EMTP MODELS를 이용한 2차 아크 모델링 기법에 관한 연구

안 상필* · 김 철환* · 채 영무**
성균관대학교* · 충주산업대학교**

A Study on the Technique for the Secondary Arc Modeling Using EMTP MODELS

Sang-Pil Ahn* · Chul-Hwan Kim* · Young-Moo Chae**
SungKyunKwan University* · Chungju National University**

Abstract - For the improvement of an adaptive SPAR(Single-Phase Auto-Reclosure) and novel protection schemes, it is important to simulate arc faults. But, it is difficult to reproduce the real arc behaviour, i.e. the extinction phenomenon exactly by computer simulations due to extremely random behavior of secondary arc.

This paper proposes a new computer modeling techniques for the primary and the secondary arc separately, which can be implemented with EMTP MODELS routine, and the performance of the proposed model is simulated on a typical 154 [kV] korean transmission line system.

1. 서 론

전력계통의 송전선로에서 일어나는 가장 빈번한 사고는 대기 중에서 발생하는 1선 지락 아크사고이다. 이와 같은 사고시 단상자동재폐로(SPAR)는 계통의 안정도를 유지하면서 사고를 차단하는 매우 유효한 방법이다. 지락사고가 차단기에 의해서 제거될 때, 아크는 큰 사고 전류(1차 아크)상태에서 훨씬 작은 아크 전류(2차 아크)를 동반한 상태로 변하게 된다. 이 기간동안의 2차 아크는 마지막 최종 소멸까지 연속적인 부분 재점호와 소멸을 반복하게 되는데, 이 특성은 건전상과의 유도성, 용량성 Coupling 뿐만 아니라 아크 회복전압, 아크 전도특성 그리고, 아크 파라미터들의 시변성에 의해서도 많은 영향을 받는다. 그러므로, 2차 아크의 재점호와 소멸시간은 성공적인 재폐로를 이루는 데에 중요한 변수로 작용한다[1-4].

비록, 2차 아크의 랜덤한 성질 때문에 컴퓨터 시뮬레이션으로 실제 여러가지 아크 특성을 만들어 내기는 힘들지만, 기존의 아크 모델은 아크 소멸시간 및 억제기술을 디자인하기 위한 파라미터들을 연구하는 데에 많은 도움이 되고 있다[5-6].

본 논문에서는 이러한 2차 아크 현상과 전력 네트워크 사이의 동적인 컴퓨터 모델링을 A.T Johns와 R.K. Aggarwal이 제시한 수학적 모델을 기초로 하여[1], 2차 아크의 수학적 모델은 물론, 고려해야할 모든 시변성 아크 파라미터들을 수치연산, 논리연산을 수행하는데 커다란 유연성(flexibility)을 제공하는 MODELS내에서 통합 시뮬레이션 하였고, 대상계통을 현재의 우리나라 실계통으로 확장 적용하였다.

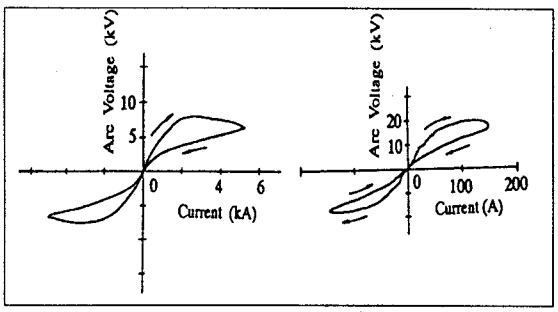
2. 아크의 특성 및 분류

2.1 1차 아크

계통에서 사고가 일어난 후에 차단기에 의해 제거되기 전의 사고 파형을 1차 아크라고 한다. 차단기 트립 전이므로 매우 큰 사고 전류를 나타내게 된다. 일반적으로 전압-전류의 특성은 그림 1의 (a)에서 보는 바와 같이 히스테리시스 루프를 나타내는데, 전류가 증가하는 동안은 전압이 거의 일정하나, 전류가 감소하는 부분에서 전압은 전류와 비례 관계, 즉 일정한 아크 저항의 특성을 보인다.

2.2 2차 아크

차단기 트립후에 1차 아크가 제거되고 2차 아크가 발생하게 된다. 1차 아크와 마찬가지로 그림 1의 (b)와 같이 히스테리시스 루프를 보이지만, 아크 전류가 훨씬 작기 때문에 파형의 폭이 매우 좁다. 또한, 1차 아크에 의해 이온화된 고온의 가스에서 2차 아크가 발생하기 때문에 2차 아크는 오랫동안 전이가 계속되지는 않는다. 또한, 2차 아크 소멸과 함께 아크 회복전압이 줄어듦에 따라 2차 아크의 최종 소멸이 이루어지게 된다.



(a) 1차 아크 (b) 2차 아크

그림 1. 아크의 전압-전류 특성 곡선

3. 아크 모델

개발된 아크 모델들은 모두 식 (1)의 Kizilcay 스위칭 아크방정식에서 근간을 찾을 수 있다.

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}(G-g) \tag{1}$$

여기서, g : 시변 아크 컨덕턴스
G : 고정 아크 컨덕턴스
τ : 시간상수

Johns와 Aggarwal은 아크 전류가 흐를 때의 고정 아크 컨덕턴스 G와 시간상수 τ를 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$G = \frac{|i_{arc}|}{u'_0 \cdot l_{arc}} \quad , \quad \tau = \frac{kf(I)}{l_{arc}} \tag{2}$$

여기서, u'_0 : 아크 길이당 아크 전압
l_{arc} : 순시 아크 길이
k : 비례상수
I : 피크치 아크 전류

3.1 1차 아크 모델

1차 아크에서의 아크 컨덕턴스 G와 시간상수 τ는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때의 V_p는 실험적으로 전류가 1.4kA~24kA 이내에서 15 V/cm로 정해졌다. 시간상수에서의 I_p는 아크 사고저항이 제로일 때의 최대 사고전류이고, 아크 길이 l_p는 1차 아크기간 동안은 상수로 가정된다.

$$G_p = \frac{|i|}{V_p \cdot l_p} \quad , \quad \tau_p = \frac{\alpha I_p}{l_p} \tag{3}$$

여기서, $\alpha = 2.85 \times 10^{-5}$

3.2 2차 아크 모델

2차 아크에서의 아크 컨덕턴스 G와 시간상수 τ 또한 1차 아크와 유사하게 식 (4)와 같이 표현된다.

$$G_s = \frac{|i|}{V_s \cdot l_s(t_r)} \quad , \quad \tau_s = \frac{\beta I_s^{1.4}}{l_s(t_r)} \tag{4}$$

여기서, $\beta = 2.5 \times 10^{-3}$ 이고 I_s는 Johns에 의해서 제시된 식 (5)에 의해서 결정된다.

$$V_s = 75\, I_s^{-0.4} \ \text{V/cm} \tag{5}$$

2차 아크 모델에서 주목해야 할 점은 모든 파라미터들이 순시 아크 길이 $l_s(t_r)$에 의해서 영향을 받는다는 것이다. 순시 아크 길이는 식 (6)과 같이 시간에 따라 선형적으로 증가한다.

$$l_s(t_r)/l_{s0} = \begin{cases} 10 \cdot t_r & , t_r > 0.1s \\ 1 & , t_r \le 0.1s \end{cases} \tag{6}$$

여기서, t_r : 2차 아크 개시시간

$l_s(t_r)$: 2차 아크 길이

l_{s0} : 2차 아크 초기 길이

앞에서도 언급한 바와 같이 2차 아크의 중요한 특징은 재점호와 소멸의 반복이다. 2차 아크는 식 (7)에서 얻어지는 아크 억제전압이 계통의 아크 전압보다 클 경우에 소멸된다.

$$V_r(t_r) = \left| \left[5 + \frac{1620\, T_e}{2.15 + I_r} \right] (t_r - T_e)\, h(t_r - T_e) \right| \cdot l_s(t_r) \ \text{kV/cm} \tag{7}$$

여기서, T_e : 2차 아크 발생에서 전류가 0이 될 때까지의 시간(sec)

I_r : I_s의 실효치

t_r : 2차 아크 초기값에서의 시간

$h(t_r - T_e)$: 시간지연을 위한 Unit step 함수

3.3 아크 모델 Block Diagram

시뮬레이션 과정을 그림 2에 Diagram으로 나타내었다. 진행과정은 1차 아크와 2차 아크를 각각의 정의에 충실하게 시뮬레이션 하였다.

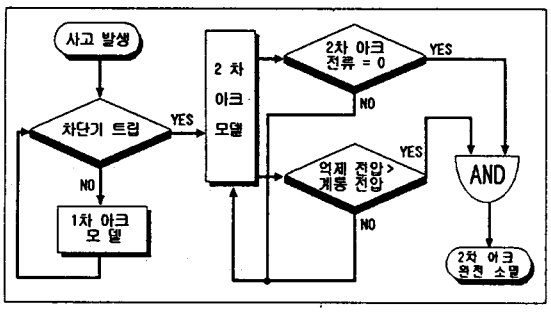


그림 2. 아크 모델 시뮬레이션 Block Diagram

2차 아크의 시뮬레이션 과정 중에 주목해야 할 점은 아크 전류가 제로가 되더라도 계통의 아크 에너지전압이 아크 억제전압보다 클 경우에는 아크의 재점호가 가능하므로, 반드시 아크 억제전압이 충분히 큰 후에 2차 아크가 완전히 소멸한 것으로 판단해야 한다. 즉, 두 가지 조건을 전부 만족시키기 위해 논리 AND 게이트를 사용하였다. 표 1은 2차 아크 소멸 Logic 모델을 나타내고, 그림 3은 swdrv 즉, 아크 소멸여부를 나타내는 파형이다.

본 논문에서는 아크 제로, 아크 억제전압 모델뿐만 아니라 각종 논리 모델들도 순시 아크 길이를 고려하여 MODELS routine내에서 통합 구현하였다.

표 1. 2차 아크 소멸 Logic 모델 (swdrv signal)

소멸여부	logic	arczro	arcvol
if logic>0 then 0 else 1	arczro-arcvol	if 아크전류=0 then 1 else 0	if 억제전압≥계통전압 then 0 else 2
아크유지(1)	-2	0	2
아크유지(1)	0	0	0
아크유지(1)	-1	1	2
아크소멸(0)	1	1	0

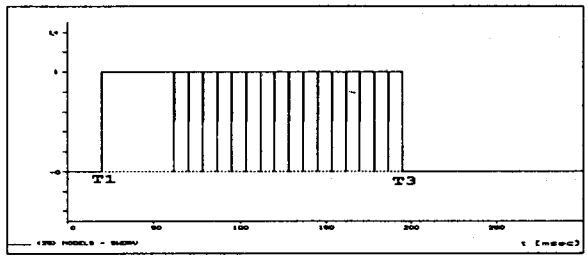


그림 3. 아크 소멸 여부 Signal(swdrv)

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션 모델 계통은 그림 4와 같은 80% 부하를 가진 410㎞×2B의 가공 송전선로로 구성된 154 kV 선로이다. 샘플링은 32샘플로 하였고, 선로 파라미터들은 표 2와 같다.

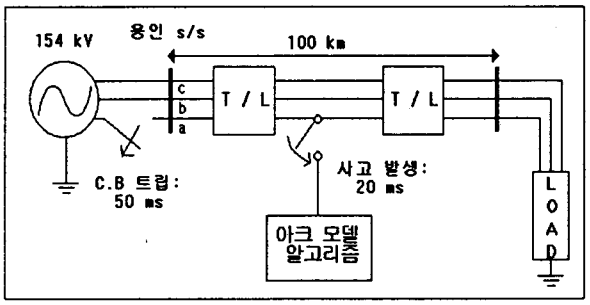


그림 4. 154 [kV] 시뮬레이션 모델 계통도

사고의 종류는 계통 사고중 70% 이상을 차지하는 1선 지락사고로 가정하고 a상 사고를 발생시켰다. 전체 시뮬레이션 시간은 300ms이고 20ms에 사고가 발생하고 50ms에 차단기가 트립하게 된다. 사고상의 완전 제거는 250ms에 이루어진다. 실제 계통의 사고인 경우에는 일시사고와 영구사고를 고려해서 재투입이 이루어지지만, 본 논문에서는 2차 아크의 특성을 중점으로 하므로 고려하지 않았다.

표 2. 시뮬레이션 계통 선로 및 전원 데이터

		영상분	정상분
선로 정수	R[Ω/km]	0.2293	0.0419
	L[Ω/km]	1.0050	0.3316
	C[μ℧/km]	1.6260	4.8309
용인 변전소	전원 용량	240 MVA	
	역률(p.f.)	0.91	
	전원 임피던스[Ω]	$Z_0 = 1.128 + 5.8434$ $Z_1 = 0.820 + 6.7482$	
부하 용량	192 MVA (80 %)		

시뮬레이션 결과 파형에서 시간 표시는 다음과 같다.

T1 : 초기 사고 발생 시간(20ms) → 1차 아크 발생
T2 : 차단기 트립 시간(50ms) → 2차 아크 전도 시작
T3 : 2차 아크 소멸 시간
T4 : 사고상 완전 제거

그림 5의 파형은 아크 억제전압의 파형이다. 아크 소멸이 이루어지는 부분에서 억제전압이 급격히 증가하는 것을 볼 수가 있다.

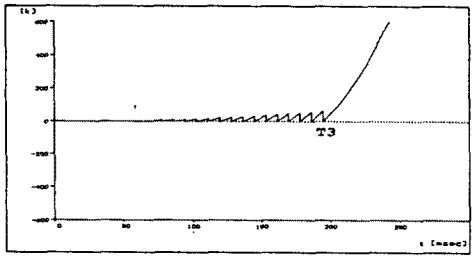


그림 5. 아크 억제전압 파형

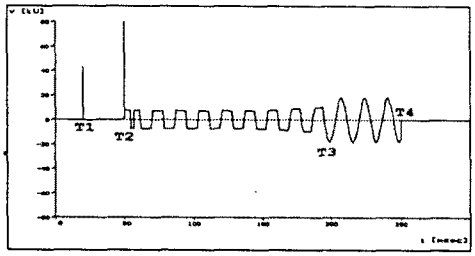


그림 6. 2차 아크 전압 파형

그림 6에서 2차 아크 전류가 소멸된 뒤, 사고상이 완전히 제거된 후에 사고 전압이 완전히 사라진다. 즉, T4 이전에 재투입이 들어가면 재투입에 실패하게 된다. 그림 8에서 1차 아크 전류에 비해 2차 아크 전류가 약 25-40 A 정도로 현저히 작음을 볼 수가 있다.

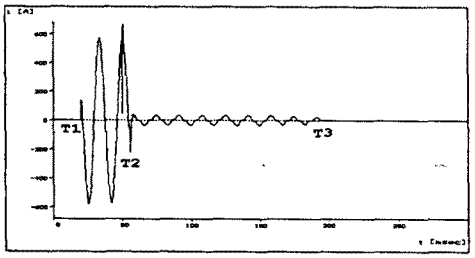


그림 7. 1차 및 2차 아크 전류 파형

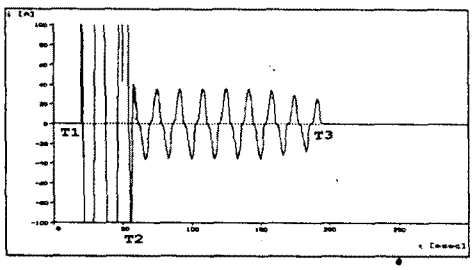


그림 8. 2차 아크 전류 확대 파형

계전점에서 본 전압의 경우 2차 아크의 특성과 같이 매우 적은 전압을 나타내게 된다. 전류 파형의 경우 차단기 트립에 의해 사고상의 전류는 제로가 되지만 coupling 되는 상의 전류가 약간 감소를 보인다.

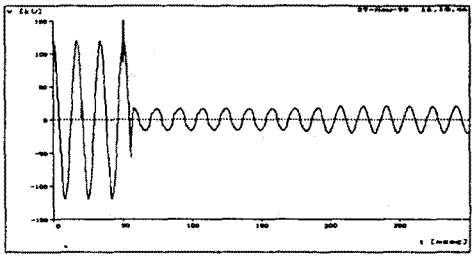


그림 9. 계전점에서의 사고상 전압 파형

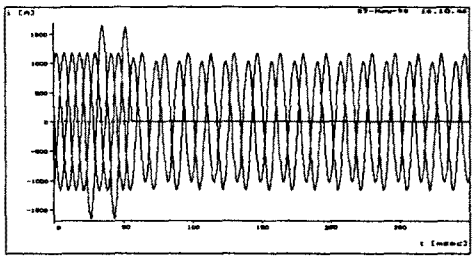


그림 10. 계전점에서의 3상의 전류 파형

사고의 파형도 중요하지만 계전기를 동작시키기 위해선 계전점의 전압, 전류 특성이 매우 중요하다. 그러므로, 앞으로 이 부분에 대한 적합한 모델링과 연구가 필요하다.

5. 결 론

아크 소멸은 매우 정의하기 어려운 2차 아크 현상중의 하나이고, 2차 아크 사고의 경우에 아크 길이에 의존하는 아크 시간상수의 시변성은 매우 중요한 요인이다.

본 논문에서는 아크 파라미터들의 영향을 모두 고려하여 1차 아크와 2차 아크를 구분하여 MODELS로 시뮬레이션 하였다. 또한, 아크 모델의 시뮬레이션 대상을 현재 우리나라의 154 [kV] 실계통에 적용하여 만족할 만한 결론을 도출해 내었다.

이러한 전력계통과 아크사고 사이의 상호관계를 동적이고 실제적으로 시뮬레이션 하는 것은 2차 아크를 고려한 새로운 방식의 보호계전 기술개발 뿐만 아니라, 향후 국내의 적응형(adaptive) 자동재폐로방식 기술 향상에 기여 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] A.T. Johns, R.K. Aggarwal, Y.H. Song, "Improved techniques for modelling fault arcs on faulted EHV transmission systems", IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., Vol.141, No.2, pp148-154, March, 1994

[2] M. Kizilcay, "Evaluation of Existing Secondary Arc Models", EEUG Meeting, Budapest, pp1-11, 1996

[3] M. Kizilcay, T. Pniok, "Digital Simulation of Fault Arcs in Power Systems", ETEP., Vol.1, No.1, pp55-60, Jan./Feb., 1991

[4] Y. Goda, S. Matsuda, T. Inaba, Y. Ozaki "Forced Extiction Characteristics of Secondary Arc on UHV Trasmission Lines", IEEE TPD, Vol.8, No.3, pp1322-1330, July, 1993

[5] S. Goldberg, William F. Horton, D. Tziouvaras, "A Computer Model of the Secondary Arc in single phase operation of Transmission Lines", IEEE TPD, Vol.4, No.1, pp586-594, Jan., 1989

[6] J. Sousa, D. Santos, M.Y. Correia de Barros, "Fault Arc Modeling in EMTP", IPST '95, Lisbon, pp475-480, Sep., 1995

[7] Laurent Dubé, "Users Guide to MODELS in ATP(New Version)", April, 1996