

축소모형을 이용한 SSSC의 제어효과 및 계통응답 분석

최종윤*, 홍순욱*, 장병훈**, 윤종수**
 *(주)효성 중공업연구소, **전력연구원

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

Jongyun Choi*, Soonwook Hong*, Byunghoon Jang**, Jongsoo Yoon**
 *Hyosung Co., **KEPRI

Abstract - This paper describes the theory and experimental result of scaled model of SSSC. The SSSC, a solid-state voltage source inverter coupled with a transformer, is connected in series with a transmission line. Injected voltage is almost in quadrature with the line current, thereby emulating an inductive or a capacitive reactance in series with the transmission line.

1. 서 론

최근의 전력 공급 시장에서는 전력공급의 제어를 통하여 공급의 유연성을 확보함과 동시에 고품질의 전력을 높은 신뢰성을 가지면서 수용가에 공급하는 송전기술에 대하여 많은 관심을 가지고 있다. 이러한 시장의 요구에 부응하여 송전 시스템의 정상상태 및 과도상태에서의 유효전력 및 무효전력을 동적으로 제어할 수 있는 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기기의 개념이 도입되었다. FACTS 기술의 개념은 기존에 수동적으로 제어하였던 선로의 전압, 임피던스 및 위상각을 능동적으로 제어할 수 있도록 하는 것이다. 지금까지 소개된 FACTS 기기로는 크게 계통에 병렬로 접속하여 무효전력을 흡수, 공급하는 STATCOM(Static Synchronous Compensator)과 계통에 직렬로 전압을 주입하여 선로 임피던스를 제어하는 SSSC(Static Synchronous Series Compensator), 그리고 두 기기를 합친 개념의 UPFC(Unified Power Flow Controller)가 대표적이다. SSSC는 STATCOM과 같은 구조로 되어 있으나, STATCOM과 다른 점은 송전선로에 직렬 접속변압기를 통하여 무효전력을 교환한다는 것이다. 그러나 직렬접속이 병렬접속에 비해 설치 및 유지보수가 곤란하고 선로전류에 직각인 직렬전압의 주입을 위한 벡터제어 등이 단순히 전압의 크기만을 비교하는 방식으로 제어되는 STATCOM에 비해 어렵다는 점 때문에 실제 설치되어 운전중인 설비는 없고 시제품의 시험정도에 그치고 있다. 하지만 최근 UPFC가 FACTS 설비중 가장 앞선 개념의 설비로서 인정되면서 전압의 직렬주입에 대한 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 SSSC의 직렬주입전압의 제어과정을 보이고, 이를 이용한 2.5 kVA급의 축소모형을 제작하여 실제 계통에서 SSSC의 운전효과를 확인하였다.

2. 본 론

2.1 SSSC 개요

SSSC는 STATCOM과 회로적으로 동일한 전압원 인버터로 구성되어 있으며, 선로에 직렬로 삽입되어 선로에 흐르는 전류와 90° 위상차를 갖는 교류전원을 주입하여 선로의 리액턴스를 가변하고 수전단에 공급되는 유효, 무효전력의 양을 증가 또는 감소시키는 역할을 한

다. 그림 1은 SSSC의 구성을 간략하게 나타낸 것이다.

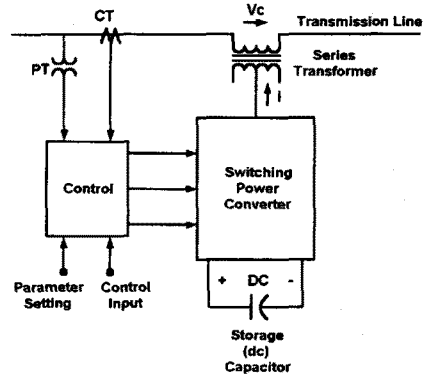


그림 1. SSSC 시스템의 구성

그림 1과 같이 SSSC는 전압원 인버터, 직류 캐패시터, 직렬 주입변압기와 제어기, 펄스발생장치로 구성되어 있다. 에너지 저장장치로 사용되는 직류 캐패시터는 지속적인 무효전력의 공급과 흡수를 위해 교류와 직류측 단자간에 형성되는 순시에너지의 평형을 유지하는 기능을 한다. 또한 직류 캐패시터의 양단전압은 인버터가 유효전력을 흡수 또는 방출함으로써 제어된다.

2.1.1 SSSC 보상

SSSC는 선로전류에 90° 위상차를 갖는 전압을 계통에 직렬로 주입함으로써 선로에 리액터나 캐패시터가 직렬로 연결된 것과 같은 역할을 하게된다. 하지만 수동소자인 리액터나 캐패시터보다 빠르게 임피던스를 가변시킴으로써 선로에 흐르는 전류의 크기나 전력의 흐름을 제어할 수 있다. 그림 2는 SSSC가 기본적인 2기 시스템에 투입된 경우를 증가적으로 나타낸 것이다.

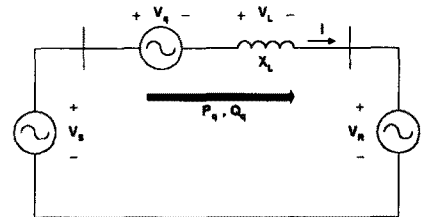
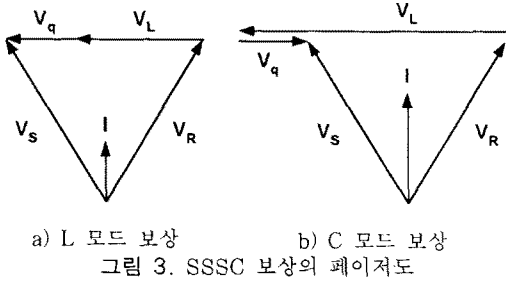


그림 2. SSSC와 2기 시스템 등가회로

그림 2에서 주입되는 전압 V_v 의 위상이 선로전류보다 90° 앞선 경우(그림3-a)는 SSSC가 L 모드로 동작하는 것으로 인버터가 계통으로부터 무효전력을 흡수하고

있다. 또한 선로전류보다 90° 뒤진 위상의 전압이 주입되는 경우(그림3-b)는 SSSC가 C 모드로 동작하여 인버터가 계통에 무효전력을 공급하고 있음을 나타낸다.



SSSC에 의한 직렬보상은 캐패시터에 의한 직렬보상과 개념상으로는 동일하나 보상에 따른 특성은 서로 다르다. SSSC는 선로전류에 관계없이 송전선에 직렬로 보상전압을 주입하므로 전송 유효, 무효전력은 다음의 식으로 표현된다.

$$P_q = \frac{V^2}{X_L} \sin \delta + \frac{V}{X_L} V_q \cos(\delta/2) \quad \text{식 1.}$$

$$Q_q = \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos \delta) + \frac{V}{X_L} V_q \sin(\delta/2) \quad \text{식 2.}$$

2.2 SSSC 축소모델

본 연구에서는 앞 절에서 살펴본 SSSC의 직렬보상기능을 실제 계통상에서 확인하기 위하여 2.5 kVA급 축소모델을 제작하였다. 그림 4는 제작된 SSSC의 하드웨어 구성을 나타내고 있다.

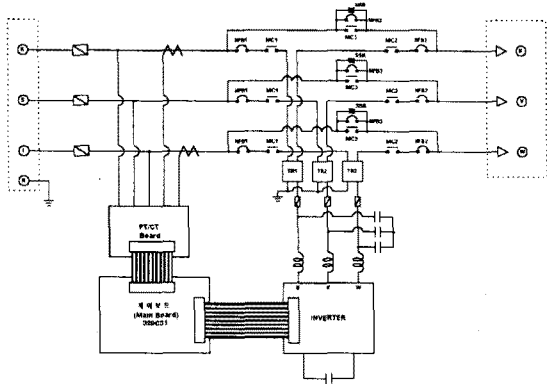


그림 4. SSSC 축소모델 하드웨어 회로

일반적인 송전계통에서 사용되는 인버터는 HNI (Harmonic Neutralized Inverter)이지만, SSSC 축소모델에 사용된 인버터는 고조파성분을 줄이기 위해 빠른 스위칭 소자인 IGBT를 사용하였고, 스위칭 방법으로는 5 kHz PWM을 사용하였다. 제어기로는 320C31 DSP 칩을 사용하였다. 또한 인버터 스위칭시 발생하는 고조파를 제거하기 위한 LC 필터를 사용하였다. 마지막으로 직렬 주입변압기를 통해 선로에 무효전력을 주입할 수 있도록 하였다. 이 때 사용된 주입변압기는 누설리액턴스를 최소화하도록 설계, 제작되었다.

그림 5는 SSSC 축소 모형의 실제 사진이다. 그림 a)는 전체 구성을 보이고, b)는 인버터와 LC 필터부, 그리고 c)는 제어기를 보이고 있다.



a) SSSC 축소모형 b) 인버터부 및 필터부

c) 제어기

그림 5. SSSC 축소모형 사진

2.2.1 SSSC 제어기

SSSC의 제어는 두 가지 모드로 동작 가능하도록 하였다. 첫 번째는 선로 임피던스제어 모드이다. 임피던스 제어모드의 제어기 블록 다이어그램이 그림 6에 나타나 있다.

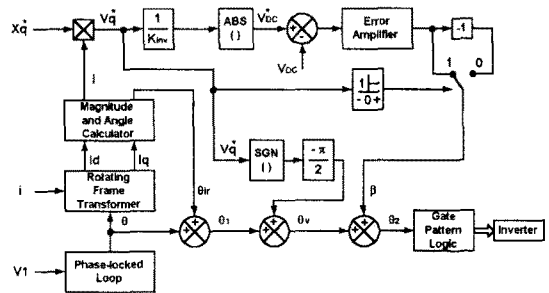


그림 6. 임피던스 제어모드 제어기 Block Diagram

그림 6에서 임피던스 지령치 X_q^* 가 양(+)인 경우는 C 모드로 동작하는 것을 의미하며, 음(-)인 경우는 L 모드로 동작하는 것을 의미한다. 제어기에 의해서 인버터는 선로전류에 대해 직각에 약간 못 미치는 위상차 ($90^\circ - \alpha$)의 전압을 주입함으로써 내부손실을 보상하고 직류 캐패시터의 양단전압을 일정하게 유지한다. 따라서 α 의 조절(+/-)을 통해서 DC 전압을 증가 또는 감소시킬 수 있으며, 이에 따라 인버터의 출력전압과 보상무효전력의 크기가 결정된다.

두 번째 제어모드는 정전력 제어모드이다. 그림 7에 정전력 제어모드의 제어기를 나타내었다.

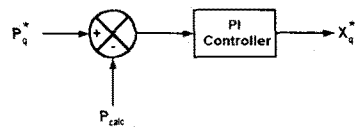


그림 7. 정전력 제어모드 제어기

그림 7의 제어기는 그림 6에 나타난 제어기의 외부로 프로세서 제어기 출력이 임피던스 지령치를 결정하도록 하였다. 정전력 제어의 경우 계통의 동요현상에서도 안정적으로 전력을 공급할 수 있도록 한다.

2.2.1 SSSC 축소모델 실험결과

그림 8은 SSSC 축소모델 제어기의 성능을 확인하기 위해 사용된 실험회로이다. 입력 전원으로는 2.5 kVA MG Set(Motor-Generator Set)를 사용하여 선간전압 110V의 3상 전원을 공급하였다.

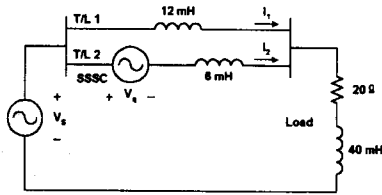
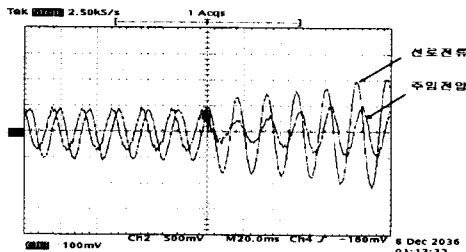
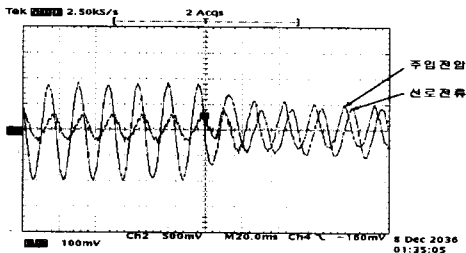


그림 8. SSSC 축소모델 실험회로

실험은 임피던스 제어모드와 정전력 제어모드에서 수행하였다. 우선 임피던스 제어모드의 실험결과가 그림 9에 나타나 있다. 그림 9-a)는 SSSC가 C 모드에서 L 모드로 변환하는 순간을 나타내고 있다. 또한 그림 9-b)는 SSSC가 C 모드에서 L 모드로 변환하는 순간이다. 그림에서 보듯이 주입전압은 선로전류와 90° 위상차를 가지며, 그 위상이 진상인지 지상인지에 따라서 L 모드, C 모드가 결정된다.



a) L 모드 → C 모드

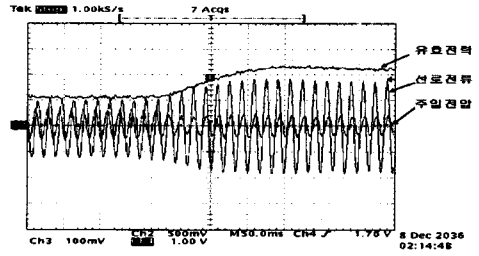


b) C 모드 → L 모드

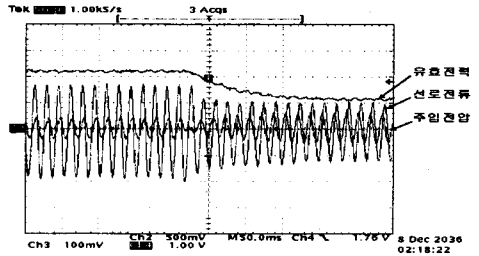
그림 9. 임피던스 제어모드의 실험파형

출력파형을 보면 L 모드의 경우 선로 임피던스를 증가시키는 역할을 하여 T/L 2에 흐르는 전류를 감소시키고, C 모드의 경우 선로 임피던스를 감소시킴으로써 T/L 2에 흐르는 선로전류를 증가시키고 있다. 제어속도는 최대 10주기 이내에서 완전히 제어될 수 있도록 하였다.

그림 8의 회로에서 선로를 통해 부하에 전달되는 유효전력은 총 358 Watt 이고, SSSC가 동작을 하지 않는 경우 T/L 1에 흐르는 유효전력은 119 Watt, T/L 2에 흐르는 유효전력은 239 Watt 이다. 이 때 SSSC의 정전력 제어모드를 이용하면 원하는 선로에 더 많은 부하를 부담시킬 수도 있고, 부하 부담을 줄일 수도 있다. 그림 10은 SSSC를 정전력 제어모드로 운전한 경우의 출력파형이다.



a) 150 Watt → 300 Watt



b) 300 Watt → 150 Watt

그림 10. 정전력 제어모드의 실험파형

그림 10-a)는 T/L 2에 흐르는 유효전력을 정전력 제어기를 통해 150 Watt에서 300 Watt로 증가시킨 순간의 파형이다. 이 때 L 모드로 동작하고 있던 SSSC가 순간적으로 C 모드로 변환하여 선로에 흐르는 유효전력의 양을 증가시킴을 보여주고 있다. 그림 10-b)는 a)와 반대의 경우로 300 Watt의 유효전력을 150 Watt로 낮추는 순간을 보여준다.

그림 10을 보면 SSSC가 없을 때 239 Watt의 유효전력이 흐르고 있는 선로에 SSSC를 투입하였을 경우, 정전력 제어를 통해 150 Watt 또는 300 Watt의 유효전력을 흐르게 할 수 있음을 나타낸다.

3. 결 론

본 연구에서는 SSSC의 제어기능과 계통에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실제 축소모델을 제작하여 실험하였다. 실험에서는 실제 계통에서의 효과를 잘 나타낼 수 있도록 하기 위하여 무한모선 전원이 아닌 소형 발전기를 이용하여 3상 전원을 공급하였다. 실험은 임피던스 제어모드와 정전력 제어모드 두 가지로 수행되었고, 그 결과 선로에 흐르는 전류와 유효전력을 제어할 수 있음을 보였다. 다만 축소모델의 경우 주입변압기의 누설리액턴스가 일반적인 송전계통에 비해 크기때문에 이에 대한 보상을 추가로 해주어야 정상적인 SSSC의 동작을 보일 수 있었다. 본 연구의 SSSC 축소모델은 직렬 FACTS 기기의 성능을 확인할 수 있는 계기가 되었고, STATCOM과의 연계를 통해 UPFC의 성능을 시험해 볼 수 있는 기반을 마련하였다.

(참 고 문 헌)

[1] Kalyan K.Sen, "SSSC - Static Synchronous Series Compensator : Theory, Modeling, and Applications", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.13 no.1, 1998
 [2] Laszlo Gyugyi, Colin D.Schauder, and Kalyan K.Sen, "Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12 No.1, 1997