

전압원 인버터에 의한 선로의 직렬보상

한 병문*, 한 경희, 신 익상, 강 중구
 명지 대학교 전기 공학과

Series Line Compensation through Voltage Source Inverter

Byung-Moon Han*, Kyung-Hee Han, Ik-Shang Shin, Joong-Goo Kang.
 Dept of Electriccal Engineering, Myongji University

Abstract - This paper describes a dynamic var compensator to compensate the line reactance for power transmission and distribution system. The compensator consists of a voltage source inverter with dc capacitor, coupling transformers, and control circuit. The operation of compensator was verified by computer simulations with EMTP and experimental works with a scaled hardware model. The advantage of the proposed system is rapid and continuous regulation of the reactive power.

1. 서 론

최근 들어 에너지와 환경 등의 문제로 새로운 송·배전 선로를 건설하는 것은 대단히 어려운 상황이다. 따라서 기존설비의 활용율을 높이는 방안이 선진국에서 많이 검토되어 왔는데 최근 혁신적으로 발전하는 대용량 전력전자기술로 해결하려는 노력이 적극적으로 추진되고 있다[1].

장거리 송전선로에서 발생하는 전압강하를 캐패시터로 보상하여 전송전력을 증대하는 방법은 교류송전 초창기부터 제안되어 왔으나 고정용량의 캐패시터를 사용할 경우 전력계통의 과도안정도를 저하시키고 저주파공진을 야기시키는 문제로 사용이 제한되어 왔다. 그후에 캐패시터에 기계식 스위치를 병렬로 연결하여 선로에 직렬로 삽입하는 방법[2], 다이리스터제어 리액터와 캐패시터를 병렬로 연결하여 선로에 직렬로 삽입하는 방법[3], 전압원인버터를 선로에 직렬삽입하는 방법이 제안되어 왔다[4].

본 논문에서는 전압원인버터를 선로에 직렬삽입하여 선로리액턴스를 보상하는 원리를 설명하고 시뮬레이션과 하드웨어 축소모형의 실험을 통하여 얻은 결과를 기술한다. 제작한 축소모형의 전압원인버터는 배전용을 가상하여 PWM 스위칭으로

동작하고 변조율과 위상각이 변경 가능한 것으로 설계되었으며 송전용의 경우는 다중펄스 스위칭 방식으로 동작하나 편의상 PWM 스위칭방식으로 동작하는 것으로 하였다.

2. 본 론

2.1 보상기의 원리

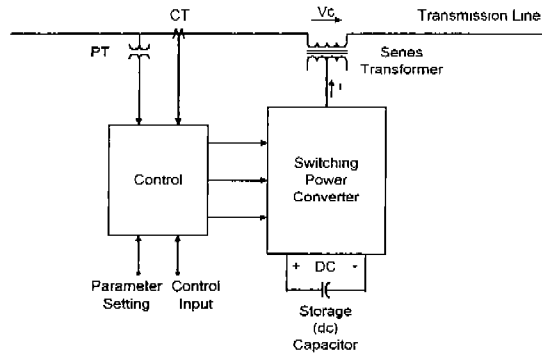
인버터식 직렬 보상기를 송전선에 직렬로 삽입하여 선로의 리액턴스를 가감하는 원리를 설명하기 위해 시스템의 구성, 유·무효전력의 출입, 그리고 동작해석 벡터선도를 그림 1에 보였다.

그림 1(a)에 보인 바와 같이 인버터식 직렬보상기는 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.

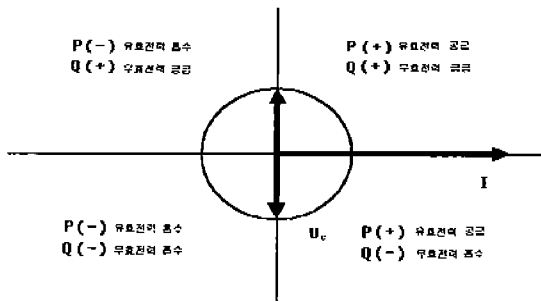
그림 1(b)는 인버터의 점호각에 따른 유·무효전력의 흡수 또는 방출을 나타낸 것인데 인버터의 출력전압이 선전류와 90° 전·지상 상태에서 직렬보상기는 무효전력을 보상할 수 있음을 나타낸다. 따라서 진상보상을 할 경우 인버터의 점호각을 설정하는데 필요한 기준신호는 선전류의 영교차점에 대해 90° 위상을 지연하여 얻어지고 인버터 손실을 보상하기 위해 점호각을 + α 또는 - α 로 조절하므로써 보상무효전력의 크기가 제어된다.

그림 1(c)는 무효전력보상기의 동작해석을 위한 벡터선도로 지상부하시 송전전압 \vec{V}_s 와 주입전압 \vec{V}_c 그리고 수전전압 \vec{V}_r 과 선로전류 \vec{I} 의 관계

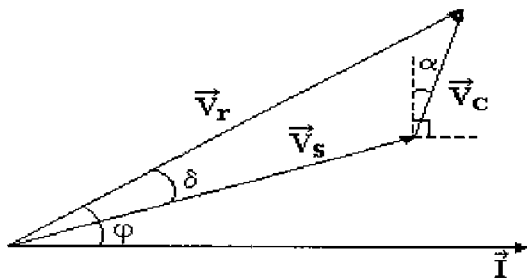
를 나타내고 있다.



(a) 시스템의 구성



(b) 유·무효전력의 출입



(c) 동작해석 벡터선도

그림 1. 직렬 보상원리

직렬보상기의 목적은 선로에서 소모되는 무효전력을 보상하여 결과적으로는 선로의 리액턴스를 보상하고 선전류를 증대하여 전송전력의 증대를 달성하는 것이다. 그림 1(c)의 벡터선도에서 직렬보상기가 공급하는 무효전력은 다음 관계식을 갖는다.

$$Q_c = I \cdot [V_r \sin \phi - V_s \sin(\phi - \delta)] = IV_c \sin \alpha \quad (1)$$

즉 보상기가 공급하는 무효전력은 송전단의 무효

전력과 수신단의 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.

그림 2는 무효전력보상기의 제어기 구성을 보인 것이다. 제어기는 먼저 CT와 PT를 이용해 계통의 전압과 전류를 측정하여 영교차점을 검출하고 이 두 교차점을 이용해 구한 위상차는 기준치와 비교되어 PI제어기를 통해 변조율을 설정하는데 사용된다. 직류링크전압을 일정하게 유지하기 위해 직류 캐패시터전압은 절연증폭기로 측정되며 PI제어기를 통해 인버터의 점화각 α 를 설정하는데 사용된다. 또한 설정된 점화각은 V_{dc} 가 무한정 증가하는 것을 막고 기준전압 V_{dcref} 을 따라 검출전압이 추종하도록 제한기를 거쳐 펄스발생기로 보내 진다.

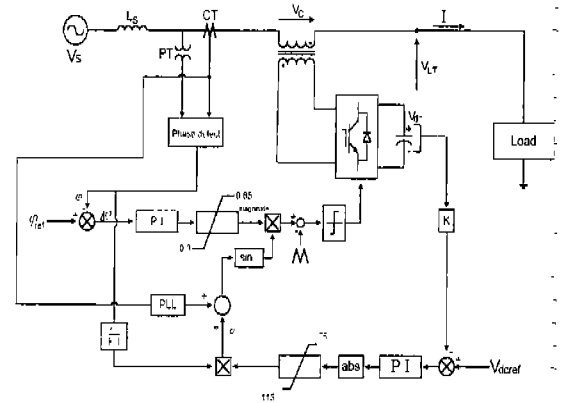


그림 2. 제어기 구성

2.2 시뮬레이션 [5]

고안된 제어기의 성능평가와 무효전력보상기의 송전계통에 대한 동적응동과 송전용량 증대효과를 분석하기 위해 80Mvar급 직렬보상기가 154kV 송전선로에 직렬로 연결되어 무효전력을 제어하는 경우를 예로 EMTP 시뮬레이션 모형을 설정하였다. 송전계통은 그림 3에 보인 것처럼 1기의 발전기가 무한대 모선에 연결되어 있으며, 발전기는 출력전압이 13.8kV로 승압변압기를 통해 송전선로에 연결되어 있다. 송전선로는 길이가 160km이고 분포정수로 모델링을 하였으며 STATCON은 12-펄스 전압원인버터로 구성되어 있으며 직렬결합변압기를 통해 선로에 연결된다.

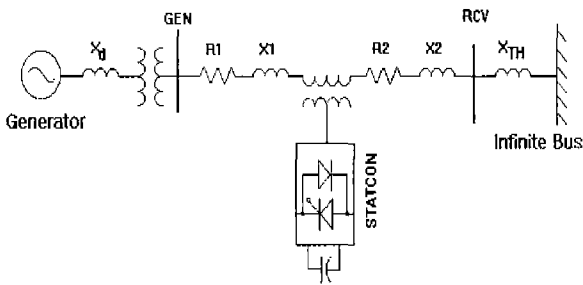
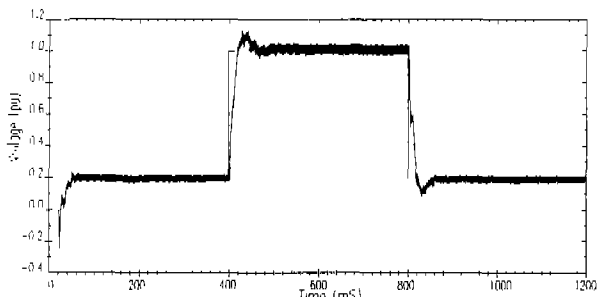
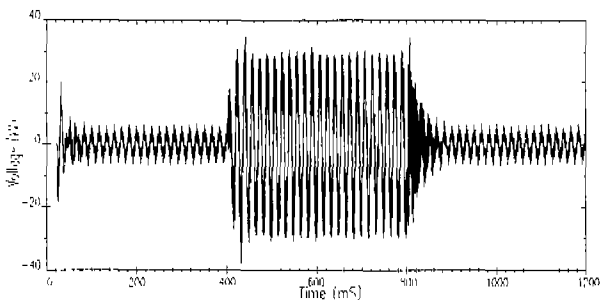


그림 3. 모의 송전선로

그림 4는 고안된 제어기의 성능 평가와 무효전력보상기의 송전계통에 대한 동적응동을 분석하기 위해 시뮬레이션 결과이다. 그림 4(a)는 직류 캐패시터 전압을 0-400ms 사이에서는 0.2p.u로 400-800ms에서는 1p.u로 그리고 800-1200ms에서는 다시 0.2p.u로 step응답을 주어 직류캐패시터 전압의 변화를 고찰한 것이다.



(a) 캐패시터전압



(b) 직렬보상전압

그림 4. 시뮬레이션결과

시뮬레이션 결과 직류캐패시터전압은 기준치를 커다란 과도현상이 없이 비교적 양호하게 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 4(b)는 주입전압의 변화를 보인 것이다. 최대 진상무효전력을 공급하는 동안인 400-800ms 사이에서는 높고 0.2pu의 진상무효전력을 공급하는 동안인 0-400ms 그리고 800-1200ms 사이에서는 낮다.

2.3 실험

하드웨어 축소모형은 단상 100V 2kVA용량으로 제작하였다. 인버터의 스위칭소자는 IGBT 듀얼모듈을 사용하였고 전체 시스템의 제어와 펄스생성장치로는 마이크로프로세서 80C196KC를 사용하였다. 인버터 게이트펄스의 기준으로는 선전류를 사용하였고 외부인터럽트를 사용하여 PWM 펄스를 생성하도록 하였다. 그림 5는 하드웨어 축소모형의 전체 회로도를 나타낸 것이다.

표 1. 직렬보상기의 회로정수

전원 전압	100V
전원 주파수	60Hz
스위칭 주파수	3060Hz
필터용 C_f	40 μ F
필터용 L_f	5.8mH
결합용 변압기	1:1
캐패시터 C_d	170 μ F
부하 조건	30+j24.2
L_s	10.7mH

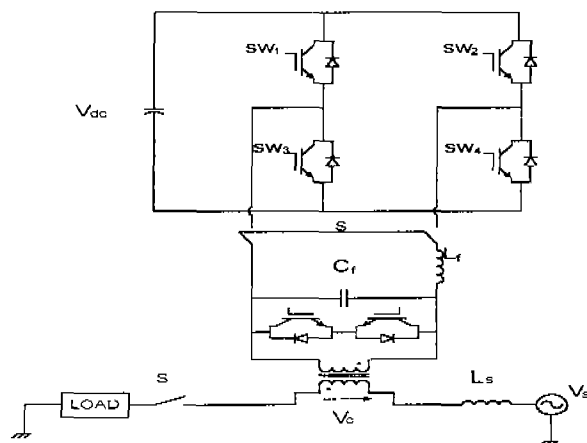
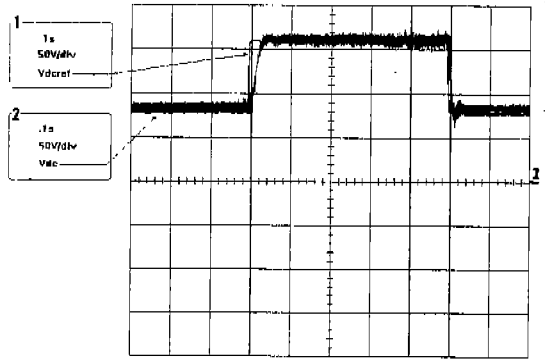
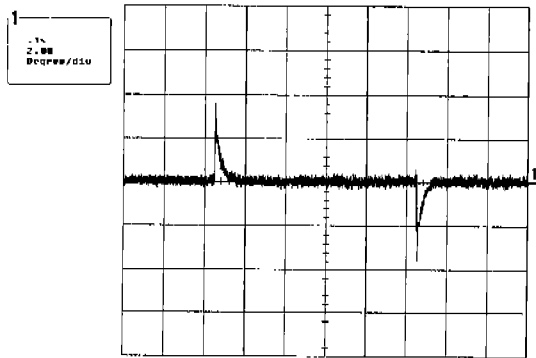


그림 5. 축소모형 전체회로도

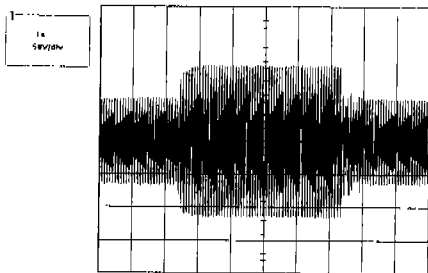
제작한 축소모형의 동특성을 관찰하기 위해 시뮬레이션과 같은 방식으로 0-500ms 사이에서 0.5p.u로 유지하고 500-1000ms 사이에서는 1.0 p.u로 상승하고 1000-1500ms 사이에서는 다시 0.5 p.u로 하강하도록 실험을 수행하였다. 여기서 직류 캐패시터 전압은 160V를 1.0 p.u로 하여 직류 캐패시터의 전압변화, 점호각의 변화, 주입전압의 변화, 선 전류의 파형을 측정된 결과를 그림 6에 보였다.



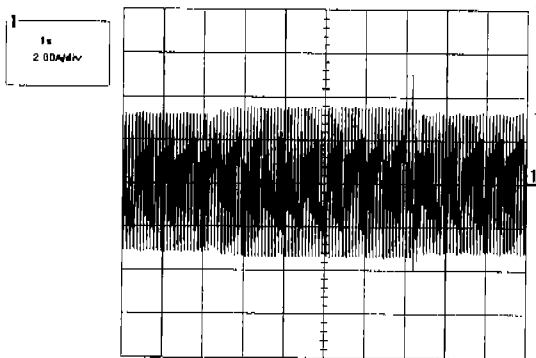
(a) 직류캐패시터 전압



(b) 점화각 α 변화



(c) 직렬보상 전압



(d) 선전류 파형

그림 6. 실험 결과

그림 6(a)는 직류캐패시터의 전압이 기준치를 추종하는 특성을 보인 것인데 정상 상태에서 160V까지 충전하여 진상 무효전력을 공급하고 다시 0.5p.u로 하강하여 진상 무효전력을 공급함을 보여주고 있다. 상태변화시 약간의 오버슈트를 가지지만 비교적 잘 추종함을 볼 수 있다. 그림 6(b)는 계통의 무효전류의 흡수와 방출을 위해 직류캐패시터 전압의 변화에 따른 점화각 α 의 변화를 보인 것이며 전류를 기준으로 정상상태동작 90° 에 대해 $+3.6^\circ$ 에서 -3.6° 로 변화하는 것을 알 수 있다. 그림 6(c)는 계통에 주입되는 보상전압의 파형을 보인 것이며, 그림 6(d)는 선 전류의 변화를 나타낸다. 실험 파형을 통해 무효전력보상기가 선로의 리액턴스를 적절히 보상하여 전송 유효전력을 증대함을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 전압원 인버터를 이용해 송전선로를 직렬 보상하는 장치를 이론적으로 고찰하고 동작과 성능을 검증하기 위해 154kV 1기 무한대 모선을 전력계통에 대해 시뮬레이션을 실시하였으며 하드웨어 축소 모형을 제작하고 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 전압원 인버터는 PWM방식으로 동작하고 변조율과 위상각을 모두 제어 가능한 것으로 하여 제어장치를 설계하였다. 실험을 통해 전압원인버터에 의한 직렬보상기는 선로의 리액턴스를 적절히 보상함으로써 전송 유효전력의 증대를 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] N. G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE SPECTRUM pp.40-45, April, 1993.
- [2] E. W. Kimbark, "Improvement of system stability by switched series capacitor", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-85, Feb. 1966.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 한 병문, 백승택, "인버터식 무효전력보상기에 의한 송전선로의 직렬보상특성해석", 대한전기학회, 전력계통연구회 97' 춘계학술회의, 서울대, 1997. 5. 31.