

# 同步發電機概述

固也泰電子工業有限公司 技術部

## 分類

一般發電機與電動機同屬於旋轉電機，兩者差異僅在於轉子，而定子是完全相同。

發電機可分為：同步、異步發電機(感應發電機)。

發電機的頻率隨轉速而改變的稱為同步發電機。發電機頻率與引擎轉速沒有直接關係的稱為異步發電機，兩者最大差異在於勵磁場轉子，同步發電機需由外部勵磁，故有勵磁引線。異步發電機其轉子為封閉迴路不需外部勵所以沒有勵磁引線。

異步發電機常見於小容量發電機上其結構簡單，操作方便，但是不能向負載提供無功功率，所以使用在電抗性負載時電壓變化大，(發電機的電壓與頻率由電容值、原動機轉速和負載大小等因素決定)。

同步發電機具良好電壓、頻率及無功功率調節，為一般電廠或備用電源接受。

註：本章節所討論為同步發電機，異步發電機將在其他章節討論。以下同步發電機簡稱發電機。

圖 1、異步發電機轉子



圖 2、同步發電機轉子



## 1、發電機內部結構

1-1、定子：由矽鋼片及繞組所組成，矽鋼片提供磁迴路，繞組則感應電壓。在發電機額定容量內(固定電壓下)矽鋼片內部磁通量不會改變。繞組內阻及感抗的電壓降與負載成正比。

- 矽鋼片依堆疊方式可分斜置及直列式，兩者相較斜置式其磁通緩增，諧波量較小。

定子繞組上大致可分為主繞組、輔助繞組、諧波繞組三種。

- 主繞組繞線方式可分集中及分佈繞線，集中繞線其節距為 1 無法抑制諧波。分佈繞組可為 2/3、5/7、7/9……等節距。節距愈短消除諧波能力愈強。
- 輔助繞組：作為 AVR 勵磁電源使用，可避免 AVR 勵磁輸出時在主繞組上造成的諧波。輔助繞組與主繞組電壓成一固定比例，頻率同主繞組。
- 諧波繞組：其繞組端電壓與發電機負載電流成正比關係，頻率為主繞組的三倍頻，形式上它

形同一個 C.T。此繞組常用來提供 AVR 勵磁電源，稱為全協波勵磁發電機。在設計上經常搭配輔助繞組使用(因為空載時諧波繞組端電壓極低)。

圖 1-1、定子繞組

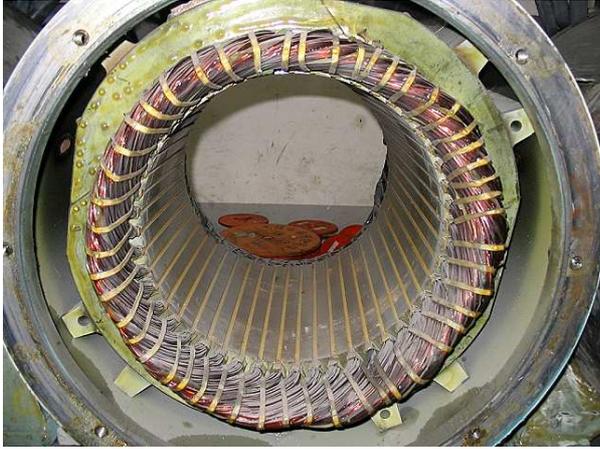


圖 1-2、諧波及輔助繞組



主繞組依發電機端電壓需求可為 $\Delta$ 或 Y 接法， $\Delta$ 接線可能產生內部環流且中性線電抗不平衡，一般均採用 Y 接線。

發電機阻抗為發電機品質重要指標之一，發電機阻抗為繞組導線電阻+導線感抗，數值越低電壓變動率越低。當不同型號發電機並聯時因阻抗不同橫流會大一些。

1-2、轉子：由矽鋼片、主勵磁繞組、阻尼繞組所組成。轉子通常為凸極單層繞組。

- **阻尼繞組**位於轉子極面上，一般為銅或鋁合金構成，前後有短路環將所有阻尼條短路(就像鼠籠式馬達轉子)，依結構可分全阻尼及半阻尼，其功能在限制定子繞組的突增電流及避免並聯電流追逐(在往後章節詳述)。

- **主勵磁繞組**：勵磁繞組接受一直流電流在轉子極面上產生相鄰相異的磁極，磁極數可為 2、4、6、8……。

圖 1-3、全阻尼繞組



圖 1-4、半阻尼繞組



1-3、勵磁機：由勵磁定子、勵磁轉子、整流器組成，定子為勵磁輸入端(直流)，勵磁轉子產生三相或多相交流電源經整流器整流為直流電源供應主磁場繞組。定子勵磁繞組為單層或雙層繞組，勵磁機為發電機產生電能的最前端，為增加定子鐵芯剩磁常在極面上嵌入永久磁鐵。在複勵型勵磁系統中勵磁繞組有兩組，其相互疊加或相減如圖 5-3。整流器可分為全波或半波整流方式(依設計需求)。勵磁機容量約為發電機容量 1/800~1500。

圖 1-5、勵磁轉子及整流器



圖 1-6、勵磁定子及永久磁鐵



#### 1-4、PMG 永磁發電機

永磁發電機其轉子由多極永久磁鐵構成，同發電機軸心驅動，定子為單或三相繞組，其電壓隨轉速改變( $E=B \cdot L \cdot V$ )，其頻率常為主繞組 2~5 倍頻。具 PMG 的發電機所承受的瞬態短路電流較高(三倍以上)，且無剩磁問題。無論單或三相其繞組諧波量很高，若不使用 PMG 電源時應在繞組兩端跨接電容器(1uF/450V 以上)避免高壓破絕緣。

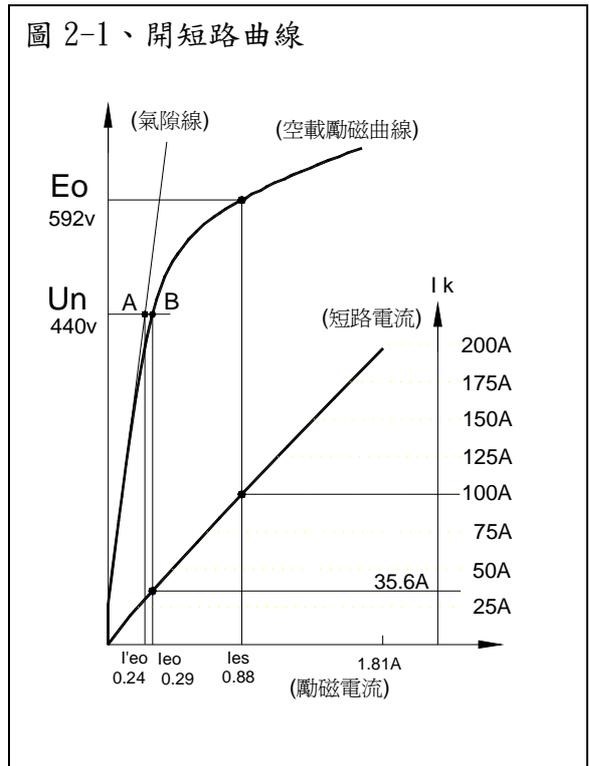
圖 1-7、PMG 永磁發電機



## 2、發電機勵磁特性

2-1、**短路比**：空載額定電壓的勵磁電壓下，三相穩態短路時的短路電流與額定電流之比，其比值約為0.25~0.45，大容量的比值較大，短路比的導數就是空載到滿載的勵磁比。例如 1：我們測量短路比為0.3，則其滿載勵磁電壓為其無載勵磁電壓的 3.3 倍。例 2：發電機無載勵磁電壓為 10Vdc，則可以推測其滿載最大勵磁電壓可能為 33Vdc，選 AVR 時只需半波整流就能滿足容量，例 3：若測量到無載勵磁電壓為 70Vdc 以上則幾乎可判定發電機發生了問題，因為 AVR 無法提供其滿載時的勵磁電壓 ( $3.3 \times 70 = 233Vdc$ )

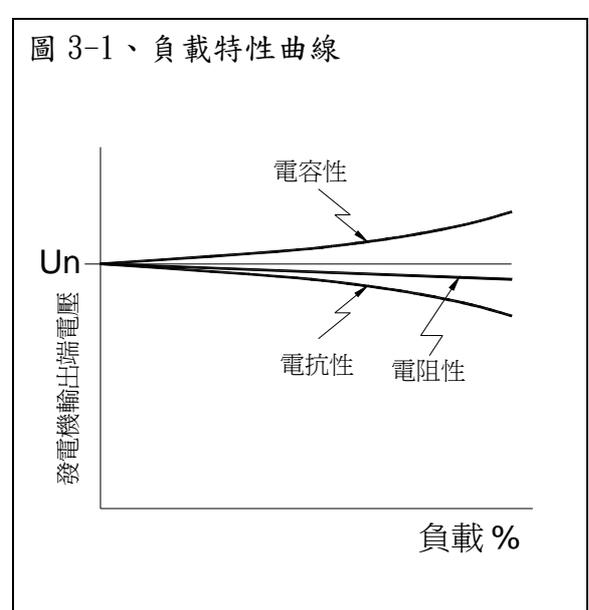
2-2、**強勵磁**：指發電機一次投入滿載負載時，期望端電壓快速恢復額定電壓值時，所需的暫態勵磁電壓值。此勵磁電壓遠大於滿載時的勵磁電壓(約為滿載勵磁電壓的 1.5~2.5 倍)。



## 3、發電機負載特性

3-1、**調整率**：在額定電壓下，發電機空載時加入發電機滿載時的勵磁電壓，所產生的端電壓與額定電壓的百分比，其值應小於 140%。

3-2、**電樞反應**：交磁、去磁、增磁作用。相同的負載電流，但因負載特性不同所需的勵磁電壓也會不同。例如：在額定電壓下加 100A 的馬達(電抗)負載時勵磁電壓為 20V(去磁作用)，同樣 100A 的電熱器(電阻)勵磁電壓降為 15V(交磁作用)，在同步馬達(電容)負載時勵磁電壓僅需 5V(增磁作用)。這是因為不同性質的負載使轉子與定子磁勢的夾角改變。若增磁作用過大不需勵磁電流也會產生很高的端電壓。**\*故發電機不適用於裝有自動功因調整器(APFR)的場所。**



## 4、發電機故障原因

### 4-1、定子繞組故障分析

#### • 內部繞組短路引起(沒有原因)

定子繞組故障包括同繞組的匝間短路、同相不同繞組的匝間短路、相間短路和繞組開路等。其極大的短路電流會產生破壞性強的電磁力，也可能產生過熱而燒毀繞組和鐵心。通常指定子繞組與鐵芯間的絕緣破壞。

當發電機發生相間短路時，發電機可能出現4~5倍於額定電流的大電流，急劇增大的短路電流和產生的巨大的電磁力和電磁轉矩，對定子繞組、轉軸、機座都將產生極大的衝擊而損傷，巨大的衝擊力將直接損壞發電機定子端部線匝，使其嚴重變形、斷裂、造成絕緣損壞。

#### • 外部回路短路引起

同步電機的突然短路是電力系統的最嚴重的故障。短路過程所經歷的時間極短（通常約為0.1~0.3s），三相電流短路後，從暫態過度到穩態，從大規模的能量交換到小規模能量交換，：突然短路時氣隙磁場變化不大，而定子電流卻增加很多，於是將產生巨大的電磁轉矩。強大電磁力的衝擊下，端部線匝很容易受損傷。在不對稱突然短路時，所產生的電磁轉矩更大，可達額定轉矩的10倍以上。

#### • 不對稱運行(移到轉子)

當三相電流不對稱時，即在發電機中會有正序、負序、零序三組對稱分量電流產生，對發電機本身的影響會引起轉子過熱。不對稱運行時的負序電流所產生的負序磁場對轉子有兩倍同步速相對速度，將在轉子的勵磁繞組、阻尼繞組以及轉子表面感應電流，這些電流將在相應的部分引起損耗和發熱，引起附加交變力矩並產生振動。長時間的振動會造成發電機的材料出現疲勞損傷和機械損傷。

### 4-2、轉子繞組故障分析

• **繞組匝間短路**：由於繞組絕緣損壞造成轉子繞組匝間短路，同時會引起磁通的不對稱和轉子受力不平衡現象，而引起轉子振動；定子繞組每相並聯回路的環流；主軸、軸承座及端部磁化。同時較大的短路電流可能會導致轉子接地故障發生。

故障原因：由於離心力的作用，在運轉中線匝絕緣的移動，繞組絕緣損壞造成轉子繞組匝間短路

• **接地故障**：發電機轉子繞組的接地故障包括一點接地和兩點接地。接地是指勵磁繞組絕緣損壞或擊穿而使勵磁繞組導體與轉子鐵芯相接觸。勵磁回路一點接地故障對發電機一般不會造成危害，因為發電機發生轉子繞組一點接地故障時，勵磁電源的洩露電阻（對地電阻）很大，限制了接地洩露電流的數值，但如果再有另外一個接地點，即發生兩點接地故障時會形成部分線匝短路，這是一種非常嚴重的短路事故。發電機勵磁繞組發生兩點接地之後，繞組部分被短接，使得繞組直流電阻變小，勵磁電流增大，由於繞組短接的磁極磁勢減小，而其它磁極的磁勢則未改變，轉子磁通的對稱性受到破壞，轉子上出現了徑向的電磁力，因此引起機組的振動。當轉子發生兩點接地之後，兩點之間構成回路，一部分勵磁繞組被短接，兩接地點之間將可能流過很大的短路電流，電流產生的電弧可能會燒壞勵磁線圈及轉子本體，甚至引發火災。

## 5、發電機勵磁系統分類

5-1、自勵—分流式、複勵、差複勵、輔助繞組、諧波繞組

5-2、他勵—永磁發電機 PMG、其他直流電源供應

### 一、自勵式系統分類

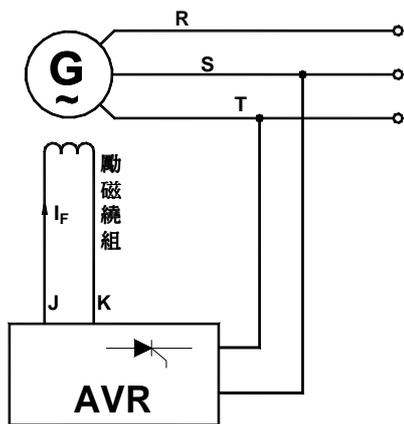


圖 5-1、分流式

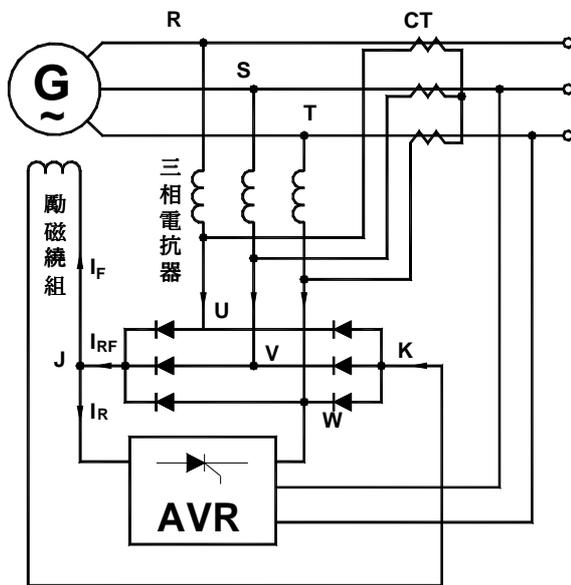


圖 5-2、複勵磁

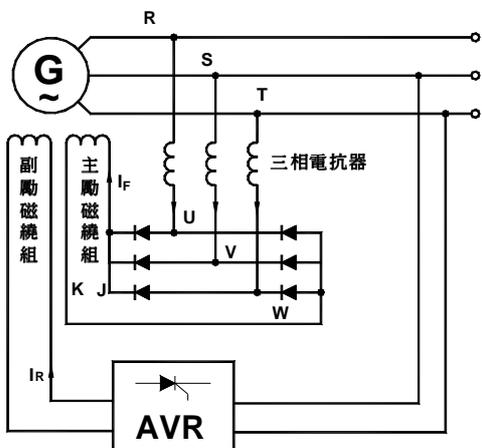


圖 5-3、差複勵磁

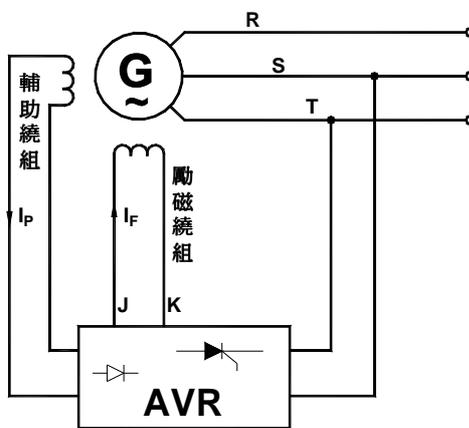


圖 5-4、輔助電源勵磁

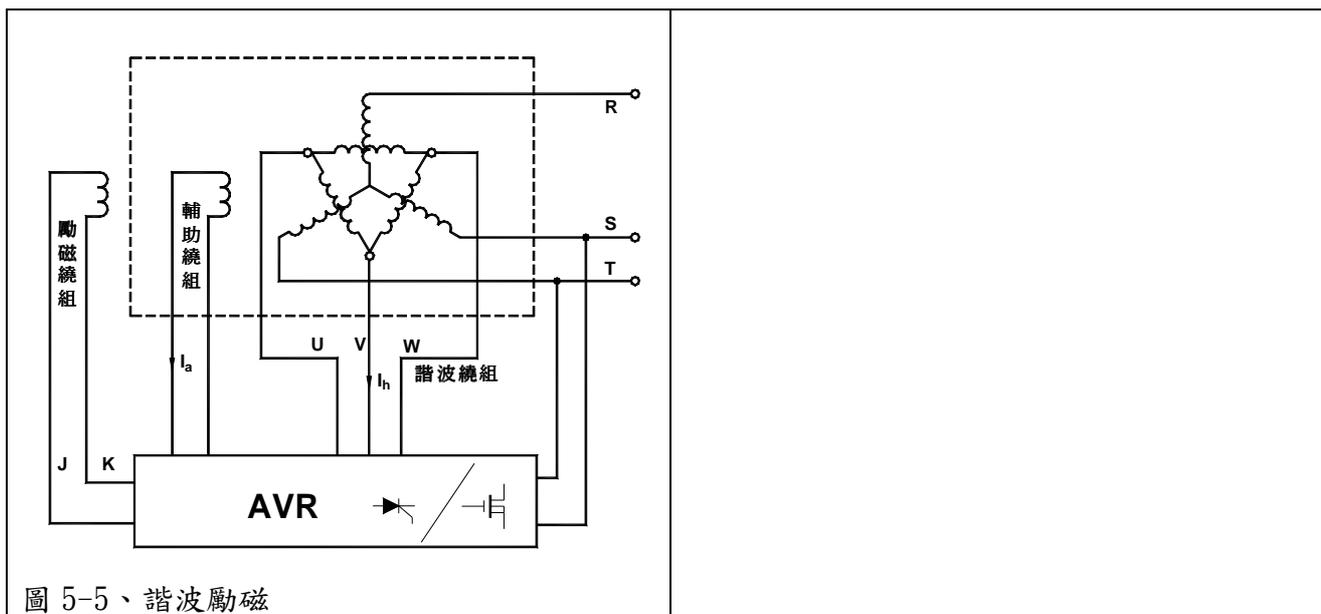


圖 5-5、諧波勵磁

## 二、他勵系統

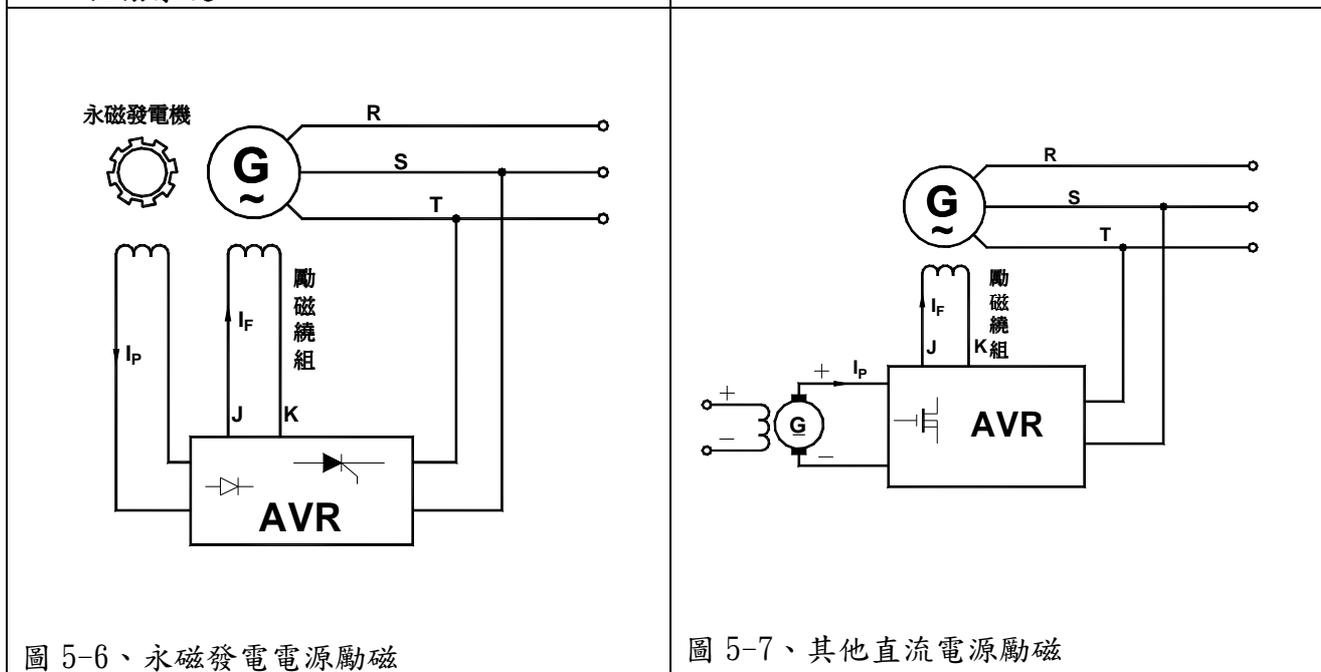


圖 5-6、永磁發電電源勵磁

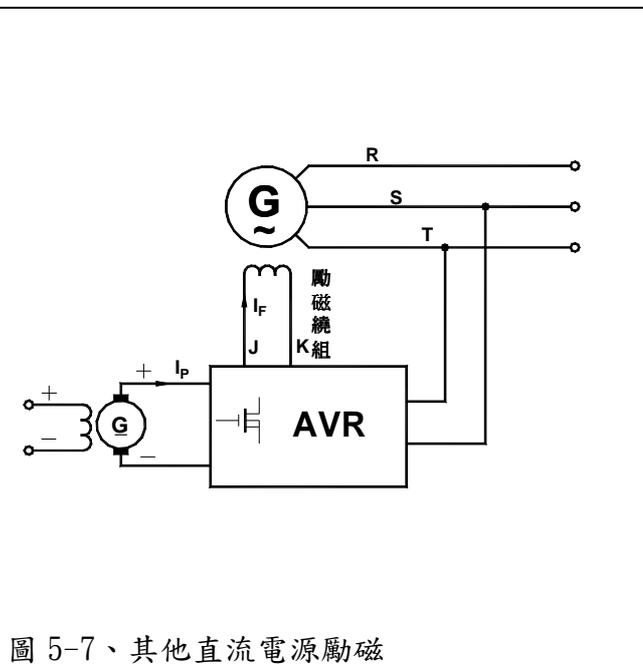


圖 5-7、其他直流電源勵磁

## 6、增益(改為勵磁機增益)

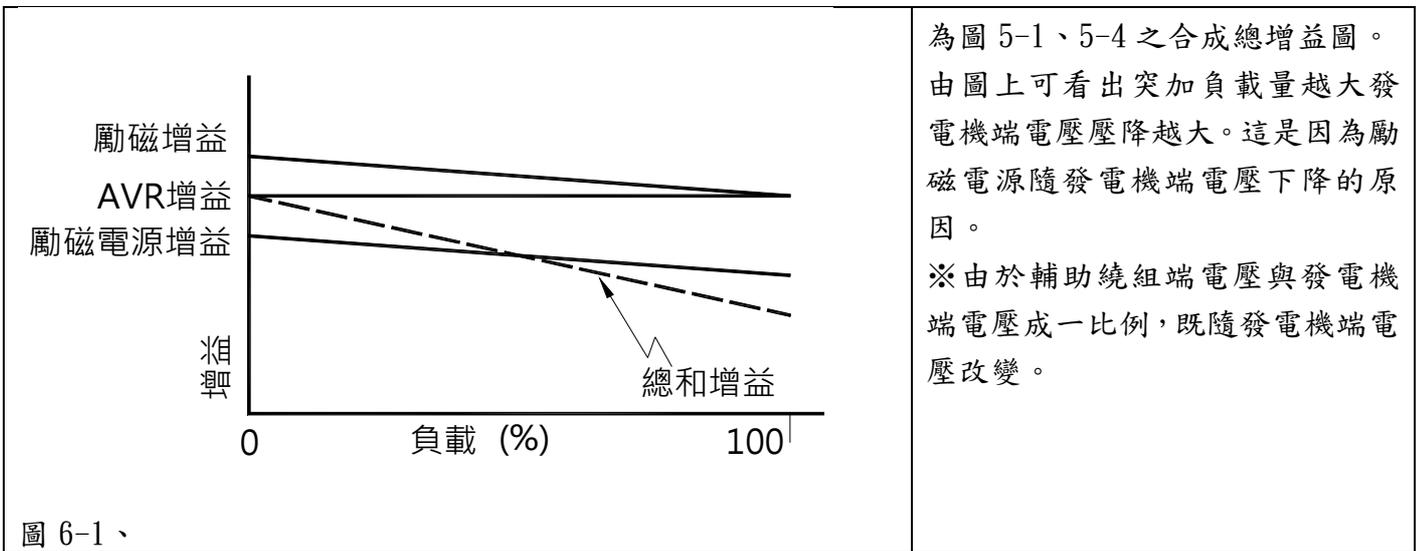
為取得發電機供電期間對負載變化保證良好的供電品質，必須先了解發電機勵磁增益、AVR增益及勵磁電源增益三者的關係。什麼是增益呢？增益在電子學上，通常為一個系統的訊號輸出與訊號輸入的比率。如5倍的增益，即是指系統令電壓或功率增加了5倍。增益(GAIN)通常以G表示。

**6-1、發電機勵磁增益：**設發電機空載勵磁電壓為20Vdc時機端電壓為220Vac，在此輸入為「勵磁直流電壓」輸出為「機端交流電壓」，若勵磁輸入不變，將發電機加到50%負載則發電機端電壓還會保持220Vac嗎？當然不會，相同的勵磁電壓在負載100%時則機端電壓更低，。這證明了發動機負載會降低勵磁增益。也得知發電機在空載時增益最大。

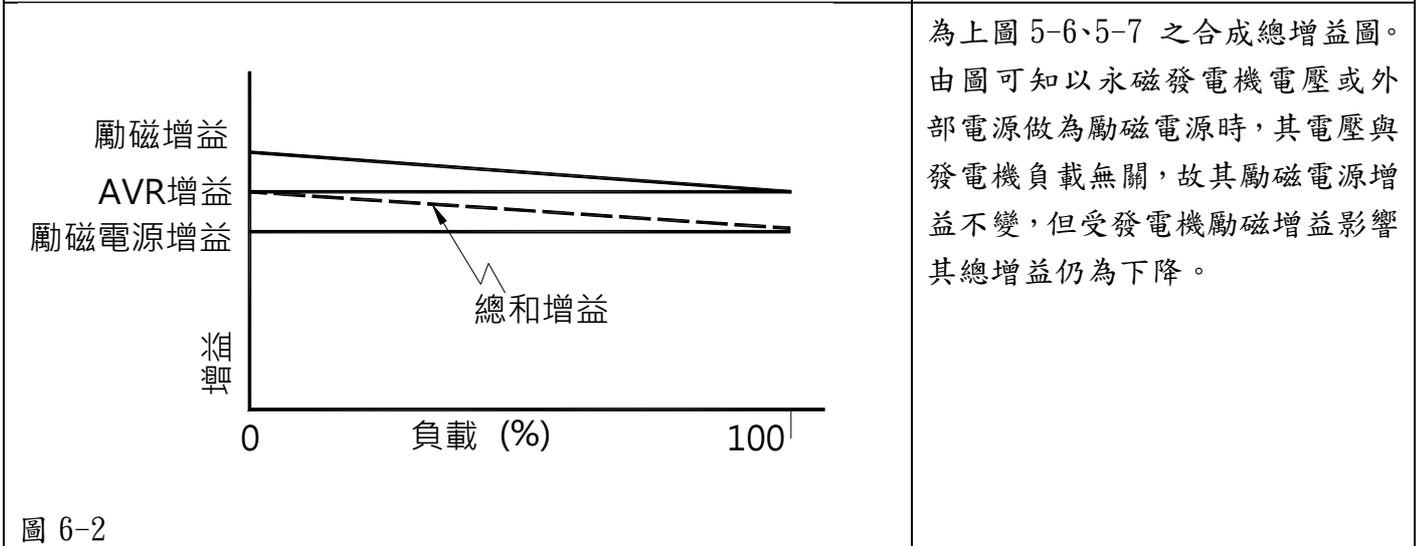
**6-2、AVR(電子)增益：**是一個固定參數值，當調整AVR靈敏度（穩定）後增益就被固定，與發電機負載大小無關。

**6-3、勵磁電源增益：**在無載時供給AVR勵磁電源電壓與突加載的瞬間提供給AVR的勵磁電源電壓兩者的比例。例，圖6-1、AVR的勵磁電源來自發電機端電源(同輔助繞組)，在發電機突加滿載瞬間機端電壓下降，造成勵磁電源減少不僅恢復時間變長也使加載瞬間端電壓降幅變大，因此其勵磁電源增益因負載而變小。圖6-2若使用永磁發電機做為AVR勵磁電源則狀況將會改善些，因為PMG端電壓與負載無關，這也提升了發電機瞬態過載容量，其勵磁電源增益在發電機空載與滿載間可維持不變。圖6-3若使用諧波繞組(圖5-2、5-3)做為AVR勵磁電源時，不僅提高了發電機瞬態過載容量，同時在瞬態壓降及恢復時間上都能得到大幅改善。

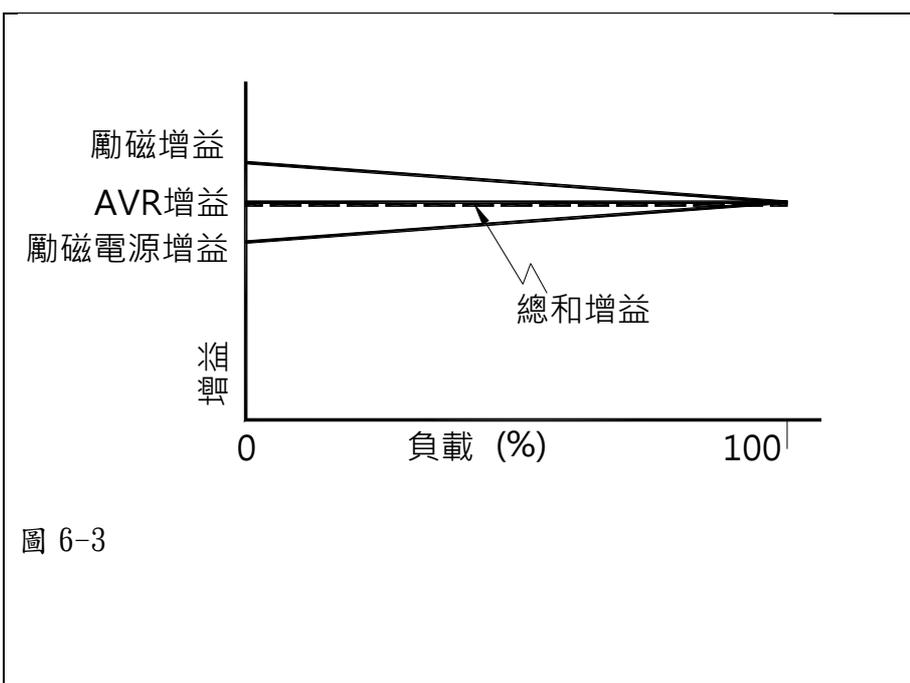
將上述三種增益在發電機突加負載瞬間以圖表表示如下：



為圖 5-1、5-4 之合成總增益圖。由圖上可看出突加負載量越大發電機端電壓壓降越大。這是因為勵磁電源隨發電機端電壓下降的原因。  
※由於輔助繞組端電壓與發電機端電壓成一比例，既隨發電機端電壓改變。



為上圖 5-6、5-7 之合成總增益圖。由圖可知以永磁發電機電壓或外部電源做為勵磁電源時，其電壓與發電機負載無關，故其勵磁電源增益不變，但受發電機勵磁增益影響其總增益仍為下降。



為上圖 5-2、5-5 之合成總增益圖。因勵磁電源端電壓隨發電機負載電流成正比例改變，所以在發電機突加負載瞬間其勵磁電源增益上升(端電壓上升)，正好可以抵補勵磁增益減少的部分。但在實際應用中，諧波勵磁並不能做到完全抵消勵磁增益下降的那部分。當發電機帶負載時，它的總增益不可能一直保持在 100%。但相較之下，諧波勵磁比其他要好一些，筆者還是建議使用諧波繞組作為勵磁電源)。

**6-4、總和增益：**勵磁增益、AVR增益、勵磁電源增益這三種增益結合起來會對供電系統有一個什麼樣的影響呢？這三個增益的總量等於發電機系統總增益，在最佳工作狀態下其增益為 100%。當增益超過 101% 時，系統開始擺振，小於 99% 時調壓系統反應減緩。最佳反應狀態是在發電機 0-100% 負載範圍內維持增益為 100%。