

## 제동력 향상을 위한 FACTS기기제어

윤중수, 이근준, 문건우, 윤석호, 추진부  
한전 전력연구원 차세대전력전송그룹

### FACTS controller design for improving Power System damping

Jong-Su Yoon, Gun-Jun Lee, Gun-Woo Moon, Suk-Ho Yoon, Jin-Boo Choo  
KEPRI, FACTS & Protection Group

**Abstract** -This paper presents a control system design for the STATCON of FACTS devices by LQR, LQG control scheme to enhance small-signal stability in the power system. the feature of this FACTS controller is coordinated with generator exciter controller(AVR, PSS) to improve the total power system stability and performance

#### 1. 서 론

최근에 발달한 대용량 전력전자기술을 이용하여 송전선로에서 전압의 크기와 위상차 그리고 선로 임피던스를 실시간으로 제어하여 계통의 송전용량과 안정도향상을 혁신적으로 향상시키려는 FACTS 연구가 최근 활발하다. 핵심적인 FACTS기기의 하나인 STATCON은 기본기능은 동기조상기와 유사하나, 신속한 제어가 가능한 진폭과 위상각을 가지므로 무효전력제어는 물론 파도안정도 및 동요의 개선에 큰 효과를 볼 수 있다. 기존의 STATCON 제어기설계는 주파수영역에서 주로 기기자체에서의 제어성능향상을 위주로 이루어져 왔는데 반해 본 논문은 1기 무한모선에 STATCON이 연계된 시스템을 모델링하고 대용량 STATCON에서 발전기 여자제어장치와 연계 제어를 통하여 계통시스템의 전체안정도와 무효전력을 제어하는 제어기법을 제안한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 STATCON 모델<sup>[2]</sup>

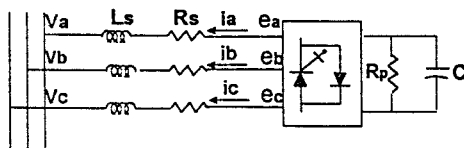


그림 1. 송전선과 STATCON 등가회로

그림 1은 송전선과 연결된 대표적인 STATCON의 등가회로이며  $L_s$ 는 변압기의 인덕턴스, 저항  $R_s$ 는 인버터와 변압기의 손실,  $R_p$ 는 인버터의 스위칭 손실을 의미할때 회로방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} (e_a - v_a) \\ (e_b - v_b) \\ (e_c - v_c) \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)을 d-q축으로 변환할 때 인버터전압  $e_d, e_q$ 는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} e_d &= m v_{dc} \cos(\alpha) \\ e_q &= m v_{dc} \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 Modulation Index이며,  $V_{dc}$ 는 인버터의 커패시터에 걸리는 DC전압을 의미하고  $\alpha$ 는 인버터 출력전압과 교류단자전압의 위상차이며 제어 입력이다. 여기서 STATCON내부의 DC성분 전력방정식을 추가하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s \omega_b}{L_s} & \omega & \frac{m \omega_b \cos \alpha}{L_s} \\ -\omega & -\frac{R_s \omega_b}{L_s} & \frac{m \omega_b \sin \alpha}{L_s} \\ -\frac{3}{2} m C \omega_b \cos \alpha & -\frac{3}{2} m C \omega_b \sin \alpha & -\frac{\omega_b C}{R_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} - \frac{\omega_b}{L_s} \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

##### 2.2 전력계통 모델<sup>[1]</sup>

본 논문의 해석대상을 1기 무한모선으로 하였고 발전기 모델링은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta \omega_r &= \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta \omega_r) \\ \frac{d}{dt} \delta &= \omega_0 \Delta \omega_r \\ \frac{d}{dt} \phi_{fd} &= \omega_0 (e_{fd} - R_{fd} i_{fd}) \end{aligned} \quad (4)$$

AVR과 PSS로 제어되는 발전기의 전체 블럭다이어그램은 그림 3과 같다

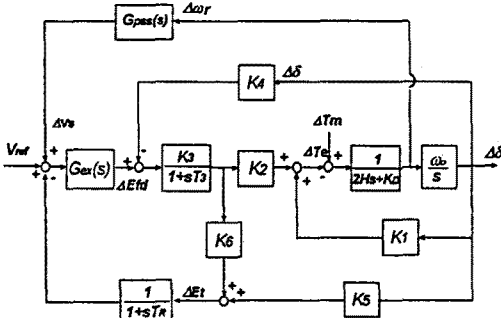


그림 3. AVR과 PSS로 여자기 제어되는 발전기<sup>[1]</sup>

### 2.3 STATCON이 연계된 전체시스템

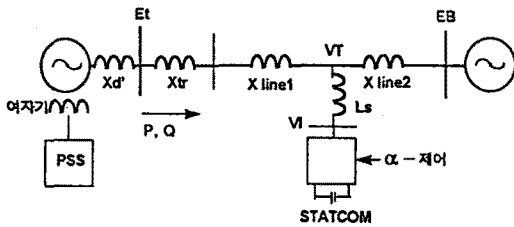


그림 4. STATCON이 연계된 1기 무한모션시스템

식(3)에서 알수있듯이 STATCON이 입력변수  $\alpha$ 에 대하여 비선형시스템이지만 정상상태해를 점호각  $\alpha_0$ 를 변수로하여  $-1.5^\circ \sim +1.5^\circ$  사이에서는  $i_d, i_q, v_{dc}$ 가 선형성을 가지므로  $\alpha_0$ 에 대하여 선형화를 통하여 섭동상태방정식을 구할 수 있다. 또한 발전기 및 전체 계통시스템에 STATCON제어를 위한 선형화모델을 구하면 식(5)로 표현된다.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B' \Delta W + B \Delta u \quad (5)$$

시스템 행렬 A, B, B'는 (6)과 같이 표현되는데 너무 복잡하므로 지면관계상 생략한다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \quad A_{12} = \begin{bmatrix} a_{16} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{26} & a_{27} & 0 & a_{29} \\ a_{46} & 0 & 0 & 0 \\ a_{56} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} \\ 0 & a_{72} & a_{73} & 0 & 0 \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & 0 & 0 \\ a_{91} & a_{92} & a_{93} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_{22} = \begin{bmatrix} a_{66} & a_{67} & a_{68} & a_{69} \\ a_{76} & a_{77} & 0 & 0 \\ a_{86} & 0 & a_{88} & 0 \\ a_{96} & 0 & a_{98} & a_{99} \end{bmatrix}$$

$$B' = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{81} & b_{91} \\ 0 & 0 & 0 & b_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$B = [b_{13} \ 0 \ b_{33} \ b_{43} \ b_{53} \ b_{63} \ b_{73} \ b_{83} \ b_{93}]^T$$

여기서

$$\Delta x = [\Delta \omega_r, \Delta \delta, \Delta \phi_{fd}, \Delta i_d, \Delta i_q, \Delta v_{dc}, \Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3]^T$$

$$\Delta u = \Delta \alpha$$

$$\Delta W = [\Delta T_m \ \Delta V_T]^T$$

식(5)의 상태변수중  $\Delta \omega_r, \Delta \delta, \Delta \phi_{fd}$ 는 발전기,  $\Delta i_d, \Delta i_q, \Delta v_{dc}$ 는 STATCON,  $\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3$ 는 발전기의 AVR과 PSS상태변수들이다.  $\Delta u$ 는 전체시스템에 대한 STATCON의 제어입력,  $\Delta W$ 는 계통에 주어지는 외란분으로 발전기 기계적인 입력의 변화와 송전선로의 전압변화분을 의미한다.

### 2.4 제어기설계

발전기 여자제어기와와의 협조적인 제어를 위하여 상태변수 제어방법인 LQR과 칼만필터를 이용한 LQG를 이용하여 STATCON 제어기를 설계하였다.

#### 2.4.1 LQR 제어기

발전기와 STATCON의 상태가 전부 측정가능하다고 가정하고 발전기부분의 상태데이터의 전송이 가능하다면 목적함수는 식(6)으로 들수있다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T R x + 2x^T N u + u^T Q u) dt \quad (6)$$

목적함수에서  $x^T R x + 2x^T N u$ 는 그림 4의 송전선로에서의 외란에 따른 계통변동분을 의미하기 때문에 R, Q는 같이 고려해 주어야한다. 제어기를 구성하기위한 대수 Riccati방정식은 식(7)과 같다.

$$A^T P + P A - (P B + M) R^{-1} (P B + M)^T + Q = 0 \quad (7)$$

제어기는 상태변수 케환형태로 식(8)과 같다.

$$u = -K x \quad (8)$$

여기서  $K = R^{-1} (B^T P + N^T)$ 이다.

#### 2.4.2 LQG 제어기

식(5)의 선형화된 시스템에 식(9)와 같이 시스템 노이즈를 고려하고 STATCON측의 상태변수만 측정이 가능하다고 가정한다면

$$\dot{x} = A x + B' W + B u + G \omega \quad (9)$$

$$y = C x + v$$

여기서  $C = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ ,  $\omega, v$ 는 White noise

전체상태변수는 칼만필터를 이용하여 관측하며 출력케환에 의한 제어기는 식(10)으로 구성된다.

$$u = K \hat{x} \quad (10)$$

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x} + B u + B' W + L (y - C \hat{x}) \quad (11)$$

여기서  $L$ 은 Ricatti 방정식에 의한 칼만이득이다.

### 3. 모 의 실험

그림 4의 1기 무한모선의 변수는 다음과 같다.

발전기 기저값 : 2220MVA, 24kV

시스템 상태 :  $P=0.9$ ,  $Q=0.3$ ,

$$E_t=1.0 \angle 36^\circ, E_B=0.995 \angle 0^\circ \text{ (p.u)}$$

발전기 :  $X'_d=0.3$ ,  $H=3.5$ ,  $KD=0$ ,  $X_d=1.81$ ,  $X_q=1.76$ ,

$$X_l=0.16, R_a=0.003, T'_{do}=8.0, A_{sat}=0.031,$$

$$B_{sat}=6.93, \psi_{TI}=0.8$$

AVR, PSS :  $K_A=200$ ,  $T_R=0.02$ ,  $K_{STAB}=9.5$ ,  $T_W=1.4$ ,

$$T_1=0.154, T_2=0.033$$

선로 :  $X_{tr}=0.15$ ,  $X_{line1}=0.1$ ,  $X_{line2}=0.5$

STATCON은 200MVA급으로 실제값  $L_s=94.3mH$ ,

$C=12.71 \mu F$ ,  $R_s=0 \Omega$ ,  $R_p=18626 \Omega$ ,  $m=1.273$ 를 단위

값으로 환산하였고  $t=1$ 에서 발전기  $\Delta T_m$ 이 0.1변할 때 미소변동분을 실험하였다.

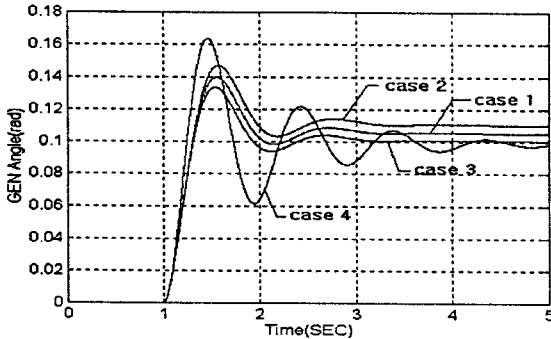


그림 5. LQR로 STATCON 제어시 발전기  $\Delta \delta$

그림 5에서 CASE 1은 STATCON 정상상태에서 운용 제어시, CASE 2는 STATCON을 커패시터모드에서 운용제어시, CASE 3은 인덕터모드로 운용 제어시, CASE 4는 STATCON 비제어상태로 PSS/AVR만의 발전기 동요억제상태를 보여준다.

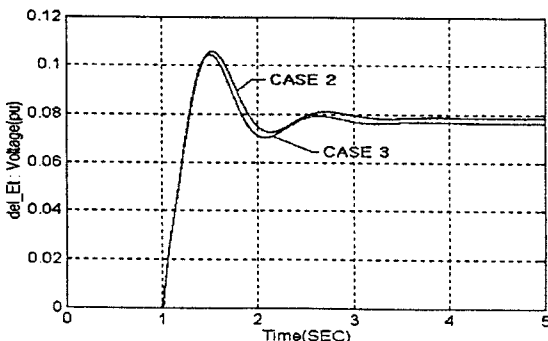


그림 6. LQR로 STATCON 제어시 발전기단자전압

그림 6의 CASE 2는 C모드, CASE 3은 L모드로 STATCON을 제어한 결과이다. STATCON의 무효

전력제어에 따른 전압보상효과를 나타낸다.

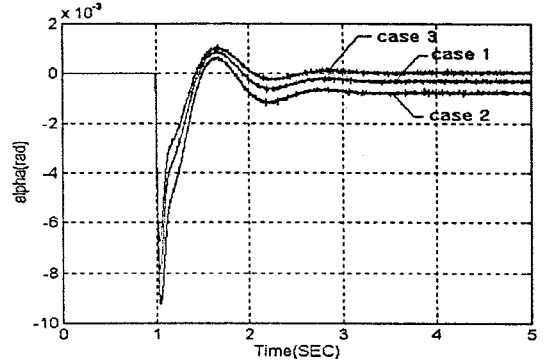


그림 7. STATCON제어시  $\alpha$  제어각

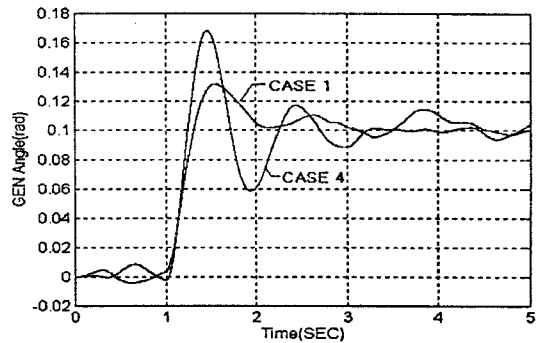


그림 8. LQG로 STATCON 제어시 발전기  $\Delta \delta$

### 3. 결 론

계통축약모델인 1기 무한 시스템에 FACTS기기인 STATCON을 투입하여 무효전력보상은 물론 계통의 안정도를 향상효과를 실험하여 기존발전기제어기와 협조한 FACTS기기의 효용성을 입증하였다. 기존의 FACTS제어기는 주로 계통의 Local Input 데이터를 통하여 제어함으로 설치된 위치에서의 전압보상을 위주하는 기기자체제어이지만 본제어기법은 계통전체시스템에서의 안정도를 고려함으로 계통에서 요구하는 최적의 제어입력을 도출할 수 있다. 본 제어기는 전체시스템의 운전점에서 선형화되었으므로 가까운 계통의 사고와 같은 비선형성이 매우 심한 과도안정도문제에서의 제어기법에 대한 보완이 계속될 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] P.Kunder, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994
- [2] 한병문 "비선형보상을 적용한 송전용 무효전력 보상기의 제어시스템 설계", 전기학회논문지, 제46권, 제1호, p31, 1997
- [3] F.L.Lewis, "Applied optimal control and estimation", Prentice-Hall, 1992