

커패시터를 이용한 대출력 펄스파워 시스템

진 윤 식, 이 흥 식, 김 종 수, *김 진 성

(한국전기연구원, *국방과학 연구소)

1. 서 론

저장된 에너지를 시공간적으로 압축, 중첩하여 짧은 시간에 대전력을 좁은 공간내에 집중함으로써 자연계에 존재하지 않는 극한 조건을 생성하는 것이 가능하다. 이러한 거대한 에너지를 발생, 제어, 응용하는 학문분야가 펄스파워 기술이다. 펄스파워 기술은 최근의 신기술과 접목되어 그 응용분야가 비약적으로 확대되고 있다. 주요한 응용분야로는⁽¹⁾

- 고온·고밀도 플라즈마의 발생: 핵융합, 플라즈마 건, 상압 플라즈마
- 고출력 펄스 레이저: 고체레이저, 기체레이저, 자유전자 레이저
- 하전입자빔 가속: 전자빔, 이온빔
- 전자력 가속: 레일건, 코일건, 전열화학 가속, 전자성형, 암반발파
- 고출력 전자파 발생: 마이크로파,ミリ파, X-선, EUV(extreme ultraviolet)

을 들 수 있으며 상기의 에너지원을 조합하고 2차 3차의 에너지 변환을 통하여 기초과학과 다양한 산업적 응용이 가능하다. 펄스파워 시스템은 그 에너지 저장 매체에 따라 크게 정전적(capacitive), 유도적(inductive), 화학적(chemical or explosive), 기계적(rotary machine) 저장 방법으로 분류할 수 있으며, 각 방법에 따라 전체 시스템을 구현하기 위한 구성 요소가 달라진다. 현재 가장 기술적 완성도가 높고 일반적으로 널리 적용되는 시스템은 커패시터를 에너지 저장 매체로 이용하는 정전적방법이다. 본 고에서는 대출력의 펄스파워를 안정적으로 발생시킬 수 있는 커패시터뱅크를 이용한 펄스파워 시스템을 중심으로 시스템의 각 구성요소와 특징을 간략히 살펴보고, 한국 전기연구원에서 최근 개발한 펄스파워 시스템을 전체시스템의 예로서 소개하고자 한다.

2. 커패시터 펄스파워 시스템의 주요 구성 요소

펄스파워 시스템은 기본적으로 R-L-C 회로와 스위치를 기본으로 구성된다. 다만 모든 소자들이 수천 암페어 이상의 대전류 통전에 따른 전자력을 견딜 수 있고 수천 볼트 이상의 고전압에 대한 절연특성을 가질 수 있도록 설계되고 제작되어야 한다. 본 절에서는 커패시터 펄스 파워 시스템의 기본 구성 요소인 커패시터와 충전장치, 인덕터, 대전류 스위치, 에너지 덩 프회로에 대하여 선정시 주요 고려 사항과 기능에 대하여 소개한다.

2.1 커패시터와 충전장치

펄스파워용 커패시터는 수요가 많지 않은 반면 축적된 기술과 신뢰도, 경제성이 중요시되기 때문에 세계적으로 미국, 영국, 프랑스 등 몇몇 국가에서만 제작, 판매되고 있다. 펄스파워용 커패시터 선정시에는 정격전압, 정격전류, 충방전 수명, 내부 인덕턴스, 허용 역전압, 에너지 밀도(에너지/중량, 에너지/부피) 등을 고려하여야 한다. 그리고 전극간에 위치하는 유전체의 미소구간에서 절연파괴가 발생할 때 이를 자동 소호하여 절연파괴 면적이 확대되지 않도록 하는 자기치유(Self Healing) 기능이 있어야 한다. 현재 펄스파워용 커패시터로는 유전체 필름에 도전성 금속을 증착시킨 전극과 유전체를 사용하는 금속증착 필름 커패시터(Metallized Film Capacitor)가 자기치유 기능을 갖고 있으며 에너지 밀도도 높일 수 있으므로 주로 사용되고 있다. 펄스파워용 고전압 고밀도 커패시터는 각국에서 정부지원을 통해서 개발되고 있으며 수출허가 품목으로 지정되어 있어 국내에서도 최근 정부지원을 받아 22kV, 50kJ급의 커패시터를 개발하였다. 아래에 미국의 Maxwell사(현 General Atomic사), 프랑스의 TPC사, 한국의 삼화콘덴서가 개발한 50kJ급의 펄스파워용 커패

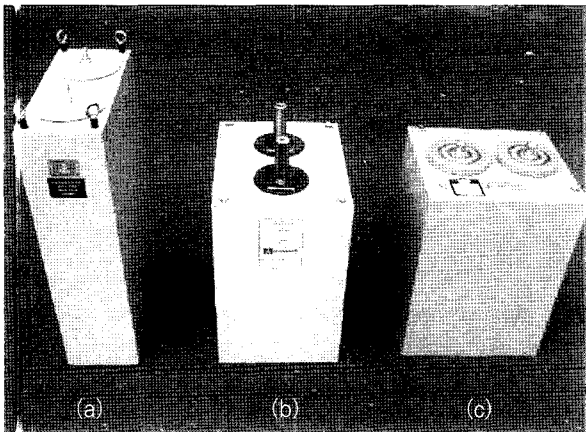


그림 1 50kJ급 고밀도 커패시터
(a)삼화, (b)Maxwell 사, (c) TPC사

표 1 커패시터 사양비교

	삼화	Maxwell I	TPC
정격	22kVDC 206 μ F	22kVDC 206 μ F	22kVDC 209 μ F
치수(mm)	430x175x670	408x305x485	368x340x505
중량(kg)	70.6	88.7	76.4
부피(cm^3)	50417.8	60353.3	63185.6
에너지밀도(kJ/kg)	0.7	0.60	0.66
에너지밀도(J/cc)	0.94	0.83	0.80

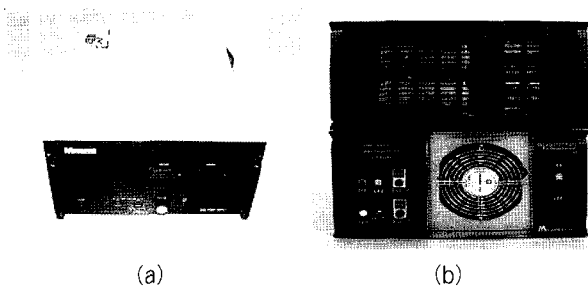


그림 2 고전압 충전장치
(a) Maxwell사 (b)한국전기연구원-미림시스콘

시 크를 보인다.

커패시터에 에너지를 충전하기 위한 고전압 충전장치는 충전 전압, 충전용량, 충전소요 시간, 병렬운전의 기능, 원격제어 기능, 고전압 켜지에 대한 보호등에 대한 고려가 필요하다. 아래 그림에 미국의 25kV, 10kJ/sec 용량의 Maxwell사 제품과 한국전기연구원에서 개발한 25kV, 30kJ/sec의 Switched Mode Power Supply(SMPS) 충전기의 모습을 보인다.

펄스파워 커패시터의 운용에 있어서 스위칭 후에 커패시터 전극 양단에 역으로 전압이 재충전되는 역전압이 문제로 된

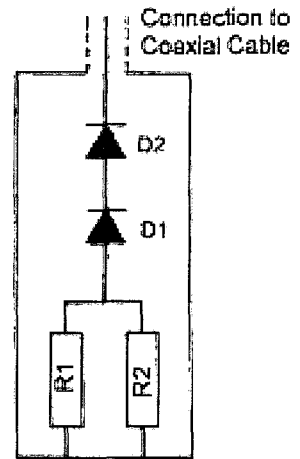
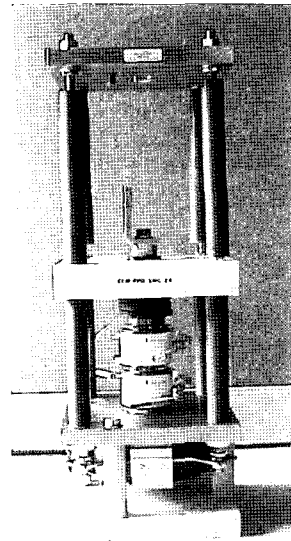


그림 3 크로바 다이오드 스택

다. 대체로 역전압은 최대 충전전압의 20%정도까지 허용되지만 과도한 역전압이 커패시터에 빈번히 인가되면 커패시터의 수명이 급격하게 감소된다. 이와 같은 과도한 역전압을 억제하는 장치가 크로바 회로이다. 크로바 회로는 출력전류의 진동을 방지하는 역할도 겸하게 되며, 회로상에서 커패시터와 병렬로 연결하여 커패시터에 전극양단에 역전압이 인가되기 시작하면 통전하여 크로바링 작용을 하게 된다. 크로바 회로에는 통전을 위한 소자로서 정교하게 개발된 Spark Gap 스위치, 폭발성 일회용 스위치, 다이오드가 사용되는데, 대전류용 스위치를 사용하는 경우에는 저가이며 켜지전압에 대한 내구성이 강한 반면 스위치의 정확한 동작개시 시점을 결정하기 위한 추가 회로가 필요하다. 다이오드를 사용하는 경우 통전개시는 역전압이 인가되는 순간에 이루어지므로 크로바 작용 신뢰성이 매우 높지만 대전류를 통전하고 고전압을 견디기 위하여 고가(高價)의 고전압/대전류 펄스파워용 다이오드를 사용하여야 하며, 고전압 켜지에 취약한 단점이 있다. 아래 그림 3에 크로바 회로용 다이오드 어셈블리를 보인다. 두개의 펄스파워용 다이오드(60kA, 11kV)가 직렬로 연결되어 있으며 다이오드를 보호하기 위한 디스크형의 110m Ω 2개가 병렬로 연결되고 모든 구성품들이 동축 구조로 연결되어 있다. 대전류 스위치를 크로바회로에 적용한 예는 참고문헌 [2]를 참조하기 바란다.

2.2 인덕터

커패시터 뱅크를 이용한 펄스파워 장치에서 인덕터는 출력전류의 상승시간과 첨두치를 제한하는 역할을 하며 인덕터의 인덕턴스 값을 변화시킴으로써 다양한 출력 펄스의 형상을



그림 4 Jelly-Roll 형 대전류 인덕터

변화시킬 수 있으므로 펄스 성형 인덕터라고도 불린다. 펄스 파워에 적용되는 인덕터로는 Solenoid 형과 Jelly Role 형이 있으며, 대전류 통전에 따른 전자력(팽창력)에 견딜 수 있는 내구력을 가져야 한다. 그림 4에 200kA의 전류를 통전하며 20uH에서 160uH까지 인덕턴스를 변화시킬 수 있는 Jelly Role 형의 인덕터를 보인다.

2.3 펄스파워용 스위치

커패시터 펄스 전원장치 주스위치를 결정하기 위한 고려사항으로는 스위치의 최대전압, 최대 침투전류, 최대 전달전하량, Action Integral(자체 에너지 소비량), 스위치 임피던스, 시간 지연/Jitter 특성, 스위치의 최대 동작주파수, 펄스 폭/시비율, 중량/부피, 수명, 전기적 특성(상승시간, 회복시간, 전압강하, 허용 전류/전압변화율) 등이 있으며, 아울러 제어성, 신뢰성, 비용, 유지/보수성 등을 반드시 고려하여야 한다. 펄스파워 시스템에 적용될 수 있는 고전압 대전류 스위치로는 Thyristor, TVS(Triggered Vacuum Switch), Spark Gap Switch, Rotary Arc Gap Switch, Thyratron, Ignitron 등이 있으며 시스템 특성에 따라 적절한 스위치를 선정하는 것이 중요하다. 아래에 상기의 스위치에 대한 특성을 간단히 알아본다.

Thyristor는 제어가 용이하며, 역전류 방지 기능이 있으며, 수명 측면에서는 매우 우수하다. 현재 제작되는 제품 중 가장 성능이 우수한 ABB Semiconductor에서 제작하는 Thyristor(5STF07Z1201)는 정격전압 11.8kV, 침투치 전류 60kA에 이르고 있다. 정격이상의 고전압, 대전류의 스위치로 적용할 때에는 몇 개의 소자를 적층하여 직렬로 스택킹하고 또한 여러개의 스택을 병렬로 연결하여 사용하게 되는데, 이 경우 소자 하나당 가격이 매우 비싸며, 적층하는 기술이 필요하며, 고가의 점호장치가 여러 대 필요한 점 등이 이 스위치의 문제점이다. Spark Gap 스위치의 경우 정격전압

~50kV, 침투치 전류 500kA 이상, 전하전달량 수백 C(쿨롱) 급, 제어성 측면에서 우수하나 Z-pinch 현상으로 인하여 전극의 손상이 크기 때문에 수명이 약 1,000회 정도로 매우 짧다. 전극간 매질이 고압가스이기 때문에 주변설비가 필요로 하며, 역전류를 막을 수 없기 때문에 역전류 저지용 다이오드가 필요로 된다. Thyratron은 정격전압 20kV~100kV, 최대전류는 40kA 미만, 전하전달량은 수 C, 0.5Torr.의 압력에서 동작되는데 주로 고전압 고반복이 요구되는 레이저 장치의 전원장치에 많이 사용된다. Ignitron은 전극간 수은이 위치하며 점호기의 아크에 의해 발생하는 수은증기에 의해 전극간 전류경로가 형성된다. 액체 특성을 갖는 수은이 있기 때문에 설치 방향성, 진동 방지, 수은에 의한 유해성 등으로 커패시터 뱅크의 스위치로는 부적절하다. Pseudospark Switch의 경우 1torr. 미만의 저압 가스영역인 Glow 방전으로 동작되며 전극의 구조상 넓은 면적에 걸쳐 전류가 전달되므로 전류전달 능력과 수명이 매우 우수할 것으로 예상되나, 성능향상과 정밀제어를 위한 점호기법에 대한 연구가 필요하다. INPIstron의 경우 동축 구조를 갖는 가스 스위치로서 역핀치(Inverse Pinch) 현상을 이용함으로써 전류의 통전 면적을 크게 넓일 수 있기 때문에 전달 전하량이 매우 높으나, 성능향상과 정밀제어를 위한 점호기법에 대한 연구가 필요하다.

TVS는 정격전압이 25kV 이상이며, 통전전류 200kA, 전하전달량 40C의 우수한 특성을 가지고 있으며, 전극간 진공도가 $10^6 \sim 10^7$ torr. 수준으로 매우 높으므로 전극물질에서 발생하는 금속증기와 극히 제한된 전자가 전하 전달자 역할을 한다. 따라서 회복시간이 짧고 주파수 특성이 우수하며 역전압에 의한 역전류를 막을 수 있는 정류특성을 갖고 있어 전류감소율이 약 300A/ μ sec 이하의 경우 추가로 역전류 저지용 다이오드를 설치할 필요가 없다³⁾. 또한, Seal-off형의 스위치

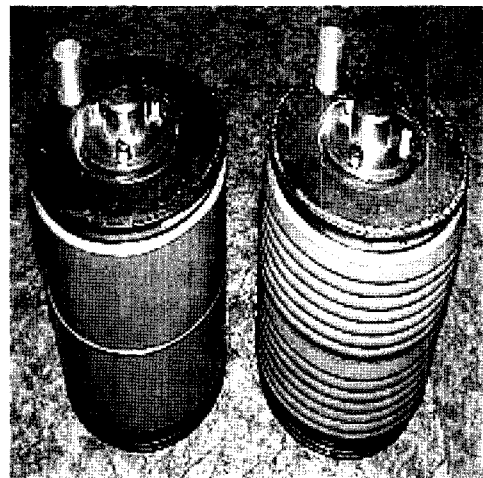


그림 5 TVS 43의 외관(직경 15cm, 높이 22cm)

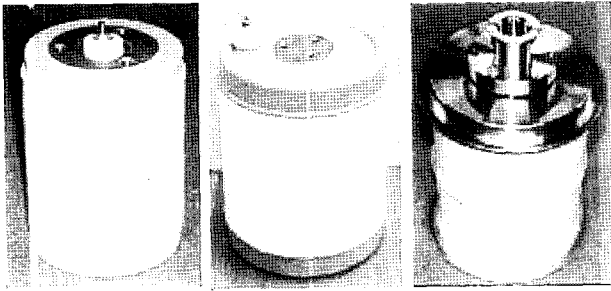


그림 6 고전압 대전류 스위치 (a)VRAG (b)IPS (c)PSS

이기 때문에 진공도를 유지하기 위한 주변장치가 필요하지 않아 부피/중량이 적으며, 간결하고 유지보수가 필요없다. 그러나 전극에서 금속증기가 발생되기 때문에 전극손상이 심하여 수명이 수천회 수준으로 제한된다. 그림 5에 러시아 VEI 사에서 개발한 TVS 스위치인 RVU-43 모델의 모습을 보인다. 펄스 파워용 스위치도 고밀도 커패시터와 마찬가지로 각국에서 기술유출을 꺼리는 전략물자로 구분되고 있어 수출허가가 필요한 품목이다. 이와 같은 상황에서 국내에서도 민수 및 군수용 펄스파워 스위치를 최근에 개발하였다. 그림 6에 28kV, 100kA급의 한국전기연구원에서 개발한 Vacuum Rotary Arc Gap (VRAG) 스위치와 Inverse Pinch Switch (IPS), 포항가속기연구소에서 개발한 Pseudospark Switch(PSS)의 모습을 보인다.

2.4 에너지 덤프회로

에너지 덤프 회로의 가장 중요한 역할은 커패시터 뱅크에 저장된 에너지를 안전하게 소모시키는 것이다. 커패시터 뱅크의 운용 중, 충전된 에너지를 부하로 방전시킬 수 없을 때, 안전하게 덤프저항을 통하여 방전시켜야하며, 또한 부하로에 커지 방전 후에 커패시터에 남아있는 잔류에너지를 안전하게 소모시켜 작업자가 필요한 조치를 취하기 위해서도 필요하다. 이러한 덤프회로의 역할을 안전하게 수행하기 위해서는 커패시터에 저장되는 에너지를 저항이 충분히 감당할 수 있도록 저항의 용량과 RC시간을 고려한 저항값을 결정하는 것이 중요하다. 또한 덤프회로는 커패시터 뱅크의 충전 및 전류릴스의 성형 기간 중에 EMI에 의한 오동작이 발생하지 않는 높은 신뢰성이 요구된다.

3. 커패시터 뱅크를 이용한 펄스파워 시스템

3.1 300kJ급 커패시터 뱅크 모듈

커패시터 뱅크를 이용한 전원장치의 예로서 300kJ급 커패시터 뱅크 모듈 구성과 동작특성에 대해서 기술한다. 이 장치

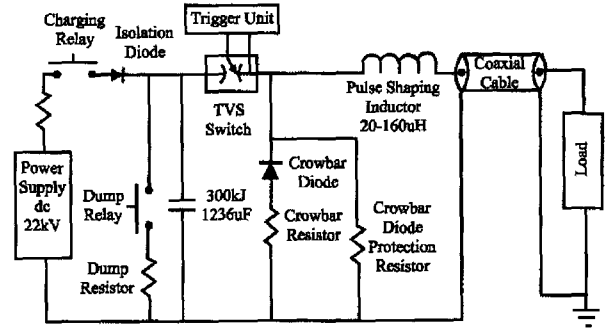
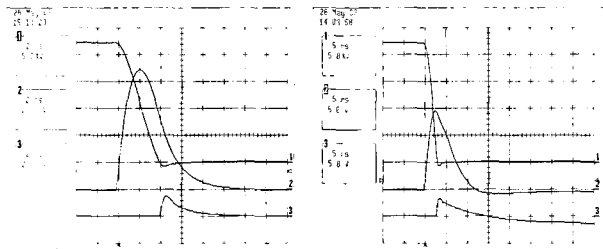


그림 7 300kJ 단위모듈의 회로도

는 후술하는 2.4MJ 펄스 전원장치의 한 모듈로서 설계되고 제작된 장치로서 회로 구성도는 그림 7과 같다. 300kJ 모듈을 구성하는 부품들의 상세한 사양 및 설명은 참고문헌 (4-5)를 참고하기 바람. 본고에서는 시스템의 각 구성품 및 특성에 대해서 간단하게 기술한다.

에너지 저장용 커패시터 뱅크는 6개의 50kJ, 22kV 커패시터(Maxwell 모델번호 32820)를 병렬로 연결하여 합계 1236uF, 300kJ의 용량이 되도록 하였으며, 커패시터의 외함은 알루미늄 프레임과 전기적으로 절연시켰다. 6개의 커패시터 양극은 하나의 구리판에 모여져 TVS 스위치의 양극에 연결된다. TVS 스위치(Russia VEI사, 모델번호 RVU-43)는 5kV, 1kA의 트리거 펄스 발생기에 의한 트리거 신호에 의해 동작되며 200kA의 전류를 수 msec동안 흘릴 수 있고, 내전압도 25kV 이상이다. 커패시터의 전압 역전을 방지하기 위한 크로바 회로는 TVS 스위치 후단과 커패시터의 음극에 병렬로 연결된 3개의 동축형 크로바 스택으로 구성하였다. 각 크로바 스택은 직렬로 연결된 2개의 11kV, 60kA 크로바 다이오드와 병렬로 연결된 2개의 크로바 저항(Disk Type, 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 전자력에 의한 요동을 방지하기 위하여 인덕터 케이스에 설치하였다. 충전 및 에너지 덤프용 스위치로는 EMI에 의한 오동작을 방지하고 절연내력을 높이기 위하여 공압구동의 릴레이를 사용하였다. 에너지 덤프 저항으로는 2kW, 25kΩ 권선저항 10개를 병렬로 연결하여 300kJ의 에너지를 시정수 3.5sec로 안전하게 방전시킬 수 있도록 하였다. 각 모듈의 충전릴레이 다음에 보호용 고압 다이오드가 설치되어 있다. 이 다이오드는 커패시터에 저장된 에너지가 충전회로에 역류하는 것을 방지하기 위한 것이다. 이 다이오드가 없으면 복수개의 커패시터를 충전하는 과정에서 하나의 커패시터 뱅크가 자발점화(self-triggering)하는 경



(a) 충전전압 22kV, 부하 100mΩ (b) 충전전압 22kV, 부하 단락시

그림 8 300kJ 커패시터 뱅크 모듈 실험결과 파형(ch1:커패시터 전압(5kV/div), ch2: 부하 전류(20kA/div), ch3: 크로바 회로 전류(20kV/div))

우, 커패시터에 충전되어 있던 에너지가 충전라인으로 역류하여 심각한 사고를 일으킬 수 있다. 또한 1개 이상의 모듈을 병렬로 운전할 때, 크로바 다이오드의 양단에 나타나는 고전압에 의한 크로바 다이오드의 절연파괴를 방지하기 위하여 6Ω의 저항을 크로바 회로와 병렬로 연결하였다.

300kJ 단위모듈의 특성실험은 정격전압인 22kV에서 절연 특성 및 대전류 통전 특성에 대해서 실시하였다. 부하특성은 100mΩ의 모의저항과 단락 상태에 대해서 조사하였다. 그림 8에 단위 모듈에 대한 시험 결과를 보인다. 오실로스코우프의 ch1은 커패시터전압, ch2는 부하전류, ch3는 하나의 크로바 스택에 흐르는 전류이다. 인덕턴스는 20uH로 고정하였다. 최대 충전전압에서, 부하단락시 모듈전류는 약 150kA, 크로바 회로 전류 최대치는 약 100kA가 흘렀으나 전체 단위모듈은 정상적으로 동작하였다.

3.2 두개의 300kJ 단위모듈을 이용한 병렬운전 특성

커패시터 뱅크에 의한 전원시스템에서 복수개의 커패시터 뱅크를 하나의 부하에 연결함으로써 다양한 형태의 전류펄스 성형이 가능하다. 각각의 단위 모듈은 독립적으로 동작하지만 병렬로 2개 이상의 모듈이 동작하게 되면 단일모듈에서 발생하지 않았던 여러 가지 현상들이 나타난다. 이러한 특이현상들은 각 모듈의 충전전압, TVS에서의 전류변화량, 두 모듈의 트리거 시간차 등에 따라 다르게 나타난다. 하나의 모듈을 점호시켰을 때 다른 모듈이 동조되어 트리거 되는 현상 (sympathetic trigger)과 두개의 모듈이 동시에 전류가 흐름으로서 발생하는 회로상의 일정부분에 나타나는 고전압 썬지, 각 모듈에 설치된 TVS의 역전압 저지 등의 문제가 발생할 수 있으며 이와 같은 문제들을 배제할 수 있도록 전체 회로를 해석하고, 필요한 부품을 추가로 보강하는 것이 중요하다^{6,7)}. 그림 9에 병렬운전을 위한 2개의 300kJ 커패시터 뱅크 모듈의 결선도를 보인다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 모듈의 출력 고압선은 고압선끼리 모아서 공통부하에 연결하였고, 저압 리턴선은 저압선끼리 연결함으로써 2개의 모

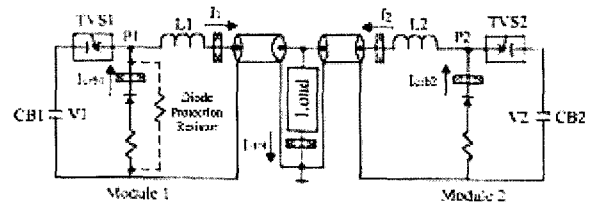
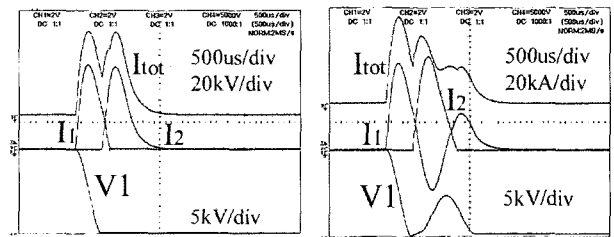


그림 9 병렬운전을 위한 결선도



(a) (b)

그림 10 2개의 300kJ 커패시터 뱅크를 병렬운전 특성

둘이 하나의 부하에 병렬로 연결되어 있다. 공통부하저항은 100mΩ이며, 각 모듈의 인덕턴스는 20uH로 고정하였다. 각 모듈 TVS의 점호 시간을 변화시켜 동시점호와 순차점호 (sequential firing)를 함으로서 부하에서의 전류형상을 변화시킬 수 있다. 그림 10에 각 커패시터의 충전전압 15kV로 하고, 500us 간격으로 점호시켰을 때, 부하에서의 전체전류 I_{tot}, 그림 9에 나타낸 펄스전류계와 펄스전압계에 의한 각 지점에서의 전류와 전압의 변화를 보인다.

그림 10 (a)에서는 각 모듈의 TVS가 전류 영점에서 소호되어 2개의 모듈이 상호간섭 없이 독립적으로 동작하여 출력단의 전류가 각 커패시터 뱅크의 전류의 단순합으로 나타남을 알 수 있다. 그림 (b)에서는 모듈 1의 TVS가 전류 영점에서 소호되지 못하여 재점호되어 모듈 1의 커패시터가 모듈 2의 전류에 의해서 재충전된 후 다시 방전하는 모습을 보인다. 이때의 출력 전류는 매우 복잡하게 되며 예측이 어려워지므로 이와 같은 상황이 일어나지 않는 조건으로 운전하는 것이 중요하다.

3.3 2.4MJ 펄스파워 시스템의 구성과 동작특성⁸⁾

3.3.1 2.4MJ 펄스 전원 및 제어기 구성

두 모듈 병렬운전을 통하여 복수모듈의 병렬연결에서 나타날 수 있는 문제점들을 보완하여 8개의 300kJ 모듈을 병렬로 연결함으로써 2.4MJ의 펄스전원 시스템을 구성하였다(그림 11). 그림 12에 2.4MJ 전원의 회로도도를 보인다. 전체시스템은 후술하는 제어 프로그램에 의해서 충전, 점호, 덤프 등의 동작이 제어된다. 3대의 25kV, 10kJ/sec 용량의 충전기를 병렬로 연결하여 8개의 커패시터 뱅크를 충전하게 되며, 각

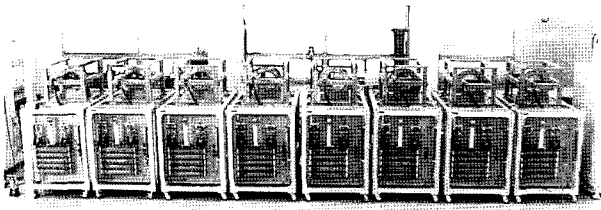


그림 11 2.4MJ(300kJ x 8) 펄스파워 시스템

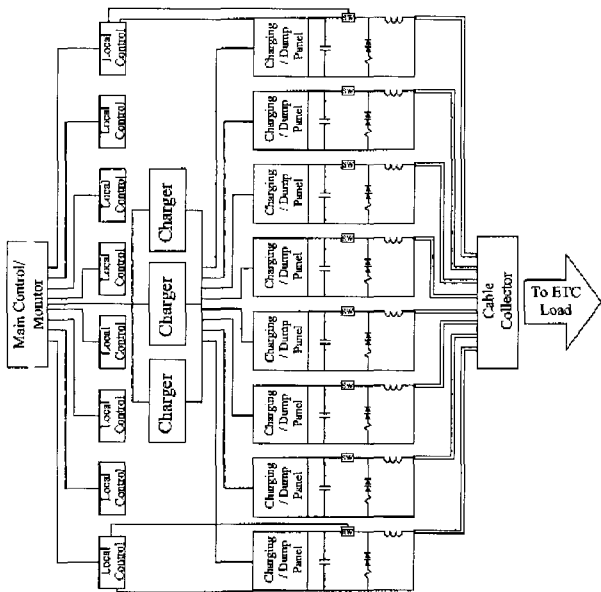


그림 12 2.4MJ 펄스파워시스템의 회로 구성도

모듈에서 발생한 출력전류는 동축케이블을 통해서 케이블 콜렉터에 연결되어 모아진 후 부하와 연결되는 구조를 취한다.

이제 시스템을 제어하기 위한 제어기는 주제어기, 공통모듈 제어기 및 모듈제어기 8대로 구성되어 있으며 다양한 대전류 펄스를 성형할 수 있도록 커패시터 충전전압 및 TVS 점호 지연 시간을 설정, 제어할 수 있게 구성되어 있다⁹⁾. 주제어기는 퍼스널컴퓨터를 이용하여 전체시스템의 제어 및 감시를 실행한다. RS232C 포트와 공통모듈제어기 및 8대의 모듈제어기의 RS485를 이용한 다중 직렬 통신을 통해 2.4MJ 커패시터뱅크 시스템 전체를 감시 제어할 수 있게 하였다. 모듈제어기는 충전기 제어, 주 제어기와의 통신 및 시스템 전체의 공통신호를 처리하는 공통제어 모듈과 8개의 300kJ 커패시터뱅크를 개별적으로 각각 제어 감시하는 모듈제어기로 구성되어 있다.

그림 13에 주제어기와 사용자의 인터페이스 화면을 나타내었다. 그림 13의 좌측 상단은 전류 펄스 성형에 필요한 8개의 300kJ 커패시터뱅크에 충전하고자 하는 설정전압(녹색), 현

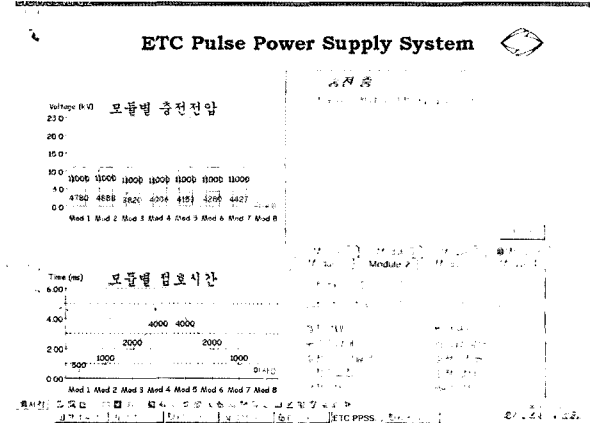


그림 13 주제어기 충전 중 진행 화면

재충전 전압(적색)을 막대그래프로 나타내고 좌측 하단은 8개의 300kJ 커패시터뱅크의 설정된 TVS의 점호시간을 꺾은선 그래프로 나타내고 있다. 우측 상단은 각각의 단계에 대해 설명문과 필요한 경우 설정값을 마우스나 자판으로 입력할 수 있다. 우측하단은 각각 모듈의 상태를 표시하는 창으로 각각의 모듈제어기로부터 받은 상태와 각 단계별 진행상태를 비교하여 오류가 있으면 적색으로 표시하고 사용자가 점검할 수 있도록 알려준다. 정상인 경우, 녹색으로 사용하지 않는 경우는 청색으로 표시된다.

전류펄스 성형을 위한 각 단계는 사용할 모듈의 선정 → 제어용 릴레이 전원투입 → 비상지령확인 → 선택된 모듈의 충전전압 설정 → 선택모듈의 점호시간 설정 → 충전 → 선택된 전 모듈 충전 완료 대기 → 점호 지령 등으로 구성되며 각각의 단계에서 이상 발견시 확인 후 처음으로 되돌아가도록 지령할 수 있다. 위와 같이 개별적으로 모듈을 제어/감시할 수 있으며 서로 다른 충전전압 및 트리거 지연시간을 설정할 수 있어 임의의 다양한 전류 펄스 파형을 만들어 낼 수 있다.

3.3.2 2.4MJ 펄스파워 시스템에 의한 대전류 펄스성형

2.4MJ 펄스파워전원의 성능을 최종적으로 검증하기 위하여 고전압 대전류 순차 점호실험을 수행하였다. 먼저, 전 모듈을 15kV까지 충전하여 순차점호 하면서, 충전기의 충전능력, 제어기의 안전한 제어, 각 모듈의 고전압 절연상태, 고압 써지에 의한 장비의 오동작 여부, 동시트리거의 가능성, 데이터 획득시스템(DAS)의 정상적 동작 등에 대한 실험을 수행하였다. 부하로는 100mΩ을 이용하였고, 최대의 전류가 얻어질 수 있도록 인덕터의 인덕턴스 값은 20μH로 하였다. 순차 트리거 시간은 각 모듈간 0.5ms로 설정하였다. 그림 14에 DAS를 통하여 계측된 전압 전류파형을 보인다. 제어기는 정상적으로 충전에서 점호, 에너지 덩크에 이르기까지 정상적으로 동작하였고, 충전도 설정전압으로 이루어졌으며, 점호

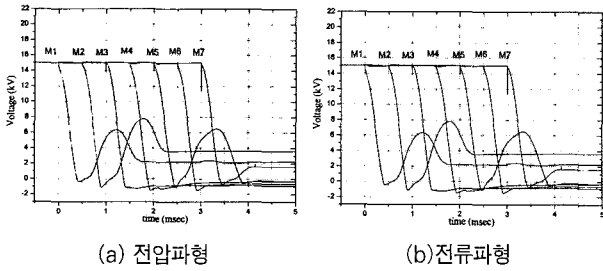


그림 14 고전압, 대전류 검증실험 결과 (15kV Charging, L=20uH, R=100m, 0.5msec firing interval). M1, M2, M5, M7 역전류 저지 기능 상실

표 1 가속기 부하를 고려한 복수모듈 시험조건

	M #1	M #2	M #3	M #4	M #5	M #6	M #7
인덕턴스 (uH)	80	20	20	20	20	20	20
총전압 (kV)	10	20	20	20	20	20	20
점호시간 (ms)	0.9	2.5	2.5	2.5	2.8	2.8	2.8

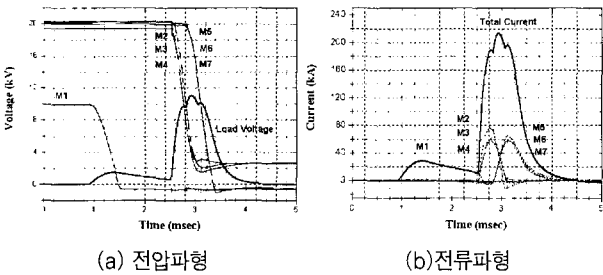


그림 15 복수모듈에 의한 고전압, 대전류 펄스 성형결과

시간도 정확하였다. 또한 고전압 써지인 TVS 등의 오동작(동시트리거)도 발생하지 않았으며, 각 모듈의 절연상태도 양호한 것으로 나타났다. TVS의 역전류 저지 기능면에서는 전류변화율이 사용한 TVS의 한계에 근접하므로 일부 실패하였으며, 방전된 커패시터가 재충전되는 현상이 나타났다.

2.4MJ 펄스전원 시스템의 유연한 펄스성형 특성을 조사하기 위하여 복수모듈의 순차점호를 이용한 펄스 성형 실험을 수행하였다. 표 2에 보인 실험조건에서 알 수 있는 바와 같이 7개의 모듈을 세개의 그룹으로 나누어서 순차트리거 하였으며 부하로는 50mΩ 저항을 이용하였다.

그림 15에 상기의 조건으로 수행한 펄스성형 실험결과를 보인다. 그림에서 각 모듈의 점호 시간은 설정한 값과 일치하며, 모든 모듈의 TVS가 역전류 저지 기능을 정상적으로 발휘하였다. 위의 실험 결과에서 살펴본 바와 같이 복수개의 커패시터를 병렬로 연결하여 충전전압, 모듈 인덕턴스, 점호시간 등을 변화시킴으로서 다양한 형태의 전압 전류 펄스의 성형이 가능함을 알 수 있다.

4. 맺음말

펄스파워 시스템은 이제 레일건, 전열포, 전열화학포⁽¹⁰⁾와 같은 국방 신무기개발 분야에서 나노파우더 생산과 같은 차세대 신소재 개발에 이르기 다양한 응용분야의 기반기술로 자리매김을 하고 있다. 본고에서는 커패시터 뱅크를 에너지 저장 매체로 이용하는 정전형 펄스 파워 시스템의 주요 구성요소와 실제의 시스템의 예를 들어 기술 소개를 하였다. 이 분야는 선진 각국에서는 이미 어느 정도 정착된 기술이나 우리나라는 이 분야에 대한 경험이 부족하고 핵심 부품 및 소재 분야에서 아직 개발해야 하는 과제가 많은 분야로 사료된다. 최근의 고밀도 펄스파워용 커패시터와 대전류 스위치의 국산화와 같은 연구 성과는 매우 의미 있는 결과로 생각되며 펄스 파워 시스템의 컴팩트화, 안정화를 위한 노력과 펄스파워 기술을 이용한 새로운 응용분야의 개척이 무엇보다도 중요하다고 하겠다.

참고 문헌

- (1) 原 雅則, 秋山秀典, “高電壓パルスパワー-工學”, 森北出版株式會社.
- (2) Y.S.Jin et al., “Novel crowbar circuit for compact 50kJ capacitor bank”, IEEE Trans. Plasma Science, 2004 April, to be published.
- (3) H.S.Lee et al. “Evaluation of RVU-43 Switch as the Closing Switch for a Modular 300kJ Pulsed Power Supply for ETC Application”, IEEE Trans. Magn., vol. 37, pp. 371-374, 2001.
- (4) Y.S.Jin et al., “Design and Performance of a 300 kJ Pulsed Power Module for ETC Application”, IEEE Trans. Magn., vol. 37, pp. 165-168, 2001.
- (5) 진 윤식, 김 중수, 이 홍식, “ETC 전원장치 구성품의 설계제작 및 동작특성 (Design and Operation Characteristics of ETC Power Supply Components)”, 제3차 전열추진기술 세미나 자료집.
- (6) Y.S. Jin et al, “High Current Pulse Forming by Modularized Capacitor Banks”, Proc. of PPS 2001, Vol. 2, pp.1205-1208.
- (7) J.S. Kim et al., “Analysis on High Surge Voltages generated in Paralleled Capacitor banks”, IEEE Trans. Magn., vol. 39, pp. 422-426, 2003.
- (8) Y.S.Jin et al., “Performance of 2.4MJ Pulsed Power System for Electrothermal-Chemical Gun Application”, IEEE Trans. Magn., vol. 39, pp. 235-238, 2003.

- [9] J.S. Kim et al., "A Flexible Control Scheme for Current Wave Forming Using Multiple Capacitor Bank Units", Proc. PPS 2001, pp. 1512-1515, 2001.
- [10] J. Jung et al., "Overview of ETC Program in Korea", IEEE Trans. Magn., vol. 37, pp. 39-41, 2001.

〈 저 자 소 개 〉



진윤식(陳潤植)

1963년 4월 17일생. 1986년 서울대 원자핵공학과 졸업. 1990년 동 대학원 원자핵공학과 졸업(석사). 1999년 일본 Nagasaki대 전자정보공학과 졸업(박사). 1990년~현재 한국전기연구원 선임연구원.



이흥식(李弘植)

1953년 9월 13일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1978년~현재 한국전기연구원 책임연구원, 전기물리연구그룹 그룹장.



김종수(金鍾洙)

1959년 12월 26일생. 1982년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1982년~현재 한국전기연구원 책임연구원.



김진성(金鎭成)

1962년 2월 9일생. 1984년 동국대 전기공학과, 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 충남대 전기공학과 졸업(박사). 2002년~2003년 미국 NRL(해군연구소) 방문연구원. 1989년~현재 국방과학연구소 선임연구원.