

동기 탈조 불안정 현상의 직·병렬 보상과 PSS에 의한 안정화 효과 분석

오태규*, 김학만*, 이영운*, 김영주**, 추진부**
한국전기연구소*, 전력연구원**

Comparison of Transient Stability Enhancement by Series/Shunt Compensation and PSS Application for Step Out Instability Phenomena

Tae Kyoo Oh*, Hak Man Kim*, Young Woon Lee*, Young Ju Kim**, Jin Boo Chu**
KERI*, KEPRI*

Abstract - Countermeasure for instability due to sudden changes like electric short circuit, line switching, generation/load dropping etc. in power systems have been sought in terms of intentional or controlled network changes such as series/shunt compensation and generation/load rejection etc. This paper presents the comparison of stability improving effects by series and shunt compensation for the first swing step out phenomena of a large capacity generating station.

본 논문에서는 대단위 발전소를 계통에 연계하는 기간 송전선로가 3상고장 사고에 의해 차단되는 상정사고에 의해 제 1과 동기탈조 현상을 나타내는 불안정 유형에 대해 전원제한에 의한 안정화 제어와 참고문헌[1]에서 제시하는 계통구성 변화 즉 직병렬 보상에 의한 안정도 향상 효과를 정량적으로 비교 분석하고 보상후 동요를 억제하기 위한 PSS 적용효과에 대해 기술하고자 한다.

1. 서 론

우리나라 계통은 지속적인 부하성장에 따라 발전설비 규모면에서 뿐만아니라 765 kV 송전계통의 도입등 계통구성면에서 대형 복잡한 계통으로 성장하고 있다. 특히 전원입지 획득의 어려움이 가중되면서 일부 지역의 발전설비 규모가 연계 운전조건에 따라서는 송전선로의 안정한계에 근접하여 가혹한 상정사고 발생시 불안정하게 되는 우려가 증대되고 있다. 또한 단위기 용량이 증대되고 계통 구성이 복잡해지면서 대단위 발전소 부근의 고장전류 크기의 증가로 계통구성에 따라서는 단위 발전소의 동기 탈조 불안정 유형 문제가 발생한다. 이러한 경향은 표 1.에서와 같은 지역 계통에서 계통구성 변경에 따라 가능성이 증대 되고 있다.

2. 계통구성변경에 따른 안정도 변화

발전기 자동전압 조정장치 혹은 PSS에 의한 계통 동특성 개선 효과를 연속제어 효과로 분류할 때 직렬 콘덴서 삽입, shunt reactor/capacitor 스위칭, 제동저항 투입등과 조작성은 계통구성 변경에 의한 안정도 향상 수단으로 분류하며, 크게는 부하차단 혹은 발전기 탈락 같은 제어 조작성도 포함한다.[1] 최근에는 사고파급 억제 혹은 단락전류 증가 억제 대책으로 정상상태에서는 분리되어 운전되던 모선 혹은 선로를 고장제거 후 절체 구성하여 계통이 원상태로 복구되기 전까지 기간에 안정도 확보를 도모하는 안정화 제어 수단이 검토되고 있다.[2]

이러한 계통구성변경 효과는 적용상정사고에 따라 등면적법에 의한 소위 first swing 안정도 해석 측면에서 상차각 곡선 크기의 변화 혹은 부하 크기의 변화로 표현된다. 즉 부하지역에서 발전기 탈락과 발전지역에서 부하 탈락은 등면적법에서 부하 증가로 모의되며, 제동저항의 삽입과 직병렬 보상은 상차각 곡선 크기 변화로 모의된다.

이러한 계통 조작성에 의한 안정도 향상 방안은 이론적인 강점에도 불구하고 실용적인 제어 기술의 미개발로 제한적으로 사용되어 왔으나 최근 고전압 대전류 전력용 반도체 소자를 이용한 고속 스위칭 전력전자 기술, 마이크로 컴퓨터 응용제어기술의 계통기술에의 접목으로 FACTS 기술로서 구현되는 단계에 이르르고 있다.[3] 여기서는 FACTS 기술에 의한 계통특성 개선에 대해서 보다는 미세한 동기화력 부족에 의한 불안정 현상이 우려될 시 발

표 1. 대단위 발전소 및 계통구성

구분	최대시설 용량 (MW)	송전선로 구성	계통구성 변경	비고
U지역	3,900	• 345 kV 2 route • 765 kV 1 route	모선 분할	단락전류 감소대책
B지역	4,800	• 345 kV 2 route	모선 분할	단락전류 감소대책
Y지역	3,900	• 345 kV 3 route • 765 kV 1 route ^a	모선 분할	단락전류 감소대책

* 1 route : 병행 2회선 송전선로로 구성됨
^a : 계통연계 보상

전기 탈락과 같은 전원제한에 의한 안정화 제어와 직병렬 보상에 의한 안정화 제어 효과를 비교 분석하여 안정화 대안으로서 가능성을 살펴보기로 한다.

3. 불안정 현상과 안정화 제어 효과

3.1 검토대상계통

본 연구에서 안정화 효과를 비교하기 위한 분석 대상 계통은 3,900 MW 규모의 발전단지가 345 kV 송전계통 3 route(1 route는 병행 2회선으로 구성됨) 로 부하중심지에 연결된 지역계통으로 하였으며, 이 부근의 계통구성과 사고전 송전선로 조류상태를 그림 1에 나타내었다. 정상 계통 구성상태에서 345 kV 1 회선 적정송전능력을 1,000 MW(열용량 한계는 약 2,000 MW)로 상정하면 6회선 모두 6,000 MW carrying capacity를 나타내며, 1 route 차단시 잔여 송전능력 역시 4,000 MW가 남아 향후 추가 설비 건설이나 무효전력 수급에 따른 전압 분포 문제를 고려하지 않을시 안정도 항상 방안에 의한 안정 운영 대책에 대한 검토 필요성이 있다.

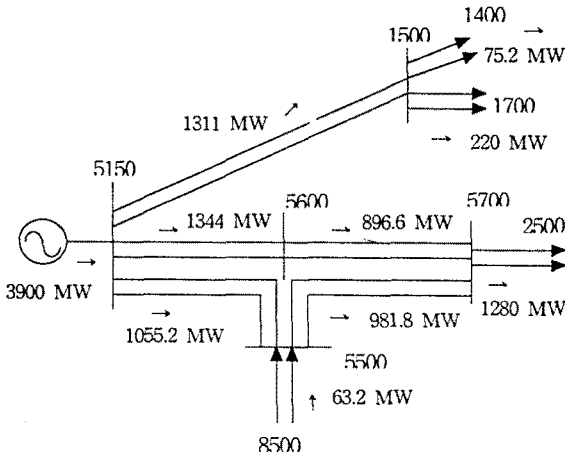


그림 1. 검토 대상 계통

그림 1에서와 같이 각각의 345 kV route 전력조류는 1055 MW에서 1311 MW로 거의 균등하게 배분되어 있으며, 모든 345 kV 전력수송로가 동일 부하 중심지로 연계되어 있다.

3.2 안정도 검토 결과

안정도 검토는 전체 계통을 대상으로 하였으며, 일반적인 PSS/E 계통해석 프로그램에 적용되는 발전기 및 제어계 모형과 표 2와 같은 부하 모형을 적용하였다. 상정사고는 5150 모선 부근에 3상단락 사고가 발생하여 6 Hz 간 지속속 5150 - 5500 모선간 345 kV 2회선 병행 선로 개방에 의해 제거되는 조건을 적용하였으며, 이 때 발전기는 최대 출력 운전상태이다.

표 2. 부하 모형

구분	정전력	정전류	정임피던스	비고
유효전력	52.05 %	12.73 %	35.22 %	최대부하
무효전력	35.51 %	8.27 %	56.22 %	
$P = P_0 \left(\frac{w}{w_0} \right)^a \quad : \quad a = 1.27$				
$Q = Q_0 \left(\frac{w}{w_0} \right)^b \quad : \quad b = 1.27$				

이 경우 5150 모선에 연계된 발전기 군은 그림 2에서와 같이 제 1과 동기탈조하는 불안정 현상을 나타낸다. 상차각 곡선에서 살펴보면 이 경우의 불안정 현상은 상당히 안정한계 근방에서 나타나는 현상으로 추정되며 실제 시뮬레이션 해석 결과에 의하면 발전기 출력 조정에 민감하게 변화하는 현상을 관찰할 수 있었다.

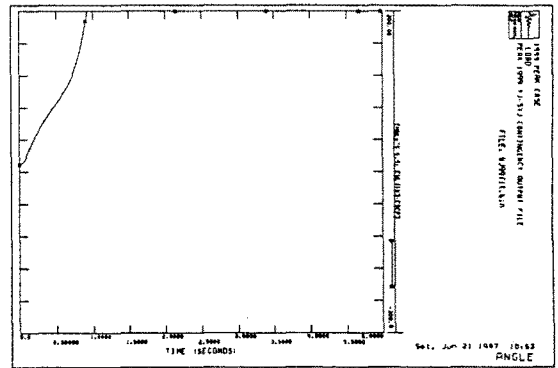


그림 2. 모선 5150-5500간 345 kV 병행 2회선 차단 상정사고시 대상 발전기 군의 위상각

3.3 안정화 제어 효과

이러한 불안정 유형을 방지할 경우 3,900 MW(전체 계통의 9.4 %)에 달하는 발전력 탈락을 초래하여 전체 계통의 안정도 유지에 어려움이 따른다. 또한 이러한 제 1과 동기탈조 불안정 유형에 대한 AVR 에 의한 안정화 효과는 미미하며, 단락사고-주요선로차단과 같은 급격한 계통구성 변경에 상응하는 제어수단을 필요로 한다. 여기서는 전원제한, 직렬보상, 병렬보상과 같은 수단에 의한 안정화 효과에 대해 살펴보기로 한다.

3.3.1 전원제한에 의한 안정화 제어

제 1과 동기탈조에 대한 안정화 제어 수단으로서의 전원제한은 제 1과 동요 4분의 1 주기 약 250 ms 근방에서 이루어진다. 이는 고장 감지, 불안정 여부 판단, 제어 조작 수행등의 요구 시간 제약과 제 1과 고유 진동 주파수에 의해 추정된 값이다.[4] PSS/E 모의해석에 의한 전원제한 효과를 그림 3에 나타내었다.

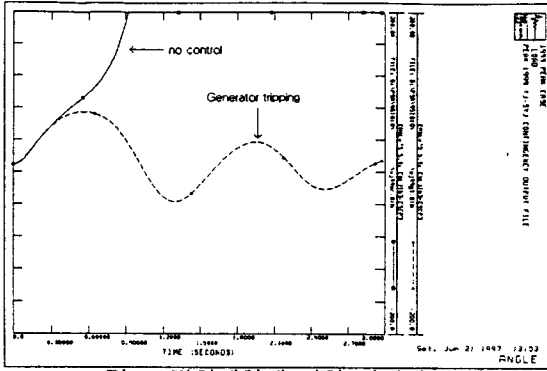


그림 3. 전원제하에 의한 안정화 효과

3.3.2 직병렬 보상에 의한 안정화 제어

보상에 의한 안정화 제어 효과를 살펴보기 위해 5150-5600 모선간 선로 보상, 5150-1500 모선간 선로 보상 효과를 분석하여 보다 보상효과가 크게 나타나는 5150-5600 모선간 선로에 대한 직렬보상 효과와 5600 모선에서의 병렬 보상에 의한 안정화 효과를 검토하였다. 표 3은 제 1과 동기탈조를 방지하기 위한 최소한의 보상요구량을 나타내며, 그림 4는 직병렬 보상량 간의 상관관계를 그림으로 나타내었으며, 이 때 주요 모선에서의 전압 분포를 표 4에 정리하였다.

표 3. 제 1과 탈조 방지를 위한 직·병렬 보상량

선택안	병렬 (MVar)	직렬 (MVar)(선로의 %)	
1	810	0	0
2	700	41	7
3	600	82	14
4	500	118	20
5	400	153	26
6	300	188	32
7	200	217	37
8	100	252	43
9	0	281	48

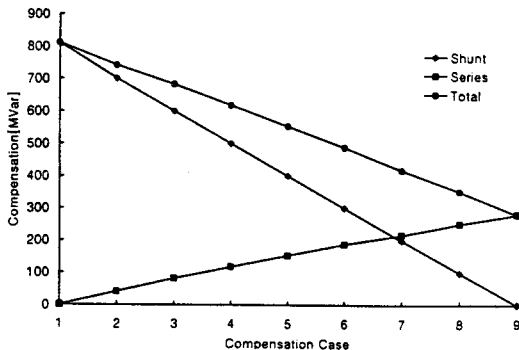


그림 4. 직·병렬 보상량

표 4. 주요 모선에서의 전압 분포

선택안	5150[PU]	5600[PU]	5500[PU]	1500[PU]
고장전	1.0280	1.0135	1.0247	1.0136
1	1.0340	1.0485	1.0351	1.0119
2	1.0323	1.0408	1.0326	1.0111
3	1.0309	1.0342	1.0303	1.0105
4	1.0293	1.0281	1.0282	1.0098
5	1.0277	1.0224	1.0263	1.0092
6	1.0260	1.0172	1.0244	1.0086
7	1.0242	1.0122	1.0227	1.0080
8	1.0226	1.0079	1.0213	1.0081
9	1.0209	1.0039	1.0199	1.0086

3.3.3 PSS 적용 효과

그림 5에서와 같이 급격한 계통구성변경에 따른 제 1과 불안정 현상에 대해 이에 상응하는 계통구성변경 조작으로 제 1과 동기탈조 방지는 가능하나 계통 제동 특성을 개선하기 위한 대책으로 PSS를 적용하여 그 효과를 살펴 보았다.

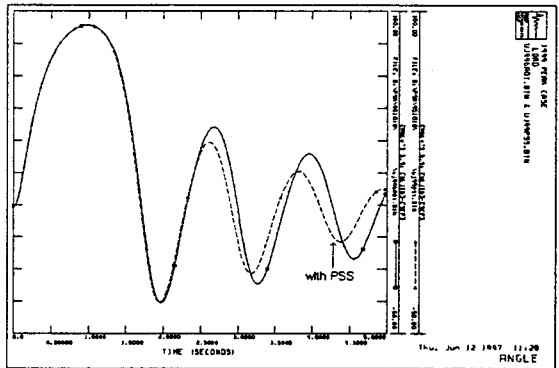


그림 5. 제동 특성 개선을 위한 PSS 적용 효과

적용 PSS 블록 다이어그램은 그림 6, 파라메타는 표 5와 같다.

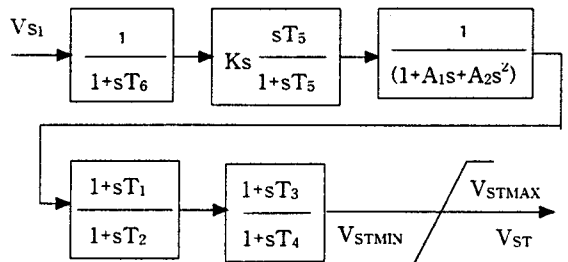


그림 6. PSS 블록 다이어그램

표 5. PSS 파라메타

기호	K_0	T_1	T_2	T_3	T_4
값	16.7	0.15	0.03	0.15	0.03
기호	T_5	T_G	V_{SMAX}	V_{SMIN}	
값	1.65	0	0.10	-0.066	

3.3.4 제동저항 적용효과

본 연구에서 검토 대상으로 한 대단위 발전소의 동기 탈조 불안정 유형에 대한 계통구성변경 조차으로 제동저항 삽입을 들 수있다. 제동저항의 규모와 시간정격은 안전성과 경제성을 상세 분석하여 선정하여야 하나 본 연구에서는 제 1과 동요기간 동안의 최대 각속도 편차에 따른 회전자 운동에너지 흡수하여 안정화를 도모하는 보조수단으로서 고장 발생후 3 Hz에서 30 Hz 까지 투입되는 조차방안에 대해 그 효과를 살펴보았다. 그림 7은 제동저항에 의한 안정화 제어 효과를 나타낸 것이고 그림 8은 소규모 제동저항 삽입에 의한 직렬보상과의 상호 보완적인 효과를 나타낸 것이다.

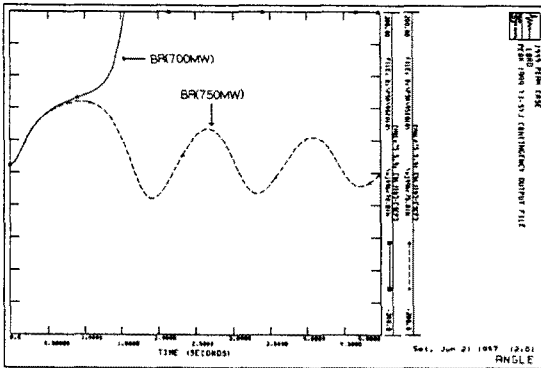


그림 7. 제동저항 적용 효과

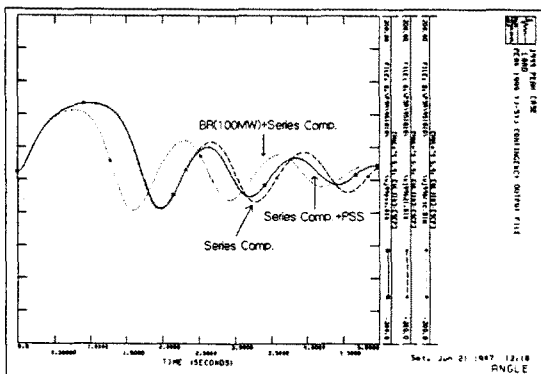


그림 8. 제동저항, 직렬보상, PSS 협조 적용 효과

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 대단위 발전소를 연결하는 기간 송전선로의 차단에 따른 제 1과 불안정 유형에 대해 계통구성변경에 의한 안정화 효과를 살펴보았으며, 발전소 용량이 대규모화 되면 될수록 송전선로 전력수송 능력은 동기 탈조 방지 및 계통동요 억제 측면에서 평가되어함을 보여 주었다. 본 연구 결과는 선형화 모형 수립에 의한 상세 검토전 단계에서 시간모의에 의한 계통 특성 분석에 의한 불안정 및 안정화 제어 효과에 대해 살펴보았다. 향후 직렬보상장치의 제어효과와 상호 협조에 의한 안정화 제어 연구를 수행할 예정이다.

[참고문헌]

- [1] Edward W. Kimbark, "Improvement of Power System Stability by Changes in the Network", IEEE Trans. PAS, May, 1969.
- [2] 佐藤 "高速과도안정도 판정법의 계통변경시에 있어서 적용한계 판정지표", 전기학회논문지B, 105 No. 5, pp 443-450, 1985.
- [3] "FACTS 연구기획사업", 과학기술처/한국전력공사 지원 특정연구사업 연구기획보고서, 1995.
- [4] 전력연구원, 실시간 시스템을 이용한 전력계통 안정화 제어·보호시스템 개발, 중간보고서, 1995.