

車用無感測直流馬達驅動器研製

蘇信銘^{1*} 楊崇雨²

^{1,2}中華民國,新竹縣,明新科技大學, 電機工程系

摘要

本研究實現了一具備完整功能的車用無感測直流馬達控制器，包括實現通訊協議、轉速控制及各種保護。本驅動器以瑞薩電子 RL78/F14 微處理控制器 (Micro Controller Unit,MCU)R5F10PAE 為控制核心，利用馬達運轉時的反電動勢來估測轉速值，同時，設計速度控制器實現轉速控制，並採用 Lin Bus 通訊協議用來實現與車輛系統的連接。保護方法有堵轉保護、過電壓保護、低電壓保護、過電流保護及防反接保護，以上保護可確保系統的安全性和穩定性。實驗結果驗證所實現的驅動器具有良好的速度控制和可靠性，可以給車用風扇控制器的產業來採用。

關鍵詞：無感測驅動、反電動勢估測法、直流馬達、LIN BUS 通訊

投稿日期:2024.10.09

修改日期:2024.12.02

接受日期:2024.12.10

刊登日期:2024.12.12

*通訊作者：蘇信銘(副教授) 地址：新竹縣新豐新興路 1 號 Tel：(03)5593142(分機 3073)
E-mail：sue7811@must.edu.tw

Implementation of a Sensorless DCM Drive for Automotive Applications

Shinn-Ming Sue^{1*} Chung-Yu Yang²

Department of Electrical Engineering, Minghsin University of Science and Technology

Abstract

This research presents the implementation of a complete functional speed sensorless DC motor controller for automotive applications, including communication protocol, speed control, and various protection features. The controller utilizes Renesas Electronics RL78/F14 microcontroller unit (MCU) R5F10PAE as the core controller, estimating the speed value based on the motor's back electromotive force (EMF) during operation. A speed controller is designed to achieve speed control, and the Lin Bus communication protocol is adopted for communication with the vehicle system. Protections including stall protection, over-voltage protection, under-voltage protection, over-current protection, and reverse-voltage protection are implemented to ensure system safety and stability. Experimental results validate that the implemented controller exhibits excellent speed control and reliability, making it suitable for adoption in automotive fan controllers.

Keywords: sensorless drive, back EMF estimation method, DC motor, LIN Bus communication

一、簡介

近年來在汽車上使用各種馬達的輔助配備數量不斷增加，如空調鼓風機、車窗升降機、雨刷控制馬達、汽油泵浦、雨刷水泵浦等。因此，採用馬達的無感測器控制方法，對降低輔助動力設備應用的成本有幫助。現有的無感測控制器大多採用反電動勢或電流漣波來實現轉速估算，這兩種方法對控制系統的參數精度和系統穩定性要求都很高。本研究目的在實現一具多功能車用無感測直流馬達控制器，來達到轉速控制、提高系統穩定性和可靠性，並提供多種保護措施來確保系統的安全運行。

1981 年，Ward Leonard 採用電壓控制的方式實現了直流馬達的速度控制 [1]。近年來多通過數位控制並用脈寬調製(PWM)技術控制馬達，因馬達繞組有低通濾波的作用，因此高頻率的 PWM 波形將在馬達繞組中產生穩定電流。另外，為精確控制馬達的轉速，必須在系統中包含回授機制 [2]。

一般平均數位濾波器與移動平均數位濾波器 [3]都旨在降低噪音和平滑數字信號。一般平均濾波器基於固定的數據集求平均，較適合一次性或靜態數據分析，但其不具備即時處理能力，因此正確選擇數位濾波器也可有效提高信號分析的準確性和效率。

在許多現代車輛上，CAN [4] [5] 和 LIN [6] [7] 會並存，以滿足不同的需求。例如，一個系統可能使用 CAN 來控制關鍵功能，同時使用 LIN 來控制輔助功能。這種組合允許工程師根據特定的需求和預算選擇最合適的協定。CAN 和 LIN 雖然都是車輛通信協定，但它們設計的目標和應用領域有所不同。透過適當地結合這兩種協定，可以在車輛系統中實現最佳的性能和成本效益。

二、直流馬達的無感測器驅動方法

(一) 常見的直流馬達無感測器控制方法

第一種是利用硬體感測器實現，常見的有光學編碼器及霍爾感測器，但存在占用體積及成本增加等缺點。

第二種為無感測控制，此方法因無需額外增加硬體設備，所以能夠減小體積及節省成本。

以下[1]-[17]參考文獻是較常見的直流馬達無感測器控制方法，它們依據實現的技巧可略分為：

1. 採用直流馬達模型估算轉子速度 [8] [9] [10] [11] [12] [13]，缺點是在低轉速時估算的轉速精準度較低及對模型參數變化非常敏感等問題。
2. 採用電流漣波估算的方法 [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19]，在開關過程中，根據電刷換相時，產生瞬時變化的漣波電流來估算轉速和轉子位置。
3. 採用反電動勢估測法 [1] [2] [11] [20] [21] [22]，在驅動過程中讓馬達固定時間空轉產生反電動勢，該方法產生的電壓大小與實際轉速成正比。

(二) 本研究採用方法

本研究使用反電動勢(Back Electromotive Force, BEMF)估測法來估測馬達轉速，具體方法為在馬達運轉時固定每一段時間使上下臂開關截止，使馬達空轉一段時間，在此時擷取穩定的反電動勢來供控制核心估算轉速，因為每次停止驅動的時間間隔會決定系統的響應速度，若時間間隔越長則系統的反應越慢，也就是說空轉的時間長短會影響反電動勢取樣的準確度，空轉時間越短越不穩定，雖然加長時間能使反電動勢穩定區域增加，但太長的空轉時間會讓馬達因速度銜接有空檔而造成馬達發出較明顯的雜音，經實驗證明本驅動器最終以間隔每 50 毫秒讓馬達空轉 3 毫秒做為轉速估測的依據。表 2.1 與表 2.1 是實際實驗後量測的數據。

表 2.1 實際轉速與 PWM 百分比值比例關係表

Duty	實際 rpm	反電動勢 A/D 值	比例關係
10%	125	18	6.944
20%	640	93	6.882
30%	1000	145	6.897
40%	1470	212	6.934
50%	1780	254	7.008

表 2.2 實際轉速與反電動勢 A/D 值比例關係表

實際 rpm	反電動勢 A/D 值	比例關係
2000	287	6.969
2500	356	7.022
2800	402	6.965
3000	423	7.092
3300	462	6.818

(三) 速度控制器設計

本研究使用比例積分控制器(PI Controller)，來實現馬達的速度控制。PI 控制器是一種常見的控制器，一般都可將控制系統的輸出調整到期望的值。PI 控制器包含比例控制和積分控制兩個部分，控制的輸出是這兩個部分的線性組合。如(1)式所示比例控制部分是轉速誤差 $e(t)$ 乘以比例常數 K_p ，積分控制部分是轉速誤差的時間積分再乘以積分常數 K_i 。這兩個控制項相加形成最終控制項 $u(t)$ ，如此可使系統達到期望。PI 控制器的基本數學式為：

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (1)$$

其中， $u(t)$ 是控制器輸出， K_p 是比例常數， K_i 是積分常數， $e(t)$ 是目前系統輸出與期望輸出的誤差， $\int e(t) dt$ 是誤差積分。在實際應用中， K_p 和 K_i 的值可通過實驗或

模擬來調整，以使系統達到適當的性能。為方便表示將(1)式連續時間數學式轉為圖 2.1 離散時間系統的 PI 控制器方塊圖。

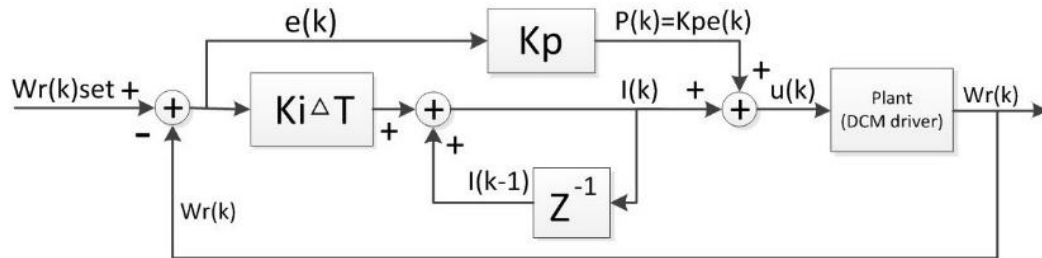


圖 2.1 比例積分控制器方塊圖

圖 2.2 為將圖 2.1 的基礎上加入積分值設上限功能，讓積分值限制在一個範圍內，能防止積分值過大，造成系統的不穩定。

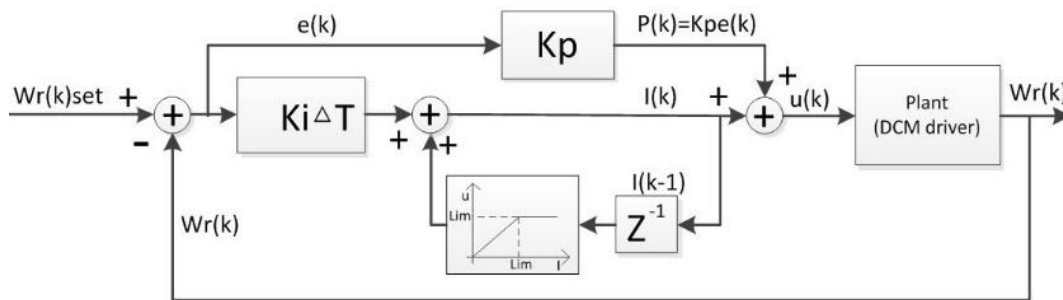


圖 2.2 比例積分控制器加入積分設上限方塊圖

為使速度控制器達到更好的效果，參考論文 [23] [24] 積分反飽和控制方法，實現方法為利用程式撰寫當 PI 值為 0 或大於最大值時，積分值為 0，如此就能達到積分反飽和的效果。圖 2.3 為加入積分反飽和後的 PI 控制器方塊圖。

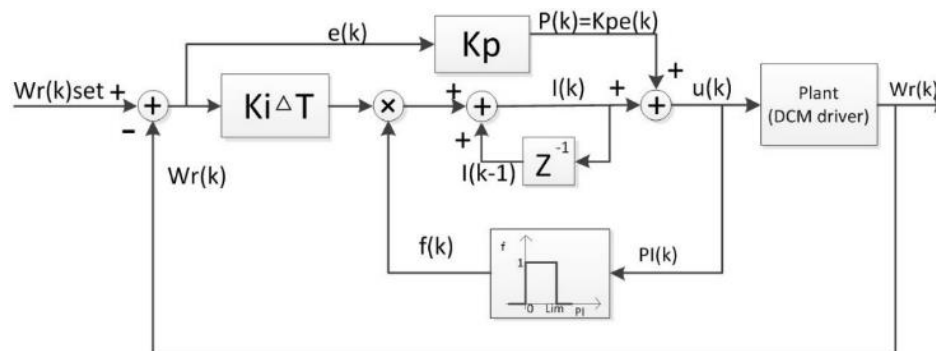


圖 2.3 比例積分控制器加入積分反飽和方塊圖

三、LIN 通訊方法

本研究的控制器規劃用來驅動車載的空調鼓風機，因此本實驗另採用車用市場常用的 LIN BUS (Local Interconnect Network Bus)通訊協定來控制，在 LIN BUS 系統中，馬達驅動器是從機(Slave)，接收主機(Master)傳來的指令，來執行風扇的各種運轉動作。通過 LIN BUS，主機可將各指令送到從機的風扇控制器執行如啟動、停止、加速、減速等。風扇控制器因具有轉速控制功能，可根據由主機收到的指令執行相應的動作來實現適當的風扇運轉模式。

(一) LIN Bus 特性及實現方法

LIN 是 Local Interconnect Network 的縮寫，中文翻譯是「區域互連網路」。LIN 是一個低速低成本的串列通訊網路，其開發目的是為了輔助車用網路的中樞 CAN 匯流排，在不需 CAN 匯流排的高速傳輸和強大功能的場合中，可以選擇 LIN 匯流排，LIN 匯流排也具備了價格低廉及性能可靠的車用網路系統。 [22]

LIN Bus 的通訊是基於 SCI(Serial communications Interface)，屬於 UART(Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) 的傳輸方式，採用單主機 (Master)/多從機 (Slave) 的模式，只要一條 12V 的訊號匯流排即可完成通訊。

(二) LIN Bus 實現方法

本研究使用兩顆 MCU 分別用做主機和從機來實現 LIN BUS 的通訊。當系統開始運作時，LIN BUS 上 ID 為 DD 時表示主機傳資料給從機；ID 為 5E 時表示從機傳資料給主機，主機一筆資料(masdatd1)為 00~FF 表示 0 rpm~3300rpm，另一筆資料(masdatd2)為顯示初始開機狀態 50 及正常運轉後 D0 兩種狀態，而從機部分一筆資料(slvdatd1)為 00~DD 表示實際轉速，另一筆資料(slvdatd2)為馬達當前狀態，表 3.1 是其組合表。當初使開機時馬達無轉動故為 $m1+p2=24$ ；當開始正常運轉後暫態中為 $m2+p4=A1$ ；穩態後正常運轉為 $m2+0=A0$ ；當正常停轉時為 $m2+p2=A4$ ；當遇到故障如電壓保護、電流保護、堵轉保護觸發時為 $m2+p2+p3=A6$ 以此類推，另外， $m3$ 的條件是為了防止汽車的發電機及

電瓶，如發生異常造成的電壓變化而設計的警示資訊，而 p1 的觸發條件可以從這些條件推斷出馬達可能已過熱。

表 3.1 LIN Bus 通訊從機狀態碼組合表

d8765	d4321
	0000=正常運轉
	p4=0001=1=暫態中
m1=0010=2=開機初	p3=0010=2=故障
m2=1010=A=正常運轉	p2=0100=4=停轉
m3=1011=B=按照轉速命令比例及電壓值改變臨界值	p1=1000=8=若轉速命令大於 3299rpm，且實際轉速達 3200rpm 以上，且馬達電流大於 18A 達 30 秒

四、實驗結果

本研究使用所開發的車用無感測直流馬達控制器進行各項實測。在實驗中，使用一顆有刷直流馬達進行轉速控制實驗並由實驗結果顯示，控制器可具有穩定而準確的轉速控制。當輸入指令從開始運轉到 3300rpm 時，與實際轉速的誤差維持在 1% 以內，且轉速響應時間也相當快速。此外，控制器還實現了堵轉保護、電壓保護、過電流保護和防反接保護等多種保護措施，確保了系統的安全性和穩定性。由實驗結果可驗證本控制器可實現較高轉速精度和較佳可靠性及安全性，使得本開發的驅動器具有良好的實用性。

(一) 轉速誤差

表 4.1 是本實驗用轉速計所量測的馬達穩態轉速值，表 4.1 顯示穩態轉速誤差均在 1% 以內，證明本研究的轉速控制相當精準。

表 4.1 轉速誤差表

轉速設定值	實際穩態轉速	誤差值
500	499	0.20%
1000	998	0.20%
1500	1497	0.20%

2000	1995	0.25%
2500	2495	0.20%
3000	2993	0.23%
3300	3334	1.00%

(二) 轉速響應圖

圖 4.1 與圖 4.1 是透過 MCU 的數位為透過 MCU 的數位轉類比腳位量測的轉速響應波形，兩圖都是以同樣的時間單位顯示，透過比較可發現圖 4.1 的轉速變化較慢為 0.5 秒變化一次。圖 4.1 的轉速變化較快為 0.05 秒變化一次，圖 4.2 比圖 4.1 轉速變化快 10 倍，因此圖 4.2 的轉速控制解析度較高。

(三) 反電動勢產生時間

本節將比較在不同的空轉時間及不同轉速下所產生反電動勢波形的不同，因無法直接透過示波器直接固定抓取反電動勢產生時的瞬間，所以利用程式設定當上下臂同時截止的同時，I/O 腳位輸出一個高電位，並利用示波器 TRIGGER 的功能抓取圖中下方波形的觸發瞬間。首先觀察空轉時間 1 毫秒時 500rpm、3000rpm 的反電動勢波形，由於空轉的時間較短，反電動勢沒有足夠的時間產生穩定且平穩的波型，在圖 4.3 中所示產生的反電動勢幅度較低，因此還能夠產生出平穩的部分，最後在圖 4.4 所示在高轉時的波形相當的不穩定，因此證明 1 毫秒的時間不足以產生穩定且平穩的反電動勢。

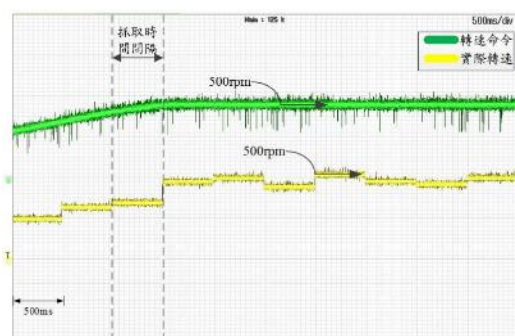


圖 4.1 間隔 500ms 之反電動勢響應波形

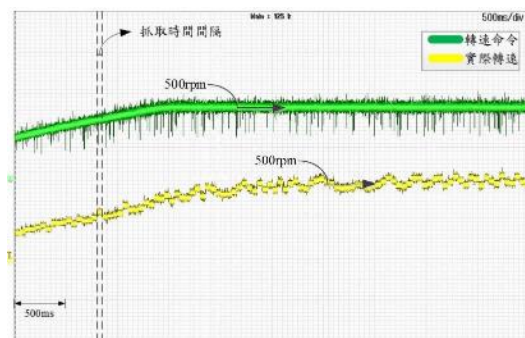


圖 4.2 間隔 50ms 之反電動勢響應波形

再觀察空轉 3 毫秒時 500rpm、1500rpm 及 3000rpm 的反電動勢波型，由圖 4.5 所示 500rpm 時產生的反電動勢波型相當平穩，在轉速達到 3000rpm 時如圖 4.6 所示雖然晃動較大，但還能保持出平穩部分的反電動勢波型，因此最後決定使用 3 毫秒的空轉時間作為本研究的方案。

(四) PI 控制器波形比較

為方便觀察在同樣條件下重合轉速暫態波形，圖 4.7 綠色的波形為積分設上限的轉速暫態，較白色波形傳統 PI 比起來最大超越量較低，圖 4.8 綠色波形為加入積分反飽和控制的暫態，發現也比傳統 PI 控制平穩。

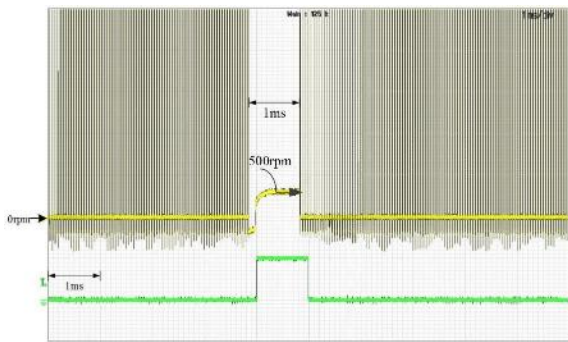


圖 4.3 轉速 500rpm，空轉 1ms 的波形

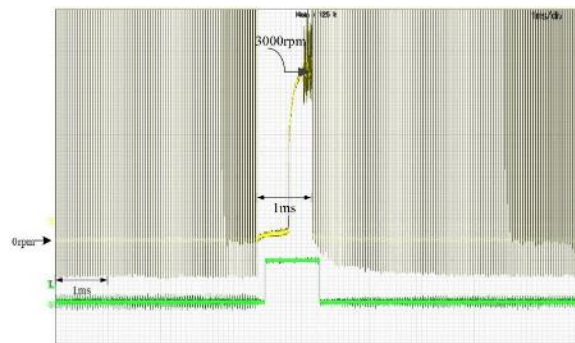


圖 4.4 轉速 3000rpm，空轉 1ms 的波形

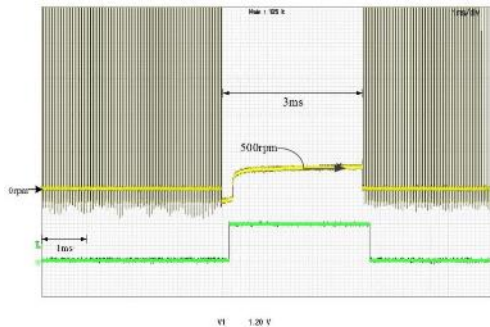


圖 4.5 轉速 500rpm 空轉 3ms 的波形

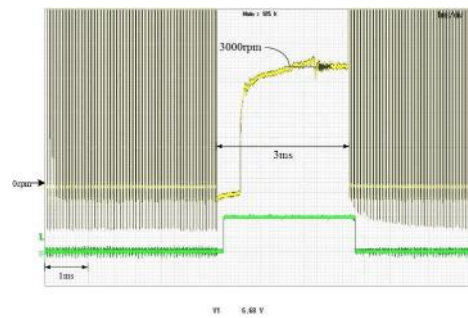


圖 4.6 轉速 3000rpm 空轉 3ms 的波形

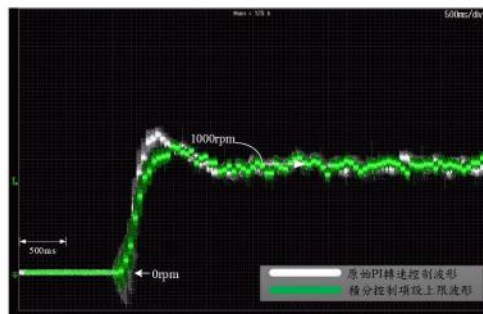


圖 4.7 重合積分設上限與原始 PI 波形

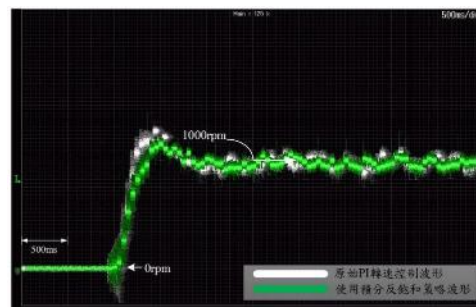


圖 4.8 重合反飽和與原始 PI 波形

(五) 驅動器保護波形展示

本驅動器堵轉保護從低速 50rpm 至高速滿載 3300rpm 以上都能觸發保護，圖 4.9 是 1000rpm 時觸發的堵轉保護，當保護啟動時會立即截止驅動，接著當時間到達後且已無障礙物堵轉，馬達恢復驅動到達設定轉速，圖 4.10 同樣在馬達 3000rpm 時觸發堵轉保護，因恢復後命令還是 3000rpm，所以啟動的電流較大。圖 4.11 是過電壓保護，當電壓值高過 16.6 伏特時馬達將會立即停止驅動，待電源電壓下降至 16 伏特恢復正常驅動。圖 4.12 是低電壓保護，當電壓值低於 9 伏特時馬達將立即停止驅動，待電源電壓上升至 9.6 伏特時才會恢復正常驅動。圖 4.13 是過電流保護測試波形，當電流值瞬間到達設定值時馬達會立即停止驅動，直到電流值下降到 1A 以下且轉速命令為零才恢復驅動。

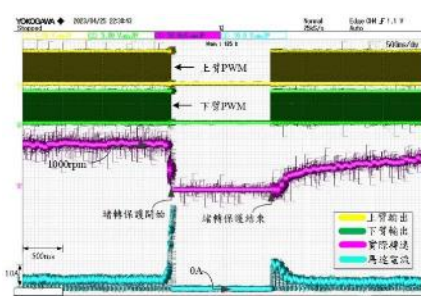


圖 4.9 堵轉保護 1000rpm 波形

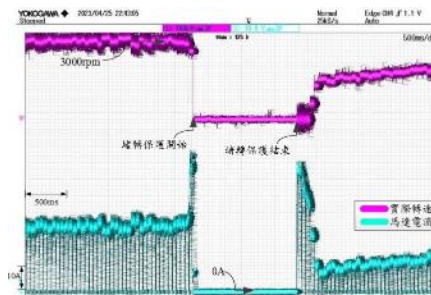


圖 4.10 堵轉保護 3000rpm 波形

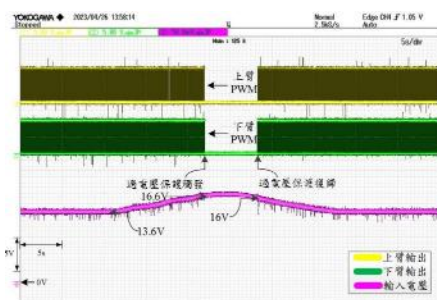


圖 4.11 是過電壓保護波形

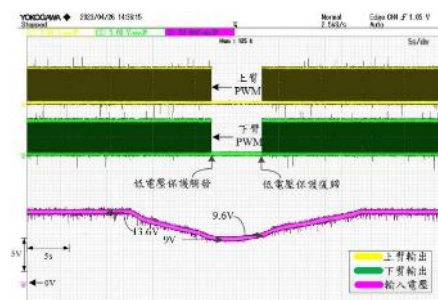


圖 4.12 是低電壓保護波形

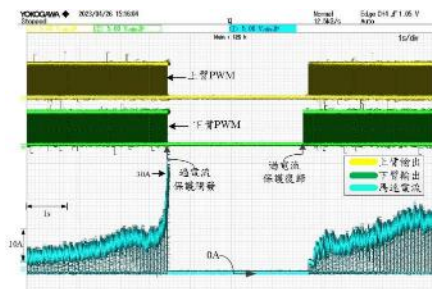


圖 4.13 是過電流保護測試波形

五、結論

本研究實現了一種直流馬達的無感測轉速控制方法，利用馬達在運轉時讓上下臂功率開關都截止一小段時間使馬達空轉的方式，以讀取反電動勢。轉速越快，反電動勢就越高，因此可以利用反電動勢來估測轉速值。每次截止時間有關馬達轉速的響應，每次空轉時間有關估測值的準確度。除了實現無感測轉速控制之外，為提高本驅動器運轉時的可靠性及安全性，還實現了 Lin Bus 通訊、堵轉保護、過電壓保護、低電壓保護、過電流及防反接保護等功能，如此可使本驅動器更適合直接應用到車用市場，實驗結果顯示，使用此方法可以實現高精度的無感測轉速控制，並且可以在實際應用中獲得穩定的控制效果。

六、參考文獻

- [1] P. S. Bimbhra, "Generalized Theory of Electrical Machines," *Khanna*, pp. 93-98, 2001.
- [2] E. Afjei, A. Nadian Ghomsheh and A. Karami, "Sensorless speed/position control of brushed DC motor," *2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, pp. 730-732, 2007.
- [3] S. -J. Kweon, S. -H. Shin, S. -H. Jo and H. -J. Yoo, "Reconfigurable High-Order Moving-Average Filter Using Inverter-Based Variable Transconductance Amplifiers," *in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, pp. 942-946, 2014.
- [4] A. Ghatak, A. A. Kumar, K. B. Patel, S. Borole and C. Rao, "Controller Area Network Bus based Communication system for Thermal Power Plant," *2020 Third International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAIECC)*, pp. 1-6, 2020.
- [5] S. Cai, M. Becherif and M. Wack, "Context system using pervasive Controller Area Network bus system to improve driving safety," *Proceedings of 2010 IEEE/ASME*

International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, pp. 560-565, 2010.

- [6] M. Popa, V. Groza and A. Botas, , “Lin Bus Testing Software,” *2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Ottawa*, pp. 1287-1290, 2006.
- [7] D. O. Oană, F. G. Lungu, M. Pașcu and C. Gerigan, “LIN Demonstrator,” *2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, pp. 131-133, 2018.
- [8] G. S. Buja, R. Menis and M. I. Valla, "Disturbance torque estimation in a sensorless DC drive," *IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 42, no. 4*, pp. 351-357, 1995.
- [9] Y. Kambara, S. Uozumi, and K. Ohnishi, “Disturbance Suppression Method for Position-Sensorless Motion Control of DC Brushed Motor,” *IEEE International Conference*, pp. 194-199, Nagoya 2015.
- [10] R. Letor, A. Testa, and S. De Caro, “Estimation of the shaft position on low-cost DC actuators,” *IEEE International Symposium on (ISIE)*, pp. 440-445, Bari 2010.
- [11] D. Ertl and L. Weber, “A Method for Real-Time Sensorless Speed Control of Brushed DC Motors in Cost Constrained Systems,” *2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, pp. 152-157, Izmir, Turkey 2020.
- [12] A. Consoli, A. Bottiglieri, R. Letor, R. Ruggeri, A. Testa, and S., "Sensorless position control of DC actuators for automotive applications," *in Conf. Rec. IEEE 39th IAS Annu. Meeting, vol. 2*, p. 1217.1224, 2004.
- [13] M. Ghosh, P. K. Saha and G. K. Panda, "Hybrid Computational Mechanical Sensorless Fuzzified Technique for Speed Estimation of Permanent Magnet Direct Current Brushed Motor," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 65, no. 6, pp. 4565-4573, 2018.

- [14] J. Vejlupek, R. Grepl, M. Matejasko, and F. Zouhar, “Automotive fuel pump fault detection based on current ripple fft and changes in magnetic field,” *in 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCO)International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, vol. 7, no. 3, pp. 130-138, 2013.
- [15] E. Vazquez-Sanchez, J. Sottile, and J. Gomez-Gil, “A novel method for sensorless speed detection of brushed dc motorss,” *in Applied Sciences*, vol. 7, no. 1, p. 14, 2017.
- [16] C. -T. Chi and S. -A. Yin, “Speed measurement of a general DC brushed motor based on sensorless method,” *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC), Ho Chi Minh City, Vietnam*, pp. 332-337, 2012.
- [17] J. M. Knezevic, “Low-Cost Low-Resolution Sensorless Positioning of DC Motor Drives for Vehicle Auxiliary Applications,” *IEEE Trans.Vehicular Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 4328-4335, Nov 2013.
- [18] J. Choi, “Robust Position-Sensorless Algorithm for DC Motor Using Ripple Current and Model-Based Method,” *2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress*, pp. 2104-2109, 2021.
- [19] M. Vidlak, L. Gorel, V. Vavrus and P. Makys, “Sensorless speed control of brushed DC machine,” *2021 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), Dubrovnik, Croatia*, pp. 169-176, 2021.
- [20] J. Scott, J. McLeish, and W. H. Round, “Speed control with low armature loss for very small sensorless brushed dc motors,” *IEEE Trans. Ind.Electron.*, vol. 56, no. 4., pp. 1223-1229, Apr 2009.
- [21] S. Kamdar, H. Brahmabhatt, T. Patel and M. Thakker, “Sensorless speed control of high speed brushed DC motor by model identification and validation,” *2015 5th Nirma*

University International Conference on Engineering (NUiCONE), Ahmedabad, India, pp. 1-6, 2015.

- [22] 高瑞成, “基於 LabView 實現 LIN 電子物理層一致性測試,” 南臺科技大學 電子工程系碩士學位論文, 中華民國一一一年一月.
- [23] S. Pandey, N. K. Soni and R. K. Pandey, “Fractional order integral and derivative (FOID) controller with anti-windup for temperature profile control,” *2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, pp. 1567-1573, 2015.
- [24] L. Harnefors, S. E. Saarakkala and M. Hinkkanen, “Speed Control of Electrical Drives Using Classical Control Methods,” *in IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 2, pp. 889-898, March-April 2013.