

## 자기 포화형 고온 초전도 한류기의 구조 및 단락특성에 관한 연구

최석진\*, 이승제\*, 이찬주\*, 이상진\*\*, 현옥배\*\*\*, 고태국\*  
 \*연세대학교 전기·컴퓨터 공학과, \*\*위덕대학교, \*\*\*한국전력연구원

### The Structure and Short Circuit Analysis of Saturable Magnetic Core Superconducting Fault Current Limiter

SukJin Choi\*, Seungje Lee\*, Chanjoo Lee\*, Sangjin Lee\*\*, Okbae Hyun\*\*\*,  
 Tae Kuk Ko\*.

\*Dept. of Electrical and Computer Engineering Yonsei University.

\*\*Uiduk University, \*\*\*Kepri.

superlab@yonsei.ac.kr

**Abstract-** Superconducting tape easily can applied to distribution of electricity . It designs basic model of Saturable Reactor Type Fault Current Limiter which used superconducting tape, and observes a specific character by means of simulation. Saturable Reactor Type Fault Current Limiter is not influenced by saturation of Magnet core appeared in Induction Fault Current Limiter, because it exploit saturation of Iron core. But, it is possible that superconducting tape quenched when AC current flow to superconducting tape which biased DC voltage.

### 1. 서 론

고온초전도한류기는 전력계통의 용량증가로 인한 차단기의 업그레이드시 발생하는 추가비용을 피할 수 있고 고가의 전력기기를 효과적으로 보호할 수 있으므로 세계각국의 연구팀들은 1998년에서 2000년대 초 사이에 상용화를 목표로 연구를 진행중이며 더욱이 저온초전도한류기가 송전계통(500 kV이상)에서만 경제성이 있는 반면 고온초전도한류기는 전기절연 및 냉각비용 측면에서 수에서 수십배 유리한 것으로 보고되어 있다. 고온초전도한류기의 상용화에 주력하고 있는 각국의 제작사는 주로 bulk형과 테이프 선재형을 proto type으로 설정하고 있으며 전자의 경우는 송전단과 배전단 모두에 적용될 수 있는 반면 후자의 경우는 배전단 적용을 위한 모델이다. 세계 각국의 중전기 업체가 한류기의 상용화를 위해 박차를 가하고 있고, 특히 1996년 11월 ABB사에서 고온초전도한류기를 기존의 5.5 MVA급 수력발전기와 차단기 사이에 설치하여 테스트하고 있다. 본 연구실에서는 자기 차폐형 모델에서 국내최초로 400V급 고온 초전도 한류기를 제작하는 기술을 확보하고 있다. 고온 초전

도 tape 선재를 이용한 Saturable Reactor type Fault Current Limiter의 단락특성을 Computer Simulation을 이용하여 해석하였다.[1]

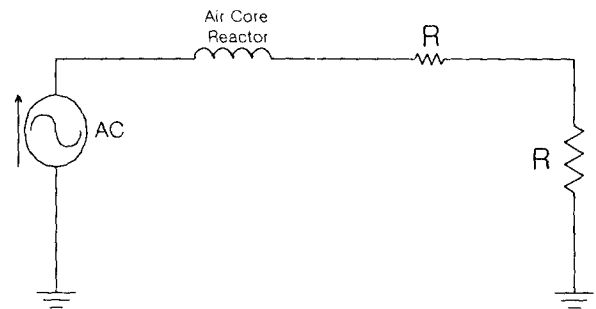


Fig 1 Power System located Air Core Reactor

### 2. 동작 원리

#### 2.1 Air Core Reactor의 동작원리

Air Core Reactor란 공심에 Copper Coil로 Winding하여 그것을 그림 1과 같이 Load와 직렬로 사용하는 것이다. 공심을 사용하기 때문에 정상 상태 시 Reactor의 Impedance는 Load의 Impedance에 비해 매우 작다. 따라서 그것에 의한 Voltage drop은 정상 상태 시 매우 작다. 하지만 사고가 발생할 경우 사고전류가 정상 전류에 비해 매우 크기 때문에 사고 전류의 변화에 의한 Air Core Reactor의 Impedance는 상대적으로 증가하게된다. 따라서 Air Core Reactor가 없는 것에 비해서 사고전류를 줄일 수 있다. Air Core Reactor의 장점은 설치가 간편하고 그것의 구조가 매우 단순하고 가격(약 22.9kV Line당 500만원선)이 매우 저렴하다는 것이다. Air Core Reactor의 계량형으로 Saturable Magnetic Core를 사용한 Reactor가 연구되었다. [2]

## 2.2 Saturable Core FCL의 동작원리

Ferromagnetic Material들의 특성은 그것이 모두다 자속(B)의 한계점을 가지고 있다는 것이다. 즉 그림 2에 나타나듯이 자계(H)가 초기적으로는 가해질 때는 자속(B)이 공기에 비해 급격히 증가하지만 자계의 세기가 세어질수록 그 값의 증가율이 떨어지고 자계가 어느 점을 초과하면 더 이상의 자속 증가가 보이지 않는 Saturation 영역이 존재한다. 이러한 특성은 강한 Magnet을 만들 때 불리한 점이지만 Air core를 사용한 Reactor의 성능을 향상 시킬 수 있는 돌파구가 된다. Saturable Magnetic Core FCL은 그림 3과 같이 Ferromagnetic Magnetic Core를 Saturation 시킨 후 Reactor의 Air core 대신 Copper Winding의 Core로 사용한다. 이렇게 할 경우 정상상태에서 전류는 Swing이 적기 때문에 자속을 적게 발생시켜 Core의 Saturation 영역을 이탈시키지 못한다. 이러한 상태에서는 자속 변화가 거의 없기 때문에 Inductance ( $= \frac{d\phi}{di}$ )가 발생하지 않고 Voltage drop 또한 없다. 사고가 발생 할 경우 전류의 Swing은 수십에서 수백 배 커지기 때문에 Core의 포화 영역을 벗어나고 Inductance가 발생하며 그것에 의해 사고전류가 제한된다. Power system의 AC 전류 성분을  $+(0-\pi)$ ,  $-(\pi-2\pi)$  성분으로 나눈다면 Saturable Magnetic Core FCL이 하나의 magnetic core만을 사용한다면 +또는 -성분의 사고만을 보호할 수 있다. 그 이유는 magnetic core를 saturation 시키는 전류와 사고전류가 같은 방향으로 형성되면 여전히 Core는 Saturation 상태에 머물고 있기 때문이다. 따라서 전류가 임의의 순간에 사고가 발생하여도 전류를 제한하기 위해서는 두 개의 magnetic core를 사용해야 한다. 두 개의 winding 방향을 반대로 한다. 즉 한쪽이 자계를 줄이는 방향으로 전류가 흐를 경우 다른 하나는 자계를 증가시키는 방향으로 전류가 흐르도록 한다. 이렇게 두 개의 Core를 사용하면 사고 각이 어떠한 사고 전류를 제한 할 수 있다.

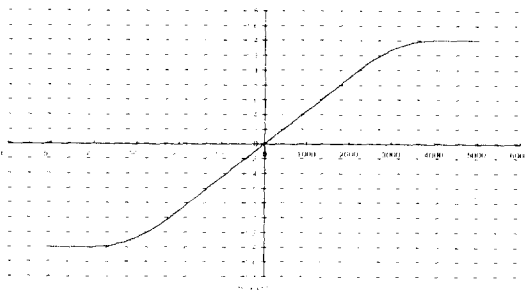


Fig 2 B-H Curve

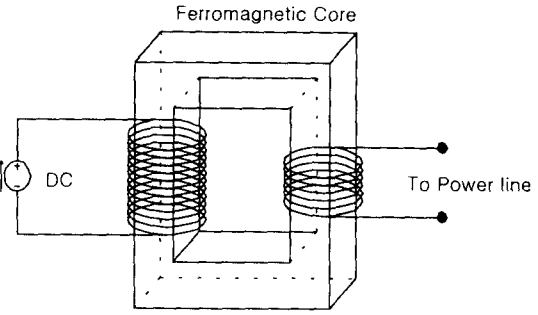


Fig 3 Ferromagnetic Magnetic Core Reactor

## 3. 특성 해석을 위한 등가회로 설정 및 설계

### 3.1 등가회로

그림 4는 Saturable Magnetic Core FCL의 등가 회로를 보여 주고 있다. 하나의 DC Current Source를 사용하여 2개의 Magnetic Core를 Saturation 시킨다. 그리고 두 개의 magnetic core는 서로 다른 방향으로 Winding 되어있는 것이 Dot convention에 나타나있다. power line은 두 개의 primary winding에 직렬로 연결된다.

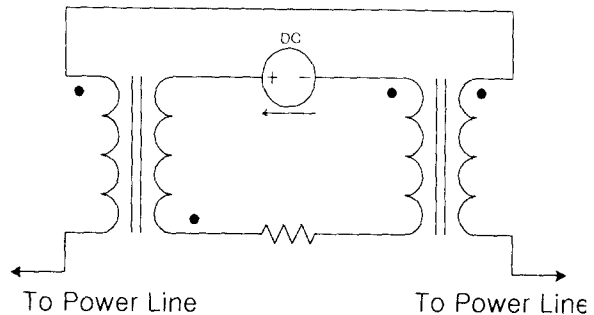


Fig 4 equivalent current

### 3.2 설계

50V급 Saturable Magnetic Core FCL를 설계한 magnetic core의 재원은 다음과 같다. 그리고 Simulation에 사용한 magnetic core의 B-H curve는 그림 2와 같이 4000 ampere\*turn에서 포화되는 일반적인 Iron으로 가정했다.

### 3.3 배전 System의 모델 설정 및 설계

50V급 Saturable Magnetic Core FCL가 설치될 전력 계통은 그림 5와 같다. 50V의 AC Voltage Source가 전원을 공급한다. 그리고 사고 전류의 크기를 명확히 하기 위해서는 Line에 Shunt 저항(0.25Ω)을 삽입하였다. 사고는 Load와 병렬로 연결된 switch를 닫음으로 구현하였다. 각각의 회로 요소의 값은 다음과 같다..

TABLE 1 FCL system parameter

Parameter	Symbol	Unit
length	L	0.6 m
cross section area	A	0.002 m
primary winding	N1	395 turns
secondary winding	N2	60 turns

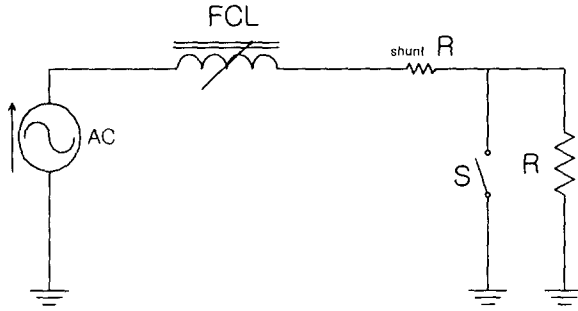


Fig 5 single-phase system contained Saturable Reactor FCL

TABLE 2 Power system parameter

Parameter	Symbol	Unit
Line voltage	Va	50V/60Hz
DC Current Source	Va	10A
Load (R)	Ra	18Ω
Load (L)	La	0.01H

#### 4. FCL System 해석

##### 4.1 Circuit System Analysis

그림 5의 system 전류를  $I_s$ 라고 하고 전류 Source에 의한 전류를  $I_{dc}$ 라고 하면 KVL에 의해서

$$E_s = I_s(R_L + R_{shunt}) + V_{FCL}$$

$$V_+ = \frac{\mu+S}{l} (N_1^2 I_s - N_1 + N_2 + I_{dc})$$

$$E_s = I_s(R_L + R_{shunt}) + \frac{\mu+S}{l} (N_1^2 I_s) - \frac{\mu-S}{l} (N_1^2 - I_s)$$

$$E_s = I_s(R_L + R_{shunt}) + \left( \frac{\mu+S}{l} N_1^2 + \frac{\mu-S}{l} N_1^2 \right) I_s$$

$$E_s = V_p \sin(120\pi t);$$

여기서

$$L_{1+} = \frac{\mu(H_+)AN_1^2}{L}$$

$$L_{1-} = \frac{\mu(H_-)AN_1^2}{L}$$

$$H_+ = N_1 + I_s + N_2 + I_{dc}$$

$$H_- = N_1 - I_s - N_2 - I_{dc}$$

#### 5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

앞에서 가정한 parameter를 가지고 Simulation을 수행하였다. 사고는 부하저항을 임의의 순간에 0으로 만들어 발생하였다. 그림 6은 한류기가 없을 때와 있을 때의 사고발생시 사고전류의 크기를 보여주고 있다. 한류기가 있는 경우 사고전류는 약25%정도로 감소하는 것을 관찰할 수 있다. ( 사고각 0° ) 그림 7은 한류기의 양단전압을 보여준다. 정상상태에서 한류기의 양단에 전압이 거의 걸리지 않다가 사고가 발생한 후 거의 모든 전압(50V)이 한류기 양단에 걸리는 것을 볼 수 있다.

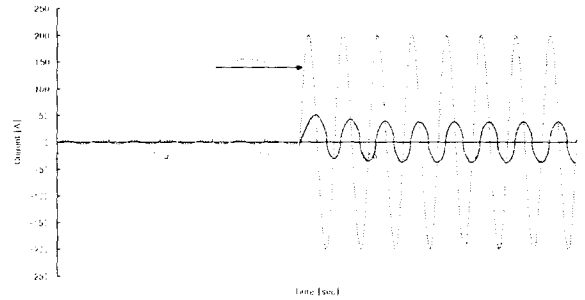


Fig 6 Fault current of Power system

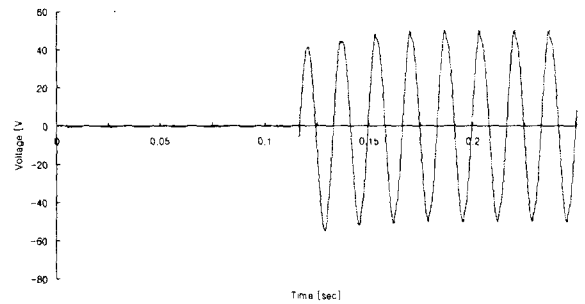


Fig 7. Voltage of FCL between both sides

그림 8.은 Positive와 Negative Winding에서 발생한 Inductance 예상한 것처럼 두 개의 Core에서 바뀌어가며 inductance가 발생한다. 그리고 정상 상태에서도 inductance가 발생하는데 이것은 사고전류를 줄이기 위해서는 커질 수밖에 없다. 즉 Biasing point가 Linear한 부분에 가까울수록 사고전류는 작아지는 대신 정상상태 loss가 커진다. 그림에서는 사고 Inductance가 정상상태 Inductance의 10%정도인 것을 알 수 있다.

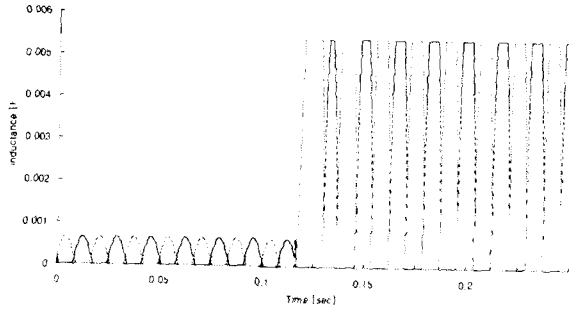


Fig 8. Inductance arised in Positive and Negative Winding  
(solid line : + dotted line : -)

그림 9는 Biasing을 위해 사용할 DC Current Source에 걸리는 전압을 나타낸다. 보는 것처럼 정상상태에서는 약3V정도의 전압이 걸리고 사고 발생 후 300V 전압이 걸린다. 이 전압을 줄이기 위해서는 Biasing Winding의 turn수를 줄여야 한다. 하지만 아직까지 4A이상의 고온초전도 선재 개발되지 않아 앞으로는 과제이다.

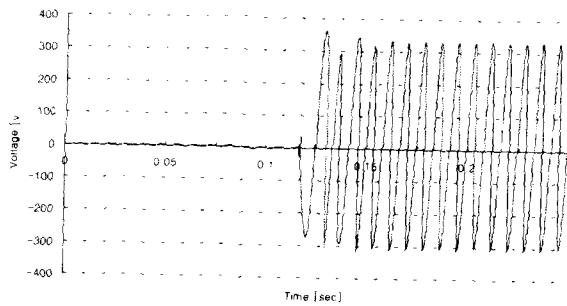


Fig 9 Voltage of DC power supply between both sides

그림 10은 Saturable Reactor Core FCL의 Impedance 특성을 보여주고 있다. 그림에서 보는 것처럼 Resistance에 의한 성분은 거의 볼 수 없다. 그리고 정확한 원형이 아니고 땅콩모양을 가지고 있는 것은 전류가 작을 때 그것의 Inductance값이 작아지고 전류가 커져야 Inductance값이 커지기 때문이다.

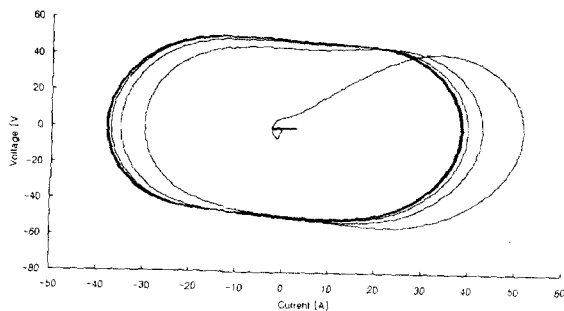


Fig 10 Impedance character curve of Saturable Reactor Core FCL

그림 11.은 Core에 작용하는 자속(H)의 크기를 보여준다. 정상상태에서는 4000amp\*turn에서 크게 벗어나지 않고 swing하다가 사고가 발생한후 hysteresis curve의 linear 한 영역까지 증가하는 것을 볼 수 있고 다시 Inductance에 의해 그 값이 계속 증가하지 못하고 감소한다. 그리고 Positive와 Negative가 각각 번갈아 가며 hysteresis curve의 linear영역에 들어온다.

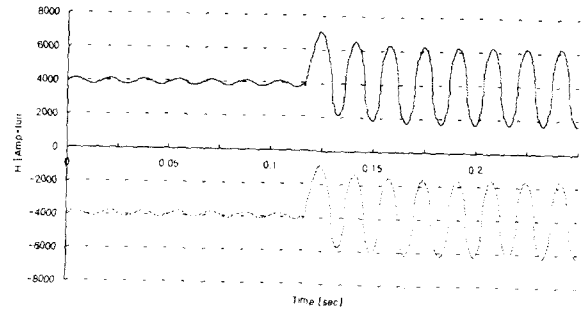


Fig 11 Amplitude of flux(H) acted to Core

## 6. 결 론

현재 계통의 증가는 막을 수 없는 필연적인 현상인데, 고온초전도한류기가 기존 차단기를 대체함으로써 얻는 효과는 에너지 절약이나 용량증가의 비용 감소 등 경제적인 측면과 시스템을 보호한다는 측면에서 월등히 뛰어나기 때문에 여러 선진국에서 연구되어 왔고, 몇몇 국가에서는 거의 실용화 단계에까지 이르고 있다. 상용화가 가장 빠른 고온초전도한류기를 개발함으로써 다른 초전도 기기의 개발에도 많은 파급효과를 불러일으킬 것이라 기대된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 고태국, "고온초전도 motor의 설계 및 제작에 관한 중간보고서" 통산산업부, 1997년 4월
- [2] A. E. Fitzgerald, "Electric Machinery", pp.322-325, 1990