

주발전기용 자동 전압조정기의 고장에 따른 터빈 가속도 발생 사고 검토

蔣 台 諤

韓電 月城原子力 本部 電氣部長

A study of turbine acceleration generated following to AVR fault of Wolsong #1 main generator.

Tae - Hee Chang*

Wolsong NPP of KEPCO(Electric eng.dep't)

Abstract-During normal operation of 100% FP Reactor power(TBN/GEN output:690MWe), several times of acceleration phenomena has been generated on the turbine generator of Wolsong #1 NPP. It was concluded that the acceleration occurred following big sudden drop of the terminal voltage of main generator due to AVR potentiometer fault. The cause of turbine acceleration is reviewed with a several records and demonstrated by computer simulation, also presents a countermeasure of its trouble.

1. 서론

터빈 발전기가 정상운전중 부하차단 등으로 과속도가 발생되며, 이때 전력계통 사고나 순간적인 계자력의 약화 등으로 가속도가 발생하는 경우가 있다.

전력계통 사고시 순간적인 송전선로 전압 변동에 따른 AVR의 응답으로 발전기 계자전압 및 단자전압 변동으로 유효출력의 변동이 종종 나타나며, 최근 발생하는 전국적인 저주파 계통동요현상(low frequency oscillation)에서도 심각한 송전계통 전압과 유/무효전력 변동 및 계자전압 변동이 발생되고 있으나 터빈 발전기에 규정치 이상의 가속도(9% 정격속도/초 이상 증가) 발생은 일어나지 않았었다. 그러나 국내 보고된 것으로는 최초로 월성 1호기 주발전기용 여자설비의 자동전압조정기(AVR:Automatic Voltage Regulator)부속품인 포텐쇼미터(Potentiometer) 접속자의 접속불량에 의해 몇차례의 순간적인 계자전압의 강하로 주발전기

단자전압이 정격의 약 42%로 감소되면서 계자력의 약화에 따른 터빈발전기 가속도현상이 발생되었으며, 이에따라 터빈 보호를 위해 주증기제어밸브가 순간적으로 일제히 닫히고 원자로속 보일러수위가 급변되어 터빈이 트립되었으며, 잇따라 역전력계전기(32)에 의해 발전기가 트립되는 발전정지사고가 발생되었다. 이에 본 고장직후 조사된 제반 기록을 통하여 터빈/발전기의 가속도 실제 발생여부를 검토하고 기개발된 전력계통 안정화장치(PSS:Power System Stabilizer) 파라미터설정 프로그램을 사용하여 터빈의 가속도 변화와 설정치 이상의 가속도 발생여부를 시뮬레이션으로 확인하고,이에대한 대책의 일환으로 동일한 AVR의 포텐쇼미터 접속불량 고장시 급격한 계자전압과 발전기단자전압 변동을 일으키지 않도록 하는 방지 대책을 제시하였다.

2. 본론

2.1 월성1호기 시스템 구성

가. 터빈/조속기(그림 1 참조)

월성1호기 터빈은 고압터빈 1 대와 저압터빈 3대로 구성되어 있으며, 주증기 제어밸브는 고압터빈용 4 개의 조속기 밸브와 저압터빈용 6개의 인터셉밸브가 있다. 또한 각각의 제어밸브 전단에는 터빈정지를 위해 비상정지 밸브를 구비하고 있다. 조속기는 전자유압식(EHG:Electro-Hydraulic Governor)으로서 전자 제어회로는 가장 신뢰도가 높은 3중화에 의한 2/3 조건 논리회로를 채택하고 있다.

터빈의 정격회전수는 1,800 RPM 이며, 회전속도 검출을 위해 터빈속 중단에 치차 1 개

와 자기탐속자 3개가 설치되어 있다.

터빈 조속기의 주요기능은 ① 광역(기동시) 및 협역(부하변동시) 제어 ② 증기압력 저하, 복수기 진공도 저하에 따른 자동 출력 감발 ③ 가속도 검출 및 보호(9%/초 초과시 제어 밸브 폐쇄) 등이 있다.

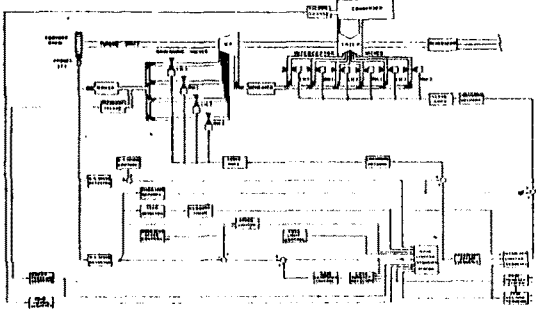


그림 1. 월성1호기 터빈 조속기 블록도

FIG 1. Block Diagram of TBN Governor System for Wolsong #1 NPP.

나. 주발전기와 여자계통(그림 2 참조)

주발전기의 정격은 3φ, 26KV, 800MVA, 60 Hz 이며, 수소냉각 (압력 4.1 Bar) 식의 회전계자형 4 극기이다. 여자는 브러쉬부 정지형 자여자방식이며, 정류기로 속용성이 좋은 다이리스터를 사용한다. 여자는 또한 발전기 단자전압이 정격의 25%~75%일 때 정상기능을 갖도록 설계되어 있다.

여자의 주요 구성요소 및 기능은 ① 초기 여자를 위한 field flashing회로 (10초간 150VDC, 1,000A 공급) ② AVR 1대 및 MVR 1대의 상호 절체기능 ③ 발전기 및 주변압기의 과자속보호(V/Hz) ④ 동기탈조시 계자보호를 위한 crow-bar회로 ⑤ 정류용 다이리스터 고장 검출 및 보호 ⑥ 부족여자시 발전기 불안 정을 방지하기 위한 제어자검출 및 보호 등이 있다.

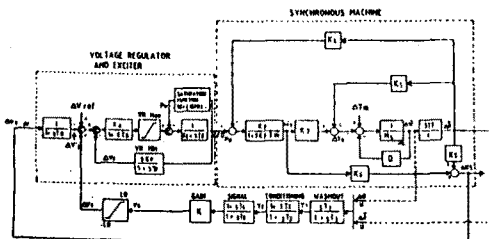


그림 2. 전력계통 안정화장치류 가진 월성원 자력 주발전기/여자계통 블록도

FIG 2. Synchronous Machine Block Diagram with Excitation System and FSS

2.2 AVR 고장과 터빈 가속도 발생

월성원자력 1호기가 원자로출력 100% FP (터빈출력 690 MWe)로 정상운전중 1991.

7.16일 05:18 본경 주발전기 여자계통 AVR 의 고장(그림3 참조)으로 여자전류 및 전압의 감소에 따라 주발전기 단자전압이 수차례 감소했으며, 이에따라 무효전력이 부족 여자제한선(UERPL)까지 내려가 발전기의 고정자와 회전자간의 자속결합력 약화로 불안정(Pole Slipping)과 이상 가속현상(9% RPM/초 이상)이 발생하여 터빈 주증기제어밸브가 자동적으로 급격히 닫혔다. 이 결과로 원자로에서 공급되는 주증기 압력이 상승되어 shrink에 따른 보일러저수위로 원자로가 트립되고 연이어 터빈/발전기 베어링의 고진동(6mm/초)으로 인한 터빈트립 후 발전기가 정지되었다.

AVR 제어블럭도 핵심

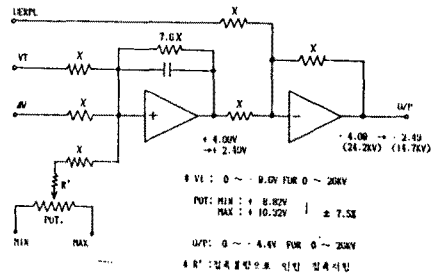


그림 3. AVR 포텐쇼미터 고장과 제어도
FIG 3. AVR Control Dia. During Pot. Fault

AVR 고장에 따라 당시 발생된 주요경보 및 발전정지사과의 진행흐름도는 표1과 같다.

시각	진행상황	경보명
05:18:10	AVR용 potentiometer 접속불량(MC630)	
	발전기계자전압, 전류 및 단자전압 급감	CI 867
	무효전력 감소 및 UERPL 동작	CI 867
	발전기 안정도 저하 (동요현상 발생)	
05:18:11	터빈 이상 가속현상 발생(RPM 9%/초 초과)	CI 895
	터빈 조속기변 닫힘	
	주증기 압력 상승/보일러 고압력 경보	CI 1466
05:18:12	보일러 저수위 경보	CI 53
05:18:13	원자로 트립	RRS 441

05:18: 14 터빈/발전기베어링 고 진동발생 및 터빈트립 CI 1197
CI 991

↓

05:18: 17 13.8 KV 모선 병렬 자동접촉 완료 CI 1526

↓

05:18: 33 발전기 트립(32 및 86 GDU동작) CI 1797

표1. 주요 정보발생 및 발전정지 사고 진행

Table 1. Flow diagram of Generator trip event with major alarm

사고당시 주요 운전변수 변화치는 표2와 같다.

항목	운전치	변화상태
발전기	685 MWe (464.0 MWe)	○ 244.8 MWe→0 MWe (순간적으로 434 MWe 까지 감소 후 복구)*
출력		
계자 전류	(2,700 ADC)	(순간적으로 1,900A로 감소후 2,400A에 안정)
계자 전압	(225 VDC)	(순간적으로 90 V 까지 감소후 201 V로 안정)
무효 전력	+50 MVar (109 MVar)	○ -190 MVar로 급감 후+240 MVar까지 급상승 (53 MVar로 감소)
발전기 단자전압	24.2 KV (24.4 KV)	○ 15.0 KV 까지 급감후 26.2 KV로 급상승 (23.4 KV로 감소)
발전기 전류	(10,800 A)	(12,150 A로 증가)
주파수	60 Hz	○ 57.5 Hz로 급감후 63.2 Hz로 급상승

표2. 사고당시 주요 운전변수 변화치 (발생 70% 출력운전중 20:02분경 발전기 단자전압 급감 재발시 값임)

Table 2. Major operating values during AVR fault condition (** means the values at 70% FP July 16, 20:02.

2.3 터빈 가속도 발생원인 검토

가. 터빈 가속도 감지회로

터빈 가속도가 설정치 이상이 될 때 기기보호를 위하여 터빈에 공급되는 주증기를 차단하도록 P&G제어반 내에 가속도 감지 모듈이 설치되어 있으며 그 가속도 감지 회로도는 그림 4와 같다.

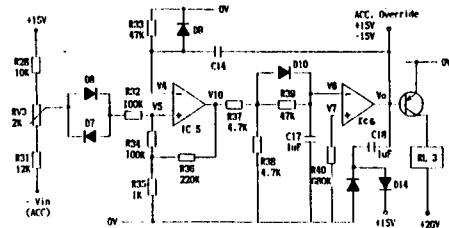


그림 4.가속도 무효화 회로
FIG.4. Acceleration override circuits

만약 가속도가 정격속도의 9%/초(= 162Rpm/초)를 0.05초 동안 초과할 때, 0.5초간의 가속방지 신호는 약 0.35 mSec 지연후 10개의 주증기 제어밸브를 닫게된다.

나. 발전기 출력 곡선(그림 5 참조)

일반적으로 발전기 출력 특성곡선은

계자전류 If1일 때 출력 P1, 부하각 δ 1로 $P_{Tbn}=P_{Gen}$ 으로 운전된다. 만약 이때 AVR 고장으로 계자 전류가 If2로 감소되면 출력과 부하각은 P2, δ 1에서 잉어출력(A) 만큼 만큼 회전자 가속이 발생되어 부하각은 δ 2로 증가되며, δ 2에서 $P_{Gen}=P_{Tbn}$ 조건이 이루어진다. 그러나 발전기 속도>동기 속도모 부하각은 계속 증가하여 δ 3까지 증가되며, δ 3에서 $P_{Gen}>P_{Tbn}$ 으로 회전자는 B출력>A출력 조건 때문에 감속하며, 부하각은 감소하게 된다. $P_{Gen}=P_{Tbn}$ 될 때까지 수차례 동요한 후 새로운 평형점에서 안정되게 된다.

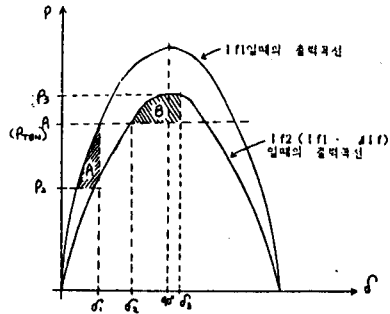


그림 5.과도현상시 발전기 출력곡선
FIG 5. Generator Capability Curve under Transient Condition

계자전류가 If2로 감소에 따른 월성 1호기 발전기 출력곡선에 부하각과 계자전류를 그려보면 그림 6과 같다. 처음 685MW,+50MVAR(지상)에서 운전중 순간적인 계자전압 강하로 난조 방지선인 부하저자 제한선(UERPL) 이하인 부하각의 안정도 한계점(75°)에 가까운 71° 지점인 -190MVAR(진상) 까지 순간적으로 감소되었다가 즉시 UERPL 까지 복귀되면서 발전기 회전자 가속도를 발생시켰으며,접속이 좋아지면서 계자전류를 증가시켰고 다시 접속 불량으로 단자전압 감소와 증가를 3회 반복하여 아주 단시간내에 상기와 같은 현상이 발생하였다.

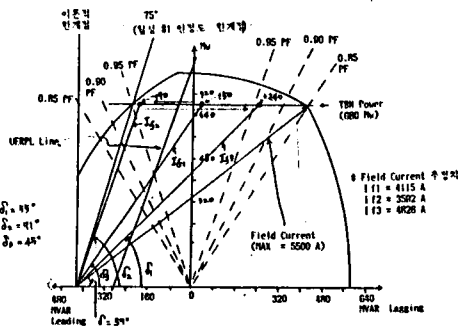


그림 6. 워싱턴 1호기 발전기 출력곡선
 FIG. 6. Generator Capability Curve for
 Wilsons #1 NFP during AVR Fault

다. 고장정지 당시 발전기 운전기록

그림 7은 AVR 고장으로 주발전기가 정지하였을 때 출력기록계에 나타난 그래프와 송전함수기록계(신속전P/O, 서대구T/L 전압동요)를 종합비교하여 그린 것이다. 이것은 발전기 제어용전산기의 경보메세지에 나타난 4번의 가속도 정보와 3-4회의 터빈/발전기에서 콘소리를 들었던 운전원의 기록과 일치하고 있다. 여기서 ①-⑤번 감소는 접속불량에서, 급상승은 접속양호로 볼 수 있으며 ⑤번 이후는 전압변동에 따른 AVR의 응답과 부하각의 변동에 따른 전압 동요가 합성되었다고 본다.

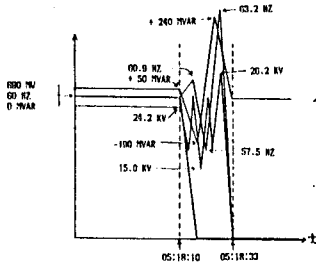


그림 7. 고장정지 당시 발전기 운전기록
 FIG. 7. Generator Operating Graphs during
 AVR Fault

2.4 시뮬레이션 및 결과 고찰

기 개발된 전력계통안정화장치 파라미터 결정 프로그램을 사용하여 PSS가 운전되지 않을 당시의 상황에서 ΔV_{ref} 를 0.42 P.U. (15/26KV = 57.69%) 만큼 순간적으로 감소시켰을 때 각속도 $\Delta \omega$ 와 부하각 $\Delta \delta$ 의 변동은 그림 8과 같이 되며 이때 각속도의 변동은 1회의 0.42P.U 감소에도 약 9%/초의 가속도가 발생됨을 볼 수 있다. 따라서 사고당시 포텐쇼미터 접속저항 증가, 감소로 발전기단 자전압을 급격히 변동시켰을 때 가속도발생은 충분히 가능하다고 본다.

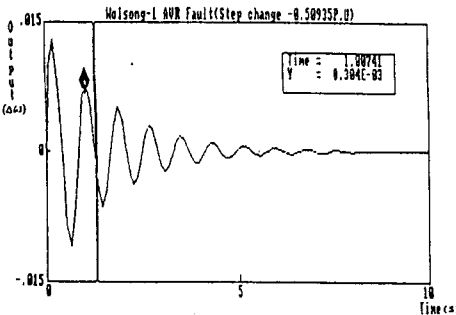


그림 8. ΔV_{ref} 0.42 PU 감소시 $\Delta \delta$ 및 $\Delta \omega$

변동
 FIG. 8. $\Delta \delta$ and $\Delta \omega$ Change by 0.42 PU Step
 Down of ΔV_{ref}

3. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

가. AVR의 포텐쇼미터 접속불량에 따른 약 42%의 계자 전류의 순간적인 감소와 단자전압 급감은 가속도 발생 가능성이 입증됨.

나. 어느정도 발전기단자전압(ΔV_{ref})의 급감에 실제 가속도 발생여부와, 발생시 탈조 가능성과 전력계통의 저주파계통 중요시 터빈가속도 발생가능성은 계속 검토되어야 함. 다. AVR의 포텐쇼미터 접속불량에 따른 주발전기 단자전압 급변의 방지책은

1)포텐쇼미터 접속점을 상시온전 위치에 서 변경하기 위한 별도의 선택저항 설치

2)포텐쇼미터의 2중화

3)포텐쇼미터 적정주기의 고체용이 있음. 라. PSS 설치 운영시 터빈 가속방지 어부에 대해 계속 검토가 필요함.

참 고 문 헌

- [1] 오태규 외 2, 전력계통의 동기탈조 보호계전장치 적용에 관한 연구(KRC-88S-J08), 한전기술연구원, 1989, P 25-30.
- [2] 조성근, 발전기 제어계통을 고려한 안정도 분석, 한국전력기술 (주), 1987, P 39-48.
- [3] 장태휘, 본산제어 알고리즘을 이용한 전력계통 안정화장치 파라미터 결정에 관한 연구, 울산대 대학원, 1990, P 15-34.
- [4] 장태휘, 공무국외어행귀국보고서, 한전 월성원자력, 1986, P 20-63.
- [5] J.E. Van Ness, F.M. Brasch, Jr, G.L. Landgran and S.T. Naumann, "Analytical investigation of dynamic instability in Powerton station", IEEE Trans, PAS, Vol. 1980, P 1386-1395.

저 자 소 개



장 태 휘(蔣 台 輝)
 1949년 3월 23일생. 1976년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 울산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987-현재 한전 월성원자력본부 전기부장 근무. 정회원.