

고압 회전기의 절연열화 진단을 위한 운전중 부분방전 측정 센서의 특성분석

윤 대희* · 황 든 하* · 김 용 주* · 이 광 식** · 김 희 동[Ⓞ] · 김 정 우[Ⓢ]

*한국전기연구소 Mechatronics연구그룹, **영남대학교 전기전자공학부, [Ⓞ]전력연구원, [Ⓢ](주)선진전자기술

Characteristics Analysis of On-Line Partial Discharge Measurement Sensor for Insulation Diagnosis of HV Rotating Machines

Dae-Hee Yoon* · Don-Ha Hwang* · Yong-Joo Kim* · Kwang-Sik Lee** · Hee-Dong Kim[Ⓞ] · Jeong-Woo Kim[Ⓢ]
 *Mechatronics Research Group, KERI, **Yeungnam University, [Ⓞ]KEPRI, [Ⓢ]Advanced Electronic Tech. Co., Ltd.

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.

4194A)인 LCR Meter를 이용하여 주파수에 따른 정전용량의 변화를 측정하였다.



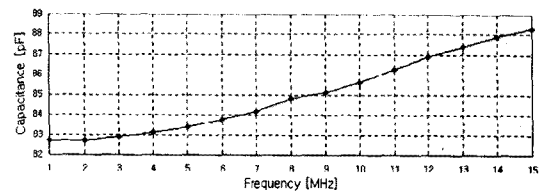
(a) 80 [pF] EMC 센서 (b) 500 [pF] EMC 센서
 그림 1. EMC 센서의 실물 사진

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 고장자 권선의 절연열화 진단방법에는 회전기의 정지중에 실시하는 Off-line법과 실제 운전중에 수행하는 On-line 방법으로 구분되고[1], 기기의 운전을 중단하지 않고 고장자 권선의 절연상태를 감시할 수 있는 다양한 운전중 부분방전 측정기법과 측정 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3-7].

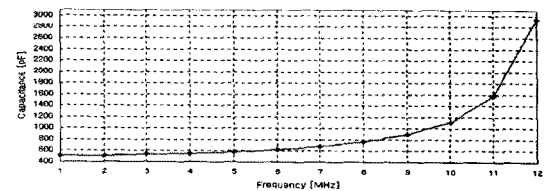
그림 2 (a)에 나타난 80 [pF] EMC 센서의 경우, 정전용량의 변화율이 10 [MHz]를 기준으로 전체 주파수 대역에서 ±3 [%] 미만으로서 고주파 특성이 우수함을 볼 수 있다. 반면에, 그림 2 (b)의 500 [pF] EMC 센서의 경우에는 주파수가 증가함에 따라 정전용량이 크게 증가함을 볼 수 있고, 특히, 9 [MHz] 이상에서는 정전용량이 급격히 증가하여 12 [MHz]에서 2,490 [pF]의 최대 정전용량이 측정되었다.

한편, 운전중 부분방전 신호 취득을 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 고장자 권선에서의 부분방전 측정을 위한 센서로서 가장 많이 사용되고 있다.



(a) 80 [pF] EMC 센서의 정전용량 변화

본 논문에서는 고압 발전기 및 전동기의 고장자 권선과 모의슬롯을 활용한 실험실적 특성시험을 통하여 접촉식 On-line 센서인 80 [pF] Epoxy-Mica Coupler (EMC) 센서와 500 [pF] EMC 센서의 주파수 응답특성을 분석한 결과를 제시한다.



(b) 500 [pF] EMC 센서의 정전용량 변화

또한, 발전기 및 전동기 고장자 권선의 온도 탐지용으로 설치하는 Resistance Temperature Detector (RTD) 센서가 운전중 부분방전 신호의 측정을 위한 On-line 센서로 사용이 가능함을 증명한다.

그림 2. 주파수에 따른 EMC 센서의 정전용량 특성

2. 접촉식 On-line 센서의 특성분석

2.1 EMC 센서의 정전용량 분석

발전기 및 전동기 고장자 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

2.2 EMC 센서의 주파수 특성분석

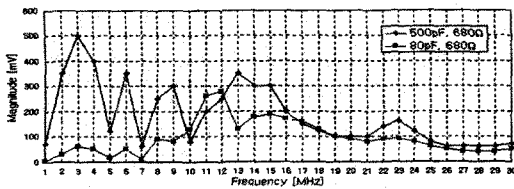
그림 3에 나타난 발전기 및 전동기 고장자 권선과 모의슬롯을 이용하여 EMC 센서에 대한 주파수 응답특성을 분석하였다. 신호 발생기(Function Generator)를 이용하여 진폭 1 [V]의 정현파(Sine Wave)와 모의 부분방전 펄스신호(Pulse Wave, 펄스폭 : 100 [ns])를 1~30 [MHz] 주파수 범위로 변화시키면서 고장자 권선에 입력하였다. 정전용량이 각각 80 [pF]과 500 [pF]인 EMC 센서를 대상으로 680 [Ω] 및 1,500

[Q] 2종류의 측정 임피던스를 사용하여 정현파와 펄스 신호에 대한 주파수에 따른 응답특성을 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

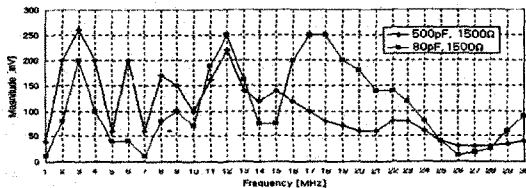


그림 3. 모의슬롯에 취부된 발전기 및 전동기 고정자 권선

680 [Ω]의 측정저항에 대한 정현파 신호의 응답특성을 나타낸 그림 4 (a)를 보면, 10 [MHz] 미만에서는 정전용량이 80 [pF]인 EMC 센서의 측정감도가 더 낮지만 10 [MHz] 이상에서는 유사한 주파수 응답특성을 보이고 있다. 그러나, 그림 4 (b)의 1,500 [Ω] 측정저항을 이용한 경우에는 10 [MHz] 이상의 주파수에서 80 [pF] EMC 센서의 응답이 더 큰 것을 볼 수 있다. 한편, 측정저항의 크기에 따른 응답특성을 분석해 보면, 8 [MHz] 미만에서는 80 [pF]와 500 [pF] 센서 모두 측정저항이 680 [Ω]인 경우의 측정감도가 더 크고, 10 [MHz] 이상의 주파수 대역에서는 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.



(a) 측정저항 680 [Ω]



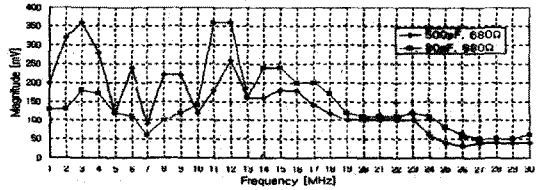
(b) 측정저항 1,500 [Ω]

그림 4. 정현파 신호에 의한 EMC 센서의 응답특성

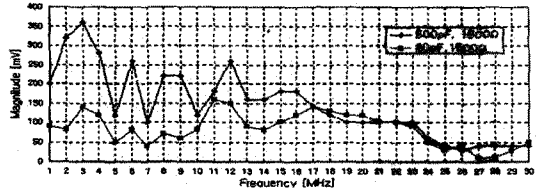
EMC On-line 센서의 모의 부분방전 펄스신호에 대한 주파수 응답특성을 나타낸 그림 5를 보면, 2종류의 측정저항 및 정전용량의 측정감도가 전체 주파수 대역에서 비교적 유사하여 고주파인 부분방전 신호를 양호하게 검출할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 1,500 [Ω]의 측정저항에 의한 응답특성이 680 [Ω]에 의한 것보다 비교적 평탄하고, 측정저항이 680 [Ω]일 때의 측정값이 1,500 [Ω]일 때보다 전반적으로 약간 큰 것을 볼 수 있고, 10 [MHz] 이상에서는 정현파 신호의 응답특성과 마찬가지로 80 [pF] EMC 센서에 의한 응답이 500 [pF]의 응답과 유사하거나 더 크다.

정현파 및 펄스신호에 대한 EMC 센서의 정전용량과 측정 임피던스에 따른 전체적인 주파수 응답특성을 분석해 보면, 측정저항이 작고 정전용량이 클수록 차단주파수가 낮아져 보다 많은 신호의 측정이 가능하므로 센서의 측정감도가 증가하는 경향이 있고, 80 [pF] 센서의 경우에는 10 [MHz] 이상의 주파수 대역에서 비교적 평탄하고 큰 응답특성을 나타내어 고주파 부분방전 신호에 대한 측정감도가 양호한 것으로 판단된다. 그러나, 주파수가 증가할수록 정전용량이 커지고 더 큰 정전용량

에서의 측정감도가 반드시 높게 나타나지는 않으므로 이에 대한 원인규명이 필요하다.



(a) 측정저항 680 [Ω]



(b) 측정저항 1,500 [Ω]

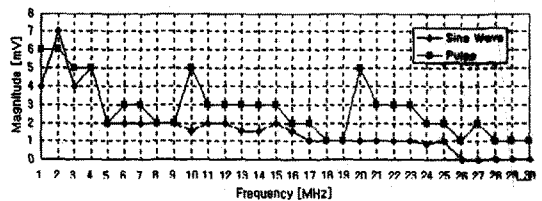
그림 5. 펄스신호에 대한 EMC 센서의 응답특성

3. 비접촉식 On-line 센서의 특성분석

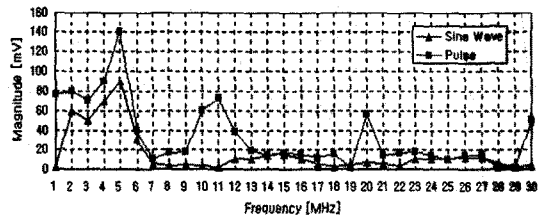
3.1 비접촉식 On-line 센서의 주파수 특성분석

비접촉식 On-line 부분방전 측정용 센서의 주파수 응답특성을 분석하기 위하여 그림 3의 발전기 및 전동기 고정자 권선의 모의슬롯 내에 상용 SSC 센서와 온도 측정용의 RTD 센서를 취부하여 특성시험을 수행하였다. 신호 발생기를 이용하여 1 [V]의 정현파 신호와 크기 1 [V], 펄스폭 100 [ns]인 모의 부분방전 펄스신호의 주파수를 1~30 [MHz] 범위로 가변시켜 고정자 권선에 입력하였고, 그림 6에 측정결과를 나타내었다.

그림 6 (a)와 (b)를 분석해 보면, SSC 및 RTD 센서에 의한 주파수 응답의 전체적인 분포형태는 유사하지만, RTD 센서의 응답이 수십 [mV]의 범위로서 SSC 센서의 수 [mV] 응답보다 더 크므로 측정감도가 더 좋은 것으로 나타났다. 그러나, 상용의 SSC 및 RTD 센서 모두 정현파 신호보다는 펄스신호의 응답이 더 크므로 부분방전 신호의 측정이 가능함을 알 수 있다.



(a) SSC 센서의 주파수 응답특성



(b) RTD 센서의 주파수 응답특성

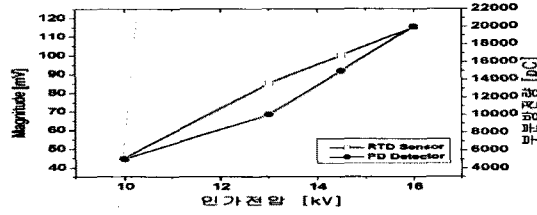
그림 6. 비접촉식 On-line 센서의 주파수 응답특성

3.2 RTD 센서에 의한 부분방전 측정

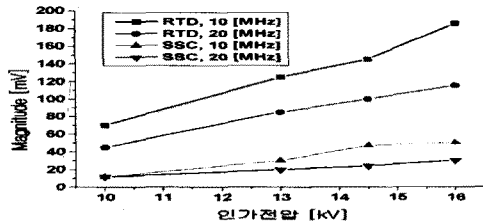
고정자 권선의 온도 측정용으로 사용되는 RTD 센서

를 이용하여 부분방전 신호가 측정된다는 것을 확인하기 위해서, 발전기 고장자 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)을 이용하였다(7).

그림 7 (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 7 (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 6에서 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 7. RTD 센서와 PD Detector 및 SSC 센서에 의한 부분방전 크기

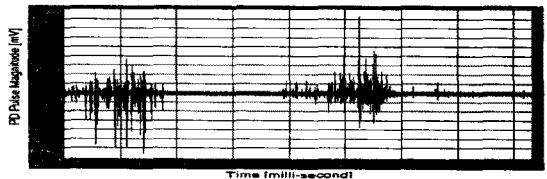
그림 8 (a)는 인가전압(16 [kV])의 1주기 동안에 발생한 부분방전 신호를 RTD 센서를 이용하여 GODS로 측정한 파형으로서 0°~90°와 180°~270°에서 펄스가 집중되어 있는 전형적인 부분방전의 발생형태를 나타내고 있다. 그림 8 (b)는 그림 8 (a)의 부분방전 신호 중에서 1개 파형을 나타내고, 펄스폭이 20 [ns]인 부분방전 펄스임을 알 수 있다. 그러므로 RTD 센서를 이용하여 발전기 고장자 권선에서 발생하는 고주파 대역의 부분방전 신호를 충분히 측정할 수 있다는 것이 증명된다. 따라서 고장자 권선의 온도를 탐지하기 위해 설치한 RTD 센서를 고압 회전기 고장자 권선의 절연진단을 위한 운전중 부분방전 측정센서로 사용할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고압 회전기 고장자 권선의 절연열화 진단을 위한 운전중 부분방전 측정센서로서 많이 사용되는 접촉식 EMC 센서와 비접촉식 SSC 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) 비접촉식의 SSC 및 RTD 센서 모두 펄스신호에 대한 응답특성이 양호하여 운전중 부분방전 신호의 측정이 가능하다.
- (4) 상용품인 SSC 센서보다 RTD 센서의 응답이 더 커서 측정감도가 더 좋은 것으로 나타났다.
- (5) 발전기 고장자 권선에서의 부분방전 측정과 파형 분석을 통하여 RTD 센서가 고주파 부분방전 신호의 측정이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

향후 EMC 센서의 정전용량, 측정 임피던스 및 주파수에 따른 정밀한 특성분석이 필요하고, RTD 및 SSC 센서의 상세한 구조분석과 RTD 센서의 부분방전 측정원리를 이론적으로 규명할 예정이다.



(a) 1주기의 부분방전 파형

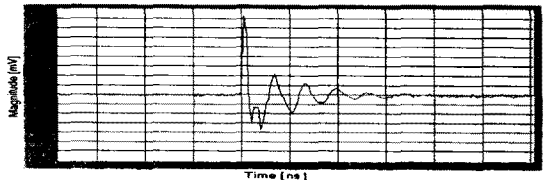


그림 8. RTD 센서를 이용한 부분방전 측정파형

(참 고 문 헌)

- (1) 한국전기연구원, "고압 회전기 On-Line 감시기술 개발", 최종 보고서, 1998.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 신병철, 황돈하, 김용주, 김정우, "발전기 고장자 권선 절연상태의 상시 감시 시스템 개발", 1999년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2212-2214, 1999.
- (5) 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.
- (6) 윤대회, 신병철, 황돈하, 김용주, 이광석, "발전기 고장자 권선의 절연진단을 위한 운전중 부분방전 측정기법", 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계학술대회 논문집, pp.136-138, 2000. 5.
- (7) 신병철, 황돈하, 김용주, 김정우, "발전기 고장자 권선의 운전중 부분방전 측정에 의한 절연진단 시스템 개발", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 1025-1027, 1999. 11.