

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

論 文

54A-2-1

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

王龍泌[†] · 鄭文圭^{*} · 鄭亨煥^{**}

(Yong-Peel Wang · Mun-Kyu Chung · Hyeng-Hwan Chung)

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 by adding a fuzzy precompensator to an existing TCSC-PSS. And we optimize the fuzzy precompensator with 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 TCSC-PSS in dynamic responses over the wide range of operating conditions and in convinced robust and reliable in view of structure.

Key Words : Genetic Algorithm(GA), GA-Fuzzy Precompensator, Thyristor Controlled Series Capacitor(TCSC)

1. 서 론

최근 급속히 발전하는 전력전자 기술과 고속 정밀제어 기술을 이용하여 교류송전에 관련된 독립변수들을 신속, 정확하게 조절하여 선로의 유, 무효전력을 제어하는데 유연성을 갖도록 구성된 교류송전시스템을 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System : FACTS)이라 한다[1]. 이 FACTS는 송전용량을 극대화할 수 있다는 점 이외에도 효과적인 전력 조류 및 전압제어, 안정도 향상, 전력계통 동요억제, 저주파공진 감쇄, 사고전류 제한 등 여러 가지 장점을 가지고 있다 [2-3]. 현재까지 널리 알려진 FACTS 설비로는 선로와 병렬로 연결되어 모선의 전압 안정도를 유지하고 선로의 전송용량을 증대시키는 정지형 동기조상기(Static Synchronous Compensator : STATCOM), 이와 동일한 구조를 가지며 선로와 직렬로 동작하는 정지형 동기직렬보상기(Static Synchronous Series Compensator : SSSC), STATCOM과 SSSC의 직렬 링크단을 공유시켜 선로로 전송되는 무효전력 뿐만 아니라 유효전력도 총체적으로 보상 가능한 통합조류제어기(Unified Power Flow Controller : UPFC), 콘덴서를 직렬로 삽입하여 송전선로의 리액턴스를 조정하는 사이리스터 직렬 커패시터(Thyristor Controlled Series Capacitor : TCSC), 선로와 병렬로 연결되어 모선의 전압 안정도를 유지

하기 위한 정지형 무효전력 보상기(Static Var Compensator : SVC)등이 있다[1,4-5].

이중 TCSC는 여러 가지 장점으로 인하여 FACTS의 구현에 있어 중요한 기기중의 하나로서 사이리스터 제어 리액터(Thyristor Controlled Reactor : TCR)와 커패시터의 병렬구조로 이루어져 있다. TCSC는 정상상태에서의 전력조류 극대화 및 제어기능과 함께 외란에 의한 과도시에 보조 제어기를 부착함으로써 전력계통 안정화 기능을 수행할 수 있다[6-7].

전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)는 동기회전자의 저주파 진동을 억제하기 위하여 발전기 여자 조절에 의해 전체 계통의 안정도를 향상시키기 위한 효율적인 수단으로서 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[8-11]. 그 가운데 특히 종래의 lead/lag형태의 PSS는 제어기의 구조가 간단하고 유용성이 있으며 그 구현이 쉽기 때문에 현대 전력계통에 가장 보편적으로 사용되고 있다. 1969년 deMello와 Concordia[8]에 의해서 저주파 진동에 PSS의 효과에 대한 연구를 기점으로 해서, PSS를 설계하기 위해 고유치기법[9], 극배치 기법[10], 최적 제어기법[11]등이 제안되었다. 또한 TCSC의 보조제어기 설계에 관한 연구로서 극배치 기법[12], 최적제어 기법[13]등이 제안된바 있다. 이와 같이 PSS 설계를 위한 기존의 선형제어 설계방법은 선형 시불변 시스템으로 형식화된 모델을 필요로 한다. 그러나 이러한 기법들은 제어기 설계 단계에서 모델의 불확실성을 고려하지 않고, 동작점 부근의 선형화된 모델을 이용하여 제어기를 설계하였기 때문에 불확실성이 많이 존재하는 전력계통에서는 정확한 제어 목적을 달성 할 수 없다.

전력계통의 가장 중요한 특징중의 하나는 발전조건, 전송조건, 또는 부하조건에 따라 동작조건이 지속적으로 변하고

[†] 교신저자, 正會員 : 東亞大 電氣電子컴퓨터工學部 BK 教授 · 工博
E-mail : ypwang@daunet.donga.ac.kr

^{*} 正會員 : 韓國電力公社 昌原電力管理處 · 工博

^{**} 正會員 : 東亞大 電氣電子컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 9月 1日

最終完了 : 2005年 1月 24日

있다는 것이다. 이러한 동작환경의 변화는 전력계통에 대한 수학적 표현과 실제 전력계통의 물리적인 구조간에 차이를 발생시킨다. 이것은 미소신호 선형화된 전력계통 모델에서 파라미터 불확실성으로 표현될 수 있다. 이러한 계통의 변동에 대응하고자 하는 노력의 일환으로 W. Gu[14]등은 자기동조 제어기법을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였고, 최근에는 적응제어[15], 퍼지논리[16], 신경회로망[17] 및 유전 알고리즘[18] 등과 같은 지능제어형 기법에 관한 연구가 진행되어 왔다. 또한 지능제어형 기법을 이용한 TCSC의 보조제어기 설계에 관한 연구로서도 역시 퍼지논리[19], H_∞[20] 및 신경회로망[21]등과 같은 지능제어 기법이 제안되고 있다.

이중 퍼지 제어기가 우수한 제어성능을 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 적자 생존과 개체 선택 방법을 모방하여 유전 연산을 적용시켜 해들을 진화시킴으로써 최적해를 찾는 탐색 알고리즘이다.

한편 본 논문에서는 PID 제어기와 퍼지 제어기의 장점만을 이용하여 설계된 하이브리드형 제어기에 관한 연구들에서 착안하여 TCSC 안정화 장치(TCSC-PSS)와 퍼지 제어기를 함께 이용한 전 보상형 형태의 TCSC-PSS를 제안하고자 한다. 여기서 lead/lag 형태의 PSS가 TCSC의 보조제어기가 되며, TCSC-PSS는 SA(Simulated Annealing) 알고리즘에 의해 최적화된 Abido의 TCSC-PSS가 사용된다. 따라서 본 연구에서는 전력계통 안정도 향상을 위해 종래에 설계된 TCSC-PSS를 교체하지 않고, 지능형 제어기를 간단히 설치할 수 있는 전 보상의 형태로서 유전알고리즘을 이용한 퍼지 전 보상을 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 Abido의 TCSC-PSS[27]보다 효율적이며 전력계통 안정도 향상에 크게 기여함을 보이고자 한다.

2. 전력계통의 수학적 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 TCSC를 포함한 1기 무한대 모선 전력계통의 모델은 그림 1과 같고, 발전기는 전기 기계적인 동요 방정식(swing equation)과 발전기 내부 전압 방정식으로 구성된 3차 모델로 표현하였다. 발전기의 동요 방정식은 식 (1)~(2)와 같다.

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

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega_b (\omega - 1) \tag{2}$$

여기서, ω 는 각속도, ω_b 는 기준 각속도, δ 는 회전자각,

발전기의 기계적 입력전력 P_m 은 일정하다고 가정하고, 전기적 출력전력 P_e 는 식 (3)과 같이 표현된다.

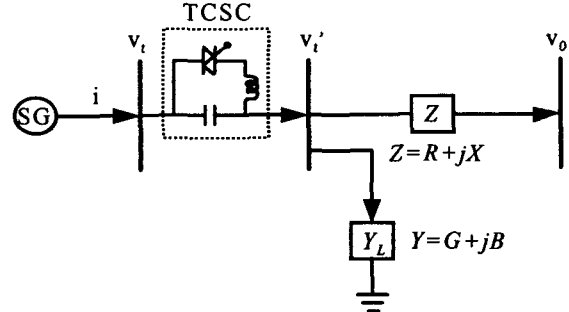


그림 1 TCSC를 포함한 1기 무한모선 전력계통

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

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \tag{3}$$

여기서, i_d , i_q 는 각각 발전기의 d축 전류, q축 전류이며, v_d , v_q 는 각각 발전기의 d축 전압, q축 전압이다.

그리고 발전기 내부 전압 e_q' 에 대한 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{d}{dt} e_q' = (E_{FD} - (x_d - x_d') i_d - e_q) / T_{do}' \tag{4}$$

여기서, E_{FD} 는 발전기의 계자전압, T_{do}' 는 발전기 d축 과도 시정수, x_d 는 발전기 d축 동기 리액턴스, x_d' 는 발전기 q축 과도 리액턴스를 나타낸다.

본 연구에서 사용된 여자 시스템은 IEEE Type-ST1이며, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} E_{FD} = (K_A (v_{ref} - v_t + u) - E_{FD}) / T_A \tag{5}$$

여기서, v_{ref} 는 발전기단자의 기준전압, v_t 는 발전기 단자전압, T_A 는 여자 시스템의 시정수, K_A 는 여자 시스템의 이득, u 는 제어입력이며, $v_t = (v_d^2 + v_q^2)^{1/2}$, $v_d = x_d i_q$, $v_q = e_q' - x_d' i_d$ 로 나타낼 수 있다.

그림 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.

그림 2는 종래의 lead-lag 형태의 안정화 장치를 포함한 TCSC의 블록선도이다. TCSC의 구조는 Open loop 임피던스 입력이 장착되어 있고, 제어기를 부착할 수 있도록 보조입력을 가지고 있다. 정상상태에서 선로조류제어를 위하여 임피

던스 기준치로 운전되며, 외란에 의한 과도상태에는 보조입력 신호를 제어함으로써 안정도를 개선할 수 있다. 제어기로부터 입력되는 임피던스 신호는 이 임피던스를 구현하는 점호각으로 변환된다. 이로부터 사이리스터의 점호각 제어를 통하여 목표 임피던스로 전이되는 동안에 약간의 시 지연이 발생한다. 이러한 시 지연은 전력계통 안정도 해석에서 1차 지연 요소로 고려할 수 있다. 식 (6)은 TCSC의 임피던스에 대한 식을 나타내고 있다.

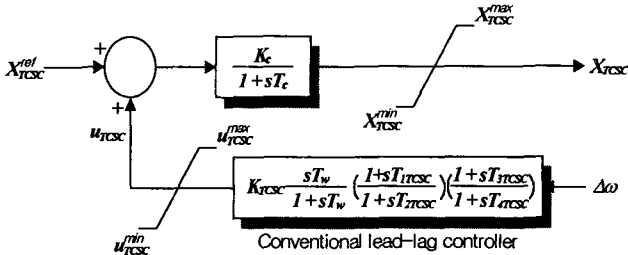


그림 2 종래의 lead/lag 안정화 장치를 포함한 TCSC
Fig. 2 TCSC with conventional lead/lag stabilizer

$$\frac{d}{dt} X_{TCSC} = K_c (X_{TCSC}^{ref} + u_{TCSC} - X_{TCSC}) / T_c \quad (6)$$

$$X_{TCSC}^{min} \leq X_{TCSC} \leq X_{TCSC}^{max}$$

여기서, X_{TCSC} 는 TCSC의 임피던스, T_c 는 TCSC의 시정수, K_c 는 TCSC의 이득, X_{TCSC}^{ref} 는 정상운전시 기준임피던스 입력신호, u_{TCSC} 는 제어입력, X_{TCSC}^{max} 및 X_{TCSC}^{min} 는 TCSC 용량의 상, 하한치를 나타낸다.

3. 퍼지 전 보상 PID 제어기

S. G. Tzafestas등이 퍼지와 PID 제어를 시스템에 적용시킨 이래로 이에 대한 많은 연구가 있었다. 그 중 PID 제어를 위한 여러 가지 동조방식에 관한 연구가 있었는데, 대표적으로 이득 변경(gain modifications)[22-23]과 기준점 변경(set-point modifications)[24-26]의 두 가지로 분류할 수 있다.

PID 제어기와 퍼지 제어를 병렬로 사용하는 구조는 이득 변경의 경우로 볼 수 있는데, 이러한 병렬 구조는 조건적으로 제어기의 출력을 계산하게 되는데 식 (7)과 같다.

$$u(k) = \begin{cases} K_p e(k) + TK_I \sum_{n=0}^k e(n) + \frac{K_D}{T} \Delta e(k), & \text{if } (e, \Delta e) \in R \\ G(e, \Delta e) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, R 은 $(e, \Delta e)$ 공간에서의 영역이다. 이 설계에서, 식 (7)의 G 로 표현되는 퍼지 제어기의 미세 동조는 PID 제어기로 대체되게 된다. 이 병렬 구조는 정상 상태 응답동안에는 PID 제어기의 정확성을 가지며, 과도 상태 응답동안에는 퍼지 제어기의 신속성을 효과적으로 결합시킬 수 있다. 이 구조의 중점 설계 목표는 동특성 성능을 최적화하기 위해 R 을 발견하는 것이다. 일반적으로 이득 변경은 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} K_p' &= K_p + G_p(e, \Delta e) \\ K_I' &= K_I + G_I(e, \Delta e) \\ K_D' &= K_D + G_D(e, \Delta e) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, G_p , G_I 와 G_D 는 비선형 함수이다. R. Babuska등[22]은 세 개의 비선형 함수를 충족시키기 위해 3개의 퍼지 제어기를 사용하는 방식을 제안하였다. 이 설계 기법은 PID 제어기의 퍼지 감독(fuzzy supervision of PID controller)이라고 한다. 반면에 S. Z. He등[23]은 이득 변경을 위해 단지 하나의 퍼지 제어기를 사용하는 또 다른 형태의 퍼지 감독 기법을 발표하였다. 그들의 계층적인 접근에서 퍼지 제어기는 제어대상의 출력을 평가하고, 보상된 이득을 발생시키기 위해 미리 기술된 과정으로부터 가능한 편차를 검출하였다.

PID 제어를 향상시키기 위한 또 다른 방법은 기준점을 변경하는 것이다. 여기서, 기준점 변경은 식 (9)와 같이 새로운 오차항을 도입한다.

$$\begin{aligned} e_p &= y_r(k) \cdot F_p(e, \Delta e) - y(k) \\ e_I &= y_r(k) \cdot F_I(e, \Delta e) - y(k) \\ e_D &= y_r(k) \cdot F_D(e, \Delta e) - y(k) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, \cdot 는 곱 혹은 합 연산자이고, F_p , F_I 와 F_D 는 e 와 Δe 의 비선형 함수들이며, 그 제어 입력은 식 (10)과 같다.

$$u(k) = K_p e_p(k) + TK_I \sum_{n=0}^k e_I(n) + \frac{K_D}{T} (e_D(k) - e_D(k-1)) \quad (10)$$

이것과는 달리, 비례항의 기준점만을 변경하는 경우가 있을 수 있는데, $F_p = \beta$, $F_I = F_D = 1$ 과 같이 나타낼 수 있다. $\cdot = \times$ 이라고 하면 식 (11)과 같다.

$$u(k) = K_p (\beta y_r(k) - y(k)) + TK_I \sum_{n=0}^k e(n) + \frac{K_D}{T} (e(k) - e(k-1)) \quad (11)$$

이것은, T. Hagglund 등[24]에 의해 제안된 기준점 가중치 설계(set-point weighting scheme)로 잘 알려져 있다. 또, 그 이후에 C. C. Hang 등[25]이 정규화된 플랜트 이득과 불감시간의 값에 기초로 해서 β 를 결정하는 방법을 연구하였다. Kim 등[26]이 기준점을 변경하기 위해 더 일반적인 구조를 제안하였는데, 그들의 설계에서는 동일한 비선형 함수를 사용하였다. 즉, $F_p = F_I = F_D = F$ 이고 새로운 기준점을 가지게 되는데, 식 (12)과 같다.

$$u(k) = K_p e'(k) + TK_I \sum_{n=0}^k e'(n) + \frac{K_D}{T} (e'(k) - e'(k-1)) \quad (12)$$

여기서, $e'(k) = y_r(k) + F(e, \Delta e) - y(k)$ 이다. 이것은 비선형 함수 F 를 만족하도록 퍼지 제어기를 사용하고 있기 때문에 퍼지 전 보상 PID 제어기(fuzzy precompensated PID controller)라 하며, 기본적인 구조는 그림 3과 같다.

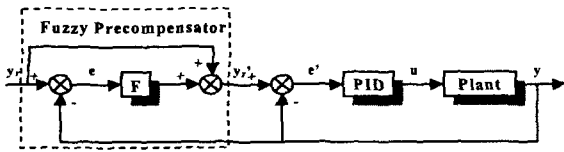


그림 3 퍼지 전 보상기의 일반적인 구조
Fig. 3 Basic structure of fuzzy precompensated PID controller

이상과 같이 퍼지 제어기는 PID 제어기의 성능을 향상시킬 수 있으며, PID 제어기와 퍼지논리 기법들을 결합하는 많은 접근들이 있었다. 이러한 퍼지 PID 제어 구조는 기준점 변경이나 또는 이득변경을 통해서 PID 제어를 자동동조 할 수 있다. 그러나 이러한 접근들의 거의 대부분은 퍼지 제어기의 구성요소 선정에 있어 시행착오법에 의지해야만 한다는 것이다. 이러한 방법에 의한 퍼지 제어기 설계는 영역(domain)에 대한 지식을 요구하며, 또 이러한 지식을 이용한다 할지라도, 퍼지 제어기의 미세 동조는 많은 시간과 노력을 필요로 하게 된다.

4. 유전 알고리즘에 의한 퍼지 전 보상기의 자동규칙 발생

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 강한 탐색방법으로 알려져 있다.

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

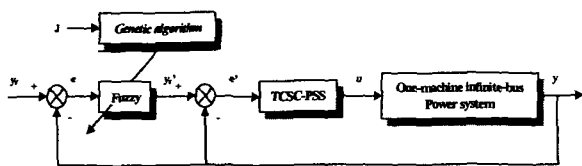


그림 4 제안된 GA-퍼지 전 보상기
Fig. 4 Proposed GA-fuzzy precompensator

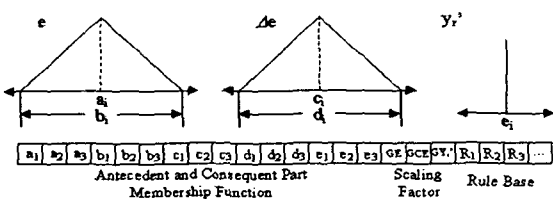


그림 5 제안된 염색체 구조
Fig. 5 Proposed chromosome structure

그림 5는 퍼지 전 보상기의 각 구성요소를 최적화하기 위한 염색체 구조이다. 본 논문에서 제안한 염색체는 실수 스트링을 사용하여 표현하였다. 염색체의 길이는 다음과 같다. 퍼지 전 보상기의 입력력인 e, Δe와 y1에 대해 스케일링 계수는 각각 GE, GCE와 GYr'로서 3개, 멤버쉽함수는 전진부의 경우 퍼지 전 보상기의 입력인 e와 Δe에 대해 입력 분할 수가 Negative, Zero, Positive이고, 각 멤버쉽함수를 표현하는데 필요한 변수는 Center와 Width이므로 전진부 스트링의 총 길이는 2×3×2=12개가 된다. 또 후진부의 경우 퍼지 전 보상기의 출력인 y1에 대해 입력 분할 수가 역시 Negative, Zero, Positive이고, 필요한 변수는 Center이므로 후진부 스트링의 총 길이는 1×3×1=3개가 된다. 그러므로 전진부와 후진부의 멤버쉽함수 최적화를 위한 스트링의 총 길이는 15개이며, 마지막으로 제어규칙의 스트링 길이는 9개이다. 그러므로 각 구성요소에 대한 총 스트링 길이는 27개이다. 그림 5에서 전진부의 e에 대한 멤버쉽함수의 중심점 a, 폭 b와 Δe에 대한 멤버쉽함수의 중심점 c, 폭 d가 차례로 염색체로 구성되며, 이어서 후진부 파라미터인 e가 배치된다. 그 다음에는 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 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. 본 논문에서 사용된 시스템 모델은 식 (1), (2), (4) 및 (5)를 이용하여 모델링 하였고, 사용된 평가함수는 식 (13)과 같이 선정하였다. 또한 사용된 외란은 회전각을 0.1[rad] 만큼 변동시켰을 경우로 하였다. 적합도 함수는 식 (14)과 같이 정의하였다.

$$J = \int_0^{t_1} (\alpha | \omega_b - \omega | + \beta | \delta_0 - \delta | + \gamma | v_{ref} - v_t |) dt \quad (13)$$

$$Fitness(J) = \frac{1}{1 + minJ} \quad (14)$$

식 (13)에서 t1은 적분시간, ωb는 기준 각속도, δ0는 초기 회전각, vref는 기준전압, α, β, γ는 가중치이다. 식 (14)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 적게 된다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 전력계통의 저주파 진동을 효율적으로 억제할 수 있는 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 전진부 및 후진부의 중심치와 폭, 스케일링 계수와 제어규칙을 계산하였다. 이 구성요소에 의한 제어성능은 평가함수가 최소화 될 때까지 반복계산 하게 된다. 제안한 제어기의 외란 억제 성능과 강인성을 입증하기 위하여 1기 무한대 모션계통에 대해 다양한 부하변동이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 통하여 Abido의 TCSC-PSS[27]와 동특성을 비교, 고찰하였다.

본 논문에서 사용한 1기 무한대 모션계통의 경우 동기기, 여자기 및 선로정수와 계통의 정상 상태는 표 1과 같고, TCSC와 종래의 lead/lag 제어기의 파라미터 값은 표 2와 같다.

표 1 계통 파라미터

Table 1 System parameters

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

표 2 TCSC와 종래의 lead/lag 제어기 파라미터

Table 2 TCSC and conventional lead/lag controller parameters

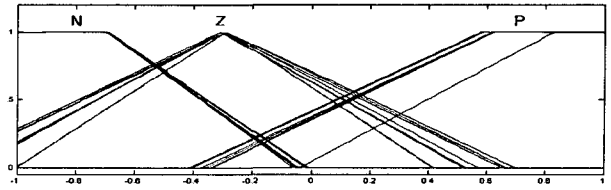
K_C	T_C	K_{TCSC}	T_w	T_{1TCSC}	T_{2TCSC}	T_{3TCSC}	T_{4TCSC}
1.0	0.05	74.726	5.0	0.0115	0.1	0.1249	0.1

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

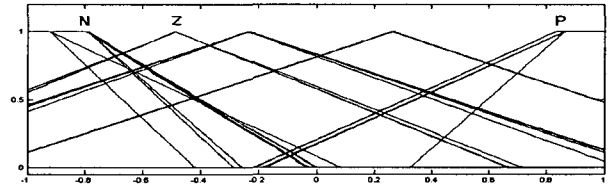
표 3 초기 파라미터

Table 3 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

그림 6 멤버십 함수의 최적화과정

Fig. 6 Optimization process of membership function

표 4 최적화된 스케일링 계수

Table 4 Optimized scaling factors

GE	GCE	GY_r'
0.070837	0.007912	0.088852

표 5 최적화된 퍼지규칙

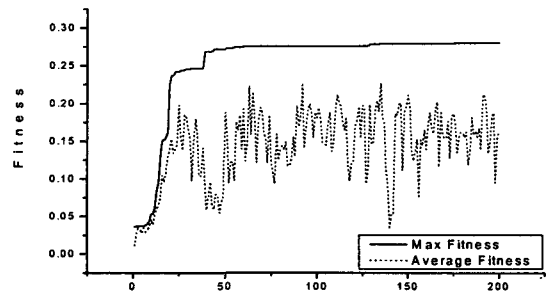
Table 5 Optimized fuzzy rules

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

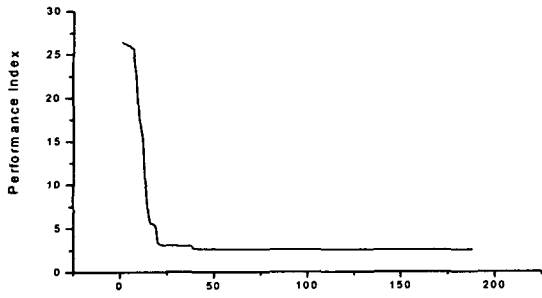
표 6 최적화된 멤버십함수

Table 6 Optimized membership function

		N	Z	P
		Center	-0.690930	-0.294360
e	Width	1.346335	1.926937	1.916682
	Center	-0.796191	-0.486510	0.830556
Δe	Width	1.592565	2.303668	2.085882
	Center	-0.909510	0.164530	0.582250



(a) Max and average fitness



(b) Performance index

그림 7 적합도와 평가함수

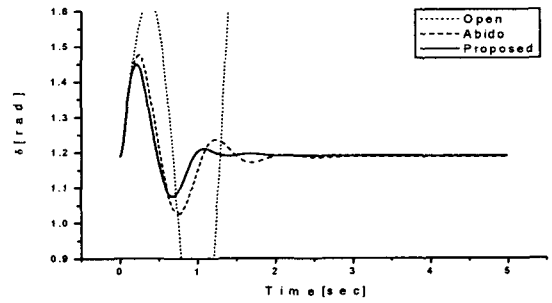
Fig. 7 Fitness and performance index

5.1 정상부하시($P_e=1.0[p.u.]$, $Q_e=0.015[p.u.]$, $X_{TCSC}=0.0[p.u.]$)

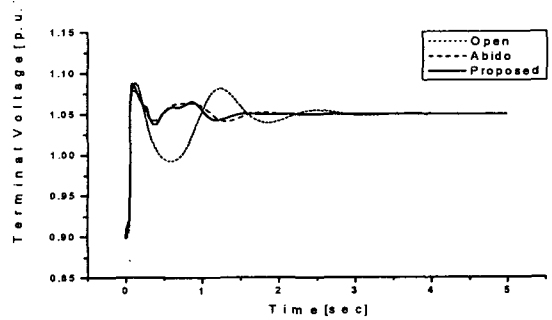
제안한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 정상 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 8은 정상 부하시 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우에 대해 발전기 각속도(angular velocity), 회전자각(rotor angle) 및 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 계자 전압 $-0.5[p.u.] \leq E_{FD} \leq 0.5[p.u.]$ 로 제한하였다. 제안한 제어기의 경우가 Abido의 TCSC-PSS를 이용한 경우보다 정정 시간 또한 우수하여 기존의 경우보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

그림 9는 발전기의 초기 회전자각을 0.1[rad] 만큼 변동시켰을 경우 Abido TCSC-PSS의 경우와 제안한 제어기를 이용한 경우에 대하여 발전기 각속도, 회전자각, 단자전압 및 제어입력의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 제어기의 경우가 기존의 경우보다 발전기의 각속도 및 회전자각의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈트 면에서도 기존의 경우보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.



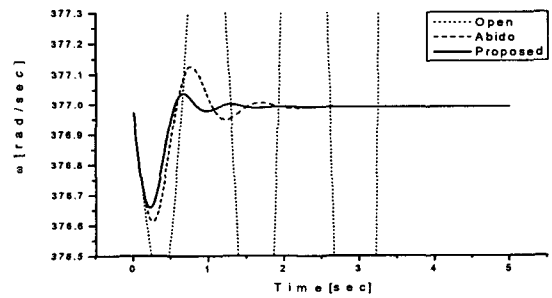
(b) Rotor angle



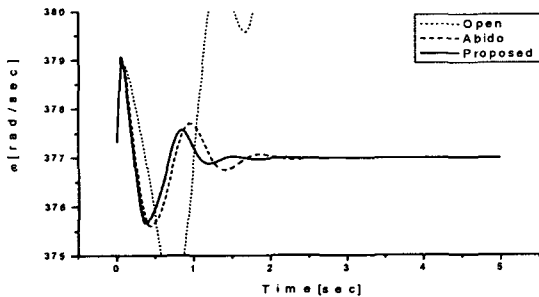
(c) Terminal voltage

그림 8 정상부하시 3상고장에 대한 응답 ($P_e=1.0[p.u.]$, $Q_e=0.015[p.u.]$, $X_{TCSC}=0.0[p.u.]$)

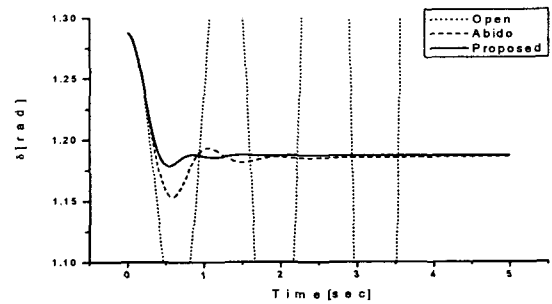
Fig. 8 Responses to three-phase fault in normal load ($P_e=1.0[p.u.]$, $Q_e=0.015[p.u.]$, $X_{TCSC}=0.0[p.u.]$)



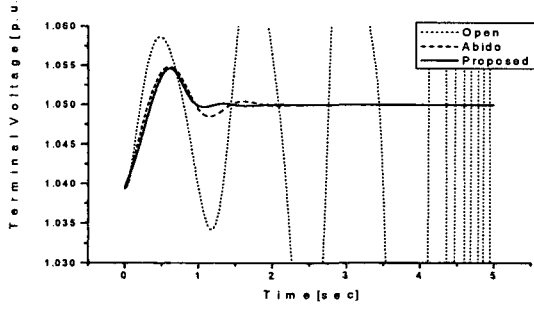
(a) Angular velocity



(a) Angular velocity



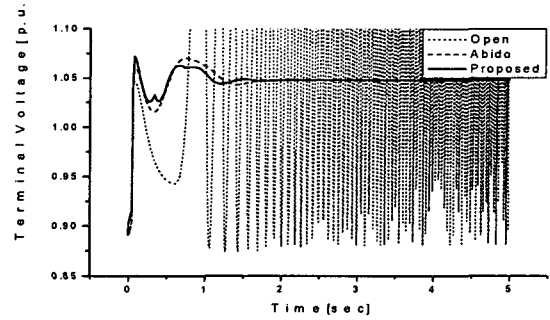
(b) Rotor angle



(c) Terminal voltage

그림 9 정상부하시 회전자각 증가에 대한 응답 ($P_e=1.0$ [p.u.], $Q_e=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=0.0$ [p.u.])

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



(c) Terminal voltage

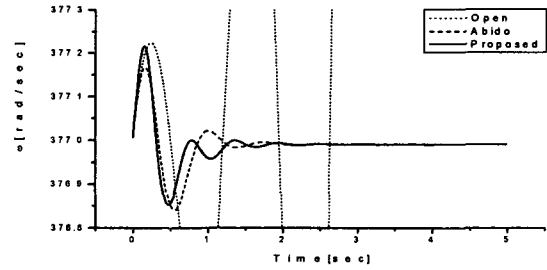
그림 10 중부하시 3상고장에 대한 응답 ($P_e=1.2$ [p.u.], $Q_e=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=-0.2$ [p.u.])

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.])

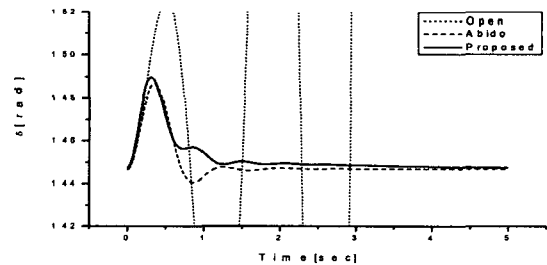
5.2 중부하시($P_e=1.2$ [p.u.], $Q_e=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=-0.2$ [p.u.])

제안한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 중부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10과 11은 중부하시 무한대 모선 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우와 발전기의 초기 회전자각을 0.1[rad] 만큼 변동시켰을 경우에 대해 발전기 각속도(angular velocity), 회전자각(rotor angle) 및 단자전압(terminal voltage)의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 제어기의 경우가 기존의 Abido의 TCSC-PSS의 경우보다 발전기의 각속도 및 회전자각의 최대 편차량이 감소하였다.

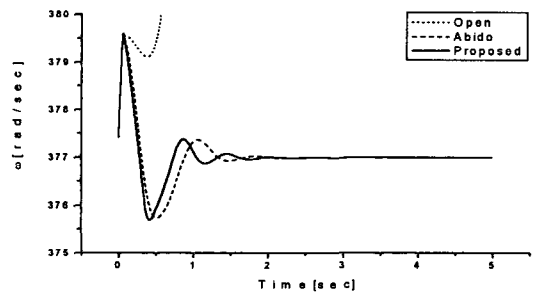
그리고 오버슈트 면에서도 기존의 경우보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.



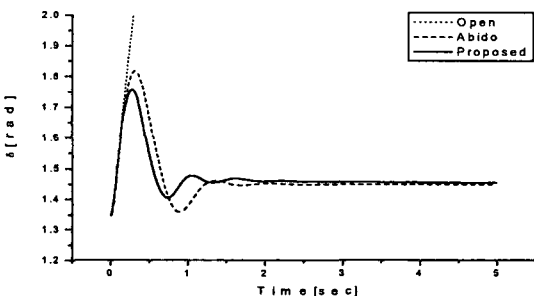
(a) Angular velocity



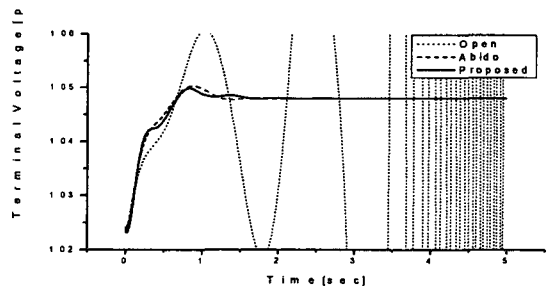
(b) Rotor angle



(a) Angular velocity



(b) Rotor angle



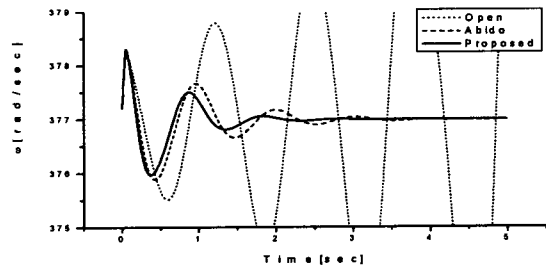
(c) Terminal voltage

그림 11 중부하시 회전자각 증가에 대한 응답 ($P_e=1.2$ [p.u.], $Q_e=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=-0.2$ [p.u.])

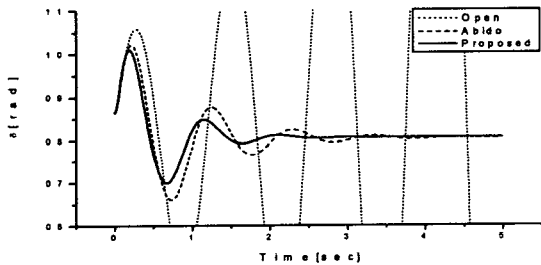
Fig. 11 Responses to increasing rotor angle in heavy load ($P_e=1.2$ [p.u.], $Q_e=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=-0.2$ [p.u.])

5.3 경부하시($P_e=0.7[p.u.]$, $Q_e=0.015[p.u.]$, $X_{rcsc}=0.2[p.u.]$)

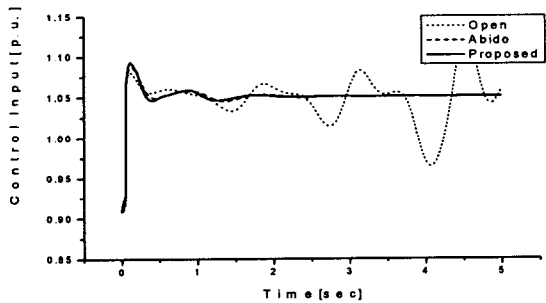
제안한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 경부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 12와 13은 경부하시 무한대 모선 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우와 발전기의 초기 회전자각을 0.1[rad] 만큼 변동시켰을 경우에 대해 발전기 각속도(angular velocity), 회전자각(rotor angle) 및 단자전압(terminal voltage)의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 제어기의 경우가 기존의 Abido의 TCSC-PSS 경우보다 발전기의 각속도 및 회전자각의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈트 면에서도 기존의 경우보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하며 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.



(a) Angular velocity

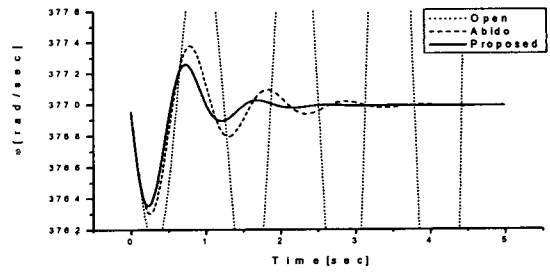


(b) Rotor angle

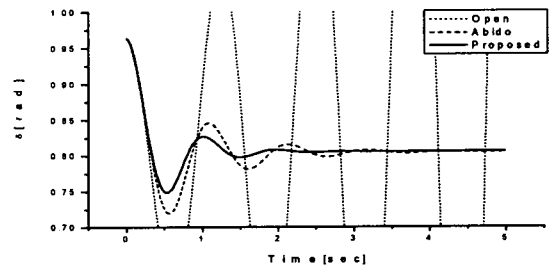


(c) Terminal voltage

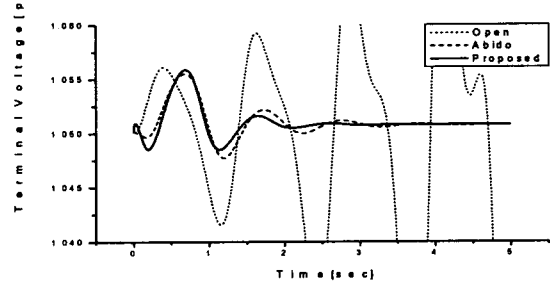
그림 12 경부하시 3상고장에 대한 응답
($P_e=0.7[p.u.]$, $Q_e=0.015[p.u.]$, $X_{TCSC}=0.2[p.u.]$)
Fig. 12 Responses to three-phase fault in light load
($P_e=0.7[p.u.]$, $Q_e=0.015[p.u.]$, $X_{TCSC}=0.2[p.u.]$)



(a) Angular velocity



(b) Rotor angle



(c) Terminal voltage

그림 13 경부하시 회전자각 증가에 대한 응답
($P_e=0.7[p.u.]$, $Q_e=0.015[p.u.]$, $X_{rcsc}=0.2[p.u.]$)

Fig. 13 Responses to increasing rotor angle in light load
($P_e=0.7[p.u.]$, $Q_e=0.015[p.u.]$, $X_{rcsc}=0.2[p.u.]$)

5. 결 론

본 논문에서는 종래의 만족스럽게 설계된 TCSC-PSS를 보상하기 위해 GA-퍼지 전 보상기를 이용하는 새로운 설계 방식과 이를 전력계통에 적용하는 문제를 다루었다. 전력계통 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 전력계통에 사용중인 PSS 및 향후 TCSC-PSS에 간단히 설치될 수 있는 제어구조를 가지고 있음을 보였다.

둘째, 3가지 경우의 사례연구를 통하여 종래의 SA 알고리즘에 의해 최적화된 Abido의 TCSC-PSS와 GA-퍼지 전 보상기의 성능을 비교, 고찰하였다. 정상부하시, 중부하시 및 경

부하시의 사례연구를 통하여 제안된 제어 장치는 전력계통 안정화에 효과적임을 알 수 있었고, 또한 강인성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS", IEEE Press, 2000.
- [2] M. Erche et al, "Improvement of Power System Performance Using Power Electronics Equipment", CIGRE Paper, 14/37/38-02, Paris, 1992.
- [3] E. Larsen et al, "Benefits of Thyristor Controlled Series Compensation", CIGRE Paper, 14/37/38-04, Paris, 1992.
- [4] N. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE Spectrum, Vol. 30, No. 4, pp. 40-45, 1993.
- [5] R. Adapa et al, "Proposed Terms and Definitions for Flexible AC Transmission System(FACTS)", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1848-1853, 1997.
- [6] J. J. Paserba et al, "A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, pp. 1471-1478, 1995.
- [7] 한전전력연구원, "FACTS 계통운용 기술개발 연구", 1999.
- [8] F. P. Demello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", IEEE Trans. on PAS, Vol. 88, No. 4, pp. 189-202, 1969.
- [9] P. Kundur, D. C. Lee and H. M. Zein El-Din, "Power System Stabilizers for Thermal Unit : Analytical techniques and on-site validation", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-1, pp. 81-95, 1981.
- [10] H. Othman et al, "On the Design of Robust Power System Stabilizers", Proceedings of the 28th Conference on Decision and Control, Tampa, Florida, pp. 1853-1857, 1989.
- [11] Y. N. Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic Press 1983.
- [12] Chen X et al, "Controlled series compensation for improving the stability of multimachine power systems", IEE Proc. C, pp. 361-366, 1995.
- [13] Chang J and Chow J, "Time optimal series capacitor control for damping inter-area modes in interconnected power systems," IEEE Trans. on PWRS, pp. 215-221, 1997.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 정형환, 왕용필, 정동일, 정문규, "유전 알고리즘을 이용한 전력시스템 안정화 장치의 최적 파라미터 선정", 대한전기학회 논문지, Vol. 48A, No. 6, pp. 683-691, 1999.
- [19] Lie T, Shrestha G and Ghosh A, "Design and application of fuzzy logic control scheme for transient stability enhancement in power systems", Electric Power System Res., pp. 17-23, 1995.
- [20] Zhao Q, Jiang J, "A TCSC damping controller using robust control theory", Electrical Power and Energy Systems, pp. 25-33, 1998.
- [21] Dai X et al, "Neural network ath-order inverse control of thyristor controlled series compensator", Electric Power System Res., pp. 19-27, 1998.
- [22] R. Babuska and P. Horacek, "Laboratory evaluation of fuzzy controllers", Preprints of the IFAC/IFIC/IMACS Internat. Symp. on Artificial Intelligence in Real-Time Control, Delft, pp. 263-268, 1992.
- [23] S.-Z. He, S. Tan and F.-L. Xu, "Fuzzy self-tuning of PID controllers", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 24, pp. 37-46, 1993.
- [24] T. Hagglund and K. J. Astrom, "Automatic tuning of PID controllers based on dominant pole design", Proc. IFAC Workshop on Adaptive Control of Chemical Processes, Frankfurt, 1985.
- [25] C. C. Hang, K. J. Astrom and W. K. Ho, "Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula", IEE Proc. D, Vol. 138, No. 2, pp. 111-118, 1991.
- [26] J. H. Kim, K. C. Kim and E. K. P. Chong, "Fuzzy Precompensated PID Controllers, IEEE Trans. Cont. Syst. Tech., Vol. 2, No. 4, pp. 406-411, 1994.
- [27] M. A. Abido, "Pole placement technique for PSS and TCSC-based stabilizer design using simulated annealing", Electrical Power and Energy Systems, pp. 543-554, 2000.

저 자 소 개



왕 용 필 (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 전기전자컴퓨터 공학부 BK 교수. 관심분야 : 직류송전 시스템 해석 및 제어설계, 전자기 과도 현상, 전력품질
Tel : 051-200-6944, Fax : 051-200-7743
E-mail : ypwang@daunet.donga.ac.kr



정 형 환 (鄭 亨 煥)
1941년 1월 19일생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 관심분야 : 직류송전 시스템 해석 및 제어설계, 전자기 과도현상, 전력품질
Tel : 051-200-7733, Fax : 051-200-7743
E-mail : hhchong@daunet.donga.ac.kr



정 문 규 (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. 관심분야 : 유연송전시스템, 전력계통 안정도
Tel : 055-268-2364, Fax : 055-268-2369
E-mail : mgjeong@kepcoco.kr