

電梯電力回生裝置節能應用 技術原理解說

練光祐 教授

國立臺北科技大學電機系

kyliau@ntut.edu.tw



財團法人

台灣綠色生產力基金會
Taiwan Green Productivity Foundation

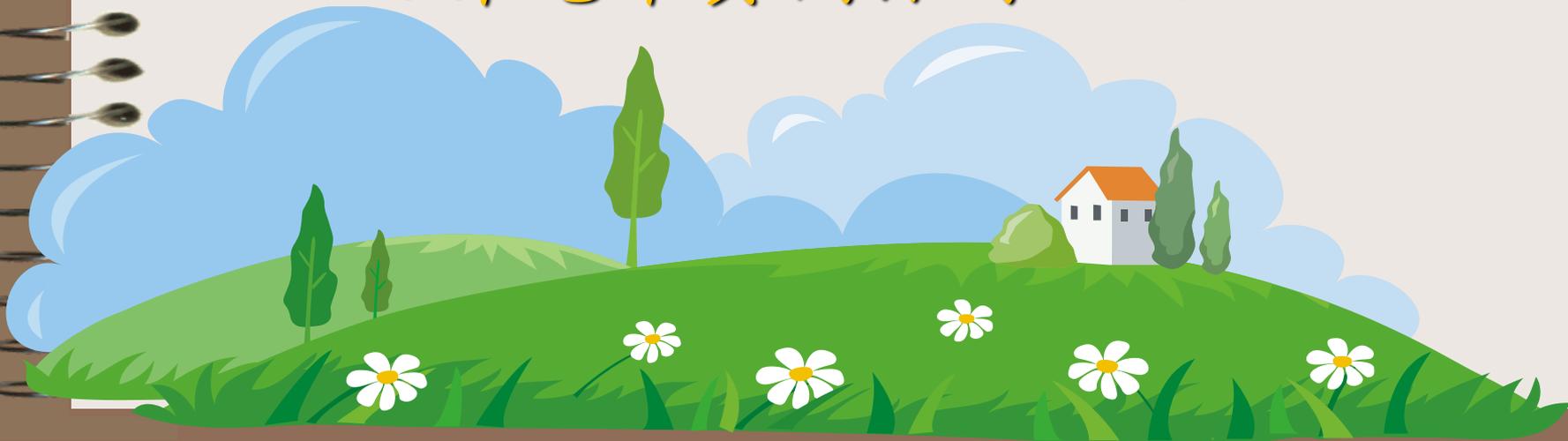
主辦單位：

指導單位： 經濟部能源局

大綱



- 一. 電梯節能的重要性
- 二. 電梯原理概要
- 三. 電梯電力回生技術
- 四. 節電率與回生電能比
- 五. 節電率實例探討一 & 二



電梯節能的重要性

提高電梯能效極為重要

- 依住商大用戶104年統計資料，電梯(含電扶梯)用電占建築整體用電平均約4.54%(約6.8億度電)，僅次於空調、照明及事務設備用電。
- 非生產性質能源大用戶用電分布平均統計圖

建築物 用途分類	空調設備	照明設備	冷凍冷藏設備	事務設備	送排風設備	給水污水設備	電梯設備	其它設備
學校	45.72	26.38	3.42	8.34	2.58	3.64	3.73	6.18
辦公大樓	48.3	20.51	1.13	9.46	4.39	3.22	6.76	6.23
醫院	49.65	17.88	4.12	6.41	5.46	3.53	5.28	7.67
量販店	40.04	20.64	17.13	3.04	4.41	3.29	5.96	5.47
百貨公司	44.6	28.23	4.3	4.8	4.6	3.22	5.47	4.79
旅館	46.19	21.03	7.29	3.65	4.73	4.82	5.51	6.78
政府機關	43.08	18.63	1.7	9.24	4.43	3.91	6.69	12.31
車站及軌道	19.12	7.28	0.33	1.87	3.27	1.82	3.62	62.68
電信網路機房	37.87	7.98	0.07	5.77	1.18	1.27	1.72	44.15
研究機構	42.97	13.05	7.32	6.8	4.09	2.94	1.63	21.21
展覽館	52.28	20.58	1.8	6.66	2.92	2.85	2.69	10.22
複合式商場	40.67	28.06	3.71	2.44	3.89	4.54	7.12	9.58
航空站	47.14	28.21	0.96	5.88	9.14	2.64	2.8	3.23
平均	42.89	19.88	4.10	5.72	4.24	3.21	4.54	15.42

政府推廣電梯電力回生裝置的措施

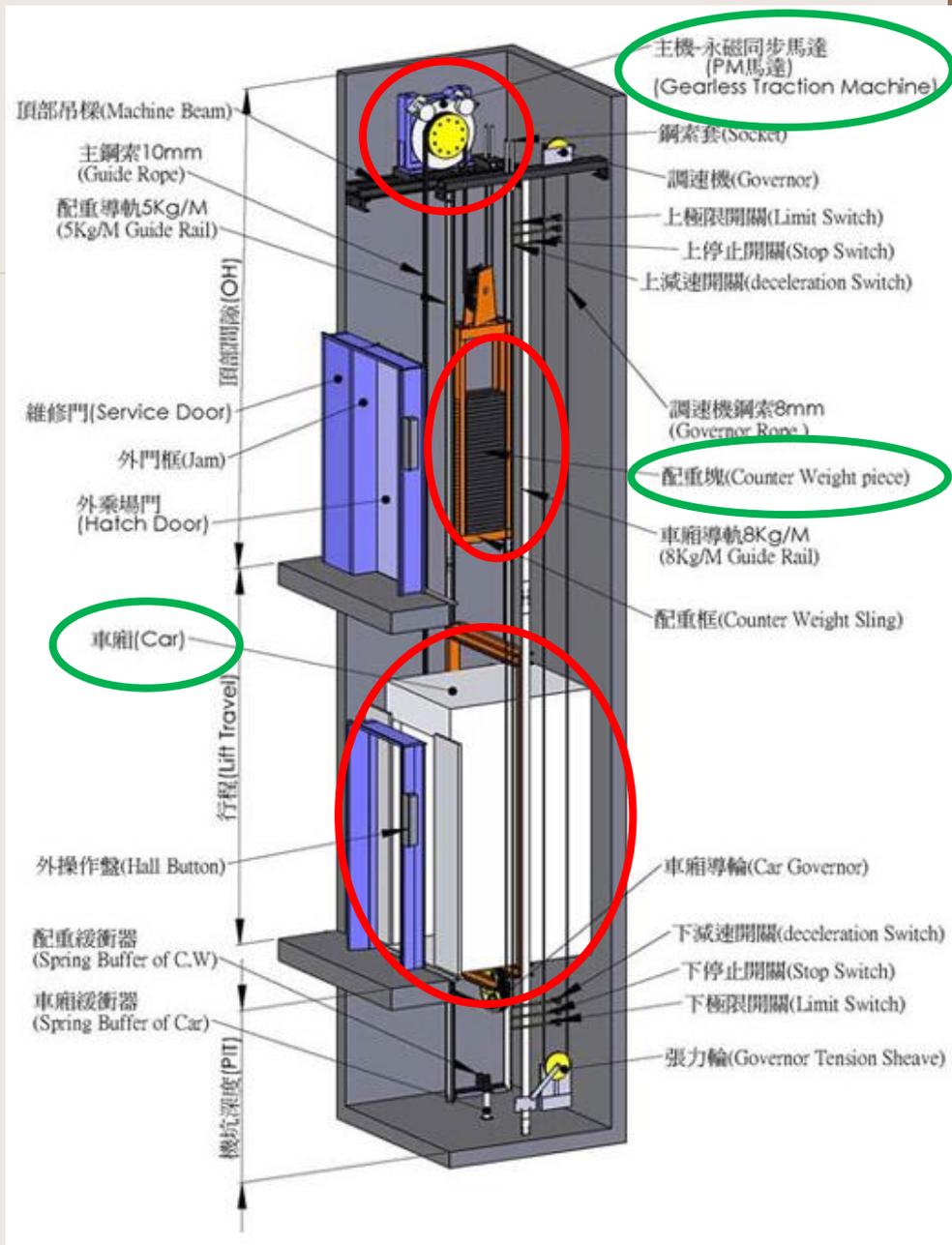
- 內政部建築研究所在民國92年就已經發展了智慧建築評估系統，符合該系統所設訂各項基準的新建建築物，可申請頒發「**智慧建築標章證書**」。
- 功能選項指標群-節能管理部分，電梯電力回生裝置可以節能技術及再生能源設備之鼓勵項目取得分數。
- 以部分補助之精神協助各政府單位於系統整合應用項目導入電梯電力回生裝置增設安裝。

電梯原理概要

電梯的構造

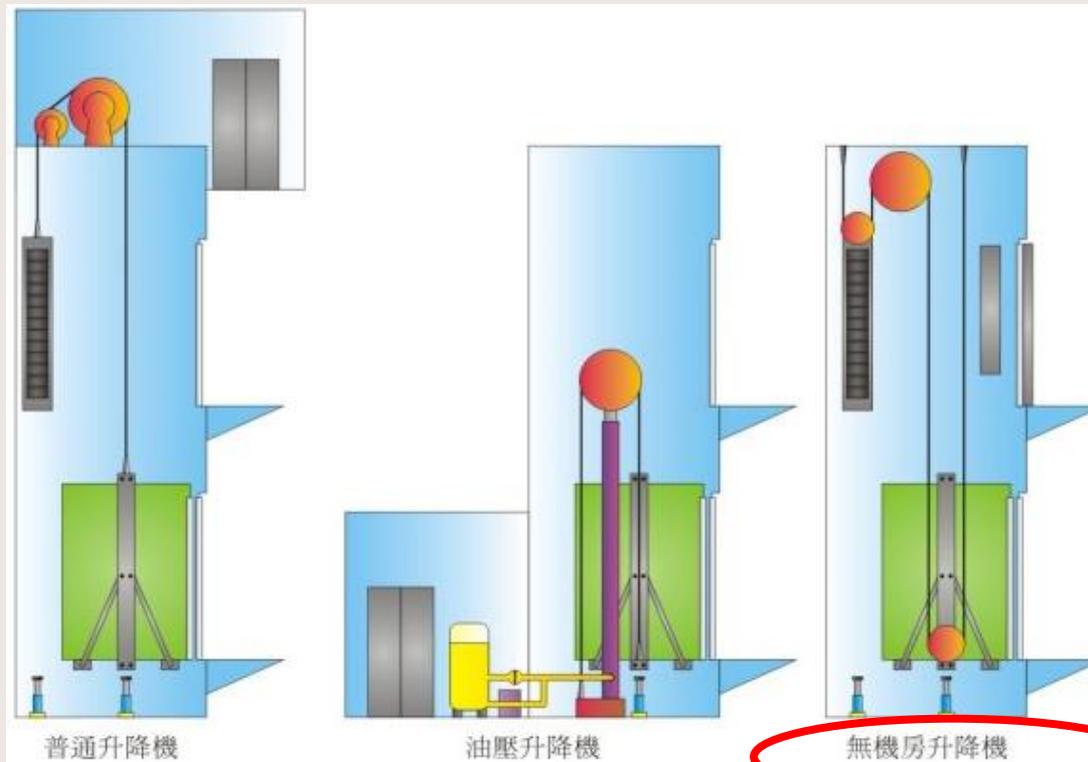
一般人常把電梯供搭乘用的車廂(裝載人、物的車廂室部份)逕稱為電梯；但電梯整體上應包含如右圖所列全部。它是由數十種類機械與電機物件所構成的，有複雜且精密的電機控制單件和機械構件。

近年來電梯大多採用永磁同步馬達，因其具有效率高、散熱容易、輸出轉矩大等優點，搭配變頻控制技術，使電梯達到高效率以及高性能。



電梯分類示意圖

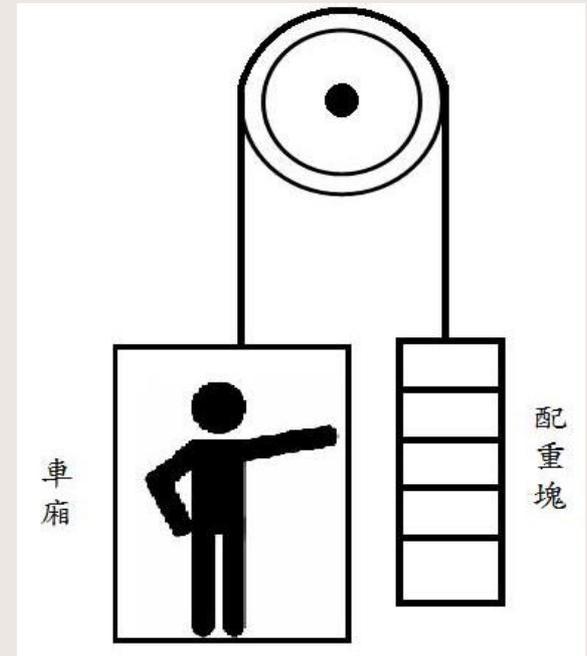
電梯有許多種分類方式，其中**無機房式電梯**(Machine room-less Elevators)其捲揚主機及控制設備都較小型化，且將捲揚主機及控制設備等均改設置在升降通道內或乘場控制面板上，故無需另行建置電梯機房。



電梯的原理

電梯的基本工作原理實為定滑輪組：

- 一側是乘客(Passenger)搭乘的**車廂側**；
- 另外一側是掛鐵塊的**配重側**；
- 以上兩者透過鋼索連結起來，中間滑輪部分代表的即是由馬達驅動之**捲揚機**。



電梯的原理

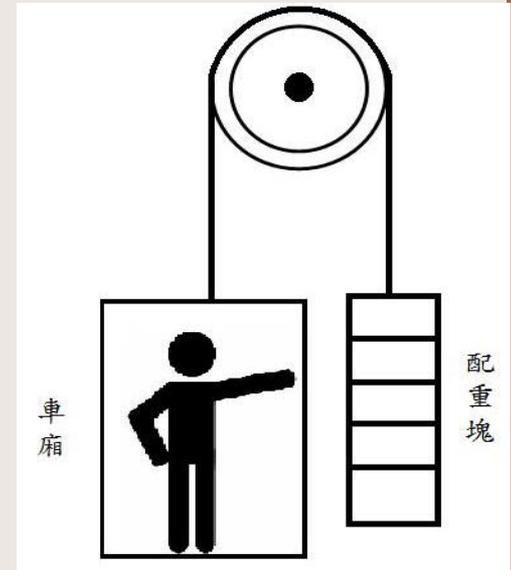
掛鐵塊的配重側重量用以下方式決定：

配重側總重量 = (車廂側空車重量 + 車廂側滿載重量) 除以 2 。

舉個例，假設車廂空車時本身淨重是 500 公斤、最大限重 800 公斤，則配重側總重必須是 $(500+1300)/2 = 900$ 公斤。

這麼訂的好處是可以極小化捲揚機的最大負荷。如上例，可讓捲揚機的最大負荷從 1300 公斤變小為 400 公斤。

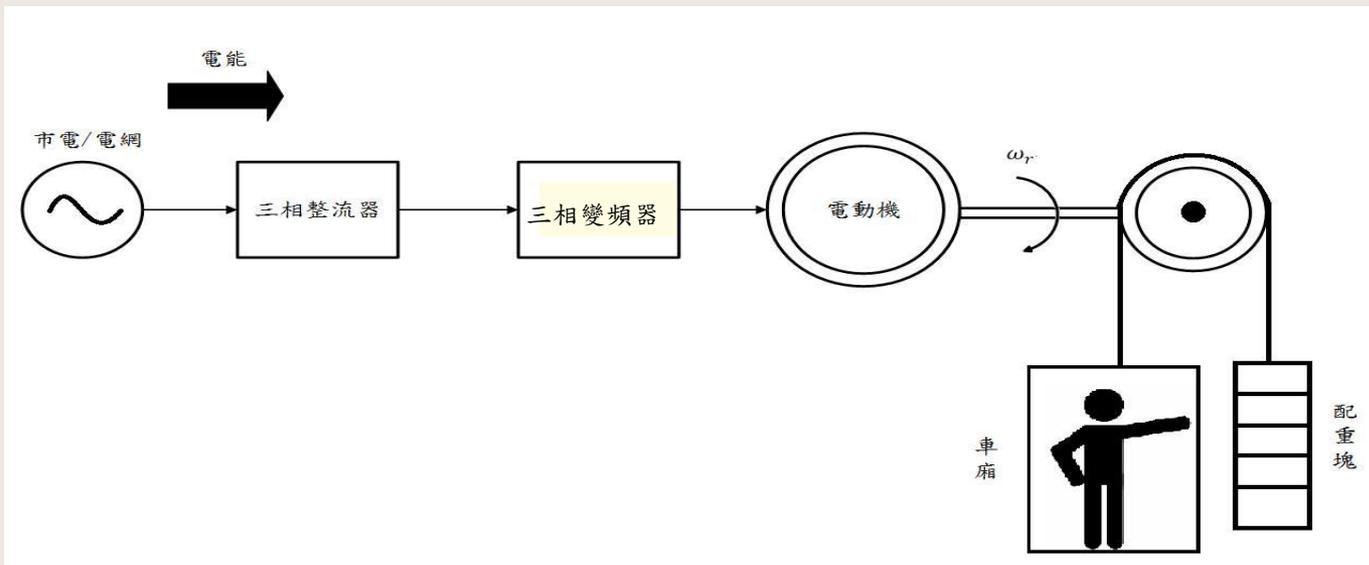
當驅動系統的負荷容量變小時，有助於減少各元件的製造成本及體積大小。



電動機驅動架構

為了提供電動機變速的能力，其驅動系統需提供可變的電壓大小及頻率，因此由公共電源(市電)所提供的定頻(60Hz)、定電壓(220V)的電源並不適合直接驅動電動機。

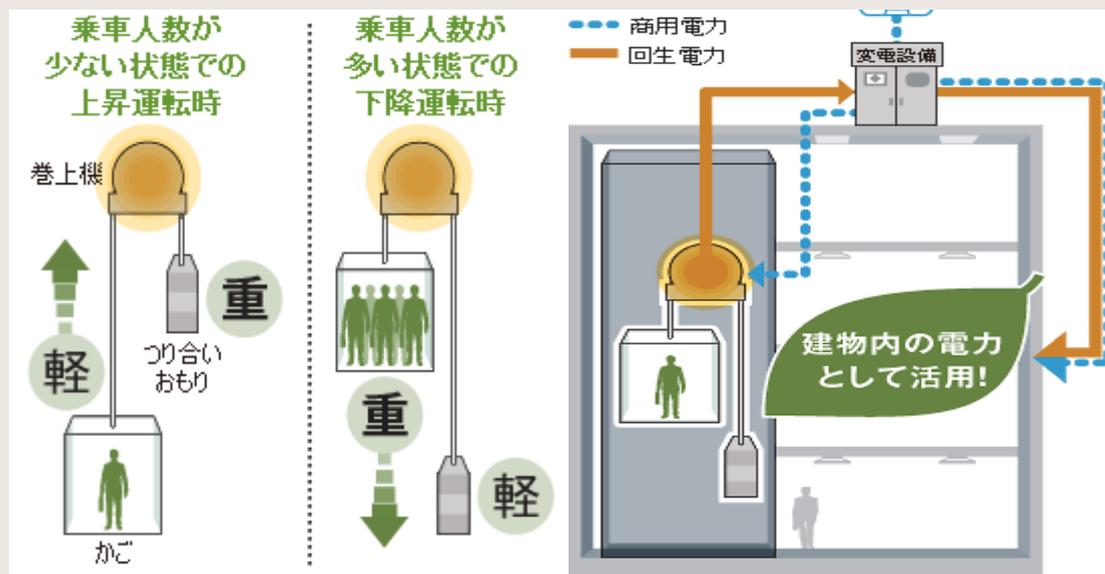
為了獲得適當的驅動電壓，電動機驅動電源包含一個**整流器**將交流轉變成直流，然而，為了降低電動機線圈的電流，通常需要再將整流後的電壓升壓，最後經過**變頻器**，產生電動機需要的交流電壓。



電梯電力回生技術

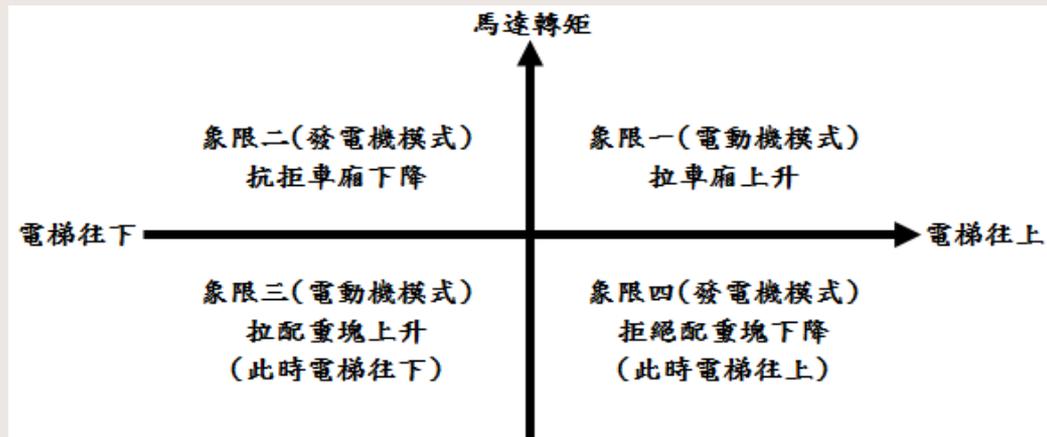
電梯電力回生原理說明

簡單的說，車輛的再生煞車技術乃是將行駛中車子的動能轉換為電能回收；而電梯的電力回生技術原理亦相似，但是它將電梯**輕載往上**或是電梯**重載往下**移動時，所多產生出來的**重力位能差**轉換為電能回收。兩者的物理原理稍有不同，但同樣是利用馬達的發電機模式將機械能轉換為電能方式達到能源回收目的。



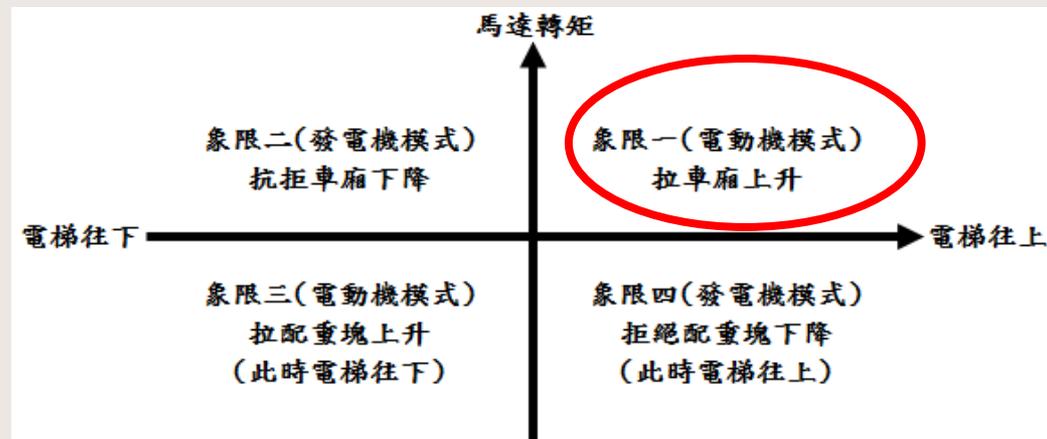
電梯運行四象限

以電梯**往上**或**往下**為橫軸，以馬達因**出力**或**受力**時的**轉矩正負**為縱軸，則電梯運行的情況可劃分為四種狀況：



象限一 電動機模式

車廂重載並由低樓層往高樓層移動，馬達出力轉矩為正向拉車廂上升，會消耗電力。



註：配重塊的重量是以車廂側空車重量加上滿載重量後，除以2來加以設定。另，假設重載上升時的轉矩為正向。

象限二 發電機模式

車廂**重載**並由**高樓層往低樓層**移動，馬達必須抗拒來自車廂的重力牽引，故馬達**受力**而以發電機模式將載重的重力位能差轉為電能輸出。



象限三 電動機模式

車廂輕載並由高樓層往低樓層移動，馬達出力轉矩為負向拉配重塊上升，以使車廂往下。



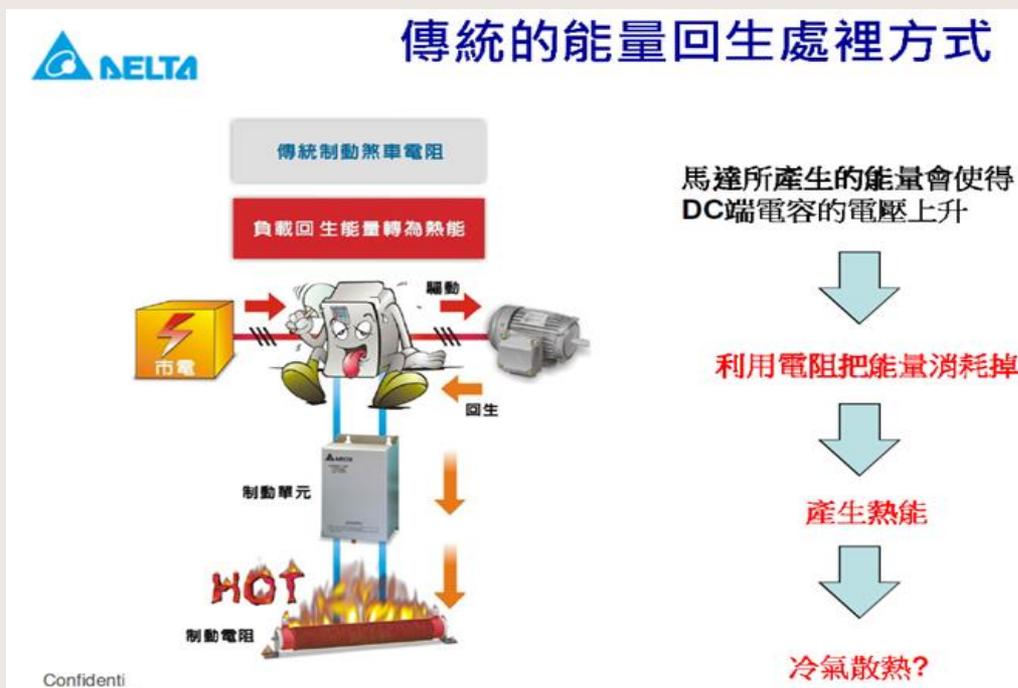
象限四 發電機模式

車廂輕載並由低樓層往高樓層移動，馬達必須抗拒來自配重塊的重力牽引，以發電機模式將配重塊與輕載車廂的重力位能差轉為電能輸出。



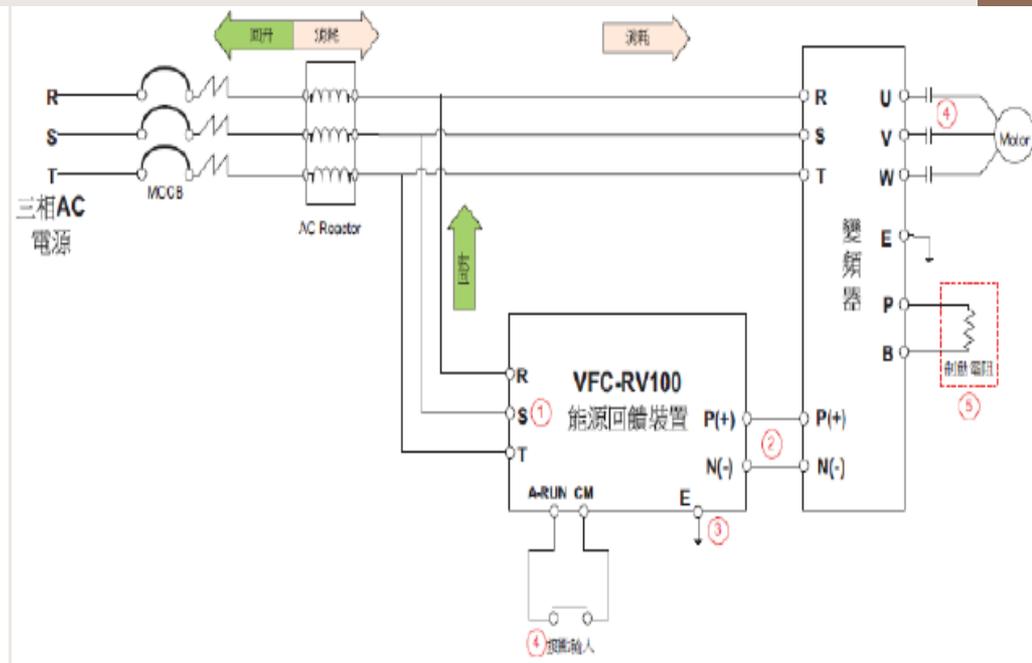
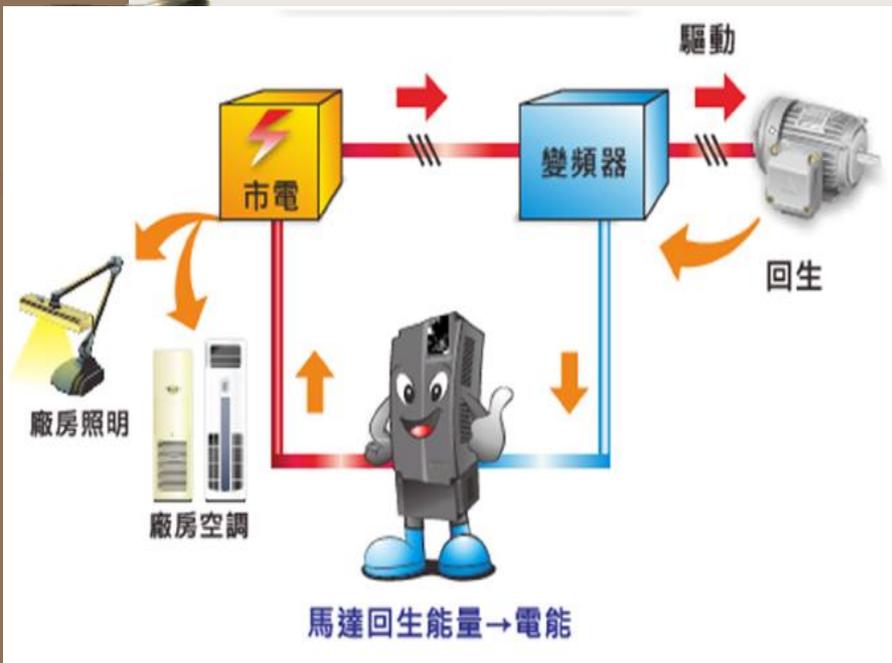
傳統回生能量處理方式

無電力回生裝置的交流變頻器驅動馬達，工作在發電機模式時，還會在啟動瞬間，直流迴路電壓會因瞬間能量突波衝擊過大而超過所設定的直流電壓準位，致使直流迴路電容燒燬。因此傳統上以並聯方式**安裝高瓦數低阻抗的回生電阻，直接釋放回生電能**。此法可解決能量突波的問題，但效率差且將增加額外硬體費用與空間。



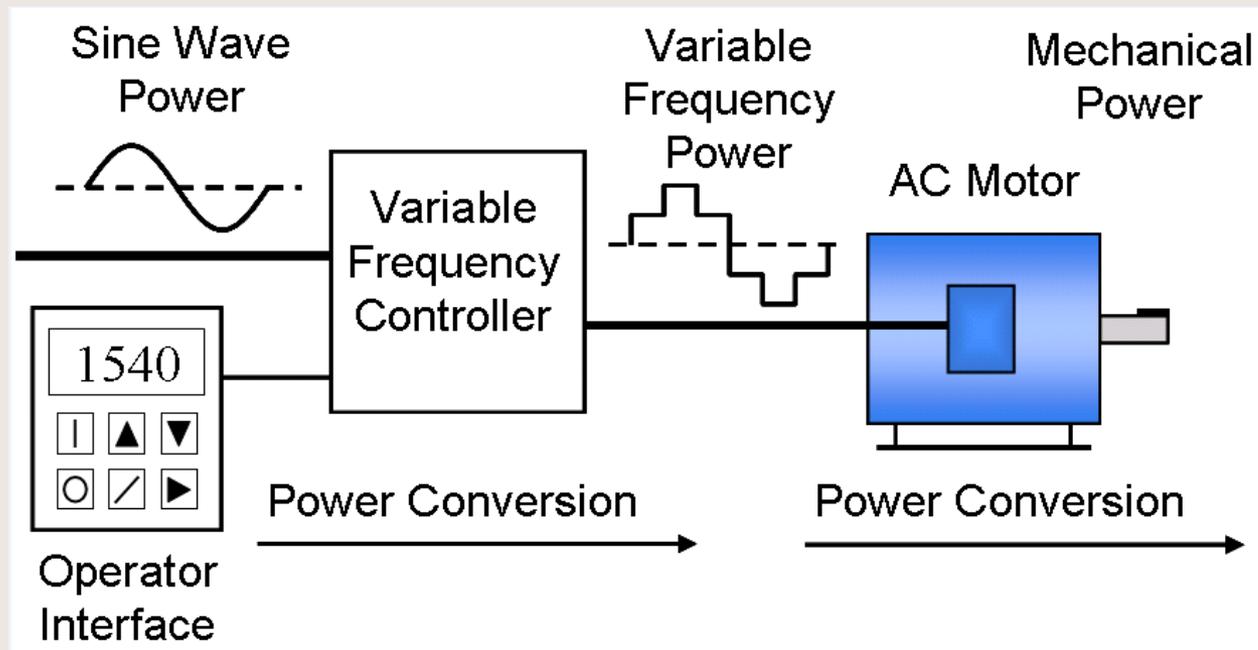
電梯電力回生技術

當電梯工作在第二、第四象限 (即制動或剎車)時，變頻器將重力位能差產生的交流電轉換成為直流電，電梯電能回生裝置則將直流電能轉為三相交流電與市電並網。



變頻器

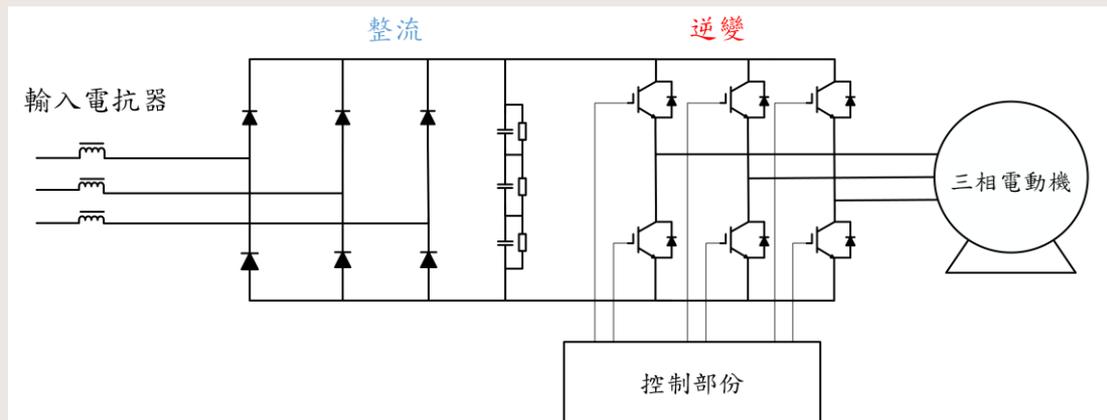
變頻器(**Variable-frequency Drive**)，也稱為變頻驅動器、逆變器(**Inverter**)、**VVVF (Variable Voltage Variable Frequency Inverter**，為日文「可變電壓可變周波數制御」的英語直譯)。變頻器是可調速驅動系統的一種，是應用變頻驅動技術改變交流馬達工作電壓的頻率和幅度，來平滑控制交流馬達速度及轉矩。



變頻器系統運作原理(維基百科)

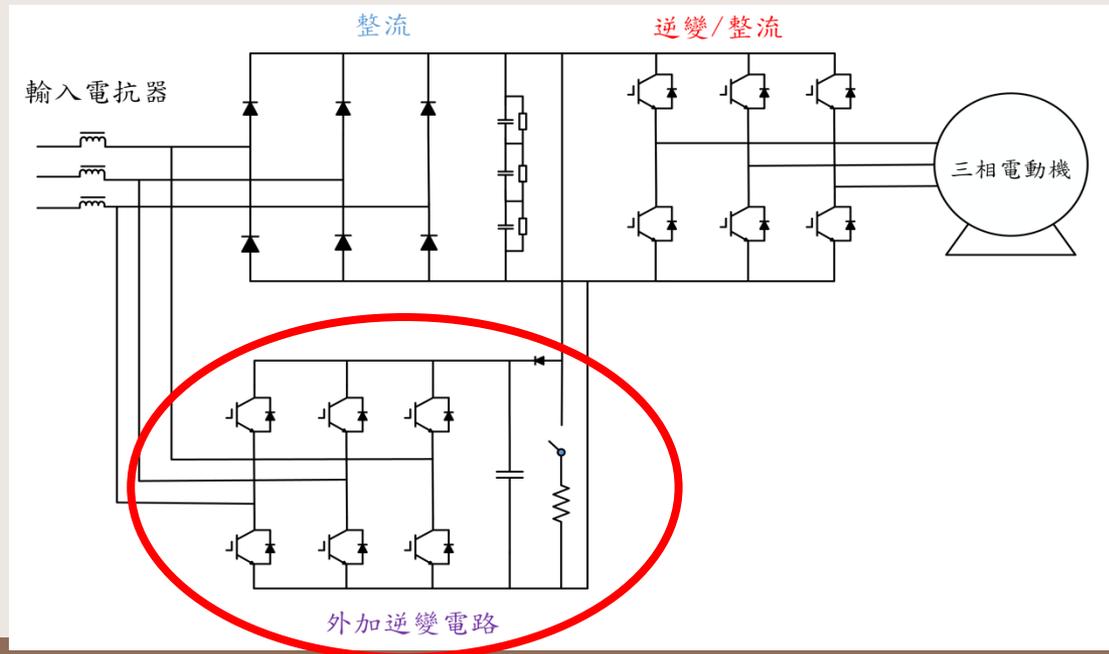
變頻器

變頻器主要分成**控制部分**與**電力驅動**部分。控制部分一般採用DSP為核心的控制架構，以實現相應目的所設計的控制法則。至於電力驅動部分，一般採用二極體整流橋將交流電源轉換成直流跨於主電路電容器上，然後採用IGBT逆變技術，藉控制電路送出六個IGBT閘及控制訊號，將直流電壓切割成三相脈波寬度調變(PWM)的電壓送至電動機。因電動機線圈自身的電感特性自動起到濾波功效，形成三相弦波電流波形，使得電動機能平滑的運轉。簡言之即將直流轉換成電壓及頻率皆可調控的交流電，用以控制交流電動機。



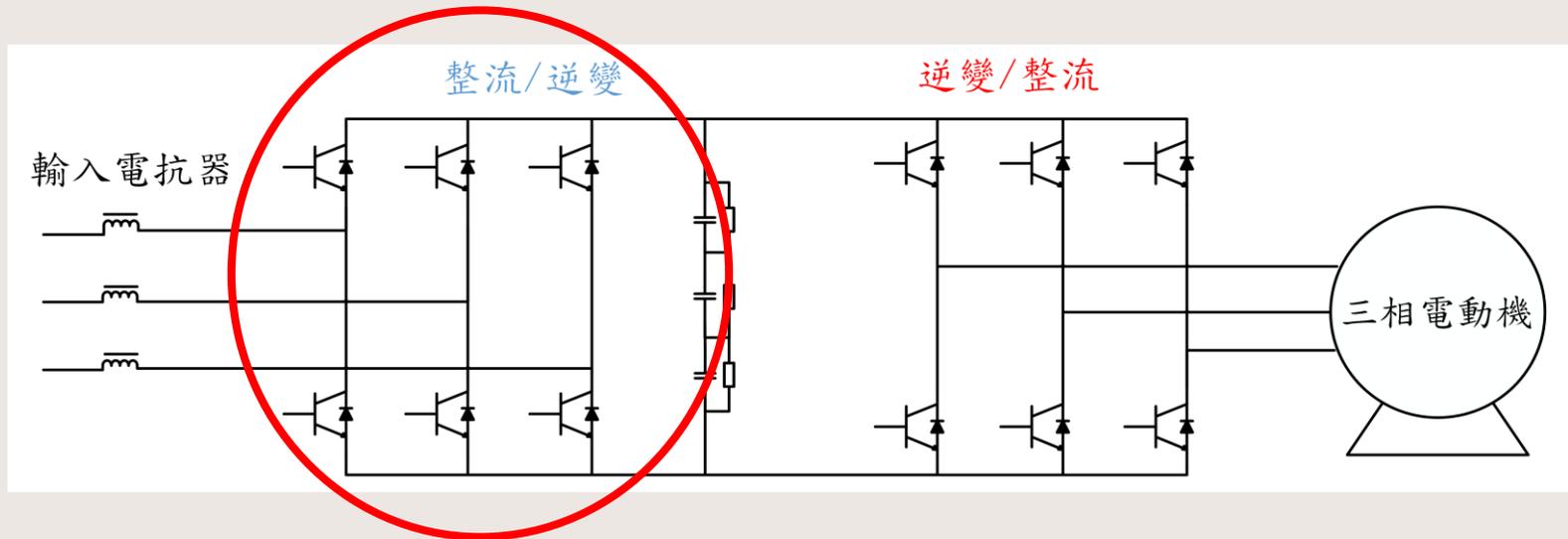
二象限變頻器

- 普通的變頻器大都採用二極體整流橋將交流電轉化成直流，然後採用IGBT逆變技術將直流轉化成電壓頻率皆可調整的交流電控制交流電動機。這種變頻器只能工作在電動狀態，所以稱之為二象限變頻器。
- 二象限變頻器採用二極體整流橋，無法實現能量的雙向流動。
- 可以新增的IGBT功率模組作成整流橋與原二極體整流橋並聯(但方向相反)，實現能量的雙向流動。



四象限變頻器 (Four-Quadrant Power Converter)

採用IGBT功率模組直接替代原整流橋的二極體元件，配合使用高速度、高運算能力的DSP產生PWM控制脈衝，則可以實現能量的雙向流動，可以將電動機回饋產生的能量反饋到電網，達到徹底的節能效果。



節電率與回生電能比

節能指標

安裝電力回生裝置其目的在節省電梯用電，節電率與回生能比是常見的節能指標。節電率如下式：

$$\text{節電率} = \frac{\text{安裝電力回生裝置後所減少的電量}}{\text{安裝電力回生裝置前的用電量}}$$

一次往返循環，一定包含一個電動機運行模式，以及一個發電機運行模式。因此節電率定義式的**分母**：

安裝電力回生裝置前的耗電量 ≈ 電動機行程的耗電量

再來，節電率定義式**分子**：

安裝電力回生裝置後所減少的電量 ≈ 發電機行程所產生的電量

節電率 \approx 回生能比

由上述，可知節電率的近似表示如下：

$$\text{節電率} \approx \text{發電機行程產生的電量} / \text{電動機行程的耗電量}$$

此式的分子與分母可以分別簡稱為回生電量與耗電量，因應這二個簡要的名詞，我們乃重新定義回生電能比如下式：

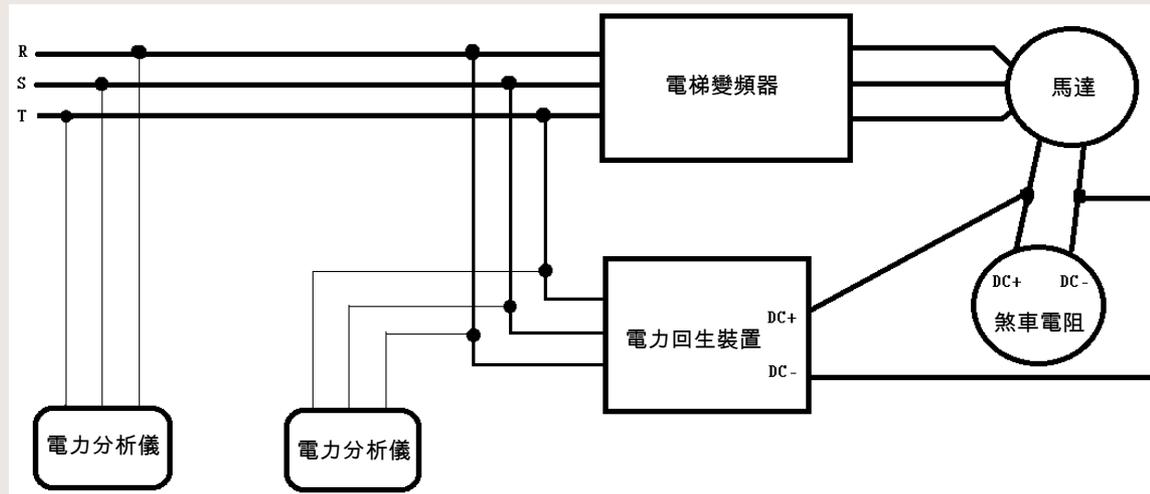
$$\text{回生電能比} = \text{回生電量} / \text{耗電量}$$

- 節電率與回生電能比是二個常見到的術語，經由上述分析，可知二者是十分相近的術語，因此常被交替使用。
- 在大部分情況下，我們要不到安裝電力回生裝置前的耗電量，因此節電率觀念雖然易懂，但不容易精確獲得，故常以回生電能比近似之。

電力回生裝置節能實測方法

運轉參數量測(包括功率因數、電壓、電流、諧波與耗電量之變化)及回生電能之同步量測。

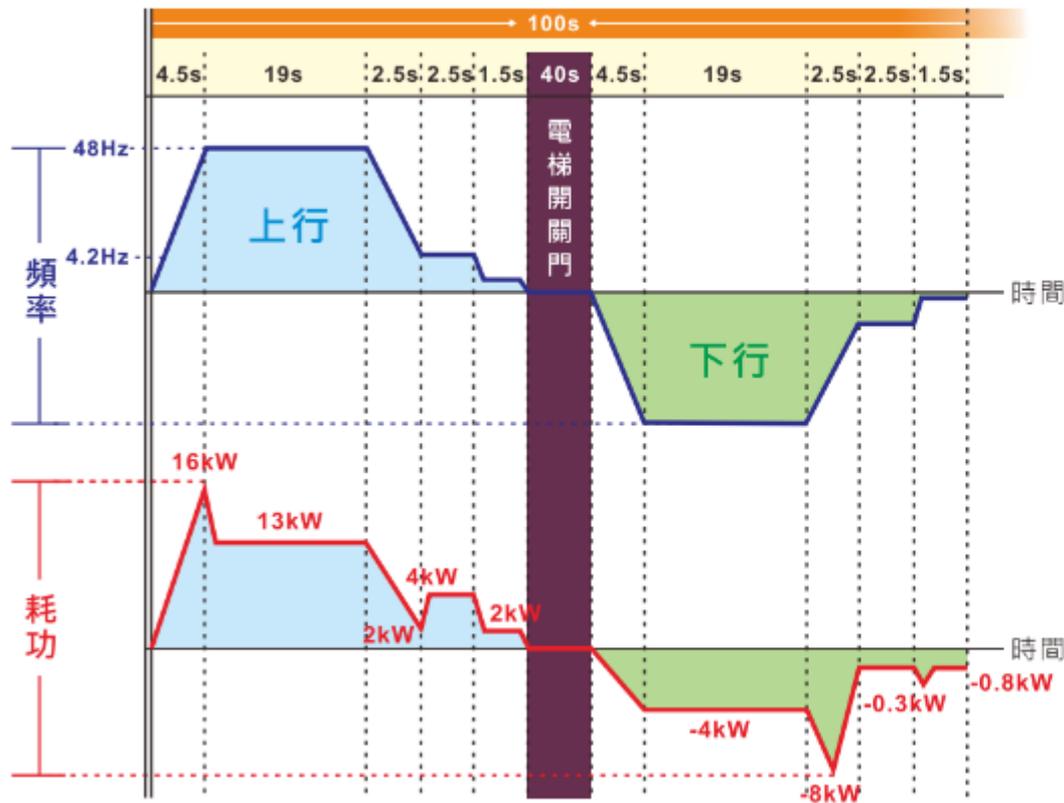
現場電力掛表量測示意圖：



節電率實例探討

節電率實例探討一

■ 電梯



在載重2噸的客梯上，梯速為60m/min，樓層為B1~4樓，採用22kW電機，加裝電能回饋單元，比較空車廂上下5趟的節電率。

使用電能回饋單元	+Whr	360.7
	-Whr	111.1
使用煞車電阻	+Whr	354.2
	-Whr	0

煞車電阻沒有回饋的能量，所以電能回饋單元較

煞車電阻的節電率 $\frac{111}{361} \times 100\% = 30\%$

單趟平均省了 $\frac{111}{5} = 23.2\text{Whr/趟}$ ，

其中單趟來回時間為100秒。

一天工作12小時，一年265工作天，一度電是3.5元

一天可做 $\frac{12(\text{小時/天}) \times 60(\text{分/小時}) \times 60(\text{秒/分})}{100(\text{秒})} = 432 \text{ 趟/天}$

一年就可省

$\frac{22}{1000} (\text{kWhr/趟}) \times 432(\text{趟/天}) \times 265(\text{天/年}) \times 3.5\text{元} = 8903\text{元}$

9,296 !

節電率計算

在載重2噸的客梯上，梯速為60m/min，樓層為B1~4樓，採用22kW電機，加裝電能回饋單元，比較空車廂上下5趟的節電率。

使用電能回饋單元	+Whr	360.7
	-Whr	111.1
使用煞車電阻	+Whr	354.2
	-Whr	0

煞車電阻沒有回饋的能量，所以電能回饋單元較

煞車電阻的節電率 $\frac{111}{361} \times 100\% = 30\%$

單趟平均省了 $\frac{111}{5} = 23.2\text{Whr/趟}$ ，

其中單趟來回時間為100秒。

使用電能回饋的用電量 = $360.7 - 111.1 = 249.6$

使用剎車電阻的用電量 = 354.2

節電率 = 省下的電量 / 本來的用電量

$$= (354.2 - 249.6) / 354.2$$

$$= 104.6 / 354.2$$

$$= 29.53\%$$

單趟平均省了 = $104.6 / 5 = 20.92\text{Whr}$

省下電費

一天工作12小時·一年265工作天·一度電是3.5元

一天可做 $\frac{12(\text{小時/天}) \times 60(\text{分/小時}) \times 60(\text{秒/分})}{100(\text{秒})} = 432 \text{ 趟/天}$

一年就可省

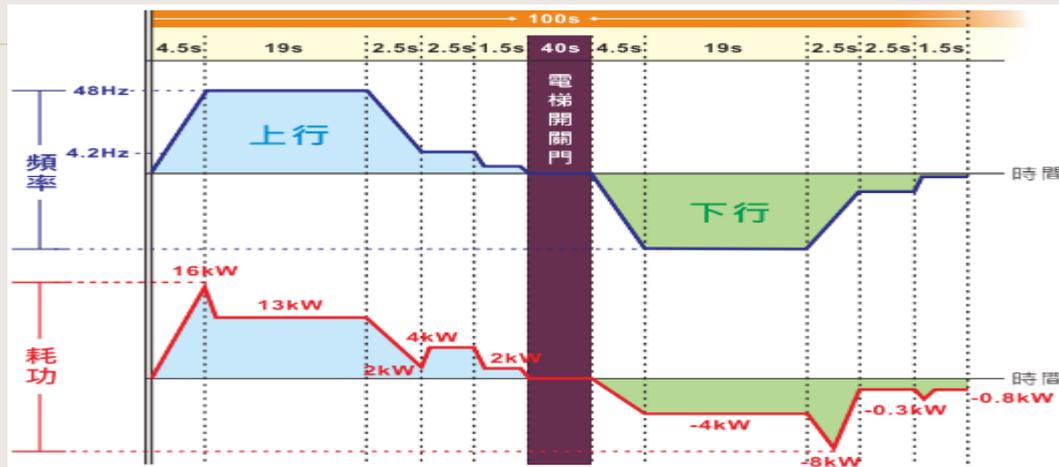
$\frac{22}{1000} \text{ (kWhr/趟)} \times 432(\text{趟/天}) \times 265(\text{天/年}) \times 3.5\text{元} = 8903\text{元}$

9,296 !

$$\begin{aligned} \text{一年省下電費} &= (20.92/1000) \times 432 \times 265 \times 3.5 \\ &= 8382 \text{ 元} \end{aligned}$$

但是注意，這是假設電梯連續不停運轉的前提下，
才會得到一天上下共**432**趟。
實際上的數值會小上許多。

耗功計算



$$\text{上行耗功} = 8 \times 4.5 + 13 \times 19 + 7.5 \times 2.5 + 4 \times 2.5 + 2 \times 1.5 = 314.75 \text{ kW.s}$$

$$5 \text{ 趟上行耗功} = 5 \times 314.75 \times 1000 / 3600 = 437.15 \text{ W.hr}$$

$$\text{下行耗功} = 2 \times 4.5 + 4 \times 19 + (6 + 4.15) \times 2.5 + 0.3 \times 2.5 + 0.8 \times 1.5 = 112.325 \text{ kW.s}$$

$$5 \text{ 趟下行耗功} = 5 \times 112.325 \times 1000 / 3600 = 156.0 \text{ W.hr}$$

註：此運行示意圖標註的是空車廂上下運行情況，則上行應是回生電能的發電機模式，下行是耗能的電動機模式，因此圖形有誤！
只是這誤植不會影響上述之分析與計算結果。

省下電費重新計算

一天工作12小時·一年265工作天·一度電是3.5元

一天可做 $\frac{12(\text{小時/天}) \times 60(\text{分/小時}) \times 60(\text{秒/分})}{100(\text{秒})} = 432 \text{ 趟/天}$

一年就可省

$\frac{22}{1000} (\text{kWhr/趟}) \times 432(\text{趟/天}) \times 265(\text{天/年}) \times 3.5\text{元} = 8903\text{元}$

9,296 !

單趟平均省了 $\sim 156 / 5 = 31.2 \text{ Whr}$

一年省下電費 $\sim (31.2/1000) \times 432 \times 265 \times 3.5$
 $= 12,501 \text{ 元}$

這數值顯然更為吸引人。當考慮每天432趟乃過於高估，兩相抵消之下，則前面計算得到之9,296元或8,382元反而是實際合理的節省電費估計值。

節電率實例探討二

- 以崇友實業股份有限公司電梯試驗塔進行配重差之比較實驗。
- 崇友電梯試驗塔的電梯採用永磁式同步電動機驅動。
- 實驗過程描述如下：首先，於電梯電源端進行掛表量測，並於電能回生裝置回生端掛表同步量測，且電梯採定速 $105\text{m}/\text{min}$ 運轉，共記錄45筆設定行程之運轉耗能及回生電能資料。



現場使用鉛塊改變電梯配重

電梯耗能與回生電能測試結果一覽表

車廂 載重	與配重 重量差	設定 行程 電能	18m (4~8F)	27m (4~10F)	36m (4~12F)	平均電能 (Wh)	回生電能比 (%)
		消耗	回生	消耗	回生	消耗	回生
0%	-50%	消耗	44.5	65.5	86.3	65.43	46.2
		回生	19.9	30.1	40.7	30.23	
25%	-25%	消耗	25.6	37.4	49.3	37.43	24.13
		回生	6.6	8.9	11.6	9.03	
50%	0%	消耗	22.2	32.6	42.2	32.33	8.97
		回生	2.8	2.9	3	2.90	
75%	+25%	消耗	33.7	49.2	64.5	49.13	35.07
		回生	12.2	17.3	22.2	17.23	
100%	+50%	消耗	54.9	81.2	106.3	80.80	47.61
		回生	25.8	38.5	51.1	38.47	

註:每種行程及狀態各運行3次,取3次測試值之平均值為代表數值。

量測結果討論

- 量測結果顯示回生電能依不同設定行程之距離與載重，而有明顯差異。
- 實測結果得知，該電能回生裝置於車廂載重0%及100%時，回生電能比最高，約可達電梯耗能之46.2~47.61%。
- 若車廂載重越接近電梯額定配重(約車廂載重50%)，其回生電能比則明顯越低，僅約8.97%(配重差接近0%時，車廂載重與配重塊之間的重力位能差較小，故馬達產生之回生電能小)。
- 車廂載重差25%、50%、75%時，其淨消耗電能(即消耗電能減去回生電能)分別為28.4、29.4、31.9Wh，三者非常接近，可知在這比較常態運轉的情況下，電梯控制系統的電能轉位能及位能轉電能的轉換效率是較為一致的，而且轉換效率是較高的。
- 當車廂載重0%及100%時，其淨消耗電能分別為35.1與42.3Wh，此時的轉換效率是相對較低的。

A silver metal spiral binding is visible along the left edge of the page, with the wire looping through a series of holes.

謝謝聆聽！