

이중퀀치를 이용한 자속구속형 초전도한류기의 과도전류제한 특성

최상재, 임성훈^a

송실대학교 전기공학부

Transient Current Limiting Characteristics of Flux-Lock Type SFCL Using Double Quench

Sang-Jae Choi and Sung-Hun Lim^a

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

(Received November 21, 2016; Revised November 22, 2016; Accepted November 23, 2016)

Abstract: In this paper, the flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) using double quench was suggested and its transient current limiting characteristics were analyzed. The suggested flux-lock type SFCL using double quench consists of two magnetically coupled windings and two high- T_c superconducting (HTSC) elements connected in series with each winding. To analyze the transient current limiting characteristics of the flux-lock type SFCL using double quench, the short-circuit tests according to the fault angles, which affect the transient component of the fault current right after the fault occurs, were executed. From the comparative analysis for the short-circuit tests at both 0° and 90° fault angles, the useful transient current limiting operations of the suggested flux-lock type SFCL through the double or the single quench occurrence were confirmed.

Keywords: Flux-lock type SFCL (superconducting fault current limiter), Double quench, Transient current limiting characteristics

1. 서론

전력계통의 송전전력 증가에 따른 보호설비의 용량 초과와 이에 따른 기존설비의 교체비용증가를 감소시키기 위한 방안들이 계통보호를 위한 중요한 기술로 대두되었으며, 그 중에서도 고장발생시 신속한 고장전류제한이 가능한 초전도한류기 개발과 함께 동작특성 향상을 위한 연구들이 진행되어 오고 있다 [1-3]. 현재 까지 다양한 종류의 초전도한류기가 제안되어 왔으며,

최근에는, 고장전류의 과도크기에 따라 효율적인 고장전류제한을 위한 초전도한류기 모델이 제안되고 있다 [3-6].

자속구속형 초전도한류기는 초전도소자의 부담을 감소시킬 수 있는 모델로, 다양한 설계조건에 따른 고장전류제한특성에 대한 분석이 보고되어 왔다. 이와 함께, 초기 고장전류의 크기에 따라 초전도한류기를 구성하는 초전도소자들의 퀀치발생을 이중으로 발생시킬 수 있는 초전도한류기 모델이 보고되기도 하였다 [5-8].

기존의 이중퀀치를 이용한 자속구속형 초전도한류기는 이중퀀치를 발생시키기 위해 별도의 초전도소자와 함께, 3차권선이나 직렬저항을 추가한 구조를 가지고 있다 [7,8]. 이와 달리, 본 논문에서는 단일퀀치를 이용한 기존의 자속구속형 초전도한류기에 이중퀀치를 이

a. Corresponding author; 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.

용하기 위해 초전도소자만 추가한 구조를 갖는 자속구속형 초전도한류기를 제안하였다. 제안한 한류기는 구조적으로 이중퀼치를 위해 초전도소자만 추가한 구조로, 초전도소자사이외에는 별도의 장치가 필요없는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 제안한 이중퀼치를 이용한 자속구속형 초전도한류기의 동작과 유용성을 검토하기 위해 고장발생직후 고장전류크기에 영향을 주는 고장각에 따른 단락모의실험을 실시하였다. 모의실험을 통해, 고장전류크기에 따라 초전도한류기를 구성하는 초전도소자들의 이중퀼치 또는 단일퀼치 발생에 따라 고장전류 제한에 따른 초전도소자들의 전력부담과 초전도한류기의 전력부담을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 구조 및 동작 원리

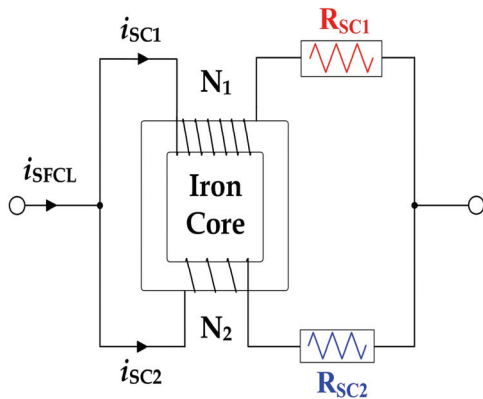


Fig. 1. Schematic configuration of the flux-lock type SFCL using double quench.

본 논문에서 제안한 이중퀼치를 이용할 수 있는 자속구속형 초전도한류기의 구조를 그림 1에 도시하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 자기적으로 결합된 두 개의 병렬권선에 각각 초전도소자가 직렬로 연결된 구조이다. 병렬로 연결된 두 개의 권선은 가극 또는 감극으로 결선이 가능하며, 본 논문에서 검토한 감극결선한 경우에는 두 권선의 인덕턴스값이 같지 않도록 설계해야 이중퀼치동작이 가능하게 된다.

동작원리는 정상시에는 병렬연결된 두 개의 권선에

서 발생하는 자속이 서로 상쇄되어 두 개의 권선에 영전압이 유지되지만, 단락사고로 고장전류가 유입되어 인덕턴스가 작은 권선에 큰 전류가 흘러 직렬연결된 초전도소자가 퀼치로 인해 저항이 발생하면 두 개의 권선에서 발생하는 자속이 상쇄되지 않게 되고 두 개의 권선에 전압이 유지됨으로써 고장전류가 제한된다. 고장발생초기에 고장전류의 과도성분이 클 경우에는 다른 권선에 연결된 초전도소자 또한 임계전류값을 초과하게 되어 퀼치가 발생하게 되고 두 차례의 퀼치발생을 통해 고장전류가 제한되게 된다.

2.2 실험 구성 및 실험 방법

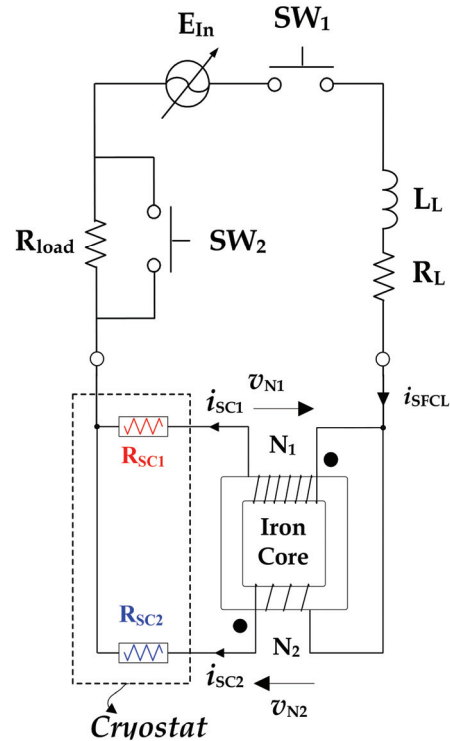


Fig. 2. Experimental circuit of the flux-lock type SFCL using double quench.

그림 2는 이중퀼치를 이용한 자속구속형 초전도한류기의 과도전류제한특성을 모의하기 위한 실험회로 구성도를 보여준다. 고장직후 고장전류의 크기에 영향을 주는 고장각조건으로 전원전압 투입후(SW₁ 투입) 0°와 90°에서 SW₂를 투입시켜 6주기동안 고장을 모의하였다. 고장을 모의하기 위한 회로를 구성하는 선로 임피

Table 1. Specifications of experimental circuit with the flux-lock type SFCL using double quench.

Experimental circuit for short circuit		
Line and load impedance	Value	Unit
$R_{Line} + jX_{Line}$	0.42+j0.066	Ω
R_{Load}	5	Ω
Flux-lock type SFCL using double quench		
Two magnetically coupled windings	Value	Unit
Winding direction	Subtractive polarity	
Turn number of winding 1 (N_1)	60	Turns
Turn number of winding 2 (N_2)	15	Turns
Two HTSC module	Value	Unit
Material	YBCO	-
Fabrication type	Thin film	-
Critical temperature (T_C)	87	K
Critical current (I_C)	27	A

던스, 부하저항, 자속구속형 초전도한류기 설계사항은 표 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 이중웬치를 이용한 자속구속형 초전도한류기의 고장각 0° 와 90° 에서 고장발생시 고장초기 전류제한특성을 보여준다. 과도전류크기가 큰 0° 고장시는 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 권선수가 작은 두 번째 권선에 연결된 초전도소자(v_{SC2})에서 먼저 웬치가 발생하여 전압이 유기된 후 첫 번째 권선에 연결된 초전도소자(v_{SC1})에서 웬치가 발생하면서 두 차례에 걸쳐 고장전류가 제한되는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 그림 3(b)에 도시한 90° 고장시에는 두 번째 권선에 연결된 초전도소자(v_{SC2})에서 웬치가 발생하면서 고장전류가 제한되지만 고장초기 과도전류크기가 작아 첫 번째 권선에 연결된 초전도소자에는 웬치가 발생되지 않는 것을 비교할 수 있다.

고장각 0° 에서 고장발생시, 측정된 고장기간동안 자속구속형 초전도한류기의 권선전압(v_{N1} , v_{N2}), 초전도소자에 유기전압(v_{SC1} , v_{SC2})을 그림 4(a)에 나타내었으며, 전체제한전류(i_{SFCL}), 각 초전도 소자전류(i_{SC1} , i_{SC2}), 초전도 소자저항들(R_{SC1} , R_{SC2})을 그림 4(b)에 나타내었다.

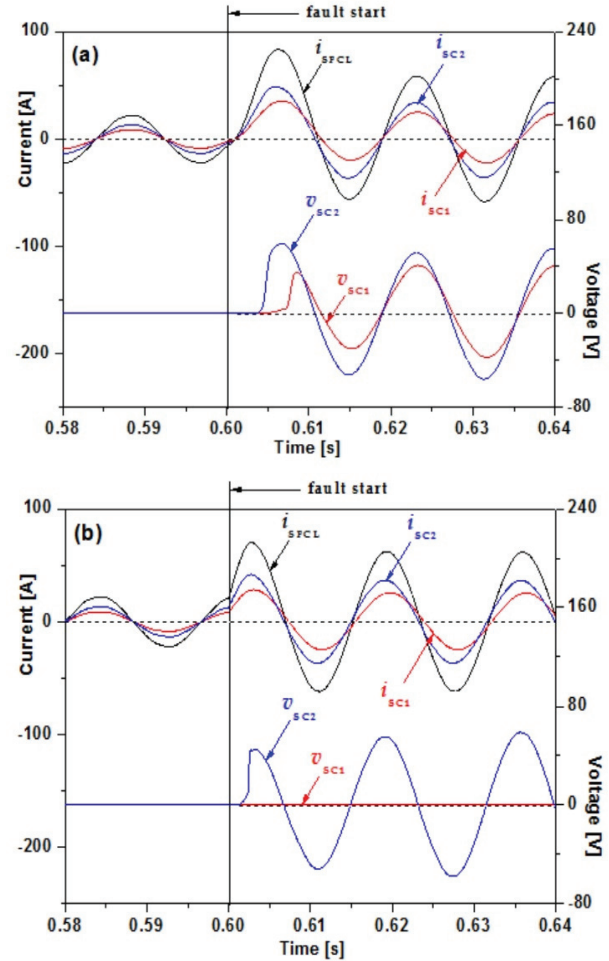


Fig. 3. Transient fault current limiting characteristics of the flux-lock type SFCL using double quench. (a) In case that fault occurs at 0° fault angle and (b) in case that fault occurs at 90° fault angle.

고장초기 큰 과도전류의 크기에 의해 두 권선에 연결된 초전도소자로 나누어 고장전류가 흐르게 되고 두 번째 권선에 연결된 초전도소자에서 저항(R_{SC2})이 먼저 발생하고 첫 번째 권선에 연결된 초전도소자에서 저항(R_{SC1})이 발생하면서 두 초전도소자들의 전압발생과 함께 두 차례의 고장전류제한이 진행되는 것을 그림 4(a)와 그림 4(b)에서 관찰할 수 있다.

또한, 고장기간동안 두 개의 초전도소자에서 발생하는 저항크기는 유사한 크기로 발생되고 있지만, 고장이 제거된 후 초전도상태로 회복되는 영저항값에 도달은 첫 번째 권선에 연결된 초전도소자(R_{SC1})는 바로 영저항값으로 회복되었지만, 두 번째 권선에 연결된 초전도

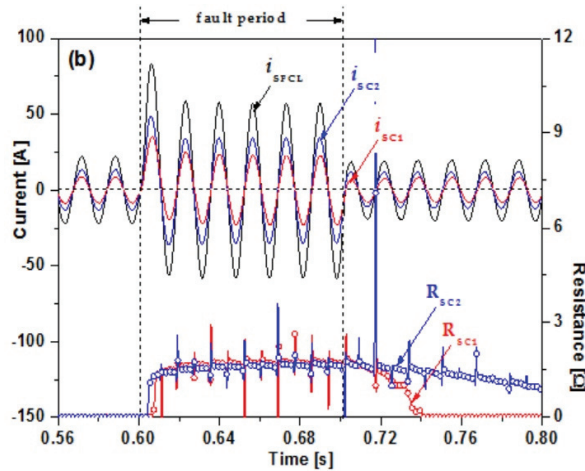
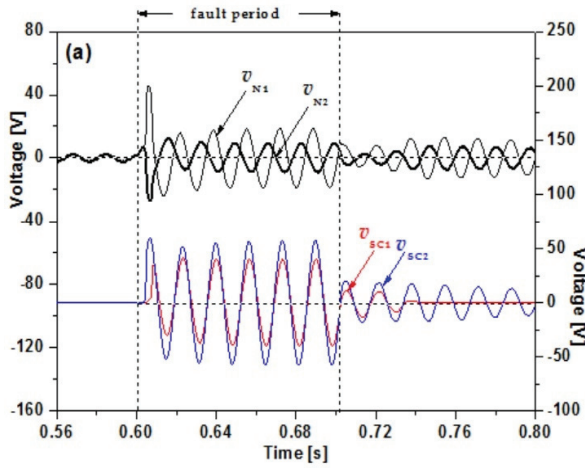


Fig. 4. Voltage and current waveforms of the flux-lock type SFCL using double quench in case that fault occurs at 0° fault angle. (a) Voltage waveforms and (b) current waveforms and resistances across each HTSC element.

소자(R_{SC2})는 일정시간이 소요되는 것을 그림 4(b)에서 관찰할 수 있다.

고장각 90° 에서 고장발생시 고장기간동안 자속구속형 초전도한류기를 구성하는 두 개의 권선과 두 개의 초전도소자의 전압파형을 그림 5(a)에, 소자 전류와 소자에서 발생하는 저항파형을 그림 5(b)에 나타내었다. 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 두 번째 권선에 연결된 초전도소자(R_{SC2})에서만 퀀치발생으로 전압(v_{SC2})이 발생하기 때문에 두 번째 권선에 유기되는 전압(v_{N2})은 그림 4에서 검토한 고장각 0° 시와 달리 크게 유기되면서 고장전류제한 동작이 이루어지는 것을 비교할 수 있다.

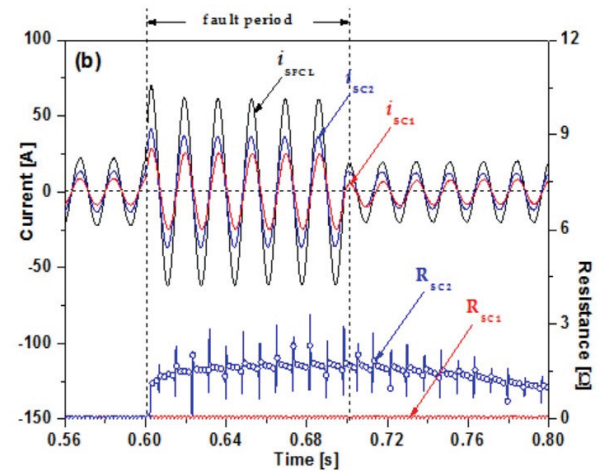
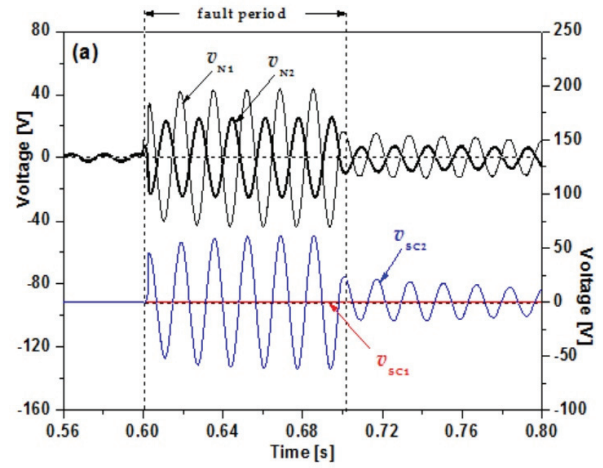


Fig. 5. Voltage and current waveforms of the flux-lock type SFCL using double quench in case that fault occurs at 90° fault angle. (a) Voltage waveforms and (b) current waveforms and resistances across each HTSC element.

고장각 0° 와 90° 일 때 이중퀀치를 이용한 자속구속형 초전도한류기를 구성하는 두 개의 초전도소자들의 전력부담(p_{SC1} , p_{SC2})을 전체 초전도한류기의 전력부담(p_{SFCL})과 비교검토한 결과를 그림 6(a)와 그림 6(b)에 도시하였다. 그림 6(a)의 고장각 0° 일 때가 그림 6(b)의 고장각 90° 에서 고장시보다 초전도소자들의 전력부담증가와 함께 한류기 전체부담이 증가하는 것을 검토할 수 있었다. 이는 고장초기 고장전류가 클 경우에 고장기간동안 두 개의 초전도 소자들의 퀀치발생에 따른 전력부담증가로 초전도한류기의 전력부담증가에도 기여하게 되는 것으로 분석할 수 있었다.

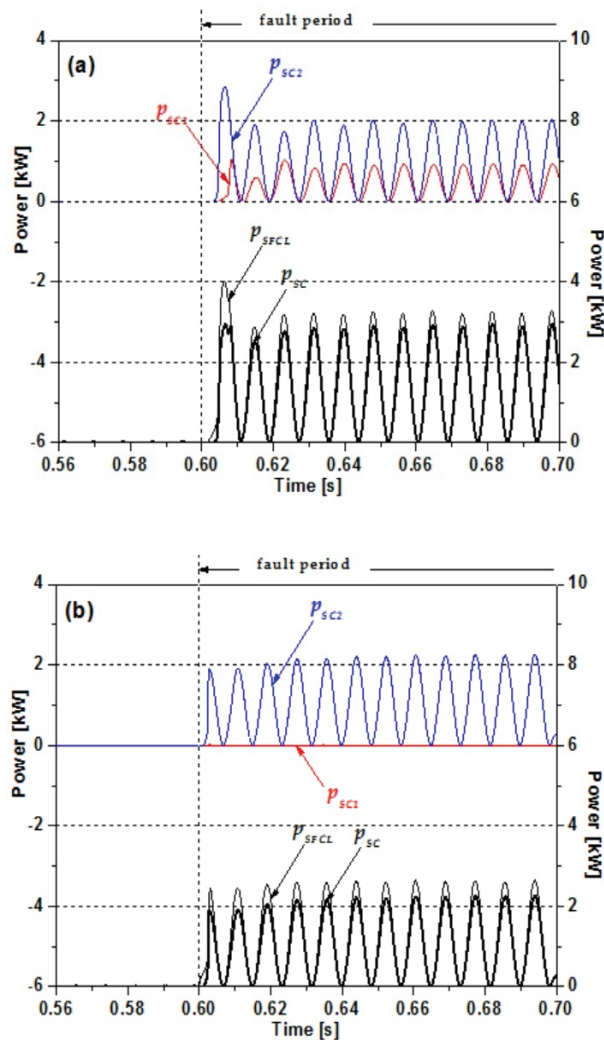


Fig. 6. Power burdens of two HTSC elements and the flux-lock type SFCL after fault occurred. (a) In case that fault occurs at 0° fault angle and (b) in case that fault occurs at 90° fault angle.

4. 결론

본 논문에서는 자기적으로 병렬 결합된 두 개의 권선에 직렬로 초전도소자가 개별로 연결한 구조를 갖는 이중퀀치를 이용할 수 있는 자속구속형 초전도한류기 구조를 제안하고 0° 와 90° 고장각에서 고장발생시 고장전류제한특성 분석을 통해 제안한 한류기의 유용성을 검토하였다.

고장초기 과도전류크기가 큰 0° 고장시에는 이중퀀치에 의해 고장전류제한동작이 이루어지는 것을 모의실험을 통해 확인하였고, 고장기간동안 각 초전도소자들의 전력부담과 초전도한류기의 전력부담이 90° 고장시보다 크게 발생하는 것을 분석할 수 있었다.

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: <https://doi.org/10.1109/61.131138>]
- [2] H. Kado and M. Ichikawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **7**, 2 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1109/77.614672>]
- [3] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, and H. W. Neumuller, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **7**, 2 (1997). [DOI: <https://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: <https://doi.org/10.1109/TASC.2004.840820>]
- [5] S. H. Lim, S. C. Ko, and T. H. Han, *Physica C*, **484**, 253 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.03.011>]
- [6] S. H. Lim, *Physica C*, **471**, 1354 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2011.05.193>]
- [7] S. H. Lim, I. K. You, and J. C. Kim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21**, 3 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2169134>]
- [8] S. C. Ko, T. H. Han, and S. H. Lim, *JKPS*, **65**, 2 (2014).