

Passivity 기반 동기 발전기의 여자기 및 조속기 시스템의 제어 기법

Passivity-based Control Approach of Exciter and Governor Systems for Synchronous Electric Generators

조 현 철*
(Hyun Cheol Cho)

Abstract - Passivity theory is significantly applied to analyze stability of nonlinear dynamic systems and construct its stable control systems. This paper presents a passivity based control design approach for exciters and governors which are employed to regulate the terminal voltage and the rotor velocity of synchronous generator systems in industry fields. We consider the IEEE type 1 exciter and the gas turbine (GT) governor models respectively in this paper. We first carry out a passivity analysis for exciter and governor control systems, which are numerically obtained from its mathematical models. And then its control parameters are selected to assure passivity conditions in a design procedure. Lastly, we investigate numerical simulations to demonstrate reliability of the proposed control approach against large-scale generators with parameter changes.

Key Words : Passivity, control system, synchronous generators, IEEE type 1 exciters, GT governors

1. 서 론

일반적으로 passivity 이론은 비선형 시스템의 안정성을 분석하거나 이를 바탕으로 제어 시스템을 설계하는데 적용되고 있다. 기존에 널리 잘 알려진 Lyapunov 안정성 이론은 시스템의 상태 모델을 이용하지만, passivity 이론은 단지 시스템의 입출력 변수만을 적용할 수 있기 때문에 매우 복잡한 동적 시스템의 안정성 분석에는 보다 효과적인 것으로 알려져 있다[1].

최근에는 네트워크 기반 제어 시스템이나 가상 물리 시스템 그리고 원격 제어 로봇 시스템을 개발하는 경우에도 passivity 이론을 적용하여 제어 이론을 산출하거나 안정성을 분석하기도 한다[2][3][4]. 이러한 제어 시스템들은 주로 원격리에 있는 대규모 제어 대상들을 다루기 때문에 시스템의 동특성 모델이 다소 복잡하며 원격리 제어로 인해 발생하는 여러 가지 통신 관련 문제들이 안정성에 영향을 미칠 수 있는데, 이러한 문제점들을 passivity 이론을 통해 해결하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

예를 들어, 네트워크 기반 제어 시스템의 경우 통신 네트워크의 시간 지연, 데이터 패킷의 누락, 트래픽의 혼잡 등과 같은 특성들이 시스템의 전체 안정성을 결정하는데 크게 좌우되며, 이를 극복하기 위한 강인 제어 기법이 개발되었다[5]. 또한 대규모 동적 시스템을 가상 물리 시스템으로 간주하고 이를 수학적 방정식으로 모델링을 실시한 후 무선 통신 네트워크를 통해 플랜트를

제어하기 위한 제어 토폴로지에도 기존의 passivity 이론을 적용하였으며, 이를 통해 전체 시스템의 안정성을 분석하였으며 관련 제어 규칙을 개발한 사례도 발표되었다[6]. 보다 최근에는, 햅틱(haptic) 로봇 시스템 등과 같은 사람과 로봇 사이의 실시간 원격 제어를 실현하기 위하여 passivity 기반 제어 시스템 기술도 성공적으로 이어져 오고 있으며[7][8], 복잡한 비선형 시스템의 passivity 특성 분석을 위한 local passivity 이론이 발표되었다[9]. 이러한 연구 동향을 살펴본 바와 같이, 대규모 동적 시스템과 이를 원격리에서 제어하기 위해 통신 네트워크 기술을 접목한 제어 시스템의 경우, 기존의 passivity 이론이 매우 중요하게 적용되고 있다는 것을 알 수 있다.

본 논문은 passivity 이론을 적용한 동기 발전기의 여자기와 조속기 제어 시스템의 설계 기법을 제안한다. 잘 알려진 바와 같이, 대규모 동기 발전기 시스템을 구성하는데 있어 여자기는 발전기의 출력 전압을 정격으로 제어하는 목적으로 사용되며 조속기는 회전자의 회전 속도 또는 동기 속도로 일정하게 유지하는데 사용된다[10]. 따라서 이 두 제어 시스템의 바람직한 설계를 통해 발전기의 효율적인 출력 특성을 기대할 수 있다.

본 논문은 동기 발전기의 여자기 및 조속기 시스템 모델에 대하여 에너지 함수를 각각 정의한 후 그 미분식을 전개한 후 각각의 파라미터로 구성된 passivity 특성 조건을 수학적으로 도출한다. 제어기 파라미터의 선정은 도출한 passivity 조건을 주어진 제어 시간 동안 항상 만족할 수 있도록 구성된다. 본 논문에서 고려한 여자기 및 조속기 시스템은 산업현장에서 널리 사용되고 있는 IEEE Type 1과 Gas Turbine(GT) 모델을 각각 적용하였다. 제안한 제어 시스템의 설계 기법의 타당성 검증을 위하여 컴퓨터

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Ulsan College, Korea

E-mail : hcjo@uc.ac.kr, hyunccho@gmail.com

Received : December 25, 2017; Accepted : March 5, 2018

시뮬레이션을 실시하였으며 발전기의 출력 파형을 분석하여 제어 특성을 검증하였다.

2. Passivity 이론

본 장은 passivity 이론에 대한 수학적 정의와 관련 이론을 정리하였다.

정의 1 [11] 연속 시간 t 에 대한 동적 시스템의 상태 벡터 $x \in R^n$ 와 출력 벡터 $y \in R^p$ 가 다음과 같은 수학적 모델로 표현되며

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(t, x, u) \\ y(t) = h(t, x, u) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 비선형 상태 함수 f 와 출력 함수 h 는 각각 $f: R^n \times R^p \rightarrow R^n$ 및 $h: R^n \times R^p \rightarrow R^p$ 와 같으며 임출력의 개수는 동일하다고 가정한다. 식 (1)에 대하여 0보다 크고 미분 가능한 연속 함수 $W(x)$ 가 존재하고 다음과 같은 조건을 만족하면 식 (1)의 시스템은 passive라고 하고 그 특성을 passivity라고 일컫는다.

$$u^T y \geq \dot{W} = \frac{\partial W}{\partial x} f(x, u) \quad (2)$$

또한 다음과 같은 다양한 부등식 조건에 대하여 여러 가지 passivity 정의를 나열할 수 있다.

- (i) Input strictly passive : $u^T y \geq \dot{W} + u^T \varphi(u)$
 - (ii) Output strictly passive : $u^T y \geq \dot{W} + y^T \varphi(y)$
 - (iii) Strictly passive : $u^T y \geq \dot{W} + \varphi(x)$
- 여기서 $u^T \varphi(u) > 0$, $y^T \varphi(y) > 0$, $\varphi(x) > 0$ 이다.

비고 1 식 (1)의 동적 시스템이 passive하면 그 시스템은 안정하다고 알려져 있다. 일반적으로 동적 시스템의 안정성 분석에는 시스템의 상태 변수를 기반으로 하는 Lyapunov 이론을 많이 적용하지만, 시스템의 임출력 변수를 이용하여 passivity 특성을 분석한 후 안정성을 논하기도 한다.

정리 1 [11] 두 시스템 ϕ_1 과 ϕ_2 가 그림 1과 같이 피드백으로 구성되어 있을 때, 만약 시스템 ϕ_1 과 ϕ_2 가 모두 passive라고 하면, 전체 피드백 시스템 또한 passive하다. 여기서 ϕ_1 과 ϕ_2 의 입력 변수는 $u_1 = r_1 - y_2$ 및 $u_2 = r_2 - y_1$ 이 된다.

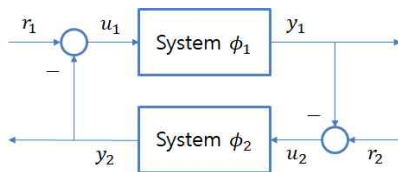


그림 1 두 동적 시스템의 피드백 구성
Fig. 1 A feedback connection of two dynamic systems

비고 2 여러 개의 시스템으로 구성된 복잡한 동적 시스템의 경우 전체 시스템의 안정성이나 passivity 특성을 분석하기가 어려운 경우 각각의 단일 시스템에 대한 passivity를 우선 분석한 후 정리 1을 적용하여 전체 passivity 특성이나 이를 바탕으로 전체 시스템의 안정성을 판단할 수 있다.

3. 동기 발전기 모델링

본 논문에서 고려하는 동기 발전기의 선형화 모델은 다음과 같다[12].

$$\begin{cases} \dot{E}(t) = -\frac{1}{K_1 \tau_d} E(t) - \frac{K_2}{\tau_d} \delta(t) + \frac{1}{\tau_d} v_F(t) \\ \dot{\omega}(t) = -\frac{K_3}{\tau_j} E(t) - \frac{K_4}{\tau_j} \delta(t) + \frac{1}{\tau_j} T_M(t) \\ \dot{\delta}(t) = \omega(t) \end{cases} \quad (3)$$

여기서 E , ω , δ 는 고정자의 EMF 전압, 회전자의 속도 및 회전 각도를 각각 나타내며, $\tau_d > 0$ 와 $\tau_j > 0$ 는 시정수를, $K_i > 0$, $i = 1, \dots, 4$ 는 발전기의 전기적 사양으로부터 결정되는 파라미터이며, v_F 와 T_M 은 발전기의 입력 변수로서 여자기와 조속기로 전달되는 계자 전압과 토크를 각각 나타낸다. 식 (3)으로부터 발전기의 출력 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$V_T(t) = \sigma_1 \delta(t) + \sigma_2 E(t) \quad (4)$$

여기서 $\sigma_1 > 0$ 과 $\sigma_2 > 0$ 는 마찬가지로 발전기의 사양을 통해 구해지는 상수가 된다. 그림 2는 식 (3)과 식 (4)의 동기 발전기 시스템의 수학적 모델에 대한 블록선도를 보여준다. 여기서, 여자기와 조속기 시스템은 발전기의 기계적 및 전기적 출력을 바탕으로 주어진 기준 속도 ω_r 과 기준 전압 v_r 을 안정하게 추종하기 위하여 바람직한 제어 동작이 이루어져야 한다. 따라서 발전기 시스템의 만족스러운 제어 특성을 위하여 이 두 제어 시스템의 효율적인 제어 성능을 발휘할 수 있는 제어 기법을 도출하여야 한다.

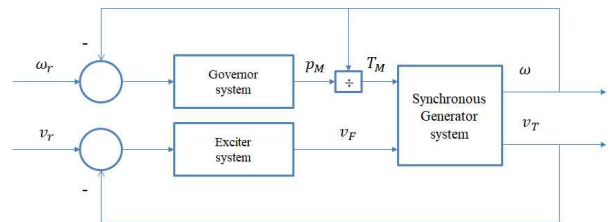


그림 2 동기발전기 시스템의 블록선도
Fig. 2 A block diagram of synchronous generator systems

3.1 안정성 분석

식 (3)의 안정성 분석은 선형 시스템 이론을 통해 간단하게 분석할 수 있다. 우선, 식 (3)으로부터 상태 행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_1\tau_d} & 0 & -\frac{K_2}{\tau_d} \\ -\frac{K_3}{\tau_j} & 0 & -\frac{K_4}{\tau_j} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

또한 식 (5)로부터 특성방정식은 다음과 같다.

$$s^3 + \frac{1}{K_1\tau_d}s^2 + \frac{K_4}{\tau_j}s - \frac{K_2K_3}{\tau_j\tau_d} + \frac{K_4}{K_1\tau_j\tau_d} = 0 \quad (6)$$

기존에 잘 알려진 고유치(eigenvalue) 이론을 통해, 식 (6)의 방정식의 근(root) 또는 고유치의 실수 부분의 값이 0보다 같거나 작으면 식 (3)의 시스템 모델은 안정하다는 것을 알 수 있다. 하지만 식 (6)은 고차 방정식이므로 기존에 널리 알려진 Routh-Hurwitz 안정성 판별법을 적용하여, 식 (3)의 시스템이 안정하기 위한 조건을 다음과 같이 도출하였다.

- 조건 1 : $\frac{K_2K_3}{\tau_j\tau_d} > 0$ (7-1)

- 조건 2 : $K_4 > K_1K_2K_3$ (7-2)

앞서 언급한 바와 같이 발전기 시스템의 모든 파라미터는 양수이므로 식 (7-1)의 조건은 자연스럽게 만족하게 되며 식 (7-2)는 발전기를 구축할 때 실제 파라미터 값을 적용하여 검토할 수 있다.

4. 여자기 제어 시스템

4-1 여자기 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 동기 발전기의 여자기 시스템은 산업 현장에서 널리 사용되고 있는 IEEE Type 1 모델로 선택하였다 [13]. 그림 3은 이 여자기에 대한 블록선도를 보여주며 각각의 장치를 포함하고 있는 블록의 전달함수는 각각 다음과 같다 [13].

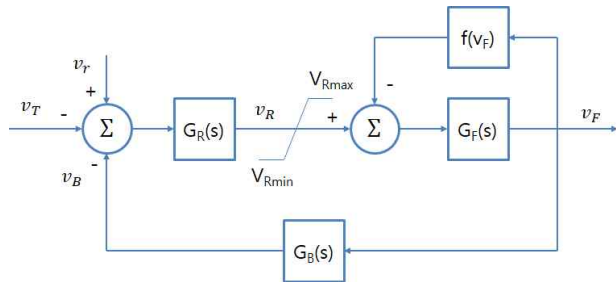


그림 3 IEEE Type 1 여자기 시스템 블록선도
Fig. 3 A block diagram of the IEEE Type 1 exciter

$$\begin{cases} G_R(s) = \frac{K_A}{1+sT_A} \\ G_F(s) = \frac{1}{K_E+sT_E} \\ G_B(s) = \frac{sK_F}{1+sT_F} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $K_A, T_A, K_E, T_E, K_F, T_F$ 은 각 장치들의 파라미터로서 모두 양수를 가지며, 여자기의 바람직한 출력을 위하여 적절한 값으로 결정되어야 한다. 식 (8)을 바탕으로 상태 변수 v_B, v_R, v_F 에 대한 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \dot{v}_B(t) = -\frac{1}{T_F}v_B(t) - \frac{K_FK_E}{T_FT_E}v_F(t) + \frac{K_F}{T_FT_E}v_R(t) - \frac{K_F}{T_FT_E}f(v_F) \\ \dot{v}_R(t) = -\frac{1}{T_A}v_R(t) - \frac{K_A}{T_A}v_T(t) - \frac{K_A}{T_A}v_B(t) + \frac{K_A}{T_A}v_r \\ \dot{v}_F(t) = -\frac{K_E}{T_E}v_F(t) + \frac{1}{T_E}v_R(t) - \frac{1}{T_E}f(v_F) \end{cases} \quad (9)$$

여기서 v_r 은 기준 전압, $v_R \in [V_{R,min}, V_{R,max}]$ 의 범위를 갖는다. 또한 식 (9)에서 $f(v_F)$ 는 여자기의 포화(saturation) 특성을 나타내는 함수로서 다음과 같은 지수함수로 주어진다.

$$f(v_F) = A_{EX} \exp(B_{EX}v_F) \quad (10)$$

여기서 A_{EX} 와 B_{EX} 은 포화곡선에 따른 상수로 주어진다. 일반적으로 여자기의 출력 전압은 양수이므로 식 (10)에서 $v_F > 0$ 및 $f(v_F) > 0$ 이 된다. 또한 식 (9)에서 v_R 은 최소값 $V_{R,min}$ 과 최대값 $V_{R,max}$ 의 범위를 가지며 따라서 이 여자기 시스템은 비선형 특성을 포함하는 것을 알 수 있다.

4.2 Passivity 특성 분석

그림 3의 시스템 모델은 각각의 전달함수를 갖는 3개의 장치들로 구성되어 있으나, 블록선도 간소화 기법을 통해 그림 4와 같은 블록선도로 다시 표현할 수 있다. 또한 식 (9)의 방정식을 다음과 같이 두 시스템 모델 ϕ_1 과 ϕ_2 로 분리하여 다시 나타낼 수 있다.

$$\phi : \begin{cases} \phi_1 : \begin{cases} \dot{v}_R(t) = -\frac{1}{T_A}v_R(t) + \frac{K_A}{T_A}v_e(t) \\ \dot{v}_F(t) = -\frac{K_E}{T_E}v_F(t) + \frac{1}{T_E}v_R(t) - \frac{1}{T_E}f(v_F) \end{cases} \\ \phi_2 : \dot{v}_B(t) = -\frac{1}{T_F}v_B(t) + \frac{K_F}{T_F}v_F(t) \end{cases} \quad (11)$$

여기서 $v_e = v_r - v_T - v_B$ 이다. 그림 4의 시스템 모델은 두 시스템이 피드백 형태로 구성되어 있으므로 정리 1을 이용하여 passivity 특성을 분석한다. 다시 말해, 식 (11)에서 시스템 ϕ_1 및 ϕ_2 에 대하여 각각의 passivity 특성을 분석한 후에 그 결과를

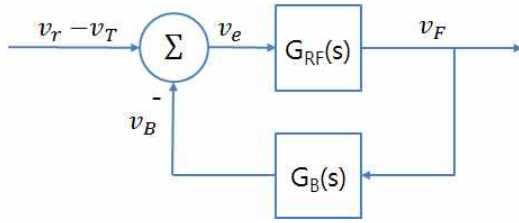


그림 4 IEEE Type 1 여자기의 간소화된 블록선도
 Fig. 4 A simplified block diagram of the IEEE Type 1 exciter

바탕으로 전체 시스템 ϕ 에 대한 passivity 특성을 알아볼 수 있다. 우선, 시스템 ϕ_2 에 대한 passivity 특성을 분석하기 위하여 에너지 함수를

$$W_{E,\phi_2} = \frac{1}{2}v_B^2 \quad (12)$$

와 같이 정의하며 미분식은 다음과 같이 전개된다.

$$\dot{W}_{E,\phi_2} = -\frac{1}{T_F}v_B^2 + \frac{K_F}{T_F}v_B\dot{v}_F \quad (13)$$

한편, 식 (13)은 다음의 부등식을 만족한다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{E,\phi_2} &\leq v_B v_F - \frac{1}{T_F}v_B^2 + \frac{K_F}{T_F}v_B\dot{v}_F + \frac{K_F}{2T_F}(v_B - \dot{v}_F)^2 - v_B v_F \\ &= v_B v_F - \frac{1}{T_F}v_B^2 + \frac{K_F}{2T_F}(v_B^2 + \dot{v}_F^2) - v_B v_F \end{aligned} \quad (14)$$

다음으로 식 (11)의 시스템 ϕ_1 에 대하여, 마찬가지로 에너지 함수를

$$W_{E,\phi_1} = \frac{1}{2}(v_R^2 + v_F^2) \quad (15)$$

와 같이 정의하고 미분식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{W}_{E,\phi_1} = -\frac{1}{T_A}v_R^2 - \frac{K_E}{T_E}v_F^2 - \frac{1}{T_E}v_F f(v_F) + v_R \left(\frac{K_A}{T_A}v_e + \frac{1}{T_E}v_F \right) \quad (16)$$

또한 식 (16)은 다음과 같은 부등식을 만족한다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{E,\phi_1} &\leq -\frac{1}{T_A}v_R^2 - \frac{K_E}{T_E}v_F^2 - \frac{1}{T_E}v_F f(v_F) + v_R^2 \\ &\quad + \frac{1}{4} \left(\frac{K_A}{T_A}v_e + \frac{1}{T_E}v_F \right)^2 \\ &= \frac{1}{4} \frac{K_A}{T_A T_E} v_e v_F - \left(\frac{1}{T_A} - 1 \right) v_R^2 - \left(\frac{K_E}{T_E} - \frac{1}{4T_E^2} \right) v_F^2 \\ &\quad - \frac{1}{T_E} v_F f(v_F) + \frac{1}{4} \left(\frac{K_A}{T_A} \right)^2 v_e^2 \end{aligned} \quad (17)$$

식 (11)에서 시스템 ϕ_1 과 ϕ_2 가 각각 passive가 되기 위한 조건은

식 (14)와 식 (17)의 부등식을 만족하여야 한다. 제어기 설계 과정에서 이 두 조건을 모두 만족할 수 있는 제어기 파라미터 값을 적절하게 결정해서 그 목적을 이룰 수가 있다.

4.3 여자기 제어 파라미터 결정

식 (14)의 부등식을 만족하는 파라미터를 산출하기 위하여 우선 식 (14)의 우변의 세 번째 및 네 번째 항을 모두 0으로 두며 다음과 같다.

$$\frac{K_F}{2T_F}(v_B^2 + \dot{v}_F^2) - v_B v_F = 0 \quad (18)$$

여기서 K_F 와 T_F 에 대하여 정리하면

$$\frac{K_F}{T_F} = \frac{2v_B v_F}{v_B^2 + \dot{v}_F^2} \quad (19)$$

와 같다. 식 (19)에서 올바른 제어 동작에 대하여 제어 시간이 경과한 후에 안정한 출력 상태가 되면 v_F 가 평형점에 도달하여 미분값 \dot{v}_F 는 0이 된다. 즉, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{v}_F(t) = 0$ 이므로 식 (19)의 최종값은

$$\frac{K_F(\infty)}{T_F(\infty)} = \frac{2v_F(\infty)}{v_B(\infty)} \quad (20)$$

가 된다. 다음으로 식 (17)로부터 시스템 ϕ_1 이 passive가 되기 위해서 우선 식 (17)의 우변 항의 첫 번째 항에서 $K_A/(4T_A T_E) = 1$ 또는 $K_A = 4T_A T_E$ 가 되어야 하며 다음으로, 두 번째 항에서 $0 < T_A < 1$ 가 되어야 한다. 그리고 세 번째 항에서는 $K_E/T_E - 1/4T_E^2 \geq 0$ 이어야 하므로 $T_E K_E > 1$ 되어야 한다. 마지막으로, 네 번째 항과 다섯 번째 항을 모두 0으로 두면

$$-\frac{1}{T_E}v_F f(v_F) + \frac{1}{4} \left(\frac{K_A}{T_A} \right)^2 v_e^2 = 0 \quad (21)$$

와 같으며 여기서 다시 T_E 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_E = \frac{4T_A^2 v_F f(v_F)}{K_A^2 v_e^2} \quad (22)$$

여기서 $\lim_{t \rightarrow \infty} v_e(t) = -v_B(\infty)$ 이므로 T_E 의 최종값은 다음과 같다.

$$T_E(\infty) = \frac{4T_A^2 v_F(\infty) f(v_F(\infty))}{K_A^2 v_B^2(\infty)} \quad (23)$$

앞서 언급한 바와 같이 $v_F > 0$ 및 $f(v_F) > 0$ 이므로 식 (23)에서 $T_E > 0$ 을 항상 만족한다.

5. 조속기 제어 시스템

5-1 조속기 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 조속기는 그림 5의 블록선도와 같이 표현되는 GT(gas turbine) 모델로 하였으며 각 장치의 전달함수는 다음과 같다[13].

$$G_1(s) = \frac{K_w}{1+sT_{sr}}, \quad G_2(s) = \frac{1}{1+sT_c}, \quad G_3(s) = \frac{1}{1+sT_t} \quad (24)$$

이 전달함수를 바탕으로 상태 변수 x_1 및 x_2 와 출력 변수 p_M 에 대한 동적 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -\frac{1}{T_{sr}}x_1(t) + \frac{K_w}{T_{sr}}e_\omega \\ \dot{x}_2(t) = -\frac{1}{T_c}x_2(t) + \frac{1}{T_c}x_1(t) - \frac{1}{T_c}P \\ \dot{p}_M(t) = -\frac{1}{T_t}p_M(t) + \frac{1}{T_t}x_2 \end{cases} \quad (25)$$

여기서 $e_\omega = \omega_r - \omega$ 이며 ω_r 는 기준 속도를 가리키며, P 는 상수로 서 droop 값을 나타내며 기계적 출력 p_M 은 유한한 값을 가지며 $p_M \in [P_{M,\min}, P_{M,\max}]$ 의 범위를 갖는다.

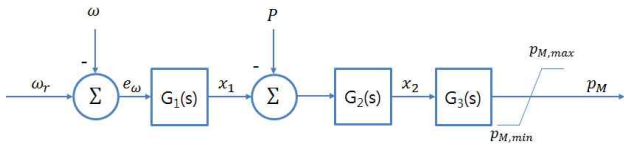


그림 5 GT 조속기 블록선도

Fig. 5 A block diagram of the GT governor

5.2 Passivity 특성 분석

식 (25)의 조속기 모델에 대해서도 마찬가지로 passivity 특성을 파악하기 위하여 먼저, 상태 변수를 이용하여 0보다 큰 에너지 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$W_G = \frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2 + p_m^2) \quad (26)$$

또한 식 (26)을 시간 t 에 대하여 미분한 후 식 (25)에 적용하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_G = & -\frac{1}{T_{sr}}x_1^2 + \frac{K_w}{T_{sr}}e_\omega x_1 - \frac{1}{T_c}x_2^2 + \frac{1}{T_c}x_1x_2 \\ & - \frac{1}{T_c}px_2 - \frac{1}{T_t}p_m^2 + \frac{1}{T_t}x_2p_m \end{aligned} \quad (27)$$

식 (27)에서 각각 다른 두 변수의 곱으로 주어진 항에 대하여 각각 다음과 같은 부등식을 구할 수 있다.

$$\frac{K_w}{T_{sr}}e_\omega x_1 \leq \frac{K_w}{T_{sr}}e_\omega x_1 + \left(e_\omega - \frac{K_w}{2T_{sr}}x_1\right)^2 = e_\omega^2 + \frac{K_w^2}{4T_{sr}^2}x_1^2 \quad (28-1)$$

$$\frac{1}{T_c}x_1x_2 \leq \frac{1}{T_c}x_1x_2 + \left(x_1 - \frac{1}{2T_c}x_2\right)^2 = x_1^2 + \frac{1}{4T_c^2}x_2^2 \quad (28-2)$$

$$-\frac{1}{T_c}px_2 \leq -\frac{1}{T_c}px_2 + \left(p + \frac{1}{2T_c}x_2\right)^2 = p^2 + \frac{1}{4T_c^2}x_2^2 \quad (28-3)$$

$$\frac{1}{T_t}x_2p_m \leq \frac{1}{T_t}x_2p_m + \left(p_m - \frac{1}{2T_t}x_2\right)^2 = p_m^2 + \frac{1}{4T_t^2}x_2^2 \quad (28-4)$$

다음으로, 식 (28)의 결과 식을 식 (27)에 적용하면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_G \leq & -\frac{1}{T_{sr}}x_1^2 + e_\omega^2 + \frac{K_w^2}{4T_{sr}^2}x_1^2 - \frac{1}{T_c}x_2^2 + x_1^2 + \frac{1}{4T_c^2}x_2^2 \\ & + \frac{1}{4T_c^2}x_2^2 - \frac{1}{T_t}p_m^2 + p_m^2 + \frac{1}{4T_t^2}x_2^2 \\ = & e_\omega^2 + \left(1 - \frac{1}{T_t}\right)p_m^2 + \left(1 - \frac{1}{T_{sr}} + \frac{K_w^2}{4T_{sr}^2}\right)x_1^2 \\ & + \left(-\frac{1}{T_c} + \frac{1}{2T_c^2} + \frac{1}{4T_t^2}\right)x_2^2 \end{aligned} \quad (29)$$

또한 식 (29)의 우변 항의 첫 번째와 두 번째 항은 다음과 같은 부등식으로 표현되므로

$$\begin{aligned} e_\omega^2 + \left(1 - \frac{1}{T_t}\right)p_m^2 & < e_\omega^2 + \left(1 - \frac{1}{T_t}\right)p_m^2 + \frac{1}{2}(e_\omega + p_m)^2 \\ & = e_\omega p_m + \frac{3}{2}e_\omega^2 + \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{T_t}\right)p_m^2 \end{aligned} \quad (30)$$

식 (30)을 식 (29)에 대입하면 최종적으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_G \leq & e_\omega p_m + \frac{3}{2}e_\omega^2 + \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{T_t}\right)p_m^2 \\ & + \left(1 - \frac{1}{T_{sr}} + \frac{K_w^2}{4T_{sr}^2}\right)x_1^2 \\ & + \left(-\frac{1}{T_c} + \frac{1}{2T_c^2} + \frac{1}{4T_t^2}\right)x_2^2 \end{aligned} \quad (31)$$

식 (25)의 조속기 모델이 passive 특성을 갖기 위해서는 식 (31)의 부등식을 항상 만족하여야 하며 이러한 목적은 시스템 파라미터를 적절하게 결정하여 이루어 질 수 있다.

5.3 조속기 제어 파라미터 결정

식 (31)의 부등식을 만족시키기 위한 조속기 파라미터의 결정을 위해, 우선 식 (31)의 우변 항에서 두 번째와 세 번째 항을 모두 0으로 둔다. 즉, 수학적으로 표현하면

$$\frac{3}{2}e_\omega^2 + \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{T_t}\right)p_m^2 = 0 \quad (32)$$

와 같으며 여기서 파라미터 T_t 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_t = \frac{2p_m^2}{3(e_\omega^2 + p_m^2)} \quad (33)$$

이 결과 식으로부터, 파라미터 T_t 는 p_m 과 e_ω 의 시간 함수가 되며 주어진 제어 시간 동안 이 두 변수의 값에 따라 그 값이 변화된다는 것을 알 수 있다. 한편, 조속기 제어 시스템의 올바른 제어 동작이 이루어질 경우, 시간이 지날수록 제어 오차는 0에 가깝기 때문에 식 (33)에서 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\omega(t) = 0$ 이 되며 이 때 T_t 의 최종값은 $T_t(\infty) = 2/3$ 가 된다는 것을 알 수 있다. 다음으로, 식 (31)의 식 4번째 항에서

$$1 - \frac{1}{T_{sr}} + \frac{K_w}{4T_{sr}^2} \leq 0 \quad (34)$$

이어야 하므로 이 부등식의 해는 $T_{sr} \leq 0.5 \pm 0.5\sqrt{1 - K_w}$ 가 된다. 여기서, 만약 $K_w = 1$ 로 두면 $T_{sr} \leq 0.5$ 이 되며, 하지만 $T_{sr} > 0$ 이어야 하므로 $T_{sr} \in (0, 0.5]$ 의 범위를 갖는다. 마지막으로, 식 (31)의 마지막 항에 대하여

$$-\frac{1}{T_c} + \frac{1}{2T_c^2} + \frac{1}{4T_t^2} \leq 0 \quad (35)$$

을 만족하여야 하며 이 부등식은 $T_c \leq 2T_t^2 \pm 2T_t\sqrt{T_t^2 - 0.5}$ 의 해를 가지며, 이때 $T_c > 0$ 이므로 $T_c \in (0, 2T_t^2)$ 의 범위를 가지며 간단하게 $T_c = 2T_t^2$ 로 결정할 수 있다. 여기서 식 (33)을 대입하여 T_c 를 다시 표현하면

$$T_c = \frac{8p_m^4}{9(e_\omega^2 + p_m^2)^2} \quad (36)$$

와 같으며, 또한 T_c 의 최종값은 $T_c(\infty) = 8/9$ 이 된다.

6. 시뮬레이션

본 시뮬레이션에 적용된 동기 발전기는 참고문헌 [12]의 예제 6.7에 사용된 파라미터 값을 이용하였으며 식 (3)과 식 (4)의 발전기 파라미터 값은 표 1과 같다. 이 발전기 파라미터 값으로부터 식 (7)에 제시된 발전기 모델의 안정성 조건을 모두 만족하는 것을 알 수 있다. 다음은 식 (9)의 여자기 시스템 모델에서 $A_{EX} = 0.36$, $B_{EX} = 0.2$, $V_{R,\min} = -15.5$ [pu], $V_{R,\max} = 17.5$ [pu]이며 각 전달함수의 파라미터 값은 4.3절에 서술한 내용을 바탕으로 $K_E = 1$, $T_F = 1$, $T_A = 0.5$ 로 두었으며 또한 $K_F = 2v_B v_F / (v_B^2 + v_F^2)$, $T_E = 4v_F f(v_F) / v_e^2$, $K_A = 4T_E$ 로 결정하였다. 다음으로, 식 (25)의 조속기 모델에 대하여 $P_{M,\min} = 0$, $P_{M,\max} = 33$ [pu], $P = 5$ [pu]이며 마찬가지로 5.3절의 파라미터 결정법에 의하여 $K_w = 1$, $T_{sr} = 0.15$, $T_c = 2T_t^2$ 이며 여기서 T_t 는 식 (33)과 같이 두었다. 여자기

와 조속기 제어 시스템은 발전기의 출력 전압과 회전 속도가 각각의 정격 전압과 동기 속도를 추정하여야 하며 이 두 정격에 대한 설정값은 각각 $v_r = 500$ [V] 및 $\omega_r = 720$ [rpm]로 두었다. 그리고 이 두 제어 시스템에 대한 제어 성능의 조건은 다음과 같다.

- 조건 1 : 5[%] 이하의 최대 언더슈트 및 오버슈트
- 조건 2 : 정상상태 오차값은 0

본 시뮬레이션은 2가지 시나리오에 대하여 각각 실시하였으며,

표 1 동기 발전기 시스템의 파라미터 값

Table 1 Parameter values for the synchronous generator model

Parameter	Values
K_1	0.3072
K_2	1.8051
K_3	1.3174
K_4	1.4479
σ_1	0.0294
σ_2	0.5257
τ_d	5.9
τ_j	0.00075

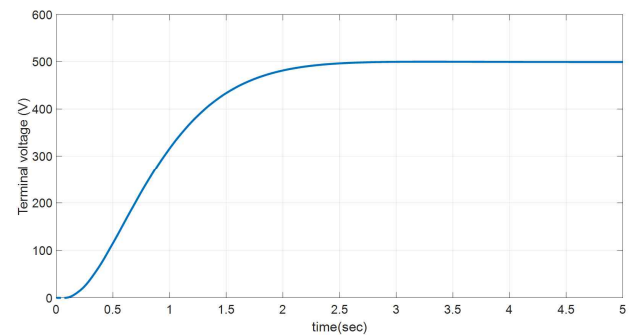


그림 6 발전기의 단자 전압(시뮬레이션 1)

Fig. 6 The terminal voltage of the generator(simulation 1)

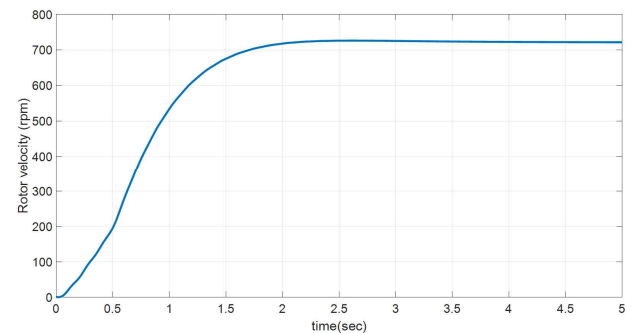


그림 7 발전기의 회전자 속도(시뮬레이션 1)

Fig. 7 The rotor velocity of the generator(simulation 1)

첫 번째 시뮬레이션에서 발전기 시스템의 초기 상태를 모두 0에서 기동하여 그 과도응답과 정상상태 응답 특성을 분석하였으며, 두 번째는 정격 운전 중에 있는 발전기에 파라미터 변화에 대한 동특성을 분석하였다. 파라미터의 변화는 표 1에서 $K_i, i=1,2,3,4$ 의 공칭값에서 각각 1%씩 증가하여 적용하였다.

그림 6과 그림 7은 첫 번째 시뮬레이션 시나리오에 대한 발전기의 출력 파형으로서 그림 6은 발전기의 단자 전압 그림 7은 회전자 속도의 회전속도 파형을 각각 보여준다. 그림 6의 단자 전압의 경우 초기 시간부터 약 2.5초까지 오버슈트(overshoot)가 없는 과도응답 특성을 보이고 있으며 그 이후로 정상상태에서 설정값으로 안정하게 도달하는 것을 관측할 수 있다. 그림 7의 회전 속도 파형에서도 유사하게 오버슈트가 거의 없는 과도응답 특성을 보이고 약 2초 이후에 안정한 정상상태 응답에 도달하는 것을 볼 수 있다. 그리고 이 두 파형에서 알 수 있듯이, 발전기의 정상상태 응답에서 단자 전압의 설정값 500[V]와 동기 속도 720[rpm]에 매우 정확하게 도달하는 것을 볼 수 있으며, 위에 제시한 제어성능의 2가지 조건을 모두 만족하는 것을 알 수 있다. 따라서 첫 번째 시뮬레이션에서 여자기와 조속기 제어 시스템이 매우 효과적으로 동작한다는 것을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9는 두 번째 시뮬레이션에 대한 결과 파형으로서 10초에 파라미터 변화를 발생하였으며 이 때 발전기의 단자 전압과 회전 속도를 각각 보여준다. 우선 그림 8의 단자 전압의 경우, 파라미터 변화가 발생한 이후부터 약 3초까지 오버슈트 및

언더슈트(undershoot)의 특성을 발생하는 과도응답을 보이고 있으며 그 이후로는 정상상태 오차가 거의 없는 정격 전압에 안정하게 도달하는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 9의 회전 속도의 경우는 파라미터의 변화가 발생한 10초 이후에 과도응답 구간에서 매우 짧은 시간 동안 오버슈트와 언더슈트가 여러 번 발생하는 감쇠 진동 특성을 보이고 있으며 마찬가지로 약 12초 부근부터는 안정한 동기 속도에 도달하는 것을 관측할 수 있다. 한편, 제어 파라미터의 값이 최적의 값이 아니거나 최적의 시뮬레이션 환경이 아닌 경우 정상상태에서 바람직하지 못한 오차가 발생할 수가 있었다. 그림 8과 그림 9의 결과 파형으로부터 최대 퍼센트 언더슈트와 최대 퍼센트 오버슈트에 대한 관측값을 표 2에 기재하였다. 이 표의 관측값에 의하면 모두 5[%] 이하의 최대 퍼센트 언더슈트와 오버슈트를 가지며, 앞서 제시한 첫 번째 제어 조건을 모두 만족하는 것을 알 수 있다. 또한 정상상태 응답에서도 모두 0의 제어 오차를 보이고 있으며 이러한 두 결론을 바탕으로 두 번째 시뮬레이션 시나리오에서도 설계한 여자기 및 조속기 제어 시스템의 효과적인 동작 특성을 관측할 수 있었다.

표 2 최대 퍼센트 언더슈트 및 오버슈트(시뮬레이션 2)

Table 2 Maximum percent undershoot and overshoot (simulation 2)

Items	Maximum percent undershoot		Maximum percent overshoot	
	Values	Time	Values	Time
Terminal voltage (Fig. 8)	4.26[%]	10.95 [sec]	1.42[%]	10.13 [sec]
Rotor velocity (Fig. 9)	0.68[%]	10.19 [sec]	1.36[%]	10.08 [sec]

7. 결 론

본 논문은 passivity 이론을 적용하여 동기 발전기에 적용되는 여자기 및 조속기 제어 시스템 설계 방법론을 제안하였다. 우선, 주어진 여자기 및 조속기 시스템의 수학적 모델에 대하여 passivity 특성 분석을 실시한 후 주어진 제어시간 동안 항상 passivity 조건을 만족할 수 있는 제어기 파라미터를 산출하였다. 본 논문에서 제안한 제어기 설계법의 타당성 검증을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이루어졌으며 발전기의 단자 전압과 회전 속도 파형 분석으로부터 제어 성능의 우수성과 신뢰성을 입증할 수 있었다. 향후 연구는 발전기 시스템의 실시간 테스트베드 구성과 실험을 통해 제안한 제어 시스템의 설계 기법에 대한 실적용 가능성 검증을 추가로 실시할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨

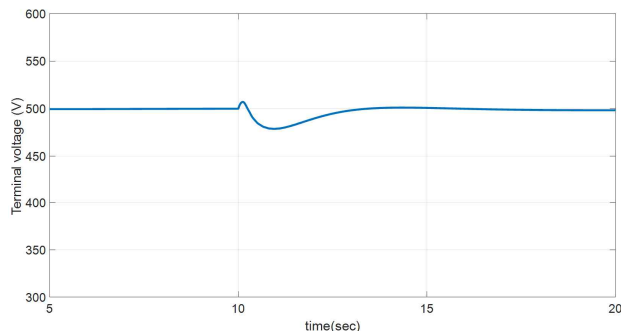


그림 8 발전기의 단자 전압(시뮬레이션 2)
Fig. 8 The terminal voltage of the generator(simulation 2)

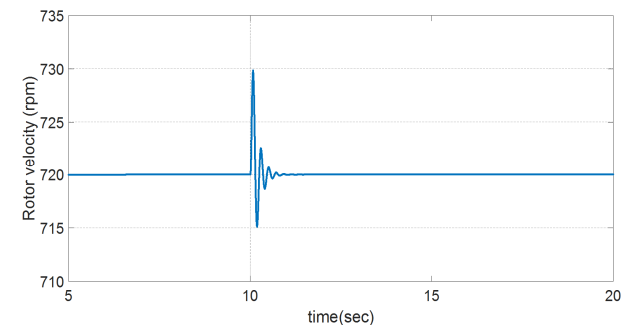


그림 9 발전기의 회전자 속도(시뮬레이션 2)
Fig. 9 The rotor velocity of the generator(simulation 2)

References

- [1] A. H. J. de Ruiter, "Some applications of passivity-based control and invariance principles," *IET Control Theory Appl.*, vol. 7, no. 7, pp. 1039-1048, 2013.
- [2] J. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, "A survey of recent results in networked control systems," *Proc. of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 138-162, 2007.
- [3] R. Rajkumar, I. Lee, L. Sha, and J. Stankovic, "Cyber-physical systems: The next computing revolution," *Proc. 47th Design Automation Conf.*, pp. 731-736, 2010.
- [4] T. Sheridan, "Telerobotics," *Automatica*, vol. 25, no. 4, pp. 487-507, 1989.
- [5] N. Kottenstette, J. Hall III, X. Koutsoukos, J. Sztipanovits, and P. Antsaklis, "Design of networked control systems using passivity," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 649-665, 2013.
- [6] P. Antsaklis, B. Goodwine, V. Gupta, M. McCourt, Y. Wang, P. Wu, M. Xia, H. Yu, and F. Zhu, "Control of cyberphysical systems using passivity and dissipativity based methods," *European J. of Control*, vol. 19, pp. 379-388, 2013.
- [7] D. Sun, F. Naghdy, and H. Du, "Neural network-based passivity control of teleoperation system under time-varying delays," *IEEE Trans. on Cybernetics*, vol. PP, no. 99, pp. 1-15, 2016.
- [8] S. Atashzar, M. Shahbazi, M. Tavakoli, and R. Patel, "A passivity-based approach for stable patient-robot interaction in haptics-enabled rehabilitation systems: modulated time-domain passivity control," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 991-1006, 2017.
- [9] M. Xia, P. J. Antsaklis, V. Gupta, and F. Zhu, "Passivity and dissipativity analysis of a system and its approximation," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 62, no. 2, pp. 620-635, 2017.
- [10] H. C. Cho, "A development of real-time monitoring techniques for synchronous electric generator systems," *Trans. of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 66P, no. 4, pp. 182-187, 2017.
- [11] H. K. Khalil, *Nonlinear systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [12] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power system control and stability*, Wiley Inter-Science, New Jersey, 2003.
- [13] Operation Technology Inc., *ETAP® 12.6 user guide*, 2014.

저 자 소 개



조 현 철 (Hyun Cheol Cho)

1997년 부경대 제어계측공학과(학사). 1999년 동아대학교 전기공학과(석사). 2006년 University of Nevada-Reno (Ph.D.). 현재 울산 과학대학교 전기전자공학부 교수

Tel : 052-279-3166

E-mail : hcjo@uc.ac.kr