

이중 켄치를 이용한 변압기형 초전도 한류기의 권선전류와 초전도소자 저항에 따른 전력소모 및 누적에너지 분석

한태희¹, 임성훈^{2,a}

¹ 중원대학교 항공재료공학과

² 숭실대학교 전기공학부

Analysis on Power Consumption and Accumulated Energy According to Resistance of Superconducting Element and Winding Current of Transformer Type SFCL Using Double Quench

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 September 5, 2016; Accepted September 19, 2016)

Abstract: In this paper, we analyzed the power consumption and the accumulated energy in HTSC (high- T_c superconducting elements) according to the resistance of HTSC element and the winding current of transformer type SFCL (superconducting fault current limiter) using double quench. For the analysis, two different inductances of the one secondary winding among two secondary windings comprising the transformer type SFCL were selected and the short-circuit tests were carried out. The consumed power and the accumulated energy in HTSC element connected into the secondary winding with larger inductance were analyzed to be larger compared to the one connected into the secondary winding with lower inductance.

Keywords: Power consumption, Accumulated energy, Transformer type SFCL (superconducting fault current limiter), Double quench

1. 서 론

지속적인 산업발전에 따라 발전소 확충, 스마트 그리드 도입, 신재생에너지를 이용한 분산전원과의 계통 연계 등 전력공급은 유연해졌지만 전력계통에 단락이나 지락과 같은 고장전류 발생 시 고장전류가 증가하

여 기존의 설치된 차단기나 보호기기의 차단용량 초과로 심각한 손상 문제 등이 예상된다.

고장전류를 극복하는 방안으로는 대용량 차단기의 교체방법이 있지만 설치에 따른 경제적 부담과 고장전류 크기는 줄어들지 않고 있다. 그 외에 방안으로는 모션분리, 직렬리액터 도입, 고 임피던스 기기 사용 등이 있지만, 전력의 공급신뢰도 저하와 전압강하 발생 및 계통의 안정도 저하 등의 문제를 수반하고 있다. 또 다른 해결 방안으로는 초전도 고유특성을 이용하여 고장전류를 제한하는 초전도 한류기는 가장 이상적인 요구조건에 근접한 특성이 있어 국내·외에서 다양한 형

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

태로 연구를 진행하고 있다 [1-3].

초전도 한류기는 정상상태에서는 전력손실이 적고, 인접계통에 영향이 없으며 고장 발생 시 초전도 한류기내 초전도소자를 이용하여 고장 전류검출과 제한 동작을 고속으로 이루어지는 장점이 있어 다양한 초전도 한류기 개발을 진행하고 있다 [4-7].

하지만 단락전류와 같은 고장전류 발생 시 초전도소자는 고장전류 감지와 제한 동작을 동시에 감당해야 하므로 초전도소자 파손의 부담이 있는 단점을 갖고 있다. 해결방안으로 초전도소자를 변압기 2차 측에 직렬이나 병렬형태로 연결하는 자속구속형 초전도 한류기를 보고된 바 있다 [8-11]. 최근에 변압기형 초전도 한류기를 제안하여 두 개의 초전도소자를 2차 권선과 3차 권선에 설치하여 고장전류 제한 특성을 보고한 바 있으나 2차 권선의 권선수에 따른 초전도소자의 소모 전력이나 소모 에너지에 관하여 아직 발표되지 않고 있다 [12,13].

본 논문에서는 변압기형 초전도 한류기의 변압기 2차 측에 3차 권선을 추가하고 2차 권선의 권선수를 변화하여 권선전류와 초전도소자 저항에 따른 소모 전력과 소모 에너지를 비교·분석하였다. 제안한 변압기형 초전도 한류기의 전기적인 등가회로로부터 동작전류를 전개하였으며, 단락 모의실험을 통해 고장전류의 과도성분에 따라 고장전류를 이중 켄치를 통해 효율적으로 제한할 수 있음을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 구조, 동작 원리 및 등가회로

2.1.1 구조와 동작원리

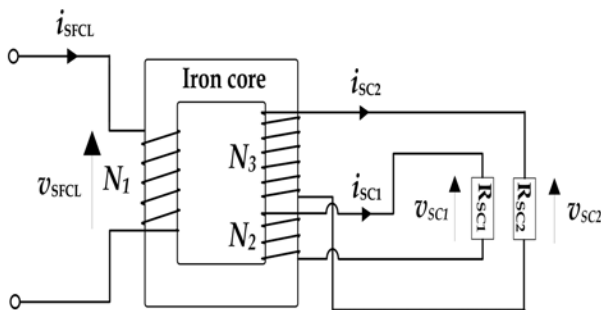


Fig. 1. Schematic configuration of the transformer type SFCL.

그림 1은 이중 켄치 기능을 갖는 변압기형 한류기의 구조를 나타낸다. 초전도소자는 임계온도 87 K의 독일 Theva사의 200 nm의 두께로 백금 층을 증착한 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) 박막을 사용하였다. 초전도소자의 임계전류는 27 A이었다. 강자성체 철심을 매개로 2차 권선과 3차 권선에 초전도소자(R_{SC1} , R_{SC2})를 각각 연결하였다. 정상 상태에서 변압기형 초전도 한류기의 초전도소자는 제로저항을 유지하고 있어 초전도소자는 제로 전압을 나타내게 된다.

기본 동작 원리는 초전도소자의 임계전류(I_c)를 초과하는 고장전류가 발생하면 각 권선에 연결된 초전도소자는 켄치 발생 때문에 저항이 발생하게 되고, 고장전류를 제한하게 된다. 이때, 고장전류가 작게 발생할 경우, 변압기 2차 측 권선의 인덕턴스가 큰 권선에서 켄치가 발생하게 되고 인덕턴스가 작은 권선에서는 켄치가 발생하지 않게 된다. 하지만, 고장전류가 크게 발생할 경우 2차 권선과 3차 권선에 연결된 초전도소자에서 이중으로 켄치가 발생하고 저항이 발생함에 따라 R_{SC1} 과 R_{SC2} 에 의해 고장전류를 제한하게 된다.

2.2 등가회로

제안한 변압기형 한류기의 전기적인 등가회로를 그림 2에 보여준다. 변압기 1차 권선의 인덕턴스를 L_1 , 변압기 2차 권선의 인덕턴스를 L_2 , 변압기 3차 권선의 인덕턴스를 L_3 로 나타냈고, 2차 권선의 인덕턴스는 가변 인덕턴스를 나타내고 있다. 초전도소자가 켄치되어 저항이 발생할 때 초전도소자 저항을 R_{SC1} 과 R_{SC2} 로 나타냈다. 등가회로를 간략화하기 위해 권선 상호 간의 상호 인덕턴스와 권선저항은 생략하였다.

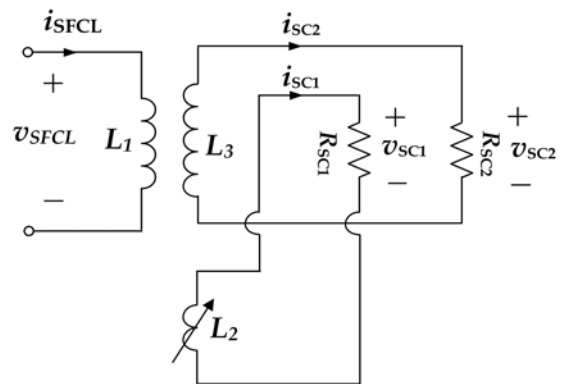


Fig. 2. Equivalent circuit of the transformer type SFCL.

2.3 실험장치 구성 및 실험 방법

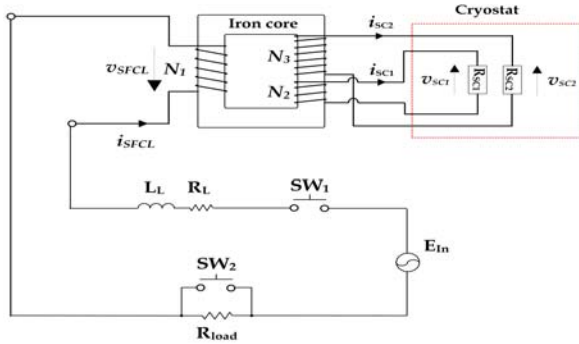


Fig. 3. Schematic configuration of the transformer type SFCL for the short-circuit test.

Table 1. Design specifications of the transformer type SFCL.

Iron core	Value	Unit
Outer horizontal length	235	mm
Outer vertical length	250	mm
Inner horizontal length	137	mm
Inner vertical length	155	mm
Thickness	132	mm
Two Coils	Value	Unit
Turn number of coil 1 (N_1)	60	turns
Turn number of coil 2 (N_2)	15, 30	turns
Turn number of coil 3 (N_3)	75	turns
HTSC element	Value	Unit
Material	YBCO	-
Critical temperature	87	K
Critical current (I_C)	27	A

그림 3은 제안한 변압기형 한류기의 전류제한 특성을 모의하기 위한 실험장치 구성을 보여준다. 고장 발생을 위한 모든 실험은 교류전원 전압(E_{in}) 200 [V], 고장 각은 0도에서 진행하였다. 선로 임피던스($L_L=1.82$ mH, $R_L=0.097$ Ω) 및 부하 임피던스($L_{load}=5$ mH, $R_L=41.2$ Ω)로 구성하였다. 이중 켄치 기능을 갖는 변압기형 한류기의 각각의 설계 치는 표 1에 표시하였다.

단락 사고 모의는 스위치 SW_1 을 전원 전압이 영이 되는 시점에서 투입한 후 스위치 SW_2 를 설정한 5주기 동안 투입하였고, 이후 스위치 SW_2 를 개방함으로써 고장을 제거하였다. 고장 기간 초전도 한류기의 초전도소자와 각 권선에 흐르는 전류와 유기전압을 계기용 변류기와 계기용 변압기를 통해 측정·분석하였다.

3. 결과 및 고찰

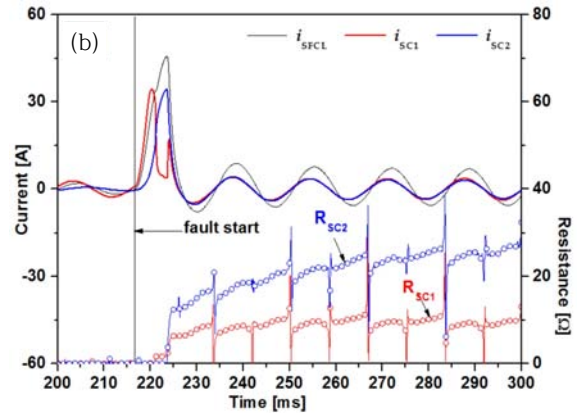
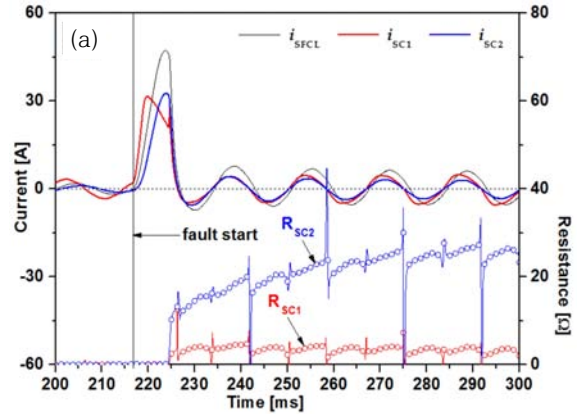


Fig. 4. Fault current limit operating characteristics of the transformer-type SFCL according to the change in the number of turns of the secondary winding. (a) Turn number of coil 2 ($N_2=15$) and (b) turn number of coil 2 ($N_2=30$).

그림 4(a)는 2차 권선의 권선수(N_2)를 15턴으로 한 경우 변압기형 초전도 한류기의 고장전류제한 동작 특성을 보여준다. 고장 발생 직후 1/2주기에서 고장전류가 급격히 증가하고 있고, 초전도소자 1과 초전도소자 2의 임계전류를 초과한 시점에 부분 켄치와 회복이 일어난 후 완전 켄치가 발생하고 있다. 완전 켄치가 발생한 225 [ms]에서 초전도소자의 저항이 발생하고 있음을 알 수 있고, 초전도소자 1보다 초전도소자 2의 저항이 크게 나타난 것을 관찰할 수 있다. 이는 초전도소자 2의 인덕턴스가 크기 때문으로 생각된다. 또한, 고장 주기가 증가할수록 두 초전도소자 간에 전류 위상차가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

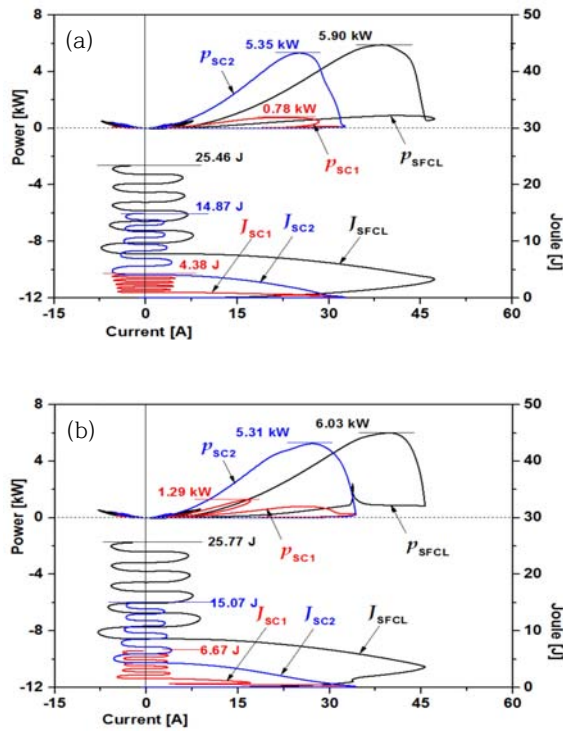


Fig. 5. Characteristic of the power consumption and the energy consumption for the current of the transformer-type SFCL. (a) Turn number of coil 2 ($N_2=15$) and (b) turn number of coil 2 ($N_2=30$).

그림 4(b)는 2차 권선의 권선수(N_2)를 30턴으로 한 경우이다. 고장 발생 직후 고장전류가 급격하게 증가하고 있고, 초전도소자 1의 부분 퀘칭과 회복이 발생한 다음 완전 퀘칭이 발생하였다. 초전도소자 2에서 반주기에서 완전 퀘칭이 일어나고 고장전류를 제한하고 있음을 관찰할 수 있다. 완전 퀘칭에 따라 초전도소자 1과 초전도소자 2는 저항을 발생하고 있고, 고장주기가 증가할수록 초전도소자의 저항 폭 간격은 그림 4(a)보다 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한, 고장 주기가 증가할수록 두 초전도소자들의 전류 위상차는 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

그림 5(a)는 2차 권선의 권선수(N_2)를 15턴으로 한 경우 변압기형 초전도 한류기의 고장 5주기 동안 전류에 대한 초전도소자의 소모 전력과 소모 에너지의 특성을 나타내고 있다. 고장 발생 시 초전도소자 1의 초기 소모 전력은 0.78 [kW]이며, 초전도소자 2의 소모 전력은 5.35 [kW]와 전체 초전도 한류기의 소모 전력은 5.90 [kW]를 나타내고 있다. 고장 5주기 동안의 초

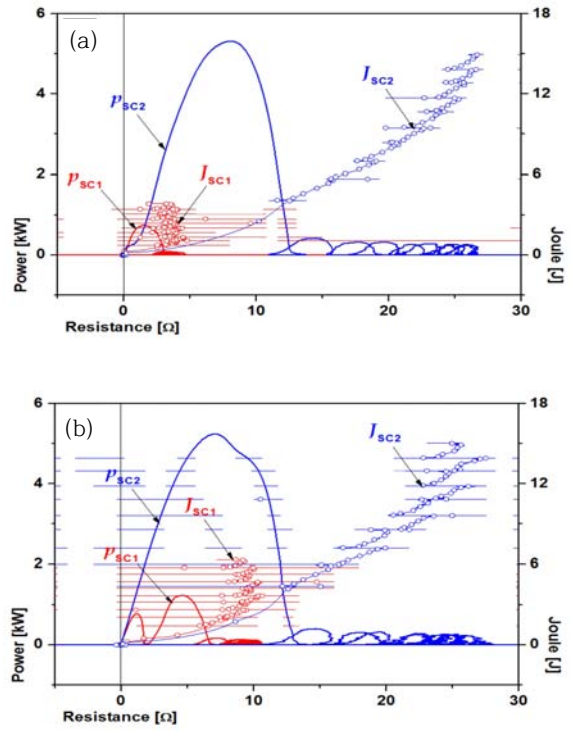


Fig. 6. Characteristic of the power consumption and the energy consumption for the resistance of the transformer-type SFCL. (a) Turn number of coil 2 ($N_2=15$) and (b) turn number of coil 2 ($N_2=30$).

전도소자 1의 소모 에너지는 4.38 [J], 초전도소자 2의 소모 에너지는 14.87 [J], 초전도 한류기의 소모 에너지는 25.46 [J]을 나타내고 있다.

그림 5(b)는 2차 권선의 권선수(N_2)를 30턴으로 증가한 경우 변압기형 초전도 한류기의 고장 5주기 동안 전류에 따른 초전도소자의 소모 전력과 소모 에너지의 특성을 나타내고 있다. 고장 발생 시 그림 5(a)보다 초전도소자 1의 소모 전력이 1.29 [kW]로 높게 나타나고 있지만, 초전도소자 2의 소모 전력은 5.31 [kW]로 적게 나타남을 확인할 수 있다. 고장 5주기 동안의 초전도소자 1의 소모 에너지는 6.67 [J], 초전도소자 2의 소모 에너지는 15.07 [J], 초전도 한류기의 소모 에너지는 25.77 [J]을 나타내고 있다.

그림 6(a)는 2차 권선의 권선수(N_2)를 15턴으로 한 경우이며 고장 5주기 동안 저항에 따른 초전도소자의 순시전력 및 소모 에너지와의 특성을 나타내고 있다. 초전도소자 1에서의 초기에 소모 전력이 발생하였고, 고장전류가 제어된 이후 소모 전력은 작게 나타나고

있다. 초전도소자 2의 초기 소모 전력은 급격히 증가하고 있고, 고장주기가 증가할수록 소모 전력은 감소하고 있음을 관찰할 수 있다. 고장 5주기 동안 저항에 대한 소모 에너지는 초전도소자 1의 경우 서서히 증가하고 있으나 초전도소자 2는 저항 증가에 따라 소모 에너지도 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 6(b)는 2차 권선의 권선수(M_2)가 30턴일 때 저항에 따른 초전도소자의 순시전력과 소모 에너지와의 특성을 보여준다. 고장 발생 시 초전도소자 1에서 부분 퀘치가 발생하여 2회의 소모 전력이 발생하고 있으며 이후 고장전류 제한으로 소모 전력은 감소하고 있다. 초전도소자 2에서는 고장발생 시 소모 전력 증가하고 있으며 저항증가에 따라 소모 전력은 감소하고 있음을 관찰할 수 있다. 초전도소자 1의 소모 에너지는 그림 6(a)보다 다소 높게 나타나고 있으나 초전도소자 2는 비슷한 에너지 값을 나타내고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 2차 권선의 권선수 변화에 따른 변압기형 초전도 한류기의 고장 발생 시 권선전류와 초전도소자 저항에 따른 소모 전력과 소모 에너지를 비교·분석하였다. 2차 권선의 권선수(M_2)가 15턴인 경우 초전도소자 간 전류 위상차가 발생하며, 저항 폭은 크게 나타났다. 고장발생 시 초전도소자 1의 초기 소모 전력은 0.78 [kW]이며, 초전도소자 2의 소모 전력은 5.35 [kW]를 나타내고 있다. 2차 권선의 권선수(M_2)를 30턴으로 증가한 경우 초전도소자 간 전류 위상차는 감소하며, 저항 폭은 줄어들었다. 초전도소자 1의 소모 전력은 1.29 [kW]로 높게 나타났고 초전도소자 2의 소모 전력은 5.31 [kW]로 적게 나타남을 확인할 수 있다. 고장발생 시 2차 권선의 변화에 따라 제안한 변압기형 초전도 한류기의 모의단락실험과 고장전류 제한 동작 특성 분석을 통해 유용성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 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] H. Kado and M. Ichikawa, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **7**, 2 (1997). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.614672>]
- [3] 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>]
- [4] H. Yamaguchi, T. Kataoka, K. Yaguchi, S. Fujita, K. Yoshikawa, and K. Kaiho, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **14**, 2 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2004.840820>]
- [5] 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>]
- [6] M. Ichikawa, H. Kado, M. Shibuya, and T. Matsumura, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **13**, 2 (2003).
- [7] 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>]
- [8] S. H. Lim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 2 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2007.903960>]
- [9] S. H. Lim and H. S. Choi, *Physica C* (2006) p. 445-448.
- [10] S. H. Lim, J. F. Moon, and J. C. Kim, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **19** (2009).
- [11] S. H. Lim, H. G. Kang, H. S. Choi, S. R. Lee, and B. S. Han, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **13** (2003).
- [12] S. H. Lim, S. C. Ko, and T. H. Han, *Physica C*, **484** (2013).
- [13] S. C. Ko, T. H. Han, and S. H. Lim, *Physics Procedia*, **45** (2013).