

# 과도 안정도 향상을 위한 TCSC의 점호각 제어용 퍼지제어기의 설계에 Tabu 탐색법의 적용

論 文

50A - 12 - 3

## Application of Tabu Search in Design of Fuzzy Controller for Firing Angle of TCSC Improving Transient Stability

金 宇 根\* · 黃 基 鉉\*\* · 金 亨 洙\*\*\* · 朴 俊 灝<sup>§</sup> · 朴 鍾 根<sup>§§</sup>

(Woo-Geun Kim · Gi-Hyun Hwang · Hyung-Su Kim · June Ho Park · Jong-Keun Park)

**Abstract** - This paper describes the application of Fuzzy Logic Controller (FLC) to Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) which can have significant impact on power system dynamics. The function of the FLC is to control the firing angle of the TCSC. We tuned the scaling factors of the FLC using Tabu Search. The proposed FLC is used for damping the low frequency oscillations caused by disturbances such as the sudden changes of small or large loads or the outages in the generators or transmission lines. To evaluate usefulness of the proposed FLC, we performed the computer simulation for single-machine infinite system. The response of FLC is compared with that of PD controller optimized using Tabu Search. Simulation results that the FLC shows better control performance than PD controller.

**Key Words** : FLC, Tabu Search, Thyristor Controlled Series Capacitor

### 1. 서 론

최근 국내의 전력수요는 매년 10% 이상의 성장률을 기록할 정도로 급속히 증가하고 있으며, 2006년에는 현재 수요의 2배에 달할 것으로 예상되고 있어 추가적인 발전소의 건설이 불가피한 실정이다. 이러한 새로운 발전소의 건설과 더불어 추가적인 송전선로의 증설이 필요하다. 새로운 송전선로의 증설은 환경 및 경제적인 측면에서 많은 제약을 받고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 추가적인 송전선로의 증설을 하지 않고 송전용량을 증가시킬 수 있는 유연 송전 시스템(flexible AC transmission system : FACTS)이 각광을 받고 있다.

FACTS는 고전압 대전류형 사이리스터와 같은 전력전자 기술을 바탕으로 하고 있으며, FACTS 중에서 최초로 하드웨어로 구현된 TCSC (thyristor controlled series compensator)는 특정 송전선로의 임피던스를 변화시킴으로써 해당선로의 조류를 제어하는 새로운 전력계통 직렬 보상장치로서 전력계통의 안정도를 크게 향상시킬 수가 있다[1,2]. 종래의 TCSC의 제어기로는 비용함수(cost function)를 이용한 비례제어기의 파라메타 결정[3],  $H_{\infty}$

등의 최적화 기법을 이용한 제어기 설계 방법[4] 등의 연구가 행해졌다. 이러한 제어기들은 선형화된 전력계통을 이용하여 설계되었기 때문에 특정 운전 조건에서는 좋은 제어성을 나타내지만 다른 운전 조건에서는 좋은 제어성을 얻기가 어렵다. 특히 무효전력 보상장치가 있는 전력계통의 동특성은 강한 비선형성을 지니고 있기 때문에 선형제어 이론을 바탕으로 설계된 제어기는 최적의 제어성을 나타내기가 어렵다.

최근에는 전력계통 안정도를 향상시키기 위하여 TCSC 제어기로 퍼지제어기와 신경회로망 제어기 등과 같은 지능제어방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[5]. 퍼지제어기가 우수한 제어성을 가지기 위해서는 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 적절히 결정해야 하는데, 종래에는 전문가의 경험과 지식 또는 시행착오법을 이용하였다. 최근에는 진화연산을 이용하여 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 튜닝하는 방법들이 많이 제안되고 있다[6,7].

본 논문에서는 경험적인 탐색방법인 Tabu 탐색법[8]을 이용하여 전력계통의 저주파 동요 감쇠를 위한 TCSC용 퍼지제어기의 입·출력 이득을 튜닝하였다. Tabu 탐색법은 주어진 초기해를 이용하여 탐색한 지점을 메모리에 기억시킴으로써 효과적으로 새로운 영역을 탐색하는 방법이다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 모선계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였고, PD 제어기와 비교하였다. 이때 PD 제어기의 이득은 Tabu 탐색법을 이용하여 최적화하였다. 다양한 계통운전 조건에 대해서 제안한 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 좋은 제어성을 나타내었다.

\* 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 碩士

\*\* 正 會 員 : 釜山大 컴퓨터 및 情報通信研究所 基金教授

\*\*\* 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 博士課程

§ 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 教授 · 博士

§§ 正 會 員 : 서울대 電氣工學科 教授 · 博士

接受日字 : 2001年 6月 12日

最終完了 : 2001年 9月 7日

## 2. TCSC 특징 및 모델링

### 2.1 발전기 모델링

송전용량 증대 및 전력수송 설비이용률을 극대화시키기 위한 TCSC 제어기의 설계에 사용된 1기 무한대 계통 (single-machine infinite system)에 대한 발전기의 미분방정식은 식 (1) ~ 식 (3)에 나타내었다. 그리고 여자기로 응답속도가 빠른 속응성 정지형 여자 시스템을 사용하면 식 (4)과 같이 여자기를 뺀 AVR (automatic voltage regulator)만으로도 모델링해도 충분하다. 그러나, 동기기의 터빈/조속기 특성은 시정수가 길며 변동폭이 상대적으로 적기 때문에 고려하지 않았고, 사용된 표기법은 참고 문헌[14] 및 부록에 나타내었다.

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T_{do}} [E'_q + (X_d - X'_d)I_d - E_{fd}] \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_{ref} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{ref}}{2H} (T_M - E'_q I_q - (X_q - X'_q)I_d I_q) \quad (3)$$

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{K_A}{T_A} (V_{ref} - V_t + V_s) - \frac{1}{T_A} E_{fd} \quad (4)$$

여기서,  $V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}$

$$I_d = \frac{1}{\Delta} [R_e (E'_d - V_\infty \sin \delta) + (X_e + X'_q) (E'_q - V_\infty \cos \delta)]$$

$$I_q = \frac{1}{\Delta} [R_e (E'_q - V_\infty \cos \delta) - (X_e + X'_d) (E'_d - V_\infty \sin \delta)]$$

$$V_d = E'_d + \frac{X'_q}{\Delta} [R_e (E'_q - V_\infty \cos \delta) - (X_e + X'_d) (E'_d - V_\infty \sin \delta)]$$

$$V_q = E'_q - \frac{X'_d}{\Delta} [R_e (E'_d - V_\infty \sin \delta) + (X_e + X'_q) (E'_q - V_\infty \cos \delta)]$$

$$\Delta = R_e^2 + (X_e + X'_d) (X_e + X'_q)$$

### 2.2 TCSC의 모델링

교류송전계통에서 두 지점간에 전송되는 전력을 제어하는 것은 송전선로의 직렬임피던스를 제어하는 것이 병렬 임피던스를 제어하는 것보다 훨씬 효과적인 것으로 알려져 있다. 특히 송전선로의 임피던스는 대부분 유도성이고 저항분은 5 ~ 10%에 불과하므로 선로에 직렬로 콘덴서를 삽입함으로써 계통의 임피던스를 쉽게 제어할 수 있다. 차단기를 이용한 기존의 기계식 직렬보상 방법은 마모의 우려 때문에 사용빈도에 제한이 있으며, 보상속도가 늦기 때문에 동적인 보상이 불가능하고, SSR (subsynchronous resonance)[9,10]와 같은 이상진동현상을 유발하는 문제점을 가지고 있다. 그러나 TCSC는 고속 스위칭이 가능한 사이리스터를 이용함으로써 신속 정밀한 제어를 할 수 있고 마모의 우려가 없기 때문에 동작 횟수에 제한되지 않고 상시 운용이 가능하며, 사이리스터 속

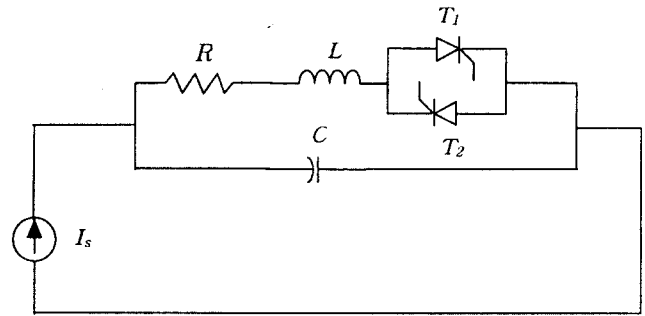


그림 1 TCSC의 기본회로

Fig. 1 TCSC circuit

용성을 이용하여 과도안정도의 향상에 크게 기여할 수 있다[1].

기존의 전력계통 안정도 해석 모델에서는 선로의 리액턴스가 상수로써 고정된 값을 가지나, TCSC가 포함된 모델에서는 선로의 리액턴스가 변화하기 때문에 더 이상 상수로 고려할 수 없으므로 수정되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 점호각 제어에 의해 TCSC의 리액턴스를 연속적으로 변화시키는 모듈레이션 제어형을 이용하였고, TCSC의 기본과 리액턴스는 전류원 구동방식을 사용하였다[11].

그림 1의 전류원으로 구동되는 TCSC회로의 기본과 리액턴스를 유도하는 과정은 아래와 같다[12,13]. 여기서,  $I_s$ 는 전원전류(=  $I_m \cos \omega t$ ),  $I_c$ ,  $V_c$ 는 커패시터 전류, 커패시터 전압,  $R, L, C$ 는 리액터의 저항, 인덕턴스(0.00085681[H]), 커패시터의 용량(0.0024634[F])이다.

① 리액터의 저항분을 무시하고, 싸이리스터 온-오프 순간의 커패시터 전압의 크기는 같고 싸이리스터 도통각의 중심에서 커패시터 전압이 0이 된다고 가정하면 리액터 전류  $I_L$ 는 다음과 같다.

$$I_L = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} I_m \cos \omega t + K_1 \cos \omega_0 t \quad (5)$$

②  $\omega t = \sigma$ 에서  $I_L = 0$ 이므로,  $K_1 = -\frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \times I_m \frac{\cos \sigma}{\cos K\sigma}$ 이다. 따라서 구하는  $I_L$ 은 식 (6)과 같다.

$$I_L = A I_m \cos \omega t - A I_m \frac{\cos \sigma}{\cos K\sigma} \cos \omega_0 t \quad (6)$$

$$\text{여기서, } A = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad K = \frac{\omega_0}{\omega}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \frac{\pi}{2} < \beta < \pi$$

③ 식 (6)에서 싸이리스터 도통시의 커패시터 전압  $V_{con}$ 은 식 (7)과 같다.

$$V_{con} = L \frac{dI_L}{dt} = \omega L A I_m \sin \omega t + \omega_0 L A I_m \frac{\cos \sigma}{\cos K\sigma} \sin \omega_0 t \quad (7)$$

④ 싸이리스터 비도통시에 커패시터 전압  $V_{Coff}$ 은 식 (8)과 같다.

$$V_{Coff} = V_{CO} + \frac{1}{\omega C} \int_{\sigma}^{\omega t} I_m \cos \omega t \, d\omega t \quad (8)$$

$$= \frac{I_m}{\omega C} (\sin \omega t - \sin \delta) + V_{CO}$$

여기서,  $V_{CO}$  : 싸이리스터 오프 순간의 커패시터 전압

⑤ 식 (7), (8)에서 커패시터 전압의 기본파 성분을 구하고, 커패시터 전압의 최대치와 전류 전류의 최대치  $I_m$  과의 비를 취하면 식 (9)와 같은 TCSC의 기본파 리액턴스  $X_{TCSC}$ 가 유도된다.

$$X_{TCSC} = -\frac{1}{\omega C} + \frac{A}{\pi \omega C} [2\sigma + \sin 2\sigma] \quad (9)$$

$$- \frac{4A}{\pi \omega C (K^2 - 1)} \cos^2 \sigma [K \tan K\sigma - \tan \sigma]$$

### 3. Tabu 탐색법을 이용한 퍼지제어기의 설계

#### 3.1 Tabu 탐색법의 개요

1980년대 중반에 Glover에 의해서 연구되기 시작한 Tabu 탐색법(Tabu Search : TS)은 경험적인 최적화 알고리즘으로써 다른 최적화 탐색 알고리즘에 비해 최적해 탐색속도가 비교적 빠르고 알고리즘이 단순하여 쉽게 프로그램화 할 수 있다[8]. Tabu 탐색법의 최적해 탐색성능은 초기해, 이웃해 선정, Tabu List의 크기 등의 영향을 받는다. 초기해를 잘못 선정하면 국부 최소값에 수렴할 가능성이 있기 때문에 일반적으로 전문가의 경험 또는 수치적 방법으로 초기해를 선정한다. 이웃해의 정의 및 크기는 대상 문제나 탐색 전략에 따라 달라지는데, 이웃해를 잘못 선정할 경우 불필요한 탐색으로 인해 탐색영역이 증가하고 수행시간이 많이 소요된다. 새로운 이웃해를 탐색하는 동안에는 이전에 탐색한 영역을 다시 탐색하는 것을 방지하기 위해 Tabu List를 사용한다. Tabu List의 크기는 탐색의 진행 방향과 밀접한 관계가 있는데, Tabu List의 크기가 크면, 이전에 탐색되었던 탐색영역을 탐색하지 않게 함으로써 탐색영역을 다양하게 탐색할 수 있도록 한다. 반면에 Tabu List의 크기가 작다면, 한번 탐색했던 영역이라도 재 탐색될 확률이 높아 같은 탐색영역을 반복적으로 탐색한다. 따라서, Tabu List를 사용함으로써 국부 최적해에 수렴하는 것을 방지할 수 있으며, 탐색영역을 다양하게 또는 한곳을 집중적으로 탐색할 수 있다. Tabu List에 속한 해(solution)라도 평가 결과가 정해진 조건을 만족할 경우에는 이를 새로운 이웃해로 선정할 수 있는데 이를 열망 조건(aspiration criterion)이라고 한다. 일반적으로 현재까지 탐색한 최적해보다 Tabu List에 속한 해의 평가 결과가 더 좋은 경우에는 열망 조건이 만족된다.

#### 3.2 Tabu 탐색법을 이용한 퍼지제어기 설계 방법

본 논문에서는 경험적 탐색방법인 Tabu 탐색법으로 TCSC 퍼지 제어기의 입·출력 이득을 튜닝하였다. 그림

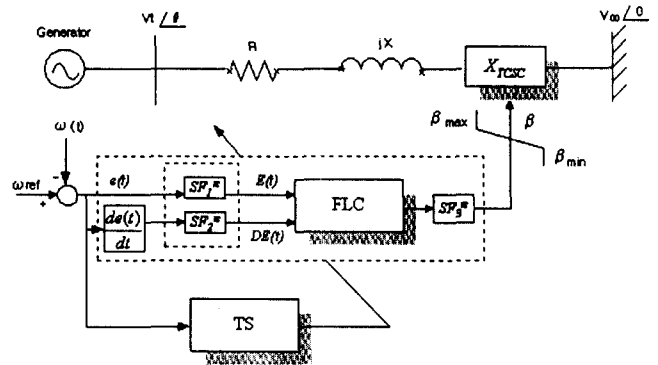


그림 2 Tabu 탐색법을 이용한 TCSC 퍼지 제어기 튜닝을 위한 구성도

Fig. 2 Configuration for the tuning of TCSC fuzzy controller using TS

2는 Tabu 탐색법으로 TCSC 퍼지 제어기의 입·출력 이득을 튜닝하기 위한 구성도를 나타낸다. 그림 2에서 보는 것처럼 TCSC 퍼지 제어기의 입력으로 발전기 각속도 오차와 변화분을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 퍼지 제어기는 퍼지화(fuzzifier) 방법으로 이등변 삼각형 방법을 사용하였고, 퍼지추론 방법으로 Mamdani의 최대-최소 퍼지추론 방법을 사용하였으며, 비퍼지화 방법으로 무게중심법을 사용하였다. 퍼지규칙은 비례-미분 형태를 사용하였다.

본 논문에서 사용한 Tabu 탐색법을 이용한 TCSC용 퍼지제어기의 설계 과정은 초기해 생성, 이웃해 선정 및 평가, 모의해(trial solution) 생성, Tabu Test, 열망조건으로 구성되어 있으며, 이를 이용하여 해를 탐색하는 과정은 다음과 같다.

- 단계 1) 초기해 선정 : 주어진 문제의 제약조건을 만족하도록 경험적인 방법으로 초기해를 생성한 후 이를 현재해로 설정하였다.
- 단계 2) 이웃해 생성 및 평가 : 탐색 영역 내에서 대상 문제나 탐색 전략에 따라 현재해에 대한 이웃해를 생성한 후 이를 목적함수에 따라 평가한다. 본 논문에서 사용한 이웃해 생성 방법은 그림 3에 나타내었고, 그 과정은 다음과 같다.

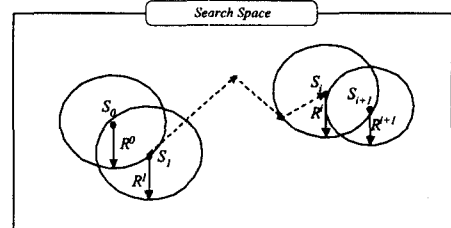


그림 3 이웃해 생성 방법

Fig. 3 Neighborhood decision

- ① 그림 3에서 보는 것처럼 제약조건을 만족하는 초기해  $S_0$ 에 대해서 탐색할 이웃해의 범위  $R'$ 를 결정한다.

- ② 식 (10)에 의해서 매 반복 횟수마다 탐색할 이웃해의 범위  $R'$  를 적응적으로 개선하였다.

$$R'^{t+1} = \begin{cases} C_d \times R' & \text{if } \alpha(t) > \delta \\ C_i \times R' & \text{if } \alpha(t) < \delta \\ R' & \text{if } \alpha(t) = \delta \end{cases} \quad (10)$$

여기서,  $\alpha(t)$  : t 반복 횟수의 이웃해 중에서 목적함수가 가장 좋은 상위 20%에 대한 표준편차

$R'$  : t 반복 횟수의 탐색할 이웃해의 범위

$C_d, C_i$  :  $R'$ 의 감소율과 증가율

$\delta$  : 상수

- ③ 이웃해의 생성 : Tabu 탐색법을 이용하여 TCSC용 퍼지제어기를 설계하기 위해서는 이웃해 생성이 중요하다. 본 논문에서는 식 (11)를 이용하여 이웃해를 생성하였다. 식 (11)에서 보는 것처럼, t+1 번째 반복횟수의 i 번째 이웃해( $S_i^{t+1}$ )는 t 번째 반복횟수에서 i 번째 이웃해( $S_i^t$ )에 식 (10)의 이웃해 범위( $R'^{t+1}$ )와  $\pm 1$  사이의 발생된 난수( $r$ )를 이용하여 생성하였다. 그리고 i 번째 이웃해는 TCSC용 퍼지제어기의 입·출력 이득( $SF_{il}, SF_{ib}, SF_{il}, SF_{ib}$ )으로 구성되어 있고, Tabu 탐색법을 이용하여 TCSC용 퍼지제어기의 입·출력 이득을 튜닝하는데 필요한 파라메타 수는 3개이다.

$$S_i^{t+1} = S_i^t + r \cdot R'^{t+1} \quad (11)$$

여기서,  $S_i^t$  : t번째 반복 횟수의 i번째 이웃해

$r$  : [-1, 1] 범위내의 난수

- ④ 이웃해 평가 : 위의 과정에서 생성된 각각의 이웃해를 평가하기 위하여 사용된 목적함수는 식 (12)와 같이 발전기 각속도의 절대치 편차의 합을 사용하였다.

$$\text{목적함수} = \text{Minimize} \sum_{k=1}^N |\omega_{ref} - \omega(t)| \quad (12)$$

여기서,  $\omega(t)$  : 발전기의 실제 각속도[rad/sec]

$\omega_{ref}$  : 발전기의 기준 각속도[rad/sec]

$N$  : 특정시간 동안 획득한 데이터의 수

- 단계 3) 모의해 생성(trial solution) : 단계 2)에서 생성된 이웃해 중에서 목적함수값이 가장 우수한 해를 모의해로 설정한다.

- 단계 4) Tabu Test: 모의해가 Tabu List에 포함되는지를 검토한다. 본 논문에서의 Tabu List는 반복횟수마다 탐색된 최적해로 구성되며 FIFO( first in first out )방법을 사용하였다. 현재까지 탐색한 최적해와 이웃해중에서 목적함수 값이 가장 우수한 모의해와의 유클리언 거리가 일정값 이하가 되는 경우에는 Tabu로 설정하였다. 만일 모의해가 Tabu List에 포함될 경우 단계 5)를 실행하고 그렇지 않을 경우 단계 6)를 실행한다.

- 단계 5) 열망조건: 모의해가 Tabu List에 포함되더라도 열망 조건을 만족할 경우에는 Tabu List에서 제외되어 다음 탐색시의 현재해로 설정된다. 본 논문에서는 모의해가 Tabu일지라도 현재까지 탐색

한 최적해보다 우수한 경우를 열망조건으로 사용하였다.

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

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

## 4. 사례 연구

### 4.1 계통 해석 조건

제안한 TCSC의 퍼지 제어기의 성능을 검증하기 위해 그림 4의 1기 무한대 계통에 대해 비선형 시뮬레이션을 수행하였다[14]. 그림 4에서 사용된 선로정수 값은  $R = 0[\text{pu}]$ ,  $X = 0.997[\text{pu}]$ ,  $G = 0.249[\text{pu}]$ ,  $B = 0.262[\text{pu}]$  이다. 비선형 시뮬레이션에 사용된 Tabu 탐색법의 시뮬레이션 계수는 표 1과 같고, 샘플링 시간은 0.01 [sec]이다. 표 1의 조건에서 Tabu 탐색법으로 TCSC 퍼지 제어기를 튜닝하였고, 튜닝된 TCSC 퍼지 제어기의 입·출력 이득은 각각 0.24, 3.50, 2.75이다. 제안한 TCSC 퍼지 제어기의 유용성을 입증하기 위해 Tabu 탐색법으로 이득을 최적화한 PD 제어기와 제어성능을 비교·검토하였다.

표 1 Tabu 탐색법의 시뮬레이션 계수

Table 1 Coefficients for simulation using Tabu Search

적용방법	이웃해의 개수	Tabu List의 수	Tabu 기준	$C_i$	$C_d$	$\delta$
Tabu Search	50	5	0.05	1.10	0.90	1.0

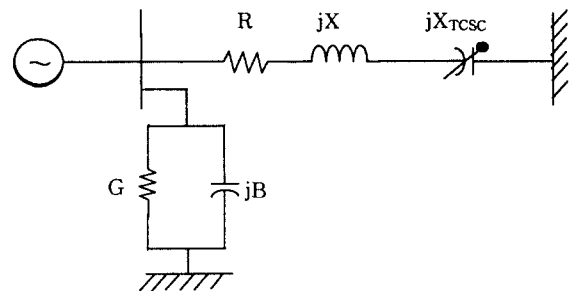


그림 4 성능평가에 사용된 1기 무한대 계통

Fig. 4 Single-machine infinite system used in performance evaluation

Tabu 탐색법에 의해서 최적화된 TCSC 퍼지 제어기와 PD 제어기와와의 제어성능을 비교하기 위해 사용된 해석 조건은 다음과 같다. 해석 조건은 TCSC 퍼지 제어기의 설계에 사용된 계통운전 조건과 TCSC 퍼지 제어기의 강인성 평가에 사용된 계통운전 조건으로 분류한다. TCSC 퍼지 제어기의 설계에 사용된 계통운전 조건은 Tabu 탐색법으로 TCSC 퍼지 제어기의 입·출력 이득 튜닝에 사용되었다. 본 논문에서 TCSC 퍼지 제어기의 설계에 사용된 계통운전 조건은 정상부하( $P_e=1.0$ ,  $Q_e=0.015$ )시에 3상 고장이 50[msec] 동안에 지속되다가 계통구성 변경없이 제거되는 경우를 이용하였다. TCSC 퍼지 제어기의 강인성 평가에 사용된 계통운전 조건은

표 2 제어기 성능평가에 사용된 시뮬레이션 조건  
 Table 2 Simulation cases used in evaluation of controller performance

시뮬레이션 사례	동작 조건 [pu]	외란 종류	고장시간 [msec]
경우1	정상부하시	A	50
경우2	( $P_e=1.0$ $Q_e=0.015$ )	B	-
경우3	중부하시	A	50
경우4	( $P_e=1.2$ $Q_e=0.015$ )	B	-
경우5	경부하시	A	50
경우6	( $P_e=0.7$ $Q_e=0.015$ )	B	-

여기서, A : 3상 지락 고장  
 B : 기계적인 토오크가 0.1 [pu] 증가

TCSC 퍼지 제어기의 설계에 사용된 계통운전조건과 다른 운전조건에서 3상 지락 고장 및 기계적인 토오크 변화에 대하여 TCSC 퍼지 제어기와 PD 제어기를 비교하기 위해 사용된 조건이다. 본 논문에서 사용된 해석 조건은 표 2와 같고, 경우1은 TCSC 퍼지 제어기의 튜닝시 사용된 계통운전 조건이고, 경우2~경우6은 TCSC 퍼지 제어기와 PD제어기의 강인성을 평가하기 위해 사용되었다.

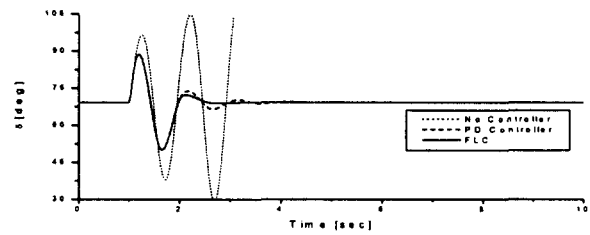
#### 4.2 시뮬레이션 결과

##### 1) 정상부하시 계통 해석

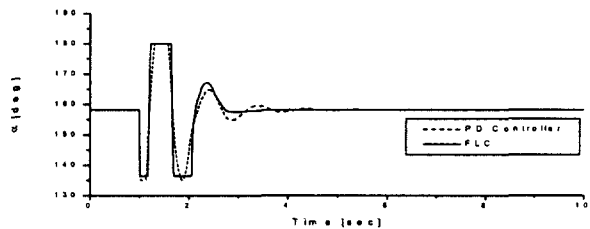
그림 5는 Tabu 탐색법을 이용하여 TCSC 퍼지 제어기의 튜닝에 사용된 정상부하시 모선단 근처에서 3상 지락 고장이 50[msec]동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 고장이 제거되었을 때, 제어기가 없는 경우, PD 제어기 및 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 있는 경우에 대해 발전기 위상각 및 점호각을 나타내었다. 그림 5에서 보는 것처럼 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 정정시간과 제동 효과 면에서 PD 제어기보다 더 좋은 제어 성능을 나타낼 수 있다. 그림 6은 TCSC 퍼지 제어기의 강인성을 평가하기 위해 튜닝에 사용되지 않은 계통 상태인 정상부하시 기계적인 토오크를 0.1[pu] 만큼 변화시켰을 때, 제어기가 없는 경우, PD 제어기 및 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 6에서 보는 것처럼 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기보다 더 좋은 제어 성능을 나타내었다.

##### 2) 중부하시 계통 해석

제안한 TCSC 퍼지 제어기의 강인성을 평가하기 위해 중부하시 모선단 근처에서 3상 지락 고장이 50[msec]동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 고장이 제거되었을 때, 제어기가 없는 경우, PD 제어기 및 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 그림 7에 보였다. 그림 8은 정상부하시 기계적인 토오크가 0.1[pu] 만큼 변화시켰을 때, 제어기가 없는 경우, PD 제어기 및 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 7과 그림 8에서 보는 것처럼 정상부하에서도 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기보다 더 좋은 제어 성능을 나타내었다.

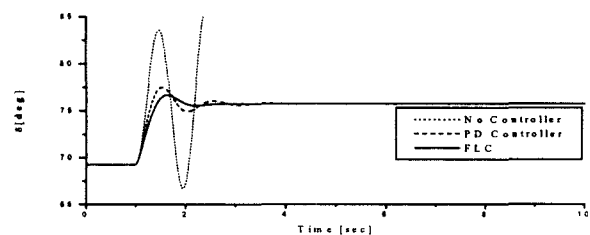


(a) 발전기 위상각

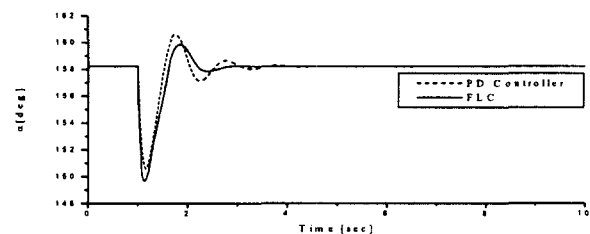


(b) TCSC 점호각

그림 5 정상부하시 3상 고장이 발생했을 때 발전기 응답  
 Fig. 5 Responses of generator when three-phase fault was occurred in nominal load



(a) 발전기 위상각



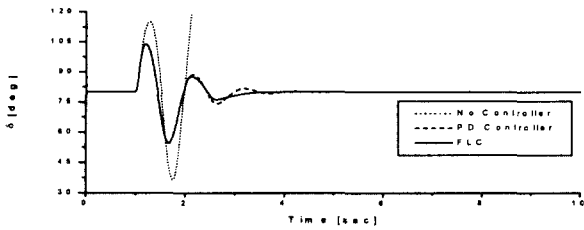
(b) TCSC 점호각

그림 6 정상부하시 기계적인 토오크가 0.1[pu]만큼 변화했을 때 발전기 응답

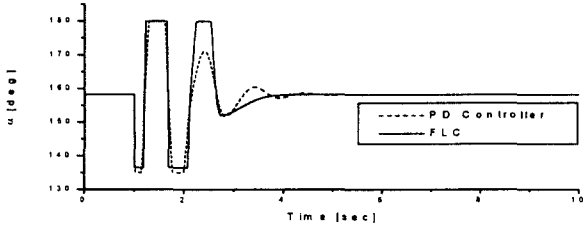
Fig. 6 Responses of generator when mechanical torque was changed as 0.1[pu] in nominal load

##### 3) 경부하시 계통 해석

제안한 TCSC 퍼지 제어기의 강인성을 평가하기 위해 경부하시 모선단 근처에서 3상 지락 고장이 50[msec]동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 고장이 제거되었을 때, 제어기가 없는 경우, PD 및 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 그림 9에 나타내었다. 그림 10은 기계적인 토오크가 0.1[pu] 만큼 변화시켰을 때, 제어기가 없는 경우, PD 제어기 및 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 9와 그림 10에서 보는 바와 같이 경부하에서도 제안한 TCSC 퍼지 제어기가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기보다 더 좋은 제어 성능을 보였다.

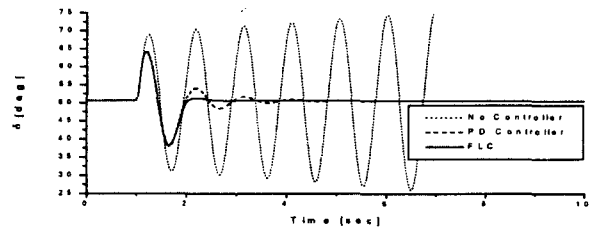


(a) 발전기 위상각

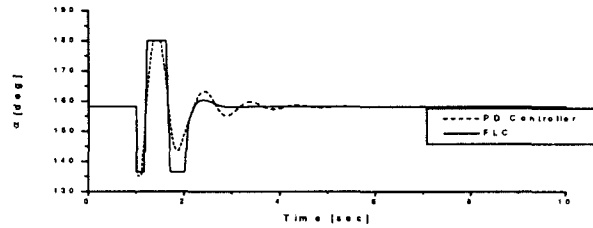


(b) TCSC 점호각

그림 7 중부하시 3상 고장이 발생했을 때 발전기 응답  
Fig. 7 Responses of generator when three-phase fault was occurred in heavy load

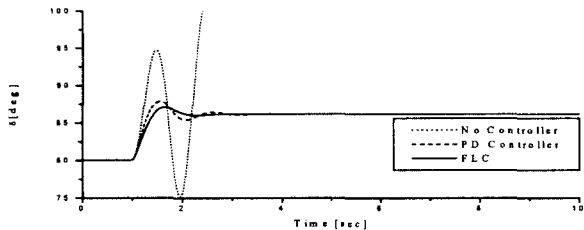


(a) 발전기 위상각

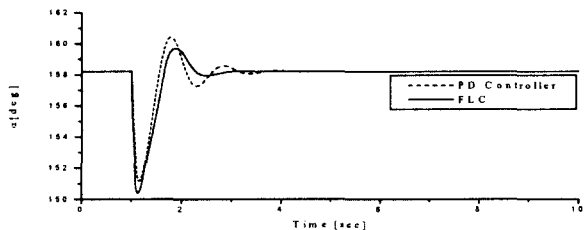


(b) TCSC 점호각

그림 9 경부하시 3상 고장이 발생했을 때 발전기 응답  
Fig. 9 Responses of generator when three-phase fault was occurred in light load

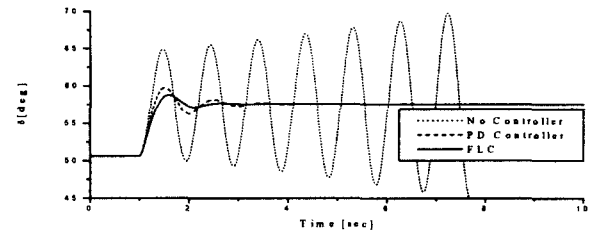


(a) 발전기 위상각

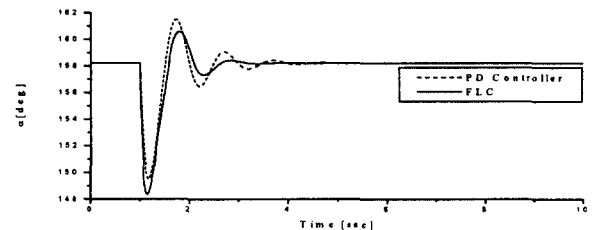


(b) TCSC 점호각

그림 8 중부하시 기계적인 토오크가 0.1[pu]만큼 변화했을 때 발전기 응답  
Fig. 8 Responses of generator when mechanical torque was changed as 0.1[pu] in heavy load



(a) 발전기 위상각



(b) TCSC 점호각

그림 10 경부하시 기계적인 토오크가 0.1[pu]만큼 변화했을 때 발전기 응답  
Fig. 10 Responses of generator when mechanical torque was changed as 0.1[pu] in light load

### 5. 결론

본 논문에서는 경험적인 탐색방법인 Tabu 탐색법을 이용하여 TCSC 퍼지 제어기를 설계하였다. Tabu 탐색시 탐색할 이웃해 범위를 적응적으로 변경하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다.

1기 무한대 계통에 대한 TCSC 퍼지 제어기의 튜닝에 사용된 정상부하시의 3상 지락 고장에 대해서 제안한 퍼지 제어기가 PD 제어기보다 정정시간과 제동 효과면에서 더 좋은 제어 성능을 보였다. 그리고 제안한 퍼지 제어기

의 강인성을 평가하기 위해 정상부하시 발전기 기계적인 토오크 변화와 중부하 및 경부하시의 3상 고장과 발전기 기계적인 토오크 변화에 대해 발전기 동특성을 해석하였다. 제안한 퍼지 제어기의 강인성 평가에 사용된 계통운전 조건에 대해서도 제안한 퍼지제어가 PD 제어기보다 더 좋은 제동 효과를 나타내었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호: 1999-2-30200-007-3) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] E. Larsen, C. Bowler, B. Damsky and S. Nilsson, "Benefits of Thyristor Controlled Series Compensation," *CIGRE* 38-04, 1992.

[2] W. A. Mittelstadt, B. Furumasa, P. Ferron and J. Paserba, "Planning and Testing for Thyristor Controlled Series Capacitor," *EPRI FACTS Conference*, 1992.

[3] A. L. B. do Bomfim, G. N. Taranto and D. M. Falcao, "Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms," *ISAP*, p. 79-83, 1997.

[4] L. Su, and T. Oyama, "Power System Stabilization with TCSC Based on  $H_{\infty}$  Theory," *IEE Japan*, Vol. 119-B, No. 2, 1999.

[5] X. Tan, L. Tong, Z. Yin, and D. Zhang, "A Fuzzy Scheme for Thyristor Controller Series Compensation in Transient of Power System," Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R. of China.

[6] M. A. Abido and Y. L. Abdel-Magid, "A Genetic-Based Power System Stabilizer," *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 26, pp. 559-571, 1998

[7] M. A. Abido and Y. L. Abdel-Magid, "Hybridizing Rule-Based Power System Stabilizers with Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 600-607, May, 1999.

[8] F. Glover and M. Laguna, *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, 1997.

[9] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Prentice Hall, 1998.

[10] K. R. Padiyar, *Power System Dynamic : Stability & Control*, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 1996.

[11] T. Kai, N. Takeuchi and T. Sato, "A Study of Thyristor Controlled Series Capacitor Models for Power System Stability Analysis," *IEE Japan*, Vol. 117-B, No. 7, 1997.

[12] Y. Baghzouz, and J. Black, "Waveform Analysis in Thyristor Controlled Series Compensated Transmission Lines," *Harmonics and Quality of Power Proceedings, Proceedings 8th International Conference*, Vol. 1, pp. 527-531, 1998.

[13] N. Christle, et al., "Advanced Series Compensation with Thyristor controlled Impedance," *CIGRE*, 38-05, 1992.

[14] 황기현, 새로운 적용진화 알고리즘을 이용한 전력계통 퍼지안정화장치의 설계, 부산대학교 박사논문, 2000. 2

부 록

- $\delta$  : 발전기 위상각 [deg]
- $\omega$  : 발전기 각속도 [rad/sec]
- $\omega_{ref}$  : 발전기 기준 각속도 [rad/sec]
- $H$  : 발전기 관성 정수 [MW · s/MVA]
- $T_m$  : 발전기 기계적 입력 [MW]
- $V_i$  : 발전기 단자 전압 [kV]

- $E_{fd}$  : 발전기 여자 전압 [kV]
- $X_d$  : 발전기 d축 동기 리액턴스 [ $\Omega$ ]
- $X_d'$  : 발전기 d축 과도 리액턴스 [ $\Omega$ ]
- $X_q'$  : 발전기 q축 과도 리액턴스 [ $\Omega$ ]
- $T_{do}'$  : 발전기 d축 과도 시정수 [sec]
- $I_d$  : 발전기 d축 전류 [kA]
- $I_q$  : 발전기 q축 전류 [kA]
- $E_q'$  : 발전기 q축 유효기전력 [kV]
- $K_A$  : 자동 전압조정 장치의 이득
- $T_A$  : 여자기 시정수 [sec]
- $V_s$  : 전력계통안정화장치의 출력 [kV]
- $V_{ref}$  : 발전기 단자 전압의 기준치 [kV]

저 자 소 개



김 우 근 (金宇根)  
 1965년 4월 7일 생. 1991년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 2000/8년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 현재 이영필합동특허법률사무소 전자2부 과장으로 근무  
 Tel : 02-588-8585

황 기 현 (黃琪鉉)  
 전기학회 논문지 50A권 5호 참조

김 형 수 (金亨洙)  
 전기학회 논문지 50A권 11호 참조

박 준 호 (朴俊瀨)  
 전기학회 논문지 50A권 5호 참조

박 종 근 (朴鍾根)  
 전기학회 논문지 50A권 5호 참조