

새로운 형태의 영구전류모드용 초전도 전원장치의 설계·제작 및 동작특성 실험

김호민* · 추 옹* · 윤용수** · 양준영* · 고태국*
 * 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 · ** 안산 공과대학 전기과

The Design, Fabrication and Characteristic Experiment of a novel type Superconducting Power Supply for Persistent Current mode

Ho-Min Kim · Yong Chu · Yong-Soo Yoon · Jun-Young Yang · Tae Kuk Ko
 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Yonsei Univ. Ansan College of Technology

Abstract - This paper deals with the design and fabrication of a novel superconducting power supply system, and characteristics have been analyzed through experiments. Superconducting power supply consists of rotating and static parts, and superconducting magnet. In this experiment, the current pumping characteristics have been analyzed with superconducting sheets placed in parallel within the static part of the machine. In addition, in order to observe the rotating flux distribution in the superconducting sheet, several hall-sensors were placed in it. With the flux distribution acquired, the effect of the flux on the superconducting sheet during the process of current pumping have been analyzed. Also, general operational characteristics of the superconducting power supply system have been investigated on the basis of the current and voltage data, and magnetic field values acquired through the experiments.

다. 여기서 외부자속의 값이 변화하면 전자유도법칙에 따라 유도되는 유기기전력 및 전류는 다음과 같다.

$$-\frac{d\Phi}{dt} = -A \frac{dB_a}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

R, L = 초전도 링의 총 저항 및 인덕턴스
 초전도회로가 아닌 일반 상전도회로에서는 발생된 유도 전류가 바로 사라지게 된다. 그러나 초전도 회로에서는 저항 $R=0$ 이므로 초전도회로의 경우 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$-A \frac{dB_a}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

식(2)에 적분을 실시하면 다음과 같다.

$$Li + AB_a = \text{Constant} \quad (3)$$

식(3)에서 좌변은 초전도 링의 총 자속이다. 즉, 좌변의 첫째 항은 회로 내에 유기기 전류에 따른 자속량이고 둘째 항은 외부에서 인가된 자속에 따른 자속량이다. 따라서 초전도회로의 경우 회로를 지나가는 총 자속은 변하지 않는다는 자속보존의 법칙이 증명되었다. 초전도회로의 전류는 영구전류이기 때문에, 초기 자속량은 계속 지속된다. 초전도전원공급장치에는 자석을 회전시켜 공급하는 회전형과 정지된 상태에서 공급하는 정지형이 있다. 본 논문에서는 이동자계에 의해 초전도 박막에서 일어나는 전자기적 현상을 이용하는 회전 자속형 저온초전도 전원장치에 관하여 연구하였다.

3. 설계 및 제작

소용량 회전자속형 플럭스펌프를 제작하여 특성실험을 수행하였다. 그림 1은 플럭스펌프 시스템의 조립도이다. 플럭스펌프는 실린더형 Nb foil과 한 개의 회전자극으로 이루어져 있다. 그리고, Nb foil 양끝에는 한 쌍의 초전도선을 spot welding한 후 초전도부하에 연결하였다. 표 1은 제작된 여자코일과 초전도 부하의 제원이며, 표 2는 사용된 Nb foil의 제원이다. 그리고, 표 3은 제작된 고정자와 회전자의 제원이다.

또한, 상전도영역의 flux density를 측정하기 위해서 Nb foil 중앙에 저온용 홀센서를 설치하였고, 출력전압을 측정하기 위해서 부하 양단에 한 쌍의 전압 탐을 부착하였다. 그리고, 초전도부하의 중앙에 저온용 홀센서를 설치하여 부하전류를 측정하였다. 모든 출력신호들은 절연증폭기를 통과한 후 analog type recorder에 기록된다. 실험과정은 먼저 축 상하에 설치된 2개의 초전도 전지석을 이용하여 회전자석을 Nb foil의 critical flux density 이상으로 여자 시킨 후 회전속도를 변화시켜가면서 출력parameters를 측정하였다.

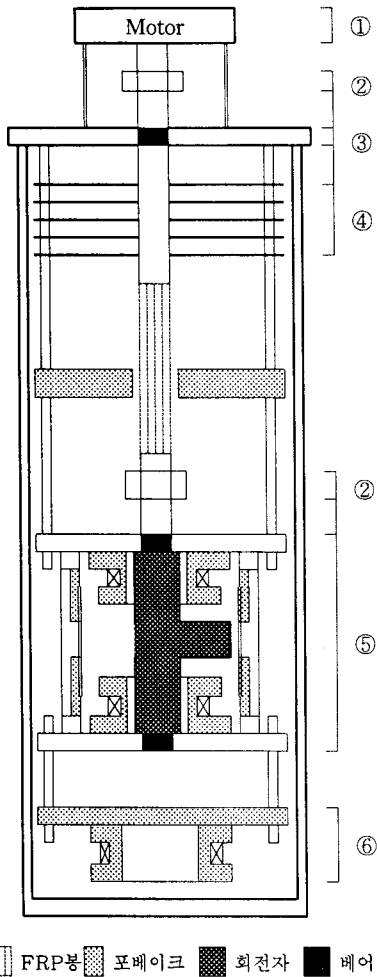
1. 서 론

초전도기기 중 의료용으로 널리 사용되는 MRI (Magnetic Resonance Imaging)나 전력 계통에서 양질의 전력을 공급하기 위하여 사용되는 SMES (Superconducting Magnet Energy Storage)등에서 사용되는 초전도자석은 외부의 전원공급장치로부터 전류를 공급받는다. 현재 사용되는 외부전원공급장치는 상전도전원장치를 사용하므로 초전도기기와 연결시에 상전도체와 초전도체의 접합이 발생하게 된다. 그러나 기존의 상전도전원장치를 초전도전원장치로 대체하여 초전도부하를 충전시킬 경우 상전도체와 초전도체간의 접합을 피할 수 있고 효율을 증가시킬 수 있는 등의 여러 가지 장점이 있다.

초전도전원장치는 자속보존의 법칙, 즉 "완전한 초전도 회로를 쇄고하는 자속은 일정하다"라는 이론을 기초로 한다[1]. 이론에 근거하여 본 논문에서는 다양한 장점이 있는 저온초전도전원장치를 제작하여 실험하였다. 제작된 시스템은 회전 자속형으로 설계하였으며 필요한 스위칭 퀀치시스템으로 임계자계 이상의 회전자속에 의한 스위칭을 채택하였고 자속의 공급원으로는 전자석을 채택하였다

2. 저온초전도 전원장치의 동작원리

외부에서 자속밀도 B_a 을 인가하고 초전도 링을 임계온도 이하로 냉각하였을 때 링으로 둘러싸인 면적을 A 라고 하면 링을 통과하는 자속은 $\phi = AB_a$ 라고 할 수 있



①모터부 ②커플링 ③헤드부 ④방열판
⑤초전도코일 및 회전자극 ⑥초전도부하

그림 1. 회전자속형 플럭스펌프 시스템의 조립도

TABLE I
SPECIFICATIONS OF THE MANUFACTURED SUPERCONDUCTING
EXCITATION COIL AND SUPERCONDUCTING LOAD

Section		Excitation coil		Load
		Upper	Lower	
Inductance	[mH]	2.14	2.21	1.81
Outer diameter	[mm]	66	66	78
Inner diameter	[mm]	50	50	70
The number of layers		8	8	4
Turns per layer	[turn]	24	24	43
Normal resistance	[Ω]	1.05	1.08	1.9

TABLE II
SPECIFICATION OF THE Nb SHEET

Material	Niobium
Thickness	50 μm
Size	100×89.25 mm
Critical magnetic field (at 4.2K)	0.2 T

TABLE III
SPECIFICATIONS OF THE ROTOR, THE STATOR

Section	Contents	
Rotor	Material	Wrought iron
	Outer diameter	110 mm
	Pole's cross-section shape	Round rectangular
	The number of pole	1
	Pole's width	14 mm
Stator	Longitudinal length	50 mm
	Material	Silicon steel plate
	Inner diameter	120 mm
	Outer diameter	150 mm
	Laminated thickness	110 mm

4. 결과 및 고찰

그림 2는 여자자계 0.2385T, 부하인덕턴스 1.81mH, 회전속도 15rpm일 때의 출력전압과 펌핑전류를 수치해석을 통해 얻었다. 상전도영역에서 자장의 변화가 일어나는 순간에 출력전압이 약 0.15mV의 DC성분을 갖고, 시간변화에 따른 출력전압은 서서히 감소한다. 전류증가는 초기에는 약 0.1mA/sec로 증가하다가 상전도영역의 손실 증가에 의해 포화되는 경향을 보이고 있다.

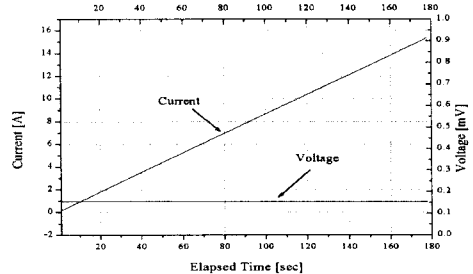


그림 2. 여자전류 12A, 회전속도 15rpm일 때의 동작특성 해석

그림 3은 여자자계 0.2385T, 부하인덕턴스 1.81mH, 회전속도 30rpm일 때의 출력전압과 펌핑전류를 수치해석을 통해 얻었다. 상전도영역에서 자장의 변화가 일어나는 순간에 출력전압이 약 0.62mV의 DC성분을 갖고, 시간변화에 따른 출력전압은 서서히 감소한다. 전류증가는 초기에는 약 0.33mA/sec로 증가하다가 상전도영역의 손실 증가에 의해 포화되는 경향을 보이고 있다.

그림 4는 여자자계 0.2385T, 부하인덕턴스 1.81mH, 회전속도 15rpm일 때의 출력전압과 펌핑전류를 동작특성실험을 통해 알아보았다. 상전도영역에서 자장의 변화가 일어나는 순간에 출력전압이 약 0.2mV의 DC성분을 갖고, 시간변화에 따른 출력전압은 서서히 감소한다. 전류증가는 초기에는 약 0.09mA/sec로 증가하다가 상전도영역의 손실 증가에 의해 포화되는 경향을 보이고 있다.

그림 5는 여자자계 0.2385T, 부하인덕턴스 1.81mH, 회전속도 30rpm일 때의 출력전압과 펌핑전류를 수치해석을 통해 얻었다. 상전도영역에서 자장의 변화가 일어나는 순간에 출력전압이 약 0.8mV의 DC성분을 갖고, 시간변화에 따른 출력전압은 서서히 감소한다. 전류증가는 초기에는 약 0.37mA/sec로 증가하다가 상전도영역의 손실 증가에 의해 포화되는 경향을 보이고 있다.

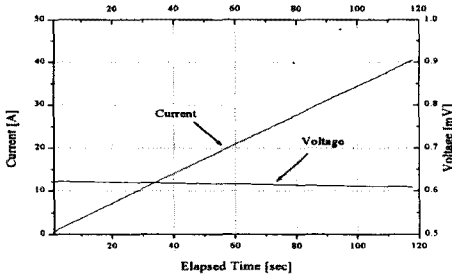


그림 3. 여자전류 12A, 회전속도 60rpm일 때의 동작특성 해석

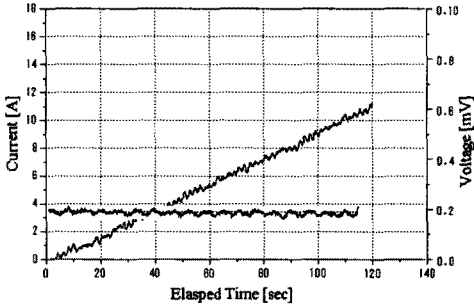


그림 4. 여자전류 12A, 회전속도 15rpm일 때의 동작특성 실험

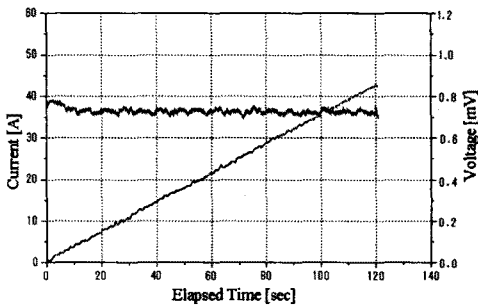


그림 5. 여자전류 12A, 회전속도 30rpm일 때의 동작특성 실험

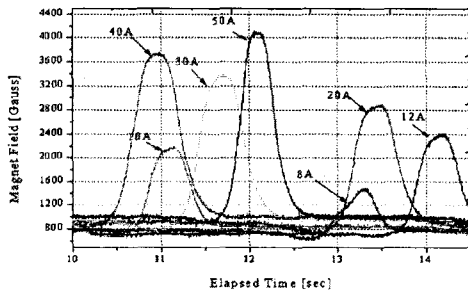


그림 6. 여자전류에 따른 중심자속밀도

그림 6은 여자전류를 인가하였을 때 상전도영역에서 발생하는 자속밀도를 실험을 통해 알아보았다.

5. 결론

본 연구는 회전 자속형 저온초전도 전원장치의 수치해석을 이용하여 동작특성을 살펴보고 소용량의 시스템을 제작하여 특성실험을 수행하였다.

- 1) 수치해석을 이용한 동작특성과 특성실험을 통한 값들은 거의 일치함을 알 수 있었다.
- 2) 회전자속형 저온초전도 전원장치의 펄핑중에 지속적으로 나타나는 DC성분 출력전압은 회전속도에 비례하는 데 이는 상전도영역의 자속밀도가 회전속도의 증가에 따라서 증가하기 때문이다.
- 3) 여자전류의 크기가 증가함에 따라서 상전도영역의 형상은 회전자의 철심이 갖고있는 투자율에 의해 넓어지는 사실을 알 수 있었다.
- 4) 장치의 펄핑전류는 포화점이 존재함을 알 수 있었다.
- 5) 펄핑전류는 여자전류와 회전속도에 의해 결정된다.
- 6) 회전속도가 빨라질수록 초전도부하의 충전율은 출력전압의 DC성분에 크게 의존한다.

[참고 문헌]

- [1] T. Orlando and K. Delin, *Foundation of applied superconductivity*, Addison-Wesley, New York, Chap. 1, 1990
- [2] J. H. Bae, Y. S. Oh, S. J. Lee, and T. K. Ko, "The Design, Manufacture and Characteristic Experiment of a Superconducting Fluxpump with Superconducting Excitation Coil", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 7, No. 2, pp. 672-675, June, 1997
- [3] J. Kraus, *Electromagnetics*, McGraw Hill Book Company, New York, pp 475-499, 1992
- [4] U. Inan and A. Inan, *Engineering Electromagnetics*, Addison-Wesley, Inc. New York, pp 505-533, 1999
- [5] D. O' Kelly, *Performance and control of electrical machine*, McGraw Hill Book Company, New York, pp 25-48, 1992