직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 전류제한 및 회복특성 분석

(Analysis on Current Limiting and Recovery Characteristics of a SFCL using Magnetic Coupling of Two Coils with Series Connection)

임성훈 · 김진석 · 안재민 · 문종필 · 김재철
(Sung-Hun Lim · Jin-Seok Kim · Jae-Min Ahn · Jong-Fil Moon · Jae-Chul Kim)
숭실대학교 전기공학부

Abstract

The superconducting fault current limiter (SFCL) using magnetic coupling of two coils with series connection, which was suggested by us, has the merit to increase the operational current and the limiting impedance of the SFCL through the adjustment of the inductance ratio and the winding direction of two coils. In addition, the recovery characteristics of the SFCL is affected by the winding direction of two coils as well as two coils' inductance ratio.

In this paper, the fault current limiting and recovery characteristics of a SFCL using magnetic coupling of two coils with series connection were analyzed. Through the analysis based on the experimental results, the recovery characteristics and the current limiting characteristics of the SFCL were confirmed to be improved more in case of the additive polarity winding.

1. 서 론

저항형 초전도 전류제한기를 계통에 적용하기 위해서는 용량증대에 따른 단위초전도 소자들의 직·병렬 연결이 필수적이다. 이는 제한기가격을 상승시킬 뿐 아니라 퀜치발생시 단위초전도 소자들의 불균일한 전력부담은 용량증대에 커다란 장애가 되어 왔다. 또한, 제한기 동작전류와 임피던스 조절이 단위초전도 소자의 특성과 개수에 의해서만 이루어지기 때문에 설계에 따른 융통성이 제한적이었다 [1-2].

이와 같이 저항형 초전도 전류제한기가 갖는 여러 가지 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기가 제한되어 개발되어 왔다. 그 중에서도 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔으며, 대표적인 예로 변압기형 초전도 전류제한기와 자속구속형 초전도 전류제한기를 들 수 있다 [3-7].

이와 더불어 본 저자는 두 코일이 직렬연결된 자속구속형 초전도 전류제한기를 제안된 바 있으며, 지금까지 연구되어 온 두 코일이 병렬연결된 자속구속형 초전도 전류제한기와 동일한 동작원리에 의해 사고전류제한이 이루어지며 제한기 동작전류와 임피던스크기를 두 코일의 인덕턴스 비와 결선방향에 의해 조절할 수 있음을 보고한 바 있다 [8-10].

본 논문에서는 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 자속구속형 초전도 전류제한기의 전류제한 특성을 포함하여 회복특성을 분석하였다. 분석을 위해 두 코일의 결선방향에 따른 특성을 비교하였으며 전류제한과 회복측면에서 유리한 결선방향을 제시하였다.

2. 본 론

2.1. 구조 및 동작원리

직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 구조는 크게 자기결합된 두 코일과 초전도 소자로 구성되며 그림 1과 같이 두 코일은 하나의 철심을 매개로 직렬연결되며, 초전도 소자는 두 코일중 하나와 병렬로 연결된 구조를 갖는다.

제한기 동작은 크게 사고전과 사고후로 나눌

수 있으며, 사고전에는 초전도 소자는 초전도 상태에 있기 때문에 영저항값을 유지하고 있으며 각 코일에 흐르는 전류에 의해 발생되는 철심내부의 자속은 서로 상쇄되기 때문에 두 코일에는 영전압이 유기되며 이로 인해 제한기 전체전압도 영전압을 유지하게 된다.

사고가 발생할 경우, 초전도소자에 흐르는 전류가 임계값을 넘어 상전도로 전이되어 저항이 발생됨과 동시에 초전도 소자에 전압이 유기되며, 이로 인해 각 코일에 전압이 유도되어 제한기 임피던스가 발생됨으로서 사고전류가 제한된다.

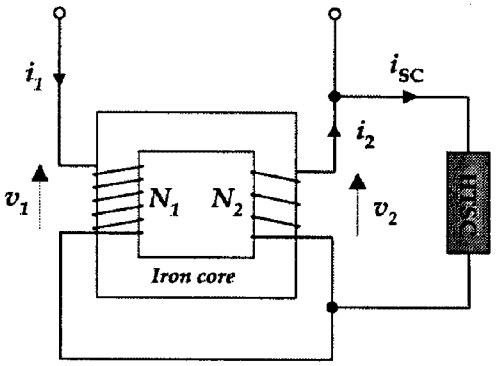

그림 1. 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 구조.
Fig. 1. Structure of a SFCL using magnetic coupling of two coils with series connection.

2.2. 실험장치 구성

전원과 부하를 연결하여 구성된 모의단락실험 구성도를 그림 2에 나타내었다. 단락사고 모의는 SW1을 투입한 후 SW2을 주어진 사고주기동안 투입하여 실시하였으며, 다시 SW2을 일정주기동안 개방시켜 두 코일과 초전도 소자에에 흐르는 전류와 유기전압을 측정하여 전류제한과 회복특성을 분석하였다.

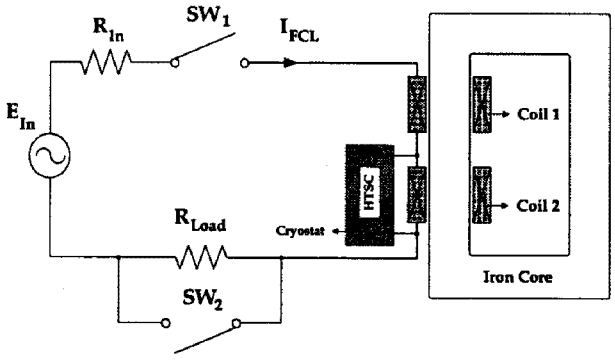

그림 2. 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 실험회로 구성도.
Fig. 2. Experimental circuit of a SFCL using magnetic coupling of two coils with series connection.

2.3. 결과 및 고찰

그림 3은 두 코일을 감극결선한 경우 전류제한과 회복특성을 보여준다. 그림 1의 구조에서 보는 바와 같이 초전도소자에 유기되는 전압은 코일 2에 유기되는 전압과 같게 나타나며 코일 1에 유기되는 전압과 반전되는 것을 볼 수 있다. 또한, 초전도 소자에 흐르는 전류는 코일 1, 2에 흐르는 전류에 반전되는 것을 볼 수 있다. 고장이 제거된 경우 초전도 소자가 초전도 상태로 회복되기까지 3.5주기의 시간이 걸리는 것을 볼 수 있으며 이로 인해 각 코일에 유기전압도 3.5주기의 시간뒤에 영전압이 되는 것을 관찰할 수 있다.

두 코일을 가극결선한 경우(그림 4)에는 초전도 소자에 유기되는 전압은 코일 2에 유기되는 전압과 동일하게 나타나나 감극결선한 경우와는 달리 코일 1에 유기되는 전압과 동상으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 초전도 소자에 흐르는 전류는 코일 1에 흐르는 전류와 동상으로 나타나나 코일 2에 흐르는 전류와는 반전되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한, 고장이 제거된 후 초전도 소자가 초전도 상태로 회복되기까지는 1.5주기시간이 걸리는 것을 볼 수 있으며 감극결선한 경우에 비해 짧게 나타나는 것을 볼 수 있다.

제한기 전류에 해당되는 코일 1에 흐르는 전류는 감극결선한 경우에 비해 가극결선한 경우가 더욱 크게 제한되어 나타나는 것을 그림 3과 4에서 비교분석할 수 있다.

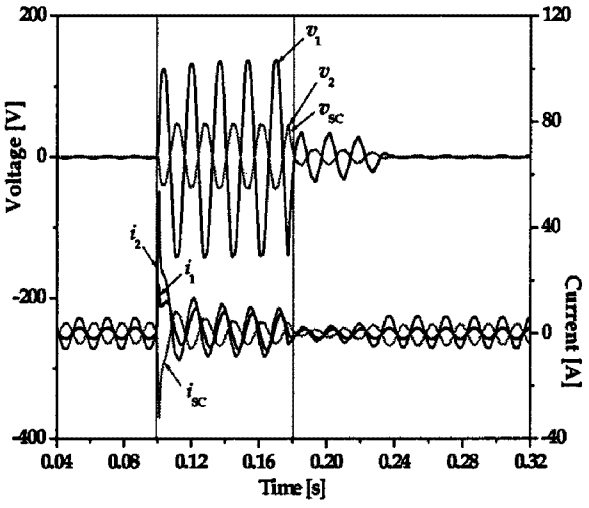

그림 3. 감극결선한 경우 전류제한 및 회복특성.
Fig. 3. Fault current limiting and recovery characteristics of a SFCL in case of the subtractive polarity winding.

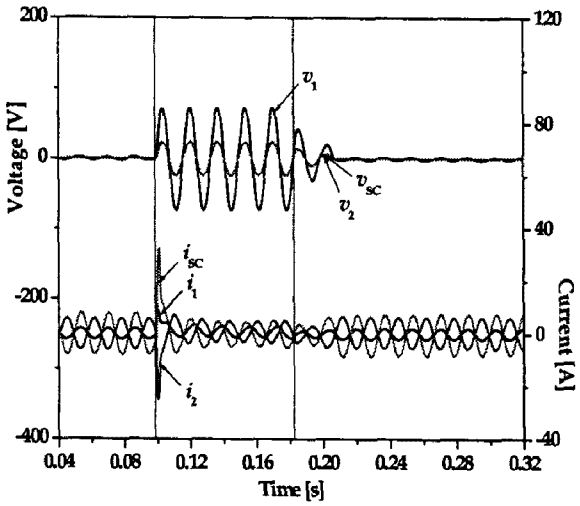

그림 4. 가극결선한 경우 전류제한 및 회복특성.
Fig. 4. Fault current limiting and recovery characteristics of a SFCL in case of the additive polarity winding.

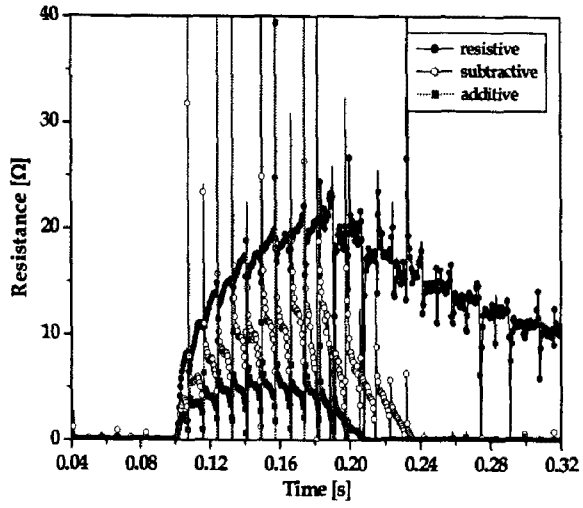

그림 5. 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 결선방향에 따른 초전도소자의 저항발생곡선.
Fig. 5. Resistance curves of HTSC element according to two coils' winding direction in a SFCL using magnetic coupling of two coils with series connection.

그림 5는 두 코일의 결선방향에 따른 제한기를 구성하는 초전도 소자의 사고발생과 제거에 따른 저항발생곡선을 보여준다. 비교를 위해 초전도 소자에 의해서만 전류제한동작을 할 경우의 저항발생곡선을 함께 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 초전도 소자만에 의해 동작하는 경우에는 사고제거후 초전도 상태로 회복되기까지 10주기가 지나더라도 회복되지 않는 것을 확인할 수 있으며, 가극결선한 경우가 감극결선한 경우보다 회복이 보다 빠르게 진행되는 것을 비교할 수 있다.

위의 분석으로부터 가극결선한 경우가 감극결선한 경우보다 제한기 전류제한측면과 제한기 회복측면에서 보다 유리함을 분석할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 자속구속형 초전도 전류제한기의 전류제한 특성을 포함하여 회복특성을 분석하였다. 분석으로부터 제한기 전류제한과 회복측면에서 가극결선한 경우가 감극결선한 경우보다 우수한 특성을 보여주는 것을 비교 분석할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] B. Gronoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies, H.-W. Neumueller, E. Baltzer, and S. Fischer, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO films - 100 kVA Functional Model," IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 656-659, June 1999.

[2] H. Kramers, W. Schmidt, B. Utz, and H. Neumuller, "Switching behavior of YBCO thin films conductors in resistive fault current limiter," IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 13, no. 2, pp. 2044-2047, June 2003.

[3] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-TC superconducting fault current limiter using a series resonance," Cryogenics, vol. 44, pp. 249-254, April 2004.

[4] 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.

[5] S. H. Lim, H. S. Choi, D. C. Chung, S. C. Ko, and B. S. Han, "Impedance Variation of a Flux-Lock Type SFCL Dependent on Winding Direction Between Coil 1 and Coil 2," IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, pp. 2039-2042, June 2005.

[6] S. H. Lim, H. S. Choi, D. C. Chung, Y. H. Jeong, Y. H. Han, T. H. Sung, and B. S. Han, "Fault Current Limiting Characteristics of Resistive Type SFCL Using a Transformer," IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, pp. 2055-2058, June 2005.

[7] H. Yamaguchi, T. Kataoka, K. Yaguchi, S. Fujita, K. Yoshikawa, and K. Kaiho, "Characteristics Analaysis of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14, no. 2, pp. 815-818, June 2004.

[8] 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.

[9] S. H. Lim, "Operational Characteristics of Flux-Lock Type SFCL With Series Conncetion of Two Coils," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, pp. 1895-1898, June 2007.

[10] S. H. Lim, "Comparative study on current limiting characteristics of flux-lock type SFCL with series or parallel connection of two coils," Phys. C, vol. 468, pp. 2076-2080, Sept. 2008.