

수 초 지속 40 kV, 280 kW 고전압 펄스전원장치 개발

김성철*, 남상훈*, 허 훈*, 공형섭*, 문 철**, 김정호***, 오승섭***, 양중원****, 소준호****
 포항가속기연구소*, 부산대학교**, LIG 넥스원***, 국방과학연구소****

Development of Few-second 40 kV, 280 kW High Voltage Pulse Power Supply

S. C. Kim*, S. H. Nam*, H. Heo*, C. Moon**, J. H. Kim***, S. S. Oh***, J. W. Yang****, J. H. Sho****
 Pohang Accelerator Laboratory*, Pusan National University**, LIG Nex1***, ADD****

Abstract - To drive a magnetron injection gun, this paper describes a design, fabrication and analysis results of proposed compact capacitor charging power supply (CCPS) formed resonant full-bridge inverter for electron gun power supply (EGPS). EGPS needs the -40 kV output voltage and 280 kW output power for few seconds continuously and have to be designed for the rise and fall time to be less than 1 ms with the ripple stability of output voltage of lower than 1%. In order to meet the requirements, we used eight resonant full-bridge modules operated in parallel. Each resonant full-bridge module can supply the current of 0.9 A and the voltage of 40 kV, and is operated by N-phase shift switching pattern. In this paper, we present the design, simulation and test results of interleaved CCPS.

과정은 마스터 제어기에서 나오는 광신호를 통한 외부 정지 명령에 의해서도 제어된다. 이 마스터 제어기는 외부 또는 시스템 제어기의 제어를 받는 8대의 CCPS를 통제한다.

1. 서 론

Magnetron injection gun은 고전압 고출력을 필요로 하며 이러한 시스템은 고안정도를 요하는 전원장치가 필요하다 [1-2]. 또한 진공 튜브의 작동 특성 중 중요한 요건인 빠른 턴온/턴오프가 요구되며 특히 턴 오프 시간은 고장으로부터 진공 튜브의 안쪽을 보호하기 위하여 가능한 짧은 시간이 필요하다. 진공 튜브의 출력 특성은 직접적으로 고전압 전원장치의 출력과 관련이 있으며 낮은 리프올과 같은 출력 특성이 요구된다. 매우 뛰어난 성능을 요구하는 레이저 시스템, 가속기 그리고 펄스 플라즈마 등등에서는 capacitor charging power supply (CCPS)를 이용한 방법들이 일반적으로 제안된다 [3]. 본 논문에서는 빠른 턴 온/오프 시간을 위해 커패시터 용량을 고려하였으며 요구사항을 충족하는 CCPS를 제작하였다. -40 kV, 7 A의 전자총 전원장치 (이하 EGPS)의 상세한 설계와, 시뮬레이션, 시험 결과를 기술하였다.

2. 본 론

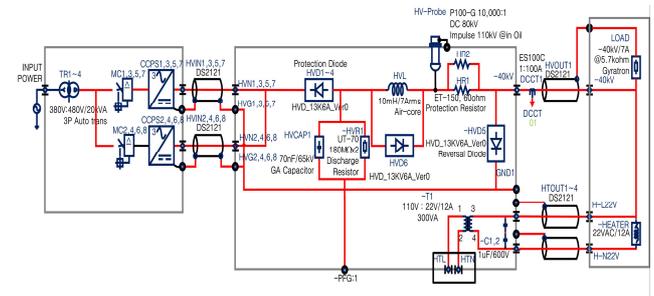
2.1 Electron Gun Power Supply

표 1은 electron gun power supply (EGPS)의 설계사항을 보여준다. 최대 출력 전압의 -40 kV, 최대 출력 전류는 7 A, 이에 따라 최대 출력 파워는 280 kW 이고, 전체적인 시스템 효율을 80% 이상이라고 가정하면, 입력 파워는 350 kW가 필요로 하게 된다. 최대 출력 전압의 안정도는 ±1% 이하이며, 이것은 피크 대 피크 리플 전압이 800 V 이하인 것을 의미한다.

<표 1> EGPS 설계사항

최대 출력 전압	-40 kV
최대 출력 전류	-7A
펄스 길이	≥ 1s
펄스 반복 기간	≤ 13s
최대 출력 전압 안정도	±1%

그림 1은 디자인 된 시스템 블록 다이어그램을 보여준다. 시스템은 CCPS, 펄스 탱크, 마스터 제어기와 외부 또는 시스템 제어기로 구성 되어있다. 외부 또는 시스템 제어기로 제어되는 EGPS 시스템은 -40 kV의 전압을 음극과 양극 사이에 공급할 수 있다. CCPS 파트는 7 A 전류와 -40 kV를 공급할 수 있도록, 병렬로 연결된 8대의 CCPS로 구성 되어 있다. 각각의 CCPS는 0.9 A 전류와 -40 kV 출력 전압을 공급할 수 있다. 이 CCPS의 충전



<그림 1>. 전자총 전원장치의 시스템 블록 다이어그램

2.2 capacitor charging power supply

Capacitor charging power supply (CCPS)의 일반적인 전압 사이클은 충전, 지속, 그리고 방전 영역으로 구분한다. 펄스 파워 시스템에서 중요한 역할을 가지는 CCPS의 성능은 작동 주파수, 충전 시간, 방전 시간, 입출력 효율을 고려하여 디자인 한다. 그 중 ccps의 핵심은 짧은 시간에 큰 용량의 커패시터를 명령에 따라 충전과 방전을 계속하는 것이다.

8개의 CCPS는 공진형 풀브리지 인버터로 구성한다. 풀브리지 인버터는 프리윙틀 다이오드를 갖는 4개의 IGBT 스위치를 갖는다. 변압기는 1:85 턴 비율을 가지는 고전압 승압형 변압기이며 턴 비율은 각 모듈마다 -40 kV의 출력 전압과 0.9 A의 출력 전류를 가능하게 한다. 시스템은 일정시간 원하는 출력을 얻기 위해 PI 제어기를 가지는 PWM 스위칭 방식을 사용하였다. 돌입 역 전류로부터 시스템을 보호하기 위해 역 전압 보호용 다이오드를 사용하였다.

여기서 공진인덕턴스 4.71 μH, 공진 커패시턴스는 3 μF이며 공진 주파수는 42 kHz로 정하였다. 공진 주파수와 스위칭 주파수의 관계에 따라 불연속 운용이 된다는 것을 알 수 있다. 전원 장치는 AC 정류기, 입력 필터, 풀브리지, 승압 변압기, 그리고 공통 커패시터로 구성된다. 인가 전압을 3상 다이오드를 걸쳐 정류하였다. 정류한 전압은 전압의 안정화를 위하여 LC 입력 필터를 통해 커패시터에 충전된다 충전된 직류 전압은 IGBT 스위치를 이용한 LC 공진형 풀브리지 인버터를 통해 부하로 흐르게 된다.

2.3 시뮬레이션 및 실험결과

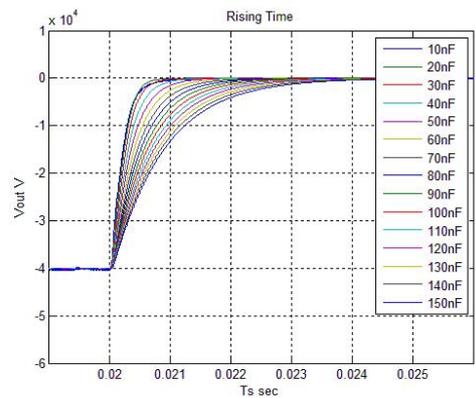
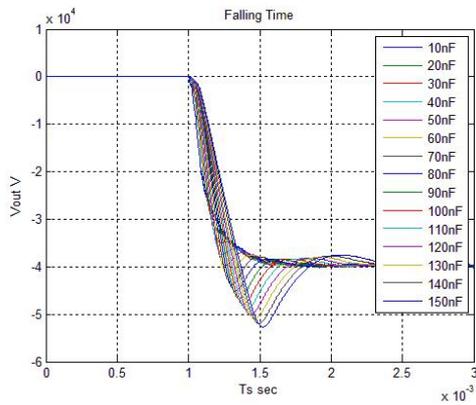
CCPS의 입력전압은 고출력의 안정성을 유지하기 위해서 공통 전압을 공유한다. 단락과 같은 고장이 발생 시 부하에 에너지를 최소화 하는 용량의 커패시터를 결정했다. 시뮬레이션 순서는 다음과 같다. 시뮬레이션 결과를 통해 출력 전압 리플을 최소화하기 위한 N-위상 시프트 스위칭 방식을 사용하였다. 그리고 나서, 시뮬레이션에서 충전 성능에 대한 상승시간과 하강시간을 최소화 하는 방향으로 부하 커패시터 값을 조절하였다. 마지막으로 CCPS의 성능을 확인하였다.

표 2는 서로 다른 N-위상 시프트를 이용하여 상호 비교 하였다. CCPS를 네개씩 두 묶음 (2-위상 시프트 180°), 두 개씩 네 묶음 (4-위상 시프트 90°), 한 개씩 여덟 묶음 (8-위상 시프트 45°)로 구분하였다.

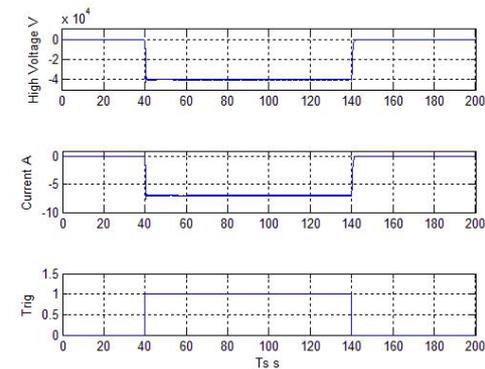
<표 2> N-위상 시프트 스위칭 상호비교

페이지 시프트 스위칭 위상	리플 비율
180°	± 9.83 % (± 7861.38 v)
90°	± 2.66 % (± 2125.17 v)
45°	± 0.86 % (± 686.16 v)

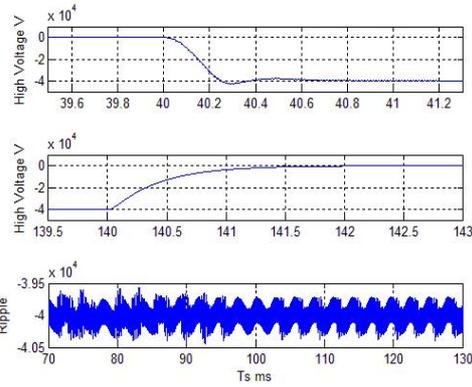
그림 2는 커패시터의 용량을 10nF에서 150nF까지 출력 전압의 상승시간과 하강시간을 보여준다. 트리거 신호는 1ms에서 발생시키고 20ms에서 제거했다. 그림에서 언더슈트는 커패시터의 용량에 직접적으로 비례하여 증가한다는 것을 알 수 있고 또한 상승/하강 시간은 커패시터의 값과 상관관계가 있다는 것을 보여준다. 그림 4는 앞서 결과들의 바탕으로 하는 최종적인 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 4(a),(b)의 과도 상태에서의 출력전압 및 정상상태 출력 전압을 보여준다. 하강시간은 154.7us, 상승시간은 882.6us 그리고 방전시 정착시간은 636.1us 이다. 전압 응답 특성은 -40.236 kV에서 -39.764 kV 사이이며 평균적인 출력 전압은 -39.999 kV, 리플 비율은 ± 0.5905% 이다.



<그림 2> 하강시간, 상승시간을 확인하기 위한 전압응답



(a)



(b)

<그림 3> 출력전압과 전류의 시뮬레이션 결과

CCPS의 성능을 테스트하기 위해서 펄스 응답 실험을 하였다. 실험에서 사용한 시스템의 스펙은 시뮬레이션과 동일하다. 그림 4은 0.5초 동안 트리거 신호가 제거기에 의해 발생할 때의 전압 응답 특성을 보여준다. 그림 4의 위에서부터 전압 응답 파형, 트리거 신호, 그리고 출력 전압 파형의 증상을 확대한 것으로 파형의 리플을 확인하였다. 지령치 전압은 -40 kV이며 실제 발생한 전압의 평균 전압은 -40.089 kV이다. 출력 전압의 리플은 -40.172 kV와 -40.005 kV 사이로 평균적인 리플 전압은 164.7 V(=0.205%)으로 요구사항에 적합하도록 디자인 되었다는 것을 증명한다.



<그림 4> 출력 전압 테스트 결과(-40kV 0.5초)

3. 결 론

본 논문에서는 EGPS를 작동을 위한 -40 kV, -7 A를 발생하는 CCPS를 디자인하고 제작하였다. 적절한 턴온과 턴오프 시간을 위해, 차징 커패시터를 최적화했다. 테스트 결과, 부하 커패시터의 전압은 -40 kV 그리고 출력 전류는 -7A를 발생하였다. 8 개의 CCPS를 결합한 EGPS는 요구되는 출력전압과 출력 전류를 충족하며 안정도 또한 뛰어나다.

[참 고 문 헌]

[1] J. Alex, et al, "A new prototype modulator for the European XFEL project in pulse step modulator technology", Proceedings of PAC09, pp. 1075-1077, 2009.
 [2] G. Taddia, et al, "Main high voltage solid state gyrotron power supply 60kV/80A", Proceedings of FEL2006, pp. 633-636, 2006.
 [3] A.C.Lippincott, R.M.Nelms, M.Garbi, and E.Strickland, "A series resonant converter with constant on-time control for capacitor charging applications," Proc. Applied Power Electronics Conf., pp.147-154, March 1990.