

실시간 전력계통 시뮬레이터를 이용한 발전기 보호 계전기 모델 개발

論 文

56-2-3

An Implementation of Generator Protective Relay for Real Time Digital Simulator

趙尹晟[†] · 朴成雨^{*} · 李哲均^{**} · 李旭和^{***} · 金泰均[§] · 申政勳^{§§} · 車乘台^{§§} · 崔竣豪^{§§§}
(Yoon-Sung Cho · Sung Woo Park · Chul-Kyun Lee · Uk-Hwa Lee · Tae-Kyun Kim ·
Jeong-Hoon Shin · Seung-Tae Cha · Jun-Ho Choi)

Abstract - This paper presents an implementation of the generator protective relay using Real Time Digital Simulator (RTDS) user defined component (UDC) model designed to facilitate the investigation and evaluation of protective relays. The UDC for RTDS is a convenient model that allows user to develop new component models and run them on the RTDS. The developed model has major features related to the development of six models such as distance, frequency, reverse power, volts per Hz, over voltage, and out-of-step relays. Also, the generator relay models have been used to support and enhance power engineering education at both the undergraduate and graduate levels. The developed model functions are verified and tested by both static test and dynamic test. The simulation results show the capabilities of the developed generator relay using RTDS UDC.

Key Words : 발전기 보호 계전기, RTDS UDC, Multifunction Relay, Static Test, Dynamic Test

1. 서 론

발전기는 전력을 생산, 공급하는 설비로서 전기 및 기계적인 요소들이 복합적으로 연결되어 있기 때문에 고장 발생 시 복잡한 현상을 수반하게 된다. 발전기를 보호 하는 계전기의 오동작(mal-operation)은 안정도 측면에서 계통에 심각한 영향을 미친다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해서 발전기 보호 계전기(generator protective relay)는 비정상적인 계통 상태 및 다양한 사고를 고려하여 개발된다[1].

최근에 디지털 기술의 발달과 더불어 마이크로 프로세서를 이용한 디지털형 계전기 개발이 활발히 진행되고 있다. 또한, 신호처리 및 고장 임피던스 계산 등 계전기의 기능이 추가됨에 따라 계전기의 알고리즘이 복잡해지고 되었고, 개발된 알고리즘의 검증에 위한 시뮬레이터의 필요성이 증대되었다. 최근까지 EMTP, PSCAD/EMTDC, MATLAB 등 다양한 소프트웨어를 이용한 계전기 알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행되었다[2-3]. 이와 같은 비실시간 시뮬레이터들의 수많은 장점에도 불구하고 계전기를 응동적으로 해석이 불가능하다는 단점을 지니고 있다. 반대로, 실시간 시뮬

레이터인 RTDS(Real-Time Digital Simulator)는 가격이 비싸다는 단점이 있지만 계전기의 응동적 해석이 가능하다는 장점을 지니고 있다[4-5].

본 논문에서는 RTDS UDC를 이용하여 발전기 보호 계전기를 개발 하였다. UDC(User Defined Component)는 RTDS의 내부 모델로서 사용자가 새로운 모델을 개발할 수 있는 프로그램이다. 본 논문에서 개발된 UDC로 구현된 계전기의 장점은 다음과 같다. 첫째, 계전기의 복잡한 기능을 하나의 모델(multifunction relay)로 만들기 때문에 사용자가 쉽게 계전기를 조작 할 수 있다. 둘째, 개발된 계전기는 하나의 모델이기 때문에 RTDS 상에서 모의 시 실행시간(execution time)을 줄일 수 있다. 셋째, 사용자는 계전기의 기본 개념을 코드화 할 수 있으며, 계전기 내부 동작을 알 수 있다. 따라서 젊은 엔지니어나 학생들의 계전기 교육 목적에 적합하다. 본 논문에서는 개발된 발전기 보호계전기는 다음과 같은 6개의 기능을 지니고 있다 1) 거리 계전기, 2) 동기탈조 계전기, 3) 과여자 계전기, 4) 역전력 계전기, 5) 과전압 계전기, 6) 주파수 계전기. 개발 모델의 유용성을 검증하기 위해서 2가지의 검증 방법을 사용하였다. 첫째, 경계점 테스트를 위해 신호 발생기를 이용하였다. 임의의 사고현상을 모의 할 수 있도록 전압과 전류를 생성시켜 계전기의 입력으로 사용하여 계전기를 성능을 검증하였다. 둘째, 시험계통(a simple two-area power system)을 이용하여 계전기의 특성을 검증하였다.

† 교신저자, 正會員 : LS産電(株) 電力研究所 主任研究員

E-mail : yschol@lsls.biz

* 非會員 : LS産電(株) 電力研究所 主任研究員

** 正會員 : LS産電(株) 電力研究所 先任研究員

*** 正會員 : LS産電(株) 電力研究所 責任研究員 · 工博

§ 正會員 : 韓電 電力研究院 責任研究員 · 工博

§§ 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員

§§§ 正會員 : 韓電 電力研究院 一般研究員

接受日字 : 2006年 11月 15日

最終完了 : 2006年 12月 15日

2. 발전기 보호 계전기의 알고리즘

2.1 거리 계전기(21)

발전기 내부 고장의 확실한 제거와 전력 계통측 고장시 지속적인 고장 전류 공급으로 인한 발전기 손상을 방지하기 위하여 후비보호 계전기를 필요로 한다. 후비보호 계전기는 주보호 계전기와 독립적으로 계통을 보호 하며 주보호 계전기가 사고를 제거하지 못했을 때 동작한다. 발전기에 설치하는 후비보호 거리 계전기는 2종류의 단락사고에 동작한다. 첫째, 승압 변압기 이후의 선로사고에 대해 동작한다(전방사고). 전방사고의 주 보호 계전기는 여러 가지가 있을 수 있으나 주보호 계전기가 동작하지 못하였을 때 충분한 시간 지연을 갖고 동작한다. 전방사고 발생시 주보호 계전기와 후비보호 계전기가 동작하지 않는다면 전방사고에 동작할 수 있는 계전기는 없기 때문에 발전기 및 전력계통 안정도에 심각한 영향을 미친다. 둘째, 발전기 출력단자와 승압 변압기간의 선로 사고에 동작한다(후방사고). 이와 같은 2종류의 사고에 대한 후비보호 계전기의 정정 기준은 표 1과 같다.

표 1 거리 계전기의 동작치 정정

Table 1 Fault simulation results

용도	동작치 정정	한시 정정
단락 후비 보호	1. 전방사고 다음 중 적은 값을 택한다. 가. 발전기 최대출력의 150%에 해당하는 임피던스 나. 승압변압기 임피던스 + 다음 구간의 최장선로 임피던스 * 곱보기계수	2.5초*
	2. 후방사고 발전기 과도 임피던스보다 크게 정정하며 가능한 범위에서 큰 값을 택함	

* 외부고장에 대하여는 최종후비이며 가능한 한 발전기 탈락을 억제하기 위해 선로의 Zone3(100 cycle)보다 50cycle의 협조시간을 두어 2.5초로 정정

본 논문에서 구현된 거리 계전기의 전체 구조는 그림 1과 같다. 거리 계전기는 임피던스 계산 모듈, 방향 판별 모듈, 전류 Supervision 모듈로 구성되어 있다. 전방사고에 대한 임피던스 계산 모듈의 동작 조건은 다음과 같다.

- 임피던스 계산 모듈

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \text{ AB: } & \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(V_{AB} - V_{BC})}{-\sqrt{3} I_B} & \textcircled{2} \text{ BC: } & \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(V_{BC} - V_{CA})}{-\sqrt{3} I_C} \\ \textcircled{3} \text{ CA: } & \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(V_{CA} - V_{AB})}{-\sqrt{3} I_A} \end{aligned}$$

임피던스 계산 모듈의 계산식은 승압 변압기의 타입(저압측 Delta, 고압측 Wye)이 고려된 것이다. 후방사고 발생시

에는 승압 변압기의 타입을 고려할 필요가 없으므로 일반적인 단락고장 임피던스 계산식을 사용한다[6]. 본 논문에서 개발된 거리 계전기는 Mho 타입을 사용하였다[6-7]. 또한, 방향 판별 모듈에서 $V_{mag} \cdot I_{mag} \cdot \cos\theta$ 의 크기가 영보다 크면 전방사고, 영보다 작으면 후방 사고를 의미한다. 고장시 고장거리 고장과 관련된 상으로 연산하지만 방향결정은 고장에 영향을 받지 않거나 고장의 영향으로 오판하지 않을 전압을 기준으로 하였다. 그림 1과 같이 전방 또는 후방 사고 발생시 각 모듈이 동작하고 각 모듈의 결과가 정정치를 만족하면서 시지연(Time delay)을 만족하면 거리 계전기는 트립 신호를 발생한다.

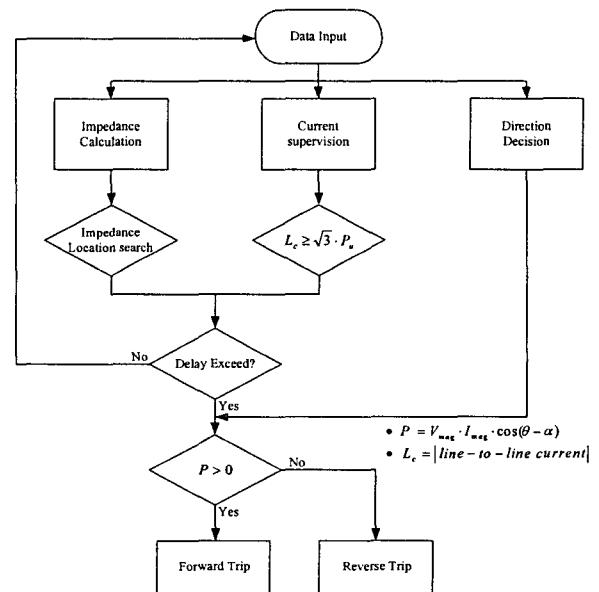


그림 1 거리 계전기의 전체구조

Fig. 1 Flowchart of phase distance relay

2.2 동기탈조 계전기(68)

동기탈조 계전기는 전력계통에서 모든 발전기들이 급격한 부하변동이나 사고로 인해서 동기 상태를 유지하지 못하여 동기탈조 상태가 발생하는 경우에 동기탈조의 영향이 파급되는 것을 막기 위하여 사용되는 계전 요소이다. 일반적으로 동기탈조 검출은 단락 거리계전 요소의 Zone 3과 내부에 존재하는 동기탈조 검출 Zone 사이의 영역을 임피던스 궤적이 통과하는 순서와 시간을 관찰함으로써 이루어지는데, 임피던스 궤적이 정해진 시간을 초과하기 전에 이 영역을 통과하면 사고로 판정하고 이 시간이 경과한 후에 통과하게 되면 동기탈조로 판정한다. 본 논문에서는 동기 탈조를 검출하기 위해 Offset Mho와 Blinder가 결합된 CEX-CEB를 사용하였다. 동기탈조 계전기의 모듈은 거리 계전기의 모듈에 CEX-CEB 특성을 추가한 구조이다.

2.3 과여자 계전기(24)

발전기와 변압기에서 과여자 현상의 주된 원인은 발전기를 기동시키거나 정지시키는 동안 정격 주파수 이하에서

AVR을 정격전압으로 설정하여 운전하는 경우이다. 예를 들어 발전기의 속도가 정격 속도의 95% 또는 그 이하일 때 AVR을 정격전압으로 설정하여 운전하면 발전기 단자에서의 전압/주파수 비율은 1.05 pu 또는 그 이상의 값이 되고 발전기와 연결된 변압기에 손상을 주게 된다. 또한 계통에 동기화되어 있는 경우, 인근 발전기의 탈조로 인하여 전압강하가 발생할 때 발전기 여자시스템이 상승하게 되는데, 사고 지속 시간 동안 여자시스템에서 제어를 실패할 경우에도 과여자가 발생한다. 그리고 상호 연계계통에서 부하가 갑자기 탈락하는 경우 단자전압이 급상승하게 되는데, 전압/주파수는 1.25 pu 이상까지 상승할 수 있으며 이 때 여자시스템의 제어가 실패하면 과여자 현상이 발생한다. 과여자 계전기의 동작 조건은 식 (1)과 같다.

$$\frac{V/F}{V_{nom}/\sqrt{3} \cdot PTR \cdot F_{nom}} > Pickup \quad (1)$$

여기서, V와 F는 각각 측정된 전압과 주파수이다. V_{nom} , F_{nom} , PTR은 발전기 정격전압, 정격 주파수, PT의 1차측과 2차측의 비율이다. Pickup은 과여자 계전기가 동작하기 위한 설정 값이다.

2.4 역전력 계전기(32)

역전력 계전기는 두 가지 용도로 쓰인다. 첫째, 발전기가 계통에 연결된 상태에서 원동기 입력이 무부하 회전을 하기 위한 양 이하가 되면 발전기는 계통에서 전력을 받아 동기전동기로 운전하게 된다. 이러한 현상을 발전기의 모터링이라고 한다. 동기발전기가 동기전동기로 운전되면 발전기에 손상이 가해지므로 적절한 보호가 요구되는데, 이때 사용되는 것이 역전력 보호요소이다. 둘째, 터빈축 사고에 대한 발전기를 급정지시키기 위함이다. 역전력 계전기의 동작 조건은 식 (2)와 같다.

$$P \cdot \cos\theta + Q \cdot \theta > Pickup \quad (2)$$

여기서, P, Q, θ 는 각각 측정된 유효전력, 무효전력, 특성각이다. Pickup은 역전력 계전기가 동작하기 위한 최소한의 발전기 출력 값이다. 발전기가 동기속도로 모터링하는데 필요한 최소한의 출력값은 종류별로 다르다.

2.5 과전압 계전기(59)

과전압 계전 요소는 발전기 전기자와 연결된 회로의 지락사고시 발전기의 전기자를 보호(59-1)하게 되며 발전기 정상 운전시 계통부하의 불형형에 의한 전압이나 평상시 제3고조파 전압에 오동작하지 않도록 동작한다(59-2). 본 논문에서는 발전기 고정자와 연결된 전 회로의 지락사고를 보호하는 59-1의 계전기를 개발하였으며, 일반적인 과전압 계전기의 동작 정정치는 정격전압에서의 최대 영상전압의 5~20%로 하며 최고 95%정도의 보호범위를 갖는다. 개발된 과전압 계전기는 발전기 중성점 전압을 측정하여 과전압 여부를 판단하였다.

2.6 주파수 계전기(81)

저주파수 현상은 임의의 발전기가 탈락하거나 중요한 연계선로의 탈락과 같은 돌발적인 에너지 입력경감에 의하여 발생하는 현상이다. 계통주파수가 저하되면 터빈발전기에서 가장 큰 영향을 받는 것은 터빈 날개(Turbine Blade)이다. 각각 길이가 다른 여러 단으로 구성된 날개는 고유진동주파수를 가지고 있어 정격회전 속도 이하로 회전하게 되면 주로 저압터빈의 종단날개가 공진에 의해 진동이 급격히 증가하여 결국 피로에 의한 균열 현상이 발생하게 된다. 과주파수 현상은 돌발적인 주요부하 및 전력공급 연계선로 등의 탈락 등에 의하여 발전기가 가속하기 때문에 발생한다. 부하의 제거는 발전기가 정격주파수 이상으로 동작하게 하는 원인이 된다. 주파수 계전기는 변동된 주파수의 크기에 따라 발전기의 터빈에 미치는 영향은 다양한 양상을 보이기 때문에 주파수 변동 크기에 따라 다음과 같이 다양한 동작 특성을 가진다. 본 논문에서는 다음과 같은 특성(당진 발전기의 정정 기준)을 가지는 주파수 계전기를 개발하였다.

- 1차 과주파수 정정(경보용) : 61.5 Hz 순시
- 2차 저주파수 정정(경보용) : 58.8 Hz 순시
- 3차 저주파수 정정(경보용) : 58.1 Hz 순시
- 4차 저주파수 정정(트립용) : 57.6 Hz 12초

3. 발전기 보호 계전기의 구조

본 논문에서 개발된 발전기 보호 계전기의 전체 구조는 그림 2와 같다. 발전기 보호 계전기는 1)신호 처리 모듈, 2)고장 계산 및 판별 모듈, 3) 출력 모듈로 구성되어 있다. 계전기의 입력은 전압(발전기 중성점 전압 포함), 전류, 설정 값이며, 출력은 트립 및 알람 신호이다. 설정 값에는 6개의 계전 요소의 정정치 뿐만 아니라 CT, PT, GT의 설정치, RTDS상에서 UDC를 동작하기 위한 설정도 포함되어 있다.

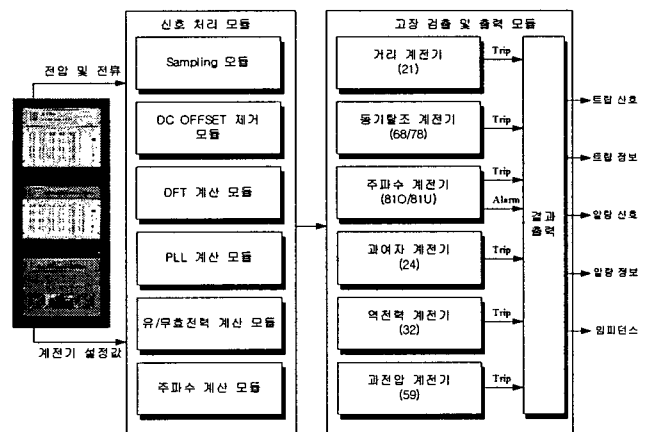


그림 2 발전기 보호 계전기의 전체 구조
Fig. 2 Structure of the generator relay using RTDS UDC

3.1 신호 처리 모듈

그림 2에서 보듯이 신호 처리 모듈은 입력되는 각상의 전압과 전류를 고장 계산 및 판단 모듈에 필요한 신호로 변환

하여 출력한다. 개발된 신호 처리 모듈에서는 고장 전류에 포함되어 있는 DC offset 성분을 제거하는 모듈이 포함되어 있다. 또한, 유효전력, 무효전력, 전압의 RMS, 주파수 값을 출력한다.

3.2 고장 검출 및 출력 모듈

고장 검출 모듈은 신호 처리 모듈로부터 데이터를 입력받은 거리 계전, 동기탈조, 주파수, 과여자, 역전력, 과전압 계전 요소에 대해 계산 및 고장을 검출한다. 그림 2에서 출력 모듈은 각 계전 요소들로부터 출력 정보를 받아 최종 트립을 위한 판단을 내린다. 계전기의 출력 요소는 트립/알람 신호, 트립/알람 정보, 임피던스 계산 값이다. 발생된 트립 신호는 차단기에 보내지며 해당 차단기는 트립된다. 그리고 사용자는 거리 계전기와 동기탈조 계전에서 계산되는 임피던스 값을 모니터 할 수 있으며 각 계전 요소의 트립 및 알람 상태를 얻을 수 있다. 표 2는 계전 요소의 트립과 알람 정보를 나타내고 있다. 출력은 Bit 형태로 구성되어 있으며 총 18개로 구성되어 있다. 특히, 거리 계전기의 전방사고 및 후방사고와 동기탈조 계전기는 AB, BC, CA 요소가 모두 동작하면 3상 사고를 의미한다.

표 2 발전기 보호 계전기의 출력 정보(트립 및 알람)
Table 2 Output information of generator protective relay

Trip/Alarm	Bit #	Trip/Alarm	Bit #
21_전방_AB	1	81_1단계_61.5 Hz	10
21_전방_BC	2	32_1단계	11
21_전방_CA	3	32_2단계	12
21_전방_3상	Σ	24_1단계	13
21_후방_AB	4	24_2단계	14
21_후방_BC	5	59	15
21_후방_CA	6	68_AB	16
21_후방_3상	Σ	68_BC	17
81_2단계_58.8 Hz	7	68_CA	18
81_3단계_58.1 Hz	8	68_3상	Σ
81_4단계_57.6 Hz	9		

Σ: Sum of above 3 bits

3.3 UDC를 이용한 모델링

UDC를 이용한 발전기 보호 계전기 모델은 다음과 같은 특성을 가진다. 첫째, RTDS상에서 사용자가 편리하게 모델을 이용하여 모의 할 수 있다. 둘째, 신호 처리, 고장 검출 등 복잡한 기능을 하나의 모델로 개발 할 수 있다. 또한 다양한 계전 요소를 통합 할 수 있다. 셋째, 개발된 계전기는 하나의 모델이기 때문에 RTDS 상에서 모의 시 실행시간(execution time)을 줄일 수 있다. 넷째, 사용자는 계전기 내부 동작을 모니터 할 수 있기 때문에 이론적으로 알고 있는

부분을 모의를 통해 얻을 수 있다. 위와 같은 유용한 정보를 바탕으로 UDC를 이용한 발전기 보호 계전기 모델은 젊은 엔지니어나 학생들의 계전기 교육 및 보호 시스템 교육에 많은 도움을 줄 수 있다. 또한, 개발된 발전기 보호 계전기는 사용자가 각 계전 요소에 대해 설정치를 편리하게 설정할 수 있으며 여러 가지 요소를 모니터 할 수 있다.

4. 사례 연구

4.1 Static test

본 논문에서는 각 계전 요소의 알고리즘을 검증하기 위해 신호 발생기를 사용하였다. 신호 발생기를 통해 발생된 전압과 전류를 계전기 입력으로 사용하여 각 계전 요소의 경계점 시뮬레이션을 수행하였다. 즉, 이론적으로 계산된 결과와 시뮬레이션의 결과를 비교·분석 하였다. 그림 3은 Static test 모의 환경을 나타내고 있다.

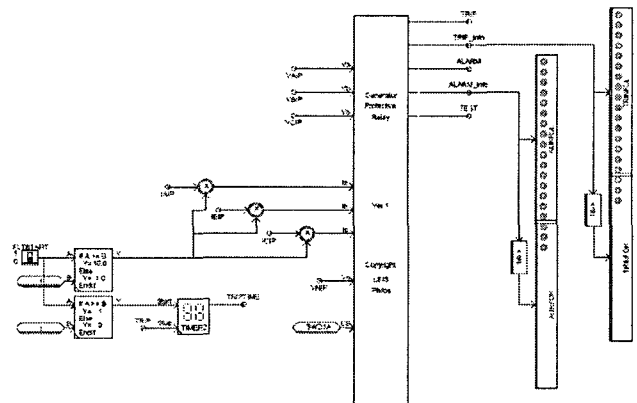


그림 3 Static test 모의 환경

Fig. 3 Structure of the generator relay using RTDS UDC

본 논문에서는 동기 탈조 계전기의 static test 시나리오를 사용하여 모의 결과를 분석하였다.

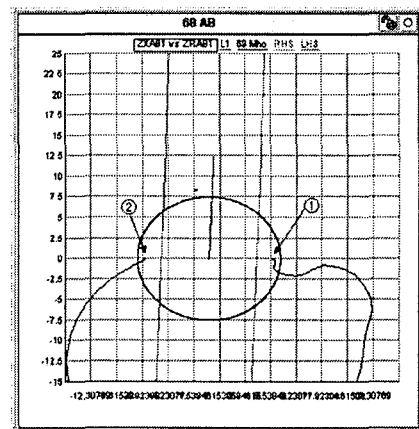


그림 4 동기탈조 계전기의 결과

Fig. 4 Result of static testing for out-of-step relay

단계1) 동기탈조 계전기의 정정치를 입력한다. 각상에 전압을 인가한다($60.0 \text{ volts } V_A \angle 0^\circ, V_B \angle -120^\circ, V_C \angle 120^\circ$).

단계2) 각상에 전류를 인가한다($9.0 \text{ amps } I_A \angle 0^\circ, I_B \angle -120^\circ, I_C \angle 120^\circ$).

단계3) 현 시점의 임피던스의 위치를 파악한다. 그림 4에 나타나듯이 ①의 위치에 임피던스가 존재한다.

단계4) 각상의 전류를 변화시킨다($9.0 \text{ amps } I_A \angle 180^\circ, I_B \angle 60^\circ, I_C \angle 60^\circ$).

단계5) 새로운 임피던스의 위치를 파악한다. 그림 4에 나타나듯이 ②의 위치에 임피던스가 존재하며 트립 신호는 발생하지 않음을 알 수 있다. 동기탈조 계전기의 정확한 동작을 파악할 수 있다.

단계6) AB, BC, CA의 동기탈조 계전기가 동작할 때까지 전류의 크기를 천천히 감소시키며, 동기탈조 계전기의 트립 신호가 발생하는 순간의 전류를 확인한다. 이때의 전류의 크기는 8.000001 [A] 이다.

위 결과를 통해 이론적 결과와 모의 결과가 일치함을 알 수 있다. 특히 실시간으로 전류의 크기를 조절하면서 계전기의 특성을 관찰함으로써 계전기 교육에 좋은 환경을 제공할 수 있다.

4.2 Dynamic test

Static test의 목적이 각 계전 알고리즘의 특성을 검증하였다면 Dynamic test의 목적은 시험 계통에서 모든 계전 요소의 동작을 검증하는 것이다. 그림 5는 Dynamic test를 위한 시험 계통이다[9].

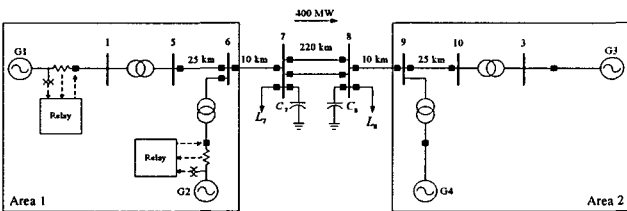


그림 5 Dynamic test를 위한 모의 계통
Fig. 5 One line diagram of a simple two-area system

표 3은 Dynamic test의 시나리오 및 모의 결과를 나타내고 있다. 표 3의 이론적 결과는 고장이 검출되고 동작을 위해 필요한 시지연 시간(정정기준)이다.

시나리오 2은 모선 5-6의 선로의 50[%]에서 90도 3상고장이 발생했을 때의 거리 계전기의 동작을 검증하였다. 고장 저항은 $0.01[\text{ohm}]$ 이며 사고 모의 시간은 4.0초이다. 그림 6은 발전기 보호 계전기의 동작 시퀀스를 보여주고 있다. 0.6초에 고장이 발생하였고 거리 계전기의 타이머가 동작하여 2.511초 후인 3.1초에 트립 신호를 발생하였다. 또한 사고로 인한 주파수 상승으로 인하여 0.95초에 주파수 계전기가 알람 신호를 발생 시켰다. 그림 6은 트립과 알람의 정보를 사용자에게 알려 주고 있다.

시나리오 9는 발전기 1번의 출력단에 A상 지락 고장이 발생했을 때의 과전압 계전기의 동작을 검증하였다. 고장 저항은 $0.01[\text{ohm}]$ 이며 사고 모의 시간은 4.0초이다. 그림 7

표 3 Dynamic test 결과

Table 3 Results of dynamic tests

계전 요소	시나리오	이론 결과(s)	모의 결과(s)	오차 (%)
거리 계전기	1. 전방사고(AB상단락)	2.500	2.511	0.0044
	2. 전방사고(3상사고)	2.500	2.513	0.0052
	3. 후방사고(AB상단락)	2.500	2.516	0.0044
	4. 후방사고(3상사고)	2.500	2.514	0.0056
과여자 계전기	5. Pickup= 1.1(pu)	4.500	4.500	0.0000
	6. Pickup= 1.18(pu)	2.000	2.000	0.0000
역전력 계전기	7. Pickup= 0.005(pu)	10.00	10.01	0.0010
	8. Pickup= 0.01(pu)	3.000	3.000	0.0000
과전압 계전기	9. Pickup= 0.064(pu)	1.500	1.514	0.0093
주파수 계전기	10. 발전기 탈락	12.00	12.00	0.0000
	11. 부하 탈락*	0.100	0.100	0.0000

* 부하탈락의 경우 시지연이 0초이지만 시지연 검증을 위해 0.1초로 설정하였다.

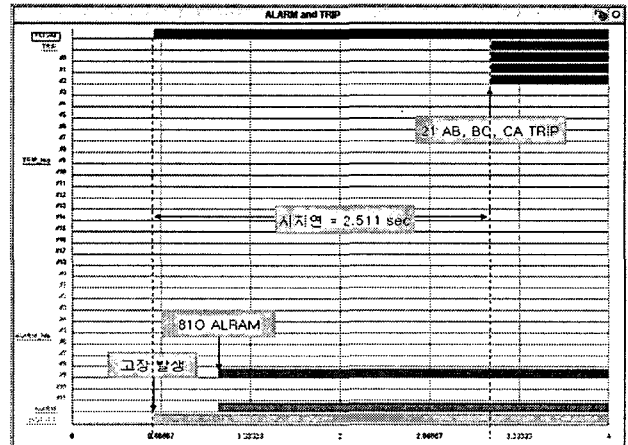


그림 6 거리 계전기의 동작 시퀀스
Fig. 6 Results of distance relay for scenario 2

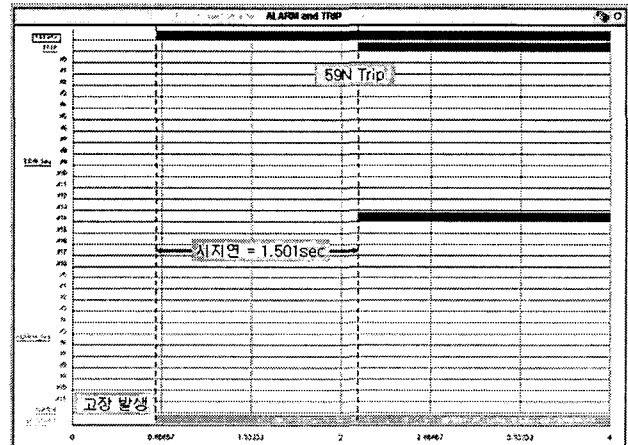


그림 7 과전압 계전기의 동작 시퀀스
Fig. 7 Results of overvoltage relay for scenario 9

은 발전기 보호 계전기의 동작 시퀀스를 보여주고 있다. 0.6초에 고장이 발생하였고 과전압 계전기의 타이머가 동작하여 1.501초 후인 2.1초에 트립 신호를 발생하였다. 과전압 계전기 정정치는 10.887[V]이고, 고장 발생으로 인한 중성점 전압은 136[V]이므로 과전압 계전기의 타이머는 동작하였다. 그림에서 보듯이 시나리오 9에 대한 다른 계전기의 동작은 발생하지 않았음을 알 수 있다.

시나리오 10은 발전기 1번의 탈락을 인한 저주파수 계전기의 동작을 검증하였다. 그림 8은 발전기 보호 계전기의 동작 시퀀스를 보여주고 있다. 발전기 1번의 탈락으로 발전기 2에 설치되어 있는 계전의 특성을 나타내고 있다. 저주파수 계전기의 정정치는 앞장에서 정의한 당진 발전소의 정정치와 동일하다. 발전기 탈락은 3.1초에 발생하였고 저주파수 계전기는 4.1초에 처음으로 알람 신호를 발생하였다. 그리고 주파수가 계속적으로 감소하여 120.3초에 주파수 계전기는 트립 신호를 발생하였다. 그림 10에서 보듯이 주파수가 57.6Hz까지 떨어졌을 때는 Pickup 신호가 발생하였으며 주파수 상승 시에는 Pickup 신호가 해소됨을 볼 수 있다.

시나리오 11은 모선 8의 부하탈락을 인한 과주파수 계전기의 동작을 검증하였다. 그림 9는 발전기 보호 계전기의 동작 시퀀스를 보여주고 있다. 발전기 1에 설치되어 있는 계전의 특성을 나타내고 있다. 과주파수 계전기의 정정치는 앞장에서 정의한 당진 발전소의 정정치와 동일하다. 부하탈락은 2.5초에 발생하였고 과주파수 계전기는 3.1초에 처음으로 알람 신호를 발생하였다. 그리고 주파수가 계속적으로 상승하여 69Hz까지 상승하였고, 20.1초에 정상 주파수 영역으로 회복되었다. 시나리오 10, 11의 개발된 계전기가 발전기 탈락 및 부하 탈락의 심각한 이상 현상에 정확하게 동작함을 알 수 있다.

본 논문에서 개발된 보호 계전기 모델은 Static/Dynamic tests를 통해 개발 모델의 유용성이 검증되었다. 표 4는 개발 모델의 전체적인 검증 방법 및 결과를 나타내고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 RTDS UDC를 이용한 발전기 보호 계전기 모델을 개발 하였다. 6개의 계전요소(거리, 과여자, 역전력, 과전압, 동기탈조, 주파수 계전기)에 대한 알고리즘을 UDC로 구현할 수 있음을 보였고 다양한 검증 방법(Static, Dynamic)을 통해 개발된 발전기 보호 계전기의 유용성을 확인하였다. RTDS UDC로 개발함으로써 실시간으로 환경에서 계전기의 내부 동작을 아주 자세하게 조사할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, Multifunction 계전기로 개발되어 사용자가 편리하게 계전기 정정 및 시뮬레이션이 가능하다. 또한, UDC를 이용해 개발된 모델은 보호 계전기에 입문하는 엔지니어나 학생들에게 좋은 훈련 시스템을 제공할 수 있다.

현재 개발된 발전기 보호 계전기를 이용해서 다음과 같은 추가적인 연구가 진행 중에 있다. 첫째, 6개의 모델 이외에 계자상실 계전기, 과전류 계전기 등 추가 모델을 개발하고 있다. 둘째, Dynamic test용 시험 계통을 이용하여 개발된 모델과 실제 계전기(G60 generator management relay)의 결과를 비교·분석하는 연구가 진행 중에 있다.

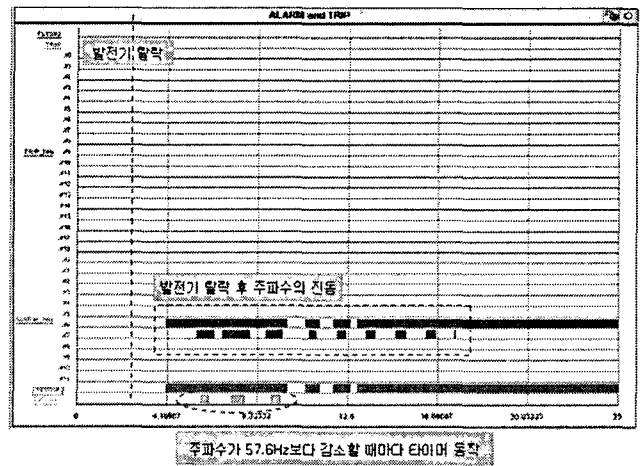


그림 8 저주파수 계전기의 동작 시퀀스
Fig. 8 Results of underfrequency relay for scenario 10

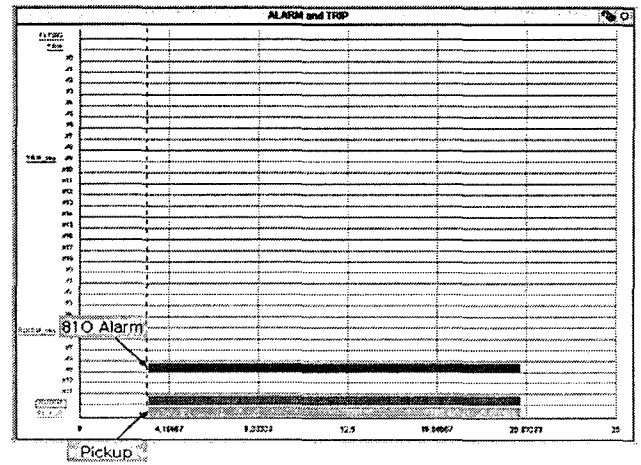
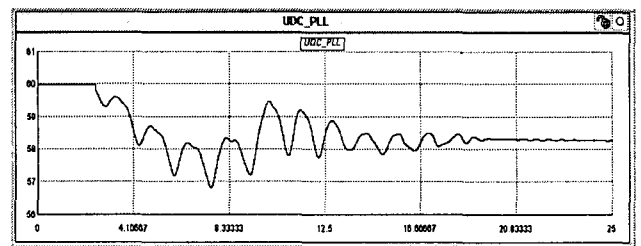
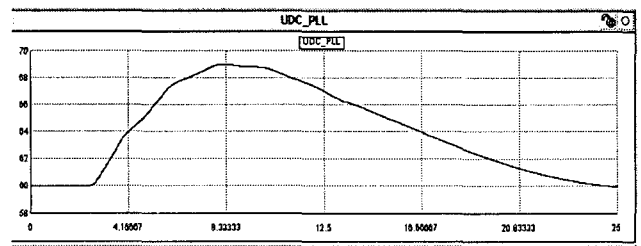


그림 9 과주파수 계전기의 동작 시퀀스
Fig. 9 Results of overfrequency relay for scenario 11



(a) 시나리오 10의 주파수의 응답 특성



(b) 시나리오 11의 주파수의 응답 특성

그림 10 주파수 응답 특성
Fig. 10 Response of frequency for scenarios 10 and 11

표 4 개발된 발전기 보호 계전기의 전체적인 Static/Dynamic tests 시나리오 및 검증 방법

Table 4 Overall static/dynamic testing scenarios and verification methods of generator protective relay

계전기명	Static test 시나리오	Dynamic test 시나리오	개발 방법	동작 특성
거리 계전기	Min./Max. reach Min./Max. delay pickup Maximum torque angle Directional control Supervision min./max.	전방/후방 단락 사고(AB, BC, CA) 전방/후방 3상사고 (다양한 고장 저항, 고장 위치, 고장 발생 각도, 고장 지속 시간)	CC*, UDC	우수
동기탈조 계전기	Pickup value Min./Max. delay pickup	전방 3상 사고 (다양한 고장 저항, 고장 위치, 고장 발생 각도, 고장 지속 시간)	CC, UDC	우수
과여자 계전기	Pickup value Min./Max. delay pickup	1번 여자기의 입력전압 증가에 의한 과여자 현상 모든 여자기의 입력전압 증가에 의한 과여자 현상	CC, UDC	우수
역전력 계전기	Angle(RCA=0.0°) Angle(RCA=180.0°) Max. time delay	조속기 제어 입력의 감소에 의한 역전력 현상 조속기 제어 입력이 Zero로 인한 역전력 현상	CC, UDC	우수
과전압 계전기	Pickup value Min./Max. delay pickup	발전단 지락사고 (다양한 고장 저항, 고장 위치, 고장 발생 각도, 고장 지속 시간)	CC, UDC	우수
주파수 계전기	Max. pickup(81U&81O) Max. delay pickup(81U&81O) Min. pickup(81U&81O)	발전기 탈락 부하 탈락	CC, UDC	우수

* CC 모델(Controls Compiler): RTDS의 기본 라이브러리를 이용하여 개발된 계전기 모델. 개발된 발전기 보호 계전기 모델은 CC 모델의 결과와 UDC 모델의 결과가 일치.

참 고 문 헌

[1] IEEE Std C37.102-1995, IEEE guide for ac generator protection

[2] C. H. Kim, M. H. Lee, R. K. Aggarwal, A. T. Johns, "Educational use of EMTF MODELS for the study of a distance relaying algorithm for protecting transmission lines", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 15, no. 1, pp. 9-15, Feb. 2000.

[3] M. Kezunovic, "User-friendly, open-system software for testing protective relaying application and design concepts", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 18, no. 3, pp. 986-992, Aug. 2000.

[4] P. G. McLaren, R. Kuffel, R. Wierckx, W. J. Giesbrecht, and L. H. Arendt, "A real time digital simulator for testing relays", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 207-213, Jan. 1992.

[5] D. Jakominich, R. Krebs, D. Retzmann, and A. Kumar, "Real time digital power system simulator design considerations and relay performance evaluation", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 14, no. 3, pp. 773-781,

[6] G. Ziegler, Numerical Distance Protection Principles and Application: Siemens-Erlangen Pulicis, 1999

[7] G60 Generator Management Relay, GE Industrial Systems, 2006

[8] RTDS Technologies, RTDS. User Defined Component Manual, Oct. 2004

[9] P. Kundur, Power system stability and control: McGraw-Hill, 1994

부 록

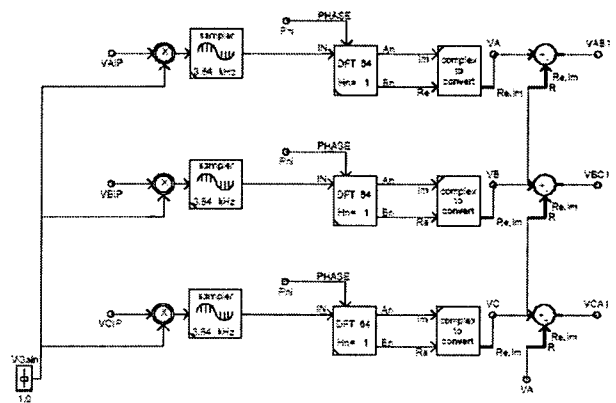


그림 11 CC를 이용한 거리 계전기 모델(임피던스 계산)
Fig. 11 Impedance calculation of distance relay using CC

저 자 소 개



조 윤 성 (趙 尹 晟)

1977년 7월 5일생. 2000년 광운대 전기공학과 졸업. 2002년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002~현재 동 대학원 박사과정. 2005~현재 LS산전(주) 전력연구소 책임연구원. 관심분야: 전력계통 해석, 실시간 시뮬레이션, EMS
Tel : 043-261-6553
Fax : 043-261-6629
E-mail : yscho1@lsls.biz



김 태 군 (金 泰 均)

1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 전력연구원 전력계통 연구소 책임연구원. 관심분야: 전력계통 해석, 운용, 계획
Tel : 042-865-5831
Fax : 042-865-5844
E-mail : tkkim@kepri.re.kr



박 성 우 (朴 成 雨)

1975년 7월 6일생. 2001년 고려대 전기공학과 졸업. 2004년 서울대 전기컴퓨터대학원 졸업(석사). 2004년~현재 LS산전(주) 전력연구소 책임연구원.
Tel : 043-261-6555
Fax : 043-261-6629
E-mail : swpark1@lsls.biz



신 정 훈 (申 政 勳)

1969년 1월 6일생. 1993년 2월 경북대 전기공학과 졸업. 2006년 동대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년 한국전력공사 입사. 현재 전력연구원 전력계통 연구소 선임연구원.
Tel : 042-865-5832
Fax : 042-865-5844
E-mail : jhshin@kepri.re.kr



이 철 군 (李 哲 均)

1972년 12월 22일생. 1995년 광운대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999~현재 LS산전(주) 전력연구소 선임연구원
Tel : 043-261-6506
Fax : 043-261-6629
E-mail : ckleea@lsls.biz



차 승 태 (車 乘 台)

1970년 2월 19일생. 1992년 일리노이 공대 전자/전기학과 졸업. 1997년 연세대 대학원 전기학과(석사). 2006~현재 고려대 대학원 전자/전기학과 박사과정. 현재 전력연구원 전력계통 연구소 선임 연구원
Tel : 042-865-5834
Fax : 042-865-5844
E-mail : stcha@kepri.re.kr



이 옥 화 (李 旭 和)

1969년 3월 27일생. 1991년 건국대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1999년~현재 LS산전(주) 전력연구소 책임연구원
Tel : 043-261-6507
Fax : 043-261-6629
E-mail : whleea@lsls.biz



최 준 호 (崔 竣 豪)

1976년 9월 5일생. 2001년 동국대 전기공학과 졸업. 2003년 고려대 대학원 전기공학과(석사). 현재 전력연구원 전력계통 연구소 일반 연구원.
Tel : 042-865-5836
Fax : 042-865-5844
E-mail : jhchoi@kepri.re.kr