

전력계통 안정도 향상을 위한 SVC용 퍼지제어기의 설계

정근영<sup>1)</sup> · 황기현 · 손종훈 · 김형수 · 문경준 · 박준호  
부산대학교 전기공학과

Design of SVC Fuzzy Logic Controller for Improving Power System Stability

G. Y. Jung<sup>1)</sup> · G. H. Hwang · J. H. Son · H. S. Kim · K. J. Mun · J. H. Park  
Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University

**Abstract** - This paper describes the design of SVC fuzzy logic controller (SVC-FLC) using adaptive evolutionary algorithm and we tuned the gain of input-output variables of SVC-FLC using it. We performed the nonlinear simulation on an single-machine infinite system to prove the efficiency of the proposed method.

The proposed SVC-FLC showed the better performance than PD controller in terms of the settling time and damping effect, for system operation condition used in evaluating the robustness and three phase grounding default in cases of nominal loading used in tuning SVC-FLC for a single-machine infinite system.

1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가에 따른 발전설비 및 송·배전설비의 신규 건설이 필요하지만, 전력수송설비의 신·증설은 전력수송로의 병목현상, 장거리 경과지 확보문제, 민원문제, 환경과의 조화 등의 문제점이 있다. 따라서 기존설비의 이용률을 극대화하여 신규 건설 없이 송전용량을 증대시키는 방안이 강구 되어왔다[1].

기존 전력수송설비에 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용한 제어기술을 도입하여 송전용량을 최대 열적 한계용량까지 증가시킬 수 있는 새로운 개념의 차세대 신 송전기술인 유연송전시스템 (Flexible AC Transmission System : FACTS)에 대한 연구가 진행되고 있다[2]. 이러한 FACTS의 한 분야인 정지형 무효전력보상장치 (Static Var Compensator : SVC)에 관한 연구로서는 선형 모델을 이용한 비례-적분 제어기[3], 진·지상 보상기[4] 및 H<sub>∞</sub> 제어기[5] 등이 제안되었다. 이런 제어기들은 선형화된 전력계통 모델을 이용하여 설계했기 때문에 많은 비선형성이 존재하는 전력계통에서는 최적의 제어성능을 발휘하기가 어렵다. 최근에는 SVC 제어기로 퍼지제어기와 신경회로망 제어기 등과 같은 지능제어 방법에 대한 연구가 진행되고 있다[6].

본 논문에서는 적응진화알고리즘을 이용하여 SVC용 퍼지제어기를 설계하였다. 적응진화알고리즘을 이용하여 SVC용 퍼지제어기의 입·출력 변수의 이득을 튜닝하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 발전기 모델링 및 SVC의 구조

2.1 발전기 모델링

SVC 제어기의 설계에 사용된 1기 무한대 계통 (Single-machine Infinite System)에 대한 발전기의 미분방정식은 식 (1) ~ 식 (4)와 같고, 사용한 표기법에 대한 설명은 참고문헌[7]에 있다.

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T_{do}} [E'_q + (X_d - X'_d)I_d - E_{fd}] \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_{ref} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{ref}}{2H} [T_M - E'_q I_q - (X_q - X'_q)I_q] \quad (3)$$

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{K_A}{T_A} (V_{ref} - V_t + V_s) - \frac{1}{T_A} E_{fd} \quad (4)$$

2.2 SVC의 구조

SVC 중 TCR(Thyristor Controlled Reactor) 방식은 가변용량의 무효전력을 발생시키는 방법 중 가장 많이 사용되는 장치로, 역병렬로 연결된 다이리스터 스위치를 이용하여 리액터에 걸리는 전압을 조정하여 무효전력을 연속적으로 변화시키는 방식이다. 다이리스터 소자를 Shunt Reactor에 직렬로 연결한 형태이며, 3상에 대하여 보통 Δ결선으로 구성되어 있다. FC(Fixed Capacitor)는 TCR과 조합하여 많이 사용되며, 고조파 필터로 동작하도록 설계된다. 본 논문에서 사용된 SVC 구조는 가장 일반적으로 많이 사용되는 TCR-FC형태를 사용하였다.

3. 적응진화알고리즘을 이용한 SVC용 퍼지제어기 설계

3.1 적응진화알고리즘

본 논문에서는 해집단을 다음세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 알고리즘을 제안하였다[7]. 적응진화알고리즘은 초기해집단을 구성할 때 각 스트링에 대해서 태그변수 0(유전알고리즘의 개체) 또는 1(진화전략의 개체)을 임의로 대용시킨 후, 각 개체의 적합도를 계산하고 룰렛휠 (roulette wheel)를 사용하여 적합도에 따라 복제한다. 복제된 개체는 태그변수에 따라 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단을 분리한 후, 유전알고리즘의 해집단에 대해 교배 및 돌연변이를 수행하고 진화전략의 해집단에 대해 돌연변이를 수행한다. 이때 부모해집단에서 적합도가 가장 높은 개체는 유전알리즘의 해집단과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하는 엘리트즘을 사용하였다.

3.2 적응진화알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 설계

본 논문에서 제안한 적응진화알고리즘을 이용하여 SVC용 퍼지제어기의 입·출력 이득을 튜닝하였다. 그림 1은 적응진화알고리즘으로 SVC용 퍼지제어기의 입·출력 이득을 튜닝하기 위한 구성도를 나타내었다. 그림 1에서 SVC용 퍼지제어기의 퍼지화방법으로 이동변 삼각형 방법을 사용하였고, 퍼지추론 방법으로 Mamdani의 최대-최소 퍼지추론 방법을 사용하였으며, 비퍼지화 방법으로 무게중심법을 사용하였다. 그리고 SVC용 퍼지제어기의 입력으로 발전기 각속도 오차와 변화분을 사용하였다. 그림 2는 본 논문에서 사용한 SVC 블록 선도를 나타내었다.

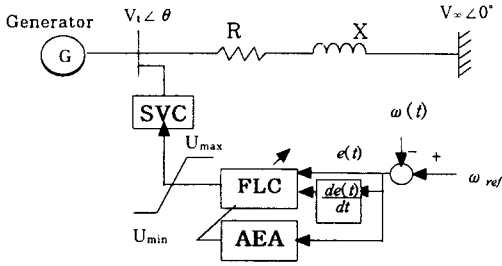


그림 1 적응진화알고리즘을 이용한 SVC용 퍼지제어기 튜닝을 위한 구성도

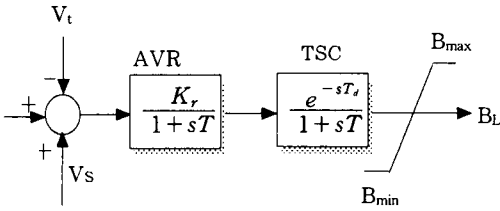


그림 2 SVC 구조

#### 4. 사례 연구

제한한 SVC용 퍼지제어기의 성능을 검증하기 위하여 그림 3의 1기 무한대 계통에 대해 비선형 시뮬레이션 수행하였다. 비선형 시뮬레이션에 사용된 적응진화알고리즘의 시뮬레이션 계수는 표 1과 같다. 표 1과 같은 조건에서 적응진화알고리즘으로 SVC용 퍼지제어기를 튜닝하였고, 튜닝된 SVC용 퍼지제어기의 입·출력변수의 이득은 각각 0.24, 3.50, 2.70이다.

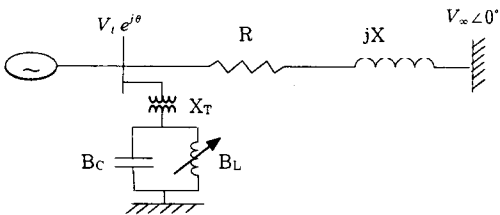


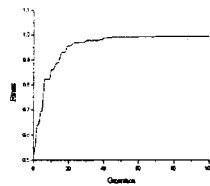
그림 3 성능평가에 사용된 1기 무한대 계통

표 1 적응진화알고리즘의 시뮬레이션 계수

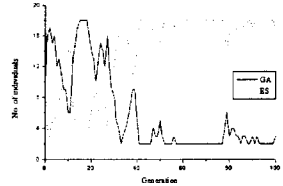
적용방법	해집단수	교배 확률	돌연변이 확률	$\delta$	$C_d$	$C_i$
AEA	20	0.95	0.005	0.5	0.95	1.05

그림 4는 매 세대별 적합도 수렴특성 및 적응진화알고리즘에서의 유전알고리즘과 진화전략의 개체수를 나타내었다. 그림 4의 (b)에서 보는 바와 같이 초기 세대에서는 유전알고리즘의 개체수가 진화전략의 개체수보다 더 많이 나타나고 세대수가 증가함에 따라 진화전략의 개체수가 더 많아짐을 알 수 있다. 이것은 초기 세대에서는 유전알고리즘에 의해 전역탐색을 행하고, 세대수가 증가함에 따라 진화전략에 의해 국부탐색을 적용적으로 수행함을 나타낸다.

적응진화알고리즘에 의해서 최적화된 SVC용 퍼지제어기와 PD제어기와의 제어성능을 비교하기 위해 사용된



(a) 적합도



(b) GA, ES의 개체수

그림 4 세대별 적합도 수렴특성 및 GA, ES의 개체수

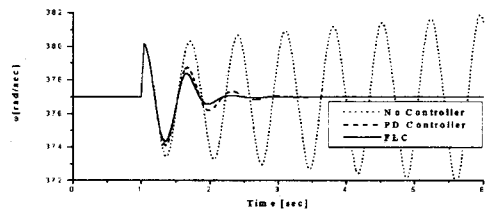
해석조건은 표 2와 같고, 경우-1은 SVC용 퍼지제어기 튜닝시 사용된 제동운전 조건이고, 경우-2~경우-6은 SVC용 퍼지제어기와 PD제어기의 강인성을 평가하기 위해 사용되었다.

표 2 제어기 성능평가에 사용된 시뮬레이션 조건

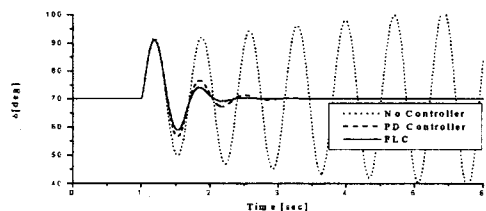
시뮬레이션 사례	동작 조건	외란 종류	고장시간
경우-1	정상부하시	3상 지락 고장	50(msec)
경우-2	( $P_e=1.0$ $Q_e=0.015$ )	$T_m$ 이 0.1(pu) 증가	-
경우-3	중부하시	3상 지락 고장	50(msec)
경우-4	( $P_e=1.2$ $Q_e=0.015$ )	$T_m$ 이 0.1(pu) 증가	-
경우-5	경 부하시	3상 지락 고장	50(msec)
경우-6	( $P_e=0.7$ $Q_e=0.015$ )	$T_m$ 이 0.1(pu) 증가	-

#### 4.1 정상부하시 시뮬레이션 결과

그림 5는 적응진화알고리즘을 이용하여 SVC용 퍼지제어기의 튜닝에 사용된 표 2의 경우-1에 대해서 제어기가 없는 경우, PD 제어기 및 제한한 SVC용 퍼지제어기가 있는 경우에 대해 발전기 각속도 및 발전기 위상각을 나타내었다. 그림 5에서 보는 것처럼 제한한 SVC용 퍼지제어기가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타낼 수 있다. 그림 6은 SVC용 퍼지제어기의 강인성을 평가하기 위해 표 2의 경우-2에 대해서 제어기가 없는 경우, PD 제어기 및 제한한 SVC용 퍼지제어기가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 6에서 보는 것처럼 제한한 SVC용 퍼지제어기가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다.



(a) 발전기 각속도



(b) 발전기 위상각

그림 5 정상부하시 3상 고장이 발생했을 때 발전기 응답

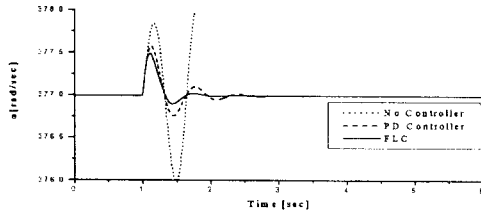
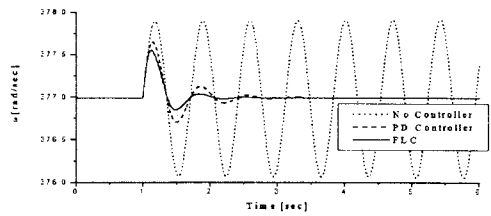


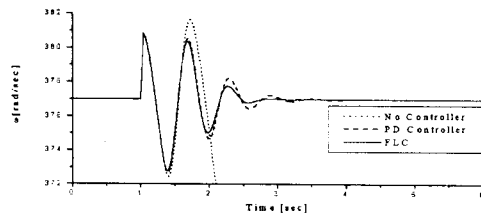
그림 6 정상부하시 기계적인 토크가 0.1[pu]만큼 변화했을 때 발전기 응답



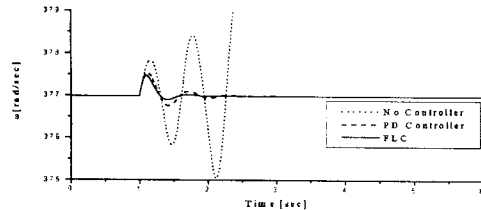
(b) 기계적인 토크오류 변화  
그림 8 경부하시 발전기 응답

#### 4.2 중부하시 시뮬레이션 결과

그림 7은 SVC용 퍼지제어기의 강인성을 평가하기 위해 표 2의 경우-3과 경우-4에 대해서 제어기가 없는 경우, PD 제어기 및 제한한 SVC용 퍼지제어기가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 7에서 보는 것처럼 제한한 SVC용 퍼지제어기가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다.



(a) 3상 지락 고장

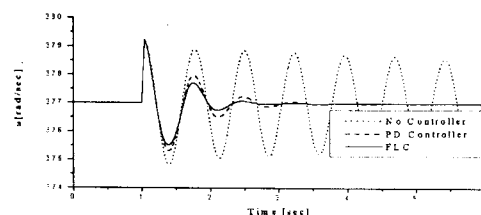


(b) 기계적인 토크오류 변화

그림 7 중부하시 발전기 응답

#### 4.3 경부하시 시뮬레이션 결과

그림 8은 SVC용 퍼지제어기의 강인성을 평가하기 위해 표 2의 경우-5와 경우-6에 대해서 제어기가 없는 경우, PD 제어기 및 제한한 SVC용 퍼지제어기가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 8에서 보는 것처럼 제한한 SVC용 퍼지제어기가 정정시간과 제동 효과면에서 PD 제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다.



(a) 3상 지락 고장

#### 5. 결론

본 논문에서는 적응진화알고리즘을 이용하여 SVC용 퍼지제어기를 설계하였다. 적응진화알고리즘을 이용하여 SVC용 퍼지제어기의 입·출력 변수의 이득을 튜닝하였다. 제한한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다.

1기 무한대 계통에 대한 SVC용 퍼지제어기의 튜닝에 사용된 정상부하시의 3상 지락 고장에 대해서 제한한 퍼지제어기가 PD 제어기보다 정정시간과 제동 효과면에서 더 나은 제어 성능을 보였다. 그리고 제한한 퍼지제어기의 강인성을 평가하기 위해 정상부하시 발전기 기계적인 토크 변화와 중·경부하시 3상 지락 고장과 발전기 기계적인 토크 변화에 대해 발전기 동특성을 해석하였다. 제한한 퍼지제어기의 강인성 평가에 사용된 계통 운전 조건에 대해서도 제한한 퍼지제어기 PD 제어기보다 더 나은 제동 효과를 나타내었다.

#### (참고 문헌)

- [1] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE, 2000
- [2] "FACTS Application", IEEE Power Engineering Society, IEEE Catalog No. 96TP, 1996
- [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 Tech. Conference, pp. 370-375, June, 1995
- [4] M. Nayebedzadeh 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] P. K. Dash, A. Routray, P. C. Panda, and S. K. Panda, "Adaptive Fuzzy Logic Control of a Static Var System", ETEP, pp. 128-133, May, 1998
- [7] 황기현, 박준호, 문경준, 김정원, "진화전략과 유전알고리즘을 이용한 적응진화연산", 47권8호, pp. 1262-1268, 1998, 대한전기학회 논문지
- [8] P. W. Sauer and M. A. Pai, Power System Dynamics and Stability, Prentice Hall, 1998