

회전기 고정자 권선에서의 운전 중 절연열화 진단기법

(On-Line Insulation Diagnosis Techniques for Stator Winding of Rotating Machines)

윤대희* · 황돈하 · 신병철 · 김용주 · 이광식

(Dae-Hee Yoon* · Don-Ha Hwang · Byoung-Chol Shin · Yong-Joo Kim · Kwang-Sik Lee)

Abstract

Recently many research activities on the diagnosis of stator winding insulation of large rotating machines have been reported. Capacitive couplers are widely used as sensors for on-line partial discharge (PD) measurement of high voltage rotating machines. This paper presents laboratory test to compare Stator Slot Coupler (SSC), Resistance Temperature Detector (RTD), 80 [pF] coupler and 500 [pF] coupler for on-line PD measurement of rotating machines. And a novel on-line monitoring system for an insulation diagnosis is proposed.

1. 서 론

산업설비가 증대되고 자동화되면서 회전기도 대형화되고 운전의 신뢰성 확보가 필수요건이 되고 있지만, 회전기의 장기간 운전에 따른 절연열화로 인하여 발생하는 돌발적인 운전정지는 생산에 막대한 지장을 초래한다. 이와 같은 돌발적인 운전정지 사태를 방지하기 위한 회전기 고정자 권선의 절연열화 진단방법에는 회전기의 정지 중에 실시하는 Off-line법과 실제 운전 중에 수행하는 On-line 방법으로 구분되고[1], 기기의 운전을 중단하지 않고 고정자 권선의 절연상태를 감시할 수 있는 다양한 운전중 부분방전 측정기법과 측정 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다[2-5].

한편, 회전기 고정자 권선의 국부적인 열화에 의한 부분방전의 탐지와 해석을 위한 On-line 센서로서는 Capacitive Coupler, Stator Slot Coupler (SSC), Radio Frequency Current Transformer (RFCT) 등이 이용되고 있고, 비접촉식의 SSC 센서와 접촉식의 Capacitive Coupler가 회전기 고정자 권선에서의 부분방전 측정을 위한 센서로서 가장 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 고압 발전기 및 전동기의 고정자 권선과 모의슬롯을 활용하여 접촉식 On-line 센서와 비접촉식 On-Line 센서의 특성을 분석하였다. 그리고, 발전기 및 전동기 고정자 권선의 온도 탐지용으로 설치된 Resistance Temperature Detector (RTD) 센서가 운전중 부분방전 신호의 측정을 위한 On-Line 센서로 사용이 가능함을 증

명한다.

또한, Generator On-Line Diagnosis System (GODS)을 통해 5개의 선택된 주파수 대역에서 부분방전의 크기, 위상 분포 및 부분방전 펄스 개수의 상호관계를 나타냄으로서 부분방전 신호의 주파수 분석이 가능하다.

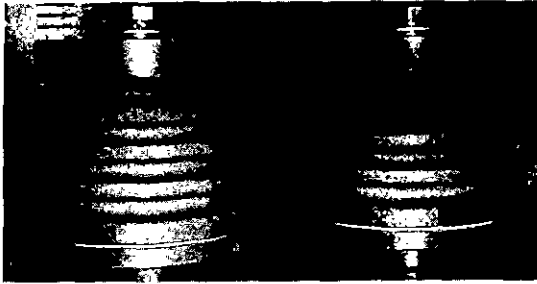
2. 접촉식 On-Line 센서의 특성분석

2.1. EMC 센서의 정전용량 분석

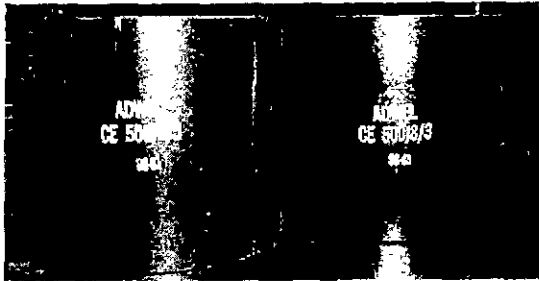
발전기 및 전동기 고정자 권선의 고전압 단자에 설치하여 운전중 부분방전 측정을 위해 많이 사용되는 EMC 센서의 예를 그림 1에 나타내었다. 캐나다 IRIS 및 ADWEL사의 제품으로서, 정전용량이 각각 80 [pF]과 500 [pF]이고, Capacitive Coupler 형태의 On-line 센서이다. 각 센서의 고주파 특성을 분석하기 위해서 HP사의 Impedance/Gain-Phase Analyzer (Model 4194A)인 LCR Meter를 이용하여 주파수에 따른 정전용량의 변화를 측정하였다.

그림 2 (a)에 나타낸 80 [pF] EMC 센서의 경우, 정전용량의 변화율이 10 [MHz]를 기준으로 전체 주파수 대역에서 ± 3 [%] 미만으로서 고주파 특성이 우수함을 볼 수 있다. 반면에, 그림 2 (b)의 500 [pF] EMC 센서의 경우에는 주파수가 증가함에 따라 정전용량이 크게 증가함을 볼 수 있고, 특히, 9 [MHz] 이상에서는 정전용량이 급격히 증가하여 12 [MHz]에서 2,490 [pF]의 최대 정전용량이

측정되었다.

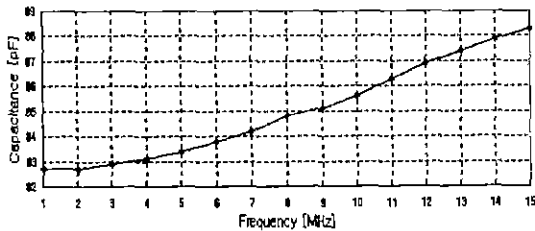


(a) 80 [pF] EMC 센서

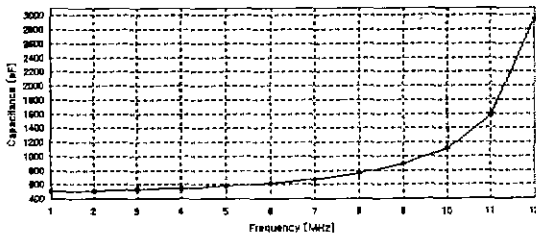


(b) 500 [pF] EMC 센서

그림 1. EMC 센서의 실물 사진
Fig. 1 Photo of EMC Sensor



(a) 80 [pF] EMC 센서의 정전용량 변화



(b) 500 [pF] EMC 센서의 정전용량 변화

그림 2. 주파수에 따른 EMC 센서의 정전용량
Fig. 2 Capacitor of EMC Sensor

2.2 EMC 센서의 주파수 특성분석

그림 3에 나타낸 발전기 및 전동기 고정자 권선

과 모의슬롯을 이용하여 EMC 센서에 대한 주파수 응답특성을 분석하였다. 신호 발생기(Function Generator)를 이용하여 진폭 1 [V]의 정현파(Sine Wave)와 모의 부분방전 펄스신호(Pulse Wave, 펄스폭 : 100 [ns])를 1~30 [MHz] 주파수 범위로 변화시키면서 고정자 권선에 입력하였다. 정전용량이 각각 80 [pF] (1,500 [Ω])과 500 [pF] (680 [Ω])인 EMC 센서를 대상으로 정현파와 펄스 신호에 대한 주파수에 따른 응답특성을 그림 4에 나타내었다.

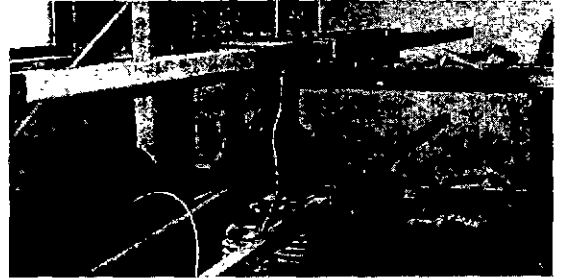
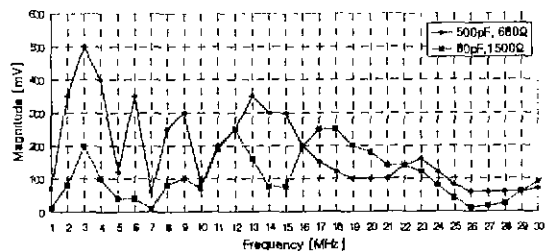


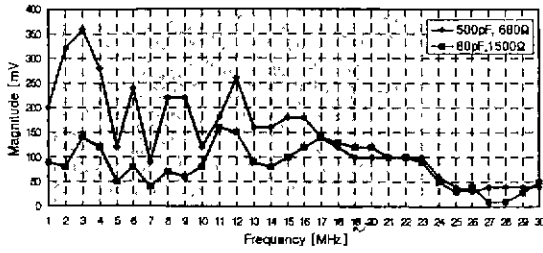
그림 3. 모의슬롯과 발전기 및 전동기 고정자 권선
Fig. 3 Simulated Slot and Generator & Motor Stator Windings

정현파 신호에 대한 응답특성을 나타낸 그림 4(a)를 보면, 16 [MHz] 미만에서는 정전용량이 80 [pF]인 EMC 센서의 측정감도가 낮지만, 16 ~ 22 [MHz] 사이의 주파수에서는 오히려 80 [pF] EMC 센서의 측정감도가 더 높고, 그 이상에서는 유사한 주파수 응답특성을 보이고 있다. 그러나, 그림 4(b)의 펄스 신호 입력의 경우에는 17 [MHz] 이하의 주파수에서 500 [pF] EMC 센서의 응답이 더 크지만, 그 이상의 주파수에서는 2개의 센서 응답이 거의 같음을 볼 수 있다.

따라서, 2종류의 정전용량을 가지는 EMC 센서는 측정감도가 고주파수 대역에서 비교적 유사하여 고주파인 부분방전 신호를 양호하게 검출할 수 있다는 것을 알 수 있다.



(a) 정현파 입력에 대한 응답특성



(b) 펄스 신호에 대한 응답특성

그림 4. EMC 센서의 주파수 응답특성
Fig. 4 Frequency Response Characteristics of EMC

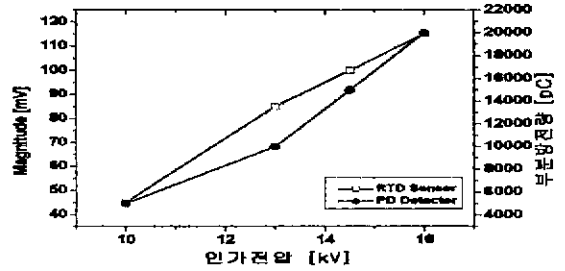
정현파 및 펄스신호에 대한 EMC 센서의 정전용량에 따른 전체적인 주파수 응답특성을 분석해 보면, 정전용량이 클수록 차단주파수가 낮아져 보다 많은 신호의 측정이 가능하므로 센서의 측정감도가 증가하는 경향이 있다. 그러나, 주파수가 증가할수록 정전용량이 커지고 더 큰 정전용량에서의 측정감도가 반드시 높게 나타나지는 않으므로 이에 대한 원인규명이 필요하다.

3. 비접촉식 On-line 센서에 의한 부분방전 측정

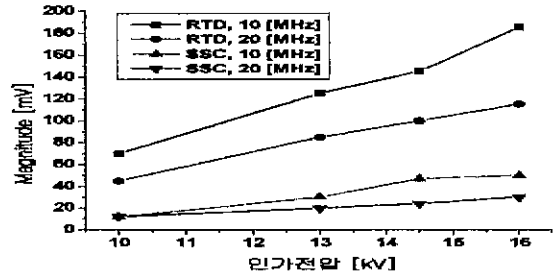
고정자 권선의 온도 측정용으로 사용되는 RTD 센서를 이용하여 부분방전 신호가 측정된다는 것을 확인하기 위해서, 발전기 고정자 권선을 이용한 모의슬롯 내에 RTD 센서를 취부하여 부분방전의 크기를 측정하였다. RTD 및 SSC 센서의 부분방전 측정은, A/D 변환기법을 적용하여 한 주기(1 cycle) 동안에 동시에 발생한 부분방전 신호의 연속적인 측정이 가능한 Generator On-line Diagnosis System(GODS)를 이용하였다[5].

그림 5 (a)는 RTD 센서와 Off-line용의 상용 부분방전 측정기(Tettex, Type 9124, PD Detector)를 이용한 부분방전 측정결과를 나타낸 것으로서, RTD 센서에 의한 부분방전 크기가 인가전압이 증가함에 따라 PD Detector에 의한 것과 마찬가지로 증가함을 알 수 있다. 그림 5 (b)는 상용 On-line 센서인 SSC와 RTD 센서의 부분방전 측정결과를 비교한 것으로서, GODS의 디지털 필터링에 의해서 중심주파수 10 [MHz]와 20 [MHz] 대역에서의 최대 부분방전 크기를 나타내었다. SSC 및 RTD 센서 모두 인가전압에 따라 부분방전 크기가 증가함을 알 수 있고, 그림 5에서 분석한 바와 같이 측정감도는 오히려 RTD 센서가 더 큰 것을 볼 수

있다.



(a) RTD 센서와 PD Detector에 의한 부분방전 크기



(b) RTD 센서와 SSC 센서에 의한 부분방전 크기

그림 5. RTD 센서와 PD Detector 및 SSC 센서에 의한 부분방전 크기

Fig. 5 PD Magnitude for RTD and PD Detector & SSC

4. GODS에 의한 부분방전 측정

종래의 Partial Discharge Analyzer (PDA)와 Turbine Generator Analyzer (TGA) 등은 측정기 기별로 정해진 일정한 주파수 성분의 부분방전만 측정하므로 측정 주파수 대역이 한정되어 있다. 또한, 이들 측정기는 일정한 진폭씩 단계적으로 측정하여 전체 진폭(크기)의 분포를 나타내므로 전원 전압의 한 주기(1cycle)에 걸쳐 동시에 발생하는 부분방전의 위상과 크기의 분포는 나타내지 못한다. 이에 비해 발전기 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 신호를 운전중에 측정하여 발전기의 절연상태를 감시하는 GODS는 부분방전의 연속적인 측정이 가능하다.

GODS는 SSC, RTD 등의 On-line 센서에서 측정된 부분방전 펄스를 전원의 한 주기에 대해 전체를 표시할 수 있다. 그림 6은 한 주기에 대해 부분방전 펄스를 연속 측정된 것을 나타낸다. 또 중심주파수(CF)가 각각 1, 5, 10, 15, 20 [MHz]까지 5개의 디지털 고주파 필터를 사용하여 측정하고자

하는 특정 대역에서의 부분방전의 크기, 위상 분포, 펄스 갱수와의 상호관계를 나타낼 수 있다. 각각의 선택된 주파수 대역에서 부분방전 펄스 파형과 필터링 하지 않은 파형과의 비교에 의해 부분방전 펄스의 주파수 특성을 파악할 수 있다.

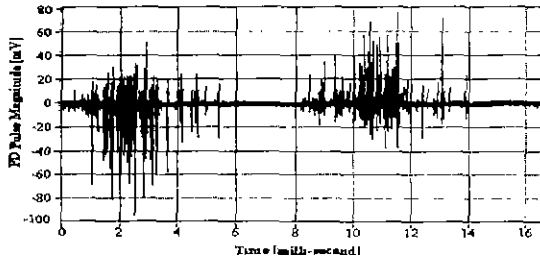
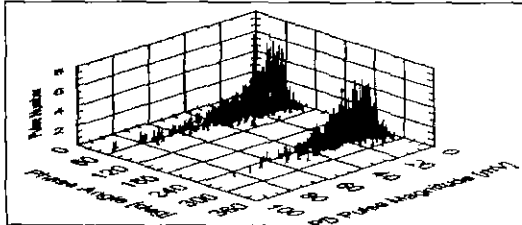
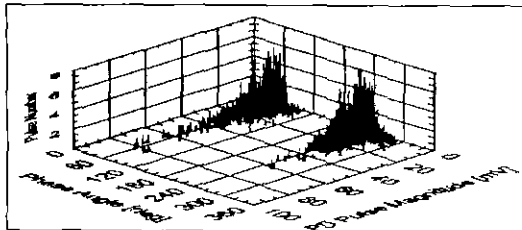


그림 6. GODS의 부분방전 펄스 측정 파형
Fig. 6 PD Pulse Wave Shape of GODS

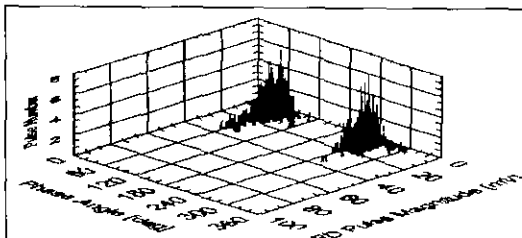
그림 7은 13.5 [kV]의 전압 인가시 1, 5, 10, 15, 20 MHz의 중심 주파수를 가지는 5개의 선택된 주파수 대역에서 부분방전 펄스의 크기, 위상 및 갱수를 나타내고 있다. 위상각 80°, 260° 부근에 부분방전 펄스가 집중되어 있는 것을 볼 수 있다.



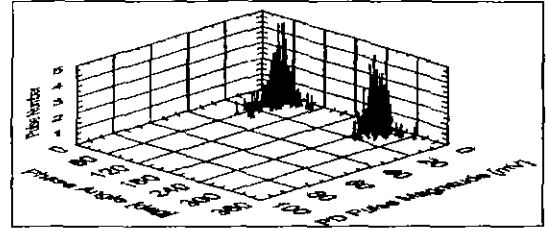
(a) 필터링하지 않았을 때



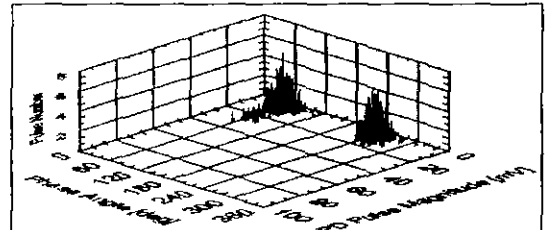
(b) CF:1 [MHz] 필터



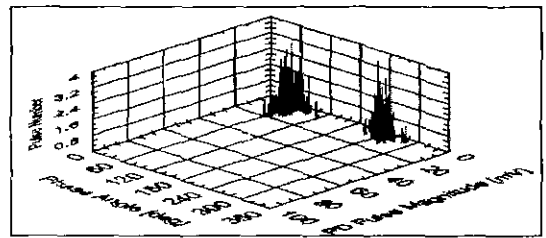
(c) CF:5 [MHz] 필터



(d) CF:10 [MHz] 필터



(e) CF:15 [MHz] 필터



(f) CF:20 [MHz] 필터

그림 7. 부분방전 펄스의 주파수 특성분석
Fig. 7 Frequency Characteristics Analysis of Partial Discharge

4. 결 론

본 연구에서는 고압 회전기 고정자 권선의 절연 열화 진단을 위한 운전중 부분방전 측정센서로서 많이 사용되는 접촉식 EMC 센서의 특성을 분석하였고, 온도 측정용 RTD 센서의 운전중 부분방전 측정센서로의 사용 가능성을 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 80 [pF] EMC 센서는 주파수에 따른 정전용량 변화율이 ± 3 [%] 미만으로서 고주파 특성이 우수하였고, 500 [pF] EMC 센서는 주파수가 증가함에 따라 정전용량이 크게 증가하였다.
- (2) 정전용량이 클수록 EMC 센서의 차단주파수가 낮아져 부분방전 신호의 측정감도가 증가한다는 것을 확인하였다.
- (3) 상용품인 SSC 센서보다 RTD 센서의 응답이 더 커서 측정감도가 더 좋은 것으로 나타났다.

- (4) 발전기 고정자 권선에서의 부분방전 측정과 파형분석을 통하여 RTD 센서가 고주파 부분방전 신호의 측정이 가능하다는 것을 알 수 있었다.
- (5) A/D 변환기법과 디지털 필터링기법을 채용한 GODS는 부분방전의 크기, 개수 및 위상분포 뿐만 아니라 주파수 특색분석을 가능하게 하여 운전중 부분방전 측정기법의 고도화와 절연상태 판정의 신뢰성을 향상시켰다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전기연구소, "고압 회전기 On-Line 감시기술 개발", 최종 보고서, 1998.
- [2] H. Zhu, V. Green, M. Sasic and S. Halliburton, "Increased Sensitivity of Capacitive Couplers for In-Service PD Measurement in Rotating Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999.
- [3] 신병철, 황돈하, 김용주, 김정우, "발전기 고정자 권선 절연상태의 상시 감시 시스템 개발", 1999년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2212-2214, 1999.
- [4] Y.J. Kim, D.H. Hwang, B.C. Shin, D.Y. Park, and J.W. Kim, "Development of Continuous Partial Discharge Monitoring System for Generator Stator Insulations", Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp. 5-8, 2000.
- [5] 신병철, 황돈하, 김용주, 김정우, "발전기 고정자 권선의 운전중 부분방전 측정에 의한 절연진단 시스템 개발", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 1025-1027, 1999. 11.
- [6] J.T. Holboll, M. Henriksen, "Frequency Dependent PD-pulse Distortion in Rotating Machines". Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol. 1, pp. 192-196, 1996.
- [7] G. Stone and J. Kapler, "Stator Winding Monitoring", IEEE-IA Magazine, Vol 4, No 5, pp 15-20, 1998.
- [8] H. G. Sedding, "A New Sensor for Detecting Partial Discharge in Operation Turbine Generators", IEEE/PES Winter Meeting, 91WM065-3EC, New York, Feb 3-7, 1991.