

저온초전도전원장치를 이용한 초전도자석의 전압 및 충전전류 특성해석

정윤도*, 윤용수**, 김호민*, 김태중*** 이상진****, 고태국*, 한태수*****

연세대학교 전기·컴퓨터공학과*, 안산공과대학 전기과**, 성남기능대학 산학협력과***, 위덕대학교 전기공학과****, 기술표준원*****

Analysis of the Characteristics of Voltage and Charging Current of the Superconducting Magnet Using by a Low-Tc Superconducting Power Supply

Yoon-Do Chung*, Yong-Soo Yoon**, Ho-Min Kim*, Tae-Joong Kim***, Sang-Jin Lee****, Tae Kuk Ko*, Tae-Soo Han*****

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Yonsei University*, Dept. of EE, Ansan College of Technology**, Sungnam polytechnic college***, Dept. of EE, Uiduk University****, Agency for Technology and Standard*****

superlabs@hanmail.net

Abstract - This paper deals with the operational characteristics of a low-Tc superconducting power supply. Its characteristics have been analyzed through experiments. In this study, 1.8 mH superconducting magnet load and 50A dc exciter current were used, and maximum 300 rpm were used for the experiment. The experimental observations have been compared with the simulation results. Pumping rate proportionally increased due to rotor speed. This reason is according to magnetic saturation of the magnetic material.

1. 서 론

초전도체를 이용하는 대전력 시스템으로는 초전도발전기, 핵자기 공명장치(NMR), 자기공명영상장치(MRI), 자기부상열차(MAGLEV), 초전도 에너지 저장장치(SMES), 초전도 핵융합 발전장치(Magnetic Fusion)등이 있으며 이들 장치는 고자장을 필요로 한다. 필요한 고자장은 초전도자석을 이용하여 만들어지는데 이는 자석의 세기를 늘릴 뿐만 아니라 충전의 규모보다 훨씬 작은 크기의 장치를 만들어 낼 수 있다는 장점이 있다.

그러나 현재 대부분의 초전도 자석은 외부의 상전도전원공급장치로부터 전류를 공급받고 있다. 이때 초전도체와 상전도의 접합이 발생하므로 불필요한 손실이 발생한다. 그러나 초전도전원장치를 사용하면 접합에 따른 문제를 해결할 수 있다.

초전도전원장치는 초전도 박막이 위치한 고정자, 여자기에서 발생된 자속을 공급하는 회전자 및 발생된 전류를 저장하는 초전도 부하로 구성되

어 있다. 전원장치에서 회전자를 회전시키면 여자기에서 발생된 자속이 고정자에 부착된 초전도 박막을 투과하게 된다.

초전도전원장치와 쇄교하는 자속은 전자유도법칙에 따라 유기기전력(emf)을 발생시키므로 초전도 부하에 전류를 공급할 수 있게 된다. 이와 같은 종류를 회전자속형 초전도전원장치라고 한다[1].

본 논문에서는 저온초전도전원장치의 동작 특성을 전기적인 등가회로를 도입하여 특성 방정식을 수립하였다. 저온초전도전원장치에서 얻어진 실험결과와 지배방정식에 유한차분법(FDM)을 도입하여 얻어진 해석 결과를 비교하였다[2].

2. 저온초전도전원장치의 동작 특성해석

정상상태에서 전류펌핑 동작 중에 전체의 시스템 특성을 해석하기 위해서는 저온초전도전원장치의 등가회로가 필요하다. 저온초전도전원장치의 전체적인 구성은 그림 1과 같은 구조를 갖게된다. 그림 2는 저온초전도 전원장치의 전기적 등가회로를 나타내는데 여기에서 나타내어진 회로의 파라메타는 다음과 같다.

$L_f(t)$: 초전도 박막에서의 자기 인덕턴스

L_L : 부하인덕턴스

R_{th} : 테브난 등가저항

그림 2의 전기적 등가회로에서 지배방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\lambda = LI \quad (1)$$

$$V = emf = RI + \frac{d\lambda}{dt} = RI + I \frac{dL}{dt} + L \frac{dI}{dt}$$

$$= RI + I\dot{L} + L\dot{I} \quad (2)$$

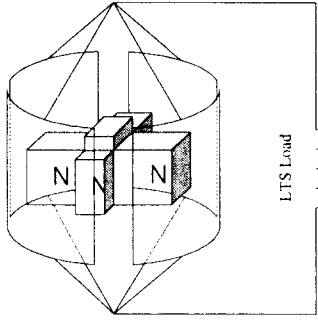


Fig.1 Schematic view of the system

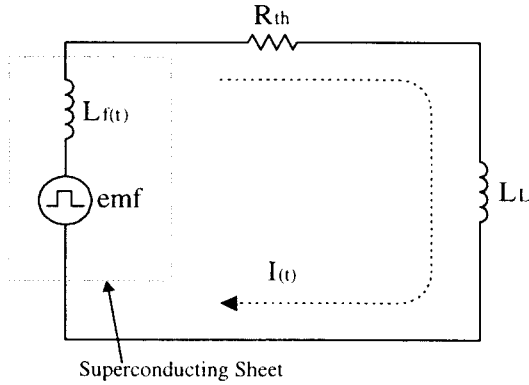


Fig.2 Equivalent circuit of the system

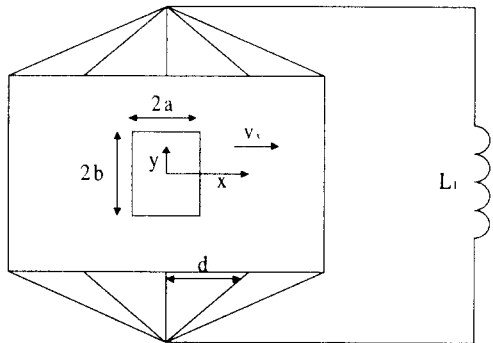


Fig. 3 Simplified model of power supply

$$\dot{I} = L^{-1} [V - (R + L)I] \quad (3)$$

식(3)에 FDM을 적용하여 다음의 방정식을 얻었다

$$\begin{aligned} I[n+1] &= \\ I[n] + L^{-1} [V[n] - (R + L)I[n]]\Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

여기에 사용된 변수값은 다음과 같다.

$$emf = \Phi \times \frac{P \times rpm}{60} \quad (5)$$

$$L = L_f(t) + L_L \quad (6)$$

여기서 Φ 는 초전도 박막 내에 인가된 자속이며, P 는 회전자의 극수, rpm 은 회전자의 분당 회전수이며, R_{th} 는 시스템의 저항이다.

실제의 인덕턴스는 상전도영역과 초전도 박막 끝에 위치한 전류리드선 사이의 길이에 비례한다. 그래서 상전도 영역이 전류리드선과 일치하여 정렬될 때 인덕턴스는 최소값을 갖는다. 그림 3에서 보여지는 근사화모형을 이용하여 인덕턴스값을 구하면 다음과 같이 나타난다 [3].

$$L_f(t) = \left| L_{f0} + L_{fl} \sin\left(\frac{2\pi v_x t}{d}\right) \right| \quad (7)$$

여기서 상전도영역이 초전도박막의 전류리드선과 일치되어 정렬되었을 때, L_{f0} 는 일정한 인덕턴스값을 갖는다. L_{fl} 은 인덕턴스 최대값과 인덕턴스 최소값 사이의 차이에 의해서 값이 결정되며, d 는 전류선 사이의 길이이다 [4].

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 4, 6, 8은 초전도전원공급장치를 제작하여 실험한 결과이다 [5]. 회전자는 여러가지 회전속도로 구동되며 발생된 자속밀도 값은 공극내에서 0.2T 이상이다. 또한 회전자의 극수는 4극이다.

그림 4는 여자전류 20A에서 60,120,300rpm으로 회전자가 회전할 때의 실험결과를 나타냈다. 170초 경과된 후 충전전류는 60rpm에서 95A를 나타내며 300rpm에서 430A를 나타낸다. 전류증가율은 60rpm에서 0.55A/sec, 300rpm에서 2.4A/sec를 나타낸다. 따라서 결과적으로 펌핑율은 회전자 속도에 비례한다.

그림 5는 회전자가 60,120,300rpm으로 여자전류는 20A로 운전할 때 시뮬레이션 결과이다. 170초가 경과된 뒤에 전류는 60rpm에서 90A가 되며 300rpm에서 430A가 된다. 전류 펌핑율은 60rpm에서 약 0.5A/sec이며 300rpm에서 2.4A/sec를 갖는다.

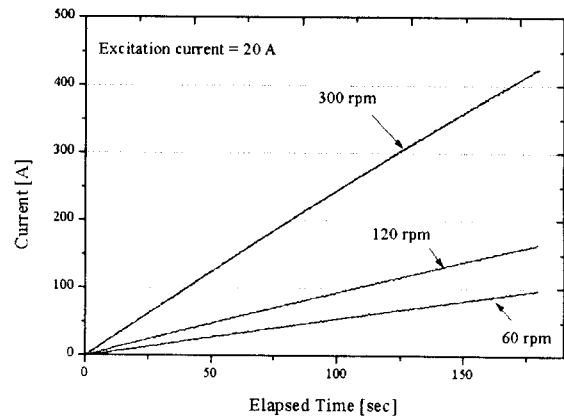


Fig. 4 Experimental result due to rotor speed

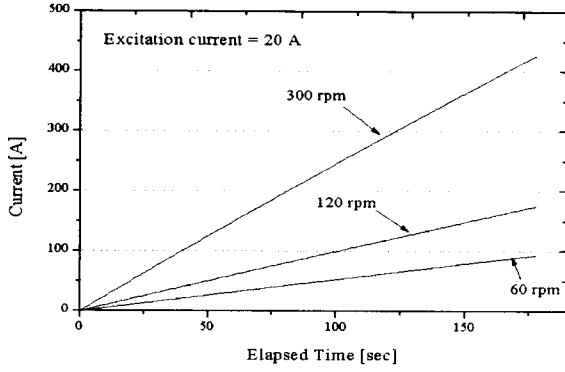


Fig. 5 Simulation result due to rotor speed

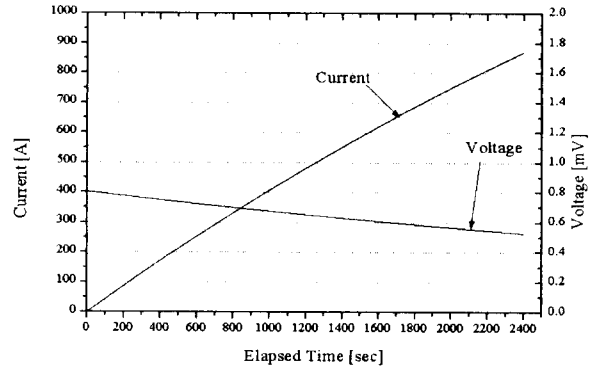


Fig. 9 Simulation result at 60 rpm with 20A excitation current

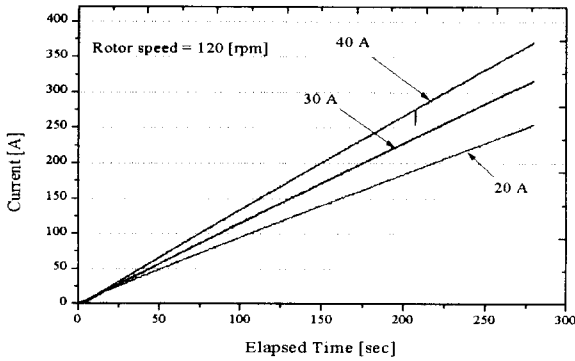


Fig. 6 Experimental result due to excitation current

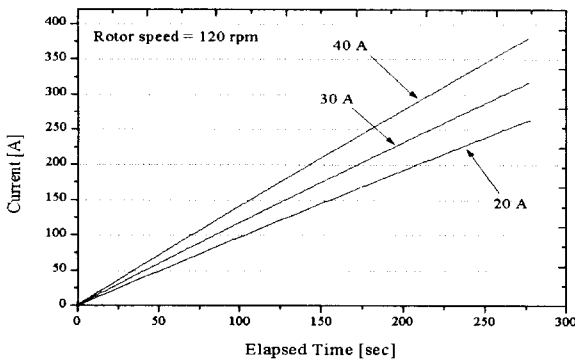


Fig. 7 Simulation result due to excitation current

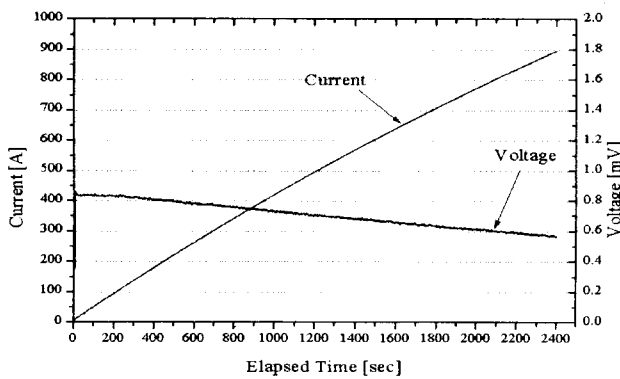


Fig. 8 Experimental result at 60rpm with 20A excitation current

그림 6은 모터의 회전속도를 120rpm으로 하고 여자전류를 20,30,40A로 각각 변화되었을 때 실험결과를 나타낸다. 280초가 경과된 후에 20A와 40A의 여자전류에 대해서 충전전류는 각각 255A와 370A를 갖는다. 여자전류가 20A와 40A에서 전류 펌핑율은 0.91A/sec와 1.32A/sec를 각각 갖는다. 그림7은 그림6과 같은 조건에서 시스템이 동작했을 때 시뮬레이션 결과이다. 280초 경과된 후에 여자전류가 20A와 40A일 때 초전도 부하에 충전된 전류는 260A와 380A를 갖는다. 펌핑율은 여자전류 20A와 40A일 때 전류는 0.93A/sec와 1.36A/sec를 갖는다. 그림 5와 그림 6에서 볼 수 있는 것과 같이 전류펌핑율은 여자전류에 비례해서 증가하지 않는다. 이것의 주요원인은 자기경로의 철이나 실리콘이 자기포화(Magnetic saturation)되기 때문이다. 그림 8은 여자전류가 20A일때 회전속도 60rpm에서 시스템의 동작에 대한 실험결과이다. 2400초가 지난 뒤에 충전전류는 900A가되며 전류펌핑율은 0.37A/sec가 된다. 그림9는 그림8과 같은 조건에서 시스템을 동작했을 때 시뮬레이션 결과이다. 2400초가 지난 후 전류는 약870A가 되며 전류 펌핑율은 0.36A/sec이다.

그림 8과 그림 9를 보면 펌핑되는 전류가 서서히 포화됨을 볼 수 있다. 이 현상은 저항과 부하 인덕턴스의 시정수 ($\tau \approx L_L / R_{th}$)에 따라 전류가 포화되기 때문이다. 결과적으로 실험결과와 시뮬레이션 결과가 대부분 일치하는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 수백A급 저온초전도전원장치의 동작특성을 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 특성실험결과 900A의 최대 충전전류를 얻었다.
- (2) 제안된 지배방정식은 저온초전도 전원장치의 설계에 사용될 수 있다.
- (3) 자기인덕턴스는 상전도 영역과 전류 리드선 사이의 거리에 의해서 결정된다.

- (4) 전류펌핑율은 회전자의 속도에 비례한다.
(5) 펌핑율은 여자전류의 증가에 비례하지 않는다. 주된 이유는 자기경로로 사용된 철심의 자기포화 때문이다.

[참 고 문 헌]

- [1] L.J.M van de Klundert and H.H.J. ten Kate. "Fully superconducting rectifiers and flux Pumps", cryogenics, Vol.21, pp195-206, 1981.
[2] W.Press, S. teukolsky, W.Vetterling and B.flannery, Numerical recipes C, NewYork: cambidge Univ. Press, pp.762-782,1992
[3] Min-Seok Joo and Tae Kuk Ko, "The determined of equivalent circuit parameters due to continuous switching action in the superconducting fluxpump", IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol.7, no.2, pp.668-671, June, 1997.
[4] F. Grover, Inductance Calculations, New York, Dover, 1962.
[5] 김호민의 4인 "새로운 형태의 영구전류모드용 초전도전원장치의 설계, 제작 및 동작 실험," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, Vol. A, pp. 244-246, 1999.