불확실한 1기 무한모선 전력 계통의 수동성 기반 적응제어

김석균, 윤태웅
고려대학교 전기전자전파공학부

Controlling an Uncertain Single Machine Infinite Bus Power System using Adaptive Passivation

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

Abstract - In this paper, an adaptive passivity based excitation and governor control scheme is proposed to enhance the transient stability of a single machine infinite bus power system with parametric uncertainties. We employ a state model where the frequency, the difference between active and mechanical power, and the difference between the squared terminal voltage and its reference are regarded as state variables. Using this state model, the proposed controller is obtained in 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 guarantee the stability of the closed loop system.

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. 그리고 전력계통을 선형화하기 위해 비선형항을 상쇄해야 하지만 파라미터의 불확실성으로 인해 비선형항은 정확히 알 수 없으므로 상쇄할 수 없다. 이러한 파라미터의 불확실성에 대처하기 위한 방법들 중 직,간접 적응 제어기법이 있는데 이 제어기법을 사용한 연구결과들은 전력계통에서 일부 파라미터의 불확실성만 고려하거나 파라미터 전체의 불확실성을 고려하더라도 상태변수의 궁극적 유계만을 보였다[7,8,9].

본 논문에서는 전력시스템의 중요한 변수인 주파수, 유효전력과 기계적 입력의 차이, 그리고 단자전압과 기준전압을 각각 제곱한 것의 차이를 상태변수로 선정한다. 이 상태 변수로 이루어진 상태공간 모델에서 수동성을 얻기 위해 간단한 직접 적응 제어기법을 사용한 수동화 제어기를 설계하고, 더불어 평형점의 전역적 점근 안정성을 위해 선형 비례적분 제어기를 설계한다. 그리고 본 논문에서 제안한 제어기가 결국 전력시스템의 모든 전기적 변수의 유한성을 보장함을 보인다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 조속기의 동특성을 포함한 1기 무한 모선 모델을 소개하고, 그 모델을 근거로 3절에서 적응 수동성 기반 제어기를 설계하고 폐루프 시스템의 성질에 대해서 논한다. 마지막으로 4절에서 결론을 맺는다.

2. 전력 시스템의 수학적 모델

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

2.1 . 기계적 동특성(Mechanical Dynamics)

발전기의 기계적 동특성은 다음과 같다.

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

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

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

여기서 δ와 ω는 발전기의 위상각과 주파수를 나타내고 P_m는 조속기로부터 들어오는 기계적인 입력이며 P_e는 전기적인 발전기의 출력으로 유효전력을 나타낸다. 또한 ω_0는 동기속도, D는 제동계수, H는 관성계수이고 T_g는 터빈의 시정수다. 마지막으로 u_g는 터빈에 가해지는 제어입력이다.

2.2 . 전기적 동특성(Electrical Dynamics)

발전기의 전기적 동특성은 다음과 같다.

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

여기서 E_q는 횡축(q-axis) 기전력이고 V_s는 무한버스 전압이며 u_f는 여자기 제어입력이다. 또한 x_d는 직축(d-axis) 리액턴스, x'_d는 직축의 과도 리액턴스, T'_{d0}는 직축의 과도 단락회로 시정수, x_{ds},x'_{ds}는 각각 발전기 전원부에서 무한모선까지 총 리액턴스와 과도 리액턴스를 나타내며, k_c는 여자기의 이득이다. 그리고 대수 방정식으로 표현되는 전기적 변수는 다음과 같다.

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

$$V_{tq}=E_q(t)-x_dI_d \tag{6}$$

$$V_{td}=x_dI_q \tag{7}$$

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

$$I_q=\frac{V_s}{x_{ds}}\sin\delta \tag{9}$$

$$P_e=E_qI_q \tag{10}$$

여기서 V_t는 발전기의 단자전압이고, V_{tq}, V_{td}는 각각 발전기의 횡축, 직축 단자전압이며 I_q,I_d는 각각 발전기의 횡축, 직축 전류이다. 그리고 P_e는 발전기의 유효 전력이다.

3. 제어기 설계

3.1 . 상태 방정식

제어목적은 1기 무한모선의 계수, 선로 파라미터 그리고 시정수를 사용하지 않고 폐루프 시스템이 다음과 같은 성질을 갖게 하는 것이다.

$$\lim_{t\to\infty}\omega=0,\ \lim_{t\to\infty}\Delta P_e=0,\ \lim_{t\to\infty}e_v=0 \tag{11}$$

여기서 $\Delta P_e:=P_m-P_e$ 이고, $e_v:=V_t^2-V_{ref}^2$ 이며 V_{ref}는 기준전압이다. 이를 위해 상태변수를 다음과 같이 정의한다.

$$x:=\begin{bmatrix}\omega & \Delta P_e & e_v\end{bmatrix}^T \tag{12}$$

그러면 이 상태변수를 식 (2)~(10)을 사용하여 미분하면 다음과 같은 상태 방정식을 얻는다.

$$D^{-1}\dot{x}=Ax+G(u+\Phi^T\theta) \tag{13}$$

여기서

$$D^{-1}:=\begin{bmatrix}\frac{1}{c_2} & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{c_3} & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{c_4}\end{bmatrix},A:=\begin{bmatrix}-\frac{c_1}{c_2} & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix},G:=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix},$$

$$u:=\begin{bmatrix}u_g\\ V_{tq}u_f\end{bmatrix},\ \Phi:=\begin{bmatrix}\phi_1 & 0\\ 0 & \phi_2\end{bmatrix},\ \theta:=\begin{bmatrix}\theta_1\\ \theta_2\end{bmatrix},$$

$$\phi_1:=[P_e\quad I_q^2\omega\quad I_qu_f\quad E_q\omega\cos\delta\quad P_m]^T,$$

$$\phi_2 := [E_q V_{tq} \quad \omega\sin\delta V_{tq} \quad \omega\cos\delta V_{td}]^T,$$
$$\theta_1 := \frac{1}{c_3}[\theta_{11} \quad \theta_{12} \quad \theta_{13} \quad \theta_{14} \quad \theta_{15}]^T,$$
$$\theta_2 := \frac{1}{c_4}[\theta_{21} \quad \theta_{22} \quad \theta_{23}]^T,$$
$$\theta_{11} := \frac{1}{T'_{d0}}, \theta_{12} := -\frac{(x_d - x'_d)x_{ds}}{x'_{ds}}, \theta_{13} := -\frac{1}{T'_{d0}},$$
$$\theta_{14} := -\frac{V_s}{x_{ds}}, \ \theta_{15} := -\frac{1}{T_g},$$
$$\theta_{21} := -\frac{2x_s}{T'_{d0}x_{ds}}, \ \theta_{22} := \frac{2}{x_{ds}}\left(\frac{(x_d - x'_d)V_s x_s}{x'_{ds}} - x_d V_s\right),$$
$$\theta_{23} := \frac{2x_d V_s}{x_{ds}},$$
$$c_1 := \frac{D}{2H}, \ c_2 := \frac{\omega_0}{2H}, \ c_3 := \frac{1}{T_g}, \ c_4 := \frac{2x_s k_c}{x_{ds}T'_{d0}}$$

이다. 그리고 $c_2 c_3 c_4$ 는 모두 양수이므로 D^{-1}는 양정치 행렬임을 알 수 있다.

3.2 . 제어기 설계

제어기 설계에 앞서 다음과 같은 가정을 한다.

가정1: $V_{tq} \neq 0, \forall t$

본 논문에서 제안하는 적응 수동화 제어기는 다음과 같다.

$$u_g := -\hat{\theta}_1^T\phi_1 - \omega + v_g, u_f := \frac{1}{V_{tq}}(-\hat{\theta}_2^T\phi_2 + v_f) \qquad (14)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_1 := \Gamma_1\phi_1\Delta P_e, \ \dot{\hat{\theta}}_2 := \Gamma_2\phi_2 e_v \qquad (15)$$

여기서 $\Gamma_1 > 0$, $\Gamma_2 > 0$ 이고 가정1에 의해 제어기 u_f는 항상 존재함을 알 수 있다.

출력을 다음과 같이 정의한다.

$$y := [\Delta P_e \quad e_v]^T$$

그러면 제어대상과 제어기로 이루어진 폐루프 시스템은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$D^{-1}\dot{x} = (J-R)x + G(v + \Phi^T\tilde{\theta}) \qquad (16)$$
$$y = G^T x \qquad (17)$$
$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma\Phi^T y \qquad (18)$$

여기서

$$J := \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \ R := \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ c_2 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \ v := \begin{bmatrix} v_g \\ v_f \end{bmatrix},$$

$$\Gamma := \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{bmatrix}, \ \tilde{\theta} := \theta - \hat{\theta}$$

이와 같은 시스템의 성질은 다음 정리에 있다.

정리1: 가정1이 성립한다고 가정하자. 그러면 식 (16)~(18)로 구성된 시스템은 수동적(Passive)이다.

증명: 다음과 같은 양정치 함수를 고려하자.

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

여기서 $D^{-1} > 0, \Gamma^{-1} > 0$이고 윗 식을 미분하고 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_1 = x^T((J-R)x + Gv)) + x^T G\Phi^T\tilde{\theta} - \tilde{\theta}^T\Gamma^{-1}\dot{\hat{\theta}}$$
$$= -x^T Rx + y^T v + \tilde{\theta}^T(\Phi y - \Gamma^{-1}\dot{\hat{\theta}}) \ (\because J = -J^T)$$
$$= -x^T Rx + y^T v \leq y^T v. \ (\because R \geq 0)$$

따라서 양정치 함수 V_1과 함께 $v \mapsto y$는 수동적이다. ■

정리2: 가정1이 성립한다고 가정하자. 그러면 식 (16)~(18)로 이루어진 시스템은 다음과 같은 선형 PI 제어기

$$v = K\xi - K_P y \qquad (19)$$
$$\dot{\xi} = -y \qquad (20)$$

로 점근 안정화 가능하다. 여기서 $K_I > 0$, $K_P > 0$이다.

증명: 다음과 같은 Lyapunov 후보 함수

$$V_d(x,\tilde{\theta},\xi) := V_1(x,\tilde{\theta}) + \frac{1}{2}\xi^T K\xi$$

를 정의하고 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_d = -x^T Rx + y^T v - \xi^T K\xi$$
$$= -x^T Rx + y^T(K\xi - K_P y) - \xi^T K\xi$$
$$= -x^T Rx - x^T GK_P G^T x = -x^T(R + GK_P G^T)x$$
$$=: -x^T R_d x \leq 0.$$

여기서 R_d는 양정치 함수이며($\because K_P > 0$) 이로부터 다음을 알 수 있다.

$$\|x\| < \infty, \ \|\theta\| < \infty, \ \|\xi\| < \infty$$

이를 이용하여 다음과 같이 점근 안정성을 확인한다.

$$\ddot{V}_d = -2x^T R_d(D(J-R)x + DG(K\xi - K_P Gx + \Phi^T\tilde{\theta})) < \infty$$
$$(\because \|x\| < \infty, \ \|\theta\| < \infty, \ \|\xi\| < \infty)$$
$$\int_0^t \dot{V}_d dt = -\int_0^t x^T R_d x dt$$
$$\Rightarrow \int_0^t x^T R_d x dt \leq V_d(x(0),\theta(0),\xi(0)) < \infty, \ \forall t \geq 0$$
$$\Rightarrow \ \lim_{t\to\infty}\int_0^t x^T R_d x dt < \infty \Leftrightarrow \lim_{t\to\infty}\int_0^t \dot{V}_d dt < \infty$$

결국 Balbalath's Lemma에 의해 $\lim_{t\to\infty}\dot{V}_d = 0$ 을 알 수 있고 $x=0$ 는 점근 안정함을 알 수 있다. ■

정리3: 가정1이 성립한다고 가정하자. 그러면 적응 수동화 제어기 (14), (15)와 비례 적분제어기 (19), (20)으로 이루어진 제어기는 1기 무한모선 전력계통의 모든 전기적인 변수를 유한하게 한다.

증명: 정리2에서 다음을 알 수 있다.

$$|\omega| < \infty, \ |\Delta P_e| < \infty, \ |\Delta V_t| < \infty, \ \forall t$$

그리고 이 사실로부터 다음을 알 수 있다.

$$|\Delta V_t| = |V_t - V_{tref}| < \infty \ \Rightarrow \ |V_{tq}| < \infty, \ |V_{td}| < \infty, \ (\because (5))$$
$$\Rightarrow |E_q| < \infty, \ (\because (6),(8))$$
$$\Rightarrow |P_e| < \infty, \ (\because (9),(10)), \ |I_d| < \infty \ (\because (8))$$
$$|\Delta P_e| = |P_m - P_e| < \infty \ \Rightarrow \ |P_m| < \infty \ \ (\because |P_e| < \infty)$$

∴ 1기 무한모선 전력계통의 모든 전기적 변수는 유한함을 알 수 있다.■

4. 결론

본 논문은 전력계통의 모르는 파라미터를 사용하지 않고 간단한 직접 적응제어와 선형 PI 제어로 전력계통을 안정화 할 수 있는 적응 수동화 제어기법을 제안하였다. 여자기와 조속기 제어입력은 서로 협조하여, V_{tq}가 0이 아니라는 가정하에 주파수, 단자전압, 그리고 유효전력이 유한함을 보였다. 또한 이 변수들이 각각의 평형점으로 수렴함을 보였다.

5. 참고 문헌

[1] P.M.Anderson, A.A.Fouad, "Power system control and stability", 2nd Edition, 2003

[2] P.Kunder,"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] Gilney Damm, Riccardo Marino "Adaptive nonlinear output feedback for transient stabilization and voltage regulation of power generators with unknown parameters", Int, J. Robust Nonlinear Control, 2004

[8]Yuzhen Wang, Gang Feng "Adaptive disturbance attenuation control of multi-machine power systems with SMES units", Automatica, 2006

[9] Do-Kwan Lee, Tae-Woong Yoon "Adaptive nonlinear control of a power system", IEEE. International Conference on Control Applications, 1998