

STATCON과 송전계통의 동적응동 분석을 위한 EMTP 시뮬레이션 모델

한 병 문
인천대학교 전기공학과

EMTP SIMULATION MODEL TO ANALYZE DYNAMIC INTERACTION BETWEEN STATCON AND TRANSMISSION SYSTEM

Byung-Moon Han
Department of Electrical Engineering
University of Incheon

ABSTRACT

This paper describes a detail simulation model with EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) which is very effective to analyze the interaction between the ac transmission line and STATCON (static condenser).

The SATCON was represented by two voltage-source converters connected in parallel and sharing an energy storage dc capacitor bank. The voltage source converters was modeled with ideal gate turn-off switches. The power system was represented by a detail generator model and a distributed transmission line model for detail performance analyses.

Analysis results show that the conceived simulation model is very effective to analyze the interaction between the ac transmission line and STATCON, and to evaluate the performance of STATCON.

1. 서론

송전계통에서 이상적으로 요구되는 특성은 선로에서 소모하는 무효전력을 최소화하여 주어진 선로를 통해 최대전력을 전송하고, 계통에 연결된 모든 발전기들을 동기상태로 유지시키며, 계통의 전압을 가능한 정격으로 유지하는 것이다.

최근 비약적으로 발전하고 있는 전력용 반도체 기술과 컴퓨터에 의한 고속 제어기술을 이용하여 송전용량을 증대하고 계통의 운용효율을 높이는 방안으로 EPRI (Electric Power Research Institute)에서 제안한 것이 FACTS (Flexible AC Transmission System) 이다.

FACTS 설비는 제대의 수동소자에 Thyristor를 고속 스위치로 응용하여 구성된 1세대 시스템과 GTO (Gate Turn-Off Thyristor)로 구성된 전압원컨버터를 이용한 2세대 시스템으로 구분된다. 1세대 시스템에는 계통의 무효전력을 보상하는 정지형 무효전력보상기 (SVC : Static Var Controller), 선로임피던스를 적절로 보상하는 다이리스터제어 직렬보상기 (TCSC : Thyristor-Controlled Series Compensator), 송전단위상각과 수전단 위상각의 차를 보상하는 다이리스터제어 위상각보상기 (TCPAR : Thyristor-Controlled Phase Angle Regulator) 등이 있다. 2세대 시스템에는 계통의 무효전력을 보상하는 정지형 조상기 (STATCON : Static Condenser), 송전단과 수전단의 전압과 양단 사이의 위상차를 동시에 보상 가능한 단일화 전력조류 제어장치 (UPFC : Unified Power Flow Controller) 등이 있다.

본 논문에서는 STATCON이 154kV 전력계통과 연결된 것을 가상하여 EMTP에 의한 모델링을 실시하고 계통과의 동적 응동을 해석 하였다. STATCON은 전압원 12-pulse 컨버터로 구성되어 모델링 하였으며, 계통은 단일기 무한대비스로 하여, 발전기는 기계적 특성을 고려한 세부모형으로, 송전선로는 분포정수로 모델링 하였다. 시뮬레이션 결과 개발된 STATCON 모형은 계통에서 요구되는 무효전력을 적절히 제어하여 전력계통과의 동적응동 해석에 유효하고, 또한 STATCON의 동작 특성 분석에 유효함을 확인할 수 있었다.

2. 송전계통의 병렬보상 효과

송전계통의 특성을 살펴보기 위해 두개의 발전기를 갖는 간단한 전력계통을 그림 1의 (a)에 보였다. 단일 송전선로가 인덕턴스만 갖고 송전단과 수전단의 전압이 같다고 하면, 중간점에서의 전압 V_M 은 그림 1의 (b)에 보인 벡터선도에서 다음 수식으로 표현된다.

$$V_M = V \cos \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

또한 이 선로를 통과하는 전류 I 는 다음과 같다.

$$I = \frac{2V}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

그러므로 선로의 손실을 무시하면 송/수전 양단과 중간점에서 유효전력은 다음 관계식을 갖는다.

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (3)$$

이 식으로 부터 선로를 통해 전달되는 유효전력은 선로의 리액턴스와 송/수전단 전압과 그 위상각에 의해 제어가 가능함을 알 수 있다.

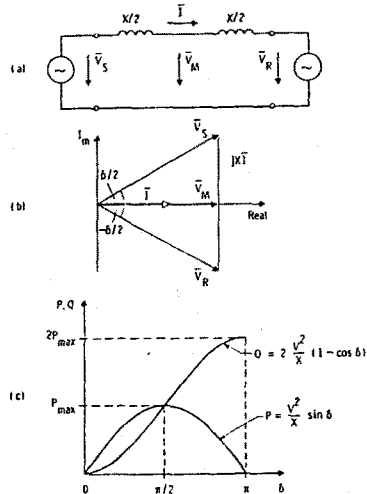


그림 1. 간이화된 전력계통
(a) 회로도
(b) 벡터선도
(c) 송전특성

한편 송/수전 양단에서의 무효전력 Q_S 와 Q_R 는 다음 관계식을 갖는다.

$$Q_S = -Q_R = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) \quad (4)$$

따라서 선로에서 소모되는 무효전력 Q 는 다음과 같다.

$$Q = 2Q_S = \frac{2V^2}{X} (1 - \cos \delta) \quad (5)$$

그림 1의 (c)는 유효전력 P 와 무효전력 Q 의 위상각 δ 에 따른 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 무효전력 Q 는 $\delta = \pi/2$ 에서 유효전력 P 와 같고 $\delta = \pi$ 에서 유효전력 P 의 두배가 된다.

그림 2의 (a)는 송전선로 중간점에 이상적인 무효전력 보상기를 병렬로 연결한 경우이다. 이 무효전력 보상기는 출력전압이 정현파이고, 그 크기는 송/수전단의 전압과 동일하며 위상각은 선로 중간점의 전압 V_M 의 위상과 동일한 전압원으로, 유효전력의 소모가 없이 송전선로에 무효전력만 공급하는 역할을 한다. 이와같이 중간점에 보상기를 설치할 경우 송전선로는 $X/2$ 의 리액턴스를 갖는 좌측부분과 우측부분으로 나누어 지는데, 유효전력은 송전단에서 중간점으로 이동하고 다시 이 중간점에서 수전단으로 이동하는 것으로 생각할 수 있다. 송/수전단의 전압과 중간점의 전압을 앞절에서와 같이 정의하고 좌우측 선로에 흐르는 전류를 각각 I_{SM} 과 I_{MR} 이라고 정의하면 이들의 벡터선도는 그림 2의 (b)와 같다.

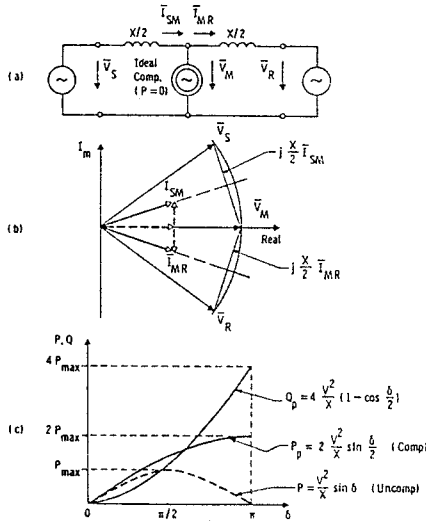


그림 2. 중간점 병렬보상
(a) 회로도
(b) 벡터선도
(c) 송전특성

이 그림에서 유효전력은 송/수전단과 중간점에서 모두 같다고 하면 그관계는 다음 식으로 표현된다.

$$P_p = 2 \frac{V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (6)$$

한편 중간점에 있는 보상기에 의해 공급되는 무효전력은 다음과 같다.

$$Q_p = 4 \frac{V^2}{X} (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad (7)$$

이상적인 병렬보상에서 유효전력 P_p 와 무효전력 Q_p 의 위상각 δ 에 따른 변화는 그림 2의 (c)와 같다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 유효전력 P_p 와 무효전력 Q_p 는 모두 두배로 증가한다. 따라서 선로에서 소모되는 무효전력 Q_p 를 중간점에서 무효전력 보상으로 공급하면 이 선로를 통해 최대 두배의 유효전력 전송이 가능하다.

실제적으로 정상상태에서 전력계통을 전송가능 최대치로 운용하는 것은 불가능하다. 왜냐하면 선로고장, 부하인가및 제거와 같은 동적교란이 발생 되었을때 이를 회복할 수 있는 충분한 여유를 필요로 하기 때문이다.

만일 보상전과 앞절에서 설명한 각각의 보상후 모든 계통이 정상상태에서 동일한 전력을 전송하고 있고, 동일한 고장이 동일한 순간에 발생하여, 동일한 시간동안 지속되었다고 하면, 보상전과 보상후 계통의 동적거동은 그림 3의 (a)와 (b) 같이 동면적법을 이용하여 분석 가능하다. 여기서 계통의 전기적 출력력을 P_m 으로 그리고 각각의 전력각을 δ_1, δ_{p1} 으로 정의하였다.

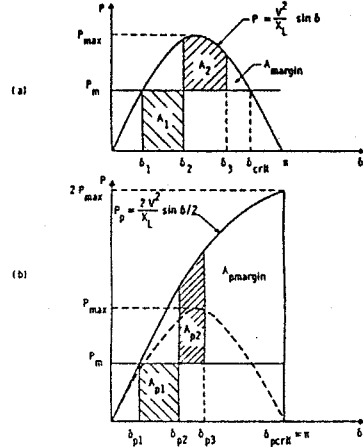


그림 3. 동면적법에 의한 과도안정도 해석
(a) 보상전
(b) 병렬 보상후

고장중에는 발전기의 기계적 출력이 일정 값인 P_m 을 유지하나 전송되는 전기적 출력이 영이 되어서 발전기는 처음 정상상태에서 δ_1, δ_{p1} 을 갖다가 고장제거 후에는 δ_2, δ_{p2} 로 가속된다. 그리고 가속되는 에너지는 각 그래프에서 면적 A_1, A_{p1} 으로 표현된다. 고장제거 후에는 전송전력은 기계적인 입력을 초과하여 발전기는 가속하고 전력각은 회전자에 축적된 운동에너지에 의하여 더욱더 증가하게 된다. 결과적으로 면적 A_2, A_{p2} 에 의하여 정의되는 감속에너지가 면적 A_1, A_{p1} 으로 정의되는 가속에너지와 같은 점인 δ_3, δ_{p3} 에서 정상상태에 도달한다.

만일 고장제거후 최대 회전자각 δ_3, δ_{p3} 가 해당 임계 회전자각 $\delta_{crit}, \delta_{p,crit}$ 보다 적은 값에 위치하면, 계통은 과도적으로 안정된 상태를 유지한다. 이때 최대 진동각과 임계각 사이의 차를 과도안정여유로 정의하는데 그림 3에서 $A_{margin}, A_{p,margin}$ 으로 표현된 것이 이것을 나타낸다. 이 그림에서 보상된 선로는 비보상된 선로에 비해 대단히 큰 과도안정여유를 갖는다는 것을 알 수 있다.

3. STATCON 모델링

(1) 전력회로

실제 STATCON에서는 48-pulse 컨버터가 사용되나 시뮬레이션 시간 문제로 본 연구에서 고려한 STATCON의 전압원 컨버터는 12-pulse 로 가정 하였다. 이 회로를 EMTP로 모델링 하기 위해 12개의 type-13 전압원이 스위치를 사용하여 회로 구성을 하였으며 게이트 입력 펄스는 720Hz 마다 1개씩 공급하는 다중 펄스방식으로 하였다. 교류입력단의 변압기는 선로의 전압을 GTO 브리지의 직류 링크 전압이 15kV 정도로 낮추고 12-pulse 구성을 하도록 배치되어 있다. 변압기의 누설 리액턴스는 10% 정도로 가상 하였다.

(2) 제어장치 설계

그림 4는 STATCON의 동작을 해석하는데 사용한 간이화 등가회로 이다. 여기서 인덕터 L_s 는 변압기의 누설 리액턴스를 의미 하고 저항 R_s 는 변압기 권선저항과 스위칭 소자의 손실을 나타낸다.

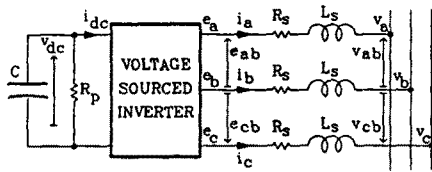


그림 4. STATCON 등가회로

이 회로에 대해 STATCON의 상태방정식을 유도 하고 a_n , i'_{q0} 를 동작점으로 하여 섭동방정식을 유도 하여 비선형 피드백 제어를 적용 하면 그림 5와 같은 제어장치를 고안 할 수 있다.

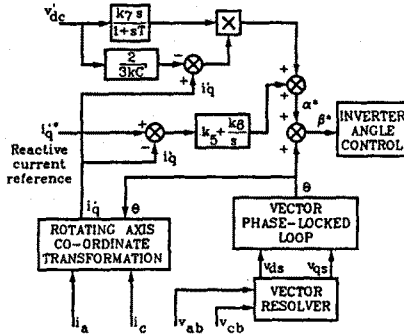


그림 5. STATCON 제어장치 구성도

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 에서 고려한 전체 시스템은 송전선로를 통해 무한대비스에 전력을 공급하는 발전기와 선로의 중간에 위치한 STATCON 으로 구성되어 있다. 통상 송전선로는 발전기에서 생산한 전력을 신뢰성 있게 공급하도록 2중 회로로 구성되어 있으나 본 연구에서는 단일 회로로 가상 하였다. 발전기의 출력전압은 13.8kV로 하고 변압기를 통하여 154kV 송전선로에 연결되는 것으로 가정 하였으며, 발전기는 EMTP에서 사용 가능한 dq 변환을 고려한 세부모형을 사용하여 발전의 동특성 분석을 용이 하도록 하였다. 시뮬레이션에서 고려한 시나리오는 t=0 에서 STATCON을 가동하여 직류링크 전압이 10kV에 도달 할 때 까지 기다렸다가 t=10ms 에서 전력계통의 중간점 bus에 연결하여 가동 하는 것으로 가상하였고, STATCON은 처음에는 지상(inductive) 무효전력을 공급하다가 t=700ms 에서 갑자기 전상(capacitive) 무효전력을 공급 하는 것으로 가상 하였다. 그림 6은 STATCON에 무효전력 기준신호를 1000A의 지상으로 공급하다, t=700ms 에서 1000A의 전상으로 갑자기 전환할 때 STATCON이 생성하는 무효전력의 추종특성을 보인 것이다. 이 그래프로부터 실제한 제어장치가 STATCON의 출력을 적절히 제어함을 확인 할 수 있다.

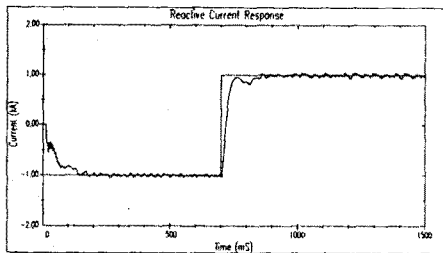


그림 6. 무효전력의 기준치 추종반응

그림 7은 연결점에서 "A"상의 전류와 전압 파형을 나타낸 것이다. 이 그래프에서는 전압과 전류의 위상은 t=700ms에서 기준 신호에 따라 정확히 반전 되는 것을 알 수 있다.

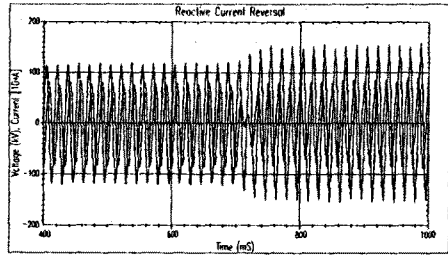


그림 7. "A" 상의 전압과 전류 파형

그림 8은 STATCON의 직류링크 전압이 무효전력의 기준신호에 따라 변동 하는 것을 나타낸 것이다. 이 그래프에서는 직류링크전압은 t=700ms까지는 9.5kV 정도로 유지되다가 무효전력의 기준신호가 지상에서 전상으로 바뀐 후 부터는 15kV로 상승하는 것을 알 수 있다.

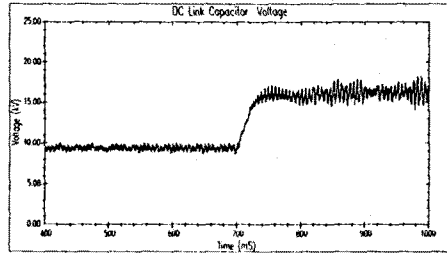


그림 8. STATCON 직류링크전압

5. 결론

본 논문에서는 STATCON이 154kV 전력계통과 연결된 것을 가상하여 EMTP에 의한 모델링을 실시하고 계통과의 동적 응답을 해석 하였다. STATCON은 전압원 12-pulse 컨버터로 구성되어 모델링 하였으며, 계통은 단일기 무한대비스로 하여, 발전기는 기계적 특성을 고려한 세부모형으로, 송전선로는 분포정수로 모델링 하였다. 시뮬레이션 결과 개발된 STATCON 모형은 계통에서 요구되는 무효전력을 적절히 제어하여 전력계통과의 동적 응답 해석에 유효하고, 또한 STATCON의 동작 특성 분석에 유효함을 확인 할 수 있었다. 전력계통과의 상세한 동적응답 분석은 계속 수행 중에 있으며 이러한 결과는 FACTS (flexible ac transmission system)의 기초연구에 유효하게 활용 될 전망이다.

참고 문헌

- [1] L. Gyugyi, "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits", IEEE Trans. on Industry Application, IA-15, NO. 5, Sept./Oct. 1979, pp521-532.
- [2] 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.
- [3] Westinghouse Science & Technology Center, "Development of Advanced Static Var Compensator", Final Report for Electric Power Research Institute, Nov., 1990.
- [4] 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.