

전력계통의 FACTS적용을 위한 직병렬 보상방안 연구

이근준* 장병훈 김영한

한국전력공사 전력연구원

The Study of Compensation Strategy for FACTS Application in Power System

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

KEPRI(Korea Electric Power Research Institute) of KEPCO

Abstract - This paper presents the study results of FACTS application plan for transmission capability Enhancement. Power transfer across the KEPCO system resulting from a concentration of load in the Kyung-In area are subject to thermal, voltage and stability constrains. In the analysis study of the KEPCO system in 2000 and 2006 year, voltage stability analysis, modal analysis and dynamic stability were simulated by the power system analysis tools(VSTAB, PSS/E).

Keywords : FACTS Application, transmission system, mid and long term power system

1. 서론

본 연구에서는 1995년 고시된 장기전력수급 계획과 전력계통설비 확충계획에 의해 작성된 중기 계통(2000년)과 장기계통(2006년)에 대해, 최근에 개발되고 있는 FACTS설비의 전력계통 적용에 의한 중장기적인 송전선로 송전용량 증대 방안을 검토하였다.

2. 중장기 계통분석

2.1 계통분석기준

정상상태에서의 계통분석기준은 상정사고 적용시 전력조류의 경우 345kV 계통에서 정격용량내에 들것과 각 모선의 전압이 1.05-0.95 pu이내일 것, 그리고 전압안정도 제약으로서 Q-V곡선상으로 임계전압이 0.95이상, Qmargin이 300Mvar 이상이 되도록 선정하고, P-V곡선상으로는 Pmargin이 100MW이상이 되도록 하였다.

2.2 중기계통 분석

중기계통(2000년)은 765kV 2개 루트가 계통에 병입되면서 345kV로 운전된다. 이때의 계통조류 및 지역간 전력용동은 그림 2.1과 같다.

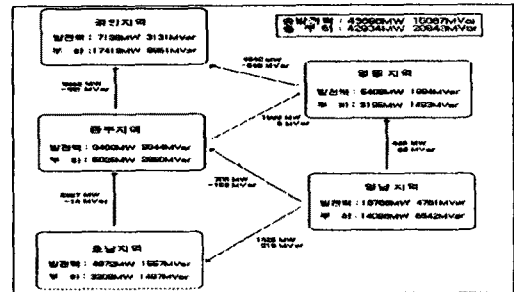
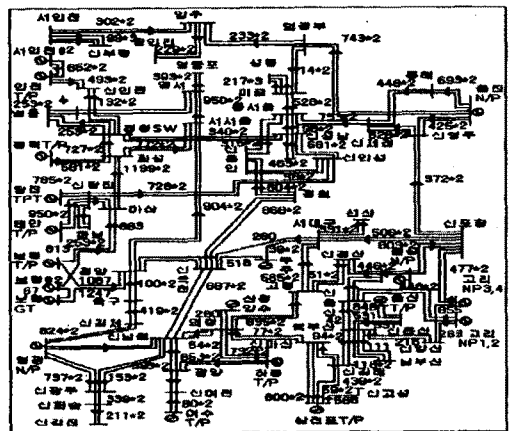


그림 2.1 중기계통에서의 계통조류 및 지역간 용동전력

상정사고는 중부 - 경인, 영동 - 경인간을 연계하는 주요 345kV 선로 사고, 345kV로 운전중인 765kV 선로가 초기 유지 보수 등으로 인하여 운전 정지된 상태에서 울진 345kV 변전소 부근의 345kV 선로 사고와 보령, 당진, 태안 발전단지 부근의 345kV 변전소 부근의 345kV 선로 사고 등이 발생하여 345kV 루트(병렬 2회선) 개방으로 고장을 제거하는 상정사고에 대해 과도안정도와 정상상태 전압안정도를 검토하였다.

(1) 과도안정도 분석

표 2.1에서와 같이 중장기 전력 수급 계획에 따라 가용한 모든 발전기 투입 운전을 고려한 설비 계획 측면에서 계통 구성에 대한 검토 결과 과도안정도는 모두 유지 되었으나, 대부분의 345 kV 2회선 사고에 대해 재동 특성이 나빠 계통 동요가 오래 지속되는 동적 안정도 문제를 나타내었다.

표 2.1 2000년 계통 안정도 해석 결과

계통상태	Case	상정 사고	안정여부
765 kV 선로 정상운전	SS00-1	신당진 345 kV 모선 부근 선로 사고	과도안정 동요지속
		신당진-신안성 345 kV 2회선 차단	
	SS00-2	울진 345 kV 모선 부근 선로 사고 울진-의정부 345 kV 2회선 차단	과도안정 동요지속
신안성- 신당진 765 kV 선로 정지시	CB00-1	보령 345 kV 모선 부근 선로 사고	부재동 (불안정)
		보령-청양 345 kV 2회선 차단	
	CB00-2	보령 345 kV 모선 부근 선로 사고 보령-청양 345 kV 2회선 차단	수렴안됨
울진- 의정부 765 kV 선로 정지시	CU00-1	아산 345 kV 모선 부근 선로 사고	수렴안됨
		아산-화성 345 kV 2회선 차단	
울진- 의정부 765 kV 선로 정지시	CU00-2	울진 345 kV 모선 부근 선로 사고	탈조
		울진-동해 345 kV 2회선 차단	
울진- 의정부 765 kV 선로 정지시	CU00-1	울진-동해 345 kV 2회선 차단	탈조
		울진-신명주 345 kV 2회선 차단	

특히 울진-의정부간 345 kV 2회선 차단시와 보령-청양간 345 kV 2회선 차단시(그림 2.2)진동이 오래 지속되었다.

또한, 765 kV 선로의 초기 유지 보수를 고려하여 765 kV 선로가 운전 정지중 상정사고시에는 발전기가 탈조하는 불안정현상을 보였다. 울진-동해간 345

kV 2회선 차단시 주요발전기의 과도안정도 특성은 그림 2.3과 같다.

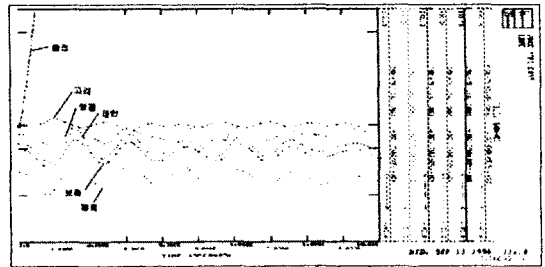


그림 2.2 상정사고 SS00-3 에서 발전기 Angle

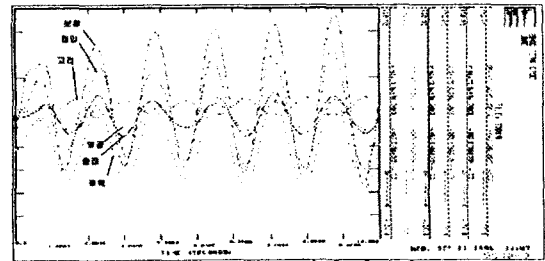


그림 2.3 상정사고 CU00-1 에서 발전기 Angle

(2) 정상상태 전압안정도 분석

표 2.1에 정리한 상정사고에 대해 EPRI 계통해석 프로그램 PSAPAC의 VSTAB(전압분포 및 전압안정도 해석 프로그램)을 이용하여 검토 하였으며, 그 중 다음의 상정사고에 대한 검토 결과는 다음과 같다.

(가) 보령 - 청양간 선로 사고(CASE SS00-3)

그림 2.4에서와 같이 4400, 4600, 6950 세 관측모선에 무효전력여유와 전압여유가 거의 없고 전압불안정 현상이 발생하는 임계점에 도달해 있음을 알 수 있다. 사고후계통에 대해 VSTAB을 이용하여 Modal Analysis를 수행한 결과, 고유치가 작은 불안정모드는 표 2.2와 같이 되었다.

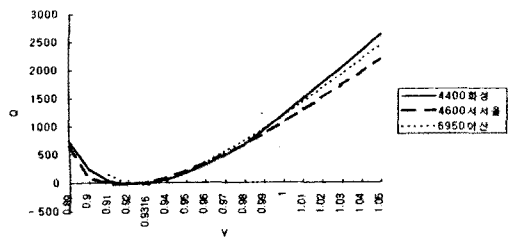


그림 2.4 CASE SS00-3의 Q-V 곡선

표 2.2 고유치 해석 결과

Mode No.	Eigenvalue	
	R	I
1	0.068965	0.00
2	0.969120	0.00
3	1.103630	0.00
4	1.281453	0.00
5	1.319654	0.00

표 2.2에서 Eigenvalue가 가장 작은 불안정한 Mode #1에 대한 Branch Participation Factor를 표 2.3에 정리하였다.

표 2.3 Mode #1에서의 Branch Participation Factor

FROM BUS	TO BUS	PFACTOR
6151(BOLNG#2)	6950(아산3)	1.0000
1500(의정부3)	5150(UJN/P#12)	0.8798
6150(보령 TP)	6950(아산3)	0.8680
4100(신안성SW)	6900(신당진12)	0.6897
4400(화성#1)	6950(아산3)	0.6184
1600(성동#1)	1700(미금345)	0.5903
2500(동서울3)	5700(신재천3)	0.5332
6100(태안TP3)	6900(신당진12)	0.4206
2400(영서3)	2600(영등포12)	0.4022
4600(서서울3)	6800(청양3)	0.3618
3350(서인천3)	3800(신부평13)	0.3468

(나) 울진-의정부간 765 선로 정지 중 울진-동해간 선로 사고 (CASE CU00-1)

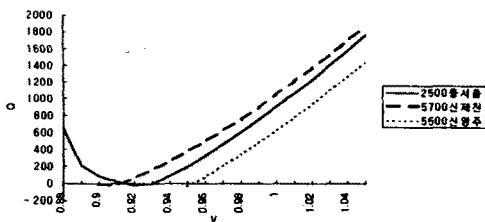


그림 2.5 CASE CU00-1의 Q-V곡선

그림 2.5에서와 같이 2500, 5500, 5700 세 관측모선에 무효전력여유와 전압여유가 거의 없고 전압불안정 현상이 발생하는 임계점에 도달해 있음을 알 수 있다. 사고후계통에 대해 VSTAB을 이용하여 Modal Analysis를 수행한 결과, 고유치가 작은 불안정모드는 표 2.4와 같이 되었다.

표 2.4 고유치 해석 결과

Mode No.	Eigenvalue	
	R	I
1	0.088855	0.00
2	0.947269	0.00
3	1.117714	0.00
4	1.210829	0.00
5	1.306513	0.00

표 2.4에서 Eigenvalue가 가장 작고 불안정한 Mode #1에 대한 Branch Participation Factor를 표 2.5에 정리하였다.

표 2.5 Mode #1에서의 Branch Participation Factor

FROM BUS	TO BUS	PFACTOR
2500(동서울3)	5700(신재천3)	1.0000
4600(서서울3)	6800(청양3)	0.7784
1600(성동#1)	1700(미금345)	0.7400
4100(신안성SW)	6900(신당진12)	0.5678
6151(BOLNG#2)	6950(아산3)	0.4324
4400(화성#1)	6950(아산3)	0.4244
5500(345KVSJ)	5700(신재천3)	0.4174
5150(UJN/P#12)	5600(동해3)	0.4125
6600(신옥천3)	7100(345KVSJ)	0.4083
6150(보령 TP)	6950(아산3)	0.3883

2.3 장기계통 분석

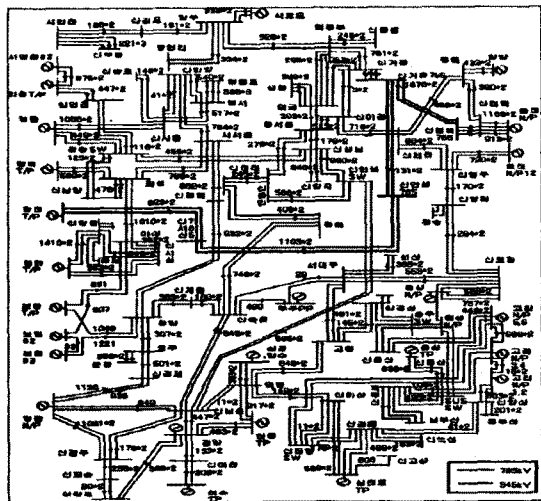


그림 2.6.(a) 장기계통에서의 계통조류 및 지역간 용동전력

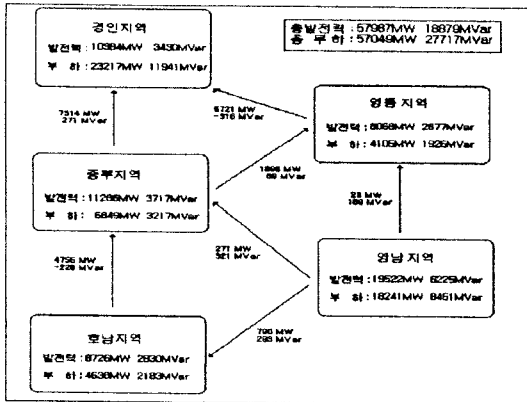


그림 2.6.(b) 장기계통에서의 계통조류 및 지역간 용통전력

장기계통(2006년)은 2000년 계통에 비해 345 kV 선로가 상당수 보강되고 신당진 - 신안성간, 신태백 - 신가평간 765 kV 선로가 정상 운전되고 있으며 이때 올린 발전소에는 3500 MW 2기, 1000 MW 4기 총 5,900 MW 발전설비 보령 발전소 부근에는 보령 4,620 MW, 태안 3,000 MW 그리고 당진 2,000 MW 발전설비가 정상 운전되고 있다는 점이다. 2006년 계통에 대한 계통조류 분포는 그림 2.6에 나타내었다.

(1) 과도안정도 분석

신태백 - 신가평 765 kV 2회선 차단 사고시에는 그림 2.7과 같이 올린 발전기군이 탈조하는 불안정 현상을 나타내었으며, 신안성 - 신서산간 765 kV 선로 차단 시는 무제동으로 불안정해지는 현상을 나타내었다.

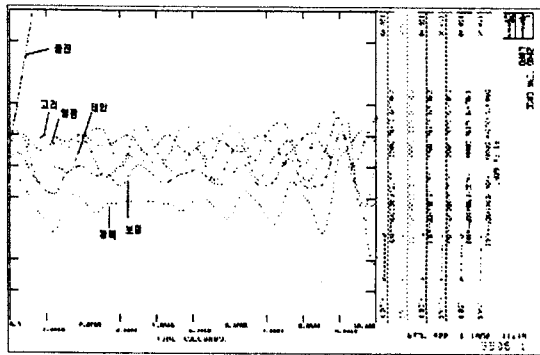


그림 2.7 상정사고 SS06-1 에서 발전기 Angle

보령 - 청양간 345 kV 2회선 차단시에는 제동력이 충분하지 않아 진동이 오래 지속되는 특성을 나타내었다. 검토 결과는 표 2.6과 같다.

표 2.6 2006년 계통 안정도 해석 결과

계통상태	Case	상정사고	안정여부
765 kV 선로 정상운전	SS06-1	신태백 765kV 모선 부근 765 kV 선로 사고 신태백-신가평 765 kV 2회선 차단	불안정
	SS06-2	신서산 765kV 모선 부근 765 kV 선로 사고 신서산-신안성 765 kV 2회선 차단	부제동
	SS06-3	보령 345kV 모선 부근 선로 사고 보령-청양 345 kV 2회선 차단	동요지속 (제동력부족)

(가) 신태백-신가평간 선로 사고(CASE SS06-1)

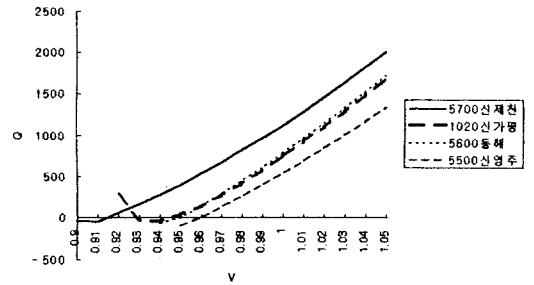


그림 2.5 CASE SS06-1의 Q-V곡선

그림 2.5에서와 같이 1020, 5500, 5600, 5700 네 관측모선에 무효전력여유와 전압여유가 거의 없고 전압 불안정현상이 발생하는 임계점에 도달해 있음을 알 수 있다. 사고 후 계통에 대해 VSTAB을 이용하여 Modal Analysis를 수행한 결과, 고유치가 작은 불안정모드는 표 2.7과 같이 되었다.

표 2.7 고유치 해석 결과

Mode No.	Eigenvalue	
	R	I
1	0.120859	0.00
2	1.126765	0.00
3	1.233141	0.00
4	1.273542	0.00
5	1.447663	0.00

표 2.7에서 Eigenvalue가 가장 작은 불안정한 Mode #1에서 Branch Participation Factor를 표 2.8에 정리하였다.

표 2.8 Mode #1에서의 Branch Participation Factor

FROM BUS	TO BUS	PFACTOR
1020(신가평12)	5010(신태백12)	1.0000
4010(신안성12)	6030(신서산12)	0.6439
1500(의정부3)	1750(신공릉12)	0.4655
1600(성동#1)	1700(미금345)	0.4126
4750(신이천12)	5700(신재천3)	0.3488
4100(신안성SW)	7100(345KVSNW)	0.3456
1400(양주3)	3100(석모도3)	0.3087
1020(신가평12)	4010(신안성12)	0.3068
6100(태안TP3)	6900(신당진12)	0.3065
3600(신시흥3)	3700(신송도12)	0.3040

2.4. 계통분석 결과 종합

정상상태 전압 안정도와 과도 안정도 검토 결과를 종합하면 계통 운전 조건과 상정사고에 따라 중부 전력 발전 단지와 경인지역을 연계하는 전력 수송로와 울진 원자력 발전소와 경인지역을 연계하는 전력 수송로에 병목 현상이 발생할 가능성이 있음을 확인하였다. 특히 765 kV 송전계통의 2회선 사고는 전력 수송 능력 저하 뿐 만 아니라 계통의 안정 운용을 제한하는 요인이 될 수 있다.

3. FACTS 적용방안

중기계통의 경우 과도 안정도는 765kV 선로가 정상 운전되면 전반적으로 안정한 결과를 보이고 있다. 그러나, 대규모 전원단지인 보령발전 지역으로부터 조류가 유입되는 345kV 보령-청양간 2회선이 차단되는 경우, 계통 동요가 확산됨으로서 불안정의 가능성을 보여주었다.

장기계통의 경우 765kV로 운전되는 선로가 개방되는 사고가 발생하면 전압안정도 및 과도안정도가 모두 불안정할 것으로 분석된다. 또한, 345kV 보령-청양간 선로사고시 대규모 발전력 이탈로 인하여 지속적인 동요가 발생하여 계통의 안정도 유지가 어려울 것으로 사료된다.

보상적용 대상선정은 중장기 계통분석에서 검토된 QV 곡선 해석으로부터 병렬보상 대상을 추정하고, PV 곡선 해석으로부터 유효전력 여유기준을 만족하는 병렬보상 위치 및 크기를 선정하였으며, Modal Analysis에 의해 구해진 후보 선로에 의해 선정된 직렬 보상 방안을 선정하였다.

가. 중기계통에 대한 FACTS 적용 대상방안

상정사고Case	보상방안	보상개소	보상량
SS00-3	직렬	보령-아산-회성-서서울 T/L	30%
	병렬	보령, 아산, 회성, 서서울 모선	200MVA
OU00-1	직렬	울진-신영주-신재천-동서울 T/L	50%
	병렬	신영주, 신재천, 동서울 모선	1000MVA
	직병렬	직렬:울진-신영주-신재천-동서울 T/L 병렬:신영주, 신재천, 동서울 모선	40% 500MVA

나. 장기 계통에 대한 FACTS 적용 대상방안

상정사고Case	보상방안	보상개소	보상량
SS06-1	직렬	신태백-동해 } 신재천-신이천 T/L 울진-신영주 }	50%
	병렬	동해, 신영주, 신재천, 신이천 모선	900MVA
직병렬	신태백-동해 } 신재천-신이천 T/L 울진-신영주 }	40%	
	병렬:신영주, 신재천, 신이천 모선	500MVA	

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