

여자기와 거버너를 이용한 전력계통 단자전압과 주파수의 비선형제어

Design of nonlinear controller for voltage and frequency of power system using excitation and governor system

임 선*, 윤 태 웅**
(Sun Im, Tae-Woong Yoon)

Abstract - This paper presents a MIMO nonlinear controller for the power system consisting of a turbine and a synchronous generator connected to an infinite bus. The controller proposed is based on feedback input-output linearization; its main goal is to regulate the terminal voltage and frequency, and is to improve the transient stability under large disturbances and unexpected faults. It is guaranteed that the voltage converges to its reference value exponentially, and that the frequency and the mechanical/electrical power are bounded. The design procedure is tested on a single machine infinite bus power system through simulations, and is seen to be effective.

Key Words : feedback linearization, voltage and frequency regulation, governor dynamics,

1장 서론

전력계통은 번개나 폭우 등의 여러 가지 요인으로 인해 변화하는 동특성을 갖는다. 이러한 부하조건이 변동하는 전력계통의 제어는 가능한 일정한 단자전압과 출력 전력을 유지하고 진동을 억제하는 데 그 목적이 있다.

그동안 이러한 목적에 부합되도록 전력계통 동기기에는 발전기 단자전압을 유지시키는 자동전압조정장치(AVR)와 감쇠토크를 증대시키는 전력계통 안정화 장치(PSS)가 설치되었다.[1] 그러나 종래의 AVR/PSS 설계는 동작점 부근에서 선형화 된 모델을 사용하므로 동작점이 바뀌거나 지락과 같은 사고 등에서는 원하는 성능을 발휘하기 힘들다. 따라서 최근에는 시스템의 안정도와 성능을 증대시키기 위해 비선형 여자 및 거버너 제어기의 설계로서 비선형 이론이 고려되고 있다[1].

전력계통은 비선형성이 강하기 때문에 이것을 효과적으로 대처하기 위해 본 논문에서 궤환 선형화를 사용한 제어방식을 채택하였다[2][3]. 또한 기존의 연구가 대부분 터빈(turbine)으로부터의 기계적 입력(P_m)의 변동을 일정하다고 가정하여 AVR 설계에만 초점을 맞춘 단일 입력 시스템에 대한 연구로 제한 되어 있었다[5]. 반면 [4]는 일반적인 동기발전기 모델을 사용하지 않고 내부전류 및 전압의 관계와 터빈의 동특성을 포함한 9차 모델을 사용하였다. 그러나 알 수 없는 위상각의 참조값을 출력으로 사용하였다. 따라서 본 논문은 기존의 기계적 동특성과 전기적 동특성을 기반으로 하는 3차인 일축모델(one-axis)과 1차인 거버너 동특성을 사용

하여 연산의 복잡성을 줄이면서, 출력으로 단자전압을 설정하고 위상각의 참조값을 사용하지 않으며 주파수와 기계적 입력을 함께 다루어 전압제어 및 안정성을 향상시키고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전력시스템의 수학적 모델에 관해서 기술하고, 3장에서는 거버너를 통한 안정화와 전압 제어를 구현한 후, 4장에서는 제시된 제어법칙의 모의실험 결과를 보인다. 마지막 5장에서는 결론을 맺는다.

2장 전력시스템의 수학적 모델

이 절에서는 전력계통의 동특성에 대하여 기술한다. 일반적인 1기 무한모선은 다음과 같은 방정식으로 표현된다[1].

2.1절 기계적 방정식(mechanical equation)

발전기의 기계적 방정식은 다음의 스윙 방정식(swing equation)으로 표현된다.

$$\dot{\delta}(t) = w(t) \quad (1)$$

$$\dot{w}(t) = -\frac{D}{H}w(t) + \frac{w_0}{H}P_m(t) - \frac{w_0}{H}P_e(t) \quad (2)$$

여기에 다음과 같은 간단한 거버너의 동특성을 포함시킨다.

$$\dot{P}_m(t) = -\frac{1}{T_g}P_m(t) + \frac{1}{T_g}u_g(t) \quad (3)$$

여기서 $\delta(t)$ 와 $w(t)$ 는 발전기의 위상각과 주파수를 나타낸다. 그리고 $P_m(t)$ 거버너로부터 들어오는 기계적 입력이고 $P_e(t)$ 는 전기적인 출력으로서 발전기의 유효전력을 나타낸다. 또한 w_0 는 동기속도, D 는 제동계수, H 는 관성계수이고 T_g 는 터빈의 시정수(time constant)이다. 마지막으로 $u_g(t)$ 는 터빈에 가해지는 제어입력이다.

2.2절 전기적 방정식(electrical equation)

$$\dot{E}_q(t) = \frac{1}{T_{d0}}(k_c u_f(t) - E_q(t)) + \frac{x_d - x_d'}{x_{ds}} V_s w(t) \sin \delta(t) \quad (4)$$

저자 소개

* 비회원 : 고려대학교 전기공학과 석사과정

imsun@adaptive.korea.ac.kr

** 정회원 : 고려대학교 전기공학과 교수, 공학박사

twy@korea.ac.kr

여기서 $E_q(t)$ 는 발전기의 횡축(q-axis) 기전력이고 $u_f(t)$ 는 여자기 제어입력이다. 또한 x_d 는 직축 리액턴스, x_d' 는 직축의 과도 리액턴스, T_{d0}' 은 직축의 과도 단락회로 시정수, x_{ds} , x_{ds}' 는 각각 발전기 전원부에서 무한모선까지의 총 리액턴스와 과도 리액턴스를 나타내며, k_c 는 여자기의 이득을 나타낸다.

발전기의 출력은 발전기의 단자전압으로서 다음과 같이 표현된다.

$$V_t(t) = \frac{1}{x_{ds}} \{x_s^2 E_q^2 + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d V_s E_q \cos \delta\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

위에서 기술한 바와 같이 전력계통의 1기 무한모선은 비선형성이 매우 크다.

식(1)~(5)에서 $\Delta P_m = P_m - P_{m0}$, $\Delta P_e = P_e - P_{e0}$ 로, 출력은 단자전압(V_t)을 설정하면 다음과 같이 상태방정식 형태로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned}$$

여기서

$$x = \begin{pmatrix} \delta \\ w \\ \Delta P_m \\ E_q \end{pmatrix}, \quad f(x) = \begin{pmatrix} -\frac{D}{H}w + \frac{w_0}{H}\Delta P_m - \frac{w_0}{H}\Delta P_e \\ -\frac{1}{T_g}\Delta P_m \\ -\frac{1}{T_{d0}'}E_q + \frac{x_d - x_d'}{x_{ds}'}V_s w \sin \delta \end{pmatrix}$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_g} \\ \frac{k_c}{T_{d0}'} & 0 \end{pmatrix}, \quad h(x) = V_t, \quad u = \begin{pmatrix} u_f \\ u_g = u_g - P_{m0} \end{pmatrix}$$

이다. 위와 같이 주어진 비선형 상태방정식에서 출력과 상태를 피드백하여 전체 폐루프 시스템을 선형화 하는 제어입력 u 를 구하고자 한다.

3장 여자기와 거버너 입력 설계

(5)를 출력으로 하고 터빈으로부터의 기계적 입력이 상수로 가정한 것의 결과는 [6]에 나타나있다. 본 논문에서는 거버너의 동특성을 추가한 후 거버너의 입력을 통하여 주파수와 유효전력을 안정하게 한다.

3.1절 여자기 입력 설계 [6]

출력 y 을 단자전압(5)로 선정하면 출력방정식은 다음과 같다.

$$y = V_t = \frac{1}{x_{ds}} \{x_s^2 E_q^2 + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d V_s E_q \cos \delta\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

입출력 변환 선형화를 적용하기 위해 출력식을 미분하면 식 (7)로 표현된다.

$$\dot{y} = L_f h(\delta, w, E_q) + L_g h(\delta, w, E_q)u_f \quad (7)$$

여기서

$$L_f h = \nabla h f = \frac{f_3}{x_{ds} f_1^{1/2}}, \quad L_g h = \nabla h g = \frac{f_2}{x_{ds} f_1^{1/2}} \text{를 나타내}$$

고, 함수 f_1, f_2, f_3 는 각각 다음과 같다.

$$f_1 = x_s^2 E_q^2 + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d V_s E_q \cos \delta$$

$$f_2 = x_s^2 E_q \frac{1}{T_{d0}'} k_c + x_s x_d V_s \cos \delta \frac{1}{T_{d0}'} k_c$$

$$f_3 = -x_s^2 E_q \frac{1}{T_{d0}'} + x_s^2 E_q \frac{x_d - x_d'}{x_{ds}'} V_s w \sin \delta - x_s x_d V_s \cos \delta \frac{1}{T_{d0}'} E_q + x_s x_d V_s \cos \delta \frac{x_d - x_d'}{x_{ds}'} V_s w \sin \delta - x_s x_d V_s E_q w \sin \delta$$

새로운 입력 v_1 로부터 (7)식을 선형화하는 제어입력 u_f 를 구할 수 있다.

입출력 변환 선형화를 위해 기준전압을 y_d , 오차 e 를 $e = y - y_d$ 라 정의하고,

$$\dot{e} + ke = 0, \quad (k > 0) \quad (8)$$

가 만족되는 변환선형화 제어입력을 설계하면 다음과 같다.

$$u_f = \frac{1}{f_2} \{x_{ds} f_1^{1/2} [-k(y - y_d) + \dot{y}_d] - f_3\} \quad (9)$$

3.2절 거버너 입력 설계

앞에서 언급한 대로 단자전압 즉 AVR 설계에만 초점을 맞추게 되면 위상각과 주파수의 진동문제가 발생하는데 이에 대처하고, 또한 위상각의 참조값을 사용하지 않기 위해 기계적 입력도 함께 다루어야 한다. 또한 여자기 입력과 협조제어를 통해 과도안정도 특성을 개선할 수 있어야 할 것이다.

다음과 같이 오차(error)를 정하고

$$e_2 = w, \quad e_3 = \Delta P_m \quad (10)$$

위 수식으로부터 오차 동특성을 구하면

$$\dot{e} = \begin{pmatrix} -a & b \\ 0 & -c \end{pmatrix} e + \begin{pmatrix} 0 \\ c \end{pmatrix} u_g' + \begin{pmatrix} -b \\ 0 \end{pmatrix} \Delta P_e = Ae + B_u u_g' + B_p \Delta P_e \quad (11)$$

여기서 $e = [e_2 \ e_3]^T$, $a = \frac{D}{H}$, $b = \frac{w_0}{H}$, $c = \frac{1}{T_g}$ 이다.

이다.

제어입력 u_g' 는 오차 e_2, e_3 뿐만 아니라 ΔP_e 가 측정 가능하므로

$$v_2 = -[k_{e2} \ k_{e3}]e - k_p \Delta P_e = -Ke - K_p \Delta P_e \quad (12)$$

같이 정의된다.

(12)번 수식을 (11)번 수식에 대입하면 식(13)과 같은 폐루프 상태방정식을 얻게 된다.

$$\dot{e} = \begin{pmatrix} -a & b \\ -ck_{e2} & -c - ck_{e3} \end{pmatrix} e + \begin{pmatrix} -b \\ -ck_p \end{pmatrix} \Delta P_e = \bar{A}e + \bar{B} \Delta P_e \quad (13)$$

(13)번 식에 사용된 제어기의 파라미터는 다음과 같은 과정을 통해서 결정된다.

외부입력에 대한 주파수와 기계적 입력에 대한 전달함수를 구하면 식(14)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \hat{e}_2(s) \\ \Delta \hat{P}_e(s) \\ \hat{e}_3(s) \\ \Delta \hat{P}_e(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -bs - bc(1 + k_{e3}) - bck_p \\ s^2 + (a + c(1 + k_{e3}))s + bck_{e2} + ac(1 + k_{e3}) \\ -ck_p s - ack_p + bck_{e2} \\ s^2 + (a + c(1 + k_{e3}))s + bck_{e2} + ac(1 + k_{e3}) \end{pmatrix} \quad (14)$$

여기서 $\hat{e}_2(s)$, $\hat{e}_3(s)$, $\Delta \hat{P}_e(s)$ 는 각각 $e_2, e_3, \Delta P_e$ 의 라플라스 변환(Laplace transform)이다.

(14)식을 보면 각각의 전달함수에서 k_p 가 다음의 두 조건인

$$k_p = -(k_{e3} + 1), \quad k_p = \frac{b}{a} k_{e2} \quad (15)$$

을 만족하면 직류 게인이 모두 0이 될 수 있다. 또한 (13)번 시스템이 안정해야 하므로 특성방정식의 근은 (16)번 식이고 k_{e3} 는 항상 양수면 된다.

$$\left\{ \frac{-\Phi \pm \sqrt{\Phi^2 - 4\{bck_{e2} + ac(1+k_{e3})\}}}{2} \right\} \quad (16)$$

여기서 $\Phi = a + c(1+k_{e3})$ 이다.

따라서 (16)번 식의 극점을 정하기 위해 양수인 k_{e3} 를 요구 사항에 맞게 정하면 (15)번 식을 만족하는 k_{e2} , k_p 가 구해진다.

전력계통 (1)-(5)과 제어기 (9),(12)로 이루어진 제어시스템에서 전압 오차 e_1 은 0으로 수렴하고, w , ΔP_e , ΔP_m 은 모두 유한하다.

4장 모의실험

무한모선에 연결된 동기발전기가 정상상태에서 가동 중 0.5초에 지락과 같은 장애가 발생하여 0.75초에 차단기가 작동하고 1초에 복구되었다. 여기서 사용된 동기기기의 초기 리액턴스 및 파라미터는 표1과 같다[6]. 또한 초기값은 $\delta_0 = 72^\circ$, $V_i = 1.0$, $P_{m0} = 0.9$ 이고, 실제 파라미터는 $k_{e3} = 10$ 으로 정하면 (15)번 식에 의해서 $k_{e2} = -0.1751$ 와 $k_p = -11$ 가 구해진다.

표1 동기기의 초기 리액턴스 및 파라미터

w_0	314.159	k_c	1	x_L	0.4853
T	6.9	x_d	1.863	T_g	0.4
D	5.0	x_q	0.257		
H	8.0	x_T	0.127		

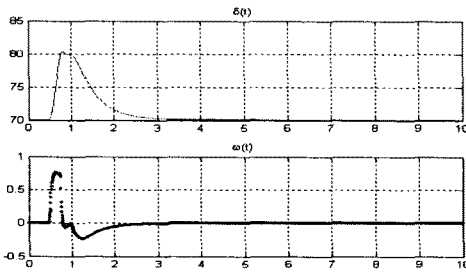


그림1 위상각(상)과 주파수(하)

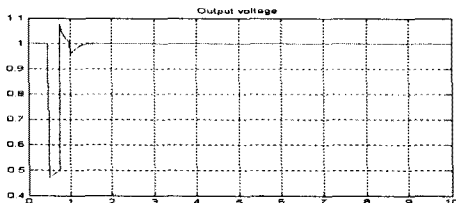


그림2 단자전압

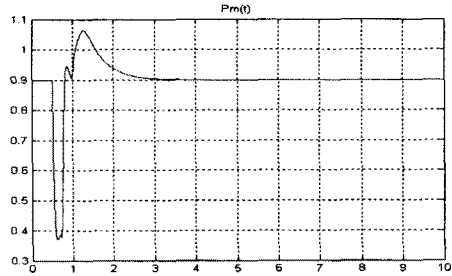


그림3 기계적 입력

그림 1과 2는 일시적인 장애일 때의 발전기의 위상각과 주파수 단자전압을 나타내며, 그림 3은 기계적 입력을 나타낸다. 모의실험 결과로부터 제안된 여자기와 거버너의 제어기가 과도상태에서도 안정도를 유지하고, 사고 발생 후 단자전압은 1.0 [pu]로 수렴되고 발전기 전력각은 동작점으로 점차 수렴해 가고 있다.

5장 결론

본 논문은 [4]에서 사용된 위상각의 참조값을 사용하지 않고 전력계통 안정화를 이루는 제어기를 제시하였다. 제시한 여자기와 거버너의 제어기는 서로 협조하여 단자전압의 지령값 수렴 및 주파수와 기계적 입력의 유한함을 보장한다. 또한 거버너의 입력에서 외부입력에 대한 주파수와 기계적 입력의 직류 게인을 줄일 수 있다는 것이 특징이다. 모의실험을 통하여 전압제어와 안정화 두 기능을 동시에 구현함을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] P. Kunder "Power system stability and control", McGraw Hill, Inc. 1994
- [2] R. Marino, "Nonlinear Control Design", Prentice Hall, 1999
- [3] R. Marino, "An example of a nonlinear regulator", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. AC-29, No.3, pp 276-279, March 1984
- [4] O. Akhrif, F. Okou, L. Dessaint, and R. Champagne, "Application of a Multivariable feedback linearization scheme for rotor angle stability and voltage regulation for power system" IEEE Transaction on Power System Vol. 14, No.2, pp 620-628, May 1999
- [5] Y. Wang, D. Hill, R. Middleton, and L. Gao, "Transient stability enhancement and voltage regulation of power system" IEEE Transaction on Power System, Vol. 8, No.2, pp 620-627, May 1992
- [6] D.-K. Lee, T.-W. Yoon, B. Lee and G.T. Park, "Adaptive nonlinear control of a power system", In proceedings of the IEEE Conference on Control application, pp 1240-1244, Italy, 1998

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R0120030001161302004)지원에 의하여 수행되었고 지원에 감사 드립니다.