

INPIStron을 이용한 Pulsed Power전원장치의 개발

서길수, 김영배, 조국희, 이형호
한국전기연구소 산업전기연구단

Development of Pulsed Power Supply using INPIStron

Kil-Soo Seo, Young-Bae Kim, Kuk-Hee Cho, Hyeong-Ho Lee
Korea Electrotechnology Research Institute, Industry Applications Research Cent.

Abstract - Closing switch는 여러 가지가 있으나, 방전시 발생하는 Z-pinch로 인한 전극의 손상으로 수명이 짧고, 소음, 열 발생 등으로 소형화가 문제점으로 되어왔다. Inverse pinch현상을 이용하여 기존의 closing switch보다 전류밀도가 1/62, 주울열의 발생, 인덕턴스가 작다. INPIStron의 수명에 영향을 미치는 절연물질은 세라믹을, 도전체로서는 경제성을 감안하여 쉽게 구할 수 있는 구리를 이용하여 제작하였고, 트리거는 gas-puffing방식을 사용하였다. 또한 이렇게 제작된 INPIStron을 이용하여 2MJ-500kA급 pulsed power 전원장치를 개발하였다.

1. 서론

Pulsed Power기술은 콘덴서, 인덕터 등에 저장된 초기 電磁에너지를 時空적으로 成形·重疊·壓縮하여 수 [ns]~수 [ms]의 짧은 순간에 고출력에너지를 좁은 공간에 집중 공급하는 기술로서 핵심은 switching기술이다. 실험에 사용한 정전 펄스 파워시스템에 이용되는 폐스위치는 구조가 간단하고, 제어가 용이하여 pulsed power system에 널리 애용되고 있다. 그 switch는 spark-gap switch, spark gap을 진공 용기 내에 수납한 TVS(triggered vacuum switch), Paschen 곡선의 최소 파괴전압의 좌측 영역을 이용한 pseudo-spark switch와 Inverse pinch현상을 응용한 INPIStron등이 있다.[1~8,10]

널리 사용되는 대 전하 전송용 스위치 spark gap은 통상 2개의 반구전극은 힘 $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ 에 기인한 z-pinch에 의해 전극의 표면이 hot spot의 형성으로 심하게 손상된다. 여기서 \vec{j} 는 전류밀도, \vec{B} 는 전류에 의한 자속밀도이다.

INPIStron은 힘 $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ 을 이용하여 전류를 조이지 않고 전류 시트형태로 분산시켜 전극의 전체면에 흐르도록 한 것이다. 전류는 유도자속밀도 B를 둘러싸는 버섯모양을 형성한다[4,5]. INPIStron은 거의 모든 parameter에서 spark gap보다 우수한 것으로 알려져 있다.

본고에서는 10[kV]-500[kA]급 예전에 발표한 INPIStron의 설계개념을 적용하여 전극, 절연물의 열적 특성을 고려하여 제작하였고, gas-puffing 트리거 INPIStron을 이용한 500[kA]-2[MJ] pulsed power전원장치의 개발에 대해서 기술하였다

2. 본론

2.2 INPIStron설계

실제 INPIStron의 설계 및 제작시 다음과 같은 사항을 고려하였다. 또한 장수명을 위해서는 closing시 발생하는 도체의 주울열, 스위치내부의 온도상승을 감안하여 도체의 재질 및 절연물을 결정해야 한다.[8,9]

도체의 온도상승

그림 1은 전류밀도, 펄스폭에 따라 단위 [cm]당 온도상

승을 나타낸 것이다. 500[kA]급 600[μs]의 pulsed current가 INPIStron을 흐른다고 하면, 설계시 허용온도를 80[°C]로 제한하면cathode나 anode의 전류밀도는 약 5[kA/mm²]이므로 전극의 단면적은 100[mm²]이다. 이것은 직경 11.3[mm]에 해당한다. 여기서는 전류가 흐르는 단면적이 100[mm²]의 2배 이상이 되도록 제작하였다.

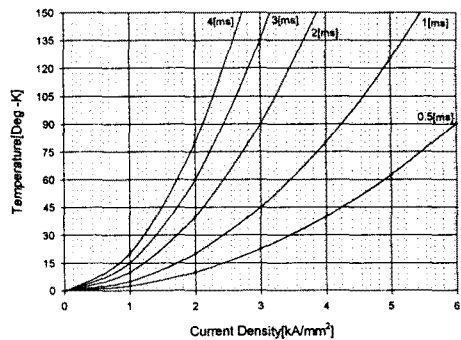


그림 1 전류밀도에 따른 도체의 온도상승

방전각도 및 Voltage hold-off

스위치내부의 압력은 80[mTorr]이하의 저기압 또는 수 [bar]의 고기압을 이용할 수 있지만, 압력이 높아지면 360° 전 영역에서 방전이 균일하게 발생하지 않게 되어 전극의 손상이 국부적으로 일어날 수 있다.

Switch의 내부를 진공펌프를 이용, 압력을 80[mTorr] 이하로 유지하면 방전유지전압 10[kV]가 가능하다. 또한 트리거는 질소가스를 puffing하는 방법으로 360° 전 영역에서 균일한 방전을 일으키도록 제작하였다. 그림 2는 switch의 Paschen's curve로서 이를 이용해 switch의 가스압력을 결정하였다.

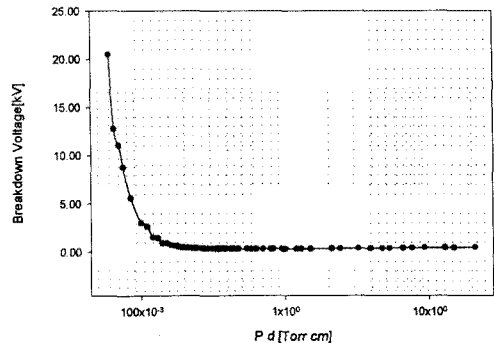
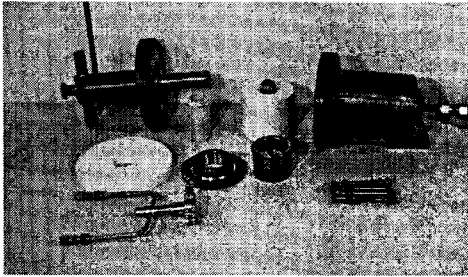


그림 2 switch의 Paschen's curve

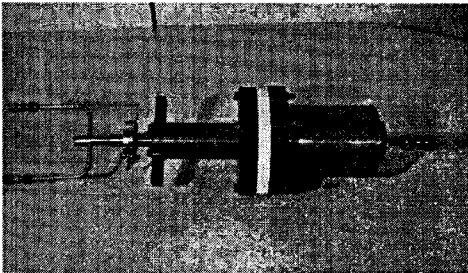
재료(물질)

절연물이 스위치의 수명에 많이 관련된다. 절연물은 다음과 같은 가혹한 환경에서 잘 견디어야 좋다. UV방

사, 충격과 특히 INPIStron에서는 열이 많이 발생하므로 녹는점이 낮은 플라스틱보다는 세라믹(alumina: Al_2O_3 , Zirconia: Zr_2O_3)은 녹는점이 $2,593[^\circ C]$ 이지만, shock wave에 약하므로 이를 고려하여 절연물을 선택하였다. 세라믹의 제작은 분말 알루미늄을 원하는 치수의 틀에 넣고 hot press casting하는 방법을 이용하였다. 그림 3은 조립전의 switch이고, 그림 4는 switch의 전체 블럭도를 나타낸 것이다.



(a) 조립전의 INPIStron



(b) 조립후의 INPIStron

그림 3 INPIStron의 구성품 및 완성품

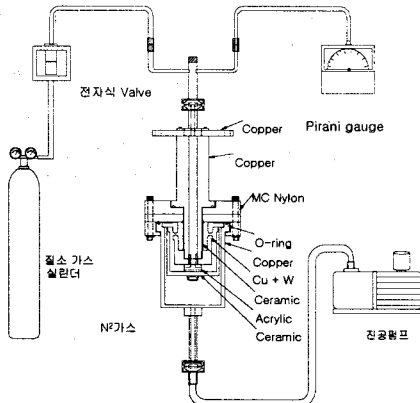


그림 4 Switch의 전체 개략도

2.2 Pulsed Power전원장치

펄스파워시스템의 회로는 그림 5와 같다. 여러 종류의 형태로 축적된 에너지는 고속 스위치를 투입하여 급속히 방출하면 pulse가 압축된다. 이렇게 하여 얻어진 pulsed power는 최종 용도에 맞는 부하로 공급되어 전기에너지로부터 입자빔, 전자파, plasma 등으로 에너지 변환되어 이용된다. 충전용 capacitor bank와 DC전압인 가용 high voltage power supply, 순간적으로 대 전류를 개폐할 수 있는 switch와 부하측에 전기에너지를 인가하

기 위한 케이블로 구성된다. 이외에도 안전을 위하여 비상시와 매 발파시 capacitor bank에 남아 있는 전기를 방전시킬 charge dump와 발파시스템을 제어할 control panel이 있다.

2MJ PULSED POWER SYSTEM BLOCK DIAGRAM

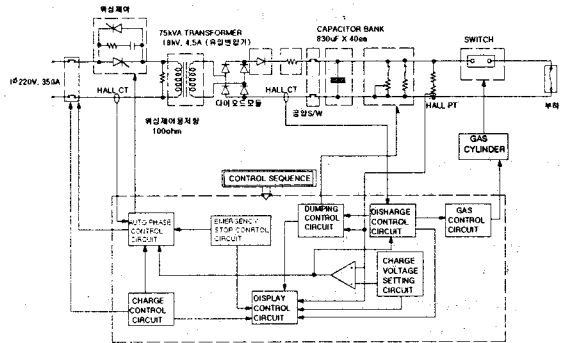


그림 5 2MJ Pulsed power system block diagram.

고전압 충전용 변압기의 용량은 입력측(1차측) 220[V], 출력전압(2차측) 18[kV], 흐르는 전류는 33.2[mF]의 커패시터뱅크에 충전전압 10[kV]로 최고 2분 이내에 충전할 수 있는 용량으로 결정하였다. 이를 결정하기 위해 그림 2의 SCR 위상제어에 의한 충전전류 제어부분, 변압기의 설계변수를 고려해 철손 및 동손을 포함시킨 변압기의 등가회로, 고압 정류 diode에 의한 정류기, 충전시작시 급격한 전류의 상승을 방지하기 위한 충전저항, ESR, ESL등을 고려한 커패시터의 등가회로로 구성된 pulsed power system 등가회로를 해석하여 변압기의 최소화 및 경제성을 고려하여 용량은 75[kVA]로 결정하였다. 또한 변압기의 1차측 SCR을 위상 제어해 시작시 soft start, 일정한 전류에 이르르면 목표전압까지 충전 완료시까지 일정한 전류가 흐르도록 하는 제어시스템과 pulse power system 감시를 위해 controller를 이용하였다.

충전저항은 변압기의 2차측의 과전류 제한용으로 필요하며, 2차측에 흐르는 전류 및 저항치를 고려하여 100[ohm], 2[kW]로 결정하였다. 또한 제어부와 고전압·대전류 발생시스템과 접속은 솔레노이드를 이용한 기계적 스위치를 이용하여 발파시 부하 및 스위치로터 발생 할 수 있는 서지를 완전히 전기적으로 차폐를 했다. 이를 위하여 충전저항과 커패시터 사이에 고압측과 접지측, 커패시터와 측정분압기 사이에 고압측과 접지측 그리고 SCR의 입력측에 MCCB를 설치하였다. 충전이 완료되면 충전저항과 커패시터 사이에 고압측과 접지측이 자동적으로 trip하고, 방전시 커패시터와 측정분압기 사이에 고압측과 접지측 그리고 SCR의 입력측에 MCCB를 trip후 closing switch에 트리거신호를 주입하도록 하여 방전시에 발생할 수 있는 서지, 노이즈에 의한 장비의 손상을 최소화 하였다.

제어판넬은 충전시작, 충전전압 조정 knob, IPS감시를 진공펌프제어기와 압력계, dump 스위치, 경보음 그리고 충전속도를 제어할 수 있는 조정 knob로 구성되어있다. 또한 부하로 방전시 및 장비의 운전을 편리하도록 적외선을 이용한 4점 제어기를 가진 원격조정기(remote controller)를 채용하였다. 이를 이용하여 25[m]이내의 거리에서 pulsed power system 충전시작, dump, 경보 및 방전을 시킬 수 있다.

정전에너지의 축적형태는 에너지축적밀도가 높아 compact하고 값싼 pulsed power system이 구성할 수 있는 가능성이 있고, 그 기술개발이 기대된다. 본 시스템의 총 정전용량은 $33.2[mF](=830[\mu F] \times 40ea)$ 으로써 전체 인덕턴스가 최소화 되도록 capacitor를 배열하였다.

500[kA]급 펄스파워전원장치에 사용된 capacitor는 Aerovox사의 metalized electrode capacitor로서 충전에너지 밀도가 크고(0.77[KJ/kg]), capacitor의 metalized electrode사에 절연과피가 발생했을 때 self healing이 가능하여 안전성이 좋으며, 수명이 길다. 500[kA]급 펄스파워전원장치의 capacitor bank의 주요 사양은 다음과 같다. 그림 5는 실제 40개의 커패시터 뱅크를 보여주고 있다. 높이는 2m이고, 너비 1.5m, 폭 0.9m이다. 또한 운반시 커패시터의 움직임을 방지하기 위해 후단에 강철로프를 이용하여 케이스에 고정시켰다.

Capacitance : $830[\mu F] \times 40ea = 32.2[mF]$
 Maximum voltage : 11[kV]
 Rated Voltage : 9[kV]
 Max. Stored Energy : 2[MJ]
 Design Life(11[kV]) : 20,307 shots
 Design Life(9[kV]) : 413,000 shots

Charge dump는 비상시의 충전한 에너지를 release한 후에 capacitor bank에 남아있는 전기를 방전시키기 위한 것으로서 그림 5는 커패시터의 잔여전압이 2kV 이하일 때, 각각 2.7[kΩ], 2[kW]인 저항 30개를 병렬로 연결하여, 즉 90[Ω]을 통해서 3초 내에 방전시킨 후, 다시 3초 이후에 2차측을 단락시켜 완전히 방전시키는 회로를 나타낸다. 이러한 방법으로 운전자의 안전을 위해 펄스파워전원장치 조작 후에 보조 charge dump를 작동시켜 capacitor bank에 남아있는 charge를 방전할 수 있도록 제작하였다.

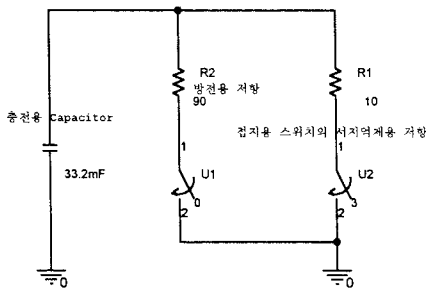


그림 5 Dump 회로

그림 6은 실제 2[MJ]-500[kA] pulsed power전원장치에 설치된 1차측 dumping 저항(2.7[kΩ], 2[kW], 30EA)과 2차측 단락용 저항(3Ω, 500W, 3EA)이다.

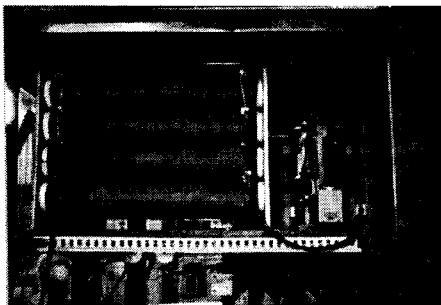


그림 6 Dump switch

그림 7은 실제 제작된 2MJ-500[kA] pulsed power 전원장치이다. 이것의 크기는 높이 2000[mm], 길이 2000[mm], 폭 2000[mm]이고, 무게는 약 4ton이다. 실제로 capacitor bank의 무게가 전체 시스템의 약 75[%]정도를 차지한다. 소형 경량화를 위해서는 capacitor bank의 크기와 무게를 줄이기 위한 연구가 필요하다.

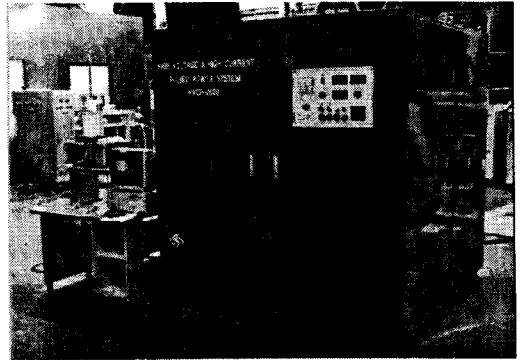


그림 7 2[MJ]-500[kA] pulsed power전원장치

3. 결 론

본고에서는 기 발표한 INPIStron의 설계개념을 적용하여 gas-puffing trigger INPIStron를 제작하였고, 이를 이용하여 500[kA]-2[MJ] pulsed power전원장치의 개발하였다.

향후 이를 이용하여 INPIStron의 성능실험, 전자성형 및 pulsed power 응용실험을 하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] 서길수, 김영배, 이형호, 채환영, "고출력 펄스파워 발생용 인덕타 설계 및 이용기술", 98춘계 방전 및 고전압연구회, pp10~13, '98. 5.23
- [2] 서길수, 김영배, 이형호, "고전압·대전류 펄스파워를 이용한 암반발파포의 기술개발", 98 전기학회 하계학술대회 DHO 7, pp. 1592~1595, '98. 7.22
- [3] Hyeong-Ho Lee, Kil-Soo Seo, Yeong-Bae Kim, Ik-Soo Kim, Jae-Gu Choi, "Application of Pulsed Power with the High Voltage and Current for Rock Fragmentation", The ICEE, Vol 2. No. PD-3. pp.759~762, '98. 7.24
- [4] Claudius Kozlik, et al., "Triggered Low-Pressure Pseudospark-Based High Power Switch" IEEE Transactions on Plasma Science, vol.17, No. 5, pp758~761, October, 1989.
- [5] Gerhard Schaefer, M. Kristiansen "Gas Discharge Closing Switches" Plenum press · New York and London
- [6] 국방과학연구소 "제 2차 전열추진기술세미나" 1998. 11. 26
- [7] Ja H. Lee, Sang H. Choi and Young S. Choi "Plasma-Puff Triggering of Plasma Switch" IEEE CAT pp 137 - 140, 1988.
- [8] 서길수, 김영배, 이형호, 채환영, "전기 Triggering형 고전압 대전류 INPIStron 설계기술 개발", 춘계 방전 및 고전압연구회, pp75~78, 99. 5.8
- [9] 서길수, 김영배, 이형호, "고전압/대전류 투입스위치의 최적 설계기술", 99 전기학회 하계학술대회 DHO 7, pp. 2173~2175, '99. 7.19-21
- [10] K.S.Seo, Y.B.Kim, K.H.Cho, H.H.Lee "Development of Pulsed Power System with 500kA Current" Proceedings of 1999 Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp29~32, 1999