

혼합배전계통에서 EMTP/ATPDraw를 이용한 개폐서지 해석

이 장 근\* , 이 중 범 , 이 재 봉 , 김 병 속  
 원광대                              전력연구원

A Study and Analysis on the Switching Surge Using EMTP/ATPDraw in Combined Distribution Systems

Jang Geun Lee\* , Jong Beom Lee, Jae Bong Lee, Beong Suk Kim  
 Wonkwang University                              KEPRI

**Abstract** - This paper describes switching overvoltage generated during transient state in 22.9kV combined distribution systems. For analysis, distribution overhead line, underground cable and surge arrester are modeled using EMTP/ATPDraw. Simulation results show switching overvoltage according to various kind of parameter and systems such as closing angle and cable length.

2. 본 론

1. 서 론

최근 도심지의 인구 집중 현상에 따른 도심지 전력수요의 급격한 증가로 인하여 전력계통의 중설이 요구되고 있으나 도심지 미관을 고려하고 인구 밀집 지역 내의 원활한 전력 수급 및 가공선로 건설부지 확보의 어려움을 해결하기 위하여 지중배전계통 및 혼합배전계통도 더불어 증대하고 있다. 이처럼 급속히 확장되고 있는 지중시스템의 고신뢰도 운전을 위해서는 계통에 발생되는 각종 서지에 대한 합리적이고 정확한 해석이 이루어져야 하며, 이를 통해 적절한 보호 대책을 수립하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 전력계통에서 발생하는 서지는 가공선로에서 침입한 뇌서지(Lightning surge), 차단기 동작으로 인한 개폐서지(Switching surge), 지락이나 부하 차단으로 인해 발생하는 일시 과전압 및 각종 과도현상으로 인한 과전압이 계통에 발생하게 된다. 이와 같은 현상에 의하여 발생한 과전압은 전기적 외란에 민감한 부하에 악영향을 주게 되고 또한 그 크기에 따라 지중배전케이블에 절연연파괴의 원인이 될 뿐만 아니라 더 나아가서는 케이블 절연파괴의 원인이 되어 정전사고를 유발시키기도 한다.

지중케이블은 자기 회복이 되지 않으며 케이블의 BIL은 케이블의 노화로 인해 감소 될 수 있어 케이블의 고장을 억제하기 위해서는 지중배전계통은 물론 혼합배전계통에서 과전압을 해석하는 것은 계통의 상황을 파악하고 보호하여 고신뢰도 운전을 확보한다는 차원에서 매우 중요하다고 하겠다[1,2]. 이처럼 케이블이 포함된 선로는 가공선로로 구성된 선로보다 더 엄격한 기준에 의해서 설계 되어야 하며 이러한 평가를 수행하는데 있어 현장 실험이 가장 정확한 방법이나 이와 같은 방법은 실험이 어렵고 경제적인 문제로 인하여 실험이 제한된다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 운전 중인 실제 혼합배전계통을 EMTP/ATPDraw를 이용하여 모델링을 하고 연속적으로 스위칭 시간을 변화시키면서 확률적 과전압을 계산하는 통계적 해석 방법을 이용하여 차단기 동작시 혼합배전선로의 과전압에 대하여 해석하였다.

2.1 모델링

본 논문에서는 22.9kV 혼합배전선로를 500m의 가공선로와 3km의 지중선로를 EMTP/ATPDraw를 이용하여 모의하였다. 모델링에서의 개폐 위치는 지중선로와 가공선로와의 접속점에서 동작하였다. 혼합배전선로의 데이터들은 국내에서 운용중인 실제 계통의 데이터를 사용하였다.

2.1.1 전원측 모델

154kV 송전선로부터 변압기를 통해 22.9kV 배전선로에 전력을 공급하는 전원을 그림 1과 같이 모의하였고 전원은 이상적인 3상 정현파 전압원으로 모의하였으며, 전원측의 전원 임피던스는 154kV측 모선 임피던스를 고려하여 R,L이 상호 결합한 형태로 모의하였다[4]. 그림 1에서 E<sub>s</sub>는 등가 전원 Z<sub>0</sub>, Z, Z는 각각 영상분 임피던스, 정상분 임피던스, 역상분 임피던스를 나타낸다.

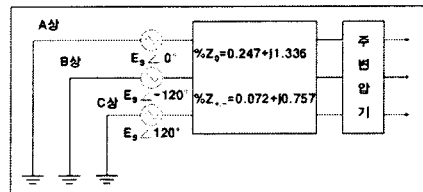


그림 1 전원측 모델 ( 154/22.9kV )

2.1.2 혼합배전선로 구성

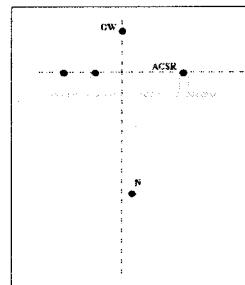


그림 2. 가공선로 장주도

그림 2는 가공선로의 기본 장주도이며 1회선용 모의하였고 가공선로의 선종은 가공지선은 ACSR 32mm<sup>2</sup>, 상도선은 ACSR 160mm<sup>2</sup>, 중성선은 ACSR 95mm<sup>2</sup>를 적용하였다. 가공선로의 선로정수는 분포정수 선로로 모델

링 하였으며 EMTP/ATPDraw의 선로정수 계산 프로그램인 ATP-LCC를 이용하여 계산하였다[1,5].

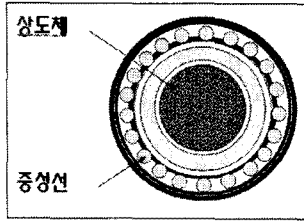


그림 3. 케이블 모델

지중 선로를 구성하는 전력 케이블은 선로의 매설 방법, 선로의 배치, 선로의 구조에 따라 다르며, 매설 방법에는 직매식, 관로식, 전력구식이 있으며 직매식은 지중 선로 공사의 초창기에 시행 되어 졌으나 점차로 사라지는 추세이며 현재 관로식이 주를 이루고 있다. 본 논문에서는 (수밀형)케이블 CNCV-W와 (난연형)케이블 FR-CNCO-W를 삼각배열 형태로 관로식과 전력구식으로 모의 하였으며 그림 3은 CNCV-W와 FR-CNCO-W의 구조를 나타낸 것이다. 그림 4, 5는 매설 방식에 따라 관로와 전력구의 케이블 배치를 나타내었다[7,12].

그림 5내의 숫자는 케이블 포설시 순서를 나타내며 위의 순서에 따라 포설을 하도록 규정되어 있다.

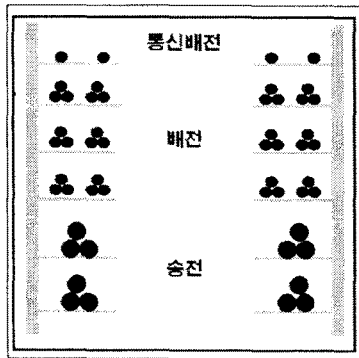


그림 4. 전력구내 케이블 배치도

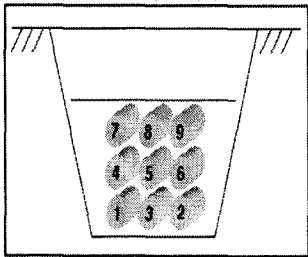


그림 5. 관로 케이블 배치도

접지방식은 현재 배전선로에서는 22.9kV 3상 4선식 다중 접지방식을 채택하고 있고 선로용 케이블의 동심 중선선은 접지개소마다 각심 일괄하여 합성 저항 값 5Ω/km 이하를 유지한다[8].

$$R = 1.2 \times \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_n}\right)} \quad (1)$$

여기서, R 은 합성 저항 값이며  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$  은 매 접지점의 접지저항 값을 나타낸다.

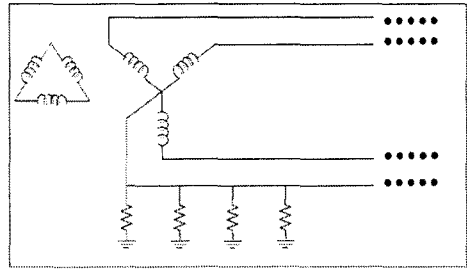


그림 6. 다중 접지 모델

본 논문의 접지저항 치는 설계기준과 식(1)에 따라 가공지선의 접지 저항 값은 200m 마다 16.7Ω을 적용하였으며 지중케이블의 접지 저항 값은 250m 마다 16.7Ω을 적용하였다[6].

### 2.1.3 혼합배전선로 모델링

차단기에 의해서 발생하는 과도현상을 분석하기 위하여 시스템 모델링을 그림 7과 같이 혼합배전선로로 구성하였다. 선로는 3상 4선식이며 중선선은 다중접지 되어 있다[11].

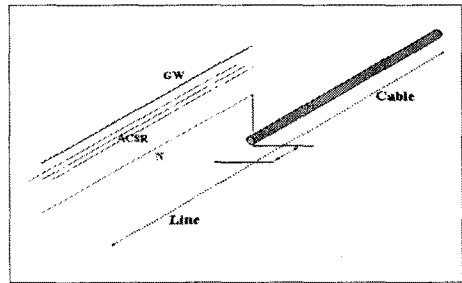


그림 7. 혼합 배전 선로 모델링

## 2.2 시뮬레이션

### 2.2.1 통계적 해석방법

Monte Carlo 기법은 선로나 변전소에 침입하는 개폐 과전압과 뇌 과전압 등의 해석시 확률 분포를 적용하여 계산하는 기법이다. 통계적인 해석방법은 EMTP의 Miscellaneous 데이터 카드에서 반복 계산횟수를 지정하고 "STATISTICS" 스위치를 조합하여 과전압을 해석하는 방법으로 무작위로 개폐기 투입시간을 선정하여 최대 과전압을 계산하는 기법이다. 일반적으로 개폐과전압의 크기는 차단기의 투입 혹은 재투입되는 시점에서 교류전압의 위상차에 따라 변화한다. 그러므로 각 상의 차단기 투입되는 시점의 위상별로 투입서지를 분석하기 위해서는 0 ~ 360도 사이의 Random Number를 선택하고, Gaussian 분포 또는 Uniform 분포 등의 통계적인 확률 분포를 이용해 표준편차(σ)에 따라 무작위로 투입시간을 반복하여 개폐 과전압을 계산하여야 한다.[3,9,10,13,14.] 그림 8은 통계스위치의 확률 분포에 따른 Gaussian 분포 또는 Uniform 분포 형태를 나타내었다.

통계스위치의 투입시간은 그림 8의 Gaussian분포에 따라서 무작위로 변화 시켰으며 차단기의 평균 투입시간은 0.0165s 이며 표준편차는 1ms로 설정하고 투입시간 분포에 따라 200회의 반복계산을 하였다. 초기상태에서는 항상 개방되어 있으며 투입된 이후 다시 개방되지 않는다.

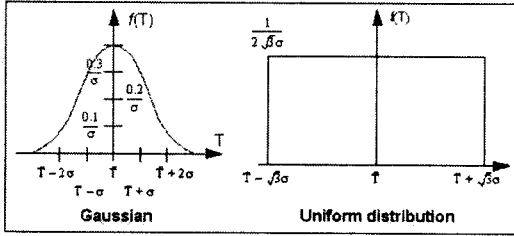


그림 8. 통계 스위치 분포 곡선

### 2.2.2 매설방식 변화에 따른 과전압 분석

본 논문에서는 매설방식에 따른 발생과전압을 분석하기 위하여 선로길이 3km를 매장 방식에 따라 그림 4와 그림 5와 같이 관로와 전력구를 모델링하였다.

그림 9는 매장 방식의 변화에 따른 발생 과전압 분포를 나타낸다.

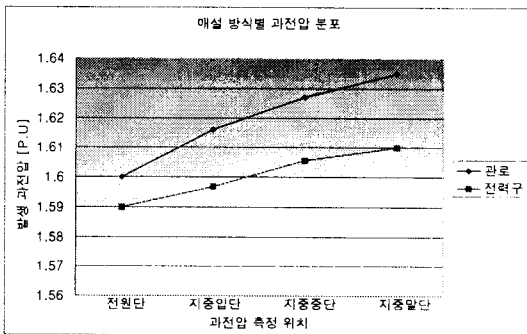


그림 9 매설 방식별 과전압 분포

발생한 과전압의 크기는 1.59 ~ 1.64 [P.U]로 현재 국내에서 적용하고 있는 개폐과전압 전연설계 목표치 2.6 [P.U]를 초과 하지 않고 있으며 전력구 보다 관로에서의 발생과전압이 크게 발생하였으며 전원단보다 말단 부근에서의 과전압이 더 크게 발생한 것을 볼 수 있다.

### 2.2.3 케이블 길이 변화에 따른 과전압 해석

케이블 길이의 변화에 따른 전원 투입시 개폐과전압을 분석하기 위하여 말단은 개방한 상태로 하여 케이블의 총 길이를 5km, 4km, 3km, 2km를 모델링한 후 시뮬레이션을 실시하였다.

그림 10은 케이블 길이에 따른 개폐과전압을 나타낸다.

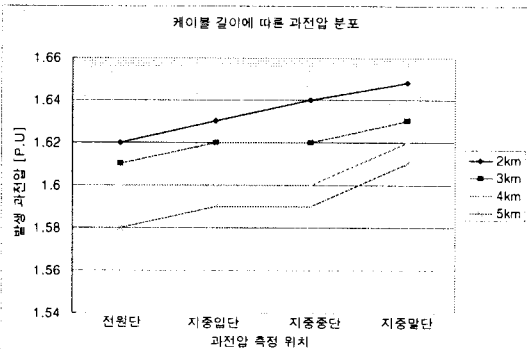


그림 10 케이블 길이별 과전압 분포

## 3. 결 론

본 논문에서는 혼합배전선로에서의 전압 투입으로 인한 과도현상을 케이블의 매설방식 변화와 케이블의 거리를 변화시켜 발생되어지는 과전압을 분석하였고 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 차단기의 투입시 지중배전케이블에 발생하는 개폐과전압의 크기는 선로의 길이가 증가 할 수록 감소한다.
- (2) 지중배전케이블의 매설 방식에 따른 개폐과전압의 크기는 전력구 보다 관로에서 그 크기 더 크게 발생한다.
- (3) 차단기 투입시 케이블에 발생하는 개폐과전압의 말단 부근에서 더 크게 발생한다.

개폐과전압의 파두 시간이 뇌 서지에 비해 길게 때문에 낮은 전압에도 선로에 미치는 영향은 매우 높게 나타날 수 있으므로 차단기의 개폐과전압으로부터 설비를 보호하기 위해서는 피뢰기 등의 보호 장치가 필요하며 그 외의 다른 방법들이 더욱 연구 되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 한국전력공사(R-2005-0-030)주관으로 수행 과제임

### [참 고 문 헌]

- [1] KEPCO, "배전계통 절연협조에 관한 연구", 2003.5
- [2] 전력연구원, "지중 송전케이블 급속 시스템 유기전압 및 순환전류 저감에 관한 연구", 2003.12
- [3] 한국 EMTP 사용자 그룹(KEUG), 기초전력연구원 "2004 EMTP 중급자 강좌", 2004.
- [4] 김익모, "EMTP를 이용한 진공 차단기 스위칭 서지해석", 2000년 대한 전기학회 하계 학술대회 논문집 2002.7
- [5] KEPCO, "설계기준 - 4906", 1999
- [6] KEPCO, "설계기준 - 3500 (집지공사)", 1999
- [7] KEPCO, "설계기준 - 5300(지중구조물)", 1999
- [8] KEPCO, "설계기준 - 5100(집지저항)", 1999
- [9] Electromagnetic Transient Program work book : EPRI EL-4651, pr 2149-6, 1986
- [10] Electromagnetic Transient Program Rule book vol 1 (1-11), 9-16
- [11] KEPCO, "설계기준 - 5001 총칙", 1999.9.7
- [12] KEPCO, "설계기준 - 5902 부록2", 1999.9.7
- [13] KEPCO 기술연구원, "전력계통 과도현상 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구 I", 1991.1
- [14] KEPCO 기술연구원, "전력계통 과도현상 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구 III", 1991.1