

2차 권선과 초전도 사이의 중성선 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 동작특성

논 문
60-6-29

Operational Characteristics of Transformer-Type SFCL with or without Neutral Line between the Secondary windings and Superconducting units

조 용 선* · 최 효 상† · 고 성 필**
(Yong-Sun Cho · Hyo-Sang Choi · Sung-Pil Go)

Abstract - The study on power capacity increase of superconducting fault current limiter (SFCL) is one of the most important researches to apply a SFCL in the power system. To achieve this, we thought that the unbalanced quenching problem generated in series connection of superconducting units should be solved. In this paper, we investigated the quenching characteristics of superconducting units in the transformer-type SFCL with or without the neutral line between secondary windings and superconducting units. In case of transformer-type SFCL without neutral line, the connection structure of superconducting units is identical to that of the resistive-type SFCL connected in series. Therefore, the unbalanced quenching was occurred by difference of critical current between superconducting units. However, in case of transformer-type SFCL with neutral line, the superconducting units with different critical current were simultaneously quenched. It was because the currents induced by secondary winding were separately flowed through the superconducting units. By these results, we confirmed that the resistances and consumption powers of the superconducting units were equally generated.

Key Words : Transformer-type SFCL, Neutral line, Simultaneous quench

1. 서 론

현재 전력계통은 전력수요량이 증가함에 따라 고장발생시 사고전류가 급증하고 있다. 이에 가장 효과적인 해결방안으로 초전도 한류기가 활발히 연구되고 있다. 초전도 한류기를 전력망에 적용하기 위해서는 초전도 소자의 직병렬 연결을 통한 용량증대 방안, 사고전류의 제한용량 선정, 초전도 소자의 회복시간 감소 및 열 해소방안 등 해결해야 할 많은 문제점이 있다[1]-[7]. 초전도 한류기의 용량을 증대시키기 위해서는 초전도 소자의 직·병렬연결이 필수적이다. 그러나 초전도 소자는 불균일한 임계특성을 가지고 있어 직렬 연결시 켄치현상이 상이하게 발생한다. 이를 해결하기 위해 초전도 소자에 병렬로 저항 및 리액터 등을 연결하여 임계특성을 줄일 수 있는 방안을 모색하고 있으나 균일한 켄치현상을 발생시키지 못하고 있다. 이와 같은 불균일한 켄치 특성으로 인해 초전도 소자간 불균일한 전력분담이 발생하고, 이로 인해 초전도 소자간 회복시간이 상이하고 길어지게 된다. 이 밖에도 초전도 소자의 냉각을 위한 저온 시스템 구축, 냉각상태 유지를 위한 비용, 다수 초전도 소자 사용에

따른 경제성 저하 등 전력망 적용을 위해서는 해결해야 할 많은 문제점을 안고 있다[6]-[9].

본 논문에서는 초전도 한류기의 전력망 적용을 위해서 필수적으로 해결되어야 할 사고전류 제한율 및 용량증대에 용이한 변압기형 초전도 한류기의 특성을 분석하였다. 변압기형 초전도 한류기는 1·2차 권선을 갖는 변압기와 초전도 소자로 구성되어 있다. 본 논문에서 분석한 변압기형 초전도 한류기는 2차 권선과 직렬 연결된 두 개의 초전도 소자 사이에 중성선을 연결하여 실험을 구성하였으며, 저항형 초전도 한류기와 중성선이 없는 경우에 따른 동작 특성과 비교·분석하였다. 이를 통해 초전도 한류기의 용량증대를 위해 다수의 초전도 소자의 연결시 발생하는 불균형 켄치특성을 개선하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 중성선 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 동작 원리

그림 1은 중성선의 유무에 따라 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도를 나타낸 것이다. 1차 권선과 2차 권선에 흐르는 전류와 인덕턴스는 각각 I_p , I_s 와 L_p , L_{SA} , L_{SB} 이다. 초전도 소자가 켄치되었을 때 발생하는 상전도 저항은 각각 R_{SC-A} 와 R_{SC-B} 이며, 중성선에 흐르는 전류는 I_{SN} 이다. 1·2차 권선의 상호 인덕턴스는 M_p 이며, 2차 권선간의 상호 인덕턴스를 M_s 로 표기하였다. 여기서 초전도 소자에서 발생하는

* 정 회 원 : 조선대 공대 전기공학과 박사
** 정 회 원 : 한국폴리텍 I 대학 제주캠퍼스 신재생에너지학과 교수
† 교신저자, 정회원 : 조선대 공대 전기공학과 교수
E-mail : hyosang@chosun.ac.kr
접수일자 : 2011년 3월 11일
최종완료 : 2011년 5월 13일

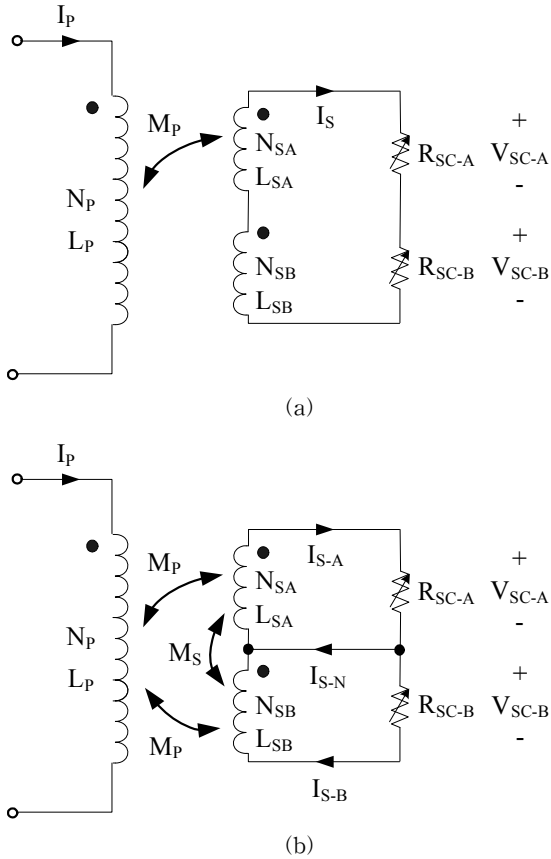


그림 1 중성선 무(a), 유(b)에 따른 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도.
 Fig. 1 Equivalent circuits of transformer-type SFCL without (a) and with (b) a neutral line.

저항 R_{SC-A} , R_{SC-B} 는 R_{SC} 로 동일하고, 2차 권선의 인덕턴스인 L_{SA} 와 L_{SB} 는 L_S 로 동일하며, 초전도 소자에 흐르는 전류 I_{SC-A} 와 I_{SC-B} 는 I_{SC} 로 동일하다고 가정한다. 또한 1·2차 권선의 결합계수 k 는 1이라 가정하였을 때 $M_p = \sqrt{L_p \cdot L_s}$ 이고 $M_s = \sqrt{L_{SA} \cdot L_{SB}}$ 이라 할 수 있다. 위의 가정하에서 중성선의 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 제한된 사고전류 I_p , 사고 초기에 제한된 사고전류 I_{ini} 는 다음과 같이 식 (1)~(4)로 나타낼 수 있다.

1) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기

$$I_p = \frac{j\omega L_s + 2R_{SC}}{j\omega M_p} \cdot I_s \tag{1}$$

$$I_{ini} = \frac{L_s}{M_p} \cdot I_Q \tag{2}$$

2) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기

$$I_p = \frac{2j\omega L_s + R_{SC}}{j\omega M_p} \cdot I_s \tag{3}$$

$$I_{ini} = \frac{2L_s}{M_p} \cdot I_Q \tag{4}$$

식 (1)의 2차 권선에 흐르는 전류(I_s)가 2차 권선에 직렬로 연결된 초전도 소자의 임계전류 값을 넘을 경우 퀘치가 발생하게 된다. 그러나 증가된 2차 전류(I_s)는 적은 임계전류 값을 갖는 초전도 소자를 먼저 퀘치시키며, 이렇게 퀘치된 초전도 소자로부터 발생하는 저항(R_{SC})에 의해 사고전류는 제한된다. 그러므로 나머지 초전도 소자는 퀘치가 안된 초전도 상태로 남아있게 된다. 이것은 초전도 소자간의 임계전류 차이 때문이며, 이 차이는 제작상 불가피하게 발생하는 문제점이다. 그러나 초전도 소자와 2차 권선 사이에 중성선을 연결하면, 식 (3)과 같이 1·2차 권선비($a = N_p/N_s$)에 의해 유도된 각각의 2차 전압(V_{SA} , V_{SB})은 각각의 초전도 소자에 전압원으로 작용한다. 즉, 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기는 초전도 소자가 개별적으로 퀘치될 수 있도록 전류가 유도되기 때문에 초전도 소자의 불균일한 임계전류의 차이를 극복할 수 있게 된다.

여기서 사고 초기에 제한된 사고전류 I_{ini} 는 2차 권선에 유도된 전류(I_s)가 초전도 소자의 임계전류에 도달하는 순간의 제한된 사고전류이다. 이것은 식 (1)과 (2)에 $R_{SC}=0$, $I_s=I_Q$, $I_p=I_{ini}$ 를 대입함으로써 식 (2)와 (4)를 구할 수 있다. 이렇게 구해진 사고 초기에 제한되는 사고전류(I_{ini})는 1·2차 권선의 비($a = N_p/N_s = I_s/I_p$)에 의해 제어할 수 있다는 것을 알 수 있다.

2.2 실험방법

그림 2는 변압기형 초전도 한류기의 과도실험을 위한 회로도이다. 인가전압(V_0)은 400V, 선로저항(R_0)과 부하저항(R_L)은 각각 1Ω과 50Ω으로 설정하였다. input과 output 단자에 변압기형 초전도 한류기를 연결한 후 전압을 인가하기 위해 SW_1 을 동작시키며, 부하저항(R_L)을 단락시키는 SW_2 를 통해 전력계통에서 발생하는 지락사고를 0°기준 5주기 동안 모의하였다.

그림 3은 변압기형 초전도 한류기의 실험에 사용된 초전도 소자의 V-I특성을 나타낸 곡선이다. 그림과 같이 초전도

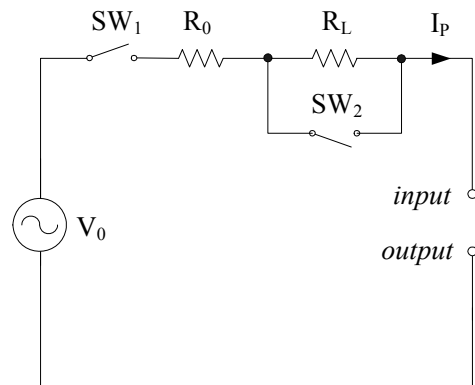


그림 2 초전도 한류기의 실험 회로도.
 Fig. 2 Experiment circuit of a SFCL.

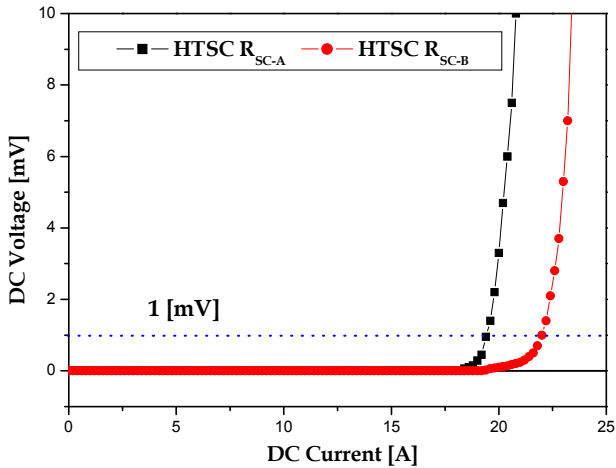


그림 3 초전도 소자의 V-I 곡선.
Fig. 3 V-I curves of superconducting units.

표 1 변압기의 철심과 1·2차 권선의 파라미터.

Table 1 Experimental parameters of primary and secondary windings in the transformer.

Primary and secondary windings	Turn's ratio (Inductance [mH])
N_P (L_P)	4 (127.4)
N_{SA} (L_{SA}) and N_{SB} (L_{SB})	1 (8.17)
	2 (32.9)

소자는 제작시 불가피하게 임계전류의 차이가 발생한다는 것을 알 수 있다. 이 차이로 인해 용량증대를 위한 직렬 연결시 초전도 소자는 불균형적인 켄치가 발생하며, 이는 초전도 소자의 전력분담이 불균형적으로 이뤄지는 원인이 된다. 표 1은 실험에 사용된 변압기의 1·2차 권선의 파라미터를 나타낸 것이다. 1·2차 권선의 턴수는 $N_P:N_{SA}:N_{SB}=4:1:1$ 로 설정하였다.

2.3 실험 결과 및 고찰

중성선 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 동작특성을 분석하기 위해 저항형 초전도 한류기의 특성 분석을 동시에 수행하였다. 그림 4는 저항형 초전도 한류기와 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기의 켄치특성을 나타내기 위한 제한된 사고전류(I_p)와 초전도 소자에서 발생하는 전압(V_{SC-A} , V_{SC-B})을 나타낸 곡선이다. 그림 4(a)의 저항형 초전도 한류기의 경우 사고전류가 35.5A로 제한된다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 중성선의 유무에 따라 변압기형 초전도 한류기의 경우 1·2차 권선의 턴수비($N_P:N_{SA}:N_{SB}=4:1:1$)에 의해 16.7A로 동일하게 제한된다는 것을 그림 4(b)와 (c)에서 확인할 수 있다. 그러나 2개의 초전도 소자가 직렬 연결된 저항형 초전도 한류기의 경우 A소자만이 켄치되어 전압이 발생한다는 것을 알 수 있다. 사고전류는 초전도 소자의 임계전류가 낮은 것부터 켄치시키며, 이로 인해 발생한

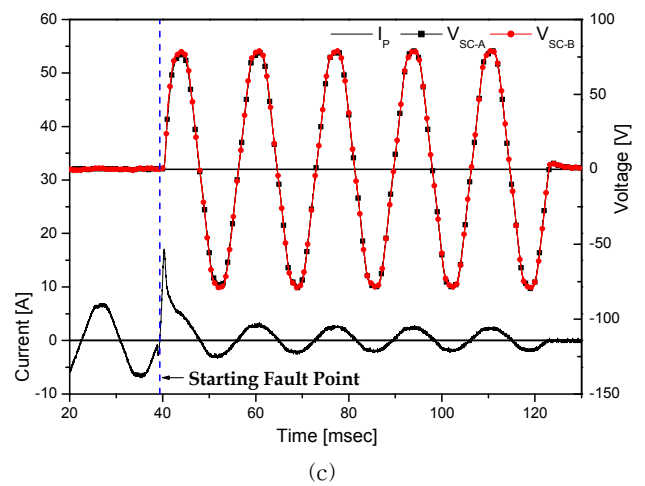
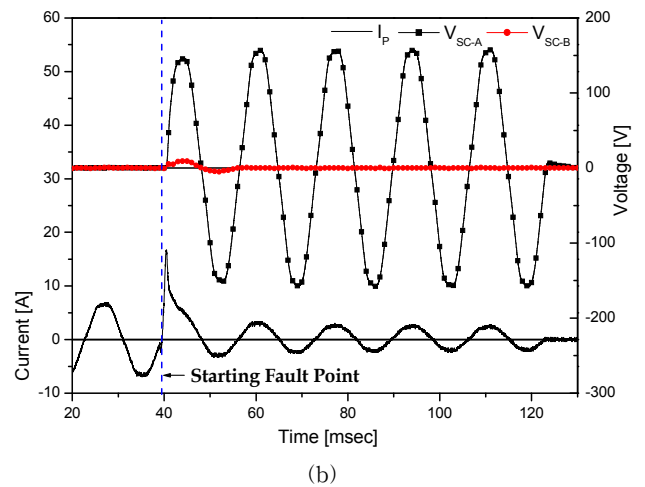
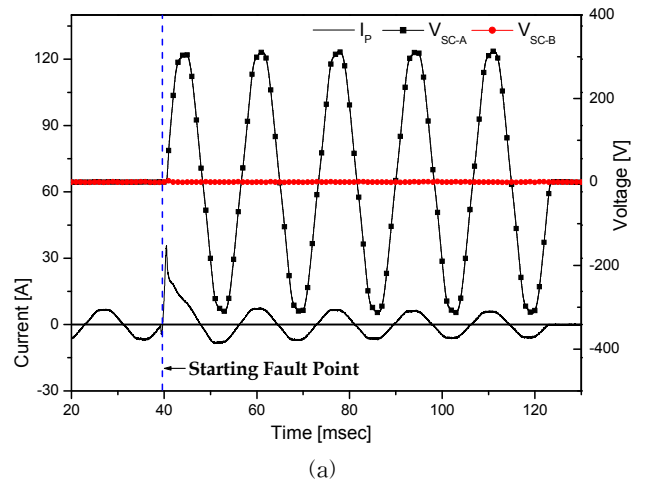


그림 4 저항형과 중성선 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 전압·전류 곡선. (a) 저항형 초전도 한류기, (b) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기, (c) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기.

Fig. 4 Voltage and current curves of resistive and transformer-type SFCL with or without a neutral line. (a) resistive-type SFCL, (b) transformer-type SFCL without a neutral line, (c) transformer-type SFCL with a neutral line.

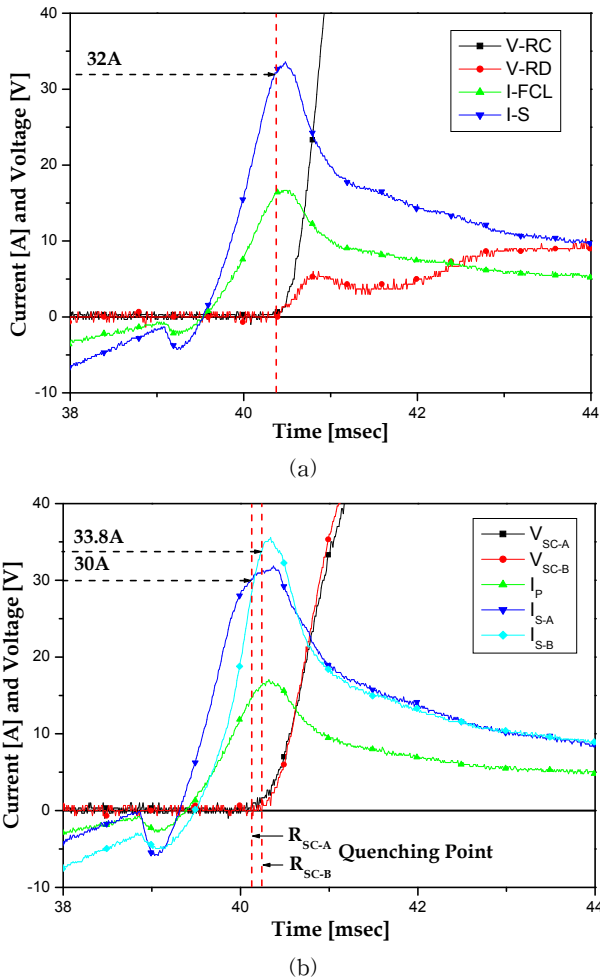


그림 5 중성선 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 퀘칭 특성 확인을 위한 전압·전류 곡선. (a) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기, (b) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기.

Fig. 5 Voltage and current curves of the transformer-type SFCL with or without a neutral line to confirm the quenching characteristics. (a) transformer-type SFCL without a neutral line, (b) transformer-type SFCL with a neutral line.

저항으로 인해 제한된다. 저항형 초전도 한류기와 마찬가지로 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기 또한 2차 권선에 직렬로 2개의 초전도 소자가 연결되어 있으므로 A소자가 주로 퀘칭되었으며 B소자는 사고발생 1주기에만 부분적으로 퀘칭되고 다시 원상태로 복귀하였다는 것을 알 수 있다. 변압기형 초전도 한류기의 2차 권선에는 권선비에 반비례하여 1차 권선보다 큰 전류가 흐른다. 이에 초전도 소자에 흐르는 전류가 저항형 초전도 한류기의 것보다 크므로 B 소자도 부분적으로 퀘칭되는 것이다.

그러나 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기의 경우 중성선으로 인해 2차 권선과 초전도 소자가 2개의 폐회로를 구성하므로 2차 권선에 유도된 전류가 초전도 소자에 개별적인 전류(I_{S-A} , I_{S-B})로 흐르게 된다. 그림 5는 중성선 유무에 따라 변압기형 초전도 한류기의 퀘칭특성을 나타내기 위

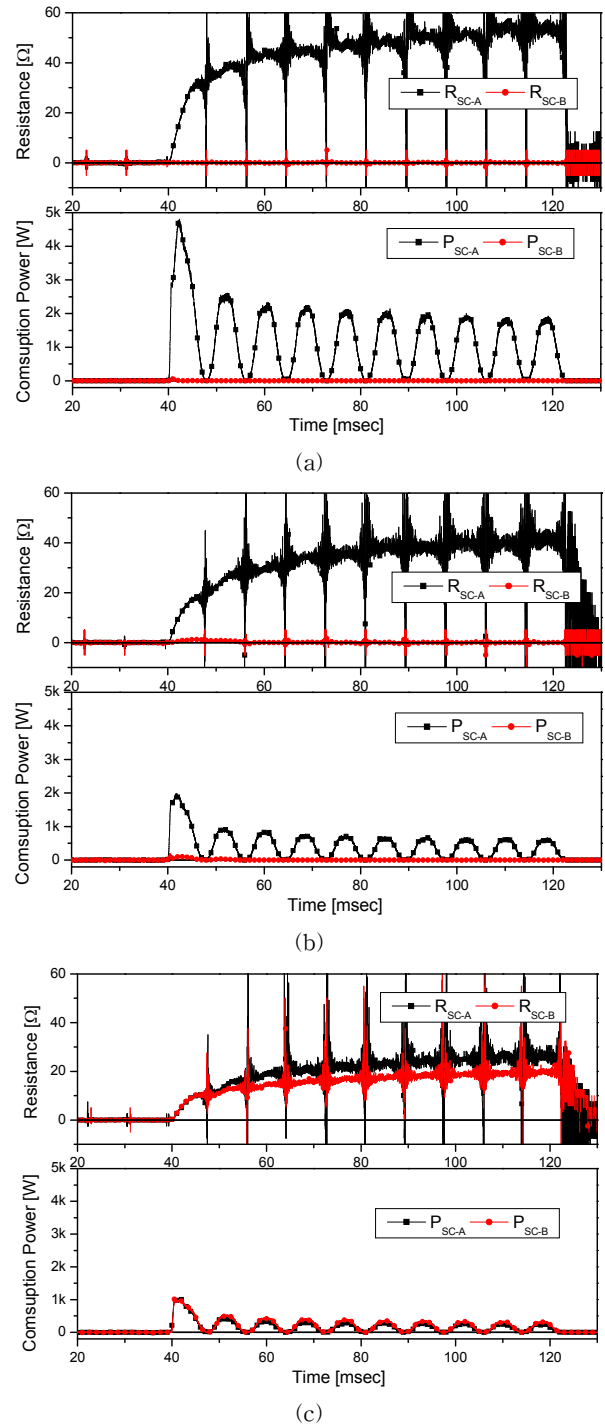


그림 6 저항형과 중성선 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기에서 초전도 소자의 저항·소비전력 곡선. (a) 저항형 초전도 한류기, (b) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기, (c) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기.

Fig. 6 Resistance and consumption power curves of superconducting units in the resistive and transformer-type SFCL with or without a neutral line. (a) resistive-type SFCL, (b) transformer-type SFCL without a neutral line, (c) transformer-type SFCL with a neutral line.

한 전압·전류 곡선을 보여준다. 그림 5(a)에서 2차 권선의 전류(I_s)는 2개의 초전도 소자에 흘러 32A가 되는 순간 켄치된다. 2개의 초전도 소자 중 임계전류가 낮은 A소자가 먼저 켄치되고, 이 과정에서 B소자를 완전히 켄치시킬 만큼 2차 권선의 전류가 증가하지 못하고 제한하게 되는 것이다. 반면 그림 5(b)의 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기의 경우 중성선으로 인해 2차 권선에서 유도된 전류(I_{S-A} , I_{S-B})가 초전도 소자에 개별적인 흐르게 된다. 그러므로 A와 B소자를 켄치시킬 수 있는 30A와 33.8A 이상의 전류가 흘러 균일하게 켄치된다는 것을 확인할 수 있다. 초전도 소자의 균일한 켄치를 유도할 수 있는 중성선의 연결로 인해 그림 4(c)와 같이 2개의 초전도 소자에서 동일한 전압이 발생한다. 초전도 소자의 균일한 켄치 특성은 초전도 한류기의 용량증대에 중요한 특성 중 하나이다. 불균일한 켄치특성으로 인해 초전도 한류기의 소비전력이 일부 초전도 소자로 집중하게 되면 절연이 파괴될 수 있어 초전도 한류기의 계통 적용을 위해서는 필히 해결해야 한다.

그림 6은 저항형과 중성선 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자에서 발생하는 저항과 소비되는 전력 곡선을 나타낸 것이다. 하나의 초전도 소자만이 켄치된 저항형 초전도 한류기의 경우(그림 6(a)) 3주기 이후 발생된 저항이 약 49 Ω 이었고, 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기의 경우(그림 6(b))에는 약 37 Ω 이었다. 중성선으로 인해 균일한 켄치특성을 보이는 변압기형 초전도 한류기의 경우(그림 6(c)) A소자는 23 Ω , B소자는 17 Ω 이었다. 저항의 차이가 발생하는 이유는 초전도 소자에서 균일한 전압이 발생하지만 초전도 소자에 흐르는 전류의 크기가 다르기 때문이다. 이로부터 계산되는 초전도 소자의 소비전력은 저항형 초전도 한류기의 경우 4,758W이었고, 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기의 경우 1,911W로 A소자에서만 발생한다. 그러나 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기의 경우 992W로 A와 B소자가 동일하게 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도 소자의 균일한 켄치특성에 의한 것이다.

3. 결 론

초전도 소자의 켄치특성을 개선하기 위해 변압기형 초전도 한류기의 2차 권선과 초전도 소자사이에 중선을 연결하였으며, 저항형 초전도 한류기와 비교하여 분석하였다. 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자에 흐르는 전류는 변압기의 1·2차 권선의 비에 의해 결정되며, 저항형 초전도 한류기와 동일하게 한가지의 전류가 직렬연결된 2개의 초전도 소자에 흐르게 된다. 저항형 초전도 한류기는 불균형 켄치로 인해 1개의 초전도 소자만이 켄치되며, 이로 인해 발생하는 저항 및 소비전력이 가장 크다는 것을 확인하였다. 또한 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기 또한 2차 권선에 유도된 전류가 2개의 초전도 소자에 동일하게 흐르므로 임계전류가 낮은 초전도 소자가 먼저 켄치되어 사고 전류를 제한시켰다. 그러나 2차 권선과 초전도 소자 사이에 연결된 중성선으로 인해 변압기형 초전도 한류기의 2개의 초전도 소자에는 개별적인 전류가 흐르게 되며, 임계전류의 차이가 있음에도 불구하고 2개의 초전도 소자가 모두 균일하게 켄치된다는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 2개의

초전도 소자에서 발생하는 저항 및 소비전력이 거의 동일하였다. 초전도 소자의 균일한 켄치특성은 초전도 한류기의 용량증대 및 절연보호 측면에서 중요한 요인 중 하나이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Noe, K. P. Juengst, F. N. Werfel, S. Elschner, J. Bock, F. Breuer, and R. Kreutz, "Testing bulk HTS modules for resistive superconducting fault current limiters," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 13, pp. 1976-1979, 2003.
- [2] R. Kreutz, J. Bock, F. Breuer, K. P. Juengst, M. Kleimaier, H.-U. Klein, D. Krischel, M. Noe, R. Steingass, and K. H. Weck, "System technology and test of curl 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high-Tc superconducting fault current limiter," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 15, pp. 1961-1964, 2005.
- [3] H. S. Choi, B. I. Jung, and Y. S. Cho, "Transient Characteristics of a Flux-Coupling Type Superconducting Fault Current Limiter According to Winding Direction," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 19, no. 3, pp. 1827-1830, 2009.
- [4] Y. S. Cho, and H. S. Choi, "The current limiting effects of a matrix-type SFCL according to the variations of designed parameters in the trigger and current-limiting parts," *Physica C*, vol. 468, pp. 2054-2058, 2008.
- [5] H. S. Choi, S. H. Lim, D. C. Chung, B. S. Han, O. B. Hyun, T. H. Sung, and J. S. Hwang, "Influence of a voltage compensation type active superconducting fault current limiter on the transient stability of power system," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 16, pp. 2035-2038, 2005.
- [6] L. Chen, Y. J. Tang, J. Shi, N. Chen, M. Song, S. J. Cheng, Y. Hub, X. S. Chen, "Electromagnetic Characteristics Analysis of Air-Core Transformer Used in Voltage Compensation Type Active SFCL," *Physica C*, vol. 469, pp. 1760-1764, 2009.
- [7] O. B. Hyun, K. B. Park, J. w. Sim, H. R. Kim, S. W. Yim, and I. S. Oh, "Introduction of a Hybrid SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issue," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 19, pp. 1946-1949, 2009.
- [8] 이상봉, 김철환, 김규호, 김재철, 현옥배, "비대칭 고장 전류에 따른 초전도 한류기 동작분석", *대한전기학회 논문지*, vol. 58, no. 3, pp. 450-454, 2009.
- [9] 김성열, 김옥원, 김진오, "저항형 초전도 한류기의 신뢰도 모델을 적용한 배전계통 신뢰도 평가에 관한 연구", *대한전기학회 논문지*, vol. 60, no. 3, pp. 465-470, 2011.

저 자 소 개



조 용 선 (趙鎔善)

1980년 1월 15일생. 2005년 조선대학교 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : cys5144@hanmail.net



최 호 상 (崔孝祥)

1966년 2월 21일생, 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), ~ 2003년 한전 전력연구원 선임연구원, 2009년 테네시 주립대 방문교수, 2003 ~ 현재 조선대 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr



고 성 필 (高晟弼)

1965년 11월 12일생, 2002년 탐라대 산업정보학과 졸업, 2006년 제주대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2010년~현재 조선대 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 한국폴리텍 I 대학 제주캠퍼스 신재생에너지학과 교수.

Tel : 064-754-7232

Fax : 064-754-7235

E-mail : spko1423@kopo.ac.kr