

# LF2407 DSP제어기를 사용한 혼합형 랜덤 펄스폭 변조(HRPWM)기법

김기선<sup>o\*</sup> 정영국<sup>\*\*</sup> 임영철<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>전남대학교 전기공학과 <sup>\*\*</sup>대불대학교 컴퓨터정보공학부

## A Hybrid Random Pulse Width Modulation(HRPWM) Technique Using LF2407 DSP Controller

<sup>o\*</sup>K.S. Kim <sup>\*\*</sup>Y.G. Jung and <sup>\*</sup>Y.C. Lim

<sup>\*</sup>Chonnam National University and <sup>\*\*</sup>Daebul University

### ABSTRACT

본 연구에서는 LF2407 DSP제어기를 사용한 혼합형 랜덤 펄스폭 변조기법(HRPWM : Hybrid Random PWM)을 제안하였다. 제안된 HRPWM은 PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence)로 동작하는 시프트 레지스터의 lead-lag 랜덤 비트를 사용한다는 점에서 종전의 방법과 동일하다. 그러나 Lead-Lag 랜덤 비트와 논리적인 비교를 하기위해 고정 주파수의 캐리어를 사용하지 않고 랜덤 주파수의 삼각파 캐리어를 이용한다는 점이 종전의 방법과 다르다. LF2407 DSP에 의하여 랜덤 주파수 및 PRBS 그리고 3상 기준 정현파를 실시간으로 발생하며, DSP외부의 주파수 변조기 MAX038에 의하여 랜덤 주파수의 캐리어를 발생한다. 제안된 기법을 LF2407기반의 3상 유도모터 구동장치에 적용한 결과, 모터 전류파형은 종전의 방법과 유사한 파형을 유지하면서도 모터 전압 및 전류의 고조파 스펙트럼은 광대역 주파수로 분포시킬 수 있었다.

### 1. 서 론

현재 산업현장의 가변속 장치로 광범위하게 적용되고 있는 PWM 인버터 구동 유도모터의 스위칭 소음은 쾌적한 작업 환경의 질을 저하시키는 중대한 요소로서 작용하고 있다. 고정 스위칭 주파수로 동작하는 인버터의 스위칭 소음 문제를 해결하기 위한 전력전자적인 방법으로 RPWM(Random PWM)이 주목 받고 있다<sup>1,2)</sup>. RPWM 기법은 랜덤화된 펄스 위치 PWM (Randomized Pulse Position PWM : RPP)방법<sup>3,5)</sup>과 랜덤 스위칭 주파수 PWM (Random Frequency Carrier PWM : RFC)<sup>6,7)</sup>으로 나눌 수 있다.

RPP는 우선 다양한 종류가 있으며, 마이크로 컨트롤러로 직접 펄스를 발생할 수 있기 때문에 하드웨어의 부담이 적으며 구현이 용이하다. 그러나 스위칭 주파수의 정수배 고조파 스펙트럼을 광대역으로 분산하기에는 이 방법으로는 한계가 있다. 반면에 RFC는 일반적으로 랜

덤 주파수의 삼각파를 하드웨어적인 방법에 의해 구현 가능하며 스위칭 주파수의 정수배 고조파 스펙트럼의 광대역화가 특성은 RPP보다 매우 탁월하다.

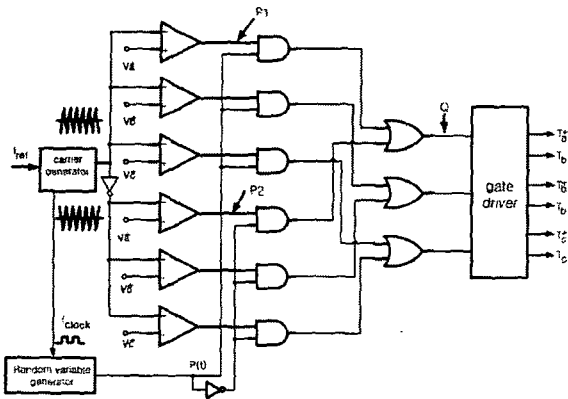
이상에서 언급된 RPP와 RFC는 마이크로 컨트롤러 기반의 공간벡터 기법과 하드웨어적인 방법으로 각각 구현 가능하다. Bor-Ren Lin<sup>[8-9]</sup>은 순수한 하드웨어적인 방법에 의해 PRBS로 동작하는 시프트 레지스터<sup>[10]</sup>의 출력과 고정 주파수 캐리어의 논리적인 비교로부터 RPP를 구현하였다. Bor-Ren Lin이 RPP를 위해 적용한 방법은 시프트 레지스터의 출력에 고정 주파수의 톱니파 또는 고정 주파수의 삼각파를 적용한 것이다. 톱니파에 의한 방법은 RLL(Random Lead-Lag)특성을 지니고 있으며, 삼각파에 의한 방법은 SVM(Space Vector Modulation)과 RLL이 혼합된 특성을 갖는다. 따라서 이 방법으로는 RPP의 근본적인 정수배 스위칭 주파수의 잔존 문제를 해결하기가 어렵다.

본 연구에서는 PRBS로 동작하는 시프트 레지스터의 Lead-Lag 랜덤 비트와 논리적인 비교를 위한 삼각파 캐리어를 랜덤하게 하여 전력전자 변환기의 고조파 스펙트럼의 분산 효과를 개선하기 위한 HRPWM기법을 제안한다. 제안된 방법은 RPP의 특징과 RFC의 특징을 모두 갖고 있는 혼합형 RPWM의 모습을 보이고 있다. 본 연구의 타당성을 확인하기 위하여 LF2407 DSP제어기 기반의 3상 유도모터 구동장치를 제작하여 모터 전압 및 전류의 특성을 파악하였다. 그 결과, 전류파형은 종전의 방법과 동일한 파형을 유지하고 있으며, 모터 전압 및 전류의 고조파 스펙트럼은 종전의 방법보다 광대역 분포를 하고 있음을 알 수 있었다.

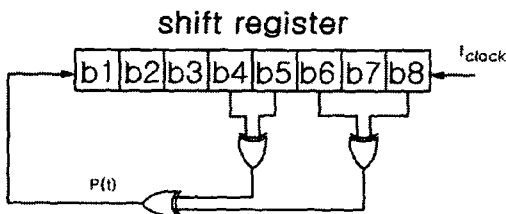
### 2. 종전의 RPWM기법<sup>[8-9]</sup>

그림 1은 논리적인 비교기법을 사용하고 있는 종전의 RPWM발생 회로이다. 그림 1을 보면 PRBS로 동작하는 시프트 레지스터의 Lead-Lag 랜덤 비트와 캐리어와 비교하여 펄스 위치를 랜덤하게 배치하고 있다. 간단한 하

드웨어에 의해 RPWM을 실용적이며 저렴하게 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다.



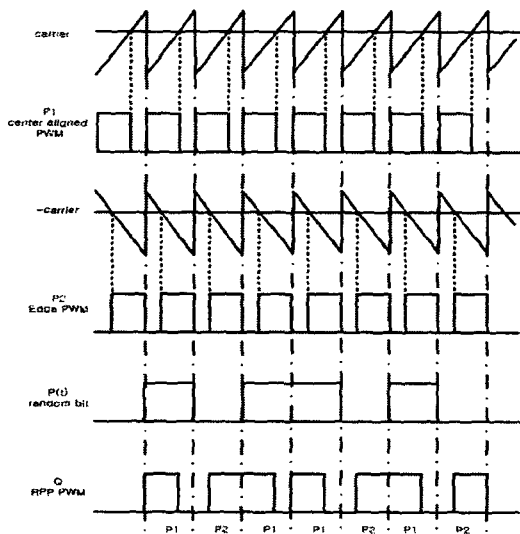
(a) RPWM generation circuit



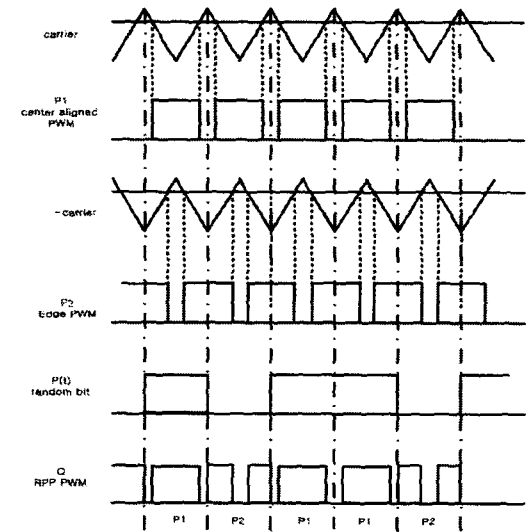
(b) Pseudo random bit generator

그림 1 논리적인 비교기법에 의한 RPWM  
Fig. 1 Typical RPWM by logical comparison

논리적 비교를 위한 캐리어로는 그림 2에서 보는 바와 같이 고정 주파수의 톱니파와 삼각파가 있으며, 톱니파를 캐리어로 적용할 경우에는 RPWM은 RLL로 동작하게 되며, 삼각파를 사용할 경우에는 RLL과 중앙정렬 SVM이 혼합된 RPWM으로 된다. 그림 2(a)의 톱니파를 이용한 RLL는 RPP중에서 가장 초기버전이며 구현이 매우 간단하다.



(a) sawtooth wave



(b) triangle wave

그림 2 고정 주파수의 캐리어에 의한 RPWM  
Fig. 2 Conventional RPWM using fixed frequency carrier

그러나 전류파형에 맥동 성분이 많아 파형의 악화를 가져오며, 따라서 스펙트럼의 랜덤 특성이 양호하지 않다. 그림 2(b)는 RLL가 전류파형의 악화를 가져오는 문제점을 해결하기 위하여 제시된 방법이다. RLL에 중앙정렬 SVM이 혼합되기 때문에 RLL로 악화된 파형을 어느 정도 개선 가능하다. 그러나 근본적으로 고정 주파수의 중앙 정렬 SVM을 이용하기 때문에 결과적인 파형에는 고정 스위칭 주파수 성분이 존재하게 된다.

### 3. 제안된 HRPWM기법

그림 3은 본 연구에서 제안된 RPP와 RFC를 혼합한 HRPWM기법을 나타내고 있다. 이 방법은 우선 공간벡터에 의하지 않기 때문에 복잡한 이론이 필요치 않고 간단하다는 장점이 있다.

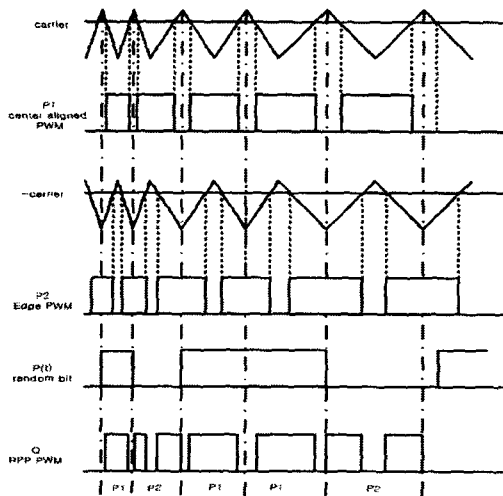


그림 3 제안된 HRPWM  
Fig. 3 Proposed HRPWM

그림 3에서 보는 바와 같이 제안된 HRPWM은 삼각파를 캐리어로 사용하기 때문에 톱니파를 캐리어로 사용하는 그림 2(a)에 비하여 급격한 Lead-Lag 랜덤 비트가 발생하지 않는다. 따라서 전류 파형의 악화를 초래하지 않으며, 또한 랜덤 주파수의 캐리어를 사용하기 때문에 그림 2(b)와 같은 고정 주파수의 캐리어가 발생하는 특정 주파수대의 스펙트럼을 광대역으로 분산시키는 효과가 크다. 즉 그림 3에서 Q로 표시된 최종 RPP PWM패턴을 살펴보면, P1의 SVM과 P2의 Lead-Lag 펄스들은 그 유형에서 동일하다 할지라도 각각의 주파수가 다르다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 시스템 구성

그림 4에는 제안된 LF2407기반의 HRPWM을 적용한 3상 유도모터 구동장치를 나타내었다. LF2407 DSP제어기는 랜덤 수 및 PRBS 랜덤 비트와 3상 기준 정현파 발생을 담당하고 있다. DSP외부에는 DSP가 발생한 랜덤 수로부터 랜덤 주파수의 캐리어를 발생하기위한 MAX038과 여러 가지 논리회로 등으로 구성되어 있다.

그림 4의 회로에 대한 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 우선 LCG(Linear Congruential Generator)알고리즘<sup>[4, 5]</sup>과 외부 인터럽트에 의하여 랜덤 수를 연산하고, DA 변환기를 통하여 랜덤 수  $v_{ran}^*$ 를 출력한다. 랜덤 수는 unsigned long형이며 따라서 DA변환기로 출력되는 랜덤 수는  $0 \sim 2^{12}(0 \sim 4095)$ 이 된다. DA변환기를 통해 출력된  $v_{ran}^*$ 신호는 MAX038로 인가되며, 여기서 MAX038은 삼각파를 생성하는 IC소자로서 본 시스템에서는 DA변환기의 출력 신호인  $v_{ran}^*$ 을 주파수 변조하여 랜덤 주파수의 삼각파 캐리어를 발생하고 있다. PRBS 랜덤 비트는 소프트웨어인 방법으로 8비트 랜덤 비트를 구현하였으며, 외부에서 입력되는 삼각파 캐리어의 피크검출(상승예지) 신호의 인터럽트에 동기되어서 DSP의 I/O포트로 PRBS 랜덤 비트를 출력한다.

3상 기준 정현파  $v_{abc}^*$ 는 DSP의 타이머 인터럽트를 이용하여 정확한 시간을 계산하고, 메모리된 테이블 값을 순차적으로 호출하여 구할 수 있다. 테이블 값은 12비트 데이터 버스를 이용하기 때문에 0x000-0xffff의 범위로 정하였으며, 1주기당 360개 구간으로 나누어 테이블 값을 데이터 버스로 출력하였다. 3상 기준 정현파  $v_{abc}^*$ 신호의 출력은 I/O 확장 번지를 통하여 선택된 외부 DA변환기로 보내어지며, 각각 120도의 위상차가 있는 3상 정현파를 출력한다.

#### 5. 실험결과 및 고찰

그림 5는 3상 기본파 주파수 60Hz, 변조지수 0.85, 3kHz 중심 주파수에 대해  $\pm 1kHz$  랜덤 대역폭을 갖는 랜덤 주파수의 삼각파 캐리어와 8비트 PRBS의 조건 하에서 발생된 여러 펄스를 측정된 결과이다. 그림 3의

HRPWM 펄스의 발생과정과 비교해보면 논리적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

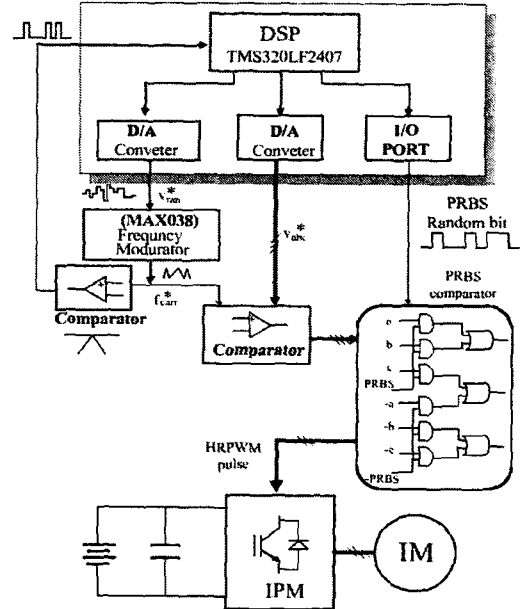


그림 4 제안된 시스템  
Fig. 4 Proposed system

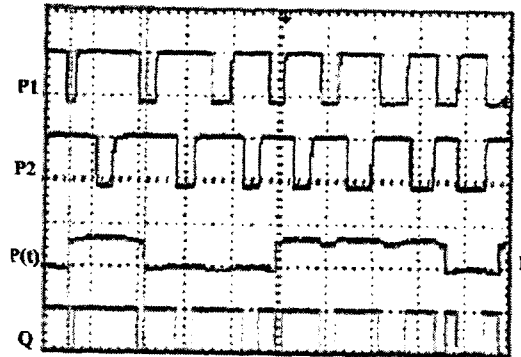
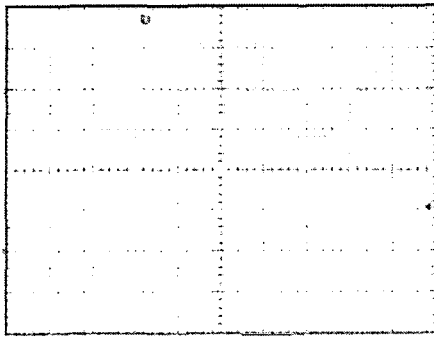
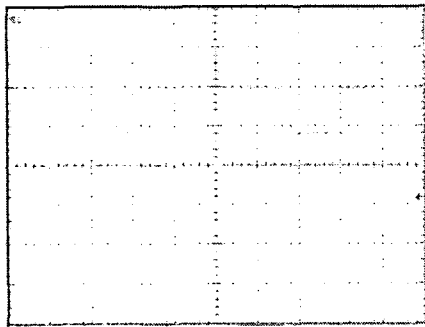


그림 5 측정된 HRPWM 펄스(P1,P2,p(t),Q)  
Fig. 5 Measured HRPWM pulses(P1,P2,p(t),Q)

실효치가 220v인 인버터 출력전압을 ECB(Eddy Current Brake)와 연결된 1.5kW급 3상 유도모터에 인가하였을 때의 측정된 모터 전압과 전류 파형을 그림 6에 나타내었다. ECB는 자체적인 기계 소음이 없으며 모터와 연결하여 부하로서 사용 가능한 전기기계이다. 그림 6(a)는 중전의 방법으로서 3kHz 고정 주파수를 갖는 삼각파를 사용한 결과이다. 그림 6(b)는 3kHz 중심 주파수에 대하여  $\pm 1kHz$  대역폭을 갖는 랜덤 삼각파를 사용한 결과이며 이때 각 방식의 전류파형과 비교해보면 제안된 방식이나 중전의 방식이 서로 유사하다는 것을 알 수 있다. 즉 일반적으로 RPWM이 사용되는 경우 발생하는 전류파형의 맥동이 제안된 방식에서는 매우 적게 발생하고 있음을 알 수 있다.

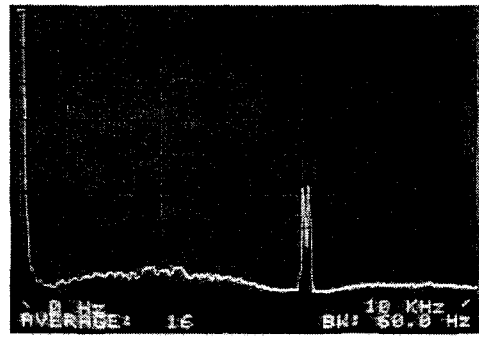


(a) Conventional method (3kHz)

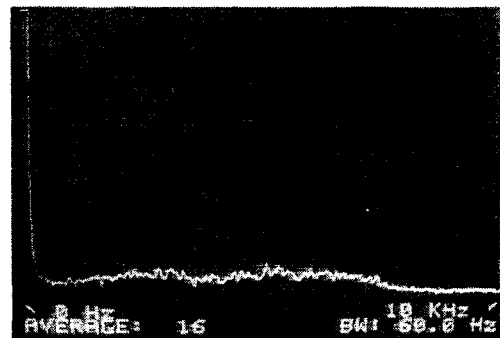


(b) Proposed method(3kHz±1kHz)

그림 6 측정된 전압과 전류파형  
Fig. 6 Measured voltage and current waveforms  
(voltage:200v/div.,current:3A/div.)

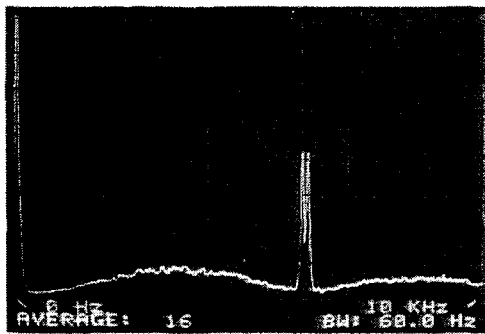


(a) Conventional method (3kHz)

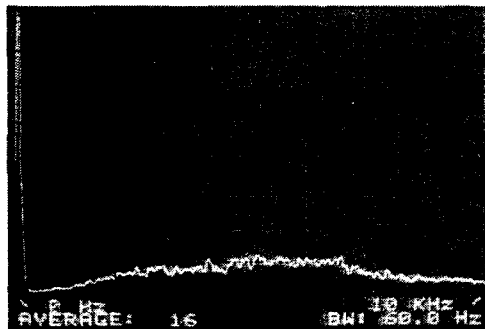


(b) Proposed method(3kHz±1kHz)

그림 8 측정된 전류 스펙트럼  
Fig. 8 Measured current spectra  
(x-axis:1kHz/div.,y-axis:10mv/div.)



(a) Conventional method (3kHz)



(b) Proposed method(3kHz±1kHz)

그림 7 측정된 전압 스펙트럼  
Fig. 7 Measured voltage spectra  
(x-axis:1kHz/div.,y-axis:200mv/div.)

그림 7과 그림 8은 그림 6으로 나타낸 종전의 방식과 제안된 방식의 전압과 전류 파형에 대한 스펙트럼 분석 결과이다. 그림 7(a)와 그림 8(a)로 나타낸 종전의 방법은 전압과 전류 스펙트럼에 모두 스위칭 주파수 3kHz의 2배수 주파수의 강한 고조파 성분이 존재한다. 그러나 제안된 HRPWM은 그림 7(b)와 그림 8(b)에서 보는 바와 같이 6kHz성분을 거의 완전하게 광대역으로 분산시키고 있다. 이것이 RPWM을 적용하는 중요한 목적이다. 다시 말하여 제안된 방법에 의한 전류파형은 고정 주파수 PWM의 특징인 양호한 전류파형과 랜덤 주파수 PWM의 특징인 고조파 스펙트럼의 광대역화 특성을 모두 가지고 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 고정 주파수의 삼각파 캐리어와 Lead-Lag 랜덤 비트의 논리적인 비교에 의한 RPP의 문제점을 개선하기 위한 HRPWM기법을 제시하였다. 제안된 방법은 랜덤 주파수 조절이 가능한 삼각파를 캐리어로 사용하여 RPP의 성능에 국한되어 있던 종전의 방법을 RFC와 RPP를 혼합함으로써 그 성능을 개선하였다.

제안된 방법을 1.5kW급 3상 유도모터 구동장치에 적용하여 모터의 선간 전압 / 전류 파형과 고조파 스펙트

를 측정하였다. 그 결과, HRPWM기법은 RPWM의 특징인 고조파 스펙트럼의 광대역화 특징을 가지면서도 전류파형은 종전의 방법과 유사하였다. 또한 종전의 방법은 2배 스위칭 주파수에서 매우 강한 전압 및 전류 고조파 스펙트럼이 존재하였으나, 제안된 방법은 특정 주파수에 집중하지 않고 광대역화된 전압 및 전류 스펙트럼 특성을 보임을 알 수 있었다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기 전자부품 및 시스템 연구센터 연구비 지원에 의하여 연구된 결과임.

### 참 고 문 헌

- [1] A. Cichowski, J. Nieznanski and A. Wojewodka, "Shaping the SPL spectra of the acoustic noise emitted by inverter fed induction motors", in Proc. IEEE IECON'03, 2003, pp.2923-2928.
- [2] K. Borisov and A. Trzynaldowski, "Experimental investigation of a naval propulsion drive model with PWM based attenuation of the acoustic and electromagnetic noise", in Proc. IEEE IECON'03, 2003, pp.12-17.
- [3] M. M. Bech, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "Random modulation techniques width fixed switching frequency for three-phase power converters", IEEE Trans. Power Electron., vol.15, no.4, pp.753-761, 2000.
- [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 PWM", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol.149, no.3, May, pp.195-202, 2002.
- [5] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "모터 구동 장치의 가청 스위칭 소음 저감을 위한 2상 및 3상 랜덤 펄스 위치 PWM기법의 성능 비교", 전력전자학회 논문지 제7권 제3호, pp.224-236, 2002.
- [6] K.A. Almarri, J.C. Balda and K. Carr, "Optimized selection of the random PWM switching frequencies in a limited pool", in Proc. IEEE APEC'00, 2000, pp.569-573.
- [7] V. Blasko, M.M. Bech, F. Blaabjerg and K. Pedersen, "A New hybrid random pulse width modulator for industrial drives", in Proc. IEEE APEC'00, 2000, pp.932-938.
- [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.
- [10] S.Y.H. Hui, I. Oppermann and S. Sathiakumar, "Microprocessor based random PWM schemes for da-ac power conversion", IEEE Trans. power electron., vol.12, no.2, pp.253-260,1997.