子控制電路比較其電壓輸入訊號，執行機組必要的整步控制。機組整步不良可令其於異相位情況下併入系統，導致電機產生過度之電磁機械力矩，嚴重時，可引起電機定子線圈過熱裝置鬆弛、轉子轉軸等元件損壞。本文以依實際之發電機整步檢測案例，依據整步要求，分析檢討整步效能，及改善對策。

關鍵詞：整步、發電機、比壓器、並聯、效率。

## 一、前言

現代之發電機同步並聯電控裝置，依系統側、機組側三相電壓輸入訊號，控制機組端電壓、轉速接近系統運轉狀態，並依機組與系統間的頻率差及其相位角度變化速率，決定機組併入系統時機。東部 B 水力發電廠於試運期間，在機組整步與同步並聯之檢測項目中，觀察到系統側 PT-3 二次側之線電壓保持著對稱與平衡狀態，而相對地三相電壓呈現相角偏移及不平衡現象，另於機組側 PT-1、PT-2 之相電壓、線電壓兩者均維持三相對稱與平衡關係；系統側相電壓不平衡之異常情況，影響機組整步效能，亟需深入檢討同步訊號失真肇因及改善整步與並聯時機之解決方案。

## 二、系統設計與結構

B 電廠依 a-b-c 系統旋轉相序作為發

電機組、主變壓器之設計基礎，主變壓器依 Ynd1 方式結線，主變壓器高壓側電壓超前低壓電壓  $30^\circ$ ，而機組與系統並聯之斷路器位於主變壓器 13.2 kV 低壓側，因而可簡化應用比壓器、輔助比壓器補償主變壓器相角位移之複雜結線之相位補償結構。

B 電廠之系統單線圖，如圖 1 所示；系統與機組架構檢述如下：(1)161 kV 系統電壓，經 Ynd1 主變壓器降壓至 13.2 kV 低壓側，經相間

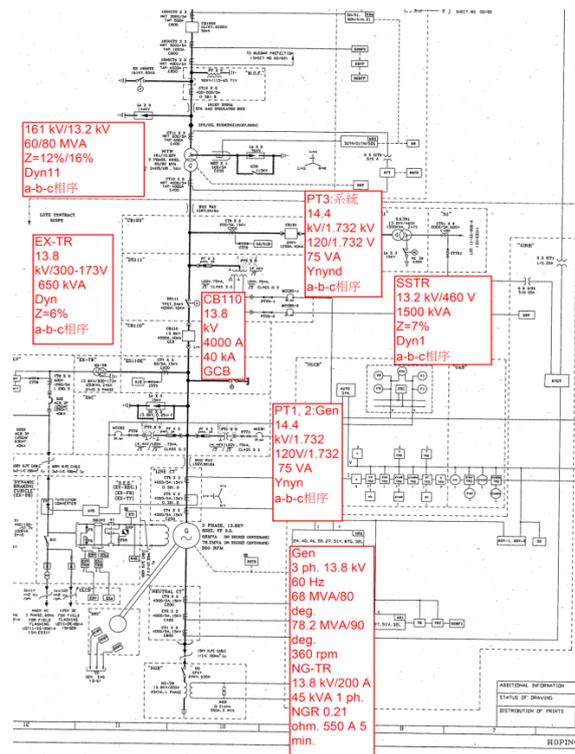


圖 1 B 電廠機組單線圖

絕緣匯流排(IPBD)連接至 110 斷路器系統側；(2)機組電樞端亦利用 IPBD 連接至 110 斷路器機組側；(3)三組比壓器屬 Yynyn 接線，系統側比壓器為 PT3，機組側比壓器分別為 PT2、PT1；(4)PT3、PT1 之 Vbn

電壓訊號輸入至同步檢定裝置，依機組與系統之電壓、頻率差進行整步，於兩者相角接近同相位時機，投入斷路器，完成機組與系統之並聯程序。

### 三、發電機整步標準與技術

機組首次併入系統前，需特別予以確認旋轉相序一致。機組併入系統前，調整電機之電樞電壓、頻率、確認相序之控制程序，稱為整步。在整步過程中，並聯裝置依橫跨於斷路器兩側之系統電壓(Vrunning)、發電機電壓(Vincoming)對時間變化關係，及其電壓包絡線的振幅、相序、相位、頻率差，控制機組之整步必要條件。

當機組與系統間電壓相位趨近零度時，完成斷路器投入，係機組整步並聯最佳的操作狀態；其次視機組整步頻率，要求提前於同相位電氣角度 $\pm 10^\circ$ 範圍內，併入系統，係整步之容許極限值。整步條件中，機組轉速稍高系統較佳，可依同步儀(synchroscope)指針以順時針方向旋轉及其約需 15 秒鐘以上轉動一圈，易及頻率差 $< 0.067 \text{ Hz}$  為佳。在同步前，機組之電樞電壓調整在 0~5%範圍中[1, 2]。機組整步相關限制值，整理如表 1。

機組於電壓稍高於系統之整步條件下，發電機可於(1)轉速稍高、提前角度併入系統，(2)轉速稍高、同相位併入系統，(3)轉速稍高、延遲角度併入系統，(4)轉速稍低、提前角度併入系統，(2)轉速稍低、同相位併入系統，(3)轉速稍低、延遲角度併入系統等 6 種運轉狀態。其中機組提供系統虛功率是其整步之必要條件，而機組於併入系統瞬間，機組提供實功率或是自系統吸收實功率，是由機組轉速高低及提前或延遲角度併入系統之條件所決定。上述現象可依機組整步併入系統量測值，經分析演算予以證實。

表 1 發電機整步限制條件

斷路器閉合角度	$\pm 10^\circ$
機組電樞電壓與系統電壓差	0~+5%
機組與系統之頻率差	$\pm 0.067 \text{ Hz}$

發電機之性能在過電流及機械應力之設計考慮因素上，並未涵蓋整步不良的異常狀態，因而應用自動整步或同步監測方案，有助於控制機組的整步條件，其效能較人工整步並聯為優。若機組整步條件，可滿足上述限制值，有助於保障機組的運轉安全。若超出上述整步限制範圍而併入系統，稱之為“整步不良(faulty synchronization)”。整步不良可導致強烈的同步化短時間電流以及暫態轉矩，並可能導致機組機械結構故障。

若系統屬於低電抗之無限匯流排，機組整步不良併入系統於  $180^\circ$  或  $120^\circ$  異相位情況下，可能導致部分或全部定子、轉子線圈損壞，損壞情況嚴重時，需以重繞線圈或是需要更換轉子方式修復。其次，當機組跳脫於整步不良情況下，其電機設計係以轉動慣量將機組減速至停機狀態。機組整步不良停機後，需針對定子線圈遮緊裝置、耦合螺栓、轉軸連接器等元件執行相關檢查，並依損壞情況進行修復評估作業。自動並聯裝置之電壓、轉速調整、對路器投入角度等設定值，可參考 IEEE 標準之整步限制條件，提供保障機組運轉安全的重要資訊與策略。

### 四、機組整步電量分析

在整步程序中，因待並聯機與系統間的頻率差不為零，其間的電壓差幅值及相位角度變化量，可以電壓包絡線表示；例如待並聯機與系統電壓在同相位(in-phase)時間點上，此一包絡線電壓為零；反之，待並聯機與系統電壓相位偏移  $180^\circ$ (out-of-phase)，可產生兩倍幅值之電壓包絡線；為準確的在十二點鐘位置關閉開關完成並聯手續，必須考慮斷路器投入機構的動作延時特性，在適當的提前角度操作斷路器，使得斷路器在閉合的瞬間，機組端電壓與系統電壓無相位差的最佳情況下，完成整步並聯程序。

#### 1. 電量計算之應用

機組整步並聯電量分析是以三相電壓、電流量測值為基底，可依分析項目分別計算線、相電壓、零相序電壓、電壓包

絡線瞬時值、瞬時功率、整步頻率、斷路器投入角度等數值。電壓包絡線分析結果，亦可與三暗法、兩明一暗法同步燈之應用法則一致[3]。

以交流電壓量測值為基底，計算線電壓、相電壓、整步之電壓包絡線、機組併入系統相位角度、瞬時功率、平均功率、電容電壓等關係式說明如下：

#### (1) 交流電訊號

電壓之時域、頻域、電流、頻率、週期、相位角度、瞬時功率等關係，表示如下：

$$v_{an}(t) = A_a \cos(\omega t - \phi_a) \quad (1)$$

$$V(j\omega) = A e^{j\phi} = A \angle \theta^\circ \quad (2)$$

$$i_a(t) = A_a' \cos(\omega t - \phi_a') \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{T} (\text{cycle/sec, Hz}) \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f (\text{rad/sec}) \quad (5)$$

$$\phi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} (\text{rad}) = 360^\circ \frac{\Delta t}{T} (\text{deg}) \quad (6)$$

待並聯機的整步頻率稍高於系統頻率，機組併入系統瞬間為輸出功率的發電機狀態；反之在機組頻率稍低時，是以輸入功率的電動機狀態併入系統，在此情況下，對系統衝擊較高；瞬時功率及平均功率，計算公式如下：

$$p_a(t) = v_{an}(t) i_a(t) \quad (7)$$

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (8)$$

同步機可由轉矩方程式觀察響應狀態，電機之電磁轉矩與每極的合成氣隙磁通 $\Phi_R$ 、直流磁場繞組的磁動勢 $F_f$ 、及兩磁軸之夾角 $\delta_{Rf}$ 決定；同步機之兩磁軸夾角 $\delta_{Rf}$ ，由轉矩為正或為負，決定電機為發電機或電動機響應。

$$T = \frac{\pi}{2} \left( \frac{\text{極數}}{2} \right) \Phi_R F_f \sin \delta_{Rf} \quad (9)$$

由機組與系統三相電壓合成之電壓包絡線，可依相別對應連接或交錯連接方式，獲得三暗整步法或兩明一暗整步法之電壓包絡線。兩明一暗整步法三相包絡線

依序到達峰值之相序，由 $f_2-f_1$ 之符號決定；當 $f_2-f_1$ 為正時，表示待並聯機組頻率稍高，包絡線依序到達峰值順序為 $e_a-e_c-e_b$ ；當 $f_2-f_1$ 為負時，表示待並聯機組頻率稍低於系統，包絡線依序到達峰值順序為 $e_a-e_b-e_c$ ；當 $b$ 相包絡線電壓進入零點時，為機組最佳的同步並聯時機，故稱之為兩明一暗整步法。電壓包絡線方程式，表示如下：

$$\begin{aligned} v_{a_{envelope}} &= \sqrt{2}V \sin[2\pi(f_2 - f_1)t] \\ v_{b_{envelope}} &= \sqrt{2}V \sin[2\pi(f_2 - f_1)t + 120^\circ] \\ v_{c_{envelope}} &= \sqrt{2}V \sin[2\pi(f_2 - f_1)t - 120^\circ] \end{aligned} \quad (10)$$

計算斷路器提前投入角度，係為掌握機組在同相位時機併入系統，計算公式如下：

$$\theta = 360^\circ \times \Delta f \times t \quad (11)$$

式中

$$\begin{aligned} \theta &= \text{斷路器提前投入角度} \\ \Delta f &= \text{機組與系統間頻率差} \\ t &= \text{斷路器投入操作時間} \end{aligned}$$

機組併入系統時，在電力的、機械的負載突然改變情況下，磁極角度將由一穩態移轉於另一穩態。電機轉子及其聯結的轉動慣量，使得此種運轉狀態的轉換作用不能突然完成，因而於電機的機械輸入功率，在短時間內維持一定值，於機械輸入大時，電機變加速；電功率輸出增加時，電機速度減緩；故電機於狀態轉換期間可發展出一電力暫態振盪；而同步化功率( $P_s$ )，是使旋轉磁極拖回至同步位置的一種作用力矩，故於磁極角度超過 $90^\circ$ 時， $P_s$ 改變為負值，可產生一使磁極推向失步之力矩，成為不穩定狀態，同步化功率瞬時方程式如下：

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{dP}{d\theta} \times \Delta\theta = P_s \times \Delta\theta \\ P_s &= kP_0 \cos\theta = \frac{E_i}{E_{s0} + E_{q0}} P_0 \cos\theta \end{aligned} \quad (12)$$

式中

$$\begin{aligned} E_s &= \text{漏電抗電壓} \\ E_q &= \text{橫向磁束電壓} \\ E_i &= E_s、E_q \text{之和} \\ P_0 &= \text{額定功率} \end{aligned}$$

## 2.機組解聯後系統側 PT1 電量分析

本技術服務於 B 電廠機組廠房，擷取 PT3、PT1 及 CT6 之三相電壓、電流訊號；系統側及機組側運轉中、解聯之三相電壓量測值，如表 2~3 所示；機組運轉中、解聯及並聯之三相電壓、電流波形，如圖 2(a) 所示；圖中各通道之電量名稱如下： $V_{an\_gen}$ 、 $V_{bn\_gen}$ 、 $V_{cn\_gen}$ 、 $I_{a\_gen}$ 、 $I_{b\_gen}$ 、 $I_{c\_gen}$ 、 $V_{an\_sys}$ 、 $V_{bn\_sys}$ 、 $V_{cn\_sys}$ 、 $V_{ab\_sys}$ 、 $V_{bc\_sys}$ 、 $V_{ca\_sys}$ ；機組運轉中、解聯及同步並聯量測值計算而得之電量波形，如圖 2(b) 所示；圖中各記錄通道說明如下：Ch1 系統側相電壓量測值之三相電壓和計算波形 ( $v_{0\_n\_sys}$ )、ch2 系統側線電壓之三相電壓和計算波形 ( $v_{0\_LL\_sys}$ )、ch3 系統側相電壓計算值之三相電壓和計算波形 ( $v_{0\_abcn\_sys}$ )、ch4 發電機相電壓量測值之三相電壓和計算波形 ( $v_{0\_n\_gen}$ )、以發電機線電壓計算值為基底之三相電壓和計算波形 ( $v_{0\_LL\_gen}$ ) [4]。

圖 2(b) 波形顯示機組於解聯運轉模式中，系統側三相相電壓之計算合成波形不為零，而線電壓計算值近似零，其相電壓、線電壓波形，如圖 3 所示。

機組解聯後，PT-3 三相相電壓時間域量測值為： $V_{an}$  7.190 kV、 $V_{bn}$  8.635 kV、 $V_{cn}$  7.117 kV，幅值變化 0.944、1.129、0.929 標么；經波形比對結果顯示：相電壓幅值、相位發生偏移，而線電壓幅值僅輕微波動，相位未變動；經分析其相電壓幅值、角度變動，與主變壓器低壓側非接地系統，及 IPBD 對地電容不平衡有關，因而三相之電容電壓呈現出電壓幅值、相角不平衡特徵。此一現象將影響機組整步程

表 2 機組解聯前、解聯 PT3 之系統電壓值

	$V_{an} / V_{ab}$	$V_{bn} / V_{bc}$	$V_{cn} / V_{ca}$
解聯前	7.615 kV	7.646 kV	7.659 kV
	13.184 kV	13.263 kV	13.243 kV
解聯中	7.190 kV	8.635 kV	7.117 kV
	13.106 kV	13.200 kV	13.194 kV

表 3 機組解聯前、解聯 PT1 之系統電壓值

	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$
解聯前	7.615 kV	7.647 kV	7.663 kV
解聯中	7.615 kV	7.647 kV	7.663 kV

序之電壓調整、掌握同相位時機之控制效能，亟需檢討改善方案，恢復自動並聯裝置之既有性能 [5, 6]。

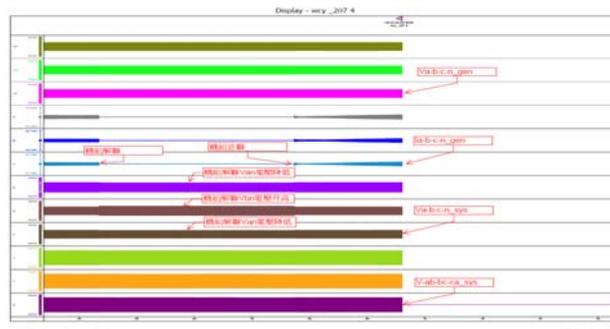


圖 2(a) 機組-系統三相電壓、電流量測波形



圖 2(b) 機組、系統三相電壓計算之波形

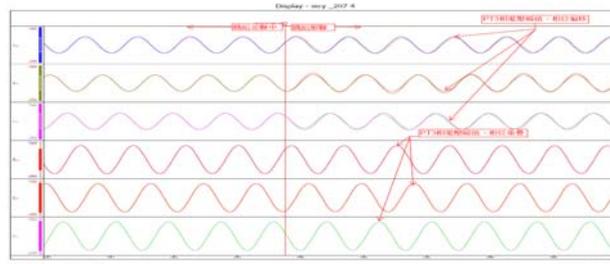


圖 3 機組解聯後，系統側 PT3 之相電壓、線電壓波形

## 3.機組整步之電量分析

早期機組之整步條件，藉指示燈以三暗法或兩明一暗法，顯示相序、頻率、電壓等整步條件，本文首先採用三暗法，以相及線電壓包絡線計算波形，檢討整步條件。

在機組整步期間，電壓包絡線同時遞增或遞減，顯示機組與系統 a-b-c 相序相同，相電壓及線電壓包絡線波形，如圖 4 所示；(1)以相電壓組成之三相電壓包絡線，並未同時指示出機組與系統之同相位時機，a 相滯後 1.12 sec，b 相約略為同相位，c 相提前約 1.23 sec；(2)以線電壓計算之三相包絡線電壓波形，同時通過零點，清晰顯示出機組與系統間的同相位時機；PT-3 二次電壓幅值與相位發生偏移，係造

成相電壓包絡線失衡的主要因素，將嚴重影響自動並聯裝置、手動並聯之同步儀偵測同步點的準確性。

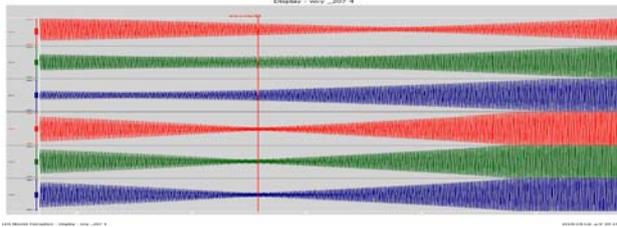


圖 4 機組整步之相電壓、線電壓包絡線波形

4.分析機組整步及併入系統狀態

機組整步時，電壓控制稍高於系統約 1.005 標么，機組併入系統前，系統頻率為 59.9978 Hz，機組頻率控制在 59.9476 Hz，頻率較系統略低 0.0502 Hz；解析在此狀態下的相電壓、線電壓包絡線變動情況，顯示機組進入同相位約可持續 150 ms，斷路器足以在此時間中完成投入操作，而自動同步檢定裝置輸出斷路器投入訊號延遲，導致機組延遲-1.9809°併入系統；機組整步、併入系統之運轉數值，如表 4 所示；機組整步、併入系統之相/線電壓包絡線波形，如圖 5 所示。

機組於電壓稍高、頻率稍低於系統情況下，併入系統瞬間，機組供應系統虛功率，而系統提供機組實功率，令機組加速至同步速度，機組慣性將產生同步化振盪功率。其次參考相電壓、線電壓繪製之包絡線，檢討機組整步之電壓控制顯示輔助比壓器適當改變電壓比例，惟無法補償其電壓相角偏移，因而影響自動並聯裝置確實掌握同步並聯時機，此一現象係非接地系統採用相電壓延伸之問題。

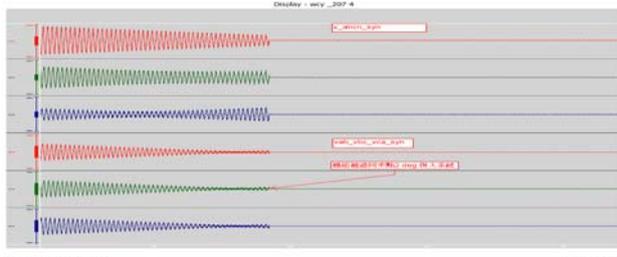


圖 5 機組併入系統之相電壓、線電壓包絡線波形

表 4 機組整步與併入系統數值

包絡線	同步角度(°)	Δt (ms)	頻率(Hz)
V <sub>an</sub>	未抵同步點		f <sub>sys</sub>
V <sub>bn</sub>	未抵同步點		59.9978
V <sub>cn</sub>	-7.2513	-401.306	f <sub>gen</sub>
V <sub>ab</sub>	-1.9809	-109.613	59.9476
V <sub>bc</sub>	-1.9809		Δf 0.0502
V <sub>ca</sub>	-1.9809		

5.機組併入系統瞬間電量分析

機組併入系統瞬間之同步化振盪電流，解析如下：a-b-c 三相電壓幅值，如表 5 所示；三相電流最大值或最小值為 46.133 A(0.014 p.u.)、40.933 A(0.0125 p.u.)、-54.667 A(0.0167 p.u.)，如表 5 所示；機組與系統並聯瞬間之電動機振盪功率，a-b-c 相分別為：-464.035 kva(0.012 p.u.)、-432.583 kva(0.011 p.u.)、-581.482 kva(0.015p.u.)， a-b-c 相之消耗電力為：-89.844 kW(2.30 m p.u.)、-128.265 kW(3.28 m p.u.)、-119.967 kW(3.06 m p.u.)，如表 6 所示。機組並聯之第 2 次振盪電量分析，如表 7~8 所示，三相電壓、電流波形，如圖 6 所示；

表 5 機組整步並聯 PT1、CT3 電量數值 (第 1 次振盪)

	V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>
Duration: 328.900 ms, Samples: 3290.			
RMS :	7.562 kV	7.594 kV	7.656 kV
	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>
RMS :	18.577 A	20.983 A	22.103 A
Max. :	46.133 A	40.933 A	25.733 A
Min. :	-21.200 A	-32.133 A	-54.667 A

表 6 機組整步並聯 PT1、CT3 之瞬時電量數值

	S <sub>a</sub> (kva)	S <sub>b</sub> (kva)	S <sub>c</sub> (kva)
Duration: 328.900 ms, Samples: 3290.			
Max. :	139.642	87.489	120.888
Min. :	-464.035	-432.583	-581.482

表 7 機組整步並聯 PT1、CT3 電量數值  
(第 2 次振盪)

	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$
Duration: 328.900 ms, Samples: 3290.			
RMS :	7.554 kV	7.622 kV	7.653 kV
	$I_a$	$I_b$	$I_c$
RMS :	17.036 A	13.246 A	12.062 A
Max. :	35.333 A	28.533 A	25.467 A
Min. :	-32.800 A	-25.733 A	-28.533 A

表 8 機組整步並聯 PT1、CT3 之瞬時  
電量數值

	$S_a$ (kva)	$S_b$ (kva)	$S_c$ (kva)
Duration: 328.900 ms, Samples: 3290.			
Max. :	342.301	251.140	264.119
Min. :	-90.867	-132.691	-150.136

同步化功率振盪波形，如圖 7 所示。機組併入系統，在 7.39964 秒時間，同步化電流、功率共交錯振盪 16 次，易及機組併入系統瞬間之功率為負值，電流經阻尼振盪衰減至零，瞬時功率轉換為正值；並依此規則交替循環，逐漸恢復至穩定狀態。

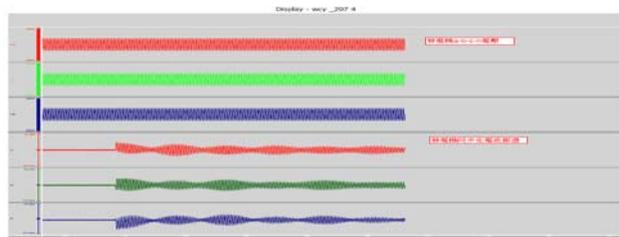
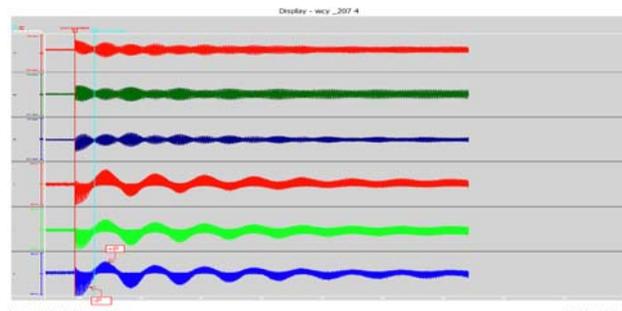
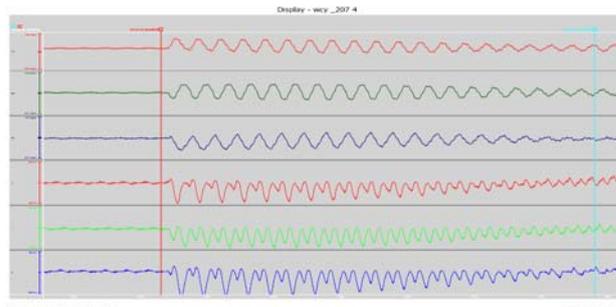


圖 6 機組整步-並聯之三相電壓、同步化電流波形



(a)



(b)

圖 7 機組整步-並聯之三相同步化電流、功率波形

## 五、改善建議

B 電廠之主變壓器屬 Ynd1 結線性質，系統 161 kV 經主變壓器降壓至 13.8 kV，主變壓器低壓側端子經 IPBD 連接至 110 斷路器系統側，發電機組應用 110 斷路器執行與系統並解聯操作。在機組與系統解聯情況下，於 13.8 kV 匯流排觀察之系統電壓，係經主變壓器轉換隔離為非接地系統。中性點接地之 PT3 並不會改變主變壓器 D 側之非接地系統特性，IPBD 對地分佈電容受到導體排列方式、相間及對地距離等參數影響其對地電容分佈不平衡，亦為相對地電壓不平衡之肇因。

機組解聯中，由 PT3 二次側相電壓幅值變化分別為 0.944、1.129、0.929 標么；依瞬時值之浮點計算其三相電壓和之幅值達 3.247 kV、0.425 p.u.，亦即此三相電壓相角偏移，而放大其零相序電值。在此情況下，應用輔助比壓器可改善 b 相電壓振幅，有助於改善機組整步之電壓調整效能；依據三暗法電壓包絡線之解析結果顯示：由相電壓和成之電壓包絡線，三相電壓包絡線並未同時到達最小值，因而無法令自動並聯裝置精準掌握整步之同相位時機，導致機組延遲 2° 併入系統。

機組在解聯前後，PT3 二次側線電壓瞬時值之和僅有 299.462 V、0.039 p.u.，顯示系統側之三相電壓平衡且對稱，因而比壓器之二次側線電壓可正確反應一次側電壓波形與相角，此觀點可藉三暗法電壓包絡線之解析結果，如圖 8 予以驗證；亦即由線電壓和成之三相電壓包絡線，顯示同時達到最大值及最小值，因而在自動並聯

裝置輸入訊號正確情況下，即可依預設值正確掌握同相位時機，將機組併入系統運轉。在改採線電壓作為自動並聯裝置之輸入訊號，需將輔助比壓器修訂為 1:1 匝比值。

發電機之電樞繞組中性點經電抗接地，屬接地系統，機組於併入系統及整步情況下，PT1 二次側之相電壓、線電壓訊號，均維持在對稱且平衡狀態。

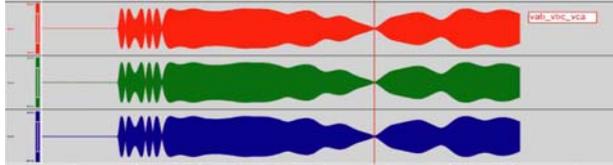


圖 8 三暗法之線電壓包絡線波形

## 六、結論

同步發電機整步與並聯之電量分析，可依機組與系統變聯於主變壓器高壓側或是低壓側決定其設計條件，機組若於主變壓器高壓側與系統並聯，需考慮變壓器 Dyn11 繞組結構之相角位移，因而並聯盤系統與機組側輸入電壓訊號，需應用 2 具以上之輔助比壓器補償主變壓器之相位移，因而在設計、現場組裝及校核作業上較為複雜。反之機組與系統並聯於主變壓器機組側，直接應用 Yyn0 之比壓器，即可將電壓訊號輸入自動並聯裝置，並不需要考慮主變壓器高低壓側相角位移的因素，可簡化比壓器二次電路及輔助比壓器之結線設計，但是於實際運轉案例中，顯示設計者並未考慮非接地系統之三相電壓性質，令同步裝置未能掌握同相位併入系統時機，影響機組同步化暫態響應及整步效能。

本文應用 IEEE 有關發電機之標準文獻臚列之基本要求與門檻條件，作為機組整步性能評估之依據。而系統側相電壓、線電壓、機組側相電壓及電流量測值，可式分析需求合成電壓包絡線，解析機組併入系統之相角及其對機組同步化瞬時功率的影響等資訊，確認整步不良之問題所在，提出採取線電壓訊號之系統具體改善對策，有效解決整步訊號失真之問題。

## 七、參考文獻

- [1] IEEE Std C50.12-2005, “IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above”.
- [2] IEEE Std C50.13-2005, “IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above”.
- [3] Bhag S. Guru (2001) Electric Machinery and Transformers(3th eds), Oxford, New York.
- [4] 鄭強，2012，TPRI G7.8 2102-0132 技術報告，台北。
- [5] IEEE Std 142™-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book).
- [6] IEEE Committee Report, “Potential Transformer Application on Unit Connected Generators,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 91, pp. 24–28, Jan./Feb. 1972.