

토크신호 스펙트럼 분석을 이용한 유도전동기 베어링 고장진단

김준영, 양철오, 박규남, 송명현
국립순천대학교 전기제어공학과

The Diagnosis for Induction Motor Bearing Faults Using Torque Signal Spectrum Analysis

Jun-Young Kim, Chul-Oh Yang, Kyu-Nam Park, Myung-Hyun Song
Sunchon National University

Abstract - The faults of a electric motor cause to rise the maintenance and repair cost and to reduce the reliability of the electric power system. In this paper, the auto fault detection system for a induction motor is developed using the torque signal spectrum analysis. The spectrum of motor torque signal is used for finding a bearing fault feature frequency. A threshold value, for detecting the motor bearing fault is set by the difference of torque signal spectrum(FFT signal) between normal condition and faulted condition of the motor.

1. 서 론

유도전동기는 전기 설비에서 핵심적인 역할을 수행한다. 만일 전동기 고장이 발생할 경우 이는 전동기의 고장으로 국한되는 것이 아니라 전기 설비의 안정성에 상당한 영향을 미친다. 따라서 전동기의 고장을 미리 예측하기 위한 전동기 실시간 감시 기술이 지속적으로 연구 및 상용화 되어 지고 있다. 전동기의 손상율의 경우베어링 고장이 50[%]로 가장 빈번하게 발생되며, 고정자 고장 16[%], 회전자 고장 8[%]의 순으로 손상이 자주 발생하는 것으로 조사되었다[1].

베어링 고장진단에 대한 연구의 경우 웨이블렛 변환을 이용하여 평치차의 진동 신호를 분석하여 평치차의 고장진단 방법, 내륜, 외륜 결함을 지닌 베어링에서 발생하는 진동신호를 이산화 웨이블렛을 적용하여 진단하는 방법 등이 제시되었다[2-5].

전류 신호를 이용하여 기계적 고장인 베어링 고장 진단을 할 경우 큰 효과를 기대 할 수 없어 복잡한 알고리즘을 통하여 진단이 이루어지며, 진동신호를 이용하는 경우에는 전동기에 진동 센서를 부착해야한다는 단점 및 진동 센서의 경우 고가이기 때문에 설비 설치비용이 증가한다는 단점을 가지고 있어 이를 보완할 수 있는 연구가 필요하다. 토크분석 이용한 베어링 고장진단의 경우 냉각 팬 구동용 전동기의 운전 중 베어링 고장 진단을 실시하였다.[6] 하지만 이 방법의 경우 (주)Baker Instrument사에서 개발한 EXP3000 전동기 자동고장진단 시스템을 사용하여 진단하였기 때문에 토크 신호를 이용한 방법에 대한 알고리즘 제시가 없고, 고가의 장비이기 때문에 저가형 장비 개발이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 전동기의 결함으로 생성되는 공극 토크 신호를 베어링 고장을 검출 할 수 있는 저가형 알고리즘을 제안하고 이 유용성을 보였다.

2. 본 론

2.1 베어링 고장진단

2.1.1 베어링 고장

베어링은 축을 지지하거나 마찰이 발생하는 부분에서 회전이나 미끄럼을 원활하게 이루어지도록 하는 기계요소로서 기계 산업의 모든 분야에 널리 활용되고 있다. 일반적으로 소형 유도전동기에서는 볼베어링 및 풀러 베어링이 이용되며, 대형 유도전동기에서는 슬리브 베어링이 사용되고 있다. 볼 베어링의 경우에는 기계적인 파손과 과열 또는 높은 진동과 지속적인 과부하가 빈번한 고장발생의 주요원인이 되고 부적절한 설치에 의해 베어링의 고장이 발생한다.

2.1.2 베어링 고장

베어링 결함은 공극의 동적 편심과 유사하게 공극 자속 밀도에 불 균일을 주어 공극 전류 및 토크의 변화로 나타난다. 베어

링의 구성 요소 중 외륜, 내륜, 볼 스펀에 결함이 있으면 식 (2.1), (2.2)과 같은 특성 주파수를 발생시킨다. 여기서, f_0 는 외륜 주파수, f_i 는 내륜 주파수를 나타낸다.

$$f_0 = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos\beta\right) \quad (2.1)$$

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos\beta\right) \quad (2.2)$$

여기서 f_r 은 운전주파수(내륜의 회전 주파수), N_b 는 볼의 개수, D_b 는 볼의 직경, D_c 는 피치 직경, β 는 볼의 접촉각이다. 베어링 고장진단을 위해선 베어링의 사양을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 또한 전동기의 회전속도에 따라 특징 주파수가 변동하기 때문에 운전주파수 f_r 을 파악하는 것 또한 중요하다[1].

2.2 토크신호 산출

유도된 회전자 전류와 전압으로부터 토크가 발생하여 전동기가 회전하게 된다. 토크 신호 측정을 위해서는 전동기의 3상의 선간 전압(v_{ab}, v_{bc}, v_{ca})과 상전류(i_a, i_b, i_c)를 수집하여야 한다. 수집된 신호를 이용하여 정지좌표계인 d, q 축으로 변환 각각, V_d, V_q 와 i_d, i_q 를 산출한 다음 식(2.4), (2.5)를 이용하여 $\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$ 를 구한다. 이를 식 (2.3)에 대입하여 공극 토크 T_e 를 구할 수 있다. 이렇게 산출된 토크 신호는 전동기에서 생성되는 모든 신호에 민감하기 때문에 전동기 고장 추정 및 속도를 추정하는데 이용할 수 있다.

$$\lambda_{ds} = \int_0^t (V_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad (2.3)$$

$$\lambda_{qs} = \int_0^t (V_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (2.4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (2.5)$$

여기서, R_s 는 고정자 저항, P 는 극쌍, λ_{ds} 는 d 축 전동기 자속, λ_{qs} 는 q 축 전동기 자속, i_{ds} 는 d 축으로 변환된 전류, i_{qs} 는 q 축으로 변환된 전류, V_{ds} 는 d 축으로 변환된 전압, V_{qs} 는 q 축으로 변환된 전압이다[1].

2.3 토크신호 스펙트럼을 이용한 전동기 회전속도 산출

베어링 고장 진단을 하기 위해서는 전동기 속도를 파악해야한다. 토크신호 스펙트럼 분석을 이용하여 속도 산출을 하기 위해서는 우선적으로 스펙트럼 변환된 주파수에서 속도에 따른 전동기 슬롯 하모닉 주파수를 계산하여야 하며 이는 식 (2.6)과 같다.

$$f_{sh} = f_e \left[n \cdot \left(\frac{(1-s)}{p} \right) \pm v \right] \quad (2.6)$$

여기서, f_{sh} 는 슬롯 하모닉 주파수, n 은 회전자바 슬롯 개수, s 는 슬립, p 는 극쌍, $v = \pm 1, \pm 2, \dots$ 는 전원에 존재하는 스테이터스 하모닉의 순서 이며 f_e 는 전원 주파수이다. 토크 스펙트럼의 슬롯 하모닉 주파수대역에서 피크로 나타나는 주파수 f_{sh} 를 검출하여 n 을 회전자 슬롯 수라 할 때, 식(2.7)에 의해 전동기의 회전속도 N 을 추정할 수 있다. 이렇게 추정된 전동기 회전속도

를 이용하여 부하별 변동하는 베어링 결함 주파수를 구할 수 있다[7].

$$N = 60 \cdot \frac{(f_{sh} \pm v f_c)}{n} \quad (2.7)$$

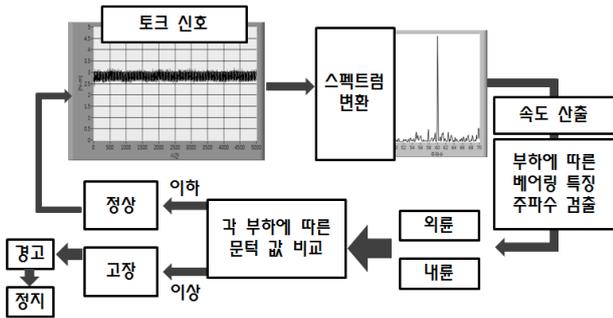
2.4 실험결과 및 분석

그림 2.3은 고장 진단 실험에 사용된 베어링이다. 인위적으로 외륜과 내륜에 고장을 발생 시킨 베어링을 전동기 결합 후 실험하였다.



(a) 외륜 고장 (b) 내륜고장
<그림 2.3> 고장 진단 실험에 사용된 베어링

그림 2.4는 자동 고장진단을 위해 사용된 베어링 고장진단 알고리즘이다. 수집된 전류 전압신호를 이용하여 토크신호를 산출하고 이를 스펙트럼 변화하였다. 변환된 토크신호 스펙트럼 신호를 이용하여 식(2.6)을 이용하여 슬롯 하모닉 주파수 f_{sh} 를 측정 후 식(2.7)을 이용하여 전동기의 회전 속도 산출한다. 전동기 속도 산출 후 부하별 베어링 고장 특징 주파수를 검출한다. 이를 실험을 통해 설정한 부하별 문턱 값(threshold)을 기준으로 특징 주파수의 진폭이 문턱 값 이상인 경우 고장으로 판별하고 이하는 정상으로 판별 하도록 하였다.

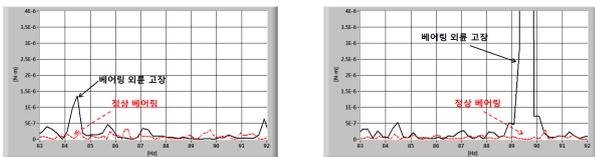


<그림 2.4> 베어링 고장 진단 알고리즘

2.4.1 실험 결과 및 검토

가. 베어링 외륜 고장

다음 그림 2.5는 외륜 고장 베어링과 정상베어링 실험을 통해 얻어진 데이터를 비교 분석한 데이터이다. 속도가 변함에 따라 특징 주파수 대역이 1.5[Hz]~2[Hz] 단위로 오른쪽으로 옮겨지고 있으며 속도가 증가할수록 진폭 크기도 커지는 것을 알 수 있다.

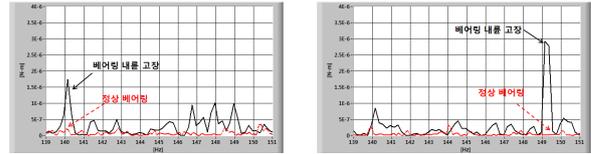


(a) 1690[rpm] 검출 대역 84.5 [Hz] (b) 1790[rpm] 검출 대역 89.5 [Hz]
<그림 2.5> 베어링 외륜 고장

속도 1690[rpm]에서 1790[rpm]까지 측정된 대역 범위는 84.5[Hz]~89.5[Hz]이다. 진폭의 변화가 속도가 증가할수록 진폭도 같이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이를 이용하여 각 속도별 주파수 진폭 크기를 평균하여 그 대역을 문턱 값으로 지정하였다. 각 속도별로 지정된 문턱 값의 기준보다 큰 주파수 진폭이 3번 이상 생성될 경우 베어링 외륜 고장으로 판별하여 이를 토대로 고장 진단하였다.

나. 베어링 내륜 고장

그림 2.6은 내륜 고장 베어링과 정상베어링 실험을 통해 얻어진 데이터를 비교 분석한 데이터이다. 속도가 변함에 따라 특징 주파수 대역이 1.5[Hz]~2.5[Hz] 단위로 오른쪽으로 옮겨지고 있으며 속도가 증가할수록 진폭 크기도 커지는 것을 알 수 있다.



(a) 1690[rpm] 검출 대역 140 [Hz] (b) 1790[rpm] 검출 대역 149.2 [Hz]
<그림 2.6> 베어링 내륜 고장

속도 1690[rpm]에서 1790[rpm]까지 측정된 대역 범위는 140[Hz]~149.2[Hz]이다. 내륜 고장도 마찬가지로 진폭의 변화가 속도가 증가할수록 진폭도 같이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이를 이용하여 각 속도별 주파수 진폭 크기를 평균하여 그 대역을 문턱 값으로 지정하였다. 각 속도별로 지정된 문턱 값의 기준보다 큰 주파수 진폭이 3번 이상 생성될 경우 베어링 내륜 고장으로 판별하여 이를 토대로 고장 진단하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 유도전동기의 결함에 의해 생성되는 모든 불평형에 신호에 민감한 토크 신호를 스펙트럼 분석하여 베어링 고장 진단하였다.

베어링 고장 진단 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 베어링의 외륜과 내륜에 대한 고장진단을 하였다. 고장 주파수 대역의 진폭 크기 비교를 하여 문턱 값 설정을 하기 위해 정상 베어링과 고장 베어링을 각각 실험하였다. 부하별 변동하는 베어링 고장에 대한 특징 주파수 대역을 추적하기 위하여 먼저 속도를 추정하여 검출 대역을 먼저 지정하였고, 정상 전동기와 비교 실험을 통하여 설정한 문턱 값 이상으로 진폭이 3회 이상 발생하면 고장으로 판별하도록 하였다.

따라서, 실험을 통하여 전동기 속도가 증가 할 수 록 베어링 고장 진단 주파수는 왼쪽으로 이동하는 것을 알 수 있었으며, 진폭 또한 증가하는 것을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 검출 범위 지정 및 초기 문턱 값 설정을 통하여 부하에 따라 변동하는 베어링 고장의 진폭 신호를 감지 할 수 있어 토크신호 스펙트럼 분석을 이용한 고장진단 알고리즘이 타당하다는 것을 제시하였으며, 이를 이용하여 자동고장 진단 시스템을 개발할 수 있어 전동기 운전 중 실시간으로 베어링 상태를 진단할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정재천, 양보석, 송명현, “전원 신호 분석 기술에 의한 회전기 기 진단, 인터비전, 2008년
- [2] W. J. Staszewski, G. R. Tomlinson, 1994, “Application of the Wavelet Transform to Fault Detection in a Spur Gear,”Mechanical Systems and Signal Processing”, Vol 8, No.3, pp. 289-307
- [3] J. Lin, L. Qu, 2000, “Feature Extraction Based on Morlet Wavelet and Its Application For Mechanical Fault Diagnosis,”Journal of Sound and Vibration, Vol. 234, No. 1, pp. 135-148.
- [4] 김진수, “진동 신호처리에 의한 베어링 고장진단”, 성균관대학교 대학원, 석사학위 논문. 2005.
- [5] W. J. Wang, 2001, “Wavelets for Detecting Mechanical Faults with High Sensitivity,”Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.15, No.4, pp. 685-696.
- [6] 홍영희, “원자력발전소 격납용기 냉각 팬 구동용 유도전동기의 운전 중 전류 및 토크 분석을 통한 고장진단 연구”, 충남대학교 대학원 석사학위 논문, 2009.
- [7] Toshiyuki Kanmachi and Isao Takahashi, “Sensorless speed control of an induction motor with no influence of secondary resistance variation”, IEEE IAS Annual Meeting conference record, pp 408-413, 1993.