

직렬 커패시터가 설치된 장거리 초고압 송전선로의 부하차단시 과전압 해석

곽주식, 강연욱, 방항권**, 최한열**, 장성익**
 한전 전력연구원, 한국전력공사**

Load rejection overvoltage analysis of long EHV transmission line compensated by series capacitor

J. S. Kwak, Y. W. Kang, H. K. Bang**, H.Y. Choi**, S. I. Jang**
 Korea Electric Power Research Institute, KEPCO**

Abstract - 본 논문에서는 직렬보상된 430 km 길이의 초고압 선로를 EMTP를 이용하여 모델링하고 부하차단시에 직렬 보상량과 차단 부하크기에 따른 발생하는 과전압을 예측계산 하였다. 이러한 결과로부터 과전압발생을 허용범위 이내로 억제할 수 있는 조류한계와 직렬보상량을 산출하였다.

평배열 선로이며 EMTP의 K.C.LEE 모델을 이용하여 임피던스가 표현되었다.

이 430 km 길이의 400 kV 선로는 매우 큰 직렬 인덕턴스로 인하여 전송가능 전력조류가 수십 MW 제한되기 때문에 보상용 직렬 커패시터가 포함되어 있다. 송전선로의 직렬 인덕턴스를 보상하여 전력전송능력을 증대시키기 위한 보상장치로 사이리스터 제어 커패시터 뱅크나 FACTS와 같은 장치가 사용될 수 있지만, 본 연구에서는 단순한 커패시터와 병렬 피뢰기만으로 표현하였다. 피뢰기는 고장전류가 흐르는 경우와 같이 조건에서 직렬 커패시터를 과전압으로부터 보호하기 위한 것이다.

1. 서 론

수백 km 이상의 초고압 장거리 송전선로에서는 높은 송전전압에도 불구하고 직렬 임피던스가 증가하게 되어 전력수송능력은 감소하게 된다. 이러한 경우 선로의 리액턴스는 직렬 커패시터로 보상하게 되면 임피던스가 작아져 전력수송능력과 안정도가 크게 개선될 수 있다. 직렬보상선로에서 커패시터가 선로임피던스와 같아지면 임피던스가 최소가 되지만 지락고장이나 부하 차단등의 외란으로 높은 과전압이 발생할 수 있으며 직렬보상량과 부하차단량에 따라 과전압의 크기가 달라지게 된다.

본 논문에서는 직렬보상된 430 km 길이의 초고압 선로를 EMTP를 이용하여 모델링하고 부하차단시에 직렬 보상량과 차단 부하크기에 따른 발생하는 과전압을 예측계산 하였다. 이러한 결과로부터 과전압발생을 허용범위 이내로 억제할 수 있는 조류한계와 직렬보상량을 산출하였다.

2. 본 론

2.1 계산조건 및 해석 모델

해석을 위한 모델선로는 길이 430 km의 400 kV 송전선로이다. 선로 양단의 변전소에 분로 리액터와 중성점 리액터 그리고 차단기가 모델링 되었다. 선로 양단과 연결되는 송전계통은 표 1과 같이 등가임피던스와 등가 전압원으로 표현되었다. 부하차단시 발생하는 과전압의 크기를 송전선로의 각 위치별로 확인하기 위하여 EMTP를 이용하여 송전선로 길이의 10%에 해당하는 매 43 km마다 각 상의 전압을 확인하고자 하였다.

전력선 도체는 ACSR 410 #이며 그림 3에서처럼 수

표 1. Equivalent Impedance(430km)

Case	등가전원 임피던스 Z [ohm]	
	송전단	수전단
G1	Z+ = 139.65 Z0 = 111.72	Z+ = 1478 Z0 = 1183
G2	Z+ = 69.8 Z0 = 55.85	Z+ = 739 Z0 = 591.5
G4	Z+ = 34.9 Z0 = 27.925	Z+ = 369.5 Z0 = 295.75

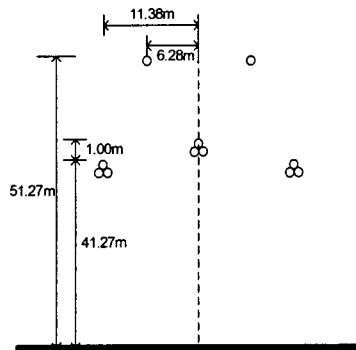


그림 2. 400 kV 송전철탑 모델

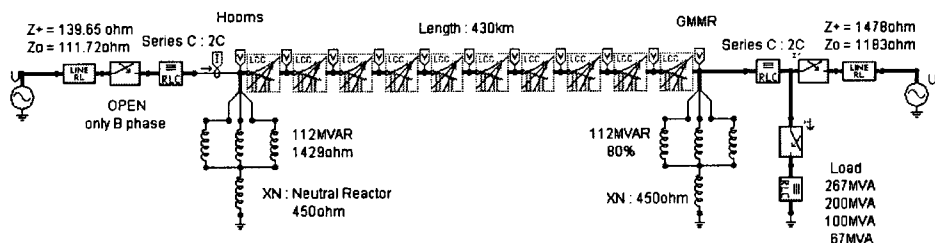


그림 1. Load Rejection Overvoltage 해석을 위한 EMTP 모델

#	Phno	Rin	Rout	Reas	Hertz	Vieww	Vmid	Separ	Alpha	NB
	[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]		
1	0.18923	1.3208	0.1996	-11.38	41.7	27.4	40	30	3	
2	0.18923	1.3208	0.1996	0	42.7	28.4	40	30	3	
3	0.18923	1.3208	0.1996	11.38	41.7	27.4	40	30	3	
4	0	0.48	0.67	0.3	-6.28	51.27	39.07	0	0	0
5	0	0.48	0.67	0.3	6.28	51.27	39.07	0	0	0

그림 3. EMTF ACSR 410 Coot 입력 Data

2.1.1 전압 제어를 위한 분로 리액터

선로의 충전용량 보상을 위한 Shunt Reactor 용량을 80%, 70%, 60% 보상하면 선로별 용량을 다음 표 2에서 보여준다.

표 2. Shunt Reactor 용량 산정(430km)

선로길이	단위[MVAR]			
	100%	80%	70%	60%
430[km]	140	112	98	84

400 kV, 430 km 선로에서 충전용량 100% 보상을 위한 Shunt Reactor 용량을 계산해 보면 다음과 같다. 선로의 충전용량 $Q_C = 279.6[MVAR]$ 이고, 충전용량 100% 보상을 위한 Shunt Reactor의 용량은 다음 식 (1)과 같다.

$$Q_L = Q_C \times 1.0(100\%) = 279.6[MVAR] \quad \text{---(1)}$$

Shunt Reactor를 두 개로 나누어 선로 양단에 설치하면 1 unit에 따른 용량 Q_L' 은 식(2)와 같다.

$$Q_L' = 279.6/2 \text{ unit} = 140.0 [MVAR] \quad \text{-----(2)}$$

식(2)로부터 Shunt Reactance를 계산해보면 다음과 같다.

$$Q = V \cdot I, V = X_L \cdot I (\Rightarrow I = V / X_L) \quad \text{-----(3)}$$

$X_L = (400 \text{ kV})^2 / 140 = 1142.86[\Omega]$ 이 된다.

충전용량 80% 보상을 위한 Shunt Reactor의 용량은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_L = Q_C \times 0.8 = 223.68 [MVAR] \quad \text{------(4)}$$

$$Q_L' = 223.68/2 \text{ unit} = 111.84 [MVAR] \quad \text{---(5)}$$

따라서 Shunt Reactor 1 unit에 따른 용량은 약 112 [MVAR]가 된다.

$$Q = V \cdot I, V = X_L \cdot I (\Rightarrow I = V / X_L) \quad \text{-----(6)}$$

$X_L = (400 \text{ kV})^2 / 112 = 1428.571[\Omega]$ 이 된다.

그림 4의 계산 결과에서는 430 km 길이의 400 kV 송전선로는 충전전압의 제어를 위하여 분로 리액터는 선로 정전용량의 60 ~ 80 % 각 수준별로 보상할 할 때의 선로 전압분포를 보여주고있다. 계통 최고 전압을 1.1 p.u.의 설계를 적용할 경우 선로를 연가한다면 그림 4의 계산 결과로부터 80 % 수준인 112 MVar의 분로 리액터 설치하면 송전단 전압을 1.06 p.u. 수전단 전압을 1.08 p.u.까지 운전가능함을 예측할 수 있다.

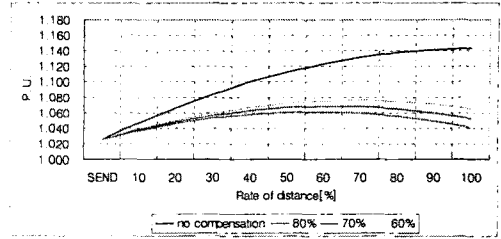


그림 4. 분로 리액터 보상량에 따른 연가선로의 Open End 전압

2.1.2 중성점 리액터

지락 고장발생시 단상 재폐로 조작에 따른 고장상의 과도한 유도전압을 억제하기 위하여 450 Ω 의 중성점 리액터를 선로의 양단에 설치하였다. 표 3은 중성점 리액터의 임피던스에 따른 단상 지락시 차단 상의 유도전압의 변화를 보여준다.

표 3. 단상 재폐로시 중성점리액터와 고장상 유도전압

Neutral Reactor X_N [Ohms]	고장상의 유도전압 [RMS in kV]
0	2,728.4
100	312.7
200	116.3
350	23.2
400	7.5
450	6.5
500	16.3
600	31.6
800	51.2
1000	63.0

2.1.3 직렬 보상 커패시터

전력전송을 위한 Series Capacitor는 다음과 같이 선정된 용량을 상정하였다. 이 선로의 직렬 인덕턴스를 EMTF에서 제공하는 ACSR 410 Coot로 계산하면, 완전연가된 430km선로에서 정상분 역상분 직렬 인덕턴스는 다음과 같다.

$$X_{Lo} = 7.20264E-1[\text{ohm/km}]$$

$$X_{L+} = 3.00431E-1[\text{ohm/km}]$$

$$\begin{aligned} \omega L &= 3.00431 \times 10^{-1} [\Omega/km] \times 430 [km] \\ &= 129.185 [\Omega] \\ \omega L &= \frac{1}{\omega C} \end{aligned}$$

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{2\pi \times 50^2 \times 129.185 [\Omega]} = 24.64 [\mu F] \quad \text{-----(7)}$$

그러나 식 (7)과 같이 선로의 직렬 인덕턴스를 100% 보상하고자 할때 선로의 지락고장 위치에 따라 선로 인덕턴스나 분로 리액터와의 공진조건이 형성될 가능성이 있으며 이 경우엔 큰 고장전류로 커패시터 양단의 전압이 현실적이 않은 수준으로 높아진다거나 혹은 실제의 커패시터라면 소손될 정도의 큰 전류가 흐르게 된다. 따라서 직렬 인덕턴스의 60 % 수준인 14.78 μF 으로 직렬 보상용 커패시터의 값을 결정하였다.

커패시터를 과전압으로부터 보호하기 위한 병렬 피뢰기는 267 MW의 정격부하에 대하여 150 %의 과부하 내량을 갖고 있는 것으로 선정하였으며 정격 부하전류의 2.5 p.u.의 보호레벨을 선정하였다.

2.1.4 부하조건

수전단에 역률 0.9의 R-L 부하를 선정하고 67 MW ~ 267 MW 사이의 각 부하조건에서 차단 과전압을 계산하였다.

2.2 Load Rejection 과전압 계산 결과

직렬 커패시터에 병렬로 과전압 보호용 피뢰기가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 각각 차단 과전압을 계산하고 비교하였다. 표 4는 직렬 보상 커패시터에 피뢰기 모델을 포함하지 않은 경우 각 부하크기별 차단 과전압을 계산한 결과를 보여주고 있다. 그림 5는 직렬 커패시터가 29.5 μ 인 경우 267 MW의 부하가 일시에 차단된

표 4. 부하차단 과전압 계산결과

Case	Series C[μ F]	Load [MW]	p.u.	Vpeak point
G1	29.5	267	1.625	TL10C
		200	1.476	TL10C
		100	1.243	TL10C
		67	1.163	TL10C
	10	267	1.880	TL08C
		200	1.681	TL08C
		100	1.309	TL10A
		67	1.193	TL10A
	15	267	1.672	TL10C
		200	1.472	TL10C
		100	1.237	TL10C
	G2	14.75	267	1.420
200			1.419	TL10A
100			1.222	TL10A
67			1.149	TL10A
10		267	2.224	SENDA
		200	1.898	SENDA
		100	1.396	SENDA
		67	1.242	SENDB
15		267	1.521	TL10A
		200	1.417	TL10A
		100	1.219	TL10A
		67	1.147	TL10A
G4	7.375	267	1.885	SENDB
		200	1.700	SENDB
		100	1.386	SENDB
		67	1.263	SENDB
	10	267	2.962	SENDB
		200	2.606	SENDB
		100	1.914	SENDB
		67	1.633	SENDB
	15	267	2.089	SENDA
		200	1.793	SENDA
		100	1.339	SENDA
		67	1.202	SENDB
20	267	1.419	TL08B	
	200	1.291	TL08A	
	100	1.130	TL10B	
	67	1.085	TL10B	

경우의 전압 상승에 대해 계산결과를 보여주고 있다.

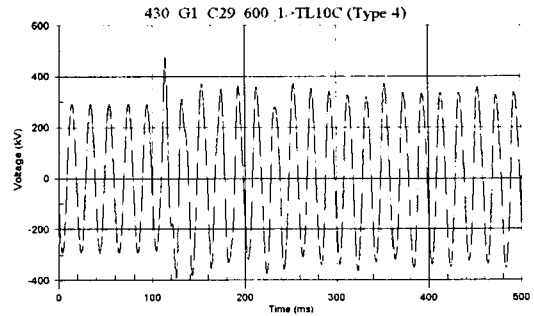


그림 5. 차단 과전압 계산 결과
(Case G1, 직렬보상커패시터 29.5 μ , 부하 267MW)

표 5는 직렬 커패시터에 과전압 보호용 피뢰기가 모델링된 경우의 부하 차단 과전압을 표 5의 계산결과와 비교한 것이다. 실제의 경우 직렬 보상 커패시터는 방전갭이나 피뢰기 그리고 별도의 고속도 바이패스 스위치를 구비하고 있어 커패시터를 보호하고 있다. 이러한 실제의 조건을 반영한 결과를 표 5에서 보여주고 있다. 직렬 보상 커패시터스 10 μ 이고 부하가 267 MW인 경우 부하 차단시 과전압은 1.880 ~ 2.049 p.u. 범위로 상승한다.

표 5. 부하차단 과전압 계산결과
(보상 커패시터스 10 μ 인, 부하 267 MW)

eq. Z [Ω]	sending voltage[kV]	without SA.		with SA	
		Vpeak	p.u.	Vpeak	p.u.
G1	323,607	608,234	1.880	608,232	1.880
G2	326,599	726,268	2.224	680,146	2.083
G4	326,600	967,422	2.962	669,164	2.049

3. 결 론

430 km 길이의 400 kV 송전선로는 전력전송을 위하여 선로의 인덕턴스를 보상하기 위한 직렬 커패시터스를 필요로 한다. 직렬 인덕턴스를 최대 60% 까지 보상하는 선로에서 부하 차단시의 과전압 상승을 검토하였다.

- 최대 부하 차단 과전압은 최대 부하 조건에서 발생
- 267 MW 부하조건에서 부하 차단시 1.880 ~ 2.049 p.u. 의 과전압 상승
- 송전선로 절연 설계는 최대 발생 과전압 이내

[참 고 문 헌]

[1] ATP, "EMTP Rule Book", Vol. 1, II, 1987
 [2] 전력연구원, "송배전선로 재페로방식 최적화 연구", 최종보고서, 1998
 [3] J. Duncan Glover, "Power System Analysis and Design", Third edition, pp 356-360, 2001
 [4] IEC, "IEC 60143-1"