

RTDS를 이용한 디지털 보호계전기 Reach Test 계통모델 선정 방안

이재욱, 차승태, 최창열, 장병태, 이재규*, 김철환**
한전 전력연구원, 대덕대학*, 성균관대학교**

The Consideration on the Selection of Power System Model used for the Reach Test of Digital Protective Relay Using RTDS

Jae-Wook Lee, Seung-Tae Cha, Chang-Yeol Choi, Byung-Tae Jang, Jae-Gyu Lee*, Cheol-Hwan Kim**
KEPRI, Daeduk College*, Sungkyunkwan University**

Abstract - 디지털 보호계전기의 성능 검증에 있어서 RTDS(Real Time Digital Simulator)와 같은 디지털 시뮬레이터를 사용하는 경우가 점점 증가하고 있다. 특히 보호계전기의 동특성(Dynamic Performance) 시험에 있어서는, 디지털 시뮬레이터를 이용한 성능 검증이 거의 필수적이다. 본 논문에서는 디지털 보호계전기 중 거리계전기의 Reach Test에 있어서 성능 검증에 사용할 계통 모델 선정 방안을 PSCAD/RTDS에서의 구현 관점에서 기술하고 있다. 양단 전원을 가지는 4모선 2회선 송전선로를 Bergeron 모델을 이용하여 모델링하고, 모델의 유효성을 귀납적인 방법을 사용해서 검증하는 방안을 제시하고 있다.

1. 서 론

보호계전기는 전력계통에서 발생 가능한 고장이나 이상현상에 대한 대책으로서, 고장이 발생한 지역 또는 기기-송전선로, 모선, 변압기 등-를 건전 계통으로부터 분리하는 역할을 담당하고 있다. 고장 발생시 해당 구간을 담당하고 있는 보호계전기에 의해서 고장 구간이 신속하게 분리되지 않는 경우, 고장이 파급될 수도 있으며, 심하게는 광역 정전으로 이어질 수도 있다. 따라서 보호계전기를 계통에 적용하기 이전에, 보호계전기의 정동작, 오동작, 부동작에 대한 성능 검증을 수행하는 것은 필수적이다.

디지털 보호계전기의 성능 검증에는 동작 성능 검증, EMC(Electromagnetic Compatibility) 특성 검증 등 다양한 종류의 검증이 있으며, 이 중 동작 성능 검증은 크게 정특성(Steady State) 시험과 동특성 시험으로 나누어진다. 동특성 시험을 위해서는 RTDS와 같은 디지털 시뮬레이터를 사용하는 것이 대부분 요구되고 있다. 본 논문에서는 디지털 보호계전기 중 거리계전기의 Reach Test에 있어서 성능 검증에 사용할 계통 모델의 선정, 구현, 검증에 대해서 기술하고 있다.

2. 본 론

2.1 송전선로 모델

PSCAD/RTDS에서는 송전선로 모델링을 위해서, 단거리 송전선로를 위한 PI 모델, 장거리 송전선로를 위한 Bergeron 모델 및 Frequency Dependent 모델을 제공하고 있다. PI 모델은 R, L, C로 구성된 단일 주파수만 고려된 모델로서, 주로 15km에서 이하의 단거리 송전선로에서 사용된다. 선로의 길이는 시뮬레이션 Time step(일반적으로 50 μ s 정도)과 연관이 있으며, 선로의 길이가 짧을 때에는 신뢰할 수 있는 특성을 나타낼 수 있다. Bergeron 모델은 Travelling wave를 고려한 모델이며, 송전선로의 물리적인 구조(도체의 지름, 도체의 높이, 도체 사이의 상대적인 거리 등)는 사용하지 않으며, 역시 단일 주파수만을 고려한 모델이다. Frequency Dependent 모델은 Travelling wave와 송전선로의 물리적인 구조를 모두 고려한 모델이며, 선로 매개변수들은

주파수에 대한 함수로 표현된다. Bergeron 모델의 기본 개념은, 손실이 없는 송전선로 모델의 노턴 등가회로에 lumped 형태의 직렬 저항을 추가한 모델이다. 직렬 저항은 선로 전체에 걸쳐서 고르게 분포되어 있는 손실을 고려한 것으로서, 실제 구현 시에서는 선로 양단에 전체 저항의 절반이 각각 추가된다.

보호계전기의 성능 검증에는 PI 모델이 주로 사용되며 그 유효성은 입증되어 있으나, RTDS를 사용하여 양단 전원을 가지는 2회선 4모선 계통을 모델링할 경우에는 실시간 모의에 대한 시간 제약에 따른 노드 수 제약으로 인해서 단일 랙에서 전체를 모델링하는 것이 불가능해지는 문제점을 가지고 있다. 그런데 랙 분할을 위해서는 PI 모델을 사용할 수가 없으며, Bergeron 모델이나 Frequency Dependent 모델을 사용해야 한다. 그러나 Bergeron 모델을 사용하기 위해서는 두 모선 사이의 선로의 길이가 시뮬레이션 Time step을 고려해서 충분히 길어야 하나, 실제로 한전 계통은 대부분 그렇지 않기 때문에 문제가 생긴다. 그리고 길이가 짧은 송전선로에 대해서 Bergeron 모델을 사용하게 되면, PSCAD/RTDS에서 컴파일 수행 시 경고가 발생하나, 컴파일은 수행되며, 실제로 RunTime상에서 사용하는 것 역시 가능하다. 그러나 RunTime에서의 출력 파형이 신뢰할 수 있는 것인지는 알 수 없다. 이를 확인하기 위해서는 2가지 방법이 있다. 첫 번째는 귀납적인 방법을 통한 접근으로서 PI선로를 사용했을 때의 경우와 비교하는 방안이다. 두 번째는 연역적인 방법을 통해서 접근하는 것으로서 Time step과 선로 모델의 연산 결과와의 관계에 대한 증명을 통해서 모델의 유효성을 입증하는 것이다. 이 중 첫 번째 방법에 대한 접근 방식에 대해서 기술하고자 한다.

2.2 선로검증용 계통 모델

한전 계통에서의 송전선로 보호에는 PCM 전송 전류 차동방식과 방향비교 Trip 저지방식이 가장 많이 사용되고 있으며, 거리계전방식은 후비보호나 방향비교 Trip 저지 방식에서의 계전 요소로 사용된다. 이러한 여러 보호 방식에 대해서 모두 검증을 할 수 있는 가장 기본적인 계통 모델은 양단전원의 4모선 계통이다. 4모선 계통을 사용할 경우, 내부 고장과 외부 고장을 모두 모의할 수 있으며, 각 고장의 위치까지도 모의할 수 있는 장점이 있다. 그러나 양단전원 4모선 계통을 PSCAD/RTDS에서 PI 모델을 사용하여 모델링 하였을 때, 사용되는 노드의 수는 21개를 초과한다.

3PC카드를 사용하는 RTDS에서는 Real Time Network Solution상에서의 실시간 연산을 위해서, 단일 3PC 카드에서 사용가능한 노드의 수를 최대 21개로 제한하고 있다. 또한 PI 모델은 lumped 구성요소로 구성된 모델이므로 시뮬레이션 Time step 동안의 통신을 이용한 랙 분할은 불가능하다. 따라서 위에서 언급한 모델은 구현이 불가능하다.

2.3 Bergeron 모델의 사용

상기에서 제시된 문제점을 해결하기 위해서 양단전원 4모선 계통을 Bergeron 모델을 사용하여 구성하였다. Bergeron 모델은 Norton 등가회로를 사용해서 송전선로를 임피던스 성분과 전류 소스로 구성된 두 개의 계통으로 분할한 성분이기 때문에 RTDS에서 래 분할을 통한 적용이 가능하다. 그러나 대칭좌표법을 사용한 고장계산이 거의 불가능하다는 점 때문에 Reach Test를 위해 구성된 계통 모델의 검증에 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해서 PI 모델을 사용한 2모선 계통, Bergeron 모델을 사용한 2모선 계통, 그리고 Bergeron 모델을 사용한 4모선 계통을 각각 모델링 하였으며, 다음과 같은 과정을 통해서 검증을 수행하였다.

- ① T-Line 모델을 이용하여 선로정수(R,L,C)를 구한다.
- ② 이 선로정수 값을 PI 모델을 사용한 2모선 계통에 적용하여 컴파일 및 RunTime을 수행한다.
- ③ PI 모델을 사용한 2모선 계통의 경우 대칭좌표법을 이용한 고장계산이 가능하므로, RunTime 상에서의 파형 값과 고장계산을 통한 전압·전류 값을 비교하여 오차를 확인한다. 이 때 오차가 허용범위(5%) 내에 있으면 PI 모델을 사용한 2모선 계통의 모델링에 오류가 없음을 확인한다.
- ④ PI 모델을 사용한 2모선 계통과 Bergeron 모델을 사용한 2모선 계통을 정상상태에서의 파형(파형 특성, 전압·전류 값)과 고장 상태에서의 파형의 비교를 통해 비교 작업을 수행한다.
- ⑤ ④의 과정에 이상이 없으면, Bergeron 모델을 사용한 2모선 계통을 4모선 계통으로 확장한다.

2.4 양단 2모선 PI 계통의 모델링 및 검증

2.4.1 정상 상태

원하는 계통이 PSCAD/RTDS로 정확하게 구현되었는지를 확인하기 위한 첫 번째 단계로, 정상상태에서 계전기 설치 점에서의 전압과 부하 전류를 계산하였다. 양단 전원을 가지는 병행 2회선 2모선 계통에서 사고 발생시, 대칭분 등가회로는 그림 2.1과 같다. 이 등가회로에서는 발전기와 변압기의 대칭분 임피던스를 등가전원 임피던스로 간단히 나타내었다.

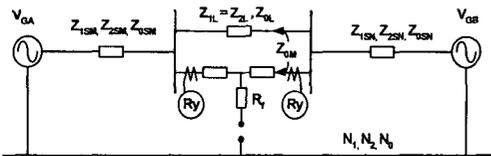


그림 1. 병행 2회선의 대칭분 등가회로

그림 1의 대칭분 등가회로에서 고장 전 부하전류는 식 (2.1)과 같이 구할 수 있고, 각 상의 부하전류는 식 (2.2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$I_{Load} = \frac{V_{GA} - V_{GB}}{Z_{ISM} + \frac{Z_{IL}}{2} + Z_{ISN}} \quad (2.1)$$

$$I_{ALoad} = \frac{I_{Load}}{2}$$

$$I_{BLoad} = \frac{I_{ALoad} \cdot a^2}{2}$$

$$I_{CLoad} = \frac{I_{ALoad} \cdot a}{2} \quad (2.2)$$

대칭좌표법을 통한 고장 계산에는 MathCAD를 사용하였으며, 본 논문에서는 이에 대한 자세한 언급은 생략한다. 정상 상태에서의 대칭 비교 결과는 표 1과 같다. 보호계전기 설치 지점에서의 상전압과 상전류에 대해서 대칭좌표법을 이용한 계산 결과 값과 RunTime상에서 측

정된 파형 값, 그리고 두 값 사이의 오차를 제시하고 있다. 오차는 0.5% 미만의 작은 값을 보이고 있다.

표 1. 정상 상태시 상전압과 상전류 비교

조 건	전압 전류	대칭좌표법 RMS	PSCAD/RTDS RMS	오차 (%)
전력위상각이 10°일 때, 보호계전기 설치 점에서의 상전압과 상전류	Va	88.4907	88.5015	0.0122
	Vb	88.4907	88.5015	0.0122
	Vc	88.4907	88.5142	0.0265
	Ia	0.4856	0.4836	0.4119
	Ib	0.4856	0.4837	0.3913
	Ic	0.4856	0.4837	0.3913

2.4.2 고장 상태

고장상태에 대한 비교는 1선 지락고장에 대해서 이루어졌다. 양단 전원의 전력 위상각 차는 10°로 설정하였으며, 10%지점 고장(고장 저항 : 0.01Ω)과 80%지점 고장(고장 저항 : 10Ω)에 대해서 각각 비교를 하였다. 표 2.2는 대칭좌표법을 이용한 계산 결과 값과 RTDS RunTime상에서 측정된 파형 값, 그리고 두 값 사이의 오차를 제시하고 있다. 표 2에서 나타난 것과 같이 오차는 1.5% 미만이며, 보호계전기 성능시험에서는 문제가 되지 않는 수준의 값이다.

표 2. 고장 발생시 상전압과 상전류 비교

조 건	전압 전류	대칭좌표법 RMS	PSCAD/RTDS RMS	오차 (%)
전력위상각 = 10° Rf = 0.01Ω 고장 종류 = AG 고장지점 = 10%	Va	18.1937	18.3935	1.0981
	Vb	106.7476	106.9202	0.1616
	Vc	105.9712	105.7584	0.2008
	Iaf	9.8546	9.8327	0.2222
	Ibf	0.4162	0.4112	1.2013
	Icf	0.5471	0.5447	0.4386
전력위상각 = 10° Rf = 10.0Ω 고장 종류 = AG 고장지점 = 80%	Va	77.7545	77.7966	0.0541
	Vb	95.8923	95.8992	0.0070
	Vc	85.9273	85.9403	0.0151
	Iaf	1.5382	1.5392	0.0654
	Ibf	0.4962	0.4958	0.0800
	Icf	0.4571	0.4543	0.6125

2.5 양단 2모선 시험 계통의 비교

고장계산을 통해서 작성된 PI 모델을 사용한 계통의 유효성을 확인한 후, PI 모델을 사용한 계통과 Bergeron 모델을 사용한 계통의 비교를 통해서 Bergeron 모델의 유효성을 확인하였다. 두 모델 모두 양단 전원을 가지는 2모선 계통으로 구성되었다. 다양한 고장 모의를 통해서 두 계통 모델의 정상 상태시 전압 및 전류 값, 고장 발생시 전압 및 전류 값을 비교하였으며, 비교 결과 각 값들의 크기 및 고장 발생시의 과도현상의 유사성을 확인하였다. 정상상태 및 고장발생시의 전압 및 전류 값의 크기는 오차가 거의 없었으며, 과도현상의 파형 특성은 다소 차이가 있었다. 이 차이에 대해서는 실리적인 방법으로는 입증할 수가 없으므로, 향후 이론적인 고찰을 통해서 입증하기로 하고 현 단계에서는 고려하지 않았다. 각 계통 모델의 구성과 파형은 생략한다.

2.6 양단 4모선 시험 계통의 모델링

양단 전원 2모선 계통의 경우에서 PI 모델을 사용한 계통과 Bergeron 모델을 사용한 계통의 비교를 수행한 후, Bergeron 모델을 사용하여 4모선 계통으로 확장하였다. 다양한 고장 케이스에 대한 용이한 시험과 디지털 보호계전기를 사용한 직접적인 시험을 위해서, 계통 모델은 시퀀스를 사용한 모델과 PSCAD의 Control Component를 사용한 모델에 대해서 각각 작성하였다.

그림 2는 Control Component를 사용한 양단 전원 4모선 계통 모델의 일부이다.

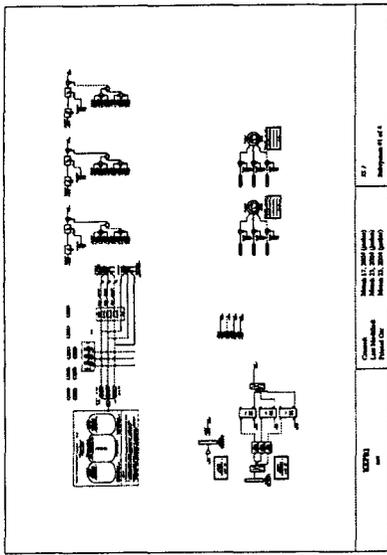


그림 2. 4Bus T-Line Model Sub System #1

2.7 성능 시험

제시된 양단 전원 4모선 계통의 유효성을 확인하기 위해, 디지털 보호계전기를 사용하여 Reach Test를 수행하였다. 시뮬레이션 툴로서는 앞에서 잠시 언급한 것과 같이 S/W로는 PSCAD/RTDS, H/W로는 4개의 3PC RTDS 랙과 전압·전류 앰프를 사용하였으며, 시험 대상 보호계전기는 Mitsubishi사의 MDT-F 모델을 사용하였다. 보호계전기의 동작의 확인을 위해서는 별도의 고장기록장치를 사용하지 않고, 보호계전기 전면 패널의 LED와 보호계전기 Trip출력 신호를 사용하였다. Trip출력 신호의 경우, RTDS의 디지털 입력으로 사용되어 계통 모델내의 해당 차단기를 동작시키는데 사용되었으며, 동작은 RunTime상에서 확인할 수 있다. 보호계전기의 정정을 위해서는 MathCAD 프로그램을 사용하여 정정에 필요한 값들을 계산하였으며, 계산된 값들은 MDT-F에 직접 입력하였다.

그림 3과 그림 4는 거리계전기의 Zone1 Reach Test에 있어서, A상 1선 지락 고장을 모의한 경우 전압 및 전류 파형의 변화와 보호계전기 LED 동작 모습을 나타내고 있다.

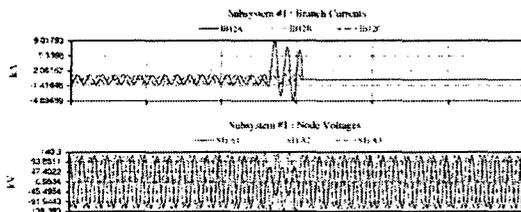


그림 3. RTDS RunTime상에서의 동작 파형

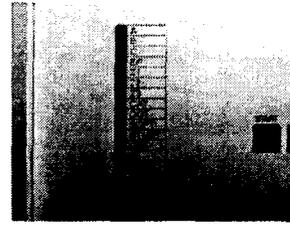


그림 4. Zone1 동작 모습

그림 5와 그림 6은 거리계전기의 Zone2 Reach Test에 있어서, BC상 2선 단락 고장을 모의한 경우 전압 및 전류 파형의 변화와 보호계전기 LED 동작 모습을 나타내고 있다.

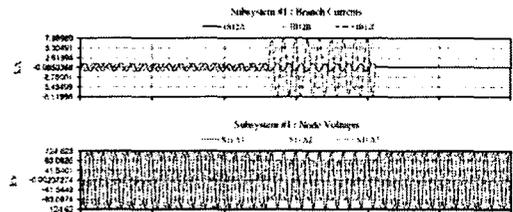


그림 5. RTDS RunTime상에서의 동작 파형

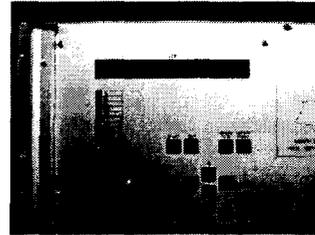


그림 6. Zone2 동작 모습

3. 결 론

본 논문에서는 송전선로용 보호계전기의 성능 검증에 있어서 Bergeron 모델을 사용하여 PI 모델을 대체하는 방안에 대해서 기술하였다. Travelling wave를 고려하고 있는 Bergeron 모델을 사용하여 PI 모델을 대체하는 방안에 대한 타당성 검증을 위해서는, 정상시와 고장 발생 시 대칭좌표법을 이용한 고장계산을 통해서 나온 값과 RTDS RunTime상에서의 값을 비교하는 방법을 사용하였다. 그리고 제시한 방안의 유효성을 확인하기 위해서 디지털 보호계전기를 사용하여 성능 시험을 수행하였다. 다양한 케이스에 대해 성능 시험을 수행해 본 결과, Bergeron 모델을 사용한 경우와 PI 모델을 사용한 경우의 각각의 파형의 특성에 미약한 차이가 있었다. 이 차이에 대한 이론적인 규명을 포함하여, 본 논문에서 실용적인 방법으로 접근한 방식에 대한 이론적인 설명을 위한 연구는 현재 진행 중이며, 차기 학회에서 발표할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Neville Watson and Jos Arrillaga, "Power Systems Electromagnetic Transient Simulation", IEE Power and Energy Series 39
- [2] Mitsubishi, "MDT-F Instruction Manual"
- [3] RTDS Inc., "RTDS Users Manual"