# 회전자 바 손상에 따른 농형유도전동기의 이상 신호 검출

김병국, 김미정, 조윤현, 황돈하*, 강동식*
동아대학교 전기공학과, *한국전기연구원 전력설비진단연구그룹

# Detection of broken rotor bars in a squirrel-cage induction motor

Byong-Kuk Kim, Mi-Jung Kim, Yun-Hyun Cho, Don-Ha Hwang*, Dong-Sik Kang*
Dong-A University, *Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

**Abstract** - This paper proposes a new method for detecting broken rotor bars in a squirrel-cage induction motor. The air-gap flux variation analysis was done using search coils inserted in stator slots when broken rotor bar occurs. An accurate modeling and analysis of air-gap flux variation in the induction motor are developed using finite-element (FE) software packages, and measurement of the flux are made using search coils. The simulation was done for the induction motor with 380 [V], 7.5 [kW], 4 Poles, 1,760 [rpm] ratings using the commercial FE analysis tool. The simulation and experiment results can be useful for detecting the broken rotor bar of an induction motor.

## 1. 서 론

철강, 화학, 석유, 시멘트 등의 장치산업에 있어서는 팬, 펌프, 전동기로 대표되는 각종 회전기기가 널리 사용되고 있는데, 특히 제철소, 석유화학 등과 같은 대형 생산설비에서는 1만대가 넘는 곳이 많다. 이러한 회전기기의 고장은 커다란 생산저하와 막대한 경제적 손실을 가져오기 때문에 정기적인 점검과 예방정비 등의 보수비용이 증가하고 있다. 따라서 설비의 상태를 정량적으로 파악하고, 이상 및 장래의 영향을 예지, 예측하는 실시간 설비진단 기술이 더욱 중요해지고 있다[1-4].

전동기는 사용 중에 베어링이 파손하기도 하고, 마모로 인한 동적 및 정적 언밸런스, 회전자 바의 손상, 권선의 열화로 인한 단락현상 등 다양한 결함을 일으키게 된다. 일반적으로 전동기의 주요소, 즉 고정자, 회전자, 베어링의 3개 부분이 전동기 고장의 80 [%]를 차지하고 있으며, 고장 상태감시 기법의 대부분은 이 세 가지 구성요소들의 고장을 검출하는 것으로 이루어진다. 다양한 전동기의 고장 중에서 회전자바의 소손은 Thermal, Magnetic, Residual, Dynamic, Environment, Mechanical stress 등이 주요 원인이 된다.

본 연구에서는 유도전동기의 회전자 고장 및 진동을 초래하는 회전자의 Broken Bar 고장을 운전중에 검출할 수 있는 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. 이를 위하여 3상 7.5 [kW], 4P, 1,768 [rpm]의 정격을 갖는 농형 유도전동기의 회전자 바 손상에 따른 전자기적 특성을 유한요소 해석을 통해 시뮬레이션 하고, 정상 모델과 회전자 바 손상 모델의 전동기 특성을 분석한다. 공극의 자속변화를 구하기 위해 고정자 슬롯에 민감도가 높은 자속센서(Search Coil)를 부착하였고, 공극에서의 쇄교자속, 공극 자속밀도 등의 해석을 통하여 Broken Bar 현상에 따른 유도전동기의 특성변화를 분석하였다. 또한, 고장모의 시뮬레이터를 이용한 실험을 통하여 정상 및 고장모의 전동기의 자속센서 출력파형을 비교하여 해석의 정확성과 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

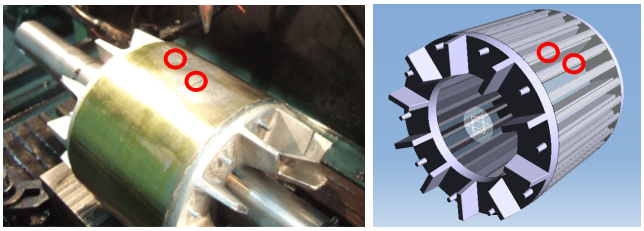
본 해석 결과를 토대로 대형 전동기의 실시간 고장 진단 알고리즘 개발을 위한 기초 자료로 활용한다.

## 2. 본 론

### 2.1 회전자 바 손상에 따른 특성 해석

유도전동기 회전자 Bar의 소손은 제작 불량이나 운전조건에 의한 파손 때문에 발생되며, Bar의 부분적인 소손으로 인하여 균등하게 놓여진 Bar에 흐르는 전류가 불균등하게 됨으로서 공극자속의 변화를 초래하고, 결국에는 회전자의 심각한 진동을 발생시키게 된다. 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 관찰함으로서 특성변화를 조사하였다. 공극자속의 관측은 고정자의 슬롯에 서치코일을 설치하여 서치코일에 유기되는 전압파형 분석을 통하여 실행하였다[3].

유도전동기의 회전자 Broken Bar 고장에 따른 자속변화 해석과 실험에 사용된 전동기는 고정자 슬롯이 36개인 3상, 4극, 3.7 [kW], 1,760 [rpm] 정격의 농형 유도전동기이고, 그림 1에 해석과 고장모의 전동기에 사용된 유도전동기의 회전자 Bar 및 엔드링 구조를 나타내었다. 회전자는 이중 농형의 회전자 바, 알루미늄 다이캐스팅 구조를 갖고 있고, 적층길이는 110 [mm], 슬롯(Bar) 수는 28개, 공극은 0.5 [mm]이다.



<그림 1> Broken Bar 고장모의 회전자

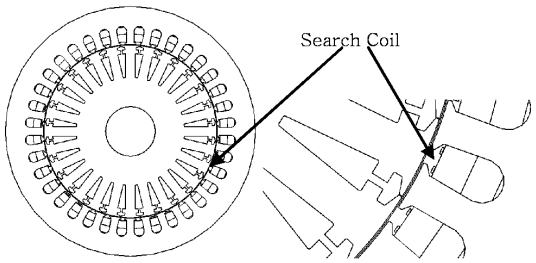
### 2.2 공극 자속 측정 센서

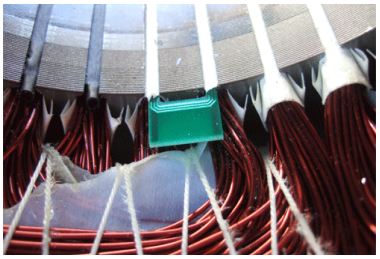
서치 코일에 유기되는 유기 전압은 식 (1)과 같은 패러데이(Faraday)의 전자유도법칙에 의해 권선수와 자속의 함수로 나타난다. 유기 전압은 전동기에 문제가 발생하는 경우 슬롯에서의 쇄교 자속이 차이를 보임으로서 건전한 전동기에 비하여 유기전압의 차이를 가져오게 된다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 원리를 이용하여 전동기 이상 유무를 감지하여 전동기의 건전성을 분석한다[5].

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

여기서, $e$=자속센서의 유기기전력, $N$=센서의 코일 턴수, $\Phi$=자속, $t$=시간을 나타낸다.

그림 2는 해석 모델의 자속 센서 취부 위치와 실제 취부된 자속 센서를 나타낸다.



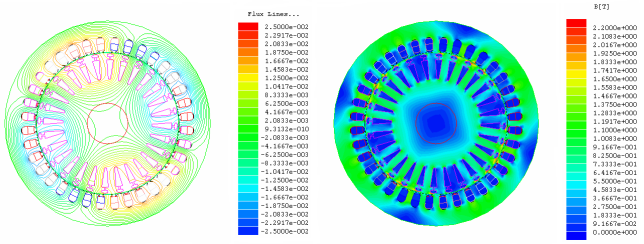



<그림 2> 자속센서의 취부 위치

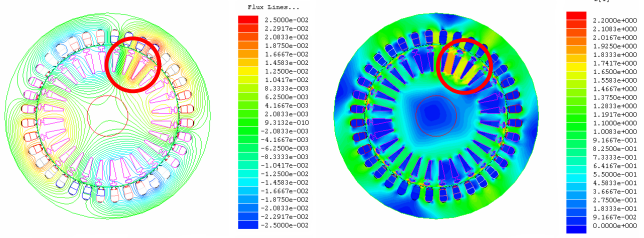
### 2.3 유한요소해석

해석 모델의 전자기적 특성을 알아보기 위하여 4극 3상 농형유도전동기의 설계 제원을 바탕으로 유한요소해석을 수행하였다. 실 모델의 경우 회전자에 스큐(skew)를 주어 제작되었으나 본 해석에서는 2차원 모델로 해석을 수행하므로 스큐에 의한 영향은 고려되지 않았다.

그림 3는 유한요소 해석을 통한 자속선도 및 자속밀도를 나타낸다. 정상 모델의 경우 공극에서의 자속밀도가 평형을 이루고 있으나 회전자 바 소손 모델의 경우 편향된 자속밀도를 보이고 있으며 이때의 공극자속밀도를 그림 4에 나타내었다. 그림 5는 회전자 바 소손에 따른 정격부하에서의 자속 센서 출력 파형을 나타낸다. 앞의 결과와 마찬가지로 전기각 180도에서의 측정 결과 출력된 자속 파형의 차이가 나타남을 알 수 있다.

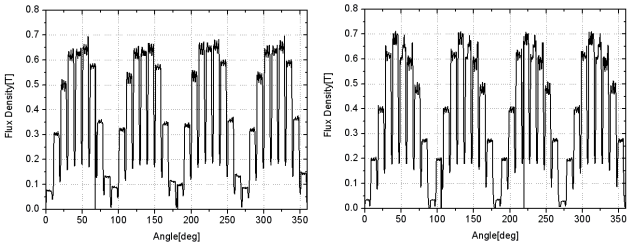


(a) 정상 모델



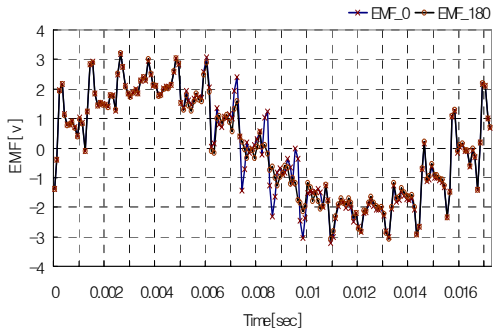
(b) Broken bar 모델

〈그림 3〉 정격부하에서의 자속선도 및 자속밀도




(a) 정상 모델 (b) Broken bar 모델

〈그림 4〉 공극자속밀도

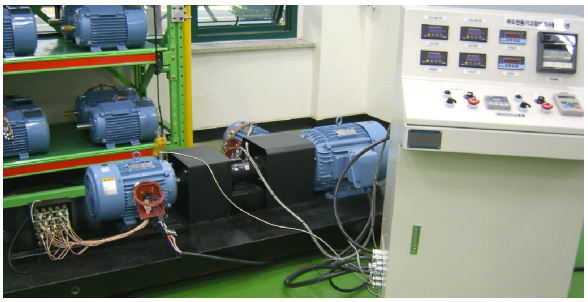



〈그림 5〉 바 소손 모델의 정격부하에서의 자속센서 출력 파형

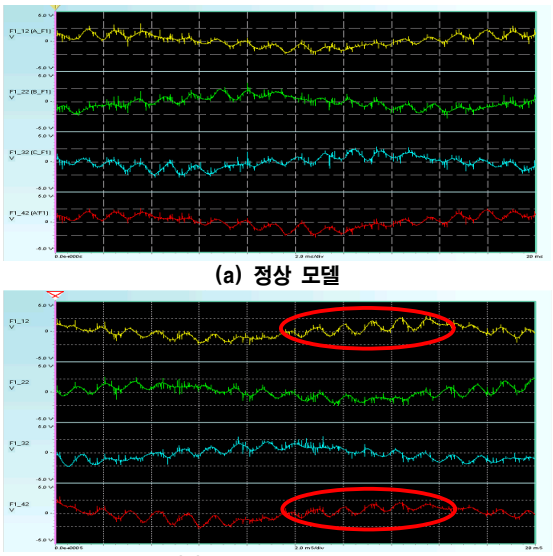
### 2.4 실험 및 특성 고찰

그림 6은 고장모의 전동기를 실험하기 위해 구축된 고장모의 시뮬레이터를 나타낸다.

그림 7은 유도전동기의 고장모의 시뮬레이터를 이용하여 정상 모델 및 Broken bar 모델의 각 상의 자속 센서의 출력 파형을 측정한 것이다 [5]. 여기서 유한요소 해석에서의 결과에서와 마찬가지로 회전자 바 손상으로 인한 공극자속밀도의 불균형으로 인하여 자속 센서의 유기 기전력이 상이한 값을 보임을 알 수 있다.



〈그림 7〉 유도전동기의 고장모의 시뮬레이터



(a) 정상 모델

(b) Broken bar 모델

〈그림 6〉 자속센서 출력 파형

## 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 3상 농형 유도전동기의 회전자 바 손상으로 인한 전자기적 현상 및 특성변화를 연구하였다. 또한 해석 결과와 고장 모의 전동기 실험 결과의 비교를 통해 해석의 타당성을 검증하였다. 회전자 바 손상으로 인한 공극 자속밀도의 변화를 검출하기 위해 슬롯 내부에 PCB로 제작된 서치 코일 형태의 자속 센서를 삽입하였다. 정상 모델과 고장 모의 모델의 자속 센서의 출력 전압을 비교함으로써 회전자 바 소손 여부와 상태를 정확히 확인 할 수 있었다. 차후 본 논문에서 논의된 회전자 바 손상이 전동기의 진동에 미치는 영향을 실험을 통하여 측정하고 FFT분석을 통하여 검증 할 예정이다. 본 논문에서 제시한 연구 결과는 차후 대형 회전기의 실시간 고장감시 시스템의 고장진단 알고리즘 개발을 위한 기초자료로 활용될 것이다.


본 연구는 산업자원부의 지역혁신인력양성사업 주관과
한국전기연구원 기본연구사업의 위탁으로 수행된 연구결과임.


### [참 고 문 헌]


[1] P. Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, Oxford: Clarendon Press, 1993. pp. 307-323.

[2] H.A. Toliyat, M.S. Arefeen, and A.G. Parlos, "A Method for Dynamic Simulation and Detection of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines",Trans. Industry Applications, Vol. 32, No. 4, pp. 910-918, Jul./Aug. 1996.

[3] C. Yung and A.H. Bonnett, "Repair and Replace ? - A Decision Model for Industrial Electric Motors", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 10, No. 5, pp. 48-58, Sept.-Oct. 2004.

[4] A.H. Bonnett, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 28, No. 4, pp. 921-936, 1992.

[5] 황돈하 外, "유도전동기 고장모의 시뮬레이터 개발", 2006년도 대한전기학회 EMECS부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 182~184, 2005. 4. 20-22.