

FM-PWM 컨버터의 제어기 설계와 전도성 잡음 저감

박석하^o, 진인수, 김재환, 김양모
 충남대학교 전기공학과

Controller design and conducted noise reduction of FM-PWM 컨버터

Seok-Ha Park^o, In-Soo Jin, Jae-Hwan Kim, and Yang-Mo Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - The conducted noises mainly emitted from PWM DC power supply have a periodicity with respect to switching frequency, and especially center at the switching frequency and the discrete harmonic frequencies. The concentration of noise energy at these discrete frequencies makes it harder to meet EMI regulations. To reduce the conducted noises, this paper presents the novel FM-PWM control method by using random switching frequency modulation control. This control makes it to generate the noises of side bands by shattering emission spectrum, and to reduce the peak level of conducted noises.

고조파를 포함한 많은 양의 잡음이 발생하게 되는 문제점도 동시에 안고 있다. 실제 전기·전자 장비에 대한 전자파장해 시험평가시 전도성 잡음 시험 규격 불만족 원인의 대부분은 이러한 스위칭 방식의 전원장치에서 발생하는 잡음의 영향인 것으로 입증되었다.[1]

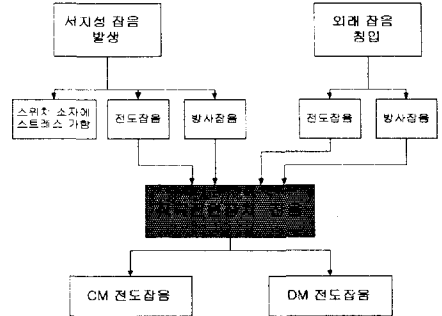


그림 1. PWM 직류전원장치의 잡음 특성

1. 서론
 PWM 직류전원장치는 전력에너지 고밀도화를 위하여 고주파 스위칭 기법을 주로 이용하는데, 이에 따라 스위칭손실, 전압/전류 스트레스 그리고 전자파장해 등의 많은 문제점들을 발생한다. 이에 대한 대책으로 스위칭손실과 전압/전류 스트레스 저감을 위해 소프트 스위칭 기법들이 사용되고 있다. 그러나 이들 소프트 스위칭 기법들은 스위칭손실과 전압/전류 스트레스를 감소시키는 데 초점이 맞추어져 있기 때문에 효과적인 전자파장해 대책이 될 수 없다[1].

한편, PWM 직류전원장치는 다른 전기/전자 장비와는 달리 갑작스런 전류/전압의 변화에 의해 주로 전자파장해를 발생한다. 따라서 PWM 직류전원장치에서 방사되는 전도성 잡음은 스위칭주파수와 그 정수배 고조파 주파수에 집중된다[1~3].

따라서 본 연구에서는 첫째, PWM 직류전원장치에서 발생하는 전자파장해의 특성에 대하여 논하고, 둘째, 출력전압 조절에 큰 영향을 주지 않도록 PWM 제어기 가능하면서 스위칭주파수를 랜덤하게 변조함으로써 전도성 잡음의 주파수 대역을 분산시킬 수 있는 FM-PWM 제어기의 원리를 분석·설계하고, 셋째, 실험을 통하여 기존 PWM 제어와 FM-PWM 제어를 비교하여 그 타당성을 확인하고자 한다.

2. PWM 직류전원장치의 전도성 잡음 해석

2.1 PWM 직류전원장치의 전도성 잡음 특성

일반적으로 전기·전자 장비 내부에서 전도성 잡음 문제가 가장 현저히 나타나는 부분이 전원장치이며, 이 전원장치는 전기·전자기기를 동작시키기 위하여 필요한 크기의 전원으로 바꾸어주기 위한 장치이다. 특히 PWM 직류전원장치는 효율이 매우 높고, 제어가 용이하며 스위칭주파수를 높여 회로가 차지하는 부피와 중량을 작게 할 수 있는 등의 장점으로 인하여 각종 전기·전자 장비의 전원장치로 급격히 보급되었다.

그러나 PWM 직류전원장치는 상기 여러 가지 장점이 있는 반면에 전력변환을 위한 다이오드, 트랜지스터, FET 등의 반도체 스위칭 동작시 스위칭주파수 및 그

그림 1은 PWM 직류전원장치에서 발생하는 잡음의 특성을 나타내고 있다. 일반적으로 PWM 직류전원장치의 전자파 잡음 발생원은 그림 1에서와 같이 외래 침투 잡음과 스위칭에 의한 갑작스런 전류/전압의 변화(di/dt, dv/dt)에 의해 가장 크게 좌우된다. 전자파장해가 발생했을 때 신호 라인 혹은 전력 라인을 통하여 전자회로내로 이동하는 잡음원을 전도성 방사잡음(Conducted emission noise)이라 하고, 라인을 따라 전달되던 잡음원이 전자유도 및 정전유도에 의해 외부회로나 혹은 타 장비로 방사되는데 이를 복사성 방사잡음(Radiated emission noise)이라 한다[4]. 본 연구에서는 전도성 방사 잡음에 대해서만 논하고 있다.

2.2 PWM 직류전원장치의 전도성 잡음 대책

그림 2는 PWM 직류전원장치에서 주로 발생하는 서지 및 잡음 발생원인과 현재 이용되고 있는 잡음 대책 기술들을 제시하고 있다. 서지나 잡음 발생에 직접 관여하는 원인은 급격한 전류/전압의 변화와 각 소자나 배선에 기생하고 있는 인덕턴스 성분이고, 그 이외로 여러 기생 정전용량이 계재하여 고주파로 진동한다. 또한 반도체의 스위치 소자에 서지 전압/전류로 인한 스트레스가 더욱 가해지고, 전반적인 회로 내의 임·출력으로 전도성 잡음이 전달된다. 전자파 잡음 문제를 극복하기 위해 그림 2에 제시된 바와 같이 여러 가지 대책들이 연구·개발 및 상용화되고 있다[1].

그러나 이들 전자파 잡음 대책들은 철저하고 상세한 계획이나 설계가 없이 반복적인 시행오차를 거듭하는 실험을 통하여 그 대책을 마련하고 있으므로, 그 대책들은 특정 컨버터의 스위칭 방식에 제한적으로 사용되고 있어 전자파장해의 체계적인 대책이 될 수 없다[1].

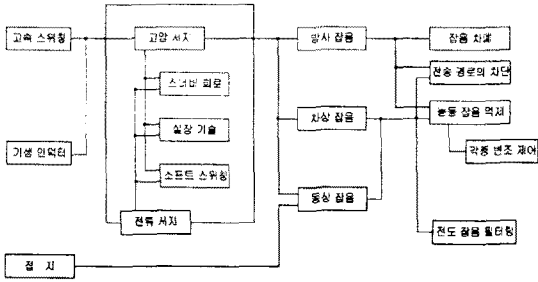


그림 2. 서지 및 잡음 발생원과 그 대책기술

3. FM-PWM 제어기 분석 및 설계

3.1 FM-PWM 제어의 원리

PWM 직류전원장치에서 방출되는 전도성 잡음은 스위칭 주파수에 주기성을 띠고 있기 때문에, 스위칭주파수와 그 이상 고조파 주파수에 전력 스펙트럼이 집중되고 있다. 이 현상이 직류전원장치의 전자파장해 조절을 어렵게 한다. 따라서 본 연구에서는 스위칭주파수를 랜덤하게 변조(random FM)함으로써 PWM 직류전원장치의 잡음전압 전력스펙트럼을 연속이 되게 하고 스위칭주파수와 그 정수배 고조파 레벨을 현저하게 감소시킬 수 있는 FM-PWM 제어를 제시하고 있다[1,3].

3.2 FM-PWM 제어의 주파수 영역해석

PWM 직류전원장치의 전도성 잡음을 분석하면 미지의 신호를 제외하고는 정현파와 구형파의 특성을 모두 가지고 있다. 그림 3은 정현파와 구형파에 대하여 기존 PWM 제어와 스위칭주파수가 랜덤하게 변조되는 FM-PWM 제어의 주파수 스펙트럼을 비교하고 있다.

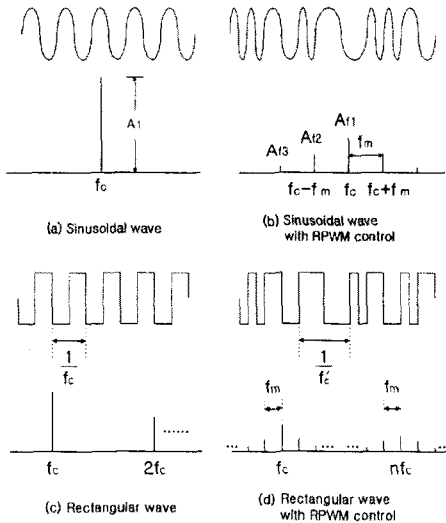


그림 3. 주파수 스펙트럼 비교

본 연구의 FM-PWM 제어는 스위칭주파수를 랜덤하게 변조하므로 일종의 주파수 변조방식으로 간주하여 해석할 수 있다. 따라서 PWM 제어에서 시간에 대해 정현적으로 변하는 기본 정현파가 $A_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1)$ 일 때, 스위칭주파수를 랜덤하게 변조하면 변조파 A_{FM-PWM} 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{FM-PWM} = A_1 \cos \omega_1 \left[1 + \left(\frac{\Delta f}{f_c} \cos \omega_m t \right) \right] \quad (1)$$

또한 시간에 대해 스위칭 온, 오프시 발생하는 구형파의 한 주기가 $T = \frac{1}{f_c}$ 일 때, 스위칭주파수를 랜덤하게 변조하면 주기 T_{FM-PWM} 은 식 (2)와 같다.

$$T_{FM-PWM} = \frac{1}{f_1 \left[1 + \frac{\Delta f}{f_c} \cos \omega_m t \right]} \quad (2)$$

여기서, f_c 는 중심 주파수, f_m 은 변조 주파수, 그리고 Δf 는 주파수 변이의 진폭이다. 스위칭주파수를 랜덤하게 변조하면 정현파 성분과 구형파 성분이 각각 그림 4(b)와 4(d)와 같이 축면 대역 고조파를 발생시키고, $f = f_c$ 일 때의 진폭은 변조되기 이전의 신호에 비해 현저하게 줄어든다.

3.3 FM-PWM 제어기의 동작

PWM 직류전원장치에 FM-PWM 제어를 적용하기 위해서 다음의 요구사항을 만족하여야 한다.

- 1) 출력전압 조절은 원하는 범위를 유지해야 한다.
- 2) 잡음 스펙트럼의 주파수성분은 컨버터내의 저역필터 대역폭 내에서 발생되지 않도록 하여야 한다.

그림 4는 FM-PWM 제어기 회로이다. 랜덤 잡음 발생기에서 만들어진 잡음 전압 V_{noise} 가 S/H에 들어오면, 순간적으로 그 값을 검출하여 주 스위치의 구동전압의 중심 스위칭 주파수를 결정하는 제어 전압 V_{ref1} 과 더해져서 톱니파 발생기의 입력전압 V_i 는 식 (3)과 같이 된다.

$$V_i = V_{ref1} \pm V_{noise} \quad (3)$$

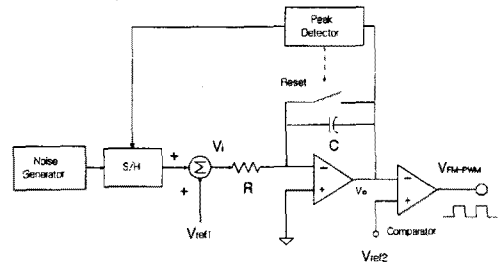


그림 4. FM-PWM 제어기 회로

그림 5는 FM-PWM 제어기의 주요 신호 파형이다. 그림 5에서 출력 톱니전압 V_o 는 기존 PWM 제어일 때의 톱니파이고, 스위칭 주기는 $T_s = RC$ 로 항상 일정하고, V_o 는 식 (4)와 같다.

$$V_o = \frac{1}{RC} (V_{ref1} t) \quad (4)$$

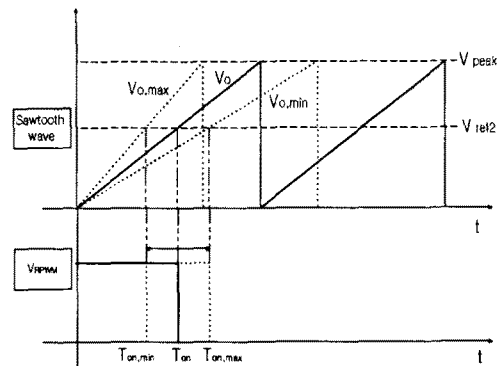


그림 5. FM-PWM 제어기의 신호 파형

FM-PWM 제어에서 최소 스위칭주파수의 변조를 결정하는 $V_{o,min}$ 경사는 식 (5)이고, 최대 스위칭주파수 변조를 결정하는 $V_{o,max}$ 경사는 식 (6)과 같다.

$$V_{o,min} = \frac{1}{RC}(V_{refl} - V_{noise})t \quad (5)$$

$$V_{o,max} = \frac{1}{RC}(V_{refl} + V_{noise})t \quad (6)$$

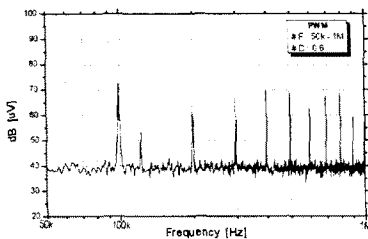
그림 5에서 $V_{o,min}$ 경사와 $V_{o,max}$ 경사 사이의 톱니 전압 범위내에서 스위칭주파수 변조가 가능하도록 톱니 전압을 발생시키고, 이 톱니전압과 주 회로의 출력전압으로부터 검출되는 출력전압 V_{ref2} 와 비교하여 최종 V_{FM-PWM} 을 발생시킨다.

4. 실험 결과 및 고찰

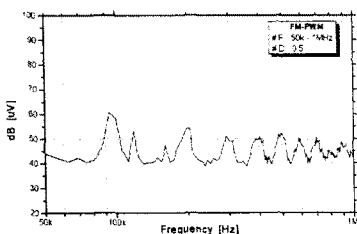
FM-PWM 제어에 이론적 타당성을 확인하기 위하여 절연형 컨버터이며 중, 소 전력변환에 많이 상용화되어 있는 리셋컨전 파워드 컨버터를 선정하여 실험을 수행하였다. 전도성 잡음을 측정하기 위하여 HP 4395A Network/Spectrum/Impedance 분석기가 사용되었으며, 피시험장치의 일정 임피던스를 확보하기 위해서 LISN을 사용하였다[1].

그림 6의 주파수 대역은 50(kHz)로부터 1(MHz) 까지이며, 그림 7의 주파수 대역은 1(MHz)로부터 50(MHz)까지이다. 그림 6에서 기존 PWM 제어보다 FM-PWM 제어인 경우가 대략 20(dB μ V)의 잡음전압이 더 감소되었음을 알 수 있다. 또한 스위칭 주파수와 그 정수배 고조파 성분이 측대역으로 더 많이 분산되고 있음을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 CISPR 22 규정의 전도성 잡음의 스펙트럼 제한치인 60 [dB μ V]를 통과할 수 있음을 확인할 수 있었다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 FM-PWM 제어인 경우가 대략 20 [dB μ V]의 잡음전압이 더 감소되었음을 알 수 있다. 그림 7에서 10.5(MHz)의 주파수 대역에서 전도성 잡음 레벨이 특히 높게 나타나고 있는데, 이를 제거하기 위한 EMI 필터 설계가 불가피하게 되었다. 그러나 설계되어야 할 EMI 필터 용량은 상대적으로 많이 감소될 것이라고 사료된다.

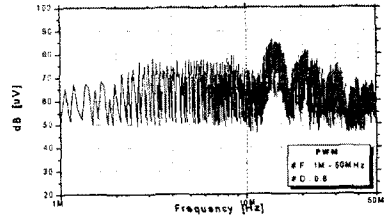


(a) PWM control

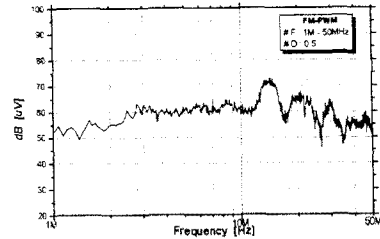


(b) FM-PWM control

그림 6. 전도성 잡음 주파수 스펙트럼(50k-1MHz)



(a) PWM control



(b) FM-PWM control

그림 7. 전도성 잡음 주파수 스펙트럼(1M-50MHz)

5. 결론

본 연구에서는 PWM 직류전원장치에서 발생하는 전도성 잡음을 분석 및 측정함으로써 전자파장해의 중요성을 다시 한번 되짚을 수 있는 기회가 되었다. 기존 PWM 제어에서는 전도성 잡음의 근본원인이라고 알려져 있는 회로 소자 및 배치에 따른 기생소자와 갑작스런 전류/전압의 변화가 전자파장해를 발생시킨다. 따라서 본 연구를 통하여 PWM 직류전원장치에서 스위칭주파수를 랜덤하게 변조함으로써 스위칭주파수와 그 정수배 고조파 주파수의 측대역으로 잡음 스펙트럼을 분산시키며, 전자파 잡음의 전력 스펙트럼을 향상시키는데 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] 박석하, 김양모, "RPWM 제어를 통한 전도성 EMI 잡음의 억제와 고조파 스펙트럼의 향상", 대한전자공학회, 제 36권, D편, 제 3호, pp. 386-393, 1999. 3.
- [2] Franc Mihalic, Tonček Bezjak and Miro Milanovic, "Random Modulated Boost Converter with Improved Harmonic Spectrum", ISIE '97, pp. 268-273.
- [3] F. Lin, and D.Y. Chen, "Reduction of Power Supply EMI Emission by Switching Frequency Modulation", IEEE Trans. on PE, Vol. 9, No.1 1994, pp. 132-137.
- [4] Tian Guo, Dan Y. Chen, and Fred C. Lee, "Separation of the Common-Mode and Differential-Mode Conducted EMI Noise", IEEE Trans. on P.E., Vol. 11, No. 3, pp. 480-487, May 1996.