

광물 탐사를 위한 고효율 양극성 펄스전원장치 설계 및 실험

배정수*, 김신*, 유찬훈**, 김형석**, 김종수**, 장성록**
과학기술연합대학원대학교*, 한국전기연구원**

Design and testing of bipolar pulsed power supply with high efficiency for mineral exploration

Jung Soo Bae*, Shin Kim*, Sung Roc Jang**, Chan Hun Yu**, Hyoung Suk Kim**, Jong Soo Kim**

University of Science & Technology*, Korea Electrotechnology Research Institute**

ABSTRACT

본 논문은 광물 탐사용 25kW 양극성 펄스전원장치에 대해 기술한다. 고효율 LCC 공진형 컨버터와 풀 브리지 기반 바이폴라 펄스 스위칭부로 구성된 500V, 12.5A 단위 모듈을 설계한다. LCC 공진형 컨버터는 도전 손실을 줄이기 위해 사다리꼴 모양의 공진 전류를 갖도록 하고, 높은 전력 밀도를 달성하기 위해 변압기의 누설 인덕턴스를 공진 인덕턴스로 활용한다. 또한, 반복적인 짧은 펄스 기반으로 설계된 게이트 구동 회로는 DC에서 8kHz의 주파수 범위를 동작시키고 게이트 변압기의 사이즈를 줄이기 위해 제안된다. 개발된 양극성 펄스전원장치는 4개의 모듈이 직병렬로 결선되어 부하 조건에 따라 Grounded dipole mode (2kV, 12.5A) 또는 Loop mode (500V, 50A)로 동작한다. 네 모듈의 출력 전압 밸런싱을 충족시키기 위해 LCC 공진형 컨버터의 변압기에 보상권선이 감긴다. 본 논문에서는 양극성 펄스전원 장치의 상세설계에 대해 기술하고, 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 이를 검증한다.

1. 서 론

심부 대규모 광체의 탐사개발이 선진국을 중심으로 진행되고 있다.^[1-4] 상용화된 탐사용 펄스전원장치는 저주파 파워트랜스를 사용하고 입력전원과 파워변압기 사이에 사이리스터 브릿지 회로를 적용하였다. 결과적으로 이러한 전원장치들은 무겁고 크기가 커질 수밖에 없다. 탐사를 위한 전원장치는 이동하며 실험해야 되는 특성상 가볍고 전력밀도가 높은 설계가 요구된다.

개발된 전원장치는 높은 효율을 달성하기 위해 LCC 공진형 컨버터를 기반으로 설계한다.^[5-11] 보통 LCC 공진형 컨버터는 높은 스위칭 주파수로 동작하기 때문에 고주파 인버터와 정류부 사이의 파워 변압기 사이즈를 줄이고 파워 변압기의 기생성분을 공진 파라미터로 효율적으로 활용한다. 더 나아가 공진전류 모양을 사다리꼴 형태로 설계하여 rms전류를 낮춰 도통손실을 크게 줄인다.

LCC 공진형 컨버터 출력으로부터 DC에서 8 kHz까지 양방향 펄스전압을 부하에 인가하기 위해 간단한 풀브릿지 회로를 적용한다. 그러나 DC부터 8 kHz의 펄스를 변압기를 통한 설계는 어려움이 있다.^[12] 광신호를 이용하는 방법을 고려해볼 수 있지만 회로가 복잡해지고 가격이 비싸질 수 있다. 그러므로

반복적인 짧은 펄스를 이용한 쉽고 간단한 동작 방법이 제안된다. 본 논문에서는 앞에 제시된 장점을 실험을 바탕으로 모듈형 설계를 검증한다.

2. 광물 탐사용 양극성 펄스 전원장치 설계 및 실험

2.1 LCC 공진형 컨버터 기반 양극성 펄스전원장치 단위모듈 설계

표 1 광물 탐사용 전원장치 설계 파라미터

Table 1 Design parameters for mineral exploration power supply

AC 입력전압	380 Vac \pm 10%
DC 입력 정류전압	513 V \pm 10%
단일 모듈 최대 펄스 출력전압, 전류	500 V, 12.5 A
4모듈 직렬 최대 펄스 출력전압, 전류	2 kV, 12.5 A
4모듈 병렬 최대 펄스 출력전압, 전류	500 V, 50 A
최대 충전전력	25 kW
펄스 반복률	DC 8 kHz
최대 역률	0.96
최대 효율	95 %

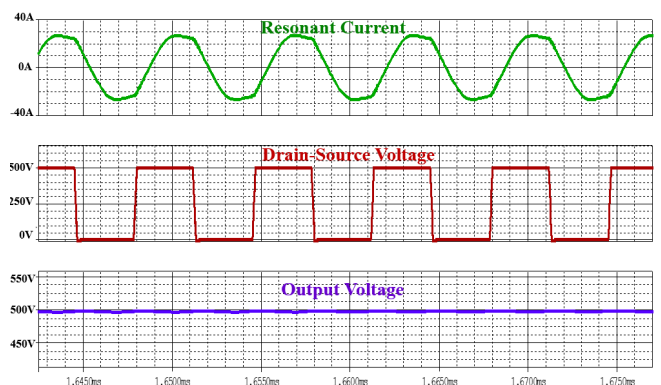


그림 1 단위 모듈 시뮬레이션 파형

Fig. 1 Simulation waveform of unit module

광물 탐사용 양극성 전원장치의 사양은 표1과 같다. 저전압 대전류로 동작하는 Loop mode를 만족시키기 위해서 4모듈이 병렬로 연결되어 500V 50A 출력을 내고, 고전압 저전류로 동작하는 Grounded dipole mode를 만족시키기 위해서 4모듈이 직렬로 연결되어 2000V 12.5 A 출력을 낸다.

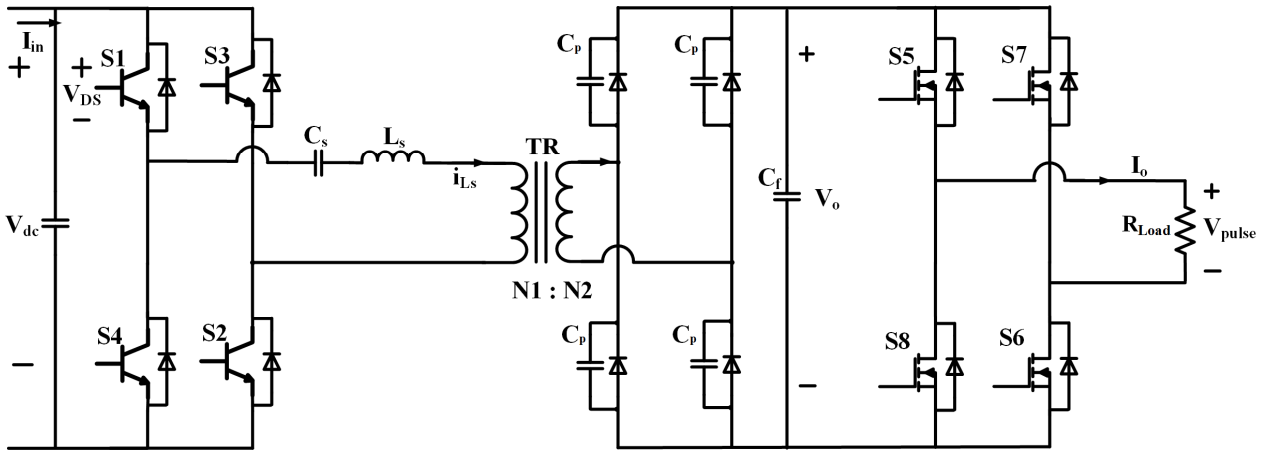


그림 2 전원장치 단위모듈 회로도
Fig. 2 Circuit of power supply unit module

이러한 탐사용 전원장치의 사양을 만족시키기 위해 DC DC 전력변환회로와 펄스부로 구성된 단위모듈은 그림 2와 같다. 설계된 파라미터를 바탕으로 그림 1와 같이 단일모듈 설계를 Pspice Simulation으로 검증하였다.

변압기 턴수 비를 의도적으로 강압형(21:18)으로 잡아 공진 전류는 사다리꼴 모양에서 살짝 기운형태로 설계되었다. 강압형 설계는 턴 오프 시점에서 스위칭 손실을 줄일 수 있고, rms 전류 값을 줄일 수 있어서 도통손실 측면에서도 장점을 가진다. 그러므로 lossless 스너버도 필요하지 않은 설계가 가능하다. 게다가 스위칭 손실의 저감은 스위칭 주파수를 더 증가시킬 수 있다는 것을 의미하므로 경부하 운전도 더 용이해질 수 있다. 하지만 사다리꼴 모양을 0에 가깝게 설계하면 하드스위칭이 발생할 수 있다. 이는 스위치의 아웃풋 커패시터가 충분히 충 방전 하지 못하게 되기 때문이다.

2.2 광물 탐사용 양극성 펄스 전원장치 실험 결과

시뮬레이션을 통해 검증된 파라미터를 바탕으로 광물 탐사용 전원장치 단위모듈 사양인 500V 12.5A 출력을 만족시키기 위해 40Ω의 정격 저항부하로 실험을 진행하였다. 그림 3과 같이 단위모듈의 성능을 정격 실험을 통해 검증하였고 공진전류, 메인 스위치 양단전압과 출력전압을 포함하고 있다.

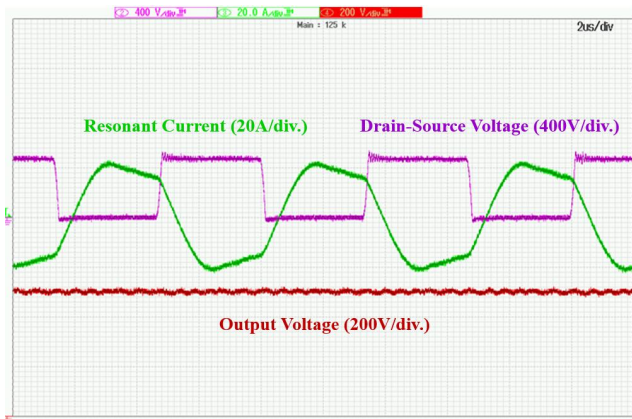


그림 3 정격 단위모듈 실험 파형
Fig. 3 Rated operation waveform of unit module

본 논문에서 제안된 양극성 펄스 전원 장치를 검증하기 위해 정격 부하저항(160Ω)으로 4 모듈 직렬 실험을 진행하였고 실험 결과에 따라 2000V 12.5A 출력을 확인하였다. 공진형 컨버터는 전류원 특성을 가지기 때문에 4 모듈을 직렬로 연결하였을 때 언밸런스가 발생한다. 이 언밸런스 문제를 해결하기 위해 보상 권선이 메인 변압기의 2차측에 각각 병렬로 연결되었다. 그림 4와 같이 4 모듈의 출력이 모두 동일한 것을 확인 할 수 있다. 일반적으로 4개의 공진형 컨버터 출력을 조절하기 위해서는 개별 제어기가 각각의 컨버터를 제어해야 된다. 제안된 전원장치는 하나의 제어기로 부터 각각의 컨버터로 제어신호를 전달하고 보상권선으로 출력을 보상한다.

그림 5와 같이 8kHz의 주파수로 4모듈 직렬 양극성 펄스 실험이 수행되었다. 펄스 동작은 50%의 듀티비를 가지기 때문에 전력소비는 DC 동작의 절반 정도이다. 실험파형은 2kV 출력이 나오는 것을 확인 할 수 있고 각각의 모듈의 전압 밸런스가 잘 이루어진다.

그림 6은 펄스 부를 연결하지 않은 컨버터 효율과 펄스 부를 연결하고 DC 실험을 통해 측정된 효율을 나타낸다. LCC 공진형 컨버터는 25 kW 정격 운전 시 95% 효율을 달성했다. 따라서 펄스 스위칭 부의 전력 손실은 1%(250W) 이다. 또한 출력 전력의 절반 조건에서 효율을 측정하기 위해 320Ω의 부하로 실험을 수행하였다. 절반 조건의 효율은 92.86%이다.

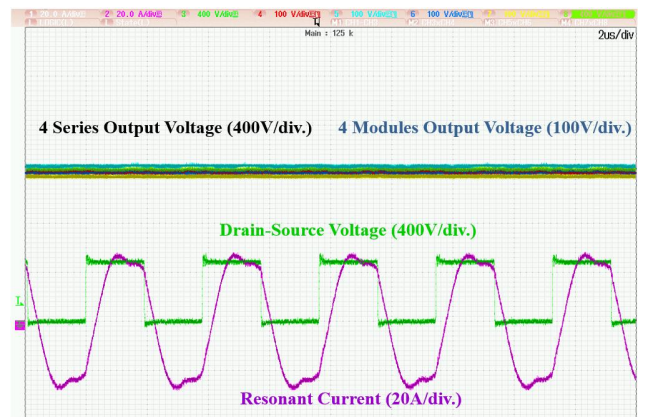


그림 4 정격 4 모듈 직렬 실험파형
Fig. 4 Rated operation waveform with 4 modules series connection

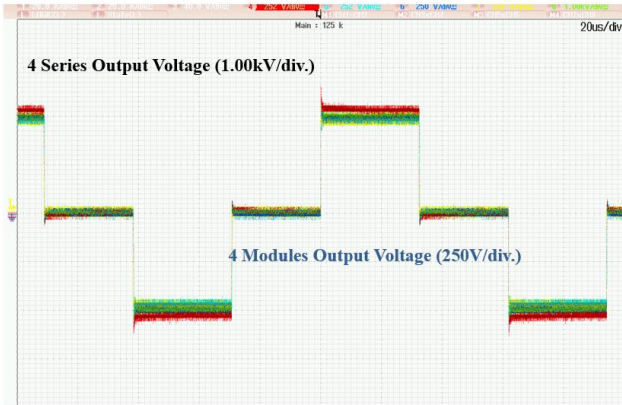


그림 5 정격 4 모듈 직렬 양극성 펄스 실험 파형
 Fig. 5 Rated bipolar pulse operation waveform with 4 modules series connection

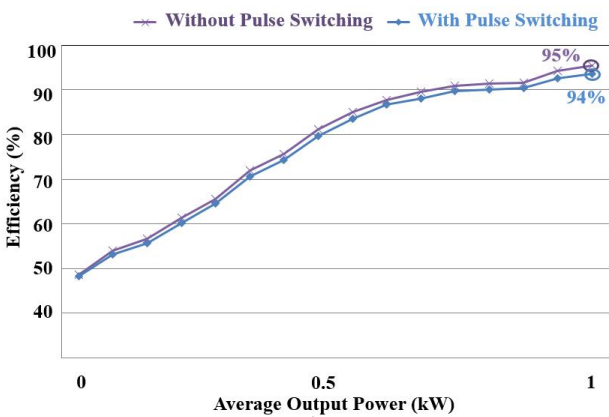


그림 6 출력에 따른 효율 곡선 그래프
 Fig. 6 Efficiency waveform

3. 결 론

본 논문은 전라광물 탐사를 위한 25kW급 양극성 펄스전원장치구동을 위한 단일모듈 설계 및 실험을 기술하였다. Loop mode (500V, 50A)와 Grounded dipole mode (2000V, 12.5A)에 따라 4개의 단위모듈이 병렬 혹은 직렬로 연결된다. 사다리꼴 모양의 공진 전류 설계를 바탕으로 고효율 설계가 이루어졌다. 4 모듈의 공진형 컨버터에 보상권선을 이용하여 하나의 제어기로 출력의 전압 밸런싱을 이루었다. 마지막으로 단위모듈과 모듈 간 연결 실험 결과는 개발된 전원장치의 높은 효율과 역률을 증명한다. 이로써 개발된 탐사용 양극성 펄스전원장치의 우수성과 타당성을 검증하였다.

이 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업임(No. 18 12 N0101 32)

참 고 문 헌

[1] ZONGE GGT 30 GEOPHYSICAL TRANSMITTER MAINTENANCE and REPAIR MANUAL, Zonge International, Tucson, AZ, USA, June 2001
 [2] POWERSTING™ External Transmitters, Advanced

Geosciences, Austin, TX, USA.
 [3] VIP 10000, Iris Instruments, 1 Avenue Buffon, Orléans, France.
 [4] 배정수, 장성록, 유찬훈, 김형석, 김종수, "전라광물 탐사를 위한 양극성 펄스전원장치 설계", 전력전자학술대회논문집, 2017. 07, 90 91
 [5] J. W. Gong, H. J. Ryoo, S. H. Ahn and S. R. Jang, "Design and Implementation of a 40 kV, 20 kJ/s Capacitor Charger for Pulsed Power Application," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 11, pp. 3623 3632, Nov. 2014.
 [6] A. J. Gilbert, C. M. Bingham, D. A. Stone and M. P. Foster, "Normalized Analysis and Design of LCC Resonant Converters," in IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 6, pp. 2386 2402, Nov. 2007.
 [7] T. B. Soeiro, J. Mühlethaler, J. Linnér, P. Ranstad and J. W. Kolar, "Automated Design of a High Power High Frequency LCC Resonant Converter for Electrostatic Precipitators," in IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 11, pp. 4805 4819, Nov. 2013.
 [8] M. C. Tsai, "Analysis and implementation of a full bridge constant frequency LCC type parallel resonant converter," in IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 141, no. 3, pp. 121 128, May 1994.
 [9] H. I. Sewell, M. P. Foster, C. M. Bingham, D. A. Stone, D. Hente and D. Howe, "Analysis of voltage output LCC resonant converters, including boost mode operation," in IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 150, no. 6, pp. 673 679, 7 Nov. 2003.
 [10] A. J. Gilbert, D. A. Stone and C. M. Bingham, "Rapid design of LCC current output resonant converters with reduced electrical stresses," in Electron. Letters, vol. 41, no. 6, pp. 365 366, 17 March 2005.
 [11] S. R. Jang, C. Yu and H. J. Ryoo, "Trapezoidal Approximation of LCC Resonant Converter and Design of Multi Stage Capacitor Charger for Solid State Marx Modulator," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. PP, no. 99, pp. 1 1.
 [12] S. Bae, A. Kwasinski, M. M. Flynn and R. E. Hebner, "High Power Pulse Generator With Flexible Output Pattern," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 7, pp. 1675 1684, July 2010.