

적응진화알고리즘을 이용한 HVDC 계통의 퍼지제어기 설계

최재곤* 황기현** 박재영* 박준호***
 * 부산대 전기공학과 석사과정 ** 부산대 전기공학과 박사과정 *** 부산대 전기공학과 교수

A Design of Fuzzy Controllers of HVDC System Using Adaptive Evolutionary Algorithm

Jae-Kon Choi · Gi-Hyun Hwang · Je-Young Park · June Ho Park

Abstract - This paper presents an optimal design method for fuzzy controllers of HVDC system using adaptive evolutionary algorithm(AEA). We have proposed an adaptive evolutionary algorithm which uses a genetic algorithm and an evolution strategy in an adaptive manner in order to take merits of two different evolutionary computations. AEA is used for tuning fuzzy membership functions, scaling constants and PD gains. The simulation results show that the disturbances are well damped by both controllers and the dynamic performances of fuzzy controllers have better responses than those of PD controllers when mechanical torque changes suddenly.

퍼지제어기의 강인성을 평가하기 위해 다른 계통의란에 대해 시뮬레이션 해본 결과, 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 뛰어난 강인성을 나타내었다.

2. 동특성 해석

본 논문에서는 초고압 직류계통의 제어기 성능평가에 그림 1과 같은 교류-직류 병행 모델계통을 사용하였다. 그리고 발전기는 2축 모델을 사용하였으며, 여자기는 IEEE-Type II를 사용하였다.

1. 서론

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 교류계통의 동특성을 향상시킬 수 있고, 송전용량을 증가할 수 있으며 단락용량이 감소하는 등의 많은 장점을 가지고 있다.

이러한 직류계통의 동특성 향상을 위해 사용된 기존의 제어기[1-4]는 특정한 동작점에서 선형화된 모델과 근계적 및 Bode 선도를 이용하여 설계된 진·지상제어기, 비례-적분(proportional-integral : PI) 제어기등이 사용되었다. 이러한 제어기는 선형제이론과 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 적응제어 이론(adaptive control theory)을 도입하여 전력계통의 비선형성(nonlinear)과 시변성에 대하여 전력계통 안정화장치에 적응능력을 부여하고자 하는 방법이 제안되었다[5-7]. 이 방법은 전력계통의 동특성을 향상시켰지만, 매주기마다 계산시간이 많이 소요됨으로 실시간으로 제어하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 직류계통의 동특성을 향상시키기 위해서 퍼지제어기와 신경회로망제어기 등과 같은 지능제어기법이 직류계통의 정전류 제어기로 많이 사용되고 있다[8].

본 논문에서는 진화연산의 탐색성능을 개선한 적응진화 알고리즘(adaptive evolutionary algorithms : AEA)[9]을 이용하여 초고압 직류계통의 정전류 및 최소 여유각 제어를 위한 퍼지제어기를 설계하였다. 제안한 퍼지제어기의 유용성을 평가하기 위하여 직류계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 사례연구 결과, 기계적인 토오크 변화와 같은 계통의란에 대해서 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 우수한 제어 성능을 나타내었다. 그리고 제안한

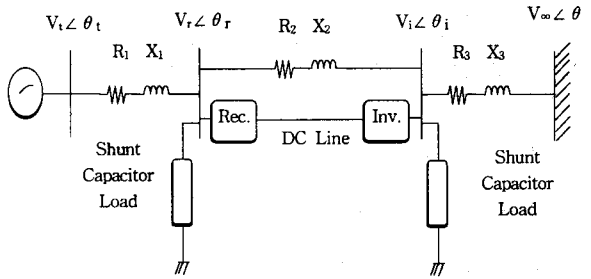


그림 1 HVDC 모델계통

1) 직류송전선로 : AC선로의 전력방정식에 포함되어 대수방정식의 형태로 나타나고 직류선로를 R-L선로로 모의하면 식 (1)~식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 표 기법 및 기호는 참고문헌[10]에 정의되어 있다.

$$I_{dc} \frac{dI_{dc}}{dt} = V_{dr} \cos \alpha - V_{di} \cos \gamma \quad (1)$$

$$- \left(\frac{3}{\pi} X_r B_r + R_{dc} + \frac{3}{\pi} X_i B_i \right) I_{dc}$$

$$V_{dr} = V_{doi} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_{dc} B_r \quad (2)$$

$$V_{di} = V_{doi} \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_i I_{dc} B_i \quad (3)$$

$$\gamma = \arccos \left(\frac{2V_{di} - V_{doi} \cos \beta}{V_{dr}} \right) \quad (4)$$

$$\Phi_r = \arccos \left(\frac{V_{dr}}{V_{dor}} \right) \quad (5)$$

$$\Phi_i = \arccos \left(\frac{V_{di}}{V_{doi}} \right) \quad (6)$$

$$P_{dr} = V_{dr} I_{dc} \quad (7)$$

$$P_{di} = V_{di} I_{dc} \quad (8)$$

$$Q_{dr} = P_{dr} \tan(\Phi_r) \quad (9)$$

$$Q_{di} = P_{di} \tan(\Phi_i) \quad (10)$$

2) 전압전류제어 특성 곡선 : 그림 2는 전압전류제어 특성 곡선을 나타내었다. 정상상태에서는 정류기의 정

전류제어(AD)와 인버터의 정여유각제어(BC)로 운전하다가 정류기측전류제어(AD)와의 전압강하와 같은 외란이 발생하면 정류기에서는 제어가 불가능하여 인버터측에서 정전류제어(BA*)를 하게 된다. 전압의존형 전류제한(voltage dependant current limits :VDCL)은 외란에 의해 변환기의 AC측 전압의 크기가 과도하게 낮아진 경우 직류전류의 지령치를 낮춘다.

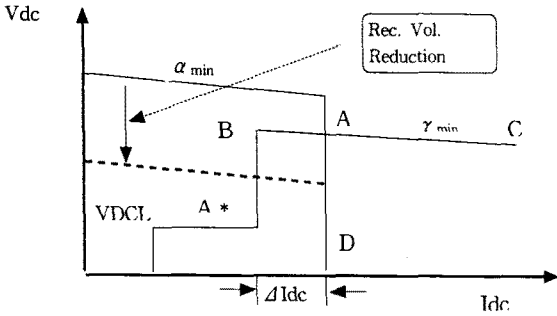


그림 2 전압전류제어 특성 곡선

3. 적응진화 알고리즘을 이용한 초고압 직류계통의 퍼지제어기 설계

3.1 적응진화 알고리즘

유전알고리즘은 진화전략에 비해 다양한 영역을 탐색함으로 전역최적해 근처까지는 빨리 수렴하나 확실적인 특성상 전역최적해를 찾는데 많은 실행시간이 요구되는 반면에, 진화전략은 유전알고리즘보다 국부탐색능력이 우수하다. 따라서, 본 연구에서는 유전알고리즘의 전역탐색능력과 진화전략의 국부탐색능력을 적용적으로 이용하는 적응진화 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 해집단을 다음세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 알고리즘이다[9].

3.2 적응진화 알고리즘을 이용한 HVDC 계통의 퍼지제어기 설계

퍼지제어기가 뛰어난 제어성능을 가지기 위해서는 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 적절히 결정해야 하는데, 종래에는 전문가의 경험과 지식 또는 시행착오법을 이용하였다. 그리고 최근에는 진화연산을 이용하여 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 동조하는 방법들이 많이 제안되고 있다[10].

본 논문에서는 방법론에서 상이한 탐색과정을 가지고 있는 유전알고리즘과 진화전략을 적용적으로 이용하는 적응진화 알고리즘을 퍼지제어기의 소속함수 모양과 입·출력 이득을 동조하였다. 그림 5는 본 논문에서 사용한 삼각형 소속함수를 나타내었으며, 제로(ZO) 소속함수의 모든 꼭지점을 영점에 고정시켰고, 각 소속함수의 폭은 모두 대칭으로 두었으며, 영점을 기준속으로 하여 모든 소속함수들을 대칭으로 구성하였다. 따라서 퍼지제어기 입·출력변수의 소속함수를 동조하는데 필요한 적응진화연산의 스트림은 그림 6과 같이 삼각형 소속함수의 꼭지점이 세 개씩 필요하며, 폭이 네 개씩 필요함으로 21개의 변수와 입·출력 이득을 포함해서 총 24개로 스트림을 구성하였다. 여기서, NB는 Negative Big, NM는 Negative Medium, NS는 Negative Small 등을 나타내는 언어적인 변수이다.

3) 정류기 제어 방식 : 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. 다음은 정전류제어방식을 도식화한 그림이다.

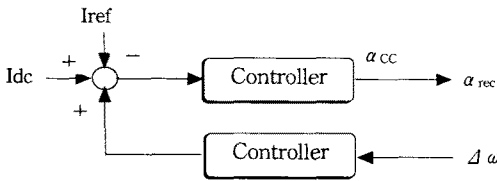


그림 3 정류기 제어방식

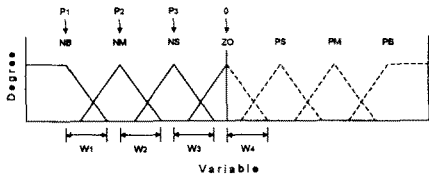


그림 5 대칭형 삼각형 소속함수

4) 인버터 제어 방식 : 정여유각제어는 인버터에서만 수행하는 제어방식으로 전류실패를 방지함과 동시에 고역률로 운전하기 위한 제어방식이다. 그림 4에서 아래쪽은 직류전류와 전류지령치(Iref - ΔIdc)를 비교하여 점호각을 결정하는 정전류제어이고, 위쪽은 여유각과 여유각지령치를 비교하여 점호각을 결정하는 정여유각 제어이다. 실제 적용되는 제어기는 두 점호각을 비교하여 작은 값으로 결정하는 최소선택기를 사용하여 결정한다.

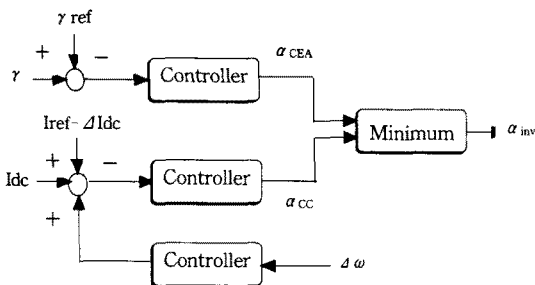
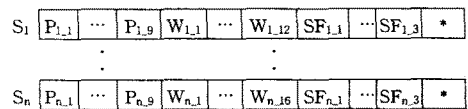


그림 4 인버터 제어 방식



여기서, P_{ij} : 소속함수의 꼭지점
 W_{ij} : 소속함수의 밑변길이의 1/2
 SF_{ij} : 입·출력 이득
 n : 스트림 개수
 $*$: 태그변수

그림 6 해집단의 구조

그리고 해집단의 각 스트림을 평가하기 위하여 사용된 적합도 함수는 식 (11)과 같이 직류전류, 여유각 그리고

발전기 각속도의 절대치편차의 합을 사용하였다.

$$fitness = \frac{1}{1 + (a|I_{dc_{err}}| + b|\gamma_{err}| + d|\omega_{err}|)} \quad (11)$$

여기서, $I_{dc_{err}}$: 직류전류지령치와 직류전류와의 차

γ_{err} : 여유각지령치와 여유각과의 차

ω_{err} : 기준 각속도와 실제 각속도와의 차

4. 사례 연구

제안한 방법의 성능을 검증하기 위해 그림 1의 1기 무한대 계통에 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 적응진화 알고리즘의 시물레이션 계수는 표 1과 같다. 적응진화 알고리즘에 의해서 최적화된 퍼지제어기와와 PD제어기와의 제어성능을 비교하였고, 퍼지제어기의 사용된 동조 조건은 기계적인 토오크가 0.25[p.u] 증가한 경우를 이용하였다. 그림 7은 동조 조건시 사용된 계통은 조건에 대한 발전기 각속도, 직류전류 및 여유각 변화를 나타내었다. 그림 7에서 보는 것처럼 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 나은 제어 성능을 보였다.

표 1 적응진화 알고리즘의 시물레이션 계수

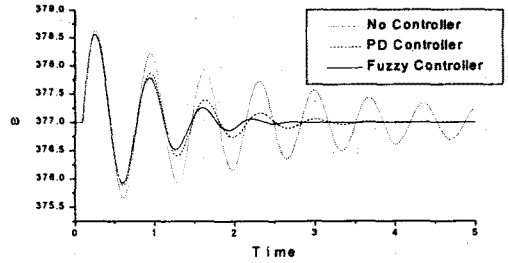
적용방법	해집단 수	교배 확률	돌연변이 확률	δ	C_d	C_i
AEA	20	0.85	0.01	0.5	0.75	1.05

5. 결론

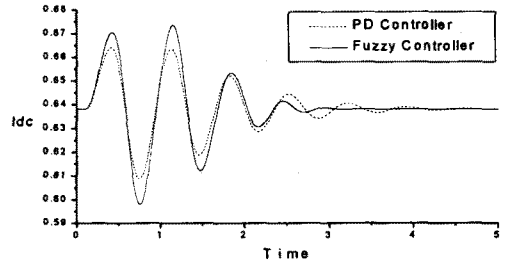
본 논문에서는 전형적인 비선형특성을 가진 HVDC 계통의 동특성 향상을 위하여 적응진화 알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 설계 방법을 제안하였다. 교류-직류 병행 계통에 대하여 비선형 시물레이션 해본 결과, 동조시 사용한 계통외란에 대해 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 나은 제어성능을 나타내었다. 퍼지제어기의 강인성을 입증하기 위해 동조시와 다른 계통외란에 대해 비선형 시물레이션을 해본 결과, 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 강인함을 보였다.

(참 고 문 헌)

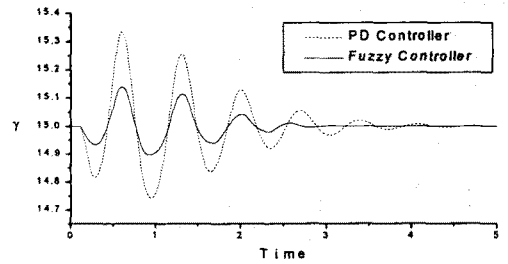
- [1] C. E. Grund and C. M. Pollard, "Power modulation controls for HVDC systems", CIGRE 14-03, 1984
- [2] S. Lefebvre, "HVDC controls for system dynamic performance", IEEE PWR6-6, pp. 743-752, 1991
- [3] M. A. Chudhury, A. S. Emarah, K. A. Ellithy and G. D. Gallanos, "Stability analysis of a modulated ac/dc system using the eigenvalue sensitivity approach", IEEE Trans. PWR6-1, pp. 128-137, 1986
- [4] Y. Y. Hsu and L. Wang, "Damping a parallel ac/dc system using PID power system stabilizers and rectifier current regulators", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 3, no. 3, pp. 540-548, 1988
- [5] S. Lefebvre, M. Saad, and A. R. Hurteau, "Adaptive control for HVDC power transmission systems", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., vol. PAS-104, no 9, pp. 2329-2335, Sept. 1985
- [6] W. J. Rugh, "Analytical framework for gain scheduling", IEEE Control Syst. Mag., vol. II, no. 1, pp. 79-84, Jan. 1991



(a) 발전기 각속도



(b) 직류전류



(c) 여유각 변화

그림 7 직류계통의 동특성 비교

- [7] J. Reeve and M. Sultan, "Gain scheduling adaptive control strategies for HVDC systems to accommodate large disturbances", IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 1, pp. 366-372, Feb. 1994
- [8] A. Daneshpooy, A. M. Gole, D. G. Chapman and J. B. Davies, "Fuzzy Logic Control for HVDC Transmission", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, no. 4, pp. 1690-1697, Oct. 1997
- [9] 황기현, 문경준, 박준호, 정정원, "진화전략과 유전알고리즘을 이용한 적응진화연산", 대한전기학회, 47권 8호, pp. 1262-1268, 1998. 8
- [10] 윤재영, 황기현, 박준호, "초고압 직류계통의 정전류퍼지 제어기 설계", 대한전기학회, 1997. 10
- [11] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc., 1994