

PWM 인버터를 위한 캐리어 랜덤 변조방식

조지원* 이정민 최규하 김한성
 건국대학교 전기공학과

Carrier Random Modulation Method for PWM Inverters

Jee-Won Joe Jeong-Min Lee Gyu-Ha Choe Han-Sung Kim
 Dept. of Electrical Eng. Kon-Kuk Univ.

ABSTRACT

All the existing PWM voltage-controlled inverters, regardless of the advantages of the operation, have produced serious problems such as acoustic noise. In this paper, the PWM technique for acoustic noise reduction is implemented using randomly modulated carrier modulation. By modulating the triangular carrier in sinusoidal PWM with band-limited white noise, it is shown that the acoustic noise level and spectral density is reduced in a tone. This method shows great merit in application the AC motor drive system to particularly environment.

I. 서론

근래 PWM인버터는 한대의 장치로써 출력전압의 크기와 주파수를 동시에 제어할 수 있는 특징을 가지므로 유도전동기의 가변속 운전분야에 크게 이용되고 있다. 이러한 PWM 인버터는 응용 분야에 따라 설정되는 PWM 제어기법이 매우 달라지며 간단한 SPWM기법에서 부터 고조파의 선택적 제거나 전류 왜형의 최소화 등의 최적 PWM기법에 이르기 까지 매우 다양하다. 이들 모든 PWM 기법들은 캐리어 또는 변조주파수 부근의 고조파가 커지고 그 영향을 억제시키기 위해 필터를 사용하며 또한 필터용량을 줄이기 위해 높은 주파수로 동작시키기도 한다. 일반적으로 PWM 기법은 동작특성은 우수하지만 가청잡음으로 인한 문제는 해결되지 않고 있다. 특히 전체의 PWM인버터 운전의 경우 필터를 사용할 수 없으므로 보다 고주파화가 필요하며 근래에 개발된 MOSFET등의 고속 스위칭 소자를 이용한 HFPWM (high-frequency PWM)의 기법을 사용하여 가청소음을 감소시키고 있다. 그러나 출력의 용량이 증대함에 따라 고속스위칭은 스위칭 손실, 효율 및 소자의 선정 등의 문제로 많은 제약이 있다. 따라서 본 연구에서는 HFPWM으로 운전하지 않으면서도 캐리어 주파수를 기준 주파수를 중심으로 랜덤하게 변화 시킴으로써 주된 가청잡음을 광대역으로 분산시켜 크기를 저하시키는 캐리어 랜덤 변조(CRM) 방식을 검토하고 그 특성을 분석하였다.

II. 캐리어 랜덤 변조 방식

제한된 SPWM은 우선 가청 잡음을 제거하면서도 스위칭 주파수 변이가 폭넓게 변하지 않아야 하고 실시간 제어와 선형성을 만족해야 하는 점과 부과적으로 전동기 부하를 구동시킬때 에너지 스펙트럼을 일정한 범위로 제한해야 하는 기능을 가지고 있어야 한다. 이런 가청 잡음을 제거하기 위한 랜덤화 아론은 여러 예에서 사용되어 왔다. 예를 들어 편 또는 프로펠러 날개의 공간적 위치와 방향의 랜덤화, 치차열의 위치를 랜덤화 하는 것은 가청 잡음을 제거시킬 수 있는 것으로 인식되어 왔다. 그러므로 PWM에도 같은 이론을 적용했을때 스위칭 주파수에 기인하는 가청잡음을 제거할 수 있는 것으로 생각된다. [1-2]

그림 1에서 설명하고 있는 기존의 SPWM파형은 기준파와 삼각파를 비교함에 의해 육구하는 주파수와 전압의 출력 파형을 얻을 수 있다는 것을 나타내고 있으며 보통은 기준파의 전압과 주파수를 제어하는 VVVF(variable voltage variable frequency) 방식을 사용하고 있다. 예를 들어 기준파의 크기가 0일때 출력은 구형파가 된다.

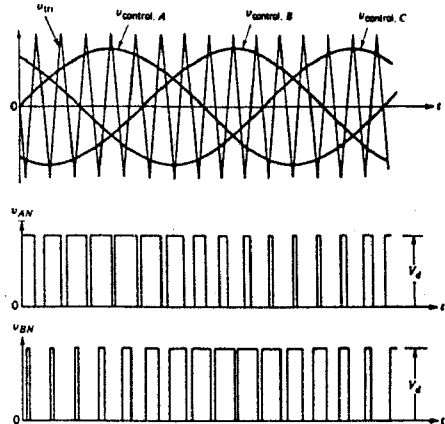


그림1. SPWM 파형

인버터출력의 선형성을 유지시키기 위해 캐리어는 삼각파를 유지해야 하고 그림 1의 기존의 SPWM에서 캐리어 주파수 f_c 는 기존 주파수 f_o 보다 9배이상 되어야 SPWM 변조방식의 좋은 특성을 얻을 수 있게 된다. 이때 PWM비교에 의해 발생된 duty cycle은 캐리어의 한주기에 대하여 기준파의 값에 비례한다. 그리고 부분구간에서의 한구간의 기울기가 변한다고 해도 선형성은 그대로 유지된다. 캐리어의 순간값, 즉 시간 t_j 와 t_{j+1} 사이의 주파수 f_i 는

$$f_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{t_{j+1} - t_j} = \frac{1}{T_c + T_n} \quad (1)$$

$$T_n = V_{max} n(t_j)$$

여기서 T_n 은 변조에 기인하는 어떤 주어진 증분의 변화이고 $n(t)$ 는 변조함수이다. 변조의 이런 형태를 디지털 통신이론에서는 FSK(Frequency shift keying)라고 알려져있다. 그림 2는 변조된 캐리어 파형과 변조함수를 나타내고 있는데 여기서 $n(t)$ 의 크기를 제한함에 의해 스위칭주파수를 미리 결정된 범위내로 유지될수 있다는 것이 분명하게 된다. 이와 같이 캐리어의 기울기를 변조시키는 변조함수 $n(t)$ 를 가우시안 백색잡음이라 하면 삼각파 주파수가 순간적으로 큰 변화를 나타나게 되어 가정음대역에서의 에너지 집중도를 제거하게 된다.

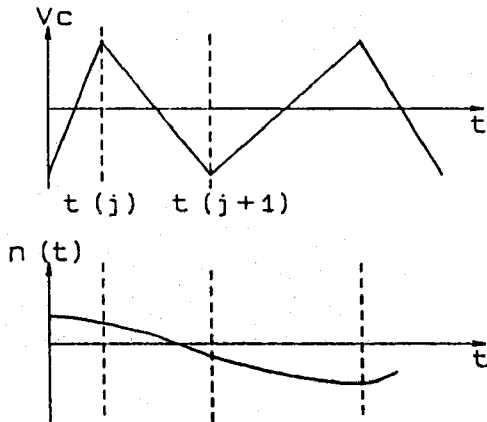


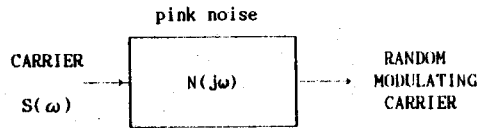
그림2. 랜덤캐리어와 변조함수 $n(t)$

그러나 출력전압의 스펙트럼 본포특성이 낮은 주파수 성분을 포함하여 매우 넓게 존재하므로 낮은 주파수 성분을 제거하기 위해 잡음의 대역폭이 제한되어야 한다. 즉 잡음원은 백색잡음을 저역통과한 핑크잡음을 사용해야 한다. 백색잡음의 전력스펙트럼 밀도도 $G_n(f) = \eta/2$ 라고 하면 간단히 RC저역통과 했을 때는

$$\begin{aligned} G_n(f) &= |H(f)|^2 G_n(f) \\ &= \frac{\eta/2}{1+(2\pi fr)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R_{no}(\sigma) &= \int_{-\infty}^{\infty} G_n(f) e^{j2\pi f\sigma} df \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\eta/2}{1+(2\pi fr)^2} e^{j2\pi f\sigma} df \\ &= \frac{1}{2\tau} e^{-|\sigma|/\tau} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $G_n(f)$ 는 핑크잡음의 전력스펙트럼밀도이고 $R_{no}(\sigma)$ 는 전력스펙트럼밀도의 역 푸리에 변환인 자기상관함수이다. 이 관계는 Wiener-Khinchine이론에서 증명된다.



랜덤 변조 캐리어의 전력 스펙트럼 밀도 $S_{no}(\omega)$ 는 이 된다.

$$S_{no}(\omega) = |N(j\omega)|^2 S(\omega) \quad (4)$$

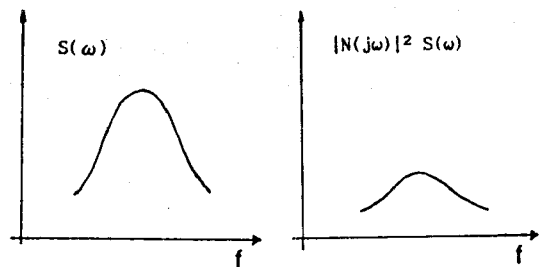


그림3. 전력스펙트럼 밀도

그림 3에서 나타내고 있는 것과 같이 캐리어를 변조 시킴에 의해 스위칭주파수에 기인하는 스펙트럼을 그림 3에서 보는 것과 같이 줄일 수 있다는 점을 알 수 있다. 그러므로 핑크잡음의 대역폭을 적절히 조정한다면 특정 가칭 주파수 대역에서의 음향잡음을 상당히 줄일 수 있게 된다.

I. 랜덤 변조 시스템의 구성

랜덤 변조 정현파 PWM회로의 구현은 그림 4에서 알 수 있는 것과 같이 저리의 SPWM에 간단히 몇가지 요소를 추가함에 의해 실현될 수 있다.

S/H는 다음 구간의 캐리어의 기울기를 결정하기 위해 삼각파의 최고치에서 피크검출기에 의해 클러킹되고 핑크잡음은 백색잡음을 저역통과시켜 얻을 수 있었다. 백색잡음은 MM5837과 같은 IC나 zener diode, 또는 여러소자들의 조합으로 얻어질 수 있다. 이와 같은 소자를 이용할 때 핑크잡음에 의한 출력전압의 대역폭을 확보하기 위해 저역통과 필터의 차단주파수가 예리해야 하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 본 논문에서는 ROM에 핑크잡음을 저장시키고 캐리어가 첨두치에

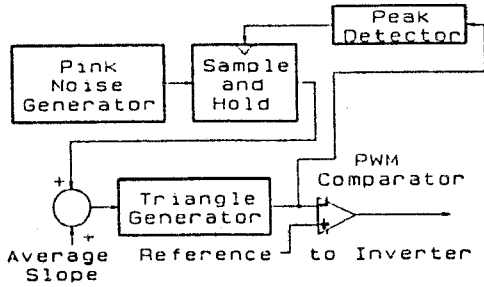


그림4. analog CRM regulator

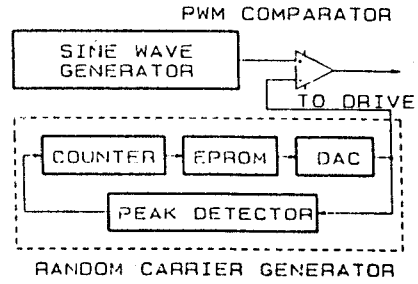


그림5. digital CRM regulator

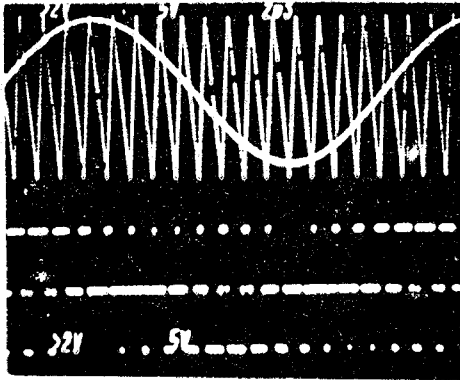


그림6. SPWM 선간전압

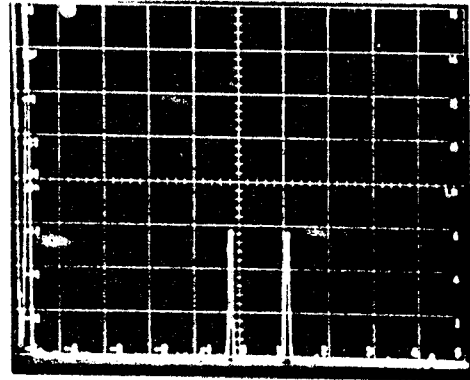


그림7. SPWM 선간전압의 스펙트럼
(200Hz div)

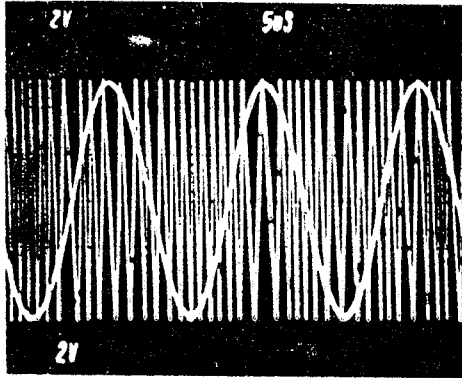


그림8. 랜덤 캐리어

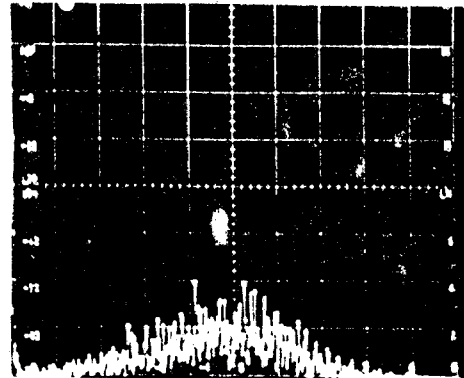


그림9. 랜덤캐리어의 스펙트럼 (200Hz div)

도달했을 때 다음의 캐리어의 기폭기를 발생시키기 위해 ROM의 data를 D/A 변환하여 출력시키는 방식을 사용하고 있다.(그림 5)

IV. 결과 및 고찰

정격이 2-20kW급 용량의 인버터에서는 스위칭 손실과 상용화된 MOSFET 용량이 작으며 가격이 비싸 가청잡음을 줄이기 위한 고속 스위칭 기법에서는 문제점이 있다. 또한 최적 PWM기법에서는 부하의 변동에 따라 가청잡음을 제거하기 위해 많은 메모리가 필요하게 되는 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서의 캐리어 랜덤 변조(CRM) 기법에 의해 가청잡음을

제거하는 기법을 제안하였다.^{[1][5][8]} 그 결과 기존의 기본파 PWM이 가지고 있는 출력에서의 선형성, 실시간 제어등의 잇점이 그대로 유지되면서 가청잡음이 상당히 줄어들게 되었다. 그림 6은 일반적인 SPWM 방식의 파형이고 그림 7은 그것의 스펙트럼 분석이다. 그리고 그림 8은 랜덤 캐리어의 파형이며 이것과 정현파를 비교하여 얻은 선간전압의 파형이 그림 10에 나타난다. 이때 그림 6과 그림 10에서 나타나듯이 출력 선간전압 파형은 크게 왜곡되지 않음을 알 수 있다. 그러나 그림 7과 CRM방식의 스펙트럼 분석결과인 그림 10을 비교했을때 CRM 방식에서는 SPWM 방식의 스위칭 주파수에 기인하는 특정 고조파가 줄어든 만큼 넓게 분산된다는 사실을 알 수 있다.

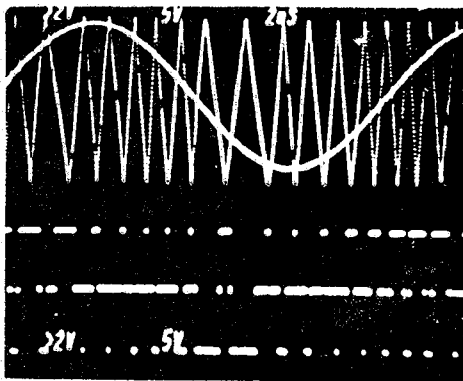


그림10. 캐리어 랜덤 변조의 선간전압

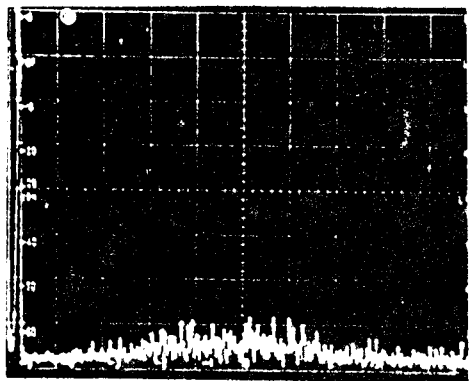


그림11. 캐리어 랜덤 변조의 선간전압 스펙트럼
(200Hz div)

V. 결론

PWM 인버터의 가청 잡음을 제거하는 랜덤 캐리어 변조(RCM) 방식을 제안하였다. 캐리어를 변조시키기 위해 핑크잡음을 이용하였고 그 회로 구성은 간단하게 실현되수 있었고 실험을 통해서 이론이 타당함을 확인하였다. 이 연구는 대용량 인버터의 무소음 운전과 SMR(Switching mode rectifier)와 같은 DC/DC 컨버터에서 동작 신뢰도를 높이는 데 사용될 수 있는 것으로 생각된다. [6-7]

참고문헌

- 1) Thomas G.Habetler and Deepakraj M.Divan, "ACOUSTIC NOISE REDUCTION IN SINUSOIDAL PWM DRIVES USING A RANDOMLY MODULATED CARRIER" PESC Conference Record, 1989, pp.665-671.
- 2) Isao Takahshi, Hiroshi Mochikawa, "Optimum Waveforms of Inverter for Decreasing Acoustic Noise of an Induction Motor" IEEE-ISA Annual Meeting Conference Record, 1985, pp.641-646.

- 3) M.Kheraluwala D.M.Divan "DELTA MODULATION STRATEGIES FOR RESONANT LINK INVERTERS", PESC Conference Record, 1987, pp.271-278.
- 4) G. A. Goodarzi and R. G. Hoft, "GTO INVERTER OPTIMAL PWM WAVEFORM", IEEE-IAS Annual Meeting Conference Record, 1987, pp.312-316.
- 5) Andrzej M. Trzynadlowski, Stanislaw Legowski, R. Lynn Kirling, "RANDOM PULSE WIDTH MODULATION TECHNIQUE FOR VOLTAGE-CONTROLLED POWER INVERTERS" IEEE-IAS Annual Meeting Conference Record pp.863-868.
- 6) Tamotsu NINOMIYA, Tetsuro TANAKA, Hiroshi KAMEDA, and Koosuke HARADA, "Noise Reduction of Switching-Mode Power Converters by Random-Switching Control", PESC '89 Record, pp.500-507, 1989.
- 7) Tetsuro TANAKA, Tamotsu NINOMIYA, Koosuke HARADA, "RANDOM-SWITCHING CONTROL IN DC-TO-DC CONVERTERS" PESC '90 Record, pp.1165-1172.
- 8) Gyu-Ha Choe, Min-Ho Park, "A New Injection Method For AC Harmonic Elimination By Active Power Filter", Proceedings, IECON 1985.