

형·종자계형 진공 스위치의 아크 전압 특성

이태호*, 서길수**, 이홍식**, 임근희**, 허창수*
 *인하대학교, **한국전기연구원

The study of Arc-voltage characteristics in Radial & Axial Manetic Field Type Vacuum Switch

Tae-Ho Lee*, Kil-Soo Seo**, Hong-Sik Lee**, Geun-Hee Rim**, Chang-Su Huh*
 *Inha University, **Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 정전형 펄스파워시스템에서 핵심은 투입 스위치라고 해도 과언이 아니다. 이러한 투입 스위치 중 진공 아크를 이용하는 스위치로는 로렌츠력을 이용 아크를 회전시켜 전극의 손상을 억제한 횡자계형과 전극의 축방향으로 자계를 발생시켜 아크가 확산되도록 함으로써 z-pinch에 의한 전극 손상을 감소시키는 종자계형으로 대별 할 수 있다. 본 논문에서는 고전압/대전류용 횡자계형과 종자계형 진공스위치의 동작특성을 파악하기 위해 아크전압-전류 특성에 대해서 기술하였다. 횡자계형 전극과 종자계형 전극을 동크롬(75:25 (wt%))으로 제작하여 진공 챔버 내에서 실험을 통해 아크 전압과 전류를 측정하였으며, 이를 통해 아크 저항과 손실 전력을 구하였다.

손상을 감소시킨 VDAG(Vacuum Diffuse Arc Gap) 스위치의 시간에 따른 아크 전압과 전류의 측정을 통해 회로방정식을 이용하여 동적 아크저항(dynamic arc resistance)을 구하였다. 또한 커패시터 뱅크의 충전 전압 변화에 따른 아크저항과 소비 전력을 구하여 VRAG 스위치와 VDAG 스위치의 손실 특성을 비교하였다.

2. 실험 장치 및 손실 계산

2.1 실험장치

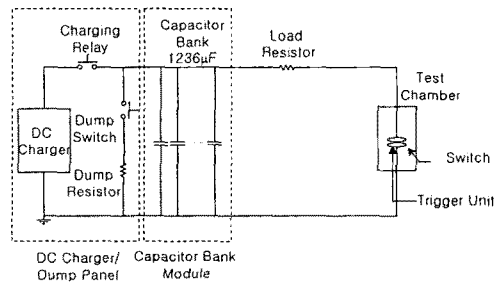


그림 1. 진공 스위치 실험 장치

1. 서 론

현대 산업의 많은 응용 기술에서는 매우 높은 전력을 순간적으로 전원에서 부하로 전달해야할 필요가 있으며, 이와 같이 부하에 순간적으로 전송되는 에너지가 아주 큰 경우를 펄스 파워 (pulsed power)라고 한다. 고전압·대전류의 대전력을 짧은 시간에 발생·제어하는 펄스 파워 기술은 고출력 단파장 레이저, 초장자계 발생장치, 고출력 X선 및 중성자 발생장치, 입자 가속기 등의 다양한 분야에서 이용되고 있다(1).

본 연구에 사용되는 펄스 파워 시스템은 그림 1과 같이 충전부, 커패시터 뱅크, 부하, 진공스위치 시험용 챔버로 구성된다. 충전장치는 맥스웰사의 동작전압 (working voltage) 22 [kV]의 DC Charger를 사용하였고, 커패시터 뱅크는 에너지 50 [kJ], 커패시턴스 206 [μ F]인 DC 커패시터 6개를 병렬로 연결하여 총 에너지 300 [kJ], 커패시턴스는 1,236 [μ F]로 하여 사용하였다. 또한 충전 후 투입 스위치의 오동작시 안전을 위하여 dump panel을 설치하였고, 전자기적 장애를 고려하여 충전 및 dump의 제어를 공압 스위치로 하였다. 커패시터 뱅크에서 스위치 시험용 챔버까지는 특수 제작된 기계적으로 강한 동축형 구조로 되어 있는 펄스 파워용 케이블을 사용하였으며, 케이블의 인덕턴스는 0.23 [μ H/m]이다. 부하용 저항은 100 [m Ω]으로 하였다. 챔버 내의 진공배기를 위해 TMP(Turbo Molecular Pump)를 사용하였으며, 실험 중에도 연속적인 배기를 통해 일정한 진공도가 유지되도록 하였다. VRAG스위치와 VDAG 스위치의 전극은 양극과 음극이 1초이고, 재질은 CuCr(75:25 (wt%)), 직경 80 [mm]이다.

이러한 펄스 파워 기술의 핵심은 고전압·대전류용 스위치라고 해도 과언이 아니며, 고전압·대전류용 스위치의 개발을 통해 전술한 다양한 분야에서 광범위하게 활용될 수 있다. 고전압·대전류 펄스용 스위치는 수십 [kV]의 고전압절연을 유지하면서 주변 운용조건의 변화에 관계없이 일정하게 동작할 수 있어야 하며, 수 만도의 고온 아크(arc)에 의한 열적 스트레스에 의한 손상을 극복할 수 있어야 한다. 또한, 여러 가지 운용조건에 따라 수십 개의 스위치가 병렬운전이 가능하여야 하며, 스위치의 소형화, 내구성, 경제성 등이 고려되어야 한다. 투입 스위치를 이용하여 고전압·대전류를 도통하는데 있어서 가장 큰 문제는 전류의 크기가 커짐에 따라 전극 손상이 심각하게 발생하는 것이다. 이는 전류의 크기 10 [kA] 이상되면 z-pinch 현상이 발생하여 아크가 더욱 응축 (constrict)되는 것이 주된 원인이라 할 수 있다(2). 이를 억제하기 위해 아크를 회전시키거나 z-pinch 현상이 일어나지 않도록 전극의 축방향에 자계를 인가하여 확산 아크 모드에서 스위치가 동작하도록 하는 방법이 있다. 이와 같은 횡자계형 스위치와 종자계형 스위치는 동일하게 전극의 손상을 억제하고자 설계되고 있으나, 그 동작 메카니즘과 에너지 손실 특성은 서로 다르다.

2.2 아크 전압의 측정과 아크 손실 계산

따라서 본 논문에서는 전압 22[kV], 전류 200[kA]급, 전하량 100[C]의 용량을 도통시킬 목적으로 직접 설계·제작하여 한국전기연구원에서 개발 시험 중에 있는 로렌츠력을 이용하여 아크를 회전시켜 전극의 손상을 억제한 아크 회전형 갭인 VRAG(Vacuum Rotary Arc Gap) 스위치와 전극의 축방향으로 자계를 발생시켜 아크가 확산되도록 함으로써 z-pinch에 의한 전극

아크 전압의 측정은 챔버의 인덕턴스를 고려하여, feedthrough를 통해 전극 양단의 전압을 고압 프로브

를 이용하여 측정하였다. 아크저항 R_a 을 산출하기 위해 스위치의 임피던스가 R_a , L_a 직렬회로라고 가정하면, 전압평형식으로부터 아크저항 R_a 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$R_a(t) = -\frac{1}{i(t)} \left[\frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt - (L_0 + L_a(t)) \frac{di(t)}{dt} - \left(\frac{dL_a(t)}{dt} - R_0 \right) i(t) \right] \quad (1)$$

여기서 C 는 커패시터 뱅크의 커패시턴스, L_0 와 R_0 는 회로의 인덕턴스와 저항이다. 아크 인덕턴스는 무시할 수 있을 정도로 아주 작으므로, 측정된 아크전압 V_a 은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$V_a(t) \approx R_a(t) i(t) \quad (2)$$

따라서 스위치의 아크에 의한 소비 전력 W 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

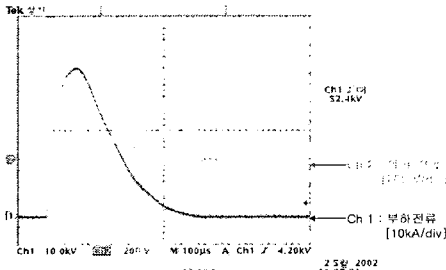
$$W(t) = V_a(t) i(t) \quad (3)$$

식 (3)의 소비전력으로부터 스위치가 도통하는 시간 동안 적분함으로써 아크에 의해 소모된 총 에너지를 산출하였다.

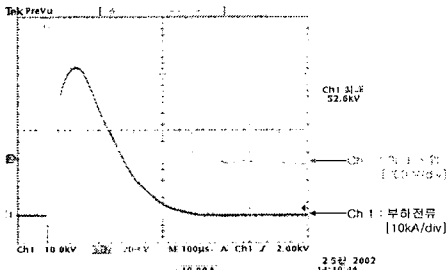
3. 실험 결과

오실로스코프로 측정한 VRAG 스위치와 VDAG 스위치의 전형적인 아크 전압과 부하전류를 그림 2에 나타내었다. 전류가 흐르기 시작하는 순간부터 약 20 [μ s]까지는 트리거 전압의 영향 때문에 전압이 (-)로 나타나는 것을 볼 수 있다.

전류 도통 후 약 520 [μ s]에서 전류는 소멸하며, 두 스위치 모두 전류 영점 이후에 전류가 완전히 차단되는 진공스위치 특성을 잘 나타내고 있다.



(a) VRAG 스위치 (전극직경 80(mm), 전극간 갭 길이 8 (mm), 커패시터 충전 전압 9 (kV))



(b) VDAG 스위치 (전극직경 80(mm), 전극간 갭 길이 8 (mm), 커패시터 충전 전압 9 (kV))

그림 2. 전형적인 아크 전압(CH2) 및 부하 전류(CH1)

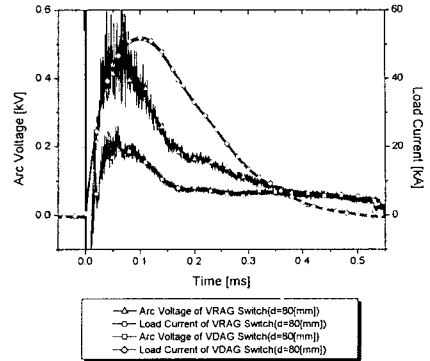


그림 3. VRAG 스위치와 VDAG 스위치의 아크 전압 비교

그림 3에는 커패시터 뱅크를 9 [kV]로 충전시킨 후 VRAG 스위치와 VDAG 스위치를 통해 각각 방전시켰을 때의 아크 전압 및 부하 전류를 5회 측정하여 평균한 것을 나타내었다. VRAG 스위치와 VDAG 스위치 모두 부하전류가 30 [kA] 이상 되는 시점에서 많은 노이즈가 섞여 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 전류가 30 [kA] 이상 되면서 음극점(cathode spot) 뿐만 아니라 양극점(anode spot)까지 발생했기 때문인 것으로 생각된다. 두 스위치의 아크 전압을 비교해 보면 VRAG 스위치에 비해서 VDAG 스위치가 spot의 수가 다소 적으며 아크 전압도 더 낮은 것을 볼 수 있다. VDAG 스위치는 약 150 [μ s]부터 전류가 소멸할 때까지 안정된 아크 전압을 유지하고 있음을 알 수 있다.

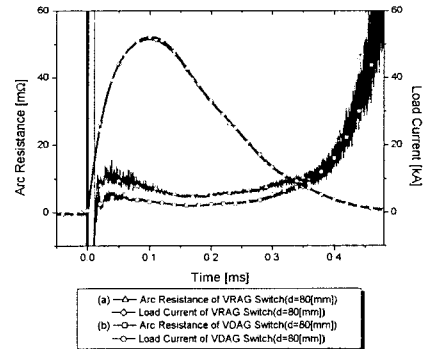


그림 4. (a)VRAG 스위치와 (b) VDAG 스위치의 전형적인 부하 전류와 아크 저항 (직경 80(mm), 전극간 갭 길이 8 (mm), 커패시터 충전 전압 9 (kV))

그림 3의 아크 전압과 부하전류로부터 식(2)를 이용하여 시간에 따른 아크 저항의 변화를 구하여 그림 4에 나타내었다. 트리거에 의해 전류가 흐르기 시작하면서 spot들의 형성에 의해 수~15 [mΩ]까지 증가한 저항은 약 200 [μ s]까지 최소 수 [mΩ]으로 서서히 감소한다. 그 이후 전류가 감소함에 따라 서서히 증가하다가 350 [μ s]이후에서 전류가 소멸할 때까지 저항은 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다.

식 (3)을 이용하여 그림 3의 아크 전압과 부하전류로부터 아크에 의해 손실되는 전력을 구하여 그림 5에 나타내었다. 그림 3의 아크 전압에서도 나타났듯이, 전력 손실의 대부분은 spot들의 생성에 기인한다고 생각된다.

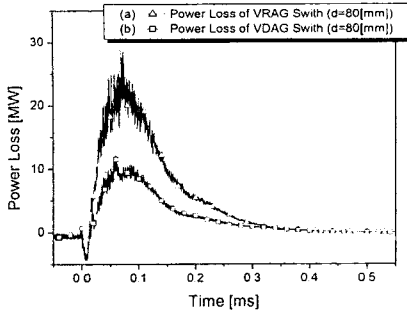


그림 5. (a) [wt%]VRAG 스위치와 (b) VDAG 스위치의 전형적인 아크 전력 파형 (직경 80(mm), 전극간 갭 길이 8 (mm), 커패시터 충전 전압 9 (kV))

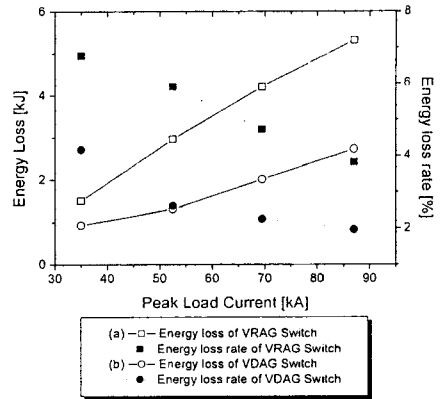


그림 8. 침두 부하 전류 크기의 변화에 따른 (a) VRAG 스위치와 (b) VDAG 스위치의 에너지 손실과 에너지 손실율의 변화 (직경 80(mm), 전극간 갭 길이 8 (mm))

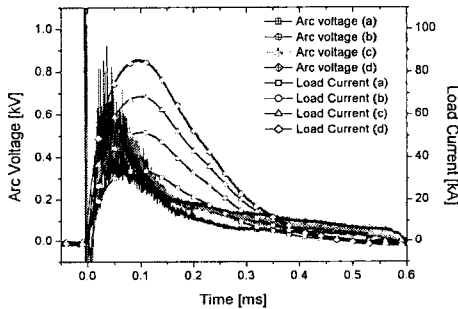


그림 6. VRAG 스위치의 커패시터 बैं크의 충전 전압 ((a) 6, (b)9, (c) 12, (d) 15 (kV))에 따른 아크 전압 및 부하 전류 (직경 80(mm), 전극간 갭 길이 8 (mm))

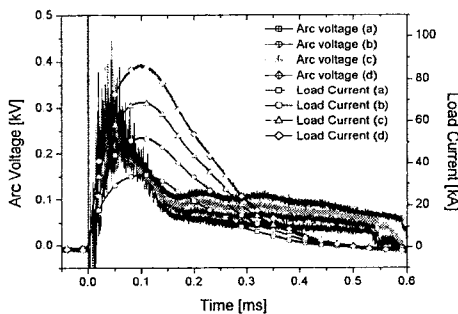


그림 7. VDAG 스위치의 커패시터 बैं크의 충전 전압 ((a) 6, (b)9, (c) 12, (d) 15 (kV))에 따른 아크 전압 및 부하 전류 (직경 80(mm), 전극간 갭 길이 8 (mm))

그림 6과 7에는 각각 VRAG 스위치와 VDAG 스위치의 커패시터 बैं크 충전 전압에 따른 아크 전압과 부하 전류의 변화를 나타내었다. 그림 6에 나타난 커패시터 बैं크의 충전 전압에 따른 VRAG 스위치의 아크 전압을 살펴보면 대체로 커패시터 बैं크의 충전전압이 높을수록, 즉 부하전류가 커질수록 아크 전압이 증가함을 볼 수 있으며, 그림 7의 VDAG 스위치의 경우도 같은 양상이 나타났다.

커패시터 बैं크의 충전 전압에 따른, 즉 침두 부하 전류의 크기에 따른 아크에 의한 에너지 손실량과 에너지 손실율(= $\frac{\text{스위치의 에너지 손실량}}{\text{커패시터 충전 에너지}} \times 100(\%)$)을 그림 8에 나타내었다. 두 스위치 모두 커패시터의 충전 에너지가 커질수록 에너지 손실도 커졌으나, 손실율 측면에서 보면 충전에너지가 커질수록 손실율은 작게 나타났다. 이것은 그림 6과 7에서 보였듯이, 커패시터 충전 에너지의 증가만큼 아크 전압이 증가하지는 않으며 아크 저항은 오히려 작아지기 때문이다. 즉 부하 전류가 증가할수록 음극점과 양극점의 발생과 소멸이 빨라짐으로써, 아크가 보다 빨리 안정화되기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 VRAG 스위치와 VDAG 스위치의 시간변화에 따른 아크 전압과 전류의 추정을 통해 회로방정식을 이용하여 동적 아크저항(dynamic arc resistance), 손실 전력 및 손실에너지를 구하여 두 스위치의 손실 특성을 비교하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 두 스위치 모두 전류 영역에서 전류가 끊어지는 정류 특성을 잘 나타내었으며, 아크에 의한 손실이 대부분 spot에 기인함을 아크 전압 추정을 통해 확인할 수 있었다.
- 커패시터의 동일한 충전에너지에 대해서, 아크 전압, 아크 저항, 손실전력, 손실에너지 모두가 VRAG 스위치에 비해 VDAG 스위치가 낮게 나타났다.
- 두 스위치 모두 커패시터의 충전 에너지를 증가시킬수록 손실에너지는 증가하였으나, 손실율은 오히려 감소하였다.

본 논문은 국방부에서 시행한 민간겸용기술사업으로 수행된 연구결과입니다.

(참 고 문 헌)

[1] S. T. Pai & Qi Zhang "Introduction to high power pulse technology", Advanced Series in Electrical and Computer Engineering, Vol 10
 [2] Gerhard Schaefer and M. Kristiansen "Gas Discharge Closing Switches", Prentice Hall, 1990