

# 物聯網技術應用於企業服務顧客設備監測 與殘餘生命預測

## Application of Equipment with Internet of Things in Prediction and Life Consumption for Enterprise Customer Service

<sup>1</sup> 徐昌鴻                      <sup>2</sup> 張嘉文

<sup>1</sup> Chang-Hung Hsu        <sup>2</sup> Chia-Wen Chang

<sup>1</sup> 張安欣                      <sup>1</sup> 馮君平

<sup>1</sup> Ann-Shing Chang        <sup>1</sup> Chin-Ping Fung

<sup>3</sup> 劉瑞榮

<sup>3</sup> Jui-Jung Liu

<sup>1</sup> 亞東技術學院 機械工程學系

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Oriental Institute of Technology

<sup>2</sup> 銘傳大學 電腦與通訊學系

<sup>2</sup> Department of Information and Telecommunications Engineering,  
Ming Chuan University

<sup>3</sup> 開南大學 多媒體與行動商務學系

<sup>2</sup> Department of Multimedia and Mobil Commerce, Kainan University

### 摘要

本研究提出了運用物聯網(Internet of Things, IoTs)技術為發展結構，將其安裝在靜止電機(變壓器)與旋轉電機(馬達)的監測與服務上面。這是一種觀察系統運轉狀態的測量與數據存儲的過程進行裝置殘餘壽命預測(Remaining life prediction)。而該方法將用於機電設備的狀態遠程監測(State remote)。測量數據多來自變壓器週邊感測器用來截取並存儲在遠端伺服器數據庫中，用於預測電力變壓器的壽命。再者，利用韋伯(Weibull)分佈定理應用於運轉中的電力裝置物理參數數據來分析。本研究介紹了一個狀態遠程監測系統，並深入分析了數據儲存子系統。最後介紹此裝置以商業角度預測機電裝置的殘餘壽命作為企業管理的基礎。

關鍵字：企業網路、物聯網、智慧電器裝置、生命預測

### Abstract

The main objective of this paper is to fulfil the design and development of the data storage and analysis method of a measurement system that will be used for condition remote monitoring (CRM) of power transformers. The measured-data is captured from multi-sensors and stored in the server

equipment database will be used for the prediction of the power transformer of life. These data analysis of on-line transformer physic parameter has been developed using the theorem of Weibull distribution. This paper is introduced a completed CRM system and describes deeply to analyze the data-store subsystems. Finally, the fundamental considerations about the installation and maintenance are introduced. Next, the results of the project are described, and the transformer life for prediction method with commercial CRM systems is discussed. The CRM system is currently successfully installed in power transformers.

Keywords: Enterprise, IoTs, remote device, life prediction

## 1. 前言

物聯網的開發聚焦在遠程監控與相關的傳感器技術已愈趨成熟，相對的許多諸如靜止電機的電力系統設備即形成很大的需求。因此物聯網它可以有效地提供並管理機電裝置的系統管理與其運轉壽命及運轉成本等分析 [1-3]。主要是為了可以精準預測機電裝置翻新與維護保養重要時機，以便控管電力裝置維護成本。因此，這種方法可以降低電力系統風險與擾動狀態。因此，許多研究亦提出，若是長時間運轉的電力裝置所需求的連續工作時間無任何感測器與監測機制存在的話，它將可能產生重大風險影響企業生產管理並對企業產生莫大生產與人員的傷害，另一觀察它可以提供相關科技與服務技術給使用者[4]。

本研究中，將提出兩個經典案例作為分析，包含了(1)變壓器、與(2)馬達系統。因為大多數研究興趣集中在機電裝置的元件老化效應和變幻莫測的災難性事件研究。接下來，本節將討論利用狀態遠程監測設備開發預測變壓器運行壽命裝置。案例中，提出工業最熟人能知的裝置，油浸式電力/配電變壓器，而影響裝置的絕緣壽命的主要因素如下：

- a) 額定電流(rated current)
- b) 變壓器負載(operation loading)
- c) 環境溫度(environmental temperature)
- d) 油中氧含量(oil content oxygen)
- e) 水分含量(oil content water)

這些研究與統計方法已被實際運用在絕緣壽命評估與測試結果[5]。在文獻[6]描述了用於評估絕緣退化的加速壽命測試方法已被用於確定熱負荷的影響。近年來，監測技術的演進已確實可以協助變壓器的壽命管理，以便檢測電氣裝置組合材料的逐漸劣化絕緣趨勢。

通過使用測量結果或估計的每日負載曲線來確定電力變壓器的變壓器壽命損失[7, 10]。需要將測量結果與變壓器負載的每日曲線在其整個壽命期間保持相同的假設條件進行比

較。電力變壓器的運行或工作時間主要是從監測數據中獲取來分析設備壽命。在本文中，執行建立變壓器的捕獲物理數據的故障狀態的時間，以提供變壓器的操作時間。總結出具有變壓器先進服務理念的結構，洞察設備的故障狀態以便預測故障狀況發生與客戶服務相關的概率是關注的重要核心。新開發的設備提供有用的測量數據分析，以滿足客戶的這種先進服務。然而，對於截取數據分析，大多數關注問題是在負載操作中的興趣捕獲數據或用於預測變壓器壽命的溶解氣體分析。我們也知道，上面提到的很少討論的問題都得到了解決。

本文將提出貢獻以物聯網裝置預測裝置殘餘壽命並結合韋伯定律分析數值。相關各節論述如下：第 2 節介紹研究背景系統架構，包含了(a)靜止電機(變壓器)、與(b)旋轉電機(馬達)的監測與服務，如何截取的相關物理數據狀態介紹。在第 3 節當中，將提出裝置實際案例並推演韋伯分佈機率技術觀察裝置連續運轉一個月之中相關消耗壽命的預測與應用，當然以變壓器與馬達作為不同研究對象與背景。最後，第 4 節將提出研究討論與結論。

## 2. 系統架構

物聯網的系統係屬於具備寬廣內建安全的互連智慧(Interconnected Intelligence)，這個定義指出相關支援網路與雲端基礎架構當然需要被提升，訊號可平穩傳輸並達到更為嚴密資料管理與分析、執行資料的目標。一般眾所週知的物聯網架構裡，它被定義區分為四大組成要件，如圖 2 所示帶來示意即為聯網裝置(Things)、閘道器(Gateway)、網路與雲端(Network and Cloud)，以及服務創建與解決方案層(Services-creation and Solutions Layer)，以下圖示以靜止電機作為示意與說明。

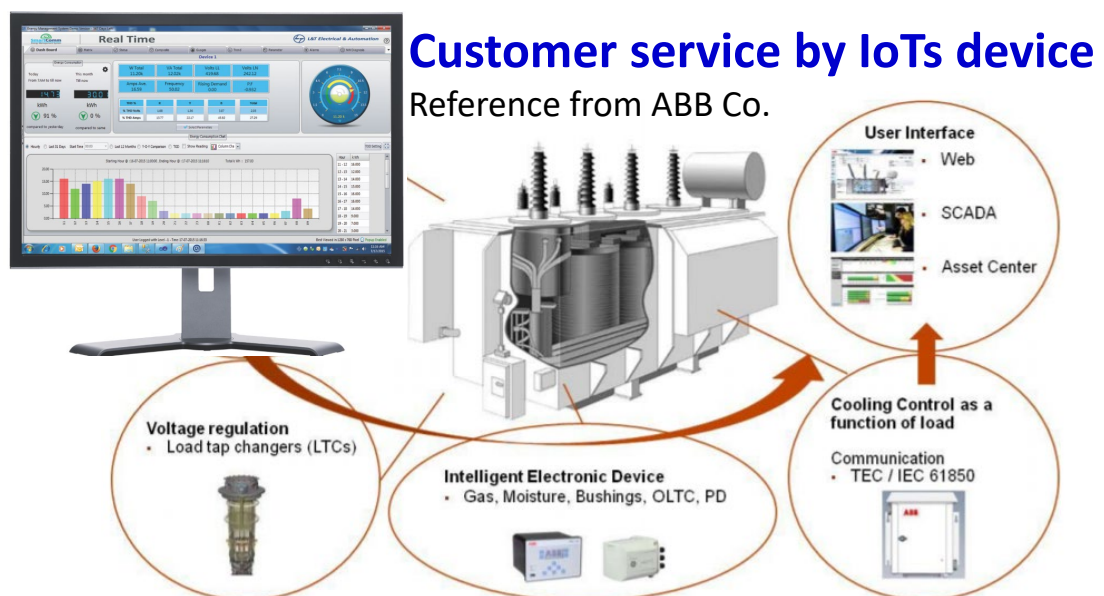


圖1. 狀態監測系統架構的開發。

### 3. 監控案例分析：

#### 3.1. 監控案例一：靜止電機於電力用變壓器運轉溫度量測應用

##### 3.1.1 三相電流(CT)和電壓(PT)感測器

本研究基礎提出量測電流與電壓的感測器，用來截取電力訊號。的電流通過使用電流傳感器來測量。電流感測器(Current transducer)是專為電流測量而設計的強度變壓器。CT 感測器，用於測量電力變壓器三相高壓側的 R, S 和 T 相電流。以相同的方式，電壓變換器用於測量高壓側的 R, S 和 T 相以及低壓電力變壓器側的 S 相中的電壓。這些電壓感測器是專為電壓測量而設計的電壓互感器。在圖 2 中，顯示 CT 和 PT 感測器捕獲信號數據形成現實的變換器。

##### 3.1.2 濕度感測器和相鄰溫度測量

變壓器外殼的外部用於測量濕度和大氣溫度感測器，其功能滿足包括完全校準，數字輸出，低功耗，優異的長期穩定性和 SMD 型封裝。該感測器設置在狀態監測系統內部。考慮到狀態監測系統是為工業應用而開發的，採用了高質量環境下的電子元件。濕度溫度感測器如圖 3 所示。

##### 3.1.3 溫度感測器(AKM)組件進行油溫測量

對於使用 AKM 感測器測量溫度，該裝置是油或繞組溫度的訊號傳感，由帶有內置電加熱元件的電阻溫度計組成。繞組溫度變化傳輸模擬了變壓器內部線圈繞組上端點溫度最熱最高部件溫度。但是，由於環境溫度很難直接從變壓器繞組的油溫測量數據。因此，本文使用的儀器是便於感測器組件可直接再一次的重現溫度的熱點曲線變化。



圖2. 狀態監測系統內部結構。

線圈繞組溫度變化傳輸感測器 AKM 放置在變壓器外殼油箱蓋的上方中。因此，AKM 感測器的設備主要是通過與變壓器負載成比例的電流截取信號數據。再由內部加熱元件給予變壓器油溫的溫度梯度與繞組在頂部油溫上的溫度後作為增加比例值。這種方法，AKM 感測器可以模擬繞組最熱部分的溫度，實際上，它意味著繞組它的真實熱點溫度。

裝置一共有三個 PT-100 感測器用於溫度測量，它有別於 AKM 溫度感測。所有這些 PT-100 的參考是 IEC-60751，它們的溫度係數  $\alpha = 0.00385055$ 。一個用於測量環境溫度。另外兩個用於測量電力變壓器底部和頂部絕緣油的溫度。AKM 感測器如圖 4 所示。狀態監測系統安裝如圖 5 所示。

### 3.1.4 IEEE 標準與熱油溫度預測計算

狀態監測的操作實現及其特定的調節，它提供  $\pm 5$  V 的模擬電壓輸入通道，它用於調節除 PT100 感測器之外的所有模擬信號。狀態監測設備的直流電流信號範圍為 4mA~20mA，默認值。電壓信號直接連接到調節卡的輸入，並且電流信號先前從精密電阻器轉換。溫度熱點的計算如下所述。從 IEEE 標準模型中模擬熱點溫度和熱老化加速因子的方程。獲得 C57.91-1995 [8]。

- $\theta_A$ :環境溫度(Ambient temperature) °C
- $\theta_{HS}$ :熱點溫度(Temperature of hot spot) °C
- $\Delta\theta_{TO}$ :油溫升高(Top oil temperature rise) °C
- $\Delta\theta_H$ :繞組溫升(Winding temperature rise) °C
- $F_{AA}$ :絕緣的熱老化加速因子(Thermal aging acceleration factor for insulation)
- $F_{EQA}$ :總時間段的等效老化因子(Equivalent aging factor for the total time period)
- n:時間間隔 t 的索引(Index of the time interval t)
- N:時間間隔總數(Total number of time intervals)
- $F_{AA,N}$ :在該時間間隔內存在的溫度的老化加速因子(Aging acceleration factor for the temperature which exists during the time interval)
- $\Delta t$ :時間間隔(Time interval per hours)

依據美國電子電機工程師學會(IEEE STD)標準裡指出，熱點溫度定義如下

$$\theta_{HS} = \theta_A + \theta_{TO} + \theta_H \quad (1)$$

詳細的模型和[8]中的熱老化加速因子，由下式定義

$$F_{AA} = e^{\left[ \frac{15,000}{383} - \frac{15,000}{\theta_{HS} + 273} \right]} \quad (2)$$

其中大於 1 的值，用於最熱點溫度的參考值。

溫度低於 110°C 與溫度低於 1°C。在給定溫度循環的給定時間段內將消耗的參考溫度的等效壽命（以小時或以日為單位）如下：

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (3)$$

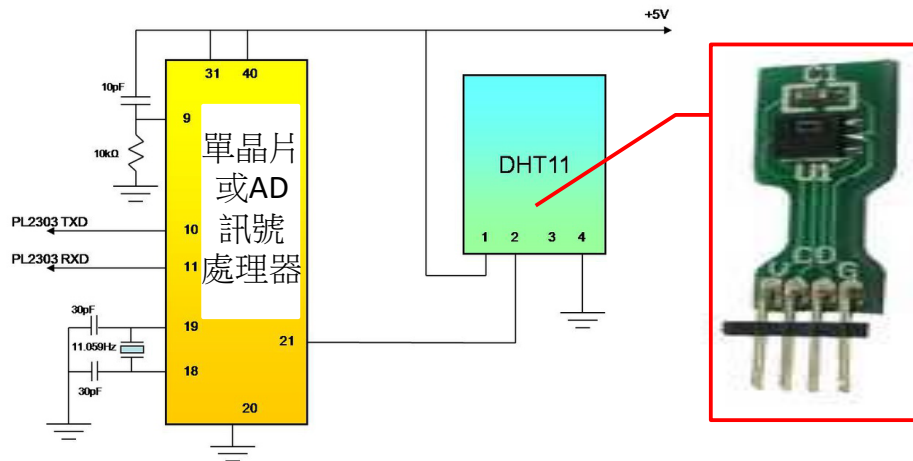


圖3 溫濕度感測器開發與電路應用設計



(a)

(b)

圖4.用於測量AKM感測器的油溫：(a)油溫指示器，(b)溫度計

## Successful Monitoring Transformer

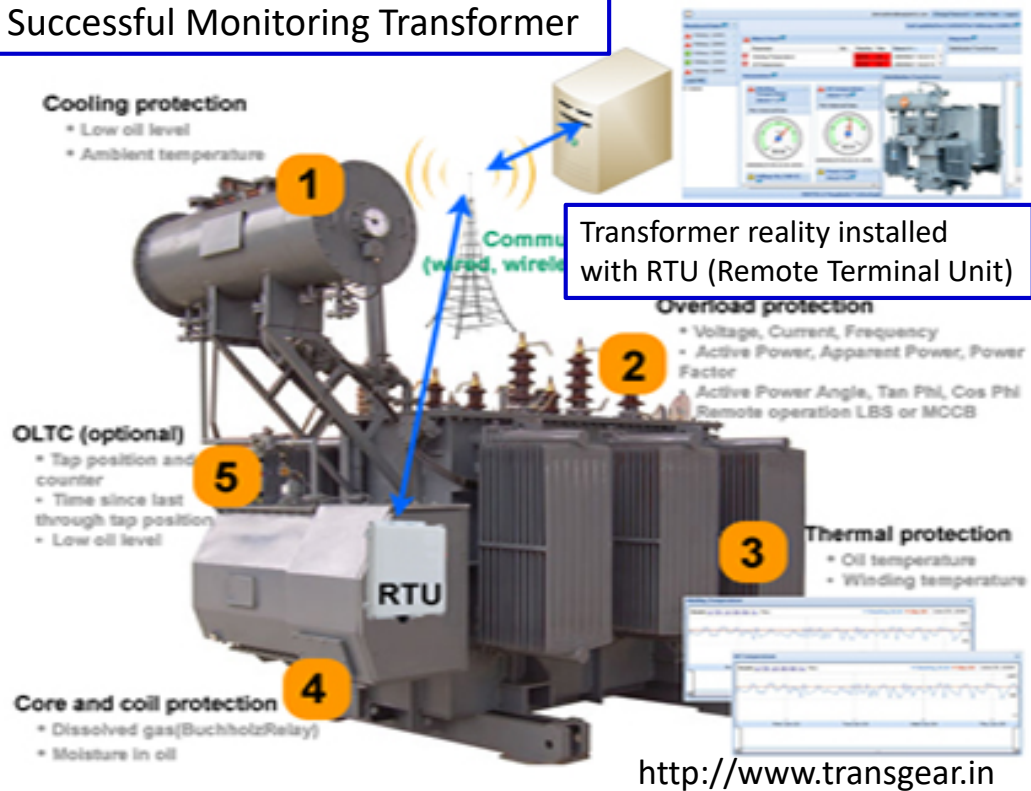


圖5 感測器和狀態監測系統安裝在1 MVA的電力變壓器中的位置

本節中討論的模擬負載和環境曲線現在用於上述 IEEE 標準的變壓器壽命計算過程中。目前正在修訂電力變壓器的裝載指南。值得注意的是，傳統的熱點溫度計算方法使用了許多不正確的假設，包含：

- (1). 假設冷卻管道中的油溫與最高油溫相同。
- (2). 忽略繞組電阻隨溫度的變化。
- (3). 忽略油粘度隨溫度的變化。
- (4). 輕敲位置的影響被忽略。
- (5). 假設環境溫度的變化會立即影響油溫。

此外，實驗工作已經表明，在突然過載開始時，油慣性引起繞組冷卻管道中的油溫快速升高，這不會被罐中的頂部油溫反射。因此，考慮到所有這些因素，正在開發交替的方程組。另一個重要的演變是變壓器“熱複製”定義指南的消失，這通常用於提供額定負載下繞組溫升的一個允許數值。此參考文獻將不再支持用於製造商所作的熱點溫升預估。這可能會降低變壓器製造商提供該關鍵熱參數的可靠性。

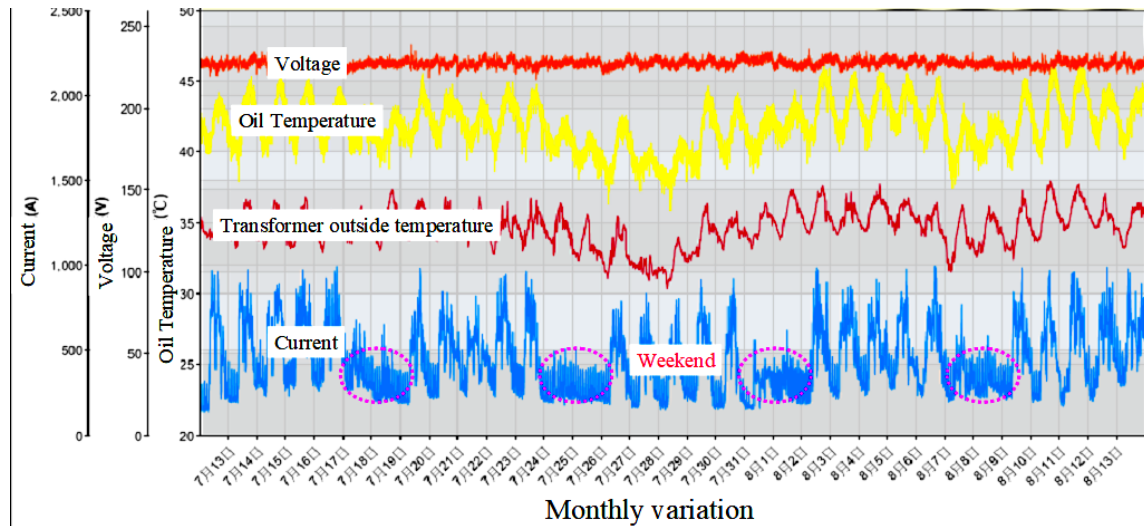


圖6.電力變壓器物理數據測量持續時間月變化

眾所周知，根據 IEEE 建議，絕緣的有效使用壽命約為 180,000 小時（約莫為 20.6 年）。但絕緣的壽命消耗變化是不同的，這是由於變壓器的運行條件變化而在特殊情況下轉移。本文旨在截取在一個月（786.931 小時）的消耗壽命中沿使用時間軸的變化。因此，壽命的終止是根據消耗絕緣壽命 786.931 小時的使用時間來模擬的。模擬值和 K 中反映的變壓器運行條件的變化將導致壽命終止值無效。在這種情況下，使用韋伯(Weibull)分佈 pdf 函數在一個月內對模擬結果進行更精細的曲線擬合。韋伯分佈最常提供最適合生命數據的分佈。

此外，使用的樣本大小足以準確區分 Weibull 和其他分佈。表明三參數威布爾分佈最適合壽命終止值，其特徵在於 $\beta$ 為 22.017，以及 $\eta$ 為約 786.931 小時（即一個月）。為了理解概率性質及其統計分佈，我們計算其期望和方差。假設上述式子(1)與(2)允許進行總結使用更新理論更為近似[9]。

$$E(\hat{T}_\lambda) \approx \frac{\lambda}{\mu} \quad (4)$$

$$\text{Var}(\hat{T}_\lambda) \approx \frac{\sigma^2 \lambda}{\mu^3} \quad (5)$$



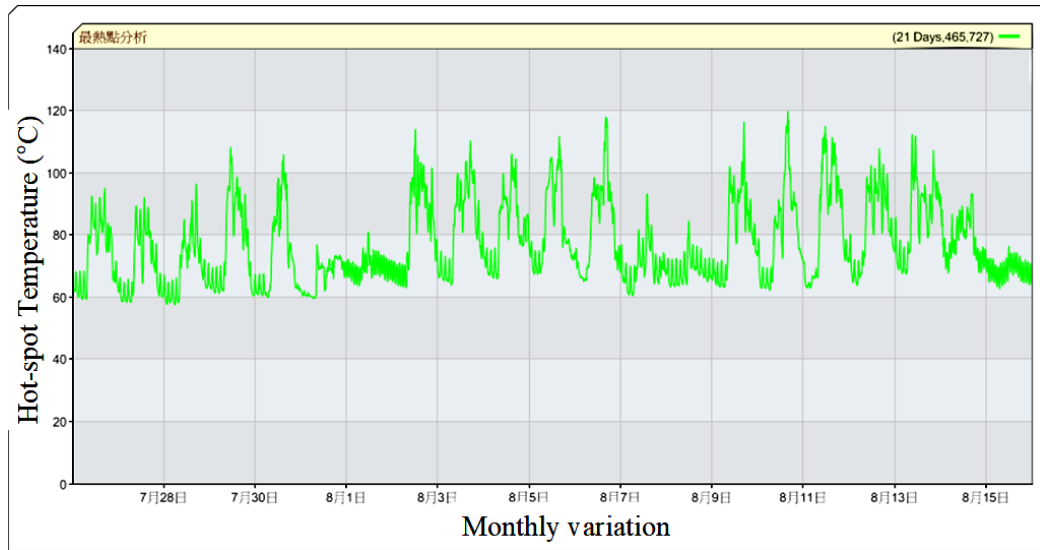


圖7.電力變壓器熱點溫度遠程監控狀態

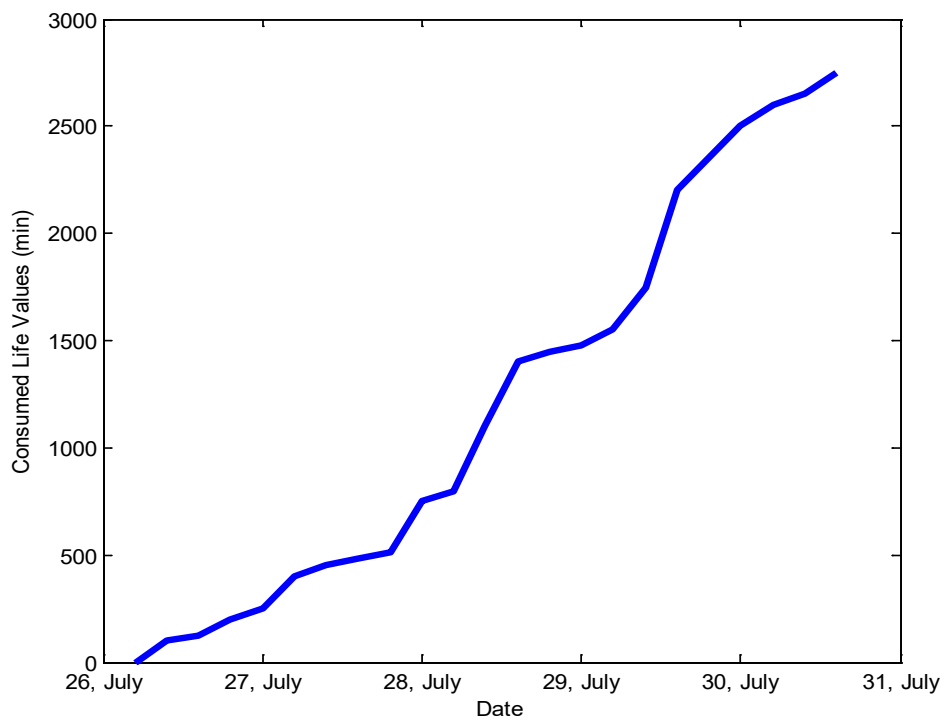


圖8.使用IEEE標準測量的消耗壽命值的測量結果

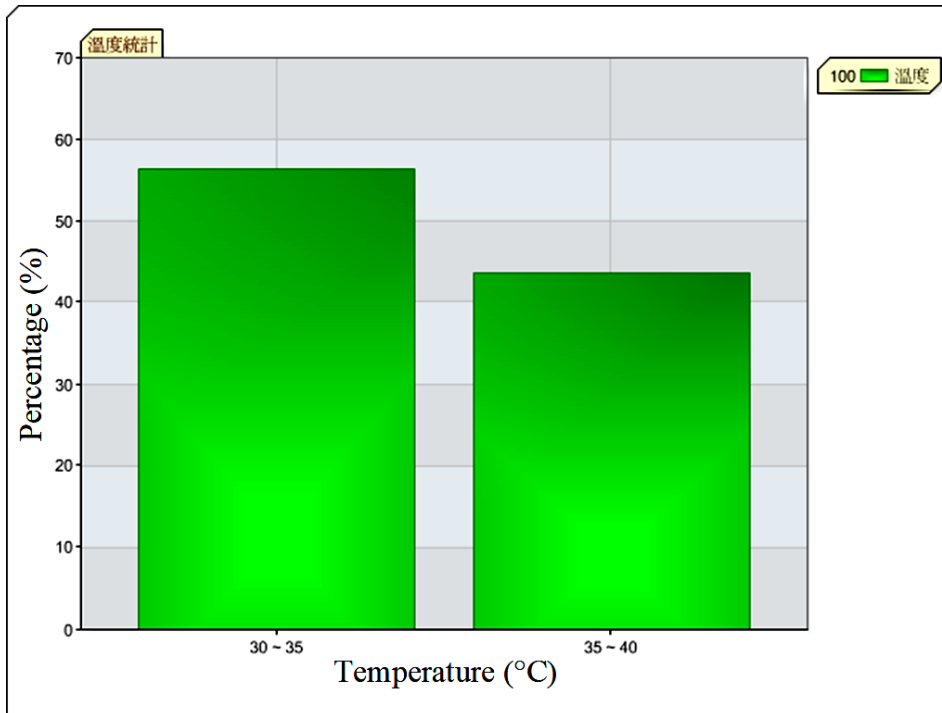


圖9.電力變壓器不同溫度百分比的測量結果

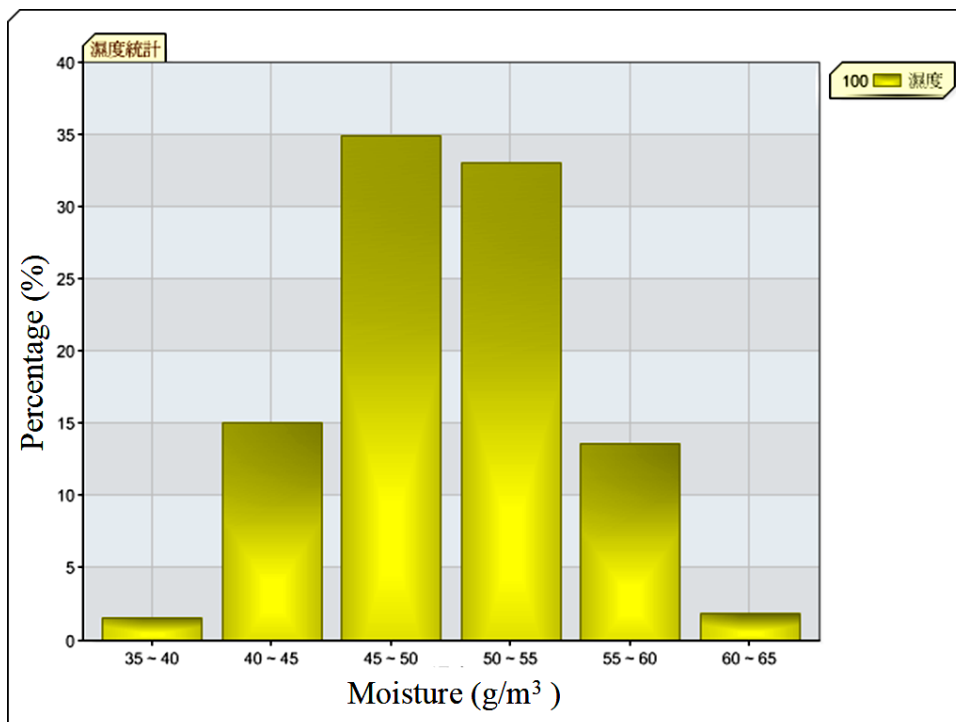


圖10.電力變壓器濕度數據百分比的測量結果，以Weibull方法估算變壓器壽命

#### 4. 物聯訊號與殘餘壽命關係討論

這些表達式將一個月消耗壽命分佈的統計特徵與達到設計壽命所花費的時間的統計特徵聯繫起來。使用(4)和(5)，消耗設計壽命 786.921 小時所需的時間的預期值是 32.17 年。並

獲得一個月的條件下運行的變壓器的耗時設計壽命的變化。根據上述等式 (4) 和 (5)，在我們的案例研究中消耗 90% 的絕緣設計壽命所需的預期時間由下式給出：

$$E(\hat{T}_\lambda) \approx \frac{k \times \lambda}{\mu} = \frac{0.9 \times 786.921}{22.017} = 32.17 (\text{殘餘運轉年壽})$$

其中完整的模擬方法是計算達到分數  $k$  的平均時間的能力。工程師在可靠性安排與重新更新建立相關的維護策略時，會對此度量標準將有所幫助。

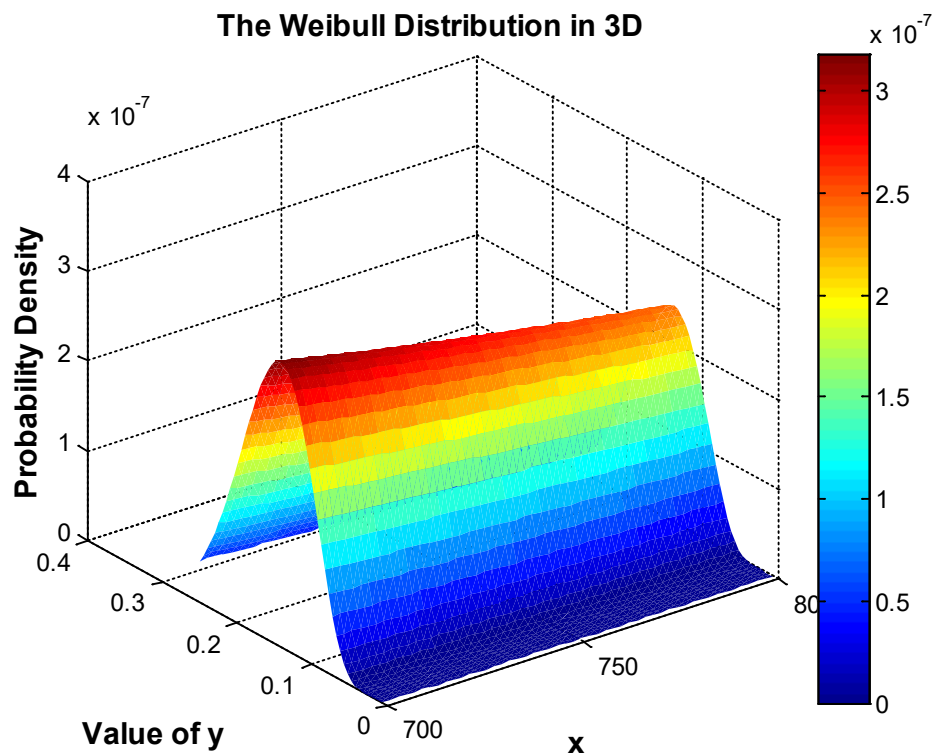


圖11.威布爾分佈方法的研究案例

### 3.2. 監控案例二：旋轉電機於『伺服馬達』動力運轉監測應用

工業應用除了上面談到靜止電機的變壓器於電力效能控制方面很重要外，另外旋轉電機如馬達系統亦顯的更多元的應用。近年來，在傳統與科技半導體產業當中，高效能的訊號處理器(MCU/MPU)即為用來提高馬達控制重要議題。因為對於馬達而言它的應用非常廣泛，包含了各種數位家電的產品冷氣、冰箱等以及泛指電動車/油車等中型、小型馬達可能高達數十顆同時在一具受控電氣裝置之中。本研究針對物聯網在馬達應用於數位家電、智慧型機電裝置或手機等等均有不同角色重要性，使用快速處理訊號或高效能半導體晶片來對馬達達到控制的目標已漸趨實現，包含了 AI 人工機器人與物聯網的應用，均有著馬達的身影與實用化的發展。

本研究使用一套為針對電動車所使用的微電腦馬達控制套件及其閉迴路控制系統，因此套件上搭載許多的控制與訊號分析用的半導體晶片整合後，用來控制馬達與輸入命令並正確的將趨動電壓平穩送入馬達以達到控制用的驅動總成，即謂之閉迴路控制系統。此研究案例，如圖 12 所示為物聯網控制馬達並成功用運用閉迴路控制系統為例作研究背景。此控制器，它屬於三相與單位控制迴路，因此具有六具驅動裝置，亦為控制電源輸出的 IC 元件與系統。此電源 IC 可以平穩有效的將控制馬達用的電壓性能極大化，以達到平穩速度控制目的，如圖 13 為本研究所使用物聯網馬達訊號截取量測平台。

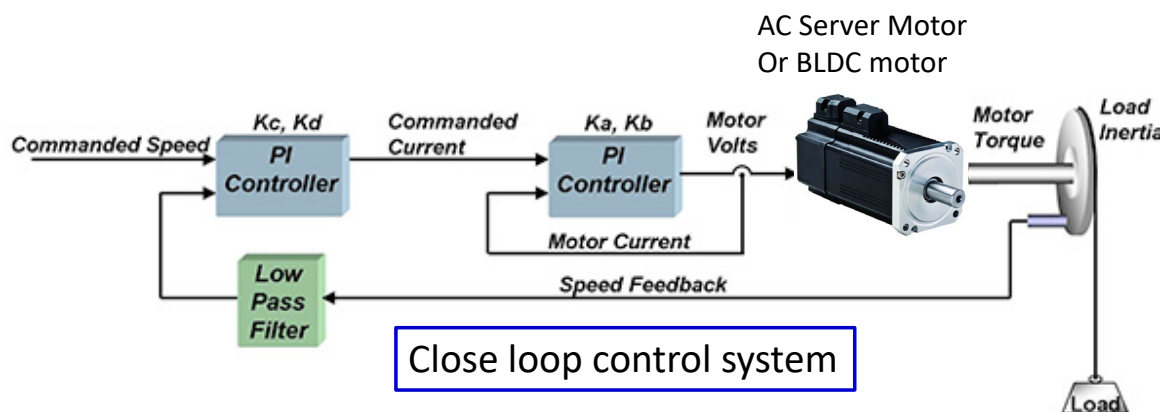


圖12. 物聯網控制馬達：以閉迴路控制系統為例

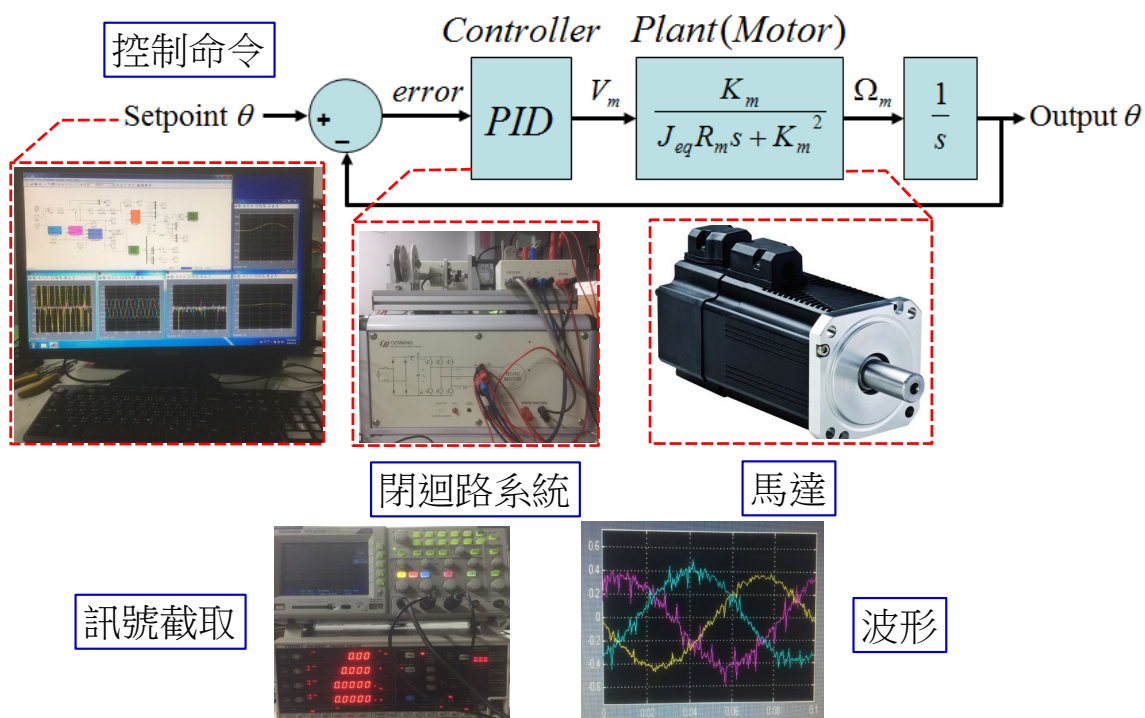


圖13. 物聯網馬達訊號截取量測平台

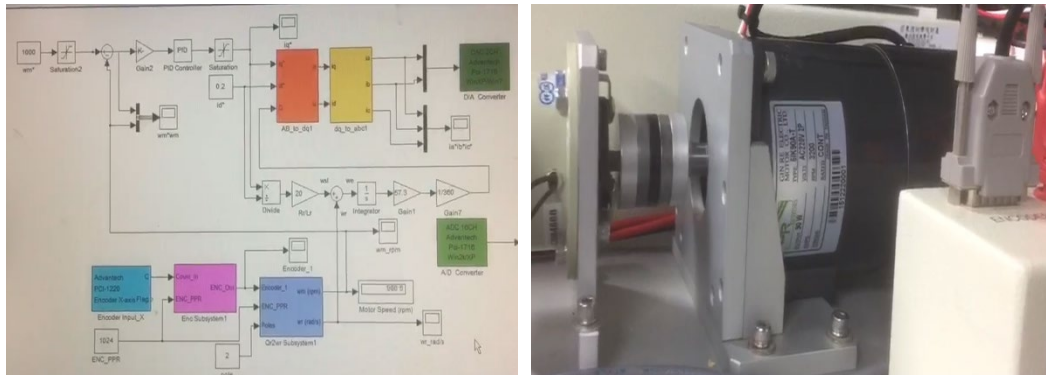
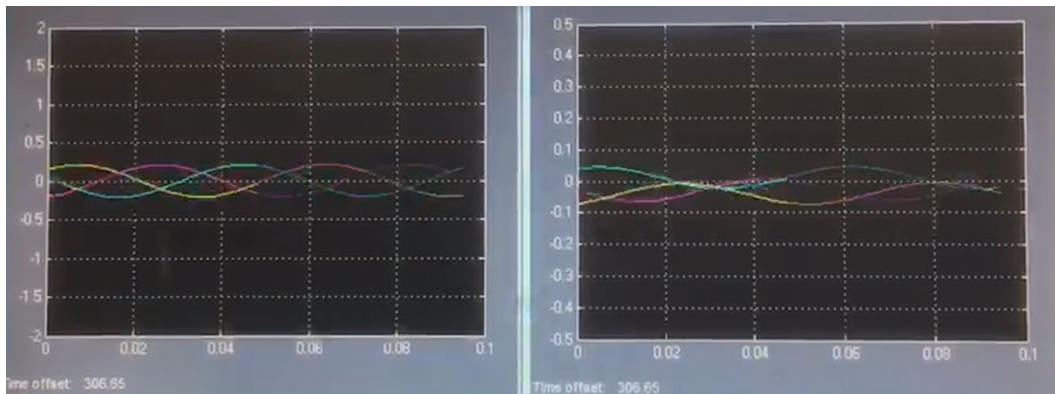
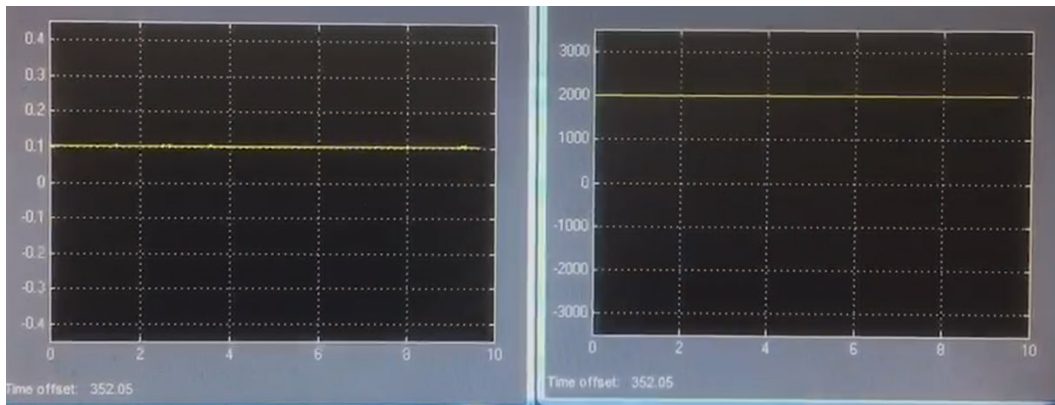


圖14. 控制系統與馬達



(a)

(b)



(c)

(d)

圖15. 物聯網馬達訊號截取結果：(a)三相電流模擬結果、(b)三相電流實際A/D Converter 訊號、(c)向量控制q軸電流、(d)馬達實際轉速(r.p.m.)量測結果

本案例提出以馬達在工業應用上的應用，與案例一相同需配合許多智慧型的多元偵測訊號的感測器應用的需求，如實際馬達量測訊號圖 14 與 15 而言，同時以控制系統設備，包含了感測器、馬達、電池與電控系統同時導入後，可以增加可靠度與控制上的精密度，並且

對於馬達運轉所發生故障問題，在物聯網技術可以立即性的偵測與排除。而且，多元的感測器針對馬達或控制系統裝置所截取的資訊，可以在現今大數據分析技術裡來搭配對馬達與電動車等應用的驗證，提出了最好的環境來預測並提供顧客的服務。

## 5. 結論

本文成功開發了一個具有物聯網特性的狀態監測系統用來分析二個案例，包含了靜止電力變壓器以及旋轉電機馬達的應用。對於系統的殘餘消耗壽命而言，選擇 IEEE 標準是因為它們的堅固性和可靠性。狀態監測系統的要求必須滿足要求條件。一般來說，它必須安裝在受控體的機制內。因此，在台面上此系統對於現有商業案例的主要優點是開放且易於重新配置以適應預測模型的變化。這個系統，在這種情況下用於很多感測器設備，包括溫度測量感測器，諸如溫度、電流、電壓或者轉速等感測器元件。因此，安裝在該應用中的商業狀態監測系統具有重要的優點，例如從感測器日期容易地與分佈式數據採集設備所綜整而成。再者，以韋伯(Weibull)分佈法分析溫度測量結果進行消耗壽命進行雙相的比較，相信以此背景所開發出來的軟體與硬體，可提供顧客有效且信賴的裝置壽命預測服務，並以物聯網訊號傳輸與數位訊號溝通為開發目標。

## 6. 參考文獻

- [1] C. L. Bak, et. al., "Overvoltage Protection of Large Power Transformers-A Real-Life Study Case," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 657-666, 2008.
- [2] A. F. Picanço, M. L. B. Martinez, C. R. Paulo, "Bragg system for temperature monitoring in distribution transformers," *Electric Power System Research*, vol. 80, no. 1, pp. 77-83, Jan., 2010.
- [3] A. S. Farag, et. al., "On-line partial discharge calibration and monitoring for power transformers," *Electric Power System Research*, vol. 50, no. 1, pp. 47-54, May, 1999.
- [4] V. Mijailovic, "Method for effects evaluation of some forms of power transformers preventive maintenance," *Electric Power System Research*, vol. 78, no. 5, pp. 765-776, May, 2008.
- [5] J. Rivera et. al., "Improving Reliability Assessment of Transformer Thermal Top-Oil Model Parameters Estimated From Measured Data," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 169-176, 2009.
- [6] L. Wenyuan, E. Vaahedi, and P. Choudhury, "Power system equipment aging," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 4, no. 3, pp. 52-58, 2006.
- [7] G. Swift, et. al., "A fundamental approach to transformer thermal modeling. II. Field verification," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 176-180, 2001.
- [8] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. *IEEE Std. C57.91-1995*.
- [9] R. C. Degeneff, et. al., "Determining the effect of thermal loading on the remaining useful life of a power transformer from its impedance versus frequency characteristic," *IEEE Trans. Power Deliver*, vol. 11, no. 3, pp. 1385-1390, Jul. 1996.
- [10] 參考台灣模糊與應用研討會，會議論文編號 19 與 20 號，2018 年 11 月 5 日-6 日

7. 致謝

- 6-1. 本研究謝謝科技部專題研究計畫支持，計畫編號 107-2218-E-161 -001，計畫執行期間自 2018 年 10 月 01 日起至 2019 年 09 月 30 日止。
- 6-2. 作者致謝台灣華城公司(Fortune Electric Company, in Taiwan)過去研究工作支持