

초전도 마그네트용 고출력 플러스 펌프의 특성

최 경달,^{*} 한 송엽,^{**} 츠키지 히로시,^{***} 호시노 토모노리,^{***} 무타 이쓰야[†]

*기초전력공학공동연구소, **서울대학교, ***일본 사가대학교, §일본 교토대학교

The Characteristics of High Voltage Output Flux Pump for Superconducting Magnet

Kyeong Dal Choi,^{*} Song Yop Hahn,^{**} Hiroshi Tsukiji,^{***} Tsutomu Hoshino,^{***} and Itsuya Muta[†]

* Electrical Engineering and Science Research Institute, ** Seoul National University

*** Saga University, Japan, § Kyoto University, Japan

Abstracts Using superconducting magnetic flux pump, thick power leads for a superconducting magnet could be replaced with thin string leads for the excitation magnet for the superconducting flux pump. We have developed a new type flux pump with high voltage output to shorten the charge and discharge time of the load magnet. The test of four stacked disks as the exciter for the load magnet has been carried out. This disk type flux pump yielded 70 mV of voltage across its terminal and 10 A of current through 85 mH load magnet which was the field winding of 20 kVA class fully superconducting generator within 12 seconds. This output voltage of the new superconducting flux pump is about 10 times larger than that of the previous work. Moreover since it is easy to stack the disks for the superconducting flux pump, the high voltage exciter for the 1kW class superconducting magnet would be expected to be made easily.

1. 서론

초전도 마그네트의 여자를 위해서는 상온의 외부로부터 전력을 공급해야 한다. 이를 위해 일반적으로 구리로 된 전류도입선을 사용하며 마그네트의 정격 전류에 비례하여 전류도입선의 단면적을 증가시켜야 한다. 최근 전류도입선의 일부분은 상온 초전도체로 제작하는 방법이 개발되었으나 이 방법 역시 전류도입선 자체를 없앨 수는 없으며 따라서 이 전류도입선을 따라 침투하는 열손실이 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다[1].

그러나 초전도 마그네트의 여자용 전원으로 초전도 플러스 펌프를 사용하면 부하인 초전도 마그네트

용 전류도입선은 필요없게 되고 플러스 펌프용 여자 마그네트를 위한 단면적이 작은 전류도입선으로 대체할 수 있게 된다. 더구나, 플러스 펌프는 부하 초전도 마그네트의 영구전류 모드를 위한 영구전류 스위치 역할도 담당할 수 있다. 이와 같은 초전도 플러스 펌프의 장점은 초전도 동기기의 계자권선과 같은 회전 부하에 더욱 유용하다. 회전하는 초전도 계자권선에 직류 전류를 공급하기 위한 슬립링과 브러시를 없앨 수 있으며 영구전류 모드를 제어하기 위한 신호선도 불필요하게 된다.

초전도 플러스 펌프의 경우, 출력 전압이 작아 여자 속도가 느리다는 것이 단점으로 지적된다.[2~4] 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위하여 20 kVA급 전초전도 발전기의 계자권선을 부하로 사용하는 디스크형의 고출력 초전도 플러스 펌프를 제작 시험한 결과를 다루었다[5]. 한 장의 디스크에 8 매의 Nb 박막을 설치하여 직렬로 연결하였고 총 4 장의 디스크를 직렬로 연결하여 출력전압을 높이고자 하였다. 특성해석을 위해 Nb 박막 8 매만을 직렬로 연결한 경우와 32 매를 전부 직렬로 연결하였을 때, 16 매가 직렬로 연결된 두 조를 병렬로 연결한 경우를 비교하였다.

2. 초전도 플러스 펌프의 구조

초전도 플러스 펌프와 부하인 전초전도 발전기를 연결한 구조도를 그림 1에 나타내었다. 그림 2는 플러스 펌프의 단면도이다. 플러스 펌프용 여자 코일은 중심에 설치하였고 공극의 자속밀도를 높이기 위해 철심을 사용하였다. 여자 코일에 사용된 NbTi 초전도선의 임계전류는 4 T에서 102 A이고, 권선수 200회인 두 개의 마그네트가 직렬로 연결되는 형태를 취하였다. 철심에는 8 개의 자극을 설치하였고 공극의 길이는 8 mm이다. 철심의 포화

자속은 1.47 T이며, 여자전류가 10 A일 때 공극 자속밀도는 0.2 T이었다. 자극의 극성은 모두 동일하다. 철심과 여자 코일은 운전중 정지하여 있고, 부하인 계자권선과 플렉스 펌프의 디스크가 회전하는 구조로 되어 있다. Nb 박막의 두께는 20 μ m이며 10 μ m 두께의 NbTi 박막으로 직렬 연결된다.

플렉스 펌프에는 총 4장의 디스크가 설치되었고, 각 디스크에는 8 개의 자극을 동시에 쇄교하도록 8 매의 Nb 박막을 설치하였다. 8 매의 Nb 박막은 직렬로 연결하였으며, 총 32 매의 박막에 대해 세 가지 형태의 실험을 행하였다. 각각의 형태에 대한 연결도를 그림 3에 나타내었다. 박막 한 매의 면적은 3.12 cm^2 이었다.

부하인 20kVA 전초전도 동기발전기 계자권선의 인덕턴스는 85 mH이며, 플렉스 펌프에서 공급하는 전류의 크기는 그림 4와 같이 전기자 권선의 발생전압을 측정하여 계산하였다.

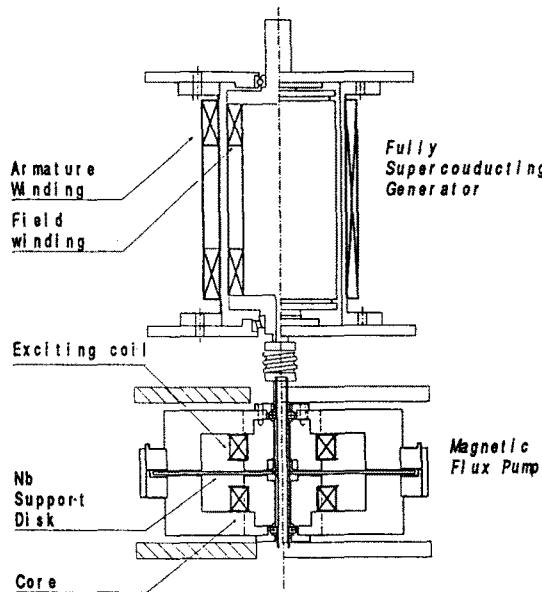


그림 1 실험장치의 구조도

3. 실험 결과

세 가지 형태의 디스크 연결에 대해 각각 부하인 초전도 계자권선의 여자특성을 시험하였다. 출력전류는 공극내의 자속 밀도와 회전속도에 비례하여 변화하며, 100 rpm에서 Nb 박막 32 매를 직렬로 연결한 경우(32S) 플렉스 펌프 여자 전류를 변화시키며 측정한 결과를 그림 5에 나타내었다. 실험한 결과, 플렉스 펌프의 펜치 전류는 부하의 펜치 전류(70 A) 보다 작게 나타났는데, 이는 Nb 박막을 연결해 주는 NbTi 박막에 안정화제를 사용하지 않았기 때문으로 파악되었다. 출력 전류는 NbTi 박막의 회복전류이

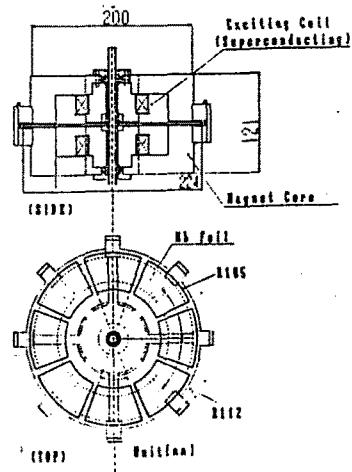


그림 2 초전도 플렉스 펌프의 단면도

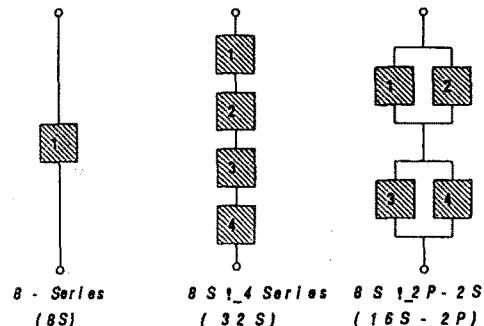


그림 3 플렉스 펌프 디스크의 연결 개념도

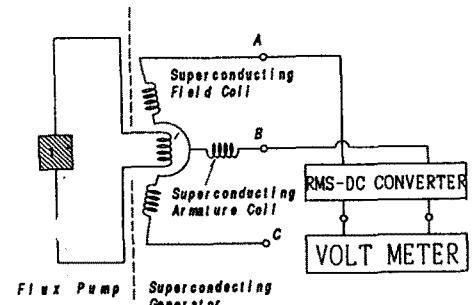


그림 4 플렉스 펌프 출력 전류 측정 개념도

하로 감소한 후 자동으로 증가하였고, 여자 전류를 0 A로 유지하면 계자권선의 전류는 영구전류모드가 되어 일정한 값으로 유지되었다.

출력전류의 증가율, 즉 출력전압은 여자전류를 증가시키거나 회전속도를 증가시키면 증가한다. 여자전류를 증가시키면 공극의 자속밀도가 증가하고, 따라서 Nb 박막의 상전도영역 면적이 증가하여 출력전압이 증가된다. 반면 회전속도를 증가시키면

dI/dt 변화율을 높일 수 있으나 Nb과 NbTi 박막에 와전류를 발생시키고 이 와전류는 플러스 펌프의 텐치전류를 감소시키게 된다.

그림 6은 회전속도 200 rpm시, 공극 자속밀도와 플러스 펌프 텐치전류의 관계를 나타내고 있다. 디스크 두장을 병렬로 연결한 16S-2P 형태에서는 디스크 한장을 사용한 8S 형태보다 2배의 텐치전류를 얻을 수 있었으나, 디스크 네장을 직렬 연결된 32S 형태에서는 오히려 텐치전류가 더 감소한 결과를 얻었다. 이는 텐치전류가 전류값뿐만 아니라 전류변화율에도 관계되기 때문으로 생각된다. 최대 텐치전류는 회전속도 50 rpm에서 여자전류를 10 A로 했을 때, 43 A이었다.

그림 7은 같은 회전속도에서 공극 자속밀도에 따른 출력전압 관계를 나타낸다. 최대 출력전압은 여자전류 25 A, 회전속도 200 rpm에서 108 mV이었다.

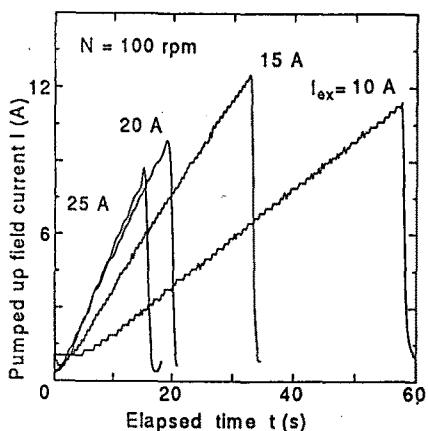


그림 5 100 rpm시 플러스 펌프의 출력전류 과정

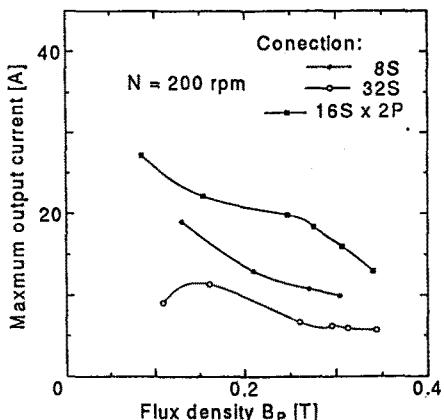


그림 6 200 rpm시 플러스 펌프의 텐치전류

4. 결론

초전도 플러스 펌프의 출력전압을 높일 수 있는 디스크형태의 플러스 펌프를 제작 시험하였다. 총 네 장의 디스크를 제작하여 이 디스크를 세 가지 형태로 구성하여 각 경우의 특성을 실험하였다. 최대 출력전압 108 mV를 얻을 수 있었으며, 최대 텐치전류는 43 A이었다. 실린더 형태의 플러스 펌프에 비해 높은 출력전압을 얻을 수 있었으나 텐치전류가 작은 것이 문제점으로 나타났다. 이 문제점은 플러스 펌프 내부의 연결을 위해 사용된 NbTi 박막에 안정화재를 사용하면 개선될 것으로 기대된다. 플러스 펌프를 디스크 형태로 제작하였을 때, 다양한 구조가 가능하여 최대 출력전압 및 텐치전류의 조정이 용이한 것을 확인하였다.

참고문헌

1. L. J. M van de Klundert and H. H. J. ten Kate, "Fully Superconducting Rectifiers and Flux Pumps," *Cryogenics*, Vol. 21, pp 195-206, 1981
2. O. K. Mawardi, "Armature Reaction in a Flux Pump," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-23, No. 2, pp 587-590, 1987
3. Van Beelen, et. al., "Flux Pumps and Superconducting Solenoids," *Physica*, Vol. 31, pp 413-443, 1965
4. S. L. Wipf, "A Superconducting Direct Current Generator," *Advances on Cryogenic Engineering*, Vol. 9, pp 342, 1964
5. I. Muta, et. al., "The Effect of Excitation Methods on Electrical Characteristics of Fully Superconducting Generator Model," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-30, No. 4, pp 2030-2033, 1994

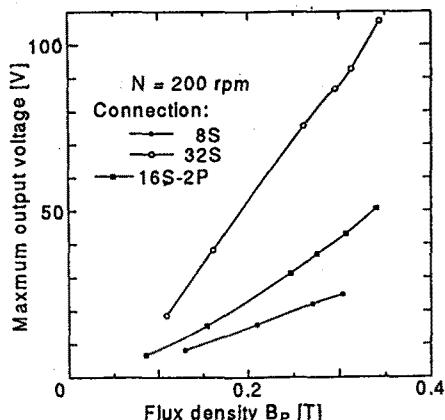


그림 7 200 rpm시 플러스 펌프의 출력전압