

전력계통의 안정도 향상을 위한 TCSC의 GA-퍼지 제어기 설계

왕용필† · 정문규* · 정형환** · 안병철***
(원고접수일 : 2004년 8월 7일, 심사완료일 : 2005년 2월 21일)

Design of GA-Fuzzy Controller of TCSC for Enhancement of Power System Stability

Yong Peel Wang† · Mun Kyu Chung* · Hyeng-Hwan Chung** · Byung-Chul An***

Abstract : In this paper, it was designed the GA-fuzzy controller of a Thyristor Controlled Series Capacitor(TCSC) for enhancement of power system stability. The newly designed controller of TCSC was designed to overcome the nonlinearity such as operating point change of power system as well as to respond to disturbances as uncertainties of line parameters and line fault. So, fuzzy controller by intelligent control theory was used for it. And the fuzzy controller was optimized from a genetic algorithm for complements the demerit such as the difficulty of the component selection of fuzzy controller, namely, scaling factor, membership function and control rules. Nonlinear simulation results show that the proposed control technique is superior to conventional PSS in dynamic responses over the wide range of operating conditions and is convinced robustness and reliableness in view of structure.

Key words : Thyristor controlled series capacitor(사이리스터 제어 직렬 커패시터), Flexible AC transmission system(유연송전시스템), Power system stabilizer(전력계통 안정화 장치), Genetic algorithm(유전알고리즘), Fuzzy controller(퍼지 제어기)

1. 서 론

전력계통의 유연성과 제어성능을 향상시킴으로써 운전효율과 신뢰도를 극대화하기 위한 방안으로 유연송전시스템(Flexible AC Transmission

System : FACTS) 기술이 개발되었다.

FACTS를 위한 소자의 일환으로서 선로의 임피던스를 변경하기 위해 직렬 커패시터(Series Capacitor)가 사용되었으며, 모선의 전압을 유지하기 위해 전력용 콘덴서(Static Condenser :

† 책임저자(동아대학교 전기공학과), E-mail : ypwang@daunet.donga.ac.kr, Tel : 051)200-6944

* 한국전력공사

** 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부

*** 부산울산지방 중소기업청 공업연구사

SC)가 사용되었다. 이후, 고정된 기계적인 스위칭에서 사이리스터 스위칭으로 대치함으로써 한층 더 발전된 사이리스터 제어 직렬 커패시터(Thyristor Controlled Series Capacitor : TCSC)와 정지형 무효전력 보상기(Static Var Compensator : SVC)의 실용화가 되고 있다.

본 논문에서 적용한 TCSC는 사이리스터 제어 리액터(Thyristor Controlled Reactor : TCR)와 고정된 커패시터의 병렬구조로 이루어져 있다. TCSC는 정상상태에서는 고정된 커패시터와 같이 동작하여 전력조류를 제어하며, 과도시에는 선로의 조류를 변조함으로써 전력계통 안정화 효과를 가져 올수 있다. 또한 기존의 기계적 스위칭에 의한 직렬 보상기가 내포하고 있는 저주파 공진 방지 기능과 커패시터 보호 및 재투입 기능을 부여할 수 있다^{[11], [12]}.

TCSC등과 같은 FACTS 만으로는 전력수요 증가에 따른 저주파 진동현상 및 경부하 심야운전 중의 전압상승등 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^[3].

전력계통의 가장 중요한 특징중의 하나는 발전 조건, 전송조건, 또는 부하조건에 따라 동작조건이 지속적으로 변하고 있다는 것이다. 이러한 동작환경의 변화는 전력계통에 대한 수학적인 표현과 실제 전력계통의 물리적인 구조간에 차이를 발생시킨다. 이것은 미소 신호 선형화 된 전력계통 모델에서 파라미터 불확실성으로 표현될 수 있다. 이러한 계통의 변동에 대응하고자 하는 노력의 일환으로 W. Gu^[4]등은 자기 동조 제어기법을 이용

하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였고, 최근에는 적응제어^[5], 퍼지논리^[6], 신경회로망^[7] 및 유전 알고리즘^[8] 등과 같은 지능제어형 기법에 관한 연구가 진행되어 왔다. 한편 지능제어형 기법을 이용한 TCSC의 보조 제어기 설계에 관한 연구로서도 역시 H_{∞} ^[9] 및 신경회로망^[10]등과 같은 지능제어 기법이 제안되고 있다.

이중 퍼지 제어기는 우수한 제어성을 나타내기 위해서 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수를 조정해야하는데, 종래에는 전문가의 경험과 시행착오법에 바탕을 두었기 때문에 시스템에 대한 전문적인 지식 없이는 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.

따라서 본 논문에서는 전력계통의 안정도 향상을 위해 TCSC의 보조 장치로서 GA-퍼지 제어기를 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 PSS의 설계가 기존의 설계 방식(Conventional PSS : CPSS)보다 효율적이며 전력계통 안정도 향상에 크게 기여함을 보이고자 한다.

2. 전력계통의 수학적 모델

전력계통의 안정도 해석, 동특성 및 제어특성을 고찰하기 위해서는 발전기, 부하, 제어계통 등으로 구성된 전력계통에 대하여 적절한 수학적 모델이 필수적으로 요구된다. 이러한 전력계통의 구성 요소들에 대한 수학적인 모델은 매우 다양하다. 수학적인 모델을 구성하는데 있어서 아무리 정교한 모델이라 하더라도 데이터의 질이 좋지 못하면 결과 또한 신뢰성이 감소하므로 근사적인 모델을 사용하더라도 정확한 데이터를 사용하게 되면 더

속 신뢰성 있는 결과를 얻게 된다. 그러므로 계통의 형태와 해석기준에 따라 적절한 모델링 방법을 선택해야 한다. 본 연구에서 사용된 TCSC를 포함한 1기 무한대 모선 계통은 Fig. 1과 같다.

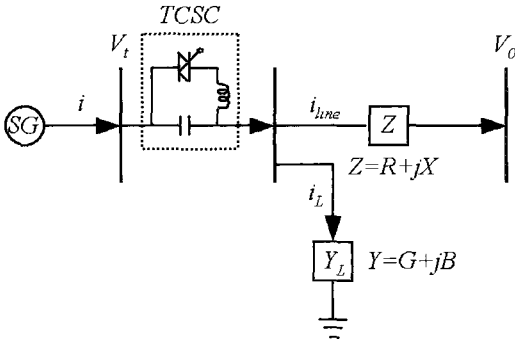


Fig. 1 One machine infinite bus power system with a TCSC

Fig. 1에서 TCSC는 전력의 흐름을 조절하기 위하여 선로에 직렬로 연결되어 있다. 그러므로 TCSC는 저주파 진동을 제동(damping)시킬 수 있으며, 전력전송 능력을 향상시킬 수 있다. 또한 TCSC는 TCR과 고정된 커패시터가 병렬로 연결된 구조로 이루어져 있으며, 사이리스터의 점호각을 제어함으로써 선로 임피던스를 조절할 수 있다.

식 (1), (2)는 동요 방정식(Swing equation)으로 발전기의 기계적인 동특성을 나타내며, 식 (3)은 발전기의 전기적인 부분으로서 여자권선에 의한 자속감쇠의 영향이 나타낸다. SSR과 같은 현상을 연구하기 위해서는 이보다 좀더 자세한 모델을 사용하여야 한다. 전기적 부분은 6차 모델을 사용하고, 기계적 부분은 터빈계통을 자세히 모델링 하여야 한다.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [T_M - (E_q' i_q + (x_q - x_d') i_d i_q + D(\omega - 1))] \quad (1)$$

$$\delta = \omega_0(\omega - 1) \quad (2)$$

$$\dot{E}_q' = -\frac{1}{T_{do}} (E_q' + (x_d - x_d') i_d - E_{fd}) \quad (3)$$

여기서, ω 는 발전기의 각속도, δ 는 회전자 각,

E_q' 는 q축 과도 유기 기전력, M 은 관성계수, T_M 은 기계적 토크입력, i_d, i_q 는 d, q축 전류, x_d, x_q 는 d, q축 동기 리액턴스, x_d' 는 d축 과도 리액턴스, D 는 제동계수, ω_0 는 기준 각속도, T_{do}' 는 직축 과도 시정수이다.

여자의 주목적은 발전기의 계자전류를 조절함으로써 발전기의 단자전압을 제어하는 것이다. 고전적 안정도 해석에서는 통상 외란시에 발전기의 여자의 효과를 무시하였으나 최근 사이리스터를 채용한 고속의 여자시스템이 채용됨으로 인해서 전력계통의 과도 안정도는 향상이 되고 있다. 그러나 미소신호 안정도에는 오히려 역효과를 나타내고 있음이 알려지고 있다. 따라서 여자는 전력계통의 안정도에 큰 영향을 미치므로 안정도 해석시에 여자의 효과를 고려하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 Fig. 2와 같은 IEEE Type ST1 여자를 채택하였고 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{E}_{fd} = \frac{K_A}{T_A} (V_{ref} - V_t) - \frac{1}{T_A} E_{fd} \quad (4)$$

여기서, E_{fd} 는 계자 전압에 해당하는 고정자의 유기 기전력을 나타내며, V_{ref} 및 V_t 는 각각 발전기 기준전압과 단자전압이다. 또한, K_A 와 T_A 는 각각 여자 시스템의 이득과 시정수이다.

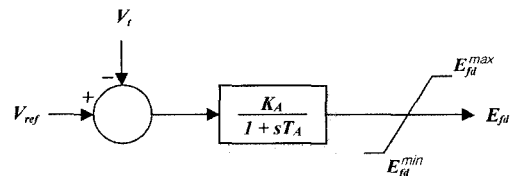


Fig. 2 IEEE type ST1 exciter

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 있다. 제어기로부터 입력되는 임피던스 신호는 이 임피던스를 구현하는 점호각으로 변환된다. 이로부터 사이리스

터의 점호각 제어를 통하여 목표 임피던스로 전이 되는 동안에 약간의 시 지연이 발생한다. 전력계통 동요해석의 주파수 범위인 0.1Hz에서 2Hz까지의 현상에 적합한 TCSC의 모델로서는 이러한 시지연을 1차 지연요소로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 이 모델을 채택하여 TCSC의 시지연을 간단한 1차 요소로 표현하였다. 여기서 채택한 모델은 식 (5)와 같고, 그 블록 선도는 Fig. 3과 같이 나타내었다.

$$\dot{X}_{TCSC} = \frac{K_{TCSC}}{T_{TCSC}} (X_{TCSC}^{ref} + u_{TCSC} - X_{TCSC}),$$

$$X_{TCSC}^{min} \leq X_{TCSC} \leq X_{TCSC}^{max} \quad (5)$$

여기서, X_{TCSC} 는 TCSC의 임피던스를 나타내며 단위는 단위법이다, T_{TCSC} 는 TCSC의 시정수, K_{TCSC} 는 TCSC의 이득, X_{TCSC}^{ref} 는 정상운전시 기준임피던스 입력신호를 나타낸다. u_{TCSC} 는 보조제어 입력으로서 계통에 미치는 과도적인 특성을 개선하기 위하여 설계된 제어기의 출력신호가 입력될 수 있다. X_{TCSC}^{max} 및 X_{TCSC}^{min} 는 TCSC 용량의 상, 하한치를 나타낸다.

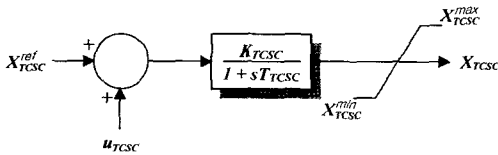


Fig. 3 Block diagram of a TCSC

Fig. 1에서 나타내고 있는 발전기, 선로에 위치한 TCSC, 그리고 부하 어드미턴스와 선로 임피던스를 포함한 전송선로를 하나의 전체적인 전력계통으로 표현하기 위하여 대수 방정식 및 망 방정식으로 이를 설명한다. Fig. 1에서 발전기 단자 전압 및 d축, q축 성분은 식 (6)~(8)과 같다.

$$V_i = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (6)$$

$$v_d = x_q i_q \quad (7)$$

$$v_q = E_q' - x_d' i_d \quad (8)$$

Fig. 1에서 TCSC는 선로에 위치해 있고, TCSC 제어를 고려한 임의의 단자전압 V_i' 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며, d축과 q축 성분은 각각 식 (10), (11)와 같다.

$$V_i' = V_i - jX_{TCSC}i \quad (9)$$

$$v_d' = (x_q + X_{TCSC})i_q \quad (10)$$

$$v_q' = E_q' - (x_d' + X_{TCSC})i_d \quad (11)$$

여기서, i 는 발전기 전기자 전류이다.

부하전류 $i_L = V_i Y_L$ 이고, 선로전류 $i_{line} = i - i_L$ 이며, 무한 모션전압 $V_o = V_i' - i_{line}Z$ 이다.

또한, 무한 모션전압의 d축과 q축 성분은 각각 식 (12), (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{od} = V_o \sin \delta = C_1 v_d' - C_2 v_q' - R i_d + X i_q \quad (12)$$

$$v_{oq} = V_o \cos \delta = C_2 v_d' + C_1 v_q' - X i_d - R i_q \quad (13)$$

여기서, 사용된 C_1, C_2 값은 각각 식 (14), (15)와 같다.

$$C_1 = 1 + RG - XB \quad (14)$$

$$C_2 = XG + RB \quad (15)$$

i_d 와 i_q 를 구하기 위하여 식 (12), (13)을 연립하여 계산하면, 발전기, TCSC 및 선로에 관한 식 (16), (17)을 구할 수 있다.

$$i_d = \frac{RC_1 + XC_2}{R^2 + X^2} v_d' + \frac{XC_1 - RC_2}{R^2 + X^2} v_q' - V_o \frac{R \sin \delta + X \cos \delta}{R^2 + X^2} \quad (16)$$

$$i_q = \frac{RC_2 - XC_1}{R^2 + X^2} v_d' + \frac{RC_1 + XC_2}{R^2 + X^2} v_q' + V_o \frac{X \sin \delta - R \cos \delta}{R^2 + X^2} \quad (17)$$

3. TCSC를 위한 GA-퍼지 제어기 설계

1970년 John Holland는 집단이 가진 염색체(chromosome)가 세대(generation)에 따라 그들이 처한 환경에 대하여 생존과 번식의 적합한 활동을 위한 자연선택(natural selection) 때문에 진화된다는 다윈의 진화이론을 토대로 한 자연의 유전원리를 모방하여 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 도입하기 시작했다. 이 유전 알고리즘은 최근 최적화 문제를 해결하는데 적용되고 있으며 해를 구하는 방법에서 강인한 탐색 방법으로 알려져 있다.

전력계통의 안정도 향상을 위해 본 논문에서 제안하는 GA-퍼지 제어기의 블록선도는 Fig. 4와 같다. 여기서, 퍼지 제어기의 각 구성요소를 시행착오법이 아닌 자동으로 최적화하기 위해 유전 알고리즘을 이용하였다. 여기서, 최적화하고자 하는 퍼지 제어기의 구성요소는 스케일링 계수, 멤버십 함수, 제어규칙이다.

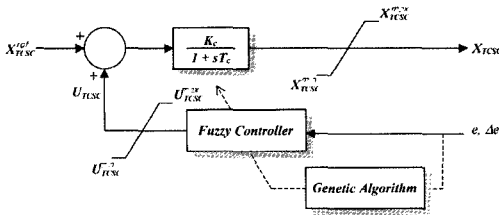


Fig. 4 Proposed GA-Fuzzy Controller for a TCSC

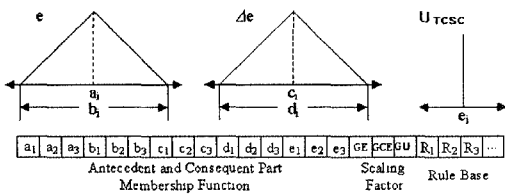


Fig. 5 Proposed chromosome structure

Fig. 5는 퍼지 제어기의 각 구성요소를 최적화하기 위한 염색체 구조이다. 본 논문에서 제안한 염색체는 실수 스트링을 사용하여 표현하였다. 염색체의 길이는 다음과 같다. 퍼지 제어기의 입력

력인 e , Δe 와 U_{TCSC} 에 대해 스케일링 계수는 각각 GE, GCE와 GU로서 3개, 멤버십함수는 전건부의 경우 퍼지 제어기의 입력인 e 와 Δe 에 대해 입력 분할 수가 Negative, Zero, Positive이고, 각 멤버십함수를 표현하는데 필요한 변수는 Center와 Width이므로 전건부 스트링의 총 길이는 $2 \times 3 \times 2 = 12$ 개가 된다. 또 후건부의 경우 퍼지 제어기의 출력인 U_{TCSC} 에 대해 입력 분할 수가 역시 Negative, Zero, Positive이고, 필요한 변수는 Center이므로 후건부 스트링의 총 길이는 $1 \times 3 \times 1 = 3$ 개가 된다. 그러므로 전건부와 후건부의 멤버십함수 최적화를 위한 스트링의 총 길이는 15개이며, 마지막으로 제어규칙의 스트링 길이는 9개이다. 그러므로 각 구성요소에 대한 총 스트링 길이는 27개이다. Fig. 5에서 전건부의 e 에 대한 멤버십함수의 중심점 a , 폭 b 와 Δe 에 대한 멤버십함수의 중심점 c , 폭 d 가 차례로 염색체로 구성되며, 이어서 후건부 파라미터인 e 가 배치된다. 그다음에는 스케일링 계수에 대한 변수가 염색체로 구성되며, 마지막으로 제어규칙이 염색체로 구성된다. 이렇게 구성된 염색체는 하나의 긴 염색체를 구성하며 이 염색체를 사용하여 유전 알고리즘이 수행된다. 새롭게 생성된 개체들도 모두 같은 구조를 따르며, 각 개체를 평가할 때에는 퍼지 제어기의 구성요소를 추출하고 추출된 구성요소에 의한 퍼지 제어기를 이용하여 평가하게 된다. 각 개체의 적합도를 평가하는 적합도 함수는 보통 풀고자하는 최적화 문제의 목적함수나 다른 주관적 평가함수에 의해 결정된다. 일반적으로 퍼지 제어기의 최적화는 평가함수값을 최소화시키는 퍼지 제어기의 구성요소를 찾아내는 것이다. 본 논문에서 사용된 계통 모델은 식 (1)~(5)를 이용하여 모델링하였고, 사용된 평가함수는 식 (18)과 같이 선정하였다. 또한 사용된 외란은 회전자각을 0.1(rad) 만큼 변동시켰을 경우로 하였다. 적합도 함수는 식 (19)와 같이 정의하였다.

$$J = \int_0^{t_1} (\alpha | \omega_b - \omega | + \beta | \delta_0 - \delta | + \gamma | v_{ref} - v_t |) dt \tag{18}$$

$$\text{Fitness}(J) = \frac{1}{1 + \min J} \quad (19)$$

식 (18)에서 t_1 은 적분시간, w_b 는 기준 각속도, δ_0 는 초기 회전자각, v_{ref} 는 기준전압, α, β, γ 는 가중치이다. 식 (19)의 적합도 함수는 퍼지 제어가 기준신호에 빨리 도달하고 정상상태 오차가 최소가 될 때, 최대의 값을 갖는다. 이렇게 정의된 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 전력계통의 저주파 진동을 효율적으로 억제할 수 있는 GA-퍼지 제어를 설계하였다. 제어기 설계 시에는 먼저, 퍼지 제어기의 입력 출력 요소인 $e, \Delta e$ 와 U_{TCSC} 에 대해서 3개의 퍼지 변수(Negative, Zero, Positive)를 초기 설정하고, 유전 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기의 전건부 및 후건부의 중심치와 폭, 스케일링 계수와 제어규칙을 계산하였다. 이 구성요소에 의한 제어 성능은 평가함수가 최소화 될 때까지 반복계산 하게 된다. 제안한 제어기의 외란 억제 성능과 강인성을 입증하기 위하여 1기 무한대 모선계통에 대해 다양한 부하변동이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 통하여 CPSS^[3]와 동특성을 비교, 고찰하였다. 본 논문에서 사용한 1기 무한대 모선계통의 경우 동기기, 여자기 및 선로정수과 계통의 정상 상태는 Table 1과 같다.

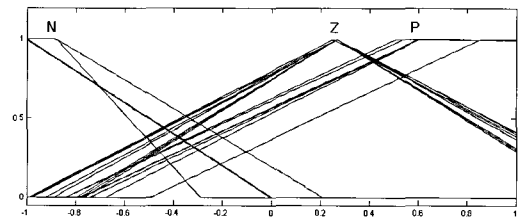
Table 1 System parameters

발전기 정수	$M = 9.26[\text{p.u.}]$ $T_{do}' = 7.76[\text{p.u.}]$ $x_d' = 0.19[\text{p.u.}]$	$D = 0.0[\text{p.u.}]$ $x_{d1} = 0.973[\text{p.u.}]$ $x_q = 0.55[\text{p.u.}]$
여자기 정수	$K_A = 50.0[\text{p.u.}]$	$T_A = 0.05[\text{p.u.}]$
선로 정수	$R = -0.034[\text{p.u.}]$ $G = 0.249[\text{p.u.}]$	$X = 0.997[\text{p.u.}]$ $B = 0.262[\text{p.u.}]$
정상 상태	$P_e = 1.0[\text{p.u.}]$ $V_t = 1.05[\text{p.u.}]$	$Q_e = 0.015[\text{p.u.}]$ $X_{TCSC} = 0.0[\text{p.u.}]$

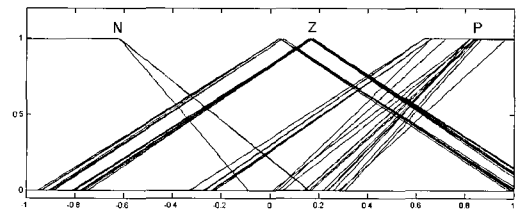
제안한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 정상 부하시(유효전력 $P_e=1.0[\text{p.u.}]$, 무효전력 $Q_e=0.015[\text{p.u.}]$, $X_{TCSC}=0.0[\text{p.u.}]$) 외란으로서 회전자각 증가가 발생한 경우에 대하여 GA-퍼지 제어를 설계하였다. 유전 알고리즘의 초기 파라미터는 Table 2와 같고, 멤버쉽함수의 동조 과정은 Fig. 6과 같다. 최적화된 퍼지 제어기의 각 구성요소의 값들은 각각 Table 3, Table 4와 Table 5와 같다. 또 각 세대에 따른 최대적합도와 평균적합도는 Fig. 7의 (a)와 같으며, 평가함수가 최소화되고 있는 과정을 Fig. 7의 (b)에서 보여주고 있다. 이 그림에서는 최적값을 찾기 위해 전역적 탐색을 수행하고 있음을 보여주고 있으며 약 50세대 이후에는 최적 멤버쉽함수 값에 수렴하고 있음을 알 수 있었다.

Table 2 Initial parameters

Parameters	Values
Population size	20
Number of generation	400
Crossover rate	0.85
Mutation rate	0.01



(a) Error



(b) Change of error

Fig. 6 Optimization process of membership function

Table 3 Optimized scaling factors

GE	GCE	GU
0.003030	0.975160	0.499104

Table 4 Optimized fuzzy rules

U _{TCSC}		Δe		
		N	Z	P
e	N	N	N	N
	Z	N	Z	N
	P	N	Z	N

Table 5 Optimized membership function

		N	Z	P
e	Center	-0.880181	0.267503	0.600684
	Width	2.178783	2.090765	2.682720
Δe	Center	-0.618934	0.167521	0.822804
	Width	1.554965	1.829030	1.357322
UTCSC	Center	-0.634377	0.387688	0.895746

4.1 정상 부하시($P_e=1.0$ [p.u.], $Q_e=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=0.0$ [p.u.])

제안한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 정상 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경

우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 8은 정상 부하시 1초 후에 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. 이때 PSS의 입력 신호 -0.2 [p.u.] $\leq U_{TCSC} \leq 0.2$ [p.u.], TCSC의 임피던스 -0.5 [p.u.] $\leq X_{TCSC} \leq 0.5$ [p.u.], 발전기 계자전압 -0.5 [p.u.] $\leq E_{FD} \leq 0.5$ [p.u.] 로 제한하였다. 제안한 제어기의 경우가 CPSS를 이용한 경우보다 정정시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다. Fig. 9는 발전기의 초기 회전자각을 0.1[rad] 만큼 변동시켰을 경우 CPSS의 경우와 제안한 제어기를 이용한 경우에 대하여 발전기 회전자각, 단자전압의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 제어기의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우보다 발전기의 회전자각 및 단자전압의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈트 면에서도 기존의 PSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

정상부하시 TCSC를 포함한 전력계통의 회전자각 및 단자전압 특성을 3상 단락 및 회전자각 증가가 발생한 경우에 대해 살펴보면 Table 6과 같다.

Table 6 Simulation results in normal load

Disturbance	Case	Control method	CPSS	Proposed
Three-phase fault	δ_{max} [rad]		3.6904×10^{-1}	2.1875×10^{-1}
	V_l max [p.u.]		3.8283×10^{-2}	4.1336×10^{-2}
	RT δ [sec]		3.26	1.44
	RT V_l [sec]		2.75	1.87
Increasing rotor angle	δ_{max} [rad]		4.5592×10^{-2}	8.9810×10^{-3}
	V_l max [p.u.]		9.9494×10^{-3}	3.7547×10^{-3}
	RT δ [sec]		3.50	1.72
	RT V_l [sec]		3.86	1.21

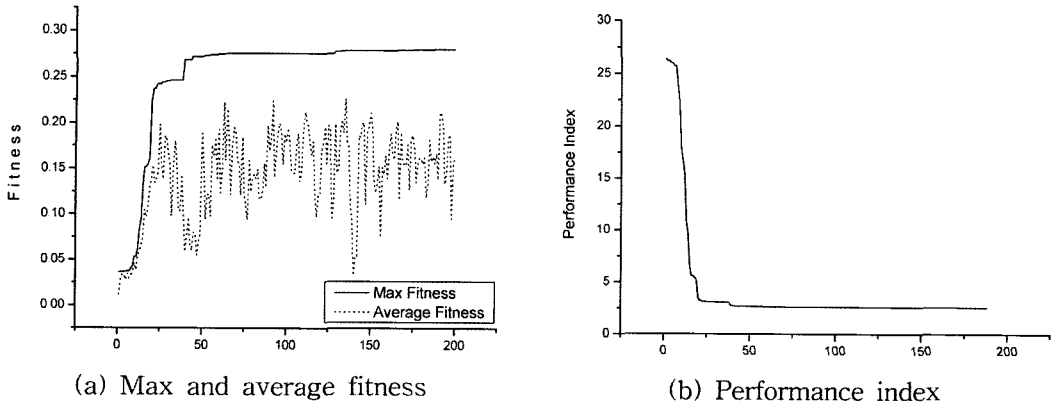


Fig. 7 Fitness and performance index

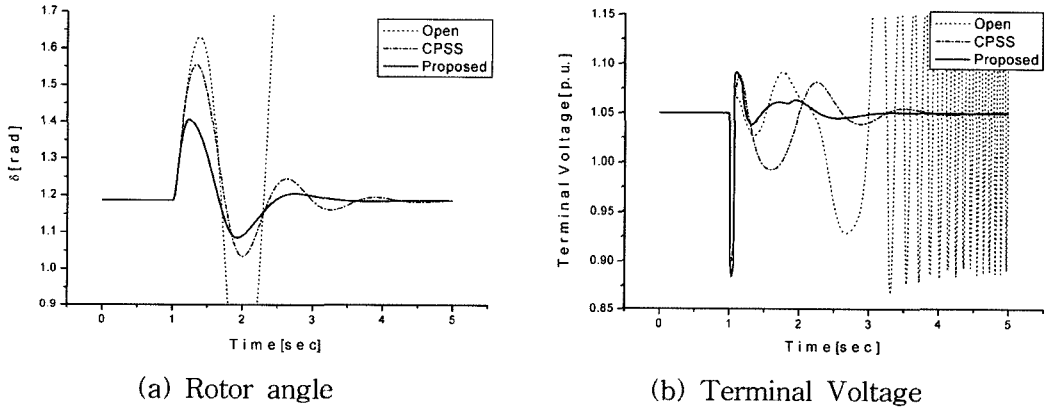


Fig. 8 Responses to three-phase fault in normal load
 $(P_e=1.0[p.u.], Q_e=0.015[p.u.], X_{rsc}=0.0[p.u.])$

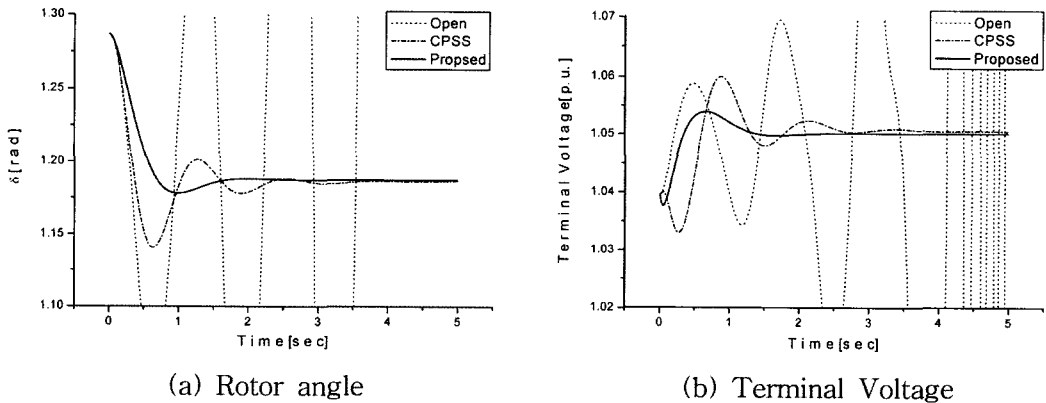
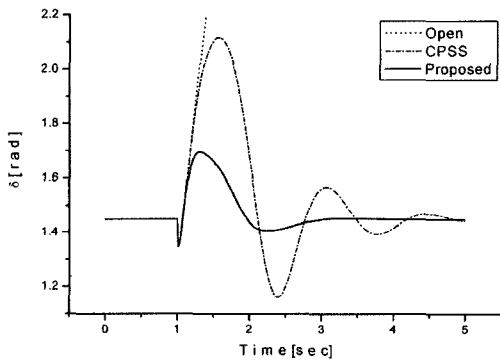


Fig. 9 Responses to increasing rotor angle in normal load
 $(P_e=1.0[p.u.], Q_e=0.015[p.u.], X_{rsc}=0.0[p.u.])$

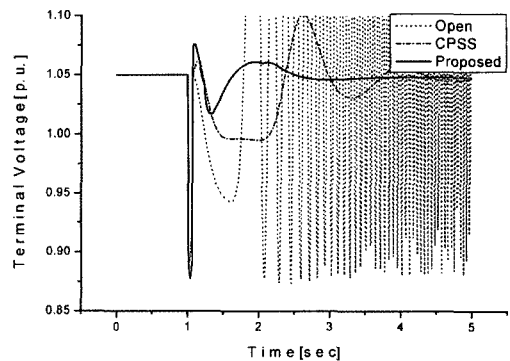
4.2 중부하시($P_e=1.2$ [p.u.], $Q_e=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=-0.2$ [p.u.])

제안한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 중부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 10은 중부하시 1초 후에 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. 제안한 제어기의 경우가 CPSS를 이용한 경우보다 정정시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하

였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성을 보였다. Fig. 11은 발전기의 초기 회전자각을 0.1[rad] 만큼 변동시켰을 경우 CPSS의 경우와 제안한 제어기를 이용한 경우에 대하여 발전기 회전자각, 단자전압의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 제어기의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우보다 발전기의 회전자각 및 단자전압의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈트 면에서도 기존의 PSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성을 보였다.

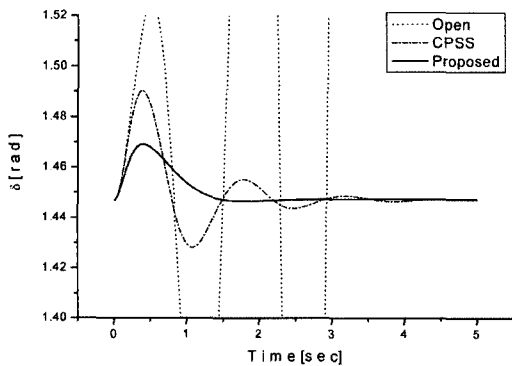


(a) Rotor angle

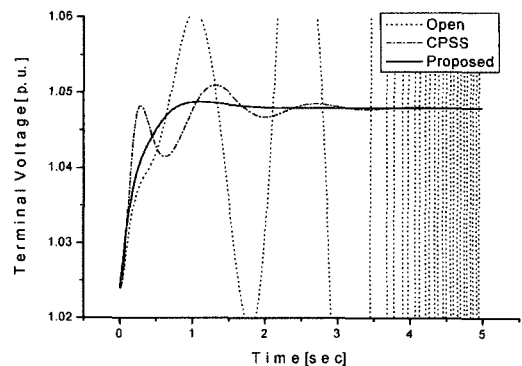


(b) Terminal Voltage

Fig. 10 Responses to three-phase fault in heavy load ($P_e=1.2$ [p.u.], $Q_e=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=-0.2$ [p.u.])



(a) Rotor angle



(b) Terminal Voltage

Fig. 11 Responses to increasing rotor angle in heavy load ($P_e=1.2$ [p.u.], $Q_e=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=-0.2$ [p.u.])

Table 7 Simulation results in heavy load

Disturbance	Case	Control method	CPSS	Proposed
Three-phase fault	δ_{max} [rad]		6.6990×10^{-1}	2.4961×10^{-1}
	V_f max [p.u.]		5.1197×10^{-2}	2.6213×10^{-2}
	RT δ [sec]		4.34	1.97
	RT V_f [sec]		3.98	1.45
Increasing rotor angle	δ_{max} [rad]		4.3062×10^{-2}	2.1944×10^{-2}
	V_f max [p.u.]		3.0372×10^{-3}	8.3604×10^{-4}
	RT δ [sec]		4.02	1.37
	RT V_f [sec]		2.94	1.86

중부하시 TCSC를 포함한 전력계통의 회전자각 및 단자전압 특성을 3상 단락 및 회전자각 증가가 발생한 경우에 대해 살펴보면 Table 7과 같다.

5. 결 론

본 논문에서는 전력계통의 안정도 향상을 위해 TCSC의 보조 장치로 GA-퍼지 제어를 설계하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 퍼지 제어기 설계시 최적화에 강인한 유전 알고리즘을 이용하였으며, 종래의 퍼지 제어기의 구성요소(스케일링 계수, 멤버쉽함수, 제어 규칙) 선정시 사용되었던 시행착오법이나 부분적인 최적화와는 달리 자동으로 모든 퍼지 제어기의 구성요소를 최적화시켰다. 또한 TCSC의 보조 장치로 지능형 제어기법을 이용함으로써 불확실성이 항상 존재하는 전력계통에 적합함을 보였다.

둘째, 2가지 경우의 사례연구를 통하여 CPSS와 GA-퍼지 제어기의 성능을 비교, 고찰하였다. 제안한 제어기의 경우가 CPSS의 경우보다 최대 편차량 및 정정시간의 특성에서 정상부하시 30~80%, 중부하시 40~70%정도 우수함을 알 수 있었다. 따라서 제안된 제어 장치는 전력계통 안정화에 효과적임을 알 수 있었고, 또한 제어기의 강인성을 검증하였다.

참고문헌

- [1] J. J. Paserba, N. W. Miller, E. V. Larsen, R. J. Piwko, "A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, pp. 1471-1478, 1995.
- [2] 한전전력연구원, "FACTS 계통운용 기술개발 연구", 1999.
- [3] Y. N. Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic Press, 1983.
- [4] W. Gu. and K. E. Bollinger, "A Self-tuning Power System Stabilizer for Wide-range Synchronous Generator Operation", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 4, No. 3, pp. 1191-1199, 1989.
- [5] C. X. Mao et al, "Studies of Real-time Adaptive Optimal Excitation Controller and Adaptive Optimal Power System Stabilizer", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3, pp. 498-505, 1992.
- [6] M. Hassan, O. P. Malik and G. S. Hope, "A Fuzzy Logic based Stabilizer

for a Synchronous Machine”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, pp. 407-413, 1991.

- [7] Y. Zhang et al, “An Artificial Neural Network based Adaptive Power System Stabilizer”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 8, No. 1, pp. 71-77, 1993.
- [8] 정형환, 왕용필, 정동일, 정문규, “유전 알고리즘을 이용한 전력시스템 안정화 장치의 최적 파라미터 선정”, 대한전기학회 논문지, Vol. 48A, No. 6, pp. 683-691, 1999.
- [9] Zhao Q, Jiang J, “A TCSC damping controller using robust control theory”, Electrical Power and Energy Systems, pp. 25-33, 1998.
- [10] Dai X et al, “Neural network ath-order inverse control of thyristor controlled series compensator”, Electric Power System Res., pp. 19-27, 1998.

저 자 소 개



왕용필 (王龍泌)

1966년 8월 25일생, 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1999년-2001년 뉴질랜드 Canterbury University(Post- Doc), 현재 동아대학교 전기공학과 초빙교수.



정문규 (鄭文圭)

1971년 11월 16일생, 1998년 동아대 공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 한국전력공사 창원전력관리처 근무.



정형환 (鄭亨煥)

1941년 1월 19일생, 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수.



안병철 (安秉喆)

1963년 6월 2일생. 1988년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산울산지방 중소기업청 공업연구소.