

# 대전류 펄스 성형이 가능한 150MW급 펄스파워 시스템의 설계 및 동작특성

## Design and Operational Characteristics of 150MW Pulse Power System for High Current Pulse Forming Network

황선묵\*, 권해옥\*, 김종서\*, 김광식\*

Sun-Mook Hwang\*, Hae-Ok Kwon\*, Jong-Seo Kim\*, Kwang-Sik Kim\*

### Abstract

This paper presents design and operational characteristics of 150 MW pulse power system for high current pulse forming network to control trigger time. The system is composed of two capacitor bank modules. Each capacitor bank module consist of a trigger vacuum switch, 9k 33kJ capacitor, an energy dump circuit, a crowbar circuit and a pulse shaping inductor and is connected in parallel. It is controlled by trigger controller to select operational module and determine triggering time. Pspice simulation was conducted about determining parameters of components such as crowbar circuit, capacitor, pulse forming inductor, trigger vacuum switch and predicting results of experiment circuit. The result of the experiment was in good agreement with the result of the simulation. The various current shapes with 300~650 us pulse width is formed by sequential firing time control of capacitor bank module. The maximum current is about 40 kA during simultaneous triggering of two capacitor bank modules. The developed 150 MW pulse power system can be applied to high current pulse power system such as rock fragmentation power sources, Rail gun, Coil gun, nano-powers, high power microwave.

### 요 약

본 논문은 트리거 시간을 조절하여 펄스 성형이 가능한 150 MW 펄스 파워 시스템의 설계와 동작특성을 알아보았다. 이 시스템은 2개의 커패시터 뱅크 모듈로 구성되어 있고, 각 커패시터 뱅크 모듈은 병렬로 연결되어 있다. 그리고 커패시터 뱅크 모듈은 메인스위치, 커패시터, 에너지 덤프회로, 크로바 회로, 펄스 성형 인덕터로 구성되어 있다. 또한 이 시스템의 모듈 선택과 트리거 시간은 트리거 제어부에서 조정된다. Pspice 시뮬레이션은 실험회로의 결과를 예측하고, 시스템의 구성품의 파라미터를 결정하기 위한 것으로 사용하였다. 실험 결과, 시뮬레이션은 실험 결과와 잘 일치하였다. 출력 전류의 펄스폭은 커패시터 뱅크 모듈에서의 순간적 점화 시간 제어로 300~650 us의 펄스폭이 형성되었다. 그리고 최대 전류값은 2개의 커패시터 뱅크 모듈이 동시에 트리거 되었을 때 약 40 kA 정도이다. 이 150 MW 펄스 파워 시스템은 파암 전원, Rail Gun, Coil Gun, 나노분말 제조, HPM 등과 같은 대전류 펄스 파워 시스템에 적용할 수 있다.

*Key words* : Pulse Power, Pulse Forming Network(PFN), Capacitor Bank Module, Rail Gun, Trigger Vacuum Switch

### 1. 서론

고출력 펄스파워는 고전압/대전류의 대전력 펄스를 고속으로 제어하는 기술로, 그 핵심은 저장된 전자에너지를 시공간적으로 압축 또는 중첩하여 극히 짧은 시간 내에 대전력 펄스를 부하로 방출하는 기술이다. 이 기술은 에너지 충전 기술, 빠른 시간 내의 에너지

\* (주)한화 구미사업장 개발 2부  
(Research & Development Department 2, Hanwha Corporation Gumi Plant)

★ 교신저자 (Corresponding author) : 황선묵  
接受日:2012年 07月 25日, 修正完了日: 2012年 08月 23日  
掲載確定日: 2012年 08月 24日

방출 스위칭 기술, 파형 성형의 펄스 포밍 네트워크 (Pulse Forming Network) 기술등 크게 3가지로 구분된다. 지금까지 이를 이용한 응용기술은 플라즈마 건, 파압, 핵융합 에너지 발생장치, 펄스성형용접, 고전압 전력시스템의 절연시험 설비 및 기타 특수한 목적으로 활용되어 있다. 최근에는 우주 로켓발사체 또는 미사일로 개발되고 있는 코일건(Coil Gun), 및 레일건 (Rail Gun), 전열추진용 펄스전원장치등과 같은 국방 분야에서도 많이 활용되고 있다. 이처럼 산업기술이 고도화됨에 따라 더욱 다양한 분야에서 펄스파워기술은 첨단기술이 요구되며, 진공기술, 프라즈마 기술, 재료소재 기술 등을 기초로 한 전력전자 및 전력변환이 부가된 복합 기술화되어 가고 있다. 또한 군수 및 민수분야 모두 대전류 펄스를 이용한 장비와 분야가 계속 증가하고 있다.[1-3]

펄스 에너지를 발생하는 펄스 전원장치로는 커패시터 뱅크가 운용성, 경제성, 확장성, 펄스성형의 제어성 및 유지관리 측면에서 장점이 있어 가장 많이 사용되고 있다. 커패시터 뱅크에 저장된 에너지를 요구조건에 만족하고 부하에 방출하기 위해서는 전압, 전류, 스위칭 시간, Jitter, 역세기 방지, 허용전기량, 수명 등의 조건을 만족하는 기술이 필요하다. 이러한 기술은 선진국의 연구소 및 회사가 해당기술을 보유하고 있고, 관련 기술을 통제하고 있다. 그래서 그 기술 확보를 위해서는 국내의 연구 활성화가 필요한 상황이고, 이와 같은 첨단기술의 연구개발 및 고전압/대전류 펄스 기술의 종합/체계적인 연구가 필요하다. 또한 펄스 파워 장치를 소형화하여 산업분야에 응용화 할 수 있는 연구개발이 이루어져야 한다.

R-L-C 회로로 구성된 단위모듈 펄스파워 시스템의 전류 펄스성형 제어는 매우 제한적이다. 이를 극복하기 위해서는 전류를 중첩시킬 수 있는 방법인 복수의 펄스파워 시스템 모듈을 병렬로 연결해야 한다. 이 방법은 각 전원 모듈의 스위치 점호 시간을 제어함으로써 정교하고 다양한 전류펄스를 형성하는 것이 가능하다[4][5]. 그리고 이 펄스성형 제어는 트리거시간 뿐만 아니라 각 모듈의 회로정수와 충전전압 등을 변화시켜 전류펄스 성형의 유연성을 극대화할 수 있다.

본 논문에서 약 9 kV, 66 kJ Pulse Forming Network용 펄스 파워 시스템은 고전압 충전전원장치, 커패시터, 주 스위치, 크로바 다이오드, 크로바 저항, 파형성형용 인덕터등으로 구성 및 설계 제작하였고, 제작된 펄스파워 전원장치에 대하여 동작특성을 알아 보았다. 또한 논문은 Pspice를 이용한 시뮬레이션과 실제 실험 결과를 비교하여 회로정수의 예측과 출력 파형 특성을 알아보았다.

## II. 본론

### 1. 실험방법

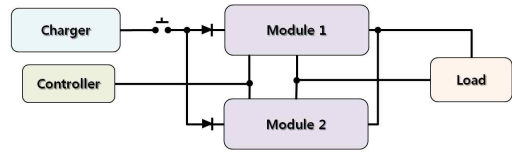


Fig. 1. Block diagram of pulse power system  
그림 1. 펄스파워 시스템의 블록 다이어그램

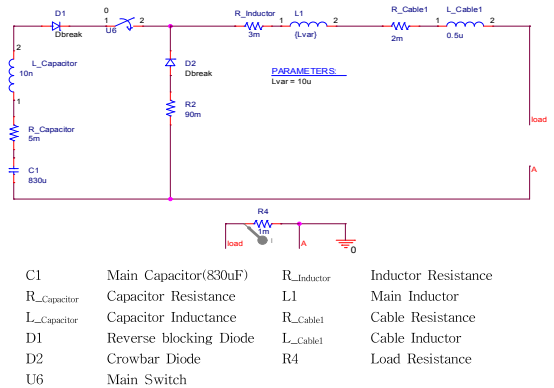


Fig. 2. The Circuit diagram of 33kJ unit module for Pspice  
그림 2. 33kJ 커패시터 뱅크에 대한 단위모듈 회로도

그림 1은 66 kJ Pulse Forming Network용 펄스 전원장치의 블록 다이어그램이다. 전체적인 펄스파워 시스템은 2개의 커패시터 뱅크 모듈, 고압충전 전원과 제어로 구성되어 있다. 66 kJ 펄스 전원장치는 펄스성형의 유연성을 최대로 하기위해 독립적으로 제어 가능한 2개의 33 kJ 모듈로 구성하였다. 각 모듈은 펄스성형이 가능한 전류 펄스폭 및 피크전류를 제어하기 위해 모듈의 개별적으로 동시 또는 순차적으로 스위칭 할 수 있도록 설계하였다. 각 모듈의 주요 핵심부품들은 33 kJ, 9 kV 펄스파워 커패시터, 메인 스위치(TVS: Triggered Vacuum Switch), 크로바 다이오드 그리고 펄스성형을 위한 인덕터로 구성되었고, 기타 부속장치로는 고압 스위치, 전압/전류 측정센서, 에너지 덩크 저항등이 있다[6][7]. 본 논문의 기본회로는 R-L-C 직렬회로이다[8].

66 kJ 커패시터 뱅크를 구성하는 주요 회로소자들의 사양을 결정하기 위해 P-spice 프로그램을 이용하여 전산모의 계산을 수행하였다. 회로소자들의 사양

결정은 부하저항이 1 mΩ에서 이루어졌으며, 33 kJ 단위모듈의 전사모의에서는 최대전류 30 kA 이상을 달성하기 위한 회로 정수값을 계산하였다. 병렬운전에 의한 66 kJ 펄스전원장치에 대해서는 연구의 목표인 최대 충전전압 9 kV, 전류 60 kA, 펄스폭 300 us~700 us를 달성하기 위한 조건들에 대해서 검토하였다. 그림 2는 33 kJ 커패시터 뱅크를 해석하기 위한 기본적인 단위모듈 P-Spice 회로도를 나타내었다. 인덕턴스가 20 uH에서 120 uH로 변화시켰을 때, 단위 모듈의 부하전류 피크치는 35 kA에서 18 kA로 변화하였다. 2모듈 병렬로 연결 시 60 kA(단위 모듈당 30 kA 이상)를 달성하기 위해서는 인덕턴스 값이 30 uH이하가 되어야 한다는 사실을 시뮬레이션으로 알 수 있었다. 그리고 이때 전류의 펄스폭은 0.35 ms~0.75 ms로 변화하였다.

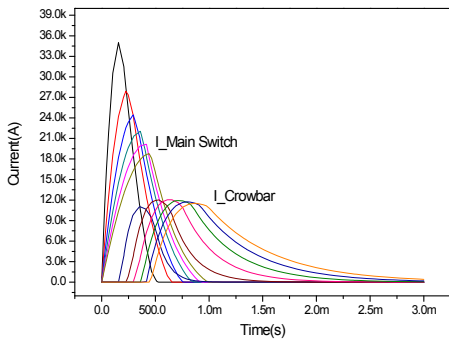


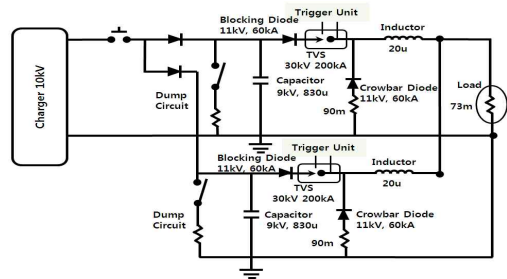
Fig. 3. The Main switch current and crowbar circuit current by inductance change(20~120 uH)

그림 3. 인덕턴스 변화에 따른 메인 스위치 전류 및 크로바 회로의 전류(20~120 uH)

그림 3은 인덕턴스 변화에 따른 메인 스위치 전류 및 크로바 회로의 전류변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 인덕턴스 변화를 20 uH에서 120 uH까지 20 uH 등간격으로 변화했을 때, 메인 스위치의 통전전류는 35 kA에서 18 kA로 변화하였다. 따라서 메인 스위치는 안전율까지 고려하여 약 60 kA 이상을 사용하면 충분할 것으로 추정되며, 그로바 회로를 통하여 흐르는 전류 최대치는 약 12 kA 정도이므로 메인 스위치와 동일한 사양의 스위치를 크로바 스위치로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 또한 크로바 보호용 저항이 10 mΩ~90 mΩ으로 변화했을때, 크로바 회로 전류 변화는 13 kA~9 kA이고, 이때 커패시터에 인가되는 최대 역전압은 약 1.1 kV 이하이므로 커패시터의 수명에 영향을 주는 일은 없을 것으로 생각

된다.

커패시터용 펄스파워 시스템은 설계 및 운영조건에 따라 차이는 있지만 기본적으로 R-L-C 직렬회로로 커패시터, 메인 스위치 조립체, 크로바 다이오드 조립체, 인덕터, 충전기 및 제거기로 구성되어 있다 [9]-[11].



(a) 회로도



(b) 150 MW 펄스파워 시스템

Fig. 4. 150 MW Pulse Power System and circuit diagram

그림 4. 150 MW 펄스파워 시스템과 회로도

커패시터는 Aerovox사 제품으로 주요 사양은 에너지 용량 33.6 kJ, 운용 충전전압 9 kV, 커패시턴스 830 uF, 내부저항 5 mΩ, 내부인덕턴스 50 nH이다. 그리고 크기는 550×350×750 mm이다. 커패시터에 저장된 에너지를 부하로 전달하는 메인 스위치는 TVS-43(Joint stock사)을 사용하였다. TVS-43을 작동하기 위해 제어장치 출력전압은 약 5 kV 이상이고, 펄스폭은 감쇠된 사인파로 0.8ms이다. 크로바 다이오드(Crowbar Diode)는 시뮬레이션을 통한 방법으로 사양선정을 하였고, 메인 스위치와 크로바 다이오드 조립체는 조립/배치에 의한 기생저항 및 인덕턴스, 전자파 및 진자력 영향을 최소화하기 위하여 진류흐름이 동축구조가 되도록 제작하였다. 또한 스위치, 다이오드, 커패시터 및 모든 구성품을 최대한 밀착시켜

배치함으로써 기생저항 및 인덕턴스를 최소화하였다. 전류파형 제어를 위한 인덕터는 대전류에 의한 팽창력을 견디면서 저항 감소에 유리한 폭넓은 젤롤(Jell Roll)형으로 제작하였다. 표피효과에 의한 도체저항과 절연이격에 의한 기생인덕턴스를 최소화하기 위해 구성품을 연결하는 부하는 최소 절연간격을 갖는 다층구조의 넓은 동판을 사용하였고, 저항은 73 mΩ이다. 그리고 동판의 표면적을 증대하기 위해 표면에 골을 파거나, 여러 개의 얇은 도체판을 복층으로 제작하였다. 펄스전원장치 운용에 필요한 제어 및 안전장치의 제어신호와 구동력은 전자파 간섭에 의한 오동작을 최소화하기 위해 쉴드 케이블 및 공기압을 사용하였고, 전류/전압 센서는 동작 진단을 위해 각 모듈별로 설치하였다. 각 펄스파워 모듈의 전체적인 크기는 1000×570×830 mm이다.

2. 실험결과 및 고찰

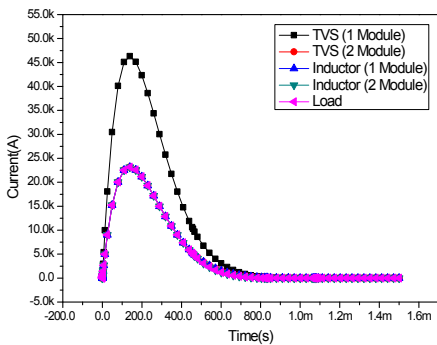


Fig. 5. Load current and current waveform of each component  
 그림 5. 부하전류 및 각 구성품에 흐르는 전류 파형

펄스 성형회로의 연결 상태를 확인 및 각 구성품의 동작 특성을 확인하기 위해서는 5개의 CT를 연결하여 실험하였다. 만약 각 구성회로에 흐르는 전류가 불균일하게 흐르는 경우, Blocking/Crowbar Diode는 과전류에 의해서 파괴될 수 있다. 그림 5는 최종부하에 흐르는 전류와 각 구성품에 흐르는 전류파형을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 최종부하에 측정된 전류는 약 48 kA이고, 정상적인 파형이 검출되었다. 그리고 각 구성품에 연결된 전류센서의 전류는 거의 동일한 파형이 나타났고, 이는 Blocking/Crowbar Diode 및 메인 스위치가 정상적으로 일어나고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 충전전압 8.72 kV, 저항부하 73 mΩ 그리

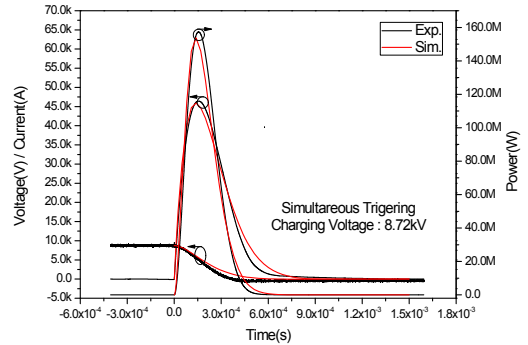


Fig. 6. Output power and current of 2 Module(Charging Voltage : 8.72kV)

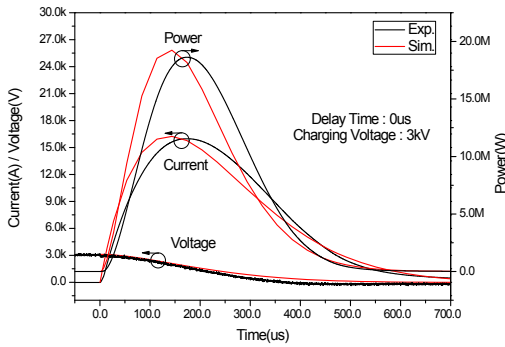
그림 6. 2모듈의 출력전류와 출력전력(충전전압: 8.72kV)

고 메인 인덕터 20 uH를 설정하여 실험에서 얻어진 2모듈의 출력전류와 커패시터 전압 그리고 출력전력 결과를 보여주고 있다. 또한 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하여 그림 6에 나타내었다. 커패시터의 충전전압이 증가할수록 출력전류는 충전전압에 비례적으로 증가하였고, 시뮬레이션과 실험결과가 일치하는 것으로 나타내었다. 출력전력도 출력전류와 마찬가지로 비례적으로 증가하였고, 시뮬레이션과 실험결과도 일치하는 것으로 보여주었다. 충전 전압이 8.72 kV 일 때, 부하의 최대 출력전류 및 출력전력은 47 kA와 150 MW로 측정되었다. 또한 커패시터에 걸리는 역전압은 -700V로 예상대로 낮게 인가되며, 안정적인

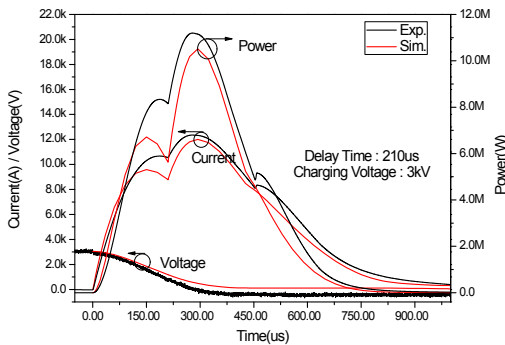
Table 1. A comprision of simulation and experiment by charging voltage

표 1. 충전전압에 따른 시뮬레이션과 실험결과 비교

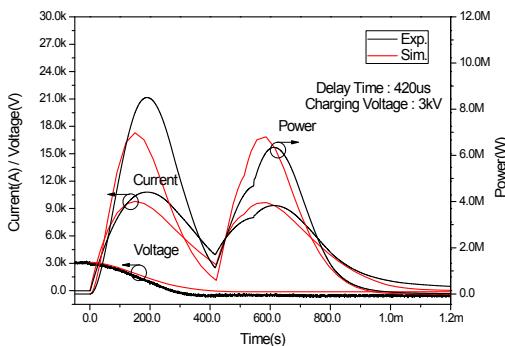
충전전압	실험결과		시뮬레이션	
	전류	전력	전류	전력
2.08 kV	11.2kA	8.5MW	12.3kA	8.7MW
3.08 kV	16.5kA	18.7MW	17.2kA	19.2MW
4.24 kV	22.4kA	35MW	23.1kA	36.2MW
5.20 kV	28.2kA	54.2MW	28.9kA	55.1MW
6.08 kV	34.3kA	72.3MW	35kA	74MW
7.07 kV	40.5kA	98.1MW	41.1kA	100MW
8.72 kV	46.5kA	159MW	47.2kA	155MW



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Pulse wave form by trigger delay time  
그림 7. 트리거 지연시간에 따른 펄스파형

출력을 보이고 있다. 표 1은 충전전압에 따른 시뮬레이션과 실험결과 비교를 나타낸 것이다.

그림 7은 2모듈 펄스전원장치의 트리거 시간에 따른 출력전류 및 출력전력을 시뮬레이션과 실험결과를 비교하여 나타내었다. 동시 트리거 시간과 비교하면, 시간변화에 따른 시뮬레이션과 실험결과는 오차범위(약 5~15%)를 보여주고 있다. 이는 트리거 시간 변화에 따른 부하저항이 비선형 저항 특성을 갖고 있기 때문에 이러한 결과가 나온 것으로 사료된다. 또한 실험과 모사실험 오차는 부하저항의 모델과 전류 침투깊이 변화에 따른 시변저항 모델의 오차에 의해서 발생하는 것으로 판단된다. 그리고 트리거 시간 변화에 의해서 펄스폭은 650 usec의 구형과 펄스 성형이 가능할 것으로 판단되고, 트리거 시간을 정밀 제어함으로써 다양한 펄스 성형이 가능하다. 트리거 정밀 제어시간은 2us의 등각격으로 제어할 수 있다. 그림 8은 두 개의 트리거 시간변화에 따른 출력 전류 펄스폭을 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 출력전류 펄스폭은 두 개의 트리거 지연시간 75us까지는 동일한 펄스폭 300us로 나타났으며, 그 이후부터는 펄스폭이 1.32인 기울기로 증가하였다. 그리고 트리거 지연시간 340us에서는 출력 전류파형이 분리되어 펄스폭이 300us로 감소하였다.

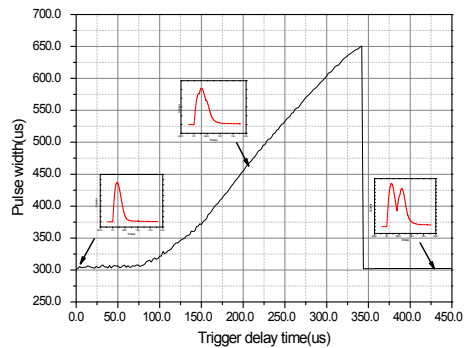


Fig. 8. The pulse width of the current by trigger delay time

그림 8. 트리거 지연시간에 따른 전류 펄스폭

### III 결론

본 논문은 66 kJ 에너지를 충전하여 155 MW 구형과 펄스전력을 성형할 수 있는 펄스 전원장치의 설계 및 동작특성을 알아보았다. 펄스 전원장치의 출력전류 및 펄스폭은 최대 46kA와 650us이고, 출력파형의 변화특성은 시뮬레이션과 거의 동일하게 나타내었다.

또한 커패시터에 걸리는 역전압은 예상대로 낮게 인가되며, 안정적인 출력을 보이고 있다. 펄스 파형의 성형은 펄스전원장치의 트리거 시간을 정밀 제어하여 다양한 펄스성형을 할 수 있고, 커패시터 뱅크의 모듈화를 통해 대전류 펄스 파워 장치의 소형화를 구현이 가능할 수 있다. 이러한 결과는 화약사용이 곤란한 상황 또는 충격 전파가 작아야할 지점 등에 사용되는 전기압반 발파, 고자장 연구자석의 착자, 의료용 충격 초음파 쇄석기, 금속 와이어의 전기 폭발법에 의한 초미세 분말합성, Rail Gun 전원장치, Coil Gun 전원장치, 화약 구동 EMP 발생장치 등 펄스 파워 응용연구에 활용 될 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- 1] Dick W.J., Goldman E.B., Johnson R.F., "Analysis of components in advanced capacitive pulse forming networks for electric guns", *Magnetics IEEE Transactions on*, Vol.31, pp.32-37, 1995
- 2] Yun-Sik Jin, Hong-Sik Lee, Geun-Hee Rim, Jong-Soo Kim, Jin-Sung Kim, Jeung-Ho Chu, Jae-Won Jung, Dong-Won Hwang, "Design and performance of a 300 kJ pulsed power module for ETC application", *Magnetics IEEE Transactions on*, Vol.37, pp.165-168, 2001
- 3] Hamelin M., Kitzinger F., Pronko S., Schofield G., "Hard Rock Fragmentation with Pulsed Power", *Pulsed Power Conference*, 21-23 Jun 1993
- 4] Augsburg B., Smith B., McNab I.R., Chen Y.G., Hewkin D., Vance K., Disley E., "Royal Ordnance 2.4 MJ multi-module capacitor bank", *Magnetics IEEE Transactions on*, Vol.31, pp.16-21, 1995
- 5] McNab I.R., LeVine F., Aponte M., "Experiments with the Green Farm electric gun facility" *Magnetics IEEE Transactions on*, Vol.31, pp.338-343, 1995
- 6] J. A. Pappas, S. P. Pish, M. J. Salinas, "Characterization of Triggered Vacuum Switches for High Current Operation", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol 35, no. 1, January, pp. 367-371, 1999
- 7] R. Dethlefsen, V.A. Sidorov, V. A. Vojdvienskii, "Triggered vacuum switch testing for millisecond pulses," *Proc. 8th International Pulsed Power*

Conference, San Diego, CA, June 1991

- 8] Hansjoachim Bluhm, "Pulsed Power Systems", Springer, 2006
- 9] Augsburg B., "DRA 500 kJ multi-module capacitor bank", *Magnetics IEEE Transactions on*, Vol. 31, pp.10-15, 1995
- 10] C. M Gilman, "Recent Capacitor-Based Pulse Forming Network(PFN) Developments" *Pulsed Power Course Nov. 13-16 1995*
- 11] Thornton E., Spikings C.R., "A 500kJ Capacitor Bank for Electrothermal Gun Research" *Pulsed Power Conference*, 1993

## 저 자 소 개

### 황 선 목 (정회원)



2003년 : 원광대학교 전기공학과 졸업 (공학사)  
 2005년 : 인하대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)  
 2010년 : 인하대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)  
 2010년 2월~현재 : (주)한화 <주관심분야> 고전압 절연, HPM/EMP 효과 분석, 펄스 파워 발생기술

### 권 해 욱 (정회원)



1998년 : 한국해양대학교 전과공학과 졸업 (공학사)  
 2007년 : 한국해양대학교 대학원 전과공학과 (공학석사)  
 2003년 7월~현재 : (주)한화 <주관심분야> 고출력 마이크로파 발생기술

김 광 식 (정회원)



1988년 : 진주기계공업고등학교 정밀  
기계과 졸업  
1988년 1월~ 현재 : (주)한화  
<주관심분야> 고출력 마이크로파  
발생장치 기구부 설계

김 중 서 (정회원)



1994년 : 금오공과대학교 전자제어공학  
과 졸업 (공학사)  
1994년 1월~2001년 12월 : 대우전자  
2001년 12월~현재 : (주)한화  
<주관심분야> 펄스파워 분야, 안전  
장치 분야, 해중소나 분야