

고용량 영구자석형 모터의 회전자 착자를 위한 200 kJ급 착자기의 착자요크 회로정수 설계 방법에 관한 연구⁺

(A Study on the Design Method of Magnetizing Yoke Circuit Constant of 200kJ Magnetizer for Rotor Magnetization of High Capacity Permanent Magnet Motors)

정민욱¹⁾, 이송근²⁾, 백권후³⁾, 김태규⁴⁾*

(Jeong Minuk, SoongKeun Lee, GwonHu Baek, and TaeKue Kim)

요약 전기차 보급과 고성능화가 진행됨에 따라 높은 출력을 가지는 모터의 수요가 증가하고 고용량 IPMSM 생산을 위한 고용량 착자기의 중요성 또한 증가하고 있다. 착자에 중요한 착자 전류의 최대값과 커패시터 방전시간은 착자요크의 회로정수에 의해 결정된다. 본 논문에서는 착자기 설계를 위한 착자요크의 회로정수 설계를 위하여 MATLAB SIMULINK를 활용한 착자 시스템의 해석을 진행하고 회로정수 설계를 위한 설계 절차를 제시한다. 그 결과 착자용량 5,000[V], 15,000[uF]에 따라 착자요크 파라미터는 0.015[ohm], 0.035[mH]로 도출하였다.

핵심주제어: 전기차, 착자요크, 착자전류, 착자기, 회로정수 설계

Abstract As the adoption and high-performance enhancement of Electric Vehicles continue, the demand for high-output motors and high-capacity Magnetizer for producing large-scale IPMSM is increasing. The maximum peak current of the magnetization and the capacitor discharge time, which are important factors in the magnetization process, are determined by the circuit constants of the magnetizer. In this paper, we analyze the magnetizing system using MATLAB SIMULINK to design the circuit constant of the magnetizing yoke for magnetizing design and present the design procedure for Design the circuit constant. As a result, the parameters of the magnetizing yoke were derived to be 0.015[ohm] and 0.035[mH] based on the capacitance of 15,000[uF] and voltage of 5,000[V].

Keywords: Electronic Vehicle, Magnetizing Yoke, Magnetizer, Circuit Constant Design

* Corresponding Author: tkkim@changwon.ac.kr
+ This research was supported by Changwon National University in 2023~2024.
Manuscript received April 03, 2023 / revised April 21, 2023 / accepted April 27, 2023

1) 창원대학교 전기공학과, 제1저자
2) LG전자 H&A 제어연구소, 공동저자
3) STX엔진 생산본부, 공동저자
4) 창원대학교 전기공학과, 교신저자

1. 서론

4차 산업혁명과 지속적인 기술의 발전으로 전기를 동력으로 가지는 전기 자동차 및 E - Mobility의 개발이 이루어지고 있다. 이에 따라 전기자동차의 보급이 가속화되고 고성능화가 진행되며 모터의 용량 및 출력밀도, 출력용량의 성능향상이 요구되고 있다. 고용량의 모터 제작을 위하여 필수적으로 필요한 IPMSM의 경우 조립의 효율성을 높이기 위하여 회전자에 영구자석을 조립 후 착자를 진행하는 선조립 후착자 방식을 이용하며, 영구자석을 자화시키는 방식이 주로 이용되고 있다(Chul-Kyu Lee et al, 2005; Young-Woo Bae et al, 2019). 이에 필요한 장치가 바로 착자기(Magnetizer)이다.

착자기란 자성을 띠지 않은 물체를 외부의 강한 자계에 노출함으로써 자구의 방향을 평행하고 일정하도록 정렬하게 만들어 자성을 띠게 만드는 장치이다. 즉, 자력을 띠지 않는 물체를 자석으로 사용할 수 있도록 자화시키는 장치를 말한다. Fig. 1은 자성 재료에 강한 외부 자계를 인가하였을 때 발생하는 내부 작용을 개략적으로 보여준다. 외부 강자계에 의해 정렬된 자구는 외부 자계를 없애 주어도 잔류자속이 계속해서 유지되어 영구자석으로써의 역할을 하게 된다(Soo-Jin Jung et al, 2001).

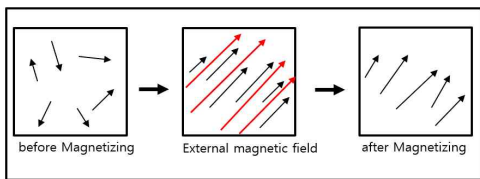


Fig. 1 Magnetization Process

높은 자속밀도를 가지는 자성체를 착자하기 위해서는 고밀도의 에너지를 커패시터에 저장하여 짧은 시간 내에 전류의 형태로 방전하여 강한 자기장을 만들어주어야 한다. 따라서 착자기의 원활한 동작을 위해서는 커패시터에 굉장히 높은 에너지를 저장할 필요가 있다(Jung-Seok Yoon et al., 2002). 이러한 높은 에너지를 커패시터에 저장하기 위해서는 저전압에서 고전압으

로의 변압 과정은 필수이다. 또한 착자기 사양에 맞는 전압으로 변압시켜준 후 정류기를 통해 AC에서 DC 전압으로 정류하는 과정이 이어지고 다음 단계로는 커패시터에 에너지를 저장하기 위해 에너지를 충전시켜주는 충전부의 동작과 커패시터의 방전을 통해 짧은 시간 동안 높은 전류를 발생시켜주는 방전부의 동작 그리고 강한 자기장을 발생시켜주는 착자요크의 동작이 일어난다. 앞서 언급했듯이 착자기 특성상 커패시터에 저장되어있는 높은 에너지를 짧은 시간 동안 전류의 형태로 방전시켜 착자요크에 전류를 흘려줌으로써 강한 자기장을 발생시키기 때문에 방전시 발생하는 서지 형태의 높은 전류를 소자들이 견딜 수 있도록 설계할 필요가 있으며 이는 착자기 설계에 중요한 요소 중 하나이다.

2. 시스템 구성

2.1 착자시스템의 기본 구성

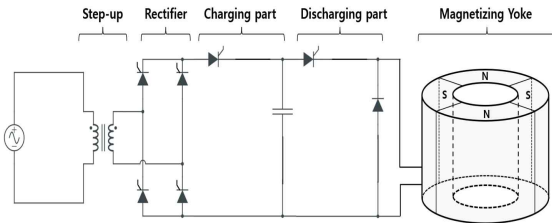


Fig. 2 Magnetizing System Configuration

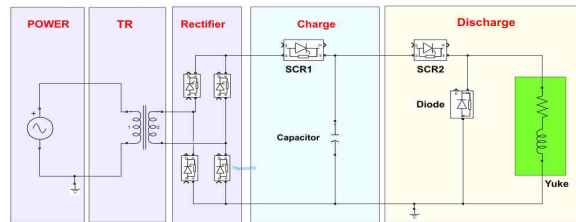


Fig. 3 Magnetizing System for MATLAB SIMULINK

착자 시스템에는 크게 전원부, 정류부, 충전부, 방전부, 착자요크로 총 5가지 구성으로 나뉜다. 커패시터의 충전, 방전을 이용한 방식의 착자기는 커패시터에 충전된 에너지를 짧은 시간

내에 한 번에 방출하기 때문에 고밀도의 에너지를 발생시킬 수 있는 방식이며 희토류 및 고용량의 영구자석을 착자시키는데 적합한 방식이다. Fig. 2는 착자기의 기본 구성으로 착자기 동작에 필수적으로 포함되어야 하는 요소를 개략적으로 보여준다(Myung-Hwan Yoon et al, 2021). 또한 Fig. 3은 Matlab SIMULINK를 통해 구성한 착자기 시스템의 해석모델이다. Fig. 2에도 나타나 있듯이 착자기 시스템의 구성은 변압, 정류, 충전, 방전의 4단계 과정을 거치게 되는데 충전과 방전 사이의 과정에서 스위치의 on-off를 통해 동작의 제어를 구성하게 된다.

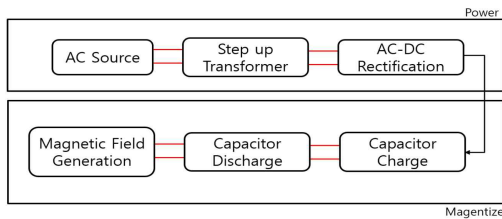


Fig. 4 Magnetizer System Process

Fig. 4은 착자기 전원 흐름을 도식화한 그림으로 AC 전원을 인가하여 원하는 전압으로 승압 후 AC에서 DC로 정류하는 과정을 거치게 된다. 이때 4개의 사이리스터를 통한 전력제어를 통해 커패시터에 흐르는 전류를 조절하여 충전 시간을 제어할 수 있게 된다. 그 후 커패시터에 충전을 거쳐 완전 충전 후 방전을 통한 펄스 전원이 착자요크에 인가되면 고밀도의 강한 자기장이 발생하고 발생된 자기장을 통해 자성체를 영구자석으로 착자 시킨다.

2.2 착자 시스템의 알고리즘

착자 시스템의 전체 동작 구성과 기본 알고리즘은 Fig. 5와 같다. 착자 시스템은 충전부와 방전부의 스위치를 통해 동작하게 되며 충전부와 방전부에 사이리스터의 반도체 스위치가 각각 존재한다. 충전부의 사이리스터를 도통 시켜 충전을 시작하게 되고 커패시터에 전류가 흘러 전류의 크기에 따라 충전 시간이 정해지게 된다. 커패시터의 충전 시간은 충전 손실과 커패

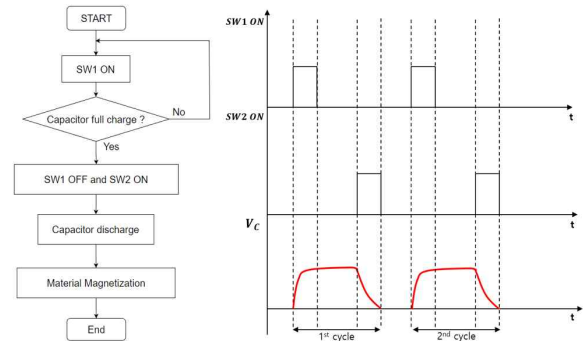


Fig. 5 Magnetizing System Basic Algorithm

시터의 내부 저항, 주파수 등의 다양한 요소들에 영향을 받으며 이에 따라 이론값보다 실제 충전 시간은 더 오래 걸리게 된다. 커패시터의 충전이 완료되면 충전부의 스위치는 OFF 되고 방전부의 스위치는 ON이 되어 착자요크에 고밀도의 에너지가 서지 전류의 형태로 흐른다. 이때 착자요크의 코일 성분으로 인해 자기장이 발생하게 되고 발생된 외부 자기장을 통해 자성재료는 착자 되어 잔류자속을 가지는 영구자석이 되며 이러한 과정을 반복하는 시스템이 착자 시스템이다.

3. 착자 전원 시스템 설계

3.1 착자 시스템의 에너지

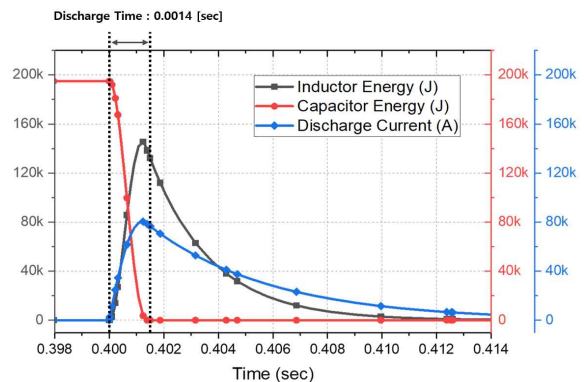


Fig. 6 Discharge Current Due to Release of Energy Stored in Capacitor and Inductor

$$W_C = \frac{1}{2} CV^2, W_L = \frac{1}{2} LI^2 [J] \quad (1)$$

전기차용 모터는 B사의 최대출력 125[kW] 토크 250[Nm]의 모터부터 P사의 최대출력 345[kW] 토크 499[Nm]까지 넓은 범위의 출력을 가지는 모터를 사용하고 있다(Yeon-Woo Kim et al, 2022). 또한 일반적으로 사용되는 영구자석은 네오디움(NdFeB)으로 강한 보자력과 잔류자속을 가진 희토류계의 자성 재료이며 모터의 출력 및 크기에 따라 차이가 있겠지만 평균적으로 1.3~1.6[T]의 값으로 설계한다(Sang-Yong Jung et al, 2010). 네오디움 자석의 평균 진성보자력은 1,000[kA/m]~ 2,000[kA/m]로 이를 착자 하기 위해서는 3~5배 정도의 외부 자기장을 인가해야 하며 이는 자석의 부피 및 형상에 따라 달라질 수 있다. 더 높은 자석 밀도의 영구자석을 통해 고출력의 모터 설계도 가능하지만, 그에 따른 크기 및 설계 비용이 상승하기 때문에 적절한 값으로 타협할 필요가 있다. Fig. 6은 커패시터에 저장되어있는 약 200[kJ]의 에너지와 착자요크의 코일에 저장되어있는 에너지 및 방전전류를 나타낸 것이며 커패시터 및 인덕터에 저장된 에너지의 양은 (1) 식과 같다 (Jae-Woong Jung et al, 2017). 방전이 시작되는 0.4[sec]부터 커패시터 에너지의 방출이 시작된다. 이때 커패시터 에너지의 완전 방전 시점부터 방전전류는 지수함수 형태의 형태로 변하게 된다. 또한 0.0014[sec] 이내에 커패시터에서 약 200[kJ]의 충전된 에너지가 방전되고 착자요크의 L 성분으로 인하여 자기 에너지로 방출하게 된다 (Tae-Kue Kim et al, 2021; Quan, D.-V. et al, 2018).

$$W = \frac{1}{2} B_{sat} H_{sat} V_m [J] \quad (2)$$

(2) 식은 자성 재료를 착자 하기 위한 에너지를 나타낸 식으로 B_{sat} 는 포화 자속 밀도, H_{sat} 포화 자계의 세기이며 V_m 은 영구자석의 체적이다. 하지만 이는 이상적인 값으로 실제로는 동손과 철손 등의 손실을 고려하여 더 높은 에

너지가 필요하다. 또한 H_{sat} 는 영구자석 내부에 침투한자계의 세기로 외부에서 발생시켜야 하는 자기장은 영구자석 내부에 자기장이 침투하면서 발생하는 손실분을 고려하여 더욱 높은 자기장을 투과시켜야 한다. 이때 발생하는 높은 자기장은 자기회로의 퍼미언스 계수에 의해 결정된다. 퍼미언스 계수는 착자요크의 형상과 회전자 마그넷 어셈블리의 형상으로 결정되며 착자요크의 설계 변수로는 권선의 턴 수, 공급 길이, 극 폭, 극 길이, 요크 폭 등 많은 설계 변수가 존재한다. 착자요크의 설계 및 해석을 위해서는 착자요크의 형상 설계를 통한 유한요소해석(FEM)으로 착자 전류에 따른 발생 자기장에 대한 해석이 필수이지만 본 논문에서는 유한요소해석을 진행하지 않고 착자요크를 R과 L의 임피던스 성분으로 등가화하여 R과 L에 변화를 통해 발생하는 착자 전류의 설계 및 해석 방법을 제시하고자 한다.

3.2 전기 회로 측면의 방전 부 해석

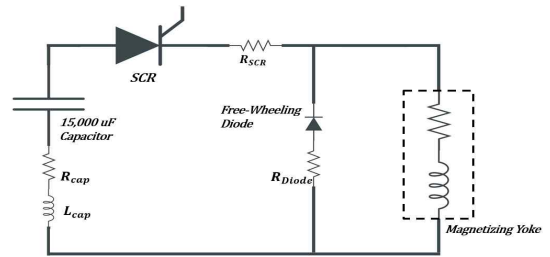


Fig. 7 Discharge Part Simplified Equivalent Circuit

방전 부는 Fig. 7에서 나타낸 것과 같이 전기 회로 측면에서 커패시터, 저항, 인덕터가 직렬로 연결된 RLC 2차 회로로 간단하게 나타낼 수 있으며 착자요크는 R과 L의 직렬로 구성된 소자 등가화할 수 있다. 또한 사이리스터, 커패시터, 다이오드의 기생성분에 대해 이상적이라 가정하고 진행하였으며 이에 따라 해당 R, L 회로 정수를 통해 전기 회로 측면의 임펄스 응답을 해석해 볼 수 있다. 커패시터의 커패시턴스 C, 착자요크 및 선로 인덕턴스의 합 L, 착자요크와 선로 저항의 합 R로 KCL을 통해 2차 회로의

응답을 확인할 수 있으며 이를 통해 방전 부의 전압과 전류에 대한 관계를 얻을 수 있다(Jione Choi et al, 2022). 2차 미분방정식은 감쇠 공진 주파수에 따라 회로의 응답이 달라지는데 방전 부의 방전전류는 착자기 특성상 매우 높아야 하며 그에 따른 저항값은 매우 낮은 값이어야 하므로 2차 미분방정식의 응답으로 부족제동(Under-damped)의 형태가 적합하다. 따라서 감쇠 공진 주파수는 0보다 작은 조건을 만족해야 한다. 방전 부의 전압과 전류의 관계식은 2차 회로의 미분방정식을 통해 유도할 수 있으며 (3), (4) 식과 같이 나타낼 수 있다. U_c 는 커패시터에 충전되어있던 초기 전압으로 전류에서는 지수함수와 사인함수의 곱으로써 나타나고 전압에서는 사인함수와 지수함수의 곱으로써 나타난다(Soo-Jin Jung et al, 2001).

$$i(t) = \frac{U_c}{w_d L} e^{-\alpha t} \sin w_d t \quad (3)$$

$$v(t) = e^{-\alpha t} \left(\frac{U_c R}{2w_d L} \sin w_d t + U_c \cos w_d t \right) \quad (4)$$

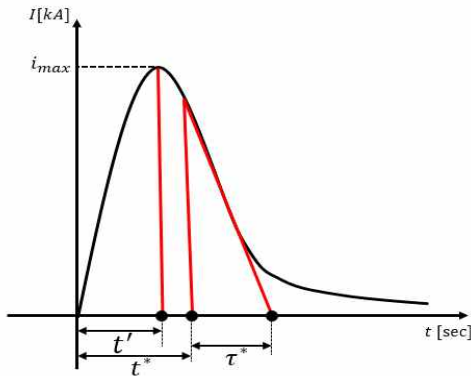


Fig. 8 Discharge Current Waveform by Freewheeling Diode

방전 부의 착자요크와 병렬로 연결되어있는 다이오드(환류 다이오드)의 역할로 인하여 삼각함수 형태의 방전전류에서 지수함수 형태의 파형으로 변하게 된다. Fig. 8과 같이 $0 < t < t^*$ 의 구간에서는 (3) 식의 전류 형태로 방전하게

되지만, 환류 다이오드의 영향으로 인해 $t^* < t < \infty$ 의 구간에서 전류는 (5) 식과 같이 나타난다. t' 과 τ^* 을 통하여 방전전류의 지연시간을 조절할 수 있으며 t' 값을 통해 방전전류의 최대값을 도출해 낼 수 있다(Yun-Sik Jin et al, 2015).

$$i(t) = i_c(t^*) e^{-\frac{t-t^*}{\tau^*}}, \tau^* = \frac{L_c}{R_c} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } t' = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{w_d}{\alpha}\right)}{w_d}$$

(여기서, t^* 은 커패시터 방전시간, τ^* 은 방전전류의 지연시간, L_c 는 착자요크의 인덕턴스, R_c 는 착자요크의 저항이다.)

3.3 착자요크 회로정수 설계 절차

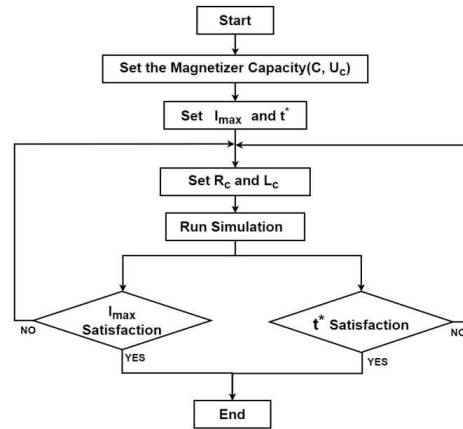


Fig. 9 Magnetizing Yoke Circuit Constant Design Process

착자기에 필요한 착자요크는 R과 L의 직렬로 증가화할 수 있으며 착자기의 R, L 파라미터의 설계를 통하여 방전전류에 대한 설계를 진행하였다. 이때 Fig. 9은 방전전류의 설계 절차를 나타낸 것이다. 회로정수의 도출을 위한 절차로는 다음과 같다.

- 1) 모터에 맞는 설계 파라미터(충전전압, 커패

시터 용량, 방전전류의 최댓값 및 최댓값 도달 시간)를 설정한다.

- 2) 방전전류의 설계를 위해 착자요크의 회로정수 R, L의 개략적인 값을 수식을 통해 지정한다.
- 3) Matlab을 통한 회로 시뮬레이션을 진행함으로써, 착자기 방전부의 회로정수에 따른 방전전류의 양상을 확인하고 방전전류의 설계 사양에 만족하는지 확인한다.
- 4) 설계 사양을 만족하지 않을 경우, 착자요크의 회로정수 R, L 값을 재조정한다.
- 5) 최종적으로 R, L의 조정을 통해 착자 전류의 사양을 만족할 때 설계는 종료된다.

(3), (4) 식에 따라 착자기 방전전류를 결정하는 요소는 커패시터의 커패시턴스, 착자요크의 인덕턴스, 착자요크의 저항, 그리고 커패시터의 인가전압이다. 이 4가지 회로정수에 대한 설계를 통해 원하는 착자기 방전전류의 최댓값과 방전시간을 설계할 수 있다 (Sung Gu Lee et al, 2022).

3.4 착자요크 회로정수 설계

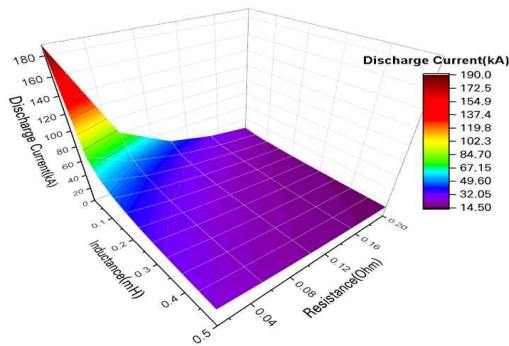


Fig. 10 Discharge Peak Current with Resistance and Inductance

Fig. 10은 착자요크의 저항과 인덕턴스에 변화에 따른 방전전류의 최댓값을 3D Surface 그래프로 나타낸 것이며 Fig. 11은 10의 그래프를 양옆에서 본 모습이다. 착자요크의 저항과 인덕턴스의 값이 0에 가까울수록 높은 최대 전류를 얻을 수 있지만 지연시간 τ^* 의 증가로 전류가 최댓값에서 0으로 수렴하는 시간이 증가하기 때

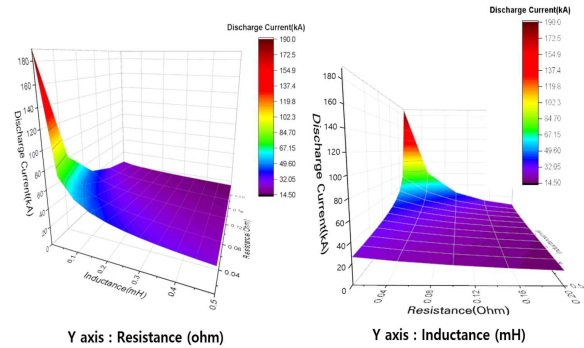


Fig. 11 Different View of Discharge Peak Current with Resistance and Inductance

문에 적절한 저항과 인덕턴스의 설계가 필요하다. 본 논문에서는 착자요크의 회로정수를 설계하기에 앞서 선행되었던 연구를 기반으로 일반적인 전기자동차 모터를 착자하기 위한 착자기의 용량을 5,000[V] 및 15,000[uF]로 선정하고 진행하였다(Jeong-Jong Lee et al, 2015). 이때 선로의 인덕턴스 및 저항은 이상적이라고 가정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 착자를 위한 전류의 최댓값은 착자요크의 형상 및 자성 재료의 진성보자력에 따라 달라진다. 본 논문에서는 착자 전류 설계의 예로써 80[kA] 크기의 착자 전류 설계를 위한 인덕턴스와 저항의 값을 선정하였다.

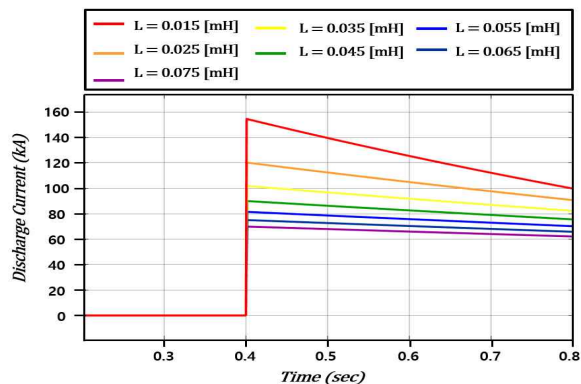


Fig. 12 Discharge Current according to R = 0 and Inductance Change

Fig. 12는 R = 0인 상태에서의 인덕턴스 증가에 따른 방전전류의 상태를 나타낸 그래프이다. 저항이 0인 상태이기 때문에 τ^* 은 무한히

증가한 것을 볼 수 있으며 방전전류의 쇄뺏값 도달시간 또한 굉장히 낮을 것을 볼 수 있다. 80[kA]의 쇄뺏값을 발생시킬 수 있는 인덕턴스는 0.055[mH]보다 작아야 함을 알 수 있으며, 따라서 인덕턴스는 0.055[mH] 미만인 값을 선정하여야 하며 0.045[mH]와 0.055[mH]에 해당하는 방전전류의 쇄뺏값은 80[kA] 이상이지만 저항 성분으로 인한 손실로 낮은 저항의 착자요크를 사용할수록 자기 에너지에 대한 변화율이 상승하는 것을 알 수 있다.

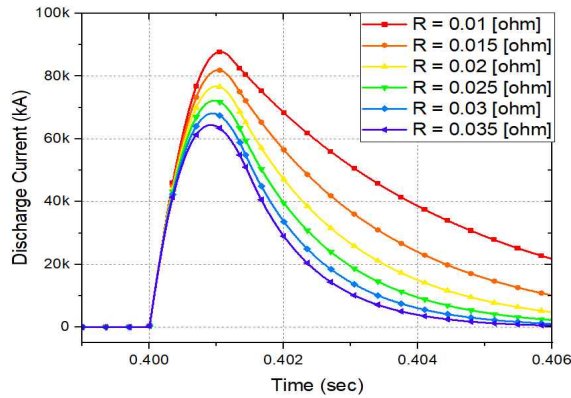


Fig. 13 Discharge Current Waveform according to Resistance Change

Table 1 Variation of Discharge Peak Current according to Resistance Change

R [ohm]	calculation [kA]	discharge peak current [kA]
0.01	88.853	87.72
0.015	82.871	81.91
0.02	77.587	76.78
0.025	72.891	72.21
0.03	68.694	68.12
0.035	64.923	64.44

Fig. 13은 인덕턴스를 0.035[mH]로 고정된 상태에서 저항의 변화를 통한 방전전류의 변화 양상을 나타낸 그래프이며 Table 1은 그에 따른 방전전류의 쇄뺏값을 나타낸 것이다. 착자요크의 저항 성분 증가로 인하여 방전전류의 지연 시간은 감소하고 방전시간 또한 감소하는 것을 확인하였다. 저항 성분이 0일 경우의 방전전류의 쇄뺏값은 약 100[kA]였지만 저항 성분

은 약 12~36[kA]의 감소를 통해 착자요크에서 발생하는 자기 에너지의 크기는 감소하고 이는 저항 성분으로 인한 손실로 낮은 저항의 착자요크를 사용할수록 자기 에너지에 대한 변화율이 상승하는 것을 알 수 있다.

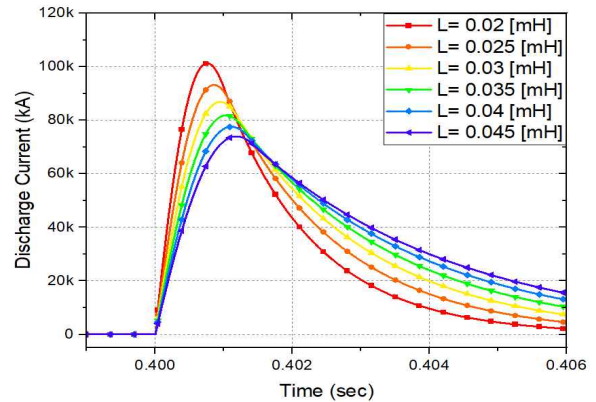


Fig. 14 Discharge Current Waveform according to Inductance Change

Table 2 Variation of Discharge Peak Current according to Inductance Change

L [mH]	calculation [kA]	discharge peak current [kA]
0.02	102.845	101.3
0.025	94.524	93.18
0.03	88.075	86.89
0.035	82.871	81.91
0.04	78.548	77.59
0.045	74.878	74

Fig. 14는 저항 0.015[ohm]에 따른 방전전류의 변화를 나타낸 그래프이며 Table 2를 통하여 상세한 값을 나타내었다. 그래프에서도 나타나듯이 총 인덕턴스가 증가할수록 최대 방전전류는 감소하는 것을 볼 수 있으며 환류 다이오드에 의한 지연시간 τ^* 및 커패시터 방전시간 t^* 이 증가하여 방전전류의 발생 시간이 증가하는 것을 볼 수 있다. 방전시간의 증가는 저항 성분으로 인한 전력손실로 이어지고 이러한 전력손실은 열로써 소비되기 때문에 방전시간의 증가는 발열에 대한 문제로 이어지기 때문에 설

계 시 방전시간을 최소한으로 설계해야 하며 또한 지연시간의 증가는 L에 증가로 인한 프리휠링 작용으로 인해 다이오드의 도통 시간을 증가시켜 다이오드의 발열 및 착자 시스템의 시간을 증가시키기 때문에 최소한으로 설계해야 한다. 인덕턴스 및 저항의 변화에 의한 방전전류의 양상을 살펴보았으며 인덕턴스와 저항의 증가는 최대방전전류의 감소로 이어진다는 것을 알 수 있었다. 앞선 결과를 바탕으로 방전 피크 전류의 설계 사양을 만족하는 값을 얻기 위하여 저항 0.015[ohm] 인덕턴스 0.035[mH] 선정하였으며 그에 따른 방전 피크 전류는 81.91[kA]로 80[kA]를 만족하는 값을 도출하였다.

4. 결론

본 논문에서는 착자 전원 발생 장치를 설계하기 위해 고려해야 하는 회로정수에 대한 설계 방법을 제안한다. 착자기는 크게 전원부, 충전부, 방전부, 그리고 착자요크 총 4단계의 구성을 둔다. 높은 전압을 커패시터에 충전시키기 위하여 변압, 정류 과정을 포함하는 전원부, 커패시터에 높은 에너지를 저장하기 위한 충전부, 빠른 방전을 통해서 높은 에너지 밀도의 에너지를 발생시키는 방전부, 방전전류를 통해 높은 기자력을 발생시키는 코일의 착자요크가 있다. 커패시터의 충전된 높은 에너지를 매우 낮은 저항의 라인을 통해 방전시키기 때문에 짧은 시간 동안 매우 높은 에너지를 방출시켜 착자기가 동작하게 되는데 이때 방전전류에 의해 발생하는 외부 자기장으로 무착자 상태였던 영구자석은 착자가 됨으로써 자성을 갖게 된다.

착자기 해석을 위한 전기적인 측면에서 방전부의 회로 해석을 진행하였으며 해석으로 도출되는 전압 및 전류의 식을 통하여 착자를 위한 설계 사양을 만족하는 착자요크의 회로정수를 도출하였으며 이에 따라 착자요크 회로정수의 설계를 위한 설계 절차를 제시하였다. 5000[V]와 15,000[uF]의 용량을 통해 착자요크의 파라미터는 0.015[ohm], 0.035[mH]를 도출하였다. 착자요크의 인덕턴스 증가는 방전전류의 최댓값

을 감소시키고 이와 반대로 지연시간은 증가시켰다. 또한 착자요크 저항의 크기가 증가함에 따라 방전전류의 최댓값은 감소하게 되고 지연시간 역시 감소하여 방전전류의 하강시간은 감소하게 된다. 방전전류의 최댓값이 낮을 경우, 자성 재료를 착자 하는데 충분한 기자력을 생성하지 못하고 커패시터의 방전시간이 증가하면 착자요크의 저항 성분으로 인한 전력손실이 증가하여 많은 발열이 발생한다. 이에 따라 시스템의 오류 가능성이 증가하고 냉각 시간 및 설비에 대한 비용이 증가하게 된다. 따라서 착자요크 회로정수 설계 시 충분한 기자력을 발생시킬 수 있는 방전 피크 전류와 시스템에 무리가 가지 않는 발열을 발생시키는 커패시터 방전 시간을 설계하는 것이 중요하며, 이를 위해 적절한 저항과 인덕턴스의 trade-off 설계 과정이 필요하다. 또한 착자요크의 실제 형상 설계를 통한 FEM 해석을 진행하여 방전전류에 따른 자계 해석이 필요하며 이에 따른 열 해석 또한 병행하여 진행하여야 상세한 착자요크 설계가 가능해진다. 이러한 설계 방법을 통해 착자기 설계 시, 착자요크 회로정수 설계 방법으로 활용할 수 있으며 효율적이고 안정적인 착자기 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Chul-Kyu Lee, Byung-Il Kwon (2005). Design of post-assembly magnetization system of line start permanent-magnet motors using FEM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(5), 1928-1931. <https://doi:10.1109/TMAG.2005.846501>.
- Jung-Seok Yoon, Gwang-Heon Kim (2002). Design and magnetization technology of permanent magnet synchronous motor (PMSM). *Journal of power electronics*, 7(5), 18-23.
- Jeong-Jong Lee, Chan-Gi Jeon, Se-Hyun Rhyu, In-Soung Jung.(2015). Magnetizing Current Analysis of 100kW-class Permanent Magnet Synchronous Motor Rotor Using Equivalent Circuit. Proceedings of 46th the

- KIEE Conference, July. 15-17, Muju, Korea.
- Jae-Woong Jung, Woong Hwang, Uk-Ho Seo, Yong-Woo Nam, Byung-Uk An.(2017). A study on the magnetization yoke of Spoke type rotor.The 48th Proceedings of the KIEE Conference, July. 12-14, Busan, Korea.
- Jione Choi, Beomjoong Kim, Hyung Gyu Lee, Junghee Lee, Aran Park, Gyuho Lee, Woo Hyun Jang.(2022). A Physically Unclonable Function based on RC Circuit with a Confidence Signal.Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, 27(4), 11-18.
- Myung-Hwan Yoon, Ki-Deok Lee, Jeong-Jong Lee (2021). Magnetization Analysis of Line-Start Permanent Magnet Motor. *Journal of the Korean Magnetics Society*, 31(3), 138-142.
- Soo-Jin Jung, Dong-Hyun Kang, Dong-Hee Kim, Yeon-Ho Jeong (2001). Design and Analysis of Magnetizing for High Speed Permanent Machines. *Proceedings of the KIEE Conference*, July. 18-20, Yongpyong, Korea
- Sang-Yong Jung, Hyun-kyo Jung.(2010). Design of drive motor for electric vehicle using integrated flux linkage.The Korean Institute of Electrical Engineers, 59(9), 30-38.
- Sung Gu Lee, Gyu-Won Lee, Su-Young Kim, Jaenam Bae.(2022).A study on high magnetic flux density magnetic field generation technology using pulse type magnetization system. The 53th Proceedings of the KIEE Conference, July. 13-16, Yeosu, Korea.
- Tae-Kue Kim, Chang-Dae Joo, Ho-Kyun Ahn.(2021). A Study on the Design and Analysis of High Frequency Coil Shape for Contactless Power Transmission System Combined with Transfer System. Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, 26(1), 41-54.
- Quan, D.-V. et al. (2018). Structure Design and Thermal Analysis of Cryogenic Cooling System for a 1500 A, 400 mH Class HTS DC Reactor. Journal of the Korea Industrial Information Systems Research.Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, 23(1), pp. 31 - 41. doi: 10.9723/JKSIS. 2018.23.1. 031.
- Yun-Sik Jin et al, (2015). A 4.8-MJ Pulsed-Power System for Electromagnetic Launcher Experiment. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(10), 3369-3373. [https://doi: 10.1109/TPS.2015.2403860](https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2403860).
- Young-Woo Bae, Woo-ju Kim, June-Seok Hong (2019). Economic Analysis of Optical Communication Control System in High Voltage Magnetizer. *Journal of Information Technology Applications & Management*, 26(6), 103-117. [http://doi: 10.21219/jitam.2019.26.6.103](http://doi.org/10.21219/jitam.2019.26.6.103).
- Yeon-Woo Kim, Seh-Wan Kim, Min-Jae Kim, Ui-Hyung Yi, Sung-won Lee(2022). Development of 200kW class electric vehicle traction motor driver based on SiC MOSFET. *Journal of IKEEE*. vol.26. no.4 pp. 671-680.



정민욱 (Jeong Minuk)

- 정회원
- 창원대학교 전기공학과 공학사
- 관심분야: 전력변환시스템
- 창원대학교 전기공학과 공학사
- 관심분야: 전력변환시스템



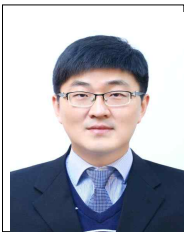
이승근 (SoongKeun Lee)

- 준회원
- 충남대학교 전파공학과 공학사
- 충남대학교 전파공학과 공학석사
- 창원대학교 메카트로닉스공학부 전기공학과 공학박사 수료
- LG전자 H&A본부 리빙솔루션연구소 책임연구원
- 관심분야: 전력변환 시스템, EMI



백권후 (GwonHu Baek)

- 준회원
- 평생교육진흥원 전기공학과 공학학사
- 창원대학교 전기전자제어공학부 전기공학과 공학석사
- 창원대학교 메카트로닉스공학부 전기공학과 공학박사 수료
- STX엔진 생산본부 특수 시운전팀 사원
- 관심분야: 비상발전기, 에너지 변환 시스템



김태규 (TaeKue Kim)

- 정회원
- 창원대학교 전기공학과 공학사
- 창원대학교 전기공학과 공학석사
- 창원대학교 전기공학과 공학박사
- (현재) 창원대학교 메카트로닉스대학 전기공학과 조교수
- 관심분야: 신호처리시스템, 전력제어시스템, 전동기제어, BMS, 차세대반도체, 스마트팩토리