

병렬형 구조의 적응 퍼지 제어기를 이용한 전력계통 안정화 장치의 설계

Design of the Power System Stabilizer Using Parallel Structured Fuzzy Adaptive Controller

조영완*(曹永完), 김승우***(金承禹), 박민용*(朴民用)

* 연세대학교 전자공학과

서울시 서대문구 신촌동 134

** 순천향대학교 제어계측공학과

충청남도 은양우체국 사서함 97호

Abstract

In this paper, using a new adaptive fuzzy controller we have designed a power system stabilizer. The adaptive fuzzy controller constitutes of several parallel fuzzy controller. Each of them can maintain the robust stability for a specified parametric uncertainty region. If the parametric variation is so large that a rule-base cannot cope with that parametric region, the other appropriate rule-base is selected to control. Applying adaptive fuzzy controller to single machine infinite bus system, we simulate the stability of the system and compare the performance with conventional PSS controller.

1. 서론

최근 원자력 발전소와 같은 대용량 발전설비가 지역적으로 편재됨에 따라 전력 계통의 계획 및 운용에 안정도 유지문제가 크게 대두되고 있다. 이러한 전력 계통의 안정도 향상을 위해 동기 발전기의 동특성 개선기법이 다양하게 연구되어 왔는데 [1,2], 그 중에서 여자제어를 이용한 연구가 집중적으로 이루어져 왔다.[3] 그러나 전력계통이 대규모, 복잡화됨에 따라 갑작스런 부하변화나 발전기, 송전선로에서의 고장 발생 등으로 계통에 교란이 생기는 경우, 특정 운전점에서 적용되던 고정이득을 갖는 여자제어기는 만족할 만한 제어특성을 얻을 수 없게 되었다. 이를 개선하기 위하여 다양한 운전점에 대해서 여자제어기의 성능이 항상 최적의 상태로 유지되도록 제어기의 파라미터를 온라인으로 자동 조절하는 자기동조 제어이론을 이용한 연구가 진행되어 왔으며 상당히 만족할 만한 결과를 보여주고 있다.[4] 그러나 이러한 적용제어기들은 그 방법론에 있어서 과다한 계산 시간을 필요로 하여 실시간 제어가 어렵고 복잡한 수학 구조 때문에 제어기의 설계와 구현이 어려우며 수렴성에 한계를 보이는 문제점들을 가지고 있으므로 실제 적용이 어렵다.

따라서 급격히 변화하는 발전기의 동적특성에 실시간으로 대처할 수 있는 보다 간단한 구조의 적용 제어 방법이 요구된다. 본 논문에서는 기존의 적용 제어기가 갖고 있는 문제점을 극복하기 위하여 보다 간단한 구조를 갖는 새로운 구조의 퍼지 적용 제어기를 이용한다. 이 적용 퍼지 제어기는 복수개의 제어규칙군이 병렬 구조로 연결되어 있으며 각각의 제어규칙군은 변화하는 전력계통의 동특성의 일정영역에 대해 강건한 안정성을 유지하며 제어하고 동특성이 한 제어규칙군의 안정영역을 벗어나면 다른 제어규칙군에 의해 안정성이 유지되도록 제어된다. 이러한 기법을 1기 무한대 모선계통에 적용하여 동기 발전기의 동요각 등의 동특성을 시뮬레이션을 통해 구해서 기존의 각속도 입력 방식 안정화 장치를 설치한 IEEE TYPE I 여자 제어기를 적용한 경우와 비교하여 효율성을 검증한다.

2. 계통의 정식화

전력계통의 동특성을 해석하는데 필요한 계통의 모델로 제

통의 기계적 입력을 고정시킨 후 ($\Delta T_m = 0$) 평형상태에서 선형화한 1기 무한대 모선 계통의 모델을 사용한다. 저주파 진동을 해석하기 위하여 혼히 사용하는 1기 무한대 모선 계통의 4차 모델의 블록선도는 다음 그림1과 같이 표현된다.[5]

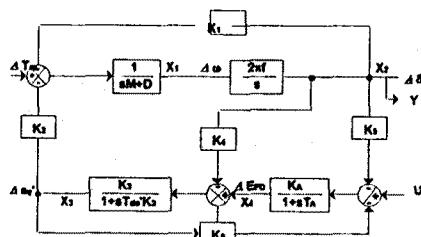


그림 1 선형화한 1기 무한대 모선 계통의 모델

여기서 $\frac{K_3}{1+sT_d/K_3}$ 는 제자회로 부분의 전달함수이고

$\frac{K_A}{1+sT_A}$ 는 여자기 모멘트의 전달함수이다. 그림1과 같은 1기 무한대 모선 모델은 식(2-1)과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ 2\pi f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_1}{T_d} & -\frac{1}{T_d K_3} & \frac{1}{T_d} \\ 0 & -\frac{K_A K_3}{T_A} & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} U, \quad Y = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서, $X_1 = \Delta\omega$, $X_2 = \Delta\delta$, $X_3 = \Delta\theta'_e$, $X_4 = \Delta E_{FD}$

3. 적응 안정화 장치의 설계

3.1 병렬형 구조의 적용 퍼지 제어기[7]

3.1.1 퍼지 멀티플 바이스 제어기의 구조

퍼지 제어기는 강인한 특징을 가지고 있는 것이 알려져 있고 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 강인함에는 한계가 있어서 제어 대상 시스템의 파라미터 변화가 그 한계를 넘어서게 되면 강인한 안정성을 보장되지 않게 된다. 이같은 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 각기 다른 강인

한 안정 영역을 갖는 여러개의 제어기를 병렬로 연결하여 전체 강인한 안정 영역을 넓히는 방법을 사용하여 제어 대상 시스템의 파라미터의 큰 변화에도 충분히 대처할 수 있는 멀티 룰베이스를 이용한 퍼지 적용 제어기를 이용한다.

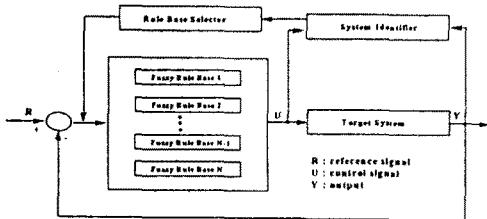


그림2 멀티룰 베이스 구조를 이용한 적용 퍼지 제어기

새로운 적용 제어기는 퍼지 멀티 룰 베이스 제어기와 적합한 룰베이스를 선택하기 위한 시스템 인식기로 구성된다. 대상 시스템의 파라미터의 변화는 시스템 인식기에 의하여 관측되고 관측된 파라미터의 불확실성에 대처할 수 있는 적합한 강인한 안정 영역을 갖는 퍼지 룰 베이스가 선택된 후에 선택된 퍼지 룰 베이스에 의해서 피드백 제어가 수행된다.

시스템 인식기는 대상 시스템의 특성 변화를 관측하고 관측된 변화량에 가장 적합한 퍼지 룰 베이스를 선택한다. 시스템 인식기는 매 샘플링 주기마다 대상 시스템을 관측해서 현재의 퍼지 룰 베이스가 적합한 제어기인지를 판단하고 적합하지 않으면 다른 적합한 퍼지 룰 베이스로 교체한다.

3.1.2 멀티룰 베이스 퍼지 적용 제어기의 설계 방법

제어 대상 시스템의 전체 파라미터 불확실성 영역은 여러 개의 하이퍼큐브의 형태로 나눌 수 있고 각각의 불확실 영역은 서로 다른 퍼지 룰 베이스에 의하여 제어되어 전체 멀티 룰 베이스 제어기는 제어 대상 시스템의 모든 파라미터 불확실성을 대처할 수 있다. 멀티 룰 베이스 제어기의 설계 방법은 다음과 같다.

단계 1 : 제어 대상 시스템의 전체 파라미터 불확실성을 측정한다. 일반적으로 이는 실험으로부터 측정 가능하다.

단계 2 : 첫번째 퍼지 룰 베이스의 구조를 결정하고 극점 할당(pole assignment)이나 근궤적(root locus)방법을 이용하여 룰 베이스의 파라미터를 결정한다. 이제 공통 Lyapunov 행렬을 구하여 전체 시스템의 안정도를 평가한다. 만약 안정도가 보장되지 않는다면 첫번째 룰 베이스의 파라미터를 다시 설계 한다.

단계 3 : 첫번째 퍼지 룰 베이스가 보장할 수 있는 강인한 안정 영역을 계산하고 주어진 강인한 안정 영역을 한변의 길이가 $\frac{2\pi}{\sqrt{n}}$ 인 하이퍼큐브의 형태로 변환한다.

$$\Delta A_{\text{root}} = \begin{bmatrix} \Delta a_1 & \Delta a_2 & \cdots & \Delta a_n \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

단계 4 : 제어 대상 시스템의 전체 파라미터 불확실성을 단계 3에서 구한 하이퍼큐브과 같은 크기의 N개의 하이퍼큐브으로 분할한다.

단계 5 : 단계 4에서 구한 하이퍼큐브의 각각에 대해서 이를 담당하는 서로 다른 N개의 퍼지 룰 베이스를 설계한다. 만약 Δa_i 공간내에서 i번째의 하이퍼큐브형 파라미터 불확실성의 중심 c_i 가 식 3.2와 같이 표현된다면

$$\Delta A_i = \frac{r}{\sqrt{n}} \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & \cdots & \cdots & m_n \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

i번째 하이퍼큐브형 파라미터 불확실성에 대처하는 강인한 특성을 갖는 i번째 퍼지 룰 베이스의 행렬 H_i^t 은 다음 식에 의해 첫번째 룰 베이스로부터 설계될 수 있다.

$$H_i^t = H_1^t - (B^T B)^{-1} B^T \Delta A_i \quad (3.3)$$

3.2 1기 무한대 모션 계통을 위한 퍼지 적용 제어기의 설계

갑작스런 외란으로 계통에 교란이 생겨 동특성이 변하는 경우 이에 대처할 수 있는 적용 제어기를 3.1절에서 설명한 병렬형 구조의 퍼지 적용 제어기를 이용하여 설계한다.

단계1 : 제어 대상 시스템의 전체 파라미터의 불확실성을 측정한다. 실제 전력계통에 있어서의 파라미터 변화는 실증하기 어려운 점이 있으므로 본 논문에서는 표1에 주어진 값들 기준으로 ±50% 범위에서 변동한다고 가정한다. 식(2.1)에 주어진 상태방정식을 퍼지 적용 제어기를 적용할 수 있는 형태인 Canonical 형태의 이산 상태방정식으로 변환하고 각 파라미터의 변화를 계산하면 다음과 같다.

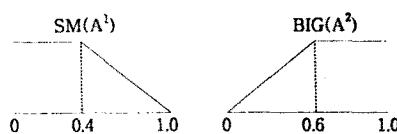
$$A = \begin{bmatrix} 2.67 & -3.0614 & 1.6543 & -0.3595 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$2.2700 \leq \Delta a_1 \leq 3.7500 \quad -3.4114 \leq \Delta a_2 \leq -2.1380 \\ 1.3752 \leq \Delta a_3 \leq 2.3270 \quad -0.5210 \leq \Delta a_4 \leq -0.2406$$

단계2 : 설계하고자 하는 퍼지를 베이스 구조는 다음과 같다.

$$R^1 : \text{If } x(k) \text{ is } A^1, \text{ then } u^1(k) = k_1^1 x(k) + k_2^1 x(k-1) + k_3^1 x(k-2) + k_4^1 x(k-3)$$

$$R^2 : \text{If } x(k) \text{ is } A^2, \text{ then } u^2(k) = k_1^2 x(k) + k_2^2 x(k-1) + k_3^2 x(k-2) + k_4^2 x(k-3)$$



전체 퍼무프의 전달특성이 다음과 같게 되도록 극점 할당에 의해 첫번째 룰 베이스를 설계한다.

$$\text{If } x(k) \text{ is SM, then the characteristic equation is} \\ z^4 - 2.65z^3 + 2.605z^2 - 1.125z + 0.18 = 0$$

$$\text{If } x(k) \text{ is BIG, then the characteristic equation is} \\ z^4 - 0.53z^3 + 0.101z^2 - 0.0082z + 0.0002 = 0$$

첫번째 룰 베이스는 다음과 같이 설계된다.

$$\text{If } x(k) \text{ is SM, then } H_1^t = [-0.02 \ 0.4564 \ -0.5293 \ -0.1205]$$

$$\text{If } x(k) \text{ is BIG, then } H_2^t = [-2.14 \ 2.9604 \ -1.6461 \ 0.3593]$$

단계3 : 강인한 안정 영역 ΔA_{root} 를 계산한다.

첫번째 퍼지 룰 베이스가 보장할 수 있는 안정성 영역은 한변의 길이가 0.848이 되는 4차원 하이퍼스피어가 된다. 즉, 식 (3.1)에서

$$-0.424 \leq \Delta a_i \leq 0.424$$

단계4 : 전력계통행렬의 전체 파라미터의 불확실성을 그림3과 같이 분할한다.

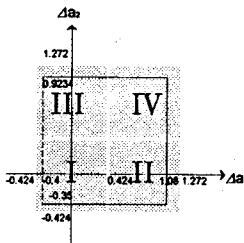


그림 3 전체 파라메터 불확실성 영역의 분포

단계5 : 두번쨰 틀베이스에서 네번쨰 틀베이스까지 설계한다.

틀베이스2 (영역 II) : $\Delta a_1 = 0.848$, $\Delta a_2 = 0$

$$H_1^1 = [-0.868 \quad 0.4564 \quad -0.5293 \quad -0.1205]$$

$$H_2^1 = [-2.988 \quad 2.9604 \quad -1.6461 \quad 0.3593]$$

틀베이스3 (영역 III) : $\Delta a_1 = 0$, $\Delta a_2 = 0.848$

$$H_3^1 = [-0.02 \quad -0.3916 \quad -0.5293 \quad -0.1205]$$

$$H_3^2 = [-2.14 \quad 2.1124 \quad -1.6461 \quad 0.3593]$$

틀베이스4 (영역 IV)

$$H_4^1 = [-0.868 \quad -0.3916 \quad -0.5293 \quad -0.1205]$$

$$H_4^2 = [-2.988 \quad 2.1124 \quad -1.6461 \quad 0.3593]$$

4. 시뮬레이션 및 결과

전력 계통이 갑작스런 교란이 생기는 경우 병렬형 구조의 적용 퍼지 제어기가 강건한 안정성을 유지하며 변화하는 계통의 동특성에 대처할 수 있음을 그림1에 나타낸 1기 무한대 모선 계통에 대해 기존의 각속도 입력 방식 안정화 장치를 설치한 여자제어기를 적용한 경우와 비교하여 그 효용성을 검증하였다. 계통의 동특성 변화는 선형화 모형의 계수 ($K_1 \sim K_6$)의 변화로 표현하였다. 이를 각 파라메터의 초기 상태는 표1과 같으며 이를 파라메터가 어느 순간 ($t = 5$) 변화했을 때 적용 퍼지 안정화 장치와 기존의 PSS를 이용한 안정화 장치의 출력 변화를 시뮬레이션하였다. 비교를 위하여 사용한 여자제어기는 IEEE TYPE1 모델에 속도 입력 방식 안정화 장치를 추가한 것이다.

표1 선형화 모형의 개수 및 발전기의 제정수

K1 ~ K6	$K_1=1.609$	$K_2=1.665$
	$K_3=0.323$	$K_4=2.535$
	$K_5=0.025$	$K_6=0.285$
	$M=3.2$	$T_{do}=5.27$
발전기 정수	$D=1.35$	$X_d=1.801$
	$X_d'=0.278$	$X_q=1.726$
여자기 정수	$K_a=150$	$T_a=0.05$

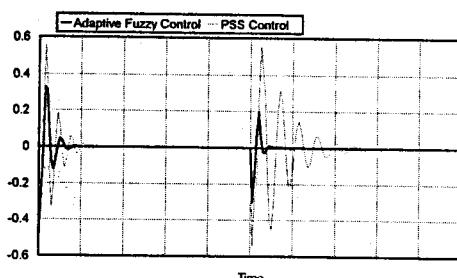


그림 4 비교적 작은 외란이 가해진 경우의 출력

Case 1 $K_1 \sim K_6$ 의 변화가 비교적 적은 경우

$$K_1=1.3, K_2=1.45, K_3=0.28, K_4=2.14, K_5=0.03, K_6=0.25$$

그림4는 $K_1 \sim K_6$ 가 표1과 같은 초기 상태에서 $t = 5$ 순간에 가해진 외란으로 선형화 모형의 계수가 위와 같이 비교적 적게 변했을 때의 제어기의 출력변화를 나타낸 것으로 여자제어에 의한 제어 결과는 약간의 진동을 거친 후 다시 안정해지고 있고 적용 퍼지 제어기에 의한 출력 변화는 여자제어기에 의해 비교적 적은 진동 후에 빠른 시간에 안정성을 회복하고 있다.

Case 2 $K_1 \sim K_6$ 의 변화가 비교적 큰 경우

$$K_1=2.04, K_2=1.25, K_3=0.57, K_4=1.83, K_5=0.02, K_6=0.32$$

계통에 가해진 비교적 큰 외란으로 계통의 상태 행렬이 비교적 크게 변화하는 경우 고정된 이득을 갖는 여자제어기는 그림5에서도와 같이 외란으로 인하여 그 출력이 진동 발산하게되어 안정성을 잃어버리지만 병렬형 구조의 적용 퍼지 제어기는 파라메터 변화에 대해 틀베이스를 바꾸어서 제어하므로 안정성을 유지하고 있다.

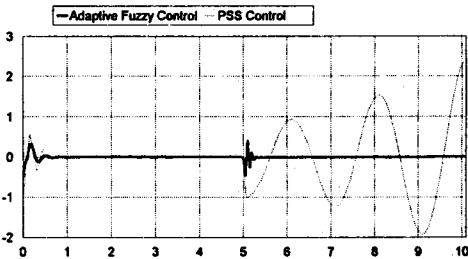


그림 5 비교적 큰 외란이 가해진 경우의 출력

5. 결론

기존의 적용 제어방법들은 실시간 처리, 설계 방법 및 구현의 어려움 등의 문제로 실제 환경에서의 적용이 어려웠다. 이러한 기존의 적용 제어기가 가지고 있는 문제점을 극복하는 전력계통 안정화 제어기의 설계를 위해 병렬형 구조의 퍼지 적용 제어기를 이용하였다. 적용 퍼지 제어기를 적용한 방식의 성능을 IEEE TYPE1 모델에 속도 입력 방식 안정화 장치를 추가한 여자제어기를 적용한 경우와 비교하였으며 계통에 갑작스럽게 가해지는 외란에 잘 대처하고 있는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] R.J.Fleming, M.A.Mohan, K.Parvatisum, "Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power Systems," IEEE Trans. on PAS Vol. PAS-100, No.5, pp.2329-2333, May 1981
- [2] O.H.Abdalla, et al., "Coordinated Stabilization of Multimachine Power System," IEEE Trans. on PAS-103, No.3, pp.483-491, March 1984
- [3] Tutorial Course, "Power System Stabilization VIA Excitation control," 1981
- [4] A.Ghosh, G.Ledwich, etc, "Power System Stabilizer Based on Adaptive Control Techniques," IEEE Trans. on PAS-103, No.5, pp.1983-1989, March 1984
- [5] Yao-nan Yu, "Electric Power System Dynamics," ACADEMIC PRESS, 1983
- [6] 이홍재, 박영문, 임찬호, "퍼지형 안정화 제어기의 비선형 특성에 관한 연구," 전기공학회 논문지, Vol.42, No.11, 1993
- [7] 김승우, 김은태, 박민용, "퍼지 제어기의 강인성을 이용한 새로운 퍼지 적용 제어기의 설계," 전자공학회 논문지, 제 30 권 B 면 제 9 호, pp. 918-933, 1993.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었습니다.