

Random PWM 기법을 이용한 3상 승압형 컨버터 전도노이즈 저감에 관한 연구

論 文
51P-3-2

A study on the Conducted Noise Reduction in Three-Phase Boost Converter using Random Pulse Width Modulation

鄭 東 孝*
(Dong-Hyo Jung)

Abstract - The switching-mode power converter has been widely used because of its features of high efficiency and small weight and size. These features are brought by the ON-OFF operation of semiconductor switching devices. However, this switching operation causes the surge and EMI(Electromagnetic Interference) which deteriorate the reliability of the converter themselves and entire electronic systems. This problem on the surge and noise is one of the most serious difficulties in AC-to-DC converter.

In the switching-mode power converter, the output voltage is generally controlled by varying the duty ratio of main switch. When a converter operates in steady state, duty ratio of the converter is kept constant. So the power of switching noise is concentrated in specific frequencies.

Generally, to reduce the EMI and improve the immunity of converter system, the switching frequency of converter needs to be properly modulated during a rectified line period instead of being kept constant.

Random Pulse Width Modulation (RPWM) is performed by adding a random perturbation to switching instant while output-voltage regulation of converter is performed. RPWM method for reducing conducted EMI in single switch three phase discontinuous conduction mode boost converter is presented.

The more white noise is injected, the more conducted EMI is reduced. But output-voltage is not sufficiently regulated. This is the reason why carrier frequency selection topology is proposed.

In the case of carrier frequency selection, output-voltage of steady state and transient state is fully regulated.

A RPWM control method was proposed in order to smooth the switching noise spectrum and reduce it's level. Experimental results are verified by converter operating at 300V/1kW with 5%~30% white noise input.

Spectrum analysis is performed on the Phase current and the CM noise voltage. The former is measured with Current Probe and the latter is achieved with LISN, which are connected to the spectrum analyzer respectively.

1. 서 론

기존 PWM 전원장치에서는 스위칭 주파수를 증가시킴으로써 인덕터 및 커패시터의 크기가 감소되고 전원장치의 무게와 부피 그리고 그에 따른 비용을 절감시킬 수 있기 때문에 전력변환장치의 소형, 경량화 및 고효율화가 가능하다.

그러나 PWM 전원장치에서 하드 스위칭 방식을 사용하는 경우 스위칭 손실 및 스트레스가 커지고 또한 전자파 장애 문제가 발생하기 때문에 스위칭 주파수를 높이는 데 제한이 따른다. 스위칭 손실 및 스트레스에 대해서는 이를 감소하기 위한 여러 가지 소프트 스위칭 기법 등이 연구되어 상당 부분 그 문제를 해결 할 수 있다. 최근에는 PWM 전원장치의 전자파 장애 문제에 있어서는 체계적인 접근보다 오히려 시행착오를 거친 실험적 대책이 주로 이용되고 있는 실정이다[1][2].

전기, 전자 장비의 활용이 확대되면서 전자파 장애에

대한 관심이 많아지기 시작하였다. 처음에는 무선 주파수 방해(Radio Frequency Interference : RFI)라고 하였으나 2차대전 이후부터는 넓은 의미의 전자파 장애, 60년대부터는 하나의 시스템이 외부에서 들어오는 전자기파에 반응 특성으로 전자파 민감(Electro-magnetic Susceptibility : EMS), 이후 하나의 시스템이 갖는 전자기적 내성 및 전자기파 발생억제 특성으로 전자파 양립성 (Electromagnetic Compatibility : EMC)이란 용어가 사용되어 왔는데 현대의 전자파 장애의 체계는 EMC가 전자파 장애 (Electro magnetic Interference : EMI)와 EMS를 통칭한 것으로 표현되고 있다. 참고로 EMI는 하나의 시스템에 의해 발생하는 전자기파가 다른 시스템의 동작에 미치는 간섭현상이다.

EMI문제가 심각한 이유는 10[μ A]라는 아주 작은 전류라도 다른 시스템에 영향을 미치기에 충분한 전자파가 발생하기 때문이다. 이것을 제어한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 그 발생원인을 밝혀 최적의 해결방법을 제공하는 것이 EMC 제어기술의 핵심이다.

기존 PWM 전원장치의 결정적인 단점은 스위칭 주파수가 증가됨에 따라 스위칭 손실 및 갑작스런 전류/전압의 변화

* 正 會 員 : 仁川專門大學 電氣科 教授
接受日字 : 2002年 5月 14日
最終完了 : 2002年 8月 16日

($di/dt, dv/dt$)에 의하여 가장 크게 좌우된다. 전자파 장애가 발생했을 때 신호선 혹은 전력선을 통하여 전자회로로 이동하는 잡음원을 전도성 노이즈(Conducted Noise)라 하고, 선을 따라 전달되던 잡음원이 전자유도 및 정전유도에 의해 외부회로나 혹은 타장비로 방사될 수 있는데 이를 방사성 노이즈(Radiated Noise)라 한다. 전도성 노이즈는 CM(Common Mode) 노이즈와 DM(Differential Mode) 노이즈로 구분되어지고 CM 노이즈는 전원라인과 접지선간의 전위차로 발생하는 노이즈이며, DM 노이즈는 전원라인간의 전위차로 발생하는 노이즈이다[3].

본 논문에서 전도 노이즈를 저감하기 위하여 첫째로 주파수 영역에서 스위칭모드 컨버터의 특성을 연구하였다. 둘째로 RPWM(Random Pulse Width Modulation)을 이용하여 전도 노이즈의 스펙트럼이 완만하고 레벨이 저감되도록 단일 스위치 3상 승압형 컨버터에 적용하여 그 타당성을 제시하였다. 셋째로 AC-DC컨버터에서 주 제어 대상이 되는 출력전압을 개선하기 위하여 정상상태와 과도상태를 판별하여 응답을 개선하기 위한 반송파 선택 회로를 제안하여 그 성능을 확인하였다.

2. 시스템 구성 및 설계

2.1 3상 승압형 컨버터

출력전압을 높이고 일정하게 유지하기 위해 단일스위치 3상 승압형 컨버터가 사용되는데, 이를 위한 전체시스템 구성도는 그림 2.1과 같다. 전체 시스템은 입력필터, 승압용 인덕터, 3상 다이오드 정류기, 승압용 IGBT소자, 환류 다이오드, 평활용 커패시터로 구성된다.

3상 승압형 컨버터는 스위칭 소자가 턴-온 시에 전원과 승압용 인덕터 사이에 단락회로가 형성되므로 전류가 선형적으로 상승되어 인덕터로 저장되고, 저장된 에너지는 스위칭 소자의 턴-오프 시에 DC링크단 커패시터에 충전되어 출력전압을 항상 일정하게 유지시키게 된다. 이때 스위치의 듀티비 제어를 통하여 상전류가 불연속적으로 흐르도록 하면 입력 상전류는 입력 상전압에 비례하여 흐르게 된다. 그림 2.2는 한 스위칭 주기에서의 각 상의 전류 파형을 나타내며 세부적으로 4개의 모드로 나눌 수 있다[5][6].

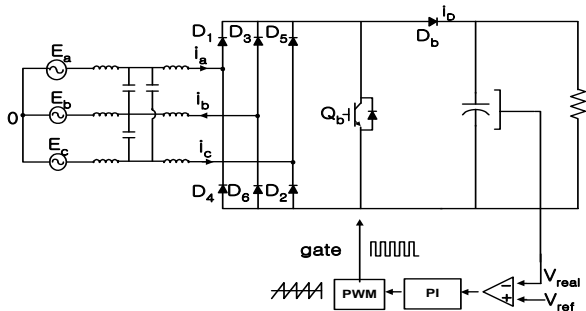


그림 2.1 단일 스위치 3상 승압형 컨버터

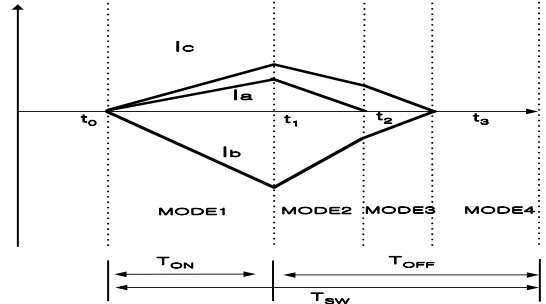


그림 2.2 한 스위칭 주기동안의 각 입력 상전류 파형

2.2 RPWM 스위칭 기법

AC-DC컨버터에 있어서 일반적으로 출력전압은 주 스위치의 온-오프 주기를 변화시킴으로써 제어된다. 그림 2.3에서 보는 것과 같이 PWM제어는 정상상태에서는 컨버터의 온-오프 주기가 일정하므로 턴-온과 턴-오프의 노이즈는 규칙적인 간격으로 발생하며 간격은 컨버터의 스위칭 주기와 같게 된다. 일반적인 PWM의 스위칭 노이즈 스펙트럼의 경우 연속적인 형태로 발생하며 특정 주파수 혹은 스위칭 주파수의 배수로서 집중하게 된다. 그러므로 그림 2.4에서와 같이 스위칭 노이즈를 저감시킨다면 주파수 스펙트럼상에서 노이즈의 피크치가 감소하게 된다. 이러한 방법은 컨버터의 출력전압을 제어하면서 스위칭을 랜덤(Random)화함으로써 얻어질 수 있다. 스위칭 노이즈는 랜덤한 스위칭에 의하여 특정주파수나 스위칭 주파수의 배수에 집중하지 않게 되어 일반적인 PWM방법보다 전도노이즈 레벨이 감소하게 된다 [6].

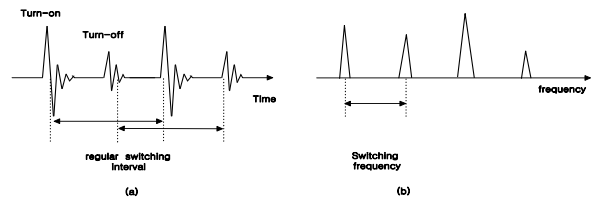


그림 2.3 PWM 스위칭노이즈 파형과 스펙트럼
(a) 파형 (b) 스펙트럼

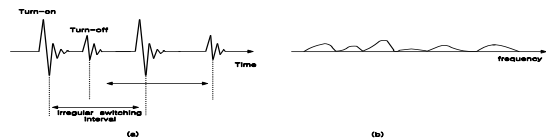


그림 2.4 RPWM 스위칭노이즈 파형과 스펙트럼
(a) 파형 (b) 스펙트럼

2.3 칼슨(Carson)의 법칙

칼슨의 법칙에 의해 주파수가 변조된 신호는 다음과 같은 두 가지 특성을 가진다.

- (1) 신호가 주파수 변조되더라도 총 양은 영향을 받지

않으며 이것은 각각의 고조파(harmonic) 크기 제곱의 합과 같다.

(2) 주파수가 변조된 신호는 각각 고조파와 일정한 밴드폭을 갖는다. 그림 2.5에서 보는 바와 같이 반송파 주파수를 기준으로 변조 주파수의 폭으로 이산된다.

그림 2.5과 같이 변조지수가 클수록 신호가 기준 주파수를 기준으로 크기가 감소되며 이산치가 커진다. 그러므로 스위칭모드 컨버터에서도 스위칭 주파수(변조지수)를 크게 하면 전도노이즈의 크기가 작아지고 이산치가 커지는 효과를 얻을 수 있다.

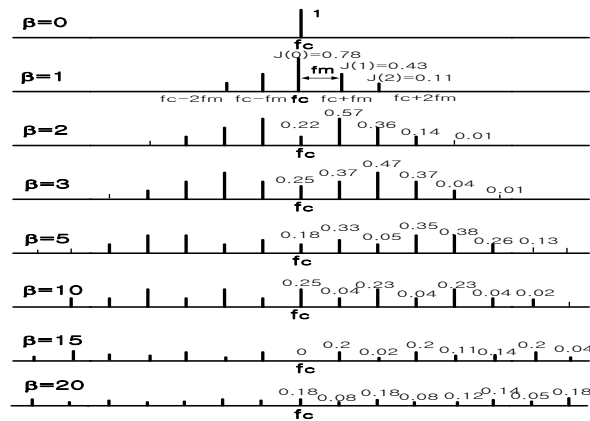


그림 2.5 β 에 따른 이산되는 신호스펙트럼

먼저 RPWM 제어기법의 구현을 위해서는 출력전압이 충분히 제어되어야 하고 또한 컨버터 내에서는 저역통과 필터의 통과 대역내로는 노이즈 주파수성분은 발생하지 말아야 한다. 랜덤-스위칭제어는 그림 2.6과 같이 랜덤신호(White Noise)발생기로부터 노이즈를 샘플&홀드(Sample & hold)되어 기존의 고정 PWM을 생성하기 위한 기준전압과 합쳐진다. 샘플링된 랜덤신호에 따라 반송파의 상승기울기가 변조되며, 반송파의 피크치는 항상 일정하게 유지시킨다. 변조된 반송파는 제어기로부터 출력된 제어신호와 비교되어 PWM 신호를 발생시켜 시비율로서 주스위치를 제어하게 된다.

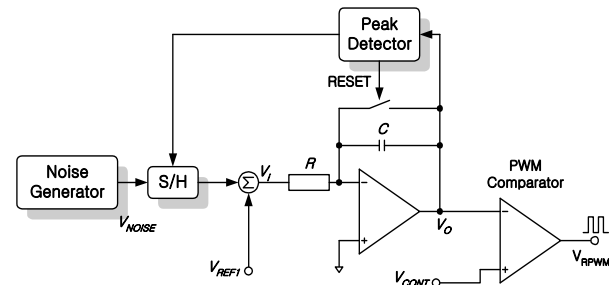


그림 2.6 RPWM 구성도

그림 2.7은 Noise Generator에서 출력되는 노이즈와 그에 따른 반송파 주파수주기의 변조를 나타낸다.

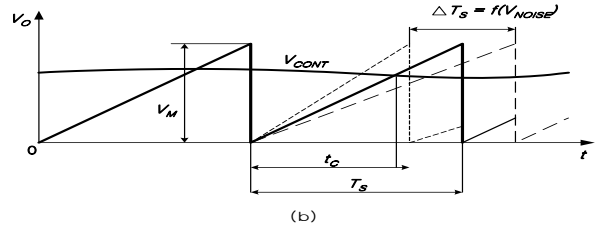
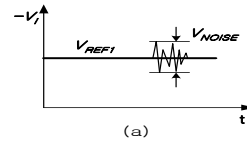


그림 2.7 RPWM 각부 신호파형 (a)입력전압 (b)반송파 발생기의 출력전압

그림 2.7에서 반송파 발생기의 입력전압 V_i 는 기준전압 V_{REF1} 과 샘플&홀드된 랜덤신호 전압 V_{NOISE} 로 결정된다.

$$V_i = V_{REF1} \pm V_{NOISE} \quad (2-1)$$

V_i 는 스위칭 주기($T_s = RC$)내에서 변화해야 하며, 기존의 PWM반송파 출력전압은 식 (2-2)와 같다.

$$V_o = \frac{1}{RC} V_{REF1} t \quad (2-2)$$

RPWM반송파 출력전압은 식 (2-3)과 같다.

$$V_o = \frac{1}{RC} (V_{REF1} \pm V_{NOISE}) t \quad (2-3)$$

노이즈 발생기에 의한 주기의 변화는 식 (2-4)과 같다.

$$\Delta T_s = f(V_{NOISE}) \quad (2-4)$$

식 (2-4)에서 알 수 있듯이 노이즈 전압에 의해 스위칭 주기가 변화함을 알 수 있다. 이 기법은 부가적인 노이즈 발생회로와 샘플&홀드회로를 추가하므로 회로의 큰 변화없이 노이즈를 저감시키는 효과를 얻을 수 있다. 또한 반송파의 피크치가 일정하므로 전달함수가 RPWM제어를 하기 위한 회로를 첨가하기 전과 같게 된다.

그림 2.8에서 파선부분은 기존의 컨버터시스템에 전도노이즈를 저감하기 위해 첨가한 부분이다.

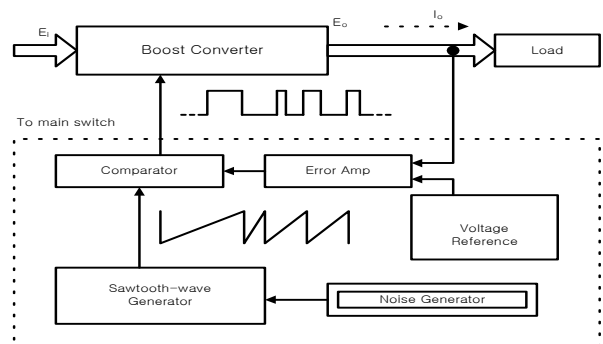


그림 2.8 RPWM회로의 간이 구성도

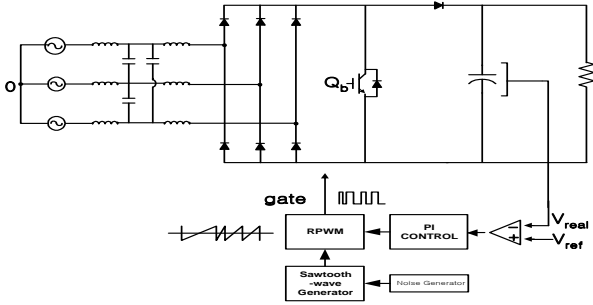


그림 2.9 RPWM방식의 단일 스위치 3상 승압형 컨버터

그림 2.9는 전도노이즈 저감을 위한 RPWM방식의 단일 스위치 3상 승압형 컨버터의 전체 구성도이다. 기존의 시스템에 전도노이즈를 저감하기 위해 RPWM제어 회로를 첨가하였다.

2.4 반송파 선택회로

RPWM제어인 경우 과도상태에서 실제의 출력전압을 추종하지 못하는 경우가 종종 발생한다. 그래서 순수 RPWM 기법만으로 출력전압을 제어하는데 한계가 있다. 또한 PWM과 RPWM의 평균 주파수와 이득(Gain)이 같아도 전압을 추종하는 속도가 다르게 나타난다.

따라서 과도상태의 출력전압의 응답을 개선하기 위하여 PWM과 RPWM제어기법을 적절한 시기에 변환하는 제어기법을 제안하였다. 과도상태에서는 이득에 따른 전압추종이 확실한 PWM으로 컨버터를 제어하다가 정상상태에 도달하면 전도노이즈를 저감하기 위한 RPWM으로 변환하여 시스템의 안정도를 향상시키게 된다

그림 2.10은 반송파 선택회로의 전체적인 블록도이다. 컨버터에서 출력전압을 검출하여 정상상태인가 아닌가를 판단하여 정상상태인 경우에 PWM에서 RPWM으로 전환하여 출력전압의 추종을 향상시킨다.

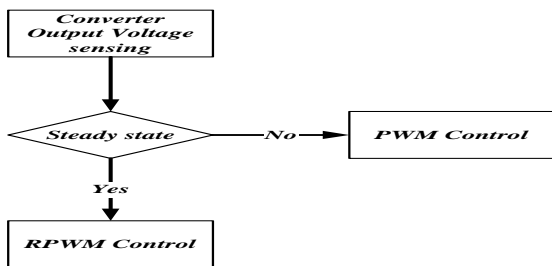


그림 2.10 반송파 선택 간이 구성도

그림 2.11은 과도상태와 정상상태 판별회로로서 밴드의 상한선과 하한선에 입력이 들어올 때 출력이 나오는 회로이다.

그림 2.12는 출력전압을 추종할 때 과도상태와 정상상태 판별회로에서 출력전압을 판별하여 각각의 신호에 맞게 PWM과 RPWM으로 컨버터를 제어할 때의 신호파형이다. 출력전압의 과도상태와 정상범위를 벗어나는 오버슈트에서는 PWM이 컨버터의 출력전압을 제어하고 정상상태에서는 RPWM이 컨버터의 출력전압을 제어하게 된다. 따라서 과도

상태에서 출력전압의 추종이 순수 RPWM제어시보다 향상되게 된다. 정상상태범위를 정하는 상한과 하한은 요구되는 전압의 품질과 제어의 성능에 따라 결정되게 된다.

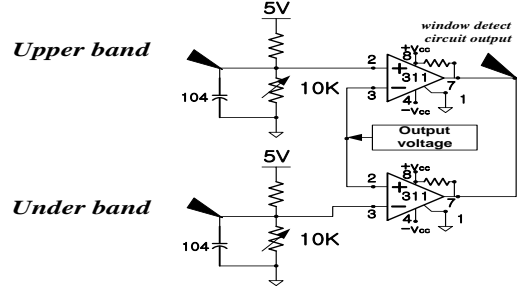


그림 2.11 과도상태와 정상상태 판별회로

그림 2.13는 전도노이즈 저감과 출력전압 추종을 향상시키기 위한 반송파 주파수변환기능을 갖는 RPWM방식의 단일 스위치 3상 승압형 컨버터의 전체 구성도이다. 출력전압을 검출하여 정상상태임을 판별하여 각각의 반송파를 발생시키는 회로를 RPWM회로에 첨가하였다.

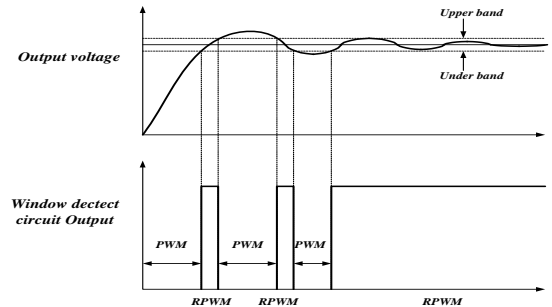


그림 2.12 출력전압과 과도상태와 정상상태 판별회로 출력

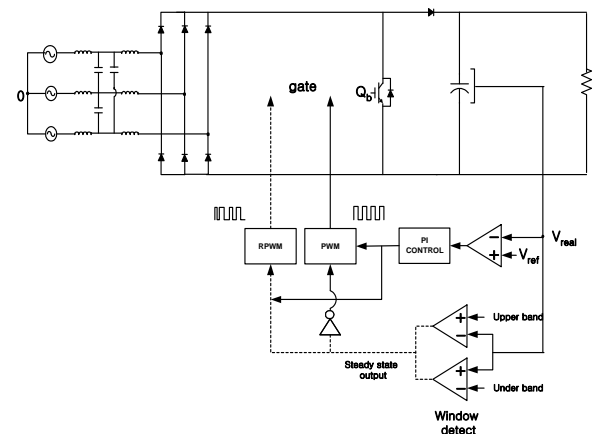


그림 2.13. 반송파 주파수변환기능을 갖는 RPWM방식의 단일 스위치 3상 승압형 컨버터

3. 결 과

본 논문에서 제안된 RPWM기법에 의한 단일 스위치 3상 컨버터를 실험하기 위해서 출력전압은 300[V], 1[kW]저항부하, 입력전압 AC 100[V], 랜덤신호를 5%에서 30%까지 변

화시키면서 스위칭 노이즈와 CM 노이즈 전압의 저감을 확인하였다. 표 3.1은 실험에서 사용된 파라미터이다.

표 3.1 시스템 파라미터

파라미터	소자 값
입력 전압	3상 AC 100[V]
저항부하	1 [kW]
DC link 제어전압	300 [V]
승압용 인덕터	50 [μ H]
컨버터 평균스위칭 주파수	10 [kHz]
컨버터 출력 커패시터	4700 [μ F]

그림 3.1에서 그림 3.3는 스위칭 노이즈 전류파형으로 랜덤 신호의 주입량이 많아질수록 노이즈 스펙트럼이 완만하고 레벨이 저감되었다. 실제 실험에서 스위칭 노이즈전류를 측정하기 위하여 Tektronix A6303 Current Probe를 사용하였다. CM 노이즈 전압을 측정하기 위해서는 3상 입력라인에 LISN을 연결하고 DMRN을 통하여 스펙트럼 분석기로 측정하였다.

그림 3.4은 PWM방식의 출력 전압파형이고, 그림 3.5와 그림 3.6은 RPWM방식의 출력 전압파형으로 랜덤신호 주입량이 많아질수록 정상상태에서 출력전압 오차가 나타남을 알 수 있다. 특히 그림 3.7에서 보는 바와 같이 같은 이득과 랜덤신호 주입량에서도 출력전압의 추종이 다르게 나타났다.

그림 3.8는 순수 RPWM제어의 단점을 보완하기 위한 반송파 선택회로 채택시의 출력전압 파형으로서 같은 조건일 때 기준전압을 잘 추종하는 결과를 얻었다.

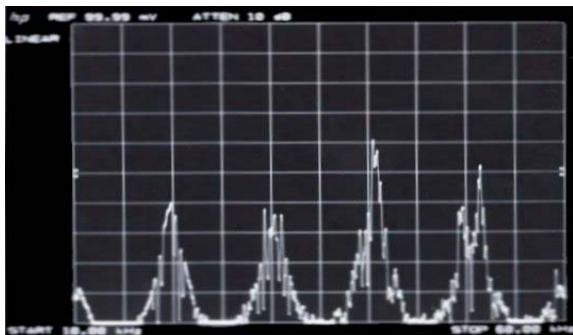


그림 3.1 PWM시 스위칭 노이즈전류
(Current : 5mA/div, Frequency Range : 10[kHz]~60[kHz])

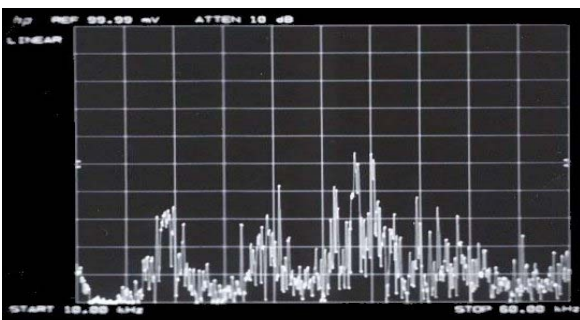


그림 3.2 RPWM시 스위칭 노이즈전류
(Current : 5mA/div, Frequency Range : 10[kHz]~60[kHz], 랜덤신호 5% 주입)

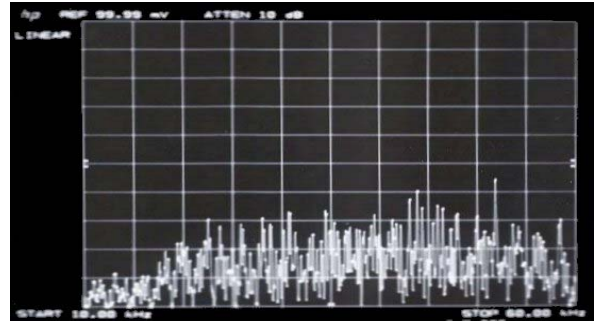


그림 3.3 RPWM시 스위칭 노이즈전류
(Current : 5mA/div, Frequency Range : 10[kHz]~60[kHz], 랜덤신호 30% 주입)

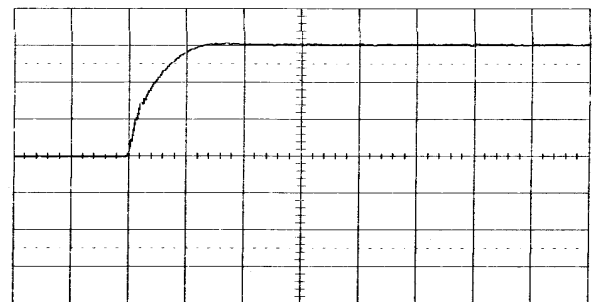


그림 3.4 PWM시 출력전압
(Voltage : 100V/div, Time : 50ms/div)

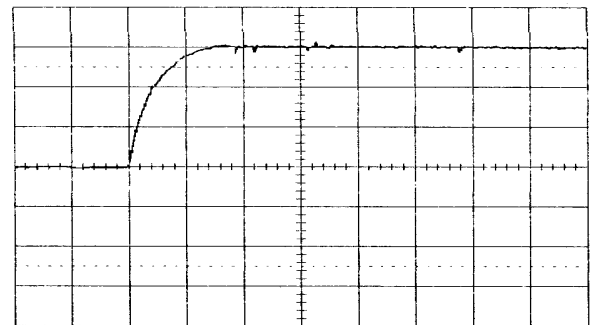


그림 3.5 RPWM시 출력전압
(Voltage : 100V/div, Time : 50ms/div, 랜덤신호 5%주입)

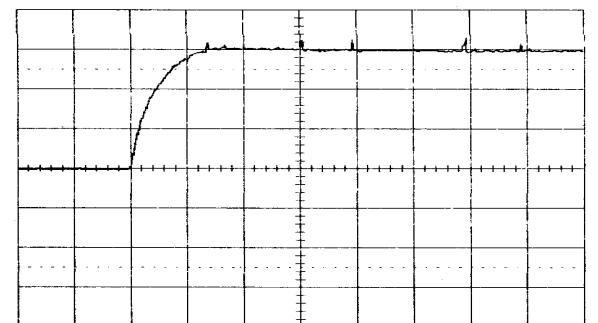


그림 3.6 RPWM시 출력전압
(Voltage : 100V/div, Time : 50ms/div, 랜덤신호 30%주입)

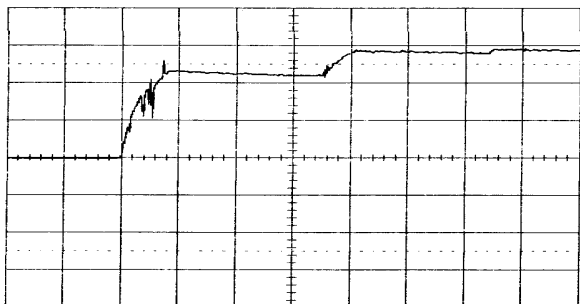


그림 3.7 RPWM시 과도상태에서 출력전압이 제어되지 않는 경우
(Voltage : 100V/div, Time : 50ms/div, 랜덤신호 30%주입)

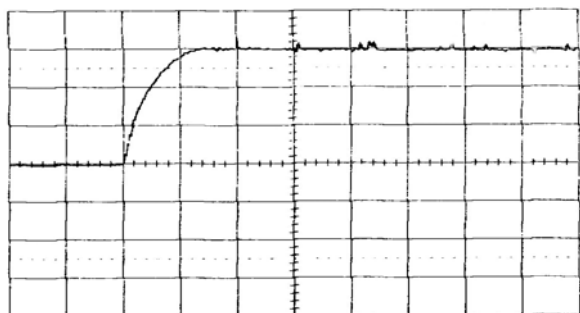


그림 3.8 반송파 선택회로 채택시의 출력전압
(Voltage : 100V/div, Time : 50ms/div, 랜덤신호30%주입)

4. 결 론

본 논문에서는 기존방식의 단일 스위치 3상 승압형 컨버터에 RPWM제어회로를 추가함으로써 스위칭 노이즈 전류 및 커먼모드 노이즈전압을 저감할 수 있는 방법을 제안하였다. 실험을 통하여 단일 스위치 3상 승압형 컨버터에서 PWM스위칭기법과 RPWM스위칭기법을 적용하였을 때의 전도노이즈 발생량을 비교하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 전도노이즈 저감을 위한 RPWM제어회로를 구현하여 단일 스위치 3상 승압형 컨버터에 적용하였다. RPWM제어회로부는 ROM에 저장된 랜덤한 신호를 샘플&홀드하여 리셋기능이 추가된 적분회로를 통해 반송파의 기울기(스위칭 주파수)가 실시간으로 변화하도록 설계하였다.
- (2) 스위칭 주파수의 랜덤화가 커질수록(랜덤신호 주입량이 큰 경우) 전도노이즈 스펙트럼이 완만하여지고 크기가 저감되었으나 출력전압은 정상상태에서 출력전압 오차가 나타난다. 그러므로 출력전압 추종과 전도노이즈 저감을 고려한 설계가 요구된다.
- (3) AC-DC컨버터에서 주 제어대상이 되는 출력전압은 RPWM제어 기법을 적용하였을 때 과도상태에서 기준 출력전압을 추종하지 못하는 경우가 발생하였다. 이를 개선하기 위하여 반송파 선택회로를 제안하여 출력전압의 추종특성을 보완하였고, 그 특성을 실험으로 확인하였다.
향후 효과적인 전도노이즈 대책을 위하여 랜덤신호 발생기

와 변조지수 설정의 최적화가 수행되어야 할 것이다. 그리고 스위칭 주파수의 랜덤화와 출력전압 추종과의 관계에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 인천전문대학 교내 연구비 지원에 의한 논문임

참 고 문 헌

- [1] Philip F.Okyere, "Computer aided analysis and reduction of conducted EMI in Switched-Mode Power Supply," IEEE PESC'98, Vol.1, May17-22, pp. 924-928, 1998.
- [2] Richard Redl, "Power electronics and electro magnetic compatibility," IEEE PESC'98, Vol. 1, pp. 15~21, 1998.
- [3] 이진환 외4명, "PWM 인버터-유도전동기 구동시스템의 전도노이즈 예측에 관한 연구," 99년도 하계 전력전자 학술대회 논문집, 전력전자학회, pp.367~372, 1999.
- [4] A.R.Prasad and P.D.Ziogas, "An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers," IEEE Trans. on PE, Vol.6, No.1, pp.83~92, Jan., 1991.
- [5] Mohammad Sedighy and Francis P. Dawson, "Single-Switch Three-Phase Power Factor Correction," in IPEC'95, pp.293~297, 1995.
- [6] F.Lin and D.Y.Chen "Reduction of power supply EMI emission by switching frequency modulation," IEEE Trans. on PE, Vol.9, No.1, pp.83~92, Jan., 1991.

저 자 소 개



정 동 호(鄭 東 孝)

1945년 4월 15일생. 1972년 명지대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 명지대학교 대학원 졸업(석사) 1999년 성균관대학교 대학원 박사과정 수료 1978년~현재 인천전문대학 전기과 교수.

Tel : 032-760-8702,
Fax : 032-760-8895
E-mail : jd5331@icc.ac.kr