

직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성 컴퓨터 시뮬레이션 분석

(Computer Simulation Analysis on Fault Current Limiting Characteristics of SFCL using Magnetic Coupling of Two Coils with Series Connection)

임성훈 · 안재민 · 김진석 · 문종필 · 김재철

(Sung-Hun Lim · Jae-Min An · Jin-Seok Kim · Jong-Fil Moon · Jae-Chul Kim)
 숭실대학교 전기공학부

Abstract

The computer simulation for the fault current limiting characteristics of the superconducting fault current limiter (SFCL) using the magnetic coupling of two coils was performed. The magnetic fluxes generated from two coils were canceled out during a normal time. However, the resistance generation of high- T_c superconducting (HTSC) element after a fault occurrence keeps up the magnetic fluxes of two coils and contributes to the fault current limiting operation. Through the computer simulation for the fault current limiting characteristics based on its electrical equivalent circuit, its operational current and the limiting impedance could be improved by adjusting the inductance ratio between two coils.

1. 서론

병렬연결된 두 코일이 자기적으로 결합된 구조를 갖는 자속구속형 초전도 사고전류제한기는 사고전에는 초전도소자의 영저항으로 인해 두 코일에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되어 단락 회로로 동작하게 된다. 하지만, 사고가 발생되어 초전도 소자의 저항이 발생하게 되면 두 코일에서 발생하는 자속은 더 이상 상쇄되지 않게 되고 이때, 발생한 제한기 임피던스에 의해 사고전류가 제한되는 특징을 가지고 있다[1-2].

직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기 또한 기존의 두 코일이 병렬연결된 구조와 동일한 동작원리에 의해 사고전류제한이 이루어지며 제한기 사고전류제한 특성이 두 코일의 결선방향과 두 코일의 인덕턴스비에 의존하는 것을 본 저자는 보고한 바 있다 [3-4].

본 논문에서는 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 두 코일의 인덕턴스비를 조절함으로써 제한기 동작전류와 제한기 임피던스를 설정할 수 있음을 확인하였다.

2. 본론

2.1. 구조 및 동작원리

직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 구조는 그림 1과 같이 하나의 철심에 두 코일이 직렬 연결되며 초전도 소자는 두 코일 중 하나와 병렬로 연결된 구조를 갖는다.

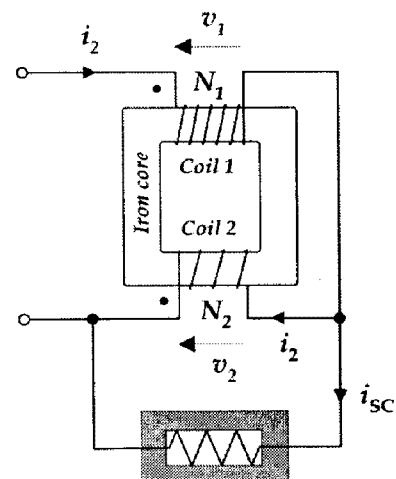


그림 1. 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 구조.

Fig. 1. Structure of a SFCL using magnetic coupling of two coils with series connection.

동작원리는 크게 사고전과 사고후로 나누어 기술할 수 있다. 사고전, 즉 평상시에는 초전도 소자는 초전도상태에 있기 때문에 각 코일에서 유기되는 자속은 상쇄되어 각 코일에 유기되는 전압은 제로를 유지하게 된다. 사고가 발생되어 초전도소자에 흐르는 전류가 임계값을 넘어 상전도로 전이되어 저항이 발생하게 되면 초전도 소자에 전압이 유기되며 이로 인해 각 코일에 전압이 유도되어 제한기 임피던스가 발생됨으로서 사고전류를 제한하게 된다.

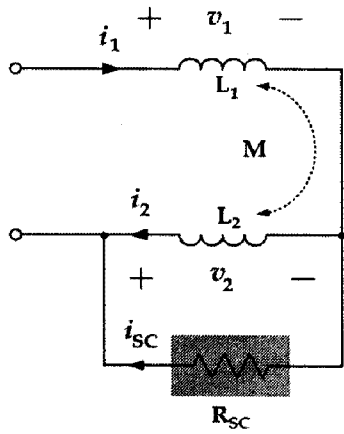


그림 2. 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 등가회로.
Fig. 2. Equivalent circuit of a SFCL using magnetic coupling of two coils with series connection.

그림 2는 사고발생시 제한기 등가회로를 보여 주며, 등가회로로부터 제한기 동작전류와 제한기 임피던스를 식 (1), (2)와 같이 유도할 수 있다. 두 식에서 보는 바와 같이 두 코일의 인덕턴스 비를 조절함으로써 제한기 동작전류와 임피던스를 설정할 수 있음을 확인할 수 있다.

$$I_{OP} = \frac{j\omega L_2}{j\omega L_2 + j\omega M} I_C \quad (1)$$

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega R_{SC}(L_1 + L_2) + 2j\omega M R_{SC}}{R_{SC} + j\omega L_2} \quad (2)$$

2.2. 시뮬레이션을 통한 사고전류제한 특성 분석

직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전

도 사고전류제한기의 동작특성을 시뮬레이션하기 위해 선로저항 및 선로 인덕턴스와 부하저항을 포함한 파라미터로 구성된 등가회로로부터 미분방정식을 유도하였으며 FDM(finite difference method)을 이용하기 위해 식 (3)과 같이 행렬변수로 표현하여 전개하였다.

$$V = R \cdot I + L \cdot \Delta I / \Delta t \quad (3)$$

여기서 R, L 은 초전도 소자의 상전도 저항과 선로저항, 부하저항을 비롯, 선로 인덕턴스를 포함한 행렬변수를 나타낸다. 시뮬레이션시 초전도 소자의 저항은 그림 3과 같이 실험으로부터 얻은 근사곡선을 반영하였으며, 매시간 변화된 전류값을 식 (4)와 같이 구하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\Delta I = L^{-1} \cdot V \Delta t - L^{-1} \cdot R \cdot I \Delta t \quad (4)$$

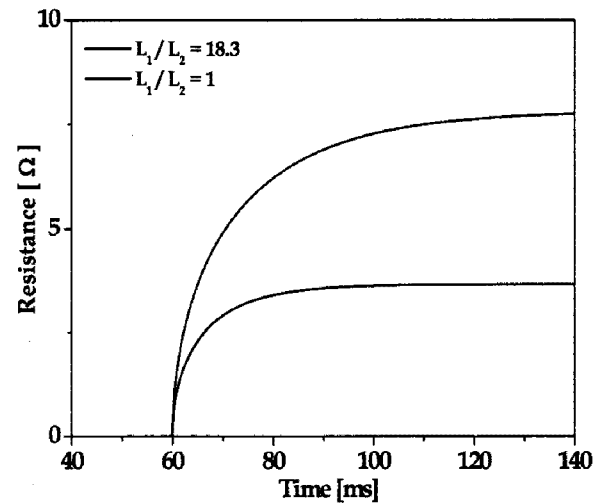


그림 3. 초전도 소자의 저항파형.
Fig. 3. Resistance curves of HTSC element.

2.3. 결과 및 고찰

그림 4와 5는 두 코일의 인덕턴스 비가 18.3인 경우 사고발생시 초전도 소자를 포함한 두 코일의 시뮬레이션을 통해 얻은 전류, 전압파형을 보여준다. 사고발생시 사고전류가 제한되는 제한기 동작전류가 초전도 소자의 임계전류값보다 작은 값에서 이루어지는 것을 볼 수 있으며 사고시 초전도 소자에 유기전압도 코일 2와 병렬로 연결된 구조로 인해 코일 2와 동일한 전압이 유기되는 것을 볼 수 있다.

그림 6과 7은 두 코일의 인덕턴스 비가 1인 경우 제한기 전류, 전압파형을 보여준다. 두 코

일의 인덕턴스비가 18.3인 경우에 비해 제한기 동작전류가 증가되는 것을 그림 6에서 확인할 수 있으며 이는 식 (1)에서 보는 바와 같이 코일 2의 인덕턴스가 증가함에 따라 초전도소자의 임계전류에 대한 제한기 동작전류의 비가 증가하게 되는 결과와 일치함을 볼 수 있다. 또한, 사고후 제한되는 사고전류크기는 두 코일의 인덕턴스 비가 18.3인 경우에 비해 증가되는 것을 볼 수 있으며 앞의 등가회로부터 분석한 식 (2)에서도 일치된 결과를 확인할 수 있다.

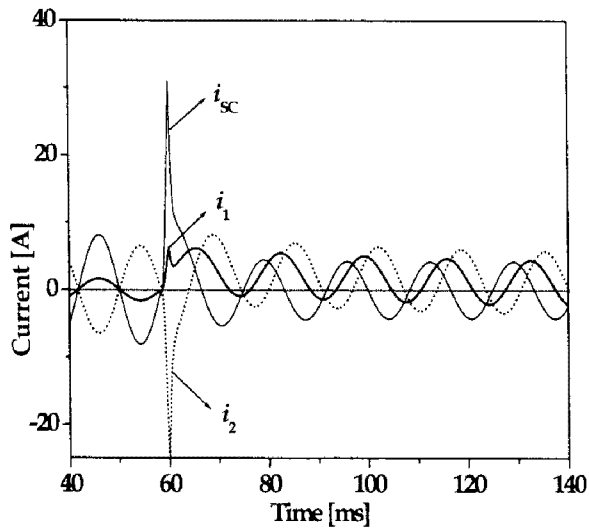


그림 4. 두 코일을 포함한 초전도 소자의 전류파형.
Fig. 4. Current waveforms of HTSC element and two coils. ($L_1/L_2 = 18.3$)

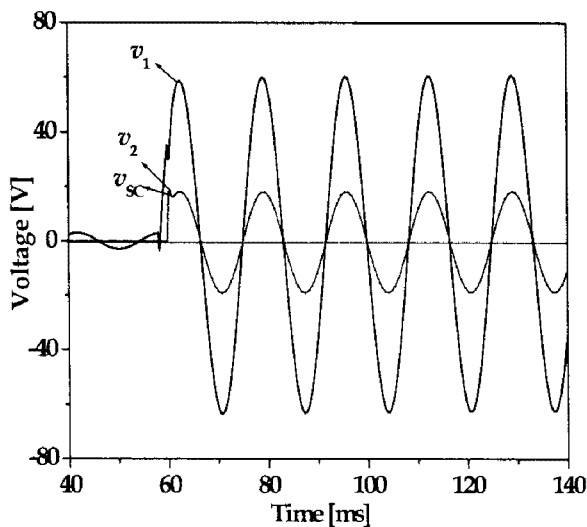


그림 5. 두 코일을 포함한 초전도 소자의 전압파형.
Fig. 5. Voltage waveforms of HTSC element and two coils. ($L_1/L_2 = 18.3$)

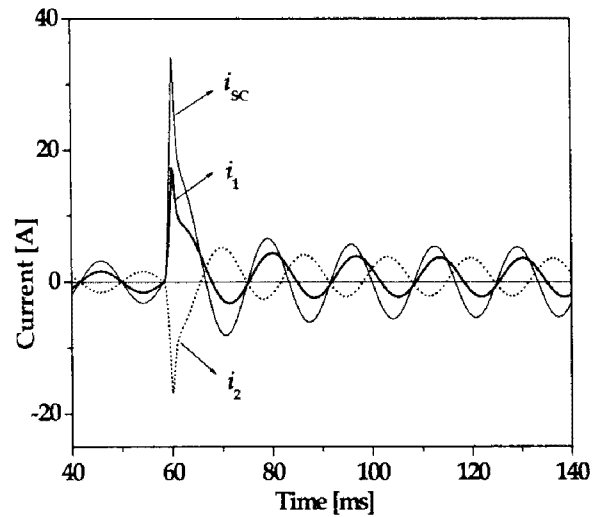


그림 6. 두 코일을 포함한 초전도 소자의 전류파형.
Fig. 6. Current waveforms of HTSC element and two coils. ($L_1/L_2 = 1$)

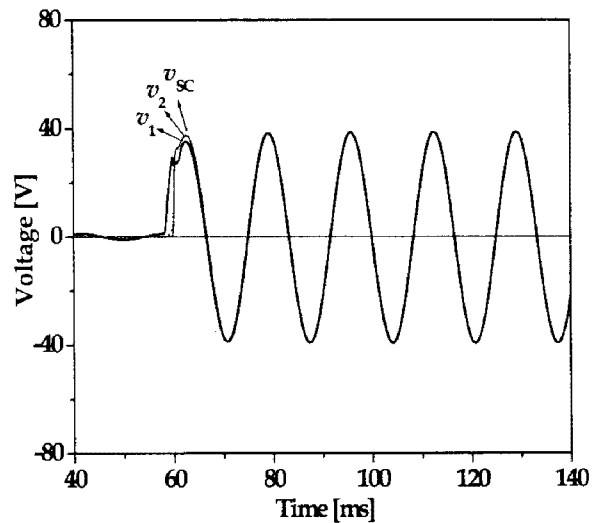


그림 7. 두 코일을 포함한 초전도 소자의 전압파형.
Fig. 7. Voltage waveforms of HTSC element and two coils. ($L_1/L_2 = 1$)

3. 결론

본 논문에서는 저자가 제안한 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였으며 등가회로부터 분석한 결과와 일치된 결과를 확인할 수 있었다.

향후 제한기 사고전류제한 시뮬레이션을 통해 다양한 설계조건에 따른 사고전류제한특성을 비교 분석하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-T_c superconducting fault current limiter using a series resonance", *Cryogenics*, vol. 44, pp. 249-254, April 2004.
- [2] 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", *Phys. C*, vol. 416, pp. 34-42, November 2004.
- [3] Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi, Seokcheol Ko, Hyeong-Gon Kang, and Byoung-Sung 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.
- [4] S. H. Lim, "Operational Characteristics of Flux-Lock Type SFCL with Series Connection of Two Coils", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 1895-1898, June 2007.