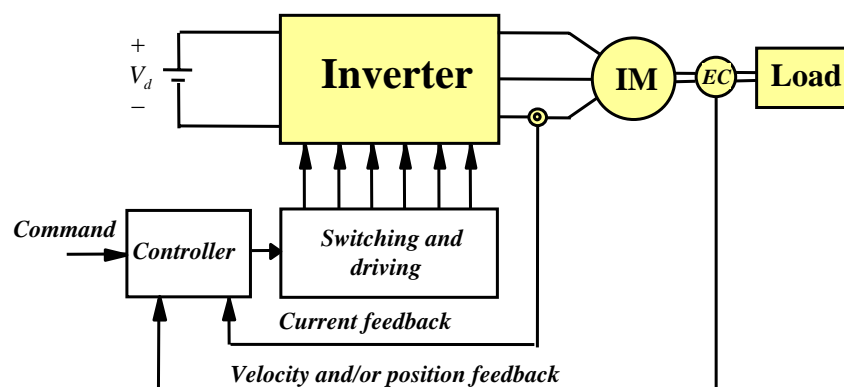


感應馬達及其變頻驅動控制

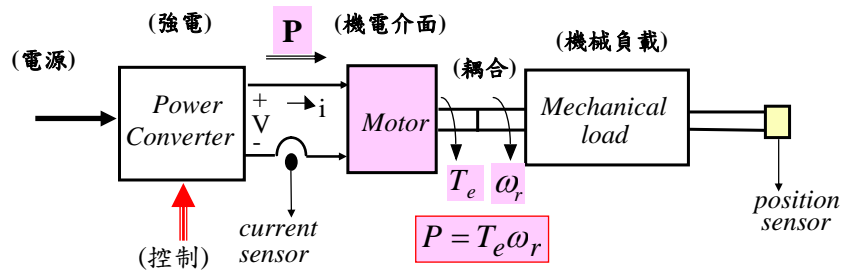
(C. M. Liaw, 清大電機系)

1. 簡介
2. 同步旋轉磁場 (Synchronous rotating field)
3. 感應馬達之分類及結構
4. 三相感應馬達之操作原理
5. 感應馬達之等效電路及操控特性
6. 變頻器供電之感應馬達驅動系統
7. 變頻器之分類
8. 變頻器供電感應馬達驅動系統之機電能量轉換
9. 感應馬達之間接磁場導向控制(或間接向量控制)
10. 由量測從事動態模式之估測

1. 簡介: 感應馬達驅動系統之組成



Converter - Motor - Mechanical load 間之配合



Motor : Electrical power to mechanical power conversion: $P = T_e \omega_r$

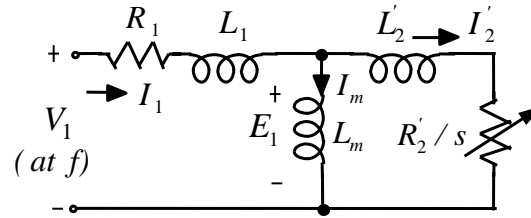
Mechanical equation : $T_e = T_L + B\omega_r + J(d\omega_r / dt)$

(Developed torque) (Load torque) (Damping ratio) (Inertia constant)

- 馬達驅動系統由電源經變頻器供給電能量至馬達，產生轉矩帶動各式機械負載，馬達需能產生適當轉矩-速度特性。而又因馬達轉矩係由電流經由電源流經變頻器之電流轉換所得，因此，變頻器中所用開關元件之額定須與馬達之轉矩樣型配合之。
- 變頻器供電馬達之特性甚受變頻器輸出諧波成份之影響，而諧波成份決定於變頻器之架構，如電壓型或電流型、及切换控制策略。在實際應用上，如何在變頻器及感應馬達間適當選擇搭配，使馬達本身具有良好操作特性，係在整體驅動系統設計上很重要之一環。首先，必須先瞭解不同組態之變頻器採用不同之切换技術，所得輸出電壓或電流之頻譜特性。其次，應瞭解在具有諧波成份之非正弦波供電下馬達之操作特性，如諧波電流、諧波損失、效率、繞組電壓應力、脈動轉矩、噪音等等。

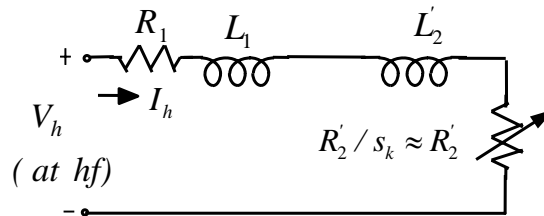
感應馬達單相等效電路

基本波



(a) 基本波

第h次諧波



(b) 第h次諧波

2. 同步旋轉磁場

☒ $m \neq 2$

P 極 m 相交流機：m 個電樞繞組在空間互差 $360^\circ / m$ 電氣角度(機械角度 = $360^\circ(2/P)/m$) 放置，通以互差 $360^\circ / m$ 電氣角度之 m 相平衡電流。同步旋轉磁場之速度為： $120f / P$ (rpm)

☒ $m = 2$ ：P 極 2 相交流機

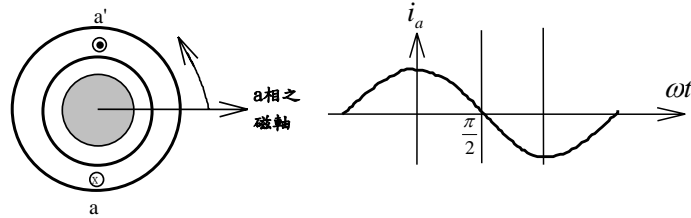
$N_a = N_m$ ：2 電樞繞組在空間互差 90° 電氣角度放置，通以互差 90° 電氣角度之 2 相平衡電流

$$i_m(t) = I \cos \omega t, i_a(t) = I \sin \omega t$$

$N_a \neq N_m$ ：2 電樞繞組在空間互差 90° 電氣角度放置，通以互差 90° 電氣角度之 2 相不平衡電流，使 $N_m i_m(t)$ 與 $N_a i_a(t)$ 保持兩相安匝平衡，亦即：

$$N_m i_m(t) = N_m I_m \cos \omega t, N_a i_a(t) = N_a I_a \sin \omega t, \\ N_m I_m = N_a I_a$$

單相線圈(m=1)之旋轉磁場



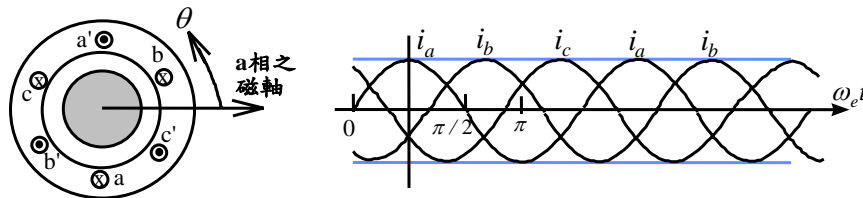
$$F(\theta, t) = N i_a \cos \theta = N I_m \cos \omega t \cos \theta =$$

$$\frac{1}{2} N I_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} N I_m \cos(\omega t + \theta) \overset{\Delta}{=} F_f + F_b$$

Forward
Backward

- 僅生脈動旋轉磁場，可分解成 Forward 及 Backward 旋轉磁場，如為單相馬達，轉子 不能自行啟動，可運轉，但具近乎 兩倍頻之脈動轉矩 (Pulsating torque)。

三相線圈(m=3)之旋轉磁場



$$\begin{aligned}
 F(\theta, t) &= N i_a \cos \theta + N i_b \cos(\theta - 120^\circ) + N i_c \cos(\theta + 120^\circ) \\
 &= N I_m \cos \omega t \cos \theta + N I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \\
 &\quad + N I_m \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \\
 &= 0.5 N I_m \cos(\theta - \omega t) + 0.5 N I_m \cos(\theta + \omega t) \\
 &\quad + 0.5 N I_m \cos(\theta - \omega t) + 0.5 N I_m \cos(\theta + \omega t + 120^\circ) \\
 &\quad + 0.5 N I_m \cos(\theta - \omega t) + 0.5 N I_m \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \\
 &= \frac{3}{2} N I_m \cos(\theta - \omega t)
 \end{aligned}$$

Only forward

3. 感應馬達之分類及結構

■ 三相 *IM*：鼠籠式、繞線式。

■ 單相 *IM*：全為鼠籠式

分相啟動式、電容啟動式、電容運轉式、
電容啟動/運轉式、蔽極式、其他。

(1)、繞線式：

轉子放有三相平衡繞組，經由炭刷滑環接到外面之電阻，
改變外加電阻值，可以得所需啟動特性及並可改變速度。

(2)、鼠籠式：

轉子為一些如圖示之短路銅條，無法如繞線式改變轉子繞
組之電阻。可密封、少維護、體積小。**銅條一般為斜置**，
以**減少運轉噪音及促進運轉之平滑**。依金屬條之形狀及單
層或雙層，可有不同轉矩特性之鼠籠式感應馬達：

class A, B, C, D。

4. 三相感應馬達之操作原理

■ 轉子沒有外加電源激勵。

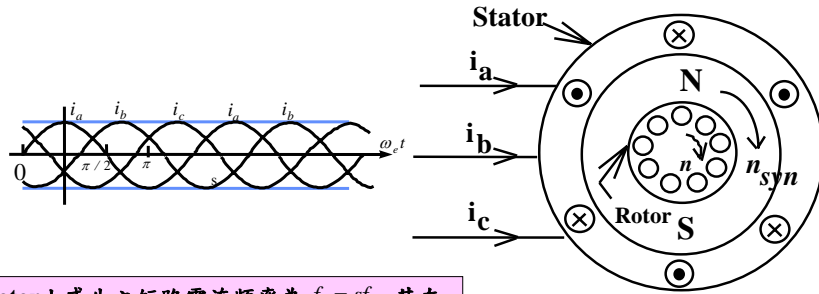
■ 當定子由外加電壓產生旋轉磁場時，轉子因轉差速度割
切產生電壓，進而於短路繞組中流有電流產生磁場，如
此，轉子與定子之 mmf 互相作用產生轉矩令轉子運轉。
轉子速度永遠小於同步轉速，Load ↑ ⇒ speed ↓：

$$\text{同步轉速} = \frac{120f}{p} \text{ (rpm)},$$

$$\text{轉差率 (slip) } s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}}, \text{ 轉子轉速} = (1-s)n_{syn}$$

■ 在一般運轉情形下，s 很小，約為3~10%，視轉子之設計
而定(如 class A, B, C, D等)。額定 s 越小之馬達，其穩態
之運轉效率越高。機械負載增加時，slip 增大機械負載增
加時，slip 增大(speed n 下降)。啟動時：s=1，必須限制
啟動電流，因啟動時IM如同一短路之變壓器。

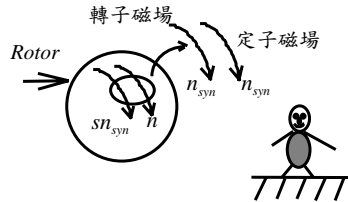
感應馬達為同步馬達之一特例(IM \leftrightarrow SM)



Rotor上感生之短路電流頻率為 $f_r = sf$ ，其在本身上產生之旋轉磁場速度為 sn_{syn} ，而本身速度為 n ，因此，轉子所生之旋轉磁場對靜止之定子而言轉速仍為：

$$sn_{syn} + n = n_{syn}$$

因此，IM之轉子所生之同步旋轉磁場對定子而言相對轉速為 n_{syn} ，而定子上之電樞繞組所生者之同步旋轉磁場轉速亦為 n_{syn} 。故，**IM仍可視為係SM之一特例。**



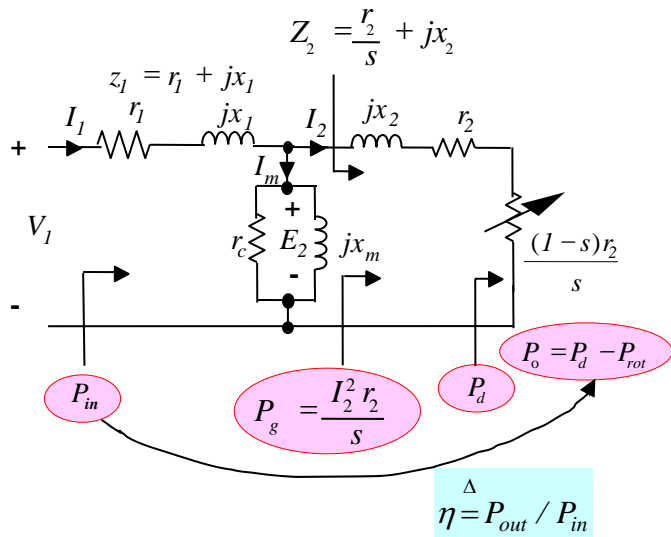
5. 感應馬達之等效電路及操控特性

■ 等效電路（轉子參數參考至定子）

等效電路之形成，各組成元件各均有其物理意義。IM於靜止時如同變壓器之二次側短路一樣；轉動後如同有載之變壓器，其負載等值電阻為 $R_L = (1-s)r_2/s$ 。變壓器與IM等效電路之比較：

	Transformer	IM
氣隙：	無	有
漏感抗：	較小	較大
激磁電抗：	較大	較小
激磁電流：	較小	較大
功因：	較大	較小

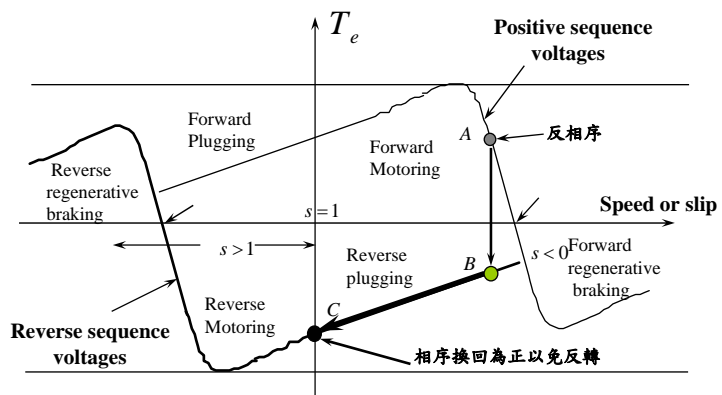
感應馬達之單相等效電路



電磁產生轉矩(Electromagnetic Developed Torque)

$$T_e = \frac{qV_1^2(1-x_1/x_m)^2(r_2/s)}{\omega_{syn}[(r_1+r_2/s)^2+(x_1+x_2)^2]}$$

轉矩-轉速特性 (固定頻率及電壓):

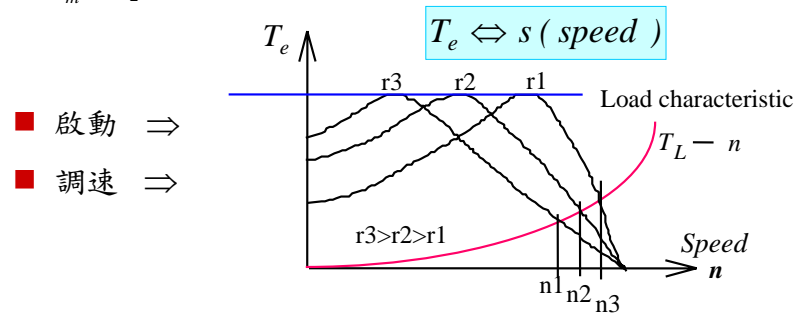


最大轉矩及其產生之轉速

$$s_m = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2}}$$

$$T_m = \frac{qV_l^2(1 - \frac{x_l}{x_m})^2}{2\omega_{syn}[r_l + \sqrt{r_l^2 + (x_l + x_2)^2}]}$$

- (1)、 s_m 與 r_2 有關，改變可改變發生最大轉矩處之 slip s_m 。
 (2)、 T_m 與 r_2 無關。



感應馬達之速度控制

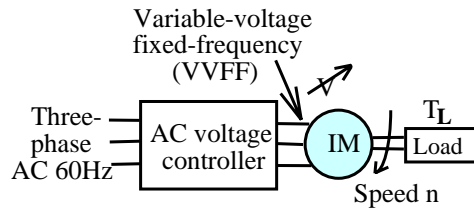
$$n = n_{syn}(1-s) = \frac{120f}{P}(1-s) \Rightarrow$$



- (1)、改變磁極 P ：為 Discrete type。
- (2)、改變 f ：需用 Inverter。
- (3)、改變轉差率 s ：
 - (a) 改變外加電壓。
 - (b) 改變轉子電阻：只有 Wound rotor 可以。

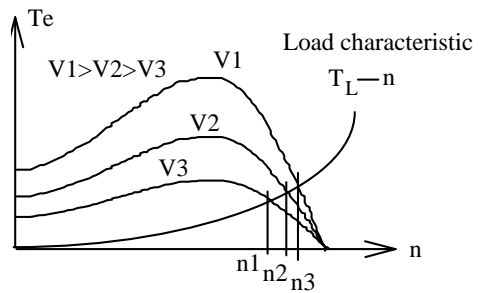
改變轉差率 s : 改變外加電壓

■ 配備



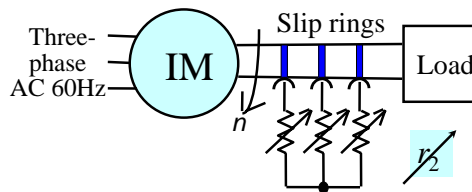
■ 控制特性

$$T_e \propto V^2$$

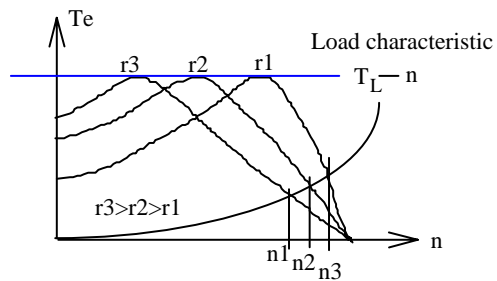


改變轉差率 s : 改變轉子電阻

■ 配備

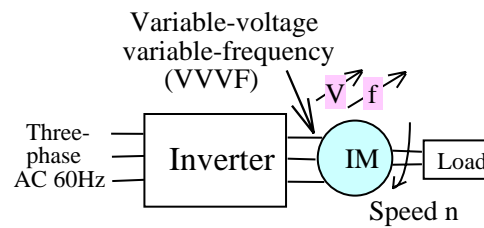


■ 控制特性



改變頻率 f

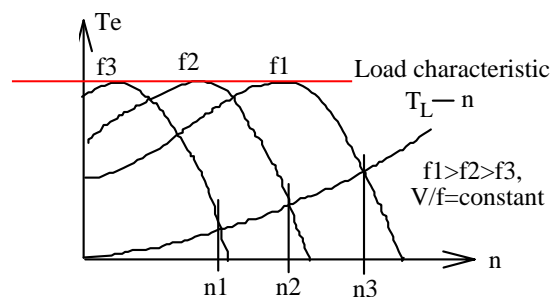
■ 配備



■ 控制特性

$$\phi \propto (V / f)$$

■ 弱磁操作特性?



三相感應馬達之啟動

■ 降壓(定頻)：降低啟動電流。

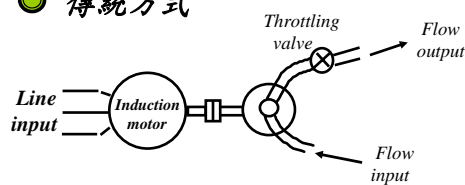
- (1) Autotransformer;
- (2) Primary resistor method;
- (3) Primary reactor method;
- (4) Y-delta starting method;
- (5) Part winding starting;
- (6) Rotor resistance (只有 wound-rotor type 可用)

■ 變頻器：降頻啟動。

7. 變頻器供電之感應馬達驅動系統

- 好處: Inverter \Rightarrow providing **variable-voltage, variable-frequency (VVVF)** source to the load can greatly improve its driving performance.
- **Motor driven pump system**: significant **energy saving** can be obtained if the speed of the pump can be adjusted according to the flow condition using an inverter.

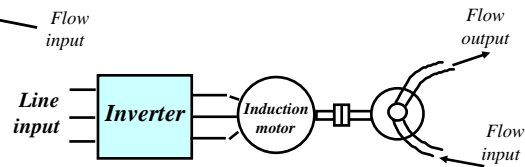
● 傳統方式



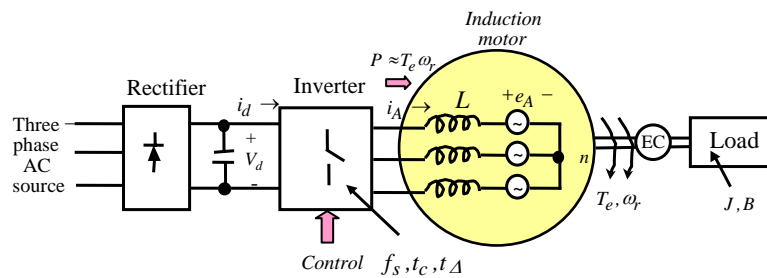
$$T_L \propto \omega_r^2,$$

$$P = T_L \times \omega_r^2 \propto \omega_r^3$$

● ASD (Adjustable Speed Drive) : 省能



The Key Parameters of an Inverter-Fed Motor Drive



■ 考量因素:

- The armature ripple current.
- The switching losses.
- The dead-time in converter transfer function.
- The DC link voltage.

■ How to Reduce the Armature Ripple Current.

Effect of Ripple Current on the Mechanical Torque and Speed

- The speed of an inverter-fed motor:

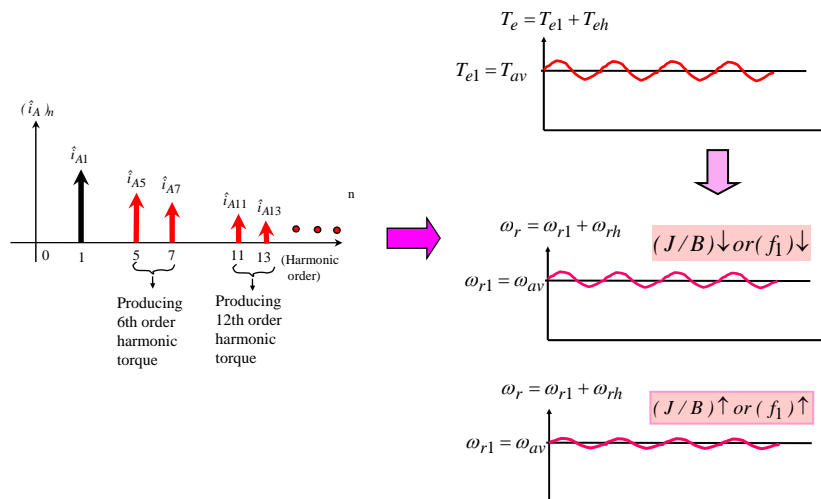
$$T_e = T_{av} + T_{eh} = T_L + B\omega_r + J(d\omega_r / dt) \Rightarrow$$

$$\omega_r = \omega_{av} + \omega_{rh} :$$

$$T_{eh} \downarrow \text{ or } (J/B) \uparrow \text{ or } (f_1) \uparrow \text{ or } (m_f) \uparrow \Rightarrow \omega_{rh} \downarrow$$

The effect of ripple current on torque and speed

Example: Six-step inverter-fed induction motor:



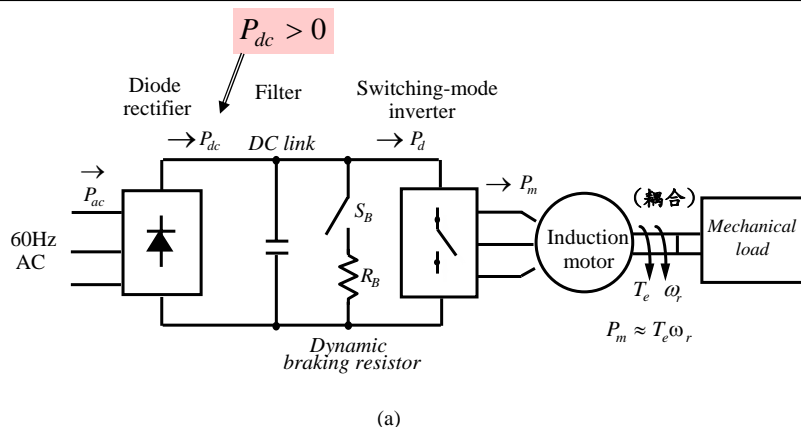
8. 變頻器之分類

依切換技術歸類：

- 方波切換或稱六塊波切換(Six-step switching)
- 脈寬調制(Pulse-Width Modulation, PWM)：又分：
 - (a) 方波 PWM (Square-wave PWM)
 - (b) 正弦波 PWM (Sinusoidal PWM, SPWM)
 - (c) 修正式 SPM (Modified SPWM)
 - (d) 規則取樣 PWM (Regular Sampled PWM, RSPWM)
 - (e) 諧波注入式 PWM (Harmonic Injection PWM, HIPWM)
 - (f) 最佳 PWM (Optimum PWM)
 - (g) 選擇諧波消除 PWM (Selective Harmonic Elimination PWM)
 - (h) **電流控制** PWM (Current-Controlled PWM) (Closed-loop)
 - 磁滯控制 (Hysteresis control)，或稱 Bang-Bang control，或 ON/OFF control，或 Adaptive Current control。
 - 定頻控制 PWM (Fixed-Frequency PWM control)，或稱 Subharmonic PWM control，或 Ramp Comparison PWM control。
 - Predictive PWM control.
- 空間向量調制 PWM (Space Vector Modulated PWM, SVM PWM) (Closed-loop):
 - (a) Current control
 - (b) Flux and Torque control
 - (c) 其他控制法則
- **隨機切換** (Random switching)

9. 變頻器供電感應馬達驅動系統之機電能量轉換

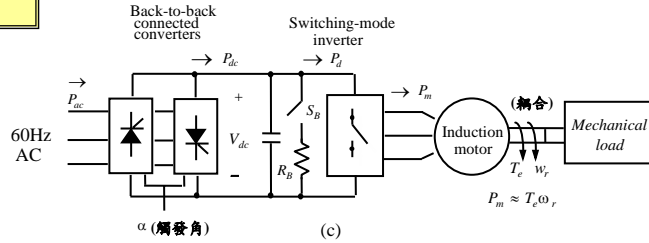
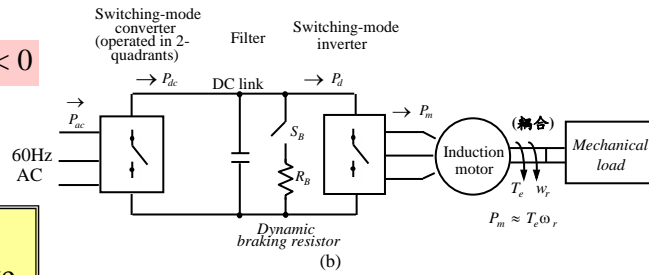
具直流鏈變流器供電交流馬達驅動系統之組態： (a) Rectifier + inverter:



具直流鏈變流器供電交流馬達驅動系統之組態：
 (b) switching-mode converter + inverter;
 (c) back-to-back connected converters + inverter.

$P_{dc} > 0$ or $P_{dc} < 0$

☒ Driving + regenerative braking



10. 感應馬達之間接磁場導向控制(或間接向量控制)

$$\omega_{sl}^* = \left(\frac{R_r}{L_r} \right) \left(\frac{i_{qs}^*}{i_{ds}^*} \right), \quad T_e = K_t i_{qs}^* = T_L + J \frac{d}{dt} \omega_r + B \omega_r, \quad K_t = \frac{3P}{4} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^*$$

