

펄스 대전류 Rotary Arc Gap 스위치 개발

조 주현, 이 홍식, 임 근희, E. Pavlov*

한국전기연구소, NIIEFA(Russia)*

A Development of the Rotary Arc Gap Switch for Pulsed High Current Transfer

Chu-Hyun Cho, Hong-Sik Lee, Geun-Hie Rim, E. Pavlov*

Korea Electrotechnology Research Institute, NIIEFA(Russia)*

Abstract- The most important question is how to use which kind of switch in pulsed power generation. There are many kinds of commercial closing switches, which have advantages and disadvantages. The most popular closing switch is the spark gap, but it has a disadvantage in life time, because of erosion of electrodes by arc heating. The Rotary Arc Gap(RAG) switch, especially Walkie-Edgar type RAG switch, was proposed to solve such problems in spark gap. It has a simple and special structure for arc moving caused from self-induced electromagnetic force, because moving arc makes less erosion on the electrodes.

In this study we have made an Walkie-Edgar type RAG switch, tested the switching with capacitive energy storage system, and measured rotating arc speed in different peak current.

를 통하여 부하로 전달된다. 이 때 전류의 경로가 그림에 나타난 바와 같이 아크가 발생하는 부분에서 자속이 상대적으로 밀도가 높게되어 아크를 움직이게 하는 전자기력이 발생한다.

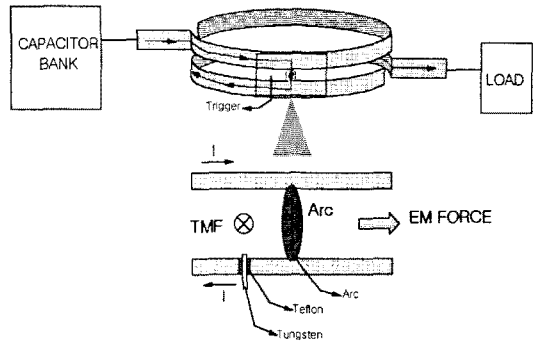


그림 1 RAG 스위치의 동작 원리 개념도

I. 서론

펄스파워에 발생 및 응용에 있어서 가장 중요하고 핵심적인 문제는 어떠한 스위치를 어떻게 사용할 것인가 하는 문제이다. 스위칭 자체에 있어서는 Closing 스위칭과 Opening 스위칭 두 가지로 크게 나눌 수 있다. Closing 스위칭으로서 현재 개발되어 상용화 되어있는 스위치의 종류는 매우 다양하고 각각 장단점을 가지고 있다. 그러나 일반적으로 가장 널리 이용되고 있는 스위치는 스파크 갭 스위치이다. 스파크 갭 스위치 또한 용도에 따라서 다양한 스위치들이 개발되어 있다.

이러한 갭 스위치들의 가장 큰 단점은 스위치의 수명이 짧다는 것이다. 일반적으로 갭 스위치들이 수명이 상대적으로 짧은 이유는 전류가 흐르는 채널이 아크에 의해서 형성되며, 아크는 매우 고온이므로 아크의 열에 의해서 전극이 증발되어 마모되기 때문이다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 제안된 방법이 전자기력에 의한 아크의 이동이다. 특별히 외부에서 자장을 가하지 않아도 자체적으로 유도된 자장에 의해서 아크가 전극 면을 따라서 이동하게 하는 구조를 가진 스위치를 Rotary Arc Gap 스위치라 부른다.

본 연구에서는 Walkie-Edgar type의 RAG 스위치를 설계 제작하고, 펄스 발생 시스템을 구성하여 제작된 RAG 스위치를 이용하여 통전 시험을 하였다. 부하측을 단락하여 감쇄 진동하는 펄스 전류의 통전시 발생하는 아크의 회전 속도를 측정하였다.

II. Walkie-Edgar Type RAG 스위치의 동작원리

그림1에 Walkie-Edgar type RAG 스위치 동작원리에 관한 개념도를 나타내었다. 스위치의 구조는 링 형태의 두 전극이 서로 반대방향에 commutating gap을 가지고 있다. 전류의 흐름은 그림1에서 커패시터 뱅크 등의 에너지 축적 소자로부터 두 전극사이에서 발생하는 아크

III. 실험장치 구성

가. 장치구성에 있어서 고려할 사항

RAG 스위치는 고전압에서 대전류를 통전하기 위해서 고안된 스위치로서 본 연구에서 설계 제작된 스위치의 성능 실험을 위해서는 고전압 펄스 대전류를 발생하기 위한 시스템의 구성이 필요하다. 시스템 구성에 있어서 고려해야 할 사항은 스위치를 포함한 전체 시스템의 응용분야로서 그 응용에 따라 다양한 사양이 필요하다. 본 연구에서 구성한 시스템은 대전류를 이용하는 분야, 특히 펄스 압력 발생 또는 초미립자 제조로 응용분야를 설정하였고, 그림 2에 나타난 시스템 구성도의 특징 중의 하나는 커패시터의 역전압 보호용 크로바 시스템을 또하나의 RAG 스위치를 이용하여 구성하였고, 그 크로바 스위치를 커패시

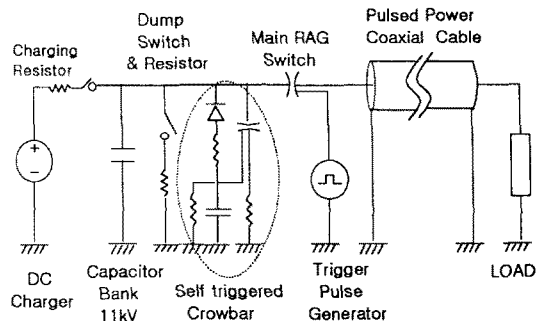


그림 2 RAG 스위치를 이용한 펄스파워 시스템 구성 회로도

터의 역전압이 일정 전압 이상이 되었을 때 자동적으로 트리거가 되도록 구성되었다는 것이다. 제어회로에 있어서 고려할 사항은 충전속도를 빠르게 하고, 원하는 충전전압에서 충전회로를 차단하고 또한 방전 후 잔류 전하를 안전하게 방전하는 것이다. 또한 비상상태에 있어서 커패시터에 저장된 에너지를 무리 없이 소비하기 위한 Dump 회로의 설계도 중요한 고려요소이다.

그림 2에서 DC 충전부는 220V/13000V, 10kVA 상용 변압기를 이용하여 승압하고, Voltage doubler 회로를 이용하여 피크 전압을 다시 크게 하여 다이오드를 이용하여 정류하여 충전저항을 통하여 커패시터 뱅크에 충전한다. 커패시터 뱅크는 830 μF, 11kV, 10개를 병렬로 하여 최대 500kJ의 에너지를 저장할 수 있으며 펄스에 따라서 커패시터를 분리하여 사용할 수 있으며, 유사시 커패시터를 보호하기 위한 퓨즈가 연결되어 있다. 이 퓨즈는 보통 때에는 충전전류를 공급하는 패스가 되고 과전류가 흐르면 주울 열에 의해서 퓨즈가 녹아서 절단되도록 설계되었다. Dump 회로는 방전이 끝난 후에 제어회로에 의해서 dump 스위치를 닫으면 dump 저항에 의해서 잔류에너지가 소비되도록 하였으며 그 소비시간은 500kJ의 에너지에 대해서 약 1분이 소요되도록 하였다.

시스템의 특성에 따라서 커패시터에 역전압이 걸릴 수 있으며 이는 커패시터의 수명을 단축시키므로 이러한 역전압을 허용치 이하로 차단하기 위해서 앞에서 언급한 바와 같이 또 하나의 RAG 스위치를 이용한 크로바링 시스템을 구성하였다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 크로바링 동작은 커패시터의 역전압에 의해서 자발적으로 트리거가 되도록 되어있으므로 복잡한 센서나 고가의 소자가 필요하지 않는 경제적인 시스템이다.

트리거 펄스는 LC 공진에 의해서 펄스를 발생시키고 펄스 변압기를 통하여 승압하여 피크 전압 약 15kV의 펄스를 메인 RAG 스위치의 그림 1의 under electrode와 트리거 핀 사이에 인가하여 트리거동작이 일어나게 된다.

발생된 펄스를 부하에 전달하기 위해서는 펄스파워용 케이블이 필요하다. 일반적인 케이블은 내부 도체와 외부 도체의 단면적이 같지 않다. 이 경우 케이블의 저항이 커지게 되므로 적합하지 않다. 펄스 파워용 케이블은 인덕턴스가 작은 동축형 이어야하고, 내부도체와 외부도체의 단면적이 같아야하며 도체는 전자력에 의해서 그 구조가 변하지 않도록 편조선 형태의 것이 바람직하다. 국내의 경우 아직 대전류 펄스파워용 케이블이 생산되지 않고 있다. 본 연구에서는 일반 케이블을 사용하였으나 전류에 의해서 케이블의 외부도체가 전자력에 의해서 뭉쳐지는 문제가 있었다.

가. 시스템 모델링 및 분석

그림 2의 회로도는 그림 3과 같이 간략화 하여 수학적으로 분석을 할수 있다.

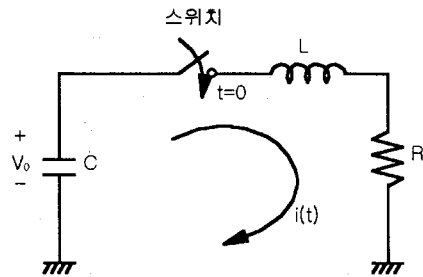


그림 3 그림 2의 회로도의 수학적 모델링

그림 3의 회로에서 전류 $i(t)$ 에 대한 미분 방정식은 다음과 같다.

$$-V_0 + \frac{1}{C} \int i(t) dt + L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R = 0 \quad (1)$$

식 (1)은 Laplace 변환을 통하여 다음의 세가지 경우에 대하여 각각 전류를 구할 수 있다.

i) $1 < \zeta^2$ 인 경우에 대해서, 즉 underdamped 시스템에 대해서 전류의 응답은 다음과 같다.

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega_n L \sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t) \quad (2)$$

ii) $1 < \zeta^2$ 인 경우에 대해서, 즉 overdamped 시스템에 대해서는 식(3)으로 표현된다. 이경우는 전류가 진동없이 감쇄하는 형태를 갖는다.

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega_n L \sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-\zeta \omega_n t} \sinh(\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} t) \quad (3)$$

iii) $\zeta = 1$ 인 경우는 critically damped 시스템으로서 식(4)로 표현된다.

$$i(t) = \frac{V_0}{L} t e^{-\omega_n t} \quad (4)$$

여기서 $\omega_n^2 = 1/LC$, $2\zeta\omega_n = R/L$ 이다. ζ 가 갖는 물리적 의미는 damping ratio로서 부하의 저항 값과 회로의 특성 임피던스의 비로 $\zeta = R/2 \times \sqrt{C/L}$ 로 정의되고 시스템의 응답을 결정하는 중요한 요소가 되고 그 조건에 따라서 다음과 같이 변환된다.

본 연구에서 구성한 시스템의 경우 i)에 해당하는 경우로서 커패시터의 값은 고정된 상태이므로 전류의 시간응답을 결정하는 가장 큰 요소는 부하의 저항값과 케이블의 인덕턴스이다. 그림 8은 830 μF 커패시터 2개 병렬, 충전전압 4kV, 케이블 5m(IKSH-16, 러시아), 회로저항 13.5mΩ, 회로 인덕턴스 2.82 μH에 대해서 측정치와 계산치를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 값이 잘 일치하고 있다. 따라서 측정된 파형으로부터 실측하기 어려운 요소인 저항 값과 인덕턴스 값을 계산해낼 수 있다.

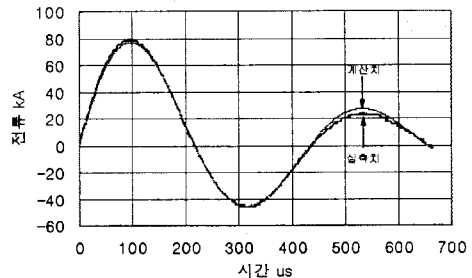


그림 4 계산된 전류파형과 실측된 전류파형의 비교

IV. 아크의 회전속도 측정

전자력에 의한 아크의 이동 속도에 관한 연구는 많이 행하여지고 있다(). 그러나 대부분의 경우 직류 수 100A ~ 수 kA의 범위이고 본 연구에서와 같이 피크 100kA에 이르러, 감쇄 진동하는 펄스 전류에 과도적 상태에서의 아크의 이동에 관한 연구는 보고되지 않고 있다. 잘 알려진 아크의 이동속도에 관한 관계식은 많은 양의 측정 데이터를 분석하여 제안된 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$V = kB^{0.6} I^{0.4} d^{-0.4} \rho_a^{-0.5} \quad (5)$$

여기서 k는 상수로 1기압의 공기 중에서는 4.6, B는 TMF[Tesla], I[A] 아크전류, d[m] 전극거리, ρ_a 매질의 상대적 밀도로서 1기압 공기 중에서는 1이다.

본 연구에서 설계 제작된 RAG 스위치에서의 아크의

회전 속도를 측정하기 위해서 그림 4에 나타난 바와 같이 스위치의 음극에 직경 2mm의 구멍을 30mm 정도의 깊이로 뚫고 그 아래에 photo diode를 설치하여 그림 5와 같은 회로를 통하여 아크의 빛을 감지하도록 하였다. 사용된 photo diode는 일본 KODENSHI CORP.에서 제작된 ST-1KLAST-1KLB 타입으로서 상승시간과 하강시간은 부하저항 100Ω, 10V에서 8, 10 μs 이다.

제작된 RAG 스위치는 내경 160mm, 외경 200mm로 그림 5에 나타난 바와 같고 전극 간격은 8mm 이다. 이와 같은 기하학적 구조의 RAG 스위치에서 회전하는

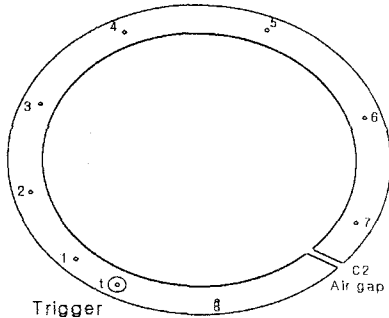
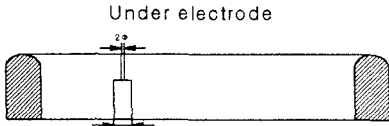
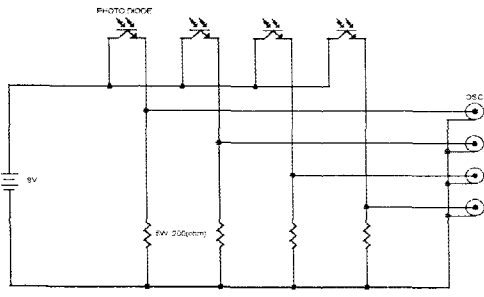


그림 5 아크의 회전속도를 측정하기 위한 photo diode의 array



Arc의 시간에 따른 위치 검출 회로

그림 6 수광된 광신호를 검출하기위한 회로도

아크의 위치를 그림 6의 회로를 통한 신호의 전형적인 패턴을 그림 7에 나타내었다. 이와 같은 방법으로 측정된 아크의 회전속도를 그림 8에 나타내었다.

그림 7의 photodiode를 통하여 수광된 신호의 형태에서 아크발생시의 과도적 특성에 관해서 몇 가지를 추론할 수 있다. 아크의 영역(전류가 흐르는 채널이 존재하는 영역)이 아크 발생초기에는 상당히 넓게 분포하지만 시간이 지날수록 그 영역은 좁아지게 된다.

한편 아크의 평균 회전속도는 그림 8에 나타난 바와 같이 회전 각 속도로 각각의 피크 전류 값에 따라서 다르다. 2회전시의 아크의 속도가 피크 전류가 적음에도 불구하고 1회전시의 아크의 속도보다 빠른 이유는 전극 표면의 상태가 변하여 아크의 회전을 방해하는 viscosity가 줄어들었고, 아크의 팽창에 의해서 압력이 낮아졌기 때문으로 해석할 수 있다. 또한 피크 전류가 적은 경우 전류 0점을 지난 후에 발생하는 아크의 위치가 불확실해지는

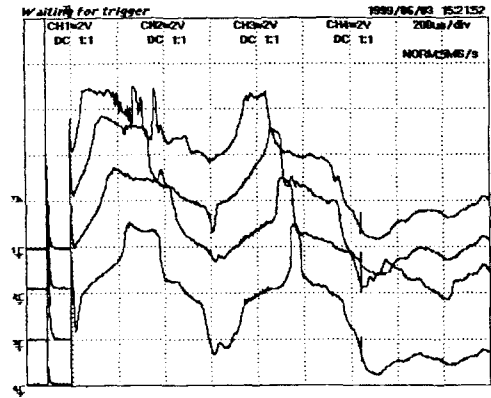


그림 7 photodiode를 통하여 수광된 신호 패턴

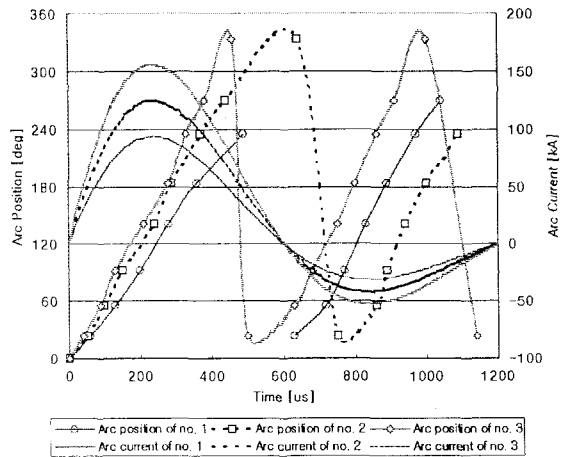


그림 8 Photodiode를 통하여 검출된 아크의 시간에 따른 위치

경우가 많았다.

V. 결론

- ◎ 제작된 RAG 스위치의 기본적인 성능
 - ◇ 스위칭 전압 3-11kV
 - ◇ 통전 피크 전류 - 400kA
 - ◇ 아크 회전속도 1.2km/sec (피크 160kA 일 때)
- ◎ 아크의 특징적 거동
 - ◇ 2번째 회전시 더 빠른 평균속도
 - ◇ 피크 전류가 작을 경우 전류 0점 후의 아크 발생 위치는 불확실하다.

참고문헌

- [1] C. Prem Kumar and A. Pramanik "Analytical Estimation of Magnetic Field and Arc Velocities in a Walkie Edgar Spark Gap Device", IEEE Trans. magnetics, Vol.31, No.1, 1995, pp 837
- [2] N Desaulniers-Soucy and J-L Meunier "A Study of magnetically rotating arc stability using fluctuations in voltage, velocity and emission line intensity" J. phys. D: Appl. Phys. 28, 1995, pp 2505.
- [3] A.E. Gulie and J.C.Sloot, "Magnetically driven arc with combined column and electrode interactions", Proc. IEE, Vol. 122, No. 6, pp 669-671, 1975.