

應及其失磁保護 同步機穩態運轉之激磁效

■ 李國楨

一、序言

欣聞今(84)年台灣地區用電量之最高尖峰負載將突破兩仟萬千瓦，在電力發展史上，憑添嶄新的一頁。這項記錄指標所涵蘊之意義頗為深遠：諸如商機朝氣蓬勃，產業景氣活絡，物產外銷、輸入激增，蔚為一幅暢旺昌盛景象，加上家居生活電氣用品普及率大幅提升，凡此種種不啻開創用電量新紀元，且締造亮麗耀眼的總體經濟成長率。這一切一切的成果，實深賴居幕後之電力源源不斷供應無虞也。

然而，同時也曾驚傳幾起電力系統大事故，衍生機組群相繼跳機，迫於情勢，不得已而採區域性輪流限電措施，以紓解一時電力不足之窘境，其影響所及除卻社會成本損失不貲外，也帶給社會大眾諸多不便，故迭遭各界紛紛責難。惟有深識今日電力結構者，徒嘆在此發電備轉容量(Reserve Capacity)嚴重不足前提下，實難發揮因應緊急事故之調度技巧，猶如巧婦難為無米之炊也。

針對當前因跳機引發電力供電不足之焦點問題，難免引人遐思「究竟機組跳脫之要件如何界定？」之嚴肅課題，故藉此良機探討，亦不失其重大意義且合乎時宜之論述。

一般而言，凡涉及(1)機組本身內部機件故障是否將肇致危害災難？(2)機組運轉出現不正常徵兆及(或)其所連接電力系統突發非穩定性狀況，足以重大影響機組運轉者。凡此種種現象，實均須由機組各相關保護電驛自動偵測、研判，如有異狀時，立即逕予跳脫，俾有效化解潛在危機。

通常所指發電機重大事故而涉及考量跳脫事件者略有下列諸因素：

1.有關於機組內部事故：

- (a) 定子(Stator) 樞繞 (Armature Windings) 以及與其互相聯合之保護區，發生相間及(或) 接地事故。
- (b) 在轉子(Rotor) 場繞 (Field Windings)內部發生接地事故。

2.關於發電機異常運轉及(或)電力系統出狀況：

- (a) 失磁(Loss of Field)或欠激(Insufficient Excitation)。
- (b) 超載(Overload)。
- (c) 過壓(Overvoltage)。
- (d) 低頻及高頻 (Under and Over Frequency)。

(e) 電流失衡 (Unblanced Currents)。

(f) 原動機脫離(電動機運作)(Loss of Prime Mover (Motoring))。

(g) 機組非同步併聯(Nonsynchronized Connection of Unit)。

(h) 失步(同步消失)(Out-of-step (Loss of Synchronism))。

(i) 次同步振盪(Subsynchronus Oscillations)。

限於篇幅無法一一詳述所載各類事故，本文擬僅選擇摘述『同步發電機之激磁效應及其失磁保護』，闡述電機基本原理概要，場流變化與功率輸出及穩態運轉之關係，最後介紹普受大型機組所採用之GE製CEH失磁保護電驛及ABB製(原WH 廠家)KLF-1(或KLF)失磁保護電驛，來說明實際應用與理論上之契合印證。

本文採「言淺意簡」方式論述，期盼有助於機組運轉人員或從事相關工程人員建立一些有關失磁保護運作之理念，甚而對電機激磁系統事故分析、研判之技巧更趨成熟，是所期許。

二、旋轉電機基本概念

依據法拉第定律 (Faraday's Law) $e = \frac{d\lambda}{dt}$ ，其物理現象為：由一時變之磁通量可產生一感應電壓。故設計將磁通改變依附在機械動力以旋轉方式運動時，機電能量轉換立即發生。通常在旋轉電機設計上，基本區分固定架構和旋轉架構兩大部份，固定部份稱為「定子」，其上有線圈繞組，稱之「電樞繞組 (Armature Windings)」簡稱樞繞。旋轉部份稱為「轉子」，其上亦有線圈繞組，稱之「磁場繞組 (Field Windings)」簡稱場繞。本文僅論述大型交流發電機，故通常電樞裝設於定子上，而磁場裝設在轉子上。磁場路徑經由交流機其它部份導入完成通路，供作激磁之初級電源，然後利用碳刷 (Carbon Brushes) 裝置於滑環 (Slip Rings) 或集流環 (Collector Rings) 上直接引入直流電流提供激磁。

圖 1. 所示，為一基本 N.S 兩極交流電機，其場繞氣隙磁通密度 β 與樞繞磁軸交角 θ 之空間分佈函數如圖 2(a)。又觀察圖 2(b) 顯示，當轉子旋轉一週，樞繞線圈 a-a 隨即對應產生感應電壓波

形。由此推論：轉速與電壓波頻率之關係式為 $f = \frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60} \dots \dots (1)$

$$f = \frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60} \dots \dots (1)$$

此處 f ：指感應電壓之頻率，單位為：

Hz(Hertz)。 $\frac{P}{2}$ ：表發電機 N、S 兩極

成對之磁極數。 $\frac{n}{60}$ ：表發電機每分鐘

旋轉速率。

今以台電電壓頻率為 60Hz 而論，若機組僅設有一對 N、S 極數，則該機組每分鐘轉速

$$n = \frac{120 \times f}{P} = \frac{120 \times 60}{2} = 3600rpm$$

(Revolutions per Minute)。依本例題而言，該機組每秒旋轉速率為

$$\frac{3600}{60} = 60, \text{ 轉/秒與感應電壓波之頻}$$

率 60Hz (或 60 週/秒) 恰好相等，故可作一一對應之函數兩者間存在同步變化運作，故稱爲此發電機爲同步機

(Synchronous Generator)。

圖 3(a)、(b) 分別爲基本四極同步機及其磁通密度之空間分佈。其每分鐘轉速爲

$$n = \frac{120 \times f}{P} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800rpm, \text{ 即}$$

每秒鐘轉速為 $\frac{1800}{60} = 30$ 轉/秒，但從圖 3(b)可知每轉可感應兩個完整週波之電壓波形，故每秒可產生2週波/轉 x30轉/秒=60週波/秒=60HZ之頻率。符合同步運作要素。

依法拉第定律 $e = \frac{d\lambda}{dt}$ 其中磁通

鏈 $\lambda = N\Phi \cos \omega t$ 此處 ωt 指定子和轉子兩線圈軸間之交角如圖3(c)所示。故

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} = \omega N\Phi \sin \omega t - N \frac{d\Phi}{dt} \cos \omega t \quad (2)$$

式中取負號表示交鏈此線圈之磁通減少時，其所感應電動勢將產生反方向電流以對抗交鏈磁通減少。式(2)右側前項表由磁場和樞繞相對運動所感應之速度電壓。第二項表變壓器電壓，僅當磁通強度隨時間變化時才存在。惟絕大多數旋轉電機在正常穩態運轉，該磁通

強度通常為定值，故 $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ 則式

(2)可化簡為

$$e = \omega N\Phi \sin \omega t = \omega N\Phi \cos(\omega t - 90^\circ) = E_{Max} \cos(\omega t - 90^\circ) \dots \dots \dots (3)$$

其中 E_{max} 為 e 之最大值，即

$$E_{max} = \omega N\Phi \text{ 因 } \cos(\omega t - 90^\circ) \text{ 落後 } \cos \omega t \text{ 有 } 90^\circ$$

故 e 與 λ 之物理關係為感應電壓落後於本身（磁通鏈）為 90° 。今以均方根值 E_{rms} (root mean square) 或有效值

(effective value)表示，

$$E_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{max} \text{ 或 } E_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \omega N\Phi = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot N\Phi = 4.44 f N\Phi \dots \dots (4)$$

式 (4) 顯示， E_{rms} 除與磁勢成正比外，亦與電壓波頻率 f 成正比。

三、同步機之等效電路

依電機理論描述：(1)當電樞（定子）電流 I_a 落後於轉子激磁之無載端壓 E_f 為 90° 時，電樞反應磁勢直接受無載磁勢抵減，如圖4(a)所示 $E_r = E_f - E_{ar}$ ；反之，(2)若樞流 I_a 超前無載端壓 E_f 90° 時，其產生之磁勢直接加到無載磁勢，如圖4(b)所示 $E_r = E_f + E_{ar}$ 。此乃直流磁場所產生無載端壓 E_f 與電樞反應電壓 E_{ar} 在相量上恰好相反，且其大小為激磁電流 I_a 乘以電樞反應之磁化電抗 (Magnetizing Reactance) X_ϕ 。故

$$E_{ar} = -jI_a X_\phi \dots \dots \dots (5)$$

負號表與 E_f 反向，由式(3)知 E_{ar} 之磁勢 Φ_{ar} 超前其 90° ，而樞流 I_a 亦超前 E_{ar} 90° 故兩者同相位。(3)若樞流 I_a 落後於無載端壓 E_f 任意相角 θ 時，各相關電壓及磁勢關係詳如圖4(c)所示，電樞反應磁通 Φ_{ar} 與樞流 I_a 同相位，故電樞反應磁勢 E_{ar} 落後樞流 90° ，因此

$$E_r - jX\phi I_a = E_r \dots\dots (6)$$

式中 $X\phi$ 是 E_r 及 I_a 之均方根值比例常數 (由式5得 $X\phi = j \frac{E_r I_a}{I_a}$)。因此電樞反應之等效電路可用一感抗替代; 又其氣隙電壓 E_r 與端壓之電位差恰為樞阻及漏電抗之合成壓降, 如圖5(a)、(b)所示, 故

$$V_t = E_r - I_a(r_a + jX_e) \dots\dots (7)$$

$$\text{代式(6)入式(7)得 } V_t = E_r - I_a[r_a + j(X\phi + X_e)] = E_r - I_a(r_a + jX_s) \dots\dots (8)$$

此處 $X_s = X\phi + X_e$ 稱為同步電抗 (Synchronous Reactance) 通常除了小型電機外, 樞阻只在研究損耗及溫昇作用才考量保留, 一般均可忽略不計。

四、同步機穩態運轉之激磁效應

同步機之特質為其激磁電流增加或減弱時, 不但影響勵磁電動勢的高低, 而且對功率因數 (Power Factor) 有直接關係, 此為其特長。如圖6所示, 試考慮發電機連接在一無窮匯流排 (Infinite bus) 上, 即連接在一甚大之電力系統上, (1) 匯流排電壓保持定值, 故同步機氣隙端壓 E_r 不變, 易言之, 定子反應磁勢 A 與轉子磁場磁勢 F 之合成氣隙磁勢 R 保持定值。

(2) 電壓波頻率維持不變。

(3) 與匯流排上之負載大小無關。

說明:

(一) 由式(3)顯示感應磁勢將超前所感應電壓 90° , 故假設氣隙端壓 \vec{E}_r 在水平軸上, 則其合成氣隙磁勢 \vec{R} (或 Φ_r) 須超前 90° , 又設樞流 \vec{I}_a 在水平向量上, 依前述 \vec{I}_a 必與反應磁勢 A 平行, 此時其功率因數 $P.f = 1.0$ 即 $\vec{F} + \vec{A}' = \vec{R}$ 。

(二) 若增加激磁電流, 則過激磁勢 \vec{F}'' 大於正常激磁磁勢 \vec{F} , 但合成磁勢 \vec{R} 維持定值, 故得反應磁勢 $\vec{A}'' = \vec{R} - \vec{F}''$, 但樞流 \vec{I}_a'' 須與 \vec{A}'' 平行, 故自原點做 \vec{A}'' 之平行線, 得知 \vec{I}_a'' 落後於 \vec{E}_r , 發電機供給系統落後仟伏安 (Lagging KVA) 之電源。

(三) 當勵磁電流減弱時, 則欠激磁勢 \vec{F} 較正常激磁磁勢為低, 因合成磁勢 \vec{R} 恒為定值, 故反應磁勢 $\vec{A} = \vec{R} - \vec{F}$, 其樞流 I_a 須平行於 \vec{A} , 從原點劃出平行於

\bar{A} 之 \bar{I}_a ，得知 \bar{I}_a 超前於 \bar{E}_r ，發電機供應超前仟伏安(Leading KVA)之電源。通常同步機輸出有效功率(Active Power)部份，由原動機機械功率轉換而來；而無效功率(Reactive Power)則由其場流激磁來決定。假設原動機輸入於同步機之有效功率維持定值，而僅激磁改變，

即 $|V_t| \cdot |I_a| \cos \theta = P$ 恒持定值，而 $|E_g|$ 大小深受影響，其變化如圖7(C)所示 $E_g \cdot \cos \delta = \bar{V}_t$

此處 δ 稱為電機之轉矩角或功率角(Torque Angle or Power Angle of The Machine)。

解說：

- (a) 同步機過度激磁時，將提供系統落後於 V_t 之電流，此可視同自系統吸取超前電流，其本質具有電容器之特性，故提供系統無效功率。
- (b) 同步機激磁不足時，將供應系統超前於 V_t 之電流，此可視為從系統吸入落後電流，其本質具備電感器之作用，故自系統吸取無效功率。

(c) 同步機之激磁正常 $E_g \cdot \cos \delta = \bar{V}_t$ 僅提供有效功率之部份，無效功率則不存在。

綜上推論：改變同步機之激磁電流，可望調節無效功率潮流量，在系統運作上，利用單獨裝設無載同步機來執行改善功率因數，或操控無效仟伏安(Reactive KVA)之潮流，此種電機稱為同步調相機(Synchronous Condensers)，其額定容量規格越大時，較靜電電容器(Static Capacitors)更符合經濟效益。

六、同步機穩態運轉之特性曲線。

圖 8. 為發電機在定值頻率及功率因數下，當負載變化時，為維持額定端電壓所需之激磁電流，繪製成特性曲線，稱為發電機複合曲線(Generator Compounding Curve)。由圖中觀知：功率因數落後者(過激)，在負載電流增加時，欲保持端壓為定值，其激磁電流增量為最大；功率因數為 1.0 者居次，功率因數超前者(欠激)反而減少。

圖9所示為考慮發電機之勵磁電流維持定值，探討負載電流與端電壓兩者之關係曲線，稱為發電機固定場流之伏特—安培特性曲線(Generator Constant

Field Current Volt-Ampere Characteristic Curves)。由圖中觀察知：(1)功率因數落後者（過激），在負載減輕時，端電壓提昇最大，其理可自圖6證明 F 之絕對值大於 R 之故。但過載（大於1.00pu）後，端壓逐漸下降，超量過載時可使端壓下降至零值。(2)功率因數為1.0者，在輕載時端壓略升，但於超載時，仍逐漸下降，過量時亦可使端壓降至零值。(3)功率因數超前者（欠激）在額定負載內，其端電壓反而低於額定值，參考圖6知，係 F 之絕對值小於 R 之故。然而卻於稍微過量時，端壓反而增高，但在超量過載下，端壓有驟降為零值之傾向，發電機即進入非穩態運轉。

通常，在某一特定電壓及功率因數下，能持續運轉而不致產生過熱之最大仟伏安負載，定義此仟伏安值為同步發電機之額定值。另者，在額定電壓值±5%內調壓可視為合理範圍。若有效功率與電壓均固定時，無效功率輸出將會因電樞（定子）或場繞（轉子）之溫升而受到限制。圖10為一大型渦輪機（Turbine-Generator）之無效電力容量曲線組（Reactive-Power Capability Curves）。依圖示：在額定電壓運轉下，考量各種功率因數及電機可容許的最

大無效功率，其電樞溫升從單位功率因數（ $P.f=1.0$ ）；到額定功率因數（本案例為0.85）範圍內之限制因數。在低功率時，場熱發揮限制作用，此種曲線組在設計或操控運轉及涵蓋所連接電力系統時，極有實質上參考用途。圖中同時顯示出增加氫壓力的效應。

七、同步機失磁原因及其保護基本原理和考量

造成同步機磁場偏低或消失，概略可歸納為下列諸因素：

- a) 主勵磁機失磁。
- b) 磁場斷路器(Field Breaker)意外跳脫。
- c) 磁場電流發生短路現象。
- d) 勵磁機之碳刷(Carbon Brush)接觸不良。
- e) 磁場斷路器門鎖失靈 (Loss of Latch)。
- f) 激磁系統之交流電源故障。
- g) 電壓調整器失靈。

當發電機磁場減弱或消失，則有下列三種物理現象發生：

- (1) 磁場激磁不足，故端電壓特低，此可由式(4) $E_{rms}=4.44fN \Phi$ 當 Φ 趨小時， E_{rms} 跟隨成正比減小。

(2)因Erms降低，故從發電機外部觀

視其內部等效阻抗 $Z = \frac{Erms}{Ia}$ 趨小，即阻抗轉趨特低。

(3)輸出功率由平常 $P + j\theta$ 轉變為 $P - j\theta$ ，因必須從系統吸取無效功率提供激磁電源，以維持端電壓於定值，此時發電機成為同步感應發電機。

發電機之失磁保護電驛(國際通用代號為40)，係針對上述三種物理現象而設計的。(1)電壓特低—考慮以欠壓元件(Undervoltage Unit)來感測。(2)阻抗特小—設計可偏移阻抗元件(Offset Impedance Unit)之特性圓來監測其大小，若落入阻抗圓內即視為失磁現象，否則即視為正常狀態。(3)無效功率流向相反—利用方向性元件來偵察，失磁時其相角 $\theta = \tan^{-1} \frac{(-Q)}{P}$ ，令方向性元件接點從常開(Normal Open)轉趨閉合。總之，失磁電驛基本保護原理係取用發電機之電壓、電流元件之相位變化而研判 θ 之流向。

除上述情節外，亦須考量發電機溫升限制及其與系統之間運轉之穩定性。在實際運作上發電機之激磁電流被調整略為落後其輸出電力，如圖11所

示，以發電機出力MW-MVAR為座標圖運轉全貌。若發電機之端壓在水平軸上，則輸出落後電流應分佈於第四象限，故第四象限視為正常運轉區域，若激磁減弱或消失，其輸出電流應轉趨超前(參閱激磁效應說明)，即輸出電流進入第一象限，故第一象限具有降低運轉穩定性之特質。

又前段曾述及無效功率之大小，受到電機(1)定子樞繞溫升，(2)轉子場繞過熱，(3)定子鐵心內部熱量積蓄等因素，而有所限制。若將此三要件分別聯合各自所對應弧狀曲線，圍築成封閉曲線，即成眾所周知之容量曲線(Capability Curves)，如圖 12(a)所示，利用此曲線來規範發電機運轉之極限範圍。此外，考量發電機與系統之穩定運轉關係，須再增列穩態穩定度極限(Steady-State Stability Limit ; SSSL)項目。其定義如下：形如圓弧狀具有圓心偏移(Center Offset) =

$$\frac{1}{2}V^2\left(\frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_d}\right) P.U \quad \text{半徑(Radius)=}$$

$$\frac{1}{2}V^2\left(\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_d}\right) P.U$$

此處V為發電機輸出之線對地端電壓，Xs為系統之總等值阻抗，以發電機

基準值標示。

X_d 為同步機之未飽和電抗，以發電機基準值標示。

從圖12(c)可見到典型的穩態穩定度極限(SSSL)曲線之軌跡，該曲線雖跟隨發電機及其所連接系統有密切關係，然而儘管系統與發電機輸出電壓隨運轉情況有所變化，但對常態穩定度而言，該限制影響程度相對地微不足道。另外，勵磁系統裝設有一極小激磁限制器 (Maximum Excitation Limiter, MEL) 其功能要求有效抑制激磁調整器操控降低場流，不得低於其設定值，而此設定值亦須維持在穩態穩定度極限(SSSL)曲線之上，從圖12(b)可觀察到。

如何將MW-MVAR座標圖上發電機容量曲線及穩態穩定度曲線轉換為R-X座標圖，以方便失磁電驛阻抗元件之應用，試考慮將容量曲線上每一點與水平軸夾角 β ，以及所對應之三相MVA值，按轉換公式

$$Z_p = \frac{KV^2}{MVA} \dots\dots\dots(9) \text{ 一次側歐姆或}$$

$$Z_s = \frac{KV^2}{MVA} \cdot \frac{R_c}{R_v} \dots\dots\dots(10) \text{ 二次側歐姆}$$

R_c ：表失磁電驛接用比流器之匝比。

R_v ：表失磁電驛接用比壓器之匝比。將所有 Z_p 或 Z_s 點之集合繪製於 R-X 座標圖，即得到容量曲線在 R-X 軸上，如圖 12(b)(d)所示。

例如圖 13 所示：0.6PU KW 在 30 Hz 之輸出為 -0.4PU 無效功率 KVA 因此

$$|KVA| = \sqrt{0.6^2 + a(-0.4)^2} = 0.715 P.U. \theta$$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{-0.4}{0.6}\right) = -33.6^\circ \text{ 轉換阻抗}$$

$$|Z| = \frac{(1.0)^2}{0.715} = 1.4 P.U. \text{ 繪製於 R-X 座}$$

標圖 $Z = 1.4 \angle -33.6^\circ$ 如圖 14 所示，若電流等值阻抗 X_s 及發電機未飽和同步電抗 X_d 為已知，則可提前完成穩態阻抗圓形，取圓心偏移原點(Origin)為

$$\frac{1}{2}(X_d - X_s) \text{ 半徑為 } \frac{1}{2}(X_d + X_s), \text{ 如圖}$$

12(d)，發電機端電壓在原點位置， X_d 在原點正下方（即負 X 軸上）， X_s 在原點正上方（即正 X 軸上）。有趣的現象是：因 $Z_p = \frac{KV^2}{MVA}$ ，故 Z_p 與 MVA

值成反比，從圖 2(a)、(b)比對出凡 MVA 值大者，其 Z_p 反而更小，因此在電力座標圖之安全運轉電力，分佈於容量曲線及穩態穩定度曲線之內部，在 R-X

座標圖之安全運轉電力，分佈於容量曲線及穩態穩定度曲線之內部，在 R-X

座標圖上，安全運轉電力，則分佈於阻抗圓之外部，當電力位階(Level)低於穩態極限時，則最小激磁限制器(MEL)將動作。

八、失磁阻抗特性圖之探討

A. 磁路事故方面：

當某一同步機因磁路問題失磁時，其將傾向感應發電機運作，即出現超逾正常速率轉動，且減少有效功率輸出及吸取無效功率供勵磁電源，此時失磁電驛所感測之阻抗將視電機特性，負載潮流進入失磁電路及磁場事故類型等而定。

(圖 15)表示單一機組連接於系統，其失磁阻抗特性圖事前已設定在R-X軸，其直徑等於發電機之同步電抗 X_s ，偏移原點下方為發電機暫態電抗 X'_d 之半，當勵磁機發生場繞短路事故，失磁電驛所觀測到阻抗軌跡如A.B.C三曲線者，說明如下：

- (1)曲線A：表滿載運轉下失磁，軌跡終結在負X軸附近區域，約略等於發電機次暫態電抗 X'_d 分佈在直軸與象限軸之平均位置。
- (2)曲線B：表示發電機介於滿載和無載間之中載失磁。

(3)曲線C：表示發電機在無載或輕載時失磁，其軌跡終結靠近在負X軸區域，其大小約略為發電機之同步電抗 X_s 分佈於直軸及象限軸平均位置。

若磁路為開路事故，而因滑環(slip rings)閃絡致場路有效短路，其曲線仍如圖 15 所示。假如滑環並未閃絡，保持場路開路，這阻抗軌跡仍將近似地終結在相同點，(如圖 15)所示者(符合原各種相同初始條件)，但因轉差率(slip rates)均不相同，通常他們將跟隨不同的路徑而到達終點上。因此，圖 15 阻抗特性圖將充分檢測出某一磁路，從任何起始負載由於開路或短路之事故。

B. 穩態系統受到干擾而發生搖擺時之失磁：

A.段所描述失磁保護，應排除穩態系統受外界干擾發生搖擺，但既要確保安全亦要避免非期盼之跳脫。圖 16 說明典型阻抗軌跡從可偏移姆歐(offset mho)電驛在發電機端觀視系統附近事故被清除後之各種境況。

- (1)虛線 A 一代表對機組主變(Unit Transformer)高壓側 F 點發生三相短路事故，正當發電機滿載運轉且為單位功率因數 (Unity

power factor)(La)。當事故被既定電驛及斷路器清除且電壓調整器仍正常運作，此阻抗跳至 Sa 點及跟隨虛線路徑返回 La 附近區域。這是一種穩態搖擺且阻抗路徑並未進入阻抗特性圓內部。

(2)實線 B —說明一種下列情況之完全整合：

- a) 發生於事故 Lb 之前電機正逢欠激運轉。
- b) 事故未被清除直到危急狀態轉變為電機面對問題之時刻。
- c) 電壓調整器失效。

因產生的搖擺是穩態的，最後將返回到 Lb 地區附近，阻抗軌跡進入較大電驛特性圓內部。根據研究指出：軌跡停留在特性圓內之期間其時程為 0.2 ~ 0.4 秒。因此，若較大之電驛特性圓被採用，則須附有時延輔助電驛，其設定約為 0.5 ~ 0.6 秒，故非期盼跳脫自可予以免除。

(圖 16)所示係引薦使用兩具可偏移姆歐特性圓，兩具特性圓應設定相等偏移量，其等於 $\frac{X'_d}{2}$ p.u.，歐姆值較小者應被設定為直徑等於 1.0 pu 阻抗，以電機為基準值，較大者之直徑等於 X_d pu 歐姆值。較小設定特性圓電驛動作

中華民國八十四年十一月

將配合內含之 4 ~ 5 週波時延。較大設定特性圓電驛動作將配合外部延時電驛，其範圍大約在 0.15 ~ 3.0 秒內。

在實務運作上，是否某一事故狀況將產生一類似圖 16 內之曲線 A 或 B 之搖擺，將視系統和發電機運轉情形而論。這只有藉系統研究方式，才可以完全被評估出來。因此，是否需要乙具或兩具特性圓，將視發電機運轉方式、發電機特性及連帶相關特殊的系統諸條件而定。

另外，關於某些涉及電壓調整器在欠激極限時之操控運作，引人深憂的是：當調整器正試著去維持極限而尚未達到任務，為此，反而促成視在阻抗 (Apparent Impedance) 瞬間進入特性圓內部。因此，如圖 15 所示僅單具特性圓可能因而誤動作（調整器未達成任務）。如圖 16 者，較大特性圓附有時延延遲，此問題可被避免發生，發電機調整器製造廠家理應受諮詢指導時延電驛之時間延遲。

如圖 16 應認清的是在真實的失磁發生於輕微負載情況，僅利用較大特性圓即可以檢測出，此將產生在某一延時後跳機，此舉將予系統某些警示效果，此應由使用者予評估。

以上基本的研討均適用於發電機配合所有型式之原動機，然而，在水力電機案例上，在輕載補償系統分佈容抗(Distributed Capacitance)期間，必須發生嚴重性欠激，阻抗特性圓方可能動作。換言之，電機端之特性圓所觀視動作情況，相當接近失磁情況。這些應用連同欠激同步調相機應用，均須參酌製造廠家所提供之額外資訊。

(九)KLF-1 型失磁電驛應用及其原理

簡介：

ABB 製 KLF-1 失磁電驛應用之接線概要(如圖 17)所示：

1. 方向性元件：當無效功率乏(VAR)流入電機，反映於 R-X 座標圖上，其零力矩線設定與 R 軸交角 -130° 其主要功能係防止失磁電驛遇外部事故（非攸關失磁情事者）而誤動作。
2. 測距元件：係一種感應式圓筒型元件，其方向特性視其磁極內之動作線圈與極化線圈兩組磁通量彼此間相位關係而定。
 - (A)動作磁勢：由一組對立磁極構成，附上 V_{AG} 偏壓，被長距離補償器(Long Reach

Compensator) T_A 所導出之電壓修正。即 $V_{op}=V_{AG}+I_A Z_A$ 。

(B)極化磁勢：附上相同 V_{AG} 偏壓，再被短距離補償器(Short Reach Compensator) T_A 所導出之電壓修正。即 $V_{POL}=V_{AG}-I_A Z_C$ 。

設計上當動作磁勢之磁通量超前極化磁勢之磁通量時，調整測距元件接點閉合，即為動作區域。

測距元件之距離(Reach)由補償器 T_A ， T_C 利用自耦變壓器標置來求得。此處所指補償器之交互阻抗(mutual impedance)，定義為『次級側感應電壓對初級側電流之比值』，每一次級側補償電壓再串接 V_{AG} ，對長距離者等於 $I_A Z_A$ ；短距離者等於 $I_A Z_C$ 。此處電流 I 為流入電驛者。

(圖 18)說明補償電壓 $I_A Z_A$ 與 $I_A Z_C$ 如何影響 R-X 特性圓。注意： Z_A 完全獨立地決定長距離者，僅 Z_C 完全獨立地安置短距離者。若 $Z_C > 0$ 則特性圓包含原點； $Z_C < 0$ 時，特性圓失去原點。下節詳述補償器動作行為。注意圖 16 中 X_C 及 C_C 促成極化電勢 V_{POL} 超前原相位 90° 。

(如圖 19(a))當 $I_a=0$ 時，極化電勢

V_{POL} 超前動作電勢 90° ，此種相位關係產生抑制力矩，即測距元件不動作。

(b)若 $I_A = |I_A| \angle 90^\circ$ 時，(i)若 $Z_c > 0$ ，特性圓含原點，遇充分足量使 $V_{OP} = V_{AG} + I_A Z_A$ 之合成量朝負 R 軸方向（因 $I_A Z_A$ 補償朝反 V_{AG} 方向運作），而 $I_A Z_c$ 補償卻增加 V_{POL} 量，其結果使阻抗元件動作。(ii)若 $Z_c < 0$ 特性圓不含原點，此改變引起 V_{POL} 減少相當於(i)中增加之補償，當電流增量趨使 V_{POL} 最後將轉變在負 X 軸時，重新建立抑制力矩，即測距元件不動作。

(c)若 $I_A = I_A \angle -90^\circ$ (i)若 $Z_c > 0$ 時 V_{POL} 朝反向 $I_A Z_c$ 補償作用，此情況下 Z_A 補償在平衡點上沒有效應，此正說明短距離者僅由 Z_c 獨立地安置，當 V_{POL} 朝負 X 軸方向，故測距元件動作。(ii)若 $Z_c < 0$ ， V_{POL} 補償 $I_A Z_c$ 同方向增加，而 V_{OP} 仍沿正 R 軸受 $I_A Z_A$ 補償，故測距元件不動作。本元件設定相關於容量曲線及 MEL 曲線，系統附近三相事故清除後穩態搖擺之 KLF 電驛，如圖 20 ~ 22 所示。

3. 欠壓元件：通常設定在系統最小安全穩態電壓值，廠家調整在 70 ~ 80 % 正常系統電壓值。在實務上，許多機

組連接在同一匯流排，若其中某部機組失磁時，此舉可能不至於降低匯流排電壓足以使其欠壓元件動作，故實際應用上可採「短路該欠壓元件」方式。

十、CEH 失磁電驛應用與原理簡介

GE 廠家製造 CEH 型失磁電驛是一具單相單區間可偏移姆歐型(offset mho)測距電驛，該電驛設計來偵測同步機失磁保護，可偏移姆歐特性圓提供介於失磁及其它可能存在於系統上正常或非正常情況間之用途。內含一組 66 ~ 88 毫秒（約 4 ~ 5 週波）定時緩遲輔助元件，被應用來防範電震(Shock)、振動(Vibration)或突然完全失去交流電壓等任何可能造成的瞬間誤動作。

可偏移姆歐元件係類似於基本的姆歐元件，添加乙具轉換器(transactor)，此轉換器為一氣隙電抗器(air gap reactor)，附有次級側繞組提供獲取所期望電壓，當初級側電流已知時，轉換器同時提供初級側電流和次級側電壓間之電氣隔離作用，利用添加轉換器次級側感應電壓串接系統比壓器端壓，以及應用向量和到姆歐元件電壓

回路，此效應即發揮可偏移姆歐特性而毋需改變其直徑大小。

內部連接到轉換器次級側是具有如後述的極性，可偏移之方向係指其移轉特性圓之圓心偏離原點正下方。(如圖 23)說明當抑制分接頭(Restraint Tap)在 100 %，可偏移分接頭 (Offset Tap)改變之諸效應。這說明特性圓之直徑並未隨偏移量改變而有所變化。但圓心以偏移分接頭值偏離原點。(圖 24)說明偏移分接頭固定在 1 歐姆，僅改變抑制分接頭之諸效應，特性圓之直徑在線對地次級側歐姆為 $\frac{500}{\text{抑制分接頭}\%}$ ；易言之，若抑制分接頭為 100 時，直徑為 5 歐姆，或 12.5 歐姆當抑制分接頭為 40 時。

輔助元件(A)裝置於中央，其功能防止電驛誤動作，當電壓回路失壓或當電壓降到零值，由於振動而使接點不穩定跳動，此元件動作時間約為 0.067 ~ 0.083 秒。

(如圖 25)所示，斷路器接點 52/a 必須被接用於直流回路內，這些 52/a 接點係為了阻止電驛在發電機起動過程可能出現低頻或無壓而誤動作。

另者，某種重要考量有關電驛接用

比壓器次級側熔絲實務問題，通常除了加至 CEH 電驛外，可能尚有其它負擔 (burdens) 連接於相對相或相對地間。若某一次級側熔絲或無熔絲開關 (NO FUSE Breaker) 單相開路，則該相電位不全然下降至零，若存有某些電位，則將視所有聯接總負載阻抗分佈於該(開路)相及其它(健全)相與接地情況而定，如此合成之電位偏壓於 CEH 電驛。其特性圓之直徑通常將增大，且最大力矩角可能隨順時針或逆時針方向轉移，應視當時情形而定。因此，在正常負載下為避免出現此類誤動作，在 CEH 電驛接用比壓器次級側採分離方式，(如圖 26)所示。然而此種作法仍無法有效解決熔絲因斷路而衍生之問題，故為防範此種顧慮，實用上，通常再增設乙具平衡電壓電驛 (Voltage Balance Relay) CFVB 型提供三相電壓監測，若三相電壓全部或部份(取自熔絲兩端)失衡，則 CFVB 電驛動作，其常閉接點(Normal contact)此時啓開，以發揮隔離直流電源通過 CEH 電驛接點而避免跳脫。

十一、結語

通常發電機被要求長期保持在系統上運轉，儘其可能提供電力輸出至系

統，尤以其佔系統某一重大比例之大容量機組為最，更突顯其運轉具有不可輕忽之地位。為達到此目標，某一機組失磁預警可予運轉人員搶救恢復激磁回路正常之可能機會，避免非必要之跳脫。蓋非必要之跳脫將失去有效功率輸出之嚴重後果，可能加速系統崩潰瓦解及混亂失措。然而，若發電機與系統間因失磁肇端導致朝向非穩態運轉發展，則發電機只有自動跳脫，以維繫系統局勢穩控運轉，故失磁保護之重要性，於此約略可窺見一斑。

資料：

-
- 1.ELECTRIC MACHINERY
FITZGERALD KINGSLEY KUSKO
3rd Edition 1971。
 - 2.ELEMENTS OF POWER SYSTEM
ANALYSIS William D.Stevenson.Jr
1975。
 - 3.PROTECTIVE RELAYING PRINCIPLES AND APPLICATIONS
J.Lewis Blackburn 1987。
 - 4.APPLIED PROTECTIVE RELAYING
W.H. ELECTRIC CORPORATION
1982。
 - 5.TYPE KLF-1 LOSS-OF-FIELD
RELAY W.H. I.L. 41-748.ID。
 - 6.LOSS OF EXCITATION RELAY
TYPE CEH51A G.E. GEK-27887C
27887D。

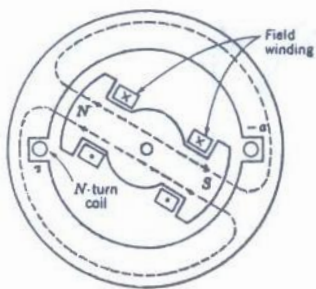


圖 1. 基本同步發電機

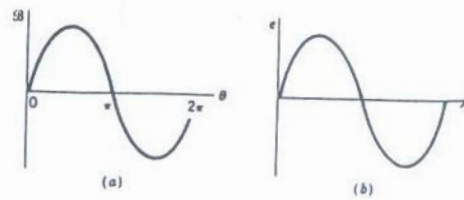


圖 2. (a)磁通密度的空間分佈 (b)產生電壓之對應波形

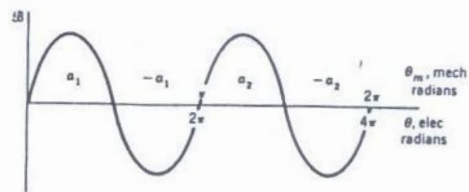
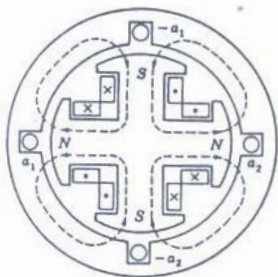


圖 3.(a)基本四極同步發電機 (b) 四極同步發電機中磁通密度的空間分佈

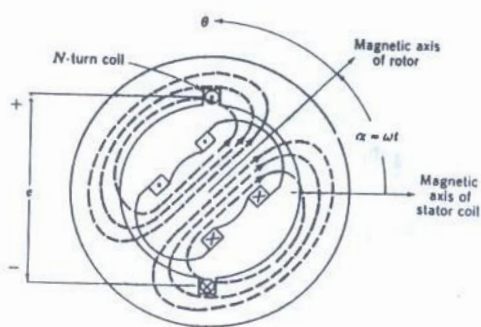


圖 3.(c)基本二極交流機轉子磁軸與定子磁軸交互運作

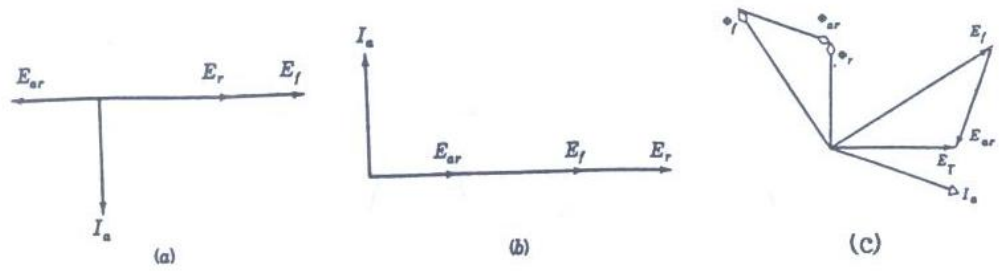


圖 4. E_f 與 E_{ar} 間之向量關係

- (a) 表示發電機輸出電流落後 $E_f \angle 90^\circ$
- (b) 表示發電機輸出電流超前 $E_f \angle 90^\circ$
- (c) 表示發電機輸出電流落後 E_f 任意角度

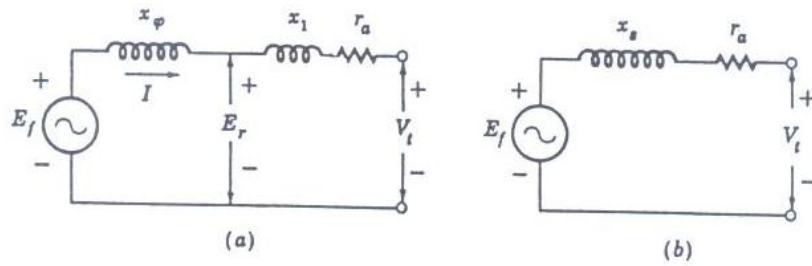


圖 5. 交流發電機之等效電路

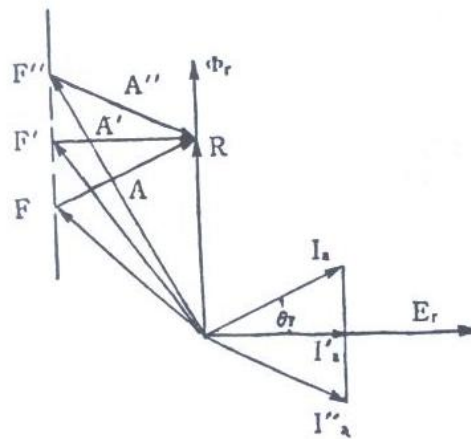


圖 6. 勵磁磁勢與電功因數

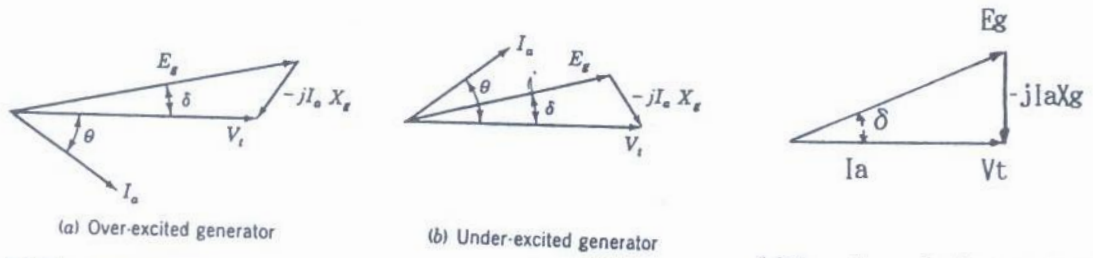


圖 7. 向量圖 (a)過激磁 (b)欠激磁 (c)正常激磁之發電機
Ia 表示發電機輸出之電流

(c) Normal excitation generator

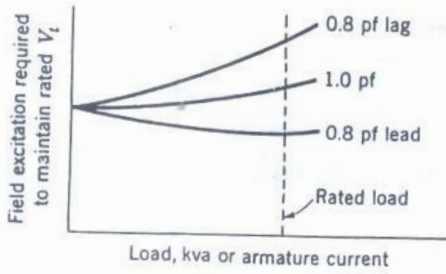


圖 8. 發電機複合曲線

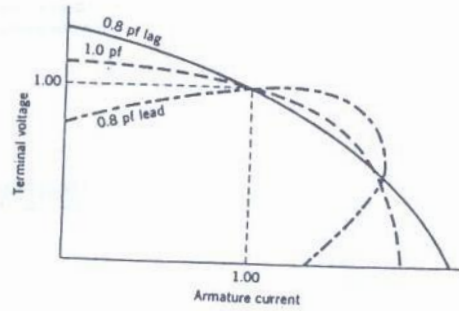


圖 9. 發電機固定場流之伏特--安培特性曲線

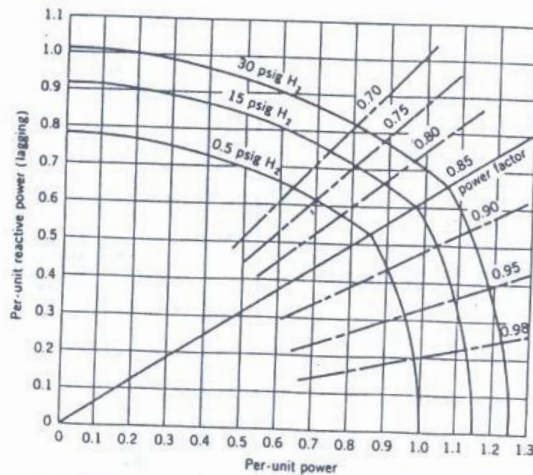


圖 10. 功率因數 0.85，短路比(SCR)0.8 氬冷式
渦輪發電機之無效功率曲線，基底 KVA
在定額值及 0.5 磅氬氣時

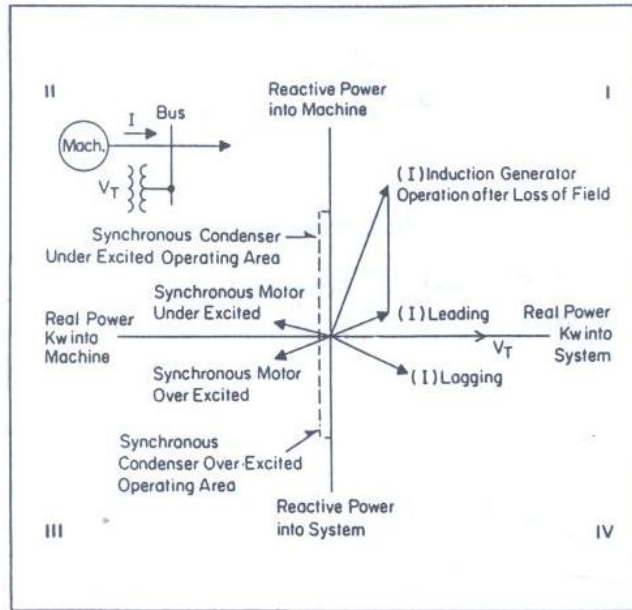


圖 11. 交流發電機在各種情況之運轉全貌

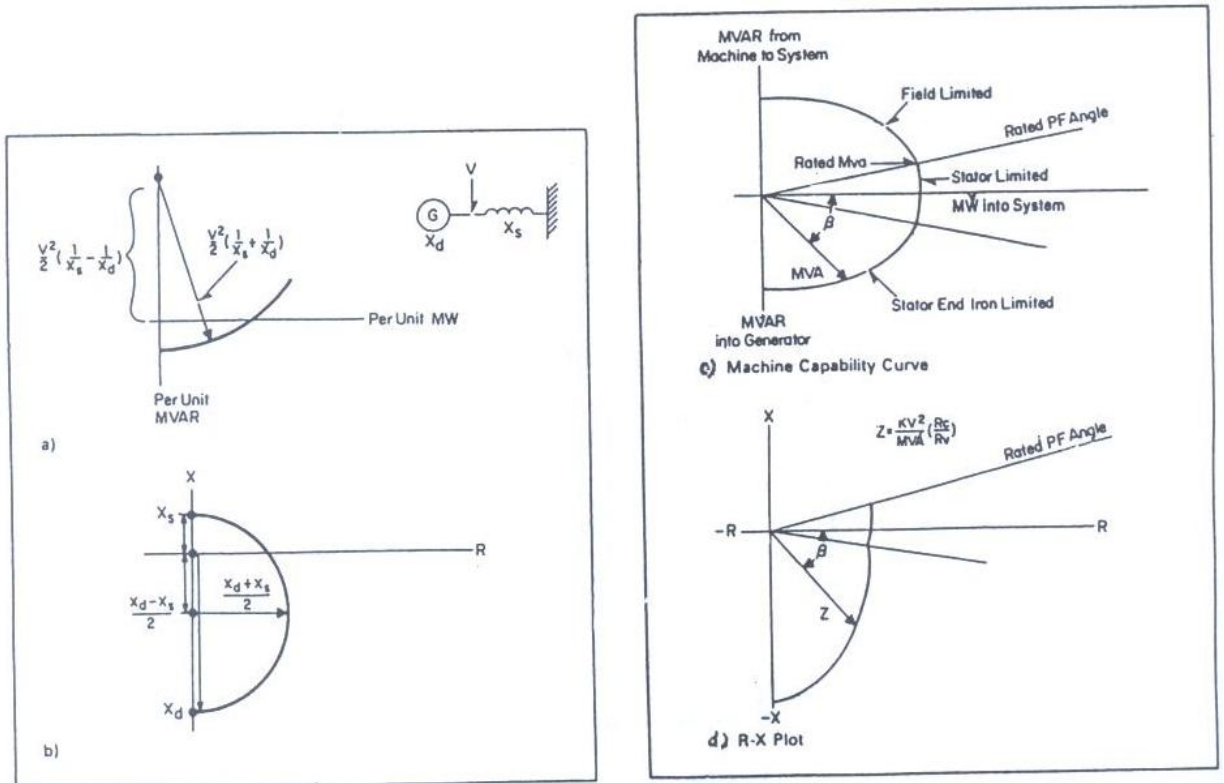


圖 12. 由 KW-KVAR 功率座標轉換為 R-X 座標
(a)(b)表容量曲線，(c)(d)表穩態穩定度曲線

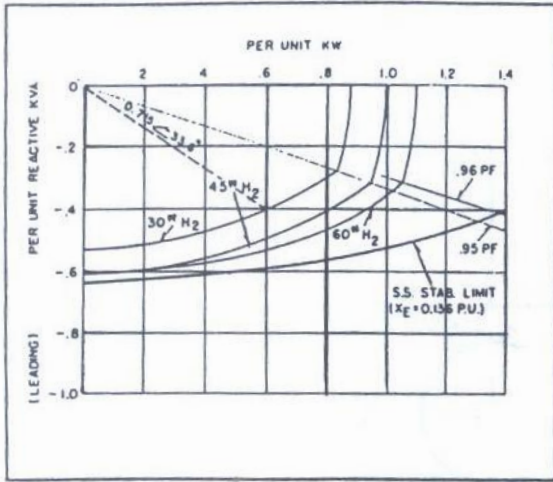


圖 13. 典型電機容量曲線以標么基值繪製
(183500KVA, 45# H2, 18KV,
0.9pf 0.64SCR 內冷式 3600rpm)

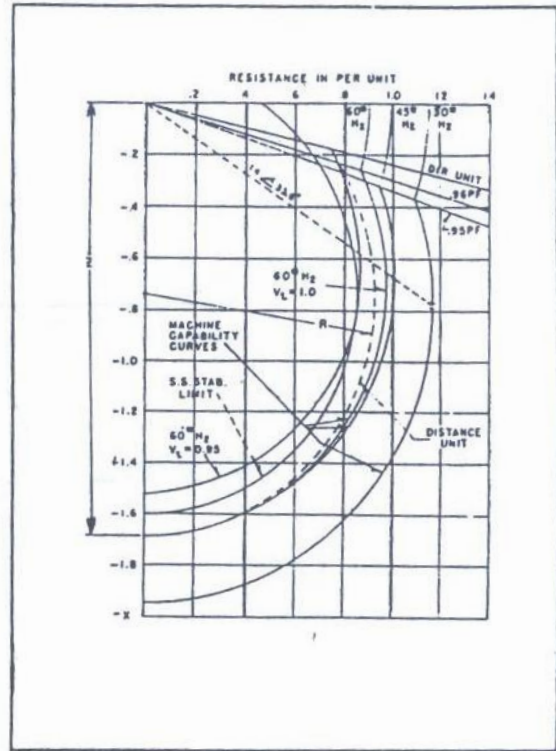


圖 14. 典型電機容量曲線與 KLF-1
取樣標置-標么阻抗

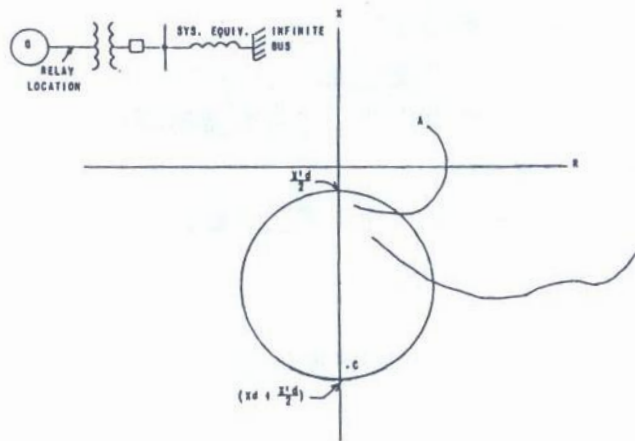
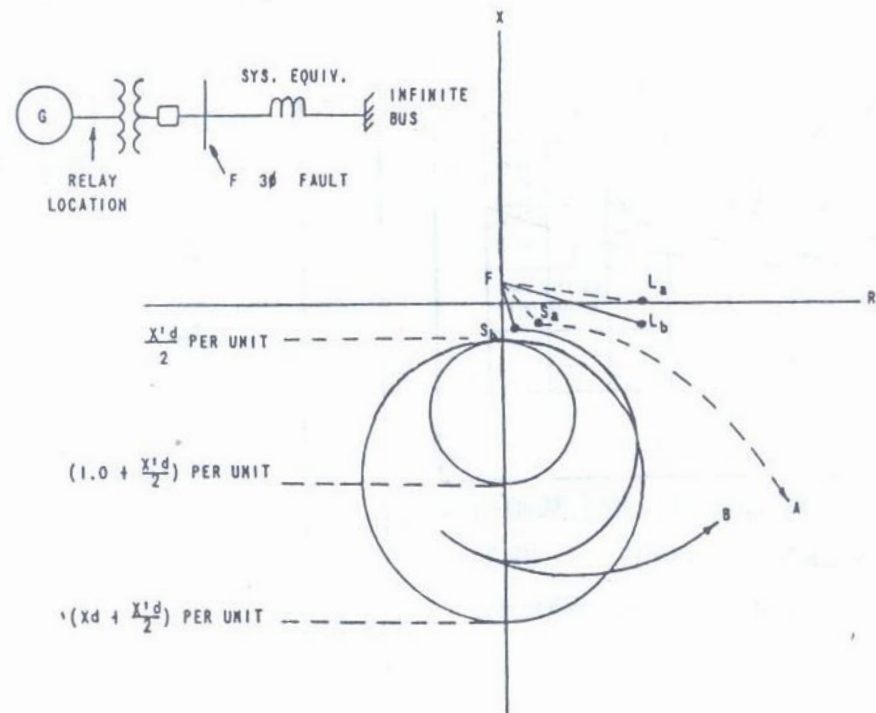


圖 15. 失磁情況下各種典型阻抗軌跡
A--表示滿載時磁場短路
B--表示中載時磁場短路



F---三相事故位置

A---在單位功率負載且(或)事故快速清除，且(或)電壓調整器使用中，發電機阻抗搖擺軌跡(虛線)

La--單位功率因數，1.0 標么負載阻抗

Sa--事故清除前之瞬時阻抗

B---在超前 0.95 功率因數負載，且事故清除在危急下轉換為發電機面對問題的時刻，且電壓調整器失效時，發電機阻抗搖擺軌跡(實線)

Lb--0.95 超前功率因數，1.0 標么負載阻抗

Sb--事故清除後之瞬時阻抗

圖 16. 受到干擾之典型阻抗軌跡搖擺現象

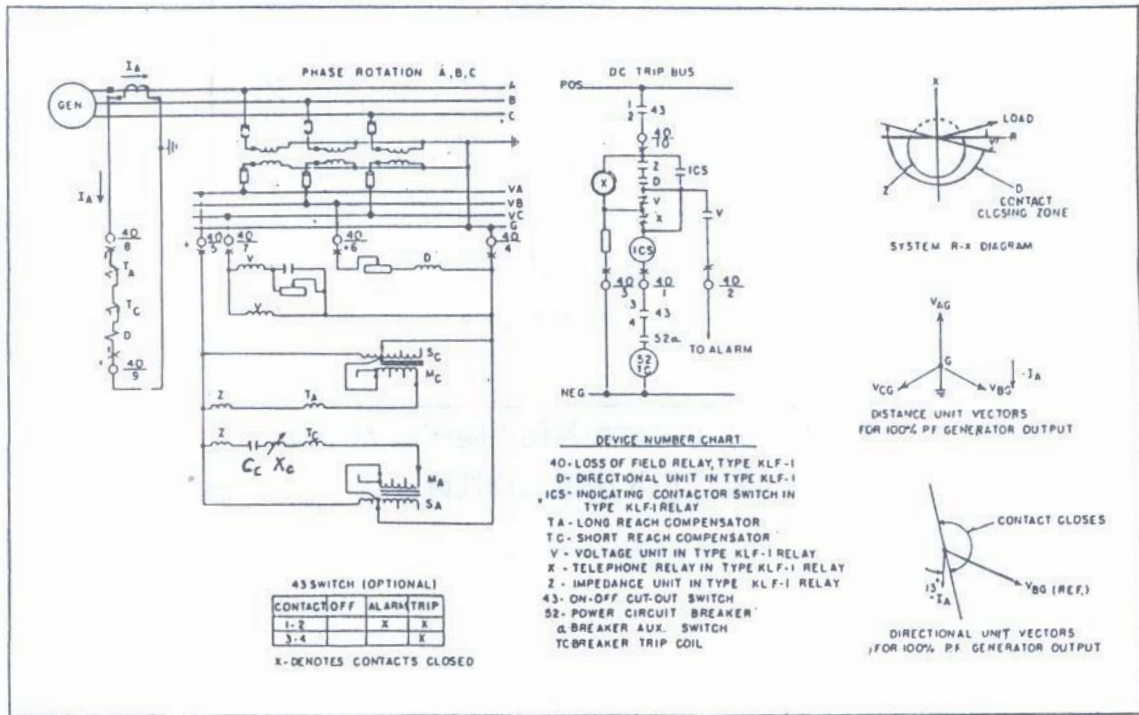


圖 17. KLF-1 型失磁電驛外部接線概要圖

圖示符號之設備說明

- 40---KLF-1 失磁電驛
- “D”--KLF-1 電驛之方向性元件
- ICS--KLF-1 電驛動作指示器
- TA--長距離補償器
- TB--短距離補償器
- X--緩時元件
- V--欠壓元件

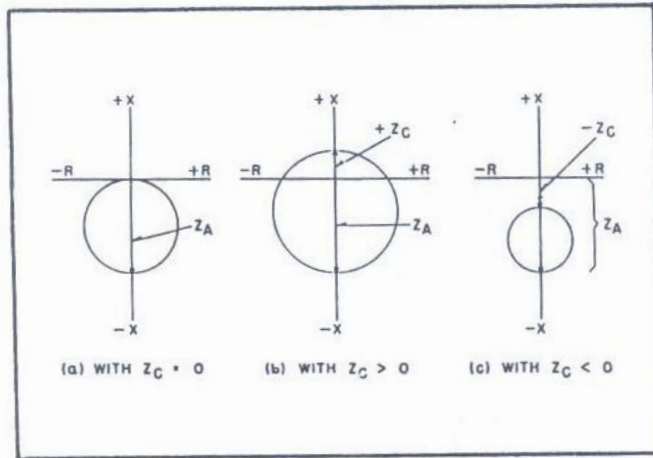


圖 18. KLF-1 電驛在各種不同標置 Z_c 補償器時繪製於 R-X 座標之特性圖

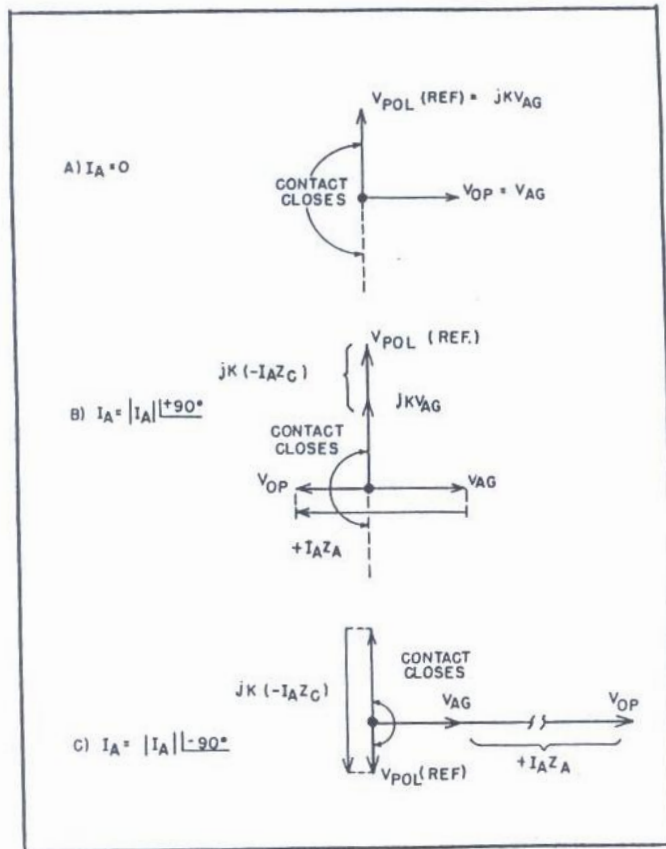


圖 19. KLF-1 電驛補償器感應電壓之效應

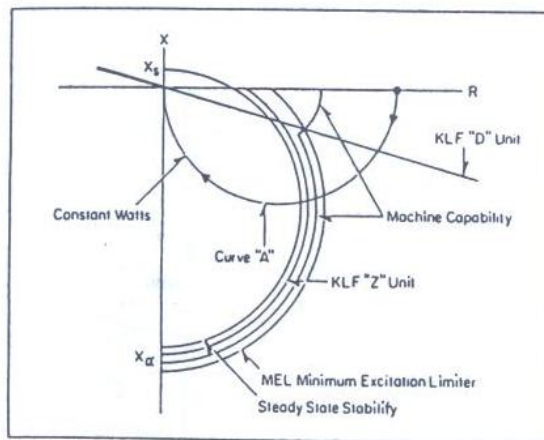


圖 20. KLF-1 電驛配合其相關容量曲線及最小激磁限制曲線之特性圓標置

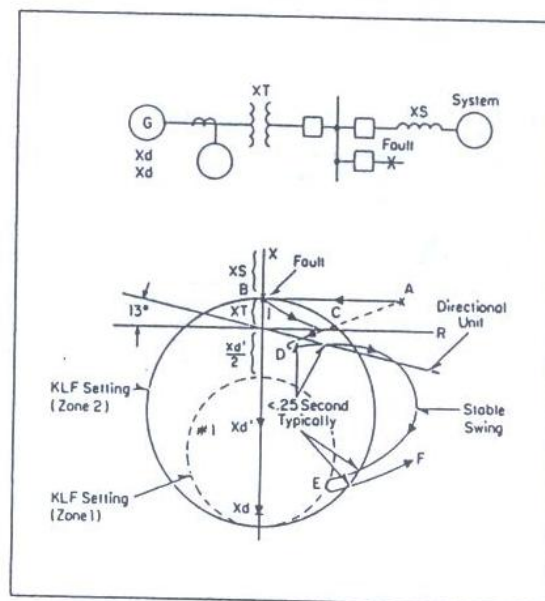
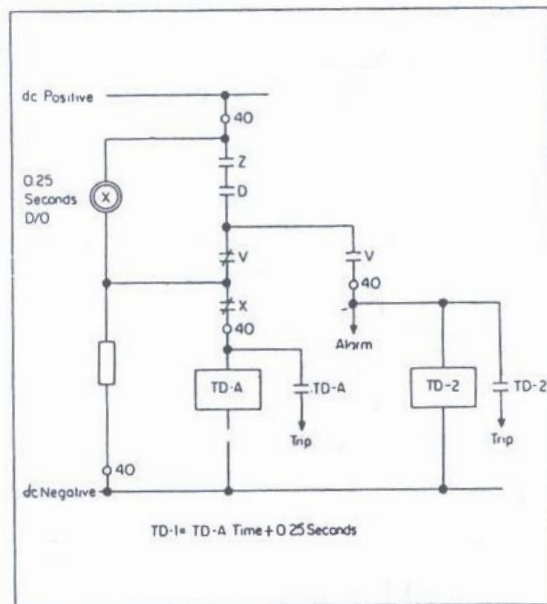
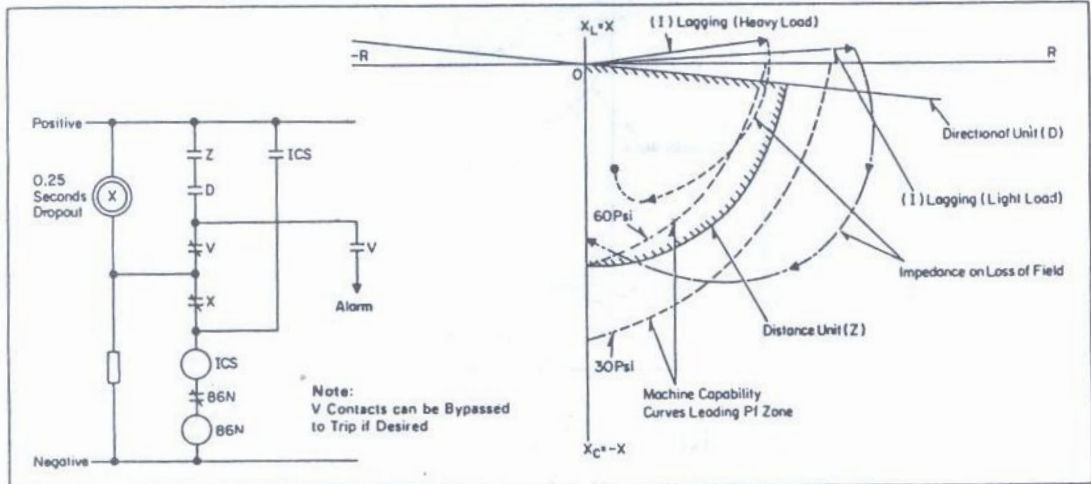


圖 21. KLF-1 電驛考量機組附近三相事故隨後穩態搖擺之特性圓標置



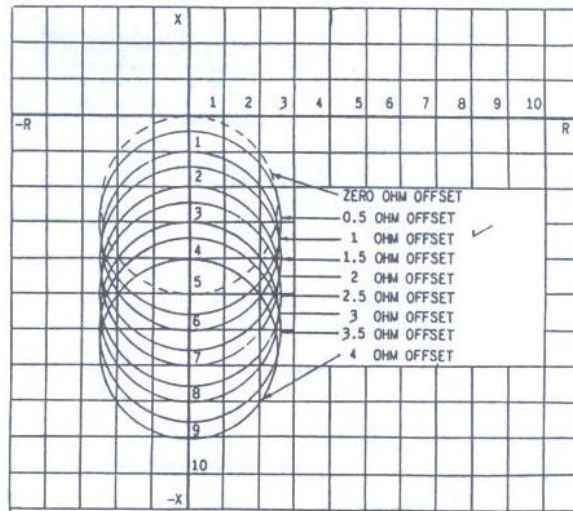


圖 23. CEH51A 型失磁電驛特性圓在 100%抑制分接頭標置下，各種可偏移圖形變化

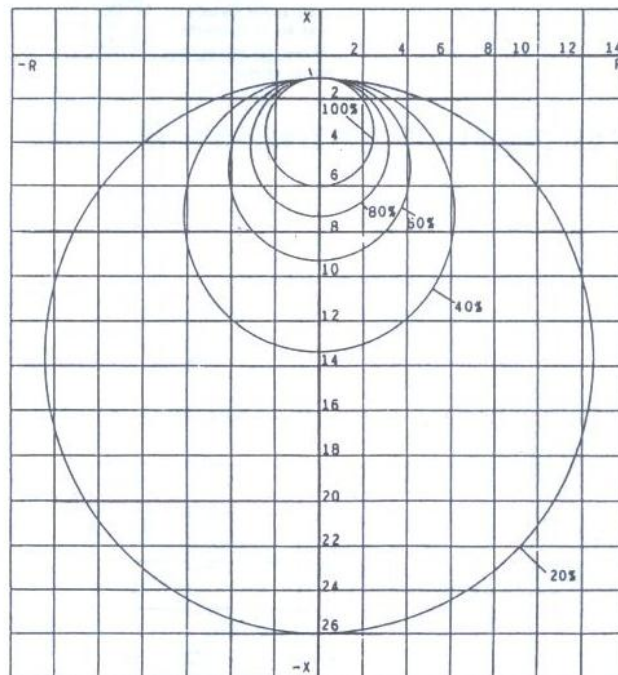


圖 24. CEH51A 型失磁電驛固定可偏移 1Ω 時，不同抑制分接頭標置下，所有相對地歐姆值

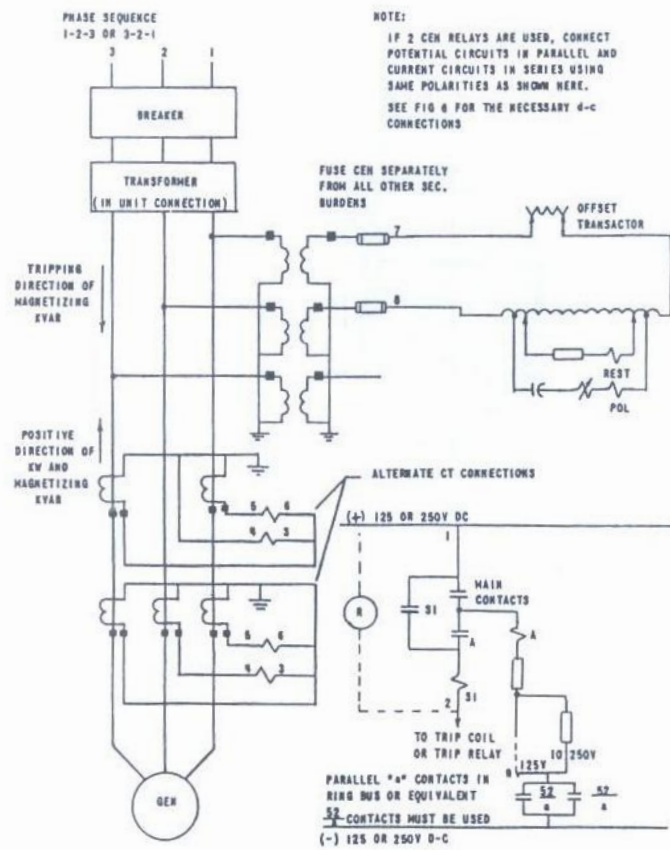


圖 25. CEH51A 型失磁電驛外部接線概要圖

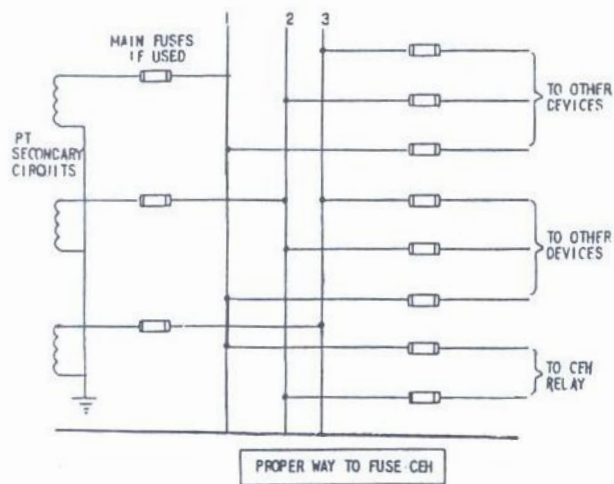


圖 26. CEH51A 型失磁電驛分離接用比壓器後端熔絲之正確接法