

배전급 고온초전도 한류기 절연설계 최적화 연구

석복철, 강형구, 이찬주, 남관우, 고태국
 현대중공업(주) 기계전기연구소, 연세대학교 전기전자공학부

A Study on Optimal Insulation Design of the Distribution Level HTS FCL

B. Y. Seok*, H. Kang*, C. Lee*, K. Nam*, T. K. Ko**
 *Electro-Mechanical Research Institute, R&D Division, Hyundai Heavy Industries, Co., LTD.,
 **Department of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - In this study, superconducting coil arrangements and cryostat concept design were conducted for the development of 13.2kV/630A bifilar winding type high temperature superconducting(HTS) fault current limiter(FCL) with YBCO coated conductor(CC) wire. The coil consists of several layers with unique non-inductive solenoid winding method.

Six types of HTS coil arrangements were investigated for the optimal insulation design of HTS FCL. And, conceptual design of cryostat was conducted for the decrement of thermal invasion and the prevention of low voltage insulation breakdown in the LHe which is used as pressurization gas in sub-cooling condition of liquid nitrogen(LN2). As the results, it was found that the modified suspended type cryostat with horizontal coil arrangement is beneficial to the insulation design of 13.2kV level bifilar winding type HTS FCL.

1. 서 론

고온초전도 한류기는 전력계통에 적용시 고장전류 제한에 따른 시스템 신뢰성 및 안정도 향상과 더불어 전력기기의 보호가 가능한 장점으로 인하여 선진사들의 개발경쟁이 치열하게 전개되고 있다[1]. 국내에서도 고온초전도 한류기 개발의 필요성이 인식되어, 1990년도 중반부터 개발연구가 진행된 이래, 많은 발전을 거듭하여 왔다. 특히 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업은 이러한 고온초전도 한류기 개발의 기폭제가 되었다. 현재, 국내에서 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 개발되고 있는 고온초전도 한류기는 모두 저항형으로, 배전급 전압 및 전류 용량을 가지는 세계 최고용량급 모델 개발 연구가 진행되고 있으며, 당해연도는 본 모델 개발의 최종단계이다.

고온초전도 한류기의 성공적 개발을 위해서는 한류기 동작 시에 발생하는 과도한 발열로 인한 냉매의 비등, 온도상승, 절연 등의 연구가 체계적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 이러한 고온초전도 한류기 동작시의 절연환경 분석을 토대로, 초전도 코일의 배치에 따른 부피최적화 및 효율적 냉각시스템 개념설계 연구를 수행하였다.

2. 개발 사양 및 절연환경 분석

2.1 개발사양

현재 진행되고 있는 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 당사에서 개발되고 있는 고온초전도 한류기는 <표 1>에서 볼 수 있는바와 같이 단상 13.2kV 630A급 저항형 한류기로, 현재 전력계통에서 22.9kV 배전급의 1상분에 해당하는 용량이다. 본 개발에서 사용될 고온초전도 재료로는 2G wire라고 불리는 YBCO coated conductor(이하 CC) wire를 이용하였으며, 본 선재의 양면에는 켈치발생시 저항을 발생시켜 단락전류를 제한하는 안정화재로 stainless steel이 부착되어 있다. 본 용량급의 고온초전도 한류기 개발을 위하여 60A@77K(≒150A@65K) 정도가 되는 CC wire를 채용할 계획이며, 전류용량에 맞추어 8본의 선재를 병렬로 감도록 설계되었다. 본 연구에서 개발된 고온초전도 한류기의 동작조건은 가압·과냉각이 냉각 및 절연에 미치는 효과를 고려하여 온도 65K, 압력 0.2~0.4MPa 정도에서 동작되도록 설계하였다[2]. 개발품의 절연시험전압은 배전급 개폐기류의 절연 시험 조건과 동등한 AC 50kV, Lightning Impulse 125kV로 설정하였다.

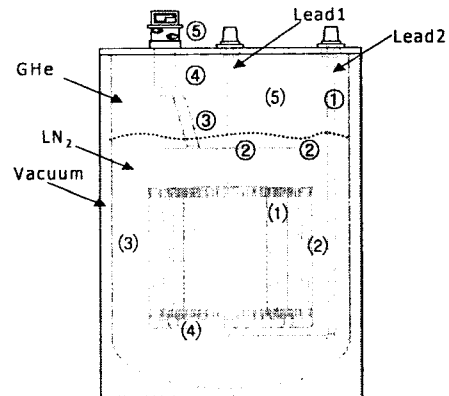
2.2 절연환경 분석

고온초전도 한류기는 상시 저항 0로 동작하기 때문에 한류기 내부의 도체에서는 어떠한 전압강하도 유발하지 않는다. 그러므로 <그림 1>의 Lead1-HTS coil-Lead2가 모두 계통전압과 동일한 전압이 인가되게 되며, 그 외의 부품들은 모두 Ground 상태가 될 것으로 예상된다. 그러므로 정상상태를 고려한 절연설계 위치는 그림1의 ①~⑤로 나타낸 영역들이 될 것으로 예상된다. 그러나 동작 시에는 초전도체에 켈치현상의 발생으로 인하여 계통전압이 입력리드(Lead1)와 출력리드(Lead2) 사이에 있는 초전도 권선부에 선재의 길이에 비례하여 분배되게 되므로, 초전도 권선의 Layer간뿐

만 아니라, 상부의 Lead간에도 전압차가 유기되고 정상시의 절연설계 위치와 더불어 그림1의 ①~⑤로 나타낸 영역이 절연설계시 부가적으로 고려되어야 할 지점으로 된다. 상기와 같이, 초전도한류기의 경우, 동작특정상 정상시와 동작시의 전압분포가 판이하게 달라지게 된다. 또한 저항형 초전도한류기의 경우, 동작 시 막대한 에너지가 극저온 내부로 유입되게 되어 기포의 비등과 압력의 변화, 초전도체 및 주변부의 온도의 상승으로 인한 절연내력의 저하문제도 심각히 고려되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 상기와 같은 동작조건에서의 열적·전기절연적 안정성 향상을 위하여 가압·과냉각 기법이 이루어진다. 그러나 일반적으로 고온초전도 전력기에서 가압을 위해서는 He가스를 가압매질로 사용하는 경우가 많다. He가스는 비등온도가 질소보다 낮아 가압효과의 유발은 가능하나, 전기절연적 측면에서는 질소가스(GN₂)보다 절연내력이 훨씬 낮으므로, 전기절연적 약점부가 액체질소 상부의 GHe층에서 발생하게 된다. 더욱이, 액체질소 상층부의 GHe층은 65K~300K에 이르는 온도변화가 이루어지는 구간이며, 냉동기와 리드부들이 복잡하게 배치된 영역들로 전기절연상 주의를 요하는 영역이다.

<표 1> 고온초전도 한류기 개발 사양

항 목	내 용	
용량	단상 13.2kV 630A	
방식	저항형(무유도 권선)	
전류제한시간	0.1(second)	
초전도 코일	소자	Coated conductor wire(YBCO wire)
	임계전류	60A@77K, 150A@65K
	선재 폭	4.33(+/-0.07)mm
	안정화재	Stainless steel
	안정화재 두께	50µm
	병렬선재 수	8본
	총 선재 소요량	2.64km
운전 조건	온도 65K	
	압력 0.2 ~ 0.4MPa	
시험 전압	ac 50kV(1min)	
	FLI 125kV(1.2/50µs)	



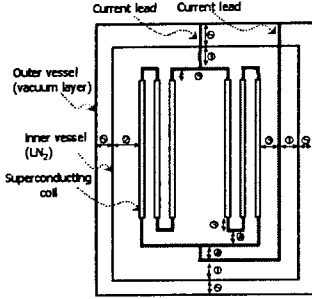
정상시 : ① ~ ⑤는 정상운전시 절연 약점부
 - Lead1 - HTS coil - Lead2 : 13.2kV
 - other parts : Ground state
 동작시 : (1)~(5)는 켈치발생시 절연 약점부
 - Lead1 (13.2kV) - HTS coil(13.2kV-0kV) - Lead2 (0kV)
 - other parts : Ground state

<그림 1> 고온초전도 한류기 절연설계 주요 개념도

3. 고온초전도 한류기 접연설계

3.1 초전도 코일 설계

고온초전도 한류기 접연설계를 위해서는 코일과 리드부 및 외함과의 사이에 발생할 수 있는 전압차를 고려한 설계가 선행되어야 한다. <그림 2>는 고온초전도 한류기 접연설계를 위한 각 부분별 기본 Dimension 설정을 나타낸다. <그림 2>에서 볼 수 있는 바와 같이, lead-cryostat : 100mm, coil-cryostat : 100mm, coil-lead : 15 & 50mm, lead간 : 20 & 50mm, 진공층 두께 : 100mm(상부) & 40mm로 설정하였다.



- lead-cryostat : 100mm
- ② coil-cryostat : 100mm
- ③ coil-lead : 15&50mm
- ④ lead-lead : 20&50mm
- ⑤ 진공층 두께 : 100mm(상부)&40mm

<그림 2> 초전도 코일 접연 설계 기본도

상기와 같은 기본 절연거리 설정 하에서 cryostat의 최소부피를 고려한 접연설계 최적화를 위하여, 본 연구에서 설정된 2.64km의 초전도 선계를 가장 최적으로 감는 방법과 냉각시스템과의 배열에 대하여 검토하였다. <표 2>는 초전도 권선의 보빈 수에 따라서 발생할 수 있는 리드의 인출 기법에 따라, 보빈의 수가 기수인 경우에 발생할 수 있는 한가지 경우와 보빈의 수가 우수인 경우에 발생할 수 있는 2개의 경우에 대하여 검토하였다. 또한, 각각의 권선을 수직으로 배치한 경우와 수평으로 배치한 경우로 설정하여 최종 고온초전도 한류기의 부피 최적화를 검토하였다.

<표 2> 초전도 권선의 보빈 Layer 수 및 배치 설정

	odd number layer	even number layer	even number layer
Vertical type coil	Case V1 	Case V2 	Case V3
Horizontal type coil	Case H1 	Case H2 	Case H3

<표 3> 초전도 권선의 보빈 Layer 수 및 배치 설정 최적형상 도출

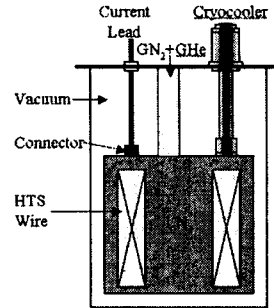
number of layers	Vertical Type Cryostat				Horizontal Type Cryostat							
	Case V1		Case V2		Case V3		Case H1		Case H2		Case H3	
	height	width	height	width	height	width	height	width	height	width	height	width
2	N/A	1.39	2	1.36	2	N/A	2.08	1.35	2.08	1.33	N/A	N/A
		1.59	1.6	1.56	1.6		1.68	1.55	1.68	1.53		
		1.79	1.4	1.75	1.4		1.48	1.75	1.48	1.73		
		1.99	1.2	1.96	1.2		1.28	1.95	1.28	1.93		
		2.19	1.1	2.16	1.1		1.18	2.15	1.18	2.13		
3	1.4	1.62	N/A	N/A	1.7	1.35	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1.6	1.32			1.4	1.55						
	1.8	1.12			1.2	1.75						
	2	1.02			1.1	1.95						
	2.2	0.95			1.04	2.15						
4	N/A	1.4	1.38	1.36	1.34	N/A	1.42	1.35	1.42	1.33	N/A	N/A
		1.59	1.14	1.56	1.14		1.33	1.55	1.22	1.53		
		1.79	1.04	1.76	1.04		1.28	1.75	1.12	1.73		
5	1.43	1.31	N/A	N/A	1.34	1.35						

<표 3>은 <표 2>의 6가지 배열에 따른 형상과, <그림 2>에서 제시된 부분별 기본 Dimension을 바탕으로 본 개발품의 최종 사이즈를 도출한 표이다. 표에서 볼 수 있는바와 같이, 최종적으로 가장 적절한 형상으로 선택된 모델은 보빈의 수를 5개로 하고, 초전도 권선을 수평 배치하는 것이 전기절연을 고려한 최적형상을 알 수 있었다.

3.2 Cryostat 설계

고온초전도 전력기기의 특성상 cryostat은 외부로부터의 열침입을 최소화하고, 액체질소 상층부의 절연이 용이하도록 선정되어야 한다. <그림 3>

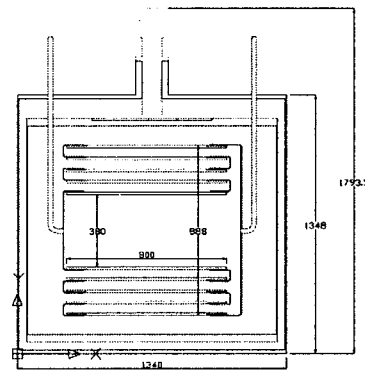
은 고온초전도 한류기 개발을 위하여 설계된 냉각시스템의 개략도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이, cryostat은 suspended type으로 고안되었으며, 가압을 위하여 GHe를 사용하였다. GHe는 열침입 및 절연적으로 매우 취약한 특성을 가지고 있으므로, 별도의 channel을 설치하여 권선부에 가압이 가능하면서도 열침입을 최소화하고, 절연적으로 아무런 영향을 받지 않도록 설계하였다. 리드부는 진공중에 노출되어 있어, 절연적으로 취약할 수 있다. 따라서 본 개발에서 사용되는 리드는 기존의 초전도 전력기들에서 사용되지 않는 새로운 절연설계기법을 개발하여 절연설계가 진공에 비하여 비교적 용이한 고체절연물에서 모두 소화할 수 있도록 설계하여 진공층에서의 절연내력에 영향을 받지 않도록 특수 설계하였다.



<그림 3> 고온초전도 한류기용 Cryostat 개념

3.2 절연 최적화 모델

<그림 4>는 본 연구에서 목표로 하는 단상 13.2kV 630A급 무유도 권선형 고온초전도 전력기기의 절연 최적화를 통한 최종모델의 개념도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이, 본 모델은 suspended type의 cryostat 내부에 5층의 보빈으로 구성된 solenoid 권선이 수평방향으로 배치되도록 하였다. 그러므로 전류 입력 및 출력을 위한 리드간 간격은 최대한 멀리 위치하도록 배치하여 리드간의 절연이 문제가 없도록 하였다. 본 모델의 최적 각 Dimension은 cryostat의 직경이 1340mm, 높이가 1348mm로 설계되어 있다.



<그림 4> 고온초전도 한류기 접연최적화 모델도

4. 결 론

본 연구에서는 배전급 22.9kV 계통의 1상분에 해당하는 고온초전도 한류기 접연설계 최적화에 대하여 연구하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 초전도 권선부는 동작시의 절연 환경을 고려하여 cryostat에 수평이 되도록 배치하여 한류기 전체 시스템의 부피가 최소가 되도록 설계되었다.
- (2) cryostat은 절연설계 및 열적 침입 방지에 용이하도록 suspended type으로 설계되었다.

4. 감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] M. Steurer, M. Noe, "Superconducting Power Devices : Superconducting Fault Current Limiters", ASC 2004 Short Course, 2004
- [2] B. Y. Seok, H. Komatsu, J. Suehiro, H. Okamoto and M. Hara, "Pressurizing and Sub-Cooling Effect on Electrical Breakdown Characteristics of LN2 in Modeled HTS Coils", IEEE Trans. on DEI, Vol. 8, No. 6, pp. 1016-1024, 2001