

회전기 권선의 펄스 전송특성 연구

강동식 · 심우용 · 황돈하 · 김용주
한국전기연구원

A Study on the Partial Discharge Wave Propagation along Stator Winding

Dong-Sik Kang · Woo-Yong Sim · Don-Ha Hwang · Yong-Joo Kim
KERI

Abstract - A lot of R&D on the diagnosis of stator winding insulation for large rotating machines has been carried out since the 1970s. The on-line partial discharge measurement has proved to be an effective technique in the evaluation of the state of stator insulation in high voltage rotating machines. It is well known that if the discharge pulses propagate through the winding conductor, they are attenuated and delayed.

In the present study, to investigate the attenuation and the time delay of discharge pulses through the winding conductor, a series of tests were conducted using a model coils and slot. Thus it could be concluded that while the high frequency pulse propagates in radiation or end-winding coupling modes, the low frequency one does in a series mode through the coil conductor.

(delamination) 현상이 나타나게 된다. 이곳에 기동과 정지의 반복에 의한 열-기계적 응력이 가해지면 박리가 증가되어 결함이 성장하게 된다. 이러한 기계적 피로는 마이카와 에폭시의 결합부에서 미소 균열을 생성시키며, 이들은 박리와 접촉하게 되어 큰 결함 통로를 형성시켜 궁극적으로 절연파괴로 진전된다.

일반적으로 방전 펄스가 케이블 및 권선을 따라 진행하게 되면 크기의 감소 및 증첩 현상이 나타나지만, 이들에 대한 정확한 규명은 이루어지지 못한 실정이다. 최근 들어 북미에서는 수력발전기 고정자 권선의 on-line 측정을 많이 하고 있지만 방전 신호 감쇠와 교정의 문제점을 지니고 있는 것으로 보고되어 있다.

560 마력, 6.6kV급 전동기를 대상으로 1000pF의 coupling capacitor로 측정된 연구결과에 의하면, 권선 전송 길이에 관계없이 고주파 성분의 펄스는 50nsec 이하의 전송시간이 나타난 반면, 저주파 성분의 펄스는 권선 전송길이에 비례하는 것으로 나타나 있다. 또한, 고주파 펄스 크기는 초기 권선 턴수에서 급격히 감쇠하지만, 저주파 펄스 크기는 상대적 감쇠율이 떨어지는 것으로 실험결과에서 보여지고 있다. 그러므로 IEEE Std 1434-2000에서도 현재 회전기 권선에서의 on-line 부분방전 진단기법의 단점으로 센서가 부착된 지점 근처의 극히 적은 권선 부분만 측정되어짐을 기술하고 있다.

1. 서 론

고압 회전기의 장기간 사용에 따른 고장원인은 고정자 권선의 절연부분에서 열화가 진전되어 예상치 못한 절연 파괴 사고로 나타나는 경우이다. 이러한 회전기 고정자 권선의 전기적 절연열화 진단방법으로 최근 on-line 부분방전 진단방법을 많이 연구하고 있다. On-line 부분방전 진단법은 절연파괴 원인과 가장 관련성이 높은 결함요인인 내부방전, 슬롯방전 및 권선단말 방전 등의 다양한 종류의 방전이 측정 가능하며, 운전중에 동일한 센서 및 계측기로 연속적으로 절연상태를 감시할 수 있는 장점을 지니고 있어 수명평가기법으로 활용하고자 활발한 연구가 수행되고 있다.

본 논문에서는 회전기 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 펄스의 전송특성을 파악하기 위하여 주파수에 따른 전송특성을 파악하였다. 그 결과 13MHz 이상의 고주파 영역에서는 radiation에 의한 영향이 나타났으며, 저주파 영역에서는 도체를 통한 전송으로 펄스의 거리에 따른 전송시간차를 파악할 수 있었다.

2. 고정자 권선에서의 방전펄스 전송 특성

고압 회전기의 고정자 권선 절연은 제작과정에서 생성된 보이드에 운전전압이 인가되면 부분방전이 발생되어진다. 더욱 장기운전에 따른 열적, 기계적, 전기적 및 환경적 열화요인 등이 작용하게 되면 부분방전 열화가 진행되어 보이드 크기가 더욱 증가하게 된다. 즉, 절연층 내의 보이드에 고전압이 인가되면 부분방전으로 도전성 경로가 형성되어 보이드가 도전체의 역할을 하게 되므로 절연간격이 좁아지는 효과를 가져와 절연파괴 전압은 저하하게 된다. 또한, 운전상태의 열적 열화로는 무기재료인 마이카의 성능은 크게 변화가 없지만, 유기재료인 에폭시 수지에서는 분자 분해와 산화를 발생시키는 화학적 과정이 수반되므로, 결과적으로 마이카와 에폭시 표면의 결합력이 감소되어 마이카와 에폭시 사이의 계면에서 박리

3. 모델 전동기를 이용한 전송특성 실험

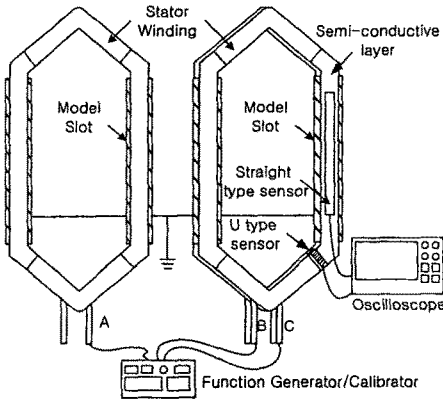
3.1 전송특성 실험을 위한 센서

고압 전동기 전송특성 실험을 위하여 당 연구실에서 소형 전동기의 절연에 손상을 주지 않도록 자체 제작한 CGVPI(coupler for global VPI) 센서와 정지중 및 운전중 측정에 사용이 가능하도록 개발한 소형 세라믹 coupling capacitor를 이용하기로 하였다. 센서의 설치 위치와 관련되어 구분하면, 고정자 권선의 웨지 위에 설치할 수 있도록 폭 10mm, 길이 150mm의 직선형으로 제작된 unshielded type, CPW(coplanar wave guide) type, microstrip type 등을 이용하였다. 또한 고정자 권선의 슬롯외부 end-winding 시작지점에 설치하는 U-type 및 권선 리드부인 전압을 인가하는 도체부에 직접 부착하는 coupling capacitor 등 총 5가지 모델의 센서를 이용하였다. 2 종류의 모델 권선과 모델전동기에 이들 센서를 부착하고 NPG-2 PD calibrator (Nihon model), 합수발생기(HP8116A) 및 실제 인가 전압(3.4kV) 조건에서의 전송특성 실험을 수행하는 것으로 하여 실험하였다.

3.2 모델권선에서의 주파수 응답 특성

6.6kV 고압전동기 모델권선에서의 전송특성 실험을 위해 그림 1과 같이 구성하였다. 입력원으로 합수발생기의 16V 정현파를 도체와 접지사이에 인가하였다. 인가지점

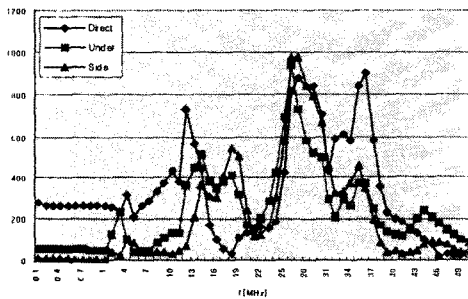
은 직선형 센서가 부착된 권선(C), 센서가 부착된 권선의 아래에 위치한 하부권선(B) 및 권선간 이격거리 100mm를 두고 옆에 위치한 권선(A)의 도체부이다. 이들 시험으로부터 센싱된 신호의 특성을 분석하면 특정 주파수로부터 신호가 radiation 또는 end-winding coupling에 의하여 전송되는지를 분석할 수 있게 된다.



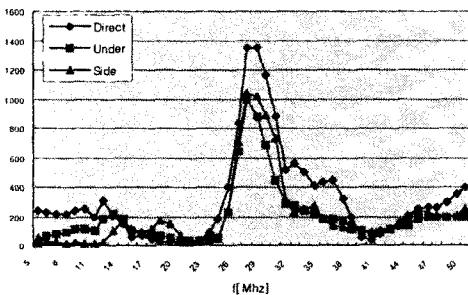
<그림 1> 주파수 응답특성을 모델권선 구성도

그림 2는 3종류 센서에서 나타난 주파수 응답특성들로서 다음과 같은 특징을 확인할 수 있었다.

- 1) 직선형 센서 중에서는 unshielded type의 센서가 가장 sensitivity가 높게 나타났다.
- 2) 모든 센서는 13MHz 이상에서는 방사신호를 검출하고, 13MHz이하에서는 유도신호를 검출하는 것으로 추정된다.
- 3) 모든 센서는 25~37MHz 대역에서 sensitivity가 가장 높게 나타났으므로 수십 nsec의 펄스폭을 지닌 부분 방전을 측정할 수 있는 것으로 보여 진다.



(a) Unshielded type 직선형 센서



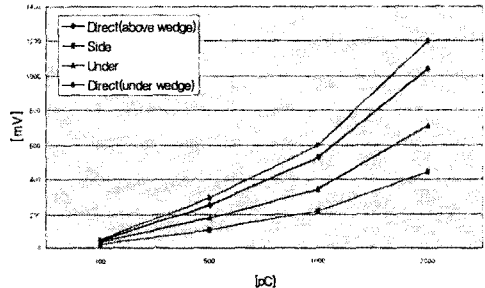
(b) U-type 센서

<그림 2> 센서의 주파수 응답특성

3.2 방전발생 위치에 따른 측정 감도 특성

방전펄스 발생지점으로부터 거리에 따른 측정 감도 변화를 파악하기 위하여 그림 1의 권선도체 각각에 NPG-2 calibrator(rising time : 30nsec)로 100~2,000pC의 방전 펄스를 입력하고, unshielded type 센서로 응답특성을 측정하는 것을 그림 3에 나타내었다.

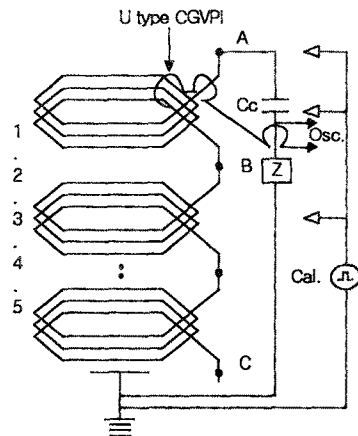
센서가 부착된 도체(C권선)에 고정 펄스를 인가한 펄스의 경우, 웨지 유무에 따른 방전 펄스 크기의 감쇠는 15~20% 발생하는 것으로 나타났다. 아래권선(B)에 펄스를 인가한 펄스의 크기 응답은 센서가 부착된 권선과 비교하면 60% 크기로 측정되었으며, 옆권선(A)에 펄스를 인가한 펄스의 크기 응답은 센서가 부착된 권선과 비교하면 35% 크기로 측정되었다. 이는 그림 2에 나타난 주파수별 응답특성의 대부분 경우처럼, 직접 권선에서의 측정값에 비교하면 타 권선에서 발생되어진 펄스의 크기는 적지만 실험실적으로 100pC까지 측정이 가능한 감도로 나타났다. 또한 방전발생 위치에 관계없이 입력된 방전량에 비례한 응답특성을 지니고 있는 것으로 다른 type의 센서에서도 나타났다.



<그림 3> Unshielded type 센서의 감도 특성

3.3 방전펄스의 전송 특성 실험

방전 펄스가 권선 도체를 따라 전송되면, 펄스 크기가 감소하고 시간 지연이 발생하는 정도를 파악하기 위하여 그림 4와 같은 회로를 5개의 6.6kV 고압전동기용 고정자 권선을 이용하여 구성하였다. 각 권선 코일은 9 turn으로 10m의 도체 길이를 지니므로, 전체 전송 권선 도체 길이는 50m가 되었다.



Cc : 2500 pF coupling capacitor
Cal. : Input calibrator and function generator
Z : Measuring impedance (680)
A, B, C : The injected position by Cal. 0m, 20m, 50m
<그림 4> Time delay 및 감쇠 특성실험 회로

NPG-2 calibrator를 이용하여 A(0m), B(20m), C(50m)위치에 2000pC의 방전 펄스를 인가하였다. 측정용 센서로는 U-type 센서와 2500pC의 coupling capacitor를 이용하여 검출되는 파형을 분석하였다.

그림 5는 중단 권선에서 측정된 펄스 파형을 나타낸 것으로, 위쪽 파형은 coupling capacitor를 이용하여 검출된 파형, 아래 파형은 U-type 센서로 검출된 방전 펄스 파형이다. Coupling capacitor로 측정된 결과를 살펴보면, 고주파 성분은 시간지연이 나타나지 않고 도착하였으나, 저주파 성분은 도체 길이에 비례하여 펄스가 도달됨이 나타났다. 이를 이용하여 권선을 따라 전송되는 저주파 성분 펄스의 전송속도를 계산한 결과 70m/μsec로 나타났다. 그러므로 고주파 성분은 end-winding coupling 또는 radiation에 의한 펄스 전송을 나타내는 반면, 저주파 성분은 권선 도체를 따라 series mode로 전송됨을 보여준다.

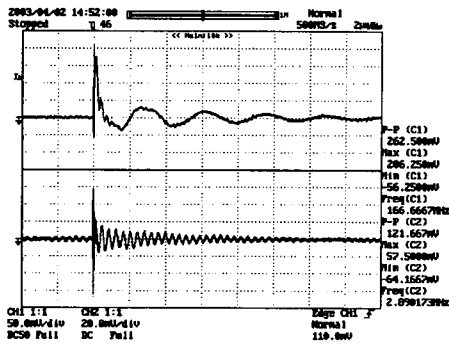
회전기 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 펄스를 on-line 방법으로 측정함에 있어서, 이러한 고주파 성분 및 저주파 성분을 동시에 측정하게 되면 저주파 성분의 전송속도를 이용하여 발생 부분방전 지점을 추정하는데 적용될 수 있는 것으로 사료된다.

4. 결론

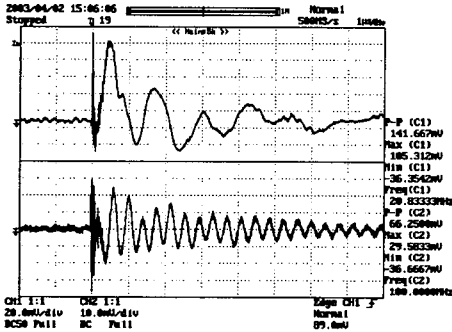
본 연구는 회전기 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 현상의 on-line 진단에 응용하기 위한 연구의 일환으로 실시한 펄스 전송특성 연구로, 자체 개발한 전동기에 손상을 주지 않고 쉽게 설치가 가능한 센서와 기존 coupling capacitor를 통하여 펄스의 특성을 파악하였다. 그 결과 고주파 성분은 end-winding coupling 또는 radiation에 의한 펄스 전송을 나타내는 반면, 저주파 성분은 권선 도체를 따라 series mode로 전송되는 것으로 나타났으며, 저주파 성분 펄스의 전송속도는 70m/μsec로 나타났다. 그러므로 저주파 성분의 전송특성을 이용하면 발생 부분방전 지점을 추정하는데 적용이 가능한 것으로 사료된다.

참고문헌

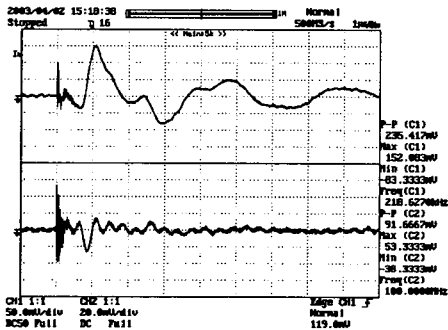
- [1] Dong-Sik Kang, Woo-Yong Sim, and Yong-Joo Kim, "The Novel Partial Discharge Sensor for Global VPI Rotating Machines", Proceedings of the 2002 Joint Conference of AECD & K-J Symposium on ED and HVE, Seoul, Korea, pp.234-237, Nov. 17-20, 2002.
- [2] A. Wilson and R.J. Jackson, "Discharge Detection Techniques for Stator Windings", IEE Proceedings, Vol. 132, Pt. B, No. 5, pp. 243-244, 1985.
- [3] IEEE Std 1434-2000, "IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery", 2000.
- [4] 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.



(a) A 지점에 calibrator 신호 인가한 경우 (0 m)



(b) B 지점에 calibrator 신호 인가한 경우 (20 m)



(c) C 지점에 calibrator 신호 인가한 경우 (50 m)

<그림 5> 센서를 통해 A 지점에서 측정된 방전 펄스 파형