

전열화학추진용 2.4MJ 펄스파워전원의 설계와 동작특성(I)

진 윤식, 이 홍식, 김 중수, 조 주현, 임 근희, 김 진성\*, 추 중호\*, 정 재원\*, 함 동원\*\*  
 한국전기연구소, \*국방과학연구소, \*\*영남대학교

Design and Operation Characteristics of 2.4MJ Pulse Power System for Electrothermal-Chemical(ETC) Propulsion(I)

Y.S.JIN, H.S.LEE, J.S.KIM, K.H.RHIM, J.S.KIM\*, J.H.CHU\*, J.W.JUNG\*, D.W.WHANG\*\*  
 KERI, \*ADD, \*\*Yeung-Nam Univ.

**Abstract** - As a drive for an ETC (Electrothermal Chemical) launcher, a large pulse power system of a 2.4MJ energy storage was designed, constructed and tested. The overall power system consists of eight capacitive 300kJ energy storage banks. In this paper we describe the design features, setup and operation test result of the 300kJ pulsed power module.

Each capacitor bank of the 300kJ module consists of six 22kV 50kJ capacitors. A triggered vacuum switch (TVS-43) was adopted as the main pulse switch. Crowbar diode circuits, variable multi-tap inductors and energy dumping systems are connected to each high power capacitor bank via bus-bars and coaxial cables. A parallel crowbar diode stack is fabricated in coaxial structure with two series 13.5kV, 60kA avalanche diodes. The main design parameters of the 300kJ module are a maximum current of 180kA and a pulse width of 0.5 - 3ms. The electrical performances of each component and current output variations into resistive loads have been investigated.

은 개별적으로, 동시에 또는 순차적으로 스위칭 할 수 있도록 설계되어 있다[1][2]. 300kJ 각 모듈의 주요 핵심부분들로는 6개의 50kJ, 22kV 펄스파워 커패시터, 3개의 동축형 크로우버 스택, 1 개의 TVS 스위치 (Triggered Vacuum Switch) 그리고 펄스생성을 위한 인덕터를 들 수 있으며, 기타 부속장치로서 고압 릴레이, 전압 전류 측정 센서류, 에너지 덤프저항 등이 있다.

1. 서 론

물체를 초속 수 km/sec 속도로 가속시키는 기술로서 전자력추진, 전열추진, 전열화학추진 등의 방법들이 1970년대부터 연구되어 왔다. 이러한 물체 가속 연구는 핵융합장치의 연료투입에서부터, 군사적 응용, 우주선의 발사시의 초기 가속등 다양한 분야에 응용되어 왔으며 또한 새로운 응용분야가 개척되고 있다.

본 논문에서는 전열화학추진 가속기(ETC Launcher) 용 2.4MJ 전원 장치의 구성에 대해서 소개하고, 2.4MJ 시스템을 구성하는 8개의 300kJ 모듈 구성품들의 동작특성에 대하여 실험한 결과에 대해서 보고한다. 또한 저항모의부하를 이용한 300kJ 모듈의 총방전 동작특성과 2개의 모듈을 병렬로 운전하여 펄스생성 실험을 실시한 결과에 대하여 보고한다.

2. 시스템의 구성

2.1 2.4MJ 펄스파워시스템의 개요

2.4MJ 파워 시스템의 회로 다이어그램을 그림 1에 보인다. 전체 시스템은 크게 8개의 커패시터 बैं크 모듈과 고압충전 전원, 제어시스템으로 이루어져있다. 펄스생성에 있어서의 유연성을 최대한 하기 위해서 2.4MJ 커패시터 बैं크는 독립적으로 제어 가능한 8개의 독립적인 300kJ 모듈로 구성하였다. 즉 넓은 범위의 펄스형태, 피크 전류, 펄스 폭 등이 얻어질 수 있도록 각 모듈

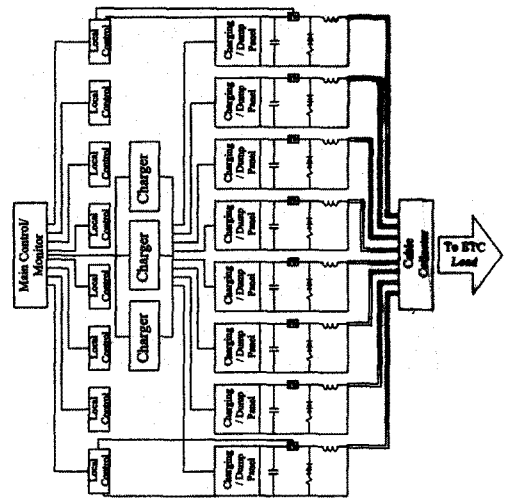


그림 1 2.4MJ 펄스파워시스템의 회로 구성도

충전전원으로서 3대의 30kV 고압충전기(Maxwell #CCS10030PI0000D)를 사용하였다. 이들 충전기들은 충전시간을 단축하기 위해서 병렬운전이 가능하도록 설계되었다. 노이즈의 차단과 고압에 대해서 보호하기 위하여 제어시스템은 광 화이버를 통해서 커패시터 बैं크와 연결되었다. 제어시스템은 커패시터 충전전압, 충전스위치와 덤프스위치의 ON/OFF상태, 기타 접지불과 커패시터 बैं크 수납용 컨테이너 문의 상태 등을 모니터링한다. 또한 커패시터의 충전전압, TVS의 통전 접화시간, 충전스위치와 덤프스위치의 ON/OFF 동작 등을 제어시스템을 통하여 제어할 수 있도록 전체시스템을 구성하였다.

2.2 300kJ 펄스파워 모듈의 구성 및 특성

그림2에 300kJ 모듈의 회로구성도를 보이고, 그림 3에 실제로 제작된 300kJ 모듈의 모습을 보인다. 300kJ 모듈을 구성하는 부품들의 상세한 사양 및 설명은 참고문헌 3을 참고하기 바라며, 여기서는 간단하게 시스템의 각 구성품 및 특성에 대해서 설명하고자 한다.

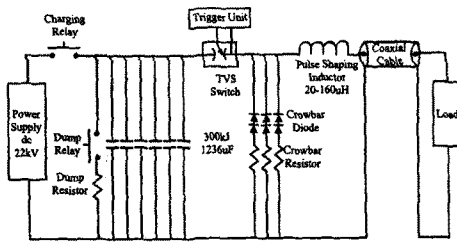


그림 2 300kJ 모듈의 회로도

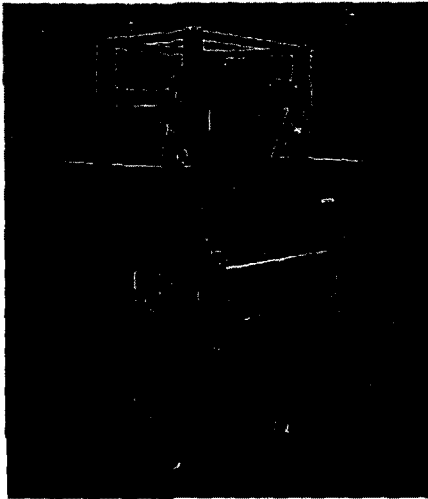


그림 3 완성된 300kJ 모듈의 모습

6개의 50kJ, 22kV 커패시터(Maxwell 모델번호 32820)는 병렬로 연결하여 합계 1236uF의 용량이 되며, 커패시터의 외함은 알루미늄 프레임과 전기적으로 절연이 되도록 하였다. 6개의 커패시터 양극은 하나의 구리판에 모여져 TVS 스위치의 양극에 연결된다. TVS 스위치(VEI, RVU-43)는 5kV, 1kA의 트리거 발생기에 의해 트리거되어 200kA의 전류를 수 msec동안 흘릴 수 있으며, 내전압도 25kV 이상이므로 본 시스템에 매우 적합한 스위치이다. 이 TVS는 통전시 스위치 내부의 아크를 안정화시키기 위해서 실린더형의 구리 케이스와 동축으로 설치하여 사용하였다. 커패시터의 전압 압전을 방지하기 위한 크로우버 회로는 TVS 스위치 후단과 커패시터의 음극에 병렬로 연결된 3개의 동축형 크로우버 스택으로 구성하였다. 각 크로우버 스택은 직렬로 연결된 2개의 11kV, 60kA 다이오드와 병렬로 연결된 2개의 디스크형 저항(HVR, 110mΩ)으로 구성되어 있다. TVS 스위치의 후단은 고압동축케이블을 이용하여 펄스 성형 인덕터에 연결된다. 인덕터는 Jelly-Roll 형이며, 펄스성형의 자유도를 높이기 위해서 20uH, 40uH, 80uH, 160uH의 4개의 단자를 준비하였으며, 통전시 발생하는 전자기력에 의한 요동을 방지하기 위하여 인덕터 케이스에 설치하였다(그림 3에서 프레임 위쪽에 설치된 부분). 인덕터 자체는 대전류 및 고압필스에 견딜 수 있도록 기계적으로 견고해야 하며 절연성이 좋아야 하는데 시험결과 160kA의 대전류에 대해서 기계적 변형이 없었으며, 22kV의 고압에 대해서도 절연파괴는 일어나지 않았다.

충전기로는 정전류형 30kV 10kW 3대를 병렬로 연결하여 사용함으로써 8개의 커패시터 뱅크를 완전히 충전하는데 80초가 걸리도록 하였다. 충전 및 에너지 덤프용 스위치로는 EMI에 의한 오동작을 방지하고 절연 내력을 높이기 위하여 공압구동의 릴레이를 사용하였다. 에너지 덤프 저항으로는 2kW, 25kΩ 권선저항 10개를 병렬로 연결하여 300kJ의 에너지를 시정수 3.5sec로 안전하게 방전시킬 수 있도록 하였다. 아래의 표 1에 300kJ 펄스파워 모듈 구성품의 주요사양을 요약 정리하였다.

표 1 모듈 구성품의 주요사양

**Electrical Specification**

- Stored Energy 300kJ
- Charge Voltage 22kV
- Capacitance 1236uF
- Pulse Shaping Inductance 20-160uF
- Peak Output Current 180kA

**Key Components**

- Capacitors 22kV, 206uF (Maxwell)
- Inductors 20uF, 40uF, 80uF, 160uF
- TVS Output Switch >200kA, > 8MJ/Ω (VEI, TVS43)
- Trigger Generator 5kV, 1kA
- Crowbar Diode 11kV, 60kA, 5MJ/Ω (2series, 3parallel) (ABB 5SDA27Z1350)
- Flexible Output Cable 0.8mΩ/m, 260nH/m, >30kV, >200kA

**3. 특성시험 결과 및 토의**

펄스 성형회로의 연결상태를 점검하고 각 구성품의 동작특성을 확인하기 위하여 2개의 300kJ 모듈을 그림 4와 같이 연결하여 실험하였다.

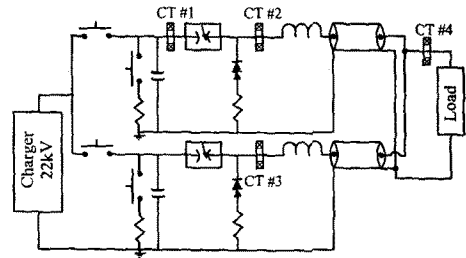


그림 4 특성실험을 위한 27kV의 300kJ 모듈배치의 전류센서들의 위치

먼저 단위모듈의 특성실험으로서 크로우버 회로의 특성을 시험하였다. 3개의 병렬 크로우버 스택에 흐르는 전류가 균일하지 못하고 불균일이 생길 경우, 크로우버 다이오드에 과전류가 흘러 다이오드를 파괴할 수 있다. 그림 5에 CT#2로 측정된 회로의 주전류와 3개의 크로우버 스택에 흐르는 전류를 측정 한 결과를 보인다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주전류 70kA에 대해서 전류의 역전은 없으며, 3개의 크로우버 스택에 흐르는 전류는 거의 동일하게 분배되고 있음을 알 수 있으며 크로우버 동작이 정상적으로 일어나고 있음을 알 수 있다. 다음으로 그림 3에 보인 단위 모듈이 최대 충전전압 22kV, 충전에너지 300kJ에 대해서 안정하게 동작하는지를 시험하였다. 시험은 가장 가혹한 조건인 인덕턴스 20uH, 부하단락 조건에서 시행하였다. 그림 6에 커패

시터의 방전전압, 통전전류, 하나의 크로우버 스택의 전류를 측정할 결과를 보인다. 최대 통전전류 피크 약 148kA를 달성하였으며, 이때 각 구성품들의 이상동작이나 아크, 기계적 변형 등이 발견되지 않았으므로 모든 모듈 구성품이 300kJ 정격을 만족함을 확인하였다.

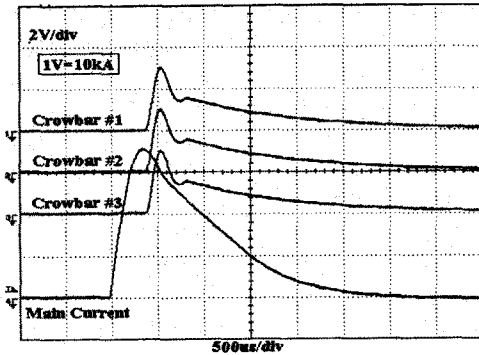


그림 5 크로우버 스택의 전류와 주전류 파형 (충전전압 = 15kV, 인덕턴스 = 40uH, 부하저항 = 12.5mΩ)

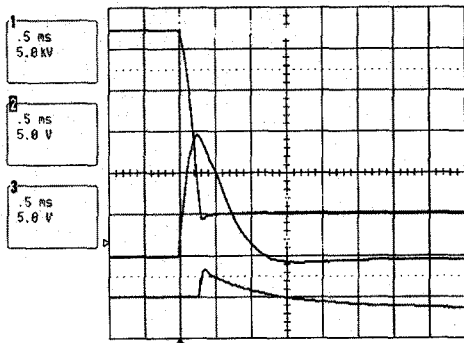


그림 6 300kJ 모듈의 출력전류파형. CH1:커패시터전압, CH2:주전류, CH3 크로우버 스택 전류(충전전압 = 22kV, 인덕턴스 = 20uH, 부하 = 단락)

2개이상의 모듈이 독립적으로 스위칭되었을 때의 전류파형 성형을 위한 예비실험으로서 그림 4에 보인 회로에서 두 개의 모듈에 대해서 스위칭 시간을 500us 차를 두고 순차로 스위칭 하였다. 이때의 각 모듈 전류를 그림 4의 CT#1 과 CT#2로 측정하고 합성전류 파형을 CT#4에 의해 측정된 결과를 그림 7에 보인다. 그림 7로서 알 수 있는 것은 모듈 1번에 의해 스위칭된 전류 및 전압이 모듈2의 동작에 영향을 주지 아니하며, 이것은 모듈 2의 TVS 스위치의 역전압 저지능력이 충분함을 보여주고 있으며, 통전중의 모듈 1번 전류파형이 500us 후에 트리거된 모듈 2번에 의하여 영향을 받지 않으며, 합성전류는 2개의 모듈전류의 산술적 합으로 나타남을 알 수 있다. 이 실험결과는 8개의 모듈에 대해서 독립적으로 충전전압 및 스위칭시간을 제어함으로써 ETC 가속기에 필요한 최적의 전류펄스를 자유자재로 성형할 수 있는 가능성을 입증한 것이라 볼 수 있다.

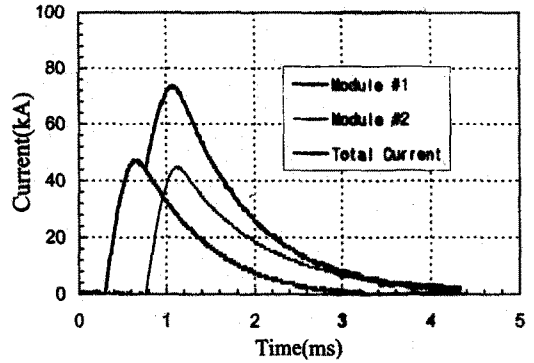


그림 7 두 개의 모듈의 순차적 스위칭에 의한 펄스성형(delay time=500us, 충전전압 = 10kV, 인덕턴스 = 40uH, 부하저항 = 12.5mΩ)

#### 4. 결 론

전열화학추진용 2.4MJ급 펄스전원장치가 설계되고 제작되었다. 8개의 각 모듈에 대해서 22kV, 300kJ의 에너지를 충전하고, TVS 스위치를 통하여 통전시험을 실시한 결과, 통전전류 최대 150kA에서 모든 모듈 구성품들이 정상적으로 동작함을 확인하였다. 또한 2개의 모듈을 병렬로 연결하여 전류파형에 대한 펄스성형에 대한 예비실험을 실시하여 2개의 모듈이 상호간섭을 일으키지 않고 독립적으로 정상적인 동작을 보임으로서 8개의 모듈을 이용한 펄스성형의 가능성을 확인할 수 있었다. 앞으로 각 모듈의 시험결과를 토대로 8개의 모듈을 제어기와 연계하여 운용하는 실험을 통하여, 전열화학추진용 2.4MJ 펄스 전원장치를 완성하고자 한다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] B.Augsburger et al, IEEE Trans. Magn., vol. 31, P. 16, 1994
- [2] I.R.M추류 and F.LeVene, IEEE Trans. Magn., vol. 31, p338, 1994
- [3] 진운식, 김종수, 이홍식, "ETC 전원장치의 구성품의 설계 제작 및 동작특성", 제3차 전열추진기술 세미나, pp. 6-1 - 6-21, 1999