대전류 펄스 성형을 위한 300kJ급 커패시터뱅크 모듈의 특성 평가

황동원●**,이홍식*,진윤식*,조주현*,김종수*,임근희*,박원주**,김진성***,정재원***,추중호***
한국전기연구소*, 영남대학교**, 국방과학연구소***

Evaluation of 300kJ Capacitor Bank Module for High Current Pulse Shaping

Dong-Won Hwang●**, Hong-Sik Lee*, Yun-Sik Jin*, Chu-Hyun Cho*, Jong-Soo Kim*, Geun-Hee Rim*, Won-Zoo Park**,
Jin-Sung Kim***,Jae-Won Jung***, Jeung-Ho Chu*** K.E.R.I.*, Yeungnam Univ**, A.D.D.***

Abstract - Key elements of in the development Electro-Thermal-Chemical propulsion(ETC) are high current pulse shaping, switching and storage bank device with high energy density.

300kJ pulse power capacitor bank module for ETC application is designed and fabricated. The tested result are described.

Ⅰ. 서 론

비교적 장시간에 걸쳐 축적된 에너지를 짧은 시간에 방전시킴으로써 대출력을 얻는 펄스 파워 기술은 대출력, 급속한 반응, 높은 제어성 때문에 최근 여러 응용분야에 이용되고 있다. 본 논문에서는 이들 중에서 전기에너지와 화약에너지의 폭발력을 동시에 이용하는 300kJ급 ETC(Electro Thermal chemical propulsion)의 전원장치에 대해서 기술한다. ETC 전원장치 개발에 있어서 핵심적인 요소는 크게 대전류 펄스성형 및 스위칭, 그리고, 에너지 밀도가 높은 저장장치로 나눌 수 있다. ETC모듈 연구에 있어서 고려해야할 중요한 조건으로는 모듈의 연속적인 범위에서의 펄스파형성형, 충전전압과 펄스성형 인덕턴스의 폭 넓은 가변범위(Range), 크로우버 시스템 등이 있다[1]. 충전전압 22kV, 50kJ의 커패시터와 최대전류 150kA, 펄스폭 0.5-3ms의 300kJ급 펄스파워 모듈을 설계·제작하여 펄스성형 시스템 파라메타 변화에 따른 실험상의 문제점과 결과에 대해 기술한다.

Ⅱ. 본 론

1. 펄스파워 시스템 설계

펄스파워 시스템은 플라즈마 인젝터에 예상되는 상태와 시스템의 요구조건을 기초로 ETC를 위한 펄스전원으로서 설계되어졌다. 그리고, 작동 파라메타를 Table1에 나타낸다.

Table 1. 펄스파워 파라메타

Energy Content : 300 kJ
Charge Voltage : 22 kV
Peak Output Current : 150 kA
Pulse Shaping Inductance : 20~160 uH
Pulse Duration : 0.5~3 ms
Pulse form : Overdamped Sinusoid
Load Impedance : Short, 12.5mΩ, 100mΩ

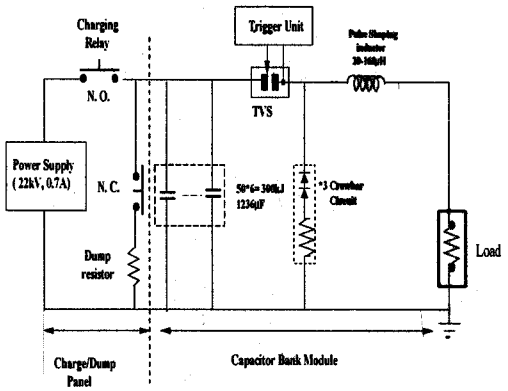

그림1. 펄스파워 시스템 구성 회로도

전기적 시스템 측면에서, 개략적인 구성회로를 그림1에 보인다. 펄스파워 시스템에서 Charge/Dump부에서 고려하여야 할 중요한 사항은 충전할 때 충전을 빠르게 하여야하고, 원하는 충전전압에서 충전회로를 차단하며, 방전 후 잔류전하를 안전하게 방전하는 일이다. 그러므로 기능고장(malfunction)이나 돌발사태가 발생하였을 때, 저장된 에너지가 전체 구성요소에 영향을 미치지 않게 에너지를 소비할 수 있도록 25kΩ저항 10개를 병렬로 연결하고 기계적 공압식 릴레이를 이용하여 스위치를 만들었다. 여기에서 N.O.는 충전하기 위해서, N.C.는 커패시터의 잔류전하를 방전하기 위해서 사용되는 스위치이다. DC 22kV까지 커패시터에 에너지를 충전하면, 이 때 충전기에 흐르는 전류(충전전류[A]=커패시턴스[uF]*충전전압[kV]/시간[s])는 약 0.7A 정도이고, 충전시간은 약 36초이다. 충방전 전류와 전압 측정 시스템은 충전전류와 충전전압의 모니터링 기능이 필요하고, 광파이바의 사용으로 어떤 전자(Electromagnetic)적 간섭없이 출력 스위치인 트리거 스위치를 제어하도록 구성하였다.

2. 펄스파워 시스템의 설치

뱅크 모듈들은 향후에 이동할 수 있도록 콘테이너에 장착 되어질 예정이다. 따라서, 모듈은 이동하기 쉽고, 보수가 용이하며, 크기가 작아야한다. 300kJ 커패시터 뱅크의 개략도를 그림2에 보인다. 모듈의 외관은 60×60(mm)의 프로파일을 기본 골격으로 제작하고, 외부크기는 L×W×H=1700×110×1200(mm)로 제작되었다. 이동이 쉽도록 바닥부분은 바퀴를 장착하고, 인덕터는 캐이스를 만들어서 프레임 상단에 올려 공간을 최대한 이용하도록 설계·제작 하였다.

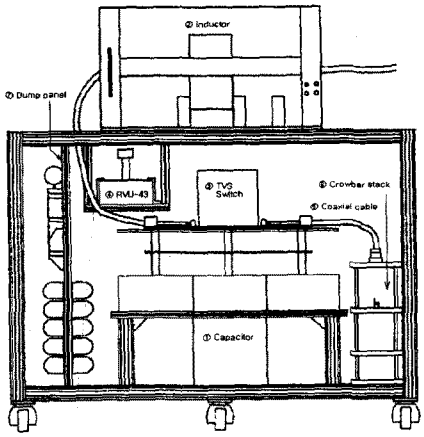

그림2. 300kJ 커패시터뱅크 모듈의 개략도

커패시터는 모두 6개로 병렬로 연결되어 있으며①, 선정 시 충방전 수명, 내부 인덕턴스, 허용 역전압율 등을 고려하여 선택하였다. 또, 프레임 바닥과는 절연을 하였다. 펄스성형을 위한 인덕터②는 20uH~160uH로 원하는 펄스파형을 만들기 위하여 가변이 가능하고, 커패시턴스 값과 모듈별로 요구되는 전류펄스 폭이 정해지면 펄스성형을 위한 리액터의 값이 정해지게 된다. TVS(Trigger Vacuum Switch)③는 Time Sequence로 Triggering하는 경우 모듈에서 어느 정도의 조건 까지 전류 역류 현상을 방지할 수 있다. 또한, TVS의 가장 큰 장점은 자기 스스로 방전을 일으키는 자기방전(Self-discharge)이 거의 일어나지 않는 다는 것이다. 그리고, 펄스전압 5kV, 펄스폭 5us의 Trigger Generator④를 사용하여 TVS를 Trigger 시킨다. 동축케이블⑤은 크로우바 다이오드 스택⑥과 인덕터에 연결되어 있고, 대전류에 의한 기계적 스트레스에 견디면서 전류파형이 왜곡되지 않게 특수 제작된 동축형 구조이다. 3set의 크로우바 다이오드 스택은 반복 피크 내역전압 13.5kV, 직류내전압 11kV/min, 피크 허용 전류 50kA인 두 개의 다이오드와 저항치 110mΩ±5%, 최대통전 피크전류 60kA인 저항과 직렬로 연결하여 제작 하였다. 다이오드와 저항을 직렬로 사용할 때 저항의 크기는 크로우바 다이오드에 흐르는 전류와 전류속도(di/dt)를 제한함으로 유의하여야 한다[2][3]. 따라서 크로우바 다이오드와 커패시터를 비교하여 최적한 조건에 알맞은 크로우바 저항값을 결정하였다. 그리고, 안전하게 충전과 덤프를 하기 위해서 Panel⑦을 제작하였다.

3. 실험상의 문제점 및 개선

고전압 대전류 실험은 다른 실험에 비하여 더욱더 많은 주의가 필요하게 된다. 그래서 시험 절차를 잘 확인하고, 특히 안전상의 문제가 없는지 반드시 확인하여 실험을 해야만 한다. 그림3에서는 인덕터 자장이 프레임에 유기한 고전압에 의해 발생한 아크흔적을 보이고, 그림4에서는 대전류 전자력이 반복작용함으로서 동축 케이블 심선이 늘어난 모습을 보인다.

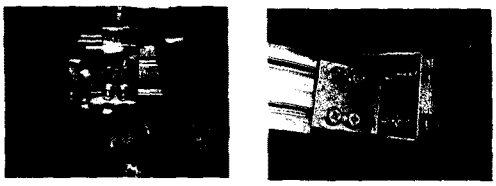

그림3. 프레임에 유기된 고전압에 의한 아크 흔적

그림4. 대전류의 전자력에 의해 늘어난 케이블 심선

그림3에서의 프로파일에 발생한 아크흔적은 전체 프로파일 중에서 상단부 세로방향(폭의 방향) 프로파일들의 접합부에 집중되어 나타났으며, 하단부측은 이런 영향을 찾아 볼 수 없었다. 프로파일들은 동전위이다. 이 현상의 원인은 펄스 대전류가 흐를 때, 프로파일 상단 위에 올려 놓은 원형 인덕터의 강한 전자 유도에 의해 세로 방향의 프로파일에 전압이 유기되어, 접지저항이 큰 부분으로 아크가 발생한 것이다. 이 때 인덕터 부근에서 유도되는 전압을 오실로스코프로 측정한 결과 약 1kV 정도의 큰 전압이 나타났다. 이 문제를 해결하기 위해 세로방향의 프로파일을 절연체(MC Nylon)로 교체하여 실험한 결과 이런 현상을 사라지게 할 수 있었다. 그림4는 200회 정도의 실험 후에 나타난 대전류의 전자력에 의해 늘어난 케이블 심선의 모습이다. 이것은 케이블 끝단의 connector류로서 인덕터와 부하저항 등 각 모듈에 연결되어 있다. 수십~수백회 실험을 할 때, 150kA의 대전류에 의한 전자력에 의해서 심선만 물고 있는 connector가 심선을 케이블에서 뽑아 내는 현상이 나타났다. 향후에 심선과 내부절연체를 같이 고정시킬 수 있는 구조로 교체할 예정이다.

4. ETC 모듈의 회로정수 계산 및 측정

펄스파워 시스템에서 각 모듈소자의 회로정수는 원하는 파형성형과 에너지 손실측면 등 펄스파워 시스템 전체에 영향을 줌으로 아주 중요하다. 다음은 회로정수를 측정한 결과이다.

(1) 커패시터:
C=206uF x 6 = 1236uF
Peak current = 30kA, 60kA fault
$L_{internal}$ = 500nH
L_{total} = 83nH

(2) 케이블
R = 0.8 mΩ/m (1kHz)(RLC meter로 측정)
L = 260 nH/m (")

(3). 인덕터

	L(uH)	주파수에 따른 저항(mΩ)					공진주파수 (kHz)
		100 Hz	500 Hz	1kHz	2kHz	10k Hz	
20uH Tap	20.7	2.5	3.5	4.1	6	20	800
40uH Tap	40.8	4.1	5	7	10	37	797.5
80uH Tap	80-82	6	9.5	13	18	70	820
160uH Tap	160 -164	10	17	23	35	150	847.5

(4) 계산치

$C = 2\pi\varepsilon / \ln\frac{b}{a}$ [F/m] =1.35 x 10^{-10} F/m = 13.5nF/m

$L = \frac{\mu}{2\pi}\ln\frac{b}{a}$ [H/m] = 1.67x10^{-7} H/m = 0.167 uH/m

III. 실 험 결 과

ETC 펄스파워 시스템에서 대전류 펄스에너지의 역할은 가속 초기에 추진제의 효과적인 화학반응을 유도하고 탄자의 지속적인 가속을 위한 가열이다. 때문에 대전류 펄스에너지는 가속 초기보다 후기에 투입하는 것이 효과적이다. 커패시터 뱅크를 저항부하에 직접연결하면, 초기에 전류값이 높고, 펄스 폭이 좁고, 지속시간이 짧은 파형이 나타난다. 이와 같은 초기전류를 제어하고, 펄스폭을 증가시키기 위해 인덕터를 직렬로 삽입하여 펄스파형 성형을 한다[4].

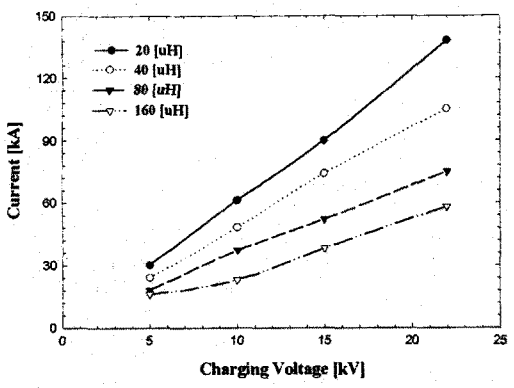

그림5. 인덕턴스 변화에 따른 피크전류 (12.5mΩ)

그림5는 300kJ 커패시터뱅크 모듈에서 인덕턴스의 값을 20uH, 40uH, 80uH, 160uH으로 가변하였을 때, 전류의 피크치를 나타낸다. 이 때 부하저항은 12.5mΩ이다. 20uH에서 가장 높은 전류인 138kA가 흘렀다.

그림6은 부하저항 100mΩ, 충전전압 22kV, 인덕턴스20uH에서 전류-전압 파형이다. 1은 전류파형이고, 2는 전압파형, 3은 크로우바회로의 전류파형이다. 초기 투입에서 0.2ms에서 90kA의 최대전류가 나타나고, 전체 전류지속시간은 1ms이다. 인덕터를 삽입할 경우 초기전류가 제한되어, 펄스폭은 늘어나지만, 전압과 전류

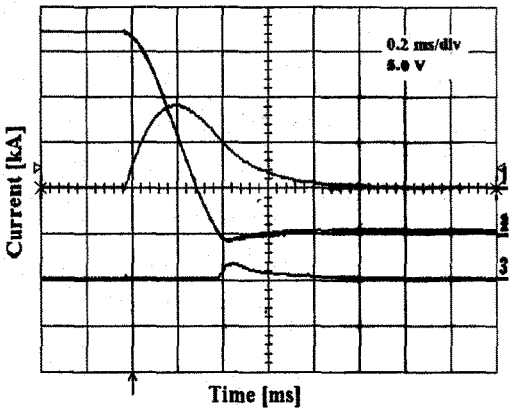

그림6. 전류-전압 파형 (100mΩ, 22kV, 20uH)

가 진동함으로 콘덴서의 수명이 단축되고, 에너지 전달 효율이 떨어짐으로 이를 해결하기 위해 부착한 크로우바 회로에 흐르는 전류파형이 3에 나타난다. 또, 커패시터 뱅크에 충전된 전압이 0이될 때, 크로우바 회로가 잘 동작함도 알 수 있다.

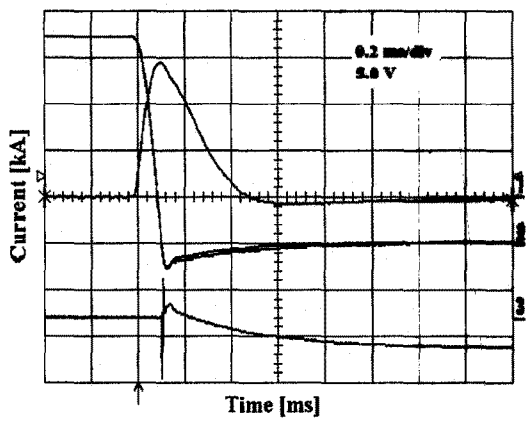

그림7. 전류-전압 파형(Short, 22kV, 20uH)

그림7은 300kJ 펄스파워 시스템에서의 가장 가혹한 조건인 Short 부하에서 실험을 행하였다. 초기에너지 투입단계로 부터 0.1ms에서 최대전류 148kA를 얻었고, 전류지속시간은 0.5ms로 나타났다.

IV. 결 론

ETC 전열추진를 위한 300kJ급 커패시터 뱅크를 설계·제작하여 대전류 펄스성형 실험을 성공적으로 수행하였다.

V. 참고문헌

[1] I.R.McNab and F. LeVine, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, p338, 1994

[2] D. F. Alferov et al, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, p.323, 1999,

[3] 1999. 대한전기학회 하계학술대회 논문집 p2215-2217 "진 윤식 외"

[4] "97전열추진기술 세미나". 국방과학연구소. 대전 1997. 9. 2 "이 홍식"