

전력시스템 안정도 향상을 위한 SVC용 GA-LQ 제어기 설계

허동렬* · 박인표* · 정문규* · 정형환* · 안병철** · 김해재***
 (* : 동아대학교 전기공학과, ** : 부산울산중소기업청, *** : 마산대학 전기과)

Design of GA-LQ Controller in SVC for Power System Stability Improvement

D.R. Hur* · I.P. Park* · M.K. Chung* · H.H. Chung* · B.C. Ahn** · H.J. Kim***
 (* : Dong-A University, ** : BUSMBA, *** : Masan College)

Abstract - This paper presents a new control approach for designing a coordinated controller for static VAR compensator system. A SVC constructed by a Fixed Capacitor and a Thyristor Controlled Reactor is designed and implemented to improve the damping of a synchronous generator, as well as controlling the system voltage. A design of linear quadratic controller based on optimal controller depends on choosing weighting matrices. A coordinated optimal controller is achieved by minimizing a quadratic performance index using dynamic programming techniques. The selection of weighting matrices is usually carried out by trial and error, which is not a trivial problem. We proposed a efficient method using GA of finding weighting matrices for optimal control law. Thus, we prove the usefulness of proposed method to improve the stability of single machine-infinite bus with SVC system.

GA를 이용하여 최적의 가중행렬을 결정하는 기법을 제안하였다. 제안한 가중행렬 제어기법을 SVC를 포함한 1기 무한대 모선 계통의 LQ 제어기 설계에 적용하여 다양한 부하의란에 대한 제어기의 안정화 효과를 관찰함으로써 제안한 방법의 효용성을 검증하였다.

2. 전력 시스템 모델

그림 1은 시스템의 개략적인 모델을 나타내고 있다. 전력시스템은 무한모선에서 고전압 송전선로를 경유하여 동기발전기에 연결되어, 발전기 단자에 정지형 무효전력 보상장치가 설치되어 있다. 이 동기발전기는 계차 전압상·하한치를 조절할 뿐만 아니라 고속 안정화 여자시스템으로 구성되어 있다. 또한 그림 2에서 나타낸 바와 같이 전압 조절 능력을 갖춘 IEEE type ST1 2차 여자기로 구성된 발전기 모델을 이용하였다.

1. 서 론

기존 전력시스템의 송전용량을 최대 열적 한계용량까지 증가시키므로 전력수송 설비시설의 건설부담을 저감시킬 수 있는 새로운 개념의 전력전송 방식인 유연송전 시스템 중에서도 사이리스터 제어 리액터와 고정 커패시터에 의해 만들어진 무효전력 보상기는 전력 산업체에서 널리 채용되었다. SVC는 전력 시스템의 안정도를 향상시키며, 동기 발전기에 대한 추가 제동 토크를 제공할 수 있고 시스템 진동의 제동을 증가시킬 수 있다. 그러나 SVC의 제동 효과만으로는 시스템의 안정도 및 성능 개선을 완벽히 실행할 수 없다.

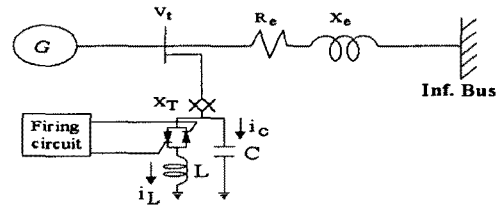


Fig. 1 Power System Configuration

따라서 새로운 전력 제어설비의 기능과 효율성을 극대화하기 위하여 최적제어를 위한 방안으로 LQ(Linear Quadratic) 제어기를 제안하고자 하였다.

최적제어를 위한 제어기의 성능은 일반적으로 판정 기준이 되는 2차 평가함수에서의 상태 가중치와 제어 가중치가 제어효과에 중요한 역할을 담당하고 있다. 일반적으로 기존의 가중행렬 선정은 경험에 의한 반복작업으로 시행착오에 따라 가중치를 선정하였고, 이를 효과적이고 체계적인 방법으로 선택한다는 것은 그리 쉽지 않기 때문에 상당한 시간과 노력이 요구된다.

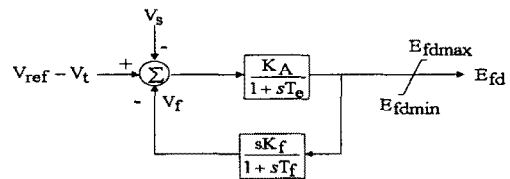


Fig. 2 IEEE ST1 excitation system

최근 인공지능 분야의 유전알고리즘(GA)은 자연 생태계의 진화를 모의한 강인한 최적화 기법으로써 전력계통의 계획 및 운용 분야의 최적화 문제를 포함한 일반적인 최적화 응용 분야에서 적용되고 있으며, 특히 최근에는 신경망 및 퍼지제어기 등의 비선형 제어기의 설계 및 성능개선, PID 제어기의 최적 이득 결정 문제 등 다양하게 이용되고 있다.

TCR-FC 정지형 무효전력 보상장치는 발전기 단자에 연결되어 있으며, thyristor 제어 리액터(TCR)과 고정 커패시터(FC)로 구성되어 있다. 리액터에 흐르는 전류는 다음 식(1)과 같다.

$$I_L = \left(\frac{V_t}{X_L} \right) \left\{ \left[\frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{\pi} \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

식 (1)은 접오각에 의해 제어되는 가변 서셉턴스를 나타내는 리액터를 표현한다.

$$B(\alpha) = \frac{1 - C(\alpha)}{X_L} \quad (2)$$

여기서 $C(\alpha) = \left[\frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{\pi} \right] - 1$ 이다.

또한 TCR-FC 보상은 다음 식(3)과 같이 X_c 의 가변 커패시터로서 나타낼 수도 있다.

$$X_r = \frac{1-C(a)}{X_L} - \left(\frac{1}{X_c}\right) \quad (3)$$

여기서 $C(a) = \left[\frac{2a - \sin(2a)}{\pi} \right] - 1$ 이고, X_L , X_c , X_r 및 a 는 각각 유도성 리액턴스, 용량성 리액턴스, 보상기의 통합 리액턴스 및 보상기 싸이리스터의 접각각이다.

전송선로와 정지형 무효전력 보상기의 등가 수식은 직류와 횡축성분으로 다음 식(4) ~ (7)과 같다.

$$V_{id} = V_b \sin \delta - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) X_c (I_a - I_{Ld} - I_{ca}) \quad (4)$$

$$V_{ia} = V_b \cos \delta + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) X_c (I_d - I_{Ld} - I_{ca}) \quad (5)$$

여기서 $I_{Ld} = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) \{1 - C(a)\} \frac{V_{id}}{X_L}$, $I_{ca} = -\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) \frac{V_{ia}}{X_c}$.

$$I_{La} = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) \{1 - C(a)\} \frac{V_{id}}{X_L}, I_{ca} = -\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) \frac{V_{ia}}{X_c} \quad (6)$$

$$V_{id} = V_b \cdot \sin \delta - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) X_c \cdot I_a \quad (6)$$

$$V_{ia} = V_b \cdot \cos \delta - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) X_c \cdot I_d \quad (7)$$

여기서 $V_b = \frac{V_b}{C \cdot (a)}$, $X_c = \frac{X_c}{C \cdot (a)}$.

$$C \cdot (a) = 1 + \{1 - C(a)\} \frac{X_c}{X_L} - \frac{X_c}{X_c}$$

3. GA를 이용한 SVC용 LQ 제어기 설계

3.1 유전알고리즘

본 연구에서는 변수를 유한 길이로 코딩하는 절차가 필요 없이 변수 그 자체로 최적화 하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 변수의 코딩 절차 없이 실 변수로 최적화 함으로써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지할 수 있다.

또한 엘리트주의 유전알고리즘을 선택하여 이 후손의 목적 함수 값이 원래의 집단 안에서 가장 열성인 유전자의 적합도 값과 비교하여 그 값보다 크면 그 집단에 가입시키고 이전 유전자는 버린다. 따라서 엘리트주의는 기존 알고리즘의 문제점 중 선택과 교배시의 한계점을 극복하고자 하는 시도이다. 이러한 과정을 통하여, 좋은 유전 배열을 가진 해들은 계속 보존되므로 이들이 선택 과정에서 탈락되는 것을 방지하며, 교배시에 더 열성의 후손이 생성될 경우 이를 배제시키는 것이다.

3.1 GA를 이용한 LQ제어기의 가중행렬 선정기법

LQ제어기를 시스템에 적용하기 위해서 식(8)과 같이 표현하였다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (8)$$

제어기의 설계목적은 식(9)의 시스템의 2차 형식의 성능 평가지수 J를 최소화시키는 식(10)의 제어법칙을 구하는 것이다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [\Delta x^T(k) Q \Delta x(k) + u^T(k) R u(k)] \quad (9)$$

$$u(k) = -K \Delta x(k) \quad (10)$$

평가 지수 J를 최소화하는 최적제어 이득행렬 K는 Q, R 값을 결정한 후에 식(11)의 대수 리카치 방정식의 해인 P를 구한 후 이를 식(12)에 적용하여 구한다.

$$P - A^T P A + A^T P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P A - Q = 0 \quad (11)$$

$$K = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (12)$$

식(11)의 리카치 방정식에서 확인할 수 있듯이 SVC용 LQ 제어기 설계시 선정되는 가중행렬 Q, R의 선정에 따라 P 행렬의 값에 영향을 주고, 또한 이는 최적제어 이득행렬에 영향을 줌으로써 최종적으로 제어법칙 $u(k)$ 의 결정에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서 선정

한 상태가중행렬과 제어가중행렬의 구조는 그림 3과 같으며, 여기서 상태가중행렬의 대각요소를 유전자로 하는 염색체를 구성하였으며, 제어가중행렬은 상수를 유전자로 하는 염색체로 구성하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \vdots & \dots & q_{nn} \end{bmatrix}, R = R_{11}$$

Fig. 3 A chromosome composed weighting matrices

본 논문에서는 식(13)과 같이 제어목적함수 부하각 편차 $\Delta \delta$ 의 진동, 발전기 단자전압 편차 ΔV , 및 SVC의 입력 편차량 ΔX_c 을 최소화하는 적합도 함수를 도입하여 SVC의 효과를 극대화하도록 SVC LQ 제어기를 설계하고자 하였다.

$$Fitness = \frac{1}{1 + \sum_{m=1}^N (\beta_1 \cdot \Delta \omega^2 + \beta_2 \cdot \Delta V^2 + \beta_3 \cdot \Delta X_c^2)} \quad (13)$$

여기서, β_1 , β_2 , β_3 는 가중치를 나타내며, m은 한 문자열이 LQ 제어기 파라미터와 합성하여 시스템에 적용되었을 경우의 한 샘플링을 말하며, N는 총 샘플링 개수이다.

3.3 GA를 이용한 SVC의 제어기 설계

SVC용 LQ 제어기를 설계하기 위해서 샘플링 시간을 0.01[sec]로 설정하였다. GA를 이용하여 최적화기법에 근거한 LQ 제어기의 가중행렬을 선정하기 위해서 가능해 집단수는 100, 교배확률을 0.8, 돌연변이 확률을 0.1로 하였다.

가중행렬 Q가 양의 반한정 대칭행렬 조건을 만족하게 하였고, R이 양의 한정 대칭행렬 조건을 만족하도록 설계하였다. 식(13)의 적합도 함수에서 가중치 $\beta_1 = 0.1$, $\beta_2 = 10$, $\beta_3 = 0.01$ 로 하였다. 본 논문에서 종결조건을 100 세대 수행후로 하여 각 부하에 대한 다음과 같은 가중행렬 및 최적제어 이득행렬을 구하였다. 또한 각 부하에 대한 적합도는 그림 4와 같다.

$$Q = \text{diag}[1.2117 \ 390432 \ 4.3496 \ 0.0064 \ 0.00008 \ 4.3730 \ 19.9856] \quad (14)$$

$$R = 13.56 \quad (15)$$

$$K = [-2.4572 \ -133.0015 \ -2.0779 \ -0.1291 \ -0.0039 \ 2.3884 \ 1.0358] \quad (16)$$

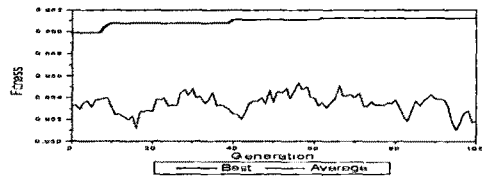


Fig. 4 Fitness

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 전력시스템 안정도 향상을 위하여 유전알고리즘을 이용한 SVC용 LQ 제어기를 설계하였다. 최적제어 이득행렬로 구성된 제어기를 1기 무한대 모선 시스템에 적용하여 외란 조건에 따른 안정화 제어효과를 고찰하였다.

적용 외란 조건은 무한대모선에 100[ms] 동안에 전력이 3[%] 변동한 경우에 대하여 계통 운용조건을 설정하고, 각

문헌점에서 선형화된 모델을 이용하여 Yu의 보상기 설계 이론에 의한 파라미터 선정 방법과 비교하여 동특성을 검토하였다. 주요 진동모드의 고유치를 해석하여 제안한 방법의 제동비가 향상되었음을 입증하였다.

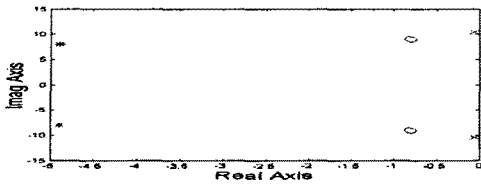
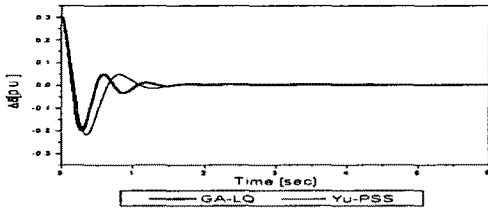
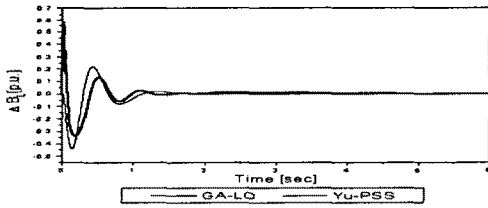


Fig. 5 Eigenvalues of major oscillation mode (* → GA-LQ, o → Yu, x → Open loop)

본 논문에서는 GA를 이용하여 LQ 제어기의 파라미터를 구하기 위하여 초기 상태를 정상부하시($P_e=1.0$ (p.u.), $Q_e=0.595$ (p.u.))에서 살펴보았다. 또한 제안한 방법의 강인성을 검증하기 위하여 외란 조건을 각 부하에 대하여 100(ms) 동안에 초기에 부하각 편차가 0.3(p.u.) 변동한 경우로 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 부하각 편차 및 SVC 제어기의 입력량을 통하여 Yu의 방법과 비교하여 제안한 방법의 유용성 및 우수성을 검증하였다.

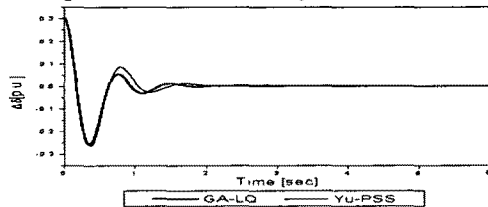


(a) Load angle deviation

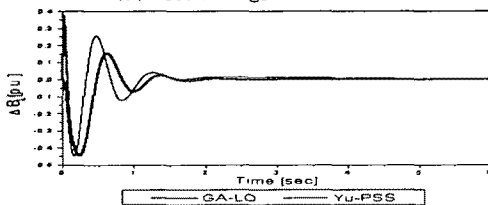


(b) Control input

Fig. 6 Response of generator when changing load angle deviation in heavy load

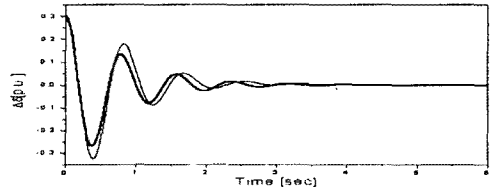


(a) Load angle deviation

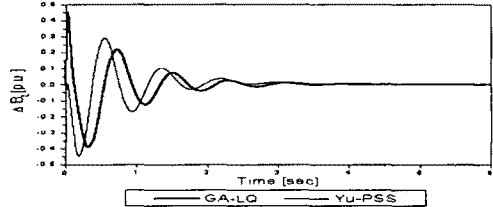


(b) Control input

Fig. 8 Response of generator when changing load angle deviation in normal load



(a) Load angle deviation



(b) Control input

Fig. 10 Response of generator when changing load angle deviation in light load

5. 결 론

본 논문에서는 전력시스템 안정도 향상을 위해, 기존 전력시스템의 송전용량을 최대 열적 한계용량까지 증가 시키므로 전력수송 설비시설의 건설 부담을 저감시킬 수 있는 새로운 개념의 전력전송 방식인 유연송전시스템 중에서도 정지형 무효전력 보상장치에 대한 LQ 제어기를 설계하였다. LQ 제어기는 2차 평가함수의 성능지수를 최소화하는 최적 제어이론을 바탕으로 하였으며, 성능에 큰 영향을 미치는 가중행렬 선정에 대해서 종래의 일반적인 방법인 경험 및 시행착오에 의존하는 반복수행과는 달리, 자연 생태계의 진화를 모의한 전역적 탐색 최적화 기법인 GA를 이용하여 SVC용 LQ 제어기의 가중행렬 선정 및 설계에 대해서 체계적인 기법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성을 조사하기 위해서 SVC를 포함한 1기 무한대 모선계통에 적용하여 SVC용 LQ 제어기를 설계하고, 이에 대한 고유치 해석과 시간모의를 통하여 제어성능을 검토한 결과, 우수한 제어 성능을 가지는 제어기를 최적화 기법인 GA에 의해서 설계할 수 있음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Special Stability Controls Working Group, "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, pp. 1994
- [2] P. M. Anderson and A. A. Found, "Power System Control and Stability", IEEE Press, New York, 1993
- [3] C. S. Chen and C. T. Hsu, "The Simplified Linear Model Derivation of Power Systems with Static VAR Compensators to Improve System Damping", IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, pp. 370-375, 1995
- [4] Y. Wang, Y. L. Tan and G. Guo, "Robust Nonlinear Coordinated Generator Excitation and SVC Control for Power Systems", Electrical Power and Energy System, Vol. 22, pp. 187-195, 2000
- [5] A. Varsek, T. Vrbancic and B. Filipic, "Genetic Algorithms in Controller Design and Tuning", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 23, No. 5, pp. 1330-1339, Sept. 10, 1993
- [6] K. E. Kinneer, "Advances in Genetic Programming", The MIT Press, 1994