

터빈발전기의 고정자권선 진단을 위한 새로운 부분방전 센서설계

이상화, 황돈하, 강동식
한국전기연구원 전력설비진단연구그룹

Novel PD Sensor Design for Stator Winding Diagnosis of Turbine Generators

Sang-Hwa Yi, Don-Ha Hwang, Dong-Sik Kang
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

Abstract - 고압회전기의 운전중 부분방전을 효과적으로 측정하고 진단하기 위해 고정자 권선과 슬롯사이에서 취부 되는 방향성 결합기형태의 부분방전센서가 일부 사용되고 있다. 기존 결합기형 센서는 마이크로스트립 등의 전송선로 타입으로, 센서 출력 단자의 효과적인 매칭을 목표로 설계되었으나, 센싱도체의 폭이 좁아 권선으로부터 효과적인 커플링이 힘들다. 본 논문에서는 고정자 권선 및 슬롯 구조의 전계분포 계산결과를 바탕으로 부분방전 신호 측정에 효과적인 형태의 센서를 설계하였다. 제작된 센서를 실제와 동일한 고정자 권선 및 슬롯 구조에서 타 센서와 비교하여 성능을 시험한 결과, 기존 마이크로스트립타입의 센서와 상용센서에 비해 좋은 감도를 가지는 것으로 나타났다.

1. 서 론

산업설비에 이용되고 있는 고압 회전기의 장기간 사용시 발생할 수 있는 고장의 중요한 원인중 하나로, 고정자권선의 절연부 열화를 들 수 있다. 이러한 고정자 권선의 전기적 절연열화를 조기에 진단하기 위해 회전을 정지시킨 후 권선에 외부 고전압을 가하여 일반적인 부분방전 검출기로 부분방전량을 측정하는 방법이 이용되어왔다[1]. 그러나 정지중 측정법은 시간이 많이 걸리고, 고용량의 고전압발생기가 필요하며, 실온전 상태에만 나타나는 특정한 방전의 경우 그 결과를 측정하기가 어려운 문제가 있다[2]. 그래서 최근 운전중 진단법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 결과로 권선 슬롯의 웨지하부에 적용하는 방향성 결합기(Directional Coupler) 형태의 센서와, 저항성 온도 측정기(Resistance Temperature Detector) 형태의 센서가 개발되어 일부 이용중이다[3, 4]. 이 중 권선 슬롯의 웨지 하부에 설치하는 결합기형 센서는, 권선 도체에 직접적인 연결을 하지 않고 반도전층 바깥쪽에 설치하므로 비교적 고전압에 안전하고, 잡음 신호의 큰 원인 중 하나인 상분리 모션과 떨어져 있고 부분방전 발생부와 가까워, 잡음에 강한 장점이 있다. 이러한 결합기형 센서는 마이크로스트립 등의 전송선로 타입으로, 센서 출력 단자의 효과적인 매칭을 목표로 설계되었으나, 센싱도체의 폭이 좁아 권선으로부터 효과적인 커플링이 힘들다. 본 논문에서는, 고압회전기의 대표적인 고정자 권선 및 슬롯 구조의 전계 해석을 통하여 효과적인 센서 형태를 고찰하였으며, 이를 바탕으로 설계한 센서의 성능을 실험을 통하여 확인하였다.

2. 비접촉식 부분방전 센서의 설계 및 제작

2.1 고정자 권선 및 슬롯 구조의 전계해석

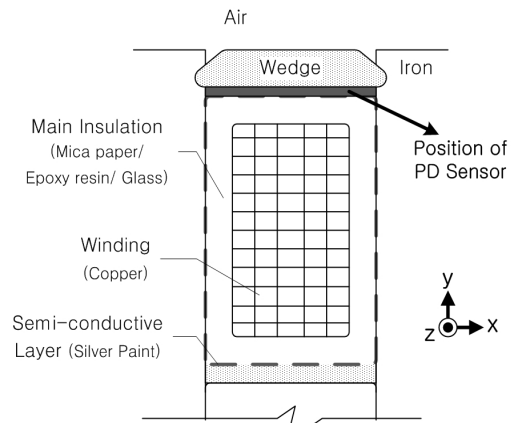
<그림 1>은 일반적인 고전압회전기의 고정자 권선 및 슬롯 구조이며, 결합기 형태의 부분방전 센서의 경우 그림처럼 웨지와 권선 사이에 설치된다. 센서의 효과적인 설계를 위하여 고정자 슬롯구조의 권선에 부분방전신호가 인가된 상황을 모의하여 전계계산을 실시하였다. FIT(Finite Integration Technique) 기반의 CST Microwave Studio를 이용하였으며, 주절연은 비유전율 4.5, 웨지는 2.4의 등방성 유전물질, 반도전 층은 도전율 $10^6 S/m$ 의 도체막, 슬롯구조는 완전도체로 설정하였고, 해석되는 단면에서 0.9m 떨어진 위치에서 1GHz이하의 균일한 주파수 스펙트럼을 가지는 임펄스가 권선을 따라 입력되는 상황을 모의하였다. 10MHz~1GHz까지의 전계분포를 계산하였고 100MHz에서, 각방향 성분별 전계분포는 <그림 2>와 같다. 센서 설치 위치에서 살펴보면, x축(좌우)방향 성분이 전계의 대부분을 차지하고 있으며, 주로 슬롯도체에 가까운 부분에 분포하고 있다. 이러한 분포는 계산된 다른 주파수에서도 유사하게 나타났다.

2.2 센서의 설계 및 제작

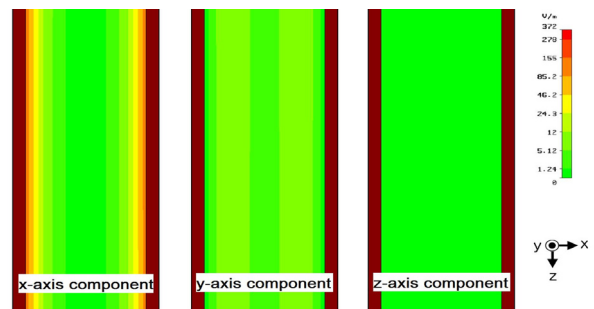
일반적인 결합기형 센서의 구조인 마이크로스트립 라인의 전송선로의 경우, 대부분의 전계가 y축(상하)방향으로 센서의 중앙에 분포하기 때문에, 2.1항에서 해석된 슬롯구조의 센서취부위치에는 효과적이지 못한 것을 예상 할 수 있다. 그러나, 센서의 전송선로 구조가 CPW(Co-planar

Waveguide)일 경우, 신호전송시 대부분의 전계는 신호도체와 양쪽 접지 사이에 x축(좌우)방향으로 분포하게 되어 해석된 슬롯구조의 전계분포와 유사하여 좀 더 효과적인 신호 감지가 가능할 것이다.

방향성 결합기를 설계할 때, 전송선로의 입력방향 전압과 출력 방향 전압의 비를 나타내는 결합도(Coupling Factor)라는 파라메타가 있으며, 이 값이 클수록 좀 더 많은 신호가 커플링 된다는 의미이다. 이 값은 두 개의 입출력 전송선로 신호선사이의 전기용량(Capacitance)이 클수록 증가한다[5]. 이러한 상황을 결합기형 센서의 디자인에 적용하면, 권선과 센서의 신호선사이의 전기용량이 클 경우 부분방전 신호측정의 감도를 높일 수 있다는 의미이다. 설치위치가 고정된 상황에서 권선과 CPW형태 센서의 신호선 사이의 전기용량을 높이기 위해서는 신호선의 폭을 증가시켜야한다. 또한 CPW의 경우 신호선의 폭이 바뀌어도 접지와와의 간격을 조정하면 임피던스정합이 가능하다.



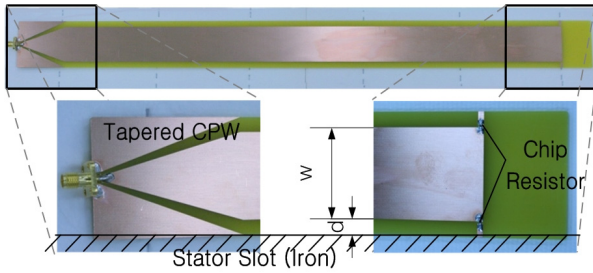
<그림 1> 고정자권선의 단면도 및 결합기 타입 PD센서의 설치위치



<그림 2> 센서설치위치에서의 전계분포 계산결과 (100MHz)

<그림 3>은 이러한 의도에서 설계된 새로운 형태의 센서이다. 결합도의 최대화를 위하여 CPW의 신호선을 넓히고 접지부를 없애는 대신, 고정자 슬롯도체 자체를 전송선로의 접지로 이용하였다. 고정자 슬롯도체는 <그림2>에서처럼, 권선에 PD신호가 들어올 때에도 접지역할을 하므로, 새로운 센서의 전송선로의 전계분포는 거의 완벽하게 권선의 PD신호 입력시 분포와 일치하게 된다. 이것은 추가적인 센서의 감도상승으로 작용할 것이다. 신호선의 폭 w와 접지와와의 간격d는 각각의 선포에 대하여 전송선로의 특성임피던스가 50Ω을 만족하도록 센서의 재질 및 설치환경을 고려하여 해석을 통해 결정하였다. 센서의 단자부는 Tapered 구조로 설계하였으며, 특히 슬롯의 접지부가 자연스럽게 CPW라인으로

변화될 수 있게 하였다. 단자의 반대쪽은 100Ω 칩저항 두개의 병렬연결을 통해 정합하였고, 2.4mm 두께의 FR4기판에 식각하여 제작하였다.

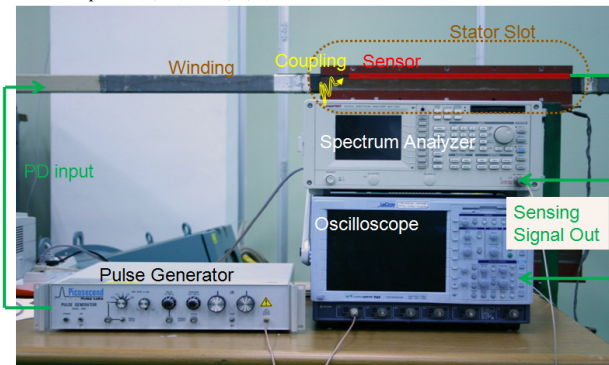


〈그림 3〉 새로운 Slot-GND형 센서

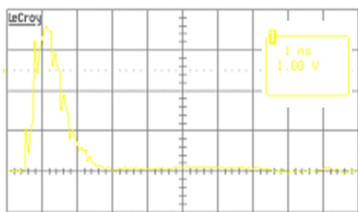
3. 센서 특성

3.1 실험장치

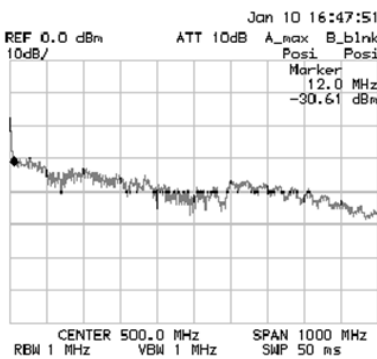
〈그림 4〉와 같이 실제의 회전기 고정자의 권선 및 슬롯과 동일한 구조물에 센서를 설치하고, 모의된 부분방전신호를 권선을 통해 입력한 후, 센서로 감지된 신호를 측정하는 실험을 실시하였다. 부분방전 신호는 펄스 발생기(Picosecond Model-2600)를 이용하여 모의하였으며, 〈그림 5, 6〉과 같은 펄스모양과 스펙트럼 분포를 나타내었다. 신호의 측정은 오실로스코프(Lecroy wavepro 960, 16Gsample/s)와 스펙트럼 분석기(Advantest R203A)로 이루어졌다. 측정대상 센서는 6가지로, 제작된 w=6mm, w=10mm의 일반 CPW센서, 새로운 Slot-GND형 센서, 일반적 마이크로스트립형태의 센서, 터빈발전기 진단에 사용중인 북미의 상용센서, 전기연구원에서 저주파 측정용으로 기존개발된 RPC(Reactive Plate Coupler)타입의 센서이다.



〈그림 4〉 실험 장치



〈그림 5〉 입력신호의 펄스모양 (20dB감쇄기 이후 단 측정)



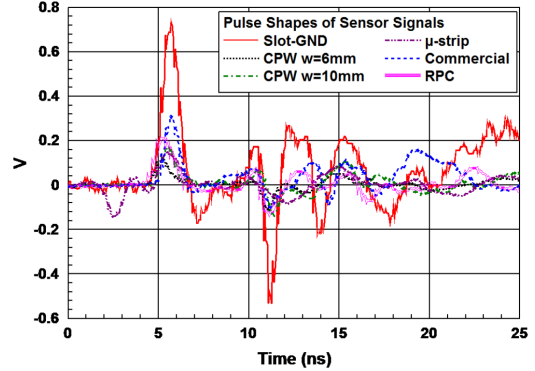
〈그림 6〉 입력신호의 주파수 스펙트럼

3.2 실험결과

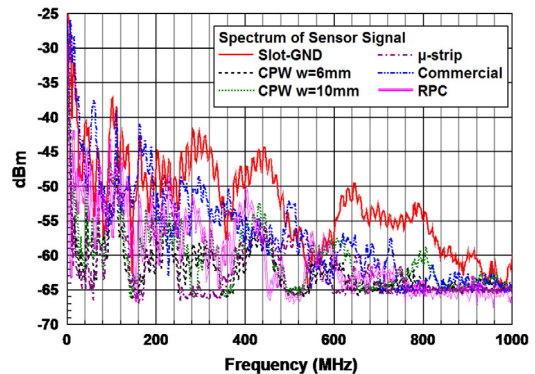
〈그림 7〉은 동일한 조건에서 여러 가지 센서로 측정된 신호의 파형

이다. Slot-GND타입의 센서가 마이크로스트립타입의 센서에 비해 4배, 상용센서에 비해 2배이상의 피크값을 가지는 파형을 검출해 내고 있다. 또한 CPW센서의 경우 선폭이 넓을수록 피크값이 큰 펄스를 검출하는 것을 확인하여, 센서 설계시 고려한 이론을 뒷받침하고 있다.

〈그림 9〉는 이러한 파형을 스펙트럼 분석기로 측정한 결과이다. Slot-GND타입의 센서는 수MHz에서 1GHz까지 대부분의 주파수구간에서 다른 모든 센서보다 높은 감도를 나타내고 있고, 특히 200MHz이상의 대부분의 주파수에서 상용센서에 비해 5dB이상의 감도를 보였다.



〈그림 7〉 센서 측정신호의 모양



〈그림 8〉 센서 측정신호의 주파수 스펙트럼

3. 결 론

고압회전기의 운전중 부분방전 측정 진단을 위해, 고정자 권선과 슬롯사이에서 취부되는 방향성 결합기형태의 부분방전센서설계에 대한 연구를 수행하였다.

먼저, 고정자 권선 및 슬롯 구조에 부분방전신호가 입사되는 상황을 모델링하여, 대부분의 주파수에서, 슬롯과 가까운 센서취부위치에 좌우방향의 전계가 주로 분포하는 것을 확인하였다. 이러한 분포와 유사한 전송선로 전계분포를 나타내고, 권선과 센서사이의 신호전송을 최대화 하기위해 중앙도체가 넓으며, 고정자 슬롯을 접지부로 이용하는 Slot-GND형의 센서를 설계하였다.

제작된 센서를 실제와 동일한 고정자 권선 및 슬롯 구조에서 다른 여러 센서와 비교하여 성능을 시험한 결과, Slot-GND형 센서가 마이크로스트립타입의 센서에 비해 4배, 상용센서에 비해 2배이상의 피크값을 가지는 파형을 수신하고, 200MHz이상의 대부분의 주파수대역에서 상용센서에 비해 5dB이상의 전력을 감지하는 스펙트럼을 보여주었다.

[참 고 문 헌]

- [1] I.M. Culbert, H. Dhirani, and G.C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines", EPRI Report EL-5036, Vol. 16, June 1989.
- [2] IEEE Std 1434-2000. "IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery". 2000.
- [3] H. G. Sedding, R. R. Campbell, G. C. Stone, G. S. Klempner, "A New Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators," IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp.700-706, Dec. 1991.
- [4] Itoh, K. etc, "New noise rejection techniques on pulse-by-pulse basis for on-line partial discharge measurement of turbine generators" IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 11, no. 3, 1996.
- [5] B.M. Oliver, "Directional Electromagnetic Couplers", Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Vol. MTT-2, November 1954, p1686.