

디지털 계전기와 연구 동향

김철환* · 여상민*

(성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부)

1. 계전기란?

전력계통은 수많은 발전소, 변전소 및 송배전 선로 등의 요소를 포함하는 매우 복잡한 구조로 되어있다. 이러한 전력계통은 일정한 전압과 주파수를 가져야 하고, 수요에 맞는 전력을 공급하도록 신뢰성있게 운영되어야 한다. 그러나, 수용가의 의사에 따라 항상 변동하는 전력 수요와 자연상태에서의 고장은 전압, 주파수 등에 영향을 미쳐 신뢰성있는 전력의 공급을 어렵게 만든다. 특히 계통에서 고장이 발생할 경우, 고장 지점에서는 매우 큰 전류가 발생하여 인명피해나 수많은 재산 피해는 물론 대규모 정전을 유발하게 될 수 있다.

계전기(Relay)는 위와 같은 비정상적인 계통 조건을 검출하고 가능한 신속하게 반응하여 계통을 정상상태로 되돌리는 역할을 한다. 이러한 계전기는 보호계전기(protective relay)라고도 불리며, 이러한 역할을 수행할 수 있도록 계획하고 설치한 시스템을 보호계전 시스템(protective relay system)이라고 한다. 다음 그림 1은 계전기가 사용되는 곳을 나타낸 것이다.

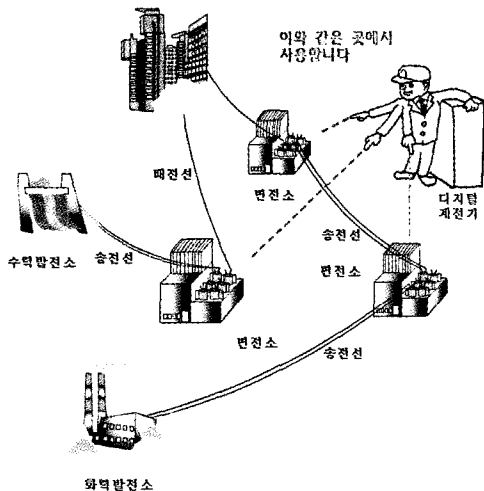


그림 1. 계전기가 사용되는 곳

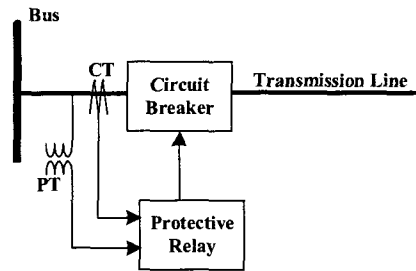


그림 2. 기본적인 설치 예

그림 2는 CT(current transformer)와 PT(potential transformer)로 부터 각각 전류 및 전압의 데이터를 입력받고, 정해진 보호 특성에 따라 보호계전기(protective relay)가 차단기(CB : circuit breaker)를 제어하는 것을 보이고 있다. 계전기는 고장이 발생하게 되면, 가능한 빨리 동작하여야 하며, 고장이 발생한 지역을 선택적으로 계통과 분리시켜야 한다. 또한 오동작이나 부동작이 없이 신뢰성있게 동작해야 한다.

2. 계전기의 종류

고장의 발생 원인과 발생 지역은 매우 다양하며, 각각에 따른 보호 특성 또한 다르다. 따라서, 각 보호 목적에 맞는 계전기를 설계, 개발할 필요가 있다. 보호 목적에 따라 계전기는 다음과 같이 분류된다.

2.1. 과전류 계전기(overcurrent relay)

계전기에 입력되는 전류가 사전에 정해진 값을 초과할 때 동작하는 계전기로서 동작치의 설정에 따라 의도적인 시간지연이 없는 순시(instantaneous), 한시 과전류 계전기로 구분된다. 그림 3은 반한시 과전류 계전기에 대한 시간-과전류의 일반적인 동작 특성을 나타낸 것이다. 반한시 특

성은 전류가 많이 흐르면 흐를수록, 동작시간은 더욱 작아지는 것이다.

이와 같은 과전류 계전기는 모든 계전기 중에서 가장 단순한 것으로, 여러 시스템 변수 중 전류 하나만의 데이터를 사용하여 동작한다.

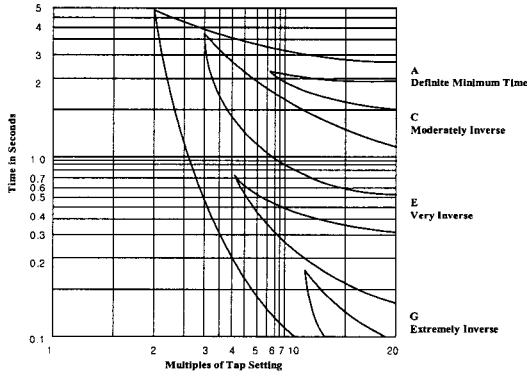


그림 3. 반한시 과전류 계전기의 동작 특성

2.2. 차동 계전기(differential relay)

보호장치와 관련하여 유입하는 전기량과 유출하는 전기량 사이의 차(difference)에 응답하여 동작하는 계전기이다. 다음 그림 4는 모선, 발전기 및 변압기 등에 차동 보호의 여러 가지 전형적인 응용 예를 나타낸 것이다.

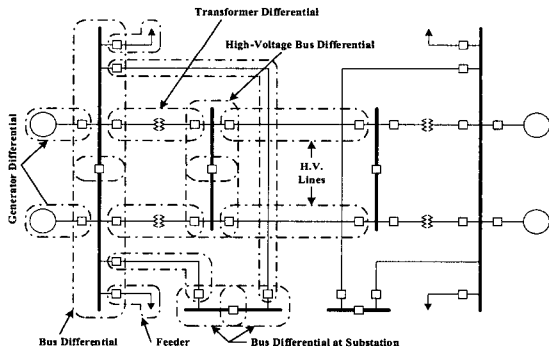


그림 4. 전형적인 전력계통의 보호 영역

2.3. 방향 계전기(directional relay)

다른 전류 또는 전압 기준에 대해 한 전류의 상대적인 위상의 위치에 응답하는 계전기로서, 다중 전원 계통에서 요구된다.

그림 4의 고압 송전선로와 같은 경우, 선로 말단에 설치된 계전기는 방향 계전기를 사용하게 된다. 왜냐하면, 이러한 선로들의 고장전류는 시스템의 양단의 발전기로부터 공급될 수 있기 때문이다. 전류의 흐름의 방향을 알고 있으면, 선택적이고, 덜 오동작하도록 보호방식을 설계하는데 도움이 된다.

다음 그림 5는 방향 계전기가 동작하는 경우의 예로서, F 지점에서 고장이 발생한 경우, CB 2가 동작하는 것을 보이고 있다.

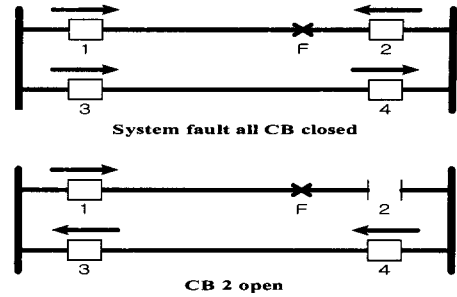


그림 5. 방향 계전기의 예

2.4. 거리 계전기(distance relay)

계전기 위치와 고장지점 사이의 거리에 대한 함수에 응답하는 계전기로서, 전압, 전류 그리고 둘 사이의 위상차를 사용하여, 고장이 발생한 거리에 비례하는 임피던스를 계산하고, 그 결과에 따라 동작하도록 설계된다. 거리 계전기는 그림 6, 7과 같은 R-X 평면상에서의 임피던스 영역에 따라 특성화되며, 그림 7에서와 같이 방향성을 부여하는 것도 가능하다.

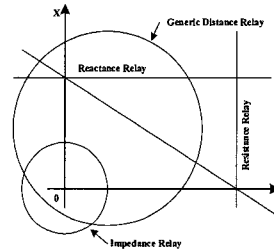


그림 6. 거리 계전기의 동작 특성

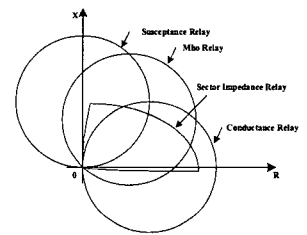


그림 7. 방향성 거리 계전기의 동작 특성

2.5. Pilot 보호(pilot protection)

선로 말단의 전기적인 값들을 비교하는데 통신 채널을 사용하는 선로 보호 방식으로, 선로 양단을 고속으로 동시에 차단하기 위해 사용된다. Pilot 계전기는 통신 수단에 따라, wire pilot, carrier pilot, microwave pilot, 그리고 fiber-optic pilot 보호시스템으로 불리며, 그림 8은 전력선(PLC : power line carrier) pilot 시스템의 예를 보이고 있으며, 통신 신호는 coupling capacitor나 CVT(capacitive voltage transformer)에 의한 고주파수의 신호와 결합되어 전송된다. coupling capacitor는 계통주파수에서는 매우 높은 임피던스를 가져, 개방회로의 역할을 하며, 실제 통신주파수인 고주파수에서는 단락회로와 같이 동작한다. hybrid coil(HYB)는 전자장치와 CVT 간의 임피던스 정합을 위해 사용된다. pilot 보호는 로컬 정보에 제한되는 보호시스템에 비해 관찰된 외란에 대한 더 많은 정보를 제공한다. 이러한 정보는 고장의 위치를 결정하는데 사용될 수 있다.

또한 보호대상에 따라 송전선 보호, 배전선 보호, 모선 보호, 변압기 보호, 리액터 보호, 발전기 보호, 전동기 보호, HVDC 보호, SSR 보호 등으로 분류된다.

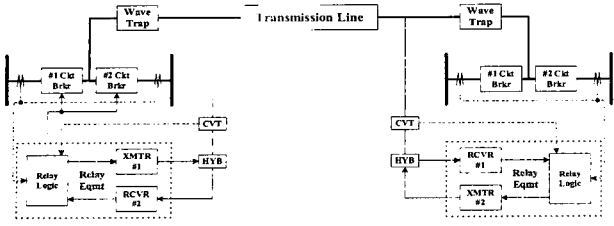


그림 8. 방향 비교 pilot 계전기 시스템

3. 계전기의 발달 과정

3.1. 전자기계형 계전기(electro-mechanical relay)

초기의 계전기는 전류와 자속 사이의 전자기적 상호작용에 의해 발생하는 힘을 사용하도록 설계되어졌다. 전자기계형 계전기는 구조에 따라 크게 다음의 두 가지로 구분된다.

- ① Plunger Type
- ② Induction Type

다음 그림 9는 plunger형의 계전기를 보이고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 코일이 여자되면 가동철심이 움직이며, 접점이 붙게 된다. 코일에 전류가 흐르지 않으면, 스프링에 의해 접점이 떨어지게 된다. 그림 10은 Induction형 계전기의 예로서, 입력전류에 의해 disc가 회전하게 되고, 사전에 정해놓은 것 이상으로 회전하면 접점이 붙게 되는 원리이다.

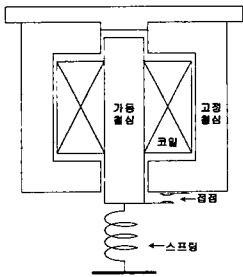


그림 9. Plunger형

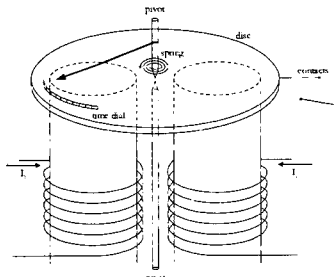


그림 10. Induction형

3.2. 정지형 계전기(static relay)

정지형 계전기는 1960년대 초반 소개되어 사용되기 시작한 것으로 기계적인 움직임이 없이 동작하는 계전기이다. 이러한 정지형 계전기는 민감성, 속도, 반복성 등의 많은 부분에서 전자기계형 계전기에 비하여 성능이 향상되었다. 전기적인 충격에도 잘 견디며, 동작시간 또한 향상되었다. 다른 시스템과의 긴밀한 협조가 가능하며, 저유지(lower maintenance), 저부담(lower burden), 소형화 등의 다양한 잇점을 가지고 있다.

정지형 계전기의 주요 단점은 작은 크기의 과도현상에도 민감하게 동작하기 때문에, 설치시에 차폐에 많은 주의 기울여야 한다. 또한 전자기계형 계전기에 비해 온도에 민

감하게 반응한다.

정지형 계전기는 거의 모든 계전 방식에 적용될 수 있으며, 다양한 보호방식으로 사용될 수 있다. 이러한 정지형 계전기는 주로 트랜지스터 회로에 의해 입력전기량의 크기의 비교, 또는 위상 비교를 수행하며, 그 비교 결과에 따라 동작한다. 다음 그림 11은 정지형 계전기의 기본 구성으로 이러한 구성을 토대로 사용 목적에 맞는 계전기를 설계한다.

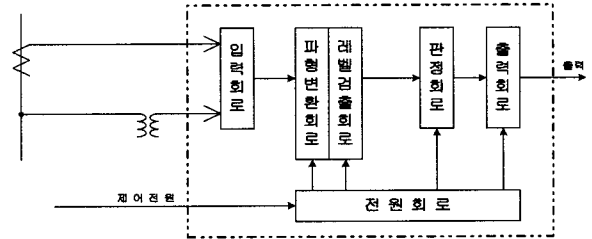


그림 11. 정지형 계전기의 기본 구성

다음 그림 12는 정지형 과전류 계전기의 회로 구성 예를 나타낸 것이다.

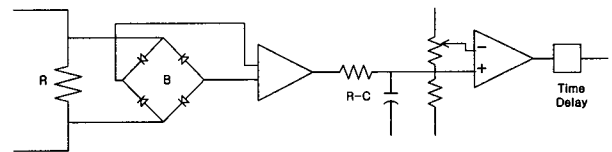


그림 12. 정지형 과전류 계전기의 회로 구성 예

3.3. 디지털 계전기(digital relay)

정지형 계전기는 계통 보호기술에 적용된 전자 기술의 1, 2세대로서 기술된다. 진공관 시대의 전자 시스템은 보호시스템에 광범위하게 사용되지는 않았다. 그러나 정지형 계전기의 등장과 함께 보호 계전기는 전자기계형 설계보다는 정지형 계전기에 더 의존하게 되었다.

디지털 계전기는 최근의 전자 기술을 적용한 것이다. 1차 개발은 초기 디지털 장치들에 의해 이루어졌으며, 많은 실험이 적용되었다. 때때로 소형 메인프레임 컴퓨터와 소형 미니컴퓨터가 사용되기도 하였다. 마이크로프로세서의 개발로 인해 저비용으로 컴퓨터와 같은 성능을 부여할 수 있게 되었으며, 디지털 보호방식은 새롭게 부각되기 시작하였다.

(1) 디지털 계전기의 역사

디지털 계전기는 수년간 대학과 기업들에서 연구되었다. 보호기능을 수행할 목적으로 디지털 장치가 사용된 초기의 개념은 1969년 Rockefeller에 의해 제시되었으며, 전체 변전소를 보호하는 계전 시스템을 위해서는 디지털 컴퓨터가 있어야 한다. 그러나, 그 당시에는 디지털 계전기를 실제로 구현하기는 어려웠다. 그 이유는 당시의 컴퓨터 가격이 매우 고가이며, 그에 반해 충분한 성능을 발휘하지 못하였기 때문이다. 이러한 상황에서도 Rockefeller는 몇몇 보호 알고

리즘에 대한 설명을 기술하였다. 다른 연구자들도 이러한 디지털 보호의 개념을 따라 연구를 수행하기 시작하였다. 그러나 대부분은 저렴한 컴퓨터가 개발되기를 기다리는 정도로 끝나게 되었다. 최근에는 컴퓨터의 가격이 내리면서, 속도와 성능은 향상되고 있는 추세를 보이고 있다. 또한 보호 유형에 따라 요구되기도 하는 메모리의 값은 급격하게 내려가고 있는 추세이다. 이러한 경향은 디지털 기술과 결합하여 컴퓨터 계전기를 만들 수 있도록 하였다. 현재의 디지털 시스템은 과전류 계전기는 물론 전체 송전계통 보호 시스템을 구현할 수 있게 되었다.

또한 디지털 계전기의 발전은 적응형 계전기의 개발을 가능하도록 하였다. 적응형 보호는 상세한 계통 조건에 더 가깝게 적용될 수 있도록 보호기능의 설정을 조정하는 기능을 가능하도록 하는 것이다.

최근의 디지털 계전기는 보호, 측정, 제어, 통신 등의 기능이 조합 또는 집적되어 설계된다. 이러한 발전 경향을 정리하여 보면 다음의 5세대로 구분하여 볼 수 있다.

- 1) 1세대 : 전자기계형 계전기
- 2) 2세대 : 정지형 계전기
- 3) 3세대 : 랙형태의 종합 정지형 계전기
- 4) 4세대 : 디지털 마이크로프로세서 계전기
- 5) 5세대 : 종합보호제어 시스템

(2) 디지털 계전기의 특성

디지털 계전기는 다음의 특징을 갖는다.

- ① 고도의 보호기능, 보호특성의 실현
디지털 계전기의 보호연산능력은 정지형 계전기에 비해 매우 높아 복잡한 계전기 특성을 구현하는데 용이하다.
- ② 장치의 축소화
마이크로프로세서는 집적도가 높은 소자들로 구성되어 소형화, 고기능화가 가능하다. 또한 기존의 계전기에서 하드웨어적인 구성으로 계전기 특성을 구현한데 반해, 디지털 계전기는 소프트웨어를 통하여 특성을 구현하므로 장치의 축소화가 이루어진다.
- ③ 자동감시기능
마이크로프로세서는 자기진단기능을 보유하고 있어, 디지털 계전기 전체의 자동감시를 수행할 수 있다.
- ④ 표준화 및 유연성
종래의 보호장치는 보호특성에 맞추어 여러 종류의 계전기를 개발한데 반해, 디지털 계전기는 소프트웨어적인 특성 구현으로 인하여, 하드웨어의 변경 없이 다양한 보호 특성을 구현할 수 있다.

(3) 디지털 계전기의 구성

디지털 계전기는 아날로그 계전기와 마찬가지로 보호장치와 연결되며, 고전압 도체와 연결된 CT, PT를 통해 얻은 데이터에 의하여 동작한다. 다른 입력 데이터는 전력계통내의 접점들의 상태에 의해 얻어진다. 출력 또한 접점들의 상태 정보이다. 다음 그림 13은 디지털 보호 시스템의 간략

한 기능도이다.

- ① Analog Input Subsystem
대부분 3~30개의 입력을 받으며, CT, PT에 의해 입력된다.
- ② Digital Input Subsystem
접점의 위치나 계전기가 요구하는 전압 검출 정보가 입력되며, 주로 5~10개의 입력신호가 존재한다. 이 신호는 버퍼에 저장되어야 한다.
- ③ Digital Output Subsystem
약 10개의 디지털 신호로서 계전기의 출력이다.
- ④ Data Scratchpad와 Historical data file
입력된 아날로그 데이터는 A/D 변환을 거쳐 샘플링되며, CPU에서 사용될 수 있도록 RAM에 저장된다. 또한 과도상태의 데이터는 historical data file에 저장된다.
- ⑤ Digital filter
입력되는 아날로그 데이터에 포함된 노이즈를 제거하는데 사용된다.
- ⑥ Relay Logic
입력값과 내부에서 계산된 값들을 사용하여 요구되는 보호기능을 구현해낸다.

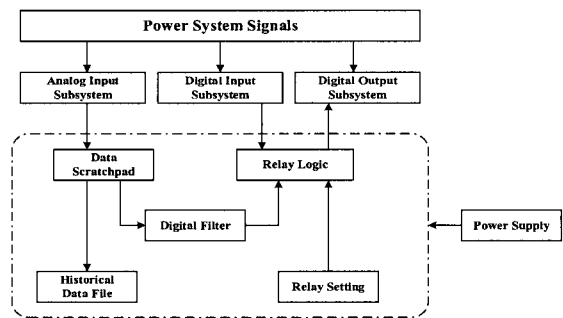


그림 13. 디지털 계전기의 기능적 구성도

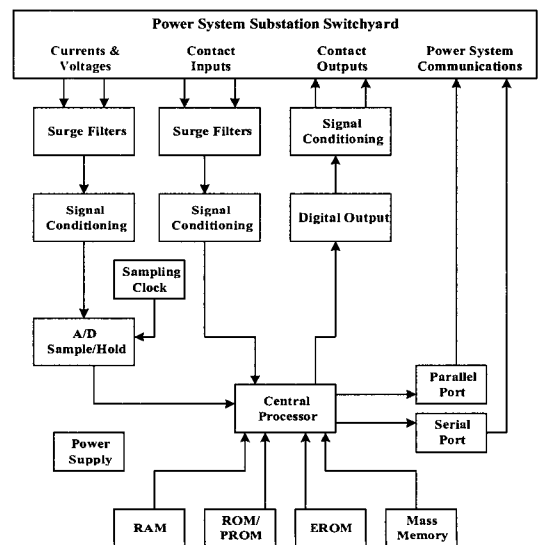


그림 14. 계전 컴퓨터의 내부 시스템 구성

그림 14는 더욱 상세한 디지털 계전 시스템을 보여주고 있다. CPU는 보호프로그램을 비롯한 다양한 기능을 수행하며, 입력데이터는 RAM에 저장된다. ROM 또는 PROM(programmable ROM)은 영구적인 프로그램을 저장하기 위해 사용되며, EROM(erasable ROM)은 계전기 정수들을 저장하기 위해 사용된다. 이러한 디지털 계전기는 계층 형태로 구성되며, 그림 15는 간단한 계층적 시스템 구조를 나타낸 것이다.

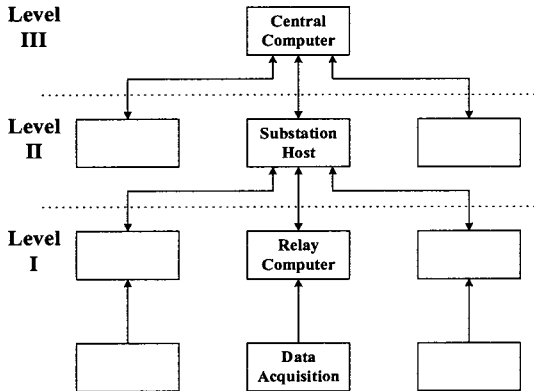


그림 15. 시스템의 계층적 구조

계전기 컴퓨터와 데이터 취득 시스템은 최하위 계층에 존재하며, 상위 시스템들은 하위 시스템을 제어하고 감시하는 기능을 수행한다.

(4) 디지털 계전기의 응용

디지털 계전기는 내부의 알고리즘에 따라 다양한 보호 방식을 채택할 수 있으며, 다양한 특성을 부여할 수 있다. 다음은 디지털 기술이 적용된 계전기의 예이다.

- ① 디지털 과전류 계전기(digital overcurrent relay)
- ② 디지털 거리 계전기(digital distance relay)
- ③ 변압기 계전기(transformer relay)
- ④ 발전기 계전기(generator relay)
- ⑤ 변전소 계전기(substation relay)
- ⑥ 기타
 - 디지털 부족주파수 보호
 - 디지털 방향 비교 송전선 보호
 - 디지털 송전선로 열 과부하 계전기

또한, 디지털 계전기는 해당 계전기만의 새로운 알고리즘을 다양하게 적용할 수 있다. 예를 들면 다음과 같은 알고리즘들을 적용할 수 있다.

- Fourier transform
- Walsh function
- Kalman filtering
- Statistical decision
- Adaptive protection

다음 그림 16은 디지털 계전기의 기본적인 구성 예를 나타낸 것이다. 전압, 전류의 입력정보는 각 3상분과 영상분

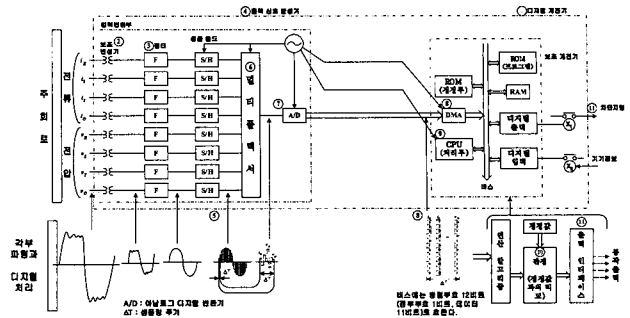


그림 16. 디지털 계전기의 구성과 각부의 상황

으로 입력된다. 디지털 계전기의 동작을 순서대로 나열하면 다음과 같다.

- ① 점선으로 둘러싸고 있는 부분이 디지털 계전기의 본체이다.
- ② 입력은 보조변성기에 의하여 절연하여 내노이즈 성능을 강화하고 있다.
- ③ 입력파형은 일반적으로 변형되어 있으며, 그대로 두면 오차가 되므로 아날로그 필터를 사용하여, 노이즈를 제거한다.
- ④ 클럭 신호 발생기에서의 신호에 의하여 각 입력 데이터를 샘플링하고, 샘플/홀드 회로에 의하여 순시값을 추출한다.
- ⑤ 샘플링 간격으로 추출된 순시값은 계단모양이 된다.
- ⑥ 멀티플렉서에 의하여 순차 아날로그 디지털 변환기에 입력하여 디지털화한다.
- ⑦ A/D변환기에 의하여 12비트의 데이터를 만들 수 있으며 마이크로 컴퓨터에 입력된다.
- ⑧ 디지털화된 데이터는 DMA에 의하여 RAM에 저장된다.
- ⑨ 마이크로 컴퓨터는 알고리즘에 기초하여 필요한 데이터를 추출하여 연산한다.
- ⑩ 연산 결과는 정정값과 비교하여 동작판정을 하고
- ⑪ 출력인터페이스를 통하여 동작 명령을 출력한다.

4. 디지털 계전기의 연구 동향

최근 계전기는 보호계전 기능 외에 계측 기능, 통신 기능, RTU 기능(데이터 전송 단말, 시퀀스 처리 기능), 제어 기능, Data 수집, 보관, 처리 기능, 그리고 자기진단기능 등의 종합보호 시스템으로 발전하고 있다.

또한, 신경회로망(artificial neural network)이나 퍼지추론(fuzzy inference), 또는 전문가 시스템(expert system)과 같은 인공지능 기법을 도입한 계전기들에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 추세는 현 계전기들의 신뢰성을 향상시키기 위한 방안으로, 디지털 계전기가 개발되면서, 실현 가능해진 것들이다. 변전소 시스템을 위한 표준 보호, 제어 설비로서의 지능형 전자 장치(IED : intelligent

electronic device)의 연구가 이루어지고 있으며, 이를 적용한 보호계전 시스템에 대한 연구도 계속되고 있다. 또한, 계통의 안정도를 고려한 시스템 측면의 보호방식인 SPS (special protection system)에 대한 연구도 진행되고 있다.

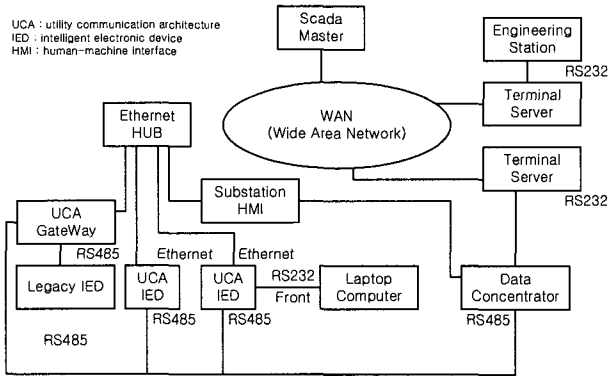


그림 17. 변전소 통합 구조

그림 17은 전형적인 UCA(utility communication architecture)를 기반으로 한 종합 변전소 보호제어 시스템의 간략한 구성을 나타낸 것으로, 각각의 장치들은 서로 네트워크로 연결되어 있으며, 계층적 기능의 구조를 가지고 있다. 위와 같은 변전소 보호제어 시스템의 기능적 계층은 전형적으로 다음의 세 단계로 구성된다.

① 1단계 : 다기능 보호 지능형 전자 장치(IED)

종합시스템의 최하단에 위치하는 것으로, 기본적인 기능은 변압기, 모선, 송배전선 등의 보호기능을 담당하며, 고장이 발생하기 전에는 데이터 취득, 제어, 감시 고장 기록 등의 기능을 수행한다.

② 2단계 : 지능형 전자 장치(IED)

아날로그와 디지털 사이의 인터페이스를 제공하며, 서로 네트워크로 연결되어 있다. 또한 1단계의 장치들과 마찬가지로 보호, 제어 기능을 제공한다.

③ 3단계 : 변전소 컴퓨터

변전소 내의 다양한 지능형 전자 장치들의 HMI (human machine interface)를 제공한다. 또한 알람, 이벤트 기록, 데이터 취득, 해석, 감시 등의 기능을 수행할 수 있다.

게이트웨이(gateway)는 구성요소 간의 다양한 규격을 일치시켜 원활한 통신이 가능해지도록 하는 기능을 제공한다. 특히 기존의 장치들과 개발된 새로운 장치들 간의 통신도 가능하며, 기존의 장치들을 폐기하지 않고도 새로운 시스템에 적용하여 사용할 수 있다.

이러한 종합 변전소 보호제어 시스템은 기존 장비의 재사용이 가능하고, 신뢰성을 향상시키는 것이 가능하다. 또한, 보호 및 제어 기능을 전체적으로 향상시킬 수 있게 된다.

5. 결 론

계전기는 신뢰성있는 전력공급을 위해서는 없어서는 안 될 매우 중요한 설비이다. 따라서 매우 오랜 기간동안 연구가 되어온 분야이며, 현재에도 계속적으로 연구가 진행중인 분야이기도 하다. 이러한 계전기는 전자기계형 계전기로부터 정지형 계전기와 디지털 계전기로 발전하였다.

디지털 계전기는 많은 다양한 보호 특성을 구현할 수 있으며, 간단한 프로그램을 통해 구현할 수 있다. 또한 하드웨어를 개선했을 때, 같은 프로그램을 동일하게 적용하는 것 또한 용이하여 기존의 계전 알고리즘의 신뢰성을 유지할 수 있다. 이러한 디지털 계전기의 장점은 전력공급에의 신뢰성을 향상시키는 역할을 한다.

최근에는 여러 주변 설비의 기능을 통합하는 것과 함께 IED와 통신을 이용한 변전소 전체 보호 시스템의 통합의 방향으로 연구가 추진되고 있다. 또한 최근 컴퓨터와 통신수단의 급속한 발달은 새로운 계전 시스템의 촉진시키고 있다.