

공간벡터 변조기법을 이용한 UPS용 삼상 전압형 인버터

○이 상훈, 김 병진, 최 재호, 안 태영
충북대학교 전기전자공학부

Three-phase Voltage Source Inverter for UPS using Space Vector Modulation

○S. H. Lee, B. J. Kim, J. H. Choi, T. Y. Ahn
School of Electrical & Electronics Eng, ChungBuk National Univ.

Abstract

In this paper, a voltage and current control scheme of a three-phase voltage source inverter for UPS is described. The inverter provides pure sinusoidal output voltage with very low THD(Total Harmonic Distortion). The proposed controller is designed to robust against the load change, parameter variations, and disturbances using PI controller. The switching pattern is determined to Space Vector Modulation. Finally, the performance of the proposed inverter is shown and discussed by simulation.

1. 서론

UPS용 인버터는 일정한 전압, 일정한 주파수(CVCF)의 정현파 출력 전압을 만족시켜야 한다. 출력 전압의 고조파 함유율의 정도를 THD로 나타내는데 비선형 부하의 과도 응답 특성을 충족하는 기준이 되고 인버터의 성능을 표시하는 기준도 된다.

대부분의 UPS부하는 비선형 부하이고 전압변동에 민감하므로 양질의 전원이 필요하다. 헤스테리시스 및 Dead Beat 제어방식은 출력전압의 피드백 값과 기준신호를 순시적으로 비교하여 에러가 최소가 되도록 제어하면서 비선형 부하에에서도 매우 빠른 응답 특성을 나타낸다.

헤스테리시스 제어는 과도 응답 특성의 측면에서 볼 때 가장 우수하지만 넓은 범위에 걸쳐 스위칭 주파수가 존재하고 이에 따른 시끄러운 모니터링 소음을 어렵게 한다. 뿐만 아니라 매우 빠른 샘플링 시간을 필요로 하므로 디지털 구현이 어렵다.

Dead Beat 제어는 디지털 전용의 알고리즘으로 비선형 부하에서도 응답특성이 좋고 일정한 스위칭 주파수를 가지기 때문에 펀터의 설계가 용이하다. 그러나 마이크로제어기의 계산시간으로 인하여 펄스폭의 제한이 있고 피드백 노이즈나 시스템 파라미터 변동에 매우 민감하다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서 제안된 제어 시스템은 전압제어, 전류제어의 2중 제어루프를 가지고 있으며, 제어기는 PI 제어기를 사용하였다.

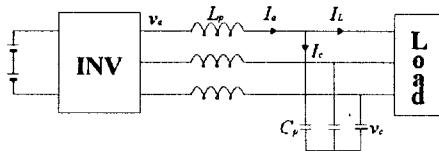


그림 1. 삼상 인버터 시스템

또한 부하에 즉기법을 적용하여 비선형 부하에서 빠른 동적 응답 특성을 가지도록 하였다. 인버터 스위칭 방식으로 공간벡터 변조기법을 이용하여 정상태의 응답특성을 고려하였다.

2. 시스템 모델링

그림 1은 일반적인 삼상 인버터의 회로도이다. 여기서 v_s 는 인버터가 스위치를 on 혹은 off함에 따라 각각 배터리 전압 vdc의 양(+), 음(-)을 가진다. 그림 1을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_p \frac{d}{dt} V_C = I_A - I_L \quad (1)$$

$$L_S \frac{d}{dt} I_A = V_A - V_C - V_X \quad (2)$$

$$V_X = (V_{uu} + V_{uv} + V_{uw})/3 \quad (3)$$

(3)식을 (2)식에 대입하면,

$$L_S \frac{d}{dt} I_A = D \cdot V_A - V_C \quad (4)$$

이 된다. 여기서,

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

이다.

(1)식과 (4)식을 d-q 변환 하게되면,

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{cd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{ad} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{C_p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Lq} \\ I_{Ld} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha}^* \\ I_{ad}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{ad} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{cd} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{cd} \end{bmatrix}$$

이 된다. 여기서 변환행렬 C는 다음과 같다.

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\omega t + 2\frac{\pi}{3}) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 2\frac{\pi}{3}) & \sin(\omega t + 2\frac{\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. 제어 알고리즘

3.1 전압제어기

그림 2는 제안된 전압제어기이다. 이것은 (9)식에 의해 구성되어지며, (9)식은 (6)식으로부터 유도할 수 있다.

$$i_{\alpha q}^* = i_{\alpha q}^* + i_{Lq}^* + k_p(v_{\alpha q}^* - v_{\alpha q}) + \omega C_p v_{cd}^* \quad (9)$$

$$i_{ad}^* = i_{cd}^* + i_{Ld}^* + k_p(v_{cd}^* - v_{cd}) - \omega C_p v_{\alpha q}^*$$

전압제어기는 출력전압의 레퍼런스와 피드백값을 비교하여 이 차를 PI 제어기를 통해 보상하게 된다. 결국 이렇게 보상된 값과 i_L^* 와 i_c^* 를 더해서 전류제어기의 입력인 i_a^* 를 만들어 내게 된다.

여기서, 부하전류의 지령치는 2차예측법을 사용하여 부하변동에 대한 동적응답특성을 향상시켜준다.

$$i_L^* = 3[i_L(t) - i_L(t-T_s)] + i_L(t-2T_s) \quad (10)$$

(단 T_s 는 sampling time)

또한 coupling 항을 제거하기 위해 전단에 $\omega C_p v_{cd}^*$ 와 $-\omega C_p v_{\alpha q}^*$ 의 피드포워드 항을 추가하였다.

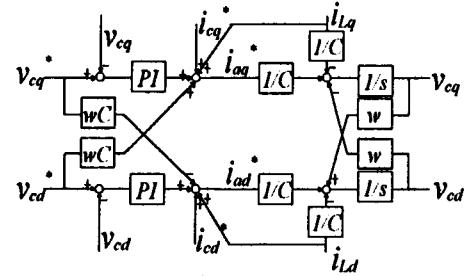


그림 2. 전압제어기

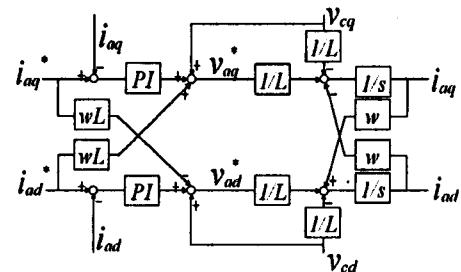


그림 3. 전류제어기

3.2 전류제어기

그림 3은 제안된 전류제어기이다. 이것은 (11)식에 의해 구성되어지며, (11)식은 (7)식으로부터 유도할 수 있다.

$$v_{\alpha q}^* = v_{\alpha q}^* + k_p(i_{\alpha q}^* - i_{\alpha q}) + \omega L_p i_{ad}^* \quad (11)$$

$$v_{ad}^* = v_{ad}^* + k_p(i_{ad}^* - i_{ad}) - \omega L_p i_{\alpha q}^*$$

전류제어기는 전압제어기로 부터 받아온 i_L^* 와 피드백값을 비교하여 이 차를 PI 제어기를 통해 보상하게 된다. 결국 이렇게 보상된 값과 출력전압의 레퍼런스를 더해서 v_a^* 를 만들어낸다.

또한 전압제어기와 마찬가지로 coupling 항을 제거하기 위해 전단에 $\omega L_p i_{ad}^*$ 과 $-\omega L_p i_{\alpha q}^*$ 의 피드포워드 항을 추가하였다.

4. 공간벡터 변조기법

인버터의 출력단 전압은 각 상의 스위칭 상태에 따라 복소평면상에 나타낼 수 있는데 그림 4와 같이 정육각형을 형성하고, 전압형 인버터에 PWM 파형을 인가하면 인버터의 출력단 전압벡터는 시간적으로 평균적인 의미에서 정육각형 내부의 어느 한 점에 놓이게 된다.

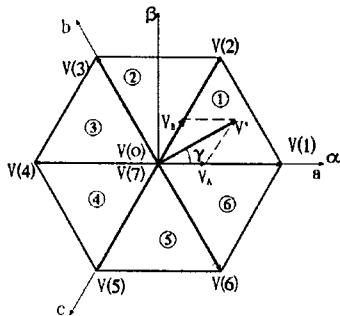


그림 4. 전압벡터도

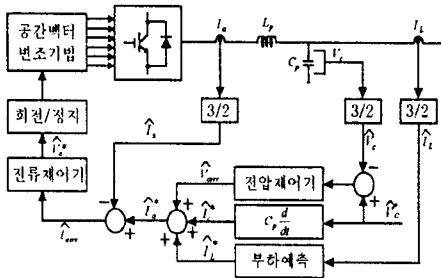


그림 5. 전체적인 제어 블록도

따라서, 임의의 인버터 출력전압을 발생하려면 원하는 전압벡터가 위치한 삼각형의 두 변에 해당되는 전압벡터로부터 저령전압의 벡터를 합성할 수 있고, 두 전압벡터의 인가시간의 합이 샘플링주기 T_s 보다 작으면 나머지 시간 동안에는 영벡터를 인가하면 된다. 여기서 인가시간 T_0 , T_1 , T_2 는 다음과 같다.

$$T_1 = \sqrt{3} T_s \frac{|V|}{E} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) \quad (12)$$

$$T_2 = \sqrt{3} T_s \frac{|V|}{E} \sin \gamma \quad (13)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (14)$$

여기서 γ 는 삼각형의 출발변으로부터 전압벡터 저령까지 반시계 방향으로 $0 \leq \gamma \leq \pi/3$ 회전한 각을 나타내고 있다.

그림 5에 본 논문에서 제안하고 있는 전체 제어 블록도가 보여지고 있다.

5. 시뮬레이션

시뮬레이션은 ACSL을 이용하여 실행하였고, 각각의 파라미터는 표 1과 같다.

그림 6은 저항부하에서의 출력전압의 과정이며, 그림 7은 삼상 정류기부하에서의 a상에 대한 출력전압과 부하전류의 과정으로 그림에서 보듯이 비교적 양호한 시뮬레이션 결과가 얻어졌다.

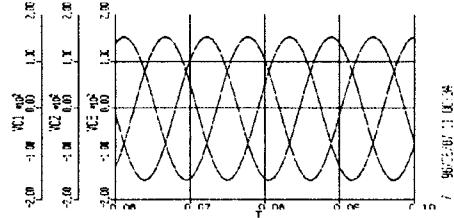


그림 6. 저항부하에서의 출력전압

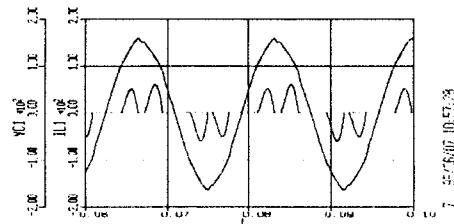


그림 7. 정류기부하에서의 출력전압과 부하전류

DCLink전압	480 V	Lp	0.1 mH
출력전압	110 V[rms]	Cp	400 uF
SW frequency	10 KHz	정격용량	5 KVA

표 1. 시뮬레이션 파라미터

6. 결론

전류제어기와 전압제어기를 PI제어기로 사용하여 강인한 제어의 특성을 얻을 수 있었다. 부하예측기법을 사용하여 비선형 부하에서도 빠른 응답특성을 가지고도록 제어기를 구성하였다.

또한 스위칭 방식으로 공간벡터 변조기법을 사용하여 전압이용률과 정상상태에서의 응답특성을 향상시켰다.

제안된 알고리즘은 선형 및 비선형부하에서의 시뮬레이션을 통해 양호한 결과를 얻었으며, 향후 제안된 방식을 실험을 통해 UPS에 적용시키는 것이 앞으로 계속 연구해야 할 과제이다.

참고문헌

1. T. Kawabata, et al, "Dead Beat Control Three Phase PWM Inverter", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 5, No. 1, January, pp.21-28, 1990
2. K. Jezernik, et al, "Microprocessor Controlled Inverter for UPS Applications" *Proc. of EPE '89*, pp.1121-1125
3. Jae-Ho Choi, et al, "Real Time Digital Control of UPS" *ICPE* pp.184-189, 1995
5. David M. Brod, et al, "Current Control of VSI-PWM Inverters" *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. IA-21, No. 4, pp.562-570, 1985
6. Ned Mohan, *Power Electronics* 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc. 1996.