

## 스위칭 함수를 이용한 3상 인버터의 특성 해석

백수현, 김 용, 맹인재, 박철현\*

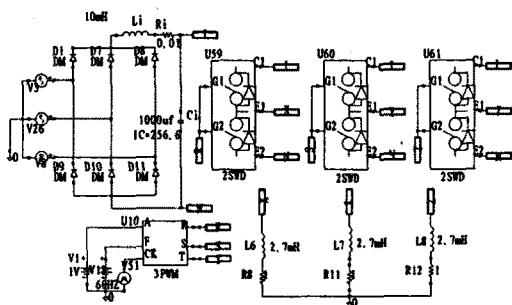
동국대학교 전기공학과

### Characteristic Analysis of Three-phase Inverters Using Switching Function

Soo-Hyun Baek, Yong Kim, In-Jae Maeng, Cheol-Hyun Park  
Dong-Guk Univ.

**Abstract** - Static power converters can be analyzed by means of available circuit simulation software packages such as PSPICE. This paper proposes the macro models developing technique for three-phase power converters using the transfer function approach.

Also, these models are based on converter switching functions rather than actual circuit configuration. In this approach, VSI(Voltage Source Inverter) and CSI(Current Source Inverter) are simulated as multiport networks avoiding nonlinear macromodels of the power switches.



## 1. 서론

현재, 산업전반에 걸쳐 회로 해석 전문 소프트웨어인 PSPICE가 널리 이용되고 있으며, 특히 전력전자 용용분야에서 피이드백 제어를 포함한 컨버터회로, 전력용 스위치(디바이스) 등의 해석과 설계에 유용하게 활용되고 있다.

그러나, 시뮬레이션 실행시 수렴문제와 긴 실행시간등과 같은 문제점이 발생하므로, 이런 문제점을 보완하기 위해서는 스위칭소자와 컨버터 모델을 단순화시킬 필요가 있다.

따라서, 본 논문에서는 전달함수와 스위칭함수 개념을 도입하여 컨버터 회로를 최적으로 단순화시킬 수 있는 매크로 모델을 제안하였다. <sup>[1, 2, 3]</sup> 입력과 출력 포트에 전압 제어 전압원과 전류 제어 전류원만을 포함하는 다중 포트 회로로서 컨버터회로를 모델링할 수 있는 VSI, CSI 컨버터 모델의 스위칭함수 <sup>[2, 4]</sup>를 정의하고자 한다.

## 2. 시뮬레이션 레벨

### A. 스위치와 컨버터 회로 모델에서 시뮬레이션

일반적으로 어떤 시스템을 매크로 모델링하기 위해서는 여러 회사들이 제공하는 라이브러리 파일을 이용하고 있으나, 시뮬레이션 실행시 시스템레벨과 컨버터회로에서의 매크로 모델링은 다음과 같은 이유로 인해 실용적이지 못하다.

1) 다이오드, 바이폴라 트랜지스터와 같은 스위칭 소자들은 일반적으로 컨버전스 문제에 따른 많은 데이터의 양과 지수 항을 포함한 함수로 인하여 비선형 제어원으로 표현되기 때문에 실행시간이 오래 걸린다는 문제점을 발생시킨다.

2) 복잡한 컨버터회로의 정확한 모델링은 많은 디바이스와 구성요소로 인해 시뮬레이션 실행시 많은 시간이 소비된다.

또한 컨버전스 문제가 발생할 가능성은 디바이스수에 따라 증가하므로 기본 파라미터와 디바이스 모델은 위와 같은 단점을 보완하기 위하여 조정되어져야만 한다.

그림1. 내부의 단순화된 스위치 매크로 모델을 이용한 정현펄스포 3상 VSI 인버터

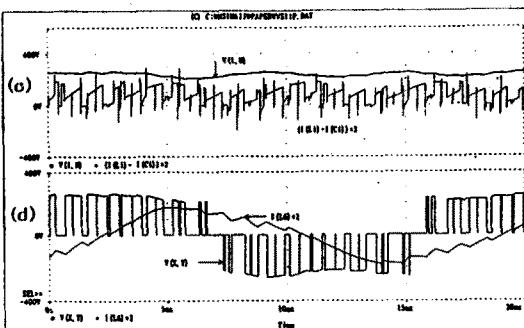
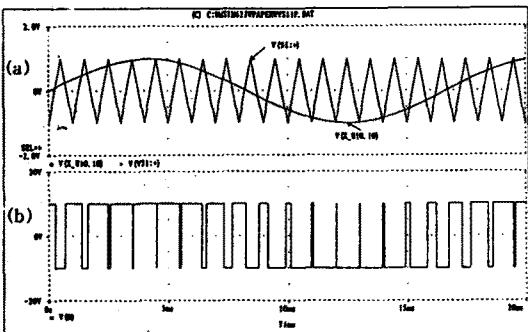


그림2. VSI 시스템의 시뮬레이션 결과

- (a) 정현펄스 발생
- (b) 2-레벨 스위칭 함수의 출력파형
- (c) DC링크 커�패시터 전압과 VSI 입력전류
- (d) 선간전압, 출력 선전류

#### B. 시스템 테스트

다중 컨버터 시스템에서 시뮬레이션은 단순화된 스위칭 모델조차도 오랜 계산시간이 걸리므로 컨버터 모델을 좀 더 단순화시킬 필요가 있다.

컨버터의 정확한 모델은 시뮬레이션 수준에서 요구되지는 않으나, 각 컨버터는 다중포트 네트워크으로 구성하여 시뮬레이션을 수행하므로, 구성된 포트의 입·출력단에서 전류와 전압의 해석 시간이 주된 과제로 된다.

다중 포트 회로망의 전달함수는 쉽게 ABM(Analog Behavioral Modeling)<sup>[1, 2]</sup>을 사용함으로써 PSPICE상에서 시뮬레이션이 가능하다.

#### 3. 컨버터 모델 및 시뮬레이션 결과

##### A. 전달함수

VSI, CSI의 해석 모델은 컨버터의 전달함수 개념을 이용하였으며, 비선형 다중 포트 회로망 컨버터는 DC, AC 그리고 제어포트로 구성된다.

DC와 AC포트는 동작모드에 의존하는 입·출력이라 할 수 있으며, 제어포트는 입력으로만 사용된다.

전달함수는 DC 입·출력과 AC 입·출력변수사이의 순시적 관계를 나타낸다.

일반적으로 컨버터는 전류와 전압, 전달함수로 구성되며, 모든 제어포트에서 동일한 스위칭함수에 의해 정의된다.

##### B. 스위칭함수

그림3은 제어입력포트로부터 출력된 2-레벨과 3-레벨 스위칭함수( $S_{\text{ab}}$ )의 신호를 나타낸다.

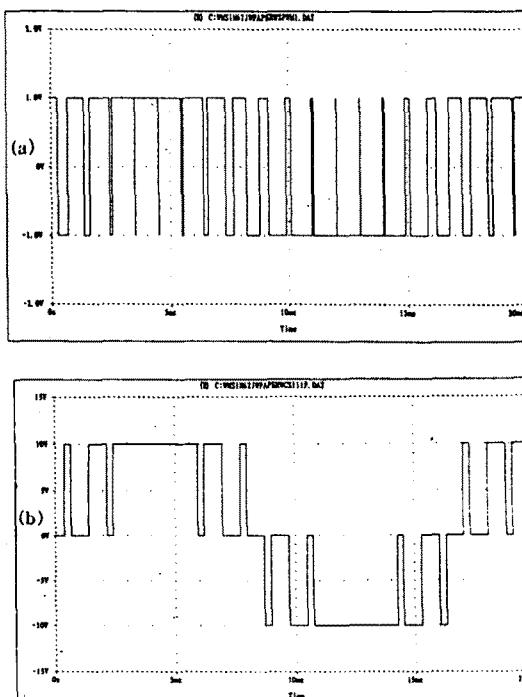


그림3. 일반적인 스위칭 함수

- (a) 2-레벨 ( $S_{\text{ab}}$ )
- (b) 3-레벨 ( $S_{\text{ab}}$ )

2-레벨  $S_{\text{ab}}$ 는 AC 출력 leg 전압발생을 위해 사용하였으며, 3-레벨  $S_{\text{ab}}$ 는 CSI(Current-Controlled Inverters)내에 AC 출력 선전류 발생을 위해 사용되었다.

컨버터내에 어떠한 기생소자와 손실도 존재치 않는다는 가정하에서 스위칭함수의 개념을 적용함으로써 컨버터들의 다양한 형태의 함수적 표현이 가능하게 되었다.

#### C. 전압원 인버터 모델(Voltage Source Inverter (VSI) Model)

VSI내에 출력전압은 스위칭 함수에 의해 정의된 시간 간격 동안에 입력 대 순시 출력 선전류와 출력 대 순시 입력전압을 동시에 나타냄으로써 발생된다. 이러한 2개 과정들은 다음 식들에 의해 공식화하여 표현할 수 있다.

벡터적 형태

$$\text{출력(AC)} : \vec{V}_{\text{output}}(t) = V_{\text{input}}(t) \cdot \vec{S}_{\text{ab}}(t) \quad (1)$$

$$\text{입력(DC)} : I_{\text{input}}(t) = \vec{I}_{\text{output}}(t)^T \cdot \vec{S}_{\text{ab}}(t) \quad (2)$$

여기서  $\vec{V}_{\text{output}}(t) = [V_a(t) \cdot V_b(t) \cdot V_c(t)]^T$  는

3상 출력 순시전압을 포함하는 벡터이고,

$\vec{I}_{\text{output}}(t) = [I_a(t) \cdot I_b(t) \cdot I_c(t)]^T$  는

3상 출력 순시 선전류를 포함하는 벡터이다.

또한,  $V_{\text{input}}(t)$ 과  $I_{\text{input}}(t)$ 는 각각의 순시 입력전압과 전류(DC량)이고,

$\vec{S}_{\text{ab}}(t) = [S_a(t) \cdot S_b(t) \cdot S_c(t)]^T$ 는 컨버터의 각leg에 2-레벨 스위칭함수를 포함하는 벡터이다.

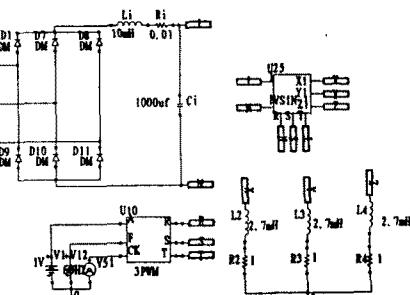


그림4. ABM을 이용하여 매크로 모델링한 정현펄스 3상 VSI 인버터

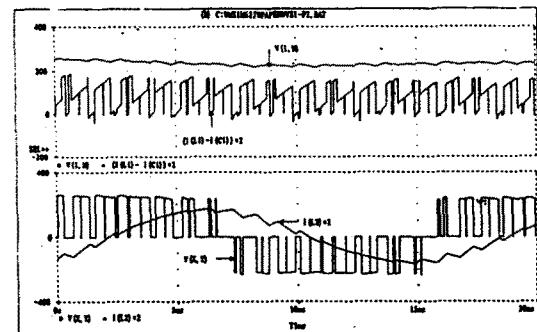


그림5. ABM을 이용하여 매크로 모델링한 정현펄스 3상 VSI 인버터 시뮬레이션 결과

표 1. 3상 전압원 인버터의 시뮬레이션 시간

MODEL	Time
스위칭 매크로 모델을 이용한 정현펄스 3상 VSI 인버터 (그림1)	483.18 sec
ABM을 이용하여 매크로 모델링한 정현펄스 3상 VSI 인버터 (그림4)	59.81 sec

정현펄스폭 모들레이터(부회로 3PWM.LIB)는 3상을 발생하기 위해 2-레벨 스위칭함수를 사용하였고 변조지수와 주파수는 Vmag(magnitude) 와 Vfreg(frequency)전압값을 변화시켜 결정하였다.

그림4에 Schematic 화일을 나타내었으며, 표1은 그림1과 그림4의 VSI시스템의 실행시간을 계산한 것이다. 이 결과로부터 알 수 있는 것은 메크로모델링한 컨버터를 사용함에 따라 실행시간이 단축되었음을 알 수 있었다.

그림5는 입력파형을 나타낸 것으로 그림2의 컨버터 메크로 모델의 경우와 일치함을 알 수 있다.

#### D. 전류원 인버터 모델 (Current Source Inverter (CSI) Model)

CSI의 전달함수는 상대성(duality)원리를 적용함으로써 식(1)과(2)로부터 구할 수 있다.

$$\text{출력(AC)} : \tilde{I}_{\text{output}}(t) = I_{\text{input}}(t) \cdot \tilde{S}_3(t) \quad (3)$$

$$\text{입력(DC)} : V_{\text{input}}(t) = \tilde{V}_{\text{output}}(t) \cdot \tilde{S}_3(t) \quad (4)$$

여기서  $\tilde{S}_3(t)$ 는 컨버터의 각 라인에 대한 3-레벨 스위칭함수를 포함하는 백터이다.

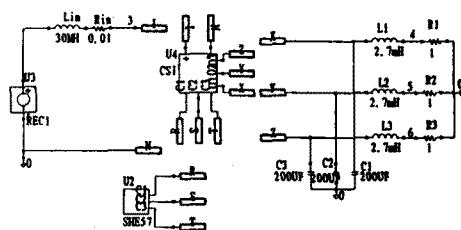


그림6. SHE(Selective Harmonic Elimination)기법을 적용한 CSI 인버터

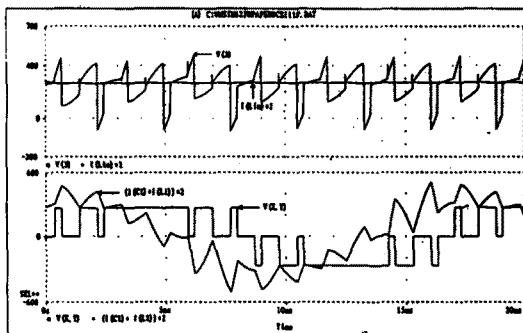


그림7. SHE(Selective Harmonic Elimination)기법을 적용한 CSI 인버터의 시뮬레이션 결과

그림6에서 SHE57은 CSI의 제어모듈을 나타낸다. 이 모듈은 인버터의 출력전류에 포함된 5차, 7차 고조파 제거를 위한 3상 3-레벨 PWM 스위칭함수를 발생한다. 그림6은 PSPICE 상의 Schematic 화일을 나타낸 것이며, 그림7은 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 필요로 되는 메모리 용량과 실행시간을 최적화하고, 3상 컨버터회로를 컴퓨터 시뮬레이션을 시행할 경우 발생하는 PSPICE상의 컨버터스 문제를 보완하기 위하여 적절한 모델을 구성하였다.

시스템레벨에서는 3상 VSI, CSI를 시뮬레이션하기 위한 메크로 모델링을 제작하였으며, 이를 모델은 컨버터 일·출력 변수들에 따라 구해진 결과의 정확도에 영향을 미치지 않고 계산시간이 크게 감소하였으며, 또한 피드백 제어루프를 가진 컨버터 시스템의 시뮬레이션에도 적합함을 알 수 있다.

#### REFERENCES

- [1] PSPICE Manual CA : Microsim Corp.
- [2] E. P. Weichman, P. D. Ziogas and V. R. Stefanovic, "Generalized functional model for three phase PWM inverter/rectifier converters," Conf. Rec. IEEE IAS'85, pp. 984-993, 1985.
- [3] P. D. Ziogas, E. P. Wiechman and V. R. Stefanovic, "A computer aided analysis and design approach for static voltage source inverters," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-21, pp. 1234-1240, Sept/Oct. 1985.
- [4] A. I. Maswood, "Computer Application in the analysis of rectifiers and inverters", IEE Proc. Electr. Power Appl. Vol. 142, No. 4, July 1995.