

종합 고조파 왜율 일정 제어를 위한 삼상 NPC PWM 인버터의 제어 기법

송 인 빈
대림 전문 대학, 전기과

The Control Technique of 3 Phase NPC PWM Inverter to control fixed Total Harmonic Distortion

Eon-Bin Song
Dept. of Electrical Eng., Dae Lim Junior College

Abstract

This paper presents a software based NPC PWM inverter control technique to eliminate the harmonics in the output waveforms of inverter. The proposed control technique is able to keep down total harmonic distortion and significantly improve the performance of the inverter. In the control mode where the frequency ratio is 36 and the modulation index is 1.2~2.0, the proposed inverter has been operated within 5% Total Harmonic Distortion.

1. 서 론

최근의 인텔리전트 빌딩에서는 건물 자동화, 사무 자동화, 정보 통신용 전원으로 무정전 전원 공급장치가 급증하고 있으며, 공장 자동화용으로 전동기 가변속 구동장치가 많이 시설되고 있다. 무정전 전원 공급장치나 가변속 구동장치는 인버터를 이용하는데, 인버터의 출력 파형에는 기본파 성분외에 고조파 성분이 함유되어 있어 근접한 통신계통, 제어계통 등 악전류 신호선에 전자유도 장애를 일으키거나 각종 계전기들의 오동작, 전동기 소음 및 토오크 맥동 등의 원인이 되고 있다.^{1),2),3)}

따라서, 배전계통에서는 이런 문제들을 없애기 위해서 종합 고조파 왜율(Total Harmonic Distortion)을 5%이내로 유지하도록 하고 있다. 종합 고조파 왜율을 낮추기 위해서, 고조파 발생원이 되고 있는 인버터 자체에서 고조파를 최대한 억제하는 것이 효과적이다. NPC(Neutral Point Clamped) PWM 인버터는 종전 PWM 인버터에 비하여 고조파 함유량을 크게 줄일 수 있는 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 사전에 인버터의 스위칭 각을 계산하지 않고 프로그램적으로 정현파와 삼각파를 만들고, 이를 비교하여 펄스 폭 변조 신호를 출력시켜 삼상 NPC PWM 인버터를 일정한 고조파 왜율 이내로 제어하는 기법을 제시하였다. 무정전 전원 공급장치나 가변속 구동장치에 효과적으로 적용하기 위하여, 여러가지 운전 모드에 대한 출력 파형에 함유된 고조파 성분을 분석하여 종합 고조파 왜율을 5%이내로 낮출 수 있음을 입증하였다.

2. NPC PWM 인버터 스위칭 기법

PWM 인버터는 펄스 폭 변조 신호를 만드는 방식이 아나로그적인 방법과 디지털적인 방법으로 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 아나로그적인 방법은 정현파인 변조파(Modulating Wave)와 삼각파인 반송파(Carrier Wave)를 비교하여 펄스 폭 변조 신호를 발생시키는 것이다. 디지털적인 방법은 먼저 특정 고조파를 제거할 수 있는 펄스 폭 변조 신호를 룩업 테이블 형태로 메모리에 저장하고, 이 신호파를 이용하여 인버터를 제어하는 것이다. 본 연구에서는 소프트웨어에 의하여 종전 아나로그 방법과 같은 형태로 펄스 폭 변조 신호를 출력시키고, 이를 이용하여 NPC PWM 인버터를 제어하였다.

유도 전동기 가변속 제어시에는 가변 전압, 가변 주파수가 필요하게 되며 PWM 인버터에서는 변조지수를 출력 주파수에 따라 변화시켜 가변전압, 가변주파수 동작을 쉽게 할 수 있으며, 주파수비를 변화시키면서 출력 파형에 포함된 고조파 성분을 줄일 수 있게 된다. 따라서, 변조지수와 주파수비를 변화시킴에 따라 여러가지 펄스 폭 변조 파형을 얻을 수 있고, 특정 고조파를 제거할 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 전동기 가변속 운전에서 이용하는 경우 정 토오크 영역에서 운전시에는 그림 1과 같이 낮은 주파수 운전시에는 주기당 펄스 수를 많이 출력되도록 변조시키고, 높은 주파수 운전시에는 주기당 펄스 수를 적게 출력되도록 하면, 고조파 왜율을 일정하게 억제하면서 효율적인 운전이 가능하게 된다. 이때 주파수비가 변하게 되는 경계에서는 전

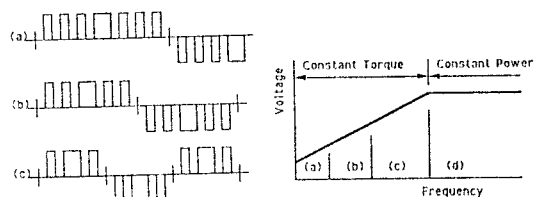


그림 1 펄스 폭 변조 패턴의 변화
Fig. 1 The Variation of PWM Patterns.

압이 갑자기 변하지 않도록 하여야 하고 그 경계에서 과도상태가 반복되지 않도록 하여야 한다. 그림 1은 유도 전동기의 일정 V/F제어의 경우에 펄스 폭 변조 패턴을 보여 주는 것이다.

그림 2는 NPC PWM 인버터의 주회로를 나타낸 것이다.

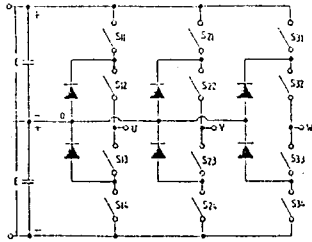


그림 2 NPC PWM 인버터의 주회로
Fig. 2 The Main Circuit of NPC PWM Inverter.

3. 고조파 특성 해석

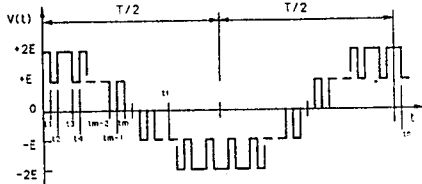


그림 3 NPC PWM 인버터의 출력 파형
Fig. 3 Output Waveform of NPC PWM Inverter.

출력전압 $V(t)$ 라 하면 $V(t)$ 는 주기 2π 이고, 한 주기내에 $n-1$ 번의 연속 구간 및 n 번의 불연속 구간을 갖는 주기함수가 되며 다음의 식으로 표시된다.

$$V_k = \frac{E}{jk\pi} (1 - e^{-jk\pi}) (-e^{-jk\pi} + e^{-jk2\pi} - e^{-jk3\pi} + \dots + e^{-jk(n-1)\pi} - e^{-jk n\pi} + e^{-jk(n+1)\pi} - e^{-jk(n+2)\pi} + \dots - e^{-jk(n-1)\pi} + e^{-jk n\pi})$$

$$= \frac{2E}{k\pi} (1 - e^{-jk\pi}) (\sin kt_1 - \sin kt_2 + \sin kt_3 - \dots - \sin kt_{m-1} + \sin kt_m) \quad (1)$$

여기서, $k=0, 1, 2, 3, \dots$

식(1)에서 k 가 우수이면 $1 - e^{-jk} = 0$ 이므로 우수차 고조파 성분은 포함되지 않는다. k 가 기수이면 $1 - e^{-jk} = 2$ 이므로 기수차 고조파 성분만 존재한다.

$$V_k = \frac{4E}{k\pi} (\sin kt_1 - \sin kt_2 + \sin kt_3 - \sin kt_4 + \dots - \sin kt_{m-1} + \sin kt_m)$$

$$= \frac{4E}{k\pi} \left| \sum_{n=1}^m (-1)^{n+1} \sin kt_n \right| \quad (2)$$

여기서, $k=2u+1, u=0, 1, 2, 3, \dots, n=1, 2, 3, \dots, m$ 이 된다.

식(2)를 보면 NPC PWM 인버터의 출력 파형에는 기수차 고조파 성분이 존재하나 스위칭 각도 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_m$ 등이 주파수비와 변조지수에 따라 달라지게 되므로 이를 조정하게

되면 고조파 성분을 제거할 수 있는 운전모드를 찾을 수 있게 된다.

인버터의 출력 파형에 포함된 고조파 성분은 펄스 폭 변조 패턴에 따라 달라지게 되므로, 인버터의 출력 파형의 고조파를 제거하면 종합 고조파 왜율(THD: Total Harmonic Distortion)은 낮아지게 된다. 여기서, THD는 다음과 같이 정의한다.

$$THD = A^2 \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{k=3}^{\infty} \left(\frac{V_k}{k}\right)^2}$$

$$= A^2 \cdot DF \quad (3)$$

여기서,

$$DF = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{k=3}^{\infty} \left(\frac{V_k}{k}\right)^2} \quad (4)$$

4. 소프트웨어에 의한 제어 시스템 구성

중전의 디지털 방식에서는 특정 고조파를 제거할 수 있는 펄스 폭 변조 형태를 직접 록업 테이블 형태로 저장하여야만 한다. 이 펄스 폭 변조 형태는 일정 V/F와 같은 가변속 응용 시스템에서 고조파 전류율을 일정 범위내에서 제어하려면 수많은 록업 테이블을 저장시켜야 하고 인버터의 출력 전압의 변화를 출력 주파수의 변화에 대응하여 선형적으로 제어하기도 어렵게 된다. 그러나, 제안한 소프트웨어에 의한 제어 기법은 기본 데이터를 이용하여 프로그램에 의하여 변조파와 반송파를 만들고, 이 둘을 비교하여 여러가지 펄스 폭 변조파들을 출력시키도록 하고 있다. 종전 아나로그 방식과 같이 인버터의 출력전압의 변화를 출력 주파수의 변화에 대응하여 선형적으로 제어하기가 용이하다. 따라서 일정 V/F 제어 응용의 경우에 주파수비와 변조지수를 바꾸는 제어신호에 의하여 여러가지 펄스 폭 변조 형태를 다양하게 하여 고조파 전류율을 낮출 수 있으며, 선형적인 제어로 가변속 구동 시스템을 효율적으로 운용할 수 있는 특징이 있

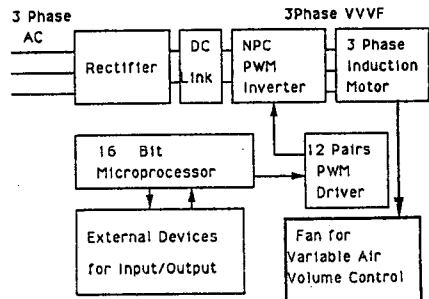


그림 4 인버터의 제어부 구성도

Fig. 4 The Configuration of Control Part.

다. 그림 4는 인버터의 제어부 구성도를 나타내고 있다. 변조지수나 주파수비를 바꾸기 위한 제어신호는 디지털값으로 입력 되도록 하고 있으며, 이 값들을 기본 데이터로 하여 펄스 폭 변조 신호를 만들고 NPC PWM 인버터를 제어하게 된다. 부하로는 공기조화용 팬을 구동하는 유도 전동기를 고려 하여 일정한 고

조파 전류를 범위내에서 제어할 수 있도록 하였다. 공기조화용 팬의 운전은 전동기 정격속도 이하의 범위에서 주로 운전된다. 가변속 제어하는 경우 전동기는 주로 저속 영역에서 운전하는 빈도가 높기 때문에, 인버터에서 발생하는 고조파에 의한 전자 유도 장애, 전동기의 과열 등의 원인이 되고 있다. 따라서, 저속 영역인 정 토크 영역에서 고조파 성분을 낮추는 것이 필요하다.

5. 고조파 분석 및 실험 결과

주파수비를 6, 12, 18, 24, 36 으로 바꾸면서 각 주파수비에 대하여 변조지수도 0.1~2.0의 범위로 변화시킬 때 고조파 성분의 크기를 측정하였다. 변조지수의 변화는 2.0이상의 범위로도 조정 가능하나 실용측면을 고려하여 최대 2.0까지 변화할 수 있도록 하였다. 그림 5는 주파수비를 36으로 하고, 변조지수를 변화시켰을 때 출력파형에 포함된 고조파 성분의 스펙트럼 측정결과이다.

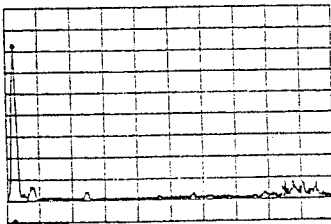


그림 5 고조파 성분의 스펙트럼 (주파수비 :36)
Fig. 5 The Spectrum of Harmonic Components.

배전계통의 경우, 종합 고조파 왜율은 5%이하로 유지하여야 한다. 주파수비와 변조지수를 변화시켰을 때, 인버터의 출력전압과 파형 왜율의 변화를 측정된 결과는 그림 6과 같다.

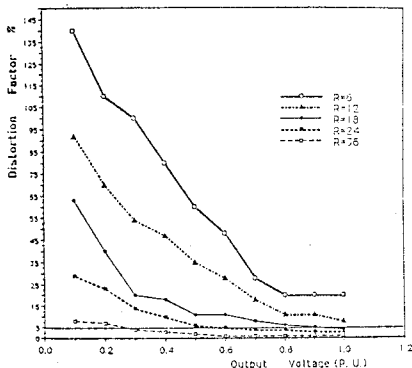
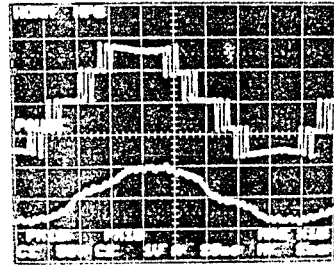


그림 6 인버터의 출력전압과 파형 왜율의 변화
Fig.6 The Variation of DF versus Output Voltage.

NPC PWM 인버터를 소프트웨어 제어기법으로 운전하여 출력 파형을 관찰하기 위하여 정격 전압 220V, 정격 출력 0.75KW, 정격 전류 3.5A, 정격 회전수 1710 rpm인 유도전동기를 부하로 사용하였다. 그림 7은 변조지수 1.8, 주파수비 36 인 경우에 정격 주파수에서 실험용 유도 전동기를 부하로 하여 운전하였을 때 출력

전압 및 전류파형을 측정된 결과이다.



전압 파형
100 V/div
전류 파형
5 A/div
(2 msec/div)

그림 7 출력 전압 및 전류 파형(주파수비 :36)
Fig.7 The Waveforms of Output Current and Voltage.

6. 결 론

본 연구에서는 소프트웨어에 의하여 NPC PWM 인버터를 제어하여 인버터의 출력 파형에 포함되는 고조파 성분을 대폭 제거할 수 있는 방안을 제시하였다. 따라서, 종전 방식으로 시스템의 특성 해석이 가능하며 다양한 펄스 폭 변조가 가능하기 때문에 특정 고조파를 제거하기가 용이한 특징이 있다. 가변 전압, 가변 주파수 운전의 경우에 일정한 고조파 전류를 이내에서 효율 좋은 운전이 가능하게 되며, 정전압, 정주파수의 경우에도 출력 파형 왜율을 개선하여 시스템 성능을 향상시킬 수 있다. 소프트웨어 제어 NPC PWM 인버터를 구동하여, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1)소프트웨어에 의하여 제어되는 NPC PWM 인버터를 구현함으로써, 출력파형에 고조파 성분을 대폭 제거하면서 고조파 왜율을 일정범위로 낮출 수 있다.
- (2)제한한 소프트웨어 제어 기법에서 주파수 비를 36으로 하고, 변조지수 1.2이상인 제어 모드에서는 대부분의 고조파 성분들을 제거할 수 있는 특징이 있다.
- (3)유도 전동기의 일정 V/F제어에 이용하는 경우 저속 영역에서 고속 영역으로 주파수비를 36, 24, 18, 12, 6으로 바꾸면서 변조지수도 0.1~2.0의 범위로 다양하게 바꿀 수 있어 고조파 전류율을 낮추면서, 전압 및 주파수 변화를 제어하여 효율 좋은 가변속 운전이 가능해진다.

참 고 문 헌

- 1)Eon Bin Song, Chun Sam Kim, Yoon Ho Kim, and Byung Do Yoon, "Distributed Computer Control of Air Volume System using Variable Speed Fan Drive," Proceedings of ISPE '92, pp.204-208, April 1992.
- 2)David E. Rice, "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics - Their effect on Power Systems Components," IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-22, No.1, pp.161-177, Jan./Feb. 1986.
- 3)Bimal K. Bose, "Recent Advances in Power Electronics," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.7, No.1, pp.2-16, Jan. 1992.