

디지털 제어형 고주파 전력발생장치 개발에 관한 연구

논 문

61-3-8

A Study on the Development of the High-frequency Power Generating System by Digital Control

김 동 희* · 김 금 수** · 문 종 현†

(Geum-Soo Kim · Dong-Hee Kim · Jong-Hyun Moon)

Abstract - The aim of this research is to develop more actual high-frequency power generators that includes various noise, to make flexible control systems for test or performance analysis of electric and electronic machines. It proposed power generating circuits using basic amplifier, B-level Push-Pull type, and FPGA for the easier control to get data and transmit. And it also testify to realize the proposed systems to report output data by input waveform and designed the digital LPF with MATLAB, universal simulation tools, for this study.

Key Words : Push-pull type amplifier circuit, Ampere-difference compensation, FPGA controll, Electric and electronic equipment tester, Digital low-pass filter design

1. 서 론

최근 전기전자장비 시스템의 동작 주파수가 반도체 제조 기술과 메모리소자의 발달에 따라 급속히 증가함에 따라, 반도체 회로를 채용한 전자응용장비 및 그 시스템의 성능에 있어서 전기전자 노이즈가 상당히 민감한 부분으로 대두되고 있다. 이들 장비의 특성은 내부에 사용하는 전자에너지의 일부를 주위의 공간이나 전원선 등을 통하여 방사하기도 하고, 또한 방출된 에너지의 영향을 받아 시스템이 오동작하거나 소정의 성능을 발휘하지 못할 경우가 있다. 더욱이 시스템의 주파수가 높아지면서, 복잡한 전기적인 노이즈 및 신호 변형을 야기시켜 회로의 성능을 극도로 악화시키는 주요인으로 작용하기도 한다. 대부분의 전력설비시스템에는 전력전자기술을 기반으로 구성되어 있어 이들로부터 발생하는 노이즈는 주변회로 및 전자응용장치에 많은 영향을 미치고 있다.^{[1],[2]}

이에 따라, 노이즈에 대한 시스템 안정성의 확보가 강력히 요구 되고 있으며, 이러한 현상들을 시험할 수 있는 고주파전력의 구현이 필요하게 되고, 원하는 형태의 노이즈가 포함된 전원파형을 출력 할 수 있는 시험장비가 필요하게 된다.^{[3],[4]} 특히, 상기의 고주파 전원발생 장치는 스위칭기술을 기반으로 하는 SMPS(Switching Mode Power Supply)를 비롯한 전력변환장치, 고주파용 변압기 그리고 2차 전지의 성능분석을 위한 시스템 등에서 그 필요성이 강조 되면서 산

업계에서도 시장이 형성되고 있어 주목을 받고 있다.^[5]

본 연구는 이러한 배경으로 각종 전기전자장치의 시험 및 성능 분석을 위해, 유연성 있는 제어시스템을 내장하여 현실적이고 보다 다양한 노이즈 전원을 포함하는 고주파전력 발생시스템 개발을 목적으로 하였다. 고주파전력 발생시스템의 구성은 먼저 전력발생회로로는 푸시풀 증폭회로를 기본형으로 하는 고주파 전력발생회로를 출력회로로 사용하였고, 모든 Data의 생성과 전송 시 제어의 용이성을 위해 Xilinx사의 FPGA(XC3S 400E)로 구현 하였다. 또한, 각각의 입력 파형에 따른 출력 파형 Data 표현방법을 제시하고, 범용 툴인 MATLAB을 사용하여 본 연구에 사용하고 있는 디지털 LPF를 설계하여, 시험 제작된 시스템의 실증시험을 통해 검증 하고 있다.

2. 고주파 전력발생시스템의 구현

각종 전자장치의 시험 및 성능 분석을 위해 보다 현실적이고 다양한 노이즈 전원을 포함하는 고주파전력 발생시스템은, 부하가 요구하는 주파수대역이 대단히 넓은 영역에 걸쳐 있으므로 기존의 고주파 발생회로 중 어느 하나의 회로 방식에 한정하여 전력발생회로로 구성하기에는 현실적으로 불가능하다. 따라서, 본 연구를 통해 제안하는 고주파전력 발생장치의 전력부는 스위칭 방식이 아닌, 선형 방식을 이용하고, 유연성 있는 제어기능을 부여하기 위해 디지털 방식을 채택하여 전체 시스템을 구성하도록 하였다.^[6]

그림 1은 본 연구를 통하여 구성 한 고주파전력 발생 시스템의 전체 구성을 나타내었다. 고주파 전력 발생부에서는 직류전압을 MOSFET에 인가하여 제어신호에 대응하는 고주파전력을 발생시킨다. 또, 부하가 요구하는 고주파전력이 공급되고 있는가를 검출하고 그 검출정보를 모두 A/D변환시켜 기준값과 비교하여 모든 데이터를 디지털제어방식을

* 시니어회원 : 영남대 전기공학과 교수

** 정 회 원 : 영남대 공대 전기공학과 박사과정, 현재 (주)누리기술 대표이사

† 교신저자, 정회원 : 영남대 공대 전기공학과 박사과정
E-mail : moonjh@nuritech.co.kr

접수일자 : 2011년 10월 24일

최종완료 : 2012년 2월 21일

통해 처리하여 실시간으로 모니터에 전송하도록 구성시켰다. 직류 전압을 입력받아 고주파 전력을 발생시키는 전력발생부와 요구하는 지령치로 설정 및 조절하는 제어부, 그리고 제어된 고주파 전력을 요구하는 대로 공급되고 있는 가를 검측하는 계측부로 구성된다.

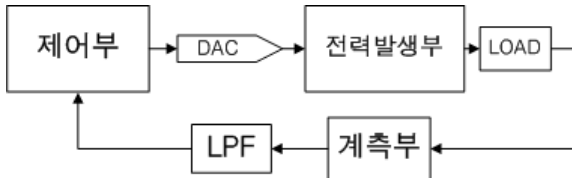


그림 1 고주파 전력발생시스템 구성

Fig. 1 Block diagram of high-frequency power generating system

2.1 전력발생부

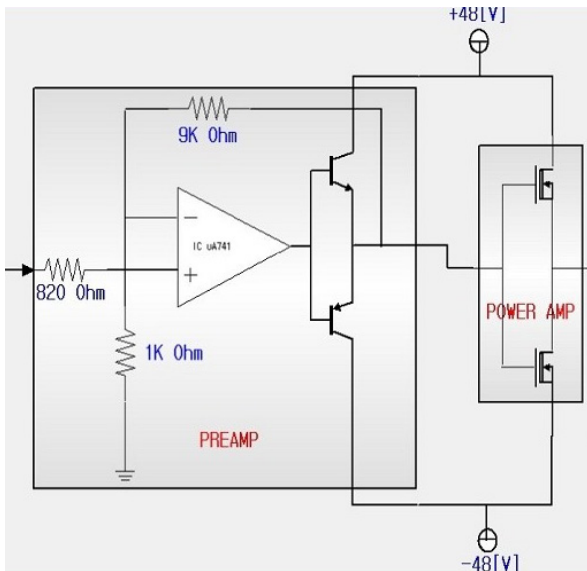


그림 2 고주파 전력발생시스템 전력발생부

Fig. 2 Power generation part of the system

그림 2는 고주파 전력발생부를 보여주고 있다. 전력발생부는 제어 신호 증폭을 위한 PRE AMP와 직류전압을 MOSFET에 인가하여 제어신호에 대응하는 고주파전력을 발생시키는 POWER AMP로 구성된다. $\pm 48[V]$ 의 직류전압을 공급하여 N-MOSFET가 동작 시는 (+)부분의 신호가 증폭 되고, P-MOSFET가 동작 시는 (-)부분의 신호가 증폭 되어지는 회로로 구성되어 있다. 또 (+), (-)신호가 동시에 주어지면 이에 따라 푸시풀 증폭기로 작용하여 고주파출력을 부하로 공급 할 수 있게 구성하였다.

본 연구에 사용한 전력발생회로는 스위칭소자인 MOSFET를 활성영역에서 선형제어를 실행시켜 고주파전력을 발생하고 있으므로, 스위칭방식의 전력증폭기에 비해 제어신호에

대한 출력파형의 복원주파수 영역에서는 유리하다. MOSFET를 병렬로 구동할 경우, MOSFET는 전압제어 구동형소자로 문턱전압(Threshold) 및 순방향 전달 컨덕턴스의 오차로 인해 드레인 전류의 불평형을 유발시키는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 각 MOSFET에 흐르는 분로전류를 적절하게 분배하여 전류의 불균형현상으로 인한 파괴를 막을 수 있도록 G-S간에 그림 3과 같은 회로를 추가하여 설계 하였다..

그림 3은 전류 편차를 해결하기위해 제안하는 회로로써, $I_1 > I_2$ 로 전류 편차가 생겼을 경우, TR1에 연결된 R의 전압강하가 TR2에 연결된 R의 전압강하보다 크므로 Q_1 을 도통시켜 전류의 편차를 감소시키도록 하였다.

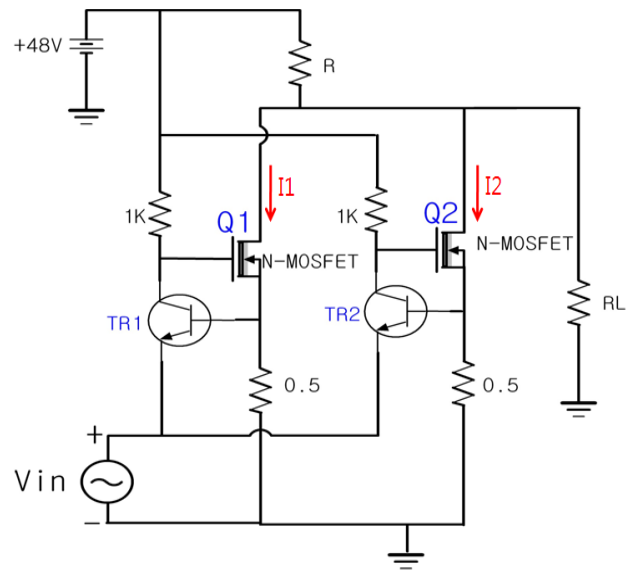


그림 3 전류편차 개선 회로

Fig. 3 The modified circuit on current-difference

2.2 제어 및 계측부

그림 4는 제안한 고주파전력 발생기의 제어를 위한 시스템 블록도를 보여주고 있다. 연구대상으로 하고 있는 고주파전력 발생 장치는 출력 전압 $\pm 40[V]$, 출력전류 $5[A]$, 출력주파수 $DC \sim 0.5[MHz]$ 까지의 출력을 발생시켜 부하에 공급하는 블록과 이를 위해 필요한 제어를 실행하는 블록으로 이루어져 있고 부하로는 Active Load로 구성 되어 있다. 그림의 제어블록으로부터 DSP에서는 PC에서 받은 출력파형을 메모리와 FPGA 내부 메모리에 저장시키고, A/D 모듈에서 발생한 출력 파형을 PC로 전송하며, 시스템의 동작 상태와 각종 오차 상황에 대한 처리를 수행하도록 설계되었다. 또한, 입력에서 설정한 시험조건과 동일한 출력을 발생하는 Power Amp.에서의 출력전압, 출력주파수, 출력전류제한 등을 DSP(Digital Signal Process)로 제어한다. 파형의 Data가 DSP의 메모리에 저장이 되면 출력 검출부에서 검출된 출력 Data비교하여 그 차이만큼 증가 또는 감소시켜서 D/A 컨버터를 설정하여 출력을 제어한다.

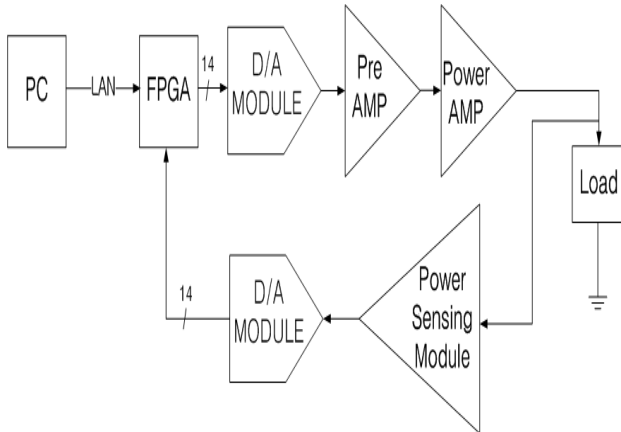


그림 4 고주파 전력발생 장치 제어 블록도

Fig. 4 Control block diagram of a high-frequency power generator

FPGA의 고속 Digital data를 D/A 모듈에서 아날로그 신호로 변경 처리하게 되는데, 50Mbps의 전류 Type의 신호를 $\pm 2.2[V]$ 신호로 변환하는 OP Amp를 필요로 한다. PreAmp에서는 $\pm 40[V]/10[A]$ 400[W], 5MHz의 비교적 고속 Power를 다루기 위한 전력 앞단에 완충 증폭을 한다.

Power sensing Module은 부하에 전달되어 지는 전력(전압, 전류)을 $\pm 0.1\%$ 이내의 오차를 유지 하도록 정확히 측정 하도록 한다. A/D Module은 5MHz 신호를 다루기 위해 80Mbps의 고속 14bit 정밀급을 사용한다.

계측부는 출력 전압과 전류를 검출 하여 FPGA로 처리된다. 1us단위로 전압, 전류 Image File을 다른 Program에서 작성하여 입력 하는 형태로, 입력에서 설정한 조건과 동일한 출력을 발생시키기 위해 Power Amp에서 출력되는 전압과 전류를 OP AMP로 검출, A/D변환기를 거쳐 LPF에 입력된다. 설계 사양은 표 1과 같다.

표 1 전압 및 전류 검출 설계 사양

Table 1 The specifications of voltage&current sensing

	Voltage Sensing		Current Sensing	
1	Amp Gain	-13.9794dB	Amp Gain	20dB
2	Amp Input	-44~+44V	Amp Input	-0.22~+0.22V
3	A/D Input	-2.2~2.2V	A/D Input	-2.2~2.2V
4	A/D resolution	14-bit	A/D resolution	14-bit
5			Shunt Resistor	10mΩ

2.3 필터설계

제어동작시 DSP는 출력 전압과 전류를 피드백하여 LPF를 통해 제어부에 입력된다. 본 연구를 통해 제안하는 고주파 전력발생시스템은 FPGA를 코어로 하는 DSP를 제어에 이용함으로써, 디지털 필터 설계를 하게 된다. 또한, 고주파 전력발생 시스템은 무엇보다 위상 왜곡 없는 안정성이 요구되므로 FIR 필터로 설계 하였다. 필터 파라메타 산정을 위한 시뮬레이션 툴로써 Matlab을 이용했고, 표 2에 필터 계수설계 사항을 정리하였다.

그림 5는 MATLAB을 이용한 FIR 필터 설계 화면을 나타내었다. 그림 6(a)는 LPF로 1MHz를 구성한 것으로 설계 값과 생성된 노이즈가 설계 수치로 잘 발생함을 알 수 있다. 또한 (b)는 이를 통합한 신호를 설계된 FIR Filter로 적용한 파형을 나타내었다. 여기서 가로축은 시간[us]을, 세로축은 전압[V]을 나타낸다.

표 2 FIR LPF 계수 설계 조건

Table 2 The design conditions of FIR LPF coefficient

구분	수치
Sampling Rate	80 [MHz]
Pass Frequency	2 [MHz]
Stop	15 [MHz]
Order	14
APass	1 [dB]
AStop	80 [dB]

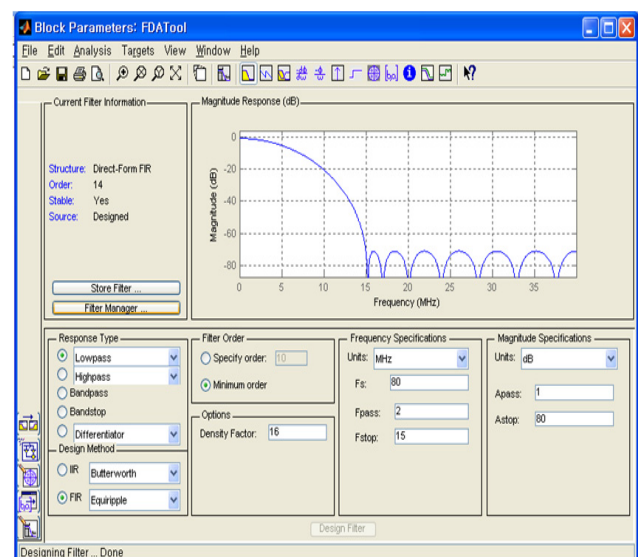


그림 5 Matlab을 이용한 FIR 필터 설계

Fig. 5 FIR LPF design using Matlab

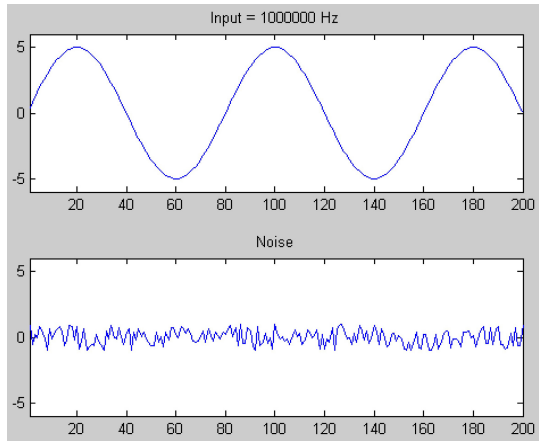


그림 6(a) 1MHz 입력 신호와 노이즈
Fig. 6(a) 1Mhz Input signal and noise

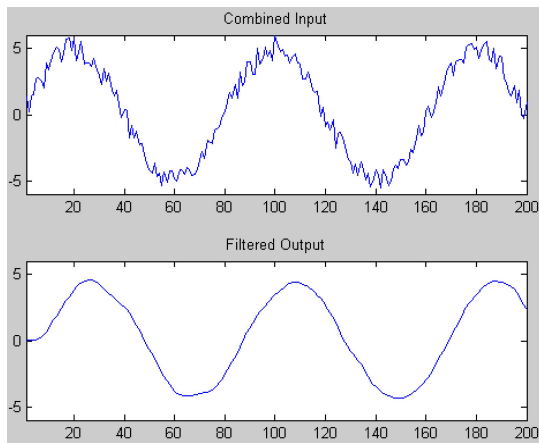


그림 6(b) 노이즈 결합 입력신호와 필터된 출력
Fig. 6(b) Combined with the noise Input and output signal

그림 7에 입력과 출력 주파수에 대한 스펙트럼 변화율 (PSD: Power Spectral Density)을 나타내었다. 주파수에 따른 이득변화가 고주파 영역으로 갈수록 노이즈가 감소함을 확인할 수 있다. 여기서 가로축은 주파수[Hz], 세로축은 Noise Power[dB]를 나타낸다.

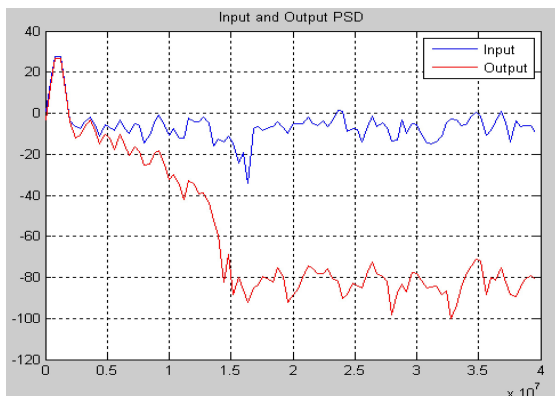


그림 7 입력과 출력 PSD
Fig. 7 Input and Output PSD

3. 실험 및 결과

그림 8에 시험 제작된 고주파 전력발생기의 실험 구성도를 나타내었다. 상용전원을 이용하고, 제작된 전력부와 디지털 제어회로를 통해 PC상에서 조작과 결과 확인을 하게 된다.

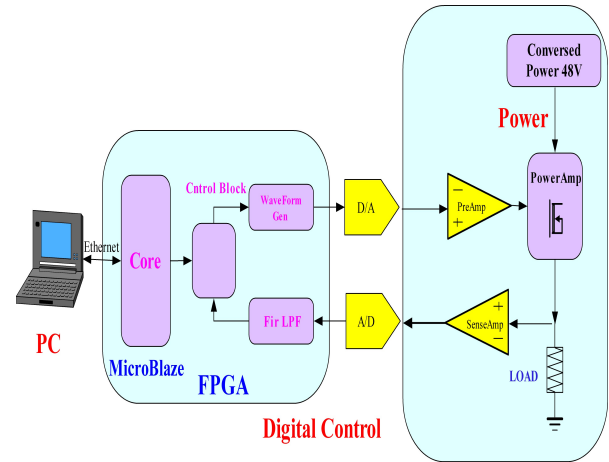
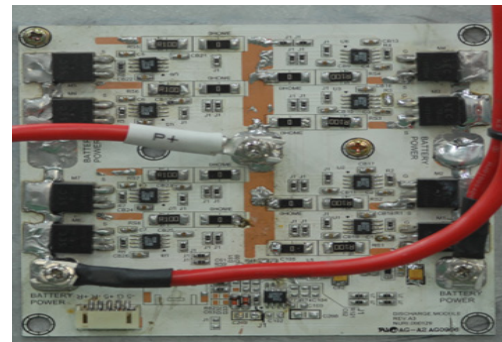
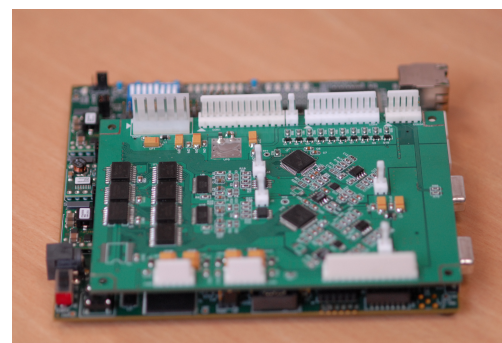


그림 8 시험 구성도
Fig. 8 Test block diagram

그림 9(a)와 (b)는 각 각 시험 제작된 고주파 전력 발생기의 Power Amp. 회로와 제어보드를 나타낸 사진이다.



(a) Power Amp.



(b) 제어보드

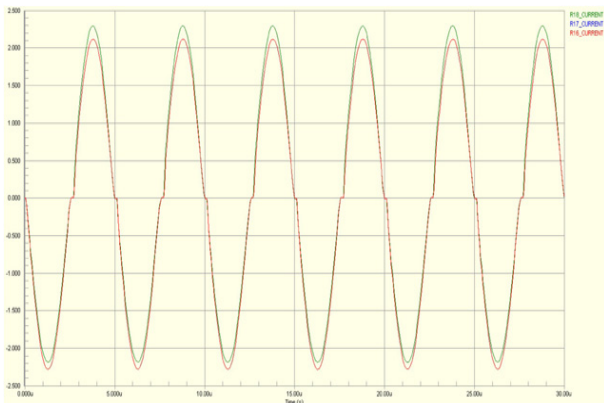
그림 9 시험 제작된 고주파 전력 발생기

(a) Power Amp. (b) 제어회로

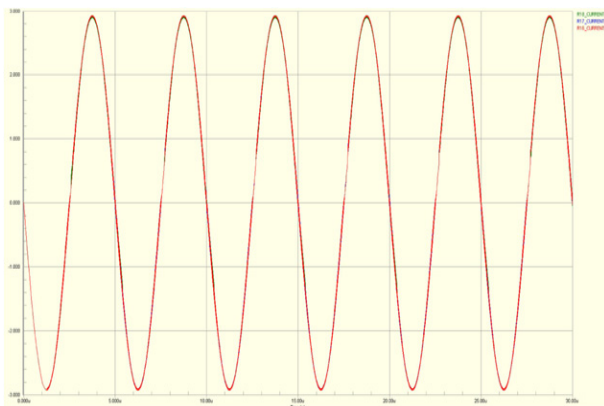
Fig. 9 A Prototype high-frequency power generation system

(a) Power Amp. (b) Control Board

그림 10(a)는 Power Amp.부에서 발생할 수 있는 전류 편차로 인한 출력 오차를 나타내고 있고, (b)는 제작된 시스템을 통해 출력전류 불평형이 완화된 그래프이다. 2.1결과 같이 특성이 서로 다른 MOSFET IRF540, IRF510 을 사용할 시, 개선 전 회로의 전류는 IRF540 은 3.0[A], IRF510 는 2.8[A]가 흘러, 200[mA]의 전류 불평형이 발생하지만, 전류 편차 개선 회로를 적용하면 IRF540 은 2.95[A], IRF510은 2.85[A]로 개선전의 회로에 비해 약 1/4에 해당하는 50[mA]로 개선시킬 수 있다. 출력 전류 RMS 오차 $\pm 0.2\%$ 이내가 된 것을 확인할 수 있다.



(a) 전류 불평형 개선전

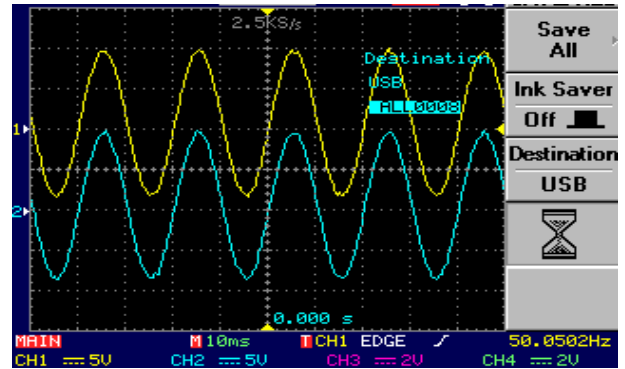


(b) 전류 불평형 개선후

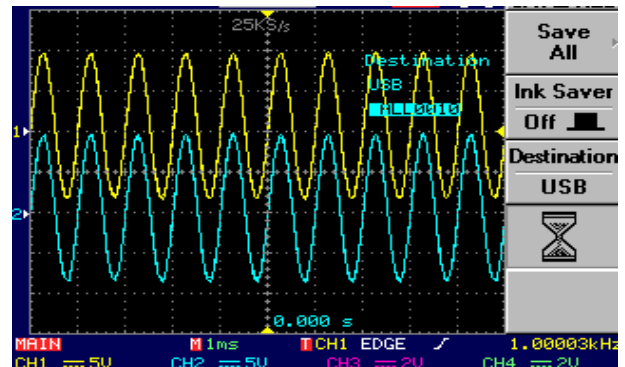
그림 10 불평형 개선 전후 비교

Fig. 10 A Comparisons of the current unbalancing of Proto-type system

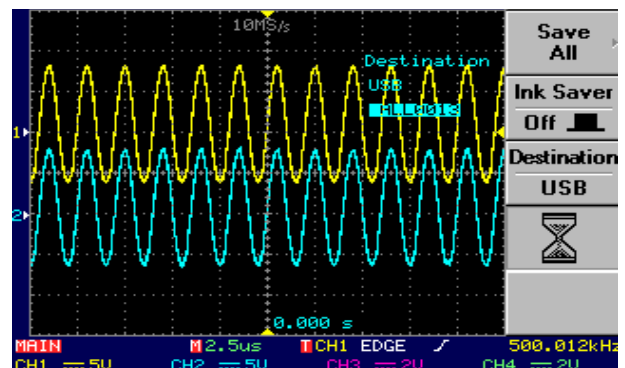
그림 11은 설계한 디지털 제어형 고주파 전력발생 시스템의 prototype 제작을 통해 실험한 결과로써, 출력 전압을 설정하여 목표로 한 주파수 범위 내에서의 신호 입출력 파형을 측정된 것이다. 그림 11(a)부터 (d)까지 10[V]/50[A] p-p 10[V]에서, 각 각 50Hz, 1KHz, 500KHz, 1MHz시의 사인파 입·출력 파형을 비교측정 하여 나타내었다. 50Hz부터 1MHz까지의 제어 주파수 범위로 파형 입출력이 가능함을 확인 할 수 있으며, 설계한 시스템 구현을 입증하였다.



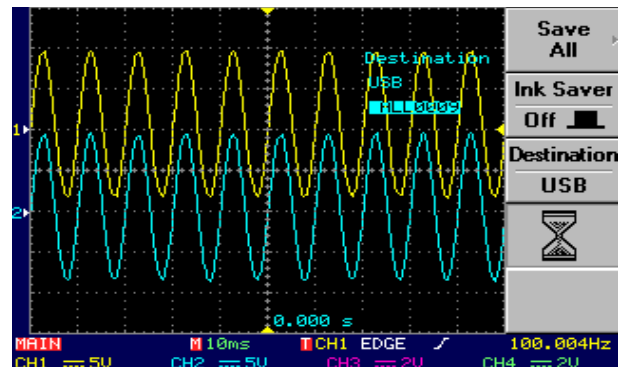
(a) 10V, 50Hz



(b) 10V, 1KHz



(c) 10V, 500KHz



(d) 10V, 1MHz

그림 11 신호 출력 파형 측정

Fig. 11 A waveform-measurement of Signal output

5. 결 론

본 연구는 각종 전기전자장치의 시험 및 성능 분석을 위해, 유연성 있는 디지털 제어시스템을 구성하여 보다 현실적이고 다양한 노이즈 전원을 포함하는 고주파전력 발생시스템 개발을 목적으로 하였다. 이를 위해 전력발생회로는 푸쉬 풀 증폭회로를 기본형으로 하는 고주파 전력발생회로를 제안하는 출력회로로 하였고, 모든 Data의 생성과 전송 시 제어의 용이성을 위해 FPGA를 코어로 하는 DSP로 디지털 필터 설계를 하였다. 범용 툴인 Matlab을 사용하여 LPF를 설계 함과 동시에, 제안된 시스템을 구현하여 성능도 입증하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- i) 종래에 사용하였던 Power Amp. 회로의 주스위치에 흐르는 전류의 불균형을 전류편차 개선회로로 균등 배분 시킴으로써, 장치의 신뢰도를 향상시켰다.
- ii) 고주파전력발생회로에 사용한 전체의 제어회로부 및 LPF 설계등을 디지털화 하여 유연성있는 시스템으로 설계하였다.
- iii) 출력전압 ($-40[V] \sim +40[V]$), 출력전류($0.1[A] \sim 4.999[A]$), 전압제어정확도 ($0.2[\%]$) 및 전류제어정확도($0.2[\%]$) DC ~ 1[MHz]의 제어주파수범위로 파형의 입·출력 이 가능한 시스템을 구현하였다.

상기의 연구결과로부터 제안한 고주파 전원발생장치의 성능 및 알고리즘이, SMPS를 비롯한 전력변환장치와 고주파용 변압기 그리고 2차 전지의 성능분석을 위한 시스템 등에서 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Shimizu, T. Kinjo, H., Wada, K, "A novel high-frequency current output inverter based on an immittance conversion element and a hybrid MOSFET-SiC diode switch", Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '03. 2003 IEEE 34th Annual Volume 4,
- [2] Abdipour, A and Moradi, G. and Saboktakin and S.; Design and implementation of a noise generator", RF and Microwave Conference, 2008. RFM 2008. IEEE International 2-4 Dec.2008 Page(s):472 - 474
- [3] Boland, J.; Yuan-Heng Chao; Suzuki, Y.; Tai, Y.C.; "Micro electret power generator", Micro Electro Mechanical Systems,2003. MEMS-03 Kyoto. IEEE The Sixteenth Annual International Conference on 19-23 Jan. 2003 Page(s):538 - 541
- [4] Li, Z.; Matsunaga, K.; Wang, D. "Development of Miniature Pulsed Power Generator", Pulsed Power Conference, 2005 IEEE 13-17 June 2005 Page(s):1053 - 1056
- [5] Lee, D.-U. and Villasenor, J.D. and Luk, W. Leong, P.H.W, "A hardware Gaussian noise generator using the Box-Muller method and its error analysis",

Computers, IEEE Transactions on Volume 55, Issue 6, June 2006 Page(s):659 - 671

- [6] 김금수, 문종현, 김동희, "장비시험용 고주파 전력발생장치 개발에 관한 연구", 대한전기학회 제41회 하계학술대회, 2010

저 자 소 개



김 동 희 (金東熙)

저자이력

1950년 11월 20일생 1973년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 Kobe 대학졸업(박사) 1987년~1989년 한국전기연구원 전력전자연구부장. 2000년9월~2001년 2월 국립 Kyushu대 교환교수. 현재 영남대 전기공학과 교수



김 금 수 (金錦秀)

저자이력

1961년 8월 21일생. 1984년 인천대 전자공학과 졸업. 1999년~현재(주)누리기술 대표이사, 2009년 8월 영남대학교 산업대학원 전기전자공학과 졸업(석사) 현재 영남대 대학원 전기공학과 박사과정



문 종 현 (文鍾現)

저자이력

1979년 5월 10일생. 2005년 영남대 전기공학과 졸업. 2009년 2월 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정