

# 外掛式感測系統於工業馬達磁鐵故障偵測應用

## Application of External Sensing System in Motor Magnet Condition Monitoring and Fault Detection

易承霈<sup>1</sup>、吳逸鈞<sup>1</sup>、劉家榮<sup>2\*</sup>、郭吟翎<sup>3</sup>、李宛龍<sup>4</sup>、楊士進<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣大學 機械工程學系 碩士生

<sup>2</sup> 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 研發經理

<sup>3</sup> 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 副研究員

<sup>4</sup> 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 研究員

<sup>5</sup> 國立臺灣大學 機械工程學系 教授

**摘要：**隨著物聯網技術的興起，工業上對於機械系統運轉狀況之即時回報功能也受到重視，其日漸成為主流研究目標。本文主要就永磁同步馬達之線上監測技術，透過開發外掛硬體的方式，進行非侵入式之即時磁場量測。此外積分電路的應用也將在本文中引入，利用其對馬達脈寬調變驅動系統之電壓量測能力，能精準還原出原始電壓並大幅提升馬達磁通估測效能，之後再透過已知參數進行永磁磁通解離，以完成即時馬達永磁場狀態監測目的。本文將以健康、均勻退磁（剩餘磁力 60%，Uniform Demagnetization UD）及區域退磁（單槽磁力剩餘 0%，Local Demagnetization LD）三顆 400W 馬達進行磁通估測器效能驗證。

**Abstract :** With the rise of the Internet of Things (IOT) technology, the industry has also paid more attention to the real-time monitoring of the operation status of the mechanical system, which also has gradually become the mainstream research object. Therefore, this article will focus on the online PMSM status monitoring, and conduct non-invasive real-time magnetic field measurement by developing external hardware. In addition, the concept of the digital-integrator is implemented to meet this requirement, which can capture the duty-cycle of the Pulse-Width Modulation (PWM) and then reconstruct it back to the original voltage signals, then the precision motor flux is derived through the state-observer design and the magnetic flux is decoupled. In this way, the abnormal magnetic flux conditions of the permanent magnet can be detected. Three motors with customized magnets that represent Health, Uniform Demagnetization (UD, 60% flux in total) and Local Demagnetization (LD, 0 %flux in one pole) are used to validate the proposed method.

**關鍵詞：**永磁同步馬達、磁場狀態分析、外掛式電壓量測、狀態估測

**Keywords :** PMSM, Flux analysis, External voltage measurement, State estimation

### 前言

永磁同步馬達 (PMSM) 有著高能量密度與高運轉效率等優點，現今已被廣泛運用於各種工業。近年來更是成為機器人、無人機與自駕車等新穎技術不可或缺之關鍵部分。然而，鈷鐵硼燒結磁鐵作為大部分永磁馬達的磁場來源，有結構脆弱及對高溫敏感 [1] 等問題。若其受到高溫影響或是衝擊而產生損傷，其磁力的下降不但會使得馬達

運轉效率降低，動力控制系統更是有可能因參數改變而進入不穩定狀態，最終導致停機也不無可能。由於在多數情況下馬達內部磁場狀況無法透過感測器直接測得，只能透過估測器 [2] 的方式來估算內部磁場狀態。而其估測準確度會受到電壓電流訊號源的精度影響，且在馬達低速低負載運轉情況下尤為嚴重。考量到傳統三相馬達變頻器中固有的死區時間延遲，命令電壓與實際電壓輸出在脈寬調變 (PWM) 之工作週期 (Duty Cycle) 上

差異較大，作為估測器輸入會產生額外誤差。其他諸如透過外掛低通濾波器來量測馬達三相電壓的方法則會有相位延遲的問題。因此本文將引入數位積分器在電壓量測上之應用，並介紹其如何透過抓取脈寬調變工作時間來準確地還原系統輸入電壓，並探討其所量測的高精準度電壓對磁通估測的影響。之後則會說明本文所使用之改良式磁通估測器架構，及如何透過估測結果導出磁鐵磁通狀態。最後再以健康、均勻退磁及區域退磁 [3] 三顆 400W 馬達進行實驗驗證。

### 監測系統規畫

本段落分成三個部分，第一部分為外掛量測系統，說明如何將其以外掛的方式安裝在伺服馬達系統上。第二部分則介紹數位積分電路，解釋變頻器三相 PWM 電壓在進入外掛感測系統前所作的處理與原因。最後是積分電路量測進入微控制器後，再被還原成三相電壓的方法。

#### 1. 外掛硬體架構

本文所使用的外掛感測器包含電壓及電流兩部分，電流感測部分選用開放式霍爾感測元件 (Hall Current Transducer) 進行外掛式非接觸電流量測。而電壓部分則是使用三相端點電壓作為積分器輸入，不需取得中性點或是端對地電壓即可量

測。因此對於一般市售伺服馬達驅動套組而言，本外掛量測架構可完全獨立於驅動系統，實現完全的外部量測方法，圖 1 展示了本文所提之外掛量測架構。

#### 2. 數位積分電路介紹

一般情況下，馬達輸出電壓可以透過電壓命令估測法來取得，其方法是透過驅動器晶片所給出的命令電壓，進行驅動器開關死區補償後，當作真實輸出電壓來使用。此方法雖然能夠避免外掛硬體架設所帶來的額外成本，但驅動器固有的死區時間所造成之非線性電壓誤差，在不同運轉狀況下會有相當大的差異。因此透過補償的方式難以完全還原成實際電壓，尤其是馬達在低速低負載運轉狀態時。除此之外，磁鐵旋轉所造成的反電動勢佔馬達電壓系統中很大一部分，其數學模型，如式 (1) 表示。

$$V_{qds}^s = r_s i_{qds}^s + \frac{1}{2} (L_{qs} + L_{ds}) \rho \cdot i_{qds}^s + \frac{1}{2} (L_{qs} - L_{ds}) e^{j2\theta_r} (\rho + j2\omega_r) i_{qds}^s + \omega_r \lambda_m e^{j\theta_r} \quad (1)$$

因此若要透過估測器來進行磁通估測，電壓回授的精確度乃是一大考量。為此本文使用數位積分電壓回授系統 [4]，利用計算 PWM 脈衝所佔時間來還原真實輸出電壓，其量測流程，如圖 2 所示。

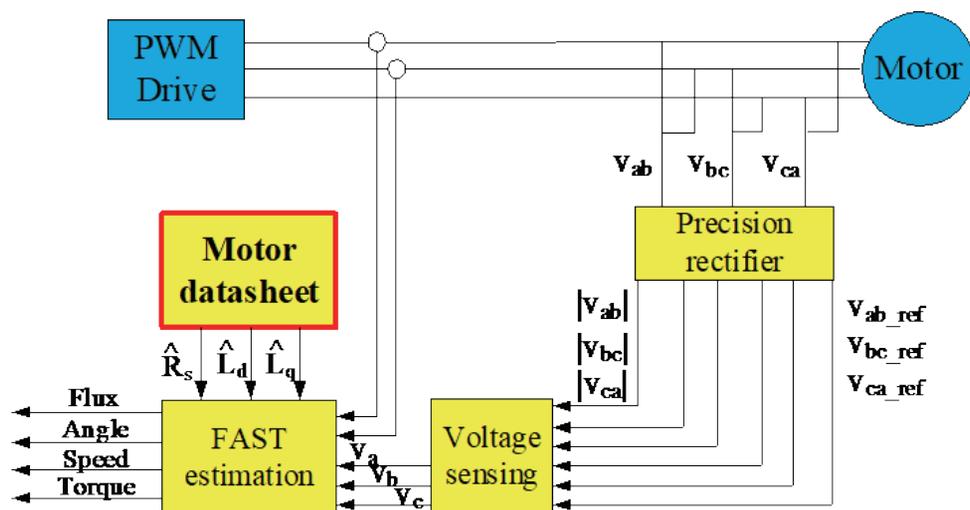


圖 1 外掛量測架構

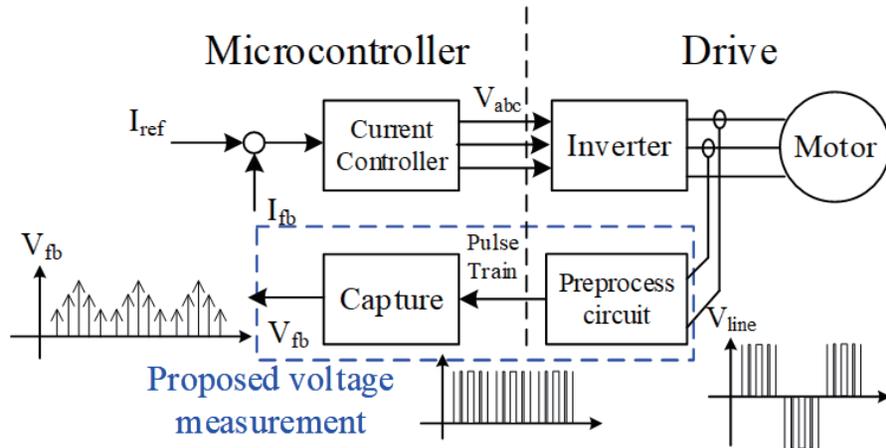


圖 2 脈寬調變電壓即時量測系統流程

虛線框起部分即為本文所使用之電壓量測系統，其會使用三組線電壓 ( $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ ) 作為數位積分電路輸入，文中以  $V_{line}$  作簡化表示。而考量到外掛感測器地端與驅動系統地端存在壓差或雜訊干擾，以及變頻器切頻時所產生之倍頻諧波影響，因此量測時採用的是線間電壓而非相對地電壓，以盡可能消除感測器輸入電壓的潛在干擾。而所得之線間電壓在進入控制器前，會分別經過壓降與極性校正二次處理，其目的是將原本的線間電壓區間 ( $+V_{DC} \sim -V_{DC}$ )，調變至處理器所能使用之範圍 (以本文所使用之微處理器為例，其工作電壓區間為  $0 \sim 3.3V$ )。此處壓降的部分只需簡單的電阻分壓電路即可完成，而極性校正部分則會使用一組半正整流與全正整流電路來完成，其架構如圖 3 所示。

整流電路工作原理可分為正、負電壓輸入兩部分來說明，當線間電壓輸入為負向時，其電壓

會因反向放大器作用反向成  $V_1$ ，其正向 (右側負向部分) 可通過二極體，而負向 (左側正向部分) 則無法，正向偏壓輸出  $V_2$ 。而當線間電壓輸入為正時，二極體為逆向偏壓形成開路，其輸出電壓  $V_3$  會等同於輸入。換句話說，當一交替於  $0 \sim 3.3V$  之間的線間電壓通過此全正整流電路後，正向電壓將維持不變而逆向部分極性反轉，致使最終輸出完全為正極之正向電壓。如此一來，原本的線間高電壓在經過偏壓與全、半正整流電路後，會形成如圖 4 之參考、相轉兩組電壓，作為控制器之數位積分輸入，為下一節的相電壓重建起到重要作用。

### 3. 相電壓重建

本節所使用之相電壓重建方法皆在處理器中完成，處理器數位積分功能將會計算 PWM 脈衝的工作時間，可乘上直流電壓  $V_{DC}$ ，還原出原始電

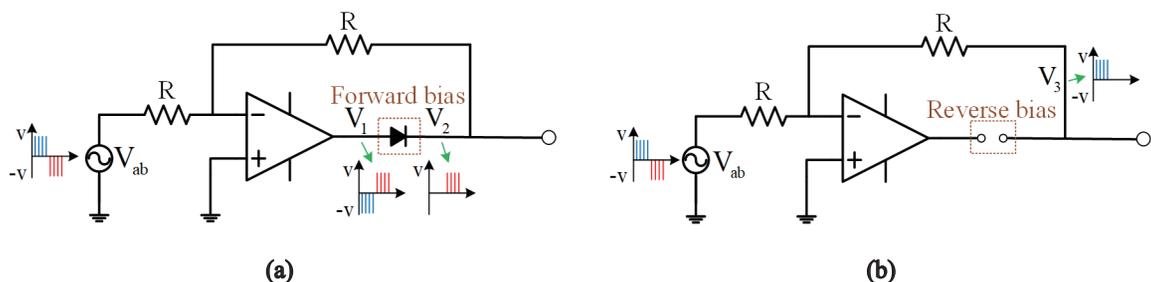


圖 3 全正整流電路 (a) 正向偏壓 (b) 逆向偏壓

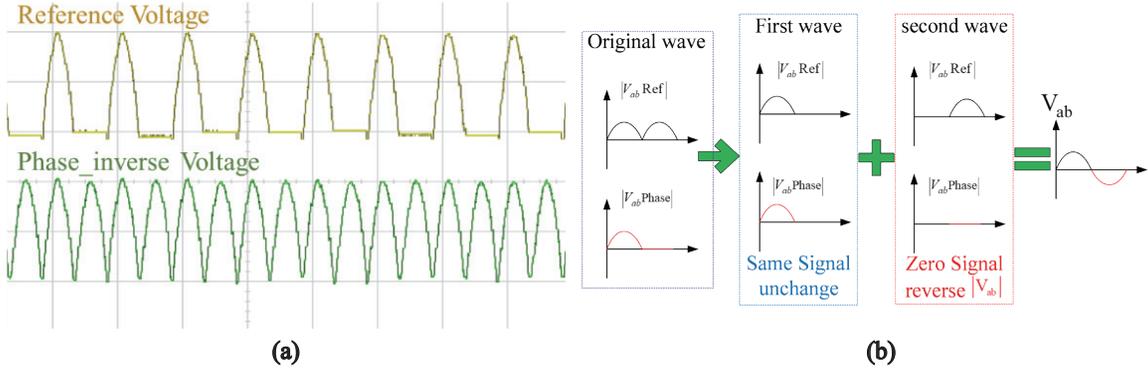


圖 4 (a) 參考、相轉換電壓 (b) 極性校正流程

壓幅值。而圖 4 展示了從參考電壓與相轉換電壓進行極性校正的過程，因參考電壓只在線間電壓為正值時有輸出，使用者可以透過訊號的有無輕易判斷出原始線間電壓之極性。

然而對於馬達狀態監控而言，線間電壓還需再轉換成相電壓才能做使用，此處我們參考變頻器之三相開關特性，及其三相電壓總合應為零，如式 (2) 表示。

$$V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} = 0 \quad (2)$$

再以相電壓表示線間電壓，如式 (3) 表示。

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{aN} - V_{bN} \\ V_{bc} &= V_{bN} - V_{cN} \end{aligned} \quad (3)$$

將兩式結合便可得出相電壓為，如式 (4) 表示。

$$\begin{aligned} V_{aN} &= \frac{V_{bc} + V_{ab}}{3} \\ V_{bN} &= \frac{V_{bc} - 2V_{ab}}{3} \\ V_{cN} &= -V_{aN} - V_{bN} \end{aligned} \quad (4)$$

有了此三相電壓後便可進一步將其轉換為定子電壓，作為磁通估測器訊號輸入源使用。

### 磁通估測器

一般情況下，馬達磁通狀態並不同於電壓、電流等物理場能以外掛形式直接量測，其只能使用狀態估測器 (State Observer) 來進行估算。除此之外，考量到一般估測器可能遇到誤差問題，本

文將會在傳統估測器架構上，引入改良式磁通估測設計，並介紹其原理，解釋如何將磁通估測結果應用於角度估測，以及完成磁鐵磁通即時狀態間監控。

#### 1. 電壓估測模型

電壓模型估測磁通系統，如式 (5) 表示。

$$\hat{V}_{qds}^s = \hat{r}_s \cdot i_{qds}^s + \frac{d}{dt}(\hat{\lambda}_{qds}^s) \quad (5)$$

其中  $\hat{V}_{qds}^s$  為前節電壓感測器取得之定子軸電壓命令，其組成包含電阻壓降項與馬達磁通變化所造成之反電動勢。其後再進行電阻壓降 (由已知電阻參數和感測器電流相乘取得) 積分，便可還原出如式 (6) 之馬達總體磁通。

$$\hat{\lambda}_{qds}^s = \int (\hat{V}_{qds}^s - \hat{r}_s \cdot i_{qds}^s) dt \quad (6)$$

由於電阻相對於電感容易量測，且系統在高負載高電流運轉時，也不會因磁場飽和產生參數變化，因此較適合用於對參數誤差敏感的開迴路估測系統。然而實務上直接積分的作法並不恰當，潛在的量測誤差可能會使估測結果產生飄移。造成此項誤差的可能來源包含 (a) 變頻器的非線性死區誤差 (長虛線)；(b) 電流量測誤差：由於電流不穩定的增益值和直流偏移量導致磁通飄移 (點虛線)；(c) 定子電阻誤差：定子電阻會隨溫度變化 (長點虛線)；(d) 初始積分常數：由於未知的初始積分常數，直接積分會導致磁通直流偏移，如圖 5 所示。

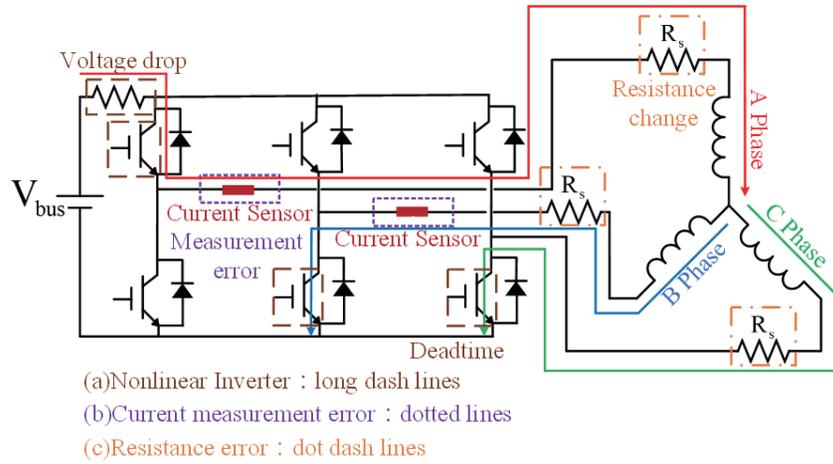


圖 5 估測器飄移誤差源

為了避免飄移誤差在積分中產生的不穩定增益，改良版之磁通估測器被提出 [5]，其方塊圖，如圖 6 所示。

此改良式估測器總共分為積分器 (左側虛線區塊) 與補償器 (右側虛線區塊) 兩項組成。積分器內部透過串聯一高通濾波器來濾除直流飄移誤差所帶來的影響，其結果等同於將待積分訊號通過一低通濾波器。而補償器的加入，則是將此低通濾波對原始訊號所造成的相位及幅值偏移，還原出真實馬達磁通。需注意此處補償器為一常數函數，其幅值、相位值僅與馬達轉速相關，因而完整估測器轉移函數，如式 (7) 表示。

$$\frac{\hat{\lambda}_{\alpha\beta}}{\hat{e}_{\alpha\beta}} = \left[ \frac{1}{s} \times \frac{s}{s + \omega_c} \right] \times \left[ \frac{s + \omega_c}{s} \right]_{s=j\omega_e} \quad (7)$$

其中  $\hat{e}_{\alpha\beta}$  為反電動勢、 $\omega_e$  為電器角頻率而  $\omega_c$  為估測器截止頻率，為適應性函數以增加估測器對轉速之靈敏度，如式 (8) 表示。

$$\omega_c = \alpha \omega_e \quad (8)$$

## 2. 角度估測與磁鐵磁通解耦

由於本文所使用的硬體採用外掛形式，故無法透過編碼器取得實際轉子位置或使用主動高頻注入進行角度估測，能透過角度估測器的方式進行位置估測。本文使用活性磁通 (Active Flux) 來進行角度訊號分離，其在轉子座標軸上，如式 (9) 表示。

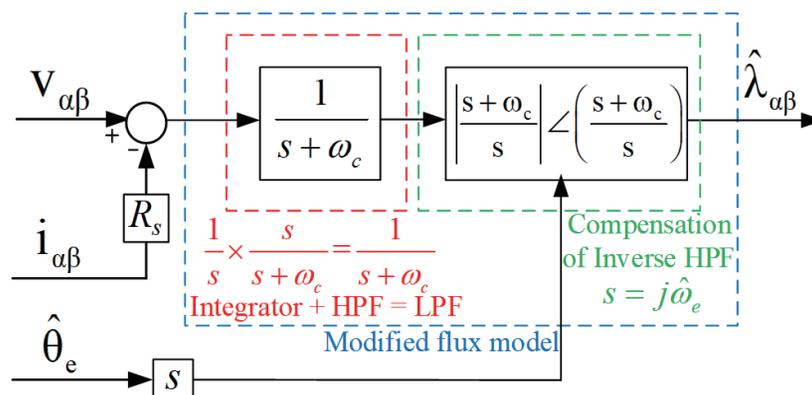


圖 6 改良式磁通估測器

$$\begin{bmatrix} \hat{\lambda}_q^r \\ \hat{\lambda}_d^r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{L}_q i_q^r \\ \hat{L}_d i_d^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{q,active}^r \\ \lambda_{d,active}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (\hat{L}_d - \hat{L}_q) i_d^r + \lambda_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

轉換至定子座標軸，如式 (10) 表示。

$$\begin{bmatrix} \lambda_{q,active}^s \\ \lambda_{d,active}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\lambda}_q^s \\ \hat{\lambda}_d^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{L}_q i_q^s \\ \hat{L}_d i_d^s \end{bmatrix} = \lambda_{act} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其向在定子軸上之向量關係，如圖 7 所示，可看到透過將估測磁通  $\hat{\lambda}_{qds}^s$  減去 q 軸電感與定子軸電流乘積，便可得出活性磁通向量位置，其指向應與轉子位置 (磁鐵磁通指向) 相同。

而根據 PMSM 馬達數學模型，其總體磁通與電感磁通項、永磁磁通之關係，如式 (11) 表示。

$$\begin{bmatrix} \hat{\lambda}_q^r \\ \hat{\lambda}_d^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{L}_q i_q \\ \hat{L}_d i_d + \hat{\lambda}_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

再將轉子座標磁通估測結果，減去電感磁通項，便可得出永磁磁通幅值。綜上所述，使用者只要能預先知道電感、電阻等參數，便能使用本文所提出之外掛式感測架構，以準確估測出馬達磁通狀況並進行即時監測。

### 實驗結果

本文所使用之實驗平台架構如圖 8 所示，使用德州儀器所生產的 DRV8301 變頻器與 TMS320F28069 控制器進行馬達驅動，並以 TI-TMS320F28377D 微處理器作為外掛硬體，收集積分電路與電流感測器資訊與執行估測器演算法，

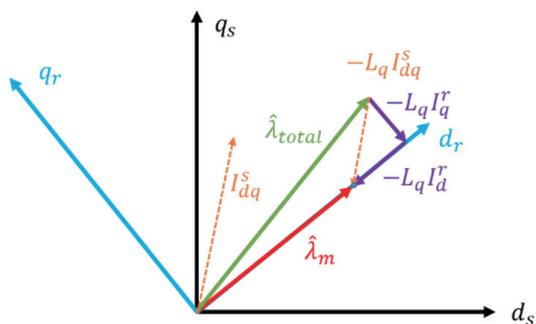


圖 7 活性磁通向量圖

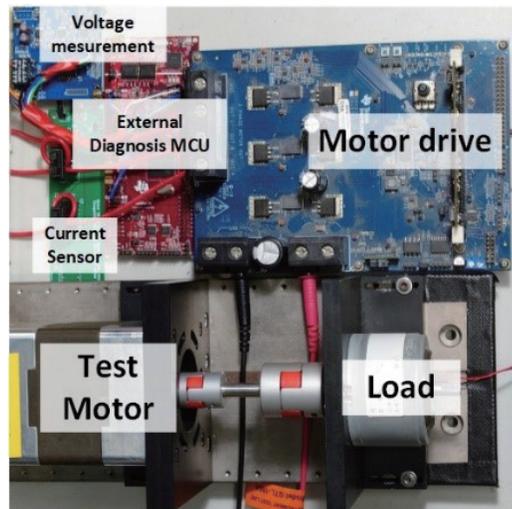


圖 8 實驗平台

並以健康、均勻退磁 (剩餘磁力 60%, Uniform Demagnetization UD) 及區域退磁 (單槽磁力剩餘 0%, Local Demagnetization LD) 三顆 400W 馬達用於驗證磁通估測器之監測效能。其使用電壓命令或積分電路感測電壓作為估測器輸入所得之磁通，與理論磁通值之誤差，如圖 9 所示，由此圖可見當馬達處於低速高負載的狀況時，死區時間會大幅增加命令與實際電壓間的差異，進而使得磁通估測誤差增加。而本文所提出之外掛式感測積分電路則可以很好的避免此問題，在大部分轉速與負載區間內，皆有良好的估測準確度 ( $\pm 5\%$ )。

圖 10 展示了使用外掛感測器架構，測試馬達不同負載下，定子軸估測磁通波形。可發現除了磁通波形會隨馬達磁場狀況差異而變化外，負載與否並不太會影響磁通估測結果，且其估測值與實際值 (0.0058Web) 相當接近。至此，本文所提出之外掛式感測器在馬達線上磁通監測之應用效能已得到充分驗證。

### 誌謝

感謝工研院機械與機電系統研究所 (計畫編號 K353C72200) 的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

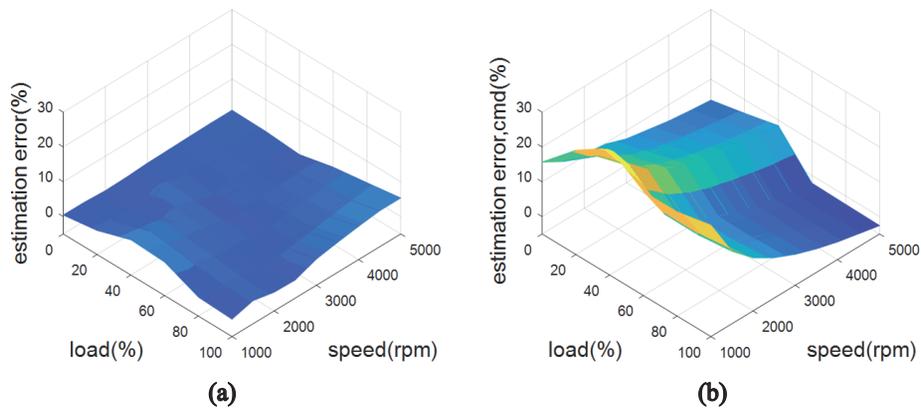


圖 9 使用 (a) 感測器 (b) 命令電壓之磁通估測誤差

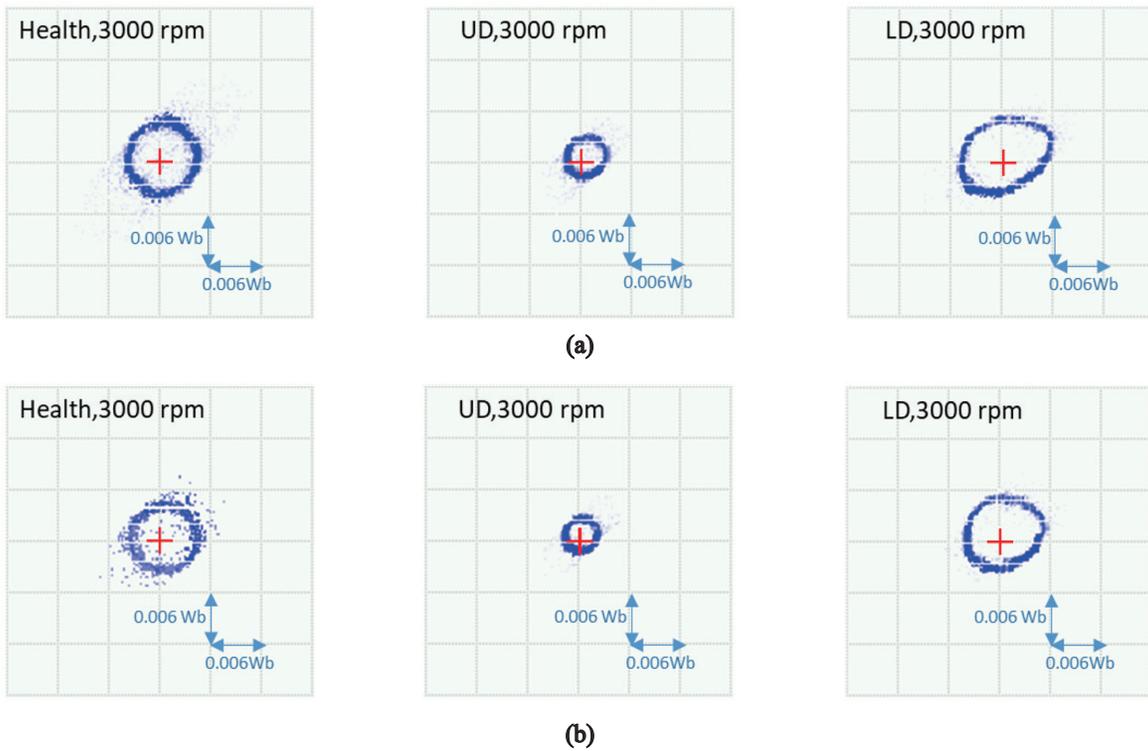


圖 10 三種馬達在 (a) 無載 (b) 50% 負載下之定子軸磁通

### 參考文獻

- [1] O. Bilgin and F. A. Kazan, “The effect of magnet temperature on speed, current and torque in PMSMs,” presented at the *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016.
- [2] F. Schweppe and R. Masiello, “A tracking static state estimator,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-90(3), 1025-1033, 1971.
- [3] T. Goktas, M. Zafarani, and B. Akin, “Discernment of broken magnet and static eccentricity faults in permanent magnet synchronous motors,” *IEEE Transactions on Energy Conversion* 31(2), 578-587, 2016.
- [4] G.R. Chen and S.C. Yang, “Phase voltage measurement for permanent magnet machine sensorless drive using controller capture modulator,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67(1), 49-58, 2020.
- [5] M. Koteich, “Flux estimation algorithms for electric drives: A comparative study,” presented at the *2016 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*, 2016.

## 工具機技術叢書



**\$ 750**

設計與分析

- | 主軸與關鍵組件
- | 進給系統
- | 整機設計
- | 382頁



**\$ 900**

工具機控制

- | 馬達與驅動器
- | 軟硬體與通訊
- | 伺服控制
- | 切削控制
- | 683頁



**\$ 750**

放電與多軸加工技術

- | 放電加工
- | 多軸加工
- | 389頁

/一套三本 **8折**/