

단상계제로 송전선로에 대한 2차 아크 모델링

박병철*, 이육화, 신중린
 건국대학교 전기공학과

Secondary Arc Modeling for Single-Pole Switching on Transmission Lines

Pyung-Chul Park, Uk-Hwa Lee, Joong-Rin Shin
 Dept. of Electrical Engineering Kon-kuk University

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 EMTDC. The computer model proposed is based on realistic arc conduction behaviors through both FFT and variable resistor modules which is supported in the EMTDC. Simulation results using the proposed technique are compared with some previous studies

1. 서론

단상계제로는 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 유지를 가능케 한다는 면에서 효과적인 제재로 방식으로 받아들여지고 있다[1,2]. 과도 안정도 향상뿐만 아니라, 복귀 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]. 이러한 특징에도 불구하고 단상계제를 사용할 때 있어서 주의해야 할 점은 고장상 차단 이후 재투입은 2차아크가 완전히 소멸한 이후에 가능하다는 것이다. 따라서 2차아크의 해석과 모델링은 매우 중요하다. 정확한 2차아크 모델링을 구현하기 위해서는 2차아크의 생성 및 소멸에 관계된 여러 요소들인 아크전류, 상간 결합도, 계통전압, 기후 조건 등이 고려되어야 한다[4]. 이러한 특성들을 고려하여 A.T. Johns는 2차아크의 대한 수학적 모델을 제안하였으며, Goldberg는 Johns의 수학적 모델에 기초하여 2차아크에 대한 컴퓨터 모델을 EMTDC프로그램을 이용하여 개발하였다[5,6]. Goldberg의 2차아크 모델은 특정 시스템에 종속된 모델이며 아크 도통 특성(Arc Conduction Characteristic)을 비현실적으로 간략화시켜 모델링 함으로서 2차아크 모의 결과에 대한 신뢰성이 의문시된다.

본 논문은 Johns의 수학적 모델을 좀 더 충실히 따르는 컴퓨터 모델을 EMTDC와 유사한 기능을 갖는 EMTDC를 이용하여 개발하였다. 본 연구에서 제안된 2차아크의 모델은 실제적인 아크의 전도 특성을 포함시키기 위해서 아크 전도 특성을 결정짓는 2차 아크전류를 Goldberg처럼 임의의 값으로 지정하지 않고 실시간으로 모의 과정에서 FFT를 통하여 추정하고 가변저항과 종속전압원을 통해서 2차아크를 구현함으로써 실제 아크도통특성과 유사한 아크전도특성을 갖도록 하였다. 제안된 모델을 사용한 시뮬레이션 결과는 Goldberg의 모델을 사용한 결과와 비교하였다.

2. 2차 아크 모델

2차 아크 모델에 대해서는 일반적으로 아크 전도 특성(arc conduction characteristic) 과 아크 지지전압특성(arc withstand voltage characteristic)을 고려하여야 한다. 본 연구에서 제시된 아크모델에 포함된 이들의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 아크 전도특성(arc conduction characteristic)

아크전도 특성은 아크전류가 흐를 때 나타나는 특성을 말하며 양단

의 전압 크기가 아크저지전압(arc withstand voltage)을 초과할 때 아크전류가 흐르게 된다. 그림 1은 Strom[8]에 의하여 제시된 실험적인 아크의 전압-전류 사이클로그래프(volt-ampere cyclogram)이다. 2차 아크의 사이클로그래프도 이와 같은 특성을 보일 것이며 따라서, 2차 아크의 피크치 전류 I_p 에 의해 V_p 가 결정되며 따라서 그때의 저항요소도 결정될 수 있다. 이 그림을 Johns는 그림 2와 같이 보다 단순화한 형태로 표현하였다. 이때 그림 2에서의 피크전압 V_p 는

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

이다. 여기서 I_p 는 2차 아크전류의 피크값이다.

단순화한 그림 2에서 아크 도통을 표현하기 위한 저항요소는 a, b, c 영역으로 구분하여 표현된다.

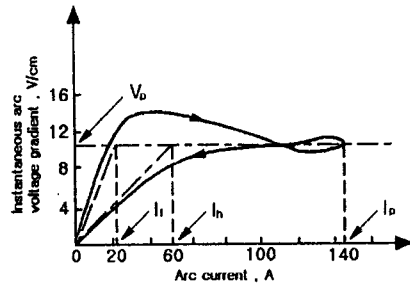


그림 1 일반적인 Long-Arc 사이클로그래프
 Fig 1. General Long-Arc cyclogram

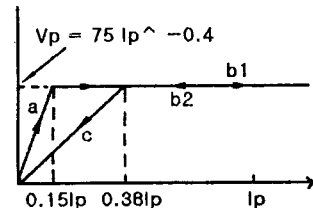


그림 2 선형화된 아크 사이클로그래프
 Fig 2. Normalized liberalized arc cyclogram

2.2 아크 지지전압 특성(Arc withstand voltage characteristic)

아크는 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, 지지전압과 아크길이는 각각 식(2),(3)과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$|V_a(t_r)| = \left(5 + \frac{1620 T_e}{2.15 + I_a} \right) (t_r - T_d) h(T_r - T_d) \quad [kV/cm] \quad (2)$$

$$\frac{K(t_r)}{I_0} = \begin{cases} 1 & t_r < 100 \text{ ms} \\ 10t_r & t_r < 10 \text{ ms} \end{cases} \quad (3)$$

여기서,

$V_p(t_r)$: 저지 전압 [kV/cm]

T_0 : 2차아크 개시점에서 전류가 0일 때까지의 시간 [sec]

I_0 : I_p 의 실효치

t_r : 2차아크 개시시간 [sec]

$$K(t_r) = \begin{cases} 1 & (t_r - T_0) \geq 0 \\ 0 & (t_r - T_0) < 0 \end{cases}$$

$K(t_r)$: 아크길이 [cm]

l_0 : 아크 초기길이 [cm]

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

$$V_{arcw}(t_r) = V_p(t_r) * K(t_r) \quad (4)$$

실제 시뮬레이션에서 계산되어지는 저지전압과 계통 전압을 비교하여 저지전압이 더 클 경우 아크는 소멸하게 된다.

3. 제안된 2차 아크의 컴퓨터 모델링

3.1 FFT를 이용한 2차 아크전류 검출

일반적으로 아크는 비선형적이며 고조파 성분이 많이 섞여 있으며 사고 발생시의 DC-offset 또한 포함되어 있다. 따라서 2차 아크 모델링에 필요한 데이터인 2차 아크전류의 피크치를 정확하게 알아내기가 쉽지 않다. 또한 같은 계통에 대해서도 선로 사고 위치에 따라 아크전류의 크기는 다르며, 전압이 다른 시스템에 대하여서도 2차 아크전류는 다르게 된다. 이러한 어려움 때문에 기존의 Goldberg의 모델에서는 2차 아크전류를 가정한 기저값으로 두고 시뮬레이션을 하였다. 그러나, 본 연구에서는 EMTDC의 FFT(Fast Fourier Transformation)모듈을 사용하여 2차아크가 발생한 후 아크의 고조파 성분과 DC-offset을 제외한 기저파의 peak치를 뽑아서 실제 2차 아크의 피크치 전류 I_p 를 구하고자 시도하였다.

3.2 아크전도 회로

아크 전도 메카니즘을 구현 함에 있어 아크의 사이클로그래를 가급적 근사적으로 모델하기 위해 본 연구에서는 Johns의 그림 2와는 달리 그림 3에서의 같이 EMTDC에서 제공하는 가변저항 및 종속 전압원 모듈을 사용하였다. 2차 아크 모델에서 사용되는 가변저항 값과 종속전압원의 값을 검출하는 과정은 식 (5) 와 (6)에 나타나 있다. 따라서 개발된 아크 모델은 그림 4와 같은 전압-전류특성을 갖게 된다.

$$R = \begin{cases} \frac{V_p}{0.15I_p} * K(t_r) & : I_{arc} - \text{상승}, V_{arc} < V_p \\ \frac{V_p}{0.38I_p} * K(t_r) & : I_{arc} - \text{하강}, V_{arc} < V_p \\ 1-0.1 & : V_{arc} > V_p \end{cases} \quad (5)$$

종속 전압원 값으로

$$|V| = \begin{cases} 0.3V_p & : b_1 \text{ 영역} \\ 0.75I_p * I_{arc} & : b_2 \text{ 영역} \\ 0.2V_p & : b_2 \text{ 영역} \\ 0.68I_p * I_{arc} & : (a), (c) \\ 0 & : (a), (c) \end{cases} \quad (6)$$

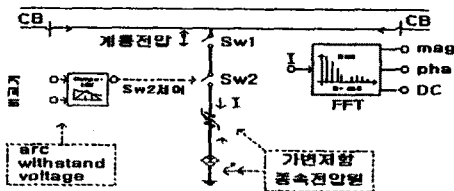


그림 1 2차아크 모델의 전체 개념도

Fig 3. Diagram of the secondary arc model

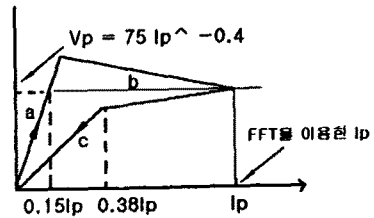


그림 4 제안된 아크 사이클로그래

Fig 4 Proposed arc cyclogram.

2차 아크 모델 논리는 그림 5의 순서도에 나타나 있다. 개발된 모델을 가지고 모의 과정을 설명하면 다음과 같다. 먼저 사고 스위치 Sw_1 이 닫힌 순간에 사고는 발생하며 CB의 작동으로 2차 아크는 시작한다. 그리고 I_p 전류값을 계산하기 위해서 EMTDC의 FFT모듈이 동작하여 아크 전류값을 구한다. 이 값을 식(1)에 대입하여 피크전압 V_p 를 구한 다음 계통전압과 비교하여 큰 경우는 아크 저항을 0.1로 두고 저지전압을 식(2)을 통하여 계산한다. 반대로 작은 경우는 가변저항식에 V_p 와 I_p 를 대입하여 그 순간의 저항값을 계산한다. 그리고 계산된 가변저항값을 이용하여 아크 전압을 구한다. 이러한 과정을 매 순간(Δt)마다 반복 수행하여 최종적으로 계산된 실제 아크 모델 계통에서 발생하는 시뮬레이션 계통 전압 V_{arc} 과 저지전압 V_{arcw} 을 아크전류가 0일 때 비교하여 그림 3의 아크도통 스위치 Sw_2 의 개폐를 결정한다. 이 논리를 수식으로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$Sw_2 = \begin{cases} ON & : V_{arc} \geq V_{arcw} \\ OFF & : V_{arc} < V_{arcw} \end{cases} \quad (7)$$

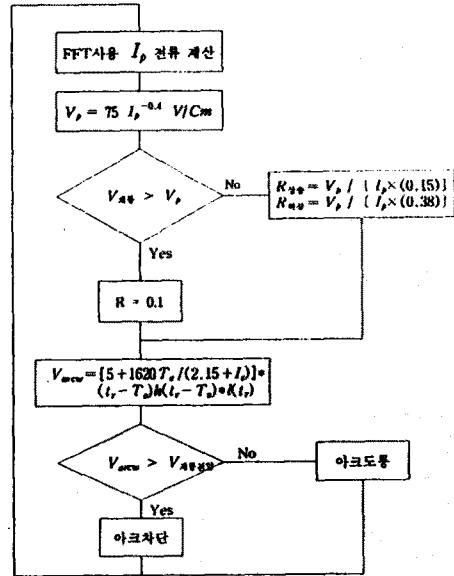


그림 5. 2차아크의 전압-전류 계산과정 순서도

Fig 5. Flowchart of secondary arc volt - ampere calculation

4 사례 연구

본 연구에서 제안된 2차아크의 컴퓨터 모델을 그림 6 같은 500kV, 328km의 완전연가된 계통의 선로 말단에 적용하였을 때의 제안 계통상황을 EMTDC로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 Goldberg의 EMTPO로 구성된 2차아크 모델을 EMTDC로 변환하여 구성된 모델의 결과와 비교하였다. 송전선로에서의 사고 시나리오는 다음과 같다. 사

고 발생시간은 모의 시작후 20ms CB의 동작시간은 2cycle로 하였다. 아크의 초기 길이는 400cm로 하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 7, 그림 8과 같다.

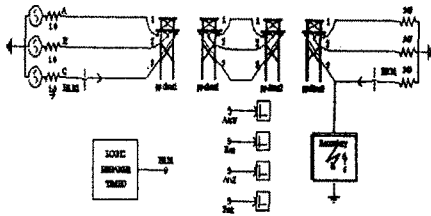


그림 6 2차아크 모듈을 적용한 표본 계통
Fig 6 Sample system with the secondary arc module

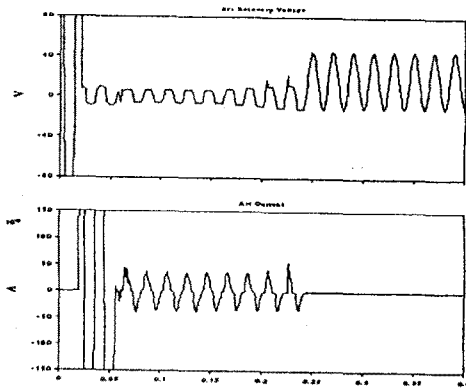


그림 7 Goldberg의 모델에 의한 2차아크 전압과 전류
Fig 7 Secondary arc voltage & current of the Goldberg's models

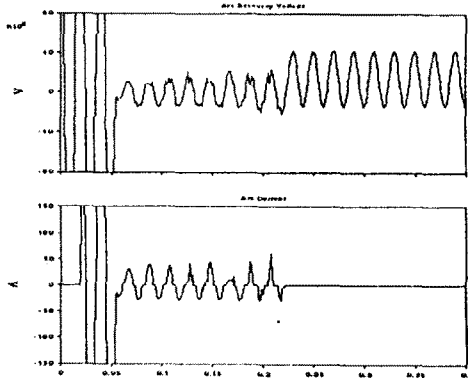


그림 8 제안된 모델의 2차아크 전압과 전류
Fig 8 Secondary arc voltage & current of the proposed models

그림 7의 Goldberg모델을 통한 2차아크 시뮬레이션의 결과는 아크전류를 35A로 규정함으로 송전선로에서 9주기 후에 아크가 소멸되었다. 그러나 그림 8의 개선된 모델에서는 FFT모듈을 통한 2차아크 전류의 검출과 그림1의 사이클로그래프는 2차아크 전압의 따라가도록 설계되어 있기 때문에 아크의 소멸이 한 파장정도 짧아졌다. 이는 사용된 아크전류가 35A보다 적은 값을 사용하였기 때문이다.

5. 결론

EMTDC를 이용한 2차아크 모델의 개발로 단상재폐로 방식의 시뮬레이션에서 보다 쉽게 2차아크가 적용될 수 있으며 아크전도 특성을 최대한으로 고려한 2차아크 모의를 가능케 하였다. 또한 2차아크 피크치 전류를 FFT모듈을 통하여 구하고 가변저항과 중속 전압으로 아크 도통 특성을 모델링 함으로 보다 현실적이고 다양한 시뮬레이션을 위한 2차아크 모델이 개발되었다. 앞으로 다양한 재폐로 방식에 개발된 아크모듈을 적용하여 비교 분석을 함으로 보다 정밀한 2차아크모듈을 구성하여야 할 것이다. 그리고 동일한 특성을 갖는 EMTP 2차 아크모델도 개발하여 개발된 모델의 타당성을 검증받아야 할 것이다. 이와 아울러 무부하시 발생하는 전로의 고주파로 인한 시뮬레이션의 오류를 수정하기 위한 방법이 더 연구되어야 한다.

참고문헌

- [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] 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
- [5] A. T. Johns, "Digital simulation of EHV systems undersecondary arcing conditions associated with single-pole autoreclosure" IEE PROC, Vol, 129, pt C, No. 2. March 1982
- [6] S.Goldberg, 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,
- [7] J. G. Kappenman "Staged fault tests with single phase reclosing on the Winnipeg-Twin cities 500kv Interconnection" IEEE Trans. on Power Apparatus and System, vol. PAS-101, No. 3 March 1982
- [8] Strom, A.P., "Long60-cycle arcs in air", Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs. , 1946, 65, pp 113-117
- [9] 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.
- [10] PSCAD/EMTDC Manual, Manitoba HVDC Research Centre, 1993.