

핵융합실험에서의 스위치 문제

鄭 基 亨
(서울대 工大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 개관
- 2. Spark gap형 스위치
- 3. 진공차단기
참고문헌

1] 개 관

중수소나 3 중수소의 플라즈마 발생, 가열 및 핵융합과정에 대한 실험에는 경비절감상 가능한 한 작은 규모의 전원을 쓰기 때문에, 에너지저장장치가 필요하고 그리고 저장된 에너지를 목적에 맞도록 시간의 함수로 출력을 제어하기 위한 스위치들을 쓰게되어 이에 대한 연구개발이 활발하다. 국외의 경향을 개관하면 1974년에 Los Alamos National Lab.이 60kV에서 연속전류 10kA, 펄스전류 25kA 규모의 스위치에 관한 연구를 시작했고, 그 후 100kA 연속전류와 280kA 펄스전류에 120kV 전압까지의 시험을 보고하였다.¹⁾ 또 General Electric Co., Westinghouse, Toshiba 등의 큰 전기회사들도 비슷한 규모의 시험들을 발표하였으며, 스위치 종류에 따른 비교시험 등도 수행하였다.²⁾ 이런 종류의 연구에는 에너지저장장치가 콘덴서이든 초전도체이든간에 수백 MJ 정도의 규모라서 많은 비용을 강요당하므로 실행이 어렵다. 우리의 경우 1979년부터 핵융합장치를 설계, 제작하면서 토로이달자장코일 (16 Sets, 5 Tons) 과 오막가열코일 (8 Sets, 1.4 Tons) 의 전원으로 11MJ과 300kJ의 에너지저장장치를 건설하고 있으나 융합장치의 본체(사진 1) 건설이 앞서서 '84년말에 거의 완성됨에 따라 임시로 콘덴서형의 에너지뱅크로 70kJ과 60kJ을 마련하여 가동하고 있다. 이에 대한 대비로서 스위치에 관한 예비실험을 수행하고 있으며 몇가지 성과를 얻고

있다. 스위치가 쓰이는 부분을 살펴보면 다음과 같다. 토로이달자장코일은 최고 30kA까지 흘리면서 전류펄스가 임계감쇠(critical damping)하도록 즉 방전시 하나의 펄스만을 형성하도록 crowbarring을 하고 있기 때문에 스위치가 회로 두 곳에 있도록

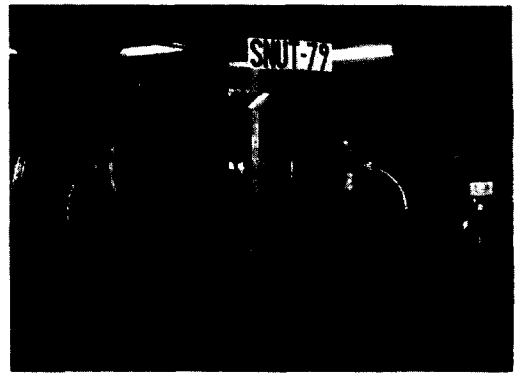


사진 1. SNUT179 토가막형 핵융합 장치 (1984, 12)

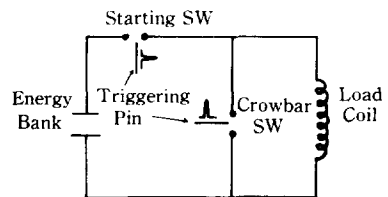


그림 1. 간단한 전기펄스의 임계감쇠회로

하였다. 따라서 그림 1 과 같은 회로에서 출발스윗치(starting switch)에 격발펄스(trigger pulse)를 보내어 방전을 시작하고 이 방전펄스의 강도가 최고치에 달할때 crowbar스윗치를 역시 격발펄스로 작동시켜 single펄스를 유발시킨다. 이때 문제점은 출발스윗치가 가동될 때 강력한 전자파가 발생되고 펄스방전시의 접지는 회로의 Impedance에 관계되어 출발스윗치와 crowbar스윗치에 격발펄스를 지연펄스발생기로 제어하려 해도 되지가 않는다는 점이다. 따라서 짧은 고출력펄스발생기 부품들이 접지상태에서 등전위를 형성하고 있던 것이 부품간에 연결된 접지선의 큰 인덕턴스로 인하여 높은 전위차를 이루는 현상이 나타나 서로 방전하므로 이에 대한 조치를 취해야 했다. 스위치로는 spark형이나 ignitron 또는 ignitron과 병행하여 mechanical switch를 쓰고 있는데 펄스전류의 경우 전류의 크기만이 문제가 아니라 펄스폭이 길 경우 전극사이에 국부방전이 일어나 전극표면이나 연결부위에 심한 손상을 초래하게 된다. 이를 방지하려면 전극 사이의 전류밀도분포를 균일하게 해야하며 이를 위하여 격발전극의 형태를 달리하거나 자장을 이용하기도 한다. 또 펄스의 입상시간을 줄이기 위한 조치로 동축형으로 설계하여 쓰기도 하며 전류용량을 늘리기 위한 수단으로 평행연결을 하기도 하나 스위치마다 전류의 균등분배를 하기 위하여는 ballistic resistor를

달아야 하는 불편이 따른다. 또 오믹코일에의 전력공급은 우선 토러스내에 전기방전을 일으켜 플라즈마를 발생시키고 발생된 플라즈마를 가열해야 하므로 그림 2 와 같은 회로가 쓰인다. 이 회로에서 S1 ~ S5는 스위치들로서 S1과 S3는 진공차단기, 그리고 S2와 S4는 pressure contact형의 스위치들을 쓴다. 그림 2의 회로작동의 결과로서 부하쪽의 유기전압을 시간의 함수로 나타내면 그림 3과 같고, 이 그림에서 $t=0$ 일때 그림 2의 회로에서 S1과 S3를 닫아 부하쪽에 직류전류를 흘려 철심을 자화시킨 후 전류가 최고치에 달한 순간 $t=t_1$ 에서 S1과 S3의 스위치들을 열고 동시에 S2와 S4를 닫는다. 그러면 S1과 S3를 닫았을때 철심내에 저장된 자장 에너지밀도 $\frac{B^2}{2\mu}$ 은 S1과 S3를 여는 순간 부하쪽의 2차코일에 해당되는 토러스 내의 플라즈마링에 원형의 고전압펄스가 유기되어 중성가스의 절연파괴가 일어나 플라즈마로 되며 S2와 S3의 연결로 발생된 플라즈마의 전류가 커지면서 가열된다. 위 설명중 B는 자속밀도이고 μ 는 철심의 투자율이다. 그러므로 그림 3에서 $t=t_1$ 이후의 전기펄스중 먼저 발생된 피크는 저장되었던 자장에너지가 변환된 것이며 뒤 것은 전원에 의한 것으로 결과는 두 펄스의 복합으로 나타나게 된다. 여기서 문제점은 S1과 S3로서 전류의 차단시에 발생하는 아크전류는 저장된 에너지의 일부로서, 저장에너지를 효율적으로 쓰기 위하여 또 스위치수명을 늘리기 위하여는 아크방전을 극소화 할 필요가 있다. 따라서 high performance의 진공차단기가 쓰인다. 그러나 고전류용 SCR들을 직렬 및 병렬연결하여 사용하기도 한다. 그러나 어느 경우라도 사용상에 결점이 따르고 따라서 경제성이 문제가 되므로 지속적인 연구를 하게 된다. 이 글에서는 우리가 흔히 쓰는 spark gap과 진공차단기 위주로 설명하고 끝내려 한다.

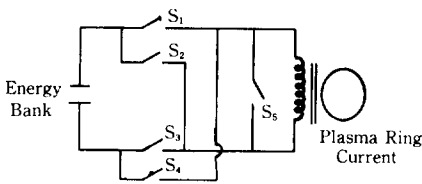


그림 2. 플라즈마 발생 및 가열회로

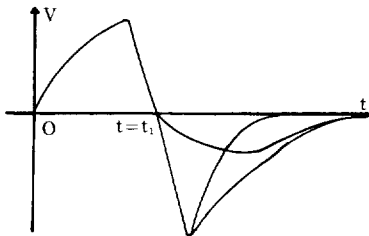


그림 3. 그림 2의 회로가 작동했을 때 스위치 조작에 의하여 제어된 전기펄스를 시간의 함수로 나타낸 것

2 Spark gap 형 스위치

이런 종류의 스위치는 소규모의 핵융합실험 특히 θ -pinch 장치와 펄스형 고출력 레이저실험에 많이 사용하는 형으로 짧은 입상시간, 고전압(수백kV)에 수MW급 출력의 펄스로서 glow방전에서 arc방전으로 발전되지 않을 정도의 시간(수 μ sec. 이하의 펄스)으로 전류는 10^5 Amp. 까지 쓰이나 고출력과 긴 펄스일 수록 수명이 짧다. 실험실에서는 값이 싸고 쉽게 분해조립 할 수 있도록 고순도 질소가압형에 시장에서 쉽게 구할 수 있는 재료들을 사용하였다. 대부분 특수한 스위치의 연구는 선진국

의 경우 국제통연연구소에서 이루어지고 있고 비공개로 된 것이 대부분이다. 이들 연구는 위에 기술한 조건외에 스위치의 안정성(Stability) 및 신뢰성 있는 제어가 생명이므로 각 부분의 재료개발과 성능에 직결되는 설계등에 주력하므로 많은 실험을 거쳐 개발된다.

우리가 spark gap 스위치분야의 개발을 시작한 것은 1976년도부터이며 이를 약술하면 다음과 같다. 에너지 बैं크(bank)에 달려 있는 spark gap 스위치의 경우 बैं크의 인덕턴스는 수 nH 정도이므로 스위치 인덕턴스를 가능한 한 극소화해야 같은 규모의 बैं크라도 출력을 극대화 할 수 있다. 그런데 입상 시간 $\tau_r = (\tau_r^2 + \tau_e^2)^{1/2}$ 로서 구성되며 여기서 τ_r 은 스위치의 극간저항에 의한 입상시간이고 τ_e 은 $\tau_e = \frac{L}{Z}$ 즉 교류항에 의한 입상시간으로서 L과 Z는 각각 스위치의 인덕턴스 및 임피던스이다. 그런데 sorensen에 의한 τ_r 은 $\tau_r = 44P^{1/2}E^{-1}Z^{1/3}$ 이고 여기서 P는 스위치내의 기체압력이며, E는 극간 전장의 세기이다. 또 L값은 스위치가 동축형일 경우 $L = 2\ell n(b/a)nH$ 로서 a는 극간에서 방전시 원주플라즈마의 반경, b는 외부전극반경이다. 제작시 a값의 결정은 구성재료의 wall loading power보다 수십분의 일로 줄여 흐르는 전류의 출력치에 맞도록 하며 실험조건 즉 출력과 냉각능력, 스위치의 개폐 주파수에 따라 결정한다. 또 짧은 펄스의 경우는 skin depth를 고려해야 하므로 재료선택도 중요한 관건이 된다. 국산재료의 경우 다공성과 내포하고 있는 불균질 및 결합등으로 수명이 단축되는 경우가 있었다. 이와 같은 기하학적 및 물리화학적 변수에 부가하여 내부가스압력에 견디도록 설계하여 쓰고 있는 스위치를 예를 들어 소개하면 그림 4와 같다. 이 스위치의 격발은 자동차엔진에 사용하는 spark plug로 하는데 격발시 시동전류가 흐를 그리도록 해야 주방전이 잘 일어나므로 방전부분을 수

정한 것이다. 전극부분은 황동재료로 전극면은 균일전장을 형성하도록 곡면으로 되었다. 황동은 부식저항이 높고, 열 및 전기전도도가 비교적 좋으며 가공성 및 시장성이 좋은 편이므로 채용한 것이나, 용점이 낮은 것이 흠이다. 용기의 벽재료는 테프론을 썼고 이 재료는 절연성, 내부식성등은 뛰어난 편이나 접착제를 쓸 수 없고 고전압절연 파괴시 후로린(F₂)과 같은 독성가스가 나오는 것이 흠이다. 이를 조립하기 전에 각 부품을 깨끗이 하고 조립후 고진공을 유지하면서 하루쯤 두었다가 건조하고 순수한 질소가스를 5기압 정도 가압하여 쓴다. 이와 같은 조건들을 철저히 지켜줄 수록 사용수명을 늘릴 수 있다. 이렇게 하여 제작된 spark gap 스위치의 인덕턴스를 쟀 결과 약 100nH로 큰 인덕턴스값을 보였다. 그러나 전송선을 동축으로 할 경우는 20~30nH로 감소시킬 수 있었으며 지면관계상 측정기술과 자세한 결과들은 발표논문³⁾으로 미루고자 한다. 이 실험의 결론으로서 인덕턴스를 줄이면 동축형태로 하고 전극간의 간격을 줄이며 분위기가스의 압력을 높여 주는 것이 바람직하다 하겠다. 그러나 부품가공과 조립에 있어서 정밀성이 선행되어야 가능한 것이다. 이제까지는 방전펄스폭이 작은 것들에 관한 것이었으나 고전류(10⁴amp. 이하)이면서 긴 펄스(수백msec.) 들에는 rail spark gap을 쓰는데 우리의 경우 핵융합장치외 토로이달자장 코일에 전류를 흘릴 때는 경제성을 고려하여 회로의 crowbarring까지 겸하도록 3중전극형 rail gap을 개발하여 부착하였으며 결과나 power crowbar 회로의 해석은 발표문헌³⁾을 참고하기 바란다.

3 진공차단기 (Vacuum Interrupter)

서론 부분에서 설명한 것처럼 저장에너지의 손실을 막고 전극의 손상을 막으려면 회로의 차단시 아크방전을 가급적 줄여야 한다. 따라서 차단기내에 전극간에 존재하는 물질의 증기나 가스를 가능한 줄이는 것이 아크방전의 형성을 막는 길이다. 그러므로 차단기 내부를 가급적 고진공으로 유지하도록 재료의 선택에 있어서도 고진공과 비교적 높은 온도에서도 낮은 증기압을 갖는 재료여야 하며 전기가 차단되는 순간 높은 전압이 걸리므로 cold emission을 방지하려면 전극재료는 높은 work function과 높은 비등점을 갖는 것이 좋다. 이때 일부 생길 금속증기는 플라즈마를 형성하므로 고진공내에서 빠르게 확산되어 절연성을 회복하도록 설계해야 한다. 또 스위치의 개폐가 빈번할 경우 전극의

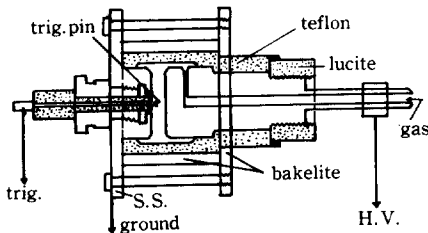


그림 4. 일반적으로 쓰이는 Spark gap S.W.의 설계도

냉각도 고려해야 하고 전극의 정확한 작동과 표면의 조도(roughness)를 적게하며 간편한 보수작업은 물론 재료들의 청결성과 고열처리에 의한 탈가스(degas)처리 등을 완벽하게 할 수록 좋은 제품이 됨은 재언할 필요가 없다. 그러나 스위치의 연결시에는 전도성이 좋아야 하고 내식성과 고비점음 요구하므로 전극의 표면을 진공 sputtering방법에 의하여 적당한 두께로 carbide화 하는 것이 좋겠다. 실제에 있어서 진공압력은 큰 스위치의 경우 $\sim 10^{-4}$ Torr 이하이고 작은 것들은 $\sim 10^{-7}$ Torr로 유지되어 있다. 이런 정도의 진공압력을 계속 유지하기 위하여 차단기내에 getter 펌프나 화학적 흡착제등을 설치하며 다양한 방법을 구사하고 있다.

또 아크방전을 아주 없앨 수는 없으므로 중방향 자장을 걸거나 전극판을 나선형으로 홈집을 내어 전류가 국부적으로 흐르지 못하도록 하여 전극표면의 손상을 막는다. 이렇게 함으로써 수명을 연장시키고 경제성을 높인다. 작동시에는 이동전극을 빠르게 후퇴시켜야하므로 관성을 줄이기 위해 가볍게 가벼워야 하며 이동력은 모터와 기어를 사용하거나 솔레노이드형의 코일을 써서 자장에 의하기도 한다. 결론적으로 이 진공차단기는 절연유나 분위기 가스등을 사용하지 않으며 작동시 충격이 적고 수명이 길어 SCR보다 많이 쓰는 편이다. SCR의

경우 국부방전에 의하여 junction부분에 손상이 많음을 연구자들은 보고하고 있다. 여기서는 진공 차단기에 대한 상품도 많이 나와 있고 설계도도 쉽게 볼 수 있으므로 생략하기로 한다.

끝으로 지면을 할애하여 주신 전기학회에 감사를 드리며 재원의 부족으로 충분한 연구실험을 하지 못한 결과를 쓰자니 송구한 마음이 앞서며, 많은 지도와 편달이 있으시길 바랍니다.

참 고 문 헌

- 1) M. M. Parsons, "A comparison between an SCR and a vacuum interrupter system for repetitive opening LA-UR-81-269 report", Los Alamos Scientific Lab., Univ. of California
- 2) 이광원의 3명, "질소가압형 spark gap switch 제작과 작동특성", 10권 2호 p. 29 Engineering Report (1978)
- 3) 이광원, "SNUT-89 토카막장치의 운전제어와 진단", p. 58 및 p. 122. 1985, 학위논문 서울대학교 원자핵공학과
- 4) W. H. Bostick의 2인, "Energy storage", Compression and Switching p. 415 Plenum Press 1976.