

## E-I철심을 이용한 변압기형 초전도한류기의 권선 위치에 따른 전류제한 및 자화특성 분석

김보희, 최상재, 임성훈<sup>a</sup>

송실대학교 전기공학부

### Analysis on Current Limiting and Magnetizing Characteristics Due to Winding Locations of Superconducting Fault Current Limiter Using E-I Core

Bo-Hee Kim, Sang-Jae Choi, and Sung-Hun Lim<sup>a</sup>

School of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received September 5, 2016; Accepted September 19, 2016)

**Abstract:** This paper compared current limiting characteristics of superconducting fault current limiter (SFCL) using E-I core due to the location of windings. Since E-I core has three legs and two magnetic paths, the current limiting characteristics of SFCL were expected to be affected by the installation location of windings, either center leg or right/left leg. To analyze its characteristics, the electrical equivalent circuit of the SFCL were derived and the electromagnetic analysis for the SFCL with the designed structure were performed. From the short-circuit tests, the hysteresis curve and the voltage-current trajectory of the SFCL due to the installation location of windings were extracted and compared each other. The SFCL with windings in the center leg of E-I core was shown to be larger magnetizing inductance compared to the one with windings in the right or left leg of E-I, which was analyzed from the hysteresis curve. In addition, larger decreased fault current right after the fault occurrence in the SFCL with windings in the center leg of E-I core was confirmed than the SFCL with windings in the right or left leg of E-I.

**Keywords:** SFCL (superconducting fault current limiter), E-I core, Current limiting characteristics

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경

최근 전력계통은 대용량 전력설비의 증가와 IT산업

의 확대 등으로 인해 전력수요가 증가되고 있는 추세이다. 그러므로 보다 높은 품질의 전력공급이 요구되고 있다. 이에 따라 전력공급의 안정성과 고품질화를 위하여 계통운영의 개선이 필요한 실정이다. 또한 화석, 원자력 연료를 기반으로 운영되던 기존의 전력계통에서 최근에는 풍력, 태양광 등과 같은 신재생 분산전원 간의 연계가 점진적으로 늘어나고 있으므로 계통 간의 연계에 대한 필요성도 증대되고 있다. 하지만 계통 연계에 의하여 전력공급이 유연해질 수 있는 반면, 용량증가로 인한 고장이 발생할 시 단락전류가 증가되는 문제가 초래될 가능성이 있다. 각종 재해의

a. Corresponding author; [superlsh73@ssu.ac.kr](mailto:superlsh73@ssu.ac.kr)

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

원인으로 지속적으로 증대되는 전력계통에 고장이 발생하게 된다. 이처럼 전력계통에 큰 고장전류가 발생하여 열을 수반한 전자기력, 절연파괴 등이 일어나게 되고, 인접계통의 전압강하 및 수용가 측의 기기파손이 초래된다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 큰 고장전류를 차단기내력 이하로 감소시키거나 차단내력이 큰 차단기로 교체해야 하지만, 기술적인 측면이나 경제적인 측면에서 이는 현실적으로 어려운 상황이다. 본 논문에서 소개되는 초전도 전류제한기는 전력계통의 고장전류를 제한하기 위해 개발된 기술로서, 신속하게 고장전류를 제한 및 차단하고 자동으로 복구할 수 있다. 또한, 기존의 전력계통에 투입이 가능하며 모선을 분리하거나 대용량 차단기로 교환 및 신규 설비 증설 등의 복잡한 방법들이 요구되지 않는다. 실제 계통에 초전도 전류제한기를 적용함으로써 공급신뢰도의 향상, 계통 재구성, 전력기기의 수명연장, 고장도미노 원천 방지 등의 효과를 기대해볼 수 있다 [1-6].

## 1.2 연구의 목적 및 방법

초전도 한류기는 선로에 과도전류가 흐를 때, 초전도성을 이용하여 전류를 자동적으로 안전 수준으로 제한해 주는 새로운 개념의 전력기이다. 초전도체를 임계온도 (약 섭씨  $-186^{\circ}$ ) 이하로 냉각하면 저항이 0이 된다. 그러나 전류가 과도하게 흘러 임계전류를 넘으면 초전도성을 잃어 저항이 급속하게 발생하는데 이를 퀘칭 현상이라 한다. 초전도 전류제한기의 퀘칭은 초전도체에 임계전류 이상의 전류가 흘러 상전도체로 전이되는 현상이다. 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 한류기는 평상시 상쇄되었던 두 코일에서 발생하는 자속이 단락발생시 초전도 소자의 저항 발생으로 상쇄되지 않게 되어, 두 코일에 전압이 유기됨으로써 고장전류를 제한하며, 고장발생시 전류제한 동작이 이루어지는 동작전류와 제한 임피던스를 두 코일의 인덕턴스 비에 의해 조절할 수 있다. 초전도전류제한기(SFCL)는 전력계통내 적용할 경우 계통보호를 보다 향상시킬 수 있는 방안이며, 수초 이내에 사고전류를 제한할 수 있다. 하나의 자로를 갖는 기존의 C-C의 철심 대신에 E-I 형태의 철심을 이용한 설계를 진행하였다. E-I 철심은 세 개의 다리로 구성되어 있으며 두 개의 자속 경로를 갖는 특징이 있다. 본 논문에서는 모의실험을 통해 E-I 철심의 각 다리에 1, 2차 권선을 결선했을 시의 전류제한특성을 알아보았다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 구조 및 동작 원리

본 연구에서 사용한 E-I 철심은 E형과 I형의 철심이 결합된 형태로 인덕턴스 값을 높여주고 자속이 갑자기 포화되는 것을 방지해 준다. 또한 와전류 손실을 줄이기 위해 여러 장의 얇은 철판을 적층하여 만들어졌다. 부하가 연결되어 있는 1차 권선(primary winding)과 초전도 소자(HTSC element)가 연결되어 있는 2차 권선을 E-I 철심의 한쪽 다리에 자기적으로 결합시켜 그림 1과 같은 두 개의 자속경로를 갖는 구조를 만들었다. 정상운전 시 두 코일의 자속은 상쇄되어 없어져, 2차 권선의 초전도소자의 임피던스는 거의 0에 가깝다. 고장이 발생하게 되면 초전도소자에서 퀘칭에 의한 저항이 발생하여 자속이 상쇄되지 않게 되어 2차 권선에 전압이 유기되어 이로 인해 고장전류를 제한하게 된다.

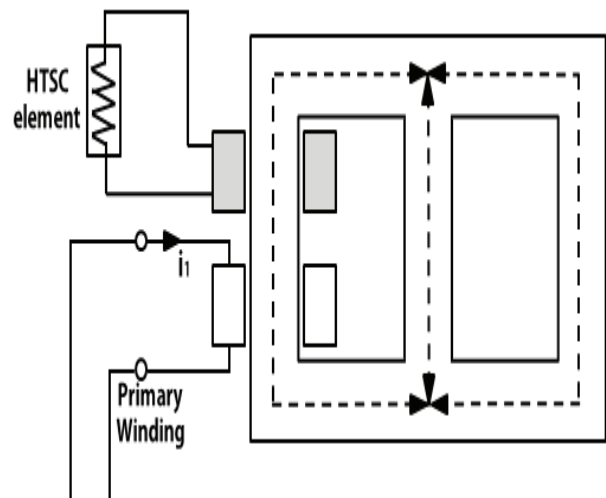
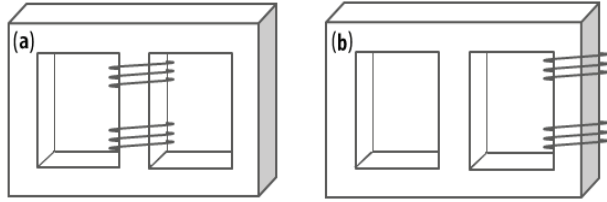


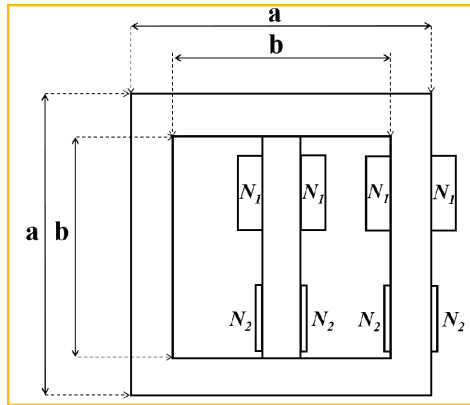
Fig. 1. Schematic configuration of SFCL using E-I core.

### 2.2 장치 구성 및 실험 방법

그림 2는 실험을 위해 E-I 철심에 1, 2차 권선을 결선한 구조를 나타낸다. 실험에 사용된 철심과 기타 재료의 사양은 그림 3과 표 1을 통해 확인할 수 있다.



**Fig. 2.** E-I core connected windings on each leg. (a) Middle leg of E-I core connected with primary and secondary windings and (b) right leg of E-I core connected with primary and secondary windings.



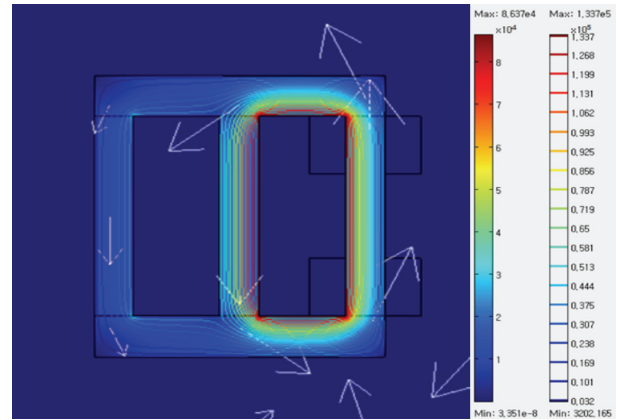
**Fig. 3.** Analysis model of E-I core.

**Table 1.** Parameters of analysis model.

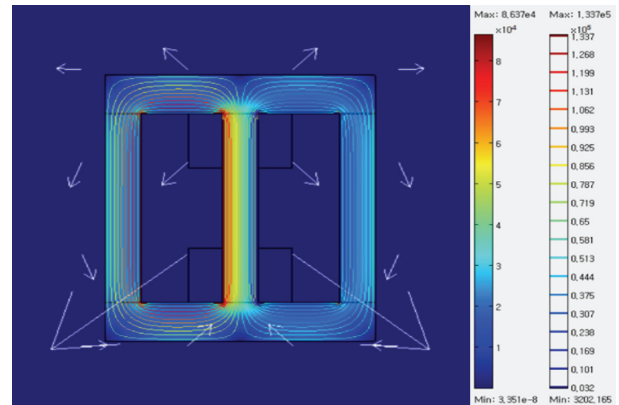
| Parameters | Mean                               | Value [Unit]          |
|------------|------------------------------------|-----------------------|
| $l_a$      | Total length of flux path (a)      | 845.8450 mm           |
| $l_b$      | Total length of flux path (b)      | 845.1172 mm           |
| $A_C$      | Cross section area of core         | 2,500 mm <sup>2</sup> |
| $T_{N1}$   | Turn number of coil 1              | 176 Turns             |
| $T_{N2}$   | Turn number of coil 2              | 66 Turns              |
| $A_W$      | Cross section area of coil         | 8 mm <sup>2</sup>     |
| $R_{N1}$   | Resistance of coil 1               | 2.1 Ω                 |
| $R_{N2}$   | Resistance of coil 2               | 0.5 Ω                 |
| $a$        | Length of a                        | 248 mm                |
| $b$        | Length of b                        | 152 mm                |
| $I_C$      | Critical current of superconductor | 21 A                  |

### 3. 결과 및 고찰

먼저 중간 철심, 우측 철심인 두 경우에 대해서 시



**Fig. 4.** Distribution of magnetic flux for right leg core.



**Fig. 5.** Distribution of magnetic flux for middle leg core.

물레이션 해석을 진행하였다. 그림 4와 그림 5는 각 경우에 대해 해석한 결과를 보여준다.

중간 철심에 권선연결 시에는 중간철심의 자속밀도가 클 것이라 예측할 수 있다. 이 때 양측 철심인 좌측 철심과 우측철심은 자로의 길이와 재질 모두 같기 때문에 각 철심의 릴럭턴스는 같을 것이며, 이에 각 철심에 링크된 자속밀도는 유사하게 나올 것이다. 반면, 우측 철심에 권선을 연결한 경우, 그림 4에서 볼 수 있드시, 좌측 철심으로 갈수록 자로의 길이가 길어짐에 따라 릴럭턴스가 증가하고 철심 자속 밀도는 낮아 질 것이다. 이는 이론에서 살펴본 수식 (1)과 수식 (2)를 증명한다.

$$X_{m_r} = \frac{2(n_1 n_2 + n_1^2) \omega A \mu}{3l_a + 2l_b} \times \frac{l_a + l_b}{l_a + 2l_b} \quad (1)$$

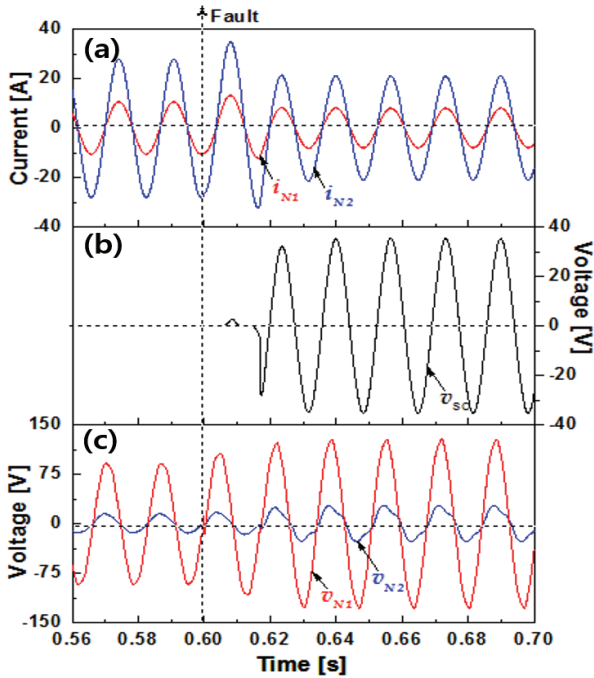


Fig. 6. Graphs of voltage and current for right leg. (a) Primary and secondary current, (b) applied voltage to HTSC, and (c) primary and secondary voltage.

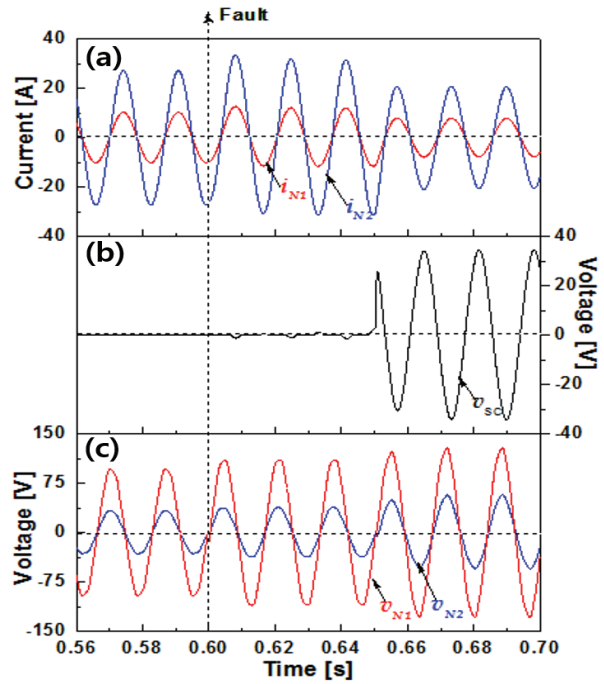


Fig. 7. Graphs of voltage and current for middle leg. (a) Primary and secondary current, (b) applied voltage to HTSC, and (c) primary and secondary voltage.

$$X_{m_m} = \frac{2(n_1 n_2 + n_1^2) \omega A \mu}{3l_a + 2l_b} \quad (2)$$

우리는 앞에서 기재하였던 실험방법과 장치구성을 이용하여 모의실험을 진행하였다 [7].

그림 6, 7은 진행한 모의실험의 각 소자전압과 권선 전압, 전류를 도시한 그래프이다. 그림 6은 우측 철심 권선연결이며 그림 7은 중간 철심에 권선연결이 된 상태이다. 먼저 각 그림 가장 상단의 전류를 살펴본다면, 중간 철심일 때 제한 임피던스가 크기 때문에에서 제한되는 고장전류가 중간철심일 경우 더 큰 것을 확인할 수 있다.

이때의 퀀치 동작은 초기 고장전류의 크기에 의해 결정되는데, 초기 고장전류는 우측권선에 연결했을 때 더 작았다. 즉 임계전류를 초과해야 퀀치되는 초전도한류기 동작에 있어서는 중간 철심일 때 퀀치가 빨리 작동하여 유리한 측면이 있다.

한편 권선 전압부분에서는 중간철심에 권선을 연결하였을 때, 2차 측에 왜곡이 생긴 것을 확인할 수 있다. 이는 철심의 자화전류가 포화영역을 포함하고 있고

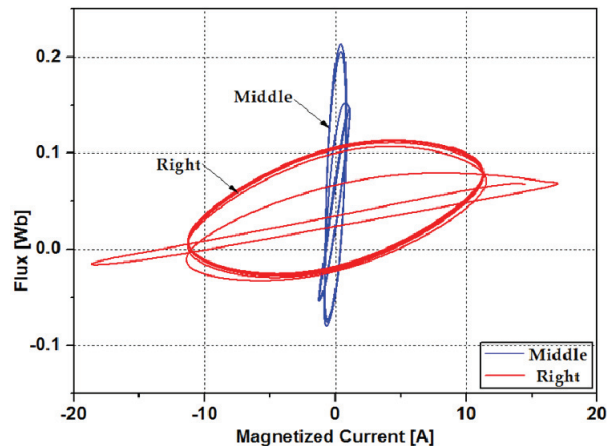


Fig. 8. Experimental hysteresis curve of middle and right leg.

히스테리시스 곡선 상, 기울기가 일정한 영역이 생겼기 때문에 포화가 발생했다고 유추할 수 있다. 따라서 포화 영역에 있어서는 중간철심 사용이 유리하다.

그림 8은 각각의 권선연결 방식에서의 자화전류와 자속을 이용하여 도시한 히스테리시스 곡선이다. 히스

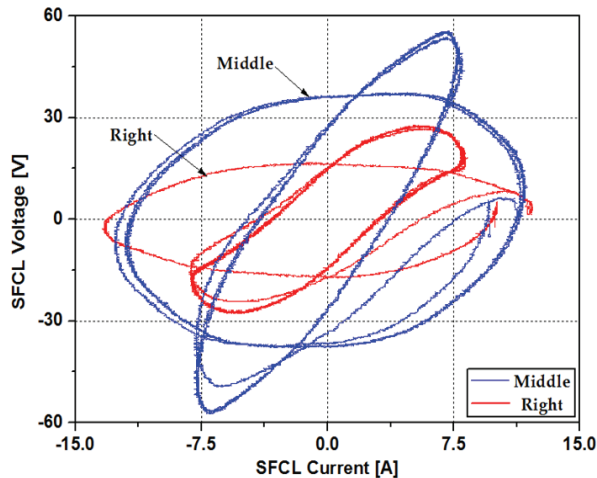


Fig. 9.  $V_{SFCL}$ - $I_{SFCL}$  curve during fault.

테리시스 곡선에서는 일반적으로 기울기가 자화인덕턴스를 의미한다. 즉 이론적으로 확인 하였던 대로, 중간 철심을 이용한 경우 자화인덕턴스가 더 크다. 이를 포화특성과 연관 짓기 위해서는 히스테리시스 곡선에서 기울기와 포화에 관한 이론이 필요하다. 일반적으로 비포화영역의 기울기가 작다면 기울기가 일정한 포화영역은 동작하는 자화전류를 초과하므로 포화가능성은 현저히 작아진다. 즉 이번 실험에서 기울기가 더 큰 중간 철심에 경우가 포화가능성이 더 크다고 결론지을 수 있다.

그림 9는 두 가지 경우에 1차 측 권선에 걸리는 전압과 그에 흐르는 전류를 꺾적 그래프로 나타낸 것이다. 이 그림도 앞의 히스테리시스 곡선과 마찬가지로 기울기가 시사하는 바가 크다. 전압전류 꺾적에서의 기울기는 이론적으로 제한 임피던스를 의미한다. 제한 임피던스는 자화리액턴스에 영향을 받는데, 중간 철심에 연결하였을 경우 자화리액턴스가 더 큰 것에 따라 제한 임피던스 또한 더 컸다. 실제로 모의실험을 통해 얻은 결과 그래프에서 살펴 볼 수 있다시피 중간 철심을 사용하였을 때 기울기가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이렇게 이론적으로 유추한 내용과 그림 6에서 볼 수 있는 실험과 일치한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 E-I코어를 통한 변압기형 초전도한류기의 권선결선방법에 따른 포화특성과 제한특성을 알아보았다. 각각의 경우에 대하여 Multi-Physics 시뮬레이션을 통한 자화인덕턴스를 유추 할 수 있었으며, 이론적으로도 확인할 수 있었다. 또한 실제 모의실험을 진행함으로 해서 이론과 시뮬레이션, 모의실험의 결과들이 모두 부합함을 확인하였다.

중간 철심에 연결 하였을 경우에는 짧은 자로의 길이로 인해 자화인덕턴스가 우측 철심의 경우에 비해 컸다. 이 큰 자화인덕턴스는 포화가능성 또한 크게 하여 악영향을 미치는 걸 확인할 수 있다. 한편 제한임피던스에 경우에는 큰 자화인덕턴스의 영향을 받아 더 커졌다.

이와 무관하게 중간 철심의 경우 초기 임피던스가 낮아 초기 고장전류가 크게 발생한 것을 확인하였다. 이로 인해 초전도체의 임계전류를 빠르게 초과하여 한류기의 동작이 빨랐다. 이 부분에 관해서는 이론적인 확인이 불가하였기 때문에 추가적인 검토와 분석이 필요할 것으로 보인다.

#### REFERENCES

- [1] M. Ichikawa, H. Kado, M. Shibuya, M. Kojima, M. Kawahara, and T. Matsumura, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13**, 2 (2003).
- [2] H. Shimizu, Y. Yokomizu, T. Matsumura, and N. Murayama, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **12**, 1 (2002). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2002.1018344>]
- [3] A. Hekmati, M. Hosseini, M. Vakilian, and M. Fardmanesh, *Physica C*, **472**, 39 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2011.10.007>]
- [4] S. H. Lim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 2 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2007.903960>]
- [5] S. H. Lim, J. F. Moon, and J. C. Kim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**, 3 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2036785>]
- [6] S. H. Lim, S. Ko, and T. H. Han, *Physica C*, **484**, 253 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.03.011>]