

# 대전력 펄스용 횡자계형 및 종자계형 진공스위치의 에너지 손실 특성 비교

論 文

52C-3-5

## A Comparison of Energy Loss Characteristics between Radial and Axial Magnetic Field Type Vacuum Switches

李泰浩\* · 許昌洙\*\* · 李弘植\*\*\*  
(Tae-Ho Lee · Chang-Su Huh · Hong-Sik Lee)

**Abstract** - Crowbar system Vacuum switches, widely used in a pulsed power system, could use the magnetic force to prevent the electrode damage. Vacuum switches using the magnetic forces are classified roughly into RMF(Radial Magnetic Field) and AMF(Axial Magnetic Field) type. The RMF type switches restrain a main electrode from aging due to high temperature and high density arc by rotating the arc which is driven by the Lorenz force. The AMF type switches generate axial magnetic field which decreases the electrode damage by diffusing arc.

In this paper, we present the energy loss characteristics of both RMF and AMF type switches which are made of CuCr(75:25 wt%) electrodes. The time-dependent dynamic arc resistance of high-current pulsed discharge in a high vacuum chamber( $\sim 10^{-6}$  Torr), which occurs in RMF and AMF type switches, was obtained by solving the circuit equation using the measured values of the arc voltage and current. In addition, we compared energy loss characteristics of both switches. Based on our results, it was found that the arc voltage and the energy loss of an AMF type switch are lower than a RMF type switch.

Key Words : RMF type switches, AMF type switches, arc voltage, arc loss characteristics

### 1. 서 론

현대 산업의 많은 응용 기술에서는 매우 높은 전력을 순간적으로 전원에서 부하로 전달해야 할 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, 초강자계 발생장치, 고출력 X선 및 중성자 발생장치, 입자 가속기 등의 다양한 분야에서 이용되고 있다[1].

이러한 펄스 파워 기술의 핵심은 고전압·대전류용 스위치라 해도 과언이 아니며, 고전압·대전류용 스위치의 개발은 전술한 다양한 분야에서 광범위하게 활용될 수 있다. 고전압·대전류 펄스용 스위치는 수십 kV의 고전압절연을 유지하면서 주변 운용조건에 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 다수 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 손

상이 심각하게 발생하는 것이다.

이는 전류의 크기 10 kA 이상 되면 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 축방향으로 자계를 인가하여 확산 아크 모드에서 스위치가 동작하도록 하는 방법이 있다. 이와 같은 방법을 통해 전극의 손상을 억제하기 위해 스위치가 설계되고 있으나, 그 동작 메커니즘과 에너지 손실 특성은 서로 다르다.

현재 국내에서는 전열화학포(ETC)와 같은 군용이나 암반 발파(巖盤 發破)와 같은 상업용 등의 펄스 파워 응용분야에 적용시킬 수 있는 전압 22 kV, 전류 200 kA급, 전하량 100 C의 용량을 도통시킬 수 있도록 로렌츠력을 이용하여 아크를 회전시켜 전극의 손상을 억제한 아크 회전형 갭인 RMF형 스위치와 전극의 축방향으로 자계를 발생시켜 아크가 확산되도록 함으로써 z-pinch에 의한 전극 손상을 감소시킨 AMF형 스위치를 개발 시험 중에 있다. 현재 개발 중에 있는 두 종류의 스위치는 트리거 전극 부분을 제외한 자계를 만들기 위한 기본적인 전극 구조는 진공 차단기의 전극 구조를 기본 모델로 하고 있다. 진공차단기의 경우 고장시 차단기가 동작하여 가동접점이 분리되면서 발생하는 아크 지속시간은 수 ms 정도 되며, 이와 같은 진공차단기의 아크 특성에 대한 연구는 많이 수행되어 왔다. 본 논문에서 제시하고 있는 진공스위치는 두 전극이 고정되어 있는 상태에서 전기적인 펄스 트리거 신호에 의해 동작하게 되며, 이 두 가지 진공스위치는 본 연구에서 사용하고 있는 펄스파워시스템에서 부하저항이

\* 正 會 員 : 仁 河 大 學 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

\*\* 正 會 員 : 仁 河 大 學 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

\*\*\* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 院 電 氣 物 理 研 究 組 長 · 工 博

接 受 日 子 : 2002년 9월 17일

最 終 完 了 : 2003년 1월 2일

100 mΩ일 때 아크 전류의 반파 주기 (half period)가 약 520 μs 정도의 펄스 파형의 형태로서 진공차단기의 아크 지속시간에 비해 대단히 짧다. 따라서 진공차단기의 접점부에서 나타나는 아크 현상과는 다소 차이가 있으며, 접점 표면에 나타나는 cathode spot이나 anode spot도 양상이 다소 다르다. 스위치의 용도 또한 펄스 파워를 부하로 투입하는 것이기 때문에 전류의 첨두치도 50 kA 이상으로 기존의 진공 차단기에서의 아크 전류에 비해 상당히 높다. 이와 같은 RMF형과 AMF형 전극 구조를 가지는 대전력 펄스 투입용 진공 스위치의 아크 전압의 양상이나 손실 특성은 아직까지 보고된 바가 없다.

따라서, 본 연구에서는 RMF형과 AMF형의 대전력 펄스 투입용 진공 스위치의 시간에 따른 아크 전압과 전류의 측정을 통해 회로방정식을 이용하여 동적 아크저항(dynamic arc resistance)과 스위치의 손실에너지를 구하였다. 이와 같은 손실 파라미터는 펄스 파워 시스템의 설계 시 전압이나 전류의 성형을 모의(simulation)하는데 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 커패시터 뱅크의 충전 전압 변화에 따른 아크저항과 소비 전력을 구하여 RMF형 스위치와 AMF형 스위치의 손실 특성을 비교하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

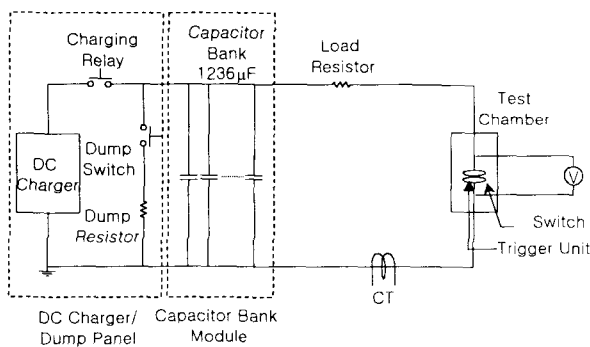


그림 1 진공 스위치 실험 장치의 개략도  
Fig. 1 Block diagram of capacitive pulsed power system

본 연구에 사용되는 펄스 파워 시스템은 그림 1과 같이 충전부, 커패시터 뱅크, 부하, 진공스위치 시험용 챔버로 구성된다. 충전장치는 맥스웰사의 동작전압(working voltage) 22 kV의 직류 충전기를 사용하였고, 커패시터 뱅크는 에너지 50 kJ, 커패시턴스 206 μF인 DC 커패시터 6개를 병렬로 연결하여 총 에너지 300 kJ, 커패시턴스는 1,236 μF로 하여 사용하였다. 또한 충전 후 투입 스위치의 오동작 시 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 펄스파워용 케이블을 사용하였으며, 케이블의 인덕턴스는 0.23 μH/m이다. 부하용 저항은 100 mΩ으로 하였다. 챔버 내의 진공 배기를 위해 TMP(Turbo

Molecular Pump, Alcatel사 ATP400 모델)를 사용하였으며, 실험 중에도 연속적인 배기를 통해 일정한 진공도(~10<sup>-6</sup> Torr)가 유지되도록 하였으며, 진공 게이지(Alcatel사 CF2P모델)로 모니터링하였다. RMF형 스위치와 AMF형 스위치의 전극은 양극과 음극이 1조이고, 재질은 CuCr(75:25 wt%), 직경은 80 mm이며, 전극간 거리는 8 mm로 하였다.

그림 2는 RMF를 형성할 수 있도록 3개의 나선형 날개가 120°각격으로 구성된 스위치의 전류 흐름과 동작원리를 나타낸 것이다. 트리거에 의해 전극간 절연파괴가 일어나 스위치가 도통될 때, 3개의 나선형 전극에 의해 발생하는 자계에 의해 진공아크는 식 (1)과 같이 φ 방향으로 아크전류의 단위 길이당 작용하는 힘을 받아 전류가 흐르는 동안 회전운동을 하게 된다. 단, 자속 B는  $\vec{r}$ 인 전극의 radial 방향, 전류 I의 방향은 전극의 축방향인  $\vec{z}$ 이다.

$$F_{\vec{\phi}} = \vec{I} \times B\vec{r} \quad (1)$$

아크가 회전함에 따라 전극의 일부분에서만 용융이 일어나지 않으므로 전극의 열화를 감소시킬 수 있게 된다.

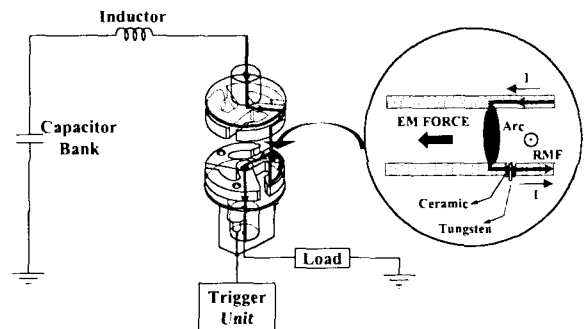


그림 2 RMF형 스위치의 구조 및 동작원리  
Fig. 2 Structure and principle of a RMF type switch

그림 3은 본 연구에 사용된 3개의 코일 전극과 3개의 슬릿(slit)으로 구성된 AMF형 진공 스위치의 전류의 흐름과 동작원리를 나타내고 있다. 슬릿이 포함된 전극 뒤에 위치한 코일 전극에서 전류는 3개로 나뉘어 원주 방향으로 균일하게 흐르게 되어 AMF가 발생된다. 이때 전극에 유기되는 와전류(eddy current)의 영향을 줄이기 위해 슬릿이 포함되게 된다. 트리거에 의해 공급되는 초기 플라즈마에 의해 주 전극간에 진공 방전이 개시되어 전류가 흐르기 시작하면, 코일 전극에서 발생하는 AMF가 인가되어 음극에서 방출되는 전자는 AMF에 의해 포획(trap)되어 라무어(Larmor) 반경을 가지고 나선형궤도 운동을 하면서 양극으로 이동하게 된다. 플라즈마 내부의 이온들은 전자와의 인력 때문에 수많은 아크 기둥(column)들을 형성하게 되어 아크 플라즈마는 확산 아크 모드(diffuse arc mode)에서 전류를 도통시키게 된다. 전류 영점 순간에 전극 표면에서의 급속 증기의 발생이 없는 확산 아크가 되면 아크 플라즈마는 소멸되고 전류는 차단되게 된다[3,4,5].

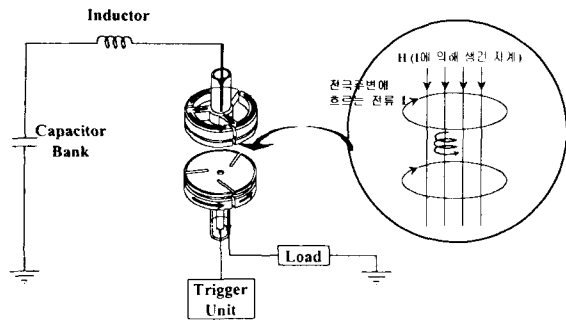


그림 3 AMF형 스위치의 구조 및 동작원리  
Fig. 3 Structure and principle of a AMF type switch

트리거 전극은 내마모성이 강한 텅스텐(W)을 사용하였고, 전계를 집중시키기 위해 끝을 원뿔 형태로 제작하였으며, 트리거 전극의 절연물은 세라믹을 사용하였다. 그림 4는 트리거 발생장치의 개략도를 나타내었다. 트리거 전원장치는 출력전압 18kV, 트리거시 트리거 전류의 최대값은 150A, 펄스 폭은 2 ~ 10µs의 성능으로 제작하였다.

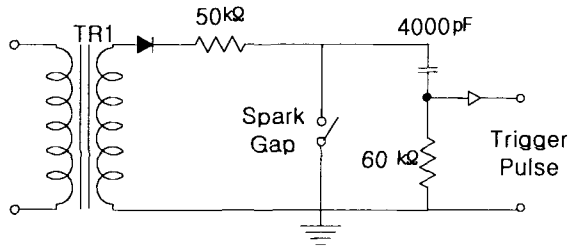


그림 4 트리거 발생장치의 개략도  
Fig. 4 Circuit diagram for trigger generator

2.2. 아크 전압 측정과 아크 손실 계산

아크 전압의 측정은 측정시 챔버의 인덕턴스에 의한 오차를 줄이기 위해, 그림 1과 같이 feedthrough를 통해 전극 양단의 전압을 고압 프로브(Tektronix사, P6015A 모델)를 사용하여 오실로스코프(Tektomix사, TDS 3032 모델)로 측정하였다. 부하전류의 측정은 CT(Pearson electronics사, Wideband Current monitor 1423 모델)를 사용하였다. 아크저항  $R_a$ 를 산출하기 위해 스위치의 임피던스가  $R_a$ ,  $L_a$  직렬회로라고 가정하면, 전압평형식으로부터 아크저항  $R_a$ 는 식 (2)와 같이 표현된다[6].

$$R_a(t) = \frac{1}{i(t)} \left[ V_b - \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt - (L_0 + L_a(t)) \frac{di(t)}{dt} - \left( \frac{dL_a(t)}{dt} + R_0 \right) i(t) \right] \quad (2)$$

여기서  $V_b$ 는 절연과피전압 즉 커패시터의 충전전압,  $C$

는 커패시터 बैं크의 커패시턴스,  $L_0$ 와  $R_0$ 는 회로의 인덕턴스와 저항이다. 아크 인덕턴스는 무시할 수 있을 정도로 아주 작으므로, 측정된 아크전압  $V_a$ 은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

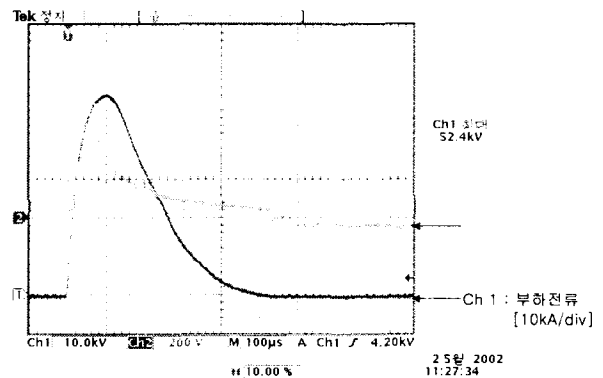
$$V_a(t) \approx R_a(t) i(t) \quad (3)$$

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

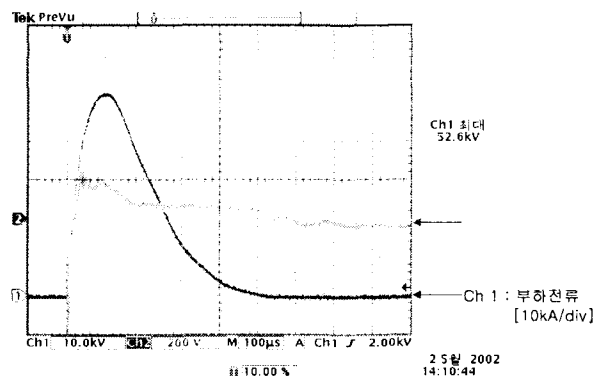
$$W(t) = V_a(t) i(t) \quad (4)$$

식 (4)의 소비전력으로부터 스위치가 도통하는 시간동안 적분함으로써 아크에 의해 소모된 총 에너지를 산출하였다.

3. 실험 결과 및 고찰



(a) RMF형 스위치 (커패시터 충전 전압 9 kV)  
(a) RMF type switch (capacitor charging voltage 9 kV)



(b) AMF형 스위치 (커패시터 충전 전압 9 kV)  
(b) AMF type switch (capacitor charging voltage 9 kV)

그림 5 전형적인 아크 전압(Ch2) 및 부하 전류(Ch1)  
Fig. 5 Typical wave forms of arc-voltage and load current

오실로스코프로 측정한 RMF형 스위치와 AMF형 스위치의 전형적인 아크 전압과 부하전류를 그림 5에 나타내었다. 전류가 흐르기 시작하는 순간부터 약 10  $\mu$ s까지는 부극성으로 인가되는 트리거 전압(-18 kV)의 영향 때문에 전압이 (-)로 나타나는 것을 볼 수 있다.

전류 도통 후 약 520  $\mu$ s 에서 전류는 소멸하며, 두 스위치 모두 전류 영점이후에 전류가 완전히 차단되는 진공스위치 특성을 잘 나타내고 있다. 전류가 차단된 이후에는 케이블 및 실험 시스템의 기하학적 인덕턴스에 의해 커패시터에 역으로 충전되는 전압이 나타나게 된다. 따라서 부하가 순저항성 부하가 아닌 유도성 부하의 경우 커패시터의 보호를 위해 크로바(crowbar) 회로가 필요하다[7].

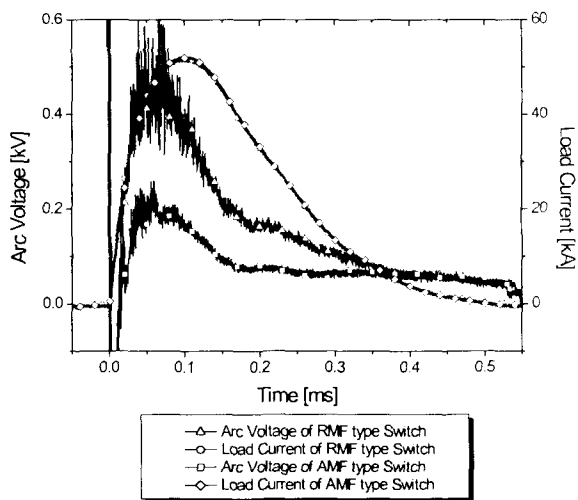


그림 6 RMF형 스위치와 AMF형 스위치의 측정된 아크 전압과 부하전류의 평균값 비교

Fig. 6 The comparison between mean values of a measured arc voltage and a load current of both RMF and AMF type switches

그림 6에는 커패시터 뱅크를 9 kV로 충전시킨 후 RMF형 스위치와 AMF형 스위치를 통해 각각 방전시켰을 때의 아크 전압 및 부하 전류를 5회 측정하여 평균한 것을 나타내었다. RMF형 스위치와 AMF형 스위치 모두 부하전류가 30 kA 이상 되는 시점에서 많은 피크(peak)가 나타나며, 이것은 전류가 30 kA 이상 되면서 음극점(cathode spot) 생성에 의한 피크뿐만 아니라 양극점(anode spot)까지 발생함으로써 큰 전압피크까지 섞여 있는 것으로 생각된다[8, 9]. 두 스위치의 아크 전압을 비교해 보면 RMF형 스위치에 비해서 AMF형 스위치가 전압 피크가 다소 적으며 보다 낮은 아크 전압을 나타내고 있다. 이것은 전류 최대치가 50 kA 이상 되는 대전류를 도통시킬 경우, 실험에 사용된 RMF형 스위치는 양극점이 발생되지 않을 정도로 빠르게 회전하지 않을 뿐만 아니라, 아크 회전시 각각의 날개 전극들 사이의 갭을 지날 때 아크 경로가 길어짐에 따라 저항이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. AMF형 스위치는 약 150  $\mu$ s부터 전류가 소멸할 때까지 안정된 아크 전압을 유지하고 있음을 알 수 있었다.

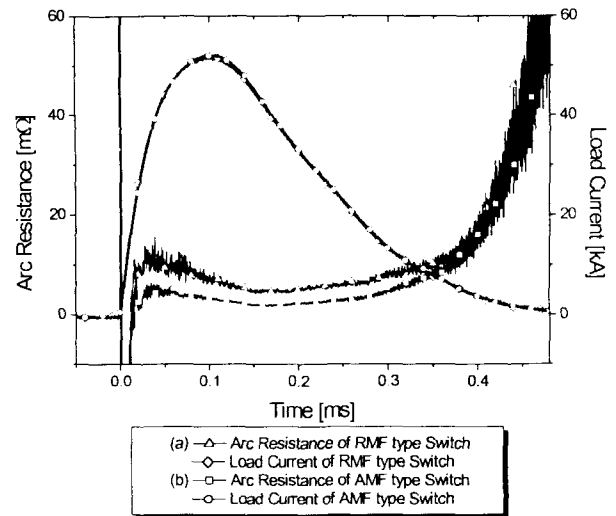


그림 7 (a)RMF형 스위치와 (b) AMF형 스위치의 부하 전류와 아크 저항 계산치 비교 (커패시터 충전 전압 9 kV)

Fig. 7 The comparison between calculated load current and arc resistance of both (a) RMF and (b) AMF type switches (capacitor charging voltage 9 kV)

그림 6의 아크 전압과 부하전류 측정결과로부터 식(2)를 이용하여 시간에 따른 아크 저항의 변화를 구하였으며, 이를 그림 7에 나타내었다. 트리거에 의해 전류가 흐르기 시작하면서 spot들의 형성에 의해 수~15 m $\Omega$ 까지 증가한 저항은 약 200  $\mu$ s까지 최소 수 m $\Omega$ 으로 서서히 감소한다. 그 이후 전류가 감소함에 따라 아크 저항은 서서히 증가하다가 350  $\mu$ s이후에서 전류가 소멸할 때까지 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다.

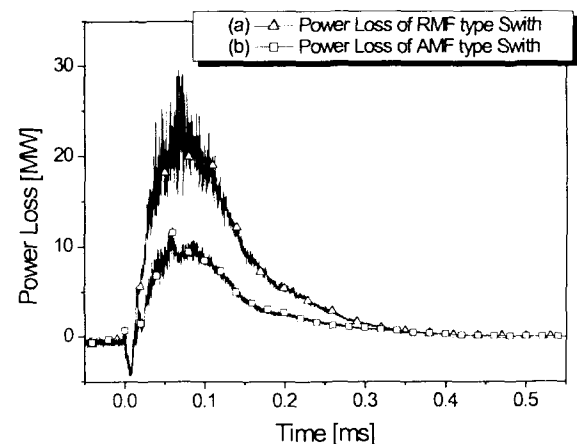


그림 8 (a) RMF형 스위치와 (b) AMF형 스위치의 아크 손실 전력 계산치의 비교 (커패시터 충전 전압 9 kV)

Fig. 8 The comparison between calculated arc losses power of both (a) RMF and (b) AMF type switches (capacitor charging voltage 9 kV)

식 (4)를 이용하여 그림 6의 아크 전압과 부하전류로부터 아크에 의해 손실되는 전력을 구하여 그림 8에 나타내었다. 그림 6의 아크 전압에서도 나타났듯이, 트리거 이후 70  $\mu$ s까지 전력 손실은 급격히 증가하며 이 손실의 대부분은 spot들의 생성과 아크 기둥의 빛과 열 에너지로 소비된다고 생각된다. 즉, 전극 표면의 국부적인 가열과 전계 집중에 의한 미세 돌출부, 유전 함유물이나 불순물 등의 미세 폭발(micro-explosion)이 spot을 형성한다고 하면 이로 인한 온도 상승과 전극 표면의 미세 폭발로 에너지가 소비된다고 볼 수 있다. 전류 최대점인 100  $\mu$ s 이후에 손실은 급격히 줄어들며 전류 영점에서 손실은 완전히 사라지게 된다.

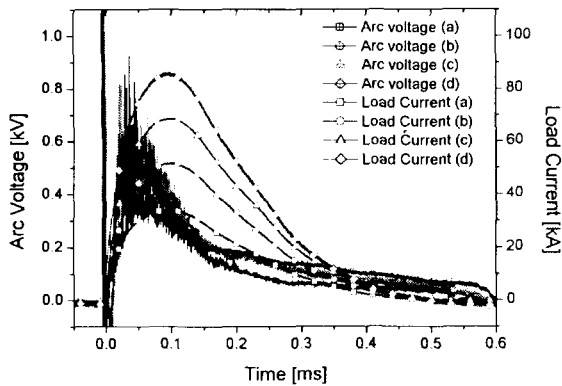


그림 9 RMF형 스위치의 커패시터 뱅크의 충전 전압 ((a) 6 kV, (b) 9 kV, (c) 12 kV, (d) 15 kV)에 따라 측정된 아크 전압 및 부하 전류의 평균치

Fig. 9 The mean value of a measured arc voltage and a load current of RMF type switch when capacitor bank was discharged into a load after it was charged with (a) 6 kV, (b) 9 kV, (c) 12 kV, (d) 15 kV, respectively.

그림 9와 10에는 각각 RMF형 스위치와 AMF형 스위치의 커패시터 뱅크 충전 전압에 따른 아크 전압과 부하전류의 변화를 나타내었다. RMF형 스위치의 경우 그림 9와 같이 커패시터 뱅크의 충전전압이 높을수록, 즉 부하전류가 커질수록 아크 전압이 증가함을 볼 수 있다. RMF형 스위치는 15 kV 충전 시 아크 전압이 최대 900 V의 피크값까지 나타내었으며, 150  $\mu$ s 이후부터 전류가 소멸하기 직전까지 200 V에서 100 V 정도로 서서히 감소하는 양상을 나타내었다. 그림 10의 AMF형 스위치의 경우도 RMF 스위치와 유사하게 커패시터 뱅크의 충전전압이 높을수록 아크 전압이 증가함을 볼 수 있다. AMF형 스위치는 15 kV 충전시 아크 전압이 최대 600 V의 피크값까지 나타내었으며, 150  $\mu$ s 이후부터 전류가 소멸하기 직전까지 100 V로 거의 일정한 양상을 나타내었다. 그림 9와 10을 비교해 볼 때 AMF형 스위치의 아크 전압이 전체적으로 낮게 나타나며, 이는 AMF형 스위치의 통전시 확산 아크 모드에서 동작함으로써 전극 면적 전체로 고르게 아크 전류가 확산되어 흐르기 때문인 것으로 생각된다.

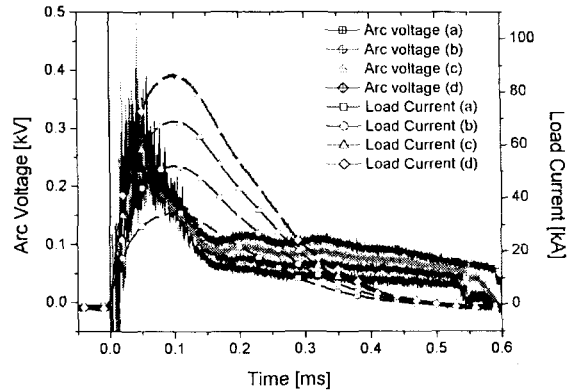


그림 10 AMF형 스위치의 커패시터 뱅크의 충전 전압 ((a) 6 kV, (b) 9 kV, (c) 12 kV, (d) 15 kV)에 따라 측정된 아크 전압 및 부하 전류의 평균치

Fig. 10 The mean value of a measured arc voltage and a load current of AMF type switch when capacitor bank was discharged into a load after it was charged with (a) 6 kV, (b) 9 kV, (c) 12 kV, (d) 15 kV, respectively.

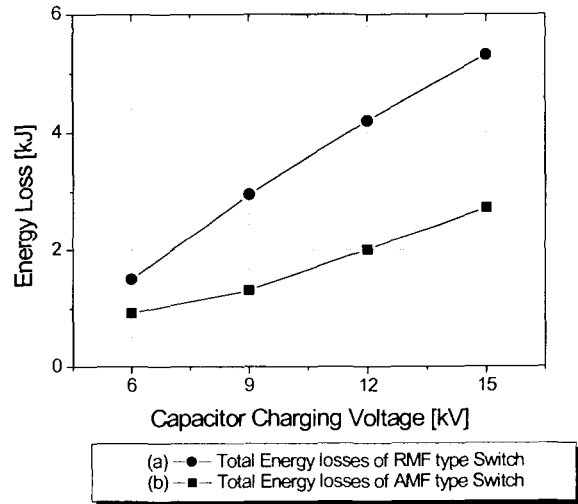


그림 11 커패시터 뱅크의 충전전압(6 kV, 9 kV, 12 kV, 15 kV)에 따른 (a) RMF형 스위치와 (b) AMF형 스위치의 에너지 손실 계산값의 변화

Fig. 11 The calculated total energy losses of (a) RMF and (b) AMF type switch when capacitor bank was discharged into a load after it was charged with 6 kV, 9 kV, 12 kV, and 15 kV, respectively.

커패시터 뱅크의 충전 전압에 따른 아크에 의한 총에너지 손실량을 그림 11에 나타내었다. 두 스위치 모두 커패시터의 충전 전압이 높을수록 즉, 충전 에너지가 커질수록 에너지 손

실도 거의 선형적으로 증가하였다. RMF 형 스위치의 경우 커패시터 뱅크를 6 kV 충전시 에너지 손실이 1.51 kJ, 15 kV 충전시 5.32 kJ로 에너지 손실이 급격히 증가하는 양상을 나타내었으며, AMF 형 스위치의 경우는 6 kV 충전시 0.93 kJ, 15 kV 충전시 2.73 kJ로 에너지 손실이 RMF형 스위치에 비해 38%~48% 정도 낮게 나타났다.

이상의 결과들을 종합해 볼 때, 30 kA 이상의 대전류 통전시 RMF형 스위치 보다 AMF형 스위치가 에너지 손실 측면에서 유리하다고 판단된다. 이는 AMF형 전극이 확산 아크 모드에서 동작하므로 보다 넓은 전극 면적에서 효율적으로 통전 시킬 수 있기 때문이다. 또한 아크 전압 측정을 통해 볼 때, 전극의 열화에 큰 영향을 미치는 양극점 발생에 의한 전압 피크가 더 적은 것으로 보아 전극의 손상 정도도 AMF형 전극이 유리할 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기존의 진공차단기 아크 전류와 달리 펄스 주기가 520  $\mu$ s 정도로 짧고 침투치가 30 kA 이상되는 아크 전류에 대한 RMF형과 AMF형의 대전력 펄스 투입용 진공 스위치의 시간변화에 따른 아크 전압과 전류의 측정을 통해 회로방정식을 이용하여 동적 아크저항, 손실 전력 및 손실에너지를 구하였다. 또한 측정된 아크 전압으로부터 스위치에서 발생하는 에너지 손실의 대부분이 전극 표면에 발생하는 많은 spot들에 의한 것임을 유추할 수 있었으며, 손실에너지 측면에서 두 스위치의 특성을 비교하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 두 스위치 모두 전류 영점에서 전류가 끊어지는 정류 특성을 잘 나타내었으며, 아크 전압 측정을 통해 볼 때 아크에 의한 에너지 손실이 아크 기둥의 빛과 열에너지 뿐만 아니라 spot의 생성에 기인하는 것으로 판단된다.
- 동일한 커패시터 충전에너지에 대해서, 아크 전압, 아크 저항, 손실전력, 손실에너지 모두가 RMF형 스위치에 비해 AMF형 스위치가 낮게 나타남으로써 에너지 손실 측면에서 AMF형 스위치가 유리할 것으로 생각된다. 또한 아크 전압 측정을 통해 볼 때, 전극의 열화에 큰 영향을 미치는 양극점 발생에 의한 전압 피크가 AMF형 스위치에는 더 적은 것으로 보아 전극의 손상 정도가 더 적을 것으로 생각된다.
- 두 스위치 모두 커패시터의 충전 에너지를 증가시킬수록 손실에너지는 증가하였으며, RMF 형 스위치의 경우 커패시터 뱅크를 6 kV 충전시 에너지 손실이 1.51 kJ, 15 kV 충전시 5.32 kJ로 에너지 손실이 급격히 증가하는 양상을 나타내었으며, AMF 형 스위치의 경우는 6 kV 충전시 0.93 kJ, 15 kV 충전시 2.73 kJ로 에너지 손실이 RMF형 스위치에 비해 38%~48% 정도 낮게 나타났다.

이상의 결과들을 종합해 볼 때, 30 kA 이상의 대전류 통전시 RMF형 스위치 보다 AMF형 스위치가 에너지 손실 측면에서 유리하다고 판단되며, 아크 전압 측정을 통해 볼 때 전극의 열화에 큰 영향을 미치는 양극점 발생에 의한 전압

피크가 AMF형 스위치에는 더 적은 것으로 보아 전극의 손상 정도가 더 적을 것으로 예상된다. 그러나, 스위치를 평가함에 있어서 스위치의 기본 설계 파라미터가 에너지 손실뿐만 아니라 지연시간(delay time), 회복시간(recovery time), 반복율 (repetition rate) 등 다양한 파라미터에 대한 복합적인 검토가 필요하다. 하지만, 현재 이와 같은 파라미터들을 종합적으로 고려하여 완료된 상태가 아니라 연구 진행 중이므로, AMF형이 RMF형에 비해 모든 특성이 우수하다고 할 수는 없다고 생각된다.

본 연구에서 얻어진 스위치의 아크저항은 펄스 파워 시스템의 설계 시 PSpice와 같은 회로 모의 프로그램에서 진공스위치를 모델링하는데 있어서 기본적인 손실 파라미터로 활용함으로써 펄스 파워 시스템의 부하로 전달되는 전류의 크기와 위상 등을 모의하는데 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소주관으로 “전력용 마이크로 TVS 개발 연구(00-중-03)”로 수행되었음.

#### 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, Preum press, 1990
- [3] Schulman, M.B. Slade, P.G. 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
- [4] J.Lafferty, Vacuum arcs theory and application, John Wiley & Sons, 1980
- [5] Zou Jiyan, Cong Jiyuan, "Theoretical analyses of arcs in triggered vacuum switches", International Symp. Proceedings, ISDEIV, XIXth Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Vol. 1, pp 192-194, 2000.
- [6] 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
- [7] Raymond L. Boxman, Handbook of Vacuum Science and Technology: Fundamentals and Applications, Noyes pub., part 2, 1995
- [8] H. Craig Miller, "A review of anode phenomena in vacuum arcs", IEEE Trans. Plasma Science, Vol. PS-13, No. 5, pp. 242~252
- [9] D.F. Alferov, V.A.Nevrovsky, "Anode erosion of a high-current multigap vacuum triggered switch",

IEEE 19th. Int. Symp. on Discharge and Electrical  
Insulation in Vacuum-Xi'an 2000, pp 515~518

## 저 자 소 개



### 이 태 호(李泰浩)

1972년 6월 19일생. 1997년 인하대 전기공학과 졸업. 1997년~1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 032-860-7391

Fax : 032-863-5822

E-mail :

g1991140@inhavision.inha.ac.kr



### 허 창 수(許昌洙)

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1983~1993년 한국전기연구소 기능재료연구실 실장. 1997~1998년 커네티컷대 방문교수. 1993~현재 인하대 전기공학과 교수

Tel : 032-860-7399

Fax : 032-863-5822

E-mail : cshuh@inha.ac.kr



### 이 홍 식(李弘植)

1953년 9월 13일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리그룹 연구그룹장(책임).

Tel : 055-280-1491

Fax : 055-280-1490

E-mail : hslee@keri.re.kr