

대전원단지의 과도안정도 불안정현상 완화방안에 대한 연구

주 준 영 송 석 하 김 입 경
한국전력거래소 계통기술처

A Study of the Improving Power System Reliability According to the Unstable Transient Stability in the Bulk Power Station

Joon-Young Joo, Seok-Ha Song, Ib-Kyoung Kim
Power System Management Department, Korea Power Exchange

1. 서 론

전력수요의 증가와 더불어 전력계통은 대규모, 복잡화 되면서 전원의 대단지화와 지역적인 편중으로 소비지역까지의 원거리 대용량 전력수송이 불가피하게 되었으며 이로 인한 전압안정도, 과도안정도 불안정 등 공급신뢰도 확보에 많은 어려움을 내재하고 있다. 이런 상황에서 전체 발전용량이 400만kW에 이르는 대전원 단지가 위치한 울진지역에 100만kW의 발전기가 신규로 추가운전됨에 따라 과도안정도 불안정 현상이 심화되는 것으로 나타났다. 이에 따라 효과적인 대책을 적용하여 대전원 단지 계통의 안정적 운영을 도모코자 우선적으로 발전기 운전상태별로 관련계통의 정상상태와 상정고장 시 조류 계산 및 전압의 변화를 검토하고, 과도안정도 측면을 고려하여 계통운영상 문제점 분석 및 대책수립 사례를 살펴보고 향후 개선방향을 모색하여 보았다.

2. 본 론

2.1 과도안정도의 정의 및 검토기준

가. 과도안정도 정의

전력계통이 어떤 조건하에서 안정적으로 운전 중 급격한 외란(계통고장에 의한 송전선로 차단 등)에 따른 계통동요의 과도(고장발생 후 2~3초 이내)현상이 발생하더라도 다시 안정상태로 회복하여 발전기가 동기운전을 지속할 수 있는 정도를 말하며 여기에는 각종 제어장치의 운동사항 까지 포함한다.

나. 검토기준

과도안정도는 관련발전소 진출력 운전상태에서 발전소 인근 3상단락 고장(0.1초간 지속)으로 발전소 연결 송전선로의 1~2회선 정지 후 재폐로 실패조건(재폐로계전기 운전 시)을 기준으로 하며, 불안정할 경우 안정을 위해 발전기를 탈락시키는 이른바 고장파급방지시스템 운전(아래 2.2.3항 참조)을 고려한다.

다. 위의 상정고장 및 전력계통 안정유지 기준은 산업자원부 고시 제2003-36호(전력계통신뢰도및전기품질유지기준;03.4.2)와 전력시장 운영규칙에 따른다.

2.2 검토내용

2.2.1 사례계통

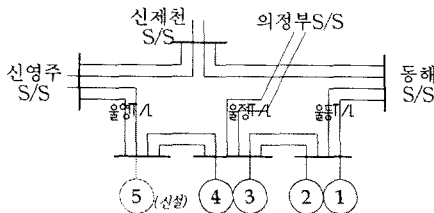


그림1 관련 계통도

2.2.2 발전기별 정격

표1 발전기별 정격출력 및 단자전압

구분	기설		신설
	1,2호기	3,4호기	5호기
정격출력(만kW)	95	100	100
단자전압(kV)	22	22	22

2.2.3 현행 고장파급방지시스템 운전현황

- 345kV 울동T/L 2회선 정지 : 1호기 차단
- 345kV 울영T/L 2회선 정지 : 3호기 차단
- 345kV 연락#3,4T/L 2회선 정지 : 3호기 차단

2.2.4 인근 전력설비 보강계획

- 765kV 신태백S/S 운전 : '04.9월
- 345kV 울진~신태백T/L 2회선 : '05.6월

2.3 검토조건

- 가. '03년도 동계 전력계통
- 나. Peak 전력 : 4,650만kW
- 다. 부하특성

표2 부하특성 [단위:%]

구분	정전력	정전류	정임피던스
유효전력	50.8	14.1	35.1
무효전력	26.3	29.3	44.4

라. 계통해석 Tool : PSS/E (V.29)

2.4 과도안정도 검토

2.4.1 검토결과

발전기 추가 운전에 따른 과도안정도 검토결과(표3, 그림2 참조) 관련 345kV T/L의 2회선 고장정지시 불안정 및 변전소 연계 송전선로 1회선 고장정지시 불안정 현상이 나타나 이에 대한 안정대책으로 발전기 1~2대를 차단하여야 하는 결과가 도출되었다.

표3 과도안정도 검토결과

고장선로명	고장전 조류 [만kW]	안정판별	안정대책 (차단대수)
울동 2회선	175.9	불안정	2대
울영 2회선	163.9	불안정	2대
울정 2회선	153.4	불안정	2대
연락#1,2 2회선	15.1	불안정	1대
연락#3,4 2회선	63.1	불안정	1대
울동 1회선	88.0	불안정	1대
울영 1회선	82.0	불안정	1대
울정 1회선	76.7	불안정	1대
연락#1,2 1회선	7.5	불안정	1대
연락#3,4 1회선	31.6	불안정	1대

2.4.2 주요 문제점

특히 송전선로 단일고장(1회선 고장정지)시에도 100만kW의 대용량 발전기를 차단하여야 하는 안정대책이 필요하게 되었으며, 이는 송전선로 차단은 곧 발전기 차단을 의미하는 것으로 345kV 송전선로 간선계통의 환상망 운전이 무색해졌다.

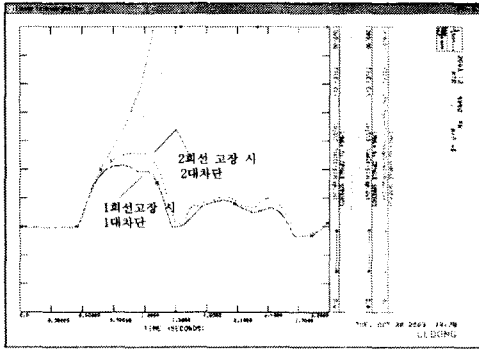


그림2 울동T/L 1~2회선 정지시 과도안정도

2.5 과도안정도 개선방안 (계통운영 측면)

과도안정도의 개선을 위해서는 전력설비의 보강이 가장 효과적이거나, 송전선로 보강계획은 울진6호기 준공예정인 '05년 6월로 예정되어 있어 5호기 시운전~6호기 준공일 까지는 안정도가 불안정으로 진행되어 갈 수밖에 없어 우선적으로 효율적인 계통운영 방안을 도출하여 발전기 차단대수의 최소화를 도모코자 ①계통운전 형태의 적정변경과 ②울진연락T/L의 재폐로 기능의 정지를 적용하였다.

2.5.1 계통운전 형태변경

그림3과 같이 울진5호기를 신영주~울진N/P간 울영#2T/L을 이용 단독으로 운전토록 하여 울동, 울정T/L의 1회선 고장정지 시에도 발전기의 안정운전이 가능토록 하였으며 울정T/L의 경우 2회선 정지시 1대만을 차단하여도 안정한 결과를 얻을 수 있었다.

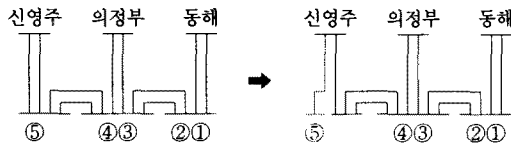


그림3 계통변경 개요도

2.5.2 연락T/L 재폐로 운전정지

울진연락T/L의 경우 발전소 switch yard간을 연결하는 기능으로 재폐로 실패시 발전기 근단고장의 형태가 되어 이는 발전기에 미치는 영향이 지대할 수 밖에 없다. 그러므로 연락T/L 고장정지시 재폐로를 미시행토록 함(필요시 근무자에 의한 수동가압)으로서 계통의 충격을 최소화시킬 필요가 있다. 이에 따라 연락#1,2T/L의 경우 1~2회선이 고장정지 시에도 안정하며, #3,4T/L의 경우 1회선 고장정지 시 안정하여 발전기 차단대수의 최소화를 기하도록 하였다.

2.5.3 효과

○상기 대책을 적용함으로써 얻어지는 차단대수의 감소효과는 아래와 같다.

표4 동일루트 2회선 고장정지시 발전기 차단대수

	울동T/L	울정T/L	울영T/L	연락#1,2T/L	연락#3,4T/L
현재	2대	2대	2대	1대	1대
개선후	2대	1대	2대	-	1대
증감	-	Δ1	-	Δ1	-

표5 1회선 고장정지시 발전기 차단대수

	울동T/L	울정T/L	울영T/L	연락#1,2T/L	연락#3,4T/L
현재	1대	1대	1대	1대	1대
개선후	-	-	1대	-	-
증감	Δ1	Δ1	-	Δ1	Δ1

○울진N/P 362kV GIS의 경우 5호기와 울영#2T/L간 연결되는 Bay의 모선CB만을 OFF하고 잔여CB를 모두 투입하여 운전함으로써 잔여 13개Bay의 경우 1.5CB방식 유지로 그 장점(모선고장 및 설비의 유지보수 등)을 얻을 수 있으나, 근본적인 안정운명을 위해서는 대용량 발전기의 경우 시운전 시점에 맞추어 선로보강 등의 대책이 적기에 이루어져야 할 것이다.

2.6 과도안정도 개선방안 (전력설비 측면)

일반적으로 과도안정도를 향상시키는 방안은 수식(1)과 수식(2)로 표현되는 동기기의 동요방정식 및 등면적법 등으로 부터 유도할 수 있으며, 크게 계통의 직렬 리액턴스 감소, 전압변동의 감소, 고장시 발전기 입출력차의 감소 등의 3가지 방안으로 분류할 수 있다.

$$P_e = \frac{E_a E_b}{X} \sin \delta_{ab} \quad (1)$$

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d \delta}{dt} = P_m - P_e \quad (2)$$

여기서는 계통변경(5호기 단독운전)에 의한 안정운영 방안 대신 ①전력설비의 보강[전압변동(Ea, Eb)의 감소를 위한 정지형 무효전력보상장치(SVC)의 설치와 계통 직렬리액턴스(X)의 감소를 위한 중간조상방식 적용]과 ②발전기 속도변화 감지를 이용한 차단방안의 적용 방법 등으로 발전기의 안정적인 운전방법을 제시코자 한다.

2.6.1 정지형 무효전력보상장치(SVC) 설치

각종 보고서(수도권 유통전력 향상방안, 계통보호시 안정도를 고려 등)에서 계통의 안정성 향상을 위한 방법으로 수도권과 인근지역에 순동 무효전력 보상장치 설치를 권고한 바 있다. 50만kVAr 용량의 SVC를 신제천변전소, 동해변전소, 울진N/P 모선에 설치 시 과도안정도의 개선효과를 비교하여 보았다.

2.6.1.1 울진N/P 50만kVAr 설치시

울진N/P 3,4호기 S/Y에 50만kVAr의 SVC를 설치할 경우, 송전선로 1회선 고장정지에 의한 불안정 현상은 없으며, 모든 2회선 정지시 발전기 1대차단으로 발전기가 안정되었다.

2.6.1.2 신제천S/S 50만kVAr 설치시

신제천S/S에 50만kVAr의 SVC를 설치할 경우, 송전선로 1회선 고장정지에 의한 불안정 현상은 없으며, 2회선 정지시 울동, 울영T/L의 경우 2대차단, 울정T/L은 발전기 1대차단이 필요하였다.

2.6.1.3 동해S/S 50만kVAr 설치시

동해S/S에 50만kVAr의 SVC를 설치할 경우, 과도안정도상의 결과는 신제천S/S 설치의 경우와 동일하게 나타났다.

2.6.1.4 종합비교

50만kVAr의 SVC를 설치할 경우 울진N/P 과도안정도는 선로 1회선 고장정지에 의한 불안정 현상의 방지 및 울정T/L 정지시 발전기를 1대차단으로 개선 가능(그림 4)하며, 표6과 같이 울진N/P측에 시설할 경우 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 수도권 유통전력 향상을 기대한다면 신제천S/S에 운용하는 방법을 적극 모색할 필요가 있겠다.

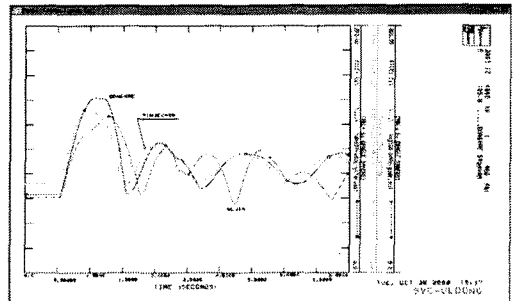


그림4 SVC 시설 후 울동T/L 2회선 정지시 검토결과

표6 SVC 시설 후 2회선 고장정지시 검토결과

설치위치	선로	울동T/L	울정T/L	울영T/L
현재		2대	2대	2대
울진N/P		1대(Δ1)	1대(Δ1)	1대(Δ1)
신제천S/S		2대	1대(Δ1)	2대
동해S/S		2대	1대(Δ1)	2대

2.6.2 중간조상방식

2.6.2.1 신태백S/S

인근 변전소 연계하는 송전선로중 울진~의정부T/L에서 2분기하여 신태백S/S에 연결 예정임에 따라 765kV 설비 운전 전 신태백S/S 모선에 50만kVar의 SVC를 설치할 경우, 울진~신태백T/L 2회선 정지 시 울진N/P 2대차단 외 나머지 경우는 모두 안정하였다. (그림5,6참조)

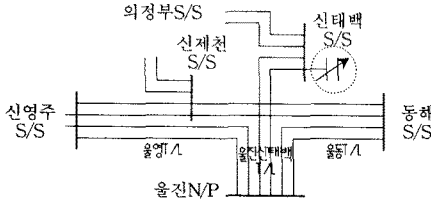


그림5 신태백S/S SVC 50만kVar 시설 계동도

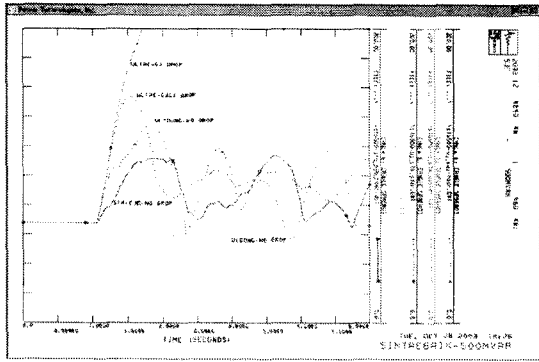


그림6 신태백S/S SVC 50만kVar 시설 후 인근 345kV T/L 2회선 정지시 검토결과

2.6.2.2 신제천 및 신태백S/S

장차 765kV 운전시 신태백S/S에 20만kVar 단위의 Sh.R를 설치 운전할 예정이므로 이 사항을 고려하여 신제천S/S에 50만kVar의 SVC 운전을 추가 설치를 반영할 경우 (그림7, 표7 참조)

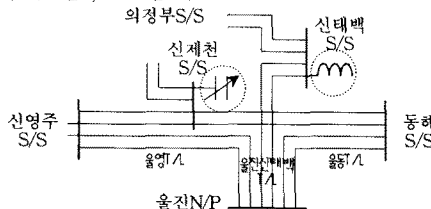


그림7 신제천(SVC), 신제천(Sh.R)시설 계동도

울진N/P 인출선로의 정지시 신태백S/S Sh.R의 연동차단을 적용한 결과 울동, 울영, 울진~신태백T/L 2회선 정지시 1대 차단으로 안정함을 알 수 있어, 향후 울진6호기의 시운전 기간중에 울진N/P 연계T/L과 Sh.R간 연동차단을 적극 모색할 필요가 있겠다.

표7 중간조상방식 적용 후 검토결과

- ① : 신태백S/S(SVC 50만kVar)
- ② : 신태백S/S(Sh.R 20만kVar)+신제천S/S(SVC 50만kVar)

	울동T/L	울진신태백T/L	울영T/L
현재	2대	2대	2대
①	안정(Δ2)	2대	안정(Δ2)
②	1대(Δ1)	1대(Δ1)	1대(Δ1)

2.6.3 발전기 속도변화에 따른 차단방식

2.6.3.1 개요

인출 송전선로 2회선 정지 직후 발전기의 가속력을 판단(3상단락>1선지락 등)하여 발전기 차단여부를 판정할 경우 가장 효율적인 방법이 될 수 있다. 검토결과 인출단 3상단락 고장시 각종 고장조건(특히 발전단지 출력크기)별 차이가 미미하여 구분이 힘들었다. 이에 따라 발전기 1대를 차단하여 발전단지를 우선 안정시키고 이후 발전기의 속도변화 추이에 따라 추가로 1대 더 차단여부를 확정하는 방식으로 접근하여 보았다.

○ 시나리오 : 고장발생 → 발전기 1대차단 → 발전기 속도 연산 → 안정여부 판정 → 안정(차단불요)/불안정(추가차단)

○ 과도안정도 평가를 위한 SIME(Single Machine Equivalent)법을 수행한 결과 2호기가 가장 취약한 것으로 나타나 2호기의 속도 변화를 검토하였다. 발전기 차단 직후에서 특정시간 까지 동안 발전기 속도가 미리 정해진 정정치 이상으로 안정될 경우 추가적인 탈락을 방지하는 방법이다.(그림8 참조) 이 경우 발전기 속도변화 폭을 감시할 수 있는 높은 연산능력을 가진 장비가 필요하나, 발전기의 속도에 따라 차단여부가 결정되므로 계통여건 변화와 발전력의 증감 또는 고장점 위치에 따라 탄력적으로 적용할 수 있어 단순히 송전선로의 On/Off에 의한 차단여부 결정시 보다 필요이상의 과도한 차단을 억제할 수 있을 것이다.

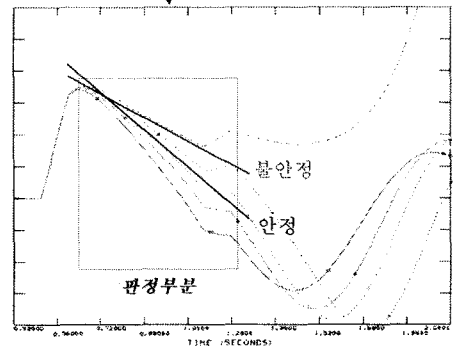
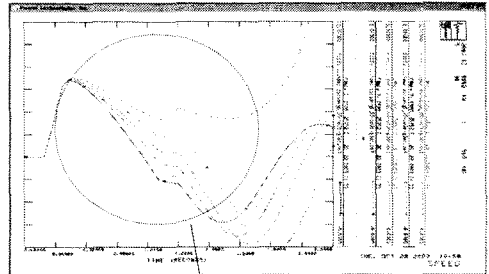


그림8 발전기 속도변화에 따른 과도안정도 안정여부

2.6.3.2 검토결과

발전기 차단직후부터 약 0.7초간(가급적 짧은 시간 내에서 충분히 확보) 발전기 속도변화를 연산하여 선형화된 감속도(dw/dt=선형그래프의 기울기) 검토결과에는 아래의 표8과 같이 나타났다.

표8 고장형태별 속도변화 검토결과

- 고장점별 구분 (전출력 조건)

	fault점	dω/dt
불안정	울동T/L 25% 지점	-0.23
안정	울동T/L 50% 지점	-0.50

○ 출력별 구분 (인출단 고장조건)

	울진N/P 총 출력	dω/dt
불안정	480만kW	-0.28
안정	460만kW	-0.83

즉 울동T/L의 경우 감속도용 선형그래프의 기울기가 -0.5보다 작을 경우 안정으로 판정하여 추가차단을 미시행토록 하여 1대 차단으로 안정의 효과를 거둘 수 있을 것이다.(그림9, 10 참조) 동일한 방법으로 시행시 울동T/L의 경우 울동T/L과 비슷한 결과를 보였으며, 울동T/L의 경우 위의 기울기가 -0.55 보다 작을 경우 발전기 차단을 미시행 하여도 안정되는 것으로 나타났다. 발전기 속도변화 추이는 4차 곡선식으로 나타날 경우 비슷한 패턴으로 인해 그 정도는 향상되나 연산속도를 감안하고 시간별 감속정도를 인식하기 위해 속도변화 곡선의 매 scan시 마다 선형화된 감속에 의한 판정이 효과적이며 또한 그 결과가 크게 달라지지 않음을 알 수 있었다.

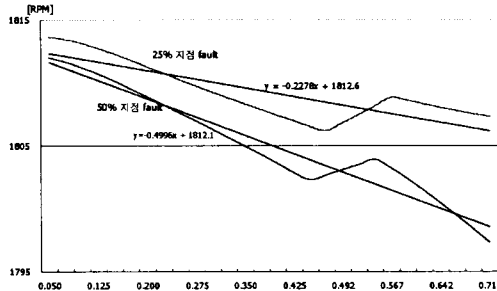


그림9 울동T/L 2회선 고장정지 (고장점별)

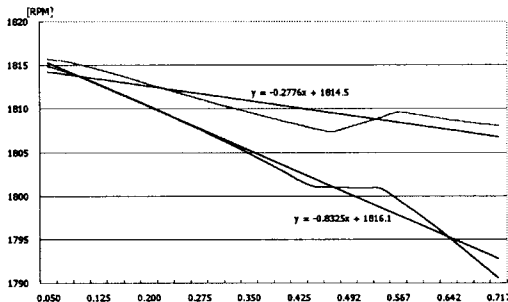


그림10 울동T/L 2회선 고장정지 (출력수준별)

3. 결 론

대규모의 발전단지에 100만kW라는 대용량 발전기가 추가 운전됨에 따라 과도안정도가 더욱 불안해져 연계된 모든 송전선로의 1~2회선 고장 시 반드시 발전기를 탈락시켜야 하는 문제점을 해소키 위해 본 논문에서는 대용량 발전단지의 과도안정도 개선을 위한 연구를 수행하였다. 이의 근본적인 개선을 위해서는 설비의 보강이 이루어져야 하나 이는 시일을 요하는 사항이므로 우선 계통운영 차원에서 5호기의 단독운전과 연락T/L의 재폐로 운전정지로 각종 상정고장시 발전기 차단대수의 최소화 방안을 제시하였다. 추후 5호기의 시운전 후 발전기 제어계 특성정수 및 PSS의 parameter를 도출하여 이를 적용한 정밀한 결과를 얻어야 할 것이다. 좀더 나아가 실계통에 SVC를 설치할 경우 과도안정도 차원에

서 효과를 분석하였으며, 발전기 출력과 계통의 변화 및 고장점 위치에 따른 능동적인 대응을 위하여 발전기의 속도변화(감속 정도)에 따른 차단방안을 제시하였다. 향후 관련계통에 765kV 설비운전과 발전기의 추가건설이 뒤따를 경우 발전단지의 안정적인 운전을 위해서는 발전기의 준공시점이 아닌 시운전 시작시점에 맞추어 송전선로나 SVC 등의 설비보강이 뒤따라야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994
- [2] 한전 송변전처, "지상조상설비 설치계획 최적기준 및 기법 개발", 1999.3.
- [3] 한국전력거래소, "수도권 순동무효전력 확보방안에 관한 연구", 2002.12.
- [4] 한국전력거래소, "전력계통 안정도를 고려한 계통보호 대책 연구(중간)", 2002.12.
- [5] 2002 대한전기학회 하계학술대회, "SVC 적용에 의한 전압 안정도 측면에서의 울동전력 향상방안에 대한 연구", 2002.7.
- [6] 한전 계통계획실, "2002년 장기 송변전 설비계획(2002년~2015년)", 2002.12.