765 kV 송전선로 보호를 위한 아크사고 시뮬레이션 및 적응적 자동재폐로 대책

論 文
48A - 11- 1

The Arcing Faults Simulation and Adaptive Autoreclosure Strategy for 765 kV Transmission Line Protection

安 相 泌* · 金 喆 煥**
(Sang-Pil Ahn · Chul-Hwan Kim)

Abstract - In many countries including Korea, in order to transmit the more electric power, the higher transmission line voltage is inevitable. So, a rapid reclosing scheme is important for EHV/UHV transmission lines to ensure requirements for high reliability of main lines. A critical aspect of reclosing operation is the extinction of the secondary arc since it must extinguish before successful reclosure can occur. Therefore the accurate simulation techniques of arcing faults are of importance. And successful reclosing switching can be accomplished by adopting a proper method such as HSGS and hybrid scheme to reduce the secondary arc extinction time.

First of all, this paper discusses a suggested arc model, which have time dependent resistance for primary arc and piecewise linear approximated arc model for secondary arc. And this simulation technique is applied to Korean 765 kV transmission lines. Also hybrid scheme is simulated and evaluated for the purpose of shortening dead time. For adaptive reclosing scheme, variable dead time control algorithm is suggested. Two kinds of algorithm are tested. One is max tracking algorithm and the other is rms tracking algorithm. According to simulation results, rms tracking has less errors than max tracking. Therefore rms tracking is applied to Korean 765 kV transmission lines with hybrid scheme.

Key Words : Arcing Fault, Secondary Arc, Hybrid Scheme, Adaptive Autoreclosure, Dead Time, 765 kV Lines

1. 서 론

전력계통 안정도와 전력공급 신뢰도 측면에서 전송전력량이 많은 송전계통에서는 송전선로 사고시에 사고를 제거한 뒤 일정기간의 무전압시간(dead time) 이후에 차단기를 재투입하여 송전선을 자동으로 재폐로 한다. 특히 송전선로 사고의 80~90% 이상인 일시적인 1선지락 아크사고의 경우 자동재폐로는 더욱 효과적인 방법이다. 이러한 전력계통의 아크사고는 크게 두 가지로 분류되는데, 차단기 트립 전의 1차아크와 차단기에 의해서 사고가 제거될 때 건전상과 사고상과의 상호 결합에 의해 지속되는 2차아크이다. 특히 2차아크는 최종 소호까지 연속적인 부분 재점호와 소호를 반복하고, 이러한 특성은 성공적인 재폐로 동작에 중요한 변수로 작용한다[1,2].

최근 산업 발전과 생활 수준의 향상으로 급증하는 전력수요에 대처하기 위해서 발전 설비 및 송전 설비의 확충이 이루어지고 있고, 이에 따라 EHV/UHV 송전계통의 운용이 늘어나고 있다. 그런데 전력계통에서 발생하는 2차아크는 송전전압이 높아지고 송전선의 길이가 길어질수록 완전소호까지 소호시간이 길어지게 된다. 따라서 EHV/UHV 송전계통에서 발생하는 사고에 의한 과도응답을 예측하기 위해 보다 정확한 아크모델링 기법이 필요하고, 또한 안전한 재폐로 수행을 위해서는 2차아크를 빨리 소호시키거나 억제시키는 새로운 방법 및 적응적인(adaptive) 재폐로를 위한 보호계전 기법들이 필요하다[3].

아크사고에 의한 전력계통의 과도현상을 실제적으로 컴퓨터 디지털 시뮬레이션하기 위해서는 아크사고의 동적인 특성이 고려되어야 하지만, 2차아크의 랜덤한 성질 때문에 컴퓨터 시뮬레이션으로 실제 여러가지 아크 특성을 만들어 내기는 힘들다. 따라서 많은 연구자들에 의해 여러가지 수학적인 아크모델이 연구되었다[4-13]. 또한, 성공적인 재폐로 수행을 위한 2차아크 소호대책에 대한 연구도 활발히 진행되어 왔다. 특히 미국에서는 4-legged 분로리액터, 일본에서는 고속접지스위치(HSGS)가 사용되고 있다[14]. 한국전력공사에서도 우수한 아크소호 능력을 갖는 고속접지스위치를 765 kV에 적용하였으며, 그 결과를 제시하였다[15]. 이외에 하이브리드 방식(hybrid scheme)이 있다[16]. 또한 적응적 재폐로를 위한 기법들도 제시되었는데, 신경회로망(artificial neural networks)과 웨이브렛 변환(wavelet transform)을 이용한 일시사고와 영구사고 구별 방안이 제시되었고, 계통의 안정도를 평가하여 무전압시간을 제어하는 기법이 제시되었다[17-19].

본 논문에서는 적절한 아크사고의 시뮬레이션을 위해 1차아크 모델은 A.T. Johns와 R.K. Aggarwal이 제시한 수학적 아크모델[10]을 기초로 하고, TACS를 이용한 S. Goldberg의 역병렬 다이오드 모델[8]을 2차아크 모델에 사용하였다. 모델 대상계통은 앞으로 우리나라 전력계통의 중추역할을

* 正 會 員 : 成均館大 電氣·電子 및 컴퓨터工學科 工學碩士
** 正 會 員 : 成均館大 電氣·電子 및 컴퓨터工學部 敎授·工博
接受日字 : 1998年 10月 12日
最終完了 : 1999年 9月 29日

담당할 765 kV 송전선로로 선정하였으며, 2차아크 소호대책으로는 하이브리드 방식을 이용하여 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 아울러, 적응적 재폐로를 위하여 무전압시간을 가변적으로 제어하는 알고리듬을 개발하였다. 개발된 알고리듬은 MODELS를 이용하여 하이브리드 방식을 채용한 765 kV 송전선로에 적용하였으며 그 결과를 제시하였다.

2. 아크사고 시뮬레이션

2.1 아크 모델

전기적인 아크는 물리적인 특성이 매우 랜덤하고 복잡하기 때문에 많은 연구자들이 동적인 특성을 표현하기 위한 수학적인 아크모델에 대해 연구를 하였다. 가장 고전적인 모델로는 Ayrton 방정식이 있고, 그후 Cassie와 Mayr의 모델을 거쳐 Browne이 아크모델을 종합하였다[4].

표 1 1차아크와 2차아크 모델
Table 1 Primary and secondary arc model

발표연도	저 자	1차아크	2차아크
80년 이전		선형 저항	선형 저항
82년	Johns와 Al-Rawi[5,6]	선형 저항	선형화된 근사 아크모델 $V=75I^{0.4}$ [V/cm]
83년	Fakheri[7]	언급 없음	시변 아크저항 (여러 개의 저항을 직렬로 연결)
89년	Goldberg[8]	선형화된 근사 아크모델 $V=75I^{0.4}$ [V/cm] (역병렬 다이오드)	선형화된 근사 아크모델 $V=75I^{0.4}$ [V/cm] (역병렬 다이오드)
94년	Johns와 Aggarwal[9,10]	스위칭 아크방정식 적용	스위칭 아크방정식 적용
97년	전력연구원[11]	언급 없음	시변 아크저항 (TACS 91번 소자)
99년	본 논문	스위칭 아크방정식 적용	선형화된 근사 아크모델 $V=75I^{0.4}$ [V/cm] (역병렬 다이오드)

80년대에 들어오면서 A.T. Johns와 A.M. Al-Rawi가 A.P. Strom의 대기 중의 아크현상을 분석하여 선형화된 근사 아크모델을 발표하였고[5,6], S. Goldberg는 역병렬 다이오드로 선형화된 근사 아크모델을 표현하였다[8]. 1990년대에 들어와 M. Kizilcay에 의해 개폐기의 스위칭 아크방정식이 전력계통의 아크모델에 처음으로 적용되었고[9], A.T. Johns와 R.K. Aggarwal은 M. Kizilcay의 스위칭 아크방정식을 도입하여 개선된 아크모델을 나타내었다[10]. 그 외에 A.J. Fakheri가 가변저항에 의한 2차아크 저항기법을 제안하였고[7], 참고문헌 [11]에서 이를 기초로 TACS type-91번 시변저항소자를 이용하여 2차아크를 시뮬레이션 하였다. 표 1에 현재까지 발표된 1차아크와 2차아크 모델을 나타냈다.

2.2 시뮬레이션 모델 계통

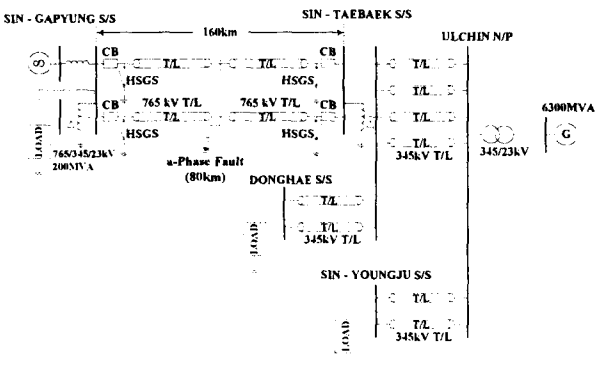

그림 1 765 kV 모델 계통
Fig. 1 765 kV model system

시뮬레이션에 사용된 모델 계통은 현재 2002년 완공을 목표로 건설중인 신가평과 신태백 구간으로 2006년의 예상 최고 부하시 조류계산을 토대로 한 최대 고장전류 50 kA 규모의 765 kV 실계통 송전선로이다. 전체의 계통도는 그림 1과 같다. 선로정수는 모두 EMTP의 line constants routine을 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 울진 원자력 발전소는 S.M.(Synchronous Machine) card를 이용하였고, 조속기계통 및 여자계통은 TACS로 구현하였다. 아크사고는 1회선 a상 지락사고를 선택하였고, 765 kV 송전선로의 중간지점인 80 km 지점에서 사고를 시뮬레이션 하였다[3].

2.3 아크사고 시뮬레이션 기법

2.3.1 제안된 아크사고 시뮬레이션 기법

제안된 아크사고 시뮬레이션 기법에서 1차아크 모델은 Johns와 Aggarwal의 아크모델[10]을 적용하였다. 수학적인 모델에 따라서 컨덕턴스 아크방정식을 계산해 아크저항을 구하고 이 값을 TACS type-91번 시변저항소자의 값으로 사용하여 1차아크를 시뮬레이션 하였다. 2차아크 모델은 선형화된 근사 아크모델을 역병렬 다이오드 모델[8]로 표현하였다. 1차아크와 2차아크 현상을 시뮬레이션하기 위한 전체 diagram을 그림 2에 도시하였다.

본 논문에서는 아크의 동적 전도특성 뿐만 아니라 각각의 모델과 스위칭 동작 인터페이스를 MODELS 루틴을 이용하여 EMTP 입력 데이터 카드 내에 통합 구현하였다. 즉, 각각의 수학적인 모델을 MODEL ~ ENDMODEL 형식의 MODELS 고유기능인 submodel을 이용하여 각 모델들간에 인터페이스가 구현되도록 시뮬레이션 하였다. 특히 2차아크의 시뮬레이션 과정 중에 주목해야 할 점은 아크 전류가 제로가 되더라도 사고지점의 아크 에너지전압이 계통의 재점호전압보다 클 경우에는 아크의 재점호가 가능하므로, AND 논리게이트를 사용하여 최종 2차아크 소호 판단이 가능하도록 구성하였다[12,13,20].

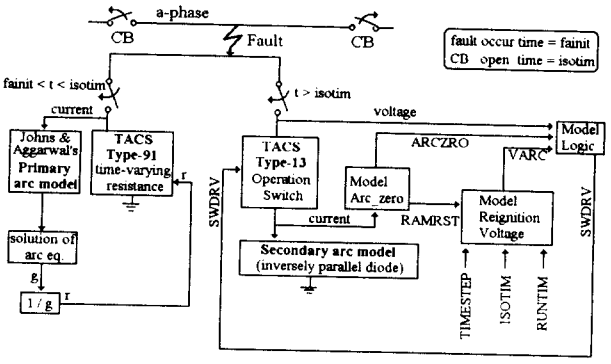

그림 2 아크모델의 전체 diagram

Fig. 2 Total diagram of arcing faults simulation

2.3.2 아크사고 시뮬레이션 결과 및 고찰

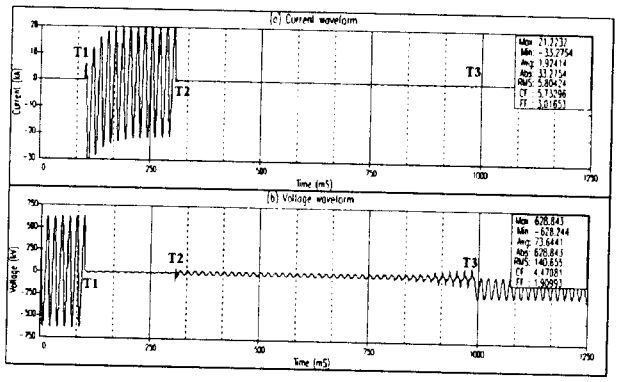

그림 3 사고지점의 전류 및 전압파형

Fig. 3 Voltage and current waveforms at fault point

그림 3은 전체 시뮬레이션과정 동안의 (a)사고지점의 전류파형 및 (b)전압파형을 보여주고 있다. 현재 시뮬레이션된 시간은 1차아크와 2차아크가 정확한 특성을 가지고 있는지, 즉 적절히 시뮬레이션이 되었는지 알아보기 위해 적당한 시간을 주었다. 시간 T1은 사고발생시간(0.1초), 즉 1차아크 발생시간, T2는 차단기 트립으로 1차아크가 제거되는 2차아크 전도 시작시간(0.3초), T3는 2차아크 자연 소호시간(약 0.99초)이다.

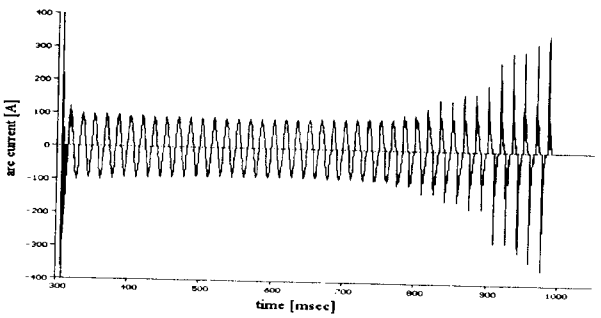

그림 4 2차아크 전류파형

Fig. 4 Waveform of secondary arc current

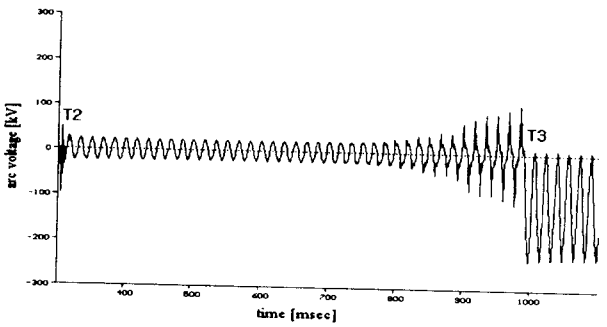

그림 5 2차아크 전압파형

Fig. 5 Waveform of secondary arc voltage

그림 4와 5는 2차아크 부분만 확대한 2차아크 전류 및 2차아크 전압파형이다.

그림 6과 7은 각각 1차아크와 2차아크의 전압-전류 특성곡선을 나타내었는데, 참고문헌 [10]과 유사하게 시뮬레이션 되었음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 아크사고 시뮬레이션 기법의 타당성을 입증하였다.

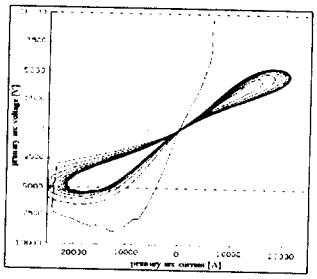

그림 6 1차아크 V-I 특성곡선

Fig. 6 V-I characteristics of primary arc

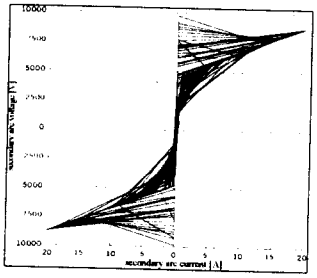

그림 7 2차아크 V-I 특성곡선

Fig. 7 V-I characteristics of secondary arc

3. 무전압시간과 2차아크 소호 대책

3.1 자동재폐로의 무전압시간

외국의 통계를 보면 송전선의 전체 사고 중 재폐로 성공률은 57% 정도이며 인위적인 재송전까지 포함시키면 성공률은 95%에 달해 그 효과는 매우 크다. 그러므로 송전선에서의 재폐로방식은 오래 전부터 사용되어 왔다.

그림 8은 재폐로 동작에 관계되는 보호계전기, 차단기 및 재폐로 계전기의 동작을 송전선 한 단자에 대해서 시간별 순서로 나타낸 것이다. 차단기는 보호계전기의 동작으로 시동되며, 차단기 트립으로 무전압이 된 후 2차아크가 소호되기를 기다렸다가 재폐로 계전기가 차단기에 투입지령을 내려 재폐로를 시킨다. 이 때 재폐로시간(reclosing time)은 사고발생 시부터 재폐로에 의해 양측 차단기가 폐로할 때까지의 총시간을 말하고, 무전압시간(dead time)은 차단기 트립 후 무전압이 된 순간부터 이온화 되었던 공기가 소이온화되고 공기의 절연이 회복되어 통전을 위한 차단기의 재투입이 완료되었을 때까지의 시간을 말한다.

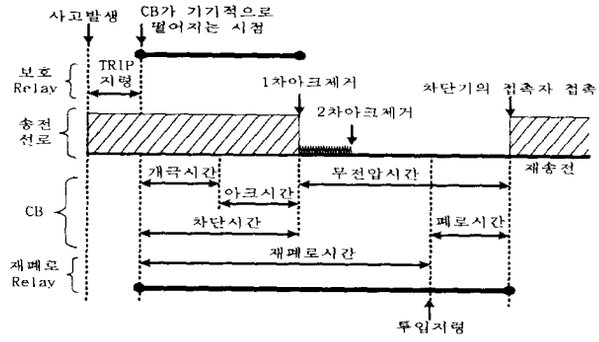

그림 8 재폐로 동작 시퀀스

Fig. 8 Operating sequence of reclosure

일반적으로 무전압시간을 줄이고 재투입시간을 빠르게 하는 것이 계통의 안정도 향상을 위해 유리하지만, 너무 빠르면 전압을 인가하였을 때 아크가 재점호할 우려가 있어 반드시 완전한 아크소호가 확인되어야 한다. 실험적으로 소요되는 최소의 무전압시간은 다음 식 (1)을 사용하여 산출할 수 있다[1,2].

$$t = 10.5 + \frac{kV}{34.5} \ [\text{cycles}] \qquad (1)$$

여기서, kV는 계통의 정격전압이다.

3.2 하이브리드 방식 및 시뮬레이션 결과

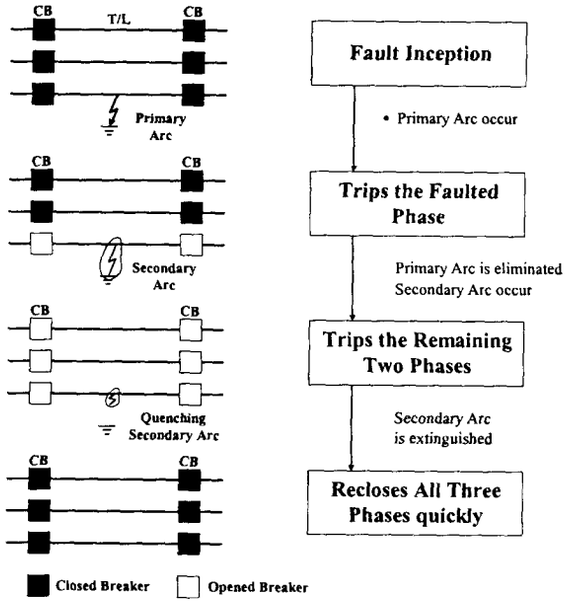

그림 9 하이브리드 방식의 동작순서

Fig. 9 Operating sequence of hybrid scheme

하이브리드 방식은 사고상을 트립하고 일정한 시간이 지난 후에 나머지 건전상인 2상을 트립하고 빠른 시간 내에 3상을 재폐로 하는 방법이다. 그림 9는 하이브리드 방식의 동작순서를 각 단계별로 설명한 그림이다. 이 방식은 단상 재폐로 방식에 나타나는 긴 2차아크의 지연을 건전상인 2상의 일시 트립으로 줄일 수 있다. 기본적으로 단상재폐로 방식이기 때문에 트립시의 초기충격은 사고상의 전력에만 영향을 미치며, 나머지 2상의 트립시 계통의 충격은 3상을 전부 트립시키는 경우 받는 충격의 반 정도 밖에 되지 않는다. 또한 3상사고 발생시에는 3상재폐로방식이 적용되는 것과 같다. 그러나 하이브리드 방식은 사고상과 건전상의 차단시간이 계통구성을 고려하여 적절히 정해져야 한다는 단점을 가지고 있다[16].

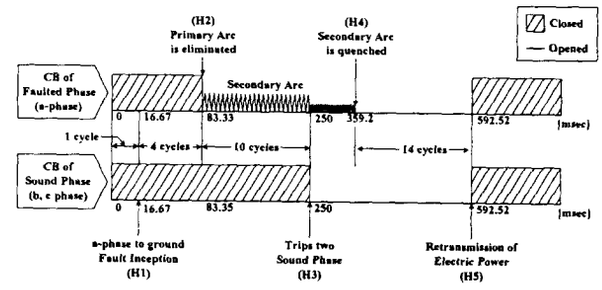

그림 10 전체 시뮬레이션 동작시간

Fig. 10 Operating timings of total simulation

하이브리드 방식에서 중요한 두 가지 사항은 사고상을 제거한 후 건전한 나머지 2상을 제거하기까지의 지연시간과 2차아크가 소호한 후에 재폐로 되는 시점까지의 시간이다. 사고상과 건전상의 동작여부와 동작시간을 그림 10에 나타냈다.

1 cycle이 지난 후에 사고가 발생하고(H1) 4 cycle 동안 주보호계전기가 동작하여 H2에서 사고가 차단이 된다. 이 시점부터 2차아크가 발생하기 시작한다. 건전상의 차단기가 트립 되기까지의 10 cycle은 사고상의 차단기가 확실히 트립 되었는지 확인하고 건전상의 차단기를 여자하는데 필요한 시간이다. H3에서 나머지 건전상의 차단기가 트립이 되면 다음 그림 11에서 보는 바와 같이 2차아크의 크기는 매우 감소하고 0에 머무르는 시간도 길어지게 되는데 H4 지점인 약 0.359초에서 2차아크가 완전히 소호하는 것을 알 수 있다. 따라서 H4 지점부터 다시 재폐로가 이루어질 수가 있으나 사고점의 공기 절연회복과 차단기 동작시간을 고려하여 14 cycle 뒤인 0.59252초에 재폐로가 되었다.

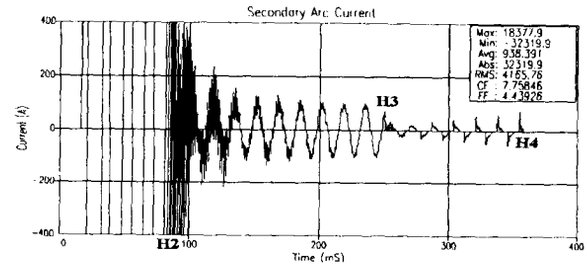

그림 11 하이브리드 방식 적용시의 2차아크 전류

Fig. 11 Secondary arc current waveform when hybrid scheme is adopted

그림 12는 0.5초에서 재폐로 된 경우의 사고지점의 전류이다. 이 때는 이온화 되었던 공기가 아직 소이온화 되지 않아서 사고지점의 아크 에너지전압이 재점호전압보다 크게 되어 사고지점의 아크가 매우 큰 값을 가지면서 재점호하게 된다.

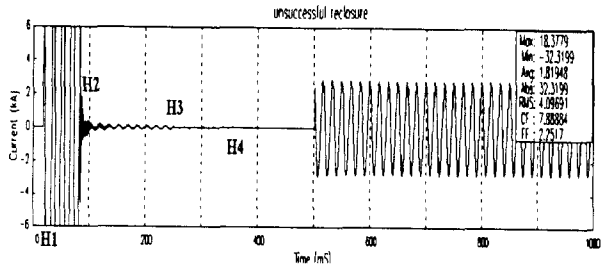

그림 12 재폐로 실패시의 재점호한 아크전류 파형

Fig. 12 Reignited arc current waveform when reclosure fails

표 2에 765 kV 선로 중간지점인 80 km와 양단지점인 신태백과 신가평에서 사고가 발생하였을 때 2차아크 자연소호시간을 하이브리드 방식을 적용한 결과와 비교하여 나타냈다. 결과에서 볼 수 있듯이 사고지점이 신태백에서 멀어질수록 아크 자연 소호시간이 약간씩 증가함을 볼 수 있고, 2차아크 소호대책으로 하이브리드 방식을 채용함으로써 신속하게 2차아크가 소호됨을 알 수 있다.

표 2 2차아크 소호시간 비교

Table 2 Comparison of secondary arc extinction time

Fault Location [km] (사고지점)	Secondary Arc Extinction Time [msec]	
	Auto-Extinction	Hybrid Scheme
0 (신태백 사고)	713.57	343.16
80 (중간지점)	772.23	359.2
160 (신가평 사고)	840.13	400.44

4. 적응적 자동재폐로 대책

4.1 가변 무전압시간 제어 알고리듬

계통의 고장해석에 있어서 계전점에서의 정보는 매우 중요하다. 왜냐하면 계전점에서의 전압과 전류를 이용하여 사고검출, 고장거리 추정, 사고발생각 등 여러가지 계통에 관련된 상황을 파악할 수 있기 때문이다. 또한 정확한 정보를 위해 CT, PT 또는 CVT를 통해 A/D 변환기를 거쳐 저장되는 전압 및 전류 파형은 aliasing 방지와 고조파 성분의 제거를 위해 저역통과필터(low pass filter)를 통과하게 된다. 일반적으로 디지털 계전기에는 2차 butterworth 저역통과필터가 사용된다.

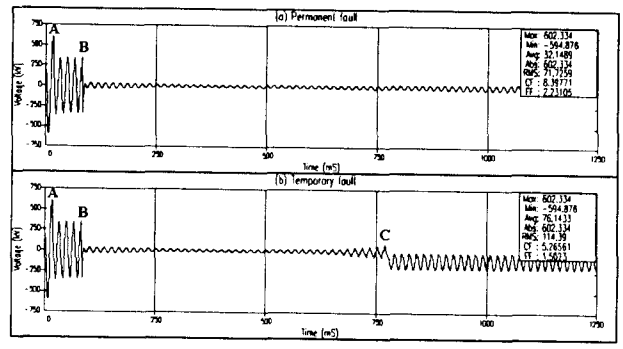

그림 13 전형적인 일시사고와 영구사고의 전압파형

Fig. 13 Typical temporary and permanent fault voltage waveforms

그림 13은 영구사고와 일시사고 두 가지 경우의 사고상 계전점에서의 전압파형이다. 그림 13(a)의 영구사고 파형에서 A지점에 사고가 발생하면 전압이 약간 감소하게 되고, B지점에서 차단기가 동작을 하여 사고를 차단하게 되는데, 이 시간 이후에도 미소한 값을 갖는 계통전압이 사고상에 유기되어 일정한 크기를 지속하게 된다. 반면에 그림 13(b)의 일시사고 발생시에는 B지점에서 사고 차단 이후에 2차아크가 형성이 되고 재점호와 소호를 반복하게 된다. 이러한 2차아크의 전도특성에 의해서 2차아크 소호까지 비선형적인 전압이 나타나고 2차아크가 완전히 소호한 C지점 이후에는 계통의 회복전압이 나타나게 된다. 그런데 자동재폐로 방식은 일시적인 사고가 발생했을 때 매우 유효하므로 그림 13(b)의 계전점 전압파형을 분석함으로써 2차아크 소호시간을 파악하고 재폐로를 투입함으로써 무전압시간을 고정시키지 않고 가변적으로 제어하는 적응적인 재폐로가 가능하다. 따라서 본 논문에서는 무전압시간을 가변적으로 제어할 수 있는 알고리듬을 제시하였다. 또한, 제시된 알고리듬을 EMTP내의 MODELS에서 계통의 데이터와 연계하여 통합 구현하였다.

4.1.1 실효값 추적 알고리듬 (Rms Tracking Algorithm)

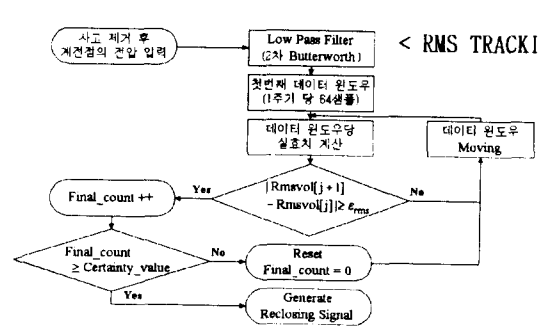

그림 14 실효값 추적 알고리듬 흐름도

Fig. 14 Flow chart of rms tracking algorithm

그림 14는 실효값 추적 알고리듬의 흐름도이다. 실효값 추적 알고리듬의 입력은 저역통과필터를 통과한 사고제거 후의 계전점 전압파형이다. 먼저 64 샘플을 데이터 윈도우

로 정하여 데이터 윈도우 구간의 실효값을 구하고 데이터 윈도우를 moving 시켜 실효값의 차이를 추적함으로써 2차 아크 소호시간을 검출하였다. 그림 15에는 실효값을 추적한 결과를 나타내었다. 2차아크가 소호한 지점에서 전압이 회복되면서 실효값이 급격히 증가하는 것을 알 수가 있다. 따라서 이 시점을 알아내기 위해 실효값의 이전 샘플과 현재 샘플의 차를 구하여 그 차이값이 설정치 이상이면 2차아크 완전소호로 판단하게 된다. 그림 16은 두 실효값의 차이값을 보여주고 있다. 또한 2차아크가 재점호하는 경우 잘못된 소호 판별을 방지하기 위하여 확신값(certainty_value)을 설정하여 알고리듬을 구성하였다.

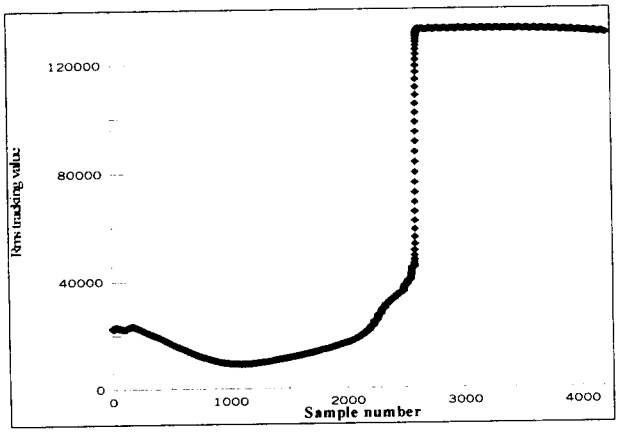

그림 15 실효값 추적 결과
Fig. 15 Tracked data of rms value

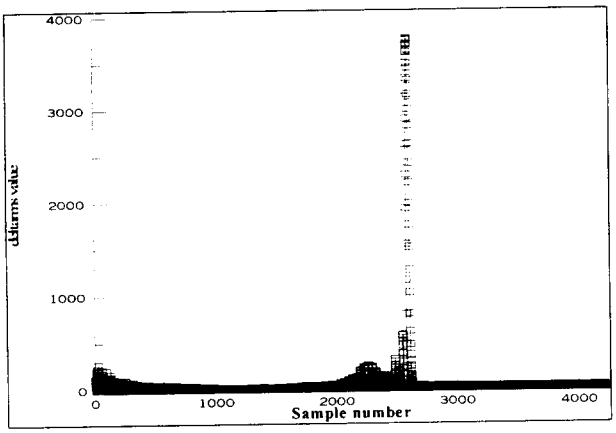

그림 16 두 실효값의 차이값
Fig. 16 Difference between rmsvol[j+1] and rmsvol[j]

4.1.2 최대값 추적 알고리듬 (Max Tracking Algorithm)

최대값 추적 알고리듬은 실효값 추적 알고리듬과 입력부의 전처리 과정을 제외하면 유사하다. 최대값만 추적하기 때문에 모든 입력데이터를 절대치로 계산해 주는 과정이 필요하다. 그림 17은 최대값 추적 알고리듬의 흐름도이다. 그림 18과 19는 각각 최대값의 추적 결과와 두 최대값의 차이값을 나타낸 그래프이다.

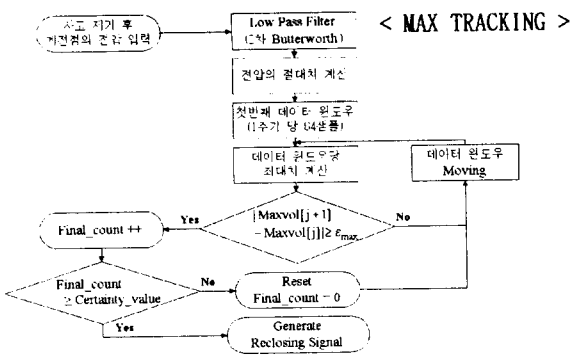

그림 17 최대값 추적 알고리듬 흐름도
Fig. 17 Flow chart of max tracking algorithm

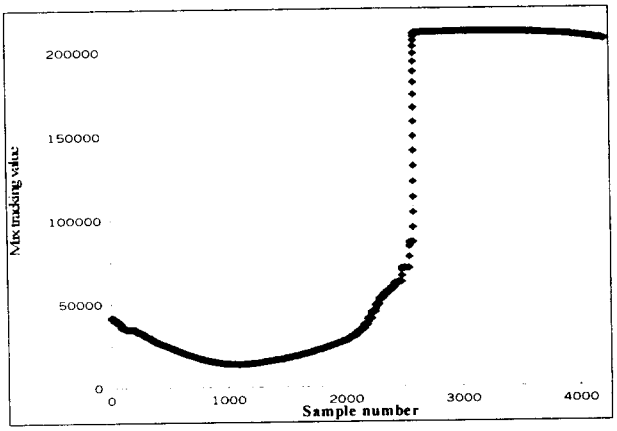

그림 18 최대값 추적 결과
Fig. 18 Tracked data of max value

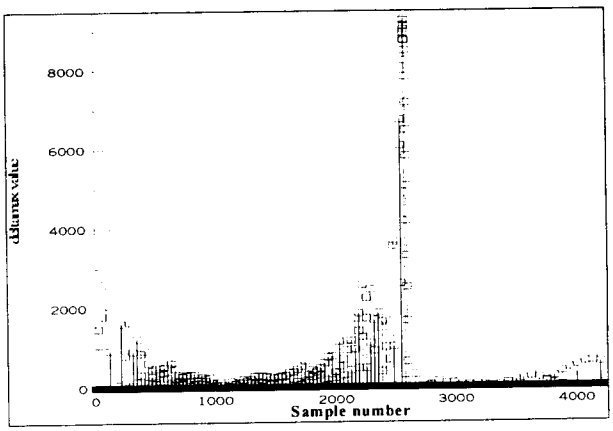

그림 19 두 최대값의 차이값
Fig. 19 Difference between maxvol[j+1] and maxvol[j]

그림 16과 19를 비교해 보면 최대값의 두 샘플의 차이값들이 불규칙적인 반면에 실효값의 차이값들은 전체적으로 규칙적이고 소호지점에서만 높은 값이 나타나므로 실효값 추적 알고리듬이 보다 정확할 것으로 추정된다. 그러므로 2차아크가 자연 소호하는 경우에 765 kV 모델 계통의 세 가지 사고에 대해 최대값 추적 알고리듬과 실효값 추적 알고리듬을 적용시켜 보았다.

표 3 실효값 추적 알고리듬을 이용한 2차아크 소호 시간 추정

Table 3 Estimation of secondary arc extinction time by rms tracking algorithm

사고 지점	실제 2차아크 소호시간 [sec]	알고리듬 추정 결과	오 차	오차율 [%]
신태백 사고 (0 km)	0.73157	0.73198	0.00041	0.056
중간 지점 (80 km)	0.77224	0.77235	0.00011	0.0142
신가평사고 (160 km)	0.85588	0.85541	0.00047	0.0549
평균 오차	0.00033	평균 오차율	0.0417 %	

다음 표 3과 표 4는 각각의 알고리듬을 이용한 2차아크 소호시간 추정 결과이다. 본 논문에서 사용된 확신값은 5, 실효값의 샘플차이값 설정치는 3100, 최대값의 샘플차이값 설정치는 8000이다. 최대값 추적 알고리듬을 사용하면 오차율이 약 0.855%로 실효값 추적 알고리듬 오차율인 0.0417 %보다 약 20배 이상이나 오차가 크다. 따라서, 실효값 추적 알고리듬을 사용하여 765 kV 송전선로 모델계통에 적용한 결과를 4.2절에 제시하였다.

표 4 최대값 추적 알고리듬을 이용한 2차아크 소호 시간 추정

Table 4 Estimation of secondary arc extinction time by max tracking algorithm

사고 지점	실제 2차아크 소호시간 [sec]	알고리듬 추정 결과	오 차	오차율 [%]
신태백 사고 (0 km)	0.73157	0.73823	0.00666	0.91
중간 지점 (80 km)	0.77224	0.77886	0.00662	0.857
신가평사고 (160 km)	0.85588	0.86271	0.00683	0.798
평균 오차	0.0067	평균 오차율	0.855 %	

4.2 765 kV 송전선로 적용 결과

본 논문에서 제시된 가변 무전압시간 제어 알고리듬을 하이브리드 방식 765 kV 모델 계통에 적용하였다. 제시된 알고리듬의 입력 데이터로 계전점의 전압을 사용하였다.

그림 20은 하이브리드 방식을 적용한 계통에서 저역통과 필터를 통과한 계전점의 전압파형이다. 사고상의 차단기가 트립 될 때 전압이 약간 감소하나 알고리듬에 영향을 미칠 정도는 아니며, 건전상의 나머지 차단기를 트립함으로써 2차아크가 소호되어 전압이 회복되므로 실효값 추적 알고리듬을 적용할 수 있다. 이렇게 2차아크의 소호가 판별되면 재폐로 동작을 위한 지연시간 14 cycle 후에 재폐로 된다.

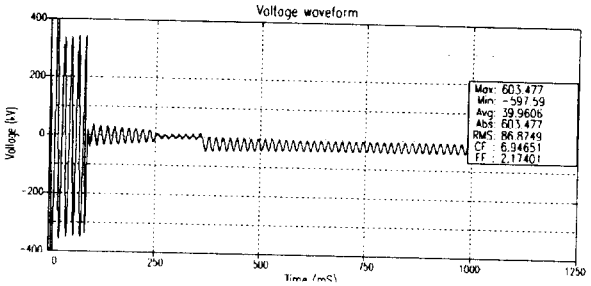

그림 20 하이브리드 방식 적용시 계전점에서의 전압파형

Fig. 20 Voltage waveform at relaying point when hybrid scheme is adopted

이러한 계통 전체의 흐름을 그림 21에 나타내었다. 먼저 차단기의 전압파형을 읽어들인 후 A/D 변환기와 저역통과 필터를 거쳐서 디지털화 된 값은 가변 무전압 제어 알고리듬의 입력으로 들어가게 된다. 프로세서 내에서 알고리듬을 수행한 뒤 적절한 재폐로시간이 결정되면 재폐로 계전기의 여자를 제어하여 알고리듬에 의해 정해진 시간에 재폐로 계전기가 동작하게 하고 이 재폐로 계전기에 의해 차단기가 닫히면서 계통의 복구가 완료하게 된다.

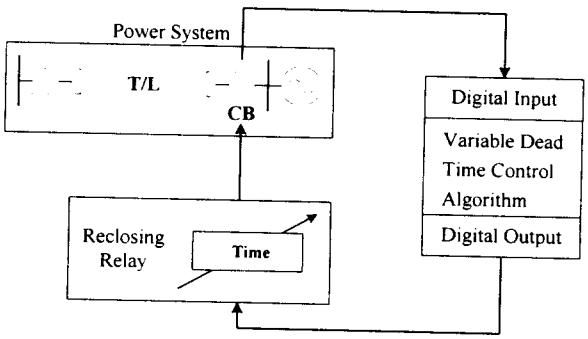

그림 21 가변 무전압시간 재폐로방식

Fig. 21 Variable dead time reclosing method

표 5 실효값 추적 알고리듬에 의한 가변 무전압시간

Table 5 Variable dead time by rms tracking algorithm

사고 지점	실제 2차아크 소호시간 [sec]	알고리듬 추정 결과	재폐로 투입시간	오차율 [%]
신태백 사고 (0 km)	0.34316	0.34373	0.5770484	0.66
중간 지점 (80 km)	0.3592	0.35909	0.5924084	0.03
신가평사고 (160 km)	0.40044	0.40102	0.6343384	0.145

표 5는 각 사고에 대한 가변 무전압시간을 나타낸 것이다. 이러한 가변 무전압시간 방식으로 재폐로를 하면 항상 고정된 차단책무와 달리 여러가지 사고종류에 따라서 무전

압시간을 결정하므로서 적응적인 재폐로를 수행할 수 있다.

그림 22는 신태백사고와 신가평사고가 서로 다른 재폐로 투입시간을 갖는 것을 보여주고 있다. 신태백사고의 경우 재폐로 투입시간이 약 0.577 초이고 신가평사고의 경우 약 0.634 초이므로 0.057 초 차이가 난다. 따라서 향후 계통전압이 높아지고 선로의 길이가 길어질수록 이러한 무전압시간은 증가할 것이며, 따라서 가변 무전압시간 재폐로방식은 전력계통의 안정성 및 신뢰성 제고에 기여할 것이다.

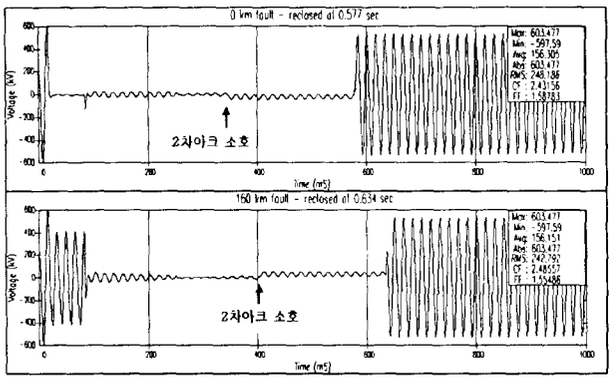

그림 22 가변 무전압시간 재폐로방식을 이용한 적응적 재폐로파형

Fig. 22 *Adaptive reclosure waveform using variable dead time reclosing method*

5. 결 론

우리나라는 2002년경 765 kV 송전선로의 운전을 개시할 것으로 전망하고 있다. 고압화 및 송전용량의 증대에 따라 보호장치의 동작신뢰도도 제고되어야 할 것이다. 특히 765 kV 송전계통에서는 2차아크의 자연 소호를 기대하기 어렵고, 사고시의 계통연계 확보를 위해서 고속도 재폐로방식의 채용이 불가피하므로, 2차아크의 소호시간을 단축해서 재폐로시간을 확보할 필요가 있다.

본 논문에서는 우리나라 765 kV 송전선로 아크사고 시뮬레이션 및 적응적인 재폐로를 위한 자동재폐로 대책을 제시하였다. 2차아크 소호 대책으로는 하이브리드 방식이 채용되었으며, 하이브리드 방식을 채용한 경우에는 사고상만 미리 차단하고 나머지 건전상을 트립하면 2차아크의 크기도 줄어들면서 소호도 빨리 이루어지는 결과를 확인 할 수 있었다. 적응적 재폐로를 위한 방법으로는 계전점의 전압정보를 이용하여 2차아크의 소호를 검출하고, 재폐로 계전기를 동작시키는 가변 무전압시간 제어 알고리듬을 제시하였다. 가변 무전압시간 제어 알고리듬으로 최대값 추적과 실효값 추적 알고리듬을 제안하였으며, 오차율이 적은 실효값 추적 알고리듬을 이용하여 하이브리드 방식 765 kV 송전선로에 적용하였다. 시뮬레이션 결과 가변 무전압시간 제어 알고리듬은 서로 다른 사고에 대해 다른 시간에 재폐로 되는 적응적 재폐로동작 결과를 보여주었다.

추후, 하이브리드 방식에 대한 연구가 보완된다면, 새로운 아크소호기법 및 적응적 자동재폐로 대책 수립에 기여할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Walter A. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications", ABB Power T&D Company Inc. pp. 333-343, 1994.

[2] 신대승, "保護繼電 시스템 技術", 技多利, pp. 229-236, 1993.

[3] 한국전력기술주식회사, "종합 용역 보고서(계통특성 관련 765 kV 설비제원 검토)", pp. 84-100, 1995.

[4] Ruben D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers", Marcel Dekker Inc., pp. 2-18, 1997.

[5] A.P. Strom, "Long 60-cycle Arcs in Air", AIEE Trans. vol. 65, pp. 113-117, 1946.

[6] A.T. Johns, A.M. Al-Rawi, "Digital Simulation of EHV Systems under Secondary Arcing Conditions associated with Single-Pole Autoreclosure", IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., vol. 129, no. 2, pp. 49-58, March 1982.

[7] A.J. Fakheri, T.C. Shuter, J.M. Schneider, C.H. Shih, "Single-Phase Switching Tests on the AEP 765 kV System -Extinction Time for Large Secondary Arc Currents", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-102, no. 8, pp. 2775-2783, August 1983.

[8] 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, pp. 586-594, January 1989.

[9] M. Kizilcay, T. Pniok, "Digital Simulation of Fault Arcs in Power Systems", ETEP., vol. 1, no. 1, pp. 55-60, January 1991.

[10] 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, pp. 148-154, March 1994.

[11] 한국전력공사 전력연구원, "전력선 자동재폐로 방식 개선에 관한 연구(최종보고서)", pp. 372-382, 1998. 3.

[12] 김철환, 안상필, "EMTP MODELS를 이용한 2차아크 모델링 기법에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (C), pp. 1217-1219, 1998. 7.

[13] C.H. Kim, S.P. Ahn, "A Study on the Arc Modeling in Transmission Lines using EMTP", IPEC '99, Singapore, vol. I, pp. 52-57, May 1999.

[14] P.O. Geszti et al., "Problems of Single-Pole Reclosing on long EHV Transmission Lines", CIGRE 33-10

[15] 한국전력공사 송변전처, "765 kV HSGS의 적용", 1999. 1.

[16] Western System Coordinating Council, "Dispatcher Manual of Single-Pole Relaying"

[17] A.T. Johns, R.K. Aggarwal et al., "Design and Implementation of an Adaptive Single Pole Autoreclosure Technique for Transmission Lines using Artificial Neural Networks", IEEE TPD., vol. 11, no. 2, pp. 748-755, April 1996.

[18] 김일동, 박종근, "신경회로망을 이용한 On-line 과도안정도 평가에 의한 자동재폐로 무전압시간 제어", 대한전기학회논문지, 제45권, 6호, pp. 779-787, 1996. 6.
[19] I.K. Yu, Y.H. Song, "Wavelet Analysis and Neural Network based Adaptive Single Pole Autoreclosure Scheme for EHV Transmission Systems", Electric Power and Systems, vol. 20, no. 7, pp. 465-474, October 1998.
[20] Laurent Dubé, "Users Guide to MODELS in ATP(New Version)", April 1996.

저 자 소 개

안 상 필(安 相 泌)
1972년 10월 19일 생. 1997년 성균관대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학교 대학원 전기 전자 및 컴퓨터공학과 졸업(공학석사)
Tel : (0331) 290-7166
E-mail : altruism@chollian.net

김 철 환(金 喆 煥)
1961년 1월 16일 생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 성균관대 전기 전자 및 컴퓨터공학부 교수. 영국 University of Bath, Visiting Academic (1996, 1998, 1999)
Tel : (0331) 290-7124
E-mail : chkim@yurim.skku.ac.kr