

GA를 이용한 SVC용 LQ 제어기의 가중행렬 선정 기법

(GA based Selection Method of Weighting Matrices in LQ Controller for SVC)

허동철* · 이정필 · 주석민 · 정형환

(Dong - Ryoil Hur · Jeong - Phil Lee · Seok - Min Joo · Hyeng - Hwan Chung)

요 약

본 논문에서는 정지형 무효전력 보상기에 대한 최적 LQ 제어기의 가중행렬 선정과정을 유전알고리즘을 이용하여 최적의 가중행렬을 결정하는 기법을 제시하였다. FACTS로 분류되는 여러 기기중 고정된 용량의 커패시터와 싸이리스터 제어에 의하여 용량이 가변되는 인덕터가 병렬로 연결된 구조를 가지고 있는 SVC 시스템은 전압을 효과적으로 제어할 뿐만 아니라 동기발전기의 댐핑을 향상시킬수 있다. LQ 제어기의 설계는 최적 가중행렬 선정에 의존하므로 본 논문에서는 종래의 일반적인 방법과는 달리, 자연 생태계의 진화를 모의한 전역적 탐색 최적화 기법인 유전 알고리즘을 이용하여 설계하였다. 이에 대해 고유치 해석과 시뮬레이션을 통해 제어성능을 검토하여 우수한 제어 성능을 가지는 제어기를 최적화 기법인 GA에 의해서 설계할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we present a GA(Genetic Algorithm) approach to select weighting matrices of an optimal LQ(Linear Quadratic) controller for SVC(Static VAR Compensator). A SVC, one of the FACTS(Flexible AC Transmission System), constructed by a FC(Fixed Capacitor) and a TCR(Thyristor Controlled Reactor), was designed and implemented to improve the damping of a synchronous generator, as well as to control the system voltage. Also, a design of LQ controller depends on choosing weighting matrices. The selection of weighting matrices which is not a trivial solution is usually carried out by trial and error. We proposed an efficient method using GA of finding weighting matrices for optimal control law. Thus, we proved the usefulness of proposed method to improve the stability of single machine-infinite bus with SVC system by eigenvalues analysis and simulation.

Key Words : Weighting Matrices, Linear Quadratic(LQ) Controller, Genetic Algorithm(GA), Static VAR Compensator(SVC)

1. 서 론

신 전력 송전 방식으로서 유연송전시스템(Flexible

AC Transmission System : FACTS) 기술 개념이 미국 EPRI에 의해 제시된 이후, 이 분야에서 급속적으로 발전이 이루어지고 있다. FACTS 기술은 전력시스템의 주요 파라미터인 선로의 임피던스, 모선 전압의 크기 및 위상각을 고속으로 정밀하게 실시간 제어하여 계통의 가제어성을 높여서 안정도 개선, 전압변동 억제 및 전력동요 억제 등 계통 특성을 향상시키

* 주저자 : 동아대 정보기술연구소 특별연구원 · 공박
E-mail : drhur@donga.ac.kr
접수일자 : 2002년 7월 8일
1차심사 : 2002년 7월 12일, 2차심사 : 2002년 8월 21일
심사완료 : 2002년 9월 24일

기 때문에 궁극적으로 계통 설비 이용의 극대화를 목표로 한다[1~2].

정지형 무효전력 보상기(Static VAR Compensator : SVC)는 FACTS로 분류되는 여러 기기중 가장 먼저 개발되고 현장에 적용되어 그 효과가 널리 검증되었고, 현재는 완전 실용화 단계에 있다. 이러한 SVC는 국내에서도 채택되어 대구지역의 전압강하 문제를 해결하기 위하여 설치 운전 중에 있다[3-5]. 또한 SVC의 제어기 입력으로 발전기 각속도를 사용하면 전력시스템의 동요 억제제를 제공할 수 있어 전력시스템의 안정도를 크게 향상시킬 수 있다.

그러나 SVC용 기존 제어기를 살펴보면 비례-적분 제어기[6], 진·지상 보상기[7] 및 강인성 제어기[8] 등이 있다. 이러한 제어기들은 특정 운전점에서는 좋은 제어성능을 나타내지만 다른 운전 조건에서는 좋은 제어성능을 얻기가 어렵다. 이러한 문제점을 해결하고자 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[9~12].

최근 인공지능 분야의 유전알고리즘(Genetic Algorithm : 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[13~17].

따라서 본 논문에서는 최적 제어 문제에서 중요한 역할을 하는 가중행렬의 선정과정에 강인한 최적화 기법인 GA를 이용하여 최적의 가중행렬을 결정하는 기법을 제안하였다. 제안한 가중행렬 선정 제어기법을 SVC를 포함한 1기 무한대 모선 계통의 LQ 제어

기 설계에 적용하여 다양한 부하 외란에 대한 제어기의 안정화 효과를 관찰함으로써 제안한 방법의 효율성을 검증하였다.

2. 전력시스템 모델

2.1 전력시스템 모델

그림 1은 시스템의 개략적인 모델을 나타내고 있다. 전력시스템은 무한모선에서 고전압 송전선로를 경유하여 동기발전기에 연결되어, 발전기 단자에 정지형 무효전력 보상장치가 설치되어 있다. 이 동기발전기는 계자 전압 상·하한치를 조절할 뿐만 아니라 고속 안정화 여자시스템으로 구성되어 있다[1, 3, 6~8, 12~13].

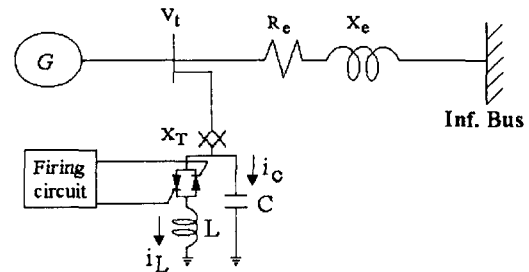


그림 1. 1기 무한모선 전력시스템
Fig. 1. Power System Configuration

2.2 SVC 시스템

SVC는 기존의 진상 무효전력 보상기인 전력용 콘덴서(Shunt Capacitor)와 지상 무효전력 보상기인 병렬 리액터(Shunt Reactor) 등과는 달리, SVC는 사이리스터를 이용하여 연속적인 제어를 수행함으로써 동기조상기와 비슷한 제어특성을 가지게 된다. 그러나, 기계적인 관성을 가지고 있지 않아 동작범위 밖에서는 전압유지특성이 급격하게 떨어지며, 제어의 응답속도가 동기 조상기에 비하여 매우 빠른 차이를 가지고 있다. 이와 같이 기존의 SVC는 전압안정도 유지 능력에 초점을 맞추어 연구가 진행되었으나, 최근에는 SVC의 과도 및 동적 안정도 개선에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 따라서 본 논문에서는 SVC 시스템에 대한 제어기의 입력으로 모든 상태변수에

GA를 이용한 SVC용 LQ 제어기의 가중행렬 선정 기법

대한 가중치를 조정한 최적제어를 적용하였다. 본 연구에서 사용한 SVC 시스템 구조로는 그림 1에서와 같이 보편적으로 가장 많이 사용되는 TCR-FC 형태를 사용하였다[5, 12~13].

또한, SVC는 빠른 응답속도와 연속적인 제어로 제어범위 내에서는 전압을 효과적으로 제어할 뿐만 아니라 빠른 응답속도를 이용하여 과도상태의 유효전력을 제어함으로써, 전압조정, 송전용량 증대, 과도안정도 여유도 증대, 과도 과전압 현상의 감소, 전력진동(Power Oscillation)의 억제, 저주파 진동의 감소, 상간부하 불균형 개선, AC-DC 변환기의 무효전력공급 등과 같은 전력시스템의 다양한 문제를 해결하기 위하여 활용되고 있다.

2.3 SVC를 포함한 전력시스템의 선형화 모델

동적 안정도 해석을 위한 전력시스템의 선형화 모델을 유도하기 위하여, 송전선로를 통하여 무한모선에 연결된 IEEE Type의 여자기를 가진 동기기로 구성된 전력시스템 모델을 이용하였다. 그림 2는 SVC를 포함한 교류 시스템의 선형화 모델의 블록선도를 나타낸다[5~8, 12~13].

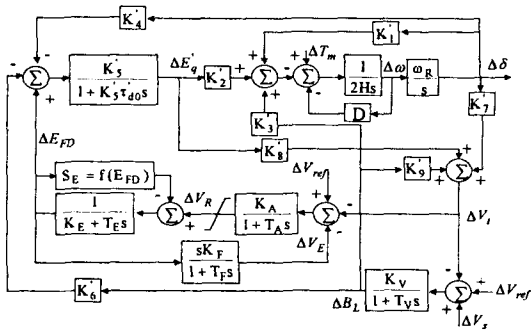


그림 2. SVC를 포함한 전력시스템의 선형화 모델
Fig. 2. Block diagram of linearized model of power system with SVC

본 논문에서 사용한 동기기, 여자기, 전송선로 및 SVC의 파라미터는 표 1에 나타내었다.

또한, 그림 2의 모델을 이용하여 다음과 같은 선형화된 동특성 방정식을 유도할 수 있다.

표 1. 시스템 파라미터

Table 1. System parameters

Synchronous Machine(p.u.)	Excitation(p.u.) & Transmission line(p.u.)	SVC (p.u.)
$x_d=1.7$	$K_A=400, T_A=0.05[\text{sec}]$	$K_v=10.0$
$x_q=1.64$	$K_F=0.025, T_F=1.0[\text{sec}]$	$T_v=0.15[\text{sec}]$
$x_d'=0.245$	$K_E=-0.17$	$B_c=0.6$
$D=0.0$	$T_E=0.95[\text{sec}]$	$X_T=0.08$
$H=2.37[\text{sec}]$	$V_{Rmax}=5.04$	$B_{L0}=0.05$
$\tau_{\omega'}=5.9[\text{sec}]$	$V_{Rmin}=-5.04$	$B_{Lmax}=0.3$
	$S_{Emax}=0.02$	$B_{Lmin}=-0.9$
	$S_{Emin}=0.001$	$V_{smax}=0.12$
	$R_e=0.02, X_e=0.4$	$V_{smin}=-0.12$

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_R \Delta\omega \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{K_1'}{2H} \Delta\delta - \frac{D}{2H} \Delta\omega - \frac{K_2'}{2H} \Delta E_q' - \frac{K_3'}{2H} \Delta B_L + \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta E_q'}{dt} = -\frac{K_4'}{\tau_{d0}} \Delta\delta - \frac{1}{K_5' \tau_{d0}} \Delta E_q' + \frac{1}{\tau_{d0}} \Delta E_{FD} - \frac{K_6'}{T_{d0}} \Delta B_L \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta E_{FD}}{dt} = -\frac{(S_E + K_E)}{T_E} \Delta E_{FD} + \frac{1}{T_E} \Delta V_R \quad (4)$$

$$\frac{d\Delta V_R}{dt} = -\frac{K_A K_7'}{T_A} \Delta\delta - \frac{K_A K_8'}{T_A} \Delta E_q' - \frac{1}{T_A} \Delta V_R - \frac{K_A}{T_A} \Delta V_E - \frac{K_A K_9'}{T_A} \Delta B_L + \frac{K_A}{T_A} \Delta V_{ref} \quad (5)$$

$$\frac{d\Delta V_E}{dt} = -\frac{K_F(S_E + K_E)}{T_E T_F} \Delta E_{FD} + \frac{K_F}{T_E T_F} \Delta V_R - \frac{1}{T_F} \Delta V_E \quad (6)$$

$$\frac{d\Delta B_L}{dt} = -\frac{K_v K_7'}{T_v} \Delta\delta - \frac{K_v K_8'}{T_v} \Delta E_q' - \frac{K_v K_9' + 1}{T_v} \Delta B_L + \frac{K_v}{T_v} \Delta V_{ref} + \frac{K_v}{T_v} \Delta V_s \quad (7)$$

3. GA를 이용한 SVC용 LQ 제어기 설계

3.1 유전알고리즘

유전 알고리즘은 John Holland에 의해 1970년대에 다윈의 진화 이론을 토대로 한 자연의 유전 원리를 모방하여 도입되기 시작한 이후, 최적화 문제를 해결하는데 적용하고 있으며 해를 구하는 방법에서 종래의 방법과 비교할 때 강한 탐색 방법이다[14-17].

유전 알고리즘은 평가함수(evaluation function), 유전 연산자(genetic operator), 그리고 문제의 해를 표현하는 염색체(chromosome)로 구성되며, 이 염색체들을 점진적으로 개선시켜 나감으로써 최적의 해를 얻게 된다. 유전 알고리즘의 유전 연산자는 복제(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 등이 있다.

그러나 기존의 유전 알고리즘은 변수들을 유한 길이의 2진 스트링으로 코딩해야 한다. 더욱 정확한 해를 요구한다면 스트링의 길이는 매우 길어야 한다. 긴 스트링에 대한 코딩 절차는 많은 계산 시간을 필요로 하고 수렴 정도를 감소시킨다. 따라서 본 연구에서는 변수를 유한 길이로 코딩하는 절차가 필요 없이 변수 자체가 최적화 하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 변수의 코딩 절차 없이 실 변수로 최적화 함으로써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지할 수 있다.

또한 기존의 유전 알고리즘은 구조적인 문제점이 따르고 있다. 즉 세대가 어느 정도 지나면 더 좋은 해가 도출되지 못하고 멈추어 버리는 조기 수렴(premature convergence)의 문제가 종종 발생한다. 이 문제점은 돌연변이 확률을 높임으로서 어느 정도 극복할 수 있으나, 이를 극복하는 데에는 한계점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 엘리트주의 유전 알고리즘을 선택하여 이 후손의 목적 함수 값이 원래의 집단 안에서 가장 열성인 유전자의 적합도 값(즉 원 집단 내의 최소 적합도 값)과 비교하여 그 값보다 크면 그 집단에 가입시키고 이전 유전자는 버린다. 따라서 엘리트주의(Elitism)는 기존 알고리즘의 문제점 중 선택과 교배시의 한계점을 극복하고자 하는 시도이다. 이러한 과정을 통하여, 좋은 유전 배열을 가진 해들은 계속 보존되므로 이들이 선택 과정시 탈락되

는 것을 방지하며, 교배시에 더 열성의 후손이 생성될 경우 이를 배제시키는 것이다. 이상의 두가지 방법을 결합한 실변수 엘리트주의 유전 알고리즘의 흐름도는 그림 3과 같다.

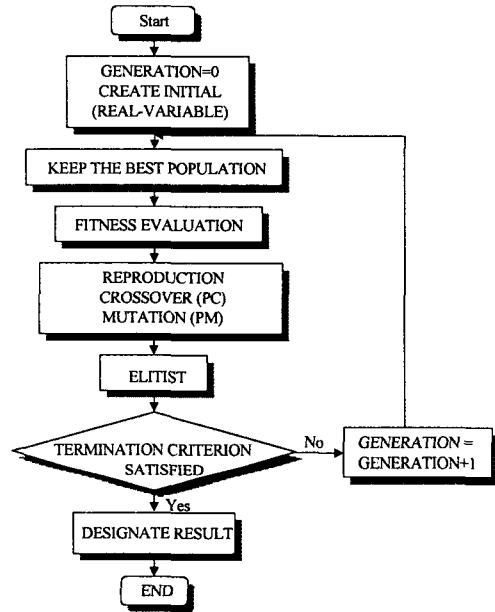


그림 3. 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘의 흐름도
Fig. 3. Flowchart of real variable elitism genetic algorithm

3.2 GA를 이용한 LQ 제어기의 가중행렬 선정 기법

LQ제어기를 시스템에 적용하기 위해서 SVC를 포함한 1기 무한대 모션의 페루프 상태방정식은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\dot{\Delta x}(t) = A\Delta(t) + B\Delta u(t) \quad (8)$$

여기서 **A**는 상태계수 행렬이고, **B**는 제어계수 행렬이다.

최적화 기법을 이용한 제어기의 설계목적은 식 (9)의 시스템의 2차 형식의 성능평가지수(Quadratic Performance Index) **J**를 최소화시키는 식 (10)의 제

GA를 이용한 SVC용 LQ 제어기의 가중행렬 선정 기법

어 $\Delta u(t)$ 를 구하는 것이다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [\Delta x^T(t) Q \Delta x(t) + \Delta u^T(t) R \Delta u(t)] dt \quad (9)$$

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

여기서, Q 는 $n \times n$ 상태가중행렬이고, R 은 $m \times m$ 제어가중행렬로서 제어기의 성능과 특성을 좌우하게 된다. 평가 지수 J 를 최소화하는 최적제어 이득행렬 $K(t)$ 는 Q, R 값을 결정한 후에 식 (11)의 대수 리카치 방정식의 해인 $P(t)$ 를 구한 후 이를 식 (12)에 적용하여 구한다.

$$\dot{P}(t) = -P(t)A - A^T P(t) - Q + P(t)BR^{-1}B^T P(t) \quad (11)$$

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

식(11)의 리카치 방정식에서 확인할 수 있듯이 SVC용 LQ 제어기 설계시 선행되는 가중행렬 Q, R 의 선정에 따라 $P(t)$ 행렬의 값에 영향을 주고, 또한 이는 최적제어 이득행렬에 영향을 줌으로써 최종적으로 제어법칙 $\Delta u(t)$ 의 결정에 영향을 미치게 된다. 따라서 가중행렬 Q, R 의 선정이 제어성능을 결정짓는 제어법칙에 영향을 미치므로 효과적인 SVC용 LQ 제어기 설계를 위해서는 적절한 가중행렬 Q, R 의 선정이 중요한 문제가 된다. 그러나 일반적인 가중행렬 선정은 경험에 의해 반복적인 수행 즉, 시행착오에 의해서 이루어지고 있으므로, 가중행렬이 적절하게 선정된 LQ 제어기는 우수한 제어성능이 보장되지만 가중행렬이 부적절하게 선정된 경우에는 제어기의 성능이 나빠지는 결과를 초래하게된다. 따라서 전력계통에 적용되는 SVC LQ 제어기를 효과적으로 설계하기 위해서는 경험에 의존한 반복적인 수행에 의한 방법보다는 최적화기법에 근거한 가중행렬 선정 및 설계기법의 체계적인 연구가 요구되며, 이에 GA를 적용하기 위해서는 최적화 대상이 되는 가중행렬이 염색체로 표현되어야 한다.

본 연구에서 선정할 상태가중행렬과 제어가중행렬의 구조는 그림 4와 같으며, 여기서 상태가중행렬의 대각요소를 유전자로 하는 염색체를 구성하였으며,

제어가중행렬은 상수를 유전자로 하는 염색체로 구성하였다.

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

↓

Q ₁₁	Q ₂₂	...	Q _{nn}	R ₁₁
-----------------	-----------------	-----	-----------------	-----------------

그림 4. 가중행렬로 구성된 염색체

Fig. 4. Weighting matrices represented by chromosome

GA의 해탐색 절차에서 필요한 평가함수는 상대적으로 환경에 잘 적응하는 개체를 평가하기 위한 함수로, 제어기 설계자의 목적 및 요구에 따라 다양한 형태로 표현 가능하다. 통상의 LQR 문제처럼 식 (9)를 각 개체에 대한 GA의 평가함수로 설정한다면 Q, R 값은 시스템의 성능과 관계없이 자명해(trivial solution)가 되기 때문에 이는 각 개체의 적합도를 평가하는 함수로서는 부적합하게 된다. 그 이유는 통상의 LQR에서는 가중행렬이 설계 파라미터로 주어지지만, 본 논문에서는 가중행렬이 최적화변수의 새로운 접근이기 때문이다. 따라서 염색체로 표현되는 각 가중행렬에 대한 시스템에서의 적합도, 즉 가능해인 각 가중행렬을 이용하여 제어기를 설계하였을 때의 제어성능을 정량적으로 평가하기 위한 효과적인 GA의 평가함수가 요구된다.

이에 대해 본 논문에서는 식 (13)과 같이 제어목적 함수 각속도 편차 $\Delta \omega$ 의 진동 및 SVC의 입력 편차량 ΔX_C 을 최소화하는 적합도 함수를 도입하여 전력시스템의 안정도 개선 및 SVC의 효과를 극대화하도록 SVC용 LQ 제어기를 설계하고자 하였다.

$$Fitness = \frac{1}{1 + \sum_{m=1}^N (\alpha \cdot \Delta \omega^2 + \beta \cdot \Delta X_C^2)} \quad (13)$$

여기서, α , β 는 가중치를 나타내며, m 은 한 문자열이 LQ 제어기 파라미터와 합성하여 시스템에 적용되었을 경우의 한 샘플링을 말하며, N 는 총 샘플링 개수이다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 GA를 이용한 SVC용 LQ 제어기의 파라미터 설계

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

상태가중행렬 Q 가 준정정(準正定) 대칭행렬 조건을 만족하게 하였고, 제어가중행렬 R 이 정정(正定) 대칭행렬 조건을 만족하도록 설계하였다. 식(13)의 적합도 함수에서 가중치 $\alpha=0.1$, $\beta=0.01$ 로 하였다. 본 논문에서 종결조건을 100 세대 수행 후로 하여 각 부하에 대한 표 2와 같은 상태가중행렬(Q), 제어가중행렬(R) 및 최적제어 이득행렬(K)을 구하였으며, 여기서 diag 는 대각행렬을 의미한다.

표 2. 가중행렬 및 이득행렬
Table 2. Weighting matrices and gain matrices

	Case study 1	Case study 2	Case study 3
Q	diag[2.5552 392453 1.6139 0.0093 0.00008 2.7842 19.9241]	diag[1.2117 390432 4.3496 0.0064 0.00008 4.3730 19.9856]	diag[1.8076 392264 2.5764 0.0013 0.0009 4.0703 39.5189]
R	14.94	13.56	21.23
K	[-3.3663 -76.4243 -3.7713 -0.1226 -0.0043 1.5332 0.9654]	[-2.4572 -133.002 -2.0779 -0.1291 -0.0039 2.3884 1.0358]	[-2.7285 -73.7024 -3.0973 -0.1076 -0.0047 1.3652 1.1651]

SVC LQ 제어기가 포함된 전력시스템은 그림 5와 같이 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있다.

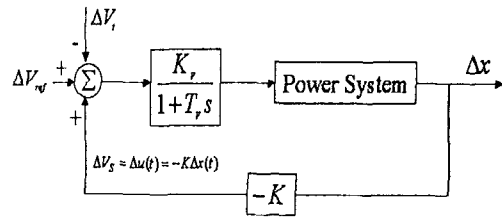


그림 5. SVC LQ 제어기가 포함된 전력시스템
Fig. 5. Power system with SVC LQ controller

4.2 결과 고찰

본 논문에서는 최적제어 이득행렬로 구성된 제어기를 1기 무한대 모선 시스템에 적용하여 각 외란 조건에 따른 안정화 제어효과를 고찰하였다. GA를 이용하여 LQ 제어기의 파라미터를 구하기 위하여 적용한 외란 조건으로는 표 3과 같다.

각 운전점에서 선형화된 모델을 이용하여 Y_u 의 보상기 설계 이론[10]에 의한 파라미터 선정 방법과 비교하여 동특성을 검토하였다.

표 3. 사례연구
Table 3. Case study

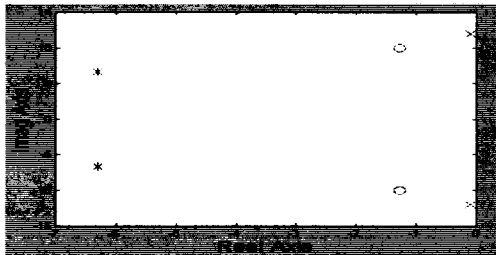
사례연구	동작조건	외란 조건	지속시간
사례연구1	중부하시[p.u.] ($P_e=1.3$, $Q_e=0.595$)	전력증가(경우 1) 전압증가(경우 2)	100[ms]
사례연구2	정상부하시[p.u.] ($P_e=1.0$, $Q_e=0.595$)	전력증가(경우 1) 전압증가(경우 2)	100[ms]
사례연구3	경부하시[p.u.] ($P_e=0.7$, $Q_e=0.595$)	전력증가(경우 1) 전압증가(경우 2)	100[ms]

또한 각 부하에 대한 주요 진동모드의 고유치를 해석하여 제안한 방법의 제동비가 향상되었음을 입증하였다. 각 부하에 대한 주요 진동 모드의 고유치 $\sigma \pm j\omega$ 는 그림 6과 같으며, 진동모드에 대한 제동 비는 표 4와 같다. 진동모드의 제동 비 ξ (Damping ratio[%]) 계산식은 식 (14)와 같다.

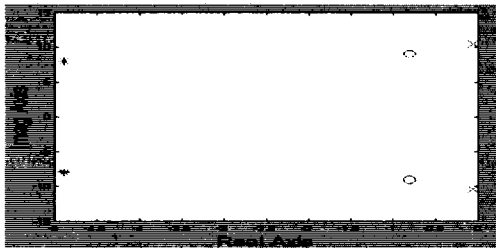
$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \times 100[\%] \quad (14)$$

표 4. 고유 진동모드의 고유치 및 제동 비
Table 4. Eigenvalues and damping ratio of major oscillation modes

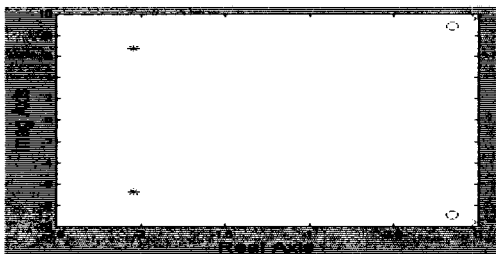
Case study	Method	Eigenvalues	ξ [%]
Heavy load	Proposed	$-6.3025 \pm j6.6443$	68.82
	Yu	$-1.2790 \pm j9.9495$	12.75
	Open loop	$-0.0893 \pm j11.9962$	0.74
Normal load	Proposed	$-4.8969 \pm j7.9915$	52.24
	Yu	$-0.8094 \pm j9.0236$	8.93
	Open loop	$-0.0603 \pm j10.3924$	0.58
Light load	Proposed	$-2.0459 \pm j6.7290$	29.09
	Yu	$-0.1569 \pm j8.8867$	1.75
	Open loop	$-0.0130 \pm j9.5697$	0.13



(a) Case study 1 - in heavy load



(b) Case study 2 - in normal load



(c) Case study 3 - in light load

그림 6. 주요 동요모드의 고유치
Fig. 6. Eigenvalues of major oscillation mode (* → Proposed, o → Yu, x → Open loop)

4.2.1 사례연구 1(중부하시)

사례연구 1에서는 제안한 방법의 강인성을 검증하기 위하여 100[ms] 동안에 전력이 3[%] 증가한 경우(경우 1) 및 전압이 3[%] 증가한 경우(경우 2)로 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 7은 경우 1에 대한 GA를 이용하여 최적의 가중행렬을 결정하여 각속도 편차, 발전기 단자전압 편차 및 SVC 제어기의 입력량을 통하여 Yu의 방법[10]과 비교하였다.

그림 7에서 보는 것처럼 본 논문에서 제안한 방법이 Yu의 제어기 적용시보다 조정시간과 제동 효과 면에서 더 나은 제어성능을 나타냄을 알 수 있다.

또한 그림 8은 경우 2에 대한 시간모의 해석으로서 제안한 방법이 Yu의 방법보다 우수한 응답특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 제어기의 제어성능을 평가하기 위한 평가함수로는 식 (15)와 같이 두었다.

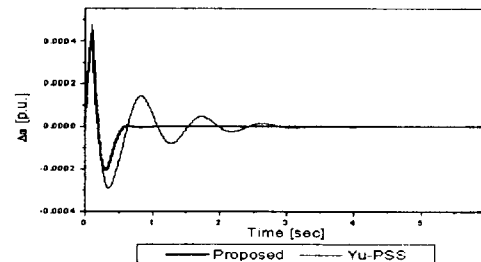
$$PI = \int (\gamma_1 \Delta\omega(t) + \gamma_2 \Delta V(t) + \gamma_3 \Delta B_L(t)) dt \quad (15)$$

여기서, $\gamma_1=3.0$, $\gamma_2=0.1$, $\gamma_3=0.3$ 이다.

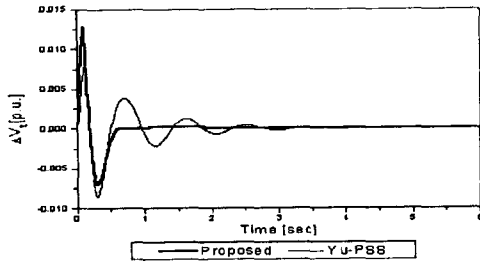
식 (15)의 평가함수를 사용하여 각 제어기법들에 대한 성능평가의 결과는 표 5와 같다. 따라서 본 논문에서 제안한 제어 방법이 시스템의 안정도 개선에 효과적임을 확인하였다.

표 5. 평가지수(중부하시)
Table 5. Performance indices(In heavy load)

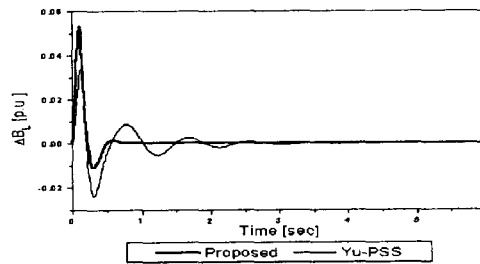
Performance indices	Control Method		Decaying rate[%]	
	Proposed	Yu		
PI	Case 1	0.3001	0.5419	44.62
	Case 2	0.4033	0.5962	32.35



(a) Generator speed deviation

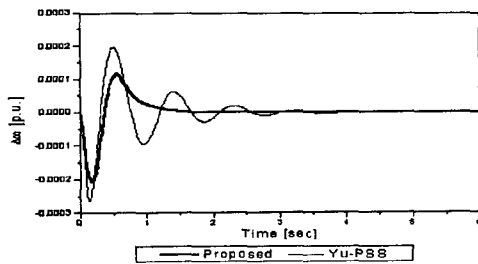


(b) Terminal voltage deviation

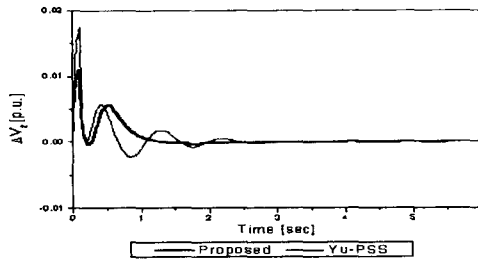


(c) Control input

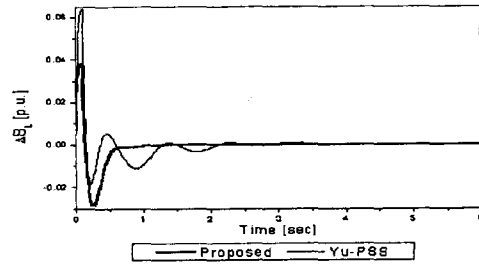
그림 7. 중부하시 경우 1에 대한 발전기 응답
Fig. 7. Response of generator for case 1 in heavy load



(a) Generator speed deviation



(b) Terminal voltage deviation



(c) Control input

그림 8. 중부하시 경우 2에 대한 발전기 응답
Fig. 8. Response of generator for case 2 in heavy load

4.2.2 사례연구 2(정상부하시)

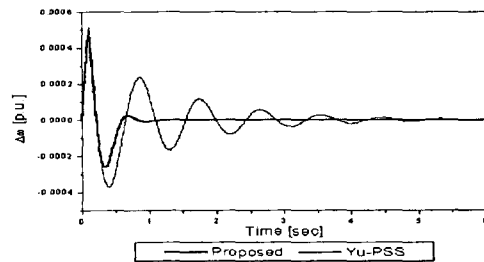
제안한 방법의 우수성을 입증하기 위하여 사례연구 2에서는 100[ms] 동안에 전력이 3[%] 변동한 경우(경우 1) 및 전압이 3[%] 변동한 경우(경우 2)로 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 9는 경우 1에 대한 GA를 이용하여 최적의 가중행렬을 결정하여 각속도 편차, 발전기 단자전압 편차 및 SVC 제어기의 입력량을 통하여 Yu의 방법과 비교하였다.

그림 9 및 10에서 보는 것처럼 본 논문에서 제안한 방법이 Yu의 제어기 적용시보다 정정시간과 제동 효과 면에서 더 좋은 제어성능을 나타낼을 알 수 있다. 또한 제안한 제어기의 성능을 평가하기 위한 평가함수의 결과는 표 6과 같이 얻었다.

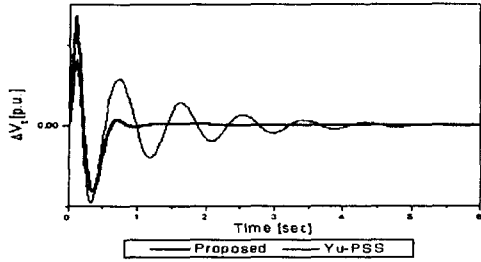
표 6. 평가지수(정상부하시)

Table 6. Performance indices(In normal load)

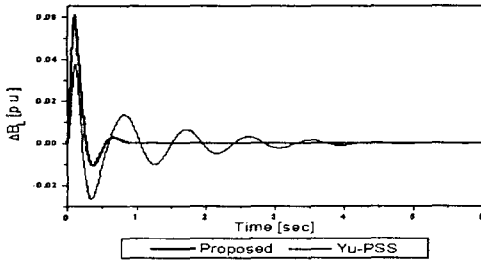
Performance indices	Control Method		Decaying rate[%]	
	Proposed	Yu		
PI	Case 1	0.4018	0.9002	55.36
	Case 2	0.4600	0.7472	38.43



(a) Generator speed deviation

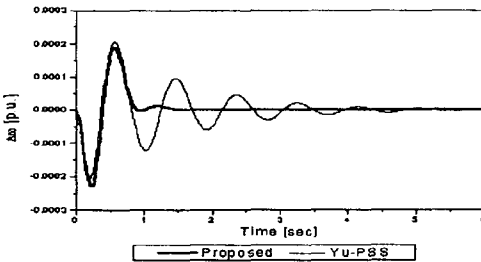


(b) Terminal voltage deviation

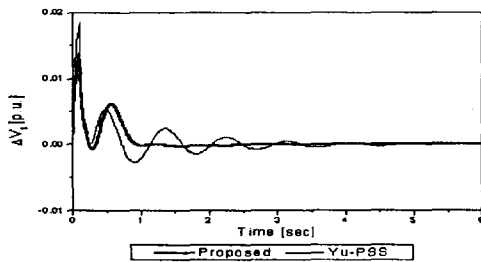


(c) Control input

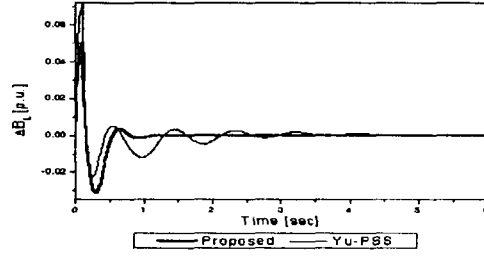
그림 9. 정상부하시 경우 10에 대한 발전기 응답
Fig. 9. Response of generator for case 1 in normal load



(a) Generator speed deviation



(b) Terminal voltage deviation



(c) Control input

그림 10. 정상부하시 경우 2에 대한 발전기 응답
Fig. 10. Response of generator for case 2 in normal load

4.2.3 사례연구 3(경부하시)

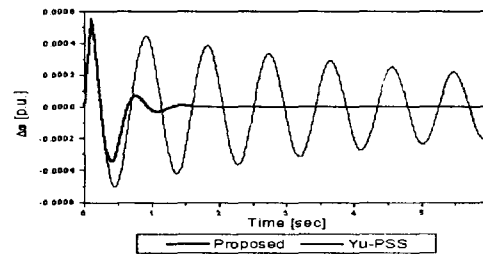
제안한 방법의 강인성을 검증하기 위하여 100[ms] 동안에 전력이 3[%] 변동한 경우(경우 1) 및 전압이 3[%] 변동한 경우(경우 2)로 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 역시 그림 11~12는 각각 경우 1 및 경우 2에 대한 응답으로 발전기 각속도 편차, 발전기 단자전압 편차 및 SVC 제어기의 입력 량을 통하여 Yu의 방법과 비교하였다.

그림 11~12에서 보는 것처럼 본 논문에서 제안한 방법이 Yu의 제어기 적용시보다 정정시간과 제동 효과 면에서 더 좋은 제어성능을 나타냄을 알 수 있었으며, 본 논문에서 제안한 제어 방법이 시스템의 안정도 개선에 매우 효과적임을 표 7의 평가지수를 통하여 확인하였다.

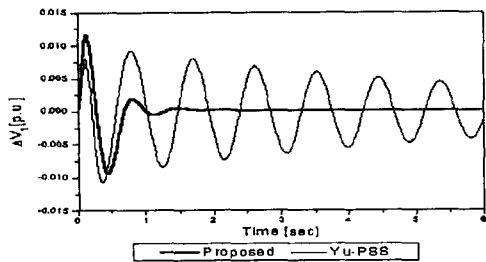
표 7. 평가지수(경부하시)

Table 7. Performance indices(In light load)

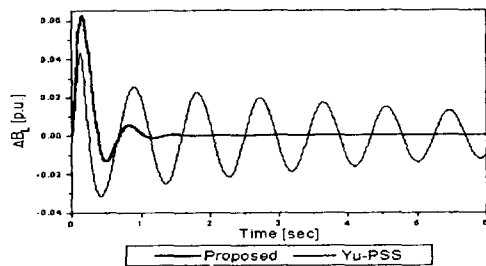
Performance indices	Control Method		Decaying rate[%]	
	Proposed	Yu		
Pi	Case 1	0.6252	3.2305	80.65
	Case 2	0.6494	1.8635	65.15



(a) Generator speed deviation

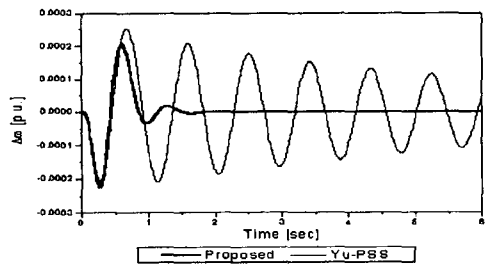


(b) Terminal voltage deviation

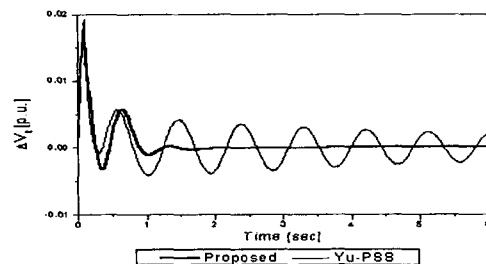


(c) Control input

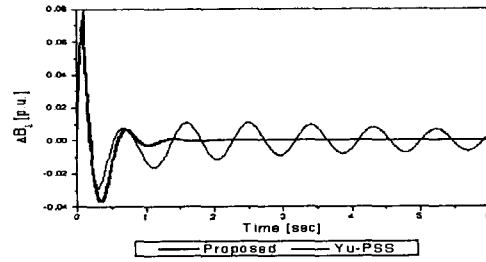
그림 11. 경부하시 경우 1에 대한 발전기 응답
Fig. 11. Response of generator for case 1 in light load



(a) Generator speed deviation



(b) Terminal voltage deviation



(c) Control input

그림 12. 경부하시 경우 2에 대한 발전기 응답
Fig. 12. Response of generator for case 2 in light load

5. 결 론

본 논문에서는 시스템 안정도 개선을 위해 SVC용 LQ 제어기의 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 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 제어 성능을 검토한 결과, 우수한 제어 성능을 가지는 제어기를 최적화 기법인 GA에 의해서 설계할 수 있음을 확인하였다. 또한 제안한 방법의 강인성을 검증하기 위하여 중부하시, 정상부하시 및 경부하시에 부하 외란을 설정하여 시스템 응답특성이 크게 향상되었음을 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

향후 실 계통에 적용되는 SVC의 LQ 제어기의 설계에 논문이 제안하는 기법을 효과적으로 적용하기 위해서는 대규모 및 대기 계통에 적용하여 다양한 부하 외란 및 SVC 설치 지점에 대한 연구가 계속 되어야 할 것으로 사료된다.

◆ 부 록

- K_1' : 일정 직축 쇄교시 부하가 변화에 대한 토크변화
 - K_2' : 일정 부하각에서 직축 자속쇄교 변화에 대한 토크 변화
 - K_3' : 일정 부하각 및 직축 자속쇄교시 SVC의 서셉턴스 변화에 대한 토크변화
 - K_4' : 외부 임피던스 부하효과를 고려한 임피던스 요소
 - K_5' : 부하가 변화에 있어서의 감자효과
 - K_6' : SVC의 서셉턴스 변화에 있어서의 감자효과
 - K_7' : 일정 직축 쇄교시 부하가 변화에 대한 단자전압의 변화
 - K_8' : 일정 부하각에서 직축 자속쇄교 변화에 대한 단자전압의 변화
 - K_9' : 일정 부하각 및 직축 자속쇄교시 SVC의 서셉턴스 변화에 대한 단자전압의 변화
- | | |
|-----------------------------------|----------------------|
| M: 관성계수 | D: 계동계수 |
| τ_{ω} : 과도 시정수 | S_E : 포화정수 |
| K_F, T_F : 여자기 진동방지회로의 상수 및 시정수 | |
| K_E, T_E : 여자기 상수 및 시정수 | |
| K_A, T_A : 여자 증폭기 상수 및 시정수 | |
| ω_R : 기준 각속도 | δ : 부하각 |
| V_t : 단자전압 | V_{ref} : 발전기 기준전압 |
| E_q' : 제자쇄교자속에 비례하는 전압 | |
| E_{FD} : 발전기 여자전압 | V_R : 조정기 증폭기 전압 |
| V_E : 조정기 안정화 회로 전압 | |
| T_m : 기계적 입력 토오크 | |
| x_d, x_q : 동기 리액턴스의 직·횡축 성분 | |
| x_d' : 과도 리액턴스 | B_L : SVC의 서셉턴스 |
| R_e : 선로 저항 | X_e : 선로 리액턴스 |
| K_v, T_v : 싸이리스터 이득 및 시정수 | |

- [8] 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.
- [9] Y. N. Yu and C. Siggers, "Stabilization and optimal control signals for a power systems", IEEE Transactions, Vol. PAS-90, pp. 1469-1481, 1971.
- [10] Yao-nan Yu, "Electric Power System Dynamic", Academic Press, INC, 1983.
- [11] M. H. Amin, "Optimal pole shifting for continuous multi-variable linear systems", INT. J. CONTROL, Vol. 41, No. 3, pp. 701-707, 1985.
- [12] A. R. Mahran, B. W. Hogg and M. L. El-Sayed, "Co-ordinated Control of Synchronous Generator Excitation and Static Var Compensator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 4, pp. 615-622, 1992.
- [13] H. H. Chung, D. R. Hur and S. H. Kim, "A Study on the SVC System Stabilization Using a Neural Network", Journal of the KIEE, Vol. 14, No. 3, pp. 49-58, 2000.
- [14] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search Optimization & Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1989.
- [15] 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.
- [16] K. E. Kinneary, "Advances in Genetic Programming", The MT Press, 1994.
- [17] H. H. Chung, D. R. Hur, J. P. Lee and Y. P. Wang, "A Design of Power System Stabilization for SVC System Using a RMECA", Trans. KIEE, Vol. 50, No. 7, pp. 324-332, 2001.

References

- [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. 229-240, 1994.
- [2] IEEE FACTS Working Group, FACTS Applications, IEEE Power Eng. Society, 1995.
- [3] Hsu. Y. Y. and Cheng. C. H., "Design of a Static VAR Compensator Using Model Reference Adaptive Control", Electric Power System Research, No. 13. pp. 129-138, 1987.
- [4] K. S. Moon, K. M. Son, T. G. Lee, S. K. Lee, J. K. Park, "Coordinated Control of SVC and ULTC Considering Reactive Power Compensation Margin", Trans. KIEE, Vol. 48, No. 4, pp.351-357, 1999.
- [5] P. M. Anderson and A. A. Found, "Power System Control and Stability", IEEE Press. New York, 1993.
- [6] 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.
- [7] A. A. El-Emary, "Effect of Static VAR Compensator upon Synchronizing Torque Coefficient", Electric Machine and Power System, Vol. 25. pp. 371-386, 1997.

◇ 저자소개 ◇

허 동 열 (許東烈)

1969년 11월 10일생. 1995년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 동아대 정보기술연구소 특별연구원.

이 정 필 (李丁必)

1971년 8월 19일생. 1997년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 동아대 정보기술연구소 특별연구원.

주 석 민 (朱碩珉)

1965년 5월 11생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 창원대 메카트로닉스 공학부 BK21 교수.

정 형 환 (鄭亨煥)

1941년 1월 19일생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수.