

모터 구동 장치의 가청 소음 저감을 위한 새로운 3상 Lead-Lag 랜덤 펄스 위치 PWM 기법

論 文

51B-7-8

A New Three-Phase Lead-Lag Random Pulse Position PWM Scheme for Decreasing Audible Acoustic Noise of Motor Drives

魏 昔 吾* · 鄭 榮 國** · 任 永 徹*** · 羅 碩 煥§

(Seog-Oh Wi · Young-Gook Jung · Young-Cheol Lim · Seok-Hwan Na)

Abstract - In this paper, a new Three-Phase Lead-Lag Random Pulse Position PWM(LL-RPWM) scheme is proposed and implemented for decreasing audible acoustic noise of motor drives. In the proposed RPWM(Random PWM), each of three phase 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 voltage, current as in the case of randomly changed switching frequency. To verify the validity of the proposed LL-RPWM, the simulation and experimental study was tried. Along with the randomization of PWM pulses, the space vector modulation is also executed in the C167 micro-controller. The simulation and experimental results show that the voltage and current harmonics are spread to a wide band area and that the audible acoustic noise is reduced by the proposed RPWM method.

Key Words : A New Lead-Lag Random PWM, Acoustic Noise Reduction, Motor Drives.

1. 서 론

근래 들어 스위칭 주파수의 고조파를 저감시키는 PWM 방법으로써, PWM의 스위칭 주파수를 특정하게 고정시키지 않고 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어지도록 하는 RPWM(Random PWM)모터 구동 장치에 대한 연구[1-11]가 진행되어져 오고 있다. 이 방법은 인버터의 출력전압과 전류에 포함되어 있는 고조파 스펙트럼을 넓은 주파수 영역으로 고루 분산시켜서 모터의 가청 스위칭 소음이 사람에게 주는 불쾌감을 저감시키는 PWM방식이다[1-2]. 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[3-5].

이러한 RPWM에 관한 연구로는, 삼각파 주파수를 랜덤하게 변조하는 삼각파에 의한 RFPWM (Random Frequency PWM)[6], 속도 지령치 전압 공간벡터가 인가되는 스위칭 구간의 시간을 랜덤하게 제어하는 공간벡터에 의한 RFPWM [7-8]이 있다. 또한 한 변조 구간에서 충분한 수의 랜덤수를 발생시켜 지령치 듀티비와 비교하여 지령치가 발생된 랜덤수보다 더 큰 경우에 스위칭 온하여 결국 지령치 듀티비에 해

당하는 펄스 온 시간을 갖도록 하는 RSPWM (Random Switching PWM)[9], 매 스위칭 구간의 시간은 일정하지만 펄스의 위치를 변조구간 내의 앞 또는 뒤에 랜덤하게 변경시키는 LL-RPWM (Lead-Lag PWM)[10-11]등이 보고된 바 있다.

그런데 삼각파 방식의 RFPWM은 캐리어를 발생시키기 위한 아날로그 회로가 요구될 뿐만 아니라, 공간벡터 변조방식에 비해 인버터의 최대 변조지수가 낮다는 단점이 있다. 공간벡터 방식의 RFPWM은 전압 지령부와 스위칭 부를 동기시키려면 제어 알고리즘의 연산시간이 스위칭 주파수의 최대 값을 제한하는 요소로 작용하게 된다. 즉 복잡한 제어루프를 구성하는 경우, 최대 스위칭 주파수는 어느 한계를 갖는다는 문제점이 있다. 또한 RSPWM은 매우 높은 스위칭 주파수를 요구하므로 전력소자 선택에 제한을 주며, LL-RPWM은 랜덤한 스위칭 주파수를 갖기는 하나 매우 제한적이다. 필요로 하는 발생 랜덤수가 오직 0과 1이므로, 간단히 구현할 수 있는 장점이 있는 반면 스펙트럼을 광대역에 고루 분포시키는 데는 한계가 있다. 그러나 LL-RPWM 방식은 다른 방법에 비하여 비교적 마이크로 컨트롤러로 간단하게 구현할 수 있으며 인버터의 출력전압 및 전류의 고조파를 광대역으로 분포시킴으로써 모터의 가청소음 저감 효과가 비교적 우수하다.

본 연구에서는 종전의 LL-RPWM 펄스 위치를 랜덤하게 함으로써 모터구동장치의 가청 소음을 저감시킬 수 있는 새로운 방식의 3상 LL-RPWM을 제안하였다. 제안된 방식은 각 3상 펄스들의 위치를 변조 구간내의 임의의 위치에 랜덤하게 배치함으로써 스위칭에 의한 고조파의 스펙트럼을 광대역화 하는 RPWM 방식이다. 제안된 LL-RPWM의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레

* 準 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 大佛大 工大 電氣工學科 專任講師 · 工博
*** 正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
§ 正 會 員 : (주)하우 무선데이터통신 責任研究員.
接受H字 : 2002年 1月 15日
最終完了 : 2002年 4月 22日

이선 소프트웨어로는 전기 기계 및 전력 전자 장치 시뮬레이션에서 좋은 성능을 발휘하는 Matlab/Simulink를 사용하였다. 실제 실험은 RPWM 발생을 위하여 16비트 고성능 마이크로 콘트롤러 C167을 사용하였다. 공간벡터 변조에 의해 각 변조 구간에서의 듀티비를 구하였으며, 균일한 분포를 갖는 랜덤 발생함수를 이용하여 각 상의 펄스를 랜덤하게 배치하였다. 그리고 제안된 LL-RPWM을 이용하여 실험한 결과, 종전의 방식에 비하여 모터의 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화 효과가 우수하며, 또한 이때 전력소자의 스위칭에 의해 발생하는 모터의 가청 소음의 저감효과가 탁월함을 확인하였다.

2. 종전의 LL-RPWM기법

일반적인 PWM 인버터의 온/오프 스위칭은 고정 스위칭 주파수로 동작되며, 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 주파수대에 이산치의 강한 고조파 성분이 나타난다. 그러나 고정 주파수가 아닌 여러 주파수가 혼재하는 PWM 스위칭을 한다면 전압, 전류, 소음 등의 스펙트럼을 광대역화 할 수 있다. 이렇게 할 경우 특정 스위칭 주파수 대에 강하게 존재하던 고조파 성분의 세력이 약해진다. 즉 연속치 성분의 스펙트럼은 다소 증가하지만 EMI, 진동, 소음 등에 좋지 않은 영향을 미치는 이산치 성분의 스펙트럼은 현저히 감소하게 된다. 이산치 성분의 크기는 고조파 성분의 크기를 의미한다. 이산치 성분의 크기가 감소되면 EMI, 기계진동 및 소음 저감에 효과가 있다. 이를 위해서 전력소자의 스위칭 주파수를 연속적으로 변경시키고, 또한 이 때의 스위칭 주파수는 넓은 주파수 대역에 균일하게 분포되도록 하는 방법이 있다. 이러한 PWM 스위칭 방식을 RPWM이라 한다.

그림1은 고정 스위칭 방식의 공간벡터 PWM(SVPWM)과 종전의 LL-RPWM의 스위칭 패턴을 나타내고 있다. 종전의 LL-RPWM에 의해 발생된 펄스는 매 변조 구간의 앞과 뒤에 랜덤하게 위치하며, 이때 발생된 랜덤수는 오직 0과 1이다. 여기서 T_s 는 샘플링 주기를 나타내고 있다. 서론에서 전술한 바와 같이 LL-RPWM은 다른 RPWM방법에 비하여 마이크로 콘트롤러로 비교적 쉽고 간단하게 구현할 수 있으며 인버터의 출력전압 및 전류의 고조파를 광대역으로 분포시킴으로써 모터의 가청소음을 저감할 수 있다. 그러나 종전의 LL-RPWM 방식은 펄스의 위치가 1주기의 앞과 뒤 중의 하나만이 선택되므로 랜덤 스위칭에 의하여 전압 및 전류 스펙트럼을 광대역화하는 데는 한계가 있다.

3. 제안된 LL-RPWM기법

3.1 랜덤수의 발생[7]

랜덤수를 발생하기 위해서는 수학적 방법과 논리적인 방법에 의하여 해결 가능하다. 수학적 방법은 랜덤수 발생을 위하여 수식을 소프트웨어적으로 처리하는 것이며 선형 일치 발생기(Linear Congruential Generator: LCG)가 대표적이라 할 수 있다. 또 다른 방법으로는 시프트 레지스터와 XOR 게이트 등과 같은 논리소자를 이용하여 랜덤수를 발생하는 논리적 랜덤수 발생기가 있다[13-14]. 본 연구에서는 마이크로 콘트롤러에 의하여 소프트웨어적으로 랜덤수 발생이 용이한 LCG법을 사용하고 있다.

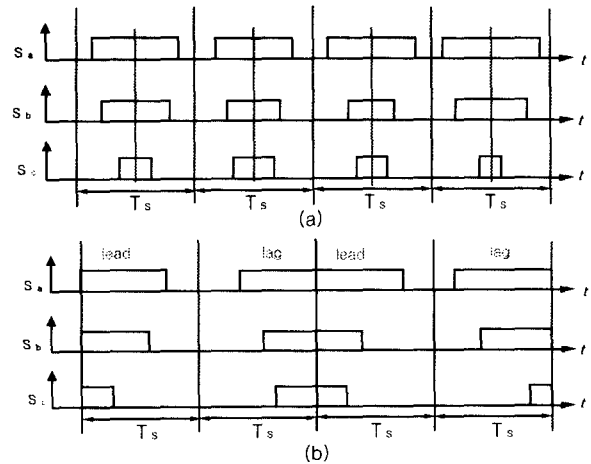


그림 1 SVPWM과 종전의 LL-RPWM을 위한 스위칭패턴

(a)SVPWM (b)LL-RPWM

Fig. 1 Switching patterns for SVPWM and conventional Lead-lag RPWM. (a)SVPWM (b)LL-RPWM

LCG에 의해 랜덤수를 발생하는 순서는 다음과 같다. 먼저 i_a, i_c, i_m 은 선택된 상수로써 각각 승산계수(multiplier), 증분계수(increment), 나머지 계수(modulus)라 할 때, 0부터 i_m 사이의 정수는 다음 식에 의해 발생된다.

$$f_{ran+1} = (f_{ran} * i_a + i_c) \% i_m \quad (1)$$

만일 0부터 1사이의 실수를 랜덤하게 발생하려면,

$$ran = \frac{(float)f_{ran}}{(float)i_m} \quad (2)$$

만일 f_{low} 부터 f_{high} 사이의 정수를 원한다면,

$$f = f_{low} + \frac{((f_{high} - f_{low} + 1) * f_{ran})}{i_m} \quad (3)$$

에 의하여 원하는 랜덤수를 구할 수 있다. 여기서 f_{low}, f_{high} 는 발생할 랜덤수의 최소값 및 최대값이다.

이렇게 구현된 랜덤 발생기는 여러 종류의 프로세서나 마이크로 콘트롤러에서 사용될 수 있다. 그러나 선택된 계수 i_a, i_c, i_m 들을 사용하여 연산하는 도중에 오버 플로우가 발생하지 않도록 주의하여야 한다. 특히 i_c 는 소수 (prime number)이어야 하며, i_c 와 i_m 은

$$i_c \approx (\frac{1}{2} - \frac{1}{6}\sqrt{3})i_m \quad (4)$$

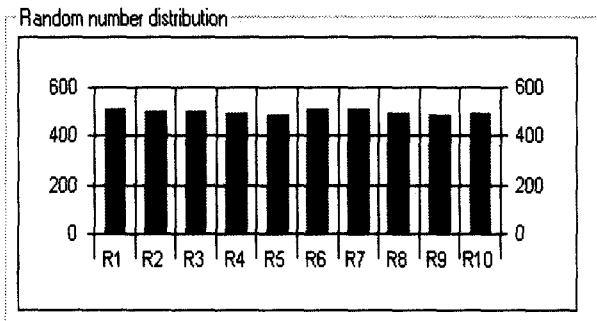
인 관계를 갖고 있다[12]. 균일한 분포의 랜덤수 발생기를 위한 몇 가지의 상수를 표1에 나타내었다.

그림2(a)는 적절한 상수에 의한 랜덤 분포결과로써 승산계수, 증분계수, 나머지 계수가 각각 6075, 106, 1283인 경우이다. 적절한 상수에 의해 각 랜덤수가 발생한 횟수는 약 500번의 고른 분포를 보임을 알 수 있다. 그림2(b)는 부적절한

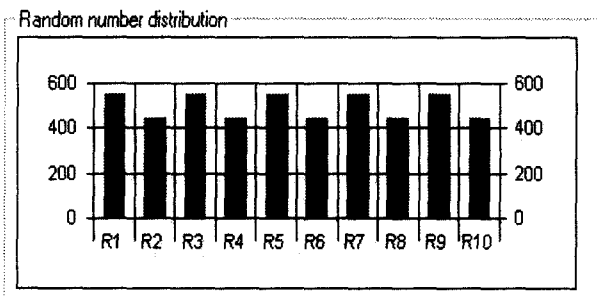
상수에 의한 랜덤 분포의 결과이다. 증가계수를 1283 대신에 소수가 아닌 1260을 선택한 경우이다.

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

Overflow at	im	ia	ic
220	6075	106	1283
221	7875	211	1663
222	7875	421	1663
223	11979	430	2531
	6655	936	1399
	6075	1366	1283
224	53125	171	11213
	11979	859	2531
	14406	967	3041



(a) Properly chosen coefficients
(im= 6075, ia = 106, ic = 1283)



(b) Improperly chosen coefficients
(im= 6075, ia = 106, ic = 1260)

그림 2 선택된 상수에 따른 랜덤 분포

Fig. 2 Random distributions along with chosen coefficients

3.2 펄스위치의 랜덤화

본 연구에서 제안한 LL-RPWM 방식의 스위칭 함수를 그림3에 나타내었으며 종전의 LL-RPWM에 비해서 매 변조구간에서 펄스의 위치가 랜덤하게 변하고 있음을 알 수 있다. 제안된 방식은 변조구간 내의 어느 위치에도 펄스를 배치할 수가 있기 때문에 전압 및 전류 스펙트럼 분포의 광대역 효과가 종전의 방식에 비하여 훨씬 크다.

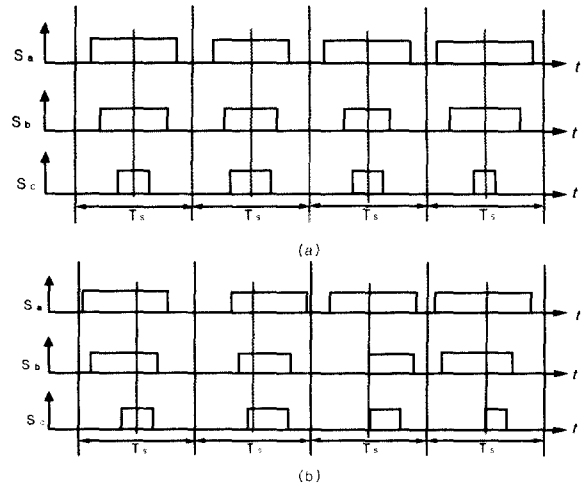


그림 3 SVPWM과 제안된 LL-RPWM을 위한 스위칭패턴
(a)SVPWM (b)제안된 LL-RPWM
Fig. 3 Switching patterns for SVPWM and proposed LL-RPWM (a)SVPWM (b)Proposed LL-RPWM

3.3 공간벡터 변조기법

원하는 전압을 인버터에 인가하기 위해서 공간벡터 변조법이 널리 이용되고 있다. 공간벡터 변조법은 교류모터를 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.

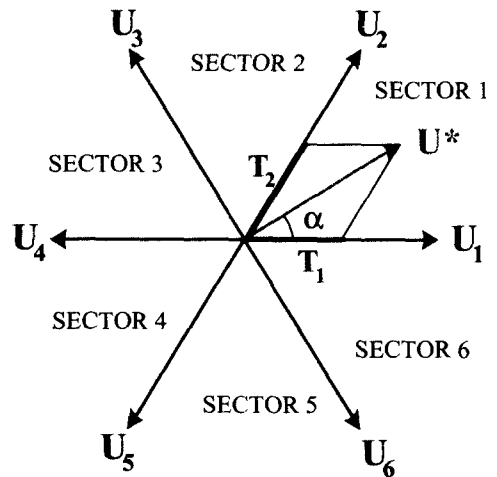


그림 4 공간 벡터도
Fig. 4 Diagram for space vector modulation.

본 연구에서는 제안된 LL-RPWM을 구현하기 위하여 공간벡터 변조 방식을 적용한다. 그림4에서 기준 전압벡터 U*를 합성하기 위해서는 U1, U2를 어떤 계산된 시간만큼 적절히 나누어 인가해줌으로써 가능하다. 기준벡터 U*가 섹터I에 위치한 경우 이 전압은 기준 벡터와 가장 가까운 벡터인 U1, U2, 그리고 영벡터의 시간적인 합성으로 나타낼 수 있다. 이

러한 원리를 바탕으로 전압에 대한 한 주기 내에서의 적분으로부터 각 유효벡터의 인가 시간을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\int_0^{T_s} U^* dt = \int_0^{T_1} U_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} U_{n+1} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} U_0 dt \quad (5)$$

벡터 U^* 의 각이 α 라면 한 변조 주기동안 벡터 U_1 을 인가해야 할 시간 T_1 과 벡터 U_2 를 인가해야 할 시간 T_2 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$T_1 = T_s \cdot M \frac{\sin(60^\circ - \alpha)}{\sin 60^\circ} \quad (6)$$

$$T_2 = T_s \cdot M \frac{\sin \alpha}{\sin 60^\circ} \quad (7)$$

$$T_0 = T_s - T_2 - T_1 \quad (8)$$

- 여기서, T_1 : Time duration of vector U_1
- T_2 : Time duration of vector U_2
- T_0 : Time duration of zero vector
- T_s : Sampling period
- M : Modulation Index

3.4 공간벡터 변조 기반의 펄스위치 랜덤화

제안된 LL-RPWM기법은 SVPWM기법을 기반으로 하고 있다. 공간벡터 변조에 의하여 매 제어 구간마다 각 상의 펄스의 듀티비가 구해지면 제안된 LL-RPWM을 수행하기 위하여 펄스의 위치를 랜덤하게 하는 작업이 필요하다. 식(1)의 LCG 기법으로 생성된 랜덤수를, 펄스가 위치할 수 있는 범위 안에 들도록, 식(3)을 이용하여 공간을 재 설정한다. 공간 전압 벡터를 통한 지령 전압 벡터는 1 제어주기 동안 2개의 이웃하는 유효벡터의 시간적인 합성에 의해 구현된다. 따라서 SVPWM기법에 기반을 둔 제안된 LL-RPWM기법은 1 제어주기 동안 2개의 유효벡터를 구현하여야 한다. 즉, 3개의 펄스는 1제어주기 구간의 임의의 위치에 존재할 수 없고, 유효벡터를 구현할 수 있는 범위에서만 랜덤하게 위치시킬 수 있다. 이를 위하여 먼저 펄스를 길이별로 정리하여 가장 큰 펄스를 영벡터 구간내에서 랜덤하게 위치시키고, 두번째로 긴 펄스를 그림5와 같이 제일 큰 펄스 구간내에 랜덤하게 위치시키고, 마지막으로 제일 짧은 펄스를 두번째로 긴 펄스 구간내에서 랜덤하게 위치시킨다. 이렇게 하면 2개의 유효벡터의 위치는 제어구간 동안 랜덤하게 위치하는 결과가 된다.

제안된 3상 LL-RPWM기법은 펄스의 위치가 매 변조구간에서 변경되므로 이는 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖게 된다. 펄스의 위치가 매 변조구간에서 변경되므로 이는 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖게 된다. 이를 위하여 '유효 스위칭 주파수'라는 용어를 편의상 도입하기로 한다. 이 유효 스위칭 주파수의 최대 값은 그림6에서 보듯이 이전 변조구간에서 펄스가 가장 뒷부분에 위치하고 다음 변조구간에서 구간의 시작 부분에 위치할 때이다. 유효 스위칭 주파수의 최댓값 $T_{(abc)_{max}}$ 과 최솟값 $T_{(abc)_{min}}$ 은 식(9)와 식(10)으로 표현할 수 있다.

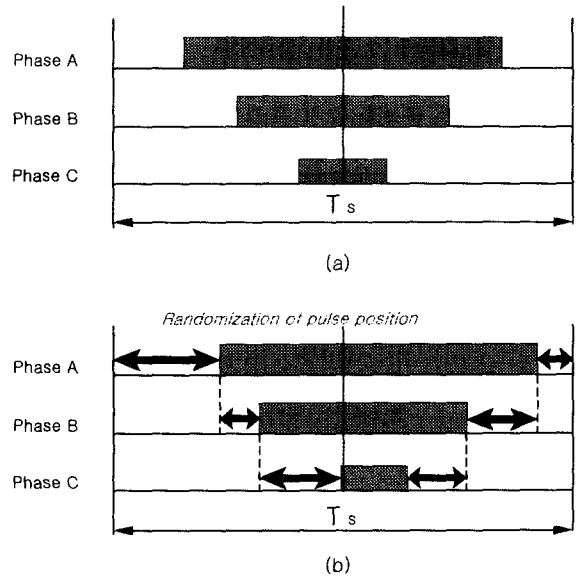


그림 5 제안된 LRPWM 수행시, 각상의 펄스에 대한 위치 범위 (a)SVPWM (b)proposed LL-RPWM
 Fig. 5 Range for each phase pulse with the proposed RPWM (a)SVPWM (b)proposed LL-RPWM

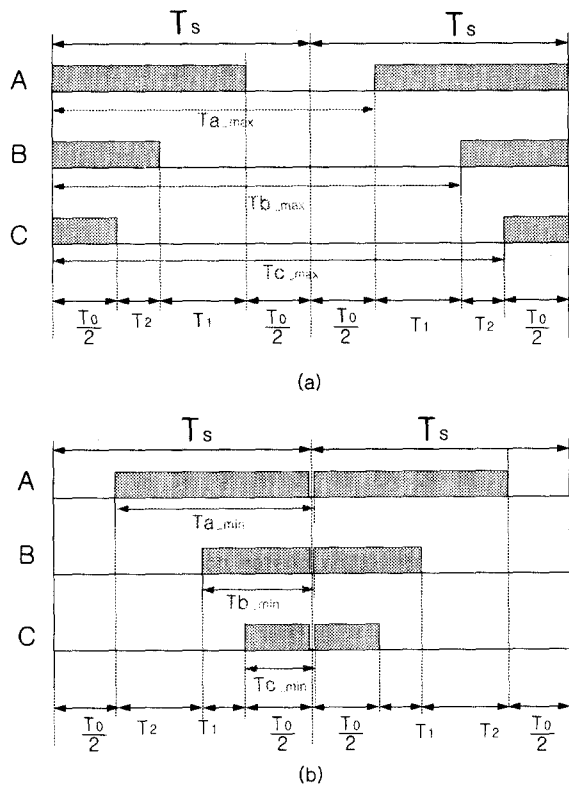


그림 6 최대 및 최소 유효 스위칭 주파수의 설명도
 Fig. 6 Illustration of maximum and minimum effective switching frequency

$$\begin{aligned}
 T_{a_{max}} &= \frac{T_0}{2} + T_2 + T_1 + T_0 = T_s + \frac{T_0}{2} \\
 T_{b_{max}} &= \frac{T_0}{2} + T_2 + 2T_1 + T_0 \\
 T_{c_{max}} &= \frac{T_0}{2} + 2T_2 + 2T_1 + T_0 = 2T_s - \frac{T_0}{2} \\
 T_{a_{min}} &= T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2} = 2T_s - T_{a_{max}} \\
 T_{b_{min}} &= T_2 + \frac{T_0}{2} = 2T_s - T_{b_{max}} \\
 T_{c_{min}} &= \frac{T_0}{2} = 2T_s - T_{c_{max}}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$$\tag{10}$$

그림7은 제안된 LL-RPWM을 구현하고 발생하기 위한 흐름선도이다. 제안된 LL-RPWM을 구현하기 위해서는 먼저 우측정렬 3상 SVPWM을 구현하고, 이를 바탕으로 펄스위치를 변경시켜야 제안된 LL-RPWM이 쉽게 실현될 수 있다. 유효벡터 인가시간 T_1 , T_2 를 구하기 위해 사용되는 초월함수는 알고리즘상에서 많은 시간이 소요되기 때문에 지령벡터의 각도에 따른 T_1 , T_2 의 비율을 오프라인으로 구하고, PWM을 발생시키기 위한 알고리즘 내에서 변조지수 M 을 곱하여 2개의 유효벡터들의 인가시간을 구해낸다.

그런데 1 변조주기 동안 1번의 ON → OFF 스위칭 상태 천이와, 1번의 OFF → ON 천이가 이루어져 스위칭 회수를 최소한으로 줄여야 한다. 이를 위해 지령전압벡터가 어떤 섹터에 위치하는가를 살펴 T_1 , T_2 와 T_0 의 합성 순서를 결정하여야 한다. 즉 지령벡터가 홀수 섹터에 있으면, 유효벡터 및 영벡터의 인가시간의 순서를 T_0 , T_1 , T_2 의 순서로 결정하고, 지령벡터가 짝수 섹터에 있으면 T_0 , T_2 , T_1 의 순서로 벡터를 시간적으로 재배치하면 3개의 펄스는 우측 정렬된 형태의 펄스를 얻을 수 있다. 이와 같이 구해진 각 상별 듀티비에 적절한 정수를 곱하여 데이터를 구할 수 있게 된다.

4. 시뮬레이션 구성 및 결과

4.1 시뮬레이션 구성

제안된 LL-RPWM에 의한 인버터 출력전압 및 전류 스펙트럼의 분포를 예측하기 위해 Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림8은 시뮬레이션 주 모델을 나타내고 있다. 전체 시스템을 위한 모델은 공간벡터 변조부, 펄스위치 랜덤화 부, PWM 패턴 발생부, IPM 인버터 부, 유도모터 부로 구성되어 있다. 유도모터 부는 3상/2상 변환부, D축 연산부, Q축 연산부, 회전자부 등으로 구성되어 있다. 이중 공간벡터 변조부, 펄스 위치 랜덤화 부 및 PWM 패턴 발생부는 블록도 내부에 기본 제공되는 라이브러리 블록 대신에 S-Function을 사용하여 직접 코딩되었다.

4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

모터를 무부하, 40Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 오픈 루프 운전하였을 때의 각 스위칭 방식에 따른 모터의 입력 선간전압의 파형을 그림9에 나타내었다. 그림9(a)는 SVPWM를 수행한 경우이며, 그림9(b)는 LL-RPWM을 수행한 경우이며, 그림9(c)는 본 연구에서 제안한 LL-RPWM을

수행한 경우이다. 각각의 전압 파형을 살펴보면 SVPWM 방식에서는 균일하나, LL-RPWM 및 제안된 LL-RPWM에서는 매우 랜덤함을 알 수 있다.

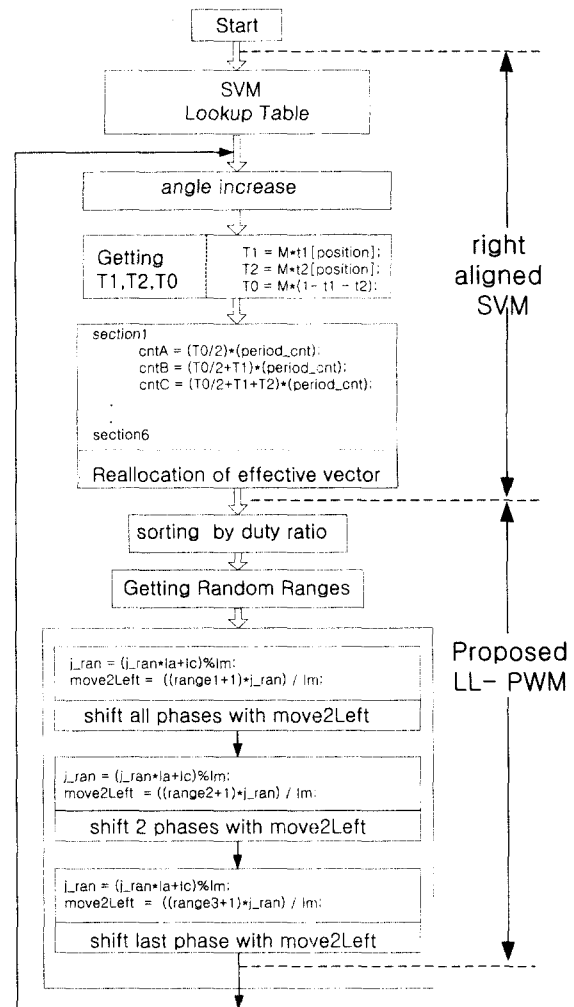


그림 7 제안된 LL-RPWM의 발생과 구현

Fig. 7 Generation and implementation of the proposed LL-RPWM

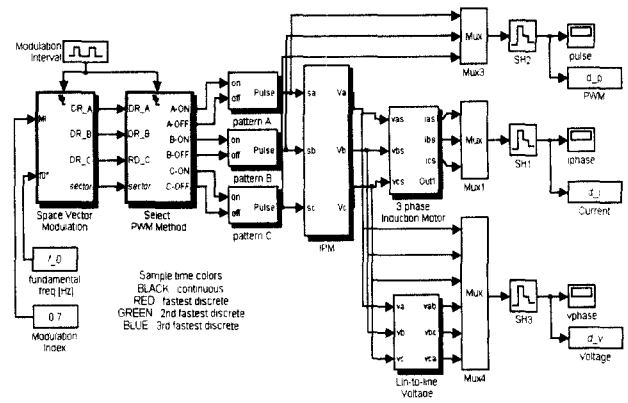


그림 8 RPWM의 시뮬레이션 주 모델

Fig. 8 Main model for RPWM simulation

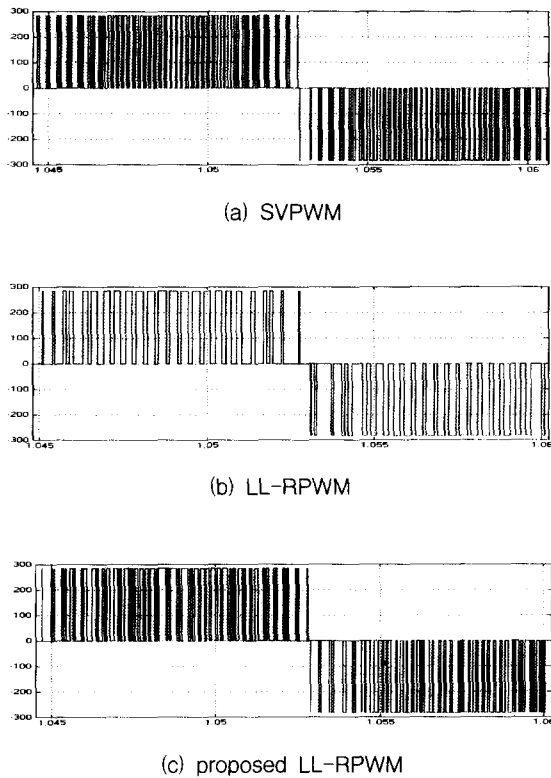


그림 9 각 PWM방식의 선간전압($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)
 Fig. 9 Line to line voltage of each PWM method
 ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)

그림10은 그림9에서 나타낸 전압 파형의 고조파 파워 스펙트럼이다. 그림10(a)로 나타낸 SVPWM의 경우, 스위칭 주파수의 2배 주파수 영역에 고조파의 가장 강한 성분이 있고 스위칭 주파수의 1배 주파수 영역에 두 번째로 강한 고조파 성분이 존재하고 있다. 그림10(b)의 경우는 LL-RPWM방식에 의한 결과로써, 2배 스위칭 주파수대의 강한 고조파가 현저히 줄었으며, 대신 1배 스위칭 주파수대의 고조파가 상당히 증가하였다. 제안된 LL-RPWM를 나타내고 있는 그림10(c)의 경우, 1배 스위칭 주파수대, 2배 스위칭 주파수대 및 3배 스위칭 주파수대 모두 고조파 성분의 크기가 매우 줄어들었음을 알 수 있다. 또한 고정 주파수 스위칭 시에는 존재하지 않았던 연속치 성분이 생기는 것을 알 수 있다.

또한 각 스위칭 방식에 따른 모터의 입력 전류의 파형을 그림11에 나타내었다. 랜덤한 PWM 배열 특성상 다른 방식에 비해 제안된 방식의 전류 파형은 다소 맥동이 존재하고 있다. 전류 파형의 맥동은 모터의 토크 맥동을 유발할 우려가 있으나, 본 연구에서의 주 관심은 토크 맥동보다는 새로운 random PWM기법을 제시하고 전압 및 전류 파형과 고조파 스펙트럼 그리고 가청 소음의 파워 스펙트럼을 확인하는데 있기 때문에 이점은 크게 고려하지 않아도 된다.

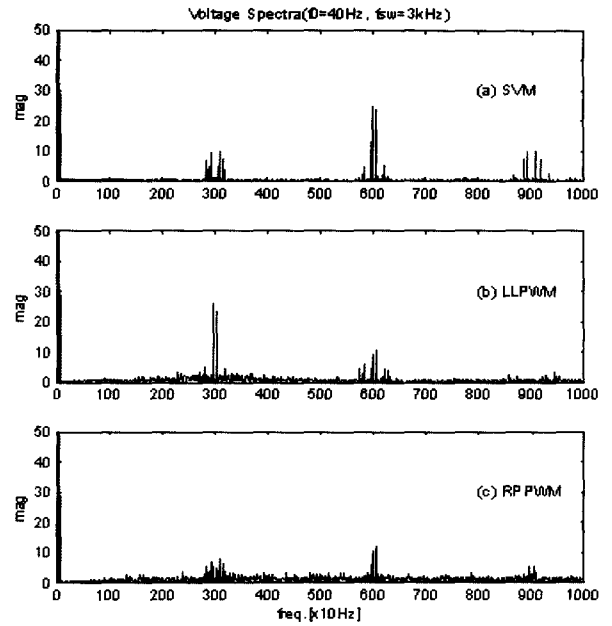


그림 10 전압스펙트럼($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)
 Fig. 10 Voltage spectra ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)

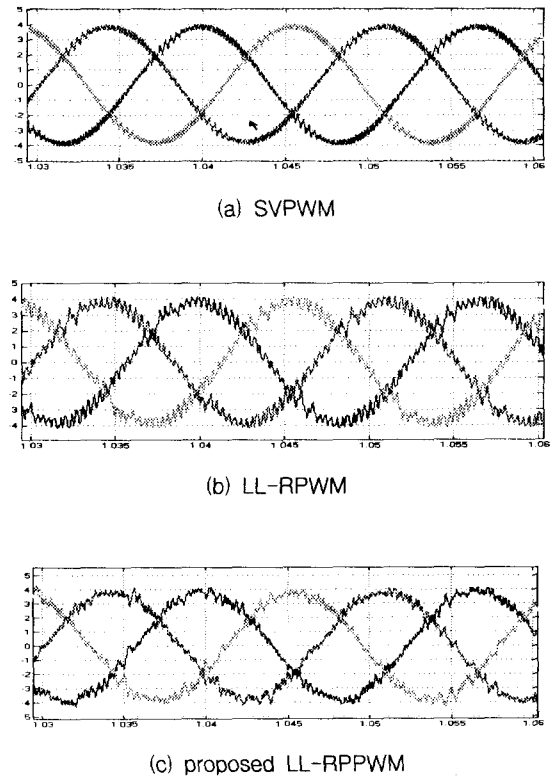


그림 11 각 PWM방식의 전류파형($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)
 Fig. 11 Current waveforms of each PWM method
 ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)

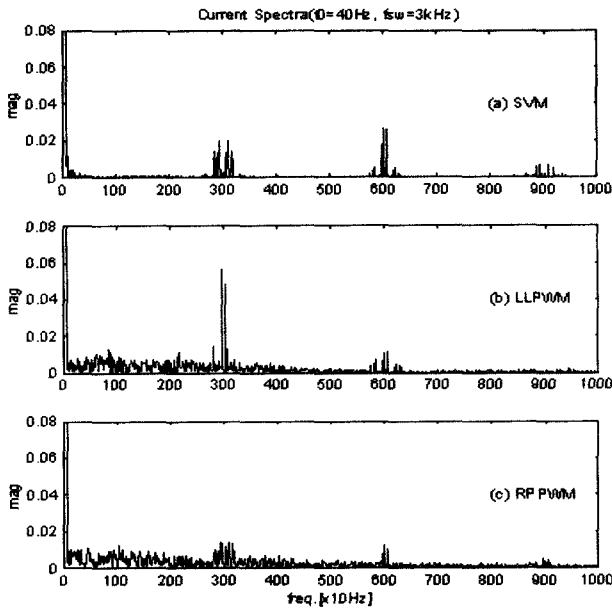


그림 12 전류스펙트럼($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)
 Fig. 12 Current spectra ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)

인버터 출력전류에 대한 고조파의 스펙트럼을 그림12에 나타내었다. SVPWM과 LL-RPWM 그리고 본 연구에서 제안한 LL-RPWM의 경우 모두, 전압의 스펙트럼 분포와 거의 비슷한 양상을 보이고 있다.

변조지수 변화에 따른 각 스위칭 방법의 전압 스펙트럼에 대한 시뮬레이션 결과를 그림13-그림15에 나타내었다. 그림 13은 기본 주파수 60Hz, 스위칭 주파수 3kHz, SVPWM방식의 변조지수 M의 변화(0 ~ 1)에 따른 고조파 분포도이다. 그림14는 종전의 LL-RPWM방식의 변조지수 변화에 따른 고조파 분포도이며, 그림15는 제안된 LL-RPWM방식의 변조지수 변화에 따른 고조파 분포도이다. 제안된 LL-RPWM에 의하여 1배, 2배 및 3배 스위칭 주파수에 대해 고조파의 양이 현저히 줄어 있음을 알 수 있다.

5. 시스템 구성 및 결과

5.1 시스템 구성

그림16은 제안한 LL-RPWM을 구현하기 위한 시스템을 나타내고 있다. 본 연구의 내용은 주로 PWM의 발생기법에 있으므로 응답성이 좋은 고성능의 페루프 제어 방식 대신 간단한 개루프 전압 제어 방식을 택하였다. 시스템은 크게 나누어 C167 마이크로 컨트롤러 보드, IPM 인버터, 1.5kW 유도모터, 제어 프로그램, 호스트 프로그램 등으로 구성되어 있다. 주 제어기로써 Siemens사의 C167 마이크로 컨트롤러를 사용하였다. C167은 16비트 RISC구조이며 직류모터는 물론 3상 브러시리스 모터, 3상 교류기를 제어하는데도 적합하며, 특히 3상 유도모터의 자속기준제어등의 고성능 시스템에 적합한 컨트롤러로 알려져 있다. 공간벡터 변조 및 랜덤수 발생등의 모든 연산은 C167내의 제어 프로그램에 의하여 수행

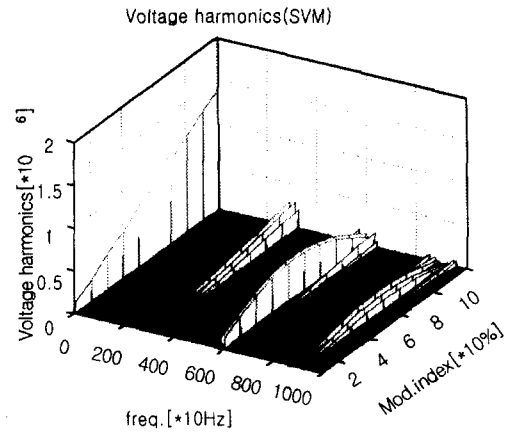


그림 13 변조지수의 변화에 따른 SVPWM의 전압고조파
 Fig. 13 Voltage harmonics at different modulation index with SVPWM

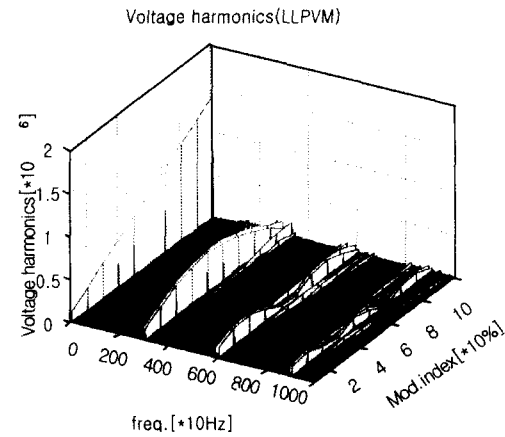


그림 14 변조지수의 변화에 따른 LL-RPWM의 전압고조파
 Fig. 14 Voltage harmonics at different modulation index with LL-RPWM

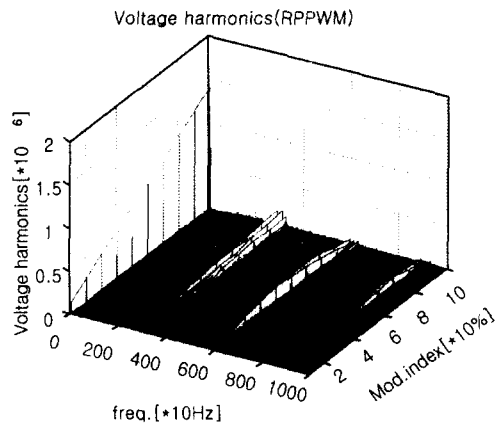


그림 15 변조지수의 변화에 따른 제안된 LL-RPWM의 전압고조파
 Fig. 15 Voltage harmonics at different modulation index with proposed LL-RPWM

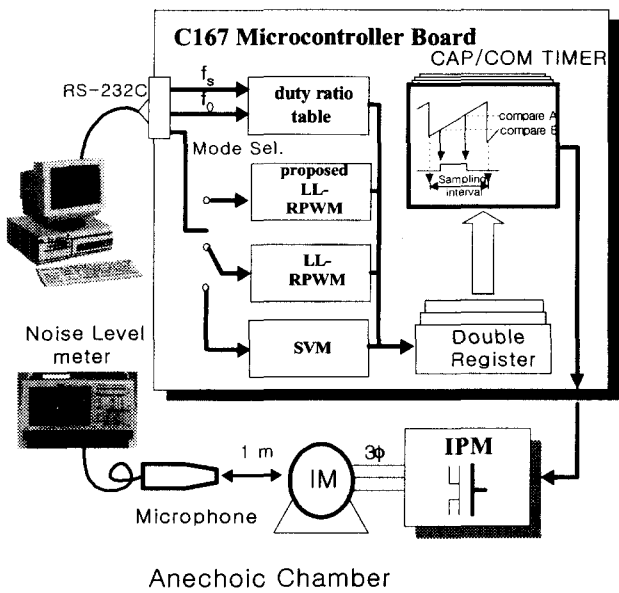


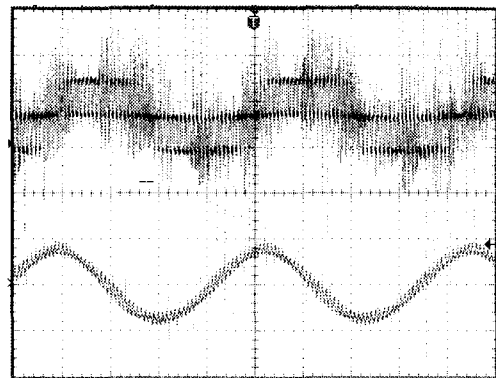
그림 16 제안된 실험 시스템
Fig. 16 Proposed experimental system

될 뿐 만 아니라 C167 마이크로 컨트롤러의 포트출력은 바로 IPM을 게이팅할 수 있는 신호이다. 즉 PLD(Programmable Logic Device)를 사용하지 않고 마이크로 컨트롤러에 내장된 CAP/COM(Capture/Compare)기능을 사용하여 저 비용의 전력제어장치를 구현하였다.

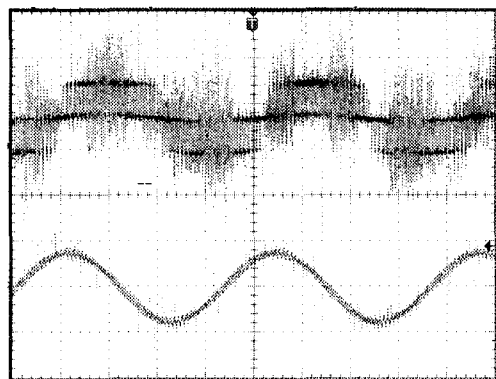
5.2 실험 결과 및 고찰

모터를 시뮬레이션과 동일한 조건인, 무부하, 40Hz의 지령 속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 오픈 루프 운전하였을 때의 각 스위칭 방식에 따른 모터의 입력 선간전압 및 전류 파형을 그림17에 나타내었다. 그림17(a)는 SVPWM를 수행한 경우이며, 그림17(b)는 LL-PWM을 수행한 경우이며, 그림17(c)는 본 연구에서 제안한 LL-RPWM을 수행한 경우이다. 제안된 RPWM은 랜덤한 PWM배열 특성상 전류 파형에 미소한 백동이 존재한다. 이와 같은 비확정적 전류 백동은 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.

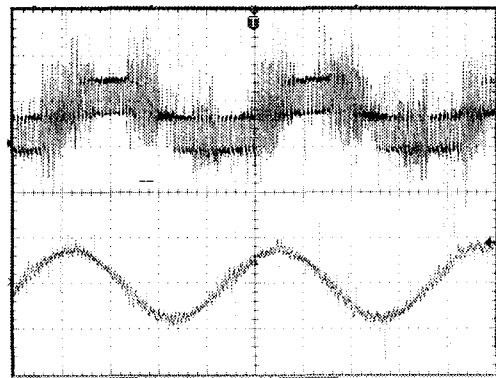
그림18은 그림17에서 나타낸 전압 파형의 고조파 파워 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림18(a)로 나타낸 SVPWM의 경우, 스위칭 주파수의 2배 주파수 영역에 고조파의 가장 강한 성분이 있고 스위칭 주파수의 1배 주파수 영역에 두 번째로 강한 고조파 성분이 존재하고 있다. 그림18(b)의 경우는 LL-RPWM방식에 의한 결과로써, 2배 스위칭 주파수대의 강한 고조파가 현저히 줄었으며, 대신 1배 스위칭 주파수대의



(a) SVPWM



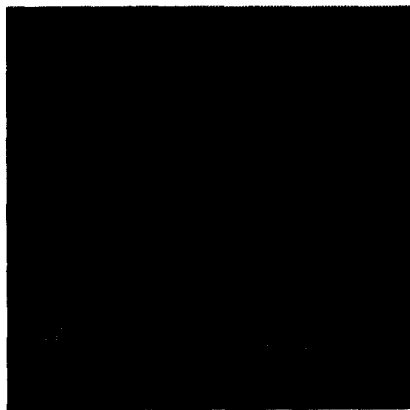
(b) LL-RPWM



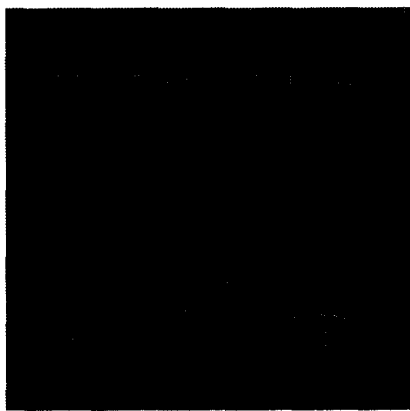
(c) Proposed LL-RPWM

그림 17 각 PWM방식의 선간전압과 전류
($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, 200v/div. , 2A/div.)
Fig. 17 Line to line voltage and current of each PWM method ($f_0 = 40\text{Hz}$, $f_{sw} = 3\text{kHz}$, 200v/div. , 2A/div.)

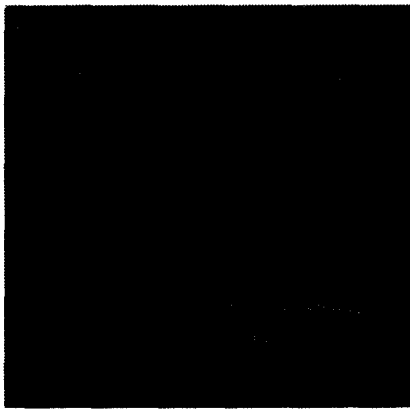
고조파가 상당히 증가하였다. 제안된 LL-RPWM를 나타내고 있는 그림18(c)의 경우, 1배 스위칭 주파수대, 2배 스위칭 주파수대 및 3배 스위칭 주파수대 모두 고조파 성분의 크기가 매우 줄어들었음을 알 수 있다. 실험결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하고 있다.



(a) SVPWM

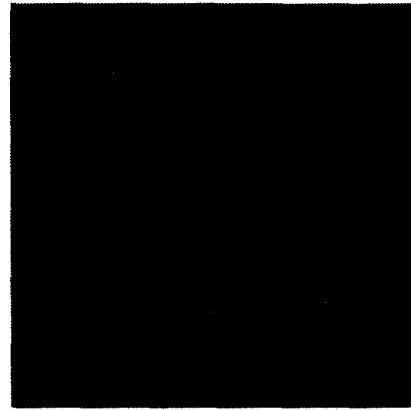


(b) LL-PWM

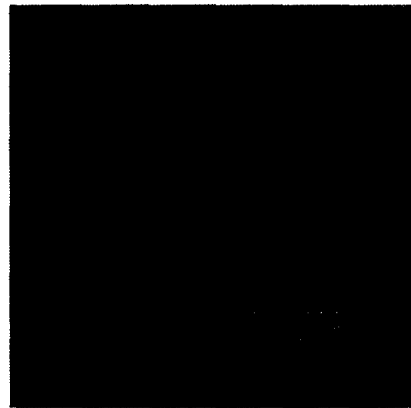


(c) Proposed LL-PWM

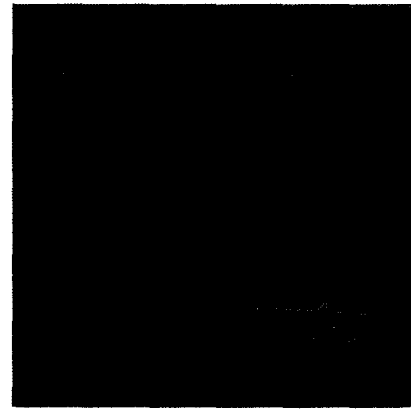
그림 18 전압스펙트럼($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw} = 3\text{kHz}$)
Fig. 18 Voltage spectra ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw} = 3\text{kHz}$)



(a) SVPWM



(b) LL-PWM



(c) Proposed LL-PWM

그림 19 전류스펙트럼($f_0 = 40\text{Hz}$, $f_{sw} = 3\text{kHz}$)
Fig. 19 Current spectra ($f_0 = 40\text{Hz}$, $f_{sw} = 3\text{kHz}$)

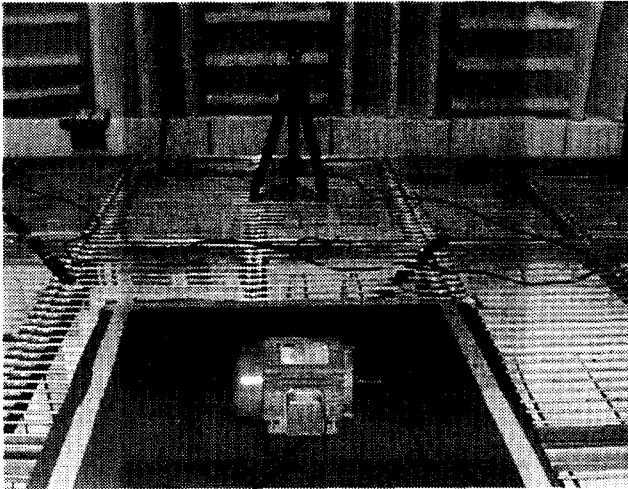


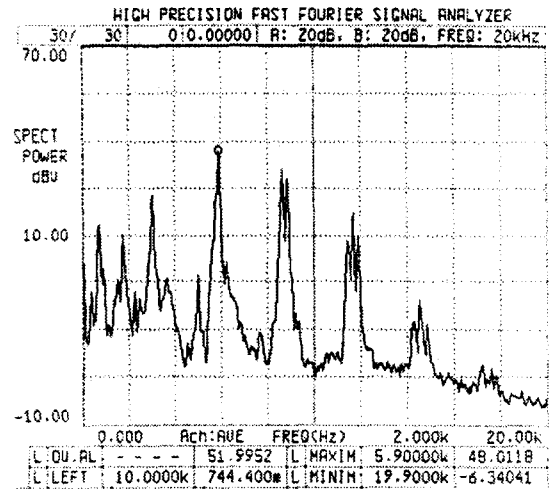
그림 20 무향실에서의 모터의 스위칭 소음 측정 사진

Fig. 20 System photograph for measuring audible switching noise of motor in anechoic chamber

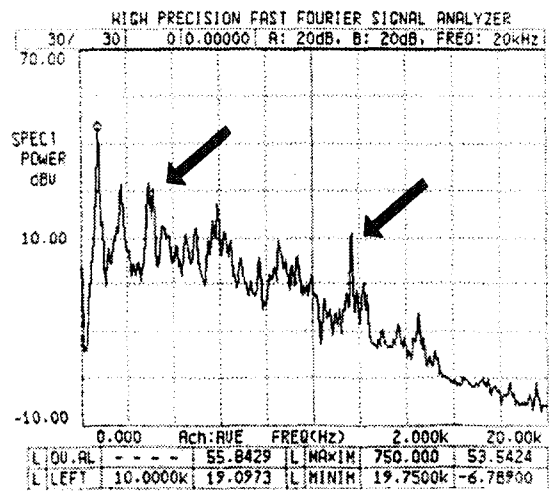
인버터 출력전류에 대한 고조파의 스펙트럼을 그림19에 나타내었다. SVPWM과 LL-RPWM 그리고 본 연구에서 제안한 LL-RPWM의 경우 모두, 전압의 스펙트럼 분포와 거의 비슷한 양상을 보이고 있다.

본 연구에서 인버터로 구동되는 유도모터의 스위칭 소음의 파워 스펙트럼을 얻기 위한 실험은 6면이 모드 흡음제로 밀폐되도록 특별하게 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 측 방향으로 1m 떨어진 곳과 상측 반지름 방향으로 1m 떨어진 곳 등 두 지점에 설치된 마이크로부터 측정된 값을 평균하여 얻은 값을 사용하였다. 그림20은 무향실에서 모터의 가청 스위칭 소음을 측정하고 있는 사진을 보이고 있다.

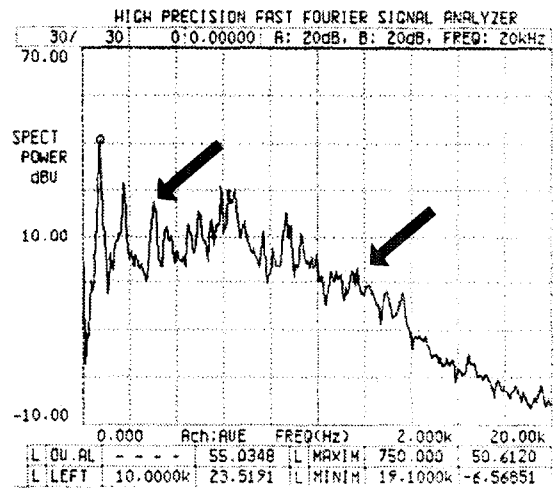
일반적으로 1-6kHz 주파수 영역에서 인간은 소음에 대해서 가장 고통을 느끼는 것으로 알려져 있으며 이 주파수 영역은 전력전자 변환기의 스위칭 주파수와 일치하고 있다. 이러한 측면에서 볼 때, 인버터로 구동되는 모터의 가청 스위칭 소음은 이 주파수대에서의 저감이 중요하다. 또한 소음의 스펙트럼은 전압과 전류 스펙트럼과는 다르게 약간의 차이가 소음에 영향을 주게 되며, 또한 동일한 소음이라 할지라도 어느 주파수대에 존재하는가가 중요하다. RPWM에서의 가청 소음과 고조파의 저감은 능동전력필터등의 고조파 저감과는 개념이 다르다. RPWM의 목적은 모터의 전압 및 전류 그리고 가청 소음에 대한 고조파 제거에 있지는 않고 스위칭 주파수의 정수배에 집중되어져 있는 스펙트럼을 백색 잡음화하는 데 있다. 그러나 실제 문제에 있어서 고조파 스펙트럼의 백색 잡음화는 불가능하며, 광대역 분포를 갖는 정현파 형태의 고조파 스펙트럼을 갖게 된다. 그리고 RPWM 기법을 적용하기 전과 후의 전체 고조파 스펙트럼과 소음 에너지의 크기는 동일하다.



(a) SVPWM



(b) LL-RPWM



(c) Proposed LL-RPWM

그림 21 소음 스펙트럼($f_0=40\text{Hz}, f_{sw}=3\text{kHz}$)

Fig. 21 Acoustic noise spectra($f_0=40\text{Hz}, f_{sw}=3\text{kHz}$)

그림 21은 각 스위칭 방식에 따른 모터의 소음 파워 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림21(a)는 SVPWM를 수행한 경우이며, 그림21(b)는 LL-PWM을 수행한 경우이며, 그림21(c)는 본 연구에서 제안한 LL-RPWM을 수행한 경우이다. 그림 21(a)의 경우 2배 스위칭 주파수대에 소음의 가장 강한 성분이 있고 1배 스위칭 주파수대에 두 번째로 강한 소음의 성분이 존재함을 알 수 있다. 그리고 스위칭과 상관없는 주파수대인 750Hz 및 1.8kHz대에 약간의 소음성분이 존재함을 알 수 있다. 그림21(b)의 경우는 1배 스위칭 주파수대 소음성분은 미소하게 증가, 2배 스위칭 주파수대 소음의 성분은 현저히 감소하였음을 알 수 있다. 그러나 750Hz대의 소음 성분은 상당히 증가함을 보이고 있다. 그림21(c)의 경우는 그림21(a)의 경우와 비교하여 1배 스위칭 스위칭 주파수대 성분은 약간 감소, 2배 스위칭주파수대 성분은 현저히 감소됨을 보이고 있다.

가칭 스위칭 소음 저감의 측면에서 제안된 LL-RPWM기법은 종전의 LL-RPWM방법에 비하여 다음과 같은 개선의 효과가 있다.

- ① 종전의 LL-RPWM기법과 비교하여 제안된 방법은 정현파 형태의 광역화된 소음 스펙트럼을 갖는다.
- ② 제안된 방법은 인간이 가장 민감하게 느끼는 1-6kHz 주파수대에서 화살표로 표시된 부분만큼의 불연속적인 소음 성분이 없다.
- ③ 제안된 방법은 특히 1-6kHz 주파수대에서 소음 스펙트럼이 종전의 방법보다 선형화 되어져 있다.

그런데 이 경우도 그림21(b)의 경우와 마찬가지로 작았던 750Hz성분이 상당히 증가하였음을 알 수 있다. 이는 여러 가지 지령속도 및 스위칭 주파수로 실험하여도 같은 주파수대에서 나타나는 것으로 보아 스위칭과 관계없는 기계적인 소음으로 판명된다. 즉 모터의 고유 진동수와 관계되는 주파수와 랜덤한 스위칭 주파수가 중첩되어 기계적인 공진[2,8]을 일으킨 것으로 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서는 펄스의 위치를 랜덤하게 함으로써 모터구동 장치의 가청소음을 저감할 수 있는 새로운 3상 공간벡터 LL-RPWM방식을 제안하였다. 제안된 LL-RPWM은 매 변조 구간마다 각 3상 펄스의 위치를 랜덤하게 배치하여 스위칭 주파수가 일정하지 않다. 그 결과 인버터의 출력 전압 및 전류 그리고 가청 스위칭 소음의 불연속적이고 강한 고조파 성분을 광대역에 연속적인 성분으로 분산시킬 수 있었다. 또한 고정 주파수 SVPWM 방식, LL-RPWM 방식 및 제안된 LL-RPWM 방식에 의한 인버터 출력 전압, 전류의 스펙트럼을 비교 검토한 결과, 제안된 방식이 불연속치 성분의 전압 및 전류의 고조파를 줄이는 데는 탁월한 효과가 있었다. 종전의 LL-RPWM 방식에서는 펄스가 위치할 수 있는 경우의 수 두가지로 매우 제한 되어 있었기 때문에 만족할 만한 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화를 이룩하지 못했다. 그러나 제안된 방식은 다른 상 펄스 위치의 경계를 벗어나지 않는 한 어느 위치에서도 연속적인 위치가 가능하므로 펄스 위치

선정에 있어서 매우 자유도가 높은 RPWM방식임을 알 수 있었다. 끝으로 제안된 RPWM은 종전의 SVPWM을 적용할 수 있는 센서리스 벡터제어를 포함한 대부분의 인버터 구동 장치에 성능 저하 또는 제한 사항 없이 적용 가능하리라 사료된다.

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

참 고 문 헌

- [1] G.A. Covic, J.T.Boys, "Noise quieting with random PWM AC dirves", IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol.145, no.1, pp.1-10,1998
- [2] J. T. Boys, P. G. Handley, "Spread spectrum switching; low noise modulation technique for PWM inverter drives", IEE Proc.-Electr.Power Appl., vol.139, no.3, pp.252-260,1992
- [3] M. M. Bech, F. Blaabjerg and J. K. Pedersen, "Random modulation techniques with fixed switching frequency for three phase power converters", IEEE PESC'99, pp.544-551,1999
- [4] R.L.Kirlin, M.M.Bech, A.M.Trzynadlowski and Bin Huo, "Power and power spectral density in PWM inverters with randomized switching frequency",IEEE PESC'01,pp.188-192,2001
- [5] A. M. Trzynadlowski, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, R. L. Kirlin, S. Legowski, "Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive systems- A Review", IEEE Trans. IA, vol. 30, no. 5, pp.1166-1174, 1994
- [6] 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
- [7] J. K. Pedersen, F. Blaabjerg, "Implementation and test of a digital quasi-random modulated SFAVM PWM in a high performance drive system", IEEE IECON'93, pp.265-270.1993
- [8] J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "Digital quasi-random modulated SFAVM PWM in an AC-drive system", IEEE Trans., IA, vol. 41, no. 5, pp.518-525, 1994
- [9] S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, "Hypersonic MOSFET based power inverter with random pulse width modulation" IEEE IAS'89, pp. 901-903, 1989
- [10] R. L. Kirlin, S. Kwok, S. Legowski, and A. M. Trzynadlowski, "Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position" IEEE PESC'93, pp.

1041-1047. 1993

- [11] S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, "Analysis and implementation of a grey-noise PWM technique based on voltage space vectors", IEEE APEC'92, pp. 586-593, 1992
- [12] D. E. Knuth, Seminumerical Algorithms, 2nd ed., vol. 2 of The Art of the Computer Programming, Addison Wesley, 1981
- [13] 배창한, 김상민, 이광원, "랜덤 스위칭 주기를 갖는 시그마 델타 변조기", 대한전기학회 B부문 논문지.50B-10-5, pp.513-519, 2001.
- [14] S. Y. R. Hui, Oppermann and S. Sathiakumar, "Microprocessor-based random PWM schemes for DC-AC power conversion", IEEE PESC'95, pp.307-312, 1995.

저 자 소 개



위 석 오 (魏昔吾)

1968년 12월 20일 생. 1993년 전남대 전기공학과 졸업(학사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정수료.

전화 : 062-530-0656

E-mail : sowi@chonnam.ac.kr



정 영 국 (鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 일본 오카야마대학 연구방문. 현재 대불대 전기공학과 전임강사. 한국과학재단 지정 전남

대 고품질 전기전자부품 및 시스템연구센터(RRC) 연구원
전화 : 061-469-1263

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



나 석 환 (羅碩煥)

1963년 4월 3일생. 1991년 전남대 전기공학과 졸업(학사). 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 무선

데이터통신 연구소 책임연구원.

전화: 016-9310-2112

E-mail : s.h.na@ieee.org



임 영 철 (任永徹)

1953년 4월 22일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업(학사). 1977년 고려대 대학원 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

전화 : 062-530-1740

전화 : 062-530-1740

E-mail : yclim@chonnam.ac.kr