

발전기 고정자 권선의 운전중 부분방전 측정에 의한 절연진단 시스템 개발

신병철* · 황돈하* · 김용주* · 김정우**
*한국전기연구소 메카트로닉스연구그룹 · **(주)선진전자기술

Development of Insulation Diagnosis System by On-Line Partial Discharge Measurement of Generator Stator Windings

Byoung-Chol Shin* · Don-Ha Hwang* · Yong-Joo Kim* · Jeong-Woo Kim**
*Mechatronics Research Group, KERI · **Advanced Electronic Tech. CO., LTD.

Abstract - Recently, many researches on a diagnosis of stator winding insulation of large generators are reported. They mostly utilize a trend analysis of Partial Discharge (PD). In this paper, a novel on-line monitoring system for an insulation diagnosis is proposed. This system obtains the parameters such as Maximum Partial Discharge Magnitude (QM), Normalized Quantity Number (NQN) and Dynamic Stagnation Voltage (DSV) by continuous on-line monitoring of winding insulation. It is capable of diagnosing the insulation condition by analyzing the trend of PD and utilizing the database built by the system.

1. 서론

최근, 고전압 대용량 전력기기의 불시적인 사고를 예방하여 안정적이고 신뢰도 높은 전력공급과 경제적인 정비계획 수립을 위한 수력 및 화력 발전기 고정자 권선의 절연진단에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^[1,2] 이러한 연구는 대부분 절연물의 국부적인 열화상태를 가장 잘 나타내는 부분방전 신호의 측정 및 검출에 관한 것으로서, 부분방전 신호의 변화추이(Trend)를 분석하여 절연상태를 진단하고 있다.^[1-3] 본 논문에서는 발전기가 운전중인 상태에서의 부분방전 측정에 의한 고정자 권선 절연상태의 On-Line 진단 시스템을 제안한다.

본 연구에서 개발한 발전기 고정자 절연의 상시 진단 시스템인 GODS(Generator On-line Diagnosis System)는 SSC(Stator Slot Coupler) 센서를 이용하여 발전기 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 신호를 운전중에 측정한다.^[3] GODS는 고정자 권선의 절연상태를 평가하기 위해 5종류의 주파수 대역에서 최대 부분방전 크기(QM), NQN(Normalized Quantity Number) 및 DSV(Dynamic Stagnation Voltage) 파라메타를 동시에 산출하여 분석할 수 있고,^[2-4] 각각의 변화추이를 저장하고 이를 비교 분석하여 발전기 고정자 권선의 절연상태를 진단할 수 있다. 그리고 개발한 시스템은 부분방전 신호와 분석 결과를 저장하여 발전기 고정자 권선의 절연상태에 관한 Database를 구축할 수 있고, 편리한 Graphic User Interface(GUI) 기능을 제공하여 비전문가도 쉽게 발전기의 절연상태를 판단할 수 있도록 하였다.

2. 운전중 부분방전 측정기법

2.1 부분방전 측정기법

운전중 부분방전 측정기법은 회전기의 정격 운전상태에서 절연상태를 진단하는 것으로서, 발전기가 운전중일 때 부정기적으로 측정하는 On-Site 방식과 정지중일 때

측정하는 Off-Line 방식의 단점인 소요시간과 비용의 과다, 복잡한 측정설비, 발전기의 운전정지, 돌발적인 상태변화 감지의 어려움, 전문가에 의한 판단의 필요성 등의 문제점을 해결하여 고정자 권선의 절연진단에 정확성과 신뢰성을 높일 수 있다. 운전중 부분방전 측정기법으로는 고정자 권선의 중성점으로 흐르는 RF(Radio Frequency) 전류를 측정하는 RF측정법과 부분방전 분석기를 이용하는 PDA(Partial Discharge Analyzer)와 TGA(Turbine Generator Analyzer)측정법 등이 있다.^[2,3] 그러나 RF측정법은 잡음을 제거하기 어렵기 때문에 부분방전 신호와 잡음을 구별하기 어렵고, PDA와 TGA는 측정 주파수 대역이 한정되어 있고, 측정시간이 짧기 때문에 각종 주파수 대역의 부분방전과 발생 빈도가 낮은 부분방전을 측정하지 못할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위해 발전기에 설치된 9개의 SSC 센서로부터 나오는 부분방전 신호를 디지털 필터를 이용하여 잡음을 제거하고, 다양한 주파수 대역에서 부분방전 신호를 측정할 수 있도록 하였다.

2.2 Stator Slot Coupler

On-Line 부분방전 측정 센서인 SSC는 부분방전에 의해 전자파가 발생되면 단말권선 방전(Endwinding Discharge)과 슬롯 방전(Slot Discharge)을 외부로 출력하게 된다.^[5] SSC의 설치도는 그림 1과 같고, 각 상당 병렬 회로수만큼 설치한다. 일반적으로 발전기 출력단의 고압권선에 설치하는 것이 진단의 효율을 극대화할 수 있다.

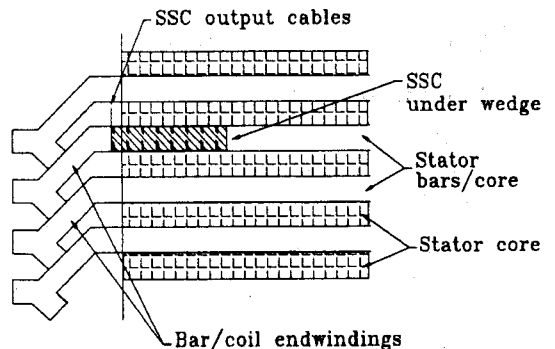


그림 1. SSC의 설치 개략도

2.3 부분방전 신호의 분석기법

부분방전 신호의 일반적인 분석기법은 QM과 NQN을 주로 측정하여 그 변화추이를 분석함으로써 발전기 권선

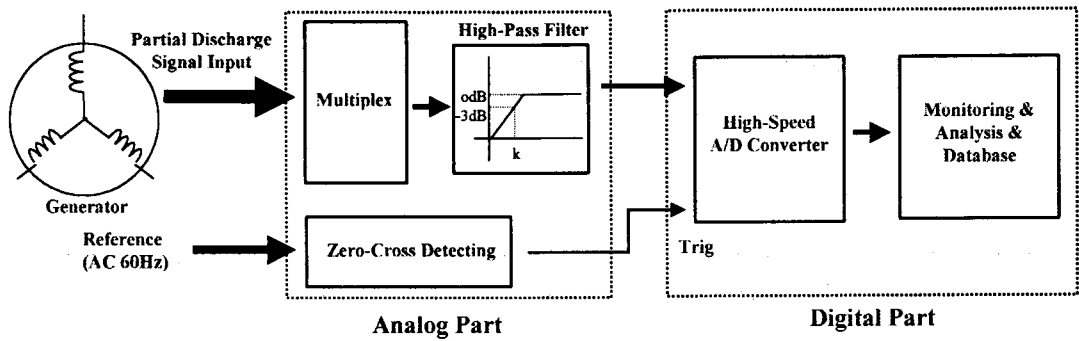


그림 2. GODS의 구성도

의 절연상태를 진단한다.^[2,3] QM은 부분방전 신호의 최대값으로서 절연물의 열화가 진행될수록 QM의 값은 커진다. 따라서 QM의 변화추이 분석을 통하여 발전기 고정자 권선의 열화 진행 정도와 이상유무를 판정할 수 있다. 그리고 NQN은 부분방전 신호의 크기와 갯수의 2차원 그래프에서 전체 데이터의 평균면적을 구하여 분석하는 방법으로서, 일정시간 내의 부분방전량을 합계한 값이다. 정(+)극성 NQN의 부분방전을 기준으로 하여 손상상태를 판정하고 정비방법 및 시기를 결정한다. 부(-)극성 NQN은 내부방전 및 도체 절연간의 방전을 나타내고, 이로 인한 손상은 보수가 불가능하여 완전히 새 권선으로 교체하여야 한다.

또한, GODS는 부분방전의 위상개념을 도입하여 발전기의 잔존수명을 예측할 수 있는 DSV 분석기법을 구현하였다. DSV는 부분방전 개시전압(DIV: Discharge Inception Voltage)과 소멸전압(DEV: Discharge Extinction Voltage)을 찾아내어 이를 위상개념으로 변환하여 절연물의 잔존수명을 진단하는 방법이다.^[4] 건전한 절연상태일 때는 부분방전이 정(+) 및 부(-)극성 전원전압의 상승구간(0~90°와 180~270°)인 작은 위상범위에서 발생하지만, 열화가 많이 진행되어 권선의 절연상태가 악화될 경우에는 부분방전의 발생위상이 점차적으로 확대된다. 이때 부분방전의 발생 및 소멸위상에 따른 전압차를 DSV로 나타내고, 이를 통하여 절연 열화 상태진단과 잔존수명의 예측이 가능하다. GODS는 QM, NQN 및 DSV를 5종류의 주파수 대역에서 분석하고, 이와 같은 진단 파라메타의 변화추이를 비교하여 발전기 고정자 권선의 절연상태를 보다 정확하게 진단할 수 있도록 하였다.

3. Generator On-Line Diagnosis System

3.1 Hardware 구성

그림 2는 GODS의 기본구성을 보여주고 있다. GODS는 기본적으로 9개의 부분방전 센서 입력을 받을 수 있도록 설계하였고, 이는 Multiplexer를 이용하여 원하는 상의 부분방전 신호를 순차적으로, 또는 선택적으로 취득할 수 있다. Multiplexer를 통해 전달되어진 부분방전 신호는 High-Pass 필터를 거친 후, 고속 A/D 컨버터로 입력된다. 일반적으로 On-Line 센서의 특성에 따라 부분방전 신호는 10 MHz 대역에서 발생하므로 저주파 성분의 잡음을 High-Pass 필터를 이용하여 제거시켰다. 고속 A/D 컨버터의 트리거 신호는 영점검출기를 이용하여 발전기의 A상 출력(60 Hz, 120 V)에서 생성하였고, 이는 부분방전 신호의 정확한 위상 동기를 가능하게 한다. 고속 A/D 컨버터는 50 MHz까지 샘플링이 가능한 것으로서, 센서에서 측정된 아날로그 부분방전 신호를 디지털 값으로 변환하고 부분방전 신호 분석 프로그램과 진단 프로그램에 의해 해석할 수 있도록 하였다.^[6,7]

3.2 Software 구성

GODS의 소프트웨어는 계측, 제어, 모니터링 및 데이터 분석용 그래픽 프로그램인 LabVIEW로 작성되었다. 그림 3은 GODS의 프로그램 흐름도로서, 고속 A/D 컨버터에 의해 입력되는 부분방전 신호를 5종류의 디지털 필터를 이용하여 주파수 대역을 나누어 분석하게 된다. 디지털 필터는 1, 5, 10, 15 및 20 MHz 대역의 Band-Pass 필터를 사용하였다. 부분방전 신호를 표준화(Normalize)시킨 후 크기, 갯수 및 위상을 각각 분석하고, 이때 크기와 갯수의 데이터에서 QM과 NQN의 분석이 가능하다. 또한, 크기, 갯수 및 위상의 3차원 데이터에서 DSV 분석을 수행할 수 있다. 현재의 부분방전 신호에서 분석한 QM, NQN, DSV는 이전의 분석결과와 비교되어 발전기의 이상유무를 진단하게 되고, 이를 주화면에 나타내고, 이상시에는 경고 메시지를 내보내도록 하였다.

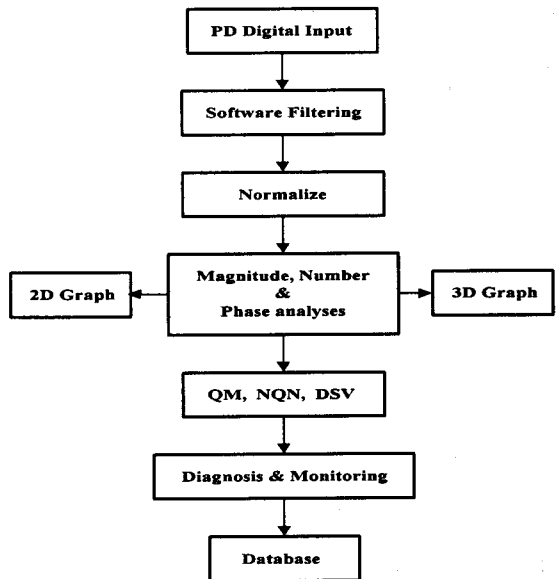


그림 3. GODS의 프로그램 흐름도

3.3 GODS의 기능

본 연구에서 개발한 GODS의 주화면을 그림 4에서 나타내었다. GODS는 부분방전의 크기에 따라 자동으로 입력범위를 조절할 수 있는 Auto-Range 기능, Background 잡음제거 범위의 선택 기능, 관심분야의 주파수 대역 데이터를 분석할 수 있는 주파수 대역 선

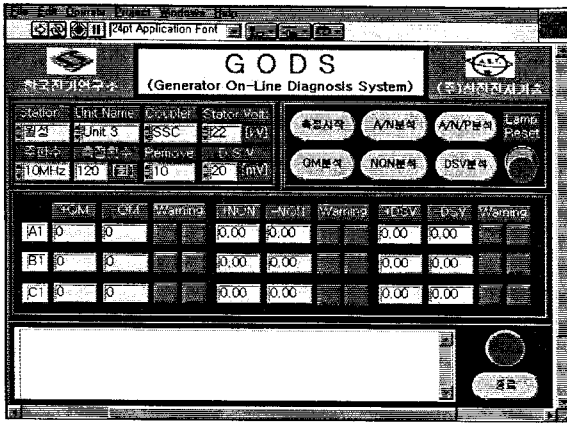


그림 4. GODS의 주화면

택 기능, 5종류의 부분방전 신호의 동시 분석 및 진단 기능, 일자별 부분방전 신호의 분석 결과 및 그래프 기능, 부분방전 분석기법에 따른 각각의 변화추이 분석 기능, 발전기 고장자 권선의 이상에 따른 경고 기능 및 정확한 이상발생 시간과 해당 데이터 저장 기능 및 표준화된 부분방전 신호 데이터와 분석 결과의 Database 구축 기능 등을 가지고 있다.

그림 5는 부분방전의 크기와 발생빈도를 2차원 그래프로 표현한 것으로서, 극성에 따른 최대 부분방전 값을 알 수 있고, 부분방전의 크기에 따른 정(+) 및 부(-) 극성 부분방전 펄스의 갯수가 파악되므로 펄스 크기분석이 가능하다. 이때 주파수 대역, 발전기의 상과 측정된 시간에 따라 원하는 부분방전 신호의 데이터를 선택할 수 있고, 최대 부분방전 크기인 QM과 NQN의 산출이 가능하다.

그림 6은 발전기 전원 주파수(60 Hz)의 위상에 따른 부분방전의 크기 및 갯수(발생빈도)의 분포를 3차원적으로 나타낸 것으로서, 0~90° 및 180~270° 사이에서 부분방전이 많이 발생하고, 그 형태도 쉽게 볼 있다. 이것은 임의의 측정 주파수 대역에 있어서 60 Hz 위상에 따른 부분방전 펄스의 크기와 갯수, 즉 위상 분포특성을 나타내는 것으로서, 펄스 위상분석이 가능함을 나타내고 있다. 마찬가지로 주파수 대역, 발전기의 상과 측정된 시간에 따라 원하는 부분방전 신호의 데이터를 선택할 수 있다. 또한, DSV에 의해 발전기의 잔존수명 평가가 가능할 것으로 판단된다.

그림 7은 QM의 변화추이를 나타내는 것으로서, 부분방전 신호의 최대 크기가 변화하는 경향을 쉽게 확인할 수 있으므로 발전기 권선의 절연상태를 진단할 수 있고, NQN, DSV의 변화추이도 또한 나타낼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 발전기 고장자 권선의 신뢰성 높은 절연상태 감시를 위하여 기존의 On-Site 방식의 단점을 보완하여 운전중 부분방전 측정에 의한 새로운 절연진단 시스템을 제안하였다. GODS의 QM, NQN, DSV 등과 같은 진단 파라메타를 동시에 측정 및 분석할 수 있는 기능은 발전기 절연진단의 신뢰성과 정확성을 높일 것으로 기대된다. 또한, 부분방전 신호의 표준화된 데이터와 분석 데이터를 저장하여 부분방전 신호의 Database를 구축하였고, 분석결과에 따른 발전기 고장자 권선 절연상태의 빠르고 정확한 진단기능을 수행할 수 있도록 하였다.

향후, 원격진단 시스템 구축을 위해 TCP/IP를 이용한 통신기능을 추가하고, Database의 활용으로 보다 많은 발전기 진단기술 개발을 추진할 것이다.

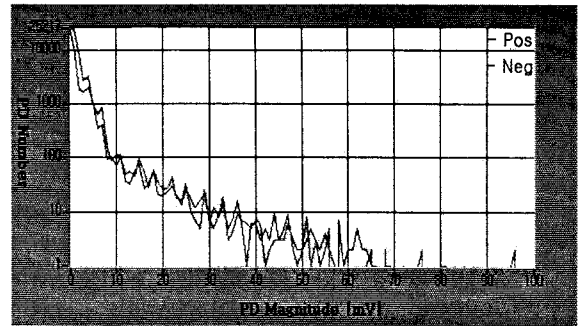


그림 5. PD 신호의 크기와 갯수 분석

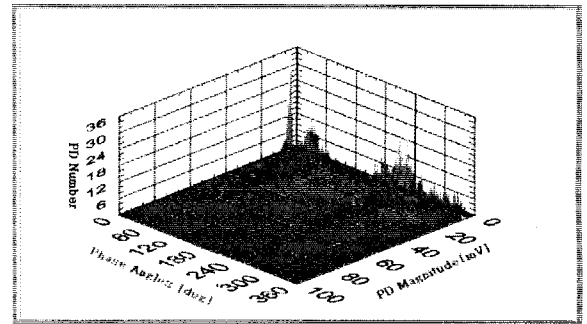


그림 6. PD 신호의 크기, 갯수와 위상 분석

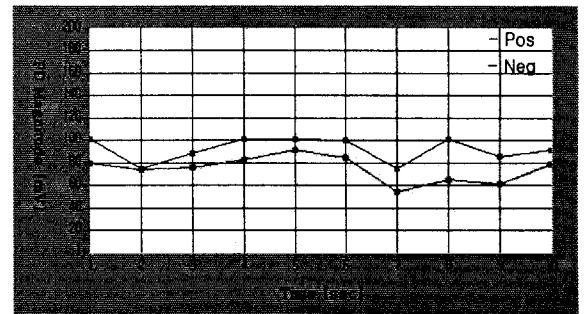


그림 7. PD 신호의 변화추이 분석

[참 고 문 헌]

- [1] G. Stone and J. Kapler, "Stator Winding Monitoring", IEEE-IA Magazine, Vol. 4, No. 5, pp. 15~20, 1998.
- [2] K. Iton, et al, "Partial Discharge Detection for Turbine Generator in Operation", IEE-Japan, DEI-95-33, pp. 33~38, Feb, 1995.
- [3] J.F. Lyles, "Ontario Hydro's Experience Regarding PDA Test Data Correlation as Applied to Hydraulic Generator Stator Winding", CEA-EPRI-Ontario Hydro PDA and RF Monitor User's Workshop, Toronto, Sep. 22-24, 1986.
- [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, 1992.
- [5] H.G. Sedding, "A New Sensor for Detecting Partial Discharge in Operating Turbine Generators", IEEE/PES Winter Meeting, 91WM065-3EC, New York, Feb. 3-7, 1991
- [6] 신병철, 황돈하, 김용수, 김정우, "발전기 고장자 권선 절연상태의 상시 감시 시스템 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2212~2214, 1999. 7.
- [7] 한국전기연구소, "고압 회전기 On-Line 감시기술 개발(최종보고서)", 과학기술부, 1998. 12.