

전압형 전력 변환기 비선형 모델 및 전류제어기 조정

박상영\*  
LG산전 빌딩시스템 연구소

Non-Linear Model of Voltage Source Power Converter and Tuning Current controller

Park.Sang-Young\*  
LG Industrial System Building system Lab.

**Abstract** - In this study Dead time equivalent resistance of Voltage source power converter is very important in current controller design. And Non-linear Modeling method can be applied in Power converter analysis. Using Describing Function method and Non-linear Resistance Modeling, Voltage Source Power Converter Bode diagram and Current controller analysis method are more reality.

1. 서 론

최근에는 전압원형 전력 변환기[1]를 인버터 입력단에 사용하는 기술이 많이 사용되고, 실제로 전력회사들이 요금 선정 시에도 전원 고조파 문제 때문에 이러한 전력 변환기를 요구하는 경우도 발생하고 있다. 그리고, 6펄스형 전력변환기 자체에 대해서는 그 근원적인 모형에 대한 문제 제기를 하지 않는 경향이 있는데, 그런데, 전력 변환기를 설계하고 사용하는 입장에서 보면, 지금까지의 연구를 통해 많은 문제를 해결하였지만, 아직 근본적인 연구는 시작 단계에 불과하다고 생각한다. 대표적인 예로 아래의 문제를 제기할 수 있다.

- (1) 최근에 소프트 웨어적인 데드타임 보상을 하는 경우외에 아예 데드 타임 자체를 제거하려는 노력[3]이 있으며, 실제로 제거되는 경우 전력변환기 측의, 고유치나 제어 측면의 이론적인 해석의 준비가 필요하다.
- (2) 전력 변환기 자체가 비선형인데 제어기 설계는 선형이라고 가정하고 실시한다. 따라서, 비선형 부분이 얼마나 영향을 주며, 모형 오차에 대한 언급이 너무 약하다.
- (3) 전력 변환기의 안정도 해석을 위해서는 고유치를 연산해야 되는데 고유치에 비선형(소자 손실, 철손, 데드타임 등) 항이 많이 포함되어 있다. 따라서, 고유치 해석전에 이러한 비선형성을 어떠한 방식으로 선형 모형에 반영시킬 것을 결정해야 한다.

일단, 본 연구에서는 고유치 해석의 전단계로서 전력 변환기의 비선형성을 Dead-zone과 포화 요소로 나누어 선형화는 기술할수 없을 통해, 연구하고, 보드 선도법을 사용하여, 기존의 방법과 비교를 실시하였다. 특히, PWM 정류기의 경우에 회생시와 모터링 시의 모형의 변경과 보드 선도를 확인하였고, 인버터에서 전동기를 제어하는 경우에 모형 변경 방법을 연구하였다.

전력 변환기의 비선형성을 선형화하는 다른 방법으로 비선형적인 소자의 손실과 데드타임 등을 등가 저항으로 표현하는 경우에서의 안정도 문제를 연구하였다.

2. 본 론

2.1 기존의 문제점

전압형 전력변환기는 구조상 직류측에 콘덴서, 교류측에 리액터로 구성되며, 이러한 구조 때문에 직류측의 단락 방지가 필요하다. 이러한 단락 방지 자체를 최근에 와서 하지 않는 방법[3]이 연구되고 있으며, 실험실 수준에서는 성공하고 있는 것으로 파악되고 있다. 이러한 방식을 상업적으로 적용하기 위해서는 다음의 것이 선행 연구되어야 한다.

- (1) 데드타임이 기존의 시스템의 안정성에 끼치는 영향 해석
- (2) 데드타임이 없어짐으로서 발생하는 기타의 악영향
- (3) 과도 상태나 고장시에서 파괴 모드의 변형 확인 등이다.

일단, 본 연구에서는 데드 타임이 기존의 시스템의 안정성에 주는 영향 해석에서 극히 기초적인 모형해석에 초점을 맞추었다.

데드 타임의 영향은 그림1과 같이 나타난다. 즉, 전류의 극성에 따라 오차 전압이 변한다.

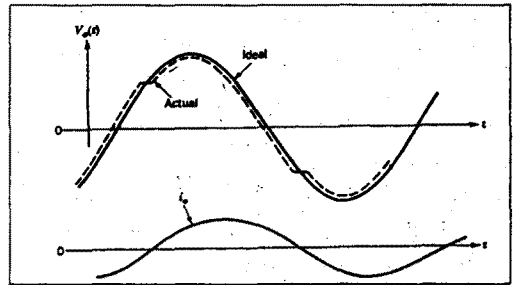


그림1. 데드타임 효과

2.1.1 전류 제어기 모형의 비선형성

비선형 제어이론[2]에 의하며, 전압형 전력 변환기의 비선형성은 일종의 비선형 증폭기로 분류되며,

- (1) Dead-zone : 입력이 있어도, 출력이 없는 영역이 있는 증폭기
- (2) 포화 : 입력이 커져도, 출력이 더 이상 커지지 못하는 증폭기로 표현된다.

그리고, 일반적인 전압형 변환기(6pulse)의 특성상

- (1) 소자 단락 방지를 데드타임 : 출력 전압이 전류의 극성에 따라, 변화됨.
- (2) 소자의 스위칭 및 도통 손실 : 흐르는 전류와 직류측 전압에 따라 변화됨
- (3) 철손 : 전력변환기에 입력에 리액터가 달린 경우 리액터의 내부 철손까지 모형에 표현됨. 단순 저항으로도 표현 가능(3조파,5조파 등이 있음.)

(4) PWM 전압자체의 고차 하모닉 문제 : PWM 변조인 경우에는 출력 전압자체가 완전한 형태의 함수 등가가 어렵다. 특히, 저차(3조파, 5조파)항이 필연적으로 발생된다.

### 2.2 비선형모형의 선형화 해석

보드 선도 해석이 필요한 경우에는 비선형 시스템의 입력과 출력의 관계를 급수로 해석하여 그 기본과 성분으로 해석을 실시한다. 사용되는 급수에는 일반적으로 푸리에 급수를 사용하며, 이러한 방법을 기술 함수법이라고 한다.

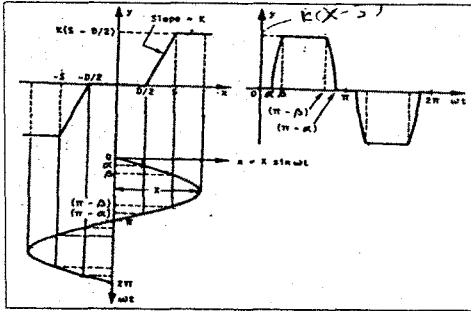


그림 2 Dead-zone과 포화 비선형의 sin 응답

#### 2.2.1 기술 함수법으로 전력 변환기(역률 = 1) 표현

역률이 1인 경우에는 단상 반 브리지 형 PWM 정류기의 경우를 해석하는 경우에는 출력 전압과 전류의 위상이 동일하므로 매우 간단하게 해석이 가능하다.

(1) 회생시 경우: 출력 전압이 그림 2와 유사한 형태가 되며, 실제로 포화가 발생할 가능성이 높다. dead-zone의 값은 deadtime / pwm값이 된다.

(2) 모터링 시의 경우: dead-zone이 그림2의 y축으로 이동되며, 포화가 발생할 가능성이 적다.

회생의 푸리에 기본파의 cos항 계수는 영이고, sin항 계수는 포화가 되지 않는 경우에는

$$A_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin \omega t - D/2) \sin \omega t d(\omega t) \quad (1)$$

모터링시는 전압이 추가되므로

$$A_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin \omega t + D/2) \sin \omega t d(\omega t) \quad (2)$$

의 식의 형태로 표현 된다.

#### 2.2.2 기술 함수법으로 전력 변환기(역률 < 1) 표현

이 경우도, 회생 시와 모터링 시로 구분되며, 다만, 푸리에 급수 상의 cos항의 성분이 발생된다. (참고:역률 = 1에서는 cos항 = 0) 일반적인 인버터의 전동기 제어기 이러한 경우에 해당되며, 전류의 극성에 따라, 데드영역의 위치가 이동되며, 여기에 다시 모터링과 회생에 따라 변화한다. 본 연구에서는 이 부분의 해석을 제외하고 그림만을 설명한다.

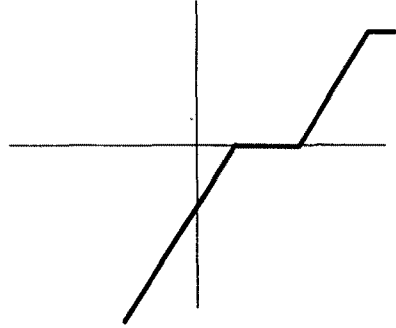


그림 3. 모터링 시 인버터 측 비선형 기술함수

#### 2.2.3 비선형의 저항 모델 방법

실제로 PWM 전력 변환기의 고유치를 해석하기 전에 행렬의 형태를 보면, 교류측의 직렬 저항 성분이 행렬의 대각항(diagonal)에 있어서, 저항 성분이 없거나 작은 경우에, 시뮬레이션시 시스템이 발산하는 경우까지 생긴다. 따라서, 임의로 저항항을 크게 하거나, 좋은 수치 적분방법을 선택해야 낮은 저항값에서도 시뮬레이션이 가능하다. 이러한 원인에 대한 수치적분상의 해석은 본 연구에서 제외하고, 이러한 저항성분의 비선형 모형 분류만을 하였다. 전력 변환기 상에서의 교류측 직류 저항 성분은 다음과 같이 분류된다.

- (1) 리액터의 손실 : 교류측 상 (per-phase) 등가
- (2) 스위칭 소자의 손실항의 교류측 표현 : 전력변환기의 손실 = 3 x 평균전류<sup>2</sup> x 등가 저항

(3) Dead-time 영향의 전압/전류 동위상 성분 : (데드타임 전압손실 + 소자 전압강하) = 등가 저항 x 평균 전류

(3)의 경우를 조금 더 설명하면, 역률이 '1'이 아닌 경우에는 조금 더 복잡한 문제가 생기지만, 전류가 흐르는 경우에는 데드타임 만큼의 전압 강하와 스위칭 소자의 필연적인 전압강하가 발생되어, 마치 전류의 흐름을 항상 방해하는 쪽으로 (=시스템에서의 댐핑을 크게하는 쪽으로) 작용한다. 따라서, 완전히 선형적인 저항으로 등가 될 수는 없지만 (전류가 변화 해도 일정전압) 시스템 해석의 측면에서는 저항으로 작용된다. 다만, 전기 회로적으로는 중속 직류 전압원으로 해석되는 것이 타당하다.

### 2.3 실제 시스템 해석 결과

전류제어기의 개루프 차단 주파수가 1000rad/sec (160Hz)인 시스템의 해석결과를 가지고 지금까지의 비선형성을 보완해서 다시 해석을 실시하였다.아래의 경우는 저항성분을 무시한 기존의 일반적인 해석방법이다. 해석 후 가장 큰 문제는 이득의 경우 문제가 없지만, 위상은 -180도로 개루프 제어가 불가능하다.

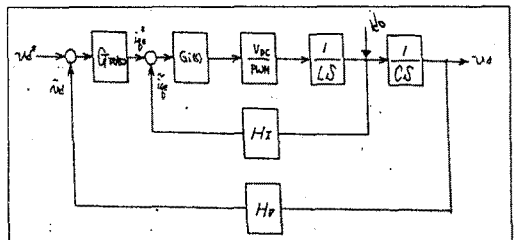


그림 3. 선형화/간략화된 제어기 블록도

전류제어 루프의 응답성은

$$\frac{i_{ge}}{i_{ge}^*} = \frac{sk_p + k_i}{s} \cdot \frac{V_{DC}}{PWM} \cdot \frac{1}{Ls} \cdot Hi = \frac{1011.3s + 404520.96}{s^2} \quad (3)$$

으로 나타난다.

그리고 보드 선도는 다음과 같다.

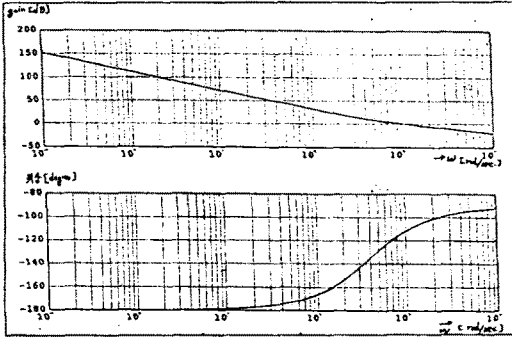


그림 4. 저항성분/ 비선형성 무시한 전류제어기 보드도

### 2.3.1 역률=1에서의 비선형 모델 해석 결과

식 (1)(2)를 반영하여 식(3)을 변형하면 식(4)로 나타난다.

$$\frac{i_{ge}}{i_{ge}^*} = \frac{sk_p + k_i}{s} \cdot \frac{V_{DC}}{PWM} \cdot K \cdot \frac{1}{Ls} \cdot Hi \quad (4)$$

그리고 그 결과를 보드선도로 그리면, 다음과 같다.

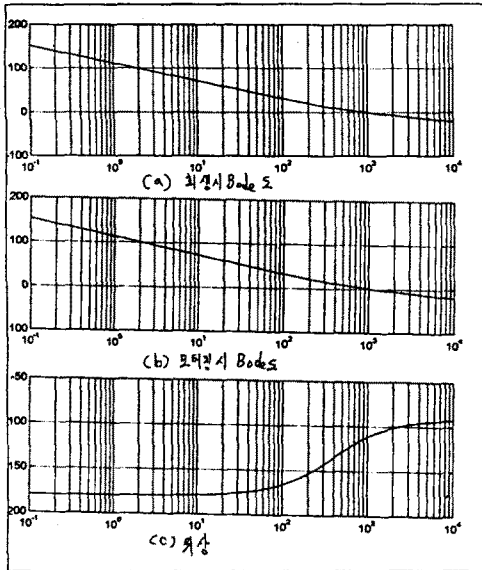


그림 5. 비선형 모델에서의 보드도

보는 바와 같이 개루프 차단 주파수 자체가 약간 변동하는 것을 확인할 수 있다.

### 2.3.2 역률=1에서의 비선형 모델 해석 결과(저항 추가)

위의 경우에서 저항 성분을 포함하여 다시 해석을 실시할 수 있다. 현재 시스템에 맞게 저항 성분을 다시 연산하면,

- (1) 철손 및 동손 : 0.1W
- (2) 컨버터측 총 스위칭 손실 : 500W(전류=100A)  
 $W = 3 \cdot I^2 \cdot R_s, R_s = 0.016$
- (3) 데드타임 등가 저항 :  $R_{dead} = V_{dead}/I_{ave}$   
 $0.3 = 30/100$

총 등가 저항은 = 0.416

을 보드 선도에 추가하여 다시 보드선도를 그렸다.

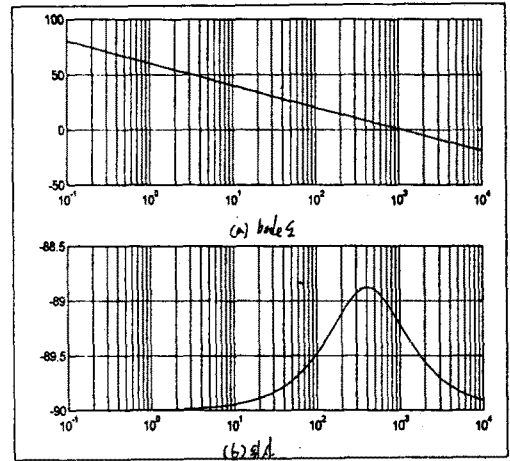


그림 6.저항항이 추가된 보드 선도

그림 4,5와의 차이는 위상이 90도 지연으로 나타나고 있으며, 실제로도 이러한 정도가 되어야지 제어 가능하지 -180도라는 값 자체는 현실적이지 못한 값이다.

## 3. 결 론

이러한 연구로 데드 타임 등가 저항이 시스템 해석시 전체 저항에서 차지하는 비중이 매우 크며, 좀더 정확한 해석을 위해서는 전력변환기에서의 교류측 저항항에 자세한 연구가 대한 필요하다는 것을 보드선도 해석으로 입증하였다. 향후의 연구 방향은 다음과 같다.

- (1) 전동기 구동시의 비선형성 고려한 고유치 해석
- (2) 컨버터에서의 데드타임을 제거 시 안정도 해석

### (참 고 문 헌)

- [1] LG산전 연구소, "3상 PWM Converter(탐색 연구 보고서)", 1996.2
- [2] John Van de Vegte, "Feedback control systems", Prentice-Hall, pp399-417, 1990
- [3] B.K.Bose, "Bate/Gate drive suppression of inactive power devices of a voltage-fed inverter and precision synthesis of ac voltage and dc link current waves", IEEE IECON 93, pp1034-1040, 1993