

3개의 초전도 소자를 갖는 자속구속형 SFCL과 변압기형 SFCL의 특성 비교

논문

58P-1-14

Comparison of Characteristics on the Flux-Lock and the Transformer Type SFCLs with Three Superconducting Units

이 주 형* · 최 효 상†

(Ju-Hyoung Lee · Hyo-Sang Choi)

Abstract -In order to increase the capacity of the superconducting fault current limiter(SFCL), the current and voltage grades of the SFCL must be increased. As a method for the increase of the current and voltage grades of the SFCL, we compared the various characteristics between the flux-lock type SFCL with three superconducting units connected in series and the transformer type SFCL using the transformer with three secondary circuits. One of three superconducting units had not quenched in the flux-lock type SFCL. Therefore, the unbalanced power burden happened because of the voltage difference generated by unbalanced quenching between the superconducting units. In the meantime, the three superconducting units were all quenched in the transformer type SFCL using the transformer, and the voltage difference generated between the superconducting units was decreased. Therefore, the difference of critical characteristics was complemented by distribution of fault current in accordance with the turn's ratio between primary and secondary windings. The unbalanced power burden of the superconducting units was reduced due to flux-share between the superconducting units in the transformer. In conclusion, the capacity increment of the SFCL using a transformer was easier due to equal distribution of voltages generated by simultaneous quench of the superconducting units. We think that the characteristics is improved more because of the decrease of saturation in the iron core if the secondary winding is increased in the SFCL using the transformer.

Key Words : Superconducting, Limiter, Flux-Lock Type SFCL, Transformor, Simultaneous Quench

1. 서 론

전력 산업의 용량증가와 함께 보다 우수한 품질을 가진 전력에너지의 안정적 공급이 사회 전반에 미치는 영향력은 지속적으로 확대되고 있다. 따라서, 안정적이고 신뢰성 있는 전력 시스템의 운전을 위하여 시스템 보호의 중요성은 더욱 증대되고 있다. 이에 영 저항 특성을 이용한 초전도체의 응용기술이 확대되어 초전도 한류기, 초전도 변압기 등 사고전류에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]-[3]. 많은 전력 설비들 중에서 전력 시스템의 신뢰성 문제는 변압기의 안정적인 동작에 가장 많이 의존하고 있다. 이들 변압기의 사고는 그 설비 자체의 치명적인 손상뿐만 아니라, 전기 공급을 중단시킴으로써 막대한 경제적 손실을 초래할 수도 있기 때문에, 성능이 우수하고 높은 신뢰도의 변압기 보호 방식이 요구된다. 이에 따라 그동안 자속구속형 한류기의 직렬연결에 따른 특성과 변압기의 2차회로의 증가에 따른 변압기형 SFCL의 사고 시 동작특성 및 초전도 소자의 임계특성의 차

이에 따른 켄치 특성을 연구하여 왔다[3]-[9]. 그러므로, 이를 전력계통에 적용하기 위해서는 설계할 때 구조적인 장·단점에 대한 비교를 통하여 전압용량과 전류용량의 증가가 필수적인 바, 본 논문에서는 3개의 초전도 소자를 갖는 자속구속형 SFCL과 변압기형 SFCL의 특성을 비교분석하여 후 개발될 기기의 특성 설계에 반영하고자 한다.

2. 본 론

2.1 구조 및 원리

그림 1은 초전도 한류기에 대한 전류제한특성을 실험하기 위한 회로도를 보여주고 있다. 그림의 input과 output단자에 자속구속형과 변압기형 초전도 한류기를 접속하여 실험을 수행하였다. 여기서 V_0 는 전원전압이며 R_0 은 전류변화를 측정하기 위한 표준저항을 나타내며 R_L 은 부하저항이다. SW_1 과 SW_2 는 전력계통에서 사고가 일어나기전의 정상상태와 1선 지락사고와 같은 불평형고장이 발생하였을 때를 모의하기 위한 스위치를 각각 나타낸다.

자속구속형과 변압기형 SFCL의 동작특성을 설명하는 지배방정식을 식 (1)-(7)에 나타내었다. L_P 와 L_S 는 변압기 1, 2차측 권선의 인덕턴스를 각각 나타낸다. Z_{FCL} 은 전체 임피던스를 의미하고, I_{FCL} 은 계통에 사고가 발생하였을 때

* 준 회원 : 조선대학교 전기공학과 석사과정

† 교신저자 정회원 : 조선대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail: Hyosang@chosun.ac.kr

접수일자 : 2008년 11월 11일

최종완료 : 2008년 11월 21일

초전도소자에 의해 제한되는 전류를 나타낸다. I_P 와 I_S 는 각각 1차측과 2차측의 권선에 흐르는 전류를 나타내며, R_S 는 초전도 소자가 켜졌을 때 발생하는 저항을 표시한다. 식 (4)의 L 은 1, 2차측 인덕턴스간의 관계를 표시하며 \pm 는 결선방향에 따라 결정되는 부호를 나타낸다. 한편, 식 (5)의 V_p 는 1차측에서 바라본 전체 전압을 나타내고, 식 (6)의 I_c 는 초전도소자의 임계전류를 의미한다. 1, 2차측의 결합계수 k 가 1이라고 가정하였을 때 M_{PS} 는 1, 2차측의 상호인덕턴스로서 $M_{PS} = \sqrt{L_P \cdot L_S}$ 라고 할 수 있으며 1, 2차측의 권선에 누설인덕턴스는 무시하고 상호인덕턴스만이 존재하며 각각의 초전도 소자에서 발생하는 저항(R_S)은 같다고 가정하였다.

1. 자속구속형 SFCL

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_P(3R_S)}{j\omega L^2 + 3R_S} \tag{1}$$

$$I_{FCL} = \frac{(j\omega L^2 + 3R_S) \cdot I_S}{j\omega(L_P + \sqrt{L_P + L_S})} \tag{2}$$

$$I_P = \frac{j\omega \sqrt{L_P L_S} + j\omega L_S + 3R_S}{j\omega L^2 + 3R_S} \cdot I_{FCL} \tag{3}$$

$$L = \sqrt{L_P} \pm \sqrt{L_S} \tag{4}$$

2. 변압기형 SFCL

$$Z_{FCL} = \frac{V_P}{I_P} = \frac{j\omega L_P R_S}{R_S + 3j\omega L_S} \tag{5}$$

$$I_{FCL} = \frac{3L_S}{M_{PS}} \cdot I_C \tag{6}$$

$$I_s = \frac{j\omega M_{PS}}{R_S + 3j\omega L_S} \cdot I_P \tag{7}$$

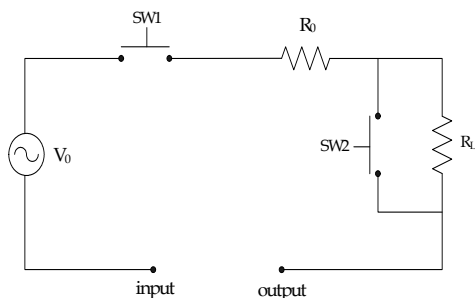


그림 1 초전도 한류기 실험을 위한 회로도
Fig. 1 Circuit diagram for the experiments of various type SFCLs

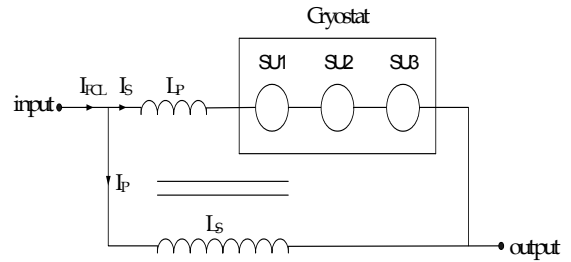


그림 2 자속구속형 SFCL의 구성도
Fig. 2 Structure of a flux-lock type SFCL

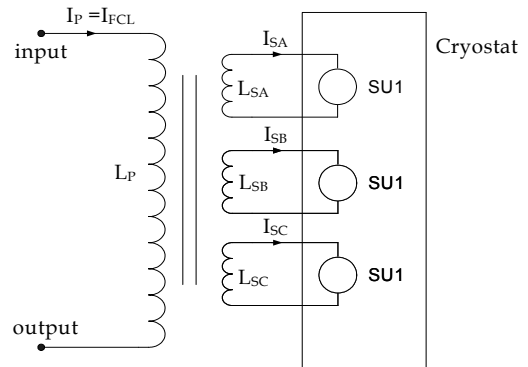


그림 3 변압기형 SFCL의 구성도
Fig. 3 Structure of a transformer type SFCL

그림 2는 그림 1의 input과 output단자에 연결하여 실험하는데 사용될 자속구속형 초전도한류소자를 보여준다. 변압기의 1차측 코일(L_P)과 2차측 코일(L_S)을 권선방향에 따라 감극결선 또는 가극 결선으로 한 후 그림에서 스위치 SW_1 을 닫아 회로에 전압을 인가하였다. 이때 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않기 때문에 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 단락선로처럼 동작하였다. 스위치 SW_2 를 닫아 단락사고를 발생시키면 고온초전도 소자에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하게 되고 켜치가 발생한다. 이때 회로에 흐르는 선로전류(I_{FCL}), 코일 1에 흐르는 전류(I_P), 초전도소자에 흐르는 전류(I_S), 코일 1, 2의 양단전압(V_P, V_S)과 초전도소자 양단전압(V_{SC})을 측정하였다.

그림 3은 변압기를 이용한 SFCL의 실험회로도로서 1·2차 권선을 갖는 변압기와 초전도 소자로 이루어져 있다. 변압기는 1차 권선에 흐르는 선로전류를 1·2차 권선수의 비에 따라 변류시킨다. 이렇게 변환된 2차 선로전류는 초전도 소자의 켜치 작용에 의해 제한된다. 초전도 소자는 박막형태의 YBCO를 사용하였으며, 특성상 극저온에서만 초전도 상태를 유지할 수 있으므로 액체질소(liquid nitrogen)가 담긴 저온용기(cryostat) 내에 담겨져 있다.

3. 분석 및 고찰

그림 4는 실험에 사용할 초전도 소자 YBCO thin film 3개의 V-I곡선으로 각각의 초전도 소자의 임계전류 값은 (A)19.3A, (B)20.2A, (C)21A로써 단순연결하였을 경우에는 동시켄치의 유도가 어렵다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 3개의 초전도 소자를 갖는 자속구속형 SFCL과 변압기형 SFCL을 턴수($N_p:N_s=63:42$)에서 160V전원전압을 인가하고 5주기 동안 0도 사고를 모의 하여 전류 곡선을 비교한 것이다. 자속구속형 감극결선인 그림 5-(a)에서 선로전류 피크값이 59.7A에서 3주기 이후 10.5A로 감소하였고 가극결선인 그림 5-(b)에서는 12.3A에서 6.2A로 감소하였다. 자속구속형의 결선방향에 따른 전류제한 특성이 상이함을 확인하였다. 변압기형인 그림 5-(c)에서는 피크값이 17.1A에서 3주기 이후 4.1A까지 감소하였다. 자속구속형 보다 변압기형이 사고전류 제한율이 더욱 높게 나타났다. 이는 자속구속형에서의 직렬연결에 따른 초전도 소자간의 임계전류값이 차이가 나기 때문에 초전도 소자간 퀘치의 불균형이 발생하였기 때문이다.

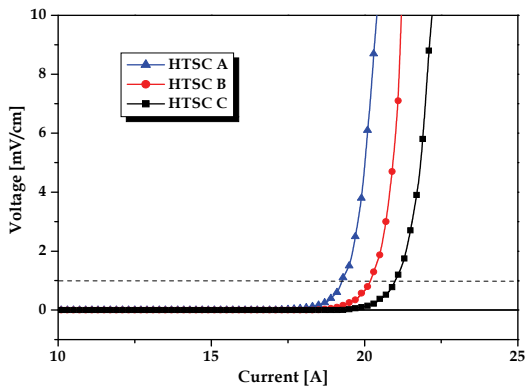
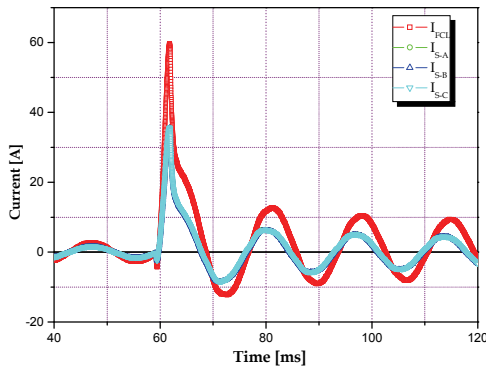
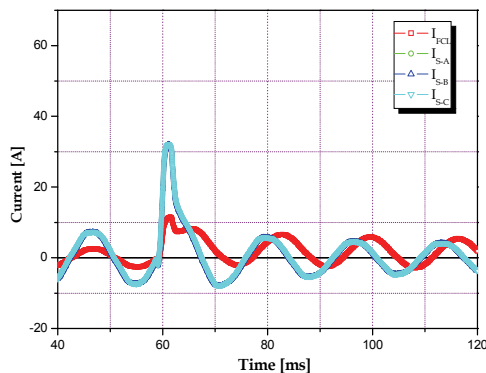


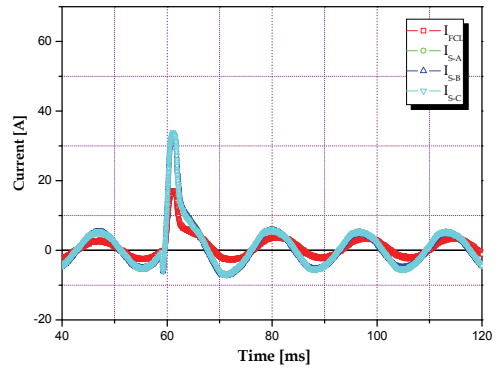
그림 4 초전도 소자 V-I 곡선
Fig. 4 Voltage and current curves of YBCO thin films



(a) 감극결선한 자속구속형 초전도 한류기



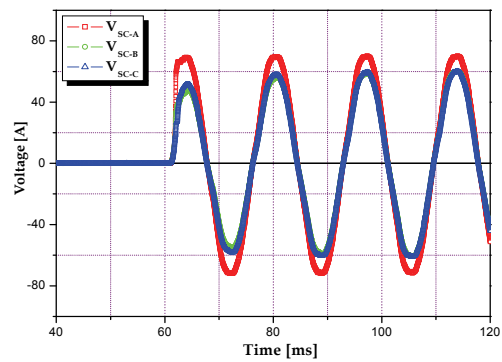
(b) 가극결선한 자속구속형 초전도 한류기



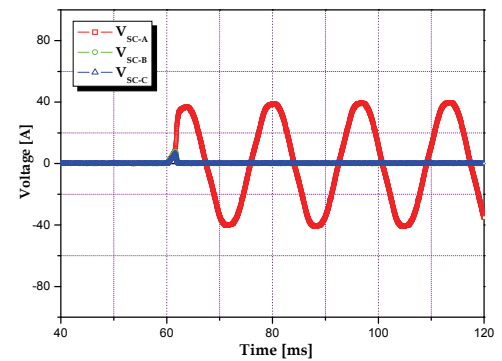
(c) 변압기형 초전도 한류기

그림 5 자속구속형과 변압기형 SFCL의 전류 파형 ($N_p:N_s=63:42$)
Fig. 5 Current waveforms of flux-lock type and transformer type SFCLs

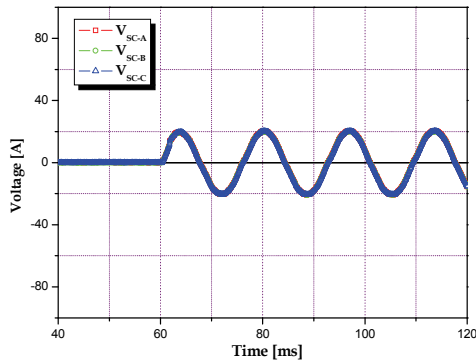
그림 6은 자속구속형과 변압기형의 전압 파형을 나타내고 있다. 자속구속형 감극결선인 그림 6-(a)에서 3개의 소자 모두 퀘치가 발생하였고 각 초전도 소자의 피크값 A(V_{SC-A})는 69V, B(V_{SC-B})는 49V, C(V_{SC-C})는 52A로 나타났다. 가극결선인 그림6-(b)에서 초전도 소자들 간의 임계특성의 차이로 인한 퀘치 불균형으로 인해 C(V_{SC})소자에서 퀘치가 발생하지 않았다. 변압기형인 그림6-(c)에서는 초전도 소자 모두 동시 퀘치가 발생하였으며 전류피크값은 20V로 나타나고 있다. 자속구속형에서 초전도 소자들 간의 임계특성의 차이가 직렬연결로 인해 불균형 퀘치를 유발하고 각각의 초전도 소자에 전압의 불평형을 야기 시킬 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) 감극결선한 자속구속형 초전도 한류기



(b) 가극결선한 자속구속형 초전도 한류기

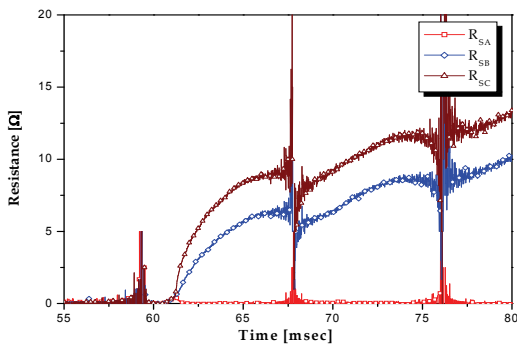


(c) 변압기형 초전도 한류기

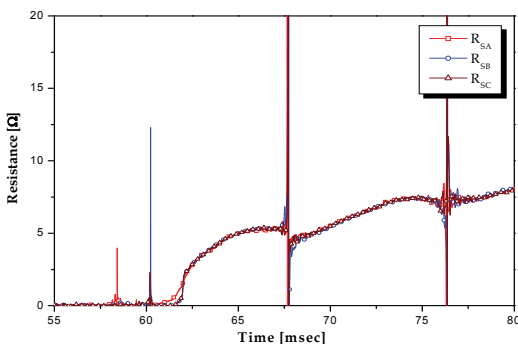
그림 6 자속구속형과 변압기형 SFCL의 전압 파형 ($N_p:N_s=63:42$)
 Fig. 6 Voltage waveforms of flux-lock type and transformer type SFCL

그러나 변압기형은 2차 권선의 연결에 따른 자속의 결합으로 소자간 퀘치가 특성을 향상시킬 수 있었다.

그림 7은 3개의 초전도 소자를 갖는 감극결선한 자속구속형 SFCL과 변압기형 SFCL의 저항곡선을 대표적으로 나타내었다. 자속구속형은 이 파형을 보면 그림 7-(b)에서와 같이 변압기를 이용한 SFCL이 동시 퀘치가 유도되는 것을 확인할 수 있다. 확인결과 3개의 초전도 소자를 갖는 자속구속형 SFCL보다 변압기를 이용하는 SFCL의 퀘치 현상이 더 우수하다는 것을 알 수 있다.



(a) 자속구속형 한류기의 저항곡선

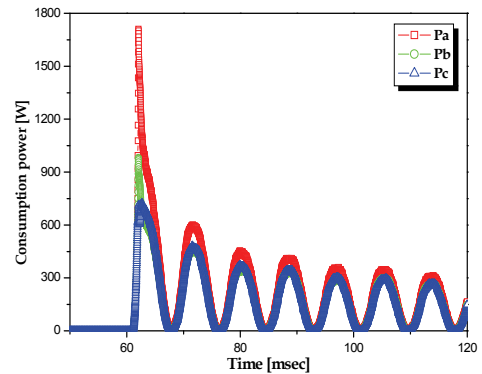


(b) 변압기형 한류기의 저항곡선

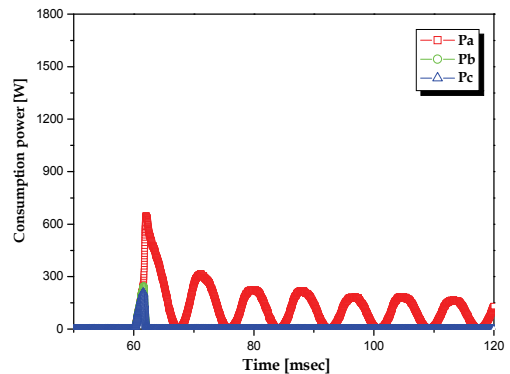
그림 7 자속구속형과 변압기형 SFCL의 초전도 소자에서 발생하는 저항곡선

Fig. 7 Resistance waveforms of flux-lock type and transformer type SFCLs

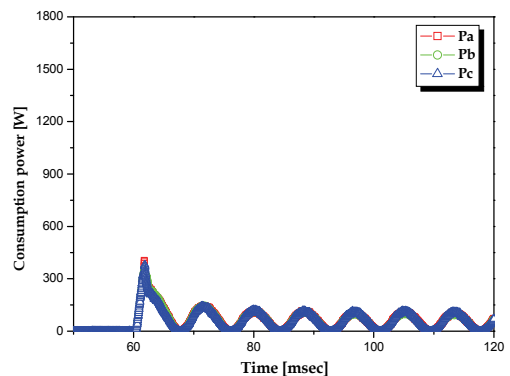
그림 8은 자속구속형과 변압기형에서 3개의 초전도 소자에 대한 소비전력을 비교한 그래프이다. 자속구속형의 감극결선인 그림 8-(b)에서 초전도 소자의 직렬연결에 따라 일부 소자에서 퀘치가 발생하지 않았다. 이로 인해 각각의 초전도 소자들 간의 소비전력의 차이를 확인할 수 있다. 이것은 초전도 소자들 간의 전력분담에 불균형을 초래하여 소자파괴의 우려를 갖는다. 변압기형인 그림 8-(c)의 경우 3개의 초전도 소자가 모두 거의 동시에 퀘치가 발생하여 전력부담 분배가 균형적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있다.



(a) 감극결선한 자속구속형 초전도 한류기



(b) 가극결선한 자속구속형 초전도 한류기

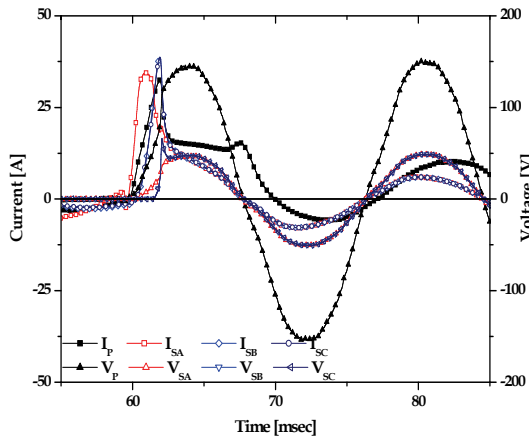


(c) 변압기형 초전도 한류기

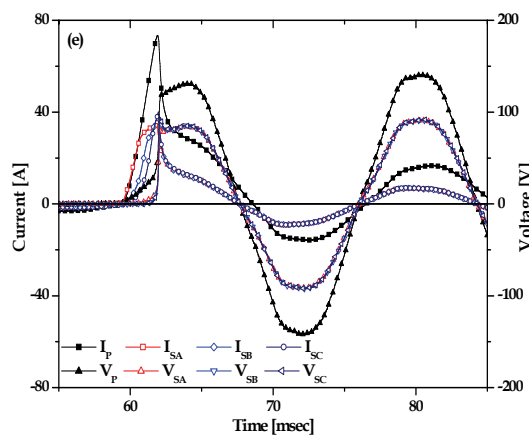
그림 8 자속구속형과 변압기형 한류기에서 소비되는 전력 파형 ($N_p:N_s=63:42$)

Fig. 8 Consumption power waveforms of flux-lock and transformer type SFCLs

그림 9는 변압기형 SFCL의 턴수($N_P:N_S=63:21$)와 턴수($N_P:N_S=63:42$)에 따른 전압 및 전류 곡선이다. 그림 9-(a)에서는 초기 제한된 사고 전류의 파형에서 포화현상이 발생하였으나 턴수 변화에 따른 그림 9-(b)파형을 보면 이러한 포화현상이 현저하게 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 1차측 권선에서 발생하는 자속이 모두 2차측 권선에 의해 쇄교되었기 때문이다. 이로써 2차측의 턴수가 적을수록 사고전류의 제한효과, 초전도 소자의 부담감소등의 장점도 있지만 철심의 포화현상이 발생하게 됨을 확인하였다.



(a) 변압기형 한류기 ($N_P:N_S=63:21$)



(b) 변압기형 한류기 ($N_P:N_S=63:42$)

그림 9 변압기를 이용한 SFCL의 턴수 변화에 따른 전압 및 전류 곡선

Fig. 9 Voltage and current curves by turns ratio in transformer type SFCL

4. 결 론

본 논문에서는 3개의 초전도 소자를 갖는 자속구속형 SFCL과 변압기형 SFCL의 특성의 차이를 비교분석 함으로써 사고전류 제한 효과와 철심의 포화현상을 고찰하였다. 초전도 소자는 제작상 불균일에 의해 임계전류 값이 차이가 발생한다. 자속구속형 SFCL은 직렬 연결에 따른 3개의 초전도 소자에서 사고발생 시 동시퀠치가 발생하지 않았다. 변압기형 SFCL은 사고발생 시 3개의 소자 모두 동시퀠치가

발생하였다. 그리고 1, 2차측 권선간의 턴수에서 턴수($N_P:N_S=63:21$)와 턴수($N_P:N_S=63:42$)를 비교하면 2차회로의 증가에 따라 철심의 포화 현상이 발생하는데 2차측 권선의 턴수의 증가에 의해 1차측 권선에서 발생하는 자속이 모두 2차측 권선에 쇄교되어 포화현상을 현저히 줄일 수 있었다. 또한 변압기형 SFCL에서 소비전력이 거의 동일하게 분배되었기 때문에 용량 증대시 유리함을 확인하였다. 변압기형 SFCL은 2차회로의 증가로 인해 부피의 크기가 커지지만 자속구속형 보다 더 좋은 퀠치특성을 고려하여 초전도 한류기를 계통에 적용할 때 특성에 맞게 설계하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nices, H.-W. Neumueller, E. Baltzer, and B. Heismann, "Resistive type fault current limiters with YBCO thin film-100 KVA functional model", IEEE, vol. 9, no. 2, pp. 656-659, June 1999.
- [2] K. Kajikawa, K. Kaiho, N. Tamada, and T. Onishi, "Design and current limiting simulation of magnetic shield type superconducting fault current limiter with High-Tc superconductors", IEEE, vol. 32, no. 4, pp. 2667-2670, July 1996.
- [3] H. R. Kim, H. S. Choi, H. R. Lim, and O. B. Hyun, "Quench distribution in superconducting fault current limiters at various voltage", Cryogenics, vol. 41, pp. 275-280, April 2001.
- [4] H. S. Choi, O. B. Hyun, and H. R. Kim, "Quench characteristics of resistive superconducting fault current limiters based on YBa2Cu3O7 films", Physica C, vol. 351, pp.415-420, April 2001.
- [5] Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi, Byoung-Sung Han, "The improved hysteresis characteristics of flux-lock type SFCL using third winding", Physica C, Vol. 406, pp.37-45, July 2004.
- [6] S. H. Lim, T.H. Han, Y.S. Cho, H.S. Choi, B.S. Han, Su-Won Lee, "Quench characteristics of HTSC elements in integrated three-phase flux-lock type SFCL according to ground-fault", Physica C, Vol. 463-465, pp. 1198-12031, October 2007.
- [7] S. H. Lim, H. S. Choi, B. S. Han, "Fault current limiting characteristics due to winding direction between coil 1 and coil 2 in a flux-lock type SFCL" Physica C, Vol 416, pp 34-42, November 2004.
- [8] S. B. Chung, H. M. Park, H. S. Choi, "Improvement of quench properties of a flux-lock type superconducting fault current limiter by the connection method of YBCO elements" KIEE, Vol. 56, pp.37-44, March 2007.
- [9] S. H. Lim, " Fault Current Waveform Analysis of a Flux-Lock Type SFCL According to LC Resonance Condition of Third Winding" KIEE, Vol. 3, pp. 213-217, June 2008.

저 자 소 개



이 주 형(李周炯)

1978년 11월 18일생, 2002년 조선대 전기공학과 졸업, 2007~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : ssamzie1201@naver.com



최 효 상(崔孝祥)

1966년 2월 21일생, 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2003년~한전 전력연구원 선임연구원, 현재 조선대 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr