

Analysis of the Recovery Behavior of SFCL According to Reclosing Operation

하 경 훈* · 조 용 선** · 김 덕 구*** · 최 효 상†
 (Kyoung-Hun Ha · Yong-Sun Cho · Deog-Goo Kim · Hyo-Sang Choi)

Abstract - The breaking capacity of circuit breakers could be no more increased in the electric power system. This is because the fault current increases due to continuous increases in electric power demand and facilities. To solve the problem, it is necessary to come up with an alternative. The superconducting fault current limiter (SFCL) has received an attention among various alternatives. The SFCL effectively reduce a fault current in cooperation with a power circuit breaker. A various types of the SFCL are suggested and a study on them have been progressed. As a result of it, the SFCL can be applied to the electric power system in the near future. But, a study on recovery behaviors of the SFCL is not enough for applying to the electric power system. If the superconducting elements do not completely recover to the superconducting state after fault operation, it might be a breakdown of the superconducting elements due to heavy power burden and it gives an bad influence on the working of other electric devices. Additionally, the distribution power system has reclosing operation such as open-0.3sec-closed/open-3min-closed/open procedure. So we need to study more about improvement of the recovery behaviors of the SFCL. In this paper, we analyzed the recovery behaviors of a flux-coupling type SFCL according to reclosing operation when a single line-to-ground fault occurred and we compared recovery behaviors of the SFCL with and without a neutral line between secondary reactors and superconducting elements. Also, the flux-coupling type SFCL has advantageous for increases of capacity by controlling the variation in turn ratios between two reactors. Consequently, when the number of turns of the secondary reactors increased, the power burden of the superconducting elements was bigger due to the increase of impedances of the secondary reactors. To distribute the power burden, two superconducting elements connected in series and the balanced quenching of the superconducting elements was induced by connecting a neutral line.

Key Words : Flux-coupling type SFCL, Recovery behaviors, Reclosing operation

1. 서 론

현재 국내 전력계통은 전력 수요량의 증가와 복잡한 방식 상식 구성 등으로 인해서 사고발생시 사고전류가 전력용 차단기의 차단용량을 초과하고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 모선분리, 차단기 교체 등 여러 대안들이 제시되어 왔으나 전력계통의 신뢰성 및 안정성 등의 또 다른 문제가 제기되고 있다. 이에 최상의 해결책으로 초전도체의 영저항 특성을 이용한 초전도 한류기에 대한 연구가 많은 관심을 받아왔다. 초전도 한류기는 초전도 소자의 영저항 특성을 이용한 전력기기로서 임계특성 이상의 외부조건 유입시 상전도 상태로 전이되어 일정값 이상의 발생된 저항으로

인해 사고전류를 제한하게 된다.

전력계통에서 사용되고 있는 전력용 차단기는 전력공급의 신뢰도 및 안정도를 유지하기 위해 재폐로 동작책무에 따라 순차적인 ON/OFF 동작을 반복·수행하게 된다. 초전도 한류기를 전력계통에 안정적으로 적용하기 위해서는 이러한 전력용 차단기의 재폐로 동작과 연동되어야 한다. 이에 사고전류 제한동작을 수행한 상전도 상태의 초전도 소자는 전력용 차단기의 개로 동작주기 이내에 다시 초전도 상태로 회복하여 다음 전력용 차단기의 폐로 동작으로 인한 사고전류 유입에 대비하여야 한다. 이러한 전력용 차단기의 반복적인 재폐로 동작에 초전도 한류기를 적용하기 위해서는 초전도 소자의 회복 특성 분석이 중요한 연구 분야로 요구되고 있다. 초전도 소자는 불규칙한 임계특성으로 인해 단순 직렬연결시 켄치가 균일하게 발생하지 못한다. 이로 인해 켄치된 초전도 소자의 회복시간이 길어진다[1-3].

본 논문에서는 1·2차측 리액터의 턴수비를 조절하여 사고전류 제한율을 조정할 수 있는 삼상 자속결합형 초전도 한류기를 구성하여 2차측 턴수 변화에 따른 초전도 소자의 회복특성을 분석하였다. 또한 각 상의 2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 연결함으로써 초전도 소자의 켄치특성과 회복특성 상호간의 연관성에 대해서도 분석하였다.

* 준 회원 : 조선대 공대 전기공학과 석사과정
 ** 정 회원 : 조선대 공대 전기공학과 공박
 *** 정 회원 : 한국폴리텍 1대학 제주캠퍼스
 신재생전기에너지학과 교수
 † 교신저자, 정회원 : 조선대 공대 전기공학과 교수
 E-mail : hyosang@chosun.ac.kr
 접수일자 : 2011년 2월 1일
 최종완료 : 2011년 4월 8일

2. 본 론

2.1 자속결합형 초전도 한류기의 동작원리

그림 1은 자속결합형 초전도 한류기의 구조를 나타내는 등가회로도이다. 직렬연결된 1·2차 권선은 하나의 철심으로 유도적으로 결합되어 있으며, 2개의 초전도 소자는 2차 권선 사이와 중성선을 통해 병렬로 연결되어 있다. 사고발생 전 초전도 소자는 영저항 상태를 유지하므로 초전도 소자의 전압 $V_{SC} = 0[V]$ 을 만족하게 된다. 따라서 식 (1)과 같이 병렬연결 관계인 2차 권선에 전압(V_{R2})이 유기되지 않는다. 즉, 철심내의 자속이 시간적인 변화가 없으므로 ($d\Phi/dt = 0$) 1·2차 권선에는 전압(V_{R1} , V_{R2})이 유기되지 않는다. 그러므로 식 (2)와 같이 V_{R1} 과 V_{R2} 의 합으로 나타낼 수 있는 전체전압(V_T)은 0[V]이므로 정상상태에서 자속결합형 초전도 한류기는 손실없이 동작한다[4-6].

$$V_{R1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt}, V_{R2} = (N_{2-1} + N_{2-2}) \frac{d\Phi}{dt}, V_{R2} = 2V_{SC} \quad (1)$$

$$V_T = V_{R1} + V_{R2} \quad (2)$$

사고가 발생하여 초전도 소자에 임계전류 값 이상의 사고전류가 흐르게 되면, 초전도 소자는 상전도 상태로 전이되어 발생하는 저항으로 인해 사고전류를 일정값 이하로 제한시키게 된다. 또한 1·2차 권선의 자속에 시간적인 변화가 발생하여($d\Phi/dt \neq 0$) 켄치된 초전도 소자의 저항에 의해 전압이 유기된다. 이때 N_{2-1} 과 N_{2-2} 가 동일한 턴수를 가지고 있으므로 초전도 소자의 전압은 동일하게 발생하게 된다. 초전도 소자는 불균일한 임계전류를 가지고 있어 불규칙한 켄치특성을 보이거나, 그림 1과 같이 2차권선과 초전도 소자 사이에 중성선으로 연결함으로써 초전도 소자의 켄치특성을 균일하게 할 수 있다.

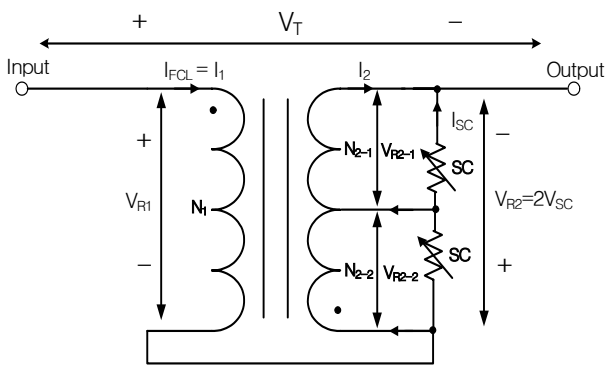


그림 1 자속결합형 초전도 한류기의 구조
Fig. 1 Structure of the flux-coupling type SFCL

2.2 실험 구성 및 방법

그림 2는 3상 자속결합형 초전도 한류기의 실험회로도이다. 그림 1과 같은 자속결합형 초전도 한류기는 그림 2의 Input과 Output단자에 연결된다. 각 상의 SW_{R-1} , SW_{S-1} ,

SW_{T-1} 은 전원인가 스위치이며, R_0 는 표준저항으로서 1[Ω]을, R -Load, S -Load, T -Load는 부하저항으로서 50[Ω]을 사용하였다. V_R , V_S , V_T 는 각 상의 전원전압으로서 280, 360, 440[V]를 인가하였다. 그리고 부하저항을 단락시켜 사고를 발생시키는 SW_{R-2} 를 ON함으로써 1선(R상) 지락사고를 모의하였다. 이때 전력용 차단기의 동작책무를 고려하여 O-t-CO-t-CO(O:open, C:close)의 동작주기를 5-10-10-20-5 주기로 설정하여 각 상의 전원인가 스위치를 ON/OFF하였다. 여기서 차단기의 폐로주기인 5와 10, 5주기는 일반적으로 25.8[kV]급 이상의 배전급 전력용 차단기가 5~8주기 이내에 동작한다는 것을 감안하여 설정된 주기이며, 차단기의 개로주기인 10과 20주기는 폐로주기의 2배로 설정하였다. 실험에 사용된 각 상의 1·2차 권선은 하나의 철심을 통해 유도적으로 연결되어 있으며, 턴수비($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}$)는 4:1:1과 4:2:2로 변화시켰다. 1·2차 권선의 결선 방향에 따라 자속결합형 초전도 한류기는 사고전류 제한특성에 약간의 차이를 갖는다. 선행된 연구 결과, 가극 결선일 경우 감극 결선인 경우보다 사고전류 제한 특성이 우수하다는 연구 결과가 보고된 바 있으므로 본 실험에서는 1·2차 권선의 결선 방향을 그림 1과 같이 가극 결선하여 수행하였다[7-9]. 그림 3은 본 실험에 사용된 각 상의 초전도 소자의 임계전류를 나타낸 곡선이다.

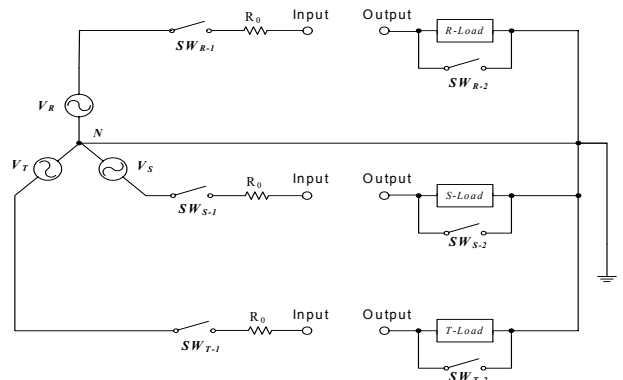


그림 2 3상 자속결합형 초전도 한류기의 실험회로도
Fig. 2 Experimental circuit diagram of the three-phase flux-coupling type SFCL

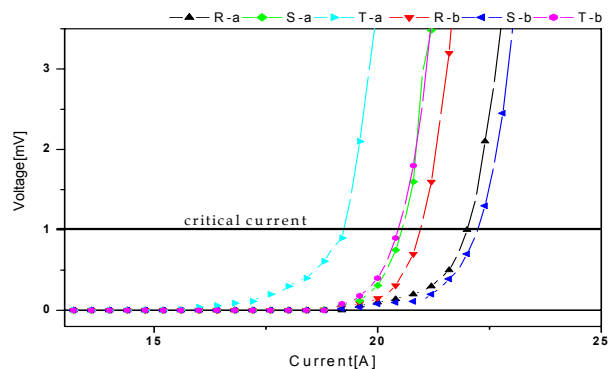


그림 3 초전도 소자의 임계전류
Fig. 3 Critical current of the superconducting elements

3. 결과 분석

본 논문에서는 중성선을 갖는 3상 자속결합형 초전도 한류기를 적용한 회로에서 1선 지락사고가 발생한 경우 초전도 소자의 켄치특성 및 회복특성의 연관성을 분석하였다.

그림 4는 1·2차 권선의 턴수비($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}$)가 4:1:1인 경우 1선(R상) 지락 사고시 3상 자속결합형 초전도 한류기의 전압 증가에 따른 사고전류(I_{FCL-R}) 및 초전도 소자의 전압(V_{R-a} , V_{R-b})을 나타낸 것이다. 사고발생 순간인 400[msec] 지점에서 사고전류(I_{FCL-R})가 초전도 소자의 임계전류값을 초과하게 됨으로써, 초전도 소자는 상전도 상태로 켄치되어 저항이 발생하였다. 이에 3상 자속결합형 초전도 한류기의 인가전압이 280, 360, 440[V]일 때 사고전류의 크기는 24, 27, 30[A]로 약 90% 이상 제한되었다는 것을 확인할 수 있다. 또한 2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 삽입하였기 때문에, 사고가 발생한 R상에 있는 초전도 소자에서 발생하는 전압이 각각의 인가전압에 따라 33, 44, 55[V]로 동일하게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 3과 같이 불규칙한 임계특성을 갖는 초전도 소자임에도 불구하고 R상에 있는 두 개의 초전도 소자가 동시에 켄치되었음을 확인할 수 있다.

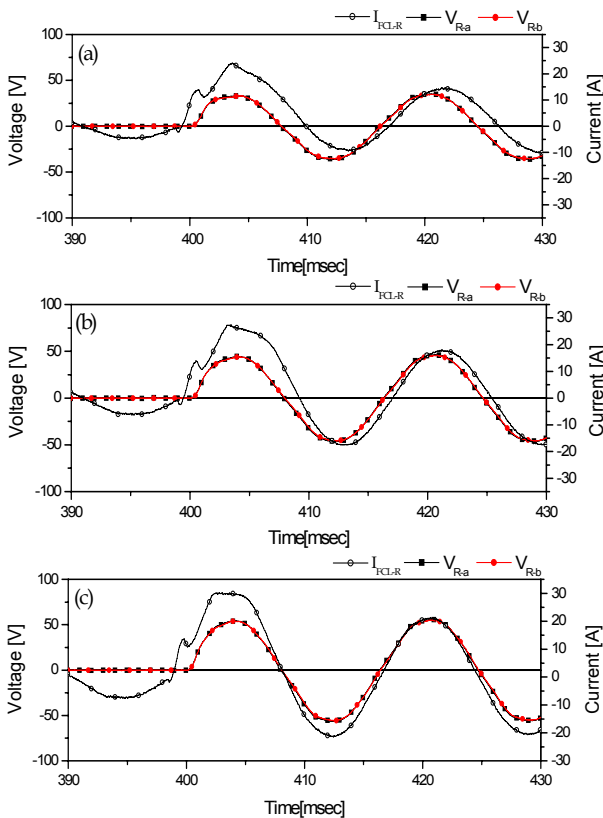


그림 4 초전도 소자의 전압 및 제한된 사고전류 파형 ($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}=4:1:1$)
(a) 280[V] (b) 360[V] (c) 440[V]

Fig. 4 Waveforms of the voltage of superconducting elements and the limited fault current($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}=4:1:1$)
(a) 280[V] (b) 360[V] (c) 440[V]

초전도 소자의 회복특성은 사고종료 후 초전도 소자의 전압이 0[V]가 되는 즉, 초전도 소자가 저항값을 가지는 상전도 상태에서 영저항의 초전도 상태로 복귀하는 시간을 의미한다. 불규칙한 임계특성을 갖는 초전도 소자의 직렬연결시 불균일한 켄치특성으로 인해 켄치된 초전도 소자의 회복시간이 길어진다. 그러나 3상 자속결합형 초전도 한류기는 2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 연결함으로써 동시에 켄치되도록 유도할 수 있다.

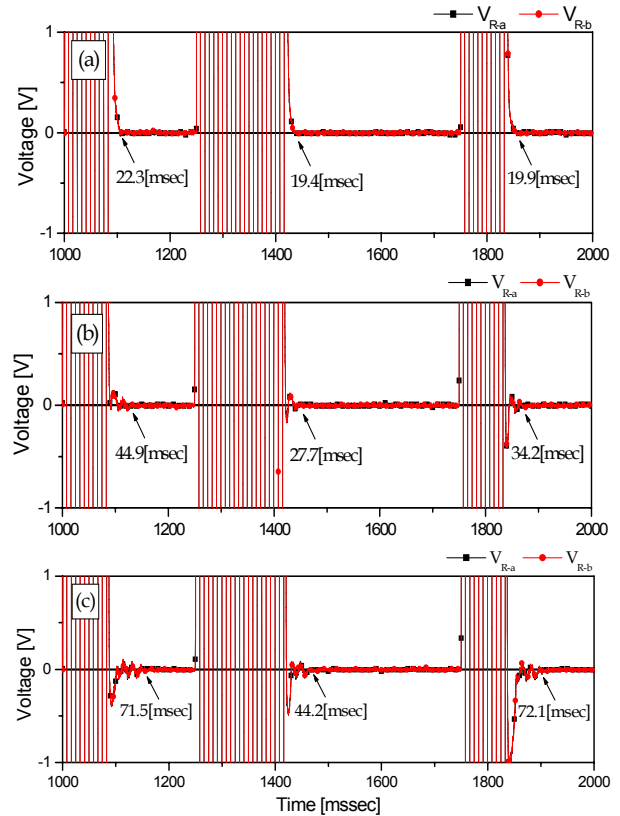


그림 5 초전도 소자의 사고종료 후 전압 파형 ($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}=4:1:1$)
(a) 280[V] (b) 360[V] (c) 440[V]

Fig. 5 Waveforms of the voltage of superconducting elements after the fault operation($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}=4:1:1$)
(a) 280[V] (b) 360[V] (c) 440[V]

그림 5는 설정된 재폐로 동작에 따라 1선 지락사고시 사고가 발생한 R상 초전도 소자의 회복시간을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있는 것과 같이 차단기의 개로 주기 이내에 켄치된 R상 초전도 소자는 거의 동일하게 초전도 상태로 회복된다는 것을 알 수 있다. 또한 440[V]의 인가전압 하에서 회복시간이 가장 긴 초전도 소자 R-b의 경우 상전도 체로 전이된 초전도 소자가 다시 초전도 상태로 복귀하는 회복시간은 3번의 사고발생 종료 후 각각 95, 69, 70[msec]로 측정되었다. 이는 차단기의 개로주기로 설정한 10주기와 20주기 이내에 모두 회복되는 시간으로서, 3상 자속결합형 초전도 한류기가 실제 전력계통에서 전력용 차단기의 최소 개로시간인 0.3초(=300[msec]) 이내에 초전도 소자가 회복할

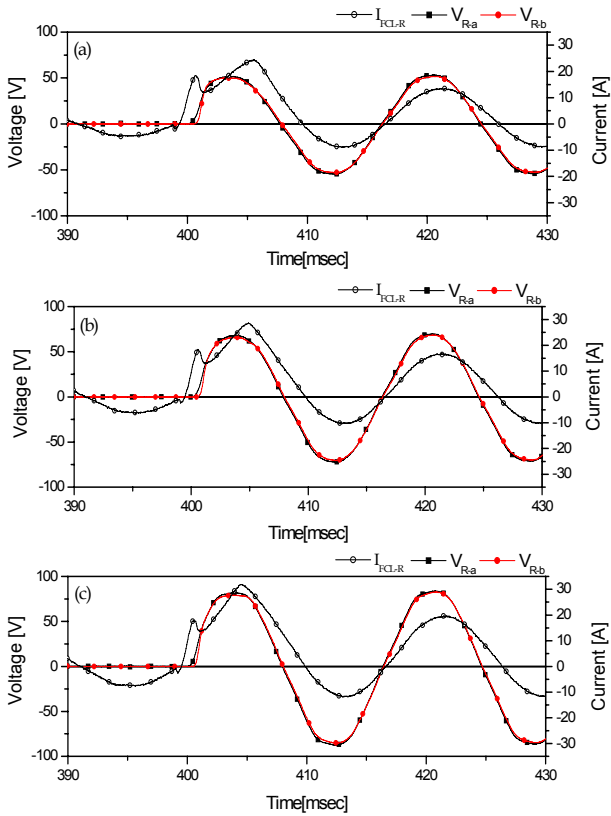


그림 6 초전도 소자의 전압 및 제한된 사고전류 파형 ($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}=4:2:2$)
(a) 280[V] (b) 360[V] (c) 440[V]

Fig. 6 Waveforms of the voltage of superconducting elements and the limited fault current ($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}=4:2:2$)
(a) 280[V] (b) 360[V] (c) 440[V]

수 있는 가능성을 보여주고 있다고 할 수 있다.

3상 자속결합형 초전도 한류기의 1·2차 권선 턴수비 ($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}$)를 4:2:2로 하였을 때 1선 지락사고로 인한 제한된 사고전류와 초전도 소자의 전압곡선을 그림 6에 나타내었다. 인가전압의 증가에 따라 사고전류는 각각 24, 29, 32[A]로 제한되었다. 2차 권선수의 증가는 자속결합형 초전도 한류기의 전체 임피던스를 증가를 의미하며, 이로 인해 제한된 사고전류의 값이 증가하게 된다. 그림 6에서 2개의 초전도 소자에서 발생하는 전압곡선을 통해서도 알 수 있듯이 인가전압의 증가에 따라 52, 67, 81[V]의 전압이 동일하게 발생하여 턴수비가 커질수록 초전도 소자의 전압이 증가한다는 것을 그림 3과 비교하여 확인할 수 있다.

그림 7은 3상 자속결합형 초전도 한류기의 1·2차 권선 턴수비 ($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}$)를 4:2:2로 하였을 때 초전도 소자의 회복시간을 확인하기 위한 전압곡선을 나타낸 것이다. 그림 5의 4:1:1의 전압곡선과 비교하여 턴수비가 증가함에 따라 초전도 소자의 회복시간이 길어진다는 것을 확인할 수 있다. 2차 권선수의 증가로 인해 병렬로 연결된 초전도 소자의 전압이 증가하였고, 동시에 초전도 소자로 흐르는 전류의 값이 증가하여 차단기가 ON되어 있는 사고발생 주기동안 초전도 소자의 소비전력이 증가하게 된다.

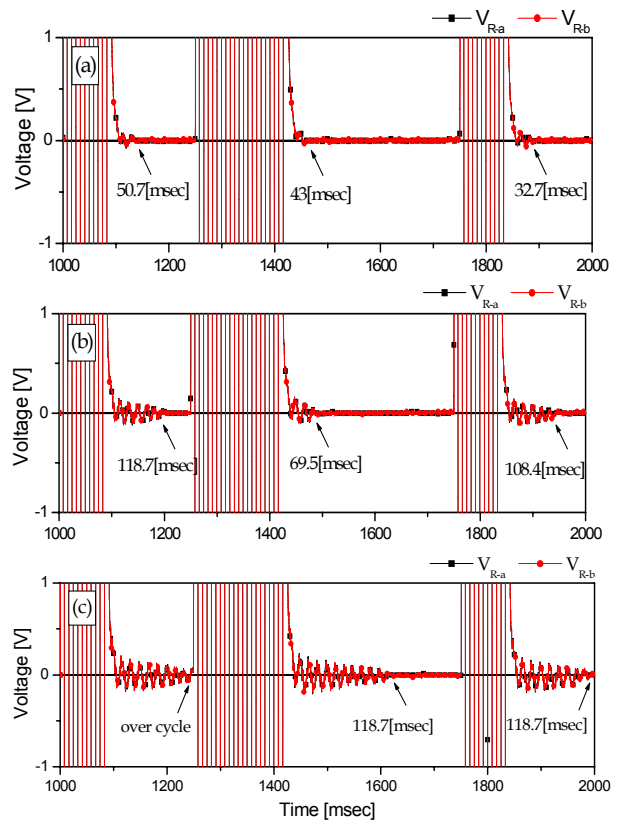


그림 7 초전도 소자의 사고종료 후 전압 파형 ($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}=4:2:2$)
(a) 280[V] (b) 360[V] (c) 440[V]

Fig. 7 Waveforms of the voltage of superconducting elements after the fault operation ($N_1:N_{2-1}:N_{2-2}=4:2:2$)
(a) 280[V] (b) 360[V] (c) 440[V]

퀵치된 초전도 소자가 다시 상전도 상태로 복귀하기 위해서는 사고발생 주기 동안 초전도 소자가 받은 전력을 모두 소비해야 가능하다. 그러므로 턴수비의 증가는 초전도 소자의 소비전력을 증가시키므로 회복시간이 길어지게 되는 것이다. 인가전압 440[V]인 경우 첫 번째 사고로 인해 초전도 소자가 차단기 OFF주기(10주기) 이내에 회복되지 못한다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 초전도 소자가 큰 전력을 부담하기 때문이므로 다수의 초전도 소자를 직렬연결하여 소비전력을 분배시킨다면 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 3상 자속결합형 초전도 한류기를 구성하여 1선 지락사고 발생시 채폐로 동작에 따른 초전도 소자의 회복특성을 고찰하였다. 2차측 리액터와 병렬로 접속된 두 개의 초전도 소자 사이에 중성선을 삽입함으로써 초전도 소자의 회복시간이 향상되었다. 이러한 결과는 중성선으로 인해 초전도 소자간 동시퀵치가 유도되어 사고전류를 균등하게 부담했기 때문이다. 그리고 자속결합형 초전도 한류기는 사용부하의 증가에 따라 1, 2차측 리액터 턴수비를 조절함으로써 용량증대를 할 수 있는 장점이 있지만, 2차측 리액터 턴

수가 증가할 때 2차측 리액터의 임피던스 증가로 인해 초전도 소자의 전력부담이 가중됐다. 즉 초전도 소자의 개수 증가 없이 턴수비만 증가시키는 것은 초전도 소자의 전력부담을 초래하였다. 따라서 1, 2차측 리액터 턴수비가 증가함에 따라 그 비율에 맞는 경제적인 초전도 소자의 개수를 결정하여 자속결합형 초전도 한류기를 설계할 때, 초전도 소자의 전력부담을 감소시켜 제한특성이 우수하고 회복시간 지연으로 인한 손실을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문 또는 저서는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-131-D00274)

참 고 문 헌

[1] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준, 문승현, 한병성, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작 특성", 대한전기학회 전기학회논문지 B, 제 48B권 제 10호 pp. 537 ~543, 1999

[2] 이상봉, 김철환, 김규호, 김재철, 현옥배, "초전도 한류기의 회복특성에 따른 재폐로 동작 분석", 대한전기학회 전기학회논문지, 제58권 제5호, pp. 905~910, 2009

[3] Seung-ryul Lee, Jong-yul Kim, and Jae-young Yoon, "A study on SFCL systems for Korean power system application", Transmission and Distribution Conference and Exhibition, page(s)1144-1148, 2005

[4] Sung-hun Lim, "Operational Characteristics of Flux-Lock Type SFCL With Series Connection of Two Coils", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, June 2007

[5] Sung-hun Lim, Jin-seok Kim, Jae-min An, Jong-fil Moon, Jae-chul Kim, "Analysis on simulation and experiment for fault current limiting characteristics of SFCL using magnetic coupling of two coils with series connection", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol.22, No.8, pp.26~30 August 2008

[6] Hyo-sang Choi, Hyoung-min Park, Yong-sun Cho, Sung-hun Lim, Byoung-sung Han, "Quench Characteristic of Current Limiting Elements in a Flux-Lock Type Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 16, pp.670-673, June 2006

[7] Hyo-Sang Choi, Byung-Ik Jung, Yong-Sun Cho, "Transient characteristics of a Flux-Coupling type Superconducting fault current limiter according to winding direction", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 19, pp.1827-1830, June 2009

[8] 정수복, 조용선, 최효상, 최명호, "결선방향에 따른 자속구속형 전류제한기의 켄치 회복 의존도 해석", Journal

of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol.22, No.1, pp.113~117 January 2008

[9] Sung-hun Lim, Choi-hyo-sang, Han-Byoung sung, "Fault current limiting characteristics due to winding direction between coil1 and coil2 in a flux-lock type SFCL", Phys C, vol. 416, pp. 34-42, November 2004

저 자 소 개



하 경 훈 (河景薰)

1982년 10월 1일생. 2009년 조선대학교 제어계측로봇공학과 졸업. 현재 동 대학교 전기공학과 석사과정.
Tel : 062-230-7054
Fax : 062-230-7020
E-mail : tnt3636@nate.com



최 효 상 (崔孝祥)

1966년 2월 21일생, 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박), ~ 2003년 한전 전력연구원 선임연구원, 2009년 테네시 주립대 방문교수, 현재 조선대 전기공학과 교수.
Tel : 062-230-7025
Fax : 062-230-7020
E-mail : hyosang@chosun.ac.kr



조 용 선 (趙鎔善)

1980년 1월 15일생. 2005년 조선대학교 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박).
Tel : 062-230-7054
Fax : 062-230-7020
E-mail : cys5144@hanmail.net



김 덕 구 (金德久)

1952년 11월 10일생. 2000년 제주대학교 산업대학원 전자·전기공학과 졸업(석사). 2011년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현 한국폴리텍 1대학 제주캠퍼스 신재생전기에너지학과 교수.
Tel : 064-754-7152
Fax : 064-754-7113
E-mail : dgk@kopo.ac.kr