

# DSP에 의한 PWM 인버터의 Real-Time Digital 제어

박가우 민완기 최재호 최성률\*

충북대학교 \*호남대학교

## Real-Time Digital Control of PWM Inverter Empolyed DSP

Ga-Woo Park Wan-Ki Min\* Jae-ho Choi Sung-ryool Choi\*

Chungbuk National University \*Honam University

### ABSTRACT

This paper is presented real-time digital control techniques of the PWM inverter for UPS. This proposed system is based on instantaneous digital control scheme which is empolyed double dead beat control and prediction method. Especially, to supply the load current from the inverter without the computation delay, the predictive methods are used to generate the load current signal. From the simulation and experimental results, it is shown that presented scheme has good performance such as very low THD of the output voltage, and good dynamic response under the nonlinear load. The experimental implementation of the system is established by using the TMS320C25 DSP.

### 1. 서론

최근, 무정전전원장치(Uninterruptible Power Supply, UPS)는 고성능 컴퓨터를 내장하고 있는 각종 제어 및 계속장비들에 사용이 급증되고 있다. 이 시스템에 사용되는 인버터는 빠른 응답특성을 갖는 출력전압의 순시제어가 요구된다.

출력파형을 개선하기 위한 인버터의 제어기술로써 출력전압의 궤환에 의한 순시전압제어가 수행되었다. [1-2] 제어계통의 구성에 따라 순시전압제어 기술은 아날로그 방식과 디지털 방식으로 구분된다. 일정하지 않은 스위칭주파수로 인하여 넓은 범위에 걸쳐서 고조파가 분포되는 단점이 있는 아날로그 방식에 비해 디지털 제어방식은 샘플링 기법이 사용되어 스위칭 주파수를 일정하게 유지할 수 있었다. 그리고 마이크로프로세서의 활용으로 새로운 디지털 제어기법의 응용이 가능하게 되었다. [3-6] 그러나 연산시간 지연 때문에 실시간 제어의 실제적인 특성개선에 실효를 거둘수 없었다.

본 연구에서는 전압 제어루프와 고속전류 제어루프를 설치한 이중 Dead beat 제어기법을 사용하여 인버터의 출력전압을 순시적으로 제어되도록 하였으며 부하전류를 예측하여 feedforward신호로 가하여 제어응답특성을 개선하였다. 특히 연산능력이 빠른 TMS320C25 DSP(Digital Signal Processor)를

사용하여 디지털 실시간 제어를 하므로서 과도상태 응답속도가 개선되어 급격한 부하변동 및 정류기 부하와 같은 비선형 부하에서 양호한 정현파 출력전압을 얻을 수 있었고, 저차 고조파를 크게 저감 하였다. 이에 대한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 방법의 우수성과 타당성을 입증하였다.

### 2. 계통 모델링 및 제어 알고리즘

#### 2.1 계통 모델링

그림 1은 단상 PWM인버터의 전력회로의 기본구성도이다. 전체 계통을 직류전압원, 단상 Full bridge인버터, LC필터와 부하로 구성되어 있다. 리액터전류, 출력전압을 각각  $I_A(t)$ ,  $V_C(t)$ 라 하고, 상태 벡터를  $X=[I_A(t), V_C(t)]^T$ 로 정의하면 전체계통에 대한 계통방정식을 세우면 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_A(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_S} \\ \frac{1}{C_P} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_S} \\ 0 \end{bmatrix} V_A(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_P} \end{bmatrix} I_L(t) \quad (1)$$

입력변수  $V_A(t)$ 는  $+V_b, -V_b, 0$ 를 취하고, 부하전류  $I_L(t)$ 는 외란으로 정의하고, 샘플링구간  $kT \leq t \leq (k+1)T$ 에서 Sampled data상태방정식 (2)를 구할 수 있다.

단, 출력전압  $V_C$ 는 인버터의 전류에 대하여 샘플링시간  $T$  동안 일정하고, 리액터전류  $I_A$ 는 출력전압  $V_C$ 에 대하여 샘플링시간  $T$  동안 일정하다고 가정한다.

$$X(k+1) = AX(k) + BV_A(k) + F I_L(k) \quad (2)$$

여기서  $X$ : 상태변수  $V_A$ : 제어 변수 (입력)  $I_L$ : 외란

식 (2)로부터 A B F는 식(3), (4), (5)와같이 구할 수 있다.

$$A(T) = \mathcal{Z}^{-1} \left[ (SI - A')^{-1} \right] = \begin{bmatrix} \cos aT & -\frac{1}{L_S a} \sin aT \\ \frac{1}{C_P a} \sin aT & \cos aT \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$B(T) = \int_0^T A(T-r)B' dr = \begin{bmatrix} \frac{1}{Ls\alpha} \sin\alpha T \\ 2\sin^2\frac{\alpha T}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$F(T) = \int_0^T A(T-r)F' dr = \begin{bmatrix} 2\sin^2\frac{\alpha T}{2} \\ -\frac{1}{Cp\alpha} \sin\alpha T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $\alpha = \frac{1}{\sqrt{Cp \cdot Ls}}$

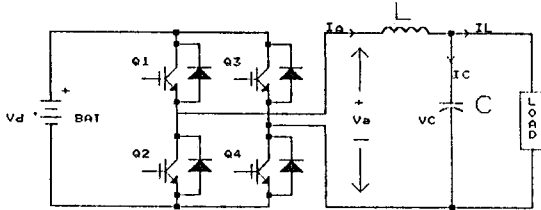


Fig.1. Circuit diagram of single phase inverter.

## 2.2 디지털 순시전압제어론

그림 2는 제안된 시스템의 인버터 정현파 출력전압제어의 Block Diagram이다. 고속 전류제어 루프와 전압제어 루프로 제어기가 구성 되고, 전류 루프의 기준신호는 무부하시 출력전압을 정현파로 유지하기 위하여 필터 커패시터 기준전류  $I_c^*$ 를  $\omega Cp Ecos\omega t$ 로 가고, 부하전류  $I_L$ 의 예측법에 의하여 Feedforward신호로 가하여 연산 지연 없이 부하전류를 공급하고, 출력전압의 지령치  $V_c^*$ 와 출력전압  $V_c$ 의 편차를 보상하여 입력 직류전원의 변동과 필터의 리액터와 커패시터의 값이 설계치와 편차를 보상하여 전압조정 및 안정화 요소로 가한다.

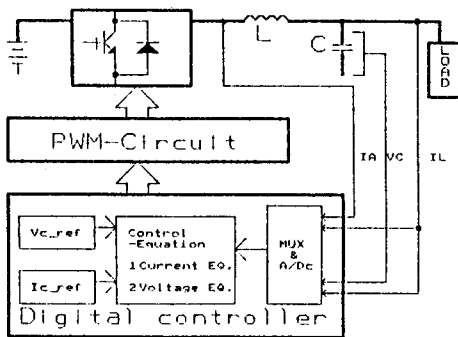


Fig.2. Block diagram of the proposed control.

### 2.2.1 Dead beat 전류 제어기

식(2)에서 (5)으로부터 인버터 전류의 Sampled data 상태 방정식은 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$I_A(k+1) = a_{11}I_A(k) + a_{12}V_c(k) + b_1V_A(k) + f_1I_L(k) \quad (6)$$

식 (6)에서 인버터전류를 Z변환하여 식(7)을 얻을 수 있다.

$$ZI_A = AI_A(z) - B(V_c(Z) + V_A(Z)) + FI_L(Z) \quad (7)$$

여기서,  $A = a_{11}$ ,  $B = -a_{12} = b_1$ ,  $F = f_1$ 이다.

식 (7)에서  $V_A^*(Z) = V_A(Z) - V_c(Z)$  리액터  $L_s$ 의 양단에 걸리는 전압으로 인버터의 전류를 제어 할수 있고, 외란  $FI_L(Z) = (F/B)I_L(Z)$ 를 삽입함에 의해서 제거 할 수 있다.

비례 적분(PI)의 제어를 이용하여, 이 시스템의 Open Loop 전달함수에서  $I_L(Z)$ 를 제거하여, 폐루프 특성방정식에서 근을 소거하고, Dead beat 응답의 조건을 구한다. 그리고 역 Z 변환하여, 커패시터 전압  $V_c(k)$ 를 더하면 식 (8)로 표현되고, 전류제어기는 그림 3과 같다.

$$V_A(k) = U(K-1) + \frac{1}{B} \{ I_A^*(k) - I_A(k) \} - \frac{A}{B} I_A(k) - \frac{F}{B} I_L^*(k) + V_c(k) \quad (8)$$

### 2.2.2 Dead beat 전압제어기

전압제어 시스템을 설계하기 위하여 필터의 인덕턴스와 전류 내부루프를 포함하는 인버터는 이상적인 전류원으로 가정하면 식 (9)가 정의된다.

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{Cp} I_c = \frac{1}{Cp} (I_A - I_L) = \frac{1}{Cp} (I_c^* + I_L^* + J_c - I_L) \quad (9)$$

여기서,  $I_L^*$  : 예측된 부하전류,  $J_c$  : 전압제어기의 출력  $I_L^* \approx I_L$ 이라 가정하고 식 (9)는

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{Cp} (I_c^* + J_c) \quad (10)$$

식 (10)로 부터 Sampled data 방정식 (11)가 유도된다.

$$V_c(k+1) = V_c(k) + \frac{T}{Cp} \{ I_c^* + J_c(k) \} \quad (11)$$

전압 기준치와 커패시터 전압의 오차  $Evc(k)$ 와  $J_c(k)$ 의 관계에서  $Evc(k) = V_c(k) - V_c^*(k-1)$ 이므로

$$V_c^* = V_c(k-1) + Evc(k) + \frac{T}{Cp} I_c^* + \frac{T}{Cp} J_c(k) \quad (12)$$

$$V_c^*(k) = V_c(k-1) + \left(\frac{T}{Cp}\right) I_c^*(k) \text{ 이므로}$$

$$Evc^*(k+1) = V_c(k) + \frac{T}{Cp} J_c(k) \quad (13)$$

식 (13)를 Z변환하여 식 (14)로 된다.

$$ZEvc(Z) = Evc(Z) + \frac{T}{Cp} J_c(Z) \quad (14)$$

이 전압 제어기에서 비례제어를 사용하였고, 이 시스템에서 특성 방식의 근을 제거하기 위하여 인버터 출력전압은 Deadbeat 응답을 사용하여 역Z변환하여 커패시터 전류와 예측한 부하전류를 더하여 계통식은 식 (15)와 같이 주어지고, 전압 제어기는 그림 3과 같이 구성된다.

$$I_A^*(k) = \frac{Cp}{T} \{ V_c^*(k-1) - V_c(k) \} + I_c^*(k) + I_L^*(k) \quad (15)$$

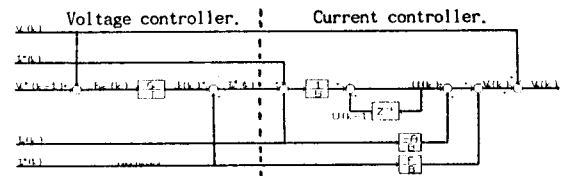


Fig.3. Dead beat voltage and current controller.

## 2.3 부하전류 예측법

부하전류가 작은 구간에서 n차 시리즈 함수로 정의된다고 가

정하면, 미래의 전류의 값은  $n+1$ 개의 과거의 데이터를 선형적으로 결합에 의해서 표현된다.

$n+1$ 개의 과거의 데이터  $I_L(t), I_L(t-T_s), \dots, I_L(t-nT_s)$ 가  $n-1$ 차 함수라 가정하면 이 함수들의 계수들은 결정되고 다음 샘플 데이터  $I_L(t+T_s)$ 가 예측된다.

#### 1차 예측법

$$I_L(t+T_s) = 2I_L(t) - I_L(t-T_s) \quad (16)$$

그림 4에서  $Z^{-1}$ 을 샘플링 시간  $T_s$  만큼의 지연된 시간이다. 예측제어법에 의한 부하전류의 연산을 Feedforward 신호로 이용하여 보상을 계산시간을 보상할 수 있다.

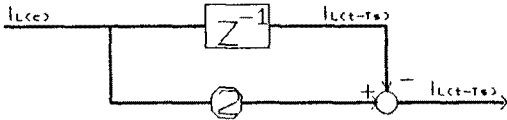


Fig. 4. Load current 1st predictor

### 3 제어기계의 구성

#### 3.1 Hardware

제어기의 Hardware의 구성을 보면 전체 Block Diagram은 그림 5와 같다. 입력신호  $V_c, I_A, I_L$ 을 AD Converter로 피드백하여 연산부분은 S/W로 처리하였고, 연산결과인 에라값과 삼각파를 비교하여 PWM 파형을 만들어 내는 부분을 Hardware로 구성하였다. DSP(TMS320C25)에서 계산된 연산결과  $V_A$ 를 20KHz의 삼각파와 비교하는데 직접 Digital Comparator를 사용하여 PWM파형을 만들어 낸다. 이때 삼각파를 만들어 내기 위해 ROM Table에 삼각파의 Pattern을 1주기 동안의 값을 8Bit로 저장하여 Counter를 사용하여 20KHz 마다 읽어내도록 하였다.

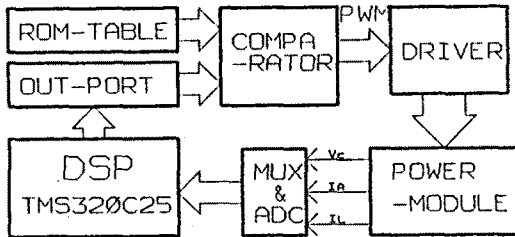


Fig. 5. Block diagram of the controller hardware.

#### 3.2 Software

제어 알고리즘의 진행 Flow는 아래의 순서와 같다.

- Step 1) 지령전압  $V_c^*(k)$ 와 지령전류  $I_c^*(k)$ 를 Program Memory에서 Data Memory에 저장한다.
- Step 2) 출력전압  $V_c(k)$ , 부하전류  $I_L(k)$ 와 리액터 전류  $I_A(k)$ 를 Loading하여 Data들을 저장한다.
- Step 3) 부하전류  $I_L^*(k)$ 를 식(16)으로 계산한다.
- Step 4) 식 (15)와 (8)로  $I_A^*(k)$ 와  $V_A(k)$ 를 계산한다.
- Step 5)  $k$ 를 증가시키고 Step 1)을 실행한다.

20KHz마다 입력값을 계산하여 출력으로 내보내기 위해 내부 Timer의 Interrupt를 사용하였다.  $V_c^*$ 와  $I_c^*$ 는 1주기분의

Data만 Table로 저장되어 있기 때문에 이 값들은 반복적으로 읽어내어 사용되어야 하는데, 이 값들의 1주기 길이인 334개를 Count 하여 매 Interrupt마다 1개씩 감소해 간다. 이 기준치의 마지막 값을 읽고나면 다시 초기화로 된다.

### 4. 시뮬레이션 및 실험

본 연구에서는 제안된 이중 Dead beat제어루프와 부하전류 예측법에 의한 제어알고리즘을 검증하기 위하여 ACSL (Advanced Continuous Simulation Language)에 의한 디지털 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 부하변동 및 정류기 부하의 제어 특성에 관한 고찰을 하였다. 또한 부하전류를 1차 예측법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 응답특성과 총고조파 왜형률을 비교 검토하였다. 그리고 시뮬레이션에 사용한 최소상수들은 정격 5KVA, 출력주파수 60Hz, 인버터의 출력전압 120V, 필터인덕턴스 200 $\mu$ F, 필터커패시터 100 $\mu$ F, 스위칭주파수 20KHz 그리고 DC 입력전압 140V이다.

그림 6은 부하변동시 출력전압  $V_c$ 와 전류  $I_O$ 의 출력파형으로 부하를 정격에서 경부하로 경부하에서 정격으로 증가하였을 경우로 양호한 응답특성을 보여주고 있다. 그림 7은 정류기부하에서 출력전압  $V_c$ 와 전류  $I_O$ 의 출력파형으로 (a) 1차 예측법을 사용한 경우이고, (b) 예측법을 사용하지 않은 경우이다. 그리고 그림 8은 정류기부하에서 출력전압  $V_c$ 의 스펙트럼분석으로 (a) 1차 예측법을 사용 (b) 예측법을 사용하지 않은 경우의 결과로서 (a)는 THD가 0.7091% (b)는 THD가 1.3715%로 1차 예측법을 한 경우가 과도응답 특성과 THD가 개선됨을 알 수 있다. 그림 9는 실험결과에서 출력전압  $V_c$ 와 전류  $I_O$ 의 파형으로 양호한 특성을 보여주고 있고, 그림 10은 무부하시의 실험결과 파형이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 고속연산이 가능한 DSP(TMS320C25)를 이용하여 무정전전원장치용 인버터의 출력전압제어를 디지털 실시간 제어로 하였다. 제어루프는 출력 정현파전압을 얻기 위해 고속전류와 전압루프에 의한 2중 Dead Beat 제어기로 구성하였다. 특히 전류 내부루프에 가하여 지는 부하전류의 예측에 의하여 feedforward신호로 가하여 출력전압이 부하변동 및 정류기 부하와 같은 비선형부하에서도 과도응답특성과 총고조파 왜형률을 개선 하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제시한 이론의 타당성을 입증 할 수 있었다. 그리고 차후의 연구의 방향은 인버터출력 전압제어시 커패시터의 전류를 제어하여 보다 빠른 응답특성을 가지도록 제어 알고리즘을 구성하여 제어 특성을 개선 하고자 한다.

### 참고문헌

1. P. Zigas, "Delta Modulation Technique in Static PWM Inverters", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-17, pp. 289-295, 1981.
2. A. Kawamura and R.G. Hoft, "Instantaneous feedback

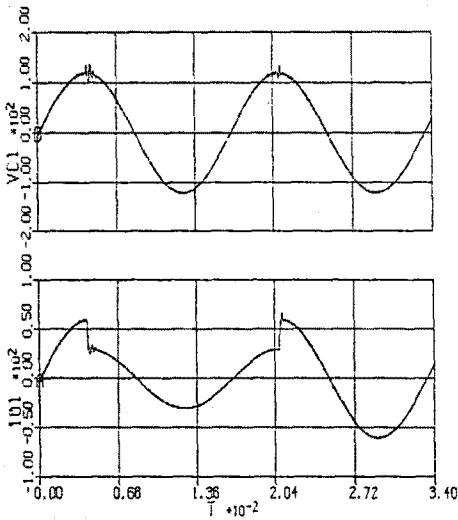
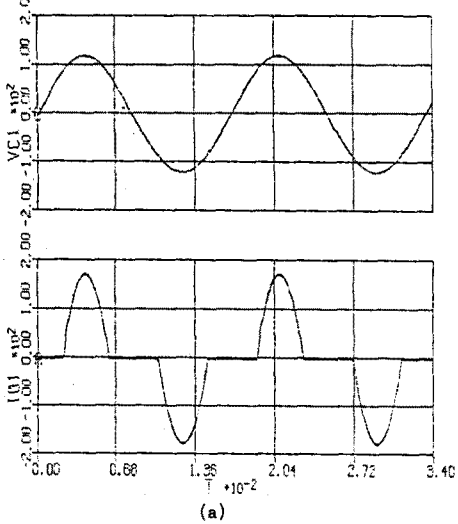
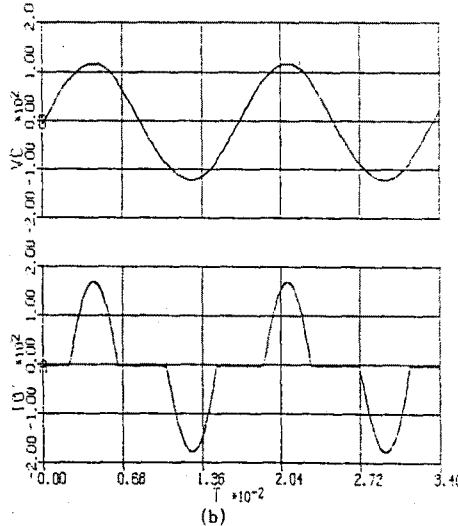


Fig. 6. Waveforms( $V_c, I_o$ ) under load change



(a)



(b)

Fig. 7. Transient response waveforms( $V_c, I_o$ ) under rectifier load (a) 1<sup>st</sup> prediction (b) no prediction

- controlled PWM inverter with adaptive hysteresis", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-20, pp. 769-775, 1984.
3. I. Takahashi and M. Nunokawa, "Prediction Control for a Cycloconverter of a Power Distortion Compensation System", in *Conf. Rec. IEEE IAS Ann. Meeting*, pp. 766-777, 1987.
  4. T. Haneyoshi, A. Kawamura, and R. G. Hoft, Waveform "Compensation of PWM Inverter with Cyclic Fluctuating Loads", in *Conf. IEEE IAS Ann. Meeting*, pp. 744-751, 1988.
  5. A. Kawamura, R. Churayapratip, and T. Haneyoshi, "Deadbeat Controller PWM Inverter with Modified Pulse Patterns for Uninterruptible Power Supply", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol. 35, No. 2 May, pp. 295-300, 1988.
  6. T. Kawabata, Y. Shikano, and S. Higashino, "Chargeless UPS using Multi-functional BIMOS Inverter", in *Conf. Record IEEE-IAS Ann. Meeting*, pp. 523-520, 1988.
  7. 민완기, 박가우, 신진국, 최성률, 최재호 "DSP에 의한 PWM 인버터의 순시전압제어", "대한전기학회 추계종합학술대회는논문집", pp. 167-170, 1992.
  8. 민완기, 김재식, 박세현, 최재호 "Single-Chip 마이크로프로세서를 이용한 UPS용 인버터의 순시전압제어", "한국조명전기설비학회 논문집 제6권 제6호 pp. 49-579, 1992.

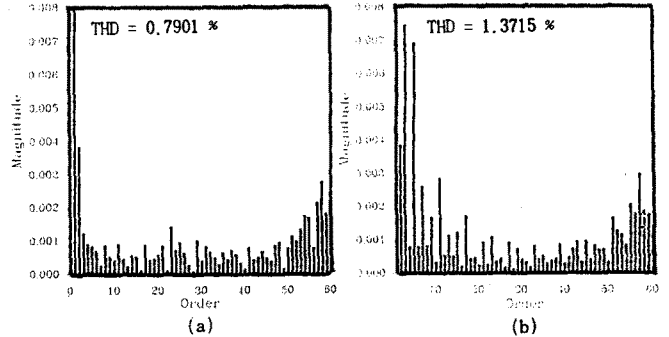


Fig. 8. Harmonic spectrum of output voltage( $V_c$ ) under rectifier load (a) 1<sup>st</sup> prediction (b) no prediction.

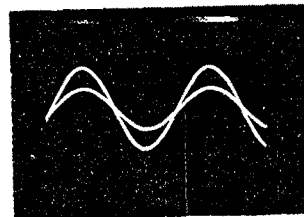


Fig. 9. Experimental waveforms( $V_c, I_o$ ) under linear load

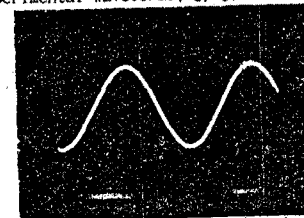


Fig. 10. Experimental waveforms( $V_c$ ) under no load