

MCSA를 이용한 BLDC 전동기의 고정자 권선 고장 진단

이대성, 양철오, 김준영, 김대홍, 문용선, 박규남, 송명현
순천대학교

Winding Fault Diagnosis for BLDC Motor using MCSA

Dae-Seong Lee, Chul-Oh Yang, Jun-Young Kim, Dae-Hong Kim, Yong-Seon Moon, Kyu-Nam Park, Myung-Hyun Song
Sunchon National University

Abstract - In this paper, a winding fault diagnosis method base on MCSA(Motor Current Signature Analysis) for BLDC motor is proposed. This method is programmed by LabVIEW for winding fault diagnosis. For winding fault diagnosis, two types of winding fault(shorted turn at one pole, shorted turn at two pole in same phase) are put intentionally in on phase. The motor current is collected by hole sensor, and transformed by the Park's transform, and then the Park's Vector Pattern are obtained, Usually this pattern is formed an ellipse, so a proper threshold value of distortion ratio(the ratio of the shortest axis and longest axis of ellipse) is suggested for winding faults diagnosis.

1. 서 론

BLDC 전동기는 자동차 산업, 우주 산업 등 다양한 분야에 걸쳐 폭넓게 적용되고 있다. 기존의 브러시 DC 전동기에 비하여 로드의 마찰, 스파크, 마모 및 파손을 피하면서 높은 동적 응답 특성, 고효율, 긴 동작 수명, 저소음 특성과 더 높은 속도 영역을 갖는다는 장점을 가지고 있다. 또한 동일한 전동기 크기 대비 보다 큰 토크를 냄으로서 공간과 무게에 제약이 적다.[1] 이러한 특성 때문에 DC 전동기를 대신하여 BLDC 전동기의 사용이 급격히 증가하고 있다. 그러나 BLDC전동기가 어떠한 원인에 의하여 고장이 발생할 경우 전체 시스템에 신뢰성에 대한 문제를 야기 시킬 수 있다. 전동기 사용 환경에서 과부하와 높은 온도는 고정자 코일을 파괴시킬 수 있다. 그러므로 시스템의 오동작이 발생되기 전에 장비 등을 이용하여 주기적으로 구동시스템을 점검하고 미미한 고장을 발견하는 것이 중요하다.

BLDC 전동기의 고장진단을 위한 연구로는 파라미터 추정방법과 신경 회로망을 이용하여 일반적인 DC 전동기의 고장을 검출하여 식별하는 방법에 대한 연구[2], BLDC 전동기의 모델을 제시하고 이 모델을 이용한 고장검출 방법[3], BLDC 전동기의 3상전류를 이용하여 특정 추출 및 백터 연산을 이용하여 BLDC 전동기의 권선 고장을 진단하는 방법에 대한 연구들이 진행 되었다.[4]. 그러나 대부분의 연구들이 모델링과 이를 이용한 시뮬레이션을 통한 결과만을 제시하고 있다. 또한, 실질적인 BLDC 전동기의 구동상태에서의 고장진단에 대한 연구는 미비한 상황이다. 따라서 실제 BLDC 전동기의 전류 신호 수집 및 분석을 통한 온라인 고장진단에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 운전 중인 BLDC 전동기 전류 신호의 수집 및 분석을 통해 BLDC 전동기의 권선 고장을 진단하였다. 권선 고장 진단을 위해 이용하여 BLDC 모터의 운전 중 고장진단이 가능한 방법을 제시하고 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

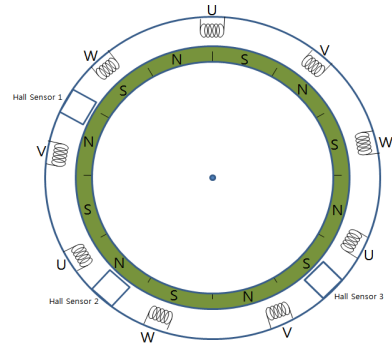
2.1 BLDC 전동기 모델

제한한 고장진단 방법의 검증은 위하여 실험에 사용된 3상 BLDC 모터의 전압방정식은 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있으며, 고정자 코일과 회전자 자석 등의 기구적인 배치를 알기 쉽게 그림 2.1에 수직 단면도로 나타내었다.

$$\begin{pmatrix} v_U \\ v_V \\ v_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_U \\ L_V \\ L_W \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_U \\ e_V \\ e_W \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

여기서, v_U, v_V, v_W 는 상 전압, R 은 상 저항, i_U, i_V, i_W 는 상 전류, L_U, L_V, L_W 는 상 인덕턴스, e_U, e_V, e_W 는 역기전력

실험에 사용된 BLDC 전동기는 60W 용량의 BD80-N024060 전동기로, 9개 극의 코일이 40도 간격으로 배치된 구조를 갖고, 9개 극은 한상이 각각 3개의 극으로 120도 간격으로 병렬연결 된 구조로 이루어진다. 회전자는 12개의 극으로 구성된 자석으로 이루어져있으며 회전자 자석(극)의 위치를 검출하기 위한 3개의 홀센서를 포함한다.

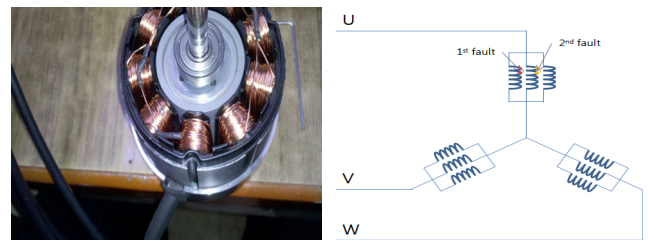


〈그림 2.1〉 BLDC 전동기의 수직 단면도

2.2 BLDC 전동기의 권선 고장과 구현

본 연구에서는 고정자 고장유형 중에서 권선의 절연 파괴 등과 같은 소손에 의한 권선 단락 고장을 진단 대상으로 하였으며 이는 고정자 결합들 가운데 가장 큰 비중을 차지한다.

그림 1을 통해 본 연구의 실험에 사용된 BLDC 전동기의 각 상이 120° 간격으로 3개의 극이 병렬로 연결된 구조를 갖고 있음을 보였다. 고장 진단을 위해 그림 2.2의 (a)와 같이 이웃한 턴 간 단락으로 고장을 디자인 하였으며 그림 2.2의 (b)에서처럼 1st와 2nd의 두 단계를 갖는다.



(a) 사진 (b) 개념도

〈그림 2.2〉 고장 전동기의 사진과 개념도

2.3 고정자 전류를 이용한 분석 기법

MCSA기법은 전동기의 구동 전류 신호 분석을 통해 전동기의 상태 등을 파악하는 방식의 데이터 분석 기법으로 진동, 전자기장 검사 등의 다른 방식들에 비하여 저가의 시스템으로 구현이 가능하며 전동기의 고장을 진단하는데 있어 우수한 방법으로 각광받고 있다.

본 연구에서는 전동기의 3상 구동 전류 데이터를 수집 얻어진 전류 데이터를 Park's Vector 변환을 이용한 분석 기법을 이용하였으며, 이를 통해 정상 전동기와 권선 고장 전동기의 Park's Vector 패턴의 왜곡률을 비교하여 전동기의 상태를 진단하는 방법을 제안하였다. 3상전류를 이용한 Park's Vector 변환 수식은 식(2.2, 2.3)과 같다.

$$i_d = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)i_u - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_v - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_w \quad (2.2)$$

$$i_q = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_v - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_w \quad (2.3)$$

여기서, 주파수와 진폭이 일치하고 각각 정확하게 120°의 위상차를 갖는 이상적인 전류 신호의 파스벡터 변환 결과는 식 (2.4, 2.5)와 같다.

$$i_d = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

$$i_q = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.5)$$

여기서, i_M 는 공급 전류의 피크값(A), ω 는 공급 각 주파수(rad/s), t 는 시간 변수 (s)

파스벡터의 기법을 이용한 고장자 권선의 고장진단의 기본적인 원리는 단락된 턴 수가 증가할수록 공급 전류의 비대칭 성분이 증가한다는 데 있다. 비대칭 성분이 증가할수록 파스벡터 패턴의 궤적의 왜곡이 더 심해지므로, 이 왜곡의 정도를 수치적으로 연산하여 권선단락 고장을 진단할 수 있다.

파스벡터 패턴의 궤적은 두 벡터 성분(i_d , i_q)의 합성에 의해 결정되므로, 식 (2.6)을 이용해 파스벡터의 스칼라 성분을 얻을 수 있다. 전동기의 상태가 이상적인 조건을 만족한다면 벡터의 크기는 $\sqrt{6}/2i_M$ 로 일정한 크기를 나타낼 것이다. 만약 권선의 턴 단락으로 인해 한 상 전류의 크기가 커진다면, 한 주기 동안의 파스벡터의 스칼라는 편차가 발생할 것이다. 최근 한 논문에서는 파스벡터 패턴의 찌그러짐의 정도를 왜곡률(DR : Distortion Ratio)이라고 정의하고, 식 (2.7)을 이용해 왜곡률을 수치적으로 연산하여 유도전동기의 고장진단에 적용하였다. r_{max} 와 r_{min} 의 크기가 같으면 왜곡률(DR)이 1로 전동기가 가장 이상적인 상태이고, r_{max} 와 r_{min} 의 차가 클수록 왜곡률이 커지므로 전동기의 권선단락으로 인한 상 전류의 불평형이 큰 상태이다[5].

$$r = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (2.6)$$

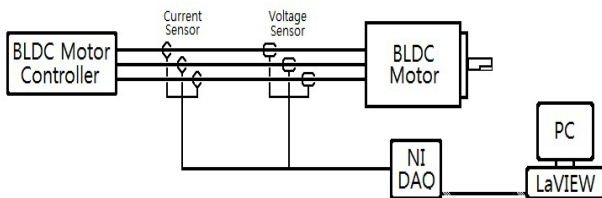
$$DR = \frac{r_{max}}{r_{min}} \quad (2.7)$$

여기서, r 은 파스벡터의 스칼라, r_{max} 는 파스벡터 패턴의 가장 큰 벡터 스칼라, r_{min} 은 파스벡터 패턴에서 가장 작은 벡터 스칼라

2.4 LabVIEW를 이용한 고장 진단 수행

2.4.1 실험 장치 구성

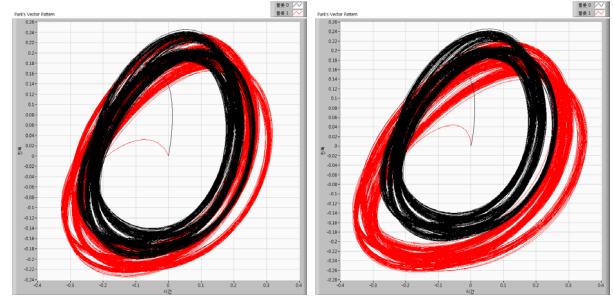
그림 2.3은 BLDC 전동기 실험장치 구성을 나타내는 그림이다. 전동기의 구동을 위하여 컨트롤러에서 출력되는 3상의 전류신호를 전류센서와 NI DAQ 장치를 이용하여 디지털 값으로 변환한다. 변환된 데이터는 컴퓨터에 의하여 다시 실제 전류신호로 복원 과정을 거쳐 데이터 분석 과정을 거친다.



〈그림 2.3〉 BLDC 전동기 고장 진단 실험 장치 구성도

2.4.2 실험 결과 및 검토

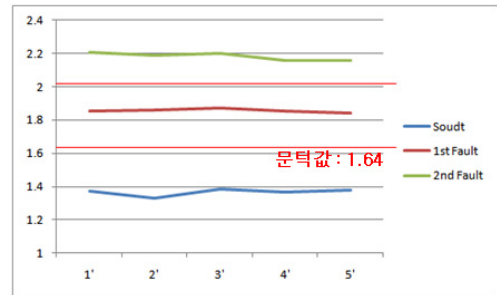
정상과 고장전동기의 Park's Vector 패턴을 비교한 결과 정상 전동기의 패턴에 비하여 고장 전동기의 패턴에 일그러짐이 발생함을 그림 2.4에서 확인할 수 있다. 전동기 상태별로 다섯 번의 실험을 통해 얻어진 전류 신호의 Park's Vector 패턴의 일그러짐의 정도(왜곡률)를 수치적으로 계산하여 그림 2.5와 같은 결과를 얻었다. BLDC 전동기의 상태별 왜곡률을 비교한 결과 고장의 정도가 심해질수록 왜곡률의 크기가 커짐을 알 수 있다. 권선 고장 진단의 문턱값은 정상 전동기 왜곡률의 최대값과 고장 전동기 왜곡률의 최소값의 중간값인 1.64로 설정하여 진단할 수 있다.



(a) 정상 vs 1st 고장

(b) 정상 vs 2nd 고장

〈그림 2.4〉 정상 전동기(흑)와 권선고장 전동기(적)의 Park's Vector 패턴



〈그림 2.5〉 전동기 상태별 왜곡률과 문턱값의 설정

3. 결 론

본 연구에서는 MCSA를 이용한 BLDC 전동기의 권선 고장 진단 방법을 제시하고 정상 및 고장 전동기의 전류 수집 및 실험을 위한 장치를 구성하여 실험을 진행하였다. 실험을 통해 얻어진 정상 전동기와 권선 고장 전동기의 구동 전류를 이용하여 BLDC 전동기의 권선 고장 진단을 위한 방법에 대한 연구를 진행함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

얻어진 전류 데이터는 저역통과 필터를 이용하여 노이즈 성분을 제거하였다. 그리고 전동기의 MCSA 해석을 통해 왜곡률을 연산하여 각 전동기 상태별(정상, 1st, 2nd)로 비교한 결과, 권선 고장의 정도가 심할수록 왜곡률의 크기가 큼을 확인하였다. 실험에 의해 얻어진 정상 전동기와 권선 고장 전동기의 왜곡률의 차이가 명확히 나타나므로 적절한 문턱값(1.64)을 설정하여 고장자 권선 고장 진단이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

This research was financially supported by the Ministry of Education, Science Technology (MEST) and National Research Foundation of Korea(NRF) through the Human Resource Training Project for Regional Innovation.

[참 고 문 헌]

- [1] 백경동, "계층적 구조의 퍼지시스템과 상태 변화 패턴을 이용한 브러시리스 직류전동기의 고장진단", 부산대학교, 공학석사 학위논문, 2008
- [2] Xiang-Qun, "Fault Detection and Diagnosis of Permanent-Magnet DC Motor Based on Parameter Estimation and neural Network", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, No.5, pp.1021~1030, 2000
- [3] Thomas Salem, "Simulation of the Brushless DC Machine", Proceeding og the Twenty-Seventh Southeastern Symposium, pp.18~22, 1995
- [4] Hyeon Bae, "Fault Detection and Diagnosis og Winding Short in BLDC Motor Based on Fuzzy Similarity", International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent System, Vol.9, No.2, pp.99~103, 2009
- [5] 송명현, 박규남, 한동기, 양철호, "Park's 벡터 패턴의 왜곡률을 이용한 고정자 권선 고장 자동진단," Trans. KIEE. Vol. 57p, No. 2, 2008.