

전압 Sag와 Surge에 대한 순시보상 기능을 갖는 PWM Buck AC-AC 컨버터

최 남 섭

여수대학교 전기 및 반도체공학과

A PWM Buck AC-AC Converter with Instantaneous Compensation for Voltage Sag and Surge

Choi, Nam-Sup

Dept. of Electrical Engineering, Yosu National University

ABSTRACT

This paper presents a PWM buck AC-AC converter with instantaneous compensation for input voltage sag and surge. The presented converter use commercial IGBT modules and its output voltage is regulated so as to remain constant AC output voltage. The feedforward control technique is also proposed to establish instantaneous duty level change whereby stable output voltage will be retained. This paper show the characteristics and control algorithm of the converter through various PSPICE simulations.

터가 매우 유용함이 밝혀지고, 실용적인 연구들이 뒤따르면서 기타 타 분야에 비하여 비교적 연구가 미진하였던 AC 초퍼에 대하여 관심이 증대되고 있다^[2].

본 논문에서는 PWM Buck AC-AC 컨버터의 동작원리와 기본적인 특성을 밝히고, 입력전압의 sag 나 surge에도 불구하고 일정한 AC 출력전압을 얻을 수 있는 순시적인 보상이 가능한 알고리즘을 제안한다. 또, 이러한 동작원리와 특성 및 알고리즘에 대하여는 PSPICE 시뮬레이션을 통해서 그 타당성 및 유효성을 밝혔다.

1. 서 론

오늘날 산업 현장에서 많이 사용되고 있는 디지털 컴퓨터나 자동화 설비 제조공정 등은 순간적인 전압강하나 수 사이클 동안의 짧은 정전에도 매우 예민하게 동작한다. 그 결과 막대한 정보의 손실, 중요 설비의 오동작 및 운전정지로 예상치 못한 심각한 경제적 손실을 초래하기도 한다. 그러므로 정밀한 장치들을 안전하게 운전하기 위해서 무정전 전원장치나 기타 다른 전력 조절장치가 사용되어 전력품질 모니터링을 위한 IEEE 1159 규정 등을 만족하도록 하고 있다^{[1],[2]}.

본 논문에서는 수용가에 공급되는 전력의 품질을 높일 수 있는 수용가 전원 응용을 위한 3상 PWM Buck AC-AC 컨버터를 다룬다. AC 초퍼는 그동안 주로 SCR을 사용한 방식이 주로 사용되다가 최근 들어 IGBT와 같이 자기소호형 소자가 발달함에 따라, PWM AC 초퍼에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[3]-[6]}.

특히 이러한 추세는 EPRI에서 제안된 Custom Power의 개념을 구현하는데 PWM AC-AC 컨버

2. 시스템 구성

2.1 동작 원리

그림 1은 출력전압 안정화를 위하여 사용된 3상 PWM buck AC-AC 컨버터를 보인다^{[4]-[6]}.

그림 1에서 X와 X'는 단일 폴의 IGBT 모듈로 구성되며, 따라서 3개의 하프브리지 모듈, 혹은 1개의 3상 인버터 모듈을 변형 없이 사용할 수 있다.

또, 그림 1에서 R은 부하를 나타내며, 인덕터와 커패시터는 출력필터로 사용되었다.

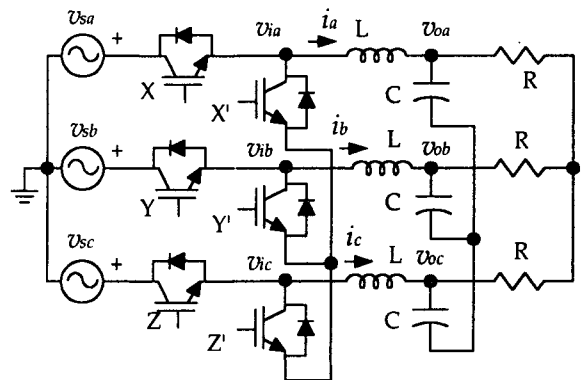


그림 1 3상 PWM Buck AC-AC 컨버터.

그림 1에서 스위치 X, Y, Z는 동시에 ON되며 이때 X', Y', Z'는 동시에 OFF되고, 입력전압이 LC필터를 통하여 부하에 전달된다. 또, X, Y, Z가 동시에 OFF될 때는 X', Y', Z'가 모두 ON되어 입력과 출력측이 분리되고, 필터의 에너지는 부하나 스위치를 통하여 환류한다. 그러므로 그림 1의 회로는 Duty ratio, D 단 한 개만의 제어변수를 갖는다. 즉 정상상태에서 부하에 인가되는 선간전압의 크기는 다음과 같다.

$$V_o = DV_s \quad (1)$$

여기서 V_s 는 입력전압의 선간전압의 실효값이다.

2.2 동작 특성

그림 1의 회로의 기본과 성분에 대하여 회로를 해석하여 인덕터와 커패시터의 크기의 기본적인 가이드라인을 정할 수 있다. 필터단의 입력전압의 기본과 성분은 다음과 같다.

$$v_{ia} = D \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} V_s \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$v_{ib} = D \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} V_s \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

$$v_{ic} = D \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} V_s \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4)$$

한편, 그림 1의 3상 회로의 각 시변 전압-전류 변수에 대하여 전원 주파수에 동기된 다음의 DQ 변환을 적용하면 3상의 시변성분이 제거된 식들을 얻을 수 있다. 즉, abc축상의 3상 변수 x_{abc} 를 qdo 축상의 변수 x_{qdo} 로 변환하는 변환행렬 K 는 다음과 같이 정의된다^[7].

$$x_{qdo} = K x_{abc} \quad (5)$$

여기서,

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

그리고,

$$K^{-1} = K^T \quad (7)$$

DQ 변환 결과 얻어진 시스템의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} x = Ax + Bu \quad (8)$$

여기서,

$$x = [i_q \ i_d \ v_{iq} \ v_{id}]^T \quad (9)$$

$$u = D(t) \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & -1/L & 0 \\ \omega & 0 & 0 & -1/L \\ 1/C & 0 & -1/(RC) & -\omega \\ 0 & 1/C & \omega & -1/(RC) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = \left[0 \quad \frac{V_s}{L} \quad 0 \quad 0 \right]^T \quad (12)$$

식 (8)~(12)로부터, 정상상태에서 i_a, i_b, i_c 의 dq성분 I_q, I_d 는

$$I_q = \frac{\left(1 - \frac{X_L}{X_C}\right) \frac{1}{X_C} - \frac{X_L}{R^2}}{\left(1 - \frac{X_L}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{X_L}{R}\right)^2} \cdot DV_s \quad (13)$$

$$I_d = \frac{\left(1 - \frac{X_L}{X_C}\right) \frac{1}{R} - \frac{X_L}{RX_C}}{\left(1 - \frac{X_L}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{X_L}{R}\right)^2} \cdot DV_s \quad (14)$$

이고, 만일 $X_L \ll R \ll X_C$ 이면

$$I_q \cong \frac{DV_s}{X_C} \quad (15)$$

$$I_d \cong \frac{DV_s}{R} \quad (16)$$

이다. 여기서 $X_L = \omega L$, $X_C = 1/(\omega C)$ 이다. 식 (2)~(4)로부터 $V_{iq} = 0$, $V_{id} = DV_s$ 이므로, 전원이 공급하는 유효 전력 P 와 무효전력 Q , 역률 PF 는 다음과 같다.

$$P = V_{iq}I_q + V_{id}I_d \cong \frac{(DV_s)^2}{R} \quad (17)$$

$$Q = V_{iq}I_d - V_{id}I_q \cong -\frac{(DV_s)^2}{X_C} \quad (18)$$

$$PF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cong \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{X_C}\right)^2}} \quad (19)$$

식 (19)로부터, 시스템의 역률이 0.95이상이 되기 위하여 설계상 $R/X_C < 0.32$ 되어야 함을 알 수 있다.

한편, 출력전압 v_{oa}, v_{ob}, v_{oc} 의 dq성분 V_{oq}, V_{od} 는 $V_{oq} = -X_L I_d$, $V_{od} = X_L I_q + DV_s$ 이므로, 출력전압의 크기는, 만일 $X_L \ll R \ll X_C$ 이면

$$\begin{aligned} V_o &= \sqrt{V_{oq}^2 + V_{od}^2} \\ &= DV_s \sqrt{\left(\frac{X_L}{R}\right)^2 + \left(1 + \frac{X_L}{X_C}\right)^2} \cong DV_s \end{aligned} \quad (20)$$

되어, 부하에 관계없이 정해진다.

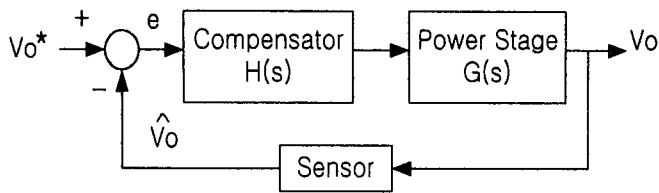


그림 2 기존의 Feedback 제어.

3. 출력전압의 제어

그림 1에 보인 PWM AC-AC 컨버터의 출력전압은 입력전압의 변동과 부하의 변동 두 가지 측면에서 영향을 받는다. 입력전압의 변동 및 교란에는 일시적인 전압저하(sag)나 상승(surge), 짧은 동안 나타나는 spike, impulse, outage 등이 있다. 이 가운데 spike, impulse는 고주파 성분이므로 보통 필터 인덕터나 커패시터에 의하여 차단 또는 흡수된다.

본 논문에서는 입력전압의 일시적 또는 영구적인 저하나 상승에도 불구하고 일정한 출력전압을 유지하도록 하는 새로운 제어기법을 제안한다.

그림 2는 기존의 일반적인 출력전압 제어 블록 다이어그램이다. 그림 2의 방법의 단점은 입력전압 V_s 가 sag나 surge를 겪을 때, 출력전압을 Feedback 받아 D를 제어하기 때문에, 일단 출력전압의 변동을 겪은 후에 제어 루프가 작동한다는 점이다. 그러므로 그림 2는 순간적인 입력전압 변동에 대하여 출력전압의 과도적 섭동이 반드시 동반된다.

그림 3은 입력전압을 센싱하여 직접 D의 명령치를 계산하는 Feedforward 루프를 삽입하여 개선한 방식으로, 입력전압이 변하면 바로 D를 변화시켜 출력전압을 안정화 시키는 방법이다. 즉, 컨버터 입력전압 \hat{V}_s 를 센싱하여 출력전압의 명령치 V_o^* 로 나누어 duty ratio의 명령값 D^* 를 계산하고, 이를 센싱된 현재의 duty ratio \hat{D} 와 비교한다.

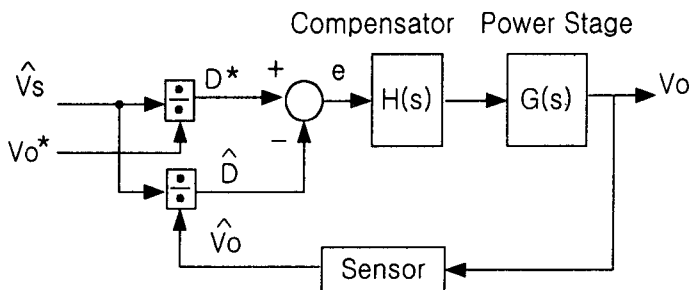


그림 3 입력전압의 Feedforward가 추가된 제어.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

PWM AC-AC 컨버터의 동작과 제어특성을 확인하기 위하여 PSPICE 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 회로정수와 제어변수의 값이다.

표 1 회로정수와 제어변수

기호	항목	값
V_s	Input Phase Voltage	380 V
L	Filter Inductor	200 μ H
C	Filter Capacitor	100 μ F
R	Load	10 Ω
f	Supply Voltage	60 Hz
f_s	Switching Frequency	10 kHz
D	Duty Ratio	0.5

그림 4의 파형은 입출력 선간전압, PWM 변조된 필터 입력단의 선간전압, 필터 인덕터의 전류를 각각 보인다. 그림 4에서 D가 0.5일 때 출력전압은 입력전압의 1/2이 됨을 볼 수 있다.

그림 5는 부하 변동에 대한 시스템의 응답을 나타낸다. 즉 순간적으로 부하를 10 Ω 에서 3.3 Ω 으로 증가시킨 경우이다. 이때 부하전류는 급격하게 증가하나, 출력전압은 약 3 msec의 과도기간을 지나 다시 입력전압의 1/2를 유지함을 확인할 수 있다. 이것은 $X_L \ll R \ll X_C$ 의 조건이 만족될 때, 출력전압의 크기가 부하저항 R의 크기에 따라 정해지지 않는 식 (20)의 결과를 확인 시켜준다.

그림 6은 입력 상전압이 12.45 msec인 순간 220 V에서 180 V로 전압저하(sag)가 발생하였을 때 feedforward 제어되는 AC-AC 컨버터의 동작파형을 나타낸다. 그림 6에서 보듯이 출력전압은 입력전압의 변동에도 불구하고 전혀 영향을 받지 않고 일정한 전압을 유지한다. 이는 그림 6의 (하)에서 보듯이 duty ratio, D가 순간적으로 0.5에서 0.61로 변한 결과이다. 이 경우 맥동하는 파형은 측정으로 얻어진 D이다. 그림 6의 시뮬레이션 파형으로 보듯이, feedforward 제어가 입력전압의 크기의 순시적인 변동에도 불구하고 출력전압을 일정하게 유지하는데 매우 효과적임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 입력전압의 sag나 surge에도 불구하고 일정한 AC 출력전압을 얻을 수 있는 PWM Buck AC-AC 컨버터를 보이고, 동작원리, 기본과 영역에서의 동작특성에 대하여 해석하였다.

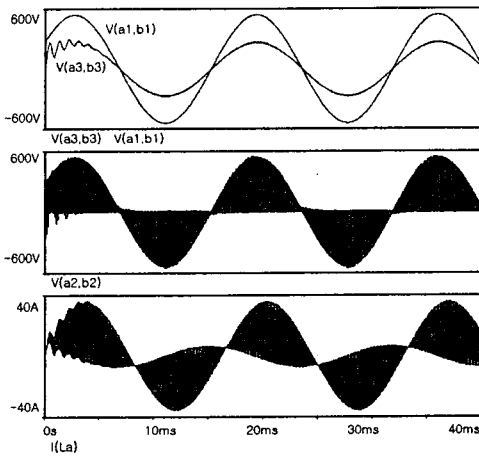


그림 4 동작 파형: (상) 입력선간전압(v(a1,b1))과 출력선간전압(v(a3,b3)), (중) 필터입력 선간전압, (하) 필터 인덕터 전류.

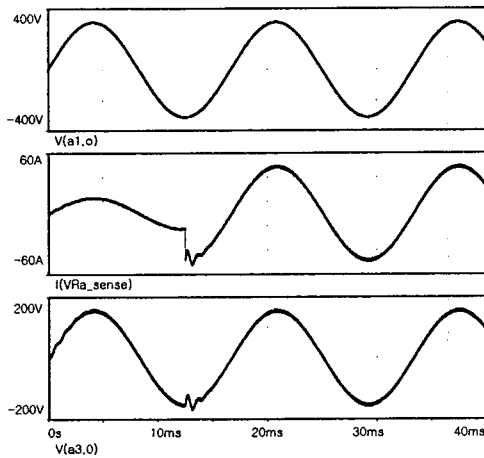


그림 5 부하를 10 Ω에서 3.3 Ω으로 증가시켰을 때의 동작파형: (상) 입력 상전압, (중) 부하 상전류, (하) 출력 상전압.

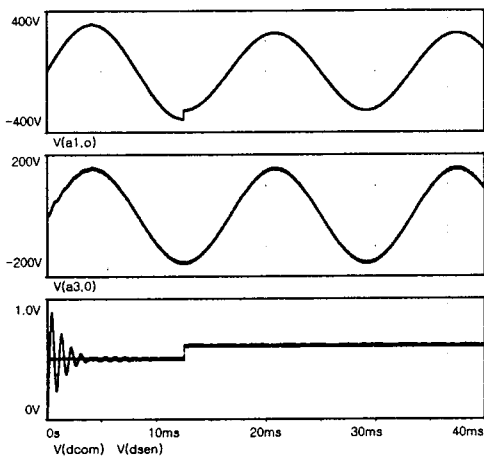


그림 6 입력전압의 sag시 동작파형: (상) 입력 상전압, (중) 출력 상전압, (하) D의 명령값(D*)과 실측값(D̂)

또, 일정한 AC 출력전압을 얻을 수 있는 순시적인 보상이 가능한 개선된 제어 알고리즘을 제안하였다. 또한, 이러한 동작원리와 특성 및 알고리즘에 대하여는 PSPICE 시뮬레이션을 통해서 그 타당성 및 유효성을 밝혔다.

끝으로, 제안된 PWM AC-AC 컨버터는 전자식 변압기나 Phase Shifter, 전력제어기 등으로 활용이 가능하며 이에 대한 연구를 병행하여 추후 발표할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] N. G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities : Role of Power Electronics in Future Power System," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, No. 4, pp. 481~482, 1988, April.
- [2] H. Mehta, "Recent Development: EPRI's Custom power Concept", *Proceedings of Power Quality '93 Conference*, Interec International Inc., Ventura, CA. pp. 794~795, October 1993.
- [3] P. D. Ziogas, et al., "A practical PWM AC Controller topology", *IEEE-IAS Annual Meeting Record*, pp. 880~887, 1992.
- [4] Shanker Srinivasan and Giri Venkataramanan, "Comparative Evaluation of PWM AC-AC Converters", *IEEE Power Electronics Specialist Conference Record*, pp. 529~535, 1995.
- [5] B. H. Kwon, B. D. Min and J. H. Kim, "Novel Topologies of AC Choppers", *IEE Proc., Electr. Power Appl.*, Vol. 143, No. 4, pp. 323~330, 1996
- [6] B. D. Min and B. H. Kwon, "Novel PWM line Conditioner with fast output voltage control", *IEE Proc., Electr. Power Appl.*, Vol. 145, No. 2, pp. 85~91, 1998
- [7] C. T. Rim, N. S. Choi, G. C. Cho and G. H. Cho, "A Complete DC and AC Analysis of Three-Phase Controlled-Current PWM Rectifier Using Circuit D-Q Transformation", *IEEE trans. on Power Electronics*, Vol. 9, No. 4, 1994.

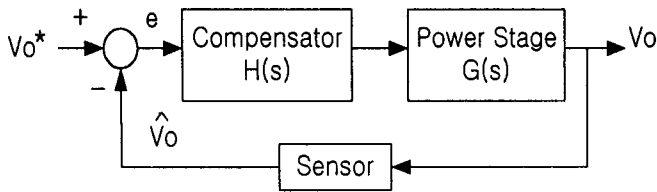


그림 2 기존의 Feedback 제어.

3. 출력전압의 제어

그림 1에 보인 PWM AC-AC 컨버터의 출력전압은 입력전압의 변동과 부하의 변동 두 가지 측면에서 영향을 받는다. 입력전압의 변동 및 교란에는 일시적인 전압저하(sag)나 상승(surge), 짧은 동안 나타나는 spike, impulse, outage 등이 있다. 이 가운데 spike, impulse는 고주파 성분이므로 보통 필터 인덕터나 커패시터에 의하여 차단 또는 흡수된다.

본 논문에서는 입력전압의 일시적 또는 영구적인 저하나 상승에도 불구하고 일정한 출력전압을 유지하도록 하는 새로운 제어기법을 제안한다.

그림 2는 기존의 일반적인 출력전압 제어 블록다이어그램이다. 그림 2의 방법의 단점은 입력전압 V_s 가 sag나 surge를 겪을 때, 출력전압을 Feedback 받아 D를 제어하기 때문에, 일단 출력전압의 변동을 겪은 후에 제어 루프가 작동한다는 점이다. 그러므로 그림 2는 순간적인 입력전압 변동에 대하여 출력전압의 과도적 섭동이 반드시 동반된다.

그림 3은 입력전압을 센싱하여 직접 D의 명령치를 계산하는 Feedforward 루프를 삽입하여 개선한 방식으로, 입력전압이 변하면 바로 D를 변화 시켜 출력전압을 안정화 시키는 방법이다. 즉, 컨버터 입력전압 \hat{V}_s 를 센싱하여 출력전압의 명령치 V_o^* 로 나누어 duty ratio의 명령값 D^* 를 계산하고, 이를 센싱된 현재의 duty ratio \hat{D} 와 비교한다.

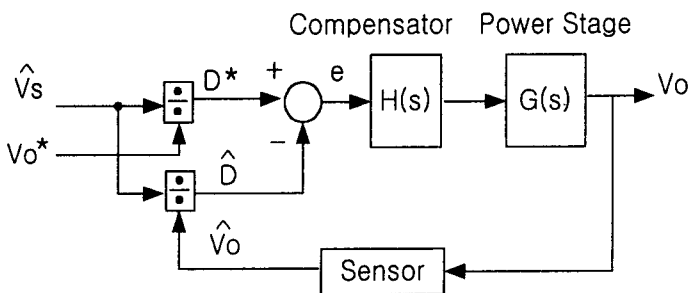


그림 3 입력전압의 Feedforward가 추가된 제어.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

PWM AC-AC 컨버터의 동작과 제어특성을 확인하기 위하여 PSPICE 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 회로정수와 제어변수의 값이다.

표 1 회로정수와 제어변수

기호	항목	값
V_s	Input Phase Voltage	380 V
L	Filter Inductor	200 μ H
C	Filter Capacitor	100 μ F
R	Load	10 Ω
f	Supply Voltage	60 Hz
f_s	Switching Frequency	10 kHz
D	Duty Ratio	0.5

그림 4의 파형은 입출력 선간전압, PWM 변조된 필터 입력단의 선간전압, 필터 인덕터의 전류를 각각 보인다. 그림 4에서 D가 0.5일 때 출력전압은 입력전압의 1/2이 됨을 볼 수 있다.

그림 5는 부하 변동에 대한 시스템의 응답을 나타낸다. 즉 순간적으로 부하를 10 Ω 에서 3.3 Ω 으로 증가시킨 경우이다. 이때 부하전류는 급격하게 증가하나, 출력전압은 약 3 msec의 과도기간을 지나 다시 입력전압의 1/2를 유지함을 확인할 수 있다. 이것은 $X_L \ll R \ll X_C$ 의 조건이 만족될 때, 출력전압의 크기가 부하저항 R의 크기에 따라 정해지지 않는 식 (20)의 결과를 확인 시켜준다.

그림 6은 입력 상전압이 12.45 msec인 순간 220 V에서 180 V로 전압저하(sag)가 발생하였을 때 feedforward 제어되는 AC-AC 컨버터의 동작파형을 나타낸다. 그림 6에서 보듯이 출력전압은 입력전압의 변동에도 불구하고 전혀 영향을 받지 않고 일정한 전압을 유지한다. 이는 그림 6의 (하)에서 보듯이 duty ratio, D가 순간적으로 0.5에서 0.61로 변한 결과이다. 이 경우 맥동하는 파형은 측정으로 얻어진 D이다. 그림 6의 시뮬레이션 파형으로 보듯이, feedforward 제어가 입력전압의 크기의 순시적인 변동에도 불구하고 출력전압을 일정하게 유지하는데 매우 효과적임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 입력전압의 sag나 surge에도 불구하고 일정한 AC 출력전압을 얻을 수 있는 PWM Buck AC-AC 컨버터를 보이고, 동작원리, 기본파 영역에서의 동작특성에 대하여 해석하였다.

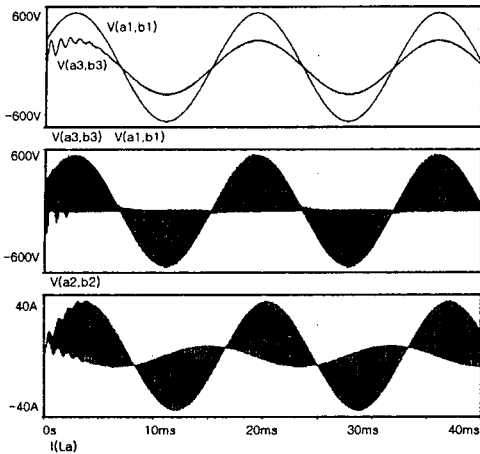


그림 4 동작 파형: (상) 입력선간전압(v(a1,b1))과 출력선간전압(v(a3,b3)), (중) 필터입력 선간전압, (하) 필터 인덕터 전류.

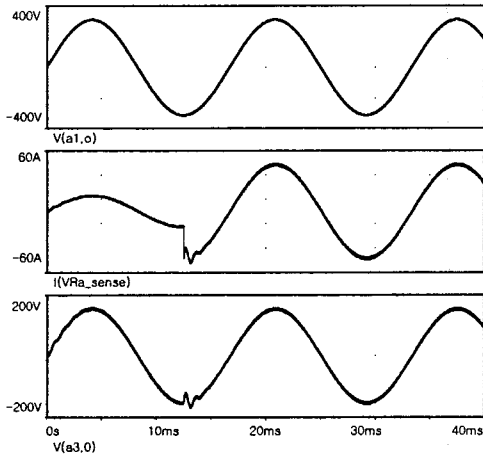


그림 5 부하를 10 Ω에서 3.3 Ω으로 증가시켰을 때의 동작파형: (상) 입력 상전압, (중) 부하 상전류, (하) 출력 상전압.

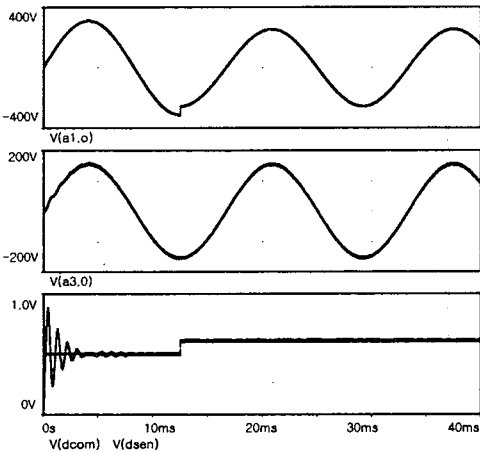


그림 6 입력전압의 sag시 동작파형: (상) 입력 상전압, (중) 출력 상전압, (하) D의 명령값(D*)과 실측값(D̂)

또, 일정한 AC 출력전압을 얻을 수 있는 순시적인 보상이 가능한 개선된 제어 알고리즘을 제안하였다. 또한, 이러한 동작원리와 특성 및 알고리즘에 대하여는 PSPICE 시뮬레이션을 통해서 그 타당성 및 유효성을 밝혔다.

끝으로, 제안된 PWM AC-AC 컨버터는 전자식 변압기나 Phase Shifter, 전력제어기 등으로 활용이 가능하며 이에 대한 연구를 병행하여 추후 발표할 것이다.

참고 문헌

- [1] N. G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities : Role of Power Electronics in Future Power System," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, No. 4, pp. 481~482, 1988, April.
- [2] H. Mehta, "Recent Development: EPRI's Custom power Concept", *Proceedings of Power Quality '93 Conference*, Interec International Inc., Ventura, CA. pp. 794~795, October 1993.
- [3] P. D. Ziogas, et al., "A practical PWM AC Controller topology", *IEEE-IAS Annual Meeting Record*, pp. 880~887, 1992.
- [4] Shanker Srinivasan and Giri Venkataramanan, "Comparative Evaluation of PWM AC-AC Converters", *IEEE Power Electronics Specialist Conference Record*, pp. 529~535, 1995.
- [5] B. H. Kwon, B. D. Min and J. H. Kim, "Novel Topologies of AC Choppers", *IEE Proc., Electr. Power Appl.*, Vol. 143, No. 4, pp. 323~330, 1996
- [6] B. D. Min and B. H. Kwon, "Novel PWM line Conditioner with fast output voltage control", *IEE Proc., Electr. Power Appl.*, Vol. 145, No. 2, pp. 85~91, 1998
- [7] C. T. Rim, N. S. Choi, G. C. Cho and G. H. Cho, "A Complete DC and AC Analysis of Three-Phase Controlled-Current PWM Rectifier Using Circuit D-Q Transformation", *IEEE trans. on Power Electronics*, Vol. 9, No. 4, 1994.