

자속 센서를 이용한 능형 유도전동기의 진동검출 기법

황 돈 하, 이 상 화, 한 상 보, 선 종 호, 강 동 식
한국전기연구원 전력설비진단연구그룹

A Method for Vibration Detection of Squirrel Cage Induction Motors Using the Flux Sensor

Don-Ha Hwang, Sang-Hwa Lee, Sang-Bo Han, Jong-Ho Sun, Dong-Sik Kang
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

Abstract - This paper proposes an alternative vibration detection method in a squirrel-cage induction motor using flux sensors. The air-gap flux will be changed when mechanical vibration occurs by bearing fault as well as broken rotor bar and air-gap eccentricity. For detecting those flux variations due to vibration, search coils are installed at stator slots. The induction motor with 380 [V], 7.5 [kW], 4 [Poles], 1,760 [rpm] ratings is used. Magnitudes and distortion of the induced voltage from flux sensors are used to discriminate faulted types. As a result, the flux sensor has been proven to be useful for vibration detection. It is compared to the result with vibration sensor as well.

1. 서 론

유도전동기가 산업전반의 핵심적인 동력전달원으로 가장 많이 사용됨으로서, 전동기 소손으로 인한 설비의 불시적인 고장이 점차 증가하고 있다. 유도전동기의 예기치 않은 고장은 생산공정의 중단을 야기시켜 생산량 및 품질 저하, 전동기의 수명단축, 유지보수를 위한 추가적인 손실, 중요 설비의 동력전달 불가능 등의 치명적 상황을 초래할 수 있다[1][2]. 유도전동기의 고장원인으로는 진동을 수반하는 베어링 소손, 회전자 편심, 회전자 바(Bar) 등의 고장이 대부분을 차지하고, 이러한 현상은 또한 Air-gap의 편심에 의한 진동을 유발하게 된다. 따라서 연속적이고 안정된 동력 공급을 위해서는 진동현상 발생시 조기에 판별하고 대처할 수 있는 신속하고 신뢰성 높은 진동감시 시스템이 필요하다[1-4].

본 논문에서는 유도전동기의 진동감시 시스템 개발을 위해서, 가격이 비싸고 부수적인 장치가 요구되는 진류 및 진동 센서를 사용하지 않고, 자속 센서를 이용한 새로운 진동검출 기법을 제안한다. 회전자의 진동이 발생하면 공극 자속밀도가 변하는 원리를 이용하여, 고정자 슬롯 내에 자속센서를 취부하여 회전자의 자속변화를 모니터링 함으로서 전동기의 고장 및 진동 등의 이상상태를 사전에 감지할 수 있게 된다.

3상 4극, 380 [V], 3.7 [kW], 1,760 [rpm] 정격의 능형 유도전동기로 제작한 고정모의 시뮬레이터를 이용하여, 베어링 및 회전자 바 소손, 회전자 공극편심 등의 이상상태에 따라서 자속 센서로 측정된 공극자속에 의한 전압파형의 왜곡과 크기를 분석하여 진동정도 및 고장원인을 판별할 수 있는 방법을 제안한다. 또한, 진동 센서에 의한 실험결과와 상호 비교를 통하여 자속센서를 이용하여 유도전동기의 진동상태를 충분히 검출할 수 있음을 증명한다.

2. 유도전동기의 사양 및 실험장치

2.1 유도전동기의 사양

본 연구에서 실험과 고정모의를 위해 사용된 유도전동기의 제원을 표 1에 나타내었다. 3상 7.5 [kW]의 범용 유도전동기를 사용하였으며 회전자는 능형, 알루미늄 다이캐스팅 구조로 적층길이는 110 [mm], 고정자 슬롯수는 36개이다.

〈표 1〉 유도전동기의 제원

| 구 분 | 항 목 | 사 양 |
|-----|-------------|---------|
| 사 양 | 정격 출력 [kW] | 7.5 |
| | 정격 전압 [V] | 220/380 |
| | 정격 속도 [rpm] | 1760 |
| | 정격 토크 [Nm] | 40 |
| 고정자 | 슬롯 수 | 36 |
| | 외 경 [mm] | 220 |
| | 내 경 [mm] | 150 |
| | 극 수 | 4 |
| 회전자 | 공 극 [mm] | 0.5 |
| | 외 경 [mm] | 149 |
| | 적층길이 [mm] | 110 |
| | 회전자 바 재질 | Al |

2.2 공극 자속 측정 센서

유도전동기의 운전중에 회전자 각 슬롯에서의 자속변화를 측정하기 위하여 서치코일 형태의 자속감지 센서를 제작하여 고정자 슬롯 외측에 설치하였다. 자속센서는 취부가 간편하도록 한 슬롯을 주회하는 형태의 PCB로 제작하였고, 모든 전동기의 동일한 위치에 취부함으로써 정밀도를 높일 수 있도록 하였다.

그림 1은 실제 제작한 자속센서를 나타내고, 턴수는 7턴이며 저항은 2.9 [Ω]이다. 그림 2는 전동기 슬롯에 자속센서가 삽입된 형태를 나타내고, 전동기의 각상별(U, V, W) 최초 입력슬롯 및 U상의 180도 맞은편 슬롯에 1개를 삽입하여 총 4개를 취부하였다.

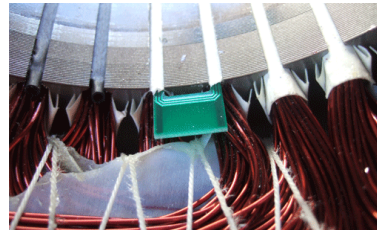
서치코일에 유기되는 유기전압은 식 (1)과 같이 Faraday의 전자유도 법칙에 의해 권선수와 자속의 합수로 나타낸다. 자속센서에서 유기되는 전압파형은 권선 각 슬롯의 누설자속 분포를 나타내며, 회전자 바의 소손, 공극의 불평형, 권선의 열화로 인한 선간 또는 상간 단락에 따라 슬롯에서 유기되는 전압파형의 크기가 다르게 나타나므로 측정된 파형 분석을 통하여 고장의 원인을 판별할 수 있다.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} [V] \quad (1)$$

여기서, e =자속센서의 유기기전력, N =센서의 코일 턴수, Φ =자속, t =시간을 나타낸다.



〈그림 1〉 자속센서의 형상



〈그림 2〉 고정자 슬롯에 취부된 자속센서

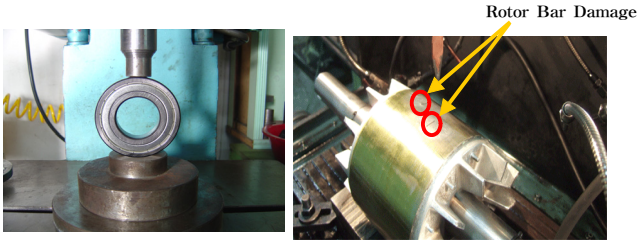
2.3 고정모의 시뮬레이터

유도전동기에 사용되는 베어링은 오랜 사용으로 전동체와 궤도륵과 접촉부분에 진동과 요동에 의한 마모가 진행되면 압흔을 생성시키는 데, 이를 폴스 브리넬링(False Brinelling)이라 한다. 본 연구에서는 이와 같은 베어링 소손을 모의하기 위해 그림 3과 같이 베어링의 외부에서 압력을 가하여 베어링 자체에 충격을 주는 방법으로 False Brinelling 현상을 모의하였다.

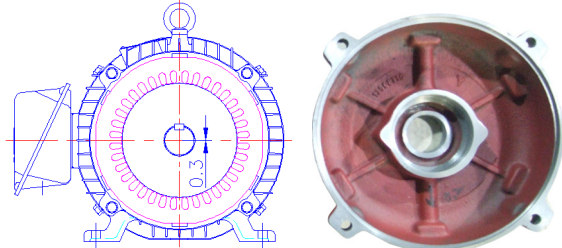
그림 4는 유도전동기 회전자의 Broken Bar를 고정모의한 실제 사진을 나타낸 것으로서, 회전자의 총 슬롯 28개 중에서 이웃한 2개의 회전자 바에 손상을 주어 고장을 모의하였다. 고장상태는 회전자 Bar의 적정 부위에 깊이 20 [mm], 폭 6 [mm]로 하여 1 [mm]의 갭을 주어 양쪽의 Bar가 전기적으로 단절되도록 제작하였다.

그림 5는 회전자 동적 편심 고장을 모의한 전동기 도면과 가공된 커버를 나타내고 있다. 전동기 앞뒤 커버의 위치를 이동할 수 있도록 제작하여 회전 중심의 이동을 가져오게 하였고, 3차원 계측기로 동심도를 측정된 결과 0.28 [mm]로 편심이 됨을 확인하였다.

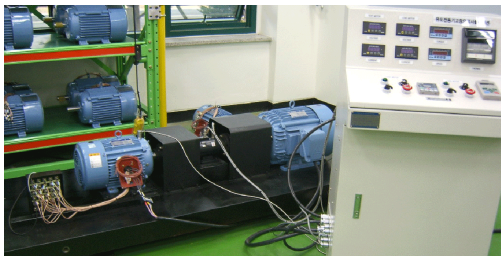
그림 6은 정상모델과 고정모의 유도전동기의 특성시험 및 각종 센서 신호의 검출실험을 위해 제작한 고정모의 시뮬레이터를 나타내고 있다. 고정모의 전동기와 구동 인버터, 부하 전동기와 구동 인버터 및 2개 전동기를 기계적으로 연결하는 커플링 부분과 토크센서 등으로 구성하였다[5].



〈그림 3〉 베어링 고장모의 〈그림 4〉 Rotor Broken Bar 고장모의



〈그림 5〉 회전자 동적편심 고장모의 (Unbalanced Rotor)



〈그림 6〉 유도전동기의 고장모의 시뮬레이터

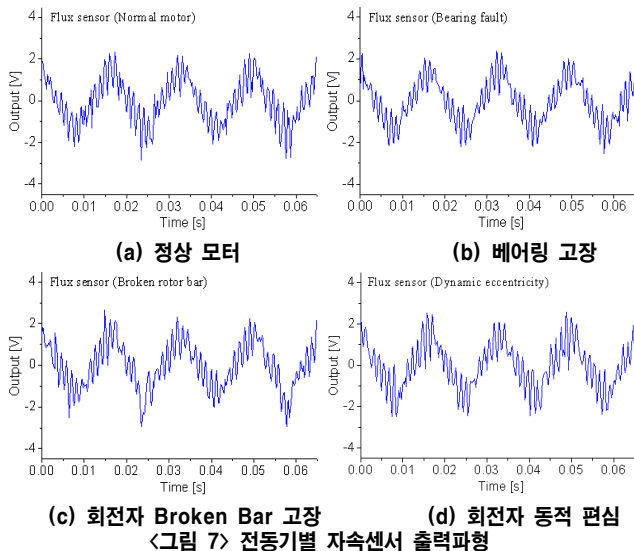
3. 실험결과 및 검토

그림 7은 정상 전동기와 고장모의 전동기의 A상 자속센서에서의 유기전압 측정파형을 나타낸 것이다.

정상 전동기는 일정한 공극 자속밀도로서 대칭성을 유지하므로 자속센서에서의 유기되는 출력파형이 왜곡이 없이 최대치 2.2 [V] 내외의 값을 나타내고 있다. 그러나 베어링 소손 전동기의 경우에는 회전자의 편심에 의해 공극자속의 불균형으로 자속센서에서의 유기전력 파형의 왜곡이 나타나고, 출력전압도 최대치 2 [V] 이하임을 볼 수 있다.

Broken Bar 고장모의 전동기에서는 손상된 회전자 바의 슬롯을 기준으로 좌, 우측 슬롯에 자속밀도의 불균형이 발생하여 자속센서에서의 유기전력이 -3 [V]까지 증가되므로 최대 파고값의 수를 파악함으로써 회전자 바의 손상 위치와 손상된 바의 수를 판단할 수 있다.

또한, 회전자 동적편심 모의 전동기의 유기전압 파형을 보면 2.5 [V] 까지 유기되고, 편심에 따른 비대칭 공극 자속분포로 인해 자기력의 불평등이 발생한 결과로 볼 수 있고, 공극 자속의 측정으로 회전자의 진동을 검출할 수 있음을 나타내고 있다.

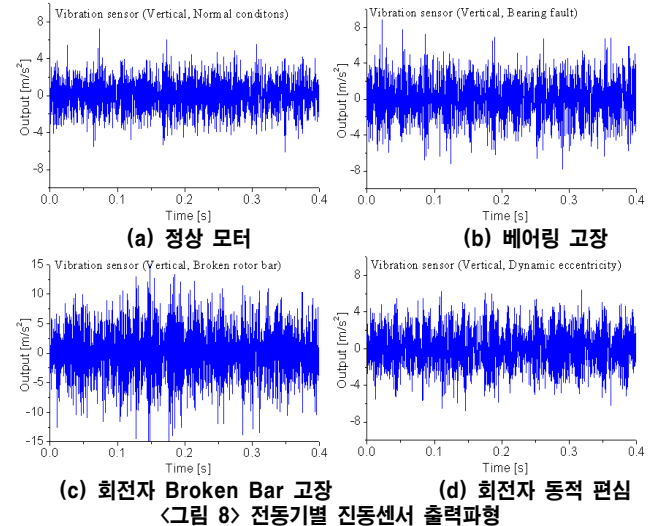


〈그림 7〉 전동기별 자속센서 출력파형

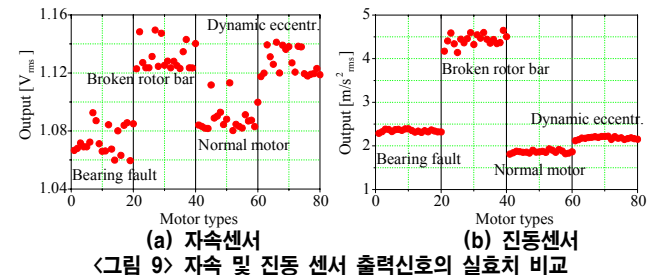
그리고 자속 센서를 이용한 유도전동기의 진동검출 방법의 타당성을 검증하기 위하여 상용 진동센서인 ACS-01 가속도계를 전동기에 취부하여 진동신호를 분석하였다. 그림 8에 나타난 전동기별 진동센서의 출력신호를 보면, 진동센서의 출력파형 자체로서는 구별이 어렵지만, 고장에 따라서 파형의 크기가 상이함을 볼 수 있다.

그림 9는 자속 및 진동 센서를 이용하여 각각의 전동기별로 20회씩 측정된 출력신호의 실효치를 나타낸 것으로서, 진동 센서와 마찬가지로 자속 센서의 출력이 고장 유형별로 실효치가 확실히 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 다만, 자속 센서의 경우에는 전동기별로 측정시점마다 실효값의 편차가 크다는 것을 볼 수 있고, 진동 센서의 실효값은 Broken Rotor Bar를 제외하고는 크기가 비슷해서 고장의 판별이 어려운 것으로 판단된다.

그러므로 고장자 슬롯에 자속 센서를 삽입하여 공극 자속을 측정함으로써 베어링 소손, 회전자 편심 등에 따른 회전자 진동검출이 가능하다는 것을 알 수 있다.



〈그림 8〉 전동기별 진동센서 출력파형



〈그림 9〉 자속 및 진동 센서 출력신호의 실효치 비교

4. 결 론

본 논문에서는 고장자 슬롯에 자속 센서를 취부하여 공극의 자속밀도를 측정함으로써 농형 유도전동기의 고장을 검출할 수 있는 방법을 제안하였고, 베어링 소손, 회전자 Broken Bar 및 동적 편심 등의 고장모의 전동기를 실제 제작하여 실험을 통하여 자속 센서를 이용한 유도전동기의 진동검출이 가능함을 확인하였다. 또한, 진동 센서의 출력신호와 비교하여 본 연구에서 제안한 자속 센서에 의한 진동감시 기법의 타당성을 입증하였다.

향후 유도전동기의 회전자 및 고장자 고장과 관련된 데이터베이스 구축을 통하여 유도전동기의 고장진단 알고리즘 개발과 On-line 모니터링 시스템 개발에 본 논문의 결과가 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, Oxford: Clarendon Press, 1993.
- [2] D.H. Hwang, et al., "A Method for Rotor Vibration Monitoring of Induction Motor by Air-gap Flux Detection", 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference (IEEE-PESC'06), Jeju, Korea, pp. 2794~2798, June 18-22, 2006.
- [3] 황돈하 외, "자속 측정을 통한 유도전동기의 회전자 바 손상 검출기법", 2006년도 KIEE 하계학술대회 논문집(B), pp. 827~828, 2006. 7.
- [4] Subhasis Nandi et al, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors - A Review", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 20, No 4, pp. 719-729, 2005.
- [5] 황돈하 외, "유도전동기 고장모의 시뮬레이터 개발", 2006년도 KIEE EMECS 부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 182~184, 2005. 4. 21