

同步發電機併聯電控迴路探討

❖ 鄭 強

台電試驗所

壹、前言

電力系統是由同步發電機、輸電線、變壓器及配電線等組合而成。為考量電力系統在運轉上的穩定性、可靠性及經濟性時，通常在同一系統之內具有為數眾多的同步發電機組，藉由同步發電機迅速併聯運轉之優點，供給各用電戶優良品質的電力；同時系統與系統之間，又可藉由互聯方式將多個電力系統聯接成爲一個大系統。當同步發電機聯接於電力系統中，其電樞端上的電壓和頻率，基本上是追隨系統之電壓和頻率而變化。因任一個別發電機只佔系統總發電量的一小部份，它不能對系統電壓或系統之頻率發生重大的影響；當系統內負載增減供需發生變化時，為配合電力調度之需求，肩負尖、離峰運轉任務之各個機組，其併聯、解聯運轉作業時而爲之。另外，新建機組竣工後首次並聯系統之操作程序，與已運轉中機組停機後再次並聯之作業程序亦有所不同；如果並聯不當，將造成發電機極大傷害。因之，發電機的並聯操作是電廠運轉人員極

爲重要的技術；以下爲同步機的併聯原理與實務技術探討。

貳、併聯原理

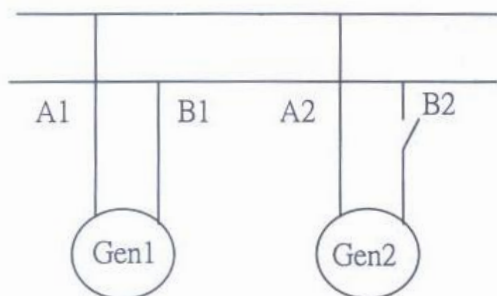
同步發電機併聯運轉時，兩交流發電機併聯之先，其頻率及端電壓必須相等，準備併聯之發電機其相角亦須與系統一致；併聯之瞬間，必須將發電機與系統之同電位各點聯接一起，而不致產生自此點流至另一點之同步化電流。欲減低待併聯機組與系統間併聯時之循環電流，必須適當調整待併聯發電機之頻率、電壓、相位使與系統趨於一致，故頻率、電壓、相位稱爲併聯三要件。待併聯機組之端電壓與系統電壓一致的條件，可經由適當的調整發電機激磁電流達成；同樣的，相位與系統一致的條件，可考慮斷路器之動作特性，計算出提前投入的角度以達成目的，斷路器提前投入角度爲 $360^\circ \times \Delta f \times T$ （斷路器投入時間）。

若調整一單相交流發電機之電壓與待併入系統電壓一致，比較發電機端電壓與

系統電壓之變化時，將由兩者同相時之最小值，變化至反相時之最大值；其電壓差由最大值衰減到最小值之變化頻率，等於兩者頻率 f_1 與 f_2 差值之一半。包絡振幅之包絡線(envelope)方程式為：

$$e = 2\sqrt{2}V \sin \frac{2\pi(f_2 - f_1)t - \alpha + \beta}{2}$$

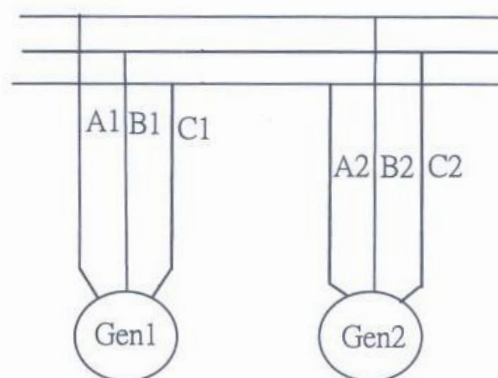
如圖一所示，若於 B2 處接一電燈，其亮度將隨拍頻 $(f_2 - f_1)$ 明滅，每 $1/(f_2 - f_1)$ 秒明亮一次，B2 關閉之適當時機為燈全暗之時刻。



圖一

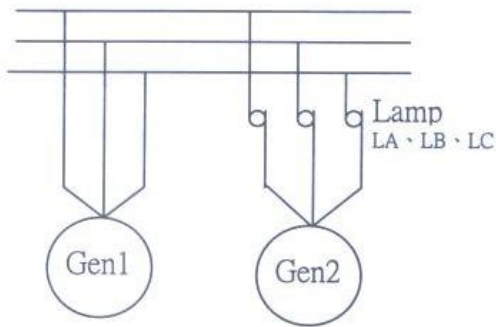
三相同步發電機併聯之基本原理與單相發電機極為類似，兩者相異之處為三相同步發電機之相序須與系統一致；所謂發電機之相序 (phase sequence) 定義為每一相對中性點之電位，其到達最大值之次序。當三相同步發電機第一次與系統併聯時，發電機相序與系統相序是否一致，必須加以試驗。試驗方式如下：假設系統與同步發電機之相序分別為 $A1 \rightarrow B1 \rightarrow C1$ 與

$A2 \rightarrow B2 \rightarrow C2$ ，將準備加入系統運轉之發電機之任一相（設為 B2）連接於系統匯流排之 A1；注意，當發電機於加入系統前之相序試驗，於第一次連接時無須為 B1 端，欲使其兩者正確併聯，必須將 C2、A2 兩端分別接入 B1 及 C1 之兩端，其相序之次序必須為 ABC、BCA 或 CAB（如圖二所示）。



圖二

三暗同步法 (3 dark method) 是檢驗相序是否正確方法之一 (圖三)，假定當頻率 f_1 等於 f_2 ，且電燈 LA 兩端之電位差為零時，待併聯發電機之相序與系統之相序相反，則電燈 LB、LC 兩端之電位差將等於線電壓。若頻率不相同，電燈 LA、LB、LC 將隨拍頻而閃動，並依次輪流變黑暗。電燈變黑暗之次序，可用來指示待併聯發電機之轉速是否快於 (Fast) 系統或慢於 (Slow) 系統。



圖三

e_A 、 e_B 、 e_C 三個電壓之包絡線，彼此相差 120° ，其方程式分別為：

$$e_A = 2\sqrt{2}V \sin[\pi(f_2 - f_1)t]$$

$$e_B = 2\sqrt{2}V \sin[\pi(f_2 - f_1)t + 120^\circ]$$

$$e_C = 2\sqrt{2}V \sin[\pi(f_2 - f_1)t - 120^\circ]$$

由上式分析三個包絡線之相序，視 $(f_2 - f_1)$ 之正負符號而定；當符號為正時，即當 $(f_2 > f_1)$ 準備併入系統之發電機轉速較快時，則各包絡線到達最大值之次序為 e_A 、 e_C 、 e_B 。反之，如果待併聯機之轉速較系統慢，即 $(f_2 < f_1)$ 則 $(f_2 - f_1)$ 為一負值，其方程式將改寫為：

$$e_A = -2\sqrt{2}V \sin[\pi(f_1 - f_2)t]$$

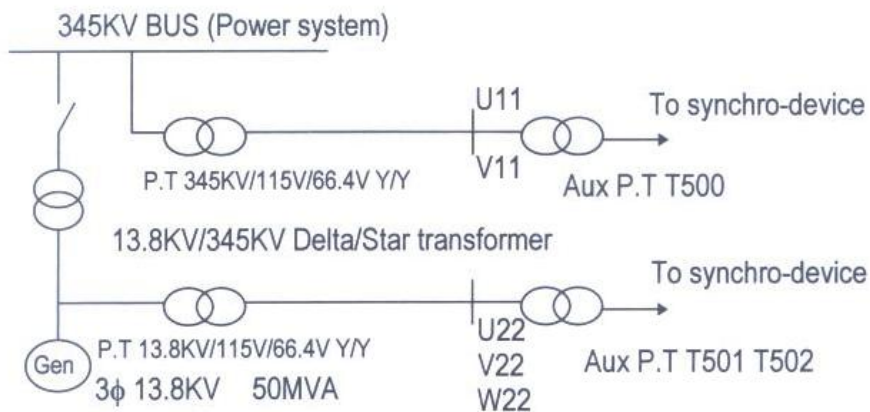
$$e_B = -2\sqrt{2}V \sin[\pi(f_1 - f_2)t - 120^\circ]$$

$$e_C = -2\sqrt{2}V \sin[\pi(f_1 - f_2)t + 120^\circ]$$

上列式子明白顯示極大值之發生次序已改變為 e_A 、 e_B 、 e_C ，與 $(f_2 > f_1)$ 之次序相反，故於調整待併聯發電機之速度的過程中，運轉人員或自動化之併聯裝置設備，均可應用此法明瞭該機轉速是太快或太慢，經由適當操作調速機使之轉速略為快於系統，並於適當之提前角度關閉斷路器，完成併聯作業。若待併聯發電機之轉速低於系統頻率，則於併聯之瞬間，併入系統之發電機將被拖曳至同步化。故發電機於併入系統之瞬間，轉速應稍快於系統。從併聯瞬間之電勢觀點而言，是屬於發電機電流，而不應是電動機電流。上述概略的介紹同步電機併聯之方式，以下將介紹同步電機於併聯作業之實務研討。

參、現場實務

一、系統單線圖（圖四）



圖四

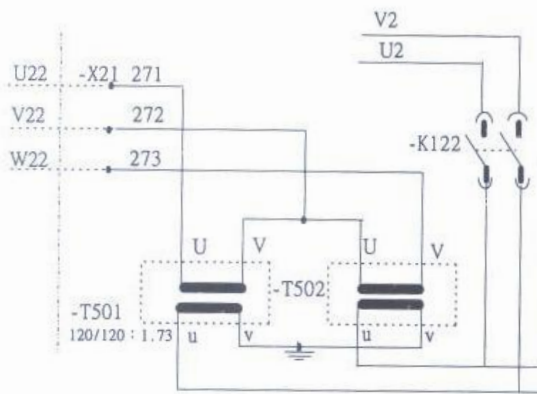
二、摘要說明

三相同步發電機：定子繞組 Y 接線 (Star)，中性點接地。

昇壓變壓器：發電機側三角法結線 (Delta)，系統匯流排側 Y 結線、中性點接地。

發電機側比壓器：Y 結線中性點接地。

發電機側輔助比壓器：T501、T502 一次側/二次側 V/U 結線如圖四(a)。



圖四(a)

系統匯流排比壓器：Y 結線、中性點接地。

匯流排側輔助比壓器：隔離變壓器。

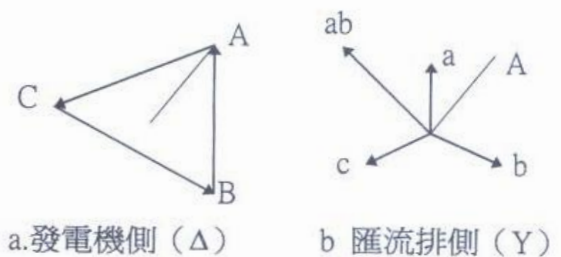
同步併聯裝置：控制室之同步指示表計、同步檢定電驛、自動併聯裝置。

三、發電機端電壓 13.8 KV 輸出經由昇壓變壓器 (Delta — Star, 13.2 / 345 KV) 昇壓至 345 KV 併聯至系統；Delta (Δ) — Star (Y) 變壓器若屬減極性正向結

線，則相位移 (Phase displacement) Y 領先 Δ 為 30 度；故發電機比壓器 (P.T) 二次側電壓，於併聯盤電控迴路上需將參考電壓移相 $\angle +30^\circ$ ，以利同步檢定與自/手動併聯設備正確運作。

四、系統相量分析

1、變壓器一/二次側向量圖



圖五、Y 超前 $\Delta \angle 30^\circ$

$$\because V_{AB} \angle 0^\circ = V_{an} \angle 0^\circ$$

$$\therefore V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = 2V_{an} \cos 30^\circ$$

$$= \sqrt{3} V_{an} \angle 30^\circ$$

2、電控迴路：發電機側 T501、T502 同步檢定移相變壓器一、二次側 (Pri./Sec.) 繞組結線分別為 V / U 接線法，其相量圖分別為：

(1)、發電機比壓器二次側三相電壓 a-b-c 接入 T501、T502 (Vpri/Usec) 之相量圖：

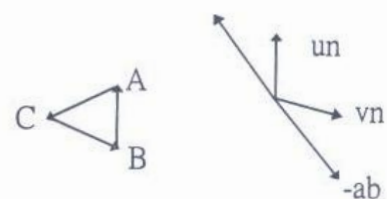


圖6a、一次側相量圖

圖6b、二次側相量圖

$$\therefore V_{AB} \angle 0^\circ = V_{UN} \angle 0^\circ$$

$$\therefore V_{UV} = V_{UN} - V_{VN} = \sqrt{3} V_{UN} \angle 30^\circ$$

當三相電壓以 a-b-c 相序接線進入一次側 V 繞組，於二次側 U 繞組產生超前一次側 $V_{AB} \angle 30^\circ$ 或 $\angle 210^\circ$ 之電壓位移角 (V_{UV} / V_{VU})。

(2)、發電機比壓器二次側三相電壓 b-a-c 接入 T501、T502 ($V_{pri./U_{sec}}$) 之相量圖：

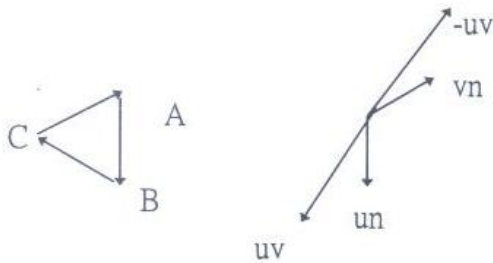


圖7a、一次側相量圖 圖7b、二次側相量圖

$$\therefore V_{AB} \angle 0^\circ = V_{BA} \angle 180^\circ = V_{UN} \angle 180^\circ$$

$$\therefore V_{UV} = V_{UN} \angle 180^\circ - V_{VN} \angle -60^\circ$$

$$= \sqrt{3} V_{UN} \angle 150^\circ$$

$$\therefore V_{VU} = V_{VN} \angle -60^\circ - V_{UN} \angle 180^\circ$$

$$= \sqrt{3} V_{UN} \angle -30^\circ$$

當三相電壓以 b-a-c 相序接線進入一次側繞組，於二次側繞組產生落後一次側 $V_{ab} \angle -30^\circ$ 或 $\angle 150^\circ$ 之電壓位移角 (V_{uv} / V_{vu})。

肆、分析與討論

一、同步檢定設備含有量測儀表：同步儀、電壓計與頻率計，同步檢定電驛，

自動併聯裝置。電壓計與頻率計分別量測系統與發電機個別之電壓與頻率差；同步儀直接標示出發電機之轉速大於或是小於系統中的同步速度，中央十二點鐘的位置則是發電機併入系統之同相位置，以作為運轉人員及自動化併聯設備調整發電機之端電壓與轉速控制，應用上電壓控制與頻率控制分屬電氣控制與機械控制，這兩項操作控制分別經由勵磁機與原動機之調速設備完成。故實際使用上，同步檢定裝置在於檢定出待併聯發電機與電力系統之電壓、頻率與相位相同之最佳併聯時機。【相位相同之定義為同相 (In phase)】。

二、電力系統中的高電壓與大電流均對工作人員有著潛在的危險，須經由適當的變比器，使之降低至較安全的低電壓與小電流，故變比器二次側之額定值分別為：電壓 110 伏特、電流 5 (或 1) 安培。當匯流排側 345 KV B.P.T 比值為 3000 / 1，圖面設計選擇 $V_{an}V_{bn}$ ($V_{ab} = 115V$) 接入併聯盤，故發電機側 13.8 KV P.T 比值為 120 / 1 ($V_{AB} = 115V$)。依據發電機單線圖，於輔助比壓器 (V/U) 接線方式之不同，將產生同相或者異相 (out-of-phase) 之相位移，併聯中的發電機在如此情況下，將發生順利併聯或是增加併聯時之同步化電流；不同相之併聯時，最嚴重的情況將造成機組與系統之間的短路事故而緊急停機。

三、依據圖示，發電機端電壓經由昇壓變壓器將電壓昇至 345KV，再將電力送至超高壓輸電線路上。假設 345 KV 匯流排 Van Vbn (V_{ab}) 為同步檢定之參考點，則發電機 $V_A V_B$ (V_{AB}) 於比壓器二側必須產生 30° 之角位移，以供同步檢定裝置正確地檢驗出最佳併聯時機。故經由 T501、T502 一、二次繞組以【V/U】結線之必要條件為：一次側與二次側線圈必須是減極性聯接。於輔助變壓器二次側電壓可產生 30° 之相角位移，此一 30° 之相位移，使得發電機側與系統側因昇壓變壓器之結線關係所產生的相位移獲得補償。

四、T501、T50 以 3ϕ (a-b-c) 電壓接入一次側繞組，二次側繞組於 T501、T502 抽頭上產生感應電壓 V_{uv} 。 V_{uv} 領先 V_{AB} 30° 度， V_{ab} 領先 V_{AB} 30° 度；所以 V_{uv} 與 V_{AB} 同相位。故 V_{uv} 與 V_{ab} 同相位。

五、T501、T502 以 3ϕ (b-a-c) 電壓接入一次側繞組，二次側繞組於 T502、T501 抽頭上產生感應電壓 V_{vu} 。 V_{vu} 領先 V_{AB} 30° 度， V_{ab} 領先 V_{AB} 30° 度；所以 V_{vu} 與 V_{AB} 相位角差為 -30° 度。故 V_{vu} 與 V_{ab} 相位角差為 -60° 度。

伍、結論

當電力系統中負載發生變動時，加入系統之發電機組數量亦須隨之增減，以利

維持衡定的系統頻率，欲保持系統之額定頻率有賴充足的機組容量；相同地欲維持系統之額定電壓則有賴發電機組供應充裕的無效電力；更重要地當系統需要更多的機組加入運轉時，併聯進入之發電機能夠迅速供給電力予系統之所需，若否；反之以電動機之型態併入系統，令機組容量已經不足之系統供電能力更行惡化，則非我們所願。當然此次討論同步發電機的併聯前作業，偏重於電控回路之探討，較傾向穩態分析，若有機會將探討自動併聯裝置之電氣與機械控制調整暨發電機併聯用斷路器提前投入角之試驗方式。

參考資料

- 交流電機 薩本棟 著 臺灣商務印書館
- 電力系統 王順源、李清吟 著 全華科技圖書公司
- Electric power systems B. M. Weedy 開發圖書公司

