

위상 배열 고출력증폭기용 고밀도 고전압 전원공급기 하드웨어 구성 및 FPGA를 이용한 고속 독립 제어방식

강춘호¹ · 이성욱^{2*} · 이홍학² · 이창훈³ · 변기식⁴

Hardware configuration of High-Density HVPS and High Speed independent Control method Using FPGA for Phased Array Transmitters

Chun-Ho Kang¹ · Sung-Wook Lee^{2*} · Hong-Hak Lee² · Chang-Hoon Lee³ · Gi-Sig Byun⁴

¹Gumi R&D Center, 354-25, Sanho-daero, Gumi City, Gyeong-buk, Korea

²R&D Center, 349 Gakpyoong-ri, Majang-myun, Yichun-si Kyunggi-do, 18031, Korea

³The 2nd(C2/IW) R&D Institute-2 Yuseong P.O Box 35-2 Daejeon, Korea

⁴Department of Control & Instrumentation Eng., Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

요약

위상배열 고출력증폭기용 고전압전원공급기(HVPS)는 다출력 소용량 진행파관(TWT)을 구동하는데 반드시 독립운용 특성을 가져야만 한다. TWT 독립운용 특성은 어느 하나의 TWT가 고장이 발생한 경우에도 부분 송신기능을 유지함으로써 관련 임무를 중단 없이 수행하는 매우 중요한 요소로 알려져 있다. 본 논문에서는 소용량 TWT들을 독립 운용하기 위한 FE 변조부를 포함한 고밀도 HVPS 하드웨어 구성 및 FPGA를 이용한 고속 독립 제어방식에 관해 기술하였다. 또한, 위상배열 고출력증폭기 운용 중 발생 가능한 고장을 모의하여 안정적으로 고장이 발생한 TWT가 독립 제어되는 시험결과를 기술하였다.

ABSTRACT

In the field of electronic warfare applications, high voltage power supply(HVPS) for high power phased array transmitters must necessarily have an independent operating characteristics for driving mini TWTs. TWT independent operational characteristics, in order to run without interrupting the electronic warfare mission by maintaining the partial transmission function even when one of the TWT has occurred a failure, is known to be very important. In this paper, we describe the research on high-speed independent control system using a high-density HVPS, including FE modulators, hardware configuration and the FPGA in order to independently operate mini TWTs. Also, we have simulated some possible faults in phased array transmitters, and presents the test results to control a faulted TWT independently.

키워드 : FE 변조부, 고전압전원공급기, 증폭기, 위상배열, 진행파관

Key word : FE modulator, HVPS, transmitter, phased array, TWT

Received 06 October 2015, Revised 20 October 2015, Accepted 09 November 2015

* Corresponding Author Sung-Wook Lee(E-mail:sulee@victel.co.kr, Tel:+82-31-7301)

R&D Center, 349 Gakpyoong-ri, Majang-myun, Yichun-si Kyunggi-do, 18031, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.11.2758>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

현대 전장 환경에서 다수의 적의 공격 신호를 재밍(Jamming) 하기 위해 일반적으로 고출력증폭기를 위상배열(Phased array) 송신 방식으로 구성한다[1]. 재밍은 고출력 전자빔을 사용하여 적의 공격 신호를 교란, 기만하는 것으로, 진행파관(Traveling Wave Tube, TWT)을 사용하여 고출력 전자빔을 생성하는 경우, 고전압 생성부(HVPS) 및 변조부(Modulator)로 구성된 고전압 전원공급기가 필요하다[2].

위상배열용 고출력증폭기는 다수의 진행파관을 독립적으로 구동하기 위해 진행파관 수와 동일한 고전압 전원공급기를 배치하는 것이 가장 이상적이다. 이러한 구성에서는 하나의 진행파관이 고장이 발생되더라도, 다른 진행파관은 정상 동작하여 부분 송신 기능이 가능하고, 임무를 수행할 수 있다. 그러나, 고전압 전원공급기는 고압부품의 특성상 용량과 상관없이 많은 공간이 필요하며, 다수의 고전압 전원공급기를 사용할 경우 제한된 공간에서 물리적, 경제적으로 매우 비효율적이다. 이를 보완하기 위해 ECM(Electronic Countermeasures) 장비에서는 일반적으로 그림 1과 같이 1개의 고전압 생성부와 n개의 변조부를 n개의 mini TWT와 조합하여 구성한다.

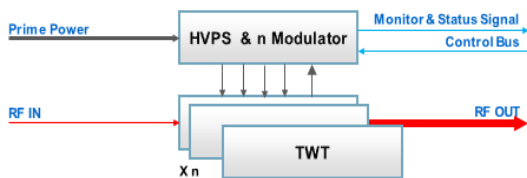


Fig. 1 Phased array transmitters configuration

이러한 구성은 공간 효율 및 비용 등에서 큰 장점이 있지만, 하나의 채널에서 고장이 발생된 경우 다른 채널에까지 영향을 주어 ECM장비가 정상적인 임무를 수행할 수 없게 하는 단점도 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 각 채널은 완벽하게 독립 제어 및 구동될 수 있도록 설계되어야 한다[3].

본 논문에서는 1개의 고전압 생성부와 n개의 변조부로 구성된 고밀도 고전압 전원공급기 구조를 유지하여, 공간 효율 및 비용 장점을 유지하면서도, 다수의 진행파관을 독립적으로 구동하기 위한 하드웨어 구성과 FPGA

를 이용한 고속 독립 제어 기법에 대해 기술한다.

II. 고밀도 고전압 전원공급기 설계 및 독립 제어 기법

2.1. 하드웨어 구성 및 성능

위상배열 고출력증폭기용 고밀도 고전압 전원공급기를 구현하기 위해서는 고속 신호처리기법과 함께 그림 2와 같은 하드웨어 구성이 필요하다.

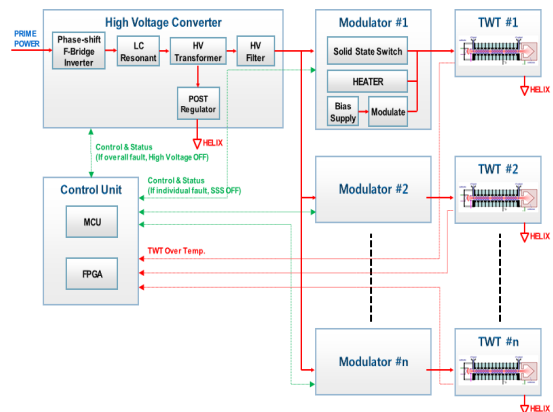


Fig. 2 Hardware configuration

고밀도 고전압 전원공급기는 고전압 생성부와 다수의 변조부 및 제어부로 구성된다. 고전압 생성부는 입력전원을 고전압으로 승압 전력 변환하여 캐소드전압과 콜렉터전압을 생성하며, 변조부는 히터 전압과 변조 전압을 생성하고, 고압 출력을 ON/OFF 제어한다. 제어부는 MCU와 FPGA로 구성되어, 고전압 생성부와 각 변조부 및 진행파관 상태를 상시 감시 및 제어하고, 고밀도 고전압공급기 운용을 관장한다.

이러한 구성에서 진행파관 내부 아킹(Arcing)과 같은 고장이 발생한 경우, 고장이 발생된 변조부의 Self-bias 고압스위치(Solid State Switch, SSS)가 고장을 먼저 차단하고, 고장 신호를 제어부의 FPGA에 순시적으로 전송한다. FPGA는 고장 신호를 고속 신호 처리하여, 해당 고장 채널을 수십 nsec 이내로 완전히 차단 제어하고, 상태를 MCU에 전송한다. 신속한 고장처리를 하여 고전압으로 인한 장비 보호 및 또 다른 고출력증폭기에 영향을 최소화하고, 고장 상태를 식별한다. 일시적 고

장일 경우, 차단 제어를 해제하여 임무를 연속적으로 수행할 수 있게 한다. 이러한 고장 차단 과정에서 발생되는 캐소드 전압 변화를 선형적으로 보상하기 위해 고전압 발생부는 Post-regulator 회로를 구성하여 고장 처리시간동안 발생한 전압변화를 보상하여, 다른 채널의 동작을 안정적으로 유지한다.

2.1.1. 고전압 생성부(HVPS)

고전압 생성부는 진행파관을 구동시키기 위한 캐소드, 콜렉터 전압을 안정적으로 생성하는 기능을 담당한다. 일반적으로 주요 구성요소 및 특징은 다음과 같다. 인버터는 직류전원을 교류전원으로 안정적으로 변환하고, 고전압 출력전압에 따라 Duty를 조절하여 출력전압을 안정화시킨다. 공진회로는 인버터과정에서 발생하는 스위칭 노이즈를 최소화하기 위한 구성품으로 전압과 전류를 동상으로 유지함으로써, 영전류 스위칭(Zero current switching)을 가능하게 하고, 노이즈를 줄여 출력 전압 안정화 및 RF 출력 특성 향상을 유도한다[4]. 고전압 승압 변압기와 고전압 정류회로는 고전압 생성을 위한 주요 구성품으로 고전압 트랜스포머, 고전압 다이오드모듈, 고전압 캐패시터 및 저항 등으로 구성되며, 고전압 노이즈, 절연내압 및 발열 등을 고려해야 원하는 출력을 안정적으로 얻을 수 있는 회로로 세심한 설계 및 노하우가 요구되는 구성품이다.

통상적으로 고전압은 위와 같은 구성요소를 조합하여 생성이 가능하지만, 보다 정밀한 제어 및 피드백 향상 등을 위해 Post regulator를 추가하는 것이 일반적이다.

본 논문에서 Post regulator는 독립제어를 위해 신속한 고전압 변화 보상을 위한 필수 구성요소이다. Post regulator는 원래 고전압 출력전압에 따라 FET를 불포화 영역에서 동작하는 선형 제어회로이며, 고전압 승압 변압기와 헬릭스 사이에 위치함으로써, 고전압 출력전압의 변화에 따라 신속하고, 민감하게 출력을 보상할 수 있게 한다.

2.1.2. 변조부(Modulator)

일반적으로 변조부는 진행파관 내 열전자 가속 및 차단을 위한 FE(Grid) Bias 전원회로, 진행파관 modulation을 위한 변조회로, 진행파관을 고온으로 유지하여 열전

자를 활성화시켜 RF출력을 향상시키기 위한 히터 전원 회로로 구성된다.

다출력용 고밀도 고전압 전원공급기에 소요되는 변조부는 위와 같은 구성요소와 함께 고속으로 고전압을 차단할 수 있는 자기 차단형(self bias) 고압스위치(SSS) 회로를 포함해야 한다.

고압스위치회로는 변조부 고장 뿐만 아니라, 진행파관 고장 발생시 해당 채널을 신속히 차단함으로써, 고장 채널 분리 및 전자회로를 보호하여 다른 채널이 영향없이 임무를 연속적으로 수행할 수 있게 하는 핵심구성회로이다. 다출력 고밀도 고전압 전원공급기를 분리된 여러개의 고전압 전원공급기와 같이 동작하도록 하기 위해 고압스위치의 동작은 매우 중요하다.

2.2. 독립 제어 기법

다출력 고출력증폭기를 개별적으로 운용하기 위해 고전압 전원공급기는 n개의 진행파관에 공급하는 고전압 전원을 제어할 수 있는 변조부가 n개 필요하며, 변조부 또는 진행파관 고장이 발생한 경우 해당 채널 고압스위치를 차단하여 타 채널 고출력증폭기를 계속 운용 가능하도록 설계해야 한다.

이렇게 n개의 변조부와 진행파관 상태를 감시하고, 제어하기 위해 수많은 로직과 이를 고속으로 처리할 수 있는 하드웨어 기반의 제어 알고리즘이 필요하다. 따라서, 여러 로직을 집약시켜 단순화하고, 고속으로 동작 가능한 FPGA를 사용해 로직 처리한 후 상태정보를 MCU에 송신한다. MCU는 FPGA에서 수신된 정보로 장치 전반적인 운용 및 제어를 수행하고, 외부 인터페이스를 담당한다.

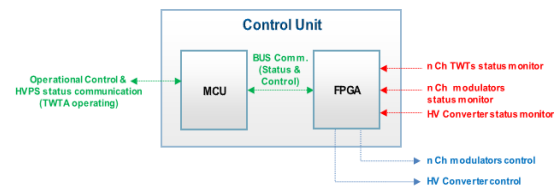


Fig. 3 Configuration of control unit

2.2.1. MCU 제어 알고리즘

MCU는 FPGA에서 선 처리된 결과를 받아 장치 운용을 관장한다. 그림 4는 장치 전반적인 운용 흐름도이며, 제어 흐름은 다음과 같다.

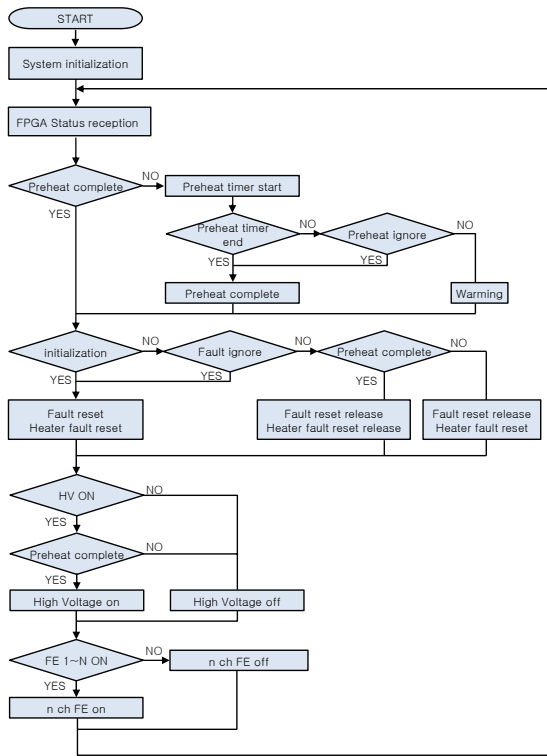


Fig. 4 Operating flow chart

- ㉠ 전원이 인가되면 시스템 초기화를 수행하고, 히터 전원과 FE BIAS 전원을 생성한다.
- ㉡ FPGA에서 입력/보조전원/히터/FE 전원에 대한 상태정보를 수신하고, 상황에 맞는 제어 명령을 내린다.
- ㉢ 히터 예열상태를 감시하며, 외부 고장 초기화 명령과 고장무시명령에 대한 제어를 수행한다.
- ㉣ 예열이 완료된 고압대기 상태에서 외부 고압명령이 인가되면 FPGA에 로직 처리를 명령한다.
- ㉤ 고압이 정상적으로 출력되고, 외부 송신 명령이 인가되면 해당 변조부 송신 ON 명령을 인가한다.

2.2.2. FPGA 고속 로직 처리

그림 5는 FPGA 로직 중 주기능인 고장상태에 따른 고압/고압스위치/송신제어에 대한 Block diagram이다. 종합고장에 대한 로직으로, 입력고장, 보조전원고장, 음극(Cathode)고장, 헬릭스과전류, 인버터과전류, HVPS과열과 같이 고압 생성에 영향을 줄 수 있는 고장

을 종합고장으로 판단하여 해당 고장이 발생하거나, 외부 고압명령이 OFF이면 고전압 생성부의 고압 ON 명령을 차단한다.

개별고장에 대한 로직으로, n개의 변조부 중 어떤 모듈에서 FE고장, 히터고장, 진행파관 과열, 진행파관 아킹과 같이 변조부나 진행파관 이상 시 발생하는 고장 신호를 받으면, 개별 고장으로 판단해 해당 모듈 고압 스위치만 차단한다. 그리고, 종합고장이 발생한 경우 모든 변조부의 고압스위치를 차단한다.

송신 ON/OFF 제어는 RF출력을 직접적으로 제어하는 가장 중요한 기능으로 모든 보호 동작 중 최우선적으로 신속히 처리되며, 송신ON 제어에 대한 동작 조건은 다음과 같다.

- 고전압 생성부에 고압ON 명령 인가
- 개별 고장 없음
- 고압이 송신에 문제가 없을 정도(정상 음극전압의 약 90% 이상)로 생성
- 개별 송신명령 인가

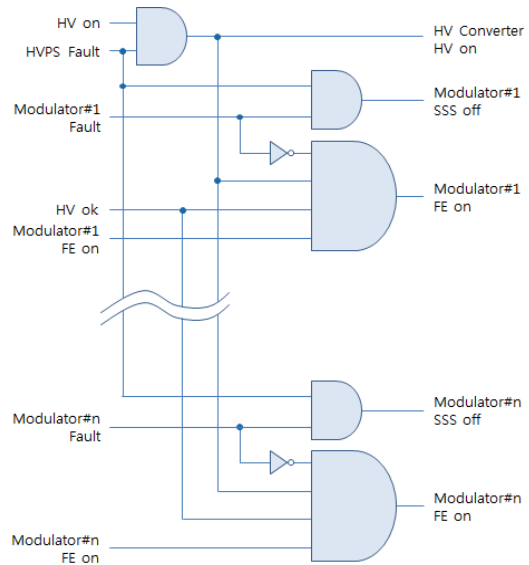


Fig. 5 FPGA fault logic process

2.3. 실험 및 성능 분석

본 논문에서는 다출력용 고출력증폭기를 개별적으로 운용하기 위한 하드웨어 구성과 제어 기법을 제안 하였으며, 이 기법은 어느 하나의 출력에 문제가 발생

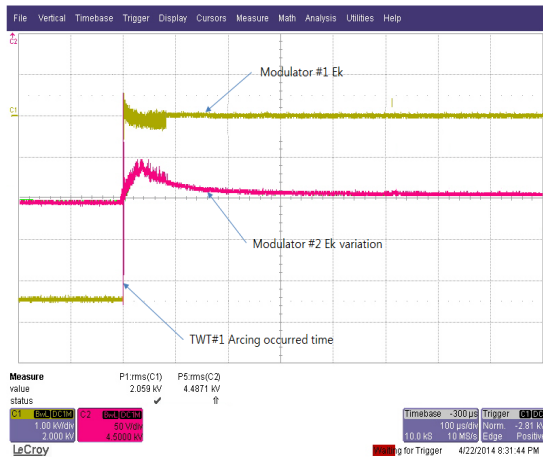


Fig. 8 Magnified arcing test waveform

일반적으로 진행파관 내부 아킹과 같은 큰 에너지를 갖는 고장은 빠른 고전압 차단을 할지라도, 캐소드 전압을 순식간에 강하시켜 다른 채널의 캐소드 전압 안정도에 영향을 미치는 것이 일반적이거나, 본 시험의 결과는 수십 nsec 이내에 분리된 변조모듈의 자기 차단형 (self bias) 고압스위치(SSS)회로에 의해 아킹과 동시에 고장을 분리하고, Post-regulator 회로가 약 350V의 캐소드 전압 보상을 하여 캐소드 전압의 변화를 최소화한 파형을 보여준다.

III. 결 론

본 논문에서는 위상배열 고출력증폭기용 다 출력 변조부를 갖는 고밀도 고전압 전원공급기에 대한 하드웨

어 설계 및 독립 제어 기법 설계에 대한 방법을 제안하였다.

다 출력 변조부를 갖는 고밀도 고전압전원공급기는 공간효율 측면에서 매우 유리하며, 고장 발생 시에도 Self-bias 고압스위치 및 Post-regulator 회로를 FPGA를 이용한 고속 로직회로와 연동하여 다 출력 고밀도 고전압전원공급기가 여러 개의 고전압 전원공급기를 분리 사용하는 것과 같은 독립 제어 효과를 얻을 수 있었다.

이를 증명하기 위해 고출력증폭기에서 가장 빈번하고, 심각하게 발생될 수 있는 고장인 진행파관 내부 아킹 시험을 모의 실시하였으며, 시험을 통해 고장 모듈이 순시적으로 고장 분리되고, 정상 출력이 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] Park, Y.J. Lyu, S.C. You, T.S. "Development of High Density High Voltage Power Supply for Phased Array Transmitters" *Pulsed Power Conference, 2005 IEEE*
- [2] S. C. Kim, S. H. Nam, and D. H. Kim, "Development of High-Power Density, 4-kV Pulse Transformers for TWTAs," *IEEE Trans. Plasma Science*, vol. 32, pp. 1873-1878, Oct. 2004.
- [3] L. Sivan, *Microwave Tube Transmitters*, London : Chapman & Hall, 1994.
- [4] A. I. Pressman, *Switching Power Supply Design*, New York : McGraw-Hill, 1999.



강춘호(Chun-Ho Kang)

송실대학교 전자공학 석사
 현) LG넥스원 구미연구소
 ※ 관심분야: 안테나 및 전자전 시스템 설계



이성욱(Sung-Wook Lee)

서울시립대학교 전기전자공학과
한빅텍 기술연구소
※ 관심분야: 고효율증폭기용 HVPS 설계



이홍학(Hong-Hak Lee)

성균관대학교 전기전자공학과 석사
한빅텍 기술연구소
※ 관심분야: 고효율증폭기용 HVPS 설계



이창훈(Chang-Hoon Lee)

한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
한국방과학연구소
※ 관심분야: 전자전 신호처리 및 시스템 설계



변기식(Gi-Sig Byun)

1990년 Wichita State University 전기공학과 공학박사
1990년~현재 부경대학교 공과대학 제어계측공학과 교수
※ 관심분야: 신호처리, 임베디드시스템 설계, 디지털제어, 센서 네트워크