765kV 송전계통에서의 고장지점 변화에 따른 아크 특성 분석

권구민*, 이유진*, 김철환*
성균관대학교*

The Analysis of Arc Characteristics according to the Change of Fault Location in 765kV Transmission Lines

Gu-Min Kwon*, You-Jin Lee*, Chul-Hwan Kim*
SungKyunKwan University*

Abstract - 송전계통에서 가장 많이 발생하는 고장은 일시고장이며, 이 중 70%~80%가 아크지락 고장이다. 일시 고장시 계통의 빠른 복구를 위한 성공적인 재폐로를 이루기 위해서는 2차아크의 재점호와 소멸시간이 중요한 변수로 작용한다. 따라서 이러한 2차아크의 특성을 분석하고 적절한 소호시점을 알아내는 것이 성공적으로 고장 후 계통을 복구시키기 위해 필요하다.

본 논문에서는 전력 계통의 과도현상 분석 프로그램인 EMTP(Electro Magnetic Transient Program)를 이용하여 765kV 송전계통에서 아크 지락 고장을 시뮬레이션 하고, 송전선로내 고장지점을 다양하게 변화시켜가며 아크 전압 특성을 분석하였다.

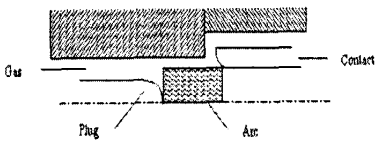
1. 서 론

전력수요의 급격한 증가에 따라 전력계통의 규모가 커지고 복잡해지면서, 계통 내의 고장 가능성도 점점 커지고 있다. 따라서 고장의 파급을 줄이고 안정적인 전력계통의 운영을 위한 노력이 요구된다. 전력계통의 안정적 운용을 위해서는 송전선로 사고시 성공적인 자동재폐로가 필요하며, 자동재폐로는 선로의 아크가 소호된 후 투입되어야 하므로 이를 위해서는 고장점의 2차아크 소호 시점을 정확히 추정해야만 한다. 따라서 송전선에서 발생하는 2차아크의 해석은 매우 중요하다. 정확한 2차아크 모델링을 구현하기 위해서는 2차아크의 생성 및 소멸에 관계된 여러 요소들인 아크 전류, 상간 결합도, 계통 전압, 기후 조건등이 고려되어야 한다[1]. 이러한 특성들을 고려한 A.T.Johns의 2차아크에 대한 수학적 모델을 적용하고, Goldberg가 Johns의 수학적 모델에 기초하여 2차아크에 대한 컴퓨터 모델을 EMTP를 이용하여 개발한 모델을 실제 적용하고 모의 하였다.

본 논문에서는 시뮬레이션을 전력계통의 과도현상 프로그램인 EMTP를 사용하였으며, 765kV 송전계통에서 1선 아크지락사고를 발생시켜 다양한 고장지점 변화에 따른 2차아크의 전압 특성을 분석하고, 계통 현상을 이해하고자 하였다.

2. 아크 특성

2.1 아크의 이해



〈그림 1〉 차단기 아크 접점의 개략도

위의 그림 1에 송전선로용 차단기의 구조를 대략적으로 나타내었다. 보통은 plug와 contact가 맞닿아 있지만, 전류를 차단해야 할 경우 plug와 contact가 빠르게 분리되며 이 때 plug와 contact사이에 전기적인 아크가 발생하게 된다.

2.2 아크의 발생과 소호

차단기는 기본적으로 스위치의 역할을 하는데, 이것은 과전류 상태에서 아크의 접점이 전도체에서 절연체로 변화하는 특성을 가진다. 차단기가 동작한 이후 완전히 전류가 차단되기 이전에는 차단기의 아크 접점 사이로 전류가 흐르는데, 이는 차단기의 접점이 열려도 그 사이의 아크 저항이 0이 아니기 때문이다. 아크가 관찰되는 동안은 아크에 의해 아크 접점의 전도성이 유지되며, 아크 저항은 비선형적 아크 컨덕턴스 값을 갖고, 이 때 아크 접점에서의 전력 소모는 거의 없다. 즉, 차단기가 동작한 직 후 전류 영점(Current Zero : CZ)까지 측정되는 전류 및 전압을 아크 전류 및 전압이라고 정의할 수 있다[4][5].

CZ이 후, 아크 접점에는 TRV(Transient Recovery Voltage)가 나타난다. 차단부의 고온의 기체 혼합물이 순식간에 절연물질로 변할 수 없기 때문에, 유한한 값의 아크 저항이 유지되며, TRV와 아크 저항에 의해서 포스트 아크 전류(Post Arc Current)라고 불리는 작은 량의 전류가 흐르게 된다[4][5]. 포스트 아크 전류가 0이 되면, 아크가 소호되고 차단기가 올바르게 작동하였음을 의미한다.

아크 소호에서 중요한 고려사항은 아크가 만든 에너지가 얼마나 빨리 소모되는가 하는 것이다[4]. 즉, 아크 소호는 아크 접점에서 얼마나 많은 전력을 소모하는가와 밀접한 관련이 있다. CZ이후 TRV와 포스트 아크 전류가 관찰되는 시간동안, 아크 접점은 이미 분리되어 있고, 이에따라 아크 저항은 매우 큰 값을 갖게 된다. 또한 소호가 이루어져 절연 상태가 될 경우 아크 저항은 거의 무한대에 가깝다고 볼 수 있다. 따라서, 전류를 차단하는 짧은 시간(수 마이크로 초)동안 아크 저항은 0에 가까운 값에서부터 무한대까지 변화하며, 이러한 특징에 따라 765kV 송전계통에 미치는 영향은 단순히 지락사고와는 다른 양상을 보이게 된다.

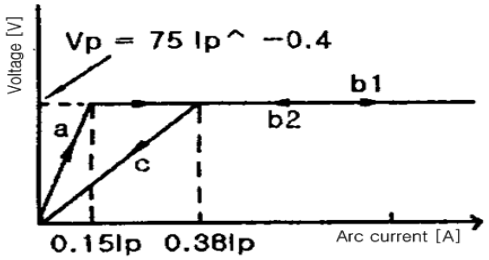
3. 아크 모델

3.1 아크 전도특성(Arc Conduction Characteristic)

아크 모델에 대해서는 일반적으로 아크 전도특성(Arc Conduction Characteristic)과 아크 내전압특성(Arc Withstand Voltage Characteristic)을 고려하여야 한다[3]. 아크전도 특성은 아크전류가 흐를 때 나타나는 특성을 말하며 양단의 전압 크기가 아크내전압(Arc Withstand Voltage)을 초과할 때 아크 전류가 흐르게 된다. 그림 2은 Johns에 의해 표현된 전압-전류 사이클로그램(Volt-Ampere Cyclogram)이다. 이때 그림 2에서의 피크전압 V_p는 다음 식(1)과 같다.

$$V_p = 75 I_p^{-0.4} \ [\mathrm{V/cm}] \tag{1}$$

여기서 I_p는 2차 아크전류의 피크값이다. 그림 2에서 아크 도통을 표현하기 위한 저항요소는 a, b, c 영역으로 구분 하였다.



〈그림 2〉 아크 사이클로그램

3.2 아크 내전압 특성(Arc withstand voltage characteristic)

아크는 시간이 지남에 따라 소멸하게 된다. 이것은 아크의 도통을 위하여 필요한 전압이 시간이 지남에 따라 커지는 것으로 생각할 수 있다. 이 때 아크 도통을 위한 최소전압을 아크 내전압이라고 하며, 내전압과 아크길이는 각각 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$|V_r(t_r)| = (5 + \frac{1620 T_e}{2.15 + I_s})(t_r - T_e) h(T_r - T_e) \quad [\mathrm{kV/cm}] \tag{2}$$

$$\frac{l(t_r)}{l_0} = \begin{cases} 1 & t_r \le 100ms \\ 10t_r & t_r > 100ms \end{cases} \tag{3}$$

$V_r(t_r)$: 저지 전압 $[kV/cm]$
T_e : 2차아크 개시점에서 전류가0일 때까지의 시간[sec]
I_s : I_p의 실효치

t_r : 2차아크 개시시간[sec]

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

$l(t_r)$: 아크길이[cm]

l_0 : 아크초기길이[cm]

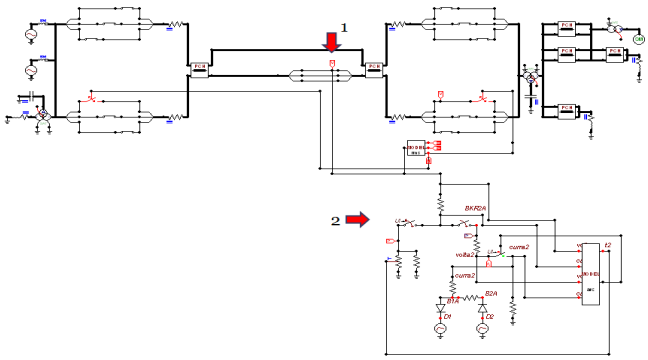
시간에 대한 내전압경사와 아크 길이를 곱하면 다음 식 (4)와 같이 내전압특성을 구할 수 있다.

$$V_{arcw}(t_r)=|V_r(t_r)|\times l(t_r)\ [kV] \quad (4)$$

4. 모의 및 결과

4.1 모델 계통

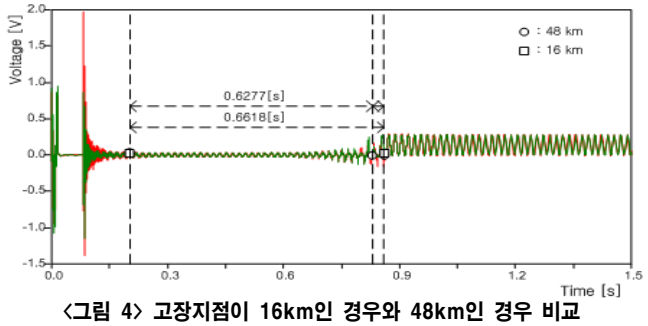
ATPDraw를 이용하여 설계한 765kV 송전계통 모델을 아래 그림 3에 나타내었다. 여기서 화살표로 나타낸 1번은 고장지점을 나타내고, 1선 아크 지락 고장을 모델링한 부분은 2번에 해당된다. 발전소에 해당하는 전원은 그림의 왼쪽 상단에 위치하고 있고, 629737.05V와 기본주파수의 값을 갖는다. 이 계통에서는 160km 2회선 송전선로를 사용하였고, 그 값을 10%만큼씩 변화시켜가며 고장지점을 바꾸어 고장지점 전압 출력파형의 변화를 관찰하였다.



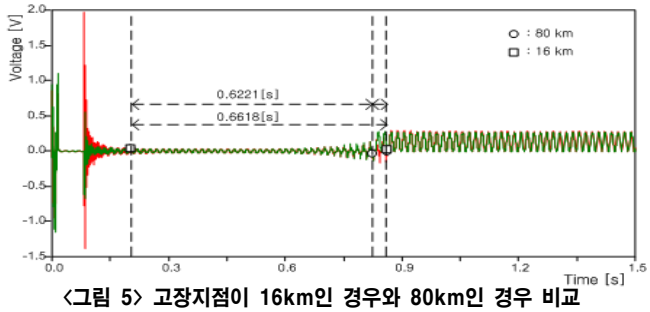
〈그림 3〉 ATPDraw를 이용한 765kV 모델 계통

4.2 고장지점 변화에 따른 특성 분석

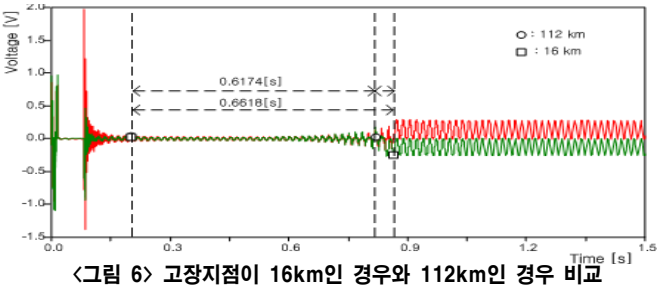
아크의 특성을 살펴보기 위해 0.0167초에서 계통에 고장을 발생시켜 1.5초까지 고장전압의 아크 출력파형을 확인하였다. 고장지점이 발전기에서 가까운 16km인 경우와 48km인 경우를 비교해 봤을 때, 고장지점이 48km인 경우가 2차아크 소호시간이 약 0.0341초 줄어든 것을 확인할 수 있다. 고장 지점을 더 멀리하여 수전단에서 가까운 144km인 경우와 16km인 경우를 비교해 봤을 때, 고장지점이 144km인 경우가 16km인 경우에 비해 2차아크 소호시간이 0.0754초 줄어든 것을 확인할 수 있다. 아래 그림 4는 고장지점이 16km인 경우와 48km인 경우, 그림 5은 16km인 경우와 80km인 경우, 그림 6은 16km인 경우와 112km인 경우, 그림 7은 16km인 경우와 144km인 경우를 각각 비교한 것이다.



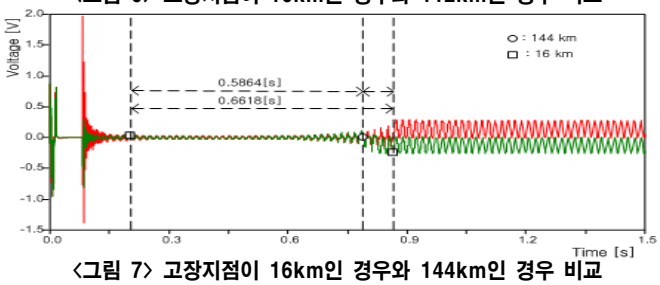
〈그림 4〉 고장지점이 16km인 경우와 48km인 경우 비교



〈그림 5〉 고장지점이 16km인 경우와 80km인 경우 비교



〈그림 6〉 고장지점이 16km인 경우와 112km인 경우 비교



〈그림 7〉 고장지점이 16km인 경우와 144km인 경우 비교

다음 아래의 표 1은 송전선로 160km에서 고장지점을 10%씩 변화시켜가며, 2차아크 소호시간과 크기를 나타낸 표이다. 표를 보면 알 수 있듯이 고장지점이 송전단으로부터 멀어질수록 2차아크 소호시간이 점점 줄어드는 것을 알 수 있다.

〈표 1〉 고장지점 변화에 따른 2차아크의 소호시간과 크기

No	거리(km)	아크 소호시간[sec]	고장시 서지전압[MV]
1	16	0.8648	1.978
2	32	0.8404	1.585
3	48	0.8307	1.025
4	64	0.8284	0.987
5	80	0.8251	0.744
6	96	0.8234	0.697
7	112	0.8204	0.931
8	128	0.7949	0.936
9	144	0.7894	0.816

3. 결 론

765kV 송전선로에서 2차아크의 특성을 알아보기 위해, 본 논문에서는 송전단으로부터 고장지점 변화에 따른 아크소호시간을 분석하여 보았다. 그 결과 고장지점이 16km인 경우에 비해 144km인 경우 아크 소호시간이 0.0754초, 약 4.52cycles 정도의 시간이 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 또한 서지전압도 16km에서부터 96km까지는 점점 줄어드는 경향을 보였다. 이러한 결과를 통해 발전소로부터 고장지점이 멀어질수록 아크 소호시간이 짧아진다는 결론을 얻을 수 있었으며, 이를 이용하여 송전계통에서 고장시 고장지점에 따른 적절한 아크 소호시점을 추정함으로써 성공적인 재폐로와 계통의 빠른 정상화를 위한 연구를 진행할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

[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] A. T. Johns, "Digital simulation of EHV systems under secondary arcing conditions associated with single-pole autoreclosure"

[3] 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,

[4] P.H.Shavemaker and L. Van Der Sluis, "The Arc Model BlockSet"

[5] M Kizikay, "Dynamic Arc Modeling in EMTP/TACS", 10th European EMTP User Group Meeting, May 5/6, 1986,