

두 번의 피크전류제한 기능을 갖는 변압기형 초전도한류기의 과도전류제한 동작 특성 연구

한태희¹, 임성훈^{2,a}

¹ 중원대학교 항공재료공학과

² 숭실대학교 전기공학부

Study on Transient Current Limiting Operational Characteristics of Transformer Type SFCL with Two Peak Current Limiting Function

Tae-Hee Han¹ and Sung-Hun Lim^{2,a}

¹ Department of Aero Materials Engineering, Jungwon University, Goesan 28024, Korea

² School of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received April 1, 2016; Accepted July 5, 2016)

Abstract: In this paper, we analyzed the operational characteristics of the fault current limiting according to the amplitude of the fault current for the transformer type superconducting fault current limiter (SFCL). If the fault current happens, the superconducting element connected to the secondary coil is occurred quench and the fault current is limited. When the larger fault current occurs, the superconducting element connected to the third coil is occurred additional quench and the peak fault current is limited. We found that the fault current can be more effectively controlled through the analysis of the fault current limiting and the short-circuit tests.

Keywords: SFCL (transformer type superconducting fault current limiter), Fault current, Quench, Superconducting element

1. 서 론

산업발전에 따라 배전계통의 전력 수요의 증가와 분산 전원의 증가로 대용량 변압기의 적용이 불가피하게 되었다. 하지만 단락이나 지락과 같은 고장 전류 발생 시 고장 전류의 크기가 증가하여 기존의 설치된 차단기나 보호기기의 차단용량 초과로 심각한 손상을 초래하게 되며 계통의 안정도 저하와 차단기의 교체비용

상승 등이 예상된다. 기존에 고장 전류에 대한 방안 중 초전도한류기는 초전도 고유특성을 이용하여 고장 전류를 제한하는 신개념의 대안으로 주목받으면서 세계 선진국에서 활발하게 연구를 진행하고 있다 [1-6].

초전도한류기는 정상상태에서 전력손실과 인접계통에 영향이 없고, 고장 발생 시 초전도한류기내 초전도 소자를 이용하여 고장 전류검출과 제한 동작을 고속으로 이루어지진다 [7-10]. 하지만 큰 고장 전류 발생 시 초전도 소자가 고장 전류 감지와 제한동작을 동시에 감당해야하기 때문에 초전도소자 파손의 부담이 있어 전류제한 용량을 증가시키려는 방안으로 초전도소자를 직렬이나 병렬형태로 연결하는 하이브리드형 초전도한류기를 보고된 바 있다 [11-13].

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

본 논문에서는 전류제한 용량을 증가하기 위하여 변압기 2차에 3차 권선을 추가하고 2차 권선과 3차 권선의 인덕턴스를 변화하여 고장 전류를 제한하기 위한 변압기형 초전도한류기를 제한하였다. 제안한 변압기형 초전도한류기의 전기적인 등가회로부터 동작전류를 전개하였으며, 모의단락실험을 통해 고장 각에 따른 고장 전류제한과 피크고장 전류제한 특성을 분석하였다. 등가회로와 단락 모의실험을 통해 고장 전류의 과도성분에 따라 초전도소자를 보다 효과적으로 활용할 수 있었고, 고장 전류를 효율적으로 제한할 수 있음을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 구조, 동작 원리 및 등가회로

2.1.1 구조와 동작원리

그림 1은 두 번의 피크전류제한 기능을 갖는 변압기형 한류기의 구조를 나타낸다. 임계온도 87 K를 갖는 박막 형태로 제작된 YBCO를 초전도소자로 사용하였다. 강자성체 철심을 매개로 2차 권선과 3차 권선에 초전도소자 HTSC₁과 HTSC₂를 각각 연결하였다. 정상상태에서 변압기형 초전도한류기의 초전도소자 (HTSC₁, HTSC₂)는 제로저항을 유지하고 있어 초전도소자는 제로 전압을 나타내게 된다.

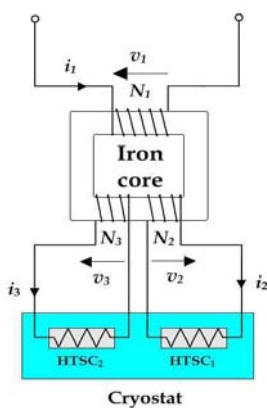


Fig. 1. Schematic configuration of the transformer type SFCL.

기본 동작 원리는 첫 번째 고장 전류 제한요소를 구성하는 초전도소자(HTSC₁)의 임계전류(I_c)를 초과하는

고장 전류(*i*₁)가 발생하면 2차 권선에 연결된 초전도소자의 저항(*R*_{SC1})이 발생하게 되면, 고장 전류(*i*₁) 일부를 제한하게 된다. 이때, 고장 전류 일부가 두 번째 피크 전류 제한요소인 초전도소자(HTSC₂)의 임계전류(I_c)를 넘지 않을 경우 초전도소자는 제로저항을 유지하게 되며 고장 전류(*i*₁)는 *R*_{SC1}에 의해 제한된다.

하지만, 고장 전류가 크게 발생할 경우 두 번째 피크전류 제한요소를 구성하는 초전도소자(HTSC₂)의 임계전류 값(I_c)을 초과하게 되며, 3차 권선에 연결된 초전도소자의 저항(*R*_{SC2})이 추가로 발생함에 따라 *R*_{SC1}과 *R*_{SC2}에 의해 고장 전류를 제한하게 된다.

2.2 등가회로

그림 2는 제안한 변압기형 한류기의 전기적인 등가회로를 보여준다. 각 권선의 인덕턴스를 *L*₁, *L*₂, *L*₃로 나타냈고, 초전도소자가 켜치되어 저항이 발생할 때 초전도소자 저항을 *R*_{SC1}과 *R*_{SC2}로 나타냈다. 등가회로를 간략화하기 위해 권선 상호 간의 상호 인덕턴스와 권선저항은 생략하였다.

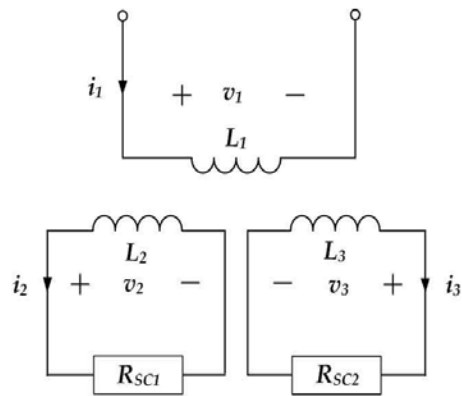


Fig. 2. Equivalent equivalent circuit of the transformer type SFCL.

피크전류제한 기능을 갖는 변압기형 한류기의 설계 파라미터를 표 1에 나타내었다.

그림 2의 변압기형 초전도한류기의 등가회로부터 고장 전류가 작을 경우 한류기의 고장 전류제한 동작 전류를 식 (1)과 같이 유도할 수 있으며, 고장 전류가 클 경우 피크 전류제한 동작전류는 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

Table 1. Design specifications of the transformer type SFCL.

Parameters	Value	Unit
60-Hz AC power supply(E_{in})	200	V
Fault angle	0, 90	°
Fault period	5	cycle
Two Windings & Third Winding		Unit
Self-Inductance of L_1	87.05	mH
Self-Inductance of L_2	4.96	mH
Self-Inductance of L_3	136.99	mH
HTSC elements		Unit
Material	YBCO	-
Critical Temperature	87	K
Critical Current	27	A

$$\frac{I_{OP1}}{I_C} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (1)$$

$$\frac{I_{OP2}}{I_C} = \sqrt{\frac{L_3}{L_1}} \quad (2)$$

2.3 실험장치 구성 및 실험 방법

제안한 변압기형 한류기의 전류제한 특성을 분석하기 위해 단락 모의 회로를 그림 3과 같이 구성하였다. 60 Hz의 교류전원 전압(E_{in}) 200 V와 선로임피던스 ($L_L=1.82$ mH, $R_L=0.097$ Ω) 및 부하임피던스($L_{load}=5$ mH, $R_L=41.2$ Ω)로 구성하였다.

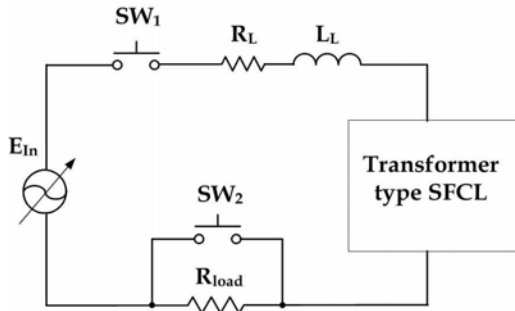


Fig. 3. Schematic configuration of the transformer type SFCL for the short-circuit test.

고장을 모의하기 위해 스위치 SW_1 을 투입한 후 고장 주기 동안 스위치 SW_2 를 투입하여 단락 사고를 유발한 후 5주기 이후 다시 스위치 SW_2 를 개방함으로써 고장을 제거하였다. 고장 기간 동안 한류기의 초전도소자와 각 권선에 흐르는 전류와 전압을 CT와 PT를 통해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 고장 각 0° 에서의 고장 전류의 과도성분에 따른 동작 특성을 나타내고 있다. 그림 4(a)는 고장 발생 시 2차 권선과 3차 권선에 연결된 초전도소자의 전류(i_{SC1} , i_{SC2})와 전압(V_{SC1} , V_{SC2})을 나타내고 있다. 고장이 발생 직후 첫 번째 제한요소와 두 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 퀘칭 발생으로 고장 전류를 제한하는 것을 알 수 있고, 1/2주기 이후 초전도소자의 전압(V_{SC1} , V_{SC2})이 유기되는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 고장 전류의 과도성분에 따른 초전도소자의 소비전력과 저항과의 관계를 나타내고 있다. 첫 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 1/2주기에서 부분적인 퀘칭과 회복이 발생한 후 1/2주기 이후 축적된 열로 인해 두 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 완전한 퀘칭이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

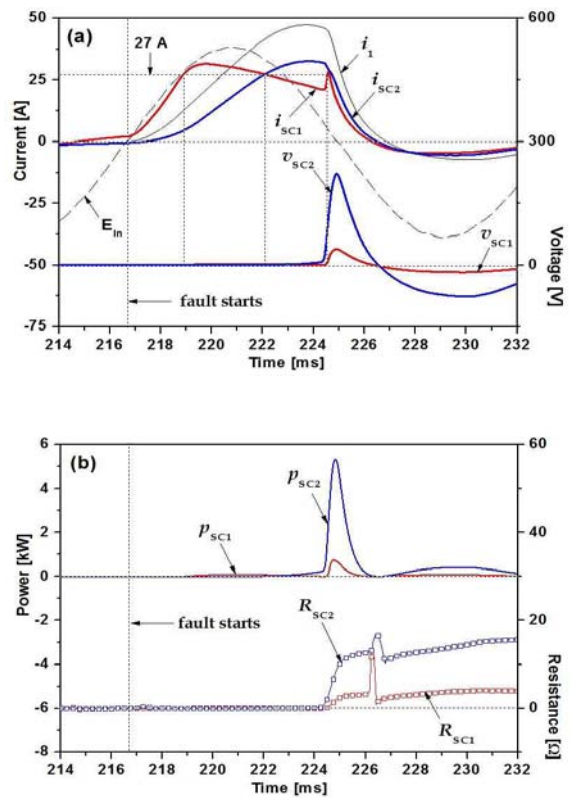


Fig. 4. Fault current limiting characteristics of the transformer type SFCL with double peak current limiting function in case that the fault occurs at 0° right after the fault occurs. (a) Current and voltage characteristics, (b) consumption power and resistance characteristics.

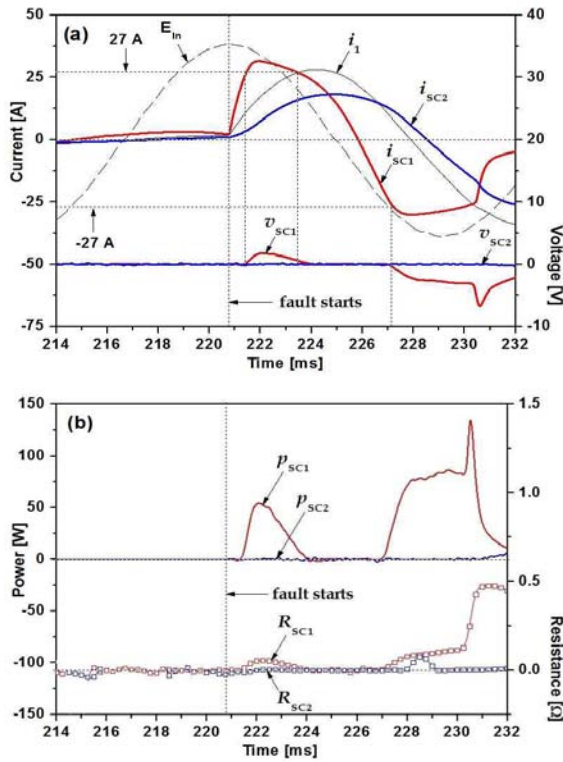


Fig. 5. Fault current limiting characteristics of the transformer type SFCL with double peak current limiting function in case that the fault occurs at 90° right after the fault occurs. (a) Current and voltage characteristics, (b) consumption power and resistance characteristics.

그림 5는 고장 각 90° 에서의 고장 전류의 과도성분에 따른 동작 특성을 나타내고 있다. 그림 5(a)는 고장 발생 직후 첫 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 켄치 발생으로 초전도소자 전압이 나타나고 있고, 고장 전류가 감소하는 시점에 초전도소자가 회복되어 제로 전압을 나타내고 있다. 1/2주기 이후 임계전류를 초과하는 시점에 다시 초전도소자 전압이 발생하는 것을 알 수 있다. 두 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자는 고장 전류가 작아 켄치되지 않고 제로 전압을 나타내고 있다. 그림 5(b)는 고장 전류의 과도성분에 따른 초전도소자의 소비전력과 저항과의 관계를 나타내고 있다. 첫 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 켄치가 발생하고 회복되다가 1/2주기 이후 다시 켄치되어 저항이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 초전도소자의 축적된 열로 인해 1/2주기 이후 소비전력이 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 제한요소를

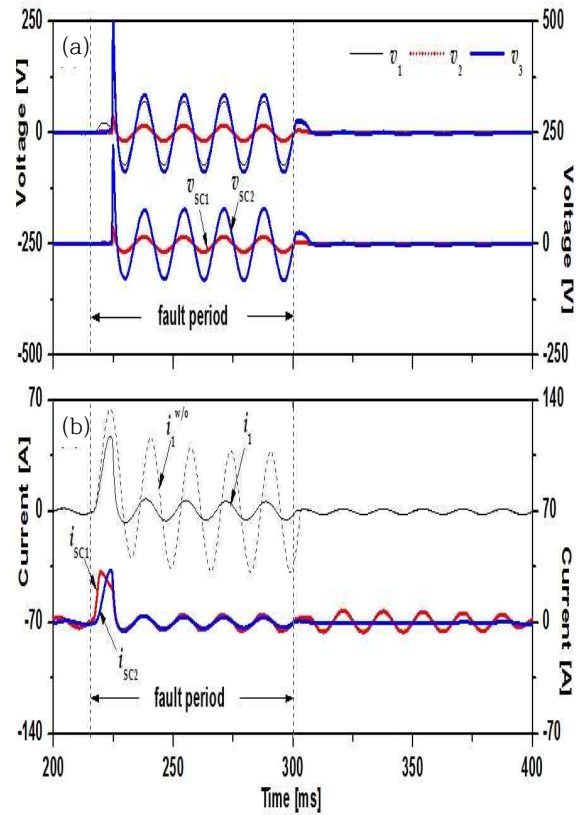


Fig. 6. Current limiting characteristics of the transformer type SFCL in case that the fault current occurs at 0° . (a) The voltage waveform induced in each coil, (b) the current waveform flowing in each coil.

구성하는 초전도소자는 고장 전류가 초전도소자의 임계전류밀도를 초과하지 않아 켄치되지 않고 제로 저항을 나타내고 있다.

그림 6은 고장 각 0° 에서의 각 권선과 초전도소자의 전압 및 전류의 동작 특성을 나타내고 있다. 그림 6(a)는 고장 발생 시 각 권선의 인덕턴스 크기에 따른 전압이 비례하여 나타나고 있고, 고장 전류가 큰 경우 첫 번째 제한요소와 두 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 켄치가 발생하며 인덕턴스 크기에 비례하여 초전도소자 전압이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)는 고장 발생 시 한류기의 전체 전류는 초기에 급격히 증가하고 있고, 고장 5주기 동안 전체전류는 작게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 첫 번째 제한요소와 두 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 켄치에 의해 고장 전류를 제한하는 것을 알 수 있다.

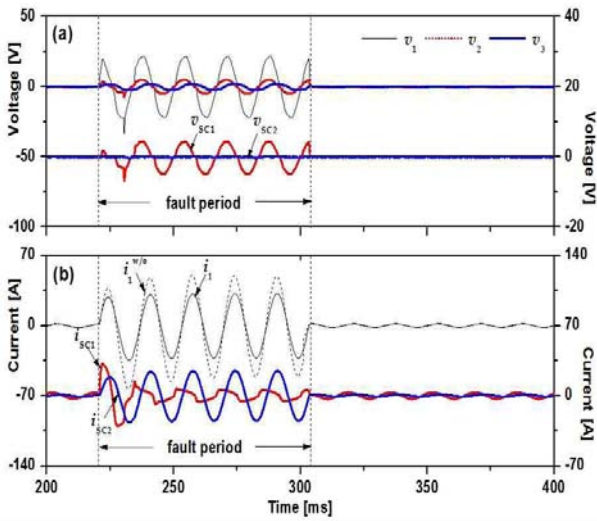


Fig. 7. Current limiting characteristics and voltage waveform of the transformer type SFCL in case that the fault current occurs at 90° . (a) The voltage waveform induced in each coil, (b) The current waveform flowing in each coil.

그림 7은 고장 각 90° 에서의 각 권선과 초전도소자의 전압 및 전류의 동작 특성을 나타내고 있다. 그림 7(a)는 고장 발생 시 고장 전류가 작은 경우이며, 첫 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 퀘치가 발생하고 두 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 퀘치가 발생하지 않음을 알 수 있다. 그림 7(b)는 고장 발생 시 한류기의 전체전류는 초기에 작게 나타나고 있으며 이후 전체전류는 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 두 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자는 퀘치되지 않고, 첫 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자의 퀘치로 고장 전류 일부만 제한하는 것으로 생각된다. 또한, 고장 각이 90° 로 증가할 경우 초전도소자의 전류(i_{sci})가 왜곡되는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 고장 각에 따른 변압기형 초전도한류기의 소비전력과 저항과의 관계를 나타내고 있다. 고장 각이 0° 에서의 소비전력과 저항을 그림 8 (a)에 나타내었다. 첫 번째 제한요소와 두 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 퀘치가 발생하였으며 소비전력과 저항 값은 크게 나타나고 있다. 고장 각 90° 에서의 소비전력과 저항을 그림 8(b)에 도시하였다. 고장 각이 90° 로 증가한 경우 초전도소자의 소비전력과 저항 값은 작게 나타나고 있음을 알 수 있고, 첫 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서만 퀘치가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

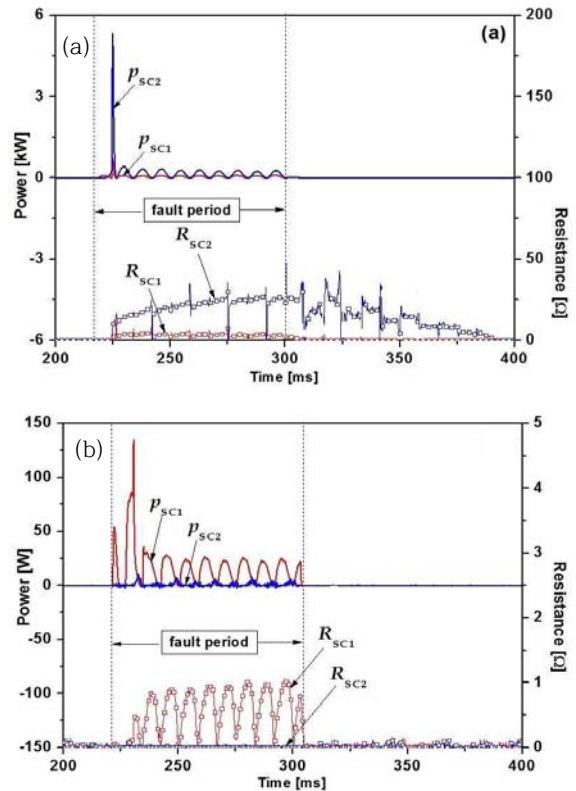


Fig. 8. Powerloss of HTSC elements and resistance characteristics of the transformer type SFCL according to the fault angle. (a) Fault angle 0° , (b) fault angle 90° .

4. 결론

본 논문에서는 고장 발생 초기 고장 전류 크기에 따라 두 번의 피크전류제한 기능을 갖는 변압기형 초전도한류기의 고장전류제한 동작 특성을 분석하였다.

고장각 0° 인 경우, 고장발생 직후 7.7 [ms]에서 첫 번째 제한요소와 두 번째 제한요소를 구성하는 초전도소자에서 완전 퀘치가 발생하여 전체 고장전류를 제한하였다. 고장각 90° 인 경우, 고장발생 직후 0.7 [ms]와 6.4 [ms]에서 첫 번째 제한요소인 초전도소자에서 부분 퀘치가 발생하였고, 두 번째 제한요소는 초전도소자의 임계전류밀도($I_c=27A$)를 초과하지 않아 고장 5주기 동안 퀘치되지 않았다.

고장발생 시 고장각 0° 와 90° 에서 고장 전류의 크기가 다르게 되므로 제안한 초전도한류기의 모의단락실험과 피크전류제한 동작 분석을 통해 유용성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2015R1D1A1A01060575)

REFERENCES

- [1] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, U. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, *IEEE Trans. On Power Del.*, **6**, 2 (1991).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.131138>]
- [2] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, and H. W. Neumuller, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **7**, 2 (1997). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.614631>]
- [3] M. Noe and B. R. Oswald, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **9**, 2 (1999).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.783552>]
- [4] H. Kado and M. Ichikawa, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **7**, 2 (1997).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.614672>]
- [5] G. Didier, J. Leveque, and A. Rezzoug, *IEEE Trans. on Power Systems*, **28**, 2 (2013).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2224386>]
- [6] J. H. Lee and S. K. Joo, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **23**, 3 (2013).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2013.2266401>]
- [7] S. C. Ko, S. H. Lim, and T. H. Han, *Physica C*, **484**, 263 (2013).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2012.03.041>]
- [8] S. H. Lim, *Physica C*, **470**, 1631 (2010).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2010.05.177>]
- [9] S. H. Lim, H. S. Choi, D. C. Chung, S. C. Ko, and B. S. Han, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **15**, 2 (2005).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2005.851659>]
- [10] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, *Physica C*, **416**, 34 (2004).
- [11] H. S. Choi, O. B. Hyun, H. R. Kim, and K. B. Park, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **14**, 3 (2002).
- [12] H. S. Choi, Y. S. Cho, and S. H. Lim, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **16**, 2 (2006).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2006.869914>]
- [13] Y. S. Cho, N. Y. Lee, H. S. Choi, D. C. Chung, and S. H. Lim, *Physica C*, **463**, 1204 (2007).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2007.03.459>]