

실 변수 엘리트주의 유전알고리즘을 이용한 SVC 계통의 안정화 장치의 설계

論 文
50A-7-4

A Design of Power System Stabilization for SVC System Using a RVEGA

鄭亨煥* · 許東烈** · 李丁必** · 王龍泌***

(Hyeng-Hwan Chung · Dong-Ryol Hur · Jeong-Phil Lee · Yong-Peel Wang)

Abstract - In this paper, it is suggested that the selection method of parameter of Power System Stabilizer(PSS) with robustness in low frequency oscillation for Static VAR Compensator(SVC) using a Real Variable Elitism Genetic Algorithm(RVEGA). A SVC, one of the Flexible AC Transmission System(FACTS), constructed by a fixed capacitor(FC) and a thyristor controlled reactor(TCR), is designed and implemented to improve the damping of a synchronous generator, as well as controlling the system voltage. The proposed PSS parameters are optimized using RVEGA in order to maintain optimal operation of generator under the various operating conditions. To decrease the computational time, real variable string is adopted.

To verify the robustness of the proposed method, we considered the dynamic response of generator speed deviation and generator terminal voltage by applying a power fluctuation and three-phase fault at heavy load, normal load and light load. Thus, we prove the usefulness of proposed method to improve the stability of single machine-infinite bus with SVC system.

Key Words : Power System Stabilizer(PSS), Flexible AC Transmission System(FACTS), Real Variable Elitism Genetic Algorithm(RVEGA), Static VAR Compensator(SVC)

1. 서 론

대전력 반도체 소자 기술의 발달에 힘입어 고전압 및 대전류의 전력 변환 기기의 구현이 용이해 짐에 따라 기존의 교류 송전 방식에서 고정되어 있는 선로의 임피던스와 계통의 조건에 의해 결정되어 지는 모선의 위상각 등을 전력 전자 기술을 이용해 연속적으로 실시간 제어하여 전력계통에 유연성과 제어 성능을 향상시킴으로써 운전 효율과 신뢰도를 극대화시키기 위한 방안으로써 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System : FACTS) 기술이 개발되어 이를 계통에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

FACTS로 분류되는 여러 기기중 기존의 전압제어 및 무효전력보상기들이 가지고 있는 비속응성과 불연속성 문제를 해결해줄 수 있는 정지형 무효전력보상기는 병렬 구조를 가지고 있으며, 모선전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬 서셉터를 변화시킴으로써 모선전압을 빠르고 연속적으로 제어하는 기기로서 FACTS 기기중 가장 먼저 개발되고 현장에 적용되어 그 효과가 널리 검증되었고, 현재는 완전

실용화 단계에 있다. 또한 SVC는 모선전압의 제어가 기본적인 제어의 목적이며 부가적으로 과도안정도 향상, 전력동요억제, 저주파진동의 억제 등의 다양한 제어가 가능하다. 이러한 SVC는 국내에서도 채택되어 대구지역의 전압강하 문제를 해결하기 위하여 설치 운전 중에 있다[4-7].

그러나 SVC 등과 같은 FACTS 기기만으로는 전력수요 증가에 따른 저주파 진동 현상, 경부하 심야 운전 중의 전압 상승 등 시스템 안정도 문제를 완벽히 해결 할 수 없다. 이와 같이 전력계통의 저주파 진동을 억제하고 계통의 안정도 특성을 향상시키기 위해서 발전기 제어장치인 전력계통안정화장치(Power System Stabilizer : PSS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. K. Bollinger[9] 등은 위상 보상 회로의 시정수에 따른 근궤적을 구하여 PSS의 계수를 구하는 방법, R. J. Fleming[10] 등은 동요 모드의 고유치를 지정하는 극 배치 방법, O. H. Abdalla[11] 등은 고유치의 감도를 이용하는 방법 등을 제안하였다. 최근 P. Kundur[12] 등에 의한 미소 신호 안정도 해석과 위상 보상법의 개발은 PSS 설계에 중요한 전기를 제공하였으며, C. J. We[13] 등은 자기 동조 제어기법을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였다. 그러나 PSS는 그 구조가 다양하고 설계방법이 복잡하여 이의 사용에 고도의 전문성이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 발전기 제어계인 안정화 장치의 최적 파라미터 선정 방법으로 자연 생태계의 진화를 모의한 유전알고리즘(GA : Genetic Algorithm)을 이용하였다. 그러나 기존의 유전 알고리즘은 많은 장점에도 불구하고, 변수들

* 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣電子컴퓨터工學部 教授 · 工博

** 正 會 員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 東亞大 工大 情報技術研究所 特別研究員 · 工博

接受日字 : 2001年 1月 29日

最終完了 : 2001年 6月 8日

을 유한 길이의 2진 스트링(string)으로 코딩(coding)하므로 다변수인 경우 많은 계산 시간을 필요로 하고 정확성을 상실할 수도 있다. 또한 구조적인 문제점으로 인해 극부값에서 조기 수렴하는 현상이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하고자 변수의 코딩 절차없이 실 변수(Real Variable)로 최적화 함으로써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지하는 방법과 양질의 유전자를 보존하며 열성 유전자를 제거하여 보다 적은 반복 횟수로도 좋은 해를 찾아 나갈 수 있는 엘리트주의(Elitism)를 이용하였다. 즉 이상과 같이 기존의 유전 알고리즘을 개선한 방법으로 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘(RVEGA : Real Variable Elitism Genetic Algorithm)을 이용하였다. 이러한 제안된 방법의 강인성을 검증하기 위해 여러 가지 운전조건에 대해 전력계통 안정도를 해석하여 기존의 안정화 장치를 적용한 경우와 비교함으로써 유용성을 입증하였다.

2. 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘

유전 알고리즘(GA : Genetic Algorithm)은 John Holland 에 의해 1970년대에 집단이 가진 염색체가 세대에 따라 그들이 처한 환경에 대하여 생존과 번식에 적합한 활동을 위한 자연 선택(natural selection) 때문에 진화된다는 다윈의 진화 이론을 토대로 한 자연의 유전 원리를 모방하여 도입되기 시작하였다. 이 알고리즘은 최근 최적화 문제를 해결하는데 적용하고 있으며 해를 구하는 방법에서 종래의 방법과 비교할 때 강인한 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. 교배는 두 염색체간의 임의의 난수 발생에 의해 구한다. 돌연변이는 부모의 염색체 중 임의의 비트가 현재 비트 값이 대립되는 값으로 바뀌는 것이다. 즉 선택된 비트 값이 0이면 1로, 1이면 0으로 변환된다. 이와 같은 탐색 방법을 사용하는 유전 알고리즘은 다변수의 제약 조건이 많은 복잡한 비선형 최적화 문제에 특히 유용하다.

그러나 기존의 유전 알고리즘은 변수들을 유한 길이의 2진 스트링으로 코딩해야 한다. 코딩할 스트링의 길이와 변수의 해는 trade-off 관계에 있다는 것을 알 수 있다. 더욱 정확한 해를 요구한다면 스트링의 길이는 매우 길어야 한다. 긴 스트링에 대한 코딩 절차는 많은 계산 시간을 필요로 하고 수렴 정도를 감소시킨다. 따라서 본 연구에서 변수를 유한 길이로 코딩하는 절차가 필요없이 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 기존의 유전 알고리즘의 문제점과 더불어 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 문제

점은 돌연변이 확률을 높임으로써 어느 정도 극복할 수 있으나, 이를 극복하는 데에는 한계점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 제안한 엘리트주의 유전 알고리즘은 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 탈락되는 것을 방지하며, 교배시에 더 열성의 후손이 생성될 경우 이를 배제시키는 것이다. 이상의 두가지 방법을 결합한 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘(RVEGA)의 흐름도는 그림 1과 같다.

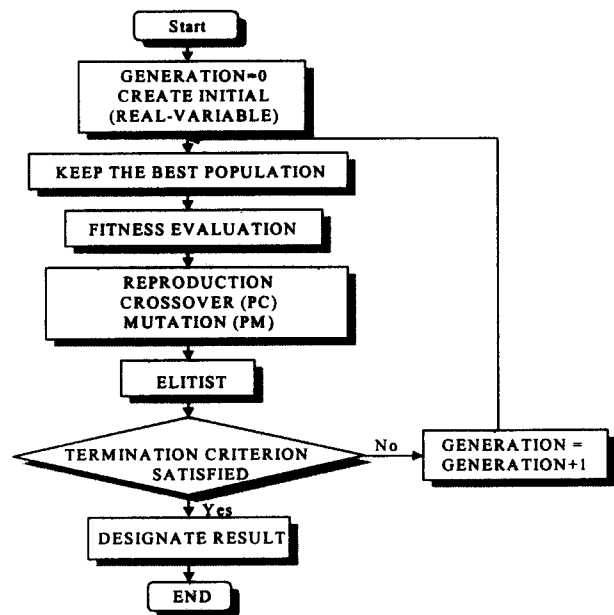


그림 1 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘의 흐름도
Fig. 1 Flowchart of real variable elitism genetic algorithm

3. 전력 시스템의 수학적 모델

3.1 전력시스템 모델

SVC는 빠른 응답속도를 가지고 연속적으로 무효전력을 보상함으로써, 제어 범위내에서는 내부 인덕턴스를 가지는 전압원으로 동작하며 일정 전압을 유지하고, 제어 범위를 벗어나면 고정된 용량을 가지는 커패시터 또는 리액터로 표현되게 된다. 즉, 제어 범위내에서 SVC는 우수한 동적전압안정도 특성과 전압제어 특성을 나타낸다.

본 연구에서 고찰하고자 하는 SVC를 포함한 1기 무한대 모션 계통 모델은 그림 2와 같으며, SVC는 감압 변압기를 경유하여 전력계통에 병렬로 연결되어 무효전력을 흡수 또는 공급함으로써, 전압을 일정하게 유지하거나 원하는 제어 동작을 수행하는 장치이다. 기존의 진상 무효전력 보상기인 전력용 콘덴서(Shunt Capacitor)와 지상 무효전력 보상기인

병렬 리액터(Shunt Reactor) 등과는 달리, SVC는 연속적인 제어를 수행함으로써, 동기조상기와 비슷한 제어특성을 가지게 된다. SVC는 목적에 따라 다양한 구성을 가지고 있으나, 가장 일반적인 구조는 그림 2에서와 같이, 고정된 용량의 커패시터(FC : Fixed Capacitor)와 사이리스터 제어에 의하여 용량이 가변되는 인덕터(TCR : Thyristor Controlled Reactor)가 병렬로 연결된 구조를 가지고 있으며, 전체적으로 사이리스터에 의하여 제어되는 가변 서셉턴스(B : Susceptance)로 볼 수 있다[1, 5-7, 18-20].

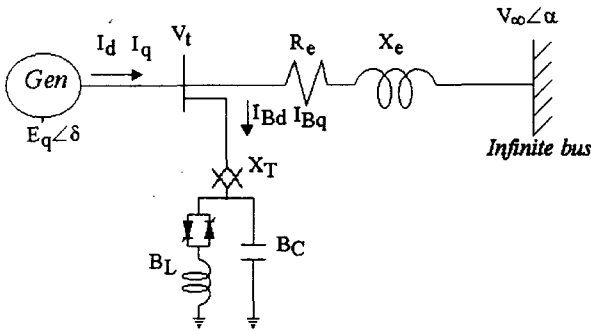


그림 2 SVC 시스템을 포함한 1기 무한 모선 계통
Fig. 2 Single machine-infinite bus with SVC system

또한, 본 논문에서는 동적 안정도 해석을 위한 전력계통의 선형화된 방정식을 유도하기 위하여 송전선로를 통하여 무한모선에 연결된 IEEE Type 1의 여자기를 가진 동기기로 구성된 전력계통 모델을 이용하였으며, 다음과 같은 선형화된 시스템 방정식을 유도할 수 있다.

$$\dot{\delta}_d = \omega_R \omega_d \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_d = -\frac{K_1}{M} \delta_d - \frac{D}{M} \omega_d - \frac{K_2}{M} E'_{qd} + \frac{1}{M} T_{md} \quad (2)$$

$$\dot{E}'_{qd} = -\frac{K_4}{\tau'_{d0}} \delta_d - \frac{1}{K_3 \tau'_{d0}} E'_{qd} + \frac{1}{\tau'_{d0}} E_{FDd} \quad (3)$$

$$\dot{E}_{FDd} = -\frac{(S_E + K_E)}{T_E} E_{FDd} + \frac{1}{T_E} V_{Rd} \quad (4)$$

$$\dot{V}_{Rd} = -\frac{K_5 K_A}{T_A} \delta_d - \frac{K_6 K_A}{T_A} E'_{qd} - \frac{1}{T_A} V_{Rd} - \frac{K_A}{T_A} V_{Ed} + \frac{K_A}{T_A} U_e \quad (5)$$

$$\dot{V}_{Ed} = -\frac{K_F (S_E + K_E)}{T_E T_F} E_{FDd} + \frac{K_F}{T_E T_F} V_{Rd} - \frac{1}{T_F} V_{Ed} \quad (6)$$

식(1)~(6)에 의해서 상태공간 표현 형태의 식(7), (8)로 유도할 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (7)$$

$$Y = CX \quad (8)$$

여기서, X는 상태벡터, Y는 출력신호, U는 입력신호이다. 상태 변수 X와 선형화된 모델의 행렬 A, B 및 C의 요소는 다음과 같다.

$$X = [\delta_d \ \omega_d \ E'_{qd} \ E_{FDd} \ V_{Rd} \ V_{Ed}]^T \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_4}{\tau'_{d0}} & 0 & \frac{-1}{K_3 \tau'_{d0}} & \frac{1}{\tau'_{d0}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_E}{T_E} & \frac{1}{T_E} & 0 \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & 0 & \frac{-1}{T_A} & \frac{-K_A}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_E K_F}{T_E T_F} & \frac{K_F}{T_E T_F} & \frac{-1}{T_F} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ K_A/T_A \ 0]^T, \quad C = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

여기서, 기호 “d”는 초기 동작점으로부터 미소변위를 의미하고, K_1 과 K_2 는 전기적인 회전력(torque)에서, K_3 와 K_4 는 계자 전압방정식에서, K_5 와 K_6 은 단자전압크기에서 계산된 선형화된 정수값 들이며, M는 관성계수, D는 제동계수, τ'_{d0} 는 과도 시정수, K_F 및 T_F 는 여자기 진동방지회로의 상수 및 시정수, S_E 는 포화정수, K_E 및 T_E 는 여자기 상수 및 시정수, K_A 및 T_A 는 여자 증폭기 상수 및 시정수, ω_R 는 기준 각속도, δ 는 부하각, V_t 는 단자전압, V_{ref} 는 발전기 기준전압, E'_q 는 계자쇄교자속에 비례하는 전압, E_{FD} 는 발전기 여자전압, V_E 는 조정기 안정화 회로 전압, V_R 는 조정기 증폭기 전압, T_m 는 기계적 입력 토크, x_d 는 동기 리액턴스의 직축 성분, x_q 는 동기 리액턴스의 횡축 성분, x'_d 는 과도 리액턴스, R_e 는 선로 저항, X_e 는 선로 리액턴스이다.

3.2 전력 시스템 안정화 장치의 구조

그림 3은 PSS의 한 모델이다[13]. 전달 함수 GEP(s)는 동기기의 회전각이 일정할 때, 여자기 입력에 대한 전기적 토크간의 전달 함수를 나타내고, 동기기와 여자기 특성에 의해 결정된다.

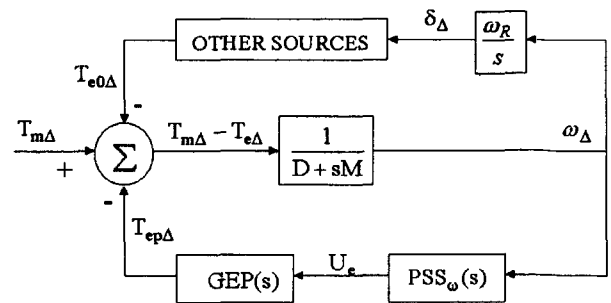


그림 3 회전자 속도를 입력으로 하는 PSS
Fig. 3 Functional representation of PSS with rotor speed as input

여기에서 $T_{ep\Delta}$ 는 PSS에 의해 발생하는 토오크 성분이고, 그 밖의 요소들에 의해 발생하는 토오크 성분은 $T_{e\Delta}$ 이다. 이때 PSS 신호에 의한 토오크 성분은 식(11)과 같다.

$$\frac{T_{ep\Delta}}{\omega_{\Delta}} = PSS_{\omega}(s)GEP(s) \quad (11)$$

4. 실 변수 엘리트주의 유전알고리즘을 이용한 전력시스템 안정화 장치의 설계

RVEGA를 이용하여 PSS의 최적 파라미터를 구하기 위하여, 목적함수는 선형 2차 평가 함수로 식(12)와 같이 표현한다.

$$\min_{K_c, T, T_1, T_2} \left\{ J = \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t)Qx(t)]dt \right\} \quad (12)$$

단, Q : 상태 가중치 행렬($n \times n$)

평가함수의 최소화를 위한 각 PSS의 최적 파라미터를 구하는 문제는 제약 조건도 많고 계산량도 많은 복잡한 최적화 문제이다. 그러나, RVEGA는 단지 어떤 해에 대한 적합도만 계산하면 확률적인 방법으로 최적해, 즉 평가 함수가 최소가 되는 최적 파라미터를 구할 수 있다.

평가함수를 최소화하는 문제를 위한 스트링을 각 PSS에 따라 구성하면 그림 4와 같다.

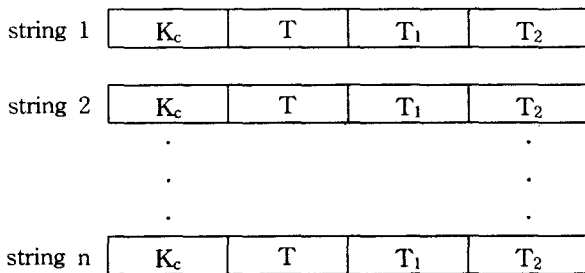


그림 4 해 집단의 구조
Fig. 4 Population Structure

따라서 각 스트링을 평가할 때 위에서 전술한 조건을 만족하도록 적합도를 식(13)과 같이 선정하였다.

$$Fitness = \frac{1.0}{1.0 + \min.J} \quad (13)$$

본 논문에서 고찰하고자 하는 PSS의 구조는 회전자 속도를 입력으로 사용하는 PSS로서 그림 5와 같으며, 전달 함수는 식(14)와 같다.

여기서, K_c 는 PSS의 이득이고 T 는 washout 시정수, $T_1 \sim T_2$ 는 PSS의 특성을 결정하는 시정수이다. 회전자 진동을 감쇄시키기 위하여 PSS는 속도 변화에 비례하는 전기적 토오크를 발생해야 하는데, 이를 위해서는 PSS에서 여

자기 입력과 전기적 토오크 간의 전달 함수의 위상 지연을 보상해 주면 된다.

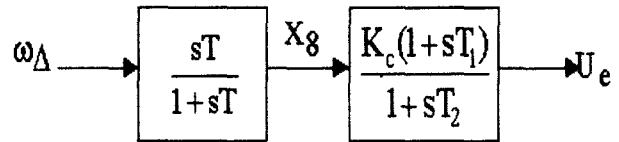


그림 5 PSS의 블록선도
Fig. 5 Block diagram of PSS

$$PSS_{\omega}(s) = K_c \frac{sT}{1+sT} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \quad (14)$$

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서 설계한 RVEGA를 이용하여 PSS 파라미터를 최적화 하는 SVC 계통은 그림 6과 같다. 단자 전압과 기준 전압과의 오차 $V_{ref} - V_t$ 를 입력으로 하여 SVC의 서셉턴스 B_L 을 조절하여 단자전압을 제어하는 신호가 되는데, 제어기의 입력으로 보조안정화신호 V_s 를 추가하면 제어성능은 향상된다. 따라서 보조안정화 신호를 출력으로 하는 PSS를 구성하였고, PSS의 입력변수는 발전기 동기속도의 오차 ω_{Δ} 로 선정하였다. PSS의 입력 변수를 이와 같이 선정한 이유는 본 논문의 대상시스템인 IEEE Benchmark 모델에 발전기가 연결되어 있으며, 시스템 외란에 따라서 발전기 속도가 변동하기 때문이다. RVEGA를 이용한 PSS의 적용목적은 SVC의 서셉턴스를 제어하여 단자전압을 제어하는 것이다. 본 논문에서 사용한 동기기, 여자기 및 선로 정수, 시스템 초기 동작조건과 SVC 파라미터는 표 1과 같다. 또한 각 경우에 대하여 중부하, 정상부하 및 경부하시에 전력 시스템 안정화 장치의 파라미터 선정을 위한 RVEGA의 계수는 표 2와 같다.

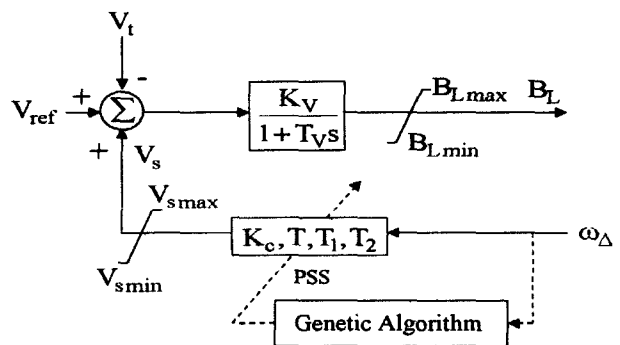


그림 6 RVEGA를 이용한 SVC 계통의 PSS
Fig. 6 Block diagram of PSS for SVC system using RVEGA

실제의 전력 시스템은 부하의 변동에 따라 선형화 계수가 변하는 비선형 시스템이기 때문에, 상태가 변함에 따라 비선형 시뮬레이션을 수행하여야 하지만, 본 논문에서는 각 부하

에 대하여 100[ms] 동안에 전력이 3[%] 변동한 경우에 대하여 계통 운용조건을 설정하고, 각 운전점에서 선형화된 모델을 이용하여 Yu의 보상기 설계 이론에 의한 파라미터 선정 방법과 RVEGA를 사용하였을 때를 비교하여 동특성을 검토하였다. 또한 선형화한 $K_1 \sim K_6$ 은 시스템 조건에 따라 변하는 정수이기 때문에 시스템 조건에 따라 각각 계산하였고, 그에 따른 시스템 고유치를 판별하여 안정도를 해석하였다.

표 1. 시스템 파라미터

Table 1. System parameters

Synchronous Machine(p.u.)	Excitation System and Transmission line(p.u.)	SVC system(p.u.)
$x_d=1.7$	$K_A=400, T_A=0.05[\text{sec}]$	$K_v=10.0$
$x_q=1.64$	$K_F=0.025, T_F=1.0[\text{sec}]$	$T_v=0.15[\text{sec}]$
$x_d'=0.245$	$K_E=-0.17, T_E=0.95[\text{sec}]$	$B_c=0.6, X_T=0.08$
$D=0.0$	$V_{Rmax}=5.04, V_{Rmin}=-5.04$	$B_{L0}=-0.45$
$H=2.37[\text{sec}]$	$S_{Emax}=0.02, S_{Emin}=0.001$	$B_{Lmax}=-0.3$
$\tau_{d0}'=5.9[\text{sec}]$	$R_e=0.02, X_e=0.4$	$B_{Lmin}=-0.9$
		$V_{smax}=0.12$
		$V_{smin}=-0.12$

표 2. RVEGA의 정수

Table 2. Parameter of RVEGA

	String size	Population size	Crossover rate	Mutation rate
Heavy load	4	100	0.85	0.01
Normal load	4	100	0.85	0.01
Light load	4	100	0.85	0.01

본 논문에서는 RVEGA를 이용하여 PSS의 파라미터를 구하기 위하여 초기 상태를 정상부하시($P_e=1.0[\text{p.u.}]$, $Q_e=0.595[\text{p.u.}]$) 100[ms] 동안에 전력이 3[%] 변동한 경우에 적용하였다. Yu의 방법과 RVEGA를 이용한 전력 시스템 안정화 장치의 최적 파라미터는 표 3과 같고, 시스템 선형화 계수 $K_1 \sim K_6$ 은 표 4와 같다. 또한 각 부하에 대한 Yu의 방법과 RVEGA를 이용한 전력시스템 안정화 장치의 최적 파라미터를 갖는 PSS의 주파수 응답특성을 그림 7, 그림 8 및 그림 9에 나타내고 있다.

표 3. Yu와 RVEGA에 사용한 PSS의 최적 파라미터

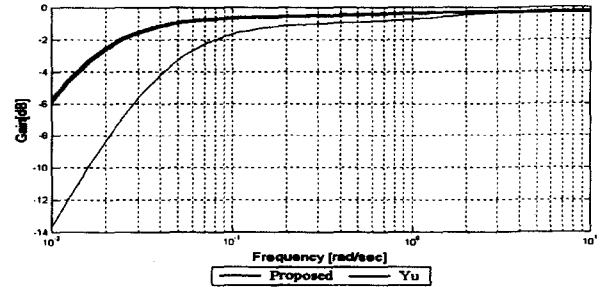
Table 3. Optimal parameter of PSS using Yu and RVEGA

Parameter Method	K_c	T	T_1	T_2
Yu 방법	7.0900	3.0000	0.6850	0.1000
RVEGA	12.9007	4.9700	2.9810	1.1442

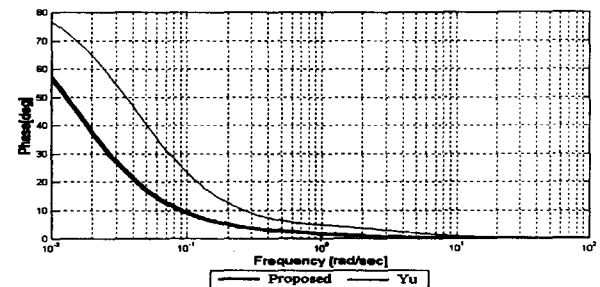
표 4. $K_1 \sim K_6$ 의 파라미터

Table 4. Parameters of $K_1 \sim K_6$

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
중부하시	1.2145	1.3545	0.3072	1.7109	-0.0237	0.4739
정상부하시	1.0746	1.2578	0.3072	1.7116	-0.0477	0.4971
경부하시	0.9086	1.1063	0.3072	1.7116	-0.0841	0.5291



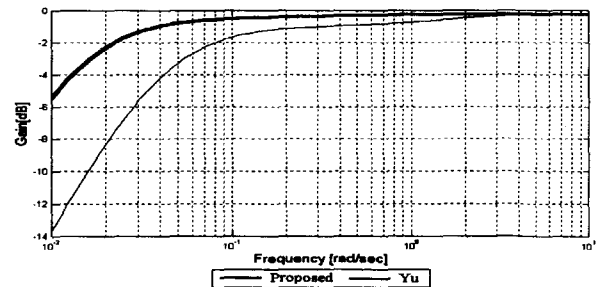
(a) Gain



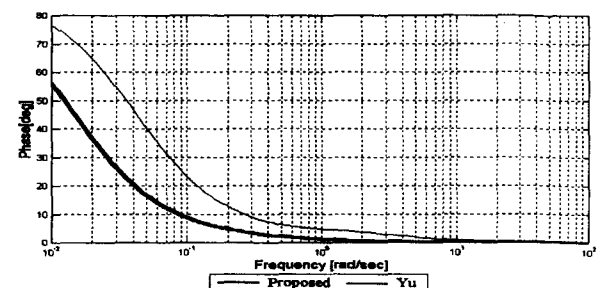
(b) Phase

그림 7 중부하시 PSS 주파수 응답

Fig. 7 Frequency response of PSS in heavy load



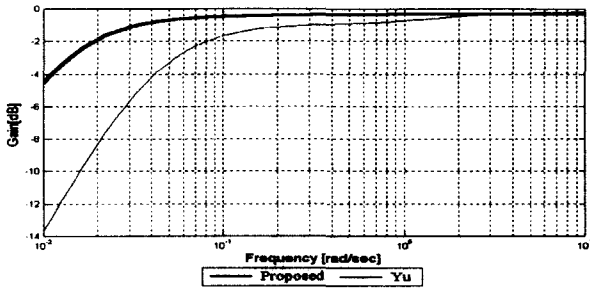
(a) Gain



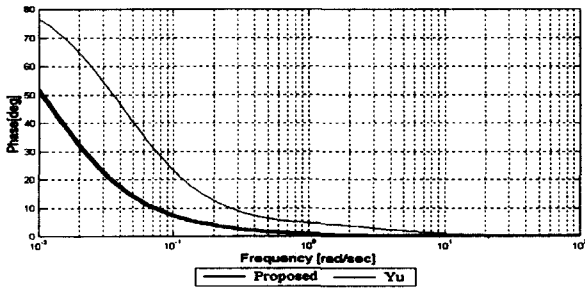
(b) Phase

그림 8 정상부하시 PSS의 주파수 응답

Fig. 8 Frequency response of PSS in normal load



(a) Gain

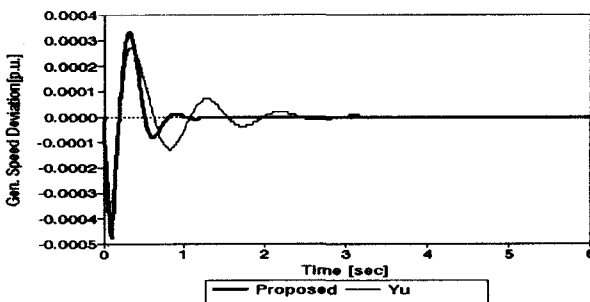


(b) Phase

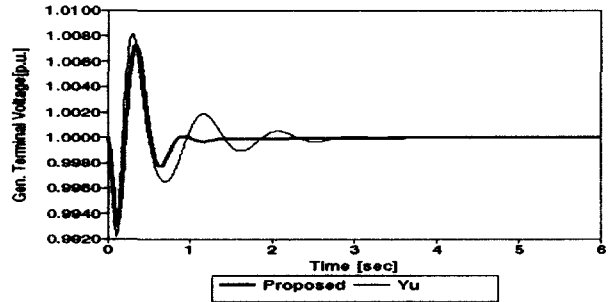
그림 9 경부하시 PSS 주파수 응답

Fig. 9 Frequency response of PSS in light load

그림 10은 중부하시($P_e=1.3$ [p.u.], $Q_e=0.595$ [p.u.]) 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우에 SVC를 포함한 시스템에 RVEGA를 이용한 PSS (Proposed)와 종래의 Yu의 방법을 이용한 PSS(Yu)에 대하여 비교·고찰하여 나타내었고, 그림 11은 중부하시 3상 고장이 100[ms] 동안에 지속되다가 계통구성 변경 없이 제거되었을 경우에 SVC를 포함한 시스템에 RVEGA를 이용한 PSS (Proposed)와 종래의 Yu의 방법을 이용한 PSS(Yu)에 대하여 각각 비교·고찰하여 나타내었다. 그림 11은 정상부하시($P_e=1.0$ [p.u.], $Q_e=0.595$ [p.u.]) 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우이고, 그림 12는 정상부하시 3상 고장이 100[ms] 동안에 지속되다가 계통구성 변경 없이 제거되었을 경우이다. 또한 그림 13과 그림 14는 각각 경부하시($P_e=0.7$ [p.u.], $Q_e=0.595$ [p.u.])에 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우와 3상 고장이 100[ms] 동안에 지속되다가 계통구성 변경 없이 제거되었을 경우를 나타내고 있다.



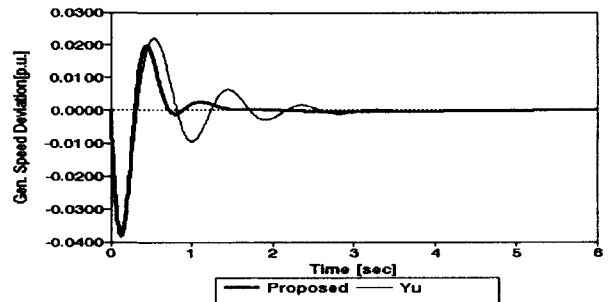
(a) Generator speed deviation



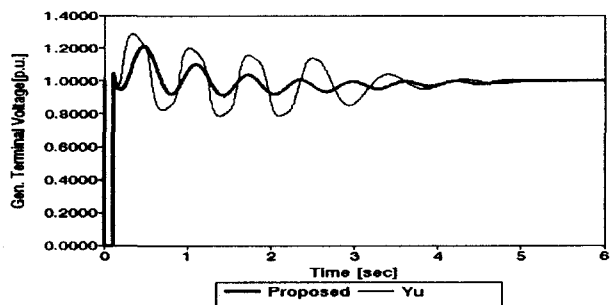
(b) Generator terminal voltage

그림 9 중부하시 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답

Fig. 9 Response of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100[ms] in heavy load



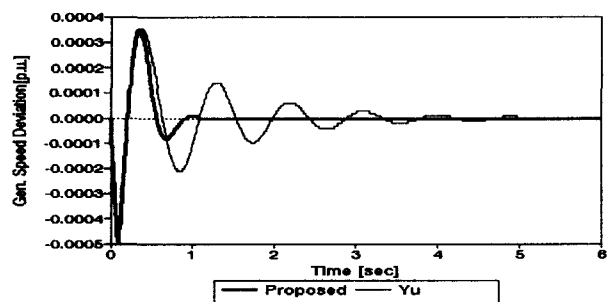
(a) Generator speed deviation



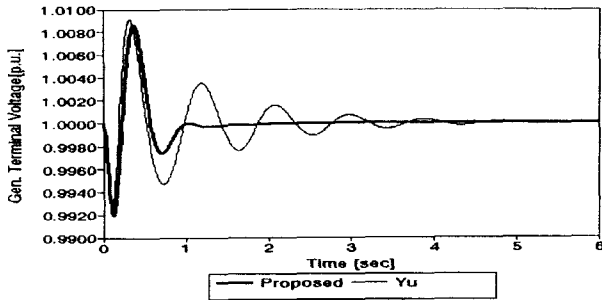
(b) Generator terminal voltage

그림 10 중부하시 3상 고장이 발생했을 경우의 발전기 응답

Fig. 10 Response of generator when three-phase fault was generated in heavy load



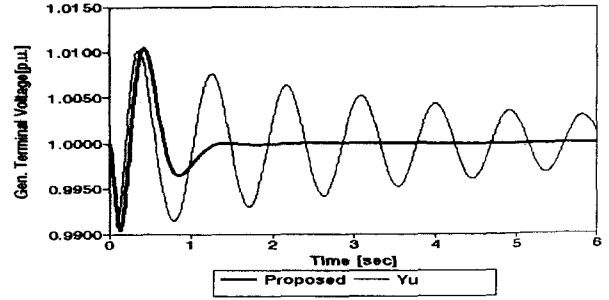
(a) Generator speed deviation



(b) Generator terminal voltage

그림 11 정상부하시 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답

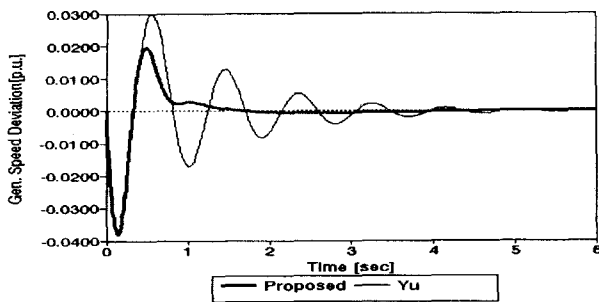
Fig. 11 Response of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100[ms] in normal load



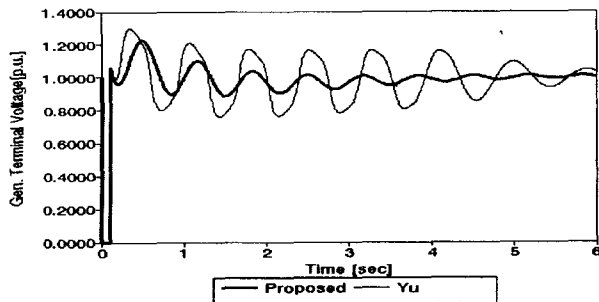
(b) Generator terminal voltage

그림 13 경부하시 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답

Fig. 13 Response of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100[ms] in light load



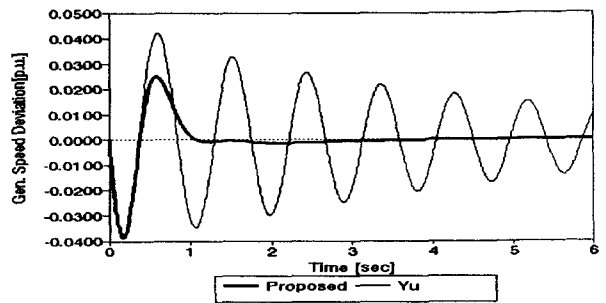
(a) Generator speed deviation



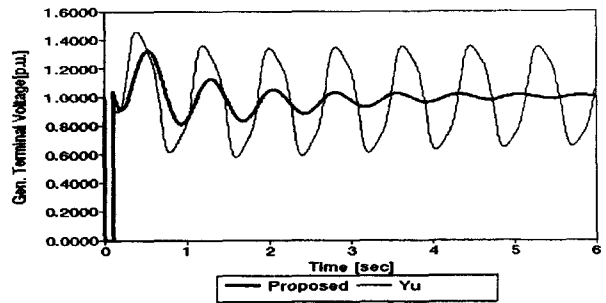
(b) Generator terminal voltage

그림 12 정상부하시 3상 고장이 발생했을 경우의 발전기 응답

Fig. 12 Response of generator when three-phase fault was generated in normal load



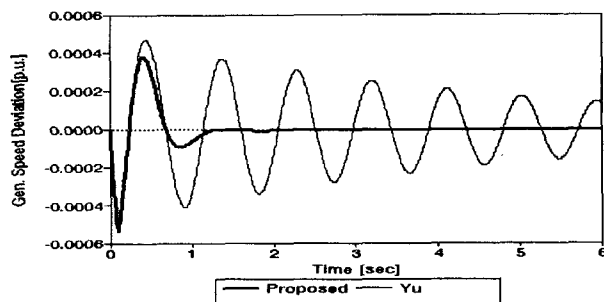
(a) Generator speed deviation



(b) Generator terminal voltage

그림 14 경부하시 3상 고장이 발생했을 경우의 발전기 응답

Fig. 14 Response of generator when three-phase fault was generated in light load



(a) Generator speed deviation

6. 결 론

본 논문에서는 시스템 안정도를 향상시키기 위해 실 변수 엘리트주의 유전알고리즘을 이용하여 저주파 진동에 강인성을 가지는 전력 시스템 안정화장치를 설계한 후, 모션전압의 제어가 기본적인 제어의 목적이며 빠른 응답속도와 연속적인 제어로 제어범위 내에서는 전압을 효과적으로 제어할 뿐만 아니라, 빠른 응답속도를 이용하여 과도상태의 유효전력을 제어함으로써 전력 시스템의 다양한 문제를 해결하기 위

하여 활용되고 있는 정지형 무효전력 보상기를 포함한 전력 시스템에 적용하여 안정도를 해석하였다.

중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) RVEGA를 이용한 PSS의 최적 파라미터 선정이 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- (2) RVEGA를 이용하여 설계한 전력 시스템 안정화장치는 광범위하고 복잡한 계통에 대해서도 안정적이고 효율적인 제어성능을 유지함을 알 수 있었다.
- (3) RVEGA를 이용하여 전력 시스템 안정화장치의 매개변수를 최적으로 선정함으로써 발전기의 계동특성이 향상되어 전력계통의 상태변화에 효과적으로 대응할 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) RVEGA 전력 시스템 안정화장치를 이용한 전력계통의 안정도 해석 결과 각속도 편차 및 발전기 단자전압 특성의 발전기 응답특성이 기존의 전력 시스템 안정화장치를 적용한 경우에 비해서 우수함을 입증하였다. 향후 SVC를 포함한 대기계통과 초고압 직류 송전의 연계 계통에 연구가 계속 되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] A. E. Hammad, "Analysis of Power System Stability Enhancement by Static Var Compensators", IEEE Trans. PWRs, Vol. 1, No. 4, pp. 222-227, 1986.
- [2] 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.
- [3] 김학만, 오태규, 신명철, 손광명, "GA를 이용한 TCSC 적용 LQ 제어기의 가중행렬 선정 기법", 전기학회논문지, 제 46권, 제 12호, pp. 1708-1715, 1997
- [4] 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
- [5] C. H. Cheng and Y. Y. Hso, "Application of a Power System Stabilizer and a Static Var Controller to a Multi-machine Power System", IEE Proc., Vol. 137, No. 1, pp. 8-12, 1990.
- [6] P. M. Anderson and A. A. Found, "Power System Control and Stability", IEEE Press. New York, 1993
- [7] 문경섭, 손광명, 이태기, 이송근, 박종근, "무효전력 보상여유를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어", 전기학회논문지, 제 48권, 제 4호, pp.351-357, 1999
- [8] Yao-nan Yu, "Electric Power System Dynamic", Academic Press, INC, 1983.
- [9] K. Bollinger et al, "Power System Stabilizer Design using Root-Locus Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. 94, No. 5, pp. 1484-1488, 1975
- [10] R. J. Fleming, M. A. Mohan and K. Parvatisam, "Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power System", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 5, pp. 2329-2333, 1981
- [11] O. H. Abdalla, et al, "Coordinated Stabilization of Multimachine Power System", IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 3, pp. 483-491, 1984
- [12] P. Kundur, N. Klein, G. J. Rogers and M. S. Zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 2, 1989
- [13] C. J. We and Y. Y. Hsu, "Design of Self-Tuning PID Power System Stabilizer of Multimachine Power System", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 3, No. 3, 1988
- [14] 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. 10ct, 1993
- [15] J. J. Grefenstette, "Optimization of control parameters for genetic algorithms", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetic, Vol. SMC-16, 1986
- [16] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search Optimization & Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1989
- [17] K. E. Kinneer, "Advances in Genetic Programming", The MIT Pres, 1994
- [18] C. J. Wu and Y. S. Lee, "Damping of Synchronous Generator by Static Reactive Power Compensator with Digital Controller", IEE Proc., Vol. 138, No. 5, pp. 427-432, 1991.
- [19] 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
- [20] 이송근, "새로운 ULTC 제어모델을 이용한 ULTC와 SVC의 협조제어", 대한전기학회지, Vol. 49, No. 11, 2000

저 자 소 개



정 형 환 (鄭 亨 煥)

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

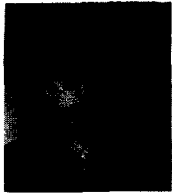
Tel : 051-200-7733 Fax : 051-200-7743
E-mail : hhchong@mail.donga.ac.kr



이 정 필 (李 丁 必)

1971년 8월 19일 생. 1997년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 051-200-6747
E-mail : leejp@mail.taegu.net



허 동 렬 (許 東 烈)

1969년 11월 10일 생. 1995년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 051-200-6747
E-mail : a967650@mail.donga.ac.kr



왕 용 필 (王 龍 泌)

1966년 8월 25일 생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1999년~2001년 뉴질랜드 Canterbury University(Post- Doc).

현재 동아대 정보기술연구소 특별연구원.
Tel : 051-200-6747
E-mail : e948730@mail.donga.ac.kr