

유한요소법을 이용한 농형유도전동기의 회전자 불량 진단에 관한 연구

김창업 · 정용배

서울시 영등포구 당산동 4가 93-1 동양타워 8층
효성중공업 기술연구소

(1996년 8월 21일 받음, 1996년 11월 28일 최종수정본 받음)

농형유도전동기의 회전자는 제조 과정에서 회전자 도체의 단선, 기포 발생으로 인한 회전자 도체의 저항 증가, 스류 불량 등 여러 가지 고장이 발생할 수 있다. 이와 같은 고장은 유도전동기의 성능을 저하시키므로 회전자를 조립하기 전에 고장 유무를 판단하면 조립에 드는 제조 비용을 절약할 수 있고 전동기의 신뢰성을 높일 수 있다. 본 논문에서는 이와같은 고장을 진단하는 방법의 하나로 유한요소법을 이용하여 회전자가 회전할 때 발생하는 전자석 코일에서의 유도 전류 파형을 검출하여 고장을 진단하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 5 Hp 삼상 농형유도전동기에 대해 고장전류를 검출하고 이를 해석 결과와 비교 분석하였다.

I. 서 론

유도전동기의 회전자 도체는 동 Bar 또는 알루미늄 다 이캐스팅으로 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 알 수 있는 방법이 요구된다. 지금까지 이와 같은 고장을 판별하는 방법으로는 실험에 의한 방법과 [1], 회전자 도체에 흐르는 전류의 스펙트럼 분석[2, 3]으로 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 회전자 도체의 고장 유무를 진단하는 방법으로서 유한요소법에 의하여 유도전동기 회전자 도체의 고장시 발생하는 자속량의 변화에 따른 전자석 코일에 흐르는 전류 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 [4, 5]에서만 회전자 회전할 때마다 요소를 재분할하고 나머지 영역에 대해서는 재분할하지 않는 방법을 사용하여 회전자가 이동할 때 요소 재분할에 소요되는 시간을 대폭 축소하였다. 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.

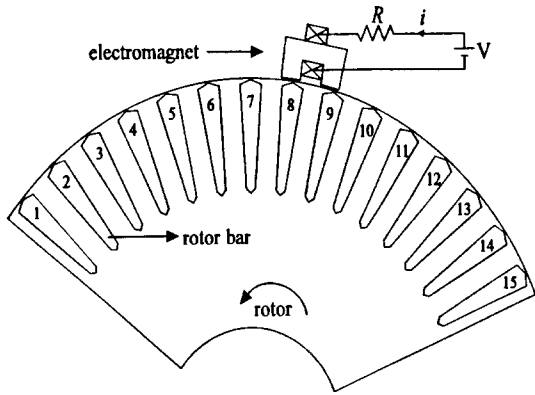
II. 유한요소 해석

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

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

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

식(1)의 우변 와전류항에서 속도항은 이동 좌표계를 사용하면 상대 속도가 없어진다 [7]. 또한, 2차축 와전류는 z축에 대하여 대칭으로 가정하여 $\nabla \phi$ 항은 생략하고 2차원으로 전개하면 식(1)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.



R : coil resistance 1.2 [Ω]
 i : current in coil [A]
 V : input dc voltage 3.0 [V]

radius of rotor : 58.75 [mm]
 height of electromagnet : 7.5 [mm]
 width of electromagnet : 12.2 [mm]

Fig. 1. 2-D finite element analysis model.

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0 + \sigma \frac{dA}{dt} \quad (2)$$

여기서, A 는 자기벡터 포텐셜의 z 축 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 시간미분항에 관해서는 차분근사식을 사용하여 시간에 대하여 이산화

하면 전체 시스템 행렬은 다음과 같다[8].

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

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

여기서, h 는 철심 적층폭, $[S]$ 는 절점 위치와 투자율에 관련된 시스템 방정식의 계수행렬로 대칭이며($n \times n$), $[M]$ 은 와전류에 관련된 계수 행렬이다[8].

권회수 N 인 전자석 코일에 쇄교하는 자속량은

$$\lambda = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = \frac{h}{3} \sum_{e=1}^{N_s} \left(\pm \sum_{i=1}^3 \frac{N}{S_p} \Delta^{(e)} A_i \right) \quad (5)$$

로 주어진다.

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

시각 t 에서 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 $t + \Delta t$ 에서 코일에 걸리는 유기전압은 다음과 같이 정리된다.

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

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 Fig. 2와 같이 공극을 3층으로 분할하고 가운데층만을 Δt 마다 재분할하는 moving band법을 사용하였다[5].

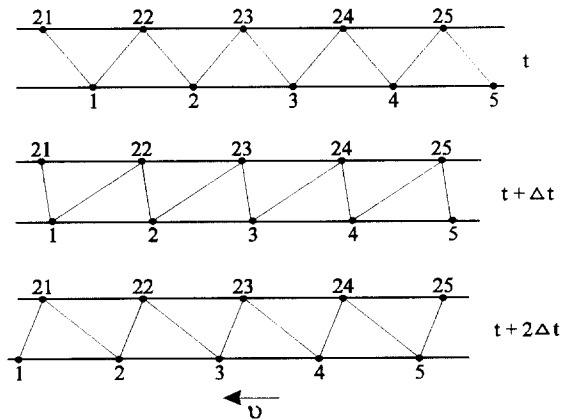


Fig. 2. Discretization process in the moving band.

III. 회전자 도체의 불량에 따른 전자석 코일의 전류 파형 분석

Fig. 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. Fig. 3과 Fig. 5, Fig. 7~12는 고장 종류별로 시간에 따라 회전자가 이동할 때 전자석 코일에 흐르는 전류 파형으로, 가로축은 시간에 따라 전자석 밀을 통과하는 회전자 도체의 위치를 나타낸다.

Fig. 3은 회전자 도체가 모두 정상인 경우 전자석 코일에 흐르는 전류의 파형을 나타내었다. 전류 파형은 일정 값을 기준으로 맥동하는 양상을 나타낸다. 전류 맥동의

원인은 회전자에 흐르는 유기 전류에 의해서 자속의 변화가 주기적으로 변화하기 때문에 생기는 속도 기전력에 의해서 일어난다. 이때의 자속 분포는 Fig. 4와 같다.

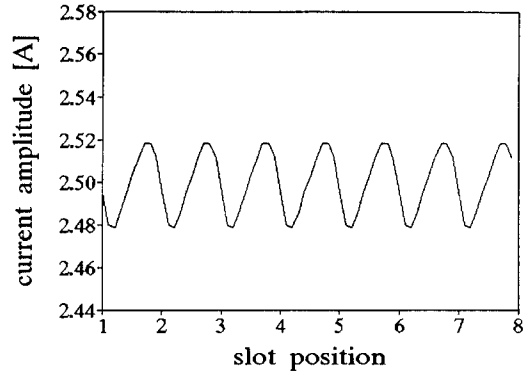


Fig. 3. Current amplitude for normal rotor bars.

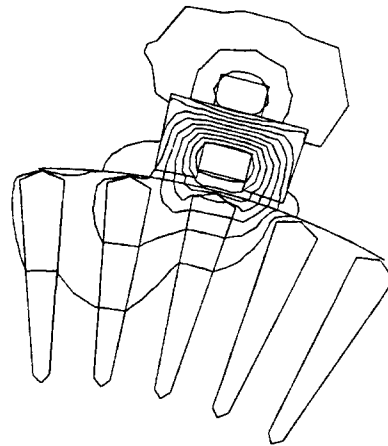


Fig. 4. Flux distribution for normal rotor bars. The direction of rotor rotation is counterclockwise.

Fig. 5는 회전자 도체 1개가 불량인 경우(5번 도체 단선)에 대하여 전자석 코일에 흐르는 전류 파형을 나타내며, Fig. 6은 이 때의 자속 분포를 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6으로부터 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.

Fig. 7과 Fig. 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

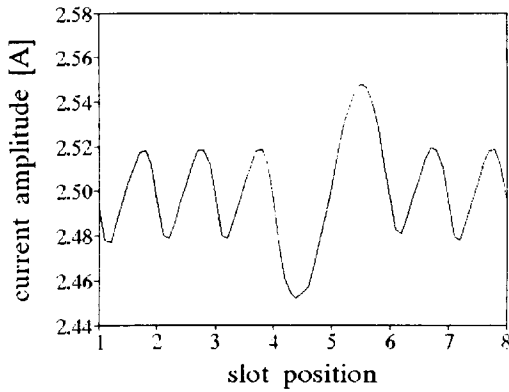


Fig. 5. Current amplitude for one broken bar(#5).

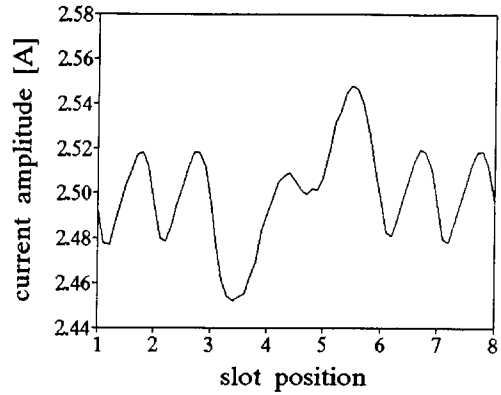


Fig. 7 Current amplitude for two broken bars(#4, #5).

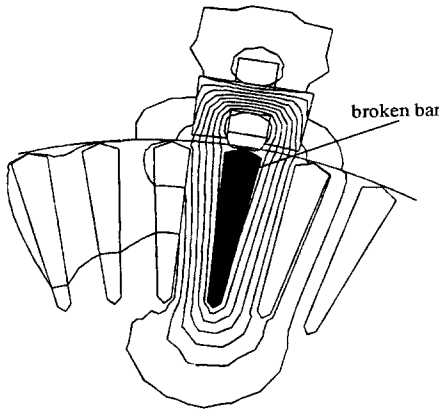


Fig. 6. Flux distribution for one broken bar. The direction of rotor rotation is counterclockwise.

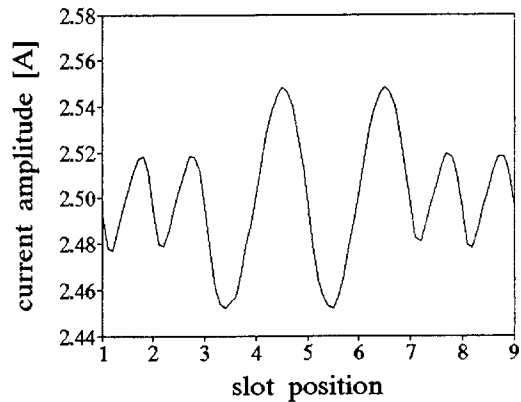


Fig. 8. Current amplitude for two broken bars(#4, #6).

코일에 흐르는 전류 분포를 나타낸 것이다.

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

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

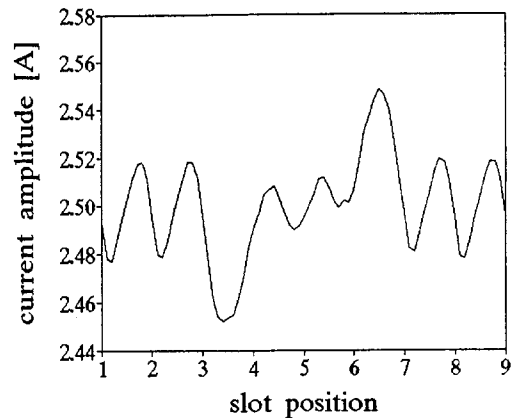


Fig. 9. Current amplitude for three broken bars(#4, #5, #6).

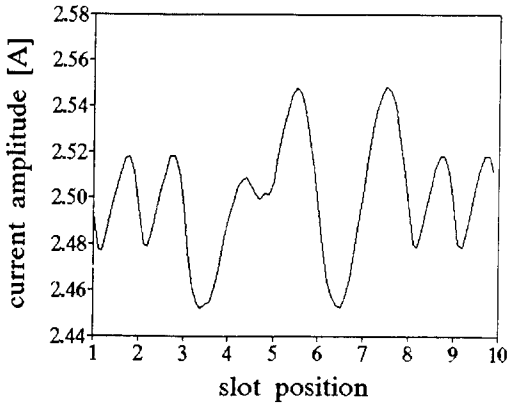


Fig. 10. Current for three broken bars (#4, #5, #7).

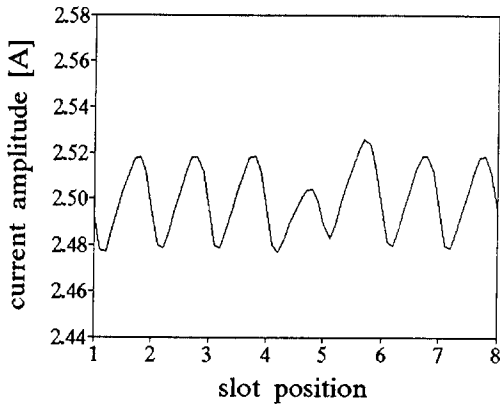


Fig. 11. Current amplitude for one highly resistive rotor bar (50% conductivity of normal rotor at #5 rotor bar).

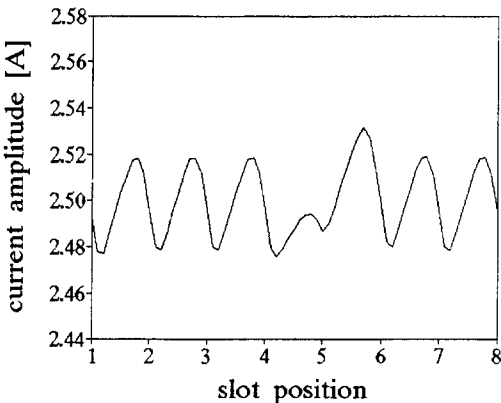


Fig. 12. Current amplitude for one highly resistive rotor bar (30% conductivity of normal rotor at #5 rotor bar).

형태로 파형이 나타났다.

Fig. 11과 Fig. 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 Fig. 5와 같으나 전류 파형의 최대치 크기는 불량 도체 도전율의 크기에 반비례하였다.

이상의 해석 결과로부터 전자석 코일에 흐르는 전류 파형을 알면 회전자 도체의 불량정도, 불량 개수 및 불량 도체의 배치에 대한 정보를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 Fig. 13과 같은 5 Hp 삼상 농형유도전동기를 대상으로

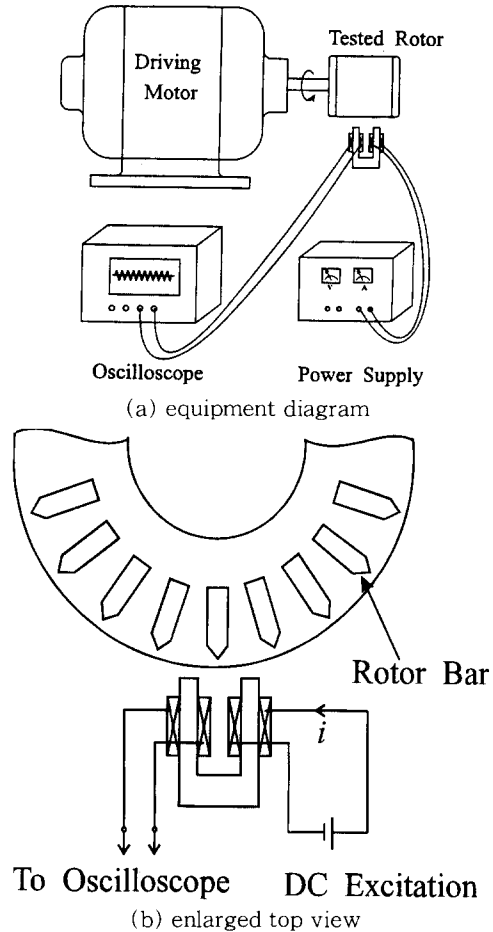


Fig. 13. Equipment diagram for checking rotor bars.

실험 장치를 구성하였다. Fig. 13(a)와 같이 5 Hp 구동 모터에 의해 시험할 회전자(5 Hp)를 커플링으로 연결하여 회전시키면서 전자석 코일에 흐르는 전류 또는 유기전압을 측정하였다. 이때, 고정자 치에 감은 코일의 저항 및 인가 전압은 해석치와 같이 각각 1.2 [Ω], 3.0 [V]로 하였으며 공극은 0.45 [mm], 회전 속도는 150 [rpm]으로 설정하였다. 회전 속도의 경우 이론적으로는 회전자의 속도가 빠를수록 속도 기전력이 커서 고장시와 정상시의 구별이 쉬울 것으로 예상되지만 본 실험기의 기계적 공차가 커서 회전 속도가 빠른 경우 파형의 진동으로 저속에서 실험을 실시하였다.

Fig. 13(b)는 시험할 회전자 도체 부분을 확대한 것이다. Fig. 14 및 Fig. 15는 각각 정상적인 회전자인 경우와 회전자 도체 1개가 단선 되었을 때의 유기전류 파형을 나타낸다. 실험 결과로부터 정상적인 경우와 불량 도체가 1개 존재하는 경우의 전류 파형이 모두 회전자 도체 도전

율이 정상치보다 낮은 도체가 존재하는 양상으로 되어 있다. 이는 본 연구에서 실험 대상으로 한 회전자의 diecast-ing 상태가 전반적으로 질이 좋지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 3과 Fig. 5의 계산 결과와 실험치를 비교하면 질이 좋지 않은 회전자의 경우에도 불량 도체가 있는 경우의 전류 파형은 정상치와 비교하여 확연히 구분할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 회전자 이동을 고려한 2차원 유한요소법을 사용하여 전자석에 나타나는 전류 파형으로 농철유도전동기의 회전자 도체 불량 내용을 판별하는 방법을 제안하였다. 해석 결과 회전자의 불량 정도, 불량 도체 수 및 불량도체의 배치 등에 따라 전자석에 흐르는 전류 파형이 정상도체인 경우와는 다른 양상을 보임으로써 고장의 내용을 판별할 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 내용중 회전자 도체 1개가 open되었을 경우의 유기전류 파형을 계산 및 실험 결과를 구했으며 비교 결과 유사한 특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제안한 방법은 농철유도전동기의 회전자 도체의 불량 진단 방법으로서 유용하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] L. C. Parker, G. E. Monchamp, Proceedings of AIEE Winter General Meeting (advance copy) (1951).
- [2] R. F. Walliser, C. F. Landy, IEEE Trans. Energy Conversion, **9**(1), pp. 152-158 (1994).
- [3] R. F. Walliser, C. F. Landy, IEEE Trans. Energy Conversion, **9**(1), pp. 159-164 (1994)
- [4] B. Davat, Z. Ren and M. Rajoi-Mazenc, IEEE Trans. Magnetics, **21**(6), pp. 2296-2298 (1985).
- [5] 임 달호, 김 창엽, 정 용배, 한국자기학회지, **5**(2), pp. 103-108 (1995).
- [6] 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).
- [7] Tang Renyuan, Hu Yan, Lu Zhanhong, Miao Lijie, IEEE Trans. Magnetics, **26**(2), pp. 1042-1045 (1990).
- [8] 김 창엽, 유한요소법을 이용한 편축식 선형유도전동기의 동특성 해석에 관한 연구, 공학박사학위논문 (1995).

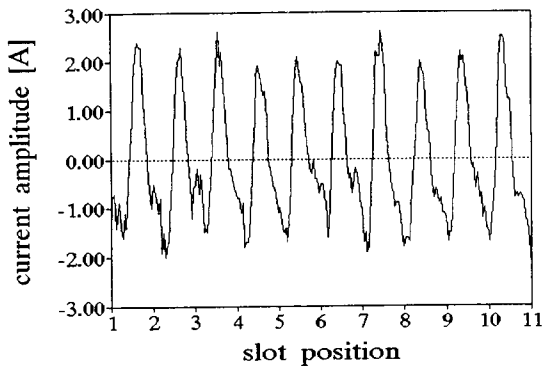


Fig. 14. Current amplitude for normal rotor bars (measured).

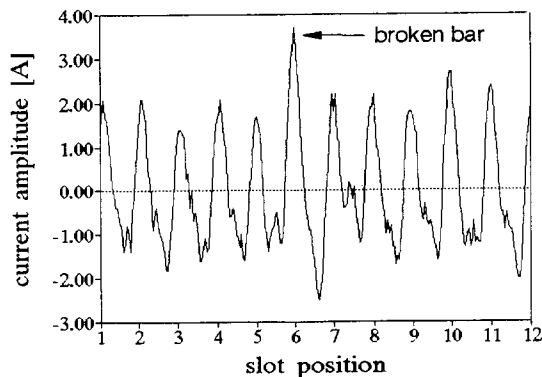


Fig. 15. Current amplitude for one broken bar (measured).

A Study on the Fault Diagnosis of Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors by Finite Element Method

Chang Eob Kim, Yong Bae Jung

Research and Development Institute, Hyosung Industries Co., Ltd., Dongyang Tower 8F.

4-Ga, Dangsa-Dong, Youngdungpo-Gu, Seoul 150-044

(Received 21 August 1996, in final form 28 November 1996)

The squirrel cage rotors of induction motors may have several faults such as broken bars, bad spots in end ring and abnormal skew caused by improper processing. These faults may cause bad effects on the performance of the induction motor. This paper proposes the detecting technique of these faults by analyzing the induced current of the detecting electric magnet, using 2-D finite element method taking account of the rotor movement.