

## 영구전류모드를 가지는 초전도 마그네트 시스템의 여자방법

예정희, 나완수, 주진호\*, 홍계원\*\*

성균관대학교 전전컴공학부, \*성균관대학교 신소재공학부, \*\*한국원자력연구소 초전도체연구실

### Energization method of Superconducting Magnet System with Persistent Current Mode

Jung-Hee Ye, Wansoo Nah, Jinho Joo\*, Gye-Won Hong\*\*

Dept. of Electrical and Computer Engineering, SKKU, \*Dept. of Metallurgical Engineering, \*\*KAERI

**Abstract** -One of the merits of superconducting magnet system is that it has persistent current mode, in which the current can be constant without any external power supply. The problem is that when we energize the magnet we can not reach the target current with constant current source, in principle. It needs another energization methods, in which it can be energized with reasonable accuracy and time. This paper suggests two energization methods for a superconducting magnet with persistent current mode and the comparisons of the two are made with respect to the accuracy and the time.

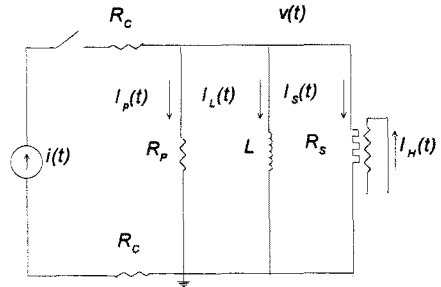


그림1. 초전도 영구전류스위치의 전기회로

## 1. 서 론

영구전류스위치(Persistent Current Switch)는 초전도 에너지 저장장치 및 MRI, NMR 등 초전도 마그네트를 이용하는 시스템에서는 필수적인 장치이다. 이 스위치는 초전도 마그네트를 외부에서 전원을 연결시킨 여자(energizing)시킨 후, 원하는 시점에서 영구전류 스위치를 동작시켜서 저항의 감쇄가 없는 새로운 페루프를 형성, 초전도 마그네트를 영구전류모드(persistent current mode)로 동작시키는 소자이다. 하지만 일정전류원으로 마그네트를 여자할 때 마그네트에 흐르는 전류가 목표전류치에 도달하는 것은 원칙적으로 불가능하다. 여자시간을 무한히 늘리면 가능하지만 비효율적일 뿐만 아니라 실제적으로도 어렵다.

본 논문에서는 이 마그네트에 흐르는 전류가 목표전류치에 세팅되도록 하는 새로운 여자방법을 제안한다. 다음 장에서 초전도영구전류 스위치회로의 일반적인 해석을 수행하고 3장에서는 새로운 여자방법을 제시한다. 또 4장에서는 사례연구로서 3장에서 제안된 방법을 실제 회로에 적용하여 전류의 응답을 계산하여 제안된 방법의 타당성을 보였다.

## 2. 초전도 영구전류스위치의 전기회로 해석

그림1은 간략화한 초전도 영구전류스위치의 전기회로도이다. 그림에서  $i(t)$ 는 전류원(current source),  $R_p$ 는 보호저항(protection resistor, dump resistor),  $R_s$ 는 스위치가 상전도 상태일 때의 저항(단열상태로 가정하며, 일정한 값을 갖는 것으로 함),  $L$ 은 마그네트의 인덕턴스이며,  $v(t)$ 는 마그네트의 양단전압이다. 여기서 보호저항은 마그네트에 퀘칭(quench)가 발생할 때 마그네트를 보호하기 위하여 삽입된 것이다. 이 그림에서부터 초전도영구전류스위치를 이용하여 영구전류모드를 얻는 과정을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

이제 각 구간별로 ramping up구간이후부터 여자까지의 전류전류에 따르는 마그네트 전류에 대하여 해석하기

로 한다. 그림1에서부터 전기회로방정식을 세우면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} \quad (1)$$

$$i(t) = I_L(t) + I_s(t) + I_p(t) \quad (2)$$

따라서 마그네트에 흐르는 전류  $I_L(t)$ 가 만족하는 회로방정식은  $1/R = 1/R_s + 1/R_p$ 로 놓으면 식(3)과 같게 된다. 이제 구간 별로 회로방정식을 분석하여보면 다음과 같다.

$$\frac{dI_L(t)}{dt} + \frac{R}{L} I_L(t) = \frac{R}{L} i(t), \quad 1/R = 1/R_s + 1/R_p \quad (3)$$

(1)  $t_1 \leq t \leq t_2$  (Ramping up)

전류의 선형적 증가시 전류원  $i(t)$ 는  $i(t) = a \cdot t$ 로 쓸 수 있고 여기서  $a$ 는 여자속도(energization velocity)를 의미한다. 이 때  $I_L(t)$ 는 다음 미분방정식을 만족한다.

$$\frac{dI_L(t)}{dt} + \frac{R}{L} I_L(t) = \frac{R}{L} a \cdot t \quad (4)$$

$$I_L(t) = a \cdot \left\{ t - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \right\} \quad (5)$$

(2)  $t_1 \leq t \leq t_2$

이 때 전류전류는  $i(t) = a \cdot t_1 = I_1$  ( $I_1$ : 동작전류)로 일정하며, 따라서  $I_L(t)$ 는 다음과 같게 된다..

$$I_L(t) = I_1 - (I_1 - I_{L1}) e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} \quad (6)$$

(3)  $t_2 \leq t \leq t_3$

충분한 시간이 경과한 후 마그네트의 전류가 동작전류에 근접했다고 생각되면 히타전원을 OFF한다. 이 때 초전도스위치는 상전도 상태에서 초전도 상태로 전이하게 된다.  $I_L(t)$ 는 일정한 값을 갖게되며 다음과 같은 형태가 된다.

$$I_L(t) = I_1 - (I_1 - I_{L1}) e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} \quad (7)$$

그림2에서 보여진 바와 같이 이러한 기존의 여자방법에서는 구간을 아무리 길게 하더라도 마그네트에 흐르는 전류가 동작전류값이 되지않음을 알 수 있다.

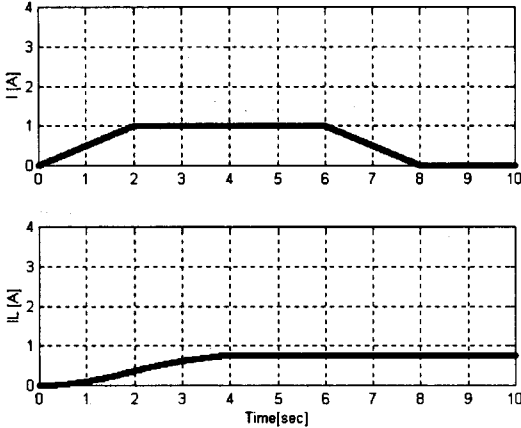


그림2. 기존 여자 방법에서의 전원전류와 마그네트에 흐르는 전류의 파형

### 3. 새로운 여자패턴

마그네트의 여자를 합리적인 시간내에 정해진 목표치에 도달하지 못 하면 초전도 스위치 히터에 인가하는 전류를 오랫동안 유지시켜주어야 하므로 냉매인 액체헬륨의 손실을 가져오게 된다.

이번 경우에는 목표전류치보다 전원전류값을 크게 또는 작게 하여 응답지연함을 합리적인 시간안에 최소화할 수 있도록 여자하는 방법을 두 가지형태로 제안한다.

#### 3.1 전원전류의 증감을 1회로 한 경우의 여자방법

이 방법은 ramping up구간에서 목표전류치까지 전원전류의 증감을 1회로 한하여 여자를 마치는 경우로 그림3과 같다.

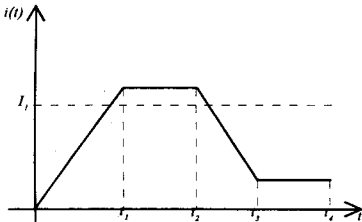


그림3. 전원 전류의 증감을 1회로 한 경우

##### (1) $t_1 \leq t \leq t_2$ (Ramping up)

전류의 선형적 증가시 전류원  $i(t)$ 는  $i(t) = a \cdot t$  로 쓸 수 있고 마그네트의 전류가 목표전류치를 초과할때까지 계속 흘러준다. 이 때의  $I_L(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$I_{L1}(t) = a \cdot \left\{ t - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \right\} \quad (8)$$

##### (2) $t_1 \leq t \leq t_2$

마그네트의 동작전류가 목표치전류를 초과하면 전원전류값을  $i(t) = a \cdot t_1$ 로 일정하게 유지시킨다.

$$I_{L2}(t) = a \cdot \left\{ t_1 - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}t_1} \right\} \quad (9)$$

##### (3) $t_2 \leq t \leq t_3$

마그네트의 전류가 최대치에 도달하면 전원전류값을 선형적으로 감소시킨다. 이 때의  $I_L(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$I_{L3}(t) = a \cdot \left\{ -\frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}t_2} + t_1 \right\} + b \cdot \left\{ \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} + (t-t_2) - \frac{L}{R} \right\} \quad (10)$$

##### (4) $t_3 \leq t \leq t_4$

마그네트의 전류가 목표치 전류에 가까이 도달하면 전원전류를 일정하게 흘려준다. 이와 같은 과정을 거치면 정확하게 마그네트에 흐르는 전류가 목표전류치에 이르는 것을 알 수 있다.

$$I_{L4}(t) = a \cdot \left\{ t_1 - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}t_1} \right\} + b \cdot \left\{ (t_3 - t_2) + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_3)} \right\} \quad (11)$$

#### 3.2 전원전류의 증감을 반복한 경우의 여자방법

이 경우는 전원전류의 선형적인 증감을 수회(數回) 반복함으로써 마그네트에 흐르는 전류를 목표전류치까지 이르게 하는 방법이다. 즉, 증감시 구간의 기울기를 달리함으로써 합리적인 시간 내에 정확한 여자를 얻을 수 있는 방법으로 그림4와 같다.

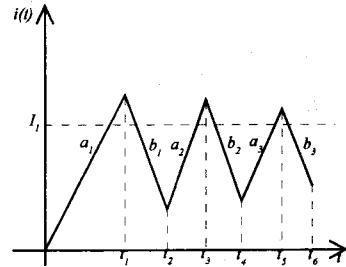


그림4. 전원전류의 증감을 수회(數回) 반복한 경우

이에 따른 각 구간별 전원전류와 마그네트전류는 다음과 같다.

##### (1) $0 \leq t \leq t_1$

$$i_1(t) = a_1 \cdot t \quad (12)$$

$$I_{L1}(t) = a_1 \cdot \left\{ t - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \right\} \quad (13)$$

##### (2) $t_1 \leq t \leq t_2$

$$i_2(t) = b_1 \cdot (t - t_1) + a_1 \cdot t_1 \quad (14)$$

$$I_{L2}(t) = a_1 \cdot \left\{ t_1 - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}t_1} \right\} + b_1 \cdot \left\{ (t - t_1) - \frac{L}{R} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} \right\} \quad (15)$$

##### (3) $t_2 \leq t \leq t_3$

$$i_3(t) = a_2 \cdot (t - t_2) + b_1 \cdot (t_2 - t_1) + a_1 \cdot t_1 \quad (16)$$

$$I_{L3}(t) = a_1 \cdot \left\{ t_1 - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}t_1} \right\} + b_1 \cdot \left\{ (t_2 - t_1) - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} \right\} + a_2 \cdot \left\{ (t - t_2) + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} - \frac{L}{R} \right\} \quad (17)$$

##### (4) $t_3 \leq t \leq t_4$

$$i_4(t) = b_2 \cdot (t - t_3) + a_2 \cdot (t_3 - t_2) + b_1 \cdot (t_2 - t_1) + a_1 \cdot t_1 \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 I_{L4}(t) = & a_1 \cdot \left\{ t_1 - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \right\} \\
 & + b_1 \cdot \left\{ (t_2-t_1) - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} \right\} \\
 & + a_2 \cdot \left\{ (t_3-t_2) + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_3)} - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} \right\} \\
 & + b_2 \cdot \left\{ \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_4)} + (t-t_3) \right\}
 \end{aligned} \quad (19)$$

(5)  $t_4 \leq t \leq t_5$

$$\begin{aligned}
 i_5(t) = & a_3 \cdot (t-t_4) + b_2 \cdot (t_4-t_3) \\
 & + a_2 \cdot (t_3-t_2) + b_1 \cdot (t_2-t_1) \\
 & + a_1 \cdot t_1
 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 I_{L5}(t) = & a_1 \cdot \left\{ t_1 - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \right\} \\
 & + b_1 \cdot \left\{ (t_2-t_1) - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} \right\} \\
 & + a_2 \cdot \left\{ (t_3-t_2) + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_3)} - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} \right\} \\
 & + b_2 \cdot \left\{ \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_4)} + (t_4-t_3) \right\} \\
 & + a_3 \cdot \left\{ -\frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_4)} + (t-t_4) - \frac{L}{R} \right\}
 \end{aligned} \quad (21)$$

(6)  $t_5 \leq t \leq t_6$

$$\begin{aligned}
 i_6(t) = & b_3 \cdot (t-t_5) + a_3 \cdot (t_5-t_4) \\
 & + b_2 \cdot (t_4-t_3) + a_2 \cdot (t_3-t_2) \\
 & + b_1 \cdot (t_2-t_1) + a_1 \cdot t_1
 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
 I_{L6}(t) = & a_1 \cdot \left\{ t_1 - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \right\} \\
 & + b_1 \cdot \left\{ (t_2-t_1) - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} \right\} \\
 & + a_2 \cdot \left\{ (t_3-t_2) + \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_3)} - \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} \right\} \\
 & + b_2 \cdot \left\{ \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_4)} + (t_4-t_3) \right\} \\
 & + a_3 \cdot \left\{ -\frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_5)} + (t_5-t_4) \right\} \\
 & + b_3 \cdot \left\{ \frac{L}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_6)} + (t-t_5) - \frac{L}{R} \right\}
 \end{aligned} \quad (23)$$

#### 4. 사례연구

지금까지 언급한 수식들의 타당성을 검증하기 위하여 마그네트의 전류에 대한 2가지의 여자방법에 대하여 기울기와 시간을 최적화 기법을 이용하여 구하였으며 이에 따르는 파형을 그림 5와 그림 6에 제시하였다. 표1과 표2는 최적화기법에 따른 결과치이다.

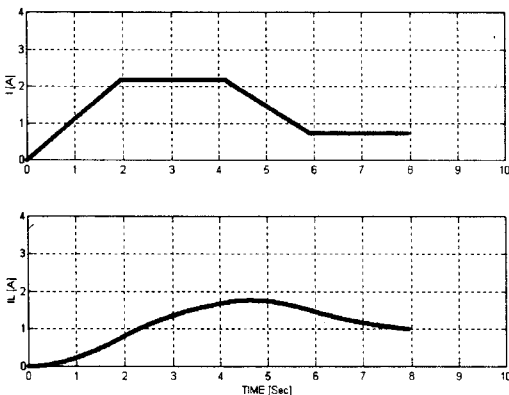


그림5. 전원전류의 증감을 1회로한 경우의 여자 파형

표1. 전원전류의 증감의 1회로 한 경우의 최적치

		결과치
기울기	a	1.1120
	b	-0.8178
시간	t <sub>1</sub>	1.9497
	t <sub>2</sub>	4.1400
	t <sub>3</sub>	5.9064
	t <sub>4</sub>	7.9488

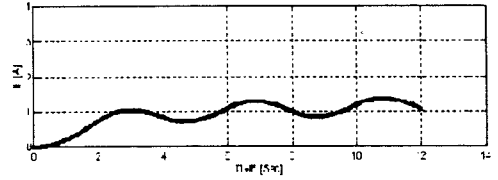
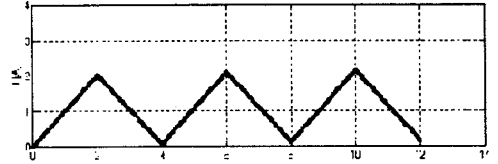


그림6. 전원전류의 증감을 수회로 한 경우의 파형

표2. 전원전류의 증감을 수회로 한 경우의 최적치

기울기	결과치	시간	결과치
a <sub>1</sub>	1.0075	t <sub>1</sub>	2.0080
b <sub>1</sub>	-0.9911	t <sub>2</sub>	3.9921
a <sub>2</sub>	1.0069	t <sub>3</sub>	6.0077
b <sub>2</sub>	-0.9906	t <sub>4</sub>	7.9913
a <sub>3</sub>	1.0060	t <sub>5</sub>	10.0064
b <sub>3</sub>	-0.9967	t <sub>6</sub>	11.9980

#### 5. 결론

본 논문에서는 합리적인 시간 내에 정확한 여자를 요구하는 방법에 최적화기법을 적용한 결과 기존의 여자방법보다 더 효과적으로 목표전류치에 도달할 수 있음을 보였다. 이러한 여자방법은 높은 자장균일도를 요구하는 초전도 마그네트시스템에 적용이 가능하게 되며, 이에 대한 연구가 진행될 예정이다.

본 연구는 한국원자력연구소의 일부지원에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

#### [참고 문헌]

- [1] DuaneHanselman, "Masing MATLAB", pp.412-444, 1995
- [2] Curtis F.Gerald, "Applied Numerical Analysis", pp29-68, 1994