

電熱化學推進裝置用 大電流 펄스成形 회로의 크로우바 저항삽입의 검토

이 홍식, 김 종수, 진 윤식, 김 진성*, 추 증호*, 정 재원*
한국전기연구소, 국방과학연구소*

Resistor Insertion in crowbar circuit of the Pulse Power System for Korean ETC Accelerator

Hong-Sik Lee, Jong-Soo Kim, Yun-Sik Jin, Jin-Sung Kim*, Jeung-Ho Chu*, Jae-Won Jung*
Korea Electrotechnology Research Institute, Agency for Defence Development*

Abstract- The high current pulsed power systems(PPS) for rail guns, ET and ETC accelerators require many components of very high cost. If one failed to select component specifications based on optimal design, cost effective and reliable PPS could not be obtained. It is very significant to study a preliminary circuit scheme and to determine optimal specifications via circuit simulation before constructing the PPS based on modularized capacitor banks. The optimal crowbar resistor value, module inductance was determined in view of energy loss, the voltage reversal of capacitors and the transient current of crowbar diodes.

22kV, 50kJ capacitor를 기본단위로 하여 300kJ module을 8개 구성하기로 결정하였다. 모듈의 펄스 성형 리액터와 부하저항에 따른 펄스 폭과 예상 전류치를 표 1에 나타 내었다.

가. 인덕터(Inductor)

- 22 kV, 180 kA (0.5 ms), 최대 160uH
- module당 1개씩 두되 20, 40, 80, 160 uH의 탭을 두어 전류 기본파형의 폭을 0.5 ms, 0.7ms, 1ms, 1.4 ms로 변화시킬 수 있게 한다.

나. 펄스 파워 스위치

- 정격전압 25kV 이상.
- 통전전류는 표1에서 180kA(0.5ms)이상.
- 통전전하량: 55[C]이상.
- Action integral : 8.1 [MJ/Ω]이상
- 기타: 1항의 검토 결과에 따라 역전류 저지기능을 가지고 비용이 낮은 TVS-43으로 결정하였다.

I. 서론

전열추진 기술개발을 위하여는 고 에너지 밀도에 제어성이 뛰어난 신뢰성 있는 펄스 파워 전원장치의 구비가 필수적이다. 커패시터 뱅크는 에너지 밀도측면에서는 매우 떨어지나 신뢰성과 제어성(전류파형 성형성)에서 가장 뛰어나 일반적으로 기술개발 단계에서는 가장 선호하는 전원장치로 되고 있다.

2. 크로우바 회로

가. 크로우바 저항 소모 에너지 검토

크로우바 저항은 표유(漂遊) 인덕턴스와 커패시터 뱅

표 1. 모듈 인덕턴스와 부하저항에 따른 전류치

Module Inductance (uH)		20	40	80	160
22kV 1236uF 300kJ (206uFx6)	τ (ms)	0.5	0.7	1.0	1.4
	Z(mΩ)	127	180	250	360
	I(R=0) (kA)	173	122	87	61
	I(R=10mΩ) (kA)	163	117	84	59
	I(R=Z) (kA)	94	67	47	34
	I(R=2Z) (kA)	64	45	32	23

그러나 대부분의 경우 전원장치의 구성에는 대단히 고가의 부품들이 다량으로 소요되어 최적한 설계에 의한 부품사양을 결정하지 못할 경우 장치의 구성에 불필요한 비용 낭비를 초래할 뿐 아니라 시스템의 신뢰성에 심각한 영향을 미치게 된다. 따라서 전열추진 기술개발을 위한 커패시터 뱅크형 전원장치의 구성에 앞서 주요 구성품의 전기적 예비 설계와 회로모의 등을 통하여 최적한 사양을 결정하는 것이 매우 중요한 일이다. 여기서는 에너지 손실 관점, 커패시터 역전압 억제, 크로우바 다이오드 과도전류 관점에서 최적 크로우바 저항 및 모듈 인덕턴스 값을 결정하는 과정을 중심으로 커패시터, 주 스위치, 도체 굵기 등의 사양결정에 대하여 서술하였고 모듈 인덕터와 커패시터, 주 스위치의 사양을 결정하고 도체 및 크로우바 회로의 사양 결정과정에 대하여 검토하였다.

크가 만들어 내는 진동성 과도전류에 의한 크로우바 다이오드 파괴를 방지하기 위하여 크로우바 다이오드와 직렬로 삽입된다. 크로우바 저항이 클수록 다이오드 피크 전류와 전류변화를 부담이 낮아지지만 크로우바 저항에서의 에너지 손실이 커지기 때문에 소자보호의 관점과 에너지 손실 저감의 관점에서 본 저항치 선정의 타협점을 찾아야 한다. 일반적으로 크로우바 저항이 삽입되면 크로우바 작용은 전류 피크를 조금 지나서 일어난다. 저항치가 클수록 더 뒤에서 일어나게 되지만 여기서는 에너지 손실 정도를 개략적으로 추산해 보기 위하여 편의상 크로우바 동작이 전류 피크에서 일어나는 것으로 가정한다. 이 경우 피크 전류를 I, 펄스 감쇄 시정수를 τ , 부하저항(선로 저항 포함)을 R_L , 크로우바 저항을 R_C 이라 하면 전류 피크시 인덕터 저장 에너지는 $\frac{1}{2}LI^2$, 크로우바 저항에서 소모되는 에너지는

$$\frac{1}{2} LI^2 \frac{R_C}{R_L + R_C}$$

그리고 전류 피크 전까지 부하에서 소모된 에너지는 $\frac{1}{4}$

II. 부품품 사양의 결정

1. 커패시터, 인덕터 및 스위치

$I^2 R_L \tau$ 이므로 %Loss는

$$\begin{aligned} \%Loss &= \frac{\frac{1}{2} L I^2 \frac{R_{cr}}{R_L + R_{cr}}}{\frac{1}{4} I^2 R_L \tau + \frac{1}{2} L I^2} \\ &= \frac{\frac{R_{cr}}{R_L}}{1 + \frac{\pi R_L}{2Z} \left(1 + \frac{R_{cr}}{R_L}\right) + \frac{R_{cr}}{R_L}} \\ &= \frac{x}{(1 + 0.5\pi\beta)(1 + x)} \end{aligned}$$

이며, 여기서 $x = R_{cr}/R_L$, $\beta = R_L/Z$, $Z = \sqrt{L/C}$ 이다.
 예를들면 부하저항의 크기가 특성 임피던스치와 비슷한 경우의 크로우바 저항에서의 에너지 손실을 초기 저장 에너지의 10% 이내로 제한하려면 크로우바 저항은 특성 임피던스의 34%이하이어야 한다고 말할 수 있다. 부하저항, 크로우바 저항 크기와 손실율과의 관계를 그림 1과 그림 2에 나타 내었다. 이 그래프로부터 여러 가지 고려 중인 크로우바 저항치와 예상 부하저항을 감안한 적정 크로우바 저항 선정을 행할 수 있다. 실제의 크로우바 저항

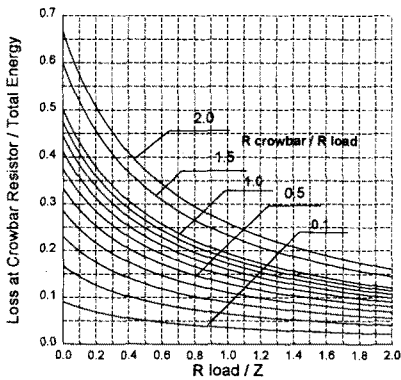


그림 1 크로우바 저항을 파라미터로한 부하저항과 손실율 그래프

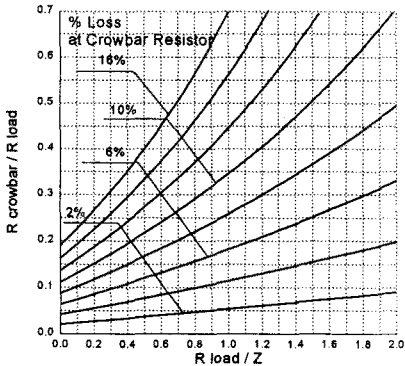


그림 2 손실율을 파라미터로한 부하저항과 크로우바 저항 그래프

손실은 이 그래프가 지시하는 것보다 작다.

나, 다이오드에 흐르는 고주파 공진 전류 억제측면에서 본 크로우바 저항

모듈 인덕터가 각각 10 μ H, 20 μ H일 때, 크로우바 저항 값을 10m Ω , 20m Ω , 부하저항을 0, 10, 50, 100 m Ω 으로 변화시키면서 크로우바 다이오드에 흐르는 피크 전류치 값을 구한 결과는 그림 3과 같다. 그림 4에는 전류변화에 대한 추이를 나타내었다. 검토대상이었던 A사의 크로우바 다이오드의 정격은 전압(V_{RRM}) 12 [kV], 피크 전류는 60 [kA], di/dt는 3.8 [kA/ μ s]이다. 최대 충전전압이 22[kV], 최대 예상 전류가 180 [kA]이므로 크로우바 다이오드를 각 모듈당 2개 직렬, 3개 병렬로 사용하고자 한다. 따라서 부하단락시 다이오드 피크전류가 180 [kA] 이하가 되려면 모듈 인덕턴스는 20 [μ H] 이상이어야 하고 크로우바 저항치는 10 [m Ω]이상이어야 함을 알 수 있다. 크로우바 저항 10m Ω 은 다이오드 피크 전류에서 안전여유가 너무 작으므로 모듈 최소 인덕턴스 20 [μ H], 크로우바 저항 20 [m Ω]을 택했을 때 부하단락시의 모듈별 다이오드 피크 전류는 160 [kA], di/dt는 그림 4에서 2 [kA/ μ s]로서 정격 11.4 [kA/ μ s]에 비하여 매우 여유가 있음을 알 수 있으며 커패시터 역전압은 그림 5에서 3.2 [kV](15%)이하로 제한할 수 있어서 커패시터 정격치인 20%보다 낮은 값을 알 수 있다.

이상과 같이 결정한 전열추진연구 펄스 전원 시스템의 구성 개념도는 그림 6과 같다.

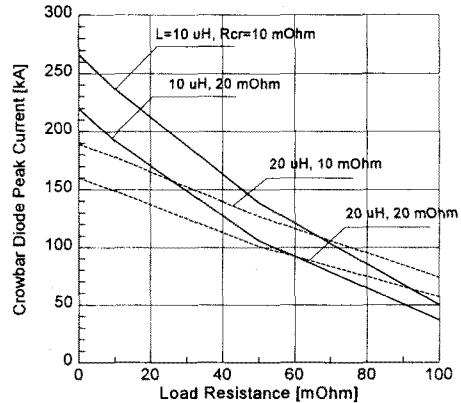


그림 3 모듈 인덕턴스, 크로우바 저항, 부하저항에 따른 다이오드 전류 피크치

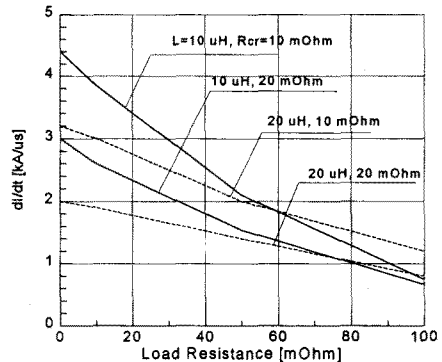


그림 4 모듈 인덕턴스, 크로우바 저항, 부하저항에 따른 다이오드 전류변화를

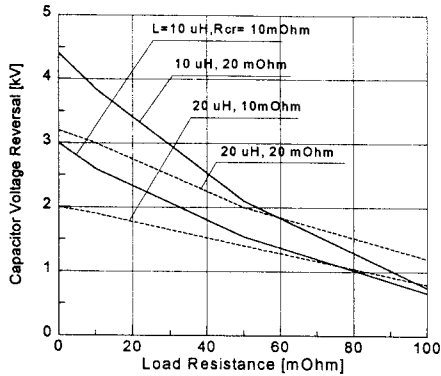


그림 5 모듈 인덕턴스, 크로우바 저항, 부하저항에 따른 커패시터 역전압

IV. 결론

전열추진 연구를 위한 2MJ 커패시터 뱅크를 구성함에 있어서 전류파형 성형의 자유도를 크게하기 위하여 여러 개의 모듈로 하여 방전을 순차제어할 수 있도록 구성하는 경우, 커패시터를 역전압에서 보호하기 위하여는 크로우바 회로가 필수적임을 또 전류 파형성형의 용이성을 도모하고 모듈의 순차방전시 모듈간 전류공진을 막기위하여는

모듈별 역전류 저지능이 필요함을 간단한 회로모의를 통하여 확인할 수 있었다. 2MJ 커패시터 뱅크를 300kJ 모듈 8개로 구성하는 경우의 소오 커패시터, 인덕터, 모듈 버스, 케이블, 크로우바 다이오드, 크로우바 저항, 주 스위치의 사양을 전기적, 열적, 기계적 제한조건을 고려하여 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 사양으로 결정하였다.

- 1) 커패시터는 22kV, 50kJ, 30kA(Normal), 60kA(Fault), 2 terminal
- 2) 인덕터는 180kA(0.5ms), 20 μ H(40 μ H, 80 μ H, 160 μ H tap)
- 3) 모듈별 케이블은 심선 50mm²이상, 통합 전류가 흐르는 도체는 400mm²이상
- 4) 커패시터와 버스 연결선의 최소굵기는 30mm²,
- 5) 모듈버스의 최소 단면적은 180mm²,

- 6) 주 스위치는 25 [kV], 180 [kA](0.5ms)이상, 55 [C], 8.1[MJ/Q]이상,역전류 저지 기능보유
- 7) 크로우바 다이오드 스택(stack)은 22 [kV], 160 [kA],전류 상승속도 2 [kA/ μ s] 이상인 HV Avalanche Diode
- 8) 크로우바 회로 삽입 저항은 모듈당 20 [m Ω]

참고문헌

- [1] Handbook of Chemistry and Physics, 70th Ed., D-181, F-146
- [2] G. L. Katulka, H. Burden, et al, "Electrical Energy Shaping for Ballistic Application in Electrothermal Guns", US Army Ballistic Research Lab Report, BRL-TR-3304, Dec 1991
- [3] 飯田修一 外, "物理定數表", 1978, 朝倉書店, pp 36, pp 152
- [4] Heinz Knoepfel, "Pulsed High Magnetic Fields", 1970, North Holland Publishing Co., Amsterdam, pp 249, pp 276-277.
- [5] 이홍식, "대전류 펄스 발생용 전원장치", '97전열추진기술 세미나, 국방과학연구소, 대전, 1997. 9. 2, pp 5-1~5-25
- [6] 정재원, 김진성, "전열화학포 연구현황 및 소요기술", '97전열추진기술 세미나, 국방과학연구소, 대전, 1997. 9. 2, pp 1-1~1-34
- [7] 이홍식, 김진성, 정재원 외, "전열추진연구 전원장치 구성부품 사양의 결정", '98전열추진기술 세미나, 국방과학연구소, 대전, 1998. 11. 26, pp3-1~3-15
- [8] F. W. Grover, "Inductance Calculations, Working Formulas and Tables", Special Edition Prepared for Instrument Society of America, 1973, Dover Publications, NY, pp 163-169
- [9] R. Dethlefsen, "Vacuum and other Switches", Pulsed Power Course, Nov. 13-16, 1995, Austin, Texas
- [10] K. A. Jamison, "Pulse Forming Networks", Pulsed Power Course, Nov. 13-16, 1995, Austin, Texas
- [11] C. M. Gilman, "Recent Capacitor-Based Pulse Forming Network(PFN) Developments", Pulsed Power Course, Nov. 13-16, 1995, Austin, Texas
- [12] 이홍식, 임근희, "전열추진기술 연구 전원장치 제작 관련 해외정보조사 귀국보고서", 한국전기연구소, 1998. 10. 30
- [13] EMTF Rule Book.

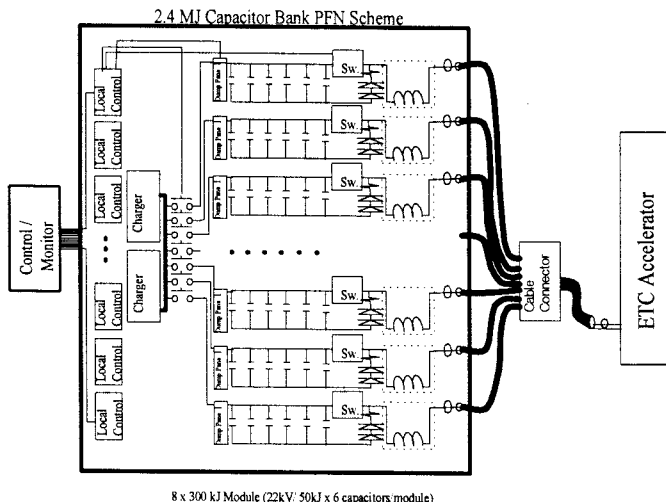


그림 6 2.4 MJ Capacitor Bank Based PFN Scheme