

## 시뮬레이션을 통한 자기결합을 이용한 초전도 한류기의 전류제한 특성 분석

### An Analysis on Current Limiting characteristics of an SFCL using Magnetic Coupling between Two Coils through Computer Simulation

김진석<sup>1</sup>, 안재민<sup>1</sup>, 임성훈<sup>2\*</sup>, 문종필<sup>2</sup>, 김재철<sup>2</sup>, 김철환<sup>3</sup>, 현옥배<sup>4</sup>

Jin-Seok Kim<sup>1</sup>, Jae-Min Ahn<sup>1</sup>, Sung-Hun Lim<sup>2\*</sup>, Jong-Fil Moon<sup>2</sup>, Jae-Chul Kim<sup>2</sup>  
Chul-Hwan Kim<sup>3</sup>, Ok-Bae Hyun<sup>4</sup>

**Abstract:** In this paper, the fault current limiting characteristics for the superconducting fault current limiter (SFCL) using magnetic coupling between two coils were investigated. The SFCL consists of a high- $T_c$  superconducting (HTSC) element and two coils. This SFCL has different characteristics that depend on the connection form, the winding direction and the inductance ratio of two coils. The impedance and the operational current of the SFCL can be adjusted higher or lower than the resistance and the critical current of HTSC element. Therefore, the SFCL can change the amplitude of the limited fault current. To confirm it, the HTSC element was modeled and the fault current limiting characteristics of the SFCL were analysed through computer simulation. It was obtained from the analysis that the connection form and the winding direction of two coils of the SFCL were the important design parameters.

**Key Words:** superconducting fault current limiter (SFCL), magnetic coupling, fault current limiting characteristics.

## 1. 서 론

전력계통의 전력용량이 증가함에 따라 고장시 발생하는 고장전류가 증가하고 있다. 이로 인해 계통에 설치된 차단기의 용량초과로 기존차단기 교체 비용 부담이 따르게 된다. 이러한 계통의 고장전류를 감소시키는 기존방식보다 효과적인 방안으로 초전도 한류기를 적용하는 연구가 진행되어 오고 있다. 초전도 한류기의 특징으로는 고장전류를 빠르게 감지 및 제한함으로써 기존에 설치된 보호장치들의 부담을 감소시켜 줄 뿐만 아니라 계통의 안정도를 향상시킬 수 있다 [1-2].

지금까지 개발된 초전도 한류기는 저항형, 유도형, 정류형이 있으며, 실제계통에 적용하기 위한 초전도 한류기의 모델로서는 국내외적으로 저항형이 가장 활발히 이루어지고 있다. 그러나, 저항형의 경우 제한하고자하는 고장전류 크기를 조절하기 위해서는 단위 초전도 소자들간에 직·병렬연결이 요구되며 특히, 직렬 연결시에는 동시 퀘치를 유도하기 위한 별도의 방안이 필요하다. 유도형은 튜브나 링 같은 특수형태의 초전도체 제작기술이 요구된다 [3-4].

본 논문에서는 실제 계통에 적용하기 위한 저항형의 문제점인 초전도 소자의 수를 줄이고, 유도형의 단점인 특수형태의 구조 극복할 수 있는 두 개의 코일과 한 개의 초전도 소자로 구성된 자기결합을 이용한 초전도 한류기의 고장전류 제한특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

자기결합을 이용한 초전도 한류기는 두 코일의 연결 형태(직렬, 병렬), 결선방향(가극, 감극)과 권선비에 따라 초전도 한류기의 동작전류와 임피던스를 조절함으로써 고장전류를 제한할 수 있는 특징이 있다 [5-7]. 이에 대한 특징을 분석하기 위해 자기결합을 이용한 초전도 한류기가 설치된 모의회로를 구성하였다. 두 코일의 연결형태(직렬, 병렬), 결선방향(감극, 가극)의 설계조건에 따라 사고발생시 고장전류 제한특성을 비교 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 구조 및 동작원리

자기결합을 이용한 초전도 한류기는 두 코일과 초전도 소자의 구성에 따라 직렬연결과 병렬연결로 분류할 수 있다. 그림 1에 나타난 것과 같이 자기결합을 이용한 초전도 한류기의 직렬연결구조는 한 개의 코일이 초전도 소자와 병렬로 연결되고 다른 코일과는 직렬로 연결되며, 병렬연결구조는 한 개의 코일이 초전도 소자와 직렬로 연결되고 이 결합이 다른 코일과 병렬로 연결된다.

기본동작 원리는 사고 전과 후로 나누어 설명할 수 있다. 사고 전에 초전도 한류기를 구성하는 초전도 소자는 초전도 상태에 있으므로 저항이 영이 되며 초전도 소자의 전압( $V_{sc}$ ) 또한 영이 된다. 따라서, 코일 1에서 발생하는 자속과 코일 2에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되어 각 코일에서 전압이 유가되지 않으므로 한류기는 단락회로로서 동작하게 된다. 반면에, 고장이 발생하여 초전도 소자의 임계전류를 넘어서 퀘치가 발생하면 초전도 한류기의 두 코일에서 발생하는 자속이 더 이상 상쇄되지 않아 두 코일에서 전압이 유가된다.

<sup>1</sup>학생회원 : 숭실대 공대 전기공학부 석사과정

<sup>2</sup>정 회 원 : 숭실대 공대 전기공학부 교수

<sup>3</sup>정 회 원 : 성균관대 정보통신공학부 교수

<sup>4</sup>정 회 원 : 한국전력연구원 수석연구원교신저자

\*교신저자 : superlsh73@ssu.ac.kr

원고접수 : 2008년 02월 15일

심사완료 : 2008년 03월 21일

이로 인해 한류기에 임피던스가 발생하게 되고 고장전류를 제한하게 된다. 이때, 두 코일의 연결형태와 결선 방향에 따라 초전도 한류기의 동작전류와 임피던스를 변화시킬 수 있다.

2.2 모델링회로 구성

자기결합을 이용한 초전도 한류기는 연결형태, 결선 방향과 권선비에 따라 고장전류 크기 및 두 코일에 유기되는 전압이 달라진다. 따라서, 한류기를 구성하는 방법에 의해 초전도 소자에 유기되는 전압이 달라지고, 이로 인해 발생하는 임피던스 크기도 변한다. 하지만, 본 논문에서 사용한 한류기에서는 연결형태와 결선방향에 따라 사고선로의 고장전류 제한특성을 비교하기 위해 발생저항이 일정한 초전도 소자를 모델링에 반영하였고, 초전도 소자의 저항 특성은 그림 2와 같다 [8].

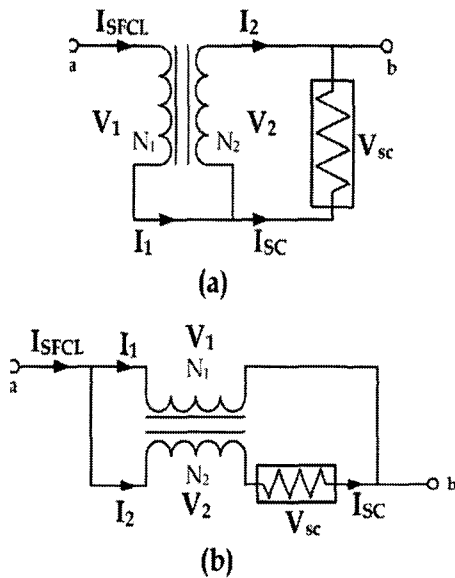


Fig. 1. Equivalent circuit of SFCL using magnetically coupled two coils. (a) Equivalent circuit of series connection. (b) Equivalent circuit of parallel connection.

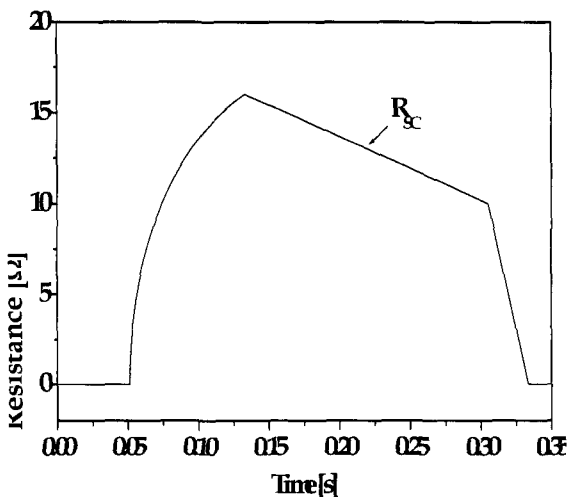


Fig. 2. Resistance curve of HTSC element.

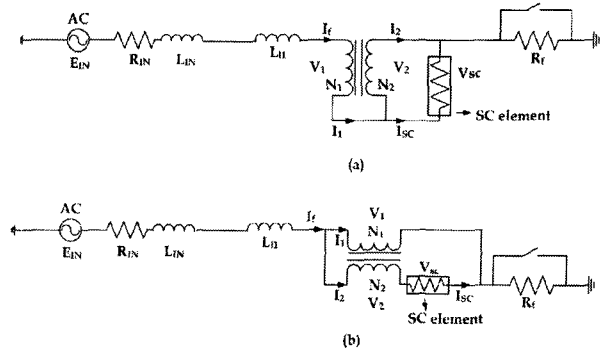


Fig. 3. A modeling circuit with SFCL using magnetic coupling. (a) Modeling circuit of SFCL with series connection. (b) Modeling circuit of SFCL with parallel connection.

고장발생시 고장전류의 제한특성을 분석하기 위해 자기결합을 이용한 초전도 한류기를 사용하여 그림 3과 같이 모델링회로를 구성하였다. 그림 3의 회로에서  $R_{IN}$ ,  $L_{IN}$ 은 전원 임피던스,  $L_{II}$ 은 선로 임피던스,  $R_f$ 는 부하를 모의한 것이다.  $N_1$ ,  $N_2$ 로 결선된 두 코일은 자기결합을 이루는 상태이며, 결선방향(가극, 감극)과 결합비를 가지고 있다. 연결형태 및 결선방향에 따라 특성을 비교, 분석하기 위해 자기결합을 이루는 두 코일의 결합비가  $N_1/N_2 = 2$ 인 일정한 조건을 가지도록 설정하였다. 모델링회로의 구성요소들의 조건은 표 1과 같다.

Table 1. Components used in modeling circuits.

전원 및 선로		
변수	값	단위
전원전압 ( $E_{IN}$ )	120	[V <sub>rms, L</sub> ]
전원 저항 ( $R_{IN}$ )	1.15	[Ω]
전원 리액턴스 ( $L_{IN}$ )	2.64	[mH]
선로 리액턴스 ( $L_{II}$ )	2.655	[mH]
부하 저항 ( $R_f$ )	206	[Ω]
초전도 한류기		
변수	값(비)	단위
초전도 소자 수렴저항	20	[Ω]
초전도 소자 임계전류	21.5	[A]
1차 코일의 권선수	60	[Turns]
2차 코일의 권선수	30	[Turns]

2.3 결과 및 분석

앞의 모델링회로에서 분석을 위해 고장 발생시간이 0.05 [s]이고 고장 제거시간은 0.1333 [s]로 설정하여 5 [cycle]동안 고장을 발생시켰다. 그림 4는 자기결합을 이용한 초전도 한류기를 설치하지 않고, 선로에 부하만 연결하고 부하  $R_f$ 에서 고장을 발생시켰을 때, 고장선로의 전류와 부하전압을 보여준다. 고장발생시 고장선로에 고장전류가 최대 51.85[A]가 되는 것을 확인할 수 있으며, 5 [cycle]후에 고장이 제거되면 고장전류와 부하전압이 정상상태로 돌아오는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 두 코일이 가극결선으로 직렬연결시 두 코일과 초전도 소자의 전류곡선으로  $I_1$ ( $I_{1,peak}=7.53$ [A])과  $I_2$ ( $I_{2,peak}=-15.06$ [A])사이의  $N_2/N_1$ 의 결합비 관계를 가지고, 두 코일에 흐르는 전류 차이가 초전도 소자에 흐르는 전류( $I_{SC,peak}=22.59$ [A])로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

수 있다.

그림 6에서는 고장시 고장선로에 흐르는 고장전류 ( $I_{peak}=7.52[A]$ )와 자기결합을 이용한 초전도 한류기의 사고에 따른 전압특성 ( $V_{peak}=99.46[V]$ )을 보여주고 있다. 자기결합을 이용한 초전도 한류기의 초전도 소자가 임계전류를 넘으면서 고장전류를 빠르게 제한하는 것을 볼 수 있다.

또한, 제한기의 전압에서는 고장의 영향으로 고장초기에 빠른 임피던스 발생으로 전압이 발생하지만 고장이 제거되면 전류가 감소하여 제한기의 전압이 낮아지고 초전도 소자가 초전도 상태로 회복을 하면서 제한기에 걸리는 전압이 점차 작아지는 것을 확인할 수 있다.

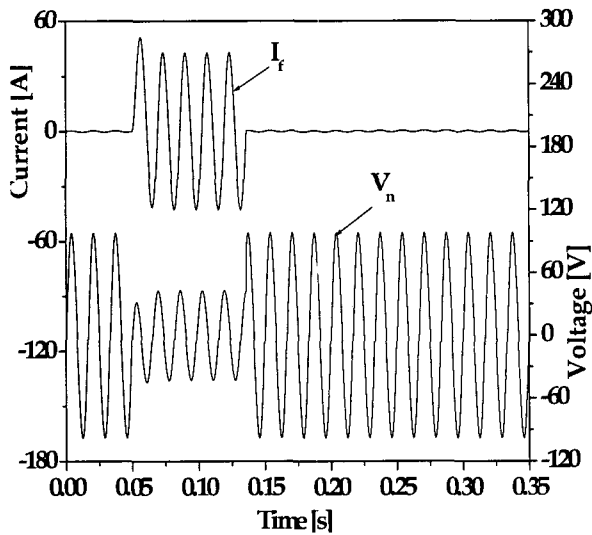


Fig. 4. Fault current and load voltage waveform in case that the SFCL is not installed.

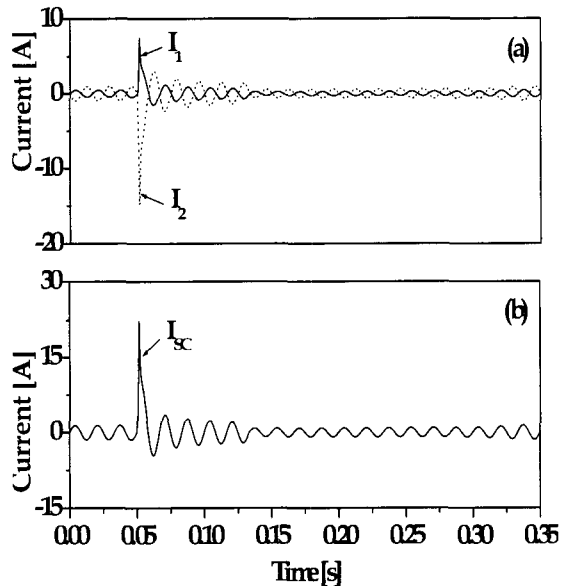


Fig. 5. Current waveform in case of the series connection of two coils (addictive polarity winding). (a) Currents of two coils. (b) Current of HTSC element.

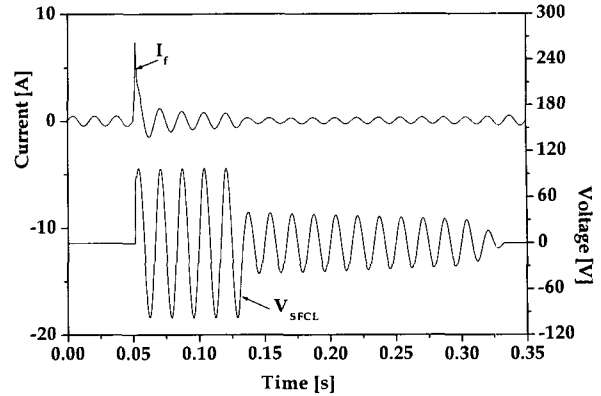


Fig. 6. Waveform of fault current and SFCL's voltage in case of the series connection of two coils (addictive polarity winding).

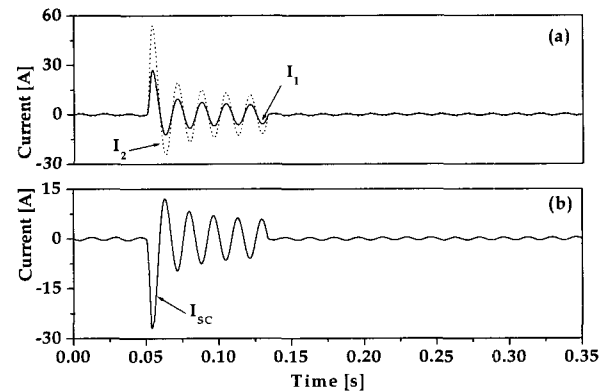


Fig. 7. Current waveform in case of the series connection of two coils (subtractive polarity winding). (a) Currents of two coils. (b) Current of HTSC element.

두 코일이 감극결선으로 직렬 연결된 경우인 그림 7에서는 한류기의 두 코일과 초전도 소자의 전류 사이가 감극결선인 관계로 두 코일의 전류방향이 가극결선인 경우와 달리 같은 방향을 갖는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 감극결선의 고장시 고장선로의 고장전류 ( $I_{peak}=27.16[A]$ )와 초전도 한류기의 전압 ( $V_{peak}=92.33[V]$ )으로 가극결선인 경우보다 제한되는 고장전류가 크게 나타나는 것을 비교할 수 있다. 이로부터 감극결선인 경우에 한류기 임피던스가 가극결선인 경우보다 작게 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 한류기에 유기되는 전압이 다른 이유는 가극결선으로 직렬연결시 두 코일에 유기되는 전압의 합이 한류기의 전압으로 나타나지만, 감극결선일 경우에는 유기된 두 코일 전압의 차로 나타나기 때문이다.

그림 9는 두 코일이 가극결선으로 병렬연결시 한류기의 두 코일과 초전도 소자의 전류파형이다. 병렬연결에서도 직렬연결과 같이 두 코일 사이의 전류관계는  $N_1/N_2 = 2$ 로  $I_2(I_{peak}=-11.798[A])$ 가  $I_1(I_{peak}=23.596[A])$ 보다 2배 큰 전류를 가지는 공통점이 있으나, 같은 결선에서 보면 두 코일 사이의 전류방향이 다른 것을 볼 수 있다. 또한,  $I_2(I_{peak}=23.596[A])$ 는 초전도 소자에 흐르는 전류 ( $I_{peak}=23.596[A]$ )와 동일함을 확인할 수 있다.

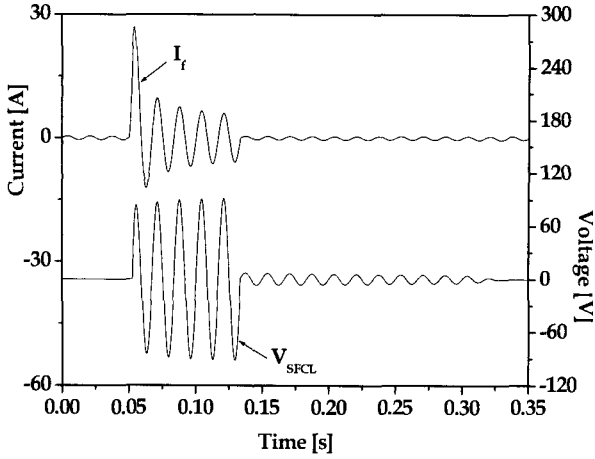


Fig. 8. Waveform of fault current and SFCL's voltage in case of the series connection of two coils (subtractive polarity winding).

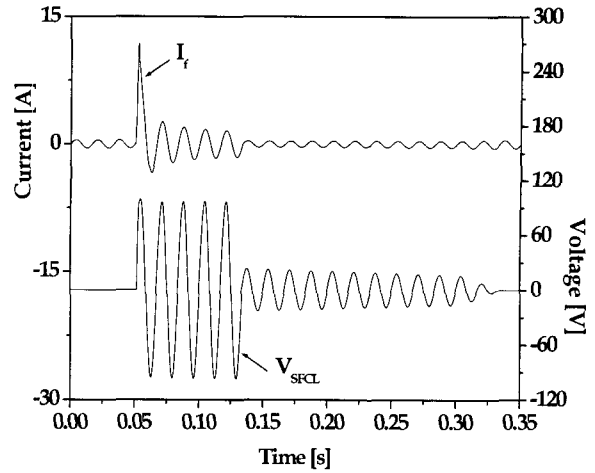


Fig. 10. Waveform of fault current and SFCL's voltage in case of the parallel connection of two coils (addictive polarity winding).

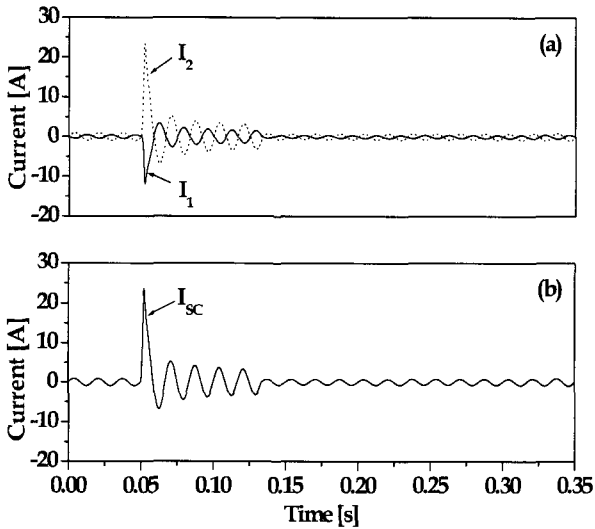


Fig. 9. Current waveform in case of the parallel connection of two coils (addictive polarity winding). (a) Currents of two coils. (b) Current of HTSC element.

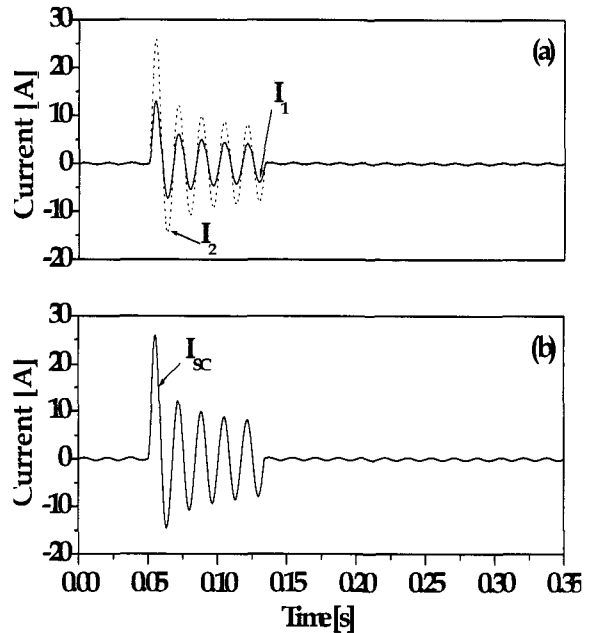


Fig. 11. Current waveform in case of the parallel connection of two coils (subtractive polarity winding). (a) Currents of two coils. (b) Current of HTSC element.

그림 10은 고장선로의 고장전류( $I_{peak}=11.85[A]$ )와 한류기의 전압특성을 보여준다. 한류기의 전압은 직렬연결의 사고발생시 한류기의 전압과 비슷하게 빠른 시간에 발생하는 임피던스에 의해 전압( $V_{peak}=97.62[V]$ )이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 병렬 연결된 한류기의 전압은 직렬연결과 달리 1차 코일의 전압이 한류기의 전체 전압과 같다는 것을 등가회로부터 확인할 수 있다.

그림 11은 두 코일이 감극결선으로 병렬연결된 제한기의 내부에 흐르는 전류 파형을 보여준다. 두 코일의 전류관계 역시 가극결선으로 병렬연결한 한류기의 전류와 같지만, 두 코일의 전류방향이 일치하는 다른 점을 가지고 있다.

그림 12는 고장선로의 고장전류( $I_{peak}=39.21[A]$ )와 한류기의 전압특성( $V_{peak}=82.51[V]$ )을 보여준다.

위의 결과에서 자기결합을 이용한 초전도 고장전류 한류기는 연결형태와 결선 방향에 의해서 임피던스의 크기가 달라지며, 이에 따라 고장전류가 제한되는 특성이 달라진다. 또한 고장시 한류기에 유기되는 전압은 비슷하지만 고장이 제거되면서 발생한 임피던스에 의해 회복구간에서 서로 다른 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

위의 결과로 볼 때, 결합비가 일정한 상태에서 연결 형태와 결선방향에 따라서 한류기에 발생하는 임피던스가 변하고, 이로 인하여 고장 초기의 고장전류의 크기, 제한되는 크기, 한류기의 전압에 다른 결과를 가져오게 되는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 표 2에 정리하였다.

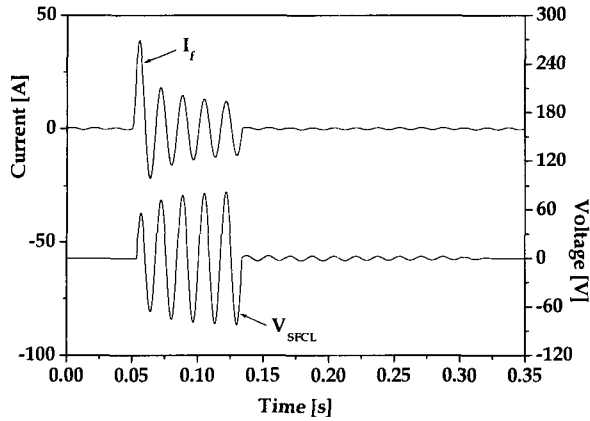


Fig. 12. Waveforms of fault current and (SFCL)'s voltage in case of the parallel connection of two coils (subtractive polarity winding).

Table 2. Result of simulations.

	직렬연결		병렬연결	
	가극결합	감극결합	가극결합	감극결합
임피던스 [ $\Omega$ ]	143.82	15.9	63.86	7.05
고장전류 [A]	7.52	27.16	11.85	39.21
제한된 전류 [A]	0.77	6.33	1.73	12.43
제한기 전압 [V]	99.46	92.33	97.62	82.51

### 3. 결 론

본 논문에서는 자기결합을 이용한 초전도 한류기의 연결형태와 결선방향에 따라 고장전류가 제한되는 특징을 살펴보았다. 연결형태와 결선방향에 따라 한류기에 유기는 전압의 차이로 제한기에서 발생하는 임피던스가 초전도 소자의 수렴 저항 값보다 크거나 작게 발생되는 것과 전류가 제한되는 특징을 확인하였다. 또한, 각 연결형태, 결선방향에 따라서 한류기에 발생하는 전압특성을 확인하였다.

본 논문에서는 결합비가 일정한 상태에서 연결형태와 결선방향에 따라서 한류기에 나타나는 결과를 알아보기 위해 초전도 소자의 동작이 일정한 것을 사용하였지만, 향후에는 실험을 통하여 초전도 소자의 특성을 반영하여 분석하고자 한다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, T. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, "Toward the superconducting fault current limiter", IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 6, no. 2, pp. 801-808, April 1991.
- [2] W. Paul and M. Chen, "Superconducting control for surge currents", IEEE Spectrum, vol. 35, pp. 49-54, May 1998.
- [3] S. H. Lim, Y. S. Cho, H. S. Choi, and B. S. Han, "Improvement of Current Limiting Capability of HTSC Elements in Hybrid Type SFCL", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 17, no. 2, pp. 1807-1810, June 2007.
- [4] O. B. Hyun, S. D. Cha, H. R. Kim, H. S. Choi, and S. D. Hwang, "Shunt-Assisted Simultaneous Quenches in Series-Connected Resistive SFCL Components", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 2060-2063, June 2003.
- [5] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "Fault Current Limiting Characteristics due to Winding Direction between Coil 1 and Coil 2 in a flux-lock type SFCL", Physica C, vol. 416, pp. 34-42, November 2004.
- [6] S. H. Lim, H. S. Choi, S. C. Ko, H. G. Kang and B. S. Han, "Fault current limiting characteristics of new Resistive type Superconducting Fault Current Limiter using Flux linkage", Phys. Stat. Sol.(c), vol. 2, no. 5, pp. 1755-1760, March 2005.
- [7] S. H. Lim, "Operational Characteristics of flux-lock type SFCL with series connection of two coils", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 17, no. 2, pp. 1895-1898, June 2007.
- [8] H. R. Kim, H. S. Choi, H. R. Lim, I. S. Kim, O. B. Hyun, "Analysis on quench recovery of Au/YBCO thin film meander lines", 2001년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 92-94.

### 저 자 소 개



김진석(金辰碩)

1983년 01월 26일생, 2007년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업, 현재 숭실대 대학원 전기공학과 석사과정.



안재민(安宰民)

1982년 01월 30일생, 2007년 안양대 공대 전기전자공학과 졸업, 2007년 숭실대 대학원 전기공학과 석사과정.



**임성훈(林成勳)**

1973년 11월 1일생, 1996년 전북대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 2006년~현재 숭실대 전기공학과 교수.



**문종필(文鍾必)**

1977년 05월 27일생, 2000년 숭실대 공대 전기공학과 졸업, 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2003~2008년 기초전력연구원 전력시스템 연구실 선임 연구원, 현재 숭실대학교 전기공학부 전임강사.



**김재철(金載哲)**

1955년 07월 22일생, 1979년 숭실대 전기공학과 졸업, 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년 서울대 대학원전기공학과 졸업(공학박사), 1988년~현재 숭실대 전기공학과 교수.



**김철환(金喆煥)**

1961년 1월 10일생, 1982년 성균관대 전기공학과 졸업, 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 성균관대 정보통신공학과교수, 전력IT인력양성 센터 센터장.



**현옥배(玄錡培)**

1953년 2월 11일생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이학박사), Ames Lab., NIST, ISTEK 연구원 역임, 현재 한전 전력연구원 수석연구원.