한국전기전자재료학회 2002년도 춘계학술대회 논문집

자성재료를 이용한 전자에너지변환기기의 설계 및 특성

Design and Characteristic of Electromagnetic Energy Conversion Devices Using Magnetic Materials

홍정표, 하경호
Jung-Pyo Hong, and Kyung-Ho Ha

Abstract

In order to improve the capability of magnetic circuit, magnetic materials are used for all kinds of electromagnetic energy-conversion devices. This paper presents the analysis method considering magnetic properties of the magnetic material and analyzes that the effects of magnetic materials. In addition, it is described that the requirements of magnetic materials for the improvement of electric machines. Several application examples using a metal powder in electromagnetic energy conversion devices is introduced.

Key Words : Electromagnetic energy conversion, magnetic circuit, magnetic material and metal powder,

1. 서 론

전기기기(電氣機器)는 자기에너지를 매개로 하여 전기 · 기계에너지 변환, 또는 전기 · 전기에너지 변환을 행하는 기기로서 비교적 간단하며 쉽게 다른 형태의 에너지로 변환이 가능하고 제어가 용이하며 자동화가 가능한 이점을 가지고 있다. 이러한 전자에너지 변환기기들은 전원을 공급하는 도체와 도체를 취부 할 수 있는 기구부의 구조로 구성되고, 각 구성 요소는 전기에너지와 자기에너지를 전달하는 경로의 역할을 하게된다. 기기 내의 자기회로를 구성하고 있는 자로의 재질 등에 의해서 특성이 결정되므로, 자성재료의 특성이 전자에너지변환기기의 성능을 좌우한다. 따라서, 에너지 변환율을 극대화하기 위해서 효율적인 자기회로 구성과 손실을 최소화할 수 있는 자성재료의 선택이 중요하다 [1,2].

근래 산업 분야에 다양하게 응용되고 있는 각종 전자에너지 변환기기는 자기회로 설계기술, 전력전자제어 기술의 발달과 더불어 자성재료의 자기적 특성의 향상에 힘입어 소형화, 경량화 및 고효율화를 실현할 수 있는 추세에 있다.

본 논문에서는 기본적인 에너지 변환과정과 자기회로를 구성하기 위한 재료의 물리적 특성이 변환기들의 동작특성에 미치는 영향을 설명하고, 에너지 변환기기의 자기회로 설계 기술과 자성재료의 손실 해석방법을 기술하였다. 또한, 최근 메탈파우다(Metal powder)을 적용한 전동기, 리액터등과 같은 에너지변환기기의 적용사례를 소개하였다.

창원대학교 전기공학과 (창원시 사림동 9번지)
Fax: 055-263-9956
E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr
Home page: http:\\ecad.eecu.net

2. 전자에너지변환기의 자기회로 설계

2.1 전자에너지 변환원리

전기에너지와 기계에너지의 변환에 이용되는 물리현상중 에너지변환기기로서 전자기 현상을 이용하는 전기기기는 그림 1과 같이 플레밍의 법칙으로 전기계와 기계계를 결합한다. 즉, 전기적인 입력 전류 i로 공급되어지는 전기에너지는 자기에너지로 대부분 공극에 저장하게 되는데 움직일 수 있는 기구부 구조를 가진다면 자기회로에 저장되는 자기에너지를 제외한 나머지는 기계에너지로 변환되어 가동부가 움직이는 힘 f 를 발생한다.

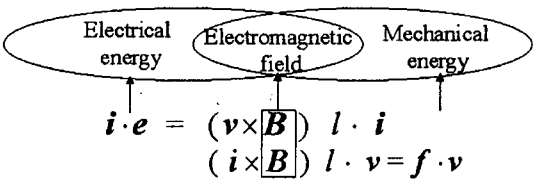


그림 1. 에너지 상호 변환

Fig. 1. Energy conversion of electromechanical system

자성체를 이용한 전기기기에서, 자속이 통하는 통로를 자기회로 또는 자로라 한다. 이때 기자력 F와 자기저항 R_m및 자속 Φ과의 관계는 암페어 주회적분법칙으로부터 다음과 같다.

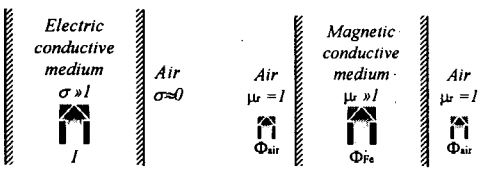
$$F = \oint \boldsymbol{H} \cdot dl = \Phi R_m = \Phi \frac{l}{\mu S} = NI \qquad (1)$$

여기서, S와 l은 자로의 단면적과 길이, N은 권선수, I는 전류이며, H는 자계의 세기이다. 식 (1)은 전기회로의 전류를 나타내는 저항법칙과 유사하므로, 기자력 평형의 법칙이라 한다. 즉, 이러한 유사성을 이용함으로서 표 1과 같이 자기회로를 전기회로와 같은 방법으로 취급할 수 있다. 자기회로에서도 전기회로의 키르히호프 제 1, 2법칙이 성립한다. 즉 자기회로에 있어서의 키르히호프 법칙은 다음과 같다.

표 1. 전기회로와 자기회로의 상사성

Table 1. Similarity of Electric and magnetic circuit

전기회로			자기회로		
명 칭	기 호	단 위	명 칭	기 호	단 위
기전력	E	V	기자력	F	AT
전류	I	A	자속	Φ	Wb
전류밀도	J	A/mm^2	자속밀도	B	T
전기저항	R_e	Ω	자기저항	R_m	A/Wb
도전율	σ	S/m	투자율	μ	H/m



(a) 전기회로 (b) 자기회로

그림 2. 전기회로와 자기회로의 비교

Fig. 2. Comparison of electric and magnetic circuit

(1) 자기회로의 분기점에서의 유출입되는 자속의 총합은 항상 0이다.

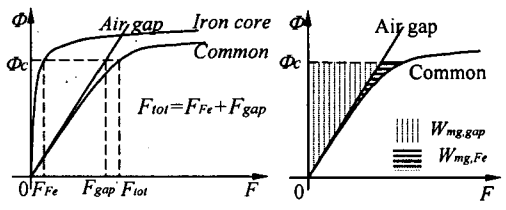
(2) 임의의 폐회로에서 자기저항과 자속의 곱의 합은 폐회로의 기자력의 합과 같다.

그러나, 전기회로와 자기회로의 큰 차이점은 전기회로에서는 절연체와 도체와의 도전율의 비가 10^{20}정도로 도체 밖으로의 누설전류는 거의 없으나, 자기회로에서는 철심의 비투자율이 공기에 비하여 10^3정도로 도전율의 비에 비하여 매우 작아 철심 밖으로의 누설자속이 전기회로의 누설전류에 비하여 매우 크다. 즉 그림 2에서 보듯이, 철심을 통과하는 주자속 외에 누설자속이 존재한다. 또한 옴의 법칙에서 전기회로의 전압과 전류와의 관계를 나타내는 저항은 포화현상이 나타나지 않아 선형으로 취급하여도 무방하다. 그러나 자기회로에서 기자력과 자속과의 관계를 나타내는 자기저항은 그림 3(a)와 같이 철심의 포화 현상으로 인하여 투자율이 비선형성이 되므로 전기회로의 해석보다는 자기회로의 해석이 복잡하다.

공극이 있는 철심에 코일을 감은 리액터의 단자에 전압을 인가한 전기입력은 자기에너지로서 철심과 공극에 저장되며, 그림 3 (b)에서 두 저장된 에너지의 비를 살펴보면 자기 에너지의 대부분이 공극에 저장됨을 알 수 있다.

$$W_m = \int_0^{\lambda} i \, d\lambda = W_{mg,Fe} + W_{mg,gap} \qquad (2)$$

가동부가 존재하는 경우 전원으로 공급되는 에너지중 일부만 자기회로에 저장되고 나머지는 기계에너지로 변환되어 가동부가 움직이게 된다. 따라서, 자성체에서의 기자력 강하에 의한 손실을 최소화하기 위해서는 투자율이 높고 선형의 특성을 가지는 자성 재료의 선택이 중요하다.



(a)공극 및 철심의 자화곡선 (b)자기저장에너지

그림 3. 철심과 공극을 갖는 리액터의 자기회로

Fig. 3. Stored energy of reactor with airgap

2.2 전자에너지 변환기의 설계

전기기기를 설계 방법에는 장하 분배법과 D^2L법과 같이 집중정수회로를 이용하여 수행하고 있다. 장하분배법에 의한 설계는 장하분배 정수를 적절히 선정하여 요구사양을 만족시킬 수 있는 기기의 치수를 결정하는 방법으로, 식 (3)과 같이 장하비 M은 전기장하와 자기장하의 비를 나타낸 것이다.

$$M = \frac{P\Phi}{NI} \tag{3}$$

여기서, 자기장하 $P\Phi$는 총자속량, NI는 기기전체의 기자력이다. 즉, 전자력을 나타내는 플레밍의 법칙에서 자속밀도 B와 전류밀도 J에 각각 대응되는 것으로 기기의 자기회로 설계는 두 성분의 적절한 분배에 의해 이루어질 수 있다.

기기의 용량은 전기 및 자기장하비를 각각 Ac 및 Bg 라고 놓으면 다음과 같다.

$$VA = \frac{K_0\pi^2}{2} \times f_N \times B_g \times A_c \times D^2L \tag{4}$$

여기서, K_0 는 동기기/유도기에서는 2.1, 직류기에서는 2, f_N는 정격 회전 주파수이며, D는 회전자 직경, L은 전동기 길이로서 D^2L은 회전자의 체적을 나타낸다. 즉, 기기의 출력은 다음과 같은 요소들에 의하여 결정되어 지므로 자기회로 설계시 각 요소들의 비율은 기기의 성능, 구조 및 가격에 큰 영향을 주게된다.

출력 = 회전자의 체적 × 회전 주파수
× 자속밀도 × 전류밀도 (5)

자속밀도와 전류밀도의 비율에 따라 크게 동기계와 철기계로 분류할 수 있으며 각각의 특성은 다음과 같다.

· 동기계: 전기장하>자기장하

동기계는 도체의 동부분이 철심에 비해서 많고 체적이 작지만 동손이 철손에 비해서 크다. 동손은 코일내에서 발생하며 코일이 절연물에 싸여 있어 열 발산이 용이하지 못하기 때문에 같은 양의 철손에 비해서 온도상승이 크다. 따라서 동기계는 온도상승과 효율이 저하되는 단점이 있다.

· 철기계: 자기장하>전기장하

철기계는 철심부분이 동부분에 비해서 크므로 골조가 굵고 체적이 크다. 또한 동손이 철손에 비해서 작으므로 온도상승은 작으나 체적이 크기 때문에 사용재료가 동기계에 비해서 많고 원가가 높아지는 점에 주의 해야한다.

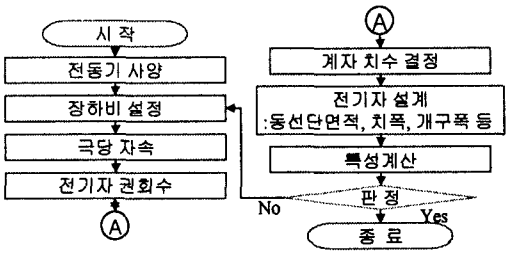


그림 4. 전동기의 설계 과정
Fig. 4 Design process of electric machines

2.3 전자에너지 변환기의 철손

전기기기는 자성재료의 향상과 주파수의 증가에 따른 에너지 밀도의 증가로 경박단소, 고효율화가 가능하게 되었으나 철손 증가를 유발하게 된다. 따라서, 철손의 영향을 무시할 수 없으므로 철손을 계산하여 기기의 특성에 반영해야 한다. 철손 w_f는 식 (6)과 같이 히스테리시스손과 와전류손으로 구성되며 히스테리시스손은 주파수에 비례하고 와전류손은 주파수 제곱에 비례한다.

$$w_f = B^2\left\{\sigma_h\left(\frac{f_s}{100}\right) + \sigma_e d^2\left(\frac{f_s}{100}\right)^2\right\} \tag{6}$$

여기서, σ_h, σ_e는 히스테리시스손과 와전류손 계수이며, d는 강대의 두께, f_s는 주파수이다.

기존의 철손계산 방법은 경험적인 실험식 (6)을 주로 이용하여 계산하였다. 그러나 전동기의 자기회로를 구성하는 각 부분의 자로에서는 교번자속과 포화특성을 가지므로 자속의 고조파를 고려한 정확한 철손 계산방법이 요구된다. 따라서 분포 특성을 해석하기 위한 전자장 수치해석 기법이 필요하다. 고조파를 고려한 전동기의 철손을 해석하기 위해서, 먼저 유한요소해석을 통하여 각 영역에서의 자속밀도를 계산하고 자속밀도를 고조파 분석한다. Epstein bridge로 측정된 자성재료의 철손 데이터에서 계산된 각 고조파 성분의 크기에 해당되는 철손값을 찾아 중첩함으로서 전동기 전체의 철손을 구할 수 있다. 그림 5는 본 논문에서 제시한 철손 계산 방법의 흐름도를 나타낸 것이다.

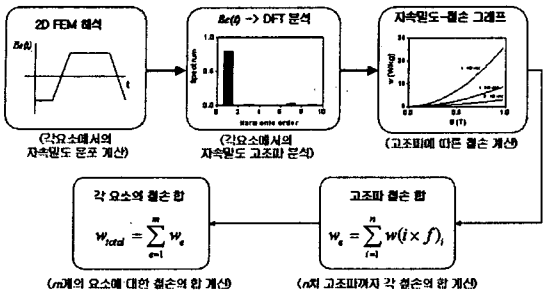


그림 5. 고조파를 고려한 철손 해석 방법
Fig. 5. Iron loss analysis considering harmonics of flux density

3. 전자에너지변환기의 응용 사례

일반적으로 각종 에너지 변환기기들은 철손을 줄이기 위해 규소강판을 적층하여 사용하고 있으나 최근에는 메탈 파우다를 전동기에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 철분 철심 가루는 가루 입자에 절연막을 싸고 있어 와류의 손실을 줄일 수 있다. 또한 다양한 형상으로 분할 코아로 만들 수 있어 점적율을 증가시키고 동손을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 소형 경량화 및 조립이 쉬운 등의 장점을 가지고 있다.

그림 6의 하단은 S18의 규소 강판과 SMC 메탈 파우다의 철손을 비교한 것으로 주파수가 높을수록 SMC 재질의 철손이 작음을 보인다. 그러나, 그림 6의 상단에서과 같이 철심 재질에 비하여 투자율, 포화자속 밀도 등의 자기 특성이 낮은 단점을 가지고 있다. 따라서, 메탈 파우다를 이용한 전동기는 영구자석 기기 등과 같은 공극이 큰 전동기나 고속용 전동기에 적합하다.

그림 7은 영구자석을 사용하는 브러시레스 전동을 대상으로 두 재질에 따른 전동기의 성능을 비교한 것으로 메탈 파우다를 사용한 전동기의 발생 토크가 약 10[%] 저하됨을 보인다.

그림 8은 메탈 파우다 재료를 이용하여 만든 리액의 구조를 나타낸 것이다. 표 2는 일반적인 강판 적층으로 만든 리액터와 메탈 파우다를 이용하여 만든 리액터의 제반 특성을 비교한 것이다. 메탈 파우다를 이용한 리액터의 인덕턴스가 큰 값을 가지며 주파수의 증가에도 둔감한 변화를 가지고, 온도 상승이 작고 소음이 개선됨을 알 수 있다. 적층 코아 구조에서 자속의 변화는 적층 낱장간에 흡인력과 반발력을 일으키기 때문에 일체형으로 만들어진 메탈 파우다 보다 소음이 증가된다.

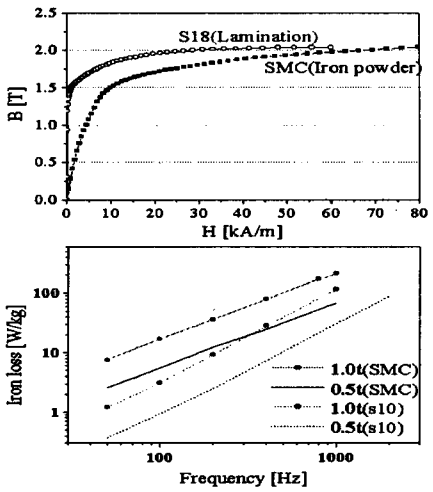


그림 6. 규소강판과 철분 철심의 자기적 특성 비교
Fig. 6 Magnetic property comparison of the lamination core and the metal powder

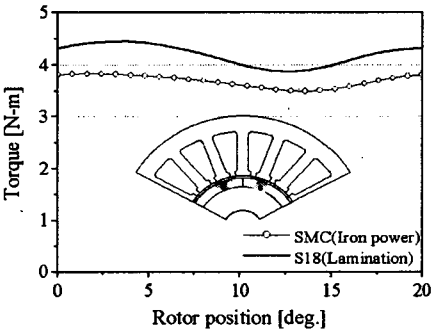


그림 7. 재질에 따른 브러시레스 전동기의 토크비교
Fig. 7. Torque comparison of the brushless motor according to magnetic materials

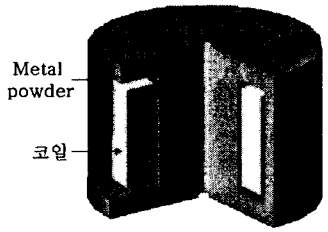


그림 8. 메탈 파우다를 이용한 리액터의 구조
Fig. 8. Structure of metal powder reactor

그림 9는 리액터 재질의 투자율 변화에 따른 인덕턴스의 변화를 계산한 것으로 투자율의 증가에 따라 인덕턴스가 급격히 증가함을 보인다.

그림 10은 스파이럴 박막인덕터의 형상을 나타낸 것이다. 그림 11은 유한요소해석법을 이용하여 자성막의 유무에 따른 박막인덕터의 주파수 특성을 해석한 결과이다. 자성막이 존재하는 경우, 자성막이 자로를 제공함으로써 누설 자속을 감소시켜 인덕턴스는 자성막이 존재하는 않는 경우에 비해 훨씬 크게 나타난다. 또한, 10[MHz] 이상의 주파수에서 인덕턴스는 자성막에 의해 도체에 발생하는 표피효과 및 근접효과를 증가시키기 때문에 자성막이 없는 것 보다 인덕턴스 값이 현저하게 감소한다.

표 2. 메탈 파우다 리액터의 장점

Table 2. Merits of the metal powder reactor

항목	적층 코아	메탈 파우다
전류리플	크다	작다
소음	크다 64.5[dB]	작다 58.2[dB]
온도상승	크다 113[℃]	작다 77[℃]
크기	작다	크다

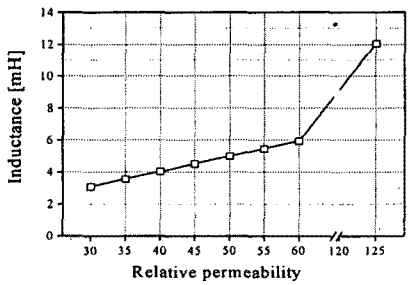


그림 9. 메탈 파우다 리액터에서 투자율에 따른 인덕턴스의 변화

Fig. 9. Variation of inductance with the relative permeability in metal powder reactor

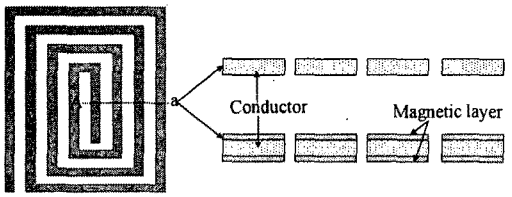


그림 10. 스파이럴 박막인덕터의 구조

Fig. 10. Structure of spiral type thin film inductor

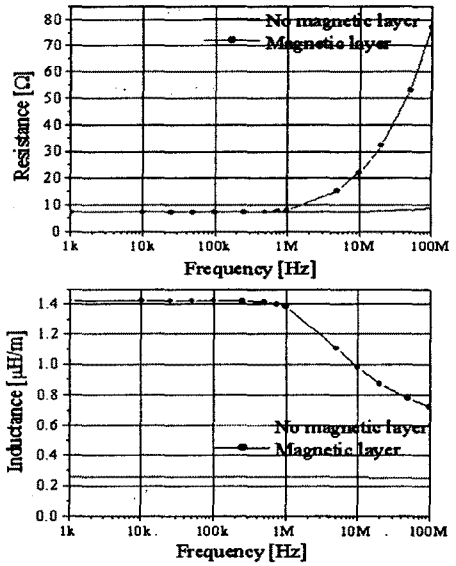


그림 11. 주파수에 대한 저항과 인덕턴스의 변화

Fig. 11. Resistance and inductance vs. frequency

4. 결 론

우수한 성능의 전자기 시스템을 설계하기 위해서는 전자기 현상을 기초로한 전자계 해석 또는 자기회로 설계와 같은 전기적 요소기술 뿐만 아니라 자성재료와 관련된 특성 분석과 해석 기술 또한 중요하다. 따라서, 본 논문에서는 에너지 변환기기의 에너지 변환 과정, 자성재료가 기기의 특성에 미치는 영향과 철손의 해석 방법을 기술하였다. 또한, 최근 관심의 대상이 되고있는 메탈 파우다 재료를 이용한 에너지 변환기기를 소개하였다. 현재는 메탈 파우다의 자기적 특성이 기존의 규소강판에 못 미치지만 앞으로 자성재료 기술의 발달로 이러한 차이가 줄어든다면 메탈 파우다를 사용한 응용 기기가 증대할 것으로 사료된다. 따라서, 자성재료와 이를 이용한 전자에너지 변환기기에 대한 상호 보완적 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] 홍정표, 강규홍, "영구자석기기의 설계 및 특성해석", 대한전기학회 학회지, Vol. 45. No 6, pp. 15-20. 2001.

[2] J. P. Hong, *et al.*, "Robust Shape Optimization of Electromechanical Devices", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.35, No.3, pp.1710-1713 1999.