

초전도 여자 코일을 이용한 초전도 Power Supply 제작 및 동작 특성 해석

배준한^{*}, 오윤상, 송명곤, 지창섭, 김호민, 고태국
연세대학교 전기공학과

The Manufacture and Operational Characteristics Analysis of a Superconducting Power Supply by using Superconducting Excitation Coils

Joon-Han Bae, Yun-Sang Oh, Myung-Kon Song, Chang-Seop Ji, Ho-Min Kim, Tae-Kuk Ko
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - This paper is a study on the rotating type of superconducting power supply(R.S.P.S.) with superconducting excitation coils. In this paper, a new idea of excitation coil is introduced to control the pole-flux in air gap. We manufactured the R.S.P.S. by using superconducting excitation coils and measured the charging current of superconducting load with respect to rotational speeds and excitational current. Through this experiment, 425A of maximum current was obtained a few minutes. It turned out that the charging rate of load current is proportional to rotational speeds and excitational current. Furthermore, it is found that it's possible to generate the charge current of thousands of amperes by using wires of larger critical current.

1. 서 론

종래의 초전도 자석의 여자 방식에는 전류도입선으로 부터의 열침입으로 인한 열선설 발생 문제와 여자를 일정하게 하기 위한 영구전류모드화 등의 문제가 있다. 그러므로 초전도 기기의 고효율화를 위해 여자계의 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다. 초전도 power supply는 초전도 현상을 이용한 대전류 발생장치로서 상온부에서 저온부로의 큰 전류도입 및 영구전류모드로의 전환시에 스위치를 필요로 하지 않는 여자계를 실현할 수 있기 때문에 상기의 문제점들에 대처할 수 있을 것으로 기대되며, 시스템의 안정도(stability) 향상, 소형화, 경량화 등이 가능하고, 회로의 큰 변경 없이 고온 초전도체로 대처할 수 있기 때문에 고온 초전도 power supply 개발로도 쉽게 전환이 가능하다는 장점이 있다.[1] 이러한 장점으로 인해 1970년 중반부터 네덜란드에서는 변압기 및 정류기를 이용한 정지형 초전도 power supply를 개발하여 MRI의 power supply로 상용화하였다.[2] 이 장치는 안정도가 높고, 고효율인 반면 고전류 발생이 어렵다는 단점을 갖고 있다. 이에 따라 미국, 일본, 러시아 등의 주요 선진국에서는 고효율이면서, 고전류를 발생할 수 있는 회전자속형 초전도 power supply를 계속 연구, 개발해 왔다.[3]

따라서, 본 논문에서는 초전도 박막에 공급되는 풀렉스량을 용이하게 제어할 수 있는 초전도 여자 코일을 이용한 새로운 방식의 회전자속형 초전도 power supply를 제작하였고, pole의 회전 속도와 여자 전류의 크기를 바꿔 가면서 초전도 부하의 충전전류를 측정하는 실험을 수행하였고, 이를 통하여 대용량 초전도 power supply의 실현 가능성은 제시하였다.

2. 초전도 power supply의 제작

초전도 power supply는 극저온에서 회전하는 부위가 있는 회전기 기이므로 회전에 의한 냉매의 기화, 회전축을 통한 열전달 등 극저온 상태에서 회전에 따른 여러 문제들을 고려하여 제작하여야 한다. 본 논문에서는 초전도 power supply를 제작하기 위하여 주어진 선재와 회전자속형 모델을 이용하여 시스템 특성해석을 하였고, 이러한 특성해석을 해석을 통하여 실제 제작에 필요한 설계값이 도출되도록 설계 프로그램을 작성하였다.[4]

2.1 저온용기 및 헤드부

실험에 사용된 저온용기는 미국 Janis사 제품을 구입하였고, 저온용기의 헤드부에는 외부복사열을 방지하기 위해 스텐레스 방열판을 부착하였고, 전류도입선은 전류에 의하여 가열되는 것을 방지하기 위해 활동 파이프와 구리막대를 이용하여 냉각채널을 구성하였다. 또한, 회전축을 통한 열전달을 차단하기 위해 회전축 중간에 FRP 봉을 사용하여 단열시켰고, 회전시 전동문제를 해결하기 위해 FRP 봉과 회전축 간에 스프링 형태의 커플링을 설치하였다. 또한 전체적인 균형을 잡기 위해 회전축의 얼라인먼트를 조절이 용이하도록 제작하였고, 극저온에서 배어링이 얼지 않도록 윤활유 및 이물질을 모두 제거한 불배어링을 사용하였다.

2.2 초전도 여자코일 및 부하

설계프로그램을 통하여 얻어진 설계결과를 이용하여 초전도 power supply의 여자코일 및 부하를 제작하였다. 표 1은 제작된 여자코일 및 부하의 제원이다. 여자 코일은 초전도선을 이용하여 발열을 최소화 하도록 하였고, 펌핑전류 lead 선은 8쌍으로 하였다. 사용된 초전도 선재의 제원을 표 2에 표기하였다.

표 1. 제작된 여자코일 및 부하의 제원

Table 1. Specifications of the manufactured excitation coil and sc load

구 분	초전도 여자코일			초전도 부하	
	상 측	하 측	비 고	제작값	비 고
인 더 먼 스 [mH]	2.14	2.21		1.97	
외 측 지 럭 [mm]	66	66		78	
내 측 지 럭 [mm]	50	50		70	
보 빙 길 이 [mm]	25	25		45	
선 재 길 이 [m]	35.5	35.7		40.2	
총 수 [층]	8	8		4	
총 당 권 선 수 [turn]	24	24		43	
총 권 선 수 [turn]	195	196		173	
중 심 자 장 [T]	0.56	0.56	at 10A	0.18	at 100A
상 전 도 저 항 [Ω]	1.05	1.08	at 상온	1.23	at 상온

표 2. 전류 lead선과 여자코일 및 부하용 초전도선재 재원
Table 2. Specifications of sc wires for current leads, excitation coil and sc load

구 분	초전도 lead 선		여자코일 및 부하	
	내 용	비 고	내 용	비 고
선 재 종 류	NbTi/Cu		NbTi/Cu	
비절연 선 재 지름 [mm]	0.45		0.941	0.940 ± 0.005
절연선 선 재 지름 [mm]	0.475		1.003	1.000 ± 0.010
필라멘트 수 [본]	24		24	
필라멘트 지름 [μm]	32			
트위스트 피치 [mm]	20		53	50 ± 10
Cu / NbTi 비	7		7.4	7 ± 1
임계전류 [A] at 4.2K, $10\mu V/m$	80 70	at 1T at 2T	300 236	≥ 265 (at 3T) ≥ 210 (at 4T)
임계온도 [K]	9.4		9.4	
R_{300K} / R_{10K}	129	≥ 100	129	≥ 100

여자코일 및 부하의 보빈으로는 포베이크를 사용하였으며, 초전도 선재의 권선시에는 초전도선의 움직임을 방지하기 위해 일정한 장력을 가하였고, 권선후에는 에폭시 수지로 합침하였다. 그림 1, 그림 2는 각각 제작된 초전도 여자코일 및 부하의 모습이다.

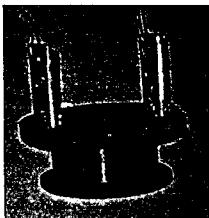


그림 1. 제작된 여자코일

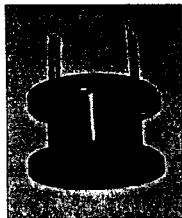


그림 2. 제작된 초전도 부하

Fig. 1. Manufactured excitation coil

Fig. 2. Manufactured sc load

2.3 회전자 및 고정자

표 3은 제작된 회전자, 고정자 및 Nb sheet의 주요 재원이다. 회전자는 연철로 만들었고, 극수는 4개로 하였다. 또한 자극단면은 조기렌치를 방지하기 위해 등근사각형 모양을 취하였다. 또한 회전방향의 크기는 7mm, 축방향길이는 50mm하여 효율을 높일 수 있도록 하였고, 자극 회전시 발생하는 액체헬륨의 손실을 최소화하기 위해 포베이크를 이용하여 자극 부분을 완전히 감싸도록 제작하였다.(그림 3) 고정자는 자기저항을 최대한 줄일 수 있는 모양이 되도록 자로를 고려한 형태를 취하였으며, 잔류자속이 남아있지 않도록 무방향성 규소강판을 적층하여 제작하였다. 고정자에 부착한 Nb sheet는 에폭시로 절연후 점접촉 용접을 하였고, Nb sheet와 초전도 lead 선간의 접합도 점접촉 용접을 하여 접합저항을 줄일 수 있도록 하였다. 그림 4은 회전자와 고정자의 조립모양이고, 그림 5는 초전도 power supply와 부하가 연결된 모습이다.

표 3. 회전자, 고정자 및 Nb sheet의 주요 재원

Table 3. Main specifications of the rotor, the stator and the Nb sheet

구 분	내 용	비 고
회전자	재 질	연 철 재
	외 측 지 률	110 mm
	자극 단 면	등근사각형
	자극 수	4 극
	자극 폭	7 mm
	축방향 길 이	50 mm
고정자	재 질	규소강판
	내 측 지 률	포철 SN-18
	외 측 지 률	120 mm
	적 총 두께	150 mm
Nb sheet	재 질	Niobium
	두께	50 μm
	크 기	100 × 377 mm



그림 3. 제작된 회전자



그림 4. 회전자와 고정자의 조립
Fig. 3. Manufactured rotor
Fig. 4. Constructed rotor and stator

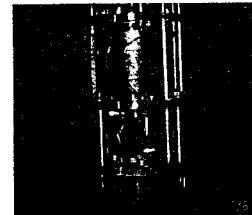


그림 5. 조립된 초전도 power supply와 부하

Fig. 5. Construction of the sc power supply and load

3. 동작특성 실험

초전도 power supply의 특성실험을 하기위해 그림 6과 같은 시험회로를 구성하였고, 아래의 사항에 중점을 두고 실험을 하였다.

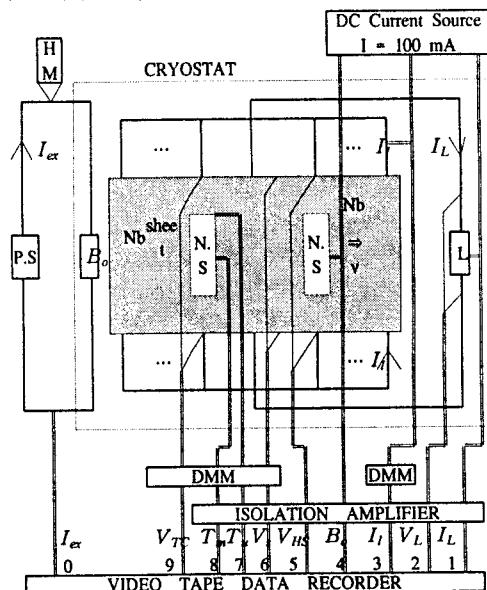


그림 6. 초전도 power supply 실험 시스템 구성도

Fig. 6. Experimental system of superconducting power supply

- 1) 회전속도 및 여자전류에 따른 초전도부하의 충전을 알아본다.
- 2) 여자전류와 회전속도에 따른 초전도부하의 충전율을 알아본다.
- 3) 충방전시 발생전압 및 발생전압의 형태를 알아본다.
- 4) 충전된 영구전류모드에서 동작전류의 감쇠율을 알아본다.

극저온상태에서 부하 및 전류 lead선에 흐르는 전류는 Hall sensor를 이용하여 측정하였고, 전압법은 부하양단과 Nb sheet의 양단에서 측정하여 발생전압의 크기를 비교할 수 있도록 하였고, 모든 신호는 절연증폭기를 통하여 애팔로그 레코더에 기록 되도록 하였다. 실험순서는 초전도 시스템을 저온용기에 완전히 위치시키고 예비냉각을 시작한다. 이때 회전부의 배어링 등이 일지 않도록 100W급 DC 모터를 이용하여 최대한 저속으로 회전 시키면서 배

드히터와 열풍기를 이용하여 계속 상온을 유지하도록 한다. 본실험은 여자전류의 저항이 0가 되는 것을 확인한 후 행한다.

4. 결과 및 고찰

그림 7은 여자전류 $I_{ex}=10.4A$ 일 때 초전도자석을 충전시키는 때 발생되는 전류 및 전압 특성을 보이고 있다.

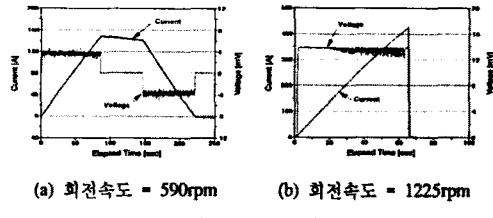


그림 7. 발생 전류 및 전압 특성
Fig. 7. Pumping current and voltage

그림(a)는 회전속도가 590rpm 일 때의 발생전류와 양단전압이다. 발생전류는 거의 선형증가하며 150A까지의 충전을 보이고 있다. 양단전압은 최대 약 4mV로 DC 성분과 AC 성분을 함께 갖고 있다. 150A 충전 소요시간은 약 85초이며 전류증가율 dI/dt 값은 약 1.76A/sec로서, 부하의 인덕턴스가 1.97mH임을 고려하면 양단전압과 거의 일치함을 알 수 있다. 그림(b)는 회전속도가 1225rpm 일 때의 발생전류와 양단전압으로서 최대 발생전류는 400A 이상으로서 약 425A에서 펜치가 발생하였다. 이는 사용된 선재의 임계전류가 300A(at 3T) 및 80A(at 1T)임을 고려할 때, 선재의 접합부분에서 초전도 상태가 깨어진 영향이라 생각된다. 이 때의 양단전압은 최대 14mV이며, 전류증가율은 6.54A/sec이다. 또한, 발생전류가 커질수록 전압의 리플성분이 많아지며, 전류증가율은 감소하였다. 그림 8은 약 360A의 영구전류모드에서 시간에 따른 영구전류를 감소하는 것이다. 이 때의 시상수는 약 750초 정도이었고, 접합저항은 약 $2.6 \mu\Omega$ 으로 계산되었다.

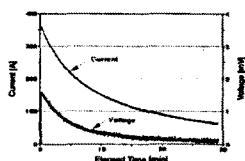


그림 8. 360A의 영구전류모드의 전류 감소 특성
Fig. 8. Current decay in the persistent mode of 360A

그림 9은 입력 파라미터의 변화에 따른 전류 및 전압 특성이다.

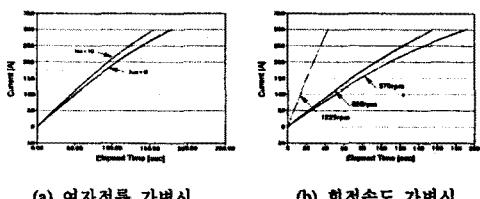


그림 9. 입력 파라미터 변화에 따른 발생 전류 및 전압 특성
Fig. 9. Pumping current and voltage w.r.t input parameters

그림 (a)는 회전속도가 640rpm 일 때 여자전류(I_{ex})의 변화에 따른 영구전류 발생 특성이다. 여자전류가 8.4A일 때 전류 증가율은 1.65A/sec 이고, 여자전류가 10.4A일 때 전류 증가율은 1.92A/sec 이다. 그림 (b)는 여자전류 $I_{ex}=8.4A, 10.4A$ 일 때 회전속도에 따

른 300A의 영구전류 발생 특성을 나타낸 것이다. 공통적으로 회전속도와 여자전류가 클수록 부하의 충전율은 빨라진다. 이것은 여자전류 클수록 단위 회전당 전류증가량이 증가하고, 회전속도가 빠를 수록 단위시간 당 포획되는 자속량이 많기 때문이다.

그림 10은 회전속도에 따른 전류 증가율과 전압 특성이다.

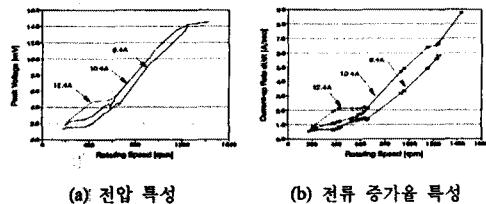


그림 10. 회전속도에 따른 전압 및 전류증가율 특성
Fig. 10. Output curves w.r.t the rotational speeds

그림 (a)는 회전속도에 따른 전압특성을 나타낸 것으로서 저속에서는 전압발생의 변화가 극미하지만 400rpm 이상에서는 선형적으로 증가 하였다. 또한, 1200rpm 이상에서는 속도증가에 대한 변화가 없다. 따라서, 여자전류와 회전속도에 대해서 전류 증가율을 크게하는 최적치가 존재할 가능성을 보이고 있다. 여자전류(I_{ex})와 회전속도에 따른 전류 증가율은 그림 (b)에 나타내었다. 여기서, 전류 증가율은 단위시간당 발생하는 전류량을 의미하고, 전류 증가율은 발생 전류의 증가와 더불어 감소하기 때문에 측정값은 충전시작 직후의 것이다. 회전속도 1430rpm, $I_{ex}=10.4A$ 일 때, 전류 증가율의 최대치는 8.85A/sec이다. 한편, 전류 증가율에 부하의 인덕턴스(1.97mH)를 곱하면 출력전압을 얻게된다. 이러한 방법을 통하여 그림 (a)와 그림 (b)를 비교하면 1200rpm이하에서의 전압 특성은 거의 비슷하지만 1200rpm 이상에서의 전압 특성은 약간 다르다는 것을 알 수 있다. 이러한 점은 측정시의 오차일 가능성이 크지만, 저속에서 초전도 자석을 충전시키는 최적의 회전속도 및 여자전류 값이 있다는 가능성을 확실히 할 수 있다.

5. 결론

본 연구 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- ① 전압 및 부하의 충전율은 회전속도 및 여자전류에 비례한다.
- ② 초전도자석을 충전시키는 최적의 회전속도 및 여자전류 값이 있다는 가능성을 확인 하였다.
- ③ 발생 전압 즉, 전류 증가율은 부하의 충전을 시작한 직후 최대치를 갖고 이후 전류의 증가와 더불어 서서히 감소한다.
- ④ 영구전류모드에서 영구전류의 감소를 측정한 결과 시상수가 약 750초 정도이고, 계산결과 접합저항은 약 $2.6 \mu\Omega$ 였다.

이와 같이 임계전류가 큰 선재로 초전도 power supply를 제작한다면 수천A의 대전류 발생도 가능함을 확인할 수 있었다.

6. 참고 문헌

- [1] “移動磁界形ポンプによる超導マグネットの励磁” 静止技術研究会資料, 1991
- [2] H.H.J. ten Kate, P.B.Bunk, R.B.Britton and L.J.M. van de Klundert, “High current and high power superconducting rectifiers” Cryogenics, pp.291-296, May, 1981
- [3] Taekuk Ko and O.K. Mawardi, “Parametric representation of a superconducting high-current generator” IEEE Trans. on magn., vol.25, no.5, pp.4346-4349, Sep. 1989
- [4] 배준한, 오윤상, 송명곤, 지창섭, 김호민, 고태국, “회전형 초전도 Power Supply의 설계 및 컴퓨터 시뮬레이션” 96대한전기학회 학제기술대회 논문집, 신사증.