

同步發電機並聯裝置

工程檢驗及應用分析

台電綜合研究所 鄭強

台灣科技大學電機工程系 蕭弘清

台電電力調度處 藍宏偉

摘要：發電機組的輸出電壓、頻率、相位及相序與電力系統一致時，是加入並聯運轉的必要條件。本文引用兩個工程實例分析同步發電機連接(Δ/Y)升壓變壓器，因變壓器及比壓器之電壓輸入相序與系統相序不同，造成自動並聯裝置同步儀指示值錯誤，影響發電機正確之並聯時機。應用量測及試驗技術進行各項檢驗工作，將發電機組安全正確地加入系統並聯運轉。

Abstract: The output voltage, frequency, phase and sequence of the generator are the major considerations before it connected to the power system. With two field tests as examples, this research discusses the wrong wiring and risks due to phase shift occurred during synchronous generator being connected to system via Δ/Y step-up transformer bank. It is recommended that examining and testing for synchronizing equipment should be executed before switching the relative circuit breaker on to connect the generator to power system and operating synchronously.

關鍵詞：包絡線，同步儀，並聯運轉，相序；envelope, synchronizer, parallels operation, phase sequence.

壹、前言

台灣地區每日約有 80 部各種型式及不同發電容量的發電機並聯於台電系統中運轉，系統中的核能與大型火力機組出力幾乎恆定，可維持與保有較佳的運轉效率，故可歸類於基載機組；其餘的中小型機組則視尖離峰負載曲線的變化狀態，適時於尖峰負載加入系統運轉發電，並於離峰負載時段與系統解聯停機。電力系統運轉控制係將系統電壓、電流及頻率維持在穩定的狀況下，換句話說，在任何時刻全系統之發電量均須與負載量維持平衡。因

此，電力系統中應用多部發電機並聯運轉可彈性機組調度(unit commitment)，以充分滿足尖離峰負載用電量之兩極化的情況。若以單一發電機自成獨立運轉系統的情況，則難以兼顧經濟調度、系統可靠度、穩定度與安全性等考慮因素；系統規劃多部發電機並聯運轉具有下述之優點：

1. 多部發電機比一部發電機更有能力供應大型負載用電。
2. 多部發電機並聯運轉可提高系統穩定度，當系統中任何一部發電機發生故障，不至影響全系統的電力供應。
3. 系統可允許一部或是多部發電機依據經濟調度原則啟動運轉或是停機。

4. 發電機組可依據月季負載需量排定適當之維護大修時程。
5. 若以多部容量較小的機組取代一部大型的機組，則可執行最佳化經濟調度之運轉控制。

三相電力系統之同步機若以原動機驅動，可將機械能轉換為電能，稱作交流發電機；反之以電能輸入時，轉換電能以產生機械之輸出功率，則稱為電動機。三相同步發電機基本結構，是由固定的三相電樞(Armature)繞組與轉動的轉子磁極所構成。轉子磁極和電樞繞組電流所產生的合成磁動勢，將使磁通穿過定子與轉子間的氣隙，使得電樞繞組產生一感應電壓，再使得定子和轉子之間發生電磁轉矩。以凸極同步機為例，定子與轉子結構是電機的主要部分，兩者都是由線圈及鐵磁材料所構成，定子亦稱電樞係由電樞繞組線圈所組成；轉子是同步機的另一部份，它裝置在轉軸上並在定子中旋轉，其中場繞組是由繞線構成，阻尼繞組係以短路銅棒穿過磁極面所構成與鼠籠式感應機的轉子結構類似，同步機安裝阻尼繞組的目的是在降

低同步機不穩定的震盪，電機機構示意圖與等效電路參考圖 1。

三相發電機在電樞繞組上產生感應電壓，其相序(phase rotation)係表示先後通過參考座標軸的先後順序，在此依慣例以反時針旋轉方向定義，若相序係以 a-b-c 相順序依次通過座標參考基準點，則稱為 a-b-c 相序；反之，稱為 a-c-b 相序；旋轉相序如圖 2 所示。台灣輸電系統的電壓相序是以 a-c-b 相序依次通過座標基準點，a-c-b 相序在電能傳輸與維持系統互聯的功能上，並無特殊的影響，但是需注意系統各個電壓階層間，相序定義必須一致，以維持系統同一電壓階層上的各個節點均保持同相位，同時在不同的電壓階層間亦維持相同的相角位移。三相系統的電壓相序與 Dy 及 Yd 接線之變壓器一、二次側間的相位移、旋轉電機的轉動方向、保護電驛、電控設備及計費電表的應用有關；本文針對 Dy 及 Yd 變壓器在不同的輸入相序感應輸出不同的相位移，對同步並聯電控裝置的影響進行探討與分析。

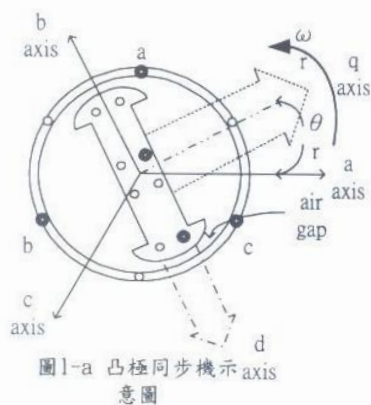


圖 1-a 凸極同步機示意圖

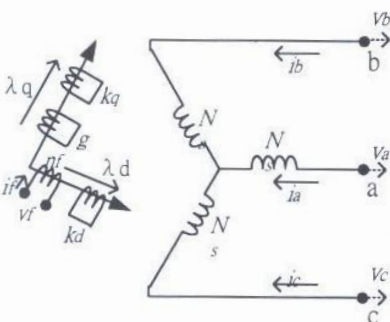


圖 1-b 凸極同步機定、轉子等效電路

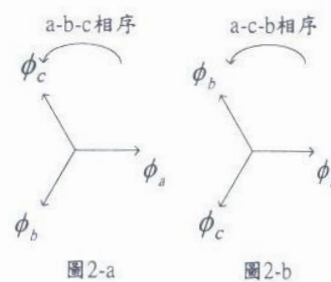


圖 2-a

圖 2-b

圖 2 · 旋轉相序

圖 1 · 凸極同步機定、轉子電路

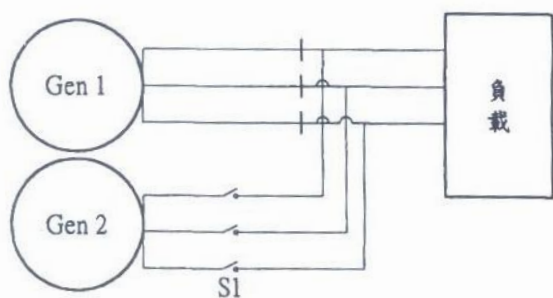


圖 3 · 發電機預備並聯至運轉中之系統

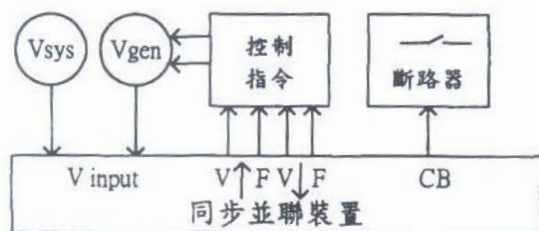


圖 4 · 發電機自動同步並聯裝置示意圖

貳、並聯條件 (The Conditions for Paralleling)

為簡化問題可將系統中運轉的機組等效成為一部發電機，稱之為 G_1 發電機 (Running System)， G_2 發電機準備於開關 S_1 閉合即加入系統運轉發電 (Oncoming Generator)，參考圖 3；為避免發電機發生嚴重損壞以及負載失去電源，則準確的三相電壓與相位是 S_1 在閉合之前的充分必要條件，若 S_1 關閉的瞬間存有電位差，則在開關閉合時，將產生過電流，過電流振幅的大小、持續時間與次暫態電感、暫態電感、穩態電感及暫態時間常數有關。因此，考慮兩機並聯之匹配四條件如下述：

1. 兩機的電壓均方根值必須相等。
2. 兩機必須具有相同的相序。
3. 兩機具有相同的相位。
4. 待並聯機連接至系統前，其頻率應稍高於系統頻率。

條件 1 說明待並聯發電機，在並聯前經由

激磁機調整磁場，使得電機輸出之端電壓振幅與系統電壓大小相等；若兩機輸出的電壓相等，同時兩機間的相角亦相等，此時兩機間將沒有電位差，則稱作滿足條件 3；條件 2 是確定兩機之各相電壓峰值以相同的順序產生，若是兩機相序不同，則三相中僅有一相屬於同相 (In phase)，其餘的兩相將互差相位 120° 稱為異相 (Out of phase)，若是機組在上述的情況中投入斷路器將兩機並聯運轉，則在斷路器投入瞬間，在兩機異相之電樞繞組間，將發生嚴重的過電流。其次，若兩機的轉速或是頻率不是非常的接近，則在並聯瞬間，將產生相當大的暫態電流，此一過電流必將持續相當的時間，直到發電機穩定的運轉於系統頻率為止。因此並待並聯發電機在滿足電壓相等的限制條件後，需適度的調整轉速，使得發電機之頻率極為接近系統頻率，此時待並聯機與系統間的相角增量差值的變化亦相當緩慢，此一相角增量值亦即相角差的變化，可以包絡線方程式或是紀錄圖形觀察之，在包絡線等於零的瞬間，就是兩機準確於同相位瞬間準確並聯的最佳時機，此時閉合 S_1 即可完成發電機的並聯加入運轉[1]。圖 4 係說明自動並聯設備的控制示意圖。

在此以 MATLAB 軟體模擬系統發電機之整步作業，模擬結果之系統電壓、發電機電壓及兩者之電壓波型及相位變化，如圖 5 所示；首先說明假設條件：設定系統電壓等於 1pu、頻率等於 60Hz，待並聯發電機之輸出端電壓等於系統電壓；其次，設定待並聯發電機頻率稍高於系統頻率為 60.5Hz (此一頻率差設定值，係為便於觀察及說明包絡線)。圖 5 顯示 V_1 及 V_2 電壓振幅大小相等，在時間軸上 0.096~0.104 秒位置，二者相角相差接近

180°，故 2pu 的電壓差達到週期中最大值；時間軸上靠近 0.2 秒的位置，顯示 V_2 以較快的速度電壓逐漸接近 V_1 ，兩者間電壓的相角差亦逐漸靠近同相位之 0°，此時二者間的電位差亦趨近零伏特；0.2 秒以後，二者的相差亦隨著時間的流動而開始另一週期的變化。

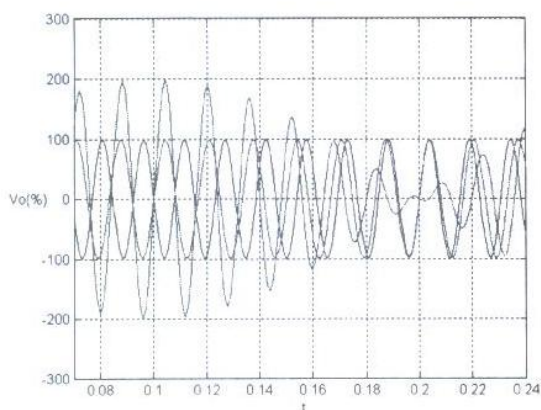


圖 5・模擬包絡線之波型－包絡線，
— V_1 ，— V_2

參、並聯同步化(Synchronizing)之程序

整步是同步發電機組加入系統並聯運轉的重要過程，發電機輸出之電壓、頻率、相位、相序與系統一致，稱之為同步並聯三條件。在此簡要說明並聯的操作程序：首先，利用電壓表量測系統電壓與機組之端電壓，以系統電壓為基準，調整場電流使得機組輸出端電壓等於系統電壓。其次，應用頻率計可調整機組轉速使得機組頻率稍高於系統頻率，可使得待並聯機在並聯時，輸出發電機功率；反之，頻率稍低的並聯情況，將類似感應機併入系統；圖 6 顯示並聯整步電壓與頻率之特性圖。相序檢測可應用靜態量測法或是動態觀察法等多種方式執行之，現場多應用相序指

示燈檢測待並聯發電機的相序與相位，這是一種簡單的規劃並不精密與準確。較佳的量測方法是使用同步儀(Synchroscope)，同步儀用來量測兩系統在同步(Inphase)間的相角差；同步儀外型如圖 7。同步儀的指針式指示在垂直方向之 12 點鐘位置▼記號上，表示兩系統間無相角差亦即在同相位置，相角差等於 0°；指針指示在 6 點鐘位置則表示不同相且相位相差 180°。同步儀的旋轉方向則視機組與系統間的轉速差而定，當機組的頻率高於系統頻率時，指針依順時針 FAST 方向旋轉；反之，同步儀指針則依反時針 SLOW 方向旋轉，指針之旋轉速度則與 $1/\Delta f$ 有關。當兩者輸入同步儀的頻率相當接近時，同步儀指示之角度變化亦趨於緩慢，當同步儀指針只在 12 點鐘位置時，表示待並聯機的電壓與系統相位相同，可以投入開關將機組加入至系統中運轉。

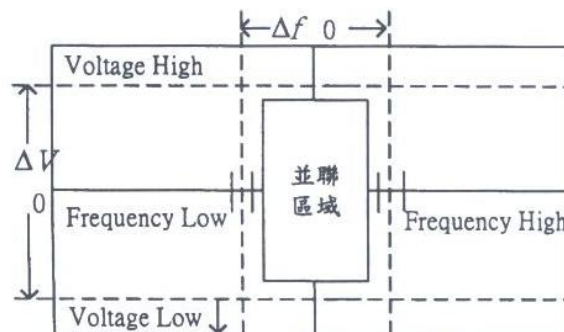


圖 6・同步並聯特性圖



圖 7・同步儀

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，機組正好在 12 點鐘位置與系統相位一致的情況下並聯，因此提前操作斷路器所需之角度計算如式 1。[2]

$$\theta = 360^\circ \times \Delta f \times t \quad \text{-----式 1}$$

θ ：斷路器提前投入角度

Δf ：待並聯機與系統間的頻率差

t ：斷路器投入所需的時間

同步儀上的 12 點鐘位置是發電機與系統之間同相位的參考點，並聯之同相位參考點亦須充分考慮與機組連接之昇壓變壓器(Δ/Y 結線)，在高低壓側產生 30° 的位移角度之影響，因此可在比壓器二次側增加一具 Y/Δ 結線之輔助比壓器，以補償主變壓氣高低壓側間 30° 的位移角度。本文將引述兩個工程實例，探討發電機組在與系統同步並聯時，影響同步儀指示 12 點鐘同步位置偏離至 2 點鐘位置之發生原因，以及量測試驗之驗證方法及改善之道。同步儀上的 12 點鐘位置是發電機與系統之間同相位的參考點，並聯之同相位參考點亦須充分考慮與機組連接之昇壓變壓器(Δ/Y 結線)，在高低壓側產生 30° 的位移角度之影響，因此可在比壓器二次側增加一具 Y/Δ 結線之輔助比壓器，以補償主變壓氣高低壓側間 30° 的位移角度。本文將引述兩個工程實例，探討發電機組在與系統同步並聯時，影響同步儀指示 12 點鐘同步位置偏離至 2 點鐘位置之發生原因，以及量測試驗之驗證方法及改善之道。

肆、三相變壓器繞組連接準則

三相交流發電機組通常包含同步發電機、昇壓變壓器(Δ/Y 之繞組接線)、斷路

器等三項主要的電力設備，並聯設備則包含並聯盤上的指示表計，如電壓計、頻率計、同步儀、相序指示燈、自動同步並聯檢定裝置(25)、儀器用之相位調整變壓器，以及控制磁場激磁、原動機之調速器等控制開關。

首先以(ANSI C57.12.70-1964(R-1971))標準敘述三相系統中變壓器繞組連接的準則，當應用三個相同的單相變壓器作三相連接，只有兩種可能的對稱且平衡接法， Y 和 Δ 接法，標準化的 $Y-\Delta$ 接法，是對稱且平衡的接線方法，所有高壓側物理量都會超前其所對應的低壓側物理量 30° ，即各相的標示方法是使高壓側 $a-b-c$ 相序量領先對應的低壓側 $a-b-c$ 相序量 30° 。對相同接線的三相變壓器，輸入 $a-c-b$ 相序的影響則剛好相反，即 HV 值落後 LV 值 30° 。若系統具有一致性的相序定義，則變壓器高低壓側間的相位角度亦屬一致。圖 8~9 分別說明 Dy1 與 Dy11、圖 10~11 係說明 Yd1 與 Yd11 之變壓器繞組之極性連接與相角位移的關係圖。[3] [4]

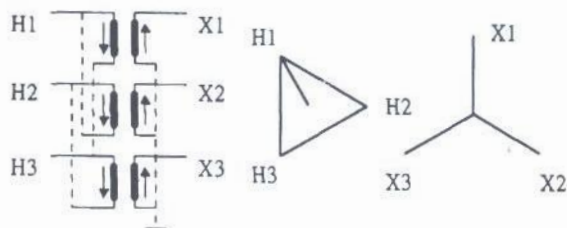


圖8-a 變壓器繞組接線

圖8-b 高低壓側相量圖

圖 8 · Dy1 變壓器繞組接線

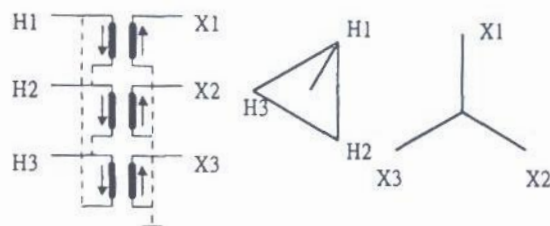


圖9-a 變壓器繞組接線

圖9-b 高低壓側相量圖

圖 9 · Dy11 變壓器繞組接線

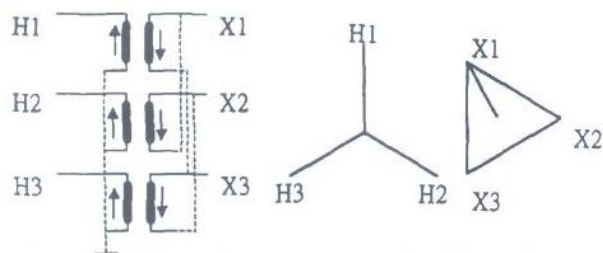


圖10-a 變壓器繞組接線

圖10-b 高低壓側相量圖

圖 10 · Yd 11 變壓器繞組接線

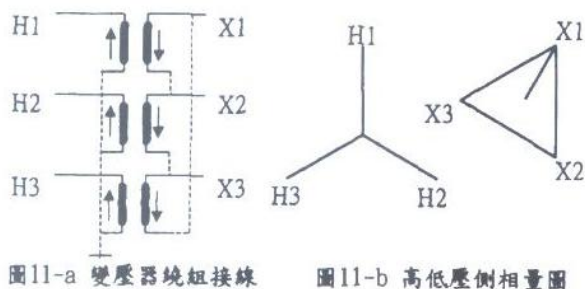


圖11-a 變壓器繞組接線

圖11-b 高低壓側相量圖

圖 11 · Yd 1 變壓器繞組接線

台電系統為使全系統可在任一輸配電系統中互聯運轉，亦依循國際慣例規定電力變壓器結線之標準相位移為『高壓側領先低壓側 30° 』。

伍、工程實例一(中部水力發電廠)

中部水力發電廠共有四部發電機組均是日本三菱公司製作，其規格為 13.8kV、50,000 kVA、0.9 P.F.、60 Hz、300 RPM；四台升壓變壓器規格均為 13.8 / 161 kV、57.5 MVA、Yd1 結線、日立公司製造。921『集集大震』導致#1、#2 主變壓器損壞而進行變壓器更新工程，新舊變壓器均依據電力系統設計原則，高壓側電壓相位領先低壓側 30° 製造，屬於 Yd1 結線。當谷關水力發電廠完成主變壓器更新工程後，順序執行加入系統前各項檢驗工作，進行至同步並聯檢定作業時，發現同步儀表之同步並聯點，由正常之 12 點鐘位置位移至 2 點鐘位置，換算出同步點相位偏

移 60° ，其發生原因有待檢驗釐清。以符合一般的操作慣例。

參考圖 12 所示，並聯盤控制迴路之輸入訊息包含系統側#1、#2 匯流排比壓器 161 kV / 115 V、Y Y 結線，輔助比壓器 Y d 結線，發電機側比壓器 13.8 kV / 115 V、V V 結線，盤面設計以發電機為基準參考點，發電機及系統側輸入盤面電壓設計為 Φ_A - Φ_B 相，且 Φ_B 為共同點。由於#4 機組並聯狀況良好，故同步儀故障的可能性極低；但在檢驗#1、#2 機組並聯相位時，同步儀指示同相位並聯點改變成 2 點鐘位置，而與正常慣例之 12 點鐘不合，研判此種反應現場之情況，其產生原因可能是：(1)比壓器極性錯誤；(2)進入並聯盤之接線錯誤；(3)Yd 結線變壓器輸入相序錯誤所致。現場執行故障確認與排除的檢測程序如表 1 所示，表 2-表 5 則為檢測紀錄。

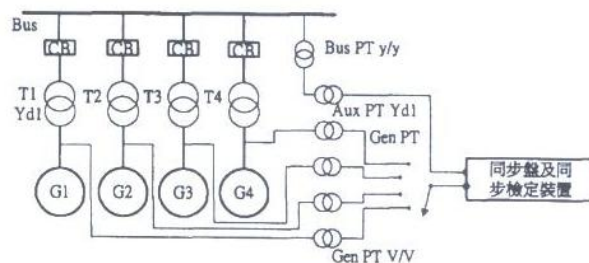


圖 12 · 發電機－變壓器－變比器系統單線圖

表 1 · 現場檢測程序

現場檢測程序
1. 依據圖面資料進行現場查盤各連接電纜之正確性。
2. 量測 161 kV 系統側三相電壓、相位及繪圖。
3. 量測 13.8 kV 發電機側三相電壓、相位及繪圖。
4. 分析與檢討。

表 2 · 161 kV 匯流排比壓器二次側量測
記錄

相別	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_B	備註
電壓(V)	66.2	66.1	66.0	113	配電盤引
相位(°)	269	30	148	0	線第1接
線號	E1+E0	E2+E0	E3+E0	基準點	續點

表 3・#4 Gen 比壓器二次側量測記錄

相別	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}	V _B	備註
電壓(V)	111.6	112.2	111.8	113	配電盤引
相位(°)	213	333	93	0	線第1接
線號	P10±P20	P20±P30	P30±P10	基準點	續點

表 4・#1 Gen 比壓器二次側量測記錄

相別	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_B	備註
電壓(V)	111.5	111.7	111.4	113	配電盤引
相位(°)	272	32	152	0	線第1接
線號	P10±P20	P20±P30	P30±P10	基準點	續點

表 5・#2 Gen 比壓器二次側量測記錄

相別	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_B	備註
電壓(V)	111.5	111.7	111.4	113	配電盤引
相位(°)	271	31	151	0	線第1接
線號	P10±P20	P20±P30	P30±P10	基準點	續點

從現場檢測結果顯示：

- (1) 現場查盤結果，接線正確與圖面一致。
- (2) 161 kV 系統側及發電機側為 A - C - B 順時針旋轉之負相序。
- (3) #1、#2 主變壓器一次側套管 A - B - C 相序由右至左排列，與 #3、#4 主變壓器由左至右排列不同。

故由表 2-表 5 量測紀錄整理可繪出相量關係圖，以方便分析及探討：

- (1) 紀錄顯示 #4 主變壓器低壓側電壓相位滯後高壓側 30° ；而 #1、#2 主變壓器低壓側電壓相位超前高壓側 30° ；顯示 #1、#2 主變壓器 Yd 結線不符電力系統之慣例。
- (2) a-c-b 相序與 a-b-c 相序之間相互轉換及繪製相量圖，可以圖解方式釐清問題。

陸、工程實例二(興達發電廠)

興達施工處複循環機組#5發電機於裝機及試運轉工程前，檢討同步並聯盤上之相關電控迴路時，經相量圖推演升壓變壓器一、二次側相位移角度，對應至比壓器二次側經連接輔助比壓器後之移相角度與昇壓變壓器不符，且兩者相差 60° ；若以同步儀 12 點鐘標準位置作為同步並聯參考點，將影響發電機與系統同步併聯時相位與系統一致的並聯條件。因此，在並聯送電前，檢討錯誤相位移產生原因及確認輸入同步並聯盤相關控制設備訊息的正確性，是保障發電機在與系統安全並聯的重要程序之一。

複循環 #5 發電機組容量為 13.8 kV、50 MVA、0.9 P.F.、60 Hz、1800 RPM；發電機連接 13.8 / 345 kV、Yd1 結線之升壓變壓器。輸入並聯盤之電壓訊息包含系統側之開關場匯流排比壓器 345 kV / 115 V、YY 結線，單相 1:1 之輔助隔離變壓器，發電機側比壓器 13.8 kV / 115 V、Yy 結線，輔助比壓器為開 d、開 y 結線。盤面設計以發電機為基準參考點，發電機及系統側輸入盤面電壓設計為 Φ_A - Φ_B 相，且 Φ_B 為共同點；如圖 13 所示。本工程於裝機階段時，發電機尚未進行試運轉，故無電源可供測試使用，因此系統相量分析及模擬試驗正是最可行之方案，現場檢測程序如表 6 所示。檢測紀錄如表 7、表 8。

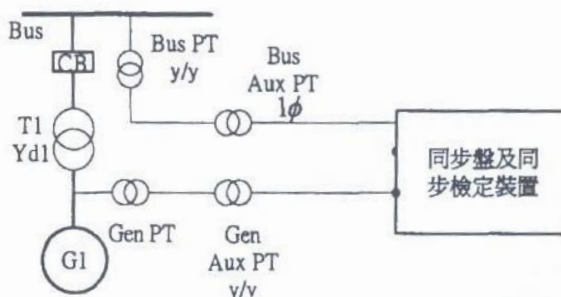


圖 13·發電機—變壓器—變比器系統單
線圖

表 6・現場檢測程序

現 場 檢 測 程 序
1. 依據圖面資料進行現場查盤各連接電纜之正確性。
2. 確定發電機側及系統側之相序。
3. 繪製升壓變壓器、輔助比壓器相量圖。如圖 14a、14b、15a、15b。
4. 設定模擬試驗項目。 4.1 輔助變壓器 4.2 極性試驗 4.3 匝比試驗
5. 試驗及量測輔助比壓器 Dy11 結線位移角之特性。
6. 分析與檢討。

表 7・T501.T502 輸入負相序電壓試驗及量測記錄

模擬電壓	發 電 機 側			系統側	備 註
	V _{AB} (Gen)	V _{BC} (Gen)	V _{CA} (Gen)	V _{AB} (bus)	
電壓 (V)	115	115	115	115	參考圖 14a-14b
相角 (°)	0	240	120	30	
量測值	T501.T502				開三角接線
	V _{BA}	V _{CA}			
電壓 (V)	115	115			
相角 (°)	180.0	120.0			開 y 接線 輸出 a-b 極性反相
量測值	V _{an}	V _{bn}		V _{ba}	
電壓 (V)	67.2	67.3		116.1	
相角 (°)	180.0	120.0		330	

表 8・T501.T502 輸入正相序電壓試驗及量測記錄

模擬電壓	發 電 機 側			系統側	備 註
	V _{AB} (Gen)	V _{BC} (Gen)	V _{CA} (Gen)	V _{AB} (bus)	
電壓 (V)	115	115	115	115	參考圖 15a-15b
相角 (°)	0.0	240.0	120.0	30.0	
量測值	T501.T502				開三角接線
	V _{BA}	V _{CA}			
電壓 (V)	115	115			
相角 (°)	0.0	60.0			開 y 接線
量測值	V _{an}	V _{bn}		V _{ab}	
電壓 (V)	67.2	67.3		116.1	
相角 (°)	0.0	60.0		30.0	

從現場檢測結果顯示：

- (1) 現場查盤結果，T500、T501、T502 接線與圖面一致。確認發電機輸出及 345 kV 匯流排相序，均為 A-B-C 逆時針旋轉；即系統相序為正相序。輔助比壓器極性記號與圖面一致。
- (2) 表 7 紀錄，模擬同相位並聯時，T501.T502 輸入負相序電壓同步儀偏移 60°，試驗結果與相量推移相同。
- (3) 表 8 紀錄，模擬同相位並聯時，T501.T502 輸入正相序電壓，同步儀指針在 12 點鐘同相位之位置，試驗結果與相量推移相同。

故由現場實測紀錄來分析，顯然：

- (1) 現場確認開關場匯流排及發電機均為正相序輸出電壓。
- (2) 發電機之升壓變壓器屬 Yd1 結線，即 345 kV 高壓側領先 13.8 kV 低壓側 30°，比壓器二次側另接 Dy11 輔助比壓器以作為補償措施，則並聯盤之各項自動與手動並聯裝置，將以 12 點鐘作為同步基準點。
- (3) 若 Dy11 輔助比壓器，以 B - A - C 電壓相序輸入時，產生 Dy1 角位移特性，因之引起輸入同步盤電壓訊息之紊亂，同步點會產生 60°的相位偏移。
- (4) 若將輸入輔助比壓器之電壓相序改為 A-B-C 相序輸入，則輔助比壓器(Dy11)二次側之-30°補償角位移，可滿足同步儀機組與系統同相位，此時同步並聯檢定裝置之同相位並聯點已恢復至正常之 12 點鐘位置。

柒、工程實例 1、2 之比較分析與評估

由上述兩個發電廠的案例可知，若將

負相序系統轉換為正相相序系統將可便於分析，且其相對特性不變。在實例 1、2 中，同步儀均輸入線電壓，當並聯操作過程中，發電機與系統發生同相位之時機，可一併偵測並滿足同相序之條件。案例 1 之 #1、#2 與 #3、#4 升壓變壓器因輸入相序不同，影響所及使變壓器二次側位移角分屬 Yd11 與 Yd1 特性，因而在輸入同步檢定並聯裝置之發電機與系統電壓訊號產生 60° 相位移，12 點鐘同步點參考位置亦因之失效，改變成 2 點鐘之位置。案例 2 於發電機側輔助比壓器一次側以 B-A-C 相序輸入，因而影響原 Dy11 位移角度，同樣地在同步檢定並聯裝置之電壓輸入訊號產生 60° 相位移，在同步儀上之同步並聯點亦改變其應有的位置。案例 1 與案例 2 共同的特徵都是三相變壓器以 D、Y 標準結線組裝，因輸入與設計要求不同之相序而產生相異的位移角度，兩者都可能造成機組整步並聯時不利的影響。以正相序系統為例，在相同電壓層級中的變壓器，若以負相序輸入 Yd1 結線之變壓器，低壓側之角位移將由 1 點鐘位置改變至 11 點鐘位置，兩者之間位移角相差 60° ，因之影響電力系統之各電壓層級間的相位角結構。

當機組之升壓變壓器因結線或是輸入相序與原設計不同時，同步並聯檢定裝置並不能夠判斷其間同步點的相異之處。以實例 1、2 模擬發電機併入系統時的過程及影響如下：

(1) 當機組以較高的轉速 (FAST) 併入系統時，假設此時機組與系統間的 ΔV 、 Δf 為最小值且機組轉速稍快，同步儀指針依 FAST 箭頭 (順時針) 方向轉動，在同步儀指針接近 12 點鐘位置前，投入斷路器進行並聯操作，此時仍

屬提前角度並聯；在斷路器兩端將有 1.0 pu 的電壓差，此一電位差會引起較強的電震及過度的同步化電流，並將拉長機組與系統同步化的動態響應時間。

(2) 當機組以較低的轉速 (SLOW) 併入系統時，假設並聯前整步條件同前，但機組轉速稍慢，同步儀指針依 SLOW 箭頭 (反時針) 方向轉動，在同步儀指針接近 12 點鐘位置前，投入斷路器進行並聯操作，此時機組轉子已超越同步點 60° ，斷路器兩端高達 1.0 pu 的電壓差，此一滯後投入角度，將使得電機產生馬達化的效應。

以匯流排作基準觀察 #1、#2、#3、#4 變壓器分屬 Yd11 與 Yd1 之特性，類似電力系統中控制有效功率潮流的相位調整變壓器，故運用上須考慮是否適合自動頻率控制運轉模式。依目前狀況，#1、#2 機組與 #3、#4 機組並聯運轉時，需評估機組間循環電流、保護協調及其他影響因素。具體改善措施可以 #1、#2 升壓變壓器一、二次側 A-C 相連接電纜互調，以更正輸入及輸出之三相電壓相序，並可將 Yd11 之角位移變換為 Yd1，提供同步並聯檢定裝置之正確輸入訊息，確保機組並聯之安全性與可靠性。

分析與評估影響性：並聯盤上各類型指示儀表之指示響應良好，並忽略其誤差值，在此條件下，運轉工程師可準確的調整發電機輸出端電壓以及機械轉速，最後依據同步儀的指示適時地將機組併入系統，同步儀指示發生指示值異常之情況，必將影響發電機產生過電流。分析上述之並聯角度差過大的情況，待並聯發電機在斷路器投入瞬間，發電機與系統之間的電位差是因角度差而起，此時系統與發電機之間的阻抗受次暫態及暫態電抗的影響，

將導致嚴重的過電流，此一過電流可能引起磁場繞組及/或電樞繞組及原動機機械結構的嚴重損壞；參考圖 14。

$$E_{\text{Gen}} - V_{\text{Bus}} = E_R \text{-----}$$

-----式 2 斷路器兩端電壓差

$$I_s = E_R / (Z_1 + Z_2) \text{-----}$$

-----式 3 並聯瞬間之循環電流

捌、作業標準化之過程與建議

案例一各發電機輸出電壓，利用兩具比壓器以 V-V 結線將高電壓轉換為電控用途之三相電壓，因其二次側僅有 V_{L-L} 線電壓，在轉換圖解順時針旋轉相序至逆時針旋轉相序有其不便之處，因各種保護、控制與量測設備均是以逆時針旋轉相序為基準設計製造，故將順時針 A-C-B 旋轉相序轉換為逆時針旋轉相序（即 A-B-C 相序），有其必要性，可方便進一步的研討與分析。圖解之相電壓與相位角度，可依據直角座標公式計算檢查之，例如：

已知：

$$V_{ab} \angle \alpha = V_{an} - V_{bn} \text{ 且 } V_{ca} \angle \beta = V_{cn} - V_{an}$$

$$V_{ab} - V_{ca} = V_{an} - V_{bn} - V_{cn} + V_{an}$$

$$= V_{an} + V_{an} - (V_{bn} + V_{cn})$$

$$= 3 V_{an} \angle \theta_a(2) \text{-----式 4}$$

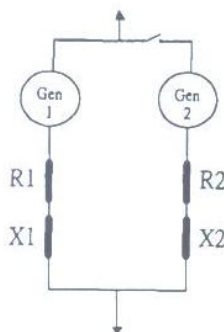


圖 14-a
並聯等效電路圖

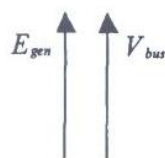


圖 14-b
Egen-Vbus 同相位

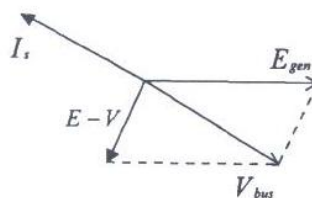


圖 14-c
Egen 相位滯後 Vbus

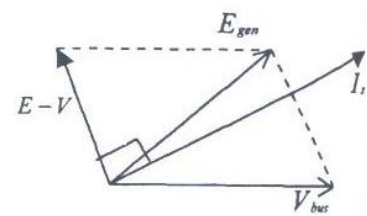


圖 14-d
Egen 相位超前 Vbus

圖 14 · 並聯發電機等效電路圖

同理，可求出 $V_{bn} \angle \theta_b$ 及 $V_{cn} \angle \theta_c$ 。

因此，可由變壓器等效電路計算 Yd 結線變壓器一、二次側相位移如圖 8~11 所示。

案例二興達發電廠之圖 13 運用輔助比壓器 T501、T502 一次線圈之電壓降落 V_{BA} 及 V_{CA} 直接繪出相量圖，並由二次側線圈之電壓降繪出 V_{ab} 座標位置，可以正確地檢討輸入同步並聯檢定裝置接線的正確性以及訊號的代表意義。

玖、結論

電力變壓器在電力系統中是和同步機、輸電線同等級的重要元件。在不同的發電和輸電系統結構中，對特定的傳輸功率，我們可提高電壓以降低電流；反之亦然，以產生適合用戶電能需求最佳的供電組合。為使系統中發、輸、配電之各電壓層級所裝置之電力變壓器得以順利並聯運轉，台灣電力系統依循國際慣例規定變壓器之標準結線原則為『高壓側領先低壓側 30° 』，因此電力變壓器的高壓側繞組無論是屬於 Y 或 Δ 方式結線，其電壓相量關係均為高壓側領先低壓側 30° [4]。在系統相

序定義為負相序時，須注意輸入電源對變壓器的位移角，恰與正相序電源輸入時不同，此時以正相序觀之，高壓側電壓相角滯後低壓側 30° 。因此既設變壓器汰舊更新時，應注意新舊設備高壓套管的排列順序與方向是否一致，以避免因輸入相序而影響不同之 $\pm 30^\circ$ 的位移角度，本文敘述的工程實例其並聯盤同步儀指示之同步點偏移 60° ，均是因為輸入變壓器一次側之電壓相序異同所引起，值得工程人員注意與重視。后記：興達複循環#5 發電機已於 87 年 1 月 16 日 16 時 48 分順利加入系統

並聯發電運轉。

參考資料：

- [1] Stephen J. Chapman "Electric Machinery Fundamentals" McGraw-Hill Book Company. (PP.407-414)
- [2] 薩本棟 交流電機 台灣商務印書館發行 (pp.389-421)
- [3] ANSI C 57.12.70-1964 (R-1971)
- [4] B.M.Weedy 1972 "Electric Power Systems Second Edition" (PP.87-97)

溫 故 知 新

◎ 變壓器之效率

*.若 P_i 為輸入功率， P_0 輸出功率， P_{loss} 為損失，則效率為

$$\eta = \frac{P_0}{P_i} = \frac{P_0}{P_0 + P_{loss}} = \frac{P_i - P_{loss}}{P_i}$$

變壓器之損失有鐵損和銅損兩種，鐵損有磁滯損和渦流損兩種，

當鐵損等於銅損時，效率最大。

*.短路試驗測量變壓器銅損 ($P_s = I_s^2 \times r_{eq}$)。

*.開路試驗測量變壓器鐵損 ($P_o = g_c' \times V_o^2$)。