

【中文題目】

MW 級風力機液壓系統性能改良案例分析

【英文題目】

Performance Improvements in Hydraulic System of a MW-scale Wind Turbine

【作者名、單位】

陳錦城/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 研究員

劉瑞弘/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 工程師

張家銘/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 經理/資深工程師

吳孟儒/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 副研究員

彭致勛/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 副研究員

林其光/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 副工程師

鄭 屹/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 副工程師

03-5913901、jienchen@itri.org.tw

關鍵詞(Keywords)

- 風力發電機 Wind Turbine
- 漏油 Oil Leakage
- 液壓系統 Hydraulic system

摘要((Abstract)

液壓系統漏油為現有風力發電機組中故障的主要原因之一，本研究以台電 2MW 風力機為例，透過實際觀察探討故障成因，利用自主技術改善原廠設計缺陷，本文中所提出之改善方案使液壓系統能夠長時間穩定運作，並且延長煞車來令片壽命，避免影響轉向軸承功能，有助於節省維修成本。

Malfunctions of the hydraulic system among wind turbine generators (WTGs) are mainly caused by the leakage of oil. For the purpose to improve this troublesome issue, a case study of the two MW WTG of Taiwan Power Company is reported in this work. The proposals introduced in this paper are designed according to practical observation of the hydraulic system and employed to reform the original hydraulic loop designs. The efficacy of the proposed improvement methods for hydraulic system is verified by intensive experiments.

1. 前言

全球大型風力發電技術發展已經非常成熟，風力發電為目前最穩定成長的再生能源之一。台灣在 2000 年開始即依據政策全力推廣再生能源計畫，陸續在雲林、澎湖、竹北完成三個示範風場後，開啟台灣在大型陸域風電的發展；目前已經有超過 300 部 MW 級的風力發電機，總容量超過 600MW，主要分布於台灣西部沿海一帶。且依據「再生能源發展條例」已公告風力發電離岸示範系統獎勵辦法，以經費補助方式，鼓勵業者設置離岸示範風場，未來也將在台灣海峽增設大型離岸風力發電機組，帶動台灣離岸風電開發之重要里程。

大型風力發電機主要由葉片、機艙、塔架、旋角系統、電力轉換系統、傳動系統、控制系統、迎風轉向系統、液壓煞車及驅動等所組成，每個次系統都是經過妥善的設計，透過系統整合及各種風況設計後，才能讓風力機順利穩定的運轉發電。但由於台灣屬於海島型國家，環境濕熱且海邊鹽害問題較嚴重，在台灣未有國產風力機情況下仍需仰賴進口風力機，許多自歐洲進口的風力機組設計之初並未考慮到這樣的氣候，加上台灣大型風力機運行初期，尚未建立及累積完善的維修保養經驗，因此在某些次系統上會出現原廠並未考慮到的故障。

不過經過近幾年的努力，本土開發商與運維商也漸漸掌握機組技術，已經具備一定的故障排除能量；本文針對大型風力機的液壓系統進行故障分析研究，進而提出改善方案，最終使液壓煞車系統能夠長時間穩定的工作，使機組能夠正常運轉。

2. 背景說明

本文研究標的為目前台電公司位於台中港區與台中龍井火力發電廠的風力機組，此機組源自於荷蘭廠商 Zephyros 的設計，型號為 Z72，額定發電量為 2000kW，目前總共有 21 部。圖 1 為此款風力機的實體照片，表 1 則為該風力機的基本規格資料。



圖 1、Z72 風力機照片

表 1、Z72 風力機基本規格[1]

Rotor diameter	70.65m
----------------	--------

Rotor speed	Variable, nominal 22.5rpm
Nominal power	2.0MW*
Transmission	Direct drive generator, single main bearing
Rated wind speed	13 m/s
Cut-in / cut-out wind speed	3-25 m/s
Survival wind speed	70 m/s
Rotor speed control	Blade pitch
Wind class	2 and S according to IEC61400-1
Generator mass	49 tons
Rotor mass	36 tons
Nacelle mass	12 tons

液壓系統在這款風力機中扮演的角色是提供煞車的壓力給葉輪轉子(Rotor Hub)以及轉向系統(Yaw System)。在轉子的部分，基本上平常都是保持在沒有壓力的狀態，轉子才能夠隨著風力大小而旋轉，除非是緊急狀態或是因為維修工作需要進入輪轂內部的時候，才會需要透過液壓系統提供壓力給安裝在轉子內部的液壓缸，再推動液壓塊乃至於煞車來令片，透過來令片的與煞車環之間的摩擦力使轉子停止不動。由於使用的機會與頻率低，這部分的功能基本上不會有太大問題，來令片也不會有太多磨損，壽命相對較長。Z72 風力機的液壓系統(如圖 2)包含了液壓站、配置對應的油路控制閥件、壓力開關、油表、液壓缸、液壓塊、煞車來令片、油箱、泵浦馬達、蓄壓器等元件。



圖 2、Z72 風力機之液壓系統實體元件

相對的，液壓系統對於轉向系統的作動次數就極為頻繁。由於正常狀態下，無論是否發電，風力機必須面對迎風方向，以取得最大的風能；此時液壓系統須提供煞車壓力使轉向系統維持固定，不會因為風吹而偏移主風向。因此，液壓系統平常必須一直提供壓力給轉向煞車。當風向與機組方向產生一定的誤差(視系統設定值而定)後，系統會下命令給轉向馬達使機艙進行轉動，以對準風向。此時液壓系統就必須讓前述煞車壓力釋放，馬達才能順利無阻礙的轉動機艙。由此可見，液壓系統在轉向系統的操作上與轉子的部分有很大差異，也因此發生故障機率就高。

當然，液壓系統具備其他安全性功能，像是緊急事故下的運作、洩漏偵測系統、泵浦保護機制，使液壓系統能夠在正常狀態下運作。遇到相對應的故障，可藉由表 2 來進行故障排除。

表 2、液壓系統故障的主要原因[2]

問題	原因及排除方式
沒有壓力	油位太低 泵浦旋轉方向錯誤 釋壓閥不起作用 蓄壓器排放閥門打開 系統內過度的滲漏
沒有作動	泵浦沒有啟動 沒有供應油壓：電磁閥損壞 機械阻塞 操作壓力太低 煞車封環損壞

圖 3 為 Z72 風力機的三維透視圖，液壓系統共裝配 12 組，集中於圖片下方轉向軸承環的前半部，如紅色標示位置，靠近發電機連結端。

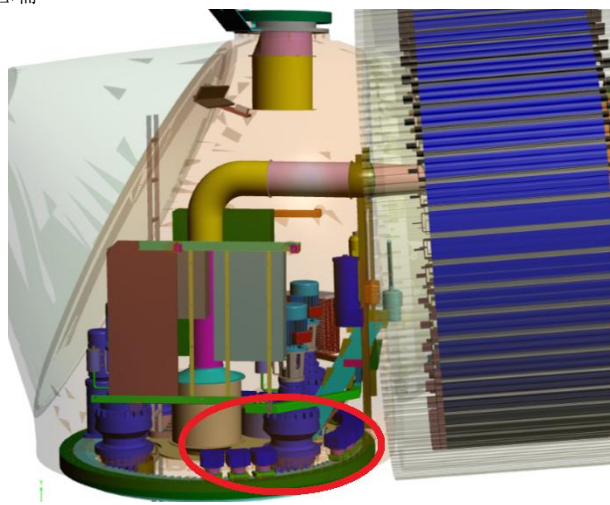


圖 3、Z72 風力機之三維透視圖

3.故障問題描述

Z72 型風力機於台灣所安置的機組，承襲著原始荷蘭 1.5MW 的設計架構與規格，然而當發電機升級成為 2.0MW 時，其中次系統規格可能由於並未考量合理設計裕度，導致無法提供 2.0MW 運轉所需的性能。以轉向馬達電磁煞車力矩而言，若無法提供有效的煞車力矩，再藉由馬達主軸與減速箱對轉向軸承形成一個煞車力，則將造成另一個液壓系統，需以較大的煞車力支撐所需之煞車力矩，因此衍生了液壓系統漏油與煞車材快速磨耗等問題，都將導致停機與待料時數增加而衍生低可用率之結果。

上述提到的漏油與煞車片磨耗就是目前液壓系統較為嚴重的兩個故障，從圖 4 的實際照片可以看出此

嚴重程度。以下針對故障以及其原因進行說明：

1) 漏油：

轉向軸承齒部上所覆蓋的液壓油，已經布滿整個齒面，且持續流向下方的塔架，漏油狀況非常嚴重；漏油可能是因為油管耐壓不足、液壓缸體內部側漏以及系統壓力過大所導致(系統限壓 210bar)

2) 來令片磨耗：

煞車來令的組成是由上方鋼板黏下方煞車片，整體厚度為大約 35mm，在風力機例行檢察中都必須注意來令整體的任何一點厚度磨耗是否平均，當煞車片最小厚度剩下約 2mm 時，就必須更換，否則磨損過度嚴重時煞車盤與來令片鋼板會接觸，造成嚴重磨損。軸承上方的墊塊，就是位於液壓塊與軸承之間的煞車來令片，除了承受更大力矩外，加上來令片材質受漏油影響，磨耗速度異常的快，導致來令片在未達更換保養期限之前就已經磨損完畢，使得來令片的金屬載具直接與軸承面相互摩擦，更導致載具被破壞。比較圖 4 左邊算過來第一個來令片與第二個來令片，第一個來令片已經完全不見，甚至可以觀察到載具厚度明顯差異。事實上載具本身也被嚴重磨耗並且變形，連帶導致維護上的困難度增加，因為載具變形後卡在溝槽內，無法取出；相對的第二個是正常的狀態。就是來令片載具這樣的相互影響，更導致了軸承面的損傷，以及液壓缸因為超出原本設計行程，使得漏油更加嚴重，惡性循環下導致液壓系統在很短時間內將油用完，因此無法建立足夠壓力讓轉向軸承正常運作。圖 5 顯示轉向軸承表面已經有因為來令片金屬載具所致的嚴重刮痕。

3) 壓力不平衡：

另外，從總共 12 個液壓缸，液壓站出來的壓力，第一個液壓缸與最後一個液壓缸壓力有差異，也導致壓力不平均，長期觀察下來，可發現其中某幾個固定來令片，磨損較快。將液壓缸進行拆解後，如圖 6，第二排從右到左分別是液壓缸本體、液壓活塞、液壓塊、煞車來令片；第一排則是安裝於液壓缸本體內側的四個不同功能的油封；從此拆解案例更可發現到圖 7 的 K 型油封的某個段落已經因為被擠壓而變形，也是導致油從液壓缸內部漏出再往下流到轉向軸承的原因。



圖 4、漏油情形照片



圖 5、轉向軸承面受損狀況



圖 6、液壓缸分解



圖 7、液壓缸內部損壞之油封

4) 液壓管路釋壓閥不起作用：

轉向煞車系統的壓力需由馬達驅動以建立各部位工作壓力，圖 8 為液壓前段系統圖，常見問題為液壓管

路釋壓閥沒有作動，一般情況下號馬達接受命令後即對系統建壓，但常因先前洩漏導致管內存在空氣，無法順利建壓，因此當馬達持續運轉超過設定值仍無法建壓時，系統將出現故障訊息，因此須將 5 號釋壓閥進行空氣排除才能使系統順利建壓，若仍無法建壓則可能問題為 6 號單向閥體或釋壓閥橡皮密封環破損所致，馬達磨損或電磁閥故障也可能導致無法建壓，若液壓系統前段能確實將這幾項檢查完畢，系統將能正常建壓。

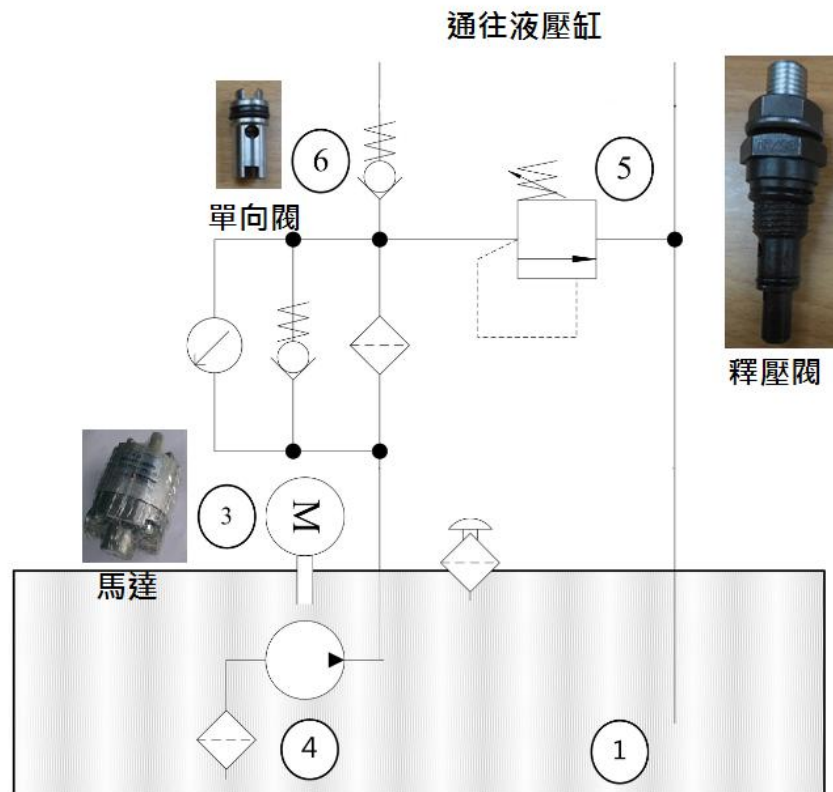


圖 8、液壓系統前段

4. 液壓系統解決方案

針對前述的幾個問題點與肇因，本文提出以下的改良方案：

液壓系統漏油問題：

1)針對油管、接頭與液壓缸本體的耐壓，重新設計挑選後，選用可耐壓超過 210bar 的產品，以確保當機艙必須固定不動，需長時間保持 190bar~210bar 壓力時，不會因為這些系統點而漏油。

2)由於液壓塊可能有擠壓到油封圈的可能性導致漏油，液壓塊運動行程以及缸體內部的幾何空間，也重新設計，即使在最差的狀況，即煞車來令片磨耗完畢，仍可正常上下作動，不會因此錯位傾斜而對密封圈施加過大負載。(圖 9)

3)原系統並未考慮壓力過大時的因應方案，但觀察系統運作，其實時常維持載最大操作壓力點，甚至風況較佳時，壓力會超過最大操作壓力；系統在這樣的條件下操作，風險相較高，也是漏油的原因之一。因此

本研究在原系統液壓油路的系統增加一卸壓閥(圖 10)，使得油路壓力超過 210bar 時，可自動洩壓，避免液壓系統壓力過大，影響整個系統的運作。

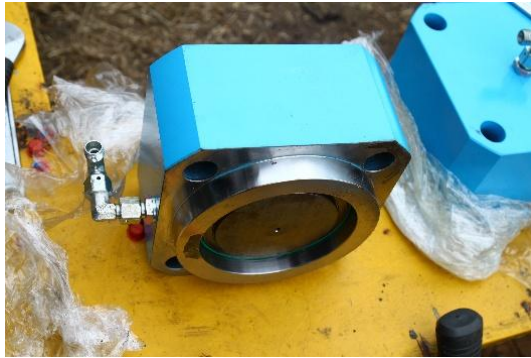


圖 9、解決方案一：液壓缸重新設計製作



圖 10、解決方案二：增設穩壓卸壓閥[3]

液壓管路及接頭老化問題：

風力機運轉過程中轉向液壓煞車系統必須保持 210bar 壓力，運轉情況下液壓缸呈現下壓狀態以維持風力機穩定迎風方向，一般風力機設計使用年限約 20 年，液壓管路油管為多層耐高壓橡皮製成，受到系統壓力長時間擠壓，橡皮會有疲乏及老化現象，因此油壓管表面產生龜裂即須更換，否則易造成漏油影響機組安全運轉，圖 11 左邊為舊有之液壓管路，表面及接頭已產生龜裂現象，金屬部位亦有鏽蝕現象產生，因此建議更換為耐壓可高達 400bar 之液壓管路如右圖所示。



圖 11、液壓管路

來令片磨耗問題：

原本來令片主要材質為酚醛樹脂(Phenolic Resin)，非耐油材質，且在吸收油脂後，會導致其加速磨耗，可能在非常短的時間，一周內就可以完全磨耗完畢。因此改採如圖 12 中，具備金屬材質的來令片，以確保液壓油滲入後，仍能保持原本的摩擦能力，提供一定的煞車力。

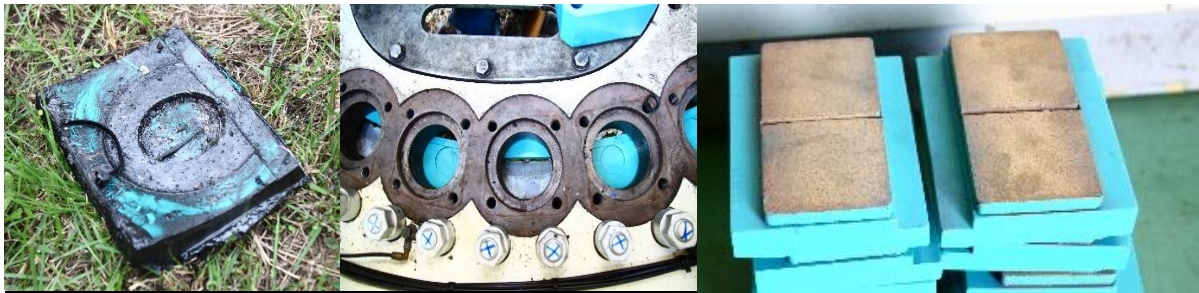


圖 12、解決方案三：煞車片材質更換

壓力不平衡問題：

本系統總共有 12 個液壓缸，以 3-6-3 的數量分配在機艙的左側、中段、右側，但由於某些液壓缸的來令片的磨耗速度相對於其他快許多，某個液壓缸來令片可能狀況正常下，另外一個液壓缸已經更換過數次來令片了。為解決此現象，本研究於主油路出口外增加一分油系統，如圖 13 所示，將主油路進行分流，分別流到 3-3-3-3 四個子油路，將液壓系統主迴路壓力由一分為四(一進四出)，分流到四組(12 顆)液壓缸，並具備可調整最大壓力之洩壓閥，於壓力超過設定值時，調節壓力並增加四個油表以便觀察，新增設液壓元件包含 1) 主體油路閥塊、2) 油壓表頭(四個出口每一出口配一油壓表以及手動開關，油壓表耐壓大於 300bar)、3) 洩壓閥(壓力調整範圍 180~250bar，耐壓 300bar)、4) 油路接頭，針對機艙轉向液壓系統改良所設計，配置之油壓分流系統，可有效改善液壓不平衡之問題。如此便可讓 12 個液壓缸內的壓力較為平均，並定期針對螺栓定磅使液壓系統受力更平均，圖 14 為液壓缸螺栓扭力定磅情形。



圖 13、液壓系統分流閥塊



圖 14 液壓缸螺栓扭力定磅

液壓管路內含空氣：

正常運轉下液壓迴路內不能存在空氣，當液壓接頭或排放空氣閥老化，均可能造成系統壓力不足，最後導致空氣進入液壓系統中，常見造成液壓管路進入空氣為加油時傾倒液壓油方式錯誤，致使有氣泡混入油內而帶入管路中；管路接頭因為振動鬆脫或油封破損使空氣吸入；管路老化龜裂或過度彎曲導致空氣進入。

空氣進入油壓系統中往往會引起過熱，亦有空氣在壓力下會被溶於油內，假使被壓縮的體積有 10% 是為於被溶的空氣，將導致壓力下降時形成泡沫，而煞車液壓缸在減壓回油時，帶泡沫的油液就有可能形成海綿的性質，因此液壓管路油中含有細微泡沫會增加總體積，造成油桶或儲液桶溢油現象。

含有空氣的液壓油，在動力傳遞時會產生急跳，類似痙攣的現象，使動力傳遞不均勻，因此現象產生的壓力波動和應力，可能造成液壓系統內部零組件損壞，嚴重時會導致整個系統損壞；含有空氣的液壓油，還可能會造成液壓馬達產生氣穴的風險，可能產生更大的吸力，會把更多的空氣連同其他雜質都吸入液壓系統內，因油中進入空氣而產生過熱現象，空氣進入同時也會帶進灰塵，這些情況會使液壓油很快變質。

圖 15 為排放空氣閥及管路接頭洩漏狀況，因為系統管路老化導致系統進入空氣，液壓油內產生灰塵現

象，圖 16 為排放空氣閥內部構造及排放空氣閥實體圖，透過鋼珠、彈簧、接觸面設計可以更有效率進行管路排放空氣，降低人員維修時間，提升系統可用率。



圖 15、管路接頭及排放空氣閥洩漏

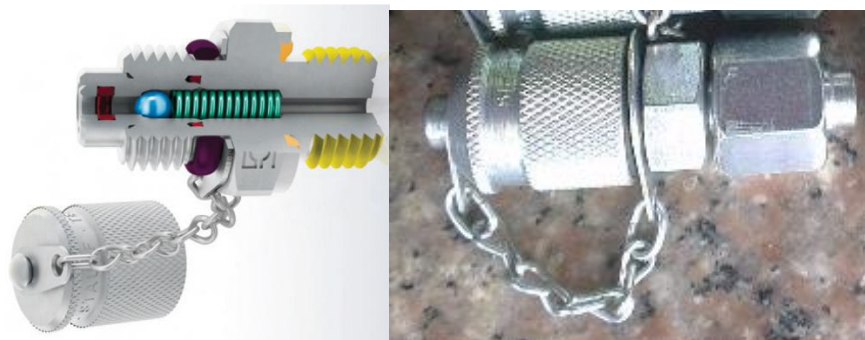


圖 16、排放空氣閥內部構造及實體圖[4]

液壓系統過熱問題：

造成液壓系統過熱可能原因為 1)液壓系統進入空氣或水分，當液壓馬達將油液轉變為壓力油時，空氣和水分就會壓縮助長熱的增加而引起過熱；2)未定期更換油品導致油變稀，使油品增生懸浮物質或與水溶合，這也會引起過熱；3) 未及時更換已損壞之零組件導致液壓馬達超過額定工作能力而跳機；液壓系統之回油閥調整不當，亦會產生過熱。

液壓系統過熱會使液壓油迅速氧化，氧化又可能會釋出更難溶的樹脂物質、油泥及酸類等，這些物質積於油路中容易加速零件磨損及腐蝕，若粘附於精密零件及電磁閥表面，還可能使零件失去原有功能，且液壓油因過熱變稀易使傳動工作變遲緩，這些過熱問題往往造成傳遞動作遲緩和回油閥門卡死，因此透過風扇散熱，有效改善液壓油過熱問題，圖 17 為液壓站及散熱風扇實體圖。



圖 17、液壓站及散熱風扇實體圖

5. 液壓改善方案成效驗證

在系統改良方案實施後，分別觀察兩部有改良(實驗組)以及未改良(對照組)的風力機組液壓系統，圖 18 為對照組、圖 19 為實驗組；從這兩部機組兩個月持續長期運轉的資料可看出，改良後的系統確實可有效使系統的工作壓力維持在正常操作壓力 190bar~210bar(圖 19)；相對的為改良的機組，液壓系統壓力在風況較大的狀況下，就會有壓力超過 210bar，達 240bar 的危險狀態。這個高壓情況雖然不至於使系統跳機，但會使機組持續處於危險的操作條件下。

另外從改良後機組的轉向系統內部外觀觀察(圖 20)，也可看到內部原本的漏油狀況不再，煞車來令片不會因為漏油快速磨耗，各個來令片由於壓力均衡，也沒有發生某個來令片因承受過多壓力而有較大磨耗的情況發生。

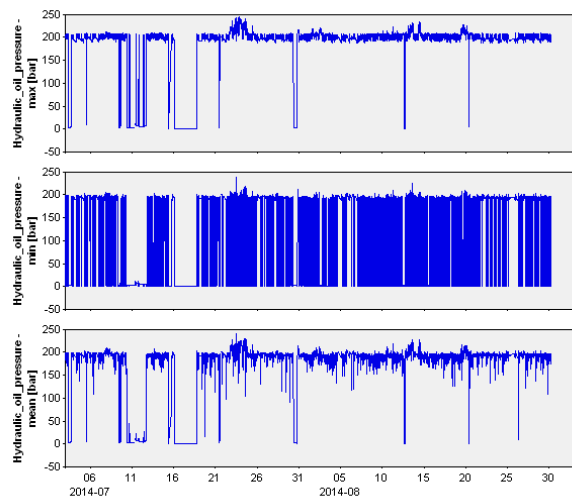


圖 18、液壓系統工作壓力(未安裝卸壓閥)

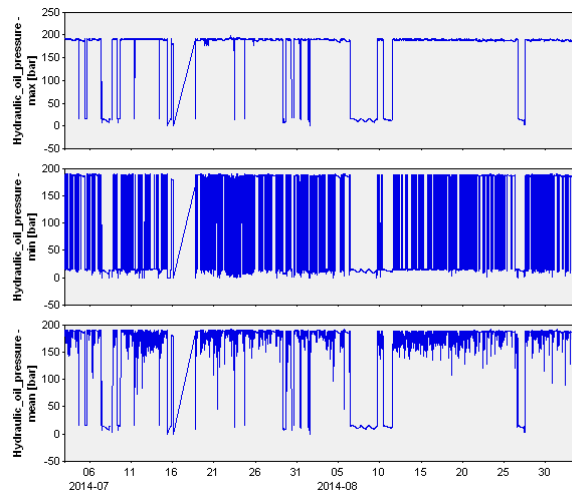


圖 19、液壓系統工作壓力(安裝卸壓閥)



圖 20、改善後(無漏油/來令片正常)

6. 結論

本研究針對風力機迎風轉向系統的液壓煞車系統進行研究改良，並成功解決原有的故障狀況。漏油是目前風力機組中的液壓系統一連串故障的主要原因，漏油問題能夠解決，許多衍生的故障發生機率都能夠降低許多。本文之改善方案使液壓系統能夠在穩定的工作壓力下持續作用。並且加強了液壓缸、液壓塊的設計，延長煞車來令片壽命，避免影響到轉向軸承，節省掉更多不必要的維修成本。

國外風力機組在台灣目前有非常多實績，透過各界持續研究投入，本土開發商與運維商的技术能量也逐漸建立，未來團隊將會持續對關鍵故障進行研究，以其本土風力運維能量能夠更完整。

參考文獻

[1] C. Moerman, “Harakosan Technical Documentation, User’s Guide (HE-0378-R03)”, Harakosan, 2009.

- [2] J. Stinlsen, "Zephyros Technical Documentation, Installation and Maintenance Manual Hydraulic Power Unit", Zephyros, 2004.
- [3]<http://www.yuli-yuya.com.tw/cht/reducing-pressure-with-check-valve/RCT.html>, last visit on 2014/08/29.
- [4] <http://www.stauff.com/>