

## 400 kV 급 장거리 송전선로의 Neutral Reactor 용량과 재폐로 무전압 시간산정

곽주식, 강연욱, 주형준, 권동진, 심응보  
한전 전력연구원

### Determination of neutral reactor and reclosing time for long 400 kV transmission line

J. S. Kwak, Y. W. Kang, H. J. Joo, D. J. Kweon, E. B. Shim  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 본 논문에서는 장거리 초고압 송전선로에서의 단상재폐로시에 발생가능한 과전압과 2차아크전류를 EMTP를 이용하여 예측계산 하였다. 예측계산결과로부터 과전압을 억제하고 재폐로 동작이 가능한 최적의 중성점 리액터와 400 kV 급 수평배열 1회선 선로를 단상으로 재폐로 하는데 필요한 재폐로 무전압시간을 구하였다.

### 2. 본 론

#### 1. 서 론

수백 km 이상의 초고압 장거리 송전선로에서 직렬인덕턴스의 크기뿐만 아니라 병렬 정전용량이 증가하게 되므로 적정수준의 전압조정을 위하여 약 50%~90% 수준의 분로 리액터를 사용한다. 이러한 초고압 장거리 선로에서 일선 지락고장제거를 목적으로 단상 재폐로를 수행하게 되는 경우 차단된 상에는 나머지 건전한 상으로부터 유도에 의하여 전압이 나타나게 되고 정전용량과 분로리액터 사이에 공진조건이 형성될 경우 매우 큰 전압이 발생할 수 있다. 이러한 과전압은 분로리액터와 별도로 중성점 리액터를 추가함으로써 억제할 수 있으며 고장상의 재폐로동작을 위한 2차 아크의 지속시간을 최소화 할 수 있다.

또한, 장거리 송전선로는 각 상 정전용량의 불평형으로 인한 불평형 전압이 무부하조건에 수전단에 발생가능성이 존재하게 된다. 이러한 불평형은 수직배열 1회선 선로의 경우보다는 두드러지지는 않지만, 수평배열 1회선 선로에서도 각 상간의 정전용량 차이에 의한 상별 충전전류가 차이가 발생하기도 한다. 이 불평형은 고장이 차단된 선로에서 전차 및 정전유도에 의한 2차 아크의 지속시간을 길게 하여 재폐로에 동작에 요구되는 무전압시간이 길어지기도 한다.

본 논문에서는 장거리 초고압 송전선로에서의 단상재폐로시에 발생가능한 과전압과 2차아크전류를 EMTP를 이용하여 예측계산 하였다. 예측계산결과로부터 과전압을 억제하고 재폐로동작이 가능한 최적의 중성점 리액터와 400 kV 급 수평배열 1회선 선로를 단상으로 재폐로 하는데 필요한 재폐로 무전압시간을 구하였다.

#### 2.1 송전선에서의 2차 아크

장거리 초고압 송전선로에서 직렬 유도성 리액턴스와 병렬 어드미턴스의 크기가 커지게 된다. 큰 직렬 인덕턴스를 갖는 430 km 장거리 송전선로를 통한 전력전송능력을 증가시키기 위해서 직렬보상이 필요해 진다. 송전용량 뿐만아니라 안정도를 증가시키기 위해서 커패시터에 의한 직렬보상이 필요하다.

선로가압, 부하차단 또는 경부시 과전압을 초래할 수 있는 초과분 커패시턴스를 보상하기 위해서 분로 리액터도 요구되어 진다. 분로 리액터는 일반적으로 선로 커패시턴스의 50% - 90% 정도이다.

분로 리액터가 위에 언급한 조건들에서 과전압을 억제하기도 하지만 분로리액터는 가압상태의 다른상도체나 다른회선으로부터 유도되는 무압상태의 차단상도체에 유도전압을 증가시킬 수도 있다. 이러한 현상은 초고압 송전선로의 단상 재폐로로부터 초래될 수 있다.

단상재폐로는 765 kV까지의 송전선에 적용되고 있으며 단상 지락고장시 안정도 마진을 유지하거나 증가시키기 위한 수단으로 사용된다. 지락사고의 약 70 - 80 %는 대개는 일시 고장이며 고장상만을 차단함으로써 제거될 수 있다. 이 방법은 특히, 단일 회선의 래디알 선로에서 안정도를 증대시킬 수 있다.

이 현상은 선로의 커패시턴스와 분로 리액턴스사이의 병렬공진으로 설명될 수 있다. 삼상의 선로에서 한상이 선로 양단에서 모두 차단되는 경우 고장으로 차단되는 경우, 고장상은 건전한 나머지 두개의 상과 용량성 및 유도성 결합을 갖게 된다. 이 결합은 용량성 결합이 유도성 결합보다는 크다. 유도 전압의 크기는 상간 그리고 상대간 커패시턴스의 함수이다. 유도 전압은 차단 이후의 고장 아크지속시간을 길어지게 만든다. 차단된 이후에 고장상에 나타나는 아크는 2차 아크라 한다. 이 2차아크 전류는 선로전압과 차단된 선로의 길이에 의해 결정되어진다. 한편 고장 위치와 고장상에 연결된 분로 리액터와 연가에 의하여 영향을 받게 된다.

일반적으로 아크전류가 리액터 보상선로에서는 40 A

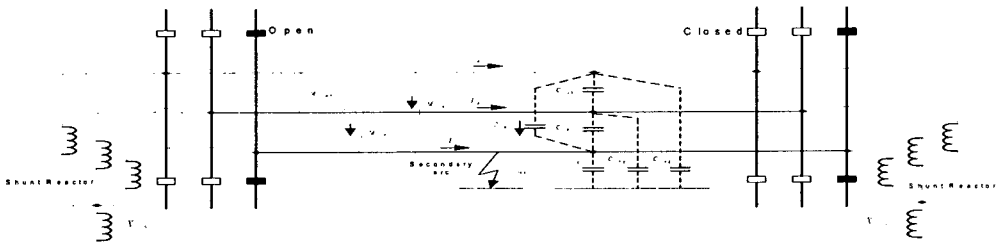


그림 1. 단상 지락시 고장상 차단후 2차 아크 발생

그리고 비 보상선로에서는 20 A 라면 2차 아크는 500 ms 이내에서 소멸되게된다. 2차 아크전류가 이 값들보다 큰 경우엔, 선로의 용량성 리액턴스를 줄여줄 필요가 있다. 그 방법의 하나는 삼상의 분로 리액터 외에 중성점에 리액터를 하나더 추가 연결하는 것이다. 이 방법은 정상운전시에 전압제어를 위해 충전전류 보상이 요구되어 분로리액터가 요구될 때 매력적인 것이 된다. 또 다른 방법은 고속도 접지 스위치를 선로 양단에 적용하는 것이다.

### 2.2 계산조건 및 EMTF 해석 모델

해석을 위한 모델선로는 길이 430 km의 400 kV 송전선로이며, 수평배열의 1회선이다. 선로 양단의 변전소에 분로 리액터와 차단기가 모델링 되었다. 선로 양단과 연결되는 송전망은 등가임피던스와 등가 전압원으로 표현되었다. 송전선로는 EMTF를 이용하여 매 43 km 단위마다 지락고장을 위한 스위치와 고장 저항을 모델링하였다. 430 km의 송전선로는 큰 값의 직렬 임피던스를 보상하기 위한 직렬 커패시터를 갖고 있으며 분로 리액터의 선로의 용량성 리액턴스의 80%에 해당하는 용량이 선로 양단에 절반씩 설치되어 있다.

2차 아크 전압 및 전류의 계산은 그림 4와 같은 모델 회로를 이용하여 양단전원 계통을 모의하였고, 267 MW에 해당하는 부하전류가 흐르도록 송전단 및 수전단의 상차각을 조정 한 후 고장상의 차단기를 개방하였다. 이때 개방된 상에 나타나는 전압을 측정 한 후, 1 ohm의 지락고장 저항을 상정하여 2차 아크전류를 측정하였다.

본 계산모델에서는 상용주파수의 유도전압과 전류만 측정하면 되므로, 주파수 독립 K. C. LEE 모델을 이용하였다.

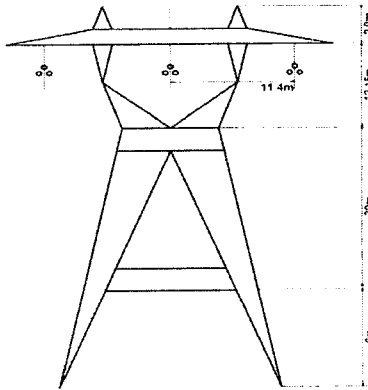


그림 2. 400 kV 송전철탑 모델



그림 3. 2차 아크전압 계산을 위한 EMTF 해석모델

#### 2.2.1 분로리액터에 의한 전압 보상

그림 4와 5의 계산 결과에서 처럼 430 km 길이의 400 kV 송전선로는 연가하고 송전전압의 계어를 위하여 분로 리액터는 선로 정전용량의 60 ~ 80 %를 수준의 보상이 필요하다.

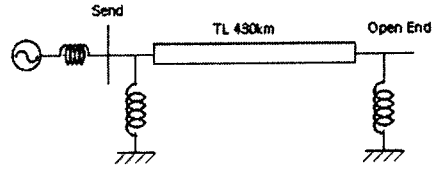


그림 4. 400 kV 선로의 분로 리액터 보상

그림 5에서는 비연가 선로인 경우에, 선로 정전용량의 60 % 수준으로 보상하면 송전단 전압이 1.04 p.u. 이면 수전단 전압은 1.08 p.u.를 넘어선다. 80 % 보상의 경우 1.06 p.u.이상으로 수전단 전압은 상승한다. 전혀 보상하지 않는 경우 1.17 p.u. 까지 상승하므로 높은 수준의 절연내력을 요구하게 된다. 한편 연가 선로의 경우를 살펴 보면 60% 수준으로 정전용량을 보상하더라도 송전전압이 1.02 p.u.일때 수전단 전압이 1.06 p.u.를 다소 상회하는 수준이다. 그리고 80 % 수준의 분로 리액터를 설치하면 송전단 전압이 1.02 p.u. 일때 수전단 전압은 1.04 p.u. 로 전압상승을 억제할 수 있다. 송전 전압운영에 여유를 고려하여 송수전단의 전압을 1.1 p.u.로 설계하는 것이 가능하리라 판단된다.

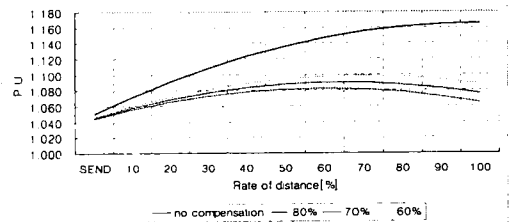


그림 5. 분로 리액터 보상량에 따른 비연가 400 kV 선로의 Open End 전압

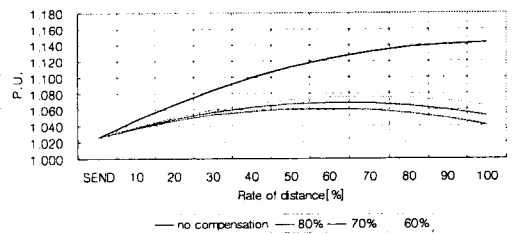


그림 6. 분로 리액터 보상량에 따른 연가 400 kV 선로의 Open End 전압

#### 2.3 중성점 리액터와 고장상의 유도전압 및 전류

아래의 해석결과들은 중성점 리액터가 430 km 길이의 초고압 송전선에 설치되어야 하는가를 잘 설명해 준다. 그림 7과 표 1은 중성점 리액터의 크기에 따른 고장상의 유도 전압과 아크전류값을 계산한 결과를 보여주고 있다. 중성점 리액터가 없는 경우 건전상에 의한 유도 전압은 실효값 2,728 kV 에 달한다. 이는 400 kV 송전선로의 절연 설계값을 매우 크게 초과하는 값이 된다. 그러나 100 Ω의 중성점 리액터가 존재하면 유도전압은 312.7 kV로 낮아지며 450 Ω의 리액터가 설치되는 경우에 유도전압은 6.5 kV 로 가장 낮은 값을 보인다.

한편, 2차 아크 전류는 중성점 리액터가 0.1 Ω 일때 53.7 A이고 100 Ω일때 33.5 A이며 450 Ω일 때에는 1.7 A 로 감소한다.

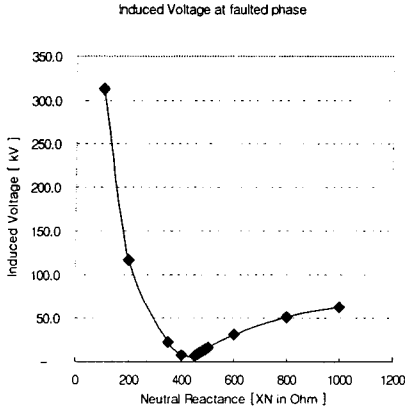


그림 7. 중성점 리액터와 2차 아크전압

표 1. 중성점 리액터와 2차 아크전류

Neutral Reactor [ohms]	Secondary Arc Current [A RMS]
0.1	53.7
100	33.5
200	19.6
400	1.8
<b>450</b>	<b>1.7</b>
600	9.4
700	13.5
800	16.9
900	19.8
1000	22.3

### 2.4 송전계통의 재페로무전압시간 선정

송전계통에서 재페로는 계통의 안정도 관점에서 가능하면 단시간 내에 재투입하는 것이 유리하다. 그러나, 공기절연이 자연적으로 회복되기 위해서는 이온화된 공기가 재결합을 하는데 필요한 시간이 필요하고, 이는 가압된 선로로부터 정전유도 및 전자유도에 의하여 지연될 수가 있다. 계통의 전압이 높아짐에 따라 일단 고장전류를 의하여 형성된 1차 아크경로가 차단기가 고장전류를 차단한 후에도 지속되는 2차 아크현상이 나타난다.

과도상태를 포함한 2차아크 저항을 정밀하게 모의하여 2차 아크의 지속시간을 계산하는 방법과, 정상상태에서 개방된 상에 나타나는 2차아크 전압과 전류를 계산하고, 실증시험결과를 이용하여 추정하는 방법이 있다.

2차 아크를 줄이는 방법으로 분로리액터가 설치된 송전선로에서는 중성점 리액터의 용량을 적절하게 조정하여 2차아크 전류를 줄이는 방법이 있으며, 분로리액터가 설치되지 않은 선로에서는 HSGS(High Speed Grouning Switch)를 투입하여 2차 아크전류를 소거하는 방법이 주로 이용된다.

#### 2.4.1 기존 수식을 이용한 재페로 무전압시간 선정

계통전압 345 kV 이하에서 사용하고 있는 재페로 무전압시간 산출 계산식은 다음과 같다.

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

400 kV 계통에 이 식을 적용하면

$$t = 10.5 + \frac{400}{34.5} = 22 \text{ [cycles]} = 0.367 \text{ [sec]} \text{ 가 된}$$

다. 단상 재페로시에는 약 2배의 시간을 가정하면 약 0.73초가 된다.

#### 2.4.2 재페로 무전압시간의 선정

그림 7과 표 1의 결과로부터, 분로 리액터의 중성점과 접지 사이에 중성점 리액터를 450 Ω을 설치하면 식 1에서 계산된 시간 이내로 2차 아크가 소호됨을 예상할 수 있다. 그러나 임피던스 200 ~ 900 Ω 사이의 중성점 리액터를 설치하여도 2차 아크전류를 20 A 이내로 억제하고 유도 전압도 0.35 p.u 이하로 낮출 수 있다. 그림 8은 500 kV 계통의 2차 아크전류 및 전압과 소호 시간의 관계를 보여주는 것으로 분 400 kV 계통의 무전전압 시간 선정시 참조하여 본다면, 3상 재페로인 경우는 식 (1)에 의하여 약 0.5초 이내에 재페로가 가능하다고 할 수 있다.

연가가 되어있을 경우 재페로 시간은 3상의 경우 0.5 초를 고려하였고, 단상의 경우는 1.0초를 고려하였다.

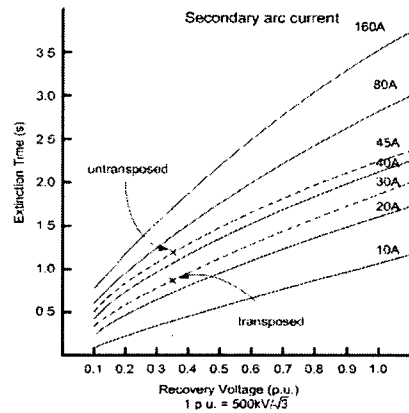


그림 8. 2차 아크 전류와 회복전압에 의한 재페로 무전압 시간의 예측

### 3. 결 론

EMTP 해석 모델을 이용하여 430 km 길이의 400 kV 장거리 송전선로 필요한 분로 리액터, 중성점 리액터를 계산하였다. 이로부터 재페로 동작을 위한 무전압 시간을 예측계산 하였다.

- 선로를 연가하고 정전용량 60 ~ 80%를 보상하면 수전단 전압을 약 1.06 p.u.로 억제할 수 있다.
- 임피던스 200 ~ 900 Ω 사이의 중성점 리액터(450 Ω 최적값)을 설치하면 2차 아크전류를 20 A 이내로 억제하고 유도 전압도 0.35 p.u 이하로 낮출 수 있다.
- 재페로 무전압시간은 연가된 선로를 기준으로 3상 재페로시 0.5초 이내, 단상재페로시 1.0 p.u로 산정하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] ATP, "EMTP Rule Book", Vol. 1, II, 1987
- [2] E.W Kimbark, "Suppression of Ground Fault Arcs on Single-Pole Switched Lines by Shunt Reactors," IEEE Trans., Vol.PAS-83, pp.285-290, March 1964
- [3] R.D. Dunlop, R.M. Maliszewski and B.M.Pasternack, "Application of Single Phase Switching on the AEP 765 kV System," Proceedings of the American Power Conference, VI:42, pp. 461-462, 1980
- [4] 전력연구원, "송배전선로 재페로방식 최적화 연구", 최종보고서, 1998
- [5] 일본 전력중앙연구소, "UIIV 송전 특별위원회계통부회 보고서-UIIV 교류 송전계통의 특성", pp 35, 1982