

# AVR 保護和控制(發電機用)

台電公司電力修護處第三大隊分隊長 廖永全

## 一、前言

發電廠是將能源轉換輸出為「電」，經輸配電網路，再送「電」至各用戶。一般而言，發電設備在電氣部分，主要包含發電電機、電力變壓器、開關設備，而忽略這些設備的電控部分--控制和保護電驛。電控像大腦和神經主宰「電」的產出，針對電控，主要分為四大類：

順序控制(Sequential control)

頻率及發電量控制(Governer)

電壓及無效電力控制(Voltage Regulator)

電驛保護(Relay Protection)

頻率及發電量控制、電壓及無效電力控制、電驛保護都需透過順序控制來完成達到其特定的任務功能，其功能失效將導致無法正常發電輸出。針對發電機要穩定連續運轉，需有良好的激磁設備控制電壓及無效電力外，也要參考其設計的熱和電運轉容許範圍，如不平衡電流、過載、過電壓、欠激等。而自動電壓調整器(AVR)除本身具有的控制外，亦需有限制和保護元件，以保護本身設備和被控制的發電機。

由於科技日新月異，主要設備發電

機的變異不大，而控制和保護卻隨著科技一直在創新。新、舊發電設備持續在運轉，汰舊換新使得控制和保護電驛新舊並存於舊機組上，有的新機組在安全、可靠的保守觀念下，部分仍使用傳統控制和保護。對控制和保護電驛的維護，其技術差異性大，且其變異速度快，維護人員的技術追隨速度不足，常造成困擾。

因此，本文闡述主要針對發電機用自動電壓調整器的保護電驛和控制介紹，讓維護者能迅速了解發電機的自動電壓調整器，幫助維護者能針對問題找到解決方案。

## 二、自動電壓調整器控制

激磁系統

同步發電機的磁場線圈是由一直流設備系統供給電力，此系統稱為激磁系統；其基本功能為：(1)供給發電機旋轉磁場之直流電力。(2)控制發電機的輸出電壓、功率因數及電力系統之無效電力。(3)對發電機及系統提供選擇性之保護和補償，以預防和指示發電機不正常之運轉。

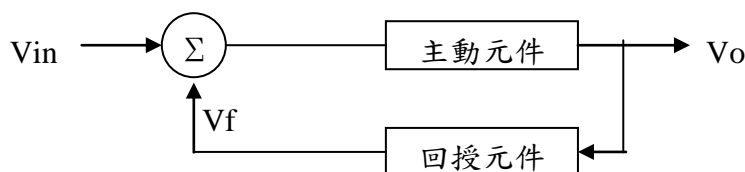


圖 2-1 自動控制系統之基本元件

圖 2-1 表示自動控制系統之基本元件，以此基準用於一般的激磁控制系統，基本的激磁控制系統如圖 2-2，含有勵磁機(Exciter)、自動電壓調整器(Automatic Voltage Regulator)、手動控制(Manual)和發電機(Generator)。前參者稱為激磁系統，激磁系統和發電機合稱激磁控制系統。另有一般選擇性的保護電驛，當控制的限制器失效時，保護電驛發揮作用，以確保設備安全。

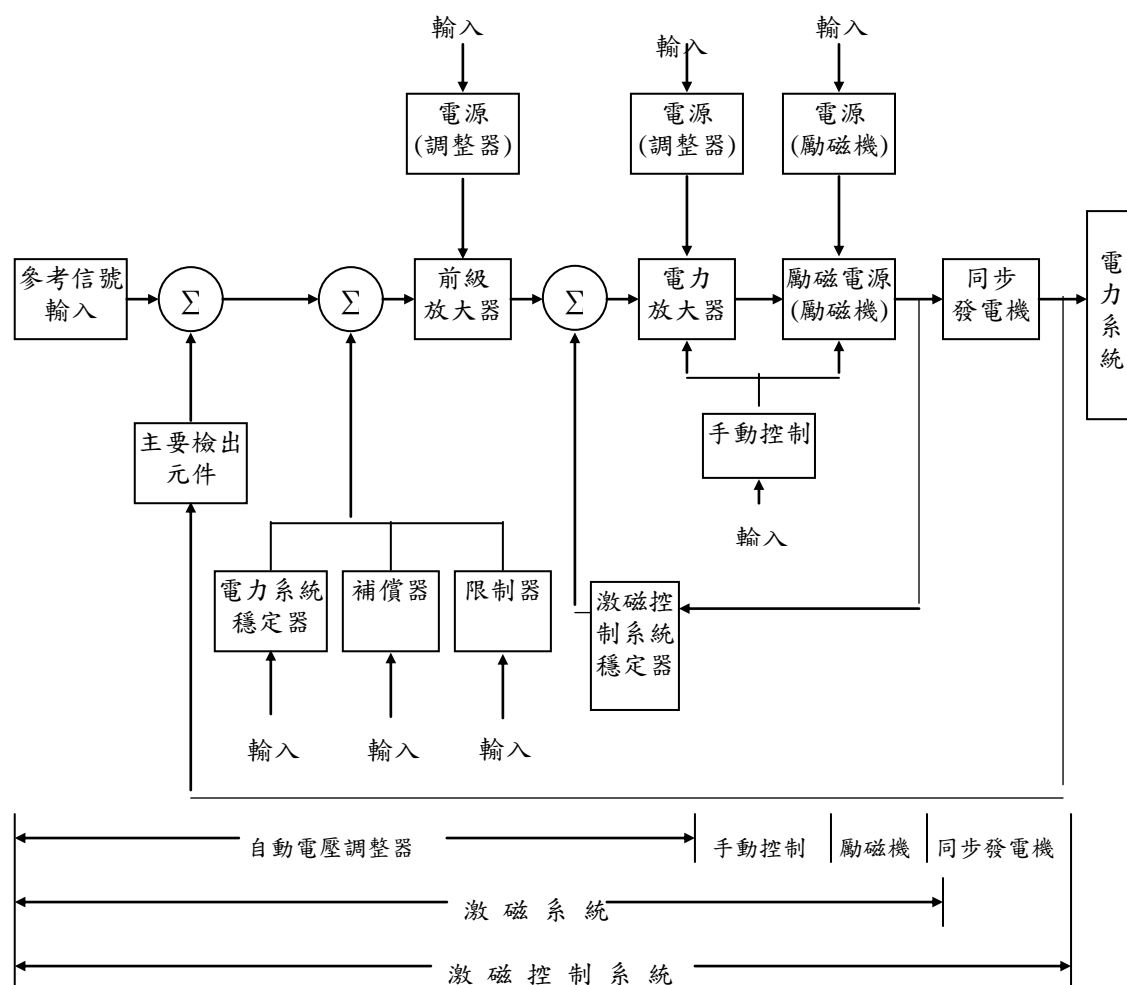


圖 2-2 一般基本激磁控制系統

### 分類

由勵磁機和自動電壓調整器組成不同型式模的激磁系統，1968 年 IEEE 發表激磁系統計算機模式來幫助分析系統暫態穩定度，分有四大類：Type1—連續動作電壓調整器和勵磁機，如 GE

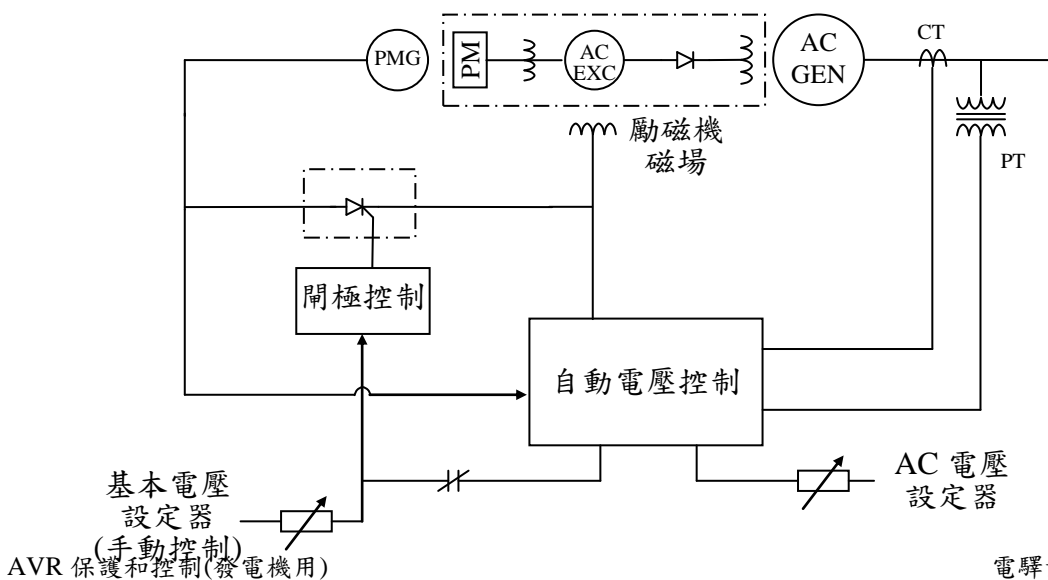
公司的 Amplidyne 電壓調整器、Alterrex、Alterrex-thyristor 和 WH 公司的 Mag-A-Stat 電壓調整器、Rototrol、TRA 電壓調整器。Type2—迴轉整流器系統，如 WH 公司 1966 年後的無刷式 (Brushless) 系統，Type3—靜態端電

壓、電流供給器，如 GE 公司的 SCPT，Type4—非連續動作調整器，如 GE 公司的 GFA4 電壓調整器，和 WH 公司的 BJ30 電壓調整器。經由 IEEE Std. 421-1972，421.1-1986 文獻整理分類，如表 2-1。近年來，交流發電機—迴轉式不可控制式整流器勵磁機(無刷式)(圖 2-3)和電力變壓器電源控制整流

器(圖 2-4)的激磁系統較多被使用。內部的控制不論是類比或數位，愈多廠家使用 PID 方式取代 Lead-Lag 方式，增加功能使內部控制就更加複雜化。計算機模型因廠家而異，在此僅提供 Lead-Lag 方式的 ac1(圖 2-5)和 st1(圖 2-6)參考。

表 2-1 激磁系統分類 (摘自 IEEE Std 421.1)

勵磁機種類	勵磁機型式	勵磁機電源	高速反應	計算機型式模
dc	直流發電機—換向器勵磁機	馬達帶動發電機或 同步機器軸	否	dc1
			否	dc2
			否	dc3
ac	交流發電機—固定式不可 控制式整流器勵磁機	同步機器軸	否	ac3
	交流發電機—迴轉式非控 制式整流器勵磁機(無刷 式)	同步機器軸	否 是	ac1 ac2
	交流發電機—SCR 勵磁機	同步機器軸	是	ac4
st	電力變壓器電源控制整流 器	同步機電壓或輔助 母線電壓	是 是	st1 st3
	複合變壓器電源非控制整 流器	同步機電壓和電流	否	st2
	複合變壓器電源控制整流	同步機電壓和電流	是	st3



調整器  
切換

圖 2-3 激磁控制系統 — 使用交流發電機—迴轉式非控制式整流器勵磁機

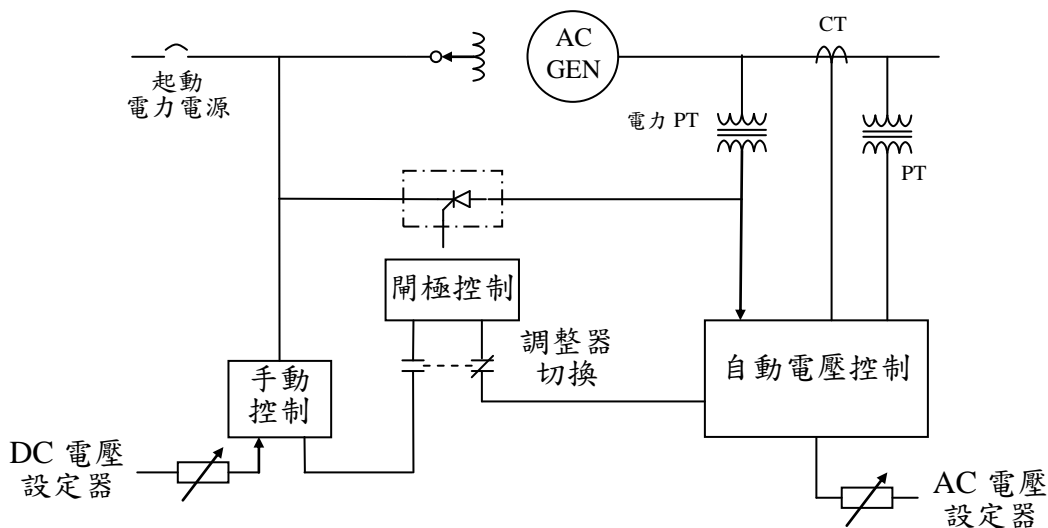


圖 2-4 激磁控制系統 — 電力變壓器電源控制整流器勵磁機

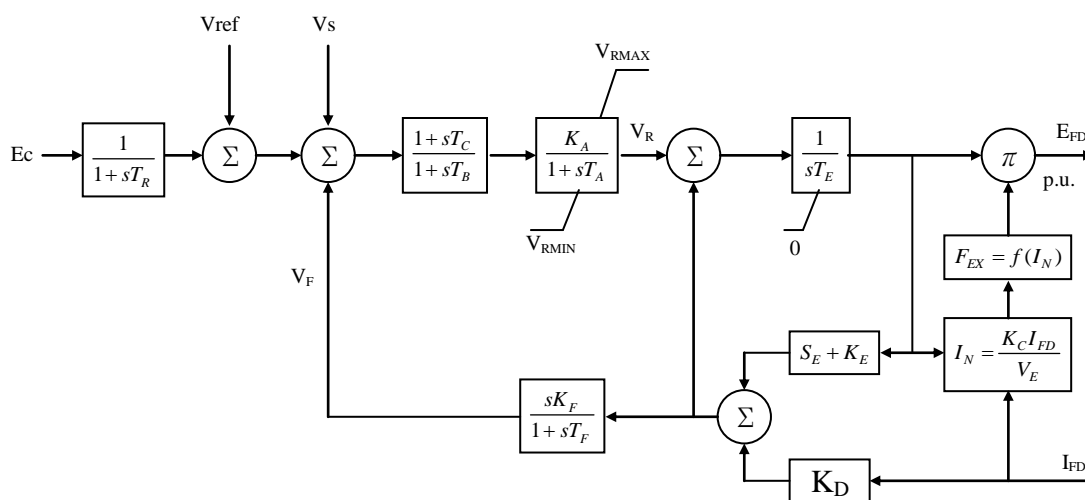
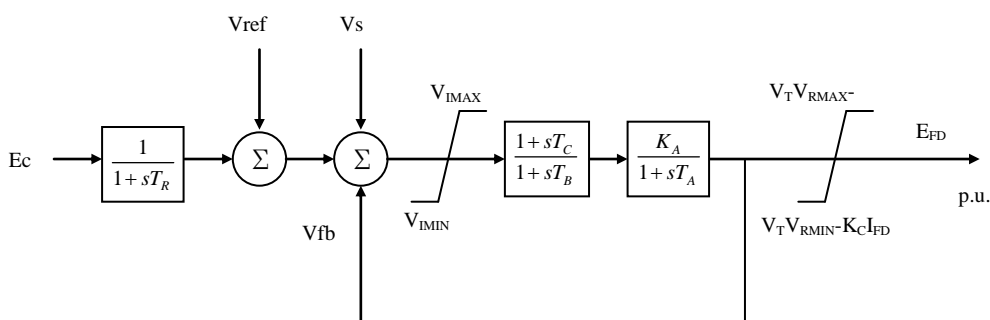


圖 2-5 計算模型 IEEE Type AC1



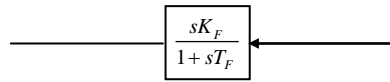


圖 2-6 計算模型 IEEE Type ST1

## 勵磁機

同步發電機的磁場線圈是由一直流設備供給全部或部分電流，此直流設備稱為勵磁機。一般每部交流發電機有它獨自的勵磁機，以提高較大的可靠度，對使用自動電壓調整器有較佳的配合，勵磁機的容量必需足夠供給發電機之額定 PF、額定 RPM、或額定 RPM 及額定電壓 105% 下之滿載出力。

### 1. 無刷式勵磁機---交流勵磁機

由於科技進步，容量大的功率半導體裝置體積小，已廣泛被使用。將

交流勵磁機的電樞置於轉軸上，將整流二極體固定在轉軸上取代換向器及碳刷划環，直接整流送至發電機磁場，此勵磁機稱為無刷式 (brushless)，如圖 2-7。由於交流勵磁機的容量可以很大，相對自動電壓調整器的輸出容量可以降低，雖此電力放大器的影響因素較多，但仍可被有效控制；且無碳刷，維護簡單，為使用者樂於接受，有成為激磁系統的主流趨勢。

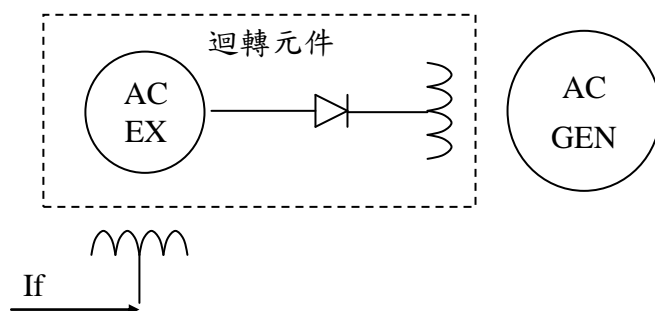


圖 2-7 無刷式勵磁機

### 2. 靜態式勵磁機

使用電力變壓器和電力整流器元件，取代傳統之直流勵磁機，因無轉動部份，故稱靜態式勵磁機，構造如圖 2-8。主要是消除換向整流引起之缺點，並具有維護容易，縮短發電機組之長度，高反應比，高極頂電壓等優點。其電力

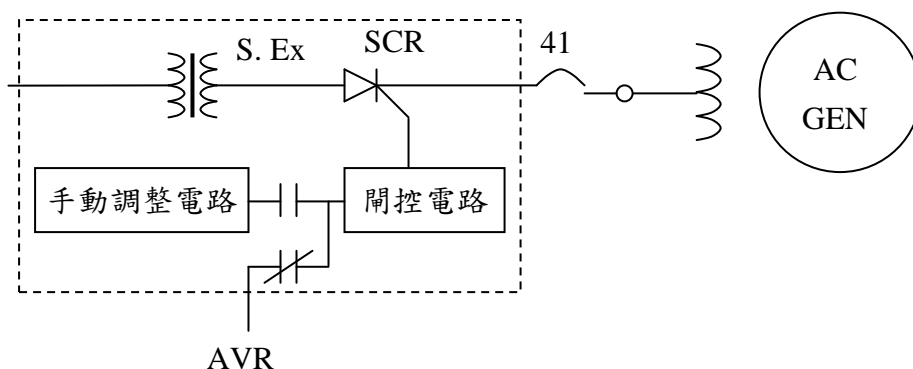


圖 2-8 靜態勵磁機

電源主要有從發機端經電力變壓器和比流器回饋，和由永久磁鐵交流發電機(PMG)，或由其他如母線電源供給。而這些交流電源都經由開流體相位控制交換器，自然或線性地把 AC 變換為 DC 的交換器，利用相位控制技巧，產生可變的輸出電壓；即控制開流體的開極脈波信號的時間，使導通的週期變化，達成控制輸出直流電壓的目的。

#### 自動電壓調整器

自動電壓調整器主要目的是維持負載變化時發電機端電壓；及系統故障時之暫態穩定度。發電機使用自動電壓調整器並聯於系統時，發電機的無效電力隨系統變動而改變。假如系統電壓降低，自動電壓調整器感測到降低信號，將自動增加發電機激磁，使系統電壓回

升到正常值。假如系統容量小，阻抗高，增加激磁即提高系統電壓。假如系統容量大，阻抗小，增加激磁即增加無效電力。假如系統容量中量，增加激磁可提高系統電壓和增加無效電力。因系統容量大，沒有提高系統電壓，發電機感應輸電壓輸出之值將會增加，產生遲相(Lag)無效電力。若系統電壓增加，發電機感應輸電壓輸出之值將會減少，產生進相(Lead)無效電力。故其必需備有：

靈敏度高	要靈敏度高，必須有高增益倍數。
反應性良好	反應要快。
穩定性良好	要穩定，不能有過度或不足之狀態發生。否則，最終就無法控制。

#### 1. 正常運轉

(1) 定壓運轉可分三種情況

a. 定功率因數(PF)

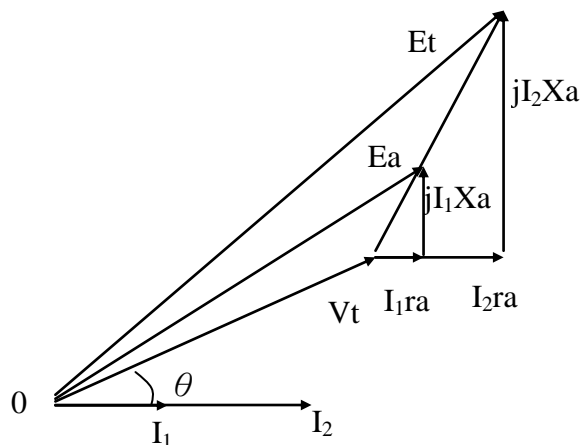


圖 2-9 定功率因數相位關係

$\theta$ ：定功率因數角

$V_t$ ：發電機輸出端電壓

$I$ ：發電機輸出端電流

$E$ ：繞組感應電動勢

$r_a$ ：電樞電阻

$X_a$ ：電樞電抗

當負載增加時，欲維持定功因運轉，發電機端電壓需保持為一定值，則須增加激磁電流以產生較高的感應電壓，以克服發電機阻抗，如圖 2-9。反

之，負載減少時，激磁電流亦隨之減少。

### b. 定電力 KVA

發電機端電壓為一定值，當遲相(Lag)功因降低時，欲維持定 KVA 運轉，必須增加激磁電流；反之，則減少，如圖 2-10。因定 KVA，所以發電機端

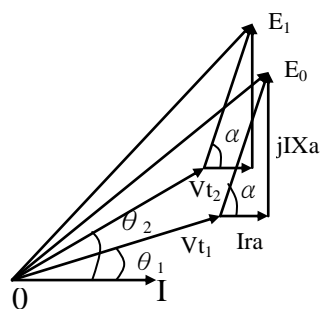


圖 2-10 定 KVA 相位關係

電壓(V)和電流(I)大小不變，以 I 為參考比較，則  $I \times (Ra + jX)$  不變。若 PF 降低，即有效電力減少，無效電力增加，使得發電機感應電壓需提昇，相對地激磁電流要增加。

$$\begin{aligned} \overline{OVt_1} &= \overline{OVt_2} \\ \overline{E_0Vt_1} &= \overline{E_1Vt_2} \\ \angle E_0Vt_1O &= 180^\circ + \theta - \alpha \\ \therefore \theta_0 &< \theta_1 \\ \therefore \angle E_1Vt_1O &> \angle E_0Vt_1O \\ \therefore E_1 &> E_0 \end{aligned}$$

### c. 定電壓

當發電機端電壓下降，欲維持端電壓時，必須增加激磁電流以產生較高的端電壓；反之端電壓上升，則需減少激磁電流。

#### (2) 變壓運轉

發電機或變電所與用戶間有一段相當的距離，若將發電機或變電所之母線電壓維持一定值運轉時，常因負載變化甚大，而使用戶端電壓發生變化。為使用戶端電壓保持一定，通常採用

- 線路壓降補償法；
- 定時改變發電機與變電所母線之電壓運轉法。

一般發電機之容量較小於系統容量，系統愈大，發電機容量就顯得微不足道。單部發電機併入系統無法有效改變系

統電壓，提高激磁量，只能改變輸出的無效電力。系統電壓的改變增加，AVR 為確保發電機端定電壓，AVR 會降低激磁量來減低系統電壓，因容量小，無法改變系統電壓，AVR 將持續降低激磁，最後導致欠激失磁而跳機，反而造成系統的不安定。因此發電機必須要變壓運轉，而有 Droop 補償加入 AVR。如發電機單獨經變壓器在高壓側併入系統時，因其間的變壓器阻抗作用，限制發電機輸出電流，可以不加補償器於 AVR 控制。

#### 2. 事故時運轉

當線路短路事故發生時，有效電力頓減，遲滯功率大量突增，但經過短時間，故障清除後，恢復正常。無高速反應電壓調整器適當反應磁場電



流，則事故經排除後，該發電機將因電壓突增，AVR 激磁反應太慢，而發生失步，造成系統不穩定。

### 三、保護電驛

一般發電機磁場線圈運轉在額定狀況下，容許額定 125% 的磁場過電壓 1 分鐘，如表 2-2。發電機在過激磁運轉，磁場的  $IR^2$  熱損失和電樞的  $IR^2$  熱損失

表 2-2 (摘自 GEK-75511A)

時間(秒)	120	60	30	10
磁場電壓(%)	112	125	146	208

將增加。轉子隨磁場線圈溫度膨脹，超過額定溫度值，對線圈結構造成影響。且將使轉子與定子更接近，定子鐵心通過的磁通密度增加，如超過允許值，對定子鐵心造成傷害。發電機如運轉在欠磁場情形下，發電機的輸出電力由  $P+jQ$  變為  $P-jQ$ ，即同步發電機變為感應發電機。如無磁場，發電機傾向過速和變成感應發電機，由調速機特性產生過速將使負載輸出降低，且發電機感應端電壓降低，使電樞電流增加，且伴隨高感應轉子電流，轉子電流流經磁場線圈(當有放電電阻器連接時)和轉子鐵心、磁極、槽楔。流經轉子本體的電流使轉子溫度迅速升高，造成傷害。且磁通在曝露的電樞線圈兩端處(end turn)產生局部過熱，亦造成線圈傷害。又當發電機在低轉速運轉，自動電壓調整器為維持定電壓，必須提高激磁量，會有過激磁現象發生。為避免這些運轉狀況發生，激磁系統設備就備有保護電驛供客戶選擇—有磁場接地保護電驛、電壓/頻率比保護電驛、欠激電驛、過激保護電驛和 PT 保險絲保護電驛。這些保護電驛大部分與控制在一起，被視為控制一部分，其

實它是獨立監督保護的，當控制失效時，就靠這些保護發揮作用，保護發電機。一般發電機本身就有這些保護電驛，如無時，可在激磁設備上選購。

#### 磁場接地保護電驛

發電機的旋轉磁場如有一點接地時，表示磁場線圈絕緣有弱點處，對磁場回路運轉並無影響。不宜立即對發電機跳脫，發出警報即可，並應擇機處理。否則，當再有另一點以上接地發生時，會造成磁場有部分短路，自動電壓調整器會自行調整增加激磁過電流。當電流偏高時交由直流過激(76)保護。亦會因激磁不足，形成欠激，交由交流欠激保護。否則會使轉子線圈溫度升高，最後對轉子結構造成傷害。磁場接地電驛，一般是獨立於自動電壓調整器，檢測方式有：

1. 利用惠斯登(wheatstone)電橋原理，如 ABB 公司的 DGF 電驛。當故障點適在平衡點時，電驛暫不會動作，但激磁電壓隨負載變動而變動，電壓一經變動，電橋無法保持平衡，接地故障便顯現出來。
2. 重疊法，用獨立的交或直流電源，一端接於磁場的正(P)極或負(N)極，一端接地，直接量測流經的電流，或相對的電阻值，以判斷磁場接地情形。
3. 電阻接地法，磁場兩端各接一等值電阻接地。早期用燈炮取代，當兩端平衡時，燈泡亮度相等，如亮度不同時，表示磁場有故障點接地。近期則以兩端對地電壓比較，兩者相差一定值時表示有故障點接地。此法缺點是接地在平衡點處，無法探側故障點接地。

#### 電壓/頻率(V/Hz)比保護電驛

自發電機電壓檢出，一般發電機運轉限制電壓/頻率比(V/Hz)為 1.09pu。當達到 1.18pu V/Hz 時，發電機運轉經 2 秒後應即跳機保護，從 1.10pu 到 1.19pu V/Hz 為反時特性延遲。小型發電機組開始運轉時，就使用 AVR，在建立電壓期間，就可用 V/Hz 限制器來限制發電機電壓。如限制器故障，發電機電壓會急升，無 V/Hz 保護電驛跳脫，將由發電機過電壓動作跳脫。

#### 欠激磁保護電驛

1. 直流的欠激保護電驛主要由磁場回路的分流器取出電壓信號，送至直流電壓電驛，依功能設定動作。由於欠激在停機中會動作，其保護需經斷路器閉合(52a)控制，且激磁設備會因系統的擾動，會有瞬間欠激現象，所以會有時間延遲，以避免保護電驛誤動作跳脫發電機，造成系統的不安定。
2. 交流的欠激保護電驛以發電機產生電力的向量來分析，由電子電路或數位計算，依發電機容量曲線，在穩態穩定度極限下，取半徑  $R_y = 1/2 E_t^2 (1/X_s + 1/X_d)$ ，圓心偏移  $R_x = 1/2 E_t^2 (1/X_s - 1/X_d)$ ，當發電機出力超過此範圍，欠激保護電驛動作跳脫發電機。亦可由發電機出力的 P 與 Q 決定允許的安全範圍值，如計算超出範圍，使欠激保護電驛動作跳脫發電機。

#### 過激磁保護電驛

分有並聯前和並聯後的過激保護電驛，以避免並聯前因激磁量過高，造成發電機電壓超過限制，破壞絕緣。可由磁場回路的分流器取出電壓信號，或直接取自磁場電壓信號，皆送至直流電壓電驛，依功能設定動作。激磁設備依發

電機轉子容量時間(表 2-2)設定時間延遲，以避免保護電驛誤動作，造成系統的不安定。一般在過激保護電驛動作前，且在有自動/手動追隨器時，會先由 AVR 跳脫至手動電壓調整器(MVR)，並有警報使運轉人員有時間操作 MVR。在特定時間內，如無法降低激磁至安全值，過激保護電驛才動作跳脫發電機。

#### PT 保險絲保護電驛

主要檢出 AVR 用發電機端電壓，判斷其三相電壓是否正常。如有一保險絲斷時，AVR 的輸入電壓劇降，將使 AVR 輸出至極頂電壓，由 AVR 反應時間延遲產生過激，PT 保險絲保護電驛將無延遲動作。如有自動/手動追隨器時，AVR 跳脫至 MVR 運轉，否則由過激磁保護跳脫發電機。

#### 參考資料：

- [1] American National Standard, ASA C85 "Terminology for Automatic Control", 1963.
- [2] IEEE COMMITTEE REPORT, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Transactions on Apparatus and System, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981.
- [3] IEEE std. 421.1-1986, IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines.
- [4] Generator Instructions GEK-75511A, GE Company, Nov. 1974
- [5] Potential Source Excitation System for Hydro and Steam Turbines Instruction GEK-83819B, GE Company, Aug. 1985
- [6] Type MGR Voltage Regulator and Stat-

- ic Exciter. WH Company, Apr. 1991.
- [7] Type DGF Generator Field Relay Instruction Leaflet 41-747G  
ABB Automation Inc., Feb. 1977.
- [8] 保護電驛原理 郭耀泉編著 台電公司  
訓練所出版 民國 70 年 5 月.
- [9] 火力發電 盧象時 孫常漢 邱遠揚編  
著 中國工程師學會出版 民國 75 年 6  
月.
- [10] 台電天輪電廠#1 機電壓調整器說明書
- [11] 靜態激磁系統設備說明書 台電電力  
修護處 民國 78 年