

사이리스터 제어 직렬 보상기에 의한 전력계통 안정화 효과

손광명\*, 조정현\*, 한학근\*, 박종근\*  
\*서울대학교 전기공학과

이병하\*\*  
\*\*인천대학교 전기공학과

Power System Stabilizing Effect  
by Thyristor Controlled Series Compensator

K.M. Son\*, J.H. Cho\*, H.G. Han\*, J.K. Park\*

B.H. Lee\*\*

\* Dep. of Elec. Eng. Seoul Nat'l Univ.

\*\* Dep. of Elec. Eng. Incheon Univ.

ABSTRACT - FACTS concept is the control of power flow and increase of the loading on existing lines to the thermal limits. This paper focuses on the ability of the thyristor controlled series compensator (TCSC) to stabilize the disturbed power systems. The result shows the potential benefit of the TCSC in addition to the role of controlling the steady state power flow. In order to show the effectiveness of controlled series capacitor, power system dynamic model is augmented and the effect of the SC into the power system dynamics is included. As a control algorithm, Linear Optimal Control theory is applied.

본 논문에서는 기존의 power system dynamic model 을 확장하여 직렬보상기를 추가하여 이로부터 직렬보상기의 dynamics 가 각 상태 변수에 미치는 영향을 고려하였다. 이렇게하여 이끌어 내어진 선형모델을 이용하여 널리 알려져 있는 다변수 최적제어기법인 LQR(Linear Quadratic regulator)제어기를 구성하였으며 사례연구를 통하여 주어진 외란에 대해 직렬보상기가 전력계통 안정화에 기여하는 바를 시험하였다.

2. 직렬보상기가 포함된 모델

본 논문에서 채택한 모델은 2축 발전기 모델과 IEEE type 1 exciter 이며, 기계적 토크 입력은 일정한것으로 가정하였다. 발전기와 여자기 모델식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{E}'_q &= \frac{1}{T_{d0}} \left\{ -E'_q - (x_d - x'_d) i_d + E_{fd} \right\} \\ \dot{E}'_d &= \frac{1}{T_{q0}} \left\{ -E'_d + (x_q - x'_q) i_q \right\} \\ \dot{\delta} &= \omega_0 (\nu - 1) \\ \dot{\nu} &= \frac{\omega_0}{2H} \left\{ -(E'_d i_d + E'_q i_q) - D(\nu - 1) + T_m \right\} \\ \dot{V}_R &= \frac{1}{T_n} \left\{ K_a R_f - \frac{K_a K_f}{T_f} E_{fd} - V_R - K_a V_t + K_a V_{ref} \right\} \\ \dot{E}_{fd} &= \frac{1}{T_e} \left\{ -(K_e + S_e) E_{fd} + V_R \right\} \\ \dot{R}_f &= \frac{1}{T_f} \left\{ R_f + \frac{K_f}{T_f} E_{fd} \right\} \end{aligned} \tag{1}$$

또한, 연속적으로 제어될 수 있는 TCSC의 모델을 다음과 같이 생각하였다. 즉, 주어진 기준리액턴스에 대해 리액턴스의 응답을 1차 지연요소로 모델링 하였다.

$$T_c \dot{X}_c = -X_c + X_{ref} + X_{sup} \tag{2}$$

위의 상태방정식은 대수 방정식(조류 방정식)을 만족하여야 한다.

1. 서론

전력계통이 대규모화 되어 망구조와 장거리 송전방식으로 발전하면서 조류의 가제어성 확보가 절실해지고 있다. 기존의 자연조류 (free flow) 방식이 가지는 여러가지 문제들을 해결하고 낮은 효율을 제고하기 위해서 조류제어(controlled power flow) 개념의 전력전송방식인 FACTS(Flexible AC transmission System)의 개발이 제기되고 있다. [1]

FACTS란 전력전자 기술과 고속통신 기술을 이용하여 송전선로의 임피던스, 선로전압의 패이스를 실시간 제어함으로써 계통의 안정도 및 신뢰도를 희생시키지 않고 송전용량을 극대화시키는 전력시스템이다. FACTS의 실시간 가변임피던스 특성을 이용함으로써 원하지 않는 조류의 흐름을 막을 수 있고, 외란시에도 조류의 경제적 안정적 제어가 가능하다. FACTS의 기기는 현재 많이 연구되고 있는 사이리스터를 이용하여 직렬컨덴서를 제어하는 TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator 이하 TCSC)와 그 외에 기존에 이미 연구가 많이 되어있는 정자형 무효전력기(Static VAR Compensation, SVC), 이상변압기(Phase-Shifter), HVDC 등이 있다.

이 중 TCSC는 송전용량의 열적한계까지 확대하는 본연의 역할 외에도 기존의 Series Compensator 가 가지고 있는 SSR(SubSynchronous Resonance) 문제를 해결할 수 있을 뿐 아니라 적절한 제어를 통해 전력계통의 안정화에도 크게 기여할 수 있다. 이는 TCSC가 무효전력 보상장치로써 뿐만 아니라 전력계통 안정화도 행할수 있음을 뜻한다.

본 논문에서는 1기 무한대 계통에서의 위의 모델의 선형화 모델을 도출 하였으며 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_{q0} \dot{\Delta E_d} &= -[1+k_1(x_q-x'_q)]\Delta E_d + k_4(x_q-x'_q)\Delta\delta + k_5(x_q-x'_q)\Delta X_c \\
 T_{d0} \dot{\Delta E_q} &= -[1+k_1(x_d-x'_d)]\Delta E_q + k_2(x_d-x'_d)\Delta\delta + k_3(x_d-x'_d)\Delta X_c \\
 \Delta \dot{\omega} &= \omega_0 \Delta v \\
 \frac{2H}{\omega_0} \Delta \dot{v} &= -k_{11}\Delta E_d - k_{12}\Delta E_q - k_{13}\Delta\delta - k_{14}\Delta X_c - D\Delta v \\
 T_a \Delta \dot{V}_R &= k_a \Delta R_f - \frac{k_a k_f}{T_f} \Delta E_{fd} - \Delta V_R + k_a \Delta V_f + k_a \Delta V_{ref} \\
 T_e \Delta \dot{E}_{fd} &= -[K_e + S_e] \Delta E_{fd} + \Delta V_R \\
 T_f \Delta \dot{R}_f &= -\Delta R_f + \frac{k_f}{T_f} \Delta E_{fd} \\
 T_c \Delta \dot{X}_c &= -\Delta X_c + \Delta X_{sup}
 \end{aligned} \quad (3)$$

### 3. Linear quadratic regulator

제어하는 플랜트의 상태방정식이 다음과 같다고 하고

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4)$$

시스템 [A,B]가 안정가능하다고 가정할 때, 표준 LQ레귤레이터의 가격함수 J를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (5)$$

여기서 Q는 양의 반한정 대칭행렬인 상태가중행렬이고 R은 양의 한정 대칭행렬인 제어가중행렬이다. 이 경우 최적제어 문제는 상태방정식의 구속조건(4)아래에서 가격함수 (5)을 최소화하는 제어법칙을 찾는 문제로써, 최적제어가 유일하게 존재할 뿐만 아니라 실시간에서 모든 상태변수를 측정할 수 있다면 최적제어를 다음과 같이 피드백형태로 실현시킬 수 있다.

$$u(t) = -Gx(t) \quad (6)$$

여기서 제어게인 행렬 G는

$$G = R^{-1}B^TK \quad (7)$$

그리고 K는 양의 반한정 대칭행렬로써 다음과 같은 제어 대수 Riccati식의 유일한 해이다.

$$KA + A^TK + Q - KBR^{-1}B^TK = 0 \quad (8)$$

LQ 레귤레이터의 특이값형상을 살펴보면 저주파 영역에서의 명령추종과 외란제거성능, 고주파에서의 잡음둔감특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

그러나 위의 식 (5)에서의 파라메타인 Q와 R을 선정함에 있어 최상의 결과를 가져오기 위해서는 시행착오적인 방법뿐이라는 단점이 있다. 또한, 전상태 피드백은 현실적으로 어려우며 이를 극복하기 위한 방법으로써 LQG와 같은 방법이 있다.

본 논문에서는 Q와 R을 각각 단위행렬에 실수(스칼라)가 곱해지는 형태로 가정하였으며, 전상태피드백이 가능하다고 생각하였다.

### 4. 사례 연구

1기 무한대 모선에 대해 최적 제어기를 설계하였으며, 시스템에 가해진 외란으로서 0.01초 동안 모든 상태에 크기 0.1 pu 의 외란이 가해졌을 경우를 시뮬레이션하였다.

그결과 각각의 상태변수가 안정화되는 효과를 그림1 - 그림4 까지 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 비제어시인 경우에 나타나는 각 상태변수와 발전기 단자 전압의 맥동을 효과적으로 제어할 수 있음을 보여주고 있다. 이는 기존의 접근방식인 발전기측에서의 전력계통안정기(Power System Stabilizer)의 효과를 TCSC가 보여줄 수 있음을 나타내고 있다.

TCSC의 보상률은 70%까지 가능한것으로 생각하였으며, 외란이전에서는 투입되지 않는것으로 하였다. 이는 일반적인 경우에 정상상태에서 일정값으로 운전하고 있는경우에도 바로 적용될 수 있다.

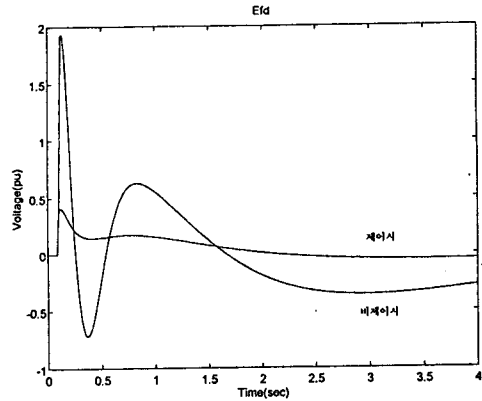


그림 1. 제어시와 비제어시의 E<sub>fd</sub> 의 변화

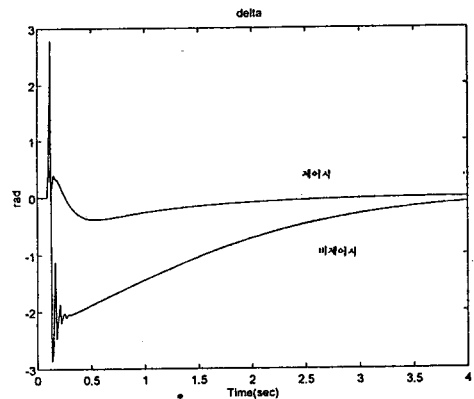


그림 2. 제어시와 비제어시의 δ 의 변화

## 5. 결론 및 향후연구

본논문에서는 전력계통안정화에서의 TCSC 의 효과를 검증 하였다. TCSC는 무효전력보상기로서, 정상상태 에서 뿐만 아니라 과도 상태에서 이를 적절히 제어함으로써 전력계통안정화에 기여할 수 있으며 SVC와PSS 등과 함께 협조되었을때 효과의 극대화를 가져올 수 있다.

또한, 이들 기기와의 협조를 위해 다변수최적 제어 알고리즘을 채택하였으며, 좀더 현실적인 다변수 제어 알고리즘의 적용과 그의 안정도-강인성을 검토할 필요가 있다.

## 참고문헌

- [1]박종근, "신 전력 전송 시스템", 대한 전기학회 춘계 전력계통연구회 논문집, 1993.
- [2]고성규, 박상영, 박종근, "순차 프리에 변환을 이용한 전압 비교형 TCSC", 대한 전기학회 하계 종합학술대회, 1993
- [3]N.Christl, P.Luetzelberger, M.Pereira, K.Sadek, "Advanced Series Compensation with Variable Impedance", EPRIWorkshop, Cincinnati, Nov.14-6, 1990.
- [4]E.Larsen, C.Bowler, B.Damsky, S.Nilsson, "Benefits of Thyristor Controlled Series Compensation", Joint Session Technology and Benefits of Flexibl AC Transmission Systems, CIGRE SC14, Paris, 1992.
- [5]Chin-Hsing Cheng, Yuan-Yih Hsu, "Damping of Generator Oscillation using an Adaptive Statc VAR Compensator", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.7, No.2, May 1992.
- [6]P.M. Anderson, A.A. Foud, "Power System Control and Stability", IEEE Press, 1977.

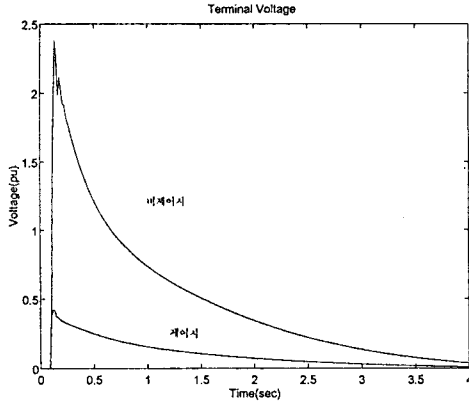


그림 3. 제어시와 비제어시의 단자전압의 변화

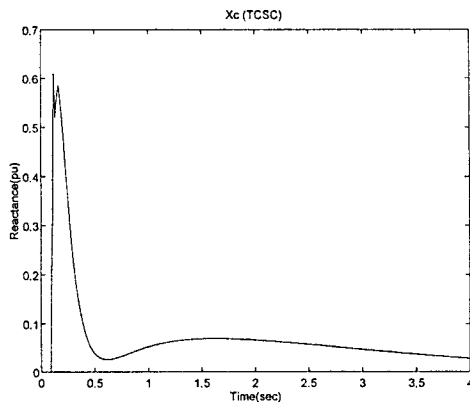


그림 4. 제어시 투입된 TCSC의 투입량

그림 1은 제어시와 비제어시의 Efd의 변화를 나타낼 경우로서 비제어시에는 과도적으로 2 pu로서 아주 큰값을 보이고 있으며 이는 여자의 포화를 초래한다. 이는 곧 발전기전압의 저하를 초래해 계통불안정의 원인이 된다. 그러나, 제어시에는 이를 직렬 보상기가 현격히 줄여줌으로써 이를 예방할 수 있다.

그리고 그림 2에서 보듯이, 발전기의 위상각도 비제어시에는 불안정성을 내포하고 있으며, 이를 안정화하는 효과가 상당히 우수함을 알 수 있다.

이러한 현상은 송전선이 과부하가 되면 될수록 극심하게 나타나기 때문에 직렬 보상기의 제어 효과가 더욱더 커짐을 알 수 있다. 사례연구에서 투입된 리액턴스의 양은 LQR제어기의 제어게인을 조정함으로써 바꿀 수 있으며, 큰 게인은 제어기의 포화를 초래하기때문에 바람직하지 않다. 그림. 4에 투입된 직렬 콘덴서의 양을 나타내었다.

위의 사례연구에서 알 수 있듯이 외란에 대해 주어진 직렬 보상기는 자체의 속응성에 의해 신속히 외란을 제거할 수 있는 능력을 가지고 있음을 알 수 있다.