

Interturn Short-Circuit Fault Detection for Permanent Magnet Synchronous Motor with Second Harmonic Voltage

Fu-Sheng Pai*, Tin-Wei Wu, Jai-Lin Tsai

Department of Electrical Engineering,
National University of Tainan,
Tainan, 70005, Taiwan

E-mail : fspai@mail.nutn.edu.tw

Abstract

This paper proposes a detection method of inter-turn short circuit faults for a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM). Based on the Field-Oriented Control (FOC) signal, the proposed method analyzes the motor-driving voltage spectrum and finds that the second-order harmonic component of motor-driving voltage can be used as an index to quantify the degree of inter-turn short circuit when the interturn short-circuit fault occurs. This proposed approach has been tested through the theoretical analysis and Matlab/Simulink computer simulation. Test results can support the feasibility of the interturn short-circuit fault detection.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, field-oriented control, inter-turn short circuit.

* Corresponding author: fspai@mail.nutn.edu.tw
DOI : 10.53106/222344892022041201003

利用二次諧波電壓偵測之永磁同步馬達匝間短路分析

白富升* 吳庭維 蔡佳霖

國立臺南大學電機工程學系

摘要

本文研究提出一馬達繞組匝間短路故障偵測之方法，所提方法是以馬達磁場導向控制器訊號為基礎，計算其驅動電壓頻譜，並找出馬達繞組匝間短路事故發生時會伴隨故障產生的二次諧波電壓特徵作為故障程度檢測之指標。本文已完成理論分析，並利用 Matlab/Simulink 對故障特徵進行實時模擬驗證，驗證結果顯示所提方法具相當之故障檢測準確性。

關鍵詞：永磁同步馬達、磁場導向控制、匝間短路

1. 前言

在當今的節能馬達科技發展中，以永磁同步馬達最具代表性，永磁同步馬達使用磁鐵輔助，無論轉矩密度、功率密度、效率都較感應電機好，同時如配合場導、弱磁或是最大電流轉矩比控制，永磁同步電機尚能達高速、高扭力與高效率設計，使其在眾多種類的電機中脫穎而出，成為現今工業與民生馬達應用的主流[1]。然而馬達設計與驅動在追求高速、高密度與高效率化等前提下，其運轉產生之機械應力、散熱與電路雜訊問題將更加複雜化，這使得馬達及其驅動系統故障率增加，因此針對 PMSM 的運轉狀態及故障診斷的監控系統的技術發展實有其必要性。

永磁同步馬達常見的故障種類包括機械故障、轉子故障與電氣故障三大類。在機械故障中，由於軸承為電機中的旋轉零件，容易耗損導致軸承故障為機械故障之主因；又轉子故障主要是由永久磁鐵老化退磁產生、電氣故障則又以驅動器或繞組故障為事故發生大宗。以繞組故障為例主要起因於繞組溫度過高、轉子與線圈運動擦撞磨損、馬達運轉暫態電流造成之絕緣破壞，並導致線圈發生短路、開路或是接地故障等異常事故。整體來看，馬達的不同故障種類發生機率統計中軸承故障約佔總體 41%、定子繞組故障約佔 37%、轉子故障約佔 10%。文獻[2]統計超過 7000 顆馬達，結果顯示有超過 30%的故障是由定子繞組故障所引起，而另一文獻[3]，顯示交流馬達的故障中，定子故障佔總體 30%，在定子繞組故障中，有八成以上故障是由匝間故障所引起。根據以上文獻資料以及眾多馬達故障學術文獻探討可歸納出，定子繞組故障為馬達電機故障中最為常見之故障類別，其中又經常由定子繞組層間短路故障所引起，因此對於此類故障偵測技術，亦有相當多的學術文獻探討。

而在故障偵測技術的文獻當中，在文獻[4]歸納出 3 個主要方向，分別是基於數學建模分析，數位訊號處理，以及大數據演算法等方式。其中數學建模分析法，通常是藉由狀態參數估測，結合查表(Look-up table)的方式，然而因仰賴數學模型，其模型複雜度大大地影響故障偵測準確度，又馬達實際上非線性飽和特性難以估測，使此法可靠度大幅下降。在數位訊號處理分析方面，此種方法針對馬達的故障特徵變化，利用數位訊號處理方式，此方法有很好的適應性，亦是目前研究較多的偵測方式，也是當前有較多研究的方式。而大數據進行機器學習、類神經網路等方式，近年來廣泛發展，然而龐大的運算需求使得硬體輔助需求亦跟著提升，這也增加偵測系統的成本。

另在眾多故障檢測法中，最常見的是利用電機電流故障特徵分析法(Machine Current Signature Analysis, MCSA)[5-10]來做為故障特徵。而文獻[12]提出一方法，利用電機發生故障時，會造成三相電流不平衡的特性，直接對三相電流的幅值進行分析，惟時域上的分析，常因電子元件的誤差以及環境因素而影響偵測精確度，在另文獻[11,12]中，電機故障時，控制器所輸出的電壓命令會由於三相不平衡而產生諧波，再進一步將諧波成分透過數位訊號處理器進行分析，以此方式實現馬達故障檢測，而在文獻[13,14]中，進一步提出在頻域的觀點下，利用快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)及小波轉換(Wavelet Analysis)的方式分析諧波成分來偵測故障，而另一文獻[15]中，更將快速傅立葉轉換分析與類神經網路技術結合，不僅有良好的精確度，亦擁有極高的適應性，惟快速傅立葉與人工知識庫的分析需仰賴大量計算資源，這使得此種方法需要較精密的控制器輔助，而限制其可之應用場合。

本文針對永磁同步馬達的電氣故障，於永磁馬達驅動系統中建構感測迴路，透過驅動電壓與電流訊號之即時回饋與分析，提出一馬達繞組匝間短路故障偵測之方法，所提方法是以馬達磁場導向控制訊號為基礎，計算其驅動電壓頻譜，並找出匝間短路事故發生時會伴隨故障產生的二次諧波電壓特徵作為故障程度檢測之指標。本文透過 Matlab/Simulink real-time 模擬驗證系統可行性，從模擬結果可看出所提方法具相當準確性。

2. 馬達匝間短路故障分析

圖 1 為馬達 A 相定子故障之等效電路模型，根據該電路三相馬達之電壓、阻抗與電流關係可表示為：

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 (V_{as}, V_{bs}, V_{cs}) 為三相馬達之相電壓、 R 為定子繞組之等效電阻、 (I_{as}, I_{bs}, I_{cs}) 為三相定子電流、 L_{aa} 為 A 相定子繞組自感、 L_{ab} 為 AB 相互感以此類推、 (E_a, E_b, E_c) 為馬達反電動勢。當馬達 A 相定子短路故障時，若 V_{as2} 為故障項所產生之相電壓、 R_{a2} 為 A 相繞組故障部分電阻、 I_f 為故障電流，此時(1)式可修正為：

$$\begin{bmatrix} V_{as_1} \\ V_{as_2} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{a_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{a_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{as}-i_f \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as_1} \\ e_{as_2} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{a_1} & M_{a_1 a_2} & M_{a_1 b} & M_{a_1 c} \\ M_{a_2 a_1} & L_{a_2} & M_{a_2 b} & M_{a_2 c} \\ M_{a_1 b} & M_{a_2 b} & L_s & M_s \\ M_{a_1 c} & M_{a_2 c} & M_s & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{as}-i_f \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

為進一步簡化(2)式，本文定義故障比率因素 u 為某相定子線圈短路故障匝數 N_s 與某相定子線圈總匝數 N_T 之比值。如此一來便可以將定子短路故障程度量化。據此圖 1，(2)式可進一步整理成：

$$V_{s,abcf} = R_{sf} i_{s,abcf} + L_{sf} \frac{d}{dt} i_{s,abcf} + \frac{d}{dt} \lambda_{PM,abcf} + v_0 \quad (3)$$

其中

$$V_{s,abcf} = [v_a \quad v_b \quad v_c \quad 0]^T \quad (4)$$

$$I_{s,abcf} = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad i_f]^T \quad (5)$$

$$R_{sf} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & -\mu R_s \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ \mu R_s & 0 & 0 & -\mu R_s - R_f \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L_{sf} = \begin{bmatrix} L & M & M & -\mu L \\ M & L & M & -\mu M \\ M & M & L & -\mu M \\ \mu L & \mu M & \mu M & -\mu^2 L \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V_0 = v_0 [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0]^T \quad (8)$$

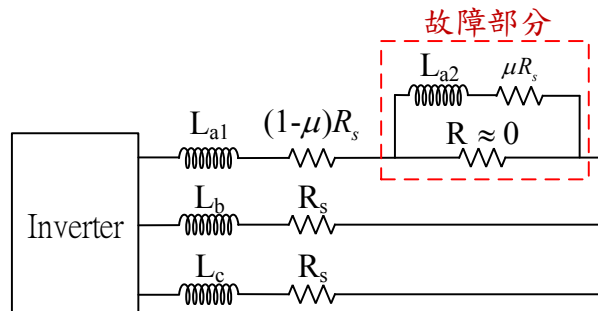


圖 1 加入故障比之馬達定子故障模型

$$\lambda_{PM,abc} = \begin{bmatrix} \lambda_{PM,1} \cos \theta + \sum_{v=2k+1} \lambda_{PM,n} \cos(n\theta - \theta_n) \\ \lambda_{PM,1} \cos(\theta - \frac{2n\pi}{3}) + \sum_{v=2k+1} \lambda_{PM,n} \cos(n\theta - \theta_n - \frac{2n\pi}{3}) \\ \lambda_{PM,1} \cos(\theta + \frac{2n\pi}{3}) + \sum_{v=2k+1} \lambda_{PM,n} \cos(n\theta - \theta_n + \frac{2n\pi}{3}) \\ \mu \left\{ \lambda_{PM,1} \cos \theta + \sum_{v=2k+1} \lambda_{PM,n} \cos(n\theta - \theta_n) \right\} \end{bmatrix} \quad (9)$$

從(9)式可看出馬達故障時磁通鏈具高頻諧波成分，但因高頻諧波成分幅值遠低於基本波，故其可忽略不計，此時(9)式矩陣第四列可簡化如下所示。

$$0 = \mu R_s i_a - (\mu R_s + R_f) i_f + \mu L \frac{di_a}{dt} + \mu M \left(\frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) - \mu^2 L \frac{di_f}{dt} + \frac{d}{dt} (\mu \lambda_{PM} \cos \theta) \quad (10)$$

$$(\mu R_s + R_f) i_f = \mu [R_s i_a + (L - M) \frac{di_a}{dt} - \omega_e \lambda_{PM} \sin \theta] \quad (11)$$

由於繞組電阻以及電感與互感抵銷之後，影響相當輕微，因此將該項削去之後，可求得故障電流為

$$i_f = \frac{u}{\mu R_s + R_f} \omega_e \lambda_{PM} \sin \theta \quad (12)$$

由(12)式可看出故障電流為一個正弦電流，其幅值與故障比率 u 、轉速及馬達磁鏈成正比。將(12)式代入(2)式並進行 d - q 軸座標轉換可得：

$$\begin{aligned} V_{dq} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 \\ 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e \\ \omega_e & 0 \end{bmatrix} (L - M) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda_{PM} \end{bmatrix} + \left\{ -T_\theta \begin{bmatrix} \mu R_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_f - T_\theta \begin{bmatrix} \mu L \\ \mu M \\ \mu M \end{bmatrix} \frac{di_f}{dt} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

(13)式顯示 SPMSM 的 dq 電壓在定子匝間短路故障時可以依與故障電流 i_f 之關聯性區分成正常電壓 v_{dqh} 與故障電壓 v_{dqf} ，即

$$V_{dqh} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 \\ 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e \\ \omega_e & 0 \end{bmatrix} (L - M) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda_{PM} \end{bmatrix} \quad (14)$$

(14)式顯示 SPMSM 的 dq 電壓在定子匝間短路故障時可以依與故障電流 i_f 之關聯性區分成正常電壓 v_{dqh} 與故障電壓 v_{dqf} ，即

$$V_{dqh} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 \\ 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e \\ \omega_e & 0 \end{bmatrix} (L - M) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda_{PM} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$V_{dqf} = -T_\theta \begin{bmatrix} \mu R_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_f - T_\theta \begin{bmatrix} \mu L \\ \mu M \\ \mu M \end{bmatrix} \frac{di_f}{dt} \quad (16)$$

$$V_{dqf} = V_{dq} - V_{dqh} \quad (17)$$

觀察(15)與(17)式可得知， V_{dqh} 是由控制器中的轉速、電流訊號計算得知，又在馬達 FOC 控制器中根據 dq 軸電流命令以及回授之 dq 軸電流訊號運算出相對應之 dq 軸電壓命令會提供向量空間脈波寬度調變運算，該閉環控制可使得定子電壓趨近於 dq 軸電壓命令，換言之 V_{dq} 訊號亦可由控制器內之 dq 軸電壓命令取代，因此定子匝間短路故障時之故障電壓分量可在 FOC 控制器內

被計算出。另由(16)式亦可看出故障電壓分量能續表示成：

$$V_{dqf} = \frac{2}{3} \mu R_S I_f \begin{bmatrix} -\cos \theta \cdot \cos(\theta + \theta_{if}) \\ \sin \theta \cdot \cos(\theta + \theta_{if}) \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \mu \omega_e (L - M) I_f \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \cos(\theta + \theta_{if}) \\ -\sin \theta \cdot \cos(\theta + \theta_{if}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$V_{dqf} = \frac{2}{3} \mu I_f \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} R_S \cos(2\theta + \theta_{if}) + \frac{(L - M)}{2} \omega_e \sin(2\theta + \theta_{if}) \\ \frac{1}{2} R_S \sin(2\theta + \theta_{if}) + \frac{(L - M)}{2} \omega_e \cos(2\theta + \theta_{if}) \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \mu I_f \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} R_S \cos \theta_{if} + \frac{(L - M)}{2} \omega_e \sin \theta_{if} \\ \frac{1}{2} R_S \sin \theta_{if} + \frac{(L - M)}{2} \omega_e \cos \theta_{if} \end{bmatrix} \quad (19)$$

上式中 θ_{if} 是故障電流和電角度之間的相位差。又在(19)式中之故障電壓前項屬二次諧波電壓分量，後項則為其直流電壓分量。如以圖 1 之 a 相匝間短路故障為例， θ_{if} 為 90 度電氣角，此時故障電壓之二次諧波與直流電壓分別為：

$$V_{dqf-dc} = \frac{1}{3} \mu I_f \begin{bmatrix} (L - M) \omega_e \\ -R_S \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \mu S \omega_e \lambda_{PM} \begin{bmatrix} (L - M) \omega_e \\ -R_S \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$V_{dqf-2\theta} = \frac{1}{3} \mu I_f \begin{bmatrix} R_S \sin 2\theta + (L - M) \omega_e \cos 2\theta \\ R_S \cos 2\theta - (L - M) \omega_e \sin 2\theta \end{bmatrix} \quad (21)$$

從上式可清楚地看出，故障電壓中因直流分量和二次諧波分量引起的偏移和幅度與故障嚴重程度有關，因此本文即提出以二次諧波的幅度作為匝間短路故障的偵測指標。

3. 馬達匝間短路故障檢測流程與電腦模擬驗證

圖 2 所示為馬達短路故障檢測之程式架構流程，從圖中可以看出馬達運作後會先監測三相電流之讀值，進行 d-q 軸座標的轉換及分析，經由數位濾波器分別濾出二次諧波成分以及直流成分，並將運算出定子匝間短路故障嚴重度及二次諧波之成分，將其傳送至程式主控端，對其嚴重度進行判決，若故障程度超過設定門檻值，將會啟動保護，使馬達停止運轉將損壞降至最低，而啟動馬達時，啟動瞬間會產生較大電流，為防止程式誤判斷，在判斷到故障時，會進行重複判斷來維持本系統的準確性，本技術提出的程控架構透過其敏感度及不停更新擷取數據，能及時在驅動器故障發生時，因應不同程度的狀況作出應對。

本文已透過 Matlab/Simulink 電腦模擬二次諧波檢測方法進行驗證，表 1 為本文模擬馬達設計參數，測試情境將馬達維持 1500RPM，透過將馬達 A 相正常狀態及故障狀態諧波訊號比較，進行故障嚴重程度的測試，並觀察馬達 d-q 軸所產生的電壓二次諧波故障特徵訊號加以分析，以驗證本研究之可行性及正確。

在 1500 轉定速測試結果中，馬達健康狀態下，圖 3(a)為馬達 ABC 三相之電流，可以看出三相電流幅值接相同，進一步將其進行磁場導向控制產生 d-q 軸電流命令後，經座標轉換與向量合成為電壓命令，再進行頻譜分析，並將訊號經過放大，得到圖 3(b)及圖 3(c)二次諧波 d-q 軸濾出之電壓直流成分，從圖 3(b)與圖 3(c)中可以看出，即時馬達呈健康狀態，在高次諧波中仍然有微小的直流分量。圖 4 至圖 8 分別為電機在不同故障率狀態下之 d-q 軸電壓分量，由表 1 可得知，本次模擬的馬達為 8 極，因此在 1500 轉時，電氣頻率基頻為 100Hz，在模擬 d-q 軸分量結果中可看出產生於 200Hz 的二次諧波成分偵測方式。在 1500 轉定速測試結果中，圖 9 為統計不同故障率下二次諧波引起之偏移及幅度曲線圖，由此統計圖可以驗證上一節所敘述，故障電壓中二次諧波分量引起的偏移和幅度與故障嚴重程度有關，因此透過模擬驗證，本文提出以電壓二次諧波的幅度作為匝間短路故障的偵測指標。

表 1 馬達設計參數表

規格	參數	單位
額定轉矩 T_{rated}	11.78	Nm
額定電壓 V_{rated}	220	V _{DC}
額定電流 I_{rated}	18	A _{RMS}
額定轉速 $N_{e,rated}$	3000	RPM
額定功率 P_{rated}	3.7	kW
轉矩常數 K_T	0.72	Nm/A _{RMS}
電器常數 K_e	0.7	Vs/rad
轉動慣量 J_m	6.33m	Kgm ²
黏滯係數 B_m	2m	Nms/rad

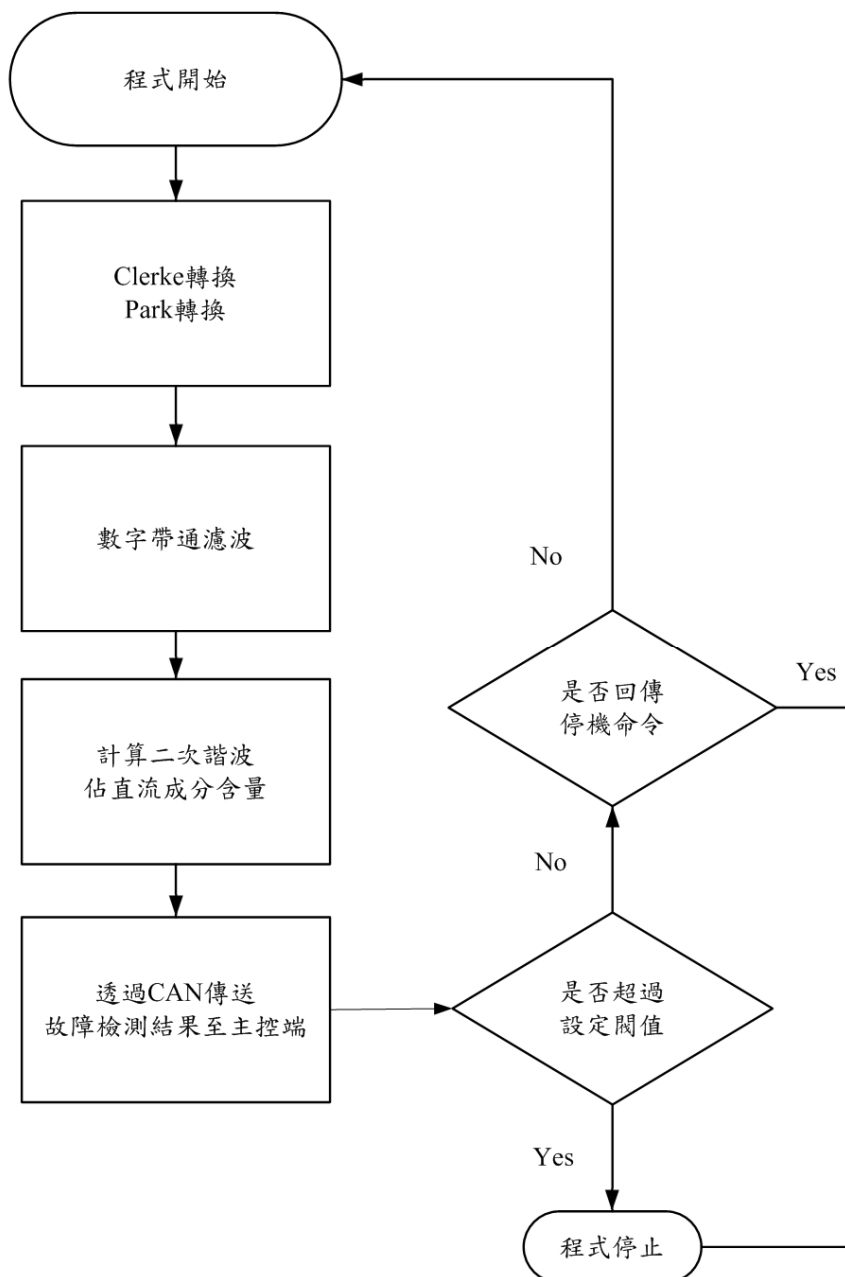
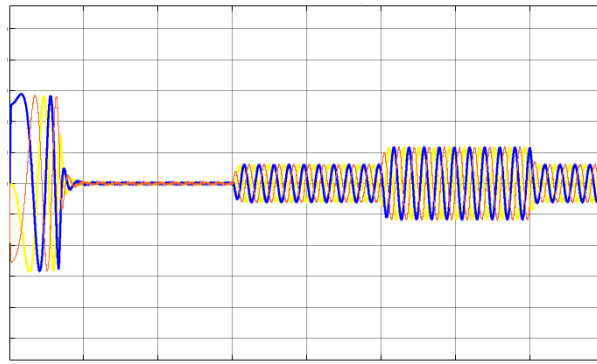
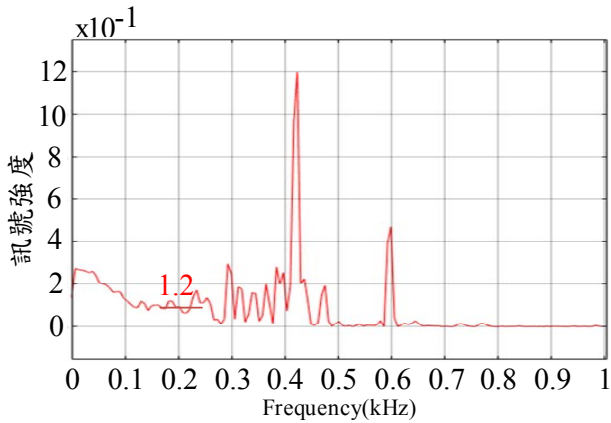


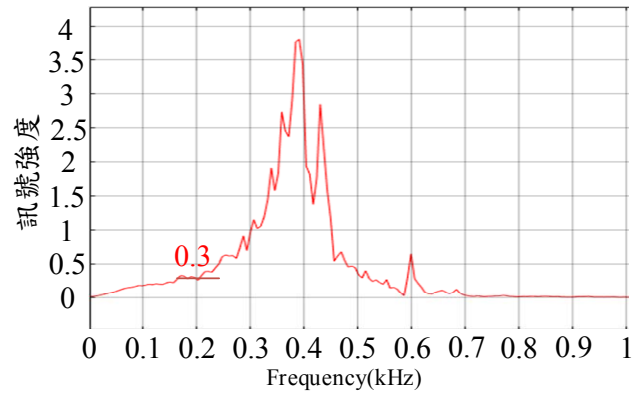
圖 2 定子繞組故障檢測程式流程圖



(a) 1500RPM 三相電流

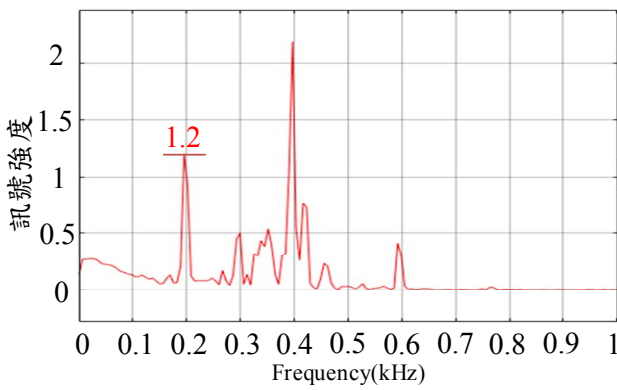


(b) d 軸分量

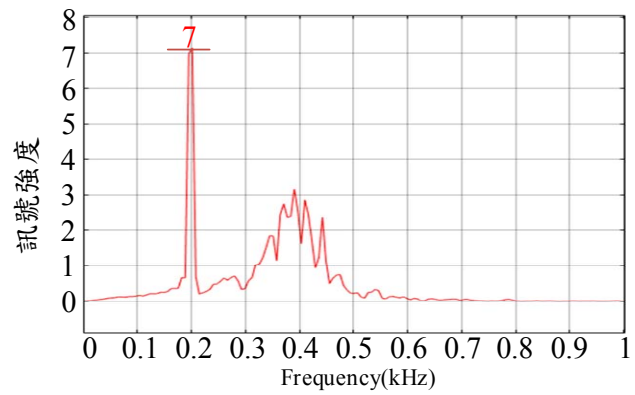


(c) q 軸分量

圖 3 永磁同步馬達健康狀態

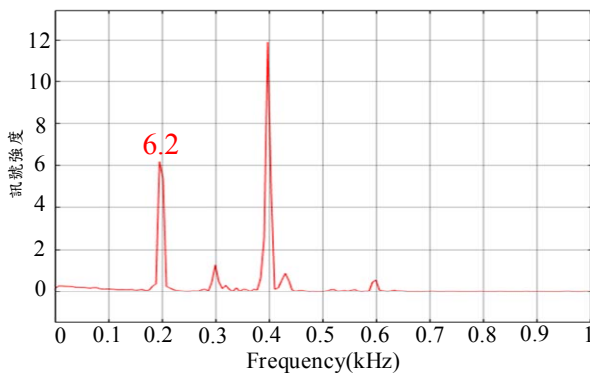


(a) d 軸分量

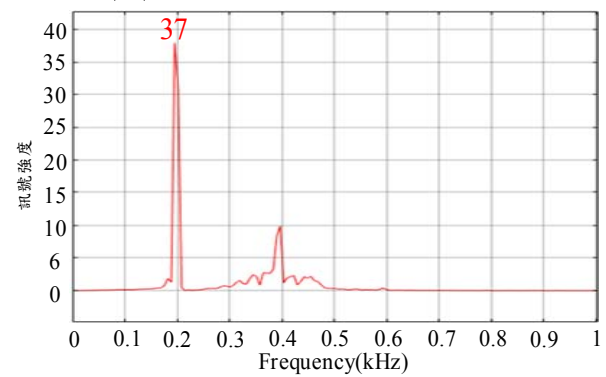


(b) q 軸分量

圖 4 馬達匝間短路故障率 5%



(a) d 軸分量



(b) q 軸分量

圖 5 馬達匝間短路故障率 16%

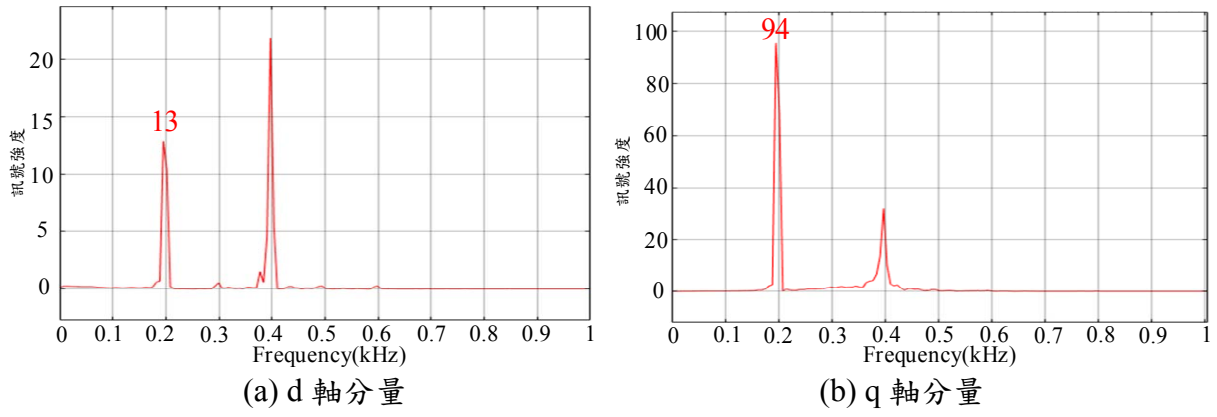


圖 6 馬達匝間短路故障率 25%

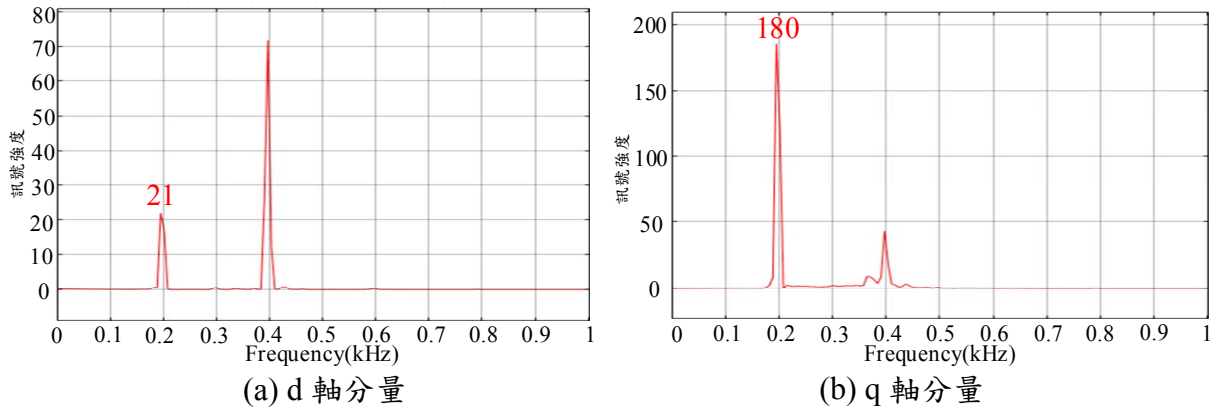


圖 7 馬達匝間短路故障率 32%

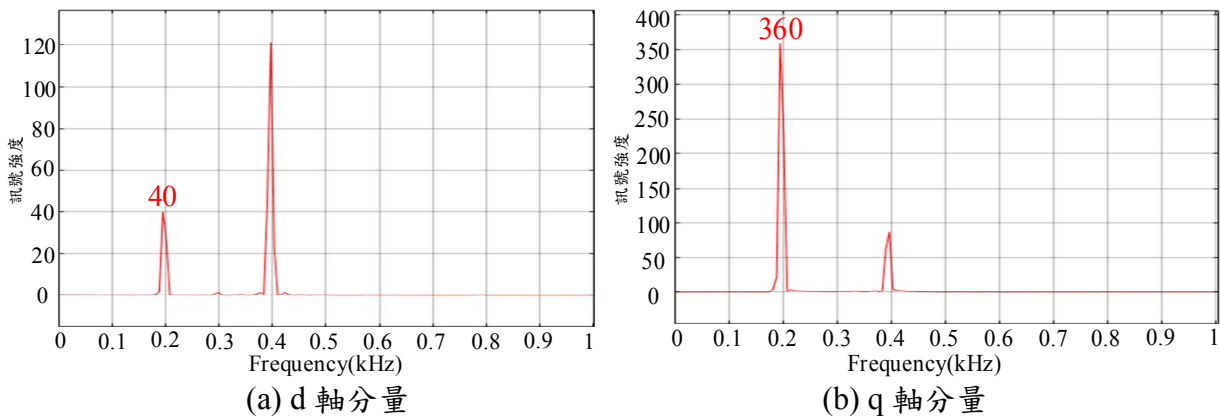


圖 8 馬達匝間短路故障率 41%

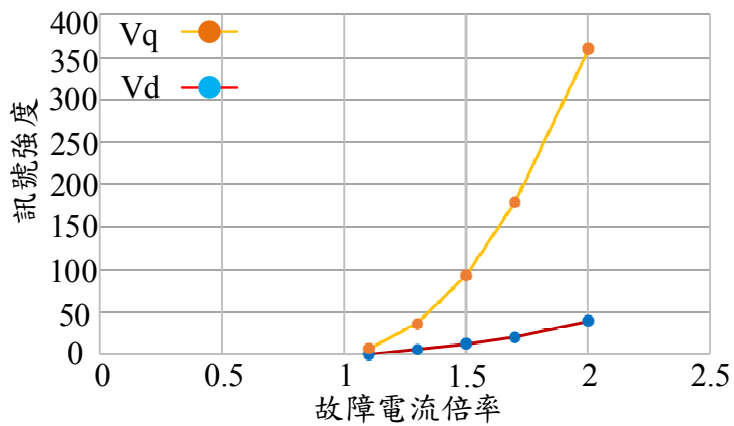


圖 9 馬達匝間短路故障引起之二次諧波變化幅度統計圖

4. 結論

本文提出一用於永磁式同步馬達繞組匝間短路故障偵測之方法，所提方法是以馬達磁場導向控制訊號為基礎，分析其驅動電壓頻譜，並找出匝間短路事故發生時會伴隨故障產生的二次諧波電壓特徵作為故障程度檢測之指標。所提方法透過數學模型及模擬，在 d-q 軸上皆能產生明顯且具有線性的故障特徵，而由於此偵測架構建立於 FOC 控制之下，能很好的在微控制器晶片上實現，故本研究未來將續朝控制與監控整合研究，並根據不同種類故障制訂檢測閾值，再與市面上已存在之其他檢測方式比較，進而進一步掌握所提方法之優勢。

5. 誌謝

本文特別感謝科技部研究計畫經費補助（計畫合約編號 110-2221-E-024 -007 -），相關經費挹注對本文之研究發展助益頗大，特此致謝。

6. 參考文獻

- [1] P. Chen, Y. Xie, and S. M. Hu, "Electromagnetic Performance and Diagnosis of Induction Motors with Stator Interturn Fault," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 57, no. 2, December 2020, pp. 1354-1364.
- [2] J. G. Cintron-Rivera, *Fault Mitigation in Permanent Magnet Synchronous Motors under an Internal Turn-to-turn Failure*. Michigan State University, 2014.
- [3] A. H. Bonnett and C. Yung, "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 14, no. 1, 2008, pp. 29-36.
- [4] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, "Recent Advances in Modeling and Online Detection of Stator Interturn Faults in Electrical Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, 2011, pp. 1564-1575.
- [5] P. D. Solanki and K. S. Sharma, "Determination of Faults in 3- ϕ Induction Motor by Motor Current Signature Analysis," *3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, 2019, pp. 461-465.
- [6] J. Royo, R. Segui, A. Pardina, S. Nevot, and F. J. Arcega, "Machine Current Signature Analysis as a Way for Fault Detection in Permanent Magnet Motors in Elevators," *18th International Conference on Electrical Machines*, 2008, pp. 1-6.
- [7] B. Noureddine, Z. S. Eddine, and S. Mohamed, "Experimental Exploitation for the Diagnosis to the Induction Machine under A Bearing Fault - Using MCSA," *4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2015, pp. 1-4.
- [8] P. Neti, M. R. Shah, K. Younsi, J. Krahn, J. Y. Zhou, and C. D. Whitefield, "Motor Current Signature Analysis During Accelerated Life Testing of Form Wound Induction Motors," *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, 2010, pp. 106-109.
- [9] H. Guo and M. Liu, "Induction Motor Faults Diagnosis Using Support Vector Machine to the Motor Current Signature," *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2018, pp. 417-421.
- [10] J. Hang, S. Ding, J. Zhang, M. Cheng, W. Chen, and Q. Wang, "Detection of Interturn Short-Circuit Fault for PMSM with Simple Fault Indicator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 4, 2016, pp. 1697-1699.
- [11] J. F. Martins, V. F. Pires, and A. J. Pires, "On-line Diagnosis of Three-phase Closed Loop Induction Motor Drives Using An Eigenvalue $\alpha\beta$ -vector Approach," *7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2007, pp. 689-693.

- [12] Y. Lee and T. G. Habetler, "An On-Line Stator Turn Fault Detection Method for Interior PM Synchronous Motor Drives," Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2007, pp. 825-831.
- [13] J. Rosero, J. Ortega, J. Urresty, J. Cardenas, and L. Romeral, "Stator Short Circuits Detection in PMSM by Means of Higher Order Spectral Analysis (HOSA)," Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009, pp. 964-969.
- [14] J. Rosero, J. Cusido, A. Garcia, L. Romeral, and J. A. Ortega, "Detection of Stator Short Circuits in PMSM by Mean of Joint Time-Frequency Analysis," IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007, pp. 420-425.
- [15] R. Hu, J. Wang, A. R. Mills, E. Chong, and Z. Sun " High-Frequency Voltage Injection Based Stator Interturn Fault Detection in Permanent Magnet Machine," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 36, no. 1, June 2021, pp. 785-794.

