

병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 전류제한 및 전압강하 보상 특성 분석

Analysis on Current Limiting and Voltage Sag Compensating Characteristics of a SFCL using Magnetic Coupling of Parallel Connected Two Coils

임성훈^{1,a}
(Sung-Hun Lim^{1,a})

Abstract

The superconducting fault current limiter (SFCL) plays a role in compensating the voltage sag of the sound feeder adjacent to the fault feeder as well as the fault current limiting operation of the fault feeder. Especially, the SFCL using magnetic coupling of two coils with parallel connection has different voltage sag compensating and current limiting characteristics due to the winding direction and the inductance ratio of two coils. In this paper, the current limiting and the voltage sag compensating characteristics of a SFCL using magnetic coupling of parallel connected two coils were analyzed. Through the analysis on the experimental results considering the winding direction of two coils, the SFCL designed with the additive polarity winding was shown to have the higher limited fault current than the SFCL designed with the subtractive polarity winding. In addition, it could be confirmed that the higher fault current limitation of the SFCL could be contributed to the higher load voltage sag compensation.

Key Words : Superconducting fault current limiter (SFCL), Magnetic coupling, Voltage sag compensating and current limiting characteristics, Winding direction

1. 서론

전력수요의 증가에 따라 발전설비의 증가와 계통에 관련된 전력설비의 용량증대를 포함한 단락전류의 증가로 변전소에 설치된 차단기의 차단용량이 초과되는 개수가 증가되고 있어 교체의 필요성과 함께 계통에 관련된 보호기에 심각한 부담을 주고 있다. 이를 해결하기 위한 대안으로 초전도 전류제한기가 가장 이상적인 요구조건에 근접한 특성을 보유하고 있다고 평가됨에 따라 고장전류 저감을 위한 신개념의 대안으로 주목받아 실제 계통에 적용하고자 하는 노력이 진행되고 있다[1,2].

이에 발맞추어, 실제 적용을 위한 초전도전류 제한기를 개발하기 위해 초전도 전류제한기를 구성하는 초전도소자의 전력부담을 감소시키기 위한 연구들이 진행되어 왔으며 그 중에서도 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기 모델들이 제안되어 왔다[3-6]. 제안된 모델중에서 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기는 고장발생시 두 코일의 자기적인 결합에 의해 두 코일에서 발생하는 자속이 상쇄되지 않게 되어 고장전류를 제한하게 되며, 고장발생시 제한기의 전류제한 특성이 두 코일의 결선방향과 두 코일의 인덕턴스 비에 의존하는 특징을 가지고 있다[5,6]. 이와 같은 특징은 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류 제한기의 임피던스와 동작전류를 두 코일의 결선방향과 인덕턴스비를 조절하여 설정할 수 있어 제한기를 구성하는 초전도소자의 부담을 감소시킬 수 있게 된다[5,6].

1. 숭실대학교 전기공학부
(서울시 동작구 상도5동 1-1)

a. Corresponding Author : superlsh73@ssu.ac.kr

접수일자 : 2009. 11. 23

1차 심사 : 2010. 1. 13

심사완료 : 2010. 1. 20

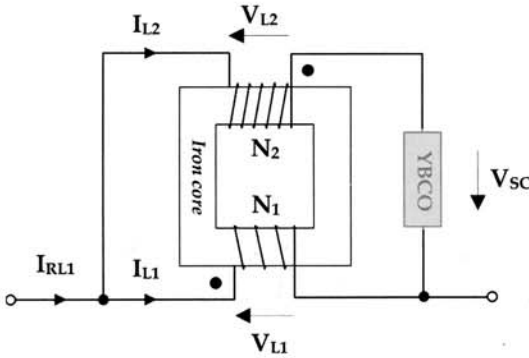


그림 1. 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기 구조.

Fig. 1. Schematic structure of a SFCL using magnetic coupling of parallel connected two coils.

본 논문에서는 이와 같은 특징을 가진 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 전력계통 적용에 따른 영향을 모의실험을 통해 분석하였다. 이를 위해 모의계통선로를 구성하였으며, 피더단에 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기를 적용시 제한기를 구성하는 두 코일의 권선방향에 따른 고장전류제한 및 부하전압강하 보상특성을 분석하였다. 분석을 통해 고장전류제한율과 부하전압강하율의 변화를 비교 분석하였다.

2. 실험장치 구성

그림 1은 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 구조를 보여주며, 구성요소로서 두 코일이 4:1의 권선비로 철심을 매개로 병렬로 결선되도록 제작하였으며, 초전도 전류제한소자는 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO)고온초전도 박막을 사용하였다. 보다 자세한 제작공정은 참고문헌에 기술된 것과 같다[5,6].

그림 2는 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 고장전류 제한특성을 모의하기 위한 실험장치 구성을 보여준다. 실험장치를 구성하는 전원 및 선로, 부하의 임피던스를 표 1에 나타내었으며, 단락사고를 모의하기 위해 SW_1 을 투입한 후 SW_2 를 주어진 고장주기동안 투입하여 단락을 모의하였으며, 고장시 선로를 포함한 두 코일, 초전도 소자에 흐르는 전류와 유기전압을 CT, PT를 통해 측정하여 분석하였다.

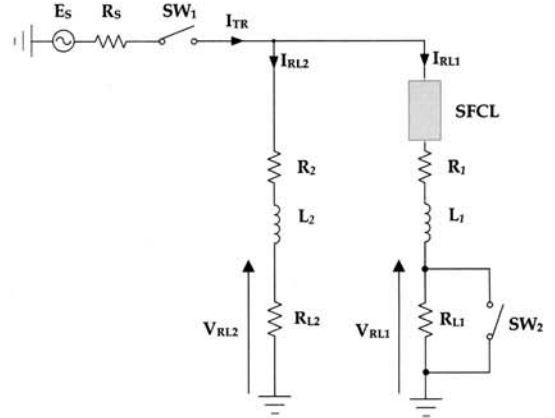


그림 2. 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 모의실험 구성도.

Fig. 2. Experimental circuit of a SFCL using magnetic coupling of parallel connected two coils.

표 1. 초전도 전류제한기를 포함한 전원 및 선로, 부하 사양.

Table 1. Specification of source, line and load impedances including SFCL.

구성요소	파라미터	값	단위
전원	전원저항	R_S	1 Ω
	선로저항	$R_1=R_2$	0.108 Ω
선로	선로리액턴스	$L_1=L_2$	2.6 mH
	부하저항 1	R_{L1}	51.5 Ω
부하	부하저항 2	R_{L2}	10.3 Ω
	코일 1 권선수	N_1	60 Turns
초전도 전류제한기	코일 2 권선수	N_2	15 Turns
	초전도소자임계전류	I_C	18 A

3. 결과 및 고찰

그림 3은 초전도전류제한기가 설치되지 않은 모의실험계통에 고장발생시 각 피더전류(I_{RL1} , I_{RL2})와 부하전압(V_{RL1} , V_{RL2})을 보여준다. 고장발생동안 고장난 피더에서 고장전류 증가와 건전 피더의 부하전압이 저하되는 것을 관찰할 수 있다. 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기를 설치할 경우 두 코일의 결선방향에 따른 고장전류 제한 및 건전상 부하전압 보상특성을 그림 4와 5에 각각 도시하였다.

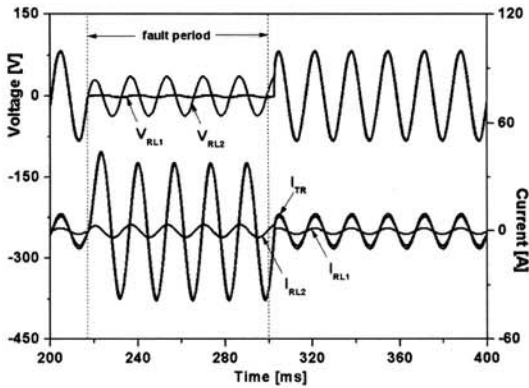


그림 3. 초전도전류제한기 미설치시 부하전압 및 고장전류파형.

Fig. 3. Load voltage and fault current waveforms in a system without SFCL.

가극결선한 경우, 코일 1의 전류(I_{L1})가 반전되어 흐르는 것을 확인할 수 있으며, 고장발생 초기 고장전류의 피크(I_{RL1})가 감극결선한 경우보다 작게 발생하는 것을 그림 4에서 비교할 수 있다. 이는 동일한 설계조건에서 가극결선한 경우, 제한기 동작전류가 감극결선한 경우보다 작게 발생하는 기존의 연구결과와 일치한다[6]. 고장발생동안 부하전압에서는 건전상 부하전압(V_{RL2})이 보상되어 고장전의 전압을 유지하고 있는 것을 그림 5에서 확인할 수 있다. 특히, 가극결선한 경우에는 건전피더의 부하전압이 고장발생과 동시에 고장전의 전압크기로 보상이 되는 반면, 감극결선한 경우에는 고장이 발생되고 1주기가 지난 후에 고장전의 전압크기로 보상이 되는 것을 볼 수 있다.

각 코일과 초전도 소자에 유기되는 전압에서는 초전도 소자에 유기되는 전압(V_{SC})이 가극결선한 경우가 감극결선한 경우보다 작게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 고장제거시 초전도전류제한기의 회복특성에서도 가극결선한 경우에 회복시간이 보다 짧게 되는 것을 그림 5에서 비교할 수 있다.

그림 6은 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 결선방향에 따른 고장전류제한률(ΔI_{RL1})과 건전피더의 부하전압의 변동률(ΔV_{RL2})을 보여준다. 고장전류의 제한률과 부하전압의 변동률은 식 (1)과 (2)와 같이 계산하여 도시하였다.

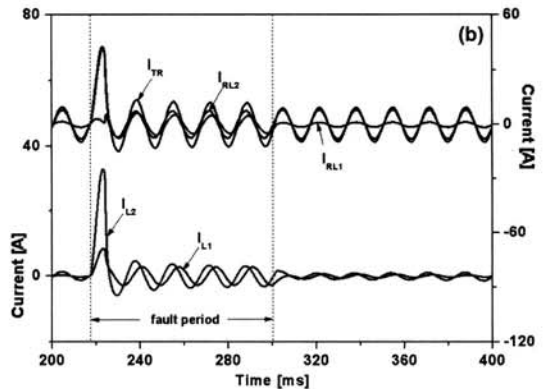
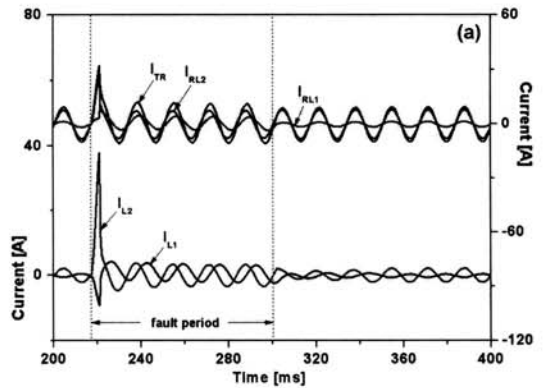


그림 4. 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 전류제한 특성. (a) 가극결선시 (b) 감극결선시

Fig. 4. Fault current limiting characteristics of a SFCL using magnetic coupling of parallel connected two coils. (a) additive polarity winding (b) subtractive polarity winding

$$\Delta I_{RL1} = (I_{RL1}^{with} / I_{RL1}^{without}) \cdot 100 \quad (1)$$

$$\Delta V_{RL2} = (V_{RL2}^{with} - V_{RL2}^{without} / V_{RL2}^{without}) \cdot 100 \quad (2)$$

앞의 전류제한 및 전압강하 보상특성에서 분석한 바와 같이 가극결선한 경우에 고장전류제한과 부하전압보상효과가 보다 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 고장발생시 제한기의 임피던스 크기가 클수록 고장전류제한과 건전피더의 부하전압 보상에 보다 크게 기여하는 것을 확인할 수 있었다.

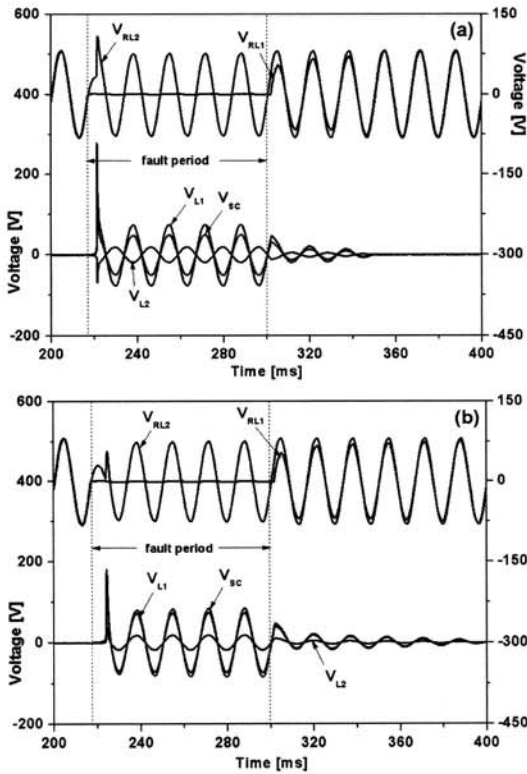


그림 5. 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 전압강하 보상특성. (a) 가극결선시 (b) 감극결선시.

Fig. 5. Voltage sag compensating characteristics of a SFCL using magnetic coupling of parallel connected two coils. (a) additive polarity winding (b) subtractive polarity winding

4. 결론

본 논문에서는 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 계통 적용에 따른 영향을 모의실험을 통해 분석하였다. 분석을 위해 초전도전류제한기를 모의계통선로의 피더앞단에 설치하였으며, 피더단에 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기를 적용시 제한기를 구성하는 두 코일의 권선방향에 따른 고장전류제한 및 부하전압강하 보상특성을 분석하였다. 분석을 통해 가극결선한 경우에 고장전류제한율과 부하전압강하율의 변화가 감극결선한 경우보다 보다 향상됨을 비교할 수 있었다.

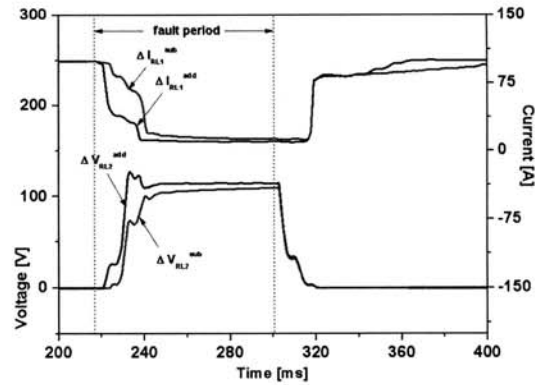


그림 6. 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 부하전압강하율 및 전류제한율을 변화.

Fig. 6. Variation of load voltage sag and current limiting rates of a SFCL using magnetic coupling of parallel connected two coils.

감사의 글

본 논문은 2009년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호 : 2009-0075355)로서 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, T. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, "Toward the superconducting fault current limiter", IEEE Trans. On Power Del., Vol. 6, No. 2, p. 801, 1991.
- [2] W. Paul and M. Chen, "Superconducting control for surge currents", IEEE Spectrum, Vol. 35, p. 49, 1998.
- [3] 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. Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2, p. 2039, 2005.
- [4] S.-H. Lim, "Operational characteristics of a flux-lock type SFCL with series connection of two coils", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, p. 1895, 2007.

- [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, p. 34, 2004.
- [6] S.-H. Lim, J.-F. Moon, and J.-C. Kim, "Current limiting and recovery characteristics of SFCLs using magnetic coupling of two coils", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 19, No. 3, p. 1900, 2009.