

Tabu 탐색법을 이용한 UPFC용 퍼지 제어기 설계

이창문<sup>\*</sup> · 황기현<sup>\*\*</sup> · 김형수<sup>\*</sup> · 문경준<sup>\*</sup> · 박준호<sup>\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>부산대학교 전기공학과 · <sup>\*\*</sup>(주)이노트론 기술개발연구소

Design of Fuzzy Controller for UPFC using Tabu Search

C. Lee<sup>\*</sup> · G. H. Hwang<sup>\*\*</sup> · H. S. Kim<sup>\*</sup> · K. J. Mun<sup>\*</sup> · J. H. Park<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Dept. of Electrical Engineering, Pusan National Univ., Busan, 609-735, Korea, <sup>\*\*</sup> Department of R&D, Intron Corp.

**Abstract** - 본 논문에서는 Tabu 탐색법을 이용하여 UPFC용 퍼지 댐핑 제어기를 설계하였다. 또한 UPFC가 장착된 1기 무한대 계통에 대한 Dynamic 모델을 유도하였고, 기존에 순차적인 해석 방법의 문제점을 해결하였다. 경험적 최적화알고리즘인 Tabu 탐색법을 이용하여 UPFC용 퍼지 댐핑 제어기의 입·출력 이득을 튜닝하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 설계한 UPFC용 퍼지 댐핑 제어기는 사례제동의 운전 조건에 대해서 기존의 제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다.

로 응답속도가 빠른 속응성 정지형 여자시스템을 사용하여 AVR(automatic voltage regulation)만으로 모델링하였다. 동기기의 터빈/조속기 특성은 시정수가 길며 변동폭이 상대적으로 작기 때문에 고려하지 않았다.

1. 서 론

전력소비가 증대하면서 전력수송망의 수요가 증가하는 것에 비해 전력 설비 증설에 상당한 제약을 받고 있는 것이 현실이다. 이로인한 병목조류, 전압붕괴 및 계통 동요현상 등의 문제가 야기될 수 있다. 해결방안으로 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System) 기술이 크게 기여할것으로 기대하고 있다. 실제 선진기술을 보유한 국가에서는 운행중에 있으며 우리나라도 10여년 실계통 적용 연구의 결실로 강진변전소에 설치, 시험운전중에 있다. FACTS 기술은 대용량 전력전차 기술을 이용하여 전력조류, 전압 및 안정도와 관련된 정수를 고속 정밀하게 제어하여 계통안정도 향상과 계통설비 이용률을 향상시키는 기술이다. 그 중에서도 UPFC(Unified Power Flow Controller)는 가장 다양한 기능의 FACTS 기기로서 송전선로에 직·병렬로 연계되어 송전선로의 전력조류에 영향을 미치는 모든 변수에 대한 제어가 가능하다. 주기능은 정상상태에서 송전선로의 유효 및 무효전력 제어와 모션의 전압 제어와 과도상태 안정도 마진을 높이는 것이다.

본 논문에서는 조류 및 전압 제어와 더불어 전력 계통 안정화를 위한 UPFC용 퍼지 제어기[1]를 시뮬레이션 해보았다. 이때 퍼지제어기는 안정도 향상을 위한 보조 제어기로서 기능을 하며 Tabu 탐색법을 이용하여 퍼지 제어기 입출력 이득을 튜닝하였다. Tabu 탐색법은 메모리 구조를 가지고 있어 반복탐색을 피해 전역 최적해에 빨리 수렴하는 장점을 가지고 있다. 제어기의 우수성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 본론은 1기 무한대 계통에서 발전기 동특성 해석을 위한 수식 전개, 퍼지 제어기 설계, 사례 연구로 나뉘 기술하였다.

사례연구를 통해 본 논문에서 설계한 제어기가 정정시간 및 제동효과면에서 기존의 제어기보다 우수함을 입증하였다.

2. 발전기 및 UPFC 모델링

본 논문에서 사용한 그림 1의 1기 무한대 계통에 대한 발전기 미분방정식은 식 (1)~(4)와 같다. 여자기

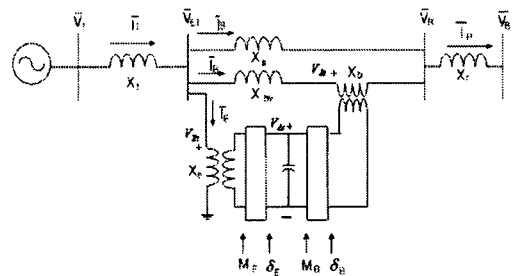


그림 1 1기 무한대계통에서의 UPFC

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_{ref} \tag{1}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{ref}}{2H} (T_m - E'J_d + (X_q - X_d') I_d I_q) \tag{2}$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_{do}} (E_{fd} - E'_q - (X_d - X'_d) I_d) \tag{3}$$

$$\frac{dE'_{fd}}{dt} = \frac{K_A}{T_A} (V_{ref} - V_d) - \frac{1}{T_A} E'_{fd} \tag{4}$$

UPFC의 미분방정식 및 대수방정식[2,3]은 식 (5)~(7)과 같다.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_d} (M_E (\cos \delta_E I_{Ed} + \sin \delta_E I_{Eq}) - M_B (\cos \delta_B I_{Bd} + \sin \delta_B I_{Bq})) \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} V_{Ed} \\ V_{Eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X_e \\ X_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ed} \\ I_{Eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_E \cos \delta_E V_{dc} / 2 \\ M_E \sin \delta_E V_{dc} / 2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} V_{Bd} \\ V_{Bq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X_b \\ X_b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Bd} \\ I_{Bq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_B \cos \delta_B V_{dc} / 2 \\ M_B \sin \delta_B V_{dc} / 2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

본 논문에서는 비선형 시뮬레이션을 수행하기 위해서 식 (1)~(4)의 발전기 미분방정식에서 발전기 d축, q축 전류와 단자전압을 고정자 및 회로망 대수방정식을 이용하여 상태변수의 함수로 표현함으로써 대수방정식을 풀지 않고 미분방정식만으로도 발전기의 동특성을 해석할 수 있다. 식 (1)~식 (5)의 발전기 및 UPFC의 발전기 d축, q축 전류와 단자전압은 다음과 같이 상태변수의 함수로 표현할 수 있다.

$$I_{ld} = I_{Ed} + I_{Pd} + I_{Sd} \quad (8)$$

$$I_{ld} = I_{Ed} + I_{Pd} + I_{Sd} \quad (9)$$

$$I_{Ed} = -(\Delta_2 - X_2 \cdot X_5 \cdot \Delta_4) / (X_d + X_r - X_2 \cdot X_3) \quad (10)$$

$$I_{Ed} = (\Delta_1 - X_1 \cdot X_6 \cdot \Delta_3) / (X_q + X_r + X_1 \cdot X_4) \quad (11)$$

$$I_{Pd} = X_3 \cdot I_{Ed} + X_5 \cdot \Delta_4 \quad (12)$$

$$I_{Pd} = X_4 \cdot I_{Ed} + X_6 \cdot \Delta_3 \quad (13)$$

$$I_{Sd} = \{(X_{bv} + X_b) \cdot I_{Bd} - M_B \cdot \sin \delta_B \cdot V_{dc}/2\} / X_s \quad (14)$$

$$I_{Sd} = \{(X_{bv} + X_b) \cdot I_{Bd} + M_B \cdot \cos \delta_B \cdot V_{dc}/2\} / X_s \quad (15)$$

$$V_i = \sqrt{(E_q - X_d' \cdot I_{ld})^2 + (X_q \cdot I_{ld})^2} \quad (16)$$

여기서,

$$\begin{aligned} X_1 &= X_q + X_r + X_{bv} + X_b + X_r \\ &\quad + (X_q + X_r + X_r) \cdot (X_{bv} + X_b) / X_r \\ X_2 &= -X_d' - X_r - X_{bv} - X_b \\ &\quad - X_r - (X_d' + X_r + X_r) \cdot (X_{bv} + X_b) / X_r \\ X_3 &= -\frac{(X_d' + X_r + X_r)}{\{X_d' + X_r + (X_d' + X_r) \cdot (X_{bv} + X_b) / X_r\}} \\ X_4 &= -\frac{(X_q + X_r + X_r)}{(X_q + X_r + (X_q + X_r) \cdot (X_{bv} + X_b) / X_r)} \\ X_5 &= \frac{-1}{\{X_d' + X_r + (X_d' + X_r) \cdot (X_{bv} + X_b) / X_r\}} \\ X_6 &= \frac{1}{\{X_q + X_r + (X_q + X_r) \cdot (X_{bv} + X_b) / X_r\}} \\ \Delta_1 &= -M_B \cdot \cos \delta_B \cdot V_{dc}/2 + V_B \cdot \sin \delta \\ &\quad - (X_q + X_r + X_r) \cdot M_B \cdot \cos \delta_B V_{dc} / (X_r \cdot 2) \\ \Delta_2 &= -M_B \cdot \sin \delta_B \cdot V_{dc}/2 + V_B \cdot \cos \delta \\ &\quad - (X_d' + X_r + X_r) \cdot M_B \cdot \sin \delta_B V_{dc} / (X_r \cdot 2) - E_q \\ \Delta_3 &= M_B \cdot \cos \delta_B \cdot V_{dc}/2 \\ &\quad - (X_q + X_r) \cdot M_B \cdot \cos \delta_B V_{dc} / (X_r \cdot 2) \\ \Delta_4 &= M_B \cdot \sin \delta_B \cdot V_{dc}/2 \\ &\quad - (X_d' + X_r) \cdot M_B \cdot \sin \delta_B V_{dc} / (X_r \cdot 2) - E_q \end{aligned}$$

### 3. Tabu 탐색법을 이용한 UPFC 퍼지제어기 설계

#### 3.1 Tabu 탐색법

일반적인 Tabu 탐색법의 성능은 초기해 생성, 이웃해 선정, Tabu List 등에 크게 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는 이웃해 선정시 목적함수에 따라 이웃해의 범위가 적응적으로 변경되는 적응 Tabu 탐색법을 사용하였다[4]. 본 논문에서 제안한 적응 Tabu 탐색법을 이용하여 UPFC 퍼지제어기를 설계하는 과정은 다음과 같다.

단계 1) 초기해 선정: 주어진 문제의 제약조건을 만족하도록 식 (16)과 같이 초기해를 생성한 후, 이를 현재해로 설정하였다.

$$S_0 = \text{Random} [SF_{i_{\max}}, SF_{i_{\min}}], \quad i=1,2,\dots,N \quad (16)$$

여기서,  $SF_{i_{\max}}$ : UPFC 퍼지제어기 이득의 상한치

$SF_{i_{\min}}$ : UPFC 퍼지제어기 이득의 하한치

$N$ : 퍼지제어기 입·출력 이득 개수

단계 2) 이웃해 생성 및 평가: 탐색영역내에서 대상 문제나 탐색 전략에 따라 현재해에 대한 이웃해를 생성한 후 이득 식 (17)과 같이 설정한 목적함수에 따라 평가한다. 각 이웃해를 평가하기 위한 평가부분에 대한 흐름도는 그림 2와 같다.

$$J = \text{Minimize} \sum_{k=1}^N |E(k)| \quad (17)$$

여기서,  $E(k)$ : k번째 기준입력과 실제출력과의 오차

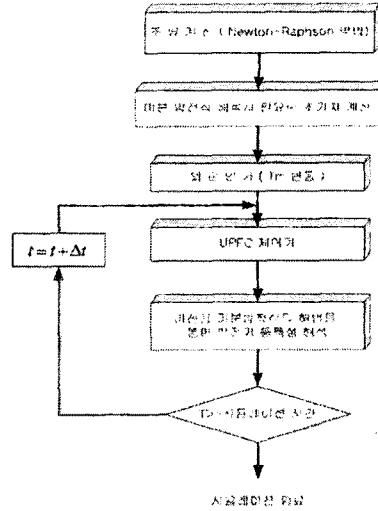


그림 2 동특성 시뮬레이션 흐름도

단계 3) 모의해 생성: 단계 2)에서 생성된 이웃해 중에서 평가값이 가장 우수한 해를 모의해로 설정한다.

단계 4) Tabu Test: 모의해가 Tabu List에 포함되는지를 검토한다. 만일 모의해가 Tabu List에 포함될 경우 단계 5)를 실행하고 그렇지 않을 경우 단계 6)를 실행한다.

단계 5) 열망조건: 모의해가 Tabu List에 포함되었다고 열망 조건을 만족할 경우에는 Tabu List에서 제외되어 다음 탐색시의 현재해로 설정된다.

단계 6) 현재해 갱신: 모의해가 Tabu List에 포함되지 않으면 다음 탐색의 현재해로 설정된다.

단계 7) 종료조건: 일정 반복횟수까지 단계 2) ~ 단계 6) 과정을 반복한다.

#### 3.2 UPFC 주제어기와 안정화 보조제어기

UPFC의 주제어 목적은 송전선로상의 유효, 무효전력 제어, 모선 전압제어 및 직류링크전압 제어이다. UPFC는 그림 3에서 볼 수 있듯이 4개의 독립된 루프로 구성되어있다. 직렬 삽입 전압원은 미리 수립된 계획에 맞게 전로조류를 제어하고 병렬 삽입 전압원은 모선의 전압을 제어하고 더불어 직렬 삽입 전압원에 의해 소모되는 유효전력을 공급하는 기능을 한다[5]. 또한 UPFC는 보조적으로 전력 안정화장치 (PSS, power system stabilizer)와 같은 기능을 할 수 있다. 본 논문에서는 계통 안정화 향상을 위해 저주파 진동을 효율적으로 억제 할 수 있는 퍼지 보조제어기를 설계하였다.

퍼지제어기의 구조는 그림 4에 나타내었다. UPFC 퍼지 제어기의 입력은 UPFC가 설치된 송전선로의 유효전력 오차와 오차의 변화분을 이용하였다[1,5]. 퍼지 규칙은 일반적으로 널리 사용되고 있는 비례 미분 형태의 퍼지규칙을 사용하였고, 퍼지 소속함수는 이동변 삼각함수를 사용하였다. 본 논문에서는 퍼지제어기의 제동효과를 향상시키기 위해 다부탐색법을 이용하여 입·출력 이득을 최적화하였다.

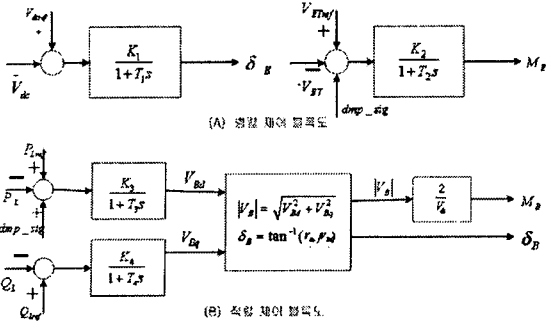


그림 3 UPFC 제어 블록도

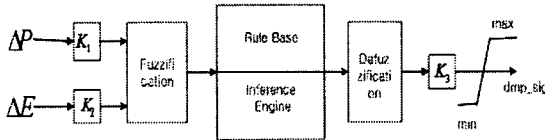


그림 4 퍼지 제어기 구조

#### 4. 사례 연구

제안한 UPFC 퍼지제어기의 성능을 검증하기 위하여 그림 1의 1기 무한대 모선 계통에 대해 3장에서 설명한 방법을 사용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. Tabu 탐색법의 시뮬레이션 계수는 표 1과 같고, 발전기, 여자기 및 UPFC의 정수는 표 2와 같다. 표 2와 같은 조건에서 Tabu 탐색법을 이용하여 UPFC 퍼지제어기를 동조하였다. 제안한 방법에 의해서 동조된 UPFC 퍼지제어기의 입·출력이득은 0.24, 0.2, 0.75이다. 본 논문에서 제안한 UPFC 퍼지제어기의 성능을 비교하기 위해 시행착오법으로 동조한 UPFC 퍼지제어기와 비교·검토하였다.

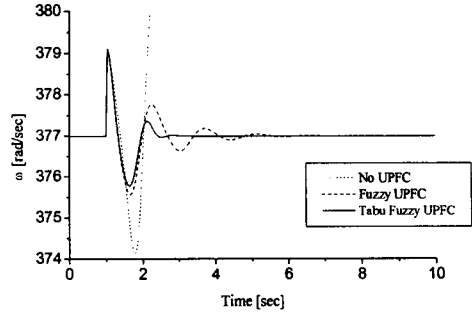
표 1 Tabu 탐색법의 시뮬레이션 계수

적용방법	이웃해의 개수	Tabu List의 수	Tabu 기준
Tabu Search	50	5	0.05

표 2 1기 무한대 모선의 각종 정수 및 초기상태

발전기 정수	H=4.0 D=0 Tdo'=0.01 Xq=0.6 Xd=1.0 Xd'=0.3
여자기 정수	$K_A=50$ Ta = 0.01
선로 정수	Xt=0.15 Xs=0.95 Xbv=0.5 Xr=0.1
UPFC정수	Xe=0.15 Xb=0.1 Cd=1

표 2과 같은 발전기 및 여자기 상수를 이용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였고, 그림 5는 Tabu 탐색법을 이용하여 UPFC 퍼지제어기의 동조에 사용된 정상부하시( $P_r=0.9$ ,  $Q_r=0.015$ ) 기계적인 토오크가 0.01(pu) 증가했을 때, UPFC 퍼지제어기가 없는 경우, UPFC 퍼지제어기가 있는 경우에 대해 발전기 각속도 및 제어입력을 나타내었다. 그림 5에서 보는 것처럼 제안한 Tabu 탐색법으로 동조한 UPFC 퍼지제어기가 기존의 퍼지제어기가 보다 더 나은 제어 성능을 보임을 알 수 있다.



발전기 각속도

그림 5 정상부하시 기계적인 토오크가 증가했을 때 발전기 응답

#### 5. 결론

본 논문에서는 Tabu 탐색법을 이용하여 UPFC용 퍼지 댐핑 제어기를 설계하기 위해서 UPFC가 장착된 1기 무한대 계통에 대한 Dynamic 모델을 유도하였고, 기존에 순차적인 해석 방법의 문제점을 해결하였다. 경험적 최적화알고리즘인 Tabu 탐색법을 이용하여 UPFC용 퍼지 댐핑 제어기의 입·출력 이득을 튜닝하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. UPFC용 퍼지 댐핑 제어기의 설계에 사용된 계통운전 조건에 대해서 기존의 제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다.

#### [참고 문헌]

- [1] T.K.Mok, Y.Ni, F.F.Wu, "Design of Fuzzy Damping Controller of UPFC through Genetic Algorithm", Power Engineering Society summer meeting, 2000
- [2] A.Nabavi-Niaki, M.R.Iravani, "Steady-state and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller for Power System Studies", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 11, No.4, 1996
- [3] H.F.Wang, "Damping Function of Unified Power Flow Controller", IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, Vol.146, No. 1, 1999
- [4] Fred Glover, Manuel Laguna, Tabu Search, Kluwer Academic Publishers, 1997
- [5] Schoder, K., Hasanovic, A., Feliachi, A., "Power system damping using fuzzy controlled unified power flow controller", Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, IEEE, Volume: 2, 2001