

고압전동기용 진동 감시 시스템의 계수 추출기법 성능 분석

박정철*, 이달호**

The Performance Analysis of the Parameter Extracting Technique for the Vibration Monitoring System in High Voltage Motor

Jung-Cheul Park*, Dal-Ho Lee**

요약 본 논문에서는 회전체의 특징 파라미터들을 추출하기 위한 센서의 신호들을 수집하여 추출기법의 성능을 분석하고자 한다. 이를 위해, 모형 시험을 수행하기 위한 진동 테스트 리그를 개발하여 정상적으로 운전하에서의 신호특성을 분석하였다. 그 결과, 가속도 센서에서 측정된 불평형 질량에 따른 가속도 센서에서 측정된 원 데이터 진폭의 변화는 나타나지 않는 것으로 판단된다. FFT를 수행하여 불평형량이 증가함에 따라 회전 주파수인 20Hz의 진폭이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 속도 센서의 불평형량 변화에 따른 분석결과도 가속도 센서와 같이 1X 하모닉 성분이 크게 증가하였다. 정렬불량의 변화시 가속도 센서 데이터에는 특별한 진폭의 변화가 없었으며, Envelope 데이터의 경우 2X(40Hz)의 진폭이 정렬불량의 정도에 따라 증가되었다. 정렬불량의 변화시 속도 센서도 가속도 센서와 유사한 결과를 보였으며 주파수 스펙트럼에서 부하의 증가에 따라 600Hz에서 피크가 감소되었다.

Abstract In this paper, the signals of the sensor for extracting characteristic parameters of the rotor are collected and the performance of the extraction technique is analyzed. To this end, a vibration test league was developed for conducting model tests to analyze the signal characteristics under normal operation. As a result, it is judged that no change in the measured the raw data amplitude will occur in the acceleration sensor with the unbalanced mass measured from the acceleration sensor. Performing FFT showed a significant increase in amplitude of the rotational frequency of 20 Hz as the unbalanced mass increased. The analysis results according to the change in the unequal mass of the speed sensor also showed a significant increase in the 1X Harmonics component, such as the acceleration sensor. There was no change in the amplitude of the acceleration sensor data when the misalignment occurred, and for the Envelope data, the amplitude of 2X (40 Hz) was increased depending on the degree of misalignment. The velocity sensor at change of misalignment also showed similar results to the acceleration sensor, and the peak was reduced at 600 Hz as the load increased in the frequency spectrum.

Key Words : acceleration sensor, FFT, raw data, speed sensor, unbalanced mass, vibration test rig

1. 서론

일반적으로 고압전동기는 소음, 진동, 절연열화 등과 같은 장애가 발생되어 전동기의 결함상태 및 유

지관리가 매우 중요하다. 고압 전동기의 진동감시설비는 발전설비의 대형화 및 경년 노후화에 대한 설비 성능 및 신뢰도 운전을 위한 필수적 요소 기술 중 하나이다[1-4]. 국내 발전소의 고압 전동기 진동감시설

** Department of Electronic Engineering, Gachon University

* Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Gachon University (jcpark@gachon.ac.kr)

Received September 18, 2019

Revised October 28, 2019

Accepted October 28, 2019

비는 거의 모두가 외산 제품이 사용되고 있으며, 주로 GE Bently Nevada, VIBRO-Meter사 등의 제품이다. 현재 발전소의 진동감시설비는 주로 터빈과 발전기의 진동을 변위센서 중심으로 감시하는 시스템과 전동기 및 펌프 등의 진동을 가속도센서 중심으로 감시하는 시스템으로 구분할 수 있다.

본 논문에서는 고압 전동기에서 발생하는 진동을 감시 및 분석하여 이상 유무를 파악할 수 있는 전용 진동감시 시스템을 연구하여 이의 국산화에 기여하고자 한다. 또한 고장 원인을 분석하고, 수명 시기를 예측하는 기능을 추가하여 시스템을 보다 효율적으로 운영하는 방안을 제시하고자 한다[5-7]. 진동 감시뿐만 아니라, 고압전동기의 온도, 전류감시 및 분석을 통해 전동기의 결함을 온도, 전기적, 기계적으로 세분화하여 분석 진단한다. 그리고 고압 전동기의 진동 특성을 나타낼 수 있는 상태진단 알고리즘을 개발시 고려되어야 할 다양한 결함을 고려하여 개발 데이터 수집 장치를 검증한다.

2 실험방법

그림 1은 본 논문에 사용된 진동테스트 리그이다. 진동 테스트 리그는 모터, RPM 센서, 불평형 로터, 결함 베어링, 기어박스, 부하 조절장치, Powder Brake, 다이얼 게이지, 모터 등으로 구성되어 있으며, 신호검출을 위한 가속도 센서, 변위 센서, 온도 센서, 속도 센서, Tachometer, Microphone을 진동 테스트 리그에 장착하였다. 결함 유형에 따른 신호 특성을 분석하기 위하여 시간영역 분석, 주파수 영역 분석 등을 수행하였고, 분석 결과로부터 상태진단 알고리즘에 적용할 특징 파라미터를 선정하였다 [8]. 그림 2에 신호처리 모듈 구성도를 나타내었다. TI C6657 DSP 코어를 통합한 이 모듈은 1.25GHz 코어 속도로 동작을 한다. C6657 코어는 사이클 당 8 개의 단 정밀도 부동 소수점 MAC 연산을 실행할 수 있으며 이중 및 혼합 정밀도 연산을 수행 할 수 있으며 IEEE 754를 준수하도록 제작하였다.



그림 1. 진동 테스트 리그
Fig. 1. Vibration test rig

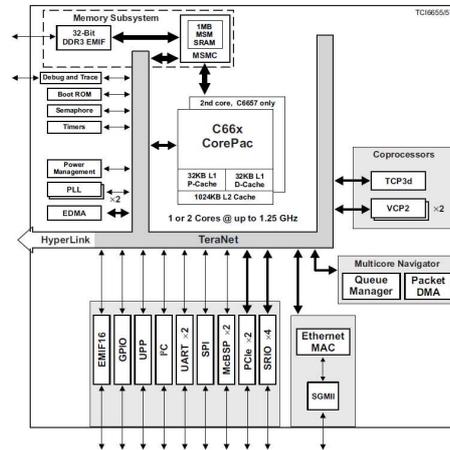


그림 2 DSP Core 모듈 시스템
Fig. 2. DSP Core Module system

주파수 스펙트럼 분석기법으로 푸리에변환을 적용하여 진동을 분석하였다[9]. 푸리에변환은 비주기적, 주기적인 신호의 주파수 특성 분석에 적용되며, 주기적인 이산신호 분석을 위해 다음과 같은 식의 푸리에급수를 사용한다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\Omega n} \quad (1)$$

$$\Omega = \frac{2\pi k}{N} \quad (2)$$

여기서 $x(n)$ 과 N 은 이산데이터 값과 한 주기 당 데이터 개수를 나타낸다.

다른 진동 요소들로부터 주기적인 충격에 의해 발생하는 진동 성분을 추출하기 위해 포락 신호처리 기법이 사용된다[10]. 본 논문에서는 포락 신호처리를 위해 연속신호 $x(t)$ 의 힐버트 변환쌍 $\bar{x}(t)$ 를 식

(3)을 이용하였으며, $x(t)$ 와 식 (3)의 $\bar{x}(t)$ 를 결합하여 식 (4)와 같은 해석신호(analytical signal) $Z(t)$ 를 생성하였다. 이로부터 포락값 $A(t) = \sqrt{x^2(t) + \bar{x}^2(t)}$ 와 신호의 위상 $\Phi(t) = \tan^{-1}[\bar{x}(t)/x(t)]$ 를 구할 수 있다.

$$Hx(t) = \bar{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3)$$

$$Z(t) = x(t) + j\bar{x}(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad (4)$$

3. 결과분석

본 진동 테스트 리그에는 축에 추를 장착하여 불평형 결함을 유발할 수 있도록 제작하였다. 질량 불평형 진동은 회전기계의 축 중심이 무게 중심과 일치하지 않아 발생하는 현상이며, 회전기계의 진동 원인 중 가장 많은 부분을 차지한다. 발생 원인에는 제작상 문제뿐만 아니라 열팽창 차에 의한 불균일 변형, 고정자 및 회전자의 접촉에 의한 굽힘, 회전체 마모 및 부식 등이 있다. 질량 불평형 조건을 만들기 위해 총 3가지의 질량시편(15g, 30g, 50g)을 준비하였으며, 질량시편은 축의 중심으로부터 반경방향 73mm 지점의 디스크 홀에 부착하였다. 질량 시편은 볼트와 너트의 조합으로 장착하였다. 그림 3은 1200rpm에서 시험 베어링 하우스 측면에 부착된 가속도 센서에서 측정된 불평형 질량에 따른 원 데이터의 변화를 나타내고 있다. 불평형 질량 변화에 따른 특별한 진폭의 변화는 나타나지 않는 것으로 판단된다. 그림 4에서는 불평형량 변화에 따른 FFT 그래프를 나타냈다. 1200rpm의 회전 주파수인 20Hz가 불평형량이 증가함에 따라 진폭이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 불평형량이 50g인 경우는 타 주파수 성분에 비해 상대적으로 크게 약 0.4g 이상으로 증가한 것을 확인할 수 있었다. 그림 5에서는 포락선 변환을 통한 주파수 스펙트럼을 나타냈다. 주파수 신호가 작고 분석이 어려울 정도로 하노믹이 많이 생성됨을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 저주파성분이 크며 고주파수에는 노이즈 성분만 남아 있는 것으로 판단된다.

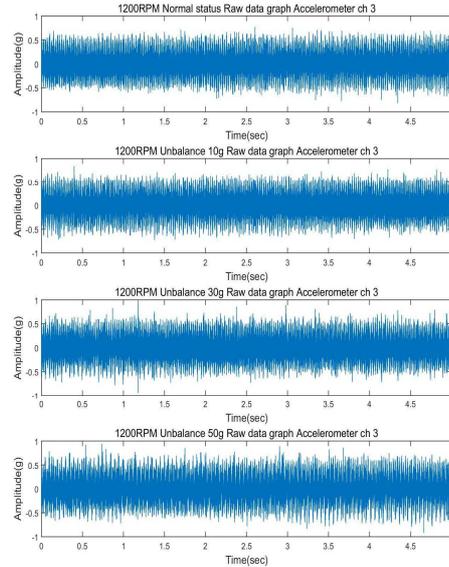


그림 3. 가속도 센서의 원 데이터
Fig. 3. Raw data of acceleration sensor

그림 6과 그림 7은 속도 센서의 불평형량 변화에 따른 원 데이터 그래프 및 FFT 그래프를 나타냈다.

속도 원 데이터와 FFT 데이터에서는 가속도 그래프와 같이 1X 하모닉 성분이 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 속도 센서의 성향에 따라 가속도 센서에 비해 더욱 도드라지게 1X 성분이 변화하는 것이 나타났다. 그림 8에서 1X 하모닉 성분(20Hz)이 불평형량 변화에 따라서 크게 증가함을 확인할 수 있다. 이는 기계 진동 특성 분석의 사례와 동일하게 1X 하모닉 성분이 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 X, Y방향으로 설치된 두 변위 센서를 이용하여 XY 그래프를 그렸으며, 샤프트의 회전 반경을 나타내고 있다. 두 변위 센서의 원 그래프를 보면, 회전속도가 증가함에 따라 회전성분의 신호가 크게 나타나고 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 변위 센서는 노이즈를 제외하면 회전속도 하모닉 성분인 1X 성분에만 반응하는 것으로 분석된다.

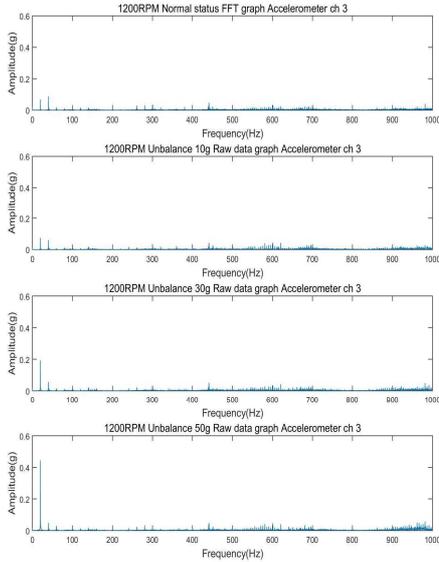


그림 4. 가속도 센서의 FFT 데이터
Fig. 4. FFT data of acceleration sensor

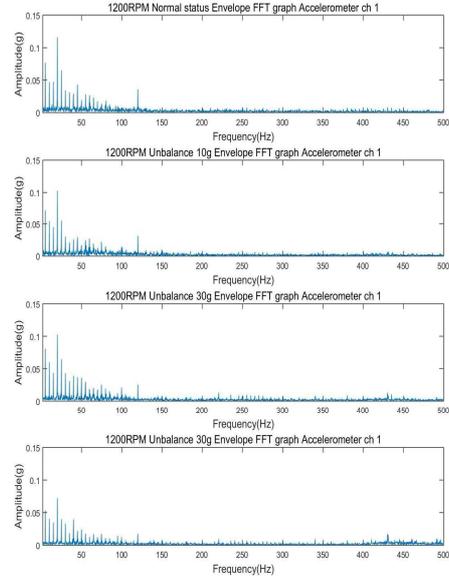


그림 5. 가속도 센서의 Envelope FFT 데이터
Fig. 5. Envelope FFT data of acceleration sensor

정렬 불량을 야기하는 주요 원인으로는 제작 불량과 조립 불량 및 축 굽힘 결함 등이 대표적이다. 정렬 불량 유형은 두 축의 연결 상태에 따라 편심 정렬불량, 편각 정렬 불량, 그리고 편심과 편각이 동시에 작용하는 복합 정렬 불량이 있다.

정렬 불량은 2개 이상의 회전축이 커플링 등으로 연결된 상태에서 상호간의 축 중심선이 동일 선상에 있지 않아 발생하는 현상이며, 불평형과 함께 기계적인 진동 발생의 주요 원인으로 알려져 있다.

본 논문에서는 편심 정렬 불량을 고려하였다. 실험 베어링이 정렬 불량에 의해 부하를 받을 수 있도록 시스템 베어링 하우징을 볼트로 미는 방식을 사용하여 조절하였다. 조절은 다이얼게이지를 사용하여 3가지 조건(0.2mm, 0.5mm, 1mm)로 시험을 수행하였다.

그림 9~11은 1200rpm인 경우 정렬 불량량의 변화에 따라서 시험 베어링 하우징 측면에 부착된 단축 가속도 센서의 측정 신호를 나타냈다. 그림 9는 원 데이터의 변화를 나타낸 것으로 정렬 불량량의 정도에 따른 특별한 진폭의 변화는 나타나지 않는다. 그림 10은 FFT 데이터의 변화를 나타낸 것으로 이론상 정렬불량의 정도가 클수록 1X 및 2X 하모닉 성분이 증가하는 경향을 보여야 하나 큰 특징 변화가 없음을 확인하였다. 그림 11은 Envelope 분석을 통한 스펙트럼을 나타낸 것으로 2X(40Hz)의 진폭이 정렬불량의 정도에 따라 증가함을 나타내고 있다. 이는 정렬불량의 정도가 작아서 고주파수에서 특징이 나타나고 있음을 유추할 수 있다.

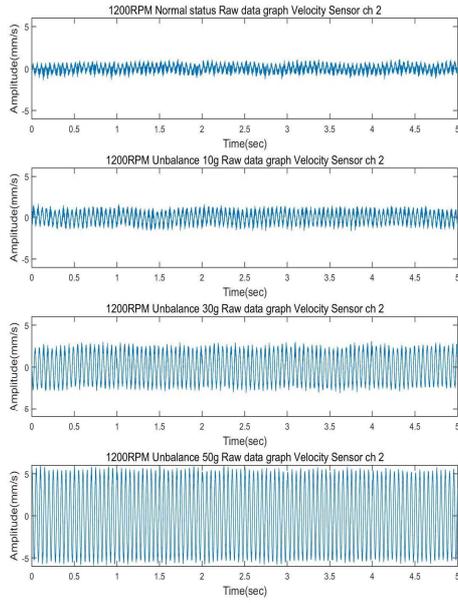


그림 6. 속도 센서의 원 데이터
Fig. 6. Raw data of speed sensor

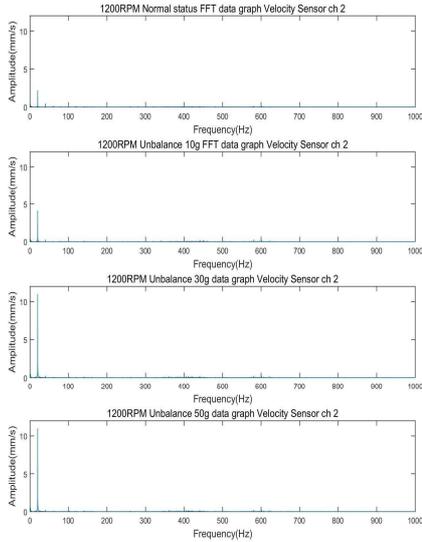


그림 7. 속도 센서의 FFT 데이터
Fig. 7. FFT data of speed sensor

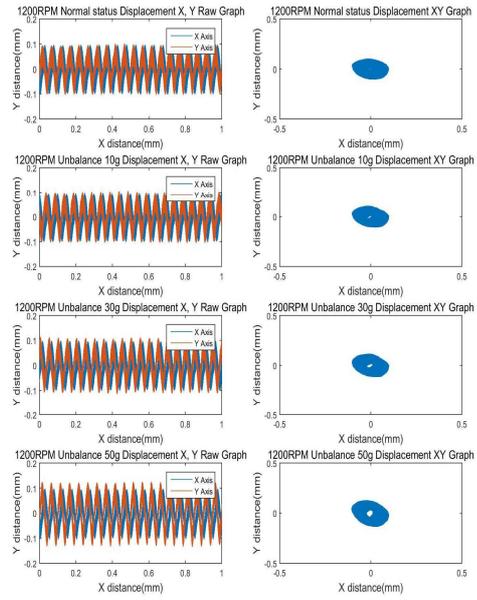


Fig. 8. 변위 센서 XY 그래프
Fig. 8. XY graph of displacement sensor

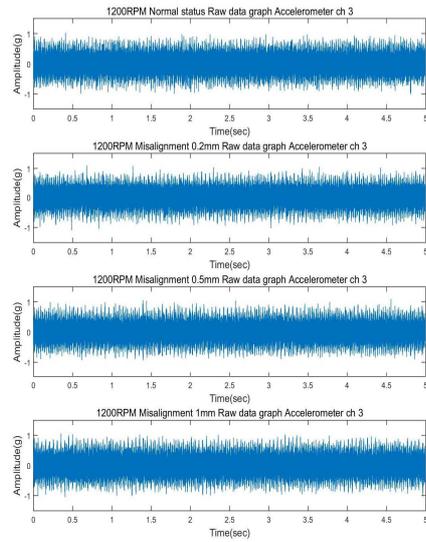


그림 9. 가속도 센서 원 데이터
Fig. 9. Raw data of acceleration sensor

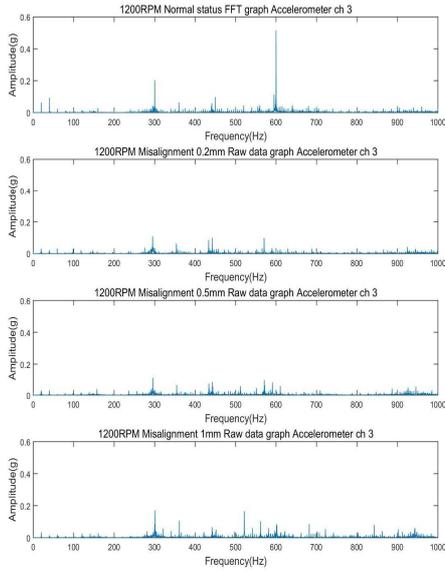


그림 10. 가속도 센서 FFT data 그래프
Fig. 10. FFT data graph of acceleration sensor

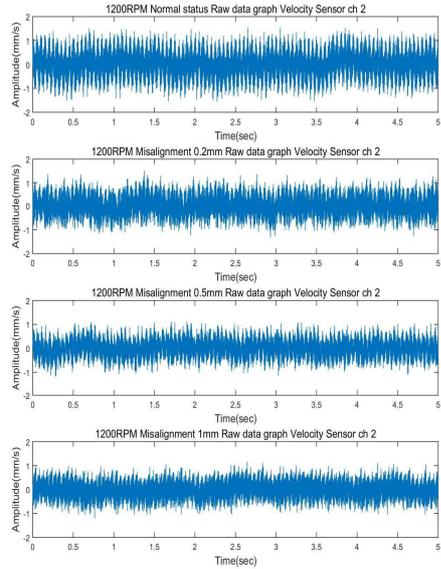


그림 12. 속도 센서의 원 데이터
Fig. 12. Raw data of speed sensor

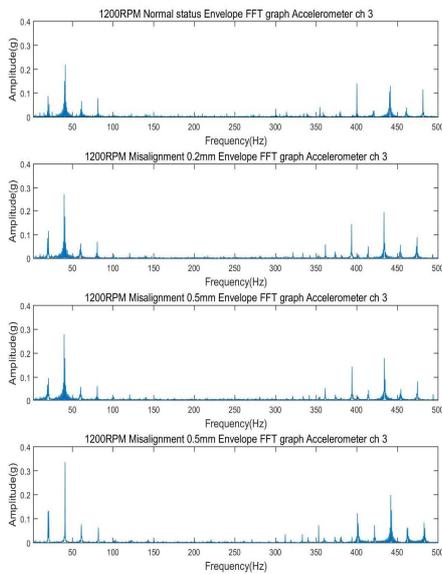


그림 11. 가속도 센서의 Envelope FFT 데이터
Fig. 11. Envelope FFT data of acceleration sensor

그림 12는 속도 센서에서 측정된 원 데이터 그래프를 나타낸 것으로 부하에 따른 신호 크기의 변화는 없는 것으로 확인되었다. 그림 13에는 FFT 데이터의 변화를 나타낸 것으로 이론상 정렬 불량량의 정도가 크에 따라 1X 및 2X 하모닉 성분이 증가하는 경향을 보여야 하나 큰 특징 변화가 없음을 나타내고 있다. 또한 속도 신호의 주파수 스펙트럼에서도 가속도 주파수 분석 결과와 유사하게 부하의 증가에 따라 600Hz에서 피크가 발생함을 보이고 있다. 이는 기어박스에 있는 기어 주파수가 전달되는 것으로 베어링-기어박스-파우더 브레이크로 구성되어 있는 구조상 부하가 증가할수록 기어박스에 부하가 가장 크게 가해지기 때문에 이와 같은 신호가 측정되는 것으로 판단된다. 그림 14는 X, Y방향으로 설치된 두 변위 센서를 이용하여 XY 그래프를 그렸으며, 샤프트의 회전 반경을 나타내고 있다.

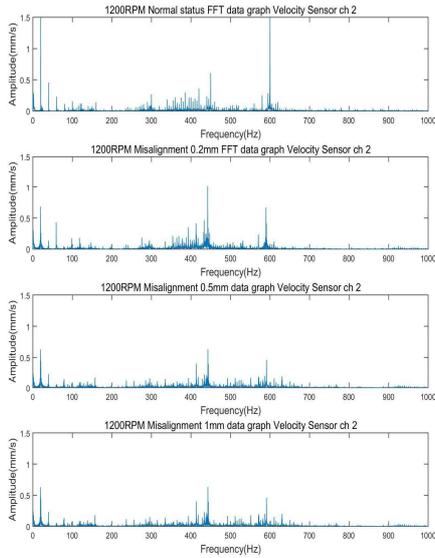


그림 13. 속도 센서의 FFT data
Fig. 13. FFT data of speed sensor

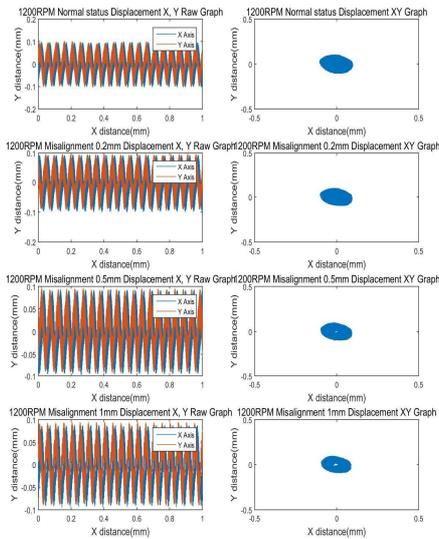


그림 14. 변위 센서의 XY 그래프
Fig. 14. XY graph of displacement sensor

두 변위 센서의 원 데이터 그래프를 보면, 회전 속도가 증가함에 따라 회전성분의 신호가 크게 나타나고 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 변위 센서

는 노이즈를 제외하면 회전속도 하모닉 성분인 1X 성분에만 반응하는 것으로 분석된다.

4. 결론

본 논문에서는 회전체의 각종 결함 유형에 따른 지능형 결함 진단을 위하여 회전체 진단 알고리즘에 기기 상태 변화 정보를 제공하는 상태진단 알고리즘의 연산결과인 특징 파라미터들이 필요하다. 이를 위하여, 모형 시험을 수행하기 위한 진동 테스트 리그를 개발하였으며, 정상적인 운전상태에서의 신호특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

불평형 질량에 따른 가속도 센서에서 측정된 원 데이터 진폭의 변화는 나타나지 않는 것으로 판단된다. FFT 결과, 회전 주파수인 20Hz가 불평형량이 증가함에 따라 진폭이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 주파수 스펙트럼 분석에서는 낮은 주파수에서 분석이 어려울 정도로 하모닉이 많이 생성되었다. 속도 센서의 불평형량 변화에 따른 분석결과도 가속도 센서와 같이 1X 하모닉 성분이 크게 증가하였다. 정렬불량의 변화시 가속도 센서 데이터에는 특별한 진폭의 변화가 없었으며, Envelope 데이터의 경우 2X(40Hz)의 진폭이 정렬불량의 정도에 따라 증가되었다. 정렬불량의 변화시 속도 센서도 가속도 센서와 유사한 결과를 보였으며 주파수 스펙트럼에서 부하의 증가에 따라 600Hz에서 피크가 감소되었다.

결함 분석을 위하여 시간영역 분석, 주파수 영역 분석, 및 포락선 분석 등의 기법을 통하여 데이터를 수집하여야 하나 현실적으로 데이터 분석량의 과다 및 전송 속도 한계 등의 이유로 다른 방법으로 특징 파라미터를 추출하여야 한다. 본 논문에서 제시한 실험 결과를 통하여 본 연구에서 제안한 알고리즘이 비교적 정확하게 신호를 분석함을 알 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 비정상적인 동작상태에서 추출된 신호의 분석으로부터 고장진단이 가능할 것이다.

REFERENCES

[1] J.S.Kang, "Development of EMD- based Fault Diagnosis System for Induction Motor", Trans, korean Soc. Noise Vib.Eng., Vol.24, No.9, pp.675 ~ 681, 2014

[2] S.S.Lee, S.J.Cho and U.P.Chon, "Fault Diagnosis System of Rotating Machines Using LPC Residual Signal Energy", Journal of the Institute of Signal Processing and System, Vol.6, No.3, pp.143~147,2005

[3] S.S.Son, "A Study on Improving High-Power Induction Motor Starting", JKIIECT, Vol.9, No.2 pp.178~184,2016

[4] L.Hwang, H.La S. K, Y.B.Kim, "A Study on Drive in Extending Break Power of The PMSM using series Resistor", JKIIECT, Vol.3.No1 pp.127~135,2012

[5] Muller,G.H. and Landdy,C.F., "A Volvel Method to Detect Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors when Interbar Currents are Persent", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18. No. 1, pp.7179,2003

[6] Dorrell,D.G.,Thomson, W.T. and Roach, S., "Analysis of Airgap Flux,current and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Airgap Eccentricity in 3-phase Induction Motors", IEEE Transactions on Indstry Applications, Vol.33, No. 1, pp.24~34,1997

[7] S.,H.Chong, K.T. and Kum,Ar, R,Ravi, "Vibration Signal Analysis for Electrical Fault Dectection of Induction Machine Using Neural Networks," Neural Computing & Applications, Vol.20, No.2, pp.183~194,2011

[8] D.H.Lee, J.C.Park, "Development of the Extracting Technique of the Character Parameter for the Vibration Monitoring System in High Voltage Motor", Journal of Korea Information Electron Communication

Technology, Vol.12, No.4, pp.349~358, 2019

[9] J.H.Han, J.H.Song, K.H. Choi, "Dagmosis of Induction Motor Faults Using Inverter Input Current Analysis", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.17, No.7, pp. 492~498,2016

[10] B.Xu,L.Sun,L.Xu, and G.Xu, "Improve- ment of the Hilbert method vis ESPRIT for detecting rotor fault in induction motors at low slip", IEEE Trans. Energy Convers, Vol.28. No.1, pp.225 ~233, 2013

저자약력

이 달 호(Dal-Ho Lee)

[정회원]



- 1982년 서울대학교 제어계측공학과 공학사
- 1985년 서울대학교 제어계측공학과 공학석사
- 1992년 서울대학교 제어계측공학과 공학박사
- 1992년~현재 가천대학교 전자공학과 교수

관심분야

시스템 식별, 필터링 기법, INS 응용, Data Hiding

박 정 철(Jung-Cheul Park)

[정회원]



- 1983년 명지대학교 전자공학과 공학사
- 1992년 명지대학교 전자공학과 공학석사
- 2000년 명지대학교 전자공학과 공학박사
- 2007년~현재 가천대학교 전자공학과 교수

관심분야

신재생에너지