

커패시터 뱅크 모듈 구성에 있어서 경제적인 크로바 시스템과 보호회로

임근희, 조주현, 이홍식, Pavlov E. P.
한국전기연구소

Low-cost crowbar system and protection scheme in capacitor bank module

Geun-Hie Rim, Chu-Hyun Cho, Hong-Sik Lee, Pavlov E. P.

Abstract - Pulsed power systems consist of a capacitor bank, an isolated high-voltage charging power-supply, high-current bus-work for charging and discharging, and a control system. In such pulsed power systems, the operating-lifetime of the capacitors is closely dependent on the voltage reversal. Hence, most capacitor-discharging systems includes crowbar circuits.

The crowbar circuit prevents the capacitor recharging with reverse voltage. Usually, it consists of crowbar resistors and high pulse-current diode-stacks connected in series. The requirements for the diode-stacks are fast-recovery time and high-voltage and large-current ratings, which results in the high cost of the pulsed-power system.

This paper presents a protection scheme of a charging and discharging system of a 500kJ capacitor bank using a low-cost crowbar circuit and safety-fuses.

1. 서 론

펄스 파워용 커패시터 뱅크 모듈에 있어서 크로바 시스템은 필수 불가결한 요소이다. 가장 효과적이며 단순한 구조는 다이오드를 이용하는 시스템이지만 10kV 이상의 내전압과 펄스 수 100kA 이상을 통전할 수 있는 다이오드를 이용한 크로바 시스템은 그 가격이 매우 비싸고, 전량 수입하여야 하므로 구입하는데 시간이 많이 소요된다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 RAG 스위치를 이용한 경제적인 크로바 시스템을 구성하고, 저항 및 보호회로용 퓨즈 등을 실험실에서 간단히 제작하여 사용하는 방법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 시스템구성

그림 1은 본 연구에서 구성한 500kJ급 펄스발생장치의 구성을 나타낸 회로도이다. Main 스위치와 Crowbar 스위치는 모두 본 연구에서 개발한 RAG 스위치를 사용하였으며 각각의 소자 값들은 다음과 같다. $R_0 = (8kW)4k\Omega$, $R_d = (16kW)1k\Omega$, $R_1 = (1kW)1.17\Omega$, $R_2 = (340W)2k\Omega$, $R_3 = 10m\Omega$, $C_0 = 10 * 830\mu F(11kV)$, $C_1 = 20\mu F(10kV)$, $D_1 = 12kV, 400A, 12.5kA(pulse)$

그림 1의 점선으로 된 타원 내부의 부분이 본 연구에서 제안하는 크로바 시스템을 나타낸 것이다.

펄스파워용 동축케이블은 내부도체와 외부도체의 단면적이 같은 구조를 갖는 케이블로서 낮은 인덕턴스를 갖

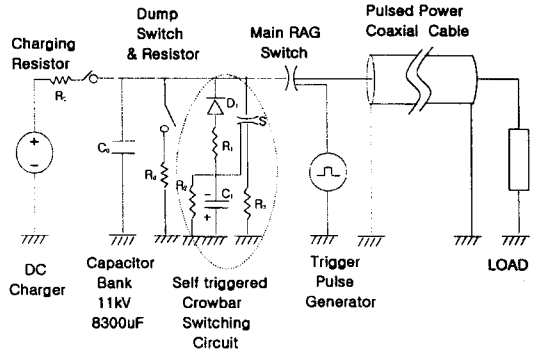


그림 1 시스템 구성 회로도

는 것이 중요하다.

2.2 Crowbar system

커패시터의 수명은 커패시터에 인가되는 역전압과 밀접한 관계가 있어서 역전압이 클수록 커패시터의 수명은 급격히 줄어들게 된다. 이러한 역전압을 방지하기 위해서 사용하는 시스템이 크로바 시스템으로서 가장 널리 사용되는 방식은 반도체 다이오드를 사용하는 것이다. 다이오드를 사용하는 경우는 역전압을 매우 낮게 억제할 수 있으며 안정적으로 동작할 수 있다. 그러나 펄스 전류가 수백 kA에 이르는 대전류를 발생하는 시스템에서는 이러한 용량의 다이오드를 사용하기는 매우 어려운 일이다. 기본적으로 10kV 이상의 내전압과 피크 통전 전류 10kA 이상의 다이오드는 그 가격이 매우 비싸고 수백 kA의 경우는 너무 많은 다이오드를 사용해야하므로 회로의 안정적 동작에 방해가 되기 때문이다.

한편 다이오드를 사용하지 않고 스위치만을 사용하는 경우는 스위치의 투입 시간을 맞추는 것이 어려운 문제이다. 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 작동시켜야 하며 일정하지 않은 트리거의 jitter 시간을 고려해야한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해서 다이오드와 스위치를 병렬로 사용하는 방식을 도입하였다. 그림 2는 그림 1의 회로에서 크로바 회로부분만을 나타낸 것이다. 그림에서 다이오드 D1은 400A 급으로서 커패시터 뱅크에 역전압이 인가되면 도통되고 저항 R1에 의해서 전류가 제한되어 커패시터 C1을 그림에 나타낸 극성으로 충전하게 된다. 커패시터 C1은 음극이 크로바용 RAG 스위치의 트리거 핀에 연결되어 있으며 커패시터 전압이 3~5kV 정도면 트리거 동작이 일어나게 된다. 이는 역전압이 3~5 kV가 인가된다는 것으로 이방식의 단점이기도 하다. 즉, 크로바 시스템이 없는 경우에 80% 이상의 역전압이 인가되지만 이 방식의 크로바

시스템을 사용하는 경우는 그 역전압을 11kV 커패시터 인 경우에는 50% 이하로 줄일 수 있으며 커패시터 뱅크의 전압이 22kV인 경우에는 20% 정도로 억제할 수 있다. 20%의 역전압은 커패시터 수명에 그다지 영향을 주지 않는 것으로 보고되고 있다.

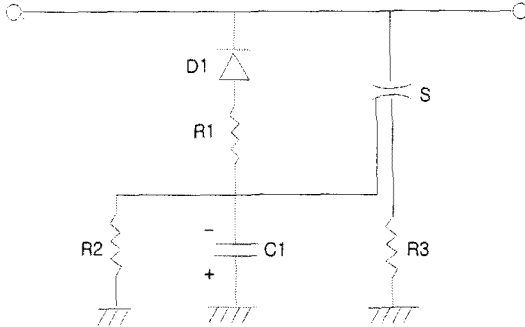


그림 2 크로바 회로 (D1: 크로바 다이오드, R1:전류제한저항, C1:트리거용 커패시터, R2:Safety resistor, S: 크로바용 RAG 스위치, R3:크로바저항)

그림 2에서 R3는 크로바 저항으로서 크로바가 작동되면 방전회로에 추가되어 시스템 파라미터를 바꾸게 된다. 즉 크로바 전에는 under-damping 회로였으나 크로바 된 후에는 over-damping 회로가 되는 것이다. 이 크로바 저항의 값은 본 연구에서 구성한 시스템의 경우 다음 식으로 주어진다.

$$R_3 = \frac{\rho}{2} = \frac{\sqrt{L/C}}{2} \quad (1)$$

여기서 L은 방전회로의 등가 인덕턴스로서 약 4uH, C는 커패시터 뱅크의 커패시턴스로서 8300uF 이므로 본 시스템의 크로바 저항은 0.01Ω이 된다. 이러한 저항을 실험실에서 손쉽게 제작할 수 있는 방법을 다음절에서 기술한다.

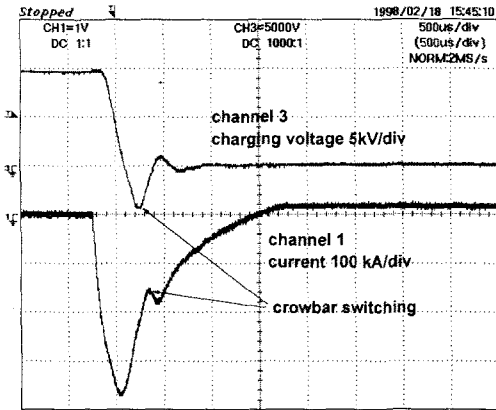


그림 3 크로바 동작시의 전압 및 전류 파형

그림 3은 이와 같은 시스템에서 크로바 동작을 나타낸 전압 및 전류 파형이다. 크로바가 동작하는 커패시터 뱅크의 역전압은 4kV로서 충전전압 10kV에 대해서 40% 정도로 역전압을 억제할 수 있으며 다이오드와 RAG 스위치를 이용하여 200kA 이상의 전류를 크로바시킬 수 있음을 나타내고 있다. 그림 4는 실제 500kJ 급 펄스발생 장치에 꾸며진 크로바 회로를 나타낸 것이다.

그림 5는 500kJ급 펄스 발생장치를 나타낸 것이다

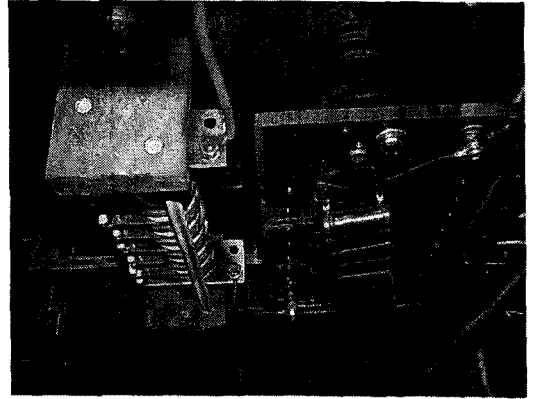


그림 4 그림 2의 크로바 회로의 실제 구성

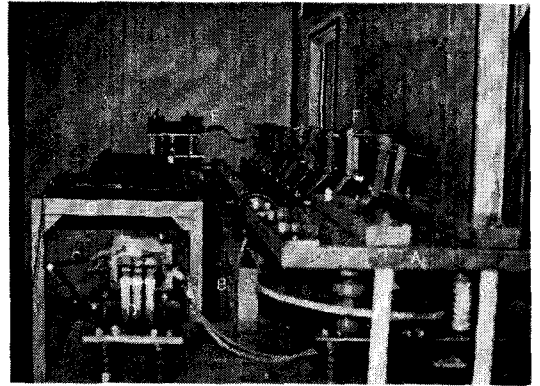


그림 5 500kJ 급 펄스발생기 (A : RAG 스위치, B: 커패시터뱅크, C:커패시터충전용 DC 파워서플라이, D:트리거 시스템, E: 크로바 회로 및 크로바용 RAG 스위치, F:크로바 저항)

2.3 고에너지용 저항과 퓨즈

크로바 저항은 저항값이 작으면서도 용량은 커야한다. 이와 같은 크로바 저항이 갖추어야할 조건을 정리하면 다음과 같다.

1. 크로바저항은 가능한 한 작은 인덕턴스를 갖아야한다. 인덕턴스가 크면 크로바 동작시에 전류상승이 지연된다.
2. 적당한 열 용량을 갖아야한다. 즉 커패시터 뱅크에 저장된 에너지의 상당부분이 크로바 저항에 의해서 소비되기 때문이다.
3. 기계적 구조가 대전류를 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 대전류에 의한 전자기력이 발생하여 구조에 변형을 가져올 수 있기 때문이다.

이러한 저항을 만들기 위해서 사용하는 재질은 일반적으로 스테인레스 등의 금속이어도 무방하지만 본 연구에서는 구리 호일을 이용하여 저항을 만들었다. 그 구조는 폭 60mm, 두께 0.1mm 정도의 호일을 100mm 정도의 길이로 지그재그로 접고 그 사이에 Teflon sheet로 절연을 하는 구조이다. 이 경우 2번의 조건을 만족시키면서 원하는 저항 값 0.01Ω을 얻기 위해서는 다음의 계산과 같이하면 된다. 저항은 0.1Ω 저항 10개를 각각의 커패시터에 병렬로 연결하는 방식으로 하였다.

저항체의 허용온도를 상온에서 100℃ 정도 상승을 허용하고, 약 40kJ의 에너지가 크로바 저항에서 소비된다면 구리의 무게는 다음과 같다.

$$m = \frac{E}{C\Delta T} = \frac{40}{0.39 \times 100} \approx 1\text{kg} \quad (2)$$

여기서 C : specific heat [cal/g/K], ΔT : 온도차 [K]를 각각 나타낸다. 따라서 폭 60mm, 두께 0.1mm의 구리 호일을 사용한다면 0.1 Ω 을 만들기 위해서는 그 길이가 다음과 같이 결정된다.

$$l_1 = \frac{S \cdot R_1}{\rho_{Cu}(1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T)} = \frac{6 \cdot 0.1}{0.025} \approx 24\text{m} \quad (3)$$

여기서 S : foil cross-section [mm²], R_1 : 크로바 저항 한 개의 값 0.1 Ω , ρ_{Cu} : specific resistance [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$], α_{Cu} : 구리에 대해서 온도에 따른 저항계수 (0.0039)를 각각 나타낸다.

실제로는 24m의 구리 호일은 약 1.28kg의 무게를 가지며 온도상승은 약 80℃ 정도이다.

한편 사고로부터 커패시터 및 회로를 보호하기 위한 퓨즈는 다음과 같이 설계된다. 기본적으로 퓨즈는 정상시는 대전류를 통전하지만 사고시에는 대전류에 의해서 절단되도록 설계된다. 퓨즈 또한 저항과 마찬가지로 대전류에 의한 전자력을 견뎌야한다.

위의 저항과 같은 구리 호일을 사용하는 경우에 그 단면적을 얼마로 하여야 하는가는 다음 조건에 의해서 결정될 수 있다.

$$\frac{E^{3/2}}{VL^{1/2}K} < S^2 < \frac{NE^{3/2}}{VL^{1/2}K} \quad (4)$$

여기서 S:foil cross-section, E_1 :커패시터 한 개에 저장된 에너지, V:커패시터 충전전압, L:커패시터 뱅크를 구성하는 bus bar 등의 leakage inductance(한 커패시터당 약 0.1 μH), K:재료상수 (구리일 경우 $K=5.9 \times 10^{17}$), N:사고 커패시터를 제외한 나머지 커패시터의 수를 나타낸다. 그림 6은 이와 같이 만들어진 저항과 퓨즈를 나타낸 것이다.

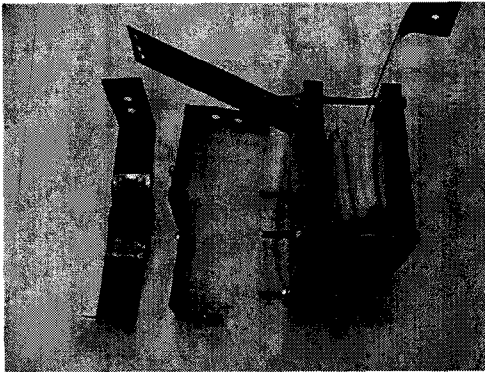


그림 6 실험실에서 copper foil을 이용하여 제작된 크로바 저항(오른쪽)과 퓨즈(왼쪽)

3. 결 론

크로바 시스템과 protection은 펄스파워 시스템에서 꼭 필요한 부분이지만 경제적인 이유로 생략되어 사용되는 경우도 많이 있다. 그러나 장기적인 측면과 안전을 위해서는 반드시 갖추어야 할 부분이다. 본 연구에서는 크로바 시스템과 보호 장치를 경제적으로 꾸미는 한가지

방법을 제안하였으며, 실험을 통하여 동작을 확인하고 실제 시스템에 적용하여 사용하고 있다.

앞으로 펄스파워 응용기술의 분야가 확대되어 감에 따라서 이와 같은 기술의 수요는 늘어날 것으로 생각되며 산업적, 경제적인 측면에서 본 연구의 결과를 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Geun-Hie Rim, Chu-Hyun Cho, Hong-Sik Lee, Pavlov E.P., An Electric-Blast System for Rock Fragmentation, IEEE 12th IPPC, Proc., pp. 165-168, 1999.
- [2] Geun-Hie Rim, Chu-Hyun Cho, Hong-Sik Lee, and Pavlov E.P. Development of the Pulse RAG Switch 1998 IEEE International Conference on Plasma Science, June 1, 1998, Raleigh, North California, Abstracts P.228.
- [3] Geun-Hie Rim, Chu-Hyun Cho, Pavlov E.P., Design and Testing of a Rotary Arc Gap Switch for Pulsed Power, IEEE. 12th IPPC, Proc., pp. 219-223, 1999.
- [4] A. Guenther, M. Kristiansen, and T. Martin. Opening Switch, Plenum Press, New York and London, 1987.