

冷凍冷藏變頻冷凝機組開發

一、前言

冷凝機組(condensing unit, CDU)定義為一種溫度控制設備，其主要功能是将冷媒由氣態冷卻到液態，將能量以熱量的形式排出，然後冷卻的液體通過封閉系統循環，在返回壓縮機時吸收熱量。該單元機組三個主要組件組成，即壓縮機，風扇和冷凝盤管，而其中冷卻盤管即一般所謂之冷凝器。冷凝機組通常與冷凍冷藏、空調、熱泵等系統整合，以進行冷凝散熱之功能，其可分類為氣冷式、水冷式與蒸發式三類，常見之冷凍冷藏氣冷式冷凝機組之樣式如圖 1 所示[1]。



圖 1 常見氣冷式冷凝機組樣式 [1]

依經濟部能源局能源統計[3]，2020 年國內總電力消費量約 2,712 億度電，住商部門占總電力約 36%如圖 2 所示。在過去 5 年所有部門中，服務業部門每年用電量均維持於 470 億度左右，其中零售業每年耗電約 35 億度。以國內食品零售業之耗電而言，國內便利商店冷凍冷藏系統年耗電量約 11 億度，超級市場之冷凍冷藏年耗電量約 7.2 億度，量販店之冷凍冷藏年耗電量約 0.8 億度，冷凍冷藏系統總合年耗電量約 19 億度，在零售業總耗電量已占 50%以上比例(如表 1 所示)，因此業者對於整體節能方案迫切需求。

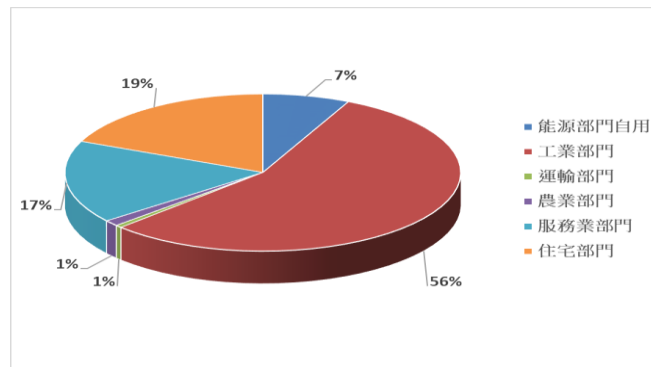


圖 2 國內 2020 年各部門之能耗比例[3]

表1 國內主要食品零售業冷凍冷藏系統耗電情形

商業場所	開店數	平均每店 電力容量(kW)	冷凍冷藏系統 年耗電量(億度)	冷凍/空調 用電比(%)
便利商店	12451	25	11	50/25
超級市場	2,243	80	7.2	70/20
量販店	115	1,200	0.8	20/40

資料來源：工研院綠能所整理 (2021)

國內便利商店與超市之冷凍冷藏系統耗電比例更超過 50%以上，其中冷凍冷藏主要系統均採用定頻冷凝機組，除便利商店之開放櫃系統採用一體式日系變頻 CDU 外，而便利商店後補式(Walk-in) & 前取式(reach-in)冷凍冷藏櫃尚未採用一體式 CDU，而是採用定頻壓縮機組搭配冷凝器外移如圖 3 所示。

由於一般冷凍冷藏定頻系統為配合夏季之高負載需求，通常容量會過大設計，對於因季節變化而產生不同負載，並無法進行系統調控，尤其在冬季低負載時，造成主機啟停 (on-off) 頻率偏高，無法發揮節電效果。國外文獻普遍認為變頻壓縮機與高效率壓縮機對於超市冷凍冷藏系統，屬於較高節能潛力項目，分別具 15%與 12%節能效率[4-6]。



(a)



(b)

圖 3 便利商店之(a)冷凍冷藏櫃與(b)冷凝機組與冷凝器

近幾年便利商店與超市業者均提及冷凍冷藏系統全變頻化之迫切需求(甚至新冷媒系統)，而國內外廠商也已紛紛投入變頻主機開發，其中國外品牌主要為日立[7]、大金[8]、三菱[9]、松下[10]等日系品牌以及艾默生(美國)[11]、丹佛斯(歐洲)[12]等歐美品牌產品，甚至有些國際品牌還特別為國內便利店業者需求，而量身訂做”特規”變頻冷凝機組，以匹配其擴充冷凍冷藏設備之負載容量。國內目前尚無此類變頻品牌技術產品，其原因為國內系統廠商較缺乏冷凍冷藏變頻開發能力與人才，因此國內冷凍冷藏 CDU 主要組裝廠商仍以定頻機種為主。此外，關鍵元件取得成本與貨物稅等問題，亦為國內廠商卻步之因素，導致國內業者僅能選擇國外產品，然而國外產品價格不菲且原始設計未必能適合國內之氣候條件、維修不易，甚至技術支援亦相對缺乏，這些也是國內業者長期所困擾之問題。

由於目前國內便利店正採用與測試中之變頻 CDU 並無公開之相關實測

節能數據，真正之節電效果如何仍不得而知。而國外食品零售業近年來亦開始著重變頻 CDU 節能技術產品開發，丹佛斯 2017 年發表冷庫專用 Optyma™ 變頻冷凝機組如圖 5 所示[12]。該變頻冷凝機組可提供冷庫、食品服務和冷鏈高效可靠的解決方案之一，變頻冷凝機組能效高，性能穩定，工作噪音低且能保證食品安全，智慧化壓縮機和冷凝器風扇控制是優化製冷系統的必備條件。其採用丹佛斯交流變頻器且優化製冷壓縮機、冷凝器和蒸發器的容量控制，可降低能耗 10%~25%，亦即透過容量自動調整與實際外界負載相互匹配方式，以提高整個系統的性能 (COP)，而達到顯著的節能效果。



圖 5 丹佛斯 Optyma™ 冷凝機組 CDU[12]

基於國內業者對於冷凍冷藏全變頻化需求孔急，在國外之相關產品尚無法完全滿足業者之需求之際(包括成本問題)，工研院累積多年之變頻技術研發能量，針對國內便利商店開發國內首台之變頻 CDU，並於同縣市、同品牌便利商店以及同規格之開放式冷藏展示櫃設備，與國內主要日系品牌進行長期能效比較。除希望解決其冷凍冷藏系統高耗電之問題，再提升其整體節電效益外，也能提供業者一套冷凍冷藏系統之完全解決方案(total solution)，以因應未來調整設備規格與國際冷媒系統之變更需求。

二、冷凍冷藏變頻冷凝機組開發

本文所開發之變頻 CDU，在設計階段初期，首先是以 3D 模擬軟體設計各組件之空間優化配置與適當之選擇元件規格乃至散熱機構設計(圖 6)，在確認各元件與管件規格後，透過冷凍冷藏系統試算軟體進行功能評估分析(圖 7)，同時亦規劃安裝相關之溫度壓力感測裝置，以利監測機組運轉時之即時狀態，之後才進行整機組裝與實驗室測試(圖 8)，由於本技術產品屬室外機型，其中測試條件特別比一般 CDU 外氣溫度更嚴苛(43°C)，待完成實驗室測試後則移至實場域執行成效驗證。

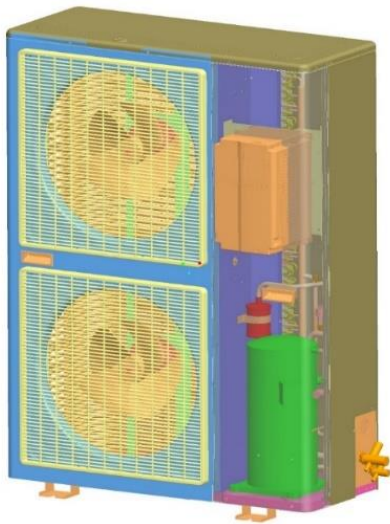


圖 6 變頻冷凝機組 3D 設計圖

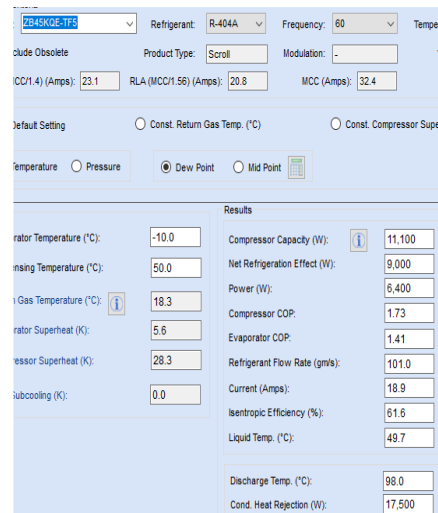


圖 7 CDU 系統性能評估分析



圖 8 於環控實驗室功能測試

本文所開發之變頻 CDU 之變頻控制核心技術，是針對適合國內氣候條件使

用，整合浮動低壓控制技術，可根據系統負載與壓縮機運轉率自動調整而達到節能效果。原則上冷凍冷藏壓縮機之性能曲線在頻率 30-50Hz 時較佳，本文所開發之頻率控制範圍從 30 至 60Hz，而非其他國外產品通常採用超頻設計 (70Hz 甚至 100Hz)[7-12]，以超頻方式達到其製冷能力，變頻控制策略流程圖如圖 9 所示。

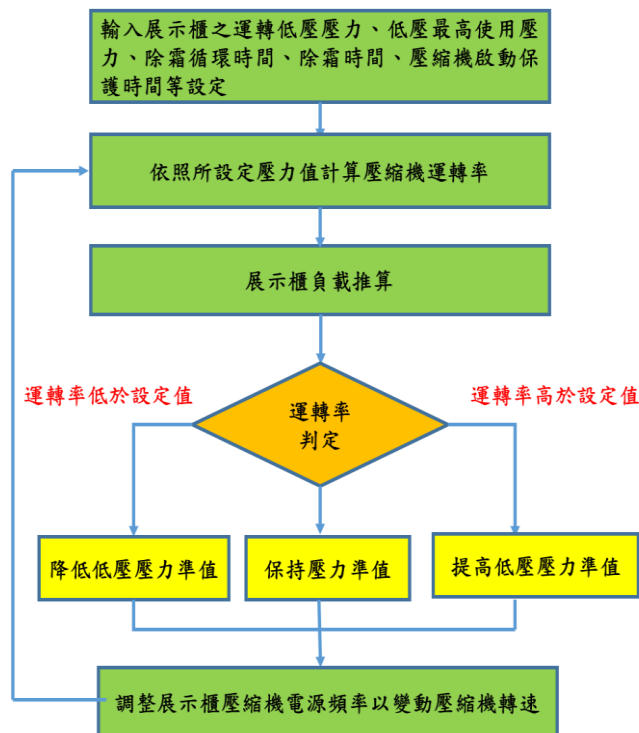


圖 9 變頻控制策略流程圖

三、實場域節能效益分析

國內目前主要測試之變頻 CDU 產品，均與國內目前主要日系產品進行節能比較基準，因此本文亦依據市場慣例，選擇目前便利商店以普遍採用之日系產品做為比對之標的。為消弭不同設備規格與氣候區之因素，以較客觀方式執行動態試驗。本文特別選擇國內同品牌與同縣市之便利商店以及同冷藏設備，將開發完成之變頻 CDU，進行實際場域測試。本文所開發之變頻 CDU 安裝於 H 店，而日系變頻 CDU 則是原安裝於 N 店，二家店均位於同一縣市，且製冷設備亦為完全一樣的開放式冷藏展示櫃(5 台 4°C 冷藏櫃，1 台 18°C 常溫櫃)，其設備

與系統安裝情形如圖 10 所示。



圖 10 (a)H 店與(b)N 店開放展示櫃與變頻 CDU

本文透過能管系統(EMS)擷取相關數據，經長達完整一年之測試時間(109.7-110.7)，通過國內酷熱與超級寒流之不同季節氣候條件嚴格考驗。自 109 年 7 月開始進行測試，主要針對二款變頻冷凝機主機之耗電進行比較，而為客觀起見，本文亦對二店之周圍外氣條件進行資料分析。由於數據資料庫相當龐大與篇幅有限，因此本文僅選取每個月份之耗電與外氣比較特殊者，進行主要比較說明。

首先本文先將整年二台主機之比較結果先例出如圖 11 所示，以利後續說明時文章之可讀性。圖 12 為二店之 109 年 7 月份耗電情形，本文所開發之變頻 CDU 剛開始 7 月份整體平均耗電度數即比日系品牌節電約 9 度/天(節電率約 10%)，至於二店當地氣候條件，H 店平均溫度反而比 N 店還高(1~2°C)，溫度感測器均

安裝於門口屋簷下，為了解其耗電之差異性，因此本文選取當月外氣溫度相近的日期，進行二台變頻主機之瞬時功率運轉曲線比對分析。由圖 13 發現，本文所開發之變頻 CDU 運轉模式，確實有隨負載變化進行加卸載運轉模式調控，平均峰值約 5kW。反觀日系變頻 CDU 的曲線波形，似乎不像一般所認知之變頻波形，且看不出其有卸載之時段出現，似乎像 on-off 之運轉模式，瞬間功率峰值一直維持在 6kW。

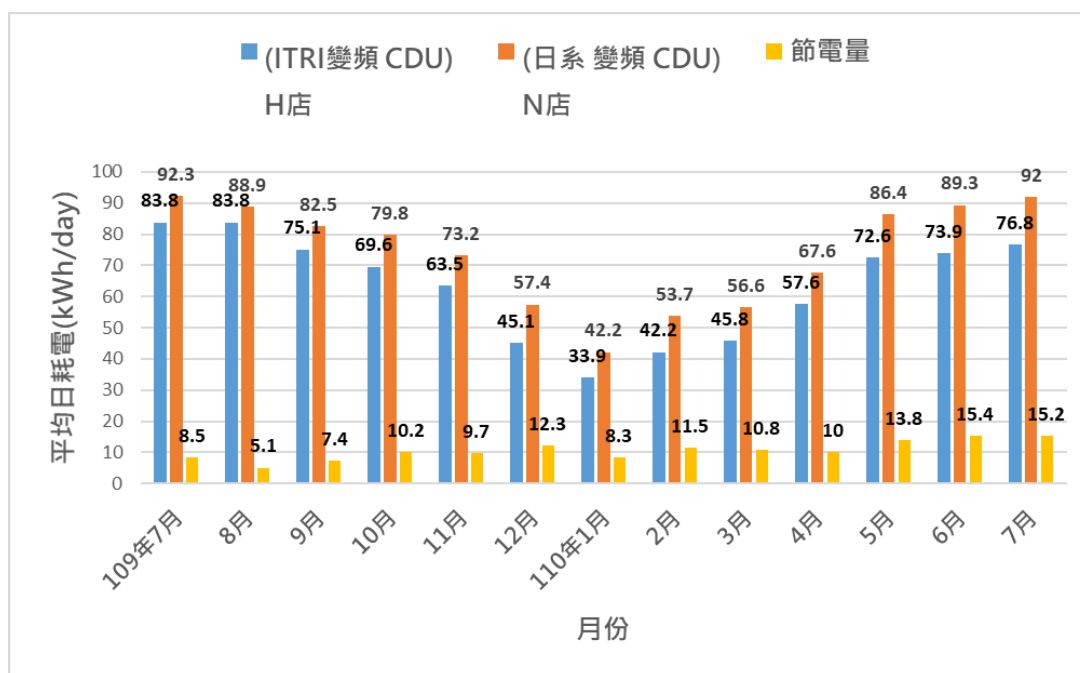
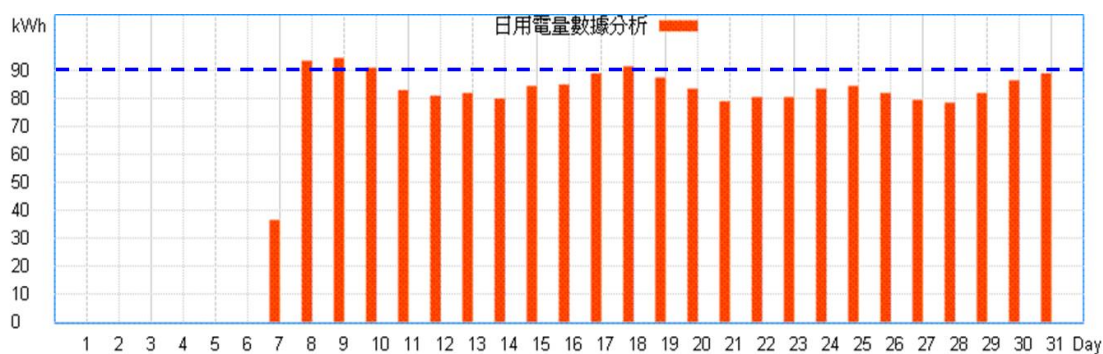
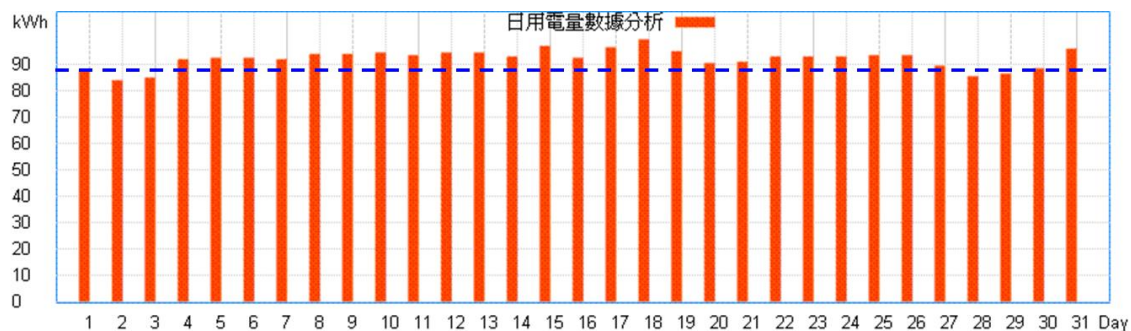


圖 11 H 店與 N 店開放展示櫃與變頻 CDU 每月耗電比較表

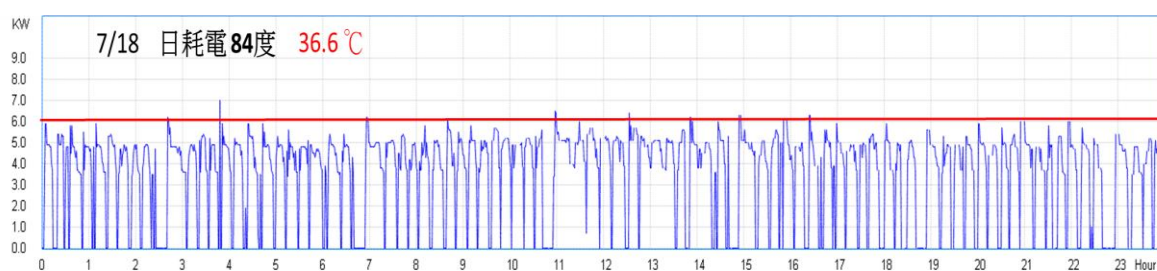


(a)

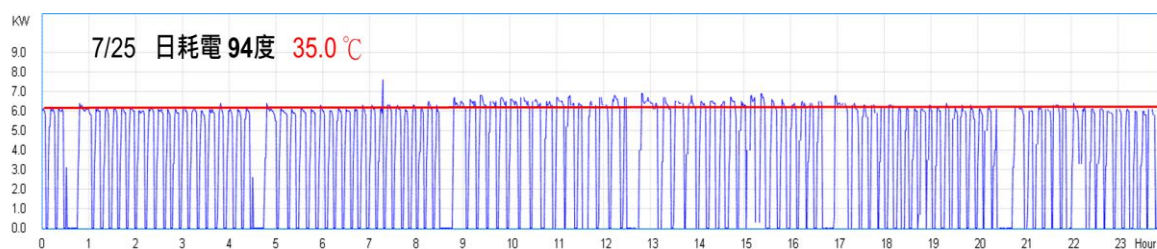


(b)

圖 12 (a)H 店與(b)N 店 7 月份變頻 CDU 每日耗電比較圖



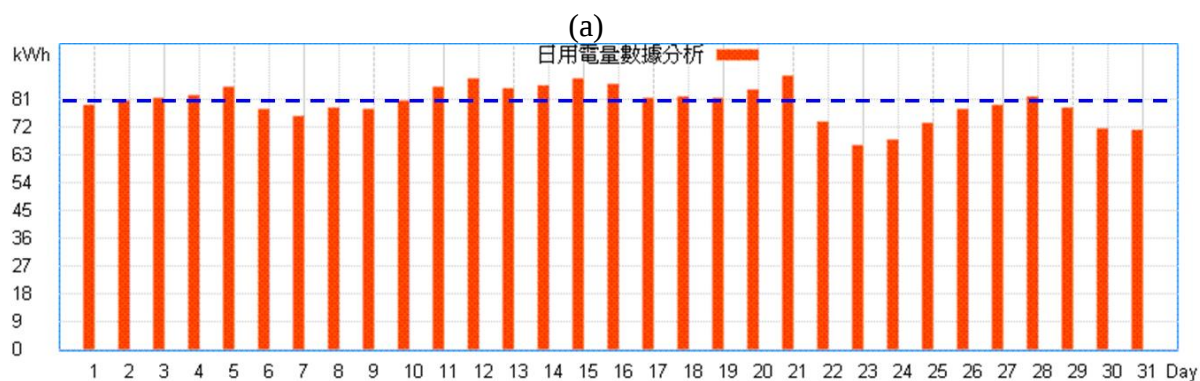
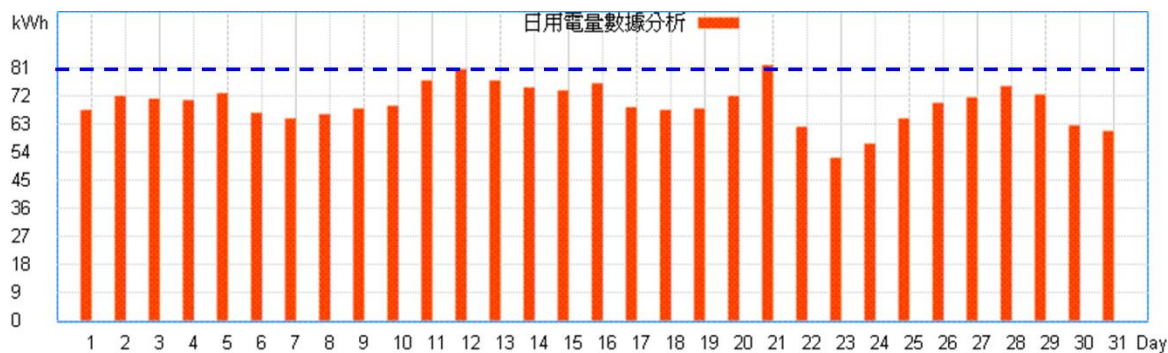
(a)



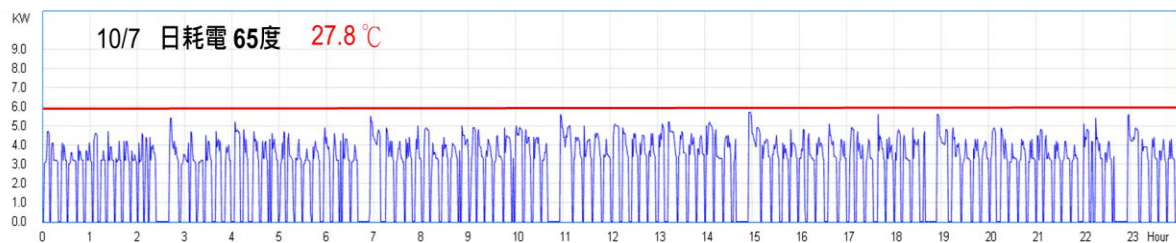
(b)

圖 13 (a)本文開發與(b)日系品牌變頻 CDU 之瞬時功率比較(109/7/18& 7/25)

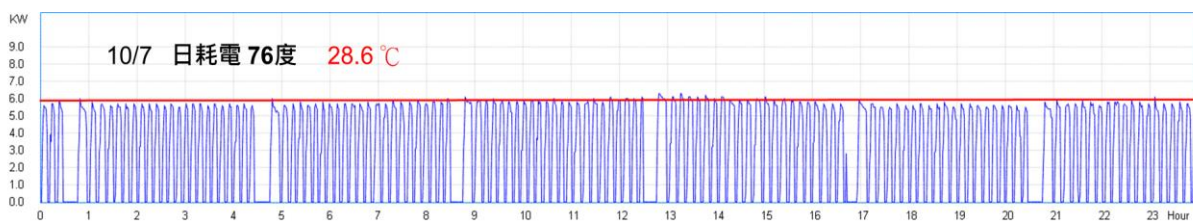
9 至 11 月隨外氣逐漸轉涼(外氣約 25°C 左右)，二台 CDU 主機耗電均相對減少，但二店之耗電量差異反而變大如圖 20 所示。為再度探索其原因，因此我們分別挑選二家店(10)月份耗電差異較大的日期(10/7，外氣溫度相當)，針對其瞬間功率進行比對。由圖 14 結果發現，當環境溫度約 28°C ，本文所開發之變頻 CDU 瞬間功率平均峰值降至 4kW ，且卸載之情形更加明顯。而日系變頻 CDU 之瞬間功率峰值幾乎仍維持在 6kW ，令人意外波型似乎一樣為啟停頻率更高之變頻波型，且看不出其有卸載之時段出現。因此導致 9-11 月份季節，二者之差異變大之主因，其日系變頻控制系統節電效果並不如預期。



(a)
圖 14 (a)H 店與(b)N 店 10 月份變頻 CDU 每日耗電比較圖



(a)

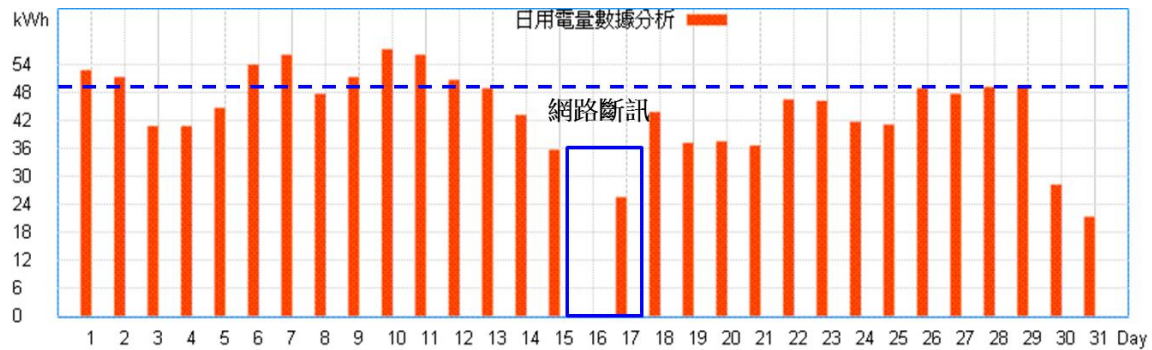


(b)

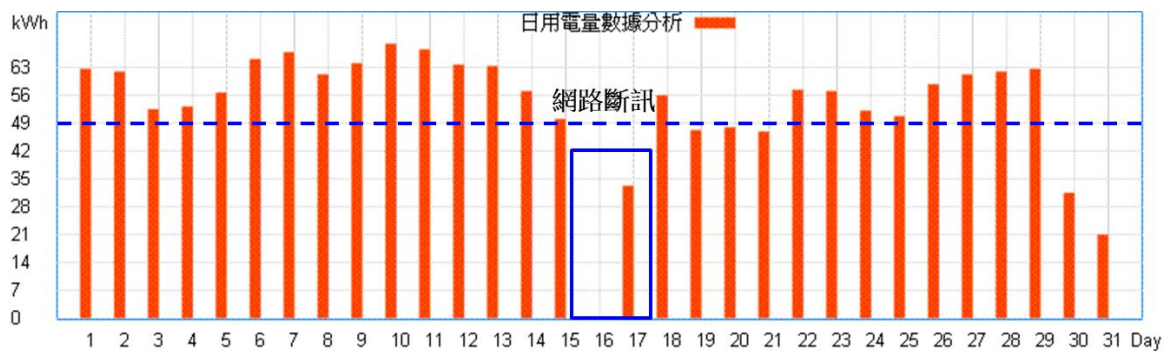
圖 15 (a)本文開發與(b)日系品牌變頻 CDU 之瞬時功率比(109/10/7)

待時令進入 12 月與隔(110)年 1 月時，明顯因環境溫度大幅降低時(12-17℃)，二者整體耗電也降低許多，但本文所開發之變頻 CDU 仍較日系 CDU 節電 12 度/天如圖 16 所示。同時再觀察其瞬時功率變化情形，此時本文所開發之變頻 CDU

瞬間功率平均峰值已下降至 3kW，而日系變頻 CDU 之瞬間功率平均峰值亦降至約 4.5kW，但似乎主要還是受外氣溫度影響，仍無明顯卸載跡象如圖 17 所示。

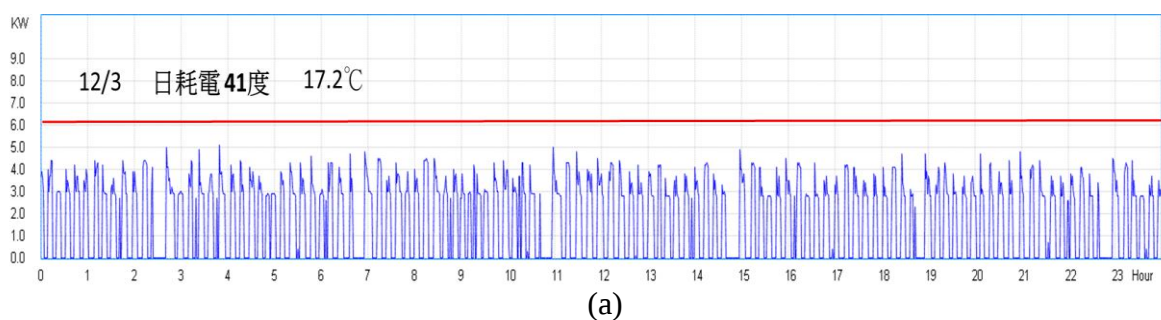


(a)

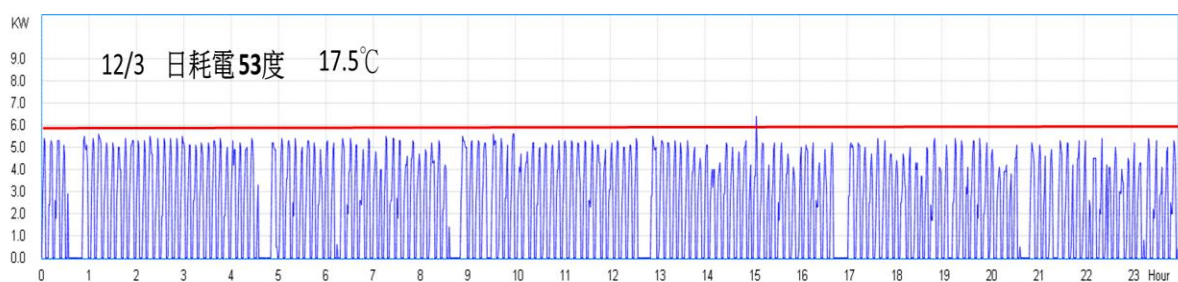


(b)

圖 16 (a)H 店與(b)N 店 12 月份變頻 CDU 每日耗電比較圖



(a)



(b)

圖 17 (a)本文開發與(b)日系品牌變頻 CDU 之瞬時功率比(109/12/3)

四、結語

本文針對國內便利商店開放式冷藏櫃開發國產化變頻 CDU，為能客觀驗證其節電效益，選擇同品牌與同縣市之二家便利超商，進行個別變頻 CDU 之耗電比較，其中一家採用目前國內常用之日系品牌變頻 CDU，測試設備均為相同之開放式冷藏櫃。經過長達一年完整之測試驗證(國內外類似案例亦不多)，以往測試時間較短，不易發現各季節變化之差異性，本文經長期測試發現各季節月份之節電效率仍有所差異。夏季月份外氣高溫酷熱(35°C 以上)，二台變頻 CDU 平均耗電差異約 10 度/天 (本文之變頻 CDU 較日系變頻 CDU，節電率 10%左右)，主要是日系 CDU 瞬時功率之平均峰值較高(6kW)且啟停頻率高，造成耗電主因。反觀本文之變頻 CDU 則瞬時功率平均峰值較低(5kW)，且明顯能因應外界負載變化而做部分卸載的運轉模式。

當時令進入春秋月份時外氣溫度轉涼(約 25°C)，二台變頻 CDU 平均耗電差異則超過 10 度/天以上(節電率 15~20%)，主要是日系變頻 CDU 瞬間功率平均峰值仍接近(6kW)，啟停頻率更高，而本文之變頻 CDU 則平均峰值降低至 4.5kW，且卸載的時段亦變長，因此節電量更大，節電率也更高。當進入冬季月份時，外氣寒流來襲(15°C 以下)，二者情況相似，此時日系瞬間功率峰值終於下降，但主要是停機頻率變高，而本文之變頻 CDU 則平均峰值亦大幅降低至 3kW，但日系變頻 CDU 啟動瞬間功率仍高於本文變頻 CDU，因此每日耗電仍有 4 度左右差異。

事實上，各家所開發產品之節能控制策略有所不同，本文僅就二款變頻 CDU 進行比較分析，日系產品相信在原產地氣候條件應具有其不錯的節能表現，而在不同氣候區(如台灣氣候)或許表現就有所差異，由本文所量測其瞬時功率波形可見一斑。而本文所開發之變頻控制系統經一年之長期驗證，完全可依據國內外氣負載條件變化而進行調整運轉策略，而達到不錯之節電效果，整年平均較日系變頻產品至少可節省 10 度/天，系統穩定度高且維修容易，深獲業者認同。

以全國超過 12,000 家便利店，滲透率若可達 30%，每年 3,300 家便利店每年至少可節電 1,300 萬度。

五、參考文獻

1. <https://climate.emerson.com/en-sg/products/refrigeration/copeland-condensing-units>
2. 2018. Condensing unit market – global forecast to 2022. MarketsandMarkets™.
3. 2021 年能源統計月報，110 年 5 月
4. Salehy, Y. Et al., 2020. Energy performances assessment for sustainable design recommendations: Case study of a supermarket's refrigeration system. Procedia CIRP 90, 328–333.
5. <http://www.grimsby.ac.uk/documents/defra/retil-supermarketefficoptns.pdf>
6. Lazzarin, R., Ge, Y., and Zilio, C., 2018. Advancements in supermarket refrigeration. 37th informatory note on technologies.
7. http://www.jci-hitachi.tw/uploads/download_catalog/57_2.pdf
8. <https://www.scribd.com/document/401190242/800-Daikin-Refrigeration-Product-catalogue-pdf>
9. <http://www.mhzykt.com/content/?182.html>
10. <https://reitouki.com/d/1409.html>
11. <https://climate.emerson.com/en-sg/shop/1/copeland-sku-zxv130be-4xd-551-en-sg>
12. <https://www.danfoss.com/en/products/dcs/condensing-units/condensing-units/optyma-plus-inverter/>