

H ∞ 강인 제어 이론의 전력계통 안정화 장치(PSS)에의 적용

論文

52A-1-1

Application of H ∞ Robust Control Theory to Power System Stabilizer and Its Experiment

全 瑩 煥*
(Yeong-Han Chun)

Abstract - This paper presents a novel application method of H ∞ optimization method to the design of Power System Stabilizer(PSS) and experimental results through hardware simulator. The approach is focused on decision of performance index and selection strategy of weighting functions together with its tuning for direct design. As the purpose of the PSS is to increase system damping at very narrow frequency band, weighting functions are determined differently from the case of general servo system control. The designed PSS was confirmed through experiments on a hardware simulator.

Key Words : PSS, 계통안정화 장치, 저주파진동, H ∞ 최적제어, 강인제어

1. 서 론

전력계통에서 저주파 동요는 응답 속도가 빠른 여자기의 제어가 실현되면서, 과도안정도 특성을 개선함과 동시에 나타나는 문제로 잘 알려져 있다. 계통에서 저주파 동요가 발생하면 이로 인해 전력 송전 용량도 제한을 받을 뿐 아니라, 댐핑 특성이 나빠지면 동요 불안정(oscillation instability) 현상도 나타나므로 동요를 억제시킬 필요가 있다. 대부분의 전력계통에서 저주파 동요는 0.2~2.5 Hz 사이의 주파수 대역에서 발생하는데 이러한 동요의 억제는 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)을 사용하여 보조적으로 발전기 여자 제어를 함으로써 효과적으로 개선할 수 있다. 기존의 PSS용 제어기로는 진·지상 제어기가 실계통에 응용이 되고 있지만, SSR과의 상관 관계를 가지는 등, 여러 가지 문제점도 내포하고 있으며 이러한 문제를 해결하기 위하여 가속력(accelerating power)을 이용하는 방법 등이 제안되기도 하였다.

H ∞ 최적화 방법(optimization method)은 주파수 영역의 설계 방법으로 주로 다변수 시스템에 많이 적용되고 있으며 외란 억제 및 각종 불확실성(uncertainty)에 대한 설계사양이 대상 계통의 특성을 적절히 반영한 가중함수로 주어지면 제어기 설계과정이 체계적이고 광범위한 운전영역에서 강인하게 동작하는 특성이 있다. 그러나 실제 적용시 좋은 성능을 얻기 위해서는 성능지표(performance index)와 가중함수(weighting function)를 적절히 선정하는 것이 매우 중요한데 가중함수 선정시 강인성과 성능이 동시에 만족하도록 trade-off를 적절히 조절하여야 한다.

본 논문에서는 설계사양을 고려한 성능지표와 가중함수의 선정 및 튜닝 방법에 대해 제안하였으며, 제어의 성능을 하드웨어 시뮬레이터를 이용하여 검증하여 실제 적용 가능성을 보여주고 있다. 또한, 제안한 성능지표와 가중함수를 적용하

여 넓은 주파수 영역에서 광역 모드(inter-tie mode)와 지역 모드(local mode)의 제동을 위한 댐핑을 향상시킬 수 있으며 DGKF 알고리즘[10]은 최적화 문제를 푸는데 사용되었다.

2. 1기 무한대 모선 계통

PSS의 성능 평가를 위해 사용한 모델 계통은 그림 1과 같은 1기 무한대 모선 계통이며 하드웨어 시뮬레이터 역시 같은 구조를 가지고 있다. 1기 무한대 모선 계통에서는 광역 모드의 모의는 불가능하므로 선로 고장이나 부하 변동을 통한 지역모드의 동요에 대해서 성능 평가를 실시하였다. 그림 2는 1기 무한대 모선의 선형화 모델을 나타내고 있다.

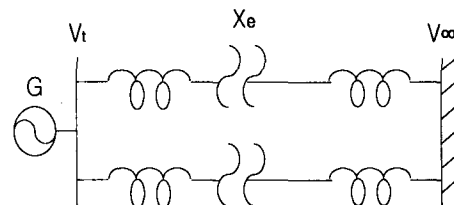


그림 1 1기 무한대 모선
Fig. 1 One machine-infinite bus system

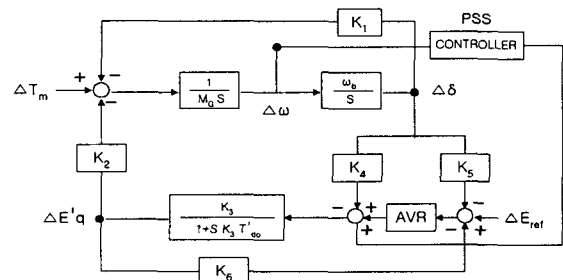


그림 2 1기 무한대 모선 선형화 모델
Fig. 2 Linearized model of one-machine infinite bus system

* 正 會 員 : 弘益大 電子電氣 工學部 助教授
接受日字 : 2002年 1月 14日
最終完了 : 2002年 9月 27日

3. H_∞ 최적화를 위한 문제의 정식화

PSS의 목적은 관심있는 주파수 대역에서 시스템의 댐핑을 증가시키는 것이다. 따라서, 제어 목적이 일반적인 레귤레이터(regulator) 문제와는 다른데 일반적인 레귤레이터 문제에서는 설계된 보상기(compensator)가 정상 상태 오차 사양을 만족해야 하지만 PSS의 경우에는 지역 모드와 광역 모드의 주파수 대역에서 댐핑을 증가시키는 것이 목적이고 조속기가 기계적 출력과 정상 상태 오차를 제어하므로 이를 고려할 필요가 없다. 이러한 특성은 제어가 가지는 washout으로 기존의 PSS에서도 이러한 특성을 고려하여 설계하고 있다. PSS 설계시 또 하나의 문제는 H_∞ 표준 문제(standard problem)의 정식화 구조에 어떻게 원하는 설계사양을 맞출 것인가 하는 것인데 여기서는 설계 사양을 성능 사양과 강인성 사양으로 나누어 생각하였다.

3.1 외란 제거 사양

피드백 제어의 목적은 시스템의 외부 불확실성으로 표현되는 외란의 영향을 억제시키는 것이다. 이 외란은 부하 변동 또는 사고 등에 의해 대략 0.2~2.5Hz의 주파수 대역에서 발생한다[2]. 여기서는 그림 3과 같이 플랜트 입력 외란과 출력 외란의 두 가지 외란에 대해 다루기로 한다.

발전기 토크의 외란은 기계적 입력 토크의 외란과 유사한 영향을 미침으로 플랜트 입력 외란을 발전기 토크로 간주할 수 있는데 전력계통으로부터의 외란이 터빈의 기계적 토크보다 발전기 토크에 큰 영향을 미치기 때문이다. 따라서, 출력 신호 $y = \Delta\omega$ 에 대한 외란의 영향은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y(d_1) \\ y(d_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T(\Delta\omega, d_1) & 0 \\ 0 & T(\Delta\omega, d_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 d_1 \\ W_2 d_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $T(i, j)$ 는 j 에서 i 로의 전달 함수이며, W_1, W_2 는 주파수에 대한 함수로 나타나는 가중함수이다.

제어 성능사양은 식(2),(3)을 동시에 만족하는 보상기 K 를 구하는 것이다.

$$\|y(d_1)\|_2 \leq \|T(\Delta\omega, d_1)W_1\|_\infty < \gamma \quad (2)$$

$$\|y(d_2)\|_2 \leq \|T(\Delta\omega, d_2)W_2\|_\infty < \gamma \quad (3)$$

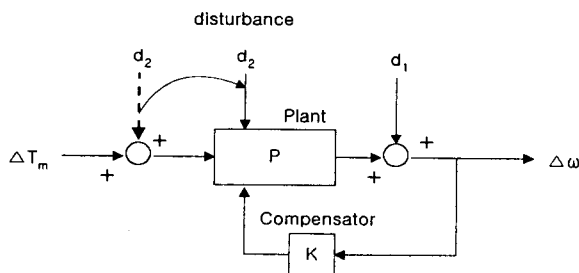


그림 3 외란 모델

Fig. 3 Position of disturbance

플랜트 출력 외란은 추종(tracking) 성능과 매우 밀접한 관련이 있으므로 보다 나은 제어 성능을 얻기 위해 출력 외란 사양을 포함시킨다.

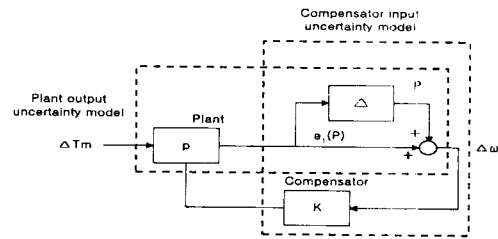


그림 4 불확실성 모델

Fig. 4 Modeling of uncertainty

3.2 플랜트 불확실성 사양과 센서 노이즈에 대한 강인성

피드백 제어의 또 다른 목적은 플랜트 불확실성에 대한 영향을 줄이는 것인데 이는 H_∞ 방법을 통해 직접 다룰 수 있다. 플랜트 불확실성을 보상기 입력 곱셈형 불확실성 모델로 나타내었으며 그림 4와 같이 플랜트 출력이나 플랜트의 보상기 입력 쪽에 위치하도록 하여 제어가 강인하게 동작하도록 하였다. 따라서, 플랜트 내부의 불확실성에 대한 강인 안정도(robust stability) 조건을 가중함수 W_3 와 함께 나타내면 식(4)와 같이 정식화된다.

$$\|e_1(p)\|_2 \leq \|T(e_1(p), p)W_3\|_\infty < 1 \quad (4)$$

3.3 제어 출력에 대한 사양

제어 사양중의 중요한 하나는 제어출력이다. H_∞ 최적화 방법에 의해 설계된 보상기는 비록 그것이 다른 주파수 대역에서 설계사양을 만족시킨다 하더라도 가끔씩 고주파의 제어 출력을 발생시키게 되고 이로 인한 액츄에이터(actuator)의 포화로 제어 성능이나 안정도에 나쁜 영향을 주게 된다. 그러므로 제어기 출력에 패널티 가중함수를 가하여 제어출력이 포화되지 않도록 하였다.

외부 신호 d_1, d_2, p 에 대한 제어출력은 식(5)와 같이 주어지고

$$\begin{bmatrix} u(d_1) \\ u(d_2) \\ u(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_u T(u, d_1) & 0 & 0 \\ 0 & W_u T(u, d_2) & 0 \\ 0 & 0 & W_u T(u, p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 d_1 \\ W_2 d_2 \\ W_3 p \end{bmatrix} \quad (5)$$

이를 다시 나타내면 식(6)~(8)과 같다.

$$\|u(d_1)\|_2 \leq \|W_u T(u, d_1)W_1\|_\infty < \gamma \quad (6)$$

$$\|u(d_2)\|_2 \leq \|W_u T(u, d_2)W_2\|_\infty < \gamma \quad (7)$$

$$\|u(p)\|_2 \leq \|W_u T(u, p)W_3\|_\infty < \gamma \quad (8)$$

제어기 설계의 목적은 크게 식(2)~(4), (6)~(8)을 동시에 만족하는 보상기를 얻는 것이고 성능지표는 그림 5와 같은 표준 문제에서 얻어질 수 있다.

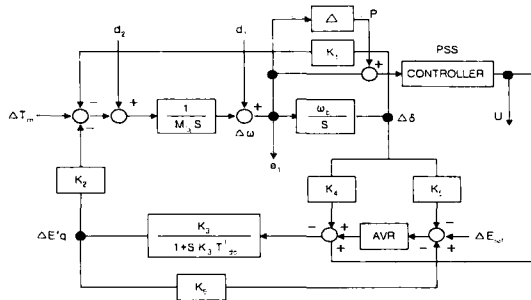


그림 5 가중함수를 포함하지 않은 성능지표
Fig. 5 Performance index without weighting functions

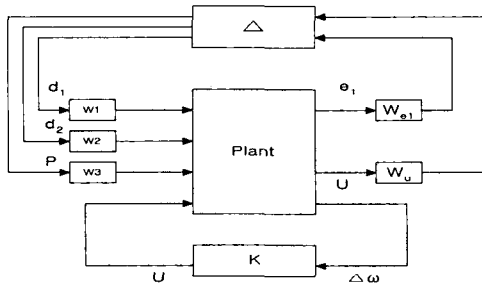


그림 6 PSS 설계를 위한 가중함수
Fig. 6 Weighting functions for PSS

4. 성능지표와 가중함수

3절에서 기술한 설계사양들은 식(9)와 같이 한 개의 성능지표로 나타낼 수 있다.

$$\min_{\text{stabilizing } K} \left\| \begin{matrix} T_{el d1} W_1 & T_{el d2} W_2 & T_{el p} W_3 \\ W_u T_{ud1} W_1 & W_u T_{ud2} W_2 & W_u T_{up} W_3 \end{matrix} \right\|_{\infty} < \gamma \quad (9)$$

성능지표는 그림 6과 같이 표준 문제로도 나타낼 수 있는데 성능지표와 함께 가중함수의 적절한 선정은 강인성과 제어 시스템의 성능을 결정하므로 균형을 이룬 제어를 얻기 위해서는 적절한 가중함수의 선정이 중요하다. 본 절에서는 서보제어의 경우와 비교하여 PSS 설계를 위한 가중함수의 선정 방법에 대해 기술하고자 한다. 이들 가중함수는 그림 6과 같이 성능 지표와 함께 사용되어야 하며 서보 제어를 위한 전형적인 가중함수의 형태는 식(10)~(14)과 같다.

$$W_1 = \frac{1}{s + \epsilon_1} \quad (10)$$

$$W_2 = \frac{1}{s + \epsilon_2} \quad (11)$$

$$W_3 = \frac{s}{\epsilon_3 s + \alpha} \quad (12)$$

$$W_u = \frac{s}{\epsilon_4 s + \beta} \quad (13)$$

$$W_{\omega 1} = 1 \quad (14)$$

4.1 가중함수 W_1

서보 제어의 경우에 가중함수 W_1 은 식(15)와 같이 주어진다.

$$W_1 = \frac{1}{s + 0.001} \quad (15)$$

작은 정상 상태 오차를 보장하기 위해서는 ϵ_1 이 충분히 작아야 ($\epsilon_1 \approx 0$) 한다. 그러나 PSS 설계에서는 조속기가 외부 루프(outer loop)에 있으므로 정상 상태 오차에 대한 고려는 하지 않아도 된다.

PSS의 목적은 단지 0.2~2.5Hz의 주파수 대역에서 보다는 큰 댐핑을 가지도록 하는 것이므로 식(16)과 그림 7에서 보여지는 바와 같이 가중함수 W_1 을 튜닝하였다. 이로써 저주파수 대역에서의 성능은 다소 불리하지만 다른 운전점(operating point)에서 파라메타들의 불확실성에 대해 강인한 제어기를 설계할 수 있다.

$$W_1 = \frac{s}{(s+1)(s+0.5)} \quad (16)$$

4.2 가중함수 W_2

식(11)로 주어진 가중함수 W_2 는 스텝(step) 토크 외란을 제거하는데 PSS가 억제해야 하는 전력계통의 실제 외란을 고려할 때 스텝 외란은 너무 가혹한 조건이라 할 수 있다. 따라서 PSS의 목적에 맞도록 식(17)과 같이 가중함수 W_2 를 튜닝하였다.

$$W_2 = \frac{s}{\left(\frac{1}{0.2 \cdot 2\pi} s + 1\right) \left(\frac{1}{2.5 \cdot 2\pi} s + 1\right)} \quad (17)$$

그림 8은 튜닝한 가중함수 W_2 의 주파수 응답 크기를 나타내고 있다. 토크 외란 모델은 속도와 위치를 모두 포함하는데 그 것은 속도를 토크의 적분을 통해 얻을 수 있기 때문이다.

4.3 가중함수 W_3

식(12)와 같은 가중함수 W_3 은 고주파 노이즈와 플랜트 불확실성을 제거하는데 PSS 설계에서는 센서 노이즈보다는 플랜트 불확실성이 더 중요하다. 가중함수 W_3 은 식(18)과 같고 그림 9는 주파수 응답 특성을 보여주어 주고 있다. 저주파수 대역의 가중치는 강인성 향상을 위해 증가시킬 수 있지만 그 크기가 1보다는 작아야 한다.

$$W_3 = \frac{s + 50}{10^{-3} s + 100} \quad (18)$$

4.4 가중함수 W_u

가중함수 W_u 는 제어 출력의 고주파 성분을 제거하기 위해 사용되며 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_u = \frac{(0.5s+1)(0.02s+1)}{(s+10^{-4})(s+10^{-8})} \quad (19)$$

그림 10은 주파수 응답 크기를 나타내며 0.5 rad/sec 이하의 주파수의 가중치가 증가하는 것은 제어가 0.5 rad/sec 이하의 신호에 대해서 민감(sensitive)하지 않아야 하기 때문이다.

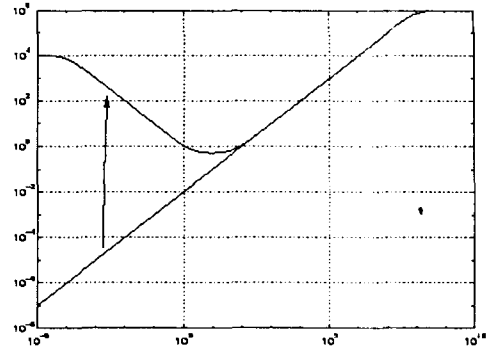


그림 10 가중함수 W_u 의 튜닝
Fig. 10 Tuning of weighting function W_u

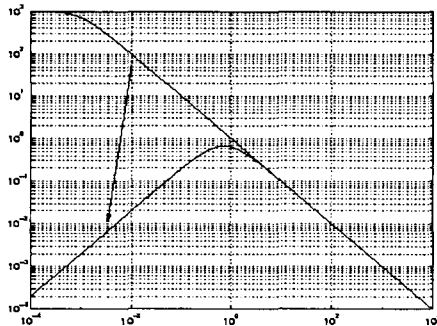


그림 7 가중함수 W_1 의 튜닝
Fig. 7 Tuning of weighting function W_1

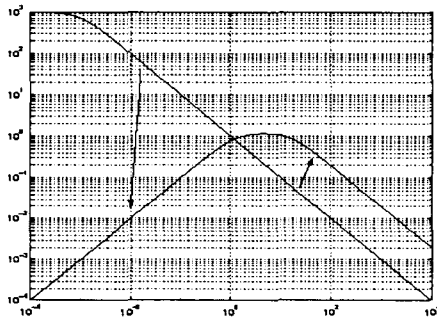


그림 8 가중함수 W_2 의 튜닝
Fig. 8 Tuning of weighting function W_2

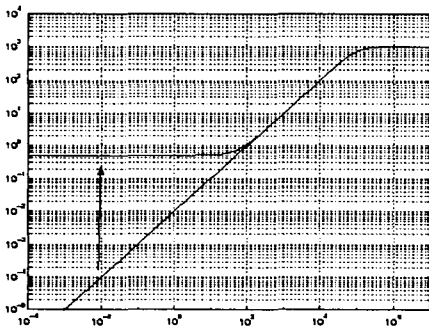


그림 9 가중함수 W_3 의 튜닝
Fig. 9 Tuning of weighting function W_3

5. 설계 절차

본 절에서는 앞선 절에서 주어진 성능지표와 가중함수들을 이용하여 PSS를 설계하는 절차에 대해 설명하고자 한다. 최적화의 관점에서 목적 함수의 각 요소들은 서로 관련성을 가지고 있으며 설계 과정은 다음과 같다.

- 1단계 : 그림 6에서와 같이 외란 d_1, d_2 의 위치를 결정한다. d_1 은 속도 외란, d_2 는 토크 외란을 나타내며 가중함수 W_1, W_2 는 4절에서 보여진 형태를 가진다.
- 2단계 : 제어기 입력에 플랜트 곱셈형 불확실성 모델을 두고 4절에서 설명한 바와 같이 가중함수 W_3 의 형태를 결정한다.
- 3단계 : 출력 신호 $e_1 = -k_1 - k_2$ 그리고 u 를 결정한다. e_1 은 속도 레귤레이션(regulation)을 위해 사용된다.
- 4단계 : 가중함수 W_u 를 결정한다.
- 5단계 : 주어진 가중함수를 가진 성능 지표를 결정한다.
- 6단계 : 최적화 과정을 거친다. 만약 최적 γ 값이 너무 크다면 가중함수 W_1 에 상수 ($\alpha < 1$)를 곱한다. 반대로 γ 가 너무 적을 경우 제어 성능 향상을 위해 가중함수 W_1, W_2 를 증가시키거나 강인성을 향상시키기 위해 가중함수 W_3, W_u 를 증가시킨다.

실험 시스템의 경우에 첫 번째 최적화 과정을 거친 후 최적 γ 값이 8.6121로 1보다 커서 안정한 제어를 설계할 수 있지만 최적 γ 값이 1근처의 값으로 되는 것이 바람직하다. 이를 위해 가중함수 W_1, W_2 은 식(20),(21)과 같이 전 주파수 대역에서 1/10로 튜닝하였고 튜닝후 최적 γ 값은 1.2072이다.

$$W_1 = \frac{s}{(s+1)(s+0.5)} \Rightarrow \frac{0.1s}{(s+1)(s+0.5)} \quad (20)$$

$$W_2 = \frac{s}{(\frac{1}{0.2 \cdot 2\pi} s + 1)(\frac{1}{2.5 \cdot 2\pi} s + 1)} \Rightarrow \frac{0.1s}{(\frac{1}{0.2 \cdot 2\pi} s + 1)(\frac{1}{2.5 \cdot 2\pi} s + 1)} \quad (21)$$

5.1 제어기 설계

표 1은 발전기와 송전선로의 데이터를 나타내며 PSS 설계를 위해 사용된 운전조건은 표2와 같다.

표 1 발전기와 송전선로 데이터

Table 1 Data of Generator and transmission lines

| x_d | x_d' | x_d'' | x_q | x_q'' | x_{tr} | x_l |
|--------|--------|---------|--------|---------|----------|--------|
| 0.3523 | 0.2726 | 0.1257 | 0.3343 | 0.0582 | 0.1305 | 0.5679 |

표 2 PSS 설계에 사용된 운전 조건

Table 2 Operation conditions for PSS design

| P | Q | V_t | V_∞ |
|-----|-----|-------|------------|
| 0.9 | 0.4 | 1.0 | 1.05 |

위의 조건을 이용하여 설계된 PSS는 13차이고 식(22)와 표3과 같다.

$$k \frac{\prod_{i=1}^{12} (s - z_i)}{\prod_{i=1}^{13} (s - p_i)} \quad (22)$$

표 3 PSS 파라메타

Table 3 PSS parameters

| i | Variables | Z_i | P_i | k |
|----|-----------|-----------------------------|-----------------------------|------------|
| 1 | | -1.0000000e5 | -1.6759861e4 | -0.0080934 |
| 2 | | -5.0000000e4 | -99.1092669 +i9.9168934 | |
| 3 | | 1.0203307e2 | -99.1092669 -i9.9168934 | |
| 4 | | -94.1720313 | -18.2500968 -i34.0480973 | |
| 5 | | -18.6148700 +i24.1130887 | -18.2500968 -i34.0480973 | |
| 6 | | -18.6148700 -i24.1130887 | -44.5478753 -i44.5478753 | |
| 7 | | -31.4120277 | -31.5133984 | |
| 8 | | -1.2635500 | -6.9084900 | |
| 9 | | -0.4993647 | -1.9695341 | |
| 10 | | -0.9762902 | -0.9977360 | |
| 11 | | -1.0051928 | -0.9667371 | |
| 12 | | -1.0000000e-4 | -0.5031825 | |
| 13 | | | -1.2635470 | |

6. 시뮬레이터

본 논문에서 사용한 시뮬레이터의 구조는 그림 11과 같다. 사례연구 1에서는 스위치 S_1 을 on/off하여 외란 발생을 모의하였고 전기적 부하는 발전기단과 무한 모선쪽 모두 연결 가능하지만 여기서는 무한 모선쪽에만 부하를 연결하였다. AVR은 PI 타입으로 식(23)과 같다.

$$AVR = (K_{PR} + \frac{K_{IR}}{s}) \quad (23)$$

여기서, $K_{PR} = K_{IR} = 6$

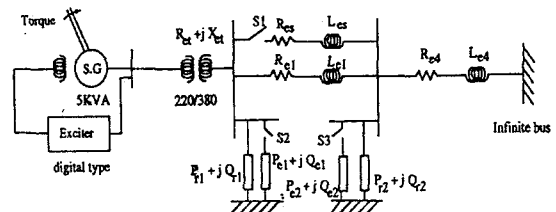


그림 11 시뮬레이터 구조

Fig. 11 Structure of simulator

7. 실험 결과

PSS는 다양한 운전점에서 동작하여야 하므로 설계된 PSS를 발전 레벨에 따라 3가지 운전조건으로 나누어 성능을 평가하였다. 각 운전조건들과 외란형태는 표4와 같다. 실험 결과 PSS가 과도 안정도(transient stability)에 영향을 미치지 않으며 전압 정정(regulation) 특성의 경우 사례연구 1에서만 다소 성능이 저하됨을 알 수 있다.

표 4 성능평가를 위한 운전점 및 외란 형태

Table 4 Operating conditions and disturbance type for performance evaluation

| | case 1 | case 2 | case 3 |
|------------------|-----------|-------------|-------------|
| P(pu) | 0.88 | 0.5 | 0.2 |
| Q(pu) | 0.1 | 0.08 | 0.1 |
| disturbance type | 1선 개방/재폐로 | 지락고장 (0.1초) | 지락고장 (0.1초) |

7.1 사례 연구 1 : 유효전력 0.88 pu

발전 레벨이 높게 되면 발전기는 전력계통과의 연계가 약해지게 된다. 발전 레벨이 0.88pu일 경우 1선 지락사고에 의해 시스템은 과도적으로 불안정상태가 된다. 여기서는 외란을 1선을 개방, 재폐로 시키는 것으로 모의하였다. 그림 12,13에서는 유효전력과 단자 전압의 응답특성을 나타내고 있다.

선로 재폐로 시간은 PSS를 적용하지 않은 경우는 4.7초, PSS를 적용한 경우는 3.95초로 측정이 되었는데, 이는 시뮬

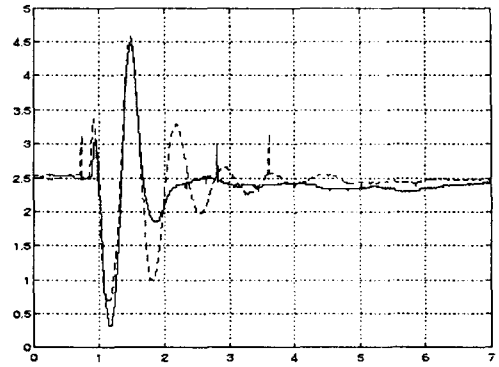
레이터를 수동 조작함으로써 생긴 오차로서 PSS의 특성에는 크게 영향을 미치지 않는다. 실험결과 전압 정정 특성은 PSS를 적용한 경우가 다소 불리하나 전력 동요는 상당히 개선되었다.

7.2 사례연구 2 : 유효전력 0.5pu

사례연구 1에 비해 발전기가 강하게 연계되어 있는 경우이다. 0.1초동안 1선지락에 대해 시스템이 과도적으로 안정함으로 외란은 1선지락이 0.1초동안 발생하는 것으로 모의하였다. 그림 14,15는 유효전력과 단자전압을 나타내며 전력 동요 억제는 상당히 우수하나 전압 정정 특성은 PSS 적용시가 약간 저하되었다.

7.3 사례연구 3 : 유효전력 0.2pu

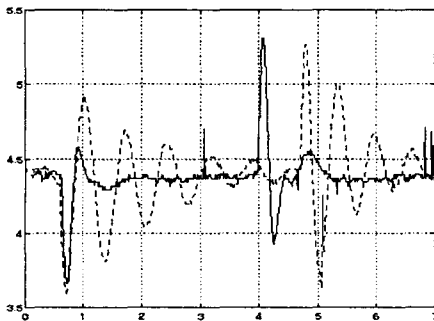
외란은 사례연구 2와 같이 0.1초동안의 1선지락으로 모의하였고 그림 16,17은 유효전력과 단자전압의 응답특성을 나타내고 있다. 유효전력과 전압 모두 좋은 성능을 나타내었고 전압 정정 특성 저하도 세 가지 사례 중에서 가장 적었다.



시 간 (초)

solid - with PSS , dashed - without PSS

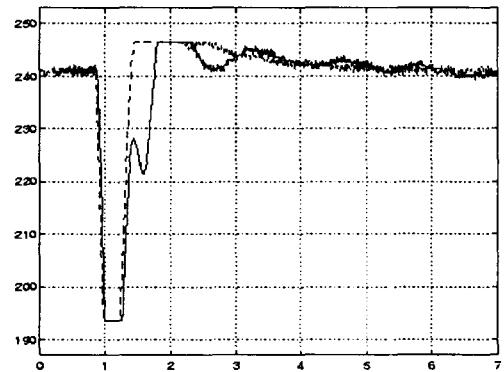
그림 14 사례연구 2 : 유효전력 (P=0.5, Q=0.08)
Fig. 14 Case study 2 : Active power(P=0.5, Q=0.08)



시 간 (초)

solid - with PSS , dashed - without PSS

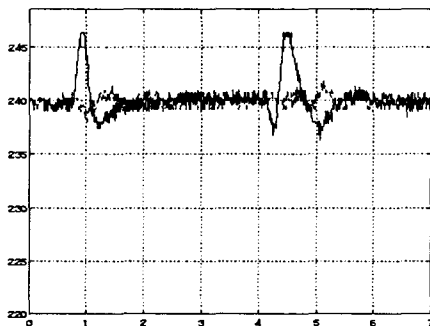
그림 12 사례연구 1 : 유효전력(P=0.88, Q=0.1)
Fig. 12 Case study 1 : Active power(P=0.88, Q=0.1)



시 간 (초)

solid - with PSS , dashed - without PSS

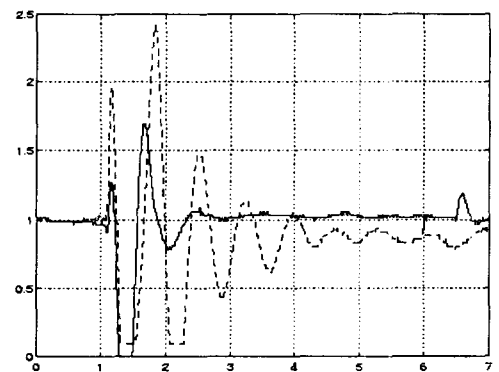
그림 15 사례연구 2 : 단자전압 (P=0.5, Q=0.08)
Fig. 15 Case study 2 : Terminal voltage (P=0.5, Q=0.08)



시 간 (초)

solid - with PSS , dashed - without PSS

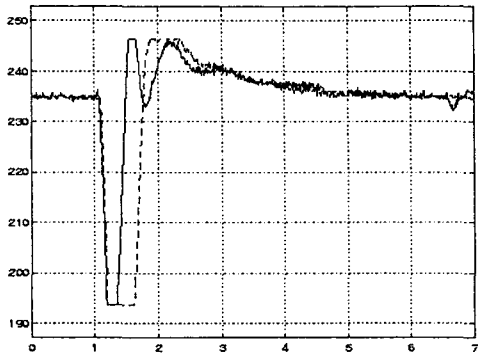
그림 13 사례연구 1 : 단자전압 (P=0.88, Q=0.1)
Fig. 13 Case study 1 : Terminal voltage (P=0.88, Q=0.1)



시 간 (초)

solid - with PSS , dashed - without PSS

그림 16 사례연구 3 : 유효전력 (P=0.2, Q=0.1)
Fig. 16 Case study 3 : Active power (P=0.2, Q=0.1)



시간 (초)

solid - with PSS, dashed - without PSS

그림 17 사례연구 3 : 단자전압 (P=0.2, Q=0.1)

Fig. 17 Case study 3 : Terminal voltage(P=0.2, Q=0.1)

8. 결 론

본 논문에서는 H_∞ 최적화 방법을 이용하여 강인한 PSS를 설계하였다. PSS 설계시 원하는 설계사양이 만족될 수 있도록 성능지표, 기본 가중함수의 설정 및 튜닝 방법을 제안하였고 설계된 PSS를 발전 레벨 0.88pu, 0.5pu, 0.2pu의 세 가지 운전조건에서 평가하였다. 기존의 lead/lag 타입의 제어기와 비교해서는 1-2 Hz 이외의 주파수 대역에서 급격하게 감소하는 이득 특성이 제어기의 강인성을 나타내며, SSR와의 상호 작용을 감소시키는 역할을 할 것으로 기대된다. 특히 PSS의 SSR과의 상호작용에 대해서는 앞으로 더욱 연구되어야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

[1] F.P. Demello and C. Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No.4, April 1969, pp.316-329

[2] E.V. Larsen and D.A. Swann, "Applying Power System Stabilizers: Part I: General Concepts", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.6 June 1981, pp.3017-3024

[3] E.V. Larsen and D.A. Swann, "Applying Power System Stabilizers: Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.6 June 1981, pp.3025-3033

[4] E.V. Larsen and D.A. Swann, "Applying Power System Stabilizers: Part III: Practical Considerations", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.6 June 1981, pp.3034-3046

[5] M.L. Crenshaw, et.al, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Committee Report, IEEE Transaction on Power Apparatus and

Systems, Vol. PAS-100, No.2 February 1981, pp.494-501

[6] P. Kundur, M.Klein, G.J. Rogers, and M.S.Zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.4, No.2 May 1989, pp.614-626

[7] J.H. Chow, L.P. Harris, M.A. Kale, and H. Othman, "Robust Control Design of Power System Stabilizers Using Multi-variable Frequency Domain Techniques", International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.2, 1992, pp.123-138

[8] B.A. Francis, Lecture Notes in Control and Information Sciences : A Course in H_∞ Control Theory, Springer-Verlag, New York, USA, 1987

[9] K.Glover and J.Doyle, "State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H_∞ norm bound and relations to risk sensitivity", Systems and Control Letters 11, 1988, pp.167-172

[10] J.Doyle, K.Glover, P.Khargonekar, and B.Francis, "State-space solutions to standard H_2 and H_∞ problems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.34, No.8, 1989, pp.831-847

[11] J.Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, Feedback Control Theory, Macmillan, 1992

[12] J.M. Maciejowski, Multi-variable Feedback Design, Addison Wesley, 1989

[13] J.Sefton and K.Glover, "Pole/zero Cancellations in the General H_∞ Problem with Reference to a Two Block Design", Systems and Control Letters 14, 1990, pp.295-306

[14] R.Y. Chiang and M.G. Safonov, "Real K_m -synthesis via generalized popov multipliers", ACC/TP9, 1992, pp.2417-2418

[15] H.Kwakernaak, "Robust Control and H_∞ Optimization -Tutorial Paper", Automatica, Vol.29, No.2, 1993, pp.255-273

[16] H.Kwakernaak, "Progress in the Polynomial Solution of the Standard H_∞ Optimal Control Problem", the 11th IFAC World Congress, Vol.5, 1990, pp.122-129

[17] G. J. Balas and J.C. Doyle, "Robustness and Performance Trade-Offs in Control Design for Flexible Structures", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.2, No.4, December 1994, pp.352-361

[18] G.J. Balas, J.C. Doyle, K.Glover, A. Packard, and R. Smith, μ -Analysis and Synthesis Toolbox : User's Guide, MuSyn Inc., Minneapolis MN, USA, 1991

[19] R.A. Hyde, The Application of Robust Control to VSTOL Aircraft, Ph.D.Dissertaton, Griton College, Cambridge, 1991

[20] Y.Hori, "Comparison of Vibration Suppression Control Strategies in 2-mass systems Including a Novel Two-Degree-of-Freedom H_∞ Controller", IEEE 2nd AMC Workshop, 1992, pp.409-416

- [21] H.S.Lee and M.Tomizuka, "Robust High-Speed Servo-Controllers for Micro positioning Systems", IEEE AMC Workshop, 1994, pp.633-642
- [22] Y.H. Chun and Y.Hori, "Rolling Mill Controller Design with H_{∞} Sensitivity Minimization", ASCC, Vol.2, 1994, pp.629-632
- [23] Y.H. Chun and Y.Hori, "A Unifying Design of H_{∞} Controller and PI Speed Feedback for High Precision Position Control fo Flexible System", KACC international session, 1994, pp.553-556
- [24] Y.H. Chun and Y.Hori, "On Weighting Functions for H_{∞} Controller and Its Experiment of 2-mass System with Low Frequency Resonance", Proceeding of IFAC Motion Control, Munchen, 1995, pp.165-172

저 자 소 개



전 영 환 (全 榮 煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동대학원 석사과정 졸업. 1997년 동경대 졸업(공학). 1985.5-1996.3 한국전기연구소 연구원. 1996.4-1998.2. 동경대학 공학부 조수. 1998.

2-2002.2 한국전기연구원 FACTS & Power Quality 연구 그룹장. 2002.3 - 현재 홍익대학교 전자전기공학부 조교수

Tel : 02-320-1620, Fax : 02-320-1110

E-mail : yhchun@hongik.ac.kr