

공극자속 측정에 의한 유도전동기의 회전자 진동 검출기법

(A Method for Rotor Vibration Detection of Induction Motor by Air-gap Flux Measurement)

황 돈 하 · 한 상 보 · 선 종 호 · 강 동 식

(Don-Ha Hwang · Sang-Bo Han · Jong-Ho Sun · Dong-Sik Kang)

한국전기연구원 전력설비진단연구그룹

Abstract

In this paper, a new method for detecting rotor vibrations in a squirrel-cage induction motor is proposed. The air-gap flux variation analysis was done using search coils inserted in stator slots when rotor vibration conditions occurs. An accurate modelling and analysis of air-gap flux variation in the induction motor are developed using finite-element (FE) software packages, and measuring the flux are made using search coils. In the FE analysis and experiment, the three-phase squirrel-gage induction motor with 380 [V], 7.5 [kW], 4 Poles, 1,768 [rpm] ratings is used. The simulation and experiment results can be useful for detecting rotor vibration of the induction motors.

1. 서 론

산업분야에서 유도전동기에 대한 의존도가 높아지면서 전동기의 소손으로 인한 손실도 증가하고 있다. 과거 몇년 동안 이러한 손실을 줄이기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있으나, 아직도 미비한 상태이다. 전동기의 소손은 회전자의 이상으로 발생하는 경우가 대부분이며, 이것은 설계, 제작상의 오류에 의한 원인과 운전중에 발생하는 베어링 마모나 이상운전이 원인인 경우가 많다[1]-[3].

전동기의 진동감시 기법은 전동기의 이상에 따른 빠른 대처로 소손을 미연에 방지하여 경제적인 손실을 줄이는 것을 목적으로 하고 있다. 전동기의 소손에 대한 감시기법으로는 공극의 자속감시나 온도측정, 회전자 속도측정, 진동측정, 전류파형 측정 등에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. 그중에서 가장 많은 관심을 보였던 전류파형 감시 시스템은 여러 가지의 부수적인 장치들이 필수적으로 요구된다[1][2].

또한, 전동기의 고장감시 시스템은 다양한 형태의 고장으로부터 원인별 대응능력까지 신속하게 진단하여 빠른 시간 내에 교체나 수리가 이루어져야 한다. 이를 위해서 고장원인별 데이터베이스 확보가 필수적이라고 할 수 있다. 최근 들어 마이크로프로세스, 컴퓨터 및 네트워크 기술이 발달됨에 따라 전동기의 고장 원인별 분석이 가능해졌으며, 그에 따른 데이터 축적도 이루어지고 있다. 또한, 산업현장에서는 전동기의 고장감시를 위하여 보다 저렴하고 간편한 방법을 활용하여 전동기

의 상시 운전상태나 고장상태를 감시할 수 있도록 연구되고 있다[1]-[5].

본 연구에서는 유도전동기 회전자의 고장에 따른 감시 및 진단 시스템을 구축하기 위해서, 회전자 편심, Broken Bar 등에 의해 발생하는 진동현상을 검출할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 회전자가 편심 되었거나 Broken Bar가 발생하게 되면 공극 자속밀도가 변하는 원리를 이용하여, 고정자 슬롯 내에 자속센서를 취부하여 회전자의 자속변화를 모니터링 함으로서 진동 및 Bar 이상상태를 사전에 감지할 수 있게 된다.

본 논문에서는 유도전동기의 진동현상을 해석하기 위한 회전자 편심 및 Broken Rotor Bar 상태를 모의한 2차원 유한요소 해석 모델을 제안한다. 또한, 공극의 자속변화를 구하기 위해 고정자 슬롯에 민감도가 높은 자속센서(Search Coil)를 부착하여, 공극에서의 쇄교자속, 공극 자속밀도 등의 해석을 통하여 편심과 Broken Bar 현상에 따른 유도전동기의 특성변화를 분석하였다. 정상상태와 고장상태의 2가지 경우에 대한 유한요소 해석 결과를 비교하였고, 공극에서 회전자 자속에 의한 전압파형의 왜곡을 분석하여 진동정도를 판별할 수 있는 방법을 제안한다.

또한, 고장모의 시뮬레이터를 이용한 실험을 통하여 정상 및 고장모의 전동기의 자속센서 출력파형을 비교하여 해석의 정확성과 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서의 특성해석 및 고장모의 실험에 사용된 전동기는 4극, 380 [V], 3.7 [kW], 1,760 [rpm] 정격의 3상 농형 유도전동기를 대상으로 하였다.

2. 유도전동기의 진동유형

유도전동기의 고장원인으로는 진동을 수반하는 베어링 소손, 회전자 편심, 회전자 바(Bar) 등의 고장이 대부분을 차지하고 있으며, 이러한 현상은 Air-gap의 편심에 의한 진동을 유발하게 된다.

또한, 유도전동기의 진동 발생원인은 크게 기계적인 요인과 전기(자기)적인 원인으로 나눌 수 있는데, 기계적인 진동원인으로는 회전자의 불균형, 조립불량, 축의 임계속도에서 운전, 구조물과 공진, 마찰, 잘못된 설치, 열팽창 등이 있다. 전기(자기)적인 진동원인으로는 극자속(Flux)의 불균형, 회전자의 Broken Bar 등에 의한 것이 주종을 이루고 있다[2][4].

그러나 전동기의 진동은 한가지 원인으로 시작되더라도 고장현상이 복합적으로 나타나는 경우가 많기 때문에, 전동기의 정확한 진동원인을 분석하기 위해서는 다양한 진동유형에 대한 해석과 분석 자료가 축적되어야만 된다. 그 중에서도 유도전동기 회전자 진동의 대표적인 유형인 회전자 편심과 Broken Bar에 의한 전동기의 진동상태 분석이 중요하다.

2.1. 회전자 편심에 의한 진동

유도전동기 진동의 가장 큰 요인인 회전자 불균형에 의한 회전자의 편심(Eccentricity)은 그림 1과 같이 정적 편심(Static eccentricity)과 동적 편심(Dynamic eccentricity)으로 나눌 수 있다. 정적 편심은 회전자가 회전자 축을 중심으로 회전하지만, 그 축이 고정자 축에서 이탈해 있는 경우로서, 공극의 길이가 위치에 따라 초기에 이미 정해져 운전시에도 변하지 않는다. 동적 편심은 회전자가 고정자 축과 동일한 축을 중심으로 회전하지만, 그 회전축이 회전자의 축과 동일하지 않은 경우이며, 전동기 운전시 공극이 수시로 변화하게 된다.

회전자 편심에 의한 진동 발생시 공극의 자속변화는, 정적 편심인 경우에는 위치에 따라 공극의 자속이 다르게 나타나므로 2개 이상의 위치에서 자속을 검출해야 한다. 동적 편심의 경우에는 공극의 자속이 주기성을 가지고 계속 변하게 되므로 1개 지점에서만 자속을 검출해도 충분히 그 원인을 분석할 수 있다.

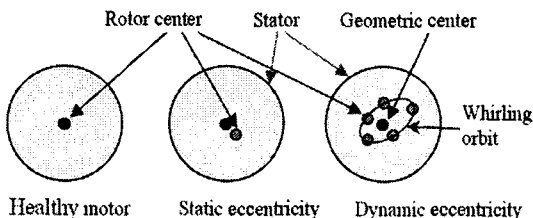


그림 1. 회전자 편심의 유형
Fig. 1. Types of rotor eccentricity

2.2. 회전자 Broken Bar에 의한 진동

유도전동기에 있어 회전자 Bar 손상은 과부하 및 불평형, 스파크나 과도한 손실로 인한 과열로 인해 발생하는 열적 스트레스, 전자기력에 의해 발생하는 자기 스트레스, 샤프트에 걸리는 부하 토크와 원심력에 의해 발생하는 잔류 스트레스, 화학적 작용 및 습기에 의한 회전자 재질의 마모나 오염에 의해 발생하는 환경 스트레스, 적층이 느슨하거나, 국부적 피로, 베어링 소손으로 발생하는 기계적 스트레스로 인해 발생하게 된다. 회전자 바가 부분적인 소손되면 균등하게 놓여진 바에 흐르는 전류가 불균등하게 됨으로서 공극 자속의 변화를 초래하고, 결국에는 회전자의 진동을 발생시키게 된다.

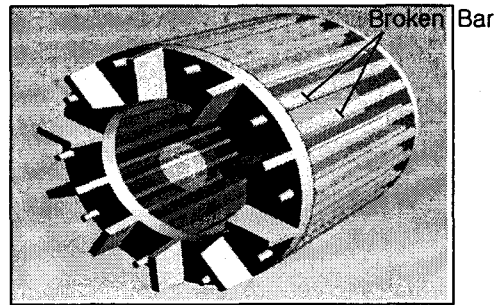


그림 2. 유도전동기 회전자의 구조
Fig. 2. Rotor Structure of the induction motor

유도전동기의 회전자 Broken Bar에 따른 특성을 구하기 위한 연구로서는, 공극의 자속변화 관찰, 온도측정, 회전자의 속도, 진동, 전류파형 분석 등의 방법이 많이 이용되고 있지만, 본 논문에서는 회전자의 정상상태와 Broken Bar 상태일 때 공극자속을 관찰함으로써 특성 변화를 조사하였다. 공극자속의 관측은 고정자의 슬롯에 서치코일을 설치하여 서치코일에 유기되는 전압파형 분석을 통하여 실행하였다.

유도전동기 회전자 Bar의 소손은 제작 불량이나 운전조건에 의한 파손 때문에 발생하며, Bar의 부분적인 소손으로 인하여 균등하게 놓여진 Bar에 흐르는 전류가 불균등하게 됨으로서 공극 자속의 변화를 초래하고, 결국에는 회전자의 진동을 발생시키게 된다.

3. 회전자 편심 및 Broken Bar에 따른 특성해석

3.1. 유한요소 해석 모델

유도전동기의 진동현상을 유발하는 회전자 편심 및 Broken Bar에 따른 자속변화 해석을 위하여 유한요소 해석을 수행하였다.

표 1은 본 논문에서 해석 및 고장 모의를 위한 농형 유도전동기의 제원을 나타내고 있다. 3상 7.5 [kW]의

범용 유도전동기를 사용하였으며 회전자는 농형, 알루미늄 다이캐스팅 구조로 적층길이는 110 [mm], 슬롯수는 28개이다.

그리고 공극 자속 측정을 위해 그림 3과 같이 전동기의 각상별(A, B, C) 최초 입력슬롯에 자속센서로서 서치 코일(Search coil)을 삽입하여 유기전압을 측정하도록 하였다. 서치 코일의 턴수는 7턴이고 저항은 2.5 [Ω]이다.

표 1. 유도전동기의 사양

Table 1. Specification of induction motor

| 구분 | 항목 | 치수 |
|-----|-------------|---------|
| 사양 | 정격 출력 [kW] | 7.5 |
| | 정격 전압 [V] | 220/380 |
| | 정격 속도 [rpm] | 1760 |
| | 정격 토크 [Nm] | 40 |
| 고정자 | 슬롯 수 | 36 |
| | 외경 [mm] | 220 |
| | 내경 [mm] | 150 |
| | 극 수 | 4 |
| 회전자 | 공극 [mm] | 0.5 |
| | 외경 [mm] | 149 |
| | 적층길이 [mm] | 110 |
| | 회전자 바 재질 | Al |

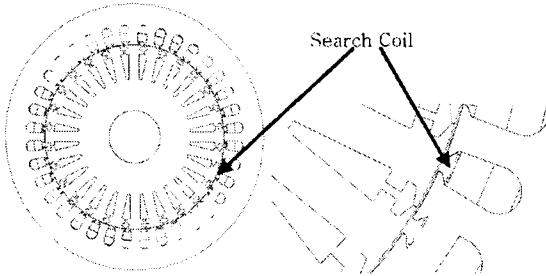


그림 3. 자속센서의 취부

Fig. 3. Attachment of the flux sensor

유한요소 해석에 사용되는 자계 방정식은 2차원 좌표계에서 자기 벡터 포텐셜(Magnetic vector potential)을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{ext} + \sigma \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} - \vec{v} \times \vec{B} - \nabla \phi \right) \quad (1)$$

여기서, A_z 는 z 축 방향 자기 벡터 포텐셜, J_{ext} 는 입력전류 밀도, \vec{v} 는 회전자 속도, ϕ 는 전기 스칼라 포텐셜, σ 는 회전자 바의 전도율을 나타낸다.

본 연구에서는 유한요소 해석 상용 프로그램인 Flux 2D를 이용하여 유도전동기를 삼각형 요소, 시간 스텝으로 모델링 하였다. 공극은 3개의 층(회전자 공극, 회전 공극, 고정자 공극)으로 분할하였으며, 가운데층인 회전 공극(Moving band)에서만 요소를 재분할하는 방법을 사용하여 요소 재분할에 소요되는 시간을 줄였다.

3.2. 유한요소 해석 결과 및 검토

가. 회전자 편심 고장인 경우

유한요소 해석결과에 따른 자속밀도 분포를 그림 4에 나타낸다. 그림 4 (a)에서 정상모델의 경우에는 공극에서의 자속밀도 분포가 균일하게 나타나고 있으나, (b)와 같이 편심이 발생한 경우에는 공극 자속밀도의 불평형이 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 5는 정격속도 1,768 [rpm], 0.24 [s]에서의 공극 자속밀도를 나타낸다. 정상모델 (a)의 공극 최대 자속밀도는 1.4 [T]로 1주기 동안에 일정한 최대값을 가지게 되지만, (b)와 같이 편심 되었을 경우는 공극 자속밀도가 편심 된 공극(210°)에서 1.6 [T], 그 반대쪽(30°) 공극에서는 1.2 [T]로 양쪽 공극에서 0.4 [T]의 차이를 보이고 있다.



(a) 정상모델

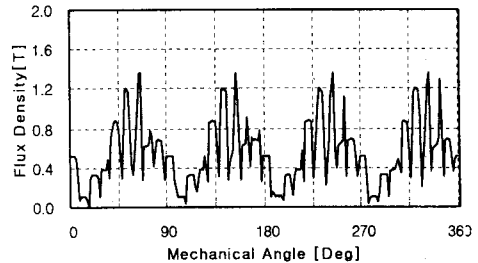
(b) 편심모델

(a) Normal model

(b) Eccentricity model

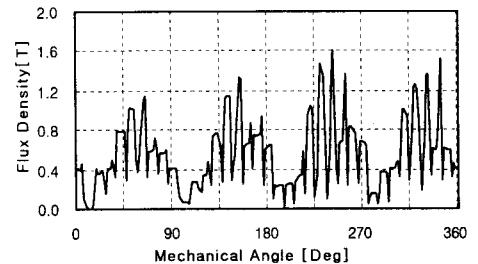
그림 4. 정격부하시의 자속밀도 분포

Fig. 4. Distribution of flux density



(a) 정상모델

(a) Normal model



(b) 편심모델

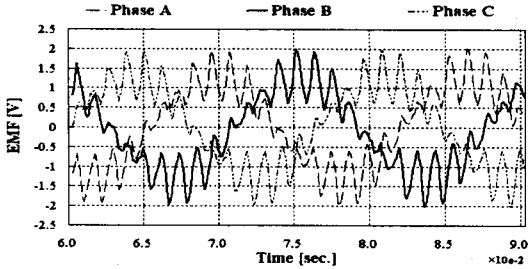
(b) Eccentricity model

그림 5. 1,768 [rpm], 0.24 [s]일 때 공극 자속밀도

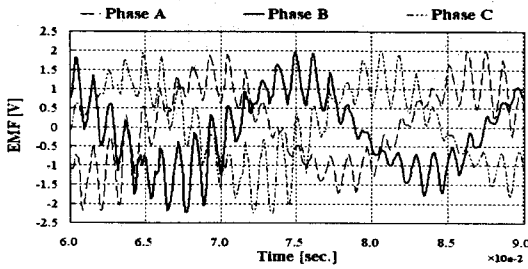
Fig. 5. Flux density of the air-gap at 1,768

[rpm], 0.24 [s]

그림 6은 유도전동기의 정상 모델과 편심 모델의 정상상태일 때 서치코일에서의 유기전압을 보여준다. 동적 편심일 경우에는 자속이 주기성을 가지고 계속 변화하기 때문에 한 지점에서만 유기전압을 검출하였다. 정상 모델의 유기전압은 최대치 2 [V]로 나타남을 볼 수 있으나 편심 모델의 유기전압 파형을 보면 공극의 길이가 최소인 지점에서 약 -2.2 [V], 최대인 지점에서 약 -1.7 [V]가 유기됨을 볼 수 있다.



(a) 정상모델
(a) Normal model



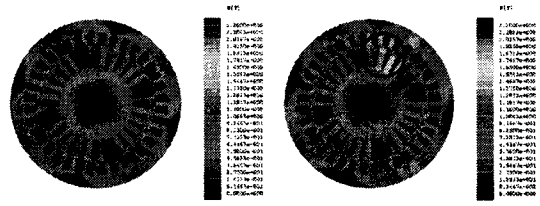
(b) 편심모델
(b) Eccentricity model

그림 6. 써치 코일 유기전압 (편심모델)
Fig. 6. Induced voltage at the search coil

나. Broken Bar 고장인 경우

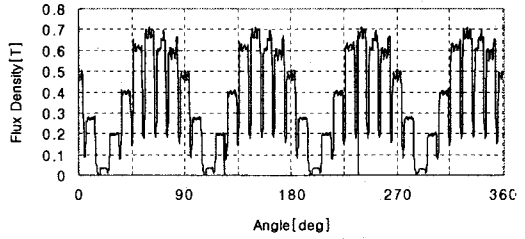
유도전동기 회전자의 Broken Bar 고장인 경우에 있어서, 유한요소 해석을 통한 정격부하에서의 자속밀도 분포와 공극에서의 자속밀도를 그림 7과 그림 8에 각각 나타내었다. 정상 전동기의 경우에는 양극에서 동일한 자속밀도를 나타내고 있으나, 고장모의 전동기에서는 양극에서의 자속밀도차가 크게 나타남을 알 수 있다. 실 모델의 경우 회전자의 스큐(skew)를 주어 제작되었으나, 본 해석에서는 2차원 모델로 해석을 수행하므로 스큐에 의한 영향은 고려되지 않았다.

그림 9는 유한요소 해석에 의해 구해진 A상의 최초 입력슬롯과 대각위치(180°)에 있는 2개의 서치코일(자속 센서) 출력신호(유기전압)를 나타낸다. 그림 9 (a)의 정상모델에서는 2개 자속센서의 유기전압이 거의 동일하지만, 회전자 바의 손상이 발생한 경우인 그림 9 (b)에서는 자속센서의 출력 신호에 차이가 남을 볼 수 있고, 따라서 이 출력 파형에 따라 회전자 바 손상의 수와 위치를 판별할 수 있다.

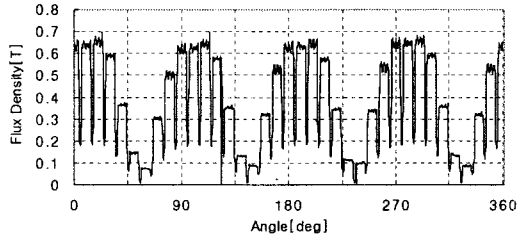


(a) 정상모델 (a) Normal model
(b) Broken Bar 모델 (b) Broken Bar model

그림 7. 정격부하에서의 자속밀도 분포
Fig. 7. Distribution of flux density

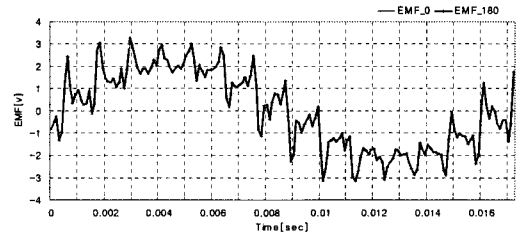


(a) 정상모델
(a) Normal model

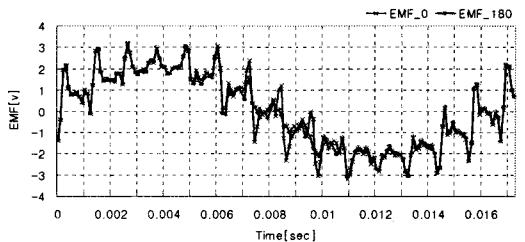


(b) Broken Bar 모델
(b) Broken Bar model

그림 8. 공극 자속밀도
Fig. 8. Flux density of the air-gap



(a) 정상모델
(a) Normal model



(b) Broken Bar 모델
(b) Broken Bar model

그림 9. 써치 코일 유기전압 (Broken Bar 모델)
Fig. 9. Induced voltage at the search coil

4. 실험결과

4.1. 실험장치

가. 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 형태로 PCB로 제작하였고, 동일한 위치에 취부함으로써 정밀도를 높일 수 있도록 설계하였다.

그림 10은 실제 제작한 자속센서를 나타내고, 턴수는 7턴이며 저항은 2.5 [Ω]이다. 그림 11은 전동기 슬롯에 자속센서가 삽입된 형태를 나타내고, 전동기의 각상별(A, B, C) 최초 입력슬롯 및 U상의 180도 맞은편 슬롯에 1개를 삽입하여 총 4개를 취부하였다.

서치 코일에 유기되는 유기전압은 식 (2)와 같이 Faraday의 전자유도 법칙에 의해 권선수와 자속의 함수로 나타난다. 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.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} [V] \quad (2)$$

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



그림 10. 자속측정을 위한 서치코일
Fig. 10. Search coil for flux measurement

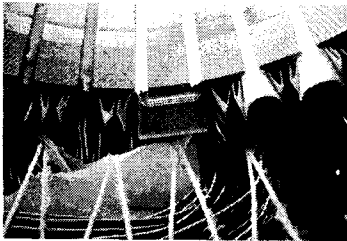


그림 11. 고정자 슬롯에 취부된 자속센서
Fig. 11. Installation of search coil

나. 고장모의 시뮬레이터

그림 12는 유도전동기 회전자의 편심 고장을 모의하기 위해서 회전자 샤프트 가공시에 프레스의 압력으로 샤프트를 굽히는 과정을 나타낸 것으로서, 다이얼게이지를 이용하여 측정한 결과 회전자의 휨량이 0.32 [mm]가 되도록 편심을 모의하였다.

그림 13은 유도전동기 회전자의 Broken Bar 고장을 모의한 실제 사진을 나타낸 것으로서, 회전자의 총 슬롯 28개 중에서 이웃한 2개의 회전자 바에 손상을 주어 Broken Bar 고장을 모의하였다. 고장상태는 회전자 바의 적정 부위에 깊이 20 [mm], 폭 6 [mm]로 하여 1 [mm]의 갭을 주어 양쪽의 Bar가 전기적으로 단절되도록 제작하였다.

그림 14는 정상모델 및 고장모의 유도전동기의 특성 시험 및 각종 센서신호의 검출실험을 위해 제작한 고장모의 시뮬레이터를 보여주고 있다. 고장모의 전동기와 구동 인버터, 부하 전동기와 구동 인버터 및 2개 전동기를 기계적으로 연결하는 커플링 부분과 토크센서 등으로 구성하였다[5].

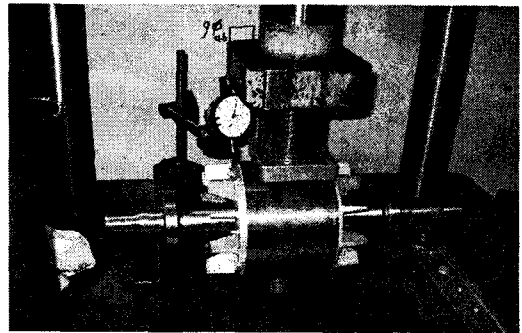


그림 12. 회전자 편심 고장모의
Fig. 12. Simulated process of rotor eccentricity

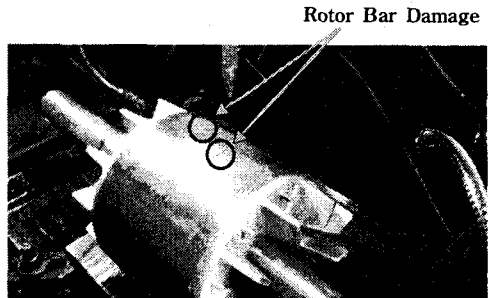


그림 13. Broken bar 고장모의 회전자
Fig. 13. Simulated process of broken rotor bar

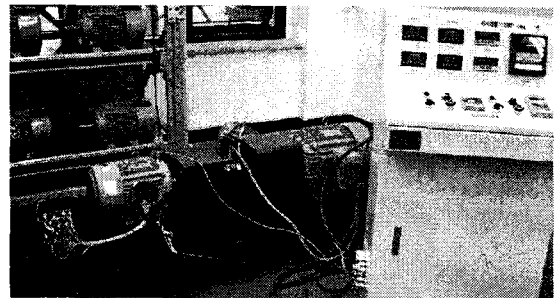


그림 14. 유도전동기의 고장모의 시뮬레이터
Fig. 14. Test system of fault simulated induction motors

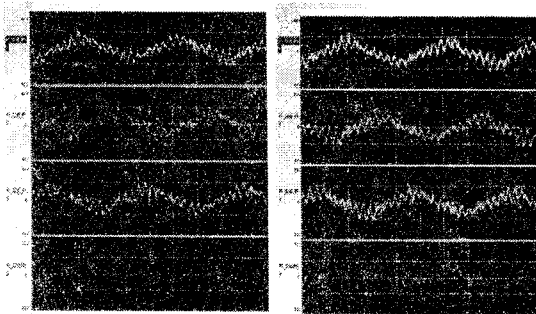
4.2. 실험결과 및 검토

가. 회전자 편심 고장인 경우

그림 15는 정상모델과 회전자 편심모델에 대해서 고장모의 시뮬레이터를 이용하여 실제 유도전동기의 고정자 슬롯에 삽입한 서치 코일에서의 유기전압 측정파형을 나타낸 것이다. 정상모델의 유기전압은 최대치 1.5 [V]로 나타남을 볼 수 있으나, 편심모델의 유기전압 파형을 보면 -2 [V]까지 유기됨을 볼 수 있다. 이것은 그림 6에 나타낸 유한요소 해석에 의한 결과와 마찬가지로 회전자의 편심에 따른 비대칭 공극 자속분포로 인해 자기력의 불평등이 발생한 결과로 볼 수 있고, 공극 자속의 측정으로 회전자의 진동을 검출할 수 있음을 나타내고 있다.

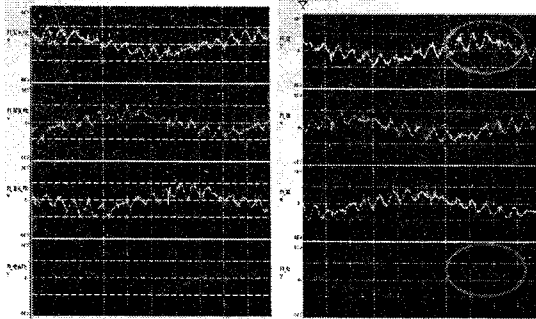
나. Broken Bar 고장인 경우

그림 16은 고장모의 시뮬레이터를 이용하여 정상 및 Broken bar 전동기 각 상의 자속센서 출력파형을 측정 한 것이다. A, B, C상의 자속센서 출력은 각각 120°의 위상차를 보이고 있다. 여기서 A상과 A상의 180° 반대편 슬롯에서의 유기기전력 파형을 비교해 보면, 그림 9에 나타낸 유한요소 해석에 의한 결과와 마찬가지로, 정상모델의 경우에는 유기기전력 파형 및 유기기전력이 동일하게 측정됨을 볼 수 있다.



(a) 정상모델 (a) Normal model (b) 편심모델 (b) Eccentricity model

그림 15. 서치코일 유기전압 측정파형 (편심모델)
Fig. 15. Induced voltage at the search coil



(a) 정상모델 (a) Normal model (b) Broken Bar 모델 (b) Broken Bar model

그림 16. 서치코일 유기전압 측정파형 (Broken Bar)
Fig. 16. Induced voltage at the search coil

그러나 Broken bar 고장모의 전동기에서는 회전자 바 손상에 따른 공극 자속밀도의 불균형으로 인하여 2개의 자속 센서 유기기전력 파형과 값이 상이함을 확인할 수 있다. 손상된 회전자 바의 슬롯을 기준으로 좌, 우측 슬롯에 자속밀도의 불균형이 발생하게 되므로 최대 파고값의 수를 파악함으로써 회전자 바의 손상 위치와 손상된 바의 수를 판단할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 공극자속 측정에 의한 유도전동기 회전자의 운전중 진동감시 기법을 개발하기 위하여, 유한요소 해석을 이용하여 진동유형에 따른 공극자속의 특성변화를 분석하였다. 유도전동기 회전자의 편심뿐만 아니라 Broken Bar 상태를 2차원적으로 모델링하였고, 회전자의 편심 및 Broken Bar에 의한 자속변화를 구하기 위해 고정자 슬롯에 Search Coil 형태의 자속센서를 부착하여 공극에서의 쇠교자속, 공극 자속밀도, 서치코일 유기전압 등을 해석하여 회전자의 진동원인에 따른 특성을 분석하였다.

또한, 고장모의 시뮬레이터를 이용하여 정상 전동기와 편심 및 Broken Bar 전동기별로 자속센서의 출력파형을 비교하였다. 이를 통해 서치 코일을 이용하여 공극자속을 측정함으로써 전동기의 정상상태와 편심 및 Broken Rotor Bar 현상에 따른 유도전동기의 제반 특성변화의 분석과 정상 및 고장상태를 판별할 수 있음을 증명하였다.

본 연구에서 제시한 공극자속 측정에 의한 유도전동기의 진동검출 기법은 회전자의 편심, Broken Rotor Bar, 베어링 고장 등에 따른 진동상태를 운전중에 감시가 가능하게 할 것으로 기대되고, 향후 유도전동기의 온라인 이상상태 모니터링 시스템의 개발에 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] P.J. Tavner and J. Penman, Condition Monitoring of Electrical Machines, Letchworth, England: Research Press Limited, 1987.
- [2] D.H. Hwang, et al., "Analysis of a Three Phase Induction Motor under Eccentricity Condition", IEEE IECON 2005, North Carolina, USA, pp. 2609~2613, Nov. 6-10, 2005.
- [3] 황돈하 외, "공극자속 측정에 의한 유도전동기 회전자의 Broken Bar 검출기법", 2006년도 한국조명전기설비학회 춘계학술대회 논문집, pp. 475~480, 2006. 5. 11-12.
- [4] A. Tenhunen, et al., "Spatial Linearity of Unbalanced Magnetic Pull in Induction Motors during Eccentric Rotor Motions", 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2002), Bruges, Belgium, Vol. 1, pp. 330-335, Aug. 25-28, 2002.
- [5] 황돈하 외, "유도전동기 고장모의 시뮬레이터 개발", 2006년도 대한전기학회 ENECS부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 182~184, 2005. 4. 20-22.