

# 유한요소법을 이용한 유도형 고온 초전도 한류기용 DC Reactor의 설계 파라미터 결정법에 관한 연구

김용구, 강형구, 김태중\*, 운용수\*\*, 고태국  
연세대학교 전기전자공학과, 성남기능대학 전기공학과\*, 안산공업대학 전기공학과\*\*

## The Study of Designing the Parameters of DC Reactor for Inductive Superconducting Fault Current Limiter By Using Finite Element Method

Yong Ku Kim, Hyoungku Kang, Taejung Kim\*, Yong-Soo Yoon\*\*, Tae Kuk Ko  
Dept. of Electrical and Electronic Engineering Yonsei University,  
Sunghnam Polytechnic College\*, Dept. of EE. Ansan College of Technology\*\*

antonio-09@yonsei.ac.kr

**Abstract** - The dc reactor type superconducting fault current limiter is composed of a power converter, magnetic core reactors and a dc reactor that is a superconducting coil. When a fault occurs, the dc reactor maintains the stability of system by limiting its fault current. In this study, we focus on the design of the dc reactor using FEM(Finite Element Method). In order to design it, various elements should be considered such as magnetic field intensity, Lorentz's force, its inductance and so forth. Firstly, we forecast the values of those elements from the simulation of FEM and then measured with a copper wire magnet. Finally, verify the reliability of this FEM method by comparing with two results.

### 1. 서 론

1911년 K.Onnes에 의해 초전도 현상이 처음 발견되었고, 그 후 계속 연구가 활발히 진행되었으며 1980년대 중반이후 고온 초전도체가 발견되었다. 고온 초전도체는 각종 시스템에 응용되어지기 위해서 초전도 변압기, 초전도 사고전류제한기, 초전도 송전용 케이블, 초전도 전동기, 초전도 발전기, 초전도 전원장치 등 여러 전력기기분야에 걸쳐 폭넓게 연구되고 있다. 그 중 초전도 한류기는 초전도 전력기기 중 변압기, 케이블과 더불어 가장 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나로 계통의 용량의 증가와 기기 보호를 위한 필수적인 전력기기로 인식되어 여러 나라에서 연구되고 있다. 현재 세계 각국에서 경쟁적으로 연구되고 있는 고온초전도 한류기의 형태를 보면 크게 저항형, 유도형, Hybrid형으로 나뉘어지며, 유도형은 다시 자기 차폐형, 포화 reactor형, dc reactor형으로 세분화되어 연구되고 있다. 이 중 dc

reactor형 한류기는 크게 magnetic core reactor, 전력변환기, dc reactor 세 부분으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 1.2kV/80A급 dc reactor를 설계하기 위해서 cost function을 이용한 최적의 parameter 값들을 도출하였다. 이렇게 얻어진 parameter 값들을 이용해서 FEM 시뮬레이션을 한 결과, 최대 자기장의 세기와 Lorentz's force의 세기를 계산하였다. dc reactor의 설계시에 이와 같은 여러 가지 요소들을 고려해야 dc reactor를 포함한 시스템의 피해를 최대한 방지할 수 있을 것이다. 또한 시스템의 안정적이고 효율적인 운전을 위해서는 dc reactor의 인덕턴스를 미리 예측해야 한다. 본 연구에서는 cost function 등을 고려하여 설계 parameter 값들을 도출하였으며, FEM tool을 이용해서 dc reactor에서의 자기장 세기, Lorentz's force, 그리고 인덕턴스 등의 여러 요소들을 시뮬레이션하였고, 이 값을 이용하여 1.2kV/80A급 초전도 한류기의 dc reactor를 설계하는 방법을 제시하였다.

### 2. FEM을 이용한 dc reactor의 최적설계

#### 2.1 dc reactor의 설계

dc reactor형 한류기는 계통에 사고가 발생할 경우 인덕턴스에 의해서 사고전류의 급격한 증가를 방지하는 전력기기이다. 여기서 dc reactor는 계통에서 사고가 발생하였을 경우 에너지를 흡수하여 시스템을 안정화시켜 주는 중요한 역할을 한다. 이와 같이 dc reactor는 한류기가 동작하는데 중요한 부분이므로 효율적으로 에너지를 흡수할 수 있도록 dc reactor에서 발생하는 자기장, Lorentz's force의 세기, 그리고 인덕턴스 크기의 여러 parameter들을 고려하여 설계하는 것이 중요하다.

#### 2.2 최적설계를 위한 parameter의 결정

1.2kV/80A급 dc reactor를 설계하기 위해서

cost function을 이용하여 시스템의 경제성을 고려한 프로그램을 만들어서 기본 설계 parameter를 도출하였으며, FEM을 이용하여 효율성을 고려한 최적의 설계조건을 설정하였다. 이 프로그램을 통해 1.2kV/80A급 dc reactor는 200mH 이상의 인덕턴스값을 가지는 것이 가장 효율적이라는 결론을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 경제성과 더불어 안정성을 고려한 200mH급 dc reactor를 FEM을 이용하여 설계하였다.

### 2.3 FEM을 이용한 시뮬레이션

FEM 시뮬레이션을 하기에 앞서 초전도선재 접합의 수와 reactor 보빈의 곡률반경, 발생 자기장의 세기와 기계적인 힘에 의한 초전도선재 임계전류의 크기의 변화 등을 고려하였다. FEM 시뮬레이션에 사용한 dc reactor의 간단한 설계도면을 Fig. 2.1에 나타내었다. Fig. 2.1의 dc reactor는 double pancake 4개를 직렬 연결된 구조로 이루어져 있으며 내경은 40cm이다. 본 연구에서 모델링에 사용된 ASC사의 초전도선재는 내경이 10cm이상이면 곡률반경에 의한 전류감소율이 거의 없게 된다. dc reactor의 설계시에 보빈의 내경의 설정은 경제적인 측면에서나 안정적인 측면에서 매우 중요한 의미를 가진다. 80A의 전류를 인가하는 경우에 그 전류값에 의한 self field에 의해서 초전도선재의 임계전류값은 감소되고, Lorentz's force 값은 증가하여 dc reactor가 손상될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FEM으로 dc reactor의 내경을 초전도선재의 임계전류값을 저하시키지 않는 범위인 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 그리고 60cm로 각각 설정하여 simulation하였다. 그 결과, reactor의 내경이 10cm, 20cm, 30cm로 작은 경우를 simulation한

Table.1 Specifications of dc reactor

|                |         |
|----------------|---------|
| Height         | 0.036 m |
| Inner Diameter | 0.4 m   |
| Outer Diameter | 0.45 m  |
| Wire Length    | 800 m   |

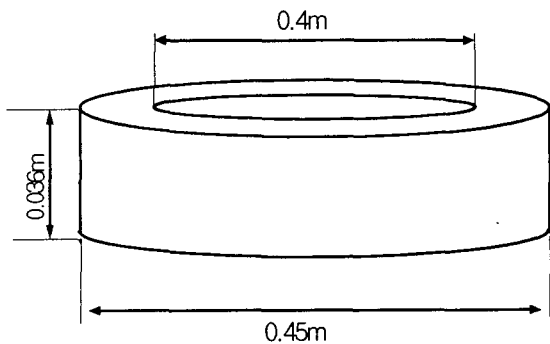


Fig. 2. 1 Schematic drawing of dc reactor

결과는 self field의 값이 매우 커서 초전도선재의 자체 임계전류값이 크게 감소할 뿐만 아니라, 그에 따른 Lorentz's force의 세기도 매우 커서 reactor가 손상되는 등 매우 불안정한 것으로 예측되었다. 반면에 reactor의 내경이 40cm, 50cm, 60cm로 비교적 큰 경우에는 self field나 Lorentz's force 등에 의한 reactor의 피해는 없을 것으로 예측되었으나 dc reactor의 크기가 커짐에 따른 냉각시스템의 효율 저하와 같은 경제적인 조건을 고려한 결과, 본 연구에서는 dc reactor의 내경을 40cm로 결정하였다. Table.1에는 FEM 시뮬레이션을 위해 설정한 dc reactor의 설계 parameter를 나타내었다.

### 2.4 Simulation 결과

이와 같이 결정된 dc reactor의 설계 parameter들을 이용하여 FEM으로 해석을 하기 위해 meshing한 모습을 다음의 그림 Fig. 2.2에 나타내었다. Fig. 2.3에서는 자장분포의 해석결과를 Y-Z방향에서 본 그림이다. Fig. 2.3에서 전류는 X방향이고, 자기장은 대부분 Z방향이므로 대부분의 자기장은 선재와 평행하게 된다. dc reactor의 인덕턴스는 해석 공간에서 발생하는 총 에너지를 통하여 계산하였으며 대략 291.7mH를 얻을 수 있었다. 모델링에 사용한 초전도선재는 ASC사에서 제조한 임계전류가 115A인 reinforced wire이다. 본 연구에서 dc reactor의 동작온도는 20K이며 Fig.2.3에서 보는 바와 같이 동작전류가 80A일때 발생하는 magnetic field의 세기는 0.478T이다. Fig.2.4를 통해서 초전도선재의 임계전류는 490A 정도가 됨을 알 수 있었으며 접합에 의한 통전을 감소율(60~70%)를 적용하면 임계전류는 대략 290~340A가 될 것이다. 또한 운전전류의 크기에 의해서 dc reactor 내에 hoop stress가 발생한다. 이 hoop stress는 Fig.2.2에서 X-Y평면을 따라 발생하는데 그 힘은 Lorentz's force를 이용하여 구할 수 있다. 이러한 hoop stress에 의해 dc reactor가 심각하게 손상될 수 있으므로 이를 대비하기 위한 연구가 같이 이루어져야 할 것이다. Table.2는 설계한 dc reactor를 FEM으로 해석한 결과 값을 나타낸 것이다.

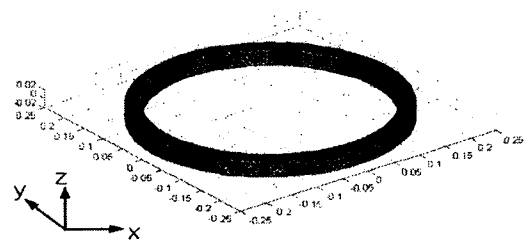


Fig.2.2 Schematic view of Mesh for dc reactor

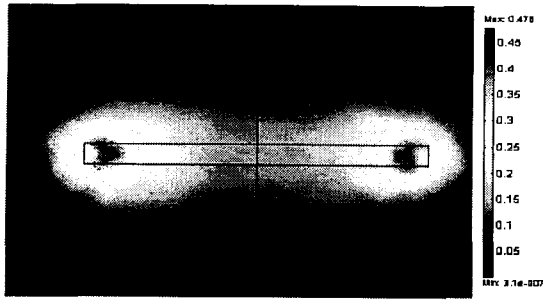


Fig.2.3 Distribution of Magnetic Field in dc reactor at 80A (Y-Z direction)

Table 2. Values of Inductance, Stress, Magnetic field in dc reactor at 80A

| I=80A<br>200m 선재 Double Pancake 4ea |           |
|-------------------------------------|-----------|
| Joint                               | 3         |
| Inductance                          | 291.7 mH  |
| Stress                              | 0.7 MPa   |
| Magnetic Field                      | 0.478 T   |
| I <sub>c</sub>                      | 290 ~340A |

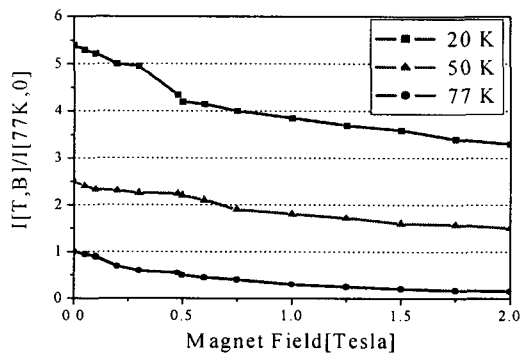


Fig.2.4 Bi-2223 performance at different temperatures and fields compared to the performance at 77K for field parallel to the tape surface

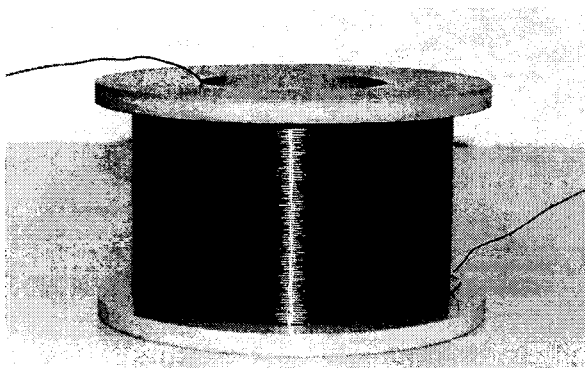


Fig.2.5 Picture of copper Magnet

Table 3. Specifications of Simulation in Copper Magnet

|                |                    |
|----------------|--------------------|
| Height         | 91 mm              |
| Inner Diameter | 100 mm             |
| Outer Diameter | 140 mm             |
| Wire           | Cu / 1.1 mm $\phi$ |
| Layer          | 21                 |
| Turns          | 1690               |
| Tension        | 1.5                |
| Length         | 637 m              |

### 3. 실험을 통한 FEM 3-D Simulation의 검증

#### 3.1 FEM 3-D Simulation

설계 parameter의 값들을 미리 결정한 후에 FEM을 이용하여 시뮬레이션을 하였으며 이 값을 검증하기 위해서 시뮬레이션과 같은 사양의 구리 magnet을 제작하여 실험하였다. Table.3에 시뮬레이션과 실험에 사용된 구리 magnet의 사양을 나타내었다.

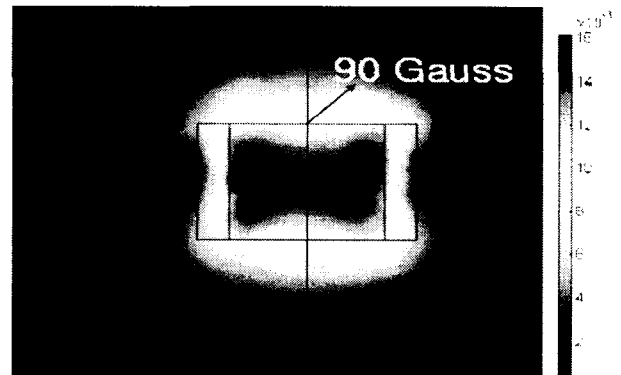


Fig.3.1 Distribution of Magnetic Field in Copper Magnet(I=1A) (Y-Z direction)

구리 magnet에 1A의 전류가 흐르는 경우를 시뮬레이션한 결과, magnet의 상단 중앙부에서 발생하는 자기장의 세기는 대략 90Gauss인 것으로 계산되었다.

#### 3.2 실험 결과

본 실험은 구리 magnet에 MPS(Magnet Pwer Supply)를 사용해 1A의 전류를 흘린 상태에서 발생하는 자기장의 세기를 홀센서를 이용해 측정하였다. 실험 결과 1A의 전류를 인가했을 때, magnet의 상단 중앙부에서 측정한 자기장의 세기는 85.7Gauss였다. Table.4에는 1A의 전류를 인가했을 때 구리 magnet이 가지는 인덕턴스와 저항, 그리고 자기장의 세기를 시뮬레이션한 값과 실제로 실험한 결과를 서로 비교하여 나타내

었다. 이 표에서 보는 바와 같이 시뮬레이션을 통해 얻은 결과값과 실험을 통해서 얻어진 값들은 거의 일치함을 볼 수 있었다. 따라서 본 실험을 통하여 FEM을 이용해 설계한 1.2kV/80A급 dc reactor의 parameter 값들의 신뢰성을 입증할 수 있었다.

Table 4. Comparison of FEM Simulation and Experiment (I=1A)

|                | Simulation | Experiment |
|----------------|------------|------------|
| Inductance     | 238.8 mH   | 241 mH     |
| Resistance     | 13.5 Ω     | 14 Ω       |
| Magnetic Field | 90 Gauss   | 85.7 Gauss |

#### 4. 결 론

본 연구에서는 최적의 1.2kV/ 80A급 고온초전도 한류기용 dc reactor를 설계하기 위해서 cost function을 이용한 프로그램을 통해 설계 파라미터를 도출하였으며, 또한 FEM 시뮬레이션을 이용해서 설계 요소들을 구하였다. 또한 간단한 구리 magnet 실험을 통해서 시뮬레이션 결과값의 신뢰성을 검증하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 통해서 1.2kV/80A급 유도형 고온초전도 한류기용 dc reactor의 인덕턴스값을 비롯한 여러 가지 설계에 필요한 parameter 값들을 도출할 수가 있었다. 이와 같은 연구결과를 통해서 경제성과 더불어 안정성있는 최적의 dc reactor를 설계, 제작할 수 있을 것이다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

#### [참 고 문 헌]

- [1] E. Leung, "Superconducting fault current limiters", IEEE Power Engineering Review, vol. 20, no. 8, pp. 15-18, 2000.
- [2] K. Yokoyama, T. Sato, T. Nomura, S. Fukui, and M. Yamaguchi, "Application of single dc reactor type fault current limiter as a power source", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp. 2106-2109, 2001.
- [3] M. Sjöström and D. Politano, "Technical and economical impacts on a power system by introducing an HTS FCL", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp. 2042-2045, 2001.
- [4] Seung-je Lee, Chanjoo Lee, Tae Jung Kim, and Tae Kuk Ko, "The conceptual design and estimate superconducting magnetic energy storage device for improvement of power system stability", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제7권, pp. 19-21, 1999.
- [5] W. T. Norris, "Fault current limiters using superconductors", Cryogenics, vol. 37, no. 10, pp. 657-665, 1997.
- [6] 이용로, 이승제, 이찬주, 김태중, 고태국, "3상 변형 브리지 형태의 한류기의 단순계통적용 시뮬레이션", 한국초전도 저온공학회 학술대회 논문집, pp. 68-71, 2001.