

永磁同步電動機定子開路故障即時監測

Open Phase Real-Time Fault Detection for Permanent Magnet Synchronous Machines

周柏寰^{1*}、楊士進²、許煜亮³、洪國原⁴、陳冠任⁴

¹ 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 資深研究員

² 國立台灣大學 機械工程學系 副教授

³ 逢甲大學 自動控制工程學系 副教授

⁴ 國立台灣大學 機械工程學系 博士生

摘要：本篇論文研究具有 Y 接繞組的永磁馬達開路故障即時偵測，提出使用繞組中性點電壓檢測故障來改善故障監控之性能。常見的開路故障檢測方式皆使用驅動器現有之電流感測器計算 dq 電流產生之諧波。由於電流大小正比於馬達轉速和負載條件，因此在輕負載或低速狀態下發生故障對於電流檢測能力仍然是需要克服的問題。本論文比較中性點電壓與 dq 電流兩種偵測方法，分別分析當開路故障時，所產生之額外諧波來找到故障訊號進行故障檢測。中性點檢測方法需加入額外之電壓感測器來量測馬達中性點電壓，由於中性點電壓對於負載變化的反應較不敏感，因此可以獲得最佳的故障檢測性能。

Abstract : This paper proposes an on-line stator open-phase fault detection and tolerant control for permanent magnet (PM) machines with Y-connected windings. The stator neutral point (NP) voltage is connected to detect the phase faults as well as to improve the fault detection performance. Conventional phase fault detection relies on the estimation of d-q axis current harmonics using drive's available phase current sensors. Phase fault at light load is still a challenge since the magnitude of current harmonic is proportional to the machine load. Under this effect, fault induced current harmonics are too small to estimate at light load. In this paper, both fault harmonics in d-q currents and NP voltage are analyzed to comparatively evaluate the detection performance. Although NP voltage detection method requires an additional voltage sensor in PM machines, the NP voltage is less sensitive to load, reaching a better fault detection performance..

關鍵詞： 永磁馬達、開路故障偵測、中性點

Keywords : Permanent magnet (PM) machines, Open-phase fault detection, Neutral point (NP)

前言

隨著科技進步。變頻馬達應用層面越來越廣泛，從小型風扇、壓縮機到大眾運輸系統。為了實現變頻驅動，馬達驅動之演算法以及控制半導體開關產生脈寬調變電壓皆需要具有高效率即時處理之微處理器。由於微處理器已經相當進步，即時故障檢測也能實現在微處理器上 [1]。

一般在工業界造成開路故障最主要在變頻器

的損壞，佔了約 38% 以上 [2]，而在開路故障中最常見的都發生在機械式接點、或變頻器開關接腳的斷開導致故障這些狀況若沒有緊急處理會造成短路電流去觸發到過電流保護。然而驅動器若一直連續的操作在故障情況下會讓馬達或驅動器產生二次的損壞 [3]。

由於微處理控制器的進步，驅動器中的控制器不僅可以進行回授控制，並且可以額外加入在線故障檢測演算法。為了達到磁場導向控制，通

常變頻器中需要量測電流訊號，在此結構中，驅動器亦可使用相電流的回授訊號進行故障的評估，另外也能透過量測馬達中性點 (Neutral Point, NP) 電壓來獲得有用的訊號。當故障發生時在電流以及中性點電壓都會產生額外故障引起的諧波，使用所量測到的訊號皆能透過在時域 [4-6]，或是頻域 [6-8] 上的處理得到故障諧波，並分析此故障諧波判斷故障情況達到在線監控能力。

根據所量測的故障訊號採用頻域訊號處理方式，必須要使用快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transformation, FFT) 分析故障諧波位置，不過 FFT 處理訊號所要計算時間至少需要一個電氣的週期 [6, 7]。假設故障諧波的頻率是已知的，可以透過頻域處理方法將故障諧波隔離並分析故障情況來進行故障監控，然而 FFT 方法有個挑戰，其故障監控僅能在響應達到穩態之後進行，考慮到變頻驅動的應用，相位故障通常都發生在高電流峰值的暫態操作期間，在這種情形，頻域訊號處理可能無法很快得知故障資訊或是檢測失效。

另一方面，時域訊號處理能不需要使用 FFT，並且能夠在速度或負載暫態變動期間進行故障監控 [5]。對 PM 馬達驅動而言，會使用磁場導向方法控制 d 軸電流 i_d 與 q 軸電流 i_q ，並且可以使用此回授電流來進行在線監控。在健康馬達中， i_d 與 i_q 一般來說都會藉由電流控制器維持在一個常數 [9]，不過當故障發生時會在 i_d 與 i_q 上產生轉子頻率兩倍的電流諧波幅值。因此可以透過電流回授 i_d 和 i_q 進行反切函數計算來評估兩倍頻故障

諧波 [4]，通常使用此時域處理訊號能夠在驅動器幾個開關週期能夠隔離出故障訊號以及偵測故障，若馬達操作在高動態響應情形使用時域監控能夠達到更精準的檢測能力。然而，對於感測器有偏移誤差時以及變頻器開關產生額外諧波時對於時域檢測是一大挑戰 [10]。

本論文針對 PM 馬達在低速與輕負載下之檢測能力。比較兩種故障檢測能力，評估故障後 dq 電流與 NP 電壓之故障諧波。dq 電流故障諧波訊噪比隨著負載減小而變低，可能會導致故障檢測結果失敗。相較之下，使用 NP 電壓諧波檢測，由於額外阻抗及電動勢電壓降，在低負載條件下可以獲得最佳的檢測性能。另一方面，NP 電壓中由 PWM 開關引起的諧波成分，也能透過附加的電阻橋量測之間的差分電壓以消除。

相位故障檢測

本節主要說明馬達開路故障發生後的模型，**圖 1** 表示馬達與變頻驅動器發生 A 相開路故障，一般開路型故障通常都會發生於馬達定子繞組接點斷開或者是 PWM 開關元件損壞。透過驅動器中現有電流感測器或是額外加入電壓感測器量測 NP 電壓方式如 **圖 1** 所示，當發生故障後可以得知在上述兩種訊號回授中會額外產生故障諧波，本章節使用 dq 電流和 NP 電壓上述兩種方法，分析在低速以及輕負載下的故障訊號，進行即時在線監控。

1. d-q 電流故障諧波

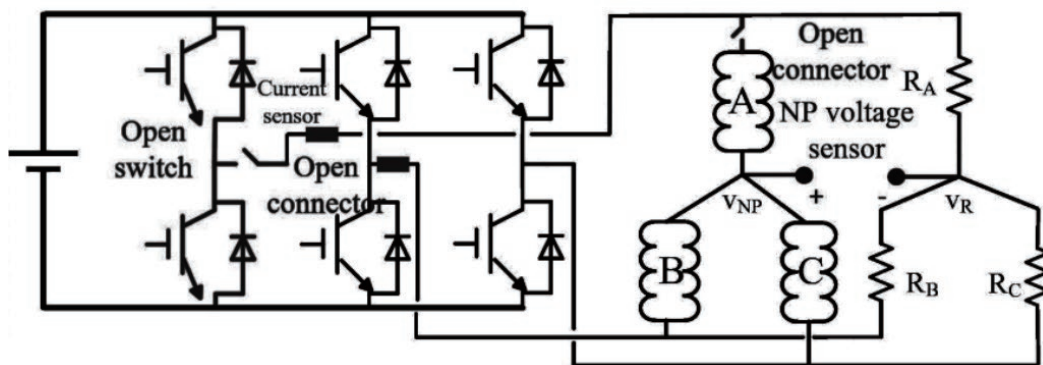


圖 1 PM 馬達發生 A 相開路故障與加入電阻橋量測 NP 零序電壓

更完整的內容

詳見 | 機械工業雜誌 | · 434 期 · 108 年 5 月號

機械工業雜誌·每期 **220** 元·一年 12 期 **2200** 元

線上訂購網址：<https://www.automan.tw/magazine/orderMag.aspx>

付款方式

1. 郵局劃撥—戶名：財團法人工業技術研究院機械所 帳號：07188562
請於劃撥單的通訊欄寫明：購買期數、金額等
2. 匯款資料—兆豐國際商業銀行新竹分行(代號 017)
帳號：203-07-02288-0 戶名：財團法人工業技術研究院
3. 信用卡—請填寫信用卡 [訂購單](#)

麻煩您將 繳款收執 或 信用卡刷卡單 傳真至 (03)582-2011，我們會盡快處理您的訂單並開通權限，再次感謝您的支持與愛護。

訂書專線：03-591-9339

傳 真：03-582-2011

機械工業雜誌·官方網站：www.automan.tw 機械工業雜誌·信箱：jmi@itri.org.tw

機械工業雜誌 優惠訂購單

訂閱一年 **12** 期

\$ 2200 / 續訂戶 \$ 2000

好禮二選一

A 史欽泰墨寶帆布袋

B 工研院機械所無人車USB (8G)

訂閱紙本+電子雜誌

\$ 3000 原價 \$ 4400

一年12期

贈送

A 史欽泰墨寶帆布袋

訂閱二年 **24** 期

\$ 4000 / 續訂戶 \$ 3600

好禮四選二

A 史欽泰墨寶帆布袋

B 工研院機械所無人車USB (8G)

C 工具機叢書任一本

D 智慧機械人叢書任一本

限量專屬精品送給您



A



B



C



D