

전력용반도체 소자를 이용한 새로운 고전압 펄스발생회로

백주원*, 이영운*, 신병철*, 김홍근**

* 한국전기연구소 산업전기연구단, ** 경북대학교 전자전기공학부

High Voltage Pulse Generator using Power Semiconductor Switches

J. W. Baek*, Y. Y. Lee*, B. C. Shin*, H. G. Kim**

* Power Electronics Div. KERI ** Kyungpook National Univ.

ABSTRACT

Using power semiconductor switches such as IGBTs, diodes and L-C circuits, novel repetitive impulse voltage generator is developed. In the presented circuits, high voltage pulse is generated by series-connection of capacitors and IGBTs. The charging of capacitors and voltage balance of IGBTs is done automatically. To verify the proposed circuit, 20kV, 300A pulse generator is manufactured and tested.

1. 서론

낮은 충전전압과 고전압 출력을 얻기 위해 펄스변압기를 사용할 필요가 없기 때문에 Marx 제너레이터와 같은 임펄스 발생회로가 널리 실험실에서 사용되어 왔다. [1] 그렇지만 기존의 이러한 Marx 제너레이터는 스파크갭을 스위치로 사용함으로써 수명의 제한 그리고 반복 주파수에 상당한 제약이 뒤따랐다. 특히, 동작시점의 제어를 위해 부가적인 회로가 추가되어야 하는 불편함이 있었다. 이외에 고전압 펄스를 얻기 위한 회로들은 공통적으로 고전압 직류전원장치를 필요로 하며 직류전원으로부터 에너지를 수동소자로 충전시켜 이를 변환하므로 고전압 펄스를 얻는 방식을 취하므로 회로의 구성이 쉽지 않고 많은 주의가 따른다.

Marx 제너레이터 이외에 고전압 펄스를 얻는 데에는 여러 가지 방법이 있으며 예로서, 진공관 스위치를 이용하여 구성하는 방식과 펄스전압을 압축시켜 고압으로 승압해 가는 방식이 있다. 이들 회로 역시 매우 낮은 전압에서 높은 승압비의 고전압 펄스를 얻기는 힘들며 반복 주파수, 신뢰성, 수명등에서 많은 문제점을 가진다.

이에 따라 상기의 문제점들을 해소할 수 있는 전력

용 반도체 소자들과 펄스변압기를 이용한 방법이 제안되기도 하였다. 그렇지만 이러한 방식은 펄스변압기의 빠른 동작을 얻기 위해 용량을 키우는 데에 제약이 따르며 소용량급에 적용이 가능하다. 본 논문에서는 새로운 전력용 반도체를 이용한 펄스전압 발생회로를 제안한다. 제안하는 회로는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 저압에서 고압으로의 펄스발생 순간 승압 방식
- 전력용 반도체를 이용한 펄스 고전압 회로
- 수 kHz의 펄스 반복주파수
- 반도체 소자의 직렬에 따른 전압 불균형으로 발생하는 과전압이 회로에 의해 클램프가 됨.
- 출력 전압이 동작하는 소자의 수로 제어가능함.
- 일부소자의 파손에도 전체 동작은 이뤄짐.

그러므로 제안하는 회로는 고전압 펄스를 얻는데 매우 유리하며 신뢰성 역시 우수한 특성을 갖는다. 특히, 제안하는 회로는 입력전압에 대해 n배의 전압을 얻기 위해 n 개의 스위치와 2n 개의 다이오드 그리고 n개의 커패시터 만으로 간단히 구성되며 펄스변압기가 필요없다.

본 논문에서는 제안하는 회로의 동작을 설명하며 이를 검증하기 위해 1200V급 18개의 IGBT 모듈을 이용하여 20kV, 300A 펄스전압 발생회로를 구성하여 이의 동작을 시험한다.

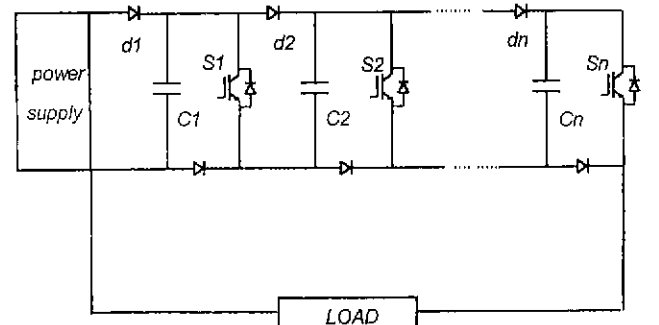


그림 1. 제안하는 회로의 개략도

2. 회로의 구성 및 동작원리

2-1. 회로구성

전체 회로의 구성은 다음 그림 2에서 나타낸 Marx generator를 기초로 변형하여 구성하였다. 입력전압의 n 배인 펄스전압을 얻기 위해 필요되는 소자는 n 개의 스위치와 $2n$ 개의 다이오드 그리고 n 개의 커패시터로 구성된다. 부하는 충전경로로 역시 이용될 수 있으며 이를 피하고자 하면 병렬로 수동소자를 연결하여 충전경로를 만들어 줄 수 있다.

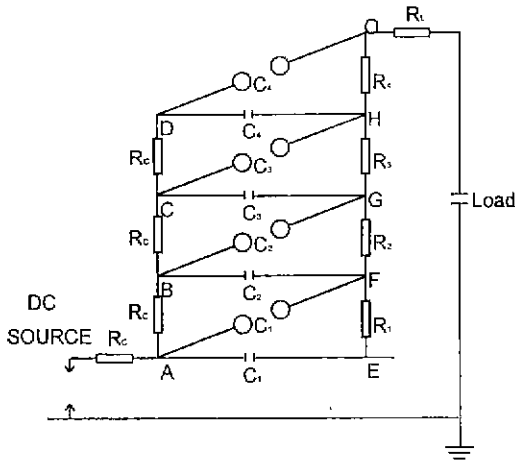


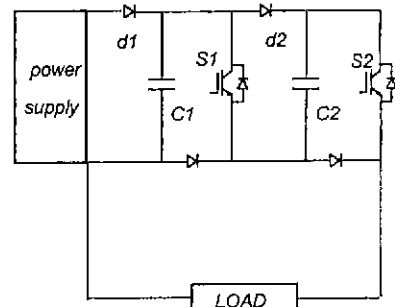
그림 2. Marks 제너레이터

또한, 부하의 위치와 접지점의 설정에 따라 양의 출력 펄스전압 또는 음의 출력 펄스전압을 얻을 수 있다. 음의 펄스전압을 얻도록 구성할 경우에는 충전경로가 부하를 통하지 않고 이뤄지므로 보다 유리한 장점을 갖는다.

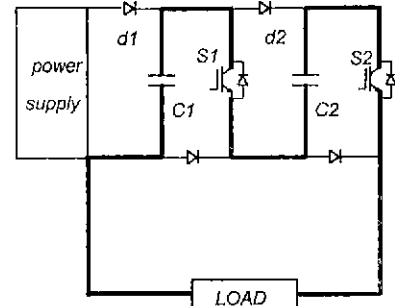
한편, 제안하는 회로에서 펄스정격이 큰 싸이리스터와 같은 소자를 사용하여 구성하면 보다 큰 펄스전류를 얻을 수 있으며 이 경우에는 커패시터 소자를 펄스 성형회로로 대체하여 이용하면 바라는 구형파 펄스전압을 얻을 수 있다.

2-2. 회로의 동작원리

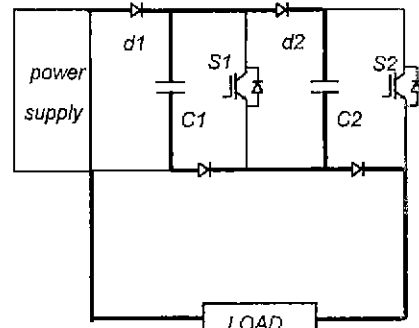
회로의 동작은 크게 3가지로 구분할 수 있으며 전체 커패시터의 충전모드와 충전이후부터 전체 스위치가 켜지기까지의 모드 그리고 스위치들이 켜져서 커패시터가 직렬로 구성되는 모드로 나눌 수 있다. 다음 그림 3은 제안하는 회로의 동작모드와 파형을 나타낸 것이다. 회로의 설명을 간단히 하기 위하여 입력전압에 대해 2배의 출력전압을 얻는 예로 설명하기로 하였다. 다이오드 및 모든 소자가 이상적이라고 가정하였다.



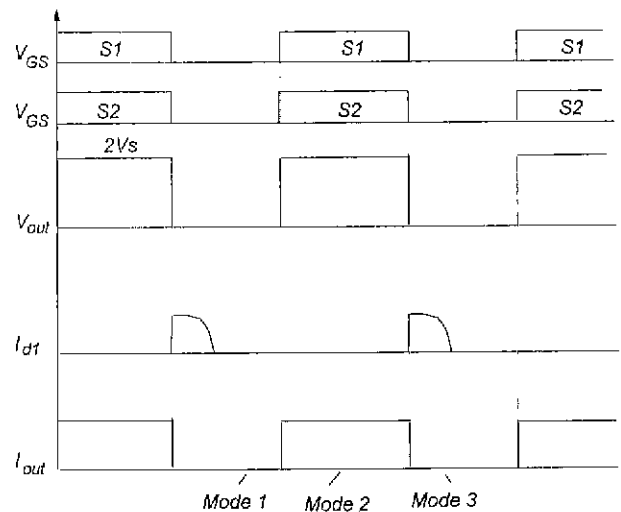
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 회로의 동작모드 및 출력 파형

모드 1 : 커패시터들이 모두 입력전압으로 충전되어 있으며 다이오드들과 스위치들은 턴 오프되어 있다. 그러므로 회로 전체는 입력전압으로 인가되어 있는 상태이므로 고압이 아닌 저압인 상태이다.

모드 2 : 스위치들이 동시에 턴 온되며 커패시터들이 직렬로 연결된다. 그러므로 커패시터 수만큼의 전압으로 승압된 출력전압이 발생하며 부하에 인가된다. 이때는 스위치들 중에서 스택의 상단부는 고압으로 되기 때문에 저전압인 부분과 펄스전압에 대한 절연이 확보되어야 한다.

모드 3 : 스위치들은 턴 오프되며 다이오드가 턴 온되어 각각의 커패시터들이 입력전압으로 충전된다. 이때, 충전경로로 부하가 역시 사용되며 충전전류를 우회시키기 위해서는 부하양단에 충전용 소자를 부가할 수 있다.

설명한 3가지 모드는 회로를 이상적으로 가정하여 나누었으나 실제 회로에서는 구동신호의 차이가 있을 수 있으며 이에 따라 스위치들의 턴 오프시미리 턴 오프한 소자에 과전압이 인가될 수 있다. 이때는 회로의 구성에 의해 자연스럽게 스위치와 병렬로 연결된 다이오드와 커패시터에 의해 클램프 동작이 일어나며 과전압에 의한 소자 파손을 막아준다.

2-3. 회로의 특징 및 설계

가. 회로의 특징

제안하는 회로는 스위치의 동작이 없을 때에는 전체 회로가 저전압으로 인가되어 있으며, 스위치의 턴온시에만 고압이 발생한다. 그러므로 전체 회로의 절연은 펄스전압을 기준으로 할 수 있으며 보다 간단하게 된다.

전체 회로는 전력용 반도체 소자를 이용하여 구성할 수 있으며 이에 따라 수명이 길고, 동작의 반복 주파수가 수 kHz까지 가능하다.

특히, 자기소호가 가능한 소자를 채택하면 펄스폭 역시 자유롭게 가변할 수 있다.

각 스위치의 과전압은 회로의 구성에 의해 자연스럽게 클램프되며 구동신호의 차이와 소자의 특성차등에 민감하지 않는 장점을 가진다.

제안하는 회로는 이외에도 많은 장점을 가지며 다음과 같다.

- 일부 소자의 파손에도 회로동작이 크게 영향을 받지 않음.
- 고전압으로 승압하기 위해 펄스변압기나 고압 전원장치등이 필요없음.
- 출력전압의 조절이 회로의 동작 또는 입력전압으로 조절가능함.

나. 회로설계

충, 방전 커패시터는 방전시의 전압강하분을 고려하여 설계하여야 한다.

$$C = \frac{\tau \times V_{out}}{\Delta V \times R_{load}}$$

여기서, τ 는 펄스폭, V_{out} 은 출력 펄스전압, R은 부하, ΔV 는 전압강하분이다.

충전용 소자를 부하에 병렬로 부착하는 것은 최대 반복주파수에 따라 설계할 수 있다.

인덕터를 이용하여 충전회로를 구성할 경우에는 충, 방전커패시터의 전압이 승압되므로 이를 고려하여 인덕터 값을 설정하여야 한다.

스위치 구동회로는 빠른 상승시간의 출력전압이 요구되는 경우에는 각각 구동신호의 차이가 최소화 되도록 구성할 필요가 있으며 상승시간에 대한 제한이 없는 경우에는 특성차이를 상당부분 무시할 수 있다.

3. 실험결과

제안하는 회로의 타당성을 검증하기 위하여 20kV, 300A의 펄스전압 발생회로를 구성하였다. 펄스폭은 1us에서 5us까지 가변이 가능하며 동작주파수는 2us 펄스를 기준으로 1kHz까지 가능하다. 다음 그림 4는 실험에 사용한 회로를 나타낸 것이다. 사용한 스위치는 세미크론사의 SKM400GB124D이며 다이오드는 IXYS사의 1200V 30A 소자를 채택하였다. 커패시터는 600V, 9uF을 직렬 연결하여 이용하였다.

IGBT의 구동은 펄스변압기를 이용하여 절연하여 제어 신호를 전달하는 방법을 이용하였다.

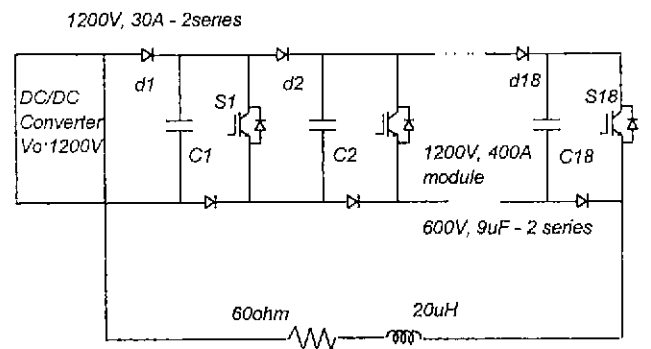
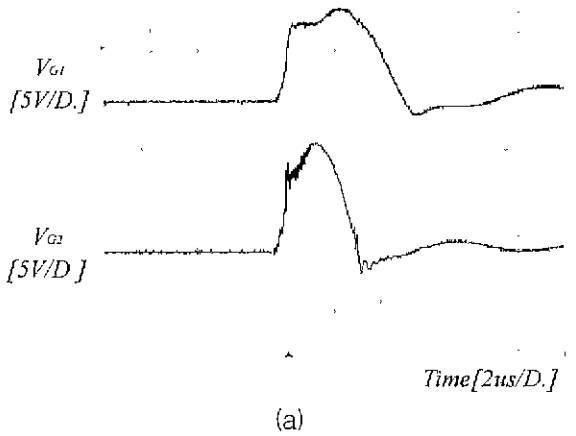
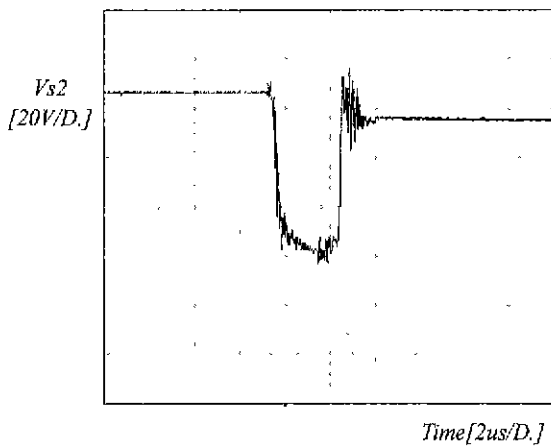


그림 4. 실험에 사용한 회로

다음 그림 5는 IGBT의 1kV의 출력전압을 발생시키는 순간에서 스위치전압을 보여준다. 구동펄스가 지연되어도 회로에 의한 전압클램프를 보여준다.



(a)



(b)

그림 5. IGBT들의 구동신호 차이 및 지연소자의 스위치 양단 전압

그림 6은 출력펄스 전압 및 펄스 전류파형을 나타낸 것이다. 전압의 상승시간이 비교적 느린 것은 펄스변압기의 특성이 일치하지 않아서 구동 시간들에 차이가 많기 때문이다.

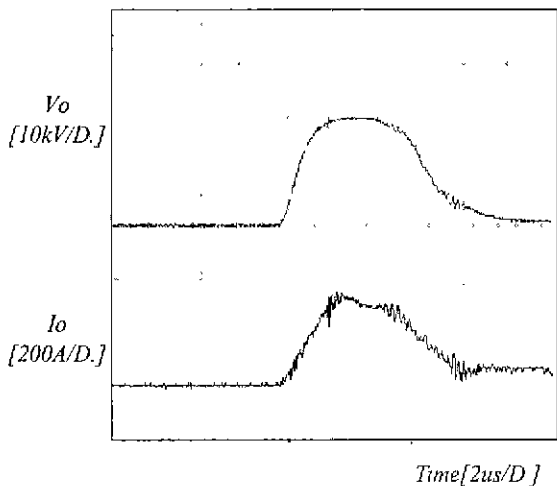


그림 6. 출력 펄스전압 및 펄스 전류파형

그림 7은 제안한 회로에서 스위치와 다이오드들 그리고 커패시터들로 구성된 펄스 승압회로 부분의 사진이다.

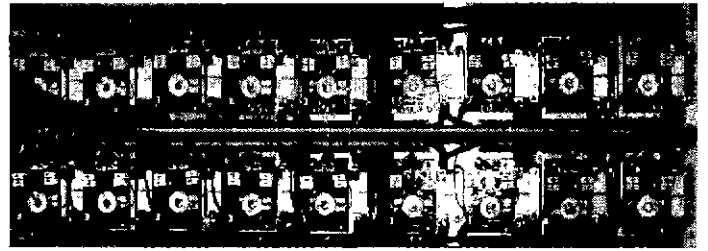


그림 7. 제안한 장치의 사진

4. 결론

본 논문에서는 새로운 전력용 반도체 소자를 이용한 고전압 펄스 발생회로의 동작원리를 설명하고 20kV, 300A, 1us - 5us 펄스 출력전압을 갖는 장치를 제작하여 이를 검증하였다.

제안하는 회로는 빠른 반복주파수와 펄스폭의 자유로운 가변이 가능하며 소자들의 직렬순간에 발생하는 지연소자의 과전압이 회로 자체에 의해 클램프되는 등 본문에서 예시한 바와 같은 많은 장점을 가지고 있다. 그러므로 소용량급에서는 물론, 대용량급 펄스 발생장치에 이르기까지 적용이 가능하며 각종 시험장치와 여러 가지 고전압 펄스가 필요되는 응용시스템에 곧바로 이용 가능한 우수한 특징을 갖는다.

참고 문헌

- [1] G. N. Glasoe, J. V. Lebacqz, "Pulse Generator", Macgraw-Hill Book Company, INC. 1948.
- [2] 백주원, 류명호, 유동욱, 김홍근, "간단한 보조회로를 이용한 새로운 IGBT 직렬 구동 기법에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제 5권, 제 1호, pp39-45, 2000년 2월
- [3] Qi Zhang, S. T. Pai, "Introduction to High Power Pulse Technology", World Scientific, 1995