

전열화학추진용 2.4MJ 펄스파워전원의 설계와 동작특성(II)

진은식, 이홍식, 김중수, 황동원*, 김진성**, 추중호**, 정재원**, 문희중***
 한국전기연구원, *영남대학교, **국방과학연구소, ***두산중공업

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

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

Abstract - Eight 300kJ modularized capacitor-banks have been constructed. These modules have been installed and assembled to make a 2.4MJ pulse power system (PPS). This 2.4MJ PPS was developed to be used as a driver of an electrothermal-chemical (ETC) gun. Each capacitor bank has six 22kV, 50kJ capacitors connected in parallel. A triggered vacuum switch (TVS-43) was adopted as a main pulse power-closing switch in each module. The module also contains a crowbar circuit made of three high-voltage diode-stacks, a multi-tap inductor and an energy-dumping resistor.

Various current shapes have been formed by a sequential firing of multiple capacitor banks. Resistive dummy load has been used and various combinations of experimental parameters, such as charging voltage, trigger time and inductance, were tested to make flexible current shapes.

1. 서 론

펄스 대전류를 물체의 가속에 이용하는 전자력(Electro-magnetic; EM), 전열(Electro-thermal; ET), 전열화학(Electro-thermal-chemical; ETC) 가속기의 전원장치는 복수 펄스 전원의 병렬운전을 필요로 한다.[1-3]. ETC 가속기에 적용할 전원은 그 동작특성을 최적화하기 위해서 다양한 펄스 전류를 발생시킬 수 있는 매우 유연성 있는 펄스파워 전원이어야 한다. ETC 가속기의 부하는 도선을 대전류로 용발시켜 아크 플라즈마를 형성하고 유지하는 것이므로 그 부하특성이 동적, 비선형적이며 추진제, 가속기 및 카트리지의 특성에 의존한다. 또한 포강내의 압력을 적절히 유지하여 최대의 포구속도를 얻기 위한 전류펄스의 형상 등은 실험을 통하여 얻을 수밖에 없다. 이와 같은 ETC 가속기의 독특한 부하특성을 조사하고 최적화시키기 위해서 300kJ의 에너지를 갖는 커패시터 뱅크 모듈 8개를 설계·제작하였다.

하나의 RLC 회로로 구성된 단위 전원장치에서 얻을 수 있는 전류 펄스형상 제어는 그 변화폭이 매우 제한적이므로, 이를 극복할 수 있는 방법이 복수의 모듈을 이용하여 전류를 중첩시키는 방법, 즉 복수전원의 병렬운전 방법이다. 이 방법은 각 전원 모듈의 스위치 점화 시간을 제어함으로써 동시에 또는 일정한 시간 간격을 두고 연속적으로 동작시킴으로서 정교하고 다양한 전류펄스를 형성하는 것이 가능하다. 더욱이 이 병렬운전에서 트리거시간 뿐만 아니라 각 모듈의 회로정수와 충전전압 등을 변화시킴으로서 전류펄스 성형의 유연성을 극대화할 수 있다. 펄스성형의 유연성은 전원 모듈의 수를 늘임으로써 증대하나 전체 시스템은 그 만큼 복잡해진다. 이러한 복수의 펄스 모듈의 병렬운전에서 기본적인 가정은 각 펄스 모듈 전원이 각기 독립적으로 동작하여야 한다는 점이다. 한 모듈의 동작이 타 모듈의 동작

에 영향을 주게 되면, 상황은 매우 복잡하게 되며, 최종 부하단에서의 전류펄스의 형상을 예측하는 것이 거의 불가능하게 된다.

본 연구에서는 복수개의 300kJ 커패시터 뱅크를 병렬로 운전했을 때 나타날 수 있는 문제점과 출력단에서의 대전류펄스 형성에 대하여 보고한다.

2. 2.4MJ펄스파워전원의 구성

2.4MJ 펄스파워전원(Pulse Power System; PPS)은 독립적으로 점화가 가능한 8개의 300kJ 커패시터 뱅크 모듈(이하 "모듈"이라 부름)로 구성되어 있다. 이들 모듈은 회로정수(인덕턴스와 커패시턴스), 충전전압을 개별적으로 설정할 수 있고, 동시 또는 순차 점화가 가능하기 때문에 2.4MJ 전원은 이들 모듈을 적절히 제어함으로써 다양한 펄스모양, 피크전류값, 펄스폭을 변화시킬 수 있다. 전체시스템의 제어기로서는 개인용 컴퓨터(PC)를 이용하였으며 고압부와 신호처리부는 광 파이버를 이용하여 신호를 전송하도록 함으로써 절연과 안전문제를 해결하였다. 제어기의 제어프로그램은 운용할 모듈의 선택, 충전전압, 점화시간 등의 설정, 각 모듈 상태의 점검하는 기능이 있으며, PC를 통하여 충전 및 점화를 할 수 있도록 하였다.

그림 1에 2.4MJ PPS의 회로 다이어그램을 보인다. 각 모듈의 커패시터는 400Ω의 충전저항을 통하여 3대의 30kV, 10kJ/sec의 충전기로 충전된다. 이들 3개의 충전기는 병렬로 운전이 가능하기 때문에 전체 2.4MJ 커패시터 뱅크를 완전히 충전하는데 80초로 충분하다.

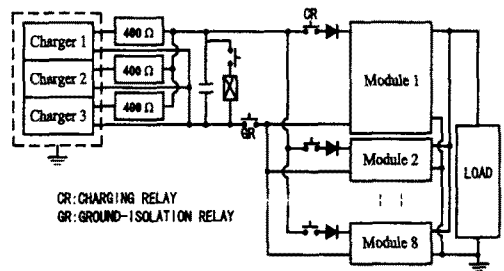


그림 1. 2.4MJ 펄스파워전원의 회로 다이어그램

그림 1의 접지분리 릴레이(GR)은 충전중에는 단차서 충전기를 커패시터 뱅크에 연결하고 충전완료시 열린다. 이렇게 함으로써 커패시터 뱅크의 점화시 접지선 루프를 통하여 전파될 수 있는 고전압 서지(surge)로부터 충전을 보호한다. 충전기의 출력단에 충전기와 병렬로 커패시터와 덤프저항이 설치되어 있다. 이 커패시터는 충

전기의 출력단이 충전과정에 사고 등으로 인하여 개방(load open)된 경우에 충전기의 전압이 급격히 상승하는 것을 막아줌으로서 충전기와 다른 구성품을 보호하는 역할을 한다. 이 커패시터에 연결되어 있는 덤프회로는 모든 커패시터의 충전이 완료되어 충전기의 고압출력이 오프된 후에 동작하여 커패시터의 에너지를 안전하게 방전시킨다. 각 모듈의 충전릴레이 다음에 보호용 고압 다이오우드가 설치되어 있다. 이 다이오우드는 커패시터에 저장된 에너지가 충전회로에 역류하는 것을 방지하기 위한 것이다. 이 다이오우드가 없으면, 복수개의 커패시터를 충전하는 과정에서 하나의 커패시터 뱅크가 자발점호(self-triggering)하는 경우, 커패시터에 충전되어 있던 에너지가 충전라인으로 역류하여 심각한 사고를 일으킬 수 있다.

각각의 300kJ 모듈의 구성 및 동작특성에 대해서는 이전에 상세히 보고하였으므로[4][5], 여기서는 표 1.에 300kJ 모듈의 중요한 파라메타를 요약하였다. 그림 2에 설계 제작된 8개의 300kJ 모듈을 보인다.

표 1. 300kJ 펄스파워 모듈 구성품의 주요사항

Electrical Specification	Stored Energy 300kJ Charge Voltage 22kV Capacitance 1236uF Pulse Shaping Inductance 20-160uF Peak Output Current 150kA
Key Components	Capacitors; 22kV, 206uF (Maxwell) Inductors; 20uF, 40uF, 80uF, 160uF TVS Output Switch; >200kA, > 8MJ/ Trigger Generator; 5kV, 1kA Crowbar Diode; 11kV, 60kA, 5MJ/ Output Cable; 0.8mΩ/m, 260nH/m, >30kV, >200kA

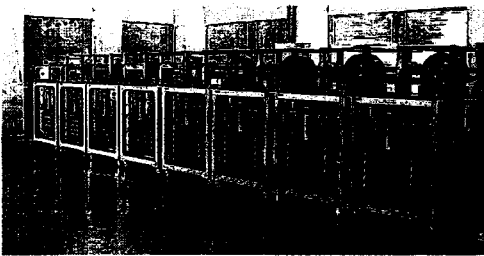


그림 2. 2.4MJ 펄스파워전원의 모습

3. 복수모듈을 이용한 전류펄스성형결과 및 토의

100mΩ의 모의 저항부하를 이용하여 복수모듈을 순차적으로 점호하여 부하측에서 형성되는 전류펄스의 형상을 조사하였다. 전류는 각 모듈의 출력단과 부하단에서 대전류 고주파 변류기(HF CT)를 이용하여 측정하였으며, 각 모듈의 커패시터 뱅크의 전압도 동시에 측정하여 DAS(Data Acquisition System)를 이용하여 실험 결과들을 처리하였다.

그림 3 (a), (b)에 복수모듈을 이용하여 펄스 형성시에 나타날 수 있는 2가지 문제점을 보여준다. 두 가지의 경우에 5개의 모듈을 이용하였고, 각 모듈의 인덕턴스 및 커패시턴스는 20uH, 1.236mF 이며, 충전전압 및 점호시간은 아래와 같다.

	#1	#2	#3	#4	#5
충전전압(kV)	3	10	10	10	10
점호시간(us)	0	500	750	1000	1250

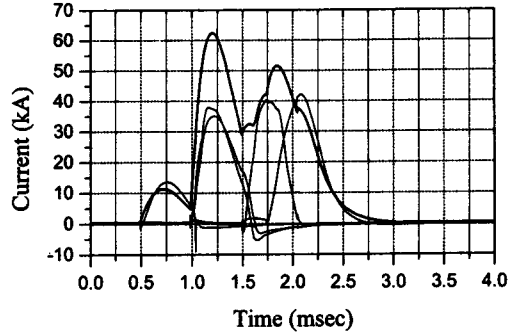


그림 3 (a) 3번 모듈의 동시트리거

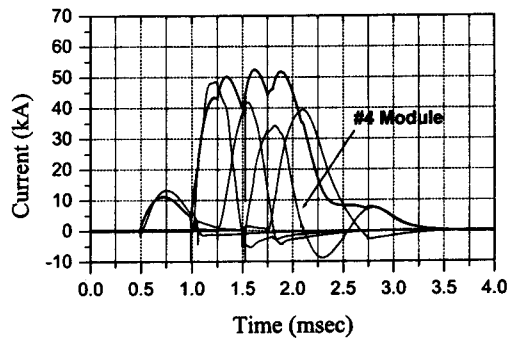


그림 3 (b) 4번 모듈 TVS의 역전류 저지실패

그림 3 (a)에서 2번 모듈이 점호되었을 때 3번 모듈도 동시에 점호되는 현상을 보인다. 이와 같이 TVS에 점호 트리거 펄스를 가하지 않았음에도 불구하고, TVS가 점호되는 현상을 동시트리거(Sympathetic trigger) 현상으로 부르고 있으며, 이 현상이 발생하면 원하는 전류 펄스를 형성할 수 가 없으며, 복수모듈 운용시 충전에너지가 높을 경우, 동시트리거로 인하여 에너지가 집중됨으로서 심각한 사고로 이어질 수 있다. 이 동시트리거는 대전류의 통전에 의해 유지되는 노이즈, 각종 스위치·릴레이의 개폐시 나타나는 노이즈 등이 TVS내의 음극과 트리거 핀 사이에 트리거 방전을 일으킴으로서 나타나는 현상이다. 이러한 현상을 제거하기 위하여 노이즈 유입경로의 해석과 반복적인 실험을 수행하여, 동시트리거의 확률이 높은 TVS는 트리거 핀과 음극사이의 절연저항값이 수십kΩ이하이며, 동시트리거가 잘 일어나지 않는 TVS에서는 절연저항값이 수십 MΩ이상이라는 사실을 밝히고 확인하였다. 이 저항값은 결국 TVS내의 트리거 핀과 음극을 분리하는 세라믹 저항의 표면상태에 따라 변화하며, 이 표면 상태는 TVS의 스위칭 동작 전후에 바뀌어진다. 이 저항값을 변화시키기 위하여 양극에 고전압을 인가하지 않은 상태에서 트리거 핀과 음극 사이에 약한 펄스방전을 시킴으로서 절연체 표면에 형성되어 있는 얇은 도전층과 금속입자를 제거하였다. TVS의 트리거 핀과 음극사이의 저항값을 수십 MΩ 이상이 되도록 처리하여 사용함으로써 동시트리거의 확률이 현격히 감소함을 알 수 있었다.

그림 3(b)에서는 동시점호는 없으나 4번 모듈의 전류가 진동하는 것을 볼 수 있다. 이것은 4번 모듈의 TVS가 전류 영점에서 차단되지 아니하고 5번 모듈의 에너지의 일부가 4번 모듈의 TVS를 통하여 역으로 흐름을 의미한다. 이렇게하여 4번 모듈의 커패시터는 재충전되며, 충전이 끝나는 순간 다시 TVS를 통하여 방전하는 모습

을 보인다. 복수개의 커패시터 뱅크 모듈을 이용하여 병렬운전 함에 있어 가장 중요한 요소 중의 하나가 각 모듈이 다른 모듈의 영향을 받지 않고 독립적으로 점호되고 운용되어야 한다는 것이다. TVS가 전류 영점에서 오프되어 역전류가 흐르는 것을 방지하는 것을 역전류 저지기능, 역전류 차단기능 또는 다이오드 기능이라고 불리며, 복수 모듈의 커패시터 뱅크를 운전할 때, 나중에 점호되는 모듈의 전류가 먼저 점호된 모듈로 흘러들어가는 것을 차단하는 기능을 한다. TVS가 통전시 전류영점에서 스위칭 아크가 소호되는 확률은 전류영점에서의 스위칭 전류 변화율(-di/dt)의 함수이며 이 값이 일정 한계치를 넘으면 역전류 저지기능은 상실된다. 이와같은 상황에서는 인덕턴스를 증가시키거나, 충전전압을 낮추어 운용할 필요가 있다. 한가지 여기에서 주목할 점은 앞서 언급한 트리거 핀과 음극사이의 절연 저항값을 수십 MΩ이상으로 증가시켜서 TVS를 사용함으로써 역전류 저지기능도 크게 증가되었다는 점이다. 이와 같이 TVS의 동시점호 확률 감소와 역전류 저지 기능의 향상을 위하여, 2.4MJ PPS의 주 제어프로그램에 TVS Treatment 기능을 추가시켰다.

그림 4 (a), (b), (c)에 위에서 언급한 문제점들을 개선하여 펄스성형을 한 예를 보인다. 실험조건은 아래와 같다.

	#1	#2	#3	#4	#5
충전전압(kV)	10	5	10	10	10
점호시간(us)	0	500	750	1000	1250

그림 4(a)에서 점호시간은 설정치와 잘 일치하고 있으며, 동시점호나 전류의 역전도 나타나지 않았다. 전체전류는 각 모듈 전류의 합으로 나타남으로서 예상하고 원하는 전류펄스 파형을 얻었다. 그림 4 (b)는 각 모듈의 전압변화를 측정된 것으로서 충전전압이 설정전압과 일치하며, 점호시간에 맞추어 방전을 개시함을 알 수 있다. 2번 모듈의 전압은 완전히 0으로 떨어지지 않는데, 이는 2번 모듈의 설정전압보다 이어서 점호되는 3번 모듈의 전압이 높으므로 2번 모듈의 에너지가 완전히 방전되기 전에 TVS가 오프되기 때문으로 보인다. 그림 4 (c)는 100mΩ 저항부하에 인가되는 전압값과 전류를 이용하여 계산한 파워의 변화를 나타낸다. 충전에너지에 대한 부하에 전달된 에너지의 92.5%로 계산되었다.

4. 맺음말

전열화학 추진의 전원으로 개발된 2.4MJ 펄스파워 전원을 이용한 펄스성형에 대해서 조사하였다. 5개의 300kJ 커패시터 뱅크모듈을 이용하여 대전류 펄스 형성시에 발생할 수 있는 TVS의 동시점호 및 역전류 저지기능의 실패에 따른 문제점을 고찰하고 이를 극복하기 위한 방법을 제안하였다. 충전전압 10kV까지 복수모듈을 충전하여 다양한 전류펄스를 합성할 수 있었다. 충전전압을 10kV 이상 높여 대전류의 펄스형성과 전열화학 추진장치의 동적부하에 대한 전원장치의 동작특성 연구 등이 추가로 이루어져야 할 연구과제이다.

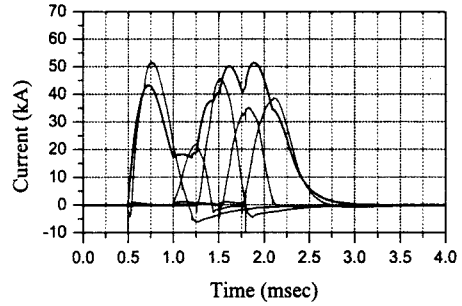


그림 4 (a) 5개의 모듈에 의한 펄스전류파형 성형
(충전전압:10kV-5kV-10kV-10kV-10kV)

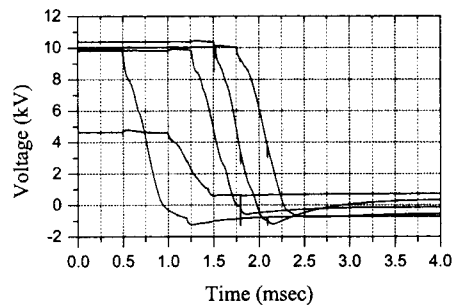


그림 4 (b) 5모듈 전압의 변화

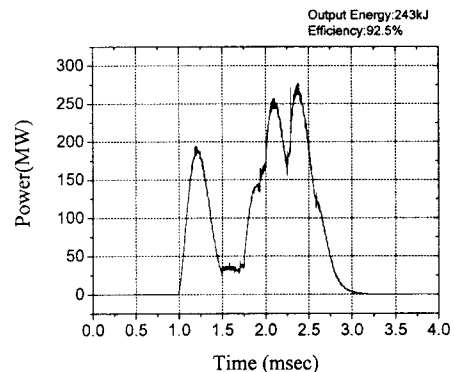


그림 4 (c) 100mΩ저항부하에서의 파워변화

(참 고 문 헌)

- [1] B. Augsburg et al., IEEE Trans. Magn., Vol. 31.1(1995)
- [2] I.R. McNab and F. LeVine, IEEE Trans. Magn., 338, Vol. 31.1(1995)
- [3] W.J. Dick et al., IEEE Trans. Magn., 32, Vol. 31.1(1995)
- [4] Y.S. Jin et al., "Design and Performance of 300kJ Pulse Power Module for ETC Application", IEEE Trans. Magn., 37, NO. 1, 165, 2001
- [5] 진윤식 외, 전열화학추진용 2.4MJ 펄스파워전원의 설계와 동작특성(I), 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, C 권, 1868, 2000