디지탈 릴레이 시뮬레이션 프로그램의 개발

최 상봉 신 대승 문 영환

한국전기연구소

Development of Digital Relay Simulation Program

Sang-Bong Choi Dae-Seng Shin Young-Whan Moon

KERI

ABSTRACT - Protection and control systems play a prominent part in avoiding power delivery interruptions and help to get a fast and secure restoration when a failure occurs. In order to meet the higher functional requirements on modern power system, protection speed, selectivity, sensitivity, dependability, and security are essential to ensure reliability. These functions can be satisfied by taking advantage of microprocessor and communication technologies, and digital protection relays (systems) have been developed and applied to real power system enhancing reliability and saving money.

It is necessary to have a tool to analyze the functions and algoritms of digital relays for installing them to power system. The purpose of this study is to develop a digital relay simulation program to estimate digital relay performances during system faults. Components of digital protective relay including analog filter,sampling unit, digital filter, and relay logic are modeled in this program.

1. 서 론

최근의 전력계통은 국가경제의 지속적인 성장에 따른 전력수요의 꾸준한 증가로 대규모, 복잡화되고 있다. 특히 전원의 대용량화, 송전선의 장거리화, 그리고 다단자계통과 다회선 병가계통및 케이블 계통 증가등으로 인하여 계통 보호를 위한 보호계전기의 동작신뢰도에 영향을 주는 여러가지 사고양상이 나타나고 있다. 계전기의 동작신뢰도를 향상시키기 위해서는 우선 보호계전기에 대한 정확한 기능평가가 선행되어야 할것이다. 그러므로 보호계전기의 기능평가를 철저히 행하기 위해서 과도현상해석프로그램(EMTP)을 이용하여 고장시 실계통에 나타나는 현상을 재현하고 이에 대응한 고도의 보호계전기 시뮬레이션 기술을 개발, 사용할 필요가 있다.

본 연구에서는 이와같은 사실에 입각하여 디지탈 보호계전기의 기본동작 성능을 검증하는 수단으로서 디지탈 보호계전기의 주요부분들(ANALOG FILTER, A/D CONVERSION, SAMPLING 회로, DIGITAL FILTER, RELAY LOGIC, SEQUENCE SOFTWARE)의 기능을 상세히 모의하여 그응동을 해석함으로써, 디지탈 보호계전기의 보호성능 향상을 도모할 수 있도록 하였다.

2. 시뮬레이션 프로그램의 특징과 기능

2.1 프로그램의 특징

1) 디지탈 릴레이는 Analog filter, Sampling 회로, 디지탈 필터, 릴레이 논리, 트립 시컨스등 5개의 부분으로 표현할 수 있으며 본 프로그램에서는 각각의 동작을 매 샘플링 시 마다 실제 디지탈 릴레이와 동일한 Bit 길이로 연산하여 시뮬레이션 하였다.

2) 일반적으로 세계각국에서 사용되고 있는 디지탈 릴레이 논리(logic)는 주로 전압,전류의 샘플링 데이타에서 실효치와 위상값을 Vector 내적 연산에 의해 구하는 방법이 많이 이용되고 있으며 따라서 본 프로그램에서도 이와같은 논리와 필터특성을 임의로 조합한 상태에서 릴레이의 내부동작과 트립 시컨스등에 대한 해석을 얻었다.

다음 표 2.1에서는 실제 디지탈 릴레이와 본 시뮬레이션 프로그램과의 검토항목별 적용성을 비교하였다.

표 2.1 디지탈 릴레이의 검토항목별 적용성 비교

		디지탈 릴레이	시뮬레이션
동작성능	아날로그필터, 디지탈필터,릴레이 논리의 동작	△	○
	릴레이의내부동작	○	○
	샘플링시간 지정	△	○
	기능별 특성지정	△	○
신뢰성	耐 Noise 성능	○	x
	耐 전파 특성	○	x
	자 동 감 시	○	x

○ : 가 능, △ : 곤 란 x : 불 가 능

2.2 프로그램의 기능

디지탈 relay 시뮬레이션 프로그램은 고주파 특성, 과도 응동 특성등 각 relay마다의 기본 특성을 검토할 수 있고 또한 계통 과도현상 해석 프로그램(EMTP)과 조합하여 사고시의 relay 응동등을 포함한 디지탈 relay의 계통적용시의 제반 검토가 가능하도록 개발한다.다음은 시뮬레이션 프로그램 작성시에 고려해야 할 점이다.

1) relay 전압,전류 입력은 시뮬레이션 프로그램 내부에서 작성하거나 계통의 과도현상 해석 프로그램인 EMTP등에서 계산한 수치를 입력으로 할 수 있다.

2)디지탈 relay 내부연산은 기본적으로 16bit 정수연산이기 때문에 16 bit 베이스로 행한다. 이때 입력량의 정수치로의 변환은 LSB(least significant bit) 환산을 하고 다시 입력부의 A/D변환을 고려하여 입력을 부호가 달린 12bit로 한다.

3)디지탈 relay는 왜곡파형에 의해 특성오차가 발생되지만 이 오차는 입력에 포함된 고주파차수, 고주파함유율 그 외에 샘플링 시간에도 의존한다. 따라서 시뮬레이션 프로그램은 임의의 시간에서도 파형을 샘플링 할 수 있도록 작성한다.

4)시뮬레이션 프로그램의 출력으로는 아날로그필터 출력, 동작량(operating force),억제량(restricting force)등을 출력한다.

5)입력에 포함된 고주파 성분이 본질적으로 제거되는 것을 검토하기 위해서 아날로그 필터,디지탈 필터 알고리즘에 대한 필터 효과를 검토한다

6))시뮬레이션 범위는 아날로그 필터, A/D 변환기, 샘플링 회로, 디지탈 필터, relay 알고리즘, 트립시퀀스 소프트웨어로 구분한다.

다음 그림 2.1 은 디지탈 릴레이 시뮬레이션 프로그램의 흐름도이다.

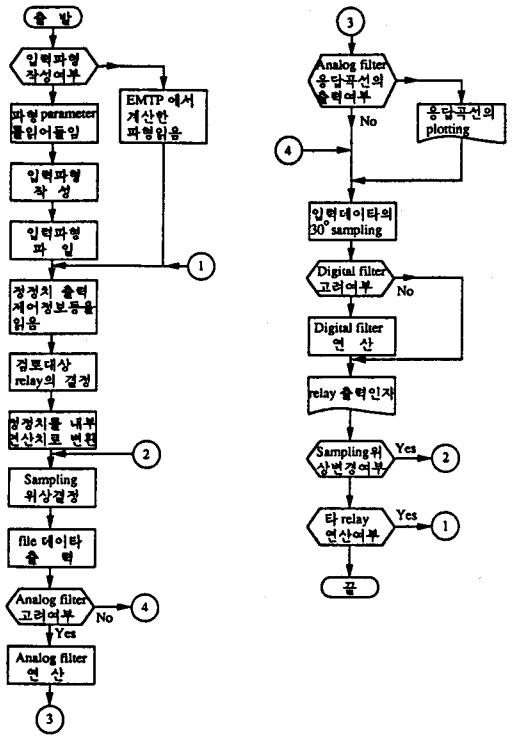

그림 2.1 디지탈 릴레이 시뮬레이션 프로그램 흐름도

3. 디지탈 릴레이 시뮬레이션 프로그램

3.1 아날로그 필터의 시뮬레이션

디지탈 relay에서는 샘플링에 의한 반복된 오차를 제거하기 위해 전치 필터인 아날로그 필터 및 계산결과의 고정도화, 위상연산 등을 목적으로 한 디지탈 필터가 사용되고 있다.
아날로그 필터에 대한 시뮬레이션 수법의 대표적인 예는 다음과 같다.

1) S의 함수식을 전개하여 상태방정식을 도출하고 미분방정식의 해를 구한다. (Runge-kutta 법, 기타)

2) Laplace 역변환을 사용하여 시간함수에 대한 해를 구한 후 임의의 입력파형에 대한 time convolution을 행한다.

3) S의 함수를 Z함수형으로 변환하여 시계열 표현으로 해를 구한다.

본 알고리즘에서는 3) 의 방법을 사용하였다. 즉 아날로그 필터 특성과 동일한 특성을 갖는 디지탈 필터를 구성하여 시뮬레이션 하였다. 이방법은 통상 순회형 디지탈 필터에서 사용되고 있는 수법과 동일하다고 볼 수 있다. 일반적으로 S 함수로 표현되는 아날로그 필터를 디지탈 필터로 변환하는 방법으로서는 Tustin 방법이 사용되고 있다. 즉, 식(3.1) 을

$$S = \frac{2}{\Delta t} \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}} \qquad (3.1)$$

아날로그 필터의 전달함수에 대입하여 디지탈 필터를 실현할 수 있다.

3.2 릴레이 논리(logic)의 시뮬레이션

디지탈 계전기를 시뮬레이션 하기위한 모델 전력계통은 345 KV, 3상 1회선 송전선로로 최대 200 KM 의 궁장을 갖는 60HZ 선로를 가정하였다. 이때 345 KV 의 송전선로의 선로정수는 EMTP 의 선로정수 서브루틴 프로그램을 이용하였다.
보호방식은 거리 3단방식으로서 제1단은 순시, 제2단과 제3단은 한시차단으로서 제1단,제2단은 리액턴스(Reactance) 계전방식, 제3단은 모(Mho) 계전방식으로 구성되어 있으며 샘플링 주파수는 600HZ 로서 전기각 30° 마다 샘플링 데이타가

릴레이에 입력되도록 되어 있다.

1) 보호 방식

과전류 릴레이가 조합된 거리 3단방식으로서 그림 3.1과 같이 Mho relay(SU) 와 Reactance relay(O_1, O_2) 의 조합으로서 릴레이의 특성이 발휘된다.

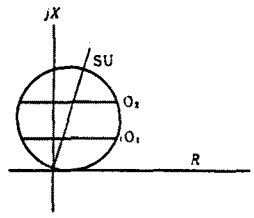

그림 3.1 보호 방식

2) 전압,전류의 LSB 와 필터특성

전압,전류는 CT 2차측 환산에서 각각 128[V],64[A] 이며 따라서 1 bit 당 가중치 즉,LSB 는 다음과 같다.

$$I_{LSB} = 64 \times 2^{-11} = 31.25\ [mA]$$

$$V_{LSB} = 128 \times 2^{-11} = 62.50\ [mV]$$

따라서 $V_{LSB}/I_{LSB} = 2[\Omega]$ 이며 각전압,전류는 3.1절의 아날로그필터의 시뮬레이션에 의하여 필터링 하였다.한편 각거리계전기의 내적연산을 보다 용이하게 하기위하여 릴레이의 전류입력이 전압에 비하여 75° 진상이 되도록 이상연산을 실시하였다.

3) 연산원리

본 릴레이는 적분필터라 불리는 알고리즘에 의하여 벡터내적을 구하게 되며 연산원리는 다음과 같다.
우선, (3.2)식과 같은 교류입력을 고려해 보면,

$$v = V_m \sin(\omega t + \theta)$$
$$i = I_m \sin \omega t \qquad (3.2)$$

(3.2) 식의 순시치적을 구하면

$$v \cdot i = \tfrac{1}{2} V_m I_m \{ \cos\theta + \cos(2\omega t + \theta) \} \qquad (3.3)$$

(3.3) 식을 60° 마다 1주기분씩 가산하면, $3\ V_m I_m \cos\theta$ 가 되고 따라서 전압,전류의 내적을 얻을 수 있다. 이와같은 관계를 식(3.4)과 같이 표현한다.

$$[v(m)xi(m)]적분필터 = 3\ V_m I_m \cos\theta \qquad (3.4)$$

i) 과전류 Relay

과전류 Relay의 연산 원리식은 식(3.5)와 같다.

$$|I| \geq I_s \qquad (3.5)$$

I : 상전류 I_s : 정정치

$$|I|^2 \geq I_s^2 \qquad (3.6)$$

식(3.6)에 적분필터를 취하면,

$$[i(m)xi(m)]적분필터 \geq 3\ (I_s / I_{LSB})^2 \qquad (3.7)$$

ii) 리액턴스 Relay(O_1, O_2)

Z_s 을 정정치 [Ω], PCT 2차측 전압,전류를 각각 V, I 라고하면 원리식은 식(3.8)과 같다.

$$(Z_s I\varepsilon^{j90} - V) \cdot (Z_s I\varepsilon^{j90}) \geq 0 \qquad (3.8)$$

릴레이 전류입력을 75° 진상하고, 정정치 Z_s 을 정수치로 환산하기 위하여 $Z_s = 10Z_s$ 을 고려하면,

$$[\{Z_s(I\varepsilon^{j75})_{(m)} \cdot I_{LSB} - 10(V\varepsilon^{-j15})_{(m)} \cdot V_{LSB}\}\{(Z_s(I\varepsilon^{j75})_{(m)} \cdot I_{LSB}\}]적분필터 \geq 0 \qquad (3.9)$$

$2\cos 15^\circ (V\varepsilon^{-j15})_{(m)} = V(m) + V(m-1)$, $(I\varepsilon^{j75})_{(m)} = I(m)$, $I_{LSB}/V_{LSB} = 1/2$을 식(3.9)에 대입하여 정리하면,

$$[\{(\frac{1}{2 \times 10} Z_s(I\varepsilon^{j75})_{(m)} - (V\varepsilon^{-j15})_{(m)}\}\{(Z_s(I\varepsilon^{j75})_{(m)}\}]$$
적분필터 ≥ 0 (3.10)

식(3.10)의 1항을 다시 쓰면,

$$Z_s' Z_s I(m) - K\{V(m)+V(m-1)\} \qquad (3.11)$$

여기서,

$$Z_s' = \frac{2\cos 15^\circ}{2 \times 10} K$$

또한, 정정치 Z_s' 을 정수치로 환산하기 위하여 $Z_s'' = 10\ Z_s'$ 을 고려하고 연산결과를 1 word 이내로 하기 위하여 각항의 결과를 8 bit 우측 shift 하여 식(3.9)을 정리하면,

$$[[\{Z_s Z_s'' I(m)\}/100 - K\{V(m)+V(m-1)\}] \times 2^{-8} \times [\{Z_s Z_s'' I(m)\}/100] \times 2^{-8}]적분필터 \geq 0 \qquad (3.12)$$

iii) Mho Relay(SU)

Z_s 을 정정치 [Ω], PCT 2차측 전압,전류를 각각 V, I 라고하고 V_p 을 극성전압이라고 하면 원리식은 식(3.13)과 같다.

$$(Z_m I\varepsilon^{j75} - V) \cdot V_p \geq 0 \qquad (3.13)$$

여기서, $V_p = V + V\{-2cycle\}^{2-3}$

정정치 z_m 을 정수치로 환산하기 위하여 $Z_m = 10z_m$ 을 고려하면,

$$[\{Z_m I(m) \cdot I_{LSB} - 10V(m) \cdot V_{LSB}\}\{V_p(m) \cdot V_{LSB}\}]적분필터 \geq 0 \qquad (3.14)$$

$$[\{\tfrac{1}{2} Z_m I(m) - 10V(m)\}\{V_p(m)\}]적분필터 \geq 0 \qquad (3.15)$$

여기서 $V_p(m) = V(m) + 1/8\ V(m-24)$ 이다.

식(3.15)의 1항을 다시 쓰면,

$$Z_s' Z_m I(m) - KV(m) \qquad (3.16)$$

여기서 $Z_s' = K / (2 \times 10)$

또한, 연산결과를 1 word 이내로 하기 위하여 제1항의 결과를 8 bit 우측 shift 하여 식(3.15)을 정리하면,

$[[\{Z_s'Z_mI(m)\} - K\{V(m)\}] \times 2\text{-}8$
$\times [\{V_m + V(m\text{-}24) \times 2\text{-}3\}]$적분필터 ≥ 0 (3.17)

4) 트립 시컨스

트립 시컨스는 각상별 과전류 Relay 를 check 하고 각상 입력을 선간량으로 변환하여 Mho Relay 연산을 실시한다. 이때 두 조건이 만족하면 제 1 단 Reactance Relay 와 조합하여 트립 신호가 발생하게 된다. 만약 이경우에 트립신호가 발생되지않을 경우에는 시간간격을 두고 제 2 단 Reactance Relay 와 제 3 단 Mho Relay 가 동작하게 된다.

3.3 사례연구

다음 그림 3.2 은 선택된 모델전력계통 구성도이며 이때 계전기는 모선 A 에 위치한 것으로 가정하였다.

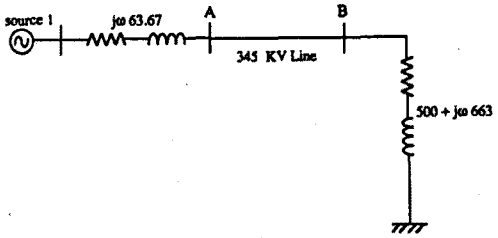

그림 3.2 샘플계통 구성도

그림 3.2의 모델 전력계통의 100 KM 지점에서 여러가지 형태의 고장을 발생시켰으며 그림3.3 은 A 상 지락사고시의 전압, 전류파형을 보여주고 있다.

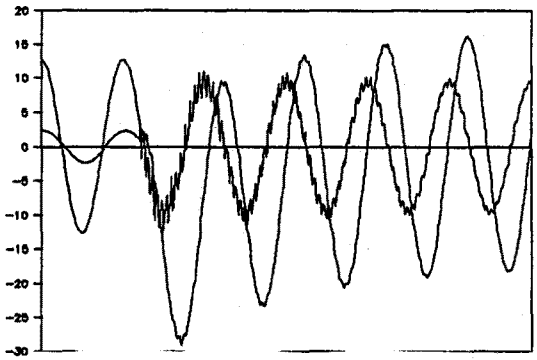

그림 3.3 A상 지락사고시의 전압,전류파형

본 사례연구에서 사용한 보호방식은 3.2 절 에서 설명한 거리 3 단방식이며, 트립 시컨스에 의하여 각 고장사례별로 Analog filter, A/D 변환, 샘플링 회로, Digital filter, Relay logic 에 대한 특성검토를 실시하였으며 그결과 고장사례별로 각 보호계전방식에 대한 응동(동작량, 억제량, 동작판정 시컨스등) 이 정확하게 모의되고 있음을 알 수 있었다. 이때 샘플링 시간 간격은 샘플링 비 N = 12 로서 1.3889E-03 이다.

4. 결 론

본 연구에서는 Digital Relay를 광범위하게 개발/실용화하기 위한 연구로서 relay의 구성과 algorithm을 상세히 표현하는 해석 프로그램을 개발하고 특히 계통사고시의 응동을 정확히 파악하여 그 특성을 평가하고자 하였다. 즉 고주파특성, 과도응동특성 등 각 relay 연산알고리즘의 특징과 장단점을 검토하고 과도현상해석프로그램(EMTP)와 조합하여 사고시의 relay 응동 등을 포함한 디지탈 보호계전기의 기본동작 성능을 검증하는 수단으로서 디지탈 보호계전기의 주요 부분들, 즉 analog 필터, A/D 변환, 샘플링 회로, 디지탈 필터, 계전기 논리 등의 기능을 상세히 모의하여 그 응동특성을 해석하였다.

5. 참고문헌

1. 電力中央研究 報告書, "テ"シ"タル リレ-シミュレ-ションフロクラムの 開發", 昭和 59 年 1 月

2. 電氣協同研究會, "テ"シ"タル リレ-, テ"シ"タル リレ-專門委員會" 昭和 61 年 1 月

3. 電氣書院, "電力系統のテ"シ"タル 制御, 保護"

4. M. Takahashi, "Fast generation shedding equipment based on the observation of swings of generators

5. 電氣書院, "送配電線の保護繼電システム"

6. 電氣書院, "發變電所の保護繼電システム"

7. 電氣書院, "電力系統の保護繼電システム"