

Electric Machine Control
(電機控制, EE 484000)

Professor C. M. Liaw
(廖聰明)

Department of Electrical Engineering
National Tsing Hua University
Hsinchu, Taiwan, ROC.

電機控制簡介

(C.M. Liaw, 廖聰明)

以下以一馬達伺服驅動系統為例，簡要介紹一個工業控制系統之組成、操作原理與相關領域之整合實務。

一、伺服驅動系統簡介

1、簡介

精密伺服驅動系統之研製，在工廠自動化或辦公室自動化產品之品質提升上非常重要。圖 1 係一個以馬達為致動器(Actuator)

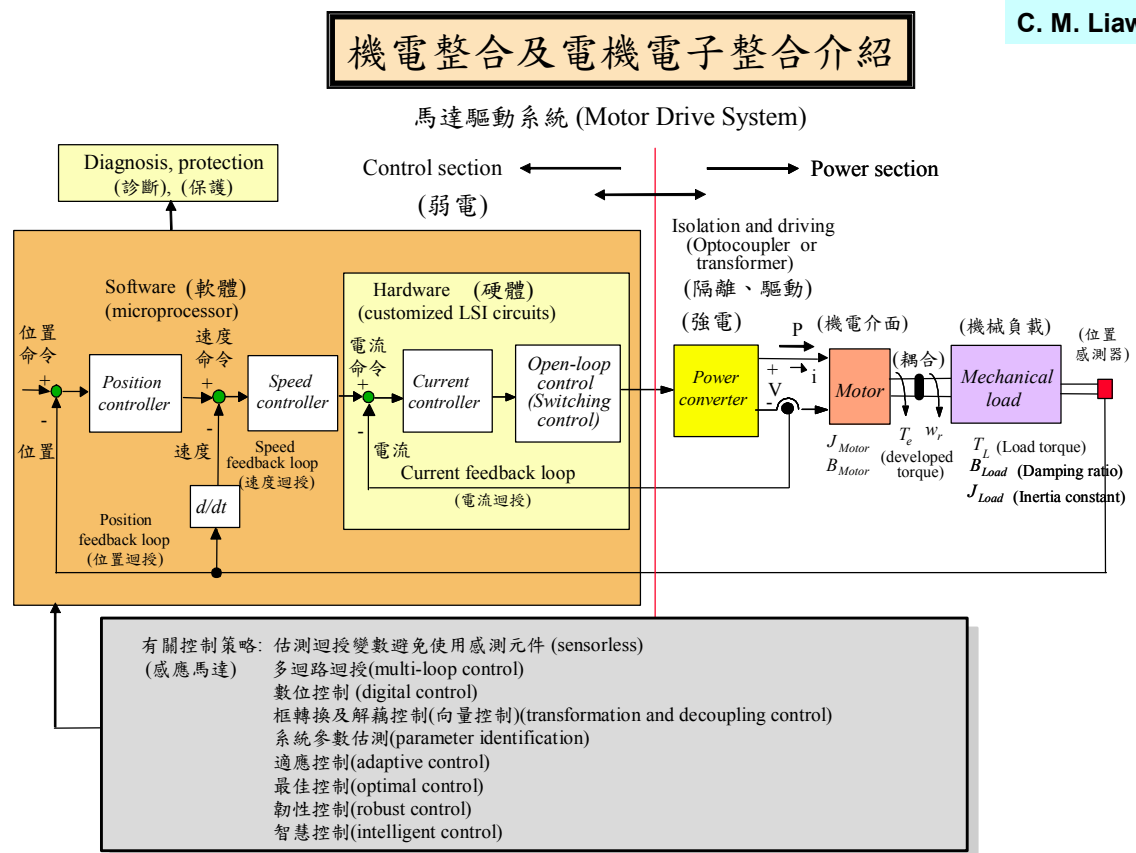
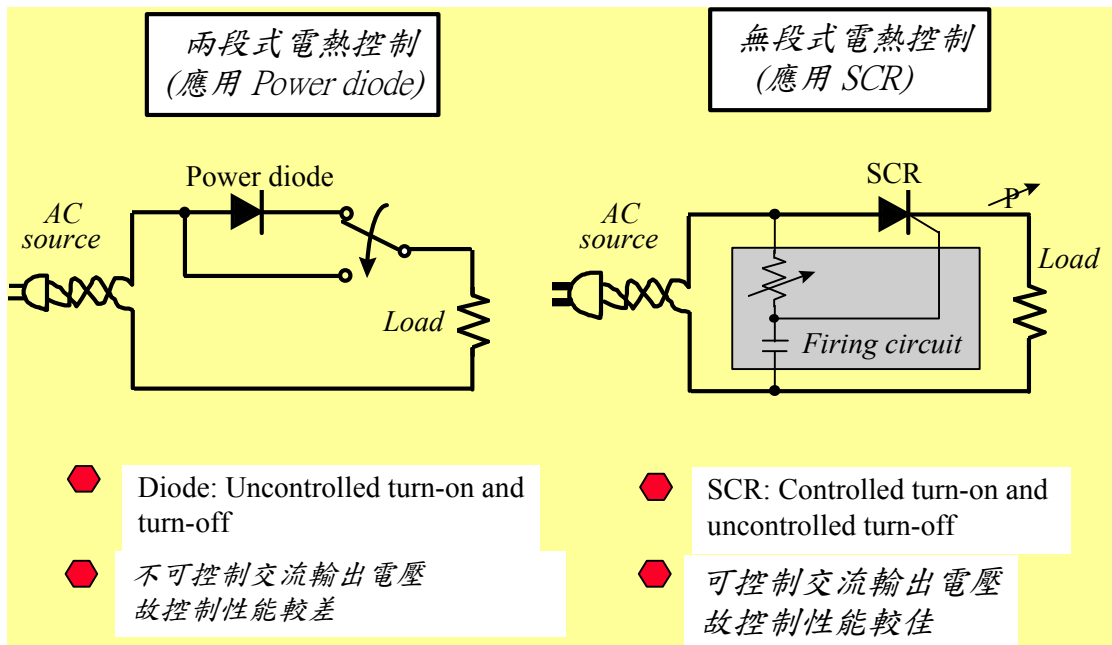
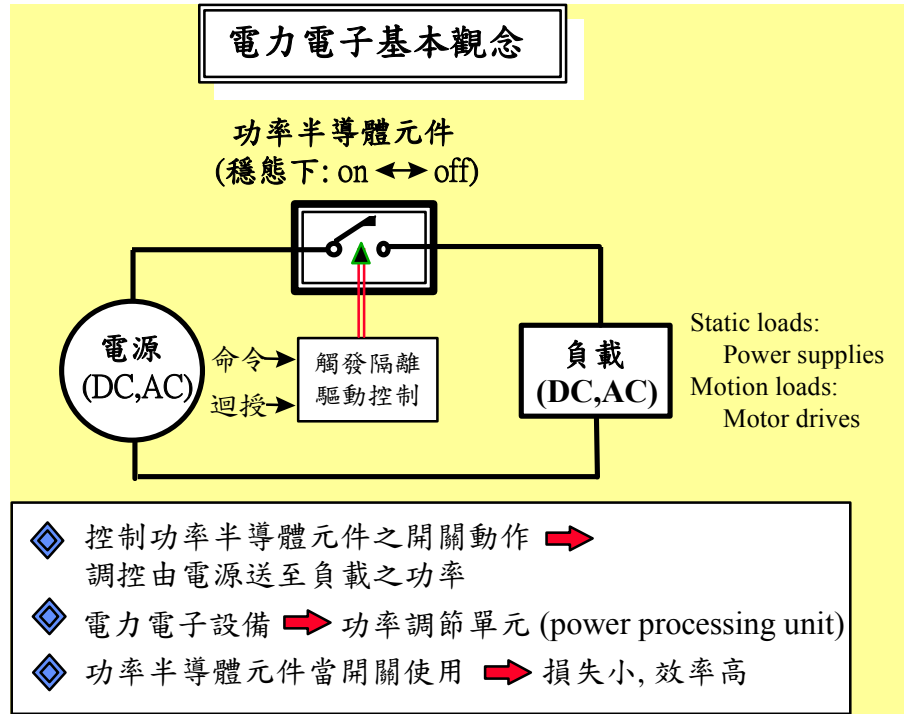


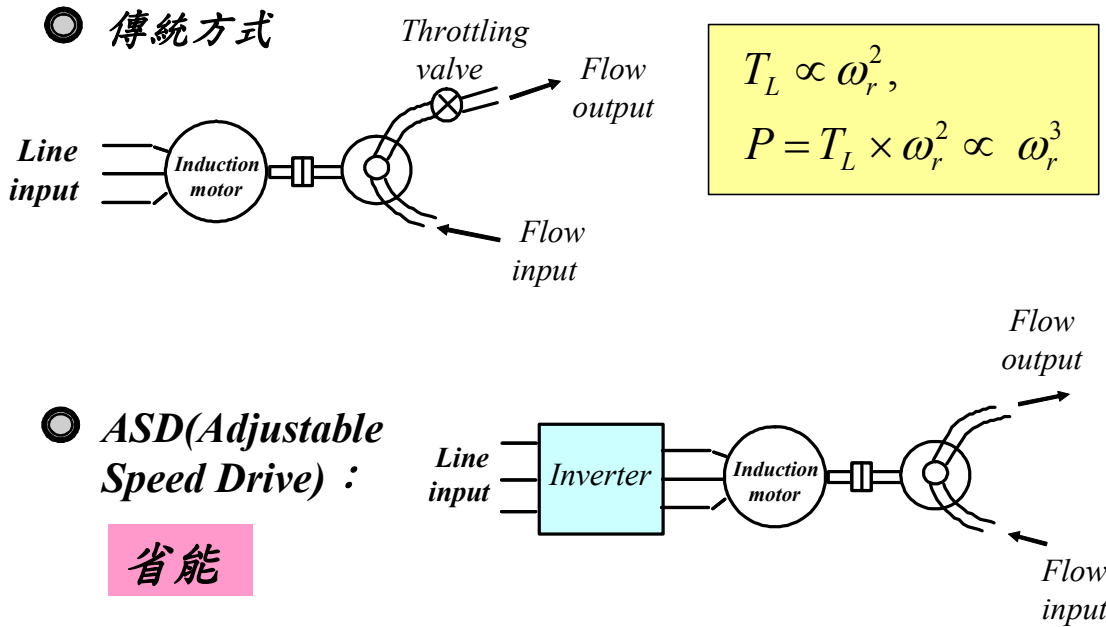
圖 1: 一個以馬達為致動器工業控制系統。

(機電整合及電機電子系統整合介紹)

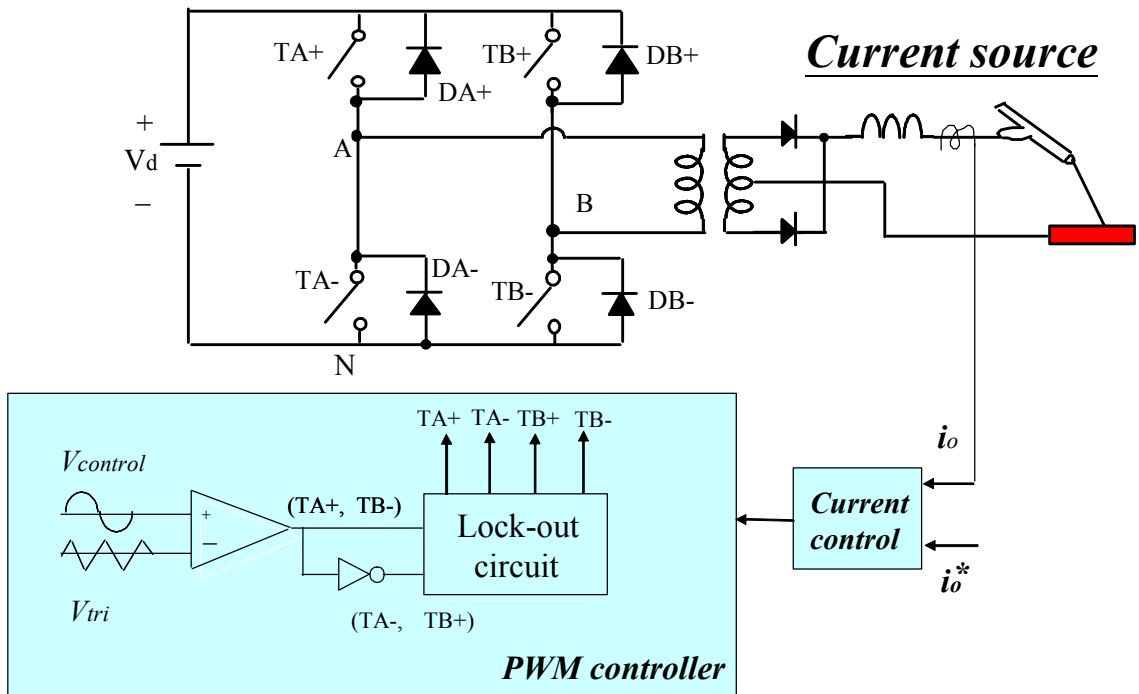
之馬達伺服驅動系統組成方塊圖，此系統可說是一個電力電子系統。一般的電力電子系統種類煩多，但可概分為靜止型之電源供應器與運動型馬達驅動系統。以下為電力電子之基本觀念、電力電子系統之定義、及一些典型電力電子系統等之簡介。



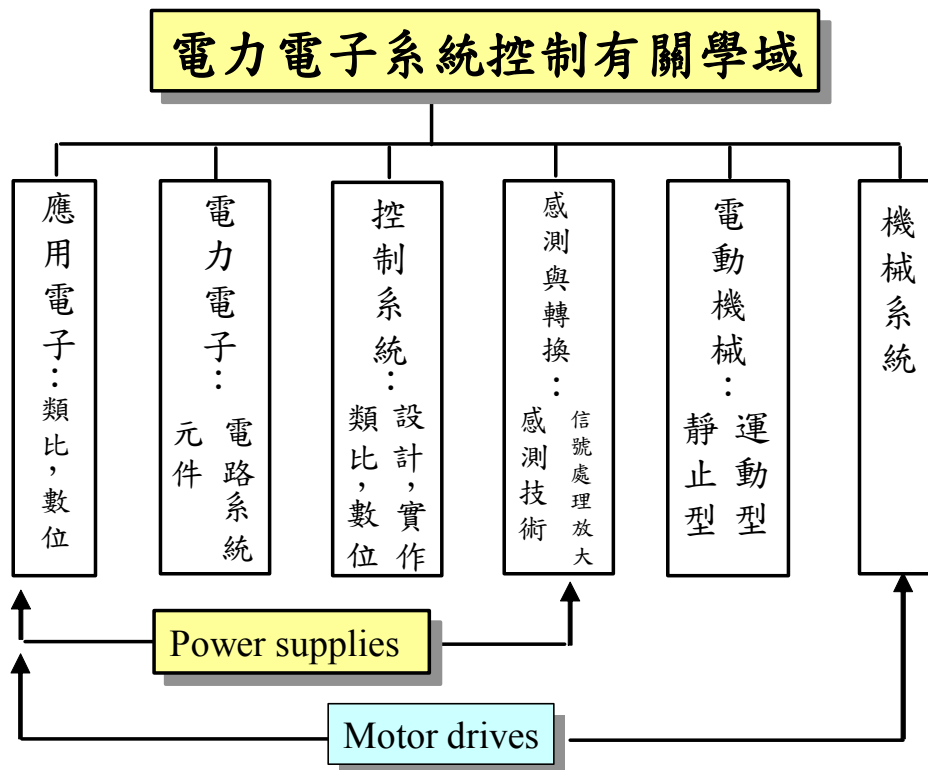
例子：Motor-Driven Pump System



變流焊接機



從事電力電子系統或一般電機控制之研發牽涉之學域如下所示：



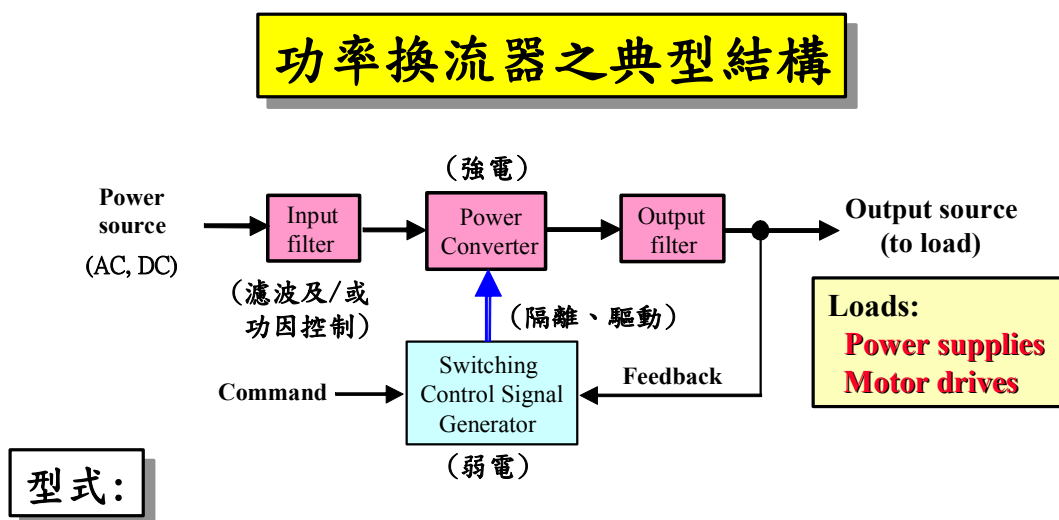
其中，如圖 1 所示之馬達驅動系統須具備之知識有：(i)應用電子、(ii)電力電子、(iii)控制系統、(iv)感測與轉換、(v)電動機械、(vi)機械系統等。應用電子用以配合人機介面，從事決策之產生；機械系統為接受馬達所生之機械能，產生適當運動型式之機構，其它各自扮演之角色為：

(1) 電動機械

提供線性或旋轉方式之驅動動力。馬達之種類繁多，不同的馬達，其激勵電源及控制方式不同，而各自之運轉特性及適用負載亦有不同。從事此藝者，必須瞭解各類馬達之特性，才能作最佳之選擇以適合於特殊之應用場合。當然，尚有其他如油壓、氣壓等致動元件，但此不在本講義之介紹範圍內。

(2) 電力電子:

如上所介紹，電力電子主要係應用功率半導體元件，將所能取得之電源轉換及控制成所選擇馬達所需之電源。一般，電力電子系統中之核心裝置即如圖 1 中所示之功率轉換器(Power converter)，可用圖 2 表示其典型組成。功率轉換器之主體為功率半導體元件，



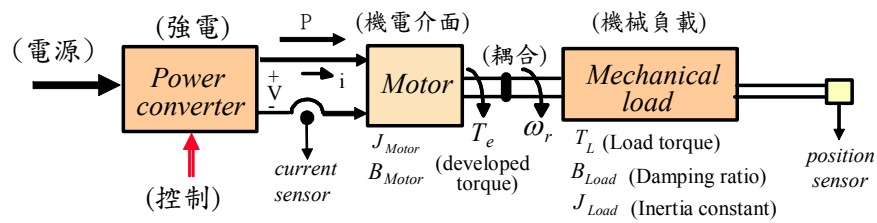
型式:

- 交流至交流交流至交流換流器 (Cycloconverter)
(含交流至直流至交流換流器)
- 交流至直流換流器 (Converter): Phase control, integral cycle control
- 直流至交流換流器 (Inverter): VVVF, VVFF
- 直流至直流換流器 (Chopper): PWM control, FM control

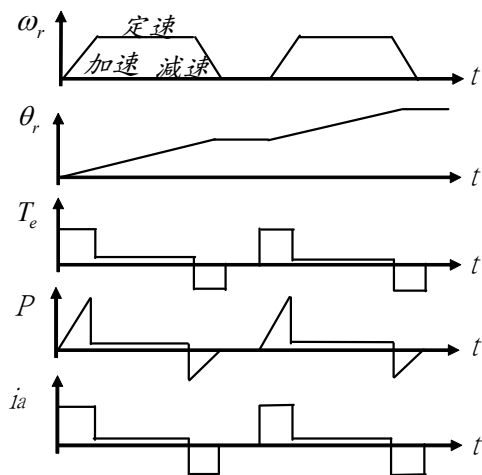
圖 2：功率轉換器之典型結構圖。

功率轉換器現有可用之種類很多，依其容量、操作開關速度各有其特性，也因此各有其適用之場合。各種半導體元件之詳細操作原理及特性可參考[1-3]。功率轉換器大體上可分成四種型式：(i)交流至直流轉換器(converter)、(ii)交流至交流轉換器(cycloconverter)、(iii)直流至直流轉換器(chopper)、(iv)直流至交流轉換器(inverter)。轉換器、馬達及機械系統間之配合情形如圖 3 簡示之。

Converter - Motor - Mechanical load 間之配合 (以直流馬達為例)



Motor : Electrical power to Mechanical power $P = T_e \omega_r$
 Mechanical dynamic equation : $T_e = T_L + B \omega_r + J(d \omega_r / dt)$



- 負載在各運轉情況下所需之轉矩, 馬達均應有能力提供。
- 馬達所需之電流 i_a 係由電源流經換流器供給, 故在負載在各運轉情況下均應注意功率元件之額定。
- 馬達之 T_e : 與 $i_{a,av}$ 成正比。
馬達之銅損: 與 $i_{a,rms}$ 之平方成正比。
馬達之換向能力: 與 $i_{a,max}$ 有關。
電晶體之電流額定: $i_{a,max}, i_{a,av}, i_{a,rms}$ 。
- 馬達與換流器之電壓及功率額定:
 $\omega_r > rated$: Constant power operation。

圖 3：轉換器、馬達及機械系統間之配合情形。

各種轉換器又有多種切換技巧，一般選擇適當換流器之步驟為：

- 由機械負載特性選擇所用之馬達。
- 由所選之馬達為直流或交流及所能取用之電源即可決定所採用之轉換器型式。
- 由負載有關特性要求，如諧波含量、損失、受控變數之精確度及動態特性等可進一步決定轉換器之開關控制方式。

另外，輸出及輸入濾波器亦應依實際之要求予以適當設計。而整體電力電子裝置之接地及遮蔽(Shielding) 之考量亦相當重要[3,5]。

(3) 感測與轉換:

一個高效能之伺服系統，如圖 1 所示均需作迴授控制。因此，必須感測一些受控物理量，如電流、轉速、電壓、、、等。有的是要將高電壓經由隔離放大器變成低電壓，有的是要將電流轉變成電壓，或將一些非電量如轉速、位移、頻率等感測並轉換放大成電壓量。因此，感測元件之認識及信號處理(Signal conditioner)技術之建立就顯得格外重要了。這些也因篇幅所限，不在此介紹，可參考[5,6]。

(4) 控制系統:

為獲得高效能之位置控制，迴授控制係必須的。在既有的控制技術中，種類繁多，有些容易實施，有些則較複雜。適當的控制技術選擇，必須依控制規格之要求，複雜性容許情形及成本去作決定，在下面有關章節將會作些介紹。

經由上面之簡要介紹可知，必須整體性配合有關學域之技術，才可研製成功高品質之伺服系統或工業控制系統。因此，必須經心地從事馬達之適當選擇、模式之建立、控制系統之設計與實現等重要課題。

另外，值得一提的是，如圖 1 之控制系統配置，類比與數位之配置比例須依電腦之操作速度、系統之規格要求、系統之複雜程度、控制法則之進步及複雜性來選擇決定。在功率轉換器本身之必要控制，如開關切換法則之實現、電流內部迴授迴路等，可利用已有之大型特殊積體電路，而複雜之控制架構始由軟體處理。當然，一切還是取決於如上述之實際需求及成本等因素。

2、馬達驅動系統分類

(1)、依控制目的分類

A、速度控制:又稱速度伺服系統:

(a) 定速。

(b) 變速:

(i) 定轉矩(Constant torque, constant flux):

Speed < rated value;

(ii) 定功率(Constant horsepower, field-weakening control): Speed > rated value.

B、位置控制:又稱位置伺服系統:

(a) 定位控制: 只控制最後位置。

(b) 輪廓控制: 控制路徑。

(2)、依伺服控制方式分類

依據伺服馬達之固有特性，以及對受控體之性能要求與成本，控制方式有下列三種可能之架構：

A、開環路(Open-loop)控制系統

欲採開環路而仍要求有適當之定位精度，則只有採步進馬達當致動器。步進馬達如在規格上適當選擇及驅動系統與脈波適當選擇，其運轉由脈波數決定，不會失步，其定位停止角度誤差不會累積。但有時規格選定或機械系統配合不良而有失步之虞時，仍可採閉迴路控制，可得精確之定位控制。

B、半閉環路(Semi closed-loop)控制系統

迴授馬達軸上裝設之編碼器脈波信號，而不是真正迴授受控機械上之受控變數。安裝容易、價格低，但由馬達軸至機械系統間為開迴路，其間之特性由其機械動態特性決定。

C、全閉迴路(closed-loop)控制系統

直接迴授機械系統受控變數，可得精確控制效能，但成本較高。

3、伺服馬達(Servo motor)

適合於伺服控制之馬達必須具有平滑低速正反轉運轉特性，有的馬達先天具有此功能，有的則無，而須配合電力電子及控制才可。一般而言 DC Servo 及 Stepping motor 具有此項特點，而 AC Servo 則須有良好之電力電子轉換器裝置及控制配合。其間在結構、額定、系統組成、價格上各有不同，在選擇上亦有不同考量。圖 4 為 Servo motor 之種類。這些馬達與機械系統間常需減速耦合，另有一種直接驅動 (Direct driving, DD)馬達不需減速耦合，。各式馬達驅動系統之概略特徵如下：

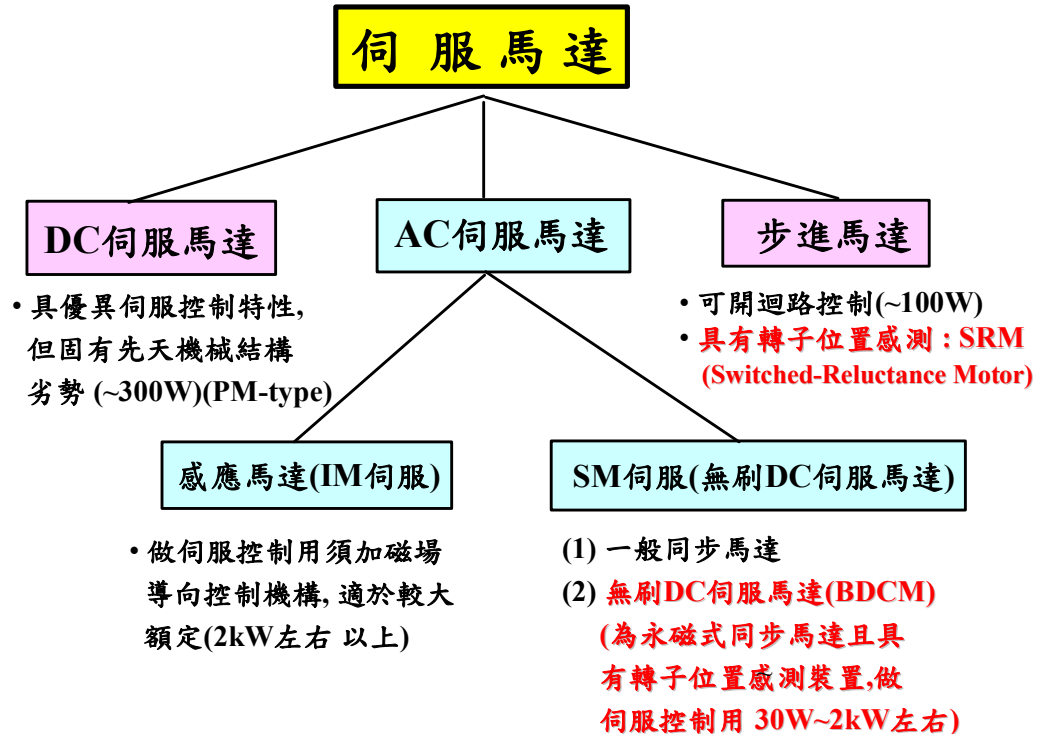


圖 4：伺服馬達之種類。

- **直流馬達(有刷式)**：係所有馬達中轉矩產生性能最佳者，但因有碳刷與換向器之滑動接觸，以及低功率密度，限制其應用場合。
- **直流無刷馬達**：為具轉子位置偵測之交流永磁式同步馬達，又可概分為：
 - (1) 速度驅動系統：方波永磁式同步馬達驅動系統。
 - (2) 位置伺服驅動系統：弦波永磁式同步馬達驅動系統。
- **步進馬達**：唯一可開迴路定位控制之馬達。
- **三相感應馬達伺服系統(須施行間接式磁場導向控制)**

應用磁場導向控制，才可使感應馬達具有如直流馬達般之運轉性能，以適於做為伺服驅動控制應用。
- **兩相感應伺服馬達系統**。。

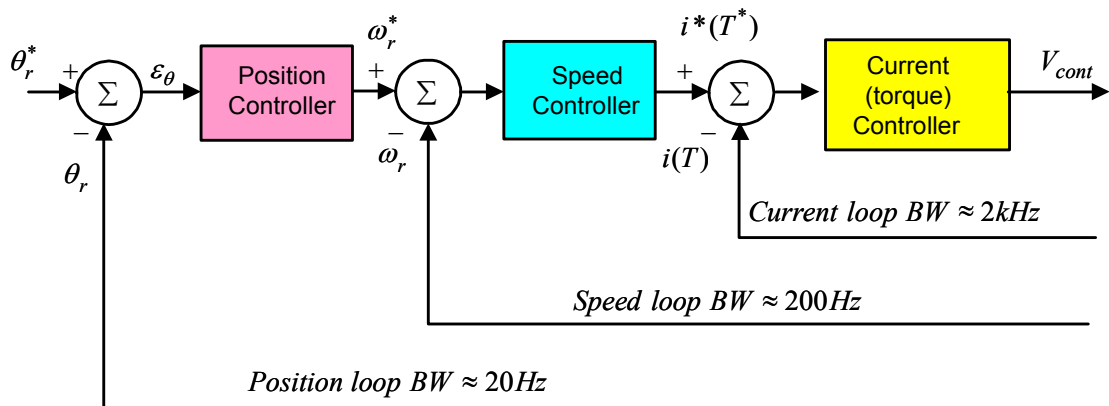
靜子具有二個線圈，一為參考線圈，加以固定電壓；另一為控制線圈，加以誤差調控之電壓，馬達響應誤差信號而轉動至所定之位置。

各類伺服馬達驅動系統之組成、操控原理、動態模式之建立與估測等技術均應予以瞭解[1-12]。

4、伺服馬達之選擇

如前所介紹之多迴路串級控制之伺服控制系統，由轉矩(或電流)、速度、位移三個控制迴路構成，不同之馬達配以不同之換流器及控制技巧，可得不同之操控特性。一般而言，越內迴路，其動態響應速度越快，即小訊號頻寬越寬，以下示之控制迴路組態為例：

Multi-loop Cascade Control System



在設計各組成控制迴路時，須對受控體之響應特性有所認識，才可定出合理之規格。

在選擇一個合適之伺服馬達驅動系統時，以下係一些考量因素：

- 成本。
- Power density：單位體積或重量之功率。
- 速度範圍及最大轉矩。
- Losses 及 thermal capacity。
- Torque-per-unit current：代表單位電流之轉矩產生之能力。
- Braking：煞車之操控特性。
- Cogging torque：在永磁轉子齒極其定子齒間所生之齒隙轉矩。
- Ripple torque：由轉換器供電之馬達，由於紋波電流所生之脈動轉矩(Ripple torque)。
- 迴授感測元件：所需採用之感測元件會影響其適用場合。
- Parameter sensitivity：驅動系統操控特性受參數變化影響之情形。當操作頻率、磁路之磁通密度($\phi \propto v/f$)、溫度等發生變化時，馬達之電阻、電感等參數亦起變化，會影響整體之運轉操控特性。為得改良之特性，一般需有適當之調控補償措施，而不同之馬達，其控制策略不盡相同，所得之控

制性能亦不同。

- 弱磁操控特性：當速度大於額定值時，須藉弱磁控制達成定功率之作。永磁式之馬達比激磁式之馬達，弱磁操作較麻煩且效率較差，因其電樞繞組需多加弱磁電流成分。而感應馬達在弱磁控制上較易施行。
- 其他因素。

5、旋轉馬達之應用

旋轉馬達之應用場合相當廣泛，不勝枚舉。以往甚至於在線性驅動之設備，亦均由旋轉馬達經適當之傳動轉換機構帶動之。於此僅簡述在空調機上應用之，馬達之配合選擇事宜。同步馬達驅動系統應用於空調機之性能比較於參考資料[14]中有詳細之介紹。其中參與比較四種 750W 之馬達為：感應馬達(Induction Motor, IM)、同步磁阻馬達(Synchronous Reluctance Motor, SynRM)、表面貼磁石式同步馬達(Surface mount Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)以及內置磁石式同步馬達(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)，其綜合比較特性簡言如下：(i) 齒隙轉矩(Cogging torque)：IPMSM 與 SPMSM 具有 Cogging torque，其中 IPMSM 較大，因其具有凸極效應(Saliency)，在壓縮機負載之應用上，應具有有效小之 Cogging torque，因需具有低噪音及低振動特性；(ii) 馬達之效率及損失：IPMSM 之效率最高，因其除具永磁轉矩外，尚具有磁阻轉矩，其所需之定子電流最小，而具有最小之銅損。SPMSM 無磁阻轉矩，其銅損增大。另外，因外包鋼膜上之感生渦流所造成之鐵損，使其效率稍低。而 SynRM 因無永磁轉矩，全靠磁阻轉矩而效率較低，但仍比 IM 高約 2~3%；(iii) 成本：以 SynRM 為 1.0 當比較對象，IM、IPMSM、SPMSM 分別為其之 1.13、1.42、1.5 倍。由上之比較可知，欲得高性能高效率之空調運操控特性，可選用 IPMSM，而如欲得最低成本者，可選用 SynRM，只是效率較低，但仍比 IM 高些。

參考資料

- [1] S. B. Dewan, G. R. Slemon and A. Atraughen, *Power Semiconductor Drives*, New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [2] M. H. Rashid, “*Power electronics: Circuits, devices, and applications*,” Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, *Power Electronics*, 3rd Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [4] J. M. Jacob, *Power electronics: principles and applications*, Delmar Thomson Learning, 2002.
- [5] J. M. Jacob, “*Industrial control electronics: Applications and design*,” Prentice-Hall, New Jersey, 1988.
- [6] J. G. Bollinger and N. A. Duffie, “*Computer control of machines and processes*,” Addison-Wesley, New York, 1988.
- [7] P. C. Krause and Oleg Wasynczuk, “*Electromechanical motion devices*,” New York: McGraw-Hill, 1989.
- [8] P. C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, IEEE Press, 2002.
- [9] G. K. Dubey, *Fundamental of electrical drives*, Pangbourne, UK, Alpha Science, 2001
- [10] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 2002.
- [11] B. K. Bose, “*Power electronics and variable frequency drives*,” IEEE Press, 1997.
- [12] Sergey E. Lyshevski, *Electromechanical systems, electric machines and applied mechatronics*, CRC Press, 2000.
- [13] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [14] H. Murakami, Y. Honda, H. Kiriya, S. Morimoto, and Y. Takeda, “The performance comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in use as air-conditioning compressor,” *Proceedings of Industry Applications Conference*, pp. 840-845, 1999.