

특집 : 펄스전원의 기술동향

펄스전원에서의 전력용 반도체 응용기술

백 주 원*, 유 동 욱**, 김 종 현**, 임 근 희**

(한국전기연구원 *선임연구원, **책임연구원)

1. 서 론

플라즈마 발생, 오염물 처리, 가공물 살균, 마이크로웨이브 발생, X-ray 발생, 레이저, 입자 빔 발생과 같은 응용분야에 대해 전원장치 측면에서 반드시 필요한 중요한 핵심기술은 펄스출력을 갖는 전기 시스템의 구현이다. 따라서 최근 여러 응용분야에서 에너지를 일정한 시간동안 저장했다가 짧은 시간에 방출하여 이용하는 펄스전원 기술이 점차 많이 이용되고 있으며 이에 대한 연구가 확산되고 있다¹⁻⁶⁾.

펄스전원의 장점은 전기에너지를 극히 짧은 시간에 방출하면 정상적으로는 실현되지 않는 초고온, 초강자계, 초고전계와 같은 극한상태가 용이하게 만들어지는 점과 과도상태의 짧은 시간이므로 주변에 미치는 영향을 작게, 그리고 공간상으로 국소 제한하는 점이다. 또한, 펄스전원에 의해 비선형이고 다른 물리적 특성을 얻는 것이 가능하다.

펄스전원기술은 오래전부터 연구되어 왔으며 소자의 진보에 따라 펄스전압 발생회로의 구성 역시 다양한 방식이 제안되어 왔다. 1960년대에는 주로 진공관 스위치와 펄스성형회로를 결합한 형태와 가장 간단한 구조의 스파크 갭을 이용한 마크스 발생기(Marx generator)가 주류를 이루었다. 이후에 기존 회로의 성능을 개선한 각종 회로가 계속 제안되었으며 이후에 가포화 변압기 또는 가포화 인덕터를 이용한 펄스압축회로와 이를 변형한 형태의 회로, 그리고 전력용 반도체 스위치를 이용한 고전압 펄스 발생회로가 제안되고 있다⁶⁾. 한편, 오랫동안 연구되어 온 펄스전원 기술에서 전력용 반도체를 이용한 전원은 최근까지 소자기술 한계로 변화가 거의 없었으며 응용분야에 따라 일부 연구가 이루어졌다. 전력용 반도체를 이용한 펄스전원은 빠른 스위칭 동작과 제어의 용이 그리고 반영구적인 수명등 기존의 펄스스위치들에 비해 많은 장점이 있다. 이에 따라 전력용 반도체를 통한 펄스 스위치의

개발이 계속 이루어지고 있으며 사이라트론과 클라이스트론 그리고 이그니트론을 대체하여 점차 여러 응용분야에 적용되고 있다⁷⁾.

본고에서는 고전압 펄스를 얻기 위해 필요한 고압 스위치를 전력용 반도체로 구현한 사례를 통해 반도체식 고전압 펄스 스위치 기술을 살펴보고자 한다.

2. 펄스전원용 스위치 기술 및 연구동향

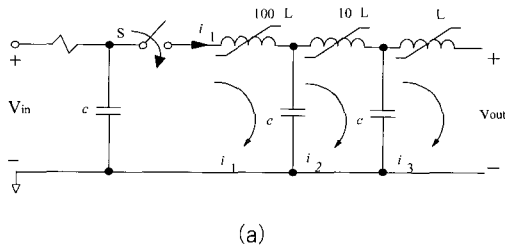
2.1 펄스전원 스위치 동향

기존의 펄스전압 발생회로는 사용소자에 따라 스파크 갭을 이용하는 회로, 진공관 스위치를 이용하는 회로, 전력용 반도체 소자를 이용하는 회로로 구분 가능하며, 고전압 파형을 성형하기 위해 필요한 2차 회로에 따라 펄스 압축회로와 펄스 성형회로를 이용하는 방식들이 있다. 이러한 회로는 장, 단점이 있으며 공통인 문제점은 어떻게 하면 수명을 길게 하고, 펄스 폭을 가변 시킬 수 있으며, 고압에서의 절연을 용이하게 하는 가이다.

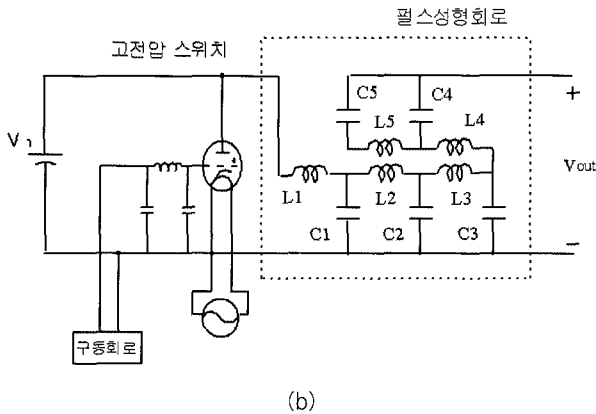
펄스전원을 구성하기 위해서 지금까지는 대 출력 소자인 진공관을 이용한 방식이 산업계에서 많이 이용되었다.

기존의 진공관 스위치를 이용하는 방식은 대용량화에는 적합하나 스위치의 수명 문제와 신뢰성이 떨어지는 단점이 있으며 스파크 갭을 이용하는 방식은 스위치의 동작 주파수가 제한되고 역시 수명 문제가 있다. 이외에 각종 펄스 압축회로를 이용한 펄스 발생회로는 ns의 짧은 펄스의 구현은 가능한 장점이 있지만 펄스 폭 변화가 어려울 뿐 아니라 부하에 따라 출력전압이 변하는 단점이 있다⁸⁾.

한편, 최근에 전력용 반도체의 정격은 나날이 커지고 있으며 이에 따라 펄스스위치로 이용 가능성이 증가하고 있다. 싸이리스터의 역전압은 8kV까지 이르렀으며 IGCT, GTO는 약



(a)



(b)

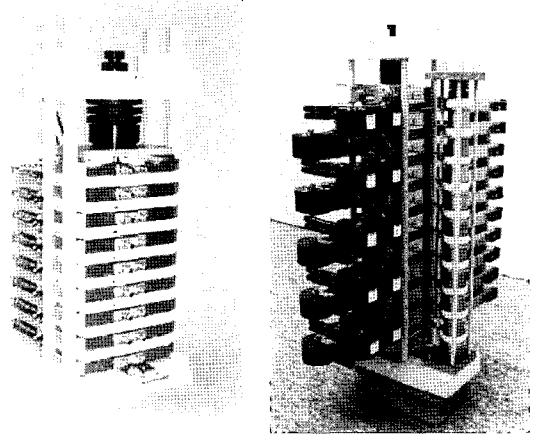
그림 1 기존의 펄스전압 발생회로 (a) 펄스압축회로 (b) 싸이리드론을 이용한 펄스성형회로

표 1 전력용 반도체 직렬 구동회로 비교

구분	스너버회로	액티브회로	시지연 구동방식	보조 게이트 인덕터회로	스위치 보조회로	종속 구동회로
회로구성	○	○	○	◎	○	○
궤적성	◎	△	△	○	○	○
개성	△	△	◎	◎	◎	◎
손실	×	○	○	○	◎	○
전압분배	○	◎	△	△	○	○
조작성	○	△	△	○	○	◎
비용	○	○	△	○	×	△

◎ : 매우우수, ○ : 우수, △ : 보통, × : 나쁨

6kV 그리고 IGBT의 최대 역전압은 6.5kV의 시작품이 완성되었다. 이에 따라 여러 연구기관과 반도체 제조 메이커에서 펄스스위치에 대한 연구를 하였으며 Westcode, Eupec, Dynex, DEI등에서 중, 소용량급의 펄스스위치 또는 다이오드에 대한 제품을 소개하고 있으며 대용량이고 실제 상용화 수준의 제품으로 다음 그림 2의 ABB사에서 소개한 펄스스위치가 있다. 그림에서 나타낸 것은 20kV, 15kA IGCT 스위치와 12kV, 2kA의 IGBT 스위치이다. 이외에 소용량 펄스 스위치로는 일본의 펄스전자에서 150kV, 15A까지의 제품을 소개하고 있다.



(a)

(b)

그림 2 ABB사의 solid state pulse switch
(a) Reverse blocking IGCT switch,
(b)Water cooled 8-level presspack IGBT switch

2.2 전력용 반도체 직렬 기술

최근 전력용 반도체 중에서 상용화된 소자는 최대 정격이 전압은 8kV이며 이보다 더 큰 정격을 요하는 고압 대용량 분야에는 개별 소자로는 적용이 불가능하다. 이로 인해 다수의 소자를 직렬 연결할 필요가 있으며 이에 관한 연구가 많은 문헌에서 이뤄졌다. 전압형 구동소자인 IGBT, MOSFET는 직렬 구성을 위해서 여러가지 방법이 연구되었으며 그 비교 예를 표 1과 그림 3에서 나타내었다.

전류형 구동소자인 GTO, IGCT는 직렬 구동을 위해 게이트 측에서 가능한 방법은 사실상 구동전압과 전류를 크게 하여 소자간의 특성을 줄이는 것 외에는 거의 없는 실정이다.

그러므로 직렬 회로를 구성하는 데에 있어서 소자간의 특성과 구동회로의 특성을 최소화하고 소용량의 스너버회로를 이용하여 소자간의 전압 분배를 하는 것이 일반적이다.

그림 3에서 전력용 반도체 스위치중에서 IGBT나 MOSFET 소자를 직렬로 구성하기 위한 회로들을 나타내었다. 그림 3(a)의 스너버 회로는 단순하고 신뢰성이 있으나 손실이 큰 단점이 있다. 그림 3(b)의 능동클램프 방식은 안정적인 전압 분배를 얻고 손실이 작지만 반면에 회로가 복잡한 단점이 있다. 그림 3(c)의 시지연 회로는 소자의 특성변화에 따른 분배전압 차이가 있으며 그림 3(d)의 회로는 우수한 전압 분배기능을 가지지만 고압 스위치로만 구현이 가능하다. 그림 3(e)의 회로는 게이트 측에서의 차이를 보상하는 기능을 가지며 그림 3(f)의 회로는 우수한 전압 분배와 작은 수의 게이트 회로를 갖는 장점이 있으나 종속 스위칭에 따라 역시 하나의 스위치로만 사용해야 한다.

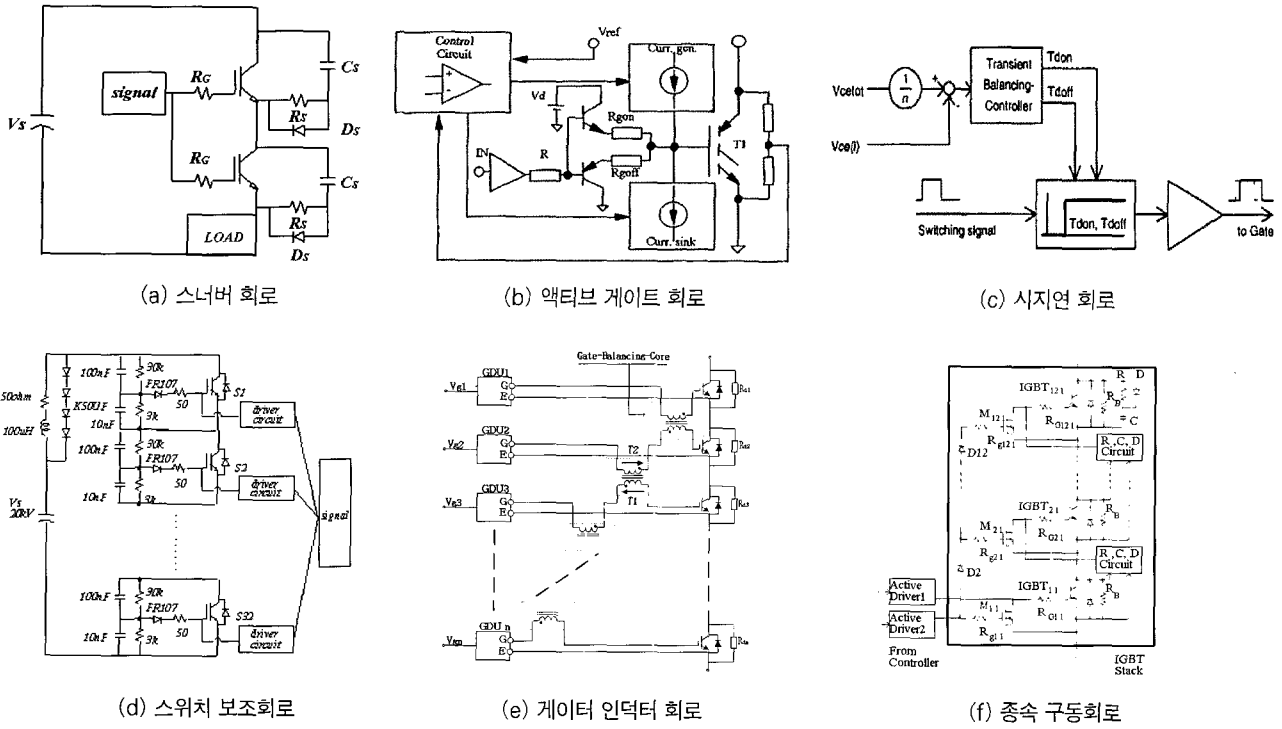


그림 3 전압 구동형 전력용 반도체 소자 직렬 회로

2.3 펄스전원 회로

전력용 반도체를 이용한 펄스전원장치는 여러 가지 회로들이 소개되어 왔으며 대표적인 회로를 그림 4에서 나타내었다. 전원회로는 구성면에서 크게 네가지로 나뉘볼 수 있으며 첫 번째로 기본적인 고압전원과 스위치회로로 구성된 스위치형 펄스전원회로와 두 번째로 펄스변압기와 저압 입력전원 그리고 스위치로 구성된 전압 승압회로와 세 번째로 Marx 전압발생기의 변형회로들 그리고 마지막으로 기존의 blumelin회로나 펄스압축회로를 이용하면서 싸이라트론등의 스위치를 대체한 형태의 회로들로 구분할 수 있다.

각각의 장 단점으로 그림 4(a)의 회로는 가장 단순한 구조이나 고압을 직접 스위칭할 스위치가 있어야 한다. 그림 4(b)와 (c)의 회로는 일차측을 저압화 할 수 있는 장점이 있으나 펄스폭이 제한된다.

그림 4(d)의 회로는 개별 충전방식의 입력전원을 펄스발생순간에 직렬로 스위칭하여 펄스를 얻는 회로이다. 절연된 입력전원이 필요한 단점이 있다. 그림 4(e)의 회로는 Marx generator를 변형한 형태이다. 이외에 기존의 그림 1의 회로에서 반도체 고압 스위치를 이용하여 회로를 구성할 수 있으며 중, 소용량에 대해 적용할 수 있다.

실제 제작 시험한 사례로서 다음 그림 5의 회로를 나타내었다. 그림 5(a)의 회로는 일차는 모두 병렬로 구성하고 펄스변압기 이차를 직렬로 구성하여 고압 펄스를 만들어내는 방식

이다. 펄스변압기의 누설인덕턴스와 선로인덕턴스를 최소화 하여야 빠른 상승시간을 얻을 수 있는 구조이다.

개별 펄스변압기를 이용한 직 병렬 구조로서 수십 ns, ~20kV의 펄스전원이 개발되었으며 유사하게 단일변압기의 일차권선들을 직렬 구조로 하고 이차를 하나로 두는 형태로 프랑스의 physique and Industrie에서 100kV, 100A, 3-30us 펄스폭의 펄스발생회로를 구현하였다.

그림 5(b)의 회로는 Marx generator를 변형한 구조로서 병렬로 저압을 충전한 뒤에 직렬로 고압 펄스를 만들어 내는 방식의 회로이다. 구성이 간단하고 스위치의 과도상태와 정상상태의 전압이 병렬 연결된 커패시터 전압으로 안정되어 신뢰성이 높다. 단점은 펄스전압과 입력전압이 절연되지 않는 것이다. 전기연구원에서 20kV, 300A, -10us의 펄스발생기를 제작 시험하였다.

그림 5(c)의 회로는 푸쉬풀 구조의 고압 발생장치와 IGBT 직렬 스위치를 이용하여 양극성 펄스를 만들어 낸 회로이다. 그림의 회로를 이용하여 시험한 출력전압은 10kV, 100A, 1us 이다.

3. 반도체식 펄스전원의 응용

싸이라트론/이그니트론등 진공관스위치들을 대체하는 분야는 모두 반도체 펄스전원의 응용분야로 볼 수 있으며 각 절에

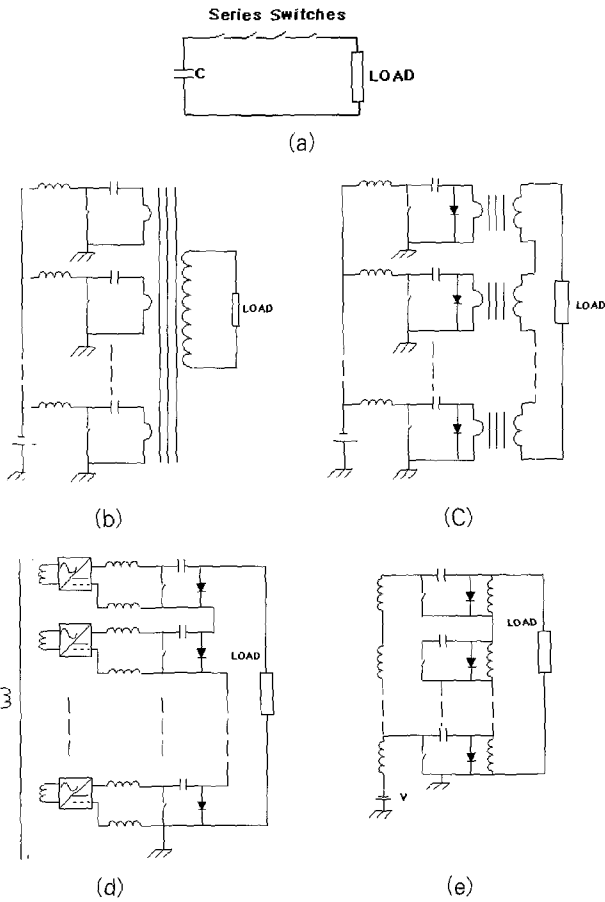


그림 4 전력용 반도체 이용 펄스전원장치 회로
 (a) 직렬스위치 (b), (c) 펄스변압기회로
 (d) 직렬 전원회로 (e) 변형된 Marx 회로

서 예시하였다. 다음 표 2에 나타난 바와 같이 다양한 응용분야가 있다.

3.1 레이저 응용 분야

산업용 레이저에서 의료용 레이저에 이르기 까지 Co2 레이저, Nd: Yag, Er: Yag 레이저 등에 적용 가능하며 이를 위한 전원으로 반도체식 펄스전원을 사용할 수 있다. 수술 치료 목적의 의료분야에서 산업용의 정밀 가공, 융합분야등에 적용된다.

3.2 바이오 응용분야

세계에 의한 세포의 융합, 사멸등에 대한 연구는 오래전부터 이뤄져 왔으며 1990년대에 미국 오하이오 주립대에서 펄스전원에 의한 미생물 살균이 본격적으로 연구되기 시작하였다. 연구 초기단계엔 싸이랏론등을 이용한 소형 펄스전원을 이용하였으나 상용화 연구가 진행되면서 전력용 반

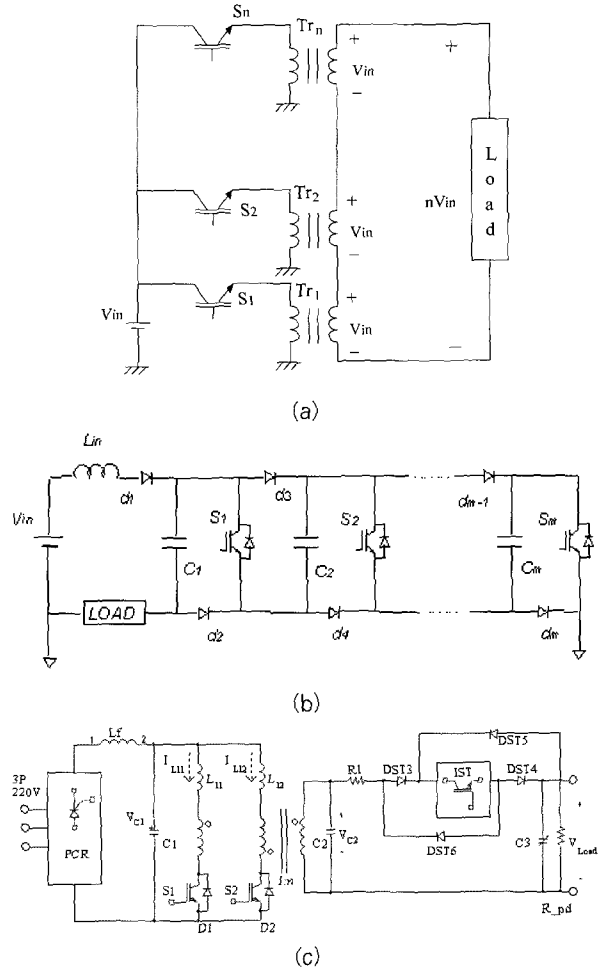


그림 5 전력용 반도체형 펄스전원 개발사례

도체를 적용한 펄스전원을 제작하였다. 다음 그림 6의 사진은 DTI사의 60kV, 600A의 양방향 펄스전원을 나타낸 것이다.

3.3 광원분야

조명분야에서 역시 펄스전원을 통한 평판광원의 개발을 시도하고 있다. 고압 펄스전원에 의한 광원의 효율향상과 일부, 평판전원에서 제작공정을 간단화하여 생산성 향상을 꾀할 수 있다. 특히, 향후 조명 및 디스플레이 분야에서 중요시되는 평판의 대구경화를 감안할 때 전원에 의한 효율개선과 고압화가 필요하다.

3.4 가속기 전원

선형 가속기용의 전력용 반도체를 이용한 펄스전원이 역시 많이 연구되고 있으며 100kV이상의 전압과 수십 MW의 펄스출력을 갖는 IGBT 직렬 스위치를 이용한 회로가 실제 가

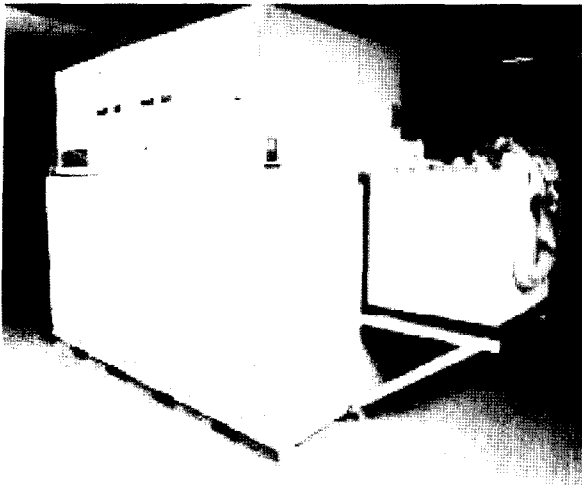


그림 6 미국 DTI사의 60kV, 600A 전력용 반도체를 이용한 펄스전원

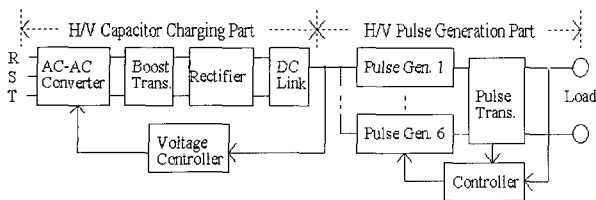


그림 7 PSII용 펄스전원 시스템

속기 전원으로 개발되었다. 저장용 커패시터에 충전된 고전압을 약 160개의 직렬 연결된 IGBT가 직접 스위칭 하여 부하에 펄스전원을 공급하는 방식이 문헌에서 소개되었다. 이외에 선형가속기 전원으로 MOSFET, 싸이리스터를 이용한 직렬 스위치들이 소개되고 있다.

3.5 기타

소재 코팅이나 강화를 위한 플라즈마 이온 증착 기술에 역시 이온의 가속을 위한 펄스전원이 필요하며 전력용 반도체를 이용한 전원기술이 접목되고 있다. 특히, 고전압이면서 수십 내지 수백 A 이하의 연속적인 펄스가 필요하므로 기존의 진공관 스위치들에 비해 반도체 스위치를 이용하는 것이 보다 유리해진다.

그림 7은 제작 시험중인 이온증착용 펄스전원시스템의 개요도를 나타내었다.

이외에 군수용 레일 건을 위한 펄스전원으로 역시 활용할 수 있으며 환경분야에서 집진이나 탈황 탈질 공정에 역시 펄스전원이 이용되고 있다.

이외에도 레이더, 파쇄기, 방전가공, 용접등의 응용분야에 역시 활용되며 표 2에 나타낸 바와 같이 의료, 농업, 화학, 전기, 기계등 다양한 분야에 역시 접목 가능하다.

표 2 펄스전원의 응용분야

응용분야	펄스전원장치
laser Welder	pulsed Nd: YAG, CO2, Nitrogen, Copper Vapor
photolithography	pulsed- X-ray
metal forming	pulsed magnetic forming
rock fracturing	pulsed power supply
surface finishing of metal	pulsed laser light/ ion implementation
steel casting	pulsed electromagnetic field
powder forming	exploding wire, MHD
fabric sterilization	rf power
pulsed U. V. for paint	pulsed U. V. source
pulsed electrostatic precipitator	pulsed E field
microwave oil sludge separation	pulsed microwave
eye surgery	pulsed laser
bone repair	pulsed low power
injection materials through the skin without needles	pulsed linear motor
ultra-low concentration analysis	pulsed laser
destroying of toxic gases and water purification	pulsed E field
killing bacteria by E fields	pulsed high voltage source
pulsed X-ray for feed grain preservation	pulsed X-ray

4. 맺음말

펄스전원은 여러 응용분야에서 새로운 물성 또는 화학적 변화를 얻기 위해 여러 가지 용도로 사용되고 있으며 이를 상용화하고 신뢰성을 높이기 위해 전력용 반도체를 이용한 전원장치가 연구되고 있다.

전력용 반도체의 반영구적인 수명과 제어 및 구성의 간편함은 실용적인 장치를 구성하는 데에 매우 매력적인 이유가 된다. 향후, 펄스전원의 응용분야의 확장과 전력용 반도체의 펄스정격의 증가로 인해 많은 실용적인 반도체식 펄스전원이 창출될 것으로 예상된다.

참고 문헌

[1] Qi Zhang, S. T. Pai, Introduction to High Power

- Pulse Technology, World Scientific, 1995
- [2] G. V. Barbosa-Canovas, M. M. Gongora-Nieto, U. R. Pothakamury, and B. G. Swanson, "Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields", Academic Press, 1999.
 - [3] G. N. Glasoe, J. V. Lebacqz, Pulse Generator, Macgraw-Hill Book Company, INC., 1948.
 - [4] S. Levy, M. Nikolich, I. Alexeff, M. Radar, M. T. Buttram, and W.J. Sarjeant, "Commercial Applications for Modulators and Pulsed Power Technology", in Conf. Rec. of 12th Power Modulator Symposium, Myrtle Beach, SC, June 23-25, pp. 8-14. (1992)
 - [5] Dr. Marcel P. J. Gaudreau, etc, "A Solid State Pulsed Power System For Food Processing", Proceedings of the Pulsed Power Plasma Science, Volume 2, pp. 1174-1177. (2001)
 - [6] K. Yatsui, "Progress of Pulsed Power Commercial Applications in Japan", 11th Pulsed Power Conference, Vol. 1, pp. 13-24, 1997.
 - [7] 二宮紀彦, 三ッ失高正, 高失勝彦, 徳地 明, "パルスパワー技術を支えるパワーエレクトロニクス", OHM 総合電気技術, pp. 5-30, 1996.
 - [8] Y. H. Chung, H. J. Kim, and C. S. Yang, "MOSFET Switched 20kV, 500A, 100Ns Pulse Generator with Series Connected Pulse Transformers", 13thIEEE International Pulsed Power Conf. Rec., pp 1237-1240, 2001.

< 저 자 소 개 >



백주원(白周元)

1967년 1월 2일생. 1990년 경북대 공대 전기공학 학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자연구그룹 선임연구원.



유동욱(兪東旭)

1959년 11월 3일생. 1983년 성균관대 전기공학 학과 졸업. 1985년 연세대 전기공학과 졸업(석사). 1997년 성균관대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자연구그룹 책임연구원(T/L). 전력전자학회 학술이사.

술이사.



김종현(金鍾賢)

1968년 4월 18일생. 1994년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 전자전기공학과 졸업(박사). 1998년 2002년 9월 삼성전기 선임연구원. 2002년 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자연구그룹 선임연구원.



임근희(林根熙)

1955년 10월 7일생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 Virginia Polytechnic Institute and State University 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 1978년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단장(책임연구원).

전기연구단장(책임연구원).