

Park's Vector Approach를 이용한 BLDC모터진단 방법과 새로운 데이터 셋 특징 추출 연구

A Study on Diagnosis of BLDC motor and New data-set Feature Extraction using Park's Vector Approach

고 영 진*, 김 지 선**, 이 범**, 김 경 민**★

Yeong-Jin Goh*, Ji-Seon Kim**, Buhm Lee** and Kyoung-Min Kim**★

Abstract

In this paper, we propose a new dataset for AI diagnosis and BLDC motor diagnosis in UAV. In the diagnosis of BLDC motor, PVA(Park's Vector Approach) is difficult to apply due to many ripples of frequency components. However, since the components of ripples are the third harmonics, we propose a method to utilize PVA as circle fitting by applying Savitzky-Golay filter which is excellent for the third harmonics. On the other hand, PVA, a technique to convert from three-phase to two-phase, is always based on the origin during the transformation process. This study demonstrates that the error of the origin and the measured center can be detected and diagnosed in the application process of Circle fitting, and that it can be used as a new data set of AI technology.

요 약

본 논문에서는 UAV의 BLDC 모터 진단방법과 AI진단을 위한 새로운 데이터 셋을 제안하였다. BLDC모터 진단에 있어서 PVA(Park's Vector Approach)는 주파수 성분의 많은 리플로 인해 적용이 어려움이 따르나, 리플의 성분이 3조파를 띄고 있음에 따라 3조파에 뛰어난 SG(Savitzky-Golay)필터를 적용하여 Circle fitting으로 PVA를 활용하는 방법을 제안하였다. 한편, 3상에서 2상으로 변환시키는 기법인 PVA는 변환과정 중 항상 원점을 기준으로 두게 된다. 이에 Circle fitting의 적용과정에서 원점과 측정된 중심점의 오차를 측정하여 고장진단이 가능하도록 하였다. 또한, 이때 측정된 오차의 offset 데이터 기반으로 AI기술의 새로운 데이터 셋으로 활용 가능성을 실험을 통해 입증하였다.

Key words : UAV, Drone, BLDC motor, PVA, Circle fitting

* Dept. of Electrical Engineering, Tongmyong University

** Dept. of Electrical and Semiconductor Engineering,
Chonnam National University

★ Corresponding author

E-mail: kkm@jnu.ac.kr, Tel: +82-61-659-7316

※ Acknowledgment: This results was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(MOE)(Grant number: 2021RIS-002) Manuscript received Mar. 2, 2022; revised Mar. 21, 2022; accepted Mar. 22, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

3상 회전기기의 다양한 진단기법 중 PVA(Park's Vector Approach)는 MCSA(Motor Current Signature Analysis) 방법으로 3상 전류신호를 D-Q변환을 통해 2상으로 전환하여 원의 패턴으로 나타냄으로써 별도의 센서를 부착하지 않아도 된다는 점과 원의 왜곡정도를 시각적으로 확인하여 고장유무를 판단할 수 있다는 이점들이 있음에 많은 연구들이 진행되었다[1-2].

최근에는 AI를 활용한 진단이 활발히 이뤄짐에 따라 PVA 원의 패턴을 이미지화하여 데이터 셋으로 활용하는 비지도 학습방법으로 연구되고 있다[3].

한편 회전기기는 과거부터 유도기 중심으로 발전되어

산업에 적용됨에 따라 PVA에 관련된 연구가 유도기에 집중되었다.

최근에는 회전기기가 퍼스널 기기에 적용되고, BLDC (Brushless Direct Current)모터 등 영구자석형 타입의 고성능 회전기기가 산업이 발달함에 따라 안전사고예방의 차원에서 고장진단방법이 요구되고 있다.

퍼스널기기 중, UAV(Unmanned Aerial Vehicles)는 산업 전반에 응용 및 활용도가 점점 높아지고 있으며, 미래에는 UAV기술을 토대로 MAV(Manned Aerial Vehicles)로 변모하여 산업 전반에 걸쳐 기대감을 가져오고 있다.

그럼에 따라 UAV의 진단기술은 향후 MAV에 적용 및 응용됨에 따라 고정밀 안전진단기술에 대한 연구가 필요하다.

한국소비자원의 조사결과(중복응답)에 따르면 UAV의 고장 또는 사고에 있어서 프로펠러 손상으로 인한 사고가 67.0%로 가장 높았고, 모터의 고장으로 인한 사고비율은 49.8%, 배터리 및 충전사고가 46.2% 순으로 나타났다[4].

프로펠러의 손상원인은 장애물 충돌 등의 사용자의 부주의한 운전으로 사고가 발생하는 반면, 모터의 고장은 전반적인 시스템 결함, 과부하 등 사용자의 의도와 달리 갑작스럽게 발생할 수 있다. 만약 모터의 고장이 심각할 경우, 추락하는 등 인명피해도 가져올 수 있음에 정밀한 고장진단 방법이 요구된다.

기존 산업기반 모터의 경우 진단 연구에 있어서 AI기반 많은 연구전환되고 있는 반면, [5]의 UAV진단기술 조사논문에 따르면 전체 115개의 연구에서 단 7개만 AI기반 진단방법이 적용됨을 알 수 있다.

이처럼 UAV의 진단에 있어서 AI기반 진단방법이 부족한 이유는 기존 산업 회전기기 대비 다양한 모델베이스 진단방법이 부족한 상태이며, 이 것은 AI 진단구성을 위한 다양한 데이터 셋 확보가 필요함을 나타내고 있다.

한편, BLDC모터는 직류모터의 구성임에도 불구하고 모터특성상 3상 준구형파의 형태를 가지고 있다. 이러한 이유로 3상 회전기기의 진단기법인 PVA의 적용이 가능하다.

그러나, BLDC모터에 PVA 진단기법을 적용하는 데는 어려움이 따른다. 그 이유는 ESC(Electronic Speed Controller)의 MOSFET을 통한 역기전력 특성으로 3상 준구형파의 형태가 3조파의 특성을 가지며 따라 원의 패턴이 불규칙성을 가지고 고장특징 임계값 설정이 어렵기 때문이다[6].

이에 본 연구에서는 BLDC모터에서 발생하는 노이즈

에 적합한 필터를 적용하여 불규칙적 PVA패턴 하에 정상상태와 고장상태를 관찰하여 진단 방법 및 AI에 활용될 데이터 셋을 제안한다.

II. 본문

1. PVA

PVA는 AC모터 중, 3상의 교류 파형이 균등한 120도 등간격이 발생해야하는 전제하에 Clarke변환을 거쳐 Park's 변환이 구성된다[7].

식 (1)에서 I_a 는 a상의 전류, I_b 는 b상의 전류, I_c 는 c상의 전류를 나타내며, I_d 는 d-q 변환에 의한 d축의 전류, I_q 는 q축의 전류를 의미하며 이 과정을 Clark변환 또는 정지좌표계라고 부른다.

$$\begin{bmatrix} I_d^s \\ I_q^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

만약 3상이 평형일 경우, $I_d^s = I_d$ 로 볼 수 있으며, 이때 회전자의 위치, 즉 기준 자속의 θ 를 알아내고 여기에 자속 성분을 일치시키기 위해서는 θ 만큼 원점을 중심으로 회전시켜야 하며 다음 식 (2)로 가능하다.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^s \\ I_q^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)에 의해 구해진 I_d 와 I_q 를 d-q동기좌표계라 불리며, 이 변환과정이 Park's변환을 의미한다.

이 과정에서 회전자와 고정자는 회전자계와 같은 속도로 회전함에 따라 원의 패턴을 가지게 되며 이를 이용한 진단 방법을 PVA라 일컫는다.

다음 그림 1은 3상을 2상으로 변환하는 과정을 나타내고 있다.

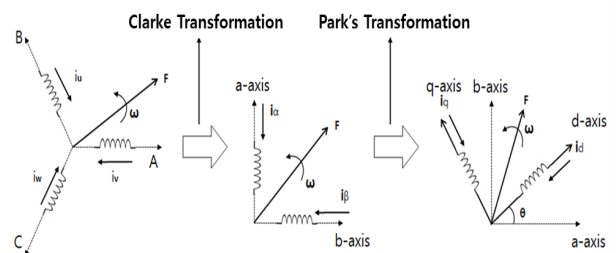


Fig. 1. Transformation of PVA.

그림 1. PVA 변환과정

만일, 모터에 고장이 발생하였을 시, I_d 와 I_q 가 불평형성을 가지게 되고, 원의 패턴은 타원으로 변함에 따라 왜곡을 시각적으로 확인할 수 있다.

다음 그림 2는 정상상태의 PVA 원 패턴과 고장이 발생했을 때의 원 패턴을 나타내고 있다.

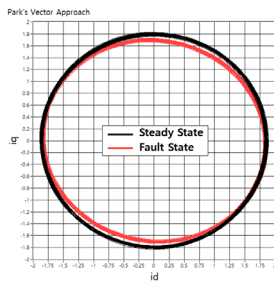


Fig. 2. PVA pattern of steady state and fault state of AC motor.

그림 2. AC모터의 정상상태와 고장상태의 PVA 패턴

2. UAV BLDC모터의 주파수 특성

UAV의 BLDC모터 구동회로는 다음 그림 3과 같이 각 권선마다 MOSFET이 2개씩 6개로 구성되어 있다.

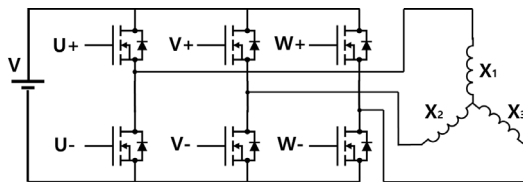


Fig. 3. Driver circuit of BLDC Motor.

그림 3. BLDC 모터의 구동회로

U상에 양의 전류가 흐를 경우, V상은 float이 되고 W상은 음의 전류가 흐르게 된다. 이러한 이유로 BLDC모터의 상전류는 교류형태의 준구형파(Quasi-square waveform)를 갖게 된다[8].

다음 그림 4는 3개의 준구형파 상전류 중, 하나의 상전류를 나타낸다.

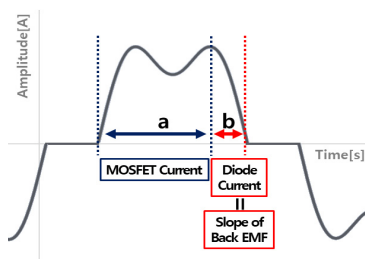


Fig. 4. Current waveform of one phase in BLDC motor.

그림 4. BLDC모터 한 상의 전류파형

그림 4의 a영역은 ESC의 MOSFET에서 공급되는 기전력에 의한 전류를 나타내며, b영역은 ESC의 Diode를 통해 빠져나가는 전류로서 역기전력에 의한 전류를 의미한다.

이때 ESC의 MOSFET과 Diode를 통한 순차적 반복으로 역기전력이 발생되기 때문에 리플이 발생하게 된다.

다음 그림 5는 3개의 준구형파 상전류를 나타낸다. 이 상전류들은 모터의 회전에 맞춰 120도 등간격을 가지게 된다.

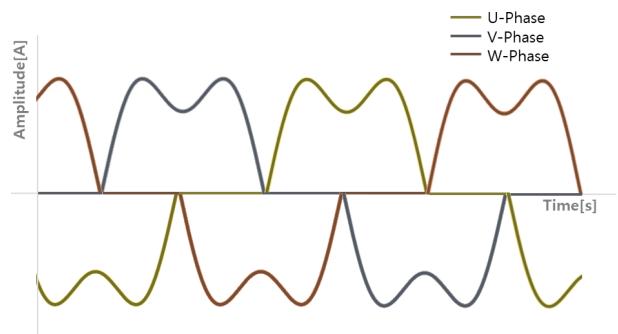


Fig. 5. 3-Phase current waveform of BLDC Motor.

그림 5. BLDC 모터의 3상 상전류 파형

비록 리플성분이 존재하더라도 3개의 상전류가 120도의 등간격을 가진다는 점에 의해 교류모터에 적용된 PVA 기법이 적용될 수 있음을 알 수 있다.

3. SG(Savitzky-Golay)필터

신호원의 노이즈 제거에 유용한 평활화 필터 중 SG필터는 노이즈 성분이 고주파 성분이라는 가정하에 강인한 방법으로 알려져 있다. 그림 4를 통해 알 수 있듯이 역기전력에 의한 전류리플은 3조파의 형태를 띠고 있음에 따라 BLDC모터에 SG필터가 효율적임을 알 수 있다.

즉, 이상적인 신호를 $x(t)$ 라고 하고, 임의의 노이즈 신호 $n(t)$ 가 추가된 것을 $x_n(t)$ 라고 할 때, 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_n(t) = x(t) + n(t) \tag{3}$$

이를 노이즈가 섞힌 신호들과 SG필터 사이의 컨볼루션 연산 결과의 평균값 계산이 필요하며, 이것은 다음 식(4)로 구할 수 있다.

$$x_d(t_j) = \frac{1}{2M+1} \sum_{i=-M}^M (C_i * x_n(t_{j+i})) \tag{4}$$

이때 $2M+1$ 은 필터 윈도우의 크기, C_i 는 필터계수이다.

4. Circle Fitting

SG 필터에 의해 개선된 신호원이라고 하더라도 3조파 외에 다양한 고조파가 발생됨을 다양한 연구결과를 통해 알 수 있다[9]. 즉, 다양한 고조파들은 PV 원의 패턴을 불규칙하게 표현하게 된다. 이에 일정시간내 불규칙 패턴 별 오차를 비교할 수 있는 방법으로 최소제곱법 Circle Fitting기법을 적용하였다.

통상적으로 fitting기법은 곡선이나 원의 편차가 발생하였을 때 편차의 제곱의 합을 최소로 하는 최적 곡선 또는 원을 구하는 데 활용되며, 식 (5)를 통해 최적의 원을 구할 수 있다.

$$Min = \sum_{i=1}^T ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2)^2 \quad (5)$$

식에서 알 수 있듯이 중점 (x_0, y_0) 이 $(0, 0)$ 이라고 할 시, $x_i^2 + y_i^2 = r^2$ 의 원의 방정식을 얻을 수 있다. 다음 차수 원에서 만약 중점이 $(0, 0)$ 이 아닌 다른 값으로 나왔을 경우, 중심축의 오차를 쉽게 알 수 있다.

즉, 회전별 중심축의 오차를 구하기 위해 다음 식 (6)과 같이 정의가 가능하다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{i=1}^T ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2)^2} \quad (6)$$

PVA는 자속 성분을 일치시키기 위해서는 θ 만큼 원점을 중심으로 회전시키기 때문에 원점 기반 차이를 식 (6)을 통해 오차값과 차이로 새로운 특징 데이터 셋을 얻도록 하였다.

III. 실험 및 고찰

1. 실험환경

다음 그림 6은 본 연구에 활용된 실험환경을 나타내고 있다.

실험에 사용된 장비 및 구성은 표 1에서 나타낸 것과 같이 전류 raw-data 측정을 위한 500 ks/s sampling 성능을 가지는 NI USB-6341 DAQ 보드를 활용하였으며, BLDC 모터의 속도변화를 위해 arduino uno를 통해 PWM 제어를 실시하였으며, 사용된 BLDC모터는 ReadyToSky RS2312 920 kv, ESC는 Favourite

LittleBee-Spring 30 A를 이용하였고, 입력 전압은 11.6V로 설정하여 주었다.

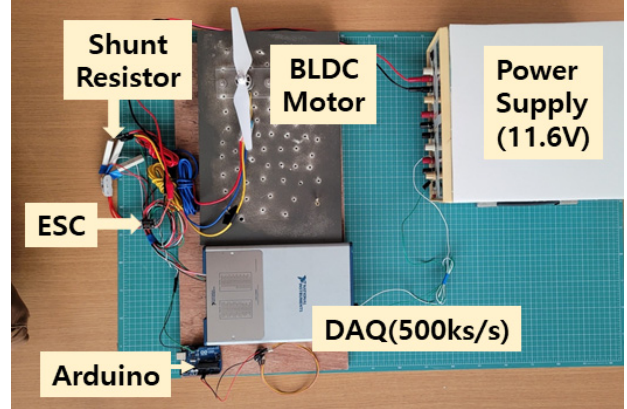


Fig. 6. Experiment environment.
그림 6. 실험환경

Table 1. Elements used in the experiment.

표 1. 실험에 사용된 요소

Description	Value
DAQ	NI USB-6341
BLDC모터	ReadyToSky RS2312 920kv
ESC	Favourite LittleBee-Spring 30A
Controller	Arduino Uno
Input Voltage	11.6V

고장 조건은 BLDC모터의 권선단락을 임의로 그림 7과 같이 만들어 주었으며, AC모터 고정자진단에 두루 활용되는 2턴 단락, 4턴 단락으로 구성하였다.

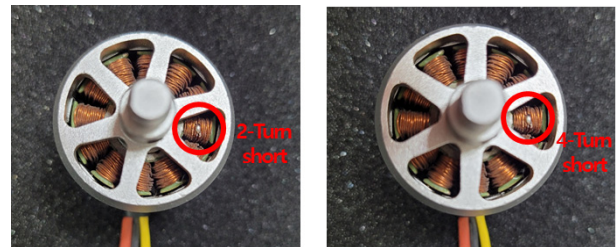


Fig. 7. Fault condition.
그림 7. 고장 조건

2. 고찰

다음 그림 8은 정상상태에서의 BLDC모터를 통해 측정된 3상 준구형파를 나타내며, 그림 9는 앞서 제한한 SG필터를 적용한 결과이다.

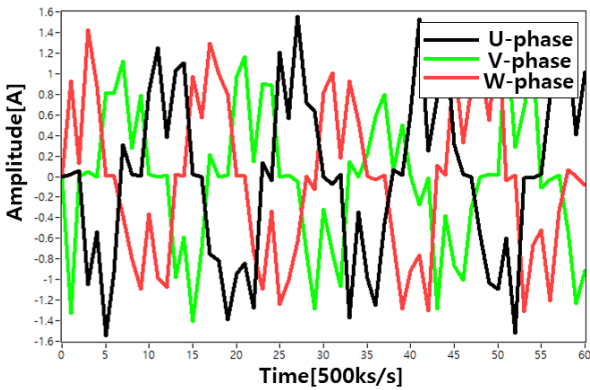


Fig. 8. Measured 3-Phase Quasi-square waveform.
그림 8. 측정된 3상 준구형파

그림 8에서 확인할 수 있듯이 역기전력의 특성으로 인하여 전류리플이 발생함을 알 수 있으며, 그림 9를 통해 SG필터를 통해 리플이 제거됨을 알 수 있다. 그러나 3조 파외에 많은 고조파성분으로 불규칙한 파형을 발생됨을 알 수 있다.

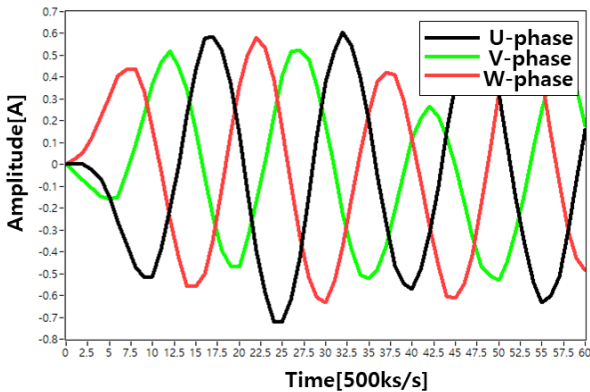


Fig. 9. Result of applying SG filter.
그림 9. SG필터 적용 결과

다음 그림 10은 PV패턴을 적용한 결과이다.

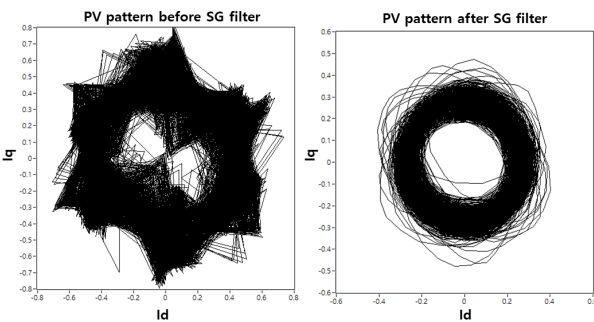


Fig. 10. Result of applying PVA.
그림 10. PVA 적용 결과

그림 10의 좌측은 SG필터 전, 우측은 적용 후를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 필터를 적용할 경우, 원의 패턴에 근접한 형태를 나타냄을 알 수 있다.

다음 그림 11-(a)는 고정자의 2턴과 4턴의 권선단락 고장에 따른 SG필터를 적용한 PV패턴을 나타내며, 그림 11-(b) Circle fitting을 적용한 결과를 나타내고 있다.

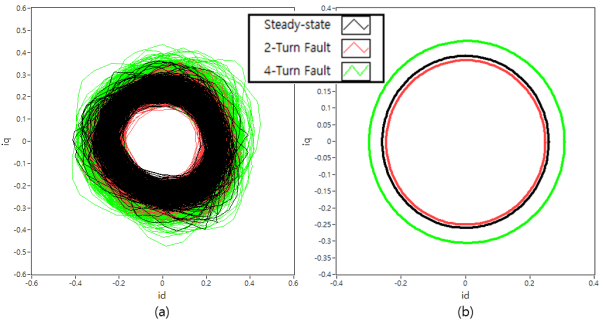


Fig. 11. PV pattern by fault(a) and circle fitting PV pattern(b).

그림 11. 고장별 PV패턴(a)과 Circle fitting된 PV패턴(b).

그림에서 확인할 수 있듯이 SG필터만 적용한 결과는 정상상태와 고장상태를 구분하기에는 어려움이 따른다. 그러나 Circle fitting을 적용할 경우, 원의 크기가 달라짐에 따라 정상상태와 고장상태가 구분될 수 있음을 알 수 있다.

한편, 2턴단락은 미세한 턴단락으로 고장으로 분류되지 않은 상태이며, 고장이 발생하기 전의 결합적 요소로 보며, 많은 연구들에서 이 문제를 해결하고자 연구를 진행하고 있으며, model-base에서 해결점이 어려움에 따라 AI기술을 통한 검출하는 데 연구가 이뤄지고 있다.

그림 11-(b)에서도 확인할 수 있듯이 정상과 2턴단락은 미세한 차이임에 따라 이를 AI 데이터셋으로 활용할 수 있는 특징점이 필요하다.

이에 앞서 언급된 PVA의 중심축 기준이라는 점과 식 (6)을 통한 오차율을 통해 데이터를 비교한 결과는 다음 그림 12와 같다.

그림 12에서 검정라인은 정상상태, 붉은라인은 2턴 단락, 녹색라인은 4턴단락을 의미한다. 여기서 radius의 차이는 그림 11-(b)의 기반으로 도출된 결과 차이를 나타내고 있다. x-offset은 중심점으로부터 x축으로의 이동에 대한 오차, y-offset은 y축으로의 이동에 대한 오차를 의미한다. 또한 radius는 실효값, x-offset과 y-offset의 오차율은 백분위로 나타낸 결과이다.

그림에서 확인할 수 있듯이 일반적인 radius외에 중

심으로부터 각 방향의 이동오차가 크게 발생함을 알 수 있다.

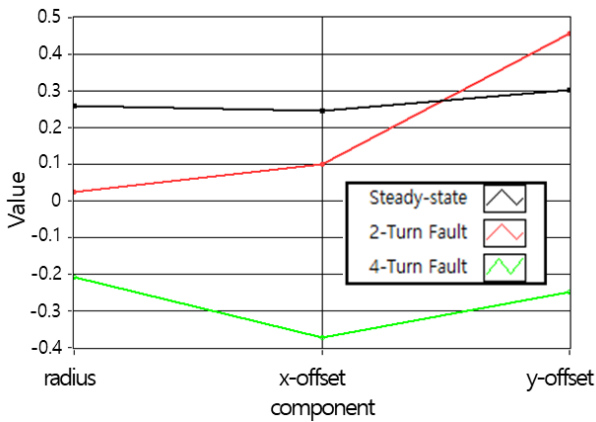


Fig. 12. New characteristic data of circle fitting for AI diagnosis.

그림 12. AI진단을 위한 circle fitting의 새로운 특징 데이터

이 데이터를 이용할 경우, 새로운 AI 데이터 셋으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 논문에서는 UAV의 BLDC모터에 있어서 고장진단 및 새로운 데이터 셋 확보를 제안하였다.

PVA는 AC모터기반 진단도구로 활용되는 기법으로 3상의 환경하여 2상으로 변환하는 기법이기에 BLDC모터는 DC모터계열이지만 ESC의 MOSFET의 스위칭으로 3상의 준구형파가 발생되므로 PVA가 적용가능하다. 그러나, BLDC모터의 ESC의 스위칭 소자로 인해 역기전력이 발생됨에 따라 전류리플을 가지게 된다. 이로인해 PVA를 진단기법으로 활용하는데는 어려움이 따른다.

그러나 본 논문에서는 BLDC모터의 리플이 3조파의 형태를 띄고 있음에 따라 3조파에 강인한 SG필터를 적용하였으며, Circle fitting을 이용하여 진단할 수 있는 방법을 제안하였다.

또한, PVA는 항상 중심축을 기준으로 둔다는 점을 이용하여 fitting된 데이터와 중심축 간의 이동오차를 추출하여 중심축 오차율이 진단방법으로 적용될 수 있음을 밝혔으며, 이는 새로운 데이터 셋으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Y. -J. Goh and O. Kim, "Linear Method for

Diagnosis of Inter-Turn Short Circuits in 3-Phase Induction Motors," *Applied Sciences*, vol.9, no.22, pp.4822, 2019. DOI: 10.3390/app9224822

[2] Y. -J. Goh, G. -N. Kim, Y. H. Kim, B. Lee and K. -M. Kim, "Diagnosis Method for Stator-aaults in Induction Motor using Park's Vector Pattern and Convolution Neural Network," *J.Inst.Korean Electr.Electron. Eng.*, vol.24, no.3, pp.883-889, 2020. DOI: 10.7471/ikeee.2020.24.3.883

[3] K. -M. Kim, Y. -H. Kim, G. -H. Park, B. Lee, S. -R. Lee and Y. -J. Goh, "A Activation Function Selection of CNN for Inductive Motor Static Fault Diagnosis," *J. Korea Inst. of Electr. Comm. Sciences*, vol.16, no.2, pp.287-292, 2021. DOI: 10.13067/JKIECS.2021.16.2.287

[4] *Editorial Department*, "Result of Drone Safety Survey," *Korean Consumer Agency*, pp.1-31, 2017.

[5] G. K. Furlas and G. C. Karras, "A Survey on Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Methods for Unmanned Aerial Vehicles," *Machines*, Vol.9, pp.197, 2021. DOI: 10.3390/machines9090197

[6] D. -S. Lee, "Development of online fault diagnosis system of BLDC motor using park's vector and FFT," Master thesis, Suncheon National Univ, 2020.

[7] Y. -J. Goh and K. -M. Kim, "Inter-turn Short Circuit Diagnosis Using New D-Q Synchronous Min-Max Coordinate System and Linear Discriminant Analysis," *Applied Sciences*, vol.10, no.6, pp.1-18, 2020. DOI: 10.3390/app10061996

[8] S. -B. Han, "Study on the Developed BLDC Motor Built-in A/D Converter and its Characteristics Evaluation," *J. Inst. Electr. Electron. Eng.*, Vol.23, no.4, pp.67-71, 2019. DOI: 10.7471/ikeee.2019.23.4.1182

[9] T. A. S and J. -W. Hur, "An Effective Stator Fault Diagnosis Framework of BLDC Motor Based on Vibration and Current Signals," *IEEE Access*, vol.8, no.99, pp.106968-106981, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3000856

BIOGRAPHY

Yeong-Jin Goh (Member)

2008 : BS degree in Electrical and Semiconductor Engineering, Chonnam National University.
 2010 : MS degree in Electrical and Semiconductor Engineering, Chonnam National University.

2016 : PhD degree in Electrical and Semiconductor Engineering, Chonnam National University.

2020.09~present : Professor, Tongmyong University

Ji-Seon Kim (Member)

2020~present : PhD degree in Electrical and Semiconductor Engineering, Chonnam National University.

Bu-hm Lee (Member)

1981 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 1989 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 1995 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

1995~present : Professor, Chonnam National University

Kyoung-Min Kim (Member)

1988 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 1991 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 1996 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

1997~present : Professor, Chonnam National University