2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2003.7.21-23

전력시스템 안정화를 위한 GA를 이용한 SPS제어기 설계

이창우* · 김상효* · 정형환* · 이정필** · 김해재***
*동아대학교 전기공학과 **한전전력연구원 ***마산대학교

Design of a GA-based SPS controller for Power system stabilization

C. U. Lee* · S. H. Kim* · H. H. Chung* · J. P. Lee** · H. J. Kim***
*Department of Electrical Eng., Dong-A Univ. **KEPRI. ***Masan College

Abstract-Design of a GA-based SPS controller for Power system stabilization has been investigated in this paper. The design problem of SPS controller is formulated as an optimization problem using GA. The dynamic characteristic responses are considered to verify performance of the proposed SPS under various disturbance for various operation conditions. The simulation results show that the proposed SPS controller provides most of the damping and improves greatly the voltage profile of the system under two different disturbances.

1. 서 론

전력시스템에 전기 기계적인 모드와 연결된 저주파 진동은 긴 시간 주기 동안 지속되며, 어떤 경우에는 전력 전송을 제한시키기도 한다. 그러한 저주파 진동을 억제하기 위한 효과적인 대책은 자동 전압 조절기의 전압 기준 입력에 보조 신호를 주입하는 피드백 제어기를 가지는 발전기를 설치하는 것이다. 이러한 장치를 전력 시스템 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)라 하고, 현대 전력시스템에 광범위하게 사용되고 있으며 이에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1].

PSS가 시스템 제동을 향상시킴에 의해서 전력시스템 안정도 한계를 확장하였음에도 불구하고, PSS의 과도한 입력으로 인하여 단자전압에 큰 변화를 일으키기 쉬운 단점을 갖고, 진상 운전을 일으킬 수도 있으며, 극심한 외란하에서 시스템 안정도를 잃을 수도 있다[2-3]

최근 전력전자분야 발전은 유연 송전 시스템(Flexible AC Transmission Systems : FACTS)의 발전을 이끌었다. FACTS는 오늘날의 기계적으로 제어된 전력시스템의 한계를 극복하고, 신뢰성 있는 고속 전자장치에 의해 전력시스템 안정도를 향상시키기 위한 수단으로 설계된다. 유망한 FACTS 장치중의 하나가 정지형 위상이동기(Static Phase Shifter : SPS)이다. 최근 전력시스템 안정도 향상을 위한 SPS의 성능에 관한 여러 연구를 통하여 그 효율성이 입증되고 있다[4-5].

본 논문에서는 자연 생태계의 진화를 모의한 유전알고리즘(Genetic Algorithm : GA)[6]를 이용하여 SPS 제어기를 설계할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 이의 성능 평가를 위해 기존의 설계방식을 이용한 PSS와 본 논문에서 도입한 GA를 이용하여 설계된 PSS 및 제안한 SPS제어기를 각각 적용한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 다양한 동작조건하에서 다양한 외란이 발생한 경우에 대한 동특성 응답을 비교·검토 하였으며, 제안한 SPS제어기가 기존의 PSS보다 전기·기계적인 모드의 우수한 제동을 제공하여 전력시스템 안정도의 향상에 기여하며, 시스템 전압 동요를 억제하는데 매우 효과적임을 보이고자 한다.

2. 전력시스템 모델

2.1 발전기 및 여자기 모델

본 연구에서 사용된 SPS를 포함한 1기 무한대 모선 전력시스템 모델은 그림 1과 같다. 여기서 사용된 여자시스템은 IEEE Type-ST1으로서 그림 2와 같고 여자시스템의 전압 기준입력에 PSS의 보조신호를 받아들이는 형태이다.

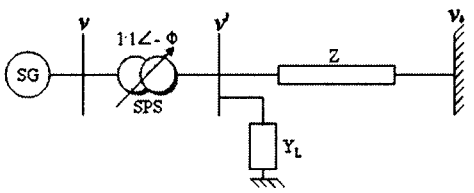


그림 1 SPS가 포함된 1기 무한대 모선 시스템

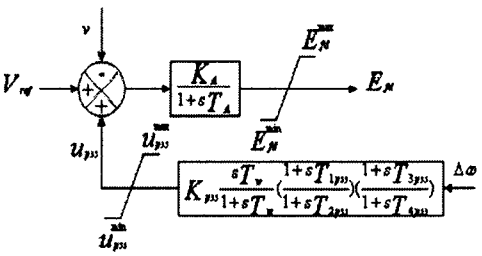


그림 2. PSS를 포함한 IEEE Type-ST1 여자시스템

동기기 및 여자시스템을 포함하는 1기 무한대 모선의 비선형 동특성 방정식은 식 (1)-(4)와 같다.

$$\frac{d}{dt}\delta = w_b(w-1) \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt}w = (P_m - P_e - D(w-1)/M \tag{2}$$

$$\frac{d}{dt}E'_q = (E_{fd} - (x_d - x'_d)i_d - E'_q)/T'_{d0} \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt}E_{fd} = (K_A(V_{ref} - v + u_{pss}) - E_{fd})T_A \tag{4}$$

이때 SPS가 포함된 경우의 유효전력은 식 (5)와 같다.

$$P_e = \frac{E'_q v_b}{X} sin(\delta - \Phi) \tag{5}$$

2.2 SPS제어기 모델

본 연구에서 사용된 SPS의 블록선도는 그림 3과 같

고, 위상 이동각 Φ에 대한 비선형 동특성 방정식은 식 (6)과 같다.

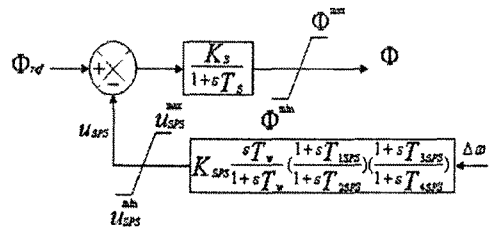


그림 3. SPS제어기의 블록 다이어 그램

$$\frac{d}{dt}\Phi = (K_S(\Phi_{ref} - u_{sps}) - \Phi)/T_S \qquad (6)$$

3. GA를 이용한 SPS제어기 설계

3.1 유전 알고리즘

일반적으로 GA는 최적화 하고자 하는 파라미터들을 2진 문자열로 표현하여 사용하였으나 높은 정밀도가 요구되어지는 경우 문자열의 길이는 매우 길어지고 이 같은 문제점 때문에 많은 연산시간과 기억용량이 필요하며 이는 수렴속도를 저하시키는 하나의 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 파라미터를 유한 길이로 코딩하는 절차가 필요 없이 변수 그 자체로 최적화하는 실 변수 GA를 이용하였다. 실 변수로 코딩되어진 염색체의 구성은 각 개체의 문자열을 변수의 상·하한치 내에서 랜덤하게 발생시켜 탐색할 각각의 변수를 실제 값으로 구성한다. 이 실 변수 GA는 변수의 코딩 절차 없이 실 변수로 최적화함으로써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지 할 수 있다.

3.2 유전 알고리즘을 이용한 SPS제어기 설계

본 논문에서 사용된 SPS제어기의 구조는 기존의 진·지상 형태의 구조를 가지며, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SPS(s) = \left(\frac{sT_w}{1+sT_w}\right)\left(\frac{1+sT_{1sps}}{1+sT_{2sps}}\right)\left(\frac{K_{sps}(1+sT_{sps})}{(1+sT_{sps})}\right) \qquad (7)$$

GA의 해 탐색 절차에서 상대적으로 환경에 잘 적응하는 개체를 평가하기 위한 수단으로서 사용한 목적함수는 식 (8)과 같이 선정하였다.

$$J = \int_{t=0}^{t=T_f} (|t\cdot\Delta\delta| + |t\cdot\Delta v_t|)\,dt \qquad (8)$$

여기서, T_f는 최종시간이다.

평가함수를 최소화하는 스트링을 평가하기 위한 적합도를 식 (9)와 같이 선정하였다.

$$Fitness = \frac{1.0}{1.0 + min.J} \qquad (9)$$

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 사용한 GA의 파라미터는 표 1과 같고, 제안한 SPS제어기와 기존의 PSS 및 GA를 적용한 PSS의 파라메타는 표2에 나타내었다.

표 1. 유전 알고리즘 파라미터

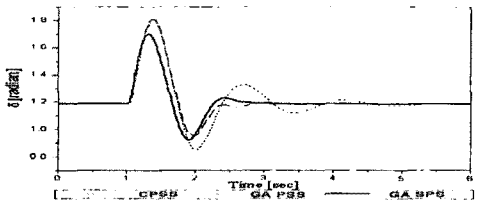
Generations number	Population size	Crossover rate	Mutation rate
100	100	0.85	0.01

표 2. PSS 및 SPS의 최적 파라메타

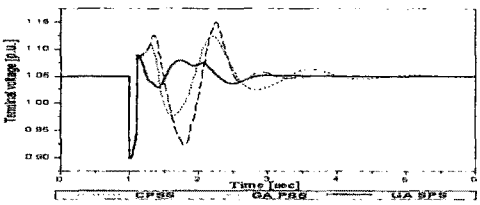
CPSS	K_C= 7.091	T_w= 5	T_1= 0.685	T_2= 0.1		
GA-based PSS	K_{pss}= 33.545	T_w= 14.353	T_{1pss}= 0.182	T_{2pss}= 0.0479	T_{3pss}= 0.3017	T_{4pss}= 0.2969
GA-based SPS	K_{sps}= 98.921	T_w= 14.065	T_{1sps}= 0.1983	T_{2sps}= 0.0352	T_{3sps}= 0.0352	T_{4sps}= 0.1040

4.1 정상 부하시

정상 부하시($P_{e0} = 1.0[p.u.], Q_{e0} = 0.015[p.u.]$) 1초 후에 무한대 모선 부근에서 3상 단락이 100[ms]동안 지속되다가 제거되는 경우에 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답은 그림 4와 같다.



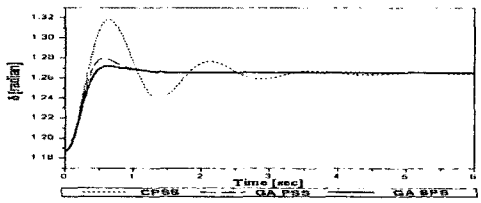
(a) Rotor angle



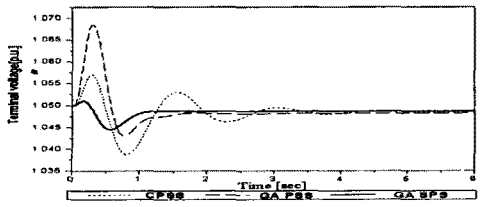
(b) Terminal voltage

그림 4. 정상 부하조건에서 3상 단락 발생시 동특성 응답

정상 부하시 발전기의 기계적 토크를 0.05[$p.u.$]만큼 변동 한 경우 대하여 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답은 그림 6과 같다.



(a) Rotor angle



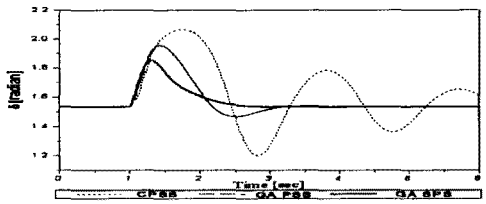
(b) Terminal voltage

그림 5. 정상 부하조건에서 기계적 토크를 증가한 경우

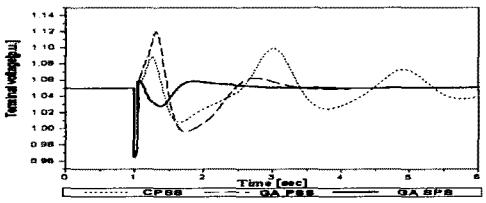
그림 4와 5의 부하각과 단자전압에 있어서 SPS가 PSS보다 첫 번째 동요에서의 제동에 있어서 뛰어나다는 것을 알 수 있으며, 이것은 SPS의 속응성에 기인함을 알 수 있었다.

4.2 중 부하시

중부하시($P_{e0}=1.10[p.u.], Q_{e0}=0.40[p.u.]$) 1초 후에 무한대 모선 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 제거되는 경우에 대한 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답은 그림 6과 같다.



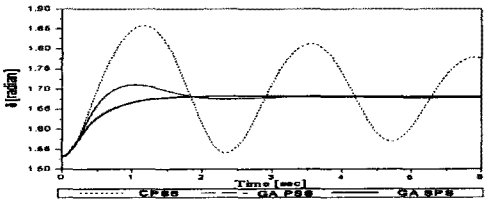
(a) Rotor angle



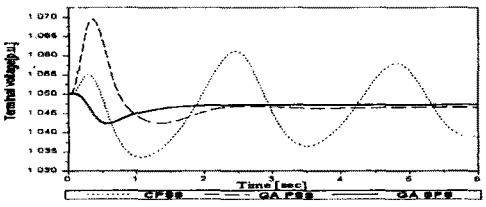
(b) Terminal voltage

그림 6. 중 부하조건에서 3상 단락 발생시 동특성 응답

중부하시에 발전기의 기계적 토크를 0.05[p.u]만큼 변동 시켰을 경우에 대한 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답은 그림 7과 같다.



(a) Rotor angle



(b) Terminal voltage

그림 7.중 부하조건에서 기계적 토크를 증가한 경우

그림 6과 7에서, 제안한 SPS제어기의 경우 부하각에서의 첫 번째 동요를 억제하고 단자전압의 오버슈트와 정정시간(settling time)이 크게 향상되었다. 따라서 SPS의 동특성 응답이 PSS의 동특성 응답보다 우수하게 나타났다. 특히, PSS는 매우 큰 외란과 중부하 시에 단자전압 응답 이 현저히 떨어졌음을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과로부터 제안한 SPS가 기존의 PSS보다 다양한 동작조건에 있어서의 다양한 외란에 대해 저주파 진동을 효율적으로 억제함을 알 수 있었으며, 전압 동요를 억제하는데 있어서도 매우 우수한 특성을 가짐을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 전력시스템의 안정화를 위하여 저주파 진동 억제에 강인성을 가진 SPS제어기의 최적 파라미터를 GA를 이용하여 선정하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 SPS제어기는 다양한 외란과 동작조건에 대하여 기존의 설계방식을 이용한 PSS 및 GA를 이용하여 설계한 PSS와 비교 및 검토하였다. 이상의 결과는 다음과 같다.

(1) SPS제어기의 설계 문제를 해결하기 위해 GA를 이용함으로써 최적 파라미터 값을 쉽게 구할 수 있었다.

(2) SPS 제어기는 기존의 PSS보다 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였고, 특히 전압의 동요를 현저히 향상시킬 수 있었다.

(3) 다양한 동작조건과 넓은 범위에 걸친 다양한 외란에 대해서 제안한 SPS의 강인성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] P. Kundur, "Power system stability and control," McGraw-Hill, Inc.(1994)

[2] Yu YN. Electric power system dynamics, New York: Academic Press, 1983.

[3] Mahran AR, Hogg BW, Al-Sayed ML. Coordinated control of synchronous generator excitation and static var compensator. IEEE Trans Energy Conversion 1992;7(4):615-22.

[4] Jiang F, Choi SS, Shrestha G. Power system stability enhancement using static phase shifter. IEEE Trans PWRS 1997;12(1):207-14.

[5] Wang HF, Swift FJ, Li M. Analysis of thyristor-controlled phase shifter applied in damping power system oscillations. Int J Electro Power Energy Systems 1997;19(1):1-9.

[6] A. Varsek, "Genetic algorithms in controller design and tuning", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol 23, No 5, pp.1330-1339 (1993)