

# 1기 무한모션 전력계통의 적응 전압 제어와 거버너를 이용한 주파수 진동의 억제

김석균, 윤태웅  
고려대학교 전기전자전파공학부

## Adaptive Voltage Control of a Single Machine Infinite Bus(SMIB) Power System with Governor Control for Reduced Oscillation of the Frequency

Seok-Kyoon Kim and Tae-Woong Yoon  
School of Electrical Engineering, Korea University, Korea

**Abstract** - In this paper, we propose two control schemes. The first control scheme is an adaptive passivity-based excitation control which regulates the terminal voltage to its reference. This controller is obtained through two steps: firstly, a simple direct adaptive passivation controller is designed for the power system with parametric uncertainties; then a linear PI controller is applied to converge the terminal voltage to its reference. The second control scheme is a linear governor control which consists of the frequency and the mechanical power. It is shown that the internal dynamics are locally stable with controllable damping. In the end, the boundness of all electrical variables, the frequency, the mechanical power, and the convergence of the terminal voltage to its reference can be achieved by these control schemes.

### 1. 서 론

부하의 변동이나 장애(fault)에도 불구하고 안정하게 전력을 공급할 수 있도록 제어기를 설계하는 것은 전력시스템에서 필수적이다. 기존의 제어 방식 가운데 AVR(Automatic Voltage Regulator)과 PSS(Power System Stabilizer)를 사용한 방법은 평형점 근방에서 선형화한 모델에 근거를 둔 것으로서, 큰 규모의 외란에 대해서는 만족할만한 성능을 발휘하기 어렵다 [1,2]. 따라서 비선형 모델을 바탕으로 제어기를 설계하는 비선형 제어의 개념이 필요하게 된다.

여러 비선형 제어 방식 가운데, 전력계통에는 되먹임 선형화 제어기법 [3,4,5]이 적용된 바 있다[6]. 그런데, 이런 전력계통의 되먹임 선형화 제어에서는 단자전압을 기준전압으로 수렴시키기 위해 상태 변수 중 하나인 위상각의 정상상태 값을 사용한다는 문제점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 출력을 단자전압의 제곱과 기준전압의 차이로 선정하고 임출력 되먹임 선형화를 하면 주파수의 진동이 발생하게 된다. 이를 위해 출력을 수정하여 주파수의 진동을 줄이고 모든 전기적 변수의 유한함을 [7]에서 보였다. 하지만 출력을 수정하게 됨으로써 제어 입력이 상쇄해야 할 비선형항이 증가하고, 출력의 수렴성으로부터 단자전압의 수렴성을 보장할 수 없다는 문제가 있다. 그리고 이 연구 결과에는 파라미터의 불확실성을 고려하지 않았다. [8]에서는 [7]과 유사한 제어기법이지만 파라미터의 불확실성을 고려하여 간접적응제어를 사용했다. 하지만 단자전압이 기준전압으로 수렴함과 발전기의 전기적, 기계적 변수의 유한성 또한 보이지 못했다.

본 논문에서는 전력시스템의 중요한 변수인 단자 전압의 제곱과 기준전압의 차이를 출력으로 선정한다. 그리고 수동성(Passivity)을 얻기 위해 간단한 직접 적응 제어기법을 사용한 여자기 입력을 설계하고 더불어 단자전압을 원하는 정상상태로 수렴시키기 위해 선형 비례적분 제어기를 설계한다. 이렇게 설계한 여자기 입력만을 사용하면 모든 전기적 변수와 주파수 그리고 기계적 입력의 유한성과 단자전압의 수렴성을 보장할 수 있지만 주파수의 진동이 발생한다. 이를 개선하기 위해 출력을 수정하지 않고 선형 조속기 입력을 설계한다. 그리고 선형 조속기 입력의 이득을 크게 함으로써 주파수의 진동을 줄일 수 있음을 보인다. 결국 제안한 제어기법은 이들 변수들의 유한성, 단자전압의 수렴성 그리고 내부 동특성 개선을 보장하게 된다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 조속기의 동특성을 포함한 1기 무한 모션 모델을 소개하고, 그 모델을 근거로 3절에서 적응 수동성 기반 여자기 입력과 선형 조속기 입력을 설계하고 페루프 시스템의 성질을 논한다. 마지막으로 4절에서 결론을 맺는다.

### 2. 전력 시스템의 수학적 모델

이 절에서는 전력계통의 동특성과 전기적 변수에 대해 기술한다. 일반적인 1기 무한모션은 다음과 같은 비선형 미분 방정식으로 표현된다[1].

#### 2.1 . 기계적 동특성(Mechanical Dynamics)

발전기의 기계적 동특성은 다음과 같다.

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

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{2H}\omega + \frac{\omega_0}{2H}P_m - \frac{\omega_0}{2H}P_e \tag{2}$$

$$\dot{P}_m = -\frac{1}{T_g}P_m + \frac{1}{T_g}P_{m0} + \frac{1}{T_g}u_g \tag{3}$$

여기서  $\delta$ 와  $\omega$ 는 발전기의 위상각과 주파수를 나타내고  $P_m$ 는 조속기로부터 들어오는 기계적인 입력이며  $P_{m0}$ 는  $P_m$ 의 정상상태이다. 그리고  $P_e$ 는 전기적인 발전기의 출력으로 유효전력을 나타낸다. 또한  $\omega_0$ 는 동기속도,  $D$ 는 계동계수,  $H$ 는 관성계수이고  $T_g$ 는 터빈의 시정수다. 마지막으로  $u_g$ 는 터빈에 가해지는 제어입력이다.

#### 2.2 . 전기적 동특성(Electrical Dynamics)

발전기의 전기적 동특성은 다음과 같다.

$$\dot{E}_q = -\frac{1}{T'_{d0}}E_q + \frac{(x_d - x'_d)V_s}{x'_d} \omega \sin\delta + \frac{k_c}{T'_{d0}}u_f \tag{4}$$

여기서  $E_q$ 는 횡축(q-axis) 기전력이고  $V_s$ 는 무한버스 전압이며  $u_f$ 는 여자기 제어입력이다. 또한  $x_d$ 는 직축(d-axis) 리액턴스,  $x'_d$ 는 직축의 과도 리액턴스,  $T'_{d0}$ 는 직축의 과도 단락회로 시정수,  $x_{ds}, x'_{ds}$ 는 각각 발전기 전원부에서 무한모션까지 총 리액턴스와 과도 리액턴스를 나타내며,  $k_c$ 는 여자기의 이득이다. 그리고 대수 방정식으로 표현되는 전기적 변수는 다음과 같다.

$$V_t = \sqrt{V_{tq}^2 + V_{td}^2} \tag{5}$$

$$V_{tq} = E_q(t) - x_d I_d, V_{td} = x_d I_q \tag{6,7}$$

$$I_d = \frac{E_q}{x_{ds}} - \frac{V_s}{x_{ds}} \cos\delta, I_q = \frac{V_s}{x_{ds}} \sin\delta \tag{8,9}$$

$$P_e = E_q I_q \tag{10}$$

여기서  $V_t$ 는 발전기의 단자전압이고,  $V_{tq}, V_{td}$ 는 각각 발전기의 횡축, 직축 단자전압이며  $I_q, I_d$ 는 각각 발전기의 횡축, 직축 전류이다. 그리고  $P_e$ 는 발전기의 유효 전력이다.

### 3. 제어기 설계

#### 3.1. 수동성 기반 여자기 제어입력 설계

단자전압의 원하는 기준전압으로의 수렴성을 보장하기 위해 출력을  $y := V_t^2 - 1$ 이라 하고 이를 미분하여 다음과 같은 동특성을 얻는다.

$$\frac{1}{c_3} \dot{y} = \theta^T \phi + V_{tq} u_f \tag{11}$$

여기서

$$c_3 := \frac{2x_s k_c}{x_{ds} T'_{d0}}, \phi := \left[ \frac{P_e}{I_q} V_{tq} \quad \omega \sin\delta V_{tq} \quad \omega \cos\delta V_{td} \right]^T,$$

이고  $\theta$ 는 모르는 파라미터 벡터이다.

제어기 설계에 앞서 다음과 같은 가정을 한다.

가정1:  $V_{tq} \neq 0, \forall t$

앞으로의 정리는 이 가정하에 논의한다. 본 논문에서 제안하는 적응 수동화 제어기는 다음과 같다.

$$u_f := \frac{1}{V_{tq}} (-\hat{\theta}^T \phi + v_f) \tag{12}$$

$$\dot{\hat{\theta}} := \Gamma \phi y \quad (13)$$

여기서  $\Gamma = \Gamma^T > 0$  이고 가정1에 의해 제어기  $u_f$ 는 항상 존재한다.

정리1: 제어기 (12)와 적응법칙 (13)은  $v_f \rightarrow y$  를 수동화(Passivation)한다.

증명: 다음과 같은 양정치 함수를 고려하자.

$$V_1(y, \tilde{\theta}) := \frac{1}{2c_3} y^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}$$

여기서  $\tilde{\theta} := \theta - \hat{\theta}$ 이고 위 식을 미분하고 제어기 (12)-(13)을 대입하면

$$\dot{V}_1 = y v_f.$$

따라서  $v_f \rightarrow y$ 는 수동적(Passive)이다. ■

정리2: 다음과 같은 비례적분 제어기

$$v_f = k_f \xi - k_{fI} \dot{\xi} \quad (14)$$

$$\dot{\xi} = -y \quad (15)$$

로 다음 성질을 얻을 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_1(t) = 1$$

증명: 다음과 같은 양정치 함수를 고려하자.

$$V(y, \tilde{\theta}, \xi) := V_1(y, \tilde{\theta}) + \frac{k_f}{2} \xi^2$$

위 식을 미분하고 제어기 (14)-(15)를 대입하면

$$\dot{V}(y, \tilde{\theta}, \xi) = y(k_f \xi - k_{fI} \dot{\xi}) - k_f \xi y = -k_{fI} \dot{\xi}^2 \leq 0.$$

이것으로부터  $|y| < \infty$ ,  $\|\tilde{\theta}\| < \infty$ ,  $|\xi| < \infty$ 을 알 수 있다. 이로부터

$$\dot{V}(y, \tilde{\theta}, \xi) = -k_{fI} c_3 y (\tilde{\theta}^T \phi + k_f \xi - k_{fI} \dot{\xi}) < \infty$$

과

$$\int_0^t \dot{V}(y(\tau), \tilde{\theta}(\tau), \xi(\tau)) d\tau = -k_{fI} \int_0^t y^2(\tau) d\tau$$

$$\Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t y^2(\tau) d\tau \leq V(y(0), \tilde{\theta}(0), \xi(0)) < \infty$$

$$\Leftrightarrow \int_0^{\infty} \dot{V}(y(t), \tilde{\theta}(t), \xi(t)) dt < \infty$$

을 알 수 있다. 그리고 Balbalat의 보조정리와 출력의 정으로부터

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_1(t) = 1 \text{임을 알 수 있다.} \blacksquare$$

### 3.2. 선형 조속기 입력 설계

우선 다음과 같은 선형 조속기 입력을 정의한다.

$$u_g := -k_2(\omega + \Delta P_m), \quad k_2 > 0 \quad (16)$$

위 제어기를 적용한 전력계통의 내부 동특성은 다음과 같다.

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

$$\dot{\omega} = -c_1 \omega + c_2 P_m - c_2 \frac{V_s}{x_{ds}} f(\delta, y) \sin \delta$$

$$\dot{P}_m = -k_2 d_1 P_m - k_2 d_1 \omega + k_2 d_1 P_{m0}$$

여기서  $c_1 := \frac{D}{2H}$ ,  $c_2 := \frac{\omega_0}{2H}$ ,  $d_1 = \frac{1}{T_g}$  이고

$$f(\delta, y) := -x_d V_s \cos \delta + x_d^2 V_s^2 \cos^2 \delta - x_d^2 V_s^2 + (y+1)x_{ds}^2$$

이다. 위 내부 동특성을 평형점에서 근사화 하면 다음과 같다.

$$\dot{x} \approx Ax \quad (17)$$

여기서  $x := [\Delta \delta \quad \omega \quad \Delta P_m]^T$ ,

$$A := \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\alpha & -c_1 & c_2 \\ 0 & -k_2 d_1 & -k_2 d_1 \end{bmatrix}, \quad \Delta \delta := \delta - \delta_0 \text{ 이고 } \delta_0 \text{는 } \delta \text{의 평형}$$

점이다. 그리고

$$\alpha := \frac{c_2 V_s}{x_s x_{ds}} \cos \delta_0 (-x_d V_s \cos \delta_0 + \sqrt{x_{ds}^2 + x_d^2 V_s^2 \cos^2 \delta_0 - x_d^2 V_s^2}) + \frac{c_2 V_s}{x_s x_{ds}} \sin \delta_0 (x_d V_s \sin \delta_0 - \frac{x_d^2 V_s^2 \cos \delta_0 \sin \delta_0}{\sqrt{x_{ds}^2 + x_d^2 V_s^2 \cos^2 \delta_0 - x_d^2 V_s^2}}).$$

보조정리:  $E_{q0} > 0$ ,  $\delta_0 \in (0, \pi/2)$  이면  $\alpha > 0$  이다.

증명: 다음 관계

$$1 = V_{i0}^2 = \frac{1}{x_{ds}^2} (x_d^2 E_{q0}^2 + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d V_s E_{q0} \cos \delta_0)$$

와 가정  $E_{q0} > 0, \delta_0 \in (0, \pi/2)$ 을 이용하면  $\alpha > 0$  임을 알 수 있다. ■

정리3: 제어기 (16)을 포함한 전력계통의 내부 동특성은 발전기의 일반적인 동작영역  $E_{q0} > 0$ ,  $\delta_0 \in (0, \pi/2)$ 에서 국부 안정하며 제어기 이득  $k_2$ 로 주파수의 진동을 억제할 수 있다.

증명: 제어기 (16)을 포함한 전력계통의 내부 동특성을 평형점에서 근사화한 시스템 (17)의 특성 방정식은 다음과 같다.

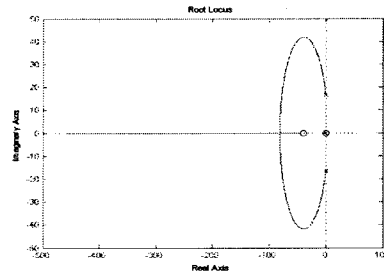
$$s^3 + (c_1 + k_2 d_1) s^2 + (c_1 d_1 + k_2 c_2 d_1 + \alpha) s + \alpha d_1 = 0$$

Routh 안정도 판별 기준에 의해 위 특성방정식의 근이 좌반평면에 존재할 충분 조건은 다음과 같다.

$$c_1 + k_2 d_1 > 0, \quad (c_1 + k_2 d_1)(c_1 d_1 + k_2 c_2 d_1) + c_1 \alpha > 0$$

$$\alpha d_1 ((c_1 + k_2 d_1)(c_1 d_1 + k_2 c_2 d_1) + c_1 \alpha) > 0$$

여기서  $c_1, c_2, d_1$ 은 양수이고  $\alpha$ 는 보조정리에 의해 양수이다. 그러므로 제어기 이득  $k_2$ 가 양수이면 내부 동특성은 국부 안정함을 알 수 있다. 그리고 제어기 이득  $k_2$ 에 의한 근계적은 다음과 같다.



<그림 1>  $k_2$ 에 의한 근계적

따라서  $k_2$ 에 의해 주파수의 진동을 감소할 수 있음을 알 수 있다. ■

정리4: 여자기 제어입력 (12)-(13)과 선형 조속기 입력 (16)으로 이루어진 전력계통의 모든 전기적 변수, 주파수, 그리고 기계적 입력은 유한하다.

증명: 제어기 (12)-(13)에 의해  $|V_f| < \infty$  이고, 이로부터 식(8)-(10)을 이용하면  $|E_q| < \infty, |P_e| < \infty, |I_d| < \infty$ 임을 알 수 있다.

따라서 모든 전기적 변수는 유한하다. 그리고 제어기 (16)을 포함한  $\omega$ 와  $\Delta P_m$ 으로 이루어진 부 시스템은 다음과 같은 선형 시스템으로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \Delta P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1 & c_2 \\ -d_1 k_2 & -d_1 k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \Delta P_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_2 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_e$$

여기서  $c_1, c_2, d_1 > 0$ 이고  $k_2 > 0$  이므로 위 시스템의 극점은 모두 좌반평면에 존재한다. 그리고  $\Delta P_e$ 가 유한하므로  $\omega$ 와  $P_m$ 은 유한하다. ■

### 4. 결론

본 논문은 전력계통의 모르는 파라미터를 사용하지 않고 간단한 직접 적용제어와 선형 PI 제어로 단자전압을 원하는 기준전압으로 수렴성을 보장하는 여자기 제어입력과 일반적인 전력계통의 동작영역에서 내부 동특성을 개선할 수 있는 선형 조속기 제어입력을 제안하였다. 결국, 제안한 제어기법은 여자기와 조속기가 서로 협조하여,  $V_{tg}$ 가 0이 아니라는 가정하에 전력계통의 모든 전기적 변수, 주파수, 그리고 기계적 입력의 유한성, 단자전압의 수렴성을 보장한다. 그리고 또한 주파수의 진동도 감소할 수 있다.

### 5. 참고 문헌

- [1] P.M.Anderson, A.A.Fouad, "Power system control and stability", 2nd Edition, 2003
- [2] P.Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994.
- [3] A.Isidori, "Nonlinear control system", Springer Verlag, 1995.
- [4] J.-J.E.Slotin and W.Li, "Applied nonlinear control", Prentice Hall, 1991.
- [5] M. Vidyasagar, "Nonlinear system analysis", Prentice Hall, 1993
- [6] Y.Guo, D.J.Hill, and Y.Wang, "Global transient stability and voltage regulation for power systems", IEEE Tran. on Power Systems, 2001.
- [7] D.-G Kim, T.-W Yoon, S.-K Kim "Nonlinear Input-Output Feedback Linearizing Control of a Single Machine Infinite Bus Power System", Journal of Control, Automation and Systems Engineering, 2007
- [8] D.-K Lee, T.-W Yoon "Adaptive nonlinear control of a power system", IEEE. International Conference on Control Applications, 1998