

히스테리시스를 고려한 전기기기의 전압원 유한요소 해석

*이 석희 김 홍규 정 현교 **홍 선기
*서울대학교 전기공학부, **호서대학교 전기전자제어공학부

Voltage Source Finite Element Analysis of Electrical Machines Considering Hysteresis Characteristics

*Seok-Hee Lee, Hong-Kyu Kim, Hyun-Kyo Jung and **Sun-Ki Hong
*School of Electrical Eng., Seoul Ntnl Univ., **School of Electrical Eng., Hoseo Univ.

Abstract - In this paper, voltage source FEA considering hysteresis characteristics for a simple electrical system is presented because most electrical machines is used under the voltage sources. The magnetization dependent hysteresis model is used for this analysis and the magnetic materials considered in this simulation are iron core and semi-hard material. For a sinusoidal voltage source, we got acceptable current wave form which is calculated.

1. 서 론

대부분의 전기기기는 자성재료의 특성을 이용하고 있으며, 이러한 자성재료들은 모두 히스테리시스 특성을 갖고 있다. 특히 강자성 재료가 이용되는 전기기기를 정밀하게 해석할 필요가 있는 경우, 히스테리시스를 고려할 필요가 있다. 형상이 복잡해지면 전자계에 대한 해석을 해석적으로 풀기 곤란하고, 이 경우 유한요소 해석법이 유리하다. 그러나 일반적인 유한요소 해석에서는 전류 밀도를 입력으로 하지만 대부분의 전기기기는 전압을 입력으로 사용하므로 전압원을 입력으로 하는 해석이 필요하게 된다. 본 논문에서는 전기기기 중 단순한 인덕터 형태의 철심 코어와 반경질 자성 재료로 구성된 기기에 대하여 자화의존 스칼라 프라이자흐 모델을 이용하여 히스테리시스를 모델링하고, 이를 유한요소 해석법과 결합하고, 다시 전압원과 결합된 유한요소 해석을 수행했다. 이로부터 인덕터 또는 변압기 등의 돌입 전류를 정확하게 모사할 수 있게 되었으며, 나아가 전동기 등의 일반적인 해석에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 본 론

2.1 히스테리시스 루프 계산법

프라이자흐 모델을 이용해서 히스테리시스 루프를 계산하는 방법에는 분포함수를 이용하는 방법과, 에버렛 함수를 이용하는 방법이 있다. 이 중 에버렛 함수를 이용하는 방법은 분포함수를 이용하는 방법에 비해 메모리

및 계산 속도 면에서 유리하다[1]. 본 논문에서는 실험을 통해 1차 전이곡선을 얻어내고 이를 이용해서 구해진 에버렛 함수값을 에버렛 다이어그램에 대입하고, 에버렛 다이어그램을 삼각형 요소로 세분화하여 이를 히스테리시스 루프 계산에 사용했다.

2.2 히스테리시스 특성을 고려한 유한요소 해석

일반적인 유한요소 해석시에는 각 요소의 자화값과 투자율을 상수로 놓고 계산을 수행한다. 그러나 히스테리시스를 고려할 경우, 투자율과 자화는 히스테리시스 루프상의 위치에 따라 변하는 값을 갖게 된다. 이를 해결하기 위해서 반복법이 사용된다. 해석의 첫 단계에서는 자성체의 모든 요소에서의 투자율을 같게 하여 해석을 한다. 즉 영구자석이 없는 문제에 대한 유한요소 해석을 하여 유한요소 해석에 필요한 데이터인 잔류자속 밀도와 리코일 투자율을 자화의존 모델로부터 계산한 후 다시 유한요소 해석을 한다. 해석의 초기치에 가정된 투자율과 자화값으로부터 자속밀도를 계산하면, 이전 스텝의 자화와 자계값으로부터 이 자속밀도가 나오는 현재 스텝의 자화와 자계값을 반복계산에 의해서 구한다. 이때 반복 계산시의 수렴 기준은 다음과 같이 자속밀도를 기준으로 하면 안정적인 값을 얻을 수 있다.

$$B_n^* > u_0 H_n^* + M_n^* \quad : \quad H_n^* \text{ 감소} \quad (1)$$

$$B_n^* < u_0 H_n^* + M_n^* \quad : \quad H_n^* \text{ 증가} \quad (2)$$

자계와 자화값이 결정되면, 유한요소 해석의 입력으로는 가투자율을 이용하고, 이에 해당하는 자화값을 계산하며, 유한요소 해석은 영구자석 문제를 적용한다. 이러한 과정을 수렴 오차를 만족할 때까지 반복한다[2]. 그림 1은 이러한 계산 과정을 보이고 있는 흐름도이다.

2.3 전압원을 이용한 유한요소 해석

일반적 유한요소 해석에서는 전류밀도를 입력으로 하

여 계산을 수행한다. 그러나 실제로는 인가전압이 주어 지므로 전류를 구하여서 유한 요소해석의 입력으로 주어 야 한다. 식 (1)은 전압과 전류, 쇄교자속의 관계를 나 타낸다.

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

여기서 V: 인가전압, R: 코일 저항, i: 전류,
N: 턴 수, ϕ : 자속

식(3)을 시뮬레이션을 위해 이산화하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$V = Ri + N \frac{\phi^k - \phi^{k-1}}{\Delta t} \quad (4)$$

여기서 ϕ^k : 현 스텝 자속, ϕ^{k-1} : 이전 스텝 자속,
 Δt : 시간간격

전체 해석 과정은 그림 2와 같다.

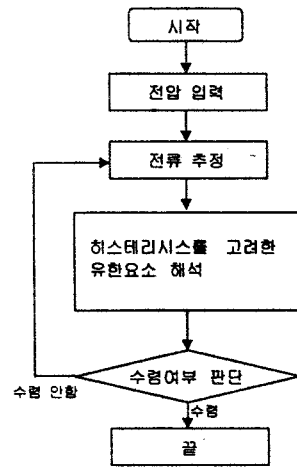


그림 2. 전압원 FEM 해석 흐름도

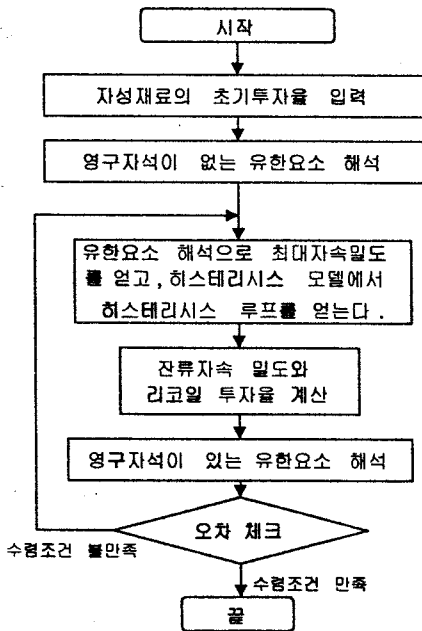


그림 1 반결질 자성 재료 유한요소 해석

식(3)에서 ϕ^k 는 유한요소 해석을 통해서 구해져야 한다. 그러나 주어지는 값은 i 가 아닌 V 이므로 i 의 값을 추정하여 유한요소 해석을 수행한 후 이 결과를 식 (4)에 넣어 비교한다. 즉

$$error = |V - Ri - N \frac{\phi^k - \phi^{k-1}}{\Delta t}| \quad (5)$$

을 최소화하는 i 를 찾는 최적화 문제가 된다. 본 논문에서는 1차원 최적화 기법 중 수렴속도가 빠른 것으로 알려져 있는 피보나치 방법[3]을 사용해서 계산을 수행했다.

3. 시뮬레이션 및 검토

전압이 정현적으로 변화할 때 자성체 내의 히스테리시스 현상을 고려한 해석 알고리즘의 확인을 위해서 그림3과 같은 간단한 코어 형상 모델에 이 방법을 적용하였다. 그림에서 오른쪽의 코어 내 사각형 영역이 히스테리시스 모델이 적용되는 영역이며, 나머지 코어 영역의 투자율은 일정하게 하였다. 코일 쇄교 자속은 왼쪽 사각형의 코일 영역에서 계산된다. 그림4는 해석 결과 얻어진 임의의 전압 값에 대한 자속 분포를 나타내며, 시뮬레이션에 사용된 자성체의 투자율이 약 10 ~ 100사이이며, 투자율이 일반 철보다 낮기 때문에 누설 자속이 발생하는 것을 볼 수 있다.

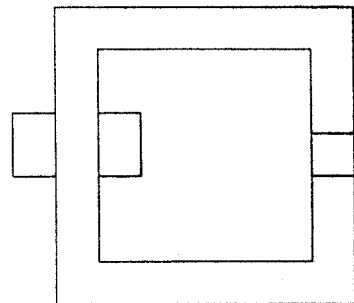


그림 3. 해석 모델

그림5는 인가 전압이 10[V], 코일 저항이 1[Ω]인 경우의 전압 파형을, 그림6은 계산된 전류 파형을 보여 준다. 그림 7은 자성체 영역의 임의의 요소에서 계산된 히스테리시스 루프를 나타낸다. 해석의 초기에는 자성체가 탈자된 것으로 가정하였기 때문에 초기자화 곡선상에서 루프가 그려졌다.

4. 결 론

본 논문에서는 전압원에 대한 전기기기의 히스테리시스를 고려한 유한요소 해석법에 대하여 연구하였다. 해석 대상으로 인덕터 형태의 철심 코어와 반경질 자성 재료로 구성된 기기에 대하여 자화의존 스칼라 프라이자흐 모델을 이용하여 히스테리시스를 모델링하고, 이를 유한요소 해석법과 결합하고, 다시 전압원과 결합된 유한요소 해석을 수행하였다. 이로부터 기기의 전류 파형을 알아 낼 수 있었고, 전압원에 대한 정확한 기기의 특성 해석을 가능하게 하였다. 이로부터 인덕터 또는 변압기 등의 돌입 전류를 정확하게 모사할 수 있게 되었으며, 나아가 전동기 등의 일반적인 해석에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

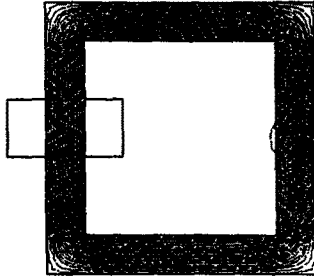


그림 4. 자속 루프도

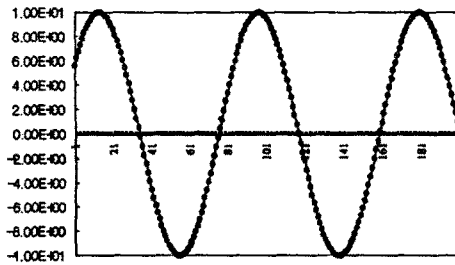


그림 5. 전압 파형(최고치 = 10[V])

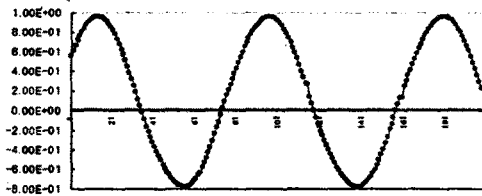


그림 6. 전류 파형

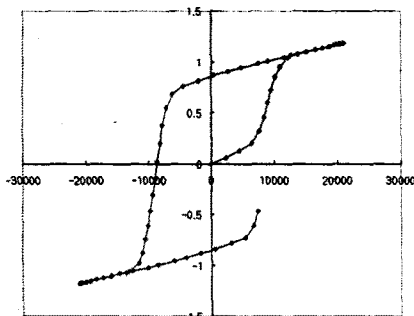


그림 7. 자성체 요소 내의 히스테리시스 루프

(참 고 문 헌)

- (1) 홍선기, 이상훈, 원중수, "자화의존 히스테리시스 모델의 특성 시뮬레이션", 전기학회 논문지 42권 6호 pp.9, 1993년.
- (2) 김홍규, "자화의존 프라이자흐 모델을 이용한 히스테리시스 전동기의 유한요소 해석", 서울대학교 공학석사학위논문, 1997년
- (3) Singiresu S. Rao, "Engineering Optimization Theory and Practice", John Wiley & Sons, Inc., 1996