

자속 측정을 통한 유도전동기의 회전자 바 손상 검출기법

황 돈 하, 한 상 보, 강 동 식, 김 병 국*, 김 미 정*, 조 윤 현*
한국전기연구원 전력설비진단연구그룹, *동아대학교 전기공학과

Detecting Method for Broken Rotor Bar of Induction Motors by Flux Measurement

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

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

산업현장에서 핵심적인 동력전달원으로서 가장 많이 사용되는 유도전동기의 불시적인 고장은 생산공정의 중단을 야기시켜 생산량 및 품질 저하를 가져오게 되고, 중요 설비의 동력전달을 불가능하게 하여 치명적 상황을 초래할 수 있다[1][2]. 유도전동기의 고장원인으로는 진동을 유발하는 베어링 소손, 회전자 권심, 회전자 바(Bar) 등의 고장이 대부분을 차지하고 있으며, 이러한 현상은 또한 Air-gap의 편심에 의한 진동을 유발하게 된다. 따라서 연속적이고 안정된 동력의 공급을 위해서는 진동현상 발생시 조기에 판별하고 대처할 수 있는 신속하고 신뢰성이 높은 진동감사 시스템의 개발이 이루어져야 한다[1-3].

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 함으로써 진동 및 Bar 이상상태를 사전에 감지할 수 있게 된다.

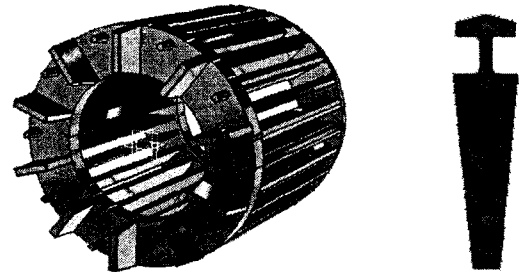
본 논문에서는 유도전동기의 진동현상을 해석하기 위한 Broken Rotor Bar 상태를 모의한 2차원 유한요소 해석 모델을 제안한다. 또한, 공극의 자속변화를 구하기 위해 고정자 슬롯에 민감도가 높은 자속센서(Search Coil)를 부착하였고, 공극에서의 쇄교자속, 공극 자속밀도 등의 해석을 통하여 Broken Bar 현상에 따른 유도전동기의 특성변화를 분석하였다. 정상상태와 고장상태의 2가지 경우에 대한 유한요소 해석결과를 비교하였고, 공극에서 회전자 자속에 의한 전압파형의 왜곡을 분석하여 진동정도를 판별할 수 있는 방법을 제안한다. 또한, 고장모의 시뮬레이터를 이용한 실험을 통하여 정상 및 고장모의 전동기의 자속센서 출력파형을 비교하여 해석의 정확성과 제한한 방법의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서의 특성해석 및 고장모의 실험에 사용된 전동기는 4극, 380 [V], 3.7 [kW], 1,760 [rpm]의 정격의 3상 동형 유도전동기를 대상으로 하였다.

2. Broken Rotor Bar에 따른 특성해석

2.1 유도전동기의 시양

유도전동기 회전자 Bar의 소손은 제작 불량이나 운전조건에 의한 파손 때문에 발생되며, Bar의 부분적인 소손으로 인하여 균등하게 놓여진 Bar에 흐르는 전류가 불균등하게 됨으로써 공극자속의 변화를 초래하고, 결국에는 회전자의 심각한 진동을 발생시키게 된다. 유도전동기의 회전자 Broken Bar에 따른 특성을 구하기 위한 연구로서는, 공극의 자속변화 관찰, 온도 측정, 회전자의 속도, 진동, 전류파형 분석 등의 방법이 많이 이용되고 있지만, 본 논문에서는 회전자의 정상상태와 Broken Bar 상태일 때 공극자속을 관찰함으로써 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 동형 유도전동기이고, 그림 1에 해석과 고장모의 전동기에 사용된 유도전동기의 회전자 Bar 및 엔드링 구조와 슬롯 형상을 나타내었다. 회전자는 이중 농형, 알루미늄 다이캐스팅 구조를 갖고 있고, 석출강이는 110 [mm], 슬롯(Bar) 수는 28개, 공극은 0.5 [mm]이다.



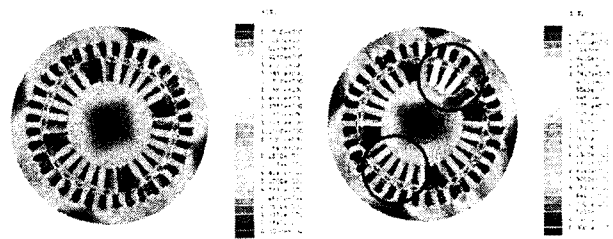
(a) 회전자 외형 (b) 회전자 바 구조
〈그림 1〉 유도전동기 회전자의 형상

2.2 유한요소 해석

정상 전동기와 고장모의 전동기의 전자기적 특성비교를 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 정상 전동기의 회전자 슬롯 수는 28개이고, 고장모의 전동기에서는 이웃한 2개의 회전자 바를 단점시켜 전기적 연결을 차단하도록 구성하여 손상된 상태를 해석하였다. 실제 전동기는 회전자의 Skew를 주어 제작되었으나, 본 해석에서는 2차원 모델로 해석을 수행하므로 스큐에 의한 영향은 고려되지 않았다.

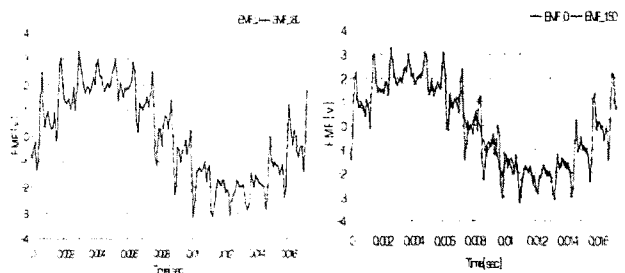
그림 2는 유한요소 해석을 통한 유도전동기의 정격부하에서의 자속밀도를 나타내고 있고, 정상 전동기의 경우에는 양극에서 동일한 자속밀도를 나타내고 있으나, 고장모의 전동기에서는 양극에서의 자속밀도차가 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 3은 유한요소 해석에 의해 구해진 U상의 최초 입력슬롯과 대각위치(180°)에 있는 2개의 서치코일(자속센서) 출력신호(유기전압)를 나타낸다. 그림 3 (a)의 정상모델에서는 2개 자속센서의 유기전압이 거의 동일하지만, 회전자 바의 손상이 발생한 경우인 그림 3 (b)에서는 자속센서의 출력 신호에 차이가 남을 볼 수 있고, 따라서 이 출력 파형에 따라 회전자 바 손상의 수와 위치를 판별할 수 있다.



(a) 정상 모델 (b) 고장모의 모델

〈그림 2〉 정격부하에서의 자속밀도 분포



(a) 정상 모델 (b) 고장모의 모델

〈그림 3〉 정격부하에서의 자속센서 출력 파형

3. 실험결과

3.1 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 하였다.

그림 4는 실제 제작한 자속센서를 나타내고, 턴수는 7턴이며 저항은 2.9 [Ω]이다. 그림 5는 전동기 슬롯에 자속센서가 삽입된 형태를 나타내고, 전동기의 각상별(U, V, W) 최초 입력슬롯 및 U상의 180도 맞은편 슬롯에 1개를 삽입하여 총 4개를 취부하였다.

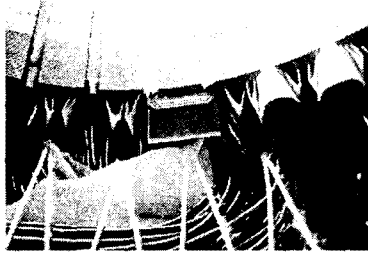
서치코일에 유기되는 유기전압은 식 (1)과 같이 Faraday의 전자유도 법칙에 의해 권선수와 자속의 합수로 나타낸다. 자속센서에서 유기되는 전압 파형은 권선 각 슬롯의 누설자속 분포를 나타내며, 회전자 바의 손손, 공극의 불균형, 권선의 열화로 인한 선간 또는 상간 단락에 따라 슬롯에서 유기되는 전압파형의 크기가 다르게 나타나므로 측정된 파형 분석을 통하여 고장의 원인을 판별할 수 있다.

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

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



〈그림 4〉 자속센서의 형상



〈그림 5〉 고정자 슬롯에 취부된 자속센서

3.2 고장모의 시뮬레이터

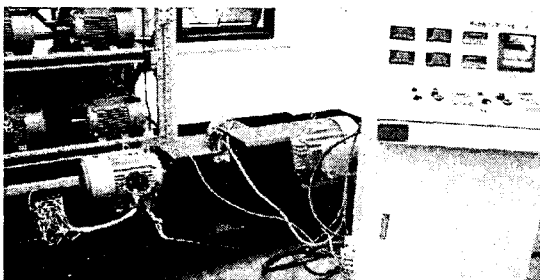
그림 6은 유도전동기의 회전자를 고장모의한 실제 사진을 나타낸 것으로서, 회전자의 총 슬롯 28개 중에서 이웃한 2개의 회전자 바에 손상을 주어 Broken Bar 고장을 모의하였다. 고장상태는 회전자 Bar의 적정 부위에 길이 20 [mm], 폭 6 [mm]로 하여 1 [mm]의 갭을 주어 양쪽의 Bar가 전기적으로 단절되도록 제작하였다.

그림 7은 정상모델 및 고장모의 유도전동기의 특성시험 및 각종 센서신호의 검출실험을 위해 제작한 고장모의 시뮬레이터를 나타내고 있다. 고장모의 전동기와 구동 인버터, 부하 전동기와 구동 인버터 및 2개 전동기를 기계적으로 연결하는 커플링 부분과 토크센서 등으로 구성하였다[4].

Rotor Bar Damage



〈그림 6〉 Broken Bar 고장모의 회전자

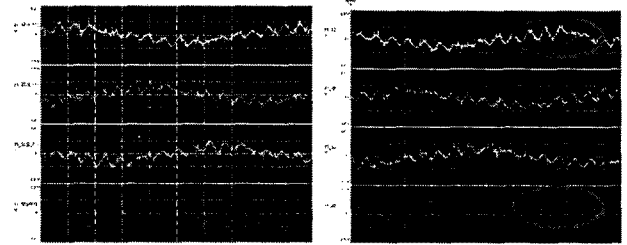


〈그림 7〉 유도전동기의 고장모의 시뮬레이터

3.3 실험결과 및 특성고찰

그림 8은 정상 및 고장모의 전동기 각 상의 자속센서 출력파형을 측정한 것이다. U, V, W상의 자속센서 출력은 각각 120°의 위상차를 보이고 있다. 여기서 정상모델의 경우 U상과 U상의 180° 반대편 슬롯에서의 유기기전력 파형 및 유기기전력이 동일하게 측정되지만, 고장모의 전동기에서는 2개의 유기기전력 파형과 값이 상이함을 볼 수 있다.

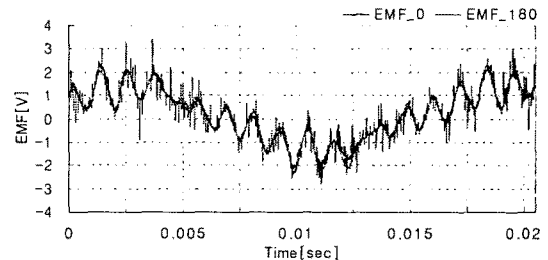
그림 9는 그림 8의 U상과 U상의 180° 반대편 슬롯에서의 유기기전력을 정량적으로 비교한 것으로서, 그림 3에 나타난 유한요소 해석에 의한 결과와 마찬가지로 회전자 바 손상에 따른 공극 자속밀도의 불균형으로 인하여 자속 센서의 유기기전력이 차이가 남을 확인할 수 있다. 손상된 회전자 바의 슬롯을 기준으로 좌, 우측 슬롯에 자속밀도의 불균형이 발생하게 되므로 최대 과과값의 수를 파악함으로써 회전자 바의 손상 위치와 손상된 바의 수를 판단 할 수 있다.



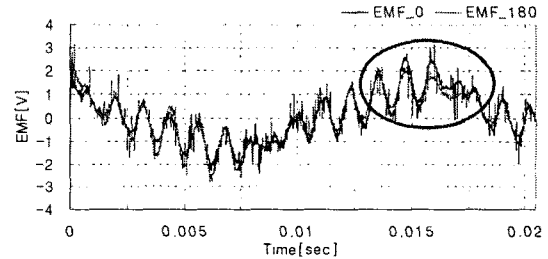
(a) 정상 모델

(b) 고장모의 모델

〈그림 8〉 자속센서 출력파형



(a) 정상 모델



(b) 고장모의 모델

〈그림 9〉 U상 자속센서의 출력신호 비교

4. 결 론

본 논문에서는 고정자 슬롯에 취부한 서치코일에서의 공극자속 측정에 의한 농형 유도전동기의 회전자 Bar 손상을 검출할 수 있는 새로운 방법을 제안하였고, 회전자 바 손상에 따른 특성을 유한요소(FE) 해석을 통하여 분석하였다. 또한, 회전자 Broken Bar 고장모의 전동기 및 시뮬레이터를 제작하여 실험을 통하여 해석결과의 타당성을 입증하였다. 유도전동기의 회전자 Bar가 손상되면 공극 자속밀도의 불균형으로 인하여 Broken Bar의 수에 따라 자속센서의 유기기전력에 차이가 나므로, 공극자속을 측정함으로써 회전자 Broken Bar의 검출이 가능함을 확인하였다. 또한, 유한요소 해석 결과와 자속센서에서의 측정결과가 유사하므로 회전자 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.J. Tavner and J. Penman, *Condition Monitoring of Electrical Machines*, Letchworth, England: Research Press Limited, 1987.
- [2] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*, Oxford: Clarendon Press, 1993.
- [3] D.H. Hwang, et al., "Analysis of a Three Phase Induction Motor under Eccentricity Condition", Proceedings of the IEEE IECON 2005, North Carolina, USA, pp. 2609~2613, Nov. 6-10, 2005.
- [4] 황돈하 외, "유도전동기 고장모의 시뮬레이터 개발", 2006년도 대한전기학회 EMECS 부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 182~184, 2006. 4. 21