

# 變頻器 節能技術手冊

經濟部能源署 指導

財團法人台灣綠色生產力基金會 編印

中華民國 112 年 11 月

# 目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	II
表目錄.....	V
前言.....	1
壹、變頻器技術.....	2
一、基本原理.....	4
二、馬達概論.....	10
三、控制模式與用途.....	25
四、節能原理與優點.....	33
五、應注意事項與缺點.....	36
貳、服務業常見應用情境.....	41
一、空調變水量、變風量控制.....	41
二、電梯/手扶梯變頻器控制.....	46
三、送排風系統.....	51
四、空氣壓縮機與鼓風機變頻.....	54
參、變頻器應用績效實例.....	59
肆、參考文獻.....	62

## 圖目錄

圖 1-1 我國電力系統架構【1】 .....	2
圖 1-2 電壓 110V 有效值的波形及頻率示意圖【2】 .....	3
圖 1-3 馬達 Y- $\Delta$ 啟動(固定輸入電壓及頻率)： .....	3
圖 1-4 馬達變頻器控制(變動電壓及頻率的輸入)【4】 .....	4
圖 1-5 三相變頻器基本方塊圖【6】 .....	5
圖 1-6 三相變頻器之弦式脈波寬度調變示意圖【6】 .....	6
圖 1-7 弦式脈波寬度調變之示意圖【7】 .....	7
圖 1-8 三相變頻器的電力電路圖【8】 .....	9
圖 1-9 直流馬達原理示意圖【9】 .....	10
圖 1-10 馬達分類樹狀圖【10】 .....	11
圖 1-11 三相感應馬達結構示意圖【11】 .....	12
圖 1-12 三相感應馬達銘牌示意圖 .....	13
圖 1-13 額定電壓及頻率操作之三相感應馬達特性曲線【12】 .....	14
圖 1-14 無刷直流馬達結構圖【13】 .....	15
圖 1-15 磁通量方向不同之馬達結構【11】 .....	16
圖 1-16 馬達之定轉子結構位置【14】 .....	16

## 圖目錄

圖 1-17 表面黏貼型馬達轉子磁石結構【15】 .....	17
圖 1-18 嵌入型馬達轉子磁石結構【15】 .....	18
圖 1-19 內藏型馬達轉子磁石結構【15】 .....	18
圖 1-20 各等級馬達效率變化圖【17】 .....	21
圖 1-21 變頻器控制系統關係圖.....	25
圖 1-22 電壓/頻率控制【6】 .....	26
圖 1-23 變頻器－電壓與頻率的關係圖例【6】 .....	26
圖 1-24 向量控制方塊圖【6】 .....	27
圖 1-25 向量控制感應馬達驅動器的控制系統【6】 .....	28
圖 1-26 磁場導向控制流程圖【20】 .....	29
圖 1-27 磁場導向控制的操作區塊圖【20】 .....	29
圖 1-28 無轉軸量測器向量控制方塊圖【6】 .....	31
圖 1-29 直接轉矩控制方塊圖【6】 .....	32
圖 1-30 模型預測控制方塊圖【25】 .....	33
圖 1-31 流量調整方法【6】 .....	34
圖 1-32 流量調整方法之耗能【6】 .....	34

## 圖目錄

圖 1-33 流量調整方法之原理【6】 .....	35
圖 1-34 諧波分解圖.....	37
圖 2-1 一次/二次側冰水系統簡圖【31】 .....	42
圖 2-2 一次/二次側冰水系統示意圖【32】 .....	42
圖 2-3 可變風量 VAV 系統簡圖【31】 .....	44
圖 2-4 空調箱示意圖.....	45
圖 2-5 電梯各部構造名稱與位置【33】 .....	46
圖 2-6 電梯配重原理示意圖與實照【36】 .....	47
圖 2-7 永磁馬達之無齒輪捲揚機【34,35】 .....	47
圖 2-8 電梯運行四象限示意圖【36】 .....	48
圖 2-9 電扶梯變頻器控制示意圖【37】 .....	50
圖 2-10 可變轉速電扶梯人員感知器與感測區示意圖【37】 .....	50
圖 2-11 廚房進排氣系統架構示意圖【32】 .....	51
圖 2-12 噴流式風機外觀【32】 .....	53
圖 2-13 停車場送排風系統監控畫面【32】 .....	53
圖 2-14 空氣壓縮機分類圖【38】 .....	54

## 圖目錄

圖 2-15 空壓系統示意圖【39】 .....	54
圖 2-16 空壓系統台數控制示意圖 .....	55
圖 2-17 汗水回收與排放流程示意圖【32】 .....	56
圖 2-18 汗水處理流程示意圖【32】 .....	57
圖 2-19 汗水機房狀態監視系統【32】 .....	58
圖 2-20 汗水泵浦超時運轉預警及狀態監控系統【32】 .....	58
圖 3-1 學校汰換冰水主機、周邊設備並導入變頻控制之節能效益【40】	59
圖 3-2 醫院汰換冰水主機、周邊設備並導入變頻控制之節能效益【40】	59
圖 3-3 採用磁浮離心式(變頻)冰水主機、變頻空壓機之節能效益【40】	.60

## 表目錄

表 1-1 馬達額定效率等級(CNS 14400,全閉型,60Hz)【16】 .....	19
表 1-2 風機相似定率【27】 .....	35
表 1-3 EN50160 對於諧波規範的極限值 .....	39
表 1-4 電感器之選用原則【30】 .....	40
表 2-1 電梯電力回生裝置回生率及相關因素統計【36】 .....	49

## 前言

台灣為海島型的國家，相較於一般內陸型地區在資源的蘊藏量來說相對是較為貧乏，在目前眾多的相關節能用電設備當中，變頻器在不不論是工業或家電的使用上節能效果都堪稱是當前最有效率的設備，而且變頻器可應用範圍更是相當的廣泛，從家庭當中的小型家電到大型的工業用研磨機及壓縮機等。據統計全球約會有近一半的能源是消耗在驅動泵、定速風扇以及壓縮機用的馬達方面，而今日整體變頻器在市場上滲透率仍舊不高。改用變頻器來做為控制馬達的轉速方式，能帶來馬達負載改變時在驅動效率上的顯著提昇，這便是使用變頻器來做為控制節能設備的最佳原因。變頻器控制技術和電力電子的技術有著相當密切關係，包括整個半導體開關元件、變頻控制技術、以及控制硬體及韌體撰寫能力的進步等都關係著變頻器能提高馬達運轉之效率。

機械為工業之母，而馬達又佔有非常重要的一席之地，如今在民生以及工業上都離不開其構成的設備，而變頻器的出現讓馬達在使用的效率上大幅度提高，在後續將對於變頻器的相關技術作一介紹，包括變頻器的基本原理、種類以及根據電器規格選用等，期待讀者透過本文能更了解關於變頻器的技術。

經濟部能源署有鑑於此，乃委託財團法人台灣綠色生產力基金會，遴聘國內專精之專家學者與業界先進，楊正光委員、徐春福委員、黃仲欽委員與蕭鈞毓委員等，協助審查及修訂彙編，使手冊貼近現場管理人員所需，業經修訂彙編完成，提供給業者盼多加參考應用。

## 壹、變頻器技術

「變頻」這一詞往往與「節能」連接，好像有變頻就會節能、為了節能必須變頻一樣，然而變頻(器)究竟是什麼？如何應用卻相當模糊？本手冊期望透過變頻器原理、馬達與控制技術等，盡可能的讓讀者理解並作為導入之參考，限於篇幅將以服務業應用為主，工業應用可參工業節能技術服務網出版之技術手冊。

讀者可以上網搜尋「變頻」一詞，大多指的是冷氣機、洗衣機、電風扇等，這些產品均有轉動部件(如壓縮機、滾筒、風扇等)，在服務業還有電梯/手扶梯、送排風機、給水/污水泵等應用，因此可以理解變頻與轉動設備(馬達)有著密不可分的關係；過往馬達僅有啟停/高低速控制，而變頻器能做到無段變速、平滑啟動/停止等功能，因此隨著電子控制技術的成熟與價格趨於低廉，變頻一詞便逐漸出現在大家眼前。

我國電力系統區分不同電壓等級(如 22.8kV/11.4kV、380V/220V 等)其頻率都是 60Hz，赫茲(Hz)是指交流電以正弦波的形式每一秒有 60 次振幅，如圖 1-1~1-2 所示，讀者有此認知即可。

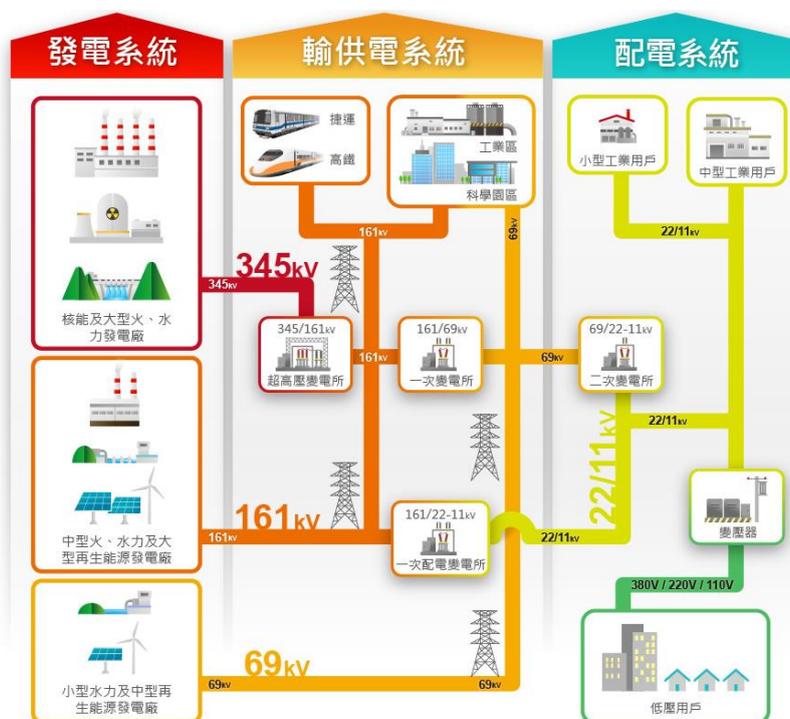


圖 1-1 我國電力系統架構【1】

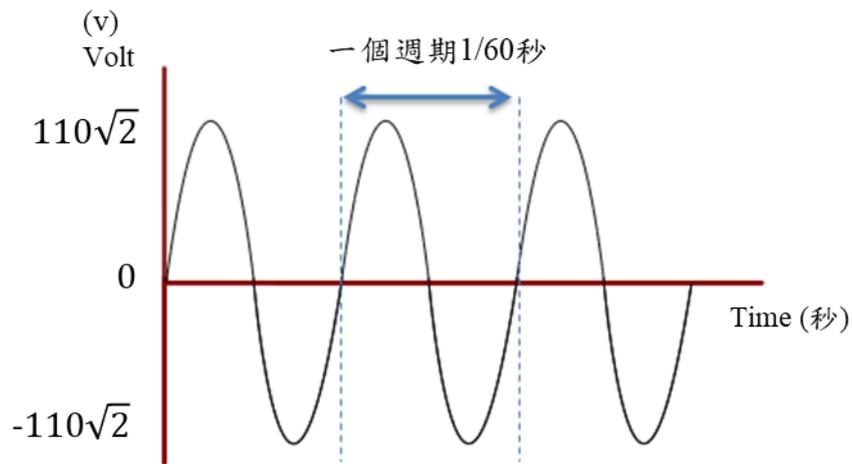


圖 1-2 電壓 110V 有效值的波形及頻率示意圖【2】

變頻器(variable-frequency drive, VFD 亦有稱 Inverter)藉由改變電源的電壓(V)與頻率(Hz)控制交流馬達，使馬達從「固定輸入電壓及頻率」變為「可配合負載變動來調節輸入電壓及頻率」，設備接線示意如圖 1-3~1-4 所示，減少負載降低時的無效能量損耗達到節能目的。各位讀者需理解，若應用的設備其負載固定且需全速運轉，那麼自然變頻器就沒有使用的意義，反之若負載變動或設備超量(過大)設計，即有降頻節能之空間。

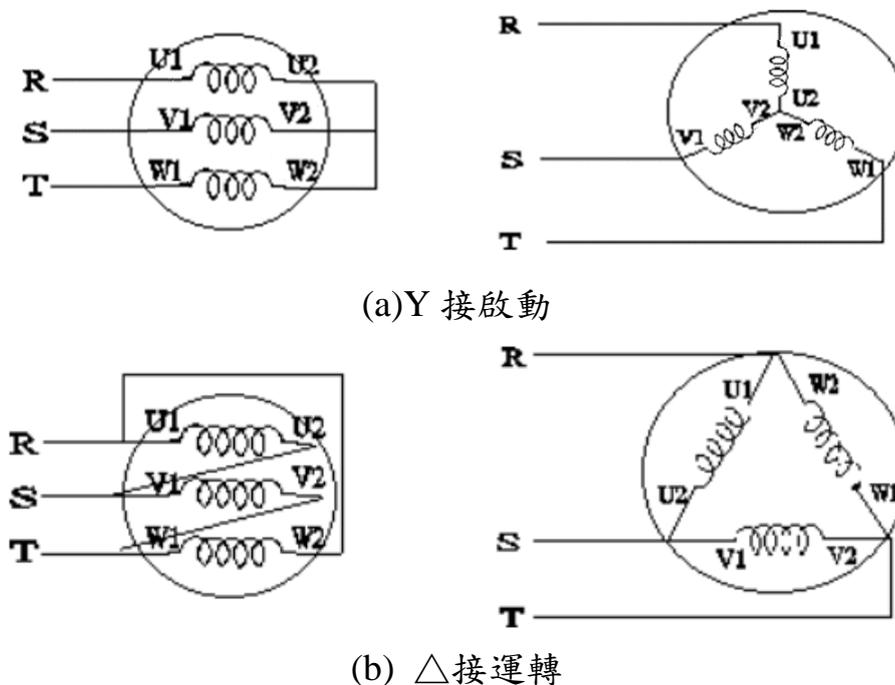


圖 1-3 馬達 Y- $\Delta$  啟動(固定輸入電壓及頻率)：

(a) Y 接啟動；(b)  $\Delta$  接運轉【3】

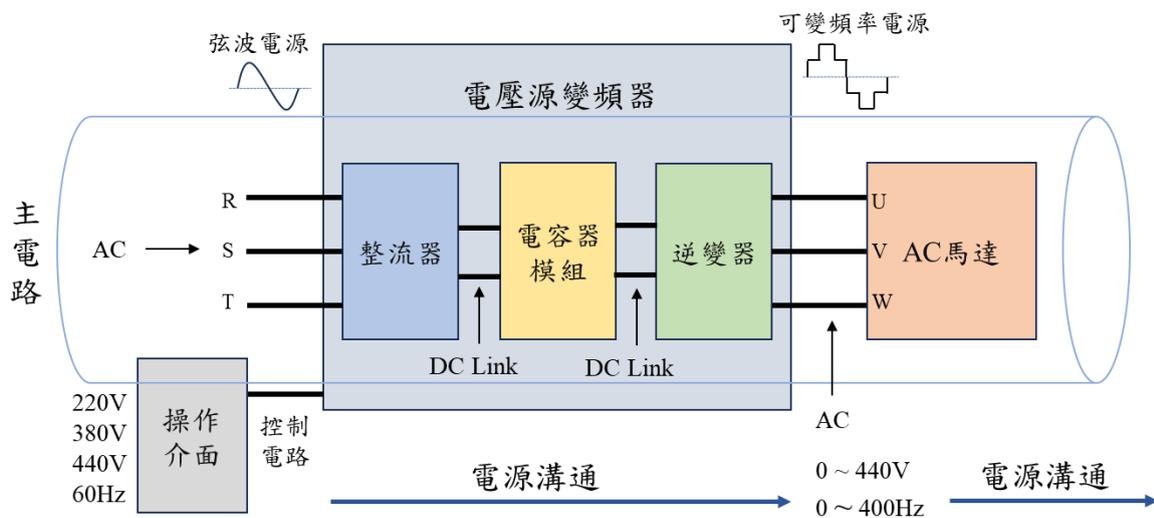


圖 1-4 馬達變頻器控制(變動電壓及頻率的輸入)【4】

## 一、基本原理

### (一)變頻器之主要功能及原理

變頻器作為調整驅動系統速度的一種設備，主要功能是作為控制輸出交流電源的電壓與頻率，應用範圍相當的廣泛，從家庭的冰箱、冷氣等家電到百貨飯店使用的空調、空氣壓縮機、電梯、手扶梯與水泵等，以及電動車皆可能使用變頻器做為控制速度的裝置。

變頻器是將固定電壓(V)與頻率(Hz)交流電源電壓，如市電電壓為220V/110V;頻率為60Hz，轉變為可控可變的交流電壓及頻率，然而電力調整並不是轉個旋鈕它就乖乖配合改變，需要經過一系列的轉換如圖 1-5 所示；交流電源經過二極體與濾波器轉換為直流電源(整流、濾波)，接收控制器訊號後，使用閘極雙極性電晶體(IGBT)輸出不同電壓與頻率的交流電源，其直流轉換為交流的過程稱為逆向改變(逆變，故變頻器也稱逆變器 inverter)，除此之外內部結構還有穩壓、檢測電路與保護電路等，因此能輸出的可變電壓與可變頻率特定電源特性。

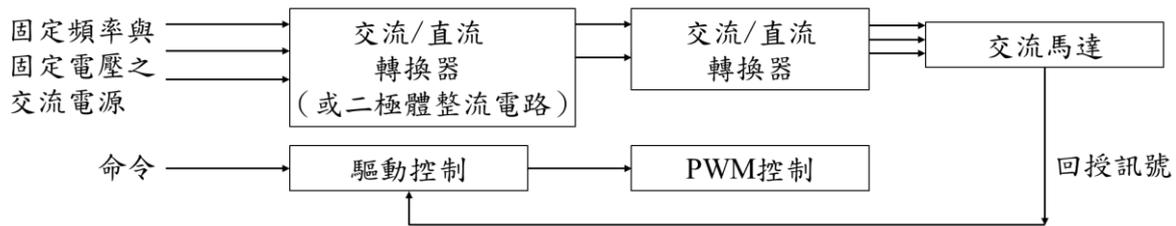


圖 1-5 三相變頻器基本方塊圖【6】

## (二)變頻器的 PWM 控制

上一節概述變頻器從交流-直流-交流的轉換過程，接下來說明系統架構，圖 1-6(A)中為三相變頻器的基本系統架構圖，其中包括六個切換開關( $Ta^+$ 、 $Tb^+$ 、 $Tc^+$ 、 $Ta^-$ 、 $Tb^-$ 、 $Tc^-$ )用來做為調變(Modulation)功能，六個二極體( $Da^+$ 、 $Db^+$ 、 $Dc^+$ 、 $Da^-$ 、 $Db^-$ 、 $Dc^-$ )則是當馬達在運轉換相時會有反電動勢及電感，此二極體作為電流的飛輪作用。

以弦式波脈波寬度調變(SPWM)為例，以圖 1-6(b) a.b.c 三個信號相差 120 度弦式波的調變信號(目標)，而三角形的是載波(carrier wave)提供對應目標波形的參考點，將 a 相與 b 相的正弦調變信號分別與載波信號做比較，當調變信號(目標)大於載波(三角形)則輸出正值的脈波，反之低於則輸出負值脈波，至於脈波の間隔、寬度則隨著調變信號而改變，可以得到如圖 1-6 (c)與(d)的電壓比較結果。

值得注意的是圖 1-6 (c)中的輸出脈波寬度隨著正弦信號的增減，這種方式就稱為「脈波寬度調變」。而圖 1-6 (d)所表示為 a 相與 b 相間的線電壓與其基本波(正弦波)，而其輸出脈波並非純弦式波形，而是包含了弦式波與諧波成分(harmonic，輸出脈波減去弦式波)。

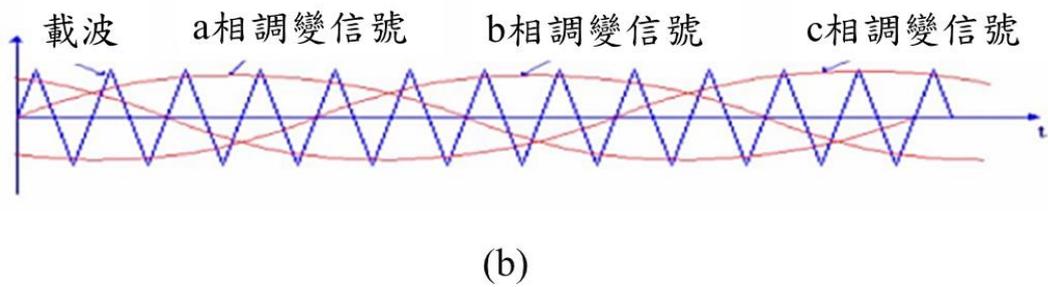
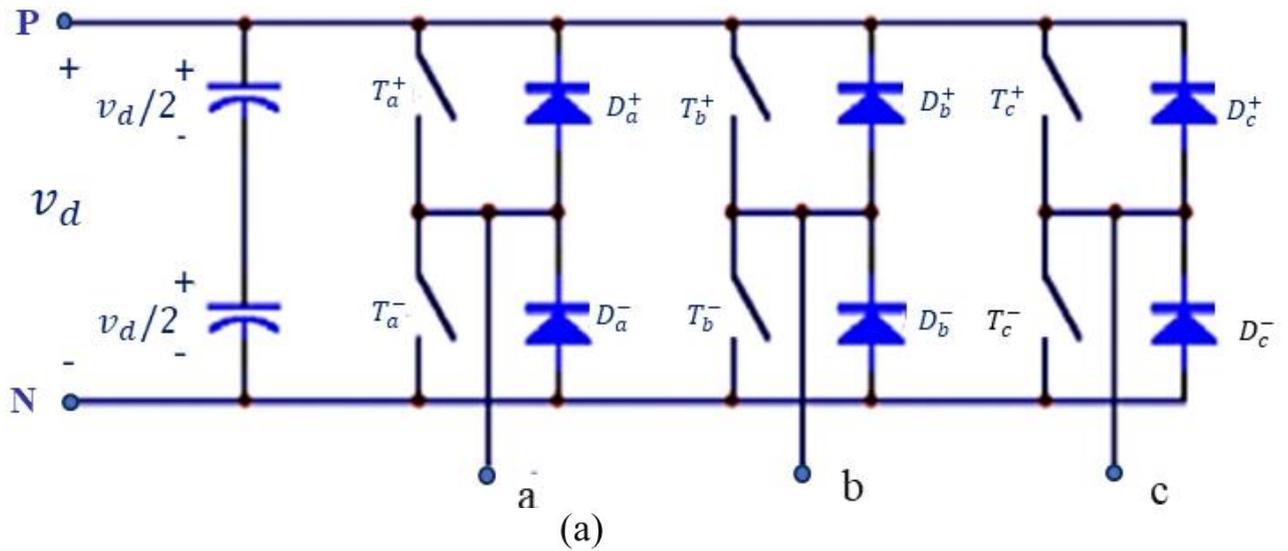


圖 1-6 三相變頻器之弦式脈波寬度調變示意圖：

(a)三相變頻器電力電路；(b)三相弦式脈波寬調變信號集載波【6】

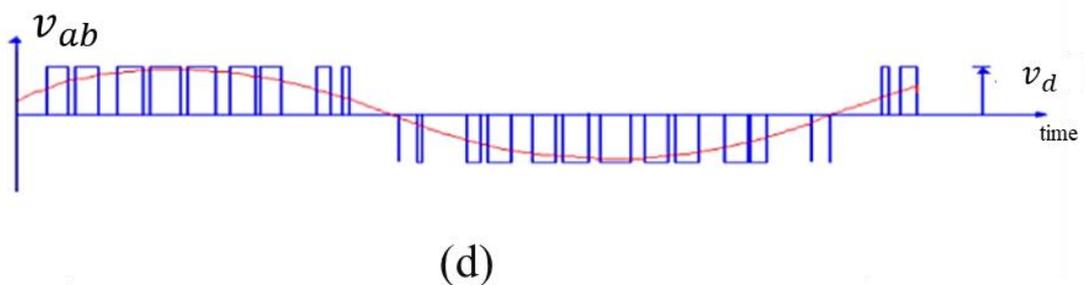
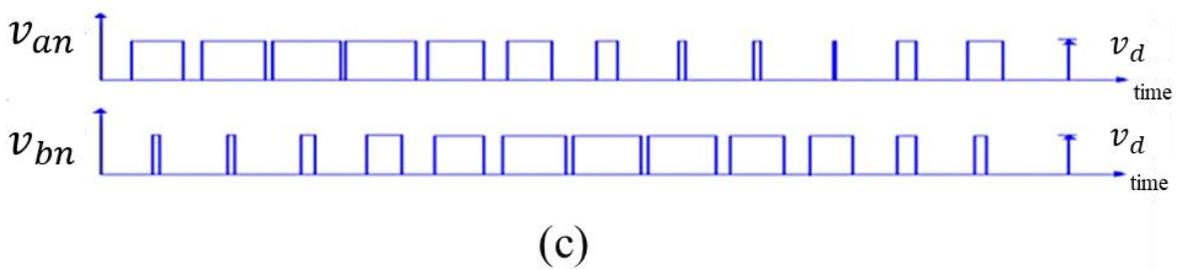


圖 1-6(續) 三相變頻器之弦式脈波寬度調變示意圖：

(c)a 臂及 b 臂電壓  $V_{aN}$ 、 $V_{bN}$ ；(d)線電壓  $V_{ab}$  及基本波【6】

### (三)SPWM 與 SVPWM

直流轉換為可控的交流電源有多種方式，在此以兩種常見模式進行說明，弦式波脈波寬度調變(SPWM)與空間向量脈波寬度調變(SVPWM)，其原理與差異分述如下：

弦式波脈波寬度調變(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)，是一種相當成熟並且廣泛被使用的調變技術，實現起來也較為簡單，以三角波作為基礎的載波，再把要輸出的三相對稱弦式波作為調變信號輸入，透過「面積相等」的概念，輸出「等幅的脈衝訊號來代表弦式波的相對數值」，因此輸出較高的脈衝時間寬度基本上呈弦式波變化。如圖 1-7 所示，將需要的正弦波等效成振幅大小相等，但工作時間不相等的三角波(圖 1-7 上半部)，再輸出不同寬度的脈波(圖 1-7 下半部)，當需要多大的輸出電壓，就直接調整 PWM 的工作週期即可。

傳統的弦式脈衝寬度調變(SPWM)可使變頻器的輸出電壓能夠更接近弦式波，但卻沒有考慮到輸出電流的波形，同時直流側的電壓使用率降低。

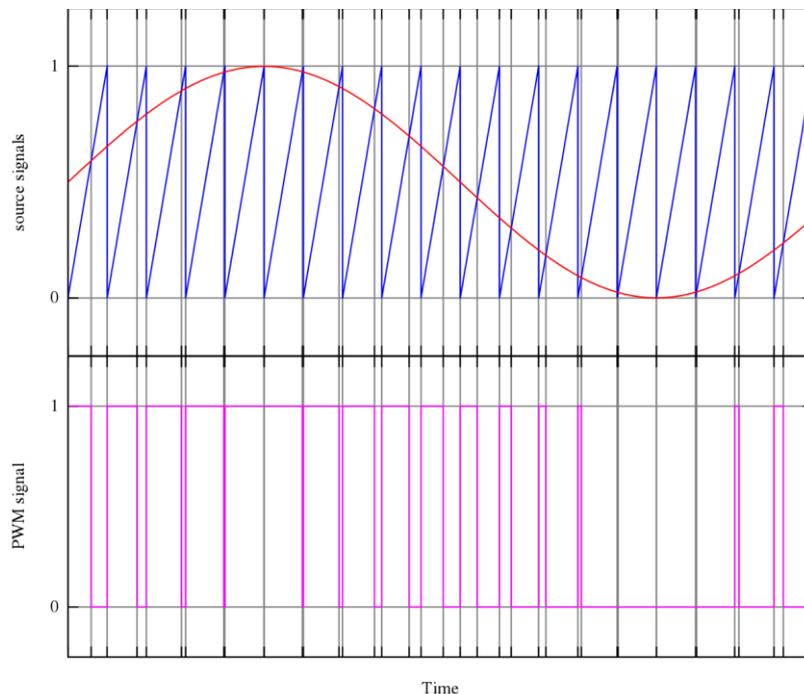


圖 1-7 弦式脈波寬度調變之示意圖【7】

空間向量脈波寬度調變 (sinusoidal vector pulse width modulation, SVPWM) 是近年較為主流的一種控制方法與前一節 SPWM 模式相比，雖有 PWM 之名其原理卻截然不同(與 PWM 技術無關，僅輸出波型相似)；SVPWM 是以三相對稱的弦式波電壓進行供電，並以馬達定子磁場相位做為參考標準，開關在適當的時間進行切換，進而輸出脈波寬度調變波形訊號，再以實際磁場向量來追蹤準確磁場。一般熟知的弦式波脈衝寬度調變控制 (SPWM) 從電源的角度考量，調整成為可以改變頻率與電壓的弦式波電源。所謂空間向量(SVPWM)透過電壓向量產生的磁場向量，也是空間旋轉之向量，其主要目的為了產生理想的圓形旋轉磁場，同時使得電機轉矩(扭力)脈動降低。

三相變頻器電力電路圖如圖 1-8 所示，是由三相變頻器中六個半導體開關元件組成的切換式電子開關，控制單元會產生脈寬調變信號來控制六個開關元件在不同時間點上做開關動作，這樣的控制技術能使輸出的電流波形相當接近理想的弦式波形。動作流程在此不做詳細描述，僅說明以下幾項特點：

1. 每一個區域內雖然有多次開關切換，但開關切換僅會使用其中某一個元件，在開關切換損耗 (switching-loss) 上能量相對較小。
2. 利用電壓向量依照不同時間比例去合成需要的電壓向量，能夠保證電壓生成波形會與弦式波相似，再利用電壓空間向量來生成三相的脈波寬度調變波形，在計算上相對是更為簡單的。
3. 空間向量脈波寬度調變 (SVPWM) 可以看成是由三角波和有三次諧波正弦波成分調變而成的變頻器，其輸出線電壓載波最大值在直流電壓，相對會比一般的弦式脈衝寬度調變 (SPWM) 變頻器的調變技術輸出電壓的直流利用率比例約高為 15.47%。

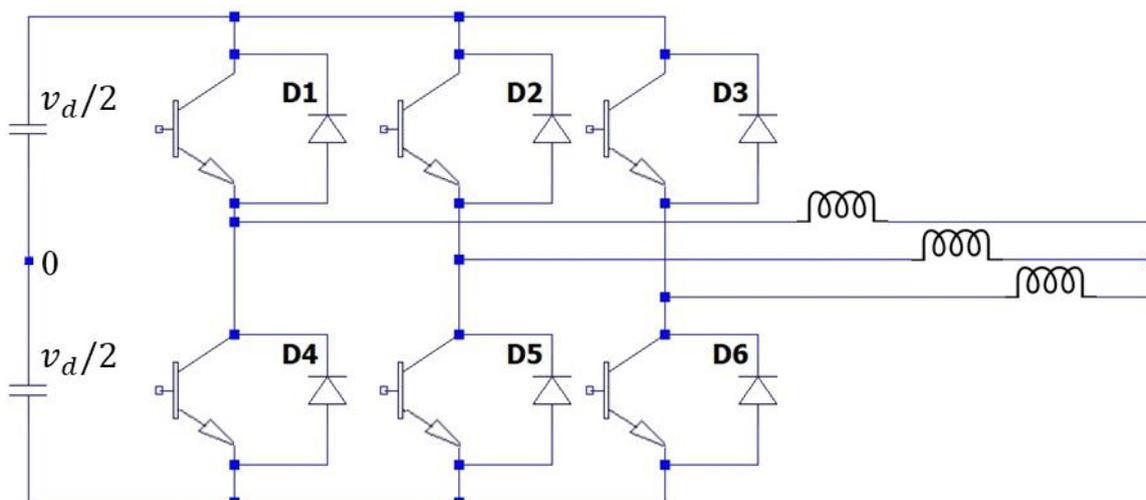


圖 1-8 三相變頻器的電力電路圖【8】

空間向量脈波寬度調變(SVPWM)和傳統的正弦脈衝寬度調變(SPWM)技術是不相同，應用在馬達領域中是將變頻器和馬達視為一體，按照跟蹤圓形旋轉磁場(rotating magnetic field)來控制脈波寬度調變技術電壓，使磁鏈(flux linkage)的軌跡是藉由電壓空間向量相加來得到。相對於傳統的脈波寬度調變控制而言，空間向量脈波寬度調變控制的優勢是直流電壓利用率高、轉矩漣波(torque ripples)低、噪音低、諧波失真較少，且方便數位化。

## 二、馬達概論

變頻器是驅動馬達(在此指電動機)調整其轉速/轉矩的設備，然而並非所有馬達都適合與變頻器組合應用，翻開型錄馬達有許多種形式，讀者所在的場域也有新舊與規格不一的馬達，如何初步理解其概念、種類用途與效率，近年推出的永磁式高效率馬達又與過往差異在哪，將於以下章節逐項說明。

### (一)基本原理

馬達(電動機)是能將「電」能轉「磁」力再轉為「機械能」的設備，如圖 1-9 所示。馬達接上電源就有源源不絕的動力，原理的部分可以參馬克斯威爾-安培定律(Maxwell law)和法拉第電磁感應定律(Faraday's law)，讀者可自行參閱相關書籍文獻。概略而言馬達構造分為固定件(又稱定子)與轉動件(又稱轉子)，其中電通過銅製的線圈產生磁場(定子)，透過磁場繞圓旋轉，進而影響另一端(轉子)跟著旋轉，為了控制馬達的速度(轉速)與力量(轉矩)因而使用變頻器做控制元件。

需要進一步理解，既然電流可以透過線圈生出磁力轉為機械能，反之機械能也能透過線圈轉換為電源，那麼就是大家理解中的「發電機」，當控制馬達減速時因為慣性或外部力量的關係，馬達會變成發電機(即輸出電能)，這些電能往往直接拋棄，後續會提「電力回生」即是將原本拋棄的電能回收再次利用。

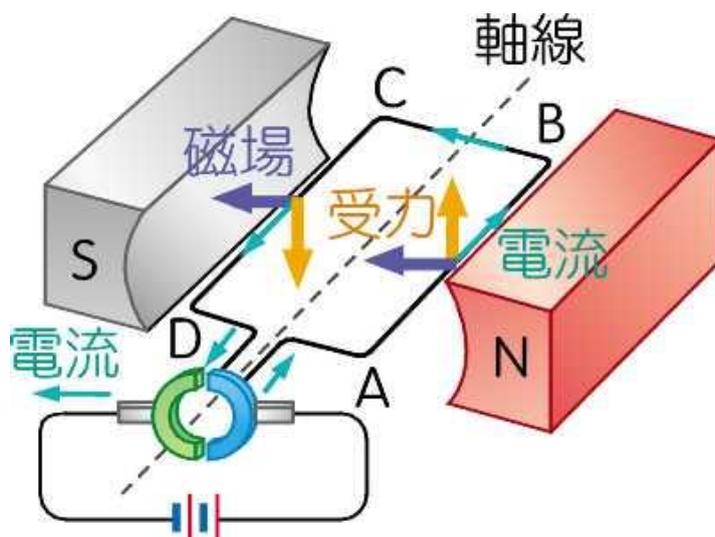


圖 1-9 直流馬達原理示意圖【9】

## (二)種類與用途

馬達的種類可分為很多種，如圖 1-10 所示，包括伺服馬達、線性馬達、可以改變磁場電阻的步進馬達、永久磁鐵式步進馬達、混合式步進馬達、感應馬達、永磁馬達、磁阻馬達等，馬達也可以根據驅動電源的種類分為直流馬達和交流馬達等，不同馬達有其不同的應用場合以及方式。而在電機領域當中大多數結合變頻系統會是感應馬達以及永磁馬達，以下將針對這兩種不同馬達作詳細的介紹。

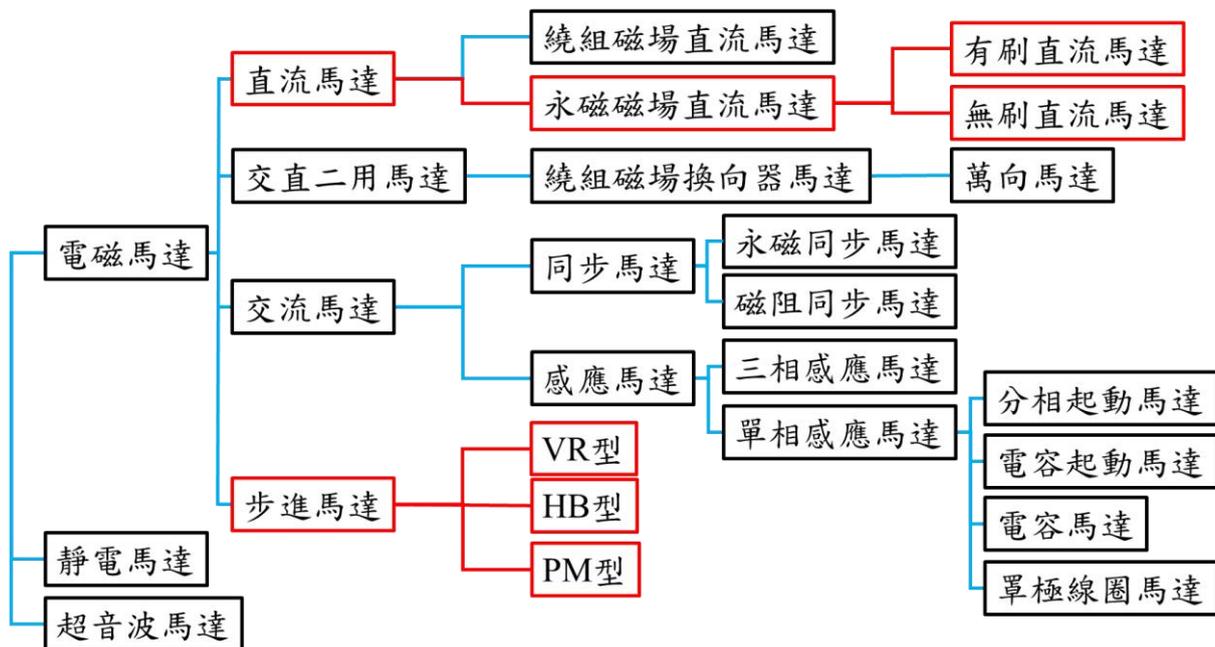


圖 1-10 馬達分類樹狀圖【10】

### 1. 感應馬達

感應馬達(induction motor, IM)，其定子(固定件)與轉子(轉動件)皆是由線圈或導電體組成，通電後生出磁力，由定子發出轉動的磁場帶動轉子轉動，因此構造中不需要永久磁鐵。依照電源需求不同分為三相與單相兩種，其中三相感應馬達從 1/4 馬力(HP)至數百馬力不等，廣泛應用於工商業各類場域，而單相馬達則應用於家用電器，在此僅針對三相感應馬達進行說明。

三相感應馬達結構如圖 1-11 所示，由外至內分別是外殼框架(含銘牌)、電源接線盒、定子、轉子、軸承與風扇，電源經由接線盒將電力輸入至定子繞組，產生磁力帶動轉子、軸承與冷卻風扇，軸承銜接欲驅動的設備如水泵、風機、油泵等，而能源轉換過程必然有損失，其中廢熱由風扇帶離馬達避免過熱燒毀。

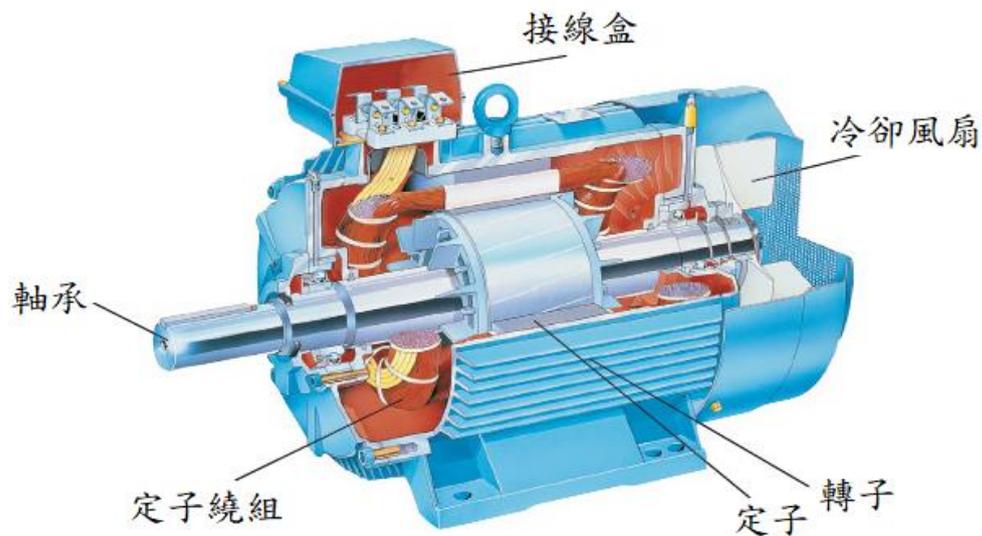
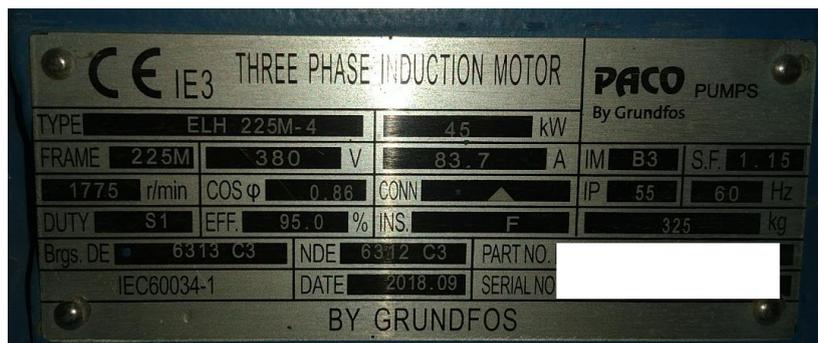


圖 1-11 三相感應馬達結構示意圖【11】

馬達諸多規格標示於銘牌如圖 1-12 所示，額定出力標示為功率(kW)或馬力(HP)、輸入額定電壓(V)/電流(A)/頻率(Hz)、絕緣等級(INS)、效率(EFF)等；搭配變頻器應用上除了變頻器容量需大於/等於馬達外，絕緣等級需高於/等於 F 級(等級由低至高分別為 A、E、B、F、H)，讀者可自行檢視周遭設備銘牌，可了解其性能諸元。



TYPE (型號)		kW (額定輸出功率)			
FRAME (框號)	V (額定電壓)	A (滿載電流)			
r/min (轉速)	COS φ (功率因數)	CONN (接線類型)		IM (安裝方式)	S.F. (服務係數)
DUTY (使用週期)	EFF. (效率)	INS. (絕緣等級)		IP (保護方式)	Hz (額定頻率)



kW(額定輸出功率)	EFF.(效率)	
HP(額定輸出馬力)	FRAME(框號)	VOLTS(額定電壓)
POLE(極數)	RATING(使用週期)	AMP(滿載電流)
AMB(環境溫度)	Hz(額定頻率)	RPM(轉速)
INS.(絕緣等級)		MODEL(型號)
IP(保護方式)		
IC(冷卻方法)		
S.F.(服務係數)、EFF.(效率)		

圖 1-12 三相感應馬達銘牌示意圖

透過三相感應馬達的等效電路及機械、鐵芯損耗的相關資訊，能夠推算該馬達在空載至滿載間的性能特性。如圖 1-13 所示，三相感應馬達的電流、效率、功率因數及轉差率的曲線。著眼於每條曲線，探討其變化特性。

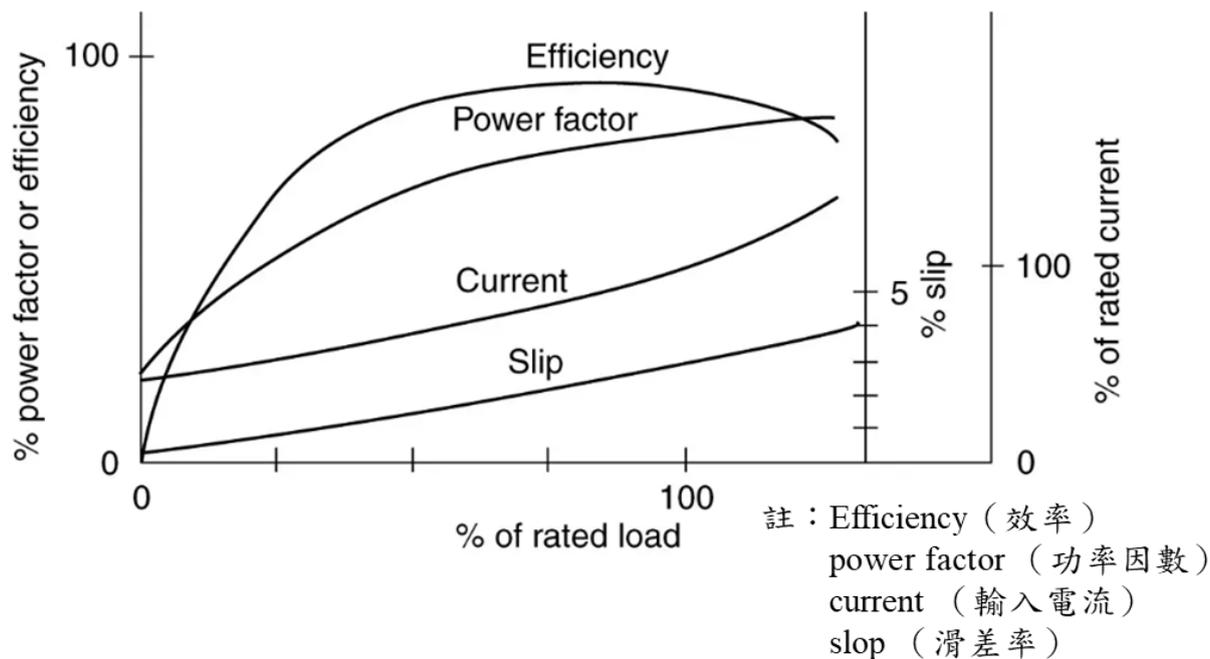


圖 1-13 額定電壓及頻率操作之三相感應馬達特性曲線【12】

## 2. 永磁馬達

永磁馬達相較於前一節的感應馬達，差異在於轉子由感應線圈改為永久磁鐵，接收磁力轉為機械能的元件有所不同。可將永磁式馬達進一步區分為永磁同步馬達(permanent-magnet synchronous motor, PMSM)與無刷直流馬達(brushless direct current motor, BLDC)，差異在其控制模式不同，磁通和反電動勢的分佈上有所區別，永磁同步馬達的反電動勢波形是弦式波；而直流無刷馬達的反電動勢波形則為梯形波(與方波接近)，運行時產生不同的電動特性，因此需要針對特定應用場合選擇適當的馬達類型和控制方式，例如利用於無塵室需要精確轉速、控制懸浮微粒(particulate matter, PM)的 FFU 風扇使用的就是永磁同步馬達；一般家庭使用的變頻風扇，只需要大致控制轉速，使用的就是直流無刷馬達。

無刷直流馬達(BLDC)，雖說是名稱帶有「直流」但實際接的是「三相交流電源」，名稱的歷史淵源在此不細談讀者有概念即可，不同於傳統有刷馬達，無刷直流馬達使用電子零件來組成相位轉換的電路，透過霍爾效應元件(Hall effect sensor)、旋轉編碼器(encoder)或解角器(resolver)來偵測轉子位置，根據偵測到的位置信號進行控制電流切換，實現無刷的操作因此又稱電子換向(electronic commutation, EC)馬達。因為減少碳刷以及換向片等機械結構，有助於延長馬達壽命並減少噪音，不同應用場合的無刷直流馬達需要不同的結構和材料，以充分發揮其性能。圖 1-14 為無刷直流馬達結構圖。

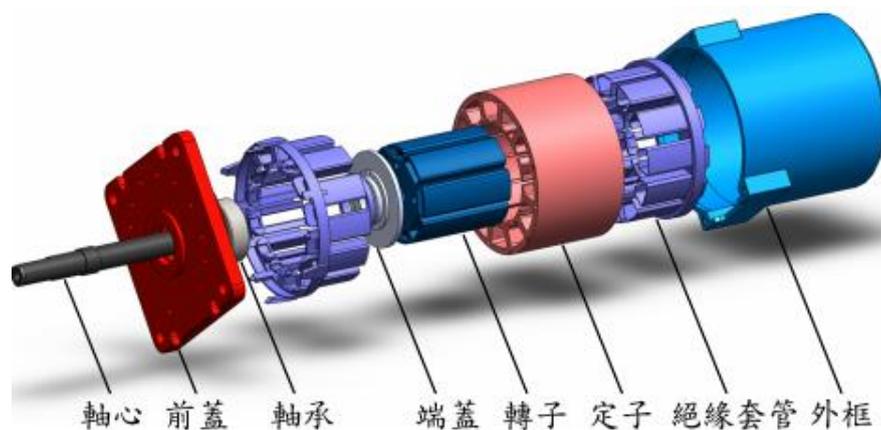
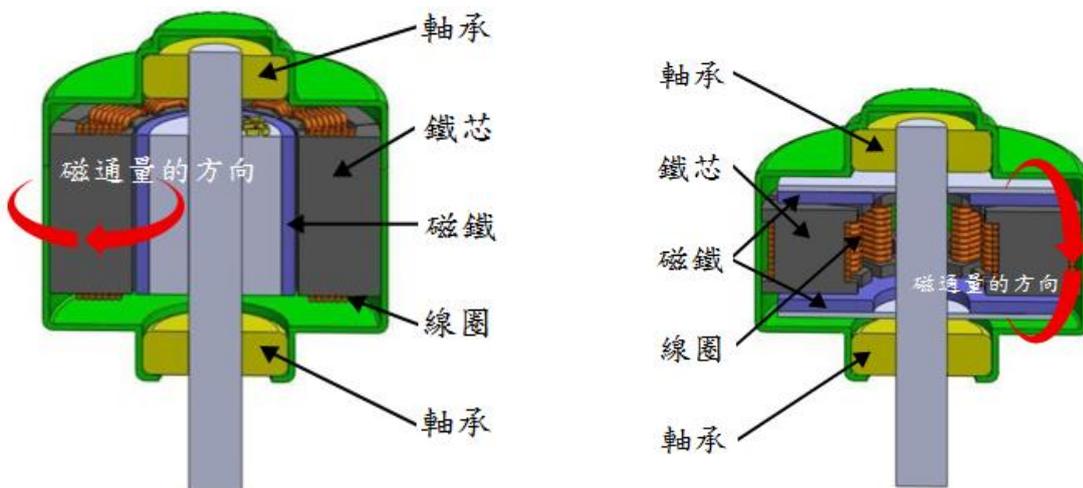


圖 1-14 無刷直流馬達結構圖【13】

根據磁通方向的不同，無刷直流馬達(BLDC)可以分為徑向磁通和軸向的磁通，如圖 1-15 所示。徑向磁通的磁場由定子向外部發散，而軸向的磁通的磁場則沿著直向運作，兩種適用於不同的應用場合，徑向磁通馬達具有較高的轉矩(扭力)密度，故大多市售品採用。軸向的磁通馬達包含有鐵芯與沒有鐵芯結構，應用於光碟機或風力發電機等處，其中沒有鐵芯結構重量更低、較小的頓轉轉矩，但相同功率情況下軸向的磁通的體積通常會比徑向磁通來的大。

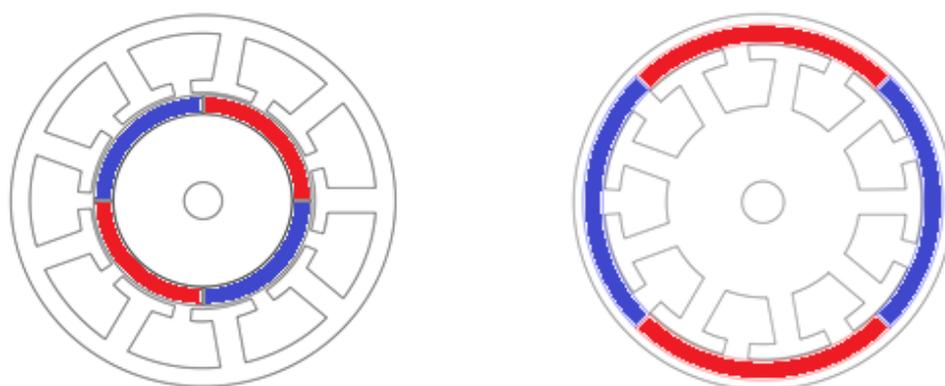


(a) 徑向磁通馬達

(b) 軸向磁通馬達

圖 1-15 磁通量方向不同之馬達結構【11】

根據轉子和定子的相對位置，無刷直流馬達可以分為內轉型和外轉型，如圖 1-16 所示。內轉型馬達的定子固定在馬達的外部、轉子在內部旋轉，這種設計具有較高的轉速與較小的轉動慣性，因此常見於需要立即增加或減少速度的風機/水泵、手工具機和電風扇等產品；外轉型則相反，定子固定在內部、轉子在外部旋轉，提供較大的轉動慣性，但增加或減少速度較慢，通常應用於負載轉動慣性較大的風扇和吊扇等產品，或是與輪胎結合形成輪軸馬達使用。



(a) 內轉型

(b) 外轉型

圖 1-16 馬達之定轉子結構位置【14】

無刷直流馬達中轉子的永久磁鐵，根據安裝方式可以分為三種類型：

(1)表面黏貼型(surface permanent magnet, SPM)

(2)嵌入型(inset permanent magnet, IPM)

(3)內藏型(interior permanent magnet, IPM)

(1) 表面黏貼型 (surface permanent magnet, SPM)

在馬達轉子鐵芯的表面黏貼永久磁鐵即為表面黏貼型，這種設計具有較大的有效磁通和磁能積，並且製造相對容易、成本較低。然而機械強度較低，在高速運轉時磁鐵可能因離心力而掉落，故通常用於轉速較低的場合，圖 1-17 為表面黏貼型馬達轉子磁石結構，通常應用於風力發電機、高效能電動工具等。

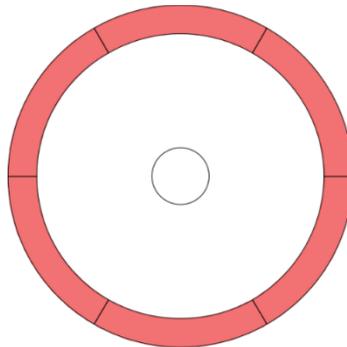


圖 1-17 表面黏貼型馬達轉子磁石結構【15】

(2) 嵌入型 (inset permanent magnet, IPM)

在馬達轉子鐵芯中間放入永久磁鐵即為嵌入型，這種設計提高了機械強度，但是漏磁係數較高而且製作成本相對昂貴。這種型式適合用於重量較重、高功率和低轉動慣性的應用，嵌入型的機械強度和轉速介於表面黏貼型和內藏型，圖 1-18 為嵌入型馬達轉子磁石結構，通常應用於無人機、手術機器人等。

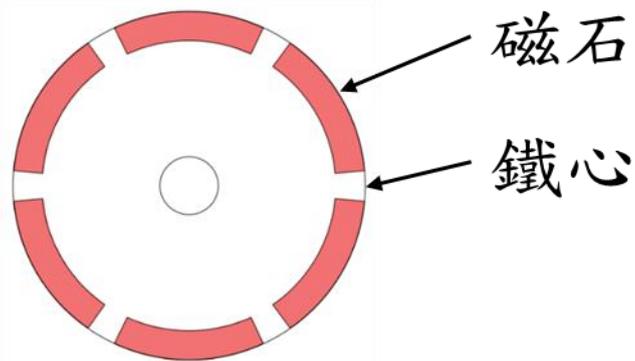


圖 1-18 嵌入型馬達轉子磁石結構【15】

### (3) 內藏型 (interior permanent magnet, IPM)

將永久磁鐵放入馬達轉子鐵芯的裡面即為內藏型，這種設計使得磁能積使用率較低導致有效磁通變得較小，但機械強度相對較高，並且可以避免磁鐵脫落等問題。這種型式適用於高轉速運轉條件，並且有磁場阻力產生轉矩(扭力)的生成而且轉矩(扭力)與轉速曲線範圍較大的情形，常見於電動車的應用，圖 1-19 馬達轉子磁石結構是為採用內藏型，通常應用於高速電動鑽機、磨光機、高速渦輪機械等。

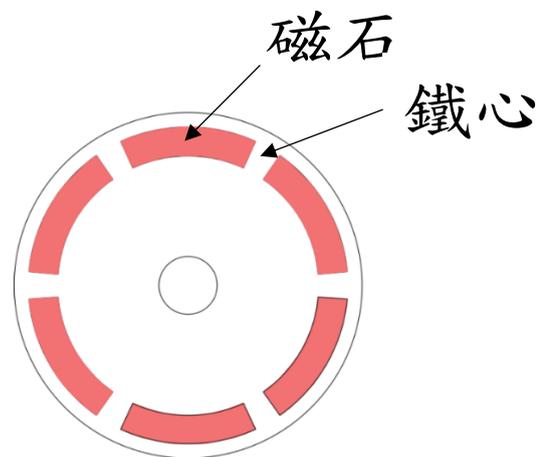


圖 1-19 內藏型馬達轉子磁石結構【15】

### (三)馬達效率等級

馬達是現代工業和家庭生活中不可或缺的動力設備，然而在使用馬達時，往往關注其性能、耐用性和能源效益，效率等級則成為一個關鍵指標，不僅關乎能源的節約，還影響到生產效率和環境保護。

目前，根據國際電工協會 IEC 60034-2-1 規範，馬達效率代表馬達將電能轉換為機械能的能力，等級可分為 IE1 (standard, 標準)、IE2 (high, 高)、IE3 (premium, 優級)、IE4 (super premium, 超優級)，還有在 IE1 及 IE2 之間發展出 IE1+ 的等級，其效率介於 IE1 及 IE2 之間，甚至有 IE5 等級的超高效率馬達被研發出來，但此兩種等級目前未列入國際電工協會的 60034-2-1 規範。

我國則參照相關國際標準訂定 CNS 14400 低壓三相鼠籠型高效率感應電動機，表 1-1 為引用其全閉型、60Hz 之效率製表而成，其中 IE4 等級參酌經濟部能源署修正草案，尚未正式定案僅供參考。

表 1-1 馬達額定效率等級(CNS 14400,全閉型,60Hz)【16】

額定輸出		2 極				4 極				6 極						
kW	HP (參考值)	同步 轉速 (rpm)	額定滿載效率 $\eta$ (%)				同步 轉速 (rpm)	額定滿載效率 $\eta$ (%)				同步 轉速 (rpm)	額定滿載效率 $\eta$ (%)			
			IE1+	IE2	IE3	IE4		IE1+	IE2	IE3	IE4		IE1+	IE2	IE3	IE4
0.75	1	3,600	72	75.5	77	82.5	1,800	80	82.5	85.5	85.5	1,200	77	80	82.5	84.0
1.1	1.5		81.5	82.5	84	85.5		81.5	84	86.5	87.5		84	85.5	87.5	88.5
1.5	2		82.5	84	85.5	86.5		85.5	84	86.5	88.5		85.5	86.5	88.5	89.5
2.2	3		82.5	85.5	86.5	88.5		85.5	87.5	89.5	91.0		85.5	87.5	89.5	90.2
3.7	5		85.5	87.5	88.5	89.5		85.5	87.5	89.5	91.0		85.5	87.5	89.5	90.2
5.5	7.5		86.5	88.5	89.5	90.2		87.5	89.5	91.7	92.4		87.5	89.5	91	91.7
7.5	10		87.5	89.5	90.2	91.7		87.5	89.5	91.7	92.4		87.5	89.5	91	92.4

表 1-1(續) 馬達額定效率等級(CNS 14400,全閉型,60Hz)【16】

額定輸出		2 極				4 極				6 極						
kW	HP (參考值)	同步 轉速 (rpm)	額定滿載效率 $\eta$ (%)				同步 轉速 (rpm)	額定滿載效率 $\eta$ (%)				同步 轉速 (rpm)	額定滿載效率 $\eta$ (%)			
			IE1+	IE2	IE3	IE4		IE1+	IE2	IE3	IE4		IE1+	IE2	IE3	IE4
11	15	3,600	88.5	90.2	91	92.4	1,800	89.5	91	92.4	93.6	1,200	88.5	90.2	91.7	93.0
15	20		88.5	90.2	91	92.4		89.5	91	93	94.1		88.5	90.2	91.7	93.0
18.5	25		89.5	91	91.7	93.0		91	92	93.6	94.5		90.2	91.7	93	94.1
22	30		89.5	91	91.7	93.0		91	92.4	93.6	94.5		90.2	91.7	93	94.1
30	40		90.2	91.7	92.4	93.6		91.7	93	94.1	95.0		91.7	93	94.1	95.0
37	50		91	92.4	93	94.1		91.7	93	94.5	95.4		91.7	93	94.1	95.0
45	60		91.7	93	93.6	94.5		92.4	93.6	95	95.4		92.4	93.6	94.5	95.4
55	75		91.7	93	93.6	94.5		93	94.1	95.4	95.8		92.4	93.6	94.5	95.4
75	100		92.4	93.6	94.1	95.0		93.6	94.5	95.4	96.2		93	94.1	95	95.8
90	125		93.6	94.5	95	95.4		93.6	94.5	95.4	96.2		93	94.1	95	95.8
110	150		93.6	94.5	95	95.4		94.1	95	95.8	96.2		94.1	95	95.8	96.2
150	200		94.1	95	95.4	95.8		94.1	95	96.2	96.5		94.1	95	95.8	96.2
185~ 375	250~ 500	94.5	95.4	95.8	96.2	94.5	95.4	96.2	96.5	-	95.0	95.8	96.2			

圖 1-20 為依據功率的增加各馬達的效率等級變化圖，橫軸為由 0.75 kW 至 375 kW 的功率變化，縱軸為 65% 至 100% 的效率變化，IE1 至 IE4 的功率對應效率變化標準，可以明顯看到效率的高低順序為 IE4 > IE3 > IE2 > IE1，且隨功率提高馬達效率標準亦隨之提高，而我國對低壓三相感應馬達效率自 105 年起需 IE3 等級以上之馬達才能販售，讀者更新設備前務必確認其符合經濟部能源署「低壓三相鼠籠型感應電動機(含安裝於特定設備之一部者)能源效率基準、效率標示及檢查方式」規範要求。

至於我國 IE4 馬達效率管制標準，筆者撰寫時預計 114 年 7 月 1 日實施，然是否如期上路仍需進一步關注，讀者購買前可至中華民國能源效率管理系統查詢，網址：<https://www.meps.org.tw/index.aspx>。

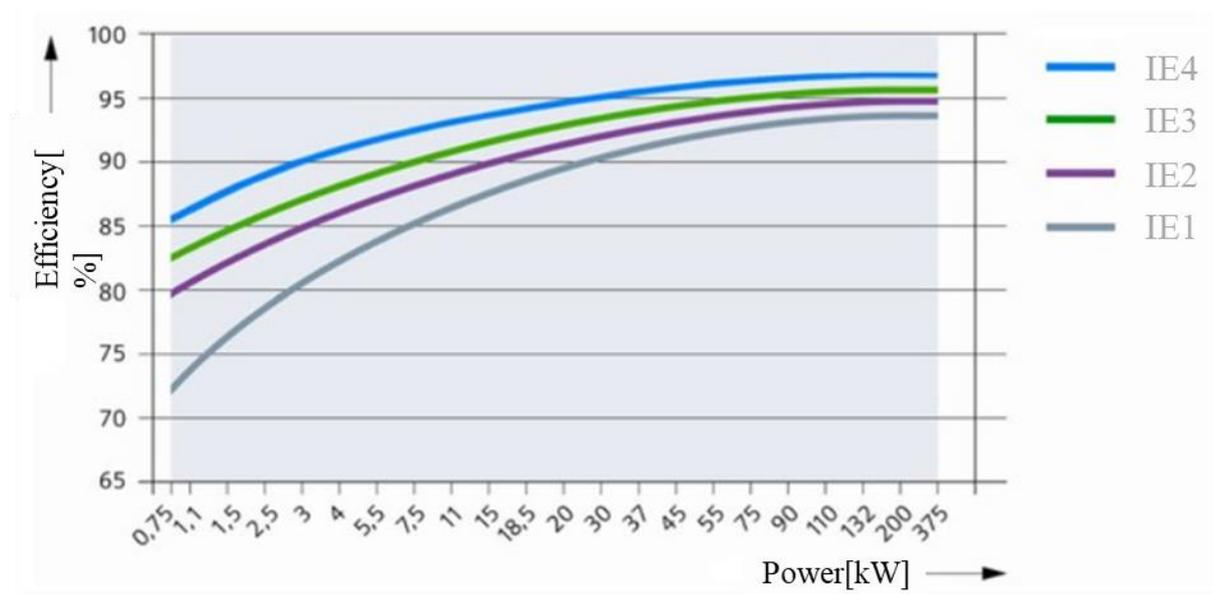


圖 1-20 各等級馬達效率變化圖【17】

#### (四) 影響馬達效率的因素

馬達效率的定義為馬達將電能轉為機械能的有效能力，也就是扣除掉所有損失後的輸出功率(軸功)與輸入功率(電功)的比值，通常以百分比表示，數值越大代表其效率越高，影響馬達效率的主要因素如下：

##### 1. 負載

負載的大小和性質是影響馬達效率的重要因素，不同馬達依效率表現會有不同的最佳負載區間，如感應馬達在負載較重的區域效率比較好，永磁馬達有大範圍的高效率區間，由常用的負載區間來選用馬達，可使馬達高效率區與負載區間相匹配以達到節能效果。

## 2. 電源品質

穩定的電源電壓和頻率有助於提高馬達的效率，依電業法家庭(電燈)電壓變動率標準於±5%、工廠(電力及電熱)±10%，若為電燈及電力混和則為±5%；高壓用戶應保持電源電壓變動±5%，影響馬達效率±1~2%【18】

讀者若發現設備電壓偏差過大時，低壓用戶可請台電協助處理、高壓用戶則可委請電力維護廠商檢測與調整，進而使變動率符合規範。

## 3. 馬達設計

例如磁極、線圈、轉子和軸承，這些都是馬達中可透過設計來提升馬達效率的零件，透過設計及材料選用可以減少能量損失與提高效率，對讀者而言選購符合國家標準 CNS 14400 之 IE3 等級以上馬達，其電能轉機械能的損失即有驗證與保障。

## 4. 控制方法

向量控制(vector control)又名磁場導向控制(field-oriented control, FOC)，是利用變頻器控制三相交流馬達的技術，馬達的輸出可藉由調整變頻器的輸出頻率、輸出電壓及相位。高效的磁場導向控制系統可以確保在需要時提供正確的功率，減少不必要的電能浪費，詳細內容會在後面講解。

## 5. 溫度

馬達運行中會因為轉動而產生熱量，而馬達在不同溫度的表現不盡相同，尤其是永磁馬達最為顯著，當磁鐵溫度上升會導致磁力降低，根據轉矩方程式為

$$T = B \cdot I \cdot L \cdot D^2 \cdot N \cdot \sin(\delta)$$

其中  $B$  為磁通密度， $T$  為轉矩， $L$  為馬達積厚， $D$  為馬達轉子外徑， $N$  為馬達繞線匝數， $I$  為輸入電流， $\delta$  為電場與磁場間的角度，也就是說溫度上升會導致磁鐵產生磁通密度減少，使轉矩下降進而影響效率。若無法有效的將熱量散掉就會直接影響馬達性能，因此在設計或選用馬達時需考慮在可運作的適當工作溫度，以避免馬達無法正常發揮。另計，溫度上升也影響導線(繞組)的等效電阻上升，銅損(導體損)也提高影響效率。

## 6. 維護和保養

對讀者而言大多設備早已安裝使用，維護保養及即早發現故障徵狀尤為重要，除了定期對各處軸承灌注黃油潤滑外，有刷馬達需清潔銅屑、永磁式無刷馬達也需定期檢視磁鐵與各處是否異常。對於馬達這類轉動機械來說，故障前期的徵兆是震動/噪音漸大，當震動已明顯讓操作人員察覺時，其軸心/軸承往往已出現不可接受的磨損，因此可透過手持式振動計定期量測與分析，其標準可參設備原廠建議值或 ISO 20816-1:2016 附件 C。

### (五) 高效率馬達發展與趨勢

現今高效率馬達的發展趨勢旨在降低能源消耗、減少碳的排量，並提供可以永久存續及環保的設計，使馬達在使用時可最大程度的減少能源的損耗與浪費，以達到節能的效果。提升馬達效率的相關因素如下：

#### 1. 高效率設計

現代高效率馬達多採用更精密的設計和材料，包括結構的改良設計(定轉子)、高密度線圈、新材料選用、較低的繞組電阻和降低運轉時的摩擦，以減少馬達在能量轉換過程中的損耗，如此可提高運轉效率。

#### 2. 使用高效率材料

現今的馬達設計為了因應新標準及法規，趨於使用高效率材料，例如高溫超導體、高效率磁性材料和新型軸承材料。例如永磁馬達關鍵組件當中的磁鐵，許多製造商藉由調整材料的配比來改善磁能積。另外同步提升磁鐵的回收再製技術等，在新一代的高效率電機中都被廣泛應用，當然成本也在考量範圍。

### **3. 數位控制技術**

數位控制技術的發展使馬達可以更精確的控制，減少不必要的能源浪費，這些技術包括高效率的變頻驅動器、向量控制、感應馬達控制及永磁馬達控制等，都可根據負載需求動態調整功率輸出。

### **4. 高效率冷卻系統**

改進的冷卻系統可以確保馬達在運行時保持較低的溫度，降低熱能損失，並提高效率，包括風力冷卻、液體冷卻、油冷卻和熱管理技術的應用等。

### **5. 整合智能控制和監測**

智能控制和監測技術可以實現遠程診斷、預測性維護和最佳運行模式的適時調整，以確保馬達維持高效運作。

### **6. 能源標準及法規**

各國對能源效率相關的法規要求不斷提高，導致馬達製造商不斷改進其產品以符合標準及法規，並提供符合能源效率要求的產品選擇。

### 三、控制模式與用途

本章主要介紹變頻器(inverter)的技術與裝置選用，從變頻器的基礎原理、種類與用途、節能原理與優點、規格與選取，作為應用變頻器來達到節能效果的選用參考。

#### (一)變頻器控制種類與用途

變頻器依照下圖 1-21 可以簡單了解其關聯性，依驅動控制方法的不同，主要有下列幾項：

1. 電壓/頻率控制(V/F control)技術
2. 向量控制(vector control)技術
3. 無轉軸量測器控制(sensorless control)技術
4. 直接轉矩(扭力)控制(direct torque control, DTC)變頻器
5. 模型預測技術(model predictive control, MPC)

除了無轉軸量測器技術外電壓/頻率控制主要為純量控制，向量控制、直接轉矩控制、模型預測技術則為向量控制技術。

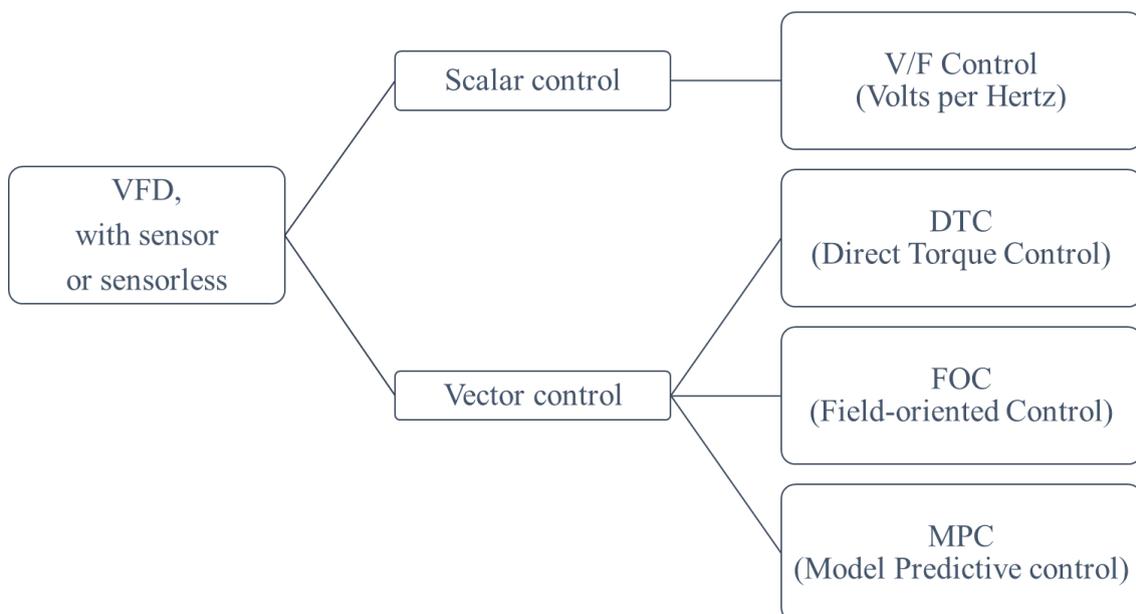


圖 1-21 變頻器控制系統關係圖

## 1. 電壓/頻率控制(V/F control)

圖 1-22 所示為電壓/頻率控制技術的方塊圖，其包含電壓/頻率控制與脈波寬度調變(PWM)控制兩大方塊。其中電壓/頻率控制如圖 1-23 所示的線性關係或等比例關係，並不需要如比例積分等控制的複雜控制器，亦不需要轉速回授。一般而言，此種控制方法最為簡單而且成本最低。其缺點為這種方法基本上不具有轉矩控制的開迴路系統，因此速度精確度較差，並且當負載加大時，其轉速將受影響相對的變動會比較大。

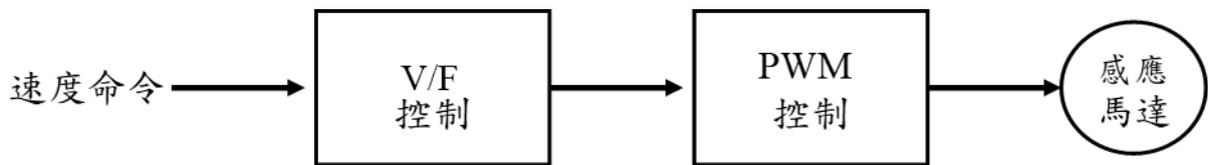


圖 1-22 電壓/頻率控制【6】

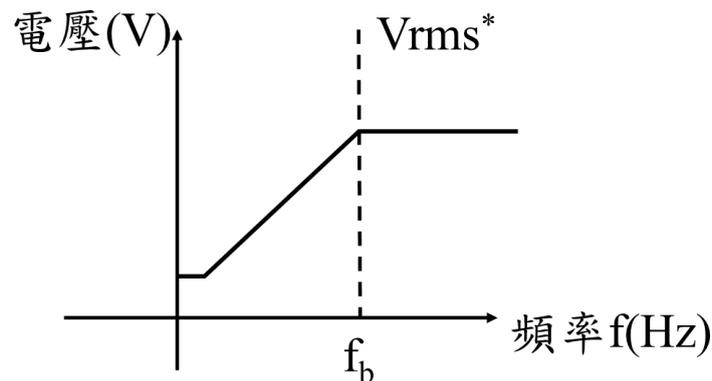


圖 1-23 變頻器—電壓與頻率的關係圖例【6】

## 2. 向量控制 (vector control)

向量控制也稱為磁場導向控制，是一種利用變頻器來控制三相交流馬達的技術，利用調整變頻器的輸出頻率、輸出電壓及相位以控制馬達的電壓及轉矩。德國西門子公司的 F. Blaschke 在 1972 年提出向量控制技術【19】，也被稱為磁場導向控制理論，使得感應馬達的控制如同直流馬達的控制。

直流馬達的控制方式是使磁場為定值，則轉矩會和電樞電流正比，而且當定子磁場與電樞磁場保持垂直的關係時，電機就可以得到最大的輸出轉矩。如圖 1-24 所示，轉矩與速度控制方塊圖，因此其速度精確度較高，並且當負載變大時轉速穩定並不會受到影響。

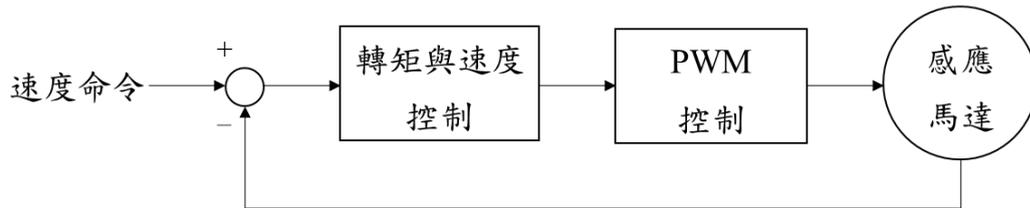


圖 1-24 向量控制方塊圖【6】

交流馬達物理量為交流變化量而不是直流馬達的固定直流量，藉由座標轉換將靜止座標上的交流量轉換成與交流電相同頻率之同步座標的直流量，相關數學方程式的推導過程可以參閱【19】。其原理好比坐在行進中火車上的人看著車外靜止不動的人來說，是一種具有兩邊互相觀察時都會產生變化的關係，但是如果是與火車有相同速度的觀察者來說火車就像是靜止現象的道理。將這種變化量轉換為直流量的關鍵便是要知道交流電的頻率，因此需要轉軸速度的回授以及估測轉子與磁場轉速差(轉差率)，用來得到同步轉速作為座標轉換之用。

為了使得磁場為定值及讓轉矩(扭力)與電樞電流成正比，交流馬達系統在穩定狀態，能使轉子磁通在互相垂直之 d-q 軸座標系統上的 q-軸分量為零。如此便可將轉子磁通完全導向在 d-q 軸同步座標系統的 d-軸上，這就是向量控制的原理。為了達到上述目的，必須使用如圖 1-25 所示的複雜方塊圖，向量控制需要速度控制器、磁通控制器與電流回路控制器，另外需要再解決耦合與轉子與磁場速度差的頻率計算等問題。



量運算來產生所需要的脈波寬度調變波形控制雙向變換器，藉此達到穩定的輸出電壓和達成馬達側的線電流弦式波。

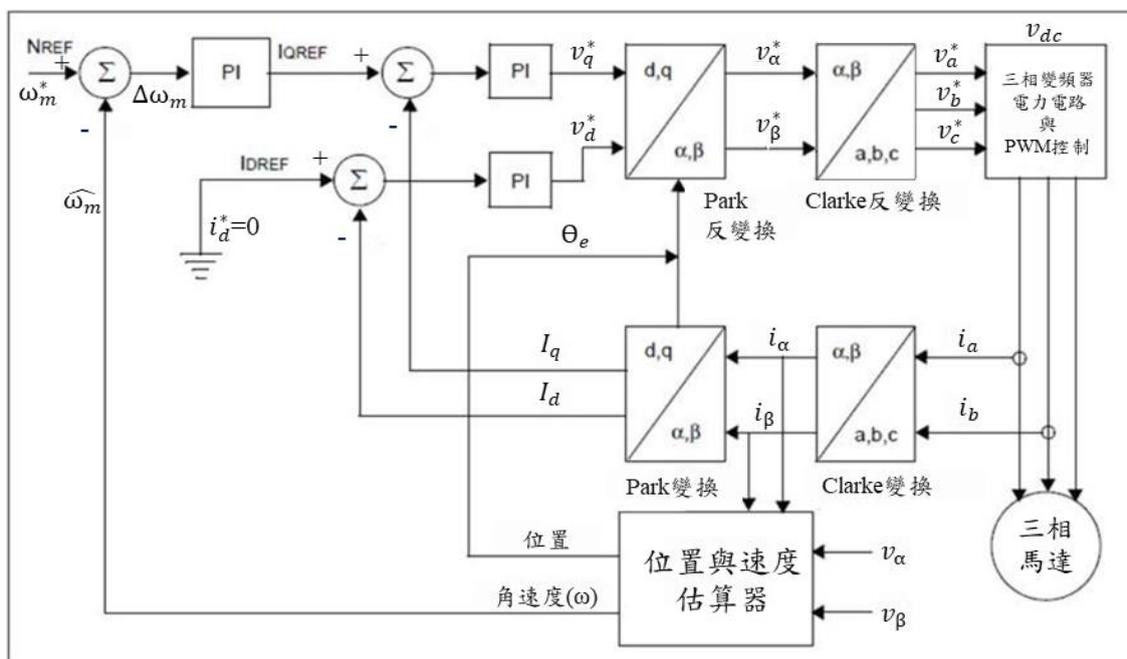


圖 1-26 磁場導向控制流程圖【20】

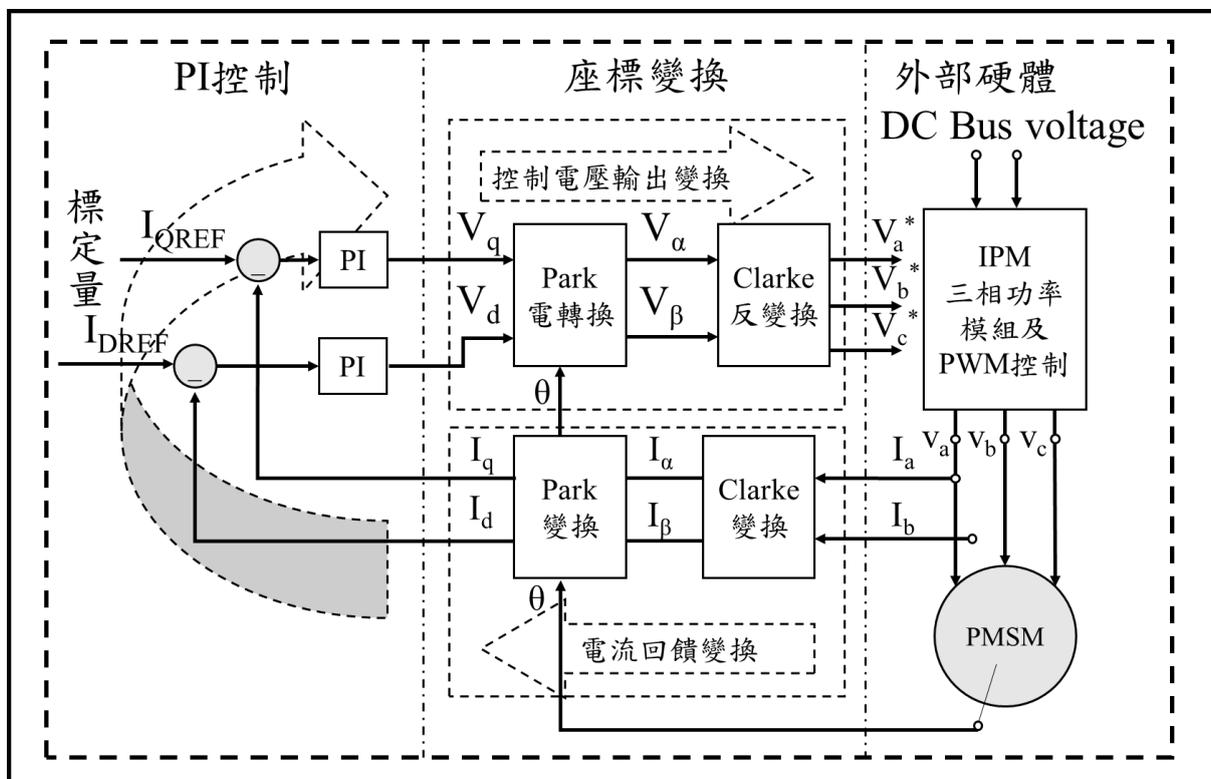


圖 1-27 磁場導向控制的操作區塊圖【20】

永磁馬達通常是在轉子參考座標系，即為 Park 的  $d - q$  模型建立數學模型，如果在沒有具備緩衝的線圈繞組(damping cage)情況下，一般可以歸納成如 (1-1)至(1-4)的組中的描述。並且從(1-3)式可以看出：

- (1) 電磁轉矩方程式包含有激磁場與磁阻轉矩分量。
- (2)  $d - q$  軸的電感參數對於比較弱的磁場控造成的影響，即是表面貼上磁鐵型的永磁同步馬達(surface permanent magnet synchronous motor, SPMSM)因  $L_d \approx L_q$  不具備明顯磁阻轉矩的分量。

另一方面，由於永磁馬達的磁阻(reluctance)與空氣相當，且內部貼上磁鐵型的永磁同步馬達(interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM)幾何的凸出型磁極特性，使得  $q -$  軸有比  $d -$  軸比較小的磁阻即  $(L_d - L_q)$  不為零；所以在當  $i_d < 0$  時磁阻產生的轉矩會具有正向的分量。IPMSM 就是基於將電流  $i_d$  持續朝向  $d -$  軸的負方向增加，而在以弱磁模式操作的速度區間當激磁的轉矩分量與轉速呈反比進而逐漸下降之際，能夠藉由磁阻的轉矩(扭力)而達到增加，以提高效率。

電壓方程式為

$$v_d = R_s i_q + L_q \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (1-1)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + \lambda_{pm}) \quad (1-2)$$

電磁轉矩方程式為

$$T_e = \frac{3}{2} \times \frac{N_p}{2} [\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1-3)$$

電機機械方程式為

$$T_e - T_L = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \bar{\omega}_m \quad (1-4)$$

其中  $N_p$  為極數， $J_m$  為慣量， $B_m$  為摩擦係數， $\omega_m$  為轉軸轉速， $\omega_r$  為電機單位的轉速(角頻率)， $\lambda_{mp}$  為等效轉子磁通鏈， $L_d$ 、 $L_q$  分別為  $d$ 、 $q$  軸電感， $R_s$  為角相等效電阻。

如果選用 SPMSM 馬達結構，相同電流輸入會產生最大電磁轉矩，當定子磁場向量及轉子磁場向量夾角為零時，因磁鐵南北極會互相吸引此時就會沒有轉矩輸出；但如果這時候的夾角變為 90 度時就會產生最大轉矩輸出，這個現象就稱為最大轉矩對應電流利用效率(maximum torque per Ampere, MTPA)，這時的輸出轉矩以及輸入電流是成正比關係的，要控制電機的輸出轉矩就只需去調整馬達電流。

### 3. 無轉軸量測器控制 (sensorless control)

由於速度回授方式是向量控制技術不可缺少的要件，其所需要的量測設備如轉速表(tachometer)與編碼器(encoder)價格在整個向量控制的調速驅動器價格比例上相當高，因此無轉軸量測器向量控制器則成為另一種考量的控制技術，以電流/電壓回授估測轉速或同步轉速如圖 1-28 所示。優點為可以減少電機的成本與體積，缺點為精確度較差與低轉速區域控制較為不容易，因此減少它的控制速度比(speed ratio)，所謂的控制速度比是指滿額負載或在額定負載的 1.5 倍以下時，可以達到的最高轉速與最低轉速的比值，目前市售無轉軸量測器向量控制變頻器的控制速度比大約在落在百分比 75-100%之間。

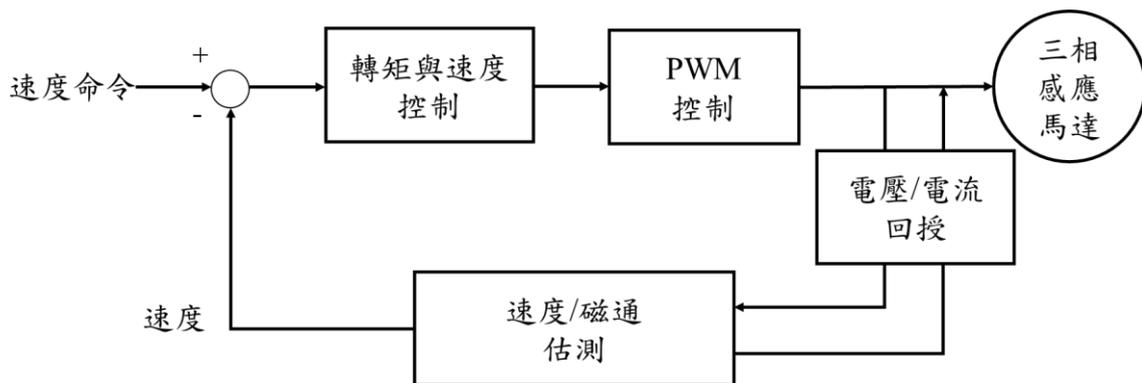


圖 1-28 無轉軸量測器向量控制方塊圖【6】

#### 4. 直接轉矩控制 (direct torque control, DTC)

直接轉矩控制技術是直接控制馬達磁通及其轉矩，讓磁通量與轉矩的誤差在限定的容許範圍內，如圖 1-29 所示，磁通量與轉矩的估測為直接轉矩控制的主要工作。其控制方塊直接轉矩控制的特色包含不需要轉軸機械位置或速度回授、快速轉矩響應及包含低轉速範圍的廣泛轉速控制區間等。

轉矩與磁通是馬達控制最直接的兩個基本物理量，在向量控制技術當中，必須經由與馬達參數有極大相關的電壓或電流解耦合以及轉子與磁場轉速差距的頻率來計算，才能達到轉矩與磁通的獨立控制；但由於參數會隨著負載增加或運轉時間加長而變動，因此就會影響了向量控制驅動器的性能。由於直接針對馬達的轉矩與磁通誤差來決定變頻器的開關切換方式，免除解耦合與轉子與磁場轉速差距頻率計算等問題，更不需要實施馬達的電流回路控制，較不會受到參數變動的影響，其控制方法也比向量控制法更加的容易。

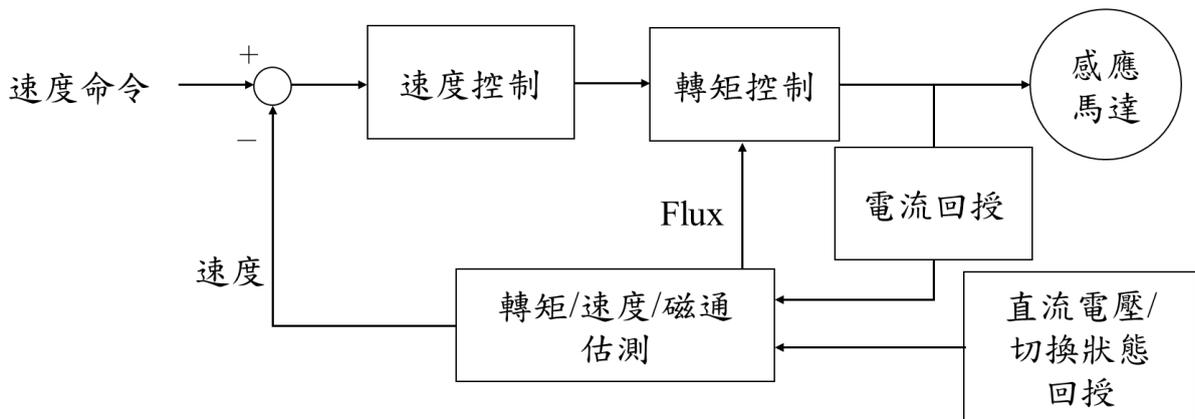


圖 1-29 直接轉矩控制方塊圖【6】

#### 5. 模型預測控制(model predictive control, MPC)

模組預測控制技術，是滿足限定條件時控制過程的控制技術，1980 年代就已經應用在化學工廠及煉油廠之中，最近幾年以來也被應用在電力系統或電力電子學中。模組預測控制技術的控制特點為針對一個時間區段做最佳化，接著進下個時間區段持續進行最佳化，此行為模式與線性二次調節器(linear quadratic regulator, LQR)相似，但線性二次調節器並沒有針對未來

進行預測的功能，且 LQR 主要是針對全部時間區間做最佳化，但模組預測控制技術會針對不同時間區間進行不同的最佳化，所以每次都有可能得到新的結果。

在經過數次區間之後，無論是測量值、估計值或是計算過程之數值皆於座標圖中趨近於水平線，因此這個方法也稱為水平回歸控制(receding horizon control, RHC)，圖 1-30 為模組預測控制技術方塊圖，求解器在每一個時間區間得出一組解之後會送入預測模型內在下一個區間使用，至於最佳化求解器得出的解會送至受控系統內。接著從輸出訊號進行取樣送入模組預測控制技術之後進行下一個時間區間的最佳化求解。

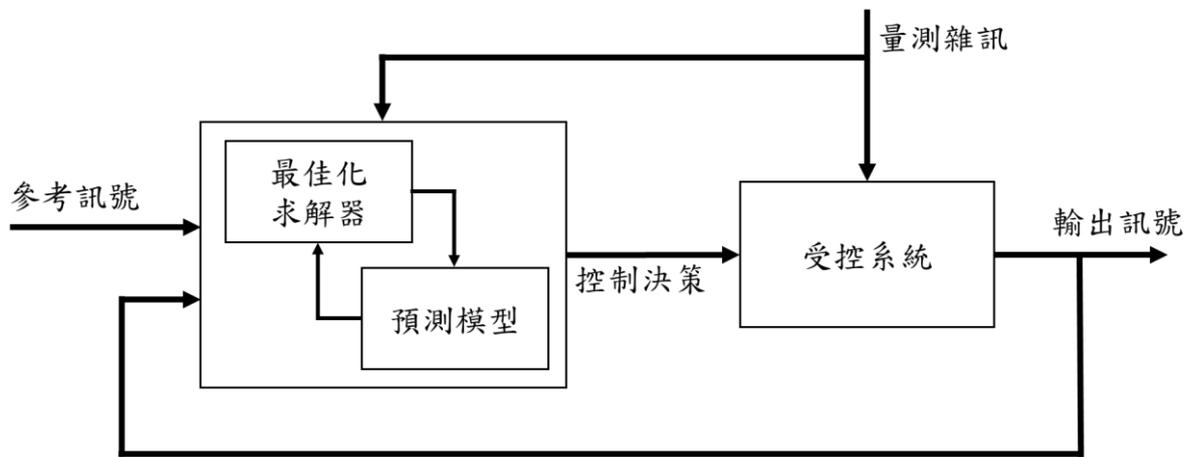


圖 1-30 模型預測控制方塊圖【25】

#### 四、節能原理與優點

如同章節開頭所說變頻器是將固定電壓及固定頻率的電源，轉換為可變速、可變頻率電源以驅動控制馬達，因應負載變動隨之調變，可將多餘(不需要)的輸出調降，自然會節能。各種調整流量如圖 1-31 所示，圖 1-31(a)節流：雖能改變輸出流量卻幾乎無法省下能源，猶如「踩油門又踩剎車」、圖 1-31(b)旁通：則是將多餘流量設一旁通閥回到原點其節能效果有限，猶如「踩油門原地空轉」、圖 1-31(c)關斷：僅適用於批次運轉的場域例如把地下室的水抽到頂樓水塔，對於連續變動負載難以因應。圖 1-31(d)變頻：透過變頻器無段調整馬達輸出，供需平衡不浪費並減少馬達的輸入功率。原理與比較如圖 1-32~1-33。

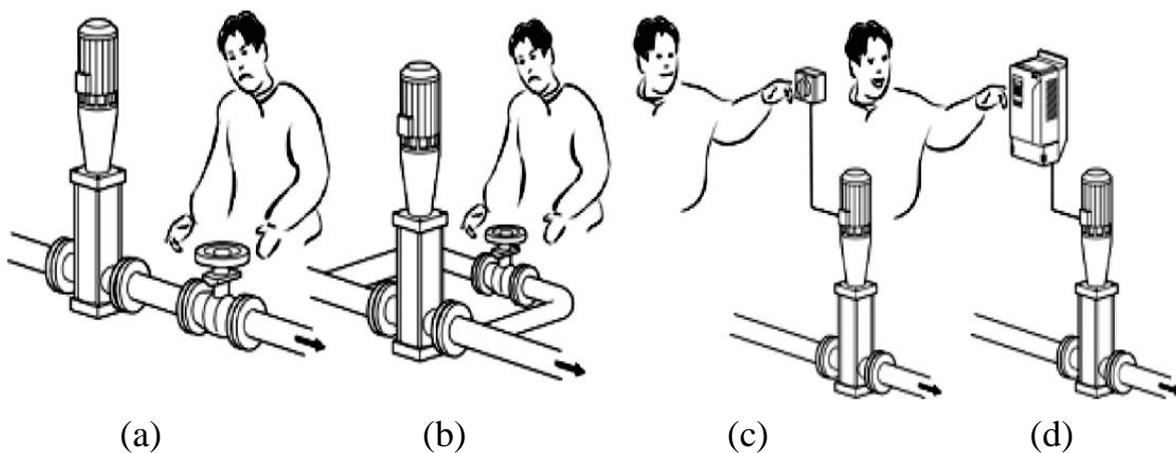


圖 1-31 流量調整方法：(a)節流；(b)旁通；(c)開斷；(d)變頻【6】

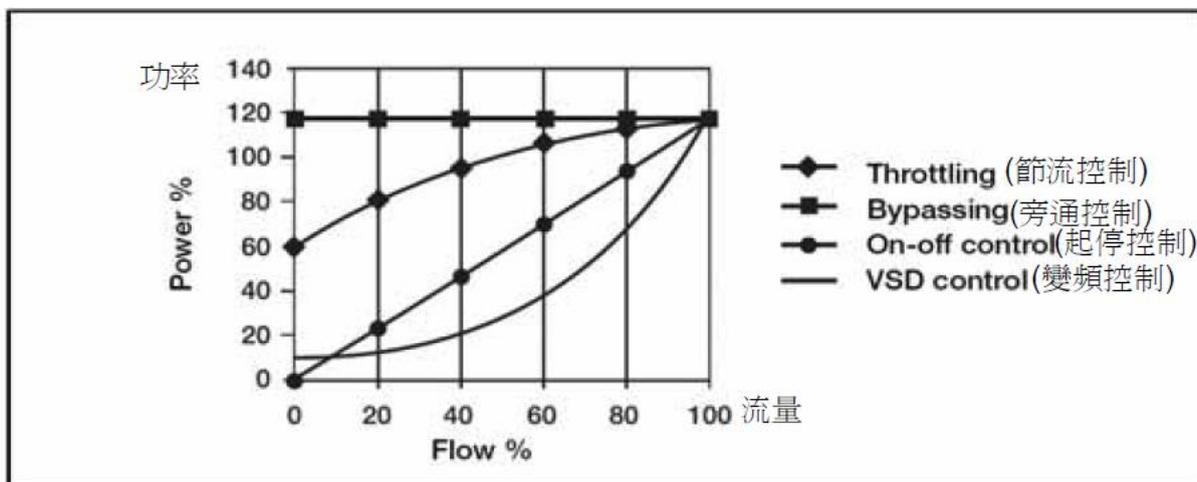


圖 1-32 流量調整方法之耗能【6】

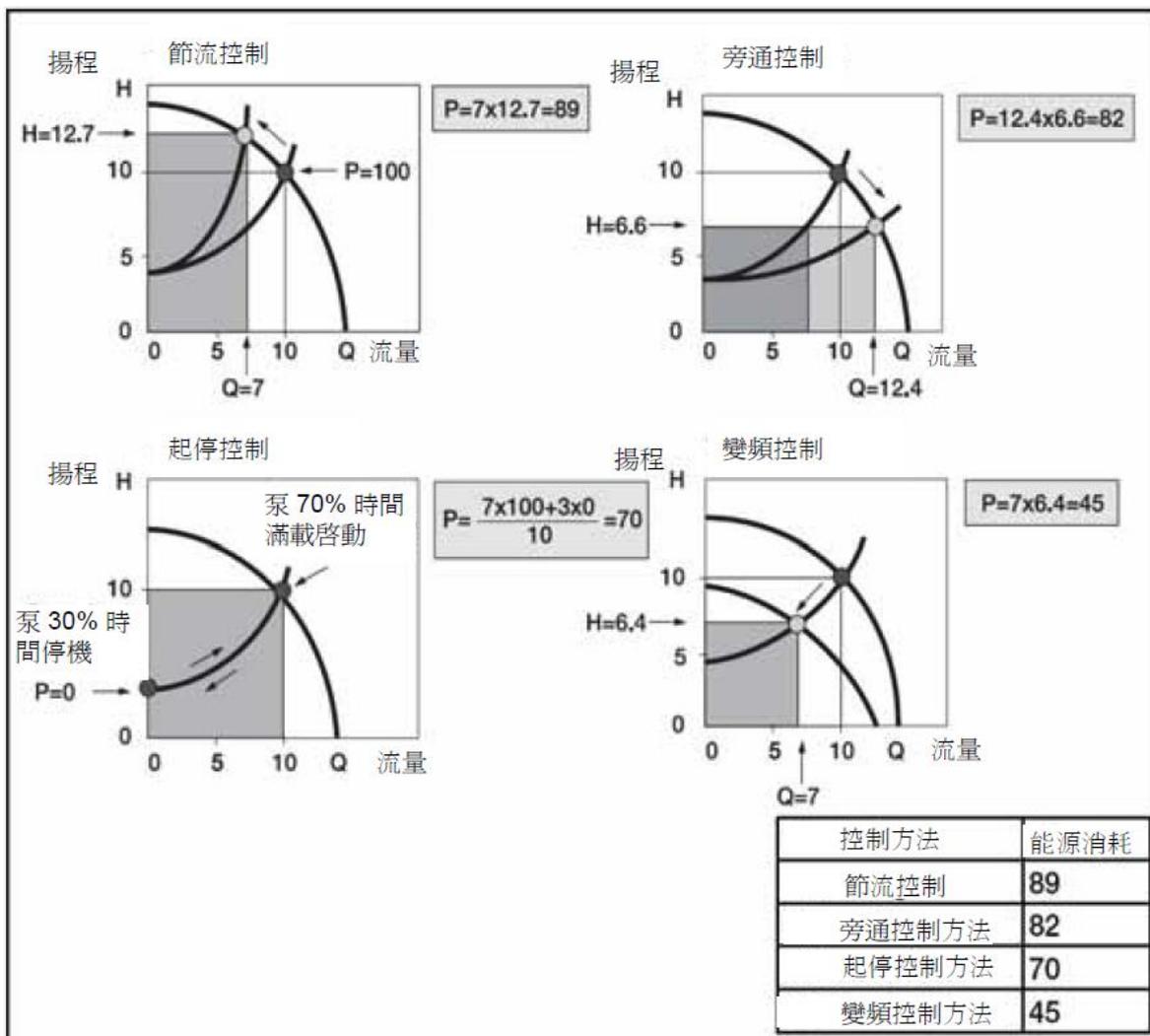


圖 1-33 流量調整方法之原理【6】

變頻器應用於流體輸送時，其節能效益適用於相似定律(Affinity Law)【26】如表 1-2 所示，當泵送流量需求下降時，透過變頻器調整則馬達輸出功率可下降三次方比。

表 1-2 風機相似定率【27】

功能	比例	公式
流量與轉速(Q)	成正比	$Q_2 = Q_1 (N_2 / N_1)$
壓力與轉速(H)	二次方比	$H_2 = H_1 (N_2 / N_1)^2$
功率與轉速(P)	三次方比	$P_2 = P_1 (N_2 / N_1)^3$

註： $N_1, N_2$  為轉速， $Q_1, Q_2$  為流量， $H_1, H_2$  為壓力， $P_1, P_2$  為功率

範例：水泵額定流量 3000LPM( $Q_1$ )、揚程 25m( $H_1$ )、馬達功率 18.65kW(25HP,  $P_1$ )。若需求流量改為 2000LPM 時( $Q_2$ )，則馬達消耗功率(kW,  $P_2$ )為何？

解答：

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{2000}{3000} = 0.67$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 = 0.67^3 = 0.3$$

$$P_2 = P_1 \times 0.3 = 5.6 \text{ kW}$$

調降後馬達功率由 18.65 kW 降至 5.6 kW，節能率約 70%！

進一步延伸以每度電 3 元、每天運轉 8 個小時(2920 小時/年)來計算耗電量與費用的差異：

改善前

18.65kW × 2920 小時/年 = 54,458kWh(度)，即每年支出 16.3 萬的電費。

改善後

5.6kW × 2920 小時/年 = 16,352kWh(度)，即每年支出 4.9 萬的電費。

在滿足使用者需求下，加裝變頻器調降馬達轉速，每年可降低可觀的電費支出，需強調的是變頻控制必須有「降低頻率的空間」才有節能潛力，若變頻控制於 60Hz，反而因為變頻器轉換電能的損失而更耗能，變頻器損失約佔馬達功率的 6%。

## 五、應注意事項與缺點

先前我們已經講解了變頻器的運作方式、種類及應用場域，也解說不少變頻器的優點，但再好用的設計都會有對應的缺點，而變頻器無法忽視的缺點，即為變頻器本身產生的高次諧波。

## (一) 為甚麼會產生諧波

變頻器可以廣泛的分成三部分：整流器、濾波器、逆變器，由於通用變頻器的整流部分採用二極體不可控橋式整流電路，以及濾波器使用大電容作為濾波使用，故經過整流後的電流相當於電容的充電電流，波型是較陡峭的脈衝波，且電容造成的諧波成分比起其他負載較大。

從市電輸入的訊號整流成直流訊號，接著經過濾波器後再透過電晶體開關元件逆變為交流訊號，在這過程中輸入電流的波型會變成不規則波型，將波型進行傅立葉級數分解之後可以得出基本波以及多個高次諧波，其中高次諧波即為影響整個供電系統效率的原因。

## (二) 介紹諧波

如圖 1-34 所示，諧波為基本頻率的整數倍頻率波型，假設基頻為 60 Hz，則二次諧波為 120 Hz、三次諧波為 180 Hz、四次諧波為 240 Hz...以此類推。電路中的負載元件皆有阻抗，因負載的阻抗作用，所以當訊號輸入進變頻器之後必定會產生諧波。

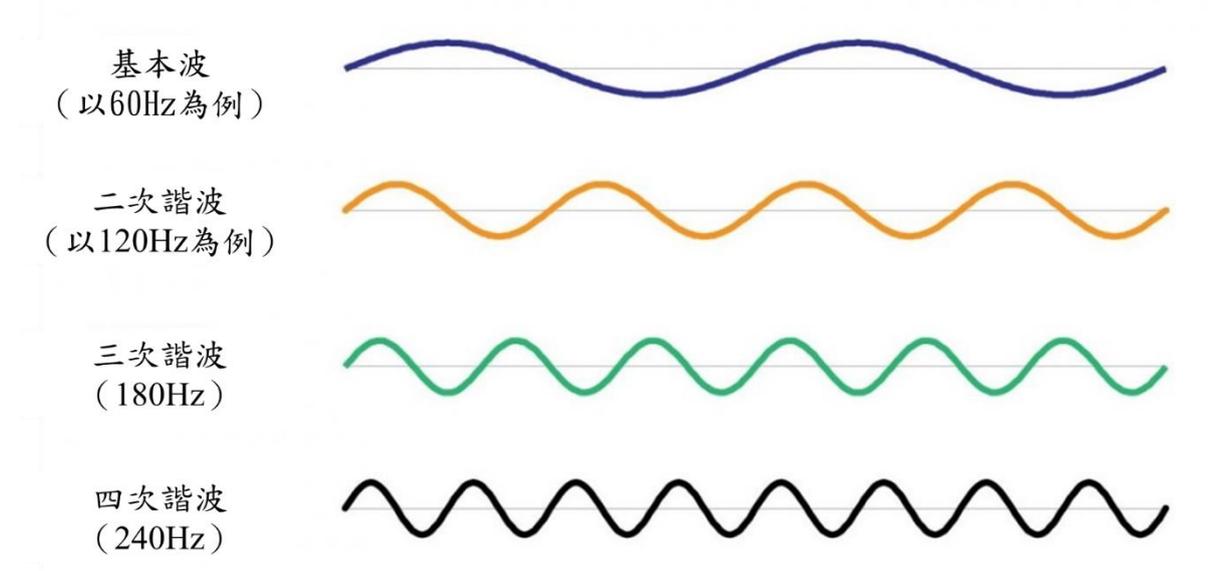


圖 1-34 諧波分解圖

現在我們已知負載會因阻抗效應產生諧波，所以負載阻抗越大，產生的諧波電流越大，且因諧波是負載產生的，故以電路整體來說，負載的輸出端電壓會大於輸入端電壓，也可以說諧波電流是從負載側流向電源側。而且當迴路中有多個非線性負載(諧波源)會因多種諧波會及使得迴路中的諧波電流加劇，迫使諧波振幅放大。

### (三)諧波對於用電設備的危害

高階諧波對於馬達來說是嚴重的缺點，因為用電設備在設計時是以正弦波為主，透過諧波的輸入使得電壓波型失真，可能會使馬達造成物理震盪進而磨損內部結構，縮短馬達壽命，效率也會大打折扣。故諧波在極大多數案例中會被視為需要「消除」的成分。

除了輸出端會影響設備，諧波也會影響輸入端的交流電波型，使得同電網的設備也會受到影響。舉例來說，當輸入設備的波型產生失真，設備的效率也會下降，意即同樣的功率輸入能吸收的有效功率也會下降，同時無法被吸收的功率則會逸散，造成溫升，若用變頻器供給電源和電網直接供給電源相比，諧波造成的影響可能會使得電流增加 10% 同時溫升增加 20%。

根據上述的例子可以簡單了解諧波造成的影響，但這是相當輕微的狀況，除了造成溫升、設備提早劣化之外，若放著不管也有可能造成起火、或是透過電磁效應以電磁波的形式穿過纜線逸散至環境。

工程上有一個指數來表示波型中的諧波含量，其名稱為總和諧波失真率(total harmonic distortion, THD)，其公式為

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^K (U_{ck})^2}}{U_{c1}} \times 100\%$$

其中分母為基本波的均方根值，分子為二階以上諧波有效值總和，THD 得出的數值為總諧波分量與基本波分量的比值，THD 可以做為評價電源諧波的參數之一。

根據 THD 而生的方案相當多，有 IEC 61000-3-2、EN 50160、IEEE 519 等，表 1-3 為 EN 50160 對於 1000 V 以下系統諧波含量的限制。

表 1-3 EN50160 對於諧波規範的極限值

諧波次數	極限值	諧波次數	極限值
2 次諧波	2.0 %	6 次諧波	0.5 %
3 次諧波	5.0 %	7 次諧波	5.0 %
4 次諧波	1.0 %	9 次諧波	1.5 %
5 次諧波	6.0 %	11 次諧波	3.5 %
總和諧波失真率			8.0 %

#### (四)諧波的解決方案

針對電力用電容器之諧波有以下對應方法：

- a. 電源側改接在電壓失真波較少的系統。
- b. 電容器串聯的電感器更換為耐諧波電流更大者
- c. 外加串聯電感器並調整阻抗值降低諧波電流輸入
- d. 檢測諧波電流並在超過限度時將電容器開路

以上的方法中，因諧波起因為變頻器本身故 a 在大部分實例並不實際，且 b 會大幅度增加成本不划算，而 d 本身可以有效阻擋諧波電流，但將電容器開路會影響電容器發揮作用故本方案也不適用於實例，所以 c 是目前最廣泛被採用的方案

一般來說電容器安裝於含諧波之電路時，應串聯 6% 之電感器，若第五諧波成分較高時應串聯 8% 電感器，若是像電弧爐等三次諧波大之場合則應串聯 13% ~ 15% 之電感器，安裝於非固定迴路則串聯 6% 之電感器。針對各主要諧波安裝電感器之選用原則，可以參考表 1-4。

表 1-4 電感器之選用原則【30】

諧波次數	電感值選用原則
三次諧波	多採用 13%，若諧波成分相當大則可以採用 15%
五次諧波	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 多裝設 16%，但不能有四次諧波存在，且三次諧波電流有可能被放大。</li> <li>2. 可裝設 8%，有助於降低諧波電流達到安裝 6% 時的 1/2 倍。有可能使三次諧波電流被放大。</li> <li>3. 可裝設 13%，可降低諧波電流達到安裝 6% 時的 1/5 倍。</li> </ol>
七次諧波	多採用 6%。
九次諧波	多採用 6%。

## 貳、服務業常見應用情境

百貨/量販/超市、醫院、學校或辦公大樓等應用情境，這類建物中的馬達設備不外乎，空調、電梯/手扶梯、給排水/汙廢水、送排風與鼓風機/空壓機等會使用馬達驅動，而本章將摘錄部分案例說明變頻器應用情境，進一步技術或行業別應用介紹，可參本會服務業節能服務網/節能知識中各類型技術手冊，服務業節能服務網，網址：<https://www.ecct.org.tw>。

### 一、空調變水量、變風量控制

本節所介紹之變頻器應用主要為中央空調系統，而窗型/箱型/分離式冷氣皆為原廠即有專屬機種、無法事後加/改裝，故中小型商用分離式冷氣不在此節討論範圍；中央空調系統組成冰水主機、冰水/冷卻水泵、區域泵、冷卻水塔及空調箱/小型冷風機等，這些都是馬達組成使用電力驅動的設備，讀者可以理解它們就是熱量的搬運工，把室內的熱能搬到室外排除，提供室內涼爽舒適的環境；因篇幅限制摘錄區域泵、空調箱變頻器做介紹。

#### (一)中央空調冰水區域泵導入變頻控制

區域泵顧名思義就是將冰水輸送到大樓各區域的水泵，讀者可以思考一下太陽東升西降、春夏秋冬、辦公室內人來人往，還有些人怕冷或怕熱，因此空調負荷會變動是理所當然的，當負荷「變動」代表各空間需求的冰水量不同，這時變頻器就有展現功能的機會。

中央空調冰水系統如圖 2-1~2-2 所示，專有名詞為一/二次變流量冰水系統(primary-secondary system)，左側(一次側)是冰水主機製造出冰水、中間是(二次側)區域泵負責接力輸送冰水到各樓層、右側是空調箱把冰涼的冷氣吹出來，共通管則是「熱力耦合、流(水)力分離」的組件；讀者若是機電同仁就能理解，夏天吹出涼爽的冷氣尤為重要，因此區域泵需要將足量的冰水輸送到各樓層，過多太冷、過少部分區域不冷，客訴電話接不完。

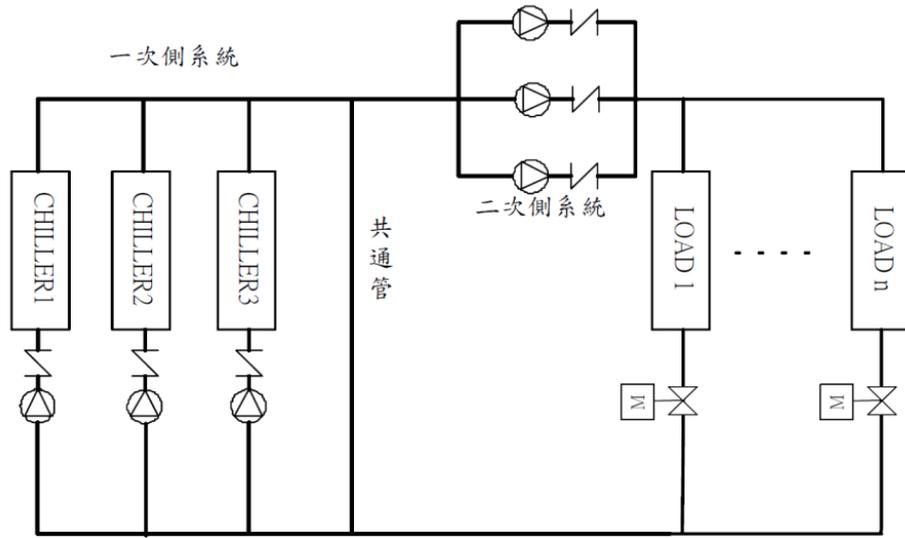


圖 2-1 一次/二次側冰水系統簡圖【31】

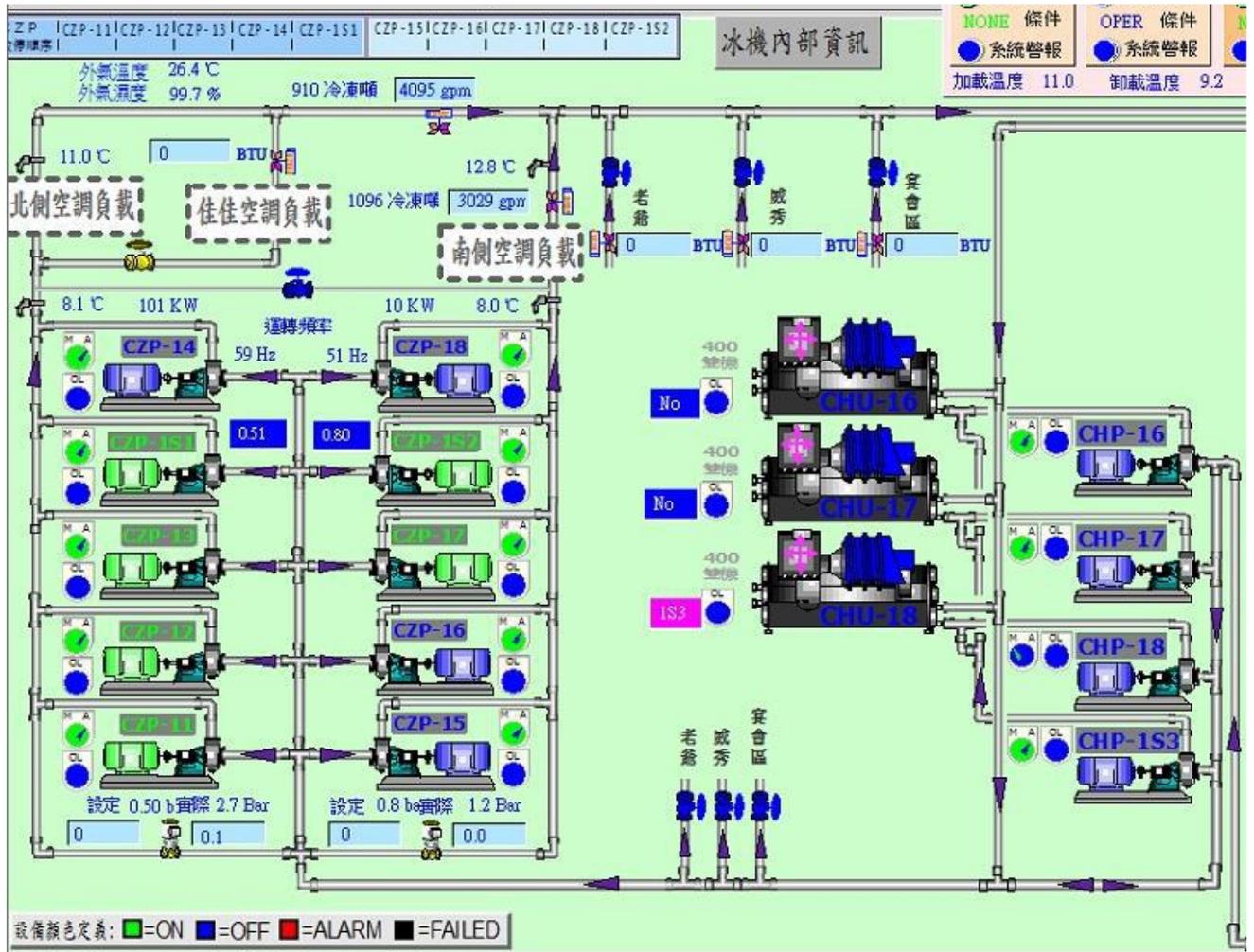


圖 2-2 一次/二次側冰水系統示意圖【32】

可是怎麼知道冰水足與不足呢？讀者可以這樣想，區域泵就像是住家的自來水恆壓泵設有「壓力」感應器，當室內開啟空調時就像是開水龍頭一樣在使用冰水，這時管路壓力下降區域泵就會加載、反之溫度到達設定(水龍頭關小)或關閉空調時，偵測到管路壓力上升就會降載，始終維持管路恆壓，概念就是如此簡單。另外各空間的冰水閥要是「二通閥」即溫度到達，會像水龍頭一樣「關閉」，而不是「三通閥」的「旁通」，若現場裝設的是三通閥那麼需要將旁通關閉才能搭配區域泵變頻器使用。

水泵若「併聯」供應同個區域，那麼變頻控制就需要協調水泵「共同出力」，用同一頻率(Hz)運轉才能發揮最佳效果，有時看見錯誤的設置範例即個別水泵加載運轉，第一台滿載才用變頻器加載第二台，那麼對第一台水泵來說變頻運轉在 60Hz 根本沒有節能效果，而第二台水泵加載到 60Hz 以前打出的水都被第一台壓制，效果也是大打折扣甚至毫無效果。水泵/風車併聯運轉就像是拔河比賽一樣，大家一同出力才有最佳效果，而非獨立開關的個人英雄主義。

### (一)空氣調節箱運用變頻器控制

空氣調節箱是將上一節提到區域泵冰水轉成冷氣吹到空間各個角落，而空調負荷在各空間的分布也有所不同，例如靠窗/走廊、辦公室常駐人員多寡、會議室有無使用等，讀者應該曾經接觸有些同仁特別怕冷、有些則需要電風扇散熱，因此即便在單一樓層或空間，各處的空調負荷也是「變化」，同樣的冷氣要輸送到使用者/設備所在的空間，給予「剛好」的溫度，才會節能。同樣礙於篇幅我們不另外探討手術/無塵室、資訊機房等特殊應用，詳情可參考本會行業別技術手冊。

分配空氣的概念與區域泵近乎相同，如圖 2-3 所示，右側是空調箱、左側是 VAV 終端箱(variable air volume,VAV)負責冷氣的分配，透過溫度感應器哪邊偏熱就送多一點冷氣、偏冷就少一點，如此便可因應空間各區域的需求調整冷氣供應量，而空調箱的供風扇則是偵測風管的「靜壓」進行加卸載，

當 VAV 終端箱把風門都打開(靜壓下降)，風車就加載全速輸送冷氣、反之溫度到達風門轉小(靜壓上升)，風車就可以降低頻率運轉。

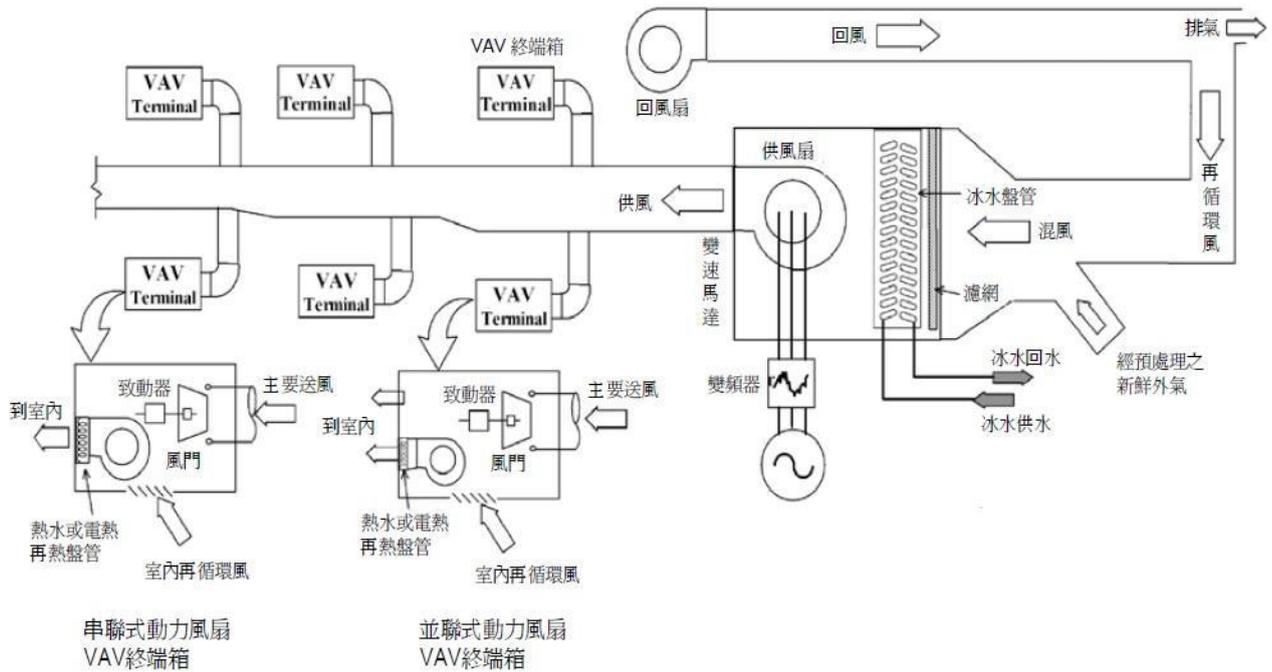
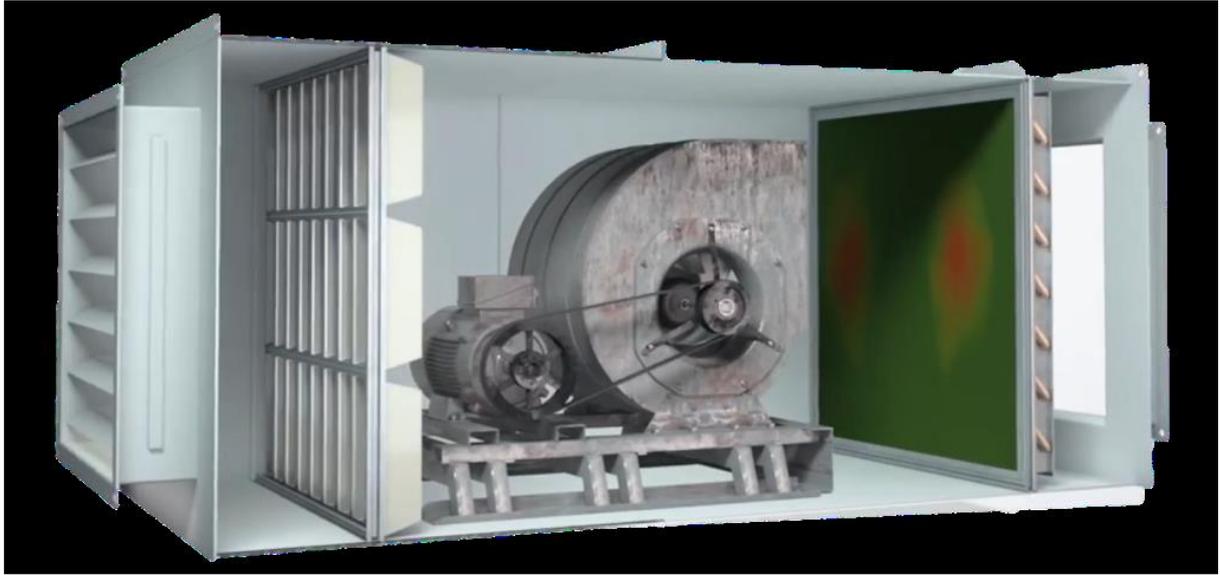


圖 2-3 可變風量 VAV 系統簡圖【31】

服務業空調箱大多還是單一風車(外型類似蝸牛殼)與馬達去帶動，如圖 2-4a，受限單一風車能調整的範圍有限、空氣與冰水熱交換盤管分布不均，而第一章第二節提到的無刷直流馬達(BLDC)又稱電子換向馬達之風車組(EC Fan)如圖 2-4b，則是現今新型空調箱的風車配置，透過風車陣列組成「風牆」，除了永磁馬達效率高於感應馬達外，控制可以更細膩、熱交換更加均勻，同時沒有傳統巨大的風車更能適應窄小的機房，以某台北市國際觀光旅館從定風量改為 EC Fan 之變風量空調箱，其節能率可達 59%。

風牆式陣列風車源自於無塵室、資訊機房等特殊應用場所，隨著產品/技術價格降低，已有部分空調箱更新案例導入，其控制邏輯如同區域泵並聯一般，一齊出力或卸載才能發揮風車組的最佳效率



(a)



(b)

圖 2-4 空調箱示意圖：(a)傳統風機；(b)電子換向馬達之風機(EC Fan)

## 二、電梯/手扶梯變頻器控制

電梯、電扶梯目的是將乘客移動至各樓層，因此我們期望這些設施可以安全、快速、平穩與安靜的提供服務。反之平日搭乘者略少時則緩步運行，營造緩和的步調兼顧節能效果，而電梯及電扶梯變頻器應用技術，由此分述如下：

### (二) 電梯變頻器與電力回生

電梯耗能的核心想當然爾是主機(馬達)，而整體構成如圖 2-5 所示，概略可理解成翹翹板，車廂與配重塊位於翹翹板兩端，中間則是馬達帶動兩端車廂與配重塊的移動。當乘客進出車廂時便會改變翹翹板其中一端的重量，如圖 2-6 所示，因此主機並非一直都在出力，有時反而需要減速。

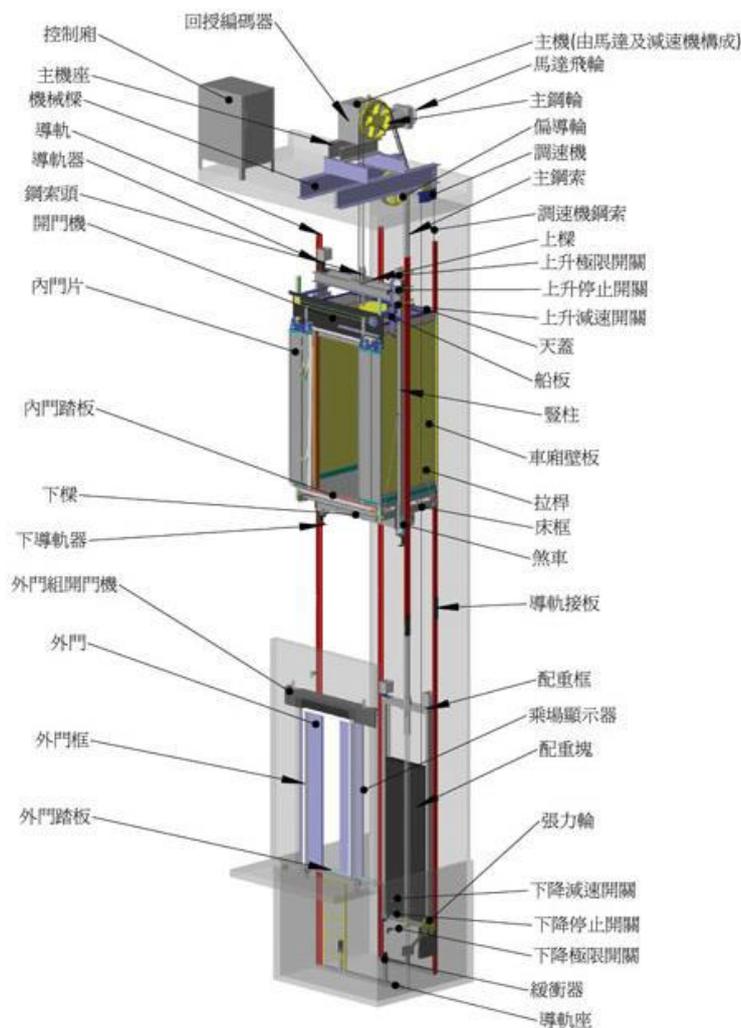


圖 2-5 電梯各部構造名稱與位置【33】

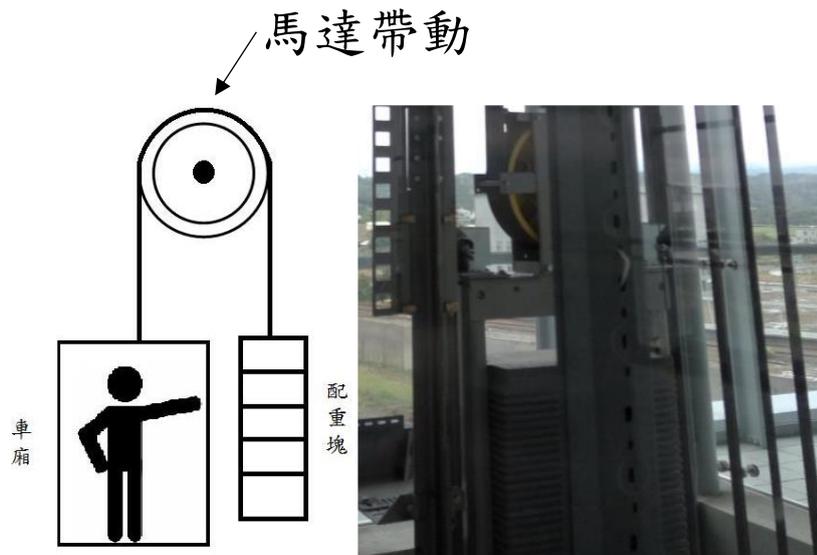


圖 2-6 電梯配重原理示意圖與實照【36】

因此節能技術概略可分為兩個層面，主機馬達效率與動能回收，前者主機效率部分，現今採永磁(PM)無齒輪式捲揚技術，如圖 2-7 所示。永磁是指主機馬達使用永久磁鐵等新材料，來提升電能轉為動能的效率，而無齒輪則是主機馬達直接驅動鋼輪，不再經過減速機轉換由此降低動能傳遞損失。

動能回收方面，可知馬達與發電機其實是一樣的，只是正/反轉、輸入/出電能而已，最常見的應用就是捷運列車減速進站，同樣的馬達起步加速、列車滑行、直到減速出現特殊的聲音，這時馬達變成發電機將動能回收轉成電能，再輸送回第三軌供應其他列車使用(當然最後煞停還是靠剎車片)。

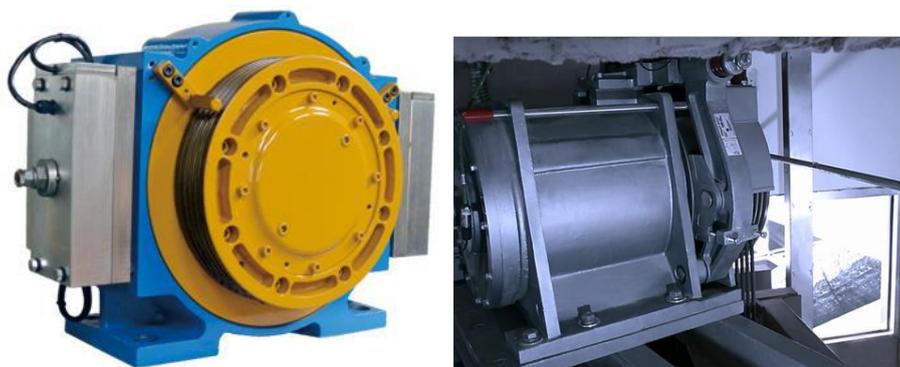


圖 2-7 永磁馬達之無齒輪捲揚機【34,35】

以圖 2-8 做說明，當車廂與配重塊平衡發生改變且車廂需要移動，有時馬達需要出力(輸入電能，象限一、三)有時卻需要減速(輸出電能，象限二、四)，而過往電梯馬達減速階段發出來的電並沒有妥善利用，而是串聯電阻變成廢熱，電梯機房為此還需裝設冷氣機避免電梯控制器與車廂過熱。隨著電力電子技術發展，現今這些減速所產生的電力可以透過「電梯電力回生裝置」將其回收再利用，我們可以理解這個裝置是將馬達減速發出的電能，重新濾波/整流後變成電網中使用的電壓如 380V 與頻率 60Hz。

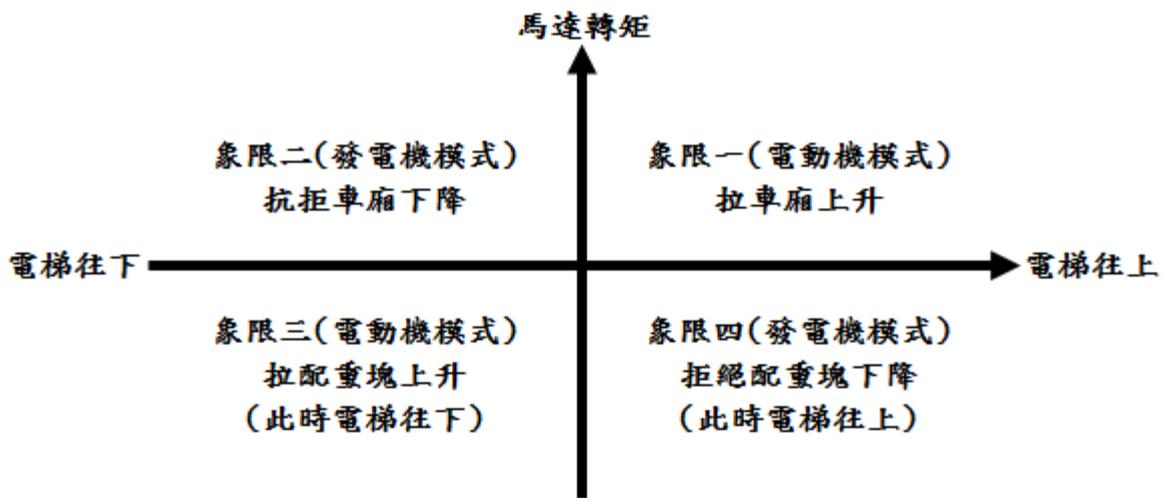


圖 2-8 電梯運行四象限示意圖【36】

依本會 104 年實測不同類型場所、電梯速度與載重，如表 2-3 所示，可知觀光旅館(行程 B4-12F)、百貨公司(行程 B5-7F)分別有 25~30%回生率，詳細測試與技術資料可參本會 105 年發行之電梯電力回生裝置節能應用手冊。現今各大電梯原廠有開發與自家電梯相容之電力回生裝置，可於設備更新時選用相關模組，兼顧保固、安全與節能需求。

表 2-1 電梯電力回生裝置回生率及相關因素統計【36】

類型	電梯速度(m/min)	載重限制(kg)	回生率(%)
辦公大樓	105	1350	26.8
觀光旅館	120	1150	25.78
社區住宅	105	700	10
大專院校	90	1000	20.4
百貨公司	120	1350	30.44
集合住宅	60	700	22.5
資訊機房	90	1000	13
政府機關	120	1350	28.5
商辦中心	120	1350	39.73
區域醫院	90	1000	11.18

### (三)電扶梯變頻怠速與自動啟停

在捷運或量販店搭乘電扶梯時，會聽到”電扶梯加速中，請緊握扶手、站穩踏階”的自動語音提醒，人少時經過還可看見電扶梯轉動的很慢甚至停止，其實這就是電扶梯的主要節能技術「變頻怠速」與「自動啟停」。

首先須了解電扶梯是由馬達帶動踏階循環，多數在營業時間內無論有無顧客搭乘均保持循環運轉，有部分時間消耗電力卻無人搭乘。而變頻怠速(如圖 2-9 所示)與自動啟停，是透過乘場兩側的光電感應器得知顧客接近，如圖 2-10 所示。前者透過變頻器控制加速與怠速約節能 30%、後者僅啟動與停止，兩種控制模式均有相當的節能效益，應用何種技術是考量營業需求，可接受啟停或是僅接受怠速，適合應用於具人潮尖離峰明顯場域。

硬體技術面對馬達加裝變頻器、光電感應與相關控制器並無問題，使用上需注意搭配語音、狀態指示或地板貼等，讓顧客了解電扶梯怠速、停止，並非故障、靠近會加速或啟動，避免造成不必要的困惑與驚嚇。

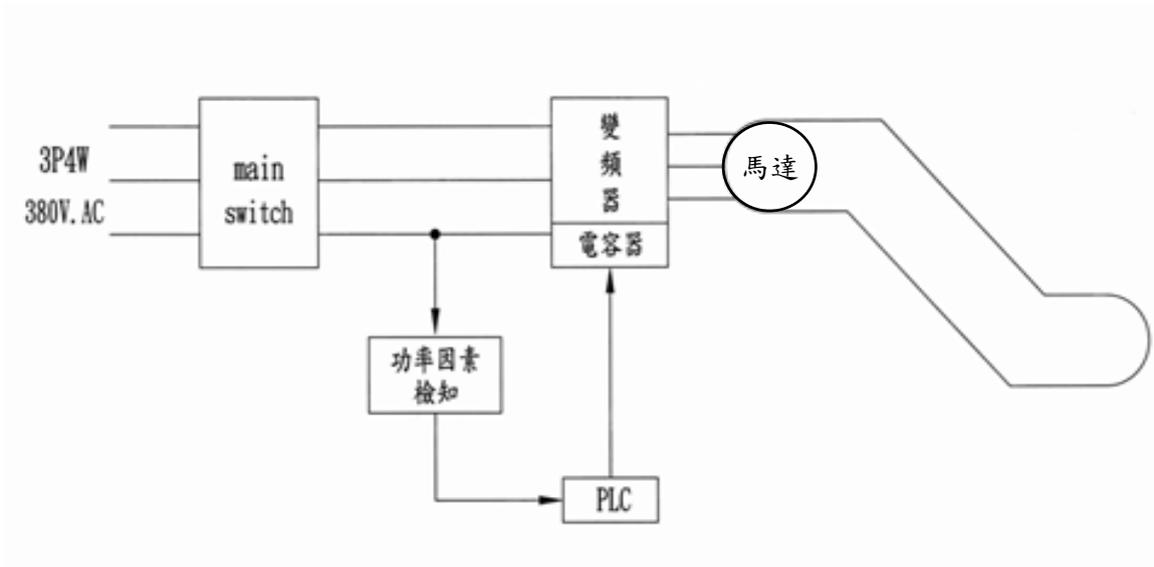


圖 2-9 電扶梯變頻器控制示意圖【37】

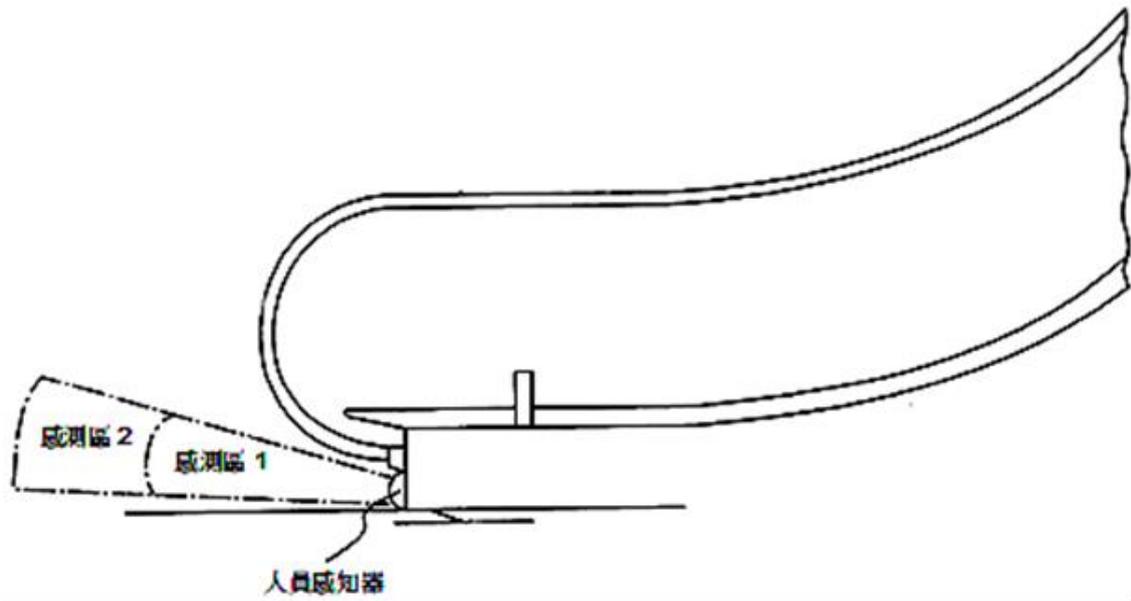


圖 2-10 可變轉速電扶梯人員感知器與感測區示意圖【37】

### 三、送排風系統

進排風的目的是將污染物稀釋與抽除，若能源頭減量自然是最好，如果不是我們能控制的，那麼則依換氣需求進行運轉，在此以廚房進/排風與停車場進/排風控制分述如下：

#### (一) 廚房進/排風控制

廚房排風的目的是將油煙、蒸氣或燃燒後廢氣排至戶外，如圖 2-11 所示。避免影響廚房工作人員的安全或不適，既然有排氣自然就會有進氣，因此廚房進排氣在維持換氣需求的前提下，會希望換氣量足夠抽除污染物但不會過大，換氣儘量減少顧客用餐區的影響。

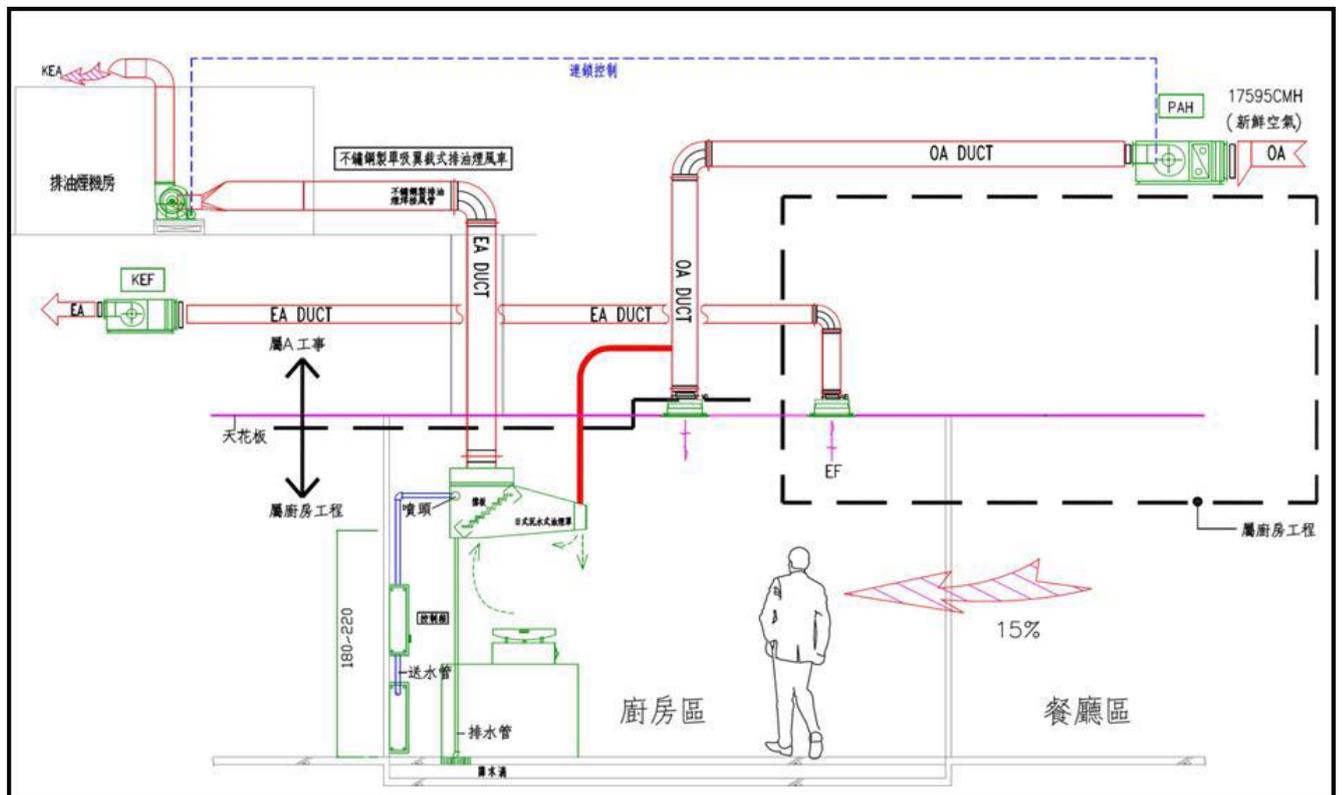


圖 2-11 廚房進排氣系統架構示意圖【32】

基於上述的需求，便可認知到初始系統設計與實際店鋪需求，必然有所差異(通常為過大設計)，中式大火熱炒與清淡的日式料理排風需求顯然不同，因此店鋪進駐後可依需求微調進、排風門，未使用的風口也應儘量關小，將風機能力提供給需求的店鋪，再搭配變頻器控制將過大的風量調降，便有節能空間，日本亦有廠商推出廚房專用 VAV 變風量系統。

補氣系統是配合排風量補充至廚房內，避免顧客用餐區冷氣大量被廚房排風機抽走，影響消費者用餐感受(過熱)；若以節能的角度，自然會希望直接以室外空氣不做處理直接輸入，然而考量室內作業人員感受與避免食品過快腐敗，有時會補氣與冷氣併供或提供涼風等，以符合多方需求；值得注意的是補氣系統送風量需略小於排風量，例如廚房獨立排氣量 100%、補氣系統進氣量為 95%，使廚房形成「微負壓」的環境避免油煙擴散至客席區，若補氣不足將抽除大量客席區冷氣，反之補氣過多則廚房熱氣/油煙擴散至客席區，兩者均增加不必要的空調負載，同時也造成用餐民眾不適。

看到此處或許讀者會問，那麼排風量、進風量或廚房微負壓又如何得知，現今風量有多種量測方式，以風速計量測平均風速(m/s)乘上開口或風管截面積( $m^2$ )最為方便，而平均風速視開口面積平均取點量測即可；廚房微負壓，畢竟不是醫院手術室無須強調必須幾 Pa 的壓差，使用衛生紙或其他輕薄材質，在廚房門口或開口處用「拔草測風向」方式，便可知曉是否處於負壓。

## (二)停車場進/排風控制

停車場進排風自然就是處理汽、機車行駛的廢氣，尤其大型建物有寬闊且多層地下停車場，更仰賴機械通風維持室內空氣品質；規模較大的停車場，常以大馬力軸流式風機結合小台的噴流式風機，如圖 2-12 所示，沿特定的方向形成一側進氣、中途接力與另一側排氣的空氣流向。

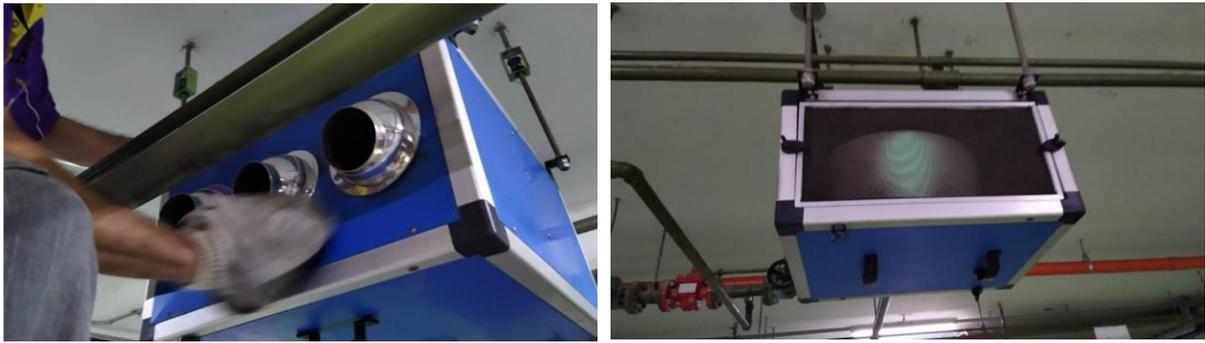


圖 2-12 噴流式風機外觀【32】

停車場主要污染物為內燃機產生的一氧化碳，因此透過一氧化碳偵測器可了解場內汙染物濃度/分布，進而以控制風機運轉，而車輛進出、尋找車位/怠速，其汙染物(廢氣)自然排放也是動態的，部分百貨業者為了提供更好的服務品質需要持續換氣，此時變頻器的應用就有空間。

以圖 2-13 某購物中心為例透過一氧化碳(CO)感測器與進排風機分組調控，可有效將汙染物排除也有效降低風車耗能；需注意的是偵測器裝設位置與人呼吸高度相近即可，安裝點位不一定要很密集，重點在進排氣風機組成的氣流迴路上佈點，藉以了解停車場區塊的空氣品質與風機開啟後換氣狀態。

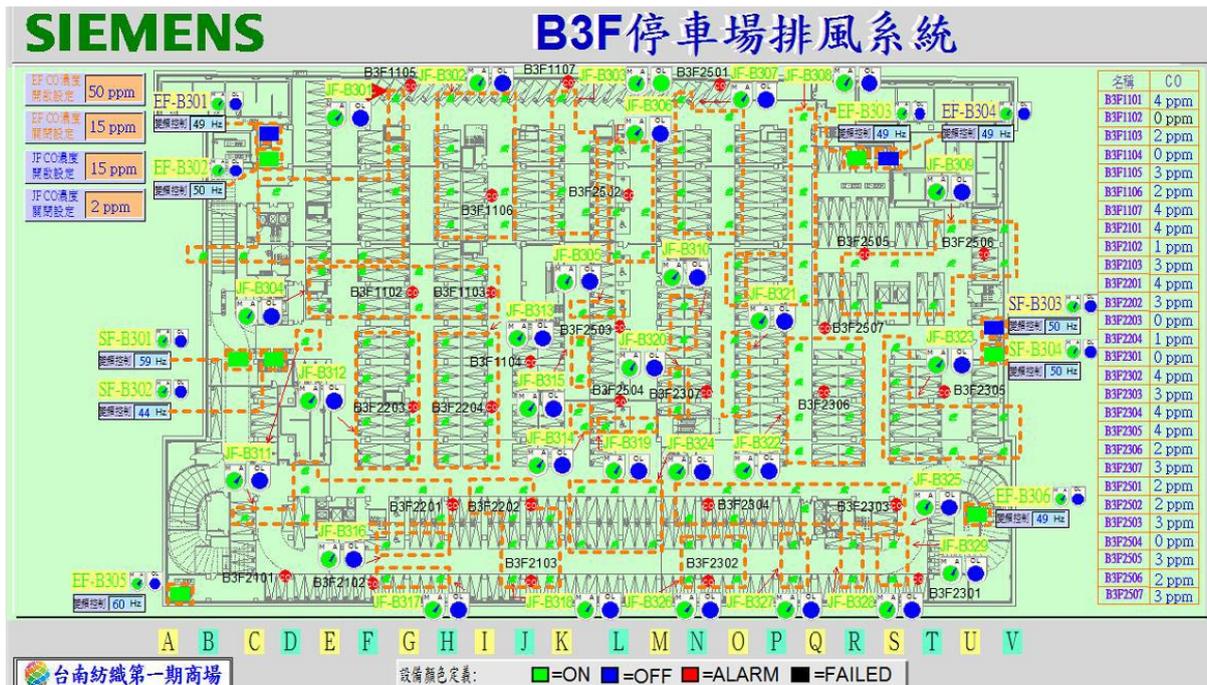


圖 2-13 停車場送排風系統監控畫面【32】

#### 四、空氣壓縮機與鼓風機變頻

空氣壓縮機與鼓風機在服務業中應用於醫用氣體、集塵器吹灰、汗水曝氣等處，兩種設備皆是將空氣加壓應用，空壓機排氣量小/壓力較高，鼓風機則相反排氣量高/壓力較小，故而依照需求的壓力、風量與潔淨度等，選用空壓或鼓風機，在此以空壓機變頻與鼓風機變頻控制分述如下：

##### (一)變頻器在空壓機之節能應用

空氣壓縮機分為往復式、螺旋式與離心式，非生產性質行業因需求量不多，大多還是使用往復式(外表為汽缸)頂多到螺旋式壓縮機，亦有區分有無潤滑油之分類，如圖 2-14 所示；週邊設備組成之系統如圖 2-15 所示。

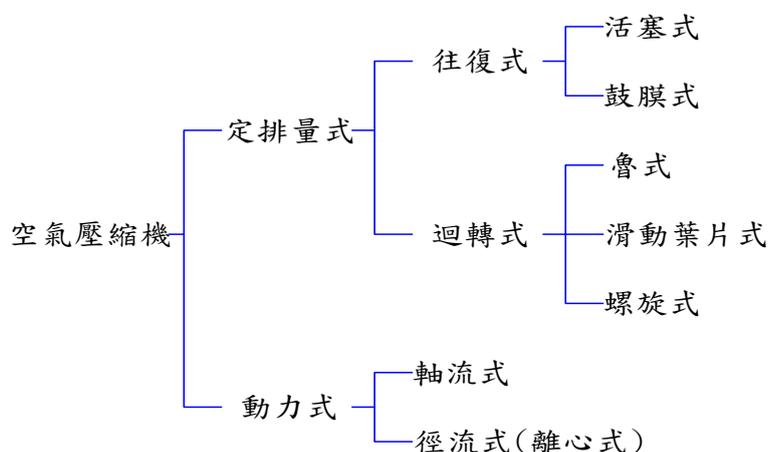


圖 2-14 空氣壓縮機分類圖【38】

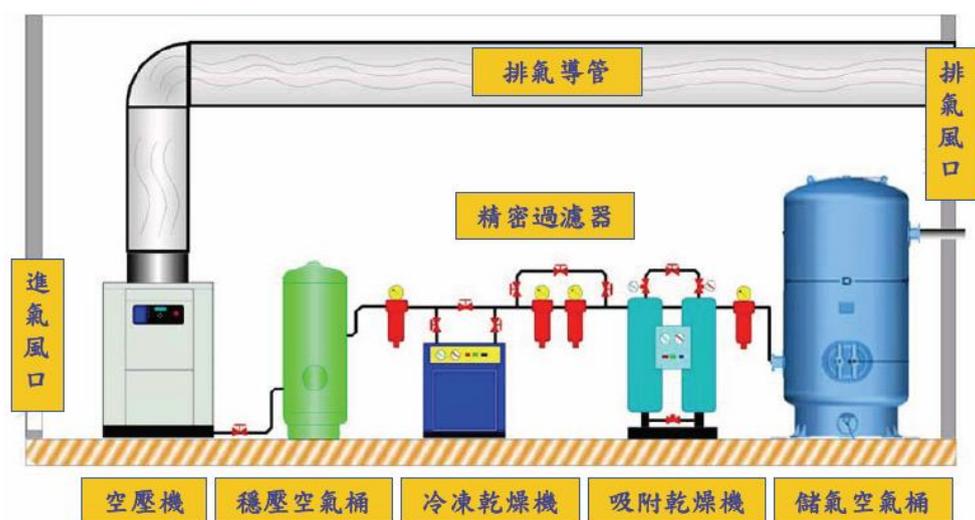


圖 2-15 空壓系統示意圖【39】

壓縮空氣在醫院做為氣動工具(醫療器械)使用，對讀者來說最常接觸的應該就是牙科，研磨牙齒、吹除口水/體液所使用的就是壓縮空氣，當然這也是變動負載否則病人就辛苦了；空壓機過往設定壓力使用台數運轉控制，即儲氣筒壓力下降(上升)/壓縮機啟動(停止)，一台不夠多開幾台並聯供應給各診間/手術室使用，變頻器即是在變動負載的需求下，隨之改變運轉頻率供應穩定的壓縮空氣。

若需求風量較大時會採多台並聯運轉，而前述空調並聯操作概念不同，空壓系統採定頻為基載、變頻器因應變動負載來調控，如圖 2-16 所示。因此需對系統需求風量有所掌握，選擇適合的機組容量來搭配運轉，導入多機連鎖控制與變頻容調的機組群，其節能率可達 30%。讀者如欲購買高效率空壓機可至動力與公用設備補助專案/補助產品查詢，取得驗證過的產品型號，網址：<https://www.mdss.org.tw/subsidy/info/index.aspx>

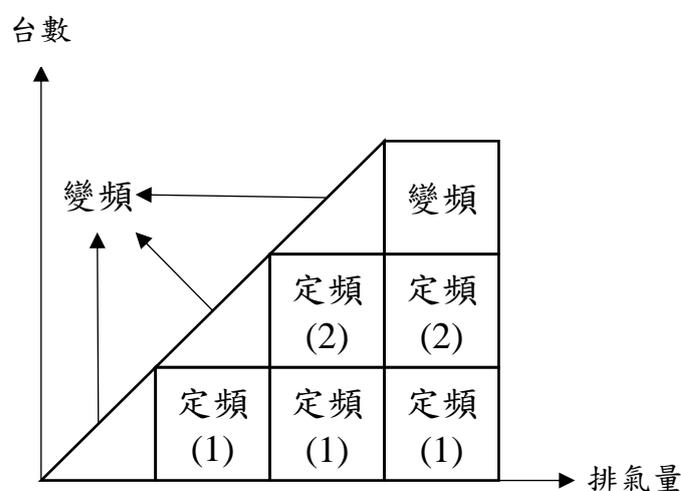


圖 2-16 空壓系統台數控制示意圖

## (二)變頻器在鼓風機之節能應用

鼓風機於服務業應用在大型建物的汙廢水預處理，提供生物處理所需的氧氣、攪動廢水等，由於其生活汙廢水排放量大，通常在開發之初便要求需完成一級(攔汙、沉沙、混凝、浮除)或二級(好氧生物)處理方能排放至建築之外，甚至要求需進行雨水/廢水回收再生之三級處理，流程如圖 2-17 與 2-18 所示，詳細的廢水處理流程在此不細談，讀者有概略認知即可。

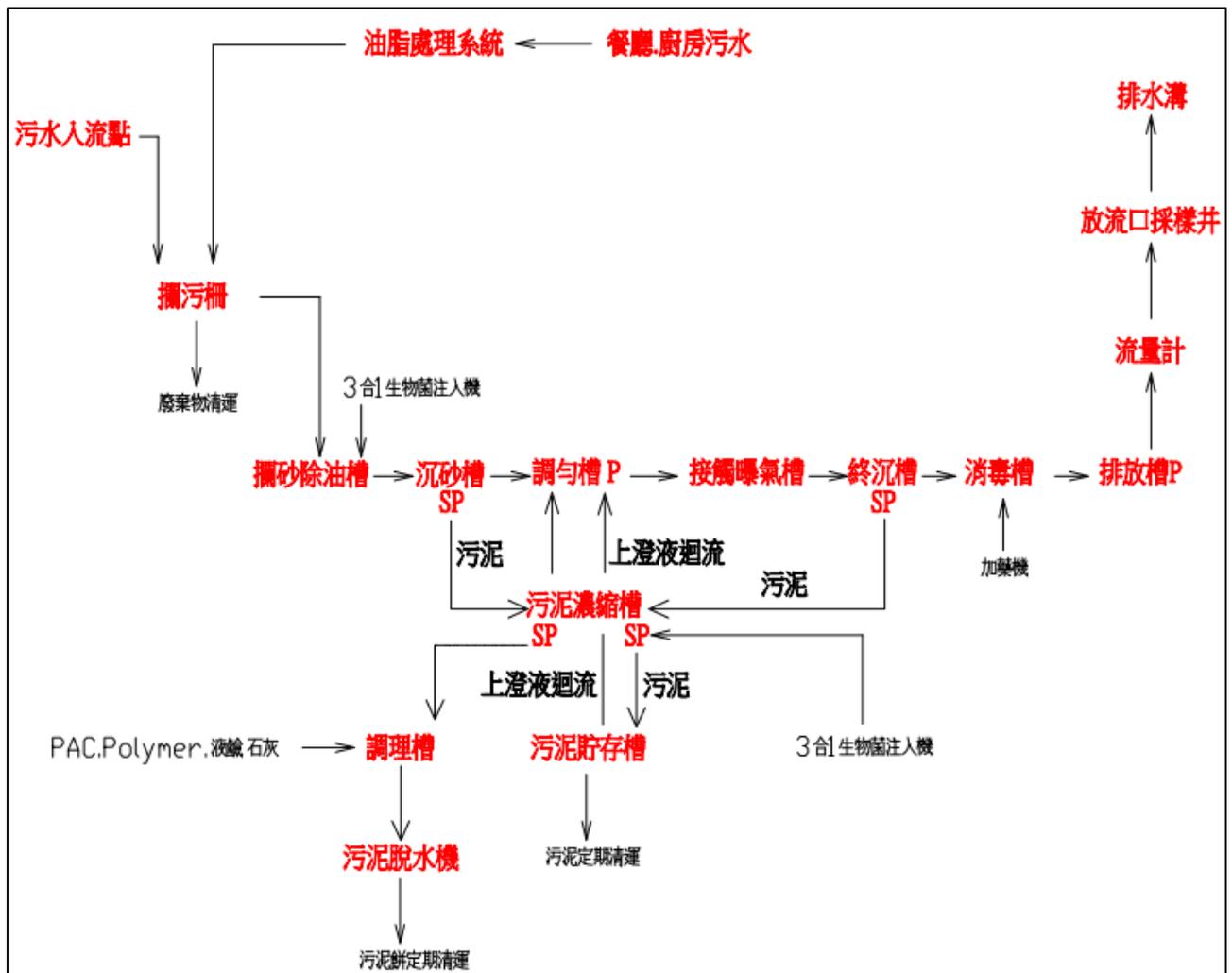


圖 2-17 汙水回收與排放流程示意圖【32】

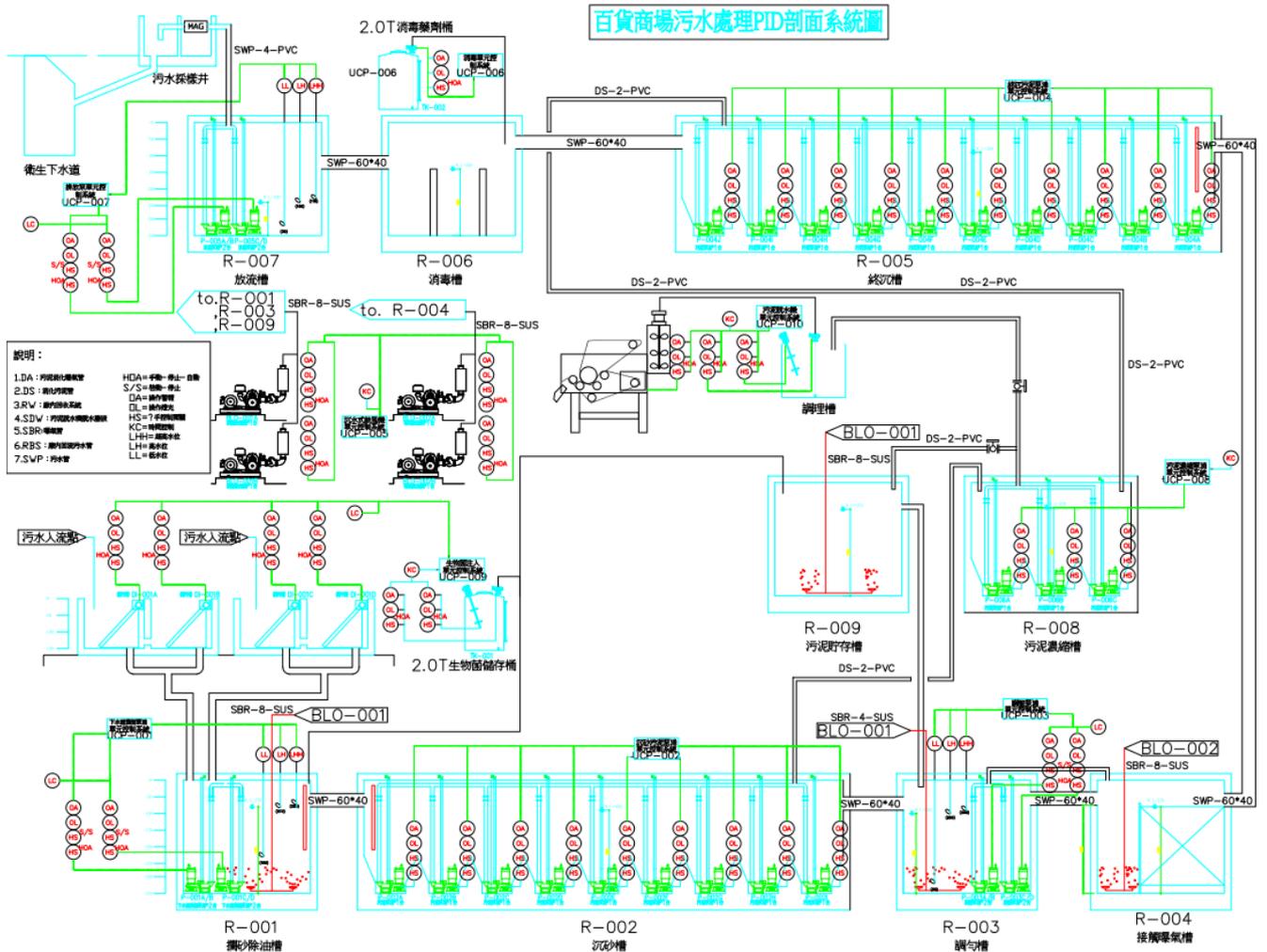


圖 2-18 污水處理流程示意圖【32】

汙廢水處理的過程，從興建之初會預估需處理的水量、水質等，進而規劃出前置槽(坑)、除油攔汙槽(坑)、沉澱槽(坑)、曝氣槽(坑)、終沉槽(坑)..等，而槽與槽之間使用沉水泵進行水處理的傳遞及運行，而過程各槽體視功能性不同，例如初期處理沉澱時間、二級生物處理所需曝氣量/時間等，會讓系統有足夠的沉澱及運轉時間，然而設計(假設)條件與營運(實際)階段多少有所不同，同時設計處理量多以最大量加上安全係數去規劃。

因此各槽/處理設備運轉時間並非不能調整，而是在不同的營運階段/負載下，請廠商取水樣評估處理設施合理的運轉時間與參數；以二級生物處理為例，池內透過細菌與微生物分解水中有機物，曝氣的目的是為了攪動水池

與提供合適的溶氧量，透過魯氏鼓風機與送風管把空氣打入池內，溶氧量太高徒增電費而沒有效果，溶氧太低則使細菌轉為厭氧發酵(多採好氧生物處理，異味低)。因此可委由專業汙廢水廠商定期檢視各池運轉情形與微調設定參數，以達符合放流標準與避免能源過度浪費，如圖 2-19、2-20 所示。

B2. 汙水機房污水處理盤系統						D. Pump運轉/停止時間監視			
C. 運轉監視與異常訊號						運轉分鐘	運轉超時	停止分鐘	停止超時
編號	目標狀態	目標監視	手自動	過載跳脫異常					
調整鼓風A	Stop	正常	正常	Normal	X46調整鼓風機A過載	180	正常	149	正常
調整鼓風B	Run	正常	正常	Normal	X47調整鼓風機B過載	149	正常	180	正常
曝氣鼓風A	Run	正常	正常	Normal	X50曝氣鼓風機A過載	141	正常	201	正常
曝氣鼓風B	Stop	正常	正常	Normal	X51曝氣鼓風機B過載	201	正常	141	正常
調整泵A	Stop	正常	正常	Normal	X52調整泵A過載	29	正常	80	正常
調整泵B	Run	正常	正常	Normal	X53調整泵B過載	34	正常	118	正常
沉澱汙泥A	Stop	正常	正常	Normal	X54轉沉汙泥泵A過載	583	正常	1275	正常
沉澱汙泥B	Stop	正常	正常	Normal	X55轉沉汙泥泵B過載	582	正常	107	正常
沉澱汙泥C	Stop	正常	正常	Normal	X56轉沉汙泥泵C過載	53	正常	47	正常
沉澱汙泥D	Stop	正常	正常	Normal	X57轉沉汙泥泵D過載	53	正常	626	正常
濃縮汙泥A	Stop	正常	正常	Normal	X60濃縮汙泥泵A過載	668	正常	718	正常
濃縮汙泥B	Run	正常	正常	Normal	X61濃縮汙泥泵B過載	630	正常	844	正常

圖 2-19 汙水機房狀態監視系統【32】

現場汙廢水槽監視盤系統(B3層)						汙水Pump 運轉時間監視				揚水Pump 運轉時間監視			
編號	單次 S	累計 hr	次數	max S	警報	編號	單次 S	累計 hr	次數	max S	警報		
P1-1	0	172.49	81	13000	正常	P1-1	0	172.49	81	13000	正常		
P1-2	0	7.14	6	13000	正常	P1-2	0	7.14	6	13000	正常		
P1-3	5476	6.09	36	1800	異常	P1-3	5476	6.09	36	1800	異常		
P1-4	328	16.22	199	1000	正常	P1-4	328	16.22	199	1000	正常		
P1-5	0	5.10	94	1000	正常	P1-5	0	5.10	94	1000	正常		
P2-1	0	0.26	5	1000	正常	P2-1	0	0.26	5	1000	正常		
P2-2	0	0.07	6	1000	正常	P2-2	0	0.07	6	1000	正常		
P2-3	522	39.00	266	2500	正常	P2-3	522	39.00	266	2500	正常		
P2-4	0	3.68	22	1000	正常	P2-4	0	3.68	22	1000	正常		
P2-5	751	38.80	194	1200	正常	P2-5	751	38.80	194	1200	正常		
P2-6	711	28.15	101	1200	正常	P2-6	711	28.15	101	1200	正常		
P2-7	773	137.80	735	1200	正常	P2-7	773	137.80	735	1200	正常		
P2-8	0	0.00	3	1000	正常	P2-8	0	0.00	3	1000	正常		
P3-1	0	0.98	16	1000	正常	P3-1	0	0.98	16	1000	正常		
P3-2	995	52.97	174	1500	正常	P3-2	995	52.97	174	1500	正常		
P3-4	0	0.03	5	1000	正常	P3-4	0	0.03	5	1000	正常		
P4-1	813	605.6	844	5400	正常	P4-1	813	605.6	844	5400	正常		
P5-1	0	23.80	11	27000	正常	P5-1	0	23.80	11	27000	正常		
P5-2	0	275.79	22	60000	正常	P5-2	0	275.79	22	60000	正常		
P6-1	0	0.00	2	1000	正常	P6-1	0	0.00	2	1000	正常		
P6-2	0	0.01	2	1000	正常	P6-2	0	0.01	2	1000	正常		
P6-3	0	17.91	10	14000	正常	P6-3	0	17.91	10	14000	正常		
P6-4	0	0.01	2	1000	正常	P6-4	0	0.01	2	1000	正常		
P7-1	0	602	79	3800	正常	P7-1	0	602	79	3800	正常		

圖 2-20 汙水泵浦超時運轉預警及狀態監控系統【32】

## 參、變頻器應用績效實例

### (一) 中央空調更新汰換與變頻控制



圖 3-1 學校汰換冰水主機、周邊設備並導入變頻控制之節能效益【40】



圖 3-2 醫院汰換冰水主機、周邊設備並導入變頻控制之節能效益【40】

## (二) 變頻空壓機汰換效益



圖 3-3 採用磁浮離心式(變頻)冰水主機、變頻空壓機之節能效益【40】

## (三) 電梯電力回生節能效益【36】

案例 1：內湖某辦公大樓

馬達容量 (kW)	電壓 (V)	電流 (A)	頻率 (Hz)	轉速 (rpm)	行程
18.5	275	50	45	1327	B3~9F
					
<p>電梯回生電能：26.8%</p>					

案例 2：某國立師範大學

馬達容量 (kW)	電壓 (V)	電流 (A)	頻率 (Hz)	轉速 (rpm)	行程
15	170	64.9	33.3	961	B1~10F
					
<p style="text-align: center;">電梯回生電能：20.4%</p>					

案例 3：某百貨公司客用電梯

馬達容量 (kW)	電壓 (V)	電流 (A)	頻率 (Hz)	轉速 (rpm)	行程
24	380	51	40	1184	B5~7F
					
<p style="text-align: center;">電梯回生電能：31%</p>					

案例 4：台北市某政府辦公大樓

馬達容量 (kW)	電壓 (V)	電流 (A)	頻率 (Hz)	轉速 (rpm)	行程
29	380	115	50	1450	B2~12F
					
<p style="text-align: center;">電梯回生電能：28.5%</p>					

## 肆、參考文獻

- [1] 台灣電力股份有限公司(2023)，電網供電資訊，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=211>。
- [2] CH.Tseng. (2023), AC Light Dimming. Retrieved November 22, 2023, from <https://chtseng.wordpress.com/2015/12/31/ac-dimming-docx/>
- [3] 臺北市立內湖高級工業職業學校(2023)，降壓啟動電路，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：  
<http://www3.ee.nihs.tp.edu.tw/wiring/content2/plc/base/ydstart.htm>
- [4] 鼎力綠色科技有限公司(2023)，三相交流電感馬達的構造，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：[http://www.igreentech.url.tw/equipment\\_02.html](http://www.igreentech.url.tw/equipment_02.html)
- [5] 台灣東方馬達股份有限公司(2023)，令人大開眼界的無刷馬達，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：  
[https://www.orientalmotor.com.tw/om/knowledge/uroko\\_bl/bl01.html](https://www.orientalmotor.com.tw/om/knowledge/uroko_bl/bl01.html)
- [6] 財團法人台灣綠色生產力基金會(2008)，變頻器應用 Q&A 節能技術手冊。
- [7] 維基百科(2023)，脈衝寬度調變，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：  
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/脈衝寬度調變>
- [8] CSDN - 专业开发者社区，SVPWM 的简单讲解与 Simulink 仿真，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：  
<https://blog.csdn.net/wqsdqw/article/details/117386238>
- [9] 翰林雲端學院，國中理化 - 電動機，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：  
<https://www.ehanlin.com.tw/app/keyword/國中/理化/電動機.html>
- [10] 電源設計技術資訊網站 TechWeb，馬達的種類與分類，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：  
<https://techweb.rohm.com.tw/product/motor/motor-driver/motor-driver-basic/12216/>
- [11] 梁賢達、黃慧容(2011)，電工機械 II，勁園台科大圖書
- [12] testbook. (2023). What happens if load goes increasing of an Induction Motor? Retrieved November 22, 2023, from  
<https://testbook.com/question-answer/what-happens-if-load-goes-increasing-of-an-inducti--61ff46921a719d2de5188e90>
- [13] Stephen J. Chapman(2013)，電機機械基本原理，東華書局。
- [14] 汪永文、劉啟欣(2010)，電工機械 II，龍騰文化。

- [15] 陳盛基、林英智、徐銘懋、胡永柟，電動代步車之永磁直流無刷馬達設計分析與性能量測，第三十一屆電力研討會，第 1403-1407 頁，民國 99 年 12 月。
- [16] 國家標準(CNS)網路服務系統，CNS14400，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：[https://www.cnsonline.com.tw/?node=search&locale=zh\\_TW](https://www.cnsonline.com.tw/?node=search&locale=zh_TW)
- [17] CTIMES:電子產業社群平台-元件、次系統、自動控制，為大功率三相 AC 馬達選擇和應用機電接觸器，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：<https://www.ctimes.com.tw/DispArt-tw.asp?O=HK64P7YNCJUARASTDS&U=OFPC>
- [18] 工業技術研究院 綠能與環境研究所(2010)，高效率馬達節能效益。
- [19] F. Blaschke, 'The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTORclosed loop control system for rotating field machines,' Siemens Review, 34,pp.217-220, 1972.
- [20] Hal 的部落格，磁場導向控制(Field Oriented Control)\_FOC 發展與原理概論，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：<https://blog.udn.com/hal9678/6714149>
- [21] J.N. Nash, "Direct torque control, induction motor vector control without an encoder,"IEEE Trans. on Ind. Application, vol. 33, no. 2, pp. 333-341, 1997.
- [22] M. Depenbrock (inventor), ABB (Assignee), "Direct-self control of the flux and rotarymoment of a rotary-field machine," US Patent 4,678,248, 1987.
- [23] 維基百科(2023)，模型預測控制，查詢日期：2023 年 11 月 22 日，檢自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/模型預測控制>
- [24] Basics of model predictive control. (2023).Retrieved November 22, 2023, from [https://www.do-mpc.com/en/latest/theory\\_mpc.html](https://www.do-mpc.com/en/latest/theory_mpc.html)
- [25] What is Model Predictive Control ? (2023). Retrieved November 22, 2023, from <https://www.mathworks.com/help/mpc/gs/what-is-mpc.html>
- [26] E. G. Pita, Air conditioning principles and systems, Prentice-Hall, pp. 293, 3rd Edition,1998.
- [27] 林延彥，2003，冰水系統運轉模式節能分析，國立台北科技大學研究所碩士論文。
- [28] 變頻器諧波的產生及抑制方法，查詢日期：2023 年 11 月 29 日，檢自：[https://www.cne.com.tw/tw/Problem\\_detail/34/generate-harmonics](https://www.cne.com.tw/tw/Problem_detail/34/generate-harmonics)

- [29] 什麼是諧波(Harmonic)?何謂總和諧波失真率(THD)，查詢日期：2023 年 11 月 29 日，檢自：  
[https://www.starway.com.tw/zh/knowledge\\_detail/?id=82](https://www.starway.com.tw/zh/knowledge_detail/?id=82)
- [30] 電力用電容器設備之諧波(Harmonic)對策，查詢日期：2023 年 11 月 29 日，檢自：<https://www.yc-capacitor.com/technical04.html>
- [31] 財團法人台灣綠色生產力基金會，2008，空調系統管理與節能手冊。
- [32] 財團法人台灣綠色生產力基金會，2022，購物中心節能技術手冊。
- [33] 盛大電梯企業股份有限公司，2016。
- [34] 誠岱機械廠股份有限公司產品型錄，2016 年。
- [35] 日本電產株式會社網站，2016 年。
- [36] 財團法人台灣綠色生產力基金會，2016，電梯電力回生裝置節能應用手冊。
- [37] 泰盛企業有限公司，法國 CNIM 之電扶梯節能設計方式？查詢日期：2022 年 11 月 8 日，檢自：<http://www.tisheng.com.tw>
- [38] 財團法人中技社節能技術發展中心，2000，壓縮空氣供氣系統節能手冊。
- [39] 工業技術研究院 能源與資源研究所，壓縮空氣系統能源查核及節約能源案例手冊。
- [40] 能源技術服務業資訊網，節能績效保證成功案例，查詢日期：2023 年 11 月 30 日，檢自：<https://escoinfo.tgpf.org.tw/Page/SuccessCase.aspx>