

고조파 스펙트럼 확산효과를 개선한 준 랜덤 주파수 캐리어 변조기법

(Pseudo-Randomized Frequency Carrier Modulation Scheme with Improved Harmonics Spectra Spreading Effects)

김종남* · 정영국** · 임영철

(Jong-Nam Kim · Young-Gook Jung · Young-Cheol Lim)

요 약

종래의 준 랜덤 주파수 캐리어(PRC : Pseudo-Randomized Frequency Carrier) 변조기법을 3상 H-브리지 멀티 레벨 인버터(HBML: H-Bridge Multi-Level Inverter)에 적용하는 경우, 스위칭 주파수의 2배 주파수 영역에서 큰 스펙트럼 클러스터가 그대로 존재하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 서로 2배의 주파수 비율을 갖는 2개의 고정 주파수 삼각파 캐리어와 3단계 멀티플렉서(MUX : Multiplexer)를 이용하여 종래의 PRC기법의 고조파 스펙트럼 확산 효과를 개선하였다. 제안된 기법은 1.5[kw]급 3상 HBML 인버터 구동시스템에 적용하였으며, 종전의 방법과 제안된 방법의 전압 및 전류 고조파 스펙트럼을 비교 검토하였다.

Abstract

In case that conventional PRC(Pseudo-Randomized Frequency Carrier) modulation scheme is applied to a three-phase HBML(H-Bridge Multi-Level Inverter), the dominant harmonics spectra appear at twice switching frequency. In this paper, the dominant harmonics spectra spreading effect of the conventional PRC scheme was improved by using three stage MUXs(Multiplexers) and two triangular carriers with fixed frequency which has mutual relation of the twice frequency. To confirm the validity of the improved PRC scheme, the experiment were performed on a 1.5[kw] three-phase HBML based induction motor drives. And, the harmonics spectra of the conventional and improved PRC schemes are compared and discussed.

Key Words : Improved pseudo-randomized frequency carrier modulation scheme,
Harmonics spectra spreading effect, Three-phase HBML drives

* 주저자 : (주)셀린 하드웨어실 연구원
** 교신저자 : 대불대학교 융합기술학부 부교수
Tel : 061-469-1263, Fax : 061-469-1299
E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr
접수일자 : 2008년 8월 4일
1차심사 : 2008년 8월 7일
심사완료 : 2008년 8월 22일

1. 서 론

근래에 개발된 전력변환장치는 대부분 전력전자 기술을 기반으로 하고 있다. 이러한 전력전자 변환 장치는 고정 주파수의 PWM기법으로 전력을 변환

한다. 그런데 고정 주파수의 PWM은 스위칭 주파수의 정수배 고조파를 전력변환장치의 출력전압과 전류에 발생시켜서 전자기적인 잡음과 가청 스위칭 소음을 발생한다[1-3]. 이러한 문제점은 RPWM(Random PWM)에 의하여 해결 가능하며, RPWM은 랜덤 펄스 위치 PWM과 랜덤 주파수 캐리어 PWM으로 분류 가능하다[4-7].

랜덤 펄스 위치 PWM은 스위칭 주파수의 1배, 2배, 3배의 고조파 성분을 랜덤하게 분포시키는데 한계가 있으며, 변조지수가 0.75이상이 되면 고조파의 랜덤 분포 성능이 더 이상 개선되지 않는다[7]. 한편 랜덤 주파수 캐리어 PWM은 공간벡터를 이용하지 않고 하드웨어로 구현하면 고전적인 RPWM의 개념과 일치한다. 이 방법은 랜덤 캐리어 발생 전용 칩이 필요하며 그 외에 정교한 회로들이 필요하다[8-9].

이상의 문제점을 해결하기 위하여 저자들은 더 이상 랜덤 캐리어가 필요하지 않는 고정 주파수 캐리어 합성을 통한 간단한 유사 랜덤 주파수의 캐리어(PRC : Pseudo-Randomized Frequency Carrier)발생기법[6-7]을 제안한 바 있다. 이 방법은 고정 주파수의 삼각파 캐리어와 역상의 삼각파 캐리어를 PRBS(Pseudo Random Binary Sequence)[10-11]에 의하여 선택한 후, 새롭게 합성된 랜덤 주파수의 캐리어를 발생하는 기법이다. 이 방법은 매우 간단하면서도 고정 주파수의 캐리어만으로 준 랜덤 주파수의 캐리어를 발생시킬 수 있는 최대의 장점을 가지고 있다. 그러나 이 방법을 3상에 적용[12]시키는 경우 고정 스위칭 주파수의 2배의 주파수 성분이 광대역으로 확산되지 않고 그대로 남아있는 문제점이 있었다.

따라서 본 연구에서는 종전의 PRC의 이러한 문제점을 개선하기 위한 개선된 PRC기법을 제안하였으며 1.5[kw]급 3상 5레벨 HBML(H-Bridge Multi-Level Inverter)인버터 구동시스템에 적용하였다. 제안된 기법은 1개의 고정 주파수의 삼각파 캐리어와 2배 주파수를 갖는 삼각파 캐리어, 이 캐리어를 각각 선택하기 위한 MUX(Multiplexer) 3개 그리고 PRBS비트 발생기로 구성되어 있다. 실험에 의하여 제안된 PRC와 종전의 PRC의 고조파 스펙트럼의 특성을 서로 비교 검토하였다.

2. 이 론

그림 1은 종래의 PRC 발생기[10-12]를 나타내고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 3[kHz] 고정 주파수의 삼각파 캐리어와 이것과 역상인 캐리어가 2입력 1출력의 MUX에 입력되면, PRBS의 출력 비트에 따라서 정상의 캐리어와 역상의 캐리어가 랜덤하게 선택된다. 이때 정상과 역상의 선택은 랜덤 비트 발생기의 출력에 전적으로 의존되며, PRBS비트가 "1"인 경우에는 역상의 캐리어, "0"인 경우에 정상의 캐리어가 선택된다.

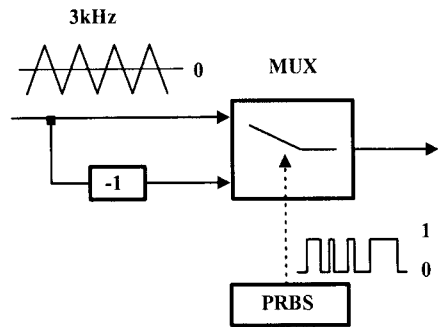


그림 1. 종전의 PRC발생기
Fig. 1. Conventional PRC generator

즉 고정 주파수를 갖는 정상 캐리어와 역상 캐리어의 합성만으로 랜덤 주파수의 캐리어가 발생된다. 이 PRC는 고정 주파수의 캐리어를 합성하여 랜덤과 유사한 효과를 내기 때문에 준 랜덤 캐리어라 한다. 여기서 시프트 레지스터로 구성된 PRBS비트 발생기는 N개의 플립플롭을 사용하여 $2^N - 1$ 개의 불규칙 수열을 발생시키는 회로이다.

그림 2는 본 연구에서 제안된 PRC발생기이다. 이 방법은 종전의 방법에 비하여 2[kHz] 고정 주파수의 삼각파 캐리어 C2와 2배수인 4[kHz]의 삼각파 캐리어 C4가 필요하다. 그리고 3개의 MUX와 1[kHz]와 2[kHz] 구형파 발생기 역시 필요하다. MUX는 일반적으로 1개의 MUX칩 속에는 여러 개의 MUX가 있는 경우가 대부분이기 때문에 MUX의 증가는 비용의 증가로 이어지지 않는다.

고조파 스펙트럼 확산효과를 개선한 준 랜덤 주파수 캐리어 변조기법

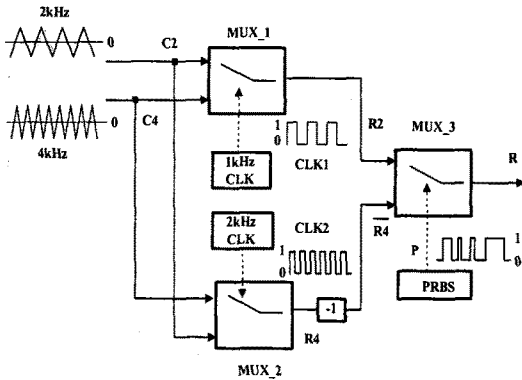


그림 2. 제안된 PRC발생기
Fig. 2. Proposed PRC generator

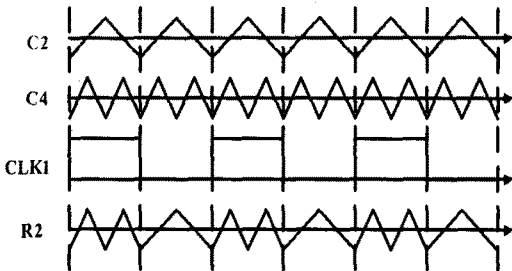


그림 3. MUX_1에서의 입력과 출력 파형
Fig. 3. Input and output waveform of the MUX_1

먼저 2[kHz] 삼각파 캐리어 C2를 기본 주파수로 하는 경우의 동작 원리를 그림 2부터 그림 7을 통하여 살펴본다. C2와 서로 동기된 2배 주파수의 삼각파 캐리어 C4를 발생시킨 후, MUX_1에 C2와 C4가 입력되면, 1[kHz] 주파수의 구형파 CLK1의 상태 "1"과 "0"에 의하여 R2가 발생된다. 이때 CLK1이 "1"의 상태이면, R2는 C4로 선택되고, "0"이면 R2는 C2로 선택된다. 따라서 R2는 CLK1의 주파수에 의해서 2[kHz]와 4[kHz]가 주기적으로 반복된다(그림 3).

한편 MUX_2로 입력된 C4와 C2는 2[kHz]의 CLK2의 조건 즉 CLK2가 "1"이면 "C2"이며, "0"이면 C4가 선택되어 R4가 얻어지고, 이 R4와 180° 위상 차이는 $\bar{R4}$ 를 얻을 수 있다(그림 4). 이상에서 발생된 MUX_1의 R2와 MUX_2의 $\bar{R4}$ 를 PRBS비트의 조건에 의하여 MUX_3에 의하여 랜덤하게 선택하게 되면 결과적인 유사 랜덤 주파수를 갖는 캐

리어 R이 얻어진다(그림 5). 이 R을 기준 정현파와 비교하면 유사 랜덤 특성을 갖는 PWM 펄스가 얻어진다(그림 6).

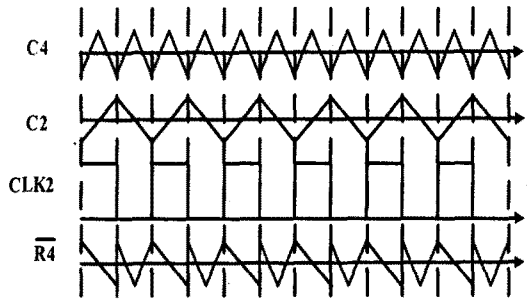


그림 4. MUX_2에서의 입력과 출력 파형
Fig. 4. Input and output waveform of the MUX_2

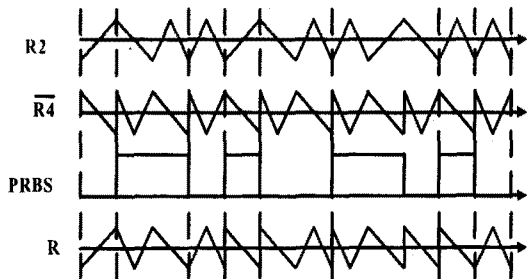


그림 5. MUX_3에서의 입력과 출력 파형
Fig. 5. Input and output waveform of the MUX_3

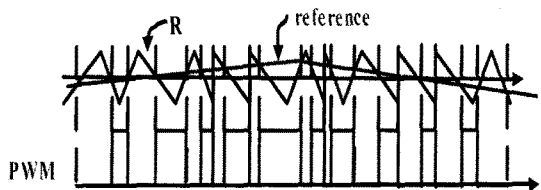


그림 6. 결과적인 PWM 펄스
Fig. 6. Resultant PWM pulses

그림 7은 3상 HBML을 구동하기 위해 그림 5의 제안된 유사 랜덤 캐리어 R을 PD(phase disposition)로 배치하고 3상 기준신호와 비교한 결과이다. 각상의 기준신호와 PD로 배치된 캐리어 R과 비교하면 HBML의 각상의 각 cell을 스위칭 하기위한 PWM신호가 발생된다.

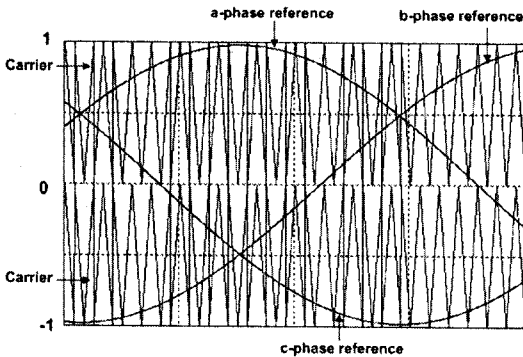
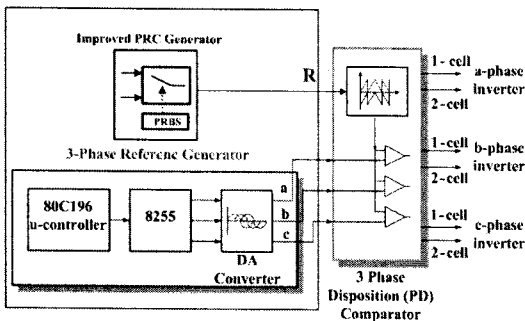
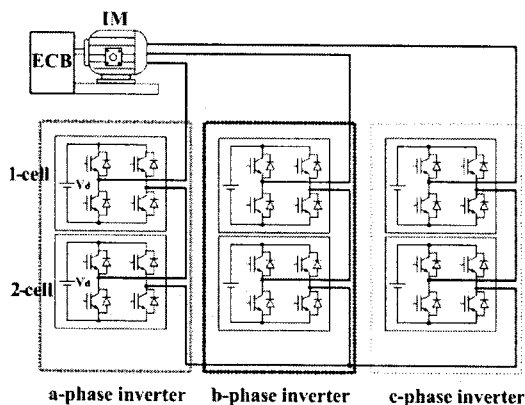


그림 7. 3상기준신호와 제안된 캐리어 파형의 PD배치
 Fig. 7. Phase disposition voltages and the proposed carriers waveform

3. 시스템 구성



(a) Improved PRC generator and its PD comparator



(b) Three-phase HMBL power circuit

그림 8. 제안된 실험 시스템
 Fig. 8. Experimental system

그림 8 (a)는 그림 2에서 나타난 3단계 MUX와 서로 2배 주파수 관계가 있는 고정 주파수 삼각파 캐리어를 이용하여, 종전의 PRC에서 발생하는 스위칭 주파수의 2배 주파수를 개선하기 위해 제안된 PRC 발생기를 나타낸 것이다.

80C196 마이크로 콘트롤러에서 발생한 3상 정현파 기준치는 그림 7과 같이 PD비교기와 비교되며 그림 8 (b)로 나타난 HMBL의 각상의 각 cell로 입력된다. HMBL은 각 상당 H-브리지 2개가 직렬로 연결되어 있으며, 각 상은 1차 축이 Δ 결선된 1.5[kw] 3상 농형 유도모터에 연결된다. 부하로는 기계적인 소음이 거의 발생되지 않은 ECB(Eddy current brake)를 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 9는 고정 주파수 $C2 = 2[\text{kHz}]$, $C4 = 4[\text{kHz}]$ 와 PRBS = 12비트 조건에 대한 제안된 PRC의 실험 파형을 나타내고 있으며, 결과적인 캐리어 R은 PD 배치하고 있다. 이는 그림 7의 시뮬레이션 결과와 동일한 양상이다.

그림 10은 종전의 방법과 개선된 방법의 a-b상 선간 전압이 5레벨인 모터 전압 v_{ab} 과 전류 i_a 파형을 나타내고 있으며, 두 방법에 의한 전류 파형은 거의 동일함을 육안으로 관측할 수 있다.

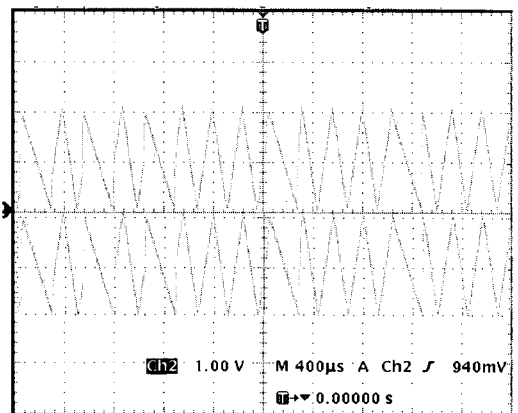
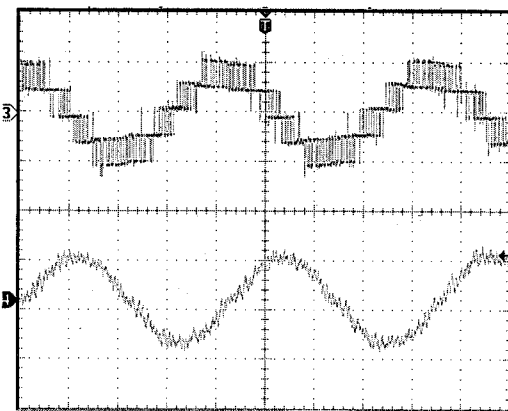


그림 9. PD로 배치된 제안된 PRC 파형
 Fig. 9. Proposed PRC waveform with a phase disposition

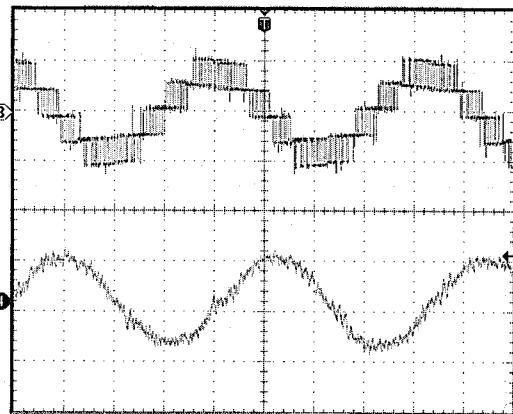
고조파 스펙트럼 확산효과를 개선한 준 랜덤 주파수 캐리어 변조기법

그림 11은 유도모터와 연결된 3상 HBML 인버터의 출력전압 v_{ab} 에 대한 고조파 스펙트럼을 나타내고 있다. 먼저 그림 11 (a)로 나타난 종전의 방법의 경우, 전압 스펙트럼은 2[kHz] 스위칭 주파수의 2배 주파수 4[kHz]에서 아주 강한 스펙트럼이 존재함을 알 수 있다[12]. 그러나 단상의 경우[10,11]에는 스위칭 주파수의 2배 주파수 스펙트럼은 3상[12]에 비하여 상대적으로 적으므로 큰 문제가 되지 않는다.

트럼은 상당히 감소되고 있다. 그러나 1-3[kHz]주파수에서 반원모양으로 분포한 고조파 스펙트럼에는 약간의 맥동이 발생되며 또한 9[kHz]대의 고조파 스펙트럼도 약간 증가된다. 이는 4[kHz] 고조파 스펙트럼을 광대역으로 분산하는 과정에서 발생하는 당연한 결과라고 생각된다. 전체적으로 살펴보면, 제안된 방법의 고조파 스펙트럼의 분포는 불연속적인 부분이 상당히 감소되어 있음을 알 수 있다.



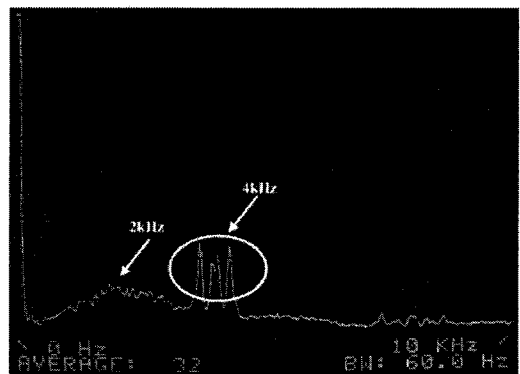
(a) Conventional PRC scheme



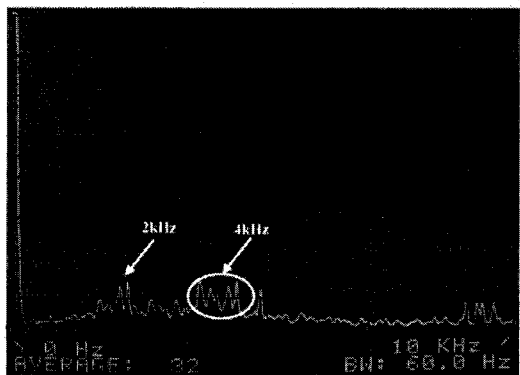
(b) Proposed PRC scheme

그림 10. 모터 출력 전압(v_{ab})과 전류(i_a) 파형
(전압: 250(v/div.), 전류: {2A/div.})
Fig. 10. Motor output voltage(v_{ab}) and current (i_a)
(voltage: {250v/div.}, current: {2A/div.})

그림 11 (b)는 제안된 방법의 결과이며, 종전의 방법에서 매우 강하게 존재하던 4[kHz] 주파수의 스펙



(a) Conventional PRC scheme



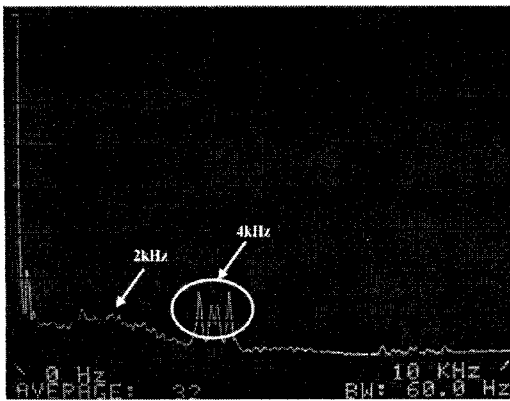
(b) Proposed PRC scheme

그림 11. 모터 출력 전압(v_{ab})의 스펙트럼
(x축: 1(kHz/div.), y축: 100(mv/div.))
Fig. 11. Motor output voltage(v_{ab}) spectra
(x-axis: 1(kHz/div.), y-axis: 100(mv/div.))

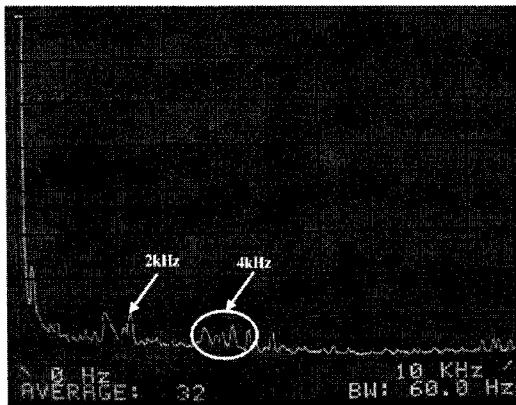
그림 12는 모터 출력전류 i_a 에 대한 고조파 스펙트럼을 나타내고 있다. 종전의 방법에 강하게 존재하던 4[kHz]대의 고조파는 제안된 방법에서는 저감되고 있으며 전압의 경우와 마찬가지로 2[kHz]대와

9[kHz] 주파수대에서 맥동이 존재한다.

제안된 방법은 3단계 MUX와 2개의 고정 주파수의 삼각파 캐리어를 필요로 한다는 점에서 종전의 방법보다 비용증가가 예상되나, 보통 1개의 MUX 칩에는 여러 개의 MUX가 내장되므로 또는 개선된 고조파 스펙트럼의 확산 성능을 고려한다면 그렇게 우려할 사항이라 생각되지는 않는다. 본 연구에서는 회로적인 방법으로 고조파 스펙트럼의 광대역 분산 성능을 개선하는 것에 목적이 있기 때문에, 고조파 해석을 위한 수학적 접근은 고려하지 않았다.



(a) Conventional PRC scheme



(b) Proposed PRC scheme

그림 12. 모터 출력 전류(i_a)의 스펙트럼
(x축: 1[kHz/div.], y축: [10mA/div.])
Fig. 12. Motor output current(i_a) spectra(x-axis:
1[kHz/div.], y-axis:[10mA/div.])

5. 결 론

본 연구에서는 종전의 PRC기법의 문제점을 해결하기 위한 3단계 MUX와 서로 2배 주파수 관계가 있는 고정 주파수의 삼각파 캐리어를 이용한 새로운 PRC기법을 제안하였으며, 유도모터와 연결된 1.5[kw]급 3상 HBML인버터에 적용하였다.

제안된 방법은 종전의 방법에 비하여 다소 복잡한 회로를 필요로 하나, 종전의 방법에서 강하게 존재하던 4[kHz] 주파수대의 스펙트럼은 제안된 방법으로 불연속적인 부분을 상당히 감소시킬 수 있었다. 그러나 1-3[kHz]주파수 영역에서 반원모양으로 분포한 고조파 스펙트럼에는 맥동이 발생하고 있으나, 이는 4[kHz] 고조파 스펙트럼을 광대역으로 분산하는 과정에서 발생하는 결과라고 생각된다.

끝으로 제안된 방법은 3단계 MUX와 2개의 고정 주파수의 삼각파 캐리어를 필요로 한다는 점에서 종전의 방법보다 비용증가가 예상되나, 보통 1개의 MUX 칩에는 여러 개의 MUX가 내장되므로 또는 개선된 고조파 스펙트럼의 확산 성능을 고려한다면 그렇게 우려할 사항이라 생각되지는 않는다. 다음의 연구로는 제안된 방법의 고조파 스펙트럼의 수학적 해석과 벡터제어 기반의 시스템 구현이 기대된다.

References

- [1] S. Kaboli, J. Mahdavi, and A. Agah, "Application of random PWM technique for reducing the conducted electromagnetic emissions in active filters", IEEE Trans. Ind. Electron., vol.54, no.4, pp.2333-2343, 2007.
- [2] A. M. Trzynadlowski, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, R. L. Kirlin and S. Legowski, "Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive systems- A Review", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 30, no. 5, pp.1166-1174, 1994.
- [3] A.M. Trzynadlowski, K. Borisov, Y. Li, and L. Qin, "A novel random PWM technique with low computational overhead and constant sampling frequency for high-volume, low-cost applications", IEEE Trans. Power Electron., vol.20, no.1, pp.116-122, 2005.
- [4] Y.G. Jung, S.H. Na, Y.C. Lim and S.H. Yang, "Reduction of audible switching noise in induction motor drives using random position space vector PWM", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol.149, no.3, May, pp.195-200, 2002.
- [5] T.G. Habetler and D. M. Divian, "Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier", IEEE Trans. Power Electron., vol. 6,

- no. 3, pp. 356-363, 1991.
- [6] C.M. Liaw, and Y.M. Lin "Random slope PWM inverter using existing system background noise : analysis, design and implementation", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 147, no.1, pp.45-54, 2000.
- [7] 김정근, 오승렬, 정영국, 임영철, "2중 영 벡터 모드를 갖는 2상 개별 펄스 위치 변조기법", 대한전기학회 논문지, 53B권, 12호, pp.739-750, 2004.
- [8] B.R. Lin, "Implementation of non-deterministic pulse width modulation for inverter drives", IEEE Trans. aerospace and electronic system, vol.36, no.2, pp.482-490, 2000.
- [9] B.R. Lin and H.H. Lu, "Three-phase ac/dc/ac/converter with random pulse position PWM", in Conf. Rec. EPE'99, 1999, in CD ROM version.
- [10] J.N. Kim, Y.G. Jung, and Y. C. Lim, "Power spectra of single-phase HBL inverters with a pseudo-random frequency carrier technique", IEEE Power Electronics Conference, PESC'06, 2006, PS 1-91, in CD-ROM version.
- [11] 김종남, 정영국, 임영철, 김광현, 박성준, "고정 주파수의 캐리어 합성에 의한 준랜덤 주파수 캐리어 PWM기법", 대한전기학회 논문집, 54B-11-7, pp.547-552, 2005.
- [12] 박진규, 김종남, 정영국, 임영철, "3상 멀티레벨 인버터 구동 유도전동기의 소음저감을 위한 3상 준 랜덤 캐리어 변조기법", 전력전자학술대회, 2005, pp.742-745.

◆ 저자소개 ◆

김종남 (金鍾南)

1978년 3월 13일생. 2004년 대불대학교 전기공학과 졸업. 2006년 전남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)셀런 하드웨어실 연구원.
Tel : (02)2140-6400
E-mail : gooddaykjin@nate.com

정영국 (鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대학교 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 대불대학교 융합기술학부 부교수.
Tel : (061)469-1263
Fax : (061)469-1299
E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr

임영철 (任永徹)

1953년 4월 23일생. 1975년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1977년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년 호주 모나시대학교 Visiting Scholar. 1998~2007년 산업자원부 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터 소장. 현재 전남대학교 전기공학과 교수.
Tel : (062)530-1743
E-mail : yclim@chonnam.ac.kr