

몰드변압기용 부분방전 측정 센서 및 시스템 개발

강동식\* · 선중호\* · 조국희\* · 이상민\*\* · 윤영호\*\*\* · 이동준<sup>§</sup> · 여수영<sup>§</sup> · 김주현<sup>§§</sup> · 최교남<sup>§§</sup>  
 \*한국전기연구원, \*\* (주)인텍 C&I, \*\*\*동우전기공업(주), <sup>§</sup>(주)태광이엔시, <sup>§§</sup>수자원공사

Development of Partial Discharge Measuring Sensor and System for Mold Transformer

D.S. Kang\* · J.H. Sun\* · K.H. Cho\* · S.M. Lee\*\* · Y.H. Yun\*\*\* · D.Z. Lee<sup>§</sup> · S.Y. Oeu<sup>§</sup> · J.H. Kim<sup>§§</sup> · K.N. Choi<sup>§§</sup>  
 \*KERI, \*\*Intech C&I, \*\*\*Dongwoo, <sup>§</sup>Taegwang E&C, <sup>§§</sup>KOWACO

**Abstract** - In order to development of diagnosis system for mold transformer, partial discharge measurement technique is recommended the best effective method for the evaluation of insulation condition on high voltage winding part. However, this technique was not applied to mold transformer yet.

The purpose of this paper is to describe the method of partial discharge measurement for mold transformer with coupling sensor and measuring system. As we reviewed and developed the on-line partial discharge test technique, ceramic coupling sensor, measuring system, terminal box and index parameters.

1. 서 론

몰드변압기는 유입식 변압기가 지니는 주요 단점인 사고시 화재 및 폭발의 위험성을 제거하기 위해 내연성에 폭시 레진을 몰딩하여 제작하는 기법으로 제작되며, 주로 소방설비가 고려되어지는 옥내형 수배전설비 및 지하철 등에 사용이 증가되고 있는 실정이다. 그러나, 유입식 변압기에서는 절연유 가스분석방법 및 부분방전 측정법을 이용한 진단기법이 개발되어 열화진전에 대한 상태감시가 가능하지만, 몰드변압기의 경우는 현재까지 현장진단기법 개발이 미진하여, 설비의 확대 보급 및 안전운전에 제약을 받고 있는 실정이다. 이러한 몰드변압기는 절연물 몰딩제조공정에서 필히 수반되는 void 또는 이물질 부위 등에서 장기간 사용후 전기적열화인 부분방전이 발생하여 진행되면 절연과피 사고로 진전되게 된다.

국내의 경우 몰드 변압기의 수명상태를 정확히 판단하지 못한 상태에서 실제적으로 장시간 운전되는 경우가 대부분이므로, 제조불량 및 장기 사용시 발생하는 부분방전 현상에 따른 절연과피 가능성이 높다. 예를 들면, 지하철에 이용되는 몰드변압기의 경우는 부하 특성으로 인하여 다른 설치 장소보다 사고가 빈번하게 발생한 것으로 조사되었다.

그러므로 최적 측정감도를 보유한 부분방전 센서, 센싱된 방전펄스를 신호처리하는 측정 transducer, 현장조건을 고려한 잠음제거기법 및 진단알고리즘을 지닌 측정시스템을 on-line으로 구축하여 절연과피 사고를 미연에 방지하고자 운전중 부분방전 측정시스템을 개발하였다.

2. 몰드 변압기의 절연열화 특성 및 진단방법

2.1 절연열화 특성

몰드변압기의 성능은 권선 절연시스템의 특성에 의하여 결정되어진다. 이 권선 절연시스템의 주성분은 난연 및 내연성을 지닌 에폭시 레진으로 주로 고전공 상태에서 몰딩

하여 제조된다. 절연물 몰딩제조공정에서 void 또는 이물질이 적은 양이지만 포함되어지며, 운전 중 부하변동에 의한 heat cycle 발생으로 도체부와 에폭시 절연부의 열팽창차이로 절연물에 crack 발생이 촉진된다. 장시간 운전 시 이러한 결점 부위에서 부분방전이 발생 진전되면서 절연재료의 열화가 촉진되어 절연성능이 떨어지고 궁극적으로 절연과피 사고로 진전될 위생성이 증대되게 된다.

몰드변압기는 운전 상태에서 전압, 열, 기계력 및 환경적 열화요인을 단독 및 복합으로 받고 있다. 일반적으로 변압기 권선은 사용 중에 상시 운전시의 전압과 뇌 전압, 침입서지 등 전기적 스트레스를 받으며, 절연시스템은 전기절연 외에 기계적 구조물의 기능도 지니므로, 기계적 지지에 단락시의 전자력 및 온도변화에 의한 열응력 등의 기계적 스트레스를 받는다. 또한 습기, 오염, 약품 등 주위 조건에 따라 여러 가지 환경적 열화가 수반된다.

2.2 열화진단 방법 검토 및 선정

몰드변압기는 유입식변압기의 단점인 사고시 화재 및 폭발의 위험성을 최소화하고자 사용이 증대되고 있는 제품이나, 절연유 분석방법을 비롯한 여러 가지 진단기법이 개발되어있는 절연상태의 감시가 가능한 유입식변압기와는 달리 현재까지 확실한 현장진단기법이 개발되지 못한 실정이다. 그러나 최근 들어 도심지 또는 산업체의 주 에너지 공급원으로서 기능 및 정보통신의 확대 등으로 고장 없는 제품에 대한 요구가 증대되고 있다.

이러한 몰드변압기의 열화상태를 진단하는 방법은 크게 전기적 측정법과 비전기적 측정법으로 대별된다. 전기적 측정법으로는 직류고전압을 인가하여 표면오손 및 흡습상태를 평가하는 절연저항 및 누설전류 측정법, 절연체의 손실율을 종합적으로 측정하여 재료의 특성 변화를 판단하는 유전정접 측정법, 국부결함지점에서 발생하는 방전펄스를 측정하는 부분방전 측정법 등이 있다. 비전기적 측정법으로는 crack과 구조적 변형 및 권선 진동을 측정하는 진동검출법, 방전시 발생하는 초음파를 분석하는 초음파 측정법 등이 있다.

본 연구에서는 몰드변압기에 대한 on-line 부분방전 측정시스템을 구축하는 것을 목표로 하여 다음과 같이 진행되었다. 첫째, 온라인 부분방전 측정방법으로 고압부 인출단에 직접 센서를 부착하는 접촉식방법을 선정, 둘째, 측정용 센서의 측정 주파수 대역 선정, 설계, 제작 및 특성평가, 셋째, on-line 부분방전 검출시스템 설계 및 transducer 제작, 넷째, 모의 열화 몰드 변압기 및 열화시험용 반환부하 설비로 모델실험을 통한 부분방전 측정가능성 확인 및 문제점 검토 분석, 다섯째, 현장설치 기법 검토 및 필요 기자재 제작, 여섯째, 상용품으로 성능 확인 및 신뢰성 입증 순서로 개발을 진행하였다.

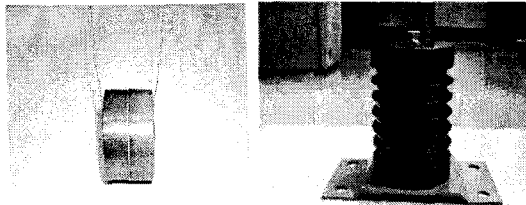
### 3. 운전중 부분방전 센서 개발

#### 3.1 6.6kV급 접촉식 부분방전 센서

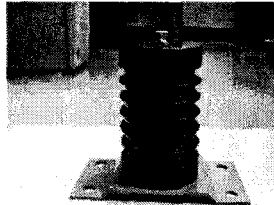
고압부 인출단에 직접 센서를 부착하는 접촉식 센서는 센싱부인 세라믹 소재와 기계적지지 및 전기적 절연부인 에폭시 돌덩부로 설계하여 제작되었다.

센싱부에 해당되는 소재는 유전율이 300근처인 세라믹 컴파운드를 배합하여 성형 및 소성하여 제작한 후, 소재의 양쪽 전극면에 Ag으로 금속 전극층을 형성하는 구조로 구성하였으며, 그림 1은 설계 제작된 105pF 세라믹 소재이며, 이 소재 외부에 연면방전 방지 및 기계적 지지를 위하여 진공 속에서 에폭시로 성형하여 완성된 6.6kV급 접촉식 부분방전 센서를 나타낸 것이 그림 2이다. 최종 제작된 제품은 높이 100mm, 직경 70mm이며, 이 제품의 개발 기준 및 최종 개발 후 완성된 상용품의 성능은 다음과 같이 나타났다.

- 1) 내전압 특성은 15[kVrms] : 만족
- 2) 3[pC]의 부분방전 개시전압 8[kV] 이상 : 15kV
- 3) 5[dB] 기준의 측정주파수 대역 : 10~100[MHz]
- 4) 교류 4[kV]에서 상온 유전정접 0.5[%] 이하 : 0.25% 이하
- 5) 건조 섬락전압 특성 21[kVrms] 이상 : 50kV



<그림 1> 접촉식 센서 소재



<그림 2> 접촉식 센서 외관

센서의 장기 신뢰성을 평가하기 위하여 13kV의 전압을 1500 시간 인가하였으나 절연파괴 및 섬락현상이 발생하지 않았다. 접촉식 센서에서 절연기능은 2 종류의 절연재료가 병렬 복합으로 사용되어지는 구조이므로, 수명지수를 선정함에 있어서 적은 값을 기준으로 하고 여기에 시험상 안전율 20%를 감안하여 선정된 수명지수 n은 4.8이다. 이를 전기적 열화지수를 표현하는데 이용되는 과전수명식을 이용하여 운전전압에서의 수명평가를 실시한 결과, 다음과 같이 계산되어져 62년으로 나타났다.

$$(V_2/V_1)^n = T_1/T_2$$

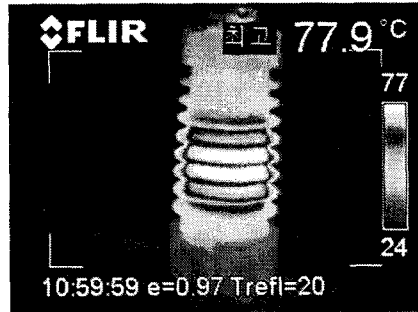
$$(13/3.81)^{4.8} = T_1 / (1500 / (24 \times 365))$$

#### 3.2 22.9kV급 접촉식 부분방전 센서

국내 배전선로에 직결되는 몰드변압기의 고압측 권선에 부착되는 부분방전 센서도 3.1항에서 언급된 것과 동일하게 센싱부인 세라믹 소재와 기계적지지 및 전기적 절연부인 에폭시 돌덩부로 설계하여 제작되었다.

센싱부에 해당되는 소재 재질은 6.6kV급과 다른 고유전율 세라믹 컴파운드로 배합하여 소재를 성형한 후, 소재의 양쪽 전극면에 Ag으로 금속 전극층을 형성하는 구조로 구성하였다. 최종 완성된 소재는 그림 1과 달리 6단 직렬 구조를 지니며 정전용량이 100pF로 나타났다. 소재의 개발 중 고유전율 컴파운드 선정과정에서 높은 유전정접으로 인한 열폭주 가능성이 나타났으나, 적정 세라믹 컴파운

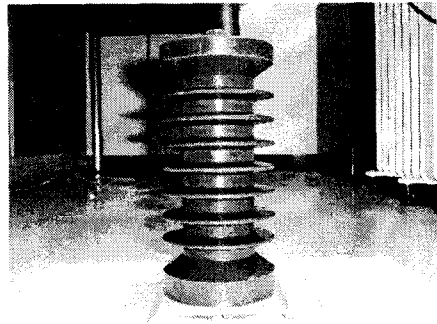
도 선정으로 열폭주 가능성이 배제된 소재를 개발하였다. 개발도중 나타난 열폭주 가능성을 나타내는 현상을 그림 3에 나타내었다.



<그림 3> 33kV 인가시 소재부 발열현상

이 소재 외부에 연면방전 방지 및 기계적 지지를 위하여 진공 속에서 에폭시로 성형하여 완성된 22.9kV급 접촉식 부분방전 센서를 나타낸 것이 그림 4이다. 최종 제작된 제품은 높이 220mm, 직경 100mm이며, 이 제품의 개발 기준 및 최종 개발 후 완성된 상용품의 성능은 다음과 같이 나타났다.

- 1) 내전압 특성은 50[kVrms] : 만족
- 2) 부분방전 개시전압 30[kV] 이상 : 35kV 이상
- 3) 5[dB] 기준의 측정주파수 대역 : 10~100[MHz]
- 4) 13[kV]에서 상온 유전정접 1.0[%] : 0.3% 이하
- 5) 건조 섬락전압 특성 70[kVrms] 이상 : 95
- 6) 뇌충격전압 특성 150[kVp/15회] : 만족



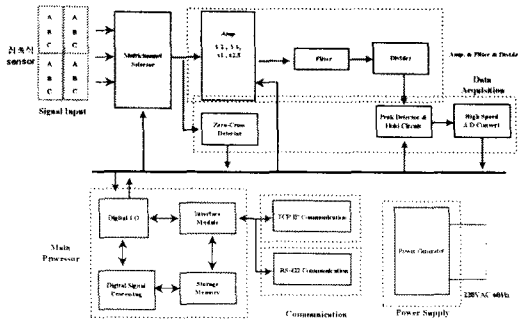
<그림 4> 22.9kV급 접촉식 센서 외관

### 4. 몰드변압기 부분방전 측정 시스템

#### 4.1 On-line 부분방전 측정 transducer 설계 제작

몰드변압기용 부분방전 측정 transducer는 portable, 현장 설치용 및 on-line용 시스템에 동시 활용되는 것으로서 현장에서 간편하게 부분방전 신호를 측정할 수 있도록 검토하였다. 최대 4대의 몰드변압기에서 센싱된 부분방전 신호를 처리하도록 경제성 측면을 고려하여 구성하였다. 전체 구성은 그림 5와 같이 아날로그 방전 신호를 처리하는 analog signal processor board, 디지털 data를 처리하기 위한 control board 및 전원 공급용 power board로 구성되어있다. On-line 시스템에서는 PC에서 portable display & analysis unit을 추가로 지원하도록 구성된다. 현장 설치용 및 on-line용 시스템의 외함에는 key pad가 부착되

어 있어 설치 후 간단히 필요사항을 입력할 수 있도록 제작되었다.



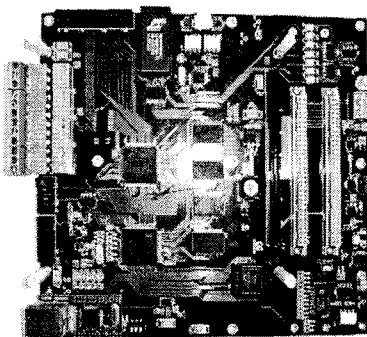
<그림 5> 부분방전 측정 시스템 전체 구성도

그림 5는 시스템의 전체 구성도로, 신호 입력단은 최대 4대의 3상 몰드변압기에 부착된 12개의 센서 신호를 동시에 받을 수 있도록 2 channel slot 형태로 구성하였다. 신호 입력단을 거쳐 진단할 채널을 선택하고, 센서 입력신호의 크기를 amp 단에서 가장 적합한 크기로 변환한다. Filter 단에서는 band-pass filter에 의해 기본적 잡음을 제거하고, divider 단에서 negative 신호와 positive 신호로 분리한다. 분리된 신호를 각각 고속의 peak detector & hold 회로에서 4.63us 동안 최대 부분 방전 신호를 검출한다. 이를 다시 고속 A/D 컨버터에 의해 digital data로 변환하여 저장한다. 저장된 data는 PC로 전송하여 분석 및 진단을 수행하며, database화 한다.

#### 4.2 Control board part

그림 6은 제작된 control board로서, DSP는 Ti사의 TMS320VC33, AD Converter 제어 및 각종 외부 IO는 모두 EPLD EPM3256ATC144-10가 담당한다. 또한 EPLD 내부에 watch dog 기능을 구현하여 DSP의 이상 동작 시 board를 reset 할 수 있다. Static Ram K6R4008V1DT은 측정된 AD data를 임시 저장하여 data를 PC로 전송하거나, 자체 알고리즘에 의해서 노이즈를 제거하고, 부분 방전에 따른 시스템의 상태를 나타낼 수 있는 인자를 계산하는 공간으로 사용된다.

Flash Rom AT29LV040A는 프로그램 메모리, key pad로 입력한 각 메뉴의 data값의 저장 메모리, 그리고 부분방전 판단을 위한 인자의 data base를 위한 공간으로 활용된다. RTC BQ4822YMA-70은 부분 방전 측정시 data 저장 시간을 제공한다. 또한 내부 8K \* 8bit NVSRAM은 데이터 저장용으로 활용된다.



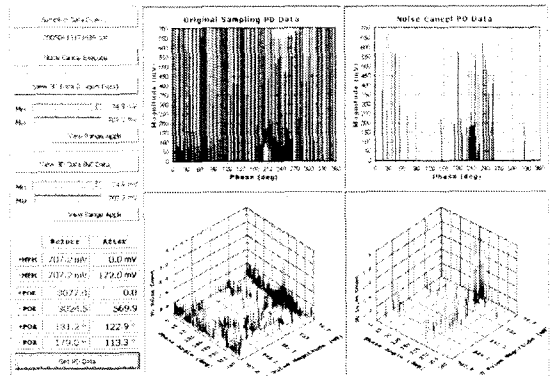
<그림 6> Control board 형상

#### 4.3 Analog board part

입력단은 6채널의 접촉식 센서 입력 단과 differential amp로 구성된다. 상 선택은 고속 relay에 의해 제어되고, 선택된 상은 기본 잡음을 제거하기 위해 OP-amp인 TI사의 THS-3001를 이용하여 differential로 구성하였다. 각 상별 위상을 검출하기 위한 zero-cross detector가 내장되어 있다. 증폭 단은 2개의 relay와 2개의 OP-amp로 구성되어 총 4가지의 증폭비를 가지며, 입력 신호의 크기에 따라 적당한 증폭비가 선택된다. Relay의 증폭비는 1/2, 1/4로서 600mV 보다 큰 신호를 500mV 전 후의 신호로 변환한다. 또한 OP-amp 증폭비는  $\times 1$ ,  $\times 5$ 로서 600mV 보다 작은 신호를 500mV 전 후의 신호로 변환한다. 부분방전 신호는 negative 펄스와 positive 펄스로 분리하여 peak detector & hold에서 부분 방전 신호를 검출한다. 이때 60Hz 한주기 동안 3,600개의 Data를 취득할 수 있으며, peak detector & hold는 4.6us내에서 동작하게 된다.

#### 4.4 2차 잡음제거 기능 구현

현장에서 사용중인 고압 전력기기의 절연상태를 파악하는 부분방전 측정 시스템의 성능은 불필요한 외부잡음을 제거에 많은 영향을 받는다. 일반적으로 적용하는 filter를 이용한 기법에서도 제거되지 않고 나타나는 잡음을 제거하기 위하여 본 연구에 적용된 기법으로, 1차적으로 전체 위상에 걸쳐 발생된 동일한 크기의 잡음을 제거하고, 2차적으로는 부분 방전이 발생할 때 집중적으로 발생한다는 원리를 이용하여 임의성 신호를 노이즈로 처리하는 방법을 적용하였다. 그림 7은 잡음제거 기법을 적용하기 전 측정신호와 이 기법을 이용하여 분리된 부분방전 신호를 나타낸 것이다.



<그림 7> Noise cancellation 기법 적용 결과

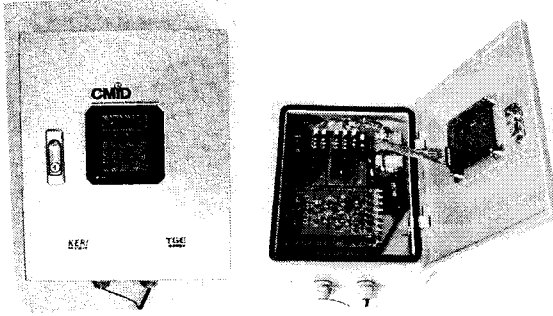
#### 4.5 완성된 부분방전 측정 시스템

몰드변압기 시료의 열화시간에 따른 발생 부분방전의 측정 정도 및 변화추이 분석을 실시하기 위하여, 반환부하법을 이용한 6.6kV/50kVA급 및 22.9kV/50kVA급 설비로 장기 부분방전 실험을 실시하였으며, 모델 시료를 이용한 가속열화 실험도 실시하였다. 또한, 이들 실험시 개발하고자하는 부분방전 측정시스템을 이용하여 시스템의 문제점 및 장기안정성을 파악하였다. 그 결과 최종 확정된 측정시스템의 기본사양은 다음과 같이 구성되었다.

- 1) Floating point DSP TMS320VC33-150
- 2) 512K  $\times$  8 Bit Flash ROM
- 3) 512K  $\times$  8 Bit High Speed Static RAM
- 4) Real Time Clock 내장
- 5) TCP/IP & RS485 통신

- 6) Watch Dog
- 7) 경보 Dry Contact
- 8) 경보 Display LED
- 9) Stand-alone 기능
- 10) Software Noise Filtering 기법 내장

이들 부품을 이용하여 완성한 부분방전 측정시스템 외형 및 내부형상을 그림 8에 나타내었다.



<그림 8> 개발 완료된 부분방전 측정시스템의 내/외부 모습

반환부하 설비를 구성하기 위하여 시료용 몰드변압기 외에 보조 변압기로 단상 70 kVA 220V/2800 V 유입자냉식 변압기, 동손 가변장치로 단상 20kVA 0-240V 공냉식 슬라이더, 철손 가변장치로 단상 5kVA 0-240V 공냉식 슬라이더 및 역률보상장치 단상 220V 1600uF를 이용하여 설치하였다.

#### 4.6 판단 기준용 부분방전 관련 인자

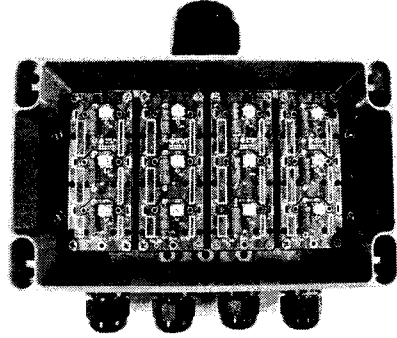
다음과 같은 인자들을 판정기준에 이용하는 것으로 선정하였으며, 이를 이용하여 극성별 경향관리를 통하여 판정기준을 정상/요주의/이상 순서로 선정하여 lamp로 나타나 지도록 설정하였다.

- 1) 최대 부분방전 크기(MPM : Maximum PD magnitude) : 절연물의 열화가 진행되면 공극의 크기가 증대되고 이에 상응한 큰 크기의 방전 펄스가 발생함.
- 2) 부분방전 발생 에너지(POE : PD occurrence energy) : 고체 절연물의 절연상태가 양호한 경우에는 발생하는 부분방전의 최대크기 및 발생수량이 적지만, 열화가 많이 진행되어 절연상태가 악화될 경우에는 발생 부분방전의 최대크기 및 발생수량이 점차적으로 증가함.
- 3) 부분방전 발생 위상폭(POA : PD occurrence angle) : 절연물의 절연상태가 양호한 경우에는 전원전압의 상승 구간( $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ ) 중 매우 작은 위상범위에서 부분방전이 발생하지만, 절연상태가 악화될 경우에는 부분방전의 발생위상이 점차적으로 확대됨.

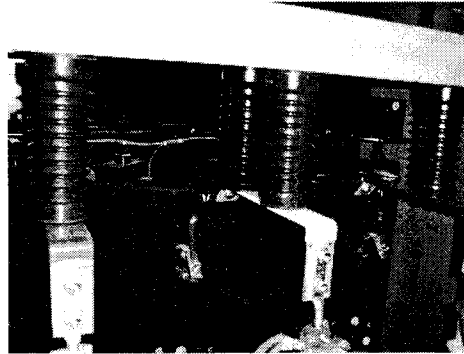
#### 4.7 현장 설치를 위한 준비

국내 대표적 배전반을 지닌 한국전력공사 및 수자원공사의 현장 파악을 통하여 개발된 센서의 부착 용이성 및 필요 기자재 등을 조사한 결과, 최대 4대의 몰드변압기에 부착된 센서를 통하여 방전신호를 받아들이기 위한 터미널 박스 4종류가 제작 되었으며 이를 그림 9에 나타내었다.

또한 현장 설치 조건에서 매우 간편하게 기존의 지지대를 대신하거나, 병렬로 설치가 가능함을 확인하였다. 이를 그림 10에 나타내었다.



<그림 9> 현장 설치용 터미널 박스 내부 모습



<그림 10> 운용중인 몰드변압기에 센서 설치 위치 예

## 5. 결 론

본 연구는 몰드변압기의 장시간 운전시 예상되는 발생 부분방전 현상을 측정하여 설비의 사고를 방지하고자 on-line 부분방전 측정방법 선정, 최적 측정감도를 지닌 접촉식 부분방전 센서의 개발, 센싱된 방전펄스를 신호 처리하는 측정 시스템 개발, 측정정도 향상을 위한 잡음제거 기법 적용, 판단기준용 부분방전 관련인자 선정 및 진단 알고리즘 구축, 현장설치를 위한 환경파악 및 기자재 구축을 완료하였다.

본 개발품은 현장에 설치하여 사용여도 충분한 안전성이 확보된 것으로 판단되며, 향후 실 운전 data를 통한 진단알고리즘의 정도 보안을 실시하면, 몰드변압기용 안전 운용에 크게 기여되리라 판단된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 강동식 외 "고압 회전기 On line 부분방전 측정용 Ceramic Coupler 특성", 대한전기학회지, Vol. 51C, No. 5, pp. 205 212, 2002.
- [2] Dong Sik Kang, Jong Ho Sun, Yong Joo Kim, "On Line Partial Discharge Measuring Techniques of Mold Transforme", KJ 2003.
- [3] 강동식 외 "권선형기 On line 부분방전 측정용 6.6kV급 Ceramic Coupler의 신뢰성 평가", 대한전기학회지, Vol. 54C, No. 2, pp. 69 75, 2005.