

부분방전 모니터링 시스템을 위한 광대역 RF 소자설계 연구

논 문
60-12-18

Design of Broad Band RF Components for Partial Discharge Monitoring System

이 제 광* · 고 재 형** · 김 군 태*** · 김 형 석†
(Je-Kwang Lee · Jae-Hyeong Ko · Koon-Tae Kim · Hyeong-Seok Kim)

Abstract - In this paper we present the design of Low Noise Amplifier(LNA), mixer and filter for RF front-end part of partial discharge monitoring system. The monitoring system of partial discharge in high voltage power machinery is used to prevent many kinds of industrial accidents, and is usually composed of three parts - sensor, RF front-end and digital microcontroller unit. In our study, LNA, mixer and filter are key components of the RF front-end. The LNA consists of common gate and common source-cascaded structure and uses the resistive feedback for broad band matching. A coupled line structure is utilized to implement the filter, of which size is reduced by the meander structure. The mixer is designed using dual gate structure for high isolation between RF and local oscillator signal.

Key Words : Partial discharge, Broad band, LNA, Dual gate mixer, BandPassFilter

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 일반 가정에서나 산업체에서 전기에 대한 의존도가 날로 증가하고 있다. 또한 전력설비의 대형화, 밀집화, 다기능화에 따라 전력설비의 고장으로 인한 전기사고 발생시에는 그 경제·산업적 피해가 막대하다. 따라서 전력의 안정적인 운영을 위해 초고압 전력기기에 대한 보수 점검 방식은 TBM(Time Base Maintenance)방식에서 CBM(Condition Base Maintenance) 방식으로 바뀌고 있어 예방진단 기술에 대한 연구가 진행되고 있다.

초고압 전력기기는 내부에 도체이물 및 공극 또는 균열 등 다양한 원인에 의하여 내부 절연파괴로 연결되는데, 사고로 발전되기 전에 펄스형태의 부분방전이 발생하게 되며, 부분방전 펄스는 1ns 이하의 급격한 상승시간(rise time)을 가지므로, 전파되는 부분방전 펄스의 주파수특성은 거의 모든 주파수 대역에 걸쳐 나타나게 된다[1][2]. 이러한 부분방전을 측정하는 방법에는 UHF[3]법과 초음파법[4]이 적용되고 있다. 특히 UHF법은 외부 잡음의 영향을 상대적으로 적게 받는 UHF대역(300MHz~3,000MHz)의 부분방전 펄스를 검출하여, 전력기기 내부의 이상 원인 및 정도를 예측하는 가장 신뢰성 있는 방법 중의 하나이다.

본 논문에서는 초고압기기의 절연 파괴로 인한 부분방전을 감지할 수 있는 UHF법을 이용한 부분방전 모니터링 시

스템의 RF 전치부를 제안하였다.

부분방전 모니터링 시스템의 수신단은 크게 안테나 등의 형태를 갖춘 전력기기 내부 센서, 수신된 미약한 RF신호를 증폭 및 주파수 변환하는 수신단 RF측정장치, 측정된 신호를 해석하는 분석장치의 3개 단으로 구성된다. 모니터링 하고자 하는 목표 주파수는 300MHz~1500MHz이며, 신호 레벨은 -80dBm~-30dBm의 범위를 감지할 수 있도록 설계하였다. 부분방전 모니터링 시스템의 RF 수신단 측정장치는 다음 그림 1과 같으며 부분방전의 반복적인 특성을 이용하여 각각 300MHz~500MHz와 500MHz~1GHz 및 1GHz~1.5GHz의 병렬시스템으로 구성하였다. 이에 본 논문은 1차 대역인 300MHz ~ 500MHz대역을 목표로 설계하였다.

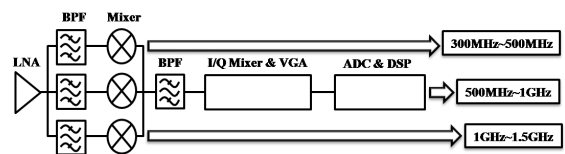


그림 1 모니터링 시스템 수신단 블럭도
Fig. 1 Block Diagram of Monitoring Receiver System

그림 1의 모니터링 시스템은 헤테로다인 방식을 사용하였으며, 표 1과 같이 시스템 사양을 결정하였다. 표 1의 시스템 사양을 바탕으로 RF단의 저잡음 증폭기, 대역통과 필터, 주파수 혼합기를 설계하였고, 뒷단의 Saw 필터, IQ주파수 혼합기와 저주파 통과 필터 및 가변 이득 증폭기를 통하여 기저대역으로 주파수를 내려 증폭할 수 있도록 적용가능한 각각의 상용칩을 제시하였다.

* 준 회원 : 중앙대 전자전기공학부 석사과정
** 정 회원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 박사과정
*** 정 회원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 박사과정
† 교신저자, 시니어회원 : 중앙대 전자전기공학부 교수
E-mail : kimcaf2@cau.ac.kr
접수일자 : 2011년 9월 14일
최종완료 : 2011년 11월 22일

표 1 수신단 시스템 사양

Table 1 System Budget of Receiver

	This Work			Saw Filter	IQ Modulator	VGA	Filter	Total
	LNA	Filter	Mixer					
NF [dB]	3	2	-	2.5	9.3	10	0.3	3.06
Gain [dB]	12	-2	1	-2.5	2.4	27.67	-0.3	40.80
OIP3 [dBm]	0		-20		9	15		

2. 본 론

광대역의 부분방전 신호를 헤테로다인 구조를 사용하여 측정하게 되면서 측정 주파수 범위가 광범위한 부분방전 대역에 비하여 상대적으로 좁아지게 되며 시스템의 선택도를 결정하는 잡음지수에 여유를 가지고 설계할 수 있다. 이는 다음 식(1)를 통하여 확인 할 수 있다.

$$Sensitivity = -174dBm/Hz + NF + 10\log(BW) \quad (1)$$

식(1)을 통하여 출력단의 대역폭(BW)을 낮게 가져감으로써 상대적으로 높은 잡음지수가 가능한 시스템을 설계할 수 있음을 알 수 있다.

시스템 사양을 통한 각 소자의 스펙을 결정 후 그에 맞게 동작 할 수 있는 300MHz ~ 1.5GHz 대역의 저잡음 증폭기, 300MHz ~ 500MHz의 대역통과 필터 및 주파수 혼합기를 다음과 같이 설계하였으며, 이후 소자는 적용 가능한 부품으로 구성하였다.

2.1 저잡음 증폭기

전단부에서 안테나의 바로 뒤에 위치하고 있는 저잡음 증폭기는 안테나로부터 받은 미약한 신호를 저잡음 증폭하는 소자로서 그 잡음 특성이 시스템 전체의 잡음특성에 크게 영향을 미친다[5]. 따라서 낮은 잡음 지수를 가지며, 광대역 특성을 가질 수 있도록 공통 게이트 구조와 공통 소스 구조의 캐스케이드 형태로 설계하였으며 기본 구조는 다음 그림 2와 같다.

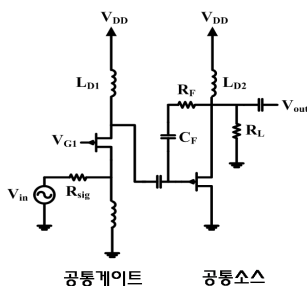


그림 2 설계된 저잡음 증폭기의 기본구조
Fig. 2 Basic Structure of Designed Low Noise Amplifier

첫 단인 공통게이트구조는 입력 임피던스가 다음 식(2)와 같이 표현되며 적정한 동작점 설정을 통하여 저잡음 저이득 동작 및 광대역 매칭에 유리하도록 설계할 수 있다.

$$Z_{IN} = \frac{1}{g_m + g_{mb}} \quad (2)$$

동작점 선택 후 입력단 바이어스 부의 인덕턴스인 L_{D1}과 입력단의 오픈 스텝 매칭단을 통하여 고주파 및 저주파 통과특성을 조절함으로써 300MHz~1.5GHz대역의 입력 매칭을 하였다. 뒷 단인 공통소스구조에는 저항성 부하회 회로를 활용하여 동작 대역 내 평평한 이득을 가지며, 공통 게이트 구조보다 높은 이득과 잡음지수를 가지도록 설계하였으며, 출력단에 병렬로 저항성 부하 R_L 를 연결하여 회로가 안정적으로 동작하도록 하였다. 다음 그림 3~5는 설계된 저잡음 증폭기의 제작 사진과 모의 실험 결과 및 측정결과이다.

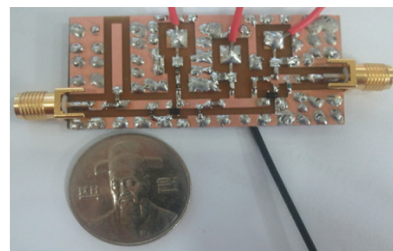


그림 3 제작된 저잡음 증폭기
Fig. 3 Fabricated Low Noise Amplifier

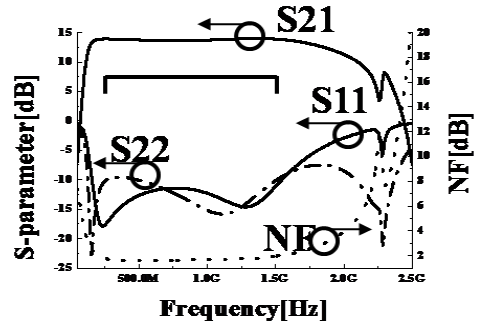


그림 4 저잡음 증폭기의 모의 실험결과
Fig. 4 Simulation Result of Low Noise Amplifier

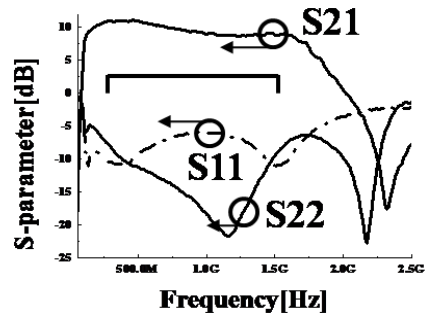


그림 5 저잡음 증폭기의 측정결과
Fig. 5 Measured Result of Low Noise Amplifier

저잡음 증폭기는 모의실험결과 동작대역인 300MHz ~1.5GHz에서 평평한 이득과 입출력 반사 특성을 가지지만, 측정 결과 고주파 대역에서 이득 감소현상이 나타났다. 하지만 동작대역 내에서 12dB정도의 이득을 가지는 것을 확인하였다. 이득곡선은 전체적으로 평평한 형태를 가지고 있고, 측정결과 IIP3는 0dBm으로 표 2에 정리하였다.

표 2 저잡음 증폭기의 요구사항과 측정결과 비교
Table 2 Compare measurement Results and Simulation Results of LNA

LNA	단위	요구사항	측정결과
NF	dB	3	2.5
Gain	dB	12	12
OIP3	dBm	0	0

2.2 대역 통과 필터

설계된 저잡음 증폭기를 지난 신호가 주파수 혼합기로 입력되기 전 이미지신호의 제거를 위한 대역통과 필터가 필요하다. 이는 그림 6을 통하여 설명된다.

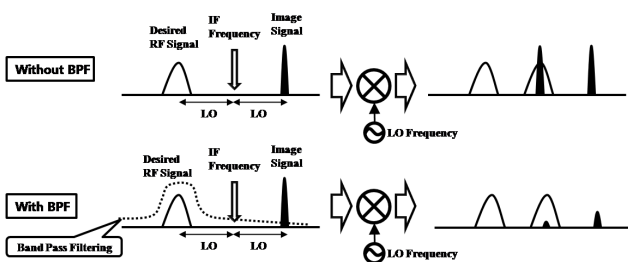


그림 6 이미지 제거를 위한 대역 통과 필터
Fig. 6 Band Pass Filter for Image Signal Rejection

그림 6과 같이 주파수 혼합기로 RF 신호가 입력되기 전 대역통과 필터를 거친 경우 이미지 신호가 제거 되면서 원 신호의 왜곡을 방지할 수 있다. 이를 위해 300MHz ~ 500MHz대역을 목표로 하는 대역통과 필터를 설계하였다. 설계를 위한 기본 구조는 Coupled Line의 형태를 활용하였고 스킷 특성을 높이기 위한 다단구조를 적용하였으며, 크기 축소를 위해 미앤더 구조를 활용하여 그림 7과 같은 구조로 설계하였다.

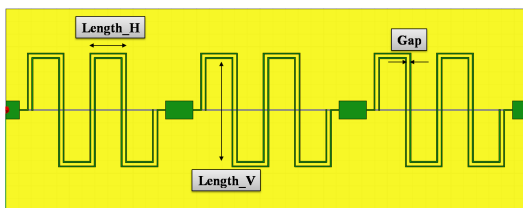


그림 7 설계된 대역통과 필터
Fig. 7 Designed Band Pass Filter

그림 7의 제안된 필터의 변수 Length_H, Length_V, Gap 값을 변화시켜 목표 주파수에 맞추었으며, 3D 모의실험 툴을 활용하여 설계되었다. 선로의 길이에 해당하는 Length_H와 Length_V의 변화에 따라 동작 주파수 및 대역이 결정되며 선로사이의 간격 Gap을 통하여 삽입손실과 주파수 등을 최종 결정하였다. 그림 8~10은 제작 사진, 모의실험 결과 및 측정 결과이다. 제작된 대역통과필터는 60[mm]×40[mm]의 크기로 설계되었으며 비유전율 4.4, 높이 1.6[mm]의 FR4 기판을 사용하였다.

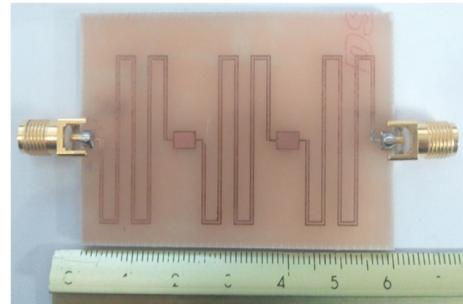


그림 8 제작된 대역통과필터
Fig. 8 Fabricated Band Pass Filter

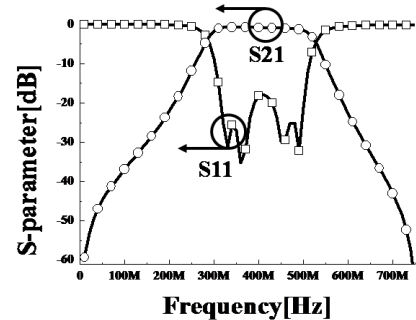


그림 9 설계된 대역통과필터의 모의실험결과
Fig. 9 Simulation Result of Designed Band Pass Filter

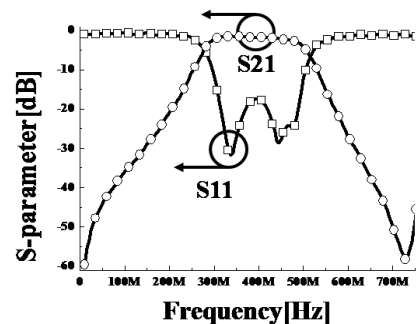


그림 10 설계된 대역통과필터의 측정결과
Fig. 10 Measured Result of Designed Band Pass Filter

모의 실험 결과와 측정결과와의 비교 시 측정결과에서 고주파 대역에 감쇠가 발생한 것을 볼 수 있다. 하지만 삽입손실을 제외한 스킷 특성 및 반사손실 등은 모의 실험과 일치

하며, 시스템의 목표사양을 만족하는 것을 확인할 수 있다.. 향후 감쇠가 적은 기관 사용 및 다단 추가등의 방안을 모색하여 개선된 성능의 필터 제작이 가능할 것으로 사료된다.

표 3 대역통과 필터의 요구사항과 측정결과 비교

Table 3 Compare measurement Results and Simulation Results of BPF

BPF	단위	요구사항	측정결과
S21(300MHz~500MHz)	dB	-2	-2 (Near 500MHz = -4dB)
S21(10MHz~200MHz)	dB	-15	Under -15
S21(550MHz~1GHz)	dB	-15	Under -15

2.3 주파수 혼합기

대역통과 필터를 통과한 300MHz ~ 500MHz의 신호는 2.37GHz~2.57GHz의 가변하는 국부발진 신호에 의해 2.07GHz의 단일대역으로 모아지게 된다. 설계된 주파수 혼합기는 입력력의 격리도를 단일 FET의 경우보다 향상시키기 위하여 이중게이트 구조를 사용하였으며, 기본 회로 구조 및 제작사진은 그림 11,12와 같다[7][8].

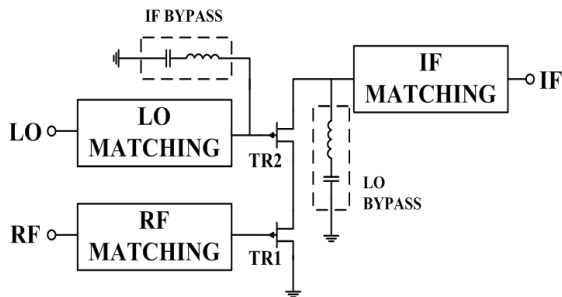


그림 11 이중게이트 주파수 혼합기의 기본 구조
Fig. 11 Basic Structure of Dual Gate Mixer

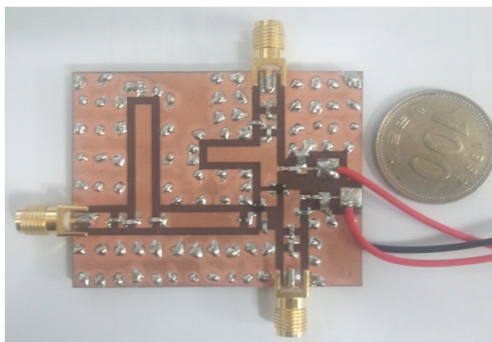


그림 12 제작된 주파수 혼합기
Fig. 12 Fabricated Mixer

이중게이트 구조는 두 개의 TR에 같은 전류가 흐르도록 동작점을 설정해 줌으로써 주파수 혼합기로 동작할 수 있

다. 큰 국부발진 신호가 입력되는 TR2는 항상 포화 영역에서 동작하며, 이에 따른 TR2의 소스전위의 변화에 따라 아래쪽 TR1은 트라이오드와 포화 영역에서 스위칭하도록 동작점을 설정한다. 이때 TR1을 흐르는 전류의 양이 동작영역에 따라 변화하게 된다. TR1의 게이트인 RF 입력단에 L-C 공진구조를 이용한 300MHz ~ 500MHz대역 매칭을 하였고, TR2의 게이트와 드레인단인 LO단과 IF단은 각각 국부발진 신호와 출력신호에 맞도록 매칭하였다. 이때 출력단으로 넘어가는 큰 국부발진 신호와 출력단에서 넘어오는 출력신호를 각각 차단해줄 수 있도록 국부발진 신호와 출력신호 바이패스 회로를 같이 구성하였다. 그림 13~15은 설계된 주파수 혼합기의 모의 실험 결과와 측정결과이다.

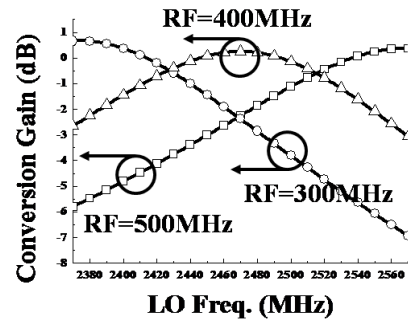


그림 13 국부발진 신호에 따른 변환이득 모의실험결과
Fig. 13 Conversion Gain Depends on Local Oscillator Signal

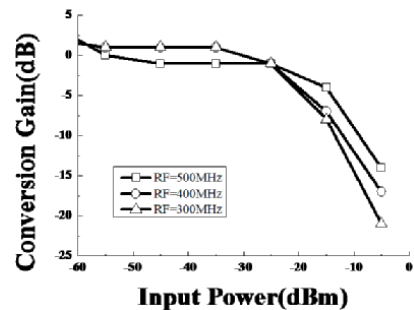


그림 14 입력 신호 세기에 따른 변환이득 측정결과
Fig. 14 Conversion Gain Depends on Input Power

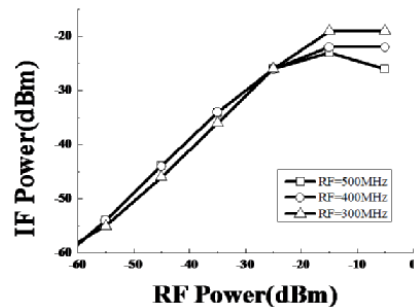


그림 15 입력 신호 세기에 따른 출력세기 측정결과
Fig. 15 Output Power Depends on Input Power

설계된 주파수 혼합기는 국부신호의 주파수 변환을 통해 RF 주파수를 선택할 수 있음을 그림 13를 통하여 확인할 수 있다. 또한 그림 14, 15를 통해 측정결과 이득은 0dB를 기준으로 주파수에 따라 흔들리는 경향을 보이나 선형적 특성을 만족한다.

표 4 주파수 혼합기의 요구사항과 측정결과 비교

Table 4 Compare measurement Results and Simulation Results of Mixer

Mixer	단위	요구사항	측정결과
Gain	dB	1	-1~1
OIP3	dBm	-20	-20

2.4 모의 실험을 통한 능·수동 소자 활용

2.4.1 대역통과 필터

주파수 혼합기를 거친 신호는 2.07GHz대역에 신호를 가지고 있으며 IQ주파수 혼합기를 통과하기 전 이미지 성분 제거를 위해 그림 6과 같이 이미지 제거 필터가 필요하게 된다. 사용하고자 하는 이미지 제거 필터는 중심 주파수 2.07GHz, 대역폭 20MHz의 대역통과 필터로서 협대역의 신호를 통과시키고 이미지를 제거할 수 있다[9]. 그림 16,17은 SAW필터 적용 전후의 스펙트럼이며, 주파수 혼합기를 거친 많은 고조파 성분들이 SAW 필터에 의하여 제거되는 것을 모의실험을 통해 확인하였다.

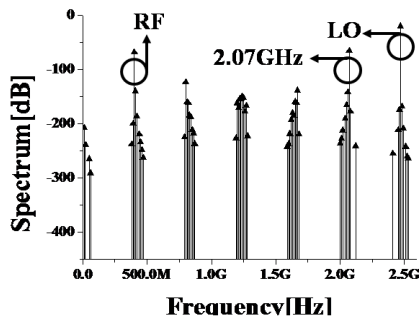


그림 16 SAW 필터 적용 전의 스펙트럼
Fig. 16 Spectrum without SAW filter

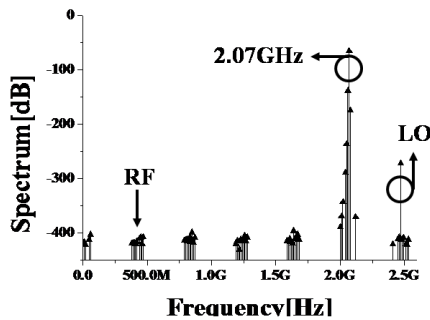


그림 17 SAW 필터 적용 후의 스펙트럼
Fig. 17 Spectrum with SAW filter

2.4.2 IQ 주파수 혼합기

IQ 주파수 혼합기의 경우 RF 신호와 국부발진 신호를 180° 위상차를 발생시켜 입력시키는 방법으로 잡음특성에 강한 성질을 가지고 있다. 잡음지수와 이득이 각각 9.3dB, 2.4dB이며 2070MHz의 협대역 신호를 기저대역으로 내리는 역할을 한다[10].

2.4.3 가변 이득 증폭기 와 저주파 통과 필터

가변 이득 증폭기 및 저주파 통과 필터는 각각 21.5dB의 이득을 가지는 증폭기와 27MHz에서 41dB의 감쇠 특성을 갖는 상용칩을 적용할 수 있다. 칩을 활용한 블록도, 구성된 회로 및 모의실험 결과는 그림 18~21과 같으며, 가변 이득 증폭기의 조절을 통하여 27dB~67dB의 이득을 조절할 수 있다[11][12].

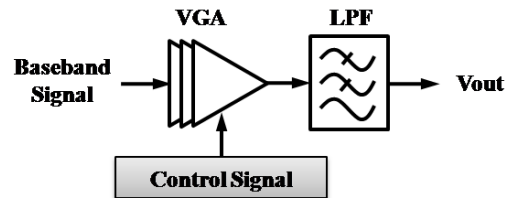


그림 18 가변이득 증폭기 및 저주파 통과 필터의 블록도
Fig. 18 Block Diagram of VGA and LPF

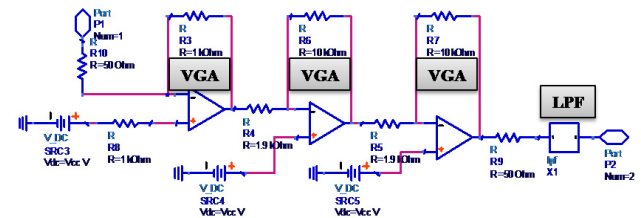


그림 19 가변이득 증폭기 및 저주파 통과 필터 회로
Fig. 19 Schematic of VGA and LPF

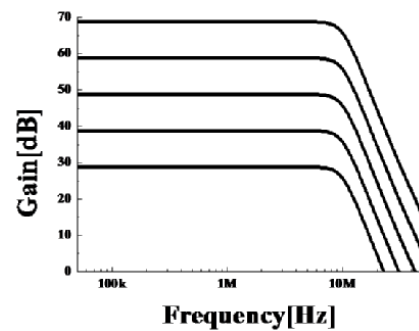


그림 20 가변이득 증폭기 및 저주파 통과 필터의 모의실험 결과
Fig. 20 Simulation Result of VGA and LPF

향후 개선된 시스템 사양을 통하여 제어신호의 가변 영역을 줄이는 노력이 필요할 것이라 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 초고압 전력기기의 부분방전 모니터링 시스템중 RF단의 광대역 부분을 설계하였으며 시스템 사양된 각 부품의 요구사양과 설계 결과는 표 5와 같다.

표 5 각 부품의 설계 사양

Table 5 Specification of Components

	단위	LNA		Filter		Mixer
		잡음 지수	이득	잡음 지수	이득	이득
요구 사양	dB	3	12	2	-2	1
결과	dB	2.5	12	2	-2~-4	-1~1

설계값이 요구사항을 만족하는 것을 확인 할 수 있으며, 이를 통해 각 부품들이 모니터링 시스템에 적용 가능할 것으로 사료된다. 향후 설계된 부품 및 모의실험을 거친 IQ 모듈레이터 및 가변이득 증폭기 등의 칩셋을 활용하여 전체의 모니터링 시스템을 구현 할 수 있을 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

[1] 최태식, 정재룡, 김민수, 김정배, 송원표, 이학성, (주)효성 중공업연구소, GIS 부분방전 측정 휴대용 On-line iPDM 시스템 개발, 대한전기학회 고전압 및 방전 응용기술 연구회, 2006.

[2] 송원표, 김정배, 김민수, 정재룡, 고희석*, "UHF 부분방전 진단법에 의한 가스절연 개폐장치의 성능검증", 정재룡, 김민수, 송원표, 김명현, 고희석, 최인혁, *(주)효성, 전기연구원, 경남대학교, 전력연구원.

[3] R .Kurrer, K .Feser, "The Application of Ultra-High-Frequency Partial Discharge Measurements to Gas-Insulated Substations", IEEE Tras. on Power Delivery, Vol.13, No.3, July 1998

[4] Fumihiko Endo, "Risk Assessment of Defects in GIS by PD Diagnostics", CIGRE WG15-03 TF15 .03 .09 Munchen Meeting, March, 2000.

[5] Ke-Hou Chen, Jian-Hao Lu, Bo-Jiun Chen, and Shen-Iuan Liu, "An Ultra-Wide-Band 0.4-10-GHz LNA in 0.18- μ m CMOS", IEEE Trans. on Circuits and Systems-II:Express Briefs, Vol.54, No.3, March 2007.

[6] L. Zhu, J. Bu and K. Wu, "Broadband and compact multi-pole microstrip bandpass filters using ground

plane aperture technique", Iee Proc.-Microw. Antennas Propag., Vol.149, No.1, February 2002.

[7] TOMOZO OHTA, MASAO MIYAZAKI, NAOKI OKAMOTO AND KAORU OKABE, "VERY SMALL AND LIGHT KU-BAND LOW NOISE CONVERTER WITH LOW NOISE FET MIXER".

[8] CHRISTOS TSIRONIS, MEMBER, IEEE, AND ROMAN MEIERER, "Microwave Wide-Band Model of GaAs Dual Gate MESFET's", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-30, No3, March 1982.

[9] ITF Co., Ltd., "SAW Bandpass Filter F2G02", Data sheet.

[10] LINEAR TECHNOLOGY, "LT5560, 0.01MHz to 4GHz Low Power Active Mixer", Data sheet.

[11] Agilent, "ABA-31563 3.5GHz Broadband Silicon RFIC Amplifier", Date sheet.

[12] MAXIM, "Triple-Channel Video Reconstruction Filter and Buffer for Composite and Y/C Outputs", Data sheet.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(2010T100100605)주관으로 수행된 과제임

저 자 소 개



이 제 광 (李濟廣)

2010년 중앙대학교 전자전기공학부 공학사
2010년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사 과정
[주 관심분야] 하이브리드 회로 및 수동 소자 설계



고 재 형 (高在亨)

2004년 중앙대학교 전자전기공학부 공학사
2008년 중앙대학교 전자전기공학부 공학 석사
2008년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
[주 관심분야] 최적 설계 및 강건 설계 기법 연구, 마이크로파 회로 설계, 안테나 설계



김 군 태 (金 君 泰)

2008년 서경대학교 정보통신공학 공학사
2010년 중앙대학교 전자전기공학부 공학석사
2010년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
[주 관심분야] 초고주파 부품 설계, 무선 부품 해석 및 최적 설계



김 형 식 (金 炯 碩)

1985년 서울대학교 전기공학 공학사
1987년 서울대학교 전기공학 공학석사
1990년 서울대학교 전기공학 공학박사
1990~2002년 순천향대학교 정보기술공학부 교수
1997~1998년 R.P.I ECSE, USA 방문교수
2002년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수
[주 관심분야] 전자장수치해석, 전기기기 및 소자 해석 및 설계, 전력설비 모니터링 시스템, SoC 응용회로, EMI/EMC, RFID 응용 기술