

가스절연개폐장치용 부분방전 감시 시스템을 위한 초광대역 극초단파 신호처리장치 개발

최재욱, 김영노, 이영상, 강창원, 박기준,* 구신근,* 윤진일*
(주)피에스디테크, *전력연구원

Development of ultra-high frequency (UHF) ultra-wide bandwidth signal processing unit for UHF partial-discharge monitoring system for gas-insulated switchgears

Jae-uk Choi,* Young-no Kim,* Young-sang Lee,* Chang-won Kang,* Kijun Park,** Sun-geun Goo,** Jin-Yu Yoon**
*R&D Center PSD Tech. Inc. and **Korea Electric Power Research Institute

Abstract - An ultra wide band ultra-high frequency (UHF) signal processing module was designed for on-line UHF partial discharge (PD) monitoring systems for gas-insulated switchgears (GIS). Major advantage of the unit is an improved PD detection sensitivity through minimizing the effect of surrounding interference signals. The detection sensitivity of the unit was <-60 dBm that is sufficient to detect UHF PD signals as low as 1 pC. Precise detection of PD occurred in the GIS, due to internal defects, is possible by using the signal processing unit.

1. 서 론

최근 전기수요급증으로 인한 변전 설비의 대형화로 인하여 가스절연개폐장치(Gas-insulated switchgear, GIS)의 예방진단에 대한 필요성이 강조되고 있으며, 특히 이를 상시 감시할 수 있는 진단시스템에 대한 요구가 계속되어 왔다. GIS 진단기법 중 극초단파(Ultra-high frequency, UHF) 부분방전 측정방법은 부분방전시 발생하는 UHF 대역의 전자파 신호를 측정하여 GIS의 상태를 감시하는 방법으로 현장 적용이 용이하고, 기존의 IEC-60270에 의거한 방식보다 높은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 가지고 있어 미소방전까지 측정할 수 있으므로 GIS 상태를 보다 정밀하게 감시할 수 있다 [1, 2]. 또한 다양한 분석기법을 적용할 수 있는 장점을 지니고 있어 GIS 예방진단기법으로 크게 각광받고 있다 [3].

고압의 SF₆ 가스 상태에서 부분방전 발생시 흐르는 전류 신호를 푸리에(Fourier) 변환 하면 대역폭이 수 GHz 이상인 광대역의 주파수 스펙트럼을 지닌다 [4]. 그러므로 적절한 센서를 이용하여 GIS 내부에서 발생된 부분방전(Partial discharge, PD) 신호를 UHF 대역에서 검출할 수 있다. 센서에서 검출된 신호는 외부 잡음원인 방출파 및 기중 코로나의 영향이 적으며 신호감쇄를 충분히 고려한 주파수대역을 선택하여 신호처리를 하여야 원하는 PD 신호만을 Analog to Digital 변환기로 전달할 수 있다. 하지만 기존의 UHF PD 신호처리장치에서는 PD 신호의 광대역 성질과 UHF 대역까지 처리할 수 있는 소자의 한계로 인하여 잡음처리가 미흡 하였다. 그러므로 잡음으로 작용하는 Cellular phone (890 MHz) 대역 및 PCS (1.8 GHz) 대역 그리고 Wireless-LAN (2.4 GHz) 대역의 신호를 제거하거나 필요한 대역만 통과시켜 불요 전자파 간섭을 최소화할 수 있는 고품질의 극초단파 신호처리장치가 필요하다.

본 논문에서는 시스템 이득과 주파수 대역을 제어할 수 있는 극초단파 신호처리장치를 설계하고 제작하였으며 다양한 계측기를 사용하여 본 장치의 특성을 확인하였

다. 아울러 PD 발생장치를 사용하여 수-수십 pC의 부분방전신호에 대한 특성 실험도 하였다. 본 논문에서 개발된 장치는 가스절연개폐장치용 부분방전 감시시스템의 핵심 구성품으로써 전체 시스템의 SNR을 향상하여 신뢰도 높은 UHF PD 검출에 사용될 수 있다고 생각된다.

2. 본 론

본 논문에서 연구한 UWB UHF PD 신호처리 장치는 가스절연개폐장치용 부분방전 감시시스템 중 UHF 센서와 Data Acquisition Unit을 연결해주는 부분으로 전체 시스템의 감도와 성능을 좌우할 수 있는 매우 중요한 장치이다. 본 장치는 센서에서 측정된 미약한 UHF 대역의 부분방전 신호를 증폭하는 역할뿐만 아니라 부분방전신호와 외부노이즈를 최대한 구별하여 Data Acquisition Unit의 변별력을 극대화할 수 있는 특성이 요구된다.

2.1 설계 및 제작

극초단파 신호처리장치의 핵심소자는 광대역 저잡음 증폭기(Low Noise Amplifier, LNA), 감쇄기(Attenuator), 대역통과필터(Band Pass Filter, BPF), 영상검출기(Video Detector, VD) 등이 있으며 전체 구성품의 고주파특성을 고려하여 상호 조화되는 회로 설계가 필요하다. 회로설계를 위한 해석 및 전산 모사 도구로서 Agilent사의 비선형 시뮬레이터인 Advanced Design System를 이용하였다. 그림 1은 GIS용 PD 감시시스템의 구성도와 UHF 신호처리장치의 상세 블록도이다.

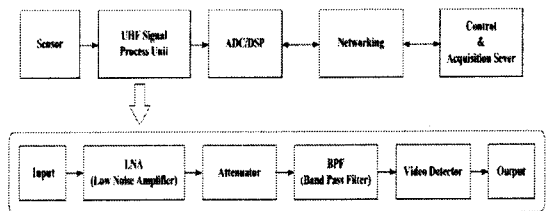


그림 1. GIS용 PD 감시시스템의 구성과 UHF 신호처리장치의 상세 블록도.

극초단파 신호처리장치의 성능에 가장 큰 영향을 주는 부분은 입력된 신호가 최초로 증폭되는 광대역 LNA와 주변의 불요 전자파 간섭을 최소화하기 위한 BPF의 성능이다. 따라서 본 장치에는 이득이 14 dB 이고 대역폭이 3 GHz이며 NF = 2.4 dB 를 가지는 광대역 SiGe LNA를 사용하였다. 그림 2는 광대역 LNA와 주변부품의 회로도 증폭기 전후단의 C1, C2 및 L1, L2는 원하는 주파수 대역

에서 이득과 이득 평탄도 및 임피던스 정합이 가능한 조정점이 되도록 설계하였다. 또한 불요 전자파 간섭을 최소화하기 위하여 주파수 대역을 선택 할 수 있는 3종의 BPF를 설계하고 제작하였다. 각각의 BPF는 고역통과 필터(High Pass Filter, HPF)와 저역통과 필터(Low Pass Filter, LPF)의 병합으로 구성하였다.

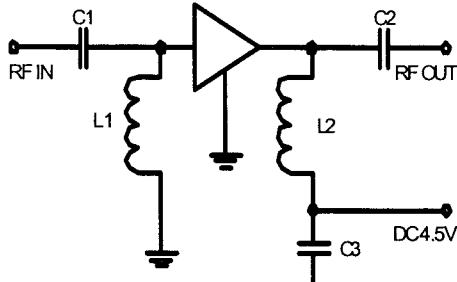


그림 2. 광대역 저잡음 증폭부 회로도.

2.2 주요부품의 특성

제작된 module의 광대역 LNA 와 BPF의 특성을 확인하기 위해서 Vector Network Analyzer (VNA, 8510C, 45 MHz ~ 75 GHz, Agilent)와 Noise Figure Analyzer (N8975A, 10 MHz ~ 26.5 GHz, Agilent)를 사용하였다. 측정된 잡음지수와 이득을 표 1에 보이고 있다. 그림 3에서 VNA로 측정한 삽입손실과 이득을 확인 할 수 있다.

표 1. 측정된 광대역 저잡음 증폭기의 잡음지수 및 이득.

Frequency	NF (dB)	Gain (dB)	비고
300 MHz	2.47	14.4	
900 MHz	2.47	14.1	Cellular대역
1.3 GHz	2.35	13.4	
1.8 GHz	2.42	12.8	PCS대역

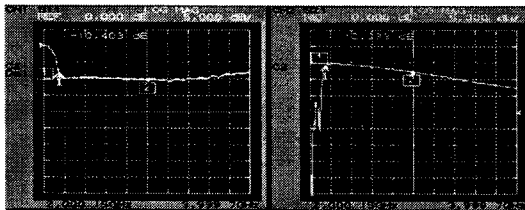


그림 3. 광대역 저잡음 증폭기의 S_{11} 및 S_{21} 측정결과.
Marker 1 : 300 MHz, Marker 2 : 2000 MHz,

Filter를 구성하는 BPF 1 - 3 의 입출력 특성을 표 2와 그림 4-6에 보였다. 각각의 BPF 특성은 다소 차이가 있으나 3 개의 BPF 모두 입력단의 반사손실이 -10 dB 이하이고, 삽입손실은 최대 약 2 ~ 2.1 dB, 통과대역 리플은 최대 0.5-1.5 dB로 측정되었다.

표 2. BPF 의 입출력 특성.

Filter #	BPF 1	BPF 2	BPF 3
중심 주파수 (MHz)	1150	675	1300
통과 대역 (GHz)	0.3 ~ 2	0.5 ~ 0.85	1 ~ 1.6
대역폭 (3 dB, MHz)	1700	350	600
통과대역리플 (dB, Max)	1.5	0.5	1.5

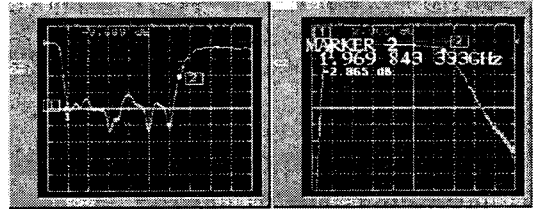


그림 4. BPF 1의 반사손실과 삽입 손실 특성
(Marker 1 : 300 MHz, Marker 2 : 1970 MHz).

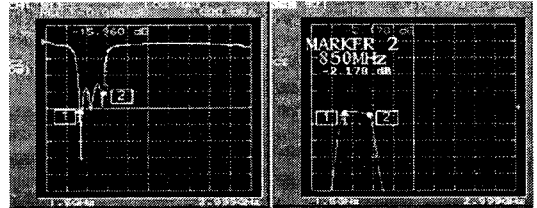


그림 5. BPF 2 반사손실과 삽입 손실 특성
(Marker 1 : 500 MHz, Marker 2 : 850 MHz).

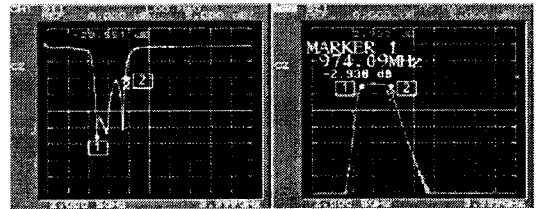


그림 6. BPF 3의 반사손실과 삽입 손실 특성
(Marker 1 : 974 MHz, Marker 2 : 1600 MHz).

2.3 검출감도측정

극초단파 신호처리장치의 검출 감도 확인을 위해서 그림 7와 같은 측정 장치를 구성하였다. 이는 펄스로 발생되는 간헐적인 부분방전신호와 유사한 조건을 모의하기 위해서 구성한 것이며, 펄스의 폭과 크기 그리고 발생 주기를 가변 할 수 있도록 신호발생기와 펄스발생기를 사용하였고 측정은 오실로스코프 (TDS5104, 1 GHz, Tektronix)를 이용하였다.

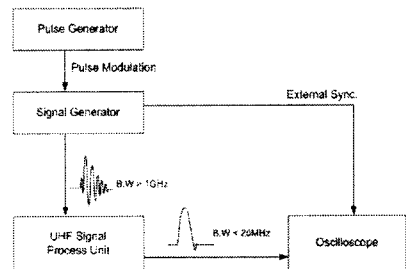


그림 7. 극초단파 신호처리장치의 검출감도 측정 구성도.

그림 8은 본 장치에 사용된 영상검출기의 입출력 특성이다. 입력신호의 세기가 -60 ~ 0 dBm인 구간에 대해서 비교적 양호한 대수특성을 보이고 있다. 특히 -65 dBm 보다 작은 신호와 +15 dBm 정도의 큰 신호에서도 충분히 사용할 수 있음을 알 수 있다.

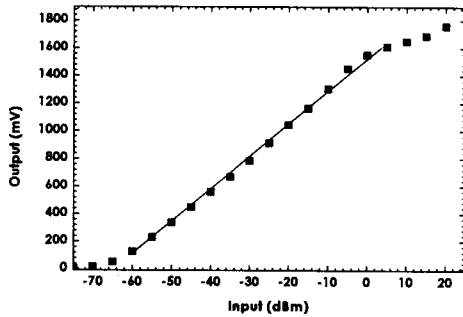
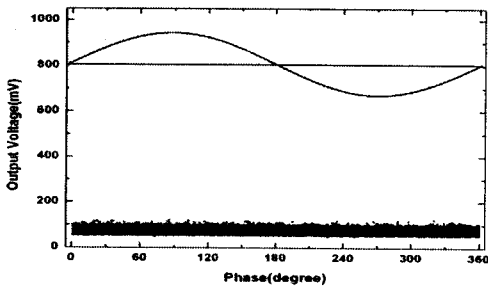


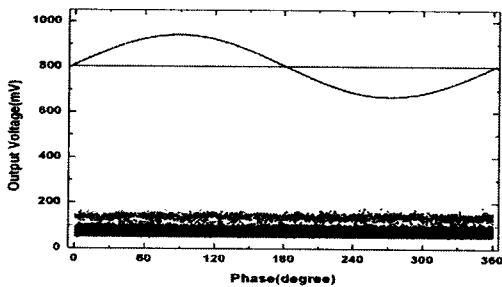
그림 8. 영상검출기의 입력력 특성 ($y = 23.4x + 1519$).

2.4 부분방전 검출 실험

그림 9의 (a), (b)는 부분방전이 발생하지 않았을 때의 극초단파 신호처리장치 (BPF 1)의 내부 잡음과 센서 연결시의 주변잡음을 측정된 PRPD 패턴이다. 내부 잡음에 의한 출력의 대략 100 mV (< -60 dBm) 정도임을 알 수 있다.



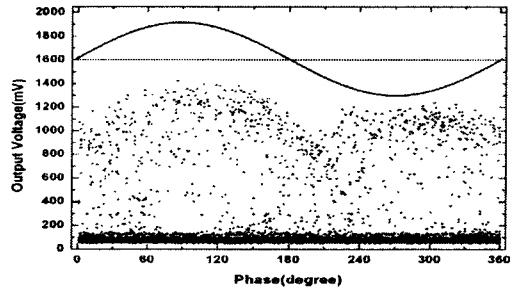
(a) 극초단파 신호처리장치의 내부 잡음.



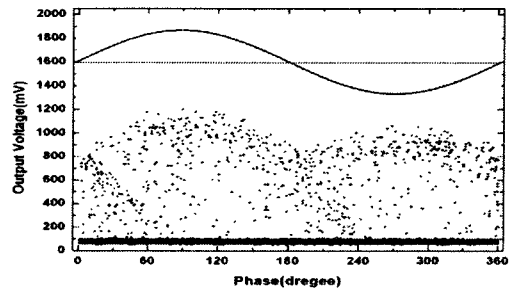
(b) 센서를 연결하고 PD 신호가 없을 경우의 주변잡음.
그림 9. BPF 1을 사용할 경우 장치의 내부 잡음 및 PD 신호가 없을 때의 주변 잡음의 크기.

본 신호처리장치와 BPF의 성능을 확인하기 위해서 5 pC 방전량에 대해 각각의 BPF를 사용하여 PRPD를 측정하였다. 그림 10에서 알 수 있듯이 각각의 BPF를 통과한 방전신호는 약간의 출력 전압이 차이가 있으나, 5 pC 방전을 검출하기에 충분한 감도를 지니고 있었다. 또한 BPF 2와 3을 사용할 경우 잡음 신호의 크기는 BPF

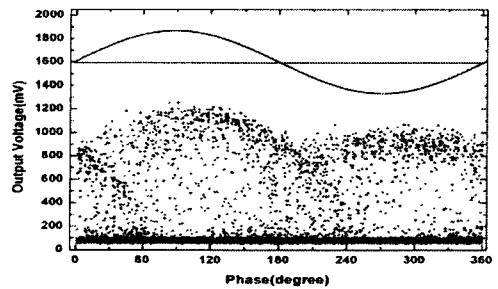
1을 사용하였을 경우보다 작음을 알 수 있었다. BPF의 선택적 적용은 외부노이즈가 심한 현장에서 주파수대역을 설정하여 측정 효율을 한층 높일 수 있음을 증명하고 있다.



(a) BPF 1을 사용한 경우의 PRPD Pattern.



(b) BPF 2를 사용한 경우의 PRPD Pattern.



(c) BPF 3을 사용한 경우의 PRPD Pattern.

그림 10. 5 pC PD에 대한 극초단파 신호처리장치의 PRPD Pattern (1200주기).

5 pC 보다 적은 방전량일때의 극초단파 신호처리장치의 감도 확인을 위하여 PD 발생기에서 약 3 pC의 부분방전을 발생시킨 후 실험하였다. 그림 11은 IEC-60270 방식에 의거한 PD 검출장치(DDX-8000, Robinson)로 방전량을 확인한 것이며, 그림 12에는 PRPD법을 적용하여 측정된 부분방전 패턴을 보이고 있다. BPF 1의 경로를 통과한 극초단파 신호처리장치는 5 pC 방전실험 시 출력전압은 1400 mV이었으며, 3 pC 방전 실험에서는 1200 mV의 출력전압을 확인할 수 있었다. 그러므로 영상검출기의 입력력 그래프(그림 8)에 의거하여 본 장치는 입력단에 30 dB 이상의 손실이 있을 경우에도 5 pC 정도의 부분방전을 검출하기에 충분한 감도를 가지고 있으며, 센서 근처에서 발생한 0.5 pC 정도의 작은 방전량에 대해서도 외부잡음과 구별 가능한 충분한 출력전압을 내어 주리라고 판단된다.

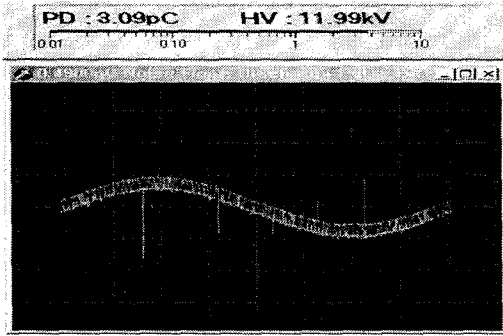


그림 11. 3 pC 일때의 부분방전크기 측정 값.

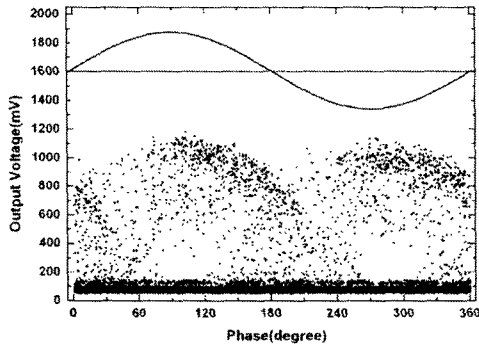


그림 12. 3 pC PD에 대한 극초단파 신호처리장치의 PRPD Pattern (BPF 1을 적용, 1200주기).

3. 결 론

극초단파 신호처리장치는 가스절연개폐장치용 부분방전 감시시스템 중 UHF 센서와 Data Acquisition Unit을 연결해주는 부분으로써 이득을 조정하고 주파수대역을 선택하여 외부노이즈에 적절히 대응하여 PD 검출 감도를 최적화하기 위한 목적으로 개발하였다. 본 논문에서는 개발된 극초단파 신호처리장치를 정밀급 계측 장비를 사용하여 고주파 특성과 감도를 측정하였다. 신호처리장치의 최소 수신감도는 -60 dBm 이하였으며 이 정도의 감도는 GIS에서 발생하는 미약한 부분방전 신호를 정확히 검출하기에 충분하다 [5, 6].

PD 발생장치를 이용한 감도 측정 실험을 통하여 본 장치는 3 pC 이하의 적은 방전량을 측정하기에 충분한 감도를 가지고 있음을 확인하였다. 특히 주파수대역을 설정할 수 있는 대역통과필터의 적용으로 외부노이즈가 심한 현장 측정 시 신호 대 잡음비를 한층 높여 검출감도의 향상 가능성이 가능하리라 판단된다. 본 장치를 장착한 GIS PD 측정 시스템은 Cellular phone, PCS, IMT-2000 및 W-LAN 대역의 신호간섭을 최소화함으로써 부분방전신호의 SNR를 높일 수 있으며 향후 본 장치가 장착된 UHF 부분방전 감시 시스템이 개발되어 많은 현장 경험과 융합되면 신뢰도 높은 전력기기 운용이 가능하리라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. F. Hampton, J. S. Pearson, C. J. Jones, T. Irwin, "Experience and Progress with UHF Diagnostic in GIS", CIGRE Session, Paris, 1992, Paper 15/23-03.
- [2] IEC, "High-voltage switchgear and controlgear-Part 203 :

Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV", IEC 62271-203, Annex C, Nov. 2003

- [3] P. Conventry, B. F. Hampton and C. J. Jones, "Ten Years Experience with the UHF Method of GIS Partial Discharge Monitoring", Sixty-Fourth Annual International Conference of Doble Clients, Apr. 21-25, Boston, 1997.
- [4] Sander Meijer, Anderea Bovis, Edward Gulski, Johnan J. Smit and Alain Girodet, "Analysis of the Sensitivity of the UHF PD Measuring Technique", Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA, USA, April 2-5, 2000.
- [5] CIGRE Task Force 15/33.03.05 of Joint Working Group 15.03, "Partial Discharge Detection System for GIS : Sensitivity verification for the UHF method and the Acoustic method, Electra, No. 183, p75-87, 1999.
- [6] 한전구매시방서, "765kV 변전소 GIS 예방진단 시스템 구매 사양서", 2003.