

다중브리지 PWM 인버터로 구성된 SSSC의 동특성 분석

배병렬, 박상호, 하요철, 김희중, 한병문, 김현우*
명지대학교, 경민대학*

Dynamic Characteristic Analysis of Multi-bridge PWM Inverter SSSC

B.Y. Bae, S.H. Park, Y.C. Ha, H.J. Kim, B.M. Han, H.W. Kim*
Myongji University, Kyungmin College*

ABSTRACT

This paper proposes an SSSC based on multi-bridge inverters. The dynamic characteristic of the proposed SSSC was analyzed by EMTP simulation and a scaled hardware model, assuming that the SSSC is inserted in the transmission line of the one-machine-infinite-bus power system. The proposed SSSC has 6 multi-bridge inverters per phase, which generates 13 pulses for each half period of power frequency. The proposed SSSC generates a quasi-sinusoidal output voltage by 90 degree phase shift to the line current. The proposed SSSC does not require the coupling transformer for voltage injection, and has a flexibility in operation voltage by increasing the number of series connection.

1. 서 론

GTO를 이용한 인버터식 FACTS 기기는 전력계통의 조류제어, 과도안정도증대, 저주파공진감쇠 등에 탁월한 효과가 기대되어 선진국에서 많은 연구가 진행되고 있다[1]. SSSC는 선로에 직렬로 삽입되어 선로양단에 걸리는 전압을 직접 제어하는 기능을 갖는다[2][3].

SSSC에 사용되는 인버터는 STATCOM에서와 마찬가지로 동작전압을 높이기 위해 다수의 GTO를 직렬로 결합한 스위치로 구성되어 있다. 그런데 GTO 소자의 직렬운용은 대단히 난이하고 직렬운용이 가능한 소자수에도 많은 제약이 따른다. 따라서 전력계통과 원만한 결합을 위해 강압변압기를 사용하는 것이 보편적이다.

소자의 직렬운용을 피하기 위해 처음으로 고안된 것이 다중레벨 STATCOM 이다. 그러나 다중레벨인버터는 출력전압의 형성이 복잡하고 많은 역결합 다이오드를 필요로 한다. 이러한 단점을 보완하고자

Peng은 한 상당 5개의 단상 풀브리지로 구성된 다중브리지 STATCOM을 제안하고 그 동작과 특성을 축소모형을 통한 실험으로 분석하였다[4][5].

본 논문에서는 한 상당 6개의 단상 풀브리지로 구성된 다중브리지 SSSC를 제안하고 동작원리와 특성을 설명하였으며, EMTP를 이용한 게이트신호발생, 제어기구성, 시뮬레이션회로, 시뮬레이션결과에 대해 상세히 기술하였다[6]. 또한 축소모형을 제작·실험하여 특성을 확인하였다.

2. 다중브리지 SSSC

2.1 다중브리지인버터

본 논문에서는 다중브리지를 이용하여 SSSC의 인버터를 구성하였으며, 그림 1은 다중브리지로 구성된 SSSC의 한 상에 대한 구성을 보여준다. 그림 1에서 보듯이 다중브리지인버터는 6개의 단상 풀브리지 인버터로 구성되어 있다.

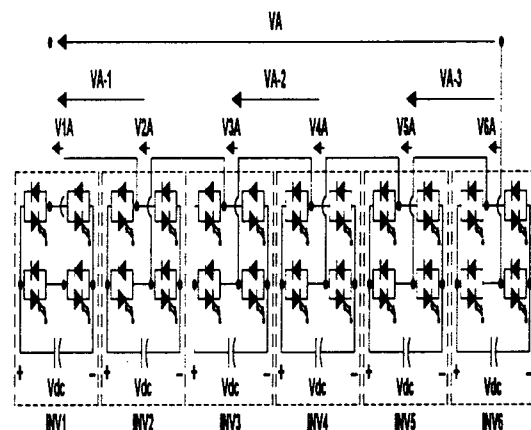


그림 1 다중브리지 SSSC
Fig. 1 Multi-Bridge SSSC

2.2 시스템 구현

현재 개발된 GTO소자를 이용하여 다중브리지인버터를 구현할 때 그림 1의 INV1 단상 폴브리지 인버터에서 GTO소자의 직렬운용을 하지 않고 실제로 구현할 수 있는 정격은 다음과 같다.

- 정격 DC 전압 : $V_{dc} \approx 5kV$
- 정격 출력전압 크기 : $V_o \approx V_{dc} \approx 5kV$
- 정격용량 : $S \approx 1/2 \cdot V_{dc} \cdot 2kA \approx 5MVA$

위의 경우 실제로 FACTS 장비에 적용하기엔 낮은 정격이다. 따라서 직렬운용이 불가피한데 직렬운용에는 소자의 직렬운용과 인버터 자체의 직렬운용이 있으며, 본문에서 제안한 6개의 단상 폴브리지 인버터로 구성된 다중브리지인버터의 정격은 다음과 같다.

- 정격 DC 전압 : $6 \cdot V_{dc} \approx 30kV$
- 정격 출력전압 크기 : $V_o \approx V_{dc} \approx 30kV$
- 정격용량 : $S \approx 3 \cdot V_{dc} \cdot 2kA \approx 30MVA$

위의 다중브리지인버터의 정격 출력전압(V_o)의 크기는 154kV 송전선로 상전압의 33.74%에 해당하며 실제 송전선로에 적용되는 FACTS 장비의 동작전압을 만족시키기에 충분하다.

2.3 EMTP 시뮬레이션

다중브리지 PWM 인버터로 구성된 SSSC의 동작 특성을 분석하기 위해서 EMTP를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

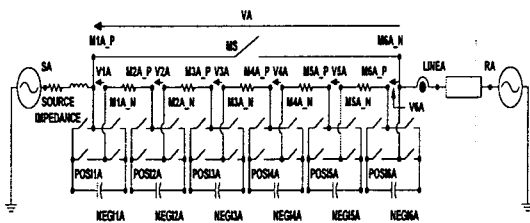


그림 2 시뮬레이션 모형
Fig. 2 Simulation Model

그림 2에서 보여지는 시뮬레이션 모형은 한 상에 해당하며 각 상이 같은 형태로 구성되어 있다. 송전단과 수전단 사이에 다중브리지인버터가 삽입되어 있고 다중브리지인버터와 수전단 사이에 선로 인덕턴스를 삽입하였으며, 선로 인덕턴스는 집중 선로정수로 모델링 하였다.

시뮬레이션에서 사용된 회로정수는 표 1에 나타나 있으며 시뮬레이션상의 모든 값은 표 1에 있는 기준값을 바탕으로 pu값으로 환산하여 나타내었다.

표 1 시뮬레이션 회로정수

Table 1 Simulation parameters

Base 전압	154[kV]
Base 용량	400[MVA]
전원 주파수	60[Hz]
선로 인덕턴스	1.56[pu]
송·수전단 위상차(전력각)	30°

2.3.1 시뮬레이션 제어기

다중브리지 PWM 인버터로 구성된 SSSC의 제어기가 그림 3에 나타나있다. 그림에 보여지는 제어기는 3상 다중브리지인버터의 경우 각 상이 캐패시터를 공유하지 않기 때문에 각상 분리 제어를 하고 있음을 보여준다.

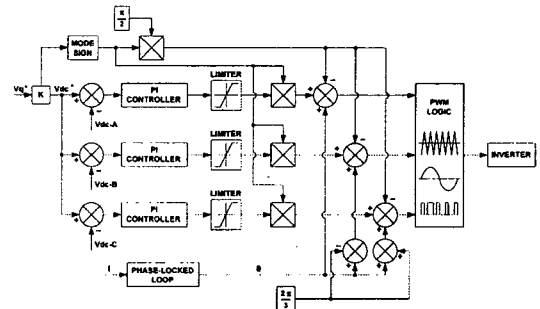
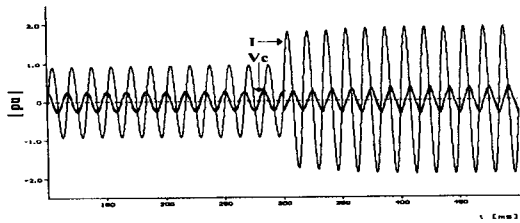


그림 3 시뮬레이션 제어기
Fig. 3 Control diagram

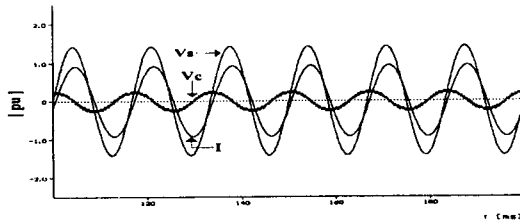
제어기의 동작은 선로 전류를 측정하여 Phase-Locked Loop에 의해서 선로 전류에 동기된 θ 를 발생하고 이 θ 는 각 상에 맞게 재조정된다. V_q^* 는 개인과 곱해져서 V_{dc}^* 를 생성하고 각 상별로 DC Link 캐패시터 전압을 Feedback 받아 PI-Controller를 거쳐서 나온 신호는 Limiter에서 적당한 동작범위의 값으로 제한되어 출력된다. 이 때 DC Link 캐패시터의 실측치는 그림 1에서 보여지는 다중브리지인버터를 구성하는 6개의 단상 폴브리지 인버터의 DC Link 캐패시터 전압의 평균값이고 V_{dc}^* 는 0.045pu이다. PI-Controller의 출력 신호는 V_q^* 의 부호를 나타내는 Mode Sign과 곱해진다. Mode Sign은 SSSC의 C-Mode와 L-Mode의 경우 DC Link 캐패시터 전압을 제어하는데 있어서 동일 PI-Controller의 출력을 이용하여 각 모드에서 정확한 동작을 하기 위한 것과 C-Mode와 L-Mode에서 SSSC가 주입하는 전압의 위상을 C-Mode에서는 전류보다 90° 뒤지게, L-Mode에서는 전류보다 90° 앞서게 하는 역할을 동시에 수행한다. 시뮬레이션 상에서 Mode Sign의 값은 C-Mode시 1, L-Mode시 -1이다. 3상 선로 전류에 동기된 신호와 DC Link 캐패시터 전압을 제어하기 위한 신호 그리고 각 Mode별 SSSC 주입전압의 위상을 결정하는 신호가 조합되어 최종적으로 인버터 게이트신호 로직에서 주입전압의 레퍼런스 신호를 발생하는데 사용된다.

2.3.2 시뮬레이션 결과

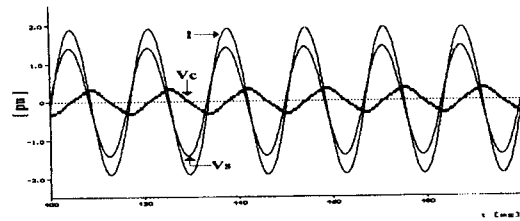
시뮬레이션 시나리오는 최초 50ms동안 그림 2에서 나타난 MS 스위치는 on상태이고 각 상의 다중브리지인버터의 스위치들은 off상태로 있으며 SSSC는 동작을 하지 않는다. 50ms~300ms동안 Mode Sign은 -1로 설정되어 SSSC는 L-Mode로 동작을 하며, 300ms~550ms사이에는 Mode Sign이 1로 설정되어 C-Mode로 동작을 한다. 시뮬레이션 결과는 그림 4에 나타나 있다.



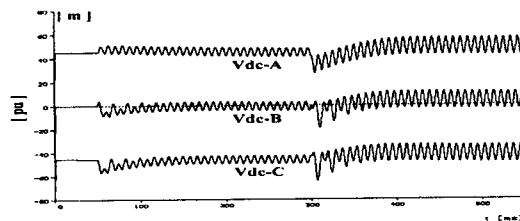
(a) 인버터 주입전압(V_c)과 선로전류(I)



(b) L-Mode시 전원전압(V_s), 인버터 주입전압(V_c), 선로전류(I)



(c) C-Mode시 전원전압(V_s), 인버터 주입전압(V_c), 선로전류(I)



(d) DC Link 캐패시터 전압

그림 4 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation results

그림 4(a)는 L-Mode에서 C-Mode로의 천이과정에서 인버터 주입전압과 선로전류를 나타낸 것으로서 천이과정의 반주기 내에 이루어짐을 알 수 있다. 그림 4(b)는 L-Mode시 전원전압과 인버터 주입전압·선로전류를 나타낸 것으로 이때 SSSC는 0.82pu의 유도성 리액턴스와 같이 동작한다. 그림 4(c)는 C-Mode시 전원전압·인버터 주입전압 그리고 선로전류를 나타낸 것으로 이때 SSSC는 0.51pu의 용량성 리액턴스와 같이 동작한다. 그림 4(d)는 그림 3의 제어기에서 쓰이는 DC Link 캐패시터 실측치를 나타낸다.

2.4 축소모형 실험

다중브리지인버터로 구성된 SSSC의 동작 특성을 분석하기 위해 축소모형을 제작하여 실험하였다. 인버터의 스위칭 소자는 MITSUBISHI사의 CT60AM-18 IGBT single-type 24개를 사용하였고, 전체 시스템의 제어와 펄스생성 장치로는 TMS320C31 DSP와 Lattice사의 EPLD를 사용하였다. 인버터 게이트 펄스의 기준신호는 선전류를 사용하였고 기준 선전류를 $\pm \theta$ 의 각도로 변화시켜서 단상 풀브리지 인버터의 게이트 펄스를 생성하였다. 그림 5는 축소모형 회로도를 나타낸 것이다. 축소모형은 기본적인 다중브리지 SSSC의 동적특성을 분석하기 위해서 단상으로 제작하였고 향후 3상으로 제작할 예정이다. 다중브리지 SSSC는 그림 5와 같이 풀브리지 인버터 6개로 구성하였고 시뮬레이션 모형과 같이 각각의 인버터는 DC Link 캐패시터를 분리 제어한다. 표2는 축소모형 회로정수를 나타낸 것이다.

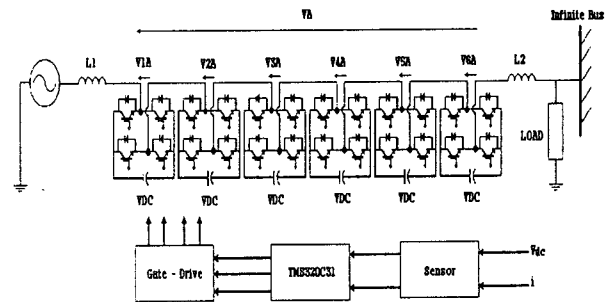
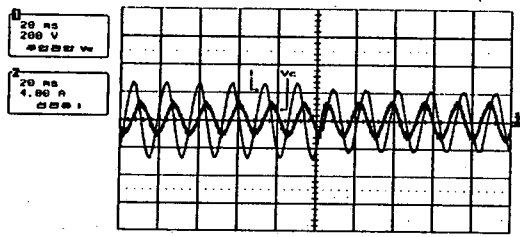


그림 5 축소모형 회로도

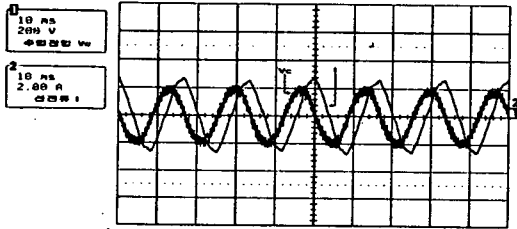
Fig. 5 Scaled model

표 2 축소모형 회로정수
Table 2 Hardware parameters

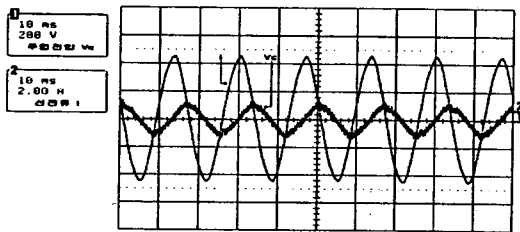
전원전압	200[V]
선로모형 L1	15[mH]
선로모형 L2	28[mH]
부하	50[Ω]
DC Link 캐패시터	2200[μF]



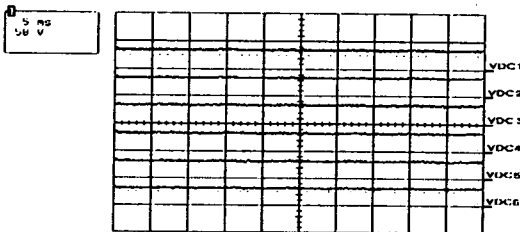
(a) 인버터 주입전압(V_c)과 선로전류(I)



(b) 인버터 주입전압과 선로전류 (L-Mode시)



(c) 인버터 주입전압과 선로전류 (C-Mode시)



(d) DC Link 전압

그림 6 실험결과

Fig. 6 Experiment results

그림 6은 축소모형 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 C-Mode에서 L-Mode로의 천이과정시 인버터 주입전압과 선로전류를 나타낸 것으로서 천이과정이 빠른 것을 알 수 있다. 동작천이시간은 1600ms동안은 C-Mode로 동작하다가 1600ms후에는 L-Mode로 동작하도록 설정하였다. 그림 6(b)는 L-Mode시 인버터의 주입전압과 선로전류를 나타낸 것으로서 이때 SSSC는 유도성 리액턴스와 같이 동작을 한다. 그림 6(c)는 C-Mode시 인버터 주입전압과 선로전류를 나타낸 것인데 이때 SSSC는 용량성 리액턴스와 같이 동작한다. 그림 6(d)는

플브리지 인버터의 DC Link 캐패시터 전압을 나타낸 것이다. 각각의 전압이 거의 균등함을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 다중브리지로 구성된 SSSC의 동특성을 EMTP 시뮬레이션과 축소모형 실험으로 분석한 결과에 대해 기술하였다. 제안하는 다중브리지 SSSC는 전력계통에서 요구되는 동작전압에 따라 브리지의 수를 가감하여 용이하게 구성할 수 있으며 주입용 변압기가 없이 선로에 직접 연결이 가능하다.

본 논문의 기여는 주입용 변압기 없이 선로에 직접 결합이 가능한 SSSC를 제안하고 진지상 보상 특성과 천이 특성을 시뮬레이션으로 확인하여 향후 실제 하드웨어 개발시 요구되는 분석기술을 제시한 것이다.

본 논문은 한국과학재단의 특정기초 연구비 지원에 의하여 수행된 결과의 일부임 (98-0101-09-01-3)

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Laszlo Gyugyi, Colin D. Schauder, Kalyan K. San, "Static Synchronous Series Compensator : A Solid-State Approach to The Series Compensation of Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997.
- [3] Kalyan K. Sen, "SSSC-Static Synchronous Series Compensator : Theory, Modeling, and Applications", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 13, No.1, January 1998.
- [4] F. Z. Peng and J. S. Lai, "A Multilevel Voltage- Source Inverter with Separate DC Sources for Static Var Generation," IEEE/IAS Annual Meeting. pp. 2541~2548, Orlando, FL, Oct. 8-12, 1995.
- [5] F. Z. Peng and J. S. Lai, "Dynamic performance and control of a static var compensator using cascade multilevel inverter," IEEE/IAS Annual Meeting. pp. 1009~1015, San Diego, CA, Oct. 6-10, 1996.
- [6] B. Han, G. Karady, J. Park, S. Moon, "Interaction Analysis Model for Transmission Static Compensator with EMTP", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998.