

원전의 전력계통 안정화장치 설치 및 전망

윤 병 호

한국전력공사 원자력건설처

1. 개 요

원자력발전소 및 대용량 화력발전소의 건설이 부지 확보 및 환경문제 등으로 인하여 부하밀집지역에서 원거리로 건설됨에 따라 전력계통의 계획과 운용에 대한 문제가 점차 크게 제기되고 있으며, 우리나라 산업구조 및 인구의 도시 집중화로 인해 전력계통은 부하가 적고 발전소가 많은 중부지역 및 영동지역에서 발전소가 적고 부하가 많은 경인지역으로의 전력 이동이 불가피하고 이런 현상은 앞으로 더욱 심화될 것으로 예상된다. 이러한 전력계통의 구조가 반드시 전력계통을 불안정하게 만드는 것은 아니나, 계통고장시 불안정한 동요현상을 최소화하기 위해서는 먼저 대용량 동기발전기의 안정적 발전이 선행되어야 한다.

과거에는 발전기 여자기계가 불감대 (Dead Band) 및 시간지연 요소가 많아 전력계통안정도 해석에 있어 소규모 계통외란의 경우에는 특별히 취급되지 않았으나, 근래 제작되는 발전기는 여자기계의 제작기술 발달로 불감대가 없어지고 동작속도도 매우 빠른 초속응여자방식이 발전기 여자기 계통에 사용됨으로써 전력계통의 과도 및 동태안정도 해석을 하는데 빼놓을 수 없게 되었다.

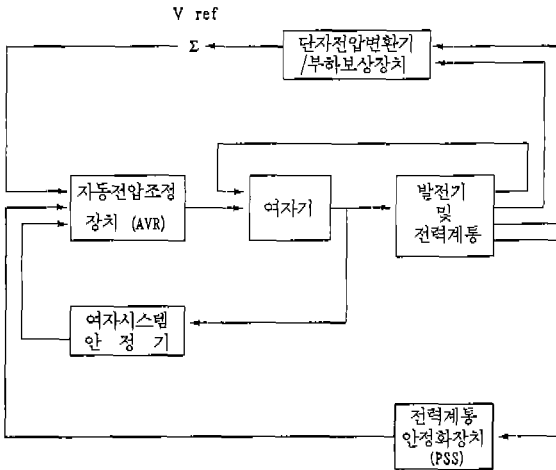
또, 발전소 운전경험에 비추어 보면, 발전기 여자기계의 특성 때문에 소규모 계통외란으로도 계통의 전

력, 전압 및 주파수의 적은 동요현상이 이따금 발생하곤 하였다. 그 중 전력계통의 안정도를 위협하는 저주파수 동요현상은 주로 초속응여자방식을 채용한 발전기와 전력계통간에 발생하는 저주파수 동요현상과 장거리 송전선로에 의해 연결된 지역간에 발생하는 저주파수 동요현상 등의 두가지로 나타났었는데 전자가 후자보다 주파수 동요현상이 더 큰 것으로 알려져 있다.

이와 같이 저주파수 동요현상은 발전기 제동토크 성분부족 및 여자기에 의한 부제동 효과 등에 주 원인이 있는데 이의 개선을 위하여 발전기 여자기계에 전력계통안정화장치를 설치하여 계통외란시 발전기의 제동력을 강화함으로써 전력계통의 안정도를 높이고 있다. 또한 최근 원자력발전소에 이러한 전력계통안정화장치를 설치중에 있어 이에 대한 내용을 살펴보고자 한다.

2. 전력계통 안정화장치(PSS)란?

전력계통 안정화장치는 기존에 설치되어 있는 발전기 전압조정용 변성기(PT) 및 변류기(CT)로부터 전압, 전류신호를 받아 송전계통 동요현상 발생시 자동전압조정기의 여자기 계자력을 강화시켜 발전기 출력의 진동현상이 발생하지 않도록 하는 장치로서 발전기의 운전안정도 및 전력계통의 동태안정도를 향상시키는 장치이다. 이 장치는 일명 PSS(Power System Stab-



〈그림 1〉 발전기 여자계통도

ilizer 혹은 Damping Stabilizer) 라고도 불리우며 일반적으로 그림 1 과 같은 회로로 구성되어 자동전압 조정장치에 제어신호를 공급한다.

3. 원전의 PSS 설치배경 및 현황

가. 설치배경

전력계통 신뢰도 안정도 향상을 위하여 국내대학 및 연구기관은 '88년부터 3년 동안에 걸쳐 Power System Simulator/Engineering (PSS/E) 프로그램을 이용하여 시간영역 해석기법에 의한 전력조류계산 및 동특성을 계산하였고, Analysis of Essentially Simultaneous Oscillation in Power System (AES-OPS) 프로그램을 이용하여 주파수영역 해석기법에 의한 전력계통 정태안정도를 계산하여 전력계통 안정도 향상 방안을 수립한 결과 현재 운전되고 있는 일부 원자력발전소의 발전기에 전력계통 안정화장치를 설치하는 경우 안정도 측면에서 매우 좋은 송전계통 고장시에도 전력계통안정에 큰 효과가 있는 것으로 분석되어 '93년 하반기에 설치를 시작하였다.

나. 국내외 PSS 설치현황

(1) 우리나라의 경우 발전소 1개 호기당 단위용량이 큰 화력발전소와 최근 신설되는 화력발전소는 거의 다

이 설비를 갖추고 있으며, 특히 첨두(Peak) 부하를 담당하고 있는 양수발전소의 경우에는 필수장치로 되어 있다. 또 원자력발전소의 경우에도 기존 운전중인 일부 원자력발전소에도 전력계통안정화장치를 설치하고 있는 중이며 시험이 완료된 발전소도 있다.

(2) 외국의 경우 미국, 일본, 대만 등 많은 나라에서 이미 오래전에 전력계통 안정화장치를 설치하여 매우 큰 효과를 거둔 바 있으며, 미국의 Consumers Power Company, Georgia Power Company 등의 전력회사에서 미국 전역에 걸쳐 설치하여 운용중이고 대만의 경우에도 '93년도에 원자력발전소와 같은 대용량 발전기에는 모두 설치한 바 있다.

일본도 동경전력 관하 발전소에 91대가 설치되어 있는 것으로 조사되었으며 27.5kV 이상 계통에 직접 접속되는 발전기에는 필수적으로 설치토록 하고 있다. 또 북해도전력 등에서도 전력계통의 안정화를 위해 기본적으로 이 장치를 설치하고 있으며, 양수발전소의 경우에는 고속전송차단장치도 설치하여 전원 사고시에 운전중 양수발전기를 고속차단하여 전력계통측 발전기와 의 위상차를 최대한 적게 하여 발전기의 탈조를 방지하고 있다.

4. PSS 적용기술

가. 일반적인 전력계통 동요현상은 아래와 같은 단계로 발전되어 전력계통에 그 영향을 미치고 있으며 이러한 동요현상을 최대한 빠른 시간내에 감쇄하고 전력계통의 안정도를 향상하기 위해서 전력계통안정화장치 (PSS)가 필요한 것이다.

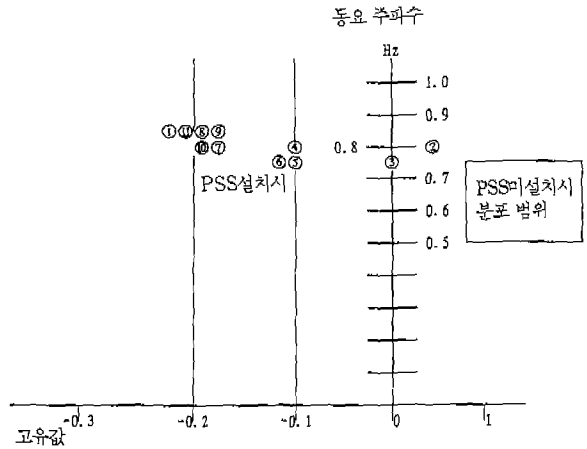
1 단계	일상 운전 단계
	발전기 운전계통에서는 동요가 있을지라도 감쇄가 빠름

↓

2 단계	취약계통 발생단계
	송전선 정지나 정거리 송전선로일 때 송전선 조류과대 예상

↓

3 단 계	저주파 동요발생 단계
	발전기 제어계 특성, 출력 및 관성에 따라 지역간 동요발생 (동요주파수 : 0.6~0.8Hz)
↓	
4 단 계	동요저속증가 단계
	발전기 정지, 또 다른 송전선 정지, 기타 전기 및 제어기기 손상



〈그림 2〉 PSS 설치 전후 효과 비교

나. 안정도 판별법 및 PSS의 효과

전력계통의 안정도는 전력방정식

$$P_{max} = \frac{E \cdot V}{X} \sin \delta$$

여기서

P_{max} : 최대 송전가능 전력

E : 발전기 내부전압

V : 발전기 단자전압

X : 선로 리액턴스

$\sin \delta$: 송전단 및 수전단 상차각

에 따라 결정되므로 계통선로 증가없이 발전용량의 증가시 상차각($\sin \delta$)이 커져 전력계통의 안정도가 현재보다 더 저하되고 상차각이 90°가 넘으면 발전기는 탈조한다.

따라서 단위용량이 큰 원자력발전소(현재는 주로 100만 kW급이지만 향후 130만 kW급으로 격상 예상됨)가 계속 건설되고 대용량 화력발전소의 신설로 계통용량이 매우 커져감에 따라 고장전류도 증가하여 전력계통에 연계되어 있는 발전기의 동요현상 발생가능성이 증가할 것으로 예상되며 동요지속시간도 길어질 것으로 예상된다.

또한 앞으로 원자력발전소의 경우 동일 부지내에 6개 호기까지 건설하여 운전할 것으로 예상되는데, 이 경우 계통단락용량의 초과로 모선분리 운전 등도 검토되어야 하고 전력계통의 안정도 측면에서도 영향을 미칠 것으로 생각된다. 일반적으로 전력계통 안정도를 판별하는 기준은 계통동요 정도를 측정하는 고유값(345kV 단일 병행 2회선 송전선로 고장정지시 동요 감쇄정도를 의미함)의 크기로 결정하는데 이론적으로 판별하는 방법과 실운용상 판별하는 방법으로 대별된다.

이론적으로는 계통동요 정도를 나타내는 고유값이 0(Zero)보다 클 때 동요증가, 0일 때 동요지속, 0보다 작을 때 동요감쇄로 판별하고 있으며 실운용상 판별은 그림 2에서와 같이 고유값이 -0.1보다 크면 불안정, -0.2보다 적으면 안정, -0.1보다 적고 -0.2보다 크면 약간 불안정한 것으로 판별하고 있다.

또 그림 2는 변환 AESOPS 프로그램에 따른 고유값 계산에 근거한 영남 및 호남의 경우이며, 지역에 위치한 4개 호기 원자력발전소에 PSS를 설치하여 그 효과가 나타나는 경우라도 ②, ③번 송전선로 정지시에는 동요현상이 조금 있음을 보여준다. 앞으로 전력계통의 대형화에 따라 전력계통 안정도를 판별하는 고유값도 점차 커질 것으로 예상되므로 전력계통안정화장치를 설치하여 계통안정도 향상을 도모하여야겠다.

특히, 2000년대 초반에 계획된 전력계통의 전압격상(345kV→765kV)에 따라 전력조류 이동도 지금과는 다를 것으로 예상되고 동일 부지내에 여러 개 호기가 설치되는 등 예측하지 못하였던 문제점이 발생할 수도 있으므로 사전에 전력계통안정화장치를 설치하여 이상상태 발생시 동요감쇄에 큰 효과를 거두도록 하여야겠으며 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)에서도 경수로형(PWR) 원자력발전소의 경우에는 전력계통안정화장치를 설치하도록 권고하고 있다.

설치비용에 있어서도 운전중에 설치하는 경우에는

대당 약 7천만원 정도가 소요되지만 발전소 건설시에 설치하게 되면 더 저렴할 것으로 예상되므로 건설시 설치하는 것이 Cost 절감 측면에서 유리하다.

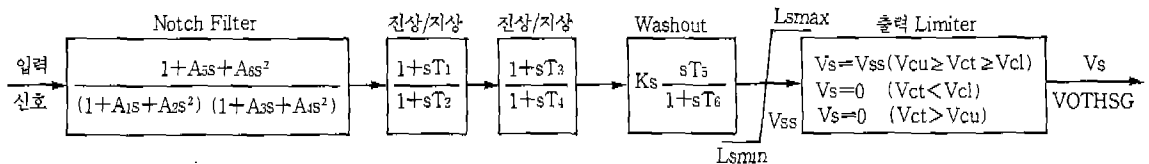
또한 설치효과 측면에서도 전력계통 동요시 발전기 출력변동을 안정시킴으로써 터빈발전기 안정도 향상은 물론이고 계통동요시 파급을 신속히 억제하는 기능을 수행함으로써 전력계통의 동태안정도 향상이 기대되며, 계통동요현상 지속에 의한 계통고장확대를 방지할 수 있는 효과도 있다.

다. PSS의 일반적 구조

그림 3은 PSS/E 프로그램에 내장된 전력계통안정화장치 모델의 하나인 IEEEEST의 블록도이다. 이 모델은 전력계통안정화장치의 일반적인 구조로서, Notch Filter와 2개의 Lead-Lag Filter, Washout Filter 등으로 구성되고 IEEEEST는 보조신호의 상(Phase)을 입력신호보다 진상으로 만드는 것이 기본기능이며 그림 3의 $T_1 \sim T_4$ 의 시정수를 이용하여 조정한다. 또한 정수인 K_s , T_5 , T_6 를 사용하여 Gain을 조절하며 정상 상태에서는 기능을 정지(Washout)시킨다.

IEEEEST의 첫번째 블록인 Notch Filter는 일종의 Band-Reject Filter로서 안정기의 목적과 관련없이 불필요한 진동을 제거하는 기능을 한다. 예를 들면 터빈발전기 축비틀림 진동(Torsional Oscillation)이라든가 전자기적으로 밀접하게 결합(Electro-Magnetically Combined)된 두 발전기간의 진동 등을 제거한다.

LSmax와 LSmin은 보조신호가 계통동요중 지나친 전압조정기능을 하지 못하도록 하며 ± 0.2 p.u.가 대표적인 값이다. 전달함수의 말단에 위치한 출력 필터는 단자전압(V_{ct})이 주어진 전압범위(V_{cu} , V_{cl})를 벗어날 경우 출력을 0으로 함으로써 안정화 기능을 정지시킨다.



<그림 3> IEEEEST PSS 기본 모델

5. 향후 전망

전력계통동요현상 감쇄방법으로는 설비운용측면에서의 대책으로서 자동전압조정장치(AVR)의 수동운전, 발전기 출력조정, 발전기 단자전압 상승운전, 동요 지역간 Loop강화 등이 있다.

자동전압조정장치 수동운전과 발전기 출력조정 등에 의한 동요현상의 감쇄는 효과면에는 나무랄데가 없으나 자동전압 조정장치를 자동운전에서 수동운전으로 절체하는 것이 쉽지 않고, 수동운전중 계통고장이 발생할 경우 발전기가 정지될 우려가 있으므로 장기간 수동운전은 곤란하다. 발전기 출력을 조정하는 방법의 경우에도 동요감쇄 효과를 크게 하기 위해서는 총출력 감발량을 크게 하는 것보다 단위용량이 크고 출력 감발시 계통안정에 효과가 가장 큰 발전기의 출력을 감발해야 하므로 발전소운용상 문제점이 따르고, 특히 전력계통 동요시 원자력발전소의 출력을 급감시킬 수 있는 제도적장치가 보완되어야 하는 문제점 등이 있다.

또한, 설비보강측면에서의 대책으로는 발전기 여자 기계체에 전력계통안정화장치를 설치하는 방법과 변전소에 정지형 무효전력 보상장치(SVC)를 설치하는 방법 등이 있는데 운용측면에서의 문제점 등을 고려하면 이미 원자력발전소에 설치하여 전력계통 동요현상 발생시 큰 효과가 예상되고 있다.

특히, 원자력발전소의 경우 월성원자력 1호기가 이미 이용률 세계 1위를 달성한 바 있고 그밖의 경수로형 원자력발전소도 안전 및 신뢰도에 있어서 선진국 수준임을 감안해 볼 때 전력계통으로부터의 동요현상에 의한 발전기 동요가 없도록 신규로 건설되는 원자력발전소에 까지 확대 적용할 것으로 전망된다.

그러나 전력계통안정화장치 설치시 수년 주기로 전력계통조류 분석을 실시하여 분석결과에 따라 선별적으로 적용하는 방법도 고려하여야 할 것이다.