

**PSCAD/RTDS에서 345kV 변압기 모델링을 통한  
변압기용 보호계전기의 동특성 시험**

권기백, 김철환

대덕대학 전자정보과 성균관대학교 정보통신공학부

**Dynamic Performance Test of Power Transformer Protective Relay  
using 345kV Transformer Modelling of PSCAD/RTDS**

Kwon Gi Baek, Kim Cjul Hwan,  
Daeduk College, Sung Kyun Kwan Univ.

**Abstract** - This paper, for the establishment of power system models and test procedures for the dynamic performance test of transformer protective relay, presents power system model, environment establishment between RTDS and protective relay, and the dynamic performance test generated internal fault or external fault.

**1. 서 론**

지금까지 디지털 보호계전기의 성능 검증은 동작치 특성 시험 등 정특성 시험(Steady-state Performance) 검증 위주로 수행되어 왔으며, 신규개발 디지털 보호계전기 및 신규 도입 디지털 보호계전기에 대해서는 정특성 시험과 함께 RTDS(Real Time Digital Simulator), 아날로그 시뮬레이터 등의 시뮬레이터를 이용한 동특성(Dynamic Performance) 시험을 병행하여 왔다. 동특성 시험은 보호계전기를 구성하는 각 계전요소의 특성을 검증하는 정특성 시험과는 달리 보호계전기에 내장된 계전요소들의 유기적인 성능을 검증할 수 있는 시험으로서, 단일 보호계전요소만으로 구성된 기존의 아날로그 보호계전기와는 달리 다기능의 보호계전요소를 탑재하고 있는 디지털 보호계전기를 검증하기 위해서는 필수적인 성능 검증 수단이다.

따라서 본 논문에서는 345kV 변압기 보호용 디지털 보호계전기의 성능 검증을 위한 계통 모델링, RTDS와 보호계전기 간의 시험 환경 구축, 변압기 내 외부고장에 대한 보호계전기의 동특성 시험 및 분석에 대해서 언급한다.

**2. 본 론**

**2.1 PSCAD/RTDS에서의 345kV 변압기 모델링**

345kV 변압기를 모델하는데 있어서, 내부고장 모의에 사용된 단상 3권선 변압기와 그외 고장모델에 사용된 3상 3권 모델로 나뉘어 진다. 아래와 같은 누설리액턴스 3배의 차이만 있을 뿐이다. 변압기 모델에서 사용한 데이터는 양주 변전소에 설치된 변압기 시험성적서를 활용하였으며, PSCAD/RTDS의 3상 3권선에 맞게 변환하는 과정은 다음과 같다.

**2.1.1 345kV 변압기 시험성적서 데이터**

- 규격 : 1 ∅ 166.7MVA 345/161/23kV
- %임피던스 : %Z<sub>EH</sub> = 9.57 [%], %Z<sub>EL</sub> = 14.58 [%], %Z<sub>HL</sub> = 10.21 [%]
- 전부하 손실 : P<sub>load loss</sub> = 305.764[kW]
- 무부하 손실 : P<sub>no-load loss</sub> = 56.213[kW]

·% 여자전류 : %i<sub>m</sub> = 0.23 [%]

**2.1.2 PSCAD 변압기 모델 입력데이터로 변환**

상기 데이터를 PSCAD의 345kV 단상 3권선 변압기 모델의 입력 데이터로 변환하는 과정은 다음과 같다.

① 무부하 손실[p.u] : [kW] 단위의 무부하 손실 데이터를 [p.u] 단위로 변환한다. 여기서는 전압과 무부하 손실을 이용하여 권선저항을 구할 수 있다.

$$P_{NoLoadLoss}[p.u] = \frac{P_{NoLoadLoss}[kW]}{U_{\text{상}}^2} = \frac{56.213}{166.7 \times 1000} = 0.000337211[p.u]$$

② 1-2차간 정상분 누설리액턴스[p.u] 데이터 입력

$$R[\%] = \frac{P_{Load Loss}}{\text{용량}} \times 100 = \frac{305.765 \times 1000 \times 100}{166.7 \times 1000000} = 0.183422316$$

$$X[\%] = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{(9.57^2 - 0.183422316^2)} = 9.568242067$$

$$X[p.u] = X[\%] \times 0.01 = \frac{9.568242067}{100} = 0.09568242067$$

③ 1-3차간 정상분 누설리액턴스[p.u] 데이터 입력

$$R[\%] = \frac{P_{Load Loss}}{\text{용량}} \times 100 = \frac{305.765 \times 1000 \times 100}{166.7 \times 1000000} = 0.183422316$$

$$X[\%] = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{(14.58^2 - 0.183422316^2)} = 14.57884619$$

$$X[p.u] = X[\%] \times 0.01 = \frac{14.57884619}{100} = 0.1457884619$$

④ 2-3차간 정상분 누설리액턴스[p.u] 데이터 입력

$$R[\%] = \frac{P_{Load Loss}}{\text{용량}} \times 100 = \frac{305.765 \times 1000 \times 100}{36.7 \times 1000000} = 0.833147139$$

$$X[\%] = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{(10.21^2 - 0.833147139^2)} = 10.17595037$$

$$X[p.u] = X[\%] \times 0.01 = \frac{10.17595037}{100} = 0.1017595037$$

⑤ 여자전류(magnetizing current) [p.u]

변압기의 주어진 데이터를 이용하여 [p.u] 단위로 환산한다. i<sub>m</sub>[p.u] = i<sub>m</sub>[%] × 0.01 = 0.23 × 0.01 = 0.0023

⑥ 공심 리액턴스(Air core reactance) [p.u]

$$X_{air}[p.u] = \%X \times 2 \times 0.01 = 0.20351901$$

대략 누설리액턴스 2배로 설정한다.

**2.2 변압기 보호계전기 시험 검증용 계통 모델**

345kV 변압기 보호방식은 주보호와 후비보호로 구성되어 있다. 주보호는 4단자용 비올차동계전방식, 2차 측 및 3차 측의 단락보호로 Zone1, Zone2로 구성되는 한시거리계전방식, 지락보호로 방향성지락과전류계전방식을 적용하며, 3차 측 단락보호로 과전류계전방식, 지락보호로 지락과전압계전방식을 적용하고 있다.

이러한 345kV 변압기 보호방식의 성능을 검증하기 위해서, 전원, 변압기, 선로, CT, CVT 등을 사용하여 345kV와 154kV 전원을 양단에 전원을 공급하도록 하였으며, 송전선로는 가공선로 1회선을 사용하여 다음 그림1과 같이 계통을 구성하였다.(부록1 참조) 특히, 변압기의 고장

모델을 이용함에 있어서 RTDS상 절점 및 스위치 제약으로 아래의 표1 처럼 내부고장, 외부고장, 여자돌입상태, 과여자상태, VT실폐(VTF), 차단실폐보호(BFP) 등으로 구분하여 모델링 하였다.

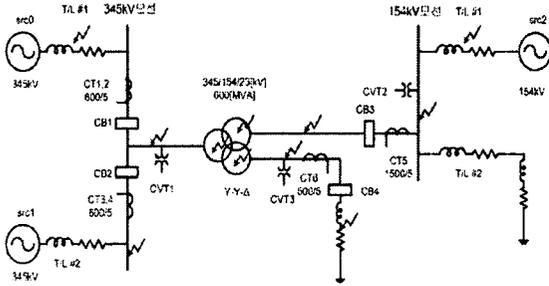


그림 1. 변압기 보호계전기 성능 검증용 계통 모델

고장 종류	고장 위치	고장 명	
내부 고장	변압기 외부단자 고장	1차측(345kV) 2차측(154kV) 3차 측(23kV)	FHTO,FMTO,FL,T0
	변압기 내부고장 20%		FHT20,FMT20,FL,T20
	변압기 내부고장 50%		FHT50,FMT50,FL,T50
외부 고장	선로(50%지점) 및 모선	1차측(345kV)	FH1.50,FH30
	선로(50%지점) 및 모선	2차측(154kV)	FML50,FMB0
	부하단	3차 측(23kV)	FLO

여자돌입상태, 과여자상태, VTF, 차단실폐보호의 경우 별도로 모델링

표 1. 보호계전기 성능검증을 위한 고장 종류 및 위치

### 2.3 RTDS와 보호계전기 간의 시험 환경 구성

다음 그림2와 같이 주보호(비율차동보호) 계전기 1대와 후비보호(거리,방향지락 과전류, 단락/지락 과전류, 과전압 요소 포함)계전기 1대의 구성된 변압기 보호계전방식의 성능시험을 하기 위해 RTDS Rack 즉, 3PC 기준으로 기본적으로는 1랙이 필요하다.

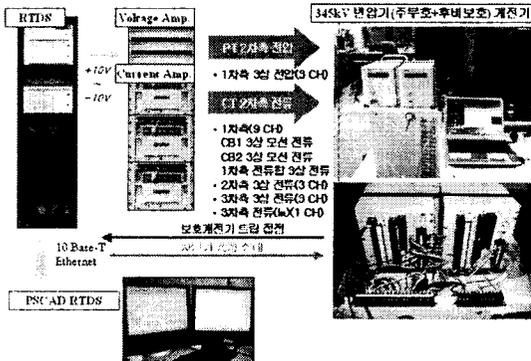


그림 2. PSCAD/RTDS 동특성 시험 환경 구축

ODAC16 카드의 설치 위치에 따라서 2개 이상의 RTDS 랙이 필요할 수도 있다. 사용되는 ODAC16 카드가 모두 동일한 RTDS 큐비클 내에 위치하고 있는 경우 RTDS Rack은 1랙만 있으면 되나, ODAC16 카드가 2개의 RTDS 큐비클에 나누어져 있는 경우 RTDS Rack은 2랙 이상이 필요하다.그리고 ODAC16 카드는 출력단 3채널 기준 7개가 필요하며(주보호:전류 12 CH, 후비보호:전류 4CH(3차측 NCT 선택),전압 3CH), 전압 앰프(TEC3620

기준) 3대, 전류 앰프(TEC7700 기준) 16대, 보호계전기 정정 및 동작결과 확인용 PC 1대가 필요하다.

보호계전기가 LAN을 통한 정정 및 통신 기능을 지원하는 경우, PC는 LAN 포트를 내장하고 있어야 하며, RS-232C 통신만을 지원하는 경우, PC는 RS-232C 포트를 내장하고 있어야 한다. 그리고 PC가 USB 포트만을 지원하는 경우, 'RS-232C를 USB로 변환 케이블'이 추가로 필요하다.

마지막으로 DC 전원 공급 장치(DC 125V 기준) 1대가 필요하다. 이것은 차단기 접점 정보(DC 125V)를 보호계전기에 제공하기 위해서 사용된다.

### 2.3 변압기 보호계전기 동특성 시험 및 분석

표1에서 나타낸 것 처럼 내부고장(1차측 내부고장모델, 2차측 내부고장 모델, 3차측 내부고장 모델), 외부고장(1차측에서 주보호와 후비보호, 2차측에서 주보호와 후비보호), 여자돌입상태(여자돌입상태와 여자돌입상태에서 변압기 내부고장), 과여자상태, VTF, 차단실폐보호에 대해 동특성 시험 및 분석을 해보았다. 여기서는 지면상 내·외부 고장만 살펴보고자 하겠다.

#### 2.3.1 내부고장

변압기 1, 2, 3 차 측의 권선지락고장, 상간단락고장 등의 내부 고장을 모의하여 과도 상태가 포함된 전압, 전류를 인가되었을 때에도 주 보호요소인 전류 비율 차동계전요소, 1, 2차 측의 후비보호요소인 단락용 거리계전요소와 방향지락과전류계전요소, 3차 측 후비보호요소로 과전류 및 지락과전류요소, 지락과전압요소로 정확히 고장을 검출하여 정동작하는 가에 대한 응답특성을 시험하고자 한다.

주보호 : 전류 비율 차동계전요소, 단순차동요소

후비보호(1, 2차 측) : 단락거리계전요소 + 방향지락과전류계전요소

후비보호(3차 측) : 지락 및 단락과전류계전요소 + 지락과전압계전요소

그림 1.에서 고장위치에 따라 다양한 고장을 모의하였다. 여기서는 1차 측 50%지점 내부고장(FHT50)에 대해서 살펴 보고자 한다.

PSCAD의 DRAFT상에서 1차 측 내부고장지점(Vf/V1) 50%로 설정하여 컴파일을 완료한 후, RunTime 상에서 다음과 같은 순서로 시험을 수행한다.

고장 저항 설정 : 지락 고장의 경우 0.1Ω, 단락 고장의 경우 0.02Ω

고장 지속 시간 설정 : 단시간 고장의 경우 150ms

고장 상 선택 : 해당하는 Switch를 On 상태로 변경

START를 사용해서 정상상태 모의 시작(그림 3에서와 같이 보호계전기의 정상상태의 계속치 및 동작상태를 확인)

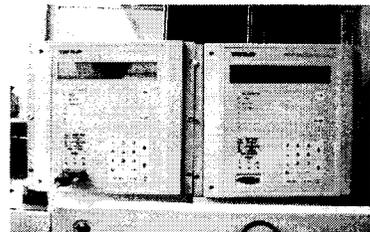


그림 3. 보호계전기 동작상태 확인

- 1 FAULT 버튼을 사용하여 고장 발생
- 2 주보호 및 후비보호계전기 동작요소 확인

- ① RunTime에서 주·후비보호계전기 동작시간 확인
- ② RunTime에서의 전압 및 전류 파형 확인
- ③ 시험성적서에 있는 고장 종류에 대해서 순차적으로 시험을 수행
- ④ 필요한 경우 보호계전기에 저장된 동작 파형(오실로 그래프)을 확인
- ⑤ 시험성적서에 기록한다.

그림 6은 주보호 계전기에서 저장된 Disturbance Recording Data를 보여주고 있다. 각 단자의 전류와 계전요소상태 그리고 최종 트립까지 시간에 대해 기록된 파형이며 이것을 토대로 좀더 자세하게 계전요소의 응답 상태를 검증할 수 있다.

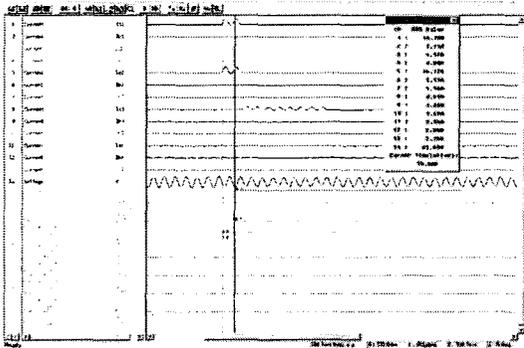


그림 6. Disturbance Recording 화면

그림 8. 은 후비보호 계전기에서 저장된 Disturbance Recording Data를 보여주고 있다. 각 단자의 전류와 계전요소상태 그리고 최종 트립까지 시간에 대해 기록된 파형이며 이것을 토대로 좀더 자세하게 계전요소의 응답 상태를 검증할 수 있다. 그리고 분석 보조루틴을 통해 R-X 임피던스 궤적과 측정된 임피던스(Zab, Zbc, Zca)의 정보를 알 수 있으며, 지락고장이기 때문에 영상분(Io) 전류가 발생됨을 알 수 있다. 동작된 후비 계전요소를 살펴보면, 방향과전류계전기(DEF-Vo)가 동작하고 동시에 단락거리계전기요소(Z2S-AB, Z2S-CA)가 동작됨을 알 수 있다. 즉 설정된 Zone 2 임피던스 궤적 안에 고장 발생함을 인식하고 동작됨을 알 수 있다. 사실 Zone2의 한시지연시간을 0.4[ms] 정도 설정하지만, 여기서는 시험시간을 줄이기 위해 지연시간을 0.0[ms]로 설정되어 순시요소로 동작하도록 하였다. 표 3~표 4는 상기 시험에 대한 시험 결과를 나타낸 것이다.

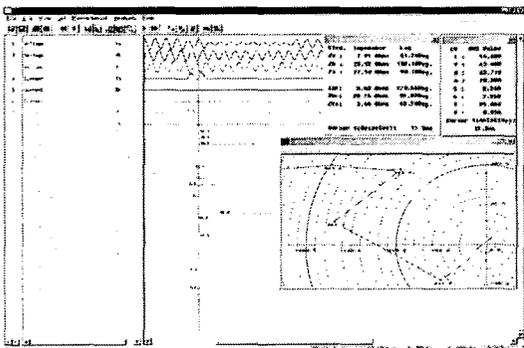


그림 8. 후비보호 계전기에서 저장된 Disturbance Recording Data

No	Fault Point	Fault Phase	Main Protective Relay Panel Status							RTDS RunTime Operation Time(ms)	Test Result
			A	B	C	N	DIFF	HOC	2F		
<b>1<sup>st</sup> Interval Fault</b>											
1	FHT20	AG					0			25.2	o.k
2		ABG					0			27.9	o.k
3		ABS					0			24.2	o.k
4		ABCG					0			28.2	o.k
5	FHT50	AG					0			24.8	o.k
6		ABG					0			27.3	o.k
7		ABS					0			25.0	o.k
8		ABCG					0			28.1	o.k
<b>2<sup>nd</sup> Interval Fault</b>											
9	FMT20	AG					0			24.9	o.k
10		ABG					0			28.0	o.k
11		ABS					0			25.3	o.k
12		ABCG					0			27.6	o.k
13	FMT50	AG					0			25.0	o.k
14		ABG					0			27.5	o.k
15		ABS					0			24.7	o.k
16		ABCG					0			27.6	o.k

표 3. 내부 고장 시험 결과(주보호)

No	Fault Point	Fault Phase	Backup Protective Relay Panel Status											RTDS RunTime 동작시간 (ms)	Test Result	
			A	B	C	N	Z1S	Z2S	DEF	EF	OC	GOC	OV			
<b>1<sup>st</sup> Interval Fault</b>																
1	FHT20	AG													28.2	o.k
2		ABG													36.5	o.k
3		ABS													x	
4		ABCG													x	
5	FHT50	AG					0	0							28.6	o.k
6		ABG					0	0							27.2	o.k
7		ABS					0	0							26.7	o.k
8		ABCG					0	0							29.1	o.k
<b>2<sup>nd</sup> Interval Fault</b>																
9	FMT20	AG													39.0	o.k
10		ABG													39.1	o.k
11		ABS													23.5	o.k
12		ABCG													x	
13	FMT50	AG						0	0						29.7	o.k
14		ABG						0	0						23.5	o.k
15		ABS							0	0					23.7	o.k
16		ABCG							0	0					23.5	o.k
<b>3<sup>rd</sup> Interval Fault</b>																
17	FLT20	AG								0	0				39.0	o.k
18		ABG								0	0				39.1	o.k
19		ABS													x	
20		ABCG													x	
21	FLT50	BG								0	0				29.7	o.k
22		ABG								0	0				23.5	o.k
23		ABS										0			23.7	o.k
24		ABCG											0	0	23.5	o.k

표 4. 내부 고장 시험 결과(후비보호)

### 2.3.2 외부고장

345kV 모선 및 선로고장, 154kV 모선 및 선로고장과 같은 변압기 외부고장에 대해 모의하여 과도 상태가 포함된 전압, 전류를 인가되었을 때 주 보호요소인 전류 비율 차동계전요소와 동작하지 않으며, 1, 2차 측의 후비 보호요소인 단락용 거리계전요소와 방향지락과전류계전 요소의 고장방향을 고려한 정동작 응답특성을 시험하고자 한다.

지면상, 154kV 모선 고장(FMBO)인 경우의 외부고장에 대해서만 살펴보기로 한다.

아래의 그림 9는 154kV 모선고장시의 주보호계전기의 Disturbance Recording Data를 보여주고 있다.

외부고장이기 때문에 전혀 동작하지 않았음을 확인할 수 있다.주보호계전기에서 345kV 모선 및 선로 고장, 154kV 선로 및 모선고장의 외부고장 발생에 대한 시험 결과는 표 5와 같으며, 모든 경우에 대해서 정상동작되었음을 알 수 있다.

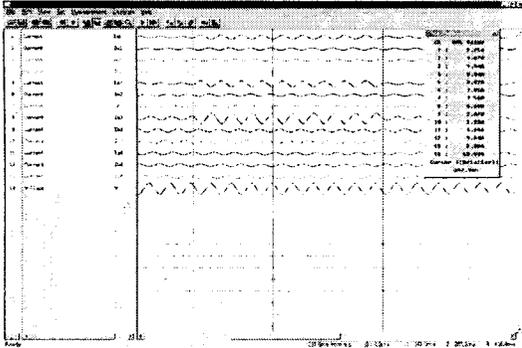


그림 9. Disturbance Recording Data(154kV 모선 고장의 경우)

No	Fault Point	Fault Phase	Main Protective Relay Panel Status							RTDS RunTime (ms)	Test Result
			A	B	C	N	DIFF	HOC	2F		
<b>EXTERNAL FAULT(345kV 선로 및 모선고장) FOR PRIMARY BACKUP PROTECTIVE RELAY TEST</b>											
1	FHL50	AG					x			x	O.K
2		BCG					x			x	O.K
3		CAS					x			x	O.K
4		ABCG					x			x	O.K
5	FHB0	AG					x			x	O.K
6		BCG					x			x	O.K
7		CAS					x			x	O.K
8		ABCG					x			x	O.K
<b>EXTERNAL FAULT(154kV 선로 및 모선고장) FOR PRIMARY BACKUP PROTECTIVE RELAY TEST</b>											
9	FML50	CG					x			x	O.K
10		CAG					x			x	O.K
11		CAS					x			x	O.K
12	FMB0	ABCG					x			x	O.K
13		CG					x			x	O.K
14		CAG					x			x	O.K
15		CAS					x			x	O.K
16	ABCG					x			x	O.K	

표 5. 외부고장 발생에 대한 시험 결과(주 보호계전기)

그림 10.은 154kV 모선고장시의 1차 측 후비보호계전기의 Disturbance Recording Data를 보여주고 있다. 1차 측에서 154kV 모선 및 선로고장은 방향과전류계전기의 보호 구간이므로 파형에서 동작됨(DEF-V0)을 확인할 수 있다.

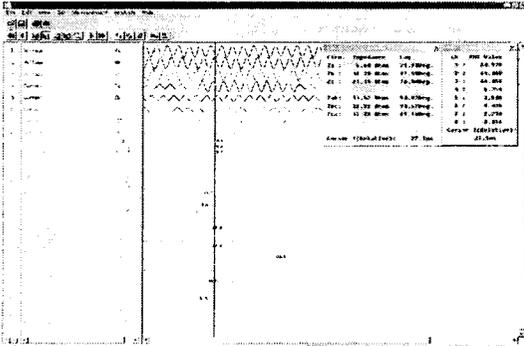


그림 10 Disturbance Recording Data(154kV 모선 고장시 1차 측 후비보호 동작)

1차 측 후비보호계전기에서 345kV 모선 및 선로 고장과 154kV 선로 및 모선고장 발생에 대한 시험결과서는 표 6과 같다. 345kV 모선 및 선로고장에 대해서는 보호구간 밖이므로 전혀 보호계전기가 동작되지 않았음을 확인할 수 있으며, 154kV 모선고장발생시 지락에 대해서는

방향과전류계전기가 동작되었으며, 단락사고에 대해서는 Z2S가 동작됨을 알 수 있다. 여기서 ZONE2의 시간지연을 100ms로 설정되었기에 118ms로 동작되었다.

No	Fault Point	Fault Phase	Backup Protective Relay Panel Status										RTDS RunTime (ms)	Test Result	
			A	B	C	N	Z1S	Z2S	DEF	EF	OC	GOC			OV
<b>EXTERNAL FAULT(345kV 선로 및 모선고장) FOR PRIMARY BACKUP PROTECTIVE RELAY TEST</b>															
1	FHB0	AG					x	x						x	O.K
2		BCG					x	x						x	O.K
3		CAS					x	x						x	O.K
4		ABCG					x	x						x	O.K
<b>EXTERNAL FAULT(154kV 선로 및 모선고장) FOR PRIMARY BACKUP PROTECTIVE RELAY TEST</b>															
9	FML50	CG												28.8	O.K
10		CAG													
11		CAS					x	x						x	O.K
12	FMB0	ABCG					x	x							
13		CG													
14		CAG													
15		CAS												118.0	O.K
16	ABCG														

표 6. 외부고장 발생에 대한 시험 결과(후비보호계전기)

### 3. 결 론

본 논문에서는 345kV 변압기 보호용 디지털 보호계전기의 성능 검증을 위한 계통 모델링, RTDS와 보호계전기 간의 시험 환경 구축, 변압기 내·외부고장에 대한 보호계전기의 동특성 시험 및 분석에 대해서 언급하였으며, 이것을 토대로 변압기용 디지털 보호계전기의 성능 검증을 위한 절차서 및 시험성적서를 작성할 수 있다. 앞으로 동특성 시험의 보편화 및 확대보급을 통해 시험에 소요되는 시간을 획기적으로 단축시킴으로써 보호계전기의 실제통의 적용시 오동작 가능성을 최소화함으로써 국내 전력계통의 공급신뢰도 향상 및 설비 건전성 확보에 이바지 할 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] TM T&D, Instruction Manual of GRT100, GRZ100 Transformer Protection Relay
- [2] RTDS Inc. Homepage, <http://www.rtds.com>

### 부록 I. 선로 및 변압기 정수, 부하 등의 등가 임피던스

전원단	전력계통 모의 데이터	비고	
345kV	$Z_{1L} = 18.210825 \angle 86.74 [Q/km]$	$\%Z_{1L} = 1.53 \angle 86.74 [\%/km]$	
	$Z_{0L} = 19.877175 \angle 82.83 [Q/km]$	$\%Z_{0L} = 1.67 \angle 82.83 [\%/km]$	
154kV	$Z_{1L} = 10.0793 \angle 82.04 [Q/km]$	$\%Z_{1L} = 4.25 \angle 82.04 [\%/km]$	
	$Z_{0L} = 21.2021 \angle 80.24 [Q/km]$	$\%Z_{0L} = 8.94 \angle 80.24 [\%/km]$	
송전선로	$R_1 = 0.01785375 [Q/km]$	ACSR 483 $\pi$ ×4 Bundle의 %임피던스(100MVA기준)	
	$X_{1L} = 0.305 [Q/km]$		
	$X_{1c} = 0.19099 [M\Omega \cdot km]$		
	$R_{0c} = 0.228528 [Q/km]$		
	$X_{0cL} = 0.95 [Q/km]$		
154kV	$R_1 = 0.10055584 [Q/km]$	ACSR 636MCM(322 $\pi$ )의 %임피던스(100MVA기준)	
	$X_{1L} = 0.467 [Q/km]$		
	$X_{1c} = 0.285375 [M\Omega \cdot km]$		
	$R_{0c} = 0.30878283 [Q/km]$		
	$X_{0cL} = 1.309 [Q/km]$		
변압기	1-2	0.0566 $\angle$ 2406 (P.U.)	규격 : 1 $\phi$ 166.7MVA
	1-3	0.1455617621(P.U.)	345/161/23kV
	2-3	10.17560037 (P.U.)	
CT	1차 측	600:5A	CT1, CT2, CT3, CT4
	2차 측	1500:5A	CT5
	3차 측	500:5A	CT6
PT	1,2,3	345/154/23kV : 115V	PT1, PT2, PT3
부하	2,3차 측	$R = 1.1799 [Q]$ , $L = 0.15158 [H]$	57.12738 / 89.8613