

유전알고리즘을 이용한 HVDC 정전류 제어용 퍼지제어기의 구현

권정욱 · 황기현 · 안중보 · 김형수 · 문경준 · 박준호  
 \* 부산대학교 전기공학과    \*\* 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신연구소    \*\*\* 한국전기연구원

Implementation of Fuzzy Controller for HVDC Current Control Using Genetic A

Jung-Uk Kwon · Gi-Hyun Hwang · Ahn Jongbo · Hyung-Su Kim · Kyøong Jun Mun · Jun  
 \* Department of Electrical Engineering, Pusan National University  
 \*\* Research Institute of Computer, Information and Communication at Pusan National Univ  
 \*\*\* Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)

**Abstract** - In this paper, we designed fuzzy logic controller(FLC) for HVDC current control using genetic algorithm. The proposed method was applied to HVDC power system simulator in Korea Electrotechnology Research Institute(KERI). We are adjusted input/output gain of FLC by real-time using genetic algorithm. Experimental results show that FLC has the better control performance than PI controller in terms of settling time, rising time.

1. 서 론

초고압 직류(high voltage direct current : HVDC) 송전방식은 정류기에서 교류전력을 직류전력으로 변환하고 송전선로를 통하여 직류전력을 수송한 후 인버터에서 직류전력을 교류전력으로 재변환하여 전력을 공급하는 송전방식이다. 직류송전은 교류송전과는 달리 전압, 전류와 송전전력에 대한 빠른 제어가 가능하므로, 외란에 대하여 강인하고 교류시스템의 동특성을 향상시킬 수 있고, 송전용량을 증가할 수 있으며 단락용량이 감소하는 등의 많은 장점을 가지고 있다.

이러한 HVDC시스템의 동특성 향상을 위해 사용된 기존의 제어기는 특정한 동작점에서 선형화된 모델과 근사적 및 Bode 선도를 이용하여 설계된 진·지상제어기, 비례-적분(proportional-integral : PI) 제어기등이 사용되었다[1,2]. 이러한 제어기는 선형제어이론과 특정한 동작점에서 선형화된 계통모델을 이용하여 제어기를 설계하였기 때문에 특정 동작점에서는 좋은 제어성능을 나타내지만, 부하의 변동이나 계통의 고장 등과 같은 계통운전 조건이 변했을 경우에는 좋은 제어성능을 얻기가 어렵다. 그리고 최근에는 HVDC시스템의 동특성을 향상시키기 위해서 퍼지제어기와 신경회로망제어기 등과 같은 지능제어기법이 직류시스템의 정전류 제어기로 많이 사용되고 있다[3-5].

본 논문에서는 한국전기연구원의 해남-제주간의 모의 HVDC계통 시뮬레이터에 대해서 자연의 진화를 모의한 확률적인 최적화 탐색알고리즘인 유전알고리즘을 사용하여 실시간으로 퍼지제어기를 설계하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 제어성능을 비교하기 위하여 시행착오법으로 설계된 PI제어기와 비교, 분석하였다. 실험결과 제안한 방법이 기존의 PI제어기보다 더 나은 제어성능을 나타내었다.

2. HVDC 계통

2.1 HVDC계통의 구성

본 논문에서는 제안한 퍼지제어기의 성능을 검증하기 위하여 한국전기연구원 HVDC계통 모의 시뮬레이터를 이용하였다. 그림 1은 한국전기연구원 HVDC 전력계통 시뮬레이터의 구성도를 나타내었다. 이 HVDC 계통은 실제 해남-제주간의 계통을 모의하였다.

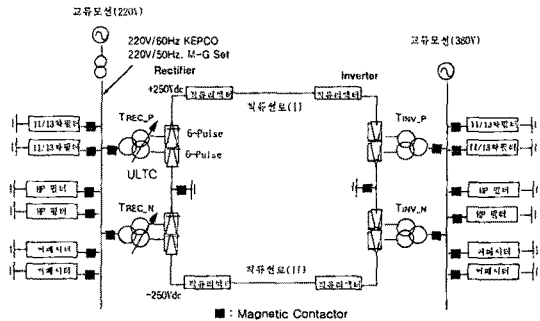


그림 1 HVDC 전력계통 시뮬레이터의 구성도

그림 1의 직류시스템은 인버터의 직류리액터 선로측 모선을 기준으로 하여 정격용량 5[kW], 정격전압 ±250(V), 정격전류 10(A)로 구성되어있다. 그리고 HV 계통의 형태는 2개의 극을 서로 독립적으로 동작시킬 수 있는 반대 극성을 지닌 두 도체로 구성된 Bipolar 방식을 사용한다. Bipolar 방식은 만일 1개의 극에서 고장발생시 나머지 1극에서 단일극성을 가진 Monopolar 방식으로 운전하여 부하의 분담이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 싸이리스터 밸브는 극당 2개의 브리지, 브리지당 6개, 총 48개의 밸브를 가지며 각 밸브는 고장발생시 교환이 가능하도록 되어있다. 직류선로는 최대 500[km]의 선로길이까지 모의 가능하며 2개의 등가 가변저항으로 이루어져서 변경이 가능하도록 하였다. 총 4대의 변환용 변압기는 0~150[%]의 양방향 직류송전이 가능하도록 하였고 AC전압의 변동범위를 ±10[%]를 유지하도록 하였다. 또한 여러 가지 운전조건에 따른 변압기의 2차측 전압을 계산하여 양방향성 조류제어를 위해서 150[%] 과부하시 변환기측에서는 최대전압, 역변환기 측에서는 최소전압을 유지하도록 ULTC를 사용하였다. 변압기 Tap간격을 1.5[%]씩 하여 24개의 Tap을 가지도록하고

(-)18.3~ (+)14.6[%]의 Tap을 가지도록 구성하였다. 무효전력 보상량을 필터, 커패시터, 교류전원이 분담하도록 설계하였다. 11/13차 필터 및 High-Pass필터 각각의 보상량이 최소부하시의 요구량을 만족하도록 필터의 단위 용량은 0.6[kVar]로 설정하고 전체 조상설비 합계용량이 4.8[kVar/Terminal]가 되도록 설계하였다. 따라서 교류전압 및 점호각의 이상 과다시에만 교류전원에서 무효전력을 공급받을 수 있도록 설계하였다. 커패시터는 380[V] 교류모선에 2개를 설치하며 AC전압의 변동폭으로  $\pm 10\%$ 를 고려하였다.

## 2.2 제어기 구성

그림 1의 HVDC 계통의 제어기는 정전류제어기, 일정점호각( $\alpha_{min} = 5^\circ$ )제어기, 일정여유각( $\gamma_{min} = 15^\circ$ )제어기로 구성되어 있다.

1) 정전류 제어기: 정전류제어는 직류선로의 전류를 일정하게 유지하는 제어동작인데, 직류전류는 일반적으로 계통의 상황에 따라 크게 영향을 받아 급격히 변화할 수 있다. 이러한 직류전류의 급격한 변동은 계통에 큰 영향을 미치므로 주로 약한 AC계통에 연결된 변환기에서 정전류제어를 수행하게 된다. 정전류제어기의 구성도는 그림 2와 같다. 그림 2에서 순변환기의  $\alpha_{rated}$ 은  $18^\circ$ 이고 역변환기의  $\alpha_{rated}$ 은  $155^\circ$ 의 값을 가진다.

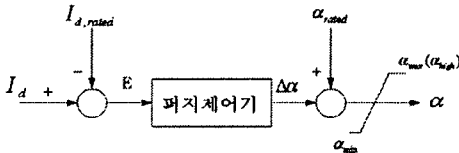


그림 2 정전류 제어기

2) 정점호각 및 정여유각 제어기: 정점호각 및 정여유각 제어기는 일정 점호각( $\alpha_{min} = 5^\circ$ ) 및 일정 여유각( $\gamma_{min} = 15^\circ$ )으로 구성되어 있다. 교류모선전압이 0.85[pu]의 값 이하이면 일정 점호각 및 일정 여유각 제어를 하고 0.85[pu]의 값을 초과하게 되면 정전류제어를 하게 된다. 정점호각 및 정여유각 제어기의 구성도는 그림 3에 나타내었다.

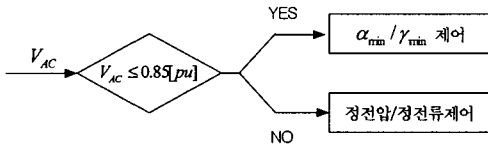


그림 3 정점호각 및 정여유각 제어

## 3. 유전알고리즘을 이용한 HVDC계통의 퍼지제어기의 설계

### 3.1 유전알고리즘

유전알고리즘은 자연의 유전학과 자연도태의 원리에

근거한 확률적인 최적화 알고리즘으로 개체간의 체계적인 정보교환을 통해 탐색공간을 조사함으로써 주위 환경에 알맞은 가장 적절한 해를 얻고자하는 최적화 알고리즘이다. 본 논문에서 사용한 유전알고리즘의 연산자는 룰렛휠 방법, 단순 교배방법, 균일 돌연변이 방법을 사용하였다.

### 3.2 GA를 이용한 HVDC 계통의 퍼지제어기 설계

한국전기연구원의 HVDC계통 모의 시뮬레이터에 대해서 실시간으로 유전알고리즘을 사용하여 정전류 제어용 퍼지제어기의 설계하기 위한 전체 구성도는 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 퍼지제어기의 입력으로 전류편차  $\Delta I$ 와 전류편차의 미분치를 사용하였고, 적합도를 평가하기 위하여 유전알고리즘의 입력으로 직류전류의 오차를 사용하였다. 그림 5는 본 논문에서 사용한 삼각형 소속함수를 나타내었다

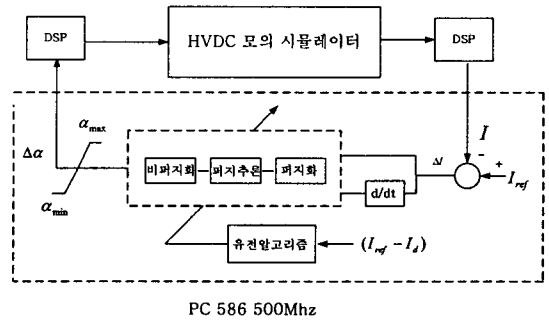


그림 4 유전알고리즘을 이용한 퍼지제어기

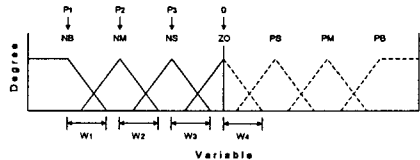
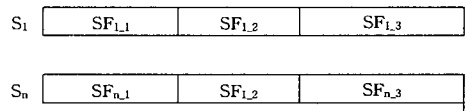


그림 5 대칭형 삼각형 소속함수

유전알고리즘을 이용하여 정전류 제어용 퍼지제어기 입·출력변수의 소속함수를 튜닝하기 위해서 그림 6과 같은 형태로 해집단을 구성하였다.



여기서,  $SF_{ii}$  : 입·출력 이득  
n : 스트링 개수

그림 6 해집단의 구조

그리고 해집단의 각 스트링을 평가하기 위하여 사용된 적합도 함수는 식 (1)과 같이 직류전류의 절대치 편차의 합을 이용하였다.

$$fitness = \frac{1}{1 + \int_{t=1}^T |I_{ref}(t) - I_d(t)|} \quad (1)$$

#### 4. 실험결과

본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 검증하기 위하여 그림 7과 같은 한국전기연구원 HVDC계통 모의 시뮬레이터를 이용하였다. 표 1은 한국전기연구원 HVDC계통 모의 시뮬레이터와 실 계통의 정격을 나타내었다. 표 2는 한국전기연구원 HVDC계통 모의 시뮬레이터의 점호각 제어범위를 나타내었다.

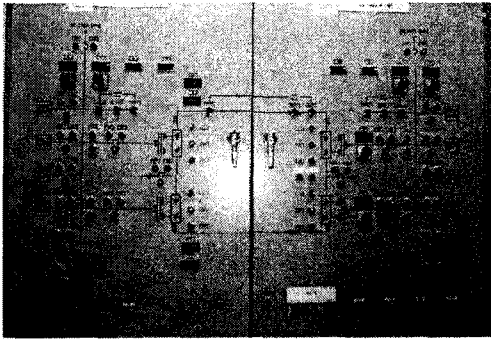


그림 7 한국전기연구소의 HVDC 시뮬레이터의 전체 시스템 외관

표 1 HVDC 시뮬레이터 정격과 실제용 정격비교

정격	시뮬레이터 정격	실제용 기준
$P_{DC}$	5.0(kW)	1000(MVA)
$V_{DC}$	$\pm 250$ (V)	454(kV)
$I_{DC}$	10(A)/Monopole	2.023(kA)
$V_{AC}$	380(V)	345(kA)

표 2 시뮬레이터의 점호각 제어범위

정격	시뮬레이터	비고
$\alpha$ 제어 범위	$\alpha_{rated} = 18^\circ$	① rated : 정상상태 정격치
	$\alpha_{min} = 5^\circ$	② min : 최소값(정상 상태 및 이상상태)
	$\alpha_{max} = 50^\circ$	③ max : 정상상태 최대값
	$\alpha_{high} = 80^\circ$	④ high : 이상상태 최대값
$\gamma$ 제어 범위	$\gamma_{rated} = 21^\circ$	① rated : 정상상태 정격치
	$\gamma_{min} = 15^\circ$	② min : 최소값(정상 상태 및 이상상태)
	$\gamma_{max} = 30^\circ$	③ max : 정상상태 최대값
	$\gamma_{high} = 70^\circ$	④ high : 이상상태 최대값

그림 8은 기준전류 값이 변경되었을 때, 제안한 퍼지제어기와 기존의 PI제어기와의 응답 특성을 보였다. 그림 8에서 보는 바와 같이, 제안한 퍼지제어기가 PI제어기보다 상승시간 및 정정시간면에서 더 우수한 제어성능을 보임을 알 수 있다. 그림 9는 ULTC 시험에 대한 제안한 퍼지제어기와 기존의 PI제어기와의 응답 특성을

보였다. 그림 9에서 보는 바와 같이, 제안한 퍼지제어기가 약간의 오버슈트는 존재하지만 PI제어기보다 상승시간 및 정정시간면에서 더 좋은 제어성능을 보였다.

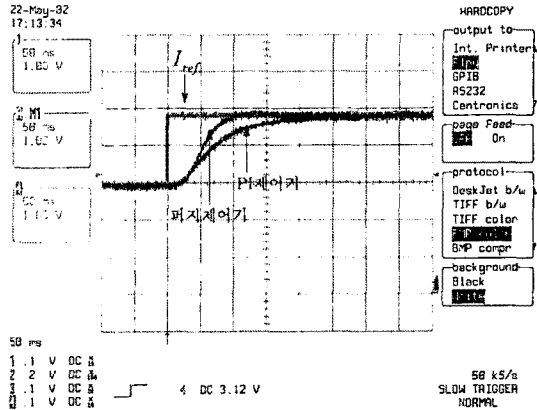


그림 8 기준전류 변화에 대한 응답특성

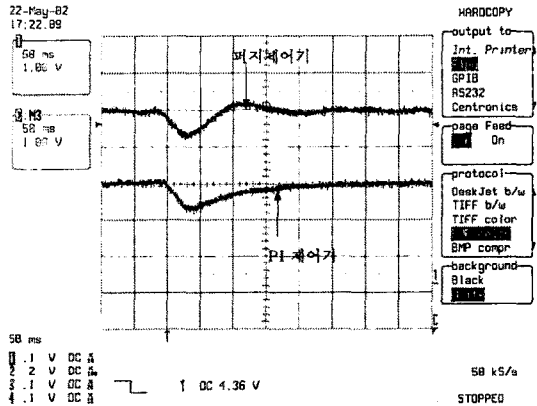


그림 9 ULTC 시험에 대한 응답특성

#### [참고 문헌]

- [1] J. Arrillara, "High Voltage Direct Current Transm IEE Power Eng. Series 6, Peter Peregrinus Ltd., 1
- [2] Palo Alto, "High-Voltage Direct Current Hand First Edition, Electric Power Research Institute, 1
- [3] A. Daneshpooy, A. M. Gole, D. G. Chapman and Davies, "Fuzzy Logic Control for HVDC Transmis IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, no. 4 1690-1697, Oct. 1997
- [4] P. K. Dash, A. C. Liew, A. Routray, "High-performance controllers for HVDC transmission links", IEE Proc. Gener., Trans., Distrib. vol. 141, no. 5, Sept, 1994
- [5] 윤재영, 황기현, 박준호, "초고압 직류계통의 정전류퍼지제어기 설계", 대한전기학회, 1997. 10
- [6] J. Reeve and M. Sultan, "Gain scheduling a control strategies for HVDC systems to accomm large disturbances", IEEE Trans. Power Syst., v no. 1, pp. 366-372, Feb. 1994
- [7] P. Kundur, "Power system stability and co McGraw-Hill, Inc., 1994.