

300kJ×8 모듈로 구성된 커패시터 뱅크의 특성 분석

성기열, 정재원, 최영호, 김진성, 추중호, 이흥식*
국방과학연구소, *한국전기연구원

Characteristics of Capacitor Bank Composed of Eight Paralleled Modules

G.Y.Sung, J.W.Jung, Y.H.Choi, J.S.Kim, J.H.Chu, H.S.Lee*
ADD, *KERI

Abstract - A pulsed power supply of 2.4MJ capacitor bank has been developed to make investigation into electric gun technology. It is made up of eight paralleled 300kJ modules, and can supply various shape of high current pulse by changing charging voltage, inductance, capacitance, and firing time of each module. The 300kJ module has been designed and fabricated for the maximum operating voltage of 22kV, peak current of 150kA, and pulse duration of 1msec.

The experiments of the modules were done, and the equivalent circuit of the module was determined. The characteristics of the module were analyzed more deeply through the circuit simulation.

The experiments of the paralleled modules with inductance of 20μH and load resistance of 100mΩ were performed, where the modules were discharged simultaneously and/or sequentially. The results of the experiments were analyzed. The 2.4MJ capacitor bank is currently used as the pulsed power supply for the ETCG (Electro Thermal Chemical Gun) research.

1. 서 론

전열화학포의 펄스전원장치는 펄스의 발생뿐만 아니라 요구되는 약실 압력 형성을 위해 펄스의 성형도 가능하여야 한다. 전열화학포 연구를 위한 펄스전원장치로서 펄스성형의 유연성, 신뢰성, 경제성, 유지 및 관리 측면을 고려하여 최대 충전에너지 2.4MJ, 최대 충전전압 22kV의 커패시터 뱅크를 개발하였다. 2.4MJ 커패시터 뱅크는 병렬 연결된 8개의 300kJ 모듈로 구성되며, 각각의 모듈은 스위치, 인덕터, 충.방전 회로 및 제어기를 가지며, 독립적으로 운용이 가능하도록 하였다. 각 모듈은 150kA의 피크와 1msec의 펄스폭을 갖는 전류펄스를 발생시킬 수 있으며, 충전전압, 점호시간, 인덕턴스 및 커패시턴스를 독립적으로 다양하게 변화시킬 수 있다. 따라서 2.4MJ 커패시터 뱅크는 서로 다른 충전전압, 인덕턴스 및 커패시턴스를 갖는 각 모듈의 순차적인 점호를 통해 다양한 펄스 파형을 발생시킨다.

각각의 모듈이 독립적으로 운용되는 경우와 병렬로 운용되는 경우에 대한 특성실험을 실시하였으며, 커패시터 뱅크에 대한 회로 모델을 제시하였다. 개발된 커패시터 뱅크는 전열화학포 연구를 위한 전원장치로서 사용중이며, 회로 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 전열화학포 실험 결과의 예측과 분석에 사용하고자 한다.

본 논문에서는 2.4MJ 커패시터 뱅크의 특성을 실험과 시뮬레이션을 통해 기술하고자 한다.

2. 커패시터 뱅크의 설계 및 구성

개발된 커패시터 뱅크는 8개의 300kJ 모듈과 충전기, 제어기로 구성된다. 여러 개의 모듈을 병렬로 구성함으로써 펄스 성형 및 에너지의 확장이 용이하며, 구성품들의 전류 정격을 감소시킬 수 있다. 300kJ 모듈에 대한 주요 구성품의 사양은 표 1과 같다. 그림 1은 모듈의 등가회로를 나타내며, 이 등가회로를 이용한 시뮬레이션을 통하여 커패시터 뱅크의 운용 특성을 분석 및 예측할 수 있다.

표 1. 300kJ 모듈의 주요 사양

| 항 목 | 사 양 |
|-----------|-----------------------------|
| 충전 에너지 | 300kJ(50kJ×6) |
| 최대 충전전압 | 22kV |
| 출력전류의 첨두치 | 150kA |
| 커패시턴스 | 1236μF |
| 인덕턴스 | 20/40/80/160μH |
| 스위치 | Triggered Vacuum Switch |
| 크로바 회로 | 다이오드 및 저항(40mΩ) |
| 동축 케이블 | 내외부도체 단면적 50mm ² |
| 크기 | 길이 1.7m×폭 1m×높이 1.8m |
| 무게 | 1톤 |

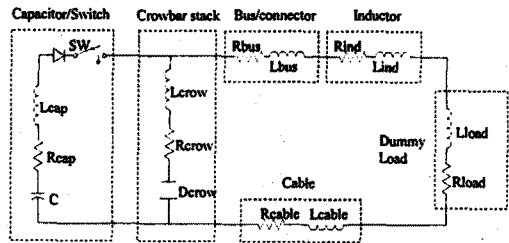
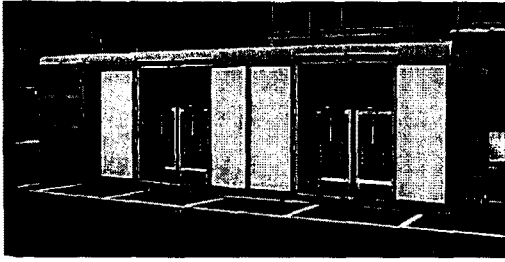


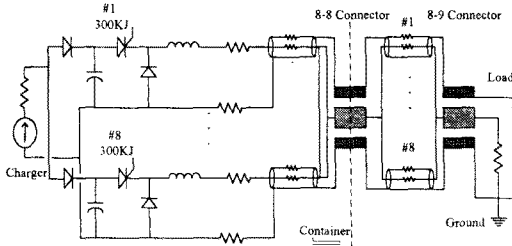
그림 1. 300kJ 모듈의 등가회로

완성된 2.4MJ 커패시터 뱅크의 외형과 구성도는 그림 2와 같다. 각 모듈의 출력단과 부하의 연결은 8×8 및 8×9 커넥터를 이용하여 전체적으로 동축 구조를 유지하도록 하였다. 충전회로는 정전류 충전기와 역전류 방지를 위한 다이오드 및 공압 구동 릴레이로 구성된다.

2.4MJ 커패시터 뱅크의 제어회로는 주 제어기와 모듈 제어기로 구성되며, 각 모듈의 충전전압과 점호시간을 제어할 수 있다. 또한 안전을 위해 원격 작동이 가능하도록 설계하였으며, 공압 선로와 광케이블을 이용하여 고압회로와 제어회로를 분리함으로써 전기적인 위험으로부터 운용자와 장비를 보호할 수 있도록 하였다.



(a) 컨테이너에 탑재된 2.4MJ 커패시터 뱅크



(b) 8개의 300kJ 모듈의 병렬 구성도

그림 2. 완성된 2.4MJ 커패시터 뱅크

각 모듈의 충전전압, 인덕턴스, 점호시간을 변화시킴으로써 다양한 형태의 전류펄스가 발생된다. 그림 3은 여러개의 모듈이 동시에 운용되는 경우 출력전압과 전류의 관계를 나타낸다. 등가 부하저항 R'_{Load} 는 식 1과 같이 실제 부하저항 R_{Load} 에 i_{Load}/i_k 를 곱한 값과 같다.

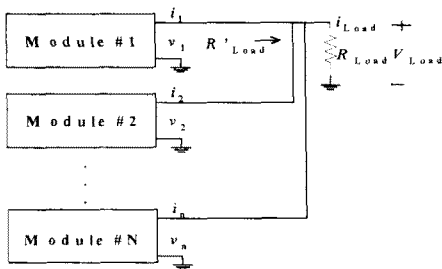


그림 3. N개의 병렬 모듈에 대한 출력전압, 전류 관계

$$\begin{aligned}
 i_{Load} &= \sum i_k \\
 V_{Load} &= i_{Load} \cdot R_{Load} \\
 v_1 &= v_2 = \dots = V_{Load} \\
 R'_{Load} &= \frac{v_k}{i_k} = \frac{V_{Load}}{i_k} = \frac{i_{Load}}{i_k} \cdot R_{Load}
 \end{aligned} \quad (1)$$

3. 실험 결과

2개의 모듈을 병렬 운용하는 경우 점호 시간차에 따른 특성을 알아보기 위해 충전전압 15kV로 충전된 2개의 모듈에 100mΩ의 저항부하를 연결하고 출력 전류 파형을 측정하였다. 그림 4는 2개의 모듈을 동시 점호시킨 경우에 대한 실험결과이다. 그림 4에서 각 모듈의 출력 전류는 식 1의 관계로부터 부하저항 200mΩ에 대해 각각의 모듈이 독립적으로 운용될 때의 출력전류와 동일함을 알 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 타당성을 확인하였

다. 그림 5는 2개의 모듈을 순차적으로 점호시킨 경우의 실험결과를 나타낸다. 그림 5에서 1번 모듈의 전류 파형으로부터 점호시간에 따라 크로바 회로의 동작 여부가 결정됨을 알 수 있다. 2모듈에 대한 병렬운용 실험에서 TVS의 역전류 차단 기능이 상실되지 않고 유지되는 경우에는 시뮬레이션을 통해 점호시간차에 따른 출력전류 파형의 예측이 가능하였다.

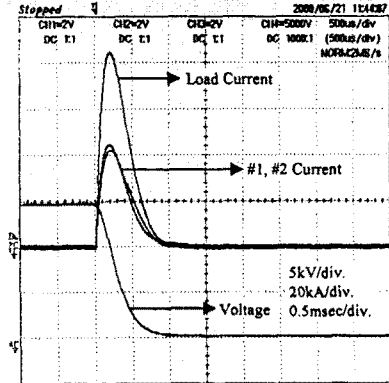
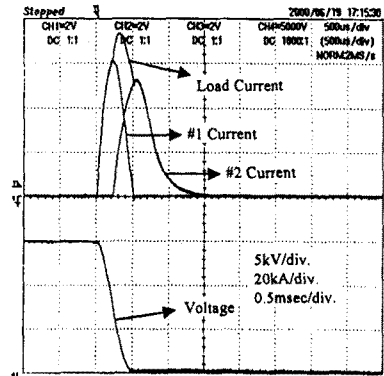
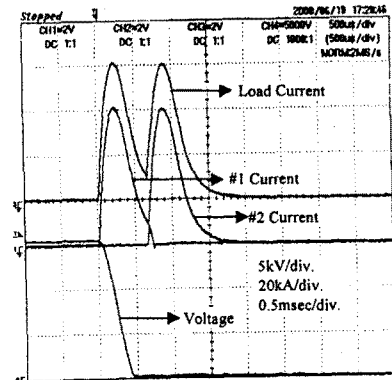


그림 4. 2모듈 동시점호 실험 결과
충전전압: 15kV, 인덕턴스: 20 μH, 부하저항: 100mΩ



(a) 점호 시간차 220 μsec



(b) 점호 시간차 650 μsec

그림 5. 2모듈 순차 점호 실험 결과
충전전압: 15kV, 인덕턴스: 20 μH, 부하저항: 100mΩ

여러 개의 모듈에 대한 병렬운용 특성을 보기 위해 6개의 모듈을 순차적으로 점호시키는 경우에 대한 실험을 수행하였다. 그림 6은 각각의 모듈을 3.5kV의 전압으로 충전하고 100mΩ의 부하저항에 대해 100μsec의 시간차를 두고 순차적으로 점호시킨 경우의 실험 및 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 각 모듈의 전류 파형에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 #1, #2, #3번 모듈의 크로바 회로가 동작하지 않았음을 알 수 있다. 이것은 후속 점호 모듈의 전류에 의해서 등가 부하저항이 회로의 임계 저항값에 도달하여 감쇠비가 증가되는 효과로 나타나기 때문이다.

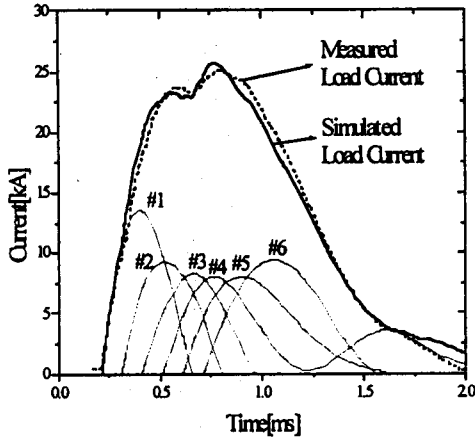


그림 6. 6모듈의 병렬운용 실험 및 시뮬레이션 결과 충전전압: 3.5kV, 인덕턴스: 20μH, 부하저항: 100mΩ, 점호 시간차: 100μsec

그림 7은 전열화학포의 전기적 특성 파악을 위해 2개의 모듈을 이용하여 사격 실험을 수행한 결과이다. 실선은 실험을 통해 측정된 전류 파형이며, 점선은 시뮬레이션을 통해 얻어진 전류 파형이다. 그림 8은 전열화학포의 전압, 전류 파형으로부터 계산된 저항 파형을 나타내는데, 시간에 대해 급격히 변화하는 비선형적인 특성을 나타낸다.

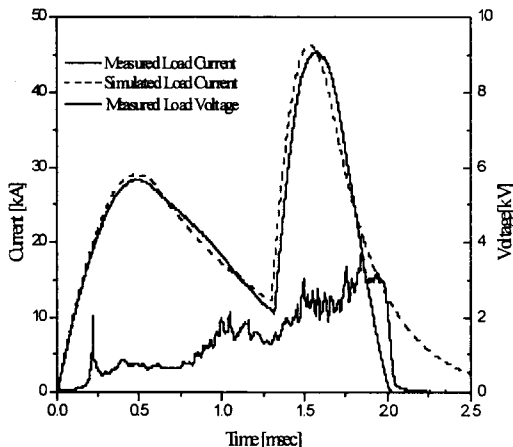


그림 7. 전열화학포의 사격시 포미전압, 전류 파형

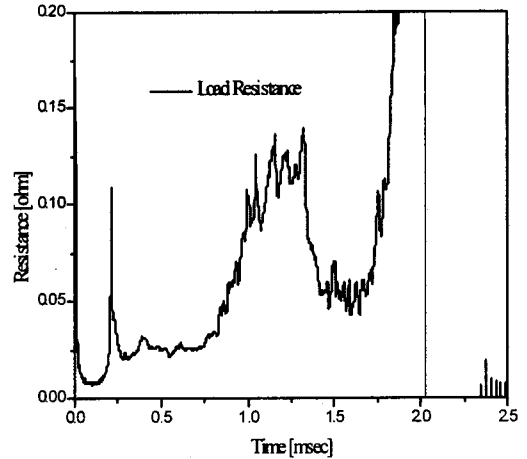


그림 8. 전열화학포의 사격시 저항 파형

4. 결 론

전열화학포의 펄스전원장치로서 8개의 300kJ 모듈로 구성된 2.4MJ 커패시터 뱅크를 개발하였으며, 개발된 커패시터 뱅크에 대한 특성을 파악하기 위해 저항부하에 대한 실험을 수행한 결과, 만족스러운 성능을 나타내었다. 또한 여러 개의 모듈을 병렬 운용함으로써 다양한 전류펄스의 성형이 가능하였다.

전열화학포의 전기적 특성 실험을 통해 시뮬레이션 결과를 이용하여 전열화학포의 동작 특성에 대한 분석 및 예측이 가능함을 확인하였으며, 현재 개발된 커패시터 뱅크를 전열화학포 실험용 전원장치로 활용하고 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 성기열, 김진성, 정재원, "2.4MJ 커패시터 뱅크의 개발 및 특성 분석", 4차 전열추진기술세미나, 국방과학연구소, 2000.11
- [2] 진윤식 외, "전열화학추진용 2.4MJ 펄스파워전원의 설계와 동작 특성(I)", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, C권, p1868, 2000.7
- [3] B.Augsburger, B.Smith, I.R.McNab, Y.G.Chen, "Royal Ordnance 2.4MJ Multi-Module Capacitor Bank", IEEE Trans. Magnetics, Vol 31, p16, 1995