

퍼지이론을 적용한 전력계통안정화 장치 설계

이 호준* 박 지홍* 백 영식* 신 정훈**
 경북대학교 전기공학과* 한전 전력연구원**

Design of Power System Stabilizer applying fuzzy theory

Ho-Jun Lee* Ji-Ho Park* Young-Sik Baek* Jeong-Hoon Shin**
 Kyungpook National Univ.* KEPRI**

Abstract - The problem of small-signal stability is usually one of insufficient damping of system oscillations. The use of power system stabilizers to control generator excitation system is the most cost effective method of enhancing the small-signal stability of power system. This paper presents the fuzzy type stabilizing controller to damp out the sustained oscillation, which is observed in normal operation, through the comparative simulation with PI type power stabilizer under various system operating condition, the efficiency of fuzzy stabilizing controller with respect to nonlinear power system is verified.

면적 S는 X의 변화에 따라 달라지므로 최소화하려는 목적함수는 다음과 같이 설정 할 수가 있다.

$$Min \ S(X) = \int_0^{\infty} |\Delta \omega(t) \times t^n| dt \quad (2)$$

$$X = [X_1 X_2 \dots X_n]^T \quad n: \text{최적화변수의 갯수}$$

이 방법은 실제 시스템의 모델과 제어 상황의 변화를 직접 계산에 반영할 수 있기 때문에 발전기의 비선형성과 복잡성을 반영 할 수가 있다. 시스템 해석은 시스템의 모델의 변화에 상관없이 없고, 실제 발전기에 더욱 가까운 비선형 시스템에 대해서도 해석이 가능한 ODCS 시뮬레이터를 이용한다.

1. 서 론

전력계통의 신뢰성 요건중의 하나는 모든 발전기들의 동기화 운전인데 이러한 동기를 상실할 경우 전압, 전류등이 중요하게 되고 보호계전기에 의해 선로나 발전기 차단등 계통 분리 사고로 확대된다. 따라서 계통의 안정도 유지는 계통운용의 필수 요건이라 할 수 있다. 근래에 여자계통에 부가적인 여자제어 장치인 전력계통 안정화장치(Power System Stabilizer, PSS)를 거의 대부분 발전기에 설치하고 있으며 전력계통 안정도향상에 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 최근 설치되는 PSS의 각 요소는 계통상황에 따라 운전자가 가변할 수 있도록 만들어져 있는데 시간의 흐름에 따라 발전기나 제어계 특성의 변화로 인하여 주기적으로 최적 파라미터로 재튜닝하여야 하는 불편함이 있다.

그리고 고전적 제어나, 현대 제어 방법에서는 제어대상의 수학적인 모델링이 매우 중요하다. 그러나 발전기와 같이 복잡한 것은 모델링이 쉽지 않고, 모델링을 얻었다고 해서 그 결과로 얻어진 비선형시스템에 대해 최적의 제어를 설계하기는 쉽지 않은 일이다. 이에 본 논문에서는 기존의 PSS와 같이 운전점이 변화되어도 제어기 파라미터를 재튜닝하는 불편이 없으며, 제어 대상의 모델링이 필요하지 않아 기존 제어기의 난점을 극복할 수 있는 퍼지(Fuzzy)형 PSS를 제안하고자 한다. 그리고 퍼지 제어기의 성능은 퍼지 규칙의 구성 방법과 멤버쉽 함수, scaling factor 등에 의존하기 때문에 보다 좋은 성능을 위해서는 이들의 동정이 필요하게 된다. 따라서 이들을 최적화 방법으로 수렴속도, 초기치 문제, 국부 수렴등의 문제를 개선시킨 혼성법(Hybrid Method)을 이용할 것을 제안한다. 이렇게 최적화한 퍼지형 PSS와 기존의 PI형 PSS를 비교하여 퍼지형 PSS의 우수성을 검증 한다.

2. 목적 함수와 최적화 변수

2.1 목적함수 설정

임의의 최적화 변수 X_1, X_2, \dots, X_n 는 각주파수(ω)의 저주파 진동을 최소화하기 위해 $|\Delta \omega(t) \times t^n|$ 의 면적을 직접구하고 제안한 방법인 혼성법을 이용하여 이 면적을 최소화 시키는 수치적인 방법으로 결정한다.

임의의 변수 벡터 X에 대해 $t=0$ 에서 $t=\infty$ 까지 $|\Delta \omega(t) \times t^n|$ 의 면적을 S라 하면 아래와 같다.

$$S = \int_0^{\infty} |\Delta \omega(t) \times t^n| dt \quad (1)$$

$\Delta \omega$: 회전자 각주파수의 변화분

2.2 최적변수 설정

퍼지형 PSS내부에서 추론과 비퍼지화 과정을 거친 값이 아무리 좋은 제어량이라 할지라도 출력부 scaling factor(이득)에 의해 예상치 못한 제어량이 여자 계통에 흘러들어가갈 수도 있다. 다시 말해서, 설계가 잘된 퍼지 제어기도 출력부의 이득이 알맞지 않으면 좋은 제어성을 발휘할 수 없게 된다. 이러한 출력부 이득을 error의 크기에 따라 이득량을 가변하므로서 퍼지형 PSS의 최종 제어량을 결정하는 것이다. 그래서 이 error가 1미만 일 때(X_1), 1에서 2사이 일 때(X_2), 2와 4사이 일 때(X_3), 4와 6사이 일 때(X_4), 6을 초과 할 때(X_5)등으로 구별하여 $X_1 \sim X_5$ 의 5개를 최적화 변수로 선정한다.

3. Conjugate Gradient Method(CGM)

그림 1은 Conjugate Gradient method를 적용하는 과정을 나타내고 있으며, 각 단계의 기울기 값(d)은 ODCS를 이용하여 수치적인 방법으로 구할 수 있다. 그리고 최적의 λ 값은 피보나치(Fibonacci) 탐색 알고리즘을 적용하여 구한다. 시스템의 변화에 관계없이 식(1)을 ODCS를 이용하여 구할 수 있으므로 수치적인 방법의 최적화가 가능하다.

3. 진화 알고리즘(Evolution Algorithm)

3.1 적합도 함수

$$F = \frac{1}{1 + \sum_0^{\infty} |\Delta \omega(t) \cdot t^n|} \quad (3)$$

n : 시뮬레이션 시간동안 획득한 데이터 수
 t : 시간

3.2 Evolution Strategy(ES)

진화 알고리즘에는 유전자 알고리즘, 진화 전략, 진화 프로그래밍, 유전자 프로그래밍의 4가지로 분류할 수 있는데 본 논문에서는 진화 전략을 사용한다. 주 연산자는 돌연변이를 사용하고 가깝 교배를 사용하기도 한다. 돌연변이에 의한 다음 세대의 개체는 다음과 같이 구한다

$$X^{t+1} = X^t + N(0, \sigma) \quad (4)$$

단, $N(0, \sigma)$ 는 평균이 0, 표준편차가 σ 인 가우스 분포를 따르는 임의의 난수이다.

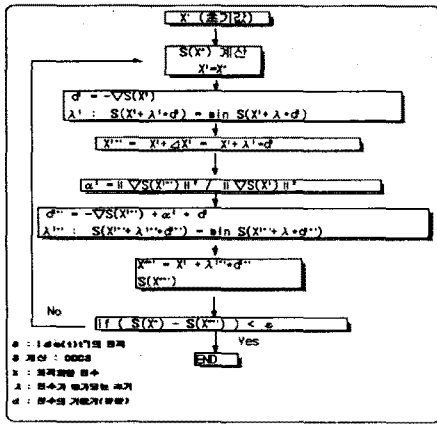


그림 1 Conjugate Gradient Method를 이용한 FPSS 최적화
Fig 1 Optimal FPSS using Conjugate Gradient Method

부모에서 자손을 생성하는 과정은 m개의 부모(X^i) 개체로된 집단중에서 n개의 자손(X^{i+1}) 개체를 생성한다. 이때, 합계(m+n)개체의 집단중에서 m개의 개체를 선택하여 다음세대의 부모로 한다. 그림 2는 ES의 수행과정을 나타내고 있다.

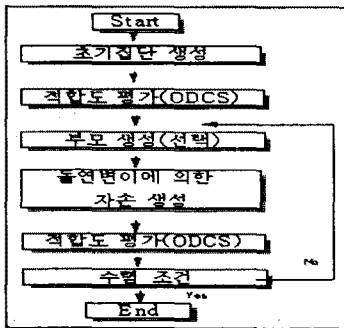


그림 2 진화전략을 이용한 FPSS의 최적화
Fig. 2 Optimal FPSS using ES

4. 혼성법(Hybrid Method : HM)

위에서 소개된 진화 전략이나, Conjugate Gradient Method 등은 각각의 단점을 갖고 있다. 진화 전략은 전역 탐색이 가능하고 목적함수의 미분가능 여부에 영향을 받지 않지만 수렴해 근처에서 수렴속도가 현저히 떨어지는 단점을 갖고 있으며 Conjugate Gradient Method는 수렴속도는 빠르나 국부수렴에 빠질 우려가 있고 수렴여부도 불확실하다는 단점들을 들 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결 하기 위해 혼성법을 제안한다. 이 방법은 초기엔 진화 전략으로 난수를 발생 시켜 초기치를 결정 한 뒤 전역 탐색을 행하고 후반부에서는 Conjugate Gradient Method를 이용하여 수렴속도를 높인다. 이렇게 설계하면 위에서 소개된 두 방법의 단점을 상호 보완 할 수 있다.

4.1 ES에서 CGM로 전환되는 조건

- 적합도값이 설정된 값이상 일때(0.90 이상)
- 세대수가 증가함에도 불구하고 설정된 세대동안 적합도 값의 변화가 없을 때(20세대 이상)
- 세대수가 설정된 세대수에 이를 때(100세대)

5. 혼성법을 이용한 퍼지형 PSS 설계

5.1 퍼지형 PSS의 파라미터

- 멤버쉽함수는 정규삼각형이며 각각 7개로 구성
- error에 대한 멤버쉽함수의 꼭지점은 0.08, 0.16, 0.24로 하고 이득은 9800으로 한다.
- Δerror에 대한 멤버쉽함수 꼭지점은 1.5, 3.0, 4.5로 하고 이득은 4로 한다.
- 출력부에 대한 멤버쉽함수 꼭지점은 0.01, 0.02, 0.03로 한다.
- 비퍼지화 방법은 무게 중심법으로 한다.
- 퍼지 추론방법은 Larsen product법을 사용한다.

5.2 규칙기반

표 1. 규칙 기반

Table 1. Rule base

$\Delta\omega, \Delta\omega', \Delta OUT$	$\Delta\omega$							
	LN	N	SN	Z	SP	P	LP	LP
$\Delta\omega'$	LP	Z	SP	P	P	LP	LP	LP
	P	SN	Z	SP	SP	P	LP	LP
	SP	N	SN	Z	Z	P	P	LP
	Z	LN	SN	SN	Z	SP	SP	LP
	SN	LN	N	N	Z	Z	SP	P
	N	LN	LN	N	SN	SN	Z	SP
	LN	LN	LN	LN	N	N	SN	Z

6. 모의 실험 결과

6.1 1기 무한대 모션

이 논문에서 사용한 전력계통 모델은 저주파 진동을 해석하기 위해 자주 사용되는 1기 무한대 모션을 단순화된 선형모델과 비선형 모델에 대해서 시뮬레이션을 수행한다.



그림 3 1기 무한대 모션 계통

Fig 3 A single machine connected to infinite bus

6.2 시스템의 모의 조건

부하토크 ΔTL를 임의의 크기로 계단 함수형태로 감소시키는 것이다. 이 논문에서는 -0.05pu와 -0.1pu의 크기를 가진 계단함수를 입력한다.

6.3 선형 모델

아래 그림 4는 1기 무한대 모션을 나타내며 시스템의 파라미터는 표 2과 같다.

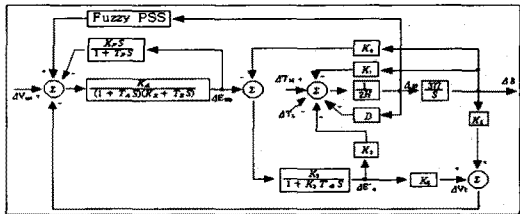


그림 4 1기 무한대 모션의 단순화된 선형 모델

Fig. 4 The simplified linear model of one machine connected to an infinite bus

표 2 시스템 파라미터

Table 2 System Parameter

발전기		여자기		선로	
K_1	1.4479	M	4.74	K_A	400
K_2	1.3174	D	0	T_A	0.05
K_3	0.3072	T'_{d0}	5.9	T_F	1.0
K_4	1.8050	T'_{e0}	0.075	K_E	-0.17
K_5	0.0294	X'_d	0.245	T_E	0.95
K_6	0.5257	X_d	1.64	K_F	0.025
H	2.37	X_d	1.7		

6.3.1 최적해

표 3 선형 시스템 최적해

Table 3 Optimal Solution of linear system

Fuzzy	factor 1	factor 2	factor 3	factor 4	factor 5
PSS	0.011	0.073	0.131	0.188	0.801
PI	KP		KI		
PSS	-21.8		-0.19		

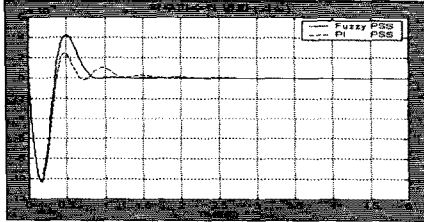


그림 5 PI PSS, Fuzzy PSS의 부하토크 (-0.05pu) 변화에 대한 $\Delta\omega$ 의 시간응답
Fig. 5 Time response of $\Delta\omega$ to a step change (-0.05pu) in ΔTL with PI PSS, Fuzzy PSS

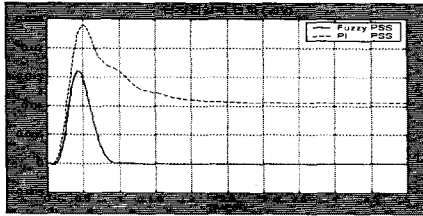


그림 6 PI PSS, Fuzzy PSS의 부하토크 (-0.05pu) 변화에 대한 ΔV 의 시간응답
Fig. 6 Time response of ΔV to a step change (-0.05pu) in ΔTL with PI PSS, Fuzzy PSS

그림 5, 6은 부하토크 -0.05pu에 대한 응답을 나타내는데 퍼지형 PSS가 PI형 PSS보다 각주파수나 단자전압의 동요를 1초정도 빨리 감쇄시키는 것을 볼 수 있다.

6.4 비선형 모델

다음 수식은 선형화 하기 이전의 식이다.

$$\omega = \frac{1}{M}(T_M - D_s - (E_q I_q - (x_q - x'_d) I_d) i_d) \quad (5)$$

$$\delta = \omega - 1 \quad (6)$$

$$E'_q = \frac{1}{T_d'} (E_{FD} - E) \quad (7)$$

$$E = E'_q + (x'_d - x_d) I_d \quad (8)$$

선로의 임피던스를 $R_e + jX_e$ 라 하면 선로 전류는

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & X_e + x_e \\ -X_e - x'_d & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \sin(\delta - \alpha) \\ E'_q - V_m \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (9)$$

모의에 사용한 여자 시스템은 IEEE type1 여자 시스템이다.

6.4.1 최적해

표 4 비선형 시스템의 최적해

Table 4 Optimal Solution of nonlinear system

Fuzzy	factor 1	factor 2	factor 3	factor 4	factor 5
PSS	0.03	0.1	0.3	0.3	0.3
PI	KP		KI		
PSS	-19.99		-0.18		

그림 7, 8은 부하토크를 -0.1pu로 감소 시킬때의 시간 응답을 나타내고 있다. 외란의 종류와는 상관없이 퍼

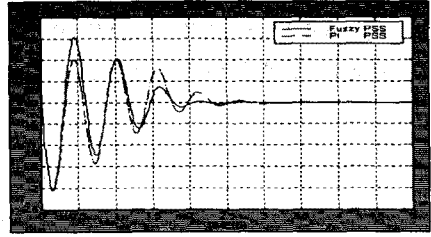


그림 7 Fuzzy PSS와 PI PSS의 부하토크 변화(-0.1pu)에 대한 $\Delta\omega$ 의 시간응답
Fig 7 Time response of $\Delta\omega$ to a step change (-0.1pu) in ΔTL with PI PSS, Fuzzy PSS

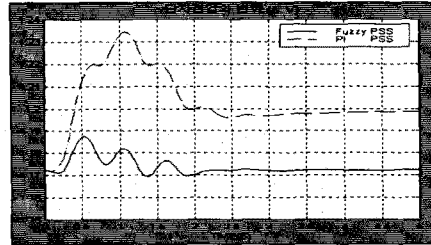


그림 8 Fuzzy PSS와 PI PSS의 부하토크 변화(-0.1pu)에 대한 ΔV 의 시간응답
Fig 8 Time response of ΔV to a step change (-0.1pu) in ΔTL with PI PSS, Fuzzy PSS

지형 PSS가 PI형 PSS보다 뛰어난 성능을 발휘함을 알 수 있다.

3. 결 론

이 논문에서는 퍼지형 PSS를 제안하였으며 또한 퍼지형 PSS를 Hybrid method를 이용하여 제어기 파라미터를 최적화 할 것을 제안하였다. 제안한 방법으로 1기 무한대 모선 시스템에 적용시켜 보았다. 그 결과 Hybrid method로 최적화시 수렴 속도면이나, 초기치 문제, 국부수렴등의 문제를 개선할 수 있어 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 외란으로 부하토크를 임의로 감소시켰을 때 퍼지형 PSS와 PI형 PSS의 응답을 각각 선형 모델과 비선형 모델에 대해 적용하였다. 그 결과 각 주파수 변화($\Delta\omega$)와 발전기 단자전압변화(ΔV)의 동요는 퍼지형 PSS가 PI형 PSS보다 빨리 감쇄함을 볼 수 있었으며, -0.05pu이외에도 -0.1pu의 외란을 주어서 다양한 외란에 대해서도 PSS의 응답특성을 비교 분석하여 퍼지형 PSS의 강인성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Lefteri H. Tsoukalas, Robert E. Uhrig, "Fuzzy and neural approaches in engineering", John Wiley & Sons, Inc, 1997
- [2] P.M Anderson and A.A Fouad, "Power System control and stability", Iowa state university press, 1997
- [3] Kundur, "Power System stability and control", McGraw-Hill, Inc, 1994
- [4] M.S. Bazarra, H.D. Sherali, C.M. Shetty, "Nonlinear Programming", John Wiley & Sons, Inc, 1993
- [5] Jinyu Wen, Shijie Cheng, O.P. Malik, "A synchronous generator fuzzy excitation controller optimally designed with a genetic algorithm", Transactions on Power System, Vol.13 No.3 884-889, 1998
- [6] Chuen chien lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-part I, II", IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 20 No. 2, March / April 1990
- [7] 박지호, 백영식, "객체지향기법을 적용한 디지털 컴퓨터 시뮬레이터", 경북대학교 석사학위 논문, 1996