

Development of the Crowbar System Using a Vacuum Switch

李 泰 浩* · 許 昌 洙** · 李 弘 植***

(Tae-Ho Lee · Chang-Su Huh · Hong-Sik Lee)

Abstract - Crowbar system is usually applied to a pulsed power system in which a capacitor bank is discharged into a load. This provides a free wheeling path for the load current and prevents the capacitor from recharging due to a reverse voltage. Usually diodes have been used as a crowbar switch, but it is not a practical system because the cost of the diodes goes up enormously with increasing the system voltage and current.

This paper presents a novel protection scheme of a charging and discharging system of a 300 kJ capacitor bank using a low-cost crowbar system which consists of a crowbar switch and resistors. Triggered vacuum switch(TVS) was used for a crowbar switch, and Rogowski coil was used to determine a trigger time of TVS. When this crowbar system is applied to our pulsed power system which consists of capacitor bank(1236 μ F), inductor(20, 160 μ H) for forming a pulse, load resistor(100 m Ω), and a closing switch, instantaneous reversal voltage of capacitor bank could be limited less than 1.8 kV until capacitor bank was charged to 17 kV.

Key Words : Crowbar, Vacuum Switch, Rogowski coil, Trigger, capacitive pulsed power

1. 서 론

현대 산업의 많은 응용 기술에서는 매우 높은 전력을 순간적으로 전원에서 부하로 전달해야할 필요가 있다. 1 J의 에너지가 1 sec 동안 전송되는 것을 1 W의 전력 전송이라고 표현하며, 같은 에너지가 1 μ s 동안 전송된다면 1 MW의 전력 전송이라고 표현한다. 이와 같이 부하에 순간적으로 전송되는 에너지가 아주 큰 경우를 펄스 파워 (pulsed power)라고 하며, 고전압·대전류의 대전력을 짧은 시간에 발생·제어하는 펄스 파워 기술은 고출력 단파장 레이저, 초강자계 발생장치, 고출력 X선 및 중성자 발생장치, 입자 가속기 등의 다양한 분야에서 이용되고 있다[1].

모든 전력원은 전송용량에 한계가 있으므로, 대전력 펄스의 생성은 입력 전력의 순간적인 압축을 필요로 하게 된다. 펄스 파워 시스템의 목적은 이러한 순간적인 전력 압축 기능을 실현하는 것이라고 할 수 있다. 이러한 순간적인 전력의 압축은 비교적 긴 시간에 걸쳐 저장 소자에 에너지를 축적하여 그 에너지를 아주 짧은 시간에 방출함으로써 수행되는데, 커패시터를 에너지 저장 소자로 사용한 펄스 파워 시스템이 대표적이라 할 수 있다.

이와 같은 고전압·대전류 펄스발생용 전원장치는 사용하

는 부하에 따라 펄스파형이 달라지게 된다. 부하의 회로정수에 따라 펄스파형은 부족제동, 임계제동, 과제동의 파형으로 나타나며, 특히 부족제동인 경우 커패시터에 역전압이 인가되어 역전압이 커패시터의 허용치 이상이 되면, 커패시터의 수명을 급격히 단축시키고 극단적인 경우 커패시터를 손상시키기도 한다. 따라서 고전압·대전류 펄스발생용 전원장치에는 일반적으로 커패시터의 전압이 0이 되는 순간에 동작하여 커패시터 쪽으로의 전류의 흐름을 차단함으로써 커패시터가 역방향으로 충전되는 것을 막는 크로바(crowbar) 회로가 필요하게 된다.

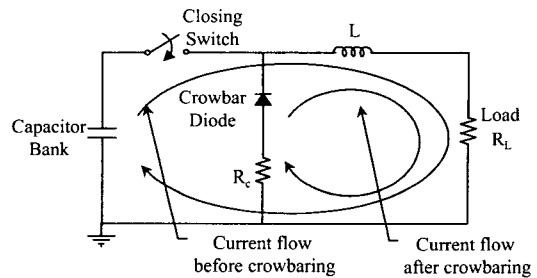


그림 1 다이오드와 저항을 이용한 일반적인 크로바 시스템
Fig. 1 A Schematic of general crowbar system using diode and resistor

이제까지 대부분의 크로바 시스템은 그림 1과 같이 다이오드와 저항으로 구성되었는데, 기본적으로 10 kV 이상의 내전압과 침투 통전 전류 10 kA 이상의 다이오드는 그 가격이 매우 비싸며 수백 kA에 적용하기 위해서는 너무 많은 값비싼 다

* 正 會 員 : 仁 河 大 學 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
 ** 正 會 員 : 仁 河 大 學 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博
 *** 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 院 電 氣 物 理 研 究 組 員 · 工 博
 接 受 日 字 : 2002 年 9 月 16 日
 最 終 完 了 : 2002 年 11 月 16 日

이오드를 사용해야하므로 실용적인 방법이 되지 못한다[2].

핵융합 실험이나 레일 건(rail gun) 실험 등의 플라즈마 물리 실험과 고자장 형성 실험에서 사용되어 왔던 대부분의 고전압·대전류 크로바 시스템은 부하전류의 피크 점 근처에서 폭발하도록 단면적과 길이가 정교하게 설계된 금속 와이어(wire)나 포일(foil)이 폭발 용단되면서 생성되는 대전류 플라즈마가 절연물을 깨뜨리고 단락시키고자 하는 두 전극사이를 크로바시켜주는 폭발형의 일회성 크로바 시스템이 주류를 이루고 있었다[3]~[5]. 크로바 소자로 다이오드를 사용하지 않고 대전류 스위치를 사용하게 될 경우 반복사용이 가능하지만 스위치의 투입시간을 결정하는 것이 문제시된다. 왜냐하면 부하의 조건에 따라서 커패시터 뱅크의 방전 패턴은 달라지게 되므로 커패시터가 완전히 방전하는 시간도 부하에 따라서 달라지기 때문이다. 따라서 전류 또는 전압을 측정하여 스위치의 트리거를 작동시켜야하며 일정하지 않은 트리거의 통계적 지연(jitter)까지도 고려해야한다. 또한 크로바 시스템이 동작해야 할 시점에서 두 전극 사이의 전위차는 거의 영에 가깝기 때문에 두 전극 사이에 방전을 일으키기가 매우 어렵다는 문제점을 안고 있다.

S. Kitagawa는 저압 갭 스위치의 방전 성형지연 시간이 고압 갭 스위치보다 긴 점을 이용하여 두 개의 갭을 직렬로 사용하여 고압 갭이 먼저 방전을 일으키게 하고 자동으로 연이어 저압 갭이 방전을 일으키게 하는 방법을 사용함으로써 크로바 시스템을 동작시켰으나 운용자가 미리 계산된 시간에 크로바 하도록 하고 있어 장치가 복잡하면서도 부하변동에 능동적으로 대처하지 못하는 단점을 안고 있다[6].

C. Friedrichs는 양성자 선형 가속기 회로에 수은 이그니트론을 크로바 스위치로 사용하여 부하의 접지측 귀로에 3 mΩ의 저항을 삽입하여 이 저항 양단의 전압을 펄스 변압기로 증폭하여 DC 3.4 kV가 상시 걸려있는 스파크 갭을 트리거시키고 이것에 의하여 크로바 이그니트론이 동작하도록 설계하였다[7]. 그러나 이 장치는 펄스 변압기와 스파크 갭의 특성이 잘 조화가 이루어지도록 반복적 시행착오를 거쳐야 전류 피크 점에서 신뢰성 있게 동작하게 되는 어려움이 있고 회로 정수가 조금만 바뀌어도 같은 시행착오를 또 겪어야 한다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 로고우스키 코일을 이용하여 크로바 스위치가 동작하는 시점을 결정하도록 함으로써 저가의 크로바 시스템을 구현하고자 하였다. 크로바 스위치로는 지연시간(delay time)과 통계적 지연이 짧고 비교적 낮은 전압에서도 동작이 가능한 TVS(triggered vacuum switch)를 사용하였다. 로고우스키코일을 통해 부하 전류로부터 신호를 유기하여 커패시터 뱅크의 전압 영점 이후에서 크로바 스위치의 트리거 펄스가 발생되도록 크로바 시스템을 동작시켰으며, 이와 같이 설계된 크로바 시스템이 부가된 펄스파워시스템에서 커패시터 뱅크를 17 kV까지 충전하여 실험을 수행하였을 때 커패시터 뱅크의 허용 역전압보다 낮게 크로바가 되는지를 확인하였다.

2. 크로바 시스템의 설계

2.1 크로바 구동용 트리거 신호 발생 회로 설계

커패시터 뱅크의 전압 영점 직후에서 크로바 시스템이 동

작하도록 크로바 스위치의 투입 시간을 결정하기 위해, 그림 2와 같이 로고우스키코일을 통해 부하 전류로부터 신호를 유기하여 고주파 제거 필터를 거쳐 노이즈의 영향을 제거한 다음, 커패시터 뱅크의 전류 침투치 직후에서 구형파가 발생하는 회로를 제작하였다. 발생한 구형파는 광신호로 변환되어 그림 6의 트리거 장치까지 전달되게 함으로써 외부로부터 침입할 수 있는 써어지나 노이즈의 영향을 억제하도록 하였다.

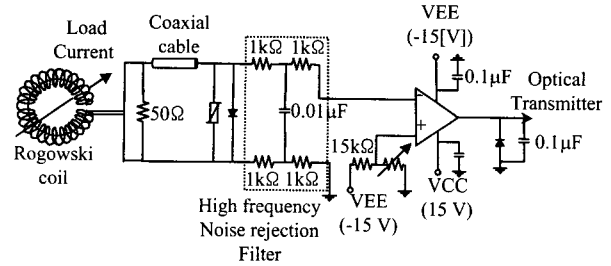


그림 2 크로바 스위치 트리거 발생장치의 SCR 구동을 위한 구형파 발생 회로

Fig. 2 Generation circuit of square pulse signal to operate SCR of a trigger signal generator used for triggering the crowbar switch

그림 3과 같이 로고우스키코일을 통해 유기되는 전압이 부하전류의 미분파형이므로 전류 최대점에서 로고우스키코일의 유기 전압은 0 이 된다.

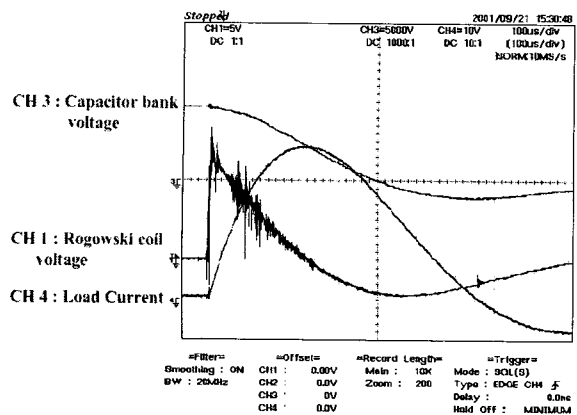


그림 3 커패시터 뱅크 전압, 부하전류, 로고우스키코일 유기전압

Fig. 3 Waveforms of the capacitor bank voltage, load current and the induced voltage in the Rogowski coil

그림 4와 같이 이 로고우스키코일의 유기전압 중에서 (+) 부분은 다이오드를 사용하여 클램핑(clamping)하였다. 크로바 스위치가 동작할 수 있는 시점으로 연산증폭기(OP Amp)의 비교 입력단 전위(comparator noninverting (+) input voltage)를 설정하여, 로고우스키코일의 유기전압이 그 전위

값이 되면 스위치의 트리거 발생장치를 구동시키는 SCR의 게이트 구동 신호가 발생되도록 하였다. 이 때, 노이즈에 의해 SCR 구동을 위한 구형파 발생 회로가 오동작 하는 것을 막기 위해 OP Amp 비교 입력단의 전위는 최소 -0.1 V 정도 보다 낮게 조절하였으며, 크로바 시스템이 커패시터 뱅크의 전압 영점 이후 적절한 시점에서 동작하도록 OP Amp 비교 입력단의 전위를 조절할 수 있도록 하였다. 그림 5는 그림 2 회로의 출력과 이 신호에 의해 동작한 크로바 스위치 트리거 발생기의 출력 전압을 나타내고 있다.

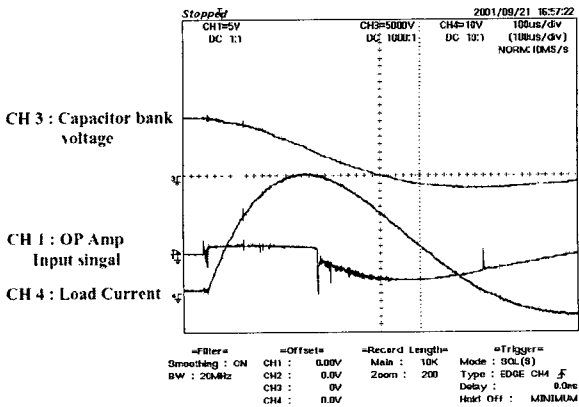


그림 4 OP Amp의 입력 신호 파형
Fig. 4 Input signal to the operational amplifier

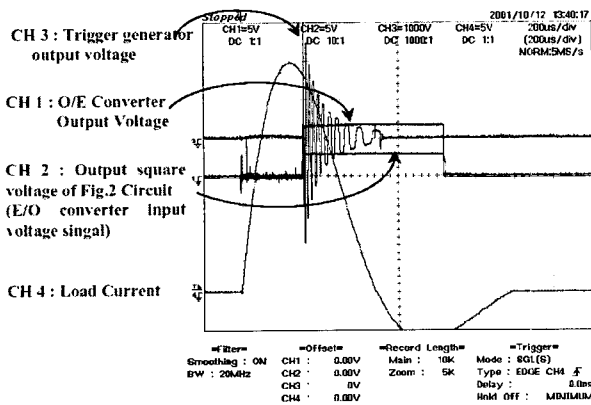


그림 5 그림 2 회로의 출력 파형 및 크로바 스위치의 트리거 발생기 출력 파형
Fig. 5 Output square pulse waveform in Fig. 2 circuit (CH 2) and output voltage waveform in the trigger generator

그림 6은 크로바 스위치를 구동하기 위한 트리거 발생기의 개념도를 나타내고 있다. 앞서 설명한 SCR 게이트 구동 신호가 광신호로 입력이 되면 광전변환 회로를 거쳐 SCR을 구동시키게 되고, 커패시터에 충전된 전압이 방전되면서 고압 절연 변압기를 거쳐 트리거 펄스 전압이 출력된다.

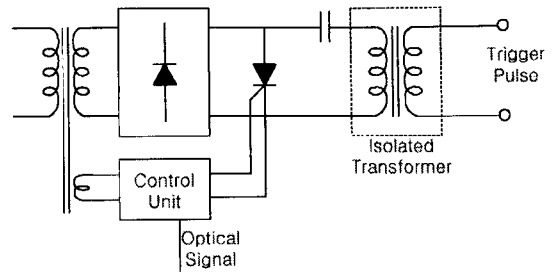


그림 6 트리거 발생기의 개념도
Fig. 6 Block diagram of trigger generator

2.2. 크로바 저항의 산정

1) 커패시터 뱅크 충전 중 커패시터 뱅크 보호 측면에서의 크로바 저항 산정

실제 펄스 파워 시스템의 구성은 투입 스위치 (closing switch) 후단에 크로바 스위치가 삽입되지만, 본 연구에서 사용하고 있는 시스템에서는 그림 10과 같이 스위치의 특성 시험을 위해 투입 스위치가 부하회로 후단에 위치하고 있다. 이와 같은 시스템에서 충전기로 커패시터 뱅크를 충전 중 TVS가 자발 방전을 일으킬 경우, 커패시터 뱅크와 크로바 회로는 단락상태가 된다. 따라서 이런 경우에 대비하여 크로바 저항은 반드시 필요하며, 이 때 흐르는 고장 전류는 다음 식에 나타낸 바와 같이 크로바 저항에 의해서 결정된다.

$$i = -\frac{V_0}{R_{cr}} e^{-\frac{t}{R_{cr}C}} \quad (1)$$

여기서, R_{cr} 은 크로바 저항, V_0 는 커패시터에 충전된 전압이며, (-)부호는 커패시터에 충전시의 전류방향과 반대방향임을 의미한다.

따라서, 본 실험에 사용된 커패시터 뱅크의 고장 허용 침투전류가 60 kA 이므로, 6개의 커패시터 뱅크가 병렬로 연결되어 22 kV로 충전할 때 TVS가 자발 방전을 일으킬 경우, 고장전류를 커패시터 뱅크의 허용 피크 전류 이하로 제한하기 위해서는 61 mΩ 이상의 크로바 저항이 필요하다.

2) 고주파 공진 전류 억제 측면에서의 크로바 저항

커패시터 뱅크에서 크로바회로까지의 선로에 인덕턴스가 존재하므로, 커패시터 뱅크의 전압 영점 직후에서 크로바 회로가 동작하게 되면 폐회로에는 고주파 공진이 발생하게 된다. 크로바 스위치로 사용하고 있는 진공스위치의 특성상 전류 영점 이후에는 절연을 회복하여 스위치가 개방상태가 된다. 따라서 이 고주파 공진을 억제하여 커패시터 뱅크의 제한 역전압인 4.4 kV 이하로 낮추고, 크로바 스위치로 사용하고 있는 TVS에 역전압이 걸려 있는 동안 전류가 흐를 수 있도록 크로바 스위치에 흐르는 전류의 영점이 충분히 후단에서 발생하도록 크로바 저항을 산정해야만 한다.

Fluke사의 PM6304 RCL Meter를 이용하여 커패시터 뱅크

에서 크로바 회로까지의 선로의 인덕턴스를 측정된 결과를 표 1에 나타내었다. 측정 결과, 커패시터 뱅크와 크로바 회로 사이의 선로에는 최대 1 μH 의 인덕턴스가 존재하고 있음을 알 수 있다.

표 1 커패시터 뱅크에서 크로바 회로까지의 선로의 인덕턴스와 저항

Table 1 Inductance and resistance of the line between capacitor bank and crowbar circuit

측정 주파수 kHz	커패시터 뱅크에서 크로바 회로까지의 선로		크로바 회로에서 커패시터 뱅크로의 귀로	
	인덕턴스 μH	저항 $\text{m}\Omega$	인덕턴스 μH	저항 $\text{m}\Omega$
1	0.6	0	0.3	0
10	0.6	2	0.4	1.9
100	0.6	14	0.4	6.2

커패시터 뱅크와 크로바 회로 사이의 인덕턴스를 1 μH 로 하고, 크로바 저항을 0, 10, 20, 50, 100, 500 $\text{m}\Omega$ 으로 하였을 때 부하전류, 커패시터 전압, 크로바 가지로 흐르는 전류의 변화를 PSpice로 모의하여 그림 7, 8, 9에 나타내었다.

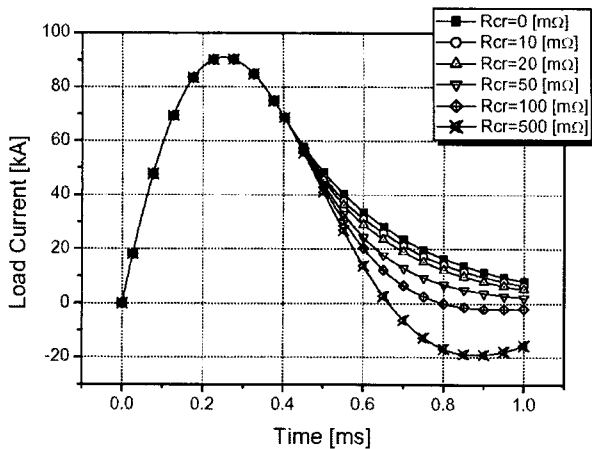


그림 7 크로바 저항 변화에 따른 부하 전류의 변화
Fig. 7 Calculated load current due to the crowbar resistance is increased.

그림 7에 나타낸 바와 같이, 크로바 저항이 100 $\text{m}\Omega$ 미만이어야 부하 전류가 전류 영점을 지나지 않고 흐를 수 있는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 적용하고 있는 시스템의 투입 스위치가 진공 스위치이므로 부하 전류가 영점을 지나게 되면 투입 스위치가 개방 상태가 되어 절연을 회복하게 된다. 따라서, 부하 전류가 충분히 흐를 수 있도록 크로바 저항이 100 $\text{m}\Omega$ 보다는 작아야 함을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9를 살펴보면, 크로바 저항이 50 $\text{m}\Omega$ 이상이면 고주파 공진이 없어지며, 커패시터 뱅크에 역전압이 걸

려 있는 동안 크로바 스위치로 흐르는 전류의 영점도 발생하지 않아서 크로바 스위치를 통해 전류가 충분히 흐를 수 있으며, 크로바 저항이 증가할수록 커패시터 뱅크의 역전압도 증가함을 알 수 있다.

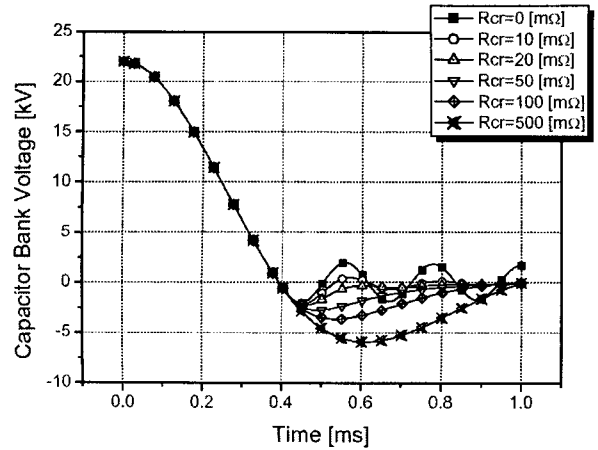


그림 8 크로바 저항 변화에 따른 커패시터 뱅크의 전압 변화

Fig. 8 Calculated capacitor bank voltage due to the crowbar resistance is increased.

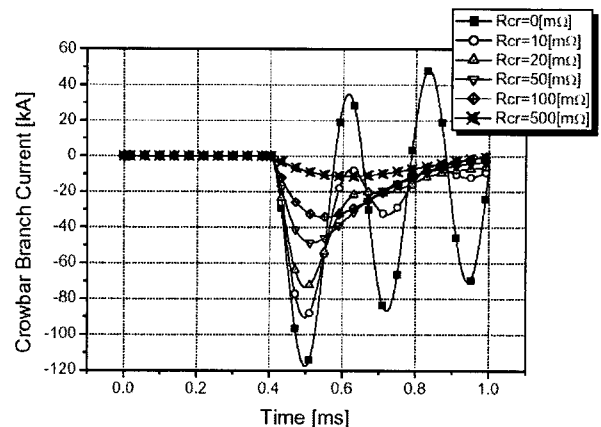


그림 9 크로바 저항변화에 따른 크로바 가지로 흐르는 전류의 변화

Fig. 9 Calculated crowbar branch current due to the crowbar resistance is increased.

따라서 이상의 고주파 공진 억제 측면과 크로바 스위치로 사용하는 진공 스위치의 동작 측면에서 모의한 결과를 종합해서 고려해 보면 50~100 $\text{m}\Omega$ 정도가 적당하다고 판단된다.

2.3 시스템 개략도

본 연구에 사용되는 펄스 파워 시스템은 그림 10과 같이 충전부, 커패시터 뱅크, 크로바 시스템, 부하, 진공스위치 시험용 챔버로 구성되어 있다. 충전장치는 맥스웰사의 동작전

압(working voltage) 22 kV의 직류 충전기 (DC charger)를 사용하였고, 커패시터 뱅크는 에너지 50 kJ, 캐패시턴스 206 μF 인 DC 커패시터 6개를 병렬로 연결하여 총 에너지 300 kJ, 캐패시턴스는 1,236 μF 로 하여 사용하였다. 또한 충전 후 투입 스위치의 오동작시 안전을 위하여 dump panel을 설치하였고, 전자기적 장애를 고려하여 충전 및 dump의 제어할 공압 스위치로 하였다. 커패시터 뱅크에서 스위치 시험용 챔버까지는 특수 제작된 기계적으로 강한 동축형 구조로 되어 있는 펄스파워용 케이블을 사용하였으며, 케이블의 인덕턴스는 0.23 $\mu\text{H}/\text{m}$ 이다. 부하용 저항은 100 m Ω 으로 하였다. 챔버 내에는 한국전기연구원에서 개발 시험 중인 VRAG(Vacuum Rotary Arc Gap) 스위치를 설치하여, 투입 스위치로 이용하였다.

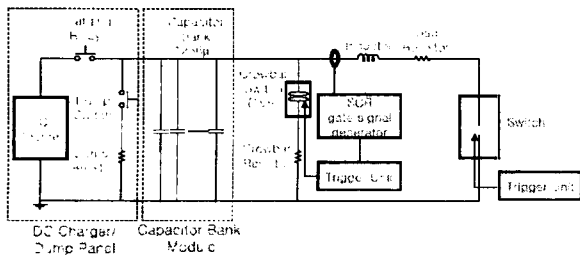


그림 10 연구에 사용된 펄스 파워 시스템의 개략도
 Fig. 10 Block diagram of capacitive pulsed power system used in this study

크로바 스위치로는 TVS (Triggered Vacuum Switch) RVU-43 모델을 사용하였다. 진공 스위치는 동작시 소음이 작을 뿐만 아니라, 수명도 길고 고전압 대전류에서 동작이 가능하며, 크기와 무게도 작고, 설치 환경에 제한을 받지 않는 장점이 있다. 표 2에 RVU-43 모델의 특성을 나타내었다[8].

표 2 TVS (RVU-43)의 제작 사양 및 동작 특성
 Table 2 The specification and characteristics of TVS (RVU-43)

Spec.	RVU 43
Operating voltage kV	0.5 25
Operating current kA	10 200
Maximum charge per pulse C	120
Delay turn on time μs	≤ 2
Electrical strength recovery time μs	100
Service life (number of operations)	104
Trigger voltage kV	5
Trigger current kA	1
Trigger current length, not less than μs	5
Dimensions	
-diameter mm	150
-height mm	203
Weight kg	7

크로바 저항은 HVR사 AB806 24 M008 모델의 디스크 저항 2개를 병렬로 연결하여 55 m Ω 이 되도록 하였다. 앞 절에서 커패시터 뱅크 충전 중 크로바 회로의 TVS가 자발 방전을 일으킬 경우에 대비하여 커패시터 뱅크 보호 측면에서의 크로바 저항을 산정한 결과가 61 m Ω , 고주파 공진 억제 측면과 크로바 스위치로 사용하는 진공 스위치의 동작 측면에서 산정한 저항이 50~60 m Ω 정도이었으나, TVS를 충분히 컨디셔닝(conditioning) 시킨 후에 사용하므로 충전 중에 자발 방전을 일으킬 확률이 아주 적고, 크로바 저항이 클수록 커패시터 뱅크에 걸리는 역전압도 커지게 된다. 따라서 가능한 한 크로바 저항이 작으면서 구조적으로 간단하게 제작했기 때문에 55 m Ω 으로 하였다.

크로바 회로가 커패시터 뱅크의 전압 영점 이후 역전압이 걸릴 때 동작하므로, 크로바 스위치로 사용한 TVS의 결선을 양극에 접지선을 음극에 커패시터의 (+)쪽으로 결선을 하였다. 이렇게 하여 실제 제작한 크로바 시스템을 그림 11에 나타내었다.

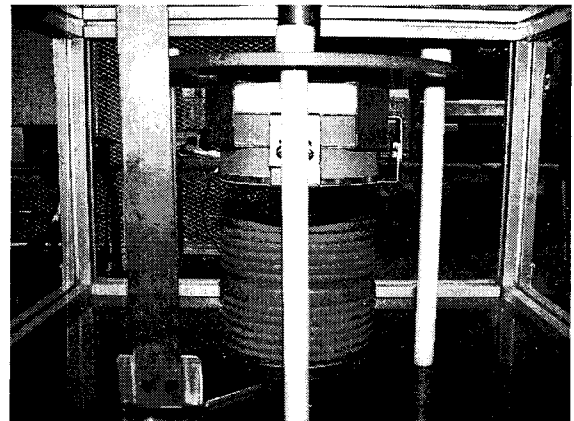


그림 11 크로바 스위치와 크로바 저항
 Fig. 11 Photograph of crowbar stack consisting of crowbar switch and resistance

3. 실험 결과

펄스 성형을 위한 인덕터의 인덕턴스가 20 μH , 160 μH 일 때, 각각에 대해 충전 전압에 따른 크로바 시스템 동작 실험 결과를 그림 12와 13에 나타내었다. 이때 인덕턴스에 따라 부하 전류의 변화율 di/dt 가 다르므로, 크로바 스위치의 동작이 가능한 시점에서 트리거 신호 펄스를 발생시키기 위해 OP Amp 비교 입력단 전위는 각각 20 μH 일 때 -2.0 V, 160 μH 일 때 -0.1 V로 하였다.

각각의 인덕터에 대해 OP Amp 비교 입력단 전위를 설정할 때, 커패시터 뱅크를 17 kV로 충전하였을 때 크로바 스위치가 안정적으로 동작할 수 있는 커패시터 뱅크의 최소 역전압 (약 600 V) 시점을 계산하여 크로바 스위치의 동작 시점으로 하였다. 이 때 커패시터 뱅크의 충전전압이 커질수록 전류 변화율이 커져서 로고우스키코일의 유기전압도 커지게 되므로 동일한 OP Amp 비교 입력단 전위에 대해 SCR 게이

트 구동 신호의 발생시점은 빨라지게 되는 한편 커패시터 뱅크의 역전압은 오히려 작아지게 된다. 따라서 커패시터 뱅크를 4~17 kV로 충전할 때 모두 크로바 회로가 안정적으로 동작하기 위해서는 커패시터 뱅크를 17 kV로 충전하였을 때 크로바 회로가 동작할 수 있도록 OP Amp 비교 입력단 전위를 맞추는 것이다.

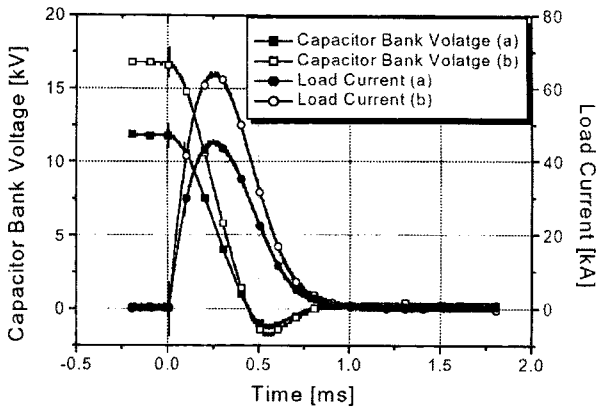


그림 12 충전전압에 따른 커패시터 뱅크의 전압과 부하 전류 (인덕턴스가 20 μ H 일 때, 커패시터 뱅크를 (a) 12 kV, (b) 17 kV로 충전한 경우)

Fig. 12 Measured capacitor bank voltage and load current with the charging voltage of 12 kV (a) and 17 kV (b). (Inductor of inductor : 20 μ H)

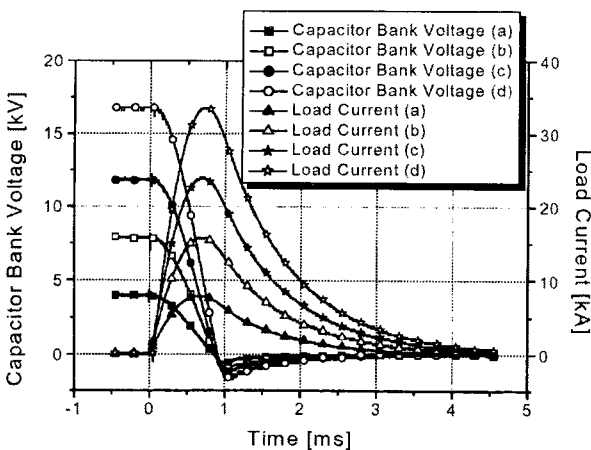


그림 13 충전전압에 따른 커패시터 뱅크의 전압과 부하 전류 (인덕턴스가 160 μ H 일 때 커패시터 뱅크를 (a) 4 kV, (b) 8 kV, (c) 12 kV, (d) 17 kV로 충전한 경우)

Fig. 13 Measured capacitor bank voltage and load current with the charging voltage of 4 kV (a), 8 kV (b), 12 kV (c) and 17 kV (d). (Inductor of inductor : 160 μ H)

그림 12와 13에 나타낸 바와 같이 펄스 성형을 위한 인덕터의 인덕턴스가 20 μ H, 160 μ H인 경우 모두 커패시터 뱅크를 17 kV까지 충전할 때 최대 역전압이 -1.8 kV 이내로 커패시터가 수용할 수 있는 역전압 한계치인 -4.4 kV의 40.9% 이내의 값으로 나타났다. 그러나, 부하의 인덕턴스나 저항, 선로의 인덕턴스, 커패시터 뱅크의 용량 등에 따라서 부하 전류의 펄스 폭이나 di/dt 가 달라지므로, OP Amp의 비교 입력단 전위도 달라져야 한다. 따라서, 본 연구에 사용된 펄스 파워 시스템과 다른 R, L, C 파라미터 값을 가진 시스템에 적용하기 위해서는 실험과 모의를 통해 적절한 OP Amp의 비교 입력단 전위값을 선택해야만 한다.

커패시터 뱅크의 충전전압의 변화에 따른 커패시터 뱅크의 최대 역전압의 변화를 그림 14에 나타내었다.

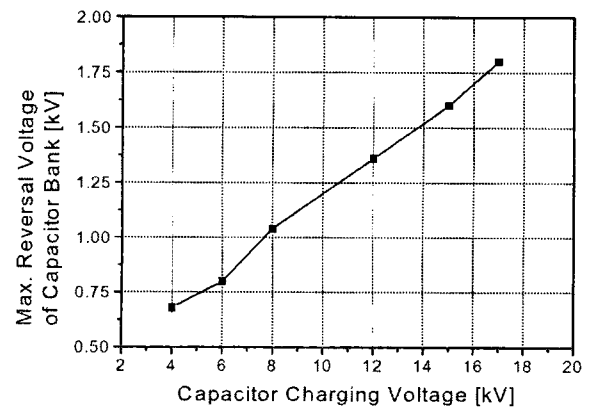


그림 14 커패시터 충전 전압 변화에 따른 커패시터 뱅크의 최대 역전압 (인덕턴스가 160 μ H 일 때)

Fig. 14 Dependence of the maximum reversal voltage of capacitor bank on the capacitor charging voltage

부하 전류의 최대값이 커짐에 따라 커패시터 뱅크의 최대 역전압도 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있는데, 이것은 커패시터 뱅크의 충전 전압이 커질수록 인덕터에 저장되는 역전압도 커지므로, 크로바 회로가 동작할 때 크로바 저항으로 흐르는 전류도 증가하기 때문이다. 따라서 진공 스위치를 크로바 스위치로 사용하는 경우 크로바 저항이 반드시 삽입되어야 하므로, 크로바 저항으로 흐르는 전류에 의한 전압 강하 때문에 본 연구에서 나타나는 커패시터 뱅크의 역전압을 더 낮게 하는 것은 어려운 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 용량형 펄스 파워 시스템(Capacitive pulse power system)에서 선로의 인덕턴스, 펄스 성형을 위한 인덕터, 용량성 부하(capacitive load)나 유도성 부하(inductive load) 등에 의해 커패시터 뱅크에 가해지는 역전압으로부터 커패시터 뱅크를 보호하기 위해 진공 스위치를 적용한 크로바 시스템에 대한 설계 및 시험 연구를 수행하였다. 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 로고우스키 코일을 이용하여 크로바 스위치로 사용한 TVS가 트리거 되도록 회로를 설계하였다. 로고우스키코일의 유기전압 중에서 (+) 부분은 다이오드를 사용하여 클램핑(clamping)시키고, 크로바 스위치가 동작할 수 있는 시점으로 OP Amp의 비교입력단 전위를 설정하여, 로고우스키코일의 유기전압이 그 전위값이 되면 스위치의 트리거 발생장치를 구동시키는 SCR의 게이트 구동 신호가 발생되도록 하였다.
- 커패시터 बैं크 충전 중 크로바 회로의 TVS가 자발 방전을 일으킬 경우에 대비한 커패시터 बैं크 보호 측면과 고주파 공진 억제 측면, 크로바 스위치로 사용하는 진공 스위치의 동작 측면 등을 고려하여 크로바 저항을 55 mΩ으로 선정하였다.
- 펄스 성형을 위한 인덕터가 20 μH, 160 μH 일 때, 각각에 대해 충전 전압에 따른 크로바 시스템 동작 실험을 수행하여 두 경우 모두 커패시터 बैं크를 17 kV까지 충전할 때 최대 역전압이 -1.8 kV 이내로 제한할 수 있음을 확인하였다. 이것은 커패시터가 수용할 수 있는 역전압 한계치인 -4.4 kV의 40 % 정도였다.

로고우스키 코일을 이용하여 신호처리를 통해 진공 스위치를 트리거 시키는 방법을 사용함으로써 저가의 크로바 시스템을 구현할 수 있었으며, 펄스 파워를 이용하는 의료 기술, 핵 융합 기술, 군사 기술 등 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소주관으로 "전력용 마이크로 TVS 개발 연구(00-중-03)"로 수행되었음.

참고 문헌

[1] S. T. Pai and Qi Zhang, "Introduction to high power pulse technology", Advanced Series in Electrical and Computer Engineering, Vol 10.
 [2] 임근희, 이홍식, 강동필, "Rotary Arc Gap (5kV, 100kA) 투입 스위치 개발", 과학기술부 특정연구개발사업 연구 보고서, 97-NZ-01-01-A-31, 2000.
 [3] P. B. Higgins, "Explosively triggered gas-dielectric crowbar switch", Rev. Sci. Instrum. Vol 50, No. 4, pp. 435-437, 1979.
 [4] R. Hornady (U of Maryland), "An Explosively Driven Fast Acting High Current Crowbar Switch", 1971 (Note).
 [5] R. Bealing, "Exploding foil devices for shaping megamp current pulses", J. of Physics E: Sci. Instrum., Vol. 5, pp. 889-892, 1972.

[6] S. Kitagawa, "Fast air gap crowbar switch decoupled by a low pressure gap", Rev. of Sci. Instrum., Vol. 46, No. 6, pp. 729-734, 1975.
 [7] C. Friedrichs, J. Lyles, J. and M. Doub, "Development of a high speed crowbar for LANSCE", Particle Accelerator Conference Proceedings of the 1997, Vol. 3, pp. 3473-3475, 1998.
 [8] Dmitrii F. Alferov, Valerii P. Ivanov, and Vladmir A. Sidorov, "High-current vacuum switching devices for power energy storages", IEEE Trans. Mag., Vol. 35, No. 1, pp. 323-327, 1999.

저 자 소 개



이 태 호 (李 泰 浩)

1972년 6월 19일생. 1997년 인하대 전기공학과 졸업. 1997년~1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 032-860-7391, Fax : 032-863-5822
 E-mail : g1991140@inhavision.inha.ac.kr



허 창 수 (許 昌 洙)

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1983~1993년 한국전기연구소 기능재료연구실 실장. 1997~1998년 커네티컷대 방문교수. 1993~현재 인하대 전기공학과 교수
 Tel : 032-860-7399, Fax : 032-863-5822
 E-mail : cshuh@inha.ac.kr



이 홍 식 (李 弘 植)

1953년 9월 13일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리그룹 연구그룹장(책임).
 Tel : 055-280-1491, Fax : 055-280-1490
 E-mail : hslee@keri.re.kr