

N.P.C 구조에 의한 히스테리시스 전류제어기의 전압파형 개선

김 윤 호, 이 병 송

A Hysteresis Current Controller with Improved Voltage Waveform using N.P.C Structure

Yun-Ho Kim, Byung-Song Lee

요 약

본 논문은 기존의 히스테리시스 전류 제어기에 N.P.C(Neutral-Point-Clamped) 인버터의 구조를 교류 전동기 시스템에 적용함으로써 전동기 시스템의 토크 특성의 개선 및 손실의 원인이 되는 고조파 성분을 감소 시키기 위한 기법을 제안하였다. 제안된 스위칭 기법은 기존의 히스테리시스 전류제어기를 적용하는 인버터와 비교하여 50%의 스위칭 주파수의 저감 효과를 기할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 스위칭 기법의 특성을 기존의 스위칭 기법과 비교하여 시뮬레이션을 시행함으로써 제안된 스위칭 기법의 우수성을 입증하였다.

ABSTRACT

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

This inverter output contains less harmonic content as compared with that of a conventional current controlled PWM type. In addition, the proposed current controlled PWM technique has lower switching frequency than that of conventional current controlled PWM technique at the same current limit. Two inverters are compared analytically. The improved voltage waveform of current controlled PWM with N.P.C structure is analyzed and the performance is investigated by the computer simulation.

Key Words: HNPC(Hysteresis Current control with N.P.C Inverter)

1. 서 론

현대 산업분야에서 Traction System과 같은 교류 서어보 시스템의 PWM(Pulse-width - modulation) 인버터로 구동되는 적용분야에대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 관점에서 다양한 PWM기법들이 개발되어왔다.^[1] 특히, NPC 구조를 가지는 PWM인버터는 소자에 인가되는 DC 전압을 저감시킬 수 있는 장점 및 연산에 의한 스위칭 패턴의 기법을 적용함으로써 전압 파형의 개선을 기하여 고조파를 감소시

키고, 손실을 저감하기 위한 PWM스위칭 기법으로서 제안되었다.

또한, 전압 파형의 개선은 물론, 공간전압 스위칭 기법을 적용하여 효율적인 스위칭 기법을 적용함으로써 이용 전압의 적용범위를 확장할 수 있는 기법이 제안되었다.^[2] 그러나, NPC구조를 이용한 이들 제안된 스위칭 기법들은 스위칭 각을 계산하여 특정 고조파 성분을 제거하기 위한 연산과정을 필요로 하거나, 스위칭 패턴의 선정시 스위칭 벡터를 선택적으로 선정하여야하는 복잡한 제어구조를 가지고있는 단점이

있다.

본 논문은 기존의 히스테리시스 전류 제어기에 N.P.C 인버터의 구조를 교류 전동기 시스템에 적용하므로써 기존의 NPC구조를 가지는 인버터 시스템의 단점을 개선하고, 전동기 시스템의 토오크 특성개선 및 손실의 원인이 되는 고조파 성분을 감소 시키기 위한 기법을 제안하였다. 기존의 히스테리시스 전류제어기를 전동기 시스템에 적용할 경우 인버터의 스위칭 소자에 인가되는 전압의 스트레스가 N.P.C 인버터를 적용할 경우와 비교하여 2배로 증가되고, 이에 따른 주어진 전류 제한범위내에서의 급격한 전류의 변화 특성은 고속의 스위칭 특성을 가지게 되므로 인버터의 스위칭 소자도 빠른 스위칭 특성을 가지는 소자를 필요로 하게 된다.^[3] 그리고, N.P.C 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.

그러나, 기존의 인버터에 히스테리시스 전류 제어기를 가지는 인버터구조와 N.P.C 구조를 가지는 인버터의 특성을 비교하여 이들 두가지 종류의 인버터가 가지는 장점을 이용한 인버터 시스템을 교류 전동기 구동시스템에 적용하여 기존의 히스테리시스 전류 제어기의 전압 파형을 개선하므로써 시스템의 손실로 존재하는 고조파 성분을 감소시킴은 물론 히스테리시스 전류제어기의 동등한 전류제한 범위 내에서 스위칭 주파수를 50%로 저감시킴으로서 대용량의 시스템의 스위칭 소자에도 적용범위를 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 N.P.C 구조를 가지는 히스테리시스 전류제어기를 제안하여 기존의 히스테리시스 전류제어기와 비교하고, 개선된 인버터시스템의 특성을 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

2. HNPC의 구조 및 스위칭 모드

HNPC(Hysteresis Current Controlled Neutral-Point-Clamped) 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-D32)와 함께 출력측 단자의 전위를 DC 전원에 독립적인 중성점 전위 (0)로 유지시키기 위한 보조적인 역할을 하는 보조 스위치이다.

본 연구에서는 이러한 기존의 NPC PWM 인버터에 히스테리시스 전류제어기(Hysteresis Current Controller)의 출력 신호를 적용하므로써 기존의 NPC PWM에서 적용했던 고조파 성분의 선택적인 제거를 위해 연산을 하여야하거나, 이

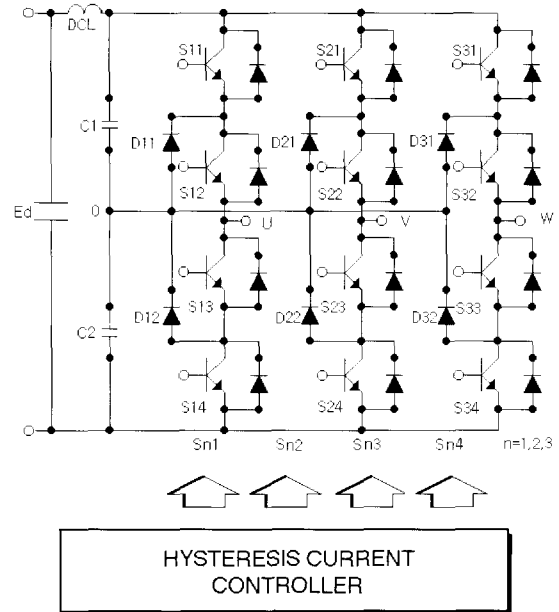


그림 1 HNPC 인버터 구조
Fig. 1 Structure of the HNPC inverter.

들 결과를 룩업 테이블 방식으로 처리하여 스위칭 패턴을 구성하는 기법에서 탈피하여 자동적으로 스위칭 패턴을 구성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 제안된 기법은 기존의 NPC PWM 인버터의 기본적인 구조를 적용하며,^[4] 한 상의 스위칭 동작은 주 스위치(S11, S14)의 동작시에는 보조 스위치 (S12, S13)는 각각 상호 반대의 스위칭 신호가 인가되어야 하고, 이러한 스위칭 신호동작에 따라 스위치 개방시에 출력측 단자전위는 NPC PWM 인버터의 중성점 전위를 유지하게 된다. HNPC PWM제어는 스위치 개방시에 출력측 단자전위가 인버터 중성점전위 (0)를 유지하는 NPC PWM 인버터가 가지는 특징을 이용함으로써 기존의 히스테리시스 전류 제어기의 전압 파형 및 스위칭특성을 개선할 수 있다.

기존의 PWM인버터에 히스테리시스 전류제어를 적용할 경우와 NPC PWM인버터에 히스테리시스 전류제어를 적용할 경우의 두드러진 차이점은 출력측 단자전압의 변화에 있다. 기존의 PWM인버터에 히스테리시스 전류제어를 적용할 경우, 출력측 단자전압의 변화가 (+Ed/2)에서 (-Ed/2)의 사이에서 변화하게되지만, NPC PWM인버터에 히스테리시스 전류제어를 적용할 경우, 출력측 단자전압의 변화는 (+Ed/2)에서 (0), (0)에서(-Ed/2)사이로 변화하게 된다. 이러한 NPC PWM 인버터의 출력측 단자전압 변화는 기존의 PWM 인버터와 비교하여 출력측 단자의 선간 전압 파형을 개선할 수 있고, 이 결과 시스템의 손실로 작용하는 부하측 선간전압 파형의 고조파 성분을 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

그림 2는 NPC PWM 인버터의 스위칭 모드를 나타낸 것이며, 공간전압벡터 이론을 바탕으로 구성할 수 있다. 각상의 인버터는 4개의 스위칭 소자로 구성되며, 이들 스위칭 소자에 의한 스위칭 상태는 $(+Ed/2)$, (0) , $(-Ed/2)$ 와 같은 3개의 스위칭 상태를 발생하고, 3상의 NPC PWM 인버터 구조에서 발생하는 전체의 스위칭 가능상태는 모두 33개의 스위칭 상태를 발생시킬 수 있다.

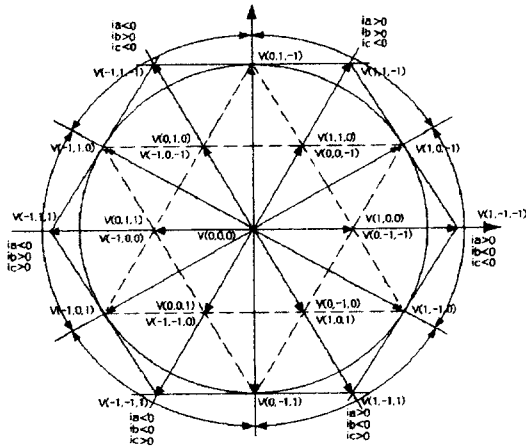


그림 2 NPC PWM 인버터의 스위칭 모드
Fig. 2 Switching modes of the NPC PWM

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

$$\vec{V} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\vec{V}_m + a \cdot \vec{V}_{m'} + a^2 \cdot \vec{V}_{m''}) \quad (1)$$

이들 스위칭 상태를 좀더 구체적으로 기술하기 위하여 그림 3과 같이 위상 각의 구간을 $\frac{\pi}{3}$ 간격으로 나누어서 생각하면 NCC RWM을 적용할 경우 전체 스위칭 벡터에서 A, B, C 그룹의 스위칭 벡터 구간으로 간략하게 도출할 수 있다. 기존의 제어 구조에서는 스위칭 패턴의 선정시 저속영역의 속도 명령에서는 공간전압 벡터 다이어그램의 내부원주 A에 해당하는 스위칭 벡터를 선정하여 제어하고, 고속영역의 속도 명령에서는 A, B, C 그룹에 해당하는 스위칭 벡터를 나누어서 제어하여야 하는 복잡성을 가지고 있다.^[2]

그러나, 제안된 HNPC PWM 구조는 기존의 시스템에서 속도 명령에 따라 저속 및 고속의 영역에 따르는 스위칭 변화를 구분하여 제어하여야 하는 복잡한 제어구조에서 탈피하여 스위칭 패턴을 자동적으로 가변하여 제어하는 장점을 가지고 있다.

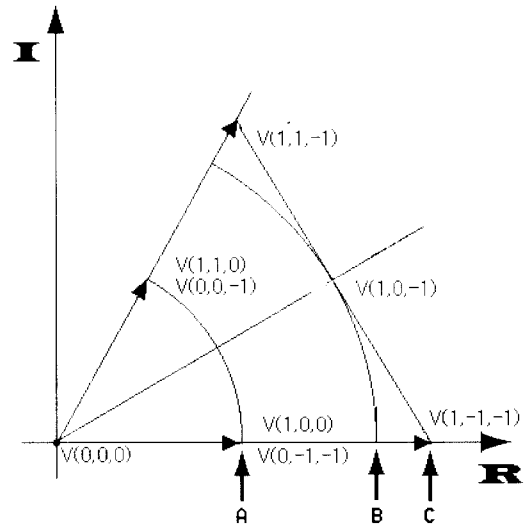


그림 3 NPC PWM 인버터의 부분스위칭 모드
Fig. 3 Partial Switching modes of the NPC PWM

또한, 기존의 제어구조는 저속영역의 벡터다이어그램 A에 해당하는 내부원주상의 전압벡터가 하나의 쌍으로서 존재하기 때문에 스위칭 상태의 선정시 동작조건의 상태에 따라 구분하여야 하는 복잡성을 지니고 있으나, 제안된 HNPC PWM을 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 한쌍의 전압벡터 선정시에도 자동적으로 이를 구분하여 제어하는 특징을 지니고 있다.

3. HNPC PWM 인버터의 스위칭특성

그림 4는 HNPC PWM 인버터의 구성모델로서 기존의 NPC인버터의 구성에 히스테리시스 전류제어기를 부가한 시스템으로 구성된다. 히스테리시스 전류제어기는 부하로부터 얻는 시스템의 현재상태 궤환신호인 실제 전동기속도 ω , 과 속도명령 ω^* 와의 속도오차를 입력으로 하는 전체 시스템 제어기의 기준 신호 I_m 을 최대값으로 하는 기준전류신호를 발생하며 이들의 관계식은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} i_a^* &= I_m \sin(\theta_r) \\ i_b^* &= I_m \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ i_c^* &= I_m \sin(\theta_r - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)와 같은 전체 시스템제어기로부터 발생한 기준전류신

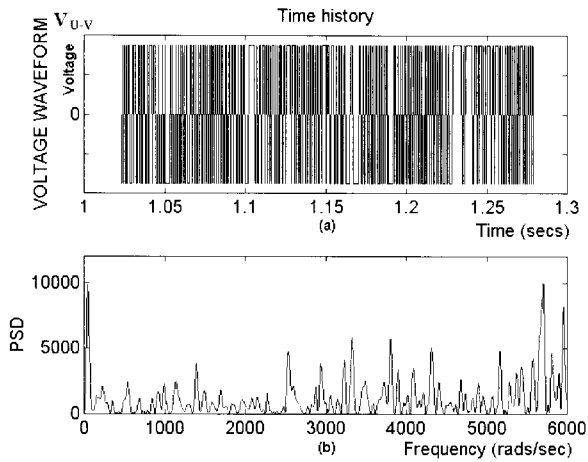


그림 8 히스테리시스 전류제어기의
 (a) 선간전압파형 (b) PSD (8Hz)
 Fig. 8 Hysteresis Current controller
 (a) Line to Line voltage waveform. (b) PSD. (8Hz)

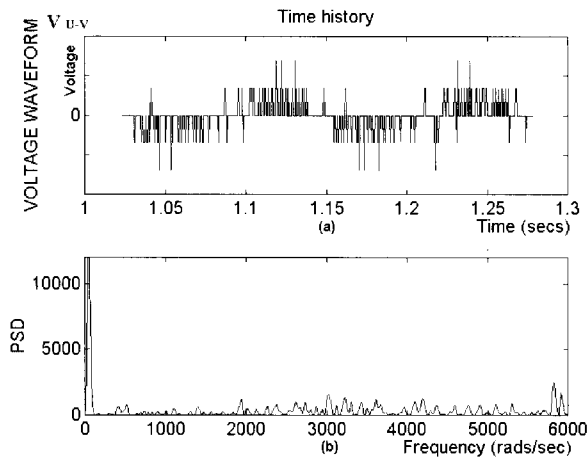


그림 9 HNPC PWM 제어기의
 (a) 선간전압파형 (b) PSD (8Hz)
 Fig. 9 HNPC PWM controller
 (a) Line to Line voltage waveform. (b) PSD. (8Hz)

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 히스테리시스 전류 제어기를 N.P.C 인버터의 구조에 적용한 HNPC PWM 인버터를 교류 전동기 시스템에 적용함으로써 전동기 시스템의 스위칭 특성 개선 및 손실의 원인이 되는 고조파 성분을 감소 시키기 위한 기법을 제안하였다. 제안된 스위칭 기법의 향상된 특성을 시뮬레이션으로 입증하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1. 기존의 인버터에 히스테리시스 전류 제어기를 가지는 인버터구조 와 N.P.C 구조를 가지는 인버터의 특성을 비교하여 이들 두가지 종류의 인버터가 가지는 장점을 이용한 인버터 시스템을 교류 전동기 구동시스템에 적용하여 시뮬레이션을 시행하므로써 전압 파형의 개선 효과를 입증하였다.

2. 기존의 히스테리시스 전류제어기의 인버터 구조와 비교하여 스위칭 소자에 인가되는 전압이 1/2배로 되어 소자의 전압 스트레스를 감소시킬 수 있는 효과를 입증하였다.

3. 제안된 스위칭 기법으로 전압 파형을 개선하므로써 시스템의 손실로 존재하는 고조파 성분을 감소시킴은 물론 히스테리시스 전류제어기의 동등한 전류제한 범위 내에서 스위칭 주파수를 50%로 저감시킴으로서 고전압 및 고전류특성을 가지나 최대 스위칭 주파수의 제한에 기인하여 히스테리시스 전류제어기를 적용하지 못하였던 고속철도 견인용과 같은 대용량의 시스템의 스위칭 소자에도 적용범위를 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Peter Vas, "Vector Control of AC Machines", 1990.
- [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] Akira Nabae, Isao Takahashi, Hirofumi Akagi "A New Neutral-Point-Clamped PWM," IEEE Trans. on Industry Applications, pp.518~523, Sept./Oct 1981.

〈 저 자 소 개 〉



김윤호(金倫鎬)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대 공대 전기 공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M 대학 졸업. 현재 중앙대 공대 전기공학과 교수, 당 학회 편집이사.



이병송(李炳松)

1988년 2월 서울산업대학 전기공학과 졸업. 1991년 2월 중앙대 대학원 전기공학과(석사). 1995년 8월 중앙대 대학원 전기공학과(박사). 현재 한국고속철도건설공단 차량연구실 선임연구원.