

인버터식 무효전력보상기에 의한 송전선로의 직렬보상 특성해석

한 병 문, 한 경 희, 신 익 상

Series Compensation Analysis of Transmission Line using Inverter-type Var Compensator

Byung-Moon Han, Kyung-Hee Han, Ik-Sang Shin

요 약

본 논문에서는 송전선로에 직렬로 삽입되어 선로의 리액턴스를 동적으로 보상하는 인버터식 직렬보상기에 대한 동적응동 해석을 기술하고 있다. 이 직렬보상기는 다중펄스로 동작하는 전압원인버터와 결합변압기, 그리고 제어장치로 구성되어 있으며, 점호각을 조절하여 선로의 리액턴스를 가변하고 용량성 뿐만 아니라 유도성 보상도 가능하다. 이 보상기로 선로의 리액턴스를 감소시키면 전송 유효전력의 증가가 가능한데, 이러한 효과를 본 논문에서는 단일기-무한대-버스 전력계통에 대해 EMTP를 이용한 시뮬레이션으로 확인하였으며, 또한 축소모형 제작과 실험을 통해 실험적으로도 확인하였다.

ABSTRACT

This paper describes interaction analysis between the series STATCON and the power transmission system. The series STATCON, which consists of a multi-pulse voltage source inverter, coupling transformers, and control circuit, can compensate the line reactance in capacitive or inductive mode by proper manipulation of inverter firing angle. The series compensation of the line reactance in capacitive mode offers the increase of active-power transmission capability through the line. This effect was verified through EMTP simulations for a typical one-machine infinite-bus transmission system. And it was also verified by experimental works with a scaled hardware model.

Key Words: STATCON (static synchronous condenser), EMTP (electro-magnetic transient program)

1. 서 론

최근 들어 지가와 환경등의 문제로 새로운 송전선로를 건설하는 것은 대단히 어려운 상황이다. 따라서 기존 설비의 활용을 높이는 방안이 선진국에서 많이 검토되어 왔는데 혁신적으로 발전하는 대용량 전력전자기술로 이를 해결하려는 노력이 미국과 일본에서 추진되고 있다.⁽¹⁾ 장거리 송전선로에서 발생하는 전압강하를 캐패시터로 보상하여 전송전력을 증대하는 방법은 교류송전 초창기부터 제안되었으나 고정용량의 캐패시터를 사용할 경우 전력계통에 과도안정도를 저하시키고 저주파공진을 야기시키는 문제로 사용이 제한되어왔다.

Kimbark⁽²⁾은 기계식스위치를 병렬로 연결한 다수의 캐패시터를 선로에 직렬로 삽입하고 계단식으로 캐패시터의 용량을 조절하여 선로를 보상하는 것을 제안하였다. Vithayathil⁽³⁾은 다이리스터제어 리액터와 캐패시터를 병렬로 연결한 정지형 무효전력보상기를 선로에 직렬로 삽입하고 리액터에 흐르는 전류를 제어하여 선로를 보상하는 방법을 제안하였다. Gyugyi⁽⁴⁾는 전압원인버터를 선로에 직렬로 삽입하고 선로전류와 위상이 90° 진상 또는 지상인 전압을 주입하여 선로를 보상하는 방법을 제안하였다. 그러나 이 연구에서는 보상개념만 제시되고 시뮬레이션이나 축소모형실험에 의한 구체적인 성능분석은 실시되지 않았다.

본 논문에서는 전압원인버터를 선로에 직렬로 삽입하여 선로의 리액턴스를 보상하는 원리를 설명하고 시뮬레이션과 하드웨어 축소모형의 실험으로 검증한 결과를 기술한다. 시뮬레이션은 EMTP를 이용하여 간단한 전력계통과 제어장치를 설계하여 직렬보상효과를 확인하였다.⁽⁵⁾ 또한 제작한 축소모형의 전압원인버터는 송전용을 가상할 경우 스위칭방식을 다중펄스로 동작하는 것이 맞으나, 검증효과를 악화하지 않는 범위 내에서 편의상 PWM으로 동작하는 것으로 하였다.

2. 직렬보상의 개념

송전계통의 특성을 살펴보기 위해 두 개의 발전기를 갖는 간단한 전력계통을 그림 1(a)에 나타냈다. 만일 송전선로가 인덕턴스만 갖고 송전단과 수전단의 전압이 같다고 한다면, 중간점에서의 전압 V_M 은 그림 1(b)에 나타난 벡터선도에서 다음 수식으로 표현된다.

$$V_M = V \cos \frac{\delta}{2} \tag{1}$$

또한 이 선로를 통과하는 전류 I 는

$$I = \frac{2V}{X} \sin \frac{\delta}{2} \tag{2}$$

그러므로 선로의 손실을 무시하면 송/수전 양단과 중간점에서의 유효전력은 다음과 같은 관계식을 갖는다.

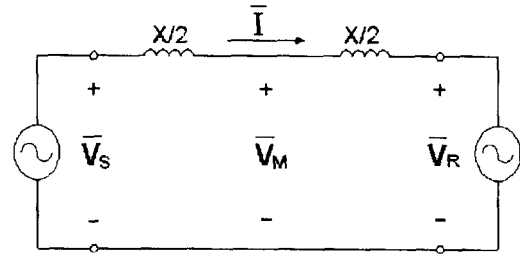
$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta \tag{3}$$

또한, 선로에서 소모되는 무효전력 Q 는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

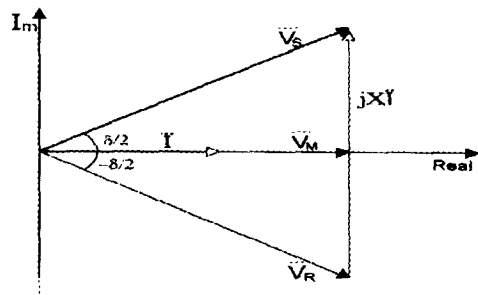
$$Q = \frac{2V^2}{X} (1 - \cos \delta) \tag{4}$$

그림 1(c)는 유효전력 P 와 무효전력 Q 의 위상각 δ 에 따른 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 무효전력 Q 는 $\delta = \frac{\pi}{2}$ 에서 유효전력 P 와 무효전력 Q 와 같고 $\delta = \pi$ 에서 유효전력 P 의 4배가 된다.

그림 2의 (a)는 커패시터에 의한 송전선로의 직렬보상을 나타낸 것이다. 이 경우 관련 전압과 전류의 벡터선도는 그림 2의 (b)와 같으며, 전체 선로의 리액턴스는 다음과 같이 표현된다.



(a) 회로도



(b) 벡터선도

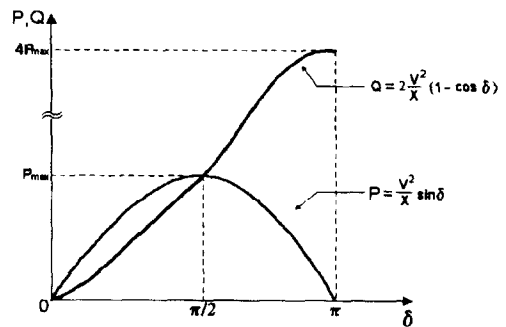


그림 1 간이화 전력계통
Fig. 1 Simplified power system

$$X = X_L(1 - s) \tag{5}$$

여기서 s 는 직렬보상 정도를 나타내는 정수로, $s = X_C/X_L$ 로 정의되며 그 값은 $0 < s < 1$ 이다. 보상된 선로에 흐르는 전류와 유효전력은 다음과 같다.

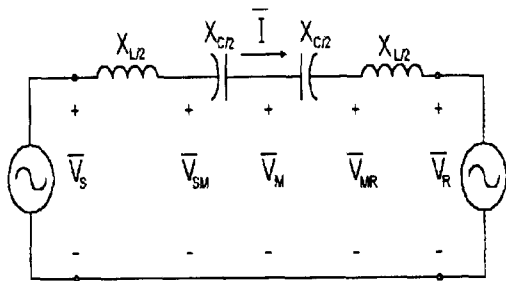
$$I = \frac{2V}{X_L(1 - s)} \sin \frac{\delta}{2} \tag{6}$$

$$P_S = I \cdot V_M = \frac{V^2}{X_L(1-s)} \sin \delta \quad (7)$$

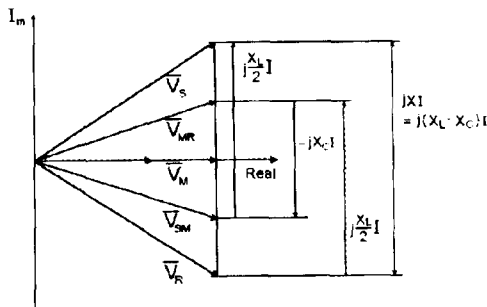
또한 직렬 캐패시터에 의해 공급되는 무효전력은 다음과 같다.

$$Q_{SC} = I^2 X_C = \frac{2V^2}{X_L} \frac{s}{(1-s)^2} (1 - \cos \delta) \quad (8)$$

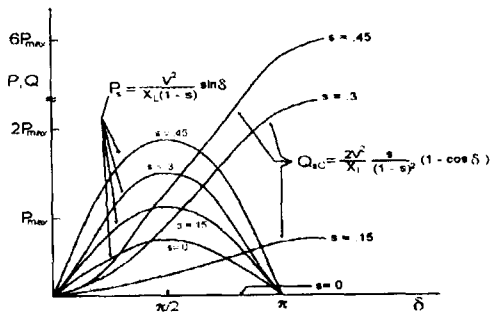
그림 2의 (c)는 보상후 유효전력 P_S 와 무효전력 Q_{SC} 의 변화를 위상각 δ 와 보상계수 s 에 따라 그래프로 나타낸 것이다.



(a) 회로도



(b) 벡터선도



(c) 송전특성

그림 2 직렬보상효과
Fig. 2 Series compensation effect

이 그래프에서 전송 가능한 전력은 s 가 증가함에 따라 큰 변화율로 증가하고 직렬 캐패시터에 의해 공급되어야 하는 무효전력은 또한 급속히 증가함을 알 수 있다.

3. 인버터식 직렬보상

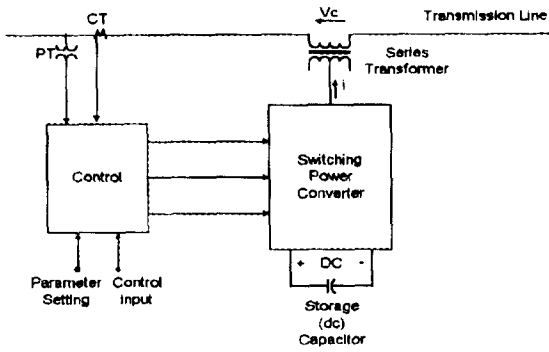
전절에서 설명한 바와 같이 캐패시터에 걸리는 전압은 선로에 흐르는 전류에 대해 90° 지상을 이루고 리액턴스에 의해 선로에 걸리는 전압과는 반대 극성을 갖는다. 즉 캐패시터의 정전에너지가 선로의 자기에너지와 서로 상쇄하여 선로의 리액턴스를 감소시키는 효과를 제공한다. 이 캐패시터 대신 전압원인버터를 직렬로 삽입하여 선로전류에 대해 90° 지상을 이루는 교류전압을 주입하면 동일한 효과를 갖는데 이것이 인버터식 직렬보상의 원리이다. 인버터식 직렬보상은 선로의 리액턴스를 연속적으로 신속하게 조정 가능하여 전송용량을 증대 할 뿐 아니라 과도안정도를 개선하는 효과도 클 것으로 기대되고 있다. 또한 고장시 주입전압의 위상을 90° 전상으로 동작시켜 고장전류를 제한하는 효과도 있을 것으로 기대된다.

인버터식 직렬보상을 송전선로에 직렬로 삽입하여 선로의 리액턴스를 가감하는 원리를 설명하기 위해 시스템의 구성, 유·무효전력의 출입, 그리고 동작해석 벡터선도를 그림 3에 보였다. 그림 3(a)에 보인 바와 같이 인버터식 직렬보상은 전압원인버터, 직류캐패시터, 주입변압기, 그리고 제어 및 펄스 발생장치로 구성된다. 에너지 저장요소인 직류캐패시터는 지속적인 무효전력의 공급과 흡수를 위해 교류와 직류측 단자간에 형성되는 순시에너지의 평형을 유지하는 기능을 한다. 또한 직류캐패시터의 양단전압은 인버터가 유효전력을 흡수 또는 방출하므로써 제어된다. 그림 3(b)는 인버터의 점호각에 따른 유·무효전력의 흡수 또는 방출을 나타낸 것인데 인버터의 출력전압이 선전류와 90° 전·지상 상태에서 직렬보상은 무효전력을 보상할 수 있음을 나타낸다. 따라서 진상보상을 할 경우 인버터의 점호각을 설정하는데 필요한 기준신호는 선전류의 영교차점에 대해 90° 위상을 지연하여 얻어지고 인버터 손실을 보상하기 위해 점호각을 $+\alpha$ 또는 $-\alpha$ 로 조절하므로써 보상무효전력의 크기가 제어된다. 그림 3(c)는 무효전력보상의 동작해석을 위한 벡터선도로 지상부하시 송전전압 \vec{V}_S 와 주입전압 \vec{V}_C 그리고 수전전압 \vec{V}_R 과 선로전류 \vec{I} 의 관계를 나타내고 있다. 직렬보상의 목적은 선로에서 소모되는 무효전력을 보상하여 결과적으로는 선로의 리액턴스를 보상하고 선전류를 증대하여 전송전력의 증대를 얻는 것이다. 그림 3(c)의 벡터선도에서 직렬보상기가

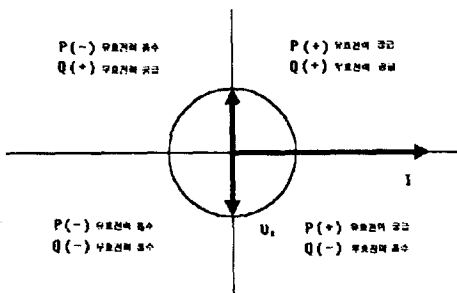
공급하는 무효전력은 다음 관계식을 갖는다.

$$Q_{SC} = I[V_R \sin \phi - V_S \sin(\phi - \delta)] = IV_c \cos \alpha \quad (9)$$

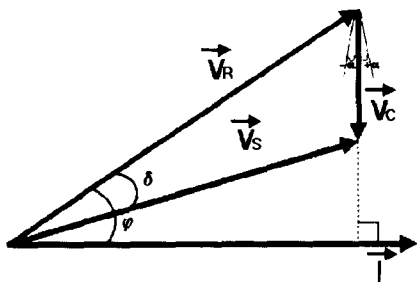
즉 보상기가 공급하는 무효전력은 송전단의 무효전력과 수전단의 무효전력의 차에 해당한다. 또한 위 벡터도에서 선전류를 기준으로 할 때 보상전압 V_c 는 이상적으로는 전류 I 와 90° 의 위상차를 갖으나 인버터의 손실 때문에 이를 보상하기 위해 90° 위치에서 α 만큼 우측으로 위치한다.



(a) 시스템의 구성



(b) 유·무효전력의 출입



(c) 벡터선도

그림 3 시스템 동작 해석
Fig. 3 System operation analysis

그림 4는 무효전력보상기의 제어기 구성을 보인 것이다. 제어기는 CT와 PT를 이용해 계통의 전압, 전류를 측정하여 영교차점(zero-crossing)을 검출하고 이 두 교차점을 이용해 구한 위상차는 기준치와 비교되어 PI제어기를 통해 변조율을 설정하는데 사용된다. 직류링크전압을 일정하게 유지하기 위해 직류 캐패시터전압은 절연증폭기로 측정되어 PI제어기를 통해 인버터의 점호각 α 를 설정하는데 사용된다. 또한 설정된 점호각은 V_{dc} 가 무한정 증가하는 것을 막고 기준전압 V_{dcref} 을 따라 검출전압이 추종하도록 제한기를 거쳐 펄스발생기로 보내진다. 결국 설정된 기준전압 V_{dcref} 에 따라 검출전압 V_{dc} 를 추종시키는 것이다. 인버터가 주입하는 교류전압은 이 직류 링크 전압에 의해 결정되므로 α 를 조절하여 V_{dc} 의 크기를 설정함으로써 주입전압의 크기를 조절하고 결과적으로 선로의 리액턴스를 조절하는 기능을 갖는다.

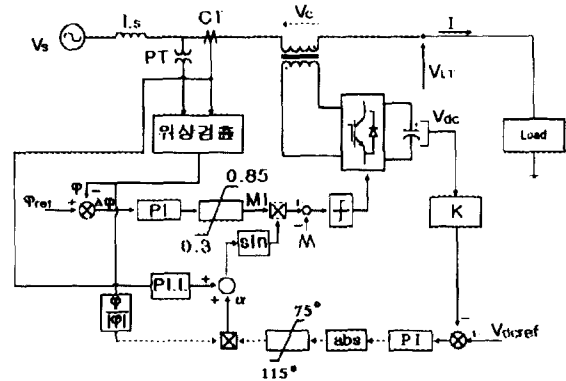


그림 4 제어기 구성
Fig. 4 Controller configuration

4. 시뮬레이션

고안된 제어기의 성능평가와 직렬보상기의 송전계통에 대한 동적응동과 송전용량 증대효과를 분석하기 위해 80 Mvar 급 직렬보상기가 154 kV 송전선로에 직렬로 연결되어 무효전력을 제어하는 경우를 예로 EMTF 시뮬레이션 모형을 설정하였다. 송전계통은 그림 5에 보인 것처럼 한기의 발전기가 무한대 모선에 연결되어 있으며, 발전기는 출력전압이 13.8 kV로 승압변압기를 통해 송전선로에 연결되어 있다. 송전선로는 길이가 160 km이고 분포정수로 모델링을 하였으며 직렬보상기는 12-펄스 전압원인버터로 구성되어 있으며 직렬 결합변압기를 통해 선로에 연결되어 있다.

이 시뮬레이션에서 고려된 시나리오들은 다음과 같다. 직류캐

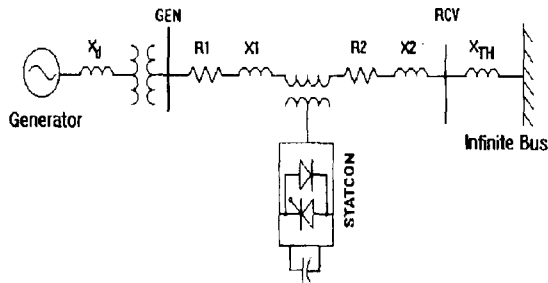


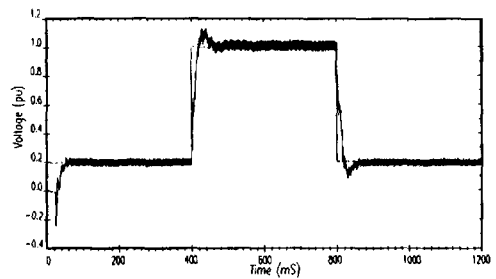
그림 5 모의 송전계통
Fig. 5 Simulation model of transmission system

패시터의 기준전압은 0~400 ms 사이에서는 0.2 pu로 유지되다가 400~800 ms 사이에서는 1.0 pu로 상승하고, 800~1200 ms 사이에서는 다시 0.2 pu로 하강하는 것으로 하였다. 여기서 직류캐패시터의 전압은 10 kV를 1.0 pu로 정하였다. 직렬보상기는 $t=10$ ms에서 동작을 시작하여 직류캐패시터를 충전하기 시작하고, $t=400$ ms까지는 2 kV로, $t=800$ ms까지는 10 kV로 그리고 $t=1200$ ms까지는 다시 2 kV로 동작시킨다. 이 경우 선전류의 변화, 주입전압의 크기, 그리고 전송유효전력의 변화를 고찰하는 것으로 하였다.

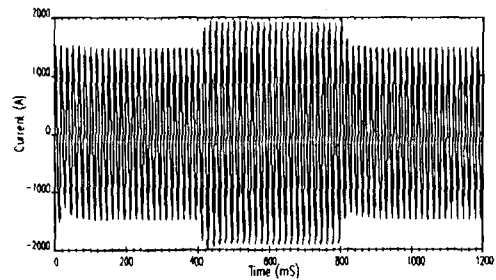
그림 6(a)는 직류캐패시터의 전압이 기준치를 추종하는 특성을 보인 것이다. 직류캐패시터 전압은 상태변화시 15% 정도의 오버슈트를 나타내나 비교적 기준치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 6(b)는 A상의 선전류를 나타낸 것으로 선전류는 직렬보상이 최대인 구간인 400~800 ms에서 상승하는 것을 알 수 있다. 그림 6(c)는 주입전압의 변화를 보인 것이다. 최대 전상무효전력을 공급하는 동안인 400~800 ms 사이에서는 높고, 0.2 pu의 전상무효전력을 공급하는 동안인 10~400 ms 그리고 800~1200 ms 사이에서는 낮다. 그림 7(d)는 선로로 전송되는 유효 및 무효전력의 양을 나타낸 것이다. 직렬보상기에 의해 80 Mvar 정도의 무효전력이 보상됨에 따라 전송유효전력은 46 MW 정도 증대됨을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과 직류캐패시터전압은 기준치를 커다란 과도현상 없이 비교적 양호하게 추종하고 있음을 알 수 있다.

5. 축소모형실험

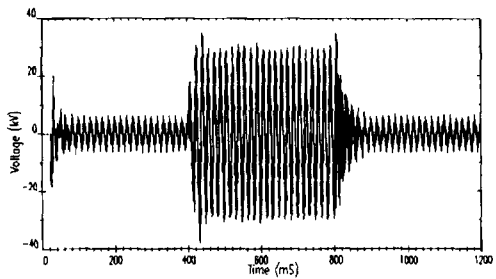
직렬보상기의 동작과 특성을 하드웨어적으로 검증하기 위해 3상, 120 V, 2 kVA 용량의 축소모형을 제작하고 발전기와 선로모형에 부착하여 실험을 실시 하였다. 그림 7은 하드웨어 축소 모형의 전체 회로도를 나타낸 것이다. 제작된 직렬



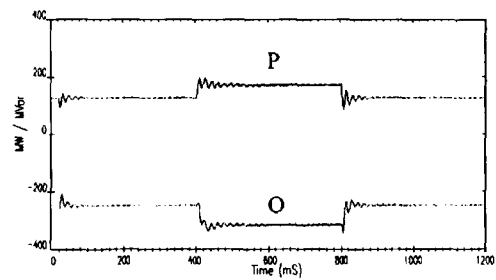
(a) 직류캐패시터 전압



(b) A상 선전류



(c) 직렬보상전압



(d) 전송 유효·무효전력

그림 6 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Simulation results

보상기의 인버터는 스위칭소자로 IGBT 듀얼모듈을 사용하였고, 전체 시스템의 제어와 펄스생성장치로는 마이크로프로세서 80C196KC를 사용하였다. 인버터의 게이트펄스를 동

기화하는 기준으로는 교류측 선전류를 전류센서로 검출하여 영교차점을 구하고, 이 영교차점을 90° 지연하여 프로세서의 외부인터럽트 신호를 생성하여 PWM 펄스를 발생한다. 실제 송전용에서는 다중펄스방식 인버터를 사용하나 본 축소모형 실험에서는 기본동작을 확인하는데 지장이 없다고 판단되어 제작편의상 PWM방식을 채용하였다. 실험에서 교류전원으로 사용한 동기발전기는 계자가 4극, 용량이 2 kVA, 출력전압이 3상 120 V이고 직류분권모터로 구동되며 출력은 3상 선로모형을 통해 부하로 연결된다. 발전기 출력전압의 주파수를 조절하기 위해 직류분권모터는 초퍼를 통해 전기자전류를 연속적으로 제어하도록 되어 있다. 시뮬레이션과 동일한 상황을 모의하기 위해서는 발전기의 출력을 다시 전력회사가 공급하는 교류단자에 인가하는 것이 정확하나, 발전기출력과 교류단자를 동기화시키는 투입장치가 준비되어 있지 않아, 최대한 동일한 효과를 검증하기 위해 R-L 부하를 연결하여 실험하였다.

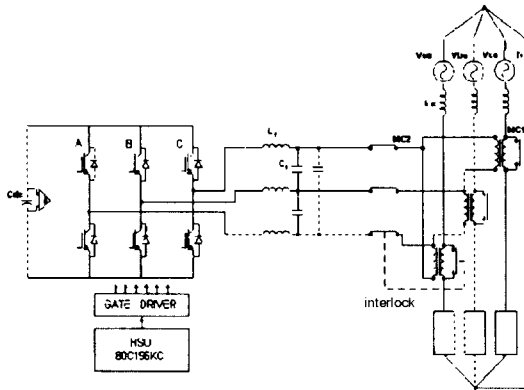
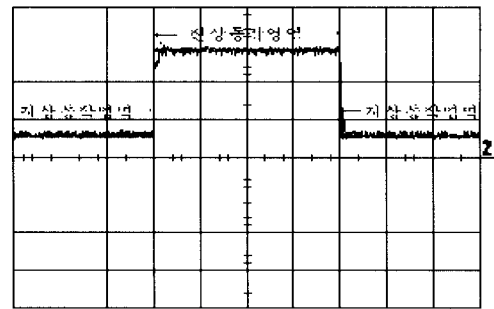


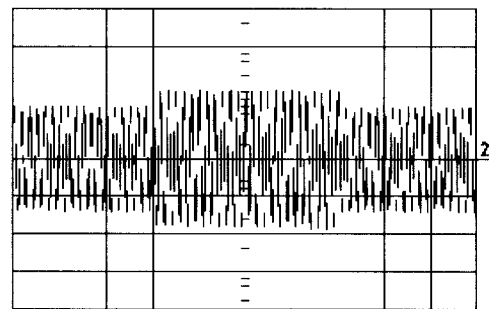
그림 7 축소모형 구성도
Fig. 7 Scaled model for experiment

표 1 축소모형 회로정수

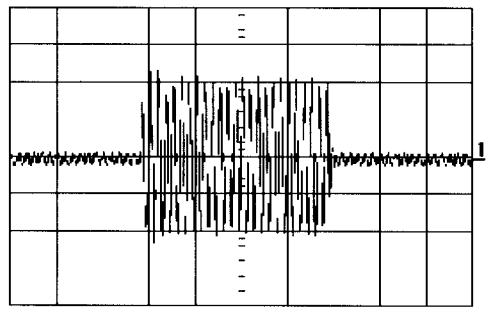
전원 전압	120V(상전압)
전원 주파수	60Hz
스위칭 주파수	3060Hz
필터용 C_f	$14\mu\text{F}$
필터용 L_f	3.37mH
결합용 변압기	1:1
캐패시터 C_{dc}	$220\mu\text{F}$
부하조건	$20+j14.13$
L_s	11.3mH



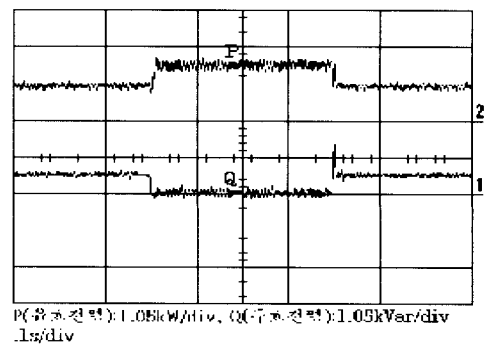
(a) 직류캐패시터 전압



(b) A상 선전류



(c) 직렬보상 전압



(d) 전송 유효·무효 전력 파형

그림 8 실험결과
Fig. 8 Experiment results

제작한 축소모형의 동특성을 관찰하기 위해 시뮬레이션과 같은 방식으로 0~400 ms 사이에서 0.2 p.u로 유지하고 400~800 ms 사이에서는 1.0 p.u로 상승하고 800~1200 ms 사이에서는 다시 0.2 p.u로 하강하도록 실험을 수행하였다. 여기서 직류 캐패시터 전압은 142V를 1.0 p.u로 하여 직류 캐패시터의 전압변화, 점호각의 변화, 주입전압의 변화, 선전류의 파형을 측정된 결과를 그림 8에 보였다.

그림 8(a)는 직류캐패시터의 전압이 기준치를 추종하는 특성을 보인 것인데 정상 상태에서 160 V까지 충전하여 진상 무효전력을 공급하고 다시 0.5 p.u로 하강하여 진상 무효전력을 공급함을 보여주고 있다. 상태변화시 약간의 오버슈트를 가지지만 비교적 잘 추종함을 볼 수 있다. 그림 8(b)는 선전류의 변화를 나타낸다. 예측한대로 선전류는 선로가 보상된 영역에서 증가됨을 알 수 있다. 그림 8(c)는 계통에 주입되는 보상전압의 파형을 보인 것이다. 보상전압은 직류링크 전압이 상승된 구간에서 증가하여 선로리액턴스에 의한 전압강하를 보상한다. 그림 8(d)는 선로로 전송되는 유효전력을 선로에 흐르는 전류와 송전단의 전압을 dq 변환하고 연산하여 D/A 컨버터를 통해 오실로스코프로 디스플레이 한 것이다. 직렬보상기가 동작하는 동안은 유효전력은 증가하고 무효전력은 감소함을 알 수 있다. 이상의 실험 파형을 통해 시뮬레이션에서 확인한 바와 마찬가지로 직렬보상기가 선로의 리액턴스를 적절히 보상하여 유효전력의 전송을 증대함을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 인버터식 직렬보상기가 선로에 직렬로 연결되어 선전류와 90° 위상차를 갖는 전압을 주입하여 선로의 리액턴스를 보상하는 경우에 대해 분석을 실시하였다. 먼저 전압원 인버터로 송전선로를 직렬보상하는 원리를 이론적으로 고찰하고 동작과 성능을 검증하기 위해 154 kV 단일기 무한대모선을 갖는 전력계통에 대해 EMTP 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과 송전선로로 전송되는 유효전력은 증가하고 무효전력은 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 하드웨어 축소 모형을 제작하고 실험을 실시하여 시뮬레이션으로 확인한 시스템의 동작을 실험적으로 재차 확인하였다. 실험에 사용된 전압원인버터는 PWM방식으로 동작하고 변조율과 위상각을 각각 분리제어가 가능하도록 설계되어 있으나 실제 실험에서는 송전용을 고려하여 위상각만 제어 가능한 것으로 하여 제어장치를 동작시켰다. 실험을 통해 전압원인버터에 의한 직렬보상기는 선로의 리액턴스를 적절히 보상함

으로써 전송 유효전력을 증대함을 확인할 수 있었다.

앞으로 계속되어야 할 연구는 발전기에서 생성되는 전력을 전력회사가 공급하는 교류단자에 동기화해서 상호연결하여 직렬보상기의 동작이 발전기의 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하고, 고장시 발전기와 직렬보상기의 과도특성해석과 보호장치 등에 관한 것이다.

본 연구는 명지대학교 부설 산업기술연구소의 '97년도 교내연구비 지원으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] E. W. Kimbark, "Improvement of system stability by switched series capacitor", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-85, Feb. 1966.
- [2] J.J. Vithayathil, et. al., "Case studies of reactive power control on an AC transmission System", Int. Conf. on Large High Voltage Electric System(CIGRE), Report 38~02, Aug.1986.
- [3] L. Gyugyi, "Solid-State Control of Electric Power in AC Transmission System", Paper No. T-IP.4, International Symposium on Electric Energy Converter in Power System Capri, Italy 1989.
- [4] L. Gyugyi, "A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems", 5th IEE International Conference on AC/DC Transmission, Sep. 17~20,1991.
- [5] Abdel-Aty Edris, "Series compensation schemes reducing the potential of subsynchronous resonance," IEEE Trans. on Power System, Vol. 5, No. 1, February 1990.
- [6] Westinghouse Science & Technology Center, "Unified Power Flow Control System", Proposal for Electric Power Research Institute (EPRI), Nov., 1992.
- [7] Westinghouse Science & Technology Center, "Advanced Static Var System for Utility Applications", Report for Electric Power Research Institute (EPRI), Sep., 1991.
- [8] 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.

- [9] 한 병문, “비선형 보상을 적용한 송전용 무효전력보상기의 제어시스템 설계”, 대한전기학회지, 46권 1호, 97년 1월.
- [10] 한 병문, “EMTP에 의한 STATCON과 송전계통의 동적응동 분석”, 대한전기학회지, 47권 7호, 97년 7월.

< 저 자 소 개 >



한병문(韓炳文)

1953년 7월 5일생. 1976년 2월 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 12월과 1992년 5월 美國 아리조나 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사 및 박사). 美國 Westinghouse중앙연구소 전력전자연구실 선임연구원. 현재 명지대학교 전기전자공학부 부교수.



한경희(韓慶熙)

1943년 4월 9일생. 1967년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 명지대 전기전자공학부 교수.



신익상(申益尙)

1971년 3월 26일생. 1996년 대전산업대학교 전기공학과 졸업. 현재 명지대 대학원 전기공학과 석사과정.