

반도체 메모리 검사를 위한 160 kV 엑스레이 전원 장치

신현범¹, 정우철², 안재범², 박장훈², 류홍제²
¹(주)썬크, ²중앙대학교

160 kV X-ray Power Supply for Semiconductor Memory Inspection

Hyeon-Beom Shin¹, Woo-Cheol Jeong², Jae-Beom Ahn², Jang-Hoon Park², Hong-Je Ryoo²
¹SEC Co.,Ltd, ²Chung-Ang University

ABSTRACT

본 논문에서는 Processing In Memory (PIM) 내부 Through Silicon Via (TSV) 검사용 엑스레이 시스템을 구성하는 고전압 DC 전원 장치에 대해 기술한다. 고전압 생성을 위해서 10 kV 급 고전압 절연형 변압기와 Cockcroft-Walton 배압 회로를 적용하였으며, 200 kV 이상의 고전압 절연 설계가 적용되었다. 엑스레이 선량은 관 전압과 지수 함수적인 관계이므로 안정적인 엑스레이를 조사하기 위해서는 낮은 리플률을 갖는 관 전압이 요구된다. 리플 저감을 위하여 높은 스위칭 주파수를 사용하고, 고주파 스위칭에 의한 발열을 저감하기 위하여 구성 소자들의 기생 성분을 활용하여 넓은 부하 범위에 대해 소프트 스위칭이 가능하도록 설계되었다. 본 논문에서는 전원 장치에 적용된 소프트 스위칭 토폴로지에 대한 분석과 시뮬레이션 및 실험 결과에 대해서 소개한다. 설계한 고전압 전원 장치는 시뮬레이션 및 엑스레이 튜브 부하를 이용한 실험을 통하여 30 kV~160 kV의 광범위한 고전압을 안정적으로 출력하는 것이 검증되었다.

1. 서론

최근 들어 인공지능 응용 영역이 확대되고 기술이 고도화됨에 따라 고성능 메모리가 요구된다. 이에 따라 고대역폭 메모리 반도체(HBM, High Bandwidth Memory)에 Processing in Memory (PIM) 기술을 적용한 HBM-PIM이 개발되었다. HBM-PIM은 기존 HBM의 오프-칩 메모리 솔루션보다 더 높은 처리 대역폭을 제공한다.^{[1], [2]} HBM-PIM 내부 Through Silicon Via (TSV)의 내부 결함 검사에는 엑스레이 시스템이 가장 적합하다.^[3]

메모리의 적층 수가 증가할수록 엑스레이 고투과력을 위해 높은 관 전압이 요구되며, 고품질 영상 취득을 위한 낮은 리플이 요구된다. 본 논문에서는 고전압 발생을 위해서 고전압 절연 변압기와 Cockcroft-Walton voltage multiplier (CWVM)가 적용되었으며, 낮은 리플을 위한 높은 스위칭 주파수가 적용되었다. 또한 고주파 스위칭에 의한 발열을 저감하기 위하여 고전압 변압기의 누설 인덕턴스를 활용하여 소프트 스위칭이 가능한 위상 천이 풀 브리지 (PSFB, Phase-Shifted Full Bridge) 컨버터를 적용하였다.

본 논문에서는 30 kV~160 kV, 0 μA~500 μA의 광범위 출력이 가능하고 낮은 리플률을 갖는 고전압 DC 전원 장치에 대해

다룬다. CWVM 기반의 컨버터 설계, 고전압 변압기 설계 그리고 광범위 출력에 대해 소프트 스위칭이 가능한 위상 천이 풀 브리지 컨버터 설계에 대해 기술한다. 전원 장치에 적용된 소프트 스위칭 토폴로지에 대한 분석과 시뮬레이션 및 실험 결과에 대해서 소개한다. 설계한 고전압 전원 장치는 시뮬레이션 및 엑스레이 튜브 부하를 이용한 실험을 통하여 광범위한 고전압을 안정적으로 출력하는 것이 검증되었다.

2. 엑스레이 전원 장치 설계

본 논문에서 설계된 엑스레이 전원 장치의 회로도를 그림 1에 나타낸다. 스위칭 회로부는 PSFB, 배압 회로부는 고전압 절연 변압기와 CWVM으로 구성되었다.

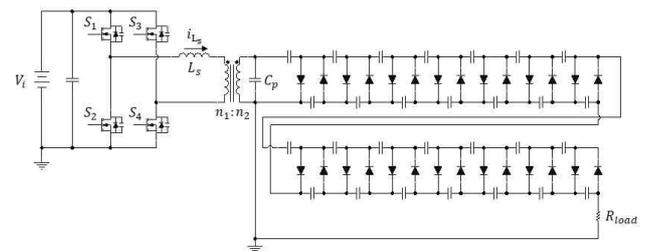


그림 1 엑스레이 전원 장치 회로
 Fig. 1 X-ray power supply circuit

2.1 위상 천이 풀 브리지 컨버터

PSFB 컨버터는 공진으로 인해 흐르는 전류를 이용하여 스위치의 출력 커패시터를 방전시켜 스위치의 양단 전압을 0 V가 되게 함으로써 영 전압 스위칭(ZVS, Zero Voltage Switching)을 할 수 있다. 하지만 토폴로지 특성상 낮은 출력 조건에서는 인덕터 전류가 작아지고 스위치의 출력 커패시터를 충분히 방전시키지 못하여 ZVS 조건 달성이 어려워진다. 데드타임을 늘려 방전 시간을 더 확보함으로써 ZVS 조건을 달성할 수 있도록 설계할 수 있지만, 위상 제어 범위가 줄어든다. 따라서 이러한 특성들을 고려하여 소자 선정 및 스위칭 파라미터 설계가 수행되었다.

2.2 배압 회로부

CWVM은 간단한 회로 구성으로 높은 전압비, 소형화의 이점을 얻을 수 있지만, 출력 전류가 증가할수록 출력 전압이 강

하하고 리플이 증가한다. 단 수를 증가시킴으로써 출력 전압을 증가시킬 수 있지만, 회로의 크기가 증가하고 출력 전압 리플도 증가한다. 본 논문에서는 스위칭 회로부의 스위칭 주파수를 증가시킴으로써 리플을 개선하였다.

CWVM만을 통해 목표 전압까지 승압을 하는 것은 회로의 크기, 구성 커패시터 용량, 리플률 등에 대해 한계가 있다. 따라서 CWVM 입력 전압 증가가 요구된다. 본 논문에서는 10 kV 급 고전압 절연 변압기를 사용하여 입력 전압을 증가시켰다. 사용된 고전압 변압기는 내절연을 만족하며 PSFB의 공진 요소로 사용될 수 있도록 설계되었다.

본 논문에서 설계된 배압 회로는 최대 160 kV까지 출력하는 것을 고려하여 200 kV 이상의 고전압 절연 설계가 적용되었다.

2.3 PSpice 시뮬레이션

그림 2와 같이 제안하는 160 kV 엑스레이 전원 장치를 PSpice 시뮬레이션을 통해 구현하였다. 그림 3(a)는 160 kV 출력 과도 구간의 시뮬레이션 결과 파형을 나타낸다. 전원 장치가 160 kV까지 출력할 수 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 160 kV 출력 및 정상 상태일 때 스위칭 회로부의 시뮬레이션 결과 파형을 나타낸다. 인덕터 전류가 스위치의 출력 커패시터를 방전시키고, 완전 방전된 시점에서 스위칭 되어 ZVS 동작을 하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(c)는 160 kV 출력 전압의 리플을 나타낸다. 리플률이 0.27 %인 낮은 리플률로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

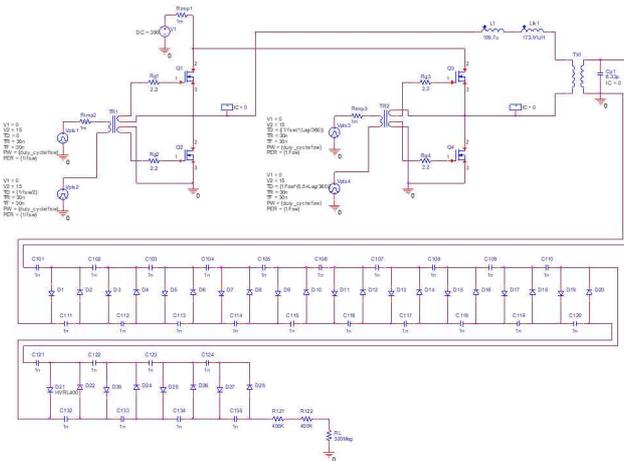
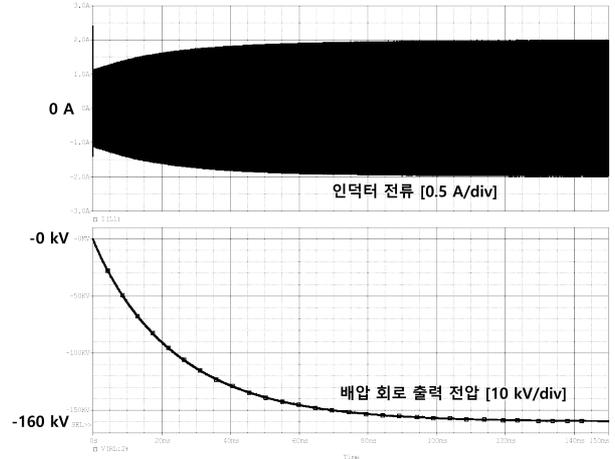
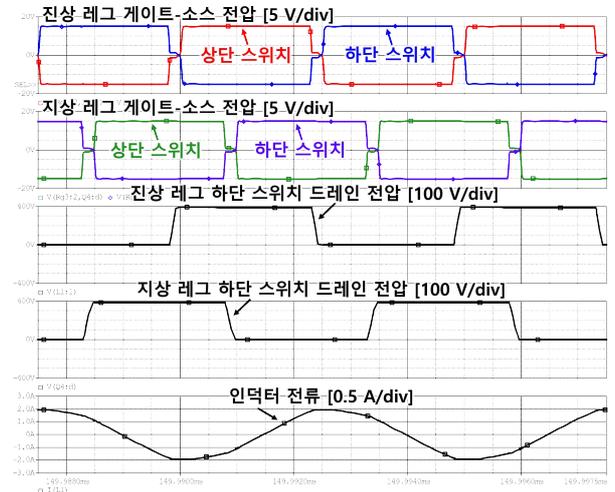


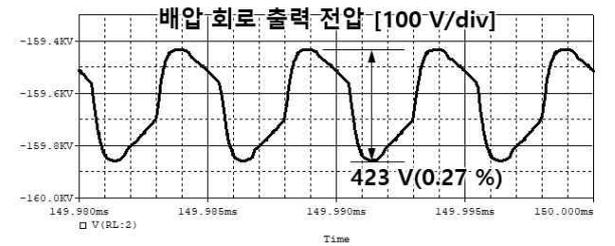
그림 2 PSpice로 구현한 160 kV 엑스레이 전원 장치
Fig 2. 160 kV X-ray power supply implemented with PSpice



(a) 0 kV to -160 kV 과도 구간



(b) -160 kV 출력 정상 상태의 스위칭 회로부



(c) 엑스레이 전원 장치 출력 전압 리플

그림 3 PSpice 시뮬레이션 결과 파형
Fig 3. PSpice simulation result waveform

3. 엑스레이 튜브 실 부하 시험

160 kV 엑스레이 전원 장치는 그림 4와 같이 제작되었다. 그림 4(a)는 스위칭 회로부의 모습을 보여준다. 배압 회로는 200 kV 이상의 고전압 절연을 위하여 절연체로 몰딩 되었으며, 그림 4(b)에서 몰딩 전 배압 회로의 모습, 그림 4(c)에서 몰딩된 배압 회로의 모습을 보여준다..

엑스레이 튜브 실 부하 시험은 그림 5와 같이 구성되었으며, 그림 6에 실험 결과를 나타낸다. 설계된 엑스레이 전원 장치 160 kV, 500 μ A를 출력하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 스위칭 회로부 모습

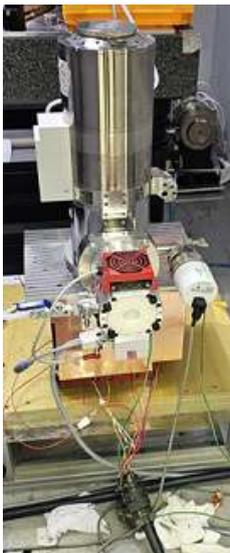


(b) 몰딩 전 배압 회로 모습

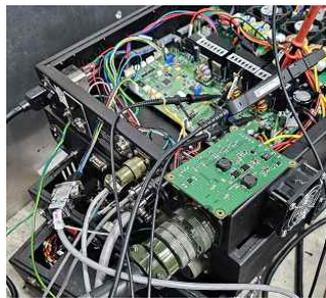


(c) 몰딩 된 배압 회로 모습

그림 4 제작된 엑스레이 전원 장치
Fig. 4 Fabricated X-ray power supply

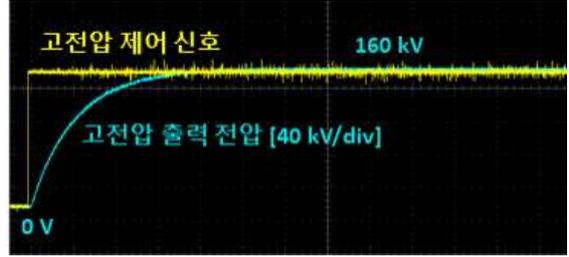


(a) 배압 회로(下) 및 엑스레이 튜브 실 부하(上) 연결 모습



(b) 스위칭 회로부 연결 모습

그림 5 엑스레이 튜브 실 부하 시험 구성
Fig. 5 X-ray tube real load test organization



(a) 엑스레이 전원 장치 출력 전압



(b) 엑스레이 전원 장치 출력 전류

그림 6 엑스레이 튜브 실 부하 시험 결과
Fig. 6 X-ray tube real load test result

3. 결론

본 논문에서는 반도체 메모리 검사를 위한 160 kV 엑스레이 전원 장치를 구현하였다. 160 kV의 높은 전압 출력을 위해 고전압 절연 변압기 및 CWVM의 고전압 절연을 고려한 설계가 수행되었고, 리플 저감 목적의 고주파 스위칭을 위해서 소프트 스위칭이 고려된 PSFB가 설계되었다. 설계된 엑스레이 전원 장치는 PSpice 시뮬레이션 및 엑스레이 튜브 실 부하 시험을 통해 검증되었다.

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2022-00155737)

참고 문헌

- [1] Y. C. Kwon, S. H. Lee, J. H. Lee, S. H. Kwon, J. M. Ryu, J. P. Son, et al. "A 20nm 6GB Function-In-Memory DRAM, Based on HBM2 with a 1.2TFLOPS Programmable Computing Unit Using Bank-Level Parallelism, for Machine Learning Applications", 2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), Vol. 64, pp. 350-352, 2021, February.
- [2] S. H. Lee, S. H. Kang, J. H. Lee, H. S. Kim, E. J. Lee, S. W. Seo, et al. "Hardware Architecture and Software Stack for PIM Based on Commercial DRAM Technology", 2021 ACM/IEEE 48th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), pp. 43-56, 2021, June.
- [3] J. Shen, P. Chen, L. Su, T. Shi, Z. Tang and G. Liao, "X-ray inspection of TSV defects with self-organizing map network and Otsu algorithm", Microelectronics Reliability, Vol. 67, pp. 129-134, 2016, December.