

폐슬롯 구조의 회전자를 가지는 유도전동기 회전자 브릿지부분의 자기포화현상 해석

이학용*, 한송엽*, 이기식**
 *서울대학교 전기공학부, **단국대학교 전기공학과

**Nonlinear Analysis of the Rotor Bridge
 in a Induction Motor with Closed Slots**

Hak-yong Lee*, Song-yop Hahn*, Ki-sik Lee**

*School of Elec. Eng., Seoul Nat'l Univ. **Dept. of Elec. Eng., Dankook University

Abstract - The starting characteristics of induction motors strongly depend on the leakage reactance and resistance of stator winding and rotor circuits. The magnetic field saturation in the rotor bridge of closed slot rotor makes it very difficult to compute the leakage reactance of rotor bars. This paper describes a comparison between timestep finite element analysis, time-harmonic analysis and experimental results for a test model which can represent the nonlinear behaviour of the rotor bridge.

에 대해 소개한다. 특히 폐슬롯 구조의 유도전동기 회전자 브릿지 부분과 같이 포화가 극심하게 일어나는 부분에 대한 선형화방안에 대비해 시간차분해석법을 통한 해석결과, 선형화한 재질을 이용한 해석결과와 실제실험결과를 비교한다.

2. 비선형 재질에서 주파수영역 해석법

서론에서 설명한 바와 같이 $j\omega$ -해석법은 선형시스템에 대해 적용할 수 있는 해석법이다. 따라서 비선형 재질을 갖는 시스템을 해석하기 위해서는 원하는 목적에 맞는 물리량을 구하기 위해 비선형 재질을 등가적인 선형 재질로 변환하는 과정이 필요하다. 자기준정적(Magneto-Quasistatic)시스템 문제에서 비선형 자성체의 유효투자율(effective permeability)를 구하는 여러 가지 방법을 소개하면 다음과 같다.

1. 서론

유도전동기의 기동토크와 최대토크는 유도전동기 등가 회로관점에서 보았을 때 고정자와 회전자의 누설리액턴스와 저항에 크게 좌우된다. 따라서 기동특성의 정확한 해석을 위해서는 누설리액턴스의 정확한 해석이 요구된다.

여러 가지 유도전동기 중에 저용량의 유도전동기에 주로 쓰이는 폐슬롯(closed slot) 구조의 회전자를 가지는 유도전동기의 회전자 슬롯 브릿지 부분은 자기포화가 심하게 일어나게 되고 이 브릿지부분의 심한 자기포화현상을 어떻게 고려하느냐 하는 것은 누설리액턴스 계산에 큰 영향을 미치게 된다.

이러한 비선형 재질을 가지는 재료를 해석하기 위해서는 시간차분법과 같이 시간에 따라 변화하는 재료의 특성을 고려할 수 있는 해석법이 요구된다. 그러나 시간차분해석에는 많은 해석시간이 요구되고 이러한 해석법은 실제 기계의 설계에 응용되기에는 어려움이 있다.

유도전동기와 같이 정현전압원에 의하여 구동되고 유도전류가 발생하는 시스템의 해석에는 상태변수를 복소변수를 사용하여 시간에 대한 변화를 한 가지 주파수로 고정하여 해석하는 주파수영역 해석법(이하 $j\omega$ -해석법)이 사용되고 있다. $j\omega$ -해석법은 시간변화함을 손쉽게 처리하여 시변자장 문제를 쉽고 빠르게 처리할 수 있는 장점이 있다.

그러나 이러한 $j\omega$ -해석법은 기본적으로 선형 시스템에 대해 적용할 수 있는 해석법이다. 따라서 이러한 $j\omega$ -해석법을 비선형 재질을 가지는 문제에 적용하려면 관심 있는 특성을 해석하기에 적절하게 비선형 시스템을 선형 시스템으로 근사화하는 과정이 반드시 포함되어야 한다.

와전류 문제에서 자성재료의 비선형성을 선형화하는 기법에는 실효치법, 에너지법, 평균에너지법등 다양한 방법들이 제안되었다.[1]~[6] 그러나 이러한 논문들에서는 시간차분 해석과의 비교를 통하여 어떤 방법이 어느 변수를 사용한 모델링에는 적절하다는 결론을 내리고 있지만 실제 모델에 대한 실험을 통하여 결론을 얻고 있지 않다.

본 논문에서는 $j\omega$ -해석법이나 기타 선형해석법에 사용하기 위해 전기장관의 비선형성을 선형근사하는 방법

2.1 RMS 법

자기벡터포텐셜을 변수로 하여 정식화하는 경우에는 자속밀도 \vec{B} 가 정현적으로 변한다고 모델링하는 경우이다. 자속밀도의 최대치를 \hat{B} 라 하면 이 경우 유효투자율을 다음과 같이 구한다.

$$\frac{1}{\mu_{eff}} = \frac{H_{rms}}{B_{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T H^2(t) dt}}{\hat{B}/\sqrt{2}} \quad (1)$$

또한 자기스칼라포텐셜을 변수로 하여 정식화하는 경우에는 자기장의 세기 \vec{H} 가 정현적으로 변한다고 모델링하는 경우이고 자기장의 세기의 최대치를 \hat{H} 라 하면 유효투자율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mu_{eff} = \frac{B_{rms}}{H_{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B^2(t) dt}}{\hat{H}/\sqrt{2}} \quad (2)$$

2.2 에너지법

자기장의 변화속에 자성재료가 놓여 있을 때 외부 자계와 자기에너지를 주고 받게 된다. 이러한 에너지 교환의 보존법칙을 이용하여 유효투자율을 구할 수 있다. 자기벡터포텐셜을 이용하여 정식화를 할 때에는 다음 식과 같이 유효투자율을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\mu_{eff}} = \frac{2}{B^2} \int_0^{\hat{B}} H dB \quad (3)$$

마찬가지로 자기스칼라포텐셜을 이용하여 정식화할 때에는 다음 식과 같이 코에너지를 이용하여 유효투자율을

구한다.

$$\mu_{eff} = \frac{2}{H^2} \int_0^H B dH \quad (4)$$

2.3 평균에너지법

한 주기동안의 평균에너지 밀도를 이용하여 유효투자율을 구하는 방법이다. 자기벡터포텐셜을 이용하여 정식화할 때 한 주기동안의 평균에너지는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\langle \omega(t) \rangle = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} \left(\int_{B_0}^{B_1} H dB \right) dt \quad (5)$$

따라서 유효투자율은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{\mu_{eff}} = \frac{4 \langle \omega(t) \rangle}{B^2} \quad (6)$$

마찬가지로 자기스칼라포텐셜의 경우에는 평균코에너지는 다음식과 같이 주어진다

$$\langle \omega_{co}(t) \rangle = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} \left(\int_{H_0}^{H_1} B dH \right) dt \quad (7)$$

$$\mu_{eff} = \frac{4 \langle \omega_{co}(t) \rangle}{H^2} \quad (8)$$

3. 해석 및 실험

3.1 해석모델

그림 1과 같이 1마력 단상유도전동기의 회전자를 이용하여 해석 및 실험모델을 정하였다. 알루미늄 다이캐스팅을 하지 않고 회전자 바가 없이 회전자를 제작한 후에 그림과 같이 권선을 하였다. 실험모델의 주된 사양은 아래의 표 1과 같다. 표에서 권회수는 그림 1에서 한 코일의 권회수를 의미한다.

3.2 시간차분 해석결과

먼저 모델에 대해 시간차분 유한요소해석법을 이용하여 유효투자율이 아닌 재료의 비선형곡선을 그대로 이용하여 자장해석을 하였다. 그림 2에 각 전류값 상황에서

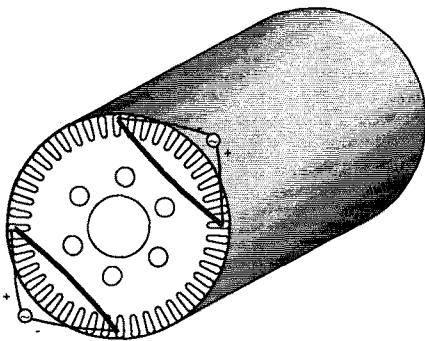


그림 1. 해석 및 실험 모델

표 1. 실험모델 사양

외경	94.2 [mm]	내경	26 [mm]
슬롯수	44개	브릿지 두께	0.46 [mm]
적층길이	60 [mm]	강판재질	S60
권회수	10 turn	권선저항	0.24[Ω]

슬롯부근의 자속분포도를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 처음에 전류값이 작을 때에는 브릿지 부분으로 거의 모든 자속이 통과하지만 전류가 커질 수록 브릿지 부분의 포화에 의해 공기중으로 지나가는 자속이 증가하는 것을 볼 수 있다. 브릿지 부분의 자속밀도는 그림 2의 (b)의 경우처럼 전류가 0.4[A]수준에서 1.6[T]를 초과하여 포화에 이르러 있고 (f)와 같이 4[A]수준에서는 2[T] 이상의 자속밀도가 발생한다.

또한 코일의 저항이 거의 없다고 보고 회로의 리액턴스를 구하였다. 재료의 특성이 비선형이므로 정현전압을 인가하더라도 전류는 비정현이 되므로 리액턴스의 값을 하나로 정의하기가 어렵다. 따라서 세가지 개념으로 리액턴스 값을 정의하여 구하였다. 전압의 실효치에 대해 전류의 실효치, 전류의 기본파의 실효치, 전류의 최대치를 $\sqrt{2}$ 로 나눈 값등을 이용하여 리액턴스를 구하였다. 그림 3에 그결과를 나타내었다. 전압의 변화에 따른 리액턴스변화가 상당히 심한 것을 알 수 있다.

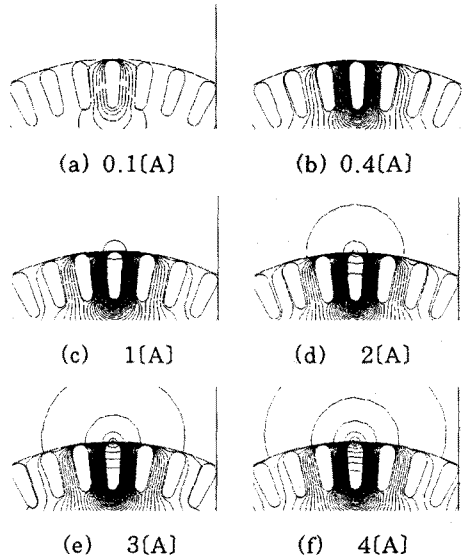


그림 2. 각 전류입력시 브릿지부분의 자속밀도분포

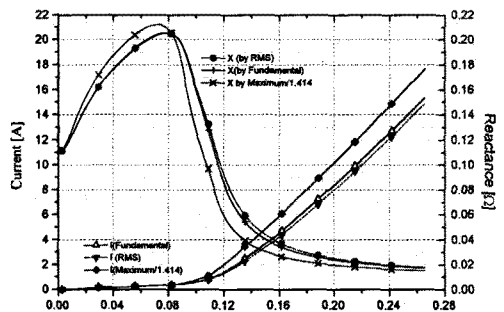


그림 3. 인가전압 변화에 따른 전류 및 리액턴스 변화 (I: 전류, X: 리액턴스)

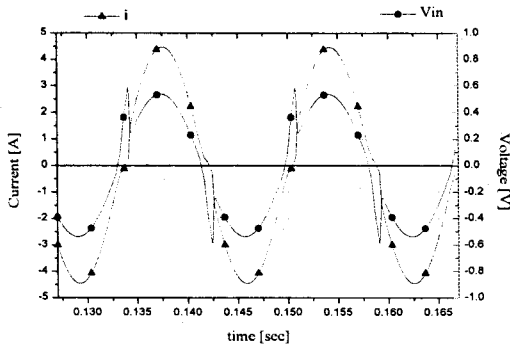


그림 4. 시간차분해석결과 전압, 전류 파형
(i : 입력전류, Vin : 단자전압)

또한 서로 다른 방식으로 정의하여 계산한 리액턴스 값이 어느 정도의 차이는 있지만 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있었다.

자장해석 결과 리액턴스성분과 회로의 저항이 거의 같은 수준이었고 임피던스가 $0.5[\Omega]$ 미만으로 작기 때문에 전압원 내부저항을 고려하여 전압-전류 파형을 해석하였다. 그림 4와 같이 비선형 인덕턴스의 영향으로 단자 전압의 왜곡이 심한 파형으로 계산되었다.

3.3 실험 결과

무부하 전압이 정현으로 변하는 전압원에 모델회로를 연결하여 전압-전류 파형을 측정하였다. 전류실효치가 2.7[A]일 때의 전압, 전류 파형을 그림 5에 나타내었다. 해석과 마찬가지로 전압원 내부임피던스의 전압 강하에 의해 입력전압에 심한 왜곡이 있다.

실측 파형과 해석결과 파형을 비교해 보면 비슷한 수준의 단자 전압에 대해 해석상의 전류값이 측정치보다 작은 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 기존의 자화곡선이 브릿지와 같이 좁은 부분에 직접 적용하기에 적절하지 않거나 제작상 오차등이 요인이 될 수 있을 것이 다.

2장에서 설명한 유효투자율을 사용하여 $j\omega$ -해석법을 이용한 경우에도 실험치와 비교하여 많은 오차를 포함하고 있었다.

4. 결 론

페슬롯 구조의 회전자 브릿지부분의 자기포화현상을 해석, 측정해 볼 수 있는 실험 모델을 제작하여 해석 및 실험을 통하여 비교하여 보았다.

현재로서는 가장 정확한 해석법으로 볼 수 있는 시간차분 유한요소 해석법으로 해석한 결과, 리액턴스분이 실측치보다는 적게 해석되었고, 이에 대한 보다 깊은 연구가 필요하다.

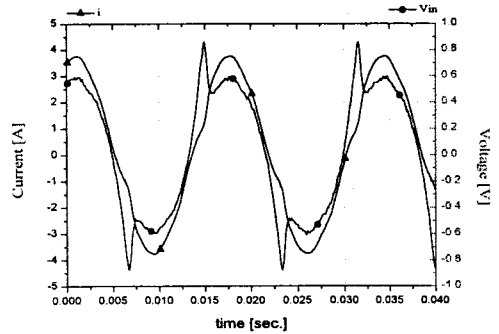


그림 5. 실측 전압, 전류 파형
(i : 입력전류, Vin : 단자전압)

회전자 브릿지와 같이 포화가 심한 곳에 적용할 수 있는 선형화 기법에 대한 연구를 위해 본 논문에서 제시한 것과 같은 모델의 정확한 해석이 선행되어야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. D. Lavers, "Finite element solutions of nonlinear two dimensional TE-mode eddy current problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 19, pp.2201-2203, 1983
- [2] Dieter Lederer, Arnulf Kost "Modelling of Nonlinear Magnetic Materials using a Complex Effective Reluctivity", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp.3060-3063, 1998
- [3] H. Hedia, J.-F. Remaels, P. Dular, A. Nocolet, A. Genon, W. Legros, "A Sinusoidal Magnetic Field Computation in Nonlinear Materials", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 6, pp.3527-3529, 1995
- [4] Y. Du Terrail, J. C. Sabonnadière, P. Masse, J. L. Coulomb, "Nonlinear Complex Finite Element Analysis of Electromagnetic Field in Steady-State AC Devices", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 20, No. 4, pp. 549-552, 1984
- [5] Gerhard Paoli, Oszkár Biró, Gerhard Buchgraber, "Complex Representation in Nonlinear Time Harmonic Eddy Current Problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp. 2625-2628, 1998
- [6] Gerhard Paoli, Oszkár Biró, "Time harmonic eddy currents in non-linear media", The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical Engineering, Vol.17, No. 5/6, pp.567-575, 1998