

同步發電機電力逆向成因探討 及其電驛保護概論

■ 李國楨

壹、緒論

在電力供求動態平衡體系中，通常同步發電機除賦有特殊用途外；例如抽蓄式水力發電機，在離峰負載期間，發電機轉換成電動機運作，抽回預留下方攔水池至上方蓄水池，以達成抽蓄運轉之任務；一般而論，其設計均定位為發出電力供應電力系統。詳言之，即利用蓄水之位能或燃燒石化、核子反應等產生之熱能轉換為電能，以有效電力(Real Power)、無效電力(Reactive Power)合成方式輸送至電力系統。就發電機結構而言，『有效電力』係由發電機之動力系統—原動機(Prime Mover)驅動轉矩輸出；『無效電力』則由發電機之激磁系統—勵磁機(Excitor)的激磁效應產生。職是之故，運轉中之發電機，若發生反向吸取電力系統中之有效電力，則可研判該機組之動力系統功能異常，之所以有此跡象，乃是為彌補原動機驅動轉矩不足之窘況，此等情節本文將予詳析探討。至於反向吸取系統中之無效電力，則可

推斷為激磁系統事故，此已披露於本刊第二期「同步機穩態運轉之激磁效應及其失磁保護」拙文，此處不再予以贅述。

運轉中之發電機反向吸取系統的有效電力現象，簡稱為『電力逆向』，其對汽渦輪機或水輪機之損害特別嚴重，可能禍延渦輪機軸心及其葉片(Blades)。試想：水輪機在低水位動能不足，易造成渦輪葉片旋轉渦凹(Blade Cavitation)，類此情況汽渦輪機在減載過程中，如果過早關閉流經閥門(Valve)的蒸汽或水流，將導致熱力動能無法滿足原動機轉矩驅動損耗；或在相關條件尚未符合發電機跳脫之際，卻突然發生渦輪機意外跳脫，則將完全失去動力支援。

儘管有許多電驛可提供發電機在運轉或控制方面事故之保護，但基本上逆向電力電驛(Reverse Power Relay)只單獨被設計賦予此項特殊任務，該電驛國際設備代號為32。目前在電力公司應用於大型汽渦輪機組的逆電力電驛，常見者有GE製之GGP型、

ABB 製之 CRN-1 型；在中、小型汽渦輪機組者，有 GE 製之 ICW 型、ABB 製之 CW 型。上述電驛之保護原理及應用將論述於後。

貳、同步發電機電力逆向成因論述及探討：

假想：電力系統是由許多同步發電機組所併聯而成，於是各機組之定子樞繞的端電壓及頻率，應受該電力系統所固定，亦即組成一無限匯流排。

各同步機常態運轉情況概要如下：同步發電機轉子載有直流場繞，運用迴轉原理感應一氣隙電壓至定子樞繞，此即電樞反應 (Armature Reaction)，爲了維持穩定的非方向性之轉矩，轉子之旋轉速度必須與定子場繞變化，不僅同步運作且需與電力系統一致，始能維繫穩態於不墜。

其次，各同步機供應電力至系統負載阻抗，其電流、功率因數應由該同步機之激磁、樞繞阻抗及所承受負載來決定，而其頻率則是由原動機的轉速來決定 (因 $f = \frac{P}{2} \times \frac{N}{60}$)。由於同步電動機本身並不具備淨起動轉矩，亦即其轉矩動能不足以承擔軸負載的損耗，只有依附電力系統反向加壓至其樞繞，再以類似變壓器耦合方式，感應一電壓於轉子場繞，以產生轉動力矩，然後提升轉速至同步境界。

當發電機因故發生電力逆向時，系統之交流電流輸入於其定子樞繞，感應交流電壓於轉子，因此轉子電流所產生的場效應與定子場同速度旋轉，兩者互動產生同方向之轉矩，由是獲得該力矩之協助，以克服原動機不足的軸負載，進而達到原運轉速度，以維持頻率於定值。值此期間，同步發電機漸趨同步電動機運作。

參、同步電機轉子磁勢(EMF)與定子磁通(Flux)運作之相量圖

依前述同步機轉子轉速在穩態下與定子樞流、頻率維繫同步運作，因此電樞所生之磁通與場流同速變化，由是產生一穩態轉矩 T，其大小如下式：

$$T = \frac{P}{2} \times \left(\frac{P}{2} \right) \times \phi_r \times F_r \times \sin \delta_{RF} \quad \dots (1)$$

式中：

P 表極數。

ϕ_r 表由定子和轉子磁勢聯合作用之合成磁通，即每極氣隙磁通之基本波。

F_r 表轉子磁勢基波的頂峰值 (Peak Value)。

轉矩角 δ_{RF} 表總磁通 ϕ_r 超前轉子場磁勢波 F_r 之相位角。

式(1)中，若 ϕ_r 、 F_r 爲定值時，轉矩 T 可藉調整 δ_{RF} 來改變大小。如圖一所示，設一同步機連接在無窮匯流排上，若考量樞阻

I_a 、漏電抗 X 因其微小而予以忽略不計時，則其氣隙電壓 E_r ，理應保持與匯流排等位電壓。

分析探討：

一、無載時：轉子磁勢 F 、定子磁勢 A 、總磁勢 R ，分別產生磁通 ϕ_f 、 ϕ_{ar} 、 ϕ_r ，如圖二所示，因 $F + A = R$ 或 $A = R - F$ ，無載時樞流 $I_a = 0$ ，故 $F = R$ ， $A = 0$ 且 R 、 F 間之相位角 $\delta_{RF} = 0$ ，使得 $\sin \delta_{RF} = 0$ ，代入式(1)，得 $T = 0$ 。相量分析如圖四(a)所示。

二、加上負載後：

(A)、電機成爲一電動機運轉時：前已述及電力系統供給電機轉矩的方向與電機原旋轉方向一致，此恰可補充呈暫態稍微減速的轉子轉速，由磁勢觀察，可得合成氣隙磁勢 R 超前於轉子磁勢 F ，兩者間轉矩角 δ_{RF} 爲正值且增加，由式(1)推知電機轉矩 T 增大。經暫態反應當 δ_{RF} 達到滿足供應軸轉矩負載時，電動機再次回復穩態同步運轉，是爲同步電動機。如圖三，轉矩—相位角特性曲線圖之“m”點所示，其相量分析如圖四(b)， $F \sin \delta_{RF} = A \cos \phi_r$ ，即圖上虛線 a、b 段， ϕ_r 爲樞流 I_a 對氣隙電壓 E_r 之功率角，圖中 $A \cos \phi_r$ 與樞流 I_a 之有效功率 $I_a \cos \phi_r$ 分量成正比，由式(1)之轉矩 T 與 F

$\sin \delta_{RF}$ 成正比，依此推論，樞流 I_a 供應有效功率，將與機械轉矩輸出成正比。

(B)、電機成爲一發電機運轉時：此時必須依附一原動機轉矩來向前驅動，且仍繼續使轉子磁勢 F 保持超前總氣隙磁勢 R ，兩者間之轉矩角 δ_{RF} 爲負值，形成發電機所承擔的負載轉矩，轉嫁到原動機驅動轉矩上，如圖三之“g”點所示。

如圖四(c)所示，電樞反應與樞流功率之相量分析， $F \cos \delta_{RF} + A \sin \phi_r = R$ ，不僅樞流 $I_a \cos \phi_r$ 有效功率分量提供轉矩，且其 $I_a \sin \phi_r$ 無效功率分量，亦須自動調整，以配合氣隙總磁勢 R ，但無效功率須藉調整場激磁來操控。

肆、各型逆力電驛之保護原理及應用

一、GE 製 GGP 型逆力電驛

此型式採用三相式組合電流、電壓交互運作用一方向性元件，在額定電壓及單位功率因數(Unit Power Factor)下，僅需 10 ~ 40 毫安培的逆向電流即足以偵測出電力逆向現象，並閉合方向性元件接點，使外加電壓得以經由方向性接點起動一過壓感應圓盤，該圓盤具有可調之行程，當活動接點完成行程與固定接點碰觸以執行跳脫責務。電驛之標置係依據發電機滿載運轉 KVA 額定值，若比流器二次側額定爲 5 安培，則逆力

保護可遴選機組額定容量 0.2% ~ 0.8% 範圍，但發電機選用之比流器匝比，通常均是超出實用需求，故就事而論，將使電驛靈敏度降低。然而在諸多實際案例中，發電機吸取逆向電力數值相當鉅大，遠超過其預設值，故對電驛靈敏度問題實無庸置疑。是以探討電驛靈敏度，應視比流器匝比及機組當時反向吸入電力多寡來論定。有關發電機吸取多少逆力即應起動逆力電驛，該最佳近似值設定，宜直接向發電機製造廠家諮詢，請求提供詳實資訊才是正途。

過壓感應圓盤之時間整定盤可調節行程遠近，在標置該項作業時應合理考慮下列情況：

1、發電機在電力系統同步運轉期間，若遭遇系統事故致電力搖擺(Power Swings)不穩定時，逆力電驛不會停滯原位不動，但不可因此而跳脫。

2、若在電機附近突發外部事故，逆力電驛方向性元件因暫態現象而動作，則電壓感應圓盤雖可轉動，但不可完成行程跳脫。

因此，建議至少標置 5 秒時程，除非具有良好理由才得以縮減時程。GGP 型電驛外部接線圖如圖五所示。值得注意的是發電機連接斷路器，其常開接點 52a 被應用於防止過壓感應圓盤(IAV)元件，可能在主斷路器開啓中誤動作，故此種設計將消除任何因顫抖而誤動作之可能性，尤其是在電機因正

加速運轉所產生的巨大震盪力的環境下。

確認 GGP 型方向性元件閉合區間涵蓋逆力現象，是非常重要的觀念，只在三相平衡電壓及電流之條件下，並以平衡系統之額定電壓為基準值來發揮其靈敏度。假如平衡體系之電壓非額定值時，則所需始動電流值應依下式修正。

$$I = I_R \times (\text{額定電壓} / \text{實際電壓}) \dots\dots(2)$$

此處 I_R 表採用額定電壓時之始動電流值。因此選用 GGP 型電驛時，務須兼顧額定電壓值能與廠方比壓器二次側電壓規範匹配。

在三相平衡系統狀態下，方向性元件轉矩通式如下：

$$T = KEI \cos(\theta - 30) \dots\dots(3)$$

式中 K = 設計常數， E = 線至線電壓， I = 相電流， θ = 電流 I 超前電壓 E 之相位角。

詳析之，總電路被排置如下： E_{12} 和 I_2 、 E_{23} 和 I_3 、 E_{31} 和 I_1 各成一組，交相運作。當發生逆力現象時，電流皆朝反向流入，例如： E_{12} 對 $-I_2$ 時由相量分析知： $-I_2$ 超前 E_{12} 相位角 $\theta = 30^\circ$ ，代入式(3)得 $T = KEI \cos(30^\circ - 30^\circ) = KEI$ 為最大力矩值。

同理可證， E_{23} 對 $-I_3$ 及 E_{31} 對 $-I_1$ 皆具最大力矩，故方向性元件處於最小始動電流狀

況下，即逆向電驛具有最高靈敏度。

標置演算：已知一大型汽渦輪機

滿載容量 MVA = 832

額定電壓 KV = 24

比壓器比值 = 25000/120

比流器比值 = 30000/5

假設電機在冷凝器完全真空下吸取最小逆力功率已知為 4.0MW，將吸取有效功率轉換至逆力電驛側：

一次電流

$$4000 / (24 \times \sqrt{3}) = 96 \text{ 安培}$$

二次電流

$$96 / (30000/5) = 0.016 \text{ 安培}$$

將一次側電壓轉換成二次側電壓

$$24000 / (25000/120) = 115 \text{ 伏特}$$

由式(2) 若選用電驛額定電壓為 120 伏特且校驗始動電流為 0.010 安培，於 115 伏特試驗電壓下之始動電流：

$$\begin{aligned} I &= 0.010 \times (120/115) \\ &= 0.0104 \text{ 安培} \end{aligned}$$

本例校驗始動電流為 0.010 安培純係建議值，至於時間延遲仍應如前述，需足夠清除非期盼性動作。

二、ABB 製 CRN-1 型逆力電驛

設計上採用單相電流、電壓交互運作一圓柱體方向性元件，利用方向性接點控制過壓元件之電壓回路，在正常情形下，方向性

元件處於開啓狀態，當逆力現象發生時，方向性元件閉合，過壓元件回路暢通得以動作，過壓元件始動值廠家已設定在額定值的 54%，以額定 120 伏特而言，始動電壓不得低於 $120 \times 54\% = 64.8$ 伏特。連續過壓耐受程度為 110% 額定值，以額定 120 伏特而言，應不高於 132 伏特，超過此值電驛有受損害之虞。

圓柱體方向性元件閉合區間由 I_A 與 V_{AC} 大小及兩者間之相位角來決定，當電流領先電壓相位角 30° 時，具有最大力矩表現，詳如圖六所示：方向性元件實際取 $(-I_A)$ 電流與 V_{AC} 極化電壓，當發生電力逆向時，電流反向成爲 I_A ，恰好領先極化電壓相位角 30° 。又一般發電機在最大無效電力輸出運轉時，其功率因數 $P.F = \cos \theta = 0.8$
 $\therefore \theta = 37^\circ$ ，表示滿載相電流落後該相電壓之相位角為 37° 。

假設：在 $P.F = 0.8$ 運轉時發生電力逆向，則方向性元件之電流與電壓其相位角差為 $37^\circ - 30^\circ = 7^\circ$ ，如此有利於方向性元件接近最大力矩位置，頗符合始動電流為極小值之要件，益增保護之靈敏度。設計上在額定電壓下且於最大力矩角之始動為 0.02 安培，如需提高時可調整彈簧張力來達成。

三、GE 製 ICW 型或 ABB 製 CW 型逆力電驛

此類型電驛的動作原理極類似於眾所週知的瓦特計，惟僅適用於三相平衡系統之汽渦輪機、回復式引擎柴油機、某些水輪機或小型汽渦輪機。外觀上只設有一感應圓盤，並由電流及極化電壓交相運作產生力矩推動圓盤，其外部接線如圖七及圖八所示：最大力矩發生於電流領先極化電壓相位角 90° ，故設計上採用極化電壓垂直於電流，如設計取用 $-I_A$ 與 V_{BC} 時，當逆力發生使電流反向，此時 I_A 領先 V_{BC} 相位角 90° 恰好為最大力矩角。電驛標置採用電流與電壓乘積所得瓦特值來表示。

標置演算：

假設某一柴油機已知三相額定電壓為13.8KV，額定容量2500KVA，廠家設定在15%滿載額定時可達到逆力保護。

由此得出柴油機吸取逆力功率
 $2500 \times 15\% = 375$ 仟瓦。

$$\begin{aligned} \text{一次側滿載電流} &= 2500 / (\sqrt{3} \times 13.8) \\ &= 102.5 \text{ 安培} \end{aligned}$$

若比流器比值為150/5，

比壓器比值為13.8KV/115V = 120

$$\begin{aligned} \text{逆力功率在電驛端} &= 375\text{KW} / (150/5) \times 120 \\ &= 104 \text{ 瓦特。} \end{aligned}$$

前已提及，逆力電驛動作時間必須大於電力系統不穩定搖擺，及不能妨礙柴油機自動同步併聯至電力系統所必要之運作時

程。假設本案例擬選定動作時間為2秒，且電驛標置為25瓦特，則流入電驛內部功率為設定值 $104/25 = 4.16$ 倍。查閱圖九所示的動作特性曲線，得出時間整定盤最佳近似位置應是刻度3.6。依本例可選用規範15~60瓦特，或25~100瓦特為設定範圍之電驛，只要最大負載電流不超過逾電驛所標定連續額定值即可(通常為5安培)，本例最大滿載電流二次側為 $102.5 / (150/5) = 3.41$ 安培，顯然上列兩種規範均可能被考慮採納。

伍、總論

綜觀各節論述，大致可獲一定論：發電機吸取逆力轉趨電動機運轉，非由電氣事故所肇致，實乃熱力機械出現動力不足之窘困，是故逆力電驛界定在此情況始能動作，並依自動跳脫渦輪機在先，繼跳脫相關斷路器在後之順序進行。除了逆力電驛外，熱機動力體系本身亦裝設測溫儀控保護設施，以監護蒸汽熱流偏低，可能導致過熱現象而損傷葉片；又如水力流動指示器監護制止低水位運轉，避免渦凹折損葉片。如此疊床架屋式的熱機保護網層，卻由於整個機組架構龐大顯得錯綜複雜，例如在諸多排氣(水)管道皆考量保護措施或制止開關，何如只乙具逆力電驛綜掌全局、簡要明確易行，是明智的提昇安全及後衛之策略。尤其這類電驛最普遍適用於柴油發電機方面，係因為考量該處可能潛藏著未燃盡之油料，恐因故引爆而有

發生火災之危機。

在此值得一提的是：同步發電機逆力轉趨同步電動機運作時，其勵磁機因維持原狀運作，故此期間之虛有功率仍保持前後一致，並不受其影響。

通常任何型式的逆力保護電驛，其偵測靈敏度要求相當精微的，在初始微量逆力出現時，即能瞬間偵測反映出。譬如假設某一渦輪機因閘門輕微關閉，使其轉矩動力略低於無載情況，具體地假設當時此渦輪機動力轉矩約足夠承荷 99 % 損耗，不足的 1 % 損耗只得取自系統電力，再進一步假設總損耗量僅佔該電機 3 % 額定 KW，故 1 % 損耗佔有 3 % 額定 KW \times 1 % = 0.03 % 額定 KW。由此觀之，逆力保護電驛實質上要提昇探測靈敏度確屬不易，更何況在機組又持續載有負載電流之情況下。

歸納當前逆力電驛之動作原理，可以區分為兩類：

(1) 動作電流落後極化電壓相位差 30° 時為最大力矩角，故動作力矩區間在 $60^\circ \sim 0^\circ \sim 270^\circ \sim 240^\circ$ ， $\theta = 330^\circ$ 為最大力矩角，如 GGP 型或 CRN-1 型均屬此類，其相異處乃 GGP 型採三組動力之力矩聯合運作，特引用 3 ϕ 相電流對應各組線間電壓產生力矩，故嚴格要求三電流、電壓平衡，係考量各組電流與其極化電壓之相位差一致，依式(3)知各組力矩相等。CRN-1 型則僅一組動作力矩，故動作電流約為 GGP

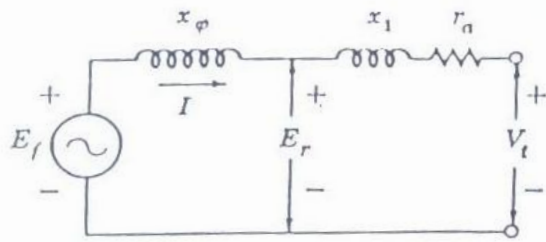
型之 3 倍。

(2) 動作電流落後極化電壓相位 90° 時為最大力矩角，故動作力矩區間在 $180^\circ \sim 270^\circ \sim 360^\circ$ ， $\theta = 270^\circ$ 為最大力矩角，如 ICW 型或 CW 型均屬此類，兩者皆類似瓦特計造型，並無差異。

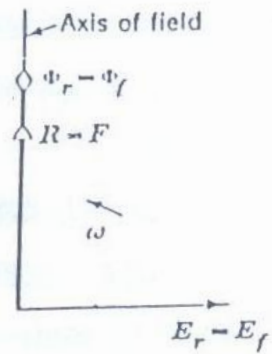
有關電驛原理論述及應用解說，係採扼要淺釋，恐有疏漏或詞未達意之處，尚請匡正。如有疑義，望請參閱相關說明書，以裨補闕失，進而獲取豐富資訊，厚植正確的電驛工程應用理念，是所企盼。

參考資料：

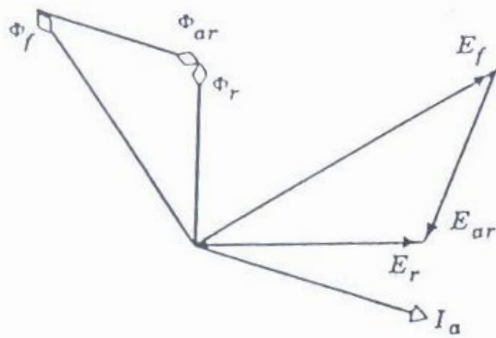
1. ELECTRIC MACHINERY 1971 written by FITZGERALD KINGSLEY KUSKO。
2. PROTECTIVE RELAYING — Principle, and Applications written by J. Lewis Blackburn。
3. PROTECTIVE RELAYING — Theory and Applications 1994 ABB Power T & D Company INC。
4. POLYPHASE POWER DIRECTIONAL RELAY FOR ANTI-MOTORING PROTECTION TYPE GGP53C edited by GE GEK-34117A。
5. TYPE CRN — 1 REVERSE POWER RELAY A.B.B ILA1-251.2P。
6. POWER RELAY TYPES ICW51A ICW52A、ICW52B GE GEH-2056D。
7. TYPE CW POWER RELAY Westinghouse I.L.41-294E 1950。



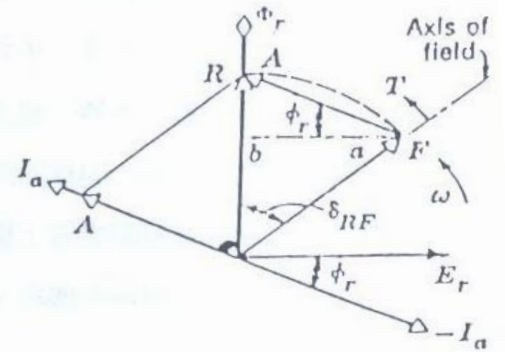
圖一、同步機等效阻抗圖



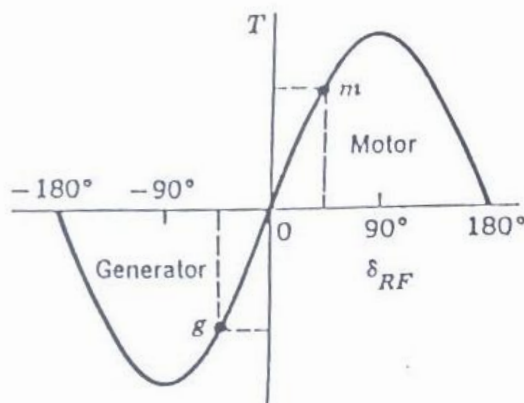
(a)無載



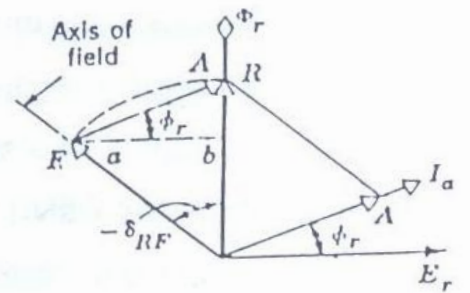
圖二、各分量磁通與其對應電壓關係相量圖



(b)電動機運作

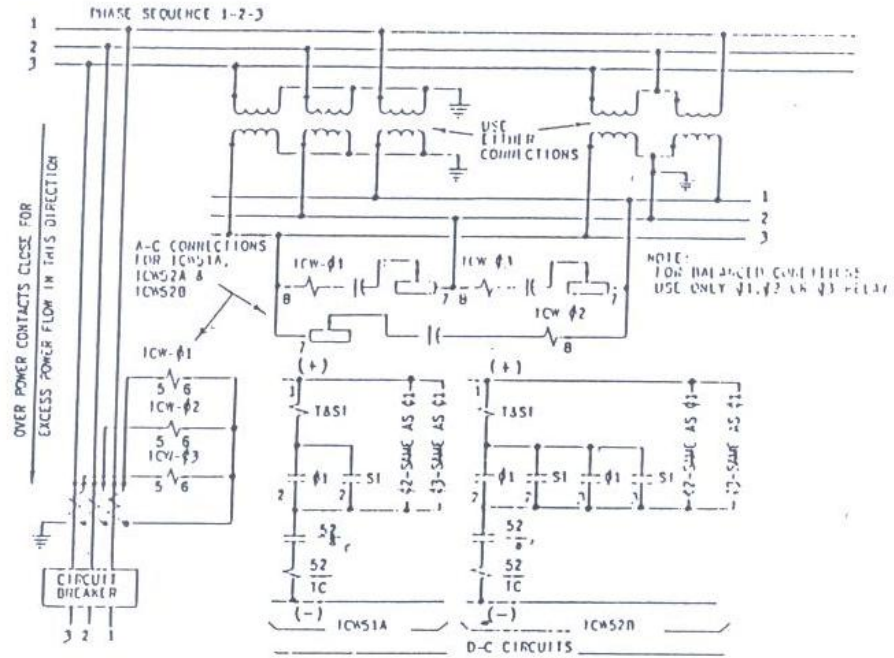


圖三、轉矩--相位角特性曲線圖

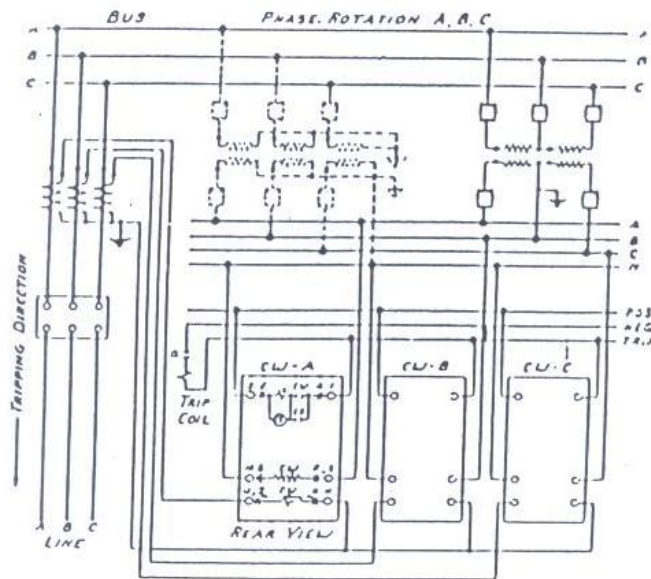


(c)發電機運作

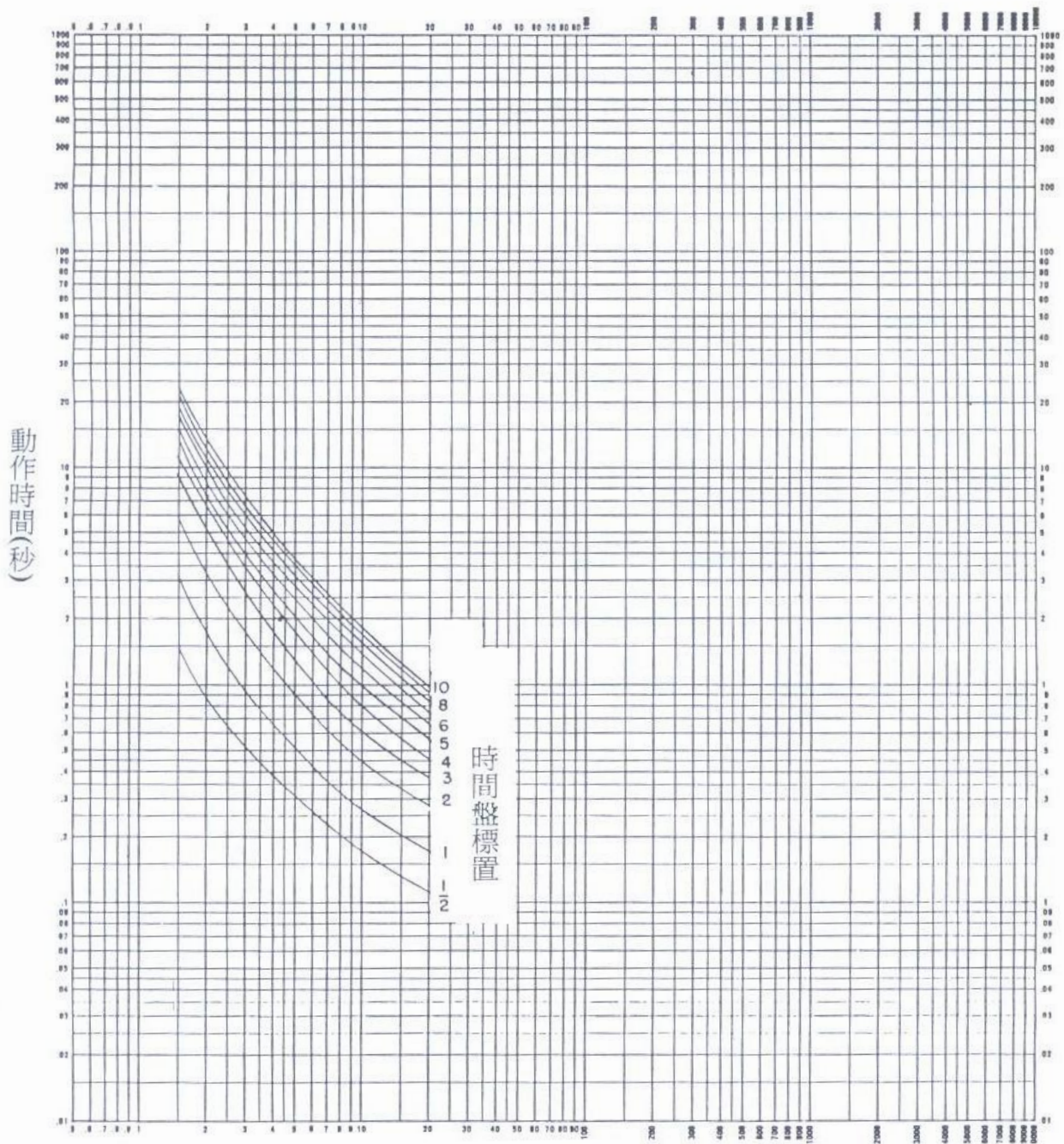
圖四、軸轉矩效應之相量分析



圖七、GE 製 ICW 型逆力電驛外部接線圖



圖八、ABB 製 CW 型逆力電驛外部接線圖



圖九、GE 製 ICW 型電驛之動作時間--瓦特曲線圖