

## 단상재폐로 선로의 2차아크에 대한 새로운 모델링 기법

박병철\* 이옥화 신종린  
 건국대학교 전기공학과

### A New Modeling Technique for Secondary Arc on Single-Pole Switching Transmission Lines

Pyung-Chul Park, Uk-Hwa Lee, Joong-Rin Shin  
 Dept. of Electrical Engineering Kon-kuk University  
 jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr

**{Abstract}**

The secondary arcing phenomenon can be hardly modeled for computer simulation due to its particularly nonlinear characteristics. This paper describes a new computer modeling technique for the secondary arc which can be implemented with the EMTP MODELS. The computer model proposed is based on realistic arc conduction behaviors through newly desined variable resistor modules which can be supported in the EMTP. In this paper, for the variable resistor modules, a new variable arc resistance formula is proposed. Simulation results using the proposed technique are compared with some previous studies

**1. 서 론**

단상재폐로는 사고 시에도 건전한 두상으로 계속 에너지를 공급하게 하고 2차 아크 소멸 후에 선로 끝에 있는 차단기를 재투입함으로써 외란의 심각성을 줄이므로 상호 연계된 전력 계통의 안정도, 전력 수송 등의 유지할 가능케 한다는 면에서 효과적인 재폐로 방식으로 받아들여지고 있다[1,2]. 과도 안정도 향상뿐만 아니라, 특히 먼 거리에 있는 발전소가 부하 중심과 한 개 혹은 두 개의 송전 선로와 연결되어 있는 계통의 가용도 및 신뢰도 향상, 스위칭 시의 과전압 억제, 대용량 기기의 진동의 억제 등과 같은 것이 단상스위칭과 관련하여 주목할 특징들이다[3]. 단상재폐로를 사용함에 있어서 주의해야 할 점은 고장상 차단 이후 재투입은 2차아크가 완전히 소멸한 이후에 가능하다는 것이다. 따라서 2차아크의 해석과 모델링은 매우 중요하다. A.T. Johns는 2차아크의 대한 수학적 모델을 제안하였으며[4], Goldberg는 Johns의 수학적 모델에 기초하여 2차아크에 대한 컴퓨터 모델을 EMTP프로그램을 이용하여 개발하였다[5].

저자등[6]은 EMTDC를 이용하여 도통특성과 아크전류크기를 고려한 2차아크 정밀모델을 제안한 바 있다.

본 논문에서는 보다 2차아크 가변저항을 정밀하게 표현함으로써 실제아크의 사이클로그래를 충실하게 재현할 수 있는 새로운 모델을 제안하였다. 이를 위해 EMTP에서 프로그램기능을 갖는 MODELS를 이용하여 2차아크의 특징을 결정짓는 2차아크 저항에 대한 새로운 가변 저항 모델을 제시함으로써 실제 아크의 고조파포함과 2차아크의 특징으로 인용되는 아크 사이클로그래를 구현하였다. A.T. Johns, Goldberg의 간단화된 수학적 모델에서 나타나지 않는 아크사이클로그래를 보완하여 정밀한 아크모델제시와 논리적으로 2차아크 제발, 생성과정을 구현하였다. 또한 단상재폐로 시물레이션용 위하여 ATP의 GUI환경인 Atpdraw에서 아크 모듈화를 통하여 보다 쉬운 시물레이션이 가능하도록 하였다.

**2. 본 론**

**2.1. 2차아크 특성**

**2.1.1. 2차아크 전류**

단상재폐로 2차아크는 사고상을 제외한 나머지 두 건전상으로부터 유도 또는 유입 전류가 사고상 차단이후에도 사고 지점으로부터 아크형태로 지속적으로 흐르는 것을 말한다. 2차아크는 사고발생후 DC성분과 높은 고조파성분을 포함하며 몇 사이클후에는 준정상상태(quasi steady state)로 들어가게 된다. 2차아크 전류는 2개의 건전상으로부터 유도가 되며 다음과 같이 계산할수 있다.

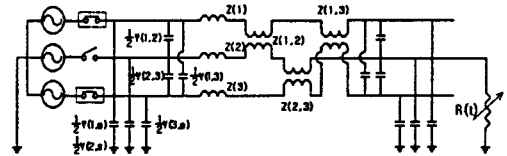


그림 1. 선로의 등가회로

$$\begin{aligned}
 I_f(i) &= I_c(i) + I_f(i) \\
 &= Y_{eo}(i, h) V_o(h) + Y_{eo}(i, k) V_o(k) \\
 &\quad - Y_{eo}(i, g) [I(h)X(i, h) + I(k)X(i, k)]
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서

$h, k$  : 건전상,  $i$  : 사고상

$$V_o : V_i \cos \frac{\theta}{2} e^{-j\frac{\theta}{2}}$$

$I_c(i)$  : 용량성 전류

$I_f(i)$  : 유도성 전류

$Y_{eo}(i, h), Y_{eo}(i, k)$  :  $h, k$ 상  $i$ 상 등가 상호 어드미턴스

$X(i, h), X(i, k)$  :  $h, k$ 상,  $i$ 상 상호 인덕턴스

$Y_{eo}(i, g)$  : 상  $i$ 의 대지간 어드미턴스

**2.1.2. 2차아크 사이클로그래**

아크는 시간이 지남에 따라 공기중의 이온이 사라지며 도통을 위해 필요한 아크양단의 전압이 높아지는 특징이 있다. 따라서 준 정상상태일 때 아크전류는 전압에 비해 일정한 크기를 가지며 전압은 높아지는 특징이 있다.

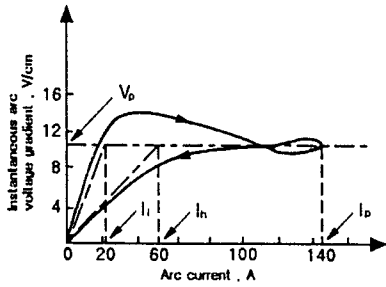


그림 2 일반적인 Long-Arc 반주기 사이클로그래프

따라서 2차아크는 위와같은 형태의 사이클로그래프이 지속적으로 증가하는 형태로 나타난다.[7]

A.T. Johns는 위의 사이클로그래프에서

$$V_b = 75 I_b^{-0.4} \quad [V/cm] \quad (2)$$

의 실험식을 얻은바 있다.[8]

### 2.1.3. 2차아크의 저항

2차아크의 사이클로그래프를 통해 볼때 전류와 전압의 상차가 생기지않는 곧 리액터성분을 포함하고 있지않으며 순 저항성분으로 이루어졌다.[9]

아크저항은 공기중의 이온상태를 모델하는 가변저항으로 표현가능하다. 또한 가변저항성분은 사이클로그래프를 그리도록 주기적으로 변하게 된다. 실험을 통하여 얻어진 준정상상태의 한주기 아크저항의 형태는 다음과 같은 모양으로 알려져 있다.[9]

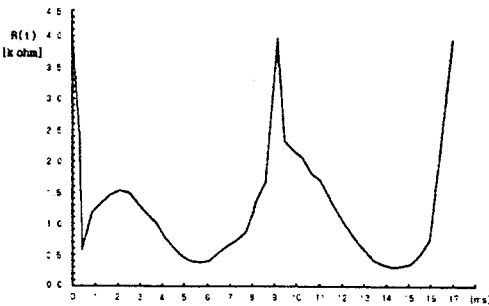


그림 3. 아크저항의 변화형태

위의 그림(3)와 같은 형태의 아크저항은 시간에 따라 증가하는 모양을 보인다. 현장실험으로 아크의 길이가 시간에 따라 길어짐을 알 수 있다.[9] 그러나 아크사이클로그래프 분석해볼 때 아크저항이 증가함에 따라 전류의 크기가 줄어지지 않는다. 즉 아크의 저항은 그림(3)와 같은 형태로 지속적으로 증가하지만 저항의 최소값 주변의 저항은 그 크기가 줄어지지 않으므로 모델링해야 한다.

본 논문에서는 위와같은 아크저항을 구현하기 위하여 다음식(3)으로 새로이 모델링 하였다.

$$R_{arc}(t) = \frac{75 I_b^{-0.4}}{I_b} * K(t) * K(t) \quad [Q] \quad (3)$$

여기서

$R_{arc}$  : 2차 아크저항

$I_b$  : 계산 아크전류의 Peak치

$l$  : 아크 길이

$K(t)$ : 그림(3)의 형태를 위한 변수

아크저항은  $K(t)$ 에 의해 지속적으로 증가하는 형태로,  $K(t)$ 에 의해 그림(3)의 패턴을 그리게 된다.

EMTP에서는 아크모델을 위한 Type 91번 TACS제어 저항을 포함하고 있으며 이는 또한 MODELS에 의해 제어 가능하다. 따라서 식(3)을 이용하여 Type 91의 가변저항을 제어함으로 아크모델이 가능하다.

### 2.1.4. 2차아크 저지전압 특성

2차아크는 시간이 지남에 따라 소멸하게 된다. 이것은 아크의 도통을 위하여 필요한 전압이 시간이 지남에 따라 커지는 것으로 말할 수 있다. 이때 아크 도통을 위한 최소전압을 아크저지전압이라고 하며, 저지전압과 아크길이는 각각 식(4),(5)과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$|V_r(t_r)| = \left(5 + \frac{1620 T_e}{2.15 + I_s}\right) (t_r - T_e) h(T_r - T_e) \quad [kV/cm] \quad (4)$$

$$\frac{K(t_r)}{l_0} = \begin{cases} 1 & t_r < 100 \text{ ms} \\ 10 t_r & t_r > 100 \text{ ms} \end{cases} \quad (5)$$

여기서,

$V_r(t_r)$ : 저지 전압 [ $kV/cm$ ]

$T_e$ : 2차아크 개시점에서 전류가 0일 때까지의 시간 [sec]

$I_s$ :  $I_b$ 의 실효치

$t_r$ : 2차아크 개시시간 [sec]

$$h(t_r) = \begin{cases} 1 & (t_r - T_e) \geq 0 \\ 0 & (t_r - T_e) < 0 \end{cases}$$

$K(t_r)$ : 아크길이 [cm]

$l_0$ : 아크 초기길이 [cm]

시간에 대한 저지전압경사와 아크 길이를 곱하면 식(4)와 같이 저지전압특성을 구할 수 있다.

$$V_{arc}(t_r) = |V_r(t_r)| * K(t_r) \quad [kV] \quad (6)$$

### 2.2. 2차아크 컴퓨터모델 알고리즘

2차아크 모델 논리는 그림 5의 순서도에 나타나 있다. 개발된 모델을 가지고 모의 과정을 설명하면 다음과 같다. 사고 발생후 차단기의 동작으로 2차아크는 시작한다. 저항제어에 필요한 2차아크 전류를 계산하며, 계산된 기본과 전류에 대하여 식(3)에 의해 저항을 구하게 되며 구하여진 저항으로 그림의 아크모델을 제어하게 된다. 또한 모델 내부에서 아크 소멸, 재발을 결정하기 위한 저지전압을 식(6)을 통하여 계산한다. 이때 실제 계통전압  $V_{계통}$ 과 저지전압  $V_{arc}$ 을 아크전류가 0일 때 비교하여 아크도통과 소멸을 결정한다.

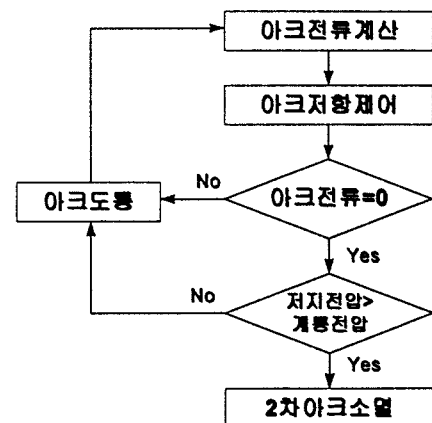


그림 4. 2차아크 모델 알고리즘

### 2.3. 사례 연구

본 연구에서 제안된 2차아크의 컴퓨터 모델을 그림 5 같은 500kV, 94mile의 연가된 계통의 선로 말단에 적용하였을 때의 제안 계통상황을 EMTP로 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션 송전선로에서의 사고 시나리오는 다음과 같다. 사고 발생시간은 모의 시작후 20ms CB의 동작시간은 2cycle로 하였다. 아크의 초기 길이는 420cm로 하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 6, 그림 7과 같다.

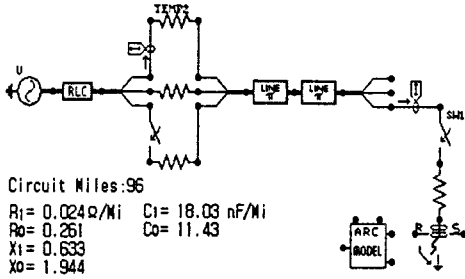


그림 5. 500kV 표본계통

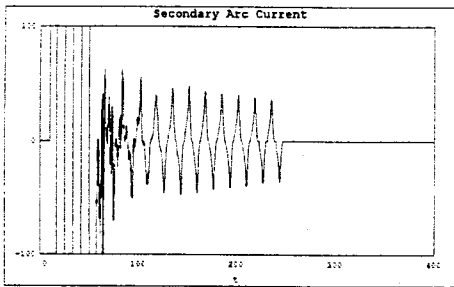


그림 6. 2차아크의 전류파형

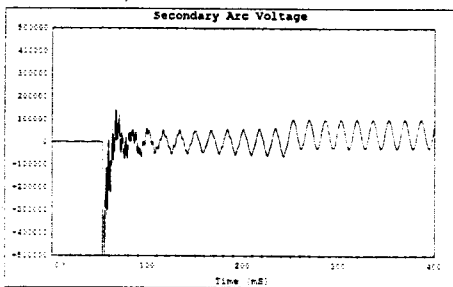


그림 7. 2차아크의 전압파형

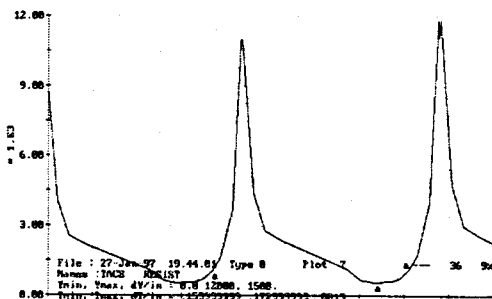


그림 8. 아크저항 변화

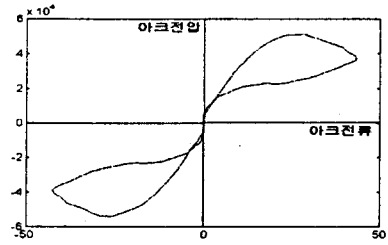


그림 9. 2차아크 전압-전류 사이클로그래프

그림(8)은 제안한 2차아크 저항식(3)으로 인해 나타나는 형태이며 실제 2차아크 저항(그림 3)과 유사함을 알 수 있다.

이들 통한 모의 결과는 살펴볼 때 그림 6, 7의 2차아크 전압, 전류의 형태가 있으며 소멸시간도 유사하다. 또한 2차아크 특성인 사이클로 그래프가 한 주기에 대해 그림(9)처럼 유사하게 모델링이 되었음을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

EMTP MODELS를 이용한 2차아크 모델을 모듈화함으로써 단상재폐로 방식의 시뮬레이션을 보다 쉽게 모의할 수 있었으며 아크전도 특성을 최대한으로 고려한 2차아크 모의를 가능케 하였다. 2차아크 전류를 선로등가화를 통해 구하고 또한 새로운 가변저항모델을 제시하여 아크도통 특성을 모델링 함으로 보다 실제 아크의 도통-차단 논리에 접근하였으며 2차아크의 특징으로 나타나는 전압-전류 사이클로그래프를 실제에 가깝게 구현할 수 있었다. 시뮬레이션 사례연구를 통하여 500kV에 대한 만족할 만한 결과를 얻었다. 아크의 전도 특성 또한 기존의 모델에 비해 실제와 유사하며 전류에 있어서도 구조와 포함이 유사함을 확인하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] IEEE Discrete supplementary controls Working Group, "Single-pole Switching for Stability and Reliability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol, PWRS-1, No, 2, May, 1986
- [2] N.N. Belyakov, "Application of Single-phase Autoreclosing in a Complex EHV Network Containing 1200kv Transmission Lines", CIGRE, 34-207,1990
- [3] IEEE Committee report, "Single-phase Tripping and Autoreclosing of Transmission Line" IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, No.1, January,1992
- [4] A. T. Johns, "Digital simulation of EHV systems under secondary arcing conditions associated with single-pole autoreclosure" IEE PROC, Vol, 129, pt C, No. 2, March 1982
- [5] S.Golderg, W.F.Horton, "A computer model of the secondary arc in single phase operation of transmission lines." IEEE Trans. on Power Delivery, Vol4, No. 1, pp586-596, January 1989,
- [6] 박병철,이옥화,신중권 "단상재폐로 송전선로에 대한 2차아크 모델링",대한전기학회,하계학술, 논문집 pp157-159,1996
- [7] Strom, A.P., "Long60-cycle arcs in air", Trans Amer. Inst. Elect. Engrs. , 1946, 65, pp 113-117
- [8] A.T. Johns, W.M.Ritchie "Application of an improved technique for assessing the performance of single-pole reclosing scheme" IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol PAS-103, No 12, December 1984.
- [9] A. J. Fakheri "Single Phase Switching Tests on the AEP 765kV System - Extinction Time for Large Secondary Arc Currents" IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 8, Aug 1983.