

피크전류제한 기능을 갖는 초전도한류기의 전류제한 특성분석

한태희¹, 임성훈^{2,a}

¹ 중원대학교 에너지자원공학부

² 숭실대학교 전기공학부

Analysis on Current Limiting Characteristics of a Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) with a Peak Current Limiting Function

Tae-Hee Han¹ and Sung-Hun Lim^{2,a}

¹ Department of Energy Resources Engineering, Jungwon University, Goesan 367-805, Korea

² Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received November 21, 2010; Revised December 16, 2010; Accepted December 20, 2010)

Abstract: The superconducting fault current limiter (SFCL) with a peak current limiting function according to the initial fault current with the different amplitudes was suggested. The proposed SFCL, which consists of two limiting components, causes only the first superconducting element among two limiting components to be quenched in case that the initial fault current with the lower peak amplitude happens. On the other hand, the initial fault current with the higher peak amplitude makes both the superconducting elements of two limiting components to be quenched, which contributes to the peak current limiting function of the SFCL. To confirm the fault current limiting operation of the proposed SFCL, the short-circuit tests of the SFCL according to the fault angle were carried out and its effective fault current limiting operations could be discussed.

Keywords: Superconducting fault current limiter (SFCL), Peak current limiting function, Fault angle, Fault current limiting operation

1. 서론

산업발전에 따른 전력수요가 지속적으로 증가하면서 전력수요지가 도심에 집중되고 있으며, 전력수요의 지속적인 요구와 전원설비의 확장은 전력시스템의 지속적인 고장전류증가를 야기시켜 왔으며, 이에 따른 관련설비들의 보호를 위한 차단기의 용량증대가 불가피하게 되었다. 이와 같은 고장전류 증가문제에 대응하기 위한 방안으로 모션분리를 수행하거나 대용량 차단기로의 교체, 직렬리액터 채용 또는 변압기

누설임피던스를 증가시키는 방안들을 적용하여 왔다 [1,2]. 하지만, 인접선로에 대한 영향과 같은 계통의 안정도 저하와 대용량 기기로의 교체에 따른 비용상승, 평상시 손실발생 등의 문제점을 안고 있다. 이와 같은 계통의 고장전류 증가문제를 보다 효과적으로 해결할 수 있는 대안으로 초전도 한류기를 도입하고자 하는 연구들이 지속적으로 진행되어 왔으며, 초전도 한류기를 도입할 경우 기존 차단기 용량증대 효과와 함께 기존의 방안들이 갖는 문제점들을 해결할 수 있어 다양한 형태의 초전도한류기 개발과 함께 계통 적용을 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [1-6]. 현재까지 개발된 초전도한류기는 일반적으로 고장이

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

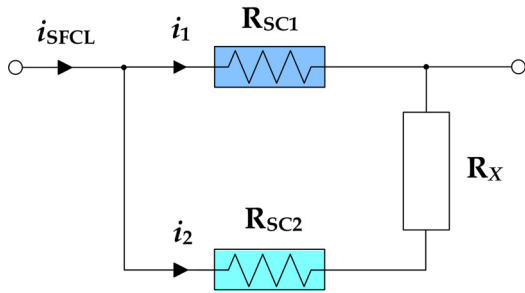


Fig. 1. Schematic configuration of SFCL with peak current limiting function.

발생할 경우 고장전류 감지와 동시에 고장전류 제한 동작이 동시에 이루어지는 일체형이기 때문에 신속한 전류제한동작이 가능한 장점을 가지고 있지만, 초전도한류기 자체가 고장전류를 모두 감당해야 되는 부담과 고장전류크기에 따른 임피던스조절이 용이하지 않는 단점이 있었다.

본 논문에서는 고장발생 초기 고장전류의 크기에 따라 피크전류제한 기능을 갖는 두 개의 제한요소로 구성된 초전도한류기를 제안하였다. 제안한 초전도한류기의 피크전류제한 동작분석을 위해 두 개의 제한요소를 구성하는 초전도소자들의 켄치여부에 따른 제한기 임피던스와 동작전류를 등가회로로부터 분석하여 비교하였으며, 모의단락 실험을 통해 제안한 초전도한류기의 유용성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 동작원리 및 동작전류

피크전류제한 기능을 갖는 두 개의 제한요소로 구성된 초전도한류기의 등가회로를 그림 1에 도시하였다. 그림 1에서 R_{SC1} 와 R_{SC2} , R_X 는 두 개의 제한요소를 구성하는 초전도소자의 저항과 삽입저항을 나타낸다. 기본동작원리는 첫번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 임계전류 (I_C)를 초과하는 고장전류 (i_{SFCL})가 발생하면 첫번째 제한요소를 구성하는 초전도소자 저항 (R_{SC1})이 발생하게 되며, 저항발생으로 전체 고장전류의 일부가 두 번째 제한요소로 분류되어 흐르게 된다. 이때, 두번째 제한요소로 분류되어 흐르는 전류 (i_2)의 값이 두번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 임계전류 (I_C)를 넘지 않을 경우 두번째

제한요소를 구성하는 초전도소자는 영저항을 유지하게 되며 전체고장전류 (i_{SFCL})는 R_{SC1} 과 R_X 에 의해 제한된다.

$$Z_{SFCL} = \frac{R_{SC1} \cdot (R_{SC2} + R_X)}{R_{SC1} + R_{SC2} + R_X} \quad (1)$$

$$I_P = \frac{R_{SC1} + R_X}{R_{SC1}} I_C \quad (2)$$

하지만, 고장발생 직후 초기고장전류의 피크가 크게 발생할 경우 두번째 제한요소의 도통전류 (i_2)가 두번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 임계전류 값 (I_C)을 초과하게 되며, 두번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 저항 (R_{SC2})이 추가로 발생함에 따라 R_X , R_{SC1} 를 포함한 R_{SC2} 에 의해 전체고장전류가 제한된다. 그림 1의 초전도한류기 등가회로로부터 한류기 임피던스는 식 (1)과 같이 유도할 수 있으며, 고장전류의 초기피크크기가 클 경우 피크전류 제한동작이 이루어지는 동작전류 (I_P)는 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

2.2 등가회로 분석

그림 2는 첫번째 제한요소에서 켄치가 발생하고 두번째 제한요소에서는 켄치가 발생하지 않았을 경우와 고장발생후 초기고장전류가 보다 크게 상승하여 첫번째 제한요소에서 켄치가 발생한 후 두번째 제한요소에서도 임계전류값을 넘게 되어 켄치가 발생하여 초전도소자의 저항 (R_{SC2})이 10 Ω 값이 되었을 때, 첫번째 제한요소의 초전도소자 저항 (R_{SC1})값에 따른 초전도한류기 임피던스 변화를 보여준다. 이때, 삽입저항은 1, 3, 5, 7, 9 Ω일 경우에 대해 초전도한류기 임피던스 변화를 도시하였다.

첫번째 제한요소에서 켄치가 발생하고 두번째 제한요소에서는 켄치가 발생하지 않았을 경우에는 삽입저항 (R_X)값이 증가할수록 한류기 임피던스가 상승하지만 일정값부터는 더 이상 큰 증가없이 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 고장전류가 보다 크게 상승하여 첫번째 제한요소에서 켄치가 발생한 후 두번째 제한요소에서도 임계전류값을 넘게 되어 10 Ω의 초전도소자 저항이 발생한 경우에는 첫번째 제한요소에서만 켄치가 발생한 경우보다 한류기 임피던스가 증가하는 것을 첫번째 제한요소에서만 켄치가 발생한 경

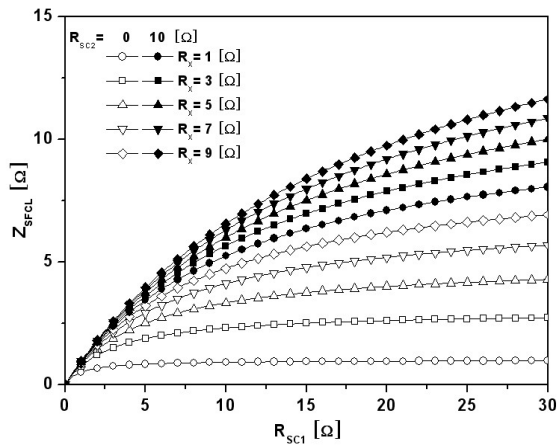


Fig. 2. Impedance variation of SFCL due to resistance amplitude of the first limiting component with each inserting resistance.

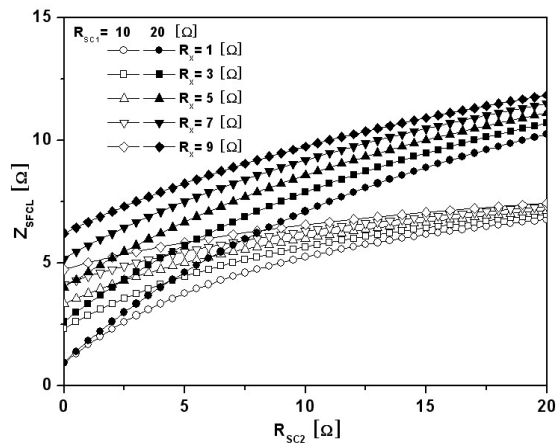


Fig. 3. Impedance variation of SFCL due to resistance amplitude of the second limiting component with each inserting resistance.

우와 비교하여 확인할 수 있다.

그림 3은 첫번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 퀀치발생으로 초전도소자의 저항이 각각 10 Ω, 20 Ω일 경우 두번째 제한요소를 구성하는 삽입 저항과 초전도소자의 저항크기에 따른 한류기 임피던스 변화를 보여주며, 두번째 제한요소의 초전도소자저항 (R_{SC2})이 증가함에 따라 한류기 임피던스가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 두번째 제한요소를 구성하는 삽입저항과 초전도체의 저항이 증가함에 따라 한류기 임피던스 증가가 완만하게 이루어지며

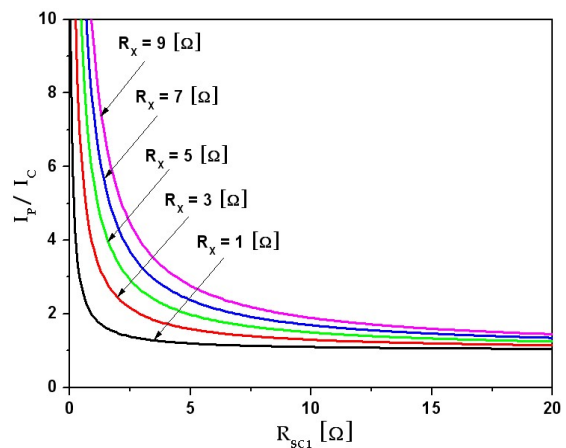


Fig. 4. Ratio between the peak current of the SFCL and the critical current of the second limiting component for peak current limiting function of the SFCL due to resistance amplitude of the first limiting component.

일정한 값으로 수렴되는 것을 분석할 수 있다. 특히, 첫번째 제한요소의 초전도소자 저항이 클수록 한류기 임피던스가 보다 증가하는 것을 확인할 수 있다.

초전도 한류기의 임피던스 변화 분석과 더불어 초전도한류기의 피크전류 제한이 이루어지는 피크전류 동작전류값의 변화를 분석하였다. 그림 4는 초전도한류기의 첫번째 제한요소의 초전도소자에서 퀀치가 발생한 후 두번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 퀀치발생 직전 첫번째 제한요소의 초전도소자 저항크기에 따른 한류기의 피크전류 제한 동작을 위한 동작전류변화를 식 (2)로부터 도식한 곡선을 보여준다. 그림 4에서 보는 것처럼 첫번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 저항이 증가함에 따라 한류기 피크전류 제한을 위한 동작전류가 감소되는 것을 볼 수 있으며, 반면에 두번째 제한요소를 구성하는 삽입저항이 증가함에 따라 한류기 피크전류 제한을 위한 동작전류가 증가하는 것을 분석할 수 있다.

2.3 실험장치 구성 및 방법

피크전류 제한기능을 갖는 초전도한류기의 전류제한 특성을 시험하기 위한 모의실험장치를 구성하였으며, 개략적인 구성도와 실험장치의 구성요소별 파라미터를 그림 5와 표 1에 나타내었다. 고장발생 직후

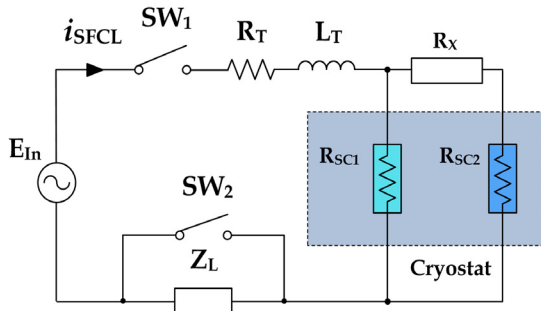
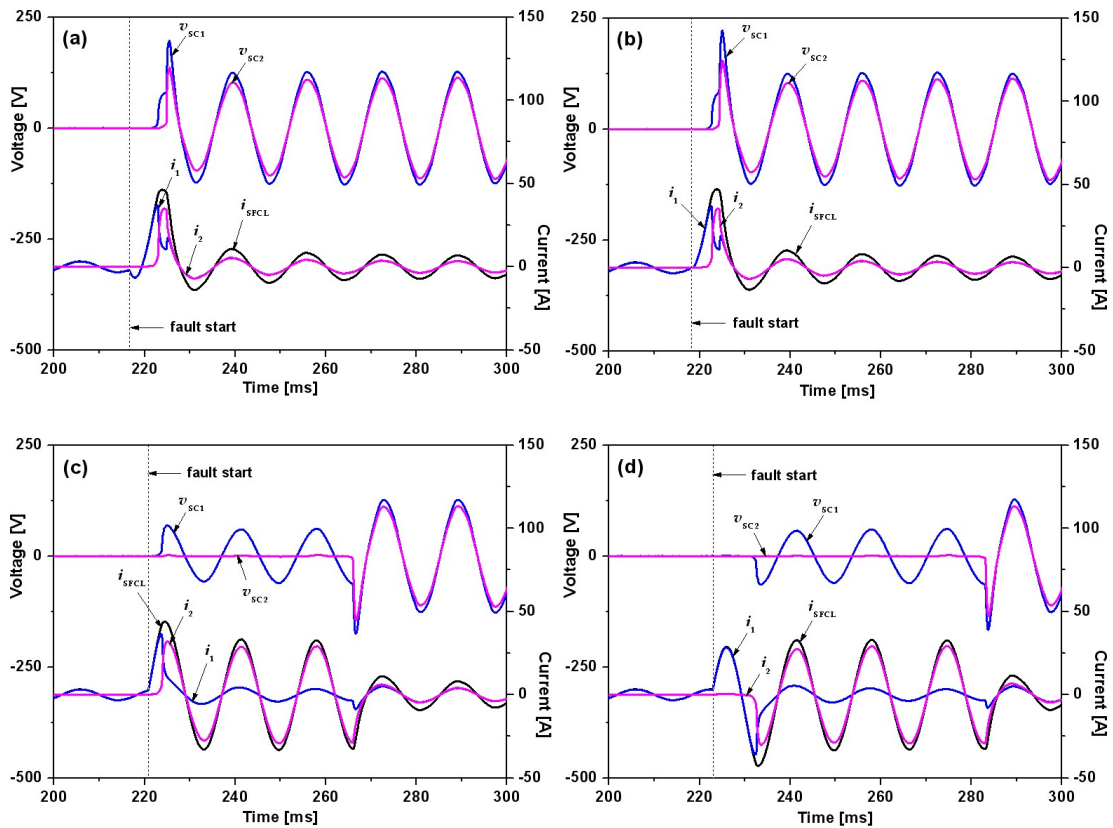


Fig. 5. Experimental circuit.

Table 1. Specification of experimental circuit with a SFCL with a peak current limiting function.

| Component | Parameter | | Value | Unit |
|-----------|----------------------|------------------|-------|----------|
| Line | Resistance | R_T | 0.124 | Ω |
| | Inductance | L_T | 1.033 | Ω |
| Load | Resistance | R_L | 41.2 | Ω |
| | Inductance | X_L | 1.885 | Ω |
| SFCL | Critical current | I_{C1}, I_{C2} | 20 | A |
| | Critical temperature | T_{C1}, T_{C2} | 92 | K |
| | Inserting resistance | R_x | 2.3 | Ω |

Fig. 6. Fault current limiting characteristics of the SFCL with a peak current limiting function according to the fault angles. (a) 0° . (b) 45° . (c) 90° . (d) 135° .

초기 고장전류의 크기에 영향을 주는 변수로 고장각에 따른 고장발생을 모의하였으며, 200 [V_{rms}] 전원전압 (E_m)을 인가한 후, 스위치 SW_1 을 투입한 후에 설정한 고장각에서 스위치 SW_2 를 투입하여 단락고장을 5주기동안 발생시켰으며, 다시 스위치 SW_2 를 개방함으로써 고장을 제거하였다.

3. 결과 및 고찰

구성한 단락모의장치를 이용하여 고장각에 따른 피크전류제한 동작을 갖는 초전도한류기의 전류제한특성을 분석하였으며, 그림 6은 0, 45, 90, 135도에서 고장발생시 각각의 제한요소를 구성하는 초전도 소자의

전압과 전류파형을 보여준다. 고장각이 0도, 45도일 경우에는 고장발생직후 두 개의 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 퀘치가 동시에 발생하는 것을 볼 수 있으며, 두 개의 제한요소에서 발생한 초전도소자들의 저항발생으로 두 개의 제한요소에 흐르는 전류가 비슷한 크기로 도통하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 고장기간동안 두번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 전압 (U_{SC2})은 첫 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 전압 (U_{SC1})보다 작게 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이는 삽입저항으로 인한 전압분배로 야기 되는 것으로 분석할 수 있다.

0도, 45도 고장각에서 고장이 발생할 경우와는 달리, 고장각이 90도일 경우에는 고장발생후 약 3주기 후에 두번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 퀘치가 발생하는 것을 그림 6(c)에서 관찰할 수 있다. 이는 고장각이 증가함에 따라 초기고장전류의 크기가 감소하게 되어 발생한 것으로, 고장발생 직후 두번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 임계전류를 초과하는 전류가 도통하였지만 부분적인 퀘치가 발생하여 작은 전압이 유기되어 회복과 퀘치를 반복하다가 축적된 열로 인해 고장발생후 3주기되는 시점에서 완전한 퀘치가 발생되어 첫번째 제한요소의 초전도소자의 전압과 유사한 크기의 전압이 유기되는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 전체고장전류 또한 크게 제한되는 것을 볼 수 있다. 또한, 고장각이 135도인 경우에는 고장발생후 4주기되는 시점에서 두번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 완전한 퀘치가 발생하는 것을 관찰할 수 있으며, 전체고장전류 또한 4주기시점부터 보다 크게 제한되는 것을 비교할 수 있다.

위에서 분석한 고장각에 따른 단락모의실험을 통해 두 개의 제한요소로 구성된 초전도한류기의 피크전류 제한 동작을 확인할 수 있었으며, 향후 보다 다양한 설계조건에 따른 피크전류제한 동작특성을 분석하고 이를 활용한 모의실험을 진행하고자 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 고장발생 초기 고장전류의 크기에 따라 피크전류제한 기능을 갖는 두 개의 제한요소로 구성된 초전도한류기의 임피던스와 피크전류 제한동작을 위한 동작전류를 등가회로로부터 분석하였고 이를 검증하기 위해 고장각에 따른 모의단락실험을 통해 피크전류제한 동작특성을 확인하였다. 향후 다양한 설계조건에서 모의단락실험을 통해 제한한 초전도한류기의 피크전류제한 동작특성을 분석함으로써 유용성을 분석하고자 한다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] H. Kado and M. Ichikawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **7**, 993 (1997).
- [2] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, U. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, *IEEE Trans. On Power Del.*, **6**, 801 (1991).
- [3] S.-H. Lim, H.-S. Choi, and B.-S. Han, *Physica C*, **416**, 34 (2004).
- [4] Sung-Hun Lim et al., *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **13**, 2056 (2003).
- [5] S.-H. Lim, H.-S. Choi, and B.-S. Han, *Cryogenics*, **44**, 249 (2004).
- [6] Sung-Hun Lim et al., *Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 1895 (2007).