

광대역 고출력 RF 증폭기 시험 자동화 장비 개발에 관한 연구

송다정, 박상훈, 한찬호

경북대학교

sdj1208@knu.ac.kr, psh200112@knu.ac.kr, ch.han@knu.ac.kr

Development of an Automated Test System for Wideband High-Power RF Amplifiers

Da Jeong Song, Sang Hoon Park, Chan Ho Han

Kyungpook National Univ.

요약

고출력 RF 증폭기의 성능 검증은 통신, 계측 등 다양한 분야에서 중요한 과제로, 이를 정밀하고 반복 가능하게 시험할 수 있는 자동화 시스템의 필요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 SCPI(Standard Commands for Programming Instruments) 명령 체계를 이용한 RF 계측기 제어 모듈로 구성된 자동화 시험장비를 개발하였다. 시험 대상 증폭기(Device Under Test, DUT)은 RS-422 및 GPIO를 통해 MCU와 연동되며, 설정된 시험 조건에 따른 결과는 실시간으로 시각화 및 저장된다. 또한 BLE(Bluetooth Low Energy) 기반 모바일 앱을 통한 원격 제어 기능도 제공된다. 본 시스템은 수동 시험 방식의 반복성 부족 및 시간 비효율 문제를 개선하였으며, ± 0.12 dB 수준의 출력 편차와 안정적인 데이터 저장을 통해 신뢰성을 확보하였다. 본 논문은 시스템 아키텍처, 통신 구조, 하드웨어·소프트웨어 구현, 시험 시나리오 및 결과 분석을 통해 자동화 시험 시스템의 구현 가능성과 실용성을 제시한다.

I. 서 론

고출력 RF 증폭기는 통신, 계측, 전자파 응용 등 다양한 분야에서 널리 사용되며, 넓은 주파수 대역과 다양한 펄스 조건에서도 안정적인 출력을 유지해야 한다. 이를 위해 출력 특성, 선형성, 응답 속도 등을 정밀하게 평가할 수 있는 시험장비가 필수적이다.

그러나 기존 시험 방식은 오실로스코프나 스펙트럼 분석기를 활용한 수동 계측에 의존하고 있어, 설정 오류, 반복성 저하, 시간 소모 등의 문제가 발생한다. 특히 다양한 조건에서 반복 시험이 요구되는 환경에서는 시험의 일관성과 재현성 확보가 어렵다.

최근에는 시험 자동화를 통해 효율성 향상, 데이터 정밀도 개선, 휴면에 최소화 등의 장점을 확보할 수 있다는 점이 널리 인식되고 있으며 [1][2], 이에 따라 본 연구에서는 SCPI 기반의 RF 계측기 제어를 중심으로 한 자동화 시험 시스템을 설계하였다.

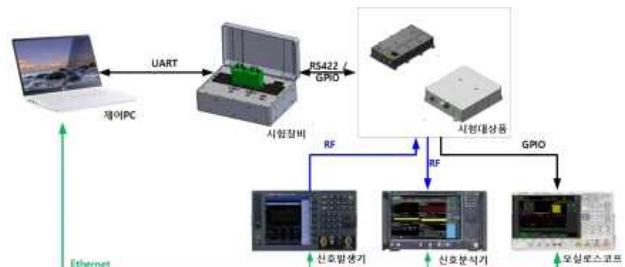
제안된 시스템은 STM32 기반 MCU, SCPI 프로토콜을 이용한 RF 계측기 제어, DAC 기반 시험 신호 생성, GUI 제어 환경, BLE 기반 원격 제어 기능으로 구성되어 있으며, 기존 수동 환경의 한계를 극복하고 반복 가능하며 신뢰성 높은 시험 환경을 제공한다.

II. 본론

본 연구에서는 고출력 RF 증폭기의 자동화 시험을 위한 통합 시스템을 설계하고 구현하였다. 해당 시스템은 STM32 마이크로컨트롤러(MCU)를 중심으로 시험 대상 장비(DUT), RF 계측기(신호 발생기 및 신호 분석기), 사용자 제어용 PC GUI, 그리고 BLE 기반의 원격 제어 모듈로 구성되어 있다. 그림 1은 본 연구에서 구현한 자동화 시험 시스템의 전체 구성 및 데이터 흐름을 개략적으로 나타낸 것이다. UART, RS-422, GPIO, Ethernet과 같은 다양한 통신 인터페이스를 통해 연동되며, 시험 조건 설정부터 계측기 제어, 계측 데이터 수집 및 시각화까지의 전 과정을 자동화 할 수 있도록 설계되었다.

시스템의 주요 설계 목표는 기존 수동 시험 환경의 반복성 부족, 설정 오

류, 작업 시간 증가 등의 문제를 해결하고, 정밀하고 일관된 시험 환경을 제공하는 것이다. 이를 위해 GUI 기반의 조건 설정 기능이 도입되었으며, 사용자는 펄스 진폭(PA), 펄스 폭(PW), 펄스 반복 간격(PRI) 등의 파라미터를 입력하면, GUI는 해당 데이터를 인터페이스 제어 문서(ICD)에 따라 인코딩하여 UART를 통해 MCU에 전달한다. MCU는 전달된 명령을 해석하여 RS-422와 GPIO를 통해 DUT의 제어를 수행하며, 필요한 경우 DAC를 통해 시험 신호를 직접 생성하거나 외부 신호 발생기(SG)와 트리거 동기화를 진행한다. DUT는 입력된 RF 신호를 설정된 조건에 따라 증폭하고, 출력된 신호는 신호 분석기(SA)를 통해 계측된다. 계측기는 SCPI 명령어를 이용해 자동으로 제어되며, 이는 VISA 기반 자동 계측 환경을 활용한 기존 연구들과 같은 맥락이다 [3]. 측정된 데이터는 Ethernet을 통해 PC로 전송되어, GUI에서 실시간으로 시각화 및 저장된다.



[그림 1] RF 증폭기의 자동화 시험시스템 블록도

각 구성 요소는 역할에 따라 기능적으로 분리되어 있지만, 전체 시험 시퀀스는 일관된 흐름을 갖도록 통합되어 있다. 시스템 초기화 단계에서는 각 장치가 전원 인가와 함께 인터페이스 설정을 완료하고 통신 상태를 확인한다. 이후 GUI에서 시험 조건을 설정하면 해당 정보가 MCU로 전송되며, MCU는 이를 기반으로 DUT 제어 및 시험 신호 출력을 수행한다. DUT의 출력은 SA를 통해 분석되고, 측정 결과는 다시 GUI에 전달되어 시각화된다. 사용자는 GUI를 통해 파형 정보, 주파수 응답, DUT 상태 등을 확인할 수 있으며, 시험 결과는 자동으로 저장된다. 시험이 종료되면 모든 장치는 초기 상태로 복귀하고, 시스템은 다음 시험을 준비하게 된다.

III. RF 증폭기의 자동화 시험시스템 구현 및 실험결과

III.1 RF 증폭기의 자동화 시험시스템 구현

하드웨어 구현 측면에서, STM32 기반 MCU는 RS-422 포트를 통해 DUT와 명령/응답을 주고받고, GPIO를 통해 DUT의 전원 및 모드를 제어한다. DAC는 펄스 신호 생성이나 외부 계측기와의 트리거 신호 동기화에 사용되며, BLE 모듈은 UART를 공유하여 스마트폰 앱과의 간단한 시험 제어 기능을 수행한다. BLE와 PC GUI의 통신 충돌을 방지하기 위해 MCU는 통신 우선순위를 동적으로 조정하도록 설계되었다.

소프트웨어 구성은 MCU 펌웨어와 PC GUI로 나뉜다. MCU 펌웨어는 STM32Cube HAL과 FreeRTOS를 기반으로 구성되었으며, 5바이트 고정 길이 패킷(헤더, 명령, 데이터 2바이트, 체크섬)을 처리한다. DUT 제어 루틴, DAC 출력 제어, BLE 명령 응답 루틴 등이 포함되어 있으며, 각 모듈은 독립된 태스크로 구동된다. PC GUI는 Python(PyQt5) 기반으로 개발되었으며, pyserial을 이용한 UART 통신과 pyVISA를 이용한 SCPI 명령어 기반 계측기 제어를 지원한다. 사용자는 GUI를 통해 조건을 설정하고 시험을 시작하며, 실시간 과정과 분석 결과를 그래프로 확인할 수 있다. 시험 결과는 로그 파일로 자동 저장되며, 장비 응답 오류 또는 통신 실패 시 적절한 예외 처리를 수행하도록 구성되어 있다.

전체 시스템은 세 가지 주요 통신 경로를 사용한다. UART는 GUI와 MCU 간 명령 송수신에 사용되며, RS-422는 MCU와 DUT 간의 고신뢰 제어 채널로 사용된다. Ethernet 기반의 SCPI 프로토콜은 SG 및 SA와의 통신에 활용되며, 과정 및 전력 데이터의 요청 및 응답을 담당한다. BLE는 UART 기반 문자열 인코딩 명령을 사용하며, 시험 상태 확인 및 간단한 제어를 지원한다.

결과적으로 본 시스템은 고출력 RF 증폭기의 다양한 조건에서의 성능을 안정적이고 반복 가능하게 시험할 수 있는 자동화 플랫폼으로 구현되었으며, 실제 환경에서의 적용을 위한 안정성과 유연성을 동시에 확보하였다.

III.2 RF 증폭기의 자동화 시험시스템 실험결과

제안된 자동화 시험 시스템을 이용하여 실제 고출력 RF 증폭기를 대상으로 수행한 시험환경과 결과를 기술한다. 본 실험은 세 가지 대표 조건 (A, B, C)으로 구성된 시험환경 설정(표 1)에 따라 수행되었다. 증폭기의 펄스 조건 반응 특성, 시간 응답 특성, 반복 측정 신뢰성 등을 중심으로 구성되었으며, 자동화 성능과 데이터 일관성을 검증하는 데 목적이 있다. 시험은 전자파 차폐 환경에서 수행되었으며, 주요 구성은 다음과 같다: STM32기반 MCU 보드, Python(PyQt) 기반 GUI를 구동하는 제어 PC, SCPI 명령어를 지원하는 신호 발생기(Keysight N5172B)와 신호 분석기 (R&S FSV40), 그리고 BLE 통신을 위한 HM-19 모듈 및 안드로이드 기반 모바일 애플리케이션. DUT는 1-6GHz 대역에서 최대 40dBm의 출력이 가능한 고출력 RF 증폭기로, 외부 RF 신호를 받아 설정 조건에 따라 증폭한 후 출력한다.

[표 1] RF 증폭기의 자동화 시험시스템 실험환경 설정

시험환경 (설정)	주요 변수	고정 조건	측정 조건
A	PA: -10~0dBm (1dB 간격)	$f = 3.5 \text{ GHz}$, PW = 500 ns, PRI = 10 μs	출력 전력, 선형성, Gain
B	PW: 100~1000ns (100ns 간격)	$f = 5 \text{ GHz}$, PA = -3 dBm, PRI = 10 μs	Rise/Fall Time, Overshoot
C	반복 시험 50회	PA = -5 dBm, PW = 300 ns, $f = 4 \text{ GHz}$, PRI = 10 μs	전력 편차(RMS), 응답 시간, 저장률

시험환경 A에서는 입력 진폭 변화에 따른 출력 전력 및 증폭률(Gain)의 선형성을 평가하였다. 출력 전력은 입력 진폭에 따라 24.1dBm에서 34.3dBm까지 선형적으로 증가하였고, 평균 증폭률은 약 34.1dB로 안정적으로 유지되었다. 1dB 압축점(P1dB)은 약 -1.5dBm에서 관찰되어 [2], DUT의 스펙과 일치함을 확인하였다. 시험환경 B에서는 펄스 폭 변화에 따른 시간 응답 특성을 분석하였다. 모든 조건에서 rise/fall time은 20 ns 이내로 측정되었으며, 펄스 폭이 100ns인 경우에만 최대 +1.8dB의 overshoot가 발생하였다. 이는 내부 회로의 바이어스 안정화 시간에 기인하는 것으로 판단된다. 시험환경 C에서는 50회 반복 시험을 통해 시스템의 데이터 반복성과 통신 안정성을 검증하였다. 출력 전력의 RMS 편차는 $\pm 0.12\text{dB}$ 수준으로 매우 낮았으며, 평균 응답 지연 시간은 약 58ms로 측정되었다. 모든 계측 결과는 정상적으로 저장되었고, 저장 누락률은 0%로 확인되었다.

시험 결과, 제안된 시스템은 다양한 조건에서 고출력 RF 증폭기의 성능을 안정적이고 정밀하게 검증할 수 있음을 입증하였다. GUI 기반의 조건 설정과 계측기 제어, 실시간 시각화, BLE 원격 제어 등 각 기능은 시험의 자동화 수준과 신뢰도를 향상시키는 데 기여하였다. 특히 반복 시험에서도 낮은 출력 편차와 완전한 저장 성공률을 달성함으로써, 본 시스템의 실용성과 확장 가능성이 충분함을 확인하였다.

IV. 결론

본 연구에서는 고출력 RF 증폭기의 성능을 자동화 방식으로 정밀하게 평가할 수 있는 시험시스템을 설계·구현하였다. STM32기반 MCU, PC GUI, SCPI 기반 계측기, BLE 원격 제어 등으로 구성된 본 시스템은 기존 수동 시험 방식의 한계를 개선하고, 다양한 조건에서 안정적이고 반복 가능한 계측 환경을 제공하였다. 실험을 통해 출력 선형성, 시간 응답 특성, 반복 신뢰성 등을 검증하였으며, 자동화와 운용 편의성 측면에서도 실용 가능성을 입증하였다.

향후에는 다채널 확장, AI 기반 분석, 무선 통신 고도화, 계측기 호환성 강화를 통해 시스템을 고도화할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 「지역혁신중심 대학지원체계(RISE)」 ICT-ABB 사업단의 지원을 받아 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] RF Globalnet, Automating RF Test And Measurement, 2023.
- [2] Keysight Technologies, Why Instrument Control Is Crucial in Test and Measurement, 2024.
- [3] SCPI based integrated test and measurement environment using LabVIEW. ResearchGate, 2019