

회전형 초전도 Power Supply의 설계 및 컴퓨터 시뮬레이션

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

The Design and Computer Simulation of the Rotating type of Superconducting Power Supply

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-In this paper, we have studied several operating characteristics through the analysis of system. First, we have constituted the equivalent circuit to analyze the operating characteristics of rotating type of superconducting power supply and have induced the optimal design parameter. The computer simulation have showed that the pumping current is in proportion to the area of the pole and rotor speed, and is inverse proportion to the magnitude of load. Therefore, to acquire maximum pumping current we must design the power supply system with maximum area of the pole and minimum inductance of the load.

1. 서론

초전도 현상을 응용하는 기기중 MRI나 SMES 등에서 사용되는 초전도 마그넷은 외부의 power supply에 의해 대전류를 공급받는다. 그러나 일반적으로 뚜렷이 다른 두 환경(상온-극저온)은 상호작용을 하여 서로 영향을 미치게 되며, 따라서 절대온도 0K에 가까운 초전도의 세계를 상온에 있는 상전도의 저항상태와 결합(interface)하는 것은 극복하기 어려운 문제 중 하나로 된다. 현재의 기술 수준에서는 초전도-상전도 접합을 통해 전기에너지를 초전도 회로에 전달하고 있다. 따라서 접합부에 의해 극저온 시스템으로 열이 침입하는 것은 불가피하게 된다. 또한 완전한 초전도 회로를 구성했을 때 얻을 수 있는 장점들을 알게 된다. 따라서, 초전도 부하에 에너지를 전달할 수 있는 초전도 generator를 만들어서 완전히 액체 헬륨 온도에서 동작할 수 있도록 즉, 상전도-초전도 접합을 피할 수 있도록 하려는 시도는 초전도 현상을 발견한 이래로 계속되어 왔다. 이중에서 회전자속 형태(rotating-Flux-Spot)의 초전도 회전자속 power supply가 높은 효율의 방향 제시와 높은 초전류 발생의 가능성 때문에 현재 많은 관심이 집중되고 있다. 본 연구에서는 대용량 초전도 power supply 개발을 위한 전단계로서 회전자속형 fluxpump를 기본모델로 500~1000[A]급 초전도 power supply를 개발하기 위하여 먼저 시스템의 특성을 나타낼 수 있는 등가 회로를 구성한 후 최적의 설계요소도출을 위해 필수적인 과정으로 각 요소별 동작 특성을 시뮬레이션으로 분석하여 보았다.

2. 동작 원리 및 등가 회로

초전도 power supply의 가장 기본적인 평평 원리는 '무자항 폐회로를 통과하는 총 자기자속(total magnetic flux)은 그 회로가 무자항 상태를 유지하는 한 변하지 않는다'는 자계

자속 보존 법칙이라 할 수 있다. 하지만 회전형 power supply의 경우에 있어서는 그 동작 원리가 매우 복잡하여서 아직까지도 정확하게 규명되어 있지 않고 있는 실정이다. 따라서 동작 원리에 근거하기보다는 여러 가지 실험데이터를 참고로 할 때 아래와 같은 가장 단순한 등가 회로를 생각할 수 있을 것이다.

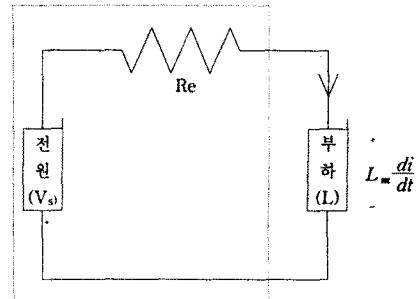


그림 1.fluxpump의 등가회로

위의 등가 회로에서 먼저 R_e 는 eddy current에 의한 손실을 등가화시킨 저항으로써 도입되었으며 아래와 같은 식으로 표현할 수 있을 것이다.

$$R_e = \frac{\text{Ohmic power loss}}{(\text{eddy current})^2}$$

두 번째로 V_s 로 표현한 전원 전압은 회전하고 있는 pole에서 nb foil로 전달하는 에너지를 등가화시킨 것으로써 기본적으로 이것은 페리데이 법칙에 의해서 나타나는 유도 기전력에 기인한 것이라 할 수 있으며 다음과 같은 두 가지 성분에 의해서 구성되어 있다고 할 수 있을 것이다.

$$V_s = V_d + V_p$$

V_d : 펌핑중에 계속 나타나는 dc전압

V_p : 전기각 2π 마다 나타나는 주기적인 전압

이 중에서 V_d 는 일정한 자기장이 존재하고 있는 상전도체 위에서 자속의 cutting이 있을 때 발생하는 전압으로써 전기각 2π 당 유도되는 기전력은 아래와 같이 표현할 수 있을 것이다.

$$\frac{d\phi}{dn} \propto B \times v \times l$$

B : 임의의 시작 t 에서 nb foil에 link되는 총 자속 밀도의 크기

v : normal spot의 회전 선속도

l : normal spot의 세로방향 크기

n : 전기각을 기준으로 한 회전수

이제 우리는 위의 식을 이용해서 시간에 대한 자속량의 변화율에 대해서 알아보자. 이것을 위해서 시각, i 와 회전수, n 과의 관계는 아래식과 같이 표현할 수 있을 것이다.

$$n = N_k \times \frac{vt}{2\pi} \quad (\text{단, } N_k \text{는 리드선의 개수})$$

위식의 양변을 미분해 보면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$dn = N_k \times \frac{v}{2\pi} \times dt$$

이것을 위에서 구한 식에 대입하면 아래와 같이 쓸 수 있을 것이다.

$$\frac{d\phi}{dn} = \frac{2\pi}{N_k v} \frac{di}{dt} \propto Blv$$

$$\therefore \frac{d\phi}{dt} = C \times N_k Blv^2$$

단, C 는 비례 상수로써 동작 원리가 명확하게 규명되어만 알 수 있는 것이므로 본 연구에서는 그 값을 1로 놓았다.

다음으로 주기마다 나타나는 전압인 V_p 에 대해서 알아보도록 하자.

실제로 초전도 펄러스 펌프가 전기각 2π 마다 이산적인 동작 특성을 갖는다고 하는 것은 여러 논문들을 통해서 잘 알 수 있는 사실이다. 그런데 이와 같은 동작 특성은 아래와 같은 자속 보존의 법칙을 분석해 보면 그 이유를 추론해 낼 수 있으리라 생각된다.

$$\Phi_0 + L_m I = C \text{ (constant)}$$

즉, 위에서 전기각 2π 마다 자속 Φ_0 가 회로에 강제적으로 더해져서 상수값 C 가 변하게 되는 것으로 생각할 수 있다. 이것을 유도 기전력으로 나타내기 위해서 아주 작은 주기, T 에 대해서 페리데이터 법칙을 적용해보면 아래와 같이 쓸 수 있을 것이다.

$$|emf| = \frac{\Delta \Phi(t)}{\Delta t} \cong \frac{\Phi_0}{T} = \Phi_0 \times f_s$$

위의 식은 특정한 시각, $t = nT$ 에 대한 전압의 크기 이므로 이것을 임의의 시간으로 확대해 보면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_p(t) = \Phi_0 f_s e^{-\frac{(t-nT)}{T}}, \quad nT \leq t \leq (n+1)T$$

(단, n 은 자연수)

여기서 T 는 시스템에서 에너지를 공급하는 쪽의 시정수로써 주기, T 에 비해서 상당히 작은 값이다.

따라서 전원 전압 V_p 는 위에서 구한 두 가지 종류의 전압의 합으로 표현할 수 있을 것이다.

이외에도 여러 가지 다른 논문들을 참조할 때 등각 회로를 구성하는 다른 parameter들도 생각할 수 있겠지만 시스템 전체에서 차지하는 비중이 그다지 크지 않기 때문에 회로의 간략화를 위해서 생략하기로 한다.

3.등각 회로에 의한 컴퓨터 시뮬레이션

위의 구한 등각 회로에서 각 파라미터들의 식은 아래와 같다.

$$V_s = N_k Blv^2 + \Phi_0 f_s e^{-\frac{(t-nT)}{T}}, \quad nT \leq t \leq (n+1)T$$

$$R_e = \rho \frac{ac}{b}, \quad \Phi_0 = abB$$

위의 등각 회로에서의 회로 방정식을 아래와 같게 된다.

$$V_s(t) = V_d + V_p(t) = R_e i_p(t) + L_m \frac{di_p(t)}{dt}$$

(단, L_m 은 부하 인덕턴스의 크기)

또한 시뮬레이션에 사용된 각 상수들의 값은 아래와 같다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 상수값들

상수의 이름	기호	상수값
자속밀도	B	0.3 (T)
nb foil의 전도도	ρ	0.068 ($\mu\Omega$)
nb foil의 두께	c	50 (μm)
철심의 가로길이	a	0.007 (m)
철심의 세로길이	b	0.05 (m)
리드선의 개수	N_k	8
시스템의 주파수	f_s	rpm/60
시스템의 주기	T	60/rpm
normal spot의 회전속도	v	$2\pi \times \text{rpm}/r/60$
normal spot의 회전수	rpm	300~1200
nb foil의 반경	r	0.05 (m)
전원측의 시정수	τ	T/10

이와 같은 회로 방정식을 가지고서 유한 차분법을 이용한 수치해석법을 사용해서 시뮬레이션한 결과는 아래에 정리되어 있다.

3.1.회전 속도 변화에 따른 시뮬레이션

펌핑 속도(300,600,1200rpm)를 바꿔가면서 부하 전류의 크기를 측정하였다.

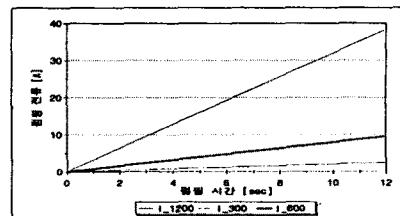


그림 2. 회전 속도 변화에 따른 펌핑 전류 변화
(부하 인덕턴스는 2mH로 일정함)

3.2.부하의 크기 변화에 따른 시뮬레이션

부하 인덕턴스의 크기(2,4,10mH)를 바꿔가면서 부하 전류의 크기를 측정하였다.

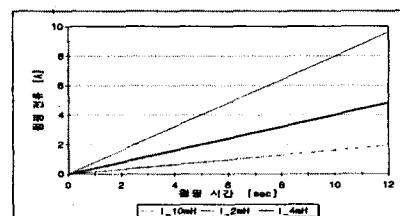


그림 3. 부하 변화에 따른 펌핑 전류 변화
(회전속도는 600rpm으로 일정함)

4.설계 프로그램에 의한 설계

4.1. 초전도 어자 코일의 설계

여자 코일을 설계할 때 고려할 가장 중요한 파라미터는 자속량이다. 그러므로 여자 코일에서 만들어지는 자제는 초전도 sheet의 임계자제 보다는 더 크고, 초전도부하와 초전도 전류단자 등의 임계자제 보다는 더 작은 값을 갖도록 설계

되어야 한다. 여자 코일을 설계하기 위한 프로그램의 흐름도는 아래에 잘 나타나 있다.

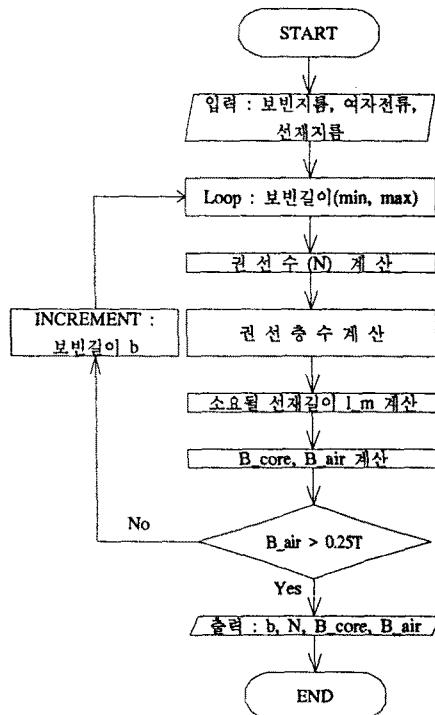


그림4. 여자코일 설계 프로그램 흐름도

이러한 설계 프로그램에 의해서 얻은 초전도 여자 코일의 설계 파라미터는 아래의 표와 같다.

표 2.초전도 여자 코일의 최종 설계치

변수	내측 보빈	선재	권선	총권선	B_{core}	B_{air}	
지름 [mm]	[mm]	[cm]	[m]	[층]	[T]	[T]	
출력 값	50.0	25.0	36.4	8	200 (at 10A)	0.399 (at 10A)	0.291 (at 10A)

4.2.초전도 부하의 설계

먼저 초전도 부하를 설계할 때 고려해야 할 것은 아래와 같은 입력 변수들에 관한 조건일 것이다.

표 3.초전도 부하 설계를 위한 프로그램 입력 변수

변수명	기호	크기
부하의 최대,최소지름	DL	50-100mm
부하의 최대,최소높이	d	40-50mm
부하 인덕턴스 크기	L	1mH
초전도 선재의 지름	L_wire_diameter	1mm
권선 층수	layer_number	작수층(4층)

초전도 부하의 인덕턴스는 되도록 작게하여 충·방전시 안정도를 높임과 동시에 영구전류모드를 만드는 시간을 줄일 수 있도록 한다. 따라서 부하의 인덕턴스는 약 1mH, 크기는 내측지름 50mm 이상, 높이 100mm이하로 제한한다.

다음 그림은 부하 설계를 위한 프로그램의 흐름도이다.

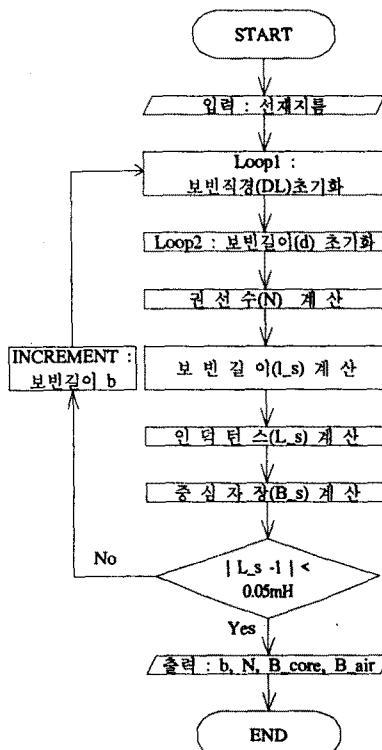


그림5. 초전도 부하 설계를 위한 프로그램 흐름도
설계 프로그램을 이용해서 얻은 부하의 최종 설계파라미터는 아래와 같다.

표 4.초전도 부하의 최종설계치

변수	보빈지름	보빈길이	권선수	L	선재	중심자장
값	[mm]	[cm]	[turns]	[mH]	[m]	[T]
76.0	46.0	168	1.06	40.1	0.18 (at100A)	

5. 결론

초전도 power supply의 특성을 분석해서 등가 회로를 구성한 후 회전 속도와 부하 인덕턴스의 크기를 바꾸어 가면서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과 부하에 충전된 전류의 크기는 회전 속도에는 비례하면서 증가하고 부하 인덕턴스의 크기에는 반비례하는 것을 확인할 수 있었으며 실제의 실험에서도 이와 비슷한 결과가 나오리라 생각된다. 따라서 실제의 실용화 단계에서 부하의 크기가 수 헨리(H)정도로 커질 때에는 회전 속도를 상당한 정도로 증가시켜야만 어느 수준 이상의 펌핑 rate를 기대할 수 있을 것이다. 물론 여기에는 회전 속도가 증가함에 따라서 증가하는 손실에 대한 연구도 아울러서 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Tae-Kuk Ko, Study of the performance of a novel superconducting fluxpump, CWRU, Ph.D. Dissertation, 1985.10
- [2] A.C.Rose-Innes and E.H.Rhoderick, Introduction to Superconductivity, UK: Pergamon, 2nd-Ed., 1978
- [3] O.K.Mawardi, et al., "Operational characteristics of a fluxpump" IEEE Trans. on magn., vol.23, no.2, pp.584-586, March, 1987