

High Power 전달을 위한 새로운 Inverse Pinch Switch에 관한 연구

(A Study on New Inverse Pinch Switch for High Power Transfer)

조국희* · 김영배

(Kook-Hee Cho · Young-Bae Kim)

요 약

Inverse pinch 스위치는 기존 스위치와 달리 전극의 손상을 줄이기 위해 나선형 전극형태로 제작하였다. 이 스위치는 전기적 트리거 펄스전압을 인가하여 동작시키며, 본 연구의 실험결과 전극간에 발생하는 아크확산 및 전류이동 때문에 전극수명이 길고, 대전류에도 견디기 때문에 펄스파워 시스템에 사용할 수 있다는 것을 확인하였다.

Abstract

In contrast to the conventional trigatron switch in which the currents are constricted by the z-pinch mechanism, the new switch operates in an inverse pinch geometry formed by a pair of spiral electrodes in a sealed-off type. Inverse pinch switch greatly reduces hot spot formations and protects the electrode surfaces. The switch can be initiated with an electrical trigger electrode. Advantages of the new switch over the conventional switches are longer useful life, high current capability and lower inductance due to the dispersed and moving current sheet. These improved characteristics may make the inverse pinch switch suitable for pulse power systems.

Key Words : Inverse pinch, Pulse power, Closing switch, Sealed off type, Trigger

1. 서 론

고전압 대전류용 스위치는 발파기, 공해 방지 시스템, 가속기 펄스 전원, 핵융합 펄스 전원, 대용량 용접기, 펄스 레이저, 전기 용해로, 플라즈마 발생 장

치, 광원 시스템, 의료 기기 등에 광범위하게 사용되고 있고 최근에 수요가 급증하고 있다. 군수 및 민수 분야에 모두 대전류 펄스를 필요로 하는 장비와 분야가 계속적으로 증가하고 새로운 분야가 개발되고 있다. 특히 최근에 사회적으로 큰 문제로 대두되고 있는 산업공해 방지에도 고전압 대전류 펄스 방식이 널리 사용되고 있는데 전기 집진기나 탈황, 탈질 처리 시스템이 대표적이거나 수입에 의존하고 있다. 스위치는 이러한 대 전류 펄스를 활용하는데 핵심 부품으로 국내에서 새로운 분야를 개발하더라도 스위

* 주저자 : 한국전기연구원 전기물리그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1577, Fax : 055-280-1490

E-mail : khcho@keri.re.kr

접수일자 : 2006년 9월 7일

1차심사 : 2006년 9월 11일

심사완료 : 2006년 10월 2일

치가 없으면 실현할 수 없고 외국에서 개발된 장비 중 충전부와 부하가 국내 기술로 가능해도 스위치를 별도로 제공하지 않으므로 장비 전체를 도입하여야 한다. 따라서 고 에너지를 발생하는 새로운 장비의 개발은 대규모의 소요가 예상된다. 캐패시터에 저장된 에너지를 요구되는 조건에서 부하에 방출하기 위해서는 전압, 전류, 스위치 시간, 지터, 허용전기량, 수명 등의 조건을 만족하는 투입스위치(closing switch)가 필요하며, 군수 및 민수분야 모두 대전류 펄스를 이용하는 장비와 분야가 계속 증가되고 있다.

고전압 대전류용 스위치는 극한의 운용 조건을 갖기 때문에 일반적인 스위치 설계 및 개발 기술로는 실현이 불가능하며 방전, 소재, 용접 등의 복합 기술과 함께 제어성, 신뢰성, 내구성, 그리고 운용성을 종합할 수 있는 설계 및 응용기술 등을 확보한 후 개발이 가능하기에 스위치 운영에 필수적인 트리거 부분의 기술정립을 통하여 고전압·대전류 펄스 스위칭 기술을 종합적, 체계적으로 개발되어야 한다[1-4]. 이와 같은 측면에서 본 연구에서는 전기트리거 방식을 이용한 Scaled-off 인버스 핀치 스위치에 22[kV], 100[kA]을 인가하여 성능을 검증하였고 펄스 파워 시스템에 적용 가능성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 Inverse pinch 스위치 기본원리

인버스 핀치 현상은 1958년 O.A. Anderson에 의하여 처음 소개되었다. Spark gap switch의 경우 $\vec{j} \times \vec{B}$ 힘이 전류의 중심으로 집중되어 전류밀도가 굉장히 높은 반면 인버스 핀치 스위치에서는 버섯 모양의 전극구조에 의해 $\vec{j} \times \vec{B}$ 힘이 바깥으로 밀어내도록 작용하여 전류밀도를 작게 만드는 구조를 가지고 있다.

과거부터 널리 사용되고 있는 대전하 전송용 스위치인 spark gap은 통상 2개의 반구전극으로 구성되어 있으므로, 그림 1에서 알 수 있듯이 $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ 에 의하여 z-pinch가 발생하여, 전극 표면이 hot spot의 형성으로 심하게 손상되는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선한 인피스트론은 그림 2와 같이 힘

$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ 을 이용하여 전류를 조이지 않고 시트형태로 분산시켜 전극의 전체면에 흐르게 함으로써 국소 hot-spot를 근본적으로 제거하도록 설계되어 있다. Cavalconte와 John은 이러한 인버스 핀치 기구를 대전류 스위치에 적용하였다[5-11].

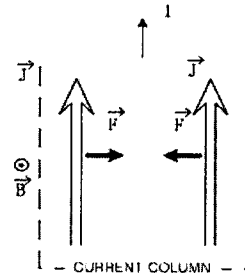


그림 1. Z-pinch 스위치
Fig. 1. Z-pinch switch

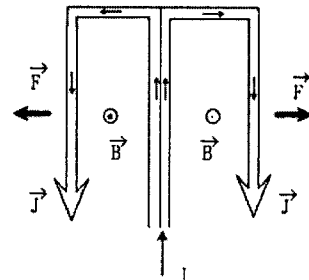


그림 2. 인버스 핀치 스위치
Fig. 2. Inverse-pinch switch

여기서 \vec{j} 는 전류밀도, \vec{B} 는 전류에 의한 자속밀도이다. 이와 같이 인버스 핀치 스위치의 전기적 특성이 spark gap보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

2.2 Inverse pinch 스위치 제작

인버스 핀치 스위치는 고진공을 유지하기 위해 전극부와 절연부를 sealed-off type으로 하여야 하며, 그림 3은 제작 도면이다. 실험결과 얻은 최적 조건으로 양극과 음극 전극간의 거리는 7[mm]이었다. 전극의 재질은 구리이며, 아크가 확산되는 위치는 Cu-Cr(75-25[%])을 사용하였다. 또한 스위치의 내부 진공도는 10⁻⁶~10⁻⁷[torr]를 유지해야 하는데 전류를 통전 시킨 후 아크에 의한 온도 상승으로 진공도가

떨어지므로 이를 보존하기 위해 케터를 설치하였다. 케터의 재질은 지르코늄알루미늄(ZrAl)합금을 사용하였고 케터의 부착위치는 그림 4와 같이 음극 전극 바깥쪽에 설치하였다. 그림 5는 실제 형태의 sealed-off type의 인버스 핀치 스위치로서, 22[kV], 100[kA]을 인가하여 성능을 검증하였고 제작하였다.

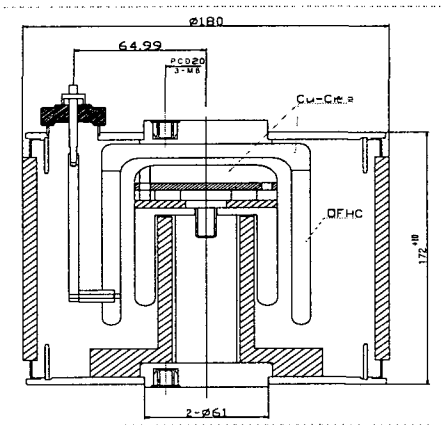


그림 3. 스위치의 sealed-off 설계도면
Fig. 3. Sealed-off design of switch

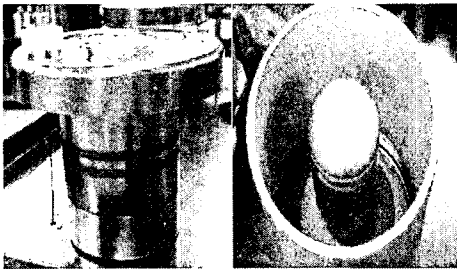


그림 4. 음극 전극과 양극 전극
Fig. 4. Cathode electrode and Anode electrode

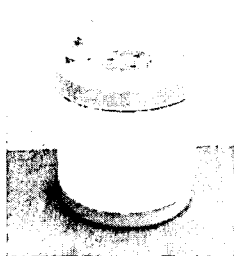


그림 5. sealed-off type 스위치
Fig. 5. Sealed-off type switch

2.3 시험장치 및 결과

2.3.1 트리거 전극 실험

인버스 핀치 스위치는 트리거 전극을 여러개 설치하여 양극과 음극 전극의 전체면을 균일하게 방전을 시켜야만 hot spot에 의한 영향을 줄일 수 있을 것으로 사료되었다. 트리거 전극에 가해지는 펄스는 수 [ns]의 빠른 상승시간을 가진 펄스가 요구된다. 이것은 트리거 펄스 발생기에서 펄스를 전송시키는데 방해가 될 요인들을 최대한 줄일 수 있기 때문이다. 전송선로는 길이의 변화에 따라 지연 특성이 나타날 수 있는데 이를 방지하기 위해 트리거 전극을 일정하게 제작하여야 한다[12-13]. 그러나 수개의 트리거 전극을 제작할 경우 트리거 전극에서의 지터 등으로 트리거 전극을 동시에 발생시키기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 여러개의 트리거 전극을 트리거 시키는 방법으로 그림 6과 같이 한 개의 펄스 트랜스를 사용하여 출력측에 고압 캐패시터를 연결하고 임피던스를 배분하여 각각의 트리거 전극에 펄스를 전송하는 방법을 사용하였다.

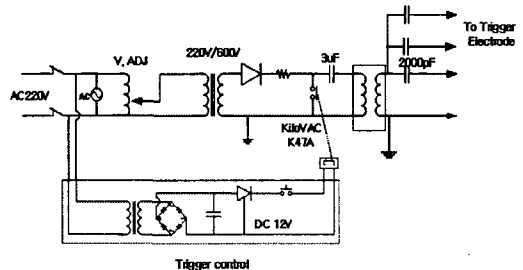


그림 6. 트리거 펄스 발생기
Fig. 6. Trigger pulse generator

그림 7은 트리거 전극구조이며 스위치의 제작시 실제 시스템을 구성할 때 고려해야 할 중요 변수는 지연 및 지터시간이며, 트리거 전압, 트리거 펄스 에너지 및 주전극간의 인가전압은 이들 변수에 영향을 미친다. 또한 트리거장치를 음극 또는 양극에 설치하는 방법과 인가되는 트리거 펄스의 극성에 따라서 달라지며, 전극간 간격, 음극 전극의 상부면과 트리거 전극시스템의 양극 상부와의 거리가 길어지면 지연시간이 길어지게 된다.

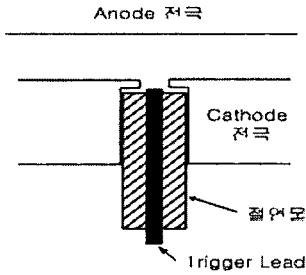


그림 7. 트리거 전극 구조
Fig. 7. Structure of trigger electrode

인버스 핀치 스위치의 트리거 전극 구조는 음극 전극 내부에 절연물과 트리거 리드가 삽입되어 있으며 트리거 리드에 트리거 펄스 전압을 인가하면 트리거 리드와 음극 전극간에 절연 파괴가 일어나면서 양극 전극 방향으로 플라즈마가 발생하여 주전극인 양극 전극과 음극 전극을 단락시키는 폐 스위치 역할을 한다. 트리거 전극의 재질은 Cu-W을 사용하였고 트리거 리드의 절연물로서는 세라믹튜브를 사용하였으며 주전극에서 통전시에 트리거 전극으로 역류를 방지하기 위한 구조로서 트리거 전극을 음극 전극표면에서 약간 안쪽으로 들어간 구조이며, 트리거 전극의 갭 거리는 0.5[mm]를 유지하였다.

전기트리거 방식을 사용하는 통상적인 스위치들은 트리거 전극이 동작을 할 때 지터가 발생한다. 원인은 트리거 펄스 장치에서 발생하는 펄스전압의 상승시간과 트리거 장치의 용량에 의해서 동작 특성이 변할 수 있기 때문이다. 따라서 트리거펄스의 상승시간이 빨라야 전압 위상이 일정할 수 있으며, 전류는 주전극의 전로파괴를 충분히 일으킬 수 있도록 인가해야 한다. 따라서 트리거 전극과 주 전극 사이에 트리거 펄스 발생기를 사용하여 트리거 전극에 인가되는 전압은 50[V]이상, 전류는 10[A]이상으로 규정한 전압 및 전류치 범위 내에 들어야 한다. 그림 8은 트리거 동작상태를 오실로스코프로 측정한 파형이다. 트리거 전류는 Stangenes Industries Inc.의 Model 1-0.1, CT, 전압은 Tektronix사의 P6015A인 고전압 프로브를 이용하여 측정하였다. 그림에서 ch1은 전압, ch2는 전류로서 트리거 전류 및 SCR의 게이트의 전압을 나타낸다. 트리거전원 장치의 스위치를 투입하면 스위치의 음극에 트리거 펄스전압이

인가된다. 실험결과 전압은 3,000[V], 전류는 100[A]로 측정되었다.

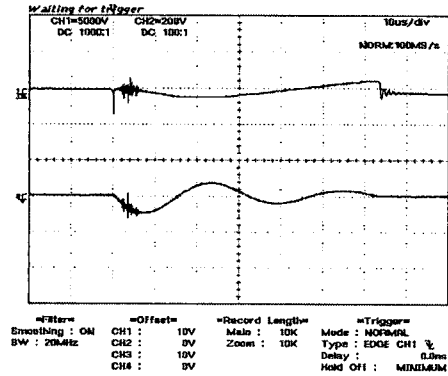


그림 8. 트리거 동작 실험
Fig. 8. Trigger operation test

2.3.2 스위칭 지연시간 실험

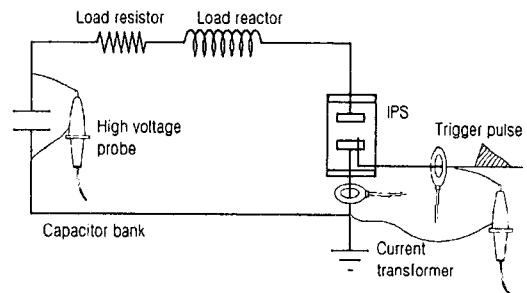


그림 9. 스위칭 지연시간 측정 회로
Fig. 9. Circuit for delay time measurement

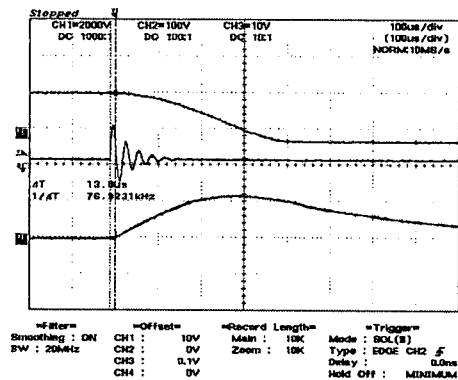


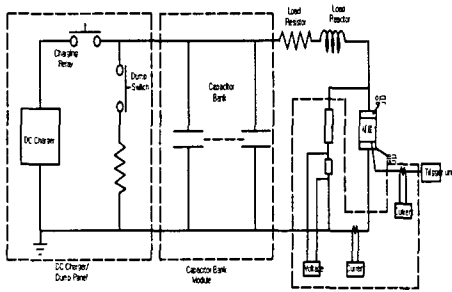
그림 10. 스위치 지연시간 파형
Fig. 10. Waveform of switch delay time

지연시간이라 함은 트리거 펄스 발생기를 사용하여 트리거 발생시점부터 스위치 전극간에 전류가 통전될 때까지의 시간을 의미하며 오실로스코프로 측정된 파형으로 부터 스위칭 지연시간을 측정한다. 스위치 지연 시간은 30[μs]이내이어야 하며 스위치 지연시간 시험은 그림 9의 기본 회로를 이용하였다.

스위치를 트리거 시키기 위해서는 트리거 전극에서 양극 전극 방향으로 양극 전극과 음극 전극 사이를 전로 파괴를 시킬 수 있는 충분한 양의 플라즈마를 발생시켜야 스위칭되는 시간이 짧아져서 안정적인 스위치의 동작이 이루어질 수 있다. 그림 10에서 ch1은 커패시터에 충전된 전압이 스위칭할 때 전압 파형이고, ch2는 전류파형, ch3는 트리거 전류 파형이며, 스위치 지연시간을 오실로스코프로 측정한 결과 스위치 지연시간은 시간은 13[μs]로 나타났다.

2.3.3 최대 전류 실험

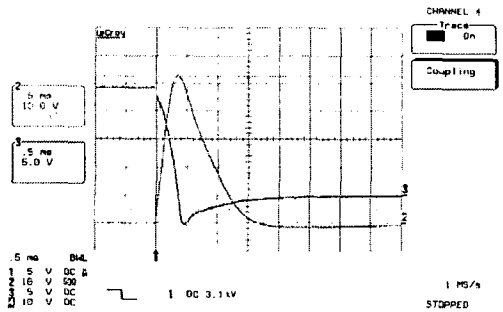
최대 전류 통전시험은 그림 11과 같은 회로로 장치를 구성하여 실험하였다. 충전기의 정격은 22[kV] 100[mA]로 국내 제작품이며 커패시터는 maxwell사 206[μF] 6대를 병렬 연결하였고 부하저항과 리액터는 각각 200[mΩ], 60[μH]를 사용하였으며 탭을 바꾸면서 저항 값과 인덕턴스 값을 조정할 수 있도록 하였다. 그리고 통전 실험 후 스위치의 이상 유무를 판정하기 위해서는 직류 내전압을 인가하여 스위치의 내부에서 절연 파괴가 발생하지 않아야 양호함을 판정할 수 있다.



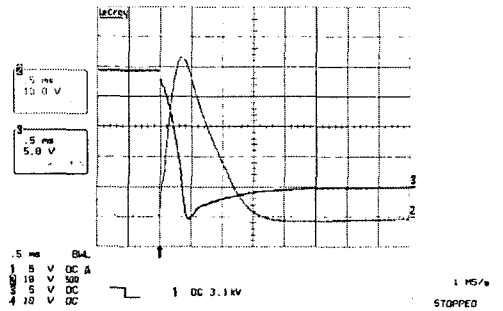
캐패시터 뱅크 : 22[kV], 1236[μF], 300[kJ]

그림 11. 최대전류 측정회로
Fig. 11. Circuit for maximum current measurement

그림 12는 설계 제작된 스위치 2대로 전압 22[kV], 투입펄스전류 100[kAp] 및 펄스폭 1[ms]로 측정된 전압 및 전류 파형이다.



(a) 최대 전류 통전시험 오실로그래프 시료 No. IPS 2-1



(b) 최대 전류 통전시험 오실로그래프 시료 No. IPS 2-2

그림 12. 최대 전류 파형
Fig. 12. Waveform of maximum current

2.3.4 직류내전압 실험

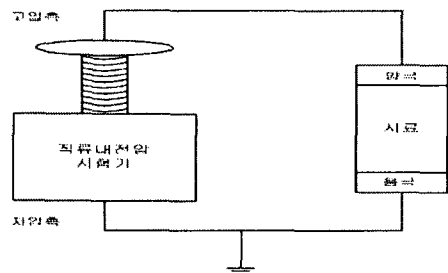


그림 13. 직류 내전압 시험회로
Fig. 13. Test circuit of DC withstand voltage

그림 13과 같이 스위치의 양극과 음극사이에 정격 전압 22[kV]의 1.5배에 해당하는 직류 정극성

33[kV]를 1분간 인가하여 스위치 내·외부에서 섬락이 일어나지 않아야 한다. 표 1은 직류내전압 시험 결과이다.

표 1. 직류 내전압 시험 결과
Table 1. Test result of DC withstand voltage

시료 No.	시험 조건	시험 결과	비 고
IPS 2-1	양극-음극 : DC 33[kV/min]	양호	40[kV/min] 인가
IPS 2-2		양호	40[kV/min] 인가

대전류 통전 실험후에 스위치의 이상 유무를 확인하기 위해 직류 내전압을 40[kV] 인가하여 스위치의 절연상태를 확인하였으며 성능은 우수한 것으로 나타났다.

3. 결 론

본 논문에서는 인버스 핀치 스위치의 트리거 특성, 지연시간 특성 및 대전류 통전 특성등을 측정하여 양호한 결론을 얻을 수 있었다. 지연시간이 30[us]이 내의 특성이 나왔고, 대전류 100[kA] 통전실험을 실시하여 고전압 대전류 펄스 스위치로서의 책무를 확인할 수 있었다.

- 전압 22[kV], 전류100[kAp], 27.192[C/shot]의 전하량을 부하에 전송할 수 있는 스위치이다.
- 트리거는 에너지 1[J], 피크전압 12[kV]인 펄스 전압을 발생하는 전원장치를 제작하여 사용하였다.

References

(1) Gerhard Schaefer, M. Kristiansen "Gas Discharge Closing Switches" Plenum press · New York and London 11. 26.
 (2) Ja H. Lee, Sang H. Choi and Young S. Choi "Plasma-Puff Triggering of Plasma Switch" IEEE CAT pp 137-140, 1988.
 (3) Yongkee Kim, "Comparative Study of Closing Plasma in Inverse Pinch Switch and Spark Cap", Master Thesis, Hampton University, 1992.

(4) Sang H. Choi "Simulation Study of a New Inverse-Pinch High Coulomb Transfer Switch" NASA Contractor Report 172420.
 (5) Development of the Pulsed Power System with 500[kA] Pulse Current Generation, Proc. of 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp.169-172, 2000. 6. 19.
 (6) S Kamakshiah and R S N Rau "Delay characteristics of a simple triggered vacuum gap" IEEE Transactions on plasma science, Vol. PS-7, No. 2, June 1979.
 (7) S. T. Pai & Qi Zhang, Introduction to high power pulse technology, Advanced Series in Electrical and Computer Engineering, Vol 10.
 (8) Gerhard Schaefer and M. Kristiansen, Gas Discharge Closing Switches, Preum press, 1990.
 (9) Schulman, M.B. Slade, P.C. Heberlein, J.V.R., "Effect of an axial magnetic field upon the development of the vacuum arc between opening electric currents (currents read contacts)", IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Technology Vol 16., pp. 180-189, 1993.
 (10) J.Lafferty, Vacuum arcs theory and application, John Wiley & Sons, 1980.
 (11) Zou Jiyun, Cong Jiyuan, "Theoretical analyses of arcs in triggered vacuum switches", International Symp. Proceedings. ISDEV. XIXth Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Vol. 1, pp 192-194, 2000.
 (12) H. Akiyama, "Current-voltage characteristics of a high-current pulsed discharge in air", IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 16, No. 2, pp 312-316, 1988.
 (13) H. Craig Miller, "A review of anode phenomena in vacuum arcs", IEEE Trans. Plasma Science, Vol. PS-13, No. 5, pp. 242-252.

◇ 저자소개 ◇

조국희 (趙國熙)

1960년 1월 13일생. 1987년 숭실대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리 연구그룹 책임연구원. 수절 연구 팀장.
 Tel : 055-280-1577
 Fax : 055-280-1433
 E-mail : khcho@keri.re.kr

김영배 (金永培)

1957년 2월 2일생. 2006년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2006년 현재 경남대학교 대학원 전기공학과 재학중 (석사과정).
 현재 한국전기연구원 선임기술원.
 Tel : 055-280-1535
 Fax : 055-280-1490
 E-mail : ybkim@keri.re.kr