

전력계통 안정화를 위한 비선형 입출력 제한 선형화 제어기

Nonlinear Input-Output Feedback Linearizing Control for Power System Stabilization

김동건*, 윤태웅**
(Dong-gun Kim, Tae-Woong Yoon)

Abstract - Many nonlinear controllers for the power system are based on nonlinear models involving the power angle as an element of the state, and therefore the reference value for the power angle is needed. As this reference value is not generally available, it is difficult to apply such nonlinear control methods in practice. To deal with this problem, we present an input-output feedback linearizing control scheme by selecting the output as a combination of the squared voltage and the relative frequency. It is shown that the internal dynamics are locally stable with controllable damping, and that the frequency remains bounded for all time. Simulations illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Inputoutput Feedback linearization, Power system stabilization, Nonlinear control, Power systems

1장 서론

전력시스템에서 부하의 변동이나 장애(fault)에 대해서도 안정한 전력을 공급하는 제어기 설계는 필수적이다. 기존의 방식 중 AVR(Automatic Voltage Regulator)과 PSS(Power System Stabilization)을 사용한 방법은 동작점 부근에서 선형화하여 해석한 방법으로 큰 규모의 외란에 대해서는 만족한 성능을 발휘하기 어렵다 [1],[5]. 따라서 비선형성을 고려할 필요가 있는데 그러한 연구 중에서 제한 선형화를 통해 선형 형태를 만들고 제어기를 설계한 다수의 논문이 있었으나 이 경우 위상각의 참조값을 실제 알기 어렵다는 단점이 있다 [3],[4].

비선형성을 고려한 다른 방법으로는 입출력 제한 선형화 제어기가 있다 [2],[6],[8]. 그 중에서 전압을 출력으로 하였을 때 위상각과 주파수에서 그 진동이 오래 간다는 단점이 있어 전압과 주파수의 1차 지연의 합을 출력으로 삼아 제어기를 제안하였다 [7]. 하지만 그러한 출력에서 전압과 주파수의 1차 지연 각자가 안정함을 보이지 못했다.

본 논문에서는 주파수의 1차 지연 대신 주파수를 사용하고 그러한 주파수와 전압의 제곱의 합을 출력으로 하여 동작점 근처에서의 선형화를 통해 감쇠 계수가 주파수에 곱한 비례 상수에 비례하여 증가함을 보이고 [7]에서 보이지 못했던 전압과 주파수의 안정함을 증명한다.

2장 시스템 모델

여기서 다루고 있는 시스템은 그림1과 같은 1기 무한 모선 모델이다. 만약 장애가 발생하면 그림1에서의 전송선로에 영향을 미치고 이것으로 인해 전송선로의 리액턴스 값인 x_L 이 바뀌게 된다.

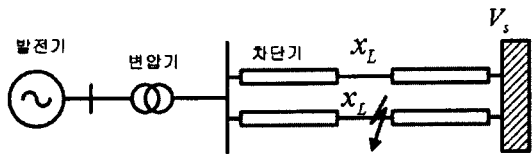


그림1 1기 무한 모선 모델

2.1절 상태방정식

발전기의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\delta} = \omega \tag{1}$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{H}\omega + \frac{\omega_0 P_m}{H} - \frac{\omega_0 V_s}{H} E_a \sin\delta \tag{2}$$

$$E_a = \frac{1}{T_d} E_a + \frac{(x_d - x_d') V_s}{x_d'} \omega \sin\delta + \frac{k_f}{T_d} u_f \tag{3}$$

변수와 상수는 표1에 정의 되어 있다.

표1 전력계통 변수와 상수들

| | |
|-------------|-------------|
| $\delta(t)$ | 발전기의 위상각 |
| $\omega(t)$ | 발전기의 주파수 |
| $E_a(t)$ | 발전기 횡축의 기전력 |
| D | 계동계수 |
| H | 관성계수 |
| P_m | 기계적인 입력 |

저자 소개

* 준 회원 : 고려대학교 전기공학과 석사과정
dgkim@cello.korea.ac.kr

** 정 회원 : 고려대학교 전기공학과 교수
twy@korea.ac.kr

| | |
|-------------|------------------|
| V_s | 무한 버스 전압 |
| ω | 동기속도 |
| k_e | 여자 증폭기의 이득 |
| $u(\theta)$ | 발전기의 SCR 증폭기의 입력 |
| x_d | 발전기의 직축 리액턴스 |
| x_d' | 발전기의 직축 과도 리액턴스 |

그리고 x_d, x_d', T_d, x_s 는 다음과 같고 이 파라미터들은 장해가 발생하면 값이 변하게 된다.

$$x_d = x_d' + x_T + x_L, \quad x_d' = x_d' + x_T + x_L$$

$$T_d' = \frac{x_d'}{x_d} T_d, \quad x_s = x_T + x_L \quad (4)$$

발전기 종단 전압은 식 (5)와 같다.

$$V_i = \frac{1}{x_d} [x_s^2 E_a^2 + x_d^2 V_s^2 + 2x_d x_s V_s E_a \cos \delta]^{1/2} \quad (5)$$

3장 입출력 궤환 선형화

3.1절 제어기

여기서는 입출력 궤환 선형화를 통해 제어기를 설계한다. 이 때 출력을 전압으로만 잡으면 위상각과 각속도에서 그 진동이 크고 오래가는 단점을 가진다. 따라서 여기서는 출력력을 식 (6)과 같이 잡는다.

$$y = V_i^2 - \alpha \omega \quad (6)$$

그럼 오차는 $e = y - y_d$ 이고 y_d 는 우리가 원하는 출력값이다. 우리는 이 오차가 식 (7)과 같은 선형식으로 수렴하기 바라며 그렇게 되기 위한 입력을 구한다.

$$\dot{e} + k_e e = 0 \quad (7)$$

이러한 입력 u_f 는 식 (8)과 같다.

$$u_f = -T_d \left[f_2 + \frac{1}{f_4} (f_5 \omega - x_d^2 \alpha f_3 + K(f_1 - x_d^2 - x_d^2 \alpha \omega)) \right] \quad (8)$$

여기서 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 는 다음과 같다.

$$f_1 = x_s^2 E_a^2 + x_d^2 V_s^2 + 2x_d x_s V_s E_a \cos \delta \quad (9)$$

$$f_2 = -\frac{1}{T_d} E_a + \frac{(x_d - x_d') V_s}{x_d} \omega \sin \delta \quad (10)$$

$$f_3 = -\frac{D}{H} \omega + \frac{\omega_0 P_m}{H} - \frac{\omega_0 V_s}{H} E_a \sin \delta \quad (11)$$

$$f_4 = 2x_s^2 E_a + 2x_d x_s V_s \cos \delta \quad (12)$$

$$f_5 = -2x_d x_s V_s E_a \sin \delta \quad (13)$$

3.2절 내부동특성 해석

정규형태를 통해 내부 동특성을 해석하기 위해 다음의 상태변수 변환을 고려한다.

$$\begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y - y_d \\ \delta - \delta_0 \\ \omega \end{bmatrix}$$

내부동특성은 식 (14)와 같다.

$$\dot{a} = \begin{bmatrix} \zeta_2 \\ \zeta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{H} \zeta_3 + \frac{\omega_0 P_m}{H} - \frac{\omega_0 V_s \sin(\zeta_2 + \delta_0)}{H k_d} \zeta_3 \\ \zeta_3 \end{bmatrix} =: A(\theta) \quad (14)$$

여기서

$$f_6 = \frac{-x_d V_s \cos(\zeta_2 + \delta_0)}{x_s} + \frac{\sqrt{f_1 + (\zeta_1 + 1 + \alpha \zeta_2) x_d^2}}{x_s} \quad (15)$$

이고

$$f_7 = x_d^2 V_s^2 \cos^2(\zeta_2 + \delta_0) - x_d^2 V_s^2 \quad (16)$$

이다. q 를 동작점 근처에서 선형화 시키면 다음과 같다.

$$\Delta \dot{q} \cong Q \Delta q \quad (17)$$

여기서 $\Delta q = q - q_0$ 이고 q_0 는 동작점을 뜻한다. 그리고 행렬 Q 는 아래와 같다.

$$Q = \frac{\partial \phi}{\partial q} \Big|_{q=q_0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ A & -\frac{D}{H} - C\alpha \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서

$$A = -\frac{\omega_0 V_s \cos(\zeta_{2n} + \delta_0)}{H k_d} f_6 \Big|_{\text{nominal}}$$

$$- \frac{\omega_0 V_s \sin(\zeta_{2n} + \delta_0)}{H k_d} [x_d V_s \sin(\zeta_{2n} + \delta_0) + \frac{x_d^2 V_s^2 \cos(\zeta_{2n} + \delta_0) \sin(\zeta_{2n} + \delta_0)}{\sqrt{x_d^2 V_s^2 \cos^2(\zeta_{2n} + \delta_0) - x_d^2 V_s^2 + x_d^2}}]$$

$$C = \frac{\omega_0 V_s x_d \sin(\zeta_{2n} + \delta_0)}{2H k_s \sqrt{f_7 \Big|_{\text{nominal point}} + x_d^2}} > 0 \quad (20)$$

이다. 따라서 선형화한 시스템의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$s^2 + \left(\frac{D}{H} + C\alpha \right) s - A = 0 \quad (21)$$

α 가 양수면 선형화한 내부동특성이 안정하고 α 가 커짐에 따라 감쇠계수가 커짐을 알 수 있다.

3.3절 전압과 각속도의 안정성

[7]에서 보이지 못한 전압과 주파수의 유한성을 증명해 보인다.

[정리 1]

(1)-(4)로 표현된 전력계통과 제어기 (8)로 이루어진 제어 시스템에서 전압과 주파수는 유한하다.

[증명]

$e = y - y_d$ 가 (7)을 만족하므로 $|e| \leq e_0$ 가 성립한다. e 를 다시 쓰면

$$e = V_i^2 - 1 - \alpha \omega \quad (22)$$

이므로 다음 식을 얻는다.

$$\alpha \omega = V_i^2 - 1 - e \geq -e_0 - 1 \quad (23)$$

따라서 주파수는 식 (24)과 같은 하한을 가진다.

$$\omega \geq -\frac{1}{\alpha} (e_0 + 1) \quad (24)$$

이번에는 주파수의 상한을 구하기 위해 다음 식을 고려한다..

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{H} \omega + \frac{\omega_0 P_m}{H} - \frac{\omega_0 V_s \sin(\zeta_2 + \delta_0)}{H k_d} f_8 \quad (25)$$

$$f_8 = \frac{\sqrt{(1 + \alpha \omega) e x_d^2 - x_d^2 V_s^2 \sin^2(\zeta_2 + \delta_0)} - x_d V_s \cos(\zeta_2 + \delta_0)}{x_s} \quad (26)$$

$\omega > 0$ 일 때 식 (25)는 다음과 같이 바뀐다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega} \leq & -\frac{D}{H}\omega + \frac{\omega_0 P_m}{H} \\ & + \frac{\omega_0 V_s}{Hk_d} \left[\frac{x_d V_s}{x_s} + \frac{\sqrt{\alpha} \sqrt{\omega x_d} + \sqrt{1+e_0} x_d + x_d V_s}{x_s} \right] \\ = & -\frac{D}{H}\omega + \frac{\omega_0 V_s}{Hk_s} \sqrt{\alpha} \omega + \frac{\omega_0 P_m}{H} + \frac{2\omega_0 V_s^2 x_d}{Hk_d x_s} + \frac{\omega_0 V_s}{Hk_s} \sqrt{1+e_0} \end{aligned} \quad (27)$$

따라서 $\omega > \omega_1 = \frac{(\omega_0 V_s \sqrt{\alpha} + \sqrt{f_0})^2}{4D^2 x_s^2}$ 이면 $\dot{\omega} < 0$ 이 성립한다.

여기서 f_0 는 다음과 같다.

$$f_0 = \omega_0^2 V_s^2 \alpha^2 + \omega_0 x_d D P_m x_s + \frac{2V_s^2 x_d}{x_d} + V_s \sqrt{1+e_0} \quad (28)$$

따라서 ω 는 유한하다. 그리고

$$V_s^2 = e + 1 + \alpha \omega \quad (29)$$

이므로 전압 역시 유한하게 된다.

4장 모의 실험

이 논문에서는 0.1초에서 장애가 발생하고 0.25초에 제거가 되고 1초에 복구가 된다고 가정하였다.

동작점과 시스템 파라미터 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_0 &= 70^\circ, P_m = 0.9, V_s = 1.0, V_i = 0.9 \\ \omega_0 &= 314.159, D = 5, H = 8.0, T_{d0} = 6.9, k_e = 1, \\ x_d &= 1.863, x_d' = 0.257, x_T = 0.127, x_L = 0.4853 \end{aligned} \quad (30)$$

아래 모의 실험은 모두 $K=10$ 일 때이며 그림2와 그림3은 입력 제약이 없고 $\alpha=0, 0.2$ 일 때의 전압과 위상각의 모습이고 그림4는 그림3에서와 똑같은 상황에서 입력에 ± 3 의 제약을 가했을 때의 모습이다. 그림2의 위상각은 매우 진동이 오래가나 그림3에서는 위상각의 진동이 매우 빠르게 수렴함을 볼 수 있으며 그림4에서는 입력 제약이 있는 상황에서도 안정하게 제어가 가능함을 보여준다.

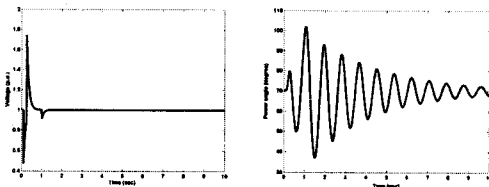


그림2 $\alpha=0$ 일 때 전압과 위상각

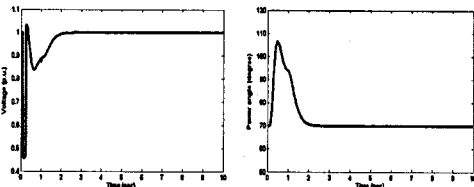


그림3 $\alpha=0.2$ 일 때 전압과 위상각

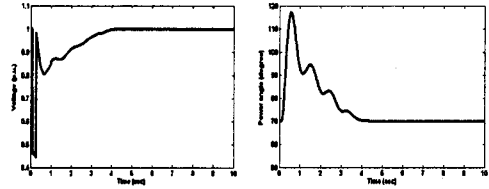


그림4 $\alpha=0.2$ 일 때 입력 제약이 있을 경우 전압과 위상각

5장 결론

실제 다수의 발전기로 구성된 전력 계통에서 위상각의 참조값을 알 수 없는 계환선형화 대신 임출력 계환 선형화를 제안하였다. 이러한 임출력 계환선형화는 참조값을 알 수 없는 위상각을 제어하는 게 아니라 알 수 있는 값을 출력으로 삼아 제어하고 그로 인해 비선형성을 제거하게 된다. 이런 출력 을 가장 관심있는 전압으로 하는 제어가 있지만 위상각과 주파수에서 그 진동이 오래 간다는 점과 그 진동이 줄어드는 시간을 조절할 수 없다는 단점을 가진다. 본 논문에서는 출력을 수정하여 동작점 근처에서 진동시간을 줄이고 그 시간도 주파수에 곱하는 비례항을 통해 조절 할 수 있음을 보였다. 그리고 [7]의 논문에서 합으로 표현된 출력을 제어해도 각각의 안정성을 보일 수 없었으나 본 논문에서는 출력을 제어하면 그 각각의 요소인 전압과 주파수가 모두 안정함을 보였다. 실제 발전기는 다른 발전기의 정보를 모른 채 자신의 정보만으로 제어해야 하는 데 본 논문에서 제안한 제어기는 그런 취지에도 맞게 설계되었다.

참 고 문 헌

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [2] A. Isidori, *Nonlinear Control System*, New York: Springer Verlag, 1995.
- [3] C. Zhu, R. Zhou and Y. Wang, "A new nonlinear voltage controller for power systems", *Electrical Power & Energy Systems*, 1997.
- [4] Y. Guo, D. J. Hill and Y. Wang, "Global transient stability and voltage regulation for power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, 2001.
- [5] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [6] J.-J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall.
- [7] D-K. Lee, T-W. Yoon, B. Lee and G. T. Park, "Adaptive Nonlinear Control of a Power System.", In *Proceedings of IEEE Conference on Control Application*, pp 1240-1244, Italy, 1998.
- [8] M. Vidyasagar, *Nonlinear system analysis*, Prentice-Hall, 1993.

본 연구는 한국과학기술원 목격기초연구 (R0120030001 161302004)지원으로 수행되었음