

## IGBT를 적용한 300kVA급 대용량 무정전전원장치 개발

변영복 김태진 조기연 박성준 김철우

한국전기연구소 전력전자연구부 \*\*거제대 전기과 \*\*\*부산대학교 전기공학과

### Development of the 300kVA Large Capacity IGBT UPS

Y. B. Byun T. J. Kim K. Y. Joë S. J. Park C. U. Kim  
KERI Koje College Pusan Natl. Univ.

**Abstract** - In order to maintain a high quality output voltage, conventional UPS systems use complex filters with large passive components. To overcome this drawback, real time feedback control schemes have been invested. However, these techniques require a high inverter switching frequency to dynamically adapt to changing load conditions reduce harmonics of the output voltage, thereby rendering the system inadequate for high power applications.

This paper presents real time digital signal processor(DSP) control of a large capacity UPS system feeding nonlinear loads to provide a sinusoidal inverter output voltage, unity input power factor, low bus voltage ripple, and excellent transient response.

#### 1. 서 론

무정전전원장치(Uninterruptible Power Supply : 이하 UPS라 함)는 상용전원에서 발생 가능한 전원장해를 극복하여 부하에 양질의 안정된 교류전력을 공급하는 중요한 전원장치이다. 입력부인 컨버터의 경우에는 주로 다이오드를 이용한 정류기를 주로 사용하여 왔으나, 일반적으로 다이오드 정류방식의 컨버터에는 펄스상의 전원전류가 흐르게 되어 전원 역률이 0.6 - 0.7 정도로 나빠진다. 더구나 저차의 고조파 전류가 흐르게 되어 전력계통 장애를 일으킨다. [1] 한편 성에너지 측면에서도 전원역률이 개선되고 전원회생이 가능한 컨버터가 요망되고 있어 입력의 단위역률화와 입력전류의 정현화가 중요한 연구과제로 등장하게 되었다. 따라서 직류측 부하에 무관하게 교류 입력측 역률을 단위 역률화하면서 입력전류의 고조파를 감소시키는 물론 부하변동에 대한 동특성을 개선시키기 위한 여러 가지 PWM 제어기술에 큰 관심이 모아지고 있다. [2]

한편 UPS의 부하에 최종적으로 전력을 공급하는 직류-교류 변환기인 인버터에서는 교류측 부하에 무관하게 출력전압을 정현파에 가장 가깝게 만드는 기법이 UPS용 PWM 인버터의 주요 연구대상이 되고 있다. 특히 통신설비, 공장자동화 설비, 첨단 의료 기기 등 전원의 외란이나 전압의 왜형에 매우 민감한 전자장치들의 사용이 급증함에 따라 UPS는 정전압, 정주파수의 전원 공급 능력뿐만 아니라 부하조건에 관계없이 최소한의 THD(Total Harmonic Distortion)을 가지는 정현파의 출력전압을 제공하여야 한다.

이러한 전자부하들은 대부분 정류기와 같은 비선형부하이므로 부하전류의 고조파 성분으로 인하여 UPS 출력전압의 THD를 크게 증가시킨다. [22]-[24] 대용량 UPS에서 THD 저감을 위한 종래의 방식으로는 출력 주파수의 3, 5, 7, 배 등의 L-C 공진 필터를 인버터의 출력단에 접속하는 방식이 있으나

UPS의 크기 및 경제적인 단점이 있으며 부하조건에 따라 필터의 정수를 변화시키지 않으면 안 된다.

본 연구에서는 상시 인버터 급전방식의 대용량 3상 UPS의 입출력 특성을 개선하기 위하여 IGBT를 사용한 3상 승압형 PWM 컨버터와 3상 PWM 인버터로 정격용량 300kVA 급의 시스템을 구성하고 고속의 DSP 제어장치를 이용한 고정도 제어방법을 적용하였다.

입력부인 3상 컨버터에서는 디지털 제어를 위하여 D-Q변환에 의한 수학적 모델링과 전압 및 전류제어를 설계하고, 단위역률 및 입력전류의 정현화를 위한 폴 디지털 제어기법을 적용하였다.

출력부인 3상 인버터에서는 급변하는 비선형부하에서도 정현적인 출력전압과 빠른 과도응답 특성을 소프트웨어로 구현하는 새로운 고조파 보상기를 제안하였다. 출력전압 왜형의 원인인 부하전류의 고조파 성분에 해당하는 고조파 전압원을 인버터의 기본파 지령전압에 합성하여 PWM 파형을 출력함으로써 출력전압의 고조파 성분을 보상하도록 하였다.

#### 2. 시스템 구성 및 제어

##### 2.1 시스템 구성

그림 1은 UPS의 전체 구성도이다. 입력부인 컨버터는 DC링크 전압제어와 입력역률 및 입력전류의 정현화를 위하여 3상 PWM 승압형 컨버터로 구성하고, 출력 측은 3상 PWM 인버터로 구성하였다. 이 외에 UPS의 특성상 출력전압 필터링을 위한 L-C 필터와 절연을 위한 출력 변압기 및 바이패스 회로가 필요하다.

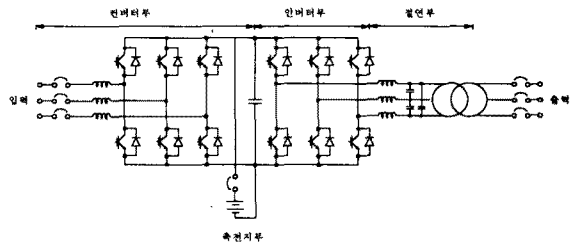


그림 1. UPS 시스템 구성도

##### 2.2 3상 PWM 승압형 컨버터의 제어

주 스위칭 소자의 저항을 무시하고 3상 전압평형으로 가정하면 3상 PWM 컨버터에 관한 입출력 전압 전류 관계는 다음과 같이 수학적으로 모델링 된다.

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \sum_{k=1}^3 i_k d_k - i_{dc} \quad (1)$$

$$L \frac{di_k}{dt} + R i_k = e_k - u_{dc}(d_k - \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 d_n); k=1,2,3 \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^3 e_k = \sum_{k=1}^3 i_k = 0 \quad (3)$$

여기에서  $k$ : 3상 전원을 위한 인덱스 = {1, 2, 3},  $d_k$ :  $k$ 상의 스위칭 함수,  $i_k$ :  $k$ 상 선전류,  $e_k$ :  $k$ 상 상전압,  $u_{dc}$ : 직류 링크 전압,  $i_{dc}$ : 출력 전류,  $R, L$ : 인터페이스 인덕터의 저항과 인덕턴스이다.

식(1)-식(3)을 2상 동기좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (i_q^e d_q^e + i_d^e d_d^e) - i_{dc} \quad (4)$$

$$L \frac{di_q^e}{dt} = e_q^e - u_{dc} d_q^e - \omega L i_d^e - R i_q^e \quad (5)$$

$$L \frac{di_d^e}{dt} = e_d^e - u_{dc} d_d^e + \omega L i_q^e - R i_d^e \quad (6)$$

식(4)에서 식(6)까지의 식들은 제어시스템 설계를 위한 기본관계식으로 2상 동기좌표계 모델의 블록도는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

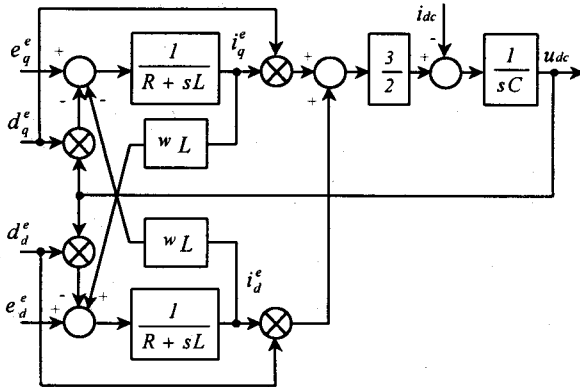


그림 2. 2상 동기좌표계 모델의 컨버터 블록도

제어기는 전압제어기와 전류제어기로 구성되며, 전압 제어기는 DC 링크 전압을 제어하며, 전류제어기는 기준 지령치  $i_q^e$ 와  $i_d^e$ 에 따라 전력과 역률을 제어한다.

### 2.2 비선형부하에 대응하는 3상 UPS 인버터의 제어

UPS는 비선형부하로 인하여 고조파 전류가 출력필터의 콘덴서에 흐르면 출력전압은 파형 왜형을 일으켜 THD가 증가하게 된다. 이 고조파 전류를 등가적인 고조파 전류원이라고 가정할 수 있다. 여기에서 한상분으로 등가화 하여 나타낸 그림 3과 같이 부하측의 고조파 전류원을 인버터측으로 변환하면, 기본파 전원에 직렬로 접속시킨 고조파 전압원이 된다.[3]

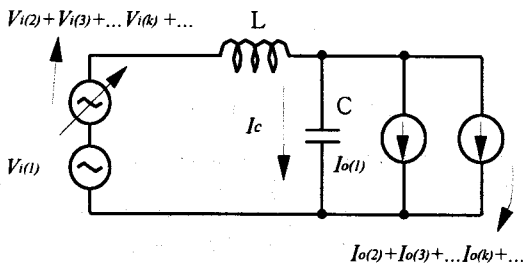


그림 3. 3상 인버터의 단상 등가회로

인버터의 기본파 전원에 고조파 전압원을 만들기 위한 합성 PWM 파형을 만들고, 직접 인버터의 PWM 전압에서 부하측으로 고조파 전류를 흐르게 하면, 인버터 출력 필터의 콘덴서에서는 상기의 보상된 고조파 전류가 흘러 출력전압 파형은 거의 정형파형으로 할 수 있다.

부하전류와 PWM 인버터 출력전압의 관계를 수식으로 표현하기 위하여 그림 4의 인버터 출력단에서  $k$ 차 고조파 성분에 대해서 전류방정식을 세우면 식(7)과 같다.

$$\frac{V_{i(k)} \angle \psi_k - V_{\alpha(k)}}{j\omega L} = j\omega C V_{\alpha(k)} + I_{\alpha(k)} \angle \theta_k \quad (7)$$

여기에서,  $I_{\alpha(k)}$ 는 부하전류에 함유된  $k$ 차 고조파 성분,  $V_{i(k)}$ 는 인버터 전압에 포함된  $k$ 차 고조파 성분,  $V_{\alpha(k)}$ 는 출력전압에 포함된  $k$ 차 고조파 성분이며 각각의 위상의 기준은  $V_{\alpha(k)}$ 이다. 식(7)을 정리하면 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{\alpha(k)} = K V_{i(k)} \angle \psi_k + K k \omega L I_{\alpha(k)} \angle (\theta_k - \frac{\pi}{2}) \quad (8)$$

$$\text{여기서, } K = \frac{1}{1 - (k\omega)^2 LC}$$

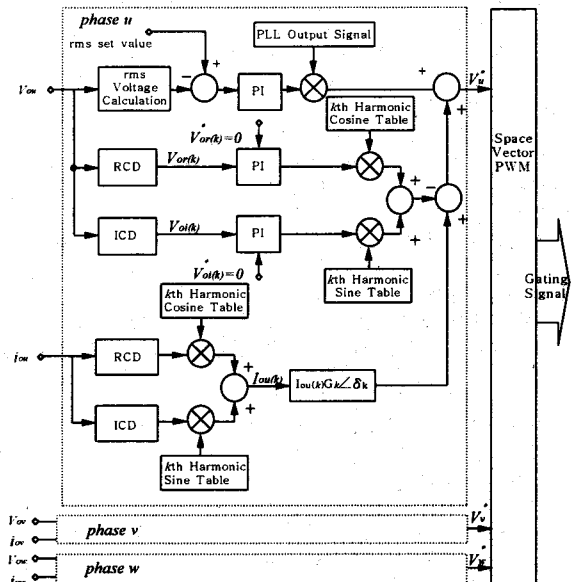
식(8)에서 출력전압의 고조파 성분  $V_{\alpha(k)}$ 가 영이 되게 하기 위해서는 인버터에서 식(9)와 같은 고조파 성분을 포함한 PWM 인버터 전압을 출력하면 된다.

$$V_{i(k)} \angle \psi_k = k\omega L I_{\alpha(k)} \angle (\theta_k + \frac{\pi}{2}) = I_{\alpha(k)} G_k \angle \delta_k \quad (9)$$

$$\text{여기서, } G_k = k\omega L, \quad \delta_k = \theta_k + \frac{\pi}{2}$$

그림 4는 UPS PWM 인버터의 부하전류 고조파를 보상하기 위한 제어구성도이다. 제어기는 출력전압 기본파 성분 제어기와 고조파 성분 보상기로 구성된다.

기본파 성분 제어기의 출력은 적절한 기본파 전압오차 보상신호이다. 이 보상신호는 출력전압과 동기를 맞추기 위해 동작되는 위상동기회로(PLL)의 출력신호와 곱해져서 출력전압의 기본파 크기를 제어하기 위한 지령전압이 된다.



- RCD : Real Component Detector of kth Harmonic
- ICD : Imaginary Component Detector of kth Harmonic

그림 4. 제안된 UPS 인버터 제어기의 구조도

고조파 보상신호는 부하전류 고조파 보상기와 출력전압 고조파 보상기로 구성된 고조파 보상기에 의해서 생성된다. 부하전류 고조파 보상기에 의해 생성된  $V_{i(k)} \angle \psi_k$ 만이 고조파 보상신호로 입력되면, 센서의 오차 및 고조파 분석

의 오차 등으로 인하여 시스템이 불안해 질 수 있다. 이러한 오차를 보상하여 시스템의 안정성을 높이기 위하여 출력전압 고조파 보상기가 추가된다. 불평형 부하에 대해서는 각 상 별로 보상기를 동작시키고, 보상하고자 하는 특정 고조파가 많을수록 그에 비례하여 고조파 보상기를 증가시킨다.

### 3. 제작 및 실험

#### 3.1 시스템 설계 및 제작

전체 UPS 시스템 구조는 4개의 합으로 구성되어 있다. 입력부 CB 및 소프트 충전을 위한 마그네틱 스위치로 구성된 입력 스위치부, 컨버터부, 인버터부, 절연부 및 바이패스 스위치로 구성된 출력 스위치부로 구성된다. 그림 5는 제작된 300kVA UPS 외관이며, 그림 6은 전면 내부 모습이다.

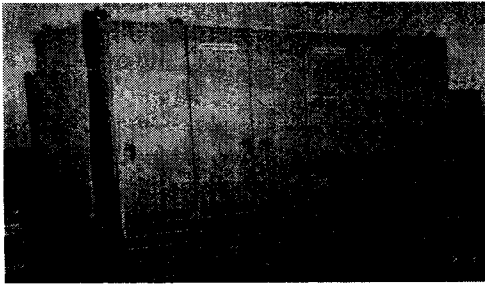


그림 5. 300kVA UPS 외관

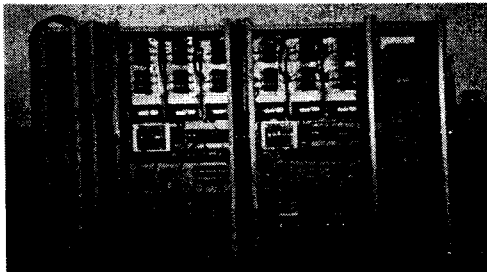


그림 6. 300kVA UPS 내부

사용된 제어기의 하드웨어는 TMS320C40을 적용한 DSP 주보드, 아날로그 보드, 디지털 보드 및 로직 인터페이스 보드로 구성된다.

전력부 스택은 1,200V, 900A Dual IGBT 2개를 병렬로 연결하여 각 상을 구성하였다. 배선 인덕턴스를 줄이기 위하여 한 개의 Dual IGBT로 상 하단의 한상 스위치를 구성하고 같은 구조로 다른 Dual IGBT를 병렬로 접속한다.

입력 단의 인터페이스 인덕터는 0.2(mH), DC 링크단 콘덴서 용량은 29,700(uF)이다. 상전류 검출용 CT는 2000(A) 정격의 LT2005-S, DC 링크 전류 및 인버터 출력전류 검출용 CT는 1000(A) 정격의 LT1005-S, DC 링크 전압을 검출하기 위하여 LV-25P를 사용하였다. 출력변압기는 220(V)/380(V),  $\Delta/Y$  구조로 하여 3상 4선식 부하에 적용할 수 있게 하였고, 출력필터의 인덕터는 35.67(uH), 캐패시터는 1,645(uF)이다. DC 링크 전압은 400(V)이다.

#### 3.2 실험 결과

그림 7은 265(kW) 저항부하를 투입하였을 때의 입력전압과 입력전류의 파형이다. 컨버터의 스위칭 주파수는 5(kHz)이다. 그림 8은 입력전류의 고조파 성분을 분석한 것이다. 입력역률 0.98이상, 입력전류의 THD는 5(%) 정도이다. 전류파형에 나타난 왜형은 스위칭 노이즈 때문

이 아니라 DC 링크단 전력의 전향보상기를 민감하게 설정하였기 때문이다. 그림 9는 출력전압, 출력전류 파형 및 출력전압의 고조파 성분을 분석한 것이다. 인버터의 스위칭 주파수는 4.2(kHz)이다, 이 때 입출력 변압기 및 UPS 내부 각 팬들을 포함한 UPS 효율은 89.5(%)이다.

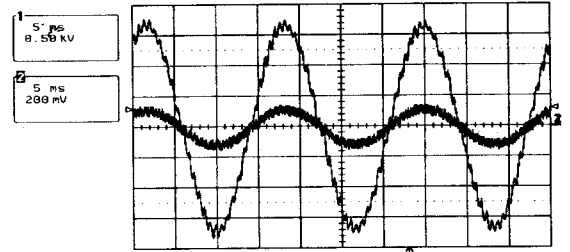


그림 7. 입력전압(500V/div)과 전류(200A/div) 파형

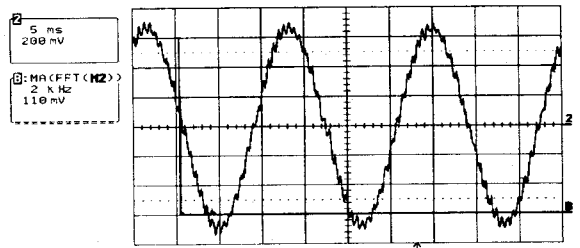


그림 8. 입력전류의 고조파 성분

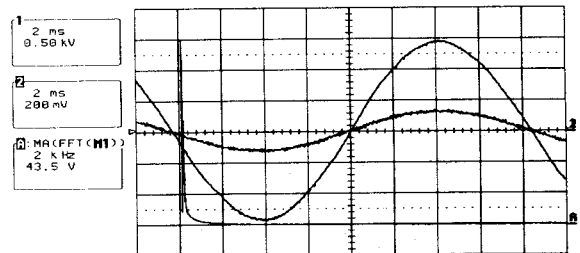


그림 9. 출력전압(500V/div)과 전류(200A/div) 및 출력전압의 고조파 성분

### 4. 결 론

본 연구에서는 급변하는 비선형부하에서도 정형적인 출력전압과 빠른 과도응답 특성을 소프트웨어로 구현하는 새로운 고조파보상기에 의하여 제어되는 3상 인버터와 3상 승압형 컨버터로 구성된 용량 300(kVA)의 UPS를 제작하여 양호한 입출력 특성을 얻었다. 제안된 제어방식으로 실시간 제어를 하기 위해서 고속의 DSP 소자를 이용한 전 디지털 제어장치를 적용하였다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] C.P.Henze and N.Mohan, "A digitally controlled AC to DC power conditioner that draws sinusoidal current", PESC'86, pp.531-540, 1986.
- [2] A.Busse and J.Holtz, "Multiloop control of a unity power factor fast switching AC to DC converter", IEEE, PESC'82, pp.171-179, 1982.
- [3] 변영복,조기연,박성준,김철우, "새로운 고조파 보상기를 이용한 비선형 부하 대응 3상 UPS 인버터의 DSP에 의한 제어" 전기학회논문지, 46권, pp.1756-1763, 1997.