

유전 알고리즘을 이용한 SVC 계통의 최적 PI 제어기 설계

論 文

49A-5-3

A Design of Optimal PI Controller of SVC System using Genetic Algorithms

鄭亨煥* · 許東烈** · 王龍泌*** · 韓吉萬[§] · 金海在^{§§}

(Hyeng-Hwan Chung · Dong-Ryol Hur · Yong-Peel Wang · Gill-Man Han · Hae-Jae Kim)

Abstract - This paper deals with a systematic approach to GA-PI controller design for static VAR compensator(SVC) using genetic algorithms(GAs) which are search algorithms based on the mechanics of natural selection and natural genetics, to improve system stability. 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.

To verify the robustness of the proposed method, considered 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 proved usefulness of GA-PI controller design to improve the stability of single machine-infinite bus with SVC system.

Key Words : Flexible AC Transmission System(FACTS), Genetic Algorithm(GA), Optimal PI Controller, Static VAR Compensator(SVC)

1. 서 론

기존의 교류 송전 방식에서 고정되어 있는 선로의 임피던스와 계통의 조건에 의해 결정되어 지는 모선의 위상각 등을 전력 전자 기술을 이용해 연속적으로 실시간 제어하여 전력계통에 유연성을 부여함으로써 운전 효율과 신뢰도를 극대화하려는 FACTS (Flexible AC Transmission System)의 도입이 활발히 진행되고 있다. 대표적인 기기로는 정지형 무효전력 보상기(Static VAR Compensator, SVC), 사이리스터 제어 직렬 보상기(Thyristor Controlled Series Compensator, TCSC) 등이 있다[1-5].

FACTS로 분류되는 여러 기기중 기존의 전압제어 및 무효전력보상기들이 가지고 있는 비속응성과 불연속성 문제를 해결해줄 수 있는 정지형 무효전력보상기(Static Var Compensator, SVC)는, FACTS 기기중 가장 먼저 개발되고 현장에 적용되어 그 효과가 널리 검증되었고, 현재는 완전 실용화 단계에까지 와 있으며, 부하에 응동하여 연속적으로 무효전력을 보상함으로써 효과적으로 전압을 제어한다. SVC는 모선전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬

Susceptance를 변화시킴으로써 모선전압을 빠르고 연속적으로 제어하는 기기로서, 모선전압의 제어가 기본적인 제어의 목적이며 부가적으로 과도안정도 향상, 전력동요억제, 저주파진동의 억제 등의 다양한 제어가 가능하다. 따라서, 그 목적상 주로 부하측 모선에 설치되어 운전되어지며, 기존의 전압제어 기기들과 상호작용이 이루어진다. 이러한 SVC는 국내에서도 채택되어, 대구지역의 전압강하 문제를 해결하기 위하여 설치 운전 중에 있다[6-9].

빠른 응답속도와 연속적인 제어범위 내에서는 전압을 효과적으로 제어할 뿐만 아니라, 빠른 응답속도를 이용하여 과도상태의 유효전력을 제어함으로써 전력계통의 안정도 문제를 해결하기 위하여 활용되고 있는 SVC를 포함한 전력계통에 PI 제어기를 이용한 연구가 계속되어 왔다 [6,10-12,17-18]. 이 방법은 극 배치 방법에 의한 방법으로서 복잡한 수식과 고유치 해석을 통하여 설계하여야 하기 때문에 시간이 많이 소모된다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 복잡한 수식이 필요 없고 계산시간을 감소시키며 적은 반복횟수로도 최적해를 찾을 수 있는 자연 생태계의 진화를 모의한 유전 알고리즘을 이용한 PI 제어기(GA-PI Controller) 설계에 관하여 연구하였다. 제안된 방법의 유용성을 입증하기 위해 SVC 없는 본래의 시스템 및 종래의 PI 제어기를 적용한 SVC 시스템과 동특성을 비교·고찰하였고, 각 시스템에 대한 주요 진동모드의 고유치를 해석하여 제동효과를 검증하였다. 그리고 제안된 방법의 강인성을 입증하기 위해 중부하시, 정상부하시 및 경부하시에 초기 전력을 변동시킨 경우와 3상 고장이 발생한 경우에 대하여 발전기 각속도 편차특성 및 발전기 단자전압의 동특성을 고찰하였다. 이러한 과정을 통하여 SVC를 포함한 1기 무한대 모

* 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 : Dept. of Electrical & Electronic Eng., Univ. of Canterbury(New Zealand), Post-Doc. · 工博
[§] 正會員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 碩士課程
^{§§} 正會員 : 馬山大學 電氣科 助教授 · 工博
接受日字 : 1999年 12月 9日
最終完了 : 2000年 4月 20日

선 계통의 안정도 향상을 위하여 유전 알고리즘을 이용한 최적 PI 제어기 설계의 타당성을 확인하였다.

2. 계통 모델

동적 안정도 해석을 위한 전력계통의 선형화 된 모델을 유도하기 위하여, 본 논문에서는 송전선로를 통하여 무한모선에 연결된 IEEE Type 1의 여자기를 가진 동기기로 구성된 전력계통 모델을 이용하였다. 그림 1은 1기 무한 모선 계통의 선형화 된 모델의 블록 선도를 나타낸다[13-15].

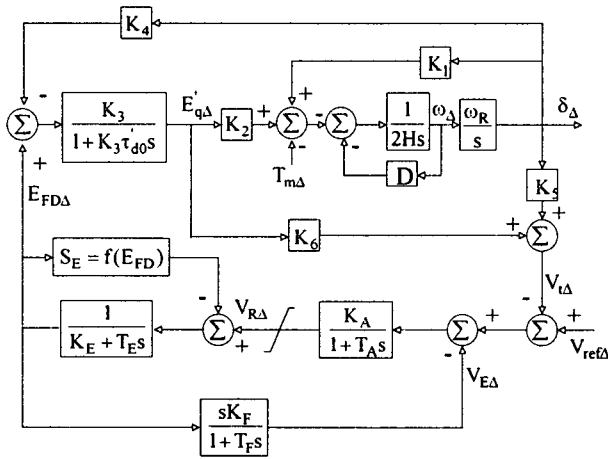


그림 1 1기 무한 모선 계통의 선형화 모델
Fig. 1 Block diagram of the simplified linear model of a single machine-infinite bus system

그림 1에서 선형화 된 모델은 상태공간 표현 형태의 식 (1), (2)로 유도할 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BU \tag{1}$$

$$Y = CX \tag{2}$$

여기서, X, Y 그리고 U는 상태 벡터, 출력 그리고 입력 신호이고, A, B, C는 모두 계수 행렬이다. 상태 변수 X와 선형화 된 모델의 행렬 A의 요소는 식(3), (4)와 같다.

$$X = [\delta_d \ \omega_d \ E_{q'd'} \ E_{FDd} \ V_{Rd} \ V_{Ed}]^T \tag{3}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_1}{2H} & \frac{-D}{2H} & \frac{-K_2}{2H} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_4}{\tau_{d0'}} & 0 & \frac{-1}{K_3 \tau_{d0'}} & \frac{1}{\tau_{d0'}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-K_E}{T_E} & \frac{1}{T_F} & 0 \\ \frac{-K_A K_5}{T_A} & 0 & \frac{-K_A K_6}{T_A} & 0 & \frac{-1}{T_A} & \frac{-K_A}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-K_E K_F}{T_E T_F} & \frac{K_F}{T_E T_F} & \frac{-1}{T_F} \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서, 기호 “1”은 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, M은 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 시정수이다. 본 논문에서 사용한 동기기, 여자기 및 전송선로의 파라미터는 표 1에 나타내었다.

표 1 계통 파라미터
Table 1 System parameters

Synchronous Machine(p.u.)	Excitation System(p.u.) and Transmission line(p.u.)	$K_1 \sim K_6$
$x_d=1.7$	$K_A=400, T_A=0.05$	$K_1 = 1.0746$
$x_q=1.64$	$K_F=0.025, T_F=1.0$	$K_2 = 1.2578$
$x_d'=0.245$	$K_E=-0.17, T_E=0.95$	$K_3 = 0.3072$
$D=0.0$	$V_{Rmax}=5.04, V_{Rmin}=-5.04$	$K_4 = 1.7116$
$H=2.37$	$S_{Emax}=0.02, S_{Emin}=0.001$	$K_5 = -0.0477$
$x_1=0.15$	$R_e=0.02, X_e=0.4$	$K_6 = 0.4971$
$\tau_{d0}'=5.9$		

3. SVC의 제어 특성 및 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 SVC를 포함한 1기 무한대 모선 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(Fixed Capacitor, FC)와 사이리스터 제어에 의하여 용량이 가변되는 인덕터(Thyristor Controlled Reactor, TCR)가 병렬로 연결된 구조를 가지고 있으며, 전체적으로 사이리스터에 의하여 제어되는 가변 서셉턴스(Susceptance, B)로 볼 수 있다 [16-19].

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

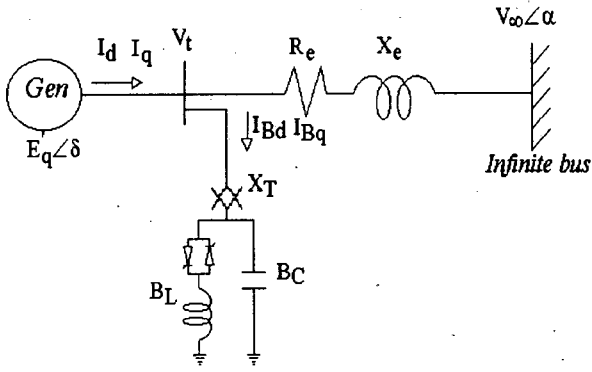


그림 2 SVC 시스템을 포함한 1기 무한 모선 계통
Fig. 2 Single machine-infinite bus with SVC system

4. 유전 알고리즘을 이용한 최적 PI 제어기 설계

4.1 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 1970년대 John holland에 의해 도입된 자연선택과 자연유전의 메카니즘에 기반을 둔 탐색 알고리즘이며, 이는 자연 세계에서 발생하는 진화현상을 모방하여 수학적 표현으로 만든 것이다. 유전 알고리즘은 최적화하기 어려운 목적 함수의 최적화, 신경 회로망의 학습, 퍼지 멤버쉽 함수의 동조, 기계 학습, 시스템 식별 및 제어 등에 널리 응용되고 있다. 또한, 유전 알고리즘은 목적 함수의 미분 가능성 및 연속성에 관계없이 최적해를 구할 수 있고, 해 집단을 동시에 탐색하는 전역적 탐색방법이므로 국부 수렴할 가능성이 적고 복잡한 과정이 필요 없이 간단하게 주어진 문제를 간단한 알고리즘으로 구현할 수 있다. 아울러 제약 조건이 추가되는 경우에도 소프트웨어의 큰 변화 없이 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다[20-21].

유전 알고리즘은 주어진 최적화 문제에 대해 대하여 파라미터들을 유한길이의 2진 문자열로 부호화 하여 동작하며, 복제(reproduction), 교차(crossover), 돌연변이(mutation)와 같은 연산자를 사용하여 랜덤하게 동작하는데, 적합도 함수를 사용하여 적합한 문자열을 선택하고, 문자열의 비율을 변화시키며, 문자열의 비트(bit)를 변경시킨다. 마지막으로 해를 디코딩하고 평가하여 최적점을 탐색할 때까지 반복 수행하는 것이다.

4.1.1 파라미터의 부호화

유전 알고리즘에서 염색체 상의 유전자(gene)는 2진 값을 갖는 비트(bit) 단위로 구성되며, 염색체는 유한길이의 2진 문자열로 표현된다. 이것은 초기에 길이가 M이고 N개의 문자열을 갖는 집단(population)을 생성시킨다.

4.1.2 적합도(fitness)의 평가

유전 알고리즘은 해집단 내 개체간의 우열을 평가하여 더 나은 해집단을 형성하기 위하여 적합도를 필요로 하는데 이

는 주로 목적함수로부터 계산된다. 각 세대마다 모든 개체는 적합도에 대한 평가를 시행하고 적합도 값의 결과는 복제, 교배, 돌연변이 등에 중요한 정보가 된다.

4.1.3 복제(reproduction)

복제 연산자는 잘 적응한 해들은 살아남고 잘 적응하지 못한 해들은 도태 되도록 유도함으로써 자연 선택(natural selection) 현상을 모델링한다. 즉, 높은 적합도를 가진 염색체일수록 다음 세대에 복제될 확률이 높다. 복제의 방법은 여러 가지가 있지만 보통 룰렛 휠에 의한 선택 방법(roulette wheel selection)을 사용한다.

4.1.4 교배(crossover)

생태계에서 염색체는 각각의 일부 유전자를 서로 교환하는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 교배(crossover)라 한다. 교배를 통해 유전자가 교환되는 과정은 유한 개수의 염색체를 갖는 개체가 생식을 통한 유전적 다양성을 얻는 것과 관련하여 중요한 현상이다. 일반적으로 두 스트링간에 교차가 일어날 확률은 0.6~0.95 범위로 설정한다.

탐색 과정에 염색체간의 국부적 동작(local action)을 통해 어비어보다 더욱 나은 전역적 성능(global performance)을 얻을 수 있는 점이 유전적 탐색 방법의 장점 중의 하나이며, 교배는 그 핵심적 역할을 수행한다.

4.1.5 돌연변이(mutation)

유전자의 돌연한 형태 변화로 새로운 형질이 발생하게 되는 현상을 돌연변이라 한다. 돌연변이는 생물의 진화에서 교차와 마찬가지로 중요한 요인이 된다. 일반적으로 유전 알고리즘에서는 돌연변이에 의해 국부 탐색(local search)은 물론 탐색 공간을 다양하게 이동(global shift)하는 것이 가능하다. 그러나, 한편으로 돌연변이는 환경에 대한 적응성과는 무관하게 랜덤하게 발생하므로 그 발생 확률은 0.001~0.01 범위에서 설정하고, 너무 크게 하면 중요한 형질을 잃을 가능성이 있다. 따라서 너무 크지 않도록 사전에 주의해서 선택해야 한다.

4.2 GA-PI 제어기 설계

본 논문에서는 PI 제어기의 K_p , K_i 의 파라미터를 구하기 위하여 유전 알고리즘을 적용하였다. SVC를 포함한 1기 무한대 모선 계통에 있어서 PI 제어기와 유전 알고리즘을 합성하는 방법은 다음과 같다. PI 제어기의 파라미터 모두를 1개의 문자열로 만들어 총 N개의 문자열로 해집단을 구성하였다. 그리고 해집단의 각 스트링을 평가하기 위하여 사용된 적합도 함수는 각속도의 편차와 단자전압 편차의 절댓값을 사용하였다.

$$\text{fitness} = \frac{1}{1 + \sum_{m=1}^M |\omega_d + V_{td}|} \quad (5)$$

여기서, m 은 한 문자열이 PI 제어기 파라미터와 합성하여 시스템에 적용되었을 경우의 한 샘플링을 말하며 M 은 총 샘플링 개수이다. 이때 사용한 집단수는 100, 교차 확률은 0.8, 돌연변이 확률은 0.01로 하였고, 샘플링 시간은 0.01[sec]이며 목적함수의 시간은 6[sec]이다.

이상의 유전 알고리즘을 사용한 SVC 계통의 최적 PI 제어기의 기본 구조는 그림 3에 나타내었다. 또한 여기에 사용한 초기 동작 조건과 SVC 파라미터를 표 2에 나타내었다.

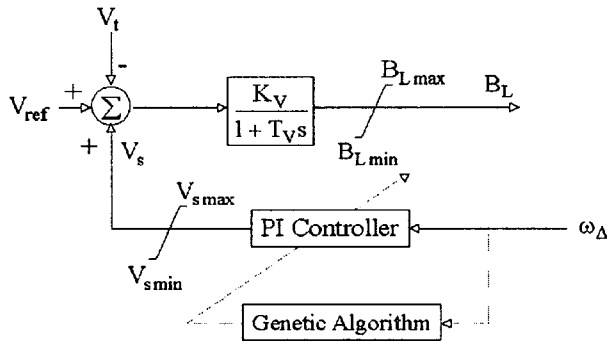


그림 3 SVC 계통의 GA-PI 제어기
Fig. 3 Block diagram of GA-PI controller for SVC system

표 2 초기 동작 조건과 SVC 파라미터
Table 2 SVC parameters and initial operation condition

K_V	$T_V(\text{sec})$	B_C	X_T	B_{L0}	B_{Lmax}	B_{Lmin}	V_{smax}	V_{smin}
10.0	0.15	0.6	0.08	-0.45	-0.30	-0.90	0.12	-0.12

유전알고리즘을 이용한 SVC 계통의 최적 PI 제어기를 포함한 계산 흐름도는 그림 4와 같다.

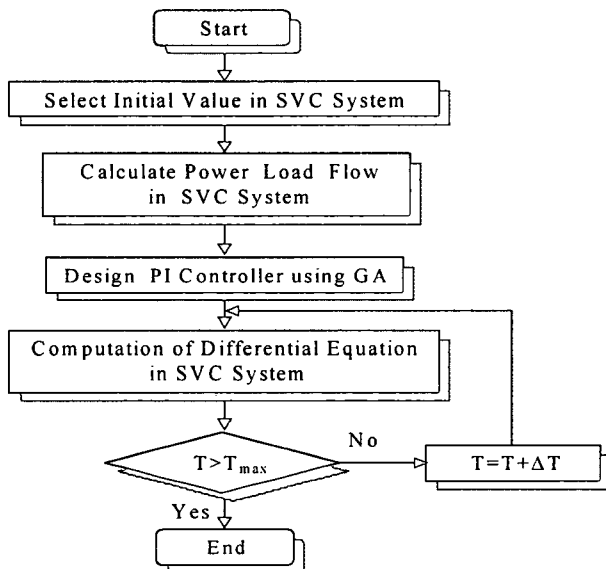


그림 4 유전알고리즘을 이용한 SVC계통의 최적 PI 제어기 계산 흐름도
Fig. 4 Calculation flowchart of optimal PI controller using GA in SVC system

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 GA-PI 제어기의 개인 값을 구하기 위해 사용된 초기 상태는 정상부하시($P_e=1.0, Q_e=0.595$) 100[ms] 동안에 전력이 3[%] 변동한 경우에 적용하였다. 제안한 GA-PI 제어기의 성능을 평가하기 위해 SVC를 포함한 1기 무한대 모선계통에 적용하여 중부하시(사례 연구 1), 정상부하시(사례 연구 2) 및 경부하시(사례 연구 3)에 시뮬레이션을 수행하였다. SVC를 포함한 시스템에 GA-PI 제어기를 적용한 경우(Case 1), SVC를 포함한 시스템에 종래의 제어기를 사용한 경우(Case 2)와 SVC 없는 본래의 시스템인 경우(Case 3)에 대하여 발전기 응답을 각각 비교·고찰하였다. 유전알고리즘을 이용하여 구한 $K_P=37.6894, K_I=14.2777$ 이다. 또한 목적 함수 적합도는 그림 5와 같다.

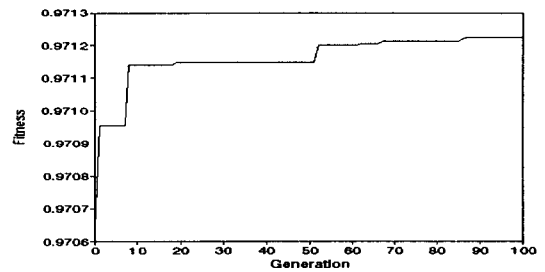


그림 5 적합도
Fig. 5 Fitness

그림 6은 정상부하시 각 시스템의 고유치 분포를 나타내고 있다. 그림 6에서와 같이 주요 진동 모드와 고유치가 시스템에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 본래 시스템에서 주요 전기적 진동 모드의 제동비는 0.52[%]로 약한 제동비를 가지므로 시스템 응답은 장시간 진동한다는 것을 알 수 있다. 하지만 종래의 제어기를 이용한 경우에는 전기적 진동 모드의 제동비가 26.5[%]이고, 본 논문에서 제안한 GA-PI 제어기를 가진 경우에는 전기적 진동 모드의 제동비가 33.66[%]로 상당히 개선되어 시스템 응답이 빠른 시간에 수렴한다는 것을 알 수 있다.

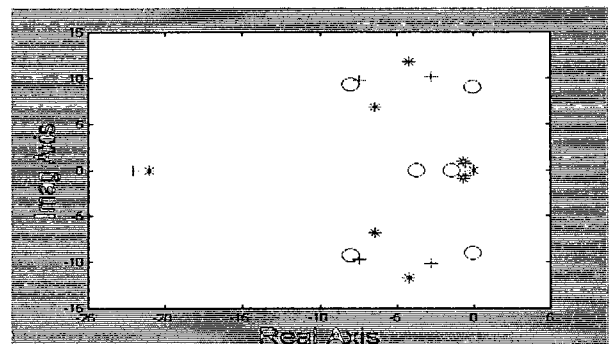
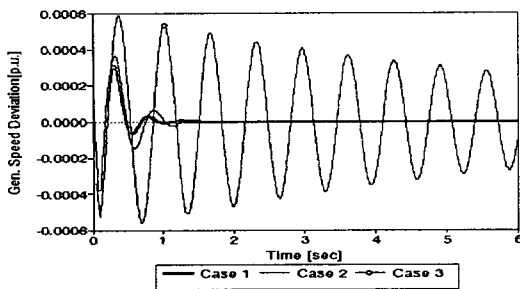


그림 6 시스템 고유치
Fig. 6 System eigenvalues
(* → Case 1, + → Case 2, o → Case 3)

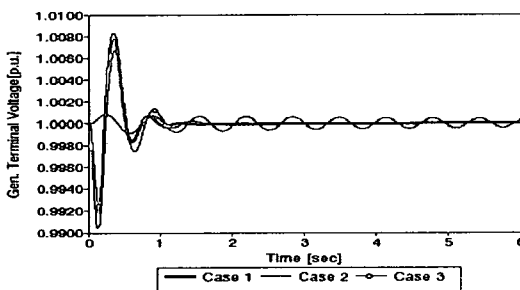
5.1 중부하시(사례 연구 1)

제안한 GA-PI 제어기의 강인성을 평가하기 위해 정상부하시 구한 GA-PI 제어기의 계인 값을 이용하여, 중부하시 ($P_e=1.3, Q_e=0.595$) 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우(그림 7)와 3상 고장이 100[ms] 동안에 지속되다가 계통 구성 변경없이 제거되었을 경우(그림 8)에 SVC를 포함한 시스템에 GA-PI 제어기를 적용한 경우(Case 1), SVC를 포함한 시스템에 종래의 제어기를 사용한 경우(Case 2)와 본래의 시스템(Case 3)에 대하여 각각 비교·고찰하였다.

그림 7의 (a)에서 발전기 각속도 편차 응답 특성이 Case 3의 경우에는 장시간 진동하고 있으나, Case 2의 경우에는 정정시간이 약 1.25[sec]이고 Case 1의 경우는 정정시간이 약 0.91[sec]로 아주 우수한 응답 특성을 보이고 있다. 그림 7의 (b)에서는 발전기 단자전압 응답 특성이 Case 3의 경우가 역시 장시간 진동함을 알 수 있으나, Case 2의 경우에는 정정시간이 약 2.17[sec]이고, Case 1의 경우에는 정정시간이 약 1.4[sec]로 아주 우수한 응답 특성을 보이고 있다.



(a) Generator speed deviation



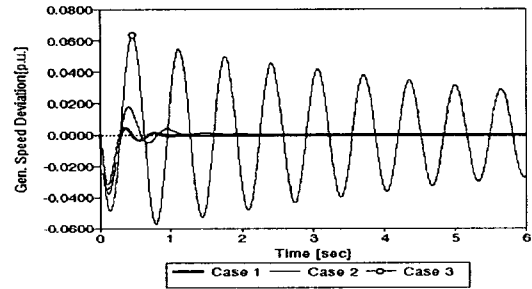
(b) Generator terminal voltage

그림 7 중부하시 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답($P_e=1.3, Q_e=0.595$ [p.u.])

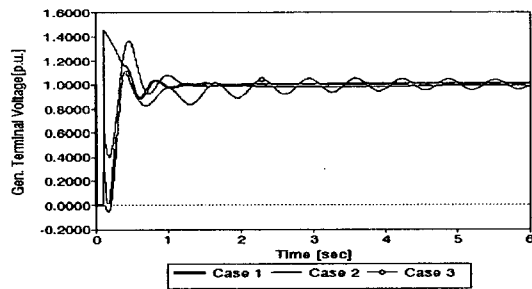
Fig. 7 Response of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100[ms] in heavy load ($P_e=1.3, Q_e=0.595$ [p.u.])

마찬가지로, 3상 고장이 100[ms] 동안에 지속되다가 계통 구성 변경없이 제거되었을 경우, 그림 8의 (a)에서 발전기

각속도 편차 응답 특성이 Case 3의 경우가 역시 장시간 진동하고 있지만, Case 2의 경우는 정정시간이 약 2.02[sec]이고, Case 1의 경우는 정정시간이 1.13[sec]로 우수한 응답 특성을 보이고 있다. 역시 그림 8의 (b)에서 Case 3는 장시간 진동하고 있으며, Case 2의 경우는 정정시간이 약 5.08[sec]이고, Case 1의 경우는 정정시간이 약 1.31[sec]로 우수한 응답 특성을 보이고 있다.



(a) Generator speed deviation



(b) Generator terminal voltage

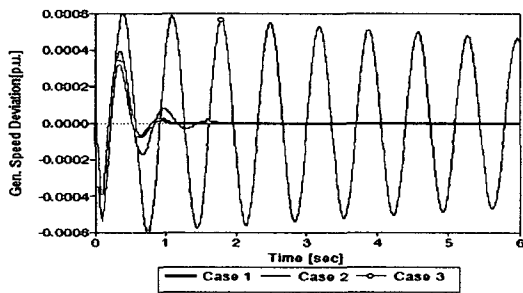
그림 8 중부하시 3상 고장이 발생했을 경우의 발전기 응답 ($P_e=1.3, Q_e=0.595$ [p.u.])

Fig. 8 Response of generator when three-phase fault was generated in heavy load($P_e=1.3, Q_e=0.595$ [p.u.])

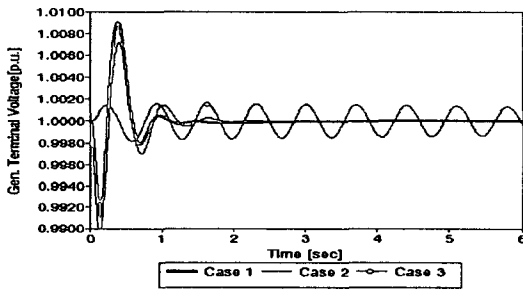
5.2 정상부하시(사례 연구 2)

본 논문에서 제안한 GA-PI 제어기의 강인성을 평가하기 위해 그림 9와 같이 정상부하시($P_e=1.0, Q_e=0.595$)에 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우, Case 1, Case 2, Case 3에 대해 발전기 응답특성을 보였다. 그림 9의 (a)에서는 발전기의 각속도 편차 특성이 본래의 시스템은 장시간 진동하고 있으나, 종래의 제어기를 적용한 시스템의 정정시간이 약 1.74[sec]이고, GA-PI 제어기를 적용한 시스템의 정정시간이 약 1.05[sec]로 우수한 응답 특성을 보이고 있다. 마찬가지로, 그림 9의 (b)에서는 발전기 단자전압 특성 역시 본래의 시스템은 장시간 진동하는 응답특성을 보이고 있고, 종래의 제어기를 적용한 시스템은 정정시간이 약 2.12[sec]이고 GA-PI 제어기를 적용한 시스템은 정정시간이 약 1.91[sec]로 우수한 응답 특성을 보이고 있다. 그림 9는 정상

부하시 3상 고장이 100[ms] 동안에 지속되다가 계통구성 변경 없이 제어되었을 경우, Case 1, Case 2, Case 3의 발전기 응답 특성을 각각 비교·고찰하였다. 그림 10의 (a)에서 Case 3의 응답은 장시간 진동하는 반면 Case 2의 경우는 정정시간이 약 1.80[sec]이고, Case 1의 경우는 정정시간이 약 0.97[sec]로 아주 우수한 응답을 보였다. 그림 10의 (b)에서는 역시 Case 3의 응답이 장시간 진동하고 있으며, Case 2의 응답은 정정시간이 약 5.16[sec]이고, Case 1의 응답은 정정시간이 약 1.53[sec]로 우수한 응답 특성을 나타내고 있다.



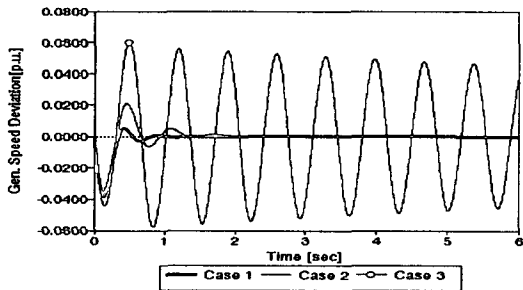
(a) Generator speed deviation



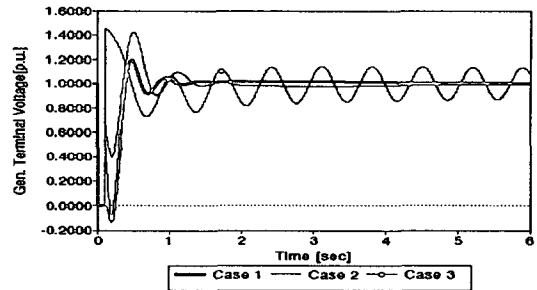
(b) Generator terminal voltage

그림 9 정상부하시 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답 ($P_e=1.0$, $Q_e=0.595$ [p.u.])

Fig. 9 Response of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100[ms] in normal load ($P_e=1.0$, $Q_e=0.595$ [p.u.])



(a) Generator speed deviation



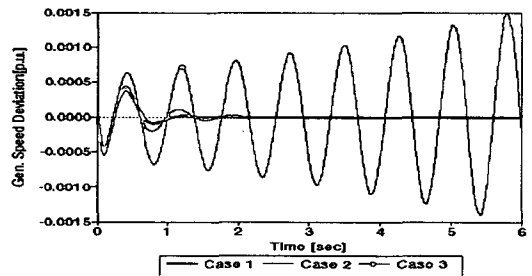
(b) Generator terminal voltage

그림 10 정상부하시 3상 고장이 발생했을 경우의 발전기 응답 ($P_e=1.0$, $Q_e=0.595$ [p.u.])

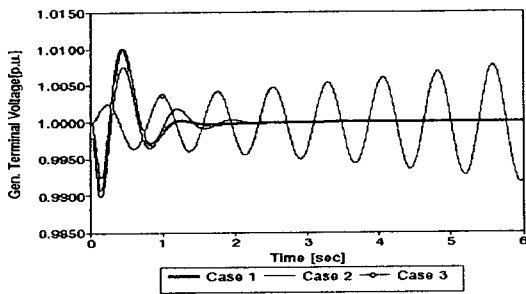
Fig. 10 Response of generator when three-phase fault was generated in normal load ($P_e=1.0$, $Q_e=0.595$ [p.u.])

5.3 경부하시(사례 연구 3)

제안한 GA-PI 제어기의 강인성을 평가하기 위해 그림 11과 같이 경부하시($P_e=0.7$, $Q_e=0.595$)에 초기 전력을 100 [ms] 동안 3[%] 변동한 경우, Case 1, Case 2, Case 3에 대해 발전기 응답특성을 보였다. 그림 11의 (a)에서는 발전기의 각속도 편차 특성이 본래의 시스템에서는 진동 발산함을 알 수 있으나, 종래의 제어기를 적용한 시스템의 정정시간이 약 2.43[sec]이고 GA-PI 제어기를 적용한 시스템은 정정시간이 약 1.4[sec]로 우수한 응답 특성을 보이고 있다. 마찬가지로, 그림 11의 (b)에서는 발전기 단자전압 특성이 본래의 시스템에서는 진동 발산함을 알 수 있으나, 종래의 제어기를 적용한 시스템의 정정시간은 약 2.81[sec]이고, GA-PI 제어기를 적용한 시스템의 정정시간은 약 2.25[sec]로 우수한 응답 특성을 보이고 있다. 그림 12는 경부하시 3상 고장이 100[ms] 동안에 지속되다가 계통구성 변경 없이 제어되었을 경우, Case 1, Case 2, Case 3의 발전기 응답 특성을 각각 비교·고찰하였다. 그림 12의 (a)에서 Case 3은 장시간 진동 발산하는 반면, Case 2의 경우는 정정시간이 약 2.16[sec]이고, Case 1의 응답은 정정시간이 약 1.04[sec]로 아주 우수한 응답을 보였다. 그림 12의 (b)에서는 Case 3의 응답이 역시 장시간 진동 발산하고 있으며, Case 2의 응답은 정정시간이 약 4.27[sec]이고, Case 1의 응답은 정정시간이 약 2.09[sec]로 우수한 응답 특성을 나타내고 있다.



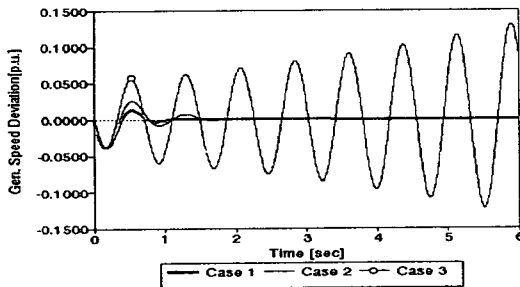
(a) Generator speed deviation



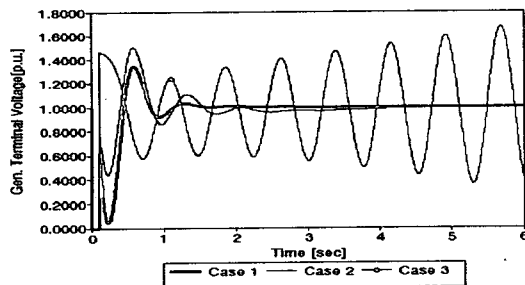
(b) Generator terminal voltage

그림 11 경부하시 초기 전력을 10[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답 ($P_e=0.7, Q_e=0.595$ [p.u.])

Fig. 11 Response of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100[ms] in light load ($P_e=0.7, Q_e=0.595$ [p.u.])



(a) Generator speed deviation



(b) Generator terminal voltage

그림 12 경부하시 3상 고장이 발생했을 경우의 발전기 응답 ($P_e=0.7, Q_e=0.595$ [p.u.])

Fig. 12 Response of generator when three-phase fault was generated in light load ($P_e=0.7, Q_e=0.595$ [p.u.])

6. 결론

본 논문에서는 FACTS로 분류되는 여러 기기중 기존의 전압제어 및 무효전력보상기들이 가지고 있는 비속응성과

불연속성 문제를 해결해줄 수 있는 정지형 무효전력 보상기 (Static Var Compensator : SVC)를 포함한 전력계통에 시스템 안정도를 향상시키기 위한 PI 제어기의 계수를 결정하는데 종래의 일반적인 방법과는 달리, 자연 생태계의 진화를 모의한 전역적 탐색 최적화 기법인 유전 알고리즘을 이용하여 설계하였다. 제안한 방법의 강인성을 검증하기 위해 중부하시, 정상부하시 및 경부하시에 적용하여 고유치 해석과 시뮬레이션을 통하여 제어성능을 검토하고, 우수한 제어 성능을 가지는 제어기를 최적화 기법인 유전알고리즘에 의해서 설계할 수 있음을 확인하였다.

중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) SVC를 포함한 시스템이 본래의 시스템 보다 효과적으로 시스템 안정도를 향상시킬 수 있었다.
- (2) 유전알고리즘을 이용한 PI 제어기의 파라미터 선정이 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- (3) 유전알고리즘을 이용한 주요 진동 모드의 고유치와 제동비가 매우 강인하게 개선되었음을 알 수 있다.
- (4) 중부하시, 정상부하시 및 경부하시에 SVC를 포함한 계통에 GA-PI 제어기를 적용한 경우가 본래의 시스템, SVC를 포함한 계통에 제어기 없는 경우 및 종래의 제어기를 적용한 경우보다 시스템 안정도에 크게 기여함을 알 수 있었다.

향후 SVC를 포함한 다기계통과 초고압 직류 송전에 연구가 계속 되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Yao-nan Yu, "Electric Power System Dynamic", Academic Press, INC, 1983.
- [2] P. M. Anderson and A. A. Found, "Power System Control and Stability", IEEE Press. New York, 1993
- [3] A. E. Hammad, "Analysis of Power System Stability Enhancement by Static Var Compensators", IEEE Trans. PWRS, Vol. 1, No. 4, pp. 222-227, 1986.
- [4] M. O'brien and G. Ledwich, "Static Reactive Power Compensator Controls for Improved System Stability", IEE Proc., Vol. 134, No. 1, pp. 38-42, 1987.
- [5] 김학만, 오태규, 신명철, 손광명, "GA를 이용한 TCSC 적용 LQ 제어기의 가중행렬 선정 기법", 전기학회논문지, 제 46권, 제 12호, pp. 1708-1715, 1997
- [6] 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.
- [7] K. R. Padiyar and R. K. Varma, "Damping Torque Analysis of Static Var System Controllers", IEEE Trans. PWRS. Vol. 6, No. 2, pp. 458-465, 1991.
- [8] 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.
- [9] E. Z. Zhou, "Application of Static Var Compensators

to Increase Power System Damping”, IEEE Trans. PWRS, Vol. 8, No. 2, pp. 655-661, 1993.

[10] A. A. El-Emary, “Formula for the Effect of a Static VAR Compensator on Synchronising Torque Coefficient”, IEE Proc. Vol. 143, No. 6, pp. 582-586, 1996

[11] A. A. El-Emary and M. A. El-Shibina, “Application of Static Var Compensation for Load Frequency Control”, Electric Machines and Power Systems, Vol. 25, pp. 1009-1022, 1997

[12] A. A. El-Emary, “Effect of Static Var Compensator upon Synchronizing Torque Coefficient”, Electric Machines and Power Systems, Vol. 25, pp. 371-386, 1997

[13] P. Kundur, “Power system stability and control”, McGraw-Hill, Inc., 1994.

[14] K. R. Padiyar, “Power System Dynamics : Stability and Control”, John Wiley & Sons(Asia) Pte Ltd., pp. 255-297, 1996.

[15] 정형환, 왕용필, 허동렬, 문영환, “수정 유전 알고리즘을 이용한 초고압 직류송전 시스템의 최적 PID 제어기 설계”, 전기학회논문지, 제 48권, 제 3호, pp. 247-256, 1999

[16] CIGRE Working Group 38-01; Task Force No. 2 on Static Var Compensators, Static Var Compensators, 1986

[17] 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.

[18] 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

[19] 문경섭, 손광명, 이태기, 이송근, 박종근, “무효전력 보상여유를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어”, 전기학회논문지, 제 48권, 제 4호, pp.351-357, 1999

[20] N. Shimamoto, A. Hiramatsu and K. Yamasaki, “A Dynamic Routing Control Based on a Genetic Algorithm”, Proc. of 1993 International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1123-1128, 1993

[21] 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, 1993

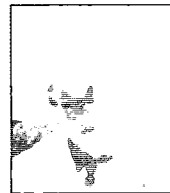
저 자 소 개



정형환 (鄭亨煥)

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

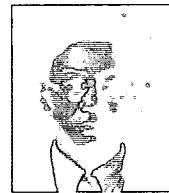
Tel : 051-200-7733, Fax : 051-200-7743
E-mail : hhchong@mail.donga.ac.kr



허동렬 (許東烈)

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

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



왕용필 (王龍泌)

1966년 8월 25일 생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동 대학 부설 정보기술연구소 특별연구원 및 뉴질랜드

University of Canterbury Post-Doctoral Researcher
Tel : 64-3-3642-987
E-mail : y.wang@elec.canterbury.ac.nz



한길만 (韓吉萬)

1972년 7월 3일 생. 1999년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정 재학중

Tel : 051-200-6747
E-mail : d9135076@mail.donga.ac.kr



김해재 (金海在)

1957년 5월 29일 생. 1980년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 마산대 전기과 조교수, 당학회 정회원

Tel : 0551-230-1330
E-mail : hjkim@masan-c.ac.kr