

대규모 계통에서의 지역계통의 안정화 방안

김학만*, 전영환*, 오태규*, 김종일*, 김영선**, 김인섭**, 추진부**
 한국전기연구소*, 한국전력공사**, 전력연구원***

Improving Stability of a Large Capacity Generation Station of KEPCO System

H.M. Kim*, Y.H. Chun*, T.K. Oh*, J.I. Kim*, Y.S. Kim**, I.S. Kim**, J.B. Chu**
 KERI*, KEPCO**, KEPRI***

Abstract - This paper presents topics on transient stability enhancement at a large capacity generation station in Korea. The reinforcement of the transmission lines, generation tripping and reactive compensation are considered as alternative to improve transient stability. Comparative study results show characteristics of each alternative.

송변전 설비 계획에 따라 작성된 계통으로 검토 대상 지역계통의 연도별 발전 및 부하는 표 1과 같으며, 계통 구성은 그림 1과 같다.

1. 서 론

최근 우리나라 전력계통은 지속적인 경제성장과 정보화 산업의 발달로 산업 활동뿐만 아니라 사회생활 전체 분야에서 전기에너지에 대한 의존도가 높아지면서 전력 수요가 급속히 성장하고 있다. 또한 전기이용 측면에서는 국민 생활 수준의 향상과 정보 기기의 사용이 보편화되면서 양질의 전기를 신뢰도 높게 공급할 것을 요구하고 있다. 이러한 경제·사회적 요구에 부응하기 위해 전력계통은 발전설비에서부터 전력수송 및 배분에 이르는 각 부분이 양적인 성장과 아울러 구조적으로 복잡화 추세에 있다.

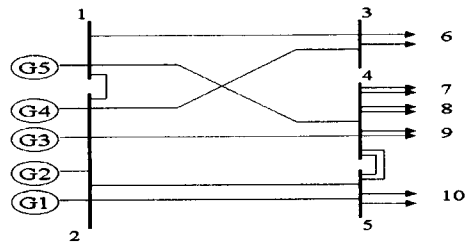
그러나 전력계통 측면에서는 전력수송설비 경과지 확보는 갈수록 어려워져 대전력 수송을 위한 765 kV 송전계통의 도입 등 전력수송밀도의 고도화가 불가피해지고 전력수요 밀집지역에서는 도시구조의 고도화 등으로 전력설비의 적기 확충이 어려워지면서 전력계통의 안정적 운용 면에서의 제약이 가중되고 있다. 특히, 우리나라의 경우는 전원지역이 해안지역에 밀집되어 있고 대단지로 구성되어 있어 대규모 발전 단지를 포함하는 지역계통에서 발전단지의 인근 계통 사고가 전체 계통에 미치는 파급효과는 가중될 것으로 전망되며, 대규모 발전 단지가 있는 지역계통의 안정화의 중요성에 대한 인식이 증대되고 있다[1-3].

본 논문에서는 중장기 전력 수급 계획에 의거 중·장기의 최대수요 예측치와 발전설비 건설 계획 및 송변전 설비 계획에 따라 작성된 계통에서 대용량 발전기가 밀집된 발전단지의 인근 계통 고장 시 제 1과 동기 탈조 불안정 발생이 예상되는 특정 지역계통에 대한 안정화 방안을 검토하였다. 발생이 예상되는 제 1과 동기 탈조 불안정은 동기화력 부족이 원인이며, 이에 대해서 안정한 계 출력을 검토하였으며, 동기화력을 보강할 수 있는 대안으로 선로 보강, 발전기 tripping, 무효전력보상에 대한 안정화 방안을 검토하였다.

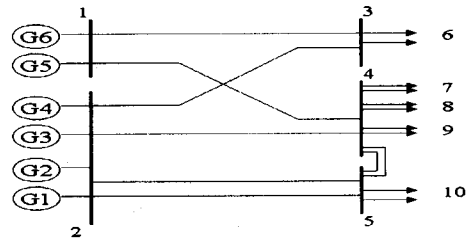
2. 지역계통 안정도

2.1 검토 대상 지역계통

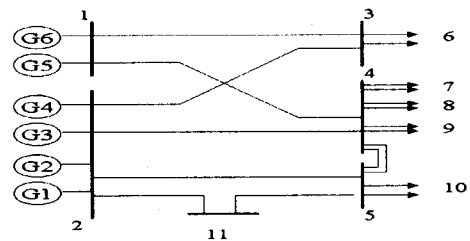
본 논문의 검토 계통은 중장기 전력 수급 계획에 의거 중·장기의 최대수요 예측치와 발전설비 건설 계획 및



(a) 구성 1



(b) 구성 2



(c) 구성 3

그림 1. 검토 대상 계통 구성도

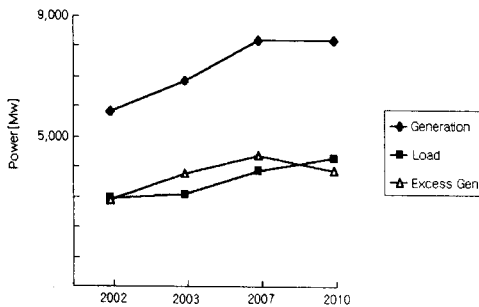
그림 1에서 (a), (b), (c)는 계통 성장에 따른 지역계통의 구성 변화를 보여주고 있다. 그림 1의 (a)는 950 MW 발전기 2기와 1,000 MW 2기가 345 kV 모선 2에 연결되어 있고, 1,000 MW 1기가 345 kV 모선 1에 연결되어 있으며 모선 1, 2는 연계되어 있다. 그림 1의 (b)는 계통은 모선 1에 1,000 MW 1기가 추가 연계됨으로써 모선 1, 2가 모선 분리되는 특징을 보이며, 그림 1의 (c)는 345 kV 선로 2-5사이에 모선 11이 π 분기로 신설 연계된다. 그리고 구성상 그림 1의 (c)와 유사하지만 장기계통에 대해서 추가 검토하였다.

그림 1에서 모선 3,5,6,7,8,9, 11은 154 kV의 하위 계급 계통으로 연계된다.

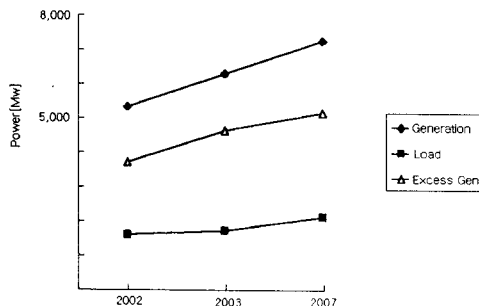
표 1. 검토 대상 연도별 발전 및 부하

검토 대상 연도	구분	전력	계통구성
A (Peak)	발전	43,504.2	구성1
	부하	42,904.3	
A (Off-Peak)	발전	25,052.3	구성1
	부하	24,627.4	
B (Peak)	발전	45,823.3	구성2
	부하	45,103.8	
B (Off-Peak)	발전	26,239.2	구성2
	부하	25,739.4	
C (Peak)	발전	54,134.4	구성2
	부하	53,424.8	
C (Off-Peak)	발전	32,153.6	구성3
	부하	31,614.6	
D (Peak)	발전	59,474.1	구성3
	부하	58,729.2	

발전량 측면에서 Peak 및 Off-Peak 시 검토 대상 지역계통의 발전량, 부하, 검토 대상 지역계통에서 초과 발전량으로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에서 지역의 발전량의 상당부분이 타 지역으로 수송되고 있는 주요 발전 지역임을 확인할 수 있고 특히, Off-Peak 시에는 대부분의 전력이 타 지역으로 수송되는 형태로 Peak 시 보다 Off-Peak 시 상대적으로 전체계통에 부담하는 발전량이 늘어나는 특징을 보인다.



(a) Peak 계통



(b) Off-Peak 계통

그림 2. 지역계통의 발전량, 부하, 초과 발전량

2.2 안정도 검토 기준 및 방법

검토 대상 계통은 기본계통을 해석 목적상 발전기 1~6의 출력을 100%로 하였고 조류계산 시 0.95~1.05 p.u. 사이로 전압을 유지하기 위해 MTr의 탭과 154 kV 모선의 SW Shunt 양을 일부 조정하였다. 그리고 Off-Peak시 발전기의 유효전력 출력을 벗어나는 발전기들은 검토 대상 지역계통 해석에 영향을 주지 않는 범위 내에서 발전량을 일부 조정하였다.

상정사고 적용은 표 2의 검토 지역 계통의 345 kV 모선 부근의 345 kV 선로에 3 상 단락사고를 적용하여 6 Hz 후 병행 2 회선 선로 개방 상정사고에 대해서 제 1과 동기 탈조가 발생하는 상정사고를 screen 하였다. 검토 시 부하 모형은 표 3, 4의 전압 특성을 가지는 ZIP 모형을 적용하였다.

표 2. 검토 상정사고

Case	상정 사고 선로
1	1-3, 2-3 각 1회선
2	1-4, 2-4 각 1회선
3	2-5 2회선(년도 1,2) 2-5, 2-11 각 1회선(년도 3,4)
4	3-6 2회선
5	4-7 2회선
6	9-10 2회선

표 3. Peak 계통 부하의 전압 특성

구분	정전력	정전류	정임피던스
유효 전력	52.05 %	12.73 %	35.22 %
무효 전력	35.51 %	8.27 %	56.22 %

표 4. Off-Peak 계통 부하의 전압 특성

구분	정전력	정전류	정임피던스
유효 전력	40.38 %	25.40 %	34.22 %
무효 전력	34.51 %	7.40 %	58.09 %

2.3 안정도 검토 결과

screen 결과 연도 A의 Peak 계통에서 Case 1, 2는 안정하였고 그 외 검토 연도별 Case 1,2,3은 제 1파에서 동기 탈조하는 안정도 문제가 발생하였다. 그리고 그 외 Case 4,5,6은 각 상정사고에 대해서는 안정하였다.

2.4 안정 한계 출력

안정도 검토 결과 제 1파 동기 탈조 불안정을 보이는 Case에 대해서 안정 한계 출력을 검토하기 위해서 안정화가 가능한 최대 출력을 검토하였다. 검토 방법은 각 상정사고에 대해서 발전기가 탈조하지 않도록 각 발전기의 출력을 동일 수준으로 각 발전기들의 출력의 합이 100단위씩 감소시켰으며, 발전력과 부하의 균형을 위해서 검토 대상 지역계통의 안정도에 상대적으로 영향을 적게 주도록 비교적 원거리의 발전량을 감발량 만큼 증가시켰다. 검토 결과는 그림 3과 같다. 그림에서 y축은 최대 출력 대비 안정 한계 출력[%]을 나타낸 것이고 x축은 아래의 상정사고를 나타낸 것이다.

3. 지역계통 안정화 방안

3.1 검토 안정화 방안

검토 대상 지역 계통 안정화 방안으로 선로 보강, 발전기 tripping에 의한 안정화 방안과 직렬, 병렬, 직병렬 등의 무효전력보상에 의한 안정화 방안을 검토하였다. 병렬 보상의 경우는 1과 탈조에 효과적이지 않아 본문에서는 상세 기술하지 않았다.

3.2 선로 보강에 의한 안정화

345 kV 2회선 선로 보강에 의한 안정도 방안으로 연도별 각 Case에 대해서 안정화가 가능한 방안으로 표 5와 같다.

표 5. 선로 보강에 의한 지역계통 안정화

보강선로	보상길이 [km]
1-3, 2-3 각 1회선	210.38
1-4, 2-4 각 1회선	317.62
1-4, 2-4 각 1회선 4-7 2회선	317.62

안정 출력 한계가 가장 작은 연도 B의 Off-Peak 시 Case 1에 대해서 1-3, 2-3 각 1회선 및 1-4, 2-4 각 1회선 선로 보강에 의한 안정화 효과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 실선 및 점선은 각각 계통 기준각에 대한 G1, G5의 상대적인 회전각이다.

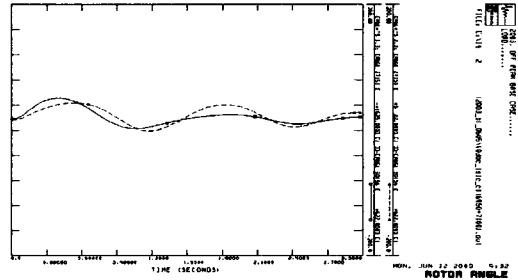


그림 4. 선로 보강에 의한 안정화

3.3 발전기 tripping에 의한 안정화

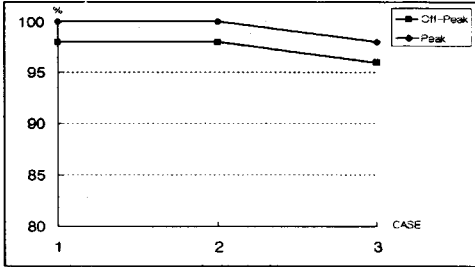
검토 대상 지역 계통에서 상정사고에 의해서 발생하는 1과 탈조를 방지하기 위하여 발전기 1~6의 tripping에 의한 안정화 방안을 검토하였다. 발전기 tripping은 계통에 고장이 발생한 후 0.15 초(9 cycle) 이후 tripping되는 것으로 하였다. 검토 결과 안정화를 위한 tripping 수는 아래의 표와 같다.

표 6. 계통 별 안정화를 위한 발전기 tripping

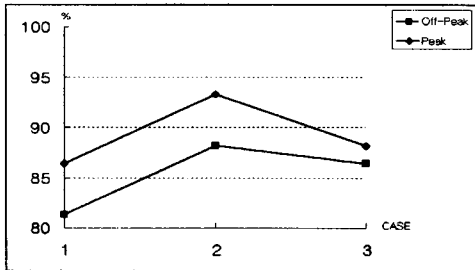
계통	연도	A		B		C		D
	구분	P	OP	P	OP	P	OP	P
tripping 수		1	1	2	2	1	2	1

P : Peak, OP : Off-Peak

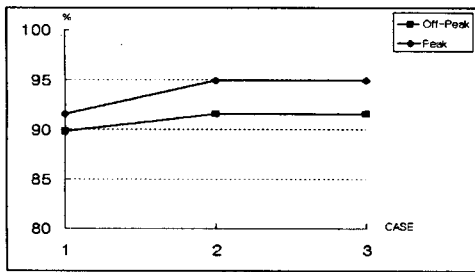
안정 출력 한계가 가장 작은 연도 2의 Off-Peak 시 Case 1에 대해서 발전기 tripping에 의한 안정화 효과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 실선 및 점선은 각각 계통 기준각에 대한 G1, G5의 상대적인 회전각이다.



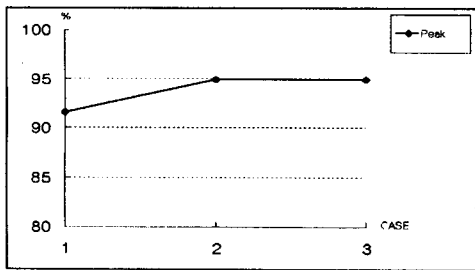
(a) 검토 연도 A



(b) 검토 연도 B



(c) 검토 연도 C



(d) 검토 연도 D

그림 3. 안정 한계 출력

안정 한계 출력을 검토한 결과, 연도 B의 Off-Peak 계통에서 제 1과 동기 탈조를 방지하기 위한 최대 출력은 발전기 최대 출력 대비 82~87%로 대상 발전 단지의 최대 출력인 5,900MW에서 800~1,100 MW 감발 운전되어야 하는 것으로 나타나 과도 안정도 측면에서 다소 가혹함을 보인다. 그리고 Peak 계통보다는 Off-Peak 계통에서 상대적으로 가혹함을 보여 그림 2의 지역계통의 초과 발전량과 관계가 있음을 보인다.

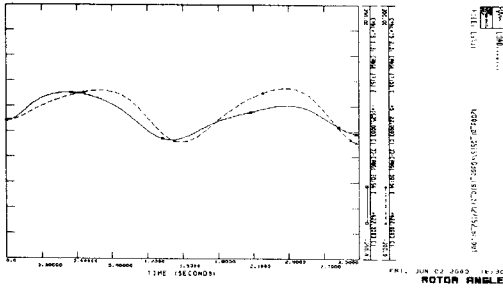


그림 5. tripping에 의한 안정화

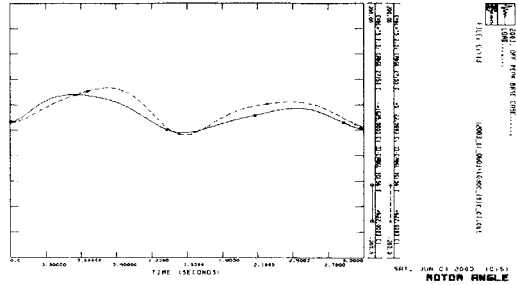


그림 7. 직렬 무효전력보상에 의한 안정화

3.4 무효전력보상에 의한 안정화

검토 대상 지역 계통 안정화를 위해 직렬, 병렬, 직·병렬 무효전력보상의 적용에 대해서 검토하였다. 병렬 및 직·병렬 무효전력보상의 병렬 부분에 대해서는 그림 6의 STATCOM 모형[4]을 이용하였다.

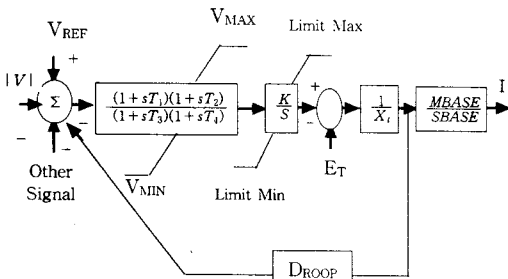


그림 6. STATCOM 모형

검토 결과, 병렬보상의 경우는 1과 탈조 방지에 효과적이지 못하였고 안정화를 위한 직렬 및 직·병렬 보상량은 다음 표 6, 7과 같다. 즉, 직렬의 경우는 1-4, 2-4 선로에 65% 보상과 동시에 1-3, 2-3 선로에 70% 보상할 경우 연도별 각 Case에 대해서 탈조가 방지되었고 직·병렬 보상의 경우는 표 7과 같이 병렬 보상량에 따라 2가지 대안이 가능하다. 표 7에서 모션* 표시는 병렬 보상 모션위치를 나타낸다.

표 6. 안정화를 위한 직렬 보상량

보상선로	직렬보상율 (%)
1-4, 2-4	65
1-3, 2-3	70

표 7. 안정화를 위한 직·병렬 보상량

대안	보상 선로 및 모션	병렬보상량 (MVar)	직렬보상율 (%)
1	1-4°, 2-4°	100	60
	1-3°, 2-3°	200	65
2	1-4°, 2-4°	-	65
	1-3°, 2-3°	200	65

안정 출력 한계가 가장 작은 연도 B의 Off-Peak 시 Case 1에 대해서 직렬 및 직·병렬에 의한 안정화 효과를 그림 7, 8에 나타내었다. 그림에서 실선 및 점선은 각각 계통 기준각에 대한 G1, G5의 상대적인 회전각이다.

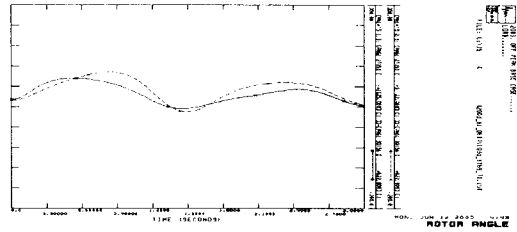


그림 8. 직·병렬 무효전력보상에 의한 안정화

그리고 연도 B의 Off-Peak 시 Case 1에 대해서 직렬보상이 된 경우 주요 345 kV 선로의 조류를 검토하였다. 검토 결과는 아래의 표 8과 같다. 표 8에서 사고 후 부하율은 실제로는 사고 후 새로운 평형점에 도달하지 못하지만 조류계산 상에서 구한 새로운 평형점에 도달한 가정하의 선로의 조류를 나타낸 것이다. 표 8에서 선로 조류(%)는 열용량 대비 조류를 나타낸 것이다.

표 8. 직렬보상에 의한 선로 부하율 변동

주요 선로	사고 전 조류(%)	사고 후 조류(%)	직렬보상시 사고 후 조류(%)
1-3	50	-	-
2-3	45	-	-
1-4	37	46	87
2-4	33	106	56
2-5(2회선)	45	65	57

100% = 2,220MVA

표 8에서 직렬보상의 경우 주요선로의 조류가 최대 87% 까지 향상되면서 안정화가 가능함을 보인다.

4. 결 론

본 논문에서는 우리나라 중장기 계통에서 대용량 발전 단지가 있는 특정 지역 계통에서 제 1과 탈조 방지를 위한 안정화 방안에 대해서 검토하였다. 이 지역 계통은 발전량의 상당부분이 타 지역으로 수송되고 있는 주요 발전 지역으로 특히, Off-Peak 시에는 대부분의 전력이 타 지역으로 수송되는 형태로 Peak 시 보다 Off-Peak 시 상대적으로 전체계통에 부담하는 발전량이 늘어나는 특징을 보인다. 이 대용량 발전단지의 인근 주요 345 kV 선로의 3상 고장이 발생할 경우 제 1과 동기 탈조

하는 불안정 현상이 발생하는데, 이에 대해서 본 논문에서는 안정화 대안으로 선로 보강, 발전기 tripping, 무효전력보상에 대해서 안정화 가능 양과 안정 효과를 검토하였다. 본 논문을 통해서 확인된 사항은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- a) 검토 대상 계통에서 발전단지의 최대 출력의 82% 수준이상의 출력일 경우 동기 탈조하는 불안정이 발생하였고 특히 Peak 시 보다 Off-Peak 시에 안정도 측면에서 열악함을 확인하였다.
- b) 동기화력 부족으로 발생하는 제 1파 동기 탈조에 대해서 선로 보강, 발전기 tripping, 직렬, 직병렬 보상으로 동기 탈조를 방지할 수 있음을 확인하였다. 그리고 상대적으로 직렬 보상이 병렬 보상 보다 효과적으로 나타났다.
- c) 직렬보상의 경우는 선로의 이용률을 높이면서 안정화가 가능함을 보였다.

제 1파 동기 탈조 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서 검토한 결과를 적용할 경우 다음의 사항에 대해서 상세 검토가 요구된다.

- a) 발전기 tripping의 경우, 공급신뢰도 측면에서 파급 효과에 따른 상세 검토가 이루어져야 한다.
- b) 병렬보상 보다 제 1파 탈조 동기 탈조 문제에 우수한 결과를 보이는 직렬보상을 적용할 경우 SSR에 대한 방지 대책에 대한 수립 또는 효과적인 제어기 구성에 대한 검토가 이루어져야 한다.

[참 고 문 헌]

[1] T.K. Oh, H.M. Kim, Y.J. Kim, H.S. Lee and E.S. Suh, "On-Line Out-of-Step Prediction Scheme using Equal Area Criteria based on Power Angle Curve Estimation", Proceedings of CIGRE International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Sep., 1999.

[2] T.K. Oh, H.M. Kim, Y.J. Kim and H.S. Lee, "On-line Out-of-step-prediction and Determination of Generation Tripping for Emergency Control of Power Systems", Proceedings of IERE '99, Sep., 1999.

[3] T.K. Oh, H.M. Kim, C.M. Kim and H.K. Rju, "Stabilizing Scheme Application for Improving Power System Security in Korea", IEEE PES Winter Meeting, 2000.

[4] Power Technologies Inc., PSS/E-24 Power System Simulator Program Operation Manual & Application Guide, Dec. 1995.