

광전자식 과전류 보호계전기의 구현에 관한 연구

박병석^o, 오면택, 이화준, 조흥근
 전력연구원, 시스템통신연구소, 정보통신그룹

Implementation of Optoelectric Over Current Relay

Byung-Seok Park, Myun-Taek Oh, Hwa-Joon Lee, Hong-Keun Cho
 Computer & Communication Group, System & Communication Lab., KEPRI

Abstract - An optical magnetic filed sensor, YIG (Yttrium Iron Garnet), response rapidly, to the power-line currents to be measured. In response to Faraday effect, it shows wide-and-linear measurable range. This paper reports the development and implementation of an OOCR (Optoelectric OverCurrent Relay) using this sensor. This relay is free from environmental electro-magnetic noises and has excellent insulation characteristics inherently. By using this OOCR, we can reduce insulation cost of protective relaying systems and its maintenance cost, and can achieve high reliability of the system.

Keywords Optical Sensor, OCR(Over Current Relay), Protective Relaying, OOCR

1. 서 론

보호 계전기(Protection Relay)는 전력 계통을 운용하는데 있어 전기적 고장의 제거와 고장의 영향을 경감시켜서 전력 계통의 안전 운전을 유지하기 위한 장치로 전력 공급의 신뢰도 확보에 매우 중요한 역할을 수행한다.

그러나 기존의 보호계전 시스템에서 전류감지에 이용되고 있는 자계유도식 변성장치는 구조상 자기포화에 의한 파형 왜곡과 썬지나 잡음 등의 문제점을 갖고 있으며, 아울러 경년에 따른 열화 등에 의해 성능이 저하되면 각종 전기사고의 원인이 된다. 더욱이 송배전 전압의 초고압화에 따른 절연 장치의 규모가 커지게 되어 경제적, 기술적, 제조상의 문제를 야기한다.

자계에 의한 광의 편광(polarization) 회전을 검출하는 Faraday 효과를 이용하여 전류 량이나 자계를 측정하고자하는 연구의 초기에는 광섬유 자체를 센서로 사용하는 형태가 많이 연구되었으나 외부환경의 변화에 열악한 특성 때문에 보다 안정적인 화합물 결정체를 주로 이용한다. 특히 온도특성^o 보상된 Faraday 소자인 희토류첨가 YIG(Yttrium Iron Garnet)를 이용한 전력계통에서의 전류 계측은 절연특성이 우수하고 내구성이 뛰어난 뿐만 아니라, 선형 특성이 매우 우수하고 넓기 때문에, 여러 가지 다양한 활용이 가능하다.

본 연구에서는 Faraday 효과를 갖는 YIG(이후 광자계센서로 명칭)를 이용하여 전류를 측정하는 광전자식 과전류 보호계전기(Optical Over Current Relay: OOCR)를 구현하였다. 구현된 OOCR은 광자계센서가 가지는 넓은 동작영역의 특성을 충분히 살려 설계하므로써 기존의 자계유도식 CT의 자기포화 현상을 방지하였을 뿐만 아니라, 새로운 구동방식을 도입하여 계통보호 설비상의 유연성 및 용이함을 향상시킬 수 있다. 아울러

광자계센서가 가지는 무유도성, 고절연성 등은 기존의 계통보호 시스템에서의 여러 가지 문제점을 간단히 해결할 수 있어 OOCR 시스템의 신뢰성은 매우 높다고 할 수 있다.

2. 광센서의 원리 및 특성

2.1 Faraday 효과

광자계센서의 기본 원리는 그림 1과 같다[1]. 여기서 Faraday 회전각 θ_F 는 자계의 세기를 H, 광센서에서 광 경로의 길이는 L, 광의 전파방향과 자계와의 각도를 ϕ 라하고 Verdet 상수를 V로 표시할 때,

$$\theta_F = V \cdot H \cdot L \cos \phi \quad (1)$$

가 된다. Faraday 효과는 센서가 갖는 Verdet 상수에 의해 편광의 회전각도가 달라지며, 시스템의 설계에 있어 온도 의존성이나 삽입 손실 등의 특성들과의 관계를 고려하여 광자계센서를 설정하여야 한다. Faraday 효과를 광자계센서의 중요 파라메타는 verdet 상수와 온도 의존성 등을 들 수 있으며, 전류 량의 정확한 측정을 위해서는 신뢰성 있는 신호처리가 중요하다[2].

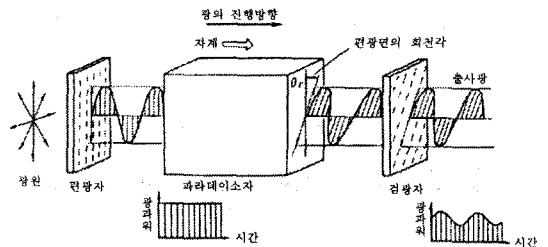


그림 1. 광자계센서의 원리

2.2 광자계 센서부의 구성

광자계센서는 소자에 인가되는 자계의 세기(Magnetic field intensity)에 따라 입사된 선형편광면이 회전하는 Faraday 효과를 이용하여 과전류를 검출하는 것을 말한다. 광자계소자로는 여러 가지가 있으나 반자성체의 연그래스, ZnSe, BSO, BGO 등이 있고 강자성체의 YIG 등이 있다[3].

본 연구에서는 Verdet 상수가 크고 온도특성이 우수한 희토류 첨가 YIG를 센서 소자로 선정하였다. 희토류 첨가 YIG는 온도특성을 개선하기 위하여 YIG결정에 온도보상용 희토류를 첨가하여 개발된 소자로 현재 널리 이용되고 있는 소자이다. 본 연구에서 사용된 희토류 첨가 YIG의 특성은 표 1과 같다.

표 1. 파라데이 소자의 특성

항 목	단 위	특 성
매 질	-	회도류침가 YIG
삽입 손실	dB	< 6
파장 의존성	deg/nm	-0.17
포화 자속밀도	kA/m	80
Verdet 상수	deg/Oe · cm	7
온도 의존성	deg/°C	0.06
두께 (기판 포함)	μm	570
사용 파장	nm	850
크 기	nm	5×5

센서부의 구성은 2개의 GRIN(Graded Index) 렌즈, 2개의 PBS(Polarized Beam Splitter), 45° 회전자 그리고 광자계 센서로 구성되어 지며, 그림 2에서 각 소자 배치를 나타내었다. 광섬유를 통하여 전달되는 광신호는 입출력부의 GRIN 렌즈에 의해 평행 광으로 정렬되어지고 전단 PBS를 통과하면서 광원의 빛이 선편광(線偏光)을 가지도록 조정된다.

광자계 센서는 선광성이 없으므로 선형 특성이 우수한 영역에서 광신호를 검출하기 위해서는 광학 바이어스를 잡아주어야 하며, 센서 전단의 45° 회전자에 의해서 이루어진다. 전류선에 전류가 흐르면 자계가 형성되고, 선편광된 빛은 센서를 통과하면서 편광면이 회전하게 되며, 후단의 PBS를 거치면서 전류의 세기에 따른 빛의 강도로 진폭 변조된다.

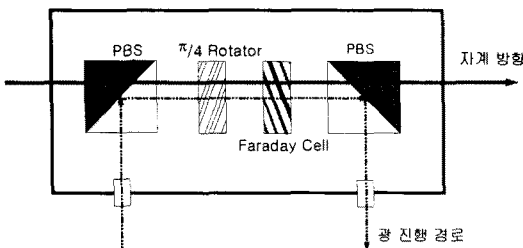


그림 2. 광자계센서부의 구성도

3. 광신호처리부의 설계

자계의 세기에 따라 진폭 변조된 광신호는 맥류신호 형태를 가지며 이것을 수식으로 표현하면, 수광부에 입사되는 광의 직류성분을 P_0 라 할 때,

$$P = P_0(1 + m) = P_0 + mP_0 \quad (2)$$

으로 나타내어진다. 여기서 m 은 Faraday 효과에 의한 광의 변화량으로서 일종의 변조도와 같다.

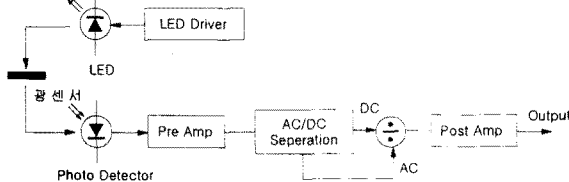


그림 3. 나눔 방식을 이용한 신호처리도

변조도 m 만을 검출하는 방법으로 수신된 광신호를 직류성분과 교류성분으로 분리한 뒤 나누어주는 방식을 택하였다. 그림 3에 나타낸 나눔 방식의 변조도 검출은 회로 구성이 간단하며, 안정적인 광신호의 변조도 검출을 가능하게 한다.

$$m = \frac{mP_0}{P_0} = \frac{\text{교류}}{\text{직류}} \quad (3)$$

이상의 원리를 적용한 광신호처리부의 블록도를 그림 4에 나타내었다. 광신호를 전기신호로 변환하는 PD(Photo Detector)에서의 신호는 매우 미약하여 잡음이나 외부간섭의 영향에 민감하므로 우수한 품질의 초단 증폭기를 이용하여야 하며 정지형 계전기에의 적용을 위하여 나눔처리 이후에는 rms치로 변환되어진다.

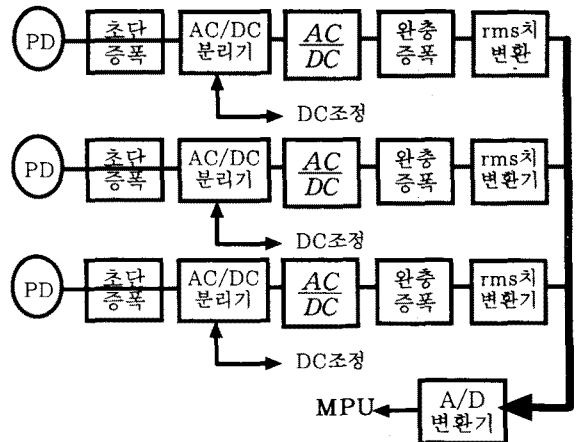


그림 4. 광신호처리부 및 인터페이스부의 블록도

4. OOCR의 설계 및 구현

설계된 OOCR은 정지형 계전기를 기본 모델로 하였으며, 그림 5에 OOCR의 블록도를 나타내었다. 광소자 구동회로에서 출력된 광신호는 광섬유를 통하여 전력선에 설치된 광센서를 거치면서 변조되어 다시 광소자 구동회로에 인가되어 전기적인 신호로 변환된다. 광소자 구동회로에서 검출된 신호는 신호처리부를 거치면서 특성치만 추출되어지며, 다시 RMS 값으로 변환되어, AD 변환기를 통하여 디지털 신호로 변환된다. 광 신호처리부에서 나온 출력은 저항에 의한 분압회로를 통하여 각 상당 2개의 채널이 AD변환기에 인가되어 AD변환기의 분해능(Resolution)을 증가시키는 효과를 가질 수 있다. 아울러 분압회로와 AD변환기 사이에 클램프회로를 두어 AD변환기를 고전압으로부터 보호하도록 하였다.

제어부에서는 마이크로 컨트롤러의 제어에 의해 전력선의 전류를 감시하며, 전면 패널에 정보를 표시하거나 패널로부터 조작 정보를 받아 처리한다.

설계된 OOCR은 넓은 동작영역에서 우수한 선형성을 갖는 광센서의 특성을 살려서 기존의 CT(Current Transformer)에서의 탭에 의해 전류 변환 비를 설정하던 방식을 제거하고 전자회로와 소프트웨어적인 처리를 통하여 센서에 관계없이 동작 전류영역을 설정하도록 구현하였다. 이러한 특성은 계통보호 시스템의 설비의 초기 설치 및 유지보수를 간편하도록 하며, 단순한 스위치 조작으로 넓은 대역의 부하에서 사용 가능하여, 엄격한 과전류 감시 및 보호가 가능하여 운영상의 유연성이 우수할 뿐만 아니라, 운전원이 고압선에 접근해야 하는 작업 회수를 줄일 수 있다.

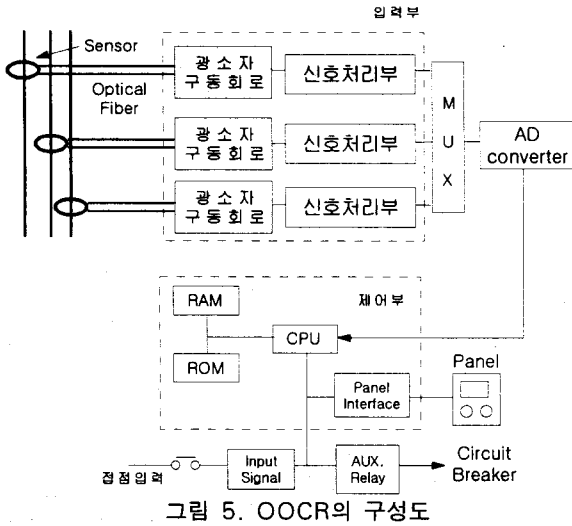


그림 5. OOCR의 구성도

전력선에 설치되는 광 센서부는 기본적으로 광 센서부와 광케이블의 지지 장치 이외에는 별도의 설비가 없어 견고하고 간단하며, 이러한 장치들은 비전도성 물질로 제작 가능하므로 절연성이 우수하다.

설계된 광전자식 과전류 보호계전기는 동작영역이 ESB 145, 150규격에 명시된 CT의 변류비 영역을 만족시킬 수 있도록 하였으며, 기존의 보호계전기가 갖는 성능을 모두 구현하였다. 설계상 고려하여야 할 하드웨어적인 제한 사항을 살펴보면 다음과 같다.

- 광센서 동작 영역 : 0 - 20,000A

광센서의 전력선 전류에 대한 응답에서의 선형성은 광 센서부의 광학적인 bias에 의해 넓은 범위에 걸쳐 선형 특성이 우수함을 [4]에서 알 수 있다. 제작된 광센서의 선형 특성이 유지되는 범위는 20,000A 정도임을 보였다. 이 범위는 전력선과 광 센서간의 거리를 좀 더 크게 조정하면 보다 큰 전류도 측정 가능하다.

- AD 변환기의 특성 : 10bit

AD 변환기의 주요 파라메타로 샘플링 주파수나 해상도를 결정하는 bit 수를 들 수 있겠다. 우선 샘플링 주파수 문제의 경우, 전력선의 교류 주파수가 60Hz로 매우 낮으며, 정지형 계전기의 경우 직접 샘플링 되는 신호가 교류를 정류한 rms값이므로 수십kHz 이상의 동작 속도를 갖는 일반 AD 변환기에서 쉽게 만족된다. 샘플링 비트 수의 경우, 전류계측의 정확도를 위해서는 비트 수가 클수록 정확하나, 비트 수가 커짐에 따라 제작비용이 증가할 뿐만 아니라, 기술적으로도 어려워지므로, 일반적인 원칩 마이크로 컨트롤러에 내장된 10bit 해상도의 AD모듈을 이용하여 시스템을 단순화하였다.

4.1. OOCR의 규격

계전기가 가지는 순시전류 설정 및 보호협조 기능 등의 기능에 부가하여 광전자식 과전류 계전기만이 가지는 변류비 설정기능 등을 다음과 같이 설계하였다.

4.1.1. 순시 전류 정정치

기존의 과전류 보호계전에서 순시 동작 범위는 전류 정정치의 400% - 1,600%까지 설정하여 사용한다. 따라서 순시 전류 동작범위의 단계별 설정치는 전류 정정

치에 대하여 400%, 500%, 600%, 700%, 800%, 900%, 1,000%, 1,200%, 1,600%의 9단계를 가지도록 설정하였다.

4.1.2. 동작영역 설정 탭

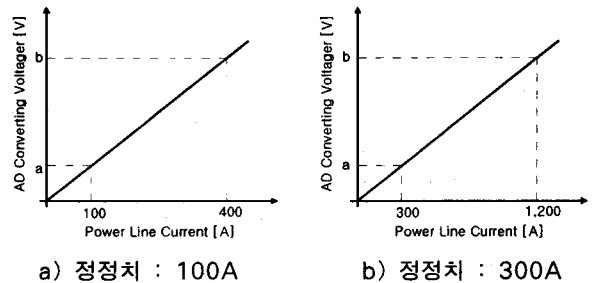
보호계전 방식에서 CT는 전력선의 고전류, 고전압이 직접 보호계전기에 인가되지 않도록 소신호로 변환하는 기능을 한다. 이때, 권선비에 의한 동작점 설정을 위한 변류비 탭에 의해 2차 측은 항상 5A를 기준치로 설정하여 동작한다. 따라서 CT를 부하의 용량에 따라서 설정하므로써, 보호 계전기는 부하용량에 따라 별도의 계전기를 만들 필요가 없이 다양한 동작영역을 가지게 된다.

반면, 광센서의 동작 영역은 기존의 철심과 코일로 이루어진 CT에 비하여 매우 넓은 동작 영역을 가지므로, 각각의 전력선의 부하 용량에 따라 개별적인 전류 비를 갖는 CT를 설치할 필요가 없이, 동일한 광센서를 계전기 조작 패널에서 CT의 변류비 탭 설정에 해당하는 동작 영역을 설정하여 보호계전이 이루어지도록 설계하였다.

이러한, 광센서의 동작 특성은 넓은 전류 영역에서의 선형성이 보장되지만, 전자회로의 처리 과정에서 AD 변환기의 해상도의 한계에 의해 동작 영역이 좁아진다. 과전류 계전기는 순시동작조건에 의해 전류 정정치의 16 배이상의 넓은 영역에서 신호처리 해야하므로, 전력선의 전류가 낮은 경우, 즉 AD변환기의 입력이 미세한 영역에서는 기기의 정확성이 AD 변환기의 해상도와 직접적인 관계를 갖는다.

AD 변환기의 해상도를 보상하기 위해서 광센서의 인터페이스 회로의 신호 증폭도를 조정하는 방법을 고안하였다. 그림 6에 보인 바와 같이 정격전류(기존 CT의 변류비)가 100A의 경우나 300A인 경우에 관계없이 AD 변환되는 기준 전압, a는 동일하도록 광신호처리부에서 증폭율을 조정한다. 이러한 구조는 동작 영역의 설정에 관계없이 동일한 정밀도에 의해 과전류 동작을 감지하여 제어할 수 있으며, 내부 제어 프로그램의 구조를 간소화할 수 있다.

시스템의 마진과 다음에 기술하는 각종 파라메타와의 영향을 고려하여 설계된 보호 계전기는 100A, 300A, 600A, 900A, 1,200A의 정격 전류 탭을 갖는다.



a) 정정치 : 100A b) 정정치 : 300A

그림 6. 동작 영역 설정의 역할
(400% 순시응답 설정)

4.1.3. 정정치의 가변 영역

앞의 4.1.2에서 정의된 동작 영역 탭은 하드웨어적인 방법에 의해 처리된다. 그러나 현장에서 사용되는 기준 전류는 임의 값이 될 수 있으므로, 그림 7에서 보듯이 전체영역을 빠짐없이 설정 가능하도록 조정할 수

있는 동작 영역에 대한 가변 영역을 조정할 필요가 있다. 이러한 가변 영역은 정정치 탭에 대한 비율로써 60% ~ 120%의 비례 값으로 설정하면 각각의 기준 전류 값에 대하여 전체영역이 설정이 가능하게된다. 예를 들면, 300A 기준 전류 탭에 대하여 60% ~ 120%의 영역은 180A ~ 360A의 범위에서 정정치를 설정할 수 있다. 이러한 비율 처리는 소프트웨어적으로 처리되며, 60% - 120%의 범위에서 자유로이 설정하도록 설계되었다.

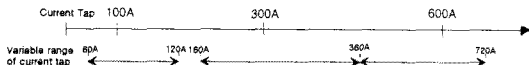


그림 7. 기준 전류 탭에 대한 전류 정정치 영역

4.1.5. 응동 시간 특성

보호 계전에서 응동 시간 특성은 반한시, 비례한시, 정한시로 분류되며, OOCR에서는 강반한시(very inverse), 초반한시(extremely inverse), 정반한시성(inverse)의 3가지 응동 시간 기능들을 구현하였다.

4.1.6. 보호협조를 위한 보호시간 지연 탭 설정

고장 규모를 최소화하고 고장 구간을 격리시키기 위하여 동일 선로상의 계전기간에 응답 시간 설정을 조금씩 다르게 한다. OOCR에서는 일반적인 과전류 계전기를 모델로 하여, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 40의 16탭을 갖도록 하였다.

4.2. 광전자식 과전류보호계전기의 구현

이상의 특성들을 고려하여 설계된 광전자식 과전류 보호계전기의 규격을 표 2에 나타내었다. 대전류용 A형과 소전류용 B형, 2종으로 나누었으나, 이는 광센서의 선형성의 제한이 아니고 단지 AD변환기나 OP-AMP상의 전압범위 등에 따른 전기회로상의 단순성과 신뢰도를 위한 것으로 상용화 등의 과정에서는 A형과 B형이 일체형으로 구현될 수 있다.

표 2. 광전자식 보호계전기의 규격

구 분	A 형	B 형
동작 영역	100A	600A
	300A	900A
	600A	1,200A
전류 정정치	60 - 120%	
Time Lever	0.25 - 40(16 TAP)	
순시 정정치	400 - 1,600%(9 TAP)	
제어전원	DC 110V(±25%)	
의 함	알루미늄	

마이크로 컨트롤러는 Intel사의 16bit급의 80C196KC를 사용하였다. 이 프로세서는 8채널의 AD 변환을 Mux를 통하여 지원하므로 3상의 신호를 처리할 수 있다. 제작된 OOCR의 메인보드를 그림 8에 나타내었다.

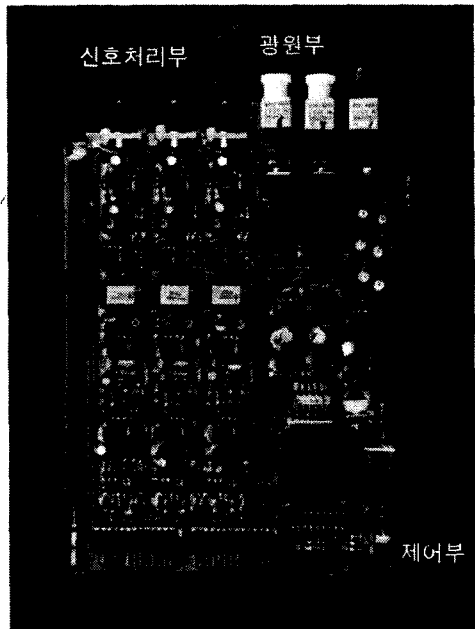


그림 8. OOCR의 메인보드

5. 결 론

본 논문에서는 광자계센서를 이용한 광전자식 과전류 보호계전기의 설계 및 구현에 관하여 기술하였다. 기존의 전력계통에서의 보호계전은 철심형 변류기를 이용하여 구성되어 포화나 경년 변화에 의한 성능 저하 및 운용상의 문제점들이 내재하고 있으며, 더욱이 전력 계통의 대용량화 및 고전압화에 따라 더욱 심화되고 있다. 본 논문에서 제시한 광자계 센서를 이용한 과전류 보호계전기의 경우, 전력선의 전류감지 과정에서 광센서를 사용하여 철심에 의한 자계포화현상이 없으며, 고절연 특성 및 무유독성에 의해 기존의 보호계전기에서의 문제점을 다수 해결할 수 있을 뿐만 아니라 및 정밀한 전류 측정이 가능하여 보호계전 기능과 전류 계측기능을 한 시스템에 통합할 수 있을 뿐만 아니라 넓은 동작영역을 가진다.

향후, 과전류 보호계전 기능에 부가하여 비율 차동 계전 기능까지 통합한 보호계전에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 박해수, "과전류 계측을 위한 광자계센서의 구현," 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, pp1871 - 1873, 7월 21, 1997.
- (2) Jun Song, "Development of Magneto-optical Current Transducers for Power Systems", Thesis for the degree of Ph. D, Univ. of Manitoba, Jan. 1996.
- (3) 布下正雄, 久間和生, "光ファイバセンサ(基礎と應用)", 情報調査會, 1986.
- (4) 조흥근, 김일동, 박병석외 2인, "광전자식 보호계전방식 및 신호처리기술연구(중간보고서)", 전력연구원, 4월, 1998.