

전원단 및 부하단 사고에 따른 DC 리액터형 고온초전도 전류제한기 동작특성

(Operational Characteristics of DC Reactor Type SFCL for Accident of Both Power Source Side and Load Side)

이수원* · 임성훈

(Su-Won Lee · Sung-Hun Lim)

요 약

본 논문은 사이리스터 또는 GTO사이리스터를 이용한 변형된 DC리액터형 고온초전도 전류제한기의 부하단 사고시 사고전류 제한동작 뿐아니라 전원단 사고로 인해 부하로의 전력공급이 중단되었을 경우, 평상시 초전도코일에 저장된 에너지를 이용하여 부하에 연속적인 전력을 공급할 수 있는 기능을 수행할 수 있음을 분석하였다. 시뮬레이션결과는 이론적인 분석과 일치함을 나타내었다.

Abstract

In this paper, we analyzed the operational characteristics of the modified DC reactor type SFCL and derived the design condition of superconducting coil to be operated properly as power source as well as fault current limiter. It was confirmed through the simulation for the operation of this SFCL that the modified DC reactor type SFCL could be operated as both the uninterruptible power supply and the fault current limiter by controlling the duty ratio of GTO thyristor bridge.

Key words : SFCL, Superconducting coil, UPS, Fault current limiter, GTO Thy. bridge

1. 서 론

DC 리액터형 고온초전도 전류제한기는 초전도 코일의 인덕턴스를 이용하여 사고전류를 제한할 수 있기 때문에 상전도 상태로의 켄치와 초전도 상태로

의 회복과 같은 천이가 필요치 않아 반복동작에 따른 초전도체의 성능저하가 없는 즉, 초전도체의 상전이를 발생시키지 않는 무켄치형(Non-Quench Type) 고온초전도 전류제한기이다.

무켄치형은 사고제거에 따른 초전도상태로의 복귀특성이 필요치 않은 점과 삼상에 적용시 하나의 리액터를 이용할 수 있다는 장점 때문에 단상에 적용할 경우보다 손실을 포함한 설치비용과 공간면에서 유리한 장점이 있어 고온초전도체의 켄치발생을 이용한 유도형이나 저항형보다 실제 계통적용을 위

* 주저자 : 군산대학교 BK21, 계약교수
Tel : 063-469-4687, Fax : 063-469-4699
E-mail : lsw91@kunsan.ac.kr
접수일자 : 2004년 5월 10일
1차심사 : 2004년 5월 17일
심사완료 : 2004년 6월 3일

한 연구가 빠르게 진행되어 왔다[1].

반면에, DC 리액터형은 사고발생후 코일에 흐르는 사고전류가 지속적으로 증가하기 때문에 코일의 임계전류값에 도달되기 전에 이를 분리하기 위한 개폐장치와 이를 제어하기 위한 장치가 필수적이다[2]. 변형된 DC 리액터형 고온초전도 전류제한기는 기존의 DC 리액터형에서 필수적인 개폐장치를 DC 리액터형의 구성요소인 다이오드브리지 대신 사이리스터 또는 GTO사이리스터를 사용하여 제거한 장치이다[3].

본 논문에서는 사이리스터 또는 GTO사이리스터를 사용한 변형된 DC 리액터형의 부하단 사고시 사고전류 제한동작 뿐 아니라 전원단 사고로 인해 부하로의 전력공급이 중단되었을 경우, 평상시 초전도 코일에 저장된 에너지를 이용하여 부하에 연속적인 전력을 공급할 수 있는 기능을 수행할 수 있음을 분석하였다. 이를 위해, 삼상에 적용한 경우, 삼상 변압기의 턴수비와 초전도 코일의 인덕턴스값에 따른 사고전류제한 효과를 포함한 연속전력 공급시간을 조사하였다. 이때, 연속전력공급 시간은 GTO사이리스터의 도통시간을 조절함으로써 제어할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. GTO사이리스터 브리지를 갖는 변형된 DC리액터형 고온초전도 전류제한기

2.1 구조

그림 1은 GTO 사이리스터 브리지가 부착된 변형된 DC 리액터형 고온초전도전류제한기의 구조를 보여준다. GTO 사이리스터 브리지를 통해 전원단과 부하단 사이에 직렬로 연결된 삼상변압기의 2차측 권선과 고온초전도 코일이 연결되어 있으며 커패시터가 변압기 2차측의 각 상 사이에 설치되어 있다.

2.2 동작원리

GTO 사이리스터 브리지로 구성된 변형된 DC 리액터형 전류제한기를 선로에 투입한 후 모든 GTO 사이리스터를 턴온상태로 동작시킬 경우, 선로전류의 피크와 동일한 DC전류가 고온초전도코일에 흐르게 되어 고온초전도 코일은 DC전류에 비례하는 에

너지를 축적할 수 있게 된다. 코일 인덕턴스에 비례하는 일정한 에너지가 축적되면 정상동작 상태에 있게 되고 이때 삼상 변압기의 양단전압강하는 일정한 DC전류로 인해 발생되지 않고 전원단으로부터 부하로 전력이 공급된다. 만약, 부하측에서 사고가 발생할 경우, 기존의 DC 리액터형 고온초전도 전류제한기와 동일한 원리로 전류제한이 이루어지게 된다. 즉 부하단에 사고가 발생할 경우 GTO 사이리스터 브리지 양단의 전압은 정상상태에 비해 크게 증가하게 되고 브리지를 통해 흐르는 전류 또한 증가해야 하지만 초전도코일의 인덕턴스로 인해 갑작스런 큰 증가가 발생되지 않고 서서히 증가되므로 사고전류의 급격한 증가가 발생되지 않고 사고후 코일의 임계전류를 넘지 않은 상태에서 개폐기를 동작시켜 전원으로부터 선로를 분리하여 사고로부터 계통을 보호할 수 있게 된다.

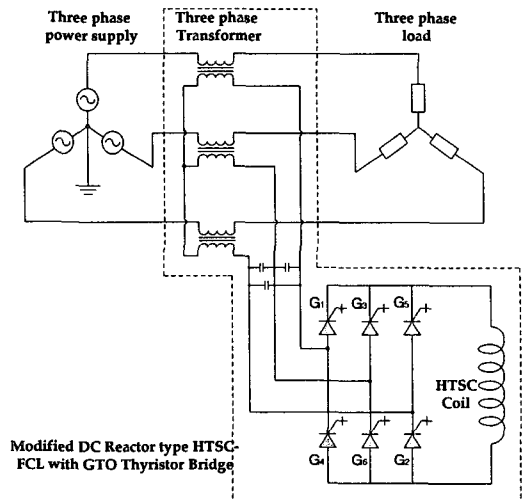


그림 1. GTO 사이리스터 브리지를 도입한 변형된 DC 리액터형 고온초전도 전류제한기

Fig. 1. Modified DC reactor type HTSC FCL using GTO thyristor bridge

GTO 사이리스터 브리지로 동작되는 변형된 DC 리액터형 전류제한기의 특징은 부하측 사고로 인한 전류제한기능 외에도 전원단측에서 사고가 발생할 경우 부하측에 연속적인 에너지공급이 가능하게 된다. 이는 평상시에 초전도코일에 저장되어 있던 에너지를 GTO 사이리스터 브리지를 인버터로 동작시

전원단 및 부하단 사고에 따른 DC 리액터형 고온초전도 전류제한기 동작특성

킴으로서 부하에 공급하게 함으로서 가능하게 된다. 이때, 출력전력은 GTO 사이리스터의 게이트신호를 제어함으로써 조절이 가능하게 된다.

2.3 고온초전도 코일의 인덕턴스 값 선정

전원단의 사고발생으로 전력공급이 중단될 동안 부하에 필요한 전력공급을 위해서는 초전도코일에 충분한 에너지를 저장하고 있어야 하며 이로부터 주어진 DC리액터형 전류제한기에 필요한 초전도 코일의 인덕턴스 값을 설정할 수 있다.

L을 코일 인덕턴스, I_d 를 코일에 흐르는 전류, P를 부하에서 필요한 전력으로 정의할 때 Δt 동안 저장된 에너지와 부하에 필요한 에너지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_{SC} = \frac{1}{2} L I_d^2 \tag{1}$$

$$E_{load} = \int_{\Delta t} P dt \tag{2}$$

부하에서 필요한 전력을 연속적으로 공급할 수 있기 위해서는 위 (1), (2)식으로부터 다음을 만족하는 코일 인덕턴스 값을 설계해야 한다.

$$L \geq \frac{2}{I_d^2} \int_{\Delta t} P dt \tag{3}$$

위에서 설계한 인덕턴스 값을 가지고 부하단 단락 사고 시 매주기마다 증가되는 코일전류 증가량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$di = \frac{3\sqrt{2} V_s}{\pi f L} \tag{4}$$

여기서 V_s 는 선로전압을 나타낸다. 따라서 부하단 사고발생 후 n주기에서 코일전류 I_d 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_d = I_{do} + n di = I_{do} + n \frac{3\sqrt{2} V_s}{\pi f L} \tag{5}$$

여기서 I_{do} 는 정상시의 I_d 값이다. 위에서 계산된 코일전류(I_d)가 부하단 사고후 최소 5~6주기 동안은 임계전류를 넘지 않도록 설계해야 한다.

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

GTO 사이리스터 브리지를 부착한 DC 리액터 타입 전류제한기의 전원단 사고와 부하단 사고시의 동작특성을 살펴보기 위해 표 1에 주어진 파라미터를 이용하여 전원개방 및 부하단락 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table. 1. Simulation parameter

Parameter	Value
Main Voltage	380[V]
Load Resistance	40[Ω]
HTSC Coil Resistance	0.002[Ω]
Three Phase Transformer Turns Ratio	0.5, 1, 2
HTSC Coil Inductance	0.6[H], 1.2[H], 2.4[H]
Capacitance in the 2nd side	50[μF]

3.1 전원단 사고시 전력공급 특성

그림 2는 t=2s일때 전원단에서 3선 지락사고가 발생한 경우 코일 양단전압과 코일전류 및 부하로 공급되는 전류파형을 보여준다. 사고전에는 초전도코일에 일정한 DC전류가 도통되고 있고 이로 인해 코일양단 전압강하는 제로가 나타남을 확인할 수 있다. 사고가 발생한 후에는 정상상태에서 약 8.8[A]의 코일전류가 1주기, 3주기, 5주기, 10주기 후에는 각각 7.4[A], 5.84[A], 4.78[A], 3.2[A]로 점차 감소되었다. 이때 사고 발생전에 7.88[A]인 부하전류가 10주기 동안 80[%]인 6.4[A]로 유지되었으며 이로부터 전원단 사고시 초전도코일에 저장된 에너지를 부하에 공급하는 동작을 수행할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 3은 코일 인덕턴스 크기에 따라 전원단 사고발생후 시간에 따른 코일전류의 크기변화를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 사고전에는 코일 인덕턴스의 크기에 관계없이 8.8[A]의 일정한 전류가 도

통되고 있으나 사고후에는 코일의 인덕턴스 값이 클수록 서서히 감소되는 것을 볼 수 있다.

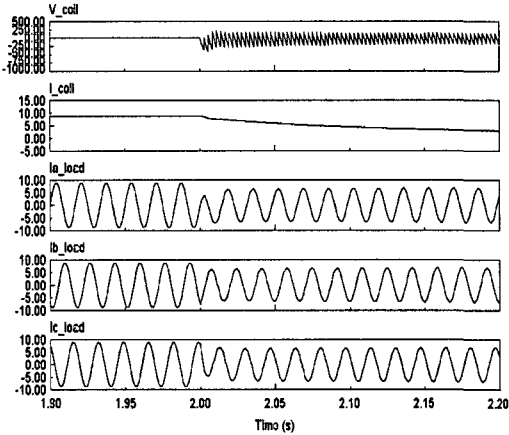


그림 2. 전원단 사고시 초전도코일 전압, 전류 및 3상 부하전류($L_{coil} = 1.2H$)
 Fig. 2. Voltage, current of HTSC coil and three phase load current in case of the opening fault occurrence in the power source terminal($L_{coil} = 1.2H$)

간동안 부하에서 필요한 전력을 고온초전도 코일에서 공급하게 됨을 의미한다.

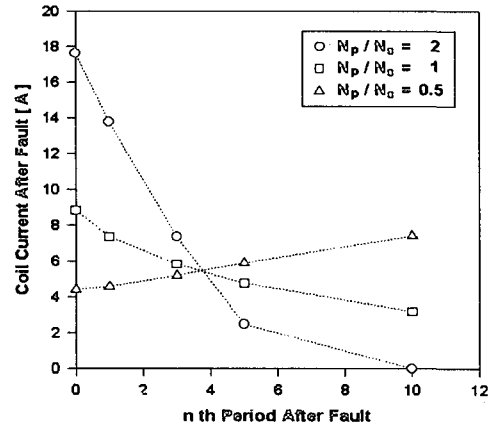


그림 4. 전원단 사고시 3상변압기 턴수비에 따른 초전도코일 전류변화($L_{coil} = 1.2H$)
 Fig. 4. Current variation of HTSC coil due to turn's ratio of three phase transformer in case of the opening fault occurrence in the power source terminal($L_{coil} = 1.2H$)

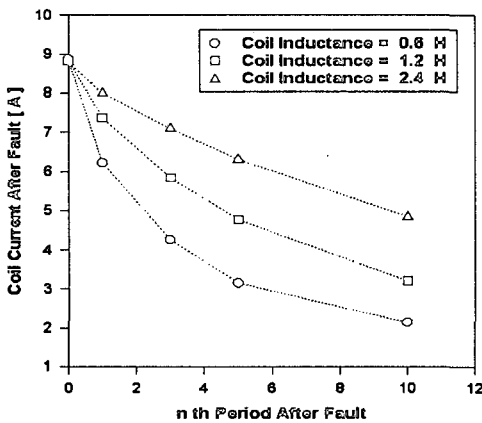


그림 3. 전원단 사고시 초전도코일의 인덕턴스에 따른 초전도코일 전류변화($N_p/N_s = 1$)
 Fig. 3. Current variation of HTSC coil due to the inductance of HTSC coil in case of the opening fault occurrence in the power source terminal($N_p/N_s = 1$)

그림 4는 삼상변압기 1, 2차코일 턴수비에 따른 사고 발생 후 초전도코일에 도통되는 전류의 크기를 보여준다.

턴수비가 큰 경우($N_p/N_s=2$)의 사고전 도통전류는 17.64[A]로, 턴수비가 작은 경우($N_p/N_s=0.5$)의 도통전류(4.42[A])보다 4배 가량 크게 나타남을 볼 수 있다. 그러나 사고후엔 턴수비가 큰 경우의 도통전류가 1주기, 3주기, 5주기 후에는 각각 13.78[A], 7.36[A], 2.49[A]로 감소되었다가 10주기에는 0A로 완전 방전되는 것을 확인할 수 있다.

턴수비가 $N_p/N_s=0.5$ 인 경우엔 사고후에 오히려 도통전류가 4.42[A], 4.59[A], 5.22[A], 5.9[A], 7.4[A]로 증가되는 것을 볼 수 있는데 이는 2차측 커패시터에 인가되는 전압이 턴수비가 감소함에 따라 증가되어 커패시터에 충전된 전압에 의한 코일에 공급하는 전류가 증가된 것에 기인함을 확인할 수 있었으며 적절한 커패시터값 선정이 필요할 것으로 사료된다.

이는 사고전에 코일 인덕턴스의 크기에 비례하는 에너지가 코일에 저장되므로 전력이 중단될 동안 코일의 인덕턴스에 비례하여 사고발생 후 보다 긴 시

3.2 부하단 사고시 전류제한 특성

앞의 전원단 사고 동작외에 GTO 사이리스터 브

전원단 및 부하단 사고에 따른 DC 리액터형 고온초전도 전류제한기 동작특성

리지가 부착된 전류제한기의 부하단에서 3상 지락사고시의 동작특성을 시뮬레이션을 통해 조사하였으며 사고 발생후 4~5주기 후 동작하는 기존의 차단기를 고려하여 $t=2s$ 시간에서 사고를 발생시킨 후 4주기 후에 다시 사고가 제거된 경우의 고온초전도 코일과 코일 양단 전압 및 삼상 선로 전류 파형을 분석하였다(그림 5).

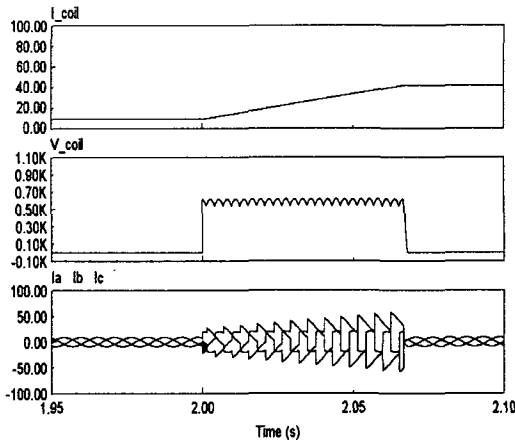


그림 5. 부하단 사고시 초전도코일 전압, 전류 및 3상 부하전류($L_{coil} = 1.2H$)
 Fig. 5. Voltage, current of HTSC coil and three phase load current in case of the short circuit occurrence in the load terminal($L_{coil} = 1.2H$)

사고후 4~5주기 동안 계통에 흐르는 선로전류와 초전도코일의 도통전류를 고려하여 계통에 관련된 보호장치들의 용량을 설정해야 할 것이며 이때, 초전도코일의 임계 전류값을 넘지 않도록 설계할 필요가 있다.

그림 6은 코일 인덕턴스 값에 따른 사고시 코일전류의 증가를 보여주고 있으며 사고전의 도통 전류값은 앞의 전원단 사고전과 동일한 8.8[A]가 도통되고 있었고 사고 후에는 인덕턴스 크기에 반비례해서 증가되었다.

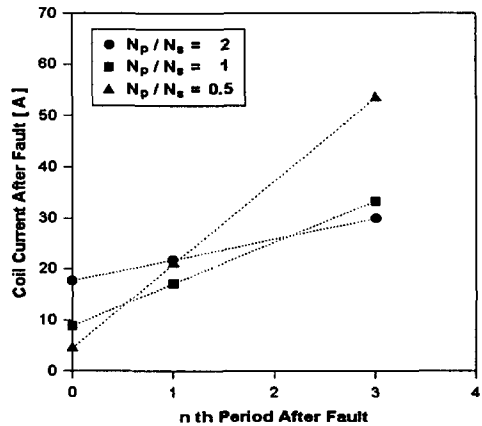


그림 7. 부하단 사고시 3상변압기 턴수비에 따른 초전도코일 전류변화($L_{coil} = 1.2H$)
 Fig. 7. Current variation of HTSC coil due to the inductance of HTSC coil in case of short fault occurrence in the load terminal($L_{coil} = 1.2H$)

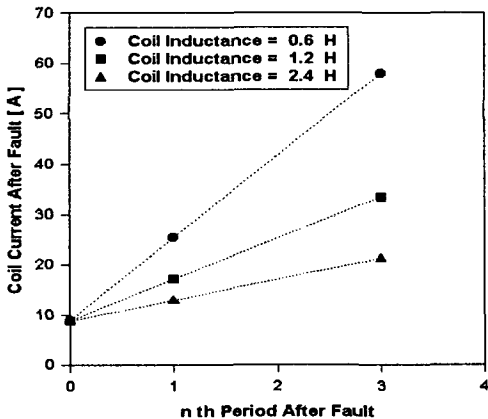


그림 6. 부하단 사고시, 초전도코일 인덕턴스에 따른 초전도코일 전류변화
 Fig. 6. Current variation of HTSC coil due to the inductance of HTSC coil in case of short fault occurrence in the load terminal

마지막으로 코일 인덕턴스 값이 1.2[H]인 경우, 변압기 턴수비에 따른 사고후 코일 전류값의 변화를 그림 7에 보였으며 사고전 코일의 도통전류는 앞의 전원단 사고전과 동일한 값에서 사고후에는 변압기 턴수비에 반비례해서 증가되어 3주기후, 턴수비가 0.5인 경우(53.49[A])가 2인 경우(29.91[A])보다 1.8 배 가량 증가됨을 볼 수 있다.

이상에서 종합하면, 전원단과 부하단 사고시 코일 인덕턴스 값에 반비례해서 코일전류의 감소와 증가가 이루어졌으며 사고전의 코일도통전류는 턴수비에 비례하며 사고후 도통전류는 반비례해서 증가됨을 확인할 수 있었다. 따라서 초전도코일을 이용한 변형된 DC 리액터형 전류제한기 설계시 위의 결과

를 고려하여 설계해야 될 것으로 사료된다.

4. 결 론

전원단과 부하단사고시 코일인덕턴스 값과 변압기 턴수비에 따른 전력공급과 사고전류 제한특성을 살펴보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 코일인덕턴스 값에 반비례해서 코일전류의 감소와 증가가 이루어졌다.
2. 사고전의 코일도통전류는 턴수비에 비례하여 증가 됨을 확인할 수 있었다.
3. 사고후의 코일도통전류는 턴수비에 반비례해서 증가됨을 확인할 수 있었다.

향후, 이를 고려하여 변형된 DC 리액터 타입 전류제한기의 설계 자료로 활용할 계획이다.

이 논문은 2004학년도 군산대학교 두뇌한국21사업의 일부 지원에 의해 수행되었음.

References

- (1) M. Yamaguchi, et al., "Performance of DC Reactor Type Current Limiter Using High Temperature Superconducting Coil", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, pp. 940-943, Jun., 1999.
- (2) T. Hoshino, et al., "DC Reactor Effect on Bridge Type Superconducting Fault Current Limiter During Load Increasing", Conf. ASC2000, Sept. 2000.
- (3) K. Yokoyama, T. Sato, T. Nomura, S. Fukui and M. Yamaguchi, "Application of Single DC Reactor Type Fault Current Limiter as a Power Source", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, pp. 2106-2109, Mar., 2001.

◇ 저자소개 ◇

이수원 (李洙原)

1968년 5월 4일생. 1991년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 군산대학교 BK21 계약교수.

임성훈 (林成勳)

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전북대학교 공업기술연구소 연구원.