

신경회로망을 이용한 TCSC 적용 LQG 제어의 설계 파라미터 선정기법에 관한 연구

◦ 김태준, 김영수, 이병하
인천대학교 전기공학과

A Study on Design Parameter Selection of the LQG Control of TCSC Using Neural Network

◦ Tae-Joon Kim, Young-Su Kim, Byung-Ha Lee
Dept. of Electrical Engineering, University of Incheon.

Abstract - In this paper we present a Neural network approach to select weighting matrices of Linear-Quadratic-Gaussian(LQG) controller for TCSC control. The selection of weighting matrices is usually carried out by trial and error. A weighting matrices of LQG control selected effectively using Neural network. It is shown that simulation results in application of this method to one machine infinite bus system are satisfactory

1. 서 론

최근 전력계통의 추세는 거대화되고 있고 전력수요 또한 점점 더 증대하고 있다. 이에 전력회사는 증가하고 있는 전력수요에 맞추어 발전설비 및 송배전설비의 신규 건설을 추진하고 있지만 환경적 문제와 부지 확보문제 등의 제약 때문에 어려움을 겪고 있다. 이에 따라 계통 연계 운영 등을 통한 기존설비의 이용률을 극대화함으로써 송전 선로를 신규로 건설하지 않고도 송전용량을 증대시키는 방안이 강구 되어왔다. [1]

이러한 일환으로서 기존 전력계통의 송전용량을 최대한 열적 상한까지 사용하기 위한 새로운 개념의 전력전송방식인 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System, FACTS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. FACTS는 전력수송설비에 전력용 반도체 스위칭소자를 이용한 제어기술을 도입함으로써, 전력수송설비의 기능을 고도화하고 설비 이용률의 극대화를 이룩하기 위한 개념의 전력 시스템이다. 신전력전송시스템을 위해 개발을 추진하고 있는 여러 가지의 기기중 신전력전송시스템의 구현을 위한 핵심기기로는 위상변이기 (Solid State Phase Shifter), 사이리스터 제어형 직렬보상기 (Thyristor Controlled Series Compensation), 정지형 무효전력보상기(Static VAR Compensator) 등이 있고 이들 기기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 FACTS 설비중 TCSC는 선로에 직렬로 연결되어 선로의 임피던스를 제어하여 전력수송능력 향상 및 전력시스템 동요를 억제하는데 활용될 수 있다. 또한 TCSC는 연속적이고 신속한 제어를 통하여 전력시스템의 안정 운전영역을 확대함으로써 안정도 및 신뢰도를 증대시킬 수 있다. 전력시스템은 전 상태변수를 다 측정하기 어려우므로 본 논문에서는 LQG제어기를 적용한다. 전력시스템의 동요억제를 향상시키기 위해서 TCSC를 적용하고 1기 무한대 모션 모델에 적용한다. LQG 제어는 현실적으로 측정할 수 있는 출력만을 이용하여 시스템의 상태변수를 추정한 후, 추정된 상태변수를 이용하여 제어기를 설계하므로 실제구현에 있어 용이하다고 할 수 있다. 그런데 LQG 제어기의 성능은 가격함에 수에 포함되어 있는 가중행렬의 선정에 따라서 민감하게 영향을 받으므로 적절한 가중행렬 선정이 요구된다. 기

준의 가중행렬 선정은 시행착오적 방법으로서 상당한 시간과 노력이 요구되므로 본 논문에서는 신경회로망을 이용해 효과적으로 적절한 가중행렬을 선정하는 것을 연구하였다.

2. TCSC 와 전력계통 모델

2.1 TCSC 모델

TCSC의 구조는 기본적으로 개루프 임피던스 입력이 부착되어 있고, 장래에 부가적인 제어장치를 부착할 수 있도록 보조 입력을 가지고 있다. 정상상태에서 선로조류제어를 위하여 임피던스 지정치로 운전되며, 외란에 의한 과도상태에서는 보조 입력 신호를 제어함으로써 안정도를 개선할 수 있다. 제어기로부터 입력되는 임피던스 신호는 이 임피던스를 구현하는 점호각으로 변환된다. 이로부터 원하는 임피던스로의 전이는 약간의 시 지연이 발생한다. 이러한 시 지연은 전력 계통 안정도 해석에서 다음과 같은 1차 지연 요소로 고려할 수 있고, 그 블록 선도를 그림1에 나타내었다.

$$T_C \dot{X}_C = -X_C + X_{ref} + X_{sup} \quad (1)$$

여기에서 X_C 는 TCSC의 임피던스를 나타내며 단위는 Per Unit이다. X_{ref} 는 정상 운전 시의 기준 임피던스 입력 신호가 부가되는 단자이고, X_{sup} 는 외부의 적당한 신호를 이용하여 TCSC가 계통에 미치는 과도적인 특성을 개선하는 데 사용될 수 있는데 이 연구에서 LQG 제어기의 출력이 된다.

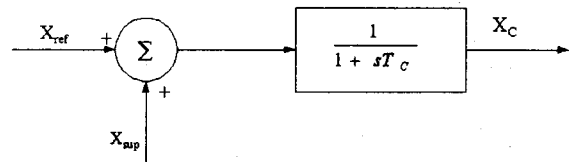


그림 1. TCSC 모델의 블록선도

2.2 전력계통 모델

본 논문에서는 시스템의 특성을 잘 반영하면서도 해석이 용이한 1기 무한대 모션 계통의 선로에 TCSC가 부착된 그림2와 같은 모델을 이용하였다.

2.2.1 발전기 모델

발전기 모델은 고차의 모델부터 간략화 모델까지 여러 가지 모델이 존재하나 본 논문에서는 과도 및 증강기 안정도 해석에 가장 널리 사용하는 2축 모델을 사용하였다. 이 모델은 과도 리액턴스 동특성을 가지는 내부 전압을 상태 변수로 나타내고, 여자권선과 댐핑권선의 효과를 고려하며, 고전적 모델에서의 접근방식을 적용하기

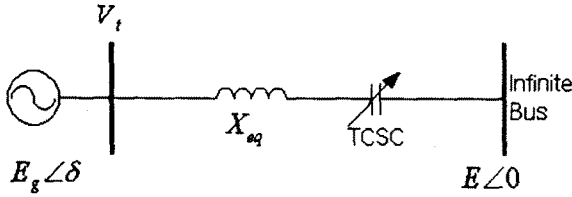


그림 2. TCSC가 포함된 1기 무한 모선 계통용이다. 발전기 모델식은 다음과 같다.

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{do}} \{-E'_q - (x_d - x'_d) i_d + E_{FD}\} \quad (2)$$

$$\dot{E}'_d = \frac{1}{T_{do}} \{-E'_d - (x_q - x'_q) i_q\} \quad (3)$$

$$\dot{\delta} = \omega_0 (\omega - 1) \quad (4)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} \{-(E'_d i_d + E'_q i_q) - D(\omega - 1) + T_m\} \quad (5)$$

2.2.2 여자기 모델

고전적 안정도 해석에서는 통상 외란시에 여자기의 효과를 무시하였으나, 근래에는 응답이 빠른 여자가가 개발되고 있으며, 이의 고려가 안정도 해석에 큰 영향을 미칠 수 있음이 알려졌다. 따라서, 안정도 해석시에 여자기의 효과를 고려하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 IEEE Type 1 여자를 대표적인 모델로서 채택하였다. 이 모델의 블록 선도는 그림 3이며, 모델식은 다음과 같다.

$$\dot{V}_R = \frac{1}{T_a} \left\{ K_a R_f - \frac{K_a K_f}{T_f} E_{FD} - V_R - K_a V_t + K_a V_{ref} + K_a V_{sup} \right\} \quad (6)$$

$$\dot{E}_{FD} = \frac{1}{T_e} \{ -(K_e + S_e) E_{FD} + V_R \} \quad (7)$$

$$\dot{R}_f = \frac{1}{T_f} \left\{ R_f + \frac{K_f}{T_f} E_{FD} \right\} \quad (8)$$

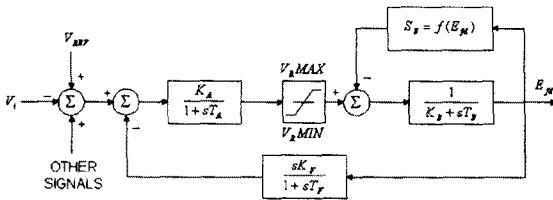


그림 3. IEEE Type 1 여자기 모델

2.2.3 TCSC가 포함된 1기 무한대 모선 계통의 선형화 모델

TCSC가 포함된 전력 계통의 상태 공간 모델을 동작 점에서 선형화 하면 다음과 같은 선형 모델을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \Delta x = A(x_0) \Delta x + B(x_0) \Delta u \quad (9)$$

위 식에서 상태 벡터는 발전기, 여자기, TCSC의 상태를 나타내고 입력은 TCSC의 보조 입력 신호이다.

3. Linear Quadratic Gaussian(LQG) 제어기 설계

LQG 제어기의 설계를 위한 확률 선형 동적 시스템은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + \xi \quad (10)$$

$$y = Cx + \theta \quad (11)$$

여기서 ξ 는 강도 Σ 인 외란, θ 는 강도 Θ 인 센서 잡음이고 둘다 0-평균 White noise로 가정한다.

이 경우 Performance index는 아래와 같은 통계학적 값으로 설정할 수 있다.

$$J = E \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x^T Q x + u^T R u) dt \right] \quad (12)$$

이때 Kalman 필터의 동역학(dynamics)과 Linear Quadratic(LQ) 제어법칙은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x} + Bu + H(y - C \hat{x}) \quad (13)$$

$$u = -G \hat{x} \quad (14)$$

여기서 \hat{x} 는 추정된 상태변수이다.

위 식에서 Kalman 필터의 동역학은 필터게인 행렬 H 에 의해 지배되는 데, 이 H 는 아래의 필터대수 Riccati equation의 해로부터 구해진다.

$$AP + PA^T + E - PC^T \Theta^{-1} CP = 0 \quad (15)$$

$$H = PC^T \Theta^{-1} \quad (16)$$

또 제어게인 행렬 G 는 아래의 제어대수 Riccati equation의 해로부터 구해진다.

$$KA + A^T K + Q - KBR^{-1} B^T K = 0 \quad (17)$$

$$G = R^{-1} B^T K \quad (18)$$

다음의 그림4는 시스템과 LQG 제어기의 블록 선도이다

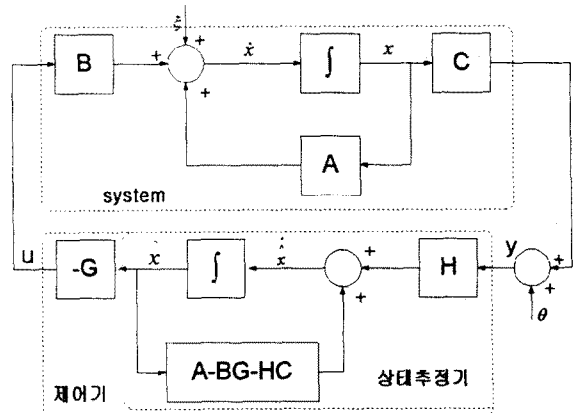


그림 4. 시스템, LQG 제어기의 블록선도

다.

본 논문에서 LQG제어기의 입력은 TCSC 설치 지점에서 측정하기 쉬운 선로의 전류이고 출력은 TCSC의 X_{sup} 이다.

4. 코호넨 네트워크 적용

4.1 경쟁학습

코호넨의 학습에서 각 뉴런은 연결강도 벡터와 입력벡터가 얼마나 가까운가를 계산한다. 그리고 각 뉴런들은 학습할 수 있는 특권을 부여받으려고 서로 경쟁하는데 거리가 가장 가까운 뉴런이 승리하게 된다. 이 승자 뉴런이 출력신호를 보낼 수 있는 유일한 뉴런이다. 또한 이 뉴런과 이와 인접한 이웃 뉴런들만이 제시된 입력벡터에 대하여 학습이 허용된다.

4.2 자기조직화 형상지도(Self-organizing Feature Maps) 알고리즘

[단계 1] 연결강도를 초기화한다. N개의 입력으로부터 M개의 출력 뉴런 사이의 연결강도를 작은 값의 임의의 수로 초기화한다.

[단계 2] 새로운 입력벡터를 제시한다.

[단계 3] 입력벡터와 모든 뉴런들간의 거리를 계산한다. 입력과 출력 뉴런 j 사이의 거리 d_j 는 다음 식과 같이 계산한다.

$$d_j = \sum_{i=0}^{N-1} (x_i(t) - w_{ij}(t))^2 \quad (19)$$

여기서 $x_i(t)$ 는 시각 t 에서의 i 번째 입력벡터이고 $w_{ij}(t)$ 는 시각 t 에서의 i 번째 입력벡터와 j 번째 출력 뉴런 사이의 연결강도이다.

[단계 4] 최소 거리 d_j 인 출력뉴런 j^* 를 선택한다.

[단계 5] 뉴런 j^* 와 그 이웃 반경내의 뉴런들의 연결강도를 다음식에 의해 조정한다.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha (x_i(t) - w_{ij}(t)) \quad (20)$$

여기에서 j 는 j^* 의 이웃 반경내의 뉴런이고 i 는 0에서 N-1까지의 정수값이다. α 는 0과 1사이의 값을 가지는 이득항(gain term)인데 시간이 경과함에 따라 점차 작아진다.

[단계 6] 단계 2로 가서 반복한다.

5. 시뮬레이션

본 논문에서는 TCSC의 시정수를 0.1초로 하였고 1기 무한 모션 계통의 주요 파라미터는 다음과 같다.

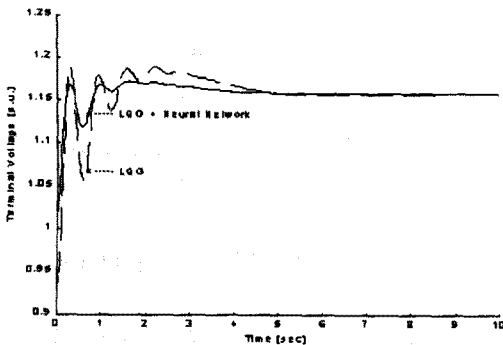


그림 5. 발전기의 단자 전압

$H=3.01, D=1.0, T_{do}=5.89, T_{\infty}=0.6, K_A=25,$
 $K_E=0.0445, K_F=0.16, x_d=1.3125, x_q=1.2578,$
 $x_d'=0.1813, x_q'=0.1813, T_A=0.06, T_E=0.5,$
 $T_F=1.0$ 제어기의 가중행렬등의 설계 파라미터 선정

은 모델의 여러 상태로 반복 학습시킨 코호넨 네트워크에서 구하여진 설계 파라미터로 제어기를 설계하였다. 또한 시뮬레이션 사례로는 정상 상태의 모델 계통에 부하등의 외란이 들어오는 것으로 가정하였다.

그림 5,6,7에서 볼 수 있듯이 코호넨 신경회로망을 이용해 선택되어진 가중행렬로 LQG 제어기를 설계하였을 때 제어 성능이 향상되는 것을 알 수 있었다.

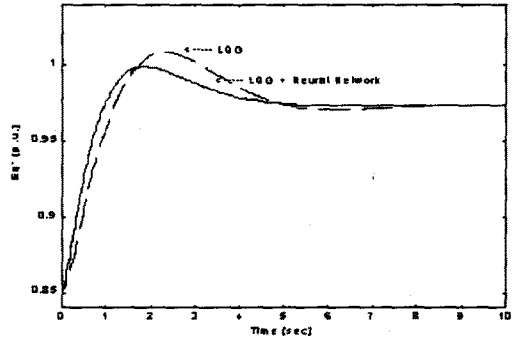


그림 6. q축 내부 전압 (Eq')

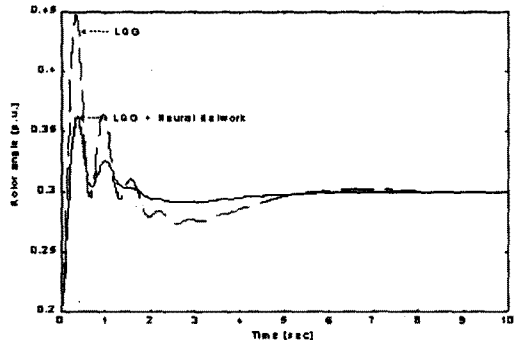


그림 7. 회전자 위상각

6. 결 론

본 논문에서는 신 개념의 전력전송방식인 FACTS 설비중 TCSC의 제어기로 LQG 제어를 설계하였고 LQG 제어 성능에 영향을 미치는 가중행렬등의 설계파라미터를 코호넨 신경회로망을 이용해 선택하였다. 또한 제어기의 입력을 TCSC 설치 단자의 전류로 선택하여 실제 적용기를 설계하기 용이하도록 하였다. 본 논문에서 제안한 선정기법으로 선택된 가중행렬로 TCSC가 포함된 1기 무한대 모션 계통에 적용한 결과 제어 성능이 향상되는 것으로 나타났다.

(참 고 문 헌)

- [1]N. G. Hingorani, "FACTS - Flexible AC transmission System", EPRI Workshop, Cincinnati, Ohio, Nov, 14-16, 1990.
- [2]P. M. Anderson, A. A. Foud, Power System Control and Stability, Iowa State Univ. Press, 1977.