

定頻及變頻離心式冰水主機變負載及變冷卻水溫度運轉效能分析 Energy Efficiency of Centrifugal Chillers with Constant and Variable Frequency under Different Heat Loads and Cooling Temperatures

駱文傑¹、陳明科¹
Win-Jet Luo¹, Ming-Ke Chen¹

¹ 國立勤益科技大學冷凍空調與能源系

¹Department of Refrigeration, Air-Conditioning and Energy Engineering,
National Chin-Yi University of Technology

E-mail: wjluo@ncut.edu.tw

E-mail: p79043101@yahoo.com.tw

摘要

本文以嘉義區一間醫學中心為研究對象,針對院內 1000 USRT 滿溢離心式冰水主機,以電腦模擬軟體及現場實測數據,來分析比較變頻及定頻主機之效能。於研究中發現,以電腦軟體 YORKWORK 模擬之數據顯示,主機運轉於滿載 100% 狀況下,且冷卻水入水溫度在 28°C 以上時,或主機運轉於部分負載 90% 以上,且冷卻水入水溫度在 30°C 以上時,定頻主機效率均優於變頻主機效率,最大約達 4%;如主機運轉於滿載 100% 狀況下,且冷卻水入水溫度在 28°C 以下時,或主機運轉於部分負載 90% 以下,且冷卻水入水溫度在 30°C 以下時,變頻主機效率均優於定頻主機效率,最大達 40%。另如針對實測數據分析後發現,主機運轉於負載率 90% 以上,且冷卻水入水溫度在 29°C 以上時,定頻主機效率均優於變頻主機效率,最大約達 3%,如主機運轉於負載率 90% 以下,且冷卻水入水溫度在 29°C 以下時,變頻主機效率均優於定頻主機效率,最大可達 39% 以上。

關鍵字詞: 離心機、熱負荷、冷卻水、操作效率

Abstract

In this study, centrifugal chillers of 1000 USRT with constant and varied frequencies in Chiayi area of Taiwan was investigated, respectively, in order to understand their operation efficiencies under different heat loads and different cooling temperatures. Through the simulation of the software, YORKWORK, it is found that the performance of the chiller with constant frequency is superior to that of the chiller with varied frequency while the operation condition is 100% heat load and the temperature of cooling water is above 28 °C or the operation condition is 90% heat load and the cooling temperature is above 30°C. From the simulation, it is also indicated that 4% efficiency difference between the two chillers can be reached under the operation conditions mentioned above. Except the operation conditions mentioned above, the performance of the chiller with varied frequency is greater than that of the chiller with constant, the maximum efficiency difference of 40% can be obtained. Furthermore, from the experimental results, it is also shown that while the operation condition is above 90% heat load and cooling temperature is above 29°C, the efficiency of the chiller with constant frequency is 3% superior to that of the chiller with varied frequency. Except the operation condition mentioned above, the performance of the chiller with varied frequency is always greater than that of the chiller with constant, the maximum efficiency difference of 39% can be obtained in experiments.

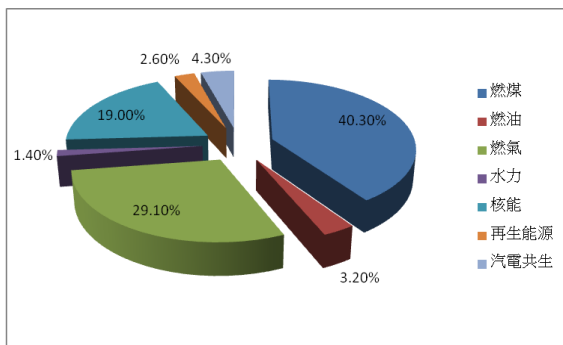
Keywords: Centrifugal chiller, heat load, cooling water, operation efficiency

1. 前言

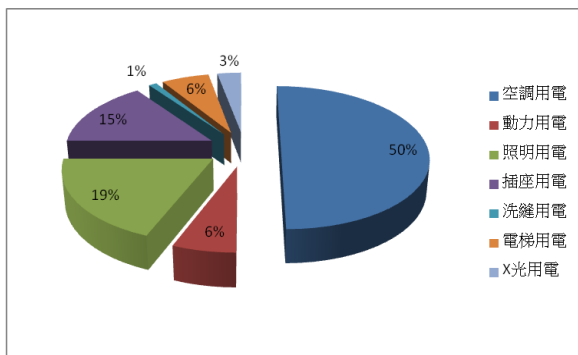
由於人類對地球的過度開發及過度消耗能源,使得溫室氣體產生量超過地球所能負荷之限度,導致地球暖化日趨嚴重,為解決此一地球暖化的問題,「節能」及「減碳」已經成為世界各國所必須面對及解決的議題;身為地球上一份子

的台灣,亦早已訂立了「國家節能減碳總計畫」,其中節能目標為「未來 8 年每年提高能源效率 2% 以上,使能源密集度於 2015 年較 2005 年下降 20% 以上;並藉由技術突破及配套措施,於 2025 年較 2005 年下降 50% 以上」;至於減碳目標為「於 2020 年 CO2 排放量降到 2005 年的狀況,於

2025 年回到 2000 年的 CO₂ 排放量』。但如此『減碳』政策，將造成占台灣主力發電 72.6% 以上之『火力』發電(如圖一)，因此而發展受限，在政府尚未發布任何後續發電配套措施之前，如此『減碳』政策恐將嚴重衝擊我國未來電力建設，因而造成經濟發展受限，所以在台灣『節能』將較『減碳』來的更貼近民情。而在台灣目前空調仍是用電大戶，約占整棟建築用電量 50% 以上(如圖二)，而冰水主機又占整棟空調用電 60% 左右，如此可計算出冰水主機約占整棟建築用電量 30% 以上，故本文將針對變頻冰水主機效能，進行研究及分析。



圖一：100 年台灣發電分配比例(參考台灣電力公司 100 年裝置容量與發電量占比)



圖二：嘉義某醫學中心用電比例

2. 離心式冰水主機加卸載方式及變頻節能原理

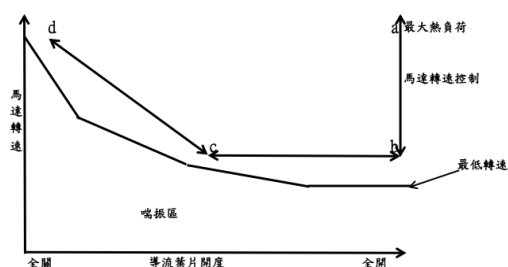
一般離心式壓縮機藉由馬達帶動葉輪高速旋轉，進而提生壓縮機內氣態冷媒速度，再藉由壓縮機本體(Casing)增壓室的設計，將速度壓轉換成壓力壓，完成壓縮功能；而一般離心式壓縮機負載調節方式，大致可分為定頻+導流葉片(Pre-Rotation Vane)控制及變頻(Variable Speed Drive)馬達+導流葉片(PRV)控制兩種。

2.1 定頻+導流葉片(PRV)控制方式

定頻離心式壓縮機壓縮過程是一種固定揚程，但藉由導流葉片控制，產生變流量的壓縮機，並藉由導流葉片(PRV)來完成主機負載控制，使壓縮機在最大揚程下的運行範圍增加，而其負載控制邏輯為，當主機控制系統接收冰水出水溫度，並與冰水出水設定溫度比較其差值，經運算後來調整導流葉片開度，並做無段負載控制，使機組穩定運行，如負載繼續降低，最後導流葉片開度將完全關閉，此時主機將發生喘震現象，此亦為主機允許之最小負荷，但如此負載控制方式，僅針對壓縮機之壓縮冷媒量，進行節流控制，而由泵浦相似定率可知，壓縮機流量僅與馬達轉速成一次方正比關係，故此負載控制方式之節電量有限，更可以說當主機負載越低，因導流葉片開度越小，但馬達轉速不變，則壓縮機無功效比例將越大。

2.2 變頻(VSD)馬達+導流葉片(PRV)控制方式

變頻離心式壓縮機壓縮過程，藉由驅動器(VSD)根據冰水出水溫度與壓縮機揚程來控制馬達轉速及導流葉片的開度，從而使冰水機組始終運行於最佳狀態區。而一般變頻離心式冰水主機其控制邏輯為如圖三，當冰水機組運行於接近滿負荷狀況時，將延 a-b 線運轉，導流葉片全開，僅控制馬達轉速，並使其運行於非喘振區內，但隨著負荷的減小，冰水機將沿著 b-c 線運轉，馬達控制於最低轉速，導流葉片開始減小開度，並繼續保持冰水機運行於非喘振區內，但負荷如繼續降低，除導流葉片(PRV)繼續關閉以外，為避免主機運轉於喘振區內，馬達轉速將會提升；而實際運轉時，負載介於 70% 至 100% 範圍內，壓縮機機組導流葉片(PRV)保持全開，通過變頻器進行馬達調速控制，以達到依實際熱負荷，來調整氣體冷媒壓縮量，當負荷低於 70% 時，導流葉片(PRV)開始減小開度，但當負荷低於 50% 時，機組為避免發生喘振狀況，造成壓縮機葉輪損傷，故變頻器會適當增加馬達轉速，如此控制邏輯，將大大增加機組運行範圍。



圖三：變頻主機負載控制邏輯(YORK 技術手冊)

2.3 離心式變頻冰水主機節能原理

離心式壓縮機藉由馬達帶動壓縮機增速齒輪，再由增速齒輪帶動葉輪高速旋轉，以提升被壓縮之氣體冷媒壓力，故藉由馬達轉速調整，亦可控制壓縮機氣體冷媒壓縮量，而壓縮機氣體冷媒所獲得之壓縮功，是由馬達耗電所產生之電功轉換為機械功所致，而馬達耗電之多寡，可由下列關係式(1)求得：

$$P \propto DV^n/n \quad (1)$$

式中：P=馬達輸入功率

D=氣態冷媒的全壓

V=氣態冷媒的體積流量

n=馬達效率

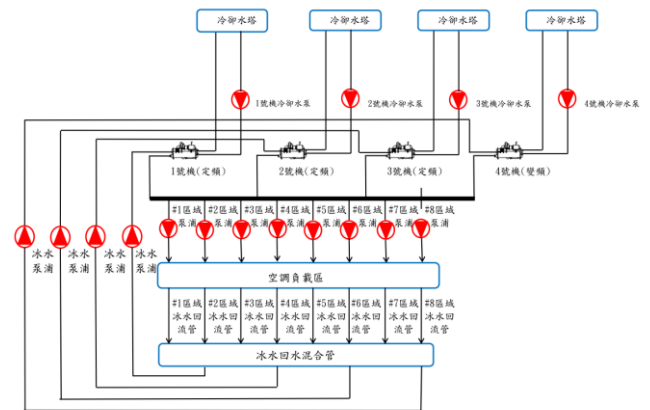
關係式中氣態冷媒的全壓 D 與轉速的平方成正比，氣態冷媒的體積流量 V 與轉速一次方成正比，故由關係式可得，馬達輸入電功率 P 與轉速的立方成正比，所以藉由馬達轉速的減小，將大大降低冰水主機的耗電量，相對的也大大提升冰水主機 COP 值，另變頻驅動方式之啟動電流，均較其他方式之啟動電流為低，對於主機啟動頻繁之辦公大樓及醫院等場所，更可大大節省電力之耗費，相對其啟動時所產生之噪音，亦可大大降低。

3. 研究方法

選定某一座北朝南、地下二層、地上十三層，主體為鋼骨構造，其地坪 17,382 m²(5,258 坪)、總面積 223,435 m²(67,589 坪)之醫學中心，該醫學中心之淨空調面積設計值為 132,351 m²(40,036 坪)，總空調噸數設計值為 4,302RT，故單位冷凍噸負擔之面積(總坪數)為 15.7 坪/RT，淨空調面積為 9.3 坪/RT，現場安裝 4 台 YORK 開放式 1000 USRT 離心式冰水主機，其中 3 台為定頻及 1 台變頻控制之離心滿液式冰水主機，其主機出廠規格如表一，另空調主機冰水及冷卻水系統流程如圖四。

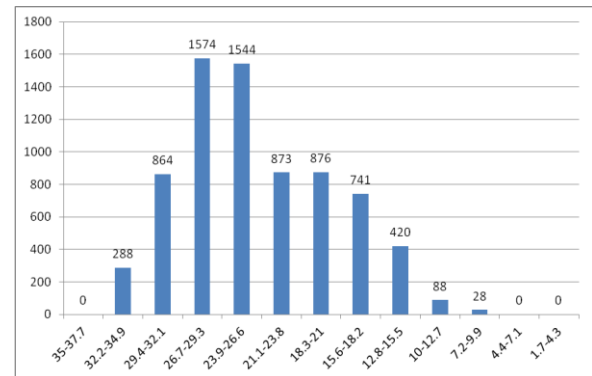
表一：原廠選機表

		定頻主機	變頻主機
壓縮機	型式	離心式	離心式
	型號	YKCLKMH9-CZF	YKCLKMH9-CZF
馬達	冷凍噸	1000USRT	1000USRT
	型式	開放式	開放式
冰水側	電壓	3300 V	460 V
	滿載電流	119 A	864 A
	進水溫度	53.6°F	53.6°F
	出水溫度	44.6°F	44.6°F
	設計壓差	24.8 FT	24.8 FT
冷卻水側	設計流量	2666.7 GPM	2666.7 GPM
	進水溫度	89.6°F	89.6°F
	出水溫度	98.6°F	98.6°F
	設計壓差	27 FT	27 FT
	設計流量	3110.4 GPM	3110.4 GPM



圖四：冰水及冷卻水系統流程圖

而依據美國冷凍空調協會(AHRI)所制定之 ARI Standard 550/590 之 5.4.1 節中所提到的，部分負載 IPLV/NPLV 之數據顯示，一般冰水主機全年將近有 99%時間運轉於部分負載下，而又如參照表一原廠冰水主機冷卻水入水溫度設計值為 89.6°F，且與嘉義區 10 個月份室外溫度分布統計圖(如圖五)分析可得，主機全年將近有 95.65%以上的時間，運行於低於原設計之冷卻水入水溫；故嘉義區更適合變頻冰水主機發展。



圖五：嘉義 10 個月份室外溫度分布圖

而本研究將針對其單台變頻及定頻冰水主機，實測主機耗電量，並依據下列公式(2)：

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (2)$$

式中： \dot{Q} =冰水機吸熱量

\dot{m} =冰水流量

C_p =冰水的比熱

ΔT =冰水出入水溫度差

計算主機冷凍噸位數，而其溫度擷取方式為，記

錄安裝於主機進水管上溫度感測器顯示之溫度值，而實際冰水流量，為根據原設備商提供之冰水設計壓差及設計流量，並依據下列公式計算流量：

$$Q = 14.28 \times C_v \times \frac{\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{G}} \quad (3)$$

Q=流量

Cv=流量系數

ΔP=進出水壓差

G=流體比重

因主機流體均為冰水，故其 G 值設計與實際均相同，且現場所使用之水閥與當初設計時均相同，故其 Cv 值亦相同，因而可延伸出下列公式算出實際冰水流量：

$$\dot{m}_{act} = \dot{m}_{des} \times \sqrt{\frac{\Delta P_{act}}{\Delta P_{des}}} \quad (4)$$

式中： \dot{m}_{act} =實際冰水流量

\dot{m}_{des} =設計冰水流量

ΔP_{act} =實際冰水進出水壓差

ΔP_{des} =設計冰水進出水壓差

而實際冰水進出水壓差擷取方式，為於現場安裝一電子式差壓傳送器，擷取其顯示之實際冰水進出水壓差，其規格如表二，並以整年實際量測冰水流量及冰水進出水溫度差，以及馬達耗電量，來計算冰水主機 RT 數及其效能，並分析比較不同負載控制方式耗能狀況，並以 ARI 認可之電腦模擬軟體 YORKWORK，來比較分析實測及電腦模擬數據之異同點。

表二：電子式差壓傳送器規格表

供應電源	24Vac/dc
量測範圍	0~1.0 bar/0~2.0 bar
輸出信號	0~10 Vdc/4~20 mA
誤差值	<2.5% of full scale
溫度飄移	<0.5% of scale/10K
長期穩定	0.03 bar/year
操作溫度	負20 ~ 70℃
介質溫度	負20 ~ 100℃
過載壓力	16 bar
防護等級	IP54

4.結果與討論

由 ARI 認可之 YORKWORK 電腦模擬軟體所模擬之數據，如表三~五比較可得，如主機運轉於滿載 100% 狀況下，且冷卻水入水溫度在 28℃ 以上時，或主機運轉於部分負載 90% 以上，且冷卻水入水溫度在 30℃ 以上時，定頻主機效率均優於變頻主機效率，最大約達 4%；如主機運轉於滿載 100% 狀況，且冷卻水入水溫度在 28℃ 以下時，或主機運轉於部分負載 90% 以下，且冷卻水入水溫度在 30℃ 以下時，變頻主機效率均優於定頻主機效率，最大達 40%。

表三：定頻冰水主機模擬數據

冷卻水溫	32	30	28	26	24	22	20	18
RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT
1000(100%)	0.596	0.562	0.532	0.506	0.482	0.46	0.44	0.421
900(90%)	0.586	0.553	0.526	0.501	0.479	0.459	0.44	0.421
800(80%)	0.585	0.555	0.529	0.505	0.482	0.463	0.442	0.424
700(70%)	0.591	0.563	0.537	0.513	0.49	0.47	0.45	0.43
600(60%)	0.603	0.575	0.548	0.523	0.502	0.48	0.458	0.437
500(50%)	0.64	0.608	0.58	0.552	0.518	0.494	0.472	0.448
400(40%)	0.665	0.635	0.605	0.577	0.553	0.527	0.505	0.472
300(30%)	0.71	0.68	0.653	0.627	0.603	0.58	0.56	0.54
200(20%)	0.81	0.78	0.75	0.725	0.705	0.685	0.665	0.655

表四：變頻冰水主機模擬數據

冷卻水溫	32	30	28	26	24	22	20	18
RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT
1000(100%)	0.621	0.581	0.541	0.504	0.469	0.437	0.406	0.375
900(90%)	0.596	0.553	0.514	0.478	0.442	0.406	0.377	0.35
800(80%)	0.581	0.538	0.495	0.455	0.417	0.386	0.355	0.324
700(70%)	0.574	0.527	0.484	0.443	0.404	0.369	0.336	0.304
600(60%)	0.577	0.533	0.487	0.442	0.4	0.362	0.325	0.292
500(50%)	0.592	0.544	0.496	0.45	0.408	0.366	0.328	0.29
400(40%)	0.618	0.565	0.517	0.468	0.423	0.382	0.34	0.303
300(30%)	0.653	0.6	0.55	0.503	0.457	0.413	0.37	0.33
200(20%)	0.755	0.695	0.63	0.575	0.525	0.475	0.43	0.39

表五：定頻及變頻主機效能比較

冷卻水溫	32	30	28	26	24	22	20	18
RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT
1000(100%)	-4.19%	-3.38%	-1.69%	0.40%	2.70%	5.00%	7.73%	10.93%
900(90%)	-1.71%	0.00%	2.28%	4.59%	7.72%	11.55%	14.32%	16.86%
800(80%)	0.68%	3.06%	6.43%	9.90%	13.49%	16.63%	19.68%	23.58%
700(70%)	2.88%	6.39%	9.87%	13.65%	17.55%	21.49%	25.33%	29.30%
600(60%)	4.31%	7.30%	11.13%	15.49%	20.32%	24.58%	29.04%	33.18%
500(50%)	7.50%	10.53%	14.48%	18.48%	21.24%	25.91%	30.51%	35.27%
400(40%)	7.07%	11.02%	14.55%	18.89%	23.51%	27.51%	32.67%	35.81%
300(30%)	8.03%	11.76%	15.77%	19.78%	24.21%	28.79%	33.93%	38.89%
200(20%)	6.79%	10.90%	16.00%	20.69%	25.53%	30.66%	35.34%	40.46%

由現場實測之運轉數據(如表六~表八)可得知，主機運轉於負載率 90% 以上，且冷卻水入水溫度在 29℃ 以上時，定頻主機效率均優於變頻主機效率，最大約達 3%，如主機運轉於負載率 90% 以下，且冷卻水入水溫度在 29℃ 以下時，變頻主機效率均優於定頻主機效率，最大可達 39% 以上。

表六:定頻冰水主機實測數據

冷卻水溫	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19
RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT
900(90%)	0.6614286	0.64	0.64										
800(80%)	0.7125	0.7	0.67			0.664	0.64774		0.62				
700(70%)	0.75	0.73	0.7		0.675	0.66571	0.64778	0.64	0.62	0.61			
600(60%)		0.738	0.71125	0.705	0.69333	0.685	0.65333	0.64333	0.64273	0.64			
500(50%)		0.76	0.73214	0.72133	0.70667	0.7025	0.69429	0.69	0.6725	0.64467	0.635		
400(40%)			0.79	0.78	0.76125	0.76	0.75833	0.72556	0.71	0.705	0.69		
300(30%)					0.91333	0.885	0.86333	0.83	0.796	0.77	0.76	0.755	0.725

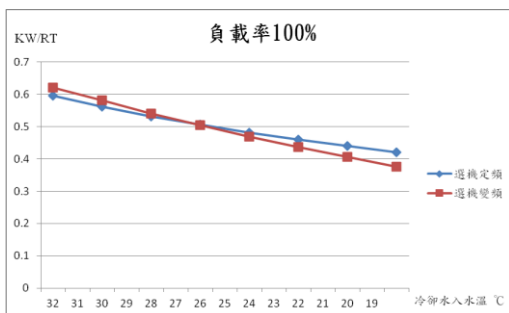
表七:變頻冰水主機實測數據

冷卻水溫	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19
RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT
900(90%)		0.66	0.66		0.645	0.635	0.623333		0.52				
800(80%)		0.7	0.67	0.67	0.6575	0.64667	0.632875	0.58					
700(70%)	0.75	0.72	0.69		0.67	0.65167	0.616	0.581111					
600(60%)		0.731111	0.703333	0.67	0.675	0.66167	0.626	0.5925	0.567222	0.517059	0.468889		
500(50%)				0.67	0.659091	0.627895	0.58875	0.546667	0.523333	0.489167	0.467	0.4525	0.42
400(40%)						0.62	0.59	0.55	0.505	0.47	0.45	0.415	
300(30%)						0.676667	0.622222	0.618125	0.573	0.537297	0.51	0.4575	0.44

表八:定頻及變頻主機效能比較

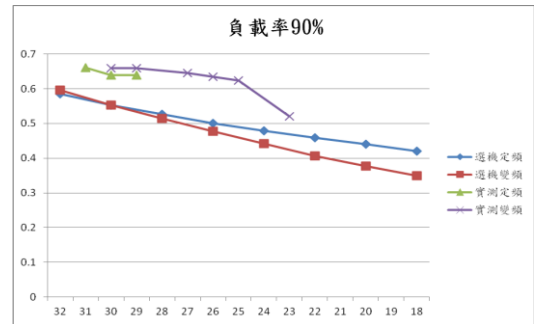
冷卻水溫	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19
RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT	KW/RT
900(90%)		-3.13%	-3.13%										
800(80%)		0.00%	0.00%			2.61%	2.21%						
700(70%)	0.00%	1.37%	1.43%		0.74%	2.11%	4.91%	9.20%					
600(60%)		0.93%	1.11%	4.96%	2.64%	3.41%	4.18%	7.90%	11.75%	19.21%			
500(50%)				7.12%	6.73%	10.62%	15.20%	20.77%	22.18%	24.12%	26.46%		
400(40%)						18.42%	22.20%	24.20%	28.87%	33.33%	34.78%		
300(30%)						23.54%	24.45%	25.53%	28.02%	30.22%	32.89%	39.40%	39.31%

由於該醫學中心與台電公司有契約容量之約定,因此主機無法運轉於滿載狀況下,故圖六僅有負載率 100%之模擬運轉效能曲線,並無實測效能曲線,且由圖六模擬所得之圖形可知,主機運轉於 100%滿載狀況下,且冷卻水入水溫度在 28°C 以上時,定頻較變頻主機節能,但如冷卻水入水溫度在 28°C 以下時,變頻較定頻主機節能。



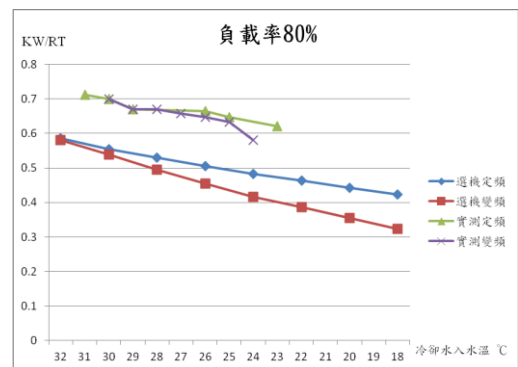
圖六:主機負載率 100%

由圖七可得知,主機運轉於負載率 90%狀況下,模擬狀況下之冷卻水入水溫度在 30°C 以上,或實測狀況下之冷卻水入水溫度在 29°C 以上時,定頻均較變頻節能,但如模擬狀況下之冷卻水入水溫度在 30°C 以下,變頻均較定頻節能,且由於實測無擷取到冷卻水入水溫度 29°C 以下之數據,故無從比較模擬及實測之差異。

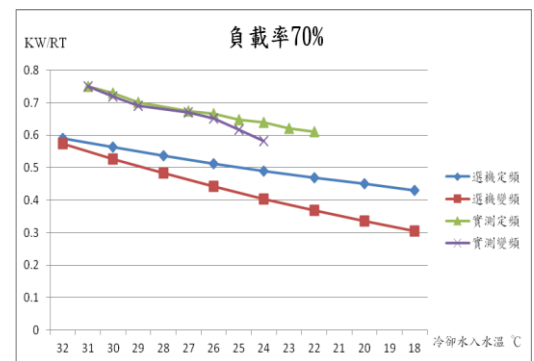


圖七:主機負載率 90%

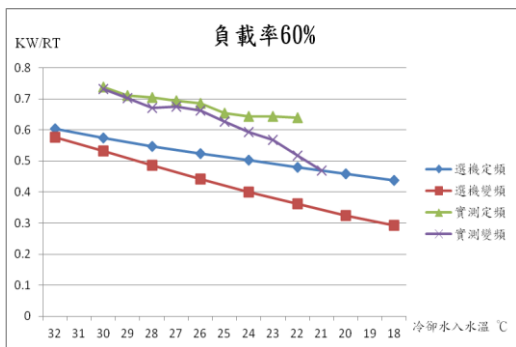
由圖八-圖十三可得知,主機運轉於負載率 80%-30%時,且在任何冷卻水入水溫度下,無論是模擬或實測所得之 KW/RT 值,定頻均較變頻節能,且負載率越低,定頻及變頻效率差異越大。



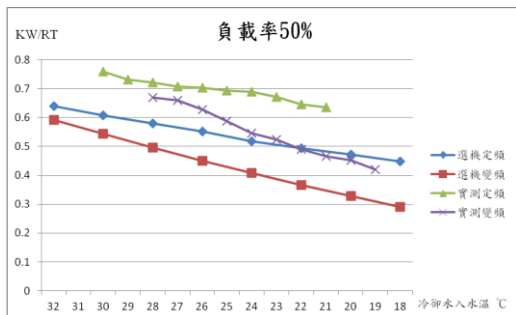
圖八:主機負載率 80%



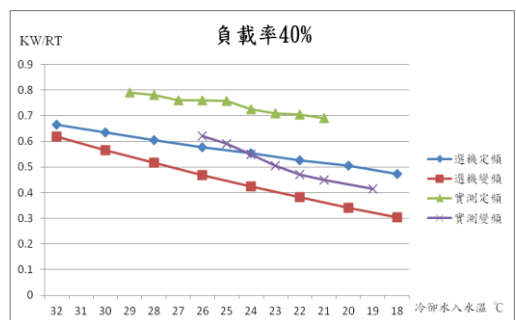
圖九:主機負載率 70%



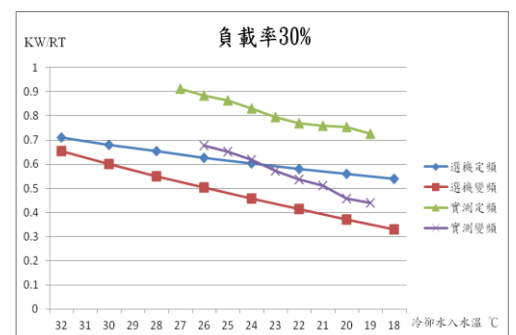
圖十：主機負載率 60%



圖十一：主機負載率 50%



圖十二：主機負載率 40%



圖十三：主機負載率 30%

5. 結論

由圖六-圖十三模擬及實測數據綜合比較，實測 KW/RT 數均較模擬之 KW/RT 還高，原因應為該醫學中心於 2008 年試車運轉至今，已將近五年時間熱交換器未曾清洗，以及主機也未曾大保養

過，因而造成主機效能較差之情形。但無論是模擬或實測所得之結果，均顯示並非於任何負載及任何冷卻水入水溫度條件下，變頻均較定頻主機省電，尤其主機如運轉在高負載及高冷卻水入水溫度狀況下，變頻主機反較定頻主機耗電，研究分析其原因，為變頻主機比定頻主機多一具變頻器，因而造成在高負載狀況下，變頻主機較為耗能，而如負載率及冷卻水入水溫度越低，其變頻主機節能效果越顯著，且節能率越高。又因醫院空調系統負荷量大小，受外在環境氣溫及上下班時段影響很大，如此條件更適合變頻主機的使用。

6. 參考文獻

1. 劉青龍，變頻離心式冰水主機之節能分析，碩士論文，國立台北科技大學冷凍空調工程系研究所，2005。
2. 王生龍及胡洪明，江森自控樓宇設備科技（無錫）有限公司，無錫 214028，文章編號：CAR146。
3. 陸靚燕及徐越輝，變頻技術在製冷機組中的應用，船電技術 2002 年 第 4 期
4. 易新等人，變頻冷水機組在中央空調系統中的應用，1. 深圳職業技術學院；2. 重慶大學 城市建設與環境工程學院，重慶大學學報（自然科學版），2002 年 8 月第 25 卷第 8 期
5. 華斌等人，變頻離心式製冷機組經濟運行控制研究，華東電力，2008 年 10 月，第 36 卷，第 10 期
6. R. Saidur, Chillers energy consumption, energy savings and emission analysis in an institutional buildings, Energy 36 (2011) 5233-5238
7. 王振輝等人，離心式冷水機組變頻調速之節能效果分析，流體機械期刊，2007 年 第 35 卷第 6 期
8. 張偉，變頻技術在離心式冷水機組上的應用，建設科技，2008 年 第 12 期
9. AHRI Standard 550/590-2003, Performance Rating of Water - Chilling Package Using the Vapor Compression Cycle.