

새로운 2상 랜덤 펄스 위치 PWM기법

魏 昔 吾, 鄭 榮 國*, 羅 碩 煥, 任 永 徹

A New Two-Phase Random Pulse Position PWM Scheme

Seog-Oh Wi, Young-Gook Jung, Seok-Hwan Na, and Young-Cheol Lim

요 약

본 연구에서는 각 상의 PWM 펄스를 개별적으로 랜덤하게 위치시킬 수 있는 새로운 2상 공간벡터 RPWM(Random PWM) 기법을 제안하고 있다. 제안된 방식은 각 2상 펄스들을 변조 구간 내에서 임의의 위치에 랜덤하게 배치하고 이를 기준으로 한 인버터 스위칭에 의해 고조파의 스펙트럼을 광대역화 하는 RPWM 기법이다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여, 16비트 고성능 마이크로 컨트롤러 C167 기반의 실험을 수행하였다. 제안된 2상 RPWM에 의한 인버터 출력 선간 전압과 직류 링크 전류의 고조파 스펙트럼 및 모터의 가청 스위칭 소음 저감 효과를 종전의 방식과 비교 검토하였으며, 제안된 방법의 우수성을 입증할 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, a new two-phase space vector RPWM(Random PWM) is proposed. In the proposed RPWM, each of two-phase PWM pulses is located randomly in each switching interval. Based on the space vector modulation technique, the duty ratio of the pulses is calculated. Along with the randomization of the PWM pulses, we can obtain the effects of spread spectra of inverter output voltage, d.c link current and audible switching acoustic noise as in the case of randomly changed switching frequency. To verify the validity of the proposed two-phase RPWM scheme, the experiment based on the C167 micro-controller was executed. The performance of the proposed scheme was compared with traditional PWM schemes experimentally.

Key Words : A New Two-Phase Random Pulse Position PWM, Power Spectra of Audible Switching Acoustic Noise

1. 서 론

전력전자 변환 시스템에서 출력을 제어하기 위하여 사용하는 PWM기법은 잡음전력을 스위칭 주파수의 정수배에 집중시켜 인버터 구동 시스템의 직류링크 고조파 전류와 가청 스위칭 소음 및 모터의 토크 맥동 등을 유발하고 있다^[1].

PWM 스위칭 주파수가 특정 주파수에 집중되는 문제점을 해결하기 위해, PWM의 스위칭 주파수를 특정하게 고정시키지 않고 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어지도록 하는 RPWM에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. RPWM 기법은 랜덤 함수에 의해 인버터의 매 스위칭 순간마다 다른 스위칭 주파수로 온 또는 오프 되도록 하여, 인버터의 출력전압과 전류의 고조파 및 모터의 전자기적 소음의 스펙트럼이 광대역으로 분산되는 효과가 있다.

이와 같은 RPWM 기법은 매 스위칭 주파수를 랜덤하게 변조하는 RSF-PWM (Random Switching Frequency PWM)^[2,3], 매 스위칭 구간의 시간은 일정하지만 펄스를 변조구간 내에서 랜덤하게 위치시켜 스

*대불대 전기공학과 전임강사

E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr

접수일자 : 2002. 2. 7

1차심사요청일 : 2002. 2. 21

심사완료일 : 2002. 3. 16

위칭 주파수의 랜덤효과를 갖도록 한 RPP-PWM (Random Pulse Position PWM)^{16, 9)}등으로 크게 분류될 수 있다. 먼저 RSF-PWM에는 구현 방식에 따라 캐리어 변조와 공간벡터 변조로 나눈다. 캐리어 변조 RSF-PWM기법은 아날로그 회로에 의하여 발생된 캐리어의 경사도를 랜덤하게 변조하는 방법¹²⁾과 캐리어 주파수를 랜덤하게 변조하는 방법¹³⁾으로 구분된다. 공간벡터 RSF-PWM기법은 일반적으로 사용되고 있는 RPWM이며, 이는 출력 주파수의 1주기당 스위칭 수 N 을 랜덤하게 변경하는 방법¹⁴⁾과 1주기당 매 60° 내의 스위칭 수 N_s 를 랜덤하게 하는 방법¹⁵⁾으로 분류된다.

한편 RPP-PWM기법에는 각상의 펄스 위치가 1주기의 앞과 뒤 중의 어느 하나만이 랜덤하게 선택되는 RLL-PWM (Random Leading-Lagging PWM)방식^{16, 7)}, 중앙정렬 SVM(Space Vector Modulation)의 펄스 중심을 랜덤하게 정렬하는 RCD-PWM (Random Centered Displacement PWM)¹⁷⁾ 그리고 중앙정렬 SVM의 총 유효 영벡터 시간을 랜덤하게 하는 RZV-PWM (Random Zero Voltage Vector Distribution PWM)등이 있다^{18, 9)}. 최근 들어 RPP-PWM의 일종으로 각상에 대한 랜덤 자유도가 매우 높은 RPWM¹¹⁾이 저자들에 의하여 제시된 바 있다.

이상에서 언급된 RPWM에 관한 연구는 대부분이 3상 변조법을 대상으로 진행되어져 왔다. 3상 변조법은 낮은 기본과 전압의 영역에서 인버터 구동 모터의 고조파 손실과 토크 맥동이 2상 변조법에 비해 우수하다. 그러나 기본과 전압이 높은 영역에서는 3상 변조법 보다는 2상 변조법이 유리하며, 특히 고주파 스위칭의 응용에서는 스위칭 손실과 구현의 용이성에 있어서 2상 변조법이 3상 변조법보다는 우수하다. 또한 인버터로 제어되는 모터를 위한 자속오차 평균값의 최소화 관점에서는 인버터 제어를 위해 요구되는 연산 시간이 매우 감소된다는 장점이 보고되고 있다^{10, 11)}.

따라서 본 연구에서는 각 상의 PWM 펄스를 개별적으로 랜덤하게 위치시킬 수 있는 새로운 2상 공간벡터 RPWM기법인 개별적 랜덤 펄스위치 RPWM기법을 제안하였다. 제안한 방식은 각 2상 펄스들의 위치를 변조 구간 내에서 임의의 위치로 랜덤하게 배치함으로써, 인버터 스위칭에 의해 고조파의 스펙트럼을 광대역화 할 수 있는 기법이다. 제안된 RPWM의 타당성을 검증하기 위하여, 16비트 고성능 마이크로 콘트롤러 C167을 기반으로 실험이 수행되었다. C167에 의하여 각 변조구간에서의 듀티비를 구한 후, 선형 랜덤 발생기를 이용하여 균일한 분포로 각 상의 펄스를 배

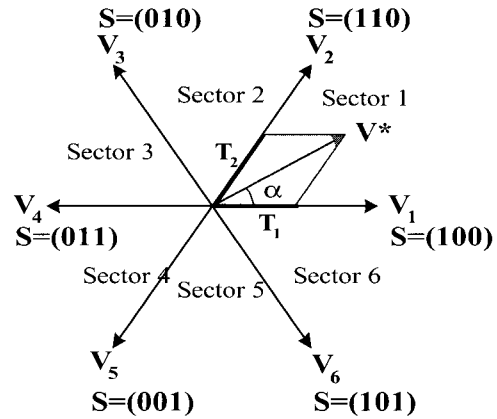


그림 1 공간 벡터도
Fig. 1 Diagram for space vector modulation

치하였다. 제안된 2상 RPWM에 의한 인버터 출력 전압과 인버터 직류 링크 전류의 고조파 스펙트럼 및 모터의 가청 스위칭 소음 효과를 종전의 방식과 비교 검토하였으며, 제안된 방법의 우수성을 입증할 수 있었다.

2. 공간벡터 변조기법

원하는 전압을 인버터에 인가하기 위해서 공간벡터 변조법이 널리 이용되고 있다. 공간벡터 변조법은 교류 모터를 구동하는 경우에 직류 링크의 전압을 최대한 많이 사용할 수 있어서 다른 종류의 PWM방식보다 우수하다고 알려져 있다. 또한 정상상태에서 삼각파 비교 방식의 PWM에 비해 전류의 고조파 성분을 크게 억제할 수 있음이 밝혀져 있다.

그림 1에서 기준 전압벡터 V^* 를 합성하기 위해서는 V_1, V_2 를 어떤 계산된 시간만큼 적절히 나누어 인가해줌으로써 가능하다. 기준벡터 V^* 가 섹터 I에 위치한 경우 이 전압은 기준 벡터와 가장 가까운 벡터인 V_1, V_2 , 그리고 영벡터의 시간적인 합성으로 나타낼 수 있다. 이러한 원리를 바탕으로 전압에 대한 한 주기 내에서의 적분으로부터 각 유효벡터의 인가 시간을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\int_0^T V^* dt = \int_0^{T_1} V_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V_{n+1} dt + \int_{T_1+T_2}^T V_0 dt \quad (1)$$

벡터 V^* 의 각이 α 라면 한 변조 주기동안 벡터 V_1

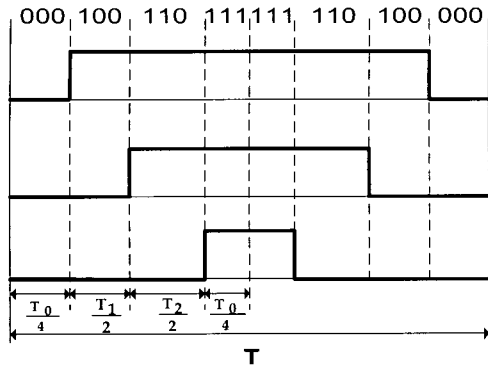


그림 2 3상 중앙 정렬 변조법의 스위칭 패턴 및 펄스
Fig. 2 Switching patterns and pulses for three-phase center aligned modulation

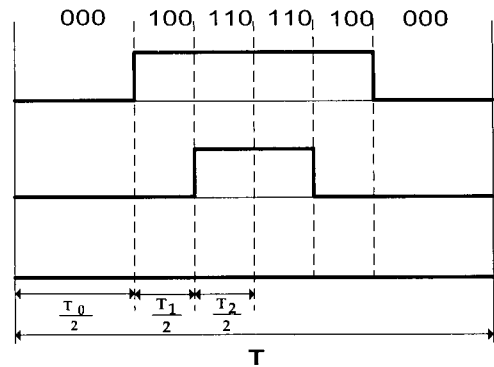


그림 3 2상 중앙 정렬 변조법의 스위칭 패턴 및 펄스
Fig. 3 Switching patterns and pulses for two-phase center aligned modulation

을 인가해야 할 시간 T_1 과 벡터 V_2 를 인가해야 할 시간 T_2 는 변조지수를 M 이라 할 경우, 다음 식으로 구할 수 있다.

$$T_1 = T \cdot M \frac{\sin(60^\circ - \alpha)}{\sin 60^\circ} \quad (2)$$

$$T_2 = T \cdot M \frac{\sin \alpha}{\sin 60^\circ} \quad (3)$$

$$T_0 = T - T_2 - T_1 \quad (4)$$

여기서, T_1 : Time duration of vector V_1
 T_2 : Time duration of vector V_2
 T_0 : Time duration of zero vector
 T : Sampling period

그림 2는 3상 중앙 정렬 변조법(center aligned SVM)의 스위칭 패턴을 나타내고 있으며 임의의 샘플링 주기에서 3상 인버터의 레그(Leg)는 모두 스위칭되고 있다.

그림 3은 2상 중앙 정렬 변조법(center aligned SVM)을 보이고 있다. 2상의 펄스는 중앙에 일치선으로 정렬되어 있고 특정 상 전압을 0으로 연속하여 인가함으로써 스위칭 횟수를 감소시키는 변조방식이다. 전류 맥동이 증가하는 단점이 있지만 샘플링 시간을 감소시킴으로써 스위칭 주파수를 올릴 수 있으며 제어 주기를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 특정상 전압에 인가되는 전압에 따라 2가지 방법이 있으며, 전력소자의 활용도를 공평하게 맞추기 위해서 각 모드가 변동될 때 마다 일정하게 유지되는 전압을 교번시킨다.

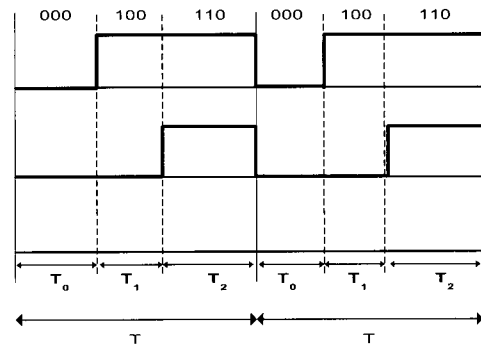


그림 4 2상 우측정렬 변조법의 스위칭 패턴 및 펄스
Fig. 4 Switching patterns and pulses for two-phase right aligned modulation

그림 4는 펄스 위치가 1주기의 우측에만 선택되는 2상 우측 정렬 변조법 (right aligned SVM)의 스위칭 펄스를 나타내고 있다. 우측정렬 변조법은 구현이 간단한 장점을 갖고 있다. 중앙정렬 방식은 한주기 동안 두번의 펄스 상태변화를 필요로 하기 때문에 펄스 발생부를 구성하는 하드웨어가 더 복잡해지며, 중앙정렬에 필요한 코드가 추가되어야 한다. 그러나 우측정렬 변조법은 한 주기 동안에 한번의 상태 변화만을 필요로 하므로 계산된 듀티비 만으로 바로 펄스 발생부에 상태변화 시점을 지령할 수 있게 되어 지령 전압벡터를 간단하게 구현할 수 있다.

3. 2상 변조 랜덤화 기법

그림 5는 각상의 펄스를 개별적으로 랜덤하게 배치 가능한 제안된 2상 RPWM의 펄스를 보여주고 있다.

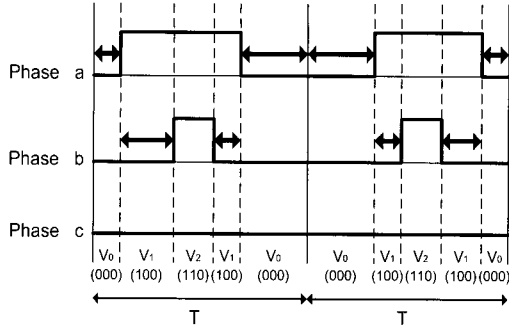


그림 5 제안된 2상 RPWM 각상의 펄스
Fig. 5 Each phase pulse with the proposed two-phase RPWM

이 방법은 변조 구간내에서 훨씬 자유롭게 펄스를 배치할 수 있기 때문에 스펙트럼 분포의 효과가 매우 크다.

공간벡터 변조에 의하여 매 제어 구간마다 각 상의 펄스의 듀티비가 구해지면 RPWM을 수행하기 위하여 펄스의 위치를 랜덤하게 하는 작업이 필요하다. 식 (5)에 의한 랜덤 발생 기법에 의하여 생성된 랜덤수를 펄스가 위치할 수 있는 범위 안에 들도록 식 (7)를 이용하여 공간을 재설정한다. 공간을 재설정할 때, 발생된 랜덤수에 나머지 연산자를 적용하여 임의로 공간을 설정하는 것이 옳은 듯 보일 수도 있으나, 이는 주기성을 유발할 가능성이 있어 좋지 않다. 각 펄스들이 위치할 수 있는 범위는 현재 지령치 전압벡터가 6개의 섹터 중 어느 위치에 있는가에 따라 달라진다.

4. 랜덤수 발생기

한 변조 구간 내에서 펄스의 위치가 고루 분포되도록 하기 위해서는 펄스 위치를 결정할 수 있는 어떠한 방법이 필요하다. 이를 위해 균일한 분포를 갖는 미리 정의된 함수가 필요한데 여기에 랜덤함수를 사용할 수가 있다. 시스템에서 제공되는 거의 대부분의 랜덤함수들은 선형 일치 발생기(linear congruential generator)이며, 정해진 범위내의 정수를 발생하도록 되어 있다.

그러나 공학적으로 이러한 랜덤함수를 이용할 경우에 랜덤수의 범위가 너무 적은 경우가 있다. ANSI C 규정은 이 범위를 RAND_MAX라는 상수로서 겨우 32767로 정해 두고 있다. 더우기 연속적으로 랜덤함수를 호출하면 발생된 랜덤수는 어느 주기를 가지며 반복적인 것이 되기 쉽다는 점이다.

따라서 시스템에 독립적이면서 사용자의 요구에 맞는 랜덤함수를 직접 작성하는 것이 안전한 방법이라 할 수 있다. 랜덤수를 발생시키기 위하여 다음의 식(C언어 코딩)들을 사용할 수 있다. 먼저 0부터 i_m 사이의 정수를 다음 식에 의해 발생시키고

$$j_{ran+1} = (j_{ran} * i_a + i_c) \% i_m \tag{5}$$

만일 0부터 1사이의 실수를 랜덤하게 발생하려면,

$$ran = \frac{(float)j_{ran}}{(float)i_m} \tag{6}$$

만일 j_{lo} 부터 j_{hi} 사이의 정수를 원한다면,

$$j = j_{lo} + \frac{((j_{hi} - j_{lo} + 1) * j_{ran})}{i_m} \tag{7}$$

에 의하여 원하는 랜덤수를 구할 수 있다. 여기서 i_a , i_c , i_m 는 선택된 상수로써 각각 multiplier, increment, modulus라 불린다. 그리고 j_{lo} , j_{hi} 는 발생할 랜덤수의 최소값 및 최대값이다.

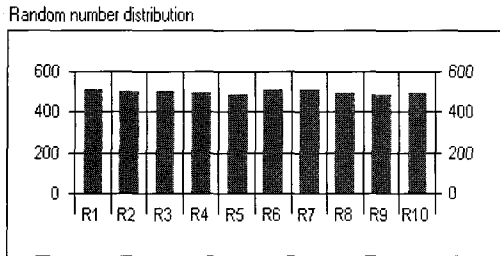
이렇게 구현된 랜덤 발생기는 다른 프로세서나 마이크로 컨트롤러에서도 공통으로 사용될 수 있다. 그러나 선택된 상수들을 사용하여 연산하는 도중에 오버플로우가 발생하지 않도록 주의하여야 한다. 또한 이때 i_a , i_c , i_m 은 신중히 선택되어야 한다. i_c 는 소수(prime number)이어야 하며, i_c 와 i_m 은

$$i_c \approx (\frac{1}{2} - \frac{1}{6}\sqrt{3})i_m \tag{8}$$

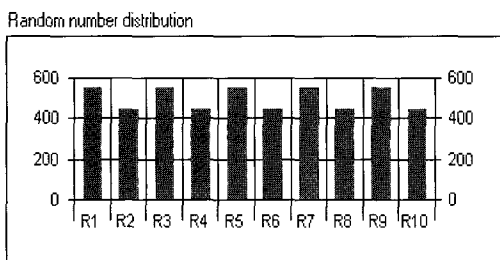
인 관계를 가져야 한다^[12]. 균일한 분포의 랜덤수 발생기를 위한 몇 가지의 상수를 표 1에 나타내었다.

표 1 균일한 분포를 갖기 위한 랜덤수를 위한 상수
Table 1 Constants for portable random number

Overflow at	i_m	i_a	i_c
2^{20}	6075	106	1283
2^{21}	7875	211	1663
2^{22}	7875	421	1663
2^{23}	11979	430	2531
	6655	936	1399
2^{24}	6075	1366	1283
	53125	171	11213
	11979	859	2531
	14406	967	3041



(a) Proper chosen constant ($i_m = 6075, i_a = 106, i_c = 1283$)



(b) Bad chosen constant ($i_m = 6075, i_a = 106, i_c = 1260$)

그림 6 선택된 상수에 따른 랜덤 분포
Fig. 6 Random distribution with chosen constants

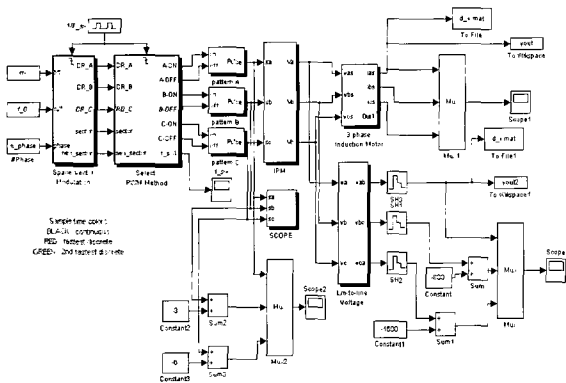


그림 7 시뮬레이션 주 모델
Fig. 7 Main model for simulation

그림 6은 상수의 선택에 따른 각 랜덤수의 발생 횟수를 나타내고 있다. 특히 그림 6(a)는 적절한 상수에 의한 랜덤 분포 결과로써 랜덤수가 발생한 횟수는 약 500번의 고른 분포를 보이고 있다.

이상으로부터 제안된 RPWM의 이론적인 고찰을 위하여, 모터전압 및 전류의 스펙트럼 분포를 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 그림 7에 시뮬레이션의 주 모델을 나타내었다.

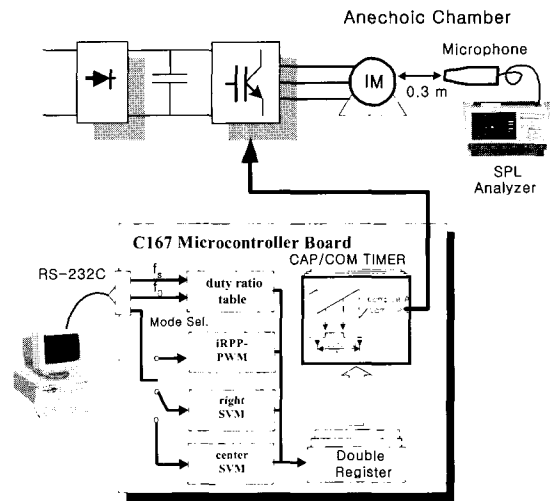


그림 8 실험 시스템 구성
Fig. 8 Configuration of experimental system

표 2 모터와 인버터의 사양
Table 2 Specifications of motor and inverter system

Power device	IPM(PMC20U060)
Rating	600v/20A
microcontroller	SAB C167
Switching frequency	2kHz - 5kHz
PWM	2 phase space vector modulation
Motor	3 phase squirrel cage induction motor
Rating	220v/60Hz, 1.5kW

5. 시스템 구성

제안된 RPWM기법을 구현하기 위한 실험 시스템과 모터 및 인버터의 사양을 그림 8과 표 2에 각각 나타내었다. 본 연구의 내용은 주로 PWM 발생기법에 있으므로 응답성이 좋은 고성능의 폐루프 제어 대신에 간단한 개루프 전압제어 방식을 택하였다.

제안된 시스템은 C167 마이크로 콘트롤러 보드, IPM 인버터, 1.5kW 유도모터, 제어 프로그램 그리고 호스트 프로그램 등으로 구성되어 있다. 공간벡터 변조 및 랜덤수 발생 등의 모든 연산은 C167내의 제어 프로그램에 의하여 수행될 뿐 만 아니라 C167 포

트 출력은 바로 IPM을 게이팅 할 수 있는 신호이다. 즉 PLD를 사용하지 않고 C167에 내장된 CAP/COM (Capture/Compare) 기능을 사용하여 저 비용의 전력 제어장치를 구현하였다.

6. 실험 결과 및 고찰

6.1 모터전류의 파형

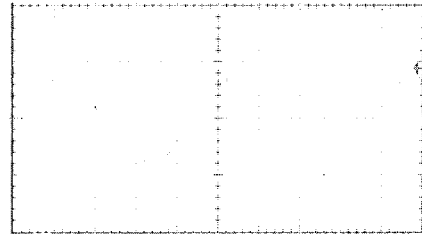
모터를 무부하, 40Hz의 지령속도, 변조지수 0.7, 2kHz의 스위칭 주파수로 오픈 루프 운전하였을 때의 모터 전류를 그림 9에 나타내었다. 그림 9(a)는 2상 center-SVM를 수행한 경우이며, 그림 9(b)는 2상 right-SVM을, 그림 9(c)는 제안된 2상 RPWM을 수행한 경우이다. 제안된 2상 RPWM은 랜덤한 PWM배열 특성상 2상 SVM 방식보다 전류 파형에 미소한 맥동이 존재한다. 이와 같은 비확정적 전류 맥동은 히스테리시스 전류제어 (Hysteresis current control: HCC) 인버터에서도 나타나기 때문에 이점은 크게 고려하지 않아도 된다.

HCC는 비 확정적인 고조파 스펙트럼 관점에서 RPWM과 유사하다. RPWM기법은 유사 랜덤특성을 갖고 있기 때문에 랜덤 특성은 오히려 HCC가 우수하다. 그러나 HCC의 랜덤특성은 부하에 강하게 의존하고 있기 때문에 예측과 제어가 어렵고 따라서 HCC를 제어 불가능한 RPWM이라 한다. 한편 RPWM은 랜덤 특성이 부하와는 무관하며 또한 예측과 제어가 가능하다는 점이 HCC와 근본적으로 다르다^[13].

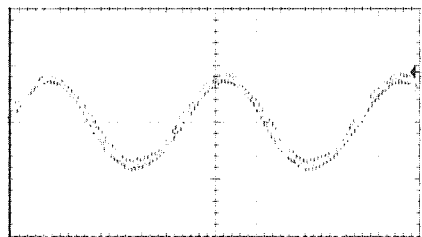
6.2 모터 전압과 전류의 고조파 스펙트럼

모터를 무부하, 40Hz의 지령속도, 변조지수 0.7, 2kHz의 스위칭 주파수로 개 루프 운전하였을 때의 모터 전압에 대한 고조파의 스펙트럼을 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 그림 10은 그림 7의 모델에 의해 시뮬레이션을 수행한 결과이며 그림 11은 실험결과이다. 시뮬레이션과 실험결과는 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 우선 그림 10(a)와 그림 11(a)는 2상 center-SVM를 나타내고 있으며 스위칭 주파수에서 가장 강한 고조파 성분이 있고 2배의 스위칭 주파수 영역에서 두 번째로 강한 고조파 성분이 존재함을 알 수 있다.

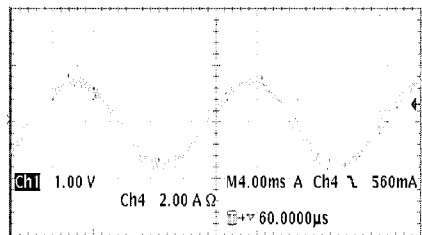
3상 center-SVM^[1]의 경우에는 2배의 스위칭 주파수에서 가장 강한 고조파 성분이 있으며 스위칭 주파수에서 2번째의 강한 성분이 존재하는 점에서 2상과는 다르다.



(a) center-SVM



(b) right-SVM



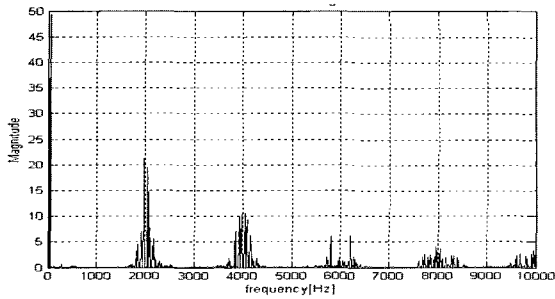
(c) proposed RPWM

그림 9 모터전류 파형 (2A/div.)
Fig. 9 Waveform of motor current (2A/div.)

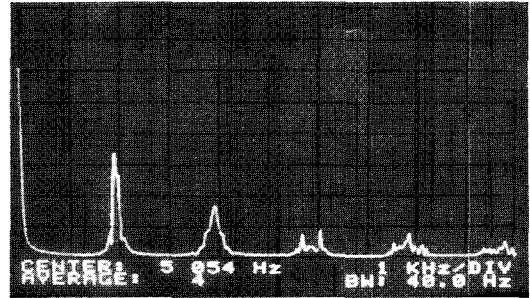
일반적으로 1-6kHz 주파수 영역에서 인간이 가장 소음에 대한 고통을 느끼는 것으로 알려져 있으며 이 주파수 영역은 전력전자 변환기의 스위칭 주파수와 일치하고 있다^[13].

그림 10(b)와 그림 11(b)의 경우는 right-SVM방식에 의한 전압 스펙트럼의 분석 결과이다. right-SVM은 2상 및 3상 변조법 모두, 스위칭 주파수에서의 가장 강한 고조파 성분이 있는 것이 특징이다. center-SVM보다는 right-SVM이 비교적 완만한 고조파 분포를 하고 있음을 알 수 있다.

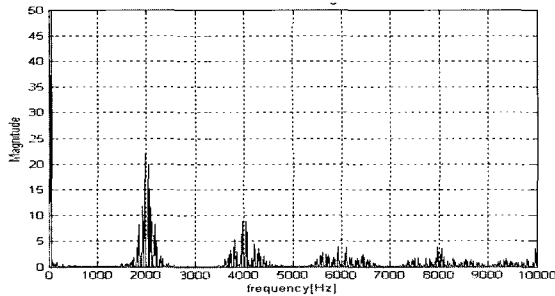
그림 10(c)와 그림 11(c)는 제안된 RPWM기법을 적용한 결과로서, right-SVM과 비교하여 스위칭 주파수대를 비롯한 전 구간에서의 고조파 성분이 특정 주파수에 고정되지 않고 넓은 주파수 영역에 고루 분포하고 있다.



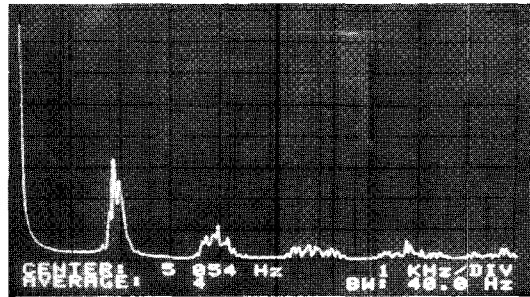
(a) center-SVM



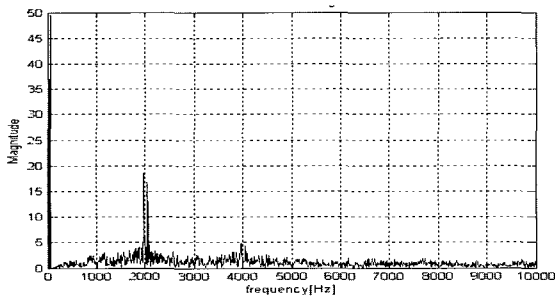
(a) center-SVM



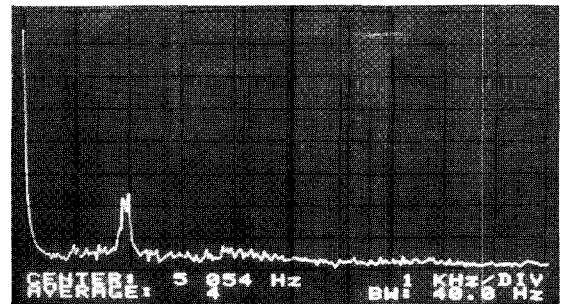
(b) right-SVM



(b) right-SVM



(c) proposed RPWM



(c) proposed RPWM

그림 10 시뮬레이션에 의한 모터전압의 고조파 스펙트럼 (1kHz/div.)

Fig. 10 Harmonic spectrum of motor voltage by Simulation (1kHz/div.)

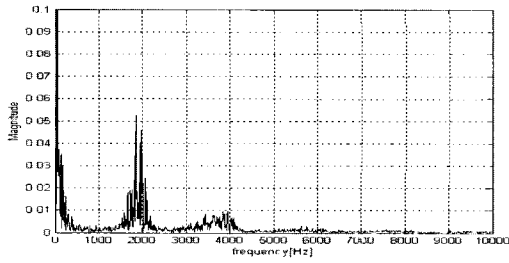
그림 12와 그림 13은 각 방식에 대한 모터전류의 고조파 스펙트럼이다. 전압 스펙트럼의 경우와 동일하게 시뮬레이션 결과와 실험결과는 매우 잘 일치하고 있다.

그림 12(c)와 그림 13(c)에서 나타낸 바와 같이, 제안된 RPWM기법을 적용한 경우는, 기존의 방식보다 전류 고조파가 고루 분포하고 있다.

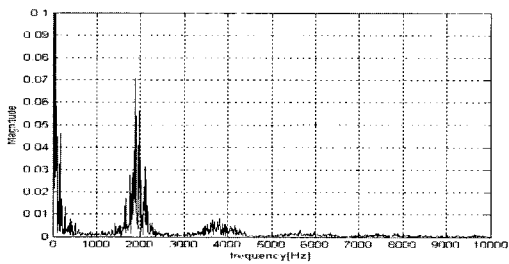
그림 11 실험에 의한 모터전압의 고조파 스펙트럼 (1kHz/div.)

Fig. 11 Harmonic spectrum of motor voltage by experiment (1kHz/div.)

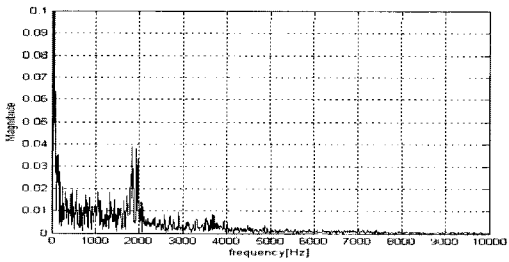
이상에서 볼때, 전체 고조파량을 저감하기 위한 능동전력필터 시스템^[14]등과 다르게, RPWM기법은, RPWM이 적용되기 전과 비교하여, 전체 고조파의량은 저감되지 않는다. 단지 SVM의 적용시 특정 스위칭 주파수의 정수배에 집중되어져 있던 스펙트럼을 광대역으로 분산시켜 서론에서 언급된 여러 효과를 얻게 하는데 그 목적이 있다.



(a) center-SVM



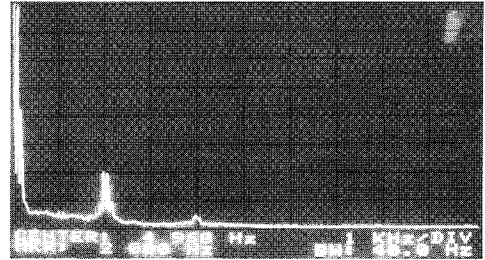
(b) right-SVM



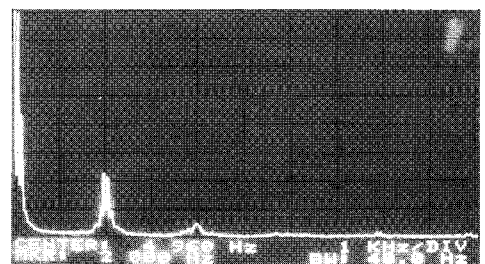
(c) proposed RPWM

그림 12 시뮬레이션에 의한 모터전류의 고조파 스펙트럼 (1kHz/div.)

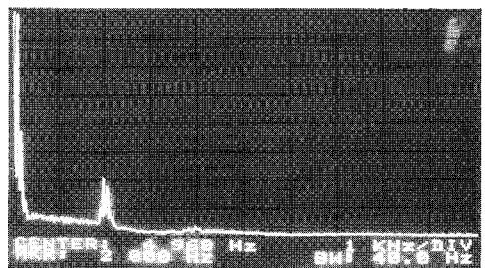
Fig. 12 Harmonic spectrum of motor current by simulation (1kHz/div.)



(a) center-SVM



(b) right-SVM



(c) proposed RPWM

그림 13 실험에 의한 모터전류의 고조파 스펙트럼 (1kHz/div.)

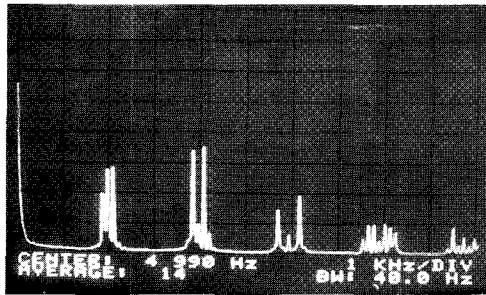
Fig. 13 Harmonic spectrum of motor current by experiment (1kHz/div.)

6.3 인버터 직류링크 전류의 고조파 스펙트럼

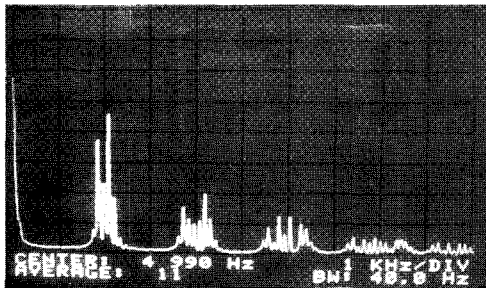
스위칭 모드 전원장치(SMPS)는 인버터의 스위칭 주파수보다는 매우 높기 때문에 SMPS에서의 주요 관심은 가청 소음보다는 EMI(Electromagnetic interference)에 있다. 그러나 인버터나 SMPS에 관계없이 전력전자 기술을 응용한 변환장치는 전원 측에 EMI를 유도시키고 있다. 전력전자 변환장치에서 발생하는 EMI의 발생 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나 대부분 전력소자의 스위칭이 그 원인이다. 인버터 응용 장치들은 출력전압과 동일하게 직류링크 전류에도 특정 스위칭 주파수의 고조파가 발생된다.

직류 고조파 전류는 인버터의 전원계통에 EMI를 유도하므로 인버터의 입력전원에는 EMI필터 등을 부착하는 경우가 많다¹⁵⁾.

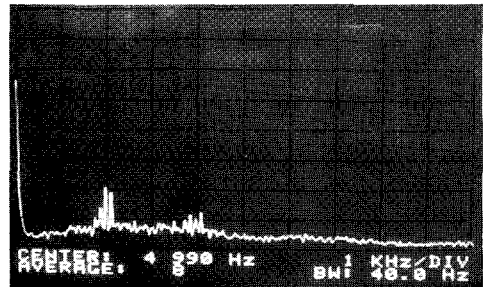
그림 14는 인버터 직류 링크 전류의 고조파 스펙트럼을 보여 주고 있다. 6.2절에서 언급된 출력 선간 전압의 고조파 스펙트럼과 유사한 형태를 지니고 있음을 알 수 있다. 특히 제안된 RPWM기법은 스위칭 주파수에서의 미소한 고조파 성분을 제외하고는 전 구간엔 걸쳐 매우 양호한 주파수 확산 분포를 보이고 있다. 이러한 결과로부터 인버터 전원 측에 부착된 EMI필터의 정격은 감소될 수 있다.



(a) center-SVM



(b) right-SVM



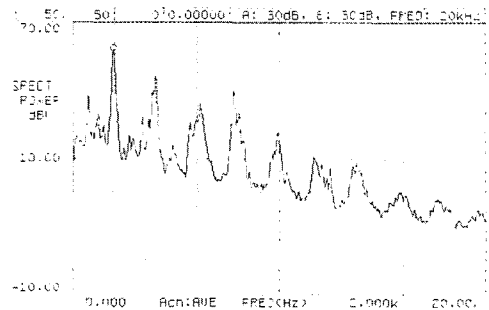
(c) proposed RPWM

그림 14 인버터 직류전류의 고조파 스펙트럼 (1kHz/div.)
Fig. 14 Harmonic spectrum of inverter dc link current (1kHz/div.)

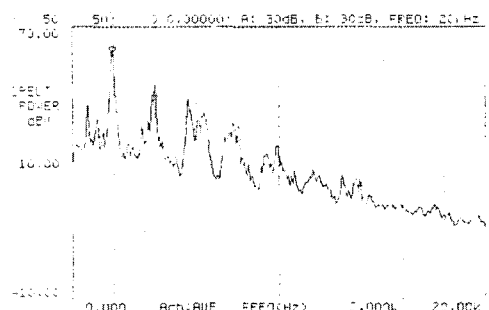
6.4 가청 소음의 스펙트럼

본 연구에서 인버터에 의해 구동되는 유도모터의 스위칭 소음의 파워 스펙트럼을 얻기 위한 실험은 특별히 설계된 무향실(無響室)에서 수행되었으며, 측정 장비로는 소음 및 진동신호에 대한 분석이 가능한 전용 측정기 「RION SA-74」를 사용하였다. 실험 결과의 분석에 사용된 데이터는 유도모터로부터 측면 0.3m 떨어진 곳에 설치된 마이크로부터 측정된 값을 50초간 평균하여 얻은 값을 사용하였다.

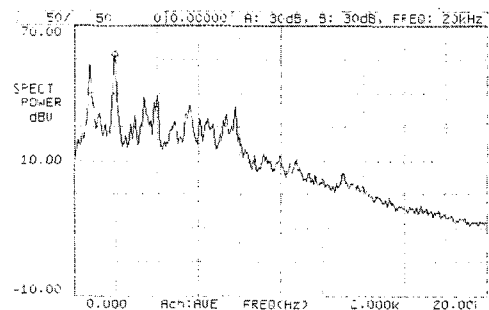
그림 15는 2상 PWM방식에 따른 모터의 가청소음 파워 스펙트럼을 나타내고 있다.



(a) center-SVM



(b) right-SVM



(c) RPWM

그림 15 가청소음의 고조파 스펙트럼 (2kHz/div.)
Fig. 15 Harmonic spectrum of audible acoustic noise (2kHz/div.)

먼저 그림 15(a)는 center-SVM을 수행한 경우인데, 선간전압의 스펙트럼과 유사한 형태를 보이고 있다. 2상 center-SVM의 가청 소음 스펙트럼은 스위칭 주파수의 정수배 고조파가 이산적인 분포를 하고 있다. 스위칭 주파수대에서 소음이 가장 강하고, 2배의 스위칭 주파수에서 2번째로 강한 소음의 성분이 있다. 그리고 스위칭 주파수와 상관없는 주파수대인 800Hz과 1.3kHz에서의 소음 성분이 약간 존재하고 있다.

그림 15(b)는 2상 right-SVM을 적용한 결과로서, 2

상 center-SVM과 비교하여 보면, 8kHz이상의 가청 소음 스펙트럼의 이산적 특성이 상당히 완화되어져 있다. 또한 3kHz와 5kHz 소음의 불연속적인 특성이 감소함을 알 수 있다.

그림 15(c)는 제안된 RPWM에 의한 소음 스펙트럼의 광대역화를 보이고 있다. 스위칭 주파수 정수배의 소음 스펙트럼 분포를 갖는 center-SVM과 비교하여 8kHz이상의 고조파에서부터 평탄특성을 보이는 right-SVM과 비교하여, 제안된 RPWM은 스위칭 주파수의 소음 스펙트럼을 제외하고는 거의 평탄한 특성을 갖고 있다. 그러나 제안된 RPWM의 경우에는 1kHz대의 소음 성분이 상당히 증가함을 알 수 있다. 이는 모터의 고유 주파수와 랜덤 주파수가 중첩되어 기계적인 공진을 유발하여 발생한 현상이다. 이와 같이 RPWM에 의해 구동되는 모터의 예기치 못한 공진은 RPWM의 단점으로 지적되고 있는데, Holtzer법^[16]에 의하여 공진 주파수를 예측한 후, 지능적 전력밀도 함수에 의하여 해당 공진 주파수만을 상쇄하는 연구^[17]가 진행되고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 본 연구의 제안된 2상 RPWM기법은, 스위칭 주파수를 제외한 파워 스펙트럼의 광대역화 특성은 인버터의 출력 선간 전압과 직류링크 전류 그리고 가청 소음의 파워 스펙트럼에 모두 동일한 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다.

7. 결 론

2상 PWM기법은 2상만을 다루기 때문에 3상 변조법에 비해 스위칭 손실과 구현의 용이성이 우수하며 또한 인버터 제어를 위해 요구되는 연산 시간이 매우 감소된다는 장점이 있다. 본 연구에서는 각 상의 PWM 펄스를 개별적으로 랜덤하게 위치시킬 수 있는 새로운 2상 공간벡터 RPWM 기법을 제안하였다.

제안된 2상 RPWM은 매 변조구간마다 각 2상 펄스의 위치를 랜덤하게 배치하여 스위칭 주파수가 일정하지 않다. 그 결과 인버터의 선간 전압 및 직류링크 전류의 불연속적이고 강한 고조파 성분을 광대역에 연속적인 성분으로 분산시킬 수 있었다. 따라서 제안된 2상 RPWM 방식은 모터의 불연속한 가청 스위칭 소음을 줄이는 데는 탁월한 효과가 있었다. 제안된 2상 RPWM의 경우에는 1kHz대의 소음이 증가하였다. 이는 RPWM이 수행되는 경우에는 랜덤한 스위칭 특성으로 인해, 모터의 고유 주파수와 어느 시점에서의 스위칭 주파수가 1kHz에서 기계적으로 공진을 일으키기

때문이다. 이는 Holtzer법과 지능적 전력밀도 분포함수에 의하여 해결 가능하다.

제안된 2상 RPWM기법에 의한 인버터의 직류링크 전류의 고조파 스펙트럼의 광대역화는 인버터 전원 측에 부착된 EMI필터의 정격을 감소할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 인버터의 직류링크 전류 및 모터의 가청 소음 파워 스펙트럼은 모두 인버터 선간 전압의 파워 스펙트럼과 동일한 형태를 가지고 있음 또한 알 수 있었다. 따라서 전압의 파워 스펙트럼을 면밀히 관찰하게 되면 소음의 스펙트럼 분포를 예측 가능하다.

끝으로 제안된 2상 RPWM기법은 종전의 3상 SVM을 적용할 수 있는 센서리스 벡터 제어기를 포함하여 대부분의 인버터 구동 장치에 부가적인 노력이 없이 응용 가능하리라 사료된다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기전자 부품 및 시스템 연구센터 연구비 지원에 의하여 연구된 결과임.

참 고 문 헌

- [1] 나석환, 정영국, 임영철, "인버터 구동 시스템을 위한 새로운 공간벡터 Random PWM기법", 전력전자학회 논문지 제6권 제6호, pp. 525~537, 2001.
- [2] C.M. Liaw, Y.M. Lin, "Random slope PWM inverter using existing system background noise : analysis, design and implementaion", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 147, no. 1, pp. 45~54, 2000.
- [3] T.G. Habetler and D. M. Divian, "Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier", IEEE Trans. PE, vol. 6, no. 3, pp. 356 ~363, 1991.
- [4] F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, "Implementation and test of a digital quasi-random modulated SFAVM PWM in a high performance drive system", IEEE IECON '93, pp. 265 ~270, 1993.
- [5] A. M. Trzynadlowski, J. K. Pedersen, R. L. Kirlin, S. Legowski, "Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate", IEEE Trans. IA, vol. 44, no. 2, pp. 173~181, 1997.
- [6] R.L. Kirlin, S. Kwok, S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, "Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position", IEEE Trans. PE vol. 9, no. 5, pp. 463~471, 1994.

- [7] M.M. Bech, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "Random modulation techniques width fixed switching frequency for three-phase power converters", IEEE PESC '99, pp. 544~551, 1999.
- [8] M.M. Bech, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "Field-oriented control of an induction motor using random pulse width modulation", IEEE APEC '00, pp. 924~931, 2000.
- [9] V. Blasko, "Analysis of a Hybrid PWM based on modified space vector and triangle comparison methods", IEEE Trans. IA, vol. 33, no. 3, pp. 756~764, 1997.
- [10] S.Halasz, B.T. Huu, "Two-phase PWM technique for inverter fed ac drives", IEEE IECON '97, pp. 688~693, 1997.
- [11] Y.S. Lai, H.C. Huang, C.M. Young, "A New random inverter control technique for motor drive", IEEE APEC '98, pp. 101~107, 1998.
- [12] D. E. Knuth, Seminumerical Algorithms, 2nd ed., vol. 2 of The Art of the Computer Programming, Addison Wesley, 1981.
- [13] M.M. Bech, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "Random modulation techniques in power conversion-an update", PEMC '96, pp. 3/357~3/365, 1996.
- [14] Y.G. Jung, Y.C. Lim, S.H. Yang, "Single-phase active power filter based on three-dimensional current coordinates", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 147, no. 6, pp. 572~578, Nov. 2000.
- [15] B. Huo, A.M. Trzynadlowski, "Novel random pulse width modulator with constant sampling frequency based on the TMS320F240 DSP controller", IEEE IECON '99, pp. 342~347, 1999.
- [16] J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "Determination of mechanical resonances in induction motors by random modulation and acoustic measurement", EPE '93, pp. 319~324, 1993.
- [17] J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "Reduction of acoustical noise emission in ac machines by intelligent distributed random modulation", EPE '93, pp. 369~375, 1993.

저 자 소 개



위석오(魏昔晷)

1968년 12월 20일생. 1993년 전남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



정영국(鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 일본 오카야마대학 연구방문. 현재 대불대 전기공학과 전임강사. 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 연구원. 당 학회 학술위원.



나석환(羅碩煥)

1963년 4월 3일생. 1991년 전남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 연구원. 현재 (주)하우 무선데이터 통신 연구소 책임연구원.



임영철(任永徹)

1953년 4월 22일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년 오스트레일리아 모나시대학 Visiting Scholar. 현재 전남대 전기공학과 교수. 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 소장. 당 학회 학술이사.