

아크 전압 방정식을 이용한 횡자계진공차단부의 3차원 아크특성분석

곽창섭*, 김태훈**, 정연하***, 이세희*
 경북대*, 기초전력연구원**, 전력연구원***

Analysis of 3D Arc Characteristics for Radial magnetic Field Type Electrode in Vacuum Interrupter by Using Arc voltage Equation

Chang-Seob Kwak*, Tae-Hun Kim**, Yeon-Ha Jung***, Se-Hee Lee*
 Kyungpook National University*, Korea Electrical Engineering & Science Research Institute**,
 Korea Electric Power Research Institute***

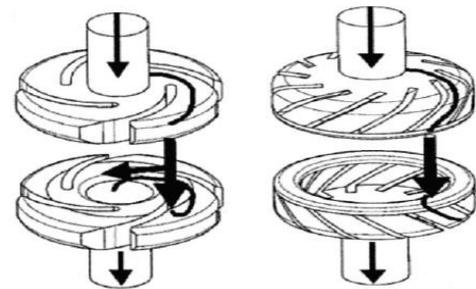
Abstract - 현재 진공인터럽터에서 사용되는 아크제어 방식은 크게 횡자계 방식과 축자계 방식이 있다. 본 연구에서는 횡자계 방식 중 나선형 타입 접점 구조에서의 아크 거동 패턴을 분석한다. 일반적인 아크 거동 해석을 위해서는 연속체적 접근을 통해 주요 캐리어에 대한 연속방정식, 운동방정식, 열방정식 등을 결합하여 아크의 거동 패턴을 분석해야 한다. 또한 매 시간 별로 아크의 움직임에 따른 격자 재설정 및 해석 등 시간적 소요가 심하다. 이러한 문제를 해결하면서 아크의 거동 패턴을 효율적으로 모사할 수 있는 기법을 강구하기 위해 여러 가정과 기존의 아크 모델들을 활용하여 독자적인 아크 거동 시뮬레이터를 개발한다.

1. 서 론

진공인터럽터는 진공차단기에서 사고전류 차단시 발생하는 아크소호 및 차단을 담당하는 매우 중요한 부분이다. 진공 인터럽터 내부의 접점이 분리됨과 동시에 아크가 발생하게 되면 이때 진공인터럽터는 아크지속시간동안 고온의 아크에 의한 접점손상을 최소화하기 위해 아크의 거동을 적절히 제어하여 아크 에너지를 접점표면에 골고루 분산시켜야 한다. 접점표면손상 정도는 진공인터럽터의 성능에 가장 큰 영향을 미친다. 이로 인해 아크 거동 분석 및 예측 기술에 대한 연구가 절실히 필요한 상황이다.

진공인터럽터는 아크제어방식에 따라 축자계방식(AMF)과 횡자계방식(RMF)으로 나뉜다. 일반적으로 축자계 방식은 횡자계 방식에 비해 차단용량이 크지만 그 구조가 복잡하여 제조가 쉽지 않아 생산단가가 높고 복잡한 구조로 인해 진류가 흐를 때 열 발생량이 많다. 이에 비해 횡자계 방식은 그 구조가 단순하여 열 발생도 적고 제조단가 또한 저렴하여 차단용량만 키울 수 있다면 경쟁력을 갖출 수 있다.

본 논문에는 횡자계 방식 전극 중 하나인 나선형 전극을 대상으로 발생하는 아크의 거동 패턴을 다양한 방법으로 접근하여 분석하고자 한다. 아크 전압 방정식에 기반 하여 형상에 따른 아크 거동 패턴을 분석한다.



(a) 나선형 타입 (b) 쪼임 타입
<그림 2> RMF타입의 종류

2.2 Gundlach's formula

아크 거동 패턴을 모의 시에는 접점 용융으로 만들어진 금속 증기의 아크 경로가 생성 된다. 생성된 아크는 매 스텝마다 전자계 해석 및 유동해석을 병행해야한다. 시뮬레이션 구성의 복잡도나 수렴성 측면을 고려할 때 많은 어려움이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Gundlach's가 제시한 아크 전압방정식을 이용한다. 현재 시점에서 아크 위치를 기준으로 다음 스텝의 새로운 아크 위치는 식(1)에 의해 결정 된다[2].

$$U_i = \sqrt{B} \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

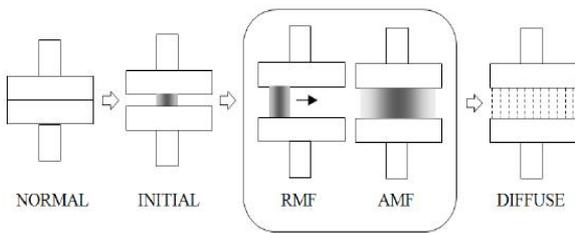
여기서 U_i 는 아크 전압, B 는 자속 밀도, d 는 라인아크의 길이, d_0 은 극간 사이의 간격을 나타낸다. 다음 스텝의 아크 위치는 현재 아크 주변에 U_i 값이 가장 작은 곳으로 이동한다.

2.3 해석 절차

아크 거동 패턴을 예측 절차에서는 다음과 같은 가정을 전제로 수행 된다[3].

- 아크 근은 전극 표면에서만 위치한다.
- 다음 스텝의 아크 이동 경로는 인접 격자를 기준으로 진행된다.
- 이전 스텝의 아크 위치로 되돌아가는 경우는 없다.

아크 거동 패턴의 절차는 그림 3과 같다. 초기 아크 위치는 전극의 중심에서 나선형 날개가 시작되는 부분이다. 초기 위치에서 전극을 통해 인가되는 전류에 대해 전류 전도 해석을 진행한다. 전류 전도 해석된 전류 밀도에 의해 발생된 자기장과 아크를 통해 생성된 복합 자기장을 계산한다. 아크가 이동 할 수 있는 경로 후보군들은 인접 격자를 기준으로 구축한다. 모든 후보군들에 대해 복합 자기장값과 전극사이의 거리, 아크 길이를 이용해 아크에 인가된 전압을 계산한다. 모든 후보군들 중에 가장 낮은 아크 전압을 가지는 후보가 다음 스텝의 아크 위치가 된다. 아크 위치가 변경 되었으므로 접점 표면의 아크 근의 위치와 극간 사이의 아크 위치를 수정 한 후 복합자기장을 다시 계산한다. 계산 값을 바탕으로 다시 아크 위치를 예측한다. 이러한 과정을 반복해서 진행 하게 된다. 여기서 아크가 이동할 수 있는 경로 후보군들은 격자의 개수에 의해 결정 된다.

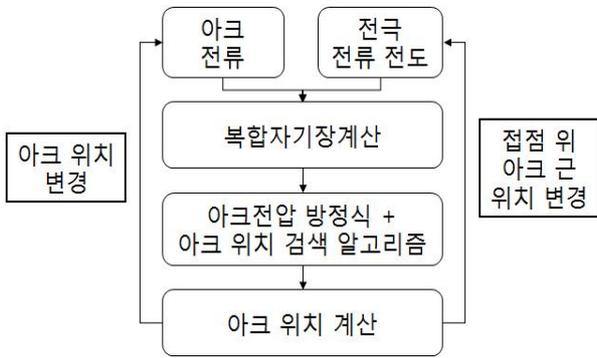


<그림 1> RMF방식과 AMF방식의 아크 소호 과정

2. 본 론

2.1 RMF 타입 접점

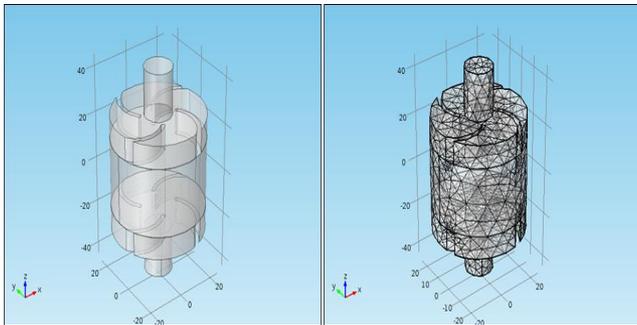
AMF과 RMF 두 방식의 궁극적인 목적은 양(+)극이 받는 열적 스트레스를 완화시켜 이에 의한 전극의 용융 및 손상을 방지하는 것이다. 횡자계는 양극점의 형성을 허용하되 이것을 로렌츠 힘을 이용해 표면위를 회전하게 함으로써 국부적인 전극의 손상을 방지 한다[1]. 이를 통해 전류가 영점하게 도달 할 때까지 아크로부터 유입되는 단위 시간당 에너지를 효과적으로 제한하여 원통형 아크를 유지시키는데 필요한 필요한 금속증기 양을 확보하지 못하게 한다. 그림 2와 같이 RMF타입은 (a)나선형 타입과 (b) 쪼임 타입으로 나뉜다. 여기서 형상항적으로 비교적 단순한 나선형 타입을 선정하여 아크 거동 패턴을 분석해 본다.



〈그림 3〉 아크 거동 패턴 분석 프로세스

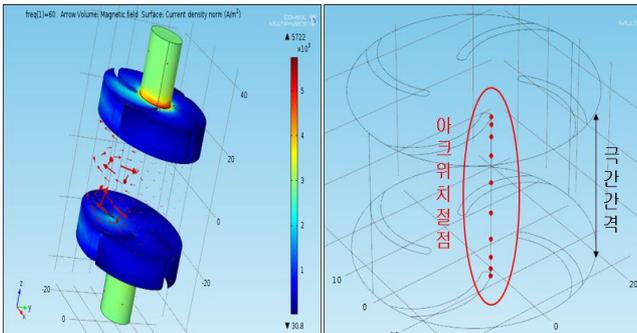
2.4 해석 결과

본 논문에서는 상용 유한해석 소프트웨어인 COMSOL 4.4과 MATLAB을 연동하여 구현하였다. 해석된 나선형 타입의 형상은 그림 4-(a)와 같고 구성된 격자 요소망은 그림 4-(b)와 같다.



(a) 해석 형상 정보 (b) 격자 요소망
〈그림 4〉 모델링 및 격자망 구성

그림 5와 같이 아크 위치에 따라 얻어진 복합자기장과 전류 밀도의 분포는 그림 5-(a)와 같다. 복합자기장 값과 5-(b)에서 얻어진 극간 간격과 아크 위치에 따른 아크 길이를 이용해 아크 전압을 계산한다. 본 논문에서는 아크 구성 절점의 개수를 8로 선정하여 음극점에서부터 양극점으로 향하면서 아크 절점을 기준으로 인접 격자로의 이동 가능 경로를 모두 구축한다.

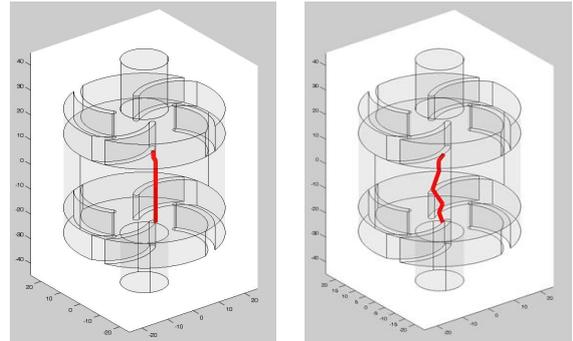


(a) 자기장 해석 결과 (b) 아크 길이 계산
〈그림 5〉 모델링 및 격자망 구성

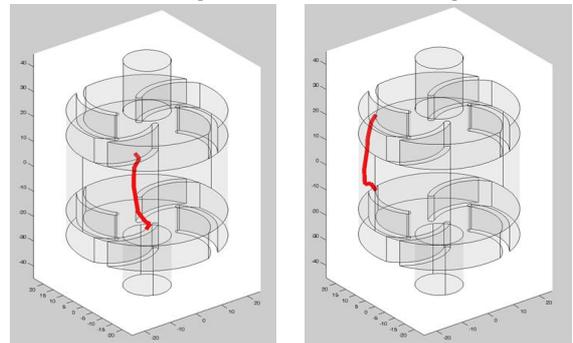
초기 아크 위치에서 다음 아크 위치로 이동을 할 때 계산된 아크 전압 계산 테이블이 표 1과 같다. 해당 테이블 데이터는 644개의 아크 이동 경로 후보 중에 가장 아크 전압이 작은 3개의 격자 이동점이다. 아크 구성 절점이 총 8개이므로 8개의 레벨로 나누어서 구성 된다. 레벨 안의 값들은 전체 격자를 구성 하는 절점들의 인덱스 번호이다. 절점들에서의 복합자기장 값과 3차원 좌표계를 통해 아크 길이를 계산 할 수 있다. 여기서 극간사이에서 구성 된 격자 정보만 이용하면 되므로 전극에 관한 격자 정보는 불필요 하므로 아크 경로를 찾을 시에는 두 전극의 격자 정보는 제외하고 진행한다.

〈표 1〉 아크전압 계산 테이블

	level 1	level 2	level 3	level 4	level 5	level 6	level 7	level 8	sqrt B	d/d0	Ui
min1	18	1215	1354	1472	1396	1341	1210	226	0.00041	30.37	0.00011
min2	18	1215	1354	1472	1396	1341	1249	247	0.0003	30.58	0.000147
min3	18	1215	1354	1472	1396	1341	1209	226	0.00032	30.80	0.000208



(a) 1 step (b) 10 step



(a) 30 step (b) 200 step
〈그림 6〉 아크 거동 패턴 스텝별 결과

매 스텝별로 아크 위치를 파악하여 결과를 도출해 본 결과 그림 6과 같이 아크 거동 패턴을 얻을 수 있다. 초기 아크 위치에서 바깥쪽으로 아크가 밀려나 회전하려는 경향이 보임을 알 수 있고, 이것은 나선형 타입의 아크 거동 패턴과 유사함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 상용유한요소 해석 소프트웨어인 COMSOL 4.4과 MATLAB을 사용하여 나선형 타입의 진공인터럽터의 아크 거동 패턴을 예측할 수 있는 시뮬레이터를 구축 하였다.

전압 방정식에 기반해 전극과 아크를 통해 생성된 복합 자기장과 아크 검출 알고리즘을 통해 실험과 유사한 아크 거동 패턴을 도출 할 수 있었다. 이를 통해 기존과 다른 전극의 형태, 두 전극의 배치 및 극간의 간격 등 다양한 요소를 고려할 때마다 거동 패턴을 분석 할 수 있다. 나선형 날개 부분에서 다른 날개로 점프하는 부분에서 아크가 받는 로렌츠 힘을 계산하여 반영한다면 더 정확한 아크거동 패턴을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Pual G. Slade, "The Vacuum Interrupter : Theory, Design, and Application", 2.4 Columnar vacuum arc, 2.5 Transition vacuum arc pp.151-156
- [2] H. Schellekens, "Arc behavior in axial magnetic field vacuum interrupters equipped with an external coil," presented at the 18 Int. Conf. Discharges and Electrical Insulation, Eindhoven, The Netherlands, Aug. 1998
- [3] J. Fontchastagner, "Coupling of an Electrical Arc Model With FEM for Vacuum Interrupter Design", IEEE Transaction on magnetics, VOL. 41, No. 5, May, 2005
- [4] Pual G. Slade, "The Vacuum Interrupter : Theory, Design, and Application", 4.2.3 Interruption of high-current vacuum arcs, pp.280-283