

임베디드 타입의 실시간 BLDC 전동기 고장진단 시스템 구현

(Embedded Type Real-Time Fault Diagnosis for BLDC Motors)

박진일* · 김용민 · 이대종 · 조재훈 · 전명근

(Jin-Il Park · Yong-Min Kim · Dae-Jong Lee · Jae-Hoon Cho · Myung-Geun Chun)

요 약

본 논문에서는 주성분 분석 기법에 의한 BLDC 전동기의 고장진단 알고리즘과 임베디드 타입의 실시간 고장진단 시스템을 구현하였다. 우선 오프라인 상태에서 제안된 고장진단 알고리즘을 검증하기 위해 BLDC 고장진단 실험장치를 구현한 후 LabVIEW 프로그램에 의해 다양한 고장 데이터를 취득하였다. 취득된 데이터는 신호특성에 맞는 전 처리과정을 수행한 후 주성분분석 기법에 의해 고장특성을 나타내는 특징을 추출하고 최종적으로 BLDC 전동기의 진단은 유클리디안 거리 유사도 방법에 의해 수행된다. 이러한 결과를 바탕으로 임베디드 타입의 실시간 BLDC 고장진단 시스템을 구현하였다. 제안된 방법은 다양한 실험을 통하여 성능을 평가하였다.

Abstract

In this paper, we propose a fault diagnosis algorithm for BLDC motors by principle component analysis (PCA) and implement a real-time fault diagnosis system for BLDC motors. To verify the proposed diagnosis algorithm, various faulty data are acquired by LabVIEW program from experimental system. We extract a fault feature using principle component analysis after preprocessing and then finally the fault diagnosis is performed by Euclidean similarity. Also, we embed the PCA algorithm and k-NN classification algorithm into a digital signal processor. From various experiments, we found that the proposed algorithm can be used as a powerful technique to classify the several fault signals acquired from BLDC motors.

Key Words : BLDC Motor, Fault Diagnosis, Embedded, PCA

1. 서 론

BLDC 전동기(brushless direct current motor)는 DC 전동기의 고 토크 특성과 유도 전동기의 고효율 특성의 장점을 가지고 있다[1-2]. 이러한 BLDC 전동기로 구동되는 시스템은 기존의 DC 전동기를 사용한 서보 시스템에서의 문제점인 브러시 및 정류자편의 기계적인 마모에 의한 유지보수 문제와 소음,

* 주저자 : 충북대학교 제어계측공학과 박사과정
Tel : 043-261-2388, Fax : 043-268-2386

E-mail : moralskr@yahoo.co.kr

접수일자 : 2009년 1월 7일

1차심사 : 2009년 1월 8일

심사완료 : 2009년 2월 11일

분진, 스파크 등의 환경적인 제약이 적을 뿐만 아니라 속용성, 제어성 및 신뢰성 측면에서도 우수한 특성을 보인다. 이러한 이유로 최근에는 정밀한 제어 특성을 요구하는 산업용 또는 자동차의 중요 구동부의 서보 운영 분야에서 DC 전동기 대신 BLDC 전동기의 사용이 급격히 증가하고 있다. 그러나 BLDC 전동기가 여러 원인에 의하여 고장이 발생할 경우 전체 시스템의 제어성 및 신뢰성에 치명적인 오류를 발생시킨다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에 BLDC 전동기의 상태를 상시 모니터링할 수 있는 고장진단 시스템 측면으로의 연구가 시도되고 있다 [3].

BLDC 전동기의 고장진단을 위해 Awadallah 등은 뉴로-퍼지 시스템을 이용하여 BLDC 전동기의 절연고장 진단 알고리즘을 제안하였다[4]. 이 논문은 BLDC 전동기로부터 취득한 전류신호를 푸리에 변환을 이용하여 정상 및 고장모델에 대한 특징점을 추출한 후 뉴로-퍼지기법을 이용하여 분류하도록 하였다. 그러나 이 방법은 절연고장과 정상만을 고려함으로써 다양한 고장들에 대한 분석이 이루어지지 않았다. 또한 이 논문에서 고장패턴을 추출하기 위해 사용된 푸리에 변환은 주파수 성분만을 고려함으로써 전동기의 속도 변화에 따른 다양한 특성에 대해서 효과적이지 않은 것으로 보고되고 있다.

Park 등은 BLDC 구동 인버터의 고장 시 제어계통의 복구방법에 대하여 제안하였다[5]. 이 방법은 인버터의 스위칭 고장 시 BLDC 전동기의 원활한 구동을 위한 제어기법을 구현한 점에서 우수한 결과를 나타냈다. 그러나 근본적으로 BLDC 전동기 내부의 고장 측면에서의 연구는 시도되지 않았다. 또한, Rajagopalan 등이 수행한 대표적인 연구내용을 살펴보면, BLDC 전동기의 급속한 가변속도 상태에서 고장진단을 위해 네 가지의 표현기법인 STFT (short-time Fourier transform), WVD(Wigner-Ville distribution), CWD(Choi-William distribution), ZAM(Zhao-Atlas Marks distribution) 등을 고려하여 고장진단을 위한 최적의 방법과 더 나아가 커널 함수를 적용한 특징추출기법을 제안하였다[6-7]. 그러나 커널함수를 적용할 경우 고장진단에서 중요한 성능인자인 처리속도가 증가한다는 문제점이 발생

하고, 제안 방법을 회전자에 고장에만 적용하여 폭넓은 고장진단 유형에 대해서는 고려하지 않았다.

본 논문에서는 주성분 분석 기법에 의한 BLDC 전동기의 고장진단 알고리즘과 임베디드 타입의 실시간 고장진단 시스템을 구현하였다. 우선 오프라인 상태에서 제안된 고장진단 알고리즘을 검증하기 위해 BLDC 고장진단 실험장치를 구현한 후 LabVIEW 프로그램에 의해 다양한 고장 데이터를 취득하였다. 취득된 데이터는 신호특성에 맞는 전처리과정을 수행한 후 주성분분석 기법에 의해 고장 특성을 나타내는 특징을 추출하고 최종적으로 BLDC 전동기의 진단은 유클리디안 거리 유사도 방법에 의해 수행된다. 이러한 결과를 바탕으로 임베디드 타입의 실시간 BLDC 고장진단 시스템을 구현하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 BLDC 전동기의 구조 및 동작특성에 대하여 기술하고, 3장에서는 제안된 방법인 주성분분석 기법에 의한 고장 진단 알고리즘에 대하여 기술한다. 4장에서 실험 및 결과에 대하여 기술하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. BLDC 전동기의 구조 및 동작특성

BLDC 전동기는 3상 권선으로 이루어진 고정자 권선과 영구자석으로 만들어진 회전자로 구성되어 있으며 구조적으로는 일반 동기 전동기와 같으나, DC 전동기에서 브러시와 정류자 등의 기계적인 접촉을 없애고, 이를 대신하는 전자적인 스위칭 장비를 설치하여 구동하는 일종의 직류 전동기이다. 구조는 그림 1과 같이 고정자권선(stator winding), 회전자 자석(rotor magnet), 위치센서(hall effect sensor), 베어링(bearing)으로 구성된다. BLDC 전동기는 권선이 고정자에 설치되어 있어 직류 전동기에 비해 방열 특성이 우수하고, 기계적인 크기에 비해 높은 전력용량을 가지며, 회전자는 축과 영구자석으로 구성되며, 또한 BLDC 전동기는 전자적인 스위칭 기법을 사용하므로, 회전자의 위치를 알아낼 수 있는 홀센서, 엔코더, 리졸버 등의 위치센서가 사용되어야 한다[3].

임베디드 타입의 실시간 BLDC 전동기 고장진단 시스템 구현

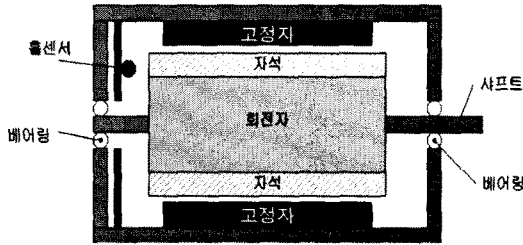


그림 1. BLDC 전동기의 구조
Fig. 1. The structure of BLDC motor

그림 2에서는 BLDC 전동기의 내부 등가회로를 나타냈으며, 이에 대한 모델식을 표현하면 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a \\ L_b \\ L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c}{\omega_m} \quad (2)$$

여기서, v_a, v_b, v_c 는 상 전압, R_a, R_b, R_c 는 상 저항, L_a, L_b, L_c 는 각 상의 inductance, i_a, i_b, i_c 는 상 전류, e_a, e_b, e_c 는 각상에 존재하는 phase back-EMF이고, ω_m 은 회전자의 각속도를 나타낸다[5].

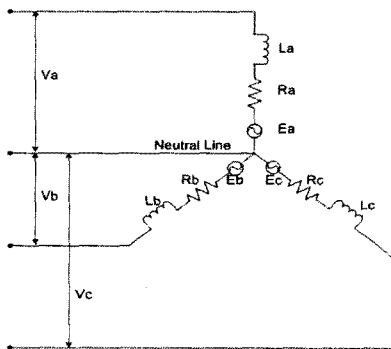


그림 2. BLDC 전동기의 등가회로
Fig. 2. The equivalent circuit of BLDC motor

BLDC 전동기의 특징으로는 신뢰성이 높고 수명이 길다는 것과 일반 DC 전동기의 최대 단점인 브러시와 정류자가 없다는 점이다. 또한 순간 허용 최대 토크와 정격 토크의 비가 커서 제어성이 우수하며

고정자 권선에서만 열이 발생하여 방열이 용이하다는 장점을 들 수 있다. 이러한 BLDC 전동기는 그림 3에서 보는 바와 같이 전동기 구동을 위한 인버터와 전동기로부터 홀센서 신호를 피드백 받아 PWM (pulse width modulation) 파형을 생성하는 제어기로 구성된다. 홀센서 3개를 조합하여 6개의 60° 간격의 각도로 표현하므로 제어기는 이를 활용하여 인버터의 스위칭과 PWM을 수행한다. 또한, 홀센서를 피드백으로 적용하며 전동기의 속도를 계산하고 PWM의 펄스폭 출력을 결정한다. 제어기에는 전동기의 운전속도를 설정하는 기준속도(ref. speed) 입력이 주어지고 홀센서 신호로부터 전동기의 속도를 계산하여 출력을 조절하는 PID에 의해 속도를 제어한다.

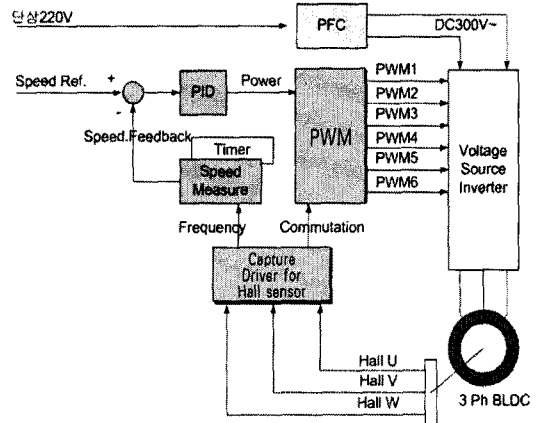


그림 3. BLDC 전동기의 구동 드라이버
Fig. 3. Driver for BLDC motor

3. 주성분분석 기법에 의한 BLDC 전동기 고장진단 알고리즘

본 논문에서는 주성분 분석기법(PCA)을 이용한 BLDC 전동기의 고장진단 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 그림 4에서 보는 바와 같이 동기화 과정을 수행하는 전처리부, PCA를 이용하여 입력전류의 특징을 검출하는 특징 추출부 및 BLDC 전동기의 상태를 검출하는 진단부로 구성되어 있다. 우선, 전류신호의 위상이 다를 경우 같은 고장의 데이터들이 다른 결과를 나타내는 문제점을 해결하기 위하여 동

기화과정을 수행하였다. 이러한 동기화는 측정된 전류신호를 홀센서로부터 얻어지는 신호를 기준으로 하여 전류파형의 위상을 동일하게 동기화한 후에 PCA를 이용하여 특징을 추출한다.

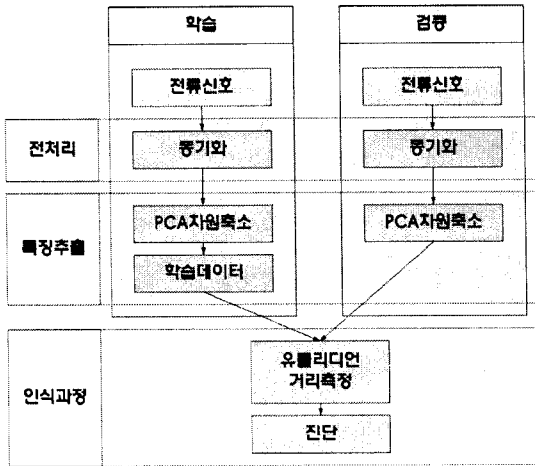


그림 4. BLDC 전동기의 고장 검출 시스템
Fig. 4. Fault diagnosis system for BLDC motor

PCA에 의한 특징 추출 및 진단 과정에 대하여 단계별로 설명하면 다음과 같다.

[단계 1] 측정된 학습용 전류신호 $X = [x_1, x_2, \dots, x_p]$ 에 대하여 다음과 같이 식 (3)을 이용하여 전체 신호의 평균을 구한다.

$$m = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P x_i \quad (3)$$

[단계 2] 전류신호에 대한 공분산행렬을 구한다.

$$\Omega = \overline{XX^T} \quad (4)$$

$$\overline{X} = [\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_p}]$$

$$\overline{x_i} = x_i - m$$

[단계 3] 식 (4)에 의해 계산된 공분산에 대한 고유값과 고유벡터를 구한다.

$$\Omega v_j = \lambda v_j \quad (5)$$

[단계 4] 고유벡터 v_j 를 고유값의 크기 순으로 나열한 후 학습용 전류신호 x_i 에 대한 특징벡터 z_i 를 구한다. 식 (6)에서 알 수 있는 바와 같이 각각의 전류신호에 대한 특징벡터는 공분산에 대한 고유벡터를 이용하여 PCA에 의해 변환된 공간으로 투영함으로써 얻을 수 있다.

$$z_i = v_i^T(x_i - m) \quad (6)$$

[단계 5] 새로운 전류신호(검증데이터)의 특징벡터는 다음과 같이 구해진다. 여기서 x'_i 는 인식하고자 하는 새로운 전류신호를 나타낸다.

$$z'_i = v_i^T(x'_i - m) \quad (7)$$

최종 진단부에서는 훈련과정에서 PCA를 이용하여 미리 계산된 특징벡터와 새로운 입력벡터간의 유클리디언 거리를 이용하여 BLDC 전동기의 운전상태(4종류 : 정상상태, 회전자 자석 이상, 베어링 이상, 고정자 권선 이상)를 진단한다.

4. 실험 및 결과 분석

4.1 오프라인 상태에서의 제안 방법 평가

BLDC 전동기의 전류신호를 얻기 위해 그림 5와 같이 실험 장치를 제작하였다. 실험 장치는 전원공급기, 인버터 드라이버, BLDC 전동기, 그리고 부하장치로 구성되어 있다. 부하장치는 무부하, 1[kg], 2[kg], 3[kg]의 부하를 BLDC 전동기의 회전자 축에 연결하였다. 전류센서에 의해 측정된 BLDC 전동기의 전류신호는 NI사의 DAQ 보드를 통하여 PC로 전송된 후 signal express를 사용한 LabVIEW 프로그램을 이용하여 취득하였다. 실험에 사용한 전동기는 국내기업인 S산전의 300 와트급 구형과 BLDC 전동기(모델명 : BD90-N220300)를 사용하였으며, 인버터 드라이버는 가변저항을 이용하여 속도를 지정할 수 있고, BLDC 전동기의 홀센서로부터의 신호를 이용하여 속도귀환 PID 루프에 의한 PWM 출력 제어와 통신을 수행한다.

임베디드 타입의 실시간 BLDC 전동기 고장진단 시스템 구현

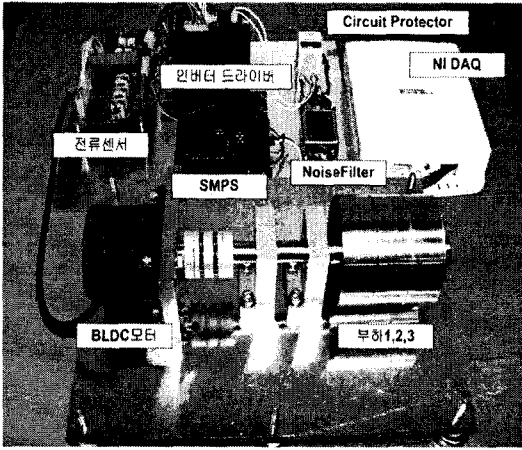
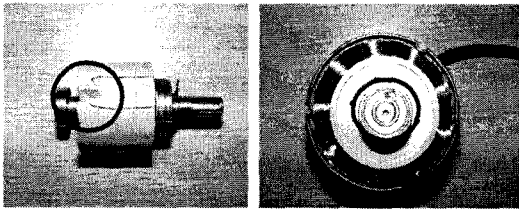
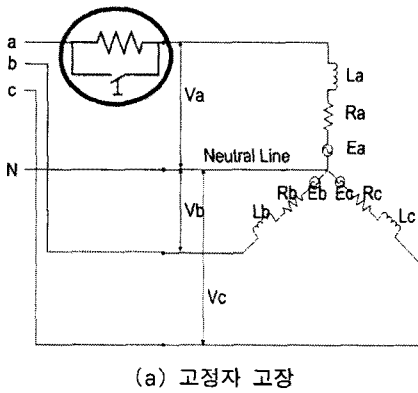


그림 5. BLDC 전동기 고장진단 실험장치
Fig. 5. Instrument of fault diagnosis system of BLDC motor

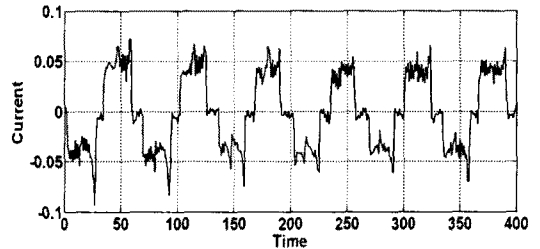


(b) 회전자 고장 (c) 베어링 고장

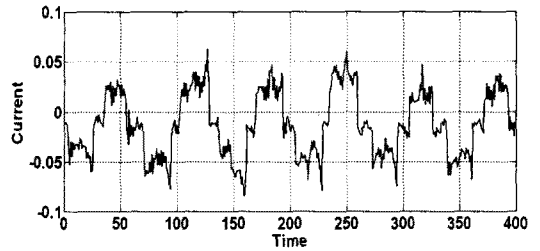
그림 6. BLDC 전동기의 고장부위
Fig. 6. Faults of BLDC motor

전류신호는 아날로그 신호를 10k[SPS]로 디지털 변환하여 2,000개씩, 즉 0.2초간 전류신호를 측정하였고, 부하별(4종류 : 무부하, 1[kg], 2[kg], 3[kg])로 각각 500개씩의 데이터를 취득하여 제안된 알고리즘

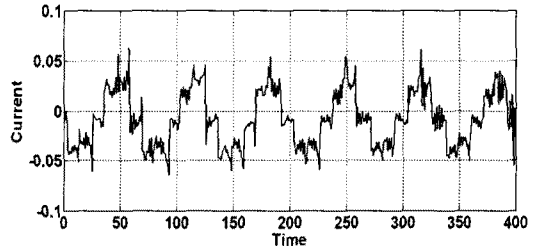
에 적용 실험을 하였다. 본 논문에서는 BLDC 전동기의 정상상태, 고정자 권선 고장, 회전자 고장 및 베어링 고장의 네 가지 상태를 고려하였다. 여기서 고정자 권선 고장은 고정자 권선이 고장 시 전동기상에 불평형 전압이 발생한다는 점에 착안하여 그림 6



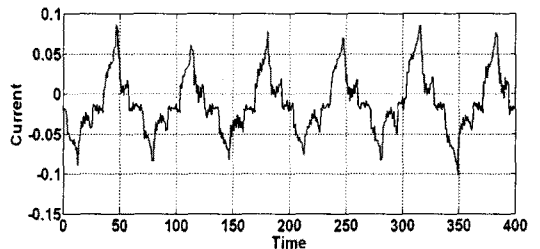
(a) 정상



(b) 회전자 고장



(c) 베어링 고장



(d) 고정자 고장

그림 7. 고장상태별 전류파형
Fig. 7. Current waves of BLDC motor

(a)와 같이 한 상에 저항을 연결하였다. 회전자 고장과 베어링 고장은 그림 6 (b), (c)에서 보는 바와 같이 회전자 자석에 크랙을 발생시켰고, 베어링 고장은 베어링 외부에서 큰 힘을 가하여 베어링이 압착 되도록 하여 고장을 모의하였다.

그림 7에서는 취득된 데이터 중에서 정상, 회전자 이상, 베어링 이상, 고정자 권선 이상의 전류파형을 나타냈다. 그림 7에서 보는 바와 같이 고장 상태별로 약간의 차이는 발생하지만 전문가라 하더라도 육안으로 구분하기는 쉽지 않은 것으로 분석된다.

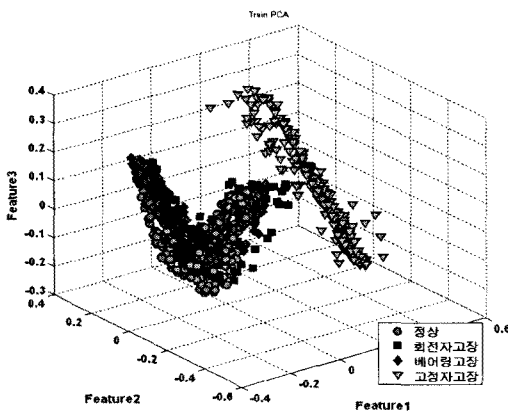


그림 8. 학습 데이터의 주성분 분포
Fig. 8. PCA feature space for training samples

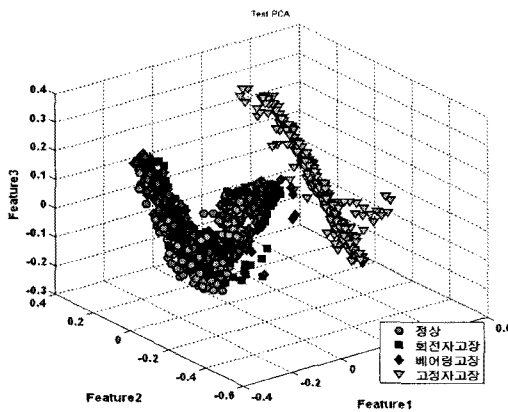


그림 9. 검증 데이터의 주성분 분포
Fig. 9. PCA feature space for testing samples

그림 8과 그림 9에서는 PCA에 의해 추출된 학습 데이터와 검증데이터의 분포를 나타내었다. 그림에

서와 같이 정상, 회전자 자석고장, 베어링 고장은 그 고장의 정도가 미미하여 정상모터와 주성분이 비슷하게 분포하며, 반면 고정자 권선 고장의 주성분 특징은 정상 전동기와 분리가 잘 됨을 확인할 수 있다.

표 1에서는 제안된 방법에 의한 진단결과를 나타냈다. 실험에 사용된 데이터는 각 부하 조건에 대해서 500개의 데이터 중 250개는 학습 데이터로 사용하고 나머지 250개는 검증용으로 사용하여 학습용 1,000개와 검증용 1,000개의 데이터를 사용하였다. 진단결과를 나타낸 표 1을 살펴보면 97.1[%]의 진단 성능을 나타냈다. 이를 전동기 상태별로 분석해보면, 정상 데이터는 99.8[%], 베어링고장은 95.9[%], 회전자 고장은 93.8[%], 고정자 고장은 98.9[%]를 나타냈다. 이 결과로부터 정상상태와 고정자 상태는 다른 고장상태에 비하여 진단 성능이 우수한 반면에 베어링 고장과 회전자 고장은 상대적으로 진단율이 저조한 것으로 나타났다. 이는 다른 고장에 비하여 베어링 고장과 회전자 고장이 정도가 심하지 않은 것에 기인한 것으로 분석된다.

표 1. BLDC 전동기의 진단 결과 [단위: %]
Table 1. Result of fault diagnosis system of BLDC motor

상태	정상	베어링	회전자	고정자
정상	99.8	0	0.2	0
베어링	4	95.9	0.1	0
회전자	6.2	0	93.8	0
고정자	1.1	0	0	98.9
인식률	97.1			

그림 10에서는 유클리디안 거리 측정에 의해 분류되었으나 오 분류된 데이터에 대해서, 주성분의 분포를 나타내었다. 오 분류된 원인으로는 BLDC 전동기가 페루프에 의한 3상 PWM 속도 제어를 하면서 생기는 과도현상으로 전류신호의 불안정이나, 전원 인버터로부터 발생하는 스위칭 노이즈등에 영향을 받은 전류신호의 불안정 때문이라고 사료된다. 회전자 자석이나 베어링 고장이 발생하였으나, 페 루프 제어에 의해 전동기가 지정된 속도로 계속하여 운전하면서 발생하는 전류의 변화가 회전자나 베어링 고

임베디드 타입의 실시간 BLDC 전동기 고장진단 시스템 구현

장의 정도에 비해 미약하여 정상운전으로 분류되었다. 회전자 자석 고장보다는 베어링 고장의 경우가 정상 분류된 것이 더 많은데 이 원인은 베어링 고장의 정도가 전동기 운전에 크게 영향을 줄 만큼 고장이 난 것이 아니라는 결론을 내릴 수 있다.

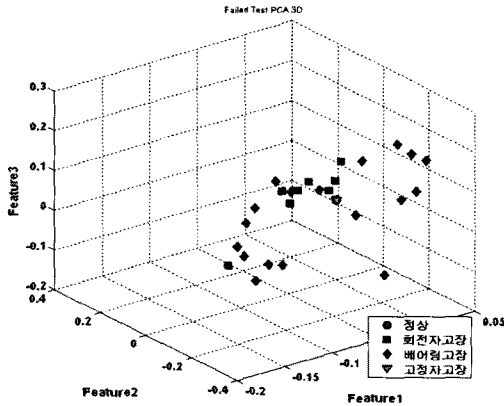


그림 10. 오 분류된 검증데이터의 주성분 분포
Fig. 10. PCA feature space of misclassified testing samples

4.2 실시간 고장진단 시스템 구현 및 평가

본 연구에서는 그림 11에서 보는 바와 같이 BLDC 전동기에 대한 임베디드 형태의 실시간 고장진단 시스템을 개발하였다. 그림 11에서 보는 바와 같이 개발된 시스템은 상용 전원(220[V], 60[Hz])을 입력받아 DC300V를 변환하는 컨버터와, 3상 PWM 인버터를 포함하는 BLDC 드라이버와 전동기 그리고, 전동기에 흐르는 전류를 분석하기 위하여 전류센서를 전동기의 1상에 직렬로 연결하였다. BLDC 전동기에 다양한 부하 변화를 실험하기 위해서 부하 장착용 기구부를 제작하였다. 학습데이터 데이터베이스는 4.1에서 구현한 내용을 기초하여 작성된 특징벡터를 DSP에 삽입하여 사용하였고, 전류센서로부터 취득한 전류데이터를 검증 데이터로 이용하기 위하여 ADC(analog to digital converter)를 추가적으로 구축하였다. 최종적으로, DSP에 주성분 분석 기법을 이용한 BLDC 전동기 고장진단 알고리즘을 구현하였다.

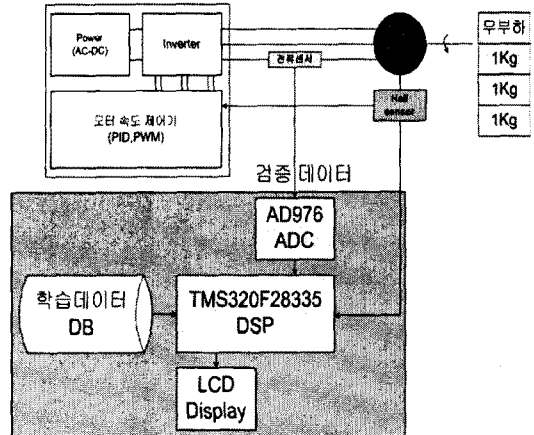


그림 11. 임베디드시스템 구성도
Fig. 11. Block diagram of the embedded system

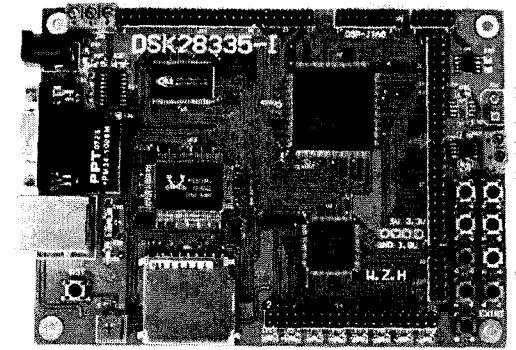


그림 12. DSP28335 CPU 보드
Fig. 12. DSP28335 CPU board

BLDC 전동기의 고장진단 알고리즘을 구현하기 위해서 TI사의 TMS320F28335(150MIPS) DSP를 선정하였다. Processor이며 controller인 TMS320F28335는 floating point unit을 내장하여 타 DSP보다 실수 연산에 대한 연산 시간을 줄였으며, CPU는 내부에 256[K]×16 flash, 34[K]×16 SARAM을 보유하여 원 칩으로 임베디드 시스템을 구현하기 이상적인 구조로 16/32 비트 단위의 XINF(external interface)가 가능하고, 세 개의 32-bit CPU timer를 사용하여 타이밍 관계형 운영체제를 사용할 수 있으며, 다수의 직렬포트로 SCI, SPI 통신 등이 가능하며 8개의 외부인터럽트와 88개의 GPIO를 설정하여 사용할 수 있어 LED 등의 표시장치를 설정하여 사용

할 수 있는 DSC(digital signal controller)이다. 그림 12에 실험에 사용된 DSP 메인 보드를 나타내었다. DSP는 5[V]의 전원을 입력 받아 IO전원 3.3[V]와 DSP CPU core 전원인 1.9[V] 전원 레귤레이터를 통하여 필요 전원을 생성한다. 다양한 peripheral과 다수의 GPIO는 MUX에 의해 선택적으로 사용되며, 실험에서는 데이터 버스, 컨트롤 버스, LED 표시, 인터럽트 연결 등을 컨넥터를 통해 연결하여 사용하였다.

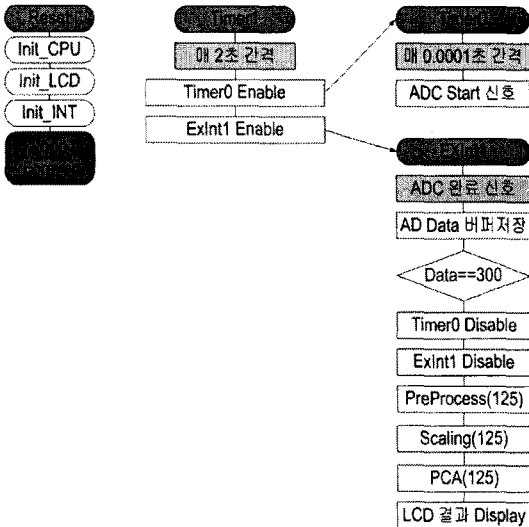


그림 13. 시스템 순서도
Fig. 13. System flowchart

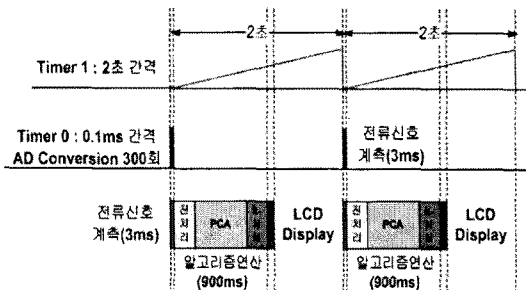


그림 14. 시스템 타이밍도
Fig. 14. System timing flow

그림 13의 시스템 순서도와 그림 14의 타이밍도를 보면 CPU는 리셋 후 PLL과 CPU기본 설정을 하며, LCD, interrupt 등의 peripheral을 초기화 하고 대기

모드에 진입한다. Timer1 루틴은 매 2초마다 발생하게 설정하였다. Timer1 서비스 루틴에서 CPU는 Timer0 interrupt와 external interrupt1을 가능하게 설정한다. 이 설정은 ADC가 매 0.0001초 마다 AD변환을 하도록 명령을 전송하며, 변환이 완료되면 external interrupt1 서비스 루틴에서 AD변환 결과가 메모리에 적재된다.

External interrupt1 서비스 루틴에서 변환된 데이터가 300개 인지 확인하여 Timer0와 external interrupt1을 불가능 설정하고, 전처리 과정을 수행한다. 이때 AD변환한 값이 정수형의 값이므로, 시물레이션 수행 시 사용했던 특징벡터와 평균값을 사용하려면 균일한 스케일이 필요하여 ADC(analog to digital conversion)데이터를 정규화(normalize)하여 사용하게 된다. PCA 알고리즘과 k-NN을 수행하게 되면 현재의 전동기 운전상태가 판별된다.

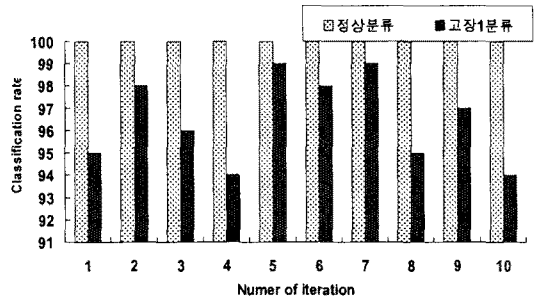


그림 15. 실시간 고장 진단 실험결과
Fig. 15. Real-time fault diagnosis result

표 2. BLDC 전동기의 실시간 진단 결과 [단위: %]
Table 2. Result of real-time fault diagnosis system of BLDC motor

상태	정상	고정자(고장1)
정상	100	0
고정자(고장1)	3.5	96.5
인식률	98.3	

개발한 실시간 고장 진단 시스템을 통하여 제안한 알고리즘 및 분류기법에 의해 BLDC 전동기의 고정자 권선에 대한 고장실험을 실시하였다. BLDC 전동기에 3[kg] 부하를 설정하고 회전속도를 1,500[rpm]을 설정하여 전류측정을 개시하였다. 매 2초마다 한

번씩 BLDC 전동기의 고장진단을 실시하였다. 실험은 전동기가 정상일 때와 고정자 권선 고장일 경우에 대해 각 100회씩 10번을 실시하여 그 결과를 다음 그림 15와 표 2에 나타냈다. 그림 15 및 표 2에서 보는 바와 같이 정상데이터에 대해서는 진단율이 100[%] 나타났으며, 고장데이터에 대해서는 96.5[%]의 인식률이 나타났다. 그림 17에 고정자 고장이나 정상 분류된 경우의 전류 파형을 보였다. 이는 전동기 제어기의 3상 PWM에 의한 과도현상이나 인버터 스위칭 노이즈에 의한 ADC 오동작으로 판단되며, 전류신호의 PCA 차원축소 후 특징 값이 고정자 고장에 대한 학습데이터 보다 정상 전류에 대한 학습데이터에 가까운 것으로 분류되었다.

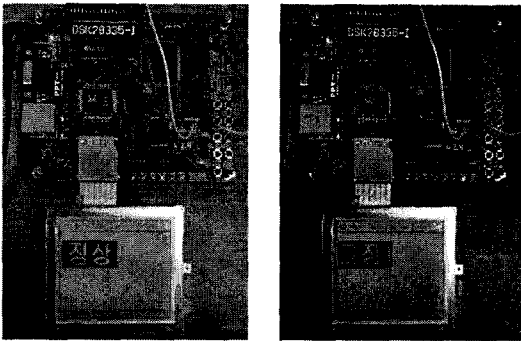


그림 16. 진단결과 표시(정상, 고장)
Fig. 16. Display of the diagnosis results (healthy, fault1)

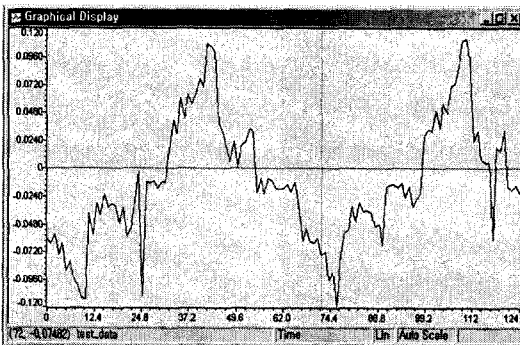


그림 17. 고정자 고장이 정상 분류된 경우의 전류 파형
Fig. 17. Misclassified faulty signal

5. 결론

본 논문에서는 주성분분석 기법을 이용한 BLDC 전동기의 고장상태 진단기법을 제안하였다. 제안된 방법의 타당성을 보이기 위해 무부하, 1[kg], 2[kg], 3[kg]의 부하실험과 데이터 샘플 수를 조정하여 실험한 결과 97.1[%]의 고장진단 성능을 나타냈다. 이를 전동기 상태별로 분석해보면, 정상 데이터는 99.8[%], 베어링고장은 95.9[%], 회전자 고장은 93.8[%], 고정자고장은 98.9[%]로, 정상전동기와 고정자 고장의 분류는 확연하게 결과가 나왔으나, 이에 비해 베어링이나 회전자 고장은 인식률이 그 고장의 정도에 따라 약간 떨어지는 결과를 보였다.

또한 실시간 고장진단을 위한 임베디드 시스템을 구현하였다. 실시간으로 매 2초마다 정상과 고정자 권선 고장에 대한 BLDC 전동기의 진단실험을 실시한 결과, 정상데이터에 대해서는 진단율이 100[%] 나타났으며 고장데이터에 대해서는 96.5[%]의 인식률이 나타났다. 본 논문은 산업계, 자동차 업계에서 부품 등으로 그 사용량이 급증하고 있는 BLDC 전동기의 다양한 고장검출에 주성분 분석기법과 k-NN 등의 비교적 간단한 패턴인식 알고리즘을 이용하여 고장 진단 시스템을 임베디드시스템으로 구현한 것으로, 향후 대단위 BLDC 전동기의 고장진단 시스템 개발에 개발방법이 충분히 활용될 것으로 예상된다.

본 연구는 보건복지가족부 보건의료기술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 것임. (과제고유번호 : A040032)

References

- [1] 백경동, "계층적 구조의 퍼지시스템과 상태 변화 패턴을 이용한 브러시리스 직류전동기의 고장진단", 부산대학교, 공학석사 학위논문, 2008.
- [2] 서석훈, 유정봉, 우광준, "시리얼 통신 기반 파라미터 추정에 의한 BLDC 모터의 고장검출", Journal of the Korean Institute of Illumination and Electrical Installation Engineer, Vol. 16, No. 5, pp. 45-52, 2002.
- [3] P. Yedamale and Microchip Technology Inc., "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals", Application Note AN885.pdf, 2003.
- [4] M. A. Awadallah and M. M. Morcos, "Detection of Insulation Failure in BLDC Motors Using Neuro-Fuzzy Systems", Conference on Electrical Insulation and

Dielectric Phenomena, pp. 18-21, 2005.

[5] B.-G. Park, T.-S. Kim, J.-S. Ryu and D.-S. Hyun, "Fault Tolerant Strategies for BLDC Motors Drives under Switching Faults", IEEE Industry Applications Conference 41st IAS, pp. 1637-1641, 2006.

[6] S. Rajagopalan, J. M. Aller, J. A. Restrepo, T. G. Habetler and R. G. Harley, "Analytic-Wavelet-Ridge- Based Detection of Dynamic Eccentricity in Brushless Direct Current (BLDC) Motors Functioning Under Dynamic Operating Conditions", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 3, pp. 1410-1419, 2007.

[7] S. Rajagopalan, W. Roux, T. G. Habetler and R. G. Harley, "Dynamic Eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet Detection in Trapezoidal Flux (Brushless DC) Motors Operating Under Different Load Conditions", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 22, No. 5, pp. 2061-2069, 2007.

◇ 저자소개 ◇

박진일 (朴眞一)

1975년 8월 4일생. 2001년 한밭대학교 제어계측공학과 졸업. 2003년 한밭대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 충북대학교 제어계측공학과 박사과정.

김용민 (金容敏)

1972년 2월 27일생. 1999년 한밭대학교 제어계측공학과 졸업. 2001~2005년 (주)에스티 기업부설연구소 연구소장. 2005~2008년 (주)에스티엔씨 기업부설연구소 책임연구원. 2009년 충북대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2009년~현재 마니랩 대표.

이대중 (李大鍾)

1969년 2월 25일생. 1994년 충북대학교 전기공학과 졸업. 1997년 충북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동대학원 졸업(박사). 2003~2004년 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 연구원. 2004~2005년 University of Alberta, Postdoctor. 2006년~2008년 충북대학교 BK21 충북정보기술단 초빙교수.

조재훈 (趙在勳)

1975년 5월 14일생. 2002년 한밭대학교 제어계측공학과 졸업. 2004년 한밭대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 충북대학교 제어계측공학과 박사과정.

전명근 (全命根)

1964년 7월 17일생. 1987년 부산대학교 전자공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1993~1996년 삼성전자 자동화연구소 선임연구원. 2000~2001년 University of Alberta 방문교수. 1996년~현재 충북대학교 전자정보대학 제어로봇공학과 교수.