

6.6kV 회전기 부분방전 측정용 Capacitive Coupler 특성

강동식* · 윤대희* · 김용주* · 윤영호** · 이정준** · 송상옥***
 *한국전기연구원, ** (주)삼화콘덴서, *** (주)선진전자기술

Characteristics of Capacitive Coupler for Partial Discharge Measurement in 6.6kV Rotating Machines

Dong-Sik Kang* · Dae-Hee Yoon* · Yong-Joo Kim* · Yung-Ho Yun** · Jung-Jun Lee** · Sang-Ock Song***
 *KERI, **Samwha Capacitor Co. Ltd, ***Advanced Electronic Technology Co. Ltd.

Abstract - Recently many researches on the diagnosis of stator winding insulation for large rotating machines have been developed since the 1970s. Capacitive coupler has been the most widely used sensor for on-line partial discharge(PD) in rotating machines.

The 105 [pF] ceramic coupler(CC) has been developed to continuously measure the PD activity in operating motor stator windings.

This paper presents frequency characteristics and laboratory test to compare traditional 80 [pF] epoxy-mica coupler(EMC) and 105 [pF] CC for PD measurement in 6.6 [kV] stator windings.

을 위해 현재 가장 많이 사용되는 캐나다 IRIS사의 제품 80 [pF] EMC를 그림 1에 나타내었다.

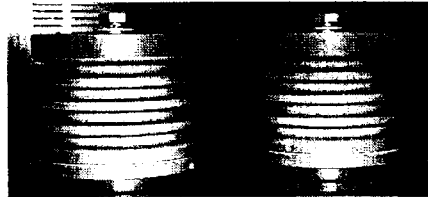


그림 1. 80 [pF] EMC 센서

1. 서 론

산업설비용 고압 회전기는 장기간 사용함에 따라 고정자 권선 절연이 열화되므로, 열화진단을 위한 방법의 하나로 고정자 권선에서 발생하는 부분방전을 측정하는 기술에 관한 많은 연구가 진행되어왔다. 회전기 고정자 권선의 절연열화 진단방법으로는 회전기를 정지하고 절연상태를 측정하는 off-line법과 회전기가 실사용 조건으로 운전되고 있는 동안 절연상태를 측정하는 on-line 방법으로 구분된다[1,2]. On-line 진단법은 내부방전, 슬롯방전 및 권선단말 방전 등의 다양한 종류의 방전이 측정 가능하며, 운전중에 연속적으로 절연상태를 감시할 수 있는 장점이 있어 초기진단 개념으로 최근 활발한 연구가 수행되고 있다. 최근 선진 외국에서는 접촉식 센서인 Epoxy-Mica Coupler(EMC)와 비접촉식 센서인 Stator Slot Coupler(SSC), Resistance Temperature Detector(RTD), Radio Frequency Current Transformer(RFCT) 등의 센서를 이용한 on-line 부분방전 측정 기술이 개발되었고, 국내에서도 1990년대부터 회전기 진단에 관한 연구를 수행하여 상당한 수준의 기반기술을 구축하고 있다[2-5].

회전기의 on-line 부분방전 측정용 센서로서 현재 가장 폭넓게 사용되고 있는 capacitive coupler는 초기에는 cable type을 사용하였으나, 설치시 문제점 등을 보완한 epoxy-mica type이 개발되어 사용 중에 있다. 지금까지는 회전기의 부분방전을 측정하기 위해 정전용량이 80 [pF]인 capacitive coupler가 주로 사용되었다. 그러나 근래 capacitive가 증가할수록 더 높은 측정 감도를 가진다는 것에 착안하여 최근 500[pF] 및 1000[pF] EMC가 개발되고 있다[6].

본 연구에서는 6.6kV급 회전기 고정자 권선의 부분방전을 on-line으로 측정하는 capacitive coupler를 개발하기 위하여 IRIS사의 epoxy mica coupler(EMC)의 각종 특성을 분석하였다. 이를 통하여, EMC와 동등 이상의 전기적 및 고주파 응답특성을 지닌 ceramic coupler(CC)를 제작하였다. 또한, 본 연구를 통하여 제작된 CC를 6.6kV급 고압 전동기 고정자 권선 모의 슬롯에 연결하여 발생하는 부분방전을 실험실적으로 비교 분석하여 부분방전 측정센서로서의 타당성을 확인하였다.

2. EMC 센서의 특성 분석

발전기 및 전동기 등의 회전기 고정자 권선의 고전압 인출부 도체에 직접 연결 설치하여 운전중 부분방전 측정

Impedance/Gain-Phase Analyzer (HP사, Model 4194A)인 LCR meter를 이용하여 그림 1에 나타낸 EMC 센서의 주파수에 따른 정전용량의 변화를 측정하였다. 그림 2에 나타낸 80 [pF] EMC 센서의 정전용량 변화율은 주파수 증가에 따라 미소한 증가를 나타내지만 고주파 특성이 우수함을 볼 수 있다.

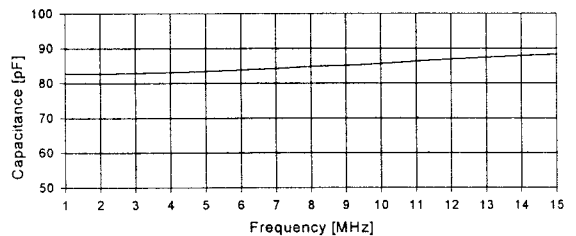


그림 2. 80 [pF] EMC 센서의 정전용량 변화

그림 3은 S Parameter Network Analyzer (HP사, Model 81532S)를 이용하여 EMC 센서의 주파수에 따른 응답특성을 분석한 것이다. EMC 센서의 cut-off 주파수 특성을 분석해 보면, 감쇠특성 5 [dB]를 기준으로 했을 때 EMC 센서의 cut-off 주파수는 10.9~68 [MHz]이고, 감쇠특성 10 [dB]를 기준으로 했을 때 cut-off 주파수는 6.4~182 [MHz]이다.

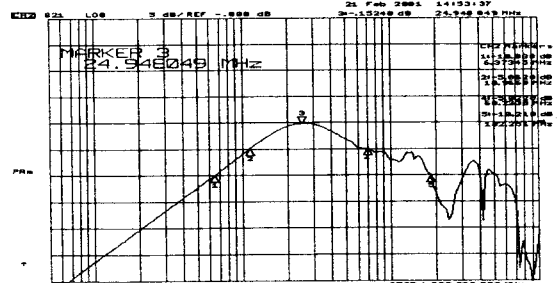


그림 3. 80 [pF] EMC 센서의 주파수 응답특성

3. 개발용 CC 센서 소체의 특성 분석

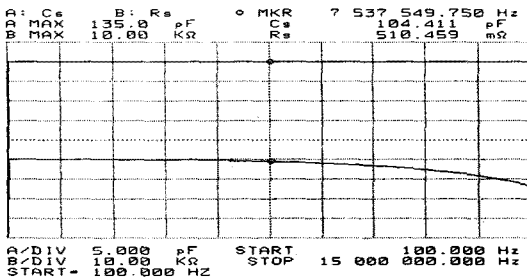
개발용 센서의 소체는 EMC 센서의 특성중 제일 주요 특성인 주파수 응답특성을 만족하면서 내전압 15 [kV·rms] 이상, 8 [kV] 인가시 부분방전 발생량이 3 [pC] 이하가 되도록 설계하였다. 개발된 소체의 재질을 세라믹으로 하고 동등 이상의 주파수 특성 및 전기적 특성을 지니도록 세라믹 컴파운드(유전율 : 약 300)로 소체를 성형하였다. 소체의 양쪽 전극면에 Ag로 프린팅후 800°C로 소성한 금속 전극층을 형성하는 구조로 하였다. 그림 4는 개발과정을 거쳐 설계 제작된 105 [pF] 및 210 [pF]의 CC 소체이다. 105 [pF] 소체는 210 [pF] 소체 2개를 직렬로 연결한 구조로 구성되었다.

이들 CC 센서의 소체 중 105 [pF]와 210 [pF]의 정전용량을 가지는 소체를 선택하여 주파수에 따른 정전용량 변화율, 주파수 응답특성, 부분방전 시험 등을 수행하였다.

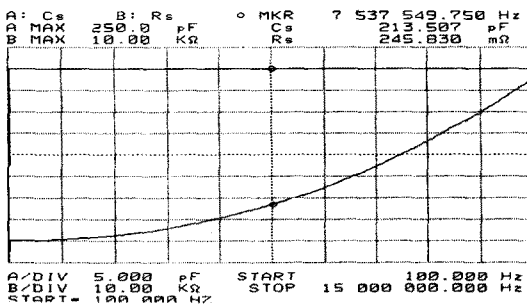


(a) 105 [pF] 소체 (b) 210 [pF] 소체
그림 4. 설계 제작된 CC 센서의 소체

그림 5는 Impedance/Gain-Phase Analyzer를 이용하여 105 [pF], 210 [pF] CC 소체의 주파수에 따른 정전용량의 변화율을 측정한 것이다. 105 [pF] CC 소체의 정전용량 특성은 10 [MHz]까지는 104 [pF]로 거의 일정한 정전용량이고 그 이상의 고주파에서 미소하게 감소하지만 그 폭은 5 [%]를 넘지 않는다. 반면에, 그림 5(b)의 210 [pF] CC 소체의 경우에는 정전용량이 8 [MHz]까지는 ± 5 [%] 미만의 변화율이지만, 주파수가 증가함에 따라 정전용량이 크게 증가하는 특성을 나타냈다. 그러므로, 105 [pF] CC 소체의 정전용량 변화특성이 기존제품과 거의 유사한 특성임을 알 수 있었다.



(a) 105 [pF] CC 소체의 정전용량 변화

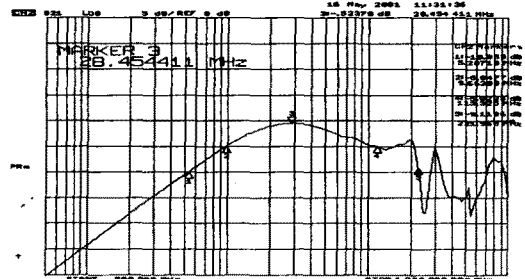


(b) 210 [pF] CC 소체의 정전용량 변화

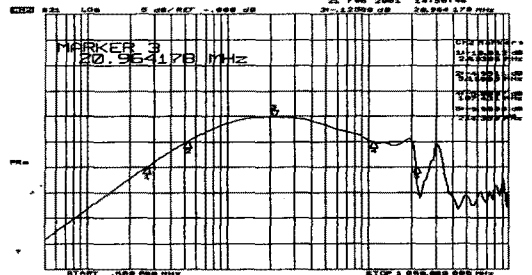
그림 5. 주파수에 따른 CC 소체의 정전용량 변화

그림 6은 S Parameter Network Analyzer를 이용하여 2종류 CC 센서 소체의 주파수 응답특성을 분석한 것이다. 감쇠특성 5 [dB]를 기준으로 했을 때, 105 [pF] CC 소체의 cut-off 주파수 특성은 9.5~110 [MHz]이고, 210 [pF] CC 소체에서는 5~107 [MHz]로 나타났다. 감쇠특성 10 [dB]를 기준으로 했을 때의 cut-off 주파수 특성시험 결과는, 105 [pF] CC 소체에서는 5.2~221 [MHz]이고, 210 [pF] CC 소체에서는 2.6~221 [MHz]로 나타났다.

각 소체의 주파수 특성을 살펴보면 105 [pF] 및 210 [pF] CC의 소체가 EMC 센서보다 좀더 넓은 주파수 대역을 지님을 알 수 있었다. 따라서, 기존의 EMC 보다 정전용량이 큰 CC의 소체가 EMC에 비해 더 넓은 주파수 대역의 부분방전을 측정할 수 있다는 논문의 결과와 잘 일치한다(6). 그러므로 이들 소체의 주파수 응답 특성은 모두 만족함을 알 수 있었다.



(a) 105 [pF] CC 소체의 주파수 응답특성



(b) 210 [pF] CC 소체의 주파수 응답특성

그림 6. CC 소체의 주파수 응답특성

각 소체의 내전압 파괴 특성은 각 45kV 및 60kV를 상회하므로 개발 기준치를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 또한 소체가 충분한 부분방전 특성을 지니는가를 확인하기 위하여 연면방전이 발생되지 않게 실리콘 유속에 넣고 실험을 실시하였다. 표 1의 부분방전 특성 결과처럼 부분방전 개시전압이 105 [pF] CC 소체에서는 17 [kV], 210 [pF] CC 소체에서는 12.5 [kV]로 나타났다. 또한 이들 전압값에서 소체 내부의 부분방전이 아닌 연면방전의 특성을 지닌 것으로 나타나, 향후 소체의 부에 예복시 합침과정 등을 거치면 연면방전 특성이 향상될 것이므로 설계 기준을 충분히 만족하고 있는 것을 알 수 있다.

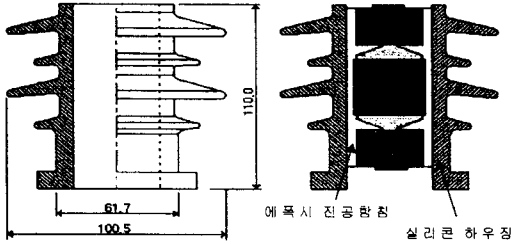
CC 센서를 제작하기 위한 소체로 주파수 특성이 EMC 센서와 가장 유사한 105 [pF] 소체를 선택하였으며, 이를 이용하여 CC를 제작하였다.

표 1. 소체의 부분방전 특성

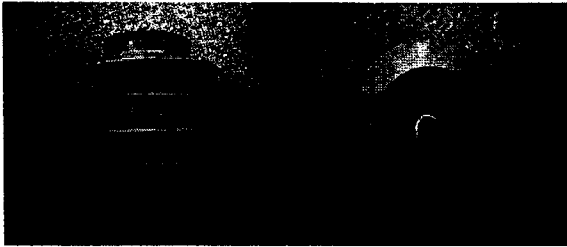
| | 210 [pF] 소체 | | 105 [pF] 소체 | |
|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| | 1차 | 2차 | 1차 | 2차 |
| PD 발생전압 | 12.5 [kV] | 13 [kV] | 17 [kV] | 17 [kV] |

4. CC 센서 제작 및 특성 분석

105 [pF] 세라믹 소체를 이용하여 그림 7(a)의 구조를 지니도록 CC의 완성품을 제작하였다. 제작된 제품의 실물 사진을 그림 7(b)에 나타내었다. 완성품은 높이 : 111 [mm], 큰 shed 최대 외경 : 101 [mm], 작은 shed 최대 외경 : 84 [mm], 에폭시 housing 외경 : 62 [mm]로 나타났다.



(a) CC 센서의 구조



(b) CC 센서의 실물 사진

그림 7. CC 센서의 구조 및 실물 사진

완성된 제품의 부분방전 특성시험을 실시한 결과를 나타낸 표 2를 살펴보면, 정상적인 제품의 경우 20kV에서도 부분방전이 발생되지 않는 것으로 나타나 소체 시험결과와 잘 일치하였다. 시료 # 2인 경우는 부분방전이 발생하였으나, 규격치를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 향후 품질 향상을 위하여 # 2 시료는 분해하면서 부분방전 발생원인을 규명할 예정이다.

표 2. 완성품 105 (pF) CC의 부분방전 특성

| 완성품 | | | | |
|---------|------|---------|------|------|
| 전압 | # 1 | # 2 | # 3 | # 4 |
| PD 발생전압 | | 12 [kV] | | |
| 12 kV | Free | | Free | Free |
| 13 kV | | 3 pC | | |
| 15 kV | | | | |
| 17 kV | | 3 pC | | |
| 20 kV | | 5 pC | | |

표 3. 주파수 특성 비교

| 주파수 cut-off 특성 | 5 [dB] 기준 | 10 [dB] 기준 |
|-----------------------|---------------|---------------|
| IRIS 제품 (EMC 82 [pF]) | 10.9~68 [MHz] | 6.4~182 [MHz] |
| CC 105 [pF] 완성품 | 9.6~113 [MHz] | 5.2~221 [MHz] |

표 3은 완성품 CC 센서의 주파수 응답특성으로 소체시험 결과에서와 같이 거의 유사한 주파수 응답특성을 보이고 있으나, 80 [pF] EMC 센서와 비교하면 약간 넓은 주파수 폭을 지님을 알 수 있다.

고압 전동기의 고정자 권선에서 발생하는 부분방전을 이용하여 측정센서의 응답특성을 비교하기 위하여, 그림 8과 같이 6.6kV 고압전동기용 고정자 권선 모의 슬롯회로를 구성하고, 제작된 CC 및 기존 EMC 센서를 이용한 실험실적 부분방전 측정 시험을 수행하였다.

인가전압은 3.2kV, 4.2kV 및 6.2kV이고, 이때 발생된 최대 부분방전 발생량은 각각 1000pC, 3000pC 및 7000pC으로 나타났다.

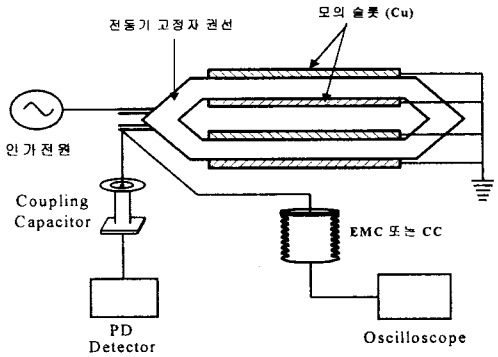
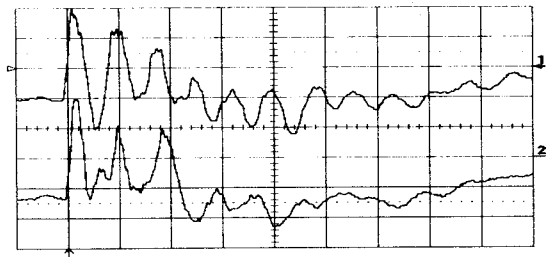


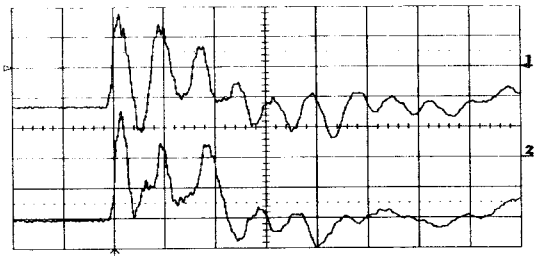
그림 8. PD 파형 측정 회로도

그림 9는 제작된 CC 센서와 IRIS의 80 [pF] EMC 센서를 이용하여 6.6kV 고압 전동기용 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 펄스를 비교 측정한 결과를 나타낸 것이다.

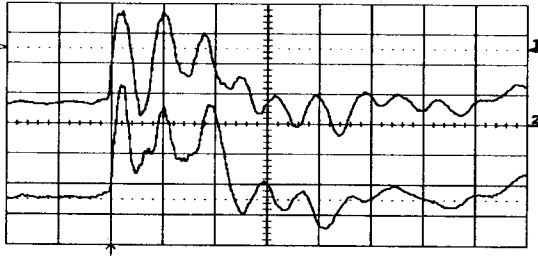
각 센서에서 측정된 부분방전 펄스를 분석해 보면, 부분방전 발생 주파수는 EMC 및 CC가 동일하나, 펄스 크기는 표 4에 나타난 것과 같이 정전용량이 큰 CC가 EMC보다 더 크게 나타났다.



(a) 1000 (pC)일 때 부분방전 파형
0.1 μs/div, 100 mV/div



(b) 3000 (pC)일 때의 부분방전 파형
0.1 μs/div, 100 mV/div



(c) 7000 [pC]일 때의 부분방전 파형
0.1 μ s/div, 200 mV/div

그림 9. EMC 와 CC 센서의 PD 측정 파형 비교

표 4. 센서에서 측정된 부분방전 펄스 크기

| 센서 \ PD량 | 1000 [pC] | 3000 [pC] | 7000 [pC] |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| EMC (80 [pF]) | 120~350 [mV] | 180~300 [mV] | 250~600 [mV] |
| CC (105 [pF]) | 160~480 [mV] | 210~360 [mV] | 300~750 [mV] |

5. 결 론

본 논문에서는 고압 회전기 고정자 권선의 절연열화 진단을 위한 운전중 부분방전 측정 센서로 많이 사용되는 EMC 센서의 정전용량 및 주파수 특성을 분석하여 이를 토대로 ceramic coupler(CC)를 제작하였다.

세라믹을 이용한 105 [pF] 소체는 주파수 응답특성 및 정전용량 변화율에서 기존 제품과 유사한 것으로 나타나 이를 기본 소체로 선정하였다.

완성된 CC는 기존 제품보다 정전용량이 20% 증가하여 센서의 cut-off 주파수 대역의 일부 증가를 가져와 부분방전 측정이 가능한 주파수 대역이 확대된 결과를 나타내었다.

실험실적 실험을 통하여 본 연구에서 제작된 CC가 기존 EMC 80 [pF] 센서보다 부분방전 응답특성이 더 큰 것으로 나타났다.

따라서, 105 [pF] 소체로 제작된 CC 센서는 부분방전 측정 센서로서의 타당성을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전기연구소, "고압 회전기 On-Line 감시기술 개발", 최종 보고서, 1998.
- [2] I.M. Culbert, H. Dhirani and G.C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation Conduction of Large Rotating Machines (Volume 16)", EPRI publication EL-5036, 1989.
- [3] 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.
- [4] Ken Kimura, Yoshiharu Kaneda, Koji Mio, Satoru Kuroki, Teruya Osawa and Hiroki Tanaka "On-line Partial Discharge Monitor for Turbine Generator", Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 1999 (ICEE '99), Vol. 1, pp. 172-175, 1999.
- [5] 電氣協同研究會, "電力設備へのセンサ技術適用", 電氣協同研究 第46卷, 第4号, 1990.
- [6] 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.