

단위 역률로 동작하는 3상 PWM AC-DC BOOST컨버터에 관한연구

· 천 창근*, 박 성준*, 권 순재**, 김 철우*
 (* 부산 대학교, ** 부산 공업대학교)

THREE PHASE PWM AC-DC BOOST CONVERTER WITH UNITY POWER FACTOR

Chang-Gun Chun*, Sung-Jun Park*, Soon-Jae Kwon**, Chul-U Kim*
 (* Pusan Univ., ** Pusan Inst.Univ)

Abstract

In this paper, the development of input power factor and the harmonic distortion of line current were showed in the proposed three phase AC-DC converter. We identified that DC voltage in the output terminal has fast dynamic response and has nearly ripple. Moreover, the converter also possesses the regenerative capability which is useful for many applications. The switching frequency of this converter operated with constant in the range of 2KHZ. Finally, simulation and experiment results are presented.

1. 서론

현재 산업계에서 사용되는 많은 기기 및 장치에서 DC전압은 중요한 역할을 하고 있다. 기존의 AC-DC전력변환장치는 위상제어 정류기나 출력전압을 제어할 수 없는 다이오우드 정류기를 사용해왔다. 그러나, 이와 같은 AC-DC전력변환장치에서는 AC전원단에서 전류도통각이 협소해져 펄스상의 전류가 흘러 변압기 이용률과 역률을 떨어뜨린다[1]. 그러므로 이를 개선하기 위하여 교류입력측과 직류출력측에는 큰 용량의 L, C를 필요로 하게되고, 이로인한 전력변환장치의 부피가 커져 경제성이 낮아진다. 따라서 교류입력역률을 최대한 개선하고 정현파로 유지한다는 것은 에너지 절감이라는 관점에서 뿐만 아니라 경제적인 면에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 80년대 초 Schlecht씨가 전류와 전압의 귀환루프를 통한 다이내믹한 고역률 AC-DC컨버터 제어를 제안한 이후 최근에는 DC-link출력전압의 리플이 거의 없는 3상 AC-DC컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고있다. 이와 같은 단위역률을 구현하는 PWM정류기를 사용하면 기존의 AC-DC전력변환장치에 비해 보다 복잡한 제어가 요구되는 단점이 있지만 컨버터의 스위칭을 순시 제어하여 입력 역률을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 입력 전류의 인그림을 줄일 수 있다는 큰 장점이 있다. 또한 PWM정류기의 단점인 제어회로의 복잡성은 최근 발달하고 있는 단일칩 마이크로프로세스에 의한 제어알고리즘의 기술개발로 극복되어지고 있는 실정이다.

현재 이러한 목적을 위하여 3상 AC-DC 컨버터에 대한 많은 제어방법들이 제시되고 있지만 각각의 특성이 모두 같은 것은 아니다[2]. 일반적으로 전류 밴드 폭 제어는 여러가지 장점이 있지만 스위칭 주파수가 일정하지 않으므로 부하변동에 따라 스위칭 stress가 달라지는 단점이 있다. 이에 비해

일정 주파수 제어는 스위칭 주파수를 일정하게 고정할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 3상 입력전원을 컨버터에 의해 빠른 동적 특성을 가진 출력전압조정과 동시에 전원측에서 선간전류는 상전압과 동위상에 가까운 정현파가 되도록 제어하는 방법을 제안한다. 이를 실현하기 위해 전류센서없는 비교적 간단한 제어알고리즘을 도출하였으며 제어기법으로서 구현하기 쉬운 정현 PWM제어를 행하였다. 또한 대전력에서 필수적인 스위칭 손실을 줄이기 위하여 스위칭 주파수를 비교적 낮은 2KHz로 고정했다. 부하가 능동부하인 경우 발전영역을 가지므로 전원쪽으로 전력 회수를 위해 4상한 동작이 가능한 제어방법을 사용하였다. 마지막으로 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 전류파형을 FFT프로그램으로 분석하여 고역률동작을 확인하고 리플이 거의 없는 출력전압을 확인한다.

2. 제어 알고리즘

2.1 주회로 구성

제안한 컨버터는 부스터 형태의 인덕터와 커패시터를 가지고 있으며 6개의 각 스위치소자는 양방향 전력전달이 가능하도록 다이오우드가 역병렬로 연결된 IGBT 전력용 반도체로 구성되어 있다. 3상 PWM AC-DC 컨버터의 주회로구성은 그림 1과 같다.

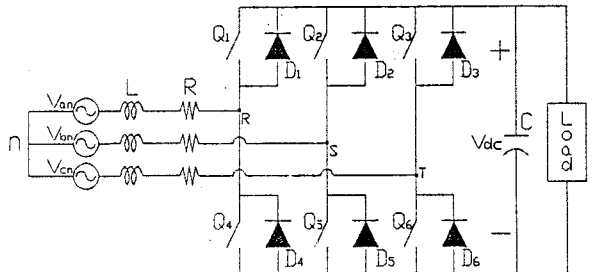


그림 1. PWM컨버터의 주회로도

주회로도에서 표시된 V_{an}, V_{bn}, V_{cn} 은 입력 상전압이고, 주전원과 컨버터 사이에 L은 변압기의 누설성분을 포함한 등가 인덕턴스값이다. 저항 R은 스위칭손실에 의한 스위치 소자의 등가저항과 인덕터권선의 등가저항을 동시에 포함한 저항값을 표현했다. 그리고 출력 측의 C는 고속 스위칭에서도 양호한 동적특성을 가지기 위해서 위상제어 정류기에 비해 비교

적 적은 용량의 커패시터를 사용했다.

입력 상전압이 3상 평형이라고 가정하면, 회로의 전압방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$V_{an} - V_{bn} = L \frac{di_{as}}{dt} + Ri_{as} + V_{RS} - L \frac{di_{bs}}{dt} - Ri_{bs} \quad \text{-----}(1)$$

$$V_{bn} - V_{cn} = L \frac{di_{bs}}{dt} + Ri_{bs} + V_{ST} - L \frac{di_{cs}}{dt} - Ri_{cs} \quad \text{-----}(2)$$

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{-----}(3)$$

$$V_{RS} + V_{ST} + V_{TR} = 0 \quad \text{-----}(4)$$

식(1), (2), (3), (4)를 이용하여 각 상전압을 구하면 다 음 식과 같다.

$$V_{an} = L \frac{di_{as}}{dt} + Ri_{as} + \frac{1}{3}(2V_{RS} + V_{ST}) \quad \text{-----}(5)$$

$$V_{bn} = L \frac{di_{bs}}{dt} + Ri_{bs} + \frac{1}{3}(-V_{RS} + V_{ST}) \quad \text{-----}(6)$$

$$V_{cn} = L \frac{di_{cs}}{dt} + Ri_{cs} + \frac{1}{3}(-V_{RS} - 2V_{ST}) \quad \text{-----}(7)$$

위 식에서 스위칭 패턴에 의해 결정되는 전압 V_{RS} , V_{ST} , V_{TR} 은 다음과 같이 정의한다. [3]

$$V_{RS} = d_1 \frac{V_{dc}}{2} - d_2 \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{-----}(8)$$

$$V_{ST} = d_2 \frac{V_{dc}}{2} - d_3 \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{-----}(9)$$

$$V_{TR} = d_3 \frac{V_{dc}}{2} - d_1 \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{-----}(10)$$

- 단, 여기서 d_1 1 만약 Q1 또는 D1이 ON하면
 -1 만약 Q4 또는 D4이 ON하면
 d_2 1 만약 Q2 또는 D2이 ON하면
 -1 만약 Q5 또는 D5이 ON하면
 d_3 1 만약 Q3 또는 D3이 ON하면
 -1 만약 Q6 또는 D6이 ON하면

으로 나타난다.

2.2 단위역을 알고리즘

본 연구에서의 단위역을 알고리즘을 적용하기 위해 식(5), 식(6), 식(7)을 입력임피던스(R,L)양단 전압으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_{an} = V_{RL1} + V_{Rn} \quad \text{-----}(11)$$

$$V_{bn} = V_{RL2} + V_{Sn} \quad \text{-----}(12)$$

$$V_{cn} = V_{RL3} + V_{Tn} \quad \text{-----}(13)$$

$$\text{단, } V_{RL1} = L \frac{di_{as}}{dt} + Ri_{as},$$

$$V_{RL2} = L \frac{di_{bs}}{dt} + Ri_{bs},$$

$$V_{RL3} = L \frac{di_{cs}}{dt} + Ri_{cs}$$

정상상태에서 a상, 즉 식(7)에 대해서만 적용하여 등가 회로도를 그려보면 그림 2와 같다.

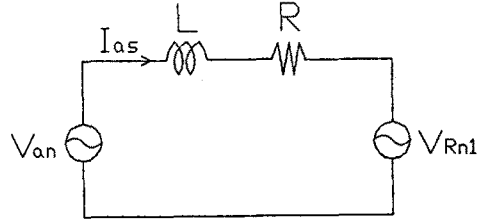


그림 2. 한 상에 대한 등가회로

그림 2에서 V_{Rn1} 은 펄스전압인 V_{an} 의 기본과 성분을 나타낸다. a상 전류인 I_{as} 는 입력 임피던스의 양단전압인 V_{RL1} 보다 위상이 항상 $\delta = \tan^{-1}(\omega L/R)$ 만큼 뒤진다는 사실을 알 수 있다. 그러므로 입력 임피던스의 양단전압 V_{RL1} 이 입력 상전압인 V_{an} 보다 위상이 δ 만큼 앞설 수 있도록 입력 임피던스의 양단전압의 지령전압이 $|V_{RL1}| < \delta$ 로서 주어진다. 단위역률상태가 이루어 질 것이다. 따라서 펄스전압의 지령치는 다음과 같다.

$$V_{Rn1} = V_{an} - |V_{RL1}| < \delta \quad \text{-----}(14)$$

위 식에서도 나타나듯이 본 제어 알고리즘의 단점은 최소정수인 입력 임피던스(R,L)를 정확하게 알아야 한다는 것이다. 그러나 이들 파라메타는 온도나 자기코어의 포화상태에 따라 변하므로 항상 일정하지는 않다. 그림 3은 부하영역과 발전 영역에서의 페이저도를 표현한 것이다.

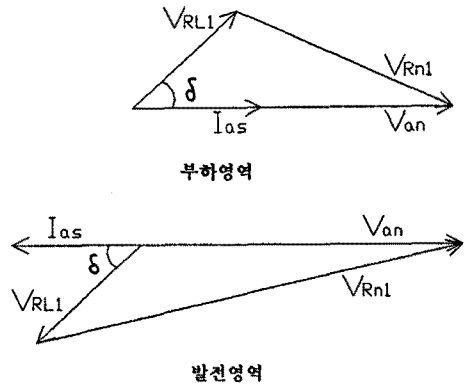


그림 3. 부하영역과 발전영역에서의 페이저도

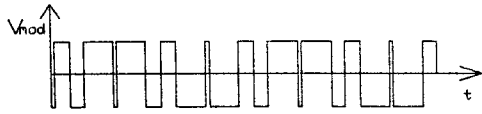
그림 3에서 알 수 있듯이 부하가 발전영역일 때는 입력임피던스 지령전압의 방향이 부의 방향으로 바뀌어져 전압위상에 반전되는 전류가 동작하게 된다.

3. 정현PWM의 동작 해석

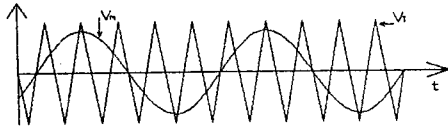
PWM컨버터에서 기존의 컨버터에 비해 낮은 차수의 고조파가 줄어드는 장점이 있지만 대용량이거나 스위칭 회수가 증가함으로써, 스위칭 손실이 증가할 뿐만 아니라 고주파 Harmonics에 의한 EMI가 발생한다는 단점이 있다. 그러므로 가능한 낮은 스위칭 주파수로 동작하되 저차 고조파가 발생하지 않는 범위에서 스위칭 주파수를 설정할 필요가 있다.

본 연구에서는 PWM방식으로서 비교적 구현하기 쉬운 정현 PWM방식을 채택하였다. 그림 4의 (a)는 전형적인 정현 PWM의

스위칭 패턴을 나타낸다. 스위칭하는 순간은 삼각파 V_T 와 모듈레이션전압 V_{mod} 이 서로 만나는 순간이다. 만약 커패시터 C 가 중간에 탭을 가지고 있다면 모듈레이션 전압파형은 그림 (b)와 같이 $+0.5V_{dc}$ 와 $-0.5V_{dc}$ 로 나타날 수 있다[4].



(a) 펄스 전압



(b) PWM 파형

그림 4. 정현 PWM의 스위칭 패턴

4. 전체 제어기의 구성

그림 5는 전체 Block Diagram을 나타내고 있다. 출력단은 PI제어기를 사용하여 제어하였으며, 제어기의 입력은 지령전압과 실제전압과의 차전압인 Error전압이고 출력은 입력임피던스 양단전압의 지령치이다. 또한 검출된 전원측의 상전압과 입력임피던스전압의 지령치의 차가 모듈레이션전압이되어 Carrier전압인 삼각파와 비교함으로써 비로소 단위역률이 이루어진다. 출력전압의 리플은 거의 영에 가까우며, 모듈레이션전압의 선형동작영역에서 최소 출력전압은 입력 상전압의 두배의 피크치가 된다[5].

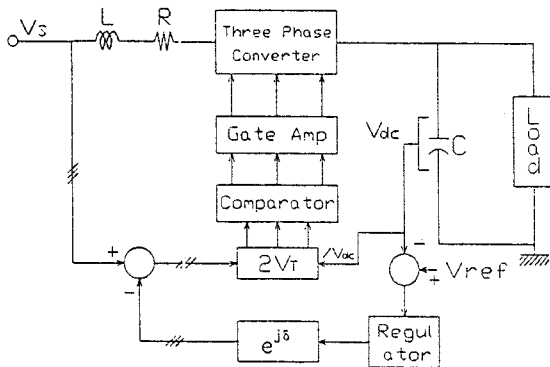


그림 5. 전체 블럭 다이어그램

5. 시뮬레이션 및 실험결과

본 논문에서 제안한 컨버터를 1KW저항부하에 대해서 행하였으며 각 회로정수는 다음과 같다.

$$L = 2\text{mH}, C = 500\mu\text{F}, \text{스위칭 주파수} = 2\text{KHZ}$$

시뮬레이션 및 실험파형을 다음 그림에 표시했다.

6. 결론

제안된 3상 PWM AC-DC컨버터의 제어알고리즘을 시뮬레이션으로 분석하여 실제 1KW 저항부하에 대하여 정류모드와 발진모드에서 동시에 선간전압과 상전류사이에 단위 역률이 이루어지는 것을 확인하였고 입력전류의 왜형률과 DC전압의 리플도 매우 작은 것을 확인하였다. 또한 과도상태에서 전체 시스템의 동적특성이 양호함을 확인하였다.

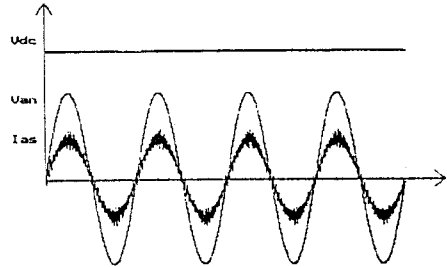


그림 6. 출력전압, 상전압, 선간전류파형 : 시뮬레이션

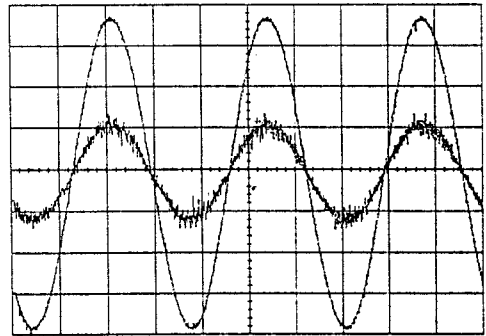


그림 7. 상전압(20V/div), 선간전류(10A/div)파형 : 실험

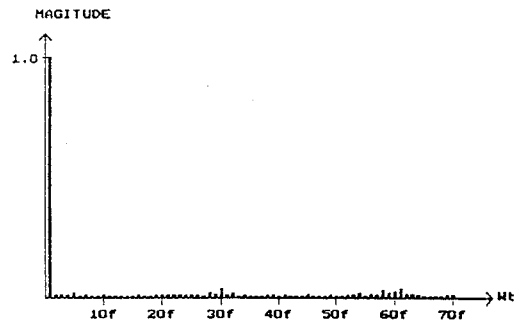


그림 8. 실험에서 얻은 선간전류 고조파 분석 고조파 차수는 70차까지

REFERENCES

- [1] D.D.Shipp, "Harmonic analysis and suppression for electrical systems supplying power converters and other nonlinear loads," Trans. on IEEE/IAS, Vol IA- 15, No.5, Sept./Oct. 1979, pp.1-6.
- [2] WERNEKINCK, E, KAWAMURA, A, and HOFT, R.: 'A high frequency AC/DC converter with unity power and minimum harmonic distortion', IEEE-PESC Record, 1987, pp.264-270
- [3] W.I.Tsai, Y.Y.Sun, J.Y.Lee, "Design of a high performance three-phase UPS with unity input power factor and high DC-voltage conversion ratio," IEEE/IAS 1993 annual meeting, conf. rec. pp.105-110.
- [4] WU, R, DEWAN, S.B, and SLEMON, G.R.: 'Analysis of an AC-DC voltage source converter using PWM with phase and amplitude control', 1991, IA.27, pp.355-364
- [5] N.Mohan, T.Undeland, W.P.Robbins, "Power Electronics: Converters Applications and Design," John Wiley & Sons, Inc. 1989, p.132.