

Rotary Arc Gap 스위치에서의 아크 회전속도 측정

조주현, 임근희, 이홍식, Pavlov E. P.
한국전기연구원

Measurements of the rotating arc speed in Rotary Arc Gap switch

Chu-Hyun Cho, Geun-Hie Rim, Hong-Sik Lee, Pavlov E. P.
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

Abstract - Usually arc phenomena are not easily characterized due to unstable behavior, very short existence-times, high temperature and the required isolation of measurement instruments. This paper presents some arc-behaviors in a rotary arc gap-switch(RAG) using a 500kJ capacitor bank. It includes the speed variations of the rotating arc, the impacts of the oscillating current on the arc initiations and re-ignitions. Changes in the arc-dimension with respect to time and current magnitudes are also analyzed.

그림 1은 RAG 스위치의 개략적인 원리를 나타낸 것이다. 스위치는 환형의 2개의 전극이 절연체로 만들어진 지지구조물에 의해서 일정한 간격을 유지하도록 되어있으며 각각의 전극은 서로 반대방향으로 잘려진 틈이 있으며 외부 회로에 연결하기 위한 터미널이 있다. 따라서 전류의 방향은 그림 1의 화살표로 표시되는 형태를 이루게 되며 이 전류의 루프가 아크를 회전시키는 역할을 한다.

스위치의 트리거는 그림 1의 확대된 부분처럼 음극 전극에 절연되어 설치된 트리거 핀에 의해서 작동되며 원리는 일반적으로 트리거트론이라 불리는 형태이다. 즉 15kV 내외의 전압에 의해서 트리거 핀과 음극사이에 연면 방전이 형성되고 이때 발생된 플라즈마에 의해서 주 전극에서 아크가 형성되는 것이다.

1. 서 론

최근까지 많은 연구자들이 전자기력에 의한 아크의 거동에 관한 연구 결과를 보고하고 있다. 그러나 아크 자체의 현상이 매우 복잡한 현상이어서 전기적 파라미터 및 물리적 파라미터를 이용한 정량화에는 이르지 못하고 있으며 많은 실험 데이터를 분석하여 실험식을 만들었지만 직류 수 kA 정도의 조건에 대해서만 적용할 수 있는 단계이다.

본 연구에서는 펄스 대전류 통전용으로 개발된 Rotary Arc Gap스위치(RAG스위치)에 있어서 회전하는 아크의 속도를 수십 kA에서 수백 kA에 이르는 다른 크기의 펄스 전류에 대해서 측정하였고, 또한 펄스전류의 과도적 현상에 의한 아크 거동의 특징적 변화에 대해서 관측 결과를 바탕으로 분석하였다.

2. 본 론

2.1 RAG 스위치의 원리 및 구조

RAG 스위치는 펄스 대전류를 통전하기 위해서 고안된 스위치로서 그 구조가 간단하고 제작이 용이한 장점이 있다.

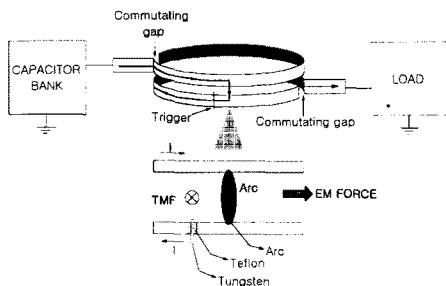


그림 1 RAG 스위치의 원리도

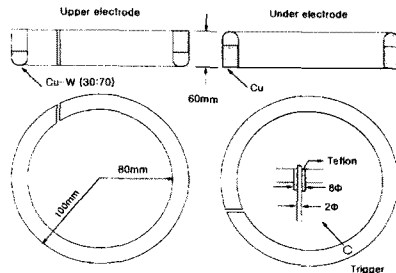


그림 2 RAG 스위치 설계 파라미터

그림 2는 본 연구에서 제작한 RAG 스위치의 설계 파라미터이다. 전극의 재질은 구리 30%에 텅스텐 70%를 합성한 금속이고 전극간 간격은 8mm, 전극면 부분은 직경 20mm의 반원 형태이다.

2.2 회전아크의 위치 검출

2.2.1 Photo-transistor의 배치

펄스 대전류를 통전하는 아크는 매우 강한 빛을 내며 수 ms 내에 끝나는 현상이므로 일반적인 관측으로는 시간에 따른 정확한 위치를 검출하기가 매우 힘들다. 본 연구에서는 Photo transistor를 이용하여 시간에 따른 아크의 위치를 검출하였다. 그림 3은 음극에 설치된 포토 트랜지스터의 위치를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 정확한 위치 검출을 위해서 음극면에 그림 3에 나타낸 바와 같이 2mm의 hole을 수직으로 뚫고 측면에 광 트랜지스터가 들어가도록 하였고, 8개의 광 트랜지스터를 등 간격에 가깝게 배치하였다.

또한 광신호를 전기신호로 변환하기 위해서 그림 4와 같은 회로를 만들었다. 이 경우 2대의 4채널 오실로스코프를 사용하는데 동기 트리거 신호는 아크 발생시 발생하는 배경 빛에 의해서 동시에 트리거가 됨을 측정된 파형을 통해서 알 수 있다. 전기 회로에서 주의할 사항

은 응답 속도로서 광 트랜지스터의 특성에 따라서 적절한 부하 저항을 연결하여야만 최적의 응답속도와 신호를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 일본 Kodenshi Corp.에서 생산되는 ST-1KLAST-1KLB 모델의 광 트랜지스터를 사용하였으며 상승시간은 약 그림 4와 같은 회로에서 15us 정도이다.

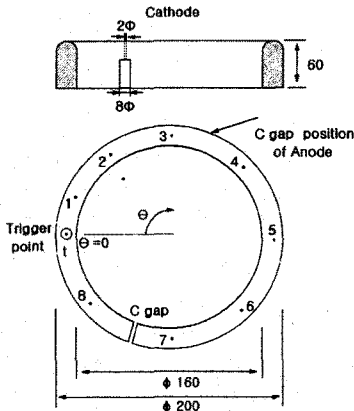


그림 3 회전 아크의 위치검출을 위한 photo transistor들의 배치도

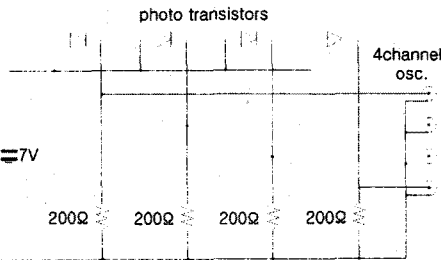


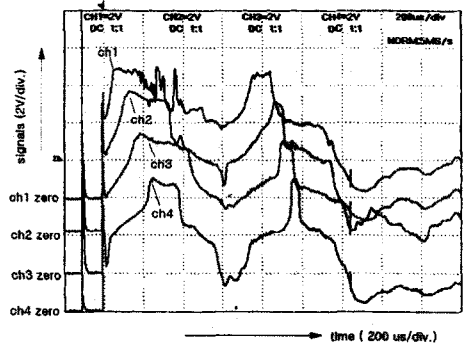
그림 4 수광판 아크 빛의 신호를 전기신호로 전환하기 위한 회로도

2.2.2 회전아크의 위치검출

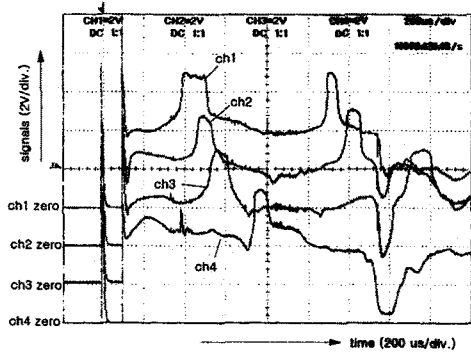
그림 5는 RAG 스위치를 이용하여 통전할 때 두 대의 오실로스코프에 나타난 전형적인 광 신호이다. 그림에서 알 수 있듯이 피크 신호의 시간지연이 명확하게 드러나고 있으며 두 대의 오실로스코프가 트리거 빛에 의해서 동기되어 있음을 알 수 있다. 또한 진동하는 전류에서 전류가 0일 때 아크의 빛이 급속하게 감쇄하고 있으며 이는 후 글로우 효과에 의한 오차를 염려하지 않아도 된다는 것을 반증하고 있다.

그림 5의 파형을 통하여 아크의 위치를 추정할 때는 몇 가지 원칙을 세워야한다. 첫째는 아크는 유동적인 상태이므로 정확한 크기를 갖고있다고 말할 수 없으며, 둘째로 아크는 전류 0점에서 소멸하였다가 재점화가 일어난다는 것이다. 또한 한가지 기준을 가지고 신호를 판독하여야 한다는 것이다. 즉 우리가 측정하는 것은 절대적인 시간이 아니고 상대적 시간이므로 상대적 시차를 가장 잘 나타내는 방식으로 신호를 판독하여야한다. 본 연구에서는 신호의 상승부분이 약 6.5V의 크기를 가질 때를 기준으로 하였다.

그림 6은 이렇게 판독된 결과를 시간에 따라서 나타낸 것이며 서로 다른 최대 전류 값을 갖는 3가지의 경우에 대해서 나타내었다. 또한 그 평균속도를 계산하여 표 1에 나타내었다.



(a)



(b)

그림 5 그림 4의 회로를 통하여 검출된 아크 광 신호
(a) 그림 3의 1-4번 광 트랜지스터를 통한 신호 (b) 그림 3의 5-8번 광 트랜지스터를 통한 신호

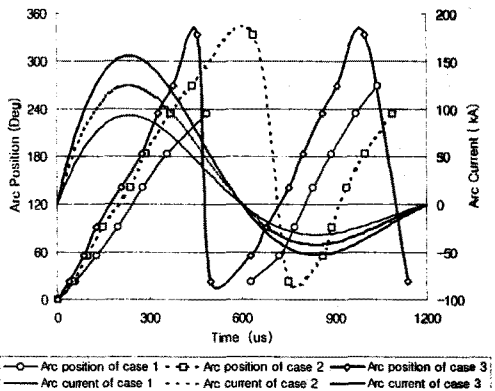


그림 6 시간에 따른 전류 변화와 검출된 아크 위치

그림 5에서 아크의 시작 초기에 신호의 파형이 매끄럽지 않게 나타나는 현상은 아크가 발생 초기에 매우 불안정함을 알 수 있으며 이는 아크 칼럼이 여러 개로 분산되어 발생했다가 소멸하거나 하나로 합쳐지는 것으로 생각된다.

2.2.3 아크의 회전속도

전자력에 의한 아크의 속도는 아직까지 정량적으로 밝혀지지 않고 있으며 많은 실험을 통하여 관측된 데이터

를 기준으로 식 (1)과 같은 실험식이 사용되고 있다.

$$v = kB^{0.6}I^{0.4}d^{-0.4}\rho_a^{-0.5} \quad (1)$$

여기서 k는 상수로서 대기압에서는 4.6이고, B는 TMF(Tesla), d는 gap 간격, ρ_a 는 기체 밀도로서 대기압 공기 중에서는 1이다. 그러나 식(1)은 직류 수백 A 범위에서 세워진 실험식이므로 본 연구에서와 같은 펄스 수백 kA 범위에서는 적용할 수 없으며 단지 정량적 분석에만 사용할 수 있다.

표 1 그림 6을 기준으로 계산한 아크 속도

Cases		Case 1	Case 2	Case 3
1 st half cycle of current	Peak current [kA]	90	125	155
	Average speed [km/sec]	0.75	0.92	1.10
2 nd half cycle of current	Peak current [kA]	30.5	41.6	52.0
	Average speed [km/sec]	1.0	1.15	1.18
Total distance of the arc moving[cm]		80	94	117

표 1에서 알 수 있듯이 아크의 속도는 1km/sec에 이르며 이동거리는 1m 정도로서 환형 전극 표면의 길이가 0.56m 임을 감안하면 아크가 약 2회전을 하고 있음을 알 수 있다. 아크의 회전 속도가 2회전 제에 작은 전류에도 불구하고 더욱 빠르게 나타난 것은 전극표면의 상태가 변하여 아크의 점성(viscosity)이 낮아지는 효과와 더불어 식(1)에서 기체밀도가 낮아지는 데에 원인이 있다.

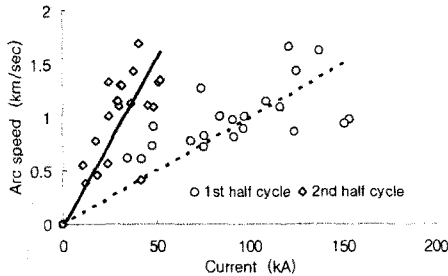


그림 7 전류에 따른 아크의 회전속도

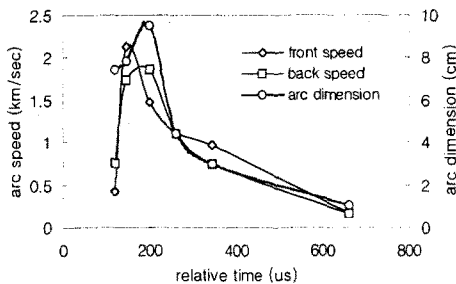


그림 8 시간에 따른 아크칼럼의 크기

그림 7은 전류의 순시값에 대한 아크의 회전속도를 나타낸 것으로서 두 번째 회전일 경우 같은 전류값에 비하여 속도가 3배 가량 빠르다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 125kA의 피크 전류에서 두 번째 회전중인 아크 칼럼의 크기를 계산한 것이다. 아크 칼럼의 크기는 아크가 회전하는 방향인 전면과 그 반대방향인 후면으로

나누어 시간을 측정하여 그 시차로부터 계산한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 아크 발생초기에 그 속도 차가 매우 커서 아크칼럼의 크기 변화 역시 매우 큼을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 RAG 스위치의 원리 및 구조에 대해서 기술하였으며 아크의 속도를 측정하기 위한 방법 및 분석 방법 등에 관해서 검토하였고, 광 트랜지스터를 이용한 아크 회전속도 측정 및 특징적인 거동을 관찰하였다. 관측된 아크의 거동을 요약하면 다음과 같다.

- 가. RAG 스위치에서 트리거에 의해서 아크가 발생되면 아크는 순간적으로 매우 빠르게 확장된다.
- 나. 아크 발생 초기에는 1개 이상의 아크 칼럼이 존재하며 시간의 경과와 더불어 소멸하거나 하나의 칼럼으로 합쳐진다.
- 다. 아크 발생 초기에 회전아크의 전면과 후면의 속도는 다르게 나타나고 이 결과 아크 칼럼은 원형이라기보다는 전극 면을 따라서 수 cm에 이르는 길쭉한 형태를 갖게된다.
- 라. 두 번째 회전하는 아크의 속도가 작은 전류에도 불구하고 첫 번째 회전하는 아크의 속도보다 더 빠르다. 이는 전극 표면의 viscosity의 변화와 온도상승으로 인한 기체의 밀도 변화에 따른 것으로 판단된다.
- 마. 전류가 진동할 때 전류 0점을 지난 후 아크의 재발생 위치는 불확실하며 일반적으로 큰 전류 (100kA 이상)에서는 소멸점과 재발생점이 같을 확률이 높지만 작은 전류의 경우는 매우 불확실한 경향이 있다.
- 바. RAG 스위치에서 전극 절단부가 아크의 회전속도에 미치는 영향은 그다지 크지 않았다.

(참 고 문 헌)

- [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, p. 837, 1995.
- [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, p. 2505, 1995.
- [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.
- [4] Geun-Hie Rim, Chu-Hyun Cho, Pavlov E.P., Design and Testing of a Rotary Arc Gap Switch for Pulsed Power, IEEE, 12th IPPC, Proc., pp. 219-223, 1999.
- [5] Geun-Hie Rim, Chu-Hyun Cho, Hong-Sik Lee, Pavlov E.P., An Electric-Blast System for Rock Fragmentation, IEEE 12th IPPC, Proc., pp. 165-168, 1999.