

전력계통 안정도 향상을 위한 TCSC 안정화 장치의 GA-퍼지 전 보상기 설계

정문규* 왕용필* 정형환* 이창우** 이정필*** 허동렬***
*동아대학교 **한국수력원자력 ***한전연구원 ****뉴그린테크

Design of GA-Fuzzy Precompensator of TCSC-PSS for Enhancement of Power System Stability

Mun-Kyu Chung* Yong-Peel Wang* Hyeng-Hwan Chung* Chang-Woo Lee** Jeong-Phil Lee*** Dong-Ryol Hur****
*Dong-A Univ. **KHNP ***KEPRI ****New Green Tech.

Abstract - In this paper, we design the GA-fuzzy precompensator of a Power System Stabilizer for Thyristor Controlled Series Capacitor(TCSC-PSS) for enhancement of power system stability. Here a fuzzy precompensator is designed as a fuzzy logic-based precompensation approach for TCSC-PSS. This scheme is easily implemented simply by adding a fuzzy precompensator to an existing TCSC-PSS. And we optimize the fuzzy precompensator with a genetic algorithm for complements the merit such as the difficulty of the component selection of fuzzy controller, namely, scaling factor, membership function and control rules. Simulation results show that the proposed control technique is superior to a conventional PSS in dynamic responses over the wide range of operating conditions and is convinced robustness and reliableness in view of structure.

1. 서 론

전력계통의 유연성과 제어성능을 향상시킴으로서 운전 효율과 신뢰도를 극대화하기 위한 방안으로 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System:FACTS) 기술이 개발되었다. 이러한 FACTS 소자의 일환으로서 선로의 임피던스를 변경하기 위해 직렬 커패시터(Series Capacitor)가 사용되었으며, 모선의 전압을 유지하기 위해 전력용 콘덴서(Condenser) 및 리액터(Reactor)가 사용되었다. 이후, 고정된 기계적인 스위칭에서 사이리스터 스위칭으로 대체함으로써 한층 더 발전된 사이리스터 제어 직렬보상기(Thyristor Controlled Series Capacitor: TCSC)와 정지형 무효전력 보상기(Static Var Compensator:SVC)의 실용화가 되고 있다.

본 논문에서 적용한 TCSC는 TCR(Thyristor Controlled Reactor)과 커패시터의 병렬구조로 이루어져 있다. TCSC는 정상상태에서의 전력조류 극대화 및 제어기능과 함께 외란에 의한 과도시에 보조제어기를 부착함으로써 전력계통 안정화 기능을 수행할 수 있다. 그러나 TCSC등과 같은 FACTS 기기만으로는 전력수요 증가에 따른 저주파 진동현상 및 경부하 심야운전중의 전압상승 등 계통 안정도 문제를 완벽히 해결할 수 없다. 이를 위해 전압 오차신호에 발전기의 속도, 주파수, 또는 전력등의 과도신호를 이용하여 추가적인 신호를 입력함으로써 실용적이며 효과적으로 동요를 억제할 수 있음이 알려져 있다. 이러한 전력계통의 저주파 진동을 억제하고 계통의 안정도 특성을 향상시키기 위한 장치의 일환인 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer, PSS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 기존의 PSS는 그 구조가 다양하고 설계방법이 복잡하여 설계자의 경험 및 시행착오에 의해서 설계되었으며, 이의 사용에 고도의 전문성이 요구된다.

한편 전력계통의 가장 중요한 특징중의 하나는 발전조건, 전송조건, 또는 부하조건에 따라 동작조건이 지속적

으로 변하고 있다는 것이다. 이러한 동작 환경의 변화는 전력계통에 대한 수학적인 표현과 실제 전력계통의 물리적인 구조간에 차이를 발생시킨다. 이것은 미소 신호 선형화된 전력계통 모델에서 파라미터 불확실성으로 표현될 수 있다. 이러한 시스템의 변동에 대응하고자 하는 노력의 일환으로 W.Gu등은 자기 동조 제어기법을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였고, 최근에는 적응제어, 퍼지논리, 신경회로망 및 유전 알고리즘 등과 같은 지능제어형 기법에 관한 연구가 진행되어 왔다.

이중 퍼지 제어기가 우수한 제어성능을 나타내기 위해서 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수를 조정해야 하는데, 종래에는 전문가의 경험과 시행착오법에 바탕을 두었기 때문에 시스템에 대한 전문적인 지식 없이는 시스템에 대한 전문적인 지식 없이도 시스템에 적합한 소속함수를 결정하기가 어려웠다. 이러한 문제의 해결책으로 본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하였다. 유전 알고리즘은 문제를 나타내는 탐색 공간에서 가능성 있는 후보해들에 대해 자연의 적자생존과 개체 선택 방법을 모방하여 유전 연산을 적용시켜 해들을 진화시킴으로써 최적해를 찾는 탐색 알고리즘이다.

또한 본 논문에서는 PID 제어기와 퍼지 제어기의 장점만을 이용하여 설계된 하이브리드형 제어기[2]에 관한 연구들에서 착안하여 TCSC 안정화 장치(Power System Stabilizer for Thyristor Controlled Series Capacitor: TCSC-PSS)[3]와 퍼지 제어기를 함께 이용한 전 보상형 형태의 TCSC-PSS를 제안하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 전력시스템의 안정도향상을 위해 종래에 설계된 TCSC-PSS를 교체하지 않고, 지능형 제어기를 간단히 설치할 수 있는 전 보상의 형태로서 유전알고리즘을 이용한 퍼지 전 보상기를 설계하고자 한다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 1기 무한대 모선에 적용한 결과를 비선형 시뮬레이션을 통하여 다양한 외란이 발생하였을 경우에 외란 억제 성능과 강인성에 대하여 고찰하였으며, 제안한 TCSC-PSS의 설계가 기존의 설계방식보다 효율적이며 전력시스템 안정도 향상에 크게 기여함을 보이고자 한다.

2. 전력계통의 수학적 모델

그림 1은 TCSC를 포함한 1기 무한대 모선 전력계통의 블록선도이다. TCSC는 전력의 흐름을 조절하기 위하여 전송선로에 직렬로 연결되어 있다. 그러므로 TCSC는 저주파 진동에 부가적인 댐핑을 제공할 수 있으며, 또한 전력전송 능력을 향상시킬 수 있다. TCSC는 TCR과 고정된 커패시터가 병렬로 연결된 구조로 이루어져 있으며 사이리스터의 점호각을 제어함으로써 선로 임피던스를 조절할 수 있다.

TCSC의 구조는 Open loop 임피던스 입력이 장착되어 있고, 부가적으로 제어장치를 부착할 수 있도록 보조입력을 가지고 있다. 정상상태에서 선로조류제어를 위하여 임피던스 지정치로 운전되며, 외란에 의한 과도상태에서는 보조입력 신호를 제어함으로써 안정도를 개선할 수

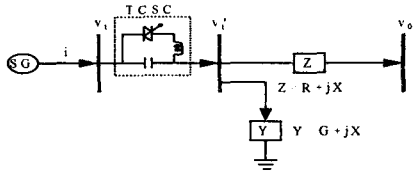


그림 1 TCSC를 포함한 1기 무한대 모선 전력계통

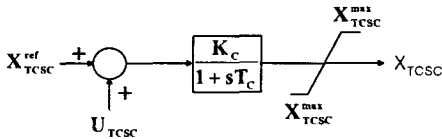


그림 2 TCSC 모델의 블록선도

$$X_{TCSC} = \frac{K_c}{T_c} (X_{TCSC}^{ref} + U_{TCSC} - X_{TCSC}) \quad X_{TCSC}^{min} \leq X_{TCSC} \leq X_{TCSC}^{max} \quad (1)$$

여기서, X_{TCSC} : TCSC의 임피던스 [p.u.]
 T_c : TCSC의 시정수
 K_c : TCSC의 이득
 X_{TCSC}^{ref} : 정상운전시 기준임피던스 입력신호
 U_{TCSC} : 제어입력
 $X_{TCSC}^{min}, X_{TCSC}^{max}$: TCSC 용량의 상·하한치

있다. 제어기로부터 입력되는 임피던스 신호는 이 임피던스를 구현하는 점호각으로 변환된다. 이로부터 싸이리스터의 점호각 제어를 통하여 목표 임피던스로 전이되는 동안에 약간의 시 지연이 발생한다. 이러한 시 지연은 전력계통 안정도해석에서 다음과 같은 1차 지연 요소로 고려할 수 있고, 그 블록선도는 그림 2와 같다. 이를 상태방정식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

3. 유전 알고리즘에 의한 퍼지 전 보상기의 자동규칙 발생

전력시스템의 안정도 향상을 위해 본 논문에서 제안하는 TCSC-PSS의 GA-퍼지 전 보상기(Fuzzy Precompensator using Genetic Algorithm)의 블록선도는 그림 3과 같다. 여기서, 퍼지 전 보상기의 각 구성요소를 시행착오법이 아닌 자동으로 최적화하기 위해 유전알고리즘을 이용하였다. 여기서, 최적화하고자 하는 퍼지 전 보상기의 구성요소는 스케일링 계수, 멤버십함수, 제어규칙이다.

그림 4는 퍼지 전 보상기의 각 구성요소를 최적화하기 위한 염색체 구조이다. 본 논문에서 제안한 염색체는 실수 스트링을 사용하여 표현하였다. 염색체의 길이는 다음과 같다. 퍼지 전 보상기의 입출력인 e , Δe 와 y_r 에 대해 스케일링 계수는 각각 GE, GCE와 GY_r 로서 3개, 멤버십함수는 전전부의 경우 퍼지 전 보상기의 입력인 e 와 Δe 에 대해 입력 분할 수가 Negative, Zero, Positive이고, 각 멤버십함수를 표현하는데 필요한 변수는 Center와 Width이므로 전전부 스트링의 총 길이는 $2 \times 3 \times 2 = 12$ 개가 된다. 또 후전부의 경우 퍼지 전 보상기의 출력인 y_r 에 대해 입력 분할 수가 역시 Negative, Zero, Positive이고, 필요한 변수는 Center이므로 후전부 스트링의 총 길이는 $1 \times 3 \times 1 = 3$ 개가 된다. 그러므로 전전부와 후전부의 멤버십함수 최적화를 위한 스트링의 총 길이는 15개이며, 마지막으로 제어규칙의 스트링 길이는 9개이다. 그러므로 각 구성요소에 대한 총 스트링 길이는 27개이다. 그림 4에서 전전부의 e 에 대한 멤버십함수의 중심점 a , 폭 b 와 Δe 에 대한 멤버십함수의 중심점 c , 폭 d 가 차례로 염색체로 구성되며, 이어서 후전부 파라미터인 e_r 가 배치된다. 그 다음에는 스케일링 계수에 대한 변

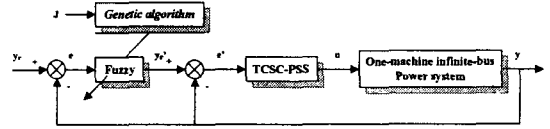


그림 3 PSS의 보상을 위한 GA-퍼지 전 보상기의 구조

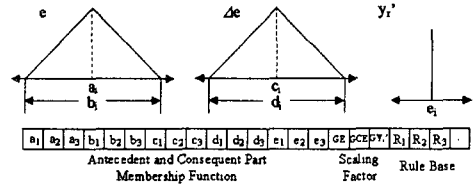


그림 4 제안된 염색체 구조

수가 염색체로 구성되며, 마지막으로 제어규칙이 염색체로 구성된다. 이렇게 구성된 염색체는 하나의 긴 염색체를 구성하며 이 염색체를 사용하여 유전알고리즘이 수행된다. 새롭게 생성된 개체들도 모두 같은 구조를 따르며, 각 개체를 평가할 때에는 퍼지 전 보상기의 구성요소를 추출하고 추출된 구성요소에 의한 퍼지 전 보상기를 이용하여 평가하게 된다. 각 개체의 적합도를 평가하는 적합도 함수는 보통 풀고자하는 최적화 문제의 목적함수나 다른 주관적 평가함수에 의해 결정된다. 일반적으로 퍼지 전 보상기의 최적화는 평가함수값을 최소화시키는 퍼지 전 보상기의 구성요소를 찾아내는 것이다. 따라서 본 논문에서 사용된 평가함수는 식 (2)와 같고, 적합도 함수는 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$J = \int_0^{t_1} (\alpha | \Delta \omega | + \beta \Delta \delta + \gamma \Delta v_r) dt \quad (2)$$

$$\text{Fitness}(J) = \frac{1}{1 + \min J} \quad (3)$$

식 (2)에서 t_1 는 적분시간이며, α, β, γ 는 가중치이다. 식 (3)의 적합도 함수는 퍼지 전 보상기가 기준신호에 빨리 도달하고 정상상태 오차가 최소가 될 때, 최대의 값을 갖는다. 이렇게 정의되어진 적합도 함수는 각 개체가 다음 세대에 생존할 가능성의 척도가 되며 이 적합도가 큰 개체는 다음 세대에 생존할 가능성이 크게 되며 이와 반대로 적합도가 작은 개체는 생존할 가능성이 작게 된다

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 전력시스템의 저주파 진동의 억제에 의해 TCSC-PSS의 GA-퍼지 전 보상기를 설계하였다. 보상기 설계 시에는 먼저, 퍼지 전 보상기의 입출력 요소인 e , Δe 와 y_r 에 대해서 3개의 퍼지변수(Negative, Zero, Positive)를 초기 설정하고, 유전 알고리즘을 이용하여 퍼지 전 보상기의 전전부 및 후전부의 중심치와 폭, 스케일링 계수와 제어규칙을 계산하게 된다. 이 구성요소에 의한 제어성능은 평가함수가 최소화 될 때까지 반복 계산하게 된다. 제안한 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 종래의 Y_u 의 보상기 설계이론에 의한 PSS[1]를 이용하였을 경우에 대하여 시뮬레이션을 통하여 동특성을 비교, 고찰하였다.

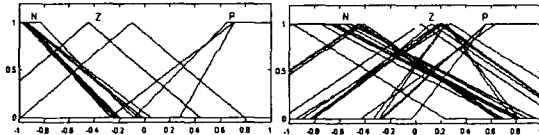
제안한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 정상 부하시($P_{e0}=1.0$ [p.u.], $Q_{e0}=0.015$ [p.u.]) 외란으로서 회전자가 증가가 발생한 경우에 대하여 GA-퍼지 전 보상기를 설계하였다. 유전 알고리즘에 의해 최적화된 퍼지 전 보상기의 각 구성요소의 값들은 각각 표 1, 표 2와 그림 5와 같다.

표 1 최적화된 스케일링 계수

GE	GCE	GYr'
0.052162	0.005254	0.276862

표 2 최적화된 퍼지규칙

y_r'		Δe		
		N	Z	P
e	N	N	Z	Z
	Z	Z	N	N
	P	Z	Z	Z



Label	N	Z	P	Label	N	Z	P
Final Center	-0.815372	0.428260	0.697158	Final Center	-0.493109	0.178480	0.558830
Final Width	1.481294	1.767739	1.902114	Final Width	2.924576	2.149305	1.658798

(a) Error

(b) Change of error

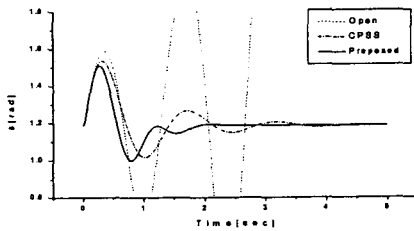
y_r'	N	Z	P
	0.496286	0.294798	0.792072

(c) Final center values of consequent part

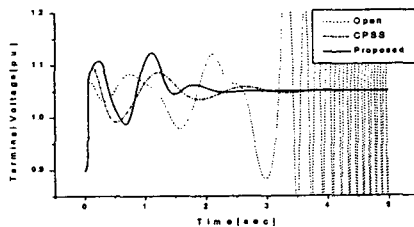
그림 5 최적화된 멤버쉽함수

4.1 정상 부하시

제한한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 정상 부하시 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6은 정상 부하시 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우에 대해 발전기 회전자각(rotor angle), 단자전압(terminal voltage)의 동특성 응답을 나타내었다. 제한한 제어기의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우보다 정정시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.



(a) Rotor angle

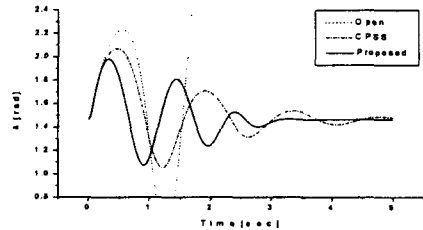


(c) Terminal Voltage

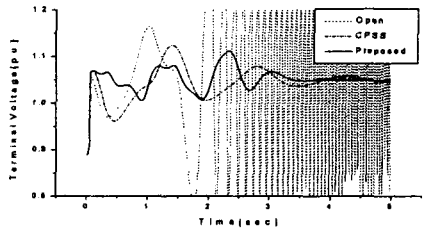
그림 6 정상부하시 3상고장에 대한 응답 ($\Delta P_{e0}=1.0$ [p.u.], $\Delta Q_{e0}=0.015$ [p.u.])

4.2 중부하시

부하조건 변화로 유효전력 $P_{e0}=1.0$ [p.u.]에서 $P_{e0}=1.3$ [p.u.]로 30%증가한 중부하시 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 정상 부하시 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우에 대해 발전기 회전자각(rotor angle), 단자전압(terminal voltage)의 동특성 응답을 나타내었다. 제한한 제어기의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우보다 정정시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.



(b) Rotor angle



(c) Terminal Voltage

그림 7 중부하시 3상고장에 대한 응답 ($\Delta P_{e0}=1.3$ [p.u.], $\Delta Q_{e0}=0.015$ [p.u.])

5. 결론

본 논문에서는 종래의 만족스럽게 설계된 TCSC-PSS를 보상하기 위해 GA-퍼지 전 보상기를 이용하는 새로운 설계방식과 이를 전력시스템에 적용하는 문제를 다루었다. 전력시스템 안정도 향상을 위한 GA-퍼지 전 보상기 설계의 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 퍼지 전 보상기 설계시 최적화에 강인한 유전알고리즘을 이용하였으며, 종래의 퍼지 전 보상기의 구성요소(스케일링 계수, 멤버쉽함수, 제어규칙) 선정시 사용되었던 시행착오법이나 부분적인 최적화와는 달리 자동으로 모든 퍼지 전 보상기의 구성요소를 최적화시켰다. 또 전 보상형 제어기법이 현재 전력시스템에 간단히 설치될 수 있는 제어구조를 가지고 있음을 보였다.

둘째, 2가지 경우의 사례연구를 통하여 종래의 보상기 설계이론에 의한 PSS와 GA-퍼지 전 보상기의 성능을 비교, 고찰하였다. 정상부하시 및 중부하시의 사례연구를 통하여 제안된 제어 장치는 전력시스템 안정화에 효과적임을 알 수 있었고, 또한 강인성을 검증하였다.

[참고 문헌]

- [1] Y. N. Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic Press, 1983.
- [2] J. H. Kim, K. C. Kim and E. K. P. Chong, "Fuzzy Precompensated PID Controllers", IEEE Trans. on Control Systems, Vol. 2, No. 4, pp. 406-411, 1994.
- [3] M. A. Abido, "Pole placement technique for PSS and TCSC based stabilizer design using simulated annealing", Elec. Power and Energy Systems, Vol. 22, pp. 543-554, 2000.