'95 대한전기학회 하계학술대회 논문집(1995. 7. 20~22)

시뮬레이션을 통한 정류형 초전도 전류발생장치의 동작특성해석

*추 용, 주민석, 홍정배, 고태국
연세대학교 전기공학과

The Analysis of operational characteristic of superconducting current generator by computer simulation

*Yong Chu, Min-Seok Joo, Jung-Bae Hong, Tae-Kuk Ko
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - A superconducting current generator, or a superconducting rectifier(SCR) is used as a current source to energize a superconducting magnets in SMES, MRI. We selected a full-wave SCR among various SCR models and analyzed its operational characteristics by computer simulation. In process of pumping the current, the improvement of performance is dependent on how much bigger the open resistance of the switch is in comparison to load coil impedance when one of two switches become active. Faster transfer can be seen in resistive commutation mode by shortening the time elapsed for the resistance to arrive at certain level from zero state. Although recovery time for the switch has no direct effect on current pumping, optimal switch design is needed to increasing operational frequency.

1. 서 론

초전도 전류발생장치는 SMES, MRI용 마그넷등 높은 DC전류(10kA - 100kA)를 요하는 극저온 초전도부하의 충전장치로서 사용된다. 또한 그 자체가 극저온에서 작동되기 때문에 전류의 유입되는 과정에서 발생하는 누설열(heat leak)과 열손실(ohmic dissipation)을 완전히 제거할 수 있게 된다.[1][2] 이러한 초전도 전류발생장치로는 회전자속형 플럭스펌프(rotating-spot fluxpump)와 초전도 변압기를 이용한 초전도 정류기(superconducting rectifier)의 두가지 종류로 분류할 수 있으며 본 연구에서는 초전도 정류기(SCR)중에서 가장 일반적인 형태인 전파정류기(full-wave rectifier)를 기본 모델로 선택하여 그 동작원리를 분석하였다. 본 모델은 크게 하나의 초전도 변압기와 2차측 권선의 상·하에 위치한 2개의 초전도 스위치로 구성되며 그 밖의 부수적인 장치로는 1차측 입력을 제어하기 위한 제어기 및 2차측 전류를 피드백 받기 위한 전류센서등이 필요하다. 이런 형태의 전류발생장치는 1차측에 작은 크기의 AC전류를 제어하여 2차측에 서서히 증가하는 큰 DC전류로 변화시켜 초전도 부하를 충전시키는데에 이용되므로 실제 실온에서 극저온 냉매로 전달되는 열의 유입은 SCR의 변압기 1차측의 AC전류에 의한 것이므로 기존의 장치보다 훨씬 낮아지게 된다.[1][2]

본 연구에서는 먼저 SCR의 작동원리를 해석한 후 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각 단계별로 동작특성을 분석한 후 전체적인 과정을 다루는 방법을 택하였다. 본 연구는 SCR의 설계프로그램에 필수적이며 고온초전도체를 재료로 하여 본 형태의 모델을 제작한 경우에도 기본적인 바탕이 될 수 있다는데 의의가 있다.

2. 동작원리

히터펄스에 의해 초전도체가 퀜치되어 상전도상태로 바뀌는 현상을 이용하여 초전도와 상전도상태를 각각 'close', 'open'상태로 사용하는 초전도 스위치 2개가 사용된 초전도 전파정류기의 구성을 그림1에서 나타내었고 그 동작진행도를 그림2, 3에 나타내었다. 그림2와 3의 과정1은 1차측 전류가 증가하는 과정으로 그 이전에 스위치1에 히터펄스를 가함으로써 'open'상태로 만든다. 여기에서 유기되는 2차측 전압의 절반($V_s/2$)이 부하코일에 인가됨으로써 부하가 충전된다. 과정2는 1차측 전압을 일정하게 유지시키고 히터펄스를 멈춤으로써 스위치1을 회복시키는 단계이다. 과정3은 부하전류의 진로를 현재의 아래쪽 루프에서 다음단계의 전류펌핑을 위해 위쪽으로 바꾸어주는 단계로서 'inductive'(그림2의 과정3), 'resistive'(그림2의 과정3) commutation의 두가지 방법이 있다. 이렇게 함으로써 동일한 극성으로 부하에 영구전류를 흘릴 수 있게 된다.[3] resistive commutation은 전류가 흐르고 있는 루프의 스위치에 히터펄스를 인가하여 스위치를 'open'시킴으로써 다른쪽 루프로 전류를 전송시키는 방법이고 inductive commutation은 현재 흐르는 2차측 루프의 전류를 정확히 센싱하여 피드백 시켜 1차측 전류를 제어기를 사용하여 적절히 변화시킴으로써 2차측의 루프간에 전송이 이루어지게 하는 방법이다.

resistive commutation의 다음과정은 그림3에서 보는바와 같이 스위치2가 이미 동작되었으므로 바로 전류를 감소시킴으로서 위에서 언급한 과정을 되풀이하게 되고 inductive commutation은 전류를 전송시킨후 스위치2에 히터를 인가하여 스위치를 동작시키고 그 후 전류를 펌핑시키게 된다.

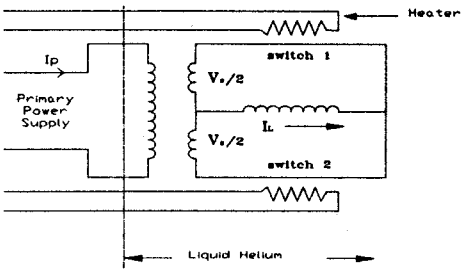

그림1. 히터스위치가 부착된 초전도 full-wave rectifier의 해석모델

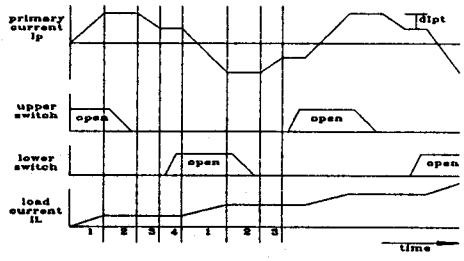

그림2. inductive commutation의 경우 SCR의 동작진행도

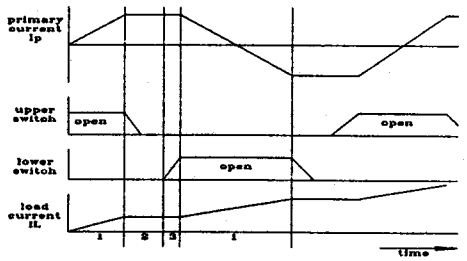

그림3. resistive commutation의 경우 SCR의 동작진행도

3. 컴퓨터 시뮬레이션

먼저 각 단계별로 시뮬레이션을 가진 후에 전체적인 과정을 다루는 방법을 취하였다. 스위치의 회복(그림2,3의 과정2)및 동작(그림1의 과정3, 그림3의 과정4)은 SCR의 동작에는 큰 영향을 미치지 않으나 resistive commutation의 경우 스위치의 동작시간이 매우 중요한 요소로서 작용한다. 또한 동작주파수를 크게 하기위해서는 회복시간 및 동작시간을 매우 짧게 하는 것이 좋으나 그것은 상반된 문제를 안고 있다.[4] 표1은 시뮬레이션에서 사용된 기본 입력값들을 표시하고 있다.

표1. 시뮬레이션에 사용된 입력값

입력요소	
Transformer	Lp = 20 [mH], k_{ps}=0.9, M_{ps}=0.9 [mH] Ls = 50 [μH], k_{12}=0.2, M=10 [μH]
Load coil	L_L=20 [mH]
Primary power amp.	Ipp (primary peak to peak value) = 6 [A]
SCD switch	switch activation time = 50 [msec], 200 [msec] pumping time = 70 [msec] switch recovery time = 60 [msec] inductive commutation time = 5 [msec]

3.1 pumping stage

이 과정에서는 그림2와3에서 과정1로서 그 때 회로에서 회로방정식을 세우면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$L_S\frac{di_1}{dt}+L_L\frac{di_L}{dt}-M\frac{di_2}{dt}-M_{PS}\frac{di_p}{dt}=0 \quad (1)$$

$$L_S\frac{di_2}{dt}+L_L\frac{di_L}{dt}-M\frac{di_1}{dt}+M_{PS}\frac{di_p}{dt}+R_1i_2=0 \quad (2)$$

$$i_1(0)=0,\ i_2(0)=I_L,\ i_L(0)=i_1(0)+i_2(0)=I_L$$

이 식에서 R_1는 pumping state전에 이미 switch1를 동작시켜 발생시킨 저항으로 일정한 값으로 생각할 수 있다. 또한, 1차측 전류는 정전류공급원에 의해 공급되므로 $M_{PS}di_p/dt$(= A)는 일정한 값으로 생각할 수 있다. 여기서 저항 R_1의 크기는 부하코일의 임피던스에 비해 상당히 크게 제작되어야 거의 'open'개념으로 볼 수 있다. 이 경우 위의 식(1), (2)에 의하면 2차측 전류는 시간에 따라 선형적으로 증가하는 것을 유도해낼수 있었다.

3.3 commutation

(1) resistive commutation

이 과정에서는 전류가 흐르고 있는 아래쪽 루프에 히터를 가함으로써 스위치2를 동작시켜 전류를 위쪽 루프로 전송시키게 된다. 이 과정을 분석하기 위해서 회로방정식을 세우면 다음과 같다.

$$L_S\frac{di_1}{dt}+R(t)i_1+L_L\frac{di_L}{dt}-M\frac{di_2}{dt}=0 \quad (3)$$

$$L_S\frac{di_2}{dt}+L_L\frac{di_L}{dt}-M\frac{di_1}{dt}=0 \quad (4)$$

$$i_1(0)=0,\ i_2(0)=I_L,\ i_L(0)=i_1(0)+i_2(0)=I_L$$

여기서, 히터에 의한 스위치2의 저항변화율(R(t))은 그림4에서처럼 시간에 대한 함수로 나타낼 수 있다. 이 때에 일정한 스위치 저항값에 도달하는데 걸리는 스위치의 동작시간(Δt_s)은 그 물성 및 형태에 의존한다.[4] 일반적인 초전도 스위치는 수십 msec정도의 동작시간을 가지고 그 상전도 저항은 부하코일의 임피던스의 크기에 따라 선택되어져야 한다. 결국 스위치의 동작시간 및 상전도저항을 정확하게 알수있다면 저항의 시간에 따른 변화를 예측할 수 있을 것이다.

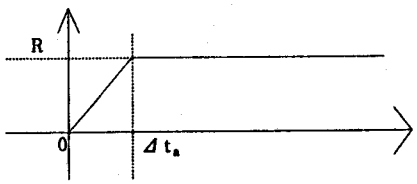

그림4. 스위치의 저항변화

다음 그림에서 보듯이 스위치의 동작시간이 빠를수록 더욱 빠른 전송이 이루어진다는 것을 알 수 있다. 또한 전송과정에서 스위치의 저항에 의해 전류가 100% 완전히 전송되지 못하고 스위치손실로 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.[6]

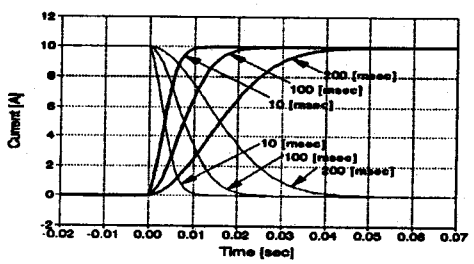

그림5. 스위치 동작시간에 따른 상하 루프의 전송

(2) inductive commutation

본 방식에 의한 상·하 루프사이의 전류 전송방법은 위의 저항에 의한 전송방법보다 현재 더욱 많이 사용되는 방법이다. 왜냐하면 저항이 아닌 1차측 전류의 조절에 의해 전송이 됨으로 전송과정중 스위치에서 발생하는 ohmic loss를 완전히 제거할 수 있기 때문이다. 그러

나 1차측 전류의 조절을 위해서는 그전에 미리 2차측의 부하에 흐르는 전류를 미리 피드백 받아야 하기 때문에 복잡한 제어회로가 요구되는 단점을 가지고 있다.

또 하나의 장점으로는 정확한 제어를 하면 앞의 저항에 의한 전송방법의 문제점중의 하나인 전송과정중 저항에 의한 전류의 감소가 완전히 제거되어 스위치손실을 0으로 만들 수 있기 때문에 그 효율적인 면에서도 크게 향상된다.

복잡한 제어회로 이외의 단점으로는 시간이 흐를수록 증가하는 부하전류 때문에 전류의 전송을 위해 더욱 큰 1차측 전류의 변화를 초래하게 되고 결국 실제로 pumping에 사용되는 1차측 전류의 변화가 작아지게 된다. 따라서 원하는 DC 전류를 얻기 위해 저항에 의한 전송방법보다 더욱 많은 시간을 요하게 된다.

$$L_S\frac{di_1}{dt}+L_{Load}\frac{di_L}{dt}-M\frac{di_2}{dt}-M_{PS}\frac{di_p}{dt}=0 \qquad (5)$$

$$L_S\frac{di_2}{dt}+L_{Load}\frac{di_L}{dt}-M\frac{di_1}{dt}+M_{PS}\frac{di_p}{dt}=0 \qquad (6)$$

$i_1(0)=0,\ i_2(0)=I_L,\ i_L(0)=i_1(0)+i_2(0)=I_L$

위의 식에서 $i_1(t)$, $i_2(t)$를 구해보면 다음과 같다.

$$i_1(t)=-\frac{A}{L_S+M}t,\quad i_2(t)=I_L+\frac{A}{L_S+M}t \qquad (8)$$

여기서, $A=M_{PS}\frac{di_p}{dt}\approx M_{PS}\frac{di_p}{\Delta t_c}$

따라서 위의 식(7), (8)에서 시간이 0에서 전송시간(Δt_c)만큼 변하였을때 $i_1(\Delta t_c)=I_L$, $i_2(\Delta t_c)=0$ 이 될 수 있도록 외부제어인 A를 조절하면 된다. 즉,

$$i_2(\Delta t_c)=0=I_L+\frac{M'_{PS}di_{pt}}{L_S+M}$$

$$\therefore\quad di_{pt}=-\frac{I_L(L_S+M)}{M'_{PS}} \qquad (9)$$

따라서, 위의 식(9)는 2차측의 부하전류인 I_L을 정확히 피드백 받아서 1차측의 전류를 외부의 제어에 의해 di_{pt}만큼 변화시켜 주면 전송될 수 있다는 사실을 설명하여준다.

3. 시뮬레이션 결과고찰

그림6과 7은 동일한 조건의 입력에 대하여 1차측 입력전류에 대한 2차측 전류의 펌핑에 대한 과정을 시뮬레이션한 결과이다. inductive commutation를 사용한 방법에서 전송시간(Δt_c)은 무시할만큼 짧은 시간이므로 두방법에 의한 동작주파수(f)는 거의 비슷하고 그 값은 약 2.7 [Hz]이다. 그림에서 보듯이 'inductive'한 방법에서는 시간의 경과에 따라 1차측 전류의 변화율의 감소로 인하여 그 한계값이 약 54 [A]로 'resistive'한 방법에 의한 89 [A]보다 훨씬 낮아지게 된다. 그러나 그림7에서 보듯이 전송기간중 저항에 의해 전류가 상, 하 루프를 이동할때 감쇠되어 그 파형에 왜곡이 생기는 것을 관찰할 수 있다. 실제 이러한 스위치손실의 문제는 전류의 크기가 커지면 커질수록 더욱 문제가 되는바 불안정성과 스위치 손실을 줄이고자 하는 노력으로 현재 대부분의 연구가 다소 복잡한 제어회로를 요하는 inductive commutation를 사용한 방법으로 진행되고 있다.

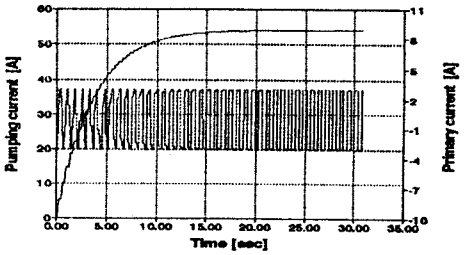

그림6. inductive commutation 방법에 따른 전류파형 분석

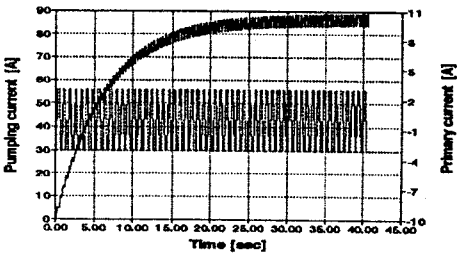

그림7. resistive commutation 방법에 따른 전류파형 분석

참고문헌

[1] L.J.M.van de Klundert and H.H.J.ten Kate, "Fully superconducting rectifiers and fluxpumps / Part 1 : Realized methods for pumping flux" Cryo., vol.21, pp195-206, Apr. 1981

[2] L.J.M.van de Klundert and H.H.J.ten Kate, "Fully superconducting rectifiers and fluxpumps / Part 2 : Commutation modes, characteristics and switches" Cryo., vol.21, pp267-77, May 1981

[3] David L.Atherton and R.Davies, "Transformer-rectifier flux fump using inductive current transfer and thermally controlled Nb_3Sn cryotrons", Rev.Sci.Instrum. 50(10), pp1245-1248, Oct.1979

[4] Mulder, ten kate, "Developement of a thermally switched superconducting rectifier for 100kA" IEEE trans on mag. vol.27, No.2, 1991

[5]. J.Sikkenga, ten kate, et al., "Design and donstructed of a 20w/1000A cryogenic power-supply" IEEE trans on mag. vol.21, No.2, 1985

[6]. Bernard, Atherton, "Performance analysis of transformer=rectifier fluxpump" Rev. Sci. Instrum.Vol 48, No. 10, 1977