

유도형 초전도 사고전류제한기의 설계

*배준한, 이상진, 오유상, 고태국
연세대학교 전기공학과

The Design of a Inductive Superconducting Fault Current Limiter

*Joon-Han Bae, Sang-Jin Lee, Yun-Sang Oh, Tac-Kuk Ko
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - This paper is a study on inductive superconducting fault current limiter design. We have created simulation for an imaginary power system with inductive superconducting fault current limiter. Then input variables for characteristic analysis and actual manufacturing, and output variables for design results was assigned. Using the results from these variables, the design criterion was determined which was fed into concept design arising from characteristic analysis to determine the inductance of limiting coil and normal state resistance value of triggering coil. These result was put back into design details to finally give out the design result for inductive superconducting fault current limiter.

1. 서론

70년대에 들어 전력 수요가 급증하고, 계통의 용량이 커짐에 따라 단락 사고 시 사고 전류를 제한할 필요성이 높아졌다. 이러한 필요에 따라 초전도체가 임계전류를 넘어서면 짧은시간내에 상전 도체로 바뀌는 특성을 이용한 초전도 사고전류제한기가 연구되었고, 기기 보호 측면을 제외한 경제성만을 고려했을 때에 550KV 이상의 계통에서는 초전도 사고전류제한기가 경제적이다 보고되고 있다.[1] 신진 외국에서는 이미 초전도 사고전류제한기의 실용화에 대한 타당성 검토가 끝난 상태에 있지만 우리나라에서는 최근에는 이에 대한 연구가 진행되고 있다.[2-3]

따라서, 본 논문에서는 유도형 초전도 사고전류제한기가 설치된 모의 전력 시스템을 구성하여 특성해석에 필요한 입력변수와 실제 제작에 필요한 입력변수, 그리고 설계대상이 되는 출력변수를 결정하고, 이 변수들을 이용하여 설계 조건을 도출하였다. 또한, 도출된 설계조건을 이용하여 특성 해석을 통한 개념 설계로부터 리미팅코일의 인덕턴스 및 트리거 코일의 상전도 저항 값을 결정하고, 이 결과를 상세 설계에 이용하여 유도형 사고 전류제한기의 설계 결과를 도출하였다.

2. 모델 설정

초전도 사고전류제한기를 설계하기 위해서 그림 1과 같이 인덕턴스 성분만 있는 제한부와 두개의 소선으로 이루어진 병렬 무유도권선이 있는 트리거 부로 구성된 유도형 초전도 사고전류제한기 모델을 설정하였다. 그림에서 v_0 는 전원 전압이며 r_0, l_0 는 전원의 내부 임피던스 및 선로 임피던스의 합이고, R은 부하 저항이다. L_s 는 리미팅코일의 인덕턴스이며, l_1 과 l_2 는 각각 트리거 코일의 내측과 외측

의 인덕턴스이고, m 은 이들의 상호 인덕턴스이다. 또한 r_1 과 r_2 는 트리거 코일 켄치시 나타나는 트리거 코일의 상전도 저항을 의미한다. 그림 1에서의 시스템에 대한 회로 방정식은 다음과 같다.

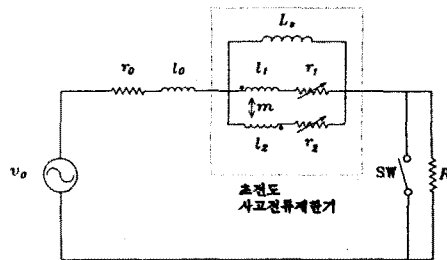


그림 1 유도형 초전도 사고전류제한기가 설치된 모의 전력 계통
Fig 1 Model system with a inductive superconducting fault current limiter

$$v_0 = (r_0 + R)i_0 + r_1 i_1 + l_0 \frac{di_0}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt} + m \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$v_0 = (r_0 + R)i_0 + r_2 i_2 + l_0 \frac{di_0}{dt} + m \frac{di_1}{dt} + l_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$v_0 = (r_0 + R)i_0 + l_0 \frac{di_0}{dt} + L_s \frac{di_3}{dt} \quad (3)$$

$$i_0 = i_1 + i_2 + i_L \quad (4)$$

$$v_0 = V_M \sin \omega t \quad (5)$$

여기서, i_1 과 i_2 는 트리거 코일의 내측과 외측에 흐르는 전류이고, i_L 는 리미팅코일에 흐르는 전류이며, i_0 는 이들의 합이다. 한편, 트리거 코일에서 소선간의 열전달은 없고, 초전도 선체의 단면이 매우 작아 단면 전체의 온도가 같다고 가정하면, 미소 채적에 에너지 보존 법칙을 적용한 선체의 길이 방향(x)에 대한 지배 방정식 및 초기 조건과 경계 조건은 다음과 같다.[4]

$$A_w C_s(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_w \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h \cdot 2\pi r (T_{He} - T) + \frac{\rho_N F j_c^2}{A_N} + \frac{\rho_S (1-F) j_c^2}{A_S} \quad (6)$$

$$T(0) = T_{He} \quad (7)$$

$$A_w \frac{dx}{2} C_s(T) \frac{\partial T}{\partial t} = A_w \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} + i^2 \frac{dx/2}{A_w} \rho \quad (8)$$

at $x=0$

$$+ h \cdot 2\pi r \frac{dx}{2} (T_{He} - T) \quad (9)$$

at $x=\infty$

$$T = T_{He} \quad (9)$$

여기서, T [K]: x 에서의 온도
 T_{He} [K]: 냉매(액체 헬륨)의 온도
 A_w [m^2]: 단면적(cross section area)
 r [m]: 반지름(radius)
 C_p [J/m^3K]: 정적 비열(volumetric specific heat)
 λ [W/mK]: 열전도도(thermal conductivity)
 h [W/m^2K]: 열전달 계수(heat transfer coefficient)
 ρ [$\Omega \cdot m$]: 비저항(resistivity)

3. 유도형 초전도 사고전류제한기의 설계

표 1 실험에 사용된 초전도 선재의 특성
 Table 1 Characteristics of superconducting wire

초전도 소선(strand)	
절연 피막을 포함한 직경 (mm)	0.170
filament diameter (μm)	0.4
filament twist pitch (mm)	1.5
insulation	Polyester varnish
matrix ratio	0.4 : 1.7 : 1
(70Cu-30Ni : 90Cu-10Ni : Nb-46.5Ti)	
DC critical current	36A @ 1T, 4.2K
스테인레스 스틸 와이어(stainless steel wire; SUS 304)	
절연 피막이 포함된 직경 (mm)	0.15
초전도 연선(cable)	
절연 피복을 포함한 직경 (mm)	0.62
초전도 소선의 수	6+1(SUS wire)
cabling twist pitch (mm)	7±3
DC critical current	216A @ 1T, 4.2K

전기 기기의 설계는 크게 개념 설계와 상세 설계로 나누어진다. 즉, 개념 설계에서는 원하는 동작 특성이 나오도록 전기적인 상수를 결정하여야 하고, 상세 설계에서는 결정된 전기적인 특성이 나올 수 있도록 기계적인 치수를 결정하여야 한다. 본 논문에서는 표 1의 초전도 선재와 그림 1의 모델을 이용하여 개념 설계를 하였다. 표 1에서 리미팅코일은 초전도 연선을 사용하였고, 트리거 코일은 초전도 소선을 사용하였다. 개념 설계에는 설계한 초전도 사고전류제한기를 계통에 설치하였을 때 나타나는 특성을 해석하여 이 값들이 실제 조건을 만족하면 받아들이는 복수 출력 방식을 채택하였다. 설계 순서는 특성해석에 필요한 입력변수와 실제 제작에 필요한 입력변수, 그리고 설계대상이 되는 출력변수를 결정하고, 이 변수들을 이용하여 실제 조건을 도출하였다. 또한, 도출된 설계조건을 이용하여 특성 해석을 통한 개념 설계로부터 리미팅코일의 인덕턴스 및 트리거 코일의 상전도 저항 값을 결정하고, 이 결과를 상세 설계에 이용하여 유도형 사고 전류제한기의 설계 결과를 도출하였다.

3.1 설계에 필요한 입력력 변수 및 설계 대상

초전도 사고전류제한기가 설치된 전력 계통인 그림 1에서 특성 해석에 필요한 입력 변수는 표 2와 같다. 표 2의 설계 변수 외에 시스템 특성 해석에 필요한 변수로는 트리거 코일의 인덕턴스가 있는데 이는 입력 변수로 주어지는 자기 결합 계수에 의하여 결정되도록 하였다. 특성 해석을 통하여 개념 설계가 완료되면 이를 기준으로 기계적인 치수를 결정하여야 한다. 먼저 트리거 코일의 중층은 정상 상태에서의 안정도와 사고 후 빠른 회복을 위하여 1층 권선을 원칙으로 하였다. 리미팅코일의 경우에는 같은 길이의 선재로 인덕턴스를 크게 하기 위해서 트리거 코일을 바깥쪽으로 위치시키고, 안쪽에는 리미팅코일을 위치시켰다. 이러한 내용을 전제로 제작에 필요한 입력 변수의 값을 표 3에 나타내었다.

표 2 특성 해석에 필요한 입력 변수
 Table 2 Input variable for characteristic analysis of system

전원 전압	v_0	220V/60Hz
정격 부하	R	5 Ω
내부저항	r_0	0.1 Ω
내부 임피던스	l_0	0.3mH
리미팅코일 렌치전류	I_{qt}	200 Apeak
트리거 코일 렌치전류	I_{qt}	45Apeak
트리거의 자기 결합 계수	k	0.9
트리거 코일 상전도 저항의 상한 r_{max}		200 Ω
리미팅코일 인덕턴스의 상한 $L_{s,max}$		50mH

표 3 제작에 필요한 입력 변수
 Table 3 Input variable for manufacture

트리거 코일의 최대 직경	$D_{a,max}$	200mm
리미팅코일의 최소 직경	$D_{L,min}$	80mm
보빈의 최소 길이	d_{min}	100mm
보빈의 최대 길이	d_{max}	200mm
초전도 소선의 지름	a_1	0.170mm
초전도 연선의 지름	a_L	0.62mm

각 코일은 정상 상태에서의 안정도 향상과 사고 후 신속한 재투입을 위하여 1층으로 권선 하는 것이 가장 바람직하지만 리미팅코일의 경우 큰 인덕턴스를 구현하기 위해서는 1층으로는 한계가 있게 된다. 또한 다층으로 할 경우 전류도입선이 반대 방향으로 연결되어야 하므로 홀수 층만이 가능하다.

따라서, 트리거 코일은 단층으로, 리미팅코일은 1, 3, 5층의 변화를 주어 설계하기로 한다. 위의 입력 변수를 이용하여 최종적으로 얻어야 할 출력 변수는 다음의 표 4와 같다.

표 4 설계 프로그램의 출력 변수
 Table 4 Output variable of design program

트리거 코일의 상전도 저항	r_1, r_2
트리거 코일의 인덕턴스	l_1, l_2, m
리미팅코일의 인덕턴스	L_s
트리거 코일의 내층과 외층의 직경	D_n, D_e
리미팅코일의 직경	D_L
보빈의 길이	d
트리거 코일의 권선 피치	wp_n, wp_e
리미팅코일의 턴 수	n_L

3.2 설계 조건

초전도 사고전류제한기는 정상 상태에서는 트리거 코일로 대부분의 전류가 흐르다가 사고 후 트리거 코일이 작동하여 리미팅코일로 전류가 분류되면서 사고 전류를 제한한다. 이때 순간적으로 정상 상태의 전류보다는 큰 과전류와 과전압이 나타나게 되는데 계통과 사고전류제한기를 보호하기 위해서는 이에 대한 한계 값이 필요하다. 또한, 트리거 코일에서 사고와 함께 상전도 저항이 급격히 증가하기 시작하는데 이로 인해 트리거 코일의 온도가 상승하고, 헬륨이 기화하게 되어 저온 용기 내의 압력이 증가한다. 따라서, 트리거 코일의 온도에 대한 조건이 필요하다. 우선, 사고 후 계통 전체에 흐르는 전류는 정상 상태 전류의 3배 보다 작고, 리미팅코일의 렌치전류인 I_{qt} 의 70%를 넘지 못하도록 하였다.

$$i_0 \leq 3 \times \frac{220 \times \sqrt{2}}{R} \quad (10)$$

$$i_L \leq 0.7 \times I_{qL} \quad (11)$$

한편, 사고 발생 직후에 사고전류제한기의 양단에 나타나는 과전압은 정격 전압의 2배 이내에서 제한되도록 설계하였으며, 사고 후 트리거 코일에서의 온도는 400K를 넘지 않도록 설계하였다.

$$v_i = L_S \frac{di_L}{dt} \leq 2 \times \sqrt{2} \times 220 \quad (12)$$

$$T \leq 400K \quad (13)$$

바깥쪽 트리거 코일의 직경(D_e)은 입력 변수로 받은 트리거 코일의 최대 직경($D_{e,max}$) 보다는 작고, 안쪽 트리거 코일의 직경(D_n)은 리미팅코일의 직경(D_L) 보다는 커야 한다. 또한, 초전도 선을 권선 할 시 보빈이 너무 얇으면 파손될 위험이 있으므로 보빈의 두께는 10mm 이상으로 하였고, 리미터와 트리거 사이에 액체 헬륨이 원활히 소용되도록 틈을 5mm 이상으로 하였다.

$$D_n \geq D_{L,min} \quad (14)$$

$$D_n \geq D_L + 15 \quad (15)$$

안쪽 트리거 코일과 바깥쪽 트리거 코일은 서로 닿지 않도록 1mm 이상이 떨어지도록 하였으며, 바깥쪽 트리거 코일이 입력된 최대 값을 넘지 않도록 정하였다.

$$D_e \geq D_n + 2 \quad (16)$$

$$D_e \leq D_{e,max} \quad (17)$$

3.3 설계 프로그램의 알고리즘 및 설계 결과

이상의 내용을 이용하여 설계 프로그램을 작성하였다. 먼저 설계에 필요한 입력 변수를 받아들이고, 이를 이용하여 l_1 , l_2 , m 의 값을 결정한다. 다음은 계통의 특성 해석에 필요한 초전도 사고전류제한기의 설계 파라미터인 r_1 , r_2 , L_S 를 초기화하여 특성 해석에 들어간다. 특성 해석에는 식 (1)에서 식 (5)까지의 회로 방정식이 사용되었고, 퀘치가 발생하면 초기 저항 발생은 퀘치 순간의 전류 율에 비례한다는 실험적으로 증명된 결과[4]와 식 (6), 식 (7), 식 (8), 식 (9)을 이용하여 트리거 코일의 상전도 저항을 계산하고, 이 저항을 이용하여 회로 방정식을 해석한다. 이 결과가 설계 조건인 식 (10)에서 식 (13)까지를 만족시키면 제작에 필요한 상수를 결정하고, 아니면 r_1 과 r_2 , L_S 를 변경하여 다시 특성 해석을 하도록 하였다. 이렇게 해서 설계조건을 만족하면 제작에 필요한 변수들을 결정하고, 식 (13)에서 식 (16)까지의 설계 조건을 만족하는지 확인한 다음 설계 결과를 출력하도록 하였다.

표 5 초전도 사고전류제한기의 최종 설계 결과

Table 5 Design value of superconducting fault current limiter

트리거 코일의 상전도 저항	r_1, r_2	138Ω, 140Ω
트리거 코일의 자체 인덕턴스	l_1, l_2	77μH, 77.2μH
트리거 코일의 상호 인덕턴스	m	69.3μH
트리거코일의 전체인덕턴스	l_t	2μH
리미팅코일의 인덕턴스	L_S	10mH
트리거 코일의 직경	D_n, D_e	φ128, φ130
리미팅코일의 직경	D_L	φ82
보빈의 길이	d	120mm
트리거 코일의 권선 피치	wp_n, wp_e	4, 3.9
리미팅코일의 턴 수	n_L	3×175turn

본 프로그램에서는 조건을 만족하는 모든 결과를 출력하게 되어 있으므로, 제작 시에는 이 값 중에서 선택하여 사용하여야 한다.

그림 3은 설계 프로그램을 개략적으로 설명한 블록 선도이고, 또한 표 5는 프로그램의 출력 결과 토대로 최종 결정된 설계 결과이다.

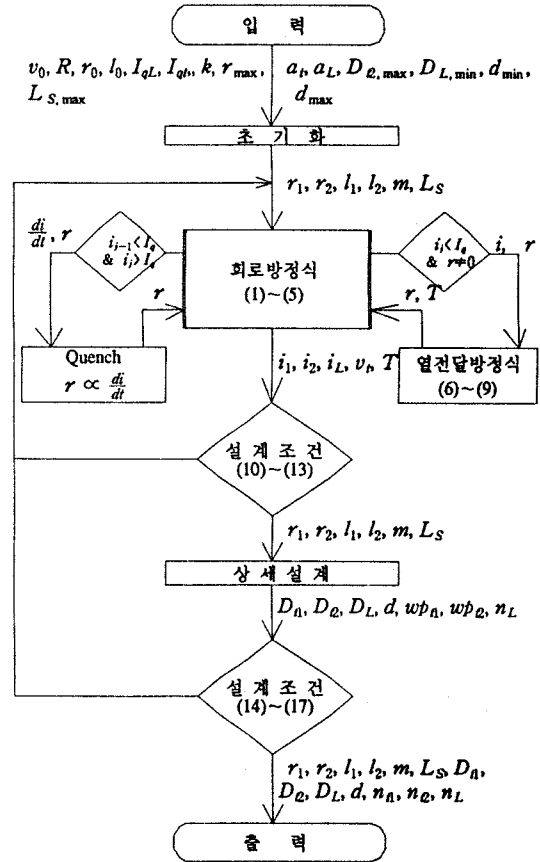


그림 3 초전도 사고전류제한기 설계 프로그램의 순서

Fig. 3 Flow chart of SFCL design program

4. 참고문헌

1. K.E. Gray and D.E. Fowler, "A Superconducting Fault-Current Limiter", Journal of Applied Physics, Vol. 49, No. 4, pp.2546-2550, April 1978
2. 최경달, 이상진, 김동수, 이지광, 김동훈, 차귀수, 한송엽, "유도형 초전도사고전류제한기의 퀘치특성", 95년도 대한전기학회 추계학술대회 논문지, pp.111-113, 1994.11
3. 최경달, 이상진, 김동수, 이지광, 김동훈, 차귀수, 한송엽 "유도형 초전도 사고전류제한기의 동작특성, 전기학회 논문지 제44권 1호, pp.34-39, 1995.1.
4. 이상진, 오윤상, 배준환, 고태국 "fast quench 발생 시 초전도 선체의 온도해석", 전기학회 논문지 심사중.
5. 이상진, 배준환, 오윤상, 고태국, 교요 "초전도 무유도권선의 퀘치시 저항변화에 관한 연구", 전기학회 논문지 심사중.