

실수형 유전알고리즘을 이용한 전력계통 퍼지안정화장치의 설계

이종규, 권순일, 김성신*, 박준호*, 황기현**

한국수력원자력(주) 원자력교육원, 부산대학교 전기공학과*, 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신연구소**

Design of Fuzzy Power System Stabilizer using Real-coding Genetic Algorithm

Lee Jong-kyu, Kwon Soon-il, Sungshin Kim*, June-Ho Park*, Gi-Hyun Hwang**

Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. Dept. of Electrical Eng., Pusan National University*

Research Institute of Computer, Information and Communication at Pusan National University**

Abstract - This paper describes the application of Fuzzy Power System Stabilizer(FPSS) for improving dynamic stability of power system. The Real-coding Genetic Algorithm(RGA) was applied to optimize gains of the inputs and outputs of the FPSS. The effectiveness of the proposed FPSS was demonstrated by simulation studies for single-machine infinite system. To show the superiority of the proposed FPSS, its performances were compared with those of Conventional Power System Stabilizer(CPSS). The proposed FPSS showed better control performances than the CPSS in three-phase ground fault under a normal load which was system condition in tuning FPSS. To show the robustness of the proposed FPSS, it was applied to damp the low frequency oscillations caused by disturbances such as three-phase ground fault under heavy and light load conditions. The proposed FPSS showed better performance than CPSS in terms of the settling time and damping effect for power system operation condition.

1. 서 론

전력계통의 저주파 진동 및 외란시, 동기발전기 여자 제어시스템에 보조제어신호를 가산하여 소신호 안정도를 개선하기 위한 전력계통 안정화장치(PSS)에 대한 연구는 1960년대 후반부터 진행되어 왔다. 일반적으로 기존의 전력계통 안정화장치는 진·지상 제어를 사용하고 있는데, 제어기의 계수를 결정하기 위해 근궤적과 Bode 선도를 이용하는 방법, 극배치(pole-placement)와 고유치 제어(eigenvalue control)를 이용하는 방법, 근궤적과 준최적화 레귤레이터(suboptimal regulator)를 이용하여 비례-적분 이득을 최적화하는 방법, 선형 최적 제어 이론을 이용하는 방법 등이 사용되고 있다[1,2]. 이러한 방법들은 선형화된 계통모델을 사용하여 전력계통 안정화장치를 설계하기 때문에 특정한 운전점에서는 좋은 제어성능을 나타내지만, 부하 변동이나 계통 고장 등과 같은 원인에 의해 계통운전 조건이 변동될 경우에는 최적의 제어성능을 얻기가 어렵다. 최근에는 전력계통 안정화장치로 퍼지 제어기와 신경회로망 제어기 등과 같은 지능제어 방법에 대한 연구가 적극적으로 진행되고 있다[3]. 퍼지 제어기가 우수한 제어성능을 갖기 위해서는 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 적절히 결정해야 하는데, 진화연산을 이용하여 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 튜닝하는 방법이 최근 연구되고 있다[4]. 본 논문에서는 실수형 유전알고리즘을 이용한 전력계통 퍼지안정화장치(FPSS)를 제안하였다.

2. 발전기 모델링 및 PSS의 특징

2.1 발전기 모델링

본 논문에서 사용한 발전기 미분방정식은 식 (1)~(3)에 나타내었고, 여자는 속응성이 좋은 정지형 여자 시스템을 적용하였으므로, 식 (4)와 같이 여자를 제외한 AVR(automatic voltage regulator)만으로 모델링 하여도 충분하다[5]. 동기기의 터빈/조속기 특성은 시정수가 길고, 변동폭이 상대적으로 작기 때문에 고려하지 않았다.

$$\frac{dE_q'}{dt} = -\frac{1}{T_{do}} [E_q' + (X_d - X_d')I_d - E_{fd}] \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_{ref} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{ref}}{2H} [T_M - E_q' I_q - (X_q - X_d')I_d I_q] \quad (3)$$

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{K_A}{T_A} (V_{ref} - V_t + V_s) - \frac{1}{T_A} E_{fd} \quad (4)$$

2.2 PSS의 특징

정상 전압(ceiling voltage)이 높고 속응성이 빠른 여자제어시스템을 사용함에 따라 계통사고 제거 후 제1파의 동요 억제 즉, 과도 안정도의 향상에는 대단히 유효한 반면, 속응성이 좋기 때문에 오히려 제1파 다음의 동요 억제를 저하시키는 부제동(negative damping) 현상을 초래하게 된다. 이와 같이, 전력계통의 고장, 부하의 투입 및 차단 등과 같은 비교적 작은 외란에 의해서 발생하는 전력계통의 진동 상태에 대한 안정도를 동태 안정도(dynamic stability)라고 한다. 따라서, 이러한 동적 상황에서도 전력계통의 제어특성을 개선하여 계통을 안정적으로 유지하기 위해서는 기존의 단순한 여자제어시스템을 보완시켜 주어야 하는데, 이를 위하여 고안·제작된 것이 PSS이다. 즉, PSS는 계통 동요에 관한 여러 신호를 받아 적절하게 이득 및 위상을 조정한 후, AVR에 보조제어신호를 제공하여 전력계통의 동태 안정도를 개선하는 장치이다[6,7]. 동기발전기 여자제어시스템의 PSS-AVR 구성도는 일반적으로 그림 1과 같다.

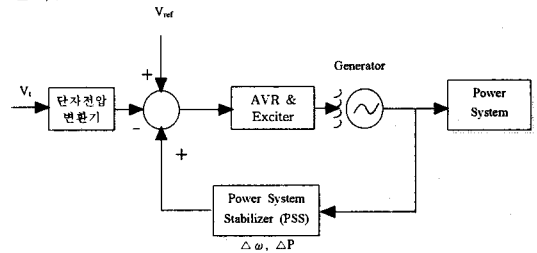


그림 1. 여자제어시스템의 PSS-AVR 구성도

3. 실수형 유전알고리즘을 이용한 FPSS의 설계

다양한 외란 및 제어시스템의 파라미터 변동에 대해서 최적의 제어성능을 발휘하기 위하여 FPSS의 입·출력 이득을 실수형 유전알고리즘(RGA)을 이용하여 튜닝하였다. FPSS의 입·출력 이득을 튜닝하기 위한 구성도는 그림 2와 같다. FPSS의 입력으로는 식 (5)에서 나타난 것과 같이 각속도 편차와 그 변화분을 사용하였으며, FPSS의 입·출력 이득을 튜닝하기 위해서 적용한 실수형 유전알고리즘의 입력은 각속도 편차의 절대치 합을 이용하였다. 여기서, $e(t) = \omega_{ref} - \omega(t)$ 이며, SF_1, SF_2 는 FPSS의 입력인 각속도 편차와 그 변화분의 이득을 나타낸다. 실수형 유전알고리즘을 이용하여 FPSS 튜닝에 사용된 퍼지규칙과 소속함수 모양은 표 1과 그림 3에 나타났다.

$$E(t) = SF_1 e(t) \quad (5)$$

$$dE(t) = SF_2 \frac{de(t)}{dt}$$

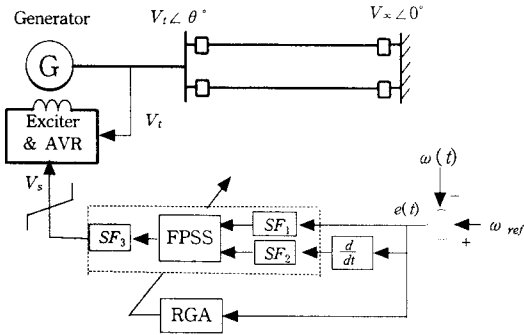


그림 2. RGA를 이용한 FPSS의 튜닝 구성도.

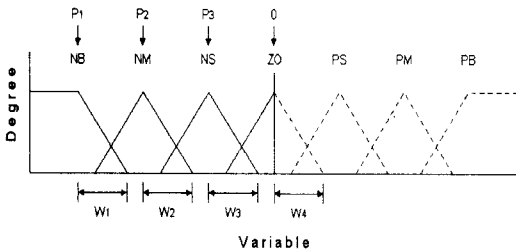


그림 3. 대칭형 삼각형 소속함수.

표 1. 비례-미분 형태의 퍼지규칙.

$\frac{dE(t)}{E(t)}$ \ $E(t)$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PB

S_1	SF_{11}	SF_{12}	SF_{13}
S_2	SF_{21}	SF_{22}	SF_{23}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_n	SF_{n1}	SF_{n2}	SF_{n3}

그림 4. 해집단의 구조.

표 1의 퍼지규칙과 그림 3의 소속함수를 이용하여, 실수형 유전알고리즘으로 FPSS의 입·출력 이득을 튜닝하기 위한 해집단의 구조는 그림 4와 같다. 여기서, SF_{ij} 는 퍼지 제어기의 입·출력 이득이며, n은 스트링 개수를 나타낸다. 그림 4에서 나타난 것처럼 FPSS의 입·출력 이득을 튜닝하는 데 필요한 파라미터의 수는 3개이다. 그리고 해집단의 각 스트링을 평가하기 위해 사용한 적합도(fitness) 함수는 식 (6)과 같이, 발전기 회전자 각속도 편차의 절대치 합을 이용하였다.

$$Fitness = \frac{1}{1 + \int_{t=0}^T |\omega_{ref} - \omega(t)|} \quad (6)$$

4. 사례 연구

4.1 계통 해석 조건

제안한 FPSS의 성능을 검증하기 위해 그림 5의 1기 무한대 계통에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 비선형 시뮬레이션에 사용된 실수형 유전알고리즘의 시뮬레이션 계수는 표 2와 같다. 표 2와 같은 조건에서 실수형 유전알고리즘으로 FPSS를 튜닝하였으며, 튜닝된 FPSS의 입·출력 변수 이득은 각각 $SF_1 = 1.35$, $SF_2 = 12.8$, $SF_3 = 0.12$ 이다. 본 논문에서 제안한 FPSS의 성능을 검증하기 위해서, 위상보상 회로를 구성하여 감쇄정수의 크기로 전력계통 안정화장치의 이득을 조정하는 기존의 전력계통 안정화장치(CPSS)와 비교·검토하였다. CPSS는 위상보상 개념을 이용하여 설계되어 있으며, 식 (7)에서 위상보상 개념으로 구해진 CPSS의 출력(V_s)을 나타내고 있다. 여기서, Washout filter의 시정수(T_w)는 3초, PSS의 안정화 이득(K_{pss})은 7.09이고, 진·지상 보상회로의 시정수(T_1, T_2)는 각각 0.065초와 0.1초이다.

$$V_s = \frac{s T_w}{1 + s T_w} K_{pss} \left(\frac{1 + s T_1}{1 + s T_2} \right) \quad (7)$$

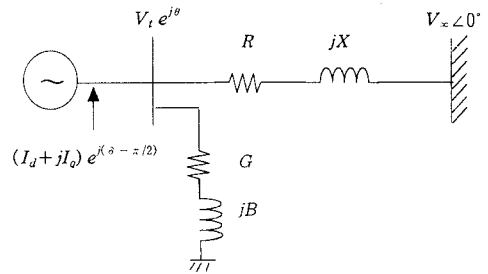


그림 5. 성능평가에 사용된 1기 무한대 계통.

그림 6은 매 세대별 적합도의 수렴 특성을 나타내고 있다. 그림 6에서 보여주는 것처럼 세대가 증가함에 따라서 적합도가 개선되고 있음을 알 수 있다. 이것은 FPSS가 실수형 유전알고리즘에 의해서 최적화되고 있다는 것을 증명하고 있다. 실수형 유전알고리즘에 의해

최적화된 FPSS와 위상보상 개념으로 설계된 CPSS의 제어성능을 비교하기 위해서 적용한 시뮬레이션 조건은 표 2의 대표적 사례와 같다.

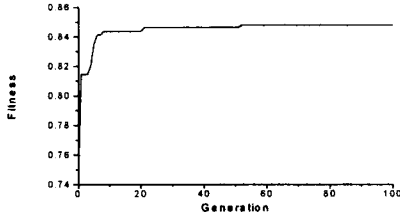


그림 6. 매 세대별 적합도 추이.

표 2. 제어성능 평가에 적용한 시뮬레이션 조건.

사 례	동작 조건 (pu)	외란 종류	고장 시간 (msec)
경우 I	정상부하시 $P_e=1.0, Q_e=0.015$	3상 지락 고장	40
경우 II	중부하시 $P_e=1.3, Q_e=0.015$	3상 지락 고장	40
경우 III	경부하시 $P_e=0.7, Q_e=0.015$	3상 지락 고장	40

4.2 시뮬레이션 결과

그림 7에서는 실수형 유전알고리즘을 이용한 FPSS의 튜닝에 적용된 정상부하시 모션단 근처에서 3상 지락 고장이 40 msec 동안 지속되다가 계통구성의 변경없이 고장이 제거되었을 때, CPSS 및 제안한 FPSS가 있는 경우에 대하여 발전기의 각속도 변화를 비교하였다. FPSS의 튜닝에 사용된 계통운전 조건에 대해서 FPSS가 정정시간, 오버슈트 및 제동 효과면에서 CPSS보다 더 우수한 제어성능을 나타내고 있다.

그림 8은 제안한 FPSS의 강인성을 평가하기 위하여 중부하시 모션단 근처에서 3상 지락 고장이 40 msec 동안 지속되다가 계통구성의 변경없이 고장이 제거된 경우, CPSS와 FPSS가 있는 경우에 대하여 발전기의 각속도 응답특성을 나타내었다. 제안한 FPSS가 정정시간과 제동 효과면에서 CPSS보다 더 좋은 제어성능을 나타냄을 알 수 있다.

그림 9는 제안한 FPSS의 강인성을 평가하기 위해서 경부하시 모션단 근처에서 3상 지락 고장이 40 msec 동안 지속되다가 계통구성의 변경없이 고장이 제거되었을 때, CPSS와 FPSS가 있는 경우에 대해 발전기의 각속도 응답특성을 나타내었다. 제안한 FPSS가 정정시간, 오버슈트 및 제동 효과면에서 CPSS보다 더 우수한 제어성능을 나타내었다.

5. 결 론

본 논문에서는 동기발전기 여자제어시스템에 보조제어 신호를 인가하여 소신호 안정도를 개선하기 위해서 전력계통 피지안정화장치를 제안하였다. FPSS의 입·출력 변수 이득은 실수형 유전알고리즘을 이용하여 피지규칙과 피지변수의 소속함수 모양을 튜닝하였으며, 최적화된 FPSS의 유용성을 입증하기 위해서 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. FPSS의 튜닝에 적용된 정상부하시의 3상 지락 고장에 대해 제안한 FPSS가 CPSS보다 정정시간, 오버슈트 및 제동 효과면에서 더 우수한 제어성능을 보였다. 그리고 제안한 FPSS의 강인성을 평가하기 위해 중부하 및 경부하시의

3상 지락 고장에 대해서도 발전기 동특성을 해석하였다. FPSS의 강인성 평가에 사용된 계통운전 조건에 대해서도 제안한 FPSS가 CPSS보다 정정시간, 오버슈트 및 제동 효과면에서 더 우수한 제어성능을 나타내었다.

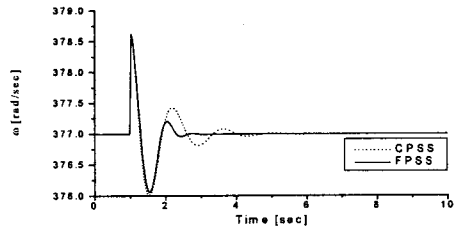


그림 7. 정상부하시 발전기 각속도 응답(경우 I).

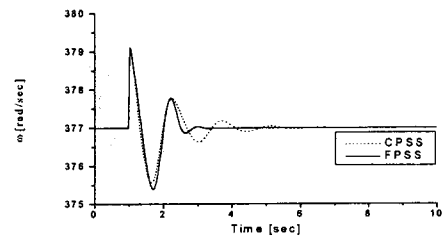


그림 8. 중부하시 발전기 각속도 응답(경우 II).

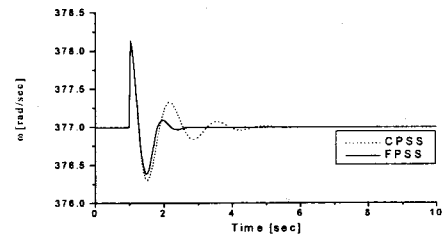


그림 9. 경부하시 발전기 각속도 응답(경우 III).

(참 고 문 헌)

- [1] Y. N. Yu, *Electric Power System Dynamics*, Academic Press, 1983.
- [2] J. H. Chow and J. J. Sanchez-Gasca, "Pole-Placement Design of Power System Stabilizers," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.4, No.1, pp.271-277, Feb., 1989.
- [3] T. M. Park and W. Kim, "Discrete-Time Adaptive Sliding Mode Power System Stabilizer with Only Input/Output Measurement," *Electrical Power Energy Systems*, Vol.18, No.8, pp.509-517, 1996.
- [4] M. A. M. Hassan and O. P. Malik, "Implementation and Laboratory Test Results for a Fuzzy Logic Based Self-tuned Power System Stabilizer," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.2, pp.221-227, June, 1993.
- [5] 황기현, "새로운 적응진화 알고리즘을 이용한 전력계통 피지안정화장치의 설계," 부산대 박사 학위논문, 2000. 2.
- [6] 발전기의 전력계통 관련 적정 기술규격에 관한 연구, 한국전력공사 전원계획처, No.94123, 1995. 6.
- [7] 이종규, 자동전압조정시스템, 한국수력원자력(주) 원자력교육원, 1997. 12.