

## 초전도 코일의 유도성 에너지에 의한 아크현상과 유기 과전압

### Arc Phenomena and Induced Voltage due to Inductive Energy of Superconducting Coil

최병주\*, 류경우\*\*, 성기철#, 김해중#

Byoung-Ju Choi\*, Kyung-Woo Ryu\*\*, K. C. Seong#, H. J. Kim#

**Abstract** : This paper present the characteristics of the internal induced voltage and arc phenomena in liquid helium at the energy transfer from a superconducting magnet to a load resistor. Especially, generation mechanism of the oscillated waveform of the coil terminal voltage is analyzed by considering circuit constant of the superconducting magnet, load condition and arc resistance of the mechanical opening switch. The wavefront and peak portion of the voltage are strongly influenced by arc discharge triggered by the switch separation in liquid helium. Abrupt arc extinction leads to voltage oscillation with an enormous peak. It is suggested that the superconducting magnet should be designed to ensure the internal surge when arc is possibly formed by switch opening or coil short circuit between turns or layers. Finally, a suppression method of the oscillating surge is proposed based on the load condition.

**Key Words** : short circuit, superconducting coil, electrical insulation, surge suppression

#### 1. 서 론

최근, 초전도기술을 전력 시스템에 응용하기 위한 송·변전 설비 및 발전·저장장치의 초전도화에 대한 연구[1,2]가 활발히 이루어지고 있다. 초전도 기기의 경우, 코일의 권치나 아크방전에 의해 이상전압이 출현[3]하고 대형 코일일수록 높은 전압이 유기되므로, 기기의 절연설계 단계에서 과전압에 대한 예측을 통하여 설계에 반영하여야 한다[4]. 또한, 시스템 내·외부의 각종 과전압에 대한 절연강도를 고려하여 상전도 기기와는 다른 관점에서 전기절연설계가 이루어져야 한다[5]. 한편, 초전도코일의 사고는 아크방전에 기인하는 것이 전체 사고의 약 30%를 점하며, 그 중에서 코일 권선 사고가 약 45% 이상을 차지하고 있으므로 [6,7] 권선의 아크방전에 의한 전기적인 단락을 고려

한 절연설계와 이에 대한 대책수립이 필요하다.

본 논문에서는, 초전도코일의 전기절연기술 연구를 위하여, 기계식 접점을 가진 스위치를 이용하여 코일의 저장에너지를 방출시킬 때 액체헬륨 중의 전극에서 발생하는 아크, 도전성입자의 권선간 단락에 의한 아크 등 시스템 내부에서 발생 가능한 각종 유형의 아크가 유기 과전압에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

#### 2. 실험장치 및 방법

##### 2.1. 구성 및 동작

실험장치는 그림 1과 같이 초전도코일 SC, 기계식 스위치 PCS, 외부 부하저항  $R_L$  및 직류전류원 DCPS로 구성되며, 초전도에너지저장장치(SMES)의 기본적인 운전모드에 대한 모의가 가능하다.

초전도코일은 인덕턴스 1H, 최대 통전전류 100A, 최대중심자계 3.5T인 솔레노이드형이다.  $R_L$ 는 무유도 부하저항( $R_L = 1\Omega, 5\Omega$ )이다. 초전도코일에 흐르는 전류  $I_L$ 을 구하기 위하여 코일 중심부에 GaAs계 Hall 소자(Toshiba, THS102A)를 설치하였다.

기계식스위치를 구성하는 가동전극과 고정전극은 Cu(직경 10mm, 길이 45mm 원주형)와 NbTi(직경 16mm, 길이 31mm의 원주형)로 제작하였다. 전극은 접점간에 발생하는 아크가 자계에 의한 로렌쯔력을 받지 않도록 코일과 동일 축 방향으로 설치한 구조이다.

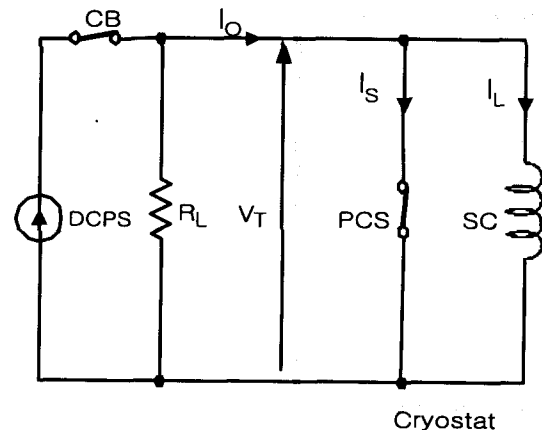


그림 1. 실험회로.

Fig. 1. Experimental circuit.

##### 2.2. 실험방법

스위치 접점간의 아크특성과 유기전압을 조사하기 위하여 먼저 PCS를 개방하고 전류  $I_0(10A \sim 50A)$ 를 흘려서 초전도 코일 SC를 여자한다. 다음, PCS를 단

\* 정 회 원 : 서라벌대학 전기전자전산계열 조교수

\*\* 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과 조교수

# 정 회 원 : 한국전기연구소 초전도응용연구그룹

원고접수 : 2000년 03월 20일

심사완료 : 2000년 04월 11일

고 CB를 개방하여 코일에너지 저장모드로 전환한 후, PCS를 개방하여 코일의 유도성 에너지를 부하저항  $R_L$ 로 방출시킨다. 이때 스위치의 개방에 의한 유도성 전류 차단과정에서 액체 헬륨 중의 아크현상을 조사한다. 점점의 개방과 동시에 전류의 급격한 변화에 의하여 코일양단에는 과전압이 유기되며, 그 순간 전극간에서 발생하는 아크전압( $V_A$ )과 코일 단자간 유기전압( $V_T$ )을 측정한다. 코일의 여자전류  $I_0$ 는 부하저항에 접속된 외부회로에서 클램프 테스트를 이용하여 측정한다. 에너지 방출시의 코일 방전전류  $I_L$ 은 보빈의 중심에 설치한 홀 소자를 이용하여 홀 전압  $V_H$ 의 측정치로부터 식(1)을 이용하여 구한다.

$$I_L = 1.5 \times 10^{-6} V_H \quad (1)$$

이들 결과로부터, 오프닝 스위치에 흐르는 전류  $I_S$ 는  $I_S = I_0 - I_L$ 에 의해 구하며, 아크저항  $R_A$ 는  $R_A = V_A / I_S$ 의 관계를 이용하여 구한다.

또한, 유기전압의 부하 의존성은  $R_L$  부하( $R_L = 5\Omega$ ),  $R_L$ - $L_L$  직렬 접속부하( $R_L = 5\Omega$ ,  $L_L = 0.1\text{mH}$ ),  $R_L$ - $C_L$  병렬 접속부하( $R_L = 5\Omega$ ,  $C_L = 0.1\mu\text{F} \sim 1.5\mu\text{F}$ )의 3 종류의 부하조건에 대하여 검토한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 액체 헬륨 중의 아크 현상

액체 헬륨 중에서 유접점 스위치를 이용하여 유도성 에너지원을 차단할 때 코일의 단자간 유기전압의 여자전류 의존성을 그림 2에 나타낸다. 그림 2에서 가장 아래쪽 파형으로부터 위쪽 파형 순서로 여자전류  $I_0$ 가 10A, 30A, 40A, 50A인 경우이다. 초전도 코일 단자간의 유기 단자전압은 수 ms 동안 거의 일정하게 유지된 후, 점점 개방 개시로부터 시간의 경과와 함께 서서히 상승하여 극대치에 도달한 다음 감쇄하여 가는

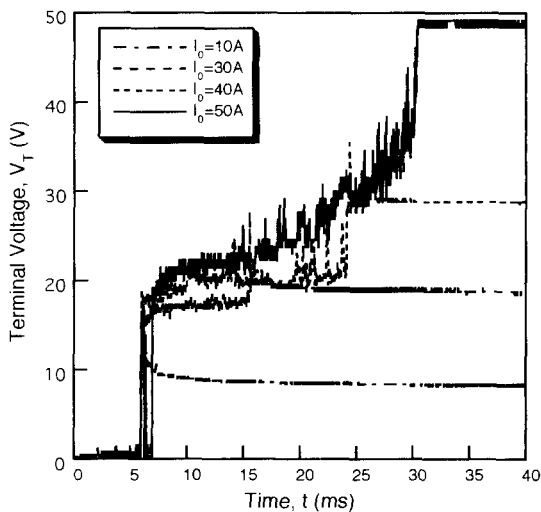


그림 2. 여자전류 변화에 의한 유기전압 파두부 파형. Fig. 2. Waveform of induced terminal voltage change with exciting current.

특성을 보인다. 여자전류가 비교적 작은 경우, 파두부에 높은 스파이크 모양의 서지 파형이 관측된다. 스위

치 개방 직후의 단자전압은 약 15~25V 정도로 유지되고 있으며, 이는 극저온 냉매중의 아크 유지전압으로 고려된다. 한편, 동일한 조건에서 행한 NbTi전극에서는 약 12~15V 정도로 관측되었다.

아크 전압을  $V_A$  V, 아크 전류를  $I_A$  A, 아크 길이를  $G$  mm라 하면, 다음의 실험식이 성립된다[8].

$$V_A = a + bG + \frac{c + dG}{I_A} \quad (2)$$

여기서,  $a \sim d$ 는 정수로서, 대기 중의 동(Cu) 전극 아크인 경우,  $a=21.4\text{V}$ ,  $b=3.0\text{V/mm}$ ,  $c=10.7\text{VA}$ ,  $d=15.2\text{VA/mm}$ 이다. 정수  $a$ 는 아크 유지전압에 상당한다. 본 실험은 액체헬륨 중의 동 전극에서의 아크 방전이므로, 이들 상수를 바로 적용하는 것은 약간의 오차가 발생할 수 있으나, 아크 전압-전류의 기본특성 평가에는 큰 지장이 없는 것으로 고려된다. 아크유지전압은 15~25V이므로, 여기서  $a=20\text{V}$ 로 둔다. 또한, 최대 아크길이를 스위치 접촉자간의 거리로 고려하면, 스위치 개방으로부터  $t$ 초 후의 아크 길이  $G$ 는 스위치의 개방속도를 100mm/s로 둔 경우, 식 (3)으로 둘 수 있다.

$$G = 100 t \quad (3)$$

그림 2의 파형으로부터, 각 파형의 전류에서의 아크 소호까지의 시간  $t_{ext}$ 를 결정하고, 식 (3)에 의해 소호 직전의 아크 길이  $G_{EXT}$ 를 구한 결과를 그림 3에 나타낸다.  $t_{ext}$ 와  $G_{EXT}$ 는 여자전류의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이고 있다. 여기서, 여자전류의 증가와 함께 아크 지속시간이 길어지는 것은 아크저항의 상승률이 저하함을 의미한다.

그림 4는 각  $G_{EXT}$ 에 대응한 아크길이에서의 아크 전압-전류특성을 식(2)을 이용하여 구한 결과이다. 아크전류가 큰 경우, 아크전압은 거의 일정한 값으로 유지되지만, 소호시의 전류감소에 따라 특히  $I_A < 4\text{A}$ 의 영역에서는 급격히 상승한다. 또한, 아크 전압은 아크 길이의 증가와 함께 상승하는 경향을 보인다.

점점을 가진 오프닝 스위치로 유도성 에너지를 방출

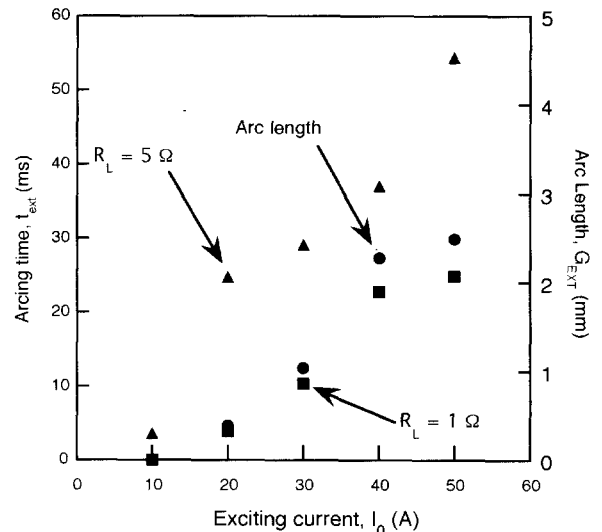


그림 3. 아크시간과 아크길이의 여자전류 의존성. Fig. 3. Dependence of the arcing time and arc length on the coil exciting current.

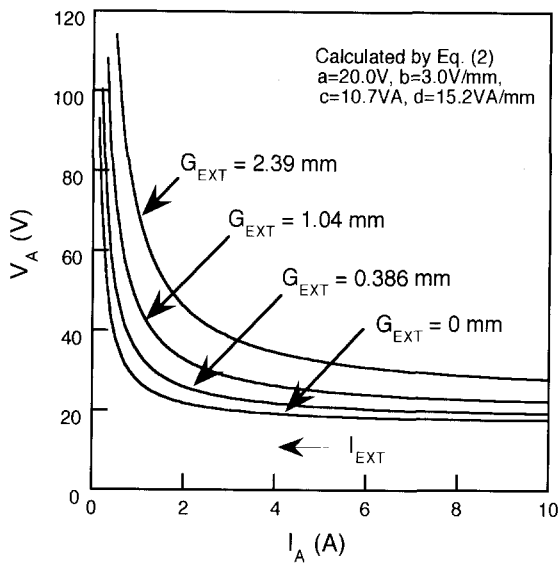


그림 4. 아크전압과 아크전류의 관계.  
Fig. 4. Relation between arc voltage and current.

하거나, 권선 중의 단락에 의해 아크방전이 일어나면 전극의 접촉부 및 권선 내부 단락점 등에서 발생한 주울 열에 의한 헬륨의 비등으로 기포가 발생된다. 아크방전 개시로부터 헬륨의 증발이 끝나기까지는 극저온 환경이라 할지라도 수 s~수 10s 정도의 시간이 걸리고, 기포의 절연내력은 액체헬륨 및 고체에 비하여 낮으므로, 아크의 발생은 시스템에 치명적인 사고로 진전될 가능성이 크다.

1회의 아크 방전에 의하여 소비되는 에너지  $E_a$ 는, 아크전류  $i_a$ , 아크전압  $v_a$ , 아크지속시간  $t_a$ 로부터, 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$E_a = \int_0^{t_a} v_a \cdot i_a dt \quad (4)$$

$i_a$ ,  $v_a$ 는 아크방전이 계속되고 있는 중에는 거의 일정하고 아크 종료점 부근에서는 수 ms에 걸쳐 급격히 변화하는 결과를 얻었으므로,  $i_a$ ,  $v_a$ ,  $t_a$ 는 각각 차단 전의 코일전류, 아크 유지전압, 아크 유지시간으로 가정하고 각각 50A, 12V(NbTi전극인 경우), 25ms로 두어 식 (4)에 의해  $E_a$ 를 구하면, 약 15J로 된다. 액체 헬륨의 증발잠열은 2.55kJ/l이므로, 액체의 증발량은 5.88ml/회 정도이다. 본 실험에 이용한 극저온 용기 자체의 침입 열에 의한 증발량은 23.5ml/min인 것을 고려하면, 실험에 지장을 줄 정도의 심각한 증발량은 아니다.

### 3.2. 유도성 에너지 방출시의 유기전압

그림 1의 회로를 이용하여, SC에 10A로 여자 후 CB를 열고 에너지 저장모드로 운전하는 과정에서 PCS를 열어 부하저항  $R_L$ 에 에너지를 방출할 경우, 에너지 저장·전송 기본특성을 나타내면 그림 5와 같다. 그림 5로부터 알 수 있는 바와 같이, 스위치가 닫혀 있는 동안 코일의 전류는 일정치로 유지되고 있으며, 스위치 접점의 분리와 함께 코일전류는 지수 함수적으로 감소하며, 이와 동시에 코일 단자간에는 급증성 펄스전압이 유기된다.

다음은, 스위치 개방후의 코일 단자전압의 시간변화

특성에 대하여, 그림 4의 극저온 중의 아크 특성을 고려하여 검토한다. 그림 2에 나타난 코일 단자간 전압 파형의 극대치를 경계로 파두부와 파미부로 나누어 모식적으로 나타내면 그림 6과 같다.

아크 방전은 영역 ①과 영역 ②의 경계에서 소호되며, 영역 ①에서는 오프닝 스위치의 아크 특성에 의해서, 영역 ②에서는 부하저항을 포함한 외부회로에서의 에너지 전송특성에 의해서 그 파형이 결정되는 것으로 사료된다. 영역 ①에서는, 아크전류의 초기치는 스위치 접점 분리 직전에 있어서의 코일전류와 동일한 것으로 고려된다. 그림 2에 의해, 여자전류가 10A 이상이면 아크 점호는 가능한 것으로 고려되므로, 스위치

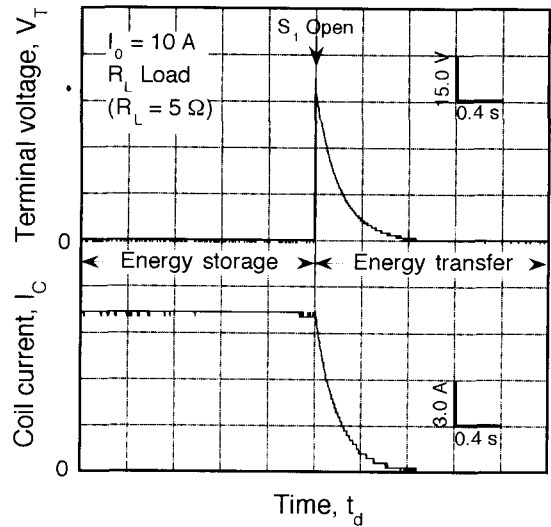


그림 5. 에너지 저장·전송 기본특성.  
Fig. 5. Basic characteristics of energy storage and transfer.

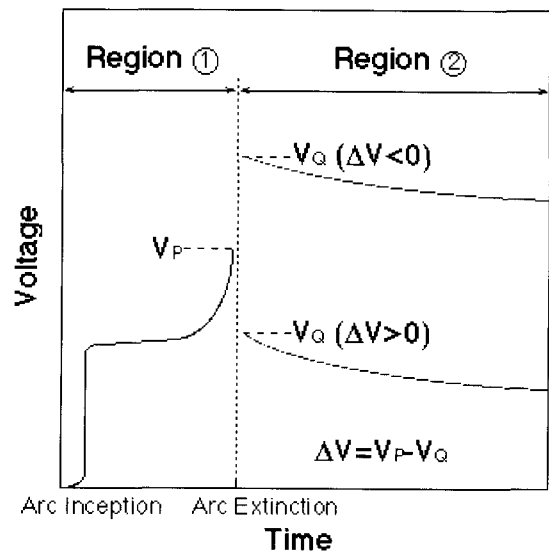


그림 6. 유기전압 파두부와 파미부 개념도.  
Fig. 6. Conceptual drawing of induced voltage wavefront and wavetail.

접점 분리개시와 동시에 아크가 점호하고, 단자간 유기전압은 아크 유지전압과 같게 된다. 전극 분리가 개시되는 아크점호 직후에 있어서, 아크길이는 대단히

짧고 아크 전류 밀도의 변화도 미소하여 아크전압은 거의 일정하므로, 단자전압도 일정하게 유지된다. 그러나, 시간의 경과와 함께 전극 갭 거리의 증가에 따른 아크저항의 증가로 인해 아크전압은 점점 상승하게 된다. 최종적으로 아크가 소호되기 직전에서 아크전류가 급격히 감소하기 때문에, 아크전압은 거의 스텝 모양으로 급격히 상승하여 최대치  $V_p$ 에 이르게 된다.

영역 ②에서, 오프닝스위치 전극간의 아크는 완전히 소호되고, 에너지전송특성은 코일 인덕턴스  $L$ 과 외부 부하저항  $R_L$  및 시스템의 부유커패시턴스  $C_S$ 에 의해 결정된다. 아크소호로부터,  $t_1$ 초 후의 부하저항의 전류  $I_2(t_1)$ 와 전압  $V_2(t_1)$ 는 각각 다음 식으로 주어진다.

$$I_2(t_1) = I_{20} \exp(-t_1/\tau) \quad (5)$$

$$V_2(t_1) = R_L I_2(t_1) = V_Q \exp(-t_1/\tau) \quad (6)$$

여기서,  $I_{20}$ 는 아크 소호 직후의 저항 전류,  $V_Q = R_L I_{20}$ ,  $\tau = L/R_L$ 이다.  $V_p$ 와  $V_Q$ 는 공히 코일의 여자전류에 의존하고,  $V_p > V_Q$ 로 되는 조건하에서는, 아크 소호 직후에 단자전압은  $\Delta V = V_p - V_Q$ 만큼 스텝 모양으로 감소하는 결과로 된다. 따라서, 소호 직후의 스텝상의 전압상승과 함께, 회로정수와 결합하여 고주파 성분의 진동 과전압이 발생하는 것으로 고려된다.

이상의 결과로부터, 비정상적인 상태에서부터 초전도 코일을 보호하기 위해, 통상 외부회로에 저항을 연결하여 저장에너지를 방출하는 경우에 발생하는 단자간 유기전압( $V_T = R_L I_{20}$ )만을 고려하여 설계하는 것은 코일의 신뢰성 측면에서 문제가 있음을 지적할 수 있다.

### 3.3. 유기전압 파두부 및 아크저항 특성

코일의 여자전류가 15A인 경우, 에너지 전송시 아크 점멸과정에서 단자간 유기전압 파두부 파형과 스위치 점멸간의 아크방전에 따른 광 전류 파형을 각각 그림 7에 나타낸다. 스위치의 개방과 동시에 액체 헬륨 중의 전극간에 아크가 발생하여 수회에 걸쳐 점멸을 반복하며, 발생한 아크의 최종 소멸시에 입력전압보다 상당히 큰 진동성의 과전압이 발생되고 있다.

그림 8은 초전도 코일에 저장된 유도성 에너지가 기계적 오프닝스위치의 개방에 의해 방출되는 과정에서 발생하는 유기전압의 피크치 특성을 나타낸다. 저장 에너지, 즉 여자전류에 의한 의존성을 뚜렷하게 나타내고 있다. 여자전류가 작은 경우가 큰 경우보다 유도 과전압비  $r_p$ (10A인 경우 최대 약 5)가 크다. 이는 비교적 적은 전류에서 아크의 급작스런 소호에 의존하는 것으로 분석된다.

그림 9는 극저온환경에서 아크가 소호되는 시점에서 아크저항의 시변 특성으로 여자전류 30A, 부하저항 5Ω인 경우의 아크전압, 전류로부터 구한 아크저항  $R_A$ 의 시간변화  $R_A(t)$ 의 예를 나타낸다.

아크저항은 부하 임피던스의 영향을 거의 받지 않고, 아크저항의 발생과 함께 아크유지전압에 대응하는 저항치(2~3Ω)를 유지한다. 그 후, 부하임피던스에 의존하면서 서서히 증가하여 최종적인 아크 소호단계에서 급증( $10^6 \sim 10^8 \Omega/s$ )하는 특성을 나타내고 있다.

부하조건 변화에 대한 아크저항 의존특성 실험결과, 여자전류가 10A, 30A인 경우,  $R_L$  부하와  $R_L-L_L$  직렬 접속부하 및  $R_L-C_L$  병렬 접속부하의 아크 소호직전에서의 아크저항  $R_A$ 와 아크저항의 시간 변화율  $dR_A/dt$ 는 각각 (15Ω, 130Ω), ( $2.5 \times 10^8 \Omega/s$ )과 (35Ω, 250Ω), ( $2.5 \times 10^8 \Omega/s$ ) 및 (3Ω, 60Ω), ( $5.5 \times$

$10^6 \Omega/s$ ) 정도로 나타났다.  $R_A$ 는 전류가 큰 경우가 부하조건에 관계없이 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 전

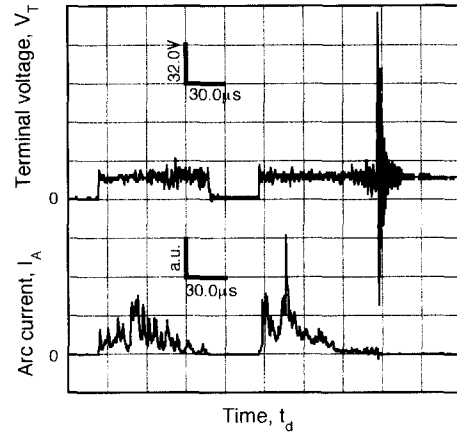


그림 7. 단자전압 파두부와 오프닝스위치점멸에서의 아크 광전류 파형.  
Fig. 7. Waveform of terminal voltage wavefront and arc photo current in opening switch.

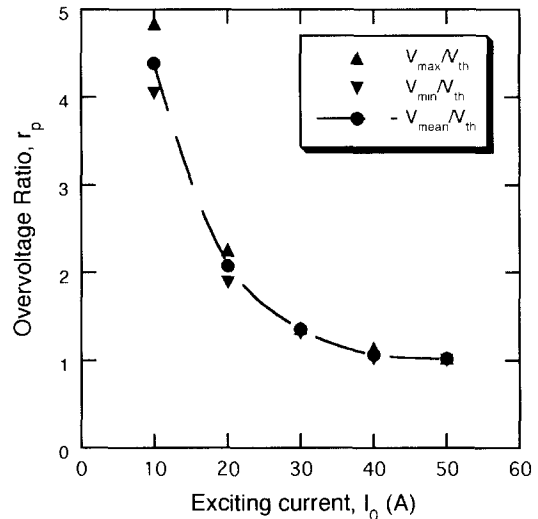


그림 8. 유기 과전압비의 코일여자전류 의존성.  
Fig. 8. Dependence of the induced overvoltage ratio on the coil exciting current.

류가 비교적 적은 경우, 극저온 환경에서 소호가 급격히 일어남을 의미한다. 전류가 큰 경우에는 가동전극이 이동하여 고정전극과의 전극간 거리가 증가하여 아크가 신장되어도 곧바로 소호되지 않고, 아크의 길이의 증가와 아크 직경의 감소에 의해 아크저항이 증가하기 때문인 것으로 고려된다. 따라서, 아크저항 특성의 분석 결과로부터, 그림 8의 비교적 작은 전류에서 과전압비  $r_p$ 가 큰 이유가 설명된다.

$R_A$ 와  $R_A(t)/dt$ 의 부하 임피던스 의존성은,  $R_L$  부하 ( $R_L=5\Omega$ )의 경우를 기준으로 다음과 같이 분석된다.  $R_L$  부하의 경우, 부유 커패시턴스  $C_S$ 가 작기 때문에 아크의 소호과정에서  $C_S$ 로 전류한 아크전류는 비교적 단시간에 감쇄한다. 따라서,  $R_A$ 는  $C_S$ 에 거의 영향을 받지 않고, 주로  $R_L$ 에 영향을 받는다.

$R_L$ - $L_L$ 부하( $R_L=5\Omega$ ,  $L_L=0.1mH$ )의 경우,  $R_L$ 부하의 경우보다도 부하임피던스가 크기 때문에, 아크전류의 부하에는 전류의 흐름이 억제된다. 그 결과, 아크 소호 직전에서의 아크저항  $R_A$ 는  $R_L$ 부하의 경우보다

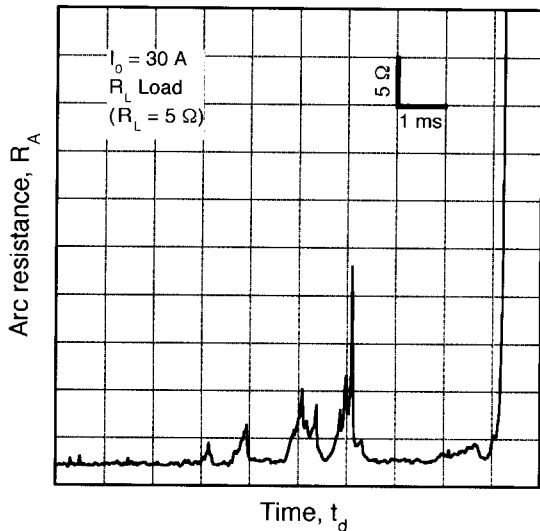


그림 9. 오프닝스위치 점접에서의 아크저항 변화  
 Fig. 9. Variation of arc resistance in opening switch contacts at energy transfer condition.

도 크게 된다. 부유 커패시턴스  $C_S(4.0nF)$ 이외에 보다 큰 부하 커패시턴스  $C_L(0.2\mu F)$ 을 접속한  $R_L$ - $C_L$  병렬접속부하( $R_L=5\Omega$ ,  $C_L=0.2\mu F$ )의 경우는 부하 임피던스의 감소에 의해  $R_L$ 부하만의 경우보다도 신속히 아크전류가  $C_L$ 로 흐르게 되어 감쇄시간이 길어진다. 따라서, 아크는 주로  $C_L$ 의 전류에 의해 순간적으로 소호에 기여하므로, 아크 소호직전에서의 아크저항  $R_A$  및 그의 변화율  $R_A(t)/dt$ 은 작아진다.

### 3.4. 유기전압 피크치의 저감 대책

진동전압 피크치를 저감시키기 위한 방법으로, (1) 부하저항과 직렬로 코일을 접속( $R_L$ - $L_L$ 직렬접속), (2) 시스템과 병렬로 커패시터를 접속( $R_L$ - $C_L$ 병렬접속)하는 2가지 방법이 고려된다. 그러나, (1)의 방법에서는 전류의 시간변화율이 크면 부하 인덕턴스  $L_L$ 에 의하여 단자간에 높은 전압이 발생할 우려가 있으므로, 본 논문에서는 (2)의 방법을 대상으로 검토하였다.

시스템의 회로정수와 부하 커패시턴스  $C_L(0.1, 1, 5\mu F)$ 을 고려한 진동전압의 계산결과를 그림 10에 나타낸다. 동 그림에서  $C_L=0.1\mu F$ 의 경우 단자전압 피크치는 170.4V이나,  $5.0\mu F$ 의 경우는 71.0V로서, 저항  $R_L$ 부하의 이론적 예상치  $V_{Th}=I_0 \times R_L=50V$ 에 근접하는 수준까지 피크치가 크게 저하하는 결과를 볼 수 있다.

다음은 이 계산에 의해 얻은 피크치의  $C_L$  의존성을 확인하기 위하여  $0.1\mu F \sim 1.5\mu F$  커패시턴스를 이용하여 실험을 행하였다.  $R_L$ - $C_L$ 병렬접속부하( $R_L=5\Omega$ ,  $C_L=0.1, 1.5\mu F$ )에서 단자전압 측정피크치  $V_{Tmax}$ 와 이론적 계산치  $V_{Th}(V_{Th}=I_0 \times R_L)$ 에 의한 과전압율  $OVR(OVR=100V_{Tmax}/V_{Th})$ 을 그림 11에 나타낸다. 동 그림에서는 과전압의 억제정도를 비교하기 위하여  $R_L$ 부하의 과전압율도 함께 나타내었다. 이 결과로부터,  $R_L$ - $C_L$ 병렬접속부하의 경우, 진동성 과전압

피크치의 억제가 가능하며, 또한 각 여자전류에서의 피크치도  $C_L$ 의 증가와 함께 저하함을 알 수 있다.

그림 12는 부하저항  $R_L=5\Omega$ , 여자전류  $I_0=10A$ 의 경우,  $R_L$ - $C_L$ 병렬접속부하에서의 단자전압 피크치  $V_{Tmax}$ 의 부하 커패시턴스  $C_L$  의존성에 관한 계산과 실험결과를 나타낸 것이다. 실험과 계산결과의 양자간에는 비교적 잘 일치하고 있다. 이와 같이 시스템과 병렬로 커패시턴스를 접속하는 것에 의해 피크치의 저감효과를 얻을 수 있다.

한편, 이 방법을 적용함에 있어서 과전압 지속시간과 전류 감쇄 시간 등을 고려한 시스템의 에너지 전송 특성에 영향을 미치지 않는 범위에서 신중하게 적용할 필요가 있다

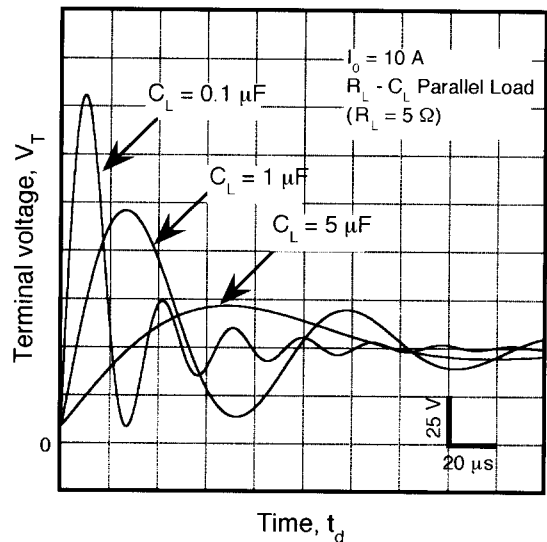


그림 10. 진동서지전압의 부하 커패시턴스 의존성.  
 Fig. 10. Effect of load capacitor on coil terminal voltage.

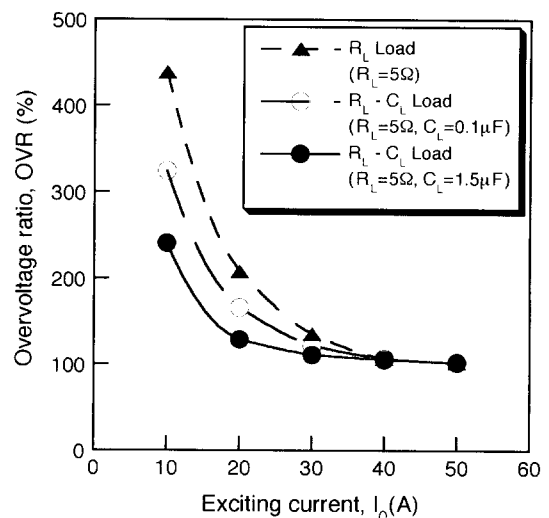


그림 11. 부하조건에 따른 단자전압 피크치의 여자전류 의존성.

Fig. 11. Effect of load condition on overvoltage ratio.

참고 문헌

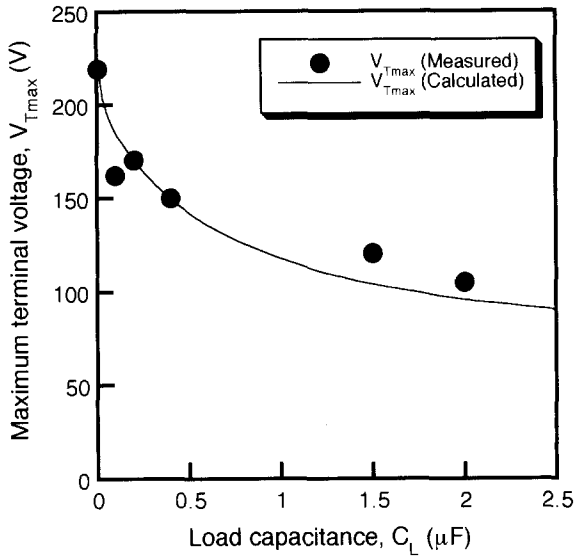


그림 12. 단자전압 피크치의 부하 커패시턴스 의존특성에 대한 실험 및 계산결과.

Fig. 12. Relation between calculated maximum coil terminal voltage and measured one.

4. 결 론

기계식스위치를 이용하여 초전도코일의 유도성 에너지를 차단할 때 액체헬륨 중의 아크현상과 아크의 유기 과전압에 미치는 영향 및 과전압의 억제를 위한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 유도성 에너지에 의한 극저온 중의 아크현상은 스위치 접점재료에 그다지 영향을 받지 않으나, 아크 유지전압은 상전도 도체(Cu 전극)와 초전도 도체(NbTi 전극)에서 각각 15~25V, 12~15V 정도로 NbTi 전극의 경우가 낮은 값을 나타내었다.

초전도 도체인 NbTi 전극은 통전시에는 거의 무손실 전로로 되며 개방시에는 전극간 아크의 신속한 소호가 가능하므로, 에너지 전송스위치 및 대전류 차단스위치 접점으로 그의 응용을 제안하였다.

(2) 초전도 코일로부터 부하에 에너지를 전송할 경우, 코일의 단자간 전압은 '여자전류×부하저항'으로 예상되는 값보다 높은 전압이 발생됨을 밝혔다.

특히, 10A 정도의 비교적 저 전류에서 과전압비가 높았다. 이것은 아크저항의 급증으로 인해 아크전류를 급감시켜 결국 아크 소호 직전에서 부하를 포함한 시스템의 회로정수와 결합하여 높은 진동성 과전압을 발생시키게 되며, 그에 대한 메카니즘을 해석하였다.

(3) 유도성 초전도 에너지의 긴급 방출시의 아크나 기타 내부 아크방전에 기인한 단자간 유기전압의 피크치를 억제하기 위한 방법을 제안하고, 계산과 실험을 통하여 그의 저감효과를 평가하였다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행한 민군겸용기술사업으로 수행한 연구결과입니다

- (1) M. Yamamoto, K. Kaiho, and T. Ishigohka, "Fully Superconducting Power System", Cryogenics 1994 Vol.34 ICEC Supplement, pp.761-764, 1994.
- (2) B.K. Johnson, R.H. Lasseter and F.L. Alvarado, "Incorporation of a SMES Coil Into a Superconducting LVdc Transmission System", IEEE Trans. AS, Vol.7, No.2, pp.419-422, 1997.
- (3) 超傳導·極低溫電氣絕緣技術調查專門委員會, 超傳導應用機器의電氣絕緣技術, 電氣學會技術報告, 第528号, pp.1-91, 1995.
- (4) A.M. Miri, C. Sihler, H. Salbert, and K.U. Vollmer, "Investigation of the Transient Behaviour of a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Generating High Power Pulses", European Transaction on Electric Power, Vol.8, No.1, pp.13-19, 1998.
- (5) J. Gerhold and M. Hara, "Procedure of Electrical Insulation Design for Superconducting Coils", Proceedings of the Eighth International Symposium on High Voltage Engineering, Vol.3, No.93.04, pp.567-570, 1993.
- (6) C.D. Henning, "Reliability of Large Superconducting Magnets Through Design", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-17, No.1, pp.618-625, 1981.
- (7) R.J. Thome, J.B. Czirr, and J.H. Schultz, "Survey of Selected Magnet Failures and Accidents", Fusion Technology, Vol.10, pp.1216-1222, 1986.
- (8) 宅間 董, 柳父 悟, 高電壓大電流工學, 電氣學會, 1988.
- (9) H.G. Kraus and J.L. Jones, "Simulation of Electric Arc with Hysteresis During Discharge of a Fusion Superconducting Magnet System", IEEE Trans. Magnetics, Vol. MAG-23, No.2, pp.1525-1530, 1987.

저 자 소 개



최병주(崔炳柱)

1958년 12월 12일생, 1981년 영남대 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1996년 일본 Kyushu Univ. (九州大學)공학연구과 졸업(공학), 1983년~1986년 현대중전기연구소 연구원, 1986년~1996년 한국전기연구소 전력기기연구부, 초전도 응용연구사업팀 선임연구원, 1997년~현재 서라벌대학전기전자전산계열 조교수



**류경우(柳旻佑)**

1962년 2월 10일생, 1983년 인하대 전기공학과 졸업, 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공박), 1986년~1995년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원, 1996년~ 현재 전남대학교 전기공학과 조교수



**성기철(成者哲)**

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 책임연구원



**김해중(金海鍾)**

1965년 11월 25일생, 1993년 경상대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년~1996년 (주)현대정공 근무, 1996년~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원