

# 馬達控制模組功率元件故障診斷與可靠度預警

## Motor Control Unit Power Stage Diagnostic and Reliability Monitoring

沈志堅

林怡君

紀坤明

黃立仁

Chih-Chien Shen, Yi-Chun Lin, Kung-Ming Ji, Li-Ren Huang

### 中文摘要

功率電子元件絕緣閘雙極電晶體(IGBT)為馬達控制系統裡的驅動元件，具有驅動電流小與導通電阻低等優勢，但是功率元件的失效卻會降低馬達運轉效能，並有可能造成系統災難性的危害。本論文主要設計了具備安全及診斷功能之馬達控制器模組，整合ARM系統單晶片處理器、馬達控制演算法、錯誤偵測診斷演算法等軟硬體相關技術，並針對系統裡最危險且容易失效的功率元件，藉由偵測三相電流的平均電流，不需要額外的感應器電路以降低系統成本，在失效初期即能診斷及紀錄失效發生的原因，並透過低功耗藍芽(BLE)模組傳送錯誤代碼，使用者可以透過智慧型手持式裝置讀取錯誤訊息，以了解系統發生的異常現象，達到預警的功能，使得安全性與可靠度大幅提升。

### Abstract

Power electronic device IGBT is the driving element in motor control system, it has the advantage of smaller driving current and lower on-state resistance. But the fault of power stage not only decrease the performance of motor system, and will cause the catastrophic failure. This paper presents a research on motor control unit power stage diagnostic and reliability monitoring, this module integrates hardware and software technology, including ARM System-on-Chip, motor control algorithm and fault detection algorithm. Especially, by using the average of three phase current, it can detect and diagnose the fault of power electronic device in the early stage and doesn't need the extra sensor effort. By using the BLE module to transmit error codes, users can use mobile device to understand the failure behavior, increasing the safety and reliability of the motor control system.

### 關鍵詞(Key Words)

絕緣閘雙極電晶體 (Insulated Gate Bipolar Transistor ; IGBT)

馬達控制模組 (Motor Control Unit)

功率元件診斷 (Power Stage Diagnostic)

低功耗藍芽 (Bluetooth Low Energy ; BLE)

## 1 · 前言

馬達能將電能轉換成機械能，再以機械能驅動應用裝置，在許多家電、工業和資訊設備中是不可或缺的一部分，應用層面廣闊，像是電動車、工具機、半導體設備、智慧製造、智

慧機器人等。而馬達的種類繁多，一般可區分為直流馬達(DC Motor)與交流馬達(AC Motor)，每種馬達依照材料、應用與成本，有不同的優缺點。像是直流馬達的控制簡單，但是碳刷卻會磨損需要定期更換；而交流馬達的控制複雜，但是具有較高的啟動轉矩與加速能力，而且也

不需要碳刷的維護，其堅固、耐用等特性，也適合在高溫等惡劣的工作環境，已逐漸在工業上形成主流，因此我們設計的控制模組主要是針對交流馬達中的永磁同步馬達(Permanent-Magnet Synchronous Motor; PMSM)做驅動與監控。

半導體製程的演進及大型積體電路的快速發展，造就了強大的系統單晶片與功率電子元件，使得電壓源變頻器(Voltage Source Inverter; VSI)應用於交流馬達的變速控制在工業上已逐漸形成主流。而絕緣閘雙極電晶體(IGBT)為電壓源變頻器的主要功率元件，傳統的雙載子接面電晶體(Bipolar Junction Transistor; BJT)具有導通電阻較小的優點，但卻有驅動電流大的缺點；而金屬氧化物半導體場效電晶體(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor; MOSFET)則剛好相反，具有導通電阻大的缺點，及驅動電流小的優點。而IGBT則剛好融合兩者的優點，不僅導通電阻低，且容易驅動，而且具有耐高電流與切換速度快等優勢，因此常應用於電動車及變頻家電等大電流物品。

電壓源變頻器已廣泛應用於馬達驅動，其主要功能為將直流電源供應的輸入產生交流的輸出波形。將一個固定直流輸入電壓給予變頻器，並藉由調整變頻器元件的開關週期，就可得到一個可控制的交流輸出電壓。三相變頻器提供了三相電壓源，其電壓的震幅、相位與頻率都是可控制的，常用脈衝寬度調變(Pulse Width Modulation; PWM)來控制變頻器的電壓輸出。根據研究統計[2]，在可變速度交流馬達驅動系統裡，有38%的故障是由於功率電子元件的失效，所佔的比例相當高，一般IGBT失效可大略分為Open-Circuit Fault及Short-Circuit Fault兩種形式。Open-Circuit Fault會造成抖動的電流，並使得輸出電壓與電流產生失真的現象，除了會降低馬達的效能，也有可能對系統造成更嚴重的二次傷害；而Short-Circuit Fault對於系統的危害更加嚴重，會迅速累積大量熱能，導致功率元件燒毀，進而造成系統的失效。

因此我們設計了具安全及診斷功能之馬達

控制器模組，此模組包含了馬達控制系統與監控系統，整合自行開發的ARM系統單晶片馬達應用處理器、空間向量脈寬調變(Space Vector PWM; SVPWM)馬達控制演算法及Park's Vector 錯誤診斷演算法等軟硬體相關技術，除了監控四大系統及八大項目外，並針對系統裡最危險且容易失效的功率元件，藉由偵測三相電流的平均電流，可以找出Open-Circuit或是Short-Circuit Fault，並且能判斷出三相上下臂是哪一個功率元件出問題。除此之外，也整合了AVAGO Gate Driver的Short-Circuit的保護機制，配合馬達控制器模組，對於短路電流的診斷與預警更加完備。此診斷系統不需要額外的感應器電路以降低系統成本，在失效發現的初期即刻採取相對應的措施，避免系統產生災難性的毀滅，同時利用控制器演算法診斷及紀錄失效發生的原因，透過低功耗藍芽模組傳送錯誤代碼，使用者可以透過智慧型手持裝置讀取錯誤代碼以了解系統發生的異常現象，此控制器及其監控系統模組使得系統安全性與可靠度大幅提升，並能迅速了解與解決發生異常之處。

## 2 · 馬達控制診斷模組系統架構

### 2.1 系統功能架構

馬達控制診斷系統架構如圖1所示，主要針對四大系統及九項監控目標做偵測，四大系統分別為控制系統、馬達系統、電池系統及功率級系統，雖然功率級系統最為重要，但其他系統在馬達控制裡也扮演非常重要的角色，任何一個訊號發生異常，都會對整體造成傷害，甚至對於功率模組有災難性的情況產生。以下將針對監控項目做一說明：

1. PWM訊號監控：針對三相PWM上下臂訊號是否斷線做監測，PWM訊號異常會造成IGBT有Open-Circuit Fault的情況產生
2. 電流感測器訊號監控：監控電流感測器U/V/W三相是否短路到VDD/GND，短路會造成大電流的情況產生
3. 霍爾感測器訊號監控：霍爾感測器經由感測電路及讀取電路後，在正常操作時會得到馬達的轉子位置，馬達控制器會依據轉子位置產生相對應的驅動訊號，感測器訊號異常

也有可能造成Short-Circuit Fault

- 馬達轉速監控：從位置感測器計算出馬達的運轉速度，馬達轉速過高會產生過大的電流產生，會造成驅動電路燒毀
- 系統電壓監控：監控系統電壓3.3V、5V及15V是否Under Voltage或是Over Voltage
- IGBT Desat 過電流監控：搭配AVAGO Gate Driver監控IGBT Saturation (Collector) 電壓是否超過Saturation Voltage Level
- IGBT Vout 電壓監控：搭配AVAGO Gate Driver監控Gate Driver輸出電壓是否低於臨界值
- IGBT Open Circuit Fault 監控：藉由偵測三相電流的平均電流及Park's Vector錯誤診斷演算法，找出IGBT Open Circuit Fault
- IGBT Short Circuit Fault 監控：藉由偵測三相電流的平均電流及Park's Vector錯誤診斷演算法，找出IGBT Short Circuit Fault

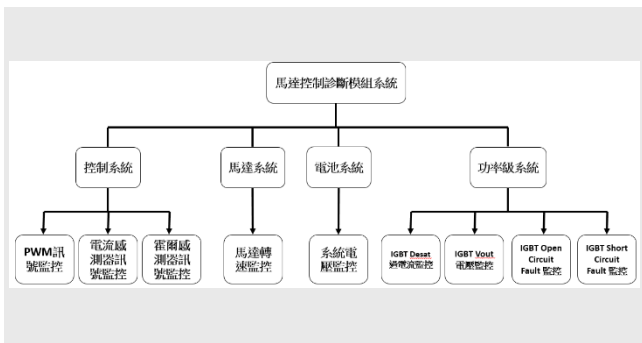


圖 1 馬達控制診斷模組系統架構

## 2.2 軟硬體架構

馬達控制與診斷控制模組採用1oo1D (1 failure out of 1 channel with diagnostic unit) 安全性控制架構，如圖2所示，也就是單一通道系統附加額外的監控單元。此系統的優勢是主控制處理器與監控診斷控制處理器都可以獨立做Shut Down，當監控診斷處理器發現異常時，可以立即做處置，不需要先通知主控制處理器再處理，加快反應處理時間，減少系統發生災難性毀滅的機率。處理完緊急事件後，再通知主控制處理器做後續處理及因應。

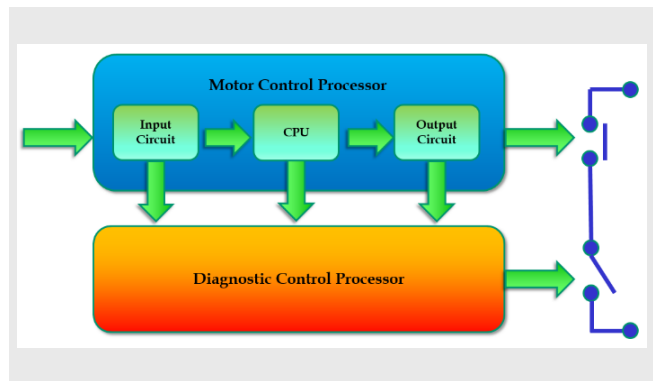


圖 2 1oo1D安全性硬體架構

馬達控制診斷模組硬體架構如圖3所示，是由二顆我們自行研發的Bison1系統單晶片所組成，一顆當作主控制處理器，另一顆則作為監控診斷處理器。主控制處理器是處理馬達向量控制演算法，如圖4所示，針對回授的速度、位置及電流等資訊做處理及運算，並產生相對應的PWM輸出，利用三相脈衝寬度調變變頻器的基本電壓向量來合成所欲產生之定子電流，此合成電流在定子線圈上產生旋轉之定子磁通向量與轉子磁通相互作用產生扭矩，使馬達得以旋轉。

而監控診斷處理器在系統在初始化後，會啟動相關的感測器及周邊，包含PWM、QEP、SPI、I2C、12Bits ADC、GPIO、Hall Sensor、Timer、CAN等，隨即進入主要監控與偵測迴圈，此時監控診斷控制單元會從各個周邊及感測器抓取各項資料並存入記憶體，再從記憶體中抓取資料做特徵萃取(Feature Extraction)，再以演算法做錯誤診斷，再將分析完後的結果以錯誤碼透過CAN Bus傳送出去，使用者可以透過PC或NB，以CAN to USB Adaptor在系統上以Rolling Trace Window，讀取分析診斷後的結果；除此之外，此控制器模組還搭配低功耗藍芽模組，將錯誤碼透過CAN to Bluetooth Module傳送出去，使用者可以透過行動裝置接收資料，並藉由執行Android APP以GUI的介面可以即時觀看此系統發生異常之處。

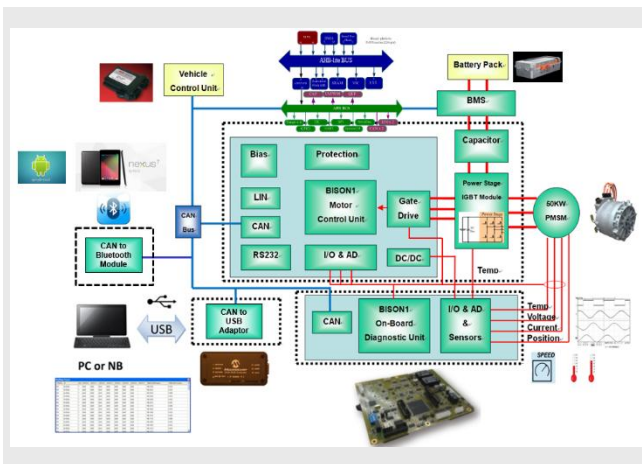


圖 3 馬達控制診斷模組硬體架構

Application Software								
Android OBD App				Windows OBD CAN Analyzer				
Algorithm/ Driver								
Storage Service	Connect Service	OBD Tx/Rx Service	3 Phase Current Monitor	Motor Control Algorithm	Motor RPM Check	Position Sensor Monitor	System Voltage Monitor	IGBT Diagnostic Service
SPI	UART	CAN	ADC	PWM	QEP	IC	ADC	GPIO
Hardware								
Flash	BLE	SAE J1962	Current Sensor	PMSM Motor	Optical Encoder	Hall Sensor	Regulator	Gate Driver

圖 5 馬達控制與監控系統軟體堆層

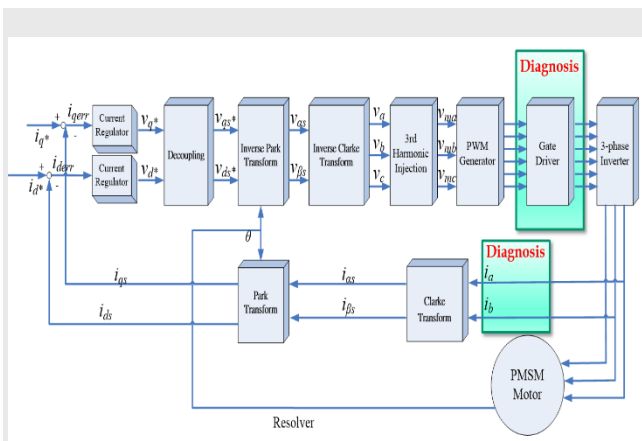


圖 4 馬達向量控制演算法

馬達控制與監控系統軟體堆層如圖5所示，從下層到上層包含硬體階層、演算法與驅動程式階層及應用軟體階層。演算法與驅動程式階層的開發在 ARM Development Suit(ADS) 或 RealView Development Suite(RVDS) 軟體下進行編譯及執行，並透過 AXD Debugger 做 On-Line Debugging。開發完成後的驅動程式再透過 Multi-ICE 燒錄到 Embedded Flash，即可 Stand Alone 執行系統相對應的控制與監控診斷程式。

### 2.3 系統單晶片處理器架構

Bison1 系統單晶片的架構如圖六所示，主要分成 AMBA AHB Bus 系統與 AMBA APB Bus 系統。AMBA AHB Bus 系統主要是 MPU 作為整個系統的流程控制以及實現馬達控制演算法與功率元件錯誤診斷演算法，操作頻率為 152MHz。系統所需的記憶體元件，包含 SRAM、Embedded Flash 以及 External Serial NOR Flash。DMA 以及 External Interface 作為大量資料搬移以及整體系統擴充的元件使用。MPU 採用 ARM 926EJS Hard Macro，為 ARMv5TE 架構，具備高效能的 5 階段管道(Pipeline)，可增加吞吐量和提高系統性能；DMA 具有八個通道並可設定優先權；H2H 主要的功能為傳遞 AMBA AHB BUS 的訊號並且提供非同步介面，使整體系統在頻率使用上有更大的彈性；SRAM 為 Artisan 所提供的 High-Speed Single-Port Synchronous SRAM，用作於 Bison1 主要的記憶體元件，有 64K Byte 大小；Embedded Flash 為 TSMC 所提供 On-Chip Non-Volatile memory，主要可供系統儲存 MPU 指令以及資料存取，有 128K Byte 大小可供使用。

### 3 · 功率元件故障分析與診斷

IGBT 毀滅性的失效行為 (Catastrophic Failure) 可以被分類為 Open-Circuit Fault 及 Short-Circuit Fault。Open-Circuit Fault 造成的原因有很多種，有可能是因為熱循環 (thermic cycling) 所造成打線 (bonding wire) 脫落，也有可能是 Gate Driver 故障，也有可能是 Short-Circuit Fault 所造成 IGBT 崩潰。Open-Circuit Fault 在故障及健康的相位均會造成 DC Current Offset，這會形成抖動力矩 (Pulsating Torque)，並減少最大平均力矩的輸出；這個 DC Current 也會在上臂與下臂電晶體之間產生不對等的壓力，甚至對整個變頻器及馬達負載造成第二種故障 (Secondary Faults)。通常電壓及電流都會帶有記號 (Signature)，因此我們能藉由分析其中的資訊，來偵測及尋找 Open-Circuit Fault。

而 Short-Circuit Fault 造成的原因也有很多種，有可能是使用者接錯線或是接線造成電源供應產生短路，也有能是因為雜訊或是計算錯誤造成控制訊號失效，也有可能是過負載的情況產生，也有可能是 Gate Driver 電路失效。不管是哪一種情況，都會造成通過 IGBT 的電流快速增加，產生大量的功率消耗及熱能。而當電流負載到達裝置的飽和電流，集級與射級之間的電壓 (Collector-to-Emitter voltage) 到達飽和電壓，IGBT 就會受到傷害。因為大量增加功率的消耗，就會使得功率裝置產生過熱並且摧毀的情況產生。

為了防止功率元件裝置受到損害，我們利用 Park's Vector Approach 做 Open-Circuit Fault 及 Short-Circuit Fault 偵測與診斷，並與 AVAGO Gate Driver 驅動電路做整合，搭配具診斷功能的馬達控制器，來實現錯誤保護的機制，以降低或關閉過電流的現象產生，達到預警的功能。

#### 3.1 Park's Vector Approach

我們採用 Park's Vector Approach 做錯誤診斷，藉由偵測三相電流的平均電流，並計算平均電流在複數領域 (Complex Domain) 下的元素 ID 及 IQ，並轉成大小值 (Magnitude Value)，以此做為臨界值 (Threshold Value) 做判斷，可以找

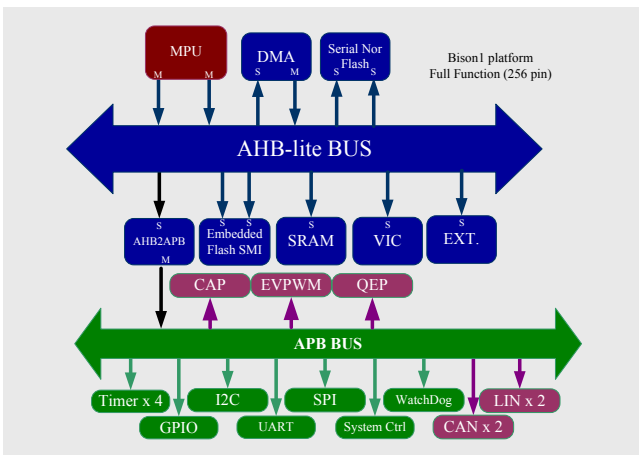


圖 6 Bison1 系統單晶片架構

AMBA APB Bus 系統用來實現馬達控制以及監控功能，操作頻率為 24MHz。主要是低速周邊以及通訊模組以及馬達控制模組，包含 GPIO、I2C、UART 等標準通訊以及 Debug 介面。CAP 可以在馬達控制系統上量測事件發生的精確時間，作為演算法開發使用；PWM 可調整脈波寬度的訊號，決定功率開關元件的切換時刻；QEP 用來檢測馬達系統的位置和速度；CAN/LIN 用來作為馬達系統通訊網路。Bison1 系統單晶片採用 TSMC 0.18um 製程設計與實現，主要電路方塊佈局如圖 7 所示，包含 MPU、Embedded Flash、SRAM、PLL、數位邏輯電路等，晶片面積大小為 5000um\*5000um，並採用 LQFP256 封裝。

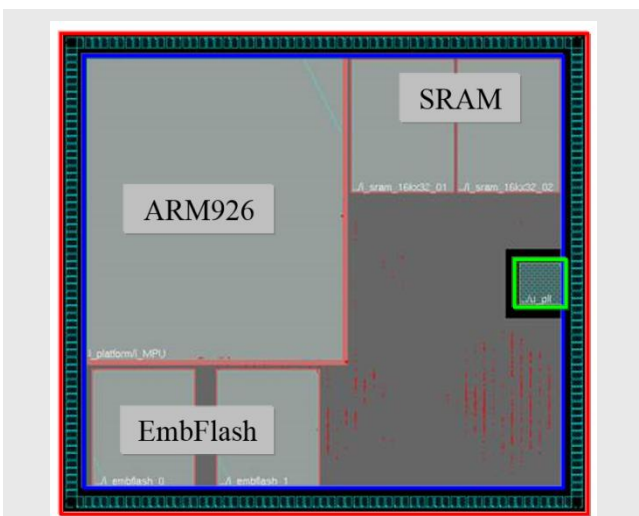


圖 7 Bison1 系統單晶片圖

出Open-Circuit Fault或是Short-Circuit Fault，再進一步利用反三角函數arctan計算出AC Current的角度，即可判斷出三相上下臂是哪一個功率元件出問題。

我們先計算Park's Vector電流  $I_{Sav}$ ，其在複數領域的表示方式如(1)所示，可以用強度(Magnitude)和相位角(Phase Angle)做表示，也可以拆成複數領域上的實部( $I_{Dav}$ )與虛部( $I_{Qav}$ )。

$$I_{Sav} = I_{Dav} + jI_{Qav} = |I_{Sav}| \angle \theta_{Sav} \quad (1)$$

$I_{Uav}$ 、 $I_{Vav}$ 、 $I_{Wav}$ 為U、V、W三個相位的平均電流，平均時間須大於一個週期。實部( $I_{Dav}$ )與虛部( $I_{Qav}$ )電流可以平均電流做表示，如(2)及(3)所示。

$$I_{Dav} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}I_{Uav} - \frac{1}{\sqrt{6}}I_{Vav} - \frac{1}{\sqrt{6}}I_{Wav} \quad (2)$$

$$I_{Qav} = \frac{1}{\sqrt{2}}I_{Vav} - \frac{1}{\sqrt{2}}I_{Wav} \quad (3)$$

將實部( $I_{Dav}$ )與虛部( $I_{Qav}$ )電流平方相加後開根號，即可得到Park's Vector電流在複數領域上的強度，如(4)所示。

$$|I_{Sav}| = \sqrt{(I_{Dav})^2 + (I_{Qav})^2} \quad (4)$$

將實部( $I_{Dav}$ )與虛部( $I_{Qav}$ )電流相除後所得到之反三角函數arctan的值，即可得到Park's Vector電流在複數領域上的相位角，如(5)所示。

$$\angle \theta_{Sav} = \arctan \frac{I_{Qav}}{I_{Dav}} \quad (5)$$

我們將定子上的線電流轉成Park's Vector電流，在健康且沒有錯誤的變頻器裡，以X軸為Park's Vector電流的實部 $I_{Dav}$ ，以Y軸為Park's Vector電流的虛部 $I_{Qav}$ ，會得到一個近似完美圓形的描繪圖，如圖8所示。

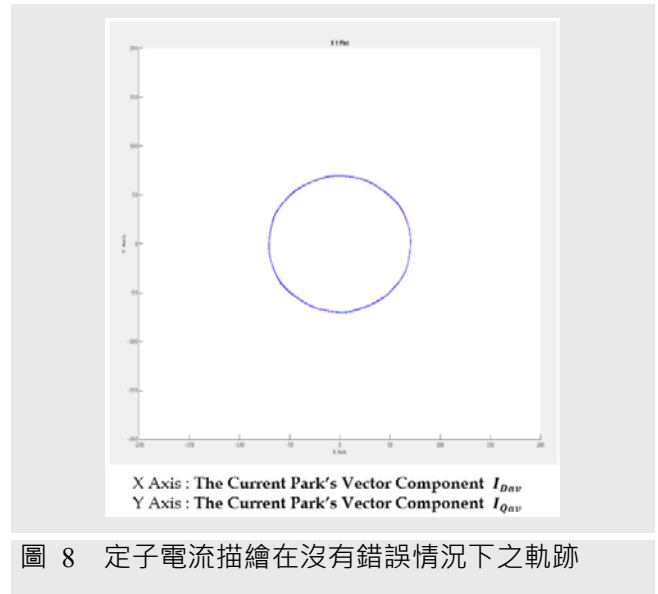


圖 8 定子電流描繪在沒有錯誤情況下之軌跡

而當有錯誤的情況產生，Park's Vector Approach所描繪的軌跡就不會是一個近似完美圓形的描繪圖，如圖9所示。當功率元件沒有錯誤情況產生時，其電流空間向量會趨近一個圓形，也就是平均電流強度會近似於零；而當有錯誤的情況產生，則平均電流強度會遠大於零，並超過臨界值，所以控制器可以此演算法判別是否有錯誤的情況產生，並可計算出Park's Vector電流在複數領域上的相位角，依角度找出是哪一個功率元件上的電晶體產生錯誤。

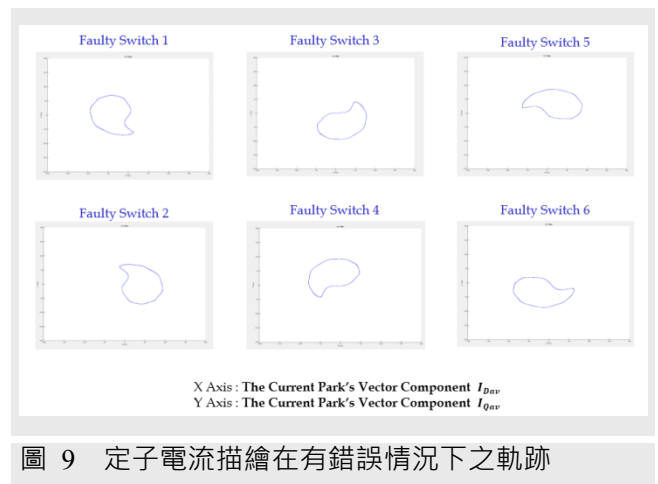


圖 9 定子電流描繪在有錯誤情況下之軌跡

### 3.2 功率元件故障診斷量測

圖10為馬達在正常運轉情況下所抓取的三相電流波形圖，電流頻率為60Hz，取樣時間為20us。

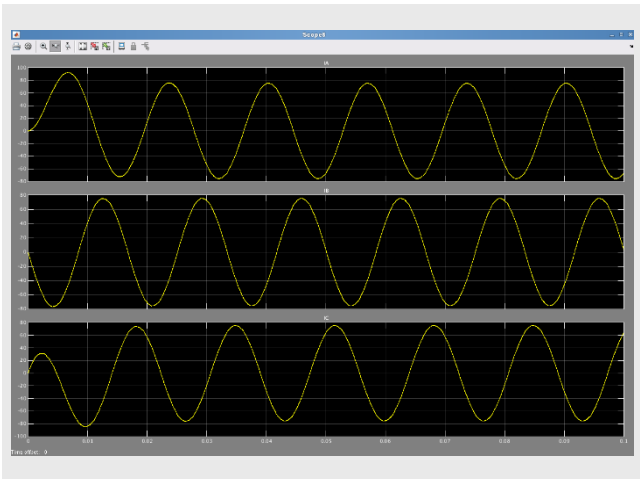


圖 10 PMSM馬達三相電流波形圖

馬達有U/V/W三相及區分為上下臂，所以總共有6種Open-Circuit Fault及6種Short-Circuit Fault，我們取其中一個錯誤做範例。當U相上臂發生Open-Circuit Fault時，可以看出U相電流上半部會被截掉，而V相與W相電流也會產生偏移的情況，如圖11之紫色波形圖所示，黃色波形圖為正常的馬達三相電流波形圖，可以相對應做比較。

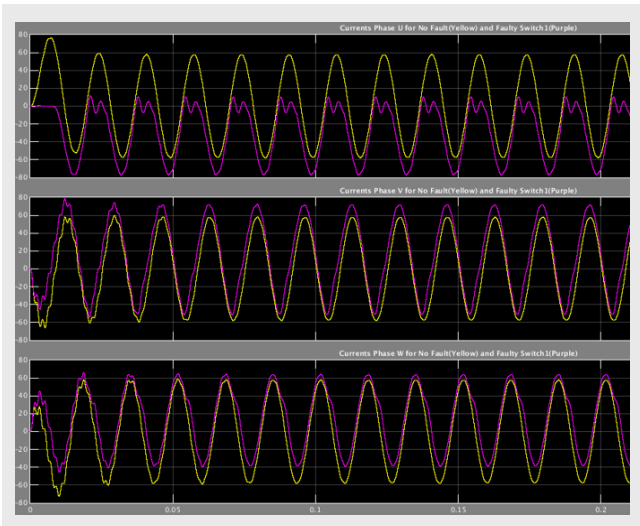


圖 11 U相上臂Open-Circuit Fault之電流波形圖

我們取其超過一個週期的U/V/W三相電流，採用Park's Vector Approach，得到實部( $I_{Dav}$ )與虛部( $I_{Qav}$ )的值，並計算出強度和相位角，如圖12所示。可以看出在正常情況下，強度為

1.37，而當有Open-Circuit Fault時，強度為35.97，遠遠大於在正常情況下的值，並計算出相位角為180.5度。

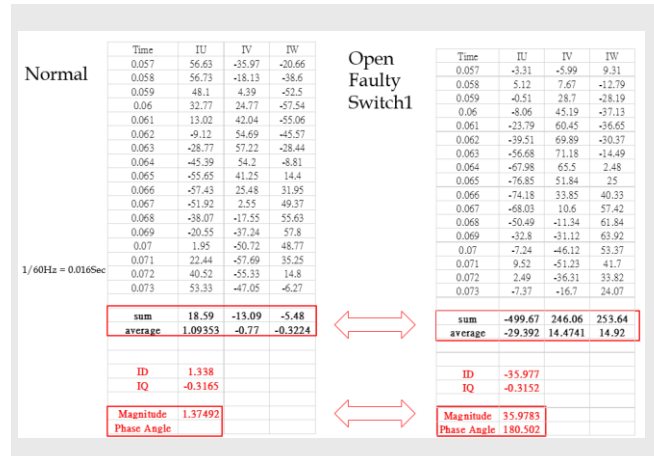


圖 12 U相上臂Open-Circuit Fault之數據分析

我們把量測的U/V/W三相平均電流、相位角及強度做整理，如表1所示。再依照量測的結果，以查表的方式，如表2所示，即可得知相對應的Open-Circuit Fault。

表 1 Open-Circuit Fault量測結果

IGBT	$I_{Uav}$	$I_{Vav}$	$I_{Wav}$	$ I_{Sav} $	$\angle \theta_{Sav}$
No Fault	1.09	-0.77	-0.32	1.37	N/A
T1	-29.39	14.47	14.92	35.97	180.45
T2	30.74	-15.59	-15.15	37.63	359.52
T3	15.84	-30.27	14.42	37.07	301.53
T4	-13.96	29.35	-15.38	35.95	118.39
T5	15.99	14.13	-30.13	36.92	57.97
T6	-13.63	-15.49	29.12	35.68	242.12

表 2 Open-Circuit Fault功率元件查表分析

Transistor	Avg. Current Magnitude $ I_{Sav} $	Current Phase Angle (deg)
T1	Exceed Threshold	150-210
T2		330-30
T3		270-330
T4		90-150
T5		30-90
T6		210-270

當U相上臂發生Short-Circuit Fault時，可以看出U相電流下半部會被截掉，而U相、V相與W相電流所產生偏移的情況，也比Open-Circuit

Fault更加嚴重，如圖13之紫色波形圖所示，黃色波形圖為正常的馬達三相電流波形圖，可以相對應做比較。

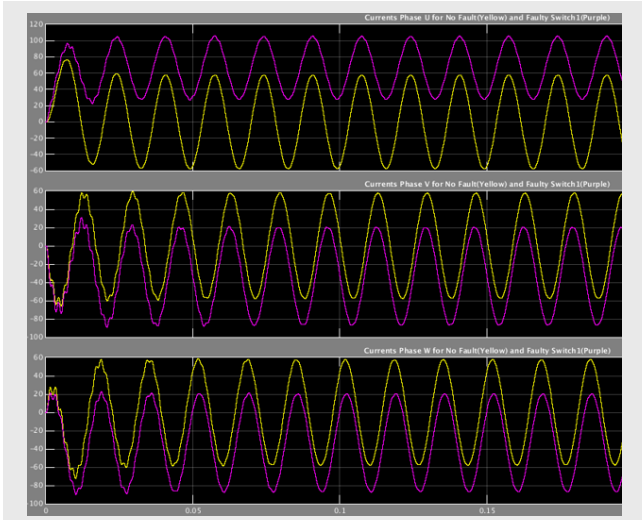


圖 13 U相上臂Short-Circuit Fault之電流波形圖

我們取其超過一個週期的U/V/W三相電流，採用Park's Vector Approach，得到實部( $I_{Dav}$ )與虛部( $I_{Qav}$ )的值，並計算出強度和相位角，如圖14所示。可以看出在正常情況下，強度為1.37，而當有Short-Circuit Fault時，強度為82.37，遠遠大於在正常情況下的值，也大於Open-Circuit Fault時的強度，並計算出相位角為359.7度。

	Time	IU	IV	IW		Time	IU	IV	IW
Normal	0.057	56.63	-45.97	-20.66	Short Faulty Switch1	0.057	104.55	-59.92	-44.62
	0.058	56.73	-18.13	-38.6		0.058	103.97	-41.75	-62.22
	0.059	48.1	4.39	-52.5		0.059	99.24	-21.17	-78.07
	0.06	32.77	24.77	-57.54		0.06	87.69	-2.68	-85.01
	0.061	13.02	42.04	-55.06		0.061	76.08	10.51	-86.59
	0.062	-9.12	54.69	-45.57		0.062	59.61	20.32	-79.94
	0.063	-28.77	57.22	-28.44		0.063	48.29	18.68	-66.98
	0.064	-45.39	54.2	-8.81		0.064	35.48	13.76	-49.25
	0.065	-55.65	41.25	14.4		0.065	20.21	-1.68	-28.52
	0.066	-57.43	25.48	31.95		0.066	27.62	-17.05	-10.57
	0.067	-51.92	2.55	49.37		0.067	32.46	-39.64	7.17
	0.068	-38.07	-17.55	55.63		0.068	40.9	-57.04	16.14
	0.069	-20.55	-37.24	57.8		0.069	53.1	-74.07	20.97
	0.07	1.95	-50.72	48.77		0.07	67.91	-83.7	15.79
	0.071	22.44	-57.69	35.25		0.071	81.43	-87.19	5.75
0.072	40.52	-55.33	14.8	0.072	93.86	-82	-11.86		
0.073	53.33	-47.05	-6.27	0.073	101.74	-71.26	-30.47		
	sum	18.59	-13.09	-5.48		sum	1144.14	-575.88	-568.28
	average	1.09353	-0.77	-0.3224		average	67.3024	-33.875	-33.428
	ID	1.338				ID	82.3786		
	IQ	-0.3165				IQ	-0.3161		
	Magnitude	1.37492				Magnitude	82.3792		
	Phase Angle					Phase Angle	359.78		

圖 14 U相上臂Short-Circuit Fault之數據分析

我們把量測的U/V/W三相平均電流、相位角及強度做整理，如表3所示。再依照量測的結果，以查表的方式，如表4所示，即可得知相對

應的Short-Circuit Fault。

表 3 Short-Circuit Fault量測結果

IGBT	$I_{Dav}$	$I_{Qav}$	$I_{Wav}$	$ I_{Sav} $	$\angle \theta_{Sav}$
No Fault	1.09	-0.77	-0.32	1.37	N/A
T1	67.30	-33.87	-33.42	82.37	359.78
T2	-65.90	32.72	33.17	80.66	180.22
T3	-32.32	66.06	-33.73	80.89	119.28
T4	34.28	-67.14	32.86	82.21	300.68
T5	-32.24	-34.11	66.36	81.26	240.94
T6	34.35	32.49	-66.84	81.85	59.08

表 4 Short-Circuit Fault功率元件查表分析

Transistor	Avg. Current Magnitude $ I_{Sav} $	Current Phase Angle (deg)
T1	Exceed Threshold	330-30
T2		150-210
T3		90-150
T4		270-330
T5		210-270
T6		30-90

較低的訊雜比(SNR)會造成錯誤的警告(False Alarm)，可以藉由停滯時間(Dead Time)來增加抵抗誤判的能力，但是停滯時間越長效率越低。表5為停滯時間的效能比較分析，比起傳統的直接電流量測方式，停滯時間減少了16%。

表 5 停滯時間效能比較分析

Performance Evaluation – Resistivity Against False Alarms	
Detection Method	Dead Time(ms)
Park's Vector Method	5
Simple Direct Current Method	6

表6為偵測時間的效能比較分析，比起傳統的直接電流量測方式，偵測時間減少了33%，越短的偵測時間，更能快速有效地針對功率元件找出故障原因。



表 6 偵測時間效能比較分析

Performance Evaluation - Detection Time	
Detection Method	Detection Time(ms)
Park's Vector Method	12
Simple Direct Current Method	18

### 3.3 功率元件可靠度預警

我們使用Park's Vector Approach即可判斷出功率元件之三相上下臂是哪一個出問題，此方法不需要額外的感應器電路，大幅降低系統成本與提升安全性。而監控診斷處理器收到通知後，會透過CAN Bus傳送錯誤代碼，再藉由低功耗藍芽模組傳送錯誤代碼，將診斷訊息即時傳送至智慧型手持裝置，使用者可以透過平板或手機上的App，如圖15所示，以GUI的方式即時呈現功率元件狀態。當有錯誤情況產生，狀態指示會從綠燈轉成紅燈，使用者可以即時知道系統哪一個環節出問題，再往下點進去下一層頁面，可以進一步知道故障發生的細項、故障產生的時間及可能造成的原因，讓使用者可以進一步排除故障，讓系統恢復正常運作，並達到預警的功能。

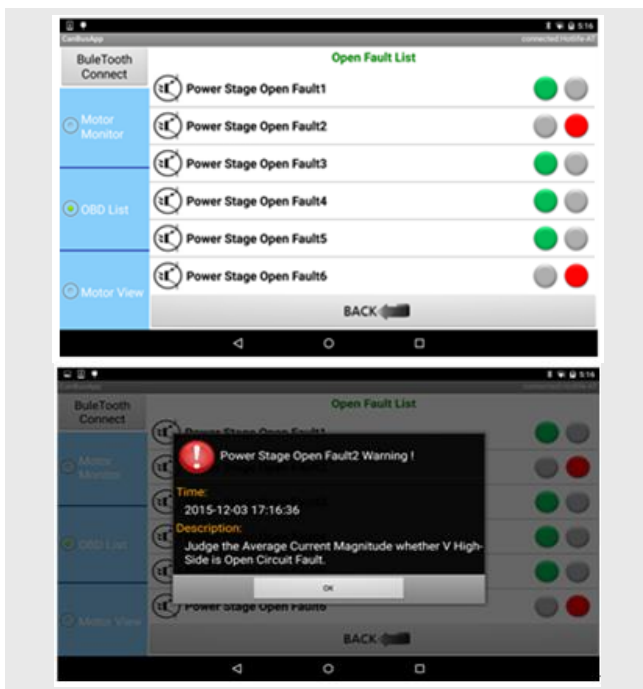


圖 15 故障診斷與可靠度預警之監控程式

## 4. 結論

這一套具備安全及診斷功能之馬達控制器系統，包含馬達控制系統單晶片、監控診斷處理器、功率元件模組發展版、驅動程式、馬達控制演算法、錯誤偵測診斷演算法、低功耗藍芽模組整合、Android App開發等，整套系統均為工研院資通所R組自行開發完成，對於成本的掌控與技術的掌握均有極大的優勢，並具備擴充的能力，能依據系統的不同，增加控制與監控的項目。隨著生產資訊化及自動化的發展，我們整合物聯網、智慧機械等相關技術，藉由智慧感測系統，完成訊息即時監控及預知保養，並連結物聯網應用開發平台，完成即時預測與可調整化系統模組，發展人機協同的智慧工作環境，可加速提升附加價值與生產力，並優化產業結構。

### 參考文獻

- [1] H. Wang, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Toward reliable power electronics - challenges, design tools and opportunities," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, no. 2, pp. 17-26, Jun. 2013.
- [2] S. Yang, A. T. Bryant, P. A. Mawby, D. Xiang, L. Ran, and P. Tavner, "An industry-based survey of reliability in power electronic converters," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 3, pp.1441-1451, May/Jun. 2011.
- [3] C. Busca, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, S. Munk-Nielsen, L. Helle, T. Abeyasekera, and P. Rodriguez, "An overview of the reliability prediction related aspects of high power IGBTs in wind power applications," Microelectronics Reliability, vol. 51, no. 9-11, pp. 1903-1907, Sep./Nov. 2011.
- [4] C. Delepout, S. Siconolfi, O. Mourra, and F. Tonicell, "MOSFET gate open failure analysis in power electronics," Proceedings of 28th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC2013), pp.189-196, Mar. 2013.
- [5] G. Breglio, A. Irace, E. Napoli, M. Riccio, and P. Spirito, "Experimental detection and numerical validation of different failure mechanisms in IGBTs during unclamped inductive switching," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 60, no. 2, pp. 563-570, Feb. 2013.
- [6] F. Hille, F. Umbach, T. Raker, and R. Roth, "Failure mechanism and improvement potential of IGBT's short

circuit operation,” Proceedings of 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC’s (ISPSD2010), pp. 33-36, 2010.

[7] J. Lutz, U. Scheuermann, H. Schlangenotto, and R. de Doncker, “Semiconductor power devices,” Springer: 2011, ISBN: 3642111246.

[8] M. Shahbazi, P. Poure, S. Saadate, and M.R. Zolghadri, “FPGA-based reconfigurable control for fault-tolerant back-to-back converter without redundancy,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.60, no.8, pp.3360-3371, Aug. 2013.

[9] L. Eunsil, and K. B. Lee, “Fault diagnosis for a sparse matrix converter using current patters,” Proceedings of 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp.1549-1554, Feb. 2012.

[10] U. M. Choi, K. B. Lee, and F. Blaabjerg, “Diagnosis and tolerant strategy of an open-switch fault for T-type three-level inverter systems,” IEEE Transactions on Industry Applications, to be published in 2014.

[11] M. Alavi, M. Luo, D.Wang, and D. Zhang, “Fault diagnosis for power electronic inverters: A model based approach”, In Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Bologna, Italy, September 2011.

[12] Jorge O. Estima and Antonio J. Marques Cardoso, “A New Approach for Real-Time Multiple Open-Circuit Fault Diagnosis in Voltage-Source Inverters”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 6, Nov/Dec 2011.

[13] E.M. Fernandes, A.C. Oliveira, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, “Comparison of HF Signal Injection Methods for Sensorless Control of PM Synchronous Motors,” in IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010, pp. 1984 – 1989.

[14] M.A. Vogelsberger, S. Grubic, T.G. Habetler, T.M. Wolbank, “Using PWM-Induced Transient Excitation and Advanced Signal Processing for Zero-Speed Sensorless Control of AC Machines,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 57, NO. 1, JANUARY 2010, pp. 365 – 374.

[15] J. O. Estima and A. J. M. Cardoso, “A novel diagnostic method for single power switch open-circuit faults in voltage-fed PWM motor drives,” in Proc. Int. Symp. Power Electron., Elect. Drives, Autom. Motion, Pisa, Italy, Jun. 14–16, 2010, pp. 535–540.

[16] S. Choi, B. Akin, M. Rahimian, and H. A. Toliyat,

“Fault diagnosis implementation of induction machine based on advanced digital signal processing techniques,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 3, 937–948, Mar. 2011.

[17] B. Akin, S. B. Ozturk, and H. Toliyat, “On-board fault diagnosis of hybrid electric vehicle motors at startup and idle mode,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 58, no. 5, pp. 2679–2688, June 2009.

[18] B. Akin, S. Choi, U. Orguner, and H. Toliyat, “A simple real-time fault signature monitoring tool for motor drive embedded fault diagnosis systems,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 5, pp. 1990–2001, May 2011.

## 作者簡介

沈志堅



資訊與通訊研究所/生醫與工業積體電路技術組/車用電子設計應用部/工程師。專長為數位電路設計、馬達系統軟硬體設計、系統整合與驗證。

[bryanshen@itri.org.tw](mailto:bryanshen@itri.org.tw)

林怡君



資訊與通訊研究所/生醫與工業積體電路技術組/車用電子設計應用部/工程師。專長為中介軟體開發、嵌入式系統開發、系統整合與驗證。

[chun@itri.org.tw](mailto:chun@itri.org.tw)

紀坤明



資訊與通訊研究所/生醫與工業積體電路技術組/車用電子設計應用部/資深工程師兼副經理。專長為數位VLSI設計、EDA設計流程整合、功能安全性分析與設計。

[digo@itri.org.tw](mailto:digo@itri.org.tw)

黃立仁



資訊與通訊研究所/生醫與工業積體電路技術組/組長。專長為類比/混合訊號IC設計、車規IC設計、功能安全性分析與設計、超大型積體電路測試。

[lruang@itri.org.tw](mailto:lruang@itri.org.tw)