

새로운 형태의 영구전류모드용 초전도 전원장치의 제작 및 운전특성

論 文
49B - 12 - 1

The Fabrication and Operational Characteristics of a Novel Type Superconducting Power Supply for Persistent Current Mode

金 鎬 民* · 尹 庸 銖** · 高 太 國*** · 韓 泰 洙§ · 張 勝 燦§§ · 吳 詳 秀§§§
(Ho Min Kim · Yong-Soo Yoon · Tae-Kuk Ko · Tae-Su Han · S. C. Jang · Sang-Soo Oh)

Abstract - This paper deals with the design and fabrication of a novel superconducting power supply system, and characteristics have been investigated through experiments. Superconducting power supply consists of rotating and static parts, and superconducting magnet. In this experiment, superconducting foils were placed in parallel within the static part of the machine, pumping currents were measured with respect to rotor speeds and excitation currents. In addition, in order to observe the rotating flux distribution in the superconducting foils, several hall-sensors were placed in it. With the flux distribution acquired, effect of the flux on the superconducting foil during the process of current pumping has been discussed. Also, the 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.

Key Words : Superconducting power supply, superconducting magnet, persistent current mode, pumping-current

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 상전도 전원장치를 사용하므로 초전도기기와 연결 시에 상전도체와 초전도체의 접합이 발생하게 된다. 초전도자석의 용량이 증가되면 외부의 상전도 전원장치에서 공급 하여야 하는 전류값이 증가하므로 상전도체와 초전도체의 접합 부분에서 발생하는 열손실이 증가하여 냉각비용이 상승하며, 조기 켜치등으로 인한 전체적인 시스템의 안정성 저하 가능성이 있다. 그러나 기존의 상전도 전원장치를 초전도전원장치(LTS power supply)로 대체하여 초전도부하를 충전시킬 경우, 상전도체와 초전도체간의 접합을 피할 수 있고 효율을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 영구전류모드 운전에 필수적인 영구전류스위치(Persistent Current Switch)가 필요 없는 등의 여러 가지 장점이 있다.

초전도전원장치는 자속보존의 법칙, 즉 "완전한 초전도회

로를 쇄교하는 자속은 일정하다"라는 이론을 기초로 한다[1]. 현재까지 일반적으로 받아들여지는 회전형 초전도 전원장치의 모델은 하나의 초전도박막을 실린더 형태로 사용한다[2]. 그러나, 이러한 형태의 전원장치에서는 전류의 증가율이 크지 않으므로 현재는 전류충전율을 높게 하기 위한 다양한 형태의 전원장치들이 고안되어지고 있다. 본 논문에서는 이러한 관점에서 실린더형태의 박막을 일정한 사이즈로 분할한 후, 그들을 서로 직·병렬로 연결한 형태의 저온초전도전원장치를 설계·제작하여 실험하였다. 제작된 시스템은 회전 자속형으로 설계하였으며 필요한 스위칭 켜치시스템으로 초전도박막(Nb-foil)이 갖는 임계자계 이상의 회전자속에 의한 스위칭방법을 채택하였고 자속의 공급원으로는 초전도자석을 채택하였다.

2. 초전도 전원장치의 동작 원리

면적이 A 인 폐회로에 외부에서 자속밀도 B_a 인 자장을 인가하면, 폐회로를 통과하는 자속은 $\phi = AB_a$ 라고 할 수 있다. 여기서 외부자속의 값이 변화하면 전자유도법칙에 따라 유도되는 유기기전력 및 전류는 다음과 같다.

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

여기서, R 과 L 은 폐회로의 저항 및 인덕턴스이다.

초전도회로가 아닌 일반 상전도 회로에서는 발생된 유도전류가 바로 사라지게 된다. 그러나 초전도 회로에서는 저항 $R=0$ 이므로 초전도회로의 경우 식(1)은 다음과 같이 된다.

* 正 會 員 : 延世大學校 電氣·電子工學科
 ** 正 會 員 : 安山工科學校 電氣科 專任講師·工博
 *** 正 會 員 : 延世大學校 電氣·電子工學科 教授·工博
 § 正 會 員 : 技術標準院 工業研究官·工博
 §§ 正 會 員 : 에너지管理工團 R&D 本部 工業研究官·工博
 §§§ 正 會 員 : 韓國電氣研究所 前任研究員·工博
 接受日字 : 1999年 10月 15日
 最終完了 : 2000年 11月 24日

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

식(2)에 적분을 실시하면 다음과 같다.

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

식(3)에서 좌변은 초전도 회로와 쇄교된 총 자속이다. 즉, 좌변의 첫째 항은 회로 내에 유기 되는 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 그림 1에서 보여주는 바와 같이 이동자계에 의해 초전도박막에서 일어나는 전자기적 현상을 이용하는 회전 자속형 저온초전도 전원장치에 관하여 연구하였다.

회전자속형 초전도전원장치는 여자기를 이용하여 초전도박막의 임계자속밀도(critical flux density=Bc) 보다 큰 자계를 외부에서 가해주면 상전도영역이 형성된다. 상전도영역은 일 정속도 v로 회전하며 초전도부하와 이루어진 폐회로를 한 주기 동안 회전할 때마다 가해진 자속을 축적시킨다. 이러한 자속의 변화 분은 유기기전력을 발생시키며 초전도부하에 전류를 공급하여 준다.

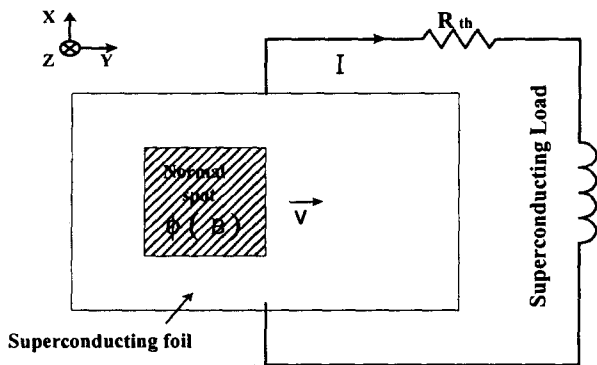


그림 1 초전도 전원장치의 개략도
Fig. 1 The schematic of superconducting power supply

3. 시스템 설계 및 제작

그림 2는 회전자속형 초전도 전원장치 시스템의 조립도 이다. 초전도 전원장치는 크게 고정자, 여자기, 회전자, 그리고 초전도 부하인 네 부분으로 되어있다. 고정자에는 여자기 역할을 하는 초전도자석이 상·하에 부착된다. 고정자는 회전자의 양끝에 설치된 여자기에서 발생한 자속이 통과하는 자로 역할을 하며 내부에 같은 크기의 초전도박막 2장을 1조로 직렬 연결시킨 초전도박막 4조가 부착된다. 초전도박막 2장의 직렬 결합은 4개의 300A급 NbTi 초전도선재를 사용하였다. 고정자는 145mm 높이로 제작되었으며 중앙부분에는 두께 0.5mm의 규소강판을 110mm 높이로 적층하였다. 규소강

판이 사용된 이유는 자로의 투자율을 높이기 위해서이다. 그리고, 2장의 초전도박막을 직렬 연결시킨 후 박막 양끝에는 한 쌍의 1000A급 NbTi 초전도선재를 사용하여 중앙부분에 약 20mm 정도 spot welding한 후 4쌍의 리드선을 초전도부하에 병렬로 연결하였다. 여자기는 보빈에 초전도선을 권선하여 제작하였으며, 초전도박막으로 사용되는 Nb foil의 임계 자속밀도값인 0.2T 이상을 발생시킬 수 있도록 설계하였다. 회전자는 네 개의 pole을 가지고 있으며, 각 pole들은 초전도 박막 상에 상전도영역을 만들며 회전할 수 있도록 제작되었다. 회전자의 pole들은 단면의 크기가 같고 pole의 회전방향과 회전축방향으로 각각 7mm, 50mm가 되도록 제작되었다. 회전자는 극저온용기 헤드부에 위치한 모터와 직결되고 외부의 열 침입을 줄이기 위해 축 중앙에 FRP 붕을 설치하였다. 또한, 외부의 열 침입을 막기 위해 극저온용기 상부에 방열판을 설치하였으며 회전축의 진동을 줄이기 위해 커플링을 사용하였다. 초전도부하는 초전도전원장치에서 발생한 전류를 저장하고 전원장치와 하나의 폐회로가 되도록 한다. 초전도부하와 여자기의 보빈은 극저온인 액체헬륨온도에서 변형이 거의 없는 포베이크로 제작하였다.

표 1은 제작된 여자기와 초전도부하의 제원이며 각각의 인덕턴스값은 LCR미터로 측정된 수치이다. 표 2는 사용된 초전도박막의 제원이다. 그리고 표 3은 제작된 고정자와 회전자의 제원이다.

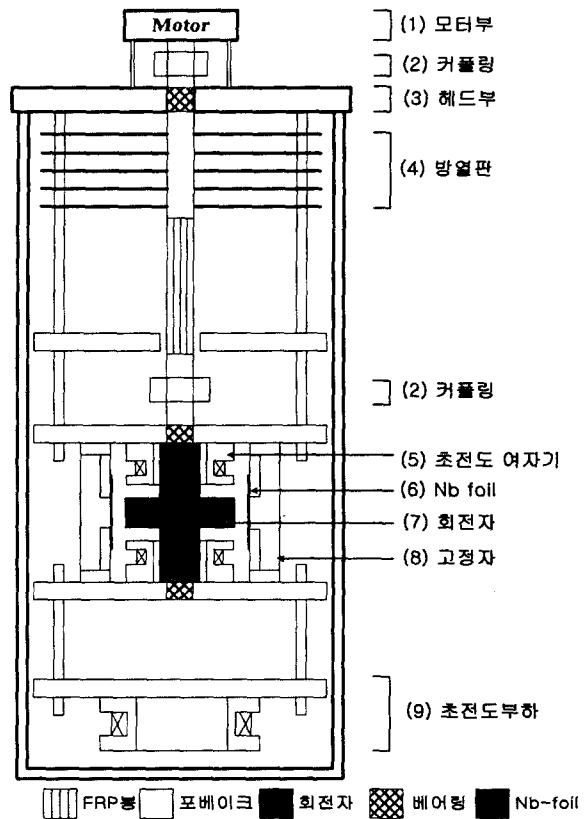


그림 2 초전도 전원장치 시스템 조립도
Fig. 2 Schematic diagram of the superconducting power supply

표 1 제작된 초전도 여자기와 초전도 부하
Table 1 Specifications of the superconducting exciter 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

표 2 초전도박막의 제원
Table 2 Specifications of the Nb foil

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

표 3 회전자와 고정자의 제원
Table 3 Specifications of the rotor and the stator

Section		Contents
Rotor	Material	Wrought iron
	Outer diameter	110 mm
	Pole's cross-section shape	Round rectangular
	The number of pole	4
	Pole's width	7 mm
	Longitudinal length	50 mm
Stator	Material	Silicon steel plate
	Inner diameter	120 mm
	Outer diameter	150 mm
	Laminated thickness	110 mm

4. 특성 실험

그림 3은 초전도전원장치 시스템의 특성실험을 위한 개략도이다. 극저온에 놓여있는 저온초전도 전원장치는 여자기에서 발생한 자속이 일정 속도로 회전하는 pole들을 통해서 Nb foil의 임계자속밀도값 0.2T 이상의 자속이 초전도박막을 통과하면서 초전도부하와 이루어진 폐회로에 자속변화 만큼의 유기기전력을 발생시키도록 되어있다.

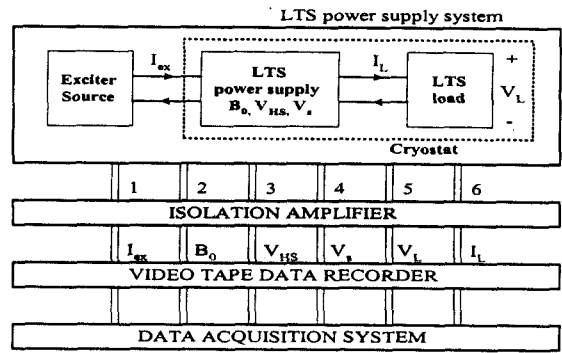


그림 3 초전도 전원장치의 실험 시스템 구성도
Fig. 3 Experimental constitution for superconducting power supply system

상전도영역의 자속밀도를 측정하기 위해서 회전자 pole이 지나가는 Nb foil 중앙에 저온용 홀센서를 설치하였고, 출력 전압을 측정하기 위해서 부하 양단에 한 쌍의 전압 탭을 부착하였다. 초전도부하에 충전된 전류는 직접 측정할 수 없기 때문에 초전도부하의 중앙에 저온용 홀센서를 설치하였다. 이것은 초전도부하를 흐르는 전류에 의해 발생되는 자계를 측정하여 요소특성실험을 통해 얻은 계수를 통해 환산함으로써 실제 부하에 흐르는 전류를 계산할 수 있었다. 계수값은 홀센서의 출력전압을 1000배 증폭하였을 때 21.743mV/A를 얻을 수 있었다. 요소특성실험은 시스템 특성실험에 쓰인 초전도부하에 극저온 환경을 만든 후 외부에서 전류를 흘려주어 전류와 부하 중앙의 자속밀도의 관계를 측정하였다. 모든 출력신호들은 절연증폭기를 통과한 후 Analog tape recorder에 기록되며, 동시에 Data Aquisition system에서 모니터링 된다. 실험과정은 먼저 고정자의 상하에 설치된 2개의 초전도 전자석을 이용하여 회전자의 pole들을 초전도박막의 임계자속밀도 이상으로 여자 시킨 후 회전속도를 변화시켜가면서 출력 파라미터들을 측정하였다. 여기서, 출력 파라미터는 초전도박막 상의 자속밀도값, 초전도부하에 흐르는 충전전류와 부하양단 전압값이다.

5. 실험 결과 및 고찰

회전 자속형 초전도 전원장치의 동작특성을 살펴보기 위해 회전자속의 속도와 크기를 변화시켜 이에 따른 초전도부하의 충전 전류값과 양단 전압의 변화를 살펴보았다. 그림 4와 그림 5에서는 제작된 초전도 전원장치 시스템의 최대 충전 전류값을 알아보기 위해 여자전류와 회전자 속도를 일정하게 유지한 후 동작시켰다. 그 결과 약 900A의 최대 전류를 얻었다. 다른 동작 조건에서도 약 900A의 최대 전류값을 얻을 수 있었는데 이것은 1000A급 초전도리드선을 사용하여 접합을 한 결과로 접합부가 가장 취약하다는 결론을 얻을 수 있다.

그림 4는 여자전류를 30A로 인가하고, 회전자의 회전수를 120rpm으로 하여 초전도 부하를 충전하였을 때의 전압, 전류 파형이다. 전류충전율은 1.05A/sec를 갖고 860.5초 후에 904A까지 초전도부하를 충전시켰다. 전압 파형은 DC값이 초기에는 2.324mV에서 1.82mV로 변화하였고, AC값은 3.66mV에서 0.29mV의 사이 값을 갖고 있다.

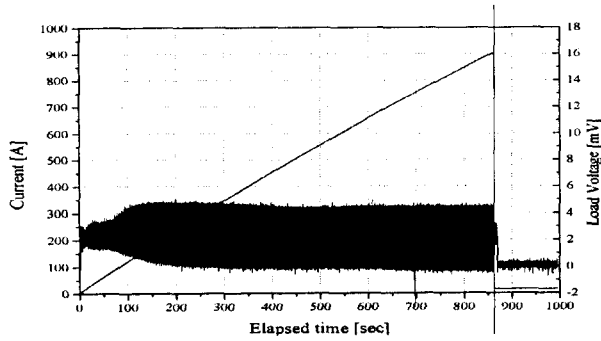


그림 4 충전모드시의 전압 및 전류특성
Fig. 4 Current and voltage characteristics in the charging mode

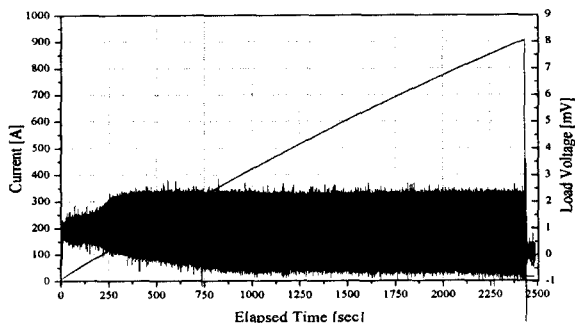


그림 5 충전모드시의 전압 및 전류특성
Fig. 5 Current and voltage characteristics in the charging mode

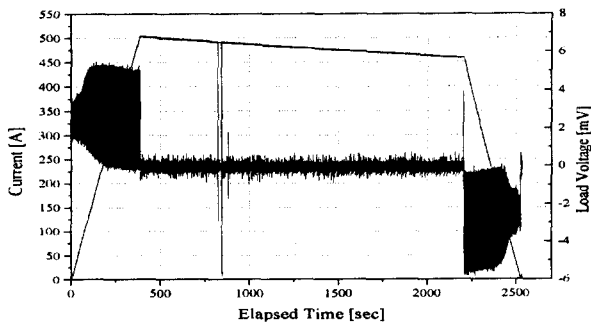


그림 6 영구전류모드시 전류 및 전압
Fig. 6 Current and voltage in persistent mode

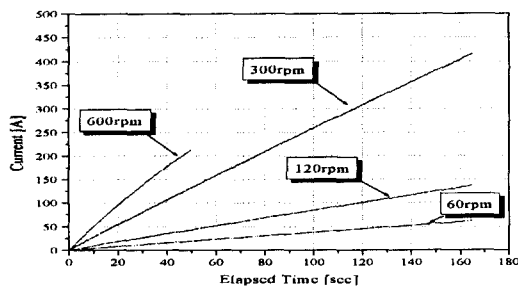


그림 7 회전자 속도 변화에 따른 전류특성
Fig. 7 Current characteristics w. r. t. variation of rotor speed at exciting current is 20A

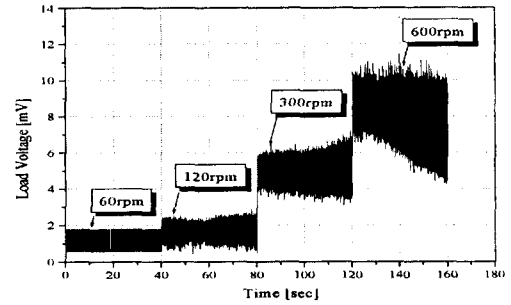


그림 8 회전자 속도 변화에 따른 부하 전압특성
Fig. 8 voltage characteristics w. r. t. variation of rotor speed at exciting current is 20A

그림 5는 여자전류 20A를 인가하고, 60rpm으로 회전시켰을 때 충전전류와 부하양단전압으로 최대 충전전류인 900A를 얻었다.

그림 6은 여자전류를 40A로 인가하고, 모터의 회전수를 120rpm으로 하여 초전도부하를 충전모드-영구모드-방전모드로 동작시켰을 때의 전압, 전류 파형이다. 전류 파형을 살펴보면, 전류충전율을 1.3A/sec를 갖고 386.5초 후에 503A까지 초전도부하를 충전시켰다. 전압 파형은 DC값이 초기에는 2.584mV에서 2.414mV로 변화하였고, AC값은 4.79mV에서 0.44mV의 값을 갖고 있다. 또한 방전모드는 충전모드와 동일한 조건에서 회전자의 회전방향을 역방향으로 동작시켜 줌으로써 충전된 전류를 방전시키는 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 그림 6을 통해 회전 자속형 초전도 전원장치와 초전도 부하의 영구전류모드 운전특성을 살펴보았다. 또한 식(4)를 이용하여 초전도 전원장치 시스템의 접촉저항값을 시정수를 통하여 얻을 수 있었다.

전체 시스템의 저항값은 영구전류모드에서 전류 감소비를 가지고 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \tag{4}$$

여기서 I 와 I_0 는 각각 영구전류모드가 끝날 때와 시작할 때의 전류값이며, t 는 영구전류모드의 경과시간이고, L 은 시스템의 인덕턴스이다.

그림 6에서 보면 I 는 2146초에서 458.4A이며 I_0 는 384초에서 499.2A이다. 또한 $t=1762$ 초이고, $L=1.8$ mH 이므로 식 4에 의하여 전체저항값 R 은 $0.087 \mu \Omega$ 로 계산된다.

그림 7은 여자기의 여자전류를 20A 인가하여 회전자계의 자속밀도값을 일정하게 유지하고 회전자의 속도를 변화시켰을 때의 부하 전류 특성을 살펴보았다. 그 결과 60, 120, 300, 600rpm 일 때의 전류충전율은 각각 0.373, 0.83, 2.52, 4.4A/sec를 얻었다. 따라서, 전류충전율은 회전 속도에 대해 비례함을 알 수 있다. 그림 7의 회전자 속도 600rpm에서 충전전류의 특성을 살펴보면 다른 회전속도의 충전전류 모습에 비해 서서히 포화되고 있음을 알 수 있다. 이것은 2장이 직렬로 연결된 4조의 초전도박막 중 한 곳에서 부분적으로 퀵치가 발생하여 충전전류가 포화현상을 보였다.

그림 8에서는 그림 7과 같은 조건에서 부하 양단에 발생하는 부하 전압 특성을 살펴보았다. 회전속도가 60, 120, 300,

600rpm에서 부하 양단 전압은 각각 0.94, 2.0, 5.21, 10.82mV를 얻을 수 있었다. 부하 양단 전압특성은 전류충전율과 마찬가지로 회전속도에 비례하여 증가함을 알 수 있었다.

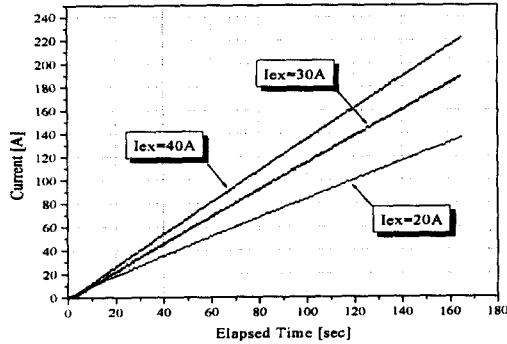


그림 9 회전자 속도 120rpm일 때 여자전류 변화에 따른 전류특성

Fig. 9 Current characteristics w. r. t. variation of exciting current at rotor speed is 120rpm

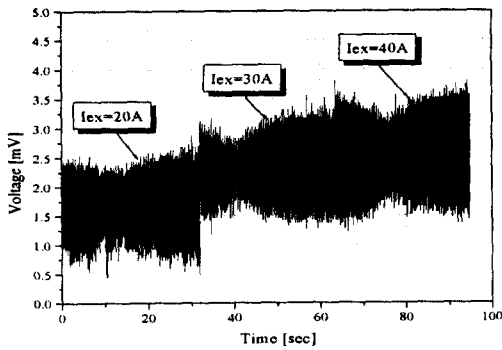


그림 10 회전자 속도 120rpm일 때 여자전류 변화에 따른 부하 전압특성

Fig. 10 Load voltage characteristics w. r. t. variation of exciting current at rotor speed is 120rpm

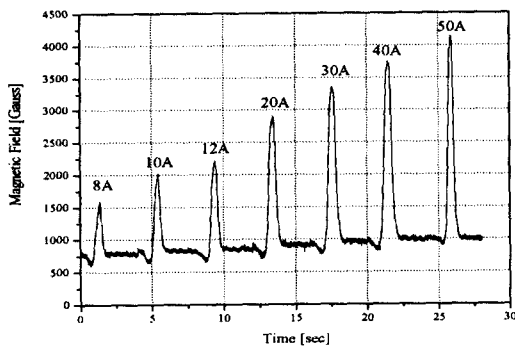


그림 11 여자전류 변화시의 자속밀도

Fig. 11 Magnetic flux density w. r. t. the exciting current

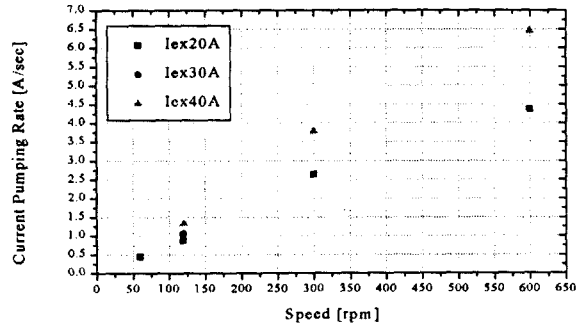


그림 12 여자전류와 회전속도 변화시의 전류충전율 변화

Fig. 12 Current pumping rate w. r. t. excitation current and rotating speed

그림 9에서는 회전자 속도를 120rpm으로 일정하게 한 후 여자에 공급되는 전류값을 20, 30, 40A로 증가시켰을 때 초전도부하에 충전되는 전류 특성을 살펴보았다. 회전속도에 대한 전류충전율은 각각 0.83, 1.14, 1.3A/sec를 보이고 있다. 여자전류변화에 따른 전류충전율은 회전속도변화에 비교하여 볼 때 1차함수에 비례하여 증가하지 않았다. 전류충전율은 초전도폐회로와 쇄교되는 총 자속량과 비례한다. 하지만 자속을 공급해주는 여자전류와 여자기에서 발생된 자속량은 1차 비례하지 않았다. 왜냐하면, 실험결과와 참고문헌[7]을 보면 상온 상태에 비하여 극저온 상태에서는 회전자 철심의 자기포화가 초기에 발생하므로 자기포화영역에서는 여자전류를 계속 증가시켜도 초전도박막을 투과하는 자속밀도값은 여자전류증가에 비례하여 선형증가하지 않기 때문이다.

그림 10은 그림 9와 같은 조건에서 여자기의 전류값만을 변화시켰을 때 초전도 부하 양단에 발생하는 전압특성을 살펴본 것이다. 여자 전류값이 20, 30, 40A로 증가하였을 때 부하양단 전압은 각각 2.0, 2.324, 2.584mV가 발생하였다. 그림 8과 그림 10을 통해서 부하 양단 전압은 교류성분과 직류성분이 함께 존재함을 알 수 있다[2].

그림 11은 회전자를 5rpm으로 회전시키면서 여자전류를 8A부터 단계적으로 증가시켜 50A까지 인가하였을 때 상전도영역에서 발생하는 자속밀도를 극저온용 홀센서를 이용하여 측정된 값이다. 초전도 여자기에서 발생한 자속은 회전자의 4개의 pole을 통해 나온 후 고정자를 거쳐 다시 회전자 축으로 회귀하는 폐회로를 형성하며 부하충전에 사용되는 자속밀도값을 정확히 측정하기 위해 극저온용 홀센서의 위치를 초전도박막의 중앙에 두었다. 한편, 초전도박막을 투과하는 자속은 Nb foil의 임계자속밀도값(0.2T) 이상이기 때문에 실제 상전도영역을 형성하는 단면은 그림 11의 시간축을 통해 환산할 수 있다. 따라서, 여자전류가 증가함에 따라 회전방향의 상전도영역이 커짐을 알 수 있다. 이러한 상전도영역 크기의 증가는 시스템 전체적으로 보았을 때 손실의 증가를 의미한다.

그림 12는 특성실험 중 여자전류와 회전자의 회전속도를 변화시켰을 때 전류충전율(di/dt)의 변화를 보여주고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 회전자속형 초전도전원장치를 설계, 제작하여 실험을 실시하였다. 결과를 종합하면 다음과 같다.

- ① 그림 7에서 여자전류 20A, 회전자 속도 600rpm으로 동작 시킨 결과를 통해 초전도 전원장치의 충전전류는 포화점이 존재함을 알 수 있었다.
- ② 그림 7과 그림 9에서 보는 바와 같이 부하전류 증가는 여자전류와 회전속도에 의해 결정된다. 여자전류에 따른 전류충전을 변화는 여자전류가 증가함에 따라 전류충전율이 증가하는데, 이것은 1차함수에 비례하지 않는다.
- ③ 그림 8과 그림10에서 부하 양단 전압은 직류성분과 교류성분이 함께 존재하는데 교류성분은 회전자속이 초전도 폐회로와 스위칭 될 때 자속변화에 의해 나타나며 이것은 실제 초전도박막을 흐르는 전류분포에도 상관성이 있다. 왜냐하면 초전도박막에서 전류의 분포에 따른 인덕턴스의 변화가 영향을 미치기 때문이다[3]. 그러나 초전도박막 내의 전류분포 변화에 따른 인덕턴스 변화는 상당히 미약하다.
- ④ 연구의 최종목표가 영구전류모드이므로 시스템 전체의 접촉저항은 중요하다. 그림 6에서 보는 바와 같이 초전도 전원장치 시스템의 접촉저항은 시정수를 통해 살펴본 결과 $0.087 \mu \Omega$ 임을 알 수 있었다.
- ⑤ 초전도전원장치 시스템의 여자전류에 따른 자속밀도는 그림 11에서 살펴보았듯이 여자전류가 50A 이상이 되면 회전자 철심(S45C)의 포화현상이 발생함을 알 수 있었다. 이에 대한 해결방법은 포화 자속밀도가 높은 철심을 사용한다.
- ⑥ 그림 11에서 살펴 본 바에 의하면 여자전류에 따른 상전도영역의 크기는 여자전류의 크기가 증가함에 따라서 상전도영역은 회전자 단면보다 더 커짐을 알 수 있다.

본 연구의 결과 영구전류모드 운전을 위한 시스템 전체의 접촉저항을 줄이기 위해 초전도 리드선과 초전도부하의 접합을 초전도 접합으로 대체하고 soft-welding시 초전도 박막과 초전도 리드선의 임계전류값을 높일 수 있는 방법을 개발하여야 하겠다. 또한 보다 큰 용량의 초전도부하에 본 논문의 연구 내용을 접목 시켜 계속해서 연구를 진행 할 예정에 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 에너지절약기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다

참 고 문 헌

- [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] Tae Kuk Ko, Study of the performance of a novel superconducting fluxpump, CWRU, Ph.D. Dissertation. 1985
- [4] J. Kraus, Electromagnetics, McGraw Hill Book Company, New York, pp 475-499. 1992
- [5] U. Inan and A. Inan, Engineering Electromagnetics, Addison-Wesley, Inc, New York, pp 505-533. 1999
- [6] D. O' Kelly, Performance and control of electrical machine, McGraw Hill Book Company, New York, pp 25-48. 1992
- [7] Richard M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE Presss, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York. pp59, 1993

저 자 소 개



김 호 민 (金 鎬 民)

1970년 8월 23일생. 1995년 제주대학교 전기공학과 졸업. 1998년 연세대학교 공학석사. 1998년~현재 연세대학교 전기·전자공학과 박사과정

Tel : 02-2123-2772

E-mail : homin@yonsei.ac.kr



한 태 수 (韓 泰 洙)

1955년 3월 3일생. 1981년 동국대학교 물리학과 졸업. 1983년 동국대학교 물리학과 졸업(석사). 1990년 일본 Tsukuba대학 공학연구과 졸업(공학). 1990~93년 일본 공업기술원 전자기술총합연구소(ETL) 연구원.

1993년~현재 산업자원부 기술표준원 정보표준과 과장. 현재 국제전기기술위원회(IEC) TC40 / TC90 국내전문위원
Tel : 02-509-7333

E-mail : tshan@ats.go.kr



윤 용 수 (尹 庸 銖)

1961년 8월 27일생. 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1995년 연세대학교 공학 졸업(석사). 1996년~현재 연세대학교 전기·전자공학과 박사과정. 1985년~1998년 대우전자 전장개발1팀장. 현재 안산공과대

학 전기과 전임강사

Tel : 031-490-6151

E-mail : ysyoon@intra.ansantc.ac.kr



장 승 찬 (張 勝 燦)

1969년 6월 30일생. 1992년 홍익대학교 전기제어공학과 졸업. 1995년 동대학원 졸업(석사). 2000년 동대학원 졸업(공학). 1995~96년 생산기술연구원 1996년~현재 에너지관리공단 R&D 본부 전기에너지팀

Tel : 031-260-4233

E-mail : schang@kemco.or.kr



고 태 국 (高 太 國)

1955년 7월 4일생. 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1983년 Case Western Reserve University (석사). 1986년 동 대학원 (공학). 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수. 현재 연세대학교 전기·전자공학 교수. 현재 대한전기학회 평의원

Tel : 02-2123-2772

E-mail : tkko@yonsei.ac.kr



오 상 수 (吳 詳 秀)

1959년 11월 1일생. 1982년 경북대학교 공대 금속공학과 졸업. 1989년 일본 Kyoto대 금속공학과 대학원 졸업(석사). 1992년 일본 Kyoto대 금속공학과 박사과정 수료. 1992년~현재 한국전기연구소 초전도응용

연구그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1654

E-mail : ssoh@keri.re.kr