

**RTDS를 이용한 디지털 보호계전기 동특성 성능검증 기반 구축에 관한 연구**

이재욱, 장병태, 최창열, 이명희\*, 노장현\*  
 한전 전력연구원, 한국전력공사\*

**Study on the establishment of dynamic performance test environment for the digital protective relay using RTDS**

Lee, Jae Wook, Jang, Byung Tae, Choe, Chang Yeol, Lee, Myeong Hee\*, No, Jang Hyun\*  
 KEPRI, KEPCO\*

**Abstract** - 디지털 보호계전기의 성능 검증은 정특성 성능 검증, 동특성 성능 검증, 내 환경 성능 검증으로 나누어진다. 이 중 동특성 성능 검증에 대한 중요성이 증가하고 있으나, 실시간 디지털 시뮬레이터에 대한 접근의 어려움으로 인해서 해당 기술의 보급이 용이하지 않았다. 전력연구원에서는 이러한 점을 해결하고 관련 기술의 보급을 위해서 디지털 보호계전기 동특성 성능 검증의 기반을 마련하였으며, 이 기반은 성능 검증을 위한 계통 모델과 성능 검증 절차서로 각각 구성되어 있다.

**1. 서 론**

국내에서 송전급 이상의 디지털 보호계전기의 대부분은 한전 계통에서 도입 및 운전되고 있다. 송전선로 보호계전기의 경우 가장 먼저 디지털화가 시작되었으며, 따라서 현재 대부분의 송전선로 보호계전기는 디지털 보호계전기가 적용되고 있다. 모선 보호계전기와 변압기 보호계전기의 경우 최근에 디지털 보호계전기가 도입되어서 실 계통에 적용되기 시작했다. 기존의 EM-Type 보호계전기와는 달리 디지털 보호계전기는 각각의 보호계전 요소가 별도의 물리적인 장치로 구성되지 않고, 단일 보호계전기 내에 소프트웨어적인 보호 계전 요소로 구성되어 있다. 또한 다수의 보호 계전 요소의 결과 값은 다양한 조건하에서 적절하게 사용될 수 있도록 인력의 시퀀스 로직(Sequence Logic)을 통해서 차단 신호(Trip Signal) 또는 경보 신호(Alarm Logic)를 생성하게 된다. 이러한 특성을 고려했을 때, 디지털 보호계전기에 대해서는 일반적인 개체 시험보다는 다양한 고장 조건에 대한 종합적인 동작 특성에 대해 검증을 수행할 필요성이 증가한다. 따라서 디지털 보호계전기에 대한 동특성 성능검증을 원활하게 수행할 수 있게 하는 성능 검증 기반으로서 표준화된 계통 모델과 성능 검증 절차서가 필요하다. 본 논문에서는 한전의 보호방식을 기준으로 하여 동특성 성능 검증 기반의 구축 과정 및 결과에 대해서 기술한다.

**2. 본 론**

**2.1 성능 검증 기반 구축이 필요한 보호계전기**

765kV를 제외한 송변전급 디지털 보호계전기의 성능 검증을 기준으로 하였을 때, 다음의 보호계전기 또는 보호계전 방식에 대해서 성능 검증 절차를 구축할 필요가 있다.

- 154kV 디지털 방향비교 방식 송전선로 보호계전기
- 154kV PCM 전류차동 방식 송전선로 보호계전기
- 345kV 디지털 방향비교 방식 송전선로 보호계전기
- 345kV PCM 전류차동 방식 송전선로 보호계전기
- 154kV 전류비율차동 방식 모선 보호계전기
- 345kV 전압비율차동 방식 모선 보호계전기
- 154kV 전류비율차동 방식 변압기 보호계전기

- 345kV 전류비율차동 방식 변압기 보호계전기

**2.2 자료 분석**

각각의 보호방식에 대해서 시험 항목을 선정하고 해당 시험 항목에 대한 시험 방법을 결정하기 위해서는 다양한 자료 분석 과정이 필요하다. 송전선로 보호계전기의 경우 국내에 도입되어 적용 중인 제품이 다양하므로, 다음과 같은 제작사 및 제품 종류에 대해서 보호계전기에 내장된 보호계전요소, 각 보호계전요소별 알고리즘 및 특성 등에 대해 분석을 수행하였다.

- Xelpower(거리계전기, PCM 전류차동계전기)
- GE(거리계전기)
- Toshiba(거리계전기, PCM 전류차동계전기)
- Mitsubishi(거리계전기, PCM 전류차동계전기)
- ABB(거리계전기, PCM 전류차동계전기)
- SEL(거리계전기, PCM 전류차동계전기)

또한 시험 대상 보호계전기 중 실제 성능 검증에 사용되는 디지털 보호계전기에 대해서 매뉴얼, 정정 방식 및 정정 예시, 시험 성적서 등에 대한 분석 역시 필요하다. 여기에 대해서는 다음과 같은 보호계전기에 대해서 분석을 수행하였다.

- 송전선로 보호계전기
  - 154kV 보호용 MDT-F(일본 Mitsubishi사)
  - 154kV, 345kV 보호용 311L-7(미국 SEL사)
- 모선 보호계전기
  - 154kV 모선 보호용 MBP-H1(일본 TMT&D사)
- 변압기 보호계전기(일본 TMT&D사)
  - 345kV 변압기 주보호용 비율차동계전기 GRT100
  - 345kV 변압기 후비보호용 거리계전기 GRZ100

이외에도 국내·외에서 수행된 동특성 시험성적서의 분석을 통해서 송전선로 보호용 거리계전기와 PCM 전류차동계전기의 각 보호계전요소별 시험항목과 시험조건, 시험방법의 도출에 활용하였다. 그리고 시험 환경 구축을 위해서 RTDS 매뉴얼(3PC), PSCAD 매뉴얼(Version 2.2), 국내·외 관련 기술자료 및 논문, 한전의 계통보호 관련 자료, 참고 서적 등에 대한 분석 역시 수행하였다.

**2.3 계통 모델링**

계통 모델링을 위한 환경으로는 PSCAD/RTDS를 사용하였다. 송전선로 등가 임피던스, 변전소 모선 등가 임피던스, 변압기 무부하 시험 데이터 등을 사용하여 계통 모델링을 수행하였으며, 최대한 실 계통의 특성을 반영하였다. 본 연구를 통해서 구축된 계통 모델은 다음과 같은 종류로 나누어진다.

- 154kV 송전선로 보호계전기 성능 검증용 계통 모델
- 345kV 송전선로 보호계전기 성능 검증용 계통 모델
- 154kV 모선 보호계전기 성능 검증용 계통 모델
- 345kV 모선 보호계전기 성능 검증용 계통 모델

- 154kV 변압기 보호계전기 성능 검증용 계통 모델
- 345kV 변압기 보호계전기 성능 검증용 계통 모델

이 중 송전선로 보호계전기 성능 검증용 계통 모델의 경우, 기본 모델 외에 SOTF(Switch-onto-the-fault) 시험, 중 부하 조류 시험, Stub 시험, 고장 전류 반전 대책 시험 등을 위한 계통 모델들이 별도로 구성되어 있다. 또한 345kV 변압기 보호계전기 성능 검증용 계통 모델의 경우 후비 보호에 사용되는 거리계전 방식의 성능 검증을 고려하여 1차 측 고장 발생 모델, 2차 측 고장 발생 모델 등으로 다시 세분화되며, 여자 돌입 전류 시험을 위한 모델, 과여자 특성 시험을 위한 모델 등 역시 별도로 구성되어 있다. [그림 1]과 [그림 2]는 각각 154kV 송전선로 계통 모델의 구성과 PSCAD 상에서 구현된 모델의 일부를 나타내고 있다.

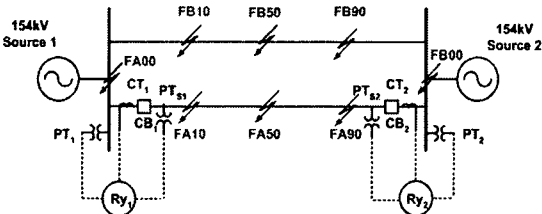


그림 1. 154kV 송전선로 시험을 위한 계통 구성

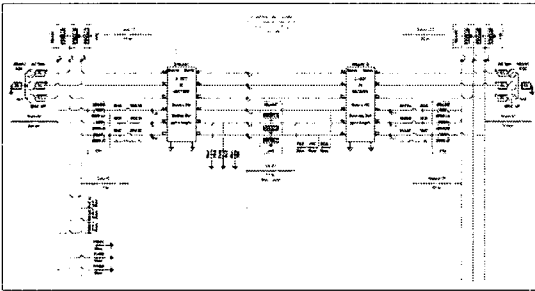


그림 2. PSCAD를 통해서 구현된 송전선로 계통

### 2.4 RTDS를 이용한 시험 환경 구축

RTDS를 이용한 디지털 보호계전기 동특성 시험 환경 구축을 위해서는 RTDS 랙 및 구성 요소인 3PC 카드, IRC 카드, WIF 카드, HVIF 판넬, ODAC 16카드, GBUS Controller, 전류 및 전압 증폭용 앰프, 광 절연 큐비클(Optical Isolation Cubicle) 등에 대한 분석과 이를 바탕으로 한 결선 작업이 필요하다. 세부적으로는 RTDS 랙 내에서의 신호 전달, RTDS 랙 사이의 신호 전달, 앰프에서의 증폭 방식, 각 구성요소들 간의 연결 방안 등에 대한 이해가 필요하다. 시험 환경 구축은 보호계전기를 시험 대상으로 하는 경우와 보호배전반을 시험 대상으로 하는 경우에 따라서 달라지며, 사용되는 보호계전기에 따라 서로 달라진다. 특히 송전선로 보호계전기의 동특성 시험시 재페로 성능의 검증을 위해서는 보호계전기의 Trip 및 Close 신호를 RTDS로 제공하고, PSCAD의 차단기 모델의 상태 정보(52a 또는 52b)를 보호계전기에 제공하는 것이 필요하다. 이러한 연결을 통해서 RTDS의 실시간 특성을 최대한 이용할 수 있으며 페루프 시험이 가능하다. [그림 3]은 송전선로 보호계전기의 1Φ+3Φ 1회 고속도 재페로 성능 검증을 위해서 송전선로 보호계전기의 3상(A상, B상, C상) Trip 신호 및 Close 신호를 광 절연 큐비클에 연결한 모습이다.

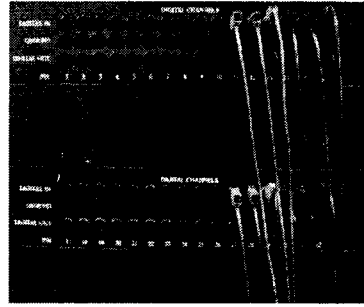


그림 3. 광 절연 큐비클에 연결된 3상 Trip 신호 및 Close 신호

### 2.5 디지털 보호계전기 성능 검증

작성된 계통 모델에 대한 검증과 성능 검증 절차서의 신뢰성 확보를 위해서 디지털 보호계전기를 사용하여 동특성 시험을 수행하였다. 송전선로 보호계전기로는 SEL사의 SEL-311L-7 모델을 사용하였으며, 방향비교방식과 PCM 전류차동방식에 사용되는 통신 장치로서는 RFL사의 IMUX2000 모델을 사용하였다. 통신 장치 사이에는 2km의 광 케이블과 광 신호 감쇠 장치가 연결되어 있다. [그림 4]는 2대의 SEL-311L-7 모델과 2대의 IMUX2000 모델, 그리고 보호계전기의 정점 및 결과 분석을 위한 PC로 구성된 시험 환경을 나타내고 있다.

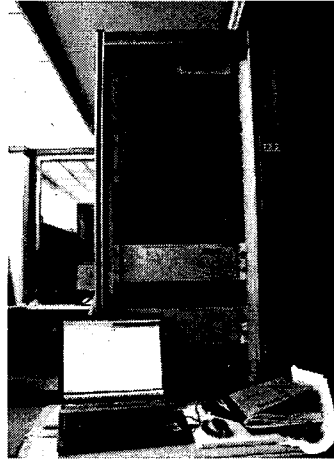


그림 4. SEL-311L-7 모델과 IMUX2000 모델

모선 보호계전기로는 TMT&D사의 MBP-H1 모델을 사용하여 동특성 시험을 수행하였으며, 변압기 보호계전기로는 주 보호계전기로서 TMT&D사의 GRT100 모델을, 후비 보호계전기로는 GRZ100 모델을 각각 사용하였다. [그림 5]는 154kV 모선 보호배전반의 정면과 후면을 각각 나타내고 있다.

### 2.6 성능 검증 절차서의 구성

각각의 성능 검증 절차서는 단독으로 사용이 가능하도록 구성이 되어있다. PSCAD 운용 절차서와 RTDS 운용 절차서를 제외한 8가지 절차서 모두 PSCAD 환경 구성과 RTDS 환경 구성에 대해서 해당 보호계전기 또는 해당 보호방식의 검증에 적합하도록 기술되어 있다. PSCAD 환경 구성의 경우 작성된 계통 모델에 대한 설명, 각각의 구성 요소에 대한 데이터 변환, 입력 예시, 고장모의 방식 등에 대한 설명을 포함하고 있다.

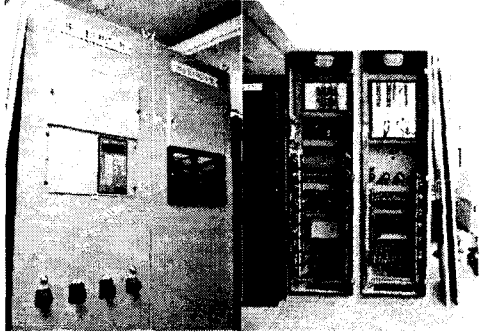


그림 5. 시험에 사용된 모선 보호배전반

RTDS 환경 구성의 경우 해당 보호계전기의 성능 검증에 필요한 결선에 대한 예시와 설명을 포함하고 있다. 성능 검증 항목에서는 해당 시험의 의미, 고장 발생 위치 또는 조건, 상세한 검증 절차, 시험 성적서가 포함되어 있다. 다음은 345kV 디지털 방향비교 방식 송전선로 보호계전기 성능검증 절차서의 목차이다.

- 제1절 PSCAD 환경 구성
- 제2절 RTDS 환경 구성
- 제3절 단순 고장 시험
- 제4절 다중고장 시험
- 제5절 진전고장 시험
- 제6절 CT 포화 시험
- 제7절 CT 개방 시험
- 제8절 PT Failure 검출 시험
- 제9절 고저항 지락 한계 검출 시험
- 제10절 Switch-onto-The Fault 시험
- 제11절 고장전류 반전 대책 시험
- 제12절 지근단 고장 시험
- 제13절 진상 Over-reach 대책 시험
- 제14절 단시간 고장 시험
- 제15절 중부하 조류 시험
- 제16절 STUB 시험

## 2.7 성능 검증 환경 구성을 위한 절차서

지금까지 기술한 성능 검증용 계통 모델과 성능 검증 절차서 외에 PSCAD 운용 절차서와 RTDS 운용 절차서가 추가로 작성되었다. 일반적인 보호계전기 시험 장비와는 달리, RTDS는 실시간 폐루프(Closed-loop) 시험이 가능한 장점 등을 가지고 있다. 그러나 사용자 입장에서는 소프트웨어(PSCAD)와 하드웨어(RTDS)를 유기적으로 사용해야 하므로, 사용자가 동특성 시험에 대해 쉽게 접근하는 것을 어렵게 하고 있다. 이러한 문제점을 해소하고자 보호계전기 성능 검증 관점에서 PSCAD 운용 절차서와 RTDS 운용 절차서를 작성하였다.

PSCAD 운용 절차서의 경우, PSCAD를 구성하고 있는 Draft Module, RunTime Module, T-Line Module에 대한 사용 방법, Draft 상에서 계통 시뮬레이션을 위한 환경 구성 방법, 각 Component 사용 방법, Sequence 구성 방법 등을 포함하고 있다. 또한 외부 기기와의 연계 방법과 Draft 구성 절차, 예러 발생시 대처 방법 등에 대한 내용도 포함시켰다. RTDS 운용 절차서의 경우, RTDS 하드웨어의 구성에 대해서 상세하게 기술하였으며, 아날로그 출력신호 튜닝 방법 등에 대해서도 기술하였다. 또한 다음의 내용에 대해서 사용자가 쉽게 활용할 수 있도록 각각의 동작 원리, 사용 방법, 실제 결선 예시 등을 기술하였다.

- RTDS의 아날로그 출력 사용 방법
- 보호계전기 Trip/Reclose 접점 신호 입력 방법
- 차단기 접점 신호를 보호계전기에 제공하는 방법

- 광절연 큐비클을 이용한 보호계전기 Trip/Reclose 접점 신호 입력 방법

## 3. 결 론

RTDS를 이용한 디지털 보호계전기 동특성 성능 검증 기반의 구축을 위해서 17개의 계통 모델과 10부의 성능 검증 절차서가 작성되었다. 이를 활용하여 기존 디지털 보호계전기 및 신형 디지털 보호계전기의 성능 검증에 적용할 수 있으며, 국내외 성능 시험 기관에서 RTDS를 이용하여 디지털 보호계전기의 성능 검증을 수행하였을 때 성능 검증 결과의 신뢰성 및 적정성 검토에도 활용할 수 있다. 또한 향후 변전소 자동화 시스템의 핵심 구성 요소인 IED의 개발 및 성능 검증 시에도 IED에 내장된 보호알고리즘의 검증을 위한 기반으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, "디지털 보호계전기 성능 검증을 위한 계통 모델 작성 및 검증 절차 수립", 2005. 4
- [2] 한국전력공사, "보호계전기 정정 지침", 1999. 1
- [3] 전력연구원, "RTDS 하드웨어-전력 계통 해석용 시뮬레이터 개발 및 설치", 2001. 10
- [4] 한국전력거래소, "급전계통도면철", 2002
- [5] 유호전기공업주식회사, "154kV Bus Protection Panel (10F/D, DUAL) 도면"
- [6] 선도전기, "345/154/23kV TRANSFORMER PROTECTION PANEL 도면"
- [7] SEL, SEL-311L-7 Relay Instruction Manual
- [8] M. Kezunovic, Y. Q. Xia, Y. Guo, C. W. Fromen, D. R. Sevcik, "Distance Relay Application Testing using a Digital Simulator", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 1, pp. 72-82, Jan. 1997.