

# 전압원인버터방식 송전용 무효전력보상기의 제어시스템 설계

한 병문  
명지대학교 전기공학과

## Control System Design for Self-Commutated Static Var Compensator

Byung-Moon Han  
Department of Electrical Engineering  
Myongji University

### ABSTRACT

This paper describes a detailed simulation model of the static condenser (STATCON) to analyze the dynamic interaction with the ac transmission line.

The static condenser was represented by a 12-pulse voltage-source inverter sharing an energy storage dc capacitor. The voltage-source inverter consists of two 6-pulse bridges modeled with ideal gate-turn-off switches. The control system for the static condenser was designed through a mathematical model deduced from the equivalent circuit.

Simulation results show that the conceived model is very effective to analyze the dynamic interaction between the static condenser and the ac transmission system.

### 서론

교류 송전선로를 통해 전송되는 전력은 선로의 임피던스, 송/수전단 전압의 크기와 그 위상차에 대해 함수 관계를 갖는데, 이 세 독립변수를 신속 정확히 제어 가능하면, 선로를 통해 전송되는 전력을 유연하게 조정가능하다.

최근 개발된 대전력 스위칭 소자와 컴퓨터제어 기술을 이용해 위의 세 변수를 제어하는 연구가 FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 라는 명칭으로 87년 경에 미국에서 착수되었다 [1]. FACTS 설비는 다이리스터와 GTO로 구성된 시스템으로 구분되며, 일부 설비는 이미 개발완료되어 사용중에 있거나 개발중에 있다. 이들 FACTS 설비는 송전선로에 직렬 또는 병렬 연결되어 무효전력을 조절하거나 선로의 임피던스를 보상하는 기능을 갖는다. 최근에는 GTO로 구성된 전압원인버터에 의한 FACTS 설비의 개발에 미국과 일본에서 많은 연구가 진행중에 있다 [2,3].

전압원인버터에 의한 무효전력보상기 (STATCON)는 지금까지 많은 연구자에 의해 제안되어 왔다 [4,5,6]. 이

무효전력보상기의 기본 동작은 동기조상기의 동작과 일치하나 동기조상기에 비해 대단히 빠른속도로 동작하므로 전력계통의 과도안정도와 전압안정도를 증대시키고 장거리 송전선로에서 발생하기 쉬운 저주파공진 현상을 신속히 감쇠시키는 기능을 갖는다.

본 논문에서는 송전계통의 무효전력을 병렬로 보상하는 전압원인버터형 무효전력보상기의 제어시스템 설계와 이를 검증하기 위한 세부 시뮬레이션 모형에 관해 기술한다. 제어시스템은 3상 등가회로에 대해 수학적모형을 전개하고 이를 통해 상태방정식을 유도하여 시스템의 동적특성을 만족하는 제어블록선도를 유도하였다. 시뮬레이션은 무효전력보상기가 154kV 단순 송전계통과 연결된 것을 가상하고 미전력연구원 (EPRI)이 개발한 EMTP를 이용하여 제어계통의 성능분석과 송전계통과의 동적응동을 해석 하였다. 시뮬레이션에서 고려한 무효전력보상기는 12-pulse 전압원인버터와 에너지저장용 직류캐패시터로 구성하여 모델링 하였으며, 전력계통은 단일기 무한대버스로 하고, 송전선로는 분포정수로 모델링 하였다.

### 동작원리

STATCON은 전압원인버터를 이용하여 출력전압의 크기와 위상을 신속히 제어할 수 있는 교류전압원으로 간주 할 수 있으며, 전압원인버터, 직류캐패시터, 결합용 변압기, 그리고 펄스발생 및 제어회로로 구성되어 있다. 선간전압이 평형을 유지하기만 하면, STATCON으로 출입하는 유효전력은 항상 합이 0 이다. 따라서 에너지저장용 직류 캐패시터는 이론적으로는 불 필요하나 직류측과 교류측의 에너지 평형을 유지하면서 무효전력을 송전계통에서 흡수 또는 공급하는데 필요하다.

그림 1은 STATCON이 송전계통과 연결된 상황에서의 간이화 단상등가회로 이다. 인버터와 교류전력계통 사이에서 무효전력의 상호교환은 인버터의 출력전압과 연결점의 모선전압과의 위상차를 조절하므로 제어 가능하다. 만일 인버터의 출력전압  $V_i$ 가 모선의 단자전압  $V_T$

와 동상이고  $V_i > V_T$  이면, STATCON은 무효전력을 송전계통에 공급하며, 만일  $V_i < V_T$  이면, STATCON은 송전계통에서 무효전력을 흡수한다.

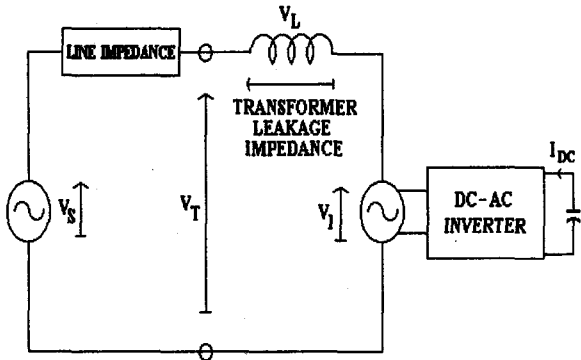


그림 1. 송전계통과 STATCON의 단상 개념도

### 제어시스템

그림 2는 STTCON이 송전선로와 연결된 상태를 3상 등가회로로 나타낸 것이다. 이 그림에서 직렬인덕턴스  $L_s$ 는 실제의 전력용 변압기의 인덕턴스를 나타내고, 직렬저항  $R_s$ 는 인버터와 변압기의 전도 손실을 나타낸다. 또한 캐패시터와 병렬로 연결된 저항  $R_p$ 는 인버터의 스위칭 손실을 나타낸 것이다.

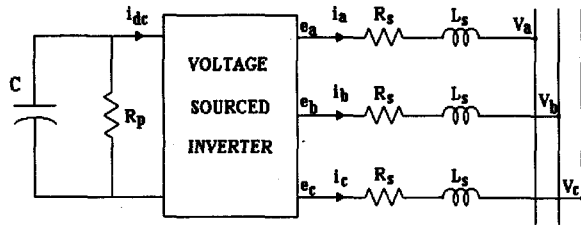


그림 2. 송전계통과 STATCON의 등가회로

이 등가회로 부터 교류측과 직류측의 회로 방정식을 유도하고 동기회전좌표에 대해 d-q 변환을 수행하면 다음 방정식이 얻어진다.

$$p \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{dc} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{dc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{w_b |v|}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s w_b}{L} & w & \frac{k w_b \cos(\alpha)}{L} \\ -w & -\frac{R_s w_b}{L} & \frac{k w_b \sin(\alpha)}{L} \\ -\frac{3}{2} k C w_b \cos(\alpha) & -\frac{3}{2} k C w_b \sin(\alpha) & -\frac{w_b C}{R_p} \end{bmatrix}$$

여기서,  $p=d/dt$  이고  $w=d\theta/dt$  이다.

모델링을 효과적으로 수행하기 위해서는 퍼유니트로 모든 변수를 환산해야 하는데, 각 변수의 퍼유니트 값은 다음과 같이 정의 한다.

$$L' = \frac{w_b L_s}{z_{base}} ; C' = \frac{1}{w_b C z_{base}} ; R'_s = \frac{R_s}{z_{base}} ; R'_p = \frac{R_p}{z_{base}}$$

$$i'_x = \frac{i_x}{i_{base}} ; v'_x = \frac{v_x}{v_{base}} ; e'_x = \frac{e_x}{v_{base}} ; z_{base} = \frac{v_{base}}{i_{base}}$$

배전용 STATCON에서는  $e_d$ 와  $e_q$ 를 PWM (pulse width modulation)에 의해 제어변수  $k$ 와  $\alpha$ 를 독립적으로 제어 가능하다. 그러나 이 방식은 인버터의 효율이 낮고, 고조파 함유율이 높아 송전용 STATCON에서는 인버터의 점호각  $\alpha$ 만을 제어하여 출력전압의 순시치를 가변적으로 조작 한다.

식 (1)에서 인버터의 출력 전압  $e_d$ 와  $e_q$ 는 고조파를 무시할 경우 다음 수식으로 표현된다.

$$e_d = k v_{dc} \cos(\alpha) \quad (2)$$

$$e_q = k v_{dc} \sin(\alpha) \quad (3)$$

여기서,  $k$ 는 인버터와 관계된 계수로 직류측 전압과 인버터 단의 교류측 상전압 최대치와의 비를 나타내며,  $\alpha$ 는 인버터 전압 벡터가 선로전압 벡터와의 위상차를 나타낸다.

방정식 (1)에 보인 STATCON의 상태방정식은  $\alpha$ 를 입력변수로 할때 비선형 특성을 갖는다. 그러나 정해진 정상상태 평형점에 대해 편차를 구하는 것은 가능하다. 선형화 과정에 의해 다음의 섭동 방정식이 구해진다.

$$p \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \\ \Delta v_{dc} \end{bmatrix} = [A_\Delta] \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \\ \Delta v_{dc} \end{bmatrix} + [B_\Delta] \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[A_\Delta] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s w_b}{L} & w_b & \frac{k w_b \cos(\alpha_0)}{L} \\ -w_b & -\frac{R_s w_b}{L} & \frac{k w_b \sin(\alpha_0)}{L} \\ -\frac{3}{2} k C w_b \cos(\alpha_0) & -\frac{3}{2} k C w_b \sin(\alpha_0) & -\frac{w_b C}{R_p} \end{bmatrix}$$

$$[B_\Delta] = \begin{bmatrix} -\frac{w_b}{L} & -\frac{k w_b v_{dc0} \sin(\alpha_0)}{L} \\ 0 & \frac{k w_b v_{dc0} \cos(\alpha_0)}{L} \\ 0 & \frac{3}{2} k C (i_{d0} \sin(\alpha_0) - i_{q0} \cos(\alpha_0)) \end{bmatrix}$$

방정식 (4)로 부터 전달함수를 구하기 위해서는 주파수 영역 해석을 수행하므로 본 연구에서는 수치해석법을 사용하여 변수  $\Delta i_q$ 와  $\Delta \alpha$ 에 대한 전달함수를 다음식과 같이 유도 하였다.

$$\frac{\Delta I_q(s)}{\Delta \alpha(s)} = \frac{L'' [s^2 + L'' C''] v_{dc0} + [L'' C' w_b] i_{d0}}{s [s^2 + w_b^2 + L'' C']} \quad (5)$$

여기서,  $L = \frac{kw_b}{L}$  ;  $C = \frac{3kw_b C}{2}$

비선형 상태변수 피드백을 이용하여 동작점에 대한 안정도 여유를 고려하여 컨트롤러를 설계하였는데 비선형 피드백 함수  $\Delta Q$ 는 다음방정식으로 정의된다.

$$\Delta Q = \Delta i_q - g \cdot [i_{d0} - i_{d0X}] \cdot \Delta v_{dc}$$

여기서,  $g$  는 이득정수로 시뮬레이션에 의해 설정된다.

$i_{d0}$ 의 정상상태 오차가 0에 가깝도록 추가의 보상을 실시하여 그림 3과 같은 STATCON의 제어블록선도를 얻었다.

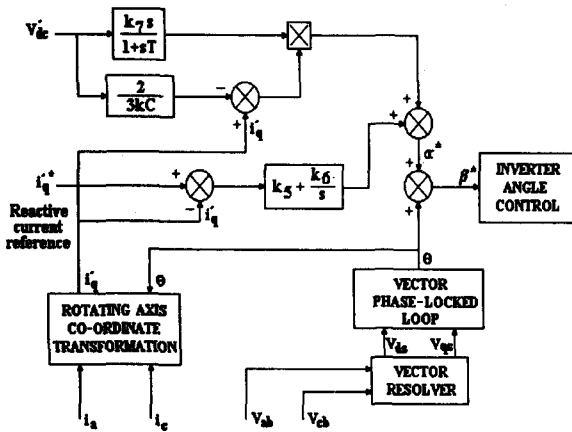


그림 3. STATCON의 제어 블록선도

**시뮬레이션**

STATCON이 154kV 송전선에 연결되어 무효전력을 제어하는 대표적인 경우를 예로 시뮬레이션 모형을 설정하였다. 전력계통은 그림 4에 보인 것 처럼 한기의 발전기가 무한대 버스에 연결되어 있는 것으로 하였으며, 발전기는 출력전압이 13.8kV로 승압변압기를 통해 송전선로에 연결되는 것으로 하였다.

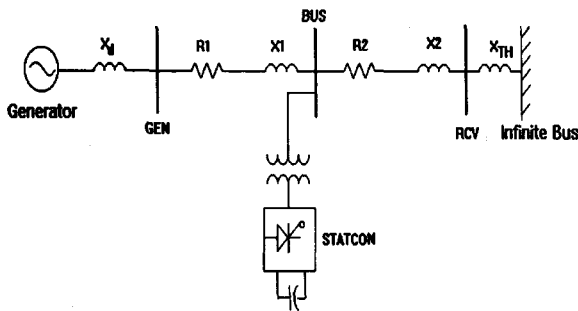


그림 4. 시뮬레이션 모형

송전선로의 길이는 160km로 분포정수에 의해 모델링을 하였으며 STATCON은 선로 중앙에 상결합변압기에 의해 연결하였다. 실제의 STATCON에서는 출력전압이 6 펄스 출력을 8개로 결합하여 48 펄스로 구성하나 시뮬레이션 효과를 높이기 위해 2개의 6 펄스 출력을 결합한 12 펄스 시스템으로 구성하였다.

**동적응동분석**

그림 4의 시뮬레이션 모형에 대해 STATCON과 교류 송전계통과의 동적응동을 분석하여 제어시스템의 동작을 분석하고 송전선로의 전송능력 증대효과를 분석하였다.

시뮬레이션 시나리오는 다음과 같다. 먼저 t=0에서 직류 캐패시터를 충전하여 직류 링크전압이 14kV에 도달하도록 하고 t=100ms STATCON을 선로에 인가하여 진상 무효전력을 공급하다가 t=400ms에서 지상무효전력으로 전환하고, t=800ms에서 다시 진상무효 전력으로 전환하는 것으로 하였다. 시뮬레이션은 컴퓨터의 동작시간을 절감하기 위해 t=1000ms에서 종료 하였다.

그림 5는 STATCON의 출력무효전류가 직선으로 표시된 기준무효전력을 추종하는 특성을 나타낸 것인데, 고안된 제어시스템은 송전계통에서 요구하는 무효전력을 적절히 제어하고 있음을 나타내고 있다.

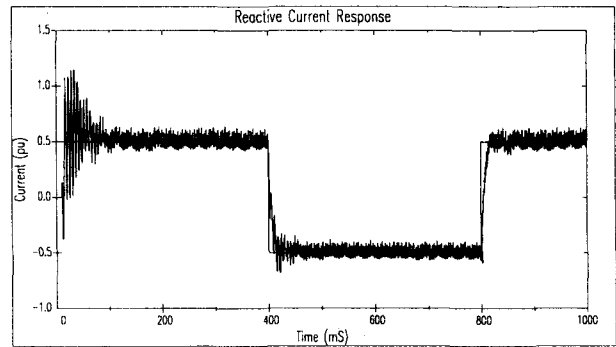


그림 5. STATCON의 출력 무효 전류

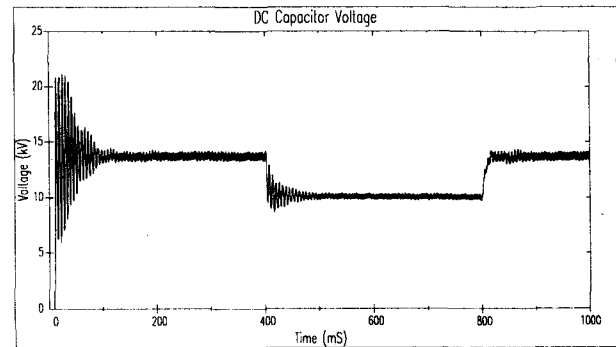


그림 6. 직류 캐패시터의 전압 변화

그림 6은 직류캐패시터의 전압변화를 나타낸 것인데 100-400ms 사이에서는 14kV 정도를 유지하다 400-800ms 사이에서는 10kV 정도를 유지하며, t=800ms 이후에서는 다시 14kV로 환원된다.

그림 7은 점호각의 변화를 나타낸 것인데 직류캐패시터를 충전하기 위해 점호각은 8° 까지 상승하며, 직류링 크전압이 설정된 후에는 0.7° 정도를 유지하여 인버터의 손실을 보상하고, t=400ms 에서는 지상무효전류로 전환되면서 점호각은 -7° 정도가 되고 다시 -0.7° 정도를 유지하여 지상무효전력을 공급한다. t=800ms에서는 무효전류가 진상으로 전환되면서, 점호각은 다시 8°까지 상승후 0.7° 정도를 유지한다.

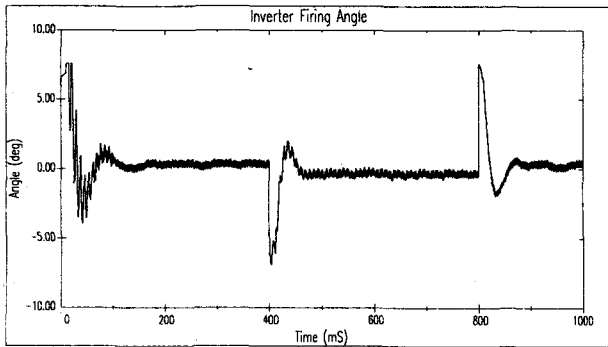


그림 7. 점호각의 변화

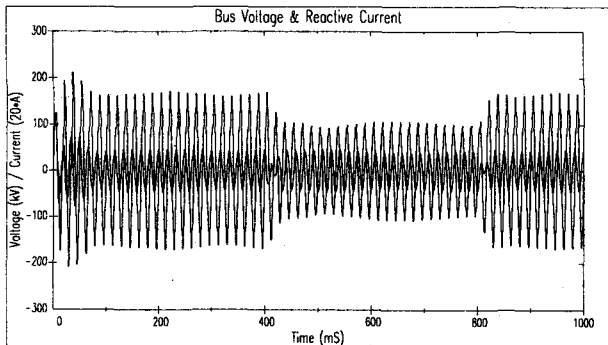


그림 8. 모선 전압과 STATCON의 무효 전류

그림 8은 연결점에서의 모선전압과 STATCON 무효전류의 A상 파형을 나타낸 것인데, 무효전류는 100-400ms 사이에서 모선전압에 대해 90° 진상이고 400-800ms 에서는 90° 지상이며 800ms 이후에서는 다시 90° 진상을 갖는다.

그림 9는 송전선로를 통해 전송되는 유무효전력의 변화를 나타낸 것으로, 예측된 바와 같이 용량성 동작에서는 무효전력이 180MVar 정도이고 유효전력은 600MW 인데, 유도성 동작에서는 무효전력이 360Mvar 정도이고 유효전력은 520MW 정도가 된다.

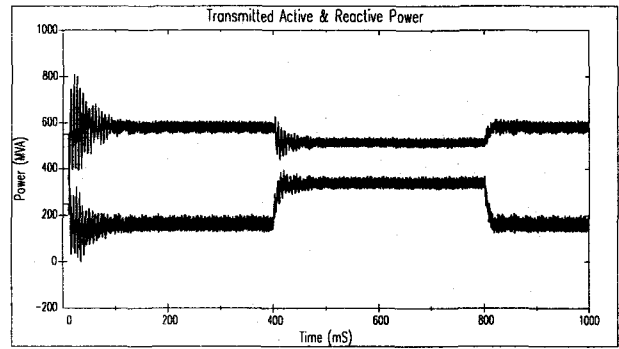


그림 9 송전선로를 통해 전송되는 유무효 전력

## 결론

본 연구에서는 장거리 송전선로 중간에 연결된 STATCON의 동작을 해석하는 세부 시뮬레이션 모형에 대해 기술하였다. 등가회로와 비선형 보상에 의한 수학적 해석을 통해 STATCON의 제어 시스템을 설계 하였으며 시뮬레이션을 통해 설계된 제어시스템이 적절히 동작하는가를 확인 하였고 송전계통과의 상호응동을 세부적으로 분석하였다.

고안된 시뮬레이션 모형은 STATCON의 제어시스템 설계와 송전계통과의 동적응동을 세부적으로 분석하는데 대단히 효과적이며, 하드웨어 설계시 필요한 데이터를 획득하는데 대단히 유용할 것으로 보인다.

## REFERENCES

- [1] N. G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE SPECTRUM April, 1993, pp. 40-45.
- [2] L. Gyugyi, "Solid-State Control of Electric Power in AC Transmission", Invited Paper, No. T-IP-4, International Symposium on Electric Energy Conversion, Capri, Italy, 1989.
- [3] L. Gyugyi, "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits", IEEE Trans. on Industry Application, IA-15, NO. 5, Sept./Oct. 1979, pp521-532.
- [4] G. Joos, L. Moran, P. Ziogas, "Performance Analysis of a PWM Inverter Var Compensator", IEEE Trans. on PE, Vol. 6, No. 3, July, 1991, pp380-391.
- [5] C. W. Edward, et al, "Advanced Static Var Generator employing GTO Thyristors", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, NO. 4, Oct. 1988, pp1622-1627.
- [6] S. Mori, et al., "Development of A Large Static Var Generator using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability", IEEE PES Winter Meeting, Paper No. 92-WM165-1PWRS, Jan. 26-30, 1992.
- [7] Westinghouse Science & Technology Center, "Development of Advanced Static Var Compensator", Final Report for Electric Power Research Institute, Nov., 1990.