

전력계통안정화장치(PSS)의 개발 및 실계통 튜닝절차(상)

추진부 한전 전력연구원 전력계통연구실 수석연구원
 신정훈 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원
 김태균 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

1. 머리말

전력수요의 증가로 전력계통이 대규모화되고 발전기의 속응 여자시스템이 급속하게 확대, 적용됨에 따라, 계통의 안정도 마진이 감소되고 있다. 따라서 정태안정도의 향상과 계통의 제동능력 향상을 도모하기 위하여 대책기술의 하나인 고성능 PSS를 개발하고 이를 최적으로 계통에 적용할 수 있는 기술개발이 요구되고 있다. 전력계통 안정화장치(Power System Stabilizer; 이하, PSS)는 일반적으로 전력계통의 작은 변화로 나타나는 지속성 동요를 감쇄시키기 위하여 적용된다. PSS는 전력계통에서 나타나는 0.1~2.0Hz의 전력진동에 대하여 안정화 보조 신호를 발생시켜 발전기 여자시스템의 자동전압조정장치(AVR)에 부가하여 이를 효과적으로 억제함으로써 전력계통의 정태 안정도(Small Signal Stability)를 향상시키는 경제적인 수단이 되고 있다.

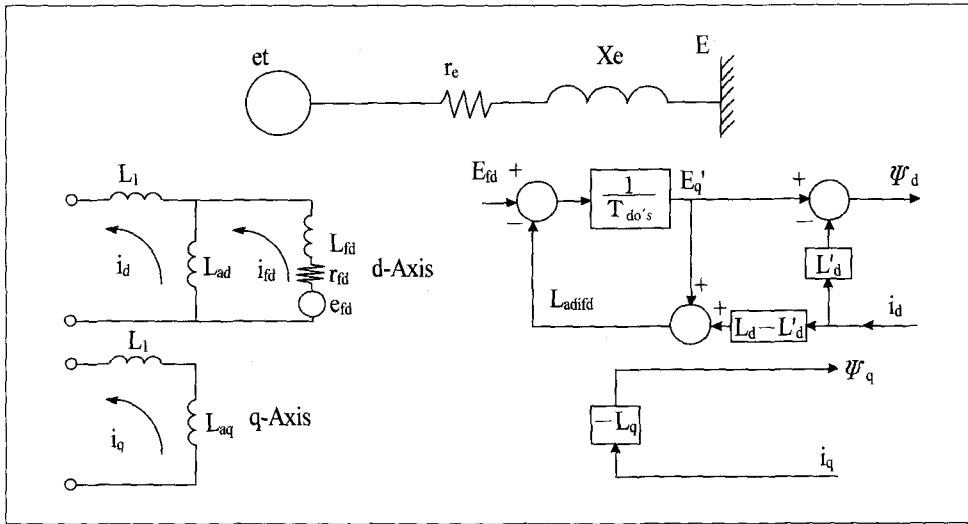
본 연구는 속응 여자방식의 아날로그 AVR에 적용할 디지털 PSS를 개발함과 동시에 전체 계통의 안정화 효과를 극대화시키기 위한 PSS의 최적 제어/튜닝기술을 확보하는 것이 목표이다. 국내 최초로 개발된 PSS는 우리나라의 Analog AVR 방식의 발전기의 표준이 되도록

IEEE 규격과 추천사항에 부합하는 세계 최고 수준의 성능을 구현하였다. 특히, 개발된 범용 Digital PSS는 상품화가 가능하도록 필요한 모듈구성과 운전환경, 보호 및 진단기능 등을 선정하여 최선의 시스템을 이루도록 기본 설계를 하고 있다. 이러한 설계와 성능평가를 위하여 개발한 실제품은 실시간 전력계통 시뮬레이터(Real-Time Digital Simulator)를 이용하여 제어기의 성능을 완벽하게 평가, 공인시험을 거쳐 실계통에 성공적으로 적용하였다. 본고에서는 개발된 PSS의 기능 및 성능시험, 최적 튜닝 기법 및 절차, 실계통 적용시험 결과 등에 대해 기술하고자 한다.

2. 디지털 PSS의 개발

가. PSS의 기본개념

현재, 세계 대부분의 전력회사는 환경제약과 전력구조 개편에 의한 송전선로 증설의 제한 등에 따라 송전선로를 증부하로 운전하고 있다. 따라서, 운전 계통의 안정도 마진은 점점 줄어들고 있는 상황이다. 이러한 계통운전 조건에서 대다수의 발전소에서 채용하는 속응성 여자시스템은 계통에 동기화 토크를 증가시켜 과도 안정도



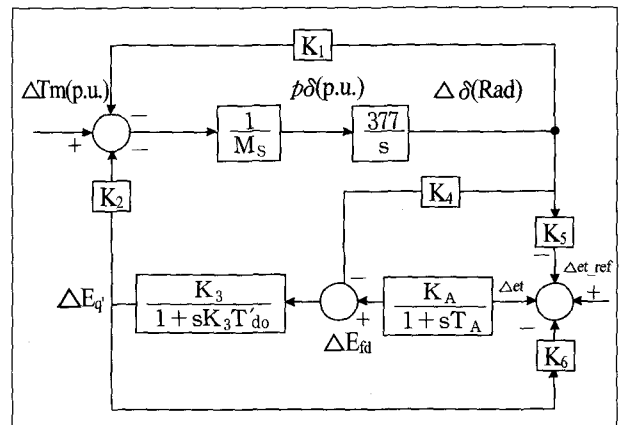
〈그림 1〉 1기 무한 모선과 간이 발전기 모델 블록도

(Transient Stability)를 향상시키는데 큰 역할을 한다. 그러나 다른 한편으로는, 속응성 여자시스템은 댐핑 토크를 저하시켜 전력계통의 다이내믹 안정도(Dynamic Stability, 혹은 소신호 안정도)에 나쁜 영향을 미친다. 이러한 이유로 동기화 토크를 손상시키지 않고 댐핑 토크를 제공하는 보조 제어장치의 필요성이 절실한데 이런 장치를 전력계통 안정화장치(Power System Stabilizer, 이하 PSS)라 한다. 이 PSS의 출력신호는 발전기 단자 전압 제어 신호에 비해서 매우 적지만 여자시스템을 통해서 발전기 단자전압을 간접적으로 제어하며 발전기 회전자의 속도($p\delta$ 또는 ω) 위상과 동상인 전기적 토크를 발생하도록 한다.

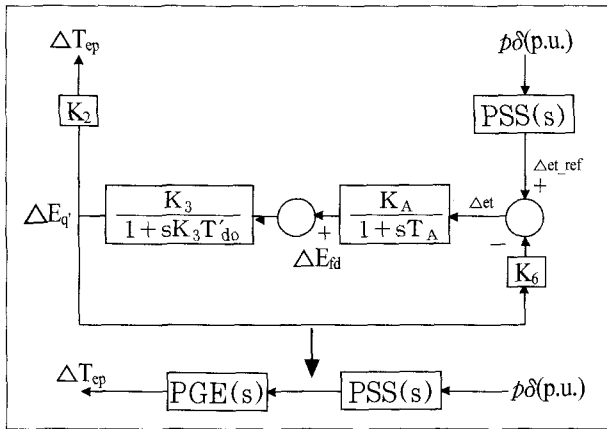
여기서 1기 무한모선을 이용하여 PSS의 기본개념을 살펴보면 다음과 같다. 그림 1은 1기 무한모선과 간이 발전기 모델 블록도를 나타내고 있다. 발전기 모델은 댐핑 권선이 없는 아주 간단한 2축 모델이나 PSS 기본개념을 살펴보기에는 충분하다. 그림 1의 비선형 방정식을 선형화하고 모델 블록도로 유도하면 그림 2와 같다. 그림 2의 상단 부분은 기계적 스윙 방정식을 선형화한 부분이 되

며, 아래 부분은 계통, 발전기, 그리고 여자시스템을 나타내는 전기적 블록 부분을 나타낸다. 기계적 특성을 나타내는 블록도를 제외하고, PSS의 입력신호를 발전기의 회전자의 속도라 가정하고 PSS를 연결시키면 그림 3과 같이 된다.

PSS는 계통, 발전기, 그리고 여자시스템의 전달함수, 일명 PGE(s) 함수에서 발생하는 위상 지연을 우리가



〈그림 2〉 1기 무한모선 선형화 전달함수 블록도



〈그림 3〉 기계적 전달함수가 제한된 전기적 전달함수, PGE(s)와 PSS(s) 전달함수 블록

관심있는 주파수 영역에서 보상해 준다. 설계된 위상보상 회로 시정수를 갖는 PSS는 회전자의 위상과 동상인 발전기 전기적 출력을 발생시킬 수 있다. 다시 말해서, 그림 3에서 회전자 속도($p\delta$)와 전기적 토크(T_e) 사이에 계통, 발전기, 그리고 여자시스템에 의한 위상 지연이 PSS에 의해서 보상된다면, 이 전기적 토크는 회전자의 속도와 같은 위상을 갖는 댐핑 토크와 동일하다. 위와 같이 전달함수 PSS(s)는 PGE(s)함수에서 발생하는 위상지연을 보상하여 양의 댐핑 토크를 계통에 제공한다.

나. PSS 개발품의 동작원리

실계통에 설치된 PSS가 적절히 튜닝된다면, 광범위한 대역에 걸쳐 계통 안정도에 좋은 효과를 얻을 수 있다. 입력신호에는 몇 가지 선택사항이 있으나 보통 속도 또는 주파수, 전력, 그리고 속도와 전력을 고려하여 계산하는 가속력을 사용하는 것이 보통이다. 개발된 PSS는 소위 '가속력 적분 입력 방식'의 안정화장치이다. 가속력 적분 방식의 PSS는 복수입력 설계인데 발전기의 전기-기계 방정식에 근거하고 있다. 회전자 속도에 대한 Dynamic 방정식은 토크의 함수로서 다음과 같다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) = \frac{1}{2H} T_{acc}$$

여기서, ω = 회전자 속도

H = 발전기 관성정수(MW-sec/MVA)

T_m = 기계(터빈) 토크

T_e = 전기-기계(공극) 토크

T_{acc} = 가속 토크

한편, p.u.시스템에서 토크는 전력과 거의 같다는 사실을 고려하여 토크(T) 대신 Power(P_e)를 사용하고 기계력(P_m)에 대해 풀면,

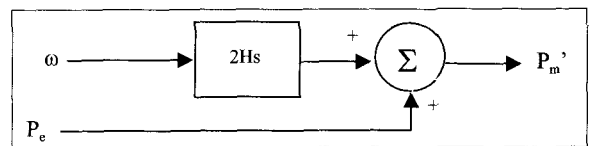
$$P_m = 2H_{sw} + P_e$$

기계력 P_m 은 실제로 측정이 어렵기 때문에, 이 식을 이용하여 속도와 전력을 측정하여 기계력 신호를 효과적으로 합성할 수 있다. 이러한 합성신호를 사용할 때 문제점은 전력계통 사고시에 전력이 급변할 수 있다는 것이다. 그러나 기계력의 변화는 실제로 매우 느리며 스텝보다는 경사적으로 변하는 것이 대부분이다. 때문에 Ramp Tracking Filter를 사용하여 기계력 변화를 얻도록 하고 있다. 기계력을 구하는 과정을 나타내면 그림 4와 같다.

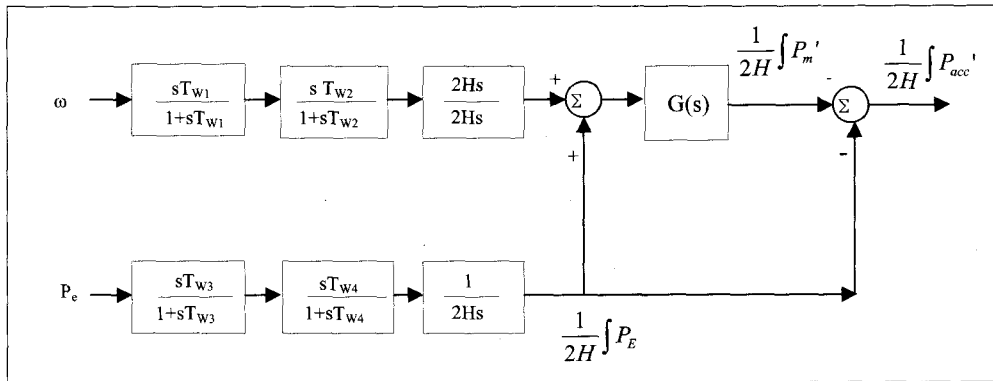
Ramp Tracking 필터는 $G(s)$ 로 나타나 있으며 multi-pole 저주파 필터로 설계되며 대략 1Hz의 cutoff 주파수를 갖는다. 합성되는 기계력 신호를 P_m 라 하면

$$P_{acc} = P_m - P_e$$

라 할 수 있고, P_{acc} 는 합성신호 P_m 를 이용하여 구한 가속력이다. 여기서, 2개의 입력신호인 속도와 전력을 검토해 보면 보통 이 둘은 정상상태의 값과 장시간에 걸쳐 느린 변화를 나타낼 수 있다. 때문에 대부분 PSS 설계에서



〈그림 4〉 기계력의 합성과정



〈그림 5〉 가속력의 합성과정

는 고주파 통과 필터를 적용한다. 이 필터를 Washout 필터라 부르는데 저주파수 신호를 없애버리거나 제거하기 때문이다. Washout 필터의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{sT_w}{1+sT_w}$$

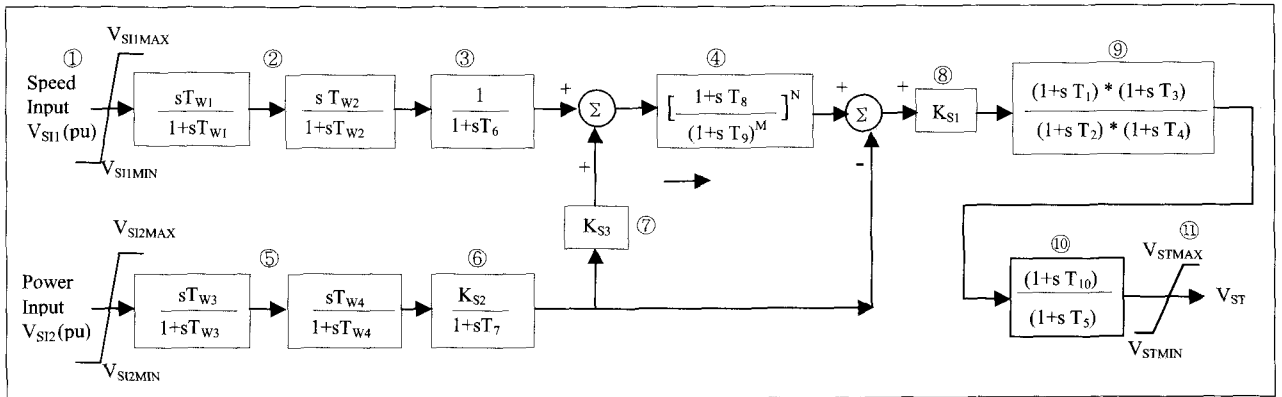
여기서 T_w 는 Washout 시정수라 불리며 보통 2~10초의 값으로 세팅된다. 이 때 Break 주파수는 $1/T_w$ rad/sec가 된다. PSS 개발품에서는 2단계의 Washout 필터를 적용하는데 Washout 시정수를 10초로 하면 저주파수 신호에 대한 cutoff는 0.1 rad/sec 또는 0.0159Hz가 된다. 한편 Washout Filter를 거친 신호들은 2H로 나뉘고 적분(1/s)된다. 가속력 적분을 구하는 과정은 그림 5와 같다.

다시 처음 방정식으로 돌아가서 가속력의 적분에 $1/2H$ 를 곱하면 속도가 된다. 그러나, 기계력을 유도하는 기법의 성격상 얻어진 입력은 저주파수에서는 속도특성을 고주파수에서는 전력특성을 갖는다. 또한 구해진 신호는 측정할 때 비교적 적은 Torsional 모드 성분을 갖는데, 이는 PSS 성능에 실제적으로 영향을 주는 매우 중요한 요소로서 터빈-발전기 Torsional 반응에 PSS가 관여할 수 있는 어떠한 상황도 배제하여야 하기 때문이다. 가속력의 적분치는 PSS의 입력이 되며 이에 대하여 위상보

상(2단계의 진지상회로)과 게인 및 출력 Limit함수가 적용된다.

그림 6은 PSS 개발품에 적당한 수리모델 PSS2B모델을 보여주고 있다(실제 적용은 PSS/E의 PSS2A 모델임). 이 블록선도에 번호들로 표시된 구성요소들은 다음과 같은 특성이 있다.

- ① PSS는 2개의 입력을 사용한다. 입력 1은 발전기 모선의 주파수 신호이다. 입력 2는 PT, CT에서 측정되어 내부에서 계산된 전력신호이다. PSS 개발품에는 사용하고 있지 않으나, 다른 모델에는 입력 Limit들에 의해 계산된 값들에 대해 상하한치를 두고 있는데 속도는 $\pm 8\%$, 전력은 $\pm 125\%$ 이다.
- ② 각 입력들은 Washout 단계를 거치는데 이는 고주파 필터로서 속도와 전력의 정상상태 또는 저주파 변화를 제거하여 PSS 출력에 영향이 없도록 한다. 현재 PSS 개발품에서는 모든 Washout 시정수들은 같은 값을 세팅하고 있다.
- ③ 속도측정에 대한 Transducer 시정수이다. PSS 개발품은 1800Hz로 빠르게 Sampling하므로 이 시정수는 0으로 세팅한다. 안정도 해석을 위한 모델에서만 있는 블록이며, 실제 PSS 개발품에는 이 블록이 없다.



〈그림 6〉 PSS 개발품의 수리모델 'PSS2B'

- ④ Block 4는 Ramp Tracking 필터로서 구해진 기계력신호를 필터링하도록 설계되었으며, 실제 기계력에 더욱 가깝도록 저주파 필터링된 출력을 만든다. Ramp Tracking이란 말은 경사추적이란 뜻으로 Step 변화를 필터링하여 급작스런 변화를 완만하게 변화시킨다. 필터는 5개의 pole과 1개의 zero를 갖고 있으며 약 1.5Hz의 cut-off 주파수를 갖는다.
- ⑤ 전력신호에 대해서는 2개의 Washout 단계가 있다. PSS 개발품에서 모든 Washout 시정수는 같도록 세팅하여야 한다. 가속력 신호를 계산할 때 이득 계수 2H와 적분항을 반드시 고려함으로써 이 모델의 Washout 블록 1개가 블록 6에서 사용되도록 한다.
- ⑥ Block 6은 Washout 시정수와 $\frac{1}{2Hs}$ 의 곱으로서 H는 관성정수이다. 이 경우 Washout의 분자의 s항이 소거되어 $Ks2 = T_w/2H$ 가 된다. 앞서 언급한 대로 PSS 개발품에서는 모든 Washout시정수가 같아야 한다.
- ⑦ PSS 개발품에서 7번 블록의 이득은 항상 1이다.
- ⑧ $Ks1$ 은 PSS의 이득을 나타낸다.
- ⑨ 최적의 위상보상을 위하여 필요하며 2단계의 진상-

지상블록이다.

- ⑩ 세번째로 추가된 진-지상단계로서 Ontario Hydro 등에서 일부 사용하고 있다. PSS 개발품에서는 따로 이 Torsional Filter를 채용하지 않았다.
- ⑪ PSS출력 Limit를 나타내는데 보통 0.05~0.1pu로 세팅한다.

이 밖에 PSS 개발품에 사용될 수 있는 PSS 수리모델은 IEEE type PSS2A인데 1992년 규격 421.5에 수록되어 있다. 특징상 PSS2A는 T_5 , T_{10} 블록이 없다(최종적으로 PSS 개발품에 적용된 모델임).

다. PSS 개발품의 H/W 기능 및 기본 사양

개발된 디지털 PSS의 기본기능 및 보조기능은 아래와 같으며, 표 1은 개발품의 기본사양을 나타낸다.

-기본기능

- CT/PT를 통한 발전기의 단자 전압/

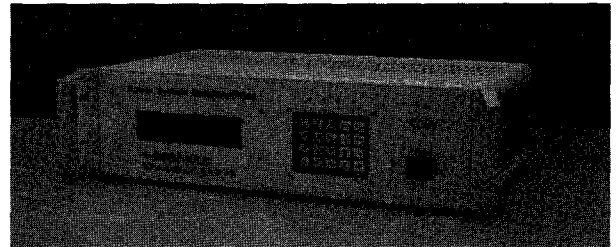
전류 검출

- Low Pass Filter, Anti-Aliasing Filter에 의한 신호처리
- 발전기 전압/전류의 Analog-to-Digital 변환
- 순시 유효/무효 전력의 계산(2전력계법)

〈표 1〉 PSS 개발품의 기본사양

구분	사양
P/T 입력	채널 수 : 3, 입력 전압 : 0 to 120VAC, 절연 전압 : 2000VAC Continuous 전압 변환 방식 : Hall C/T, 입력 필터 : Second-Order LPF
C/T 입력	채널 수 : 3, 입력 전류 : 0 to 5A, 절연 전압 : 2000VAC Continuous 전류 변환 방식 : Hall C/T, 입력 필터 : Second-Order LPF
PSS 출력	출력 형식 : 전압 출력, 출력 전압 : -10V to +10V, 절연 형식 : Photo-Coupler, 절연 전압 : 1000VAC Continuous 부가 기능 : Configurable Limit, Read-Back Protection
아날로그 출력	출력 형식 : 전압 출력, 출력 전압 : -10V to +10V, 절연 형식 : Photo-Coupler, 절연 전압 : 1000VAC Continuous
디지털 입력	입력 점수 : 8, 입력 전압 : 24VDC, 절연 형식 : Photo Coupler, 절연 전압 : 2000VAC Continuous
디지털 출력	출력 점수 : 8, 출력 형식 : Dry Contact, 절연 형식 : Photo Coupler 절연 전압 : 2000VAC Continuous, 부가 기능 : Read-Back Protection
외형	외함 크기 : 3U(H) × 84HP(W) × 240mm(D)
제어장치	CPU : DSP320C32, 표시 장치 : LED, LCD Display KEY-PAD : Numeric, Function Key, 통신 포트 : RS485 1 Port, RS232 1 Port
자가진단 기능	Self Test, Watch-Dog, Memory Test, ADC Test, DAC Test Bypass기능, Fail 발생시 Hard-Wire Bypass 기능
공급전원	전원 전압 : 125VDC, 소비 전력 : 최대 300W
동작환경	주위 온도 : 0 to 55°C, 습도 : 0 to 90%RH, Non-Condensing, 설치 장소 : 실내

- PSS 알고리즘 연산
- Zero-lock 기능
- 보조적 기능
 - 자체진단 및 보호기능
 - 사용자 Interface
 - Event logging 기능
 - Testing Mode



〈사진 1〉 개발된 전력계통 안정화장치(PSS)의 외관

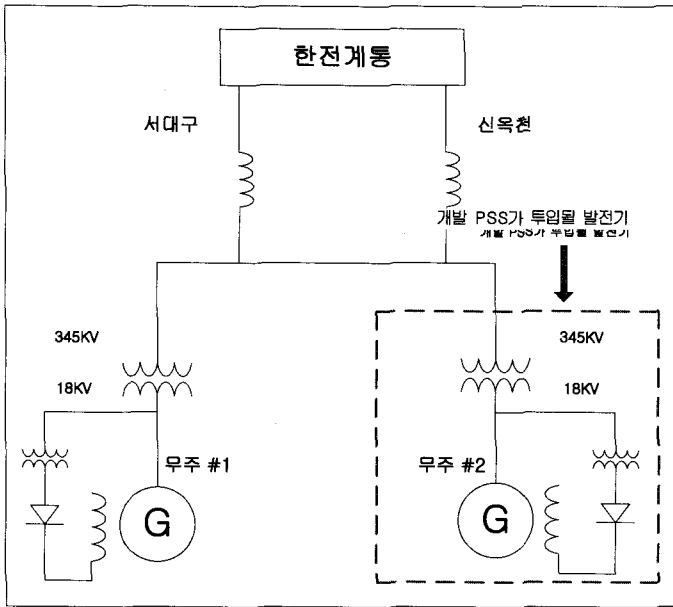
라. PSS 개발품의 성능시험

PSS 개발품의 H/W 환경시험은 공인인증 시험기관인 산업기술시험원에서의 인증을 득했으며(2000. 11), 본 절에서는 실제통(무주양수) 투입 전, 실시간 전력계통 시뮬레이터(RTDS)를 이용한 성능시험 결과에 대해 기술한다.

■ 무주—양수 발전소(2호기) 모의계통 구성

무주양수 발전소와 한전계통과의 간략한 계통도를 그림 7에 나타내었다.

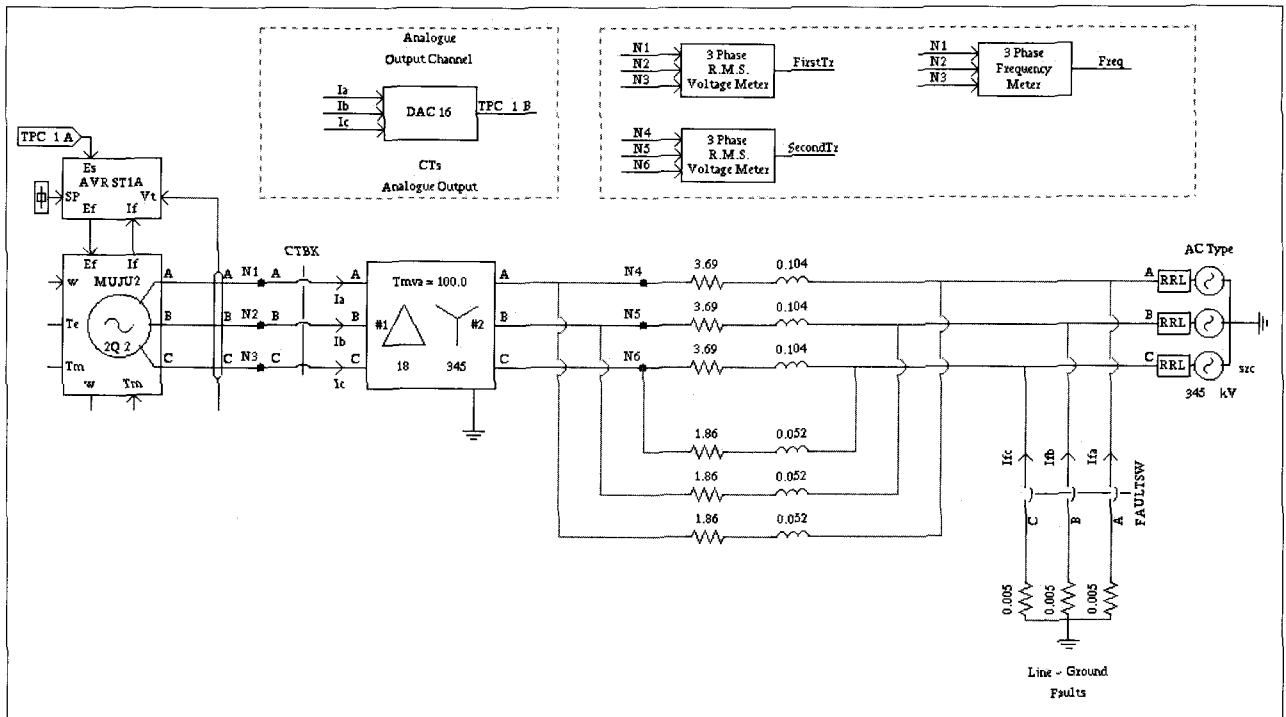
그림 7의 한전계통을 포함한 무주-양수(2호기) 계통을 기본으로 실시간 디지털 시뮬레이터(RTDS)를 이용한 다양한 성능시험을 할 수 있도록 무주-양수 발전기 2호기와 한전계통을 무한모션 축으로 모의한 1기 무한모션 계통을 이용하여 성능 시험을 하였다. PSCAD/ RTDS를 이용한 1기 무한모션 모의 계통을 그림 8에 나타내었다. RTDS에서 모의된 계통은 기준이 343MVA이고 출력력은 300MW, 발전단쪽의 단자전압은 18kV이다. 그림 8에서 무주양수 2호기를 모의한 발전기는 실제입력하여 실제 운전계통과 동일한 조건으로 구성하였다. 변압기를



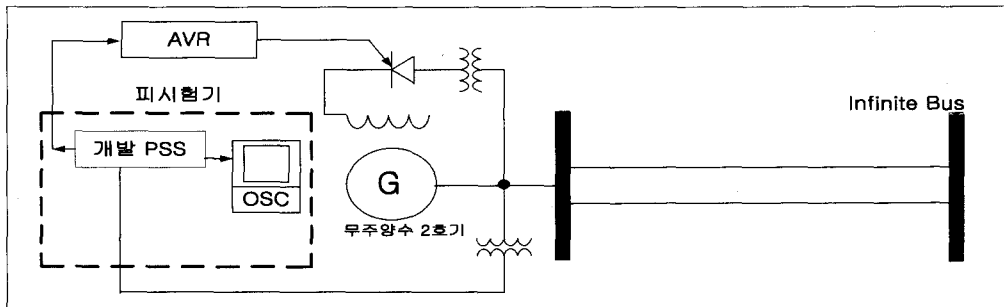
〈그림 7〉 한전 계통을 포함한 무주양수 발전소 계통도

통한 한전계통(무한모선)과의 연결은 2회선 선로로 구성하였다. 성능시험을 위한 상정사고는 무한모선 쪽에서 3상 단락사고를 적용할 수 있도록 구성하였고 여자의기 기준전압(Vref)은 PSCAD/RTDS의 Run-Time 모듈에서 적용할 수 있도록 구성하였다. 또한, 발전기의 출력조정은 RTDS의 Run-Time Module에서 Mechanical Torque(T_m) 값을 조정하여 유효출력을 조정할 수 있도록 하였다.

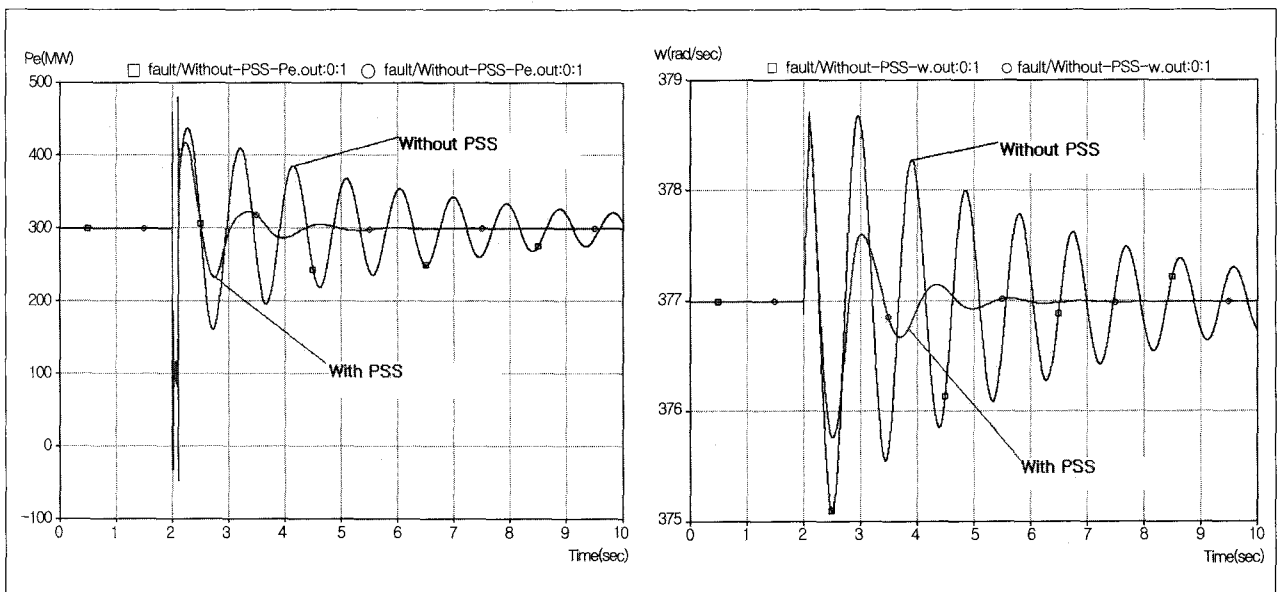
PSS 개발품의 성능시험은 다음의 4가지 시험을 적용하였다. 우선 기준전압의 5%를 Step Up/Down하는 AVR Step Test를 수행하고 다음으로 3상 단락사고와 같은 상정사고를 모의하여 그 성능을 분석하였다. 그리고 발전기의 출력변화를 통한 성능시험을 실시하였다. 4가지 경우 모두



〈그림 8〉 성능시험을 위한 1기 무한모선 모의계통 구현



〈그림 9〉 피시험기(PSS)를 포함한 성능 시험 구성도



〈그림 10〉 3상 단락사고 적용시 PSS 성능 시험 결과(上 : 유효전력(Pe) 변화, 下 : 주파수(w) 변화)

우수한 성능을 나타내었으며 본 절에서는 상정사고시의 PSS 성능시험 결과에 대해서만 기술하였다.

성능시험의 기본적인 구성을 그림 9에 나타내었다. RTDS와 증폭기로 구성된 시험장치에 피시험기에 해당하는 PSS개발품을 적용하였다. 여러 가지 성능시험결과는 PSS에서 직접 오실로스코프를 통하여 측정할 수 있고 주된 결과 파형의 측정은 PSCAD/ RTDS의 MultiPlot Module에서 측정된 결과를 비교 분석한다.

그림 10은 3상 단락사고와 같은 상정사고를 모의하여 그 성능을 평가한 결과이다. 사고적용은 AVR Step 시험과 마찬가지로 RTDS의 Run-Time Module에서 사고 모의스위치(Seq-trigger)를 on하는 방법으로 적용한다. 사고 지속시간은 0.1sec(6cycle)이다. 결과에서와 같이 PSS가 있을 경우, 전력과 주파수 동요가 신속히 감쇠됨으로써 PSS 성능이 우수함을 알 수 있다. ■

(다음호에 계속)