

초전도 한류기 설계 검증을 위한 초전도 한류 모듈 단락 특성 시험

Test of a Current Limiting Module for Verifying of the SFCL Design

양성은¹, 김우석², 이지영³, 김희선¹, 유승덕¹, 현옥배⁴, 김혜림^{4*}

S.E. Yang¹, W.-S. Kim², J.-Y. Lee³, H. Kim¹, S.-D. Yu¹, O.-B. Hyun⁴, and H.-R. Kim^{4*}

Abstract: KEPCO Research Institute has been researching a Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) which is considered one of solutions of fault current problems with Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM) and Hanyang University since 2011. In this paper, we fabricated a current limiting module and conducted electrical short circuit tests for checking the validity of the transmission level SFCL design. Based on the short circuit characteristics of the second generation High Temperature Superconductor (HTS), we analyzed the short circuit characteristics of 3 parallel connected superconducting wires. The structure of the HTS wire is as follows: the stainless steel stabilizer of 100 μm is laminated on the superconductor layer and under the substrate, both of which are electrically jointed with solder. We fabricated the current limiting module which has 40 series and 6 parallel connections and studied the short circuit characteristics of the module under various voltage levels.

Key Words: fault current, SFCL, short circuit test

1. 서 론

국내 전력 계통의 경우 전력 수요가 지역별로 편중되어 있고, 전력 품질 향상을 위하여 network 형태로 운영하고 있다. 또한 하계 및 동계 전력 수요가 급격히 늘어남에 따라 고장 전류의 크기가 차단기의 용량을 초과하는 문제가 발생하고 있다. 이러한 고장 전류의 문제를 해결하는 방법으로 모선분리, 공심리액터 설치, 차단기의 용량증대 등이 있으나 이는 완벽한 해

결책이 아니다. 모선 분리는 계통 간 결합력 감소로 인하여 안정도가 손상되어 전력품질이 감소하는 문제를 갖고 있으며, 공심리액터 설치하는 상시에도 선로 임피던스를 증가시켜 전력 손실을 가져온다. 대용량 차단기로의 교체 역시 교체 비용이 문제가 된다. 이에 향후 지속적인 고장 전류 증가 문제를 해결할 방법으로 초전도 한류기의 필요성이 대두되고 있으며, 한전 전력연구원에서는 22.9 kV급 초전도 한류기를 LS 산전과 공동으로 개발하여 현재 이천변전소에 설치하여 운영 중에 있다[1-2]. 또한 송전급 초전도 한류기 연구를 한국기계연구원, 한양대와 함께 2011년부터 시작하였다. 본 논문에서는 초전도 선재와 초전도 모듈의 단락 특성 시험을 통하여 초전도 한류 모듈 설계의 타당성을 확인하고자 하였다.

2. 초전도 선재 단락 특성

2.1. 초전도 선재의 단락 특성

초전도 한류 모듈을 설계하고 그 특성을 예상하기 위해서는 한류 모듈 제작 시 사용할 초전도 선재의 특성을 분석하는 것이 필요하다. 본 논문의 실험에서는 100 μm 두께의 stainless steel이 양면에 부착되어 있는 선재를 사용하였다. 폭은 4.4 mm이며, 임계 전류는 약 80 A(1 uV/cm criterion, 77K self field)이다. 초전도 선재의 단락 특성 시험은 1 m 선재를 샘플홀더에 부착한 후 그림 1처럼 스위치의 조작을 통하여 고장을 모의하여 진행하였다. 그림 2는 초전도 선재의 단락 특성 시험 결과 중 인가전압 및 고장 전류 지속 시간에 따른 저항 발생 곡선이다. 10 V 정도의 낮은 인가전압에서는 그림에서 확인 가능하듯이 전류가 줄어들 때 잠시 동안 회복하는 특성을 보이지만, 30 V 이상에서는 이러한 특성을 보이지 않는다. 선재 양단의 전압이 30V 이상일 때 고장 전류 제한 시간이 지속됨에 따라 온도는 점차 상승하며, 양단 전압의 크기가 커질수록 상승폭은 더욱 커진다. 이렇듯 초전도 선재가 한류동작을 하는 시간이 선재의 온도상승에 영향을 미치므로 선재의 한류동작 시간을 얼마나 줄일 수 있는가가 선재 사용량을 결정하는 중요한 요소가 된다[3]. 한전 전력연구원에서는 배전급 한류기 개발에 있어서 1/2 주기 내에 동작하는 고속 스위치를 개발하여 인가가능전압을 크게 향상시킴으로써 초전도 선재량을 대폭 줄인 형태의 초전도 한류기[1]를 개발한 바 있다. 이처럼 초전도 한류기의 개발에 있어서 초전도 선재의 한류 동작 시간은 중요한 요소이다. 현재 송전급에서는 1 주기 내에 동작하는 스위치가 개발되어 있지 않기 때문에 앞으로의 한류기 설계에 있어서는 4 cycle을 기준으로 하여 60 V/m로 설계를 진행하였다.

¹정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 연구원

²정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

³정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 위촉연구원

⁴정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 수석연구원

*교신저자 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

원고접수 : 2012년 07월 16일

심사완료 : 2012년 09월 18일

게재확정 : 2012년 09월 18일

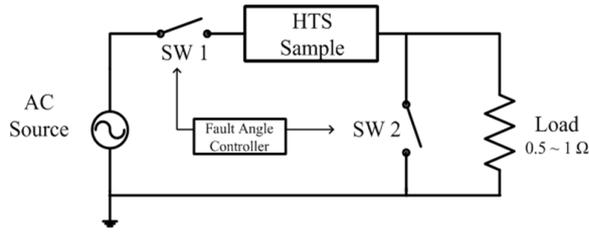


Fig. 1. Schematic diagram of short circuit test.

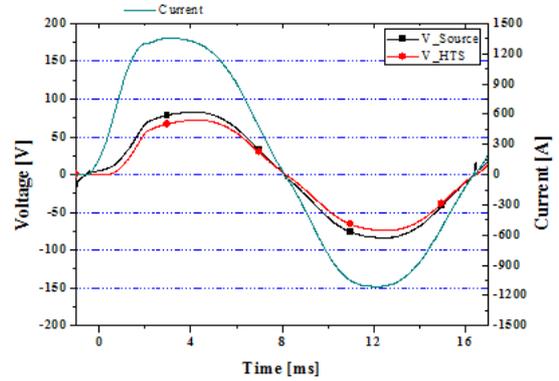


Fig. 4. Short circuit test result of 3 wire-parallel connected Sample

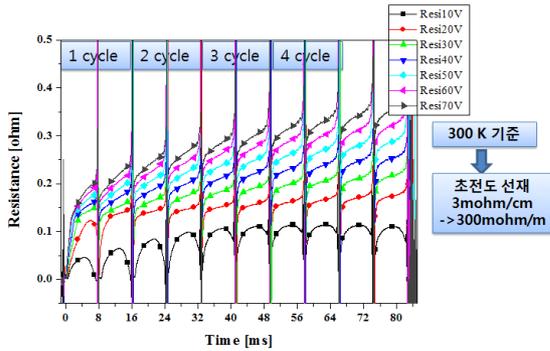


Fig. 2. Resistance of HTS wire according to fault condition.

초전도 한류기 설계 시에는 정상 전류 통전 시에 발생하는 교류 손실을 줄이기 위해 무유도 권선을 고려하게 된다. 이는 교류 손실을 줄이는데 아주 큰 기여를 하지만 한류 동작 시에는 선재에 발생하는 저항에 의하여 선재 간 전위차가 발생하기 때문에 선재의 절연이 필요하다. 초전도 선재의 절연은 에폭시 함침, 테이프 래핑 등의 방식으로 이루어지는데 에폭시 함침은 에폭시 시의 낮은 열전도도 등으로 리커버리가 거의 불가능하기 때문에 테이프 래핑 방식을 사용하기로 결정하였다.

초전도 선재의 절연을 위해서 테프론 테이프를 사용하였다. 래핑 작업 시에는 1/3 씩 겹치게 하여 권선하였다. 절연 전의 초전도 선재의 두께는 약 0.3 mm였으며, 권선 후의 선재의 두께는 약 1 mm였다.

그림 3은 테프론으로 절연한 선재와 절연하지 않은 선재의 전류 테이터를 비교한 그래프이다. 그림 3에서 보듯이 고장 전류의 크기가 큰 차이가 없다. 이는 선재를 절연하여도 선재의 단락 특성에는 영향이 없음을 나타낸다. 그림 2의 기준을 그대로 사용할 수 있음을 의미한다.

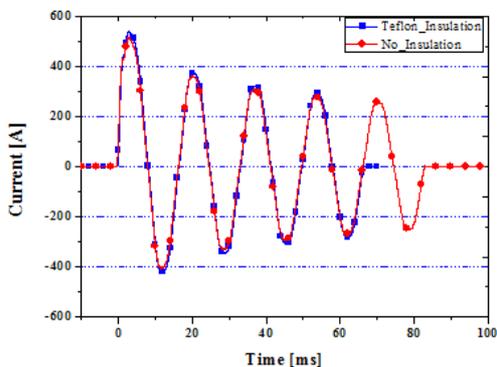


Fig. 3. Current comparison between insulated wire and non-insulated wire.

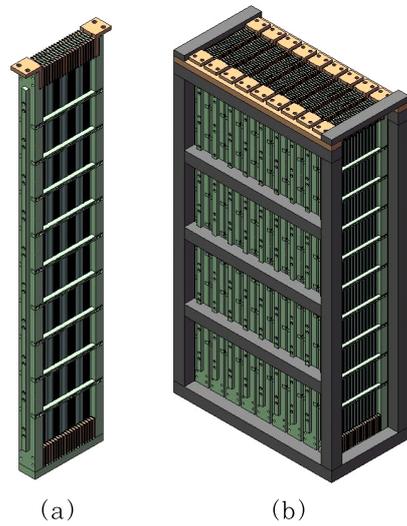


Fig. 5. Short HTS SFCL module ((a)unit module (b) example of parallel connection).

2.1. 3병렬 연결된 선재의 단락 특성

초전도 선재 한 개만으로 정상전류를 통전할 수 없기 때문에 초전도 모듈에는 선재의 병렬 연결이 반드시 포함된다. 이에 선재 3개를 병렬 연결하여 단락시험을 수행하였다. 그림 4는 인가 전압이 70 V일 때 단락시험 결과이다. 그림 3과 비교하여 고장 전류의 첫 번째 피크 값은 515 A_{peak}에서 1350 A_{peak}로 약 2.6배 증가하였다. 초전도체의 저항이 1/3이 되기 때문에 고장 전류는 3배 상승 하여야 하지만 그렇지 않은 이유는 라인 임피던스에 의한 영향으로 분석된다. 그림 4에서 보듯이 전원 전압의 일부가 초전도체가 아닌 라인에 인가된다. 이는 라인 임피던스(약 10 mohm)가 초전도 선재의 임피던스(3 병렬 시 50 mohm)에 비하여 무시할 수 없는 크기이기 때문에 고장전류 크기에 영향을 주기 때문이다. 앞선 하나의 선재를 이용한 단락 시험 결과와 비교해 볼 때 초전도 선재의 병렬 개수가 증가하여도 최대인가 전압은 그대로 유지되어 병렬 연결은 선재의 인가전압에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 지금까지 시험결과를 토대로 앞으로 제작할 초전도 한류 모듈의 단락 특성을 예상할 수 있다. 선재의 직렬길이는 특별한 전압 불균형이 일어나지 않는 이상 선재의 미터 당 인가전압(V/m)에만 영향을 주며, 병렬 연결은 제한된 전류의 크기에 영향을 준다. 만약 6병렬-6m 한류 모듈을 만들어 특성을 평가하는 경우,

단일 선재의 10 V와 6병렬-6m 한류 모듈의 60 V를 비교하면 선재의 온도는 10 V 일 때와 동일하게 올라가며, 하나의 선재에는 10 V 인가했을 때의 전류가 흘러서 10 V 고장 전류에 비해서 6배 정도의 고장 전류가 흐를 것으로 예측이 된다. 선재가 다수 병렬 연결될 경우 전류의 불균일 분배 문제가 발생할 수 있다. 이 경우 정상 상태에서는 선재의 저항이 없기 때문에 선재와 전류 단자와의 접촉저항이 지배적이어서 불균일 문제가 발생할 수 있으나 고장 전류를 제한할 때는 선재의 저항발생이 영향을 주어 불균일 분배 문제가 완화된다[4].

3. 초전도 한류 모듈 단락 특성 시험

3.1. 설계 및 제작

그림 5에 직선형 단위 모듈의 설계 모습을 나타내었다. 본 직선형 단위 모듈은 상부에 전류의 인입부 및 인출부가 양단에 위치하고 있으며, 상하로 뻗어 있는 1 m길이의 고온초전도 선재가 선재의 넓은 면의 방향으로 간격을 두고 적층되어 있는 형태로 구성이 되어 있다. 각 고온초전도 선재들은 상하 단부에서 번갈아가며 인접한 고온초전도 선재의 단부에 작은 구리 접속부를 통하여 전기적으로 연결되어 있어서, 전류가 흐르는 방향이 인접한 고온초전도 선재에 흐르는 전류의 방향과 항상 반대가 되도록 지그재그로 연결하게 된다. 본 연구에서 설계한 직선형 단위 모듈 내에는 6개의 고온초전도 선재가 병렬로 구성되어 있으며, 1 m 길이 고온초전도 선재를 총 40회 적층하여 구성하였다. 따라서 단위 모듈의 고온초전도 선재 병렬수는 6개, 직렬길이는 1 선재당 40 m 이며 단위 모듈을 위한 고온초전도 선재의 총 소요량은 약 240 m 이다. 이렇게 제작된 단위 모듈은 고장 전류 인가시 약 2 ohm의 저항을 발생하게 된다. 단위 모듈 내 고온초전도 선재들의 간격은 3 mm 이며, 이 간격을 유지하기 위하여 테프론 튜브를 50 mm 간격으로 삽입하였다. 고온초전도 선재의 양단부의 접속을 위하여 구리 접속부와 고온초전도 선재 사이에 Ostalloy 158을 사용한 솔더링으로 접속하여 접속저항을 최소화 하고자 하였다. 이러한 접속부는 본 단위 모듈의 경우 내부에 40개가 존재하게 되며, 이러한 상전도부에서 주울 손실이 발생할 수 있다. 이 주울 손실을 임계전류 하에서 계산해 본 바 5 W 이내로 계산되었으므로, 본 연구의 냉각시스템에 사용 예정인 냉동기의 용량인 4 kW에 비교해 볼 때, 거의 무시할 수 있는 수준으로 한류 모듈의 특성에 영향을 주지 않을 것으로 판단되었다.

3.2. 6직렬 특성 시험 결과

단위 초전도 한류 모듈의 단락 시험에 앞서 직렬 연결 시 단락 특성이 유지 되는지와 전압 불균형 문제가 발생하는 지에 대한 실험을 진행하였다. 그림 6처럼 단위 모듈과 동일한 형상으로 6개의 병렬 연결과 6개의 직렬 연결을 갖는 모듈을 단위 모듈의 제작방식과 동일하게 제작하여 실험하였다. 그림 6은 초전도 선재에 10 V를 인가했을 때와 모듈에 60 V를 인가했을 때의 고장 전류 패턴이다. 앞서 2절에서 기술한 것처럼 고장 전류의 크기만 약 6배 증가하는 패턴을 보인다. 그림 7은 전압 불균형이 발생하는지에 대한 결과이다. Section1~6은 6개의 선재에 걸리는 전압을 측정하는 것이다. 동일하게 전압이 분배되어 겹쳐 보인다. 6개의 선재에서 같은 전압이 걸리는 것으로 보아 이 모델의 전압 불균형 문제는 발생하지 않을 것으로 보인다.

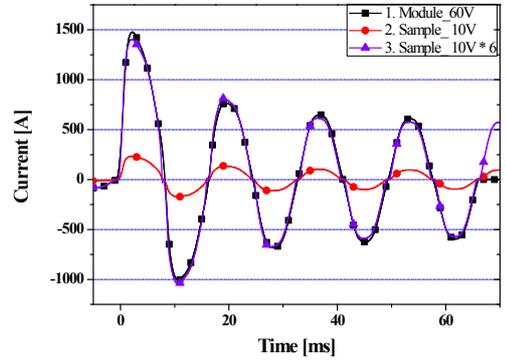


Fig. 6. 6-series module short circuit test result.

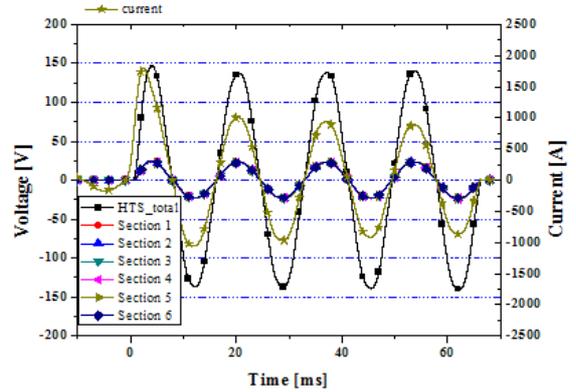


Fig. 7. 6-series module short circuit test result.



Fig. 8. SFCL unit module and experiment setup.

3.3. 초전도 한류 모듈 특성 시험 결과

그림 8은 그림 5의 설계를 기반으로 하여 제작한 초전도 한류 단위 모듈과 모듈을 크라이오스탯 내에 설치한 모습이다. 77 K 대기압에서 실험을 진행하였다. 그림 9는 600 V 전원전압 일 때, 한류 모듈이 사고 전류를 제한했을 때의 그래프이다. Calibration 전류와 비교하였을 때 첫 피크에서 22 kA(peak-peak)에서 3.5 kA(peak-peak)로 전류가 제한됨을 볼 수 있다. 과도하게 전류가 제한된 것처럼 보이나 이는 단락 실험 설비 특성 상 고장 시 라인 임피던스가 0.15 mH에 불과하기 때문에 초전도 모듈의 발생저항에 크게 영향을 받기 때문이다. 그림 10은 전원전압에 따른 저항 상승 곡선이다. 전원 전압을 600 V, 900 V, 1200 V, 1500 V, 3000 V로 변경하면서 단락시험을 진행하였다. 단선재의 저항 상승 곡선과 비교했을 때 매우 유사하게 진행되고 있음을 알 수 있다. 인가 전압이 3000 V 일 때는 선재에는 미터 당 75 V 가 인가되는 상황이며, 고장 시간이 3 cycle이 지속되었을 때 설계의 기준으로 한 300 K을 초과한다.

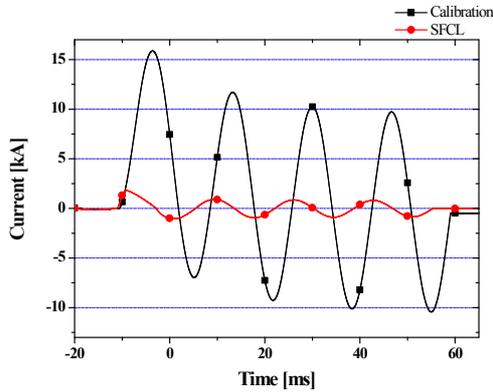


Fig. 9. Unit module short circuit test result , Source voltage : 600V.

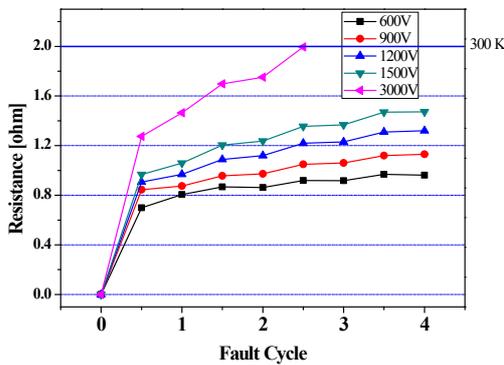


Fig. 10. Current comparison between insulated wire and non-insulated wire.

4. 결 론

본 논문에서는 초전도 단일 선재, 절연한 선재, 병렬 연결한 선재의 단락 특성 실험 결과를 바탕으로 선재의 미터당 최대인가가능전압을 설정하고 초전도 한류 모듈을 설계, 제작하였다. 그리고 제작한 단위 초전도 모듈의 단락시험을 통하여 한류 모듈의 설계가 유효함을 확인할 수 있다. 또한 샘플 선재의 특성이 6병렬-40직렬의 모듈에서도 전압 불균형의 문제 없이 동작하는 것을 확인하였다. 추후에는 이 제작한 모듈의 통전 전류에 따른 교류 손실 및 추가 제작을 통한 단위 모듈들의 직렬 연결 특성 시험을 진행할 예정이다.

감사의 글

본 과제는 지식경제부 한국에너지기술평가원의 전력산업융합원천기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Ok-Bae Hyun, Kwon-Bae Park, Jungwook Sim, Hye-Rim Kim, Seong-Woo Yim, and Il-Sung Oh, "Introduction of a Hybrid

SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issue", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 19, 1946-1949, 2009.

[2] Kim, H.-R.; Yang, S.-E.; Yu, S.-D.; Kim, H.; Kim, W.-S.; Park, K.; Hyun, O.-B.; Yang, B.-M.; Sim, J.; Kim, Y.-G., "Installation and Testing of SFCLs", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 22, 5602704, 2012.

[3] Park, Dong-Keun; Kim, Min-Jae; Yang, Seong-Eun; Kim, Young-Jae; Chang, Ki-Sung; Na, Jin-Bae; Ko, Tae-Kuk, "A Study on the Short Circuit Characteristic of Metallic Stabilizer Free Coated Conductor for FCL Application", 한국초전도저온공학회논문지, v.9, no.4, pp.37-40, 2007년 11월.

[4] 조대호, 양성은, 김민재, 안민철, 박동근, 배덕권, 석복렬, 고태국, "사병렬 초전도코일의 전류분류 측정을 위한 Rogowski 코일의 제작 및 특성 실험", 한국초전도저온공학회논문지, v.9, no.3, pp.37-40, 2007년 9월.

저 자 소 개



양성은(梁盛銀)

1978년 12월 3일생, 2003년 연세대학교 공과대학 기계전자공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 전력연구원 일반연구원.



김우석(金佑錫)

1970년 6월 12일생, 1996년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업 (공학박사), 현재 전력연구원 책임급 연구원.



이지영(李志榮)

1987년 1월 24일생, 2010년 충남대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 현재 전력연구원 위촉연구원.



김희선(金喜宣)

1986년 8월 13일생, 2008년 KAIST 기계공학과 졸업, 2010년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 전력연구원 일반연구원.



유승덕(劉承德)

1974년 11월 20일생, 1997년 한밭대학교 전기공학과 졸업, 2001년 충남대학원 전기공학과 졸업(공학석사) 현재 전력연구원 일반연구원.



현옥배(玄鈺培)

1953년 2월 11일생, 1976년 연세대학교 물리학과 졸업, 1987년 아이오와 주립대학교 물리학과 졸업(이학박사), 현재 전력연구원 수석연구원.



김혜림(金蕙林)

1957년 3월 15일생, 1979년 서울대학교 물리학과 졸업, 1991년 코넬대 물리학과 졸업(이학박사), 현재 전력연구원 책임연구원.