

고압 전동기 고정자 권선의 절연진단을 위한 운전중 부분방전 측정 시스템 개발

(Development of On-Line Partial Discharge Measuring System for
Insulation Diagnosis of High-Voltage Motor Stator Windings)

황 돈하* · 강 동식* · 신 병철** · 이 영진*** · 이 광식****
(Don-Ha Hwang · Dong-Sik Kang · Byoung-Chol Shin · Young-Jin Lee · Kwang-Sik Lee)

한국전기연구원* · (주)인텍C&I** · (주)오토파워*** · 영남대학교****

Abstract

In this paper, a new on-line high-voltage motor monitoring system is proposed. This system monitors the insulation condition of the stator winding by on-line measurements of partial discharge (PD). And this system displays magnitude and phase angle distribution of PD. Sensor, CC (Ceramic Coupler) is used for PD measurement. PD signals are continuously measured and digitized with a A/D converter to build the database of the high-voltage motor's insulation condition. Also, this system can communicate with the central monitoring system via RS-232, 422, and TCP/IP. This helps more efficient operation and maintenance of the high-voltage motor.

1. 서 론

산업 플랜트 및 발전설비의 증가·대형화와 함께 자동화 및 정보통신 기기의 폭증에 따라 안정적이고 효율적인 전원공급과 동력발생을 위한 회전기(발전기, 전동기)의 운전 신뢰성 확보가 크게 요구되고 있다. 특히, 고압 회전기의 장기간 운전에 따른 고정자 권선의 절연 열화가 원인이 되어 발생하는 절연파괴에 의한 돌발적인 운전정지는 사고로 인한 파급효과가 크고, 장기간의 복구시간이 요구되며, 권선 교체 보수비용이 과다하게 소요되기 때문에 예방진단의 필요성이 크게 요구되고 있다. 이에 따라 운전중의 심각한 절연파괴가 발생하기 전에 회전기 고정자 권선의 절연열화 상태 평가와 예방정비를 위한 절연진단 기술에 대한 연구가 많이 이루어지고 있고, 대부분 절연물의 국부적인 열화상태를 가장 잘 나타내는 부분방전 신호의 측정 및 검출 기법과 관련된 연구를 진행하고 있다[1-3].

고압 회전기의 절연진단에는 정지중(Off-line) 진단법과 운전중(On-line) 진단법이 있지만, 기기의 실제 운전중에 발생하는 부분방전 신호를 측정하여 권선의 절연상태를 진단하는 On-line 진단법이 슬롯 방전과 권선단발 방전 등의 다양한 종류의 방전이 측정 가능하여 점차 확대 적용되고 있다.

선진외국에서는 고정자 권선의 절연진단 및 부분방전 측정기술의 확보와 함께 운전중 진단 시스템의 개발 연

구가 1980년대 이후부터 활발히 진행되어, 일부 제품은 상용화되어 현장에 적용중인 상태이다[2][3]. 국내에서도 고압 회전기의 실제 운전중인 상태에서 고정자 권선의 절연상태를 판단하기 위한 On-line 부분방전 측정기법, 운전중 절연진단 시스템, 부분방전 측정 데이터의 신호처리 기법 및 부분방전 측정용 On-line 센서 개발 등에 대한 연구가 최근에는 많이 이루어지고 있다[1-5]. 그러나 측정결과와 분석과 판정에 전문가의 판단이 필수적으로 요구되고, 부분방전 측정시의 신뢰성 확보가 미흡하고 가격경쟁력이 부족하여 보급이 확산되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 부분방전 신호의 측정 신뢰성을 만족하면서 기존의 On-line 측정기법에 비해 경제성을 가지는 운전중 부분방전 측정기법을 제안한다. 또한, 기존의 고정자 권선 절연상태 진단 시스템들의 단점을 보완하고, 비전문가도 용이하게 고정자 권선의 절연상태를 진단할 수 있는 고압 전동기 고정자 권선의 운전중 부분방전 측정 시스템(High-Voltage Motor On-line PD Detector)을 개발하였다.

고정자 권선에서 발생하는 고주파 부분방전 신호의 운전중 측정을 위해 주로 사용되는 용량성 커플러인 Ceramic Coupler 센서를 이용하여 A/D (Analog-to-Digital) 변환기법을 적용한 새로운 운전중 부분방전 측정기법을 설명하고, 절연열화의 상태진단을 위하여 최대 부분방전 크기(QM), NQN (Normalized Quantity

Number), DSV(Dynamic Stagnation Voltage) 등의 부분방전 진단 파라미터를 소개한다[1-4].

또한, 새로운 A/D 변환기법을 적용하고 마이크로프로세서를 탑재한 On-line 부분방전 측정 시스템은 디지털 신호처리 및 필터링 기법을 적용하여 부분방전 신호의 주파수 특성분석, 부분방전 펄스의 크기, 갯수 및 위상 분석, 다양한 절연진단 파라미터의 산출과 제반 부분방전 파라미터의 변화추이 분석이 가능하도록 하였다.

마지막으로 본 연구에서 개발한 운전중 부분방전 측정 시스템을 3.3 [kV], 1 [MVA]급 유도전동기에 실제 설치하여 수행한 고장자 권선의 On-line 절연감시 시스템의 성능시험 결과를 제시한다.

2. 운전중 부분방전 측정기법

2.1. 펄스탐지 기법

고압 회전기 고장자 권선의 On-line 부분방전 측정을 위해서 종래에는 일반적으로 Single-channel analyzer를 이용한 펄스탐지 기법을 사용하였다. 이러한 펄스탐지 기법은 그림 1에서와 같이 부분방전의 크기를 60 [Hz] 상용 주파수의 한 주기 내에서 미리 설정된 특정크기 및 특정 펄스폭의 부분방전만을 탐지하는 방식으로, 설정값을 증가 또는 감소시켜 부분방전의 크기 스펙트럼을 구하는 방식이다. 그러나 부분방전의 크기에 따라 많은 시간동안의 측정이 필요하고, 부분방전 신호의 최대값을 정확하게 측정하기가 쉽지 않다. 또한, 고장자 권선을 따라 전파되는 부분방전 신호의 펄스폭이 다양하기 때문에 불연속적인 부분방전 펄스 신호를 탐지할 수 없게 된다. 따라서 한 주기 동안에 발생한 부분방전 신호를 모두 검출할 수 없기 때문에 잘못된 절연상태의 판단 가능성이 크다는 단점이 있다[2][3][5].

2.2. Full A/D 변환기법

상기의 Single-channel Analyzer에 의한 고정 펄스폭 및 크기 탐지기법에 의한 부분방전 측정시의 문제점을 극복하기 위해서 사용한 방식이 Full A/D 변환기법이다. On-line 센서에 의해 측정된 한 주기 전체의 부분방전 신호를 고속 A/D 변환기에 의해 샘플링하여 디지털 신호로 변환하는 방식으로, 부분방전 파형에 관한 정보의 손실이 거의 없기 때문에 펄스탐지 기법에서는 검출할 수 없는 신호를 측정할 수 있고, 디지털 필터링 기법을 적용하여 부분방전 신호를 주파수 영역에서 상세히 분석할 수 있는 장점이 있다. 그러나 Full A/D 변환방식은 만족할만한 성능을 위해서는 수 [ns] 및 50 [MHz] 이상의 샘플링이 가능한 고가의 아날로그 디지털 변환기(A/D Converter)가 필요하다. 따라서 시스템의 가격이 높아져 고압 전동기에 적용하기에는 경제성이 떨어지는 단점이 있다[1][3][5].

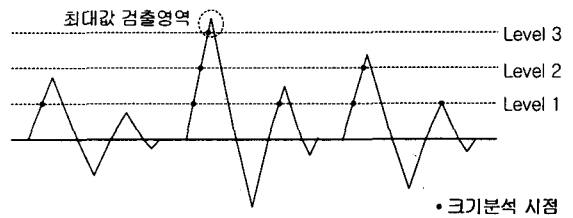


그림 1. 펄스탐지 기법의 개념도
Fig. 1. Pulse detecting method

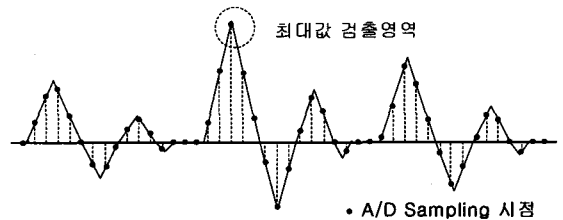


그림 2. Full A/D 변환기법의 개념도
Fig. 2. Full A/D conversion method

2.3. Dual A/D 변환기법

미리 설정된 부분방전 크기만을 측정함으로써 불연속적인 부분방전 신호를 종종 탐지할 수 없는 Single-channel Analyzer를 채용한 펄스탐지 기법의 단점을 개선하고, 가격 경쟁력이 낮은 Full-A/D 변환기법의 단점을 개선하기 위해서, 본 연구에서는 On-line 부분방전 신호 측정을 위한 저가형 고속 A/D 변환 보드를 개발하여, 신뢰성은 만족하면서 저가로 시스템을 구현하여 전동기에 적용함에 있어서도 경제성을 확보할 수 있는 새로운 부분방전 측정기법을 개발하였다.

2개의 고속 A/D 변환 Chip을 사용하여 교차방식으로 샘플링을 수행하여 50 [MHz] 샘플링으로 부분방전 신호를 측정할 수 있는 Dual A/D 변환기법과, 방대한 부분방전 Data를 저장할 수 있도록 외부 메모리를 이용한 DMA (Director Memory Access) 방식을 적용하였다. 이렇게 측정된 부분방전 신호를 고속 DSP에서 진단 파라미터를 추출하고, 이를 압축하여 중앙의 모니터링 시스템으로 전송하도록 하였다.

3. 부분방전 신호의 진단 파라미터

3.1. 최대 부분방전 크기(QM)

고압 전동기 고장자 권선에서 발생하는 부분방전 신호를 운전중에 측정하게 되면 그림 3과 같이 부분방전의 크기와 발생빈도를 2차원 그래프로 나타내게 된다. 이것은 부분방전의 크기에 따른 정(+) 및 부(-) 극성 펄스의 갯수가 파악되는 펄스크기 분석(Pulse Height Analysis)이 가능함을 보여주고, 부분방전 신호의 진단 파라미터로서 그림 4와 같이 최대 부분방전 크기(QM)와 NQN의 산출이 가능하다[1-5].

전동기의 운전전압에서 측정되는 최대 부분방전 크기(QM)는 초당 10개의 부분방전 펄스가 발생할 때의 부분방전 크기로서 산출하고, 고정자 권선 절연물내의 국부적인 열화를 검출하는 수단으로서 사용한다. 일반적으로 절연열화가 진행되면 방전전하가 커지고 방전 발생갯수[빈도] 또한 증가하여 QM이 커지면 절연 파괴진압이 저하되는 관계를 이용해서 고정자 권선의 열화진행 정도 및 이상유무를 판단하는데 이용된다. 그림 3과 그림 4에서 Y축은 부분방전 펄스의 반복율, 즉 심각한 열화의 분포범위를 의미하고, X축은 최대 부분방전 펄스의 크기로서 절연파괴의 징후를 나타낸다.

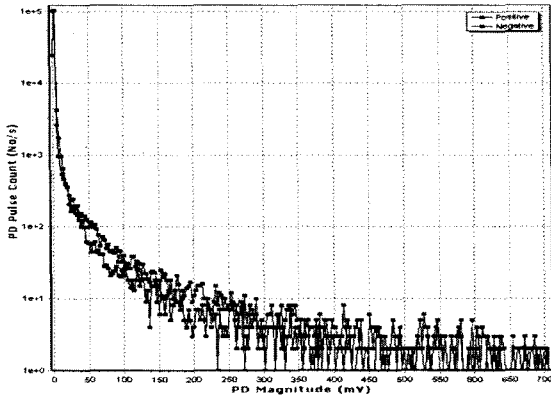


그림 3. 부분방전 신호의 펄스크기 분석
Fig. 3. Pulse height analysis of PD signal

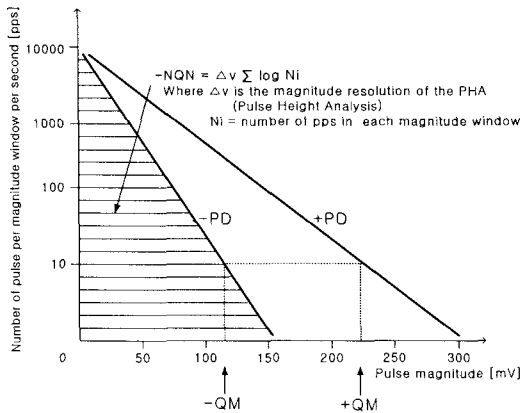


그림 4. QM과 NQN의 산출방법
Fig. 4. Calculating method of QM and NQN

3.2. NQN (Normalized Quantity Number)

NQN은 그림 4에 나타낸 것과 같이, On-line 부분방전 측정시 나타나는 부분방전의 크기와 갯수의 평균면적으로서, 물리적인 의미는 유전정접(power factor tip-up)과 마찬가지로 일정시간 동안의 부분방전 발생량을 합계한 값이고, 절연손상의 정도를 검출하는 수단으로 사용된다. NQN인 제안된 것은 On-line 부분방전 측정시, [mV] 단위로 나타나는 부분방전의 크기가 전동기

고정자 권선의 인턴턴스와 전동기 Endwinding 부분의 복잡한 구조로 인하여 심하게 감소되는 등의 영향으로 교정이 어렵고, [mV]와 [pC]간의 변환은 부분방전 센서의 설치 위치에 따라 달라서 절대 기준값으로의 의미를 부여할 수 없기 때문이다. NQN은 정극성(+)과 부극성(-)으로 나누어 분석하며 정극성 NQN은 회전기의 손상 상태를 판정하고 정비방법 및 시기를 결정하는데 사용되고, 부극성 NQN은 내부방전 및 도체 절연간의 방전을 나타내고, 이로 인한 손상은 보수가 불가능하며 완전히 새 권선으로 교체하여야 한다[1-3].

3.3. DSV (Dynamic Stagnation Voltage)

운전중에 부분방전 신호를 측정할 때 위상에 따른 부분방전 개시전압(DIV ; Discharge Inception Voltage)과 소멸전압(DEV ; Discharge Extinction Voltage)을 구할 수 있고, 이것을 이용하여 고정자 권선의 절연수명 예측이 가능한 DSV(Dynamic Stagnation Voltage)를 산출할 수 있다. 그림 5는 DSV의 개념을 설명한 것으로서, 일반적으로 고정자 권선의 절연열화가 미소하여 절연상태가 양호할 경우에는 정 및 부극성 전원전압 상승구간의 좁은 위상범위에서 발생하지만, 열화가 많이 진행되어 절연상태가 악화될 경우에는 부분방전의 크기와 발생위상이 점차적으로 확대된다. 이때 식 (1)과 같이 부분방전의 발생 및 소멸위상에 따른 전압차이를 이용하여 DSV를 계산하고, 이를 통하여 절연열화 상태를 진단하고 잔존수명을 예측할 수 있다[3][4].

$$(\pm) DSV = |\sqrt{2} E \sin \theta_1 - \sqrt{2} E \sin \theta_2| \text{ [kV]} \quad (1)$$

여기서, E 는 고압 전동기 고정자 권선의 상전압을 나타내고, θ_1 과 θ_2 는 각각 부분방전 펄스의 소멸위상과 개시위상을 나타낸다.

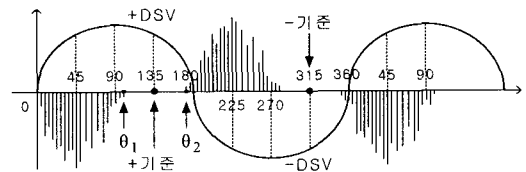


그림 5. DSV의 개념도
Fig. 5. Concept of the DSV

그림 6에서는 운전중 부분방전 측정에 의해 전동기 입력전압의 위상에 따른 부분방전의 크기와 갯수의 분포를 3차원적으로 나타내고, 펄스 위상분석(Pulse Phase Analysis)이 가능하여 0~90° 및 180~270° 사이에서 부분방전이 많이 발생하는 전형적인 부분방전의 위상분포 특성과 부분방전 펄스의 발생형태를 확인할 수 있고, DSV의 산출이 가능함을 볼 수 있다.

그러나 현재까지의 연구결과로 볼 때, QM, NQN 등의 절대값만을 사용하여 고정자 권선의 절연상태를 판정하는 것은 어려움이 있으므로 부분방전 진단 파라미터의 변화추이(trend)를 고려하여 권선의 손상상태를 판정해야 한다[1][3][5].

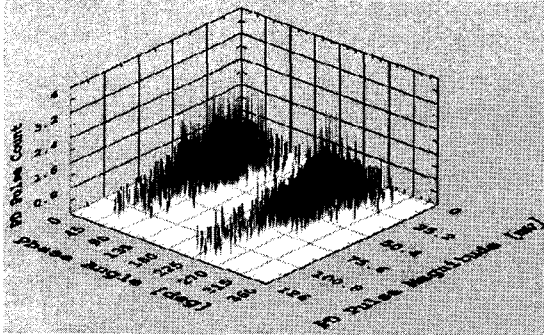


그림 6. 부분방전 신호의 펄스위상 분석
Fig. 6. Pulse phase analysis of PD signal

4. 운전중 부분방전 측정시스템 개발

4.1. 운전중 부분방전 측정시스템

본 연구에서 개발한 고압 전동기 고정자 권선의 절연 상태 진단을 위한 운전중 부분방전 측정 시스템의 블록도를 그림 7에 나타내었다. 시스템의 구성은 Analog 입력, 디지털 신호처리, 통신 및 Power Management 부분으로 크게 나눌 수 있다.

Analog 입력단에서는 전동기 고정자 권선의 각상에 설치된 센서에 의해 검출된 부분방전 신호를 Channel Selector를 통하여 각 상별로 순차적, 연속적으로 측정하고 전동기의 위상정보를 입력받는다. 부분방전 신호는 먼저 Amplifier단에서 가장 정밀하게 검출할 수 있는 최적의 크기로 변환(Normalize)시키고, Filter단에서 저주파 잡음을 제거하고 5 [MHz] 이상 대역의 부분방전 신호만을 검출한다. 검출된 부분방전 신호는 고속 Peak Detector에서 검출하여 A/D Converter를 통해 디지털 데이터화된다.

본 연구에서는 고주파의 부분방전 신호 측정에 가장 이상적인 방법인 고속 A/D Conversion 방식을 채택하였고, 50 [MHz]의 A/D Sampling이 가능한 저가의 A/D Converter(TI사의 ADS830E)를 사용하여 경제성을 고려하였다. 부분방전 신호의 안전한 취득을 위해서 2개의 ADS830E를 이용하여 교차방식으로 각 25 [MHz] 샘플링을 수행하여 최종적으로 50 [MHz] 샘플링이 가능한 Dual A/D 변환기법을 구현하였다.

그림 8은 아날로그 입력단의 실제 사진으로서, Input, Filter 및 Amplifier 등의 각 Part별로 Module화를 실현하여 향후 개선이 쉽고, 실험 및 상품화에 용이하도록 하였고, 외부 Case를 차폐가 가능하도록 개별 제작하여

외부 노이즈에 강하도록 하였다.

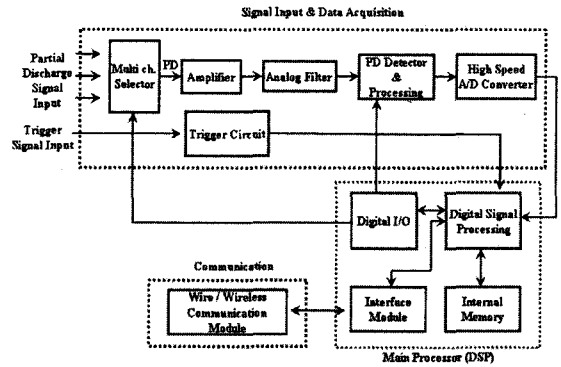


그림 7. 운전중 부분방전 측정시스템의 블록도
Fig. 7. Block diagram of the on-line PD measuring system

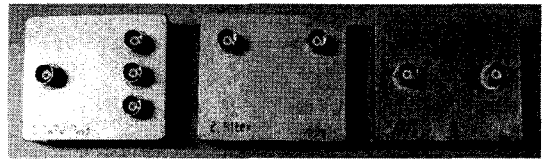


그림 8. 아날로그 모듈
Fig. 8. Analog module

Digital 신호처리 단에서는 2개의 A/D Converter를 이용하여 검출된 부분방전 신호를 디지털 데이터화하고, 마이크로프로세서(DSP)를 통하여 디지털 필터링에 의한 잡음제거 및 주파수 특성분석을 수행하고, 부분방전 파라미터(QM, NQN, DSV)를 산출하여 LCD로 디스플레이 된다. 또한, 이들 파라미터는 RS-232, RS-422 또는 TCP/IP 통신을 이용하여 중앙의 모니터링 시스템으로 전송되어 원격 감시진단이 가능하도록 하였다.

그림 9는 기본 Clock이 150 [MHz], 32비트 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 실제 제작한 Main Processor 보드의 사진을 나타내고 있다. TMS320VC33를 중심으로 측정된 부분방전 신호를 저장하는 메모리 부분과 부분방전 신호를 측정하는 Analog 회로를 제어하는 제어부, 중앙 모니터링 시스템으로 Data를 전송하는 인터페이스 모듈로 구성되어 있다.

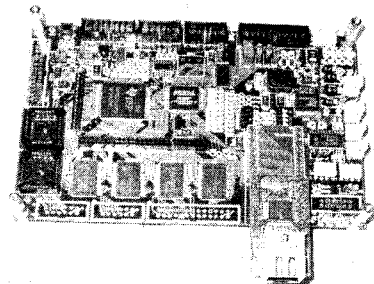


그림 9. 프로세서 보드의 실제 사진
Fig. 9. Main processor board

그리고 본 시스템에 사용된 Power단은 노이즈를 최소화하기 위하여 LDO(Low Drop Out) Regulator를 이용하여 구성하였고, Analog 전원은 특별히 2개 부분으로 분리하여 외부잡음 유입을 최소화하였다.

그림 10은 본 연구에서 개발된 고압 전동기 고정자 권선의 절연진단을 위한 운전중 부분방전 측정 시스템의 실제 사진을 보여주고 있다.

4.2. On-line 부분방전 측정 센서

고압 회전기 고정자 권선의 On-line 부분방전 측정센서에는 고전압 입력단에 직접 센서를 부착하는 접촉식과 고정자 Wedge 밑에 삽입하는 비접촉식 등이 있지만, 본 연구에서는 전통적인 Off-line 부분방전 측정시에도 대부분 사용하는 접촉식 센서를 채택하였다. 사용된 On-line 접촉식 센서는 100 [pF] 세라믹 소체를 이용하고, 에폭시 절연물로 몰딩한 형태의 Ceramic Coupler 부분방전 측정센서로서, 높이 90 [mm], Shed 외경 70 [mm]이다. 그림 11에 Ceramic Coupler 부분방전 센서의 실물사진과 3.3 [kV], 1 [MVA]급 유도전동기의 입력단자에 설치된 모습을 보여주고 있다.

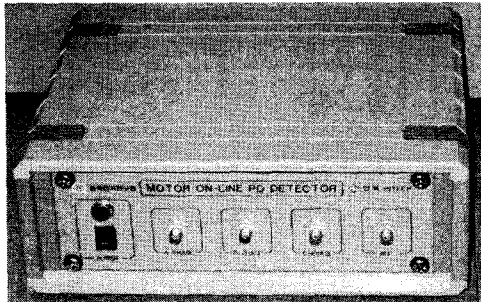


그림 10. 운전중 부분방전 측정시스템의 사진
Fig. 10. On-line PD measuring system

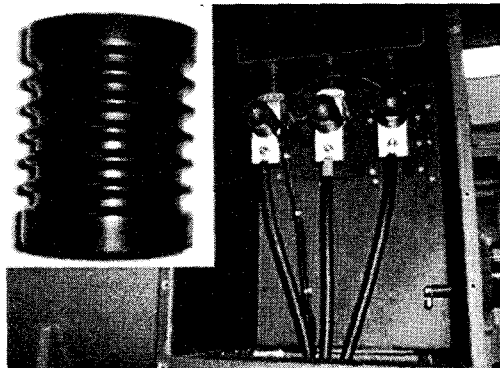


그림 11. On-line 부분방전 측정 센서 및 설치사진
Fig. 11. On-line PD sensor and installation

5. 실증시험 및 실험결과

본 연구에서 개발한 고압 전동기 고정자 권선의 절연진단을 위한 On-line 부분방전 감지진단 시스템을 3.3

[kV], 1 [MVA]급 유도전동기에 설치하여 실증시험을 수행하였다.

그림 12는 고압 전동기 고정자 권선의 절연진단을 위한 On-line 부분방전 측정 시스템의 구성도를 나타내고, 그림 13은 실제 고압 전동기에서의 실증시험 장면을 보여주고 있다. 고압 전동기의 터미널 박스 내에 전동기 각 상의 입력전원과 병렬로 부분방전 측정을 위한 센서인 Ceramic Coupler를 설치하여 부분방전 신호를 상시 검출하고, 부분방전 센서의 출력은 동축케이블을 통하여 On-line 부분방전 측정시스템(On-line PD Detector)로 전달되고, 각 상별로 측정 임피던스 회로에 의해 순차적으로 부분방전 신호가 검출된다. 이렇게 검출된 부분방전 신호는 마이크로프로세서를 통하여 부분방전 진단 파라미터를 산출하고, 통신을 이용하여 모니터링 시스템으로 전송된다.

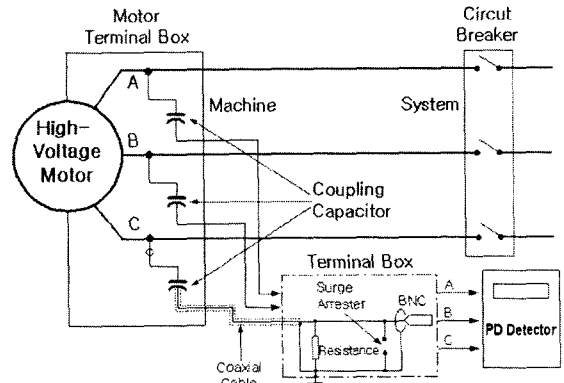


그림 12. 운전중 부분방전 측정 시스템의 구성도
Fig. 12. Configuration of On-line PD detector

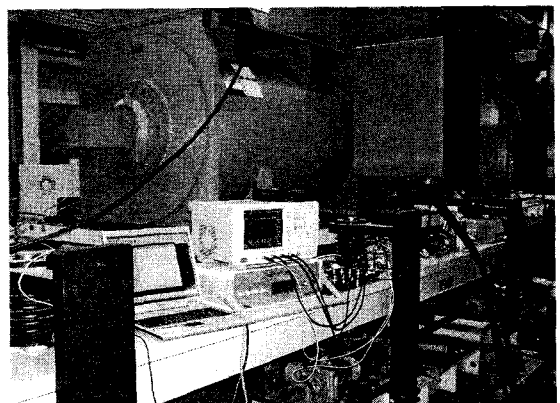


그림 13. 1(MVA) 유도전동기의 실험사진
Fig. 13. Experiment Setup

종래의 운전중 부분방전 측정기는 일정 주파수 성분의 부분방전만 측정하고, 일정한 진폭씩 단계적으로 측정하므로 전원전압의 한 주기에 걸쳐 동시에 발생하는 부분방전의 위상과 크기 분포를 나타내지 못한다.

이에 비해 본 연구에서 개발한 Dual A/D 변환방식에

서는 부분방전 신호의 연속적인 측정이 가능하여 부분방전 펄스를 전원의 한 주기 전체를 표시할 수 있다. 그림 14는 본 연구에서 개발한 시스템으로 측정한 실제의 부분방전 파형을 나타내고, 한 주기에 대해 부분방전 펄스를 연속적으로 측정이 가능함을 보여주고 있다.

그림 15는 운전중 부분방전 측정 시스템에 의한 부분방전 신호의 크기에 따른 갯수 분포를 2차원 그래프로 나타낸 것으로서, Pulse Height Analysis가 가능하고, 최대 부분방전 크기(QM)와 NQN값의 산출이 가능하다.

그림 16은 부분방전의 발생위상에 따른 크기와 갯수의 분포를 3차원 그래프로 나타낸 것으로서, 부분방전 파라메타인 DSV의 산출이 가능하고, 부분방전 신호의 발생 위상 및 전체적인 발생형태를 파악할 수 있는 Pulse Phase Analysis가 가능함을 알 수 있다.

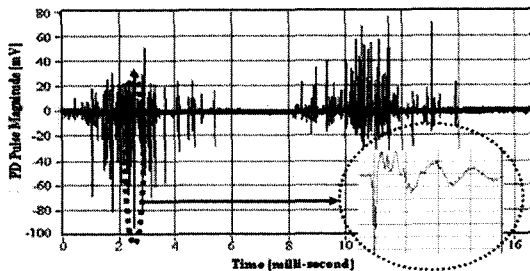


그림 14. 60[Hz] 한주기의 부분방전 측정 파형
Fig. 14. Waveform of PD signal

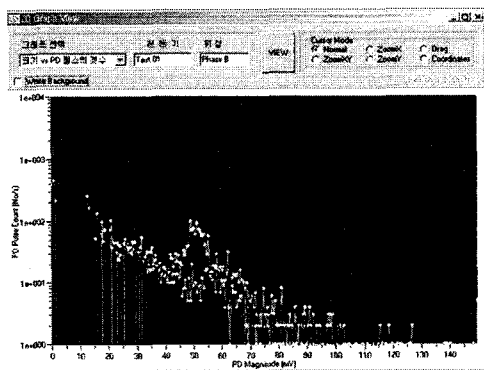


그림 15. 부분방전 신호의 2차원 측정결과
Fig. 15. Two-dimension graph of PD signal

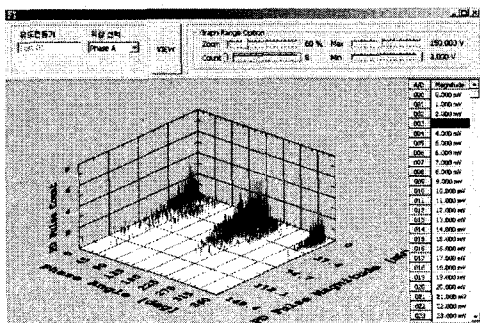


그림 16. 부분방전 신호의 3차원 측정결과
Fig. 16. 3-dimension graph of PD signal

그림 17은 부분방전 감시 파라미터의 변화추이를 나타내는 Trend Analysis 화면의 한 예로서, QM, NQN 그리고 DSV의 시간에 따른 변화추이를 상세히 분석할 수 있음을 볼 수 있다.

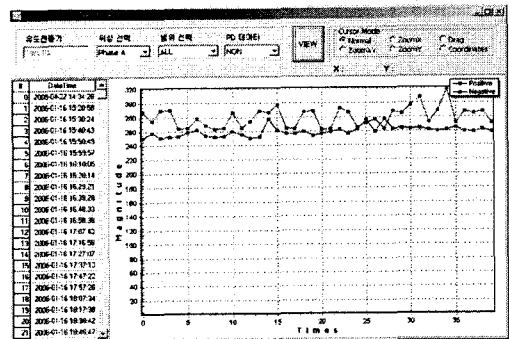


그림 17. NQN의 변화추이 분석 화면
Fig. 17. Trend analysis of NQN

6. 결론

본 논문에서는 산업설비의 핵심 동력원으로 사용되는 고압 전동기의 운전 신뢰성 향상을 위하여 고정자 권선의 절연진단이 가능한 On-line 부분방전 측정 시스템으로서, 기존의 펄스탐지 기법이나 Full A/D 변환기법의 단점을 보완한 새로운 운전중 부분방전 측정시스템을 개발하였고, 현장설치를 통한 실증시험을 수행하여 성능을 검증하였다. Dual A/D 변환기법에 의하여 운전중 부분방전 신호의 측정 정밀도가 크게 향상되었고, 디지털 신호처리를 통한 부분방전 펄스의 크기, 갯수 및 위상 분석이 가능하고, QM, NQN, DSV 등의 다양한 절연진단 파라미터의 산출과 제반 부분방전 파라미터의 변화추이 분석이 가능함을 확인하였다.

본 연구에서 개발한 운전중 부분방전 측정 시스템에 의한 고압 전동기 고정자 권선의 절연상태 감시진단을 통하여 부분방전 측정기법의 고도화와 절연상태 판정의 신뢰성을 높일 수 있고, 저가격화를 달성함에 따라 향후 산업 및 발전설비에 설치가 확대될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) 한국전기연구원, "발전소 고압 전동기 절연감시 시스템 개발", 전력연구원 수탁 연구과제 최종보고서, 2001. 7.
- (2) G.C. Stone and J.F. Kapler, "Stator Winding Monitoring", IEEE IA Magazine, Vol. 4, No. 5, pp. 15~20, 1998.
- (3) 한국전기연구원, "고압 회전기 On-Line 감시기술 개발", 과학기술부 특정연구개발사업 최종보고서, 1998. 12.
- (4) Y.J. Kim and J.K. Nelson, "Assessment of Deterioration in Epoxy/Mica Machine Insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 5, pp. 1026~1039, Oct. 1992.
- (5) 황돈하 외, "고압 전동기 고정자 권선의 절연진단을 위한 운전중 부분방전 측정기법", 2001년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(C), pp. 1727~1729, 2001. 7. 18~20.