

축소모델을 이용한 STATCOM의 제어효과 및 계통응답 분석

유현호\*, 한영성\*, 박상태\*\*, 오관일\*\*  
 \*(주)효성 중공업연구소, \*\*전력연구원

Analysis of Control and Performance Response of System using Scaled Model for STATCOM

Hyunho Yoo\*, Youngsung Han\*, Sangtae Park\*\*, Kwanil Oh\*\*  
 \*Hyosung Corporation R & D Institute, \*\*KEPRI

**Abstract** - This paper describes the theory and experimental result of scaled model of STATCOM. The STATCOM, a solid-state voltage source inverter coupled with a transformer, is tied to a transmission line. A STATCOM inject an almost sinusoidal current of variables magnitude, at the point of connection. This injected current is almost in quadrature with the line voltage, thereby emulating an inductive or capacitive reactance at the point of connection with the transmission line.

1. 서 론

국민 생활의 향상에 따라 전력수요가 급증하고 있으며, 송전설비의 대용량화가 진행되고 있다. 송전설비의 대용량화를 위하여 선로의 확충이 필요하지만 경제적인 측면과 환경규제, 부지확보에 따라 많은 어려움을 겪고 있다. 이에 따라 기존 설비의 이용률을 향상시켜 송전용량을 증대시키는 기술이 필요하게 되었으며 기존의 직·병렬 보상장치나 위상 제어기등의 제어장치들은 간명한 기술에도 불구하고 기계식 스위칭으로 인한 느린 응답특성과 마모성등의 문제로 인하여 능동적인 제어에 한계점이 있었다. 이러한 한계점을 극복하고 시장의 욕구에 부응하여 송전 시스템의 정상상태 및 과도상태에서의 유효전력 및 무효전력을 동적으로 제어할 수 있는 FACTS(Flexible AC Transmission System)기기의 개념이 도입되었다. FACTS기술의 개념은 기존에 수동적으로 제어하였던 선로의 전압, 임피던스 및 위상각을 능동적으로 제어할 수 있도록 하는 것이다. 이러한 FACTS기기의 능동제어 기능을 구현하기 위해서 고속의 전력전자 시스템, 제어 기술 및 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 기술이 필수적으로 수반되어야 한다. 본 연구에서는 계통의 안정도 향상과 송전용량 증대를 기하기 위하여 FACTS 기기중 병렬기기인 STATCOM의 설치효과에 대하여 기기 제작 및 실험을 통하여 동작특성을 살펴보았으며, 2.5kVA급 축소모델을 이용하여 송전계통의 전압보상을 살펴보았다. 또한 발전기와 연계해 통하여 다양한 계통 조건에서 STATCOM의 동작특성을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 STATCOM 개요

교류 송전선로 및 배전선로는 직렬 리액턴스와 병렬 콘덴서로 구성되어 있기 때문에, 부하 및 역률의 변동에 따라 송전선로의 전압 분포가 바뀌고 수전단에서 큰 폭의 전압 변동을 일으킬 수 있다. 대부분의 부하들은 이러한 전압 변동에 크게 영향을 받는다. 또한 정상상태의

문제뿐만 아니라 선로 개폐조작이나 부하 분리와 같은 외란으로 인해 무효전력수급이 급변하고 이에따라 전압이 변동되었을 때, 발전단부근에서 과도적으로 유효전력수급에 불균형이 생겨나 발전기가 가속하여 탈조를 일으키고 전력계통으로부터 분리될 가능성이 있다. 이에따라 적절한 보상 장치가 필요하게 되었으며, 과거의 병렬 콘덴서나 리액터를 접속제어하는 방식을 벗어나 자력식 인버터를 사용하여 무효전력을 공급할 수 있는 새로운 형식의 정지형 무효전력보상장치(STATCOM)가 개발되었다.

2.1.1 STATCOM 특성

STATCOM은 그림1과 같이 3상 인버터, 결합용 변압기, DC Capacitor, 제어회로, 펄스발생기로 구성되어 있으며, 3상 출력전압은 교류 계통 전압과 위상이 일치하도록 되어있다. 등가적으로는 크기와 위상을 신속히 제어할 수 있는 전압 phasor를 변압기를 통하여 계통에 인가하는 교류전압원으로 볼 수 있다.

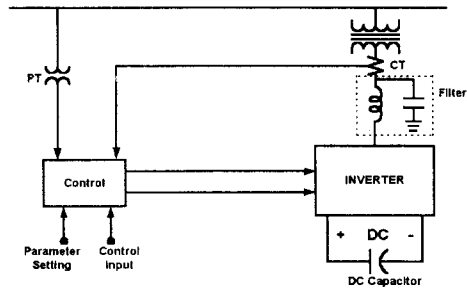


그림 2. STATCOM 구조

STATCOM은 넓은 범위의 선로전압에 걸쳐 AC 시스템 전압과 독립적으로 용량성(capacitive) 또는 유도성(inductive) 출력전류를 발생시키며 SVC(Static Var Compensator)와 유사한 제어동작을 수행한다. 하지만 SVC와는 달리 STATCOM은 무효전력을 공급 또는 흡수하는데 Capacitor나 인덕터와 같은 수동소자를 사용하지 않는다. 송전계통과 유효전력을 교환하는데 있어 정지형 컨버터 방식을 채택하고 있어 SVC에 비해 선로전압의 유지 측면에서 우수한 성능을 갖는다. STATCOM의 원리는 SVC와 같이 큰 용량의 Capacitor와 리액터를 사용하지 않고 단순히 제어 가능한 AC 전압원 Inverter를 적절한 결합 인덕턴스를 통하여 선로에 연결시킴으로써 무효전력을 발생시키는 것이다. 계통의 선간 전압이 평형인 경우, 계통과 STATCOM사이의 유효전력의 합계는 항상 0이고 이론적으로는 에너지 저장장치인 직류 Capacitor는 필요치 않으나 지속적인 무효전력의 흡수 및 공급을 위해서는 교류와 직류 단자간에 에너지 평형을 유지하기 위한 적은 용량의 직류 Capacitor를 필요로 한다. STATCOM

의 출력전압이 선로전압과 동상이고 선로전압보다 크다면, 선로로부터 들어오는 전류는 용량성이다. 동일한 조건하에서 출력전압이 선로보다 낮다면 전류는 유도성이다. 이는 기기의 역기전력은 제어 가능하고 동기 리액턴스는 선로에 연결할 때 임피던스가 되는 Synchronous Condenser의 동작원리와 정확하게 일치한다.

### 2.2 STATCOM 축소모델

STATCOM의 병렬 보상기능을 살펴보기 위하여 소형 발전기와 축소모델을 제작하였으며 발전기와 연계하여 계통을 구성하여 축소모델로 보상효과를 살펴보았으며 그림은 STATCOM의 하드웨어 구성도이다.

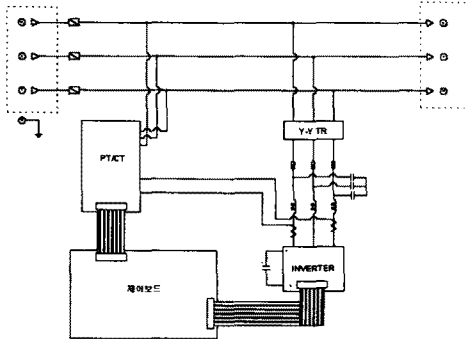


그림2. STATCOM 하드웨어 구성도

송전계통에서 사용되는 Inverter는 HNI(Harmonic Neutralized Inverter)이지만 STATCOM의 축소모델에 사용된 스위칭 소자로는 IGBT를 모듈화 시킨 IPM을 사용하였으며, 3kHz의 PWM 방식을 사용하였다. 또한 스위칭시 발생하는 고조파를 제거하기 위하여 LC 필터를 사용하였다. 제어기로는 DSP칩을 사용하였다.

그림 3은 실험에 사용된 축소모형의 사진이다. a)는 시스템 전체 구성도이며, b)는 인버터부 c)는 필터부 d)는 제어기이다.

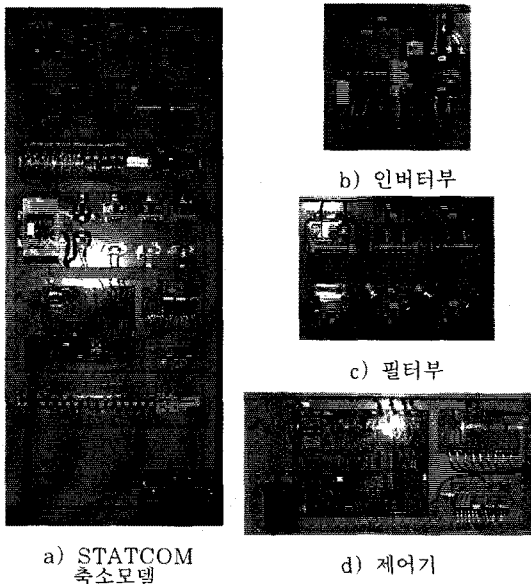


그림 3. 축소모형 사진

### 2.2.1 STATCOM 제어기

무효전력 제어를 위한 STATCOM의 제어기는 전압제어기와 전류제어기로 이루어지며 제어기는 그림에 나타나 있다.

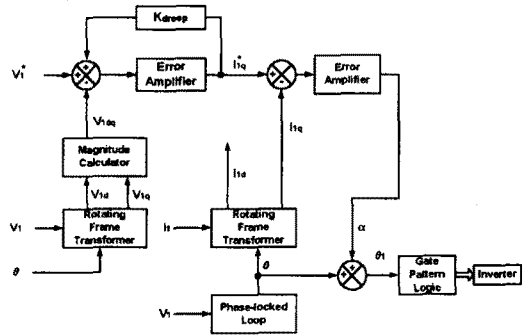
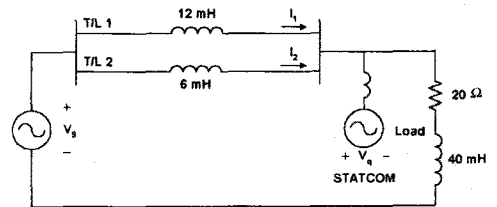


그림 4. STATCOM 제어기

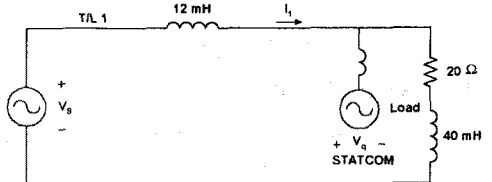
STATCOM의 전압제어는 선로에서 선로전압  $V_1$ 을 센싱하여 유효분( $V_{1d}$ )과 무효분( $V_{1q}$ )으로 변환하여 전압의 크기를 구해 전압 지령치와 비교하여 PI제어기를 거쳐 무효전류 지령치를 형성한다. STATCOM의 전류제어는 PCC전압  $V_1$ 을 PLL을 거쳐 회전좌표 기준각( $\theta$ )을 구하며, PCC점의 전류는 dq변환에 의하여 유효분( $i_{1d}$ )과 무효분( $i_{1q}$ )으로 변환되며, 무효분 요소( $i_{1q}$ )는 전압제어에 의해 구해진 무효전류지령치와 비교하여 PI제어기를 거쳐 점호각( $\alpha$ )를 생성한다. 이 점호각을 이용하여 STATCOM의 inverter 출력전압을 형성하며 무효전류를 선로에 공급 또는 흡수한다. 축소모델의 H/W 간략화를 위해 PWM과 필터를 채택하고 MI는 항상 1로 운전하였다.

### 2.3 STATCOM 축소모델 실험결과

STATCOM 축소모델의 보상 효과를 보기 위하여 계통의 선로를 다음과 같이 a) 등가 선로임피던스가 4mH인 선로와 b) 선로임피던스가 12mH인 선로를 구성하였으며 2.5kVA급 MG(Motor·Generator)Set을 구동시켜 선간전압 120V의 전압원으로 사용하였다.



a) 등가 임피던스가 4mH인 선로



b) 등가 임피던스가 12mH인 선로

그림 5. 시스템 등가회로

STATCOM의 설치 위치에 따라 보상효과를 보기 위

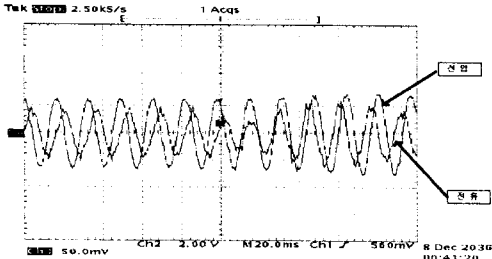
하여 선로임피던스를 조절하였으며 각각의 선로에 L모드 운전과 C모드 운전을 통하여 보상효과를 알아보았다. 실험결과가 그림 6과 7에 나타나 있으며 그림 6 a)는 등가 임피던스 4mH의 선로에 STATCOM이 설치되었을 경우 L모드 동작에서 C모드 동작으로 변하는 순간이다. 그림 6 b)는 선로 임피던스가 12mH인 선로에 STATCOM이 설치되었을 경우 L모드에서 C모드로 변하는 순간이다.

### 3. 결 론

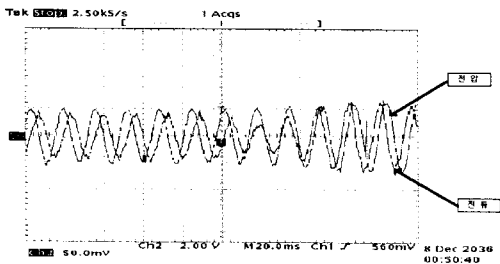
STATCOM의 Dynamic한 제어기능이 계통에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실제 축소모델을 제작하여 실험하였다. 실질적 계통을 모의하기 위하여 발전기를 사용하여 3상 전원을 공급하였으며 선로 임피던스와 부하를 조절하여 실험하여 보았다. 실험을 통하여 STATCOM을 이용한 동적 전압 제어 능력을 확인 할 수 있었다. 동적 제어 능력이 우수한 STATCOM과 같은 기기의 활용도를 높이기 위하여 커패시터 뱅크와 연동하여 STATCOM이 정격용량으로 L모드로 운전할 경우 급격한 전압강하시에 정격 C모드로 운전하는 전략을 사용한다면 정격의 2배용량의 동적제어 범위를 갖게 된다. 계통의 운전 조건에 따라 축소모델을 통한 실험에 의하여 다양한 운전전략을 수립할 수 있을 것이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Kalyan K.Sen, "STATCOM - STATic synchronous COMPensator: Theory, Modeling, and Applications", Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting - Volume 2, V.2, 1998
- [2] Sen KK, Stacey EJ, "UPFC - UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER - THEORY, MODELING, AND APPLICATIONS", IEEE Transactions on Power Delivery, V.13 N.4, 1998
- [3] Schauder C, Stacey E, Lund M, Keri A, Mehraban A, Edris A, Gyugyi L, Kovalsky L, "AEP UPFC PROJECT - INSTALLATION, COMMISSIONING AND OPERATION OF THE +/-160 MVA STATCOM (PHASE I)", IEEE Transactions on Power Delivery, V.13 N.4, 1998

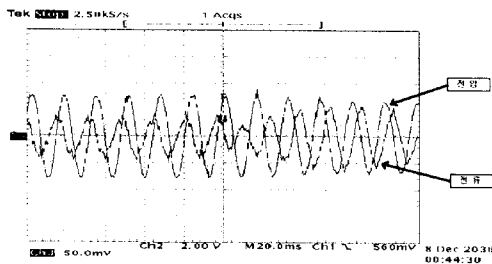


a) 등가 임피던스 4mH선로의 L 모드 → C 모드

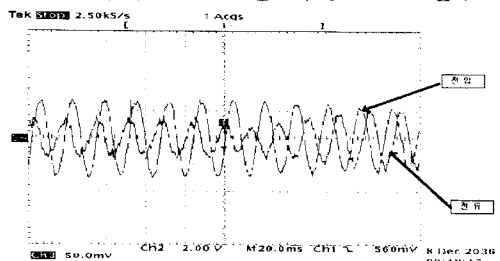


b) 등가 임피던스 12mH선로의 L 모드 → C 모드  
그림 6. L 모드 → C 모드

그림 7은 C모드에서 L모드로 변할 때 a)는 4mH의 등가 임피던스를 가지는 선로이며 b)는 12mH의 등가 임피던스를 가지는 선로이다. 그림에서 볼 수 있듯이 STATCOM은 선로 임피던스가 큰 쪽에서 더 많은 보상을 함을 알 수 있다.



a) 등가 임피던스 4mH선로의 C 모드 → L 모드



b) 등가 임피던스 12mH선로의 C 모드 → L 모드  
그림 7. C모드 → L 모드