

고압 전동기 고정자 권선의 절연진단을 위한 운전중 부분방전 측정기법

황 돈 하* · 신 병 철* · 심 우 용* · 박 도 영* · 김 용 주* · 송 상 옥**

*한국전기연구원 Mechatronics연구그룹 회전기진단TFT, ** (주)선진전자기술

On-Line Partial Discharge Detecting Method for Insulation Diagnosis of High-Voltage Motor Stator Windings

D.H. Hwang* · B.C. Shin* · W.Y. Sim* · D.Y. Park* · Y.J. Kim* · S.O. Song**

*Mechatronics Research Group, KERI, **Advanced Electronic Tech. Co., Ltd.

Abstract - Partial discharge testing are rapidly becoming the most powerful tool to assess the condition of high voltage generator and motor stator windings. Recently, on-line monitoring scheme with trending technique is widely applied in insulation diagnosis. This paper describes the on-line partial discharge detecting techniques in the high voltage motor stator windings. Also, on-line monitoring system for an insulation diagnosis are proposed.

1. 서 론

급속한 기술발전과 경제규모가 커지면서 산업 생산설비의 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, 파급효과가 큰 불시적인 운전정지와 고가의 권선 교체비용이 요구되는 심각한 절연파괴가 발생하기 전에 회전기 고정자 권선의 절연열화상태 평가와 예방정비를 위한 절연진단 기술이 매우 중요하게 인식되고 있다. 이러한 연구는 대부분 절연물의 국부적인 열화상태를 가장 잘 나타내는 부분방전 신호의 측정 및 검출에 관한 것으로서, 최근에는 기기의 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 활발히 이루어지고 있다.¹⁻⁵⁾

본 논문에서는 산업설비의 핵심 동력원으로 사용되는 고압 전동기의 운전 신뢰성 향상을 위하여 고정자 권선의 절연진단을 위한 On-line 부분방전 검출방식을 소개하고, A/D(analog-to-digital) 변환기법을 이용한 새로운 운전중 부분방전 측정기법을 제시한다. 고정자 권선에서 발생하는 고주파 부분방전 신호의 측정을 위해서 주로 사용되는 Capacitive coupler와 RFCT(radio-frequency current transformer) On-line 센서를 이용한 부분방전 검출방식을 설명하고, 절연열화의 상태진단을 위하여 최대 부분방전 크기(Qm), DSV(dynamic stagnation voltage) 및 NQN(normalized-quantity number) 등의 부분방전 진단 파라미터를 제안한다.^{4,5)}

또한, 미리 설정된 부분방전 크기만을 측정함으로써 불연속적인 부분방전 신호를 종종 탐지할 수 없는 종래의 Single-channel analyzer를 채용한 펄스탐지 기법의 단점을 개선하고, On-line 부분방전 측정과 절연진단이 가능한 시스템으로서, A/D 변환기법을 적용한 DADU(data acquisition & diagnosis unit)를 제시한다. 마이크로프로세서를 탑재한 DADU는 디지털 신호처리 및 필터링 기법을 적용하여 부분방전 신호의 주파수 특성분석, 부분방전 펄스의 크기, 갯수 및 위상분석, 다양한 절연진단 파라미터의 산출과 제반 부분방전 파라미터의 변화추이 분석이 가능한 특징을 갖고 있다.

2. On-line 부분방전 측정방식

2.1 부분방전 측정 시스템의 구성

고압 전동기 및 발전기 고정자 권선에서의 운전중 부분방전 측정에 의한 절연진단 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 부분방전 측정을 위한 On-line 센서에는 고압 전동기 각 상의 입력단에 병렬로 직접 설치하는 Capacitive coupler 형태의 EMC(epoxy-mica capacitor), 써지 흡수용 콘덴서(surge capacitor)의 접지측 또는 고정자 권선의 중성 접지선에 설치하는 RFCT가 일반적으로 사용된다.³⁻⁴⁾ On-line 센서에 의해서 검출된 부분방전 신호는 동축케이블을 통하여 측정 임피던스용 저항(resistor), 회로 보호기(surge arrester) 및 접지로 이루어진 단자함(terminal box)에서 진단 시스템으로 전송되어 진다. Capacitive coupler를 이용할 때는 고전압 회로와 직접 연결되기 때문에 전원전압의 위상검출이 용이하지만, RFCT를 사용할 때에는 전원전압 위상과의 동기를 위해서 PFCT(power frequency current transformer)를 별도로 설치해야 한다.

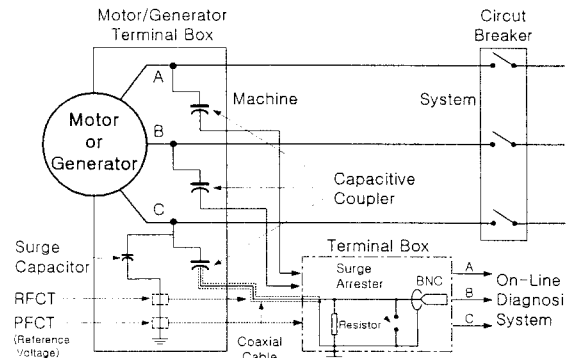


그림 1. 부분방전 측정 센서 및 시스템 구성도

2.2 운전중 부분방전 검출기법

2.2.1 펄스탐지 기법

회전기 고정자 권선의 On-line 부분방전 측정을 위해서 종래에는 일반적으로 Single-channel analyzer를 이용한 펄스탐지 기법을 사용하였다.¹⁻³⁾ 이러한 펄스탐지 기법은 그림 2에서의 같이 부분방전의 크기를 60 [Hz] 상용 주파수의 1주기 내에서 미리 설정된 특정크기 및 특정 펄스폭의 부분방전만을 탐지하는 방식으로서, 설정값을 증가 또는 감소시켜 부분방전의 크기 스펙트럼을 구한다. 그러나 부분방전의 크기에 따라 많은 시간동안의 측정이 필요하고, 부분방전 신호의 최대값을 정확하게 측정하기가 쉽지 않다. 또한, 고정자 권선을 따라 전파되는 부분방전 신호의 펄스폭이 다양하기 때문에 불연속적인 부분방전 펄스 신호를 탐지할 수 없게 된다. 따라서 한 주기동안에 발생한 부분방전 신호를 모두 검출할 수 없는 단점이 있다.

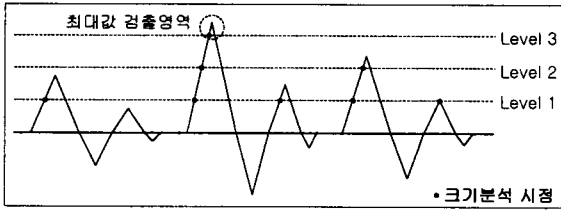


그림 2. 펄스탐지에 의한 부분방전 측정방법

2.2.2 A/D 변환기법

상기의 고정 펄스폭 및 크기 탐지기법에 의한 부분방전 측정시의 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 A/D 변환기법을 이용한 부분방전 검출방식을 도입하였다. A/D 변환기법은 그림 3과 같이 On-line 센서에 의해 측정된 1주기 전체의 부분방전 신호를 고속 A/D 변환기에 의해 샘플링하여 디지털 신호로 변환하는 방식으로서, 부분방전 파형에 관한 정보의 손실이 거의 없는 장점이 있다. 부분방전 펄스의 폭 및 크기 탐지를 위한 전용의 On-site 부분방전 측정기는 낮은 측정 신뢰성과 가격이 비싼 단점이 있지만, A/D 변환기법의 경우 비교적 저가의 A/D Converter를 채용하여 신뢰성을 높이고 저가의 시스템을 구현할 수 있다. 또한, A/D 변환기법과 부분방전 신호의 디지털 필터링 기법을 동시에 사용하여 외부잡음이 제거된 부분방전 활동만을 상세히 분석할 수 있고, 부분방전 펄스의 주파수 영역 분석이 가능하다^[4,5]

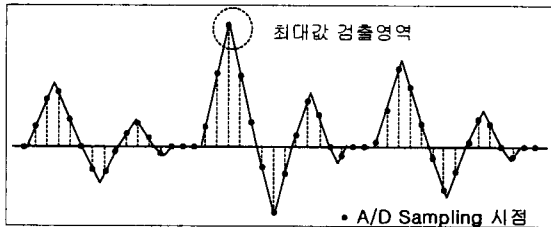


그림 3. A/D 변환에 의한 부분방전 측정방법

3. 부분방전 측정 및 절연진단 시스템 (DADU)

3.1 DADU의 구성

고압 전동기 고정자 권선의 절연진단과 신뢰성 높은 부분방전 측정을 위해서 본 연구에서는 A/D 변환기법을 적용한 On-line 부분방전 측정 및 절연진단 시스템으로서 DADU(data acquisition & diagnosis unit)를 개발하였다. 그림 4는 DADU의 전체 시스템 구성도를 나타내고 있다. 전동기의 위상 정보와 고정자 권선의 각 상에서 발생하는 부분방전 신호를 입력받고, Phase Selector를 이용하여 각 상별 부분방전 신호를 순차적 또는 선택적으로 취득할 수 있다. 입력된 부분방전 신호는 On-line 센서의 특성에 따라 일반적으로 10 [MHz] 이상의 대역에서 발생하므로 고주파 대역통과 필터를 이용하여 저주파 성분의 잡음을 제거시키고, A/D 변환기의 입력특성을 고려하여 부분방전 신호를 증폭하도록 하였다. 각 상별로 잡음이 제거된 아날로그 부분방전 신호는 고속 A/D 변환기에 의해 디지털 신호로 변환된다.

디지털화된 부분방전 신호는 마이크로프로세서를 통하여 디지털 필터링에 의한 잡음제거 및 주파수 특성분석을 수행하고, 부분방전 파라미터(QM, NQN, DSV 등)를 산출하도록 하였다.

그림 5는 실제 운전중인 6.6 [kV] 유도전동기 고정자 권선에서 발생한 부분방전 신호를 Oscilloscope로 측정된 파형이고, 그림 6은 DADU를 이용하여 측정된 부분방전 파형을 나타낸 것으로서, 2개 파형 모두 전형

적인 부분방전 발생특성을 보여주고 있다. 따라서 A/D 변환기법에 의한 DADU를 이용한 부분방전 신호의 검출이 Oscilloscope에서 측정된 실제 부분방전 신호와 마찬가지로 Data 손실없이 가능함을 알 수 있다. 그러나 일정 주파수에서 단계적으로 측정하는 펄스탐지 기법으로는 그림 5, 6과 같이 전원전압의 한 주기(1 cycle)에 걸쳐 동시에 발생하는 부분방전의 위상과 크기 분석의 측정이 불가능하다.

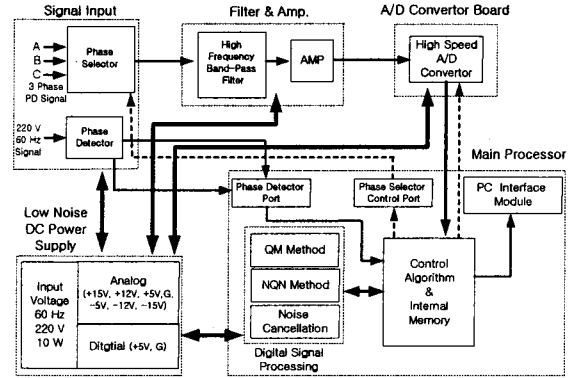


그림 4. DADU의 구성도

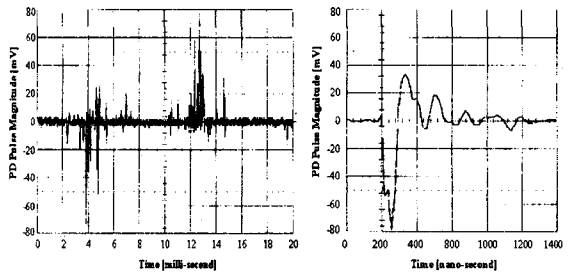


그림 5. Oscilloscope를 이용한 부분방전 측정파형

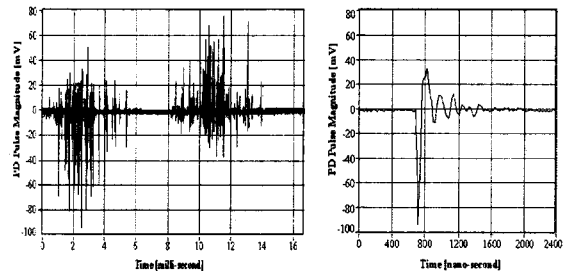


그림 6. DADU에 의한 부분방전 측정파형

3.2 부분방전 신호의 진단 파라미터

A/D 변환기법으로 취득한 부분방전 신호를 DADU에서는 디지털 필터링에 의한 잡음제거와 부분방전의 주파수 영역분석 뿐만 아니라 디지털 신호처리 알고리즘에 의하여 다양한 절연진단 파라미터의 산출이 가능하고, 제반 진단 파라미터의 변화추이(trend)를 분석하여 고정자 권선의 절연상태를 진단한다.

그림 7에서는 부분방전의 크기와 발생빈도를 2차원 그래프로 나타낸 것으로서, 부분방전의 크기에 따른 정(+) 및 부(-) 극성 펄스의 개수가 파악되는 펄스크기 분석(Pulse Height Analysis)이 가능함을 알 수 있다. 이때 주파수 대역, 발전기의 상과 측정시점에 따른 부분방전 신호를 임의로 선택할 수 있고, 진단 파라미터로서 그림 8과 같이 QM과 NQN의 산출이 가능하다.

그림 7과 그림 8에서 Y축은 부분방전 펄스의 반복율, 즉 심각한 열화의 분포범위를 의미하고, X축은 최대 부분방전 펄스의 크기로서 절연파괴의 징후를 나타낸다. 그리고 QM은 초당 10개 펄스가 발생할 때의 부분방전 크기로서 절연물내의 국부적인 열화를 검출하여 고정자 권선의 열화진행 정도 및 이상유무를 판단하기 위하여 이용된다. NQN은 부분방전의 크기와 갯수의 평균면적으로서, 유전정접(power factor tip-up)과 마찬가지로 일정시간 동안의 부분방전 활동량을 합계한 값이고, 절연손상의 정도를 검출하는 수단으로 사용된다.

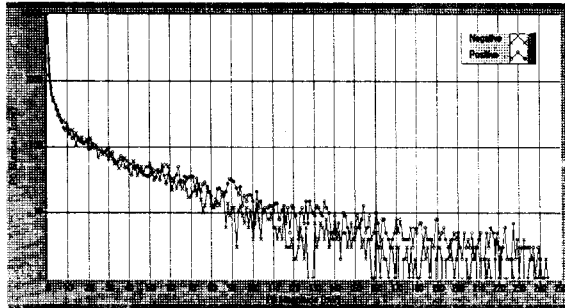


그림 7. Pulse Height Analysis

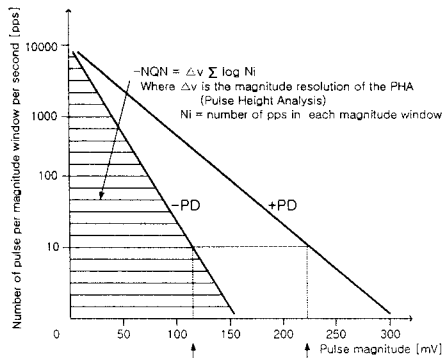


그림 8. QM과 NQN의 산출방법

그림 9에서는 전동기 입력전압의 위상에 따른 부분방전의 크기와 갯수의 분포를 3차원적으로 나타낸 것으로서, 펄스 위상분석(Pulse Phase Analysis)이 가능하여 0~90° 및 180~270° 사이에서 부분방전이 많이 발생하는 전형적인 부분방전의 위상분포 특성을 확인할 수 있고, 부분방전 펄스의 발생형태도 쉽게 볼 수 있다. 뿐만 아니라 그림 9에서는 위상에 따른 부분방전 개시 전압(DIV : discharge inception voltage)과 소멸전압(DEV : discharge extinction voltage)을 구할 수 있고, 이것을 이용하여 고정자 권선의 절연수명 예측이 가능한 DSV를 산출할 수 있다.

그림 10은 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.

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

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

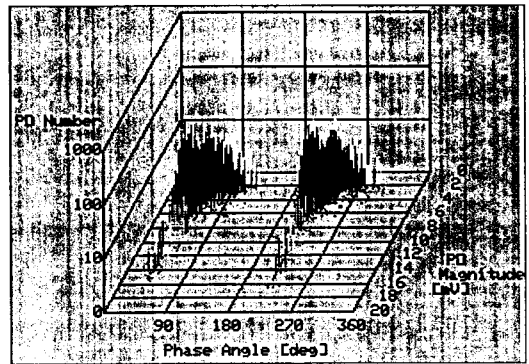


그림 9. Pulse Phase Analysis

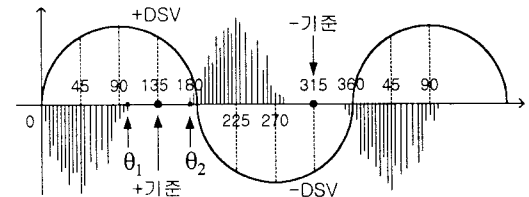


그림 10. DSV(Dynamic Stagnation Voltage)의 개념도

4. 결 론

본 연구에서는 고압 전동기의 운전 신뢰성 향상과 고정자 권선의 절연열화 진단을 위해 기존의 펄스탐지 기법의 단점을 보완한 A/D 변환기법을 사용한 새로운 부분방전 측정기법을 제안하였다. 또한, 마이크로프로세서를 탑재한 On-line 부분방전 측정 및 절연진단 시스템을 통하여 DADU를 개발하였다. A/D 변환기법에 의하여 운전중 부분방전 신호의 측정 신뢰성을 크게 향상시켰고, DADU의 디지털 신호처리 및 필터링 기법을 통한 부분방전 신호분석에 의하여 주파수 영역에서의 부분방전 특성분석과 부분방전 펄스의 크기, 갯수 및 위상 분석이 가능하고, QM, NQN, DSV 등의 다양한 절연진단 파라미터의 산출과 제반 부분방전 파라미터의 변화추이 분석이 가능하도록 하였다.

제안한 A/D 변환에 의한 On-line 부분방전 측정기법과 DADU에 의한 고압 전동기 고정자 권선의 절연진단을 통하여 부분방전 측정기법의 고도화와 절연상태 판정의 신뢰성 향상에 크게 기여할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] B.A. Lloyd, et al., "Continuous On-line Partial Discharge Monitoring of Generator Stator Windings", IEEE Trans. on EC, Vol. 14, No. 4, pp. 1131~1137, Dec. 1999.
- [2] G.C. Montanari, et al., "Random Sampling and Data Processing for PD-Pulse Height and Shape Analysis", IEEE Trans. on DEI, Vol. 7, No. 1, pp. 30~39, Feb. 2000.
- [3] G. Stone and J. Kapler, "Stator Winding Monitoring", IEEE IA Magazine, Vol. 4, No. 5, pp. 15~20, Sep./Oct. 1998.
- [4] Y.J. Kim, et al., "Development of Continuous Partial Discharge Monitoring System for Generator Stator Insulations", Conf. Record of the IEEE-ISEI, Anaheim, USA, pp. 5-8, Apr. 2-5, 2000.
- [5] Y.J. Kim and J.K. Nelson, "Assessment of Deterioration in Epoxy/Mica Machine Insulation", IEEE Trans. on EI, Vol. 27, No. 5, pp. 1026~1039, Oct. 1992.