

Robust 제어기를 이용한 발전 여자 시스템 전력 안정도 개선

홍현문*, 최재호*, 류홍우**

*충북대학교 전기공학과, ** 한국전력연구원

PSS Improvement of Generator Excitation System using Robust Controller

H. M. Hong*, J. H. Choi*, H.W. Rhew**

* Dept. of Electrical Eng. Chungbuk National University

** Korea Electrical Power Research Institute (KEPRI)

Abstract

This paper deals with the design and evaluation of the robust controller for generator excitation system to improve the steady state and transient stabilities. The nonlinear characteristics of the system is treated as model uncertainties, and then the robust control techniques are introduced into the PSS design to take into account these uncertainties at the controller design stage. The performance of the designed controller is examined by extensive non-linear time domain simulation. It is shown that the performance of the robust controller is superior to that of the conventional PSS in all cases studied.

Keywords: Robust control, Power System Stabilizer, Excitation, Transient Stability.

I. 서론

이 논문에서는, 다변수 강인 제어기 기법을 AVR (Automatic Voltage Regulator)과 PSS(Power System Stabilizer) 제어기를 포함한 강인한 여자 시스템 디자인에 적용하여 평가하였다. 강인한 제어기이라는 것은 시스템이 플랜트 불확실성을 갖고 있음에도 폭넓은 동작 조건에서 시스템의 안정과 성능을 유지하는 제어기를 말한다. 전력 시스템은 매우 비선형적이고, 시스템의 구성과 동작 조건은 주로 시간을 가지고 변화한다. 일반적인 전력 시스템은 선형화된 모델을 근거로 해서 제어기를 설계한다. 그리고, 제어기의 성능은 시스템의 폭넓은 조건 하에서 동작 조건을 만족시키기 위해서 오프-라인 비선형 시뮬레이션을 사용하여 폭넓게 평가되어 왔고, 또 여자기에 적용된 전력 안정도(PSS) 제어 기법들은 대전력 시스템 동적 응답을 개선시키고, 안정도 한계를 넓혀 왔다.[1][2]

60년대 이후 싸이리스터 방식을 이용한 발전 여자 시스템들이 순간 응답과 높은 상한 전압을 공급할 수가 있도록 폭넓게 사용되어 왔다. 이런 여자기들의 빠른 속도와 높은 개인들은 시스템의 과도 상태 안정도를 상당히 개선하였다. 그러나, 빠른 여자기 응답은 시스템 댐핑에서 역효과를 가져올 수가 있고, 정상 상태에서 불안정을 일으킬 수가 있다. 결과적으로, 전력 안정도(PSS)는 동기

기 회전자의 동요에 부가적인 댐핑을 제공하도록 발전기 여자기를 조정함으로써 안정도를 넓히도록 개발되어 왔고, 전력 안정도(PSS)에 대한 많은 연구의 노력으로 적절한 전력 안정도 제어기 디자인하기 위해서 다음과 같은 root locus, eigenvalue techniques, pole placement, adaptive 제어 등과 같은 제어 방법들이 사용되었다. 그러나, 이런 방법들로 전력 안정도(PSS)를 설계시 파라미터의 노화, 드리프트에 의한 변화와 높은 주파수 동적 특성들은 무시되고 모델화되지 못했다. 결국 플랜트의 불확실성을 고려하지 못하였다. 이런 불확실성을 극복하기 위해서 최근에는 불확실성을 고려한 강인제어 이론을 전력 안정도(PSS) 제어기에 적용하여 모델 불확실성을 극복할 수가 있었다.[3][4][5]

본 논문은 강인 제어 기법에 대한 이론의 우수성을 기술하고, 모델의 불확실성을 고려한 다변수 강인 제어기를 설계하였다. 디자인된 강인 제어기 성능을 비선형 시스템에 적용하여 폭넓은 동작 조건으로 시뮬레이션 하여 고찰하였다. 특히, 강인 제어기의 성능이 고전적인 전력 안정도(PSS) 제어기와 비교해서 우수하다는 것을 보였다.

II. 시스템 모델링

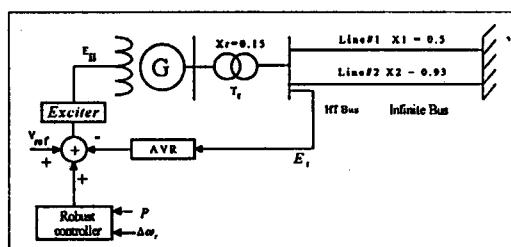


그림 1 시스템 구성도

그림 1에 시스템 구성을 나타내었다. 제시된 전력 시스템은 두 개의 병렬 전송 라인을 무한대 버스에 연결한 동기 발전기 모델로 표현하였다. 그림에서 보인 바와 같이 기존의 AVR 시스템 과도 안정도와 정상 상태를 개선하기 위하여 강인 제어기를 설계하여 적용하였다.

전기자를 가진 발전기 모델을 비선형방정식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$p\Delta\omega_r = (T_m - T_s - K_D \cdot \Delta\omega_r)/2H \quad (1)$$

$$p\delta = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (2)$$

$$\begin{aligned} p\Psi_{fd} &= \omega_0 [e_{fd} - R_{fd} \cdot i_{fd}] \\ &= \frac{\omega_0 R_{fd}}{E_{fd}} \cdot E_{fd} - \omega_0 R_{fd} \cdot i_{fd} \end{aligned} \quad (3)$$

$$p\Psi_{1d} = \omega_0 (\Psi_{ad} - \Psi_{1d}) R_{1d} / L_{1d} \quad (4)$$

$$p\Psi_{1q} = \omega_0 (\Psi_{aq} - \Psi_{1q}) R_{1q} / L_{1q} \quad (5)$$

$$p\Psi_{2q} = \omega_0 (\Psi_{aq} - \Psi_{2q}) R_{2q} / L_{2q} \quad (6)$$

$$pv_1 = (E_t - v_1) / T_R \quad (7)$$

$$E_{fd} = K_A \cdot (V_{ref} - v_1 + v_2) \quad (8)$$

$$E_{fdmax} \geq E_{fd} \geq E_{fdmin} \quad (9)$$

$$v_{2max} \geq v_2 \geq v_{2min} \quad (10)$$

$$\Psi_{ad} = (-i_d + \Psi_{fd}/L_{fd} + \Psi_{1d}/L_{1d}) L_{ad}$$

$$\Psi_{aq} = (-i_q + \Psi_{1q}/L_{1q} + \Psi_{2q}/L_{2q}) L_{ad}$$

$$p \text{ 미분자 } d/dt \quad \delta \text{ 회전각}$$

$$\omega_0 \text{ 전기적 주파수}$$

$$T_m \text{ pu 기계적 토크} \quad T_s \text{ pu 전기적 토크}$$

$$K_D \text{ 세동 상수} \quad H \text{ 관성 상수}$$

$$\Psi_{fd} \text{ 계자권선 쇄교자속} \quad \Psi_{1d} \text{ d-축 아마추어 쇄교자속}$$

$$\Psi_{1q} \#1 q\text{-축 전기자 쇄교자속}$$

$$\Psi_{2q} \#2 q\text{-축 전기자 쇄교자속}$$

$$\Psi_{ad} \text{ d-축 상호쇄교자속} \quad \Psi_{aq} \text{ q-축 상호쇄교자속}$$

$$v_1 \text{ 전압 변환 출력} \quad E_t \text{ 발전기 단자 전압}$$

$$T_R \text{ 전압 변환 시상수} \quad K_A \text{ 여자기 계인}$$

$$v_2 \text{ 강인성 또는 PSS 제어기 출력}$$

비선형방정식 식(1-4)을 정규동작점 둘레에서 선형화하고, 선형 방정식을 상태 공간 형태인 A_0 , B_0 , C_0 , D_0 로 표현된다. 정규 시스템의 전달 함수 행렬은 다음과 같다.

$$G_0(s) = C_0 (Is - A_0)^{-1} B_0 + D_0 \quad (11)$$

이 여자기 제어기의 목적은 모든 동작 조건에서 충분한 제동비를 제공하고, 시스템 과도 안정도와 정상 상태 안정도를 개선하기 위해서 종전의 전력 안정도(PSS)보다 좋은 성능을 갖게 하는데 중점을 두었다.

III. H_∞ 제어 이론

H_∞ 제어 이론은 그것들의 모델이 불확실성을 가진 시스템 특성에 대한 제어 시스템 디자인을 취급한다. 강인성 안정도와 성능을 강조하였다. 제어기가 모든 시스템 안정도와 만족한 성능을 공급한다면, 시스템 불확실성이 주어진 것은 강인하다고 말한다. 전력 시스템에서 모델 불확실성 주요 원인은 동작 조건 변화에 의한 것이다. 불확실성은 정규 시스템 주파수 응답 크기에서의 범위로서

대개 나타낸다. 그와 같은 범위는 승산 또는 가산 형태로 나타낸다. 그러나, 단지 이 논문에서는 불확실성 승산 형태를 고려하였다. 만약 정규 모델과 실제 모델을 $G_o(s)$ 과 $G(s)$ 로 나타내면, 그것들의 관계식은 다음과 같다.

$$G(s) = (I + \Delta_m(s)) G_o(s) \quad (12)$$

$$\begin{array}{ll} G_o(s) & \text{공칭 모델} \\ \Delta_m(s) & \text{승산 불확실성 범위} \end{array} \quad G(s) \text{ 실제 모델}$$

불확실성을 가진 페루프 시스템 안정도, 즉 강인성 안정도는 다음 조건을 만족하면 안정 할 수가 있다.

$$\| \Delta_m(s) T(s) \|_\infty = \sup(\sigma_{\max}(\Delta_m(s) T(s))) \leq 1 \quad (13)$$

$T(s)$ 는 보수 감도 함수라고 칭하고 (또는 페루프 전달 함수) 다음처럼 정의된다.

$$T(s) = G_o(s) K(s) [I + G_o(s) K(s)]^{-1} \quad (14)$$

$S(s)$ 는 페루프 시스템 감도 함수는 다음처럼 정의된다.

$$S(s) = [I + G_o(s) K(s)]^{-1} \quad (15)$$

강인성 성능은 $K(s)$ 를 선택하는데 다음 혼합 감도를 최소화함으로써 일을 수가 있다. 혼합 감도를 최소화하는 식은 다음처럼 정의된다.

$$\begin{array}{c|cc|c} \text{Min} & W_1(s) S(s) & \\ \hline K(s) & W_3(s) T(s) & \infty \\ \hline \text{Min} & W_1(s) [I + G_o(s) K(s)]^{-1} & \\ \hline K(s) & W_3(s) G_o(s) K(s) [I + G_o(s) K(s)]^{-1} & \infty \end{array} \quad (16)$$

식(16)을 최적화 하는 것은 하중 혼합 함수의 최대 고유치를 최소화하도록 제어기 $K(s)$ 를 찾는 것을 의미 한다. 일반적으로, 주어진 제어 목적을 위한 제어기 디자인은 두 가지 $W_1(s)$, $W_3(s)$ 하중 함수가 있다. $W_1(s)$ 은 시스템이 바라는 정상 상태 성능을 얻기 위해서 사용되고, 반면 $W_3(s)$ 은 식(10)을 만족하도록 선택하여야 한다. [5] $W_1(s)$ 하중함수, $W_2(s)$ 하중함수과 $W_3(s)$ 하중함수를

$$W_1(s) = \left[2.9 \frac{s^2 + s + 1}{s + 4}, 4.5 \frac{s^2 + s + 1}{s + 4} \right] \quad (17)$$

$$W_2(s) = [] \quad (18)$$

$$W_3(s) = \left[\frac{1.0(s+10)}{0.03(s^2 + s + 1)}, \frac{0.9(s+10)}{0.03(s^2 + s + 1)} \right] \quad (19)$$

얻었다.

강인 제어기 설계에 이용한 소프트 페키지는 Matlab Robust control toolbox를 사용하였다.[6] 바라는 응답을 얻기 위해서 식(17), (18), (19)의 값을 바꾸어서 반복 한다. 역하중함수의 주파수 응답은 그림 2와 그림3에서 보여주고 있다.

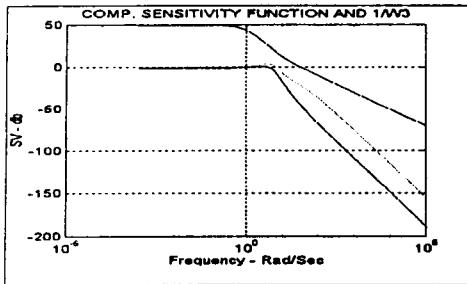


그림 2 보완 감도함수와 W_3^{-1} 하증

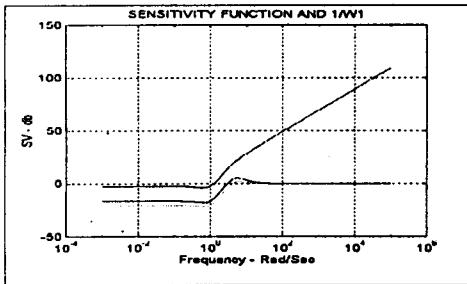


그림 3 감도함수와 W_1^{-1} 하증

IV. 시뮬레이션 결과

제어기 장인한 성능을 평가하기 위해 비선형 시변 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 그 결과는 종전의 전력안정도(PSS)와 비교하였다. 정상상태와 파도안정도에서 개선됨을 부하의 증가와 고장을 통해 시스템의 제어기 성능을 시뮬레이션으로서 증명하였다. 시뮬레이션 결과는 종전의 전력안정도(PSS)보다 훨씬 큰 제동을 공급할 수 있고, 모든 동작 조건에서 시스템 안정도를 유지할 수 있다. 그림.4에서는 부하의 증가에 대한 회전각 응답에서 장인 제어기가 응답이 빠름을 보여주고 있다. 그리고, 그림.1 #2선의 중간에서 선간 고장이 일어났고, 0.06초 후에 분리되었다. 그후 파도상태에 대한 시뮬레이션은 그림 5에서 보여 주고 있다. 단자 접합은 그림.5(c)에서 고전적인 전력안정도(PSS) 경우보다 빠르게 응답한다. 또한, 회전자각의 첫 번째 스윙 피크치는 대략 3° 정도 줄일 수가 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 AVR 가진 단상 무한 버스 시스템에 장인 제어를 이용한 전압 안정도(PSS)가 폭넓은 조건 아래에서 파도 안정도와 동적 안정도를 실현하였다. 장인 제어기 특성과 성능을 비선형 시스템에 적용하여 시뮬레이션으로서 고전적인 전력 안정도와 비교하였다. 성능면에 있어서 장인 제어기는 플랜트의 불확실성을 고려하여, 고전적인 전력 안정도(PSS)보다 우수함을 알 수 있었다.

장인 제어기는 파도 상태 안정도와 정상 상태 안정도 모두 뿐만 아니라 모든 제동비를 개선할 수 있었고, 시스템의 비선형 특성은 적절한 하증 함수를 선택함으로서 쉽게 제어기 디자인에 결합시킬 수가 있다. 장인 제어기 단점은 차수가 전력안정도(PSS)보다 높다는 것이다.

특히, 다변수 장인 제어를 적용하여 설계한 제어기가 장인한 성능을 갖고 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] F.P. Demello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as effected by excitation control on power systems." IEEE Trans. Power System, PWRS-5, pp.353-358 1990.
- [2] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System control and stability." The Iowa Univ. Press, Ames, Iowa, 1977.
- [3] E.V. Larsen and D.A. Swann, "Applying Power system Stabilizer, parts I - III." IEEE Trans., Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, pp.3017-3046, 1981.
- [4] P.Kundur, "Power system stability and control.", McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [5] K. Ohtsuka, T. Taniguchi, T. Sato, " A H_∞ Optimal Theory-based Generator Control System.", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. EC-7, No.1, pp.108-115, March, 1992.
- [6] R.Y. Chiang and M.G. Sofonov, "Robust control Toolbox User's Guide", The Math Works Inc., 1995.

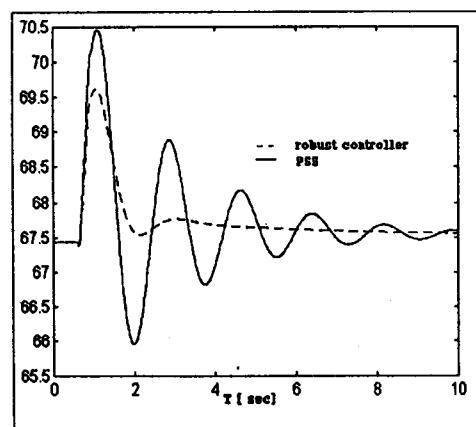


그림 4 부하에 대한 회전각 응답

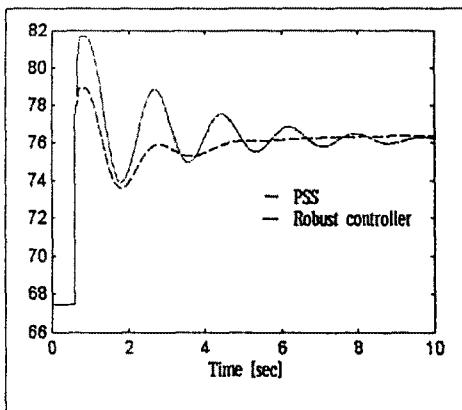


그림 5(a)

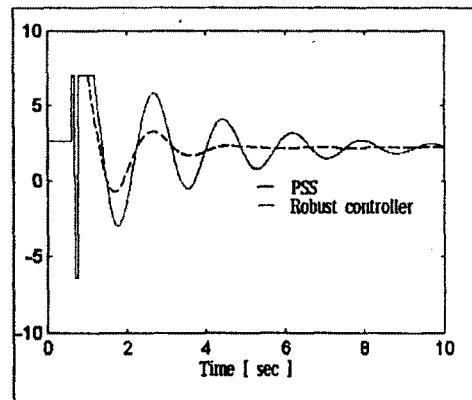


그림 5(d)

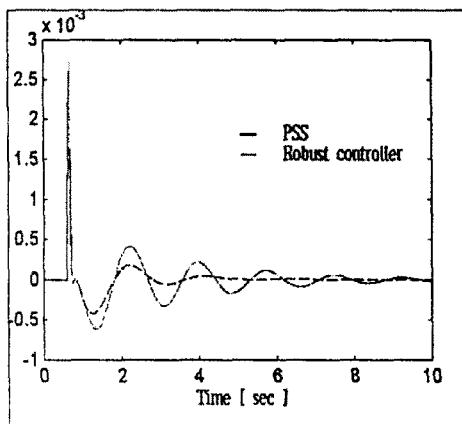


그림 5 (b)

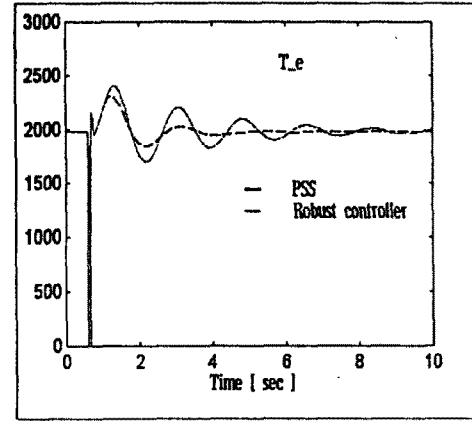


그림 5(e)

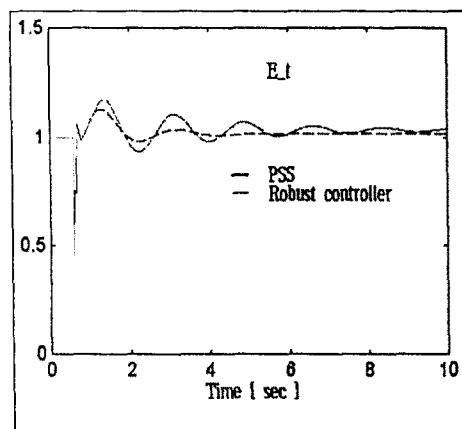


그림 5(c)

그림 5. 고장시 강인 제어기와 고전적인
전력안정도(PSS)
5 (a) 부하각, 5 (b) 각속도 편차, 5 (c) 단자전압,
5 (d) 계자전압, 5 (e) 전기적 출력