

직병렬보상방법에 의한 초고압장거리송전선로의 보상효과분석

정재길 김영록 *
 중앙대학교 전기공학과

The Effect Analysis of Series and Shunt Compensation Schemes
 for EHV Long Transmission Lines

J. K. Chung Y. M. Kang
 Department of Electrical Engineering, Chung Ang University

Abstract

This study discuss two subjects : maximization of transmission capability and regulation of voltages along line within the permissible bounds. Series and parallel line compensation methods have been applied for those purposes using capacitors and reactors.

In this paper, the effect of series and shunt line compensation for symmetrical line is analyzed. The results obtained in this paper can be applied 765kV class EHV transmission system.

1. 서 론

앞으로의 남북한 전력계통의 연계는 물론 동북아 전력계통의 연계가 검토되고 있다. 이러한 초고압 장거리송전은 전력전송의 극대화와 선로전압은 허용범위내에서 유지하여야 하는 과제를 안고 있다. 전송전력은 계통의 안정도에 의하여 제약을 받으며 선로만을 대상으로할때 전원측과 부하측은 각각 태브낭등가회로가 가능하므로 2기의 문제로 간략화해서 그 선로에대한 전송전력이 결정될 수 있다. 선로의 전압은 부하의 상태와 역률에 의하여 크게 좌우되며 선로의 절연을 고려해야 하므로 전원측이나 부하측은 물론 선로도중의 전압분포까지 파악해야할 필요가 있다.

전송전력의 극대화와 전압을 허용범위내에서 유지하려면 회로정수의 등가적변경에 의하여 해결될 수 있으며 회로의 직병렬보상에 의하여 경제적으로 달성될 수 있다. 전력용콘덴서나 리액터를 선로에 직렬 또는 병렬로 삽입함으로써 등가적 회로정수의 변경이 가능하다.

본 논문은 송전선로의 직병렬보상에 의한 선로의 전송능력향상효과를 분석하고 효과적인 전송능력향상과 동시에 전압상태의 개선방법을 모색하는데 주안점을 두었다.

2. 비보상가공송전선로의 특성

2.1 송전선로의 송수전단간의 기본방정식

1단에만 전원이 있는 무손실 송전선로의 송수양단간의 전압,전류의 기본관계식을 표시하면 식(2.1)과 같이 표시된다.

$$E_s = V_r \cos \theta + jZ_0 I_r \sin \theta$$

$$I_s = j \frac{V_r}{Z_0} \sin \theta + I_r \cos \theta \quad (2.1)$$

여기서, Z_0 : 선로의 파동 임피던스, $\theta = \beta a [rad]$ 로서 β 는 전파정수, a 는 선로의 길이를 표시하며, 765kV선로는 $\beta = 1.283 \times 10^{-3}$, $Z_0 = 252$ 가 된다.

2.2 전압에 의한 전송전력의 제한

(1) 무부하시 선로의 특성

무부하시의 방사상선로의 수전단전압은 식(2.2)로부터 구할 수 있으며, 송전선로의 길이에따른 수전단전압의 변화를 표시하면 표2.1과 같다.

$$V_r = E_s / \cos \theta \quad (2.2)$$

표2.1 무부하시 수전단 전압

길이 (km)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Vr/E (p.u)	1.008	1.034	1.079	1.148	1.248	1.393	1.605	1.931	2.474	3.523

(2) 부하시 선로의 특성

수전단전압을 기준벡터로 취하면 부하전류는 식(2.3)과 같다.

$$I_r = \frac{(P-jQ)}{V_r}$$

(2.3)

부하역률을 $\cos \phi$ 라고 하면 식(2.1)은 다음과 같이 변형된다.

$$E_s = V_r \cos \theta + jZ_0 \sin \theta \frac{P-jP \tan \phi}{V_r}$$

(2.4)

선로의 고유부하 $P_0 = V_0^2 / Z_0$ 이므로 송전단전압을 $E_s = V_0 = 1$ 로 고정시키면 무부하시 수전단전압은 식(2.5)과 같이 표시된다.

$$V_r^2 = \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \left[\left(1 - \frac{P}{P_0} \tan \phi \sin 2\theta \right) \pm \sqrt{\left(\frac{P}{P_0} \tan \phi \sin 2\theta - 1 \right)^2 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \sin^2 2\theta (1 + \tan^2 \phi)} \right] \quad (2.5)$$

즉 방사상선로의 수전단전압은 선로의 길이, 부하의 크기, 역률에 따라 변한다.

선로길이가 300 km일 때 부하의 역률의 변화에 따른 송전전력과 수전단전압과의 변화상태를 표시하면 그림2.1 과 같다.

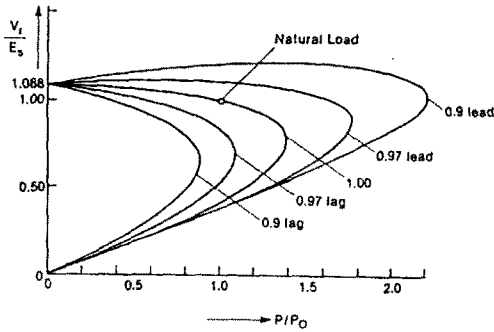


그림2.1 방사상선로의 선로길이,부하,부하역률에 따른 송전전력과 수전단전압과의 관계(선로길이300 km)

일반적으로 부하의 증가에 따라 진상역률에서는 수전단전압이 상승하고 지상역률에서는 전압강하가 나타나서 역률이 나빠질수록 전압변동이 심하게 나타난다.

대칭선로에서는 송수전단간의 전압,전류가 $I_s = -I_R$, $E_s = E_R$ 이며 선로중간점에서의 역률은 1이다. 따라서 대칭선로의 길이 및 전송전력의 변화에 따른 선로중간점의 전압 V_m 과 선로길이의 변화에 따른 최대송전전력 및 허용전압 범위내에서의 최대송전전력은 역률이 1이고 선로공장이 1/2 인 방사상선로의 경우와 같다.

수전단 진상역률에서 수전단전압 상승을 10%내로 유지할 경우 최대송전전력은 상당히 제약 받는다. 따라서 수전전력을 증가시키기 위해서 무효전력제어나 분포리액터등의 보상장치가 필요하다.

2.3 안정도에 의한 전송전력의 제한

초고압송전선로에서 전송전력은 수전단전압 뿐만 아니라 안정도에 의해서도 제약을 받게된다. 송수전단 전압간의 상차각을 δ 라고 하고 송수전단 전압을 $E_s = E_R = V_o$ 로 고정하면 대칭선로의 전송전력 및 상차각은 식(2.6)로 표시된다.

$$p = \frac{P}{P_o} = \frac{\sin \delta}{\sin \theta} \quad (26)$$

$$\delta = \sin^{-1}(\sin \theta \cdot p)$$

선로길이에 따른 최대가능전송전력을 나타내면 표2.2와 같다.

표2.2 안정도를 고려한 최대전송전력(대칭선로)

길이 (km)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400
$\frac{P}{P_o}$	3.91	1.97	1.30	1.02	0.84	0.72	0.64	0.58	0.55	0.52	0.50	0.513

3.보상송전선로의 특성

3.1 선로보상의 목적

선로보상의 목적은 안정도와 전압개선을 위한 것으로 전력 전송능력을 향상시키기 위하여 송전선의 전기적 특성을 수정하는 것을 말한다.

- (1) 모든 전력전송에서 송전선로의 균일전압분포를 이루게 한다.
- (2) 최대전송전력을 증가시켜 안정도에 기여한다.
- (3) 송전계통에서 무효전력요건을 충족시키는 경제적인 수단이 된다

3.2 선로중간점 보상선로의 성능

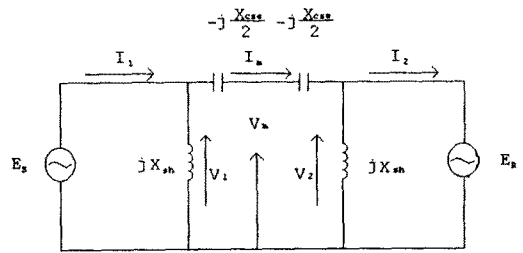


그림 3.1 직렬 및 병렬로 보상된 대칭선로

선로중간점에 2개의 분포리액터와 직렬커패시터를 설치한 대칭선로는 그림3.1과 같다.

그림에서 직렬커패시터의 양단자간 전압 V_c 및 중간점의 전압,전류 V_m , I_m 는 식(3.1)~식(3.3)로 표시 할 수 있다.

$$V_c = V_1 - V_2 = -jI_m X_{csc} \quad (3.1)$$

$$I_m = I_1 + j \frac{V_1}{X_{sh}} = I_2 - j \frac{V_2}{X_{sh}} \quad (3.2)$$

$$V_m = V_1 - \frac{1}{2} V_c = V_2 + \frac{1}{2} V_c \quad (3.3)$$

이 경우 전송전력 P는 식(3.4)와 같이 표시된다.

$$P = \frac{E_s E_R}{[Z_o \sin \theta - \frac{X_{csc}}{2} (1 + \cos \theta) \mu_s] \mu_r} \quad (3.4)$$

여기서, $\mu_s = 1 + \frac{Z_o \sin \theta}{X_{sh} (1 + \cos \theta)} = 1 + \frac{Z_o}{X_{sh}} \tan \frac{\theta}{2}$

완전병렬보상시 $E_s = V_1$ 이므로 분포리액터의 리액턴스는 식(3.5)와 같이 주어진다.

$$X_{sh} = Z_o \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{1 - \cos \frac{\theta}{2}} \quad (3.5)$$

이 경우 전송전력 P는 식(3.6)와 같이 표시된다.

$$P = \frac{E_s^2}{2 Z_o \sin \frac{\theta}{2} - X_{csc}} \sin \delta \quad (3.6)$$

위의 식에서 $\rho = P/P_n$, $P_n = E^2/Z_0$ 로 놓으면 송수전단간의 전송각은 다음과 같다.

$$\sin \delta = \rho \left[\sin \theta - \frac{X_{csc}}{2Z_0} (1 + \cos \theta) \right] \quad (3.7)$$

또한 송전단에서의 소요무효전력은 식(3.8)과 같다.

$$\frac{Q_s}{P_n} = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{v_m} \right)^2 \left(\frac{X_{csc}}{2Z_0} \right) [(\mu_x - \mu_x) - (\mu_x + \mu_x) \cos \theta] + \sin \theta \left[1 - \left(\frac{X_{csc}}{2Z_0} \right) \mu_x \mu_x \right] - \frac{v_m^2}{2} \mu_x \mu_x \sin \theta \quad (3.8)$$

여기서 $\mu_x = 1 - \frac{Z_0(1 + \cos \theta)}{X_{sh} \sin \theta}$

분로리액터가 없는 경우의 송전단의 무효전력은 다음과 같다.

$$\frac{Q_s}{P_n} = \frac{1}{2} \left[\sin \theta \left(\frac{\rho}{v_m} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{X_{csc}}{2Z_0} \right)^2 - v_m^2 \right] - \cos \theta \left(\frac{\rho}{v_m} \right)^2 \frac{X_{csc}}{Z_0} \right]$$

완전병렬보상시 중간점전압은 식(3.9)와 같다.

$$v_m = \frac{V_m}{V_n} = \frac{\cos \frac{\delta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2} + \frac{Z_0}{X_{sh}} \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3.9)$$

분로리액터가 없는 경우의 중간점 전압은 다음과 같다.

$$v_m = \frac{\cos \frac{\delta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2}} \quad (3.10)$$

직렬커패시터 단자전압 $\frac{V_1}{V_n} = \sqrt{v_m^2 + \left(\frac{X_{csc} \rho}{2v_m} \right)^2}$

커패시터 양단자간전압 $\frac{V_c}{V_n} = -j \frac{\rho X_{csc}}{v_m}$

비보상시 전송각 $\delta = \sin^{-1}(\sin \theta \rho)$

4. 사례 연구

대칭선로에서 송수전단전압을 $E_s = E_n = V_n$ 로 고정하고 765Kv에서 전파정수는 1.283×10^{-3} [rad/km], 파동 임피던스 $Z_0 = 252$ 가 된다.

4.1 선로중간에 직렬커패시터만 설치할 경우

선로정수및전압을 각각 Z_0 와 V_0 를 기준으로 하고, $X_{sh} = \infty$,

$\mu_x = \mu_x = 1$, 직렬보상도를 50%로 한 경우 300 km, 600 km, 1000 km 선로에 대한 전송전력, 선로전압, 상차각 등의 계산은 다음 식으로부터 표시된다.

전송각 $\sin \delta = \rho \left[\sin \theta - \frac{X_{csc}}{2Z_0} (1 + \cos \theta) \right]$

중간점전압 $v_m = \frac{\cos \frac{\delta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2}} = 1.0188 \cos \frac{\delta}{2}$ (300km인 경우)

송전단의 무효전력 $\frac{Q_s}{P_n} = 0.0969 \left(\frac{\rho}{v_m} \right)^2 - 0.1878 v_m^2$ (300 km일 때)

직렬커패시터 단자전압 $\frac{V_1}{V_n} = \sqrt{v_m^2 + \left(\frac{X_{csc} \rho}{2v_m} \right)^2}$

커패시터 양단자간전압 $\frac{V_c}{V_n} = -j \frac{\rho X_{csc}}{v_m}$

비보상시 전송각 $\delta = \arcsin(\sin \theta \rho)$

표 4.1 분로리액터가 없는 경우의 중간점 직렬보상선로의 성능

$a = 300 \text{ km}$ $K_{sc} = 0.5$

$\rho = \frac{P}{P_n}$	$v_m = \frac{V_m}{V_n}$	$\frac{Q_s}{P_n} = \frac{-Q_R}{P_n}$	$\delta (^\circ)$	$\frac{V_1}{V_n}$	$\frac{V_c}{V_n}$	비보상 $\delta (^\circ)$
0	1.0188	-0.1949	0.	1.0188	0.	0.
0.25	1.0185	-0.1890	2.723	1.0188	0.0473	5.3880
0.50	1.0176	-0.1711	5.452	1.0187	0.0946	10.824
0.75	1.0162	-0.1412	8.193	1.0187	0.1421	16.361
1.00	1.0141	-0.0989	10.953	1.0186	0.1898	22.061
1.25	1.0115	-0.0442	13.740	1.0185	0.2379	28.001
1.50	1.0082	0.0236	16.560	1.0183	0.2864	34.291
1.75	1.0042	0.1049	19.421	1.0181	0.3355	42.094
2.00	0.9995	0.2004	22.345	1.0179	0.3852	48.694
2.25	0.9940	0.3109	25.310	1.0176	0.4357	57.683
2.50	0.9877	0.4376	28.361	1.0174	0.4908	69.882
2.75	0.9805	0.5817	31.502	1.0170	0.5399	
3.00	0.9723	0.7450	34.752	1.0167	0.5940	

4.2 분로리액터가 없는 경우의 중간점 직렬보상선로의 성능

$a = 600 \text{ km}$ $K_{sc} = 0.5$

$\rho = \frac{P}{P_n}$	$v_m = \frac{V_m}{V_n}$	$\frac{Q_s}{P_n} = \frac{-Q_R}{P_n}$	$\delta (^\circ)$	$\frac{V_1}{V_n}$	$\frac{V_c}{V_n}$	비보상 $\delta (^\circ)$
0	1.079	-0.4052	0.	1.0793	0.	0.
0.25	1.0779	-0.3937	5.2355	1.0785	0.0893	10.02
0.50	1.0744	-0.3591	10.515	1.0812	0.1786	20.36
0.75	1.0686	-0.3004	15.887	1.0774	0.2701	31.466
1.00	1.0602	-0.2161	21.407	1.0761	0.3630	44.106
1.25	1.0489	-0.1034	27.145	1.0742	0.4587	60.458
1.50	1.0341	0.0419	33.196	1.0720	0.5583	
1.75	1.0149	0.2267	39.698	1.0692	0.6637	
2.00	0.9899	0.4623	46.886	1.0662	0.7777	
2.25	0.9554	0.7738	53.389	1.0578	0.9065	
2.50	0.9057	1.2140	65.853	1.0535	1.0624	

표4.3 분로리액터가 없는 경우의 중간점 직렬보상 선로의 성능

$a = 1000 \text{ km}$ $K_{sc} = 0.5$

$\rho = \frac{P}{P_o}$	$v_m = \frac{V_m}{V_o}$	$\frac{Q_s}{P_o} = \frac{-Q_R}{P_o}$	$\delta (^\circ)$	$\frac{V_1}{V_o}$	$\frac{V_c}{V_o}$	비보상 $\delta (^\circ)$
0	1.248	-0.7432	0	1.248	0	0
0.25	1.245	-0.7332	7.85	1.247	0.129	13.872
0.50	1.236	-0.6919	15.87	1.243	0.259	28.653
0.75	1.220	-0.6199	24.22	1.236	0.394	45.993
1.00	1.196	-0.5403	33.16	1.226	0.536	73.536
1.25	1.1606	-0.3582	43.13	1.211	0.691	
1.50	1.1063	-0.1287	55.13	1.189	0.879	
1.75	1.0020	0.2751	73.18	1.148	1.120	

위의 결과로부터 선로에 직렬커패시터를 설치하면 $K_{sc} = 0.5$ 인 경우 직렬보상이 없는 경우에 비하여 전송각 (δ)은 1/2 정도 감소되고 최대전송가능전력도 크게 증가 하였다.

4.2 선로중간점에 직렬커패시터와 분로리액터를 설치한 선로의 성능

선로의 중간에 분로리액터를 추가시킨 선로중에서 600km, 1000km 선로에 대해서 검토하기위해서 아래의 식을 사용하였다.

분로리액터의 리액턴스 $X_{sh} = Z_o \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{(1 - \cos \frac{\theta}{2})}$

표4.4 분로리액터를 가진 중간점 직렬보상 선로의 성능

$a = 600 \text{ km}$ $K_{sc} = 0.5$ $X_{sh} = 5.129 Z_o$

$\rho = \frac{P}{P_o}$	$v_m = \frac{V_m}{V_o}$	$\frac{Q_s}{P_o} = \frac{-Q_R}{P_o}$	$\delta (^\circ)$	$\frac{V_1}{V_o}$	$\frac{V_c}{V_o}$	비보상 $\delta (^\circ)$
0	1.	-0.1950	0.	1.	0.	0.
0.25	0.9990	-0.1836	5.2355	1.0002	0.0963	10.0205
0.50	0.9958	-0.1490	10.5154	1.0005	0.1933	20.3650
0.75	0.9904	-0.0903	15.8875	1.0010	0.2915	31.4665
1.00	0.9826	-0.0060	21.4076	1.0018	0.3917	44.1070
1.25	0.9721	0.1067	27.1454	1.0030	0.4949	60.4586
1.50	0.9583	0.2521	33.1957	1.0043	0.6025	
1.75	0.9406	0.4367	39.6987	1.0061	0.7161	
2.00	0.9175	0.6721	46.8864	1.0085	0.8390	
2.25	0.8854	0.9837	55.3895	1.0109	0.9781	
2.50	0.8394	1.4238	65.8532	1.0157	1.1465	

표4.5 분로리액터를 중간점 직렬보상선로의 성능

$a = 1000 \text{ km}$ $K_{sc} = 0.5$ $X_{sh} = 3.005 Z_o$

$\rho = \frac{P}{P_o}$	$v_m = \frac{V_m}{V_o}$	$\frac{Q_s}{P_o} = \frac{-Q_R}{P_o}$	$\delta (^\circ)$	$\frac{V_1}{V_o}$	$\frac{V_c}{V_o}$	비보상 $\delta (^\circ)$
0	1.	-0.3328	0.	1.	0.	0.
0.25	0.9976	-0.3154	7.8609	1.0008	0.1608	13.8718
0.50	0.9904	-0.2622	15.8750	1.0036	0.3239	28.6528
0.75	0.9777	-0.1698	24.2243	1.0082	0.4921	45.9926
1.00	0.9584	-0.0313	33.1669	1.0152	0.6693	73.5364
1.25	0.9300	0.1674	43.1452	1.0252	0.8622	
1.50	0.8865	0.4600	55.1469	1.0397	1.0854	
1.75	0.8029	0.9826	73.2140	1.0654	1.3982	

표4.4와 표4.5에서와 같이 직렬커패시터 보상선로에 분로리액터를 설치로 인해서 직렬커패시터 양단의 전압 및 선로전압을 전송전력에 관계없이 거의 정적전압으로 유지 할 수 있다. 또한 선로 양단의 무효전력도 크게 감소시킬 수 있다.

5. 결 론

본논문은 초고압 장거리송전선로에서 무보상시 계통전압과 전송전력의 제한관계를 검토하고 직렬보상방식 및 그 효과를 제시하였다.

일반적으로 역류이 지상일 때 선로가 길어지고 역류이 저하함에 따라 전압강하로 전송전력에 제한을 받는다. 전상일 때 역류의 저하에 따라 전송전력은 증가 하나 수전단전압 상승으로 전송전력이 제한된다.

선로의 최대가능전송전력은 전압에의한 제한과 과도안정도에 의한 제한을 고려해야 하며 보통 상차각 $\delta = 30^\circ$ 를 취하고 있다.

선로의 전송전력만을 증대시키기 위해서는 직렬보상도를 크게하고 유도성 병렬보상도를 적게하면 된다. 직렬보상만 이루어진 경우 상차각이 보상전의 1/2로 감소되어 전송전력이 증가된다. 그러나, 전원측 선로의 전압이 높게되는 문제점이 있다. 병렬보상을 함께 할 경우 직렬커패시터의 양단 전압을 저감시켜 전선로의 전압분포로 거의 균일하게 유지 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Timothy J.E. miller, "Reactive Power Control in Electric Systems", John Wiley and Sons, 1982
- [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., 1994