

온도특성을 고려한 착자회로 및 요크의 특성해석

백수현* · 맹인재** · 김필수** · 김철진***

* : 東國大 電氣工學科 ** : 忠淸專門大學 電氣科 *** : 電子部品綜合技術研究所

Characteristics Analysis of Magnetizing Circuit and Fixture considering Temperature Characteristic

Soo-Hyun Baek* · In-Jae Maeng* · Pill-Soo Kim** · Cheri-Jin Kim***

* : Dong-Guk Univ. ** : Chung-Cheong Coll. *** : KETI

Abstract

A method for simulating general characteristics and temperature characteristics of magnetizing fixture coil of the capacitor discharge impulse magnetizer-magnetizing fixture system using SPICE is presented. This method has been developed which can aid the design, understanding and inexpensive, time-saving of magnetizing circuit. As the detailed characteristics of magnetizing circuit can be obtained, the efficient design of the magnetizing circuit which produce desired magnet will be possible using our SPICE modeling. Especially, The knowledge of the temperature of the magnetizing fixture is very important to forecast the characteristics of the magnetizing circuits under different conditions. The capacitor voltage was not raised above 810[V] to protect the magnetizing fixture from excessive heating. The temperature estimation method uses multi-lumped model with equivalent thermal resistance and thermal capacitance.

1. 서론

산업용 기기로부터 가전제품에 이르기까지 대부분의 전기전자제품에 필수적으로 사용되고 있는 영구자석은 사용기기의 목적 및 종류에 따라 일반 페라이트 자석에서부터 Ne-Fe-B와 같은 고성능 영구자석에 이르기까지 종류도 다양하고 성능도 광범위하다. 특히 각종기기의 고성능화, 극소형화 및 고경량화 추세에 따라 기기의 규모가 작아지면서 이에 따라 장착되고 있는 영구자석도 고성능화 되어가고 있는 실정에 있으므로 Nd계열, SmCo계의 고성능 영구자석 개발은 극히 중요하다고 할 수 있다. [1-2] 이러한 영구자석 생산시스템의 하나인 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템 (Capacitor Discharge Impulse Magnetizer-Magnetizing Fixture System)의 경우 착자회로의 충전-방전 현상이 착자요크와 영구자석 재료에 따라 의존되고 사용전원이 고전압·대전류화 되어 위험요소까지 내포하며, 착자장치의 제작 및 시험에는 고가의 비용이 소요되므로 합리적인 설계방안이 수립되어야 한다. [3-10] 지금까지는 바람직한 설계방법을 찾기보다는 실험을 통한 경험에 의해 설계함으로써 착자회로 및 착자요크의 성능이 떨어지고 에너지 효율이 낮으며, 영구자석의 불량 착자로 인한 착자빈도가 클 경우 온도상승으로 인하여 착자장치의 수명이 단축되고 고장이 빈번한 단점을 갖게 되었다. [7, 9, 10, 11-17] 따라서 본 연구에서는 가장 광범위하게 이용되고 있는 SPICE프로그램을 이용하여 상기한 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템을 컴퓨터 모델링함으로써, 반복적인 시험제작 이전에 시스템의 전반적인 특성을 파악할 수 있는 시간, 비용 및 위험요소를 감소시킬 수 있는 방법을 제시하였으며, [18-23] 특히 착자요크코일의 온도모델을 제시함으로써 [13] 온도상승요인의 해결가능성을 제시하였다.

2. 임펄스 착자 시스템

커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템은 커패시터에 충전된 전원을 SCR등의 방전 스위치를 이용하여 착자요크코일(동자 R-L 부하)로 방전시키고 이 때 발생하는 강자계를 이용하여 각종 영구자석을 생산하는 자기용융기기의 하나이다.

그림1은 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템을 나타

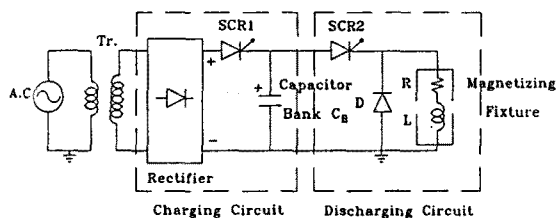


그림 1. 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템

낸 것으로 충전회로 및 방전회로로 구분되며, 특히 고성능의 영구자석을 생산하기 위하여 착자전류가 더욱 대용량이 되어 시간, 비용 및 위험요소등이 커지게 되므로 큰 난제가 되고 있으며, 방전회로의 온도상승 및 착자요크의 최적형상등은 설계상 해결하여야 할 문제가 되고 있다. 이상의 여러 문제중 착자요크의 최적형상을 찾는 방법은 유한요소법에 의한 자체해석을 통하여 해결이 가능하며, 나머지 문제는 착자시스템의 컴퓨터 모델링을 통하여 해결이 가능하다. 특히 방전회로의 온도상승요인 중 방전스위치 SCR2 및 다이오드 D부분은 온도상승정도가 그다지 크지 않은 반면, 착자요크코일의 저항 R은 영구자석재료가 직접 장착되는 부분으로 반복착자로 인한 온도상승이 매우 크다고 할 수 있으며, 고가의 설비비가 필요로 되는 곳으로 가장 난해한 부분이라 할 수 있다.

3. 컴퓨터 모델링

임펄스 착자기-착자요크 시스템의 컴퓨터 모델링 과정에서 주요 모델링부분은 충전부의 변압기, 스위치에 해당되는 SCR 및 착자요크코일의 온도상승고려할 수 있다. 따라서 이 세부부분을 주요 모델링 대상으로 하여 언급하고자 한다.

3.1 착자 시스템 모델링

SPICE에는 인덕터 모델이 내장되어 있으나 이상적인 변압기 모델이므로 실제회로와는 큰 오차가 있다. 따라서 SPICE에 내장되어 있으면서 자성재료의 비선형 특성이 고려된 Jiles-Atherton 모델을 이용하기로 한다. 이 모델은 자성재료의 히스테리시스 특성을 고려할 수 있어서 실제 모델의 특성을 크게 반영할 수 있는 특징이 있다. 그림2는 본 연구에서 이용된 SPICE 내장모델의 파라미터와 히스테리시스 특성곡선을 나타낸다. 한편, 방전 SCR의 모델링은 내장 Analog Behavioral 모델링을 통하여 실제 모델과 매우 근접된 특성을 나타내도록 하였으며, 본 연구의 시험용 소자인 258RT180 SCR(일본 inter Co.)의 SPICE 파라미터는 역시 그림2(a)에 포함되어 있다.

```

*Transformer model description
-----
.model k_3c8 core(area=90 path=15.5
+ms=420e3 alpha=2e-5 a=26 c=1.05 k=18)
*****
*SCR model description
-----
.SUBCKT 258RT180 anode gate cathode
X1 anode gate cathode SCR PARAMS:
+ Vdrm=2500v Vrrm=2500v Ih=80ma Vtm=1.76v
+ ILM=785 dVdt=200e6 Igt=200ma Vgt=3v
+ Ton=3.5u Toff=30u Idrm=80m
*92-6 Nihon Inter Elec. Co.
.ENDS
    
```

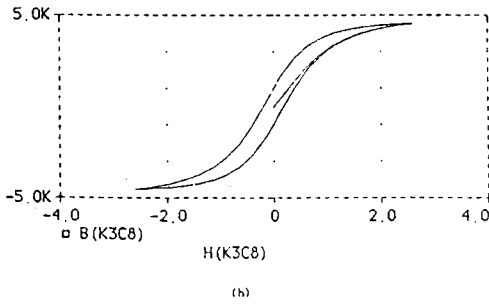


그림 2. SPICE 파라미터 및 히스테리시스 특성곡선

3.2 착자요크코일의 온도산정

SPICE등과 같은 대부분의 패키지 프로그램은 회로 모델링 과정에서 온도에 관하여 일정하게 고정되거나 무시되어서 다루어지지 않고 온도변화가 심한 경우 시뮬레이션의 정확성은 매우 떨어지게 마련이었다. 이에 따라 대부분의 SPICE프로그램을 이용할 경우 과도해석기간에 각 소자의 온도변화를 고려하지 못하거나 과도적인 열특성을 내포하지 못하고 있다. 따라서 본 장에서는 착자요크 코일저항에 있어서 과도해석기간에 순시적으로 온도특성이 고려될 수 있는 SPICE 저항모델을 제시하고자 한다.

일반적으로 표준 SPICE프로그램에서 저항모델은 식(1)과 같은 일정한 콘덕턴스로서 정의된다.

$$IR = (1 / R) \times VR \quad (1)$$

여기서 R은 저항[ohm]이며, IR은 전류[A], VR은 전압[V]을 나타낸다.

식(1)은 식(2)를 이용하여 시뮬레이션 초기에 미리 설정된다.

$$R = RO \times (1 + TC1 \times (T1 - TO) + TC2 \times (T1 - TO)^2) \quad (2)$$

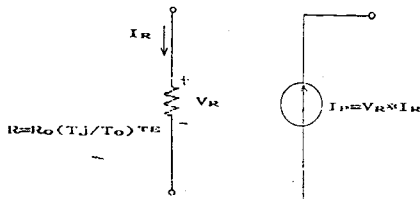
여기서 RO : 공칭저항 [ohm]
TC1 및 TC2 : 온도계수
TO : 공칭온도 [K]
T1 : 조정온도 [K]

식(1)의 콘덕턴스가 순시적으로 자동반복되어 조절되고 실제의 영향을 좀 더 반영할 수 있도록 하기 위하여 식(3)과 같은 지수 함수형태를 정의할 수 있다.

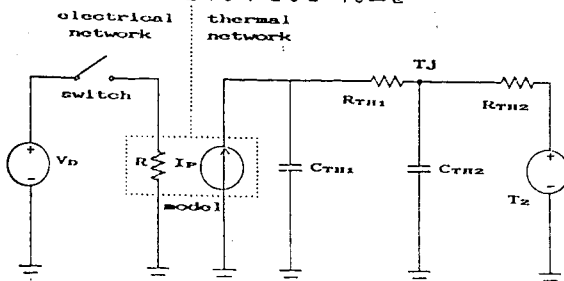
$$IR = (1 / RO \times (Tj / TO)^{-TE}) \times VR \quad (3)$$

여기서 Tj는 접점온도[K]이며 TE는 온도지수이다.

그림3(a)는 식(3)의 열특성이 반영된 저항모델을 나타내며, 그림 3(b)는 착자시스템에 적용된 저항모델을 나타낸다.



(a) 열특성이 반영된 저항모델



(b) 제안한 SPICE 저항모델

그림 3. 온도산정용 저항 모델

식(3)을 전압 VR 및 접점온도 Tj에 관하여 미분형태로 변형하면 식(4) 및 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$g_{rv} = dIR / dVR = 1 / RO \times (Tj / TO)^{-TE} \quad (4)$$

$$g_{rt} = dIR / dTj = -TE \times VR \times g_{rv} / Tj \quad (5)$$

이 경우 전류는 온도에 대해서 비선형함수가 되므로 반복시점의 선형화를 위하여 식(6)과 같이 오프셋(offset) KP가 포함된 형태로 정의할 수 있다. 이 경우 IR은 전 전류이다.

$$IR = g_{rv} \times VR + g_{rt} \times Tj + KP \quad (6)$$

여기서

$$KP = IR - g_{rv} \times VR - g_{rt} \times Tj = TE \times VR \times g_{rv} \quad (7)$$

또한 그림3의 저항모델은 식(8)과 같이 온도특성을 나타낼 수 있는 전류원이 필요로 되며, 이 전류원은 소비전력의 크기로 결정 된다.

$$IP = (VR^2 / RO) \times (Tj / TO)^{-TE} \quad (8)$$

따라서 전류-전압특성 및 온도특성이 식(3)~식(8)의 과정이 반복되어 계산되게 된다.

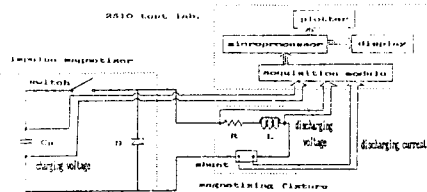
4. 결과 비교 및 검토

본 연구에서 이용된 착자요크는 자동차 에어크리너 직류 모터 용 고정자 자석을 착자하는 요크로서 1.6[mm] 나동선이 32[회] 감겨 있으며, 에폭시 몰딩된 것이다. 이 요크코일 내부에 열전대 가 부착되어 착자에 따른 온도특성이 Tektronics Co.의 측정시스템 (2510 Test Lab.)의 입력모듈을 통하여 입력되며, 모니터 및 플로터 등의 출력장치를 통하여 출력되게 된다. 이때의 요크코일의 저항은 R=0.024[ohm], 요크코일의 인덕턴스는 L=0.1251[mH]이다.

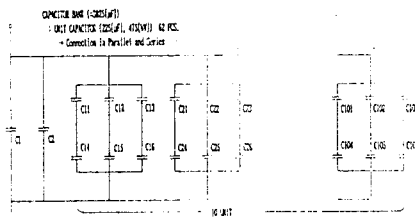
그림4는 본 연구에서 전압 및 전류특성을 측정하기 위한 시스템 구성도를 나타낸다.

그림4(a)의 구성도에서 충전전압의 측정을 위하여 커패시터뱅크 C₀양단 및 착자요크 양단에 각각 21[Kohm] (3[Kohm]×7[개])의 저항을 병렬연결하였으며, 방전전류의 측정을 위하여 방전회로에 직렬로 shunt저항(Type:YS-3, Rating:400[A]×10[배], 50[mV], Yamaki Electric)을 연결하였다. 여기서 측정된 각부의 정보는 Tektronics Co.의 측정시스템(2510 Test Lab.)의 입력모듈을 통하여 입력되며, 모니터 및 플로터 등의 출력장치를 통하여 출력되게 된다.

한편, 커패시터뱅크 C₀는 그림4(b)의 경우와 같이 (주)삼화의 커패시터(225[μF], 475[WV]) 62[개]를 직·병렬 연결하여 사용하였다.



(a) 측정 시스템

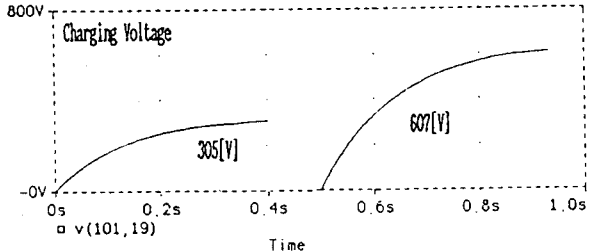


(b) 커패시터 뱅크

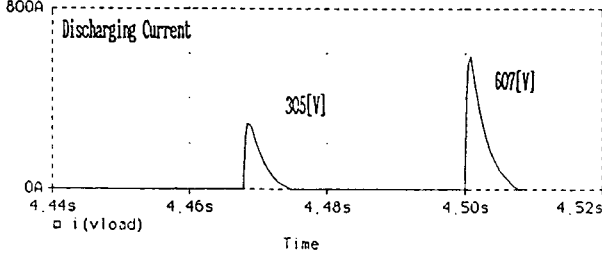
그림 4. 측정시스템

그림5와 그림6은 충전전압 및 방전전류에 대한 각각의 모델링 결과 및 실험결과를 나타낸 것으로 충전전압 305[V]와 607[V]의 두 경우에 대하여 고려하였다. 여기서 그림5(a)와 그림6(a)의 충전 전압파형을 비교하면, 충전시간은 305[V]의 경우 약 0.04[sec], 607[V]의 경우 약 0.02[sec]의 근소한 오차를 나타내는 것을 알

수 있다. 여기서 그림6(a)의 실측파형이 백동하는 것은 다수의 커패시터를 직·병렬 연결하여 사용한 관계로 에너지 전달과정상의 지연이라 생각된다.

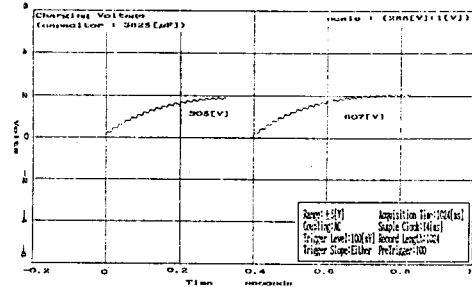


(a) 충전전압 파형

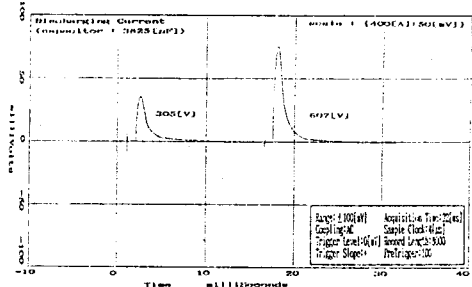


(b) 방전전류 파형

그림 5. SPICE 모델링 결과
(C=3825[uF], R=0.024[ohm], L=0.1251[mH])



(a) 충전전압

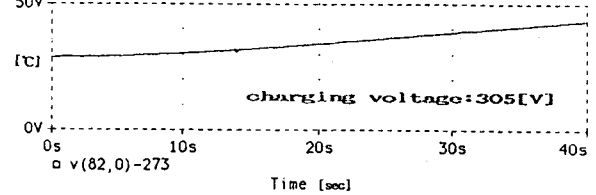
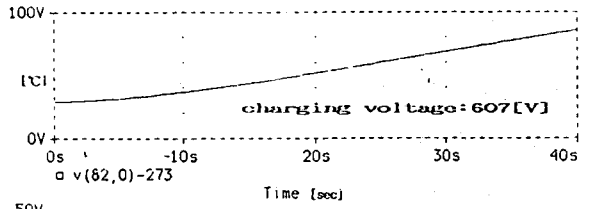


(b) 방전전류

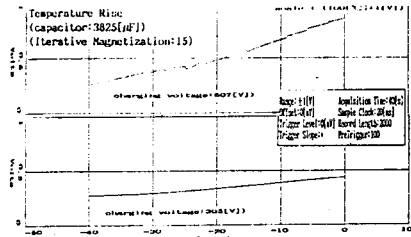
그림 6. 실측 결과
(C=3825[uF], R=0.024[ohm], L=0.1251[mH])

그림3의 저항모델을 이용하여 착자요크코일에서 발생하는 온도 특성을 산정하면 다음과 같으며, 이 때의 커패시터 용량은 3825[μ F], 주변온도는 27[$^{\circ}$ C]를 기준으로 하였다. 그림7(a)는 약 2.7[sec] 간격으로 40[sec]동안 15회 연속착자시 충전전압을 305[V] 및 607[V]로 가변시켰을 경우의 온도변화를 실측한 것으로 충전전압 305[V]의 경우 최종 약 42.7[$^{\circ}$ C]로서 기준온도보다 15.7[$^{\circ}$ C]가 상승하는 것을 알 수 있으며, 충전전압 607[V]의 경우는 최종 약 86[$^{\circ}$ C]로서 59[$^{\circ}$ C]정도 상승하는 것을 알 수 있다. 따라서 충전전압의 정도에 따라 온도의 상승정도를 확인할 수 있다. 그림7(b)는 SPICE 모델링 결과로서 충전전압 305[V]의 경우 최종 43.3[$^{\circ}$ C], 충전전압 607[V]의 경우 최종 85.74[$^{\circ}$ C]로서 실측치와 각각 0.6[$^{\circ}$ C], 1.34[$^{\circ}$ C] 및 0.26[$^{\circ}$ C]의 오차를 나타내어 거의 일치되는 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

Temperature Rise
(Capacitor:3825[μ F])
(Iterative Magnetization:15)



(a) 실측치



(b) 모델링 결과

그림 7. 충전전압을 변화시킨 경우의 온도특성

5. 결론

본 연구에서는 범용 패키지 프로그램인 SPICE를 이용하여 커패시터 방전 임펄스 착자기-착자요크 시스템의 모델링 및 착자요크 코일의 온도 모델링을 함으로서 다음과 같은 특성을 얻을 수 있었다.

첫째, 착자시스템의 충·방전특성을 시험제작 이전에 단기간내에 관찰할 수 있는 방법을 제시하였다.

둘째, SPICE를 이용하여 착자요크코일의 온도모델링을 통하여 온도상승특성을 확인할 수 있었다.

셋째, 본 방법을 이용하여 착자시스템의 용량에 관계없이 시험상의 위험부담 및 비용을 감소시킬 수 있으리라 보며, 본 방법을 착자요크의 유한요소해석과 더불어 사용할 경우 착자시스템의 최적 설계도 가능하리라 본다.

앞으로 본 연구를 기초로 하여 광범위한 수요가 예상되는 고성능의 극소형 회로류 자석을 착자하기 위한 착자요크 설계시 극소형 착자요크의 급격한 온도상승 등의 문제해결을 위한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 平賀貞太, 他, フェライト, (株)丸善, 1988.
- [2] David Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman and Hall, 1990.
- [3] 中田高義, 他, "有限要素法によるノルリス着磁機の過渡磁界解析", 日本電気學會回轉機研究會, RM-85-57, 1985.
- [4] T.Nakata and N.Takahashi, "Numerical Analysis of Transient Magnetic Field in a Capacitor-Discharge Impulse Magnetizer," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, No. 5, 1986.
- [5] T.Nakata, et al, "Numerical Design Method for Magnetizer," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 41, pp.418-420, 1984.
- [6] T.Nakata, et al, "New Technique for Producing a Strong Multi-Pole Magnet," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, No. 5, 1986.
- [7] G.W. Jewell, et al, "Simulation of Capacitor Discharge Magnetisation," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 26, No. 5, 1990.