

UPS용 인버터 출력특성 개선

김 동욱, 김 연풍, 신 현주, 백 병산, 류 승표, 민 병권
 현대중공업(주) 마북리 연구소

The Characteristic Improvement of Inverter Output for Static UPS

D.U.Kim, Y.P.Kim, H.J.Shin, B.S. Baik, S.P. Ryu, B.G.Min
 Mabook-Ri Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

Abstract - In spite of nonlinear or step-changing load and line disturbances, the inverter for the UPS must provide the pure sinusoidal output voltage with low THD(Total Harmonics Distortion). This paper proposes an inverter controller for the UPS which has a good dynamic response characteristic and robustness for applying industrial world directly. The inverter output voltage is controlled instantaneously with a double regulation loop by a TMS320C31 Digital Signal Processor so that it has very good dynamic response for nonlinear or step-changing load and line disturbances. To improve the voltage utilization and response characteristics, the Space Vector Modulation(SVM) technique is adapted for the switching method of this system. The characteristics of the proposed control system were verified by simulations and experiments.

2.1 시스템 모델링.

전력회로의 설계 및 제어동작에 대한 컴퓨터 모의시험을 위하여 다음과 같이 모델링을 하였다.

그림1에서 전류 및 전압방정식을 나타내면 아래와 같다.

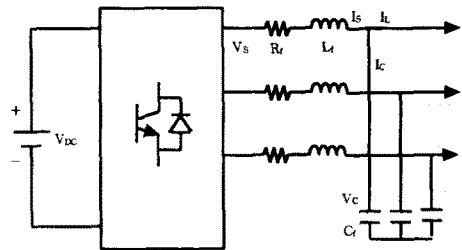


그림 1 3상 UPS의 인버터부 전력회로

$$i_c = C_f \frac{dv_c}{dt} = i_s - i_L \quad (1)$$

$$v_s = R_f i_s + L_f \frac{di_s}{dt} + v_c + v_{01} \quad (2)$$

$$v_{01} = (v_a + v_b + v_c) / 3 \quad (3)$$

(3)식을 (2)식에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. 단, 직렬리액터 내부저항분 및 출력중성점 전압은 무시한다.

$$L_f \frac{di_s}{dt} = X v_s - v_c \quad (4)$$

여기서,

$$X = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

위의 (1)~(5)식을 이용하여 3상의 전류 및 전압방정식을 출력 전원주파수 ω 로 회전하는 d-q좌표로 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sd} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{sq} \\ V_{sd} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cd} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cd} \end{bmatrix} + \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sd} \end{bmatrix} - \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Ld} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,

d, q : d-q 좌표변환시 d축과 q축.

I_{sd}, I_{sq} : 인버터 출력전류의 d축성분과 q축성분.

I_{Ld}, I_{Lq} : 인버터 부하전류의 d축성분과 q축성분.

V_{sd}, V_{sq} : 필터 입력전압의 d축성분과 q축성분.

V_{cd}, V_{cq} : 필터 출력전압의 d축성분과 q축성분.

제어를 위한 기준전압, 검출된 3상의 출력전압 및 전류를 인버터 출력전원 주파수 ω 로 회전하는 d-q좌표로 변환하는 관계식은 다음과 같다.

먼저, 출력기준전압은 다음과 같다.

1. 서 론

무정전전원장치(UPS : Uninterruptible Power Supply)는 전원장해시에도 양질의 무정전 전원을 부하기에 공급하는 장치로서, 무정전의 양질의 전원을 필요로 하는 모든 곳에 필수적으로 사용되며, 최근 정보통신기기의 폭발적 증가, 컴퓨터 보급의 확산과 자동화 확장 추세에 따라 수요가 크게 증가하고 있으며 그 중요성이 높아가고 있고 부하특성 또한 다양화되어가고 있다[1]. 따라서 UPS도 부하조건 및 특성에 관계없이 정전압 정주파수의 전원공급뿐만 아니라 부하조건에 관계없이 우수한 출력특성이 요구되고 있다. 중요한 출력특성으로는 출력전압 파형 및 THD, 부하급변에 대한 응답특성, 비선형 부하특성 그리고 불평형 부하특성 등을 들 수 있다. 현재, 널리 적용되고 있는 UPS용 인버터의 제어방식[2]에는 히스테리시스(Hysteresis)제어법[3], PWM(Pulse Width Modulation) 제어법[4] 등에 의한 아날로그 제어방식과 마이크로프로세서를 이용한 디지털 제어방식이 있다[5,6,7]. 히스테리시스 제어는 과도응답특성이 우수하지만 넓은 범위에 걸쳐 스위칭 주파수가 존재하고 서브하모닉이 존재하여 필터 설계가 어려우며 또한 빠른 샘플링 시간을 필요로 하므로 디지털 구현이 어렵다. Dead Beat제어법[8]은 디지털 전용의 알고리즘으로 비선형 부하에서도 응답특성이 좋고 일정한 스위칭 주파수를 갖기 때문에 필터의 설계가 용이하다. 그러나 마이크로프로세서의 계산시간으로 인하여 펄스폭이 제한되어 있고 피이드백 노이즈나 시스템 파라미터 변동에 매우 민감하다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 상기의 단점을 보완하여 어떠한 특성의 부하에서도 강한 디지털 제어시스템을 제안하였다. 제안된 제어시스템은 전압제어, 전류제어의 2중 제어루프를 가지고 있으며, 제어기는 PI제어기를 사용한 공간벡터 변조기법을 이용하였으며, 또한 부하예측기법을 적용하여 빠른 동적 응답특성을 갖도록 하였다. 마이크로프로세서로서 실시간 제어를 위하여 우수한 성능의 DSP 전용소자인 TMS320C31을 사용하였다. 전력 소자로서 IGBT를 사용하여 스위칭 주파수를 높여 소음을 줄이고, 과도응답 및 THD 특성을 개선하였다.

2. 인버터 출력제어

$$\begin{bmatrix} V_d^* \\ V_q^* \end{bmatrix} = V_o \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, θ = 출력전압 a상과 d축사이의 각.

V_o = 출력상전압의 크기.

다음으로 출력전압 및 전류의 변환식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta) & \cos(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\omega t + \theta) & \sin(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta) & \cos(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\omega t + \theta) & \sin(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, V_a, V_b, V_c 는 인버터출력 상전압,

i_a, i_b, i_c 는 인버터출력 상전류이다.

2.2 제어 알고리즘

그림 2는 본 연구에서 적용한 인버터 출력전압제어의 기본 원리를 보여주고 있다.

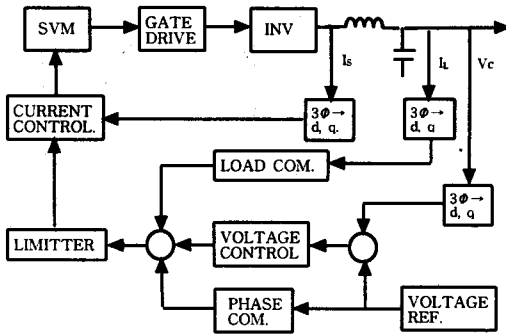


그림 2 인버터 출력전압제어 블록도

이 시스템은 크게 두 가지의 전류제어루프와 전압제어루프가 있다. 전류제어루프는 이 시스템의 핵심으로서 필터의 입력전류를 제어하며, 전압제어루프는 인버터 출력전압파형을 정현파로 하기 위한 루프로서 전압제어기의 출력은 전류제어루프의 기준치로 인가된다. 전압제어루프 및 전류제어루프는 각각 그림 3, 4와 같다. 출력전압을 결정하는 PWM 패턴은 매 샘플링시간마다 변화되며, 스위칭 방식으로는 디지털 제어의 구현이 용이하고 전압이용률과 정상상태에서의 빠른 응답특성을 가지도록 공간벡터 변조기법을 적용하였다.

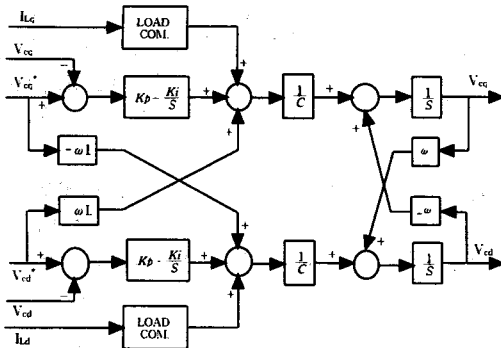


그림 3 전압제어루프

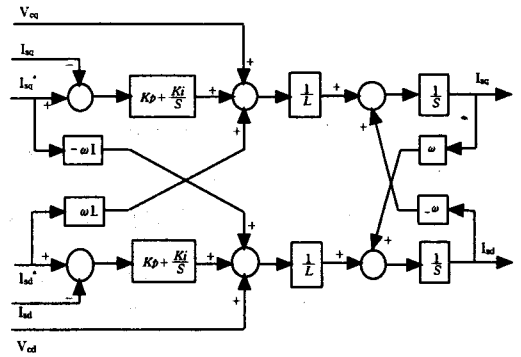


그림 4 전류제어루프

3. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 제어시스템의 타당성을 검토하고 그의 특성을 관찰하기 위하여 실제 시스템과 동일한 조건으로 표 1과 같이 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 이용한 각종 파라미터들은 실제 시스템에 바로 적용할 수 있도록 선정하였으며 시뮬레이션 프로그램 또한 실제 제작하는 시스템과 동일한 모델로 작성하였다.

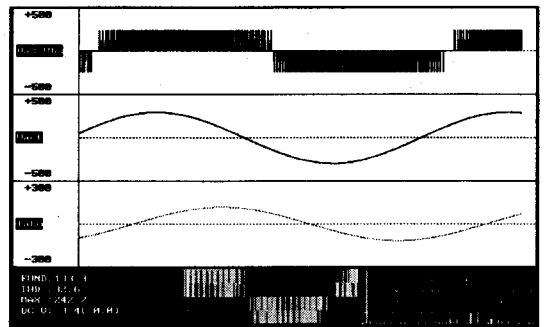


그림 5 PWM파형의 필터링전/후 전압·전류 및 FFT파형

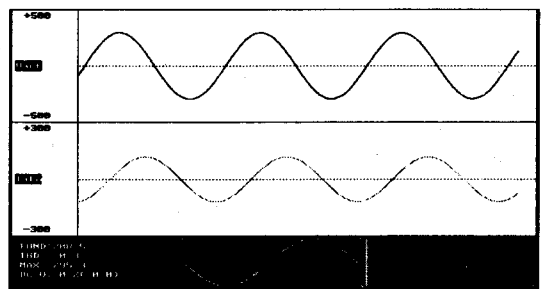


그림 6 비선형부하에서의 출력전압/전류파형 및 FFT분석

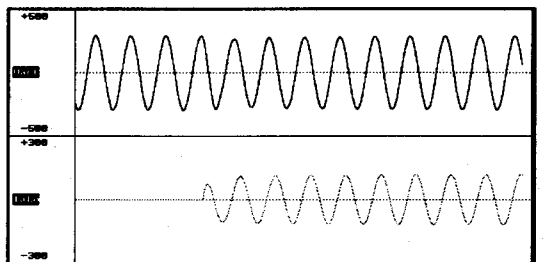


그림 7 부하급변시(100% R-L) 출력전압파형

그림5는 100% 비선형부하일 때 7.2KHz의 PWM과형의 필터링전과 후의 전압과형과 출력전류를 보여준다. FFT분석은 PWM전압과형에 대한 것이다. 그림6은 100% 비선형부하일 때의 출력전압 및 부하전류와 그 때의 전압에 대하여 FFT분석 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림7은 동특성을 시험하기 위한 것으로서 무부하로 운전하다가 비선형의 100%부하를 인가하였을 때의 출력전압변동을 보여주고 있다.

4. 실험 및 결과

본 연구에서 제안한 인버터 출력제어방식을 UPS 시스템의 인버터부에 적용하여 그 특성을 검토하였다. 실험용으로 이용한 인버터 시스템은 시뮬레이션에서 얻은 파라미터와 거의 동일하게 제작하였다. 제어용 마이크로프로세서로서 TI사의 TMS320C31 DSP를 33MHz의 클럭으로 동작시켜 사용하였다. 그리고 전력 반도체소자로서 EUPEC사의 IGBT를 사용하였으며, 출력 필터용 직렬 리액턴스는 인버터출력단에 송입 및 절연용으로 설치하는 변압기의 %임피던스에 삽입시켜 적용하였다. 표1은 중요한 설계파라미터 값들(3상 30KVA)이며 제작상의 오차만 존재할 뿐 시뮬레이션 값과 동일하다.

표 1.

DC 전압	243Vdc	
DC 링크단 커패시터	26,400uF	
출력단 변압기	입력전압	105Vac
	출력전압	208Vac
	%임피던스	5.4%
출력단 필터 커패시터	700uF	
인버터 스위칭 주파수	7.2KHz	

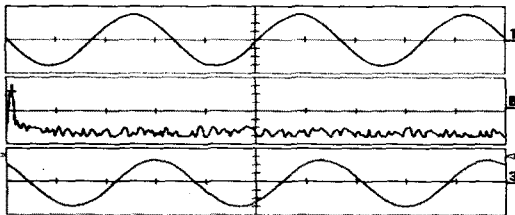


그림 8 비선형부하에서의 출력전압 및 FFT분석/전류과형

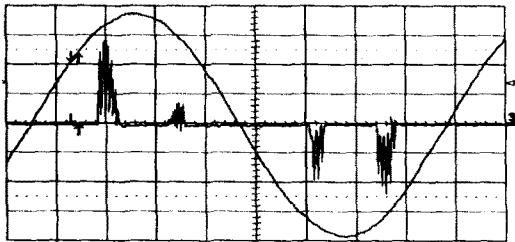


그림 9 비선형(정류기)부하에서의 출력전압/전류과형

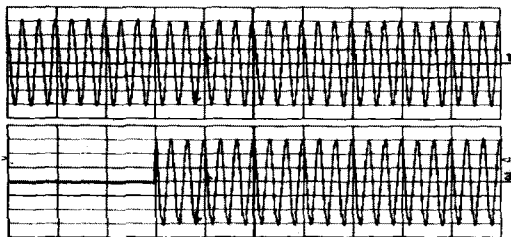


그림 10 부하급변시(100%) 출력전압/전류과형

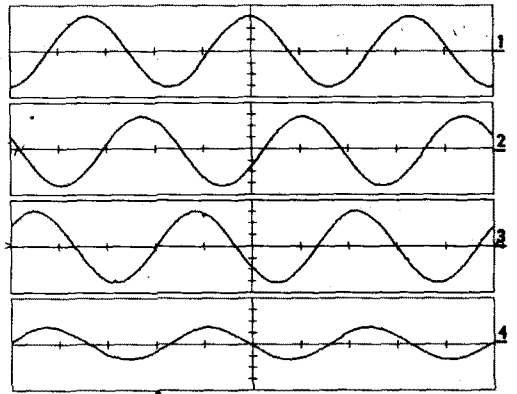


그림 11 불평형부하시(50%) 출력전압과형

그림8은 100% 비선형부하일때의 출력전압과형과 그의 FFT 스펙트럼이고 이때의 THD는 0.53으로 나타났으며, 세번째는 출력전류과형을 보여준다. 그림9은 정류기부하일때의 출력전압 및 부하전류를 보여주고 있다. 그림10은 동특성을 알아보기 위하여 무부하로 운전하다가 비선형의 100%부하를 인가하였을때의 출력전압변동(±3.81%)을 보여주고 있다. 그리고 그림11는 불평형부하특성을 확인하기 위하여 R상에 부하를 걸지않은 상태에서 다른상에 50%부하를 인가시의 R, S, T상의 전압과형을 보여 주고 있다.(전압불평형율:±1.16%) 참고로 인버터 효율은 91.6%로 측정되었다.

5. 결론

본 연구에서는 현재 아날로방식으로 적용되어 산업계에 널리 사용되는 인버터출력제어방식을 디지털 제어방식으로 구현하여 산업계에서 실제 사용할 수 있도록 하였다. 즉, 부하의 종류, 외란 및 외부 노이즈에 강인한 UPS용 인버터 출력전압 제어방식을 제안하였다. 본 논문에서 적용한 제어알고리즘은 탁월한 성능보다는 시스템의 강인함과 신뢰성에 더욱 비중을 두어 적용하였으며, 하드웨어의 구성도 마찬가지이다. 그의 성능은 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인할 수 있듯이 양호한 결과를 얻었다.

참고문헌

- [1] J. Platis & J. St. Aubyn, "Uninterruptible Power Supplies", London, pp. 9~17, 1992.
- [2] 정승기 외, "UPS용 3상 인버터의 LC필터단 출력 전압 제어방식 비교연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 312~317, 1996.
- [3] M. Carpita, et al., "A new control system for UPS using hysteresis comparator", in Conf. Rec. IEEE IAS Annual Meetings, pp. 749~754, April 1987.
- [4] Michael A. Boost et al., "State-of-the-Art Carrier PWM Techniques: A Critical Evaluation" IEEE Trans. on Industry Applications, VOL.24, No 2, pp. 271~280, March/April 1988.
- [5] Atsuo Kawamura, et al., "Disturbance Observer Based Fully Digital Controlled PWM Inverter for CVCF Operation", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.9, No.9, pp. 473~480, Electronics, Vol.9, No.9, pp. 473~480, September 1994.
- [6] Shoichi Kawauchi, et al., "Microprocessor-Based Robust Digital Control for UPS with Three-Phase PWM Inverter", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.10, No.2, pp. 196~204, March 1995.
- [7] Y. H. Chung et al., "Parallel Operation of Voltage Source Inverters by Real Time Digital PWM Control" EPE FIRENZE, pp. 58~63, 1991.