

## NPC 인버터를 위한 새로운 전류제어 기법

이 병 송 · 김 길 동 · 변 윤 섭 · 한 영 재 · 박 현 준  
한국철도기술연구원

### A New Current Controlled PWM technique for NPC Inverter

Byung-Song Lee · Gil-Dong Kim · Yeun-Sub Byun · Young-Jae Han · Hyun-June Park  
Korea Railroad Research Institute, KRRRI

#### Abstract

A new current controlled PWM technique with NPC structure is proposed in this paper. A current controlled PWM technique with neutral-point-clamped pulse-width modulation inverter composed of main switching devices which operates as switch for PWM and auxiliary switching devices to clamp the output terminal potential to the neutral point potential is described.

The proposed current controller has a first and second current band. The switching pattern will be made by the first current band. According to the second current band, the output state of the switching pattern is changed into positive and negative state.

This inverter output contains less harmonic content and lower switching frequency than that of conventional current controlled PWM technique at the same current limit. Two inverters are compared analytically and the performance is investigated by the computer simulation.

#### 1. 서론

PWM(Pulse-width-modulation) 인버터로 구동되는 소용량의 서보 시스템이나, Traction System과 같은 교류 서어보 시스템의 적용분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 관점에서 다양한 PWM 기법들이 개발되어왔으며, 특히, NPC 구조를 가지는 PWM 인버터는 소자에 인가되는 DC 전압을 저감시킬 수 있는 장점 및 연산에 의한 스위칭 패턴

의 기법을 적용함으로써 전압파형의 개선을 기하여 고조파를 감소시키고, 손실을 저감하기 위한 PWM 스위칭 기법으로써 제안되었다.[1]

또한, 전압 파형의 개선은 물론, 공간전압 스위칭 기법을 적용하여 효율적인 스위칭 기법을 적용함으로써 이용전압의 적용범위를 확장할 수 있는 기법이 제안되었다.[2] 그러나, NPC 구조를 이용한 이들 제안된 스위칭 기법들은 스위칭 각을 계산하여 특정 고조파 성분을 제거하기 위한 연산과정을 필요로 하거나, 스위칭 패턴의 선정시 스위칭 벡터를 선택적으로 선정하여야 하는 복잡한 제어구조를 가지고 있는 단점이 있다.

본 논문은 제안된 히스테리시스 전류 제어기를 NPC 인버터 구조의 교류 전동기 시스템에 적용함으로써 기존의 NPC 구조를 가지는 인버터 시스템의 단점을 개선하고, 구동 시스템의 토크 특성개선 및 손실의 원인이 되는 고조파 성분을 감소시키기 위한 기법을 제안하였다. 기존의 히스테리시스 전류제어기를 전동기 시스템에 적용할 경우 인버터의 스위칭 소자에 인가되는 전압의 스트레스가 NPC 인버터를 적용할 경우와 비교하여 2배로 인가되고, 이에 따른 주어진 전류 제한범위 내에서의 급격한 전류의 변화 특성은 고속의 스위칭 특성을 가지게 되므로 인버터의 스위칭 소자도 빠른 스위칭 특성을 가지는 소자를 필요로 하게 된다.[3] 그리고, NPC 구조를 가지는 인버터의 특성은 기존의 인버터 구조와 비교하여 스위칭 소자에 인가되는 전압이 1/2배로 되어 소자의 전압 스트레스가 감소하는 특성이 있으나, 전압 파형의 개선 및 고조파 성분의 제거를 위한 스위칭 패턴을 연산하여 제어하는 복잡한 과정을 필요로 한다.

본 논문에서는 기존의 인버터에 히스테리시스 전류 제어기를 가지는 구동 시스템과 NPC 구조를 가지는 인버터의 특성을 비교하여 이들 두 가지 종류

의 인버터가 가지는 장점을 이용한 제안된 구동 시스템을 교류 전동기에 적용하여 전압 파형을 개선하였다.

이 결과 시스템의 손실로 존재하는 고조파 성분을 감소시키는 것은 물론 히스테리시스 전류제어기의 동등한 전류제한 범위 내에서 스위칭 주파수를 50%로 저감 시킴으로써 고전압 및 고전류특성을 가지나 최대 스위칭 주파수의 제한에 기인하여 히스테리시스 전류제어기의 적용에 제한을 받는 대용량 시스템의 스위칭 소자에도 적용범위를 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 제안된 알고리즘을 기존의 히스테리시스 전류제어기와 비교하고, Matlab, Simulink Tool의 시뮬레이션을 통하여 개선된 인버터시스템 특성을 입증하였다.

## 2. NPC 인버터의 구조 및 스위칭 모드

NPC 인버터 구조는 그림 1과 같고, 스위치 (S11,S14), (S21,S24), (S31,S34)는 출력전압을 제어하기 위한 PWM을 발생하는 주 스위치로 동작하는 스위칭 소자이고, 스위치(S12,S13), (S22,S23), (S32,S33)는 다이오드(D11-D33)와 함께 출력 측 단자의 전위를 DC 전원에 독립적인 중성점 전위 (0)로 유지시키기 위한 보조적인 역할을 하는 보조스위치이다.

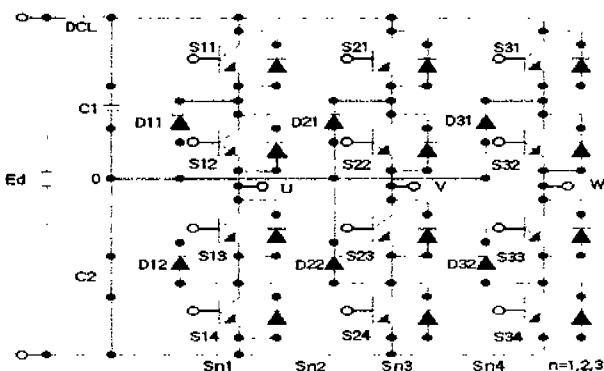


그림 1. NPC 인버터 구조

본 연구에서는, 그림 1과 같은 기존의 NPC 인버터에 히스테리시스 전류제어기(Hysteresis Current Controller)의 출력신호를 적용함으로써 기존의 NPC 인버터에서 적용했던 고조파 성분의 선택적인 제거를 위한 연산과정이나, 이들 결과를 룩업 테이블 방식으로 처리하여 스위칭 패턴을 구성하는 기법에서 탈피하여 자동적으로 스위칭 패턴을 구성할 수 있는

장점을 적용한다. 그러므로, 제안된 기법은 기존의 NPC 인버터의 기본적인 구조를 적용하며, 한 상의 스위칭 동작은 주 스위치(S11,S14)...의 동작시에 보조 스위치 (S12,S13)는 각각 상호 반대의 스위칭 신호가 인가되어야 하고, 이러한 스위칭 신호에 따라 스위치 오프시에 출력 측 단자전위는 NPC 인버터의 중성점 전위를 유지하게 된다. HNPC 인버터의 제어는 스위치 오프시에 출력측 단자전위가 인버터 중성점전위 (0)를 유지하는 NPC 인버터가 가지는 특징을 이용하여 기존 히스테리시스 전류제어기의 전압파형 및 스위칭특성을 개선할 수 있다.

기존의 2-레벨 PWM 인버터에 히스테리시스 전류제어를 적용할 경우와 NPC 인버터에 히스테리시스 전류제어를 적용할 경우의 두드러진 차이점은 출력측 단자전압의 변화에 있다. 기존의 PWM 인버터에 히스테리시스 전류제어를 적용할 경우, 출력측 단자전압의 변화가 (+Ed/2)에서 (-Ed/2)의 사이에서 변화하게 되지만, NPC 인버터에 히스테리시스 전류제어를 적용할 경우, 출력측 단자전압의 변화는 (+Ed/2)에서 (0), (0)에서(-Ed/2)사이로 변화하게 된다.

이러한 NPC 인버터의 출력측 단자전압 변화는 기존의 2-레벨 인버터와 비교하여 출력측 단자의 선간전압파형을 개선할 수 있고, 이 결과 시스템의 손실로 작용하는 부하측 선간전압 파형의 고조파 성분을 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

그림 2는 NPC 인버터의 스위칭 모드를 나타낸 것이며, 전압벡터이론을 바탕으로 구성할 수 있다.

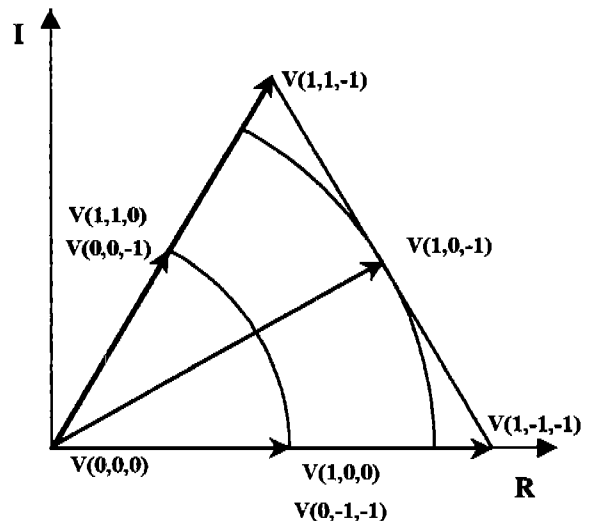


그림 2. NPC PWM 인버터의 스위칭 모드

인버터의 각 상은 4개의 스위칭 소자로 구성되며, 이들 스위칭 소자에 의한 스위칭 상태는 (+Ed/2), (0), (-Ed/2)와 같은 3개의 스위칭 상태를 발생하고, 3상의 NPC 인버터 구조에서 발생하는 전체의 스위칭 가능상태는 모두 3<sup>3</sup>개의 스위칭 상태를 발생할 수 있다.

이들 스위칭 상태에 따르는 전압벡터는 이론을 바탕으로 하여 다음 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{V} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\vec{V}_{w0} + a \cdot \vec{V}_{w1} + a^2 \cdot \vec{V}_{w2}) \quad (1)$$

이들 스위칭 상태를 그림 2와 같이 위상각 구간  $\frac{\pi}{3}$  간격으로 나누어서 생각하면 NPC 구조의 PWM을 적용할 경우 전체 스위칭 벡터에서 A, B, C 그룹의 스위칭 벡터 구간으로 도출할 수 있다. 기존의 제어 구조에서는 스위칭 패턴의 선정시 저속영역의 속도 명령에서는 공간전압 벡터 다이어그램의 내부원주 A에 해당하는 스위칭 벡터를 선정하여 제어하고, 고속영역의 속도명령에서는 A, B, C 그룹에 해당하는 스위칭 벡터를 나누어서 제어해야만 하는 복잡성을 가지고 있다.

그러나 제안된 HNPC 구조는 기존의 시스템에서 속도명령에 따라 저속 및 고속의 영역에 따르는 스위칭 변화를 구분하여 제어하는 복잡한 제어구조에서 탈피하여 스위칭 패턴을 자동적으로 가변하여 제어하는 장점을 가지고 있다.

또한, 기존의 제어구조는 저속영역의 벡터다이어그램 A에 해당하는 내부원주상의 전압벡터가 하나의 쌍으로서 존재하기 때문에 스위칭 상태의 선정시 동작조건에 따라 구분하여야 하는 복잡성을 지니고 있으나, 제안된 HNPC 구조를 사용할 경우 기준전류에 따라 스위칭 상태를 가변하여 제어하므로 이들 스위칭 다이어그램 내부원주 A의 같은 위상에 존재하는 V(1,0,0), V(0,-1,-1) 등과 같은 한 쌍의 전압벡터 선정시에도 자동적으로 이를 구분하여 제어하는 특징을 지니고 있다.

### 3. HNPC PWM 인버터의 스위칭특성

그림 3은 HNPC 인버터제어의 구성모델로서 기존의 NPC 인버터의 구성에 히스테리시스 전류제어기를 부가한 시스템으로 구성된다. 히스테리시스 전류 제어기는 부하로부터 얻는 시스템의 현재상태 궤환 신호인 실제 전동기속도  $\omega_r$ 과 속도명령  $\omega_r^*$ 와의 속

도오차를 입력으로 하는 전체 시스템 제어기의 기준 신호  $I_m$ 을 최대값으로 하는 기준전류신호를 발생하며 이들의 관계식은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} i_a^* &= I_m \sin(\theta_r) \\ i_b^* &= I_m \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ i_c^* &= I_m \sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)와 같은 전체 시스템제어기로부터 발생한 기준전류신호와 전류궤환 실제전류  $i_a, i_b, i_c$ 의 오차 비교에 의한 그림 3의 인버터 모델 각상의 상위 및 하위, 보조 스위치의 스위칭 신호  $S_{n1}, S_{n2}, S_{n3}, S_{n4}$ 를 인버터에 인가하게 된다.

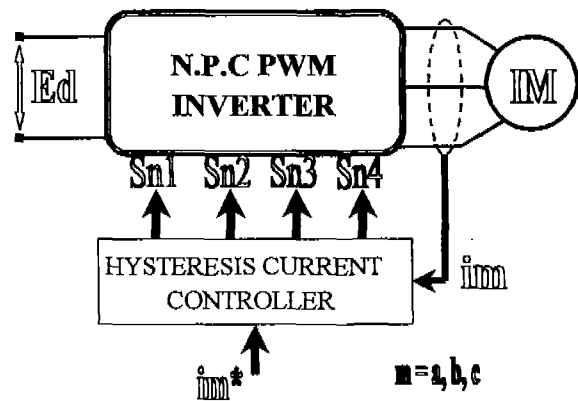


그림 3. HNPC 인버터 모델

HNPC 인버터의 스위칭 상태는 기 설정된 1차, 2차 밴드 및 궤환된 실제전류를 바탕으로 하여 2차 밴드와 실제전류의 비교에 의해서 발생하는 신호를 기준으로 하여 기준신호가 양의 값을 가질 경우와 음의 값을 가질 경우로 크게 나누어서 각 스위칭 소자의 상태를 판단하여 1차 밴드의 비교에 의해서 발생하는 스위칭 신호를 인버터의 주스위치와 보조스위치로 나누어서 인가하게 된다. 이러한 주스위치  $S_{n1}, S_{n4}$ 와 보조스위치  $S_{n2}, S_{n3}$ 의 상태는 기준 신호에 따라 구분되는 조건을 제외하고는 기존의 NPC 인버터와 같은 상태로 스위칭 상태를 가진다.

그림 4는 HNPC 인버터의 스위칭 동작을 주스위치와 보조스위치로 각각 구분하여 나타낸 것이다. NPC 인버터에 히스테리시스 전류제어를 적용할 경우 인가전압의 감소 및 역기전력의 영향에 의한 실제전류의 설정전류 제한범위의 이탈이 발생할 수 있고, 이를 제어하기 위한 2차 밴드의 설정에 의해 발생하는 기준신호명령  $U^*$ 를 기준으로 실제의 시스템

제어시 부하의 특성 및 스위칭 소자의 제어 가능한 스위칭 주파수를 고려하여 상한밴드와 하한밴드를 설정해야 한다. 그리고, 제한된 실제전류와 기 설정된 히스테리시스 밴드의 상한과 하한의 비교에 의한 스위칭 신호를 주스위치  $S_{n1}$ ,  $S_{n4}$ 와 보조스위치  $S_{n2}$ ,  $S_{n3}$ 의 동작신호로 구분하여 출력한다.

이들 각 스위치의 구분된 동작특성은 기준신호  $U^*$ 가 +를 유지하는 구간에서 주스위치  $S_{n1}$ 의 동작시 보조스위치  $S_{n2}$ 는 항상 ON상태를 유지하여야 하고, 또 다른 보조스위치  $S_{n3}$ 는 주스위치  $S_{n1}$ 과 반대의 신호가 입력되어야 한다.

또한, 기준신호  $U^*$ 가 -를 유지하는 구간에서 주스위치  $S_{n4}$ 의 동작시 보조스위치  $S_{n3}$ 는 항상 ON상태를 유지하여야 하고, 또 다른 보조스위치  $S_{n2}$ 는 주스위치  $S_{n4}$ 와 반대의 신호가 입력되도록 제어하여야 한다.

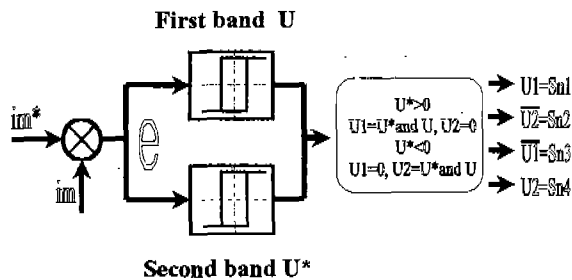


그림 4. HNPC PWM 인버터의 스위칭 동작

그리고, 상위 및 하위 스위치, 보조 스위치의 스위칭 상태는 시스템 전체의 제어기로부터 발생하는 식 (2)의 기준전류신호와 제한에 의한 실제전류의 비교로부터 발생하게 되지만 기존의 히스테리시스 전류 제어기와는 다른 스위칭 신호를 인버터에 인가하여야 하며 이들 스위칭 상태는 표 1과 같다.

표 1. HNPC 인버터의 스위칭 상태  
Table.1. Switching state of the HNPC inverter.

| Switching State. | $U^* < 0$ |          | $U^* > 0$ |          |
|------------------|-----------|----------|-----------|----------|
|                  | $S_{n1}$  | $S_{n2}$ | $S_{n3}$  | $S_{n4}$ |
| $S_{n1}$         | OFF       | ON       | OFF       | OFF      |
| $S_{n2}$         | ON        | ON       | ON        | OFF      |
| $S_{n3}$         | ON        | OFF      | ON        | ON       |
| $S_{n4}$         | OFF       | OFF      | OFF       | ON       |

이러한 규칙을 바탕으로 스위치의 동작신호를 제어함으로써 출력전압을 제어하여 PWM을 발생하고, 출력측 단자의 전위를 DC 전원에 독립적인 중성점 전위 (0)로 유지하는 특성을 가지게 되므로 기존의 히스테리시스 전류제어기를 적용할 경우의 출력전압 파형의 특성보다 우수한 출력전압 파형의 개선이 가능하고, 소자에 인가되는 전압의 스트레스를 1/2로 저감시킬 수 있다.

그리고, 전류변화에 의한 밴드폭의 상한과 하한의 제한범위를 기준으로 하여 스위치의 ON, OFF를 제어하는 히스테리시스 전류제어기의 경우에 하나의 스위칭 소자에 인가되는 전압의 감소는 결과적으로 상 전류의 변화률도 기존의 시스템과 비교하여 감소하게 되므로 동일한 히스테리시스 밴드폭으로 전류를 제어할 경우에도 기존의 전류제어기에 비하여 감소된 스위칭 주파수를 가지게 되므로, 기존에 저전압, 저전류 및 고속의 스위칭 주파수특성을 가지는 스위칭 소자에서만 가능하였던 적용분야를 고전압, 고전류 및 낮은 스위칭 주파수를 가지는 스위칭 소자에도 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 검토

시뮬레이션은 유도 전동기를 부하로 하는 서보 시스템을 모델로 하여 시행하였다. 이 시스템 모델을 적용하여 시행한 시뮬레이션 결과는 본문에서 제안한 알고리즘을 토대로 하여 시뮬레이션 과정을 선정하고, 기존의 히스테리시스 전류제어 기법과 제안된 HNPC 전류제어 기법의 시뮬레이션 결과를 비교 검토하였다.

그림 5와 그림 6은 고속인 경우 기존의 히스테리시스 전류제어기와 제안된 HNPC 전류제어기법을 서보 시스템에 적용하였을 경우 순간전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 이들 기존의 기법과 제안된 기법의 비교 시뮬레이션 결과는 동일한 조건하의 히스테리시스 밴드[정격전류의 10%], 전압 주파수 [40Hz]로 선정하여 시뮬레이션을 시행하였다.

그림 5는 기존의 히스테리시스 전류 제어기에 의한 전압파형으로써, 그림 6의 본 논문에서 제안된 HNPC 구조를 가지는 인버터의 전압파형과 비교하던 기존의 스위칭 기법에 비하여 제안된 스위칭 기법은 앞서 서술한 바와 같이 스위칭 주파수가 약 50% 감소하는 특징을 나타내며, 스위칭시 소자에 인가되는 전압도 1/2로 감소하는 특징을 결과로 파형

의 개선은 물론 소자에 인가되는 전압의 스트레스도 감소시킬 수 있는 특징이 있음을 알 수 있다.

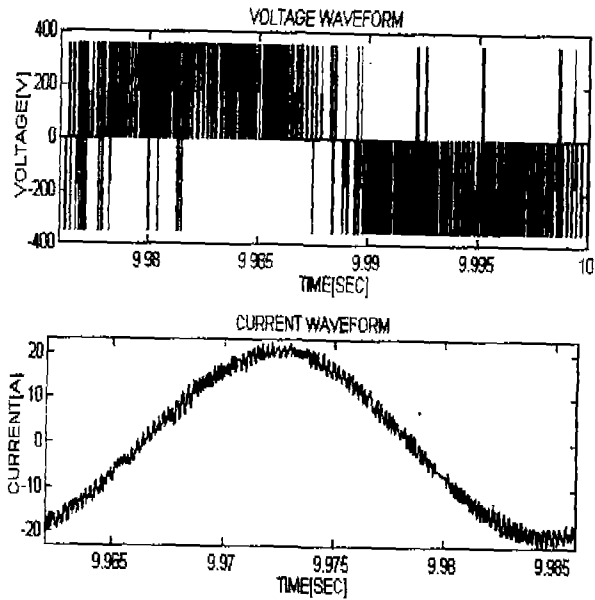


그림 5. 히스테리시스 전류제어기의 선간전압 및 전류파형 [40Hz]

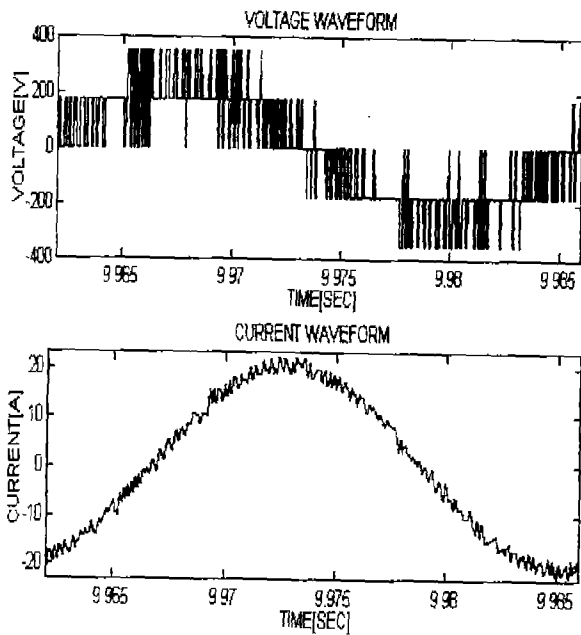


그림 6. HNPC PWM 제어기의 선간전압 및 전류파형 [40Hz]

또한, 그림 7 (b)의 PSD(power spectrum density)의 분석결과에서 나타난 바와 같이 제안된 전압 스위칭 기법은 그림 7 (a)의 PSD의 분석결과에서 나타난 기존의 히스테리시스 전류제어기를 적용한 경

우보다 감소된 고조파 성분 PSD를 나타내고 있고, 기존의 NPC 인버터의 스위칭 기법과는 달리 연산에 의한 스위칭 패턴을 선정하여 특정 고조파 성분을 제거하기 위한 복잡한 과정을 필요로 하지 않고 전압파형을 개선하여 고조파 성분을 감소시킬 수 있는 특징도 있다.

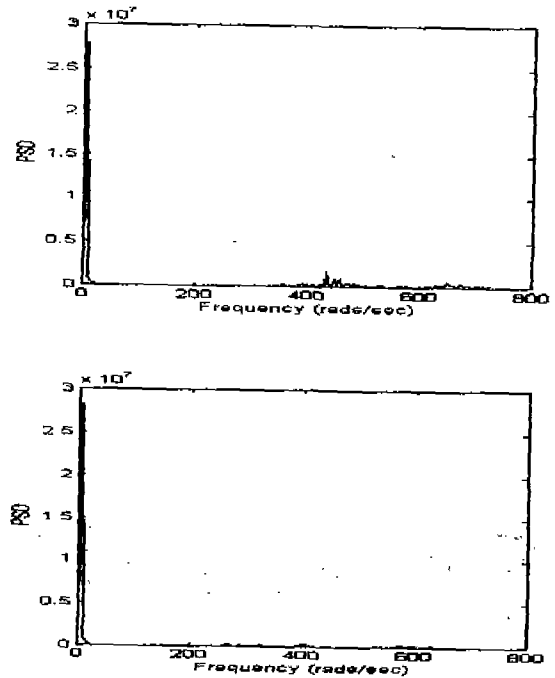


그림 7. 선간전압 고조파 스펙트럼

- (a) 히스테리시스 전류제어기
- (b) HNPC PWM [40Hz]

그림 8과 그림 9는 저속인 경우 기존의 히스테리시스 전류제어기와 제안된 HNPC 전류제어기법을 서로 시스템에 적용하였을 경우 선간전압 및 전류파형을 나타낸 것이다. 이들 기존의 기법과 제안된 기법의 비교 시뮬레이션 결과는 동일한 조건하의 히스테리시스 밴드[정격전류의 15%], 전압 주파수[8Hz]로 선정하여 시뮬레이션을 시행하였으며, PSD 해석 시 동일한 시간범위 및 동일한 데이터 수에 대한 분석을 기준으로 한다.

그림 8은 기존의 히스테리시스 전류 제어기에 의한 전압파형으로써 그림 9의 본 논문에서 제안된 HNPC 구조를 가지는 인버터의 전압파형과 비교하면 기존의 스위칭 기법에 비하여 제안된 스위칭 기법은 스위칭 주파수가 약 50% 감소하는 특징은 물론, 앞서의 스위칭 벡터도의 A 원주상의 전압벡터로서 스위칭됨으로써 동일한 출력특성상에서 공급전력이 현저히 감소함을 알 수 있다.

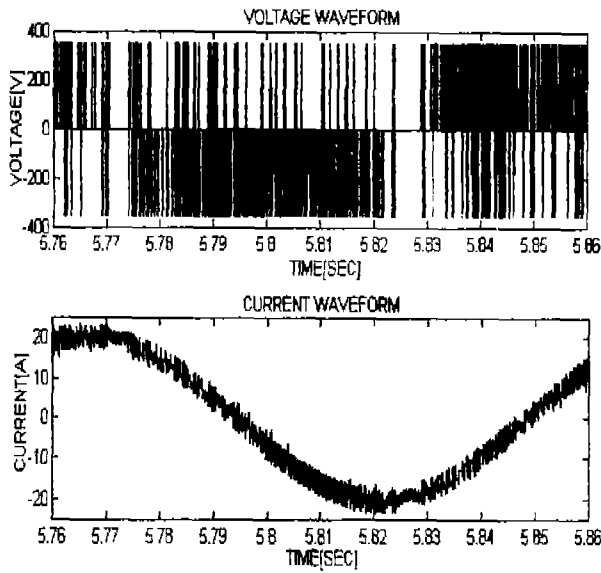


그림 8. 히스테리시스 전류제어기의 선간전압 및 전류파형 [8Hz]

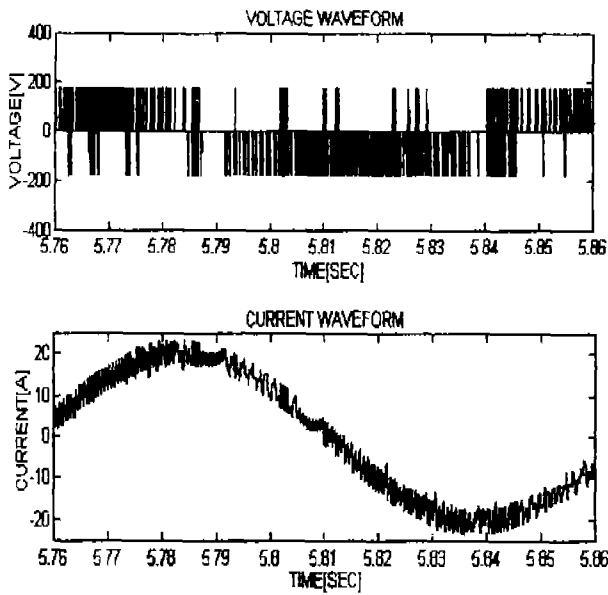


그림 9. HNPC PWM 제어기의 선간전압 및 전류파형 [8Hz]

또한, 그림 10의 PSD의 분석결과에서 나타난 바와 같이 제안된 전압 스위칭 기법은 저속영역에서 그림 10.(a)의 PSD의 분석결과에서 나타난 기존의 히스테리시스 전류제어기를 적용한 경우보다 크게 감소된 고조파 성분 PSD를 나타내는 특징이 있음을 알 수 있다.

이들 PSD 해석시 동일한 시간범위 및 동일한 데이터수에 대한 분석을 기준으로 한다.

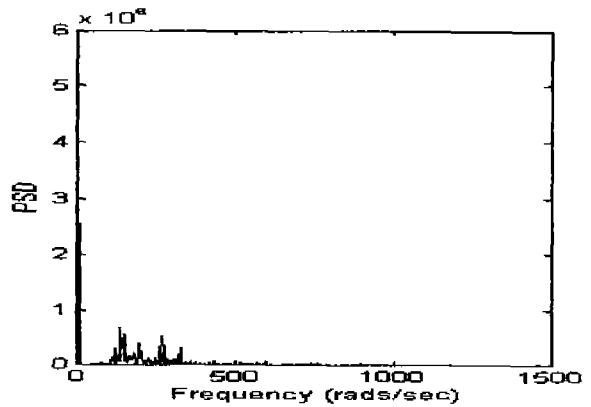
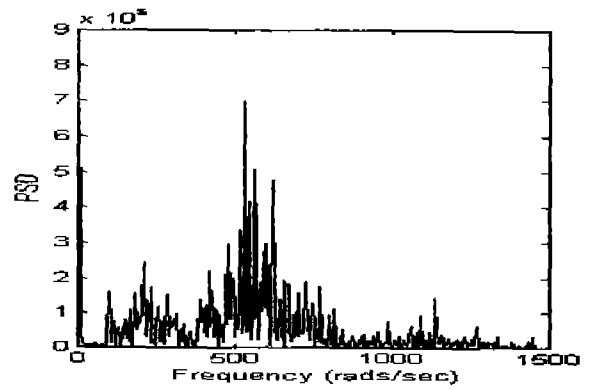


그림 10. 선간전압 고조파 스펙트럼 (a)히스테리시스 전류제어기 (b)HNPC PWM [8Hz]

## 5. 결론

본 논문에서는 기존의 히스테리시스 전류 제어기에 NPC 인버터의 구조를 적용한 HNPC PWM 인버터를 교류 전동기 시스템에 적용함으로써 전동기 구동시스템의 스위칭 특성 개선 및 손실의 원인이 되는 고조파 성분을 감소시키기 위한 기법을 제안하였다. 제안된 스위칭 기법의 향상된 특성을 시뮬레이션으로 입증하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1. 기존의 인버터에 히스테리시스 전류 제어기를 가지는 인버터구조와 NPC 구조를 가지는 인버터의 특성을 비교하여 이들 두 가지 종류의 인버터가 가지는 장점을 이용한 인버터 시스템을 교류 전동기 구동시스템에 적용하여 시뮬레이션을 시행함으로써 전압파형의 개선 효과를 입증하였다.
2. 기존의 히스테리시스 전류제어기의 인버터 구조와 비교하여 스위칭 소자에 인가되는 전압이 1/2 배로 되어 소자의 전압 스트레스를 감소시켰음

물론 동일한 출력에 대한 효율의 증가 효과를 기대할 수 있다.

3. 제안된 스위칭 기법으로 전압파형을 개선함으로써 시스템의 손실로 존재하는 고조파 성분을 감소시킴은 물론 히스테리시스 전류제어기의 동등한 전류제한 범위내에서 스위칭 주파수를 50%로 저감시킴으로써 고전압 및 고전류 특성을 가지나 최대 스위칭 주파수의 제한에 기인하여 히스테리시스 전류제어기를 적용하지 못하였던 고속철도 전인용과 같은 대용량 시스템의 스위칭 소자에도 적용범위를 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Akira Nabae, Isao Takahashi, Hirofumi Akagi  
"A New Neutral-Point-Clamped PWM," IEEE Trans. on Industry Applications, pp.518 - 523, Sept./Oct 1981.
- [2] Roberto Rojas, Tokuo Ohnishi, Takayuki Suzuki  
"Neutral-Point-Clamped Inverter with Improved Voltage Waveform and Control Range," IEEE Trans. on Industrial Electronics, pp.587-594, VOL. 42, No 6, DEC. 1995.
- [3] Akira Nabae, Satoshi Ogasawara, Akagi Hirofumi  
"A Novel Control Scheme for Current- Controlled PWM Inverters" IEEE Trans. on Industry Applications, vol.4, pp. 518-523, Jul./Aug. 1986.
- [4] Mario Marchesoni, " High-Performance Current Control Techniques for Applications Multilevel High-Power Voltage Source Inverters," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.7 No.1 pp. 81-88, Jan.1992.