

유도전동기의 회전자 Broken Bar 현상에 따른 공극의 자속변화 해석

황 돈하*, 이기창*, 강동식*, 김용주*, 최경호**, 이진희***

*한국전기연구원, **경북전문대학, ***포항산업과학연구원

Analysis of Air-gap Flux Variations by Broken Rotor Bar in Induction Motors

Don-Ha HWANG*, Ki-Chang LEE*, Dong-Sik KANG*, Yong-Joo KIM*, Kyeong-Ho CHOI**, Jin-Hee LEE***

Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Kyungbuk College**, RIST***

Abstract - In this paper, a new approach detecting broken rotor bars in a squirrel-cage induction motor is proposed. The air-gap flux variation analysis was done using search coils inserted in stator slots when broken rotor bar conditions occur. 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, the three-phase squirrel-gage induction motor with 380 [V], 5 [HP], 4 Poles, 1,742 [rpm] ratings is used.

2. 회전자 Broken Bar 모델링

유도전동기의 회전자 Broken Bar의 경향에 따른 자속 변화 해석에 사용된 전동기는 고정자의 슬롯이 36개, 회전자 Bar의 갯수가 28개인 4극, 5 [HP] 농형 유도전동기이고, 유한요소 해석시간을 고려하여 1/2면만 모델링하였고, 해석에 사용된 프로그램은 상용프로그램인 Maxwell을 이용하였다. Broken Rotor Bar를 모델링하는 방법으로는, Bar의 재질을 변화시켜 정상상태의 Bar에 비해 도전율을 매우 작게 하여 상대적으로 저항을 크게 함으로서 Bar에 전류가 흐르지 않게 하는 방법과, 1개 Bar에 대하여 주위의 Bar와 연계된 회로를 단절함으로서 전류가 흐르지 않도록 하는 등의 2가지가 있다 [1]-[3]. 본 연구에서는 2번째의 방법을 적용하여 Broken Rotor Bar를 모델링 하였다.

유도전동기의 회전자 Broken Bar에 따른 특성을 구하기 위한 연구로서는, 공극의 자속변화 관찰, 온도측정, 회전자의 속도, 진동, 전류파형 분석 등의 방법이 많이 이용되고 있지만[1]-[3], 본 논문에서는 정상상태와 Broken Bar 상태일 때 상전류의 파형과 전류 스펙트럼을 분석하였고, 또한 공극의 자속을 관찰함으로써 특성 변화를 조사하였다. 공극 자속의 관측은 고정자의 슬롯에 서치코일을 설치하여 서치코일에 유기되는 전압의 파형과 주파수 분석을 통하여 실행하였다[4].

그림 1은 유도전동기의 회전자 Broken Bar에 따른 특성을 관찰하기 위한 2차원 모델로서, Broken Bar를 1~3개로 각각 설정하고, 각 경우에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 20 turns, 18 [Ω]의 값을 가지는 서치코일은 FE 프로그램 특성을 고려하여 외부회로로 연결하여 쇠교자속과 유기전압을 각각 구하였다.

그림 2는 Broken Rotor Bar로 인한 전류의 흐름을 나타내고 있다. 수직선은 각각 Bar를 의미하고, k+1번째 Bar가 Broken되었을 때 각각의 Bar에 흐르는 전류는 균형이 깨어지면서 k+1 주위의 k와 k+2 Bar에 흐르는 전류가 그림과 같이 큰 루프를 형성하면서 전류가 같아지게 된다. 이러한 Broken Bar의 현상으로 인하여 공극 자속의 불균형이 일어나고 동시에 국부적인 온도 변화, 상전류의 변화를 가져오게 된다[1].

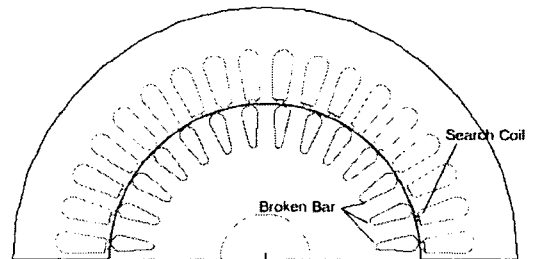


그림 1. Broken Bar 모델링

1. 서론

전동기에 의해 소비되는 전력량은 총 전력생산량의 약 60 [%]에 이르고 있으며, 산업현장의 다양한 형태로 유도전동기가 사용되고 있다. 특히, 주요 생산설비나 특수한 분야에 사용되는 전동기는 직간접적으로 회사의 매출액이나 생산품의 품질과 밀접한 관계를 가지고 있다. 또한, 최근에는 고품질, 고정밀도를 요구하는 생산품들이 늘어나면서 산업현장에서 안정된 구동시스템은 필수 조건으로 자리 매김하고 있다. 산업현장에서의 필수 동력원인 전동기 구동시스템은 다양한 연구를 통해서 비약적으로 발전되어 왔으나, 예상치 못한 고장으로 인한 품질저하, 생산성 감소 등의 가능성은 여전히 존재하고 있다.

이러한 고장으로 인한 손실을 미연에 방지하기 위하여 전동기의 상시 감시 시스템을 통한 진단, 수리, 교체가 사전에 이루어지고 있으나, 고장 원인별 대처능력은 상당한 숙련공이 아니면 불가능한 실정이다. 따라서 전동기의 고장 유형별 진단 시스템 구축이 우선적으로 이루어져야 하고, 전동기의 이상징후를 조기에 예측하여 적절한 대응을 함으로서 생산성 향상에 기여할 수 있을 것이다[1]-[3].

본 연구에서는 유도전동기의 회전자 고장을 초래하는 Broken Rotor Bar를 운전중에 검출할 수 있는 방법을 제시한다. 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 Broken Rotor Bar 상태를 모의할 수 있는 2차원 유한요소 모델을 제시한다. 또한, 공극의 자속변화를 구하기 위해 고정자 슬롯에 민감도가 높은 자속센서(Search Coil)를 부착하였고, 공극에서의 쇠교자속, 공극 자속밀도, 상전류 파형, 전류 스펙트럼 등의 해석을 통하여 Broken Bar 현상에 따른 유도전동기의 특성변화를 분석하였다. 정상상태와 고장상태의 2가지 경우에 대한 유한요소 해석결과를 비교하였고, 회전자 Broken Bar의 갯수를 다르게 모델링하여 해석하였다. 해석에 사용된 전동기는 4극, 380 [V], 5 [HP], 1,742 [rpm]의 정격을 갖는 농형 유도전동기를 사용하였다.

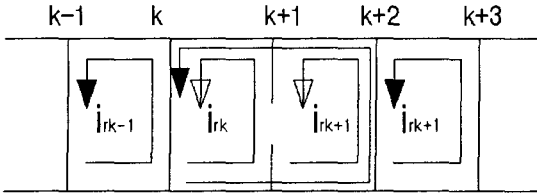


그림 2. Broken Bar에 따른 전류 흐름도

3. Broken Bar에 따른 유한요소(FE) 해석

Broken Rotor Bar에 따른 전동기의 특성변화를 분석하기 위하여 정상상태와 Broken 상태의 2가지 경우에 대하여 FE 해석을 수행하였다. 또한, Broken Bar 상태는 Broken된 Bar의 수량을 다르게 하여 해석하고, 각각의 결과를 비교 분석하였다. 해석결과는 정상상태와 Broken Bar 상태에서의 토크 특성, 상전류 파형, 서치코일의 유기전압 및 공극의 자속밀도 변화를 분석하였다.

그림 3과 그림 4는 각각 정상상태와 3개의 Broken Bar 상태에서 토크 특성을 나타낸 것으로서, 정상상태에서는 회전자가 회전하더라도 일정한 토크로 나타나고 있으나, Broken Rotor Bar가 있는 경우에는 토크 특성이 크게 변화되는 것을 볼 수 있다.

그림 5와 그림 6은 각각의 경우에서 상전류 파형을 나타낸 것으로서, 정상상태에서는 시간이 흐름에 따라 파형이 일정하게 나타나고 있으나, Broken Rotor Bar 상태에서는 상전류 파형이 주기성을 갖고 진동하는 것을 볼 수 있다.

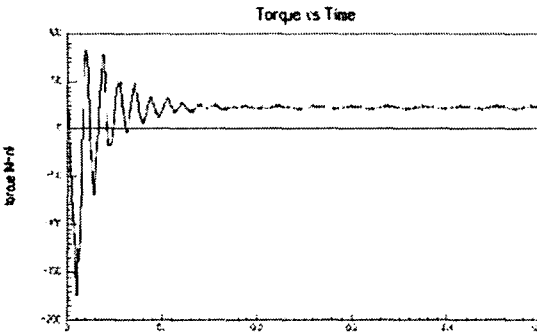


그림 3. 정상상태에서 시간에 따른 토크 특성

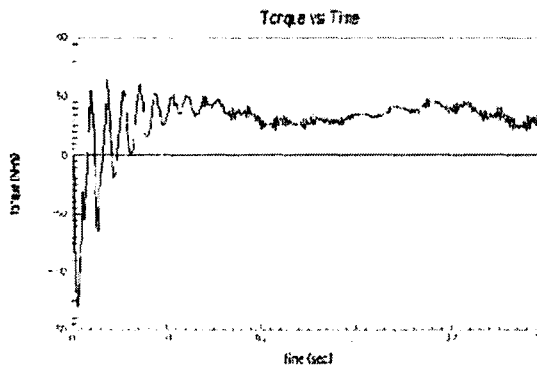


그림 4. 3-Broken Bar일 때의 시간에 따른 토크 특성

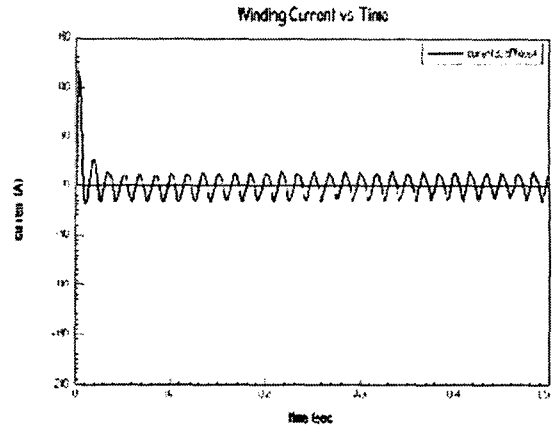


그림 5. 정상상태에서 시간에 따른 상전류 파형

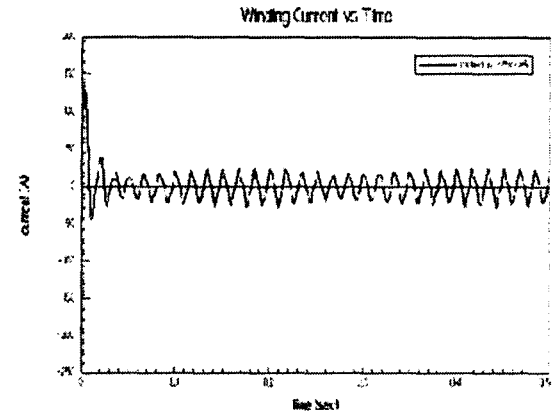


그림 6. 3-Broken Bar일 때의 시간에 따른 상전류 파형

그림 7과 그림 8은 각각 정상상태와 3개의 Broken Bar 상태에서 상전류의 스펙트럼을 나타낸 것으로서, 모두 60 [Hz]에서 가장 큰 값을 보여주고 있으나, Broken Bar의 경우에는 60 [Hz] 전후의 주파수 대역에서 다양한 성분이 나타남을 볼 수 있다. 또한, 그림 8에서와 같이 Broken Rotor Bar일 때에는 170~180 [Hz] 부근에서 큰 스펙트럼 분포특성을 나타내고 있다.

그림 9와 그림 10은 각각 정상상태와 3개의 Broken Bar인 경우에 대한 고정자 슬롯에 삽입된 서치코일에서 유기되는 전압파형을 나타내고 있다. 그림 9에서와 같이 정상상태에서는 최대값이 1.285 [V]로 거의 일정하게 나타나고 있으나, 그림 10의 Broken Bar인 상태에서는 최대값은 정상상태와 비슷하나 회전자의 위치에 따라서 전압파형의 찌그러짐 현상이 두드러지게 나타남을 볼 수 있다.

그림 11과 그림 12는 각각 정상상태와 3개가 Broken Bar일 때의 공극 자속밀도를 나타낸 것으로서, 대체적으로 정상상태에서는 자속밀도가 높은 반면 Broken Bar일 때는 낮게 나타났다. 특히, Broken Bar가 위치해 있는 150~180° 부분에서는 그림 12에서와 같이 공극 자속밀도가 심하게 변화된 것을 볼 수 있다. 또한, 대칭성이 보이지 않고, Broken Bar 지점은 고정자의 Tooth에 의한 자속밀도 변화를 크게 받지 않고, 크기도 작은 값에서 크게 변하지 않음을 볼 수 있다.

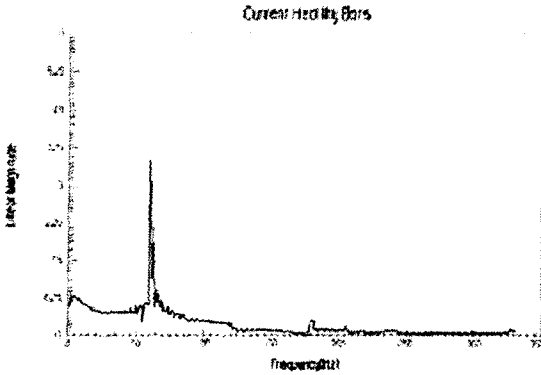


그림 7. 정상상태에서 상전류 스펙트럼

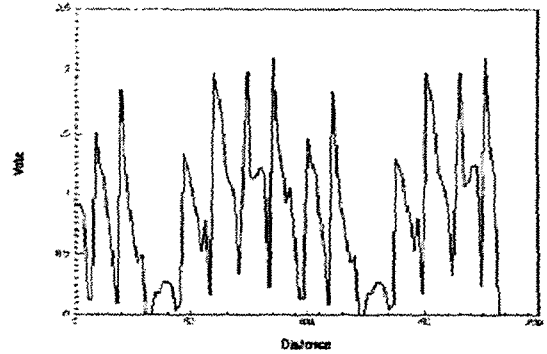


그림 11. 정상상태에서 공극 자속밀도

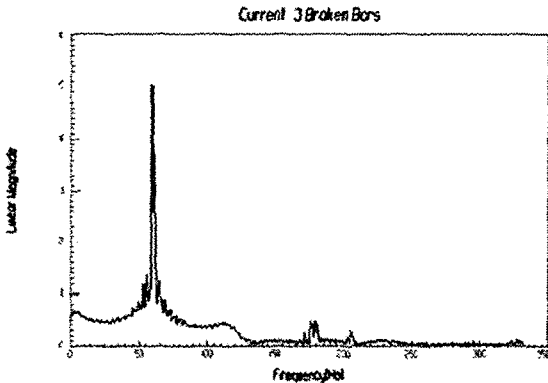


그림 8. 3-Broken Bar일 때의 상전류 스펙트럼

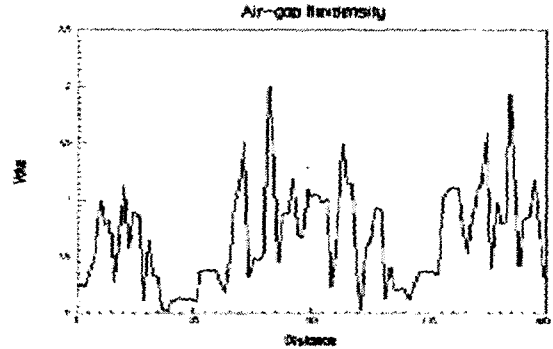


그림 12. 3-Broken Bar일 때의 공극 자속밀도

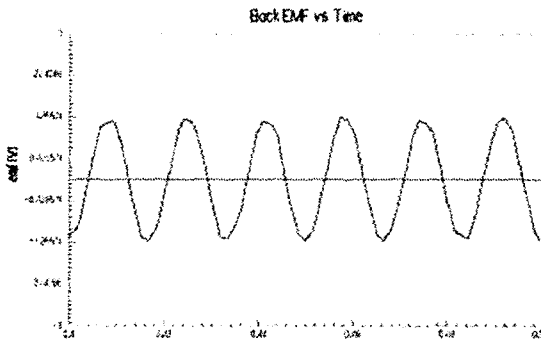


그림 9. 정상상태에서 서치코일의 유기전압

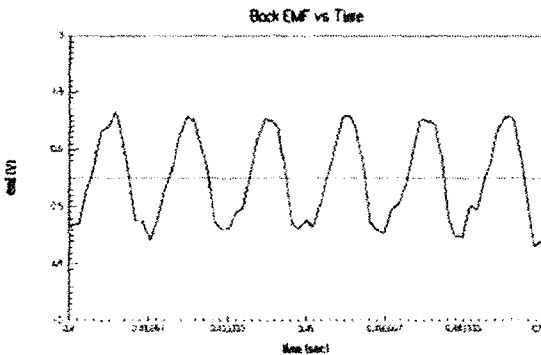


그림 10. 3-Broken Bar일 때의 서치코일 유기전압

4. 결론

본 논문에서는 유도전동기의 회전자에서 발생하는 고장 중에서 Broken Rotor Bar를 전동기의 운전중에 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 회전자의 Broken Bar 상태를 2차원적으로 모델링 하였고, 회전자의 진동 및 Broken Bar에 의한 자속변화를 구하기 위해 고정자 슬롯에 Search Coil을 부착하여 공극에서의 채교자속, 공극 자속밀도, 토크특성, 유기전압, 상전류 파형, 전류 스펙트럼 등을 해석하였다. 이를 통하여 정상상태 및 Broken Rotor Bar 현상에 따른 유도전동기의 제반 특성변화를 분석한 결과, 정상 및 고장상태를 판별할 수 있음을 증명하였다. 향후 자속센서를 이용하여 유도전동기 회전자의 Broken Bar, 편심 등의 고장상태를 운전중에 감지할 수 있는 모니터링 시스템 개발에 중요한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

[참고 문헌]

- [1] G.B. Kliman, R.A. Koegl, J. Stein, R.D. Endicott, and M.W. Madden, "Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, pp. 873-879, Dec. 1988.
- [2] R.F. Walliser, and C.F. Landy, "Determination of Inter-bar Current Effects in the Detection of Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, pp. 152-158, March 1994.
- [3] J.R. Cameron, W.T. Thomson, and A.B. Dow, "Vibration and Current Monitoring for Detecting Air-gap Eccentricity in Large Induction Motors", IEE Proceedings., Vol. 133, Pt. B, No. 3, pp. 155-163, May 1986.
- [4] 황돈하, 이기창, 이주훈, 김용주, 최경호, 이진희, "유도전동기의 회전자 진동에 따른 공극의 자속변화 해석", 2004년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부회 춘계 학술대회 논문집, pp. 62-64, 2004. 4.