

# 초고압 직류송전 시스템의 전력 동요억제를 위한 정지형 무효전력 보상기에 MGA-PI 보조제어기 설계

論 文  
51A-7-2

## A Design of MGA-PI Supplementary Controller in SVC for Power Oscillation Damping of HVDC Transmission System

鄭亨煥\* · 許東烈\*\* · 李丁必\*\*\* · 吳泰圭§  
(Hyeng-Hwan Chung · Dong-Ryol Hur · Jeong-Phil Lee · Tae-Kyoo Oh)

**Abstract** - In this paper, a methodology for optimal PI supplementary controller using the modified genetic algorithm has been proposed to the oscillation damping in HVDC transmission system. These study processes are summarized as the formulation for load flow calculation in HVDC transmission system with SVC, the investigations on the basic control in HVDC system, the mathematical modeling for dynamic characteristics analyses, and the optimal design of MGA based PI controller generation the supplementary control signal of SVC. Its proprieties were verified through a series of computer simulations including dynamic stability. It means that the application of MGA-PI controller in HVDC transmission system can contribute the propriety to the improvement of the stability in HVDC transmission system and the design of MGA-PI controller has been proved indispensable when applied to HVDC transmission system.

**Key Words** : Static Var Compensator(SVC), HVDC Transmission System, Optimal PI Supplementary Controller, Modified Genetic Algorithm(MGA)

### 1. 서 론

최근 반도체기술이 비약적인 발전을 거듭함에 따라, 반도체를 이용한 전력제어장치가 전력전송시스템에 혁신적인 변화를 가져다 줄 것으로 기대되고 있으며, 전자기기의 제어나 전동기 제어 등 각종 산업분야에서 전력용 반도체 제어장치가 광범위하게 사용되고 있다. 특히 대용량의 전력용 반도체가 실용화됨에 따라 응용범위가 더욱 확대되는 추세에 있어, 발전소에서 생산한 전력을 수요지까지 공급하는 전력전송설비의 제어에도 이용할 수 있게 되었다. 이러한 전력용 반도체를 이용한 제어기술을 응용함으로써 전력전송설비의 기능을 고도화하고 설비이용률의 극대화를 이룩하기 위한 새로운 개념의 전력시스템이라고 정의할 수 있는 유연송전시스템(FACTS: Flexible AC Transmission System) 기술이 개발되었다. FACTS 기술은 전력전송설비의 송전용량 증대와 설비이용률 향상으로 장기적인 전력에너지 수송대책이라는 측면에서 매우 유력한 수단으로 평가되고 있다[1-4].

따라서 본 논문에서는 전력전송설비의 송전용량 증대와 설비이용률 향상 효과를 가져다 줄 수 있는 FACTS 기기의 하나인 SVC를 적용하여 비동기 및 다른 주파수 연계가 가능하며 교류시스템의 단락용량을 증대하지 않고 시스템을 연계할 수 있는 교류-직류 전력시스템에 대하여 연구하였다[5-8].

SVC를 포함한 교류-직류시스템에서 직류전압은 SVC를 포함한 교류전압과 점호각의 함수이며, 직류전류는 순변환기와 역변환기의 직류전압차에 의하여 결정된다. 직류전류는 한쪽 직류전압의 미세한 변동에 대하여도 크게 변동될 수 있기 때문에, SVC를 포함한 교류-직류시스템 상태변동에 따라서 직류전류를 일정하게 제어하는 정전류제어는 직류시스템에서 필수적인 기본 제어방식이다. 하지만 시스템에 다양한 외란이 인가하였을 경우 정전류제어 역시 시스템의 전압을 안정하게 유지하기 위해서는 보조제어신호가 필요하다. 또한 교류-직류시스템에서 직류시스템의 컨버터나 인버터가 동작할 때 무효전력이 발생하며, 무효전력량이 상당하기 때문에 컨버터나 인버터 인근에 AC 필터나 콘덴서 설치가 필요하며, 약한 교류 시스템에서는 부하가 바뀔 때 따라서 교류 전압 조정을 위해서는 동기조상기나 SVC를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 SVC의 장점을 최대한 활용하여 SVC를 포함한 교류-직류 전력시스템에 전력동요억제, 과도안정도 향상, 저주파 진동 억제 등의 효과를 얻기 위하여 SVC에 보조제어신호로서 제어기를 설계하였다.

최근에는 전력시스템의 동특성을 향상시키기 위한 보조제어신호를 구하기 위하여 선형제어이론에 바탕을 두고 있다. 그러나 종래의 선형제어이론은 직류송전 시스템과 같은 높은 비선형을 가진 시스템에서는 제어의 정밀도와 강인성이 감소된다. 따라서 최근에는 동기발전기의 여자기 제어 및 직류송전 시스템의 동특성 향상을 위하여 비례·적분제어, 퍼지 제어 및 신경회로망 제어방법이 사용되었다[9-12]. 따라서 본 논문에서는 지능제어기법 중에서 계산시간을 감소시키고 정확성을 유지할 수 있으며, 보다 적은 반복횟수로도 최적해를 찾을 수 있고, 조기수렴 현상을 극복하여 빠른 시간 내에 최적해 즉 최적 PI 보조제어기의 이득계수를 얻을 수 있는 수

\* 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 : 韓國電氣研究所 電力研究團長 · 工博  
接受日字 : 2001년 10월 16일  
最終完了 : 2002년 4월 25일

정 유전알고리즘을 이용하였다. 제안된 방법의 유용성을 입증하기 위하여 기존의 PI 제어기와 비교·고찰하였다. 또한 제안된 방법의 강인성을 검증하기 위하여 전력을 변동시킨 경우, 부하각 편차를 변동시킨 경우 및 직류전류를 변동시킨 경우에 대하여 동특성을 고찰하였으며, 이러한 과정을 통하여 초고압 직류송전 시스템의 동요억제를 위하여 수정 유전알고리즘을 이용한 SVC의 PI 보조제어기 설계에 대한 타당성을 확인하였다.

## 2. 수정 유전알고리즘

유전알고리즘은 자연선택과 진화적인 유전학의 메카니즘을 토대로 한 확률적인 최적화 알고리즘으로서 John Holland에 의해 처음으로 도입되었으며, 이후 Goldberg 등에 의해 광범위하게 연구되었다. 유전 알고리즘은 고전적 방법으로 최적화하기 어려운 목적 함수의 최적화, 신경 회로망의 학습, 퍼지 멤버십 함수의 동조, 기계 학습, 시스템 식별 및 제어 등에 널리 응용되고 있다. 또한, 유전 알고리즘은 목적 함수의 미분 가능성 및 연속성에 관계없이 최적해를 구할 수 있고, 해 집단을 동시에 탐색하는 전역적 탐색방법이므로 국부 수렴할 가능성이 적고 복잡한 과정이 필요 없이 간단하게 주어진 문제를 간단한 알고리즘으로 구현할 수 있다. 아울러 제약 조건이 추가되는 경우에도 소프트웨어의 큰 변화 없이 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다.[13-14]

그러나, 기존의 유전 알고리즘은 많은 장점에도 불구하고, 다음과 같은 문제점이 있다.

첫째, 변수들을 유한 길이의 2진 스트링으로 코딩하므로 다 변수인 경우 많은 계산 시간을 필요로 하고 정확성을 상실할 수 있다. 둘째, 구조적인 문제점으로 인해 국부 값에서 조기수렴 현상이 발생한다. 셋째, 단순 유전 알고리즘은 같거나 및 같지 않은 적합도인 다중의 최적해를 갖는 경우가 있다. 따라서 유전 알고리즘 연산자인 샘플링 오차에 의하여 단일 해 및 전역적인 최적해에 수렴하게 되어 안정한 집단을 유지할 수 없게 된다. 넷째, 단순 유전 알고리즘을 사용한 전역적인 최적화 탐색은 많은 세대와 상당한 계산 시간이 필요하게 된다. 따라서 시간이 제한될 때 성능과 시간 사이에 교체가 이루어지게 되고, 최적인 해가 필요한 상황에 따라 몇 개의 해가 존재하는 경우가 발생하게 된다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하고자 네 가지 새로운 방법을 사용하는 수정 유전 알고리즘을 제안하였다.

- (1) 실 변수 유전 알고리즘 적용 : 변수를 유한 길이로 코딩하는 절차가 필요 없이 변수 그 자체로 최적화 하는 실 변수 유전 알고리즘(Real Variable Genetic Algorithm : RVGA)을 이용한다. 실 변수로 코딩하는 RVGA의 염색체 구성은 각 개체의 스트링을 변수의 상·하한치 내에서 랜덤하게 발생시켜 탐색할 각각의 변수를 실제 값으로 구성한다. 즉 스트링은 모든 변수를 포함하는 벡터로서 표현된다. 이 실 변수 유전 알고리즘은 변수의 코딩 절차 없이 실 변수로 최적화 함으로써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지할 수 있다.
- (2) 엘리트주의 유전 알고리즘 적용 : 좋은 성질의 유전자를 보존하며 열성 유전자를 제거하여 보다 적은 반복 횟수로도 좋은 해를 찾아 갈 수 있는 엘리트주의 유전 알고

리즘(Elitist Genetic Algorithm : EGA)을 이용한다. 엘리트주의 유전 알고리즘 후손의 목적 함수 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 유전 알고리즘은 기존 알고리즘의 문제점 중 선택과 교배시의 한계점을 극복하고자 하는 시도이다. 이러한 과정을 통하여, 좋은 유전 배열을 가진 해들은 계속 보존되므로 이들이 선택 과정시 탈락되는 것을 방지하며, 교배시에 더 열성의 후손이 생성될 경우 이를 배제시키는 것이다.

- (3) 적소 유전 알고리즘 적용 : 모든 국부 최적지역 근처 다른 해들 사이에 경쟁제어를 도입하여 보조집단이 거의 전역적이고 국부적인 최적점을 유지하도록 적소 유전 알고리즘(Niche Genetic Algorithm : NGA)을 사용한다. 여기서 적소는 집단의 개체 수의 적합도 함수로서 나타나며, 좋은 유사한 특징을 갖는 유기체의 모임이다. 이 적소 유전 알고리즘은 각 세대의 마지막에 적용한다.
- (4) 마이크로 유전 알고리즘 적용 : 집단의 크기를 작게 고정하고, 새로운 개체의 집단을 규칙적인 간격을 사용하여 조기수렴 현상을 극복하고, 항상 더 좋은 성질의 개체를 복제하고, 가능한 한 최적인 해를 빨리 찾는 마이크로 유전 알고리즘(micro Genetic Algorithm : mGA)을 사용한다. 이 방식은 진화과정에서 새로운 집단이 생성된다는 것이다. 여기서 제안된 마이크로 유전 알고리즘 구조에서, 집단의 크기는 5개로 고정하였다.

이러한 네 가지 방법을 결합한 수정 유전 알고리즘(Modified Genetic Algorithm : MGA)을 이용하여 SVC의 PI 보조제어기 이득계수를 최적화 하였다. 본 논문에서 제안한 수정 유전 알고리즘은 그림 1과 같다.

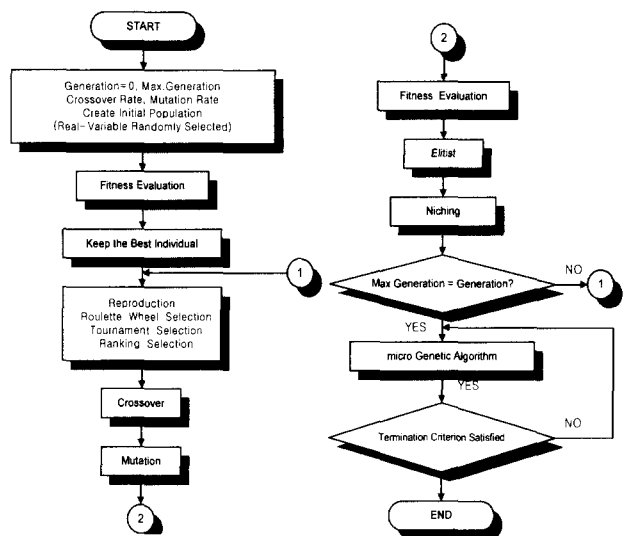


그림 1 수정 유전 알고리즘  
Fig. 1 Modified genetic algorithm

### 3. 계통모델

본 논문에서 고찰하고자 하는 SVC를 포함한 교류-직류 시스템 모델은 그림 2와 같다. 직류시스템 모델은 변환기가 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[15-18]. SVC는 감압 변압기를 경유하여 전력계통에 병렬로 연결되어 무효전력을 흡수 또는 공급함으로써, 전압을 일정하게 유지하거나 전력시스템의 동요를 억제하는 기능을 수행한다.

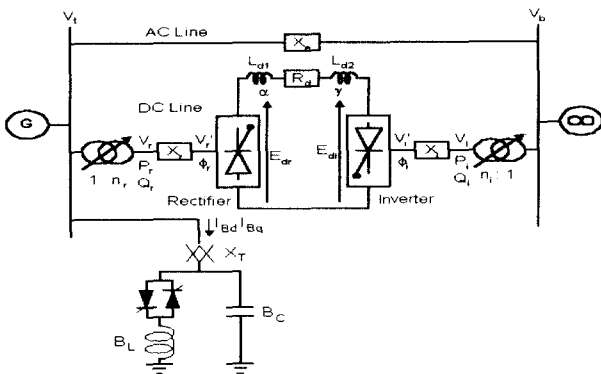


그림 2 SVC를 포함한 교류-직류 시스템 모델  
Fig. 2 Model of AC-DC power system with SVC

#### 3.1 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[19-24]. 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 3과 같다. 그림 3을 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.

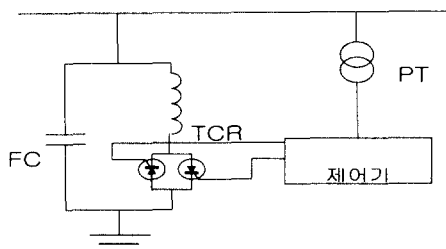


그림 3 SVC의 기본 구조  
Fig. 3 Basic structure of SVC

SVC는 모션전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬 서셉턴스를 변화시킴으로써 모션전압을 빠르고 연속적으로 제어하는 기기로서, 발전기 단자전압의 제어가 기본적인 제어의 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.

#### 3.2 직류제어시스템

변환기용 변압기의 저항, 변환기의 양극 전압강하 및 내부 등가저항은 무시하고, 그림 2를 기초로 한 변환기의 교류전류 I와 직류전류 I\_d는 식(1), (2)와 같이 된다.

$$I \cong \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \quad (1)$$

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

여기서 X\_r, X\_i는 전류리액턴스(commutation reactance), R\_d는 직류선로 저항, gamma는 여유각, V\_r, V\_i는 변환기의 교류측 전압이다.

##### 3.2.1 순변환기측(Rectifier Side)

순변환기측의 제어각이 점호각 alpha인 경우, 시스템 방정식을 요약하면 식(3)~(9)와 같은 관계를 갖는다.

$$E_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_r \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_d \quad (3)$$

$$\cos \alpha = \frac{\cos \phi_r + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_d X_r}{V_r'}}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \right\}^2 + 2 \left\{ 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r'} \sin \phi_r \right\}}} \quad (4)$$

$$\tan \phi_r = \sqrt{\left\{ \frac{\pi E_{dr} + 3 I_d X_r}{\pi E_{dr} \cos \alpha} \right\}^2 - 1} - \frac{18 I_d X_r}{\pi^2 E_{dr}} \quad (5)$$

$$V_r = V_r' \sqrt{1 + 3 \left\{ \frac{I X_r}{V_r'} \right\}^2 + 2 \sqrt{3} \left\{ \frac{I X_r}{V_r'} \right\} \sin \phi_r} \quad (6)$$

$$V_r' = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{E_{dr}}{\cos \phi_r} \quad (7)$$

$$P_r = \sqrt{3} V_r' I \cos \phi_r \quad (8)$$

$$Q_r = \sqrt{3} V_r' I \sin \phi_r + \frac{18}{\pi^2} I_d^2 X_r \quad (9)$$

##### 3.2.2 역변환기측(Inverter Side)

역변환기에서도 유사한 형태로 구성되는데 소호각 beta로 제

어하는 경우, 시스템 방정식을 요약하면 식(10)~(16)과 같다.

$$E_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_i \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_i I_d \quad (10)$$

$$\cos \beta = \cos \gamma_{\min} - \frac{\sqrt{2} X_i}{V_i} \quad (11)$$

$$\tan \phi_i = \sqrt{\left\{ \frac{\pi E_{di} + 3 I_d X_i}{\pi E_{di} \cos \gamma} \right\}^2 - 1} - \frac{18 I_d X_i}{\pi^2 E_{di}} \quad (12)$$

$$V_i = V_i' \sqrt{1 + 3 \left\{ \frac{I X_i}{V_i'} \right\}^2} + 2\sqrt{3} \left\{ \frac{I X_i}{V_i'} \right\} \sin \phi_i \quad (13)$$

$$V_i' = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{E_{di}}{\cos \phi_i} \quad (14)$$

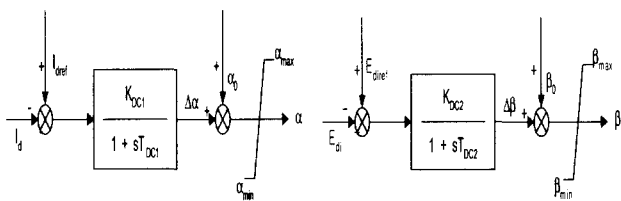
$$P_i = \sqrt{3} V_i' I \cos \phi_i \quad (15)$$

$$Q_i = \sqrt{3} V_i' I \sin \phi_i + \frac{18}{\pi^2} I_d^2 X_i \quad (16)$$

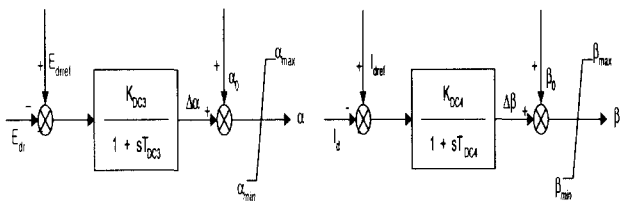
직류송전 시스템에서의 송전은 교류시스템과는 전혀 다른 원리로 이루어지고, 직류송전선의 양단에 설치된 순·역변환기의 제어특성에 의해서 전체적인 특성이 크게 영향을 받는다.

본 연구에서는 순변환기와 역변환기의 운전제어방식을 각각 그림 4와 그림 5에서와 같이 정전류-정전압제어(Case 1), 정전압-정전류제어(Case 2)로 구성하여 순변환기측은 점도각  $\alpha$ 를 제어하고 역변환기는 소도각  $\beta$ 를 제어하도록 하여 특성을 고찰하였다.

한편, 직류전류의 제한 값(limit)으로는 변환기의 열적 손상 때문에 정격전류의 20[%]를 초과하지 않도록 상한치를 설정하고, 또한 너무 낮을 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 4** 정전류제어와 정전압제어의 블록선도 (경우 1)  
**Fig. 4** Block diagram of ACR and AVR (Case 1)



(a) AVR in rectifier (b) ACR in inverter  
**그림 5** 정전압제어와 정전류제어의 블록선도 (경우 2)  
**Fig. 5** Block diagram of AVR and ACR (Case 2)

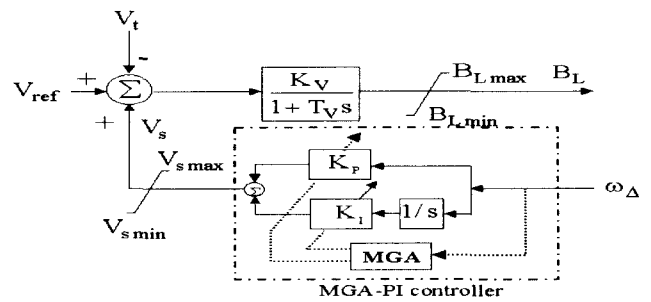
#### 4. MGA를 이용한 SVC의 PI 보조제어기 설계

본 논문에서는 SVC의 PI 보조제어기  $K_p$ ,  $K_i$ 의 파라미터를 구하기 위하여 수정 유전 알고리즘을 적용하였다. PI 보조제어기의 파라미터 모두를 1개의 문자열로 만들어 총 N개의 문자열로 해집단을 구성하였다. 그리고 각 스트링을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 SVC를 포함한 교류시스템의 각속도와 SVC의 주요목적인 전압유지를 위하여 단자전압을 이용하여 식(17)과 같은 적합도 함수를 선정하고, 이 값이 최대가 되는 PI 보조제어기의 이득계수를 선정하였다.

$$F_i = \frac{1}{1 + \sum_{m=1}^M |\xi_1 \omega_\delta + \xi_2 V_{td}|} \quad (17)$$

여기서 m은 한 문자열이 PI 보조제어기 파라미터와 합성하여 시스템에 적용되었을 경우의 한 샘플링을 말하며 M은 총 샘플링 개수이다. 또한  $\xi_1$ 와  $\xi_2$ 는 가중치이다.

이상의 수정 유전 알고리즘을 사용한 SVC의 보조제어기의 기본 구조는 그림 6에 나타내었다. 또한 여기에 사용한 SVC의 파라미터를 표 1에 나타내었다.



**그림 6** SVC의 MGA-PI 보조제어기  
**Fig. 6** SVC MGA-PI supplementary controller system

**표 1** SVC의 파라미터 및 초기동작 조건  
**Table 1** SVC parameters and initial operation condition

$K_v$	$T_v(\text{sec})$	$B_c$	$X_T$	$B_{L0}$	$B_{Lmax}$	$B_{Lmin}$	$V_{smax}$	$V_{smin}$
10.0	0.15	0.6	0.08	-0.45	-0.30	-0.90	0.12	-0.12

#### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 초고압 직류송전 시스템의 전력 동요억제를 위하여 정지형 무효전력 보상기에 유전알고리즘을 이용한 PI 보조제어기를 설계하였다. 단자전압과 기준전압과의 오차  $V_{ref}-V_t$ 를 입력으로 하여 SVC의 서셉턴스  $B_L$ 을 조절하여 단자전압을 제어하는 신호가 되는데, 제어기의 입력으로 보조안정화 신호를 추가하면 제어성능은 향상된다. 따라서 보조안정화 신호를 출력으로 하는 PI 제어기를 구성하였고, PI 제어기의 입력변수는 발전기 동기속도의 오차  $\omega_\delta$ 로 선정하였다. 이와 같이 선정된 이유는 본 논문의 대상시스템인 IEEE Benchmark 모델에 발전기가 연결되어 있으며, 시스템 외란에 따라서 발전기 속도가 변동하기 때문이다.

제안한 방법을 전력(사례 연구 1)을 변동시킨 경우, 초기에 부하각 편차를 변동시킨 경우(사례 연구 2)와 초기에 직류전

류를 변동시킨 경우(사례 연구 3)에 대하여 유용성 및 강인성을 검토하였다. 표 2는 PI 제어기의 이득계수를 최적화하기 위하여 설정한 수정 유전 알고리즘의 계수들이다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션에 사용한 교류 및 직류시스템의 정수는 표 3과 같다.

표 2 수정 유전 알고리즘 파라미터

Table 2 Parameters of MGA

적용방법	해집단 수	교배확률	돌연변이 확률	최대 세대수
MGA	50	0.85	0.02	100

표 3 시스템 파라미터

Table 3 System parameters

AC system			
$x_d$	= 1.7 [p.u.]	$K_A$	= 400 [p.u.]
$x_q$	= 1.64 [p.u.]	$T_A$	= 0.05 [sec]
$x_d'$	= 0.245 [p.u.]	$K_F$	= 0.025 [p.u.]
$D$	= 0.0 [p.u.]	$K_E$	= -0.17 [p.u.]
$H$	= 2.37 [sec]	$T_E$	= 0.96 [sec]
$\tau_{d0}'$	= 5.9 [sec]	$x_c$	= 0.4 [p.u.]
$S_{E_{max}}$	= 0.02 [p.u.]	$T_F$	= 1.0 [sec]
$S_{E_{min}}$	= 0.001 [p.u.]	$\delta$	= 0.7727 [rad]
DC system			
$L_d$	= 0.032 [p.u.]	$R_d$	= 0.012 [p.u.]
		$X_r$	= 0.1 [p.u.]
		$K_{DC1}$	$T_{DC1}$
$X_i$	= 0.100 [p.u.]	$\sim$	= 1.0 [p.u.]
		$\sim$	= 0.1 [sec]
		$K_{DC6}$	$T_{DC6}$

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.

직류시스템의 동작조건을 표 4와 같이 지정 조건하에서 시뮬레이션을 하였다. 이상의 조건에서 수정유전알고리즘을 이용하여 구한 PI 이득계수는 표 5와 같다. 또한 목적함수 적합도는 그림 7과 같다.

표 4 직류시스템의 동작 조건

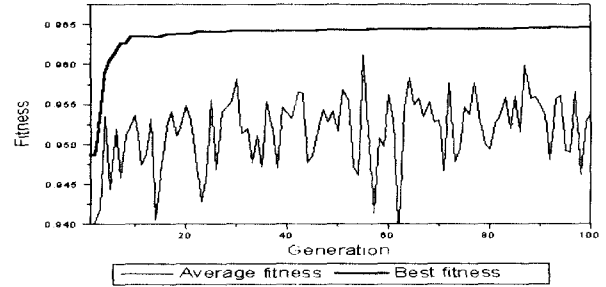
Table 4 Setting values of DC control system

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.]

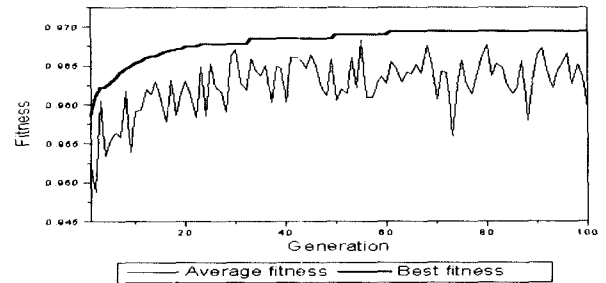
표 5 MGA를 이용한 최적 PI 제어기의 파라미터

Table 5 Parameter of optimal PI controller using MGA

PI parameter	Case 1	Case 2
$K_P$	40.763228	48.260998
$K_I$	0.000126	0.0302482



(a) Fitness of case 1



(b) Fitness of case 2

그림 7 적합도

Fig. 7 Fitness

MGA에 사용한 최대 적합도와 평균적합도를 각 세대별로 살펴보면, 세대가 지남함에 따라 최대 적합도와 평균 적합도가 향상되어짐을 알 수 있었다. 이 결과는 각 세대에 있어서 최적인 해가 많이 존재함을 알 수 있다. 따라서 수정 유전 알고리즘이 계산시간을 감소시키고 정확성을 유지할 수 있었으며, 전역적인 최적해를 유지하였고, 조기 수렴현상을 극복하여 빠른 시간내에 최적해, 즉 최적 PI 제어기의 이득계수를 얻을 수 있었다.

또한, 제안한 방법(MGA-PI controller)과 기존의 PI 제어기(PI controller)를 적용한 시스템의 고유 진동모드 고유치 및 제동비를 표 6에 나타내었다.

표 6 시스템 고유치 및 제동비

Table 6 Eigenvalues of system and damping ratio

Method	Eigenvalues	Damping ratio[%]
PI controller	-2.1732 ± j8.9039	23.71
MGA-PI controller	-4.4763 ± j7.8633	49.47

5.1 사례 연구 1 : 전력이 증가한 경우

첫 번째 사례 연구로서 부하가 0.1[sec] 사이에 정격 출력의 3[%] 증가한 경우에 SVC에 수정 유전 알고리즘을 이용

하여 최적 PI 보조제어기를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제어기 성능을 비교·고찰하였다.

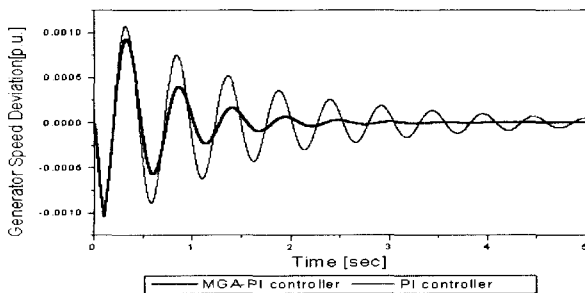
그 결과를 기존의 PI 제어기와 본 논문에서 제안한 MGA-PI 제어기와 비교하여 평가지수는 표 7에 나타내었으며, 발전기의 각속도, 발전기 단자전압 및 직류전류의 동특성은 그림 8~9와 같이 나타내었다.

표 7 평가지수(사례 연구 1)

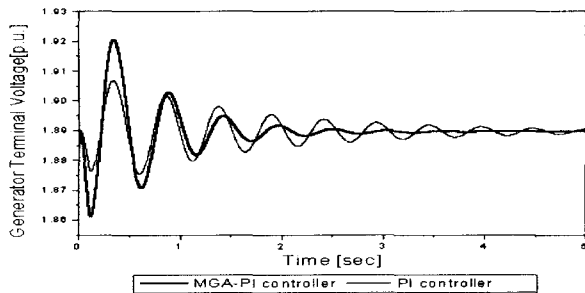
Table 7 Performance indices(Case study 1)

Case study 1	MGA-PI controller	PI controller	Decaying rate[%]
Case 1	0.169726	0.416681	59.27
Case 2	0.119908	0.178817	31.20

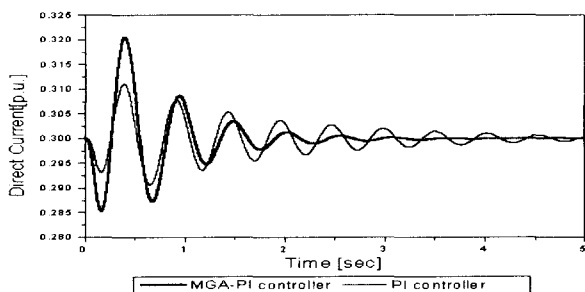
표 7에서와 같이 평가지수를 살펴보면 MGA-PI 제어기가 기존의 PI 제어기보다 평가지수가 Case 1에서는 59.27[%] 감소하였고, Case 2에서는 31.20[%] 감소하였다.



(a) Generator speed deviation



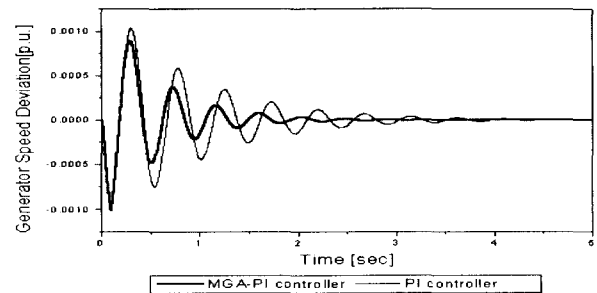
(b) Generator terminal voltage



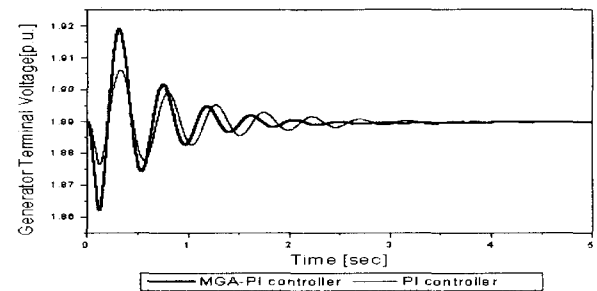
(c) Direct current

그림 8 부하가 100[ms] 사이에 정격 출력의 3[%] 증가한 경우의 동특성(경우 1)

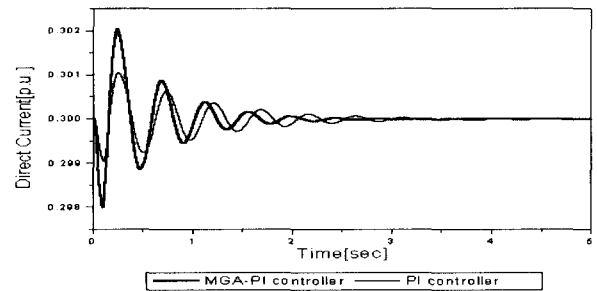
Fig. 8 Dynamic response to increasing power 3[%], disturbance duration 100[ms](Case 1)



(a) Generator speed deviation



(b) Generator terminal voltage



(c) Direct current

그림 9 부하가 100[ms] 사이에 정격 출력의 3[%] 증가한 경우의 동특성(경우 2)

Fig. 9 Dynamic response to increasing power 3[%], disturbance duration 100[ms](Case 2)

각 경우에 대한 발전기의 각속도 특성을 살펴보면, 제안한 MGA PI 보조제어기 적용시가 첫 번째 오버슈트(1st O.S.)와 두 번째 오버슈트(2nd O.S.)에 대한 감소율을 보면 57~60[%]로 기존의 PI 제어기 적용시 30~43[%]보다 아주 우수하게 감소하였다. 또한 발전기의 단자전압 특성 및 직류전류 특성 역시 우수한 응답특성을 보이고 있다. 이 결과를 표 8에 종합하여 나타내었다.

표 8 시뮬레이션 결과

Table 8 Simulation results

	Controller	1st O.S.	2nd O.S.	Decaying rate[%]
Case 1	MGA-PI	0.000927	0.000395	57.39
	PI	0.001068	0.000753	29.49
Case 2	MGA-PI	0.00089	0.00036	59.55
	PI	0.001026	0.00059	42.49

5.2 사례 연구 2 : 부하각이 증가한 경우

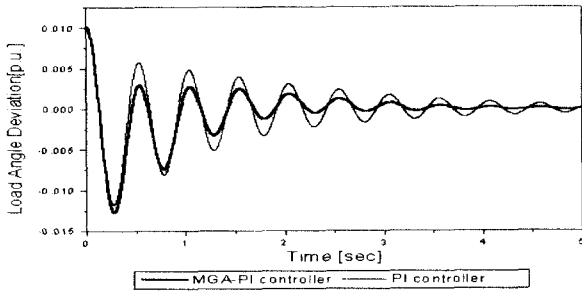
두 번째 사례 연구는 초기 전력 변동시와 같이 초고압 직류송전 시스템의 동요억제를 위하여 초기에 부하각 편차를 3[%] 변동한 경우에 SVC에 MGA-PI 보조제어를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제어기 성능을 비교·고찰하였다.

최적화된 제어기의 구성요소에 대한 평가지수는 표 9에서와 같이 나타났으며, 본 논문에서 제안한 MGA-PI 제어기 적용시가 기존의 PI 제어기 적용시보다 감소율이 Case 1에서 37.16[%], Case 2에서 30.81[%]로 우수하게 감소하였다.

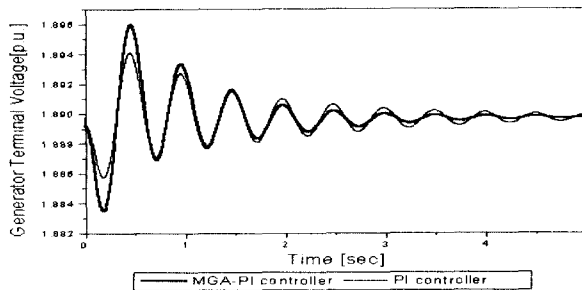
표 9 평가지수(사례 연구 2)

Table 9 Performance indices(Case study 2)

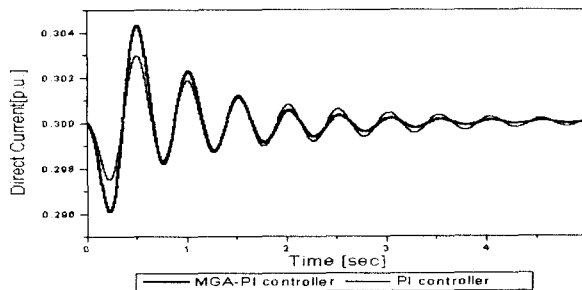
Case study 2	MGA-PI control	PI control	Decaying rate[%]
Case 1	0.069338	0.110337	37.16
Case 2	0.255322	0.369022	30.81



(a) Load angle deviation



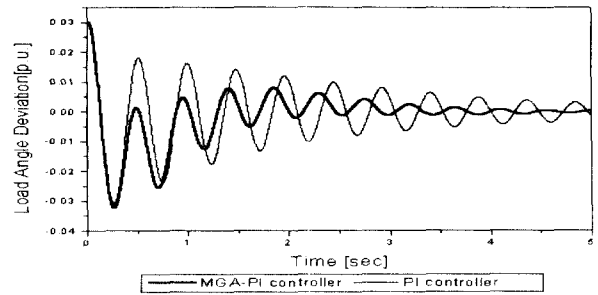
(b) Generator terminal voltage



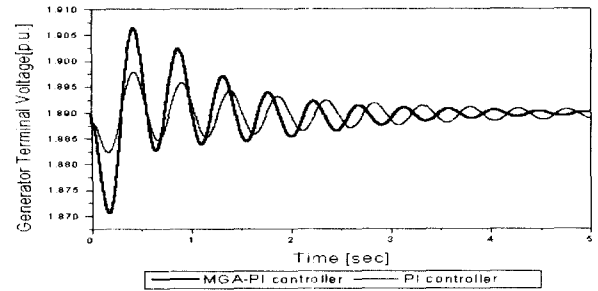
(c)Direct current

그림 10 초기에 회전자각 편차를 0.03[p.u.] 증가한 경우의 동특성(경우 1)

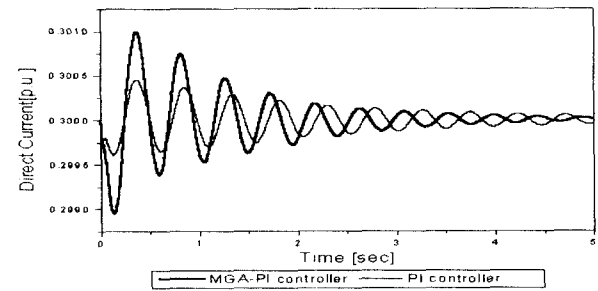
Fig. 10 Dynamic response to increasing load angle 0.03[p.u.] in initial point(Case 1)



(a) Load angle deviation



(b) Generator terminal voltage



(c)Direct current

그림 11 초기에 회전자각 편차를 0.03[p.u.] 증가한 경우의 동특성(경우 2)

Fig. 11 Dynamic response to increasing load angle 0.03[p.u.] in initial point(Case 2)

표 10 시뮬레이션 결과

Table 10 Simulation results

	Controller	1st U.S.	2nd U.S.	Decaying rate[%]
Case 1	MGA-PI	-0.012764	-0.00742	41.87
	PI	-0.01177	-0.00811	31.10
Case 2	MGA-PI	-0.032475	-0.022259	31.46
	PI	-0.03092	-0.023679	23.42

우선 각 경우에 발전기의 부하각 편차 특성을 살펴보면, Case 1에서는 제안한 MGA-PI 제어기 적용시의 언더슈트 감소율이 41.87[%]로 기존의 PI 제어기 적용시 31.10[%]보다 현저히 감소하였으며, Case 2에서도 역시 MGA-PI 제어기 31.46[%]가 기존의 PI 제어기 23.42[%]보다 감소하였다. 또한 수렴시간 및 도달시간에 있어서 좋은 특성을 보이고 있다.

이 결과를 표 10에 종합하여 나타내었다. 따라서 MGA-PI 보조제어기가 제어능력이 우수한 제어기임을 입증하였다. 반면 발전기의 단자전압 특성 및 직류전류의 특성을 살펴보면, 기존의 PI 제어시 보다 MGA-PI 제어시가 초기에는 속응성이 떨어짐을 보이나 직류전류의 극한값 이내에서 운전하므로 시간이 지남에 따라 속응성이 뛰어났다. 따라서 MGA-PI 제어기 적용이 시스템의 과도 안정도를 향상시켜 안정운전에 크게 기여하고 있음을 알 수 있었으며, MGA-PI 제어기가 제어능력이 우수하고, 강인성을 갖는 제어기임을 확인하였다.

5.3 사례 연구 3 : 직류전류가 증가한 경우

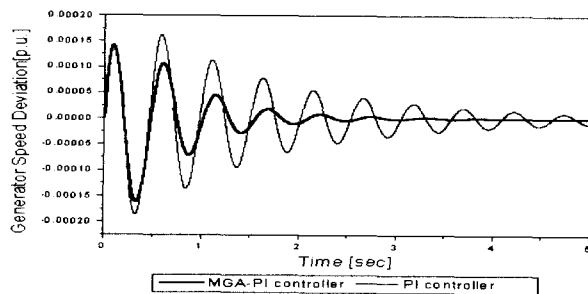
세 번째 사례 연구로서는 시스템 외란으로 초기에 직류전류 편차가 0.03[p.u.] 만큼 변동한 경우에 SVC에 MGA-PI 보조제어기를 설계하였다.

각 경우에 있어서 최적화된 제어기의 구성요소에 대한 평가지수는 표 11에서와 같이 나타났으며, 본 논문에서 제안한 MGA-PI 제어기 적용시가 기존의 PI 제어기 적용시보다 감소율이 Case 1에서 58.83[%], Case 2에서 30.80[%]로 현저하게 감소하였다. 따라서 제안한 제어기 적용이 시스템 안정도 향상에 크게 기여함을 알 수 있었다.

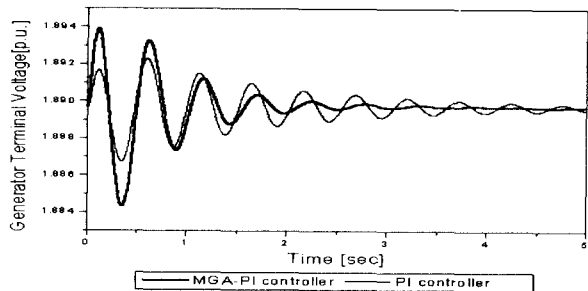
표 11 평가지수(사례 연구 3)

Table 11 Performance indices(Case study 3)

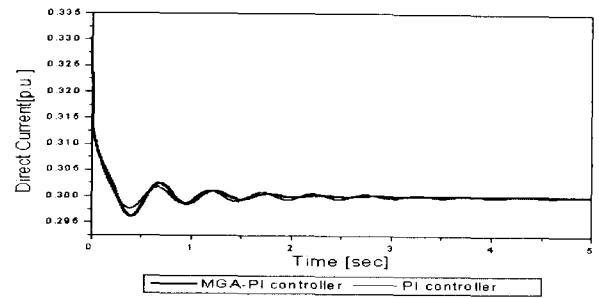
Case study 3	MGA-PI control	PI control	Decaying rate[%]
Case 1	0.031328	0.076100	58.83
Case 2	0.003904	0.005642	30.80



(a) Generator speed deviation



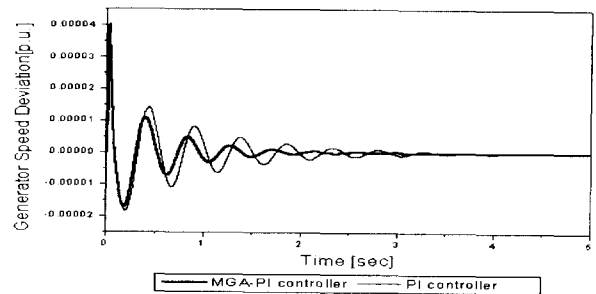
(b) Generator terminal voltage



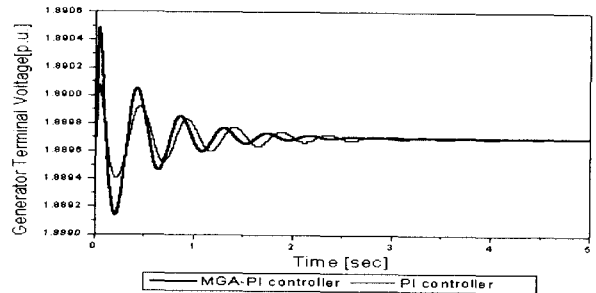
(c) Direct current

그림 12 초기에 직류전류를 0.03[p.u.] 증가한 경우의 동특성(경우 1)

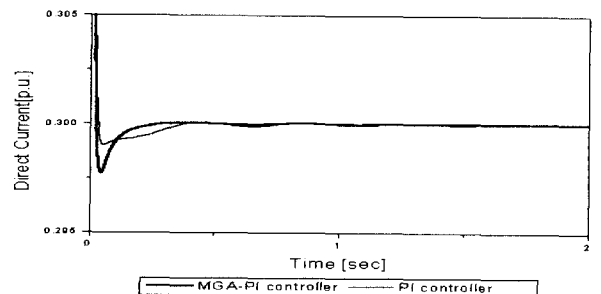
Fig. 12 Dynamic response to increasing direct current 0.03[p.u.] in initial point(Case 1)



(a) Generator speed deviation



(b) Generator terminal voltage



(c) Direct current

그림 13 초기에 직류전류를 0.03[p.u.] 증가한 경우의 동특성(경우 2)

Fig. 13 Dynamic response to increasing direct current 0.03[p.u.] in initial point(Case 2)



표 12 시뮬레이션 결과  
Table 12 Simulation results

	Controller	1st O.S.	2nd O.S.	Decaying rate[%]
Case 1	MGA-PI	0.000141	0.000107	24.11
	PI	0.000138	0.000162	-17.39
Case 2	MGA-PI	0.000044	0.000021	52.27
	PI	0.000046	0.000024	47.83

우선 각 경우에 발전기의 각속도 편차 특성을 살펴보면, Case 1에서는 제안한 MGA-PI 제어기 적용시의 오버슈트 감소율이 24.11[%]로 기존의 PI 제어기 적용시의 오버슈트 감소율 -17.39[%]로 발산하는 것 보다 현저히 감소하였으며, Case 2에서도 역시 MGA-PI 제어기 52.27[%]로 기존의 PI 제어기 47.83[%]보다 감소하였다. 또한 수렴시간 및 도달시간에 있어서 좋은 특성을 보이고 있다. 이 결과를 표 12에 종합하여 나타내었다. 따라서 MGA-PI 보조제어기가 제어성능이 우수한 제어기임을 입증하였다. 반면 직류전류의 특성을 살펴보면, 기존의 PI 제어기 보다 MGA-PI 제어기가 초기에는 속응성이 떨어짐을 보이거나 직류전류의 극한값 이내에서 운전하므로 시간이 지남에 따라 속응성이 뛰어났다. 따라서 MGA-PI 제어기 적용이 초고압 직류송전 시스템의 동요억제를 위하여 안정운전에 크게 기여함을 확인하였다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 초고압 직류송전 시스템의 동요억제를 위하여 종래의 일반적인 방법과는 달리, 자연 생태계의 진화를 모의한 전역적 탐색 최적화 기법인 수정 유전 알고리즘을 이용하여 FACTS로 분류되는 여러기기 중에서 병렬구조를 가지는 SVC에 최적 PI 보조제어기 설계방법을 제안하였다. 이러한 연구과정을 SVC를 포함한 교류시스템에 대한 조류계산 정식화, 직류시스템의 조류계산 정식화, 안정도 해석용 모델 선정 및 MGA를 이용한 SVC에 최적 PI 보조제어기를 구성하였다. 또한 제안한 기법의 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 논문에서 제안한 수정 유전 알고리즘은 계산시간을 감소시키고 정확성을 유지할 수 있었다. 또한 보다 적은 반복횟수로도 최적해를 찾을 수 있었으며, 전역적인 최적해를 유지하였고, 초기 수렴현상을 극복하여 빠른 시간 내에 최적해 즉 최적 PI 보조제어기의 이득계수를 얻을 수 있었다.
- 2) 최적화된 이득계수 변화에 대한 평가 지수 및 오버슈트를 살펴보면 MGA-PI 보조제어기 적용시가 기존의 PI 제어기 적용시보다 평가 지수가 감소하였으며, 오버슈트 감소율이 제안한 MGA-PI 제어기 적용시가 더욱 증대하였다. 따라서 MGA-PI 보조제어기가 시스템 안정도 향상에 크게 기여함을 알 수 있었으며 MGA-PI 보조제어기가 제어

성능이 우수함을 알 수 있다.

- 3) 직류시스템의 2가지 제어방식에 대한 발전기의 각속도 특성 및 단자전압 특성을 살펴보면, 기존의 PI 제어기 적용시보다 MGA-PI 보조제어기 적용시가 우수한 응답특성을 보이고 있다.
- 4) 직류전류 특성을 살펴보면, 기존의 제어기 적용시보다 MGA-PI 보조제어기 적용시가 초기에는 속응성이 떨어짐을 보이거나 직류전류의 극한값 이내에서 운전하므로 시간이 지남에 따라 우수한 속응성을 보이고 있고, 이에 따라 시스템의 안정도가 향상됨을 알 수 있다. 따라서 초고압 직류송전 시스템의 동요억제를 위하여 SVC에 강인성을 갖는 MGA-PI 제어기 적용이 안정도 향상에 크게 기여함을 할 수 있었고, MGA-PI 보조제어기 설계의 타당성을 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] IEEE FACTS Working Group, "FACTS Application", IEEE Power Eng. Society, 1995.
- [4] 손광명, 김동현, 이태기, 장길수, 윤용범, 이진, "서대구 SVC 및 제어시스템 분석", 전기학회지, 제50권, 제 7호, pp. 37-44, 2001.
- [5] A. E. Hammad, "Analysis of Power System Stability Enhancement by Static Var Compensators", IEEE Trans. PWRs, Vol. 1, No. 4, pp. 222-227, 1986.
- [6] K. R. Padiyar and R. K. Varma, "Damping Torque Analysis of Static Var System Controllers", IEEE Trans. PWRs, Vol. 6, No. 2, pp. 458-465, 1991.
- [7] E. Z. Zhou, "Application of Static Var Compensators to Increase Power System Damping", IEEE Trans. PWRs, Vol. 8, No. 2, pp. 655-661, 1993.
- [8] 문경섭, 손광명, 이태기, 이송근, 박종근, "무효전력 보상 여유를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어", 전기학회논문지, 제 48권, 제 4호, pp. 351-357, 1999
- [9] C. T Harris, "Intelligent Control-Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets", World Scientific Pub. (1993).
- [10] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, pp. 544-555 (1994).
- [11] M. A. M Hassan, O. P Malik, and G. S Hope, "A Fuzzy Logic Based Stabilizer for a synchronous Machine", IEEE Trans. Energy Converse. 6(30), pp. 407-414 (1991).
- [12] A. R Hassan and A. H M Sadral, "Design and Implementation of a Fuzzy Controller Based Automatic Voltage Regulator for a Synchronous Generator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.

9, No. 3, (1994).

- [13] 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
- [14] 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.
- [15] E. N. Dialynas and N. C. Koskolos, "Reliability modeling and evaluation of HVDC power transmission system", Vol. 9, No. 2, pp. 872-878 (1994).
- [16] C. Jing, V. Vittal, G. C. Ejebe and G. D. Irisarri, "Incorporation of HVDC and SVC models in the northern state power co. (NSP) network for on-line implementation of direct transient stability assessment", IEEE Trans. on Power systems, Vol. 10, No. 2, pp. 898-904 (1995).
- [17] K. G. Narendra and V. K. Sood, "Intelligent current controller for an HVDC transmission link", IEEE 0-7803-3713-1, (1997).
- [18] 한국전력공사, "제주-육지간 전력계통 연계 타당성 검토 보고서", 한국전력기술주식회사, (1997).
- [19] Liou. K. L. and Hsu. Y. Y., "Damping of generator oscillations using static VAR compesators", IEEE Trans. AES, Vol. 22, pp. 605-617, 1986.
- [20] 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.
- [21] A. A. El-Emary, "Formula for the Effect of a Static VAr Compensator on Synchronising Torque Coefficient", IEE Proc. Vol. 143, No. 6, pp. 582-586, 1996
- [22] A. A. El-Emary, "Effect of Static Var Compensator upon Synchronizing Torque Coefficient", Electric Machines and Power Systems, Vol. 25, pp. 371-386, 1997
- [23] CIGRE Working Group 38-01; Task Force No. 2 on Static Var Compensators, Static Var Compensators, 1986
- [24] C. S. Chen and C. T. Hsu, "The Simplified Linear Model Derivation of Power Systems with Static VAR Compensators to Improve System Damping", IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, pp. 370-375, 1995

## 저 자 소 개



### 정형환(鄭亨煥)

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

Tel : 051-200-7733

Fax : 051-200-7743

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



### 허동렬(許東烈)

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

Tel : 051-200-6747

E-mail : drhur@donga.ac.kr

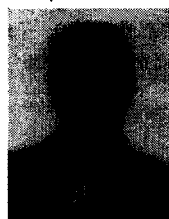


### 이정필(李丁必)

1971년 8월 19일 생. 1997년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

Tel : 051-200-6747

E-mail : leejp@mail.taegu.net



### 오테규(吳泰圭)

1951년 4월 30일 생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 Iowa 주립대 전기공학과 졸업(공학). 1987년 4월-현재 한국전기연구소 책임연구원(전력연구 단장).

Tel : 055-280-1300

E-mail : tkoh@keri.re.kr