

토카막용 CICC의 펄스 전원에 대한 켄치특성 연구

이승제 추 용 김호민 이준영 *김태중 고태국
연세대학교 전기·컴퓨터공학과 *성남기능대학 생산자동화학과

A Study on Quench Characteristics of CICC For Tokamak by Pulse Current

S.J.Lee, Y.chu, H.M. Kim, *T.J. Kim, T.K.Ko
Dept. of E.E. of Yonsei University, *Dept. of A.P.T of Sunnam polytechnic College

Abstract - The quench characteristics of cable consisted of superconducting strand for Tokamak system are observed and analyzed. The superconducting strands chrome-plated are twisted into cable. This cable was wound on bobbin and quench test is carried out by pulse source. At about 2500A the cable quenched.

1. 서 론

핵융합 반응로인 Tokamak 장치를 제작하기 위해서는 입제전류 밀도가 매우 높은 초전도 선재를 Cabling하여 사용하여야 된다. 이러한 선재 중 높은 안정도를 가지고 있는 것이 CICC이다. 하지만 이러한 높은 전송전류를 가지고 있는 선재에 Quench가 발생할 경우 그것에 의한 피해역시 동시에 증가 한다. 따라서 초전도 선재의 Quench 검출 및 보호는 매우 중요하다. 특별히 Quench는 그것의 요인에 따라서 회복되는 경우와 회복되지 않고 전체로 확산되는 경우가 있다. 이번 연구에서는 그러한 Quench의 판정기준을 위해서 현재 CICC에 사용되어질 초전도 strand를 cabling 하여 열Quench와 전류 Quench 특성을 파악하였다.

2. Quench Source

금속으로 만들어진 모든 도체는 자기장(외부 +내부)의 변화에 의해서 eddy current가 흐를 수밖에 없다. Time Varying Magnetic Field에 의해서 Superconducting Strand Twisted Cable에 유가 되는 전류는 초전도체가 존재하기 때문에 그 형태가 일반적인 상전도 Cable에서 나타나는 것과 다르다. 다시 말하면 초전도 Strand가 뻗어 가는 축 방향(z)으로는 Electric Field가 형성되지 않는다. 따라서 E Field는 축에 수직인 방향으로 형성된다. 위와 같은 Cable에 Time Varying Magnetic Field가 입사할 경우 초전도 Cable에 형성되는 Eddy Current구하는 것은 초전도 Cable의 Quench를 예상하는데 중요하다. 초전도 Cable에 형성되는 Eddy Current구하기 위해서 다음과 같은 가정을 한다.

- ① Superconducting Strand Twisted Cable에 비대칭 접이 존재하지 않는다.
- ② 외부 Magnetic Field는 Cable에 수직(x축)으로 입사한다. 자장은 Homogeneous 하다.
- ③ 3개의 초전도 Strand 사이의 Potential을 쉽게 구하기 위해서 3개의 Strand 사이에 회전하지 않는 또 다른 초전도 Strand가 있다

Radius = D/2
Twisted pitch = l_p
Twisted angle = ϕ_p

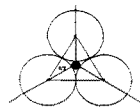


그림 1 단면

2.1 Analysis

x축 방향으로 입사하는 Magnetic Field에 의해서 유가 되는 Electric Potential을 구하기 위해서 하나의 회전하는 초전도 Strand와 움직이는 Strand사이 A, C를 따라서 형성되는 면적으로 적분을 수행한다.

$$\oint_c E \cdot dl = -\dot{\Phi} = -\int BdA = -D \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} z\right) \cdot \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} \quad (1)$$

위의 식 중에서 Electric Field가 형성될 수 있는 영역은 초전도 Strand를 제외한 부분이다. 따라서 식(1)의 1/2이 Electric Potential(2)을 형성한다.

$$V(z) = \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} \frac{D}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} z\right) \quad (2)$$

위치 z를 angle(ϕ)로 나타낼 수 있다.

$$V(\phi) = \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} \frac{D}{2} \sin(\phi_p) = \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} x \quad (3)$$

이것과 같은 방법으로 축의 초전도 Strand를 기준으로 하는 각각의 electric potential을 구할 수 있다.

$$\oint_c E \cdot dl = -\dot{\Phi} = -\int BdA = -D \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} z\right) \cdot \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} \quad (4)$$

$$V_1(z) = \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} \frac{D}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} z\right) \quad (5)$$

위상이 120° 차이가 있기 때문에 각각 얻은 V_1, V_2, V_3 를 가지고 3개의 Strand 사이의 전압 차를 구한다.

$$\begin{aligned} V_{12} &= V_1 - V_2 = \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} \frac{D}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} z\right) - \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} \frac{D}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} \left(z + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ &= \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} \frac{D}{2} \left(\sin\left(\frac{2\pi}{l_p} z\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} \left(z + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right) \\ &= \dot{B} \frac{l_p}{2\pi} \frac{D}{2} \cdot 2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{l_p} \left(z + \frac{\pi}{3}\right)\right) \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} \left(-\frac{\pi}{3}\right)\right) \\ &= -\dot{B} \frac{l_p}{2\pi} D \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} \frac{\pi}{3}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{l_p} \left(z + \frac{\pi}{3}\right)\right) \end{aligned}$$

Electric Field를 구하기 위해서 Potential에 Gradient를 취한다.

$$\begin{aligned} E &= E_x + E_y = -\nabla_{xy} V \\ E &= -\nabla_{xy} V_{12} = 2\dot{B} \frac{l_p}{2\pi} D \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} \frac{\pi}{3}\right) \left(\cos\left(\frac{2\pi}{l_p} \frac{\pi}{3}\right) a_y - \sin\left(\frac{2\pi}{l_p} \frac{\pi}{3}\right) a_x \right) \end{aligned}$$

The transverse current density

$$J = \frac{1}{\rho_c} E$$

단위 부피당 발생되는 와전류

$$p_e = JE = \frac{1}{\rho_c} E^2$$

$$p_{e1} = \frac{1}{\rho_c} B^2 \left(\frac{2Dl_e}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{l_e} \frac{\pi}{3}\right) \right)^2$$

시변자장의 제곱에 비례해서 Energy가 증가하는 것을 알 수 있다.

3. Experiments Setup

초전도 Cable의 전류 Quench 특성을 알아보기 위해서 실험을 설계하였다. 본 연구실에 3000A 이상 전류를 증가시킬 수 있는 Ramping power supply가 없다. 지금까지 3000A급 초전도체를 Quench 시키기 위해서 전류 quench 가 불가능했기 때문에 고자장내에서 임계 전류밀도를 낮추거나, 열을 가하는 방법을 생각했다. 여기에는 고 자장 (2T 이상)의 Magnet이 필요하거나 저온초전도체의 온도를 정확히 제어해야 하는 문제가 있다. 따라서 실제적으로 Cable의 특성을 파악하기 위해서는 전류 전원 장치가 필요하다. 이것을 충족시키기 위해서 펄스 전원 장치를 고안하였다.

3.1 Pulse Current Generator

아주 짧은 시간 안에 전류를 고속으로 증가하여 초전도 선재에 발생하는 문제점을 관찰하는 것이다. 따라서 지속적인 Power의 공급은 필요하지 않다. 이러한 pulse power 장치에 주로 사용되는 것이 Inductor나 Capacitor이다. 자장이나 전기장을 이용하여 에너지를 저장한 후 순간적으로 방전시켜 고전압이나 고 전류를 얻는다. 고전압이 필요할 경우에는 Inductor를 주로 사용하고 고 전류가 필요할 경우 Capacitor를 사용한다.

3.1.1 회로 및 분석

그림2와 같은 RLC 회로이다. 초기에 전압원을 통해서 Capacitor를 충전하고 스위치를 동작시켜 저장되어진 에너지를 순간적으로 방전한다. 그림 3은 위의 회로를 가지고 예비실험을 수행한 결과이다. 약 2000A 까지 순간적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

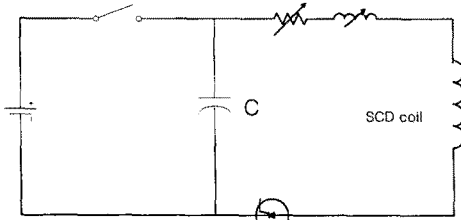


그림 2 펄스 전원의 회로도

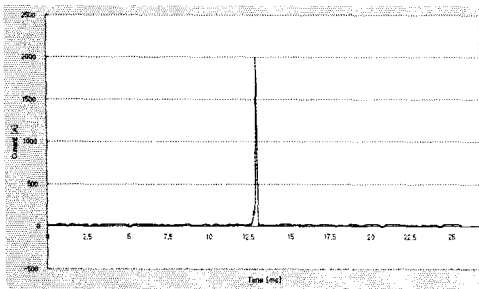


그림 3 무부하 펄스 전원의 전류

표 2 펄스 전원의 요소

Parameter	Value
Capacitance	800mF
Inductance	1mH, 10mH, 100mH
Resistance	10mΩ
SCR	3000 A / 1500V
Diode	1000A / 1500V
Charged Voltage	500V [max]
Discharged Current	6000A [max]
Ramping Rate	10 ⁷ A/sec

3.2 실험 구성

전체 실험도가 그림 4와 같이 나타나있다. 그림에 보이는 것처럼 표본 자석을 중심에 배치하였고 그것에 저장된 에너지를 주기 위해서 Background 자석을 배치하였다. Background 자석의 용량은 약 2T 정도이다. DC Current Source를 통해서 초전도 Cable에 400A-800A정도의 전류를 흘리고 Background 자석을 통해서 약 0T-1.5T 정도의 자장을 가한 후에 Pulse Current Supply의 저장된 전압을 조정하여 출력 전류의 범위를 조정하면서 실험을 수행하였다.

3.2 실험 종류

크롬 코팅 Cable을 보빈에 감은 후 전송전류를 흘린 후 Pulse Current를 더하여 흘려 보내어 Quench를 발생시킨다. 실험 순서는 표 2에 나타나있다.

표 2 실험 순서 및 종류

	1회	2회	3회
DC Current	0A	400A	500A
Pulse power	300V	400V	500V
Background 자석	200A	0A	0A

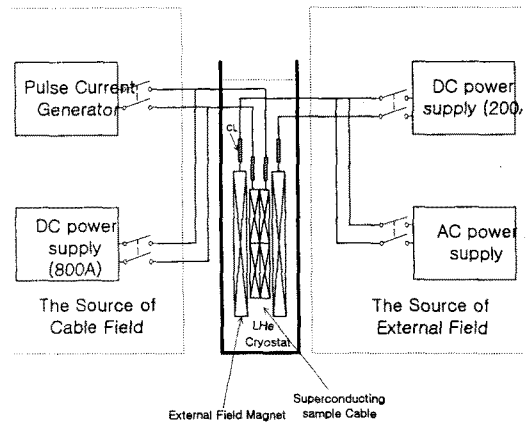


그림 4 실험 구성도

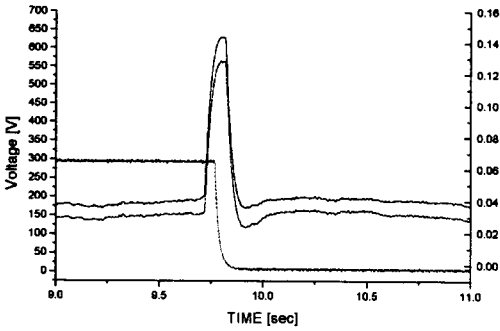


그림 5 300V 방전 시 전압 탭과 방전 전압

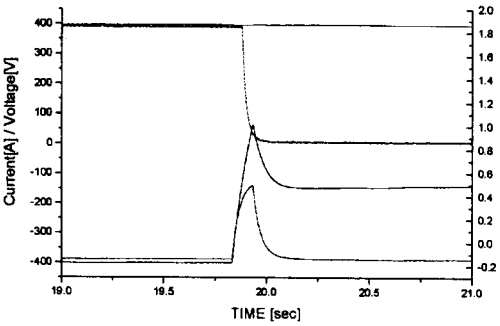


그림 6 400A에 400V 방전 시 전압 탭과 방전 전압

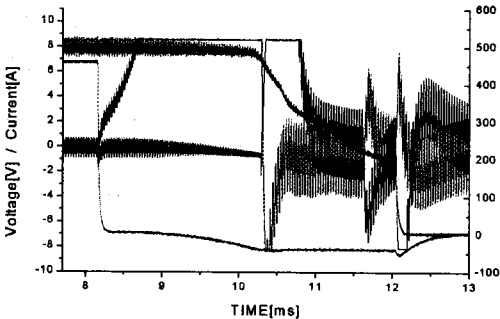


그림 7 500A에 500V 방전 시 전압 탭과 방전 전압

4 결과 고찰

그림 5 - 그림7은 실험 순서에 따른 각각의 결과 그래프이다. 각각 전송전류, 콘덴서 전압, Inductive Voltage Tap, Noninductive Voltage Tap의 신호들을 보여주고 있다. 그림 5에 보이는 것처럼 초전도선에 Pulse 전원을 가했을 경우이다. (콘덴서 충전 전압이 사라지는 시간) 아주 짧은 시간동안 초전도 선재에서 저항이 발생하여 전압이 유지 되지만 0.5초 이내에 사라져 버리는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 6에 보이는 것은 초전도 선에 전송 전류를 400A 가한 상태에서 Pulse 전원을 가했을 경우이다. (콘덴서 충전 전압이 사라지는 시간) 아주 짧은 시간동안 초전도 선재에서 저항이 발생하여 전압이 유지 되지만 0.5초 이내에 사라져 버리는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 초전도 선재

에서의 Quench가 발생 할 경우에도 그것이 더 이상 증가하지 않고 사라지는 것을 관찰 할 수 있었다. 그림 7은 전송전류를 500A로 높이고 콘덴서 충전 전압을 500V로 높였을 때 선재에 Full Quench가 발생하여 전송전류가 사라지는 것을 나타내고 있다. 그림에 보이는 것처럼 Voltage Tap에서 전압이 순간 적으로 증가하는 것을 관찰 할 수 있었고 전압 증가 후 약 2 초 후에 전류가 감소하는 것을 볼 수 있다.

5 결 론

토카막용 초전도 선재에 전류 Quench를 발생시키기 위해 펄스 전류 전원을 개발하였고 이 펄스 전류 원을 이용하여서 토카막용 초전도 선재에 Quench를 발생시켜 초전도체의 Quench 특성을 관찰하였다. 초전도 선재가 회복 가능한 Quench가 발생할 경우 약 0.5이내에 사라지는 것을 확인할 수 있었고 Quench가 전체로 확산되는 경우 Voltage tap에 전압이 회복 가능한 Quench에 비해서 100배 이상 높아지는 것을 관찰하였다. 또한 Noninductive Voltage의 경우 전송전류의 변화가 있을 경우에 전압이 순간적으로 발생하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Yong Chu, Ho Min Kim, Tae Kuk Ko, * Ki Man Kim, "The Response Characteristics of Cowound Voltage Sensors in Cable-in-Conduit Conductor", IEEE Transaction. on Applied Superconductivity, Sept. 1999
- [2] Yong Chu, Joon Han Bae, Tae Kuk Ko, Oh Sang Soo, Sang Kwon Jeong, Kee Man Kim, "The Analysis of Quench Protection System from the Aspect of Thermo-Electrodynamics of Resistive Transition in Epoxy-Impregnated Superconducting Magnet", IEEE Transaction on Magnetic Technology Conference, Beijing, 1997.10
- [3] Yong Chu, Ho Min Kim, Tae Kuk Ko, * Ki Man Kim, "The Response Characteristics of Cowound Voltage Sensors in Cable-in-Conduit Conductor", '98 Applied Superconductivity Conference, Palm desert, CA, US, 1998.9
- [4] 추용, 배준한, 김호민, 장미혜, 주민석, 고태국, 김기만, 정상권, "초전도자석내의 국부적 상변이에 대한 열적·전기역학적 해석 및 켈치보호시스템의 설계 및 특성해석" 97대한전기학회 하계학술대회 논문집, vol.A, pp.86-89, 1997.7