

공극형 고온초전도한류기의 특성실험

주민석*, 이찬주, 추용, 고태국

연세대학교 전기공학과

Tests of Inductive High-T_c Superconducting Fault Current Limiter with an Air-Gap

Minseok Joo, Chan Joo Lee, Yong Chu, Tae Kuk Ko

Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - A novel model of an inductive superconducting fault current limiter with an inductive superconducting fault current limiter with the air-gap core was fabricated and tested. If its impedance is not high enough to limit the fault current, then destructive damage occurs in the power system. We attained a magnetic saturation under higher current by an effective air gap introduced in the core. The fault current was successfully limited to two times as much as the nominal current at a 60 Hz source having an effective voltage of 70 V. The fault current flowing under such conditions can be limited to a desired value without any fault current peak within 1/4 cycles.

I. 서 론

최근의 전력수요에 따라 전력계통은 송전전압의 고전압화와 송전선의 다중화 관점에서 기술개발이 되어왔다. 그 결과, 단락사고시의 과전류에 대한 대처가 중요한 문제가 되었다. 일반적으로 전력계통에서 사고전류 또는 단락전류는 보호시스템이 동작할 만큼 높아야하며 그 기준이 잘 정의 되어야한다. 또한 보호시스템이 사고전류를 차단하기 전까지 Bus line이나 회로소자에 사고전류가 흐르므로 전력계통의 보호차원에서 가능한 한 낮아야한다. 전력계통에서 사고전류의 악영향은 주로 높은 사고전류가 회로에 흐름으로써 발생하는 열적, 기계적 스트레인이다. 따라서 초전도한류기를 전력계통에 도입한다면 사고전류를 차단기의 용량 이내로 제한해 주므로 기존의 계통의 교체없이 계통간을 적극적으로 연계하는 것이 가능하여지고 계통의 용량을 증가시킬 수 있어 전력수요의 증가에 손쉽게 대처가 가능하다.

초전도한류기는 외부의 어떠한 제어장치 없이 스스로 사고전류를 감지하여 작동하는 것이 특징이다. 이러한 감지는 초전도체의 동작상태가 정해진 임계곡면내에 있다가 그 곡면을 이탈함으로써 이루어진다. 지금까지 개발된 초전도한류기는 저온초전도선체를 이용한 모델과 고온초전도선체를 이용한 모델 그리고 고온초전도벌크를 이용한 모델이 있다. 저온초전도선체를 이용한 모델은 유도형과 저항형 모두 긴 선체가 필요하므로 선체의 가격이 비용에 커다란 영향을 미친다. 저온초전도선체는 일반적으로 매우 고가이고 또한 냉각비용 역시 고온초전도체를 사용하는 모델보다 5~10배정도 더 소비되므로 아주 높은 전압에서만 경제적 타당성이 있다. 고온초전도선체를 이용한 모델은 주로 saturable reactor 형태이다. 이 모델은 코어의 부피가 전류제한에 중요한 역할을 하므로 코어의 비용이 중요한 경제적 평가요소이다. 또한 긴 길이의 고온초전도선체를 이용하므로 고온초전도선체의 가격도 매우 중요한 요소가 된다. 일반적인 평가는 높은 정격의 새로운 변압기의 제작비용과의 비교가 경제성 평가기준이 된다. 고온초전도벌크를 이용한 모델은 큰 지름

의 벌크를 사용하므로 냉각용기의 지름이 따라서 커지는 단점과 역시 코어를 사용하므로 코어의 비용이 경제적 평가의 중요한 요소가 될 수 있다. 그러나 코어의 비용은 saturable reactor 만큼 들지 않고 냉각 비용도 액체질소를 사용한다는 장점 때문에 현재까지의 모델중에서 중간전압에서도 가장 경제성이 있다고 평가되어 2000년 전후에 실용화가 예측되는 모델이다.

II. 고온초전도한류기 개념

A. 공극형 고온초전도한류기

고온초전도벌크를 사용하는 모델은 크게 자기결합형과 자기차폐형이 있다. 이 두 모델의 차이점은 초전도체와 상전도 권선간의 구조적 차이이나 동작원리는 그다지 차이가 없다. 이러한 모델에서 6~22.9kV의 배전계통에 적용시키려면 요구되는 초전도체의 지름은 50~90cm정도이다. 그 정도의 고온초전도체의 벌크는 이미 제작가능성이 이미 타진되었으며 여러회사에서 고임계전류를 가지는 큰 지름의 고온초전도체를 생산중이다. 그러나 중간전압에서 동작하는 프로토타입에서 조차도 코어의 포화로 인해 한류효과가 감소하는 문제점이 발생하고 있다. 이러한 문제점은 코어의 단면적을 늘리거나 1차권선의 권선수를 증가시킴으로써 해결할 수 있다. 하지만 두가지 방법 모두 고온초전도체의 지름의 증가나 임계전류밀도의 증가와 같은 보다 좋은 고온초전도체를 요구한다. 따라서 이러한 고온초전도체의 크기의 증가나 임계전류밀도의 향상없이 한류효과를 증가시킬 수 있는 모델의 개발이 필요하게 되었다. 효과적인 공극을 코어의 구조에 도입함으로써 과도상태시 한류효과 감소를 방지할 수 있다. 이러한 공극형 고온초전도한류기는 구리권선으로 이루어진 1차권선과 단락된 고온초전도체인 2차권선 그리고 공극이 도입된 코어로 구성된다. 동작원리는 정상상태시 고온초전도체의 자기차폐효과에 의해 철심에 자속은 침입할 수 없게 된다. 따라서 그때의 임피던스는 단지 누설임피던스와 구리권선에 의한 저항뿐이다. 사고시는 전류가 증가하여 고온초전도체의 임계전류를 초과하게되면 자기차폐 효과가 없어지므로 자속이 철심을 통과하게 된다. 따라서 임피던스는 크게 증가하게 된다. 만약 자속이 코어의 최대자속밀도에 도달한다면 공극은 고온초전도한류기의 급격한 임피던스의 감소를 방지한다.

B. 고온초전도한류기의 계통응용

기존의 계통 보호시스템은 154kV아래의 전압에서만 동작하며 특히 외부의 제어장치에 의해 동작하므로 안정성이 감소한다. 고온초전도한류기는 제어장치가 필요없고 빠른 한류시간으로 계통의 안정성을 높여주며 154kV이상의 전압에서도 설치할

수 있고 기존의 차단기의 차단용량을 배가시킬 수도 있다. 이러한 장점으로 인해 계통에 적용 방법이 다양하게 제시되고 있다. 그럼에서 그러한 방법을 예시하고 있다. 고온초전도한류기의 계통적용은 아래와 같다.

1. 다양한 전력수요의 대처

아아크로 및 용접기와 같은 대용량의 전력기기는 높은 단락전력을 확보할 수 있는 계통이 필요하다. 이러한 이유로 현재는 기기의 전력소비보다 높은 전압의 계통에 연결할 수밖에 없다. 보다 높은 단락전력을 얻기 위해 중간전압이나 154kV 배전계통의 두 busbar의 결합은 차단기의 차단용량을 초과함으로써 일반적으로 허용되지 않는다. 고온초전도한류기를 이용한 busbar간의 결합은 그러한 문제점을 해결할 수 있다. 그림 1이 이러한 방법을 예시하고 있다. 개다가 busbar에 설치된 고온초전도한류기는 부하변동이 심한경우도 안정성을 확보할 수 있게 한다. 변동이 심한 부하는 한류기를 통해 일반적인 부하와 분리를 시킴으로써 사고가 발생하였을 때 계통교란을 최소화시켜 준다. 그림 2는 새로운 전력수요의 창출로 인해 높은 전압의 계통이 필요할 경우 기존의 계통을 그대로 이용해 차단기의 차단용량 이내로 사고전류를 제한함으로써 기존의 계통의 전력용량을 배가시켜주는 방법을 예시하고 있다.

2. 고전압 모터와 발전기간의 연계

500kW급의 높은 정격을 가지는 모터나 발전기는 일반적으로 높은 전압(6~10kV)에 설치된다. 이러한 기기가 중간에 변압기 없이 그대로 계통에 연결된다면 높은 단락전류를 수반하게 된다. 이러한 단락전류의 증가에 어떠한 교란이 침가되어 사용하는 계통의 정격보다 높게 된다면 고용량의 모터나 발전기의 사용자는 높은 단락전류를 적정한 값 이내로 감소시켜야 하는데 한류기가 이러한 용도로 사용될 수 있다.

3. 계통기기의 보호

계통에 사용되는 모든 기기는 적정의 단락전류 래벨을 가지고 있음에도 불구하고 불구하고 배전반근처 즉, 변압기 근처에서 자주 사고가 발생하면 사고횟수에 따른 노화로 기기가 견딜수 있는 단락전류 래벨이 차츰 낮아지게 된다. 노화된 변압기 근처에서 사고가 발생한다면 연속적인 사고의 원인이 될 수 있다. 한류기의 사용으로 이러한 악영향의 원인을 감소시킬 수 있다.

4. 초전도기기와의 연계

초전도변압기나 초전도 송전선의 경우 초전도상태에서 상전도상태의 전이현상인 펜치로 부터 보호될 필요성을 가지고 있다. 그러한 기기나 송전선에서 펜치가 발생하면 연속적인 온도상승으로 장시간의 초전도상태 회복시간이 필요하게 된다. 이러한 펜치의 발생을 방지할 목적으로 한류기가 필요하게 된다.

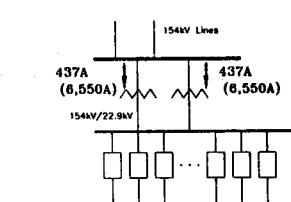


그림 1(a) 기존의 계통 (팔호안은 사고전류)

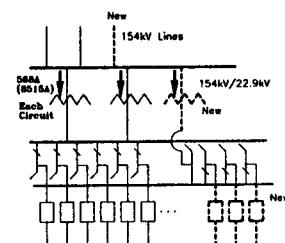


그림 1(b) 새로운 변압기와 이중 bus의 필요성

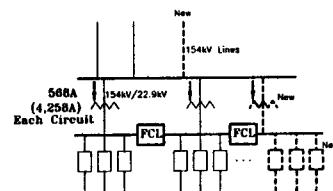


그림 1(c) 한류기의 설치로 인한 새로운 bus의 필요성 제거

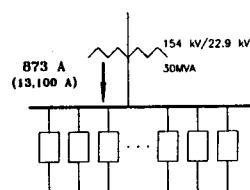


그림 2(a) 기존의 전력계통 (팔호안은 사고전류)

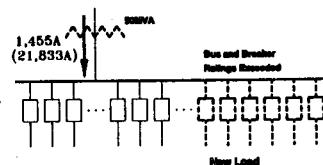


그림 2(b) 새로운 수요의 증가로 인한 정격 초과문제

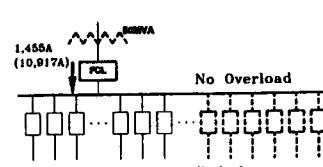


그림 2(c) 사고전류감소로 기존계통의 용량증가 방법

III. 실험

양질의 시편을 만들기 위해서, MPMG 공정이 도입되었다. 효과적인 파닝센터의 증가와 약결합 문제를 극복하기 위한 MPMG법의 도입으로 YBCO 링의 높은 임계전류 I_c 를 얻었다. Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO 을 시작분말로 하여 $Y_{1.6}Ba_{2.3}Cu_3$ 의 조성으로 공기중 900°C에서 24시간 하소하였고 1400°C에서 용융시킨 후, 차기운 구리판으로 납작하게 금형시켰다. 용융금형된 시편은 미세한 분말로 분쇄되었고 균일하게 혼합하였다. 그후 분말은 원하는 형태의 링으로 프레스한 후 1100°C에서 20분 동안 가열한 후 1000°C까지 가동한 한 빨리 냉각시킨 후 940°C까지 1°C/h의 비율로 서냉시킨다. 마지막으로 링은 48시간동안 산소분분위기에서 후열처리하였다. YBCO 링의 제원은 외경이 64mm, 내경이 51mm, 높이가 5mm. YBCO 링의 수송임계전류의 측정은 유도성, 무접촉법을 이용하였다. 측정된 시편의 임계전류는 450~500 A_{ms}이다.

그림 3에서 보여지는 시험회로는 공급전원으로 사용되는 자동변압기와 부하저항과 SFCL로 구성된다. SFCL은 권선 수의 작은 변화를 위해 1차권선에 직렬로 전압 템을 내었다. 110과 120T으로 구성된 1차권선은 정상상태의 전류를 변화시킬 수 있다. 초전도 링에서 시변자속에 의해 유기된 전류를 측정하기 위해서 로고우스키 코일을 부착한 채로 한 쪽 레그에 위치시켰다. 다양한 사고조건을 시뮬레이션하기 위해 트라이악으로 구성된 사고각-제어기를 부하저항에 병렬로 연결하였다. 트라이악의 트리거각을 조정함으로써 다양한 사고각이 시험되었다. 사고전류의 데이터 처리는 Analog Recorder에 의해서 기록되었다. 모든 시험은 30~70V의 실효치를 갖는 60Hz의 공급전원에 의해서 수행되었다.

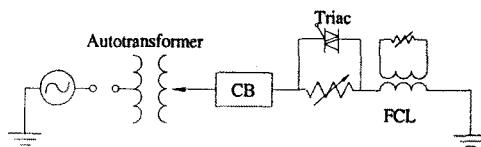


그림 3. 고온초전도한류기 포함된 모의통회로

IV. 실험결과

그림 4~6는 각각 부하저항이 18Ω, 공급전압이 30, 50, 70V, 턴수가 120, 120, 130이고 사고각이 0, 90, 90도일 때 사고전류의 파형이다. 그림 4의 경우는 정상상태시의 전압은 거의 없다가 사고가 나면 초전도링의 임계전류까지 전류가 급격히 증가하여 펜치가 발생하여 1차측 전류가 수 ms이내에 전류가 제한된다. 이때 1차측전류는 약간의 피크를 동반하는데 이것은 2차측전류가 초전도링의 임계전류까지는 전류가 계속증가하므로 이에 대응하여 1차측전류도 따라서 증가하는 데서 오는 피크이다. 그림 5의 경우는 그림 3와 마찬가지이나 약간의 포화가 진행되어 있어 1차측 전류의 값이 차츰 감소한다. 전류의 감소율은 시상수에 따른다.[1] 그림 4와 그림 5의 경우 모두 전류제한이 전류가 제한되기까지 2개의 피크가 나타난다. 이것은 공극의 효과로 볼 수 있다. 그림 6의 경우는 2차측에 초전도링을 2개 깨우고 단락실험을 하였다. 제작된 초전도링의 임계전류가 너무 작아 50V이상의 공급전압에서는 펜치가 발생하여 링을 2개 깨우고 실험하였다. 이 그래프에서도 수 ms이내에 전류가 제한되었다. 이 그래프에서도 역시 2개의 피크가 발생하는데 이것은 역시 공극구조의 효과이다.

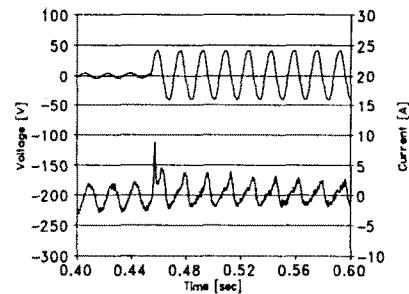


그림 3. 단락실험 파형 (사고각 0°, 공급전원 30V)

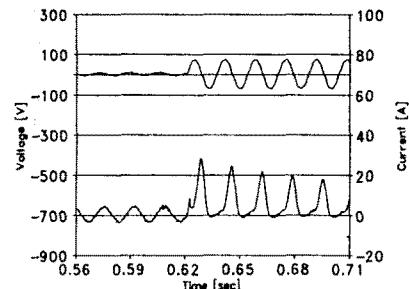


그림 4. 단락실험 파형 (사고각 90°, 공급전원 50V)

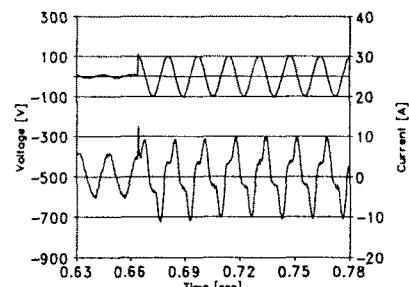


그림 5. 단락실험 파형 (사고각 90°, 공급전원 70V)

V. 결론

본 논문에서는 고온초전도한류기의 기본적 한류효과와 전력계통에 어떻게 적용될 수 있는지를 살펴보았다. 자기차폐형이나 자기결합형 고온초전도한류기의 경우 용량증가에 중요한 요소는 철심의 포화를 어떻게 방지할 수 있는가이다. 철심의 포화는 한류효과의 감소로 나타난다. 이것의 보상책은 철심의 단면적을 증가시키거나 효과적인 공극구조를 도입하는 것이다. 공극형 고온초전도한류기의 한류특성은 위의 실험에서 보인 것처럼 수 ms이내에 사고전류를 신속하게 제한하므로 실용화 모델에 이것을 적용시킬 수 있을 것이다.

VI. 참고문헌

- Minseok Joo, et al., IEEE Trans. Appl. Superconduct. VOL.6, NO.2, (1996)
- Yu.A.Bashkirov, et al., IEEE Trans. Mag. VOL.27, NO.2, p1089 (1991)