

Tabu 탐색법과 신경회로망을 이용한 SVC용 적응 퍼지제어기의 설계

論 文

51A-4-5

Design of Adaptive Fuzzy Logic Controller for SVC using Tabu Search and Neural Network

孫鍾訓^{*} · 黃琪鉉^{**} · 金亨洙^{***} · 朴俊灝[§] · 朴鍾根^{§§}

(Jong-Hun Son · Gi-Hyun Hwang · Hyung-Su Kim · June Ho Park · Jong-Keun Park)

Abstract – We proposed the design of SVC adaptive fuzzy logic controller(AFLC) using Tabu search and neural network. We tuned the gains of input-output variables of fuzzy logic controller(FLC) and weights of neural network using Tabu search. Neural network was used for adaptively tuning the output gain of FLC. The weights of neural network was learned from the back propagation algorithm in real-time. To evaluate the usefulness of AFLC, we applied the proposed method to single-machine infinite system. AFLC showed the better control performance than PD controller and GAFLC[10] for three-phase fault in nominal load which had used when tuning AFLC. To show the robustness of AFLC, we applied the proposed method to disturbances such as three-phase fault in heavy and light load. AFLC showed the better robustness than PD controller and GAFLC[10].

Key Words : FLC, Tabu Search, SVC, Adaptive Fuzzy Logic Controller

1. 서 론

산업이 발달하고 경제가 성장함에 따라 전력수요는 매년 급격하게 증가하고 있다. 국내만 하더라도 전력수요는 매년 10% 이상의 성장률을 기록할 정도이며, 2006년에는 현재 수요의 2배에 달할 것으로 예상되고 있어 전력 회사는 발전설비 및 송·배전설비의 추가적인 건설이 불가피한 실정이다. 그러나, 전력수송설비의 신·증설은 환경 및 경제적인 측면에서 많은 제약을 받고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 계통 연계 운영 등을 통한 기존설비의 이용률을 극대화함으로써 송전선로의 신규건설 없이 송전용량을 증대시키는 방안이 강구되어 왔다[1,2].

유연송전시스템(flexible AC transmission system : FACTS)은 기존 전력계통의 송전용량을 최대 열적 한계 용량까지 증가시켜 전력수송 설비시설의 건설 부담을 경감시킬 수 있는 새로운 개념의 전력전송방식이다[3,4]. FACTS 중에서 SVC(static var compensator)는 특정 송전선로의 임피던스를 변화시켜 해당선로의 조류를 제어함으로써 전압 및 무효전력 제어가 가능하고, SVC의 입력으로 발전기 각속도를 사용하면 댐핑을 제공할 수 있어

전력계통의 안정도를 크게 향상시킬 수 있다. 종래의 SVC의 제어기로는 선형모델을 이용한 비례-적분 제어기[5], 진·지상 보상기[6] 및 H_∞ 제어기[7] 등이 제안되었다. 이러한 제어기들은 선형화된 전력계통을 이용하여 설계되었기 때문에 특정 운전점에서는 좋은 제어성능을 나타내지만 다른 운전 조건에서는 좋은 제어성능을 얻기가 어렵다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 최근에는 전력계통 안정도를 향상시키기 위하여 SVC용 제어기로 퍼지제어기와 신경회로망 제어기 등과 같은 지능제어방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[8].

본 논문에서는 경험적인 탐색방법인 Tabu 탐색법[9]과 신경회로망을 이용한 SVC용 적응 퍼지제어기(adaptive fuzzy logic controller : AFLC)를 설계하였다. 제안한 SVC용 적응 퍼지제어기는 두 단계를 구성되어 있고, 첫 번째 단계는 실시간으로 신경회로망을 이용하여 퍼지제어기의 출력 이득을 조정하는데 필요한 출력 이득의 초기값과 신경회로망의 초기 가중치를 Tabu 탐색법으로 튜닝하였다. 두 번째 단계는 신경회로망을 이용하여 퍼지제어기의 출력 이득을 실시간으로 조정하는 단계이고, 이때 신경회로망의 가중치는 역전파 학습알고리즘을 이용하여 조정하였으며, 신경회로망의 초기 가중치는 Tabu 탐색법을 이용하여 튜닝한 값을 사용하였다.

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며, 같은 계통에 적용된 SVC용 PD제어기, 유전알고리즘(genetic algorithm : GA)으로 설계된 퍼지제어기(GAFLC)[10]와 비교하였다. 이때 PD제어기의 이득은

* 正會員 : 釜山大 電氣工學科 碩士

** 正會員 : 釜山大 컴퓨터 및 情報通信研究所 基金教授

*** 正會員 : 釜山大 電氣工學科 博士

§ 正會員 : 釜山大 電氣工學科 教授 · 博士

§§ 正會員 : 延大 電氣工學科 教授 · 博士

接受日 : 2001年 8月 29日

最終完了 : 2002年 2月 7日

Tabu 탐색법을 이용하여 최적화하였다. 다양한 계통운전 조건에 대해서 제안한 AFLC가 PD제어기와 참고문헌[10]의 제어기보다 더 좋은 제어성능을 나타내었다.

2. SVC의 특징

최근 발달한 대용량 전력전자기술을 이용하여 송전선로에서 선로의 임피던스를 실시간으로 제어하여 계통의 안정도를 향상시키려는 SVC 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. SVC는 싸이리스터를 이용함으로써 연속 제어가 가능하고, 진폭과 위상각의 신속한 제어로 무효전력의 보상은 물론 계통의 동요 등 계통의 동적 특성 및 안정도 향상에 큰 효과를 얻을 수 있다.

SVC는 무효전력을 공급 또는 흡수하여 계통의 임피던스를 실시간으로 변화시켜 전압안정도 및 과도안정도를 향상시킬 수 있다. 이전에는 전압안정도에 많은 관심을 둔 반면에, 최근에는 과도 및 동적 안정도 개선에 SVC의 적용에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 SVC의 입력으로 발전기의 각속도를 사용하여 전력계통의 과도 및 동적 안정도 개선에 목적을 두었다. 본 논문에서 사용한 SVC 구조는 일반적으로 가장 많이 사용되는 TCR-FC 형태를 사용하였고[10], SVC의 특징은 다음과 같다.

(1) 정상상태 전압 제어: 중부하시의 계통전압저하는 송전선로에 흐르는 큰 조류로 인한 무효전력 손실이나 수용지점에 투입된 무효 전력원 또는 저 역률 부하의 증대로 인하여 주로 발생하며, 이로 인하여 송전손실이 증가하고 송전용량이 감소하며 계통안정도가 저하된다. 또한 경부하시의 계통전압 상승은 부하의 탈락이나 송전선로의 총전용량증대 또는 역률 개선 콘덴서에 의한 무효전력증가가 큰 원인이 되며 이러한 전압상승은 결국 전력설비의 과부하나 절연파괴 등을 일으킨다. 이에 대하여 기존의 기계적인 무효전력 보상설비인 분로리액터, 콘덴서 등과 더불어 SVC를 포함한 FACTS 설비의 운용이 적절한 해결책이 될 수 있다.

(2) 전력계통의 제동효과 증대: SVC는 과도안정도나 동태안정도의 향상을 위해 사용할 수 있다. SVC는 신속하고, 적절하게 무효전력을 공급하여, 전압을 유지함으로서 계통 안정도 향상을 기할 수 있다. 송전계통에서 전압안정도, 과도안정도, 제동문제는 전압동요에 의해 일어나므로, 전압이 변동되는 지점에 SVC를 설치하면 불안전성이 감소될 것이다. 계통에서 부하의 탈락이나 변동은 외란의 원인이 되는데, 이러한 외란들은 궁극적으로 발전기제어기에 의해 제어된다. 그러나 계통에서의 부댐핑 요소나 발전기의 동기토크 부족으로 인하여 작은 외란들이 전압과 발전기 스윙에 동요를 발생시킨다. 이러한 경우 연속적으로 고속의 무효전력보상이 가능한 SVC에 의하여 계통의 동요가 제어될 수 있다. 그러나 이와 같은 동작을 효율적으로 수행하기 위해서는 별도의 보조제어기를 이용

하여 주 제어기인 SVC 제어기에 명령을 전달하도록 해야한다.

3. Tabu 탐색법과 신경회로망을 이용한 SVC용 적응 퍼지제어기 설계

3.1 Tabu 탐색법을 이용한 신경회로망 및 퍼지제어기의 설계

본 논문에서 제안한 SVC용 AFLC는 두 단계를 구성되어 있고, 첫 번째 단계는 실시간으로 신경회로망을 이용하여 퍼지제어기의 출력 이득을 조정하는데 필요한 출력 이득의 초기값과 실시간으로 퍼지제어기의 출력이득을 조정하는데 필요한 신경회로망의 초기 가중치는 Tabu 탐색법으로 튜닝하였다. 두 번째는 신경회로망을 이용하여 퍼지제어기의 출력을 실시간으로 조정하는 단계이고, 이때 신경회로망의 가중치는 역전과 학습알고리즘을 이용하여 조정하였으며, 신경회로망의 초기가중치는 Tabu 탐색법을 이용하여 튜닝한 값을 사용하였다. 그림 1은 1기 무한대 계통에 대해서 Tabu 탐색법으로 신경회로망의 가중치와 퍼지제어기의 입·출력 이득의 튜닝 및 실시간으로 퍼지제어기의 출력 이득을 신경회로망으로 조정하는 SVC용 AFLC의 구성을 나타내었다. 그림 1에서 보는 것처럼 SVC용 AFLC의 입력으로 발전기 각속도 오차와 오차변화분을 사용하였다. 그림 1은 그림 1의 구성을 SVC 모델에 대한 볼록선도를 나타내었다. 그림 2의 SVC 모델은 AVR과 TSC(thyristor susceptance control)로 구성되어 있고, 여기서 K_r , T_r 은 AVR의 이득 및 시정수이고, T_b , T_d 는 TSC의 시정수 및 시지연이다.

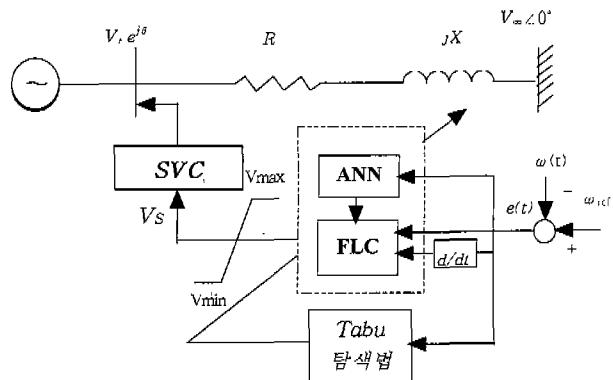


그림 1 Tabu 탐색법을 이용한 SVC용 AFLC의 구성도
Fig. 1 Configuration of AFLC for SVC using Tabu Search

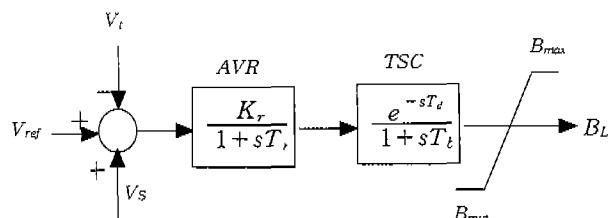


그림 2 SVC 구조
Fig. 2 Structure of SVC

그림 1에서 Tabu 탐색법을 이용하여 AFLC의 입·출력 이득과 신경회로망의 가중치를 튜닝하기 위한 구성도는 그림 3과 같다. 그림 3에서 보는 것처럼 AFLC의 입력으로 식 (1)과 같이 오차와 오차의 변화분을 사용하였고, 신경회로망의 입력으로 시지연을 가지는 기준입력과 실제 출력사이의 오차를 사용하였다.

$$\begin{aligned} E(t) &= SF_1 \cdot e(t) \\ DE(t) &= SF_2 \cdot \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $e(t) = Ref(t) - Out(t)$

SF_1, SF_2 : AFLC의 오차 및 오차변화분의 이득

$Ref(t)$: 기준입력

$Out(t)$: 실제출력

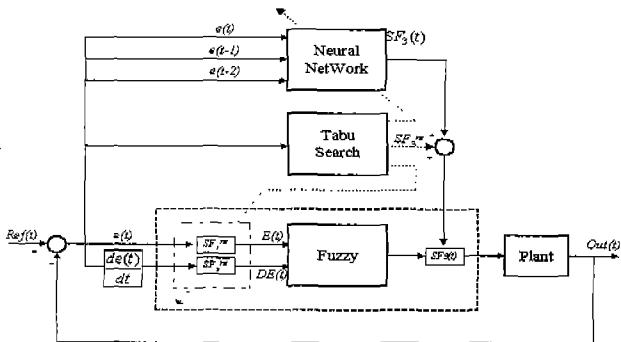


그림 3 Tabu 탐색법을 이용한 AFLC 튜닝 구성도
Fig. 3 Configuration for the tuning of AFLC using Tabu Search

Tabu 탐색법을 이용하여 신경회로망의 가중치와 AFLC의 입·출력 이득을 설계하는 과정을 요약하면 아래와 같고, 본 논문에서 사용한 AFLC는 퍼지화(fuzzifier) 방법으로 이등변 삼각형 방법을 사용하였고, 퍼지추론 방법으로 Mamdani의 최대-최소 퍼지추론 방법을 사용하였으며, 비퍼지화 방법으로 무게중심법을 사용하였다. 퍼지 규칙은 비례-미분 형태를 사용하였다. 그리고 신경회로망의 구조는 입력층, 은닉층 및 출력층으로 구성되어 있고, 입력층의 뉴런의 수는 3, 은닉층의 뉴런의 수는 5, 출력층의 뉴런의 수는 1이다.

단계 1) 이웃해 선정: 주어진 문제의 제약조건을 만족하도록 식 (2)와 같이 초기해를 생성한 후, 이를 현재해로 설정하였다.

$$S_0 = Random [(SF_{i_{\min}}, SF_{i_{\max}}), (W_{jk_{\min}}, W_{jk_{\max}})] \quad (2)$$

여기서, $SF_{i_{\max}}$: i 번째 AFLC의 입출력 이득의 상한치

$SF_{i_{\min}}$: i 번째 AFLC의 입출력 이득의 하한치

$W_{jk_{\max}}$: jk 번째 신경회로망 가중치의 상한치

$W_{jk_{\min}}$: jk 번째 신경회로망 가중치의 하한치

단계 2) 이웃해 생성 및 평가: 탐색 영역 내에서 대상 문제나 탐색 전략에 따라 현재해에 대한 이웃해를 생성한 후 이를 목적함수에 따라 평가한다. 본 논문에서 사용한 이웃해 생성 방법은 그림 4에 나타내었고, 그 과정은 다음과 같다.

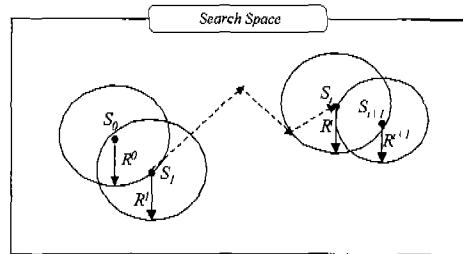


그림 4 이웃해 생성 방법

Fig. 4 Neighborhood decision

- ① 그림 4에서 보는 것처럼 제약조건을 만족하는 초기해 S_0 에 대해서 탐색할 이웃해의 범위 R^t 를 결정한다.
- ② 식 (3)에 의해서 매 반복 횟수마다 탐색할 이웃해의 범위 R^t 를 적응적으로 개선하였다.

$$R^{t+1} = \begin{cases} C_d \times R^t & \text{if } \sigma(t) > \lambda \\ C_i \times R^t & \text{if } \sigma(t) < \lambda \\ R^t & \text{if } \sigma(t) = \lambda \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $\sigma(t)$: t 반복 횟수의 이웃해 중에서 목적함수가 가장 좋은 상위 20%에 대한 표준편차

R^t : t 반복 횟수의 탐색할 이웃해의 범위

C_d, C_i : R^t 의 감소율과 증가율

λ : 상수

- ③ 이웃해의 생성 : Tabu 탐색법을 이용하여 SVC용 층용 퍼지제어기를 설계하기 위해서는 이웃해 생성이 중요하다. 본 논문에서는 식 (4)를 이용하여 이웃해를 생성하였다. 식 (4)에서 보는 것처럼, $t+1$ 번째 반복횟수의 i 번째 이웃해(S_i^{t+1})는 t 번째 반복횟수에서 i 번째 이웃해(S_i^t)에 식 (3)의 이웃해 범위(R^{t-1})와 ±1 사이의 발생될 난수(r)를 이용하여 생성하였다.

$$S_i^{t+1} = S_i^t + r \cdot R^{t-1} \quad (4)$$

여기서, S_i^t : t 번째 반복 횟수의 i 번째 이웃해

r : $[-1, 1]$ 범위내의 난수

- ④ 이웃해 평가 : 본 논문에서는 참고문헌[10]과 같은 조건하에서 제어기를 설계하기 위해서 목적함수는 식 (5)와 같이 기준입력과 실제출력 사이의 절대치 오차 합을 사용하였다.

$$J = \text{Minimize} \sum_{k=1}^N |E(k)| \quad (5)$$

여기서, $E(k)$: k번째 기준입력과 실제출력과의 오차

단계 3) 모의해 생성: 단계 2)에서 생성된 이웃해 중에서 평가값이 가장 우수한 해를 모의해로 설정한다.

단계 4) Tabu Test: 모의해가 Tabu List에 포함되는지를 검토한다. 본 논문에서의 Tabu List는 반복횟수마다 탐색된 최적해로 구성되며 FIFO(first in first out)방법을 사용하였다. 현재까지 탐색한 최적해와 이웃해중에서 목적함수 값이 가장 우수한 모의해와의 유클리디언 거리가 일정값 이하가 되는 경우에는 Tabu로 설정하였다. 만일 모의해가 Tabu List에 포함될 경우 단계 5)를 실행하고 그렇지 않을 경우 단계 6)를 실행한다.

단계 5) 열망조건: 모의해가 Tabu List에 포함되더라도 열망 조건을 만족할 경우에는 Tabu List에서 제외되어 다음 탐색시의 현재해로 설정된다. 본 논문에서는 모의해가 Tabu일지라도 현재까지 탐색한 최적해보다 우수한 경우를 열망조건으로 사용하였다.

단계 6) 현재해 갱신: 모의해가 Tabu List에 포함되지 않으면 다음 탐색의 현재해로 설정된다.

단계 7) 종료조건: 일정 반복횟수까지 단계 2) ~ 단계 6) 과정을 반복한다.

3.2 신경회로망을 이용한 적응 퍼지제어기의 설계

일반적으로 퍼지제어기는 외란 및 제어대상의 파라메타 변동에 대해서 뛰어난 제어 성능을 나타내지만, 다양한 운전조건을 가지는 전력계통의 파라메타 변동에 대해서 최적의 제어 성능을 얻을 수 없다. 따라서 본 논문에서는 다양한 외란 및 제어대상의 파라메타 변동에 대해서 최적의 제어 성능을 얻기 위해서 SVC용 AFLC의 출력이득을 신경회로망을 이용하여 실시간으로 매 샘플링시간마다 적응적으로 변경하는 방법을 제안하였고, 그 구조는 그림 5에 나타내었다.

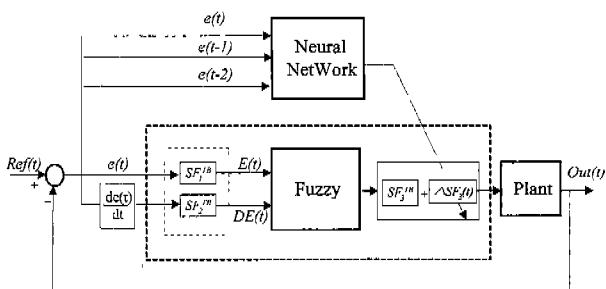


그림 5 AFLC의 실시간 운전을 위한 구성도

Fig. 5 Configuration for on-line AFLC

그림 5에서 보는 것처럼 신경회로망의 출력은 식 (6)과 같이 퍼지제어기의 출력 이득의 변화분이다. 식 (6)에서 퍼지제어기의 출력 이득은 신경회로망에 의해 실시간으로 매 샘플링시간마다 적응적으로 변경됨을 알 수 있다. 이렇게 신경회로망을 이용하여 매 샘플링시간마다 퍼지제어기의 출력 이득을 변경한 이유는 변화하는 제어시스템에 대해서 최적의 제어성능을 얻기 위해서이다.

$$SF_3(t) = SF_3^{TS} + \Delta SF_3(t) \quad (6)$$

여기서, $SF_3(t)$: AFLC의 출력이득

$$SF_3^{TS} : TS에 의해서 튜닝된 AFLC의 출력 이득$$

$\Delta SF_3(t)$: 신경회로망에 의해서 변경되는 AFLC의 출력이득의 변화분

본 논문에서 실시간으로 신경회로망의 가중치를 개선하기 위해 사용된 역전파 학습알고리즘 과정은 아래와 같다. 매 샘플링 시간마다 신경회로망의 가중치를 변경하기 위한 비용함수는 식 (7)과 같이 선정하였다.

$$J(k) = \frac{1}{2} e(k)^2 = \frac{1}{2} [\omega_{ref} - \omega(k)]^2 \quad (7)$$

여기서, ω_{ref} : 발전기 기준 각속도

$\omega(k)$: 발전기 실제 각속도

활성화 함수 $a(\cdot)$ 는 식 (8)과 같은 쌍방향 시그모이드(sigmoid) 함수를 사용하였다. 비용함수를 최소화하는 방향으로 가중치를 조정하는 방법은 다음과 같다. 식 (9)는 $a(\cdot)$ 의 미분이다.

$$O_k(t) = \Delta SF(t) = a(net) = \frac{2}{1+e^{-\lambda net}} - 1 \quad (8)$$

$$a'(net) = \frac{\lambda}{2} (1 - y^2) \quad (9)$$

여기서, $O(t)$: 신경회로망의 출력

$a(\cdot)$: 쌍방향 시그모이드

단계 1) 신경회로망의 은닉층과 출력층 사이의 가중치를 변경하기 위해 역전파 학습 알고리즘을 사용하였으며, 식 (10)과 같이 출력층의 오차 신호(δ_k)를 계산한다.

$$\begin{aligned} \delta_k &= -\frac{\partial E}{\partial net_k} \\ &= -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial Out} \frac{\partial Out}{\partial u_p} \frac{\partial u_p}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial net_k} \end{aligned} \quad (10)$$

그러나 식 (10)에서 $\partial Out / \partial u_p$ 의 값을 구하기 위해서는 자코비안을 계산하거나 동조회로(identifier)를 사용하여야 한다. 이러한 복잡한 계산과정을 없애고 실시간으로 가중치의 학습을 향상시키기 위해서 $\partial Out / \partial u_p$ 을 sign 함수로 근사화 하였다. 근사화를 바탕으로 오차신호를 다시 계산하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned}\delta_k &= -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial Out} \frac{\partial Out}{\partial u_p} \frac{\partial u_p}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial net_k} \\ &\cong e \cdot \text{sgn}\left(\frac{\partial Out}{\partial u_p}\right) \cdot u \cdot \frac{\partial O_k}{\partial net_k}\end{aligned}\quad (11)$$

식 (11)를 이용하여 가중치의 변화량 식 (12)와 같이 계산되며, 식 (12)에 의하여 변화된 가중치는 식 (13)과 같다.

$$\Delta W_{kj} = -\eta_{kj} \frac{\partial E}{\partial \omega_{kj}} = -\eta_{kj} \frac{\partial E}{\partial net_k} \frac{\partial net_k}{\partial \omega_{kj}} = \eta_{kj} \delta_k O_j \quad (12)$$

$$W_{kj}(n+1) = W_{kj}(n) + \Delta W_{kj}(n) \quad (13)$$

여기서, u : AFLC의 비퍼지화 출력

u_p : AFLC의 제어신호

net_k : k 번째 뉴런(출력총)의 입력

$a(net_k) = O_k$: k 번째 뉴런의 출력

O_j : j 번째 뉴런의 출력

η : 학습률

W_{kj} : 은닉층과 출력층 사이의 가중치

단계 2) 신경회로망의 입력층과 은닉층 사이의 가중치를 변경하기 위해서 식 (14)와 같이 출력층의 오차 신호(δ_j)를 계산한다. 식 (14)를 이용하여 가중치의 변화량이 식 (15)에 의해서 계산되며, 식 (15)에 의하여 변화된 가중치는 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned}\delta_j &= -\frac{\partial E}{\partial net_k} = -\frac{\partial E}{\partial net_k} \frac{\partial net_k}{\partial O_j} \frac{\partial O_j}{\partial net_j} \\ &= \sum_k \delta_k \omega_{kj} f_j(net_j)\end{aligned}\quad (14)$$

$$\begin{aligned}\Delta W_{ji} &= -\eta_{ji} \frac{\partial E}{\partial \omega_{ji}} = -\eta_{ji} \frac{\partial E}{\partial net_j} \frac{\partial net_j}{\partial \omega_{ji}} \\ &= \eta_{ji} \delta_j O_i\end{aligned}\quad (15)$$

$$W_{ji}(n+1) = W_{ji}(n) + \Delta W_{ji}(n) \quad (16)$$

여기서, net_j : j 번째 뉴런의 입력

$a(net_j)$: j 번째 뉴런의 출력

W_{ji} : 은닉층과 입력층 사이의 가중치

d : 목표값

4. 사례 연구

4.1 계통 해석 조건

제안한 SVC용 AFLC의 성능을 검증하기 위해 그림 6의 1기 무한대 계통에 대해 비선형 시뮬레이션을 수행하였고, 비선형 시뮬레이션에 사용된 발전기 미분방정식은 참고문헌[10]에 언급되어 있다. Tabu 탐색법의 시뮬레이션 계수는 표 1과 같고, 표 1의 조건에서 Tabu 탐색법으로 SVC용 AFLC를 튜닝하였고, 튜닝된 AFLC의 입·출

력 이득은 0.038, 3.619, 0.103이다. 제안한 AFLC의 유용성을 입증하기 위해 Tabu 탐색법으로 이득을 최적화한 PD제어기와 참고문헌[10](GAFLC)의 제어기와 제어성능을 비교·검토하였다.

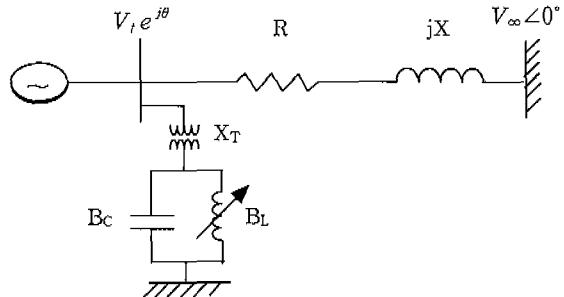


그림 6 성능평가에 사용된 1기 무한대 계통

Fig. 6 Single-machine infinite system used in performance evaluation

표 1 Tabu 탐색법의 시뮬레이션 계수

Table 1 Coefficients for simulation using Tabu Search

적용방법	이웃해의 개수	Tabu List의 수	Tabu 기준	C_i	C_d	λ
Tabu Search	50	5	0.05	1.1	0.9	1.0

Tabu 탐색법에 의해서 최적화된 AFLC, PD제어기 및 GAFLC의 제어성능을 비교하기 위해 사용된 해석 조건은 다음과 같다. 해석 조건은 AFLC의 설계에 사용된 계통운전 조건과 AFLC의 개인성 평가에 사용된 계통운전 조건으로 분류한다. AFLC의 설계에 사용된 계통운전 조건은 Tabu 탐색법으로 AFLC의 입·출력 이득과 신경로망의 가중치의 튜닝에 사용되었다. 본 논문에서 AFLC 설계에 사용된 계통운전 조건은 정부하시($P_e=1.0$ $Q_e=0.015$)에 3상 고장이 40msec 동안에 지속되다가 계통구성 변경 없이 제거되는 경우를 이용하였다. AFLC의 개인성 평가에 사용된 계통운전 조건은 AFLC의 설계에 사용된 계통운전조건과 다른 운전점에서 3상 고장에 대하여 AFLC, PD제어기 GAFLC를 비교하기 위해 사용된 조건이다. 본 논문에서 사용된 해석 조건은 표 2와 같고, 경우-1은 AFLC의 튜닝시 사용된 계통운전 조건이고, 경우-2와 경우-3은 AFLC, PD제어기와 GAFLC의 개인성을 평가하기 위해 사용되었다.

표 2 제어기 성능평가에 사용된 시뮬레이션 조건

Table 2 Simulation cases used in evaluation of controller performance

시뮬레이션 사례	동작 조건	외란 종류	고장시간
경우-1	정상부하시 ($P_e=1.0$ $Q_e=0.015$)	3상 지락 고장	40 [msec]
경우-2	증부하시 ($P_e=1.2$ $Q_e=0.015$)	3상 지락 고장	40 [msec]
경우-3	경 부하시 ($P_e=0.7$ $Q_e=0.015$)	3상 지락 고장	40 [msec]

4.2 시뮬레이션 결과

1) 정상부하시 계통 해석

그림 7은 Tabu 탐색법을 이용하여 AFLC의 튜닝에 사용된 정상부하시 모선단 근처에서 3상 지락 고장이 40msec 동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 고장이 제거되었을 때, 제어기가 없는 경우, PD 제어기, GAFLC 및 제안한 AFLC가 있는 경우에 대해 발전기 위상각, 제어입력, 단자전압 및 출력이득($SF_3(t)$)의 변화를 나타내었다. 그림 7에서 보는 것처럼 제안한 AFLC가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기나 GAFLC 보다 더 나은 제어 성능을 나타낸을 알 수 있다.

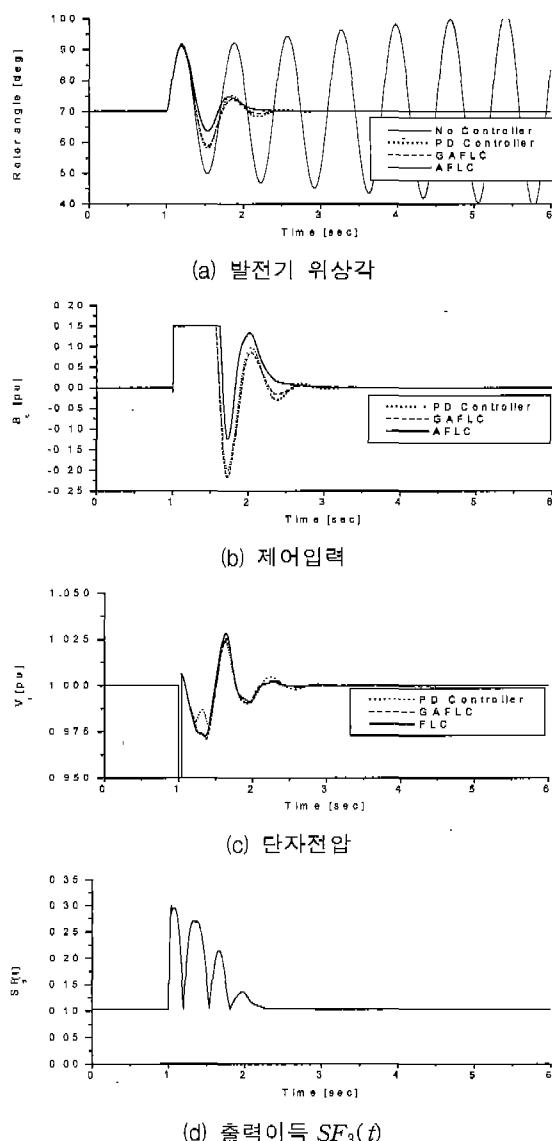


그림 7 정상부하시 3상고장이 발생했을 때 발전기 응답
Fig. 7 Responses of generator when three-phase fault was occurred in nominal load

2) 중부하시 계통 해석

제안한 AFLC의 강인성을 평가하기 위해 중부하시 모선단 근처에서 3상 지락 고장이 40msec 동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 고장이 제거되었을 때, PD제어기, GAFLC 및 제안한 AFLC에 대해 발전기 위상각, 제어입력, 단자전압 및 출력이득($SF_3(t)$)의 변화를 그림 8에 보였다. 그림 8에서 보는 것처럼 중부하시에도 제안한 AFLC가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기나 GAFLC 보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다.

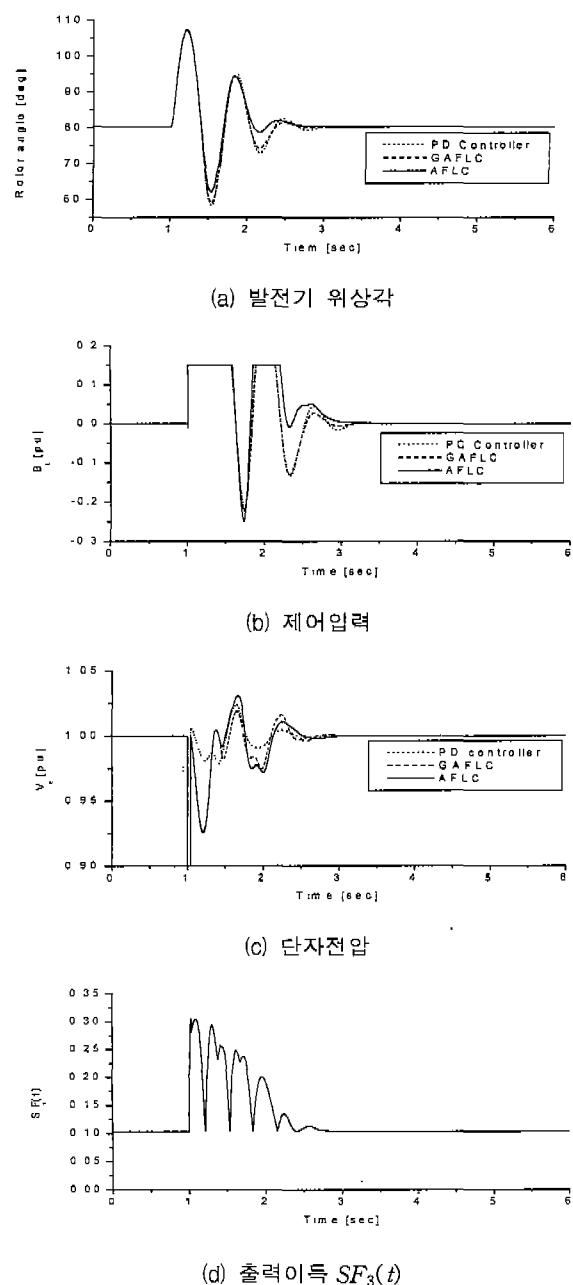


그림 8 중부하시 3상고장이 발생했을 때 발전기 응답
Fig. 8 Responses of generator when three-phase fault was occurred in heavy load

3) 경부하시 계통 해석

제안한 AFLC의 장인성을 평가하기 위해 경부하시 보선단 근처에서 3상 지락 고장이 40 msec 동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 고장이 제거되었을 때, PD제어기, GAFLC 및 제안한 AFLC에 대해 발전기 응답특성을 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 보는 바와 같이 경부하시에도 제안한 AFLC가 정정시간과 제동 효과면에서 PD제어기나 GAFLC 보다 더 좋은 제어성능을 보였다.

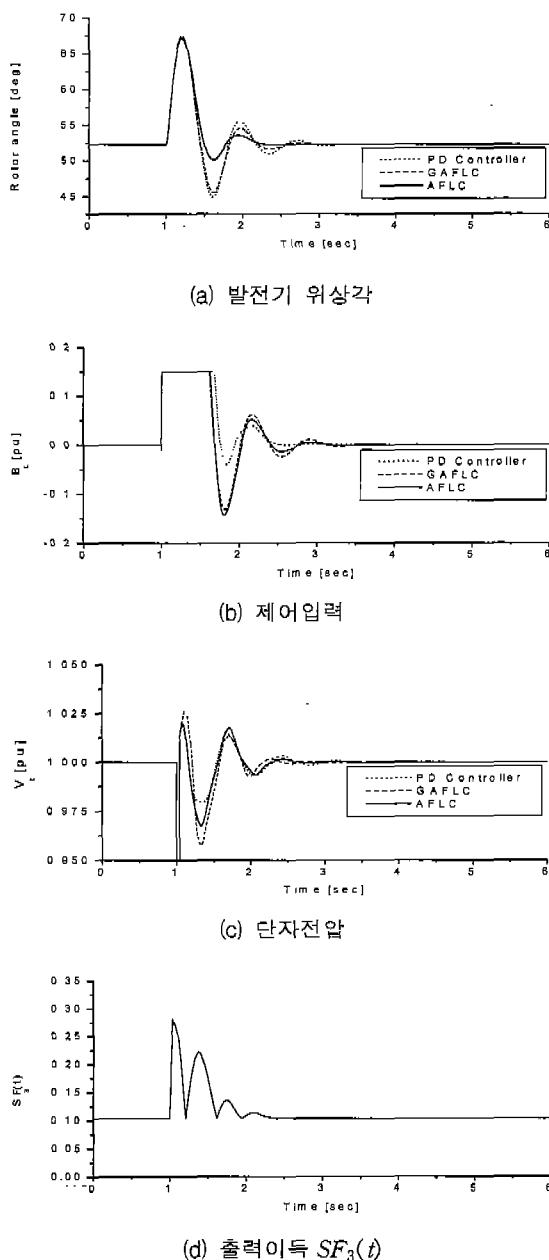


그림 9 경부하시 3상고장이 발생했을 때 발전기 응답

Fig. 9 Responses of a generator when three-phase fault was occurred in light load

4) 동적 안정도 여유(dynamic stability margin)

경부하, 정상부하 및 중부하시의 초기상태에 대해 기계적인 토오크를 증가하면서 PD제어기, GAFLC와 AFLC의 동적 안정도 여유를 평가하기 위한 과정은 아래와 같고, 표 3은 PD 제어기, GAFLC와 AFLC의 동적 안정도 여유를 나타내었다. 표 3에서 보는 것처럼 AFLC가 발전기의 동적 안정도를 증가시킬 수 있다.

단계 1) 기계적인 토오크를 0.001[pu] 씩 증가시키면서 발전기의 각속도를 변화를 본다.

단계 2) 만일 발전기 각속도가 발산하지 않으면 단계 1)를 수행하고, 발산하면 단계 3)를 수행한다.

단계 3) 발산하기 직전의 기계적인 토오크의 변화에 대해서 발전기의 유효전력과 위상각을 계산한다.

표 3 동적 안정도의 여유

Table 3 Dynamic stability margin

조건		방법	PD	GAFLC	AFLC
경부하시	최대 유효전력[pu]	1.676	1.654	1.681	
	최대 발전기 위상각[rad]	1.528	1.498	1.536	
정상부하시	최대 유효전력[pu]	1.494	1.468	1.505	
	최대 발전기 위상각[rad]	1.619	1.584	1.639	
중부하시	최대 유효전력[pu]	1.380	1.361	1.401	
	최대 발전기 위상각[rad]	1.662	1.651	1.683	

5. 결 론

본 논문에서는 신경회로망과 역전파 학습알고리즘을 이용하여 실시간으로 퍼지제어기의 출력이득을 조정하는 SVC용 적응 퍼지제어기(AFLC)를 제안하였다. 이때, SVC용 적응 퍼지제어기의 입·출력이득과 신경회로망의 초기 가중치를 Tabu 탐색법을 이용하여 튜닝하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다.

1기 무한대 계통에 대한 SVC용 AFLC의 튜닝에 사용된 정상부하시의 3상 지락 고장에 대해서 제안한 AFLC가 PD제어기와 참고문헌[10]의 제어기보다 정정시간과 제동효과면에서 더 나은 제어성능을 보였다. 그리고 AFLC의 장인성을 평가하기 위해 중부하 및 경부하시의 3상 고장에 대해 발전기 동특성을 해석하였다. 제안한 AFLC의 장인성을 평가에 사용된 계통운전 조건에 대해서도 AFLC가 PD제어기와 참고문헌[10]의 제어기보다 더 나은 제동효과를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 과학재단에서 시행한 특정연구 과제의 연구결과임.(과제번호:#1999-2-302-007-3)

참 고 문 헌

- [1] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, Understanding FACTS : Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, *IEEE*, 2000.
- [2] N. G. Hingorani, "FACTS - Flexible AC Transmission System", *EPRI Workshop*, Cincinnati, Ohio, Nov., pp.14-16, 1990.
- [3] 박종근, "신 전력 전송 시스템", 대한전기학회 춘계 전력 계통 연구회 논문집, 1993.
- [4] "FACTS 기기 개발 I 단계 연구(1MVA급 IGBT형 Statcon 개발)", *TM96EJ29.97.628*, 전력연구원, 1997.
- [5] 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 Technology*, pp. 370-375, June, 1995.
- [6] M. Nayebzadeh and A. R. Messina, "Advanced Concepts of Analysing Static Var Compensators to Damp Inter-Area Oscillation Modes", *ETEP*, Vol. 9, No. 3, pp.159-165, May, 1999.
- [7] Q. Zhao and J. Jiang, "Robust SVC Controller Design for Improving Power System Damping", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 4, pp.1927-1932, Nov., 1995.
- [8] T. Hiyama, M. Mishiro, and H. Kihara, "Fuzzy Logic Switching of Thyristor Controlled Braking Resistor Considering Coordination with SVC", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 4, pp. 2020-2026, Oct., 1995.
- [9] Fred Glover and Manuel Laguna, Tabu Search, *Kluwer Academic Publishers*, 1997.
- [10] 정근영, "전력계통 안정도 향상을 위한 정지형 무효 전력보상기의 설계", 석사논문 2000.

저 자 소 개



손종훈(孫鍾訓)

1973년 1월 8일생. 1999년 경성대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 기술신용보증기금 보증부에 근무

Tel : 055) 321-0840



황기현(黃琪鉉)

1968년 3월 1일 생. 1994년 경성대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 부산대 일반대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 부산대 컴퓨터 및 정보통신 연구소 기금교수

Tel : 051-510-3188

E-mail : hwanggh@hyowon.pusan.ac.kr



김형수(金亨洙)

1972년 1월 26일 생. 1994년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 연구분야는 지능 시스템 및 전력계통 최적운용 분야

Tel : 051-510-3188

E-mail : kimhsu@hyowon.pusan.ac.kr



박준호(朴俊灝)

1955년 9월 17일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1978년~1981년 한국전기연구소 연구원. 1981년~1984년 충남대 공대 전기공학과 전임강사 및 조교수. 1989년~1990년 Pen. State Univ. Visiting Scholar. 현재 부산대 공대 전기공학과 교수

Tel : 051-510-2370

E-mail : parkjh@hyowon.pusan.ac.kr



박종근(朴鍾根)

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1983년~현재 서울대 전기공학부 교수

Tel : 02-880-5516, Fax : 02-883-0827

E-mail : parkjk@snu.ac.kr