

## EMTDC를 이용한 단상재폐로방식에서의 2차아크의 분석

\*임성정\* 류영돈\* 오정환\* 김재철\* 김용상\*\* 유명호\*\*\*

\* : 숭실대학교 전기공학과

\*\* : 한국 전기연구소

\*\*\* : 한국전력 기술연구원

### Analysis of the secondary arc in single phase operation using EMTDC

Seong-Jeong Rim\* Young-Don Ryoo\* Jung-Hwan Oh\* Jae-Chul Kim\* Eung-Sang Kim\*\* Myung-Ho You\*\*\*

\* : Dept. of Elec. Engineering, Soongsil Univ.

\*\* : KERI

\*\*\* : KEPCO Research Center

#### Abstract

This paper describes a computer model of the secondary arc associated with single pole switching scheme to use in system simulation studies. The computer model is based on the mathematical model described by A.T.Johns, et.al[3], and is implemented by the EMTDC which is similar to the Electro Magnetic Transient Program(EMTP). Simulation results using the computer model compare with a previous simulation and field test results.

#### 1. 서 론

전력 시스템의 가공송전선로에서 발생하는 사고의 대부분은 일시적인 지락사고가 차지한다. 이러한 일시적인 사고를 해소하기 위한 방안으로 재폐로 방식을 널리 채용하고 있다. 재폐로 조작이 성공하려면 재투입 이전에 반드시 2차 아크가 소호되어야 한다. 따라서 2차아크의 해석은 매우 중요하며 소호시간에 관련된 요소로는 아크전류, 상간결합도, 계통전압, 기후조건 등이 있다[1-2].

재폐로 조작을 시뮬레이션하기 위해서는 2차 아크 현상에 대한 컴퓨터 모델이 요구된다. 이러한 컴퓨터 모델은 계통 운용자에게 다양한 재폐로 방식에 대한 컴퓨터 해석을 좀 더 정확하게 수행할 수 있도록 한다.

본 논문에서는 계통 시뮬레이션 해석을 위해 2차 아크에 대한 컴퓨터 모델을 제안하였다. 제안된 컴퓨터 모델은 A.T. Johns[3]의 수학적 모델에 기초를 두었으며 과도 현상 해석 프로그램인 EMTP과 유사한 상입용 프로그램인 EMTDC 프로그램을 사용하여 개발하였다[5].

제안된 모델을 사용한 시뮬레이션 결과는 EMTP 프로그램의 시뮬레이션 결과[4]와 현장실험한 결과[3]와 비교하였다.

#### 2. 2차 아크 모델

##### 2.1 수학적 모델

2차 아크 모델에 대해 다음의 2가지 특성이 고려되어야 한다. 즉, 아크전류가 흐를 경우 적용하는 아크 전도 특성(arc conduction characteristic)과 아크전류가 흐르지 않을 경우 적용하는 아크 지지전압 특성(arc withstand voltage characteristic)이다.

##### 아크 전도 특성 (Arc Conduction Characteristic)

아크모델의 전압-전류특성은 그림 1에서 보는 바와 같이 아크사이클로그래프로 나타낼 수 있다[3]. 이때 피크전압  $V_p$  은

$$V_p = 75I_p^{-0.4} [V/m] \quad (1)$$

여기서,  $I_p$  는 2차 아크전류의 피크값이다. 아크모델은 히스테리시스 성질을 가지며, 그림 1에서의 상향-하향 등가저항은 아크길이의 함수이므로 시변이다. 이러한 아크모델은 아크전압경사도(arc voltage gradient)가 모든 아크전류에 대해  $V_p$  값을 가지는 단순모델에 비해 현실적이다.

본논문에서는 이 모델에 대해 두가지 경우로 구분하여 구성하였다. 즉, 그림2에서 보는바와 같이 히스테리시스성질이 없고, 2차아크 개시시간( $T_r$ )에 대해 시작에서  $V_p$  까지의 경로를 나타낸다. 그림에서 (a)는  $T_r=250[ms]$ 일 경우이고, (b)는  $T_r=1000[ms]$ 일 경우이다.

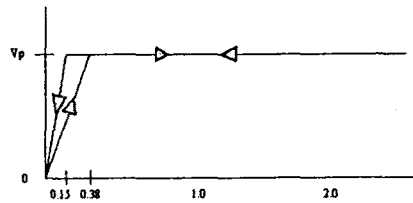


그림 1. 아크 사이클로그래프

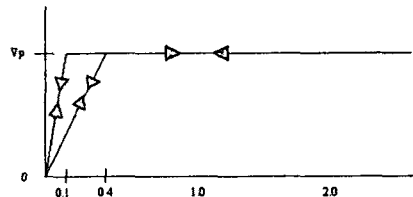


그림 2. 시뮬레이션 아크 사이클로그래프

아크 지지전압 특성(Arc Withstand Voltage Characteristic)

아크의 지지전압은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다[3].

$$|v_r(t_r)| = \left( 5 + \frac{1620T_c}{2.15 + I_p} \right) (t_r - T_c)h(t_r - T_c) [kV/cm] \quad (2)$$

또한, 아크의 길이는 다음과 같다.

$$\frac{l(t_r)}{l_0} = \begin{cases} 1 & , t_r \leq 100 \text{ ms} \\ 10t_r & , t_r > 100 \text{ ms} \end{cases} \quad (3)$$

여기서,

$V_r(t_r)$  : 지지전압 [kV/cm]

$T_c$  : 2차아크 개시점에서 전류가 0일때까지의 시간 [sec]

$I_a$  :  $\frac{I_p}{\sqrt{2}}$  [A,rms]

$t_r$  : 2차아크 개시시간 [sec]

$$h(t_r) = \begin{cases} 1 & , (t_r - T_c) \geq 0 \\ 0 & , (t_r - T_c) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$l(t_r)$  : 아크길이 [cm]

$l_0$  : 아크 초기길이 [cm]

윗식을 이용하여 본 논문에서 아크지지전압을 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{arcw}(t_r) = |V_r(t_r)| \cdot l(t_r) [kV] \quad (5)$$

따라서 아크 지지전압이 실제 아크 개방전압보다 클 경우 아크 소호가 일어나게 된다.

## 2.2 컴퓨터 모델

2차 아크의 컴퓨터모델은 그림 3과 같이 블록선도로 나타내었다. 여기서, A상 단상사고가 발생하고 사고상은 t<sub>iso</sub> 이후 계통에서 분리된다는 가정한다. 이때 스위치(13)은 정상상태시 닫혀있는 상태이고 아크 진도 회로를 통해 대지로 흐르게 된다. 스위치(13)은 사고전류가 0이 되면 개방된다.

실제 아크전압(TB1A)은 전류가 0에서 다음에 전류가 다시 0이 될때까지의 계산된 아크지지전압( $V_{arcw}$ )와 비교한다. 따라서  $|TB1A| < V_{arcw}$  일 경우 논리회로는 스위치(13)이 닫히도록 신호를 보낸다. 그다음 이러한 과정은 전류가 0이 될때까지 반복된다.  $|TB1A| \leq V_{arcw}$  일 경우 스위치(13)은 개방된 상태를 유지하며 사고는 정정된다.

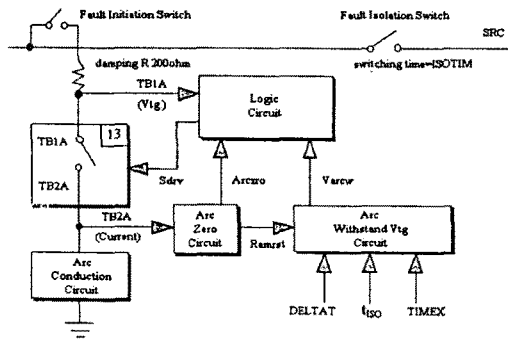


그림 3. 2차 아크모델의 블록선도

### 아크 진도 회로(Arc Conduction Circuit)

그림 4의 아크진도전압의 크기(TB2A)는 전압 D1에서 잘 통제-역제 시킨다. 이때 D1은 다음과 같이 계산된다.

$$D1 = \begin{cases} 75XIP^{-0.4} I_{GAP} & , tr \leq 100 \text{ ms} \\ 75XIP^{-0.4} I_{GAP} \cdot 0.01 Tr & , tr > 100 \text{ ms} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 XIP : 2차아크전류의 최대값 ( $I_p$ ) [A]

$I_{GAP}$  : 아크의 초기길이 ( $l_0$ ) [cm]

$Tr$  : 2차아크 개시시간 ( $t_r \times 10^3$ ) [ms]

여기서  $D2 = -D1$ 이고, 5168 [ $\Omega$ ] 저항은 그림1에서와 같이 개시점에서  $V_p$  까지의 경로를 제공한다.

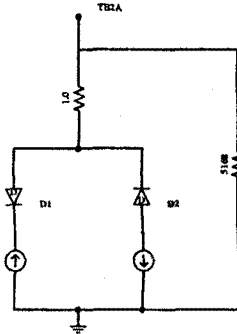


그림 4. 아크 진도 회로

### 아크 제로 회로(Arc Zero Circuit)

이회로의 입력인 아크전류(TB2A)는 ARCIA를 구성하기 위해  $100/I_p$  으로 배율조정된 후 절삭(truncate)한다. 절삭된 ARCIT가 매번 0로 가면, 1을 출력한다. 이 출력은 ARCZRO로서 아크전류가 0임을 나타낸다. 배율조정된 결과로서 ARCZRO는 약 0.01 [rad] 또는 0.6[deg] 정도이다. ARCZRO는 LEAD를 만들기 위해 미분하며 최대값이 약 5[V]정도 된다. RAMRST를 만들기 위해 LEAD에서 4를 뺀다. 이때 RAMRST는 아크 지지전압회로를 리셋하기 위한 신호이다.

### 아크 지지전압 회로(Arc Withstand Voltage Circuit)

아크지지전압은 반주기마다 매번 계산한다. 이때 아크 지지전압을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$V_{arcw} = \left( 5 + \frac{1.62T_r}{2.15 + \frac{XIP}{\sqrt{2}}} \right) \cdot 0.01 \cdot I_{GAP} \cdot T_r \cdot RAMP \quad (7)$$

여기서 RAMP : 아크전류가 0가 되는 최종시간 [ms]

$$= (tr - T_c) \times 10^3$$

$Tr$ 이 0일 경우 계산된  $V_{arcw}$ 는 0에서 시작한다.

$$V_{arcw} < V_{arc}(tr) \quad , tr < 0.1 \text{ [sec]} \quad (8)$$

$$V_{arcw} = V_{arc}(tr) \quad , tr > 0.1 \text{ [sec]}$$

이  $V_{arcw}$ 는 논리회로를 통과한다.

### 논리 회로(Logic Circuit)

논리회로는 매주기동안 스위치(13)을 개방하기 위해 신호(SDRV)를 제공한다. 또한, 아크지지전압  $V_{arcw}$ 와 아크전압의 절댓값  $|TB1A|$ 를 비교한다.

$V_{arc} \leq |TBIA|$  이면,  $S_{DRV}$ 는 1을 출력하고 스위치(13)는 닫혀진다. 아니면, 반대로  $V_{arc} > |TBIA|$  이면,  $S_{DRV}$ 는 -1을 출력하고 스위치(13)는 개방된 상태를 그대로 유지한다.

### 3. 사례 연구

#### 3.1 컴퓨터모델의 적용

2차아크의 컴퓨터모델은 그림 4와 같이 시스템에 적용할 수 있다. 여기서 시뮬레이션의 시작은 사고발생 20 [ms] 이후이고, 사고분리(tiso)은 사고발생 50 [ms] 후이다. 시뮬레이션 시간간격( $\Delta t$ )은 0.05 [sec]이다. 그림 4에서 송전선로는 PI 모델을 사용하였으며, 사고시 사고전류의 최대값은 35 [A]이 되도록 하였다.

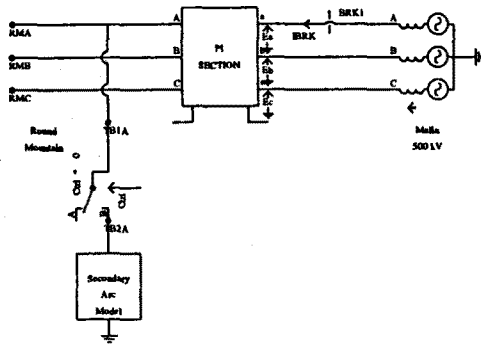


그림 5. 시스템에의 적용

시뮬레이션 결과는 그림 6 와 그림 7에 나타내었다. 소호시간은 16 [cycle]정도이다. 그림 6와 그림 7에 나타난 파형은 이전 시뮬레이션의 결과[4]와 유사함을 나타낸다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 2차아크특성을 포함한 단상재폐로방식(SPAR)방식의 시뮬레이션을 하기 위해 컴퓨터모델을 제시하였다. EMTDC를 이용하여 제시한 2차아크에 대한 컴퓨터모델은 전자기 과도현상을 시뮬레이션을 하기 위해 널리 사용되는 프로그램인 EMTPT결과와 비교하여 유사한 결과를 출력하였다.

본 논문을 통해 여러가지 다양한 SPAR방식의 시뮬레이션을 훨씬 더 현실적으로 실행가능함을 입증하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] R.K.Haun, "13 years experience with single-phase reclosing at 345 kV," IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol.PAS-97, No.2, March/April 1978.
- [2] Hasibar, et.al, "The application of high-speed grounding switches for single-pole reclosing on 500 kV power systems," IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol.PAS-100, No.2, April 1981.
- [3] A.T.Johns, W.M.Ritchie, "Applications 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.

[4] S.Goldberg, W.F.Horton, "A computer model of the secondary arc in single phase operation of transmission lines," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.4, No.1, pp.586-595, January 1989.

[5] PSCAD/EMTDC Manual, Manitoba HVDC Research Centre, 1993.

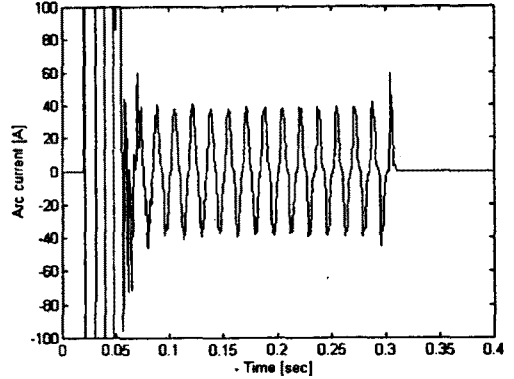


그림 6. 아크전류 파형

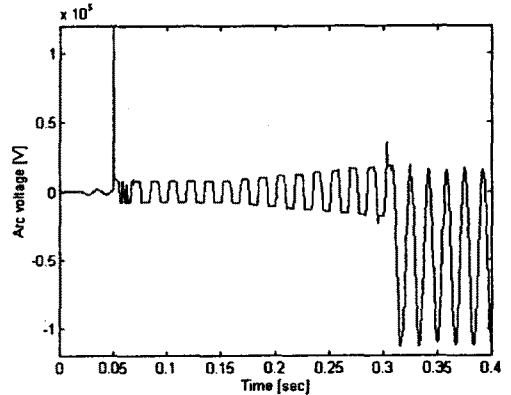


그림 7. 아크전압 파형