Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 21, No.3, pp. 27~34 March 2007 논문 21-3-4

농형유도전동기의 회전자 불량진단에 관한 해석 및 실험적 고찰

(The Analysis and Experimental Investigation of the Diagnosis of Rotor Faults for the Squirrel Cage Induction Motor)

김창업* · 정교범
(Chang-Eob Kim · Gyo-Bum Chung)

요 약

농형유도전동기에서 회전자 도체의 고장은 전동기 성능에 나쁜 영향을 미친다. 본 논문에서는 이와 같은 고장 유무를 수치해석적 방법으로 분석하는 방법을 제안하였다. 정상이 아닌 회전자 도체가 있는 농형유도전동기의 회전자에서 고장에 따라 나타나는 특징적인 파형을 수치 해석적 방법으로 분석하였다. 이와 같은 방법으로 정상적인 도체와 고장 도체가 있는 경우의 특징을 분석함으로써 고장의 유무, 상태를 파악할 수 있다. 회전자 고장진단 실험 장치를 제작하고 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성과 유용성을 확인하였다.

Abstract

The rotor faults of induction motors may cause bad effects on the performance of the induction motor. This paper proposes the detecting technique of these faults by analyzing the waveform of the induced current and voltage of search coil using numerical analysis and the experiment. Several defective rotor bars are simulated to analyze the fault conditions - broken bars and high resistance of rotor bars. In order to prove the usefulness of the proposed method, we made an prototype experimental apparatus. The waveform of the induced voltages in search coil has the obvious characteristics and it is easy to differentiate the normal rotor from the abnormal one. The experimental results show that the proposed method is useful to detect the rotor fault conditions.

Key Words : Fault diagnosis, Numerical analysis, Rotor bar, Squirrel cage induction motor

1. 서 론

유도전동기의 회전자 도체는 동 바 또는 알루미늄 다이캐스팅으로 제작되며, 다이캐스팅으로 제작되는 경우에는 제작 과정 중에 생기는 기포 또는 불순물로 인하여 회전자 도체가 전기적으로 단선 되거나 일부분의 도체가 정상 도체보다 저항이 증가하여 전동기 성능에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 불량을 판별하기 위해서 지금까지는 전동기를 조립하여 전동기의 성능 시험으로 고장 유무를 파악하였으나 이것은 시간이 많이 소요되며 비경제적이다. 따라서 회전자를 완전히 조립하기 전에 고장 내용을

* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 부교수
Tel : 041-540-5657, Fax : 041-540-5693
E-mail : cekim@office.hoseo.ac.kr
접수일자 : 2006년 1월 2일
1차심사 : 2006년 1월 6일, 2차심사 : 2006년 12월 26일
심사완료 : 2007년 1월 23일

알 수 있는 방법이 요구된다. 지금까지 이와 같은 고장을 판별하는 방법으로서는 실험에 의한 방법과 회전자 도체에 흐르는 전류의 스펙트럼 분석으로 연구가 진행되고 있다[1-5]. 본 논문에서는 회전자 도체의 고장 유무를 진단하는 방법으로서 유한요소법에 의하여 유도전동기 회전자 도체의 고장시 발생되는 자속량의 변화에 따른 전자석 코일에 흐르는 전류 및 유기전압의 파형으로 불량 상태를 판별하는 방법을 제안하였다. 유한요소법으로 해석할 때 매 시각마다 요소망을 재분할하면 계산 시간이 많이 걸린다. 여기에서는 이와 같은 단점을 해결하기 위해서 공극을 3층으로 분할하고 가운데층인 moving band 에서만 회전자가 회전할 때마다 요소를 재분할하고 나머지 영역에 대해서는 재분할하지 않는 방법을 사용하여 회전자가 이동할 때 요소 재분할에 소요되는 시간을 대폭 축소하였다[6-7]. 여러 종류의 회전자 도체 고장에 대하여 회전자 도체의 불량 정도(전기적으로 끊어진 상태 또는 기포 발생으로 인한 저항 증가), 불량 도체의 수 및 배치 방법에 따라 전자석 코일에 흐르는 전류 파형을 각각 구하고 비교 분석하였다. 본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 5[Hp] 3상 농형유도전동기의 회전자를 대상으로 정상인 경우와 불량 도체의 경우에 대해 전류 파형을 계산치와 비교하였다.

2. 유한요소법에 의한 유도전동기 회전자 고장해석

본 연구에서 해석 대상으로 한 유도전동기의 회전자와 전자석의 2차원 해석 모델을 그림 1에 나타내었다. 와전류가 있는 해석 영역에서의 지배방정식은 다음과 같다[6-8].

$$\nabla\vec{A}\times(\frac{1}{\mu}\nabla\times\vec{A}) = -J_0+\sigma[-\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}+\vec{v}\times(\nabla\times\vec{A})+\nabla\phi] \quad (1)$$

$\vec{A}$: 자기벡터 포텐셜, μ : 자기투자율
σ : 도전율, J_0 :입력 전류밀도
v : 회전자 속도, ϕ : 전기스칼라포텐셜

식 (1)의 우변 와전류항에서 속도항은 이동 좌표계를 사용하면 상대 속도가 없어진다. 또한 2차측 와전류는 z축에 대하여 대칭으로 가정하여 $\nabla\phi$항은 생략하고 2차원으로 전개하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 R은 코일 저항 1.2[Ω], 회전자 반경 58.75[mm], I는 코일 전류 [A], V는 인가전압 3.0[V], 전자석 높이 7.5[mm], 전자석 폭 12.2[mm]이다.

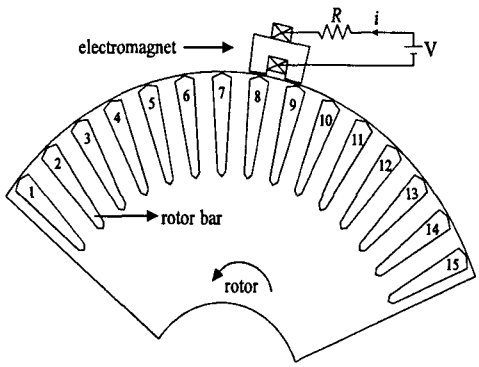


그림 1. 유한요소해석 모델
Fig. 1. Finite element analysis model

$$\frac{\partial}{\partial x}\frac{1}{\mu}(\frac{\partial A}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}\frac{1}{\mu}(\frac{\partial A}{\partial y}) = -J_o+\sigma\frac{dA}{dt} \quad (2)$$

여기서 A는 자기벡터 포텐셜의 z축 성분을 나타낸다.

또한 전자석 코일의 회로방정식은 다음과 같다.

$$V = Ri+\frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

여기서 R : 코일의 저항, V : 인가한 직류 전압, λ : 전자석 코일의 쇄교 자속, i : 코일에 흐르는 전류이다.

식 (2)의 지배방정식을 Galerkin법을 사용하여 유한요소 영역으로 이산화하고, 식 (2)와 식 (3)의 시간 미분항에 관해서는 차분근사식을 사용하여 시간에 대하여 이산화하면 전체 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [S]\frac{+[M]}{\triangle t} & -[T] \\ -[T]^T & -\frac{R\triangle t}{h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ i \end{bmatrix}_{t+\triangle t} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{[M]}{\triangle t} & 0 \\ -[T]^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ i \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} [0] \\ -V\frac{\triangle t}{h} \end{bmatrix}_{t+\triangle t} \quad (4)$$

$$[T]=\begin{bmatrix} [0] \\ \\ \frac{N}{3} \end{bmatrix}$$

여기서 h는 철심 적층폭, [S]는 절점 위치와 투자율에 관련된 시스템 방정식의 계수행렬로 대칭이며 ($n\times n$), [M]은 와전류에 관련된 계수 행렬이다. 권회수 N인 전자석 코일에 쇄교하는 자속량은

$$\lambda = \oint \vec{B}\cdot d\vec{S} = \oint \vec{A}\cdot \vec{dl} = \frac{h}{3}\sum_{e=1}^{Ns}(\pm\sum_{i=1}^{3}\frac{N}{S_p}\triangle^{(e)}A_i) \quad (5)$$

로 주어진다.

여기서, + : 전류가 흘러 나오는 요소일 때
- : 전류가 흘러 들어가는 요소일 때
$\triangle^{(e)}$: 삼각형 요소의 면적
N_s : 권선 영역의 요소수이다.

시각 t에서 전자석 코일에 유기 되는 유기전압 E(t)는 식 (6)과 같이 전자석 코일에 쇄교하는 자속의 시간 미분으로 나타낼 수 있다.

$$E(t) = -\frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (6)$$

식 (6)의 시간미분항을 후퇴차분법으로 정리하면 시각 $t+\triangle t$ 에서 코일에 걸리는 유기전압은 다음과 같이 정리된다.

$$E(t+\triangle t) = -\frac{\Phi(t+\triangle t)-\Phi(t)}{\triangle t} \quad (7)$$

따라서 시각 t에서 전자석 코일에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$i(t) = \frac{V(t)+E(t)}{R} \quad (8)$$

이때 회전자의 이동 처리는 요소 재분할에 소요되는 시간을 줄이기 위하여 그림 2와 같이 공극을 3층으로 분할하고 가운데층만을 $\triangle t$마다 재분할하는 moving band법을 사용하였다[7].

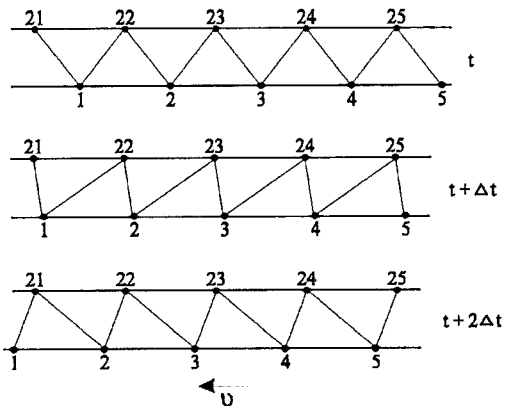


그림 2. Moving band에서의 요소 이동 과정
Fig. 2. Moving process of elements in the moving band

그림 1의 해석 모델에 대하여 회전자를 일정 속도로 회전시켰을 때의 전자석 코일에 흐르는 전류 파형을 해석하였다. 여기서 전자석 코일의 저항은 1.2 [Ω], 인가 전압은 직류 3.0[V]이며 회전자의 회전 속도는 동기속도인 1800[rpm], 전자석과 회전자 사이의 공극은 0.6[mm]로 설정하였다.

그림 3~12는 고장 종류별로 시간에 따라 회전자가 이동할 때 전자석 코일에 흐르는 전류 파형 및 자속 파형으로, 가로축은 시간에 따라 전자석 밑을 통과하는 회전자 도체의 위치를 나타낸다. 그림 3은 회전자 도체가 모두 정상인 경우 전자석 코일에 흐르는 전류의 파형을 나타내었다. 전류 파형은 일정값을 기준으로 맥동하는 양상을 나타낸다. 전류 맥동의 원인은 회전자에 흐르는 유기 전류에 의해서 자속의 변화가 주기적으로 변화하기 때문에 생

기는 속도 기전력에 의해서 일어난다. 이때의 자속 분포는 그림 4와 같다. 회전자의 회전방향은 반시계 방향이다.

그림 5는 회전자 도체 1개가 불량인 경우(5번 도체 단선)에 대하여 전자석 코일에 흐르는 전류 파형을 나타내며, 그림 6은 이 때의 자속 분포를 나타낸다. 그림 7, 그림 8로부터 불량 도체가 있는 도체 부분에서는 자속의 변화가 정상 도체만 있는 경우보다 훨씬 크게 나타나며 그 결과 전자석 코일에서의 유기 전류가 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8은 불량인 회전자 도체가 연속적으로 배치되어 있는 경우(4, 5번 도체 단선)와 불량 회전자 도체가 하나 건너 배치된 경우(4, 6번 도체 단선)의 전자석 코일에 흐르는 전류 분포를 나타낸 것이다.

그림 7과 같이 연속적으로 불량 도체가 배치된 경우 전류 최대치가 불량도체 전후에서 나타나며 그 중간에는 정상시 전류보다 작은 전류 파형이 하나 나타난다. 4, 5번 도체 중간에서의 이 전류 파형의 변화는 도체의 유기전류 영향은 없고 단지 회전자의 이동에 따라 자기저항이 변화하기 때문이다. 이에 비해 불량 도체가 하나 건너 배치된 경우 최대치가 4개 나타남을 알 수 있다.

그림 9는 불량 도체가 연속으로 3개 있는 경우(4, 5, 6번 도체 단선)의 전자석 코일에 흐르는 전류 분포 파형으로 그림 9와 같은 경향이며 중간에 작은 전류 파형이 생겼다. 그림 10은 불량 도체 2개가 연속적으로 배치되어 있고(4, 5번 도체 단선), 하나 건너 불량 도체(7번 도체 단선)가 배치되어 있는 경우로 그림 7와 그림 8의 합성 형태로 파형이 나타났다.

그림 11과 그림 12는 불량 도체(5번 도체)의 도전율이 정상치의 50[%]와 30[%]로 낮은 경우의 전자석 코일에 흐르는 전류 파형을 나타내었다. 전류 파형의 최대치는 불량 도체 전후에서 나타나는 경향은

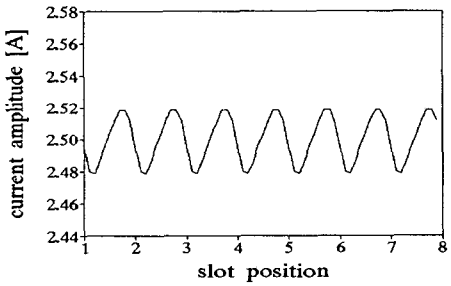


그림 3. 정상 회전자인 경우 전류분포
Fig. 3. Current waveform of search coil for normal rotor bars

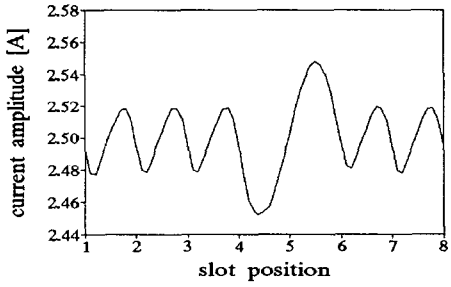


그림 5. 1개 회전자 도체가 단선된 경우 전류파형 (#5)
Fig. 5. Current waveform of search coil for one broken rotor bar(#5)

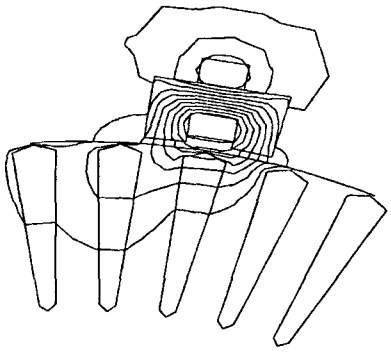


그림 4. 정상 회전자인 경우 자속분포
Fig. 4. Flux waveform for normal rotor bars

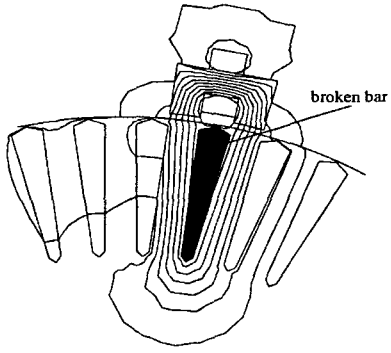


그림 6. 1개 회전자 도체가 단선된 경우 자속파형
Fig. 6. Flux waveform for one broken rotor bar

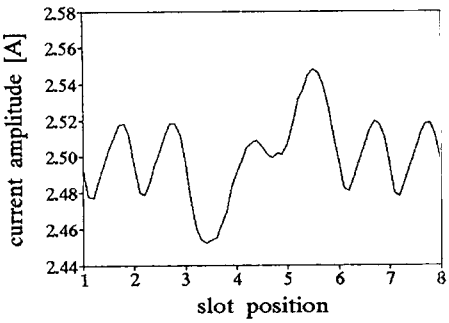


그림 7. 2개 회전자 도체가 연속으로 단선된 경우 전류파형 (#4, #5)

Fig. 7. Current waveform of search coil for two broken rotor bars(#4, #5)

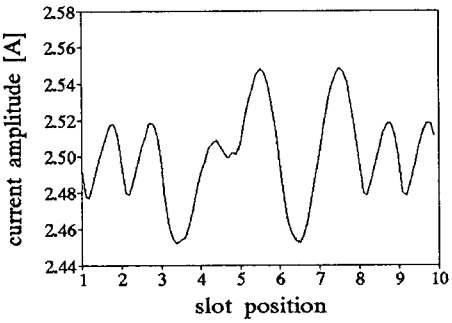


그림 10. 3개 회전자 도체가 단선된 경우의 전류파형(#4, #5, #7)

Fig. 10. Current waveform of search coil for three broken rotor bars(#4, #5, #7)

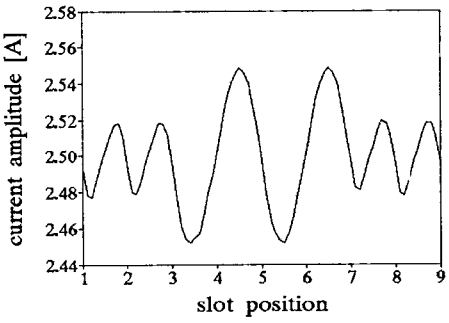


그림 8. 2개 회전자 도체가 하나 건너 단선된 경우의 전류 파형(#4, #6)

Fig. 8. Current waveform of search coil for two broken rotor bars(#4, #6)

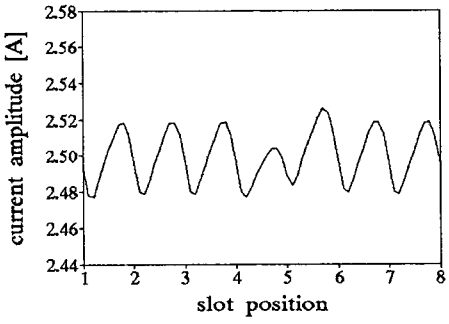


그림 11. 1개 회전자 도체의 저항이 높은 경우의 전류파형 (#5 도체 도전율 50[%])

Fig. 11. Current waveform of search coil for one high resistive rotor bar(#5 : 50% conductivity)

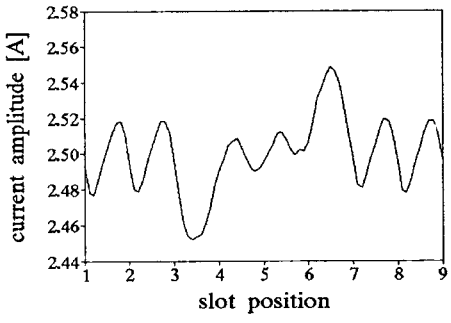


그림 9. 3개 회전자 도체가 연속으로 단선된 경우의 전류 파형(#4, #5, #6)

Fig. 9. Current waveform of search coil for three broken rotor bars(#4, #5, #6)

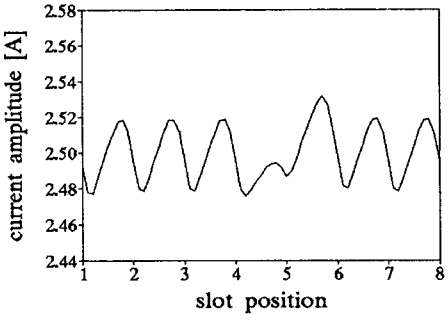


그림 12. 1개 회전자 도체의 저항이 높은 경우의 전류파형 (#5 도체 도전율 30[%])

Fig. 12. Current waveform of search coil for one high resistive rotor bar(#5 : 30% conductivity)

그림 5와 같으나 전류 파형의 최대치 크기는 불량 도체 도전율의 크기에 반비례하였다.

이상의 해석 결과로부터 전자석 코일에 흐르는 전류 파형을 분석하여 회전자 도체의 불량정도, 불량 갯수 및 불량 도체의 배치에 대한 정보를 추정할 수 있다.

3. 실험 및 검토

본 실험에 사용된 전동기는 5 마력 삼상 농형유도전동기로, 실험은 그림 13과 같이 구동 전동기를 서서히 구동하면서 고장신호 검출장치에 나타난 유기전압을 측정하였다. 결함이 있는 농형유도전동기의 회전자 도체를 구동 전동기로 회전시켜 고장신호 검출장치에 나타나는 유기전압 전압 파형을 측정할 수 있다. 본 실험에서는 회전자 도체의 회로가 완전히 끊어지는 경우에 대하여 측정하였다. 회전자 도체의 결함은 인위적으로 회전자 도체에 홈을 내어 고장 패턴을 형성하였다.

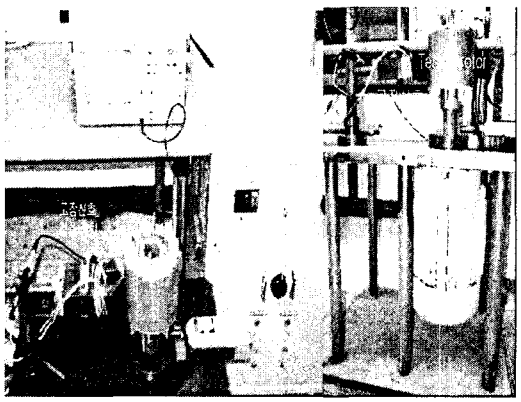
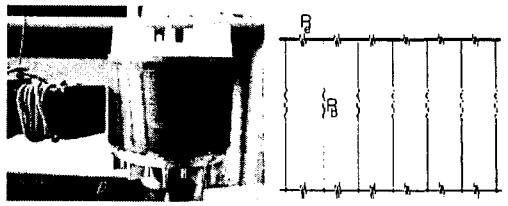


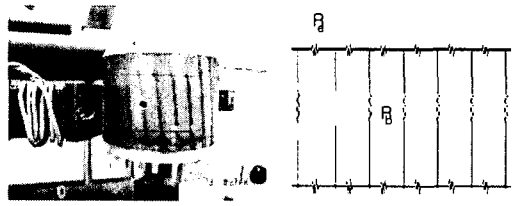
그림 13. 고장진단 실험 장치
Fig. 13. Experimental system for rotor fault diagnosis

그림 14는 정상정인 회전자를 가진 회전자와 회전자 회로를 나타낸다. 여기서 R_b는 회전자 도체의 저항, R_e는 엔드링 저항을 나타낸다. 그림 15~18은 각각 유도전동기의 회전자 도체가 1개 고장, 2개 연속 고장, 3개 연속 고장 및 고장 회전자가 하나 건너 배치된 경우(2개 불연속 고장)의 회전자 모양과 회로도를 나타내었다.



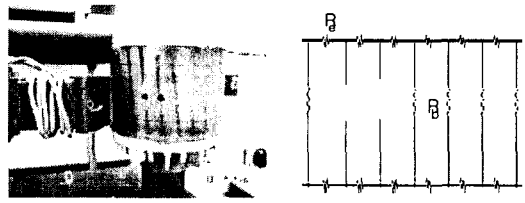
(a) 정상 회전자 (b) 회전자 회로도

그림 14. 결함이 없는 정상 회전자 및 회로도
Fig. 14. Normal rotor and rotor circuit with normal rotors



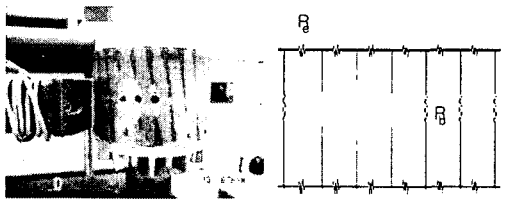
(a) 1개의 고장 도체를 갖는 회전자 (b) 회전자 회로도

그림 15. 1개의 회전자도체 고장과 회로도
Fig. 15. Abnormal rotor and rotor circuit with one broken rotor bar



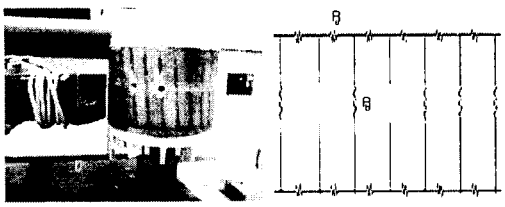
(a) 2개의 고장 도체를 갖는 회전자(연속) (b) 회전자 회로도

그림 16. 2개의 회전자도체 고장과 회로도
Fig. 16. Abnormal rotor and rotor circuit with continuous two broken rotor bars



(a) 3개의 고장 도체를 갖는 회전자(연속) (b) 회전자 회로도

그림 17. 3개의 회전자도체 고장과 회로도
Fig. 17. Abnormal rotor and rotor circuit with continuous three broken rotor bars



(a) 2개의 고장 도체를 갖는 회전자(불연속) (b) 회전자 회로도

그림 18. 2개의 회전자 도체 고장과 회로도(불연속 고장)
Fig. 18. Abnormal rotor and rotor circuit with discontinuous two broken rotor bars

그림 19에서 보는 바와 같이 회전자의 도체 결함이 없는 정상적인 경우에는 일정한 유기전압의 파형이 반복적으로 증가, 감소함을 알 수 있다. 동일한 유기전압 파형의 반복 갯수는 슬롯 수와 동일하다. 이는 1 슬롯 피치만큼 회전자가 회전할 때 자기저항이 변화하기 때문에 일어난 현상이다. 이론적으로는 회전자의 속도가 빠를수록 속도 기전력이 커서 고장시와 정상시의 구별이 쉬울 것으로 예상되지만 본 실험기의 경우 기계적 공차가 커서 회전 속도가 빠른 경우 파형의 진동으로 저속에서 실험을 실시하였다. 그림 20은 1개의 회전자 도체가 고장인 경우 실험 결과이다. 도체 1개가 고장 난 경우 고장 도체 부근에서 유기전압의 크기 및 모양이 변화함을 알 수 있다. 유기전압의 파형은 전류 파형과 거의 유사함을 알 수 있다. 유기전압의 크기는 인가전압 또는 자속의 세기, search coil 권수 등을 조절하여 개선할 수 있다고 생각된다. 그림 20~23은 각각 회전자 도체의 고장 패턴에 따른 유기전압의 파형을 보여준 것이다. 유기전압의 파형은 시뮬레이션에서 구한 전류 파형과 거의 근사함을 알 수 있다.

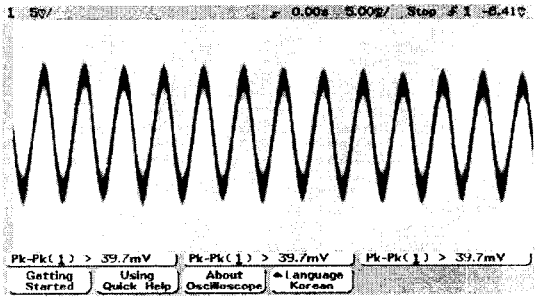


그림 19. 정상상태인 경우 전압 파형
Fig. 19. Induced voltage waveform of search coil for normal rotors

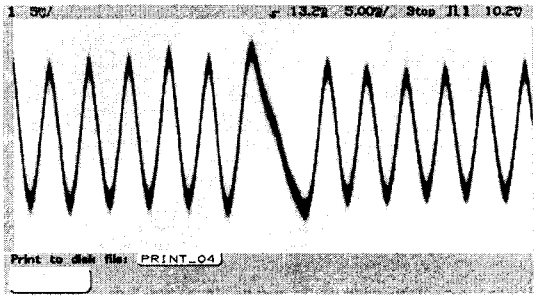


그림 20. 1개의 회전자 도체가 고장인 경우 전압 파형
Fig. 20. Induced voltage waveform of search coil for one broken rotor bar

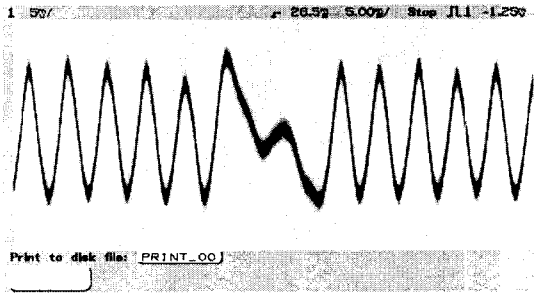


그림 21. 2개의 회전자 도체가 고장인 경우 전압파형 (연속 고장)
Fig. 21. Induced voltage waveform of search coil for continuous two broken rotor bars

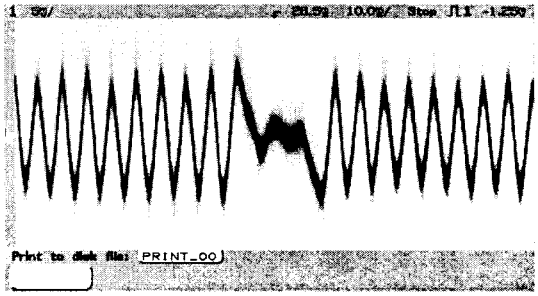


그림 22. 3개의 회전자 도체가 고장인 경우 전압 파형 (연속 고장)
Fig. 22. Induced voltage waveform of search coil for continuous three broken rotor bars

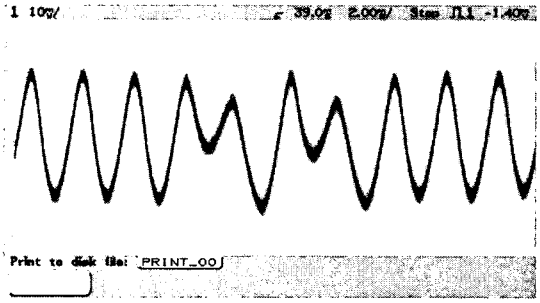


그림 23. 2개의 회전자 도체가 고장인 경우 전압 파형 (불연속 고장)
Fig. 23. Induced voltage waveform of search coil for discontinuous two broken rotor bars

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 농형유도전동기의 회전자 도체 고장 진단 방법을 제안하였다. 회전자 도체에 결함이 있는 경우 그 도체의 도전성이 떨어지므로 유도전류 및 전기자 반작용이 약해진다. 이런 현상을 이용하여 회전자 도체의 고장 정도를 도전율이 떨어지는 정도로 모의하여 수치해석 및 실험을 하여 고장시 전류 및 유기전압의 특징을 분석하였다. 정상 도체를 갖는 회전자의 경우에는 유기전압이 1 슬롯피치 동안 일정하게 슬롯 수만큼 증가와 감소를 한다. 그러나 결함이 있는 전동기는 고장의 수, 결함 정도, 결함이 있는 회전자 배치 방법에 따라서 유기전압 특성이 다르게 나타났다. 본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 5마력 3상 농형유도전동기를 대상으로 실험 장치를 구성하고 회전자에 임의로 고장 상태를 만들어 실험을 하였다. 회전자 도체의 상태에 따른 탐색코일의 유기전압 파형의 신호패턴을 측정하였다. 실험 결과 결함 유무에 따라서 신호 패턴이 시각적으로 구분할 수 있을 정도로 차이를 보였으며 고장의 내용을 파악할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구는 2004년도 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제관리번호 : R-2004-B-206) 주관으로 수행된 과제임.

References

[1] Chang-Eob Kim, et. al., "The fault diagnosis of rotor bars in squirrel cage induction motors by time stepping finite element method," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 23, no. 2, pp.2131-2134, 1997.
[2] Pavel N. Dobrodeyev, et. al., "Method for detection of broken bars in induction motors," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 36, no. 5, pp.3608-3610, 2000.
[3] John F. Bangura, et. al., "Diagnotics of eccentricities and bar/end-ring connector breakages in polyphase induction motors through a combination of time-series data mining and time-stepping coupled FE-state-apace techniques," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 39, no. 4, pp.1005-1013, 2003.
[4] Faiz J., Tabatabaei I., Sharifi-Ghazvini E., "A precise electromagnetic modeling and performance analysis of a three-phase squirrel-cage induction motor under mixed eccentricity condition," Electromagnetics, vol.24, no.6, pp.471-489, 2004.
[5] Byung-Hoon Chung, A study on the Fault Detection of the Induction Motors using Input Current Analysis, Ph.D. dissertation, Hoseo University, 2004.
[6] Chang-Eob Kim, A Study on the Analysis of Dynamic Characteristics in Single-sided Linear Induction Motors using Finite Element Method, Ph.D. dissertation, Hanyang University, 1995.
[7] B. Davat, Z. Ren and M. Rajoi-Mazenc, "The movement in field modeling," IEEE Trans. on Magnetics, vol.21, no.6, pp.2296-2298, 1985.
[8] 中田高義·高橋則雄, 電氣工學の有限要素法, 森北出版 株式會社, 東京,1991.

◇ 저자소개 ◇

김창업 (金昌業)
1960년 1월 1일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983~1997년 (주)효성 중공업기술연구소 책임연구원. 2000~2001년 University of Southampton(Post Doc.). 1997년~현재 호서대학교 전기공학과 부교수.

정교범 (鄭敎範)
1959년 12월 20일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 Univ. of Florida(박사). 1992~1993년 Virginia Tech (Post Doc.). 1993~1995년 한국전기연구소 선임연구원. 1995년~현재 홍익대학교 전자·전기·컴퓨터공학부 부교수.