

RTDS 초전도한류기 해석모델 개발

Development of SFCL Model using RTDS

이승렬¹, 권중지¹, 윤재영^{1,*}, 이병준²

Seung Ryul Lee¹, Jung-Ji Kwon¹, Jaeyoung Yoon^{1,*}, Byongjun Lee²

Abstract: It is very important to study the protective relaying system from the viewpoint of technical analysis to apply superconducting power devices to real power systems. In this paper, we developed Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) analysis model using Real Time Digital Simulator(RTDS) for protective relay tests in power system with SFCLs. The RTDS model has the operation mechanism of a real SFCL system.

Key Words: superconductor, RTDS, protective relay, power system.

1. 서 론

초전도전력기기가 계통에 적용되기 위해서는 계통 측면에서 다양한 검토가 요구된다. 보호협조문제는 현재 계통측면에서 가장 중요한 문제점 중에 하나로서 대두되고 있다. 이와 관련하여 지금까지는 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC와 같은 Tool을 이용한 기본 연구 및 정성적 분석을 주로 하는 기초연구만이 수행되었다[1-2]. 보호협조 문제를 실제 운영을 반영하여 보다 정확히 검토하기 위해서는 실시간 전력계통 해석시뮬레이터 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 이용하여, 초전도 전력기기가 적용된 초전도 전력계통에서의 보호계전기 응용특성 시험이 필수적이다. RTDS 보호계전기 시험연구는 초전도 전력기기가 계통에 적용되었을 때, 실제 계통 내의 실제 보호시스템에 미치는 영향을 분석하고 문제 발생시 대안을 제시하기 위한 연구이다. 현재 전세계적으로 초전도한류기에 대한 RTDS 보호계전기 시험연구는 송전급 초전도한류기에 대한 기초시험만이 일부 이루어졌으며[3], 배전급 초전도한류기의 RTDS 계전기 시험은 전무한 실정이다. 이러한 RTDS 시험을 위해서는 초전도 전력기기의 RTDS 해석모델개발이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 현재 초전도사업단에서 개발하고 있는 배전급 초전도한류기[4-5]의 RTDS 계전기 시험을 위한 기본 해석모델과 시험계통모델을 개발하여 시뮬레이션 결과를 보인다.

2. RTDS 개요

¹정 회 원 : 한국전기연구원 전력연구단

²비 회 원 : 고려대학교 전기공학과

*교신저자 : jyyoon@keri.re.kr

원고접수 : 2008년 01월 10일

심사완료 : 2008년 03월 13일

게재확정 : 2008년 03월 13일

RTDS는 전력계통 실시간 디지털 시뮬레이터로서, 전력계통과 관련 설비를 특정 조건에서 모의하여 실시간으로 응용특성을 검토하기 위한 장비이다. RTDS는 전력계통의 과도현상을 실시간으로 구현하기 위한 하드웨어와 소프트웨어로 구성되어 있으며, 대표적인 응용분야는 다음과 같다.

- closed-loop testing of protective relays, and integrated protection and control schemes
- closed-loop testing of control systems for HVDC, SVC, TCSC, and synchronous machines, including AVR and PSS
- studying general AC system operation including behaviour of generation and transmission systems
- investigating power system equipment interaction
- studying interaction between integrated AC/DC systems
- developing FACTS devices and associated controls

상기 다양한 활용분야 중에서 본 연구와 관련된 보호계전기(Protective relays)의 응용특성 시험을 위한 closed-loop test 구성 예는 그림 2와 같으며, 하드웨어 구성 예는 그림 3과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 보호계전기 시험은 RTDS로 전력계통을 모의하고 실제 보호계전기를 RTDS와 연계하여 시험한다.

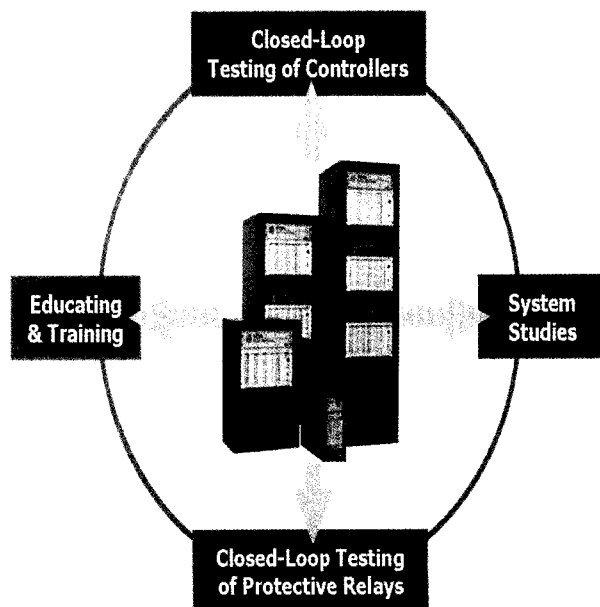


Fig. 1. RTDS system and applications.

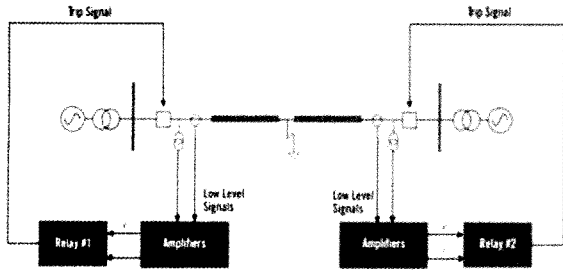


Fig. 2. Closed-loop testing of protective relays.

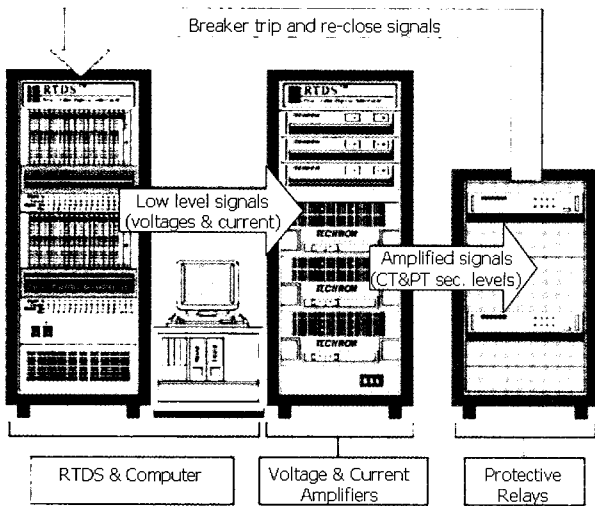


Fig. 3. Interfacing protective relays to RTDS.

3. 초전도계통 RTDS 보호계전기 시험방법

앞에서 설명한 바와 같이 RTDS에 실제 보호계전기의 응답특성을 시험할 수 있다. 본 연구에서는 향후, 그림 4와 같이 초전도(신)전력계통(6)과 초전도전력기기를 RTDS로 모의하고, RTDS에 실제계통에서 사용하고 있는 보호계전기를 연계한 후, 모델링된 초전도계통을 대상으로 보호계전기의 정상동작여부를 시험하고, 문제 발생시 이에 대한 대안을 제시할 예정이다.

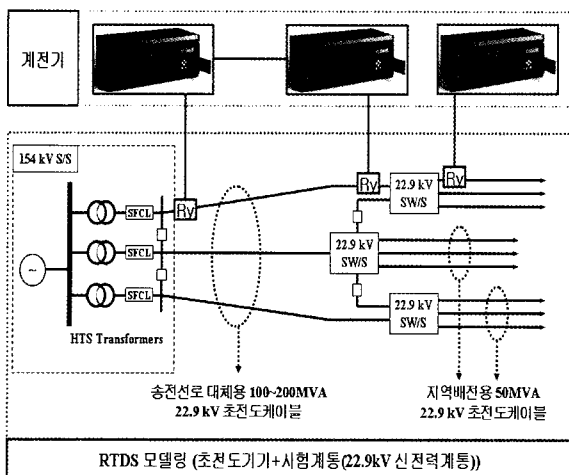


Fig. 4. RTDS relay test.

4. 초전도한류기 모델개발

4.1. 기본 동작특성

초전도계통을 대상으로 한 RTDS 보호계전기 시험을 위해서는 우선적으로 초전도기기의 실제 동작특성을 반영한 해석모델의 개발이 필요하다. 본 논문은 실제계통에서 보호협조 문제발생 가능성이 매우 높은 초전도한류기 RTDS 모델 개발을 목표로 하고 있다. 현재, 전 세계적으로 개발되고 있는 초전도한류기는 매우 다양하지만, 본 연구에서는 DAPAS 사업을 통해서 LS산전과 전력연구원에서 공동으로 개발하고 있는 22.9kV급 복합형 초전도한류기의 특성을 반영한 RTDS 기본모델을 개발하였다. 이는 LS산전에서 기 발표한 논문을 토대로 개발한 것으로서(4-5), 매우 기초적인 동작특성만을 고려한 해석모델이다. 향후, LS산전과 협의 하에 상세 시험데이터를 적용하여 본 모델을 수정 보완할 예정이다. 참고로, LS산전에서 개발 중인 복합형 초전도한류기의 구성은 그림 5와 같다.

대부분의 초전도한류기는 기본적으로 동작개시전류(임계전류) 이상의 고장전류가 흐르면 초전도상태가 붕괴되어 켄치 상태가 됨과 동시에 초전도체의 저항이 증가하는 특성을 갖는다. 그러나, LS산전에서 개발한 복합형 초전도한류기는 계통고장 발생시 초전도체는 고장감지 역할만 하고, 고속스위치 동작을 통해서 상전도 R(또는 L)이 투입되어 고장전류가 제한된다. 여기서 고장전류 제한을 위해서 투입되는 상전도 R은 초전도체가 아니기 때문에 시간에 따라 변하는 값이 아닌 고정 값을 갖는다.

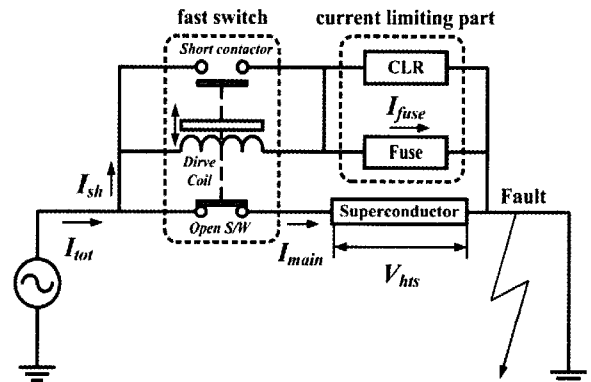


Fig. 5. Configuration of hybrid SFCL.

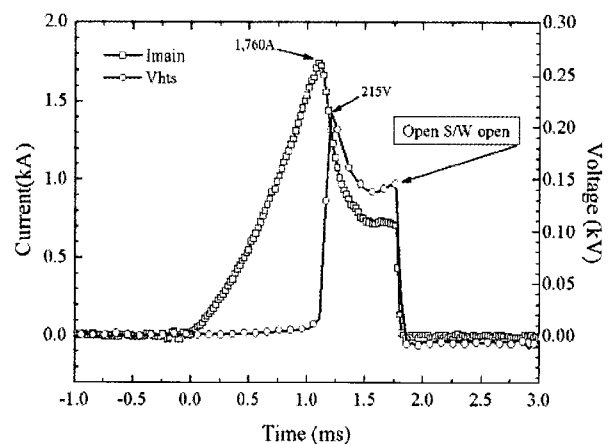


Fig. 6. Voltage and current during quench state of YBCO modules.

그림 6은 LS산전에서 기 발표한 논문의 초전도체 시험결과 그래프이다[4]. 여기서, 고장감지 역할을 하는 초전도체의 켄치시간은 0.7ms로서 매우 짧고, 초전도체 쪽으로 흐르는 고장전류가 전체 고장전류의 약 10% 이하이므로, 초전도체의 전체 고장전류의 제한효과는 미미하다고 할 수 있다. 따라서, 초전도한류기 모델링시 초전도체의 켄치 메카니즘은 고려하지 않아도 될 것으로 판단되어, 본 논문에서는 이를 간략화 하여 모델링을 수행하였다. 단, 고장감지 후 고속스위치 동작 완료시간의 시간지연은 매우 짧기는 하지만, 초전도한류기의 정확한 동작시간을 위해서 필요한 내용이므로 이를 고려하여 해석모델을 개발하였다.

4.2. RTDS 초전도한류기 기본모델

상기 4.1절에서 기술한 기본 동작특성을 기본으로 하여 RTDS 초전도한류기 기본모델을 개발하였다. 동작조건은 다음과 같다.

- 초전도한류기 켄치 조건
 - 한류기 통전전류 $I_{SFCL} \geq$ 한류기 동작전류 I_q
- 고속스위치 동작시간(한류 지연시간)
 - LS산전에서 기 발표한 논문의 시험데이터를 참조하여 0.7ms로 가정
- 고장전류 한류용 상전도 R
 - LS산전에서 기 발표한 논문의 시험데이터를 참조하여 고정 값 1Ω으로 가정

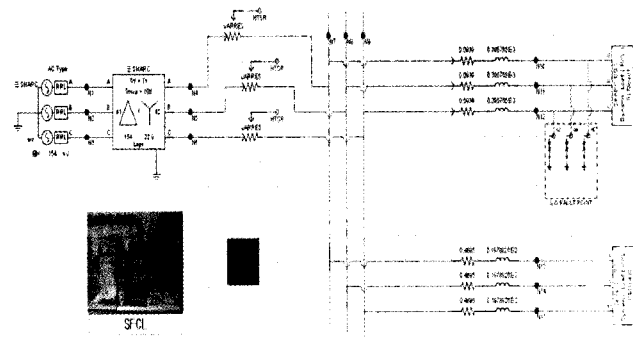


Fig. 7. Test system for RTDS relay test.

5. 시험계통 모델

본 장에서는 향후 초전도기기를 적용한 실계통을 대상으로 RTDS 보호계전기 연계시험을 하기 위한 시험계통을 모델링하였다. 본 논문의 RTDS 시험계통은 상전도 계통에서의 초전도한류기 적용에 따른 효과를 우선적으로 시험하기 위한 것이기 때문에, 초전도한류기를 제외한 타 전력기기는 상전도기기를 적용한 것으로 가정하였다. 시험계통 구성은 그림 7과 같으며, 여기서 사용된 관련 데이터는 다음과 같다.

- 154kV 변전소 : 등가전원으로 모의
 - 등가임피던스 : $1.778 \angle 80^\circ$ [Ω]
 - 전압 : 154 kV (1.0 PU)
 - 위상각 : 0°
- 주 변압기(MTR)
 - 용량 : 100 MVA
 - %임피던스 : 12 %
- 배전선로(피더)데이터

- CNCV 325 mm², 1km 기준
- 용량 : 10MVA
- R = 1.7906 %/km
- X = 2.8451 %/km
- 부하
 - 10MVA, 역률 0.92 기준
 - P : 9.2 MW
 - Q : 3.9 MVAR

고장해석에서 154kV 계통의 상세구성은 주변압기 2차측 22.9kV 배전계통에 큰 영향을 미치지 않기 때문에, 154kV 변전소 등가임피던스로 축약하여 모의하였다. 여기서, 154kV 차단기 용량인 50kA를 실계통에서 최악의 고장전류 조건으로 가정하여, 154kV 변전소 등가임피던스를 산정하였다.

주 변압기는 현재 한전에서 실계통 도입을 추진 중에 있는 100MVA급의 대용량 변압기로 가정하였다. 이 때, 변압기의 %임피던스는 현재 실계통에서 사용하고 있는 45/60MVA급 상전도변압기의 %임피던스 (11.5%~14.5%)와 비슷한 수준으로 하되, 22.9kV급 초전도한류기의 고장전류 제한 효과를 효과적으로 보여 주기 위해서 12%로 가정하였다.

피더용 배전선로는 실계통에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 CNCV 325 mm²를 사용하였으며, 상세 데이터는 한전에서 출간한 자료를 참조하였다[7].

부하는 피더의 최대용량인 10MVA를 기준으로 중부하 역률 0.92를 가정하여, 유효전력 9.2MW, 무효전력 3.9MVAR를 적용하였다.

6. 사례 연구

개발된 RTDS 초전도한류기 모델의 동작에 따른 고장전류 제한효과를 확인하기 위해서, 그림 6의 시험계통을 대상으로 하여 고장해석을 수행하였다. 계통고장 발생 위치는 154kV/22.9kV 변압기 2차측 22.9kV 모선(F1)과 부하 앞단(F2)이며, 3상 단락고장이 발생한 경우를 가정하였다. 고장전류 검토결과(rms)를 표 1에 요약하였으며, 각각의 해석 Case별 고장전류 결과와 고장지점 전압결과는 그림 8~11과 같다.

검토결과에서 고장위치에 따라서 초전도한류기를 적용하기 전에 고장전류가 19.79kA, 16.07kA에서 초전도한류기를 적용함에 따라 각각 10.94kA, 9.65kA로 감소함을 확인할 수 있다. 본 결과는 실제 개발 중인 초전도한류기의 정확한 과도특성까지는 포함하지 못하고 있다. 보다 신뢰성 있는 검토결과를 위해서는 해당 기기의 시험데이터가 필수적이다.

나아가서 실제 보호계전기의 연계시험을 통하여 기존 보호시스템의 정상동작 여부를 확인할 필요성이 존재한다.

Table 1. Summary of fault analysis(rms).

고장위치 SFCL 적용여부	변압기 2차측 22.9kV 모선 (F1)	부하 앞단 (F2)
SFCL 미적용	IF=19.79kA	IF=16.07kA
SFCL 적용	IF=10.94kA	IF=9.65kA

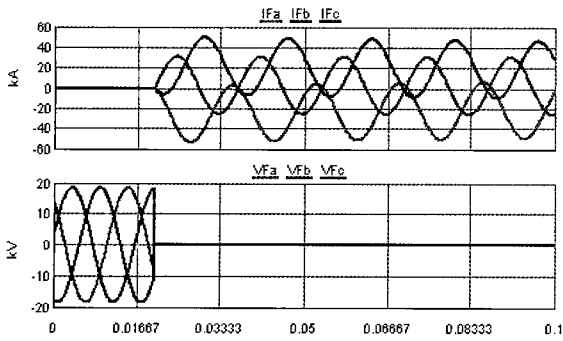


Fig. 8. Results(No SFCL, Fault at F1).

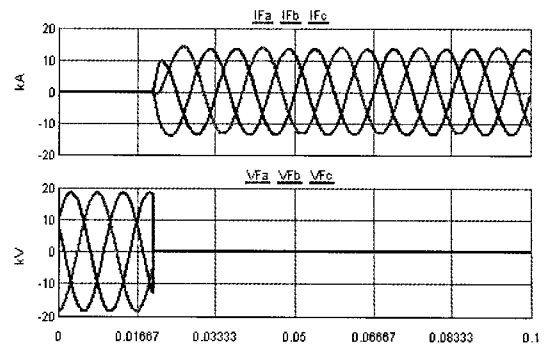


Fig. 11. Results(SFCL installation, Fault at F2).

7. 결 론

본 논문에서는 실제 보호계전기기를 RTDS에 연계하여 계전기 응답특성시험을 하기 위한 초기 단계로서, 초전도한류기의 RTDS 기본모델을 개발하였다. 본 모델은 DAPAS사업을 통해서 LS산전과 전력연구원에서 공동으로 개발하고 있는 복합형 초전도한류기를 대상으로 하였다. 현재 개발된 모델은 기 발표된 논문의 한류기 동작특성을 반영한 것으로서, 향후 LS산전 및 전력연구원과 협의하여 실제 실험데이터를 기반으로 하여 상세 모델을 개발할 예정이다. 또한, 실제 보호계전기기를 RTDS와 연계하여 초전도한류기가 적용된 실제통을 대상으로 기존 보호시스템(과전류계전기 동작, 재폐로 동작, 보호협조 등)의 정상동작 여부를 시험할 계획이다. 나아가서, 기존 보호협조시스템에 문제가 발생하는 경우 이에 대한 대안을 제시하고, 초전도계통에 적합한 보호알고리즘을 개발할 계획이다.

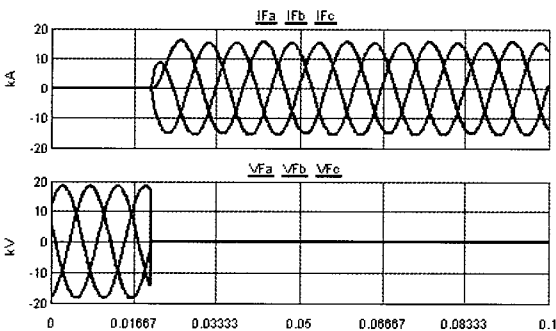


Fig. 9. Results(SFCL installation, Fault at F1).

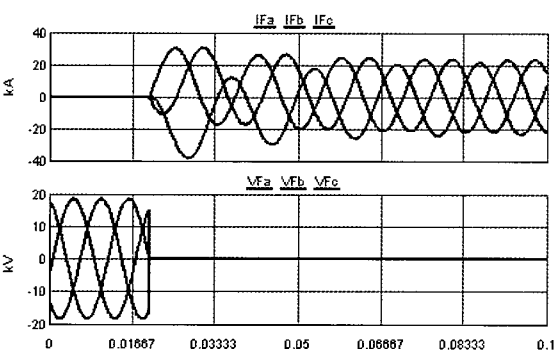


Fig. 10. Results(No SFCL, Fault at F2).

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 최효상, 현옥배, 고태국, "초전도 한류기를 포함한 계통의 지락사고에 대한 EMTDC 해석", 전기학회 논문지, 48B권 4호, pp161-166, 1999. 4.
- [2] 이승렬, 김종율, 윤재영, 이병준, "대용량 초전도 신 전력계통 보호방식 문제해결을 위한 기본연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 9권, 3호, 2007. 9.
- [3] J. Langston 외, "A generic real-time computer Simulation model for Superconducting fault current limiters and its application in system protection studies", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, June 2005.
- [4] B. W. Lee, K. B. Park, J. Sim, I. S. Oh, H. G. Lee, H. R. Kim, O. B. Hyun, "Design and Experiments of Novel Hybrid Type", IEEE MT-20 Conference, 2007. 8.
- [5] B. W. Lee, J. Sim, K. B. Park, I. S. Oh, "Practical Application Issues of Superconducting Fault Current Limiters for Electric Power Systems", IEEE MT-20 Conference, 2007. 8.
- [6] Jae-young Yoon, Seung Ryul. Lee, Jong Yul Kim, "Application Methodology for 22.9kV HTS Cable in Metropolitan city of South Korea", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, 2007. 6.
- [7] 한국전력공사, "배전 보호협조 기초", 2001.

저 자 소 개



이승렬(李昇烈)
1975년 9월 13일생, 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료, 현재 한국전기연구원전력연구단 전력기술팀 선임연구원.



윤재영(尹在暎)
1962년 7월 30일생, 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1993년 기술사 (발송배전), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학), 현재 한국전기연구원 전력연구단전력기술팀 책임연구원.



권중지(權重志)
1979년 10월 17일생, 2005년 경상대학교 전기공학과 졸업, 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 한국전기연구원전력연구단 전력기술팀 연구.



이병준(李炳峻)
1961년 7월 16일생, 1987년 고려대 공대전기공학과 졸업, 1991년 미국 Iowa 주립대 졸업(석사), 1994년 미국 Iowa 주립대 졸업(공학), 현재 고려대학교 전기공학과 교수.