

이중퀀치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기의 삼상지락 고장 종류에 따른 고장전류 제한 특성 분석

이신원¹, 한태희², 임성훈³ 

¹ 중원대학교 컴퓨터공학과

² 중원대학교 반도체공학과

³ 숭실대학교 전기공학과

Analysis on Fault Current Limiting Characteristics of Three-Phase Transformer Type SFCL using Double Quench According to Three-Phase Ground-Fault Types

Shin-Won Lee¹, Tae-Hee Han², and Sung-Hun Lim³

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

² Department of Semiconductor Engineering, Jungwon University, Goesan 28024, Korea

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

(Received August 8, 2023; Revised August 21, 2023; Accepted August 23, 2023)

Abstract: The fault current limiting characteristics of three-phase transformer type superconducting fault current limiter (SFCL), which consisted of three-phase primary and secondary windings wound on E-I iron core, one high-T_c superconducting (HTSC) element connected with the secondary winding of one phase and another HTSC element connected in parallel with other two secondary windings of two phases, were analyzed. Unlike other three-phase transformer type SFCLs with three HTSC elements, three-phase transformer type SFCL using double quench has the merit to perform fault current limiting operation for three-phase ground faults with two HTSC elements. To verify its proper three-phase ground fault current limiting operation, three-phase ground faults such as single-line ground, double-line ground and triple-line ground faults were generated in three-phase simulated power system installed with three-phase transformer type SFCL using double quench. From analysis of its fault current limiting characteristics based on tested results, three-phase transformer type SFCL using double quench was shown to be effectively operated for all three-phase ground faults.

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

✉ Sung-Hun Lim; superlsh73@ssu.ac.kr

Copyright ©2023 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.

최근에 신재생에너지를 이용한 분산전원 증가로 전력공급은 유연해졌지만 계통 내 지락 및 단락 등 사고 발생 시 고장전류가 증가하여 기존의 설치된 차단기나 보호기기의 차단용량 초과로 심각한 문제 등이 예상된다. 고장전류를 해결하기 위한 가장 이상적인 방안으로 초전도 특성을 이용한 초전도한류기(superconducting fault current

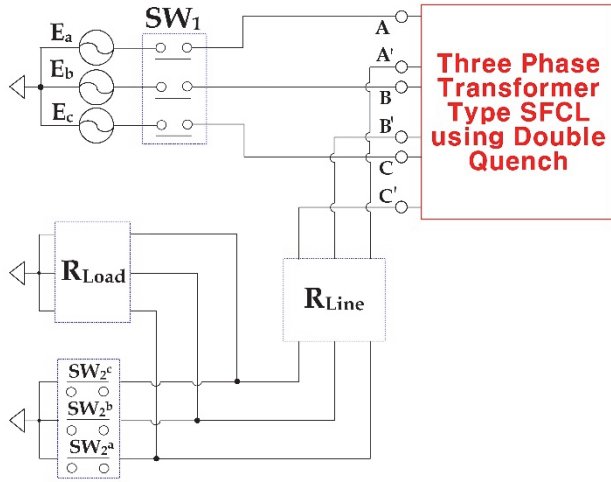


Fig. 2. Configuration of simulated power system to generate three-phase ground fault.

Table 1. Specifications of three-phase transformer type SFCL using double quench.

Three phase power system	Value	Unit
Line voltage	480	V
Line resistance	1	Ω
Load resistance	40	Ω
Two coils	Value	Unit
Turns of primary winding (N_1)	400	Turns
Turns of secondary winding (N_2)	100	Turns
Two HTSC elements	Value	Unit
Material	YBCO	Thin film
Critical current of HTSC element	27	A
Total meander line length	420	mm
Line width	2	mm
Thin film thickness	0.3	μm
Gold layer thickness	0.2	μm

평형 및 불평형 고장사고가 발생한 경우, 이중켄치를 이용한 삼상 변압기형 초전도한류기를 구성하는 초전도소자의 켄치특성을 그림 3에 도시하였다. 그림 3(a)는 불평형 고장인 일선지락 고장이 발생한 경우이다. 고장 발생과 동시에 초전도소자 1과 초전도소자 2의 임계전류(27 A)를 초과하여 켄치가 발생한 것을 알 수 있다. 고장선로인 a상에서 고장 발생 후 3.0ms에서 켄치가 발생하여 초전도소자 전압(V_{sc1})이 유지되었다. 건전선로인 b상과 c상에 연결된 초전도소자 2는 4.1ms에서 부분 켄치가 발생하였지만 과도성분이 작아 전압은 발생되지 않았다. 이선지락 고장이

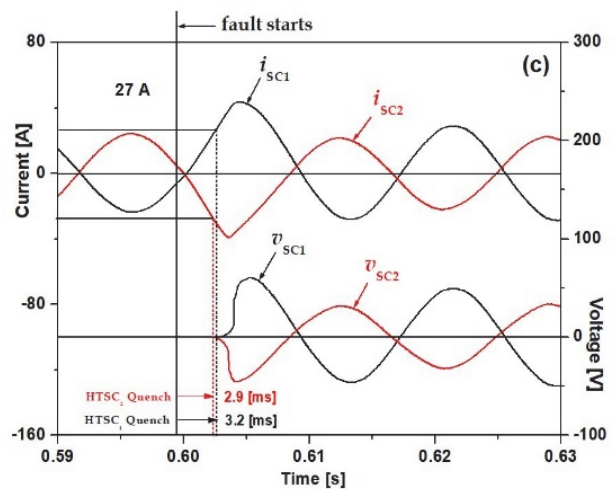
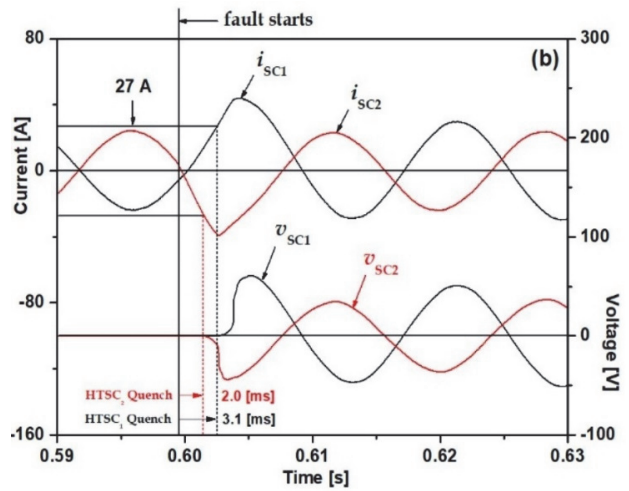
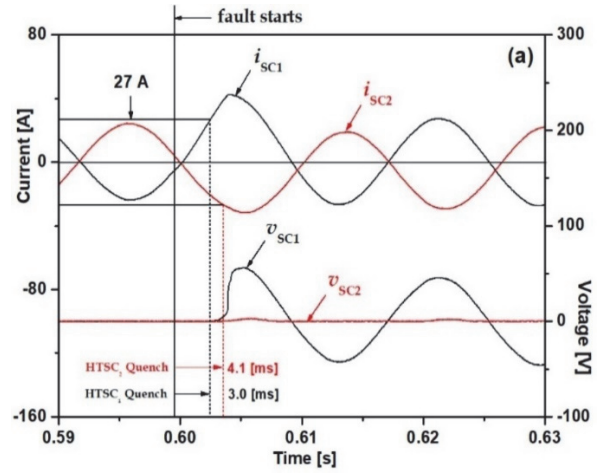


Fig. 3. Double quench characteristics of three-phase transformer-type SFCL using double quench in case that balanced and unbalanced faults occur. (a) In case of single line ground fault, (b) in case of double line ground fault, and (c) in case of triple line ground fault.

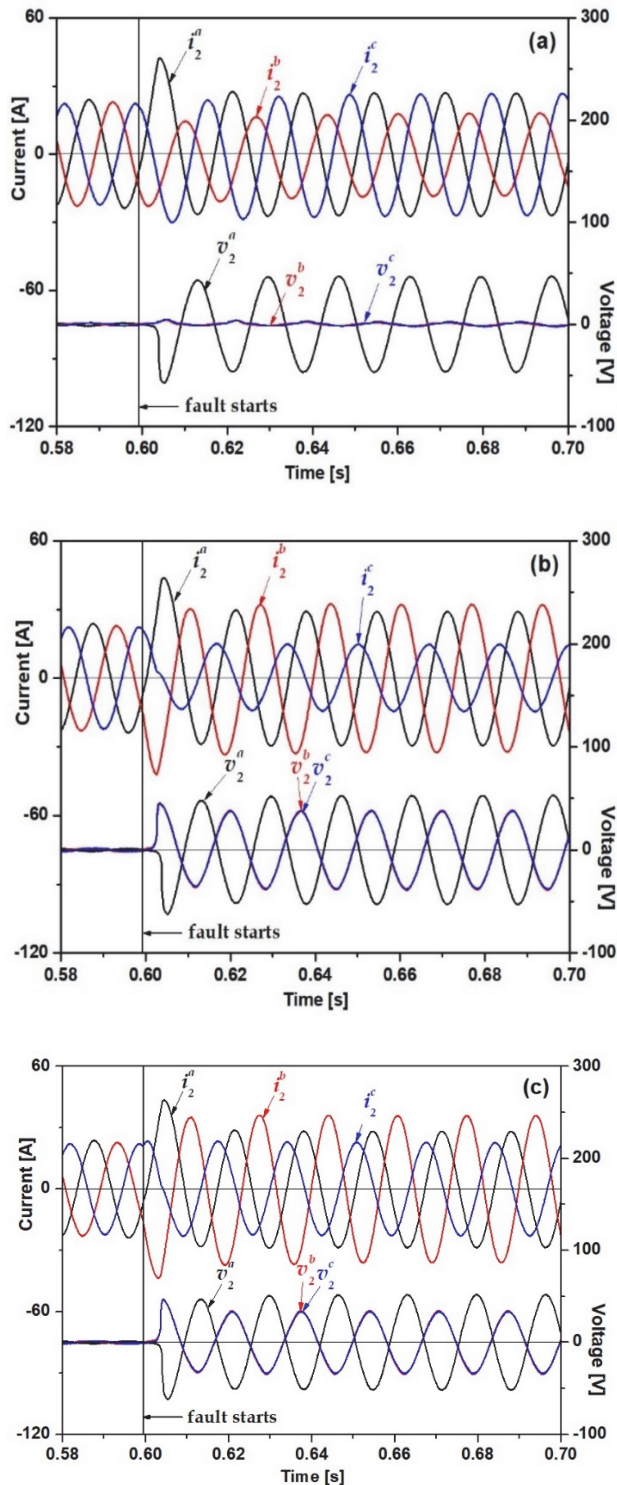


Fig. 4. Current and voltage waveforms of secondary windings in case that balanced and unbalanced faults occur. (a) In case of single line ground fault, (b) in case of double line ground fault, and (c) in case of triple line ground fault.

발생한 그림 3(b)의 경우, 고장 발생과 동시에 두 초전도소자의 이중퀀치가 발생하였다. 고장 발생 직후 초전도소자 2는 2.0ms, 초전도소자 1은 3.1ms에서 퀀치가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 평형 고장인 삼선지락 고장인 그림 3(c)의 경우, 고장 발생 후 초전도소자 2는 2.9ms, 초전도소자 1은 3.2ms에서 퀀치가 발생함을 확인할 수 있다. 고장전류 분석을 통해 이선지락과 삼선지락 고장이 발생한 경우, 이중퀀치가 발생하였고, 초전도소자 2의 퀀치가 초전도소자 1보다 빠르게 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 평형 및 불평형 고장에 따른 고장전류를 초전도소자의 이중퀀치를 이용하여 제한이 가능함을 확인할 수 있었다.

이중퀀치를 이용한 삼상변압기형 초전도한류기의 평형 및 불평형 고장에 따른 2차측 권선의 전류 및 전압파형을 그림 4에 도시하였다. 그림 4(a)는 a상에서 일선지락 고장이 발생한 경우의 2차권선의 전류와 전압파형을 보여준다. 고장 발생과 동시에 초전도소자의 퀀치에 의한 저항 발생으로 2차권선의 전압(v_2^a)이 유기되어 증가하고 있다. 건전상인 b상과 c상의 2차권선 전압은 초전도소자의 부분 퀀치에 의해 미소전압이 발생하였으나, c상의 2차전류(i_2^c)는 과도성분이 b상의 전류보다 9.45 A 크게 발생하였다. 그림 4(b)는 a상과 b상에서의 이선지락 고장인 경우의 2차권선의 전류와 전압파형을 보여준다. 고장과 동시에 두 초전도소자의 이중퀀치가 발생하여 2차권선 전압이 발생되었다. b상과 c상의 2차권선 전압은 같은 전압을 나타내고 있다. 이것은 b상과 c상의 2차권선이 병렬결선으로 연결된 구조에 기인한 것으로 볼 수 있었다. 이선지락 고장인 경우 고장상인 a상과 b상의 과도성분으로 전류가 각각 43.95 A, -42.04 A로 나타났고, 건정상인 c상의 전류가 고장기간 동안 고장 전 전류보다 7.3 A 감소한 것을 확인할 수 있었다. 그림 4(c)는 평형 고장인 삼선지락 고장의 2차권선의 전류와 전압파형을 보여준다. 고장 발생 직후 두 초전도소자의 이중퀀치가 발생하였고, 2차권선에 전압이 유기된 것을 알 수 있었다. b상과 c상의 권선전압은 동일한 전압을 나타내고 있고, 같은 전압 크기를 보이고 있다. 삼선지락 고장의 경우 c상의 2차전류(i_2^c)는 과도성분이 이선지락 고장에 비해 8.48 A 더 크게 발생하고 있지만, a상과 b상의 2차전류(i_2^a, i_2^b)에 비해 20 A 작게 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 5는 평형 및 불평형 고장에 따른 1차측 전류 및 전압파형을 나타내고 있다. 그림 5(a)는 a상에서 지락 고장이 발생한 경우의 1차측 전류와 전압파형을 보여준다. 고장 발생과 동시에 초전도소자의 퀀치에 의한 저항 발생으로 1차측 전압(v_1^a)이 172.7 V로 증가되고 있고, 1차측 전류(i_1^a)는 고장 발생으로 6.27 A 더 증가하고 있다. 고장 발

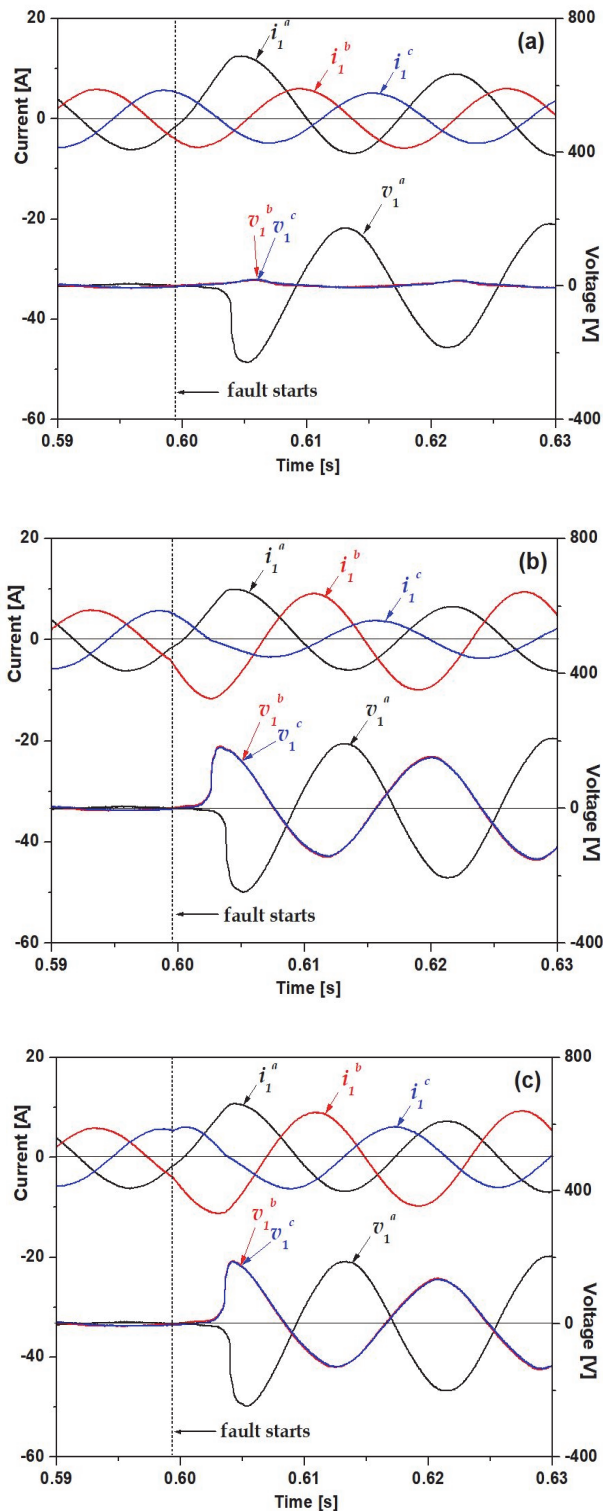


Fig. 5. Current and voltage waveforms of primary windings in case that balanced and unbalanced faults occur. (a) In case of single line ground fault, (b) in case of double line ground fault, and (c) in case of triple line ground fault.

생 이후 과도성분이 작아 b상과 c상에 전압이 유기되지 않음을 관찰할 수 있다. 그림 5(b)는 a상과 b상에서 고장이 발생한 불평형 고장의 전류와 전압파형을 보여준다. 고장과 함께 두 초전도소자의 켄치에 의한 저항 발생으로 1차 권선 전압이 증가하고 있다. 켄치에 의한 저항 발생으로 a상과 b상의 1차측 전류(i_1^a , i_1^b) 과도성분은 각각 9.93 A, -11.7 A로 크게 나타나고 있고, 건전상인 c상에서는 고장 전 전류(i_1^c)보다 고장 후의 전류(i_1^c)가 1.83 A로 조금 감소된 것을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 a상, b상 및 c상에서 지락 고장이 발생한 경우의 1차측 전류와 전압파형을 보여준다. 고장 발생 즉시 두 초전도소자의 켄치가 발생되었고, 초전도소자의 전압이 유기되는 것을 관찰할 수 있다. a상과 b상에서 이선지락 고장인 경우 1차측 전류(i_1^a , i_1^b)의 과도성분은 각각 10.74 A, -11.26 A로 나타났고, c상은 a상에 비해 1차측 전류(i_1^c)의 과도성분이 4.65 A로 작게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 이중켄치를 이용한 삼상 변압기형 초전도한류기의 평형 및 불평형 지락 고장에 따른 고장전류 제한 동작을 모의실험을 통해 확인하였다. 일선지락 고장의 경우 지락이 발생한 a상에서 과도성분이 크게 발생하여 a상의 초전도소자에서 켄치가 발생하여 고장전류를 제한하였고, 건전상인 b상에서는 부분 켄치가 발생하였지만 전압은 유기되지 않았다. 이선지락과 삼선지락 고장의 경우, 초전도소자의 이중켄치에 의한 저항 발생으로 고장전류를 제한함을 확인할 수 있었다. 모의단락 실험을 통해 평형 고장 및 불평형 고장에 따라 두 차례의 켄치발생을 이용하여 고장전류 제한의 가능성을 분석하였고, 분석한 과도전류 제한 특성으로부터 제안한 초전도한류기의 유용성을 확인하였다. 본 논문을 바탕으로 효과적으로 고장전류를 제한하기 위해 임피던스를 증가시킬 수 있는 다양한 구조와 E-I 철심 설계에 대한 동일한 제한 특성을 도출하기 위한 연구를 진행할 예정이다.

ORCID

Sung-Hun Lim

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

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MOE) (No.2020R1F1A1077206) and was also supported by the Jungwon University Grant for 2022 Research Year.

REFERENCES

- [1] L. Ye, L. Z. Lin, and K. P. Juengst, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **12**, 900 (2002).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2002.1018545>
- [2] 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>
- [3] S. H. Lim, T. H. Han, Y. S. Cho, H. S. Choi, B. S. Han, and S. W. Lee, *Physica C*, **463**, 1198 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.03.458>
- [4] C. R. Park, H. I. Du, B. H. Choi, B. S. Han, H. S. Choi, and Y. H. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **18**, 721 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2008.920662>
- [5] S. H. Lim, J. S. Kim, J. F. Moon, J. C. Kim, S. B. Rhee, C. H. Kim, and O. B. Hyun, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**, 1835 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2017754>
- [6] Y. Shirai, S. Noda, K. Yamabe, K. Hattori, J. Baba, T. Nishihara, T. Nitta, S. Kobayashi, and K. Sato, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **23**, 5601905 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2233533>
- [7] Y. Shirai, S. Noda, K. Yamabe, K. Hattori, J. Baba, S. Kobayashi, and K. Sato, *Physica C*, **484**, 248 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.03.039>
- [8] K. Yamabe, N. Yonemura, Y. Shirai, and J. Baba, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **24**, 5600505 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2284543>
- [9] S. Yan, L. Ren, Y. Zhang, K. Zhu, R. Su, Y. Xu, Y. Tang, J. Shi, and J. Li, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29**, 5603205 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2908614>
- [10] T. H. Han, S. H. Lim, and S. C. Ko, *J. Electr. Eng. Technol.*, **15**, 2501 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00534-2>
- [11] S. C. Ko, T. H. Han, and S. H. Lim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **31**, 5600505 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3057318>