

나선형 구조의 VI 전극간의 비틀림 각도가 아크거동에 미치는 영향

김병철, 박종배*, 박홍태*, 강성화**, 임기조
 충북대학교, LS산전 전력연구소*, 충청대학**

Influence of twisting angle between contacts on arc behavior in spiral type vacuum interrupter

Byoung-Chul Kim, Jong-Bae Park*, Hong-Tae Park*, Sung-Wha Kang** and Kee-Joe Lim
 ChungBuk Univ, LS Industrial Systems Electrotechnology R&D Center*, Chungcheong Univ**

Abstract : In this paper the arc behavior in spiral type vacuum interrupter was analyzed by observing taken photographs from high-speed digital camera(10000frame/second) and current-voltage waveform from oscilloscope. As a result, the influence of twisting angle between contacts on arc behavior could be analyzed by matching and comparing arc voltage and photographs simultaneously.

Key Words : Spiral type, Vacuum interrupter, Vacuum arc, Twisting angle, Arc behavior

1. 서론

진공인터럽터의 아크소호 방식에는 크게 축자계 방식과 횡자계 방식으로 분류된다. 본 논문에서는 횡자계 방식 전극구조 중 나선형(spiral type) 전극을 대상으로 아크소호와 관련된 아크거동을 다루고자 한다. 축자계 방식의 전극구조는 횡자계 방식에 비해 상대적으로 차단용량은 크게 가져갈 수 있지만 그 구조가 복잡하여 제조가 쉽지 않고 생산단가가 높으며 복잡한 전극구조로 인해 전류가 흐를 때 열발생량이 많은 단점이 있다. 이에 비해 횡자계 방식인 나선형전극은 그 구조가 단순하고 제조단가도 저렴할 뿐만 아니라 전극의 구조상 소형화가 용이하며 그 차단용량도 점진적으로 증가하고 있어 향후 그 개발가치가 크다고 할 수 있다.

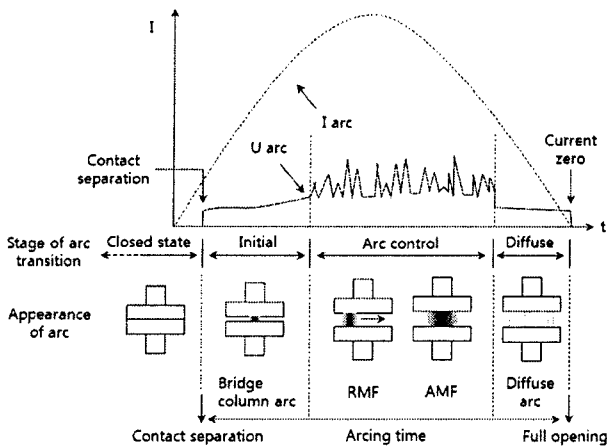


그림 1. 아크 소호 과정 중 시간에 따른 아크 상태 천이 과정과 그에 따른 전압 전류파형(과도회복전압미포함)

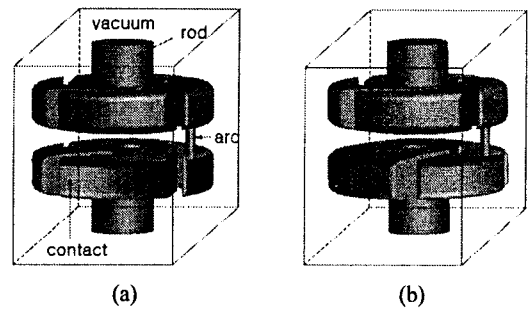


그림 2. 비틀림 각도의 영향을 알아보기 위한 전극모델의 개념도. 비틀림 각도 : (a) 0° (b) 45°

본 논문에서는 성공적인 사고전류차단을 전제로 하므로 과도회복전압(Transient recovery voltage)과 아크소호이후 시점에서의 전류(post-arc current) 등의 아크재발호와 관련된 내용은 다루지 않았다.

2. 실험

2.1 실험장비

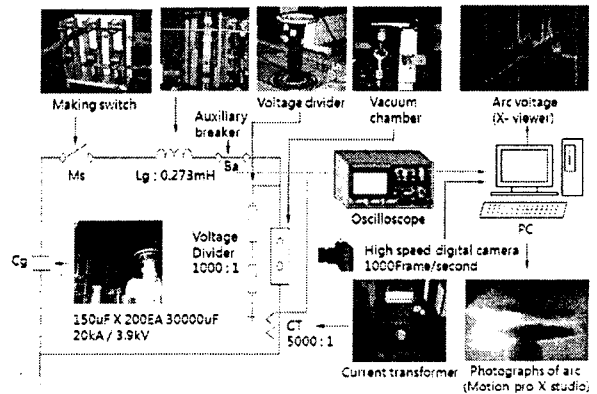


그림 3. 등가회로 구성도

실험장비의 구성은 그림 3과 같이 나타내었다. 사고전류는 직렬LC공진회로로 결선된 커패시터전류원과 공진리액터를 이용하여 인가되었다. 전류원은 식(1)의 공진조건을 이용하여 60Hz의 공진주파수를 발생시키기 위하여 30000 μ F의 커패시터와 0.273mH의 공진리액터를 구성하였으며 각각의 전압파형과 전류파형은 각각 분압비 1000 : 1인 분압기와 변류비가 5000 : 1인 변류기를 사용하여 오실로스코프로 결과파형을 도출시켰다.

$$w = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

최종 극간거리는 45mm, 인가전류는 31.5kA(rms), 전극의 개극속도는 3m/s로 고정시키고 차단시험을 실시하였다. 전극은 4개의 폐탈을 가지며 직경 85 ϕ 인 나선형의 전극이 사용되었다. 일반적으로 진공인터럽터 내부에는 전극주위를 차폐판(Shield)으로 감싸고 있는데 본 실험에서는 아크의 거동촬영에 중점을 두어 전극을 둘러싸고 있는 실드는 고려하지 않았다. 다만 진공챔버의 내벽으로의 아크의 증착을 영두에 두어 그물망(Mesh)을 사용하여 내벽을 보호하였다.

2.2 실험방법

계통상의 사고전류는 임의로 발생한다. 전극이 분리된 시점(아크발생시점)으로부터 전류영점(아크가 소호되는 시점)까지의 시간을 아크지속시간(arcing time)이라고 한다(그림 1). 주파수가 60Hz인 경우 한 주기에 대략 16.6ms (1/60s)이므로 반주기는 8.3ms이다. 사고전류발생 이후 첫 번째 전류영점에서 완벽한 차단이 이루어진다고 가정하면 아크지속시간이 반주기 이내의 범위를 가진다는 점에서 전류영점예측기를 사용하여 인위적으로 8.3ms이내의 아크지속시간을 설정하여 아크촬영 및 아크전압파형을 취득하였다. 아크는 초고속디지털카메라를 사용하여 초당 10000 프레임(1프레임당 시간간격 : 0.1ms)을 촬영할 수 있도록 설정하여 한 주기를 83장의 프레임으로 분할하여 아크상태를 확인할 수가 있었다. 이렇게 취득된 아크촬영 데이터는 Motion pro X-studio, 아크전압파형은 X-viewer라는 PC 연동프로그램을 사용하여 본 논문에서 사용할 수 있도록 편집할 수가 있었다.

3. 결과 및 검토

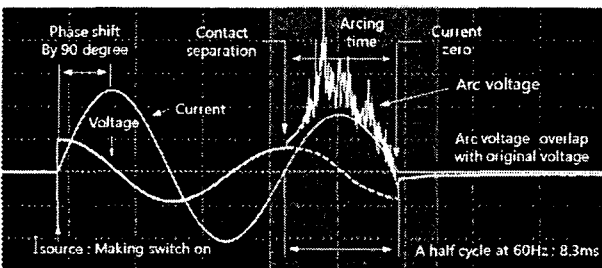


그림 4. 그림 3의 전류원으로부터 입력전류 인가시점으로부터 전류영점이후까지의 연속적인 전압-전류파형

회로구성자체가 LC공진회로이기 때문에 공진과 동시에 감쇄하게 되는데 본 실험에서 인가한 31.5kA(실효치)의 전류는 그림 4에서 보는 바와 같이 전류인가 후 두 번째 주기에서 그 값이 출력되도록 미리 조정되었다. 또한 전류원에서 인가되는 전류는 전류원이 커패시터충전전류인 이유로 전압보다 90°의 위상만큼 앞서게 되는 진상전류가 나오게 된다. 이렇게 위상이 뒤진 전압은 전극분리후 입력전압에 아크전압이 실리게 되게 되어 순수 아크전압을 고려하기 위해서는 측정된 전압에서 입력전압을 빼줘야 한다. 따라서 원래의 입력전압파형을 예상할 수 있도록 그림 4에서 보는 바와 같이 연두색의 파선으로 별도로 표시를 하였다. 따라서 실질적으로 아크지속시간만을 고려하기 위해 그림 4에서 다소 밝게 음영을 준 부분을 확대하여 그림 6과 같이 나타내었다. 그림 6은 각각 아크지속시간이 각각 (A)는 6.2ms, (B)는 8.2ms인 경우이다. 사실 아크지속시간이 1/4주기 이내인 짧은 경우이면 아크가 거동을 하지 않은 채로 바로 확산모드로 전환된다. 아크지속시간이 짧으면 곧 전류영점부근에서 전극분리가 이루어지므로 전류도 작고 감소하는 구간이기 때문에 차단도 쉽게 이루어지므로 그다지 고려할 대상이 아니다. 참고로 아크지속시간이 비교적 짧은 경우(전류의 1/4주기 이내에서 전극분리)의 아크전압과 사진을 그림 5에 첨부하였다.

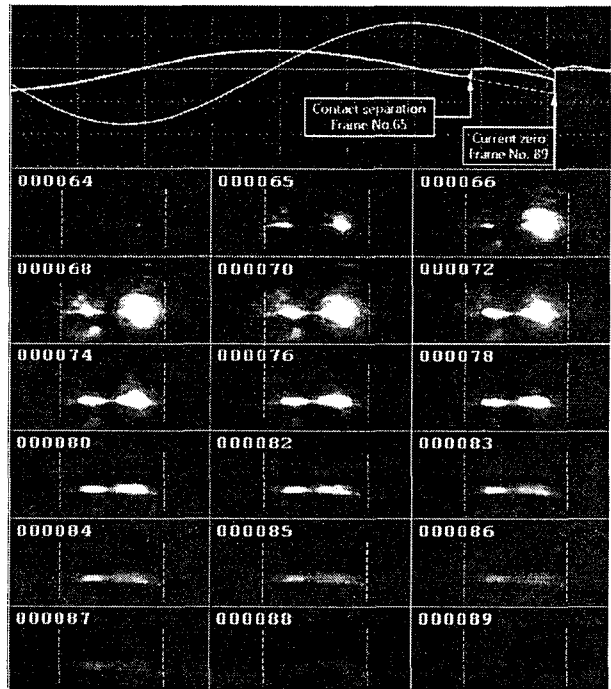


그림 5. 입력전류가 25kA(rms)의, 비틀림 각도가 45°, 아크지속시간이 2.5ms일 때의 아크전압과 아크사진

그림 5로부터 아크지속시간이 비교적 짧은 경우에는 아크가 발생한 이후 바로 확산단계로 전환됨을 알 수 있다. 순수 아크전압(측정전압-입력전압)이 거의 일정하여 아크의 거동상태가 매우 안정된 상태임을 알 수가 있으며 아크촬영결과 역시 아크발생이후 특별한 거동없이 바로 확산모드로 전환됨을 확인할 수가 있다.

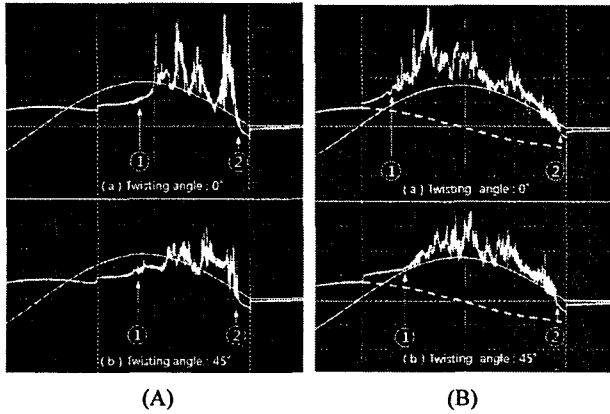


그림 6. 동일한 아크지속시간동안 비틀림 각도가 0도일 때와 45도일 때의 아크전압파형 (A) 아크지속시간 : 6.2ms (B) 아크지속시간 : 8.2ms

그림 6에서 전극분리 후 ①이전의 구간은 그림 1에서 나타내었듯이 전극분리 후 아크초기상태로 bridge column arc라고 한다[2]. ①에서 ②까지의 구간이 실제 아크가 로렌츠힘에 의해 구동하는 구간으로서 이때의 아크의 상태를 Running arc라고 한다. 그 다음 구간인 ②이후에서 전류영점까지의 구간이 아크가 확산모드로 전환된 diffuse arc 상태구간이다. 그림 6으로부터 전극간 비틀림 각도가 0° 일 때가 45° 일 때보다 측정전압(입력전압+아크전압)의 진동폭과 최대치(0° 와 45° 각각 347V, 253V)가 큼을 알 수 있다. 그림 6에서 두 경우에서 아크전류와 아크지속시간이 동일하기 때문에 특별히 아크전압이 실린 전압에서 입력전압을 빼지 않아도 간단히 비교가 가능하기 때문에 별도로 뺀 값을 나타내지 않았다. 이는 동일한 전류가 흐르기 때문에 저항값의 차이라고 할 수 있다. 횡자계방식에서 아크가 로렌츠힘에 의해 회전하는 구간에서의 아크상태를 고정전극과 가동전극을 전기적으로 이어주며 원통형을 하고 있어서 columnar arc라고 하는데 그림 7에서와 같이 이 원통형의 아크가 로렌츠힘에 의해 전극의 가장 끝부분을 타고 운동함과 동시에 아크발생에 의한 아크팽창력에 의해 밖으로 밀려 중간부분이 순간 끊겨 보이지만 이런 상태에서 힘겹게 전류를 통전시키면서 전극표면을 따라 이동하였기 때문이다. 이는 아크의 거동으로 증명된다(그림 7). 아크가 끊어지면 전류가 흐르지 못하므로 로렌츠 힘을 받지 못하여 확산모드로 전환된다. 하지만 그림 7로부터 아크전압이 최대일 때(Frame No.26)의 아크상태는 아크가 운동하는 구간의 초기에 해당되므로 이때에도 전류가 여전히 흘러 로렌츠 힘에 의해 아크가 거동하고 있음을 알 수가 있다. 또한 상대적으로 26번 프레임보다 측정전압이 낮은 21,29번 프레임에서 아크는 26번째 프레임일 때보다는 상하 두 전극을 잘 연결해주고 있어 그 결과로 저항이 상대적으로 작다는 것을 확인할 수 있다.

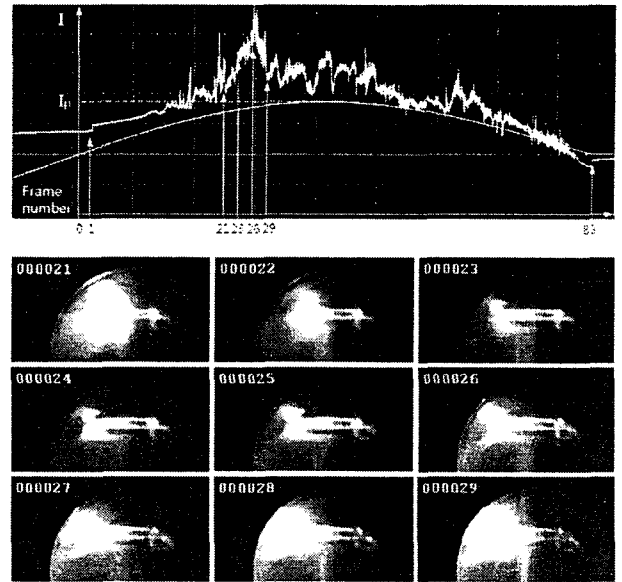


그림 7. 입력전류가 31.5kA, 비틀림 각도가 0°, 아크지속시간이 8.3ms일 때의 아크전압과 아크촬영 사진

4. 결 론

본 논문에서는 4페달 나선형 전극구조인 진공인터럽터의 두 전극사이의 비틀림 각도가 아크거동에 미치는 영향을 알아보았다. 그 결과는 다음과 같다.

전극간 비틀림 각도가 0° 일 때가 45° 일 때보다 측정전압(입력전압+아크전압)의 진동폭과 최대치가 큼을 확인하였다. 여기서 측정된 전압의 차는 입력전압이 동일하므로 아크전압의 차로 볼 수 있다. 이 아크전압의 차는 아크촬영을 통하여 아크의 연결상태와 관련지어 아크저항의 차에 기인한다는 결론을 얻었다. 이는 아크구동력으로 사용되는 로렌츠 힘이 전극간 비틀림 각도가 0° 일 때가 45° 일 때보다 더 강하기 때문인 것으로 판단되며 현재 유한요소해석 프로그램을 사용하여 로렌츠 힘 분석을 진행하고 있으며 향후 그 경향을 비교분석할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자분들께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] M. Bruce Schulman, "The behavior of Vacuum Arcs Between Spiral Contacts with a Fixed-Polarity Arc Shield", IEEE Trans 1999
- [2] Paul G. Slade, "The vacuum Interrupter : Theory ,Design and application"
- [3] Dullni "Vacuum arc driven by cross magnetic field(RMF)" IEEE Trans. 2003
- [4] Van Lanen, "The current interruption process in vacuum"