중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기의 용량증대 개선 연구

논 문

60-7-22

Analysis on the Improvement of Power Capacity Increase in the Transformer-Type SFCL with Neutral Lines

조 용 선* · 최 효 상[†] · 김 덕 구** · 고 성 필**

(Yong-Sun Cho · Hyo-Sang Choi · Deog-Goo Kim · Sung-Pil Go)

Abstract - The increase of power capacity in the superconducting fault current limiter (SFCL) is essential for application into the power grid. To achieve this, when superconducting units were connected in series and parallel, the unbalanced quenching characteristics between superconducting units generated by different critical current behavior should be improved. In the transformer-type SFCL, the superconducting units connected in series could be simultaneously quenched by the connection of neutral lines between secondary coils and superconducting units. From this the consumed power in superconducting units was equally distributed. In addition, the more the turn ratio of the transformer was reduced, the more consumed power in the superconducting units was reduced by the decrease of the induction voltage generated in the superconducting units. From those results, the transformer-type SFCL using neutral lines could increase the power capacity of the SFCL by the equal power division into the superconducting units.

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

1. 서 론

국내의 전력수요량은 산업과 생활환경의 발전과 함께 꾸준히 증가하고 있다. 이로 인해 전력망에서 발생하는 지락 및 단락 고장 등으로 인한 부하의 급변으로 고장전류는 급격히 증가하고 있는 실정이다. 이 고장전류는 전력기기 및 보호기기 등의 절연파괴 및 화재로 인한 도미노식 대규모 정전사태를 유발시킬 뿐만 아니라 인명 및 재산피해 등의 2차 사고까지 야기시키고 있다[1]-[2]. 이러한 고장전류의 저감 및 차단을 위해 차단용량이 큰 차단기로의 교체, 모선분리, 고임피던스 기기 도입 등의 대처방안을 적용하고 있으나, 경제성·신뢰성 등의 많은 문제점을 야기시키고 있다. 현재 기존의 방안에 대한 문제점을 해결할 수 있는 새로운 대처방안이 시급히 요구되고 있는 실정이다. 이에 국내·외에서는 0저항 특성을 갖는 초전도체를 이용한 전류제한기의 연구가 진행되어 현재 전력망 적용실험이 진행 중이다[2]-[7].

초전도 한류기를 전력망에 적용하기 위해서는 전력망과 보호협조 문제, 제페로 동작책무와의 협조, 초전도 한류기의 용량증대, 고장 유형에 따른 동작 신뢰성 확보 등 앞으로 해결해야 할 많은 과제들이 남아있다[8]-[9]. 많은 해결과제

중 본 논문에서는 초전도 한류기의 용량증대를 위한 초전도 소자의 직·병렬 연결시 발생하는 켄치특성을 분석하였다. 초전도 소자는 균일한 임계특성을 갖도록 제작하기가 불가능하다. 이러한 임계특성의 차이는 초전도 소자의 불균일한 켄치특성을 발생시키며, 고장에 대한 전력부담이 불균형적으로 분담되어 초전도 소자의 전기적 절연파괴를 야기할 수 있다. 초전도 소자의 균일한 켄치특성 확보를 통해 고장전류 제한에 대한 동작 신뢰성을 확보할 수 있으며, 전력망 적용을 위한 초전도 한류기의 용량증대의 문제점을 일부 해결할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 변압기형 초전도 한류기의 2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 연결함으로써 초전도 소자의 균일한 켄치를 유도하기 위한 방안을 연구하였다. 결과 비교를 위해 저항형 초전도 한류기와 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기를 동일한 조건에서 실험하였다. 초전도 소자의 켄치특성 개선을 통해 변압기형 초전도 한류기의 용량증대 특성을 분석하였다. 다수 초전도 소자의 동시켄치를 유도하여 전력부담을 최소화시킴으로써 초전도 한류기의 용량증대를 위한 개선방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 용량증대를 위한 변압기형 초전도 한류기의 구성

초전도 한류기를 전력망에 적용하기 위해서는 전력망의 용량에 맞도록 용량을 증대해야 한다. 초전도 한류기의 용량을 증대하기 위해서는 임계전류밀도가 높은 초전도 소자

* 정 회 원 : 조선대 공대 전기공학과 박사

** 정 회 원 : 한국폴리텍 I 대학 제주캠퍼스
신재생에너지학과 교수

[†] 교신저자, 종신회원 : 조선대 공대 전기공학과 교수

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

접수일자 : 2011년 4월 8일

최종완료 : 2011년 5월 16일

그림 1 초전도 소자의 직렬연결에 따른 저항형과 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도. (a) 저항형 초전도 한류기, (b) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기, (c) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기.

Fig. 1 Equivalent circuits of resistive and transformer-type SFCL according to serial connection of four superconducting units. (a) resistive-type SFCL, (b) transformer-type SFCL without a neutral line, (c) transformer-type SFCL with neutral lines.

를 사용하는 방법과 다수의 초전도 소자를 직·병렬로 연결하여 전압·전류 용량을 증대시키는 방법이 있다. 그러나 전력망의 용량에 맞추기 위해서는 전자의 방법 또한 초전도 소자의 직·병렬연결이 불가피하다. 초전도 소자의 고유한 임계특성은 제작시 균일한 특성을 갖도록 하는 것은 거의 불가능하다. 이로 인해 초전도 한류기로 사고전류가 유입할 때 임계전류밀도가 낮은 초전도 소자가 먼저 켄치되며, 반면 높은 임계전류밀도를 갖는 초전도 소자는 켄치되지 않는다. 이는 초전도 한류기의 용량증대 시 가장 큰 문제점으로 나타나고 있다.

초전도 한류기의 용량 증대를 위해 그림 1과 같이 3가지의 초전도 한류기를 구성하였다. 그림 1(a)는 초전도 소자의 일반적인 직렬연결로서 저항형 초전도 한류기라 한다. 각각 다른 임계전류를 갖는 초전도 소자가 직렬로 연결되어 있으므로 가장 낮은 임계전류를 갖는 초전도 소자가 켄치되어 사고전류를 제한하게 된다. 그러므로 켄치된 초전도 소자의 전력부담이 가장 크게 되며, 임계전력 이상이 되면 초전도 소자는 절연이 파괴될 우려가 높다. 그림 1(b)는 변압기형

초전도 한류기로서 변압기의 2차 권선에 4개의 초전도 소자가 직렬로 연결된 것이다. 이 타입 또한 초전도 소자의 연결방법이 저항형 초전도 한류기와 같으므로 비슷한 켄치특성을 나타낸다. 그림 1(c) 또한 변압기형 초전도 한류기이며, 초전도 소자와 변압기의 2차권선 사이에 중성선을 연결한 것이다. 이 타입은 중성선으로 분리된 각각의 2차 권선이 초전도 소자의 임피던스에 비례하여 개별적인 유도전류(I_{SA} , I_{SB} , I_{SC} , I_{SD})를 흘려보내 준다. 이로 인해 상이한 임계특성을 갖는 초전도 소자들이 개별적으로 흐르는 유도전류에 의해 켄치된다.

2.2 실험방법

그림 2는 초전도 한류기의 실험을 위해 구성한 회로도이다. 여기서 V_0 는 인가전압이고 $R_0(1\Omega)$ 는 선로저항, $R_L(50\Omega)$ 은 부하저항이다. *input*과 *output*은 초전도 한류기를 연결하는 단자이며, SW_1 은 전압을 인가하는 스위치, SW_2 는 부하저항을 단락시켜 사고를 발생시키는 스위치이다.

변압기형 초전도 한류기에 사용되는 변압기는 표 1과 같은 철심과 1·2차 권선의 파라미터를 갖는다. 1·2차 권선의 턴수비에 따른 특성을 비교하기 위해 1차 권선(N_p)을 8과 4로, 2차 권선(N_{SA} , N_{SB} , N_{SC} , N_{SD})을 1과 2로 각각 설정

그림 2 초전도 한류기의 실험 회로도.

Fig. 2 Experiment circuit of a SFCL.

표 1 변압기의 철심과 1·2차 권선의 파라미터.

Table 1 Parameters of iron core, primary and secondary coils in the transformer.

Iron Core	Value [mm]
Outer Horizontal length	331
Outer vertical length	415
Inner Horizontal length	191
Inner vertical length	274
Thickness	130.1
Primary and secondary coils	Tum's ratio (Inductance [mH])
N_p (L_p)	8 (505.7)
N_s (L_s)	4 (127.4)
	8 (505.7)
N_{SA} (L_{SA}), N_{SB} (L_{SB})	1 (8.2)
N_{SC} (L_{SC}), N_{SD} (L_{SD})	2 (32.9)

그림 3 사용된 변압기 사진.

Fig. 3 A transformer used for the experiment.

그림 4 초전도 소자의 V-I 곡선.

Fig. 4 V-I curves of superconducting units.

하였다. 그림 3은 실험에 사용된 변압기의 외형을 나타낸 사진이다. 그림 4는 초전도 한류기의 실험에 사용된 4개의 초전도 소자의 V-I특성을 나타낸 곡선이다. 초전도 소자는 제작과정에서 상이한 임계전류를 갖으며, 그림을 통해 확인할 수 있다.

2.3 실험 결과 및 고찰

초전도 한류기는 초전도 소자의 직·병렬연결을 통해 용량을 증대시킨다. 그러나 저항형 초전도 한류기와 같이 단순 직렬연결의 경우 그림 3과 같은 초전도 소자의 임계전류의 차이로 인해 켄치의 불균형이 발생하여 전력의 불균형 분담이 발생한다.

그림 5는 저항형과 변압기형 초전도 한류기의 제한된 사고전류(I_p)를 나타낸 곡선이다. V_0 가 400V인 경우 저항형 초전도 한류기는 32.7A, 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기는 31.1A($N_p:N_s=8:8$)와 14.5A($N_p:N_s=8:4$), 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기는 28.6A($N_p:N_{SA}:N_{SB}:N_{SC}:N_{SD}=8:2:2:2$)와 15.5A($N_p:N_{SA}:N_{SB}:N_{SC}:N_{SD}=8:1:1:1$)로 사고전류가 각각 제한되었다. 변압기형 초전도 한류기의 경우 1차 권선과 2차 권선의 비($a=N_p/N_s$)에 따라 제한된 사고전류의 값이 정해진다는 것을 알 수 있다. 그러나 2차 권선에 각각 직렬로 연결된 초전도 소자의 켄치 특성은 그림 6의 전압곡선을 나

타낸 것과 같이 불규칙적으로 발생한다는 것을 알 수 있다. 저항형과 중성선이 없는 초전도 한류기의 경우 D소자만이 사고초기부터 완전히 켄치되었으며, A소자가 부분적으로 켄치되어 점점 전압이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도 소자의 직렬연결로 인해 임계전류가 낮은 초전도 소자가 사고전류에 의해 먼저 켄치되어 제한하기 때문이다. 그리고 임계전류가 두 번째로 낮은 소자가 부분적으로 켄치되어 주변으로 전파되는 것이다. 반면 그림 6(c)의 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기의 경우 2차 권선이 각각의 초전도 소자에 개별적으로 전류를 유도하므로 임계전류가 상이한 초전도 소자라 하더라도 독립적으로 켄치되며, 발생하는 전압이 모두 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 초전도 소자의 상이한 임계전류 특성은 제작상 불가피하게 발생하지만 중성선을 이용한 변압기형 초전도 한류기는 이러한 상이한 특성을 균일하게 개선할 수 있다. 이로부터 초전도 한류기의 용량증대를 위한 초전도 소자의 직렬연결시 불균일한 켄치특성 균일하게 유도할 수 있게 되어 유리하다는 것을 알 수 있다.

그림 7과 8은 저항형과 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자에서 소비되는 전력을 나타낸 곡선이다. 초전도 소자들의 불균형 켄치가 발생하는 저항형(그림 7(a))의 경우 3,750W의 소비전력이, 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류

그림 5 저항형과 변압기형 초전도 한류기의 제한된 사고전류 곡선. (a) 저항형 초전도 한류기, (b) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기, (c) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기.

Fig. 5 Current curves of resistive and transformer-type SFCL with or without neutral lines. (a) resistive-type SFCL, (b) transformer-type SFCL without a neutral line, (c) transformer-type SFCL with neutral lines.

그림 6 저항형과 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자에서 발생하는 전압 곡선. (a) 저항형 초전도 한류기, (b) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기($N_P:N_S=8:8$), (c) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기($N_P:N_{SA}:N_{SB}:N_{SC}:N_{SD}=8:2:2:2$).

Fig. 6 Voltage curves of resistive and transformer-type SFCL with or without neutral lines. (a) resistive-type SFCL, (b) transformer-type SFCL without a neutral line, (c) transformer-type SFCL with neutral lines.

기(그림 7(b))의 경우 6,740W로 켜진 초전도 소자의 전력 이 크게 소비된다는 것을 알 수 있다. 반면 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기(그림 7(c))의 경우 4개의 초전도 소자가 모두 켜져 소비되는 전력이 2,100W로 균일하게 분배되어 가장 낮다는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 저항형 초전도 한류기를 기준으로 초전도 소자의 전력부담이 약 1/2배로 줄어들어 초전도 한류기의 용량을 2배 이상 증가시킬 수 있게 된다. 또한 변압기 2차 권선의 턴수가 1/2로 줄어든 그림 8의 경우 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기의 켜진 소자에서 1,850W의 전력이 소비되는 반면 중성선이 있는 경우에는 760W로 소비전력이 줄어들었다는 것을 확인할 수 있다. 이는 불균형 켜치가 발생하는 저항형 및 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기보다 중성선을 사용함으로써 균일한 켜치를 유도하여 초전도 소자의 전력용량을 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 균일한 켜치를 유도하여 초전도 소자들의 전력부담을 균일하게 분배함으로써 전력망에서 발생하는 사고로부터 초전도 소자의 전기적 충격을 줄여주게 된다.

그림 9는 변압기형 초전도 한류기의 턴수와 인가전압의 변화에 따른 초전도 소자의 소비전력 추이를 나타낸 곡선이다. 1차 권선과 2차 권선의 비에 따라 변압기형 초전도 한

그림 7 저항형과 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자에서 발생하는 소비전력 곡선. (a) 저항형 초전도 한류기, (b) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기($N_P:N_S=8:8$), (c) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기($N_P:N_{SA}:N_{SB}:N_{SC}:N_{SD}=8:2:2:2$).

Fig. 7 Consumption power curves of superconducting units in resistive and transformer-type SFCL with or without neutral lines. (a) resistive-type SFCL, (b) transformer-type SFCL without a neutral line, (c) transformer-type SFCL with neutral lines.

그림 8 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자에서 발생하는 소비전력 곡선. (a) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기($N_P:N_S=8:4$), (b) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기($N_P:N_{SA}:N_{SB}:N_{SC}:N_{SD}=8:1:1:1:1$).

Fig. 8 Consumption power curves of superconducting units in resistive and transformer-type SFCL with or without neutral lines. (a) resistive-type SFCL, (b) transformer-type SFCL without a neutral line, (c) transformer-type SFCL with neutral lines.

그림 9 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자에서 발생하는 초기 소비전력 그래프. (a) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기, (b) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기.

Fig. 9 Voltage and current curves of resistive and transformer-type SFCL with or without neutral lines. (a) resistive-type SFCL, (b) transformer-type SFCL without a neutral line, (c) transformer-type SFCL with neutral lines.

류기의 초전도 소자에 흐르는 전류의 비가 결정된다. 그리고 직렬 연결된 초전도 소자의 켄치 특성에 따라 전력부담이 결정된다. 변압기의 턴수비가 1/2로 감소함에 따라 켄치된 초전도 소자의 소비전력이 약 1/2 이상으로 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 또한 직렬 연결된 초전도 소자를 균일하게 모두 켄치시킴으로서 전력이 균등 분배되어 줄어든다는 것을 알 수 있다. 변압기의 2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 삽입함으로써 소자에 개별적으로 유도된 전류가 동일한 켄치를 유도하게 된다. 이 특성으로 인해 초전도 소자의 소비전력을 균등 분배시켜 초전도 한류기의 제한용량을 증대시킬 수 있으며, 고가의 초전도 소자를 사고로 인한 대전류로부터 보호할 수 있을 것이다.

3. 결 론

초전도 한류기의 용량증대는 전력망으로의 적용을 위해 해결해야 할 중요한 문제이다. 이 문제의 해결을 위해서는 초전도 소자의 직·병렬 연결이 필수적이다. 그러나 직렬 연결된 초전도 소자들은 제작상 불균일한 임계특성으로 인해 상이한 켄치특성을 나타낸다. 이는 초전도 소자가 단순 직렬 연결된 저항형 초전도 한류기가 임계특성이 낮은 초전도 소자를 위주로 켄치된다는 것으로 입증하였다. 변압기의 원리를 이용하여 초전도 소자들이 2차 권선에 직렬 연결된 초전도 한류기 또한 거의 동일한 켄치특성을 보인다. 그러나 변압기의 2차 권선과 직렬 연결된 초전도 소자 사이에 중성선을 삽입함으로써 2차 권선은 초전도 소자에 개별적으로 유도전류를 흘려주어 동일한 켄치특성을 유도할 수 있다. 상이한 임계특성을 갖는 초전도 소자들을 동일하게 켄치시

킴으로서 소자에서 소비되는 전력을 균등 분배하여 약 1/2 배 이상 줄어든다는 것을 확인하였다. 또한 2차 권선의 비에 따라 초전도 소자에 유도되는 전압을 줄여주어 소비전력이 줄어든다는 것을 알 수 있었다. 직렬 연결된 초전도 소자를 동시에 켄치시킴으로서 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기가 용량을 증대시키는데 유리하다는 것을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, vol. 1, pp. 19-31, 1998.
- [2] 현옥배, "초전도 한류기 개발과 활용 전망", 전기의 세계, vol. 59, no. 10, pp. 26-30, 2010.
- [3] 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. on Appl. Superconduct., vol. 15, pp. 1961-1964, 2005.
- [4] M. H. Kim, S. H. Lim, J. F. Moon, J. C. Kim, "Method of recloser-fuse coordination in a power distribution system with superconducting fault current limiter", IEEE Trans. on Appl. Superconduct., vol. 20, pp. 1164-1167, 2010.
- [5] 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. on Appl. Superconduct., vol. 19, pp. 1946-1949, 2009.
- [6] I. K. You, S. H. Lim, J. C. Kim, O. B. Hyun, "Study on protection coordination between protective devices in a power distribution system with an SFCL", IEEE Trans. on Appl. Superconduct., vol. 20, pp. 1168-1171, 2010.
- [7] S. W. Yim, S. D. Yu, H. R. Kim, M. J. Kim, C. R. Park, S. E. Yang, W. S. Kim, O. B. Hyun, J. Sim, K. B. Park, I. S. Oh, "Construction of testing facilities and verifying tests of a 22.9 kV/630 A class superconducting fault current limiter", Physica C, vol. 470, pp. 1611-1614, 2010.
- [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 효 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

김 덕 구 (金德久)

1952년 11월 10일생. 2000년 제주대학교 산업대학원 전자·전기공학과 졸업(석사). 2011년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국폴리텍 1대학 제주캠퍼스 신재생전기에너지학과 교수.

Tel : 064-754-7152

Fax : 064-754-7113

E-mail : dgk@kopo.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