

# 전력 수송능력 증대를 위한 FACTS의 전력계통 적용효과 연구

장 병 훈\* 이 근 준 김 영 한

한국전력공사 전력연구원

## The Study of FACTS Application Effects

### for Power Transmission Capability Enhancement in Power System

Byung-hoon Chang\* Geun-Joon Lee Yeng-Han Kim

KEPRI(Korea Electric Power Research Institute) of KEPCO

**Abstract** - This paper presents the study results of FACTS application effect for transmission capability Enhancement. In a study of the application of series and shunt compensation to the mid and long term KEPCO system in 2000 and 2006 year, it was concluded that the successful application of FACTS would be capable of controlling power flow in KEPCO system with increased transfers without exceeding existing thermal and dynamic stability limits.

**KeyWords** : FACTS Application, transmission system, mid and long term power system

#### 1. 서 론

본 연구에서는 FACTS설비의 실제 적용효과를 분석하였다. 적용방법은 우선 직렬 혹은 병렬 단독보상으로 안정도 확보가 가능한가에 대해 검토하였고, 직·병렬 동시보상에 의한 효과를 살펴보았다. 직렬 보상은 해당선로의 임피던스를 변화시키는 것으로 하고 제어기는 포함하지 않는 것으로 모의하였으며, 병렬 보상은 PSS/E SVC 모형을 적용하여 모의하였다.

보상적용 대상선정은 QV 곡선 해석으로부터 병렬 보상 대상을 추정하고, PV 곡선 해석으로부터 유효전력 여유기준을 만족하는 병렬보상 위치 및 크기를 선

정하였으며, Modal Analysis에 의해 구해진 후보 선로에 의해 선정된 직렬 보상 방안을 선정하였다.

#### 가. 중기계통에 대한 FACTS 적용 대상방안

상정시 고Case	보상 방안	보상개소	보상량
SS00-3	직렬	보령-아산-화성-서서울 T/L	30%
	병렬	보령, 아산, 화성, 서서울 모선	200MVA
CU00-1	직렬	울진-신영주-신재천-동서울 T/L	50%
	병렬	신영주, 신재천, 동서울 모선	1000MVA
	직병렬	직렬:울진-신영주-신재천-동서울 T/L	40%
		병렬:신영주, 신재천, 동서울 모선	500MVA

#### 나. 장기 계통에 대한 FACTS 적용 대상방안

상정시 고Case	보상 방안	보상개소	보상량
SS06-1	직렬	신태백-동해 }-신재천-신이천 T/L 울진-신영주 }	50%
	병렬	동해, 신영주, 신재천, 신이천 모선	900MVA
직병렬	직렬	신태백-동해 }-신재천-신이천 T/L 울진-신영주 }	40%
	병렬	신영주, 신재천, 신이천 모선	500MVA

#### 2. 적용 효과 분석

##### 가. 중기 계통

(1) 보령 - 청양간 345 kV 2 회선 차단시  
(CASE SS00-3)

가) 보상전

상정사고후 계통의 과부하 및 전압 조사결과 345kV T/L 과부하는 BOLNG#2 - 아산 에서 102.5% 가 발생되었으며, 345kV모선중 0.95pu이하의 저전압이 "아산" (0.926pu)모선의 7개 모선에서 발생되었다.

계통의 과도안정도는 그림 2.1과 같이 상정사고 지역 부근에 있는 보령, 태안 발전기들이 부제동 특성으로 불안정해지는 현상을 나타내었다.

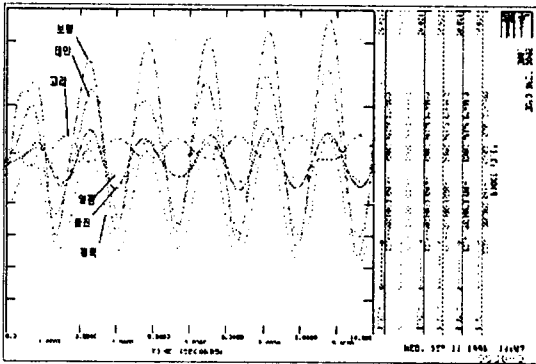


그림 2.1 상정사고 SS00-3 에서 발전기 Angle

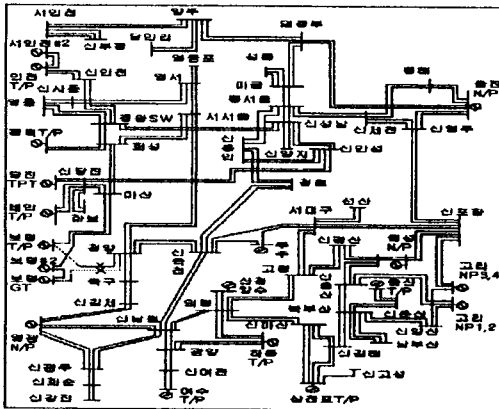


그림 2.2 상정사고 SS00-3 계통도

이 경우 지역간 조류변화는 중부지역에서 경인지역으로 조류가 증가하고, 중부지역에서 영동지역으로, 영동지역에서 경인지역으로의 조류는 감소하게 되며, 이를 그림 2.3 에서 보였다.

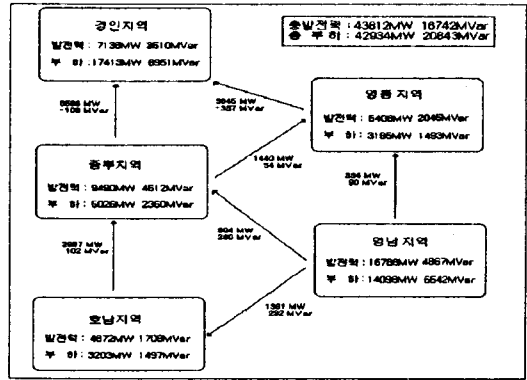


그림 2.3 Case SS00-3 에서의 지역간 조류변화

나) 보상후

4400(화성), 4600(서서울), 6150(보령), 6950(아산) 등의 모선에 200MVA 병렬보상을 적용하고, 보령-아산-화성-서서울간 345 kV 선로에 30%직렬보상을 적용하였다.

이 결과 과도안정도는 그림 2.4 (직렬보상)와 그림 2.5 (병렬보상)에서와 같이 각각 안정한 것으로 나타났다.

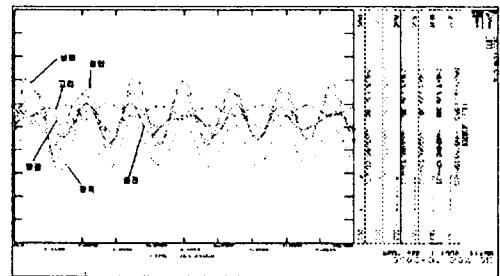


그림 2.4 SS00-3에서 직렬 보상시 발전기 Angle

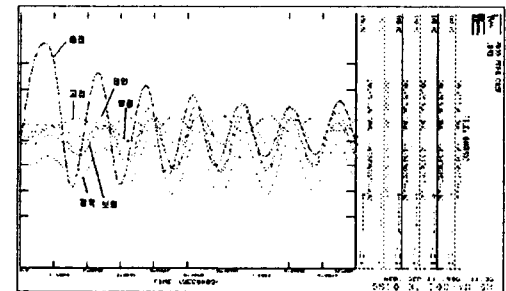


그림 2.5 SS00-3에서 병렬보상시 발전기 Angle

상정사고시 발생했던 BOLNG#2 - 아산 송전선로의 102.5%의 과부하는 병렬보상 적용결과 101.1%로 감소하였으며, 직렬보상시에는 99%로 감소되었다.

직렬 및 병렬 보상작용에 의한 전압 보상효과를 아래 표 2.1에서 정리하였다. 병렬보상시 200MVA SVC를 적용한 아산, 화성, 서서울 모선의 전압이 다른 모선에 비해 더 효과적으로 향상되고 있음을 알 수 있다. 직렬보상시에는 거의 모든 저전압 모선이 0.95pu이상으로 보상되었으며, 특히 아산과 서서울 모선의 전압보상효과가 두드러지게 나타나고 있다.

표 2.1 저전압 모선의 병렬, 직렬 보상효과

모선번호	모선이름	상정사고 모선전압 (pu)	병렬보상시		직렬보상시	
			모선전압 (pu)	보상효과 ( $\Delta$ pu)	모선전압 (pu)	보상효과 ( $\Delta$ pu)
2600	영동포	0.9491	0.9585	+0.0094	0.9624	+0.0133
2700	신양지	0.9468	0.9531	+0.0063	0.9589	+0.0121
4100	신안성	0.9391	0.9467	+0.0076	0.9561	+0.0170
4400	화 성	0.9389	0.9538	+0.0149	0.9609	+0.0220
4600	서서울	0.9422	0.9531	+0.0109	0.9580	+0.0158
4700	신용인	0.9372	0.9440	+0.0068	0.9519	+0.0147
4900	청 원	0.9367	0.9427	+0.0060	0.9492	+0.0125
6950	아 산	0.9260	0.9415	+0.0155	0.9620	+0.0360

※ ( $\Delta$ pu) : 상정사고시와 비교된 전압 보상효과

지역간 조류변화를 살펴보면, 상정사고후 영동에서 경인지역으로의 유효전력조류가 현저하게 감소하고, 중부에서 경인지역으로 증가하는 현상이 발생하는데, 이는 보령-청양간 345kV 2회선 차단에 의해 청양-신옥천을 거쳐 영동지방으로 우회하는 조류가 감소됨에 기인한다. 병렬보상과 직렬보상의 결과 중부-경인의 무효전력 공급이 현저하게 호전되었다.

표 2.2 직, 병렬보상에 의한 지역간 조류변화

From	To	Base Case 지역간 조류		상정사고시 조류 변화		병렬보상 효과		직렬보상 효과	
		MW	MVar	$\Delta$ MW	$\Delta$ MVar	$\Delta$ MW	$\Delta$ MVar	$\Delta$ MW	$\Delta$ MVar
영동	경인	4542	-640	-697	+273	+12	-38	+13	-80
중부	경인	5863	-391	+723	+282	-8	-952	-10	-581
중부	영동	1999	6	-559	+48	-4	-16	+6	-36
영남	영동	485	69	-151	+21	-10	-8	-22	-20
영남	중부	706	-193	+198	+473	-4	-32	-4	-62
호남	중부	2927	-16	+60	+118	-1	-39	-1	-80
영남	호남	1325	210	+66	+22	-1	-7	-2	-13

※ 상정사고시 : Base Case와 비교된 조류변화

※ 직, 병렬보상시 : 상정사고시와 비교된 보상효과

(2) 울진 - 의정부 간 765 kV 선로정지시  
울진-동해간 345kV 2회선 차단시 (CASE CU00-1)

가) 보상전

보상전 계통의 과도안정도는 그림 2.6에서와 같이 울진 발전기들이 탈조하는 불안정 현상을 나타내었다.

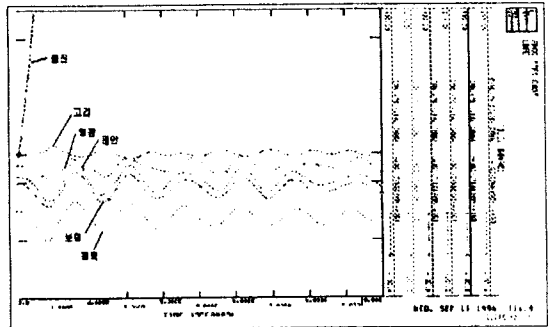


그림 2.6 상정사고 CU00-1 에서 발전기 Angle

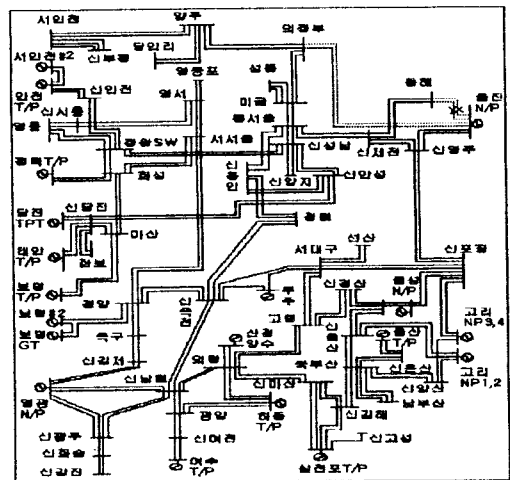


그림 2.7 상정사고 CU00-1 계통도

상정사고후 345kV 영서 - 서서울 T/L에 108.9%, 청원 - 신옥천 T/L에 108.2%의 과부하가 조사되었으며, 345kV모선중 0.95pu이하의 저전압이 "신제천" 모선(0.7936pu)의 27개 모선에서 발생되었다.

이 경우 지역간 조류변화는 영동에서 경인으로의 조류가 감소하고, 영동서 영남, 영남에서 중부, 중부에서 경인으로의 조류가 증가하는 현상을 보이고 있다. 이를 그림 2.8에서 보았다.

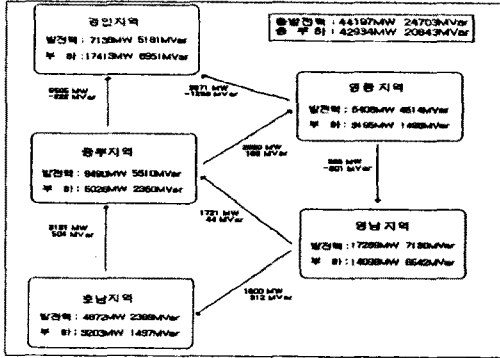


그림 2.8 상정사고 CU00-1에서의 지역간 조류변화

나) 보상후

울진-신영주-신제천-동서울간 345kV 선로에 50% 직렬보상을 적용하고, 5500(신영주), 5700(신제천), 2500(동서울) 등의 모선에 1000MVA 병렬보상을 적용하였다.

이 때의 과도안정도는 직렬보상시 그림 2.9와 같이 울진발전기들의 느린 진동감쇠 현상을 보이면서 안정도를 유지하고 있다. 그러나, 병렬보상의 과도 안정도는 그림 2.10과 같이 울진발전기들이 탈조하여 여전히 불안정한 현상을 나타내고 있다.

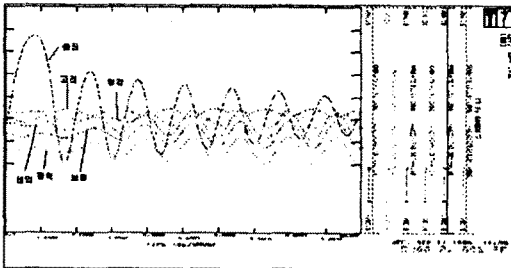


그림 2.9 CU00-1에서 직렬보상시 발전기 Angle

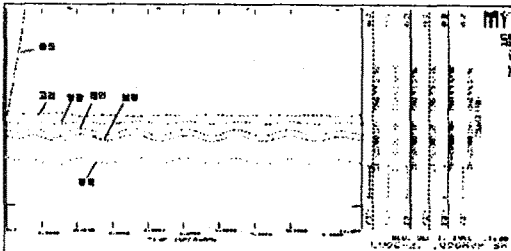


그림 2.10 CU00-1에서 병렬보상시 발전기 Angle

상정사고시 발생했던 "영서"과 "서서울" 모션간에 108.9%, "청원"과 "신옥천" 모션간에 108.2%의 과부하는 직렬보상 적용결과 101.5%와 91%로 감소되었으며, 병렬보상 적용결과 각각 104.8%와 101.6%로 감소하였다.

직렬과 병렬 동시보상효과를 살펴보기 울진-신영주-신제천-동서울간 345 kV 선로에 40%직렬보상을 적용하고, 5500(신영주), 5700(신제천), 2500(동서울) 등의 모선에 500MVA 병렬보상을 적용하였다.

이 경우의 과도 안정도는 제동토크 부족으로 인하여 느린 감쇠 진동을 보이고 있다 (그림 2.11).

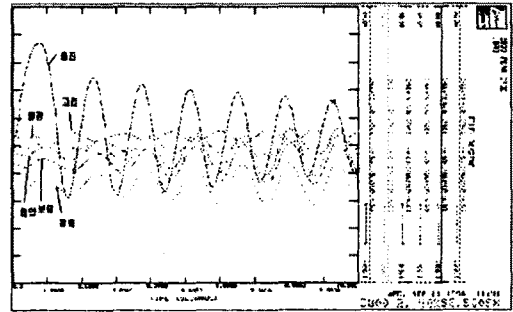


그림 2.11 CU00-1에서 직,병렬 동시보상시 발전기 Angle

상정사고시 발생했던 과부하는 직렬, 병렬 동시보상 적용결과 100.4%와 92%로 모두 감소되었으며 전압도 단일 보상시 보다 대체로 향상되어 더 좋은 결과를 보이고 있다.

병렬보상, 직렬보상, 직병렬 동시보상 적용에 의한 전압 보상효과를 살펴보면 병렬보상시에는 경인지역, 영동지역, 영남지역에는 전압보상 효과가 있으나, 중부지역과 호남지역에서는 전압이 더욱 낮아지는 결과를 가져오고 있다. 직렬 보상시에도 경인지역과 중부지역에서는 전압이 더욱 낮아지는 결과를 보이고 있으나, 영동지역과 호남지역, 영남지역에서는 전압보상효과를 보이고 있다. 직,병렬 동시보상시에는 전지역에서 고루 전압보상효과가 있으며, 특히 경인지역과 영동지역에서의 전압보상효과가 두드러지게 나타났다.

표 2.3.에서는 병렬보상, 직렬보상, 직병렬 동시보상시의 지역간 조류변화를 정리하였다.

표 2.3 직,병렬보상에 의한 지역간 조류변화

From	To	Base Case		상정사고시		병렬보상		직렬보상		직병렬동시	
		MW	MVar	ΔMW	ΔMVar	ΔMW	ΔMVar	ΔMW	ΔMVar	ΔMW	ΔMVar
영동	경인	4542	-640	-571	-643	+168	+447	+430	+330	+384	+489
중부	경인	5863	-391	+642	+169	-190	-142	-459	+291	-420	-3
중부	영동	1999	6	+521	+162	-110	-160	-355	+15	-321	-89
영남	영동	485	69	-881	+732	+216	-741	+789	-534	+670	-757
영남	중부	706	-193	+1015	+273	-257	+94	-706	+138	-645	+98
호남	중부	2927	-16	+254	+520	-71	-115	-1732	-194	-152	-87
영남	호남	1325	210	+275	-102	-76	+8	-171	-2	-163	-14

※ 상정사고시 조류변화는 Base Case와 비교, 직렬, 병렬보상효과는 상정사고시와 비교됨

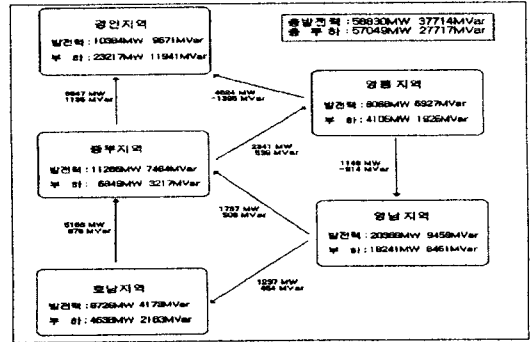


그림 2.13 SS06-1 에서의 지역간 조류분포

나. 장기 계통

(1) 신태백-신가평 765kV 차단시(CASE SS06-1)

가) 보상전

과도안정도는 그림 2.12에서와 같이 울진 발전기가 탈조하면서, 평택, 태안, 보령 발전기들의 위상각 진동이 증가하면서 불안정 상태로 진전되었다.

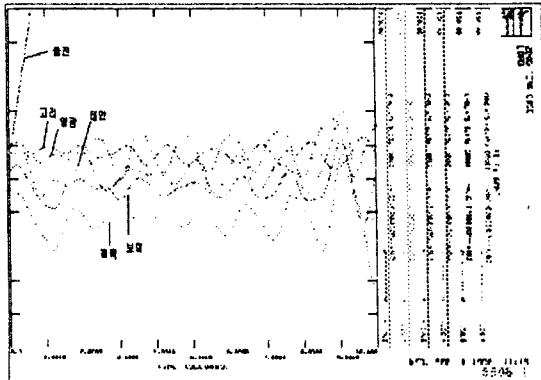


그림 2.12 상정사고 SS06-1 에서 발전기 Angle

상정사고시 345kV이상 송전선중 신양지 - 신성남 T/L은 134.7%, 청원 - 신옥천 T/L은 107.4%의 과부하가 조사되었으며, 전압기준을 위반한 모선으로서는 765kV 모선중 신가평/S/S (0.8396pu), 345kV 모선중 신제천S/S (0.7565pu)의 58개 모선에서 발생되었다.

이 경우 지역간 조류변화는 영동에서 경인으로의 조류가 감소하고, 영동서 영남, 영남에서 중부, 중부에서 경인으로의 조류가 증가하는 현상을 보이고 있다. 이를 그림 2.13에서 보았다.

나) 보상후

신태백-동해, 울진-신영주, 동해-신제천, 신영주-신제천, 신제천-신이천 간 345 kV 선로에 50%직렬보상을 적용하고, 5600(동해), 5500(신영주), 5700(신제천), 4750(신이천) 등의 모선에 900MVA 병렬보상을 적용하였다.

이 때의 과도안정도는 직렬보상시 그림 2.14와 같이 울진 발전기들의 진동이 계속되지만 증가하지는 않아 안정도가 유지되며, 병렬보상시는 그림 2.15과 같이 울진발전기가 탈조하고, 평택, 보령, 태안, 발전기들의 진동증가폭이 더욱 커지는 불안정 현상을 나타내고 있다.

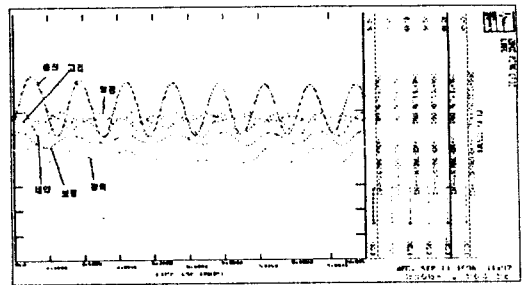


그림 2.14 SS06-1 에서 직렬보상시 발전기 Angle

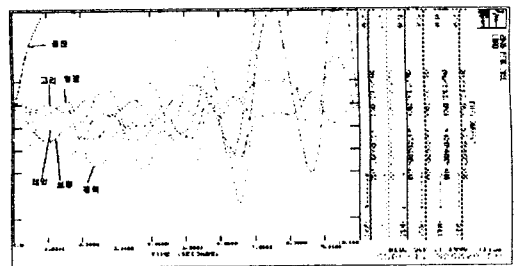


그림 2.15 SS06-1 에서 병렬보상시 발전기 Angle

상정사고시 발생했던 신양지-신성남 T/L 및 청원-신옥천 T/L의 과부하는 직렬보상시 134.7%→118.0%와 107.4%→84.0%로 감소되었고, 병렬보상시 134.7%→113.0%, 107.4%→89%로 각각 감소하였다.

직,병렬 동시보상시 과부하는 134.7% →114.8%와 107.4%→83%로 감소되어 직,병렬 동시보상 적용이 병렬이나 직렬의 단일 보상시 보다 더 좋은 결과를 보이고 있다.

이 경우의 과도 안정도는 울진 발전기들의 진동이 감소되고 있으며, 다른 발전기 들에서도 그림 2.16과 같이 안정해진다.

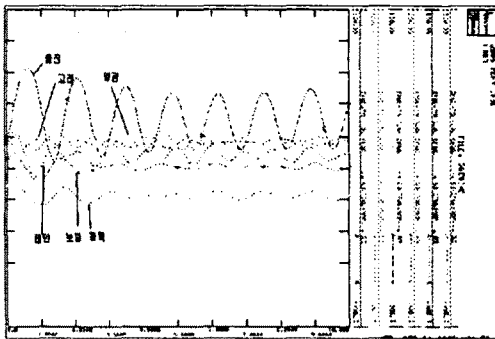


그림 2.16 SS06-1 에서 직병렬 동시보상시 발전기 Angle

병렬보상, 직렬보상, 직,병렬 동시보상 적용에 의한 전압 보상효과를 살펴보면, 직렬보상시에는 전압이 전반적으로 향상되고 있으나, 향상폭은 병렬보상시에 비해 적다. 직병렬보상시는 전압이 거의 기준내로 들어오게 된다.

표 2.4에서는 병렬보상, 직렬보상, 병렬 및 직렬 동시보상시의 지역간 조류변화를 정리하였다.

표 2.4 직,병렬보상에 의한 지역간 조류변화

From	To	Base Case 지역간 조류		상정사고시 조류변화		병렬보상 효과		직렬보상 효과		직렬 및 병렬 동시보상효과	
		MW	MVar	ΔMW	ΔMVar	ΔMW	ΔMVar	ΔMW	ΔMVar	ΔMW	ΔMVar
영동	경인	5721	-318	-1197	-1077	+310	-29	+646	+370	+596	+228
중부	경인	7314	271	+1233	+864	-320	-1005	-636	-579	-606	-859
중부	영동	1896	69	+445	+470	-135	-466	-273	-309	-262	-422
영남	영동	23	189	-1172	+725	+219	-754	+727	-478	+628	-710
영남	중부	271	321	+1466	+185	-464	-172	-836	-115	-807	-149
호남	중부	4755	-226	+413	+902	-142	-666	-235	-610	-231	-715
영남	호남	790	293	+447	+161	-164	-111	-260	-110	-257	-123

### 3. 결론

#### 3.1 중부 - 경인간 전력수송로

보령 발전소 출력을 90 % 수준으로 유지하면 345 kV 2 회선 차단 상정사고에도 안정도에 의한 병목현상은 발생하지 않는다. 그러나 발전소 출력을 95 % 이상 수준으로 올리면 보령 T/L 사고시 보령 발전기군이 불안정해지고 아산-화성-서서울간 345 kV 모선에서 무효전력 여유 부족으로 발생하는 전압불안정 현상을 확인하였다. 이 경우 보령-아산-화성-서서울간 345 kV 선로를 각각 30 % 보상하거나, 보령, 아산, 화성, 서서울 변전소에 각각 200 MVA 씩 병렬보상하면 전압 안정도에 의한 계통사고를 예방할 수 있다. 이는 직렬 혹은 병렬보상에 의해 해당 전력수송로의 송전용량을 약 450 MW 증대시키는 효과를 얻을 수 있음을 의미한다.

#### 3.2 울진 - 경인간 전력수송로

765 kV 신태백-신가평 2 회선이 차단되는 상정사고가 발생하면 여기에 연계된 발전기군이 탈조하는 불안정 현상이 나타나고, 또 이런 계통구성에서는 보상에 의한 안정화 방안이 현실적이지 못한 것으로 나타났다. 별도 송전선로 추가 건설이 확정되기전 까지 상정사고 대책으로서 보상방안을 검토하기 위한 모선연계가 가능하다고 전제하고 실제 운전조건에서 원자력 발전은 100 % 출력을 전제할 때, 765 kV 2회선 사고시 울진 발전기군의 안정도 유지를 위해서는 950 MW 2 기를 정지, 즉 울진 발전소 출력을 4,000 MW 수준으로 유지하여야 한다. 이 경우에 대해 CASE SS06-1 과 같이 해당선로를 각각 40 %씩 직렬보상하고, 해당모선에 각각 500 MVA 씩 병렬보상하면 동일 상정사고에 대해서도 울진 발전소 출력을 5,900 MW 로 하여도 안정하게 되어 결국 이 전력수송로의 송전용량을 1,900 MW 증대시키는 효과를 나타낸다.

#### 참고문헌

1. 전력연구원 “송전선로 송전용량 증대방안에 관한 연구” KRC-94Y-S12, 1996. 9
2. EPRI “Application of TCSC in New York State” EPRI TR 103641 1993.12
3. EPRI “Flexible ac Transmission Systems(FACTS): Scoping Study” Volume 1, Part 1, 1990. 8