

RTDS를 이용한 초전도 한류기 모델 개발

이주훈*, 이진, 이욱화, 김용길, 오일성, 이방욱, 박권배
LG산전

Development of Superconducting Fault Current Limiter using RTDS

Joo-Hun Lee, Jin Lee, Wook-Hwa Lee, Yong-Gil Kim, Il-Song Oh, Bang-Wook Lee, Kwon-Bae park
LG Industrial Systems co., Ltd

Abstract - This paper describes the modelling method of the Superconducting Fault Current Limiters(SFCL) for Real-Time Digital Simulator (RTDS). The simulations in this paper were carried out using the R type SFCL. The R type SFCL is developed by using User Defined Component(UDC).

기술의 융합을 요구하게 되어 처음 초전도 현상이 발견 되었을 당시의 예상과는 다르게 실제 상업적 응용에 이르지 못하고 있다. 특히 전력분야에서 같은 초전도 기술을 이용한 케이블, 변압기 등이 종래에 사용하던 도체를 초전도체로 교체하여 손실을 줄이려고 한 것과는 다르게 초전도 한류기는 초전도체의 특성을 이용하여 과전류가 흐를 때 큰 저항을 발생시키는 새로운 개념의 기기로서 이상적인 한류기의 특성은 다음과 같다.

1. 서 론

국내의 154kV급 이상의 전력계통은 전력공급의 신뢰도 향상 및 계통운용의 유연성 등의 이유로 인하여 송전선로가 망상(mesh network) 형태로 구성되어 있고 또한 최근에는 연평균 6%의 지속적인 전력수요의 성장에 따른 설비 증설로 인하여 계통의 규모가 증대됨에 따라서 등가 임피던스가 점점 감소하게 되어, 사고 시의 고장전류가 점점 증대되고 있다. 그 결과 현재 송전계통에 설치되어 있는 차단기의 35%이상 이 차단내력을 초과하고 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나 차단기의 차단내력을 증가시키는 것은 기술적인 면이나 경제적인 면에서 많은 제약이 따르게 되므로 초전도 재료의 특성과 초전도 기술을 이용하여 고장전류의 크기를 제한하는 초전도 한류기(SFCL, Superconducting Fault Current Limiter)를 도입하고자 하는 연구가 국내·외에서 이루어지고 있다.

본 논문에서는 전력계통 해석용 실시간 시뮬레이터인 RTDS(Real Time Digital Simulator)에서 사용이 가능한 초전도 한류기 모델을 개발하고 다양한 시뮬레이션을 통하여 한류 효과 및 계통 안정도 향상 효과 등을 모의하고, 그 모의결과를 통하여 한류 용량 결정 및 최적 저항 결정 등과 같은 실제 초전도 한류기의 개발 지표로서 활용할 수 있도록 모델의 개발, 검증 그리고 사례연구 결과를 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 초전도 한류기의 특성

일반적으로 초전도체 특성은 퀸치(quench) 발생, 전파, 분포, 회복 특성 등으로 나타내어지며 대부분 단위 소자를 대상으로 측정하여 그 측정 결과로써 특성을 파악하게 된다. 따라서 초전도 한류기를 실제 개발하기 위해서는 우선적으로 퀸치특성 분석 및 이용 기술, 전자장모의 기술, 퀸치 발생 시의 회로 해석 기술, 교류 손실 해석 기술 그리고 제조 기술 등에 대한 연구가 요구되는데, 이러한 연구는 전기, 물리, 기계, 재료 등의 다양한

- ① 정상상태에서 임피던스는 거의 0일 것.
- ② 상전이 발생 시 특정 임피던스를 발생할 것.
- ③ 사고 발생이후 1 사이클 이내 전류 제한할 것.
- ④ 사고 제거 후 자동 회복 가능할 것.
- ⑤ 소형이면서 경량일 것.
- ⑥ 신뢰성과 경제성이 높을 것.

한류기의 설치장소로는 발전기 보호용으로 승압변압기 1차측, 네트워크간 연계선로, 송전급 모선연계선로, 변압기 2차측 보호용으로 변압기 2차측 등에 연결하여 사용하는 경우에 효용성이 높은 것으로 조사되고 있다.

2.2 초전도 한류기의 종류

일반적으로 초전도체는 저온 초전도체(4.2K, -269℃)와 고온 초전도체(77K, -196℃)로 나눌 수 있는데, 저온 초전도체의 경우에는 극저온 시스템의 저효율성으로 인하여 경제성이 저하되므로 초전도 현상이 나타나는 온도(임계온도)를 높이는 연구가 이루어지고 있으며, 고온 초전도 한류기의 경우에는 어느 정도 검증된 기술로 인정받고 있다.

고온 초전도 한류기를 유형별로 저항형, 유도형 그리고 전자식 유도형(정류식 유도형)으로 분류할 수 있으며, 첫 번째로 저항형은 소형의 간단한 구조를 가지고 있으면서 파형의 변형이 거의 없다는 장점이 있으며, 단점으로는 한류 시에 고열을 발생한다는 점이다. 두 번째로 유도형은 저항성분이 아주 적어서 열발생이 적으며 제작이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 부피가 커지고 리액턴스 성분으로 인해서 파형의 변형이 발생한다는 단점이 있다. 마지막으로 전자식 유도형은 정류식 유도형이라고도 하며 반도체 소자인 다이오드(diode)를 이용하여 브리지(bridge)를 구성하고 내부에 초전도 리액터와 직류 전원을 두어 전류를 제한하는 방식으로 고장전류가 사고 초기부터 제한된다는 장점이 있지만, 전력전자소자에 의한 손실과 고전압에 적합한 내부전원 제작 등과 같은 문제가 있다. 전자식 유도형은 다양한 형태로 변형되어 연구되고 있다.

2.3 초전도 한류기 모델 개발

국내·외 초전도 한류기에 대한 연구 현황을 살펴보면, 실제 초전도 재료를 이용한 연구뿐만 아니라 전력계통 해석용 시뮬레이터를 이용하여 앞에서 살펴본 3가지

종류의 소프트웨어(software) 모델들을 개발하고 이 모델들을 이용하여 각 초전도 한류기들을 실제 계통에 적용하여 서로 비교하는 등의 연구가 이루어지고 있다.

시뮬레이터에서 소프트웨어적으로 모델링 된 기존의 국내·외 초전도 한류기 모델들의 모델링 방법을 살펴보면 초전도체를 인덕턴스 성분이 전혀 없는 무유도 코일로 가정하고 한류 소자로는 저항형인 경우에 저항 소자를 유도형인 경우에 리액터 소자를 병렬 연결하고 한류기의 임계전류(동작개시전류)를 설정하여 사고전류가 설정된 임계전류 이상이 되면 상전이가 발생하여 초전도체에 고저항이 발생하도록 하는 방법을 사용하였다. 여기서 임계전류와 사고전류를 비교하기 위하여 과전류 계전요소를 이용하여 과전류 발생을 검출하고 이 검출 신호를 스위치(switch) 또는 싸이리스터(thyristor) 등에 보내어 저항을 변화시키는 방법으로 모델링 되었다. 그러나 실제 초전도 한류기의 특성은 외부의 과전류 검출 신호와는 상관없이 자체적으로 과전류에 의하여 발생하는 열에너지에 의하여 상전이가 발생하여 고저항이 발생하는 것이 원래의 특성이다.

본 논문에서는 앞에서 살펴본 바와 같은 초전도 한류기의 종류별 특성에 의하여 한류 시에 고열을 발생한다는 단점이 있지만 소형의 간단한 구조를 가지고 있으면서 파형의 변형이 거의 없다는 장점 때문에 앞으로 중점적으로 개발될 것으로 예상되는 저항형 초전도 한류기(R type SFCL)를 전력계통 해석용 실시간 디지털 시뮬레이터(RTDS)를 이용하여 실제 계통에 적용하여 모의가 가능하도록 사용자 정의 모델(UDC) 개발 기법을 이용하여 개발하였다.

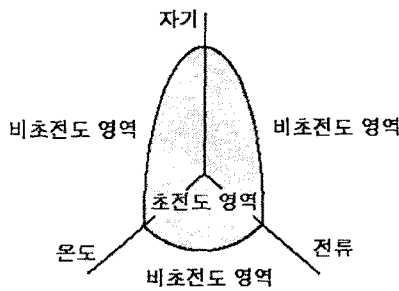


그림 1. 초전도 상태 다이어그램(diagram)

초전도체의 퀸치는 위의 그림 1에서 보는 바와 같이 전류에 의한 퀸치, 온도에 의한 퀸치 그리고 자기에 의한 퀸치로 나누어 생각할 수 있는데, 저항형 초전도 한류기는 실제 초전도 한류기에는 약간의 인덕턴스를 포함하게 되므로 자기에 영향이 있겠지만, 영향이 매우 작으므로 자기에 의한 퀸치는 무시하였다. 따라서 본 저항형 초전도 한류기 모델은 사고 시 선로에 흐르는 사고전류와 임계전류(critical current)를 비교하여 사고전류가 임계전류보다 커지는 경우뿐만 아니라 사고전류에 의하여 발생하는 열에너지(열량 또는 소비전력)에 의하여 초

전도 한류기의 온도가 임계온도(critical temperature)보다 높아지는 경우에 퀸치가 발생하여 그림 2에서 보는 바와 같이 저항이 급격히 증가되도록 모델링하여 초전도체의 특성을 최대한 반영하였다.

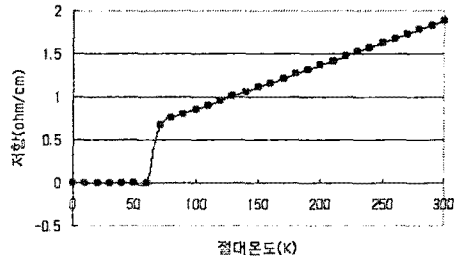


그림 2. 온도에 따른 R-SFCL의 저항 변화

다음의 그림 3은 본 논문에서 제시하는 초전도 한류기의 동작 다이어그램(diagram)이다.

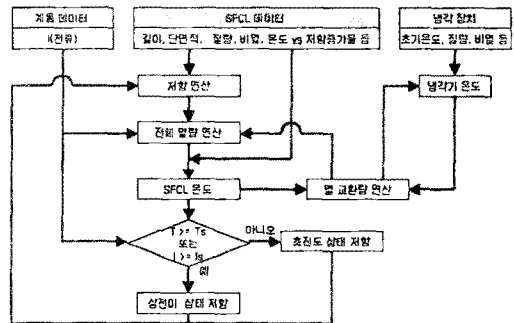


그림 3. 초전도 한류기 모델의 동작 다이어그램

동작 다이어그램을 살펴보면 사고전류에 의하여 증가 되는 저항형 초전도 한류기의 온도는 선로의 전류와 저항에 의하여 발생하는 열에너지를 먼저 연산하고 이를 초전도 한류기의 열용량(heat capacity)으로 나누어주면 된다. 여기서 주의할 점은 이 때 발생하는 열에너지는 초전도 한류기뿐만 아니라 초전도 한류기의 온도가 증가하면서 냉각장치와 열적평형을 유지하기 위하여 냉각장치로도 전달된다는 것이다. 따라서 초전도 한류기의 온도와 냉각장치의 온도를 계속 비교하여 한 타임스텝 내에 전달되는 열량만큼의 열량을 교환하도록 모델링하였다. 이 때 한 타임스텝(time step) 내에 교환되는 열량은 초전도 한류기와 냉각장치의 표면적, 표면전달계수, 온도차에 따라서 결정되고 냉각장치 외에 기관 등으로 전달되는 열량 등은 무시하였다. 냉각장치 내의 액체질소(liquid nitrogen)는 대기 기압 하에서 77 K에서 액체상태로 존재하고 임계압력 33.5 atm에서 임계온도가 125.79 K 이지만 냉각탱크의 압력 또는 부피의 변화가 없고 대기 기압과 동일하다고 가정하였고 냉각장치의 온도가 임계온도에 이르면 기화되면서 초전도 한류기로부터 전달되는 모든 열에너지를 기화하는데 소비하게 되는데, 냉각하면서 기화된 액체질소만큼의 액체질소가 바로 보충되므로 냉각장치의 용량이

충분한 경우에 냉각장치는 거의 일정한 온도를 유지하게 된다.

2.4 활용방안연구

앞에서 제시한 초전도 한류기를 전력계통 해석용 시뮬레이터에서 이용할 수 있도록 소프트웨어(software)적으로 모델링하여 개발하는 경우에 다음의 목적으로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

- ① 한류 용량 결정
- ② 최적 저항 결정
- ③ 과도 안정도에 미치는 영향 평가
- ④ 보호 시스템에 미치는 영향 평가 및 대책방안 수립

2.5 사례연구

앞에서 제안한 초전도 한류기의 모델을 검증하기 위하여 장래에 초전도 한류기의 사용이 요구될 것으로 예상되는 계통전압이 154 kV급인 지역을 선정하여 그 지역의 부하 데이터, 선로 데이터 등을 이용하여 시험계통을 구성하였다.

2.5.1 모의계통

모델검증을 위한 모의계통은 154 kV급으로 서울지역 인근의 한 2회선 PI 선로를 선정하고 2회선 PI 선로 중에 한 선로에 저항형 초전도 한류기 모델을 위치시켰다. 나머지 계통은 등가 처리하여 전압원과 부하를 이용하여 해당 선로의 조류를 실제 계통과 동일하도록 조절하였다. 모의계통은 아래의 그림 4와 같다.

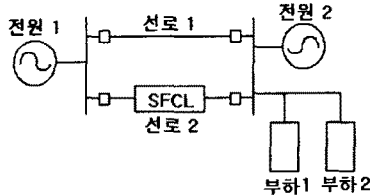


그림 4. 모의계통

위의 모의계통에서 사용된 계통 데이터는 다음과 같다.

표1. 모의계통 데이터

	계통 데이터
전원	전원1 : 157.70 ∠ 0.5075 ° 전원2 : 157.728 ∠ 0.0 °
선로	정상분 저항 : 0.14 [ohm] 정상분 인덕턴스 : 1.089 [ohm] 정상분 캐패시턴스 : 0.06 [Mohm] 영상분 저항 : 0.785 [ohm] 영상분 인덕턴스 : 3.776 [ohm] 영상분 캐패시턴스 : 0.06 [Mohm] 상호 영상분 저항 : 0.647 [ohm] 상호 영상분 인덕턴스 : 2.236 [ohm]
부하	부하1 : 169 + j66.79 [MVA] 부하2 : 404 + 0.2 [MVA]

현재 154 kV급 저항형 초전도 한류기는 개발 중에 있으므로 실험용으로 제작된 4 인치(inch) 3 mm 폭으

로 패턴한 경우의 초전도 한류기의 한류소자 한 장의 데이터를 이용하여 입력 파라미터를 개략적으로 선정하였고 한류소자에 대한 데이터는 다음과 같다.

표2. 초전도 한류소자 데이터

	초전도 한류소자 데이터(1장)
단면적(두께)	YBCO : 3×10^{-4} [mm] Au : 2×10^{-4} [mm]
질량	YBCO : 1.556×10^{-2} [g] Au : 3.129×10^{-2} [g]
일계전류	30 A
허용최대전압	650 Vrms
밀도	YBCO : 6.4×10^{-3} [g/mm ³] Au : 19.3×10^{-3} [g/mm ³]

위의 표에서 보인 데이터를 기준으로 하였을 때 초전도 한류소자를 이용하여 154 kV급으로 제작하는 경우에 230~240 장의 초전도 한류소자가 소요될 것으로 예상된다. 그러나 이 수량은 실제 계통의 전류용량과 상승전압, 초전도 한류소자의 병렬 연결 개수 그리고 안정적인 사용을 위한 마진(margin) 등에 의하여 결정되므로 현재로서는 정확하게 데이터를 선정하는 것이 불가능하다. 초전도 한류기의 전체 저항을 10 Ω 정도로 지정하였다.

다음의 그림 5는 모의계통과 저항형 한류기 모델을 이용하여 전력계통 해석용 실시간 시뮬레이터(RTDS)로 모의하기 위하여 GUI 환경인 RTDS/PSCAD에서 구성된 드래프트(draft) 화면이다.

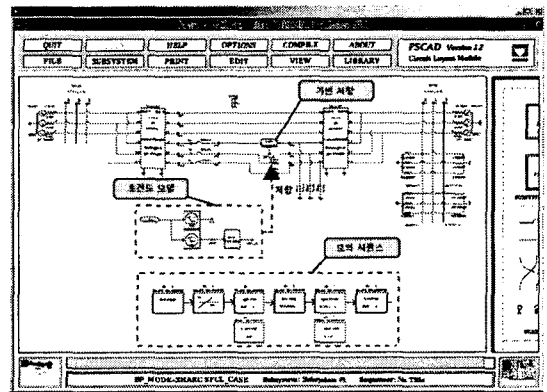


그림 5. 드래프트(draft) 화면(RTDS/PSCAD)

그림 5를 살펴보면 모의계통과 사고모의를 위한 시퀀스로 구성되었으며, 초전도 한류기 모델은 선로에 가변 저항을 연결하고 외부에서 그림 3에서 제시한 알고리즘에 의하여 저항이 연산되어 가변저항으로 입력되도록 구성하였다. 사고모의 시퀀스는 A상 기준으로 사고각이 0도인 경우에 3상 단락사고를 인가하였고 5주기 후에는 보호 시스템에 의하여 사고가 감지되어 해당선로가 차단되는 것으로 가정하여 5주기 후에 차단기를 개방(open) 하면서 사고를 제거하도록 구성하였다.

2.5.2 모의결과

그림 4의 모의계통에서 1선 지락사고 시의 초기 사고 전류는 약 40 kA 정도로써 현재 154 kV용으로 사용되고 있는 차단기의 정격전류는 31.5 kA와 50 kA이므로 50 kA의 정격차단용량을 가지는 차단기를 사용하면 되지만 3상 단락사고의 경우에는 80 kA정도의 사고전

류가 발생하므로 초전도 한류기를 이용하여 사고전류를 감소시킬 필요가 있다.

다음은 RTDS/PSCAD의 런타임(runtime) 화면이다.

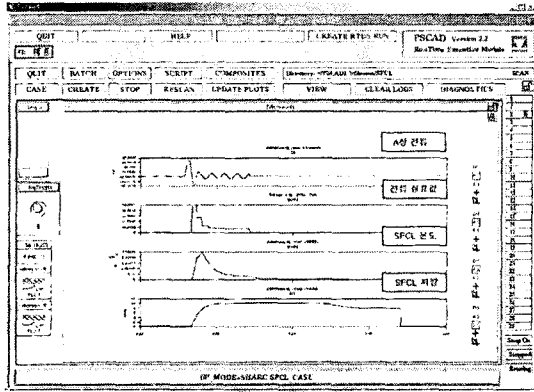
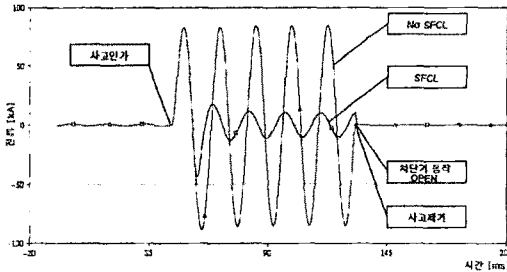
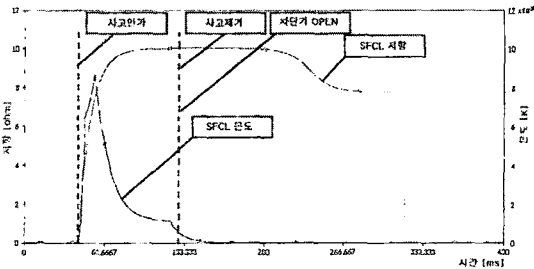


그림 6. 런타임(runtime) 화면(RTDS/PSCAD)

다음의 그림 7은 사고각이 0도 3상 단락사고를 인가하고 초전도 한류기가 있는 경우와 없는 경우 비교한 파형과 초전도 한류기의 저항과 온도 변화를 나타낸 것이다.



(a) 전류파형(0도, 3상 단락사고시)



(b) 저항 및 온도(0°, 3상 단락사고시)

그림 7. 모의 결과

2.5.3 결과분석

그림 7의 모의결과를 살펴보면 사고전류는 초전도 한류기에 의하여 1주기 이내에 퀘치가 발생하여 저항을 급격히 증가시키므로써 사고전류의 크기를 8 kA 수준까지 제한하였으며, 초전도 한류기의 온도는 사고직후 급격히 증가하다가 냉각장치와의 열교환을 통하여 열적 평형상태를 이루기 위하여 다시 감소하게 되는데 이 때의 온도는 냉각장치의 액체질소가 기화되면서 유지하게

되는 온도인 125.79 K 이하의 온도가 되는데, 냉각장치의 용량이 충분한 경우로 가정하면 77 K로 유지된다. 이때 모델의 최소동작시간인 0.015 ms 만큼의 시지연이 발생하였다.

3. 결론

본 논문에서는 저항형 초전도 한류기의 모델 개발방안과 활용방안을 제시하였다. 또한 사례연구를 통하여 모델을 검증하였다. 제시한 저항형 초전도 한류기 모델은 기존의 단순한 모델링 방식과 다르게 원래의 초전도체의 특성에 가깝게 동작하도록 모델링함으로써 기존의 단순한 저항의 스텝증가가 아닌 실제 초전도 한류기를 이용한 시험에서 얻을 수 있는 자속에 의하여 발생하는 저항 (flux flow resistance)에 의한 지수함수적인 저항증가를 포함하여 모의할 수 있을 뿐만 아니라 실제 초전도 한류기의 동작 성능에 영향을 미치는 냉각장치를 또한 모델링에 포함하므로 기존에 불가능하였던 초전도 상태로의 복귀 특성 등을 모의할 수 있다는 장점이 있어서 초전도 한류기 포함된 계통에 재래로 방식을 적용하는 경우 등에 유용하게 사용할 수 있다.

4. 향후 연구 계획

앞 절에서 설명한 바와 같이 154 kV와 같은 고전압용으로 개발되는 초전도 한류기에 대한 데이터는 실제 계통의 전류용량과 상승전압, 초전도 한류소자의 병렬 연결 개수 그리고 안정적인 사용을 위한 마진(margin) 등에 의하여 결정되므로 현재로서는 정확하게 데이터를 선정하는 것이 불가능하지만 차후에는 실제 초전도 한류소자의 데이터를 취득하여 실제 초전도 한류기에서 측정된 데이터와 비교함으로써 보다 근접한 모델을 개발할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 과학기술부, "고온초전도기술개발, 전력용 고온초전도 한류기 개발 및 특성해석", 보고서, 2001년 9월
- [2] 한국전력공사 전력연구원, "초전도 사고전류 제한 기술개발(1)", 2차년도 중간 보고서, 2001년 3월
- [3] 최효상 외 5명, "초전도 한류기를 적용한 계통의 3상 단락사고에 대한 EMTDC 시뮬레이션", 전북대학교 공업기술연구소, pp.77-82, 1999년
- [4] Hideyuki Kameda 외 1명, "Setting Method of Specific Parameters of a Superconducting Fault Current Limiter Considering the Operation of Power System Protection", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp.1355-1360, JUNE 1999
- [5] Yasunobu Yokomizu 외 3명, "A Study on Power Transient Stability due to Introduction of Superconducting Fault Current Limiters"