

# 수정 유전 알고리즘을 이용한 초고압 직류송전 시스템의 최적 PID 제어기 설계

論 文  
48A-3-11

## A Design of Optimal PID Controller in HVDC Transmission System Using Modified Genetic Algorithm

鄭亨煥\* · 王龍泌\*\* · 許東烈\*\*\* · 文英煥§  
(Hyeng-Hwan Chung · Yong-Peel Wang · Dong-Ryol Hur · Young-Hwan Moon)

**Abstract** - In this paper, a methodology for optimal design of PID controller using the modified genetic algorithm has been proposed to improve the transient stability at system fault in HVDC transmission system. The process of this study is composed of formulation of load flow calculation, basic controls on HVDC transmission system, mathematical model preparation for stability analysis, and supplementary signal control by an optimal PID controller using the modified genetic algorithm(MGA). The propriety was verified through computer simulations regarding transient stability. It means that the application of MGA-PID controller in HVDC transmission system can contribute the propriety to the improvement of the transient stability in HVDC transmission system and the design of MGA-PID controller has been proved indispensable when applied to HVDC transmission system.

**Key Words** : HVDC Transmission System, Optimal PID Controller, Modified Genetic Algorithm(MGA)

### 1. 서 론

교류송전방식은 전력의 생산과 분배가 쉽기 때문에 널리 사용되고 있으나, 교류로 송전할 때는 무효전력의 발생, 선로에 의한 전력손실 및 전력제어의 어려운 점 등이 단점으로 되어 있다. 이로 인하여 계통이 확장됨에 따라 시스템의 안정도는 점차 저하되고 있어 양질의 전력시스템에 대한 지속적인 대책 수립이 필요하다. 이러한 교류시스템의 문제점 해결방안의 하나로서, 20세기 중반에 들어와 직류송전(direct current transmission)에 대한 관심이 높아지고 있다. 직류송전의 특징으로는 교류송전에 비해 초기 설비비는 높으나 교류송전의 단점을 보완할 수 있기 때문에 적용 목적에 따라 더욱 선호대상이 되고 있다. 또한 직류송전은 비동기·궤주파수 연계가 가능하고, 교류시스템의 단락용량을 증가하지 않고 시스템을 연계할 수 있으며, 신속한 조류제어가 가능하여 주파수 제어나 안정도 향상에 유효하며, 장거리 가공전선·케이블 송전에서는 건설비가 낮다는 장점들이 있다[1-4].

직류송전은 1954년 스웨덴 ASEA사가 수은 아크 밸브를 이용하여 스웨덴 본토와 Gotland섬 사이(200[MW], 100[kV], 96[km])에 최초 상업운전을 시작하였다. 그 이후 직류송전시

스템의 양적 증가와 운전경험의 축적으로 하드웨어 및 소프트웨어에서 많이 발전되어, 국내에서도 1997년 제주-해남(300[MW], ±180[kV], 96[km])간 직류송전시스템이 상업운전을 시작하였다.

이러한 직류송전 시스템의 원활한 운용 및 동특성 향상을 위한 기존의 제어기 설계방법은 선형제어이론에 바탕을 두고 있다[5-7]. 그러나 종래의 선형제어이론은 직류송전 시스템과 같은 높은 비선형성을 가진 시스템에서는 제어의 정밀도와 강인성이 감소된다. 따라서 최근에는 동기발전기의 여자기 제어 및 직류송전 시스템의 동특성 향상을 위하여 PID 제어, 퍼지 제어 및 신경회로망 제어방법이 사용되었다[8-10].

본 논문에서는 초고압 직류송전 시스템에 있어서 시스템 고장시 과도 안정도 향상을 위하여 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 제어기 설계에 관하여 연구하였다. 제안된 방법은 직류송전시스템에서 가장 중요하며 기본적인 제어동작을 수행하는 직류제어시스템의 순·역변환기제어에 적용하였으며, 이때 사용한 직류시스템은 IEEE 시험시스템(1기 무한대 모선)을 사용하였다[13]. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 직류시스템의 무 제어 및 기본적인 제어와 비교·분석하였다. 그리고 제안된 방법의 강인성을 입증하기 위해 전력을 증가시킨 경우와 3상 단락이 발생할 경우의 2가지 사례 연구를 통하여 교류시스템의 회전각의 각속도 및 직류시스템의 변환기 제어각, 직류전류의 동특성을 고찰하였다. 이러한 과정을 통하여 초고압 직류송전 시스템의 안정도 향상을 위하여 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 제어기 설계의 타당성을 확인하였다.

### 2. 수정 유전 알고리즘

\* 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : Univ. of Canterbury(New Zealand), Dept. Electrical & Electronic Eng. Post-doc. · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 博士課程

§ 正 會 員 : 韓國電氣研究所 電力系統研究部  
시스템制御研究팀 팀장 · 工博

接受日字 : 1998년 11월 20일

最終完了 : 1999년 2월 12일

유전 알고리즘은 고전적 방법으로 최적화하기 어려운 목적 함수의 최적화, 신경 회로망의 학습, 퍼지 멤버쉽 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.[11-12]

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.

첫째, 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.

둘째, 좋은 성질의 유전자를 보존하며 열성 유전자를 제거하여 보다 적은 반복 횟수로도 좋은 해를 찾아 갈 수 있는 엘리트주의 유전 알고리즘(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.

셋째, 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.

넷째, 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 PID 제어기 이득계수를 최적화 하였다. 본 논문에서 제안한 수정 유전 알고리즘은 그림 1과 같다.

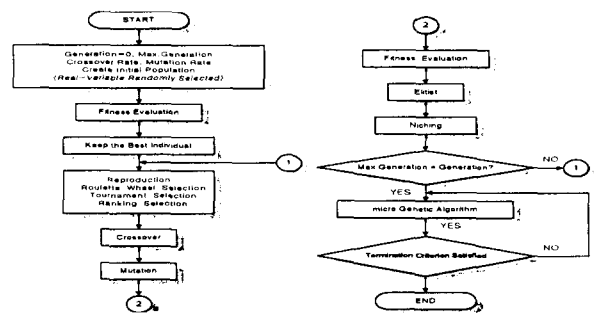


그림 1 수정 유전 알고리즘  
Fig. 1 Modified genetic algorithm

### 3. 초고압 직류송전시스템

본 논문에서 고찰하고자 하는 대표적인 초고압 직류송전시스템 모델은 그림 2와 같으며 이는 직류시스템의 제어기 성능평가에 널리 사용되는 시스템이다[13]. 그림 2에서와 같이 동기 발전기는 2 단자 직류선로와 교류선로가 병렬로 연결되어 무한대 모선에 전력을 공급하고 있다. 발전기 교류시스템 모델은 여자 전압 제어시스템과 주파수 제어시스템으로 구성되어 있다. 직류시스템 모델은 변환기가 싸이리스터 밸브(thyristor valve)로 구성되어 있으며, 전력을 양 방향으로 전송할 수 있는 2단자 양극성 초고압 직류시스템(two terminal bipolar HVDC system)으로 외국에서는 표준화되어 있다.

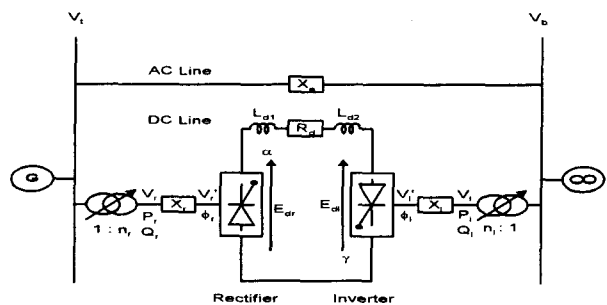
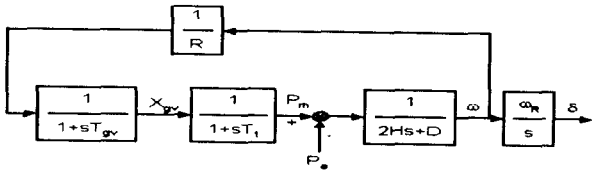


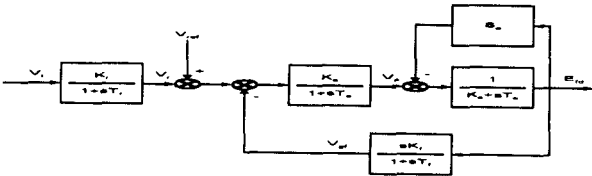
그림 2 초고압 직류송전 시스템 해석 모형  
Fig. 2 HVDC transmission model for analysis system

### 3.1 주파수 및 여자기 제어 시스템

본 논문에서 사용한 주파수 및 여자기 제어시스템은 그림 3과 같은 IEEE-Type을 사용하였으며, 상태방정식을 구성하면 식(1) ~ (9)와 같다[14-17].



(a) Speed governor-turbine control system



(b) Excitation voltage control system

그림 3 속도 조속기 터빈과 여자 전압 제어시스템 블럭선도  
Fig. 3 Block diagram of speed governor-turbine and excitation voltage control system.

$$\dot{E}_q' = -\frac{1}{K_3 T_{d0}} E_q' - \frac{K_4}{T_{d0}} \delta + \frac{1}{T_{d0}} E_{fd} \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (P_m - D\omega) - \frac{1}{2H} P_e \quad (2)$$

$$\dot{\delta} = 2\pi f_0 \omega \quad (3)$$

$$\dot{V}_r = \frac{K_6 K_r}{T_r} E_q' + \frac{K_5 K_r}{T_r} \delta - \frac{1}{T_r} V_r \quad (4)$$

$$\dot{V}_{gf} = -\frac{1}{T_f} V_{gf} + \frac{K_f}{T_f T_e} V_a - \frac{K_f (S_e + K_e)}{T_f T_e} E_{fd} \quad (5)$$

$$\dot{V}_a = \frac{K_a}{T_a} V_r - \frac{K_a}{T_a} V_{gf} - \frac{1}{T_a} V_a \quad (6)$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_e} V_a - \frac{S_e + K_e}{T_e} E_{fd} \quad (7)$$

$$\dot{P}_m = -\frac{1}{T_t} P_m + \frac{1}{T_t} X_{gv} \quad (8)$$

$$\dot{X}_{gv} = -\frac{1}{RT_{gv}} \omega - \frac{1}{T_{gv}} X_{gv} \quad (9)$$

여기서  $E_q'$ 는 계자 쇠교자속 전압,  $\omega$ 는 발전기 각속도,  $\delta$ 는 발전기 회전자각,  $V_r$ 은 조정기 입력 필터 전압,  $V_{gf}$ 는 조정기 안정화 회로 전압,  $V_a$ 는 조정기 증폭기 전압,  $E_{fd}$ 는 발전기 여자 전압,  $P_m$ 은 발전기 기계적 입력,  $P_e$ 는 발전기 전기적 입력,  $X_{gv}$ 는 조속기 밸브 위치이다.

### 3.2 직류제어시스템

변환기용 변압기의 저항, 변환기의 양극 전압강하 및 내부 등가저항은 무시하고, 그림 2를 기초로 한 변환기의 교류전류  $I$ 와 직류전류  $I_d$ 는 식(10), (11)과 같이 된다[14-17].

$$I \cong \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \quad (10)$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}(V_r \cos \alpha - V_i \cos \gamma)}{\pi R_d + 3(X_r - X_i)} \quad (11)$$

여기서  $X_r$ ,  $X_i$ 는 전류리액턴스(commutation reactance),  $R_d$ 는 직류선로 저항,  $\gamma$ 는 여유각,  $V_r$ ,  $V_i$ 는 변환기의 교류측 전압이다.

#### 3.2.1 순변환기측(Rectifier Side)

순변환기측의 제어각이 점호각  $\alpha$ 인 경우, 시스템 방정식을 요약하면 식(12)~(18)과 같은 관계를 갖는다.

$$E_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_r \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_d \quad (12)$$

$$\cos \alpha = \frac{\cos \phi_r + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_d X_r}{V_r}}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r} \right\}^2 + 2 \left\{ 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r} \sin \phi_r \right\}}} \quad (13)$$

$$\tan \phi_r = \sqrt{\left\{ \frac{\pi E_{dr} + 3I_d X_r}{\pi E_{dr} \cos \alpha} \right\}^2 - 1} - \frac{18I_d X_r}{\pi^2 E_{dr}} \quad (14)$$

$$V_r = V_r' \sqrt{1 + 3 \left\{ \frac{I X_r}{V_r'} \right\}^2} + 2\sqrt{3} \left\{ \frac{I X_r}{V_r'} \right\} \sin \phi_r \quad (15)$$

$$V_r' = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{E_{dr}}{\cos \phi_r} \quad (16)$$

$$P_r = \sqrt{3} V_r' I \cos \phi_r \quad (17)$$

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

#### 3.2.2 역변환기측(Inverter Side)

역변환기에서도 유사한 형태로 구성되는데 소호각  $\beta$ 로 제어하는 경우, 시스템 방정식을 요약하면 식(19)~(25)와 같다.

$$E_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_i \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_i I_d \quad (19)$$

$$\cos \beta = \cos \gamma_{\min} - \frac{\sqrt{2} X_i}{V_i} \quad (20)$$

$$\tan \phi_i = \sqrt{\left\{ \frac{\pi E_{di} + 3I_d X_i}{\pi E_{di} \cos \gamma} \right\}^2 - 1} - \frac{18I_d X_i}{\pi^2 E_{di}} \quad (21)$$

$$V_i = V_i' \sqrt{1 + 3 \left( \frac{IX_i}{V_i'} \right)^2} + 2\sqrt{3} \left( \frac{IX_i}{V_i'} \right) \sin \phi_i \quad (22)$$

$$V_i' = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{E_{di}}{\cos \phi_i} \quad (23)$$

$$P_i = \sqrt{3} V_i' I \cos \phi_i \quad (24)$$

$$Q_i = \sqrt{3} V_i' I \sin \phi_i + \frac{18}{\pi^2} I_d^2 X_i \quad (25)$$

직류송전 시스템에서의 송전은 교류시스템과는 전혀 다른 원리로 이루어지고, 직류송전선의 양단에 설치된 순·역변환기의 제어특성에 의해서 전체적인 특성이 크게 영향을 받는다. 통상 직류시스템에 사용되는 운전형식은 일정전력 제어이고, 이를 위한 순·역변환기에서의 제어방식으로는 정전류제어(Automatic Current Regulator ; ACR), 정전압제어(Automatic Voltage Regulator ; AVR), 정점호각제어(Automatic Ignition Angle Regulator ; AaR), 정여유각제어(Automatic Margin Angle Regulator ; AγR), 정전력제어(Automatic Power Regulator ; APR) 등이 사용된다[13-14]. 본 연구에서는 순변환기와 역변환기의 운전제어방식을 각각 정전류-정전압제어(Case 1), 정전압-정전류제어(Case 2)로 구성하여 순변환기측은 점호각  $\alpha$ 를 제어하고 역변환기는 소호각  $\beta$ 를 제어하도록 하여 특성을 고찰하였다. 또한 운전제어방식을 표 1과 같이 구성·설계하였고, 그림 4~5는 각 경우의 제어시스템의 블록선도이다.

한편, 직류전류의 제한값(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.

표 1 직류 시스템의 순변환기측과 역변환기측의 제어방식  
Table 1 Control method of rectifier and inverter side in HVDC transmission system

control method	Rectifier	Inverter
Cases		
Case 1	ACR	AVR
Case 2	AVR	ACR

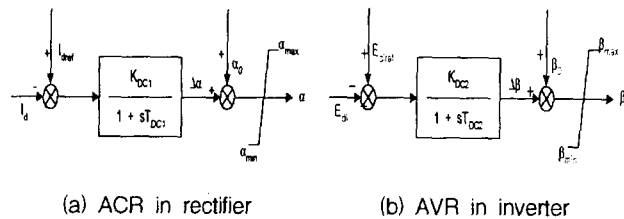
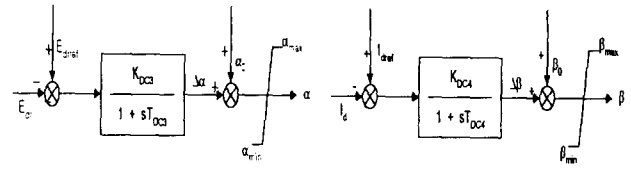


그림 4 순변환기측 정전류제어와 역변환기측 정전압제어의 블록선도 (경우 1)

Fig. 4 Block diagram of ACR in rectifier and AVR in inverter (Case 1)



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

그림 5. 순변환기측 정전압제어와 역변환기측 정전류제어의 블록선도 (경우 2)

Fig. 5 Block diagram of AVR in rectifier and ACR in inverter (Case 2)

그림 2에서 평활코일(smoothing coil)  $L_d$ 를 갖는 직류선로의 전압방정식은 식(26)과 같고 그림 4~5의 블록선도로부터 점호각  $\alpha$ , 소호각  $\beta$ 를 상태벡터로 하는 각 제어방식의 동특성 방정식은 식(27)~(30)과 같다.

$$L_d \frac{dI_d}{dt} + R_d I_d = E_{dr} - E_{di} \quad (26)$$

○ Case 1 : ACR in rectifier, AVR in inverter

$$T_{DC1} \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = K_{DC1} (I_{dref} - I_d) \quad (27)$$

$$T_{DC2} \frac{d\beta}{dt} + \beta = K_{DC2} (E_{dref} - E_{di}) \quad (28)$$

○ Case 2 : AVR in rectifier, ACR in inverter

$$T_{DC3} \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = K_{DC3} (E_{dref} - E_{dr}) \quad (29)$$

$$T_{DC4} \frac{d\beta}{dt} + \beta = -K_{DC4} (I_{dref} - I_d) \quad (30)$$

이상의 1, 2절에서 언급한 특성방정식에서 동적인 안정도를 유지하기 위해서는 평형 운전점에서 발생할 수 있는 미소 외란에 대하여 제어시스템이 항상 안정하게 운전할 수 있는지 판정할 필요가 있다. 따라서 평형 운전점 부근의 변화를 고려하여 해석하였다.

#### 4. 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 제어기 설계

본 논문에서는 PID 제어기의 순변환기측  $K_{PR}$ ,  $K_{IR}$ ,  $K_{DR}$ 과 역변환기측  $K_{PI}$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{DI}$ 의 파라미터를 구하기 위하여 수정 유전 알고리즘을 적용하였다. 직류 제어시스템에 있어서 순·역변환기측의 PID 제어기의 파라미터와 유전 알고리즘을 합성하는 방법은 다음과 같다. PID 제어기의 파라미터 모두를 1개의 문자열로 만들어 총 N개의 문자열로 해집단을 구성하였다. 그리고 각 스트링을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 교류시스템의 각속도와 직류시스템의 순·역변환기 제어의 입력신호를 이용하여 식(31)과 같은 적합도 함수를 선정하고, 이 값이 최대가 되는 PID 제어기의 이득계수를 선정하였다.

$$F_i = \frac{1}{1 + \sum_{m=1}^M \frac{|e(k)|}{M}} \quad (31)$$

단,  $e(k) = e_{AC}(k) + e_{DC}(k)$ ,

$$e_{AC}(k) = y_{ACref} - y_{AC}, \quad e_{DC}(k) = y_{DCref} - y_{DC}$$

여기서  $i=1,2, \dots, N$ 이며,  $e(k)$ 는 오차이다.  $m$ 은 한 문자열이 PID 제어기 파라미터와 합성하여 시스템에 적용되었을 경우의 한 샘플링을 말하며  $M$ 은 총 샘플링 갯수이다.

이상의 수정 유전 알고리즘을 사용한 직류 제어시스템의 순·역변환기측의 최적 PID 제어기의 기본 구조를 그림 6에 나타내었다. 또한 순·역변환기의 입력신호와 유전 알고리즘을 사용한 PID 제어기의 입력신호는 표 2와 같다.

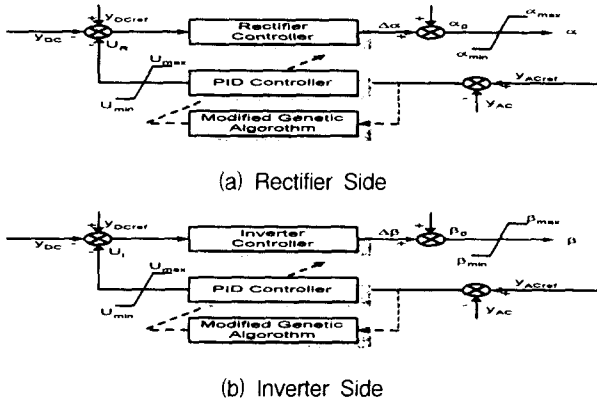


그림 6 직류 제어 시스템의 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 제어기

Fig. 6 Optimal PID controller using MGA in D.C. control system

표 2 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 제어기를 갖는 직류 제어시스템의 입력신호

Table 2 Input signal of D.C. control system with optimal PID controller using MGA

input signal	Rectifier				Inverter			
	$y_{ACref}$	$y_{AC}$	$y_{DCref}$	$y_{DC}$	$y_{ACref}$	$y_{AC}$	$y_{DCref}$	$y_{DC}$
Case 1	$\omega_0$	$\omega$	$I_{d0}$	$I_d$	$\omega_0$	$\omega$	$E_{di0}$	$E_{di}$
Case 2	$\omega_0$	$\omega$	$E_{dr0}$	$E_{dr}$	$\omega_0$	$\omega$	$I_{d0}$	$I_d$

5. 시뮬레이션 결과

5.1 PID 제어기의 이득계수 최적화

제안한 방법을 전력(사례 연구 1)을 증가시킨 경우와 3상 단락이 발생(사례 연구 2)한 경우에 유용성 및 강인성을 검토하였다. 표 3은 PID 제어기의 이득계수를 최적화 하기 위하여 설정한 수정 유전 알고리즘의 계수들이다[10-11]. 또한 컴퓨터 시뮬레이션에 사용한 교류 및 직류시스템의 정수는 표 4와 같다[13-14].

표 3 수정 유전 알고리즘 파라미터

Table 3 Parameters of MGA

Cases	Parameter number	Population size	Crossover probability	Mutation probability	Max.Gen number	MGA
Case 1	6	50	0.65	0.02	100	○
Case 2	6	50	0.65	0.02	100	○

표 4 시스템 파라미터

Table 4 System parameters

A.C. system		
$E_a' = 1.017$ [p.u.]	$V_b = 1.000$ [p.u.]	$\delta = 0.698$ [rad]
$X_e = 0.400$ [p.u.]	$X_d = 1.343$ [p.u.]	$X_q = 1.258$ [p.u.]
$X_d' = 0.182$ [p.u.]	$T_{d0}' = 5.890$ [sec]	$T_R = 0.060$ [sec]
$K_R = 1.100$ [p.u.]	$T_E = 0.670$ [sec]	$K_E = -0.060$ [p.u.]
$T_F = 0.350$ [sec]	$K_F = 0.100$ [p.u.]	$T_A = 0.200$ [sec]
$K_A = 50.000$ [p.u.]	$S_E = 0.360$ [p.u.]	$H = 5.364$ [sec]
$D = 0.008$ [p.u.]	$f_0 = 60.000$ [Hz]	$R = 0.050$ [p.u.]
$T_{gv} = 0.083$ [sec]	$T_t = 5.000$ [sec]	
D.C. system		
$L_d = 0.032$ [p.u.]	$R_d = 0.012$ [p.u.]	$X_r = 0.100$ [p.u.]
$X_i = 0.100$ [p.u.]	$K_{DC1} = 1.000$ [p.u.]	$T_{DC1} = 0.100$ [sec]
	$\tilde{\sim} = 1.000$ [p.u.]	$\tilde{\sim} = 0.100$ [sec]
	$K_{DC4}$	$T_{DC4}$

5.2 결과 고찰

교류시스템에 교류선로와 제어시스템을 포함하는 상태 변수는  $X_{AC} = [E_q', \omega, \delta, V_r, V_{gr}, V_a, E_{fd}, P_m, X_{gv}]^T$ 이고, 직류시스템에 직류선로와 제어시스템을 포함하는 상태변수는  $X_{DC} = [I_d, \alpha, \beta]^T$ 이며, 제어변수는  $U_{DC} = [U_r, U_i]^T$ 이다. 샘플링 주기는 0.001[sec]로 하였다. 이것은 직류시스템이 교류시스템에 비해서 변화의 속도가 빠르므로 샘플링 주기를 짧게 잡는다.

직류 제어시스템에서 순·역변환기측이 표 1의 2가지 경우로 운전한다고 할 때 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 적게 함으로써 소요 무효전력을 감소시켜 교류전압의 저하를 억제하는 방법으로 동작하고, 역변환기는 소호각  $\beta$ 를 적게 하여 교류전압의 저하를 억제시키게 된다. 각 경우는 표 5와 같은 지정 조건[13-14]하에서 시뮬레이션하였다.

표 5 직류 제어 시스템의 제어 설정치

Table 5 Setting control values of D.C. control system

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

5.2.1 사례 연구 1 : 전력이 증가한 경우

첫 번째 사례 연구로서 부하가 0.1[sec] 사이에 정격 출력이 3[%] 증가한 경우에 직류 제어시스템의 순·역변환기에 수정 유전 알고리즘을 이용하여 최적 PID 제어기를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제어기 성능을 비교·고찰하였다. 그 결과 최적 PID 제어기의 이득계수는 표 6과 같이 최적화되었고, 무제어시, 기본 제어시, MGA-PID 제어시의 평가지수는 표 7에 보인바와 같았다. 그림 7은 각 경우에 최대 적합도와 평균 적합도를 나타낸 것이다. 또한 기본 제어시와

MGA-PID 제어기 적용시 각 제어방식에 있어서 교류시스템의 회전자각의 각속도 및 직류시스템의 변환기 제어각, 직류전류의 동특성은 그림 8~9와 같이 나타났다.

표 6 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 제어기의 파라미터(사례 연구 1)

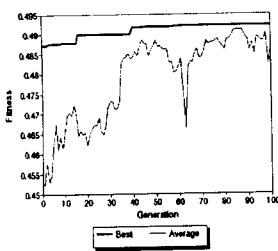
Table 6 Parameter of optimal PID controller using MGA (Case study 1)

Optimal PID gain Cases	Rectifier			Inverter		
	$K_{PR}$	$K_{IR}$	$K_{DR}$	$K_{PI}$	$K_{II}$	$K_{DI}$
Case 1	0.979	0.093	0.994	0.973	0.094	0.565
Case 2	0.979	0.098	0.254	0.973	0.094	0.565

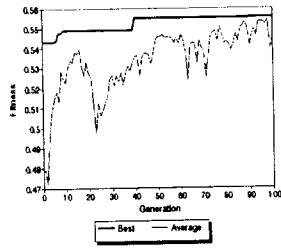
표 7 평가 지수(사례 연구 1)

Table 7 Performance indices(Case study 1)

Each case	$P.I = \sum_{m=1}^{100}  e(k) $			
	Without control	Base control	MGA-PID control	SPR [%]
Case 1	6.2518	6.0892	1.5874	73.93
Case 2	6.2518	6.1495	1.6336	73.40



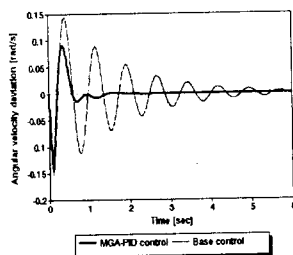
(a) Best and average fitness (Case 1)



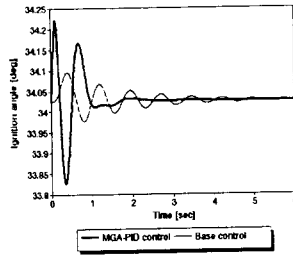
(b) Best and average fitness (Case 2)

그림 7 부하가 100[msec] 사이에 정격 출력의 3[%] 증가한 경우의 최대와 평균적합도(사례 연구 1)

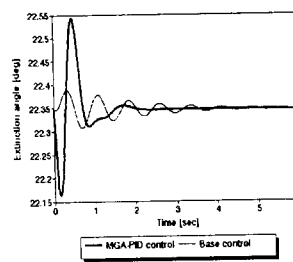
Fig. 7 Best and average fitness to increasing power 3[%], disturbance duration 100[ms](Case study 1)



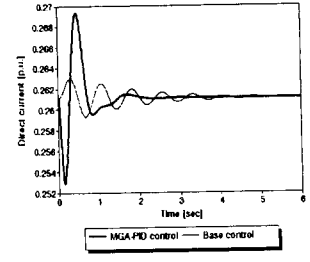
(a) Angular velocity  $\Delta\omega$



(b) Ignition angle  $\alpha$



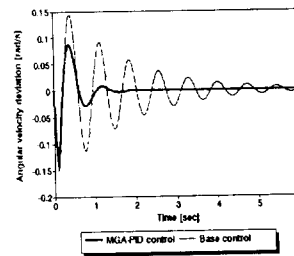
(c) Extinction angle  $\beta$



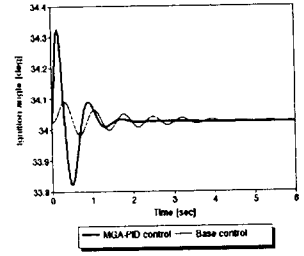
(d) Direct current  $I_d$

그림 8 부하가 100[msec] 사이에 정격 출력의 3[%] 증가한 경우의 동특성 (경우 1, 사례 연구 1)

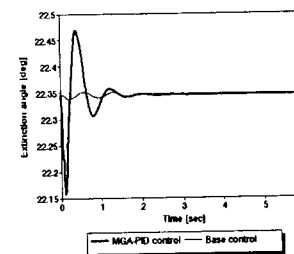
Fig. 8 Dynamic response to increasing power 3[%], disturbance duration 100[ms] (Case 1, Case study 1)



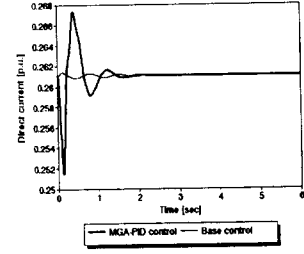
(a) Angular velocity  $\Delta\omega$



(b) Ignition angle  $\alpha$



(c) Extinction angle  $\beta$



(d) Direct current  $I_d$

그림 9 부하가 100[msec] 사이에 정격 출력의 3[%] 증가한 경우의 동특성 (경우 2, 사례 연구 1)

Fig. 9 Dynamic response to increasing power 3[%], disturbance duration 100[ms] (Case 2, Case study 1)

초고압 직류송전 시스템에 있어서 교류시스템 및 직류시스템의 안정도 향상을 위하여 직류 제어시스템에 강인성을 가진 보조제어기를 Case 1, 2인 경우의 순·역변환기측에 수정 유전 알고리즘을 이용하여 이득계수를 최적화한 최적 PID 제어기를 적용하였다.

MGA에 사용한 적합도를 각 세대별로 최대 적합도와 평균 적합도를 살펴보면, 세대가 지나감에 따라 최대 적합도와 평균 적합도가 향상되었으며, 최대 적합도가 평균 적합도와 거의 비슷해짐을 알 수 있었다. 이 결과는 각 세대에 있어서 최적해인 해가 많이 존재함을 알 수 있다. 따라서 수정 유전 알고리즘이 계산시간을 감소시키고 정확성을 유지할 수 있었으며, 전역적인 최적해를 유지하였고, 조기 수렴현상을 극복하여 빠른 시간 내에 최적해, 즉 최적 PID 제어기의 이득계수를 얻을 수 있었다. 최적화된 이득계수 변화에 대한 평가 지수를 살펴보면 MGA-PID 제어기가 기본 제어기보다 평가

지수가 73[%] 정도 감소하였다.

각 경우에 대한 교류 시스템의 회전자각의 각속도 특성을 살펴보면, 기본 제어시보다 MGA-PID 제어시가 첫 번째 오버슈트(first overshoot : 1st O.S)는 36~40[%], 두 번째 오버슈트(second overshoot : 2nd O.S)는 90~99[%], 첫 번째 언더슈트(first undershoot : 1st U.S)는 7~56[%] 정도 감소하였다. 또한 수렴시간(settling time) 및 도달시간(reaching time)에 있어서 우수한 특성을 보이고 있다. 이 결과를 표 8에 종합하여 나타내었다. 따라서 MGA-PID 제어기가 제어 성능이 우수한 전할한 제어기임을 입증하였다.

표 8 시뮬레이션 결과(사례 연구 1)  
Table 8 Simulation results(Case study 1)

Control method		Base	MGA-PID	SPR [%]
Cases		$\Delta\omega$ [rad/s]	$\Delta\omega$ [rad/s]	
Case 1	1st O.S	0.1430	0.0905	36.69
	2nd O.S	0.0887	0.0000	99.98
	1st U.S	-0.0031	-0.0013	56.86
Case 2	1st O.S	0.1440	0.0878	39.03
	2nd O.S	0.0911	0.0082	90.97
	1st U.S	-0.1536	-0.1426	7.05

반면 직류 제어시스템의 변환기 제어각, 직류전류의 특성을 살펴보면, 기본제어시 보다 MGA-PID 제어기가 초기에는 속응성이 떨어짐을 보이나 직류전류의 극한값 이내에서 운전하므로 시간이 지남에 따라 우수한 속응성을 보이고 있고, 이에 따라 교류시스템의 안정도가 향상됨을 알 수 있다. 따라서 시스템 전력 변동시에 직류 제어시스템에 강인성을 갖는 MGA-PID 제어기 적용이 초고압 직류송전 시스템의 안정도 향상에 크게 기여함을 할 수 있다. 따라서 직류 제어시스템의 보조제어신호에 MGA-PID 제어기 적용이 시스템의 안정도를 향상시켜 안정운전에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다.

이의 결과에 따라 초고압 직류송전 시스템의 기본 데이터를 구축하고, 시뮬레이션을 통하여 제어계의 특성을 파악할 수 있었다. 또한 초고압 직류송전 시스템에서 직류제어방식의 비교 연구와 더불어 미소 교란에 의한 안정도 해석을 통하여 실 시스템에의 응용 가능성을 고찰하고, 양쪽 변환기의 제어효과에 따라 안정도에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 따라서 MGA를 이용한 직류 제어시스템의 순·역변환기측에 최적 PID 제어기 설계가 효과적임을 확인할 수 있었다.

5.2.2 사례연구 2 : 3상 단락이 발생한 경우

두 번째 사례 연구는 초고압 직류송전 시스템 중 교류선로가 단자모선 근처에서 3상단락이 발생하여 0.1[sec]후 고장이 회복된 경우에 시뮬레이션을 통해 성능을 비교·고찰하였다.

일반적으로 과도 특성을 고찰하는데는 미소 외란에서와 같이 미소 변동분으로 해석할 수 있으나 발전기에 걸리는 전기적 부하는 내부 기전력 및 회전자각의 변동분만으로 계산될 수 없으므로 실제의 기전력과 회전각을 계산하였고, 내부 기전력과 회전자각에 대한 상태 변수는 변동분이 아닌 실제 값

을 변수로 취하고 교란 전 상태에 대한 조류계산을 하여 단자전압과 위상각을 구하고 초기값을 선정하였다. 그 결과 최적 PID 제어기의 이득계수는 표 9와 같이 최적화 되었고, 무제어시, 기본 제어시, MGA-PID 제어시의 평가 지수는 표 10과 같이 나타났다. 또한 기본 제어시와 MGA-PID 제어기 적용시 각 제어방식에 있어서 교류 시스템의 회전자각의 각속도 및 직류시스템의 변환기 제어각, 직류전류의 동특성은 그림 10 ~11과 같이 나타났다.

표 9 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 제어기의 파라미터(사례 연구 2)

Table 9 Parameter of optimal PID controller using MGA (case study 2)

Optimal PID gain	Rectifier			Inverter		
	$K_{PR}$	$K_{IR}$	$K_{DR}$	$K_{PI}$	$K_{II}$	$K_{DI}$
Case 1	0.9794	0.0099	0.1230	0.9743	0.0098	0.2257
Case 2	0.9794	0.0012	0.9834	0.9507	0.0010	0.8453

표 10 평가 지수(사례 연구 2)

Table 10 Performance indices(Case study 2)

Each case	$P.I = \sum_{k=1}^{100}  e(k) $			
	Without control	Base control	MGA-PID control	SPR [%]
Case 1	7252.627	8468.441	6815.575	19.51
Case 2	7252.627	7023.068	5058.542	27.97

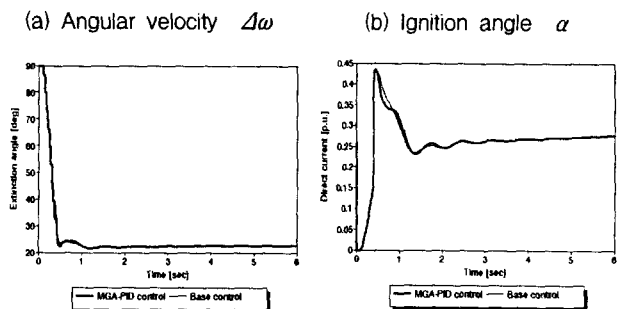
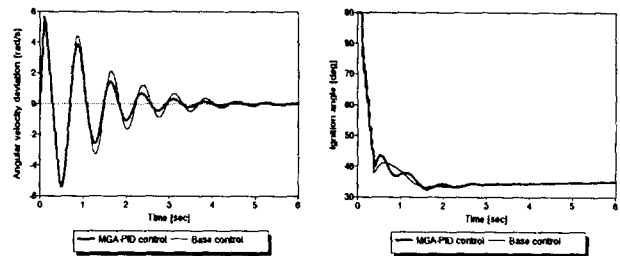


그림 10 3상 단락이 발생하여 0.1[sec] 후 고장이 회복된 경우의 동특성 (경우 1, 사례 연구 2)

Fig. 10 Dynamic response to three phase short, fault duration 100[ms] (Case 1, Case study 2)

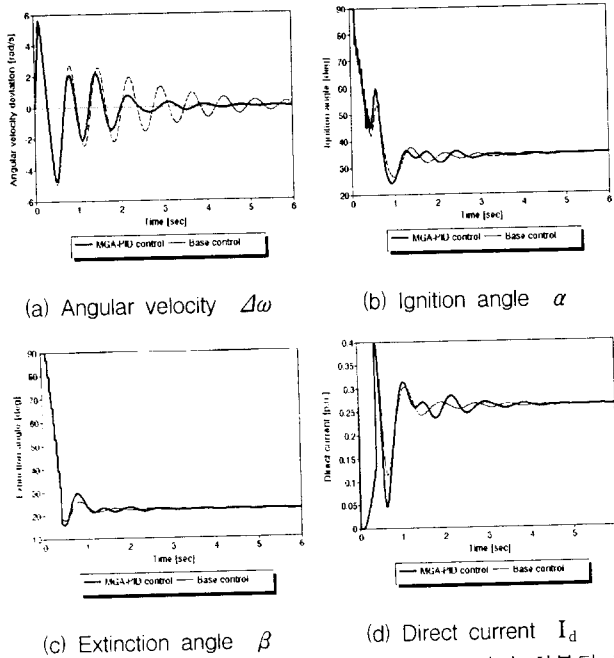


그림 11 3상 단락이 발생하여 0.1[sec] 후 고장이 회복된 경우의 동특성 (경우 2, 사례 연구 2)

Fig. 11 Dynamic response to three phase short, fault duration 100[ms] (Case 2, Case study 2)

최적화된 이득계수 변화에 대한 평가 지수를 살펴보면 MGA-PID 제어가 무 제어 및 기본 제어보다 평가 지수가 19~30[%]가 감소하였다. 또한 Case 2인 경우는 Case 1인 경우에 비하여 평가 지수가 현저히 감소하였다. 따라서 3상 단락이 발생한 경우에는 Case 2인 순변환기-정전류, 역변환기-정전압제어에 의한 MGA-PID 제어가 시스템 안정도 향상에 크게 기여함을 알 수 있다.

단락 초기에 큰 변동에 의하여 직류시스템의 영향에 따라 안정범위에 수렴하기는 하지만 장시간 진동을 나타내고 있고, 오버슈트, 언더슈트가 기본 제어시에 비하여 크게 나타났으나 우수한 제어성능에 따라 빠른 수렴 특성을 보여주고 있다. 따라서 3상 단락과 같은 시스템의 급격한 변동에도 불구하고 MGA-PID 제어가 우수한 제어성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다.

우선 각 경우에 교류시스템의 각속도 특성을 살펴보면, 기본 제어시보다 MGA-PID 제어가 첫 번째 오버슈트는 변함이 없었지만, 두 번째 오버슈트는 12~23[%], 첫 번째 언더슈트는 3[%] 감소하였다. 또한 수렴시간 및 도달시간에 있어서 좋은 특성을 보이고 있다. 이 결과를 표 11에 종합하여 나타내었다. 따라서 MGA-PID 제어가 제어성능이 우수한 제어기임을 입증하였다. 반면 직류제어시스템의 변환기 제어 각, 직류전류의 특성을 살펴보면, 기본 제어시보다 MGA-PID 제어가 초기에는 속응성이 떨어짐을 보이나 직류전류의 극한값 이내에서 운전하므로 시간이 지남에 따라 속응성이 뛰어났다. 따라서 3상 단락과 같은 큰 부하변동에도 직류제어시스템의 보조제어신호에 MGA-PID 제어가 적용이 시스템의 과도 안정도를 향상시켜 안정운전에 크게 기여하고 있음을 알 수 있었으며, MGA-PID 제어가 제어성

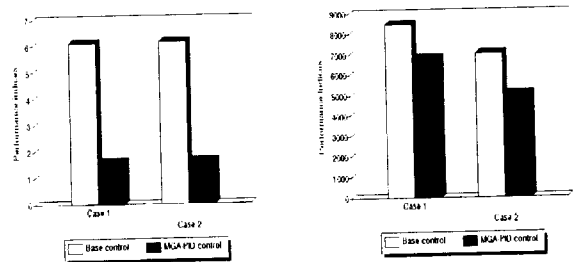
능이 우수하고, 강인성을 갖는 제어기임을 확인하였다.

그림 12는 각 사례 연구의 평가 지수를 비교·종합하여 나타내었다. 따라서 본 연구에서 선정한 사례 연구의 타당성을 입증하였고, 실 시스템에 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 제어를 적용하기 위한 데이터를 구축할 수 있었다.

표 11 시뮬레이션 결과(사례 연구 2)

Table 11 Simulation results(Case study 2)

Each case	Control method	Base	MGA-PID	SPR [%]
		$\Delta\omega$ [rad/s]	$\Delta\omega$ [rad/s]	
Case 1	1st O.S	5.64946	5.64946	0.00
	2nd O.S	4.41534	3.87900	12.14
	1st U.S	-5.46673	-5.29237	3.18
Case 2	1st O.S	5.64946	5.64946	0.00
	2nd O.S	2.69205	2.06863	23.15
	1st U.S	-4.92382	-4.73800	3.77



(a) Performance indices to increasing power 3%, disturbance duration 100[ms] (Case study 1)

(b) Performance indices to three phase short, fault duration 100[ms] (Case study 2)

그림 12 각 사례연구의 평가 지수

Fig. 12 Performance indices of each case study

## 6. 결론

본 논문에서는 초고압 직류송전 시스템에 있어서 시스템 고장시 과도 안정도 향상을 위하여 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 제어기 설계방법을 제안하였다. 이를 위하여 본 연구 과정을 조류계산 정식화, 직류 시스템의 기본적인 제어, 안정도 해석용 수학적 모델 선정, 수정 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 설계에 의한 보조신호제어로 구성하였다. 또한 제안한 기법의 타당성을 과도 안정도 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수정 유전 알고리즘은 계산시간을 감소시키고 정확성을 유지할 수 있었다. 또한 보다 적은 반복횟수로도 최적해를 찾을 수 있었으며, 전역적인 최적해를 유지하였고, 초기 수렴 현상을 극복하여 빠른 시간 내에 최적해 즉 최적 PID 제어기의 이득계수를 얻을 수 있었다.
- 2) 최적화된 이득계수 변화에 대한 평가 지수를 살펴보면 MGA-PID 제어가 무 제어 및 기본 제어보다 평가 지



수가 감소하였다. 따라서 MGA-PID 제어가 시스템 안정도 향상에 크게 기여함을 알 수 있었으며 MGA-PID 제어가 제어성능이 우수함을 알 수 있다.

3) 직류시스템의 2가지 제어방식에 대한 교류시스템의 각속도 특성을 살펴보면, 기본 제어시보다 MGA-PID 제어가 오버슈트, 수렴시간 및 도달시간에 있어서 우수한 특성을 보이고 있다.

4) 직류시스템의 변환기 제어각, 직류전류 특성을 살펴보면, 기본제어시보다 MGA-PID 제어가 초기에는 속응성이 떨어짐을 보이거나 직류전류의 극한값 이내에서 운전하므로 시간이 지남에 따라 우수한 속응성을 보이고 있고, 이에 따라 교류시스템의 안정도가 향상됨을 알 수 있다. 따라서 직류 제어시스템에 강인성을 갖는 MGA-PID 제어가 적용이 초고압 직류송전 시스템의 안정도 향상에 크게 기여함을 할 수 있었고 MGA-PID 제어가 설계의 타당성을 입증하였다.

장차 초고압 직류송전 시스템의 정확한 모델링 및 다양한 직류 제어시스템의 제어기 설계를 통한 안정도 해석이 필요하며 또한 초고압 직류송전 시스템 모의 장치를 통한 주파수 제어면과 전압제어면에서의 안정도 검토 등에 관하여 연구가 필요하다.

이 논문은 1998학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

[1] A. Nyman, M. Vaitnomaa, B. Jansson, and K-G. Danielsson, "The Fenno-Skan HVDC line commissioning", IEEE Trans. on PD., Vol. 9, No. 1, pp.1-9, (1994)

[2] D. L. Dickmader, S. Y. Lee, and M. Granger, "AC/DC harmonic interactions in the presence of GIC for the Quebec-New England phase HVDC transmission", IEEE Trans. on PD., Vol. 9, No. 1, pp.68-78, (1994)

[3] S. Kuruganty, "Effect of HVDC component enhancement on the overall system reliability performance", IEEE Trans. on PD., Vol. 9, No. 1, pp.343-351, (1994)

[4] M. Sanpei, A. Kakehi and H. Takeda, "Application of multi-variable control for automatic frequency controller of HVDC transmission system", IEEE Trans. on PD., Vol. 9, No. 2, pp.1063-1068, (1994)

[5] M. A. Choudhry and D. P. Carroll, "Coordinated active and reactive power modulation of multiterminal HVDC Systems", IEEE Trans.on PAS, Vol. PAS-103, pp. 1480-1485, (1984)

[6] IEEE COMMITTEE REPORT, "Functional model of two-terminal HVDC system for transient and steady-state stability", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No. 6, pp.1249-1255, (1984)

[7] E. N. Dialynas and N. C. Koskolos, "Reliability modeling and evaluation of HVDC power transmission

systems", IEEE Trans. on PD., Vol. 9, No. 2, pp. 872-878, (1994)

[8] K. W. V. To, A. K. David and A. E. Hammad, "A robust coordinated control scheme for HVDC transmission with parallel ac system", IEEE Trans. on PD., Vol. 9, No. 3, pp.1710-1716, (1994)

[9] J. Reeve and M. Sultan, "Robust adaptive control of HVDC system", IEEE Trans. on PD., Vol. 9, No. 3, pp.1222-1236, (1994)

[10] B. W. Hogg, Q. H. Wu and E. Swidenbank, "Optimal PID automatic voltage regulator for synchronous machine", INT. J. CONTROL, Vol. 50, No. 6, pp.2615-2634, (1989)

[11] 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)

[12] 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)

[13] IEEE SSR Task Force, "IEEE first benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonances", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-96, No. 5, (1977)

[14] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc., (1994)

[15] H. H. Chong, Y. P. Wang, H. J. Kim, T. G. Lee, H. S. Koh, "Application of Optimal PID Controller and Control Characteristic for Synchronous Generator in A.C.-D.C. Power System", KIEE Trans., Vol. 44, No. 6, pp.717-725, (1995)

[16] H. H. Chong, Y. P. Wang, H. J. Kim, K. S. Jo, "Dynamic Characteristic Analysis for Parallel A.C.-D.C. Power System by Weighting Factor Regulation", KIEE Trans., Vol. 44, No. 10, pp. 1265-1273, (1995)

[17] H. H. Chong, Y. P. Wang, B. C. An, K. W. Lee, "A Study on Comparative of Direct Current Control in A.C.-D.C. Interconnected Power System", KIEE Trans., Vol. 45, No. 4, pp.474-483, (1996)

### 저 자 소 개



#### 정 형 환(鄭亨煥)

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