

회전자계에 따른 전기강판의 자계특성 측정

김홍정, 고창섭, 홍선기¹⁾, 신판석²⁾

충북대학교 전기공학과, 호서대학교 정보제어공학과¹⁾, 홍익대학교 전기공학과²⁾

Measurement of the magnetic properties under rotating magnetic flux of electrical steel sheets

Hong Jung Kim, Chang Seop Koh, Sun-Ki Hong¹⁾, Pan Seok Shin²⁾

Dept. of Electrical Eng. Chungbuk National University, Hoseo University¹⁾, Hongik University²⁾

Abstract - 전기강판으로 제작되어진 전기기기의 보다 정확한 수치적인 해석을 위해서는 회전자계(Rotating magnetic flux)에 따른 전기강판의 정확한 자계특성 측정이 필요하다. 이 논문에서는 개발되어진 2방향 자계인가 형 Single sheet tester를 이용하여 회전자계에 따른 전기강판의 자계특성을 측정하였다. 실험을 통하여 등방성 시료와 방향성 시료에 대하여 각각 1.6[T] 와 1.2[T] 까지 측정할 수 있었다.

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}$$

그리고 각 요소들은 2차원 자계특성 측정을 통하여 계산되어진다. 따라서 2방향 자계인가 형 Single sheet tester를 이용한 전기강판의 자계특성 측정을 통하여 투자율 텐서는 자속밀도(B)에 대한 자계의 세기(H)와 θ_{HB} 의 관계로 표현할 수 있고, 이러한 측정값을 전기기기의 특성 해석에 반영하여 보다 정확한 특성해석을 수행할 수 있게 된다.[3] 여기서 θ_{HB} 는 자속밀도(B)와 자계의 세기(H)의 각도 θ_H 와 θ_B 의 차이이다.

1. 서 론

이미 잘 알려진 대로 회전자계 손실(rotational power loss)은 삼상 변압기(three-phase transformer)의 T-joint 부분이나 회전기기(rotating machine)에서 발생 되어진다. 일반적으로 회전기기나 삼상 변압기의 T-joint 부분에서의 특성 해석에 있어서 단지 easy axis 와 그것의 수직 방향의 hard axis의 자계특성만을 고려하여 특성해석이 행해져 왔다.[1]

이런 기존의 해석 방법은 부분적으로 기기의 교번자계의 특성해석에는 효과적일 수 있다. 하지만 회전자계 특성은 교번자계의 특성과 매우 다르기 때문에 기존의 방법으로는 정확한 회전자계 특성을 해석할 수 없다. 특히 실제적으로 회전자계(Rotating magnetic flux)에 따른 자속밀도(B)와 자계세기(H) 사이의 Phase 차이나 방향의 차이가 존재하게 되는데 이런 특성이 전혀 고려되지 않았다.[2]

그러므로 이와 같은 문제점을 해결하고 보다 효율이 높은 기기의 최적 설계를 위해서는 기기의 회전자계 특성을 정확하게 측정하고 이를 설계에 반영해야 한다.[3]

이런 회전자계 특성 측정을 위하여 본 논문에서는 개발되어진 2방향 자계인가 형 Single sheet tester를 이용하여 등방성 전기강판과 이방성 전기강판의 회전자계에 따른 자계특성을 측정하였다.

2. 전기강판의 자계특성

일반적으로 전기강판 내의 자속밀도(B)와 자계세기(H)의 관계를 보면, 그림 1에서 보는 바와 같이 자속밀도와 자계의 세기의 Vector 서로 간에 차이가 나타나고 자속밀도가 회전함에 따라 그 차이가 불규칙적으로 변하게 된다.

기존의 측정에 있어서는 시료의 한 방향으로 자계를 인가하고 이에 대한 결과를 측정하였다. 그러므로 그 측정결과는 단지 측정된 방향에 대하여만 자계특성을 나타내게 된다. 그래서 측정결과를 통하여 투자율을 표현하는데 있어 한계가 있었다. 하지만 2차원 자계특성(회전자계) 측정을 통하여 투자율 텐서(Permeability tensor)의 표현은 완전하게 다음과 같이 된다.

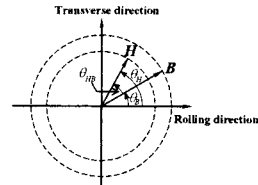


그림 1. 자계의 세기(H)와 자속밀도(B)의 관계

3. 측정 시스템

3.1 2방향 자계인가 형 Single sheet tester

이방성 전기 강판에 방향에 따른 자계를 인가하기 위하여 2방향 자계인가 형 Single sheet tester를 이용하여 측정하였다. 그림 2는 2방향 자계인가 형 Single sheet tester의 측정시스템을 나타낸다. 그림 2에 나타난 것과 같이 개발된 2방향 자계인가 형 Single sheet tester는 크게 시료(specimen), 여자권선(exciting coils), 요크, b-coil과 H-coil 그리고 나머지 신호처리부로 구성된다. 컴퓨터에서 발생된 x-방향 및 y-방향의 여자전압의 파형은 고주파 성분을 제거하기 위하여 Low Pass Filter를 통과한 후, 전력증폭기(Power Amplifier, 2kVA)에 연결된다. 증폭된 여자전압은 직류성분을 제거하기 위하여 Matching Transformer를 거치게 되고 이는 각각 x-방향 및 y-방향 여자 권선에 연결된다. H-coil 및 B-coil에서 측정된 유기전압은 Isolation Noise Amplifier를 이용하여 증폭된 후, 컴퓨터로 들어오게 된다. 이때 측정시스템과 컴퓨터 간의 통신은 DAQ Board 를 사용하여 이루어진다.

3.2 B Waveform control

전기강판에 회전자계를 인가하기 위해서는 rolling direction 방향의 자속밀도(B)는 코사인파로 transverse direction 방향의 자속밀도(B)는 사인파로 만들어 주어야 한다. 이때 얻고자 하는 각각의 자속밀도의 파형은 다음과 같이 표현한다.

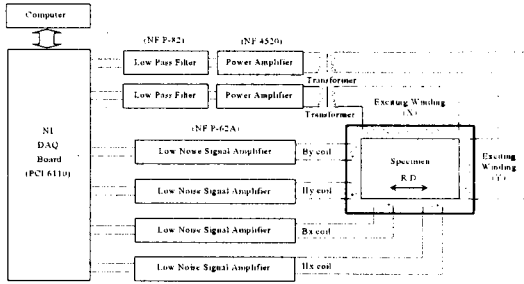


그림 2. 2방향 여자철 Single sheet tester 시스템

$$B_{RD}(t) = B_m \cos(\omega t) \quad [T] \quad (1-1)$$

$$B_{TD}(t) = B_m \sin(\omega t) \quad [T] \quad (1-2)$$

여기서, B_m 은 회전자계의 크기이다. $B_{RD}(t)$ 는 rolling direction 방향의 얻고자 하는 자속밀도 파형 $B_{TD}(t)$ 는 transverse direction 방향의 얻고자 하는 자속밀도 파형이다.

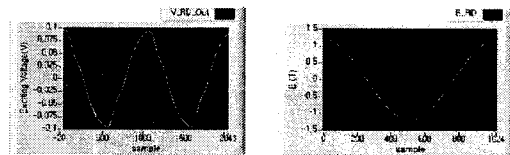
이에 해당하는 유기전압의 파형은 각각 다음과 같이 된다.

$$e_{RD}(t) = (Area \cdot Turn)_{RD} \omega B_m \sin(\omega t) \quad [V] \quad (2-1)$$

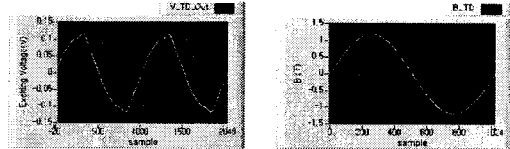
$$e_{TD}(t) = (Area \cdot Turn)_{TD} \omega B_m \cos(\omega t) \quad [V] \quad (2-2)$$

따라서 측정과정에서 자속밀도가 식(1-1)과 식(1-2)와 같이 주어지는 정현파가 되도록 하기 위하여 rolling direction 방향 및 transverse direction 방향의 유기전압이 각각 식 (2-1)과 (2-2)가 되도록 rolling direction 방향 및 transverse direction 방향의 여자전압의 파형을 조절하였다.

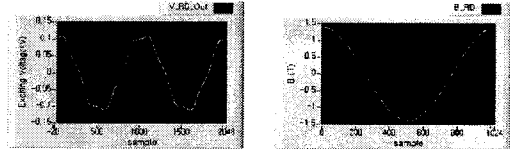
그림 3은 B Waveform control 후의 여자전압과 자속 밀도를 나타내는데 자속밀도가 정현파가 되기 위해서 여자전압에 많은 왜곡이 일어났음을 알 수 있다.



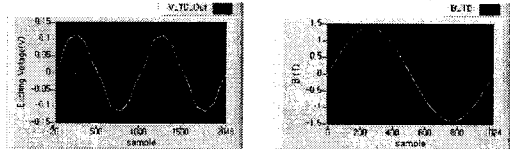
(a) After B Waveform control(등방성 시료A, RD방향)



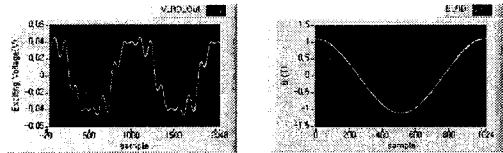
(b) After B Waveform control(등방성 시료A, TD방향)



(c) After B Waveform control(등방성 시료B, RD방향)



(d) After B Waveform control(등방성 시료B, TD방향)



(c) After B Waveform control(이방성 시료C, RD방향)



(f) After B Waveform control(이방성 시료C, TD방향)

그림 3. 여자전압 과 자속밀도

4. 측정결과

개발된 2방향 여자 형 Single sheet tester를 이용하여 회전자계에 따른 전기강판의 특성으로 rolling direction 과 transverse direction 에 대하여 자속밀도(B)와 자계 세기(H) 그리고 θ_{HB} 를 측정하였다. 여기서 θ_{HB} 는 자속 밀도가 회전하면서 생기는 각 θ_B 와 이에 따른 자계세기의 각 θ_H 의 차이이다. 측정에 사용된 시료는 등방성 2종, 이방성 1종으로 하였다. 측정 주파수는 전원 noise를 피하기 위하여 50Hz로 하였다.

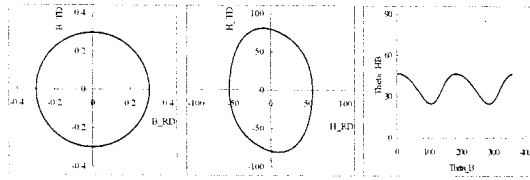
그림 4는 등방성 시료A에 대한 회전자계에 대한 자속 밀도 와 자계세기의 궤적, 회전하는 자계에 대한 자속 밀도와 자계의 세기의 위상 차이를 나타내는 $\theta_{HB} - \theta_B$ 를 나타내었다. 회전자계의 자속밀도의 크기가 증가함에 따라서 θ_{HB} 가 점점 0에 근접해 감을 알 수 있다. 그리고 좀 더 강한 회전자계가 인가된다면 0으로 완전히 수렴되어 질 것으로 생각된다. 회전자계가 0.3T 일 때, θ_{HB} 가 처음 θ_B 가 0도 일 때 대략 50deg의 값을 갖는데, 이는 RD(rolling direction) 방향만 인가하였더라도 인가자계가 TD(transverse direction) 방향에 영향을 기침으로써 생겨나는 현상으로 볼 수 있다. 결과에서 보듯이 전기기기의 특성을 정확하게 해석하고, 손실을 계산하기 위해서는 회전자계에 따른 자기적인 특성의 변화를 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.

그림 5는 등방성 시료B에 대한 회전자계에 대한 자속 밀도 와 자계세기의 궤적, 회전하는 자계에 대한 자속 밀도와 자계의 세기의 위상 차이를 나타내는 $\theta_{HB} - \theta_B$ 를 나타내었다. 회전자계가 0.3T일 때, θ_{HB} 의 값이 45deg로 다소 일정한 것을 볼 수 있는데, 이는 철판 자체의 특성으로 보이며, 시료 A와 같이 회전자계의 자속밀도의 크기가 증가함에 따라서 θ_{HB} 가 불규칙적으로 변화하며 점점 0에 근접해 감을 알 수 있다

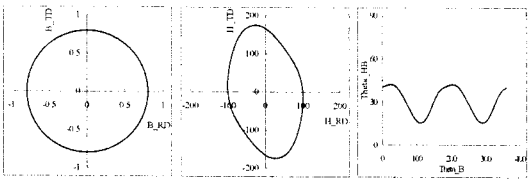
그림 6는 이방성 시료C에 대한 측정결과로 회전자계에 대한 자속밀도와 자계세기의 궤적, 회전하는 자계에 대한 자속밀도와 자계의 세기의 위상 차이를 나타내는 $\theta_{HB} - \theta_B$ 를 나타낸다. $\theta_{HB} - \theta_B$ 곡선을 보면 등방성 시료 2종과는 다른 형태의 모습을 나타낸다. 회전자계가 0.2T 일 때를 보면, θ_{HB} 가 75deg에서 시작하여 기울기가 일정하게 감소하다가 θ_B 는 90deg 부근에서 θ_{HB} 값이 음의 값을 갖다가 180deg 부근에서 다시 급격하게 75deg로 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 당연한 현상으로 볼 수 있다. 등방성 시료와는 달리 이방성 시료는 자화가 잘 일어나는 easy axis 와 그 방향에 수직하는 hard axis로 이루어져 있다. 따라서 전기강판에 2개의 축이 존재하게 되므로 위와 같은 현상이 일어남을 알 수 있다. 그리고 회전자계가 1.2T일 때를 보면, 자계세기(H)의

케적이 double grain-oriented electrical steel sheet처럼 나타나는 것으로 생각되어 지는데, 이는 측정결과에서 보듯이 이방성 철판(grain-oriented electrical steel sheet)의 시료자체의 특성으로 보인다.

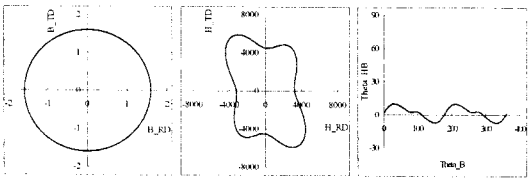
위에서 살펴보았듯이 전기강판의 회전자계특성은 기존의 교번자계 특성과 매우 다름을 알 수 있고, 따라서 회전전기나 삼상변압기의 T-joint 부분에서의 해석에 있어서 이를 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.



(a) 등방성 시료A, B=0.3T

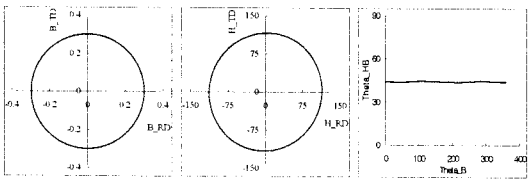


(b) 등방성 시료A, B=0.8T

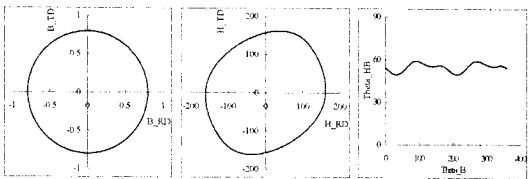


(c) 등방성 시료A, B=1.6T

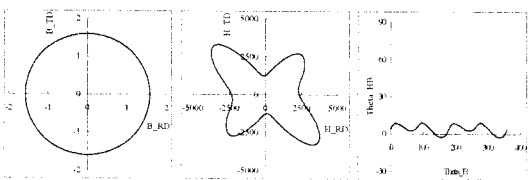
그림 4. 등방성 시료A의 자계특성



(a) 등방성 시료B, B=0.3T

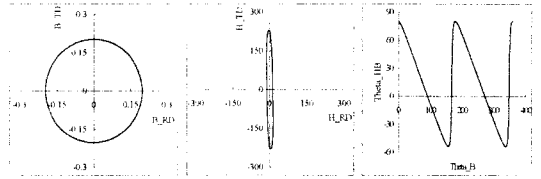


(b) 등방성 시료B, B=0.8T

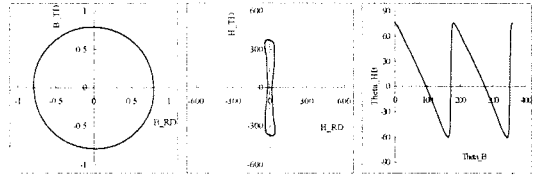


(c) 등방성 시료B, B=1.6T

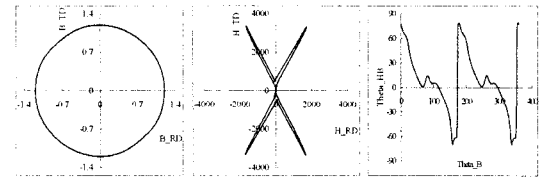
그림 5. 등방성 시료B의 자계특성



(a) 이방성 시료C, B=0.2T



(b) 이방성 시료C, B=0.8T



(c) 이방성 시료C, B=1.2T

그림 6. 이방성 시료C의 자계특성

5. 결 론

본 논문에서는 전기강판으로 만들어지는 회전전기나 삼상변압기의 T-joint 부분에서와 같은 기기의 정확한 해석을 위하여 회전자계에 따른 전기강판의 특성을 측정하였다. 하지만 현재의 2방향 여자형 Single sheet tester에 충분히 강한 자장을 걸어 주지 못했는데, 이는 향후 요크의 권선수를 증가함으로써 해결할 수 있다고 생각하며, 보다 강한 자장을 인가하게 된다면 등방성 전기강판의 경우 $\theta_{HB} - \theta_B$ 곡선에서 자속밀도와 자계세기의 위상차 θ_{HB} 가 0deg로 수렴할 것 이라고 생각한다.

본 논문에서는 전기강판에 회전자계중 원 회전자계가 인가되는 경우의 자계특성을 측정하였으나, 앞으로는 회전자계가 원이 아닌 타원으로 인가되는 경우의 특성 측정이나 회전자계와 교번자계가 동시에 인가되는 경우의 특성 측정이 향후 연구주제가 될 것이다. 그리고 이런 측정결과를 수치해석기법을 이용한 전기기기의 특성해석 과정에 반영 할 수 있도록 적절한 모델링 기법도 연구 되어야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Nakata, N. Takahashi, K. Fujiwara and M. Nakano, "Measurement of magnetic characteristics along arbitrary direction of grain-oriented silicon steel up to high flux density", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 29, No. 6, pp.3544-3546 November 1999
- [2] M. Nakano, H. Nishimoto, K. Fujiwara and N. Takahashi, "Improvement of single sheet testers for measurement of 2-d magnetic properties up to high flux density" IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp.3965-3967 September 1999
- [3] M. Enokizono, K. Yuki and S. Kanaoi, "Magnetic Field Analysis by Finite Element Method Taking Rotational Hysteresis into Account", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, No.5, pp.3375-3378, September 1994