

논단 IV

디지털 보호계전기 장치의 구현

금성산전연구소
전력계통연구실
실장 안복신

1. 서론

보호계전기란 전력계통의 이상상태를 즉시 감지하여 전기적 사고를 제거함으로써 사고의 영향을 경감시켜 전력계통의 안전운전을 유지하기 위한 장치로 전력공급의 신뢰도 확보에 중요한 역할을 하는 장치이다. 이러한 보호 계전기는 1901년 미국에서 개발한 플렌저형 과전류 계전기를 시작으로 이후 유도 원판형 과전류 계전기등의 전자기계식 계전기에서 트랜지스터를 이용한 정지형 계전기로 발전되었으며 1960년 부터 마이크로 프로세스를 이용한 디지털형 보호계전기로 발전되었다.

국내의 보호계전기는 지금까지 Electromechanical형태 및 Solid-State형태의 보호계전기가 대부분의 보호 기능을 수행하여 왔으며 이런 형태의 보호 계전기로는 현재의 추세인 전력 수급의 대규모화로 인한 각 기기간의 결선이 복잡해짐과 전력 계통의 안정화 요구를 만족 시킬 수 있는 기능을 갖기 어렵고, 특히 전력계통 자동화 시스템의 구현 및 실행에 아주 취약한 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점의 해결과 성능 향상을 위해서 선진 외국에서는 Micro-processor를 이용한 Digital 보호

계전기를 개발하기 시작하였고, 기존의 기계식 보호 계전기(electromechanical or solid-state relay)가 수행하는 보호 기능보다 개선된 보호 성능이 입증되었으며 현재는 반도체 기술의 발전과 보호 algorithm의 지속적인 개발로 보호 계전기의 digital화는 가속되고 있고 더욱 개선된 고성능, 다기능의 보호 계전기가 개발되고 있는 추세이다.

최근에는 디지털 기술의 발달과 신호처리 Algorithm의 발달 및 표시장치등과 같은 User interface의 발달로 하나의 보호계전기로 여러 가지의 보호계전 기능을 통합적으로 처리할 수 있게 되었으며 디지털 보호계전기는 경제적이고 합리적인 보호기능을 제공할 수 있을 뿐만아니라 Performance의 증가, 적용성의 확대, 판넬 크기 및 배선의 감소, 여러가지 전력계통의 Parameter의 측정등이 가능해 지고, 고장 기록 기능과 통신기능, 자기진단등의 여러가지 장점들을 제공할 수 있어졌다.

본 논문에서는 이러한 최근의 디지털 보호계전기 구현에 관하여 금성산전연구소에서 개발한 22.9kV 배전선로용 디지털 보호계전장치(DMPR)와 수배전반용 디지털 전력감시제어장치(GIPAM)를 중심으로 기술하고자 한다.

2. Digital 보호계전기의 특징

디지털 보호계전기의 구성은 크게 두가지로 나뉘어진다. 첫째 구성은 마이크로프로세서가 단순히 릴레이 logic만을 대체하고, 전류 및 전압신호는 처리하지 않음으로서 많은 아나로그 회로를 사용하는 형태이다. 이와같은 형태의 보호계전기는 그 정밀도가 아나로그 소자에 의존하게 되며, dc-offset이나, 주위온도, 공급전압 및 부품의 노화등에 의해서 특성에 영향을 받게 된다. 두번째 구성은 마이크로프로세서가 릴레이 logic 기능의 수행 뿐만 아니라 입력 전기 신호 처리를 수행함으로써 보다 간단하고 우수한 performance를 가지는 형태이다. 이와같은 형태로서는 값싼 DSP의 출현과 진보된 디지털 신호 처리 기술의 도입으로 아나로그 hardware에 의한 문제점들을 줄일 수 있다.

또한 최근에는 DSP 프로세서가 신호처리를 위해 탑재되고, 이러한 DSP와 더불어 I/O처리와 릴레이

Logic을 처리하는 일반 프로세서를 함께 사용한 Dual프로세서의 형태의 보호계전기가 출현하고 있다.

이러한 최근의 디지털 보호 계전기의 주요 · 특징으로는 신호 처리 기술을 이용한 보호기능의 개선, 적용대상에 대한 유용성의 확대, 판넬 및 배선의 축소, 각종 전기량의 계측등의 복합기능의 수행, Event 기록 기능(Event recording), Fault 기록 기능(Fault recording), 원방제어 및 감시를 위한 통신기능, 장치의 자기진단 기능, 자동 조정기능(Self-calibration) 등의 다양한 기능을 수행할 수 있다는 것이며 금성산전에서 개발한 22.9kV 배전선로용 디지털 보호 계전장치와 수배전반용 디지털 전력감시 제어장치에서도 이러한 주요 특징들을 포함하도록 구현하였다. 이들 2가지의 디지털 보호 계전기가 가지고 있는 보호기능, 연산 알고리즘, 동작 판단 알고리즘, 하드웨어 구성, 자기진단 및 통신기능의 구현 내용과 성능시험 내용에 관해 기술하고자 한다.

3. 보호 기능

22.9kV 배전선로용 디지털 보호계전장치는 단락 및 지락과 전류, 고저항 지락등의 고장 검출기능과 저주파수 검출, 자동재폐로 기능 그리고 각기능의 동작치 표시 기능이 있으며 수배전반용 디지털 전력 감시제어장치는 단락 및 지락과 전류, 과전압 및 부족전압, 지락 과전압과 선택지락 계전기능외에 각 전기량의 계측기능과 원방 감시 제어를 위한 통신기능을 구비하고 있다. 이들 각 보호 기능은 아래와 같은 특성을 가지고 있다.

• 단락 과전류 보호

배전 계통의 3상 단락 및 2상 단락고장을 검출하고 교류 기기의 과부하 보호를 행하며 순시요소와 한시 요소를 가진다. 한시요소는 여러 종류의 반한시 특성과 정한시특성을 구비하고 있다.

• 지락과전류 보호

배전 계통의 1상 및 2상 또는 3상 지락고장전류를 검출하고 보호하고 순시요소와 여러 종류의 반한

시 특성과 정한시특성을 구비하고 있다.

• 과전압 보호

계통과 Feeder보호 및 동기전동기 보호, 교류 회로의 이상전압 상승검출등을 행하며 넓은 범위의 정한시 특성을 구비하고 있다.

• 부족전압 보호

계통과 Feeder보호 및 유도전동기 보호, 교류회로의 이상전압 강하 검출등을 행하며 넓은 범위의 정한시 특성을 구비하고 있다.

• 고저항지락 보호

선로의 지락 고장을 검출하는 기능으로 지락고장시 비대칭분 Arc전류에 포함되는 우수 고조파 성분(360Hz~1920Hz)을 추출, 비울편차 방식에 의해 고저항지락 미소고장전류를 검출한다.

• 저주파수 보호

계통주파수 강하시 저주파수를 검출하여 부하차단(Load Shedding)기능을 수행하며, 고속도형 저전압 검출요소를 내장하고 계통고장시 순간 전압 강하에 의한 오동작 방지를 위한 순시 저전압 Lock 기능을 갖는다.

• 지락과전압 보호

배전선의 지락검출 및 발전기 보호등에 사용되며 한시 순시 요소를 가지고, 한시요소로는 반한시 특성을 구비하고 있다.

• 선택지락 보호

고압 배전선로의 지락보호용으로 영상전압과 영상전류로 고장 배전선을 선택 차단하며, 동작 영상전류, 동작 영상전압을 각각 정정할 수 있고, 최대 감도 위상 각은 45° 전류 진상으로 되어있다. 넓은 범위의 정한시 특성을 구비하고 있다.

• 자동재폐로

고장검출 계전기 요소의 동작으로 차단기가 차단되는 경우 차단기를 자동으로 투입한다.

4. 디지털 보호계전기에 사용되는 연산 알고리즘

1) RMS 연산

일정한 간격의 전기각으로 샘플링한 데이터를 이용하여 단락 및 지락 과전류 보호, 부족전압 보호, 과전압 보호등의 동작전류 및 전압값은 아래 식(1)의 TRUE RMS값을 취한다.

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^M e(n)^2}{M}} \quad n=1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

여기서 M은 주기당 샘플수 이고, e(n)은 샘플링된 전기량 데이터 이다.

2) PHASOR를 이용한 기본파 연산

일정한 간격의 전기각으로 샘플링한 데이터를 이용하면 선택지락 보호, 지락 과전압 보호를 위해 검출된 영상전류 및 영상전압은 식(2)와 같은 페이서의 형태로 표현할 수 있다.

$$E = A + jB = |E| \angle \theta \quad (2)$$

식(2)로 표현된 페이서의 Real 성분과 Imaginary 성분은 아래식 (3)과 같이 구한다.

$$I_s = \text{동작 정정치}$$

$$a = \text{특성함수의 지수}$$

한시 요소는 만일 $I > I_s$ 이고 다음의 조건을 만족하면 계전기가 동작하게 된다. 동작시간t의 계산간격을 Δt , Δt 동안의 동작 weight를 ΔQ 라 하고 (식 3)에 의해 ΔQ 를 구하면

$\Delta Q = Q_{trip} \left(t / \Delta t \right)$ 이 되고, 따라서

$$\Delta Q = \frac{I^a - 1}{K} \times \Delta t \times Q_{trip} \text{ 이 된다.}$$

$$Q(n) = Q(n-1) + \Delta Q$$

$Q(n) > Q_{trip}$ 이면 계전기가 한시 동작한다.

여기에서 $Q(n)$: n번째 구간까지의 동작 weight

$Q(n-1)$: n-1번째 구간까지의 동작

Weight

ΔQ : Δt 동안의 동작 weight

Q_{trip} : TRIP weight

순시 요소는 $I > I_{inst}$ (순시 동작 요소)이면 50ms 이내에 계전기가 동작한다.

2) 동작위상 판별요소

선택지락 계전기등의 방향성 계전기의 동작 위상각을 판별요소하는데 적용된다. 영상전압과 영상전류의 기본파성분을 페이저로 표현하면, 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} I_o &= I_{or} + jI_{oi} = I_o \angle \theta_I \\ V_o &= V_{or} + jV_{oi} = V_o \angle \theta_V \end{aligned} \quad (6)$$

I_o 와 V_o 는 각각 영상전류, 영상전압의 크기이고, θ_I 와 θ_V 는 각각 영상전류, 영상전압의 위상각이다. 식(7)과 같은 동작 판별식을 통해 $T > 0$ 이면 계전기가 동작한다.

$$\begin{aligned} T &= V_o I_o \cos(\theta - \theta_0) \\ &= (V_{or} I_{or} + V_{oi} I_{oi}) \cos(\theta_0) + (V_{or} I_{oi} + V_{oi} I_{or}) \sin(\theta_0) \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 $\theta = \theta_I - \theta_V$ 이고 θ_0 는 $+45^\circ$ 이다. <그림-1>은 선택지락 계전기 동작 위상 특성을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} A(N) &= \frac{2}{M} \sum_{n=1}^M (e(n) \times \cos(N \times \frac{2\pi}{M} \times t)) \\ B(N) &= \frac{2}{M} \sum_{n=1}^M (e(n) \times \sin(N \times \frac{2\pi}{M} \times t)) \end{aligned} \quad (3)$$

$A(N)$ 과 $B(N)$ 은 N 차의 Fourier계수이며, N 은 고조파의 차수이다. 이때 영상전압, 전류의 크기는 식(4)와 같이 된다.

$$C(N) = \sqrt{A(N)^2 + B(N)^2} \quad (4)$$

$C(N)$ 은 제 N 차 고조파의 크기이다. $N=1$ 일때 $C(1)$ 이 기본파의 크기가 되며 이값을 동작값으로 취한다.

3) Parseval's relation을 이용한 주파수분석 알고리즘

고저항 지락 검출은 real time연산을 위해 Parseval's relation을 이용한다. 한주기별로 기수고조파, 우수고조파의 함유율을 계산하고 우수고조파에 대한 기수고조파의 비율과 그 비율의 변화율을 계산한다. 우수고조파의 함유율은 다음과 같이 구한다.

$$\text{Even Power EP} = \sum_{i=0}^{31} (S(i) - S(i+32))^2$$

기수 고조파의 함유율은 Odd power

$$\text{OP} = \sum_{i=0}^{31} (S(i) - S(i+32))^2 \text{ 이 된다.}$$

따라서, 비율 Ratio(R) = EP/OP이 되고, 변화율 Variance

$$\text{VR} = \sum_{K=0}^{\text{End}} (R(K) - R(K-1))^2 \text{ 이 되어 계산된 비}$$

율과 변화율을 정정치와 비교하여 고장판정을 한다.

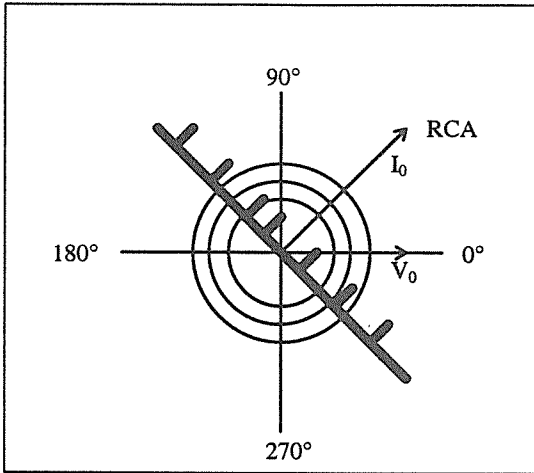
5. 동작 판단 알고리즘

1) 한시 특성요소

한시특성 요소는 아래식 (5)의 IEC 255-3을 적용하여 단락 및 지락 과전류 계전기등의 동작 특성에 적용된다.

$$t = \frac{K}{\left[\frac{I}{I_s} \right]^a - 1} \dots\dots (5)$$

여기에서 t =동작시간
 k =계전기 특성정수
 I =동작치



〈그림-1〉 선택지락 계전기의 동작 위상 특성

6. 하드웨어 구성

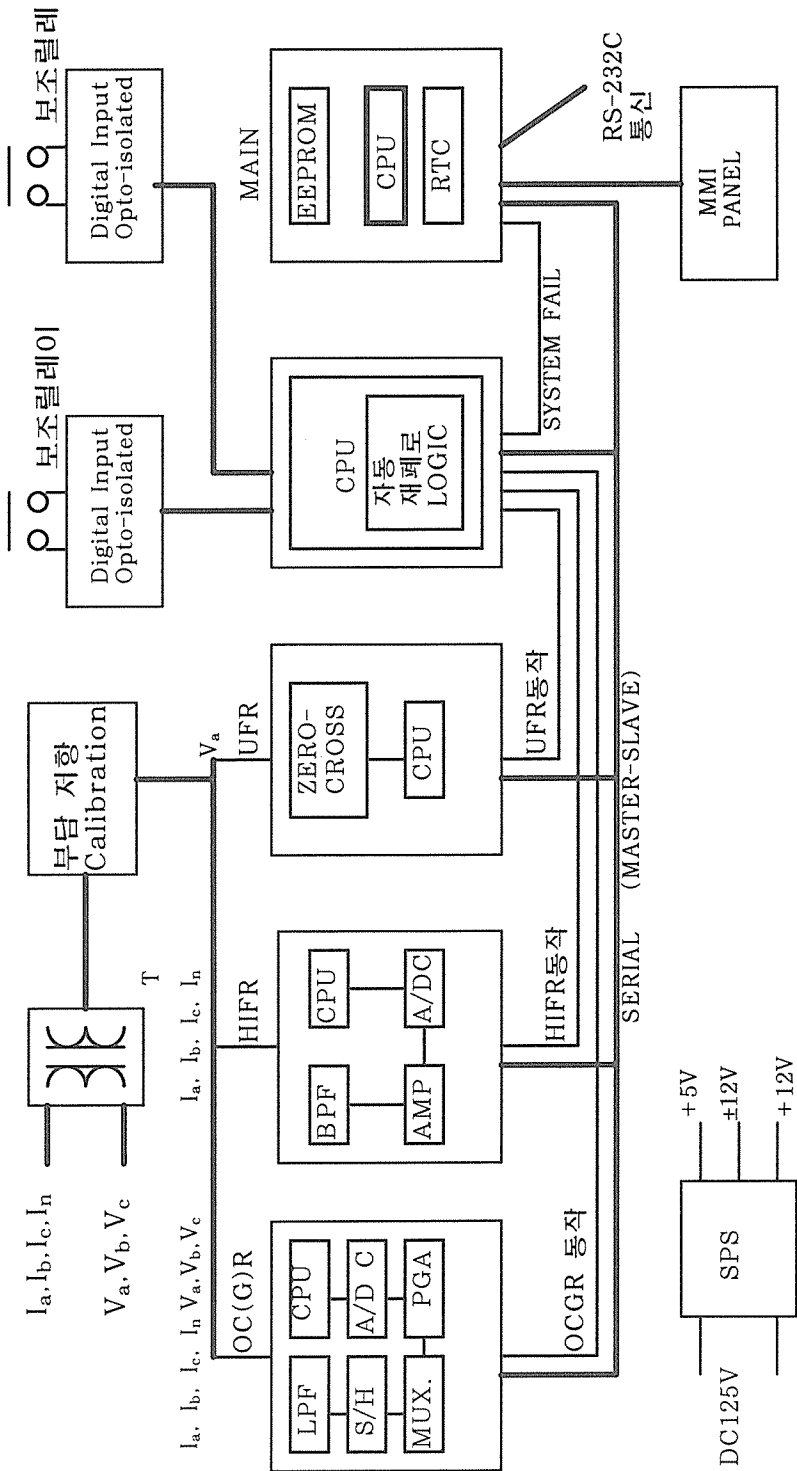
1) 22.9kV 배전선로용 디지털 보호계전장치의 하드웨어 구성

위 장치의 하드웨어 구성은 〈그림-2〉와 같다. 각 상의 전압, 전류신호는 potential transformer(PT)와 current transformer(CT)를 이용하여 scaling되고 절연되며, 절연된 아날로그 신호들은 정밀하게 calibration되고 해당 계전기 모듈로 입력된다. 과전류 계전기(OC(G)R) 모듈은 샘플링 주파수의 반이상 range의 주파수에 있는 harmonics와 noise의 효과를 줄이기 위한 로패스필터부, 필터링한신호를 multiplex하는 Multiplexer(MUX.)부, 또한 전류의 동작정정치 범위가 넓고, 약 20배의 전류량까지 측정하기 위해 phase 전류와 neutral전류의 개인 조정을 optimize는 PGA(programable gain amplifier)부, 이 scale된 아날로그신호를 디지털값으로 변환하는 ADC(analog to digital converter)부, 보호연산을 수행하는 마이크로프로세서(CPU)부로 구성된다. 고저항 지락계전기(HIFR)모듈은 360Hz~

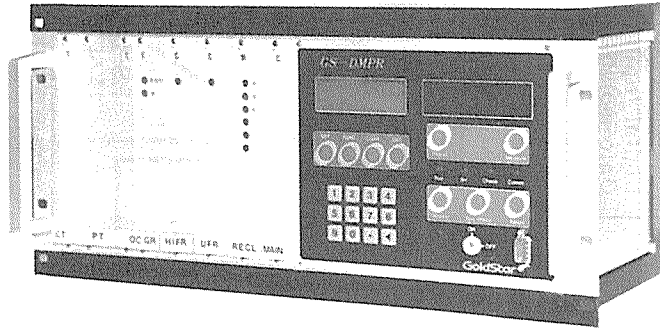
920Hz사이의 주파수만 선택하여 통과시키는 band pass filter(BPF)부, 적절한 레벨로 증폭하는 증폭시(AMP.)부, 이 scale된 아날로그 신호를 디지털값으로 변환하는 ADC부, 보호연산을 수행하는 CPU부로 구성된다. 저주파수 계전기(UFR)모듈은 입력전압의 주파수를 검출하는 zero-cross 검출부, 보호연산을 하는 CPU부로 구성된다. 자동재폐로 계전기 모듈은 각 고장검출 계전기의 동작상태를 입력받는 부, 차단기를 자동으로 투입하는 부와 CPU부로 구성된다. 메인 모듈은 정정 데이터의 수정, 입력전기량의 표시, 고장 표시등을 하는 MMI판넬부, 고장발생의 시간등을 관리하는 RTC부, 정정데이터를 보관하는 E²ROM부와 CPU부로 구성되어 있다. 〈그림-3〉은 22.9kV 배전선로용 디지털 보호계전장치의 외형그림이다.

2) 수배전반용 디지털 전력감시 제어장치의 하드웨어 구성

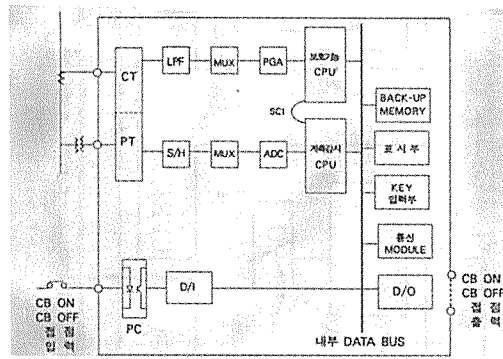
위 장치의 하드웨어 구성은 〈그림-4〉와 같다. 배전반의 계기용 변성기(CT/PT)로 부터 전기적 신호를 입력받아 장치내부의 CT/PT를 통해 적당한 신호 레벨로 변환한다. 보호계전기능을 위한 입력신호는 LPE(Low Pass Filter)와 PGA(Programable Gain Amplifier)를 거쳐 보호기능 CPU 내부의 A/D Converter(10-bit 분해능)로 처리되고, 계측감시를 위한 입력신호는 S/H(Sample & Holder)회로로 입력된 다음 14-bit A/D Converter로 처리한다. 두 CPU간은 Serial Interface되며, 정정 DATA와 Event Recording DATA등의 Backup을 위한 NV-RAM, MMI를 위한 KEY입력부, 표시부가 내부 DATA BUS에 Interface된다. 또한 차단기 ON, OFF 접점신호와 외부 계전기 동작 접점신호를 입력받아 표시하며, 차단기 동작 제어를 위한 출력접점과 고장 정보 출력접점등으로 구성되어 있다. 〈그림-5〉는 수배전반용 디지털 전력감시 제어장치의 외형그림이다.



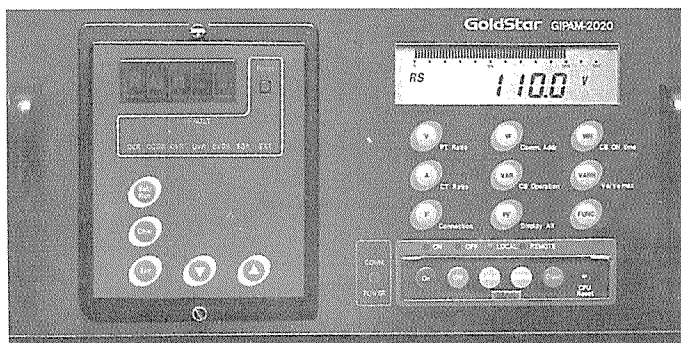
〈그림-2〉 22.9kV 배전선로용 디지털 보호계전장치의 하드웨어 Block도



〈그림-3〉 22.9kV 배전선로용 디지털 보호계전장치의 외형그림



〈그림-4〉 수배전반용 디지털 전력감시 제어장치의 하드웨어 Block도



- 설비의 간소화
배전반의 모든 계측, 계전기 및 조작장치의 집중화, 감시만 구성시 별도의 RTU Panel 불필요
- 보호계전기의 Digital화
Digital Filter 기술로 보호동작의 고신뢰성 실현, 다양한 동작특성의 정정으로 보호협조 최적화
- 자기 진단 기능
회로 불량 발생시 경고 출력 및 이상요인의 표시 및 전송으로 신속한 대응이 가능
- 뛰어난 유연성
상·선식 및 PT비, CT비 등을 DIP Switch로 간단히 설정 가능하므로 회로정격 변경에 손쉽게 대응
- 고속, 고신뢰의 통신기능
독자 개발한 LSI에 의한 250kbps 고속 직렬 통신 기능 원방제어 및 중앙감시 가능

〈그림-5〉 수배전반용 디지털 전력감시 제어장치의 외형그림

7. 자기진단 및 통신기능

1) 자기 진단

보호계전기의 자기진단에는 상시감시기능과 자동 점검 기능의 2가지가 있다.

• 상시감시

본 보호계전기장치는 기능을 정상적으로 유지하고 내장된 하드웨어와 소프트웨어 불량시 신속한 대처를 위해 최소한 다음의 구성요소들을 상시감시하고 불량이 지속되는 경우 경고 및 표시가 되며, 필요한 경우 TRIP회로를 분리시킨다.

a. On-chip 감시

데이터 메모리 전영역에 걸쳐 소정의 데이터를 쓰고 읽어내어, 데이터가 동일한가를 검사하는 RAM Verify감시, 프로그램 메모리 전영역의 데이터의 총화와 기지의 데이터를 비교하는 ROM sum-check, 프로그램 실행시 watch dog timer가 폭주되지 않도록 timer count를 일정한 시간마다 clear하는 watch-dogtimer감시(CPU감시) 등이 있다.

b. 입력 변환부 감시

A/D변환이 끝남을 알리는 신호(EOC)가 정해진 시간내에 출력되는가를 보는 A/D변환부 감시, 고정도의 기지직류전압을 PGA부에 인가해 증폭비를 바꾸면서 데이터를 검사하는 PGA감시부, 대칭좌표법을 이용해 영상분 전류(I_o)와 neutral전류(I_n)를 비교하는 CT와 아날로그 회로의 전체적인 감시등이 있다.

c. 디지털 신호 입출력 감시

보호계전기 외부와 연결되는 디지털 입출력을 feed back을 받아 비교하여 감시하는 방법이다.

d. 전원회로 감시

보호 계전기 내부의 제어전원은 디지털 회로에 +5V, 아날로그회로에 $\pm 12V$, 동작부에 +12V를 사용한다. 이 전원의 이상상승, 강하등을 comparator

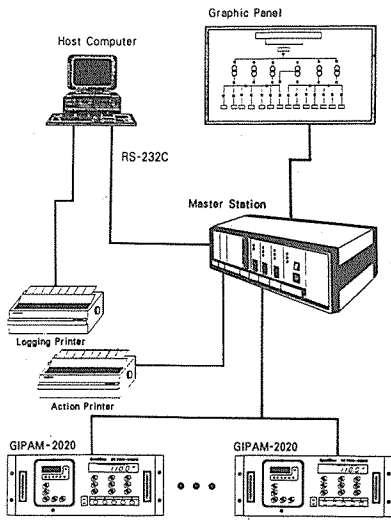
를 사용해 감시한다.

e. 자동점검

본 보호계전기장치는 피보호설비의 확실한 동작을 보장하기 위하여 자체 고장입력으로 출력을 확인하는 방법으로 불량을 검출한 경우에는 경고 및 표시가 되며, 필요한 경우 TRIP회로를 분리시킨다. 점검시간을 지정할 수 있으며 점검중 TRIP회로를 lock하여 점검으로 인한 동작을 방지하고, 점검중 실체사고 발생시는 즉시 RESET하여 본래의 기능을 수행한다.

2) 통신 기능

디지털 보호 계전기의 통신 방식은 잡음의 영향이 매우 큰 배전선로나 배전반에 적용된다는 점에서 독자개발한 통신용 LSI를 이용하여 신뢰도를 향상시켰다. 즉, DATA 송·수신 BUFFER, 변·복조회로, 동기회로, ERROR 검출 회로, FLOW CONTROL 회로를 1 CHIP에 집적시킨 통신 DRIVER로써 하드웨어와 통신 처리 소프트웨어를 간단 명료하게 구성할 수 있게 하였고, 송·수신 신호에 대해 Pulse Transformer로 절연함으로써 Noise, Surge 침입을 방지하였다. 통신사양은 250 kbps의 비동기 직렬 통신으로 최대 1km(Repeater사용시 2.5km) 전송거리와 Bipolar 변복조, 16-Bit CRC Error 검출, 최대 255대 Multi-drop 가능한 방식이다. <그림-6>은 위의 통신기능을 이용한 중앙 감시반의 구성도이다. 이는 본 장치들을 Slave로 두는 Master Station을 중심으로 개인용 컴퓨터와 주변장치, Logging 프린터, Graphic Panel로 구성된다. 본 장치는 계전기 정정 DATA, 계측 DATA, 고장 정보(동작계전기, 고장전압/전류, 고장 상), Event Recording DATA등을 수집하여 중앙으로 전송함으로써 중앙 감시반에서의 그래픽 화면 처리 및 기록작성(일보, 월보)을 가능케 하고, 제어명령(차단기 ON/OFF, Fault Reset등)을 받아 동작하므로써 원방 감시와 원방제어가 이루어 진다. <그림-6>은 수배전반용 디지털 전력감시 제어장치로 구성되는 중앙감시반의 한 형태이다.



〈그림-6〉 중앙감시반의 구성도

8. 성능 시험

22.9kV 배전선로용 디지털 보호계전장치에 대해 실시한 KERI 인증 시험항목은 기본기능 시험, 절연저항, 상용주파 내전압, 뇌임펄스 내전압, 온도상승 한도, 온도성능 시험, 과부하 내량, 내구성 시험, 내 노이즈 시험, 진동 및 충격시험, 제어전원 이상시험, 부담 시험, 동작 특성시험, 부동작 특성시험, 복귀 특성 등이며, 다음의 표는 디지털 보호계전기의 시험 항목을 나타낸 것이다.

시 험 항 목	시 험 구 분		
	인정	검수	참고
절연저항	○	○	
상용전압 내전압	○	○	
뇌임펄스	○		
온도상승 시험	○		
온도성능 시험	○		
과부하 내량 시험	○		
내구성 시험	○		
접점용량 시험	○		
내 노이즈 시험	○		

시 험 항 목	시 험 구 분		
	인정	검수	참고
진동 및 충격 시험	○		
제어전원 이상시험	○	○	
부담 시험	○	○	
동작 특성 시험	○	○	
부동작 특성 시험	○	○	
복귀 특성 시험	○	○	

9. 결 론

디지털 보호계전기가 가지고 있는 여러가지 특징과 장점으로 국내 여러회사에서 제품개발을 하고 있으나 국내에서는 아직까지 디지털 보호계전기에 대한 시험방법 및 기준이 정립되지 않아 성능시험을 하는데 많은 어려움이 있다. 앞으로 본제품만이 아니고 국내에서 계속 개발될 여러종류의 디지털 보호계전기의 신뢰성을 보장하기 위해서는 검증 및 공인된 시험 방법 및 시험규격이 만들어져서 국내 디지털 보호계전기의 수준을 높였으면 한다. 또한 본 논고에서 기술한 디지털 보호계전기 구현이 디지털 보호계전기의 개발과 사용에 참조가 되었으면 한다.



불법복제 주방하여
산업기술 보호하자