

500 kV 수평배열 1회선 송전선로의 재폐로 무전압시간 산정

심응보, 곽주식, 주형준, 박홍석, 강연욱
한전 전력연구원

Calculation of Reclosing Dead Time of 500 kV Horizontal Single Circuit Transmission Line

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

Abstract - It is usual to operate the long transmission line with transposition of each phase in order to avoid voltage unbalance due to unbalanced capacitances at each phase of the line end. This paper described the Ferranti voltage rise of line end, charging current and secondary arc current according to the transposition of line or not. The positive and negative sequence current was derived by the phase current, and then the unbalanced rate was calculated. Then, we obtained the reclosing dead time of the single phase reclosing scheme for 500 kV single circuit horizontal arrangement transmission line system.

1. 서 론

장거리 송전선로는 각 상 정전용량의 불평형으로 인하여 무부하시 수전단의 전압에 불평형이 발생할 우려가 있어 통상 연가를 하여 운전을 하는 것이 일반적이다. 이 불평형은 수직배열 2회선인 경우에 더욱 두드러지게 나타나지만, 수평배열 1회선 선로에서도 대지간의 정전용량은 일정하나 각 상간의 정전용량 불평형에 의하여 충전전류가 차이가 생기고, 때로는 각 상의 불평형 전류에 의한 상시 역상전류가 발생할 수 있다. 또한, 이 불평형은 고장이 차단된 선로에서 전자 및 정전유도에 의한 2차 아크의 지속시간을 길게 하여 재폐로에 필요한 무전압시간이 길어지기도 한다.

본 논문에서는 연가 및 비연가시 수전단의 전위상승과 충전전류 및 2차아크 전류를 EMTP를 이용하여 예측계산 하였다. 각 상에 흐르는 전류를 이용하여 정상 및 영상분 전류를 구하고 상시 흐르는 역상전류의 불평형율을 검토하였다. 이 결과를 이용하여 500 kV 급 수평배열 1회선 선로를 단상으로 재폐로하는데 필요한 재폐로 무전압시간을 구하였다.

2. 본 론

2.1 계통 구성 및 모의계산 모델

최종 계통 규모의 발전량과 계통 구성을 고려하여 예상한 PSS/E 데이터를 등가로 축약하여 그림 1과 같은 EMTP 모델을 만들고, 송전선로 정수 및 충전용량을 계산하였다. 대상구간은 500 kV 변전소 A(BUS1)에서 변전소 B(BUS2)까지의 220 km 구간과, 500 kV 변전소 B(BUS2)에서 변전소 C(BUS3)까지의 195 km 구간이다. 500kV 송전선로 모델은 2개의 가공지선(97 mm sq.)과 3상의 전력선(330 mm sq. x 4 bundle)으로 이루어진 1회선 수평배열 선로를 가정하였다.

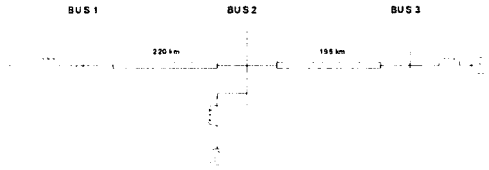


그림 1. 500 kV 송전계통 모델

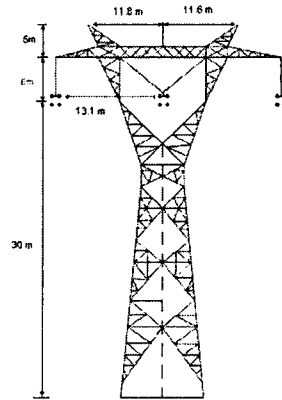


그림 2. 500 kV 철탑

2.2 수전단의 최대전위상승

220km 선로의 수전단 전압은 송전단 전압이 1.0 p.u. 일 경우 1.03이었다. 송전단 전압이 1.025 p.u.일 경우에는 수전단 전압은 1.06 p.u.이었다. 만약 송전단 전압이 1.05 p.u.로 더 가혹한 경우에는 수전단 전압은 1.08 p.u.이었다. 따라서, 계통 최고 운전전압을 550 kV로 제안하였다.

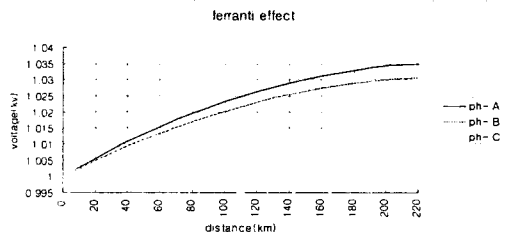


그림 3. MEPE 500 kV 송전선로의 수전단 전위상승

2.3 차단기 정격과 충전전류 예측계산

비연가 선로에 대한 계산결과 충전전류는 220km 선로에서는 B상에서 460 A_{peak}이었으며, 195km 선로에서는 388 A_{peak}이었다. 500 kV 선로의 차단기의 선로 차단 용량은 500 A로써, 220 km 선로 차단전류는 460 A로서 기기정격을 만족하고 있다. IEC 62271-100-2001(구 IEC 56-1, 1986)에 의한 선로, 케이블 및 커패시터에 대한 충전전류 차단용량은 표 1과 같다.

표 1 차단기의 충전전류 차단 용량 추천값

Voltage rating (rms)	Line A(rms)	Cable A (rms)	Single Capacitor bank A(rms)
362	315	355	400
420	400	400	400
550	500	500	400

2.4 상시 역상전류 불평형을

장거리 송전선로는 각 상간의 상호 커패시턴스에 의해 수평배열의 구조에서도 각 상간에 불평형을 일으킨다. 220 km 선로의 충전전류에 의하면, A상과 C상의 최대 전류값은 약 410 A, 반면에 B상은 460 A이다. 1회선 장거리 송전선로는 연가가 필요하고, 만약 그렇지 않다면 역상의 불평형 전류가 흐르게 되고 이는 발전기 권선의 과열의 원인이 될 수 있다.

2.4.1 계산조건 및 해석 모델

본 계산시에 부하전류는 계통의 최종규모 예측계산 결과에 따라 2,265 A를 가정하였으나, 부하의 크기에 관계없이 선로의 형태에 따라 불평형율은 일정하게 되므로 중요한 변수는 아니라고 할 수 있다. 연가의 계산은 선로를 3등분하여 연가하는 방법과 EMTP 모델에서 지원 하는 완전연가모델을 사용하여 비교 하였으며, 그 해석 모델간의 차이는 없었다.

2.4.2 역상전류 상시불평형을 계산 수식

각상에 흐르는 전류를 대칭좌표법으로 환산하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{식 1})$$

식 1에서 각상의 전류 벡터를 I_p 라 하면,

$$I_p = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{식 2})$$

대칭전류 벡터를 I_s 라 하면,

$$I_s = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{식 3})$$

변환행렬 A 는

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (\text{식 4})$$

가 된다. 그러므로 우리가 구하고자하는 I_s 는

$$I_s = A^{-1}I_p \quad (\text{식 5})$$

여기서 A의 역행렬 A^{-1} 은

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (\text{식 6})$$

식 1에서 각상의 전류는

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \quad (\text{식 7})$$

$$I_b = I_0 + a^2I_1 + aI_2 \quad (\text{식 8})$$

$$I_c = I_0 + aI_1 + a^2I_2 \quad (\text{식 9})$$

그리고 대칭분 전류는

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (\text{식 10})$$

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (\text{식 11})$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (\text{식 12})$$

가 된다. 3상 Y 결선 계통에서 중성점 전류 I_n 은

$$I_n = I_a + I_b + I_c \text{ 이 되고, 식 10에 의해서}$$

$$I_n = 3I_0 \text{가 된다.}$$

본 계산에서는 EMTP 모델을 이용하여 각상의 전류를 구하고, 이를 대칭좌표법으로 환산하였다.

2.4.3 역상전류 상시불평형율과 연가의 필요성

ANSI 규격상의 연속 역상전류 허용치는 표 2와 같으며, 발전기 정격 960 MVA까지는 불평형율을 8% 이내로 하여야 하므로 연가가 필요함을 알 수 있다.

표 1. 발전기 권선에의 역상 불평형 전류 계산

전압 (도체)	연가/비연가	전류 (A)	역상전류 (A)	불평형률 (%)
500kV (330m×4B)	연가 (220km)	2,265 (부하전류)	0	0
	비연가 (220km)	2,265 (부하전류)	192	8.5

표 2. ANSI 규격 (연속 역상전류)

냉각 형태	정격 [MVA]	I_2/I_1 [%]
간접 냉각	-	10
직접 냉각	- 960	8
	961 - 1,200	6
	1,201 - 1,500	5

비고 : 1. I_2 : 역상전류
2. I_1 : 발전기 전류(정상)

2.5 송전계통의 재페로무전압시간 산정

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, 실중시험결과를 이용하여 추정하는 방법이 있다. 본 계산에는 후자의 방법을 이용하였다.

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.

2.5.1 기존 수식을 이용한 재페로 무전압시간 산정

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

$$t = 10.5 + \frac{kV}{34.5} \text{ [cycles]} \quad (\text{식 13})$$

500 kV 계통에 이 식을 적용하면

$$t = 10.5 + \frac{500}{34.5} = 25 \text{ [cycles]} = 0.42 \text{ [sec]} \text{ 가 된다.}$$

단상 재페로시에는 약 2배의 시간을 가정하면 약 0.9초가 된다.

2.5.2 2차아크 전류 및 전압의 계산

2차 아크 전압 및 전류의 계산은 그림 4와 같은 모 델 회로를 이용하여 양단전원 계통을 모의하였고, 부하전류는 최대 2,265 A의 전류가 흐르도록 송전단 및 수전단의 상차각을 조정하여 B 상을 개방하였다. 이 때 개방된 상에 나타나는 전압을 측정하여 후, 다시 1 ohm의 지락오 장 저항을 상정하여 2차 아크전류를 측정하였다.

본 계산모델에서는 상용주파수의 유도전압과 전류만 측정하면 되므로, 주파수 독립 K. C. LEE 모델을 이용 하였으며, 완전연가시와 비연가시를 검토하였다.

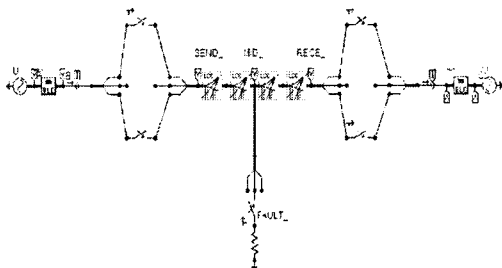


그림 4. EMTP에 의한 2차 아크전류와 회복전압 계산을 위한 회로

2.5.3 재페로 무전압시간의 산정

본 검토에서는 분로리액터와 HSGS가 사용되지 않는 계통이므로 자연소호 조건에 대해서 검토하였다. 개방된 B상 회로에 유기되는 전류는 약 30 A 이었으며, 이 때 개방된 상에 유기되는 전압은 약 0.35 p.u. 이었다. 3상 재페로인 경우는 식 13에 의하여 약 0.5초 이내에 재페 로가 가능하다고 할 수 있다.

연가가 되어있을 경우 재페로 시간은 3상의 경우 0.5 초를 고려하였고, 단상의 경우는 1.0초를 고려하였다. 만 약 연가가 되어 있지 않다면 단상재페로에-필요한 재페 로 무전압 시간은 1.2 초보다 크게 되어 단상 재페로 시 간을 1.5초로 고려하였다.

그림 5의 재페로 무전압시간 산정 그래프를 구하기 위 한 사용한 시험조건은 갭 길이 6.5 m, 풍속 2 m/sec이므 로 가혹한 조건에서의 검토라고 할 수 있다.

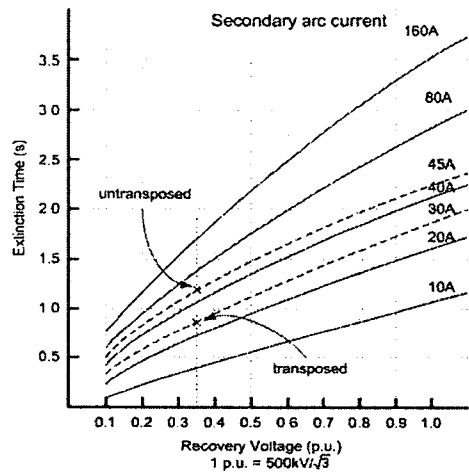


그림 5. 2차 아크 전류와 회복전압에 의한 재페로 무전압 시간의 예측

3. 결 론

EMTP를 이용하여 500 kV 장거리 송전선로의 수전단 전위상승, 충전전류, 역상전류 불평형을 및 재페로 무전 압 시간을 예측계산 하였다.

- 220 km 선로 수전단의 전압은 약 1.06 p.u. 로 나타 났으며 550 kV를 최대 정격전압으로 선정하였다.
- 선로 충전전류는 dir 460 A(peak)로서 IEC 규격치 500 A(rms)를 초과하지 않았다.
- 비연가시 역상전류 불평형율은 ANSI 허용 기준치를 초과하므로 연가를 하여야 한다.
- 재페로 무전압시간은 연가된 선로를 기준으로 3상 재 페로시 0.5초 이내, 단상재페로시 1.0 p.u로 산정하였 다.

[참 고 문 헌]

- [1] ATP, "EMTP Rule Book", Vol. 1, 1, 1987
- [2] IEC, "IEC 62271-100-2001",
- [3] J. Duncan Glover, "Power System Analysis and Design", Third edition, pp 356-360, 2001
- [4] 전력연구원, "송배전선로 재페로방식 최적화 연구", 최종보고서, 1998
- [5] 일본 전력중앙연구소, "UIIV 송전 특별위원회계통부회 보고서-UIIV 교류 송전계통의 특성", pp 35, 1982