

고전압/대전류 투입스위치의 최적설계기술

서 길수*, 김 영배, 조 국희, 이 형호
한국전기연구소 고전압연구팀

Optimized Design Technology of Closing Switch for High Voltage & Current

Kil-Soo Seo*, Young-Bae Kim, Kook-Hee Cho and Hyeong-Ho Lee
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper presents the development of closing switch for high voltage and current in detail. Design concept of INPIStrom triggered by the gas puffing, voltage hold-off, current capacity, insulating and electrode material, rise time etc, are described. Also for the optimized design of the electrical triggering switch, pin, ring, wire brush, surface discharge and HCP(Hypo-Cycloidal Pinch) trigger are considered.

으로 심하게 손상된다. z-pinch 메카니즘은 $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ 에 기인한 것이고 여기서 \vec{j} 는 전류밀도, \vec{B} 는 전류에 의한 자속밀도이다.

1. 서 론

전력전자공학 펄스의 개념으로부터 확장된 고출력 펄스파워기술은 종래의 고전압·대전류 공학을 기초로 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 기술이다. 펄스파워기술의 시작은 1940년의 핵융합의 연구로 거슬러 올라갈 수 있는데, 고 밀도 플라즈마를 발생시키기 위한 펄스대전류를 콘덴서 방전으로 얻기 위하여 펄스 대전력의 제어기술이 필요하다.[1~3]

대전력의 제어기술의 핵심은 switching기술로서 기능별로는 폐 스위치(closing switch) 개 스위치(opening switch)가 있고, 매질별로는 가스, 진공, 액체, 고체, 마그네트 스위치가 있다. 정전 펄스 파워시스템에 이용되는 폐 스위치는 구조가 간단하고, 제어가 용이하여 pulsed power system에 가장 널리 애용되는 spark-gap switch, spark gap을 진공 용기 내에 수납한 TVS(triggered vacuum switch), Paschen 곡선의 최소파괴전압의 좌측 영역을 이용한 pseudo-spark switch이 있다.[4,5]

또한 중대전류영역인 100~1,000[kA]에 적합한 INPIStrom을 개발을 위한 많은 노력이 high power 레이저 펌프, EM추진기, MPD제어로켓과 같은 우주개발 응용에 집중되어 왔었다. 우주공간에서의 스위치는 긴 수명을 가진(30년 동안 >10⁹회, 1Hz), 높은 신뢰성(1/10⁴ 이하의 고장율), high power의 전송(>10¹⁰V-A)등의 이러한 조건을 갖추어야 한다. 종래의 spark gap은 수명이 짧고, 신뢰성이 떨어지기 때문에 이러한 조건을 만족시킬 수 없다. 더구나 빠른 상승시간, 대전류의 제어성, 빠른 회복시간(이것은 반복율에 영향을 미친다.), 높은 유지전압, 빠른 열 발산 및 각 부분의 손상을 최소화 등이 해결해야할 문제이다.

따라서 본고에서는 500[kA]급 INPIStrom스위치의 설계 개념 및 설계 최적화로서 전극, 절연물의 열적 특성을 고려하였다. 또한 INPIStrom의 가장 중요한 균일 방전을 위해 현재 이용하고 있는 gas puff 트리거 및 향후 개발하고자하는 전기적 trigger기법에 대해서 기술하였다.

2. 본 론

2.1 INPIStrom 스위칭 mechanism

가장 널리 사용되는 대 전하 전송용 스위치는 spark gap이었다. Spark gap은 통상 2개의 반구전극은 그림 1과 같이 z-pinch에 의해 전극의 표면이 hot spot의 형성

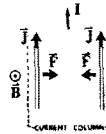


그림 1 Z-pinch

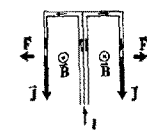


그림 2 Inverse-pinch

INPIStrom은 그림 2와 같이 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. Cavalcont와 John은 이러한 inverse-pinch기구를 대전류 스위치에 적용하였다.

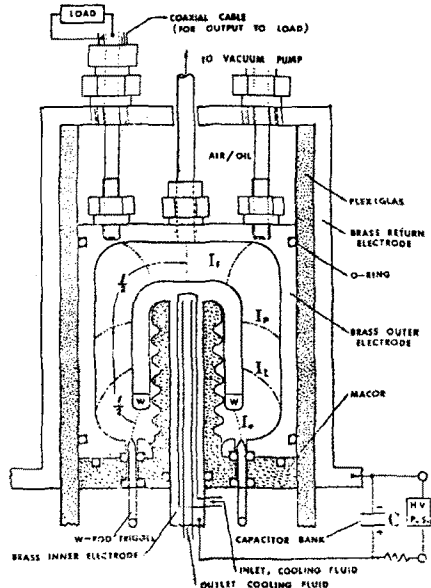


그림 3. Pin트리거에 의한 INPIStrom

INPIStrom은 거의 모든 parameter에서 spark gap보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 그림 3에서 트리거 펄스를 인가하여 방전이 개시하면, 버섯모양의 전류시트(current sheet)가 형성되는데 current sheet의 속도는 plasma focus에 해석에 사용하는 snow-plow 모델을 이용한다. 여기에서는 동축 원통구조를 1차원 모델로 단순화하여의 다음 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt}(2\pi r_0 \rho_0 z \frac{dz}{dt}) = 2\pi r_0 \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{I}{2\pi r_0}\right)^2 \quad (1)$$

여기서 좌측항은 가스 current sheet의 운동량의 변화분이고, 우측항은 $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ 에 작용하는 힘을 서로 같다고 가정하면 위의 식이 얻어진다.

2.2 INPIStrom설계

실제 INPIStrom의 설계시 다음과 같은 사항을 고려해야 한다. 또한 장수명을 위해서는 closing시 발생하는 도체의 주울열, 스위치내부의 온도상승을 감안하여 도체의 재질 및 절연물을 결정해야 한다.

도체의 온도상승

저항을 가진 도체는 전류가 흐르게 되면 온도가 도체의 비열과 저항율에 따라 변화하게 된다. 비열과 저항율을 상수로 두고 전류밀도와 펄스폭에 따른 온도상승을 고려하면 실제 상황보다 올라가게 된다. 그림 4는 전류밀도, 펄스폭에 따라 단위 [cm²]당 온도상승을 나타낸 것이다. 500[kA]급 600[μs]의 pulsed current가 INPIStrom을 흐른다고 하면, 설계시 허용온도를 80[°C]로 제한하면 cathode나 anode의 전류밀도는 약 5[kA/mm²]이므로 전극의 단면적은 100[mm²]이다. 이것은 직경 11.3[mm]에 해당한다. 또한 고속의 반복주파수를 가진 INPIStrom으로서 고려하면 이보다 훨씬 커지게 되며, 수·공냉각방식을 채용해야 한다.

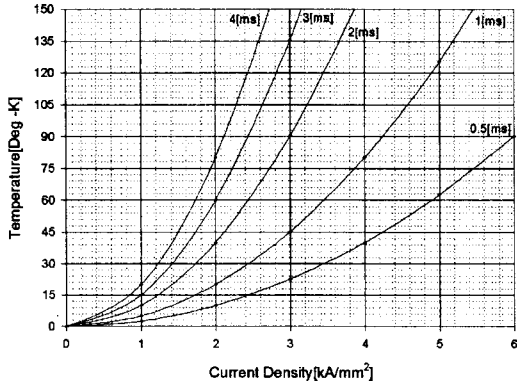


그림 4 전류밀도에 따른 도체의 온도상승

방전각도

INPIStrom에 inverse pinch효과를 최대로 높이기 위해서 가장 중요한 것은 균일한 방전을 일으킴으로서 전류밀도 J를 줄여 전극의 수명을 연장하는 것이 중요하다. 질소 가스중 80[mTorr]이하의 압력에서는 거의 360° 전 영역에서 균일한 방전을 일으키고, 전류 밀도 J는 spark gap에 비해 약 62배 낮은 것으로 보고되고 있다.[6]

Voltage hold-off

Anode-Cathode간 유지전압은 Paschen 곡선의 좌측이나 우측을 이용하여 결정한다. 유지전압이 상당히 높은 경우에는 전극간 갭 간극을 여러 개 적층하거나 고기압에서는 전기적 부성기체인 SF₆가스를 주입하여 절연내력을 높인다.

스위치내부의 압력은 80[mTorr]이하의 저기압 또는 수 [bar]의 고기압을 이용한다. 압력이 높아져 고기압으로 되면 360° 전 영역에서 방전이 균일하게 발생하지 않게 되어 전극의 손상이 국부적으로 일어날 수 있다. 저기압에서 INPIStrom의 동작시간동안 arc-runner가 길어져 스위치의 인덕턴스가 증가하게 된다.

Rise time

INPIStrom은 일반스위치에 비해 인덕턴스가 상당히 낮다. 인덕턴스는 스위칭하는 동안 플라즈마 역학에 의존

하고, 시간에 따른 전류 시트의 위치에 의해 결정된다. 그렇지만 이것은 무시할 만큼 상당히 낮다. Rise time은 아래와 같이 쓸 수 있다. 여기서 L, C는 INPIStrom의 인덕턴스, 커패시턴스이다.

$$t_r = 0.75\sqrt{LC} \quad (2)$$

재료(물질)

Spark gap에서는 Z-pinch에 의한 전극의 손상을 감소시키기 위해 전극의 재질로서는 W(tungsten), Cu-W합금(copper tungsten)이 주로 사용되어 왔다. 그러나 가공이 어려워 제작비가 많이 든다. 몰리브덴(Mo)은 W와 같은 성질을 가지고 있지만 W에 비해 Mo가 다루기 쉽고, 가공성이 좋다.

절연물이 스위치의 수명에 많이 관련된다. 절연물은 다음과 같은 가혹한 환경에서 잘 견디어야 좋다. U.V방사, 충격과 특히 INPIStrom에서는 열이 많이 발생하므로 녹는점이 낮은 플라스틱보다는 세라믹(alumina: Al₂O₃, Zirconia: Zr₂O₃)은 녹는점이 2,593[°C]이지만, shock wave에 약하므로 이를 고려한 절연물을 선택해야 한다. 이를 만족하는 세라믹은 표 1에 나타난 것처럼 질화알루미늄이 열전도율이 높고, 절연내력이 14 ~ 15[kV/mm]로서 적합하다고 사료된다.

표 1. INPIStrom의 절연물

재료 종류명			절화 알루미늄 AIN		
			TAN-070	Tan-170	Tan-200
밀도	g/cm ³	3.3	3.3	3.3	
흡수율	%	0.00	0.00	0.00	
색조		탄흑색	백색	백색	
열적특성	비열	J/kg·K	740	740	740
	열전도율	w/m·K	70	170	200
열팽창계수	열팽창 계수	×10 ⁻⁶ /°C	4.6	4.6	4.6
	RT-50°C				
절연내력	50Hz	kV/mm	14	15	15
	체적	25°C	>10 ¹²	>10 ¹³	>10 ¹²
고유저항	500°C	Ω·m			
	유전율	1MHz	8.8	8.8	8.8
유전정점	1MHz	tan δ × 10 ⁻¹	10.0	5.0	5.0
	10GHz	tan δ × 10 ⁻¹	30.0	3.0	3.0
경도			1,100	1,000	1,000
극강도	MPa		350	350	350
	압축강도	MPa			
영율	GPa		330	330	330
poisson 비			0.24	0.24	0.24

2.3 Trigger 기법

트리거 핀

그림 3은 pin트리거를 이용한 INPIStrom의 구조이다. 100[ns]의 상승시간을 가진 펄스를 트리거 핀에 인가하면 INPIStrom의 원하는 균일한 방전 또는 재현성은 압력 10[mTorr]에서 20%이하로 제한된다. 고속의 높은 트리거 펄스를 트리거 핀에 인가하면 재현성은 어느 정도 개선이 되지만 트리거 핀의 마모가 심각해진다.

링 트리거

링 모양의 트리거전극은 방전개시를 위하여 주 전극간에 설치된다. 링 트리거 전극은 매우 날카로운 모서리와 같고, 스위치의 아랫부분에 설치되어 있어서 날카로운 모서리는 INPIStrom의 주 전극에 직접 향하게 된다. 또한 미니 Marx발생기로부터 발생하는 고속, 높은 전압 40[kV]인 트리거펄스가 트리거전극과 주 전극간에 인가되고, 주 전극간에 14[kV]가 인가되어 있으면 전체 전위차는 54[kV]이다. 약간의 전위차를 가진 스위치가 낮은 압력(≤30[mTorr])에서 동작하면 전자사태에 의한 균일

한 방전이 관측된다.

wire-brush 트리거

링 트리거에서 날카로운 날이 제거 후에 원래 링 트리거가 있던 자리에서 2[mm]정도 높은 위치에 대략 직경 1[mm]의 텅스텐 선을 삽입한다. 이 시험에서 압력을 적절하게 조절하면서 링 트리거와 유사한 시험을 수행하였다. 40[kV], 상승시간 30[ns]의 고전압의 트리거 펄스를 트리거전극과 주 전극의 하나에 인가하면 저 압력영역에서 방전이 불규칙적이고 균일하지 않다.

연면방전 트리거

주 전극 cathode와 trigger전극사이 에 절연물을 삽입하고 트리거 전극을 절연물내에 넣어서 만든다. 이 전극에 rise time이 빠른 고전압 $dV/dt \geq 10^9$ [kV]을 인가하면 고기압 가스 SF₆나 N₂중에서 5 [channel/cm]이 절연물 연면을 따라서 발생하게 된다. 이때 발생하는 방전의 전하를 주 전극에 공급하는 방법이다. 저기압에서는 트리거 전극의 360°에서 방전이 발생하도록 rise time이 빠른 고전압을 인가해야 한다. 연면방전 트리거를 이용한 INPISTron의 구조는 그림 4와 같이 된다.

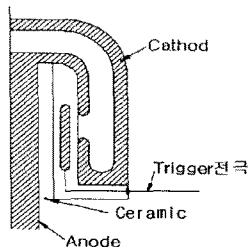


그림 5 연면방전 트리거를 이용한 INPISTron

HCP(Hypo-Cycloidal Pinch) plasma puff 트리거

방사상의 플라즈마 가속기인 HCP 장치는 핵융합을 위한 고밀도 고온플라즈마를 만든 J. H. Lee에 의해 개발되었다. 후에 이장치는 HEL(High Energy Laser) 펄핑으로 강한 광원을 만드는 데 이용되었다. 이 플라즈마 가속기를 스위치의 트리거로 채용하였다.

INPISTron 발명 후에 균일한 방전을 넓은 동작영역에서 제공하는 기구가 inverse-pinch기구를 실현하는 중요한 요소로 인식되었다. INPISTron은 기존에 펄스파위에 응용되는 스위치에 비해 많은 장점을 가졌음에도 불구하고, 적절한 트리거 기구의 부족으로 더디게 발전하였다. HCP 장치는 압축되기 전에 균일한 방위각의 플라즈마를 생성하므로 트리거에 매우 적합한 것으로 생각된다. 그리하여 INPISTron의 조합과 트리거 장치로서 HCP트리거를 고려하였다.

HCP 절연물의 초기방전은 과전압을 인가에 의한 연면방전에 기인한 것이다. 그래서 전류시트는 전류밀도와 유기된 자속밀도에 의해 작용하는 ponder motive힘에 의해 주 스위치 내부전극의 기능을 향해 중심방향으로 압축되게 된다. 이 압축된 플라즈마 시트는 결과적으로 HCP전극의 주 전극의 내부전극과 내부전극간의 열린 부분에 도달하게 되어 스위치의 주 전극에 가장 가까운 갭 내에 주입되게 된다.[7]

2.4 Gas puff trigger INPISTron

그림 6는 250[kA]급 pulsed power system의 전류 제어용 closing switch로 사용하고 있는 INPISTron의 구조를 나타낸 것이다. 동작원리는 Paschen 곡선의 좌측영역을 이용하는 것으로 초기에 switch의 내부를 원하는 유지전압에 해당하는 $pd < \text{수 [mTorr} \cdot \text{cm]}$ 로 펌핑한 후, 전자식 gas valve를 이용하여 N₂ 가스를 puffing하면

그림 7과 같이 주 전극간에 절연내력이 Paschen 곡선을 따라 이동해 closing하게 된다.

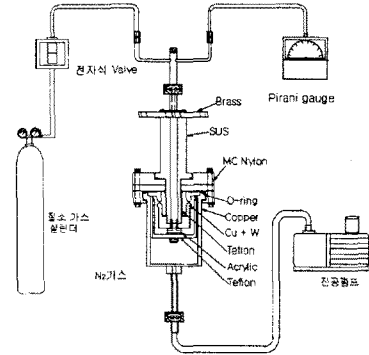


그림 6 Gas Puffing Trigger INPISTron

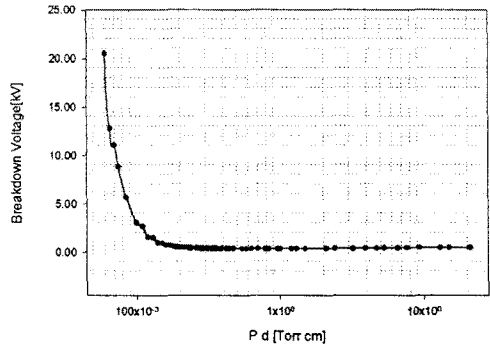


그림 7 INPISTron의 Paschen 곡선

3. 결 론

본 논문에서는 고전압/대전류 투입스위치인 INPISTron의 최적설계를 위하여 스위치 도체 및 절연체의 열적특성에 대해서 고찰하였다. 또한 INPISTron의 가장 중요한 요소인 균일 방전을 위한 각종 트리거 방식 및 동작 조건에 대해서 기술하였다. 실제 500[kA]급 펄스파워전원장치 투입스위치로 이용될 gas puffing트리거형 INPISTron에 대한 최적설계도 행했다.

[참 고 문 헌]

- [1] 서길수, 김영배, 이형호, 제환영, "고속력 펄스파워 발생용 인다타 설계 및 이용기술", 방전 및 고전압연구회, pp10~13, '98. 5.23
- [2] 서길수, 김영배, 이형호, "고전압·대전류 펄스파워를 이용한 암반발파모의기술개발", '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.