

### 전력계통 동요억제를 위한 FACTS 제어기 설계

정문규\* 왕용필\*\* 정형환\*\* 이정필\* 허동렬\*\*\* 정동일\*\*\*\*  
\*한국전력공사 \*\*동아대학교 \*\*\*뉴그린테크 \*\*\*\*동의공고

### Design of FACTS Controller for Oscillation Damping of Power System

M. K. Chung\* Y. P. Wang\*\* H. H. Chung\*\* J. P. Lee\* D. R. Hur\*\*\* D. I. Chung\*\*\*\*  
\*KEPCO \*\*Dong-A Univ. \*\*\*New Green Tech. \*\*\*\*Dong-Eui Tech. High School

**Abstract** - In this paper, we design the Thyristor Controlled Series Capacitor(TCSC) supplementary controller for oscillation damping of power system. Here the supplementary controller is designed as a fuzzy logic-based precompensation approach for TCSC. This scheme is easily implemented simply by adding a fuzzy precompensator to an existing TCSC. And we optimize the fuzzy precompensator with a genetic algorithm for complements the demerit such as the difficulty of the component selection of fuzzy controller, namely, scaling factor, membership function and control rules. Simulation results show that the proposed control technique is superior to a conventional method in dynamic responses over the wide range of operating conditions and is convinced robustness and reliableness in view of structure.

#### 1. 서 론

FACTS 기술은 대용량 전력전자 기술을 이용하여 전력조류와 전압, 계통 안정도와 관련된 계통정수를 고속, 정밀하게 제어하여, 계통 안정도 향상과 전력조류의 효율적 제어를 통하여 전력수송 능력과 계통설비 이용률을 향상시키기 위한 기술이다.

현재까지 널리 알려진 FACTS 설비로는 선로와 병렬로 연결되어 모선의 전압 안정도를 유지하고 선로의 전송용량을 증대시키는 정지형 동기 조상기(Static Synchronous Compensator : STATCOM), 이와 동일한 구조를 가지며 선로와 직렬로 동작하는 정지형 동기 직렬 보상기(Static Synchronous Series Com- pensator : SSSC), STATCOM과 SSSC의 직렬 링크단을 공유시켜 선로로 전송되는 무효전력뿐만 아니라 유효전력도 총체적으로 보상 가능한 통합 조류 제어기(Unified Power Flow Controller : UPFC), 콘덴서를 직렬로 삽입하여 송전선로의 리액턴스를 조정하는 사이리스터 직렬 커패시터(Thyristor Controlled Series Capacitor : TCSC) 그리고 선로와 병렬로 연결되어 모선의 전압 안정도를 유지하기 위한 정지형 무효전력 보상기(Static Var Compensator : SVC) 등이 있다.

이중 TCSC는 FACTS의 구현에 있어 가장 핵심적인 기기의 하나로서 사이리스터 제어 리액터(Thyristor Controlled Reactor : TCR)와 커패시터의 병렬구조를 이루어져 있다. 이 TCSC는 정상상태에서 전력조류를 극대화시킬 뿐만 아니라 외란에 대해서도 억제효과가 있기 때문에 전력계통 동요억제 기능을 수행할 수 있다.

최근 이러한 전력계통 동요억제를 위해 TCSC의 보조 제어기를 이용하는 연구가 진행되고 있다. 보조 제어기로서는 그 구조가 간단하고 전력계통 동요억제를 향상시키며, 유용성이 있으며, 그 구현이 쉽기 때문에 현대 전력계통의 진동억제 목적으로 보편적으로 사용되고 있는

Lead/Lag 형태의 제어기가 많이 이용되고 있다. 이와 함께 다양한 선형 및 비선형 제어기를 이용하는 연구가 상당한 관심을 받고 있다. Chen 등은 극 배치기법을 이용하여 TCSC 상태 피드백 제어기를 제안하였다. 그러나 이 제어기는 모든 계통의 상태를 필요로 하기 때문에 실 계통에 적용하기가 어렵다는 단점이 있다. Chang 등은 평가함수를 최소화하는 TCSC 최적제어 전략을 개발하였지만, 계통 적용시 고전모델의 발전기 모델을 사용하였으며, 여자기 부분을 고려하지 않아 정확한 평가를 하지 못했다는 단점을 가지고 있다. 또한 Lie 등은 전력계통 과도 안정도 향상을 위해 퍼지 논리제어기를 제안하였는데, TCSC의 임피던스는 동기회전자각과 속도편차에 의해 조정되었다. 그러나 퍼지 논리제어기의 각 구성요소가 전문가의 경험에 의한 시행착오법에 바탕을 두고 있다는 단점을 가지고 있다. Zhao 등은 전력계통의 진동억제를 위해 TCSC의 H 최적화 기법을 이용한 강인한 제어기를 설계하였고, Dai 등은 TCSC 보조 제어기 설계시 학습 가능한 신경회로망을 이용함으로써 적응성과 안정도를 향상시키도록 하였다.

이러한 연구동향에 따라 본 논문에서는 전력계통의 동요억제를 위해서 종래의 일반적인 Lead/Lag 보조 제어기 방법과는 달리, 자연 생태계의 진화를 모의한 진격적 탐색기법과 퍼지이론을 기반으로 하여, TCSC의 새로운 보조 제어기를 설계하고자 한다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 비선형 시뮬레이션을 통하여 다양한 외란이 발생하였을 경우에 외란 억제 성능과 강인성에 대하여 고찰하였으며, 제안한 설계기법이 기존의 설계방식[3]보다 효율적이며 전력계통 동요억제에 효과적임을 보이고자 한다.

#### 2. TCSC를 포함한 전력계통의 정식화

##### 2.1 TCSC 모델

그림 1은 TCSC를 포함한 1기 무한대 모선 전력계통의 블록선도이다. TCSC는 전력의 흐름을 조절하기 위하여 전송선로에 직렬로 연결되어 있다. 그러므로 TCSC는 저주파 진동에 부가적인 댐핑을 제공할 수 있으며, 또한 전력전송 능력을 향상시킬 수 있다.

TCSC는 기본적으로 Open Loop 임피던스 제어방식으로 동작하며, 이를 제어하기 위해서 기준 임피던스 입력이 부착되어 있고, 장래에 부가적인 제어장치를 부착할 수 있도록 보조입력을 가지고 있다. 정상상태에서 선로 조류제어를 위하여 임피던스 지정치로 운전되며, 외란에 의한 과도상태에서는 보조 입력신호를 제어함으로써 안정도를 개선할 수 있다. TCSC의 제어원리는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 외란이 인가되었을 경우 제어대상 전압과 전류에 의한 임피던스를 측정하여 기준 임피던스와의 차이에 따라서 사이리스터 점호각 제어를 통하여 전체 TCSC의 리액터 값을 변화시켜 임피던스 유지에 필요한 보상전류  $I_{TCSC}$ 를 흐르게 하는 것이다.

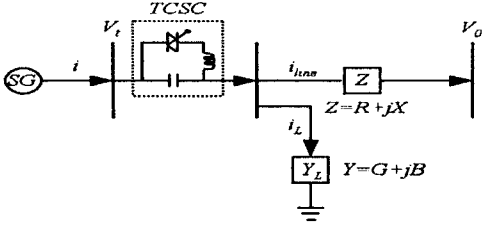


그림 1 TCSC를 포함한 1기 무한대 모션 전력계통

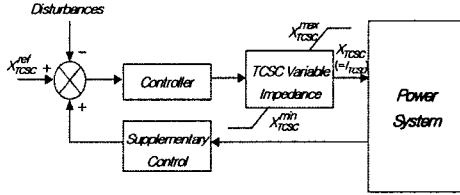


그림 2 보조제어를 포함한 TCSC 제어의 블록선도

입력되는 임피던스 지령신호는 이에 상응하는 점호각 제어와 TCSC의 고유응답에 의하여 원하는 임피던스의 구현에 시지연이 발생한다. 전력계통 동요해석의 주파수 범위인 0.1Hz에서 2Hz까지의 현상에 적합한 TCSC의 모델로서는 이러한 시지연을 1차 지연요소를 표현할 수 있다. 본 논문에서는 이 모델을 채택하여 TCSC의 시지연을 간단한 1차 요소로 표현하였다. 여기서 채택한 모델은 식(1)과 같고, 그 블록선도는 그림 3과 같이 나타내었다.

$$X_{TCSC} = \frac{K_{TCSC}}{T_{TCSC}} (X_{TCSC}^{ref} + u_{TCSC} - X_{TCSC}) \quad (1)$$

$$X_{TCSC}^{min} \leq X_{TCSC} \leq X_{TCSC}^{max}$$

여기서,  $X_{TCSC}$ 는 TCSC의 임피던스를 나타내며, 단위는 단위법이다.  $T_{TCSC}$ 는 TCSC의 시정수,  $K_{TCSC}$ 는 TCSC의 이득,  $X_{TCSC}^{ref}$ 는 정상운전시 기준 임피던스 입력신호를 나타낸다.  $u_{TCSC}$ 는 보조제어 입력으로서 계통에 미치는 과도적인 특성을 개선하기 위하여 설계된 제어기의 출력신호가 입력될 수 있다.  $X_{TCSC}^{max}$  및  $X_{TCSC}^{min}$ 는 TCSC 용량의 상·하한치를 나타낸다.

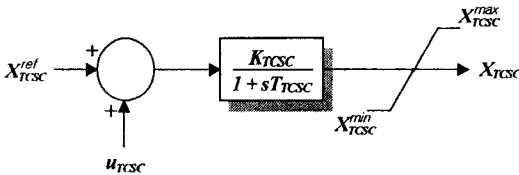


그림 3 TCSC의 블록선도

## 2.2 TCSC를 포함한 고정자 대수 및 망 방정식

그림 1에서 나타내고 있는 발전기[1], 선로에 위치한 TCSC, 그리고 부하 어드미턴스와 선로 임피던스를 포함한 전송선로를 하나의 전체적인 전력계통으로 표현하기 위하여 대수 방정식 및 망 방정식으로 이를 설명한다. 그림 1에서 발전기 단자전압 및 d축, q축 성분은 식(2)와 같다.

$$V_i = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}, \quad v_d = x_d i_d, \quad v_q = E_q' - x_d' i_d \quad (2)$$

그림 1에서 TCSC는 선로에 위치해 있고, TCSC 제어를 고려한 임의의 단자전압  $V_i$ , d축과 q축 성분은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i = V_i - jX_{TCSC} i, \quad v_d' = (x_d + X_{TCSC}) i_d$$

$$v_q' = E_q' - (x_d' + X_{TCSC}) i_d \quad (3)$$

여기서,  $i$ 는 발전기 전기자 전류이다. 부하전류  $i_L = V_i Y_L$ 이고, 선로전류  $i_{line} = i - i_L$ 이며, 무한 모션 전압  $V_o = V_i - i_{line} Z$ 이다. 또한, 무한 모션전압의 d축과 q축 성분은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{od} = V_o \sin \delta = C_1 v_d' - C_2 v_q' - R i_d + X i_q$$

$$v_{oq} = V_o \cos \delta = C_2 v_d' + C_1 v_q' - X i_d - R i_q \quad (4)$$

여기서, 사용된  $C_1, C_2$  값은 식(5)와 같다.

$$C_1 = 1 + RG - XB, \quad C_2 = XG + RB \quad (5)$$

식(2)를 식(4)에 대입하면, 식(6)을 얻을 수 있다.

$$C_3 i_d + C_4 i_q = V_o \sin \delta + C_2 E_q'$$

$$C_5 i_d + C_6 i_q = V_o \cos \delta - C_1 E_q' \quad (6)$$

여기서, 사용된  $C_3 - C_6$  값은 식(7)과 같다.

$$C_3 = C_2 (x_d' + X_{TCSC}) - R, \quad C_4 = C_1 (x_q + X_{TCSC}) + X$$

$$C_5 = -C_1 (x_d' + X_{TCSC}) - X, \quad C_6 = C_2 (x_q + X_{TCSC}) - R \quad (7)$$

$i_d$ 와  $i_q$ 를 구하기 위하여 식(4)를 연립하여 계산하면, 발전기, TCSC 및 선로에 관한 식(8)을 구할 수 있다.

$$i_d = \frac{RC_1 + XC_2}{R^2 + X^2} v_d' + \frac{XC_1 - RC_2}{R^2 + X^2} v_q' - V_o \frac{R \sin \delta + X \cos \delta}{R^2 + X^2}$$

$$i_q = \frac{RC_2 - XC_1}{R^2 + X^2} v_d' + \frac{RC_1 + XC_2}{R^2 + X^2} v_q' + V_o \frac{X \sin \delta - R \cos \delta}{R^2 + X^2} \quad (8)$$

## 3. 유전 알고리즘을 이용한 TCSC 보조 제어기의 퍼지 전 보상기 설계

본 논문에서는 전력계통의 동요억제를 위해 TCSC의 Lead/Lag 보조 제어기 입력단에 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 이용한 퍼지 전 보상기[2]를 부착하였다. 이것은 Lead/Lag 제어기의 파라미터를 고정시켜 두고 기준점을 변경하는 방법과 비선형적인 전력계통에 강인한 지능제어 이론을 제안한 것이다. 여기서 사용된 GA는 변수 코딩시간을 감소시키고 정확성을 유지할 수 있도록 하기 위해 최적화 대상을 긴 염색체 구조로 구성하고, 토너먼트 선택방법과 엘리트스트 선택방법을 병행한 실변수 GA를 이용하였다.

GA를 이용한 TCSC 보조 제어기의 퍼지 전 보상기의 블록선도는 그림 4와 같은데, GA를 이용한 퍼지 전 보상기를 이용하여 Lead/Lag 제어기 입력단의 기준점을 변경시켰다. GA를 이용하여 퍼지 전 보상기의 구성요소(스케일링 팩터, 멤버쉽 함수, 제어규칙) 최적화시 부분적인 최적화하는 달리 모든 퍼지 전 보상기의 구성요소를 최적화시키도록 하였다.

그림 4에서 출력과 기준입력 그리고 이들의 오차를 이용하여 페루프 시스템을 구성할 수 있다. 이 값들이 변경된 기준입력과 변경된 오차로 변환되어 전 보상 형태의 구조를 만들어 낸다. 그림 4에서 Lead/Lag 제어기는 구조가 고정된 형태일 뿐만 아니라 파라미터도 양호하게 조정된 고정된 형태로서, 안정성에 우선순위를 두어 구조와 파라미터는 변동하지 않도록 하였다. 이러한 제어구조는 종래의 TCSC 보조 제어기 설계시 파라미터를 최적화하는 이득변경 방법이 제어대상 특성이 변화할 때마다 파라미터를 재설정해야하는 부담 때문에 초기에 설정한 파라미터로 운전중인 점과 비교해 볼 때 보다 더 안정적인 구조이다.

그림 5는 퍼지 전 보상기의 최적화 대상 염색체 구조이며, 그림 6은 GA를 이용한 퍼지 전 보상기의 각 구성요소가 최적화되는 과정과 전체적인 전력계통 동요억제 특성해석 흐름도이다.

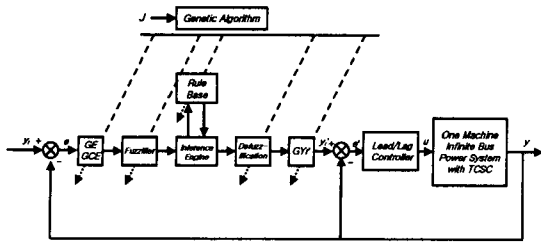


그림 4 GA를 이용한 TCSC 보조 제어기의 퍼지 전 보상기

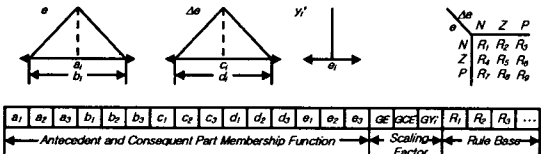


그림 5 제안된 검색체 구조

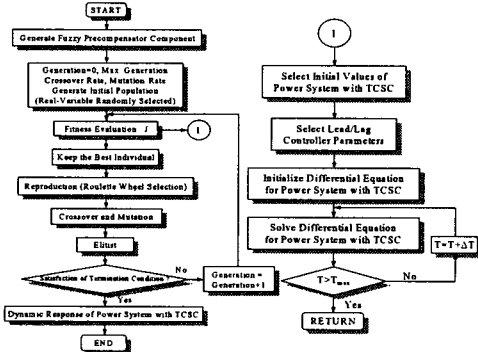


그림 6 TCSC를 포함한 전력계통의 특성해석 흐름도

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

##### 4.1 정상부하시 ( $P_0=1.0$ [p.u.], $Q_0=0.015$ [p.u.], $X_{TCSC}=0.0$ [p.u.])

그림 7은 제안한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 정상부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 제거되는 경우에 대해 각속도, 회전자각, 단자전압, TCSC 임피던스의 동특성 응답을 나타내었다. 제안한 제어기의 경우가 이득변경에 의한 TCSC 보조 제어기[3]의 경우에 비해 각속도의 최대 편차량에서 25.30%, 정정시간의 특성에서 30.18% 우수한 동특성을 나타내었다. 단자전압의 최대 편차량은 다소 속속성이 떨어짐을 보이나 정정시간 특성에서 보다 나은 특성을 보이고 있어 저주파 진동을 억제하는데 효과적임을 알 수 있다. TCSC 임피던스 응답 특성에서는 외란 발생 후 약 2초 후에 정상부하 조건인 0.0[p.u.]에 도달함을 알 수 있다.

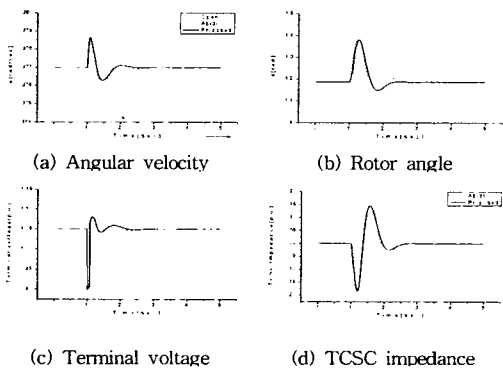


그림 7 정상부하시 3상 단락에 대한 응답

##### 4.2 중부하시 ( $P_0=1.1$ [p.u.], $Q_0=0.4$ [p.u.], $X_{TCSC}=-0.2$ [p.u.])

그림 8과 같이 중부하시 특성에서도 제한한 제어기의 경우가 이득변경에 의한 TCSC 보조 제어기의 경우에 비해 최대 편차량 및 정정시간의 특성에서 우수한 동특성을 나타내었다.

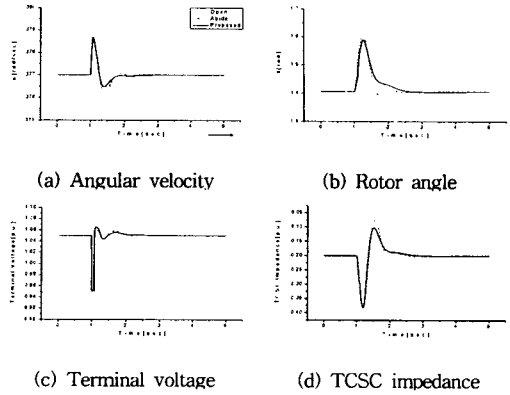


그림 8 중부하시 3상 단락에 대한 응답

#### 4. 결론

본 논문에서는 전력계통의 동요억제를 위하여 종래의 일반적인 방법과는 달리, 자연 생태계의 진화를 모의한 진역적 탐색기법과 퍼지이론을 기반으로 하여 FACTS로 분류되는 여러 가지 기기 중에서 직렬구조를 가지는 TCSC의 보조 제어기로서 GA를 이용한 퍼지 전 보상기를 설계하였다.

중요한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 논문에서 제안한 새로운 형태의 TCSC 보조 제어기는 정상상태에서의 전력조류 극대화는 물론 과도시에 저주파수 진동과 같은 동요억제 문제에 더욱 효과적임을 알 수 있었다.
2. 종래의 Lead/Lag 형태의 TCSC 보조 제어기의 상당수가 계통의 안정성을 고려하여 초기 파라미터 튜닝 상태이거나 운전되지 않고 있는 실정을 감안할 때 파라미터를 고정시켜 두고 기준점을 변경하는 방법이 파라미터를 최적화하는 이득변경 방법에 비해 현실적이고, 더 간단히 설치될 수 있는 제어구조를 가지고 있음을 알 수 있었다.
3. GA를 이용한 퍼지 전 보상 제어기는 비선형적인 전력계통의 각종 선로 파라미터들이 가지고 있는 불확실성을 해결할 수 있었다.
4. GA를 이용하여 퍼지 전 보상기의 구성요소를 최적화시킬 때에 부분적인 최적화와는 다르게 모든 퍼지 전 보상기의 구성요소를 최적화시켰다.
5. 변수 코딩시간을 감소시키고 정확성을 유지할 수 있도록 하기 위해 최적화 대상을 긴 검색체 구조로 구성하고, 토너먼트 선택방법과 엘리티스트 선택방법을 병행한 실변수 GA를 이용함으로써, 2진 구조의 단순 GA보다 평가함수 최소화에 더 효과적임을 알 수 있었다.
6. 두 가지 경우의 사례연구를 통하여 종래의 보조 제어기에 비해 효율적이며, 전력계통 동요억제에 우수함을 알 수 있었다.

#### [참고 문헌]

[1] Y. N. Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic Press, 1983.  
 [2] J. H. Kim, K. C. Kim and E. K. P. Chong, "Fuzzy Precompensated PID Controllers", IEEE Trans. on Control Systems, Vol. 2, No. 4, pp. 406-411, 1994.  
 [3] M. A. Abido, "Pole placement technique for PSS and TCSC-based stabilizer design using simulated annealing", Elec. Power and Energy Systems, Vol. 22, pp. 543-554, 2000.