

KSTAR 토카막용 초전도 코일 퀘치 보호 시스템 개발

송인호, 신현석, 최창호
 POSCON 기술연구소

Development of SC Coil Quench Protection System for KSTAR TOKAMAK

I. H. Song, H. S. Shin, C. H. Choi
 POSCON Corporation R&D Center

ABSTRACT

KSTAR 핵융합 장치에 초전도 코일을 사용하는 경우 코일의 저항이 제로에 가까우므로 낮은 전압으로 20kA 이상의 전류를 흘릴 수 있어 많은 전력을 필요로 하지 않는 장점이 있다. 그러나 초전도 코일 내부의 한 부분에서 온도가 상승하여 저항이 증가하는 퀘치 현상이 자주 일어날 수 있으며 이 경우 코일이 손상된다. 이를 막기 위한 회로가 퀘치 보호회로이며, 대전류 차단기와 에너지를 소비시킬 저항으로 구성되어 있다. 초전도 코일에 적용되는 전원장치의 용량은 20kA에서 35kA에 이르며, 퀘치 보호를 위해 직류 대전류 차단기를 필요로 한다. 그러나 현재 상업적으로 생산되고 있는 기계적 차단기는 교류에서만 동작하며, 직류 차단이 가능한 차단기들은 용량이 위의 값에 미치지 못하며, 크기와 가격 및 반복성에 있어서 제약을 가지고 있다. 따라서 기계적 스위치의 장점과 반도체 싸이리스터 스위치의 장점을 결합한 직류 대전류 차단기를 개발함으로써 시스템의 크기와 가격을 낮추어 경제적으로 더 나은 효과를 가져오며, 신뢰성 및 반복성을 높인 회로를 개발하여 KSTAR 토카막 초전도 코일 퀘치 보호시스템에 적용하고자 한다.

1. INTRODUCTION

KSTAR 토카막은 모두 12(8개의 코일 set)개의 초전도 코일을 가지고 있으며, 플라즈마 내부에서 약 3.5T의 자장을 형성하고, Plasma Current가 2MA에 달한다. 이 코일들은 20kA에서 35kA급의 전원장치와 높은 신뢰성을 갖는 퀘치 보호회로를 갖는다. 전원장치의 정밀도는 0.1% 이내이다. 퀘치 보호회로는 직렬구조를 사용하였으며, 기계적 스위치와 반도체 스위치를 결합한 직류전류 차단 스위치를 주 스위치로 사용하여 성능 및 신뢰성을 향상

시켰다. 또한 직류차단 스위치에 이상이 발생하는 경우를 대비하여 Pyrobreaker를 Backup 스위치로 사용하였다. 실제 퀘치 발생신호가 제어기에 들어온 후 에너지의 Dump가 시작되기까지의 지연시간은 200ms 미만이며, 최대 전압은 2kV 이상 상승하지 않도록 설계하였다..

2. DESIGN REQUIREMENTS AND PROTECTION CIRCUIT FOR KSTAR SUPER CONDUCTING COILS

2.1 Design Requirements

KSTAR 토카막은 모두 8종류의 초전도 코일(1종류의 TF 코일과 7종류의 PF 코일)을 가지며, 초전도 코일에 흐르는 전류는 20kA에서 35kA에 달한다. 각각의 코일들은 서로 강하게 coupling 되어 있으며, 자기인덕턴스와 상호인덕턴스를 합한 값은 TF 코일의 경우 759.6mH이며, PF 코일의 경우 30mH에서 400mH의 값을 갖는다. 각각의 코일은 12펄스 싸이리스터 컨버터를 전류 공급장치로 가지며, 필터 회로와 수십 kA급의 차단 스위치와 저항으로 이루어진 퀘치 보호회로를 갖는다. 퀘치 보호회로의 요구사항은 다음과 같다.

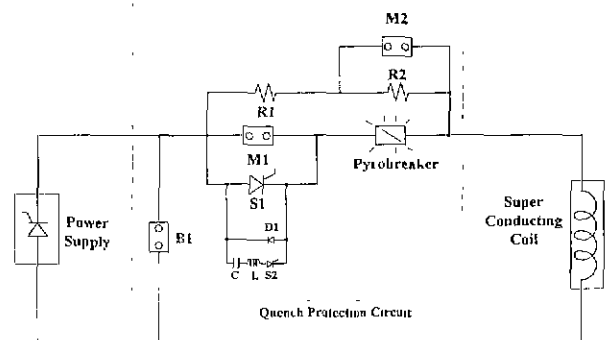


그림 1. 퀘치 보호 회로도

- 1) 퀘치 보호회로 동작 시 코일의 단자 전압은 6kV 이하로 한다.
 - 2) 감쇄 시정수는 4s로 한다.
 - 3) 에너지 dump가 일어나기까지의 지연시간은 200ms 이내로 한다.
 - 4) 코일에 전류가 흐르고 있는 동안은 어떠한 상황에서도 동작 가능하여야 한다.
 - 5) 정전의 경우에도 동작 가능한 회로를 구성한다.
- 기계적 스위치와 반도체 싸이리스터 소자를 이용한 20kA급 퀘치 보호회로의 구성도는 그림 1과 같다.

2.2 Quench protection during Normal Power Service

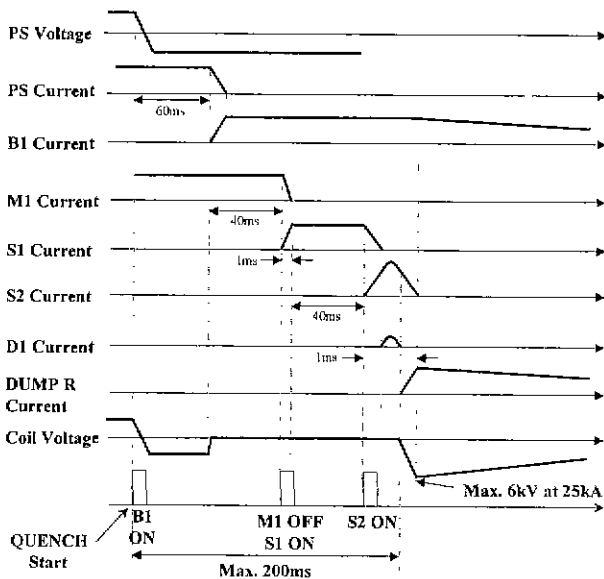


그림 2. 퀘치 보호 시퀀스도

그림 2에 정상적인 전원공급 시 퀘치 보호회로의 time-sequence diagram을 제시하였다. 초전도 코일에 전류가 흐르고 있는 동안 코일 퀘치가 발생하면 (1) BI를 close 하는 신호가 보내지면서 동시에 power supply는 negative 전압을 발생한다. (2) BI 스위치가 close 되는데 약 60ms 정도가 소요되며, power supply 전류는 제로가 되고 모든 부하전류는 BI를 통하여 흐르게 된다. (3) power supply의 전류가 제로임이 확인되면 M1 스위치 open 신호와 S1 스위치의 on 신호가 보내진다. M1이 open 하면서 순간적으로 발생하는 arc 전압은 S1을 완전하게 도통시키고, 모든 전류는 1ms 이내에 S1을 통하여 흐르게 된다. M1의 전류는 제로가 된다. (4) M1의 전류가 제로가 되었음을 확인한 후 S1 싸이리스터를 off 하기 위하여 commutation 회로를 동작시킨다. S2 스위치에 on 신호를 줌으로써 S1 스위치를 off 하고, 모든 부하전류는 dump 저항을 통하여 흐르게 된다. 퀘치 발생에서 부하전류가 저항을 통하여 흐르는데 까지 걸린 지연시간은 약 200ms 정도이다. 코일의 보호측면에서 위의 지연시간은 짧을수록 좋다. 또한 코일 양단간에 발생

되는 최대전압은 퀘치 발생시 전류값과 dump 저항의 곱만큼 순간적으로 발생하며 전류의 감쇄와 함께 같이 작아진다. 이 값은 초전도 코일의 절연 한계 전압에 의해 결정되며, KSTAR 초전도 코일의 경우 6kV를 넘지 말아야 한다.

2.3 Quench Protection during Interruption of Power Service

토크막을 운전하고 있는 동안, 즉 초전도 코일에 전류를 흘리고 있는 동안에 정전이 되도 퀘치 보호회로는 안정적으로 초전도 코일의 에너지를 없앨 수 있어야 한다. 모든 제어전원과, 게이팅 전원은 무정전 전원장치로부터 전원을 공급받도록 하며, 또한 M1 기계적 스위치와 S1, S2 싸이리스터의 오동작, 게이팅 선이 open 되는 경우 등 발생할 수 있는 모든 fault 상황을 고려하여 pyrobreaker를 backup 스위치로 삽입하였다. pyrobreaker는 기계적 스위치와 소용량의 fuse가 병렬로 연결된 구조이며 트리거 신호를 인가하면 전류를 차단하게 된다.

3. COMPONENTS OF THE PROTECTION CIRCUIT

표 1에 퀘치 보호회로에 사용된 주요 component 들에 대한 사양을 제시하였다.

Symbol	Name	Specification
M1	High speed DC breaker	1pole
	Air-spring activated	
	Short time break current	40kA
	Rated voltage	1500V DC
	Rated current	5000A
	Contact resistance	100 $\mu\Omega$
	Make time	500ms
	Break time	30ms 이하
	Weight	125kg
Dimension(W*D*H)	346*585*850	
S1,S2	Thyrnstor	
	Model	5STP33L2800
	Rated voltage	2800V
Pyro-breaker	Rated current	3300A
	Maker	Ferraz
	Rated voltage	2500V
R1,R2	Rated current	5000A
	Maternal	stainless steel
	Rated voltage	1500V
	Rated current	20kA, 10sec
	Dimension(W*D*H)	700*600*800

표 1. 퀘치 보호회로 주요 구성부의 정격사양

3.1 Main Circuit Components

퀵치 보호회로에 사용되는 스위치는 기본적으로 일반 상용의 차단기류를 적용하여도 가능하나 보호 시스템의 성능 개선을 위하여 다음과 같은 기능을 요구한다. 첫째로, 직류 대전류를 항시 흘릴 수 있도록 조인트 부분과 그 외의 통전 부분들이 설계되어야 하며, 둘째로, 가능한 차단 동작 시간 (Mechanical Break Time)을 줄일 수 있는 구조여야 한다. 기계적 스위치의 차단 동작 시간이 빠를수록 싸이리스터 스위치 및 commutation 부분의 용량 설계를 보다 작게 할 수 있다. 싸이리스터 소자의 경우 퀵치 보호회로의 스위칭 과도 상태 동안만 동작하기 때문에 짧은 시간동안의 전류 정격이 싸이리스터 평균 전류 정격의 10배 이상이 되는 특성을 이용하면 작은 정격의 싸이리스터를 사용할 수 있다. 실제로, ABB thyristor 5STP33L2800 3300A, 2800V 소자의 경우 8.3ms non - repetitive surge 전류 정격은 65000A이고, 10ms non - repetitive surge 전류 정격은 60000A이다.

3.2 Commutation Circuit Design

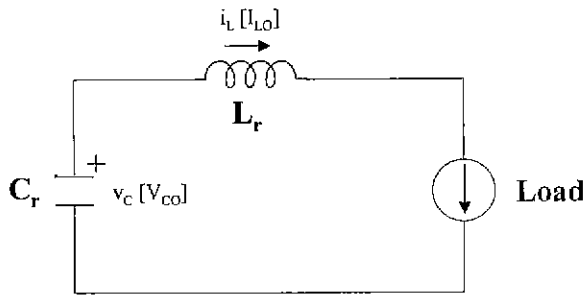


그림 3. 비감쇄 직렬 공진회로

Commutation 회로는 S1 싸이리스터를 turn-off 하기 위해서 싸이리스터 S2 및 L과 C의 공진회로로 구성되어 있다. S1에 흐르는 정격 전류보다 높은 peak 전류가 흐르도록 특성 임피던스 값을 결정하고, 소자의 최대 tq(turn-off time)값 이상을 갖도록 공진 주파수를 결정한다. 그림 3에 L과 C 값을 설계하기 위한 비감쇄 직렬 공진회로를 제시하였다. 부하는 일정 전류의 전류원으로 가정하였으며, commutation 회로의 L과 C 값은 다음 수식을 이용하여 구한다. t_0 에서 부하 전류는 I_{L0} 이며, 인덕터의 전류 i_L 과 커패시터의 전압 v_C 가 변수가 되며 t_0 에서 각각 초기조건으로 I_{L0} 와 V_{CO} 를 갖는다. 회로 방정식을 세우면 식 (1), (2)와 같다.

$$L_r \frac{di_L}{dt} + v_C = 0 \quad (1)$$

$$C_r \frac{dv_C}{dt} = i_L \quad (2)$$

방정식을 풀면

$$i_L(t) = I_{L0} \cos \omega_0(t - t_0) - \frac{V_{CO}}{Z_0} \sin \omega_0(t - t_0) \quad (3)$$

$$v_C(t) = V_{CO} \cos \omega_0(t - t_0) + Z_0 I_{L0} \sin \omega_0(t - t_0) \quad (4)$$

위에서 $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$ 이고, 특성 임피던스

$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \Omega$ 이다. 원하는 commutation 전류의 크기와 시간에 의해서 커패시턴스와 인덕턴스 값이 정해진다.

4. TESTING OF QUENCH PROTECTION CIRCUIT

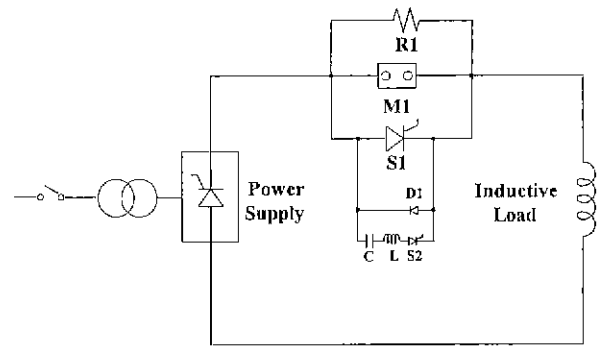


그림 4. 퀵치 보호회로 실험회로

퀵치 보호회로의 동작을 확인하기 위하여 100A 급 퀵치 보호회로를 제작하였다. 현재는 20kA급 퀵치 보호회로 제작을 위한 설계를 하고 있으며, M1 기계적 스위치는 5000A급까지 개발하였다. 초전도 코일을 부하로 하여 시험할 수 없기 때문에 퀵치 start 시에 power supply가 역전압을 내면 부하전류가 급격히 감소하여 퀵치회로의 동작을 확인할 수 없다. 따라서 그림 4와 같이 실험회로를 구성한 후에 퀵치 start를 하여도 power supply가 일정 전류를 공급하도록 하였다. 그림 5에 100A 퀵치 보호회로 실험결과 파형을 제시하였다. 퀵치 지연 시간은 약 120ms 정도이나, 실제 스위칭에 소요된 시간은 더 적음을 알 수 있다. 그러나 접촉 및 판단 시간을 고려하여 200ms 정도의 지연 시간을 갖도록 설계할 것이다. 실험에 사용된 기계적 스위치는 1000A급 고속 차단기이며, 그림 6은 실험 set을 보여주고 있다. 현재 표 1에 제시한 5000A 급 차단기가 개발 완료되어 있으며, 차단시간은 약 25ms 정도이다. 완성된 5000A급 차단기와 차단 시험 파형을 그림 7과 8에 나타내었다. 5000A 차단기의 경우 정격전류 시험은 아직 준비중이며 그림 8의 시험 파형은 약간의 전류만을 흘리고 지연 시간을 측정하는 것이다.

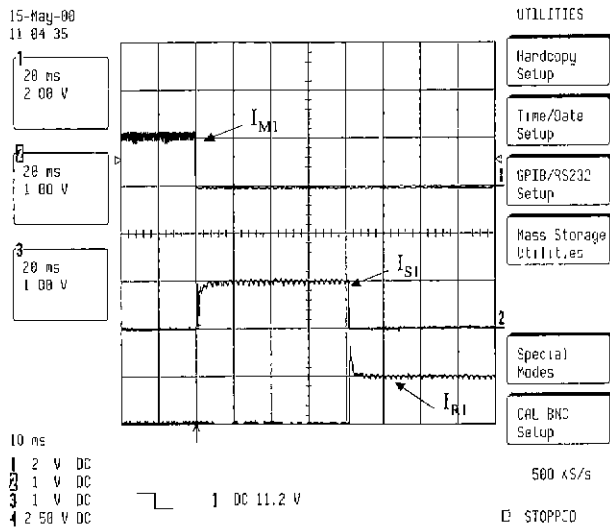


그림 5. 100A급 퀀치 보호회로 실험과정

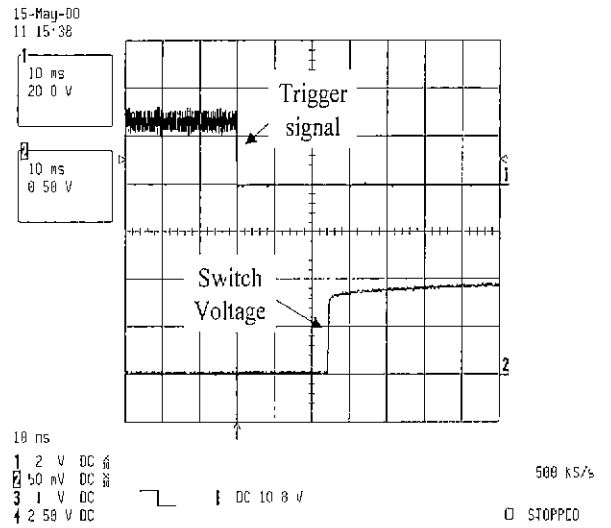


그림 8. 5000A 차단기 차단동작 지연시간 측정 파형

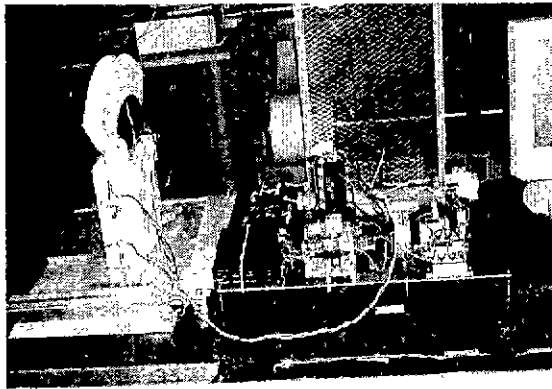


그림 6. 100A 퀀치 보호회로 실험 set

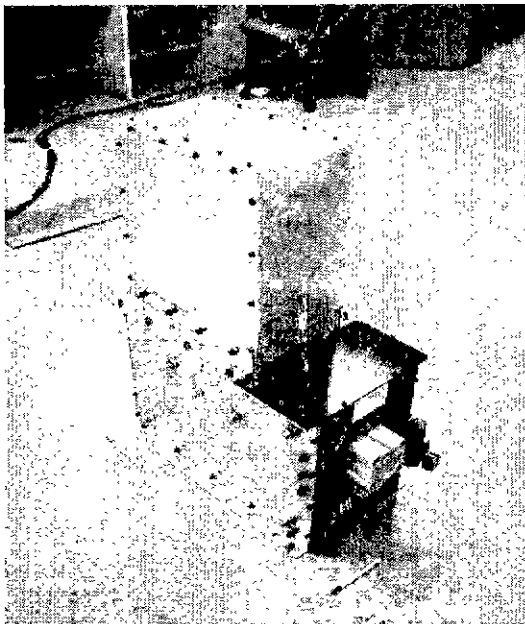


그림 7. 5000A급 기계적 차단기

5. CONCLUSION

KSTAR 토카막 초전도 코일에 사용할 퀀치 보호회로를 설계하였다. 이 회로는 20kA 직류 전류를 dump 저항으로 보낼 수 있다. 또한 기계적 스위치의 장점과 반도체 싸이리스터의 장점을 전류 통전 시와 전류 차단 시에 적용함으로써 크기를 작게 하고, 직류 대전류 차단기의 제작을 쉽게 하였다. 기계적 차단기의 차단 시에 발생하는 과전압의 문제를 해결하여 초전도 코일을 보다 효과적으로 보호하며 보호회로의 수명과 신뢰성을 높였다. 현재 제작하고 있는 20kA급 퀀치보호회로는 KSTAR 핵융합과제의 토카막용 초전도 코일 중 Poloidal Field 6 Upper Coil에 적용할 예정이다. 20kA급의 12펄스 전원장치는 8월에 제작 완료되며, 12월까지 시험완료를 할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] "FAST DISCHARGE OPTIONS FOR TOKAMAK PHYSICS EXPERIMENT TOROIDAL FIELD & POLOIDAL FIELD SUPERCONDUCTING MAGNETS", TPX Document Number 40-9308270 PPPL/Cneumeyer-01.
- [2] MOHAN, UNDERLAND, ROBBINS, "POWER ELECTRONICS", WIE WILEY 2nd.
- [3] S. Tanahashi, "Power Supply for Superconducting Coils of the Large Helical Device", NIFS.