

이중퀸치를 이용한 삼상변압기형 한류기의 고장전류제한 동작 분석

한태희¹, 고석철², 임성훈³ 

¹ 중원대학교 반도체공학과

² 공주대학교 산학협력단 & 지역산업응용연구소

³ 송실대학교 전기공학과

Analysis on Fault Current Limiting Operation of Three-Phase Transformer Type SFCL Using Double Quench

Tae-Hee Han¹, Seok-Cheol Ko², and Sung-Hun Lim³

¹ Department of Semiconductor Engineering, Jungwon University, Goesan 28024, Korea

² Industry-University Cooperation Foundation & Regional-Industrial Application Research Institute, Kongju National University, Kongju 32588, Korea

³ Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received January 14, 2022; Revised January 24, 2022; Accepted January 24, 2022)

Abstract: In this paper, the fault current limiting operations of three-phase transformer type superconducting fault current limiter (SFCL) using double quench, which consisted of E-I iron core with three legs wound by primary and secondary windings and two superconducting modules (SCMs), were analyzed according to three-phase ground fault types. To verify the effective operation of the three-phase transformer type SFCL using double quench, the test circuit for three-phase ground faults was constructed, and the fault current tests were carried out. Through analysis on the fault current test results, the different fault current limiting characteristics of three-phase transformer type SFCL using double quench from three-phase transformer type SFCL using three SCMs were discussed.

Keywords: Fault current limiting operations, Three-phase transformer type superconducting fault current limiter (SFCL), Double quench, Three-phase ground fault types

초전도한류기(superconducting fault current limiter, SFCL)는 전력 계통에 발생하는 고장 전류를 초전도체의 고유특성을 활용하여 고장전류의 감지와 제한 동작이 동시에 이루어질 수 있는 장점이 있어 국내·외적으로 활발하

게 연구가 진행되고 있다 [1-5].

초전도한류기 중 변압기형 초전도한류기는 1차권선에 선로에 직렬로 연결되고 2차권선에 초전도소자가 연결되어 선로로부터 초전도소자를 절연시킬 수 있는 구조를 갖는다. 선로에서 발생한 고장전류가 직접적으로 초전도소자로 도통되지 않는 변압기형 초전도한류기는 초전도소자의 부담을 줄일 수 있고, 동작전류와 제한 임피던스를 권선비를 통해 조절할 수 있는 특징이 있다 [3-5].

또한, 전력계통에 적용하기 위한 변압기형 초전도한류

✉ Sung-Hun Lim; superlsh73@ssu.ac.kr

Copyright ©2022 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.

기 모델로 단일 자기경로를 갖는 C-C 철심에 삼상변압기 1차, 2차권선을 세개의 초전도 모듈과 함께 구성함으로써 변압기철심의 부피와 무게를 감소시킬 수 있는 변형된 삼상변압기형 초전도한류기가 보고된 바 있다 [6,7].

최근에는, 기존의 변압기형 초전도한류기에 추가 2차권선과 2개의 초전도 모듈을 이용하여 지락 발생초기의 고장 전류의 크기에 따라 두차례의 켄치를 이용하여 고장전류를 제한할 수 있는 이중 켄치형 초전도한류기가 보고되었다 [8,9].

본 논문에서는 E-I형 철심을 활용한 이중 켄치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기를 제안하였으며 삼상지락 고장 모의실험을 통해 삼상지락 고장 종류에 따른 고장전류 제한 특성을 분석하고 각상에 초전도 모듈을 이용한 기존의 삼상변압기형 초전도한류기와 다른 동작 특성에 대해 비교 분석하였다.

이중 켄치를 이용한 단상변압기형 초전도한류기의 구성도를 그림 1(a)에 도시하였다. 기존의 단상변압기형 초전도한류기에 추가 2차권선(N_2')과 또다른 초전도 모듈(R_{SC2})로 구성된 추가 회로(additional circuit)로 구성된다. 동작원리는 평상시엔 1차권선에서 발생하는 자속과 2차권선에서 발생하는 자속이 상쇄되어 두 권선에 유기되는 전압은 영에 가까운 값으로 나타나게 된다. 반면에, 고장이 발생되면 2차권선에 연결된 초전도 모듈(R_{SC1})에 흐르는 전류가 임계전류값을 초과하게 되어 켄치가 발생하게 되고 철심내부에 유기된 자속에 의해 권선에 전압이 유기되어

고장 전류를 제한할 수 있다. 하지만, 고장 초기에 고장 전류가 클 경우 추가 2차권선에 연결된 초전도 모듈(R_{SC2})에 흐르는 전류가 임계전류값을 초과하게 되어 또 다른 켄치가 발생하게 되고 두차례 켄치, 즉, 이중 켄치에 의해 고장 전류를 제한할 수 있게 된다.

이중 켄치를 이용한 단상변압기형 초전도한류기를 E-I 철심을 이용하여 이중 켄치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기로 확장하여 구성한 구조를 그림 1(b)에 도시하였다. a, b, c 상의 각 1차측권선(N_1)은 선로에 직렬로 연결되며, a, b, c 상에 해당되는 각 2차권선(N_2)은 3개의 단자(a_1', b_1', c_1')가 공통점 1에 연결된다. 이중 켄치를 사용하기 위해 E-I 철심 자속 경로의 대칭을 고려하여 a, b, c 상 중에 a, c 상 2차권선에 2개의 초전도 모듈(R_{SC}^a, R_{SC}^c)을 각각 연결한 후 또다른 공통점 2에 b_1 과 함께 공통으로 연결하여 구성하였다.

이중 켄치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기의 동작 원리를 설명하기 위해 그림 1(b)에 도시한 a, b, c 상 2차측 등가회로와 2차측 전류페이저도를 그림 2에 도시하였다.

a, b, c 상의 2차권선으로부터 공통으로 연결된 절점 2에 인입되는 또는 절점 1에 인출되는 전류들($i_{2nd}^a, i_{2nd}^b, i_{2nd}^c$)의 합은 0이다. 2차측 전류에 대해 페이저도로 도시하면 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 각 전류 사이의 위상차는 120° 이며, 크기는 $|i_{2nd}^a| = |i_{2nd}^b| = |i_{2nd}^c|$ 로 동일하다. 이를 고려하면 a, b, c 상의 2차측 전류들의 페이저 합은 식 (1)과 같이 0으로 표현될 수 있다.

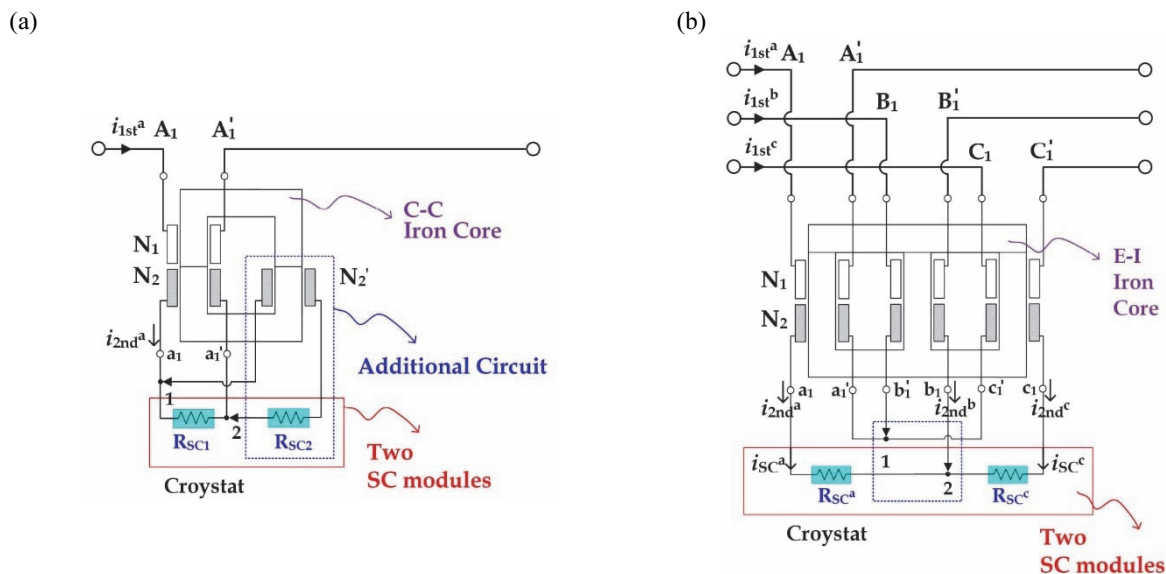


Fig. 1. Schematic configuration of transformer type SFCL using twice quench. (a) Single phase transformer type SFCL and (b) three-phase transformer type SFCL.

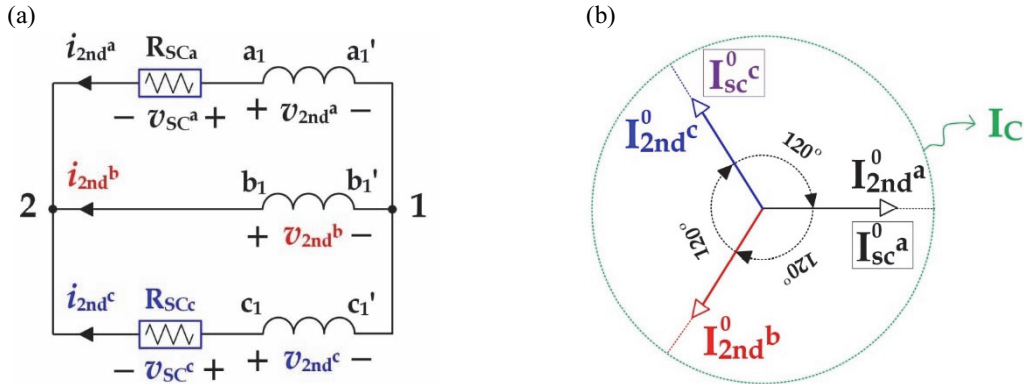


Fig. 2. Electrical equivalent circuit and current phasor diagram of secondary winding of three-phase transformer type SFCL using twice quench. (a) Electrical equivalent circuit and (b) current phasor diagram.

$$I_{2nd}^a + I_{2nd}^b + I_{2nd}^c = 0 \quad (1)$$

$I_{2nd}^a, I_{2nd}^b, I_{2nd}^c$ 는 초전도 모듈에 해당되는 전류인 $I_{sc}^a, I_{sc}^b, I_{sc}^c$ 와 동일하며, 평상시에는 임계전류(I_c)보다 작은 크기로 흐르게 된다.

a상에서 일선지락이 발생하거나 a상과 b상에서 이선지락이 발생할 경우, a상에 해당되는 2차측 전류(i_{2nd}^a)가 증가되고 이로 인해 a상에 연결된 초전도 모듈에서 켄치가 발생하게 되어 전류제한이 이루어지면 공통으로 연결된 절점에 인입되는 전류들의 합이 0이 되므로 b상과 c상의 2차측 전류(i_{2nd}^b, i_{2nd}^c)가 증가될 수 있게 된다. 이에 따라, 또 다른 초전도 모듈이 연결된 c상의 경우, 초전도 모듈의 임계전류를 초과할 경우 켄치발생을 통해 고장전류제한이 이루어지며 a, b, c상의 전류들의 합이 0이 됨에 따라 b상의 2차측 전류도 감소될 수 있게 된다.

이중 켄치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기의 고장 전류제한 특성을 분석하기 위해 삼상지락 고장을 위한 모의회로를 그림 3과 같이 구성하였다.

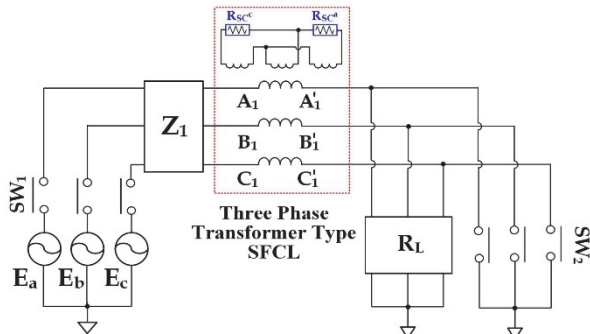


Fig. 3. Experimental circuit for the short-circuit test of three-phase transformer type SFCL using twice quench.

지락고장을 위한 모의회로는 삼상 교류전원(E_a, E_b, E_c), 선로 임피던스(Z_1) 및 부하저항(R_L)으로 구성하였다. E-I 철심내 3개의 자로에 a, b, c상에 해당되는 1차측과 2차측 권선을 결선하였으며, a상과 c상의 2차권선에 초전도 모듈로 임계전류 27 A를 갖는 YBCO 박막을 연결하여 공통 절점을 갖도록 구성하였다.

E-I 철심에 결선된 1차권선과 2차권선의 권선수는 각각 45, 15턴으로 설계하였으며, 초전도 모듈은 실리콘 기판위에 YBCO 층을 증착한 박막을 사용하였으며, 보호층으로 금층(gold Layer)을 코팅하였다. 이와 함께, 켄치발생 시 열발생으로부터 박막소자를 보호하기 위해 2.3 Ω 의 셉트 저항을 연결하였다. 초전도 모듈의 세부 설계 사양은 표 1과 같으며, 세부 제조 과정은 이전의 문헌에 기술되어 있다 [8,9].

삼상지락 고장을 위해 삼상교류전원을 스위치(SW_1)를 투입한 후 부하저항(R_L)에 병렬 연결된 지락 스위치(SW_2)를 10주기 동안 투입하여 모의실험을 진행하였다. 이때, a상의 일선지락, a, b상의 이선지락, a, b, c상의 삼선지락

Table 1. Specifications of SCMs.

Two SCMs	Value	Unit
Material	YBCO	
Fabrication type	Thin film	
Total line length	420	mm
Line width	2	mm
Thin film thickness	0.3	μm
Gold layer thickness	0.2	μm
Critical temperature (T_c)	87	K
Critical current (I_c)	27	A

을 해당되는 개별 지락 스위치를 동작시킴으로써 삼상지락 종류별 지락고장을 모의 실험하였다. 모의실험 시 전압, 전류데이터를 측정과 함께 수집하여 삼상지락 고장 종류별로 이중 켄치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기의 고장전류 제한 특성을 분석하였다.

삼상지락 고장의 대표적인 비대칭 지락고장인 일선지락 고장이 발생하였을 경우 이중 켄치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기의 고장전류 제한 동작을 그림 4에 도시하였다. 그림 4에서 전압전류변수내에 포함된 첨자(w/o)는 삼상변압기형 초전도한류기를 설치하지 않은 경우를 나타낸다.

그림 4(a)에서 확인할 수 있듯이 a상에서 일선지락 고장 발생 직후 증가한 2차권선 전류(i_{2nd}^a)는 a상에 연결된 초전도 모듈의 켄치를 발생시켰고, 제한으로 감소된 전류는 공통 절점을 통해 b상과 c상의 전류(i_{2nd}^b, i_{2nd}^c)가 증가된다. 이때, c상의 전류가 연결된 초전도 모듈의 임계전류(I_C)를 초과하여 부분 켄치와 회복을 반복한 다음 3주기 이후 완전 켄치가 발생하는 것을 c상에 연결된 초전도 모듈의 전압(v_{SC}^c)에서 관찰할 수 있다. 이와 함께, a상 선로전류(i_{1st}^a)의 경우에도 a상 초전도 모듈의 켄치발생으로 고장발생 직후 고장전류 제한동작이 이루어지는 것을 그림 4(b)에서 확인할 수 있다.

비대칭고장의 또다른 고장으로 a상과 b상에서 이선지락이 발생한 경우, 고장전류 제한 동작을 그림 5에 도시하였다. 고장발생 직후 a상의 2차권선 전류(i_{2nd}^a)와 b상의 2차권선 전류(i_{2nd}^b)가 증가되지만 a상에 연결된 초전도 모듈의 켄치발생으로 a상 2차권선 전류제한과 함께 b상 2차권

선의 전류에서 제한이 이루어지는 것을 관찰할 수 있다. c상 2차권선 전류의 경우에는 고장 전의 전류와 차이가 없어 c상에 연결된 초전도 모듈에서는 켄치가 발생되지 않는 것을 확인할 수 있다.

반면에, 1차권선이 연결된 a상 선로전류(i_{1st}^a)의 경우에는 2차권선 전류 감소로 제한이 이루어지지만, b상 선로(i_{1st}^b)전류의 경우에는 고장 초기 과도적인 제한을 제외하고 큰 고장전류제한이 이루어지지 않는 것을 그림 5(b)에서 분석할 수 있다.

마지막으로 삼상지락 고장의 대표적인 대칭 고장인 a, b, c상에 삼상지락 고장이 발생한 경우, 이중 켄치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기의 고장전류 제한동작을 그림 6에 도시하였다. 고장발생 직후 a상 2차권선에 연결된 초전도 모듈(v_{SC}^a)에서 켄치가 먼저 발생한 후 c상 2차권선에 연결된 초전도 모듈(v_{SC}^c)에서 켄치가 발생되면서 b상 2차권선의 전류(i_{2nd}^b)도 a상, c상 2차권선의 전류(i_{2nd}^a, i_{2nd}^c)와 함께 감소되는 것을 그림 6(a)에서 확인할 수 있다. 반면에, a, b 이선지락 고장에서 검토했던 분석과 유사하게 b상의 선로전류(i_{1st}^b)에서는 고장전류제한 효과가 발생되지 않는 것을 그림 6(b)에서 분석할 수 있다. 초전도 모듈이 연결되지 않는 b상의 2차권선 전류는 a상과 c상의 2차권선 전류의 감소와 함께 감소가 이루어진 반면, 1차권선의 b상전류는 고장초기를 제외하고 커다란 제한 효과가 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다. 이에 대해서는 추가적인 모의실험을 통해 E-I철심의 자화특성을 고려한 분석을 통해 검토하고자 한다.

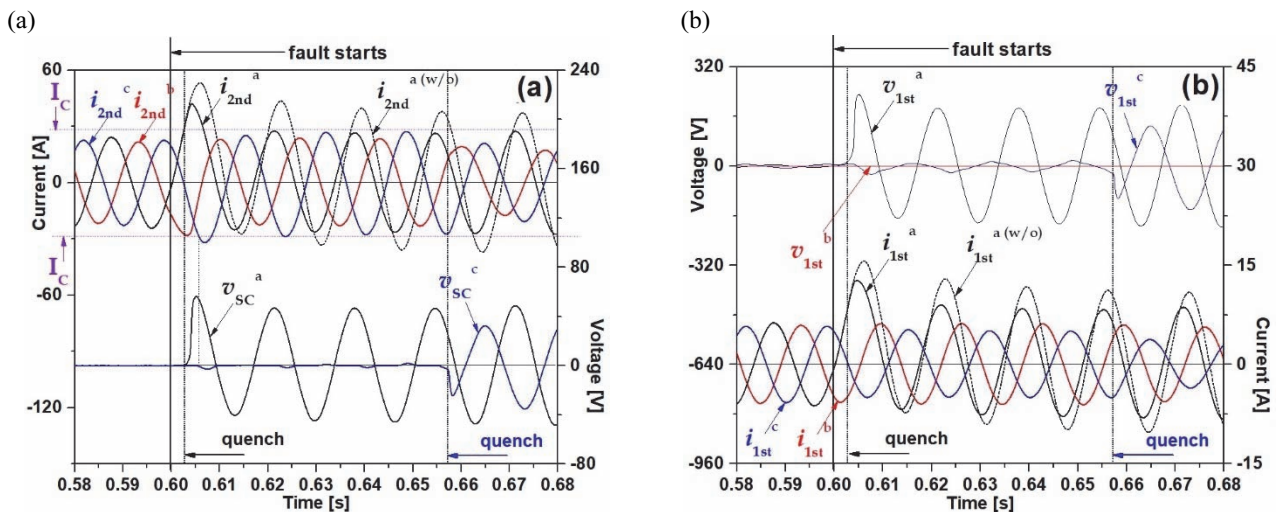


Fig. 4. Fault current limiting characteristics of three phase transformer type SFCL using twice quench in case that single line ground (a phase) fault happens. (a) Current waveforms in secondary windings and Voltage waveforms in two SCMs and (b) voltage and current waveforms in primary windings.

본 논문에서는 이중 켄치형 단상변압기형 초전도한류기를 삼상변압기형 초전도한류기에 적용하기 위해 E-I 철심을 이용하여 이중 켄치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기를 구성하였다. 삼상 모의전력 계통에 삼상지락 모의 실험을 통해 구성된 이중 켄치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기의 고장전류 제한 특성을 분석하였다.

초전도 모듈이 설치하지 않은 2차권선의 전류는 초전도 모듈이 설치된 2차권선의 전류가 켄치발생으로 제한이 이루어짐과 동시에 a, b, c상이 공통으로 연결된 절점을 통해 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 반면에, 초전도 모듈이 설치되지 않은 선로와 연결된 1차권선의 전류는 지락발

생 과도시 일부 전류제한 효과가 있지만 고장주기 동안 전류제한 효과는 크지 않았다.

본 논문을 바탕으로 효과적으로 고장전류를 제한하기 위해 임피던스를 증가시킬 수 있는 다양한 구조와 E-I 철심 설계에 대한 동일한 제한 특성을 도출하기 위한 추가 연구를 진행할 예정이다.

ORCID

Sung-Hun Lim

<https://orcid.org/0000-0002-9733-3754>

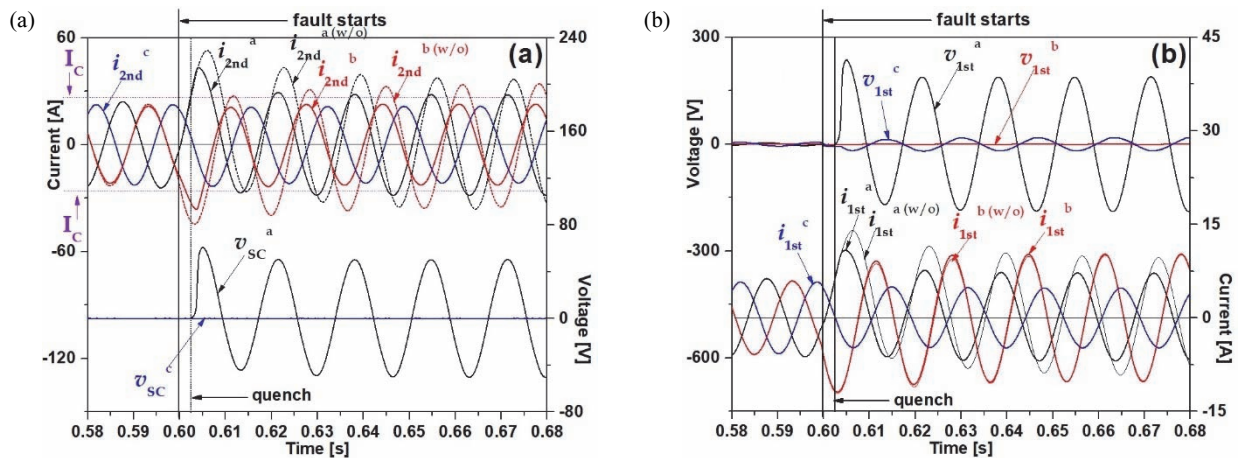


Fig. 5. Fault current limiting characteristics of three phase transformer type SFCL using twice quench in case that double line ground (a, b phases) fault happens. (a) Current waveforms in secondary windings and Voltage waveforms in two SCMs and (b) voltage and current waveforms in primary windings.

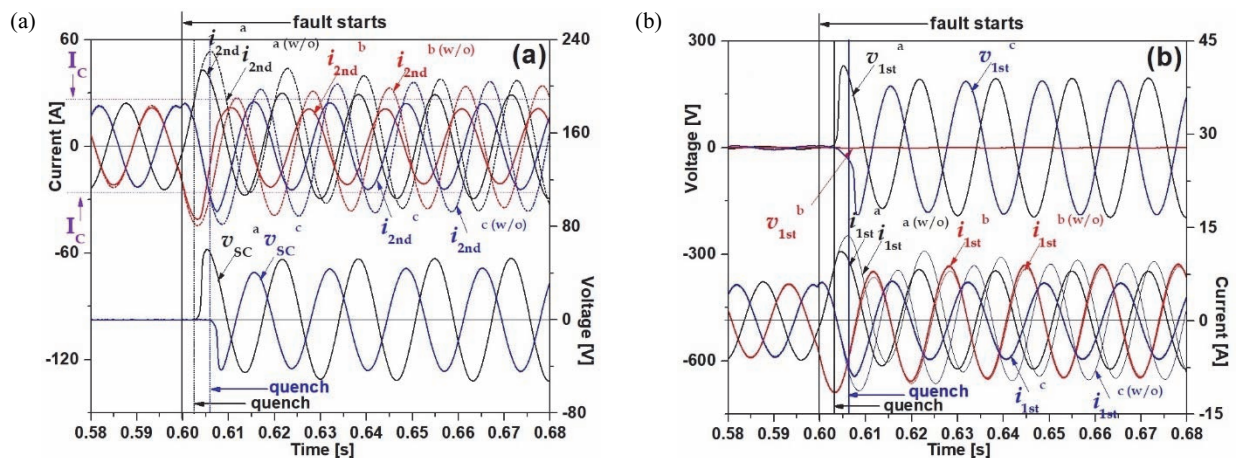


Fig. 6. Fault current limiting characteristics of three phase transformer type SFCL using twice quench in case that triple line ground (a, b, c phases) fault happens. (a) Current waveforms in secondary windings and Voltage waveforms in two SCMs and (b) voltage and current waveforms in primary windings.

감사의 글

This Work was supported by the Jungwon University Grant for 2020 Research Year and was also supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MOE) (No. 2020R1F1A1077206).

REFERENCES

- [1] B. Li, F. Guo, J. Wang, and C. Li, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **25**, 5600805 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2374191>]
- [2] A. Morandi, *Physica C*, **484**, 242 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.03.004>]
- [3] H. Yamaguchi, T. Kataoka, K. Yaguchi, S. Fujita, K. Yoshikawa, and K. Kaiho, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **14**, 815 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2004.830284>]
- [4] S. H. Lim, H. S. Choi, D. C. Chung, Y. H. Jeong, Y. H. Han, T. H. Sung, and B. S. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15**, 2055 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.849450>]
- [5] S. T. Lim, S. C. Ko, and S. H. Lim, *J. Electr. Eng. Technol.*, **13**, 533 (2018). [DOI: <http://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.2.533>]
- [6] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **16**, 715 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2006.871269>]
- [7] S. H. Lim, H. T. Han, Y. S. Cho, H. S. Choi, B. S. Han, and S. W. Lee, *Physica C*, **463**, 1198 (2007). [DOI: <http://doi.org/10.1016/j.physc.2007.03.458>]
- [8] T. H. Han and S. H. Lim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28**, 5601705 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2786264>]
- [9] 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>]