

전력계통 안정도 향상을 위한 STATCOM 안정화 장치 설계

이석오 · 정영민 · 문경준 · 황기현 · 박준호 · 이정관  
 부산대학교 전기공학과 · 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신연구소 · 한국전력공사

Design of STATCOM Stabiliser for Improving Power System Stability

Seok-Oh Lee · Young-Min Jung · Kyeong Jun Mun · Gi-Hyun Hwang · June Ho Park · Jeong-Kwan Lee  
 Dept. of Electrical Eng., Pusan National University  
 Research Institute of Computer, Information and Communication at Pusan National University

**Abstract** - This paper proposes the design of STATCOM(static synchronous compensator) stabilizer for improving power system stability using fuzzy logic controller(FLC). The STATCOM DC voltage regulator contributes negative damping to the power system as the installation of STATCOM DC voltage regulator. STATCOM stabiliser is superimposed on the AC voltage regulator to compensate the negative damping effect.

To evaluate usefulness of the proposed method, we perform the nonlinear simulation on a single-machine infinite bus system. As results of the simulations, the proposed method shows better control performance than PI controller in terms of damping effects.

성 좋은 정지형 여자방식을 사용하였다. 식 (1)~(4)의 발전기 미분 방정식에서 발전기로부터 선로쪽으로 흐르는  $d, q$ 축 전류  $I_{ILd}$ 와  $I_{ILq}$ 를 STATCOM을 포함하는 상태변수의 함수로 표현하는 과정은 다음과 같다[2-4]. 여기서 사용된 표기법은 참고논문[2]에 표기되어 있다.

1. 서 론

정보 통신기술의 발전과 소규모 고효율 및 고풍력 발전 설비의 생산 기술 향상으로 전력 산업분야에서도 경쟁체제 도입이 활발히 추진되고 있다. 따라서 전력도 일 반 상품처럼 거래가 이루어지는 경쟁적 전력거래시장 체제로 변화 발전하고 있다. 이러한 전력산업의 구조적 변화 과정에서 송배전 계통은 전력 수송망으로써 자연적 독점형태가 유지되나 송배전 계통을 이용한 전력에너지 수송은 경쟁적 전력시장의 요구에 부응해야 하는 새로운 변화가 요구된다. 이와 같은 전력사업 환경변화에 대응하기 위한 수단으로 FACTS(Flexible AC Transmission System, 유연 송전 시스템)기술, Custom Power 기술 등에 관한 인식이 높아가고 있다[1].

따라서, 본 논문에서는 전력계통 안정도 향상을 위해서 FACTS 설비의 일종인 STATCOM(static synchronous compensator)의 안정화 장치를 퍼지제어기를 이용하여 설계하였다. STATCOM 안정화장치용 퍼지제어기는 유전알고리즘을 이용하여 설계하였고, 이 장치는 AC 전압조정장치에 설치하여 전압형 컨버터 STATCOM으로 인한 계통요소 감소를 보상하였다. 제안한 STATCOM 안정화장치의 유용성을 입증하기 위해 1기무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 계통해석 결과, 제안한 방법이 정정상전 및 계통효과면에서 PI 제어기보다 더 우수한 제어성능을 보였다.

2. 발전기 및 STATCOM 모델링

본 논문에서 사용한 그림 1의 1기 무한대 계통에 대한 발전기 미분방정식은 식 (1)~(4)와 같다. 여기서, 여자는 속은

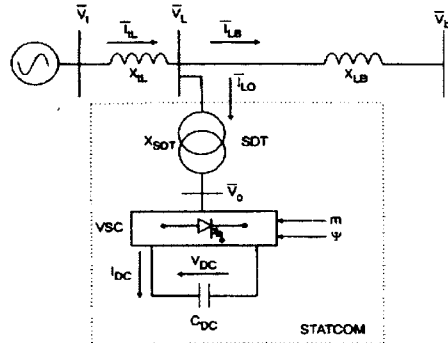


그림 1 1기 무한대 계통에서의 STATCOM

$$\delta = \omega - \omega_{ref} \tag{1}$$

$$\dot{\omega} = (P_m - P_e - D\omega) / M \tag{2}$$

$$\dot{E}'_q = (-E'_q + E_{fd}) / T_{do} \tag{3}$$

$$\dot{E}'_{fd} = -\frac{1}{T_A} E_{fd} + \frac{K_A}{T_A} (V_{to} - V_i) \tag{4}$$

여기서,  $P_e = E'_q I_{ILq} + (x_d - x'_d) I_{ILd} I_{ILq}$

$$E_q = E'_q + (x_d - x'_d) I_{ILd}$$

$$V_i = \sqrt{(E'_q - x'_d I_{ILd})^2 + (x_q I_{ILq})^2}$$

그림 1에서 STATCOM이 설치되어 있는 모선에 대해 KCL과 KVL를 적용하여 구한 전류 및 전압 방정식은 식 (5)~(6)과 같다. 식 (5)를 식 (6)에 대입하여 전개하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{LB} &= \bar{I}_{IL} - \bar{I}_{LO} = \bar{I}_{IL} - \frac{\bar{V}_L - \bar{V}_O}{jx_{SDT}} \\ &= \bar{I}_{IL} - \frac{\bar{V}_i - jx_{IL} \bar{I}_{IL} - \bar{V}_O}{jx_{SDT}} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\bar{V}_i = jx_{IL} \bar{I}_{IL} + jx_{LB} \bar{I}_{LB} + \bar{V}_O \tag{6}$$

$$\begin{aligned} j(x_{IL} + x_{LB} + x_{IL} \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}) \bar{I}_{IL} \\ = (1 + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}) \bar{V}_i - \frac{x_{LB}}{x_{SDT}} \bar{V}_O - \bar{V}_B \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)에서  $I_{dL}$ ,  $V_t$  및  $V_0$ 를  $d$ ,  $q$ 축 성분으로 분리하면 식 (8)과 같고, 식 (8)에서  $d$ ,  $q$ 축 전류  $I_{dLd}$ 와  $I_{dLq}$ 를 구하면 식 (9)~(10)과 같다.

$$j(x_{dL} + x_{LB} + x_{dL} \frac{x_{LB}}{x_{SDT}})(I_{dLd} + jI_{dLq}) = (1 + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}) \{ x_q I_{dLq} + j(E'_q - x'_d I_{dLd}) \} \quad (8)$$

$$- \frac{x_{LB}}{x_{SDT}} (cV_{DC} \sin(\delta - \phi) + jcV_{DC} \cos(\delta - \phi)) - V_B \sin \delta - jV_B \cos \delta$$

$$I_{dLq} = \frac{V_B \sin \delta + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}} cV_{DC} \sin(\delta - \phi)}{x_{dL} + x_{LB} + x_{dL} \frac{x_{LB}}{x_{SDT}} + (1 + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}) x_q} \quad (9)$$

$$I_{dLd} = \frac{(1 + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}) E'_q - V_B \cos \delta - \frac{x_{LB}}{x_{SDT}} cV_{DC} \cos(\delta - \phi)}{x_{dL} + x_{LB} + x_{dL} \frac{x_{LB}}{x_{SDT}} + (1 + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}) x'_d} \quad (10)$$

모선단에서 STATCOM으로 들어오는 전류  $I_{LO}$ 를  $d$ ,  $q$ 축 성분으로 분리하여 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{I}_{LO} = \frac{\bar{V}_t - jx_{dL} \bar{I}_{dL} - \bar{V}_0}{jX_{SDT}} \quad (11)$$

$$I_{LOq} = \frac{cV_{DC} \sin(\delta - \phi)}{x_{SDT}} - \frac{x_q + x_{dL}}{x_{SDT}} I_{dLq} \quad (12)$$

$$I_{LOd} = \frac{E'_q}{x_{SDT}} - \frac{x'_d + x_{dL}}{x_{SDT}} I_{dLd} - \frac{cV_{DC} \cos(\delta - \phi)}{x_{SDT}} \quad (13)$$

STATCOM 출력전압과 직류링크전압은 식 (14)~(15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{V}_0 = cV_{DC} (\cos \phi + jsin \phi) = cV_{DC} \angle \phi \quad (14)$$

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{I_{DC}}{C_{DC}} = \frac{c}{C_{DC}} (I_{LOd} \cos \phi + I_{LOq} \sin \phi) \quad (15)$$

여기서,  $c = mk$

$m$  : 조정비

$k$  : 직류 교류사이의 전압비

### 3. STATCOM 안정화장치의 설계

#### 3.1 컨버터 직류링크전압 제어기

컨버터 직류링크 전압 제어기의 블록선도는 그림 2에 나타내었다. 컨버터 직류링크 전압 제어기는 STATCOM 출력 전압의 위상을 제어하여 유효전력을 수수함으로써 직류링크 전압의 크기를 일정하게 유지할 수 있다. 그러나 이러한 유효전력의 수수는 계통의 제동 토크를 감소시키는 요인으로써 작용하게 된다[2].

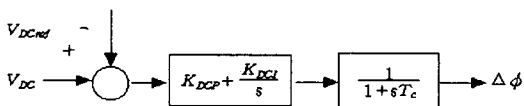


그림 2. Converter의 직류링크전압 제어기

#### 3.2 GA를 이용한 STATCOM 안정화장치 설계

STATCOM 직류링크단 전압 제어에 의해서 발생한 부제동을 보상하기 위한 STATCOM 안정화장치용 퍼지 제어기의 구성은 그림 3과 같다. 그림 3에서 STATCOM 안정화장치용 퍼지제어기는 AC 전압조정장치의 보조제어기로 사용하였다. STATCOM 안정화장치의 입력으로 각속도 변화분을 이용하였고, 안정화장치의 출력은 STATCOM이 설치되어 있는 모선단 전압차와 합산하여 AC 전압조정장치의 입력으로 사용된다. STATCOM 안정화장치용 퍼지제어기가 최적의 제어 성능을 얻기 위해서 확률적인 최적화 알고리즘인 유전알고리즘을 이용하여 퍼지제어기의 입·출력 이득을 튜닝하였다.

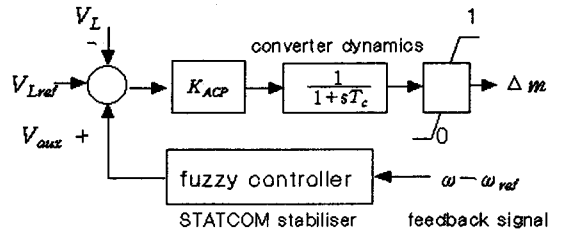


그림 3. STATCOM 안정화장치의 구성도

#### 4. 사례연구

제한한 STATCOM 안정화장치의 성능을 검증하기 위해서 그림 1과 같은 1기 무한대 계통[2]에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 실행하였다. STATCOM 안정화장치의 설계에 사용된 유전알고리즘의 시뮬레이션 계수는 표 1과 같고, 제어기 성능 평가에 사용된 시뮬레이션 조건은 표 2에 나타내었다.

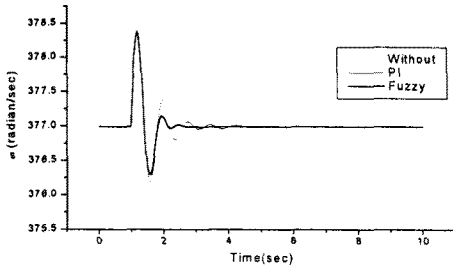
표 1. 유전자 알고리즘의 시뮬레이션 계수

반복횟수	해집단수	교배확률	돌연변이 확률
500	30	0.85	0.05

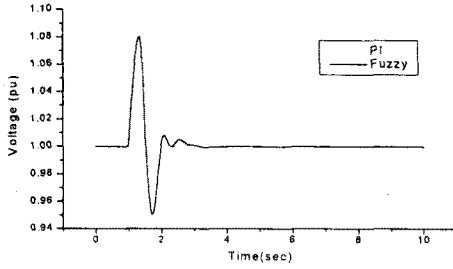
표 2. 제어기 성능 평가에 사용된 시뮬레이션 조건

분류	동작조건	외란종류	고장시간
경우-1	정상부하시 ( $P_e = 0.8$ )	Pm 0.2[pu] 증가	0.1[sec]
경우-2		Pm 0.1[pu] 감소	0.1[sec]
경우-3		3상 지락	0.1[sec]

표 2의 경우-1은 STATCOM 안정화장치의 설계에 사용한 계통조건이고, 경우-2와 경우-3은 강인성 평가를 위해서 사용하였다. 그림 4는 STATCOM 안정화장치의 설계에 사용된 계통 운전 에 대해서 발전기 각속도 및 모선단 전압의 변화를 나타내었다. 그림 4에서 보는 것처럼, 제안한 방법이 PI 제어기보다 정지시간 및 제동 효과면에서 우수한 제어 성능을 보임을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6은 표 2의 경우-2와 경우-3의 조건에서 발전기 각속도 및 모선단 전압의 변화를 나타내었다. 그림 5와 그림 6에서 보는 바와 같이 제안한 방법이 비교적 PI 제어기 보다 더 나은 성능을 보였다.

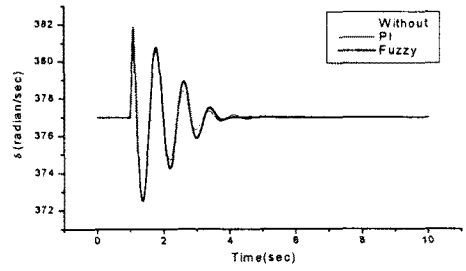


(a) 발전기 각속도

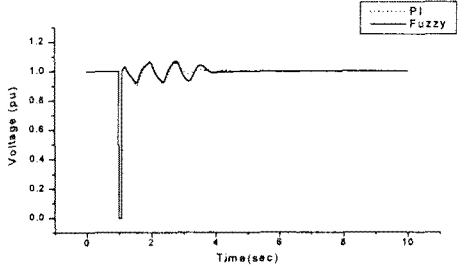


(b) 모선단 전압

그림 4. 발전기 각속도 및 모선단 전압 특성 (경우-1)



(a) 발전기 각속도



(b) 모선단 전압

그림 6. 발전기 각속도 및 모선단 전압 특성 (경우-3)

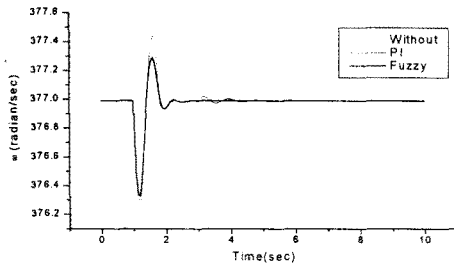
## 5. 결 론

본 논문에서는 유전알고리즘을 이용한 STATCOM 안정화장치용 퍼지제어기를 설계하였다. STATCOM 안정화장치용 퍼지제어기는 직류링크 전압 제어기에 의해서 발생하는 부제동 요소를 보상하기 위해 사용되었다.

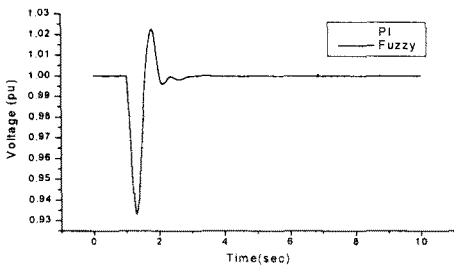
제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 1기 무한대 계통에 적용하여 PI제어기와 제안한 STATCOM 안정화장치용 퍼지제어기와 비교하였다. 계통해석 결과, 제안한 방법이 PI제어기보다 정정시간 및 제동 효과면에서 더 우수한 제어성능을 보였다. 또한 강인성 평가에 사용된 계통 운전 조건에 대해서도 제안한 방법이 PI제어기보다 더 나은 성능을 보임을 알 수 있었다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 한국전기연구소, 효성중공업기술연구소, LG산전전력연구소, "FACTS에 의한 송배전 계통의 용량증대 기술개발" 과학기술부 2000.
- [2] H.F.Wang, "Phillips-Heffron model of power systems installed with STATCOM and application", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol 146, No. 5, september, 1999
- [3] Peter W. Sauer, M.A.Pai, "Power System Dynamics and Stability" Prentice-Hall, Inc. 1998
- [4] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Press, 2000.
- [5] Douglas J. Gotham, G.T.Heydt, "Power Flow Control and Power Flow Studies for System with FACTS Devices" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 1, February 1998.



(a) 발전기 각속도



(b) 모선단 전압

그림 5. 발전기 각속도 및 모선단 전압 특성 (경우-2)