

다양한 선재 조합에 따른 이종 초전도 스위치의 특성 실험 및 분석

Experimental and Analytical Studies on the Characteristics of Fast Switch in Combinations of Various Superconducting Tapes

이지호¹, 김영재¹, 나진배², 최석진², 장재영², 황영진², 김진섭³, 고태국^{4,*}

Jiho Lee¹, Young Jae Kim¹, Jin Bae Na², Sukjin Choi², Jae Young Jang², Young Jin Hwang², Jin Sub Kim³, Tae Kuk Ko^{4,*}

Abstract: A Hybrid Fault Current Limiter(FCL) which has more advantages in fast response and thermal characteristics than a simple resistive FCL had been proposed by our group. The Hybrid FCL consists of a resistive FCL for reducing the magnitude of the first peak of fault current, and a fast switch for detecting fault current and generating the repulsive force within a cycle in fault situation. In ideal case, the impedance of the fast switch wound with two other kinds of HTS tape is negligibly zero in normal operation. But, during the fault situation, each HTS tape has different quench characteristics because of asymmetric current distribution. And this phenomenon causes effective magnetic flux and this flux opens the switch through the repulsive force applied to a metal plate of the fast switch.

The magnitude of the repulsive force affects the switching characteristics of the fast switch. It should be large enough to raise the metal plate up. Otherwise the arc re-out break which are caused by not enough repulsive force to raise the metal plate up can cause unintended operation of the fast switch.

In this paper, the numerical calculation of the repulsive force applied to the metal plate of the fast switch in various combinations of HTS tapes was performed by using the short-circuit test and finite element method.

Key Words: asymmetric non-inductive coil, eddy current, fast switch, fault current limiter, FCL, repulsive force, SFCL.

1. 서 론

최근 증가하는 전력수요에 의해 전력용량의 레벨이

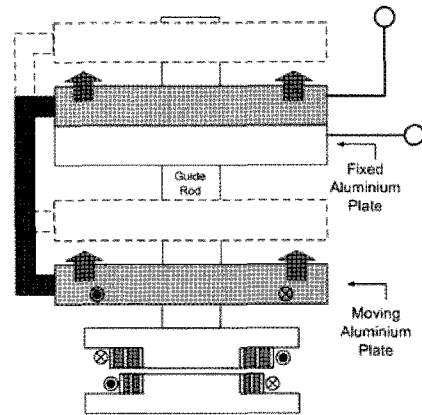


Fig. 1. A schematic view of Fast Switch of Hybrid FCL.

증가하고 있고, 이는 사고 발생 시 사고 전류가 급증하게 되는 결과를 야기하게 된다. 현재의 전력계통은 사고전류에 대한 대책으로 차단기를 사용하고 있지만, 차단기는 사고 감지 후 차단까지 0.1 초 이상의 긴 시간이 소요되어 병렬 네트워크로 전기를 공급하고 있는 우리나라의 경우, 대규모 정전 사태가 발생할 가능성이 있다.

본 논문에서는 이전의 연구에서 제시되었던 하이브리드 한류기(Hybrid Fault Current Limiter)에 적용된 이종 초전도 코일(Asymmetric Non-inductive Coil)을 이용한 패스트 스위치(Fast Switch)의 다양한 선재 조합에 따른 반발력 특성에 대해서 다루었다[1].

이종 초전도 스위치란 Fig. 1과 같이 서로 다른 종류의 선재를 Pancake 형태로 GFRP 보빈에 권선한 모듈을 서로 마주보는 방향으로 조립하고, 그 위에 위치한 움직이는 알루미늄 플레이트와 고정된 알루미늄 플레이트로 이루어진다. 정상 시에는 서로 반대 방향으로 권선되어 있는 병렬로 연결된 두 개의 초전도 선재에 같은 크기의 전류가 흐르고 있으므로 전류에 의한 자기장은 서로 상쇄되지만, 사고 시에는 두 선재의 서로 다른 비저항 값에 의해서 두 선재에 불균등한 전류분배가 이루어진다.

두 개의 선재가 모두 초전도 상태이고 서로 반대 방향으로 권선되어 있으므로 전류에 의한 자기장은 서로 상쇄되지만, 사고 시에는 두 선재의 서로 다른 쿼치 특성에 의해서 비저항이 다르기 때문에 전류가 불균등하게 분배되어, 이종 초전도 스위치의 중심 부분에 강한 자기장이 발생한다. 이때 렌츠의 법칙에 의해서 이종 초전도 모듈에 발생하는 자기장의 생성을 방해하는

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 통합과정

²학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

³학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정

⁴정 회 원 : 연세대 전기전자공학과 정교수

*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2010년 10월 08일

심사완료 : 2011년 03월 03일

게재확정 : 2011년 03월 04일

방향으로 알루미늄 플레이트에 와전류가 발생하게 된다. 이 와전류에 의한 자기장의 방향과 이종 초전도 모듈 중심부의 자기장이 서로 반대 방향을 나타내어 알루미늄 플레이트에 반발력이 발생하여 위로 움직여 스위치가 개방된다.

본 연구에서는 기존의 연구에서 이미 이종 초전도 모듈에서 발생하는 반발력으로 스위치가 열리는 것을 확인하였기 때문에 알루미늄 플레이트를 제외하고 실험을 실시하였다[2]. 4개의 초전도 선재로 구성된 6개의 조합으로 이종 초전도 모듈을 구성하고 단락실험을 수행하여 각각의 선재에 흐르는 전류 값을 얻어내었다.

실험을 통해 얻은 사고 전류 값들을 반영하여 Infolytica사의 MagNet으로 Finite Element Method 모델을 구성하고 자기장 해석을 이용하여 6개의 조합에 대한 사고 상황에서의 반발력을 계산한 후, 그 결과를 비교하여 각 조합별 동작 특성을 파악하였다.

2. 실험방법

2.1. 사용선재

본 실험에 사용한 선재들은 American Superconductor®의 344S, Bi2223 선재와 Super Power 사의 SF4050, SCS4050 선재이다.

이종 초전도 스위치를 구성했을 시 각각 다른 종류의 선재로 조합이 구성되는데, 초전도 선재들이 갖고 있는 물성 값이 다르기 때문에 사고전류가 발생할 때 켄치가 일어나는 각각의 시점이 다르다. 이 시점의 차이가 두 선재간의 불균등한 전류분배를 유발하고, 이것이 Fig. 1의 알루미늄 플레이트에 와전류를 발생시킨다.

Table 1. Specifications of HTS tapes and each HTS pancake type module.

사용 선재				
종류	344S	Bi2223	SF4050	SCS4050
너비 [mm]	4.4	4.15	4	4
두께 [mm]	0.2	0.25	0.05	0.10
모듈				
turn 수	16.5			
선재 총 길이 [m]	3.89			
두께 [mm]	0.35			
보빈 내경 [mm]	54			
보빈 외경 [mm]	79.63	78.65	77.91	78.20

2.2. 권선 및 제작 방법

본 실험에 사용한 4개의 선재는 모두 두께가 다르기 때문에, 선재에 절연 테이프를 부착한 후 같은 turn 수로 보빈에 감았을 때, 선재의 총 길이와 외경이 서로 다른 값을 갖는다. 이는 정상 시 이종 초전도 모듈의 무유도성을 떨어뜨리기 때문에, 본 실험에서는 절연을 위해 붙이는 캡톤 테이프의 췌수를 선재별로 서로 달리 하여 GFRP 보빈에 권선하였다. 이 방식을 통해서 모든 선재의 절연 후 두께는 0.35 mm로 같아졌고, 권선된 단일 코일의 모듈은 거의 비슷한 외경을 갖는다. Table 1은 사용된 각 선재의 종류와 실제로 측정된 각 단일 선재 모듈의 사양이다.

Fig. 2.은 이 방식을 통해서 권선한 실제 단일 선재 모듈이다. 위에서 언급된 선재의 두께를 같게 만드는 방법으로 두께가 상대적으로 두꺼운 344S 선재로 권선한 단일 선재 모듈과, 상대적으로 얇은 SCS4050 선재로 권선한 단일 선재 모듈의 외경이 거의 같다.

Table 2은 각각의 단일 코일 모듈의 전기적 특성의 실제 측정값이다. 두 개의 단일 모듈을 조립하여 Fig. 3과 같은 이종 초전도 스위치 모듈이 완성된다.

2.3. Finite Element Method를 이용한 반발력 계산

FEM simulation을 통하여 알루미늄 플레이트에 발생하는 수직방향으로 작용하는 힘을 계산하였다. 이 수직 방향의 힘의 거의 대부분은 와전류에 의한 반발력 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$F = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

Table 2. Electrical specifications of each wound pancake module.

선재	344S	Bi2223	SCS4050	SF4050
임계전류 [A]	75.7	72.0	69.0	70.7
저항 [Ω]	1.04	42.2	49.6	3.59
인덕턴스 [mH]	0.0153	0.0158	0.0172	0.0122

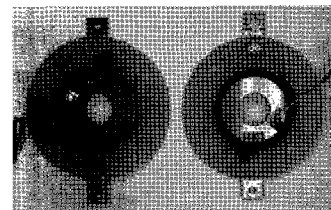


Fig. 2. Wound HTS pancake type modules. 344S(left), SCS4050(right).

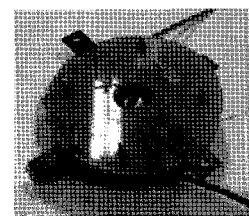


Fig. 3. Assembled asymmetric non-inductive HTS coils.

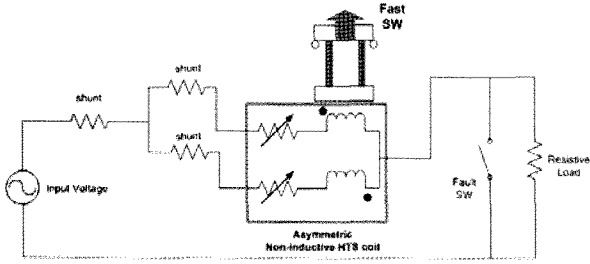


Fig. 4. A equivalent circuit of short circuit test.

사고 시의 퀴치에 의한 두 초전도 선재의 비저항 차이에 의해 전류 분배의 차이가 발생하게 된다. 그로 인해 생성되는 중심자기장에 의해 와전류가 발생하게 되므로, FEM 해석에서는 사고 상황에서의 전류 분배값만을 이용하였다.

실제 이중 초전도 스위치의 동작에서 10 ms 이내에 스위치가 열리게 되므로 결과 분석에서는 0~8.5 ms 동안 첫 peak의 반발력을 비교하였다.

3. 실험결과

3.1. 단락 실험

Fig. 4는 단락실험을 위한 회로도이다. 이 회로와 같이 구성된 단락회로에 이중 초전도 모듈을 설치한 후, 60 Hz의 주파수를 가진 교류 전압을 인가하여 6 cycle 동안 단락시켜 전류분배의 추이를 보았다. 각각의 이중 초전도 스위치 모듈 양단간에 약 18.3 V, 29 V, 40 V의 전압을 인가한 후, 6개의 모듈에 대하여 각각 3번씩 총 18번의 실험을 수행하여 6 cycle 동안 발생한 사고 전류의 데이터를 얻었다.

Fig. 5는 입력전압이 40V인 단락실험에서의 전류 분배 값이다. 6 cycle 동안 사고전류에서, 첫 번째 cycle에서 Bi2223 선재에는 최고 733.90853 A, SCS4050 선재에는 최고 405.11355 A가 흘러, 사고 순간 이중 초전도 모듈에 불균등한 전류 분배가 나타나는 것을 볼 수 있었다.

3.2. FEM 해석 결과

Fig. 6과 같은 알루미늄 플레이트를 포함한 이중 초전도 스위치 모델에 대하여 FEM 해석을 통해서 알루미늄 플레이트에 작용하는 수직방향의 힘의 크기를 계산하여, Fig. 7과 같이 사고 시 1 주기 동안 알루미늄 플레이트에 작용하는 반발력을 시간에 대하여 계산하였다. 기본적으로 입력 전압이 증가할수록 힘의 크기는 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 각 조합별 힘의 최고값의 크기를 입력전압 크기별로 나타낸 것이다. 힘의 peak값의 크기로 비교해보면 (Bi2223-SCS4050), (Bi2223-344S), (Bi2223-SF4050), (SCS4050-SF4050), (SCS4050-344S), (344S-SF4050)의 순서로 큰 값을 보인다. 이것으로 사고 시에 전류가 집중되는 선재의 순서를 유추 할 수 있는데, 이 실험에서 사용한 4개의 선재의 경우, Bi2223 > SCS4050 > 344S > SF4050의 순서로 각 선재에 더 큰 전류가 흐른다고 할 수 있다.

Fig. 9은 입력전압이 40 V일 때, 각 조합별 반발력의 크기를 시간에 대해 나타낸 그래프이다. 사고 시에 더 큰 전류가 흐르는 선재에 따라서 반발력의 peak값이 나타나는 시간이 달라짐을 알 수 있다. 사고 시에 Bi2223 선재 쪽으로 전류가 집중되는 (Bi2223-SCS4050), (Bi2223-344S), (Bi2223-SF4050) 조합의

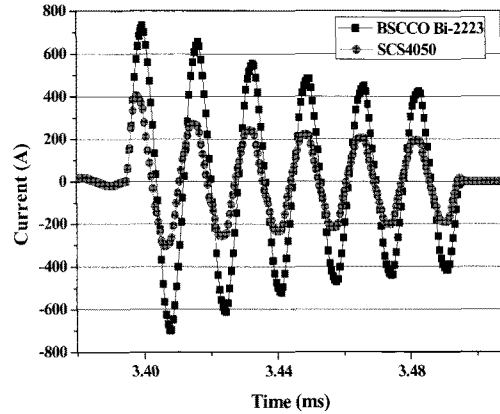


Fig. 5. A current waveform of Bi2223-SCS4050 combination, when input voltage was 40 V.

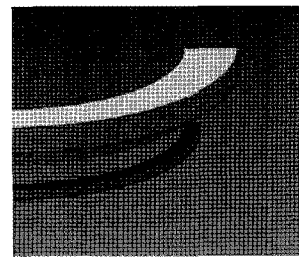


Fig. 6. A schematic FEM simulation model of Fast Switch.

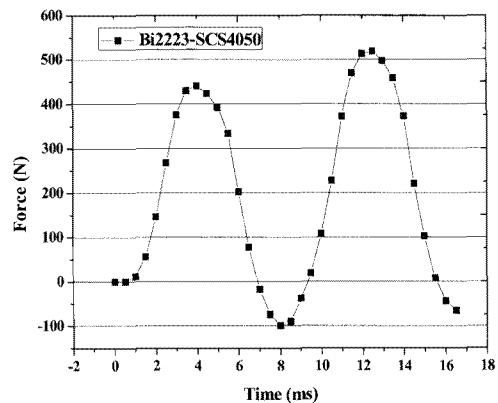


Fig. 7. Calculated repulsive force applied to the aluminium plate in fault operation.

경우, 4.5 ms, 사고 시에 SCS4050 선재 쪽으로 집중되는 (SCS4050-SF4050), (SCS 4050-344S) 조합의 경우는 3 ms 부근, 344S 선재 쪽으로 전류가 집중되는 344S-SF4050 조합의 경우에는 2 ms 부근에서 가장 큰 힘이 발생한다.

4. 결 론

본 연구에서는 4개의 선재를 이용한 6개의 이중 초전도 모듈 조합을 각각 입력전압 18.6 V, 29 V, 40 V에 대해 총 18회의 단락 및 사고실험을 수행한 후 얻은 전류 값들로 FEM 해석을 수행하여 알루미늄 플레이트에 작용하는 반발력을 계산하였다.

가장 큰 반발력이 계산된 조합은 (Bi2223-SCS4050) 조합이었고, 가장 빨리 반발력의 peak값에 도달한 조합은 (344S-SF4050) 조합이었다. 그러나 (Bi2223

-SCS4050) 조합의 경우 모든 시간대에서 가장 큰 반발력을 가지는 것으로 계산되었기 때문에, 6개의 조합 중에서 가장 큰 반발력을 발생시키는 선재 조합은 (Bi2223-SCS4050) 조합이다.

이러한 사실을 통해서 유추해 볼 때, 반발력의 크기는 사고시의 각각의 선재에 통전되는 전류가 이중 초전도 모듈의 초전도 선재부분으로 불균등하게 분배되는 정도와 연관이 있는데, 사고 시 전류의 크기는 각각의 선재의 사고 시 온도 별 비저항의 크기와 연관이 있기 때문에 이 점을 중점에 두어 추후에 연구할 필요가 있다.

Fig. 10은 이번 실험에 사용된 4개 선재의 온도별 비저항 측정값이다. 이 값들을 통하여, 사고 시, 이중 초전도 스위치의 양쪽의 선재에 조합별로 불균등한 전류 분배의 정도가 다른 이유를 추측할 수 있다. 초전도 선재의 임계온도 이상의 온도에서 비저항 값은 Bi2223, SCS4050, 344s, SF4050의 순서이다. 비저항 값이 가장 작은 Bi2223 선재가 사용된 스위치 조합들인 (Bi2223-SCS4050), (Bi2223-344s), (Bi2223-SF4050) 조합들이 다른 조합들 보다 더 높은 반발력의 peak값을 갖는 것을 볼 때, 비저항과 반발력의 관계를 정량적으로 확인할 수 있다.

또한 반발력의 peak값이 발생하는 시간은 초전도 선재의 온도가 상승하여 저항 값이 상승하는 속도와 연관이 있는데, 이는 선재의 n-value도 연관이 있는 것으로 보인다.

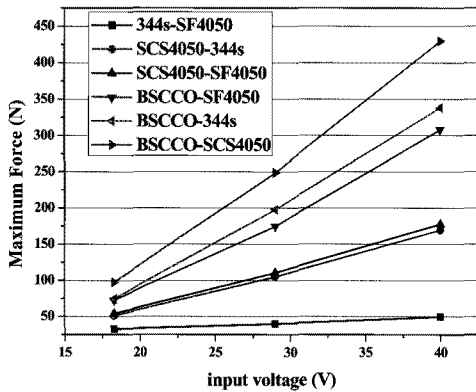


Fig. 8. Calculated peak repulsive force applied in aluminium plate of each combination.

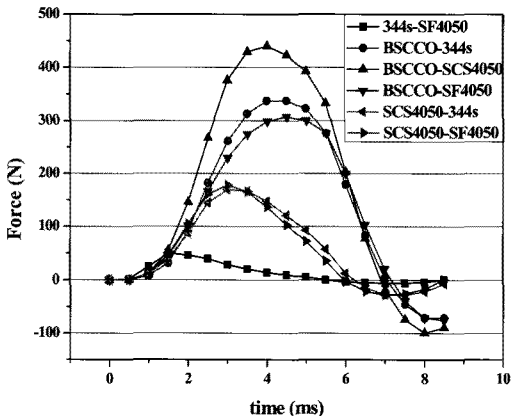


Fig. 9. Repulsive force applied in aluminium plate of each combination when input voltage was 40 V.

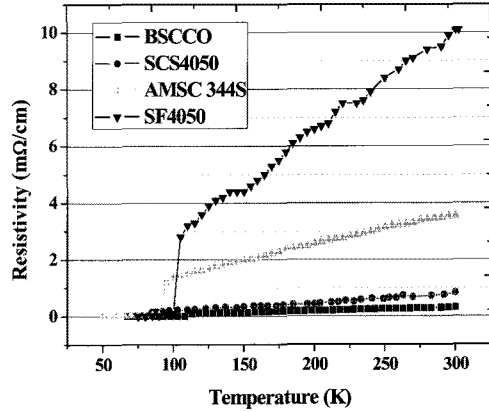


Fig. 10. Resistivity of several HTS tapes with respect to the temperature.

온도 별 비저항의 크기와 저항 값이 상승하는 속도는 V/m, 임계전류, n-value, 온도별 비저항 등 각 선재의 특성과 연관이 있다. 그러나 사고 시, 각 조합의 초전도 선재의 온도는 선재의 복잡한 사양과 이중 초전도 스위치 모듈이 두 개의 서로 다른 선재로 구성되는 점으로 인해서 측정 혹은 예측하기 매우 어렵다.

따라서 스위칭 시간과 반발력의 크기 등 이중 초전도 스위치의 스위칭 특성에 각각의 선재의 특성이 미치는 영향을 연구하기 위해서는 사고 시의 각 선재의 V/m과 임계전류, n-value 등의 선재의 종합적인 특성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2010-0018852).

참고 문헌

- [1] Jae Young Jang, Dong Keun Park, Seong Eun Yang, Young Jae Kim, Jin Bae Na, Hyun Chul Jo, Min Cheol Ahn, Tae Kuk Ko, "A Study on the Non-Inductive Coils for Hybrid Fault Current Limiter Using Experiment and Numerical Analysis," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp 1151-1154, 2010.
- [2] Dong Keun Park, Ki Sung Chang, Seong Eun Yang, Young Jae Kim, Min Cheol Ahn, Yong Soo Yoon, Ho Min Kim, Jung-Wook Park, Tae Kuk Ko, "Analytical and Experimental Studies on the Hybrid Fault Current Limiter Employing Asymmetric Non-Inductive Coil and Fast Switch," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp 1896-1899, 2009.

저 자 소 개



이지호 (李知浩)
1986년 10월 22일생, 2010년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 통합과정.



김영재 (金永宰)
1981년 6월 7일생, 2005년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 통합과정.



나진배 (羅鎭培)
1976년 9월 19일생, 2001년 충청대 공대 컴퓨터공학과 졸업, 2006년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업, 현재 동 대학원 박사과정.



최석진 (崔錫鎭)
1974년 6월 10일생, 1998년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



장재영 (張宰榮)
1982년 11월 8일생, 2007년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



황영진 (黃英珍)
1980년 3월 31일생, 2007년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2010년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



김진섭 (金珍燮)
1984년 10월 8일생, 2010년 건국대 공대 전기공학과 졸업, 현재 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정.



고태국 (高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (M.Sc). 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (Ph.D). 1986년 ~ 1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008년 ~ 2010년 한국 초전도 저온공학회 회장, 현재 연세대 학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도 저온공학회 명예회장.