

Newton Method를 이용한 DC Reactor Type 한류기의 최적설계

서호준, 고태국, 이승제*
연세대학교 전기·전자공학과, *(주)프리컴시스템

The Optimal Design of DC Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter using Newton Method

Ho-Jun Suh, Tae Kuk Ko, Seungje Lee*
Dept. of Electrical and Electronic Eng. Yonsei University,
*FreecomSystem Co. Ltd

quenchbass@kebi.com

Abstract - This study is concerned with the optimal design of DC reactor type high-Tc superconducting fault current limiter(SFCL) by Newton method. What should be first thought over in developing SFCL is the condition in which the cost function is minimized under given constraints. So, this condition is supposed to be the values corresponding to the variables the cost function counts on. In this paper, we got the result for the SFCL available at the level of 6.6kV-200A by means of simulation.

1. 서 론

초전도한류기(SFCL)는 전력계통의 송전단이나 배전단에 설치되어 사고시 이로 인한 과전류를 억제함으로써 고가의 전력기기들을 보호하기 위한 장치이다. 여기서 다루는 DC 리액터 타입 한류기는 고온초전도한류기로서 전기절연 및 냉각비용에서 저온초전도한류기보다 훨씬 유리할 뿐 아니라 정상상태로의 전이가 없어서 초전도체의 성능저하를 줄일 수 있는 장점이 있다.

그러나 상용화의 관점에서 볼 때, 고온초전도 선재가 상당히 비싸다는 점에 주목할 필요가 있다. 한류기는 사고시점에서부터 차단기가 작동하는 순간까지만 역할을 수행하게 된다. 따라서 이 시간, 즉 한류기가 작동해야 할 사고시간이 주어지면, 초전도코일의 인덕턴스와 변압기의 권선비, 이로부터 영향을 받는 정상전압과 전류, 선재의 가격 및 임계전류 등을 얼마나 잘 조율하느냐에 따라 주어진 조건 하에서 비용을 최소화 할 수 있다.

본 연구실에서는 국내 최초로 단상 및 삼상 DC 리액터 타입 한류기를 제작하여 실험을 수행한 바 있다. 이번 논문에서는 6.6kV-200A급 한류기의 최적설계를 위한 방법으로서 Newton method를 사용하였다. 한류기의 cost function을 설정하고, 주어진 조건을 만족하는 한도 내에서

이 함수가 최소값을 갖도록 하는 여러 변수들의 값을 시뮬레이션을 통해 찾아내었다.

2. 삼상형 DC reactor type SFCL

2.1 구조

DC 리액터 타입 한류기의 구조는 계통과 한류기를 연결해주는 변압기, 사고전류가 발생했을 때 그 전류증가를 억제하는 리액터인 초전도코일, 이 초전도코일로 보낼 직류를 정류하는 정류기, 초전도상태를 유지하기 위한 cryostat으로 이루어져 있다. 그림 1은 한류기의 개략도 이다.

2.2 동작특성

삼상형 DC 리액터 타입 한류기의 기본적인 동작원리는 일반적인 브리지회로와 동일하다. 전력계통에 정상적으로 전원이 인가될 경우, 브리지회로로 들어오는 삼상 교류전류들이 전파 정류되어 초전도코일로 보내어지고 코일의 인덕턴스로 인해 정류된 전류는 작은 리플을 가지게 된다. 인덕턴스가 클수록 리플은 작아지고 거의 일정한 DC가 리액터에 흐르게 되어 한류기 양단에서의 전압강하는 거의 없다. 따라서, 회로 내에서의 전력손실은 선재에 의한 손실과 정류기

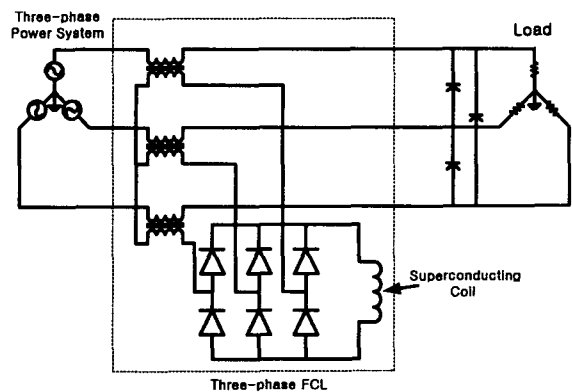


Fig. 1. Schematic drawing of three-phase DC reactor type SFCL

에 의한 손실이다. 그러나, 초전도선재를 사용하므로 손실을 최소화 할 수 있다. 또한 정류기를 통해서 걸리는 전압에 의한 손실은 매우 적다. 즉, 정상상태에서 한류기에 의한 손실은 거의 없다고 할 수 있다. 전력계통에 단락사고가 발생할 경우 각각의 정류기에 걸리던 전압은 정상 상태에 비해서 수십 배 증가하게 되고, 브리지회로를 통과하던 전류의 양은 증가하게 된다. 그러나, 리액터의 인덕턴스로 인해 사고전류가 완전히 증가하지 않은 상태에서 차단기가 동작하여 전원으로 부터 회로를 차단, 안전하게 보호되는 것이다.

3. 최적설계

3.1 개념

여기에서는 cost function을 최소화하는 변수들의 값을 구하는 것이 목적이다. 이 함수는 종속변수들과 이들의 변수인 독립변수들을 갖는다.

$$\text{Cost Function} = C(w_1 x_1, \dots, w_n x_n) \quad - (1)$$

$$x_1 = x_1(s_1, s_2, \dots, s_m)$$

$$x_2 = x_2(s_1, s_2, \dots, s_m)$$

...

$$x_n = x_n(s_1, s_2, \dots, s_m) \quad (a_i \leq s_i \leq b_i)$$

최적설계를 위한 방법으로는 적분을 이용한 Euler-Lagrange method도 있으나 본 연구에서는 미분법을 이용한 Newton method를 이용하였다.

$$\nabla C = \sum_{k=1}^n \bar{a}_{x_n} \frac{\partial C}{\partial s_k} \bigg|_{s_1, s_2, \dots, s_m} \quad \frac{\partial C}{\partial s_l} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial C}{\partial x_k} \frac{\partial x_k}{\partial s_l} \quad - (2)$$

임의의 함수 값에 대한 구배를 구하여 수렴방향을 찾고 그 크기에 비례한 만큼 이동한다. 그리고 이 위치에서의 함수값을 구한다. 여기서 다시 구배를 구하여 같은 방법으로 다음 함수 값을 찾는다. 이를 반복함으로써 구배가 영인 지점에서의 함수값에 도달하면 이 때의 변수값들이 최적설계의 결과물이 된다.

그러나 이 방법은 병렬 처리를 하므로 단순히

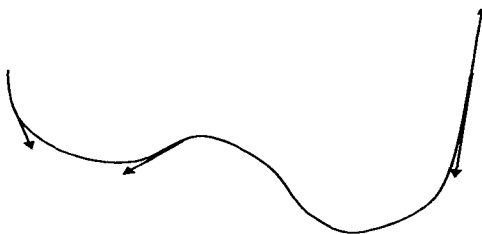


Fig. 2. Process to find minimum values by Newton Method

독립된 값들만 결정할 뿐 그 형태 및 기타 다른 면은 고려하지 못한다. 다시 말해, 인덕턴스의 값, 변압기의 권선비, 전력 변환기의 전류와 전압 및 용량 등은 결정하나 자석의 모양, 전력변환기의 형태, 삼상 변압기는 결정하지 못한다. 또, 4차원 이상의 경우에는 시각화가 불가능하여, 구배가 영으로 되는 값이 최소값이 아닌 다른 극소값들 중 하나가 될 수도 있다. 여기서는 이러한 문제를 해결하기 위해서, 초기값을 무작위로 설정하여 수차례 수행함으로써 얻은 극소값들 중 가장 작은 값을 최소값으로 선택하는 방식을 썼다. 그림 2는 1차원에서 Newton method를 이용하여 최소값을 구하는 과정을 그림으로 나타낸 것이다. 여기서 초기값을 무작위로 설정하여 반복된 처리과정을 거치면 두 개의 극소값을 모두 구하게 된다. 오른쪽의 극소값이 더 작으므로 최소값으로 선택한다.

3.2 설계 및 알고리즘

한류기의 cost function에 영향을 미치는 종속 변수는 여러 가지가 될 수 있으나, 본 연구에서는 실제로 제어 가능한 요소들 중 가장 중요한 선재의 길이만 고려하였다. 그리고 이에 대한 독립변수로 인덕턴스와 권선비를 설정하였다. 이렇게 구한 함수를 양의 값을 가지는 독립변수들의 선형결합으로 표현하면,

$$C = \alpha\sqrt{L} + \beta\frac{I_f}{I_c} \quad - (3)$$

L : inductance

I_c : critical current

I_f : fault current

이 된다. 이 함수의 최소값을 구하였다.

설계의 제한조건은 표 1, 알고리즘은 그림 3과 같으며, I_f 를 위해 SPICE와 시뮬레이션 프로그램을 함께 연계구동 하였다.

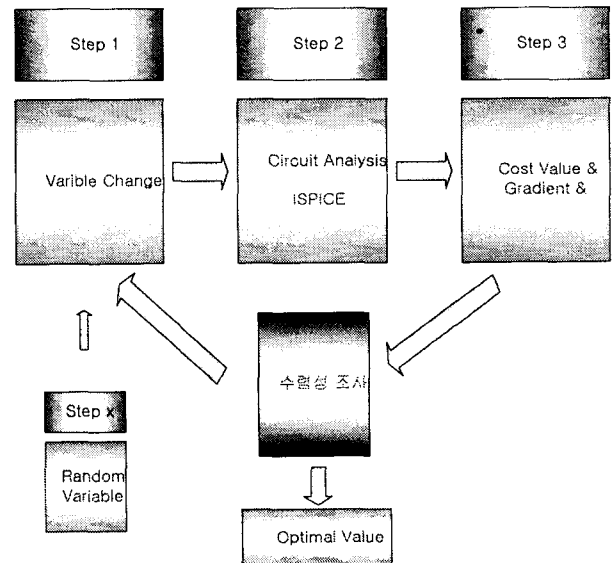


Fig. 3. Algorithm for simulation

Table 1. Conditions

parameters		values
input voltage	line to line	6.6 kV(rms)
	line	3.8 kV(rms)
resistance	load	19.05 Ω
	line + power converter	0.5~1.5 Ω
maximum power	over 2.3 MVA	
current	200 A(rms)	
inductance	0.01~2 H	
turns ratio (s/p)	0.01~2	

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 시뮬레이션 결과

원래의 목적을 위해서는 극소값을 가질 때의 결과들을 구하도록 되어 있으나, 여기서는 모든 지점에서의 함수값들을 전부 표시해 보았다(그림 4, 그림 7). 그림 4~그림 9, 표 2~표 3은 각각 사고시간이 80ms, 10ms에서의 시뮬레이션 결과와 최적설계 결과이다.

4.1.1 사고시간 80ms

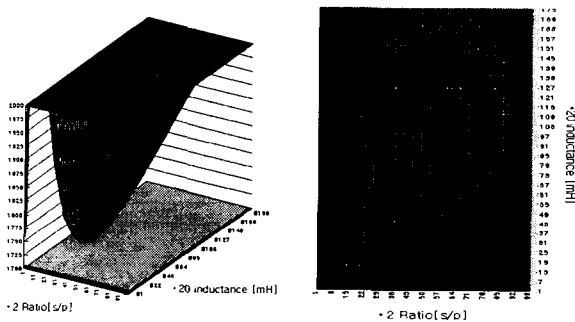


Fig. 4. Cost distribution in case of the fault time 80ms

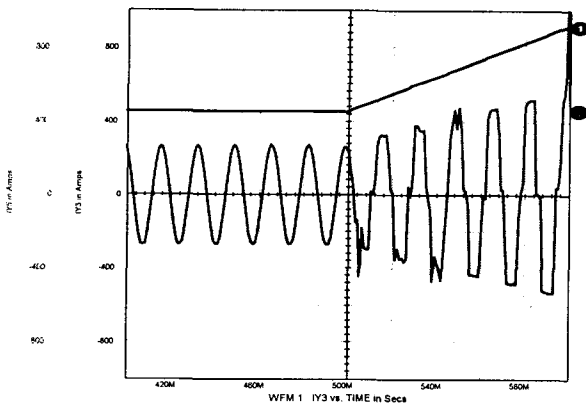


Fig. 5. Coil(1) & line(2) current in case of the fault time 80ms

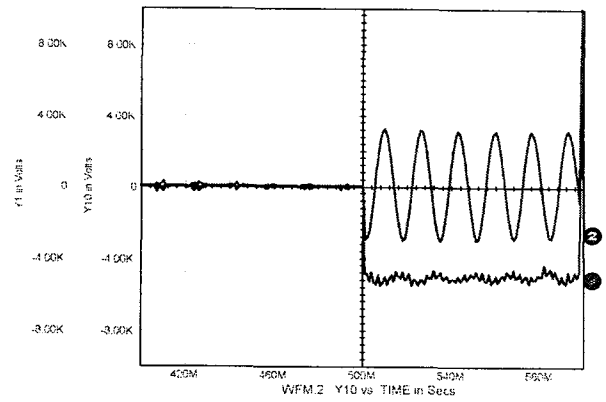


Fig. 6. Coil(1) & SFCL(2) voltage in case of the fault time 80ms

Table 2. Result in case of 80ms

parameters	values
turns ratio (s/p)	0.61
inductance	1.09 H
critical current (after 30ms)	884 A

4.1.2 사고시간 10ms

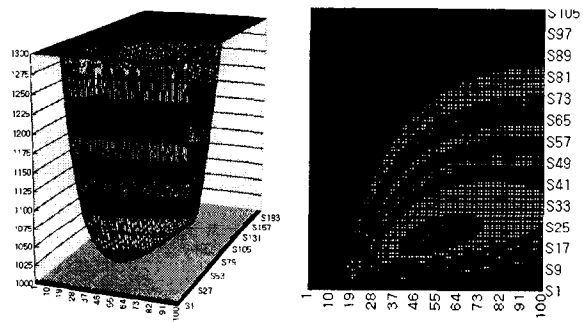


Fig. 7. Cost distribution in case of the fault time 10ms

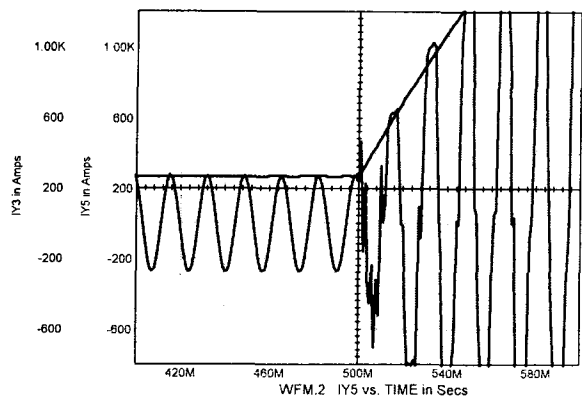


Fig. 8. Coil & line current in case of the fault time 10ms

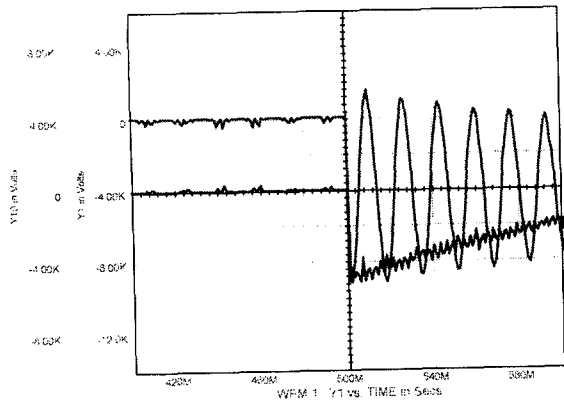


Fig. 9. Coil & SFCL voltage in case of the fault time 10ms

Table 3. Result in case of 10ms

parameters	values
turns ratio (s/p)	1.06
inductance	0.40 H
critical current (after 30ms)	520 A

4.2 고찰

시뮬레이션 결과를 종합해보면 그림 10과 같다. 사고전류의 경우, 초전도코일의 인덕턴스에 의해 증가비율만 감소될 뿐 계속 증가하므로 사고시간과 최대전류 값이 비례하는 건 당연하다. 인덕턴스도 마찬가지로, 한류기는 사고시점과 차단기 작동시점 사이에서 작동하고 사고전류는 계속 증가한다는 점을 고려할 때, 차단기가 작동하는 시점에서의 사고전류가 최대 상한선보다 낮아 야하기 때문에 사고시간이 길어짐에 따라 요구되는 인덕턴스도 커질 것이다. 인덕턴스는 감은 수의 제공에 비례하므로 선재의 길이도 증가한다. 권선비는 사고전류의 증가비율과 한류기 양단에 걸리는 전압에 비례하므로 사고시간이 길어질수록 작아져야 한다.

6.6kV-200A급 한류기에서는 리액터가 작동하는 사고시간을 되도록 줄이고자 사이리스터를 사용할 것이다. 그러면 사고시점 이후 길어야 반주기 안에 전류를 차단하게 되므로 10ms에서

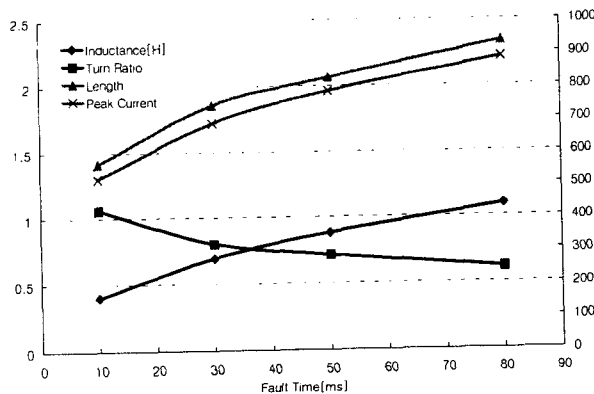


Fig. 10. Optimized values with respect to the fault time

Table 4. Optimal design

parameters	values
inductance	570 mH
critical current	over 620 A
fault time	within 20 ms
turns ratio (s/p)	0.89

의 결과를 최적설계의 자료로 활용할 수 있다. 다이오드를 그대로 사용한다면 사고시간을 다섯 주기로 보아 80ms의 결과를 사용해야 하겠다.

부가적으로, 그림 4와 그림 7을 비교하면 사고시간이 짧아질수록 최소값을 갖는 범위가 넓다는 것을 알게된다. 직관적으로도, 사고시간이 짧을수록 위험부담이 적어져서 각 요소들이 가질 수 있는 범위가 넓어진다고 추측 가능하다.

결국, 여유분을 30%정도로 생각하여 표 4를 6.6kV-200A급 한류기를 위한 최적설계로 결정하였다.

5. 결 론

삼상 DC 리액터 타입 한류기는 사고시 전력 계통에 흐르게 되는 과전류를 막아줌으로서 손실을 예방하는 역할을 한다. 그런데 이러한 손실 예방을 위한 한류기 자체의 가격이 고가의 초전도 선재로 인하여 비싸지는 딜레마에 빠지게 된다. 따라서 주어진 요구조건에 맞는 최적설계는 경쟁력 있는 한류기의 상품화에 필수적이다. 본 연구에서는 Newton method를 이용하여 몇 가지 사고시간에 대해 cost function의 분포를 분석하여 시뮬레이션 하였다. 6.6kV-200A급에서 다이오드 대신 사이리스터를 이용할 것이므로 사고시간이 짧은 범위에서의 결과를 최적설계로 선정했다. 이번 연구에서는 비중이 가장 큰 선재의 가격만을 종속변수로 하였지만, 다른 가능한 모든 변수들을 전부 이용한다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Yamaguchi, "Performance of DC Reactor Type Fault Current Limiter Using High T33temperature Superconducting Coil", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, June 1999, pp.940~943
- [2] Eung Ro Lee, "Simulation of the Three-phase DC Reactor Type Fault Current Limiter for the Short-circuit Test", 2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 18~20 July, 2001, pp.717~719
- [3] Erwin Kreyszig, "Advanced Engineering Mathematics", 7th ed., 1993, pp.925~934