

혼합감도 H_∞ 제어기법을 이용한 강인한 부하주파수 제어기 설계

정형환* · 김상효* · 이정필* · 한길만*

Design of Robust Load Frequency Controller using Mixed
Sensitivity based H_∞ norm

H. H. Chung · S. H. Kim · J. P. Lee · G. M. Han

Key words : Load frequency control(부하주파수 제어), H_∞ control(H_∞ 제어), Mixed sensitivity(혼합감도), Robust controller(강인한 제어기), Weighted transfer function(가중치 전달함수), Uncertainty(불확실성)

Abstract

In this paper, a robust controller using H_∞ control theory has been designed for the load frequency control of interconnected 2-area power system. The main advantage of the proposed H_∞ controller is that uncertainties of power system can be included at the stage of controller design. Representation of uncertainties is modeled by multiplicative uncertainty. In the mixed sensitivity problems, disturbance attenuation and uncertainty of the system is treated simultaneously. The robust stability and the performance of model uncertainties are represented by frequency weighted transfer function. The design of load frequency controller for each area was based on state-space approach. The comparative computer simulation results for the proposed controller and the conventional techniques such as the optimal control and the PID one were analyzed at the additions of various disturbances. Their deviation magnitude of frequency and tie line power flow at each area were mainly evaluated. Also the testing results of robustness for the cases that the perturbations of the all parameters of power system were amounted to about 20% were introduced. It was approved that the resultant performances of the proposed H_∞ controller with mixed sensitivity were more robust and stable than the one of conventional controllers.

* 동아대학교 대학원 전기공학과(원고접수일 : 2000년 2월)

기호설명

- T_g : Speed governor time constant
- T_t : Turbine time constant
- T_{ps} : Power system time constant
- K_{ps} : Power system gains
- R : Self-regulation coefficient of generator
- Δf : Frequency deviation
- ΔP_t : Change in steam turbine output
- ΔP_g : Change in governor-valve position
- ΔP_d : Change in load demand
- ΔP_{tie} : Tie-line power flow deviation
- P_r : Rated area power
- P_{tiemax} : Maximum tie-line power
- a_{ij} : Ratio of the rated power of area i and j
- δ_{ij} : Nominal values of phase angles
- i, j : Area ($i, j=1, 2$)

1. 서 론

전력계통의 부하가 변하여 발전기의 기계적 입력이 부하와 평형을 이루지 못할 경우 전력계통의 주파수가 변동하게된다. 주파수의 심한 변동은 주파수에 관계되는 정밀기계의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 발전소나 기타 전기설비에 큰 지장을 초래하며 수명 또한 단축시킨다. 또한 각 지역을 연결하는 연계선 전력 조류는 주파수의 변동에 매우 민감하므로 이에 대한 제어를 신속히 행하지 않으면 상시 변동 조류가 대단히 크거나 조류의 동요가 심하게 되어 전력계통의 안정도가 저하된다. 그러므로 계통 운용의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 시간에 따른 계통 상태의 변화, 사고에 대한 계통 구성의 변동 등 전력계통의 다양한 상태변동에 대하여 전력 수급의 균형을 조절하여 주파수 및 연계선 조류편차를 허용범위 이내로 유지하도록 해야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 전력계통의 부하 주파수제어(Load Frequency Control : LFC)^{1)~4)}가 필요하다.

부하주파수 제어를 위한 노력의 일환으로 비례, 적분, 미분요소를 갖는 피드백 제어⁵⁾로부터 선형 최적제어 기법⁶⁾, 인공 신경회로망⁷⁾ 등이 제안되었

다. 그러나 이러한 제어기법들의 단점 중에 하나는 불확실성을 고려하지 않은 고정된 선형화 모델을 이용하여 제어기를 설계하였기 때문에, 계통내의 파라미터 변동과 같은 불확실성이 존재하는 경우에는 정확한 제어 목적을 달성할 수가 없다. 즉, 강인성의 결핍을 들 수 있다. 제어기의 강인성은 시스템의 불확실성에도 불구하고 폭넓은 동작조건 변화가 발생할 경우에도 시스템의 안정성과 성능을 유지할 수 있도록 하는 것이다. 수학적 모델 플랜트와 실제 플랜트는 정확하게 일치하지 않는다. 이는 비선형적인 실제 플랜트를 선형화 하는 과정에서 발생한 모델링 오차에서 발생한다. 따라서 이러한 모델의 불확실성에도 불구하고 시스템 응답을 안정하고 플랜트의 매개변수들의 차이에 따른 강인성을 보장하며, 갑작스런 부하 변동시 안정된 응답을 확보하기 위해서 강인한 제어기가 절대적으로 요구된다. 이를 위하여 강인 제어기법은 제어기 설계시 미리 최악의 조건을 설정하고, 그와 같은 상황에서도 적절히 제어할 수 있는 제어기 형태를 제시해 주고 있다.

최근에는 불확실성이 존재하는 실제 시스템에 이러한 제어시스템을 적용하는데 중점을 두는 연구가 활발히 진행되고 있다⁸⁻¹⁰⁾. 특히 H_{∞} 제어¹¹⁻¹⁴⁾는 외란에서 출력으로 가는 전달함수의 주파수 응답의 최대치가 되는 H_{∞} -노름(norm)을 평가 기준으로 하여 이를 최소화하는 제어기 설계 방법으로써, 그 기본적인 설계 방식으로는 시스템의 출력에 대한 외란의 영향을 최소화하는 외란 억제 제어와, 제어 모델에 대한 불확실성에도 불구하고 안정성을 확보할 수 있는 강인 제어가 있다. 그러므로, H_{∞} 제어기 설계는 실제 시스템이 안정하게 동작할 수 있도록 모델오차의 크기를 제공함으로써 외란 및 모델 오차에 견딜 수 있는 강인한 제어기가 된다. M. Furuhashi¹⁵⁾등은 전력계통의 부하주파수 제어를 위해서 H_{∞} 제어 이론을 적용한 바 있으나, 이는 외란억제 제어에 한정시켰다.

본 논문에서는 전력계통의 부하주파수 제어 문제를 실제 플랜트에 적용할 수 있도록 시스템의 선형화 과정에서 발생하는 모델링 오차뿐만 아니라, 외란 부가시에도 강인한 성능을 나타내는 혼합감도 H_{∞} 제어 이론을 사용하여 제어기를 설계하였

다. 실제 제어를 설계하는 문제는 H_∞ 최적화 문제로 바뀌어야 하는데, 여기서 모델 불확실성에 대한 강인성 및 성능 조건은 H_∞ 제어의 표준문제에서 적절한 주파수 영역의 가중치 전달함수로 표현하였다. 그리고 종래의 제어기법인 PID 제어¹⁰⁾ 및 최적제어¹¹⁾와 제안한 H_∞ 제어를 각각 적용하여, 다양한 부하 외란이 발생한 경우에 대하여 시뮬레이션을 행하여 각 지역의 주파수 편차 및 연계선 조류 편차량에 대한 동특성 응답을 비교 고찰하였으며, 또한 파라미터가 변할 경우의 강인성능에 대해서도 비교 고찰하였다. 결과적으로 전력계통의 부하주파수 제어를 위해 설계된 H_∞ 제어기는 시스템 출력에 대한 외란의 영향을 적게하고, 시스템의 파라미터 변동시에도 안정성을 확보할 수 있는 강인한 제어기임을 확인하였다.

2. 계통방정식

본 논문에서는 제어기 설계를 용이하게 하기 위하여, 상호 연계된 전력계통 중에 하나의 지역에 대한 모델을 사용하여 H_∞ 제어 이론을 적용하였으며, 설계된 제어기를 2지역 모델의 각각의 지역에 적용하여 제안한 제어기의 제어 성능과 강인 성능을 고찰하기로 한다.

하나의 지역에 대한 제어기를 설계하기 위하여 제어지역을 블록선도로 나타내면 그림 1과 같다.

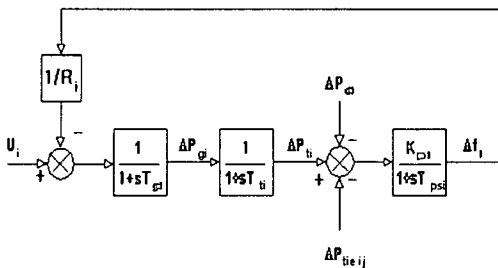


Fig. 1 Block diagram of power system for iarea

그림 1을 기초로 하여 모델에 대한 상태 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_{pi} & K_{psi}/T_{psi} & 0 \\ 0 & -1/T_{ti} & 1/T_{ti} \\ -1/T_{gi}R_i & 0 & -1/T_{gi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/T_{gi} \end{bmatrix} u_i + \begin{bmatrix} -K_{psi}/T_{psi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{di} \\ & + \begin{bmatrix} -K_{psi}/T_{psi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{tie\ ij} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x_1, x_2, x_3 는 각각 $\Delta f_i, \Delta P_{ti}, \Delta P_{gi}$ 이다. 그리고 출력 방정식은 식 (2)와 같다.

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. H_∞ 제어 이론과 제어기 설계

3.1 H_∞ 제어이론

H_∞ 제어 이론은 여러 설계요구 조건들을 시스템 전달함수의 H_∞ -놈(norm)을 최소화시키는 수학적 최적화 문제로 변환시켜 해결하는 방법이다. H_∞ 이론에서 성능척도인 H_∞ -놈은 주파수 영역에서 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\|G\|_\infty = \sup_w \bar{\sigma}_{\max} [G(j\omega)] \quad (3)$$

여기서, $\bar{\sigma}_{\max} [G(j\omega)]$ 는 $G(j\omega)$ 의 최대 특이치 (Maximum Singular Value)를 의미한다.

그림 2는 표준문제를 나타내는 블록선도이며 w, u, z, y 는 벡터치인 신호들이다. 여기서 w 는 외부로부터의 입력 신호로써, 명령신호, 외란 그리고 센서 노이즈로 구성될 수 있으며, u 는 제어 입력, y 는 측정된 출력, z 는 제어될 출력으로써 추정오차들, 필터된 실행기 신호들이다. 그리고 전달함수 $P(s)$ 는 가중함수를 포함하는 일반화 플랜트를 나

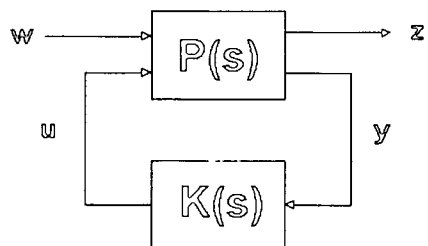


Fig. 2 Block diagram for H_∞ standard problem

타내며, $K(s)$ 는 제어기를 나타낸다. 여기서 전달행렬 $P(s)$ 와 $K(s)$ 는 유리함수(Real-Rational)이고, 유한 진분수(proper)형태 이다. 여기서, $P(s)$ 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 2에 의해서 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} z &= P_{11}(s)w + P_{12}(s)u \\ y &= P_{21}(s)w + P_{22}(s)u \\ u &= K(s)y \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 연립하여, u 와 y 를 소거하여 풀면 식 (6)과 같다.

$$z = [P_{11}(s) + P_{12}(s)K(s)(I - P_{22}(s)K(s))^{-1}] P_{21}(s)w \quad (6)$$

식 (6)은 외부 입력 변수 w 에서 z 로의 폐루프 전달함수이며, 이를 $P(s)$ 와 $K(s)$ 에 대한 선형 분수 변환(Linear Fractional Transformation : LFT) $F_l(P, K)$ 라고 한다. 여기서, $F_l(P, K)$ 는 식(7)과 같이 정의 되며, 식(6)은 식(8)로 간단히 나타낼 수 있다.

$$F_l(P, K) = P_{11}(s) + P_{12}(s)K(s)(I - P_{22}(s)K(s))^{-1} P_{21}(s) \quad (7)$$

$$z = F_l(P, K)w \quad (8)$$

이때, H_∞ 표준문제라는 것은 제어기 $K(s)$ 가 플랜트 $P(s)$ 를 안정하게 한다는 조건하에서, w 에서 z 로의 전달 함수 $F_l(P, K)$ 의 H_∞ -norm을 최소화시키는 진분수인 실 유리함수 형태의 제어기 $K(s)$ 를 구하는 것이다. 이것은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{minimize } \|F_l(P, K)\|_\infty \quad (9)$$

3.2 H_∞ 제어기 설계

실제로 H_∞ 제어기를 설계하기 위해서는 그림 3과 같이 특이값 루프 정형 방법을 이용하여 외란의 영향과 모델의 불확실성에 의한 영향을 고려하여야 한다.

3.2.1 외란 억제 문제

감도함수는 외란 w 로부터 출력 y 로의 전달 함수

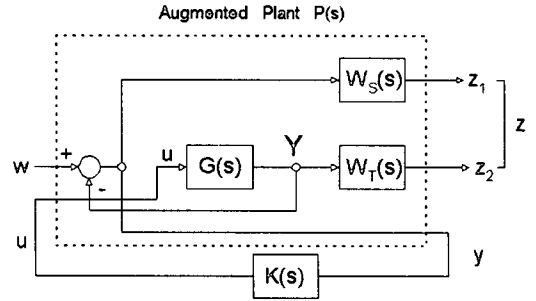


Fig. 3 Closed loop system with weighted functions

로서 식 (10)과 같고, $S(s)$ 의 특이치는 외란의 억제 정도를 낸다. 일반적으로 외란은 저주파수 영역에서 한정되어 있으므로, 외란 w 가 출력 y 에 영향이 최소화 되도록 감도함수 $S(s)$ 의 H_∞ -norm을 최소화 함으로서 루프를 안정화하는 제어기 $K(s)$ 를 설계할 수 있다. 그러나 외란이 에너지를 갖는 주파수 영역 외에서 감도를 최소화하는 것은 불필요한 잡음 증폭을 일으킬 수 있으며, 충분한 안정도 여유를 갖지 못하게 된다. 따라서 식 (11)과 같은 조건을 만족하는 외란이 에너지를 갖는 저주파수 영역에서 안정하며, 최소위상인 전달함수 $W_S(s)$ 를 가중시킴으로써 외란에 대한 감도를 최소화한다.

$$S(s) = [I + G(s)K(s)]^{-1} \quad (10)$$

$$\|S(j\omega) W_S(j\omega)\|_\infty < 1 \quad (11)$$

3.2.2 강인 안정성 문제

한편, 상보감도함수는 제어 시스템의 안정도 여유, 즉 모델의 불확실성과 관련된 함수로서 식 (12)와 같다. 모델 불확실성은 주로 고주파수 영역에서 에너지를 가지기 때문에 불확실성의 크기에 대해서 주파수에 따른 경계치를 고려하기 위해, 식 (13)을 만족하도록 전달함수 $W_T(s)$ 를 가중시킨다.

$$T(s) = G(s)K(s)[I + G(s)K(s)]^{-1} \quad (12)$$

$$\|T(j\omega) W_T(j\omega)\|_\infty < 1 \quad (13)$$

3.2.3 혼합감도 문제

일반적으로 외란에 대한 강인성을 나타내는 감도함수와 모델화 오차에 대한 강인성을 나타내는 상보감도 함수 사이에는 $S(s) + T(s) = I$ 인 관계가 있으므로, 외란에 대한 강인성을 증대시키는 일과,

모델화 오차에 대한 강인성을 증대시키는 일 사이에는 절충관계(trade-off)가 있다. 따라서, 감도함수와 상보감도함수는 외란 억제와 강인 안정성 조건을 만족하도록 선정해야 한다. 이를 위하여, 일반적으로 $W_S(s)$ 는 낮은 주파수에서 크고 높은 주파수에서는 작게 하며, $W_T(s)$ 는 낮은 주파수에서 작고 높은 주파수에서 크게 한다. 따라서, 감도함수 $S(s)$ 와 상보감도함수 $T(s)$ 를 동시에 고려한 문제를 혼합감도 문제라 하며, 그림 3과 같이 특이값 루프 정형 방법에 의해 H_∞ 제어를 설계 하면, w 에서 z 로의 전달함수 $F_l(P, K)$ 는 식 (14)와 같다.

$$F_l(P, K) = \begin{bmatrix} W_S(s) S(s) \\ W_T(s) T(s) \end{bmatrix} \quad (14)$$

따라서, 혼합감도 문제라는 것은 식 (14)와 같이 주파수 영역에서 가중된 감도함수 $S(s)$ 와 상보감도함수 $T(s)$ 의 H_∞ -놈을 동시에 최소화하는 제어를 설계하는 것이다. 즉 식 (15)를 만족하는 제어를 구하는 문제가 된다.

$$\min_{K(s)} \left\| \begin{bmatrix} W_S(j\omega) S(j\omega) \\ W_T(j\omega) T(j\omega) \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (15)$$

그림 3과 같이 $G(s)$ 와 $K(s)$ 를 정의하고, 식 (14)에 식 (10)과 식 (12)를 대입하여 선형 분수변환 $F_l(P, K)$ 를 다시 쓰면 식 (16)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F_l(P, K) &= \begin{bmatrix} W_S(s) S(s) \\ W_T(s) T(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} W_S(s) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -W_S(s)G(s) \\ W_T(s)G(s) \end{bmatrix} \\ &\quad \times K(s)[I - (-G(s))K(s)]^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

그리고 식(4)에 정의된 전달행렬 $P(s)$ 의 부분 행렬들은 식 (7)을 이용하면 식 (17)과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{11}(s) &= \begin{bmatrix} W_S(s) \\ 0 \end{bmatrix}, & P_{12}(s) &= \begin{bmatrix} -W_S(s)G(s) \\ W_T(s)G(s) \end{bmatrix} \\ P_{12}(s) &= [I], & P_{22}(s) &= [-G(s)] \end{aligned} \quad (17)$$

따라서, $G(s)$ 를 확장한 플랜트 $P(s)$ 의 전달 함수는 식 (18)과 같다.

$$\begin{aligned} P(s) &= \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} W_S(s) & -W_S(s)G(s) \\ 0 & W_T(s)G(s) \\ I & -G(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

H_∞ 제어 문제를 상태 공간 알고리즘을 이용하여 해를 구하기 위해서는, 전달함수 $P(s)$ 를 상태 방정식으로 나타내고, 이에 대한 대수 Riccati 방정식을 풀어서 원하는 제어를 구한다.

4. 부하주파수 제어에 대한 H_∞ 최적화 기법의 적용

본 논문에서는 외란 억제와 강인 안정성 제어를 동시에 고려한 혼합 감도 문제를 다룬다. 그러므로 가중함수를 포함한 확장된 계통모델은 그림 4와 같다.

제어기 설계시 제일 첫 번째 단계는 시스템의 변수에 큰 영향을 미치는 외란, 잡음, 불확실성이 에너지를 갖는 주파수 대역에서 감도함수와 페루프함수의 최대 특이치를 고려하여 가중함수를 선정한다. 시스템 출력이 외란의 영향을 최소화 되도록 $W_S(j\omega)$ 는 $\omega < 2 \text{ rad/sec}$ 에서 감도함수 조건이 $\bar{\sigma}[S(j\omega)] \leq -20 \text{ db}$ 을 만족하도록 식 (19)와 같이 선정하였다.

$$W_S(s) = \frac{s+20}{0.5s^2+s+0.001} \quad (19)$$

그리고 모델화 되지 않은 불확실한 모델에 대한

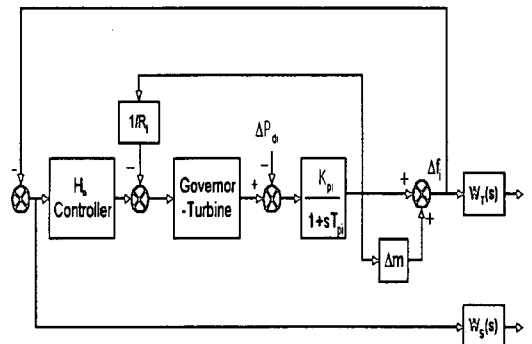


Fig. 4 Augmented power system model of i-area including weighted functions

시스템의 강인성을 향상시키기 위해 높은 주파수 대역에서 $\bar{\sigma}[T(j\omega)]$ 을 최소화하기 위해 가중함수 $W_T(j\omega)$ 는 식 (20)과 같이 선정하였다.

$$W_T(s) = \frac{10s^2 + 10s + 50}{0.1s^2 + 10s + 5000} \quad (20)$$

일반적으로 가중함수의 선정은 매우 중요한 문제가 되는데, 본 논문에서는 각 지역간의 상호간섭 작용을 무시하고, 연계선 전력량을 외부 입력으로 간주하여 각각의 지역에 대하여 제어기를 설계하였기 때문에 이러한 불확실성을 가중함수에 포함되도록 하기 위해, 가중함수는 알맞은 응답특성이 얻어질 때까지 시행 착오적인 방법으로 반복하여 선정하였다. 가중함수가 선정이 되고 나면 식 (1)과 같이 주어진 공칭 플랜트에 가중함수를 부가하여 식(18)과 같이 확장된 플랜트를 구성하고 최적의 γ 가 얻어질 때까지 반복하여 H_∞ 제어 문제의 해를 구한다. 이와 같이 H_∞ 제어 문제의 해를 구하는 단계를 요약하면 그림 5와 같다.

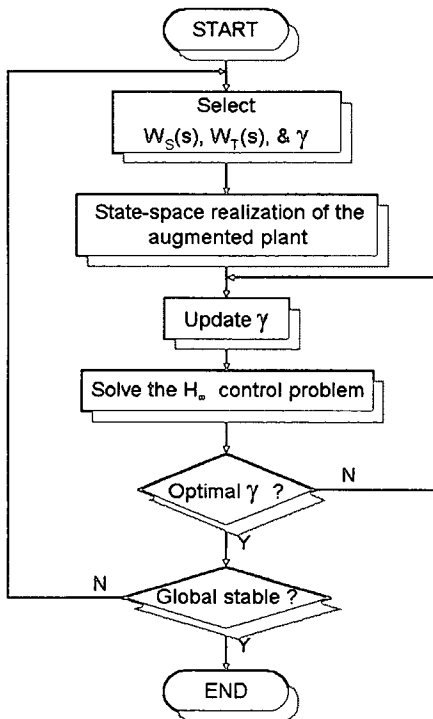


Fig. 5 Flowchart for the H_∞ controller design procedure

그림 5에 의한 절차를 통하여 설계된 제어기를 전달함수 형태로 나타내면 식 (21)과 같다.

$$K(s) = \frac{3.6957 \times 10^6 s^6 + 4.5159 \times 10^8 s^5 + 1.935 \times 10^{11} s^4}{s^7 + 7.0647 \times 10^8 s^6 + 4.0977 \times 10^6 s^5 + 1.215 \times 10^9 s^4} + \frac{4.1552 \times 10^{12} s^5 + 2.6508 \times 10^{18} s^2}{+ 1.9117 \times 10^{11} s^5 + 4.5472 \times 10^{12} s^2} + \frac{6.9377 \times 10^{18} s + 1.2386 \times 10^{14}}{+ 8.3401 \times 10^{12} s + 9.5776 \times 10^9} \quad (21)$$

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 H_∞ 제어 이론을 이용하여 시스템의 불확실성에도 불구하고 폐루프 시스템의 안정성을 유지하면서, 예측하지 못한 외부 외란에 대처할 수 있는 강인하고 성능이 우수한 제어기를 설계하여, 2지역 전력계통의 부하주파수 제어에 적용하였다. 설계된 제어기는 각각의 지역에 적용되었고, 각 발전기의 제어 입력은 load reference setpoint로서 조속기계에 적용되며, 이 입력을 조절함으로써 주파수를 조절하도록 하고 있다.

제한한 H_∞ 제어기의 외란 억제 성능과 강인성을 검토하기 위하여 외란이 발생한 경우와 계통 파라미터가 변동한 경우에 대하여, 제안한 제어기와 기존의 최적제어 및 PID 제어기를 각각 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하여 각각에 대한 동특성을 비교 고찰하였다. 여기서 사용된 최적제어는 문헌⁽⁶⁾과 같고, PID 제어기의 파라미터를 구하는 방법에는 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 시스템의 임계이득과 임계주기를 구하여 PID 파라미터를 쉽게 구할 수 있는 Ziegler-Nichols 방법을 이용하였다. 본 논문에서 사용된 계통 파라미터는 표 1과 같다.

Table 1 System parameters

T_{gi}	=	0.08	[s]
T_{ti}	=	0.3	[s]
R_i	=	2.4	[Hz/p.u.MW]
T_{psi}	=	20	[s]
K_{psi}	=	120	[Hz/p.u.MW]
T_{ij}^*	=	0.545	[p.u.MW/Hz]
P_{tiemax}	=	0.1	[p.u.MW]
P_{ri}	=	2000	[MW]
δ_{ij}^*	=	30	[deg]
a_{ij}	=	$-Pr_j / Pri = -1$	

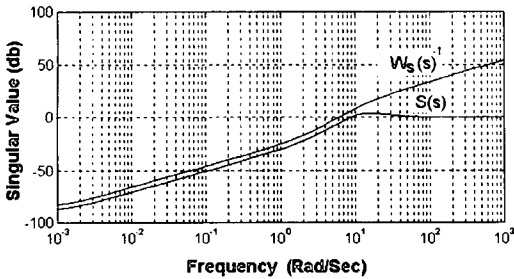


Fig. 6 Sensitivity function $S(s)$ and $W_S(s)^{-1}$ of H_∞ control design

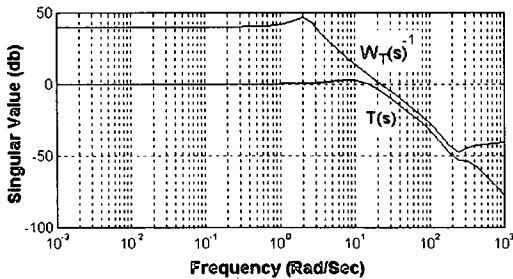


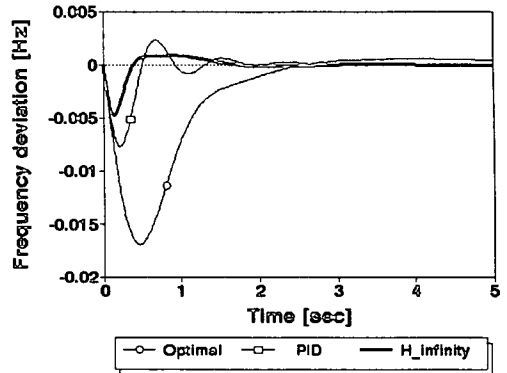
Fig. 7 Complementary sensitivity function $T(s)$ and $W_T(s)^{-1}$ of H_∞ control design

그림 6은 설정된 가중함수 $W_S(s)$ 와 감도함수 $S(s)$ 와의 관계를 보드 선도에 나타내고 있으며, 그림 7은 $W_T(s)$ 와 상보감도함수 $T(s)$ 와의 관계를 보여주는 보드선도이다. 그림 6과 7은 식 (11)과 식 (13)을 만족하도록 설정이 되었다. 감도함수 $S(s)$ 는 저주파수 영역에서 적으므로 외란 제거 성능이 좋고, 상보감도함수 $T(s)$ 는 저주파수 영역에서 1이므로 정상상태 오차 없이 기준 명령을 잘 추종하고, 고주파수 영역에서 충분히 roll-up되므로 측정 잡음 제거 성능이 좋고, 모델화 안된 동특성 효과가 적다는 것을 알 수 있다.

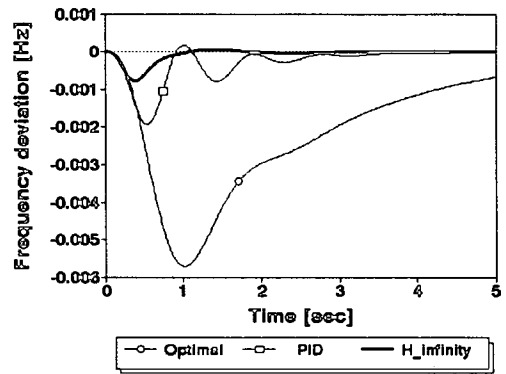
5. 1 사례 연구 1

첫 번째 사례연구로는 최적제어, PID제어와 같은 종래의 제어 방식과 제안한 H_∞ 제어기의 제어 성능을 비교 검토하여 고찰하였다. 사례연구의 조건으로는 부하 외란($\Delta P_{d1} = 0.01$ [p. u.])이 1지역에서만 지속적으로 발생한 경우로 하였다.

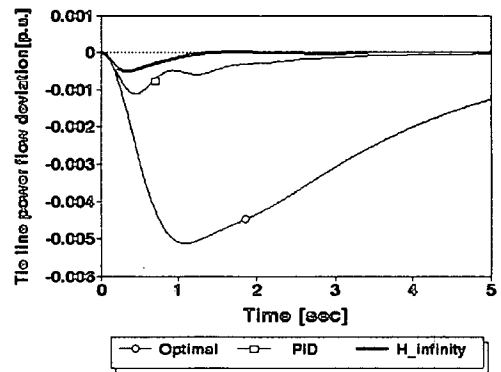
그림 8은 제안한 H_∞ 제어기의 우수성을 검증하기 위해 종래의 제어기법인 최적제어, PID 제어기



(a) Δf_1



(b) Δf_2



(c) ΔP_{tie12}

Fig. 8 Dynamic response of power system by Optimal, PID and H_∞ controller ($\Delta P_{d1} = 0.01$ [p. u.]

에 대한 1, 2지역의 주파수 편차와 연계선 조류 편차의 응답특성을 비교하여 나타내고 있다.

먼저 그림 8의 (a)는 1지역의 주파수 편차량의

응답을 나타내고 있으며, 주파수의 최대 편차량을 비교해 보면, 최적 제어기법은 16.899×10^{-3} [Hz], PID제어는 7.649×10^{-3} [Hz] 로써 PID제어가 최적제어 보다 약 55%의 감소를 나타내었으며, 제안한 H_∞ 제어방식을 사용하였을 때의 1지역의 주파수 최대 편차량은 4.731×10^{-3} [Hz]로 최적제어 보다는 약 72%, PID제어 보다는 약 38%의 감소하여, 비교되어진 타제어 기법들 보다는 주파수 최대 편차량을 크게 경감시킬 수 있었다.

또한 초기 과도 상태에서 빠른 응답을 나타내고 있을 뿐 아니라 정정시간 또한 빨라짐을 알 수 있다.

그림 8의 (b)는 2지역의 주파수 편차량의 응답특성을 나타내고 있다. 여기에서도 제안된 H_∞제어기가 비교되어진 최적제어 및 PID제어보다 주파수 최대 편차량이 감소되었을 뿐만 아니라 정정시간 또한 현저히 줄일 수 있었다.

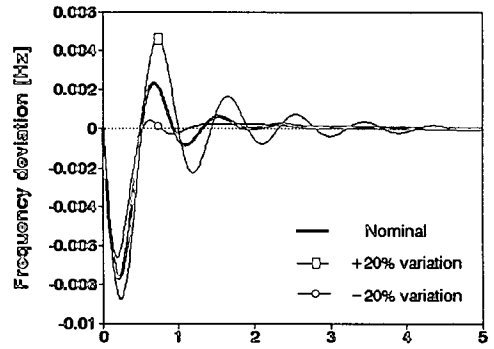
그림 8의 (c)는 연계선 조류 편차량의 응답특성을 나타내고 있다. 역시 제안한 H_∞제어기가 최적제어 및 PID제어보다 연계선 조류의 최대 편차량이 현저히 감소되었고, 정정시간 역시 현저히 감소하였다. 이상의 결과로부터 본 논문에서 제안한 H_∞제어기는 종래의 제어방식들 보다 1,2 지역의 주파수 최대 편차량 및 정정시간을 감소시킬 수 있었고, 연계선 조류의 최대 편차량 및 정정시간 또한 현저히 감소되어짐을 알 수 있었다.

5.2 사례연구 2

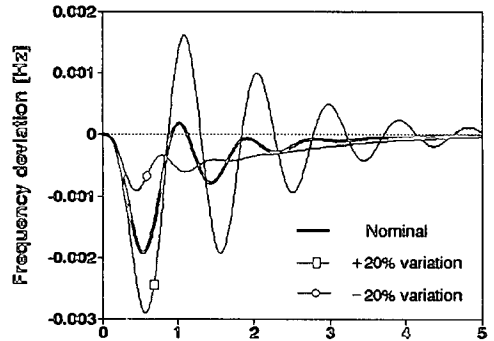
두 번째의 사례연구로서 제안한 H_∞ 제어기의 강인성을 검증하기 위해서 계통내의 파라미터가 변동한 경우에 종래의 제어 기법인 최적제어 및 PID 제어를 각각 적용한 경우에 대하여 동특성 응답을 비교 고찰하였다. 사례연구 조건으로는 파라미터 T_{gi}, T_{ti}, R_i, K_{psi}, T_{psi}, T_{ij}가 설정된 값에서 동시에 ±20%가 변동하였을 경우로 하여 시뮬레이션 하였다. 이때 부하 외란($\Delta P_{d1}=0.01$ [p.u.])은 1지역에서만 지속적으로 발생하였을 경우로 하였다.

그림 9, 그림 10, 그림 11은 각각 PID제어, 최적제어, H_∞제어기법을 이용하였을 경우에 파라미터 변동시에 대한 1, 2지역의 주파수 편차와 연계선 조류편차에 대한 동특성 응답을 나타내고 있다.

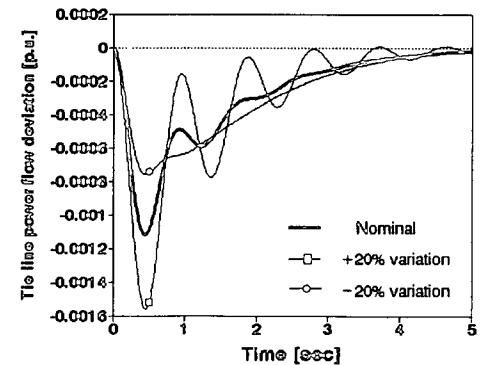
그림 9의 (a)는 1지역의 주파수 편차량에 대한 응답을 나타내고 있다. 파라미터 증가시 주파수 편차량의 진동이 심해져 정정시간이 매우 길어졌으며, 파라미터의 감소시에는 주파수 편차량의 진동



(a) Δf_1



(b) Δf_2



(c) ΔP_{tie12}

Fig. 9 Dynamic response of power system by PID controller under parameter variations

이 매우 감소하여 빠른 정정시간을 가졌다. 그러므로 PID제어의 경우 주파수 동특성 응답이 파라미터의 증감에 따라 매우 민감한 특성을 보였다.

그림 9의 (b)는 2지역의 주파수 편차량에 대한 응답을 나타내고 있다. 2지역의 주파수 편차량 또한 파라미터의 변동에 매우 민감한 동특성 응답을 보이고 있다.

그림 9의 (c)는 연계선 조류 편차량에 대한 응답을 나타내고 있다. 연계선 조류편차량 역시 파라미터의 변동에 의해 민감한 동특성 응답을 보이고 있다. 그러므로 PID제어는 파라미터 변동에 대해 민감한 응답을 보이고 있어 강인성이 떨어진다고 할 수 있다.

그림 10은 최적제어방식을 사용하였을 경우에, 파라미터 변동시 1, 2지역의 주파수 편차와 연계선 조류편차에 대한 동특성 응답을 나타내고 있다. 그림 10의 (a)는 1지역의 주파수 편차량에 대한 응답을 나타내고 있고, 그림 10의 (b)는 2지역의 주파수 편차량에 대한 응답을 나타내고 있으며, 그림 10의 (c)는 연계선 조류 편차에 대한 응답을 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 PID제어 방식보다는 진동의 증감이 심하지 않으나 1, 2지역의 주파수 편차의 정정시간이 매우 길어졌고, 연계선 조류편차에 대한 정정시간도 매우 길어졌다.

그림 11은 제안한 H_{∞} 제어기를 사용하였을 경우 1지역 및 2지역의 주파수 편차량과 연계선 조류 편차량에 대한 동특성 응답을 나타내고 있다. 먼저 그림 11의 (a)는 1지역의 주파수 편차량에 대한 응답을 나타내고 있는데, 그림에서도 알 수 있듯이 파라미터의 증감시 주파수 편차량의 초기 과도 상태에서 조금의 변동을 보이고 있을 뿐 정정시간은 파라미터가 변동하기 전과 거의 일치하였다.

그림 11의 (b)는 2지역의 주파수 편차량에 대한 응답을 나타내고 있다. 2지역의 주파수 편차량 또한 파라미터의 증감시 초기 과도상태에서 조금의 차이만 있을 뿐 정정시간에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

그림 11의 (c)는 연계선 조류편차에 대한 응답을 나타내고 있다. 역시 파라미터의 변동에 대하여 매

우 강인한 응답을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러므로 제안한 H_{∞} 제어기는 파라미터의 변동에 대하여 매우 강인함을 알 수 있었다.

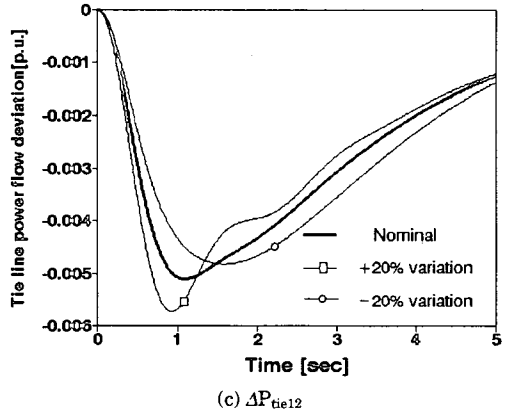
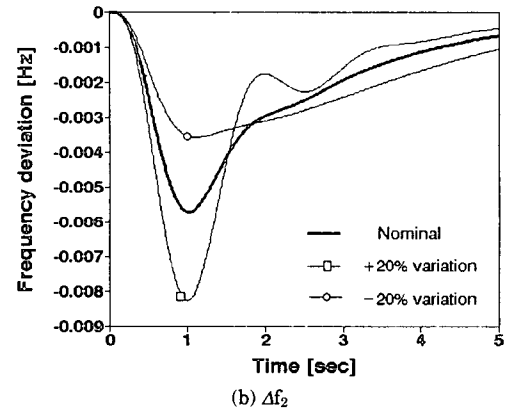
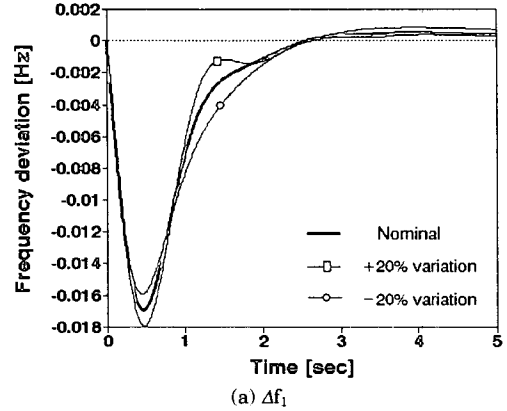
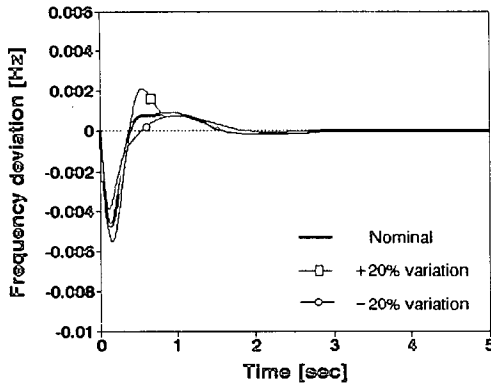
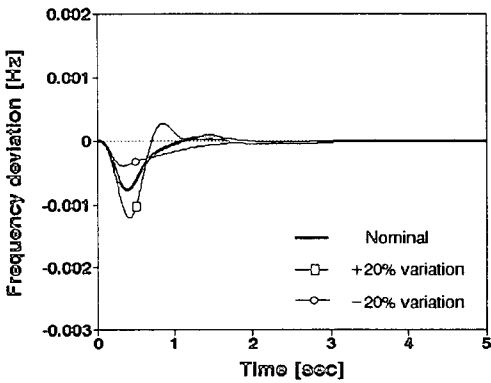


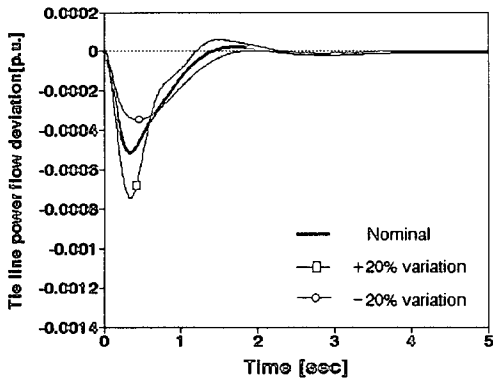
Fig. 10 Dynamic response of power system by Optimal controller under parameters variation



(a) Δf_1



(b) Δf_2



(c) ΔP_{tie12}

Fig. 11 Dynamic response of power system by H_∞ controller under parameters variation

6. 결 론

본 논문에서는 2지역으로 연계된 전력시스템의 부하주파수 제어를 위해 H_∞ 제어 이론을 이용하여

제어기를 설계하였다. 제안한 H_∞ 제어기는 다양한 부하의란에 대해서 외란의 억제능력이 뛰어나도록 하고, 실제 계통 모델과 수학적인 계통 모델사이의 다소간의 차이에도 불구하고 제어 목적을 달성할 수 있도록 설계하였다. 이를 위하여 혼합감도 최소화법을 이용한 H_∞ 제어기를 설계하였다. 제어기 설계를 용이하게 하기 위하여 하나의 지역에 대하여 제어기를 설계하여 2지역 전력계통에 적용하였다. 이를 위하여 연계선 전력 편차량을 외부 외란으로 간주하여 제어기를 설계하였다.

제안한 H_∞ 제어기와 종래의 제어기법인 최적제어 및 PID제어를 다양한 부하 외란이 발생할 때와 계통의 파라미터가 변동하였을 때의 동특성 응답을 비교 고찰하였다. 각각의 사례연구를 통하여 1, 2지역의 주파수 편차와 연계선 조류 편차의 동특성을 비교 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부하 외란이 1지역에 지속적으로 발생하였을 경우 제안한 H_∞ 제어기는 종래의 제어 방식들 보다 외란의 영향을 덜 받아 주파수 최대 편차량 및 정정시간을 줄일 수 있었다.
- 2) 계통의 동작 조건의 변화로 인한 파라미터 변동에 대해서 PID제어 방식은 매우 민감한 응답특성을 보였고, 최적제어의 경우 PID제어 방식보다는 덜 민감하였지만 정정시간의 차이가 다소 심하게 나타났다. 그러나 제안한 H_∞ 제어기는 파라미터 변동에 대해서 1, 2지역의 주파수 편차 및 연계선 조류 편차의 초기 과도상태만 조금의 차이를 보일 뿐 정정시간에는 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 따라서 제안한 H_∞ 제어기는 파라미터 변동에 대해서 강인 안정성을 제공함을 알 수 있었다.

이러한 폭넓은 부하변동과 파라미터 변동에 대하여 외란억제와 강인 안정성이 우수한 것은 계통의 성능조건을 만족하는 가중함수들이 매우 강인하게 잘 설정된 결과라고 할 수 있다.

따라서 제안한 H_∞ 제어기는 광범위하고 복잡 대형화되고 있는 전력 계통의 불확실성을 효과적으로 취급할 수 있기 때문에 간단한 계통 모델만으로 제어기를 설계하여도 실제 전력계통의 부하주파수제어에 매우 유용하리라 생각된다.

참고문헌

- [1] Allen. J. Wood and Bruce F. Wollenberg, "Power generation, operation and control", John Wiley & Sons, 1984.
- [2] P. Kunder, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [3] Kia Yong Lim, Youyi Wang and Rujing Zhou, "Decentralised robust Load-frequency control in coordination with frequency-controllable HVDC links", Electrical Power & Energy System. Vol. 19, No. 7, pp.423~431, 1997.
- [4] 정형환, 주석민, 정동일, 김상효, 이정필, "새로운 FPID 제어기를 이용한 2지역 계통의 부하 주파수 제어", 대한전기학회 논문지, Vol. 47, No. 5, pp. 541~548, 1998.
- [5] Y. Mizutani, "Suboptimal control for load frequency control of P-I type using area-decomposition and aggregation methods", IEE J., Vol. 100, No. 1, pp.9~16, 1980.
- [6] Charles E. Fosha, Olle I. Elgerd, "The megawatt -frequency control problem : A new approach via optimal control theory", IEEE Trans., on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 4 pp. 563~573, 1970.
- [7] F. Beaufay, Y. Abdel-Magid, B.widrow, "Application of neural networks to load-frequency control in power system", Pergamon contributed article neural networks, Vol. 7, No. 1, pp. 183~194, 1994.
- [8] F. K. Agbenyo, N. Yorino, H. sasaki, "An improved H_{∞} power system stabilizer", T. IEE Japan, Vol. 116-B, No. 12, pp. 1470~1477, 1996.
- [9] Y. Uriu, M. Ohasi, F. Koyanagi, "Stabilization for multi-machine power system by decentralized generator control strategy using H_{∞} control theory", T. IEE japan, Vol. 116-B, No. 1, pp.7~13, 1996.
- [10] R. N. Yalwarker, A. Sambandan, " H_{∞} controller for a CSI-FED induction motor drive system", Electric Machine and Power Systems, 25, pp. 621~633, 1997.
- [11] J. M. Maciejowski, "Multivariable feedback design", Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [12] John C. Doyle, Keith Glover, Pramod P. Khargonekar, "State-state solutions to standard H_2 and H_{∞} control problems", IEEE Trans., on Automatic control, Vol. 34, no. 8 pp.831~847, 1989.
- [13] R. Y. Chiang and M. G. Sofonov, "Robust control toolbox User's guide", The Maths Works Inc., 1992.
- [14] Kemin Zhou, "Essentials of robust control", Prentice-Hall. 1998.
- [15] Masayoshi Furuhashi, Takeru Saito and Goro Fujita, "Load frequency control of multi-area power system on H_{∞} control theory", 日本電氣學會全國大會論文集, pp.129~130, 1996.
- [16] K. J. Astrom, T. Hugglund, "Automatic tuning of PID controller", Instrument Society of America, 1988.

제 자 소개



정명완(鄭明完)
 1941년 1월 19일 생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동아대 공대 전기공학과 교수. 당학회 회원



김상효(金相孝)
 1965년 8월 25일 생. 1992년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동아대학교 부설 정보기술연구소 특별연구원. 당학회 회원



이정필(李丁必)
 1971년 8월 19일 생. 1997년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중. 당학회 회원



한길만(韓吉萬)
 1972년 7월 3일 생. 1999년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정 재학중. 당학회 회원