

신경회로망을 이용한 SVC용 적응 퍼지제어기의 설계

Design of Adaptive Fuzzy Logic Controller for SVC using Neural Network

孫鍾訓* · 黃琪鉉** · 金亨洙*** · 朴俊灝****

(Jong-Hun Son* · Gi-Hyun Hwang** · Hyung-Su Kim*** · June Ho 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[8] 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[8].

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

1. 서론

유연송전시스템(flexible AC transmission system : FACTS)은 기존 전력계통의 송전용량을 최대 열적 한계용량까지 증가시켜 전력수송 설비시설의 건설 부담을 경감시킬 수 있는 새로운 개념의 전력전송방식이다[1,2]. FACTS 중에서 SVC는 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[3], 진·지상보상기[4] 및 H_{∞} 제어기[5] 등이 제안되었다. 이러한 제어기들은 선형화된 전력계통을 이용하여 설계되었기 때문에 특정 운전점에서는 좋은 제어능을 나타내지만 다른 운전 조건에서는 좋은 제어

성능을 얻기가 어렵다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 최근에는 전력계통 안정도를 향상시키기 위하여 SVC용 제어기로 퍼지제어기와 신경회로망 제어기 등과 같은 지능제어방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[6].

본 논문에서는 경험적인 탐색방법인 Tabu 탐색법[7]과 신경회로망을 이용한 SVC용 적응 퍼지 제어기(adaptive fuzzy logic controller : AFLC)를 설계하였다. 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)[8]과 비교하였다. 이때 PD제어기의 이득은 Tabu 탐색법을 이용하여 최적화하였다. 다양한 계통운전 조건에 대해서 제안한 AFLC가 PD제어기와 참고문헌[8]의 제어기보다 더 좋은 제어성능을 나타내었다.

2. SVC의 특징

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[8], 구조는 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 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.

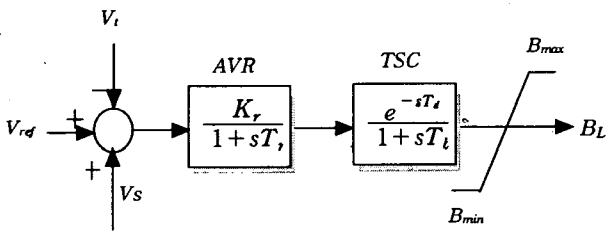


그림 1. SVC 구조

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 출력 이득을 조정하는데 필요한 신경회로망의 초기 가중치를 Tabu 탐색법[9]으로 튜닝하였다. 두 번째는 신경회로망을 이용하여 퍼지제어기의 출력 이득을 실시간으로 조정하는 단계이고, 이때 신경회로망의 가중치는 역전파 학습 알고리즘을 이용하여 조정하였으며, 신경회로망의 초기가중치는 Tabu 탐색법을 이용하여 튜닝한

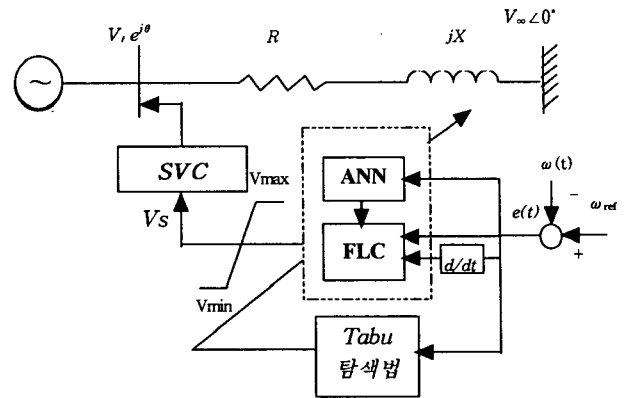


그림 2. Tabu탐색법을 이용한 SVC용 AFLC의 구성

값을 사용하였다. 그림 2는 1기 무한대 계통에 대해서 Tabu 탐색법으로 신경회로망의 가중치와 퍼지제어기의 입·출력 이득의 튜닝 및 실시간으로 퍼지제어기의 출력 이득을 신경회로망으로 조정하는 SVC용 AFLC의 구성도를 나타내었다. 그림 2에서 보는 것처럼 SVC용 AFLC의 입력으로 발전기 각속도 오차와 오차변화분을 사용하였다.

그림 2에서 Tabu 탐색법을 이용하여 AFLC의 입·출력 이득과 신경회로망의 가중치를 튜닝하기 위한 구성도는 그림 3과 같다. 그림 3에서 보는 것처럼 AFLC의 입력으로 오차와 오차의 변화분을 사용하였고, 신경회로망의 입력으로 시지연을 가지는 기준입력과 실제출력사이의 오차를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 Tabu 탐색법은 참고문헌[9]에 언급되어 있다.

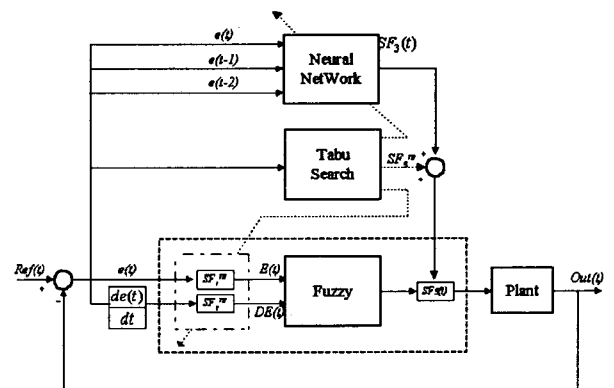


그림 3. Tabu탐색법을 이용한 AFLC 튜닝 구성도

본 논문에서 사용한 AFLC는 퍼지화(fuzzifier) 방법으로 이등변 삼각형 방법을 사용하였고, 퍼지추론 방법으로 Mamdani의 최대-최소 퍼지추론

방법을 사용하였으며, 비퍼지화 방법으로 무게중심법을 사용하였다. 퍼지규칙은 비례-미분 형태를 사용하였다. 그리고 신경회로망의 구조는 입력층, 은닉층 및 출력층으로 구성되어 있고, 입력층의 뉴런의 수는 3, 은닉층의 뉴런의 수는 5, 출력층의 뉴런의 수는 1 이다.

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 출력 이득을 신경회로망을 이용하여 실시간으로 매 샘플링시간마다 적응적으로 변경하는 방법을 제안하였고, 그 구조는 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 보는 것처럼 신경회로망의 출력은 식 (1)과 같이 퍼지제어기의 출력 이득의 변화분이다. 식 (1)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. 본 논문에서 실시간으로 신경회로망의 가중치를 개선하기 위해 사용된 역전파 학습알고리즘을 사용하였다.

$$SF_3(t) = SF_3^{TS} + \Delta SF_3(t) \quad (1)$$

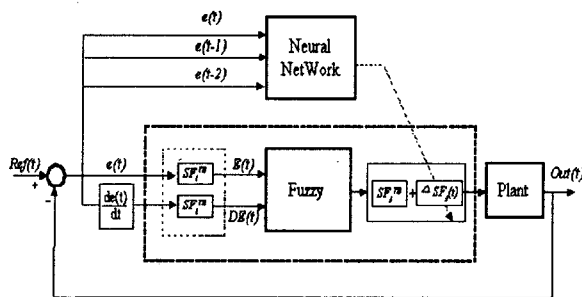


그림 4. AFLC의 실시간 운전을 위한 구성도

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

4. 사례 연구

4.1 계통 해석 조건

제안한 SVC용 AFLC의 성능을 검증하기 위해 그림 5의 1기 무한대 계통에 대해 비선형 시뮬레이션을 수행하였고, 비선형 시뮬레이션에 사용된 발전기 미분방정식은 참고문헌[8]에 언급되어 있다. Tabu 탐색법으로 튜닝한 AFLC의 입·출력 이득은 0.038, 3.619, 0.103이다. 제안한 AFLC의 유용성을 입증하기 위해 Tabu 탐색법으로 이득을 최적화한 PD제어기와 참고문헌[8](GAFLC)의 제어기와 제어성능을 비교·검토하였다.

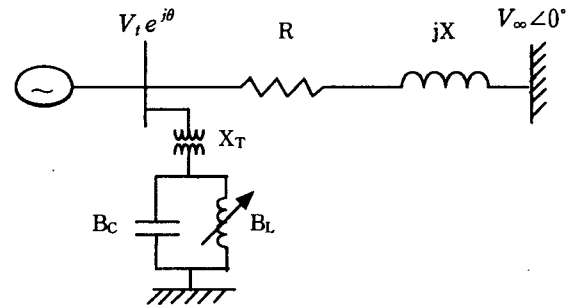


그림 5. 성능평가에 사용된 1기 무한대 계통

Tabu 탐색법에 의해서 최적화된 AFLC, PD제어기 및 GAFLC의 제어성능을 비교하기 위해 사용된 해석 조건은 다음과 같다. 해석 조건은 AFLC의 설계에 사용된 계통운전 조건과 AFLC의 강인성 평가에 사용된 계통운전 조건으로 분류한다. AFLC의 설계에 사용된 계통운전 조건은 Tabu 탐색법으로 AFLC의 입·출력 이득과 신경회로망의 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 변경없이 제거되는 경우를 이용하였다. AFLC의 강인성 평가에 사용된 계

통운전 조건은 AFLC의 설계에 사용된 계통운전 조건과 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 강인성을 평가하기 위해 사용되었다.

표 2. 제어기 성능평가에 사용된 시뮬레이션 조건

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	중부하시 ($P_e=1.2$ $Q_e=0.015$)	3상 지락 고장	40 [msec]
경우-3	경 부하시 ($P_e=0.7$ $Q_e=0.015$)	3상 지락 고장	40 [msec]

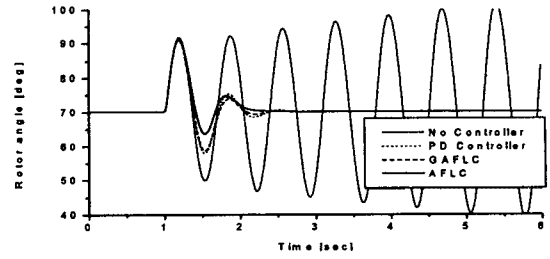
4.2 시뮬레이션 결과

1) 정상부하시 계통 해석

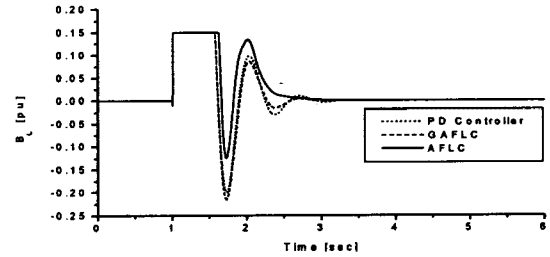
그림 6은 Tabu 탐색법을 이용하여 AFLC의 튜닝에 사용된 정상부하시 모션단 근처에서 3상 지락 고장이 40msec 동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 고장이 제거되었을 때, 제어기가 없는 경우, PD 제어기, GAFLC 및 제안한 AFLC가 있는 경우에 대해 발전기 위상각, 제어입력 단자전압 및 출력이득($SF_3(t)$)의 변화를 나타내었다. 그림 6에서 보는 것처럼 제안한 AFLC가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기나 GAFLC 보다 더 나은 제어 성능을 나타냄을 알 수 있다.

2) 중부하시 계통 해석

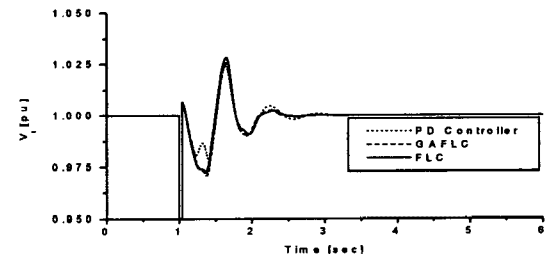
제안한 AFLC의 강인성을 평가하기 위해 중부하시 모션단 근처에서 3상 지락 고장이 40msec 동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 고장이 제거되었을 때, PD제어기, GAFLC 및 제안한 AFLC에 대해 발전기 위상각, 제어입력, 단자전압 및 출력



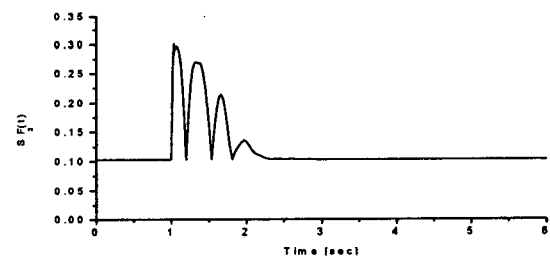
(a) 발전기 위상각



(b) 제어입력



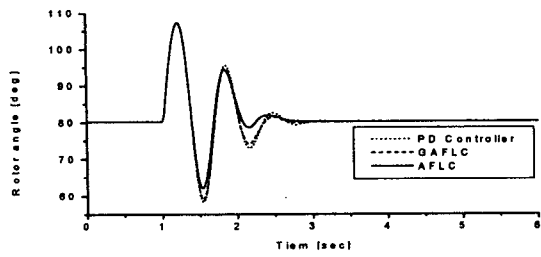
(c) 단자전압



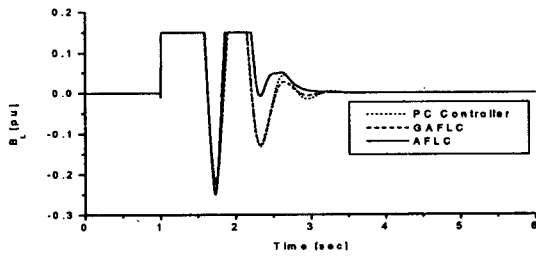
(d) 출력이득 $SF_3(t)$

그림 6. 정상부하시 3상고장이 발생했을 때 발전기 응답

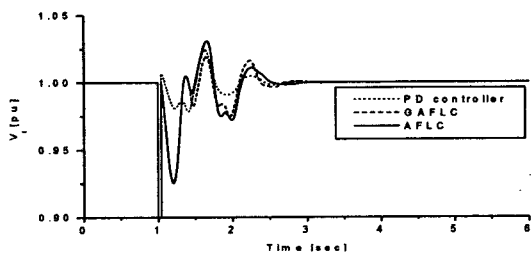
이득($SF_3(t)$)의 변화를 그림 7에 보였다. 그림 7에서 보는 것처럼 중부하시에도 제안한 AFLC가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기나 GAFLC 보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다.



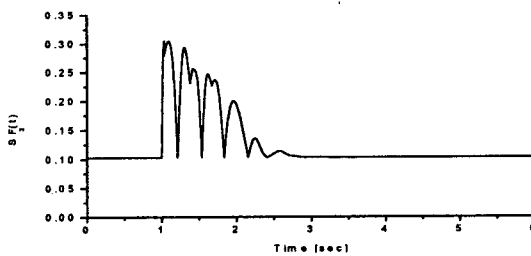
(a) 발전기 위상각



(b) 제어입력



(c) 단자전압



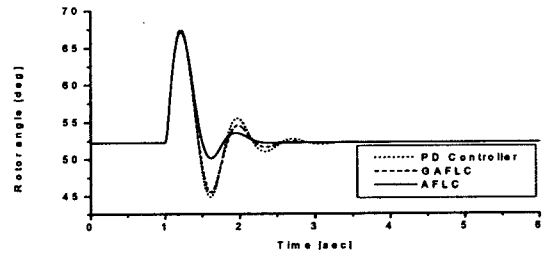
(d) 출력이득 $SF_3(t)$

그림 7. 중부하시 3상고장이 발생했을 때 발전기 응답

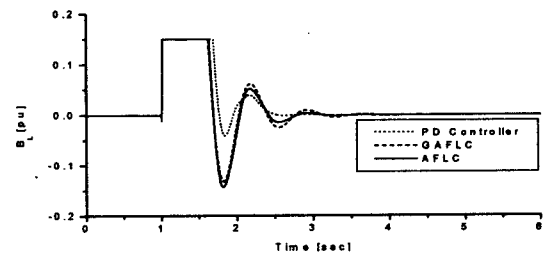
3) 경부하시 계통 해석

제안한 AFLC의 강인성을 평가하기 위해 경부하시 모션단 근처에서 3상 지락 고장이 40 msec 동안 지속되다가 계통구성 변경 없이 고장이 제거 되었을 때, PD제어기, GAFLC 및 제안한 AFLC에

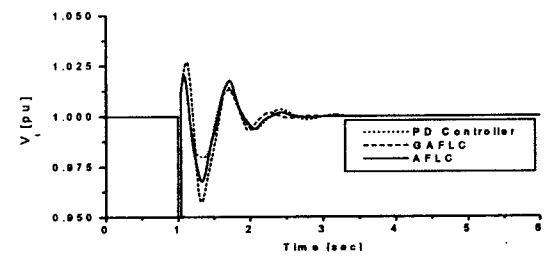
대해 발전기 응답특성을 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보는 바와 같이 경부하시에도 제안한 AFLC가 정정시간과 계동 효과면에서 PD제어기나 GAFLC 보다 더 좋은 성능을 보였다.



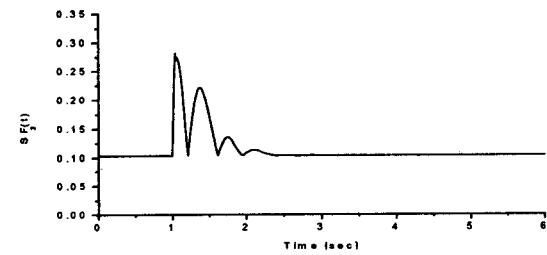
(a) 발전기 위상각



(b) 제어입력



(c) 단자전압



(d) 출력이득 $SF_3(t)$

그림 8. 경부하시 3상고장이 발생했을 때 발전기 응답

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[8]의 제어기보다 정정시간과 제동효과면에서 더 나은 제어 성능을 보였다. 그리고 AFLC의 강인성을 평가하기 위해 중부하 및 경부하시의 3상 고장에 대해 발전기 동특성을 해석하였다. 제안한 AFLC의 강인성 평가에 사용된 계통운전 조건에 대해서도 AFLC가 PD제어기와 참고문헌[8]의 제어기보다 더 나은 제동 효과를 나타내었다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] 박종근, "신 전력 전송 시스템", 대한전기학회 춘계 전력 계통 연구회 논문집, 1993.
- [2] "FACTS 기기 개발 I 단계 연구(1MVA급 IGBT형 Statcon 개발)", TM96EJ29.97.628, 전력연구원, 1997.
- [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 Technology*, pp. 370-375, June, 1995.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Fred Glover and Manuel Laguna, *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [8] 정근영, "전력계통 안정도 향상을 위한 정지형 무효 전력보상기의 설계", 석사논문 2000.
- [9] 손종훈, *Tabu 탐색법과 신경회로망을 이용한 SVC용 적응 퍼지제어기 설계*, 석사논문 2000