

# 교류-직류 시스템의 동특성 개선을 위한 SVC RVEGA-Fuzzy 제어기 설계

論 文

51A-10-1

## A Design of SVC RVEGA-Fuzzy Controller to Improve Dynamic Response of AC-DC System

鄭亨煥\* · 許東烈\*\* · 王龍泌\*\* · 鄭文圭\*\*\* · 高義石§

(Hyeng-Hwan Chung · Dong-Ryol Hur · Yong-Peel Wang · Mun-Kyu Chung · Hee-Seog Koh)

**Abstract** - In this thesis, an optimal design technique of fuzzy logic controller using the real variable elitist genetic algorithm(RVEGA) as a supplementary control to Static Var Compensator(SVC) in order to damp oscillation in an AC-DC power system was proposed. Fuzzy logic controller is designed self-tuning shape of fuzzy rule and fuzzy variable using genetic algorithm based on natural selection and natural genetics. To verify the robustness of the proposed method, considered dynamic response of system by applying a load fluctuation.

**Key Words** : Static Var Compensator(SVC), AC-DC Power System, Fuzzy Logic Controller, Real Variable Elitist Genetic Algorithm(RVEGA)

### 1. 서 론

경제성장 추세의 지속과 국민복지 수준의 향상으로 전력수요의 지속적인 성장에 따른 송전선로의 장거리 화, 송전선로의 용량부족 등으로 현대의 전력계통은 안정도 여유의 감소로 인한 제어의 어려움과 예기치 못한 사고 발생 시 계통전체의 안정성 측면에서 심각한 위협에 직면하고 있다. 이러한 문제에 능동적으로 대처하기 위하여 전력용 반도체를 이용한 제어기술을 응용함으로써 전력전송 설비의 기능을 고도화하고 설비이용률의 극대화를 이룩하기 위한 효과적이면서 경제적인 해결책으로 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기술이 주목받고 있다. FACTS기기 중 SVC(Static Var Compensator)는 현재 사용 운전 중이며 기존의 송전계통의 전압 조정에 이용되는 동기조상기에 비해 가격이 싸고, 신속 정확한 전압제어를 수행하며, 병렬 리액터와 커패시터의 기계적 스위칭에 의한 과도현상과 갑작스러운 전압변동을 유발하지 않는 장점이 있다. 이와 같이 전력전송설비의 송전용량 증대와 설비이용률 향상 효과를 가져다 줄 수 있는 SVC를 적용하여 다른 주파수 연계가 가능하며 교류시스템의 단락용량을 증대하지 않고 시스템을 연계할 수 있는 교류-직류 전력시스템에 대하여 연구하였다[1-4].

SVC를 포함한 교류-직류시스템에서 직류시스템의 컨버터나 인버터가 동작할 때 무효전력이 발생하여 시스템 동요를 유발하며, 무효전력량이 상당하기 때문에 컨버터나 인버터 인

근에 AC 필터나 콘덴서 설치가 필요하며, 약한 교류 시스템에서는 부하가 바뀔에 따라서 시스템 동특성 개선을 위해서는 동기조상기나 SVC를 필요로 한다. 또한 SVC의 제어기 입력으로 각속도 편차를 사용하면 교류-직류 전력시스템에 전력동요억제, 과도안정도 향상, 저주파 진동 억제 등의 효과를 얻을 수 있으며, 본 논문에서는 SVC에 RVEGA-Fuzzy 제어기를 설계하였다.

최근에는 전력시스템의 동특성을 향상시키기 위한 제어신호를 구하기 위하여 퍼지 제어 및 신경회로망 제어방법이 사용되고 있다[5-6]. 논문에서는 지능제어기법 중에서 제어하고자 하는 시스템에 대한 정확한 수학적인 모델링이 필요 없고 얻어지는 정보가 정성적이고 불확실한 경우에 뛰어난 제어성을 나타내는 퍼지제어기를 사용하였다. 그러나 퍼지제어기를 이용하여 좋은 제어성능을 얻기 위해서는 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 조정해야 하는데 종래에는 전문가의 경험과 시행착오법에 바탕을 두었기 때문에 시스템에 대한 전문적인 지식 없이는 시스템에 적합한 소속함수를 결정하기가 어려웠다. 그래서 최근에는 자연의 유전학에 바탕을 둔 확률적인 최적화 알고리즘을 이용하여 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 동조하여 좋은 성능을 얻고 있다.

따라서 본 논문에서는 교류-직류 전력시스템의 동특성 개선을 위하여 실변수 엘리트주의 유전알고리즘(RVEGA : Real Variable Elitist Genetic Algorithm)과 퍼지이론을 기반으로 하여 SVC의 RVEGA-Fuzzy 제어기를 설계하였다. 제안된 방법의 유용성을 입증하기 위하여 평가함수 및 각속도 편차에 대한 감소율을 조사하였다.

### 2. SVC를 포함한 교류-직류 시스템 모델

본 논문에서 고찰하고자 하는 SVC를 포함한 교류-직류 시스템 모델은 그림 1과 같다. 직류시스템 모델은 변환기가

\* 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 東亞大 情報技術研究所 特別研究員 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 博士課程 修了

§ 正 會 員 : 慶南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 1月 17日

最終完了 : 2002年 7月 24日

싸이리스터 밸브(thyristor valve)로 구성되어 있으며, 전력을 양방향으로 전송할 수 있는 2단자 양극성 초고압 직류시스템(two terminal bipolar HVDC)으로 국외에서는 표준화되어 있으며, 해남과 제주사이에 설치·운영되고 있다[9-13]. 또한 SVC는 감압 변압기를 경유하여 리액터와 커패시터로 구성되어 있으며, 발전기 단자에 설치되어 무효전력을 흡수 또는 공급함으로써 전력시스템 동요를 억제하는 기능을 수행한다.

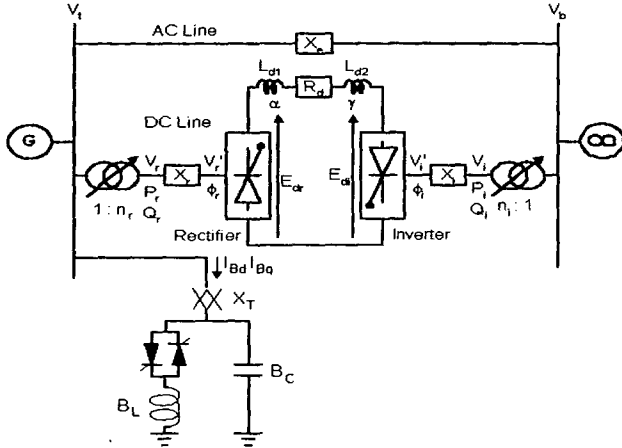


그림 1 SVC를 포함한 교류-직류 시스템 모델  
Fig. 1 Model of AC-DC power system with SVC

동적 안정도 해석을 위한 전력시스템의 선형화 모델을 유도하기 위하여, 송전선로를 통하여 무한모선에 연결된 IEEE Type 1의 여자기를 가진 동기기로 구성된 전력시스템 모델을 이용하였다. 그림 1에서 선형화 된 모델을 바탕으로 동특성 방정식을 표현하면 식(1)~(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_R \Delta\omega \tag{1}$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{K_1'}{2H} \Delta\delta - \frac{D}{2H} \Delta\omega - \frac{K_2'}{2H} \Delta E_q' - \frac{K_3'}{2H} \Delta B_L + \frac{1}{2H} \Delta T_m \tag{2}$$

$$\frac{d\Delta E_q'}{dt} = -\frac{K_4'}{\tau_{d0}} \Delta\delta - \frac{1}{K_5' \tau_{d0}} \Delta E_q' + \frac{1}{\tau_{d0}} \Delta E_{FD} - \frac{K_6'}{\tau_{d0}} \Delta B_L \tag{3}$$

$$\frac{d\Delta E_{FD}}{dt} = -\frac{(S_E + K_E)}{T_E} \Delta E_{FD} + \frac{1}{T_E} \Delta V_R \tag{4}$$

$$\frac{d\Delta V_R}{dt} = -\frac{K_A K_7'}{T_A} \Delta\delta - \frac{K_A K_8'}{T_A} \Delta E_q' - \frac{1}{T_A} \Delta V_R - \frac{K_A}{T_A} \Delta V_{Em} - \frac{K_A K_9'}{T_A} \Delta B_L + \frac{K_A}{T_A} \Delta V_{ref} \tag{5}$$

$$\frac{d\Delta V_E}{dt} = -\frac{K_F (S_E + K_E)}{T_E T_F} \Delta E_{FD} + \frac{K_F}{T_E T_F} \Delta V_R - \frac{1}{T_F} \Delta V_E \tag{6}$$

$$\frac{d\Delta B_L}{dt} = -\frac{K_V K_7'}{T_V} \Delta\delta - \frac{K_V K_8'}{T_V} \Delta E_q' - \frac{K_V K_9' + 1}{T_V} \Delta B_L + \frac{K_V}{T_V} \Delta V_{ref} + \frac{K_V}{T_V} \Delta V_s \tag{7}$$

식(1)~(7)에 의해서 상태공간 표현 형태의 식(8), (9)로 유도할 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BU \tag{8}$$

$$Y = CX \tag{9}$$

여기서, X는 상태벡터, Y는 출력신호, U는 입력신호이다. 상태 변수 X는 식(10)과 같고, 선형화된 모델의 행렬 A, B 및 C의 요소는 다음과 같다.

$$X = [\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta E_q' \ \Delta E_{FD} \ \Delta V_R \ \Delta V_E \ \Delta B_L]^T \tag{10}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1'}{2H} & -\frac{D}{2H} & -\frac{K_2'}{2H} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_3'}{2H} \\ -\frac{K_4'}{\tau_{d0}} & 0 & \frac{1}{K_5' \tau_{d0}} & \frac{1}{\tau_{d0}} & 0 & 0 & -\frac{K_6'}{\tau_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{(S_E + K_E)}{T_E} & \frac{1}{T_E} & 0 & 0 \\ -\frac{K_A K_7'}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_8'}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A}{T_A} & -\frac{K_A K_9'}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_E K_F}{T_E T_F} & \frac{K_F}{T_E T_F} & -\frac{1}{T_F} & 0 \\ -\frac{K_V K_7'}{T_V} & 0 & -\frac{K_V K_8'}{T_V} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_V K_9' + 1}{T_V} \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad C = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

### 2.1 SVC의 제어특성 및 모델

SVC는 기존의 진상 무효전력 보상기인 전력용 콘덴서(Shunt Capacitor)와 지상 무효전력 보상기인 병렬 리액터(Shunt Reactor) 등과는 달리, SVC는 연속적인 제어를 수행함으로써 동기조상기와 비슷한 제어특성을 가지게 된다 [14-17]. 그러나, 기계적인 관성을 가지고 있지 않아 동작범위 밖에서는 전압유지특성이 급격하게 떨어지며, 제어의 응답속도가 동기조상기에 비하여 매우 빠른 차이를 가지고 있다. 현재 SVC는 목적에 따라 다양한 구성을 가지고 있으나 가장 일반적인 구조는 그림 2와 같다. 그림 2를 보면, 고정된 용량의 커패시터(FC : Fixed Capacitor)와 싸이리스터 제어에 의하여 용량이 가변되는 인덕터(TCR : Thyristor Controlled Reactor)가 병렬로 연결된 구조를 가지고 있으며, 전체적으로 싸이리스터에 의하여 제어되는 가변 서셉턴스(B : Susceptance)로 볼 수 있다.

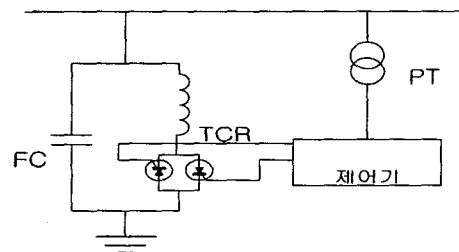


그림 2 SVC의 기본 구조  
Fig. 2 Basic structure of SVC

SVC는 모선전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬 서셉턴스를 변화시킴으로써 모선전압을 빠르고 연속적으로 제어하는 기기로서, 발전기 단자전압의 제어가 기본적인 제어

의 주목적이다. 또한 부가적으로 과도안정도 향상, 전력동요 억제, 저주파진동의 억제, 교류-직류시스템 변환기의 무효전력 흡수 및 공급 등의 다양한 제어가 가능하다. 따라서, 그 목적상 발전기 단자에 설치되어 운전되며 SVC의 제어효과를 극대화하기 위하여 기존의 전압제어 기기들과 상호 협조제어가 필요하다.

2.2 직류제어시스템

변환기용 변압기의 저항, 변환기의 양극 전압강하 및 내부 등가저항은 무시하고, 그림 2를 기초로 한 변환기의 교류전류 I와 직류전류 I<sub>d</sub>는 식(11), (12)와 같이 된다.

$$I \cong \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \tag{11}$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}(V_r \cos \alpha - V_i \cos \gamma)}{\pi R_d + 3(X_r - X_i)} \tag{12}$$

여기서 X<sub>r</sub>, X<sub>i</sub>는 전류리액턴스(commutation reactance), R<sub>d</sub>는 직류선로 저항, γ는 여유각, V<sub>r</sub>, V<sub>i</sub>는 변환기의 교류측 전압이다.

2.2.1 순변환기측(Rectifier Side)

순변환기측의 제어각이 점호각 α인 경우, 시스템 방정식을 요약하면 식(13)~(19)와 같은 관계를 갖는다.

$$E_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_r \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_d \tag{13}$$

$$\cos \alpha = \frac{\cos \phi_r + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_d X_r}{V_r'}}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \right\}^2 + 2 \left\{ 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \sin \phi_r \right\}}} \tag{14}$$

$$\tan \phi_r = \sqrt{\left\{ \frac{\pi E_{dr} + 3I_d X_r}{\pi E_{dr} \cos \alpha} \right\}^2 - 1} - \frac{18I_d X_r}{\pi^2 E_{dr}} \tag{15}$$

$$V_r = V_r' \sqrt{1 + 3 \left\{ \frac{IX_r}{V_r'} \right\}^2 + 2\sqrt{3} \left\{ \frac{IX_r}{V_r'} \right\} \sin \phi_r} \tag{16}$$

$$V_r' = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{E_{dr}}{\cos \phi_r} \tag{17}$$

$$P_r = \sqrt{3} V_r' I \cos \phi_r \tag{18}$$

$$Q_r = \sqrt{3} V_r' I \sin \phi_r + \frac{18}{\pi^2} I_d^2 X_r \tag{19}$$

2.2.2 역변환기측(Inverter Side)

역변환기에서도 유사한 형태로 구성되는데 소호각 β로 제어하는 경우, 시스템 방정식을 요약하면 식(20)~(26)과 같다.

$$E_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_i \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_i I_d \tag{20}$$

$$\cos \beta = \cos \gamma_{\min} - \frac{\sqrt{2} X_i}{V_i} \tag{21}$$

$$\tan \phi_i = \sqrt{\left\{ \frac{\pi E_{di} + 3I_d X_i}{\pi E_{di} \cos \gamma} \right\}^2 - 1} - \frac{18I_d X_i}{\pi^2 E_{di}} \tag{22}$$

$$V_i = V_i' \sqrt{1 + 3 \left\{ \frac{IX_i}{V_i'} \right\}^2 + 2\sqrt{3} \left\{ \frac{IX_i}{V_i'} \right\} \sin \phi_i} \tag{23}$$

$$V_i' = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{E_{di}}{\cos \phi_i} \tag{24}$$

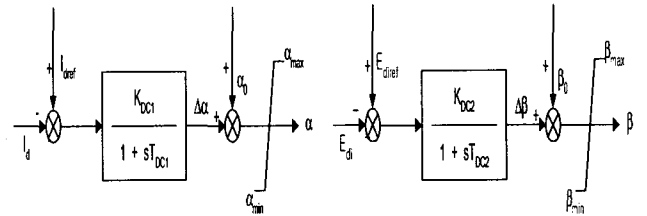
$$P_i = \sqrt{3} V_i' I \cos \phi_i \tag{25}$$

$$Q_i = \sqrt{3} V_i' I \sin \phi_i + \frac{18}{\pi^2} I_d^2 X_i \tag{26}$$

직류송전 시스템에서의 송전은 교류시스템과는 전혀 다른 원리로 이루어지고, 직류송전선의 양단에 설치된 순·역변환기의 제어특성에 의해서 전체적인 특성이 크게 영향을 받는다.

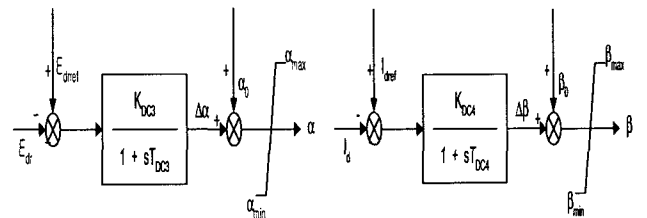
본 연구에서는 순변환기와 역변환기의 운전제어방식을 각각 그림 3과 그림 4에서와 같이 정전류-정전압제어(Case 1), 정전압-정전류제어(Case 2)로 구성하여 순변환기측은 점호각 α를 제어하고 역변환기는 소호각 β를 제어하도록 하여 특성을 고찰하였다.

한편, 직류전류의 제한 값(limit)으로는 변환기의 열적 손상 때문에 정격전류의 20[%]를 초과하지 않도록 상한치를 설정하고, 또한 너무 낮은 경우는 일정전력 운전에 대해 과전압을 초래하여 전류실패(commutation failure)가 될 수 있으므로 하한치가 10[%] 이하로 내려가는 것을 피하고 있다.



(a) ACR in rectifier (b) AVR in inverter

그림 3 정전류제어와 정전압제어의 블록선도 (경우 1)  
Fig. 3 Block diagram of ACR and AVR (Case 1)



(a) AVR in inverter (b) ACR in rectifier

그림 4 정전압제어와 정전류제어의 블록선도 (경우 2)  
Fig. 4 Block diagram of AVR and ACR (Case 2)

### 3. RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기 설계

#### 3.1 RVEGA

본 논문에서는 단순 유전알고리즘의 문제점을 개선한 실변수 엘리트주의 유전알고리즘(RVEGA: Real Variable Elitist Genetic Algorithm)을 제안하였다. 기존의 단순 유전알고리즘은 변수들을 유한길이의 2진 스트링으로 코딩해야 한다. 코딩할 스트링의 길이와 변수의 해는 trade-off 관계에 있다는 것을 알 수 있다. 더욱 정확한 해를 요구한다면 스트링의 길이는 매우 길어야 한다. 긴 스트링에 대한 코딩 절차는 많은 계산시간을 필요로 하고 수렴정도를 감소시킨다.

기존의 단순 유전알고리즘에서 변수를 유한 길이로 코딩하는 절차를 없애고 변수 그 자체로 최적화 하는 실 변수 유전알고리즘(Real Variable Genetic Algorithm: RVGA)을 이용하였다[18-19]. 실 변수로 코딩하는 RVGA의 탐색체 구성은 각 개체의 스트링을 변수의 상·하한치 내에서 랜덤하게 발생시켜 탐색할 각각의 변수를 실제값으로 구성한다. 즉, 스트링은 모든 변수를 포함하는 벡터로서 표현된다. 이 실 변수 유전알고리즘은 변수의 코딩 절차 없이 실 변수로 최적화 함으로써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지할 수 있다.

또한, 기존의 유전알고리즘은 여러 가지 문제점과 더불어 구조적인 문제점이 따르고 있다. 즉, 세대가 어느 정도 지나면 더 좋은 해가 도출되지 못하고 멈추어 버리는 조기수렴(Premature Convergence)의 문제가 종종 발생한다. 이 문제점은 돌연변이 확률을 높임으로서 어느 정도 극복 할 수 있으나, 이를 극복하는 데에는 한계점을 가지고 있다. 실제로 이는 무한 번의 반복을 요구하는 것으로 현실적으로는 불가능하다. 조기수렴의 원인을 살펴보면 다음과 같다. 첫째로, 세대가 진행됨에 따라 유전자 배열의 중복도(Duplication)를 들 수 있다. 즉, 세대가 지나면 점차 유전자들의 유전배열이 거의 비슷해지므로 다시 새로운 배열 패턴을 얻을 확률이 적다. 따라서, 집단 내의 유전인자들이 포화상태에 이르게 되는 것이다. 둘째로, 선택과 교배시의 문제를 들 수 있다. 즉, 나중에 좋은 값을 낼 가능성이 있는 유전배열을 가진 유전자가 교배 후에 그 배열을 잃어버리는 경우가 생길 수 있다. 또한 이러한 유전자가 선택되지 않음으로 해서 다음 세대에서는 소멸되어 버리기도 한다.

본 논문에서 적용한 RVEGA는 이 후손의 평가지수 값이 원래의 집단 안에서 가장 열성인 유전자의 적합도 값(즉, 원 집단 내의 최소 적합도 값)과 비교하여 그 값보다 크면 그 집단에 가입시키고 이전 유전자는 버린다. 즉, 자기 집단 내에서 우성의 후손을 반복 생성하게 된다. 후손이 점차 대입될수록 집단의 평균값은 점차 증가하다가 나중에는 포화되어 더 이상 변하지 않게 된다. 따라서 엘리트주의(Elitist) 유전알고리즘은 기존 알고리즘의 문제점 중 선택과 교배시의 한계점을 극복하고자 하는 시도이다. 이러한 과정을 통하여, 좋은 유전배열을 가진 해들은 계속 보존되므로 이들이 선택 과정 시 탈락되는 것을 방지하며, 교배시에 더 열성의 후손이 생성될 경우 이를 배제시키는 것이다. RVEGA를 요약하면 다음과 같다.

단계 1: 각 개체의 스트링을 변수의 상·하한치 내에서 랜덤

하게 발생한다.

단계 2: 각 개체의 스트링을 최적화 대상 파라미터로 변환하여 시스템의 동특성을 시뮬레이션 한 후 평가지수를 구하고 적합도를 평가한다.

단계 3: 적합도를 평가 후 한 세대의 집단에서 가장 우수한 개체를 유지시키고, 엘리트주의를 이용하여 각 개체를 복제시킨다.

단계 4: 룰렛 휠을 이용하여 적합도에 따라 다음 세대에 생존 여부를 결정하고, 각 세대의 가장 우수한 개체는 다음 세대에 항상 살아 남는다.

단계 5: 교배 확률에 따라 어비로부터 자손을 발생시킨다.

단계 6: 돌연변이 확률에 의해 선정된 유전자에 대하여 돌연변이를 한다.

단계 7: 수렴조건을 만족하면 종료하고 아니면 단계 2 ~ 단계 6 과정을 반복한다.

#### 3.2 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기 설계

SVC를 갖는 교류-직류 전력시스템의 안정화를 위하여 제안하는 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기의 블록선도는 그림 5와 같다.

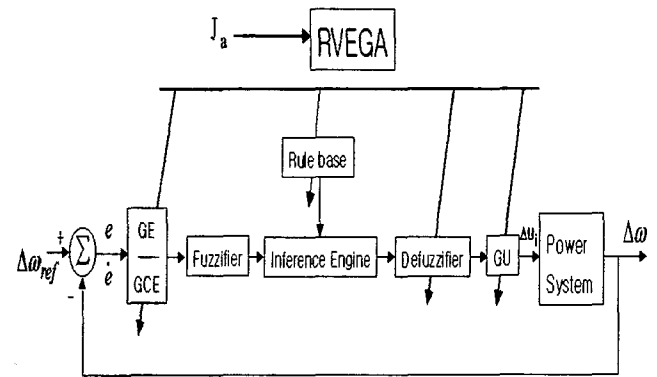


그림 5 RVEGA를 이용한 퍼지제어기  
Fig. 5 Proposed fuzzy controller using RVEGA

그림 5에서 퍼지 제어기는 식(27)~(29)와 같이 기준각속도  $\Delta\omega_{ref}$ 와 시스템의 출력  $\Delta\omega$ 를 사용하여 방정식을 정리하였다.

$$e(t) = \Delta\omega_{ref}(t) - \Delta\omega(t) \tag{27}$$

$$\dot{e}(t) = \frac{d}{dt} e(t) \tag{28}$$

$$\Delta U_i(t) = F[e(t), \dot{e}(t)] \tag{29}$$

이때,  $e(t)$ 는 기준각속도  $\Delta\omega_{ref}(t)$ 와 시스템 출력  $\Delta\omega(t)$  사이의 오차,  $\dot{e}(t)$ 는 오차의 변화량이다. 또한,  $F[e(t), \dot{e}(t)]$ 는 퍼지논리에 의한  $e(t)$ 와  $\dot{e}(t)$ 의 비선형 함수로서  $\Delta U_i(t)$ 가 되며 이는 시스템의 제어입력이 된다.

최적화 하고자하는 퍼지제어기의 구성요소는 스케일링 계

수(Scaling Factors), 멤버십 함수(Membership Function), 제어규칙(Control Rule)이다. 그림 6은 퍼지제어기의 각 구성요소를 최적화하기 위한 염색체 구조이다.

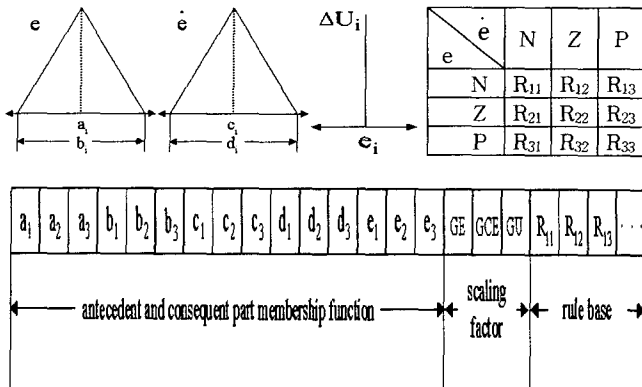


그림 6 염색체 구조  
Fig. 6 Proposed chromosomes structure

여기서, 퍼지 제어기의 각 구성요소를 시행착오법이 아닌 자동으로 최적화하기 위해 유전알고리즘을 이용하였다. 이에 대한 흐름도는 그림 7과 같다.

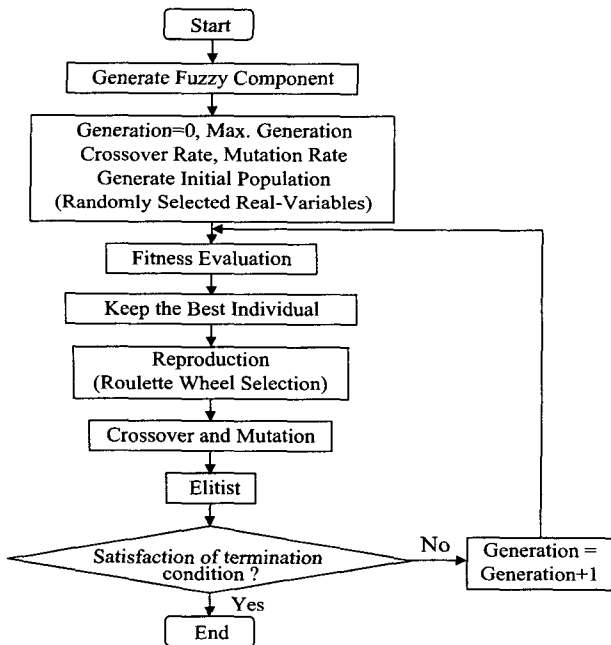


그림 7 RVEGA를 이용한 퍼지제어기 구성요소의 자동동조  
Fig. 7 Auto-tuning of fuzzy component using RVEGA

각 개체의 적합도를 평가하는 적합도 함수는 보통 풀고자 하는 최적화 문제의 목적함수나 다른 주관적 평가지수에 의해 결정된다. 일반적으로 퍼지제어기의 최적화는 평가지수 값을 최소화시키는 퍼지제어기의 구성요소를 찾아내는 것이다. 평가지수의 구성요소는 시스템의 주요 진동모드에 대해서 회전자의 각속도와 관계되는 상태변수가 가장 높은 영향을 가지는 상태변수로 나타났지만, 고속 여자기 등의 선택 또는 그의 제어기에 의해서 주요 동요모드에 다른 상태변수들

이 추가로 많은 영향을 보일 수가 있다. 따라서 사용된 평가지수는 식(30)과 같이 영향이 높은 상태변수를 반영하였고, 적합도 함수는 식(31)과 같이 정의하였다.

$$J_a = \int_{t_1}^{t_2} (g_1 \Delta \omega^2 + g_2 \Delta v_i^2 + g_3 \Delta B_i^2) dt \quad (30)$$

$$Fitness(J) = \frac{1}{1 + \min J_a} \quad (31)$$

식(30)에서  $t_r$ 은 적분시간이며,  $g_1, g_2, g_3$ 는 가중치이다. 본 논문에서 적용한 가중치는 각각  $g_1=0.1, g_2=0.03, g_3=0.001$ 이다. 식(31)의 적합도 함수는 퍼지제어기가 기준신호에 빨리 도달하고 정상상태 오차가 최소가 될 때 최대의 값을 갖는다. 이렇게 정의되어진 적합도 함수는 각 개체가 다음 세대에 생존할 가능성의 척도가 되며, 이 적합도 함수의 값이 큰 개체는 다음 세대에 생존할 가능성이 크게 되며, 이와 반대로 값이 작은 개체는 생존할 가능성이 작게 된다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

##### 4.1 RVEGA를 이용한 퍼지제어기의 파라미터 최적화

SVC를 포함한 교류시스템의 방정식과 직류시스템의 순·역변환기의 기본특성, 동작특성 및 제어특성에 관한 이론을 정립하여 SVC를 포함한 교류-직류 전송 시스템의 조류계산을 정식화하였다. 또한 직류시스템의 순·역변환기 제어방식을 정전류-정전압제어(Case 1) 및 정전압-정전류제어(Case 2)로 구성·설계하였다. 따라서 본 연구에서는 SVC를 포함한 교류-직류 시스템 안정화를 위하여 SVC 시스템에 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기를 설계하였다.

제어기 설계시에는 먼저, 퍼지제어기의 입출력 요소인  $\Delta \omega$ ,  $\Delta \omega$ 와  $\Delta U$ 에 대해서 3개의 퍼지변수(Negative, Zero, Positive)를 초기 설정하고, RVEGA를 이용하여 퍼지제어기의 전건부 및 후건부의 중심치와 폭, 스케일링 계수와 제어규칙을 동조하였다. 이 구성요소에 의한 제어성능은 평가함수가 최소화 될 때까지 반복계산 하였다.

제안한 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 전력(사례연구 1), 직류전류(사례연구 2)를 변동시킨 경우에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기존의 제어 기법인 비례·적분(PI) 제어기 및 퍼지제어기와 비교·고찰하였다.

표 1은 유전알고리즘에 사용한 초기 파라미터를 나타내었고, 표 2는 시스템 파라미터를 나타내었다.

표 1 초기 GA 파라미터

Table 1 Initial GA parameters

Parameters	Values
Population size	40
Number of generation	100
Crossover rate	0.85
Mutation rate	0.01

표 2 시스템 파라미터

Table 2 System parameters

AC system	
$x_d = 1.7$ [p.u.]	$K_A = 400$ [p.u.] $K_1' = 1.0826$ [p.u.]
$x_q = 1.64$ [p.u.]	$T_A = 0.05$ [sec] $K_2' = 1.1848$ [p.u.]
$x_d' = 0.245$ [p.u.]	$K_F = 0.025$ [p.u.] $K_3' = 0.0756$ [p.u.]
$D = 0.0$ [p.u.]	$K_E = -0.17$ [p.u.] $K_4' = 1.7599$ [p.u.]
$H = 2.37$ [sec]	$T_E = 0.96$ [sec] $K_5' = 0.3156$ [p.u.]
$\tau_{\omega}' = 5.9$ [sec]	$x_e = 0.4$ [p.u.] $K_6' = -0.7341$ [p.u.]
$S_{E_{max}} = 0.02$ [p.u.]	$T_F = 1.0$ [sec] $K_7' = -0.0573$ [p.u.]
$S_{E_{min}} = 0.001$ [p.u.]	$\delta = 0.7727$ [rad] $K_8' = 0.4925$ [p.u.]
	$K_9' = 0.2338$ [p.u.]
SVC system	
$K_V = 10.0$ [p.u.]	$T_V = 0.15$ [sec] $B_c = 0.6$ [p.u.]
$X_T = 0.08$ [p.u.]	$B_{L0} = -0.45$ [p.u.] $B_{L_{max}} = -0.3$ [p.u.]
$B_{L_{min}} = -0.9$ [p.u.]	$V_{s_{max}} = 0.12$ [p.u.] $V_{s_{min}} = -0.12$ [p.u.]
DC system	
$L_d = 0.032$ [p.u.]	$R_d = 0.012$ [p.u.] $X_r = 0.100$ [p.u.]
	$K_{DC1} \quad T_{DC1}$
$X_i = 0.100$ [p.u.]	$\sim = 1.0$ [p.u.] $\sim = 0.1$ [sec]
	$K_{DC6} \quad T_{DC6}$

4.2 결과고찰

SVC를 포함한 교류-직류 시스템의 안정도를 평가하기 위하여 SVC 시스템에 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기를 설계하였다. 따라서 SVC 시스템의 서셉턴스 변화에 따라 시스템의 안정도에 크게 영향을 미치므로 적합도 함수를 시스템 출력인 각속도 편차, 단자전압 편차 및 서셉턴스 편차를 선정하였다.

SVC를 포함한 교류시스템에 교류선로와 제어시스템을 포함하는 상태 변수는  $X_{ac} = [\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta E_q' \ \Delta E_{FD} \ \Delta V_E \ \Delta V_R \ \Delta B_L]^T$ 이며, 제어변수는  $\Delta U$ 이고, 직류시스템에 직류선로와 제어시스템을 포함하는 상태변수는  $X_{dc} = [\Delta I_{dc} \ \Delta\alpha \ \Delta\beta]^T$ 이다. 샘플링 주기는 SVC를 포함한 교류시스템에서 0.01 [sec]로 하였고, 직류시스템은 0.001[sec]로 하였다. 이것은 직류시스템이 교류시스템에 비해서 변화의 속도가 빠르므로 샘플링 주기를 짧게 잡는다.

직류시스템에서 순변환기측은 점호각  $\alpha$ 가 제어되는 반면 역변환기측은 소호각  $\beta$ 가 제어된다. 또한 각 경우에 있어서 미소 외란에 의해 순변환기측의 교류전압이 저하한 경우, 순변환기는 점호각  $\alpha$ 를 작게함으로써 소요 무효전력을 감소시켜 교류전압의 저하를 억제하는 방법으로 동작하고, 역변환기는 소호각  $\beta$ 를 적게하여 교류전압의 저하를 억제시키게 된다. 직류시스템의 동작조건을 표 3과 같이 지정 조건하에서 시뮬레이션을 하였다.

표 3 직류시스템의 동작 조건

Table 3 Setting values of DC control system

DC control method	Rectifier	Inverter
Case 1	0.2[p.u.]	1.0[p.u.]
Case 2	1.0[p.u.]	0.2[p.u.]

가. 사례연구 1 : 전력을 변동시킨 경우

첫 번째 사례 연구로서 부하가 0.1[sec] 사이에 정격 출력의 3[%] 변동한 경우에 SVC 시스템에 RVEGA를 이용하여 최적 퍼지제어기를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제어기 성능을 비교·고찰하였다.

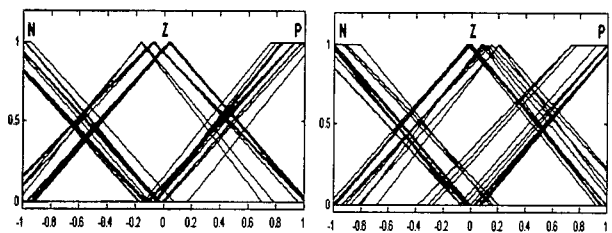
그 결과 최적화된 퍼지제어기의 스케일링 계수는 표 4에 나타내었고, 퍼지제어기 멤버쉽함수의 전진부 동조과정은 그림 8에, 후진부의 최적화된 중심값은 표 5에 나타내었다. 또한, 최적화된 퍼지 규칙은 표 6에 나타내었다. 그림 9는 SVC를 포함한 교류-직류 시스템에 있어서 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기를 직류시스템의 각 경우에 적용하여 최대 적합도 및 평균 적합도를 나타내었다. 표 5-11은 평가지수를 각 경우에 대하여 종합하여 나타내었다.

또한 PI 제어기 적용시, 퍼지제어기 적용시 및 본 논문에서 제안한 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기 적용시에 있어서 시스템의 각속도 편차 및 직류전류의 동특성을 그림 10~11에 각각 나타내었다.

표 4 최적화된 스케일링 계수

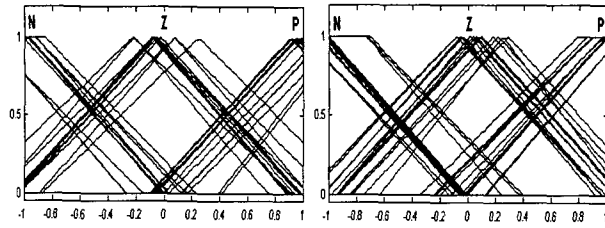
Table 4 Optimized scaling factors

Scaling factors	GE	GCE	GU
Cases			
Case 1	0.001197	0.000748	0.055689
Case 2	0.001360	0.000055	0.052229



Values	e			ė		
	N	Z	P	N	Z	P
Initial	-1.0839	-0.0781	1.0401	-1.0726	-0.0296	0.9235
Final	-1.1936	-0.1648	1.0659	-0.9155	0.1475	1.2324

(a) Case 1



Values CE	e			e-dot		
	N	Z	P	N	Z	P
Initial	-1.0032	0.0298	1.0239	-1.0386	-0.0075	0.9924
Final	-1.2718	-0.2161	1.2530	-1.1803	0.2865	0.7856

(b) Case 2

그림 8 최적화된 멤버쉽 함수

Fig. 8 Optimized membership functions for e and e-dot

표 5 최적화된 CE  $\Delta U$

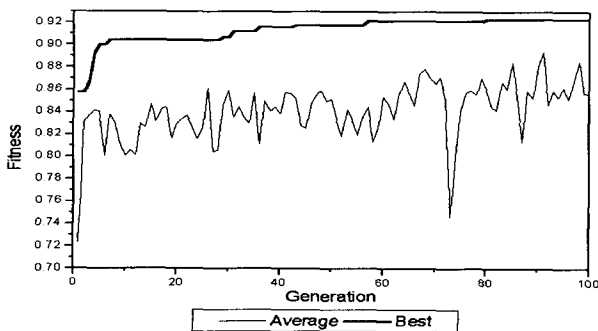
Table 5 Optimized CE  $\Delta U$

Cases	Fuzzy variable	N	Z	P
	Case 1	-0.943402	0.058162	1.087097
Case 2		-0.904106	0.095894	1.067937

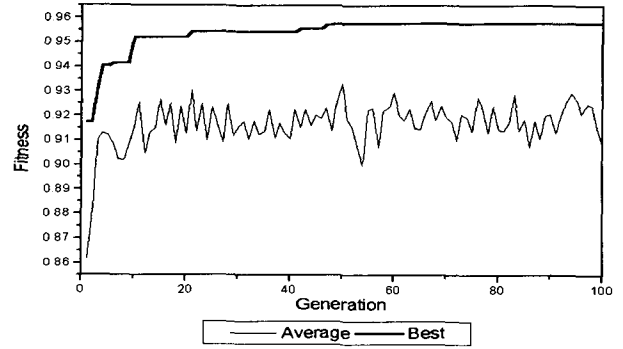
표 6 최적화된 퍼지 규칙

Table 6 Optimized fuzzy rules

Case 1	e			Case 2	e-dot			
	N	Z	P		N	Z	P	
e	N	2	1	2	N	2	1	2
	Z	1	2	3	Z	1	2	3
	P	2	2	3	P	2	2	2



(a) Case 1



(b) Case 2

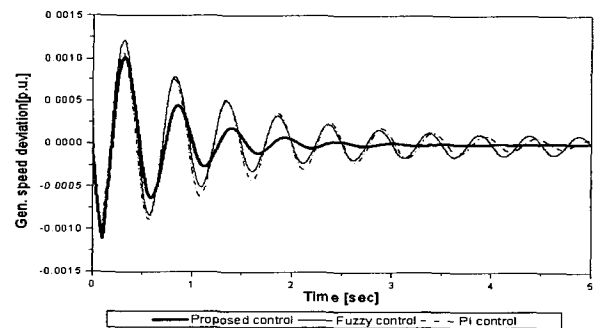
그림 9 전력증가시 최대적합도 및 평균적합도

Fig. 9 Best and average fitness(Power increment by 3[%] during 100ms as disturbance)

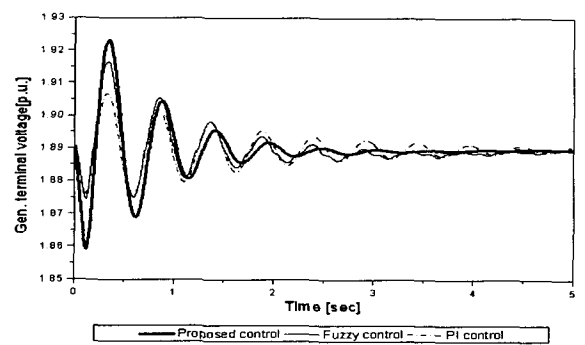
표 7 평가 지수

Table 7 Performance indices

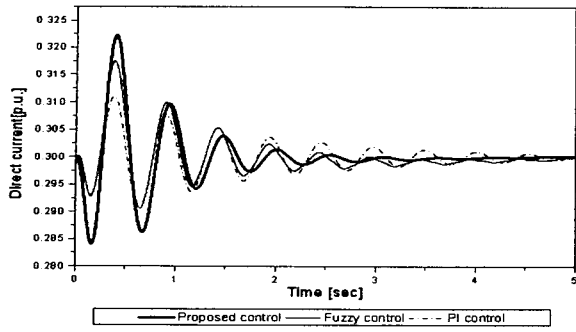
Cases	Control method	PI	Fuzzy	Proposed
	Case 1	0.407661	0.381763	0.195998
Case 2		0.600129	0.399900	0.086388



(a) Generator speed deviation :  $\Delta\omega$



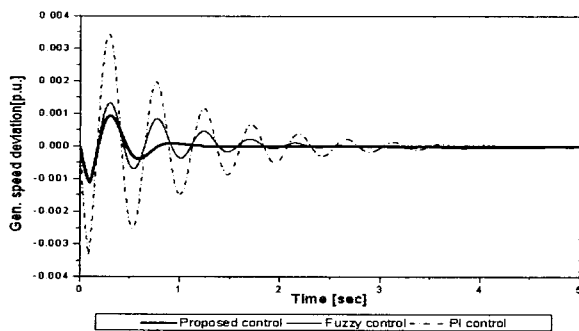
(b) Generator terminal voltage :  $V_t$



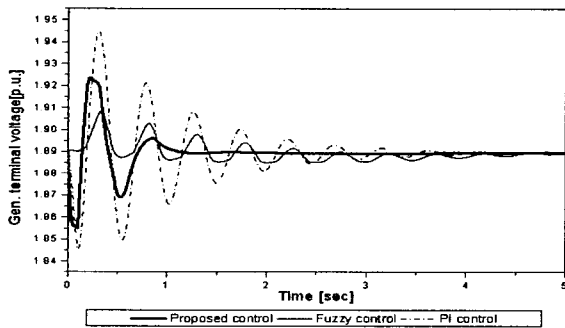
(c) Direct current :  $I_{dc}$

그림 10 경우 1에 대한 전력 증가시의 동특성

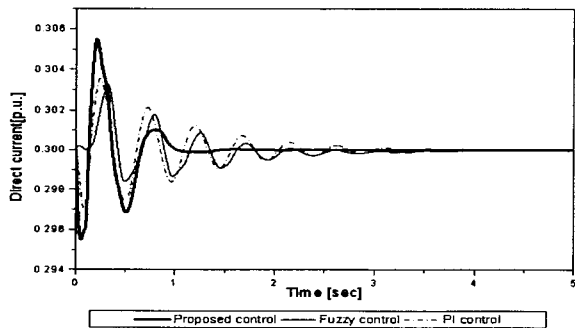
Fig. 10 Dynamic responses for case 1(Power increment by 3% during 100ms as disturbance)



(a) Generator speed deviation :  $\Delta\omega$



(b) Generator terminal voltage :  $V_t$



(c) Direct current :  $I_{dc}$

그림 11 경우 2에 대한 전력 증가시의 동특성

Fig. 11 Dynamic responses for case 2(Power increment by 3% during 100ms as disturbance)

RVEGA를 이용한 적합도를 각 세대별로 최대 적합도와 평균 적합도를 살펴보면, 세대가 지남에 따라 최대 적합도 및 평균 적합도가 향상되어지는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 각 세대에 있어서 최적의 해가 많이 존재함을 알 수 있었다. 따라서 RVEGA가 계산시간을 감소시키고 정확성을 유지할 수 있었다. 또한 보다 적은 반복횟수로도 최적해를 찾을 수 있었으며, 조기수렴 현상을 극복하여 빠른 시간 내에 최적해, 즉 퍼지제어기의 각 구성요소를 얻을 수 있었다.

최적화된 제어기의 구성요소에 대한 평가지수를 살펴보면, 제안한 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기를 적용한 경우가 퍼지제어기 적용시 Case 1(48%), Case 2(78%), PI 제어기 적용시 보다 Case 1(50%), Case 2(85%) 감소하였다.

각 경우에 대한 SVC를 갖는 교류시스템의 각속도 특성을 살펴보면, 제안한 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기 적용시가 첫 번째 오버슈트(first overshoot : 1st O.S.)와 두 번째 오버슈트(second overshoot : 2nd O.S.)에 대한 감소율을 보면 Case 1(55%), Case 2(90%)로 PI 제어기 적용시 Case 1(30%), Case 2(42%) 및 퍼지제어기 적용시 Case 1(35%), Case 2(36%)보다 아주 우수하게 감소하였다.

또한 직류시스템에서 직류전류의 특성은 초기 오버슈트 면에서는 다소 속응성이 떨어짐을 보이나 직류전류의 극한값 이내에서 운전하므로 시간이 지남에 따라 수렴성에서 우수한 속응성을 보이고 있다. 이에 따라 안정도가 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 SVC 시스템에 강인성을 갖는 본 논문에서 제안한 제어기 적용이 SVC를 포함한 교류-직류 시스템의 안정도 향상에 크게 기여함을 알 있다.

표 8 시뮬레이션 결과

Table 8 Simulation results

Case	O.S.	1st O.S.	2nd O.S.	Decaying rate [%]
Case 1	Proposed	1.0100E-3	4.49064E-4	55.54
	Fuzzy	1.2100E-3	7.79838E-4	35.55
	PI	1.0600E-3	7.46631E-4	29.56
Case 2	Proposed	9.3940E-4	9.21481E-5	90.19
	Fuzzy	1.3200E-3	8.34724E-4	36.76
	PI	3.4500E-3	1.97000E-3	42.90

나. 사례연구 2 : 직류전류를 변동시킨 경우

두 번째 사례 연구로서는 초기에 직류전류 편차를  $\Delta I_{dc} = 0.03$ [p.u.] 만큼 변동한 경우에 SVC 시스템에 RVEGA를 이용하여 최적 퍼지제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 제어기 성능을 비교·고찰하였다.

그 결과 최적화된 퍼지제어기의 스케일링 계수는 표 9, 퍼지제어기 멤버쉽함수의 전건부 동조과정은 그림 12, 후건부의 최적화된 중심값은 표 10과 같이 얻어졌으며, 최적화된 퍼지규칙은 표 11과 같다. 그림 13은 직류시스템의 각 경우에 대한 최대 적합도 및 평균 적합도를 나타내었고, 표 12는 직류시스템의 각 경우에 대한 평가지수를 종합하여 나타내었다.

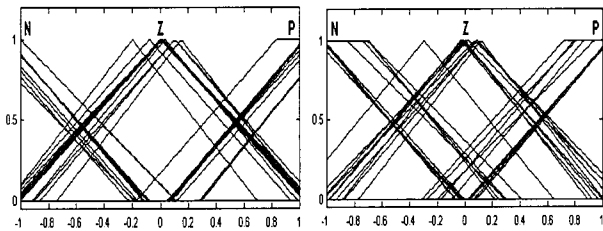


또한 PI 제어기 적용시, 퍼지제어기 적용시 및 본 논문에서 제안한 제어기 적용시에 있어서 시스템의 각속도 편차 및 직류전류의 동특성을 그림 14~15에 각각 나타내었다.

표 9 최적화된 스케일링 계수

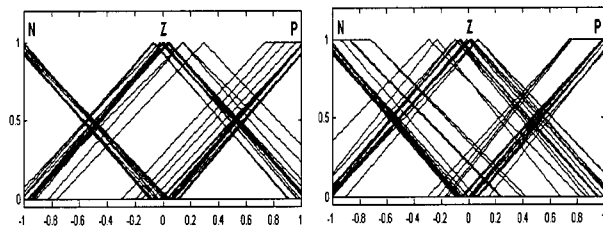
Table 9 Optimized scaling factors

Cases	Scaling factors	GE	GCE	GU
	Case 1		0.000066	0.000006
Case 2		0.000056	0.000006	0.038416



Values	e			e-dot		
	N	Z	P	N	Z	P
Initial	-1.0937	-0.0237	1.0321	-0.9031	0.0110	0.9600
Final	-1.1645	0.0049	1.2219	-0.7046	0.0724	0.7187

(a) Case 1



Values	e			e-dot		
	N	Z	P	N	Z	P
Initial	-0.9320	0.0493	0.9496	-1.0198	0.0479	0.9093
Final	-1.1287	-0.1821	1.2020	-0.7668	-0.2706	0.7416

(b) Case 2

그림 12 최적화된 멤버십 함수

Fig. 12 Optimized membership functions for e and e-dot

표 10 최적화된 CE<sub>ΔU<sub>i</sub></sub>

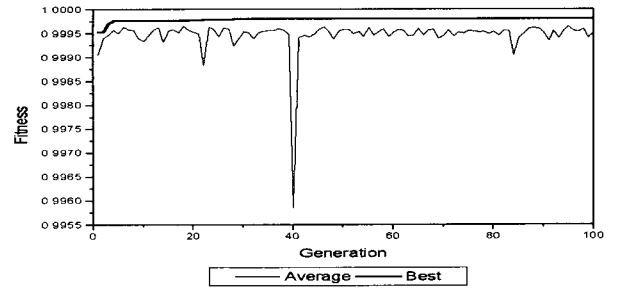
Table 10 Optimized CE<sub>ΔU<sub>i</sub></sub>

Cases	Fuzzy variable	N	Z	P
	Case 1		-1.022385	-0.018671
Case 2		-1.091789	0.062268	1.005572

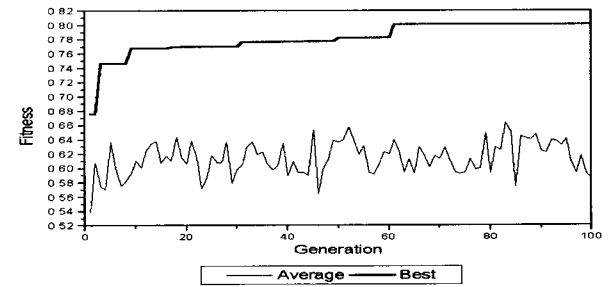
표 11 최적화된 퍼지 규칙

Table 11 Optimized fuzzy rules

Case 1	e-dot			Case 2	e-dot			
	N	Z	P		N	Z	P	
e	N	2	1	2	N	2	1	2
	Z	1	2	3	Z	1	2	3
	P	2	3	2	P	2	2	2



(a) Case 1



(b) Case 2

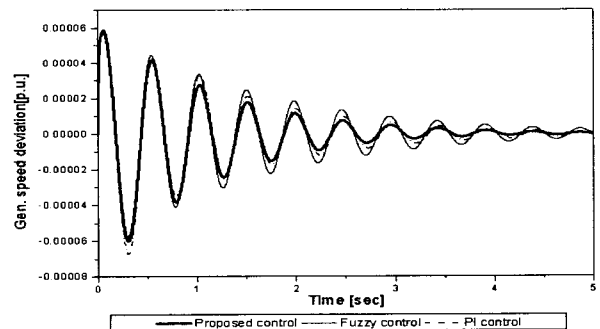
그림 13 직류전류 증가시의 최대 적합도 및 평균 적합도

Fig. 13 Best and average fitness (Initial DC current increment by 0.03(p.u.))

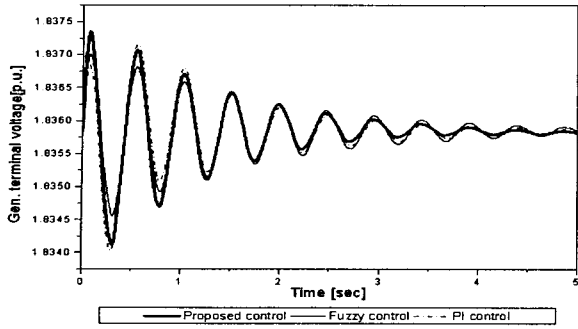
표 12 평가 지수

Table 12 Performance indices

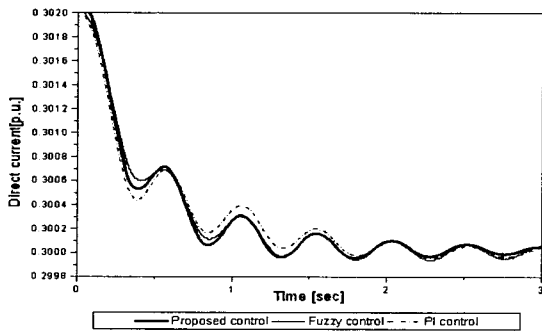
Cases	Control method	PI	Fuzzy	Proposed
	Case 1		0.033732	0.027789
Case 2		0.023317	0.014174	0.007168



(a) Generator speed deviation : Δω

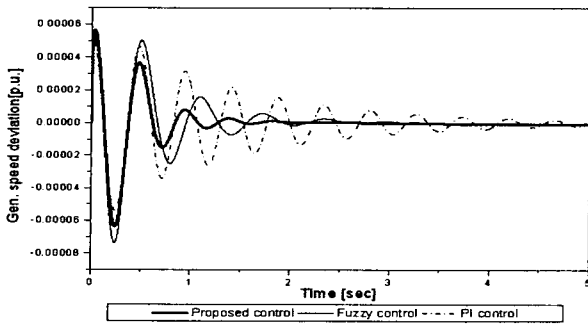


(b) Generator terminal voltage :  $V_t$

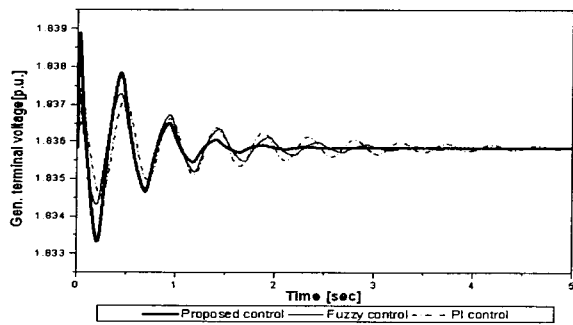


(b) Direct current :  $I_{dc}$

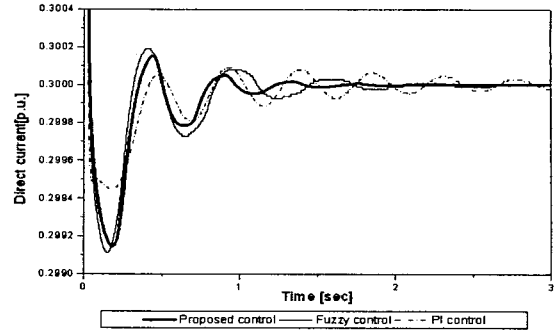
그림 14 경우 1에 대한 직류전류 증가시의 동특성  
Fig. 14 Dynamic responses for case 1(Initial DC current increment by 0.03[p.u.])



(a) Generator speed deviation :  $\Delta\omega$



(b) Generator terminal voltage :  $V_t$



(b) Direct current :  $I_{dc}$

그림 15 경우 2에 대한 직류전류 증가시의 동특성  
Fig. 15 Dynamic responses for case 2(Initial DC current increment by 0.03[p.u.])

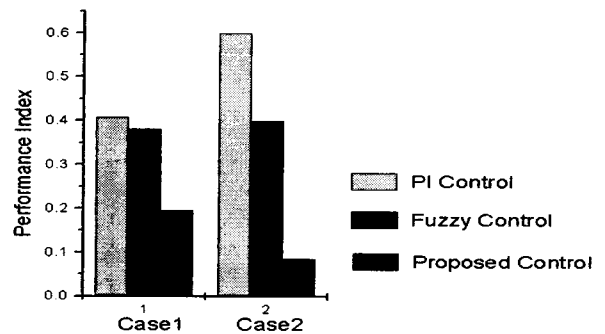
최적화된 제어기의 구성요소에 대한 평가지수를 살펴보면, Case 1에서 제안한 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기를 적용한 경우가 기존의 PI 제어기보다 31.62[%] 감소하였고, 퍼지제어기 보다는 17[%] 감소하였다. Case 2에서도 제안한 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기를 적용한 경우가 퍼지제어기 적용시 50[%] 및 PI 제어기 적용시 보다 70[%]로 현저히 감소하였다. 따라서 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기 적용시가 시스템 안정도 향상에 크게 기여함을 알 수 있다.

그림 16은 각 사례 연구의 평가 지수를 비교·종합하여 나타내었다. 따라서 본 연구에서 설계한 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기를 각 사례 연구를 통하여 타당성을 입증하였다. 또한 실 계통에 제안한 제어기를 적용하기 위한 데이터를 구축할 수 있었다.

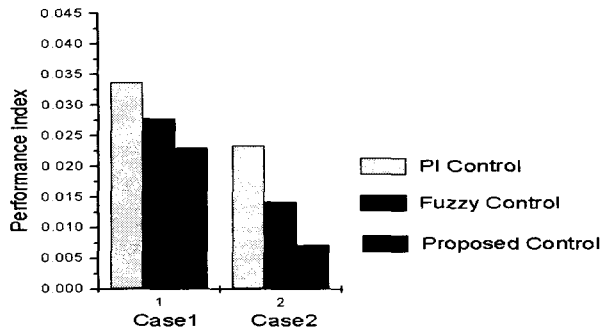
표 13 시뮬레이션 결과

Table 13 Simulation results

Case	O.S.	1st O.S.	2nd O.S.	Decaying rate [%]
Case 1	Proposed	5.86163E-5	4.18109E-5	28.67
	Fuzzy	5.79519E-5	4.45992E-5	23.04
	PI	5.66628E-5	4.30074E-5	24.10
Case 2	Proposed	5.65620E-5	3.64603E-5	35.54
	Fuzzy	5.23514E-5	5.01303E-5	4.24
	PI	4.78887E-5	4.62935E-5	3.33



(a) Case study : 1



(b) Case study : 2

그림 16 각 사례 연구의 평가 지수

Fig. 16 Performance indices for each case study

## 5. 결 론

본 논문에서는 교류-직류 전력시스템의 동특성 개선을 위하여 종래의 일반적인 방법과는 달리, 자연 생태계의 진화를 모의한 전역적 탐색 최적화 기법인 RVEGA와 퍼지제어 이론을 기반으로 하여 FACTS로 분류되는 여러 기기 중에서 병렬구조를 가지는 SVC의 제어를 설계하였다. 지금까지 SVC 시스템에 교류-직류 전력시스템 동요 억제에 위하여 지능제어방법의 적용은 일반적인 퍼지제어기를 사용하거나 또는 비례·적분 제어기의 이득을 유전알고리즘으로 동조하는 연구가 수행되었다. 따라서, 단순 유전알고리즘의 단점을 보완한 RVEGA를 적용하여 퍼지제어기 소속함수의 형태를 동조한 연구내용은 SVC를 포함한 교류-직류 전력시스템에 대한 새로운 설계방법이라고 할 수 있다.

중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) SVC를 포함한 교류-직류 전력시스템에서 SVC를 포함한 교류시스템의 선형화와 직류시스템의 제어모드에 따른 전력방정식을 유도하고, 이와 같이 유도된 선형화 방정식 및 전력방정식을 이용하여 SVC를 포함한 교류-직류 전력시스템의 전력조류계산과 동특성을 해석하였다.
- 2) 본 논문에서는 기존의 단순 유전알고리즘을 개선한 RVEGA를 사용하여 퍼지제어기의 소속함수를 최적화 하였다.
- 3) RVEGA는 세대가 지남에 따라 최대 적합도 및 평균 적합도가 향상되어짐을 알 수 있었다. 이 결과는 각 세대에 있어서 최적인 해가 많이 존재하고 있음을 알 수 있다. 따라서 RVEGA는 보다 적은 반복횟수로도 최적해를 찾을 수 있었고, 전역적인 최적해를 유지하였으며, 조기 수렴현상을 극복하여 빠른 시간 내에 최적해 즉 퍼지제어기의 구성요소를 얻을 수 있었다.
- 4) 최적화된 퍼지제어기의 구성요소 변화에 대한 평가지수를 살펴보면 PI 제어기 및 퍼지제어기 적용시 보다 평가지수가 감소하였다. 따라서 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기 적용 방법이 시스템 동특성 개선에 크게 기여함을 알 수 있었으며, 제어기의 제어능력이 우수함을 알 수 있었다.
- 5) 전력 및 직류전류 변동시에 직류시스템의 응답특성을 살펴보면, 초기에는 다소 속응성이 떨어짐을 보이나 직류전

류의 극한값 이내에서 운전하므로 시간이 지남에 따라 우수한 속응성을 보이고 있고, 이에 따라 시스템의 동특성이 크게 개선됨을 알 수 있다. 따라서 SVC 시스템에 RVEGA를 이용한 최적 퍼지제어기가 교류-직류 전력시스템의 동특성 개선에 크게 기여함을 알 수 있었고, 본 논문에서 설계한 제어기 설계가 타당함을 입증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. M. Anderson and A. A. Found, "Power System Control and Stability", IEEE Press, New York, 1993
- [2] IEEE Special Stability Controls Working Group, "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, pp. 229-240, 1994
- [3] E. N. Dialynas and N. C. Koskolas, "Reliability modeling and evaluation of HVDC power transmission system", Vol. 9, No. 2, pp. 872-878 1994
- [4] 손광명, 김동현, 이태기, 장길수, 윤용범, 이진, "서대구 SVC 및 제어시스템 분석", 전기학회지, 제 50권, 제 7호, pp. 37-44, 2001
- [5] T. Senjyu, A. Miyazato, and K. Uezato, "Improvement of Power System Stability by Cooperative Fuzzy Controller", IEE Proc., 1990
- [6] C. T. Harris, "Intelligent Control-Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets", World Scientific Pub. 1993
- [7] Vittorio Maniezzo, "Genetic evaluation of the popology and weight distribution of neural networks", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol5, No 1, pp. 39-53 1994
- [8] Gen and Cheng, "Genetic algorithms & engineering design", Wiley interscience, pp. 16-95 1997
- [9] 直流送電適用 技術調査 専門委員會, "直流送電の 現況と適用技術", 日本電氣學會技報告 (II部), 第 346호, 1990
- [10] 舟木 剛, "電壓型變換器を用いた 直流送電による 安定解析", 日本電氣學會研究會資料, PE-92-61, pp. 115-123, 1992
- [11] Padiyar, "HVDC power transmission systems", John Wiley & Sons, pp. 5-8, 1991
- [12] K. G. Narendra and V. K. Sood, "Intelligent current controller for an HVDC transmission link", IEEE 0-7803-3713-1, 1997
- [13] 한국전력공사, "제주-육지간 전력계통 연계 타당성 검토 보고서", 한국전력기술주식회사, 1997
- [14] CIGRE Working Group 38-01; Task Force No. 2 on Static Var Compensators, Static Var Compensators, 1986
- [15] C. H. Cheng and Y. Y. Hso, "Design of a Static VAR Compensator Using Model Reference Adaptive Control", Electric Power System Research, No. 13, pp. 129-138, 1987
- [16] 문경섭, 손광명, 이태기, 이송근, 박종근, "무효전력 보상

여유를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어”, 전기학회논문지, 제 48권, 제 4호, pp.351-357, 1999

- [17] H. H. Chung, D. R. Hur, J. P. Lee and T. K. Oh, “A Design of MGA-PI Supplementary Controller in SVC for Power Oscillation Damping of HVDC Transmission System”, Trans. KIEE, Vol. 51, No. 7, pp. 317-326, 2002
- [18] N. Shimamoto, A. Hiramatsu and K. Yamasaki, “A Dynamic Routing Control Based on a Genetic Algorithm”, Proc. of 1993 International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1123-1128, 1993
- [19] A. Varsek, T. Vrbancic, and B. Filipic, “Genetic algorithms in controller design and tuning”, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 23, No. 5, pp. 1330-1339, 1993



**정 문 규(鄭 文 圭)**

1971년 11월 16일 생. 1998년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

Tel : 051-200-6747

E-mail : d9134723@smail.donga.ac.kr



**고 희 석(高 羲 石)**

1942년 8월 21일 생. 1966년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 동아대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 경남대 전기전자공학부 교수. 2002년 현재 경남대 부총장.

Tel : 055-249-2628, 249-2003

E-mail : powersys@kyungnam.ac.kr

저 자 소 개



**정 형 환(鄭 亨 煥)**

1941년 1월 19일 생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수.

Tel : 051-200-7733 Fax : 051-200-7743

E-mail : hhchong@mail.donga.ac.kr



**허 동 렬(許 東 烈)**

1969년 11월 10일 생. 1995년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 동 대학 정보기술연구소 특별연구원.

Tel : 051-200-6747

E-mail : drhur@donga.ac.kr



**왕 용 필(王 龍 泌)**

1966년 8월 25일 생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1999년-2001년 뉴질랜드 Canterbury University(Post-Doc.). 현재 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 시간강사 및

정보기술 연구소 특별연구원.

Tel : 051-200-6747

E-mail : ypwang@smail.donga.ac.kr