

EMTP를 이용한 아크 사고의 모의

변성현, *최해승, *계중병, *김철환, **한경남, **김일동, **김영한
 *성균관대학교 전기공학과 **한전 전력연구원

Simulation of Fault-Arc using EMTP

S. H. Byun, *H. S. Choi, *J. B. Chae, *C. H. Kim, **K. N. Han, **I. D. Kim, **Y. H. Kim
 * Sung Kyun Kwan University ** Korea Electric Power Research Institute

Abstract

High impedance fault (HIF) is defined as fault that general overcurrent relay can't detect or interrupt. Especially when HIF occur under 15 kV, energized high voltage conductor results in fire hazard, equipment damage or personal threat. Because most HIF occur arc, HIF detection using arc is to increase.

Numerical arc model can be applied in an electromagnetic transients program (EMTP) to reproduce the dynamic and random characteristic of arcs for any insulator arrangement, current and system voltage. It allows the representation of any network configuration to be investigated, so the digital simulation of arc faults through air can be substitute for demanding power arc test

1. 서론

전선로의 거리 보호는 고장 선로를 선택적으로 차단시키기 위해 정확한 고장점을 추정해야 한다[1][2]. 정확한 고장점 추정은 선로의 한쪽 끝에서 선전압과 선전류를 이용하여 임피던스를 계산함으로써 수행된다. 그러나 임피던스 계산은 고장점에서 발생한 arc에 의해 영향을 받는다[3].

고장점에서 발생하는 아크(arc)는 비선형 전압, 전류 특성을 가질 뿐만 아니라 그것에 작용하는 힘에 의해 시간에 따라 변하는 길이를 가진다[4]. 따라서, 이에 관해 많은 연구 결과들이 제시되었으며, W. Rogers는 실용적인 free-air 아크 모델을 제시하였고, EMTP에서 사용될 수 있도록 개발하였다. 그가 제시한 모델은 5단계 과정으로 구성되며 실계통에서 측정된 아크의 전압-전류 곡선과 일치시키기 위한 것이다. 아크 모델에서 5단계 과정은 측정된 아크 전압과 전류에 대한 변수들을 사용하여 V-I 특성이 일치하는 아크 모델을 구하는 것이다.

측정된 실계통 데이터와 아크 모델과의 최적 조화를 위해서 기본 모델과 개선 모델의 두가지 모델이 제시되었다. 기본 모델에서는 ZnO 기준전압, ZnO 지수부, 저항 R, 인덕턴스 L 및 전류원의 크기 등 5가지 변수가 모델링 과정에 사용된다.

개선 모델은 컨덕턴스와 캐패시턴스의 영향을 고려하기 위하여, 기본 모델에 사용된 5가지 변수 이외에 캐패시터와 분로 저항이 추가된 8가지 변수가 사용된다. 이들 추가요소는 원점근처에서 아크 곡선이 cross over되도록 함으로서, 보다 정확한 아크 모의가 가능하다.

아크가 수반되는 고저항 사고는 감전사고, 화재 등의 손실을 수반하므로, 전력공급의 신뢰도를 증가시키기 위해 중요하다. 그러나, 아크 사고를 실제로 모의하는 것은 여러 가지 어려움이 따르며, 또한 현재까지 전력계통 모의에 널리 이용되는 EMTP에도 이에 대한 정확한 모델이 없는 상태이다. 따라서, 실계통의 아크 시험 데이터의 V-I 특성을 이용하여, 실계통에 근사한 아크 모델을 개발하고, EMTP내에서 모의 가능하도록 하는 것은 계통보호를 위해 매우 유용하다.

2. 아크 모델

2-1. 기본 모델

기본 모델에서는 에너지 저장 소자인 인덕터와 분로(shunt)되어 있는 ZnO(zinc oxide) 요소가 직렬로 연결된 구조이다. 저항은 아크 전압-전류 곡선의 기울기와 형태를 조정하기 위해서 ZnO 요소와 병렬로 연결되어 있다. 또한, 스위치는 아크가 소멸되었을 때 고장전류를 초기화시키고 종료시키기 위해서 사용된다.

기본 모델에서 아크를 모의하기 위한 회로는 다음 그림 1과 같이 구성 요소들은 다음과 같다.

- ① ZnO 요소
- ② 저항 R
- ③ 인덕터 L

ZnO 요소의 전류 i 는 다음 식(1)과 같다.

$$i = \left(\frac{v}{K}\right)^{ALPHA} \dots \dots \dots (1)$$

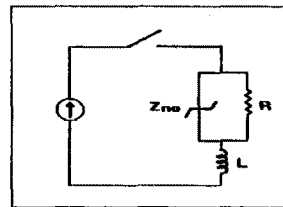


그림 1 기본 모델의 회로

데이터와의 일치를 위해서 사용되는 변수는 다음과 같다.

- ① ZnO의 기준전압 K
- ② ZnO의 지수 ALPHA
- ③ 저항 R
- ④ 인덕턴스 L
- ⑤ 전류원의 크기

위의 5가지 변수들은 독립적으로 사용가능하므로 측정된 데이터와 모델을 각각 독립된 변수값으로 일치시키기 위해 사용될 수 있다. 단지 5가지 독립적인 변수만을 가지고 있으므로 5가지 수치만이 일치될 수 있다. 그러나 ALPHA와 K는 최적 조화를 위해서 반복 과정을 필요하므로 상호 의존적이라고 할 수 있다.

모델의 응답과 측정된 데이터와의 일치를 위해서 변수들을 조정할 때 전류원은 모델을 여차시키기 위해서 사용된다. 모델이 커다란 EMTP의 일부분으로 사용될 때 전류원은 생략가능하다.

다음 그림 2의 V-I 특성에서 주요한 부분은 1상한과 3상한에 나타난다. 모델화된 아크곡선에서 나타나는 비대칭성은 시변환 변수와 측정 오차에 기인된다.

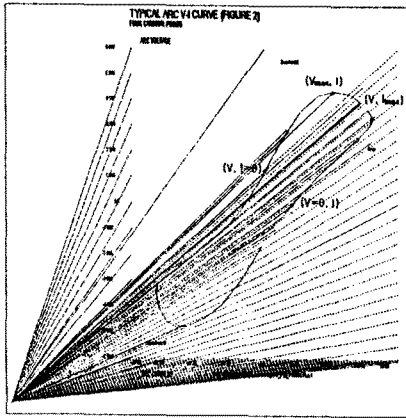


그림 2 아크 사고시의 V-I 특성곡선

아크 곡선에서 나타나는 주요한 부분은 다음과 같다.

- ① 전류가 0일 때 전압 (I=0, V)
 - ② 전압이 0일 때 전류 (V=0, I)
 - ③ 최대전류일 때 전압 (I_{max}, V)
 - ④ 최대전압일 때 전류 (V_{max}, I)
- 위의 4가지 중요 지점에서는 6가지의 독립적인 수치를 갖는다.

- ① 전류가 0일 때 전압 (I=0, V)
- ② 전압이 0일 때 전류 (V=0, I)
- ③ 최대전압 (V_{max})
- ④ 최대전압일 때 전류 (V_{max}, I)
- ⑤ 최대전류 (I_{max})
- ⑥ 최대전류일 때 전압 (I_{max}, V)

EMTP에서 사용될 아크 모델을 얻기 위해서 실제계에서 측정된 아크 데이터를 이용하여 조건을 설정한다. 아크 데이터의 한 주기만이 아크 모델과 실아크 데이터의 일치화를 위해서 선택된다. 또한, 실제 아크는 DC 전류를 전달하지 못하므로 DC offset은 제거되어야 한다. 다음 최대 전류를 결정한다. 모델화된 아크전류는 완전히 정현적이지만 측정된 데이터는 noise, offset, clipping을 가질 것이다. 마지막으로 모델의 5가지 변수의 변화는 아크의 V-I 특성의 주요 부분과 측정된 데이터를 일치시키기 위해 사용되며, 다음 그림 3은 기본 모델을 사용한 모델링 과정의 흐름을 보여준다.

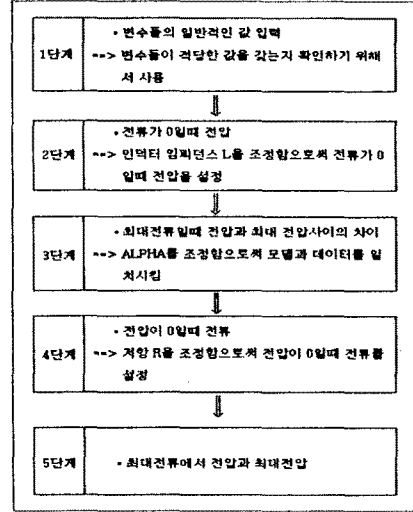


그림 3 기본 모델의 모델링 과정

2-2. 개선 모델

개선 모델은 다음 그림 4와 같이 기본 모델에 캐패시터 요소와 분로저항 요소가 추가된다. 기본 모델에서 주어진 주요한 부분은 개선 모델에서도 역시 유효하지만, 여기에 몇 가지 추가되어진 아크 곡선의 특성들을 사용해야만 한다. 개선 모델의 V-I 특성 곡선은 원점 근처에서 pinch off나 cross over를 나타낸다.

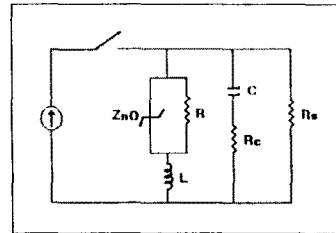


그림 4 개선 모델의 회로

개선 모델은 다음과 같은 8가지 변수들을 가진다.

- ① ZnO의 기준전압 K
- ② ZnO의 지수 ALPHA
- ③ ZnO를 가로질러 병렬연결된 저항 R
- ④ 인덕턴스 L
- ⑤ 캐패시턴스 C
- ⑥ 캐패시터 감쇄 저항 Rc
- ⑦ 분로 저항 R_s
- ⑧ 전류원의 크기

개선 모델을 이용하여 측정된 아크 데이터와 근접하게 일치시키기 위한 모델링은 반복 과정을 필요로 하며, 다음 그림 5와 같다. 논리적이고 단계적인 형태로 접근하면 모델은 측정된 데이터값에 빨리 수렴할 것이다.

한가지 데이터를 3가지 또는 그 이상의 시험 모델로 실행하여 측정된 데이터값과 비교하는 것은 최적 조화의 모델링을 돕는다.

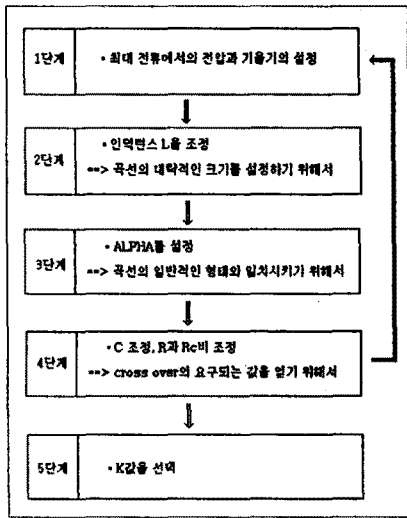


그림 5 개선 모델의 모델링 과정

3. 아크 모델의 시뮬레이션 및 결과 고찰

3-1. 기본 모델의 결과

그림 6은 그림 1에 있는 기본 모델 회로에서 발생하는 아크 파형을 나타낸다. 이 논문에서 사용한 EMTP 데이터에서는 저항값이 0.01~1.0 (Ω)의 선택적인 범위에서만 아크 파형이 발생했으며, 이때 인덕턴스의 값은 아크 파형이 만들어지는 것에 전혀 영향을 미치지 못했다.

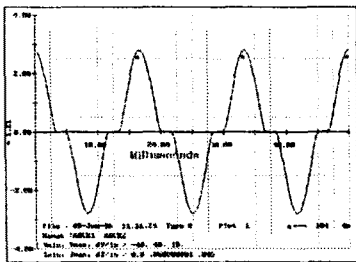


그림 6 기본 모델의 아크 파형

3.2 개선 모델의 결과

그림 7과 그림 8은 그림 4의 개선 모델 회로에서 발생하는 아크 파형이다. 그림 7은 에너지 저장 소자인 캐패시턴스만을 가진 회로에서 발생하는 아크 파형이며, 캐패시턴스가 첨가됨으로 인해서 실제용 데이터와 더욱 유사한 아크파형이 만들어졌고 아크의 V-I 특성 곡선에서는 cross over를 발생시켰다. 그림 8은 분로 저항 R_s 만을 가진 회로에서 발생하는 아크 파형으로서 이것도 역시 실제용 데이터와 유사한 아크를 발생시켰지만 실제용을 모의할 때에는 고려하지 않아도 될 소자이므로 별 의미가 없다. (R_s : 컨덕턴스를 의미) 즉, 선로와 대지 사이의 충전용량만을 고려하고 컨덕턴스 값은 무시하기 때문에 실제적으로는 기본 모델에 캐패시턴스만을 첨가한 그림 7의 개선 모델이 더 유용하다.

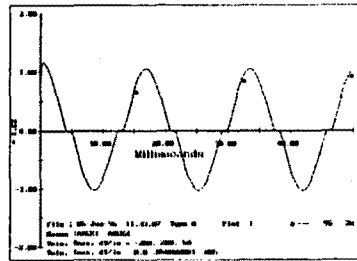


그림 7 개선 모델의 아크 파형
(기본 모델 + 캐패시턴스)

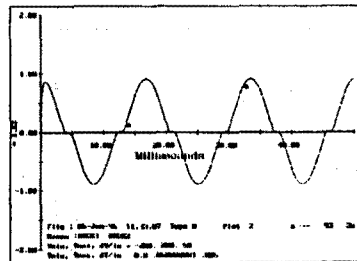


그림 8 개선 모델의 아크 파형
(기본 모델 + 분로 저항)

4. 결론

전력계통에서 발생하는 고저항 사고(HIF)는 아크를 발생시키므로 HIF는 아크를 통해 검출이 가능하다. 따라서 아크에 관한 많은 연구들이 개발되고 있는데 이 중 W. Rogers는 EMTP에서 사용할 수 있는 아크 모델을 제시하였다. 이 모델은 5가지 변수를 갖는 기본 모델과 8가지 변수를 갖는 개선 모델로 분리되어 있으며 5단계 과정을 통해 실제용 아크와 유사한 아크 모의를 할 수 있었다.

기본 모델은 선로정수 중 저항과 인덕턴스 성분만을 고려한 것이고, 개선 모델은 저항, 인덕턴스, 컨덕턴스, 캐패시턴스 (R, L, G, C) 모두를 고려했다. 따라서 EMTP내에서 반복 해법을 통해 얻어지는 개선 모델의 아크는 실제용 아크와 거의 일치했다.

이와 같은 아크 모의는 실제용의 고저항 사고로 인한 화재 및 감전사고 예방대책 수립에 큰 도움을 줄 것이다. 또한, 전기에 대한 안정성 및 전력공급의 신뢰도를 높이고, 고저항 사고 대책 수립에 기여할 것이다.

5. 참고문헌

- [1]. M. Kizilcay, K.H.Koch, "Numerical Arc Simulation Based Power Arc Tests", EMTP News letter.
- [2]. L.Dube, I. Bonfanti, "MODELS : A New Simulation Tool in the EMTP", ETEP Vol. 2. No. 1, January /February 1992.
- [3]. Grega Bivjak, Peter Zunko, "Circuit Breaker Model for Digital Simulation based on Mayr's and Cassie's Differential Arc Equation", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 10, No. 3, July 1995.
- [4]. M. Kizilcay, "Dynamic Arc Modeling in EMTP / TACS", 10th European EMTP Users Group Meeting, May 5/6, 1986, Copenhagen, Denmark.