

초전도 마그네트 시스템 내부 아크방전에 의한 발생 서어지의 전파특성

崔炳柱*, 末廣純也**, 原雅則**

* 한국전기연구소 전력기기연구부, ** 구주대학 공학부 전기공학과

Propagation Characteristics of Surge Generated due to Internal Arc Discharge in Superconducting Magnet

Byoung-Ju Choi, Junya Suehiro and Masanori Hara

* Korea Electrotechnology Research Institute, ** Kyushu University

Abstract Transient voltage distribution tests are carried out to evaluate effects of a high frequency oscillating voltage generated in a superconducting magnet as a result of the arc discharge extinction. Especially, the effects of temperature and conduction state of the magnet conductor on surge behavior are carefully investigated. Based on the results of simulation tests, it is shown that internal voltage waveforms are influenced by its transmission along the superconducting wire and reflection at the terminal and that attenuation process of the waveforms depends considerably on the conductor resistance which decreases with lowering the temperature.

1. 서론

최근, 초전도 기술의 전력분야에의 응용에 관한 검토가 적극적으로 검토되고 있으며, 실용화를 위해서는 시스템의 대용량화와 함께 신뢰성의 향상이 요구된다. 운전중의 시스템은 전차력에 의하여 코일 구조의 변형 및 도전성 입자의 혼입 등에 의한 절연파괴의 전기적 사고가 발생할 가능성이 상존하며, 실제로 각종 사고 예[1,2]가 보고되어 있다. 이 경우, 단락 권선간에는 아크가 발생하며[2,3], 아크방전의 소호과정에서 급준파 서어지가 발생한다[4,5,6]. 필드에 설치되어 운전중인 기기에 있어서는, 내부 발생 서어지 이외에도 뇌 및 개폐 서어지 등 각종 과전압의 침입도 고려된다. 이와 같은 급준파 서어지가 초전도 마그네트 시스템의 내부에서 발생 또는 외부로부터 침입한 경우, 시스템 내부에서 서어지의 거동은 상전도 기기 내부에서의 거동과 다를 것으로 예상된다.

본 논문에서는 내부 발생 급준파 서어지를 대상으로, 초전도 마그네트 시스템 내부에서의 전파 거동과 그 결과로 인하여 발생하는 전기적 스트레스의 평가를 행하였다.

2. 실험장차 및 방법

본 실험에서는 에너지 전송용 스위치로서 기계식 오프닝 스위치를 채용한 초전도 펄스파워 시스템[4]을 이용 했다. 실험회로를 그림 1에 나타낸다. 초전도 마그네트(S.M.)는 17층(각층 297턴)의 솔레노이드 권선방식으로, 권선의 총 길이는 약 1,540 m이다. 동 그림에서, $T_0 \sim T_{17}$ 은 각 층에 설치된 전압 측정용 텡을, O.S.는 오프닝스위치를, R_L 은 부하저항(5Ω)을 나타낸다.

급준파 서어지 전압의 시스템 내부에서의 거동을 규명하기 위해, 마그네트의 단자간 및 층간에서 발생하는 진동성 전압[5]을 모의한 서어지(피크치 1 V, 주파수 0.25MHz의 정현파 1주기 전압)를 마그네트의 단자간($T_0 \sim T_{17}$) 및 층간($T_{16} \sim T_{17}$)에 인가하였다. 특히, 서어지 전파특성의 코일저항 의존성을 조사하기 위하여 마그네트를 실온공기(R.T.), 액체질소(LN₂, 온도 77 K) 및 액체헬륨(LHe, 온도 4.2 K)으로 침적냉각 하였다.

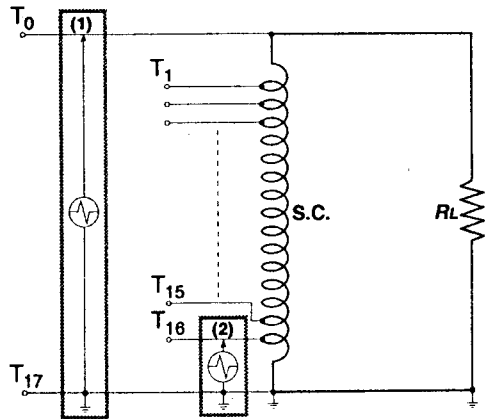


그림 1. 서어지 전파 시뮬레이션 실험회로

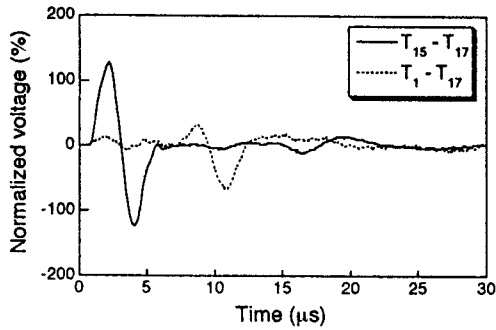
3. 실험결과 및 고찰

3.1 코일 내부전압분포의 온도 의존성

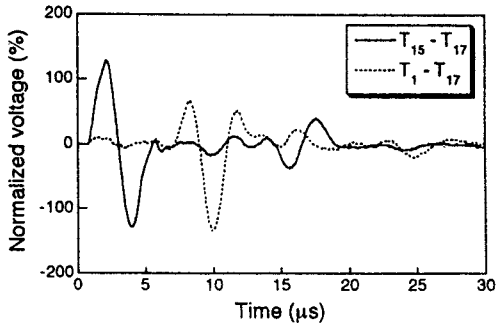
모의 서어지 전압을 층간($T_{16} \sim T_{17}$)에 입력한 경우, 실온, 77 K, 4.2 K에서의 코일단자 T_1 과 T_{16} 의 측정파형을 그림 2에 나타낸다. 동 그림으로부터, 코일내부전압은 뚜렷한 온도 의존성을 나타내고 있다. 이 현상은 급준파 서어지가 코일 내부를 전파하여 가는 진행파로 고려함으로써 설명할 수 있다. 즉 코일 내부의 전압분포를 좌우하는 주요 요소인 진행중의 서어지의 감쇄율, 전파속도 및 시스템 내부에서의 반사율의 온도 의존성에 기인한다. 그림 2의 결과로부터 얻은 서어지의 전파특성 파라메타는 표 1과 같다. 이들 특성 파라메타를 요약하면, 1) 진행중 서어지의 감쇄는 온도의 저하와 함께 감쇄됨을 나타낸다. 이 결과로부터 서어지 전파특성의 온도 의존성은 주로 코일권선저항의 온도의존성에 기인함을 알 수 있다. 2) 서어지 전파속도는 상전도로 부터 초전도에의 환경변화에 의해 약 15% 증가 했다. 실온에서의 측정 전파속도는 상전도 교류발전기의 권선에서 측정된 전파속도 1.6×10^8 m/s (광속도의 약 55%)와 거의 동일한 값이다. 3) 반사율은 시스템 내부에서의 특성 임피던스에 의존하며, T_0 에서는 전반사, T_{16} 에서는 약 35%의 반사율을 나타냈다. T_0 에서의 전반사에 의한 내부 전압 스트레스의 증폭을 예상할 수 있다.

3.2 코일 내부전압분포의 서어지 발생위치 의존성

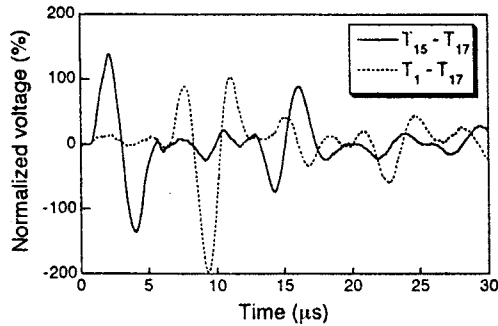
코일의 단자간 및 층간에 모의 서어지 전압을 입력한 경우의 온도 의존성을 포함한 층-대지간 전압의 피크치를 그림 3에 나



(a) R.T.



(b) 77 K



(c) 4.2 K

그림 2. 층간 발생 서어지에 의한 내부전압 측정파형의 온도 의존성

표 1. 각 온도에서의 서어지 전파 파라메타

Temperature	Attenuation coefficient ($T_{15} \sim T_1$) d_r (%)	Velocity of propagation v_p (m/s)	Reflection rate ρ_r (%)	
			T_0	T_{16}
R.T.	59.5	1.85×10^8	100	—
77 K	17.5	2.06×10^8	100	—
4.2 K	0	2.29×10^8	100	35

타낸다. 단자간에 서어지가 침입을 모의한 경우, 입력전압 이상의 피크치는 관측되지 않는다. 그러나, 코일내부 층간에서 서어지가 발생하는 경우를 모의한 실험결과로부터, 코일 온도의 저

하와 함께 피크치가 높게 되는 경향을 알 수 있으며, 4.2 K의 초전도 상태에 있어서는 입력치의 2배 이상의 전압이 발생 될 수 있다. 이는 시스템 내부에서의 반사특성에 주로 의존한다.

3.3 시스템 내부 서어지 전파 및 파형형성 과정

초전도 상태(4.2 K)에 있어서는 코일 각층에서의 내부전압분포 특성의 측정결과를 그림 4에 나타낸다. 동 그림으로부터, 입력 서어지는 코일의 내부를 전파하여 가는 진행파로서 작용함을 알 수 있다. 이러한 전파특성의 해석을 위해서는, 시스템 전체를 고려한 접속점에서의 반사 및 투과특성을 규명 할 필요가 있다. 반사특성의 해석에 이용한 모델을 그림 5에 나타낸다. 동 그림

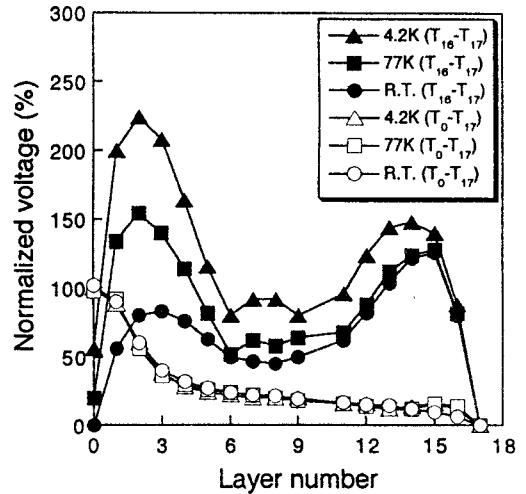
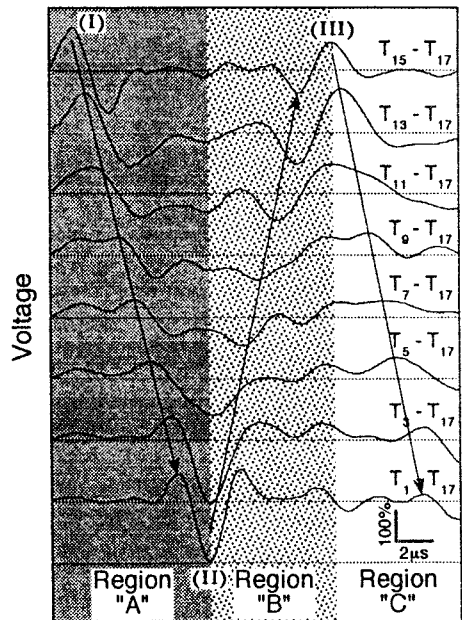


그림 3. 층-대지간 전압 피크치 특성



Time

그림 4. 층-대지간 전압의 측정파형

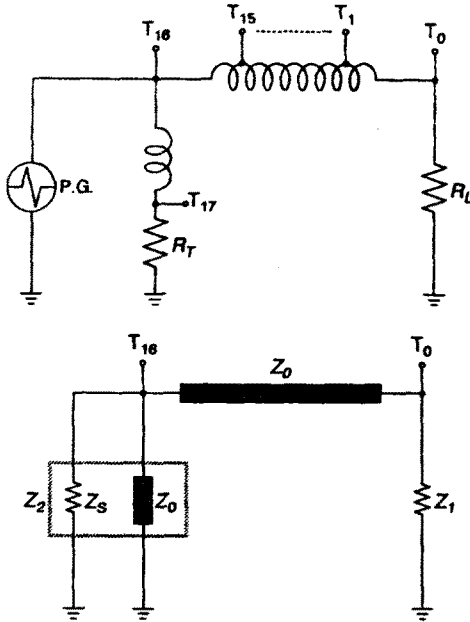


그림 5. 반사특성 해석에 이용한 모델

에서 Z_S 는 임의파형발생장치 P.G.(YOKOGAWA, AG-200)의 임피던스(100 k Ω)를, Z_1 은 외부 부하저항($Z_1=R_L=5 \Omega$)을, Z_0 는 코일의 특성 임피던스를 나타낸다.

그림 4 및 그림 5로부터, 서어지의 코일 내부에서의 전파 과정은 다음과 같이 요약된다. 1) T_{16} 으로 부터 입력된 서어지는 T_0 를 향하여 진행(입사파)하고, 2) 입사파가 부하저항 R_L 과의 접속점 T_0 에 도달함과 동시에 반사를 일으킨 후, T_{16} 을 향하여 진행(제1반사파)하여 가며, 3) T_{16} 에 도달한 제1반사파가 접속점 T_{16} 에서 다시 반사를 일으켜 T_0 를 향하여 진행(제2반사파)하여야 한다. 이후, 진행파의 기능을 소멸할 때 까지 이와같은 과정을 반복한다.

그림 5에서 전원 및 외부부하와의 각 접속점(단자 T_0 , T_{16})의 반사계수는 각각 다음식으로 주어진다.

$$\rho_{r,m} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

$$\rho_{r,m} = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

단, Z_0, Z_2 는

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r(T)^2 + \omega^2 l^2}{\omega c}}$$

$$Z_2 = \frac{Z_0 Z_1}{Z_0 + Z_1}$$

이다. 단, 여기서 적용한 코일의 회로정수는 실험 및 해석 모델로부터 구하였으며, $r(T)=5.19 \Omega$, $l=5.92 \times 10^{-4} \text{ H}$, $c=3.22 \times 10^{-14} \text{ F}$, $Z_0=135.6 \text{ k}\Omega/\text{m}$ 이다. 이들 관계를 이용하여 구한 각 접속점의 반사율은 $\rho_{r,m}=99.9 \%$, $\rho_{r,m}=40.4 \%$ 이다. 이 값은 표 1의 실험결과와 잘 일치한다.

이상의 분석 결과, 급준파 서어지가 시스템 내부에서 발생하였을 경우, 코일내부 전압파형은 시스템 내부에서 반사 및 투과를 반복하는 진행파의 특성에 의해 좌우되며, 특히 진행중의 서어지의 감쇄율, 전파속도 및 반사계수에 의존함을 알 수 있다.

4. 결론

초전도 코일의 단자간 및 층간에서 발생한 아크방전의 소호시에 발생하는 진동 서어지전압의 시스템 내부에서의 거동 특성에 대한 시뮬레이션 실험을 행한 결과, 초전도 상태와 상전도 상태에서의 서어지 전파 및 코일내부 전압분포 특성상의 상이점을 밝혔다. 상전도 상태에서는 코일의 권선저항에 의해 서어지가 진행중 감쇄가 일어나지만, 초전도상태에서는 감쇄없이 진행하여, 접속점에서 과전압을 발생시키기 때문에, 외부회로를 포함한 초전도 마그네트 시스템 전체를 대상으로 임피던스 매칭을 고려한 전기적 최적설계가 요구된다.

참고문헌

1. R.J. Thorne, J.B. Czirr and J.H. Schultz, "Survey of Selected Magnet Failures and Accidents", Fusion Tech., Vol. 10, pp. 1216-1222 (1986)
2. S.Y. Hsieh, J. Allinger, G. Danby, J. Keane, J. Powell and A. Prodel, "A Survey of Failure Experience in Existing Superconducting Magnet Systems and Its Relevance to Fusion Reactors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-13, No. 1, pp. 90-93 (1977)
3. P.L. Walstrom, "Short Circuit Detection in the Winding and Operation of Superconducting Magnets", IEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-19, No. 3, pp. 1094-1096 (1983)
4. B.J. Choi, N. Inoue, J. Suchiro and M. Hara, "Internally Induced Voltage of a Superconducting Magnet and Arcing Phenomena of an Opening Switch Immersed in Liquid Helium", 8th Int. Symp. on High Voltage Eng., No. 93.03, pp. 563-566 (1993)
5. 崔炳柱, 井上順介, 末廣純也, 原雅則, "에너지 전송과정에 있어서의 초전도 마그네트의 내부 유도전압 특성", 전기학회논문지 (일본), Vol. 114-A, No. 6, pp.451-458 (1994)
6. K.P. Jungst and H. Kronhardt, "Influence of Discharge Voltage on Electrical Arcing in Magnet Systems with Short-Circuits", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, No. 1, pp. 263-266 (1992)