

## A Two-Phase Separately Randomized Pulse Position PWM Technique with Double-Zero Vector Mode

金汀根\* · 吳承烈\*\* · 鄭榮國† · 任永徹\*\*\*

(Jung-Geun Kim · Seung-Yeol Oh · Young-Gook Jung · Young-Cheol Lim)

**Abstract** - In case while M(modulation index) is more than 0.7, the spectrum of motor voltage and current of a conventional two-phase SRP-PWM scheme are not reduced considerably. To solve the problems of a conventional two-phase SRP-PWM, this paper proposes a two-phase SRP-PWM(DZSRP-PWM) with double zero vector mode which zero vector is selected as V(111) in case of  $M > 0.7$ , and zero vector is selected as V(000) if  $M < 0.7$ . For the validity of the proposed method, the PSIM simulations and experiments were achieved. And the simulation and experiment results show that the voltage and current harmonics all over the modulation index are spread to a wide band area.

**Key Words** : Double Zero Vector Mode, Two-Phase SRP-PWM(Separately Randomized Pulse Position PWM), Reduction of Harmonics Spectrum, Critical Modulation Index

### 1. 서 론

인버터와 유도 모터로 구성되는 모터 구동 시스템에서 모터의 가변속 운전을 위해 일반적으로 사용하는 PWM방식은 고정 스위칭 주파수로 동작하기 때문에 현대역의 특정 스위칭 주파수의 고조파가 인버터의 출력 전압 및 전류에 포함되는 문제점이 있다[1]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 낮은 스위칭 주파수를 그대로 유지하면서 스위칭 패턴을 변경하여 가청 스위칭 소음을 완화하는 기법들이 제시되고 있는데, Optimum PWM[2], Random PWM(RPWM) [1,3-16]등이 있다.

RPWM기법은 PWM 주파수를 랜덤하게 변경하여 소음 전력을 광대역화 하는 기법으로, 비교적 최근에 전력전자 분야에서 연구되고 있다. RPWM기법에는 여러 종류가 있으며 특히 랜덤 펄스 위치 PWM기법[3-15]은 고정 스위칭 주파수를 갖는 펄스의 위치만을 랜덤하게 변경하기 때문에 다른 방식에 비하여 마이크로 콘트롤러로 구현이 용이하다는 장점이 있다. 랜덤 펄스 위치 PWM기법에는 각상의 펄스 위치가 1주기의 앞과 뒤 중의 어느 하나만이 랜덤하게 선택되는 RLL (Random Leading-Lagging PWM)방식[3], 중앙정렬 SVM(Space Vector Modulation)의 펄스 중심을 랜덤하게 정렬하는 RCD(Random Centered Displacement PWM)[4,15] 그리고 중앙정렬 SVM의 영 벡터 V(111)와 V(000)

의 시간 분배를 랜덤하게 하는 RZV(Random Zero Voltage Vector Distribution PWM)[4], 랜덤하게 배치된 a상의 펄스 범위 내에서 나머지 상의 펄스 위치를 개별적으로 랜덤하게 배치할 수 있는 SRP (Separately Randomized Pulse Position PWM)[5-14]등이 있다. 랜덤 펄스 위치 PWM기법 중에서 근래 개발된 SRP기법은 IRP(Individually Randomized Pulse Position PWM)[5] 라고도 하며, 이 기법은 랜덤하게 배치된 a상의 펄스 범위 내에서 나머지 상의 펄스 위치를 랜덤하게 배치할 수 있기 때문에, 고조파 및 소음 저감특성이 다른 방식에 비하여 우수하다. SRP기법은 랜덤 변위와 펄스를 배치하는 방법에 따라 랜덤 변위를 계산하여 각상의 펄스 배치에 위배되지 않도록 직접 랜덤하게 배열하는 방법[6-9]과 우측 정렬 후 랜덤 변위에 따라 각상의 펄스를 좌측으로 랜덤하게 배치하는 방법[10-14]으로 구현된다. 이 두가지 방법은 최근에 전력전자 변환장치에 많이 적용되는 고속의 DSP로 구현하는 경우, 연산 및 구현의 속도에 근본적인 차이는 없으나, 우측 정렬 후 SRP를 구현하는 방법은 SRP-PWM의 도식적인 설명에 이하다.

이 상에서 언급한 랜덤 펄스 위치 PWM기법들은 3상 변조 및 2상 변조기법으로 구현[11,15]되고 있으며, 2상 변조기법은 3상 변조기법에 비하여 전류 파형이 다소 저하되는 점을 제외하고는 고조파 스펙트럼이나 소음 저감의 특성이 3상 변조기법보다 우수하다. 또한 2상 변조기법은 3상 변조기법에 비하여 구현이 용이하며 연산 시간을 절약할 수 있다는 장점이 있다[9,12]. 특히 2상 SRP기법[9,12]은  $M < 0.7$ 의 영역에서 매우 우수한 고조파 스펙트럼의 광대역화 특성이 있으나  $M > 0.7$ 이상의 영역에서는 광대역화 효과가 뚜렷하게 개선되지 않는다. 그러나 대부분의 전력전자 변환장치들이  $M > 0.7$ 영역에서 동작한다는 점을 고려할 때, M이 0.7이상인 영역에서도 스펙트럼의 광대역화 특성을 개선하도록 할 필요가 있다. 이러한 현상을 개선하기 위한 노력으로 높은 M

† 교신저자, 正會員 : 大佛大 컴퓨터情報工學部 助教授 · 工博  
E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr

\* 學生會員 : 全南大 工大 電氣工學科 碩士

\*\* 學生會員 : 全南大 工大 電氣工學科 碩士

\*\*\* 正會員 : 全南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 3月 10日

最終完了 : 2004年 11月 9日

에서는 랜덤 스위칭 주파수 기법을 사용하고 낮은 M 구간에서는 2개의 영 벡터를 랜덤하게 조절하는 Hybrid RPWM [16]기법 등이 제시된 바 있다.

본 연구에서는 M에 따라서 영 벡터를 선택하는 2상 변조 DZSRP(Double-Zero Vectors SRP)기법을 제안하였다. 제안된 DZSRP는 모터가  $M < 0.7$  인 영역에서 동작되는 경우, 영 벡터를 종전과 같은  $V(000)$ 로 사용하고,  $M > 0.7$ 의 조건에서는,  $V(111)$ 을 영 벡터로 선택한다. 영 벡터를  $V(000)$ 으로 하는 종전의 2상 변조 SRP는  $M < 0.7$ 인 영역에서의 모터 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화 효과는 양호하다. 이 방식은 M이 1에 가까울수록, 스펙트럼의 광대역화 효과는 더 이상 증가되지 않는다. 한편, 영 벡터로  $V(111)$ 이 적용된 2상 변조 SRP는, M이 0.7보다 큰 영역에서는 스펙트럼의 랜덤화 효과가 우수하고, M이 0.7보다 낮은 영역에서는 반대의 현상이 나타난다. 따라서 이 두 가지 영 벡터를 혼합하여 M이 0.7보다 크면 영 벡터로  $V(111)$ 을 선택하고, 작은 경우에는  $V(000)$ 을 선택하게 된다면, M의 전 영역에 걸쳐서 랜덤 효과가 탁월한 고조파 스펙트럼을 얻을 수 있다.

일반적으로 모터로부터 발생되는 스위칭 소음의 스펙트럼은 모터 전압 및 전류 스펙트럼과 유사한 형태를 보이고 있다[9,12]. 따라서 모터의 스위칭 소음 스펙트럼을 측정하기 위해 고가의 무향실에서 번거로운 실험을 하지 않고도 시뮬레이션에 의해 모터 전압 및 전류 스펙트럼을 잘 관찰한다면, 스위칭 소음의 스펙트럼을 예측할 수 있다. 본 연구는 바로 이 점에 주안점을 두고 있다. 제작된 3상 유도 모터 구동 시스템으로부터 M의 변화에 따라 측정된 선간전압 및 전류 스펙트럼과 PSIM 시뮬레이션 결과를 간단히 비교하여 본 연구의 유용성을 입증하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 2상 변조 SRP-PWM기법[9,12]

그림 1은 2상 변조 SRP-PWM기법의 4주기 동안을 나타낸 펄스 패턴을 나타내고 있다. 여기서  $T_s$ 는 샘플링 주기이다. 이 방법은 2상 변조 SVM을 기반으로 하기 때문에 1 샘플링 주기 동안 2개의 상만이 2번의 펄스 교번(commutation)이 이루어 1 샘플링 주기 동안 두 상에만 펄스가 존재하게 된다. 이렇게 얻어진 두개의 펄스는 그 위치를 랜덤하게 정할 수 있는데, 각 펄스별로 자유롭게 그 위치를 정할 수 있다.

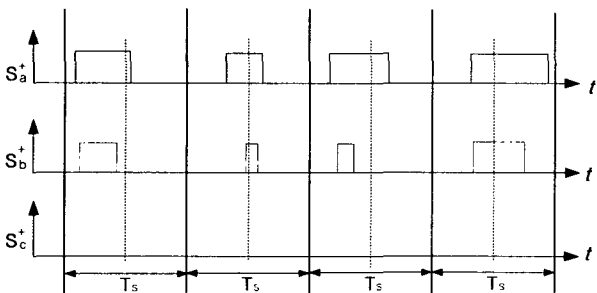


그림 1 2상 변조 SRP-PWM  
Fig. 1 Two-phase SRP-PWM

지령전압 벡터  $V^*$ 가 그림 2로 나타난 공간 벡터도의 1번 섹터에 있을 때, 1주기 동안의 2상 변조 SRP-PWM을 그림 3에 나타내었다. 3상 변조 SRP-PWM의 경우에는 랜덤 변위  $T_{RAND}$ 가 세 번이 필요한 반면 제안된 2상 변조 SRP-PWM의 경우 두 번의 랜덤 변위만으로 구현이 가능하다. 즉 구현이 더 용이함을 알 수 있다. 본 연구에서 구현된 2상 변조 SRP-PWM은 두개의 펄스 위치를 좌우측으로 어느 정도 변위시킬 것인가를 랜덤하게 지정하는 방법으로 랜덤 함수[5-8]를 사용한다.

이를 구현하기 위한 과정이 그림 3에 자세히 도시되어 있다. 먼저 a상 펄스를 영 벡터  $V(000)$ 의 범위 내에서의 결정된 랜덤 변위( $T_{RAND1}$ )만큼 위치시킨다. 그리고 b상 펄스를 a상 펄스 범위에서 결정된 랜덤 변위( $T_{RAND2}$ )만큼 위치하면 지령 전압벡터를 충실히 구현하면서 2상 변조 SRP-PWM이 구현된다.

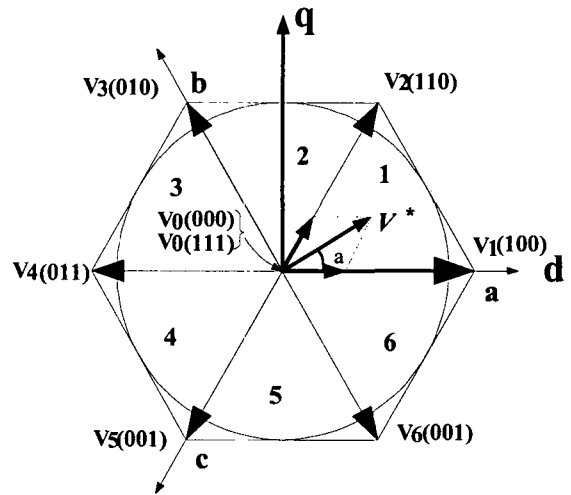


그림 2 2상 변조 SRP-PWM의 전압 벡터도  
Fig. 2 Voltage vector diagram for a two-phase SRP-PWM

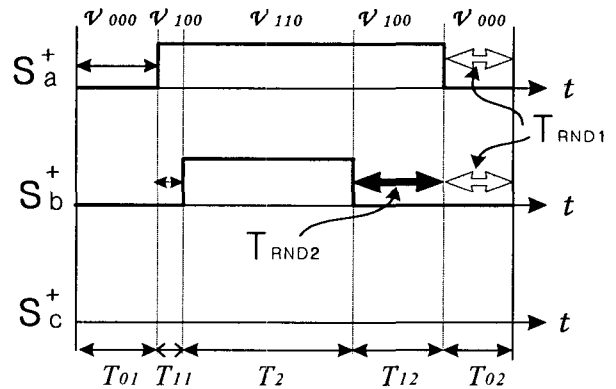


그림 3 2상 변조 SRP-PWM 발생 과정  
Fig. 3 The procedure of a two-phase SRP-PWM generation

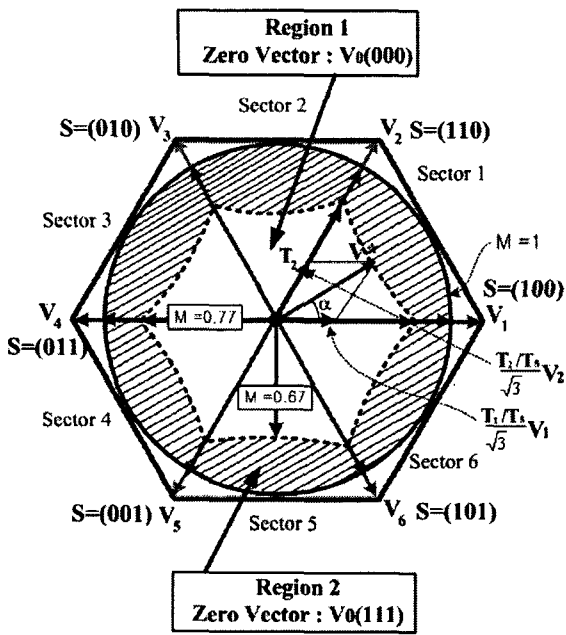
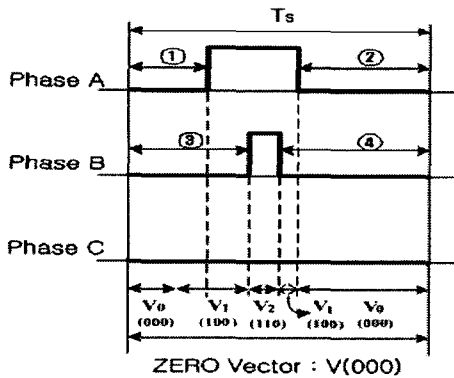


그림 4 2상 변조 DZSRP의 전압 벡터도  
Fig. 4 Voltage vector diagram for a two-phase DZSRP

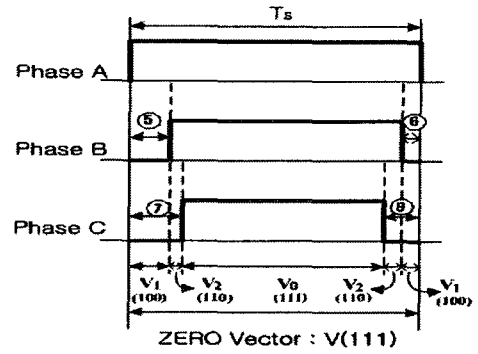
2.2. 제한된 2상 변조 DZSRP기법

본 연구에서는 변조지수 M의 변화에 따라 펄스 배치의 자유도를 높이기 위해, 선택적으로 영 벡터를 취하는 방법을 제시한다. 그림 4는 M에 따라 영 벡터를 V(000)과 V(111)으로 선택하기 위한 전압 벡터도를 나타내고 있다. M이 0.7 미만일 때는 그림 4의 점선 내부인 영역 1에 지령 전압벡터가 형성되며, 이때 영 벡터로는 V(000)을 선택하며, M이 0.7 이상일 때는 점선 육각형과 실선 육각형 사이인 영역 2에 지령 전압벡터가 형성된다. 이때는 영 벡터로 V(111)이 선택된다.

그림 5는 M이 0.7미만인 M=0.3을 선택한 경우, 지령 전압벡터가 그림 4에서 나타낸 공간 벡터도의 1번 섹터에 위치할 때의 펄스 파형을 나타낸 것이다.

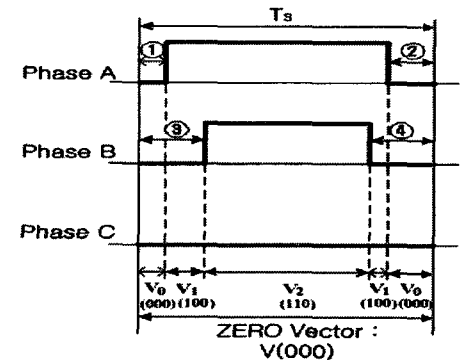


(a) zero vector: V(000)

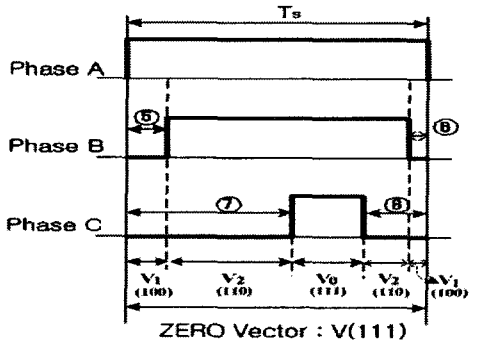


(b) zero vector: V(111)

그림 5 M=0.3인 경우, 펄스모양  
Fig. 5 Pulse patterns in case of M=0.3



(a) zero vector: V(000)



(b) zero vector: V(111)

그림 6 M=0.75인 경우, 펄스모양  
Fig. 6 Pulse patterns in case of M=0.75

그림 5(a)는 영 벡터로 V(000)을 사용하였을 때이고, 그림 5(b)는 영 벡터로 V(111)을 선택하였을 경우이다. 서로 동일한 크기의 벡터를 표현하고 있지만, 펄스의 위치를 랜덤하게 배치할 수 있는 공간은 영 벡터로 V(000)을 선택한 경우가 더 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 영 벡터로 V(000)을 선택하였을 때, 펄스 위치를 자유롭게 이동시킬 수 있는 공간은 ①+②+③+④이며 2T0+T1으로 표현할 수 있다. 공간전압벡터 이론에 의한 선행벡터, 후행벡터 그리고 영 벡터의 인가시간은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_1 &= M \cdot T \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \\ T_2 &= M \cdot T \cdot \sin \alpha \\ T_0 &= T - T_1 - T_2 \end{aligned} \quad (1)$$

(1)의 관계를 이용하여 이를 정리하면, (2)로 다시 표현가능하다.

$$\begin{aligned} 2T_0 + T_1 &= 2T - T_1 - 2T_2 \\ &= T \{2 - M \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) - 2 \cdot M \cdot \sin \alpha\} \end{aligned} \quad (2)$$

한편 영 벡터를 V(111)을 선택하였을 때, 펄스를 자유롭게 배치할 수 있는 공간 ⑤+⑥+⑦+⑧은  $2T_1+T_2$ 이며, 수식으로 표현하면 (3)과 같다.

$$2T_1 + T_2 = M \cdot T \{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) + \sin \alpha\} \quad (3)$$

여기서 펄스 위치 자유도 (2)와 (3)이 서로 같게 되는 조건, 즉  $2T_0 + T_1 = (2T_1 + T_2)$  에서는 영 벡터 V(000)와 V(111)이 서로 동일한 효과를 나타냄을 의미한다. 즉 이 조건을 만족하는 경우에는 영 벡터를 V(000)와 V(111) 중 어느 것을 사용하여도 동일한 스펙트럼 분포를 보임을 의미하며, 이때의 M을 임계 변조지수(Critical Modulation Index)라 하고, 임계 변조지수  $M_c$ 는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} 2T_0 + T_1 - (2T_1 + T_2) &= T [2 - 3M \{ \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) + \sin \alpha \}] \\ &= T \{2 - 3M (\sin \frac{\pi}{3} \cos \alpha - \sin \alpha \cos \frac{\pi}{3} + \sin \alpha)\} \\ &= T [2 - \frac{3}{2} M (\sqrt{3} \cos \alpha + \sin \alpha)] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

(4)를 이용하여  $M_c$ 값을 구해보면 (5)와 그림 7의 결과를 얻을 수 있다. 그림 7에서 임계 곡선보다 지령벡터의 M이 낮으면 영 벡터로 V(000)을 선택하고, 높으면 V(111)를 선택하여 펄스의 랜덤 위치 결정범위가 증가되어 SRP효과는 극대화된다.

$$\begin{aligned} T_1 > T_2 \quad (0^\circ < \alpha < 30^\circ) \text{의 경우} \\ \text{① } \alpha = 0^\circ &\rightarrow M = 0.77 \\ \text{② } \alpha = 30^\circ &\rightarrow M = 0.66 \\ T_1 < T_2 \quad (30^\circ < \alpha < 60^\circ) \text{의 경우} \\ \text{① } \alpha = 30^\circ &\rightarrow M = 0.66 \\ \text{② } \alpha = 60^\circ &\rightarrow M = 0.77 \end{aligned} \quad (5)$$

지령 전압벡터가 1번 섹터에 있으면,  $T_1$ 이  $T_2$ 보다 큰 경

우에는  $\alpha$ 는  $0 \sim 30^\circ$  범위에 있고,  $T_2$ 가  $T_1$ 보다 크게 되면  $\alpha$ 는  $30^\circ \sim 60^\circ$  범위에 있다. 영 벡터로 V(000)과 V(111)중 어떤 것을 선택하여야 펄스 위치 자유도가 더 높을 것인지를 결정하는  $M_c$ 는 (5)와 같이 지령 전압 벡터의 지령각  $\alpha$ 에 의존적이며,  $\alpha$ 에 따라 약 0.66 ~ 0.77의 범위에서  $M_c$ 가 형성된다. 본 연구에서는  $M_c$ 의 최소치인 0.66과  $M_c$ 의 최대치인 0.77의 중간 값인 0.7을  $M_c$ 로 하여 영 전압 벡터를 선택하는 방법을 제시한다.  $M_c$ 의 최소 값은 0.66이며, 지령벡터의 위상이 각각  $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ$  그리고  $330^\circ$ 에서 이루어진다. 또  $M_c$ 의 최대 값은 0.77이며 그때의 위상은  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$  그리고  $360^\circ$ 이다. 그림 6은 M이 0.75 일 때, 영 벡터의 종류에 따라 펄스 배치를 도사한 것으로 영 벡터로 V(111)을 선택했을 경우, 펄스의 자유배치 공간 ⑤+⑥+⑦+⑧은, V(000)을 선택했을 때 얻어진 공간 ①+②+③+④보다 더 크게 됨을 알 수 있다.

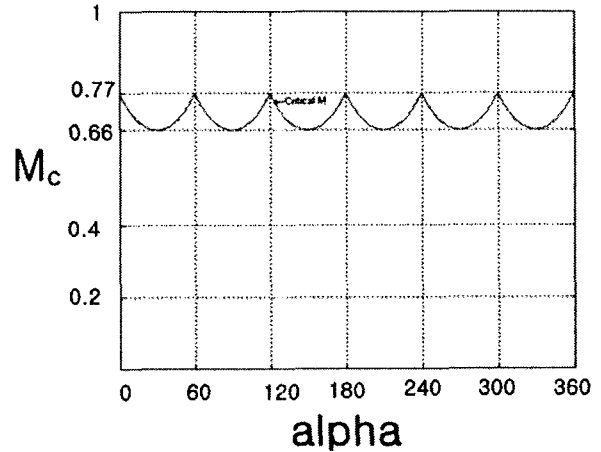


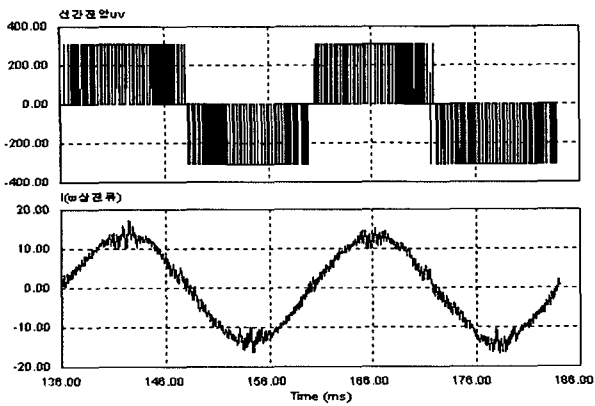
그림 7 α에 따른 임계 변조지수  $M_c$ 의 변화  
Fig. 7 Variation of  $M_c$  in accordance with  $\alpha$

### 3.시뮬레이션 및 실험 결과 고찰

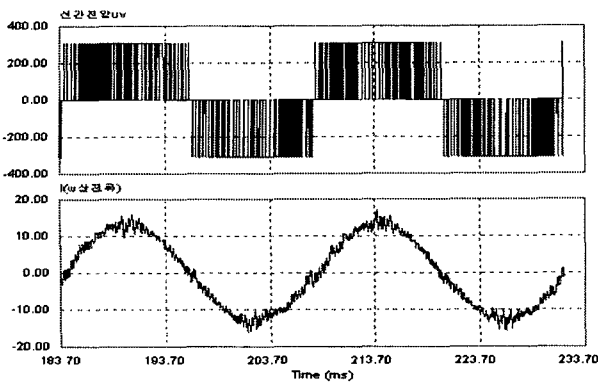
3상 유도 모터를 40Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 무 부하 운전하였을 때, 종전의 2상 변조 SRP-PWM 및 제안된 2상 변조 DZSRP의 모터 전압과 전류 파형 그리고 각각의 고조파 스펙트럼을 M의 변화에 따라 측정하였다.

#### 3.1. 모터의 전압 및 전류 파형

종전의 2상 변조 SRP 및 제안된 2상 변조 DZSRP에 따른 모터 전압 그리고 전류의 파형을 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 제안된 방식과 종전의 방식 모두 약간의 전류 파형의 맥동이 존재한다. 이러한 전류 파형의 맥동은 SRP를 비롯하여 대부분의 RPWM기법의 경우에 발생하는 문제점이다. 파형의 맥동은 모터의 토크 맥동을 유발할 우려가 있으나, 본 연구에서의 주 관심은 토크 맥동 보상 보다는 새로운 2상 RPWM기법을 제시하고 전압과 전류 파형 및 고조파 스펙트럼을 예측하는데 있기 때문에 이점은 크게 고려하지 않아도 된다.



(a) SRP



(b) Proposed DZSRP

그림 8 모터 전압 및 전류의 시뮬레이션 파형

( $f_{sw}=3kHz$ ,  $M=0.9$ )

Fig. 8 Simulated waveforms of motor voltage and current

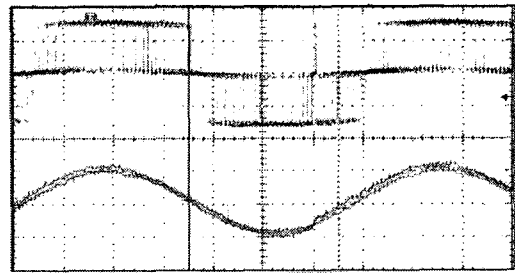
( $f_{sw}=3kHz$ ,  $M=0.9$ )

### 3.2. M의 변화 따른 3-D 전압 스펙트럼

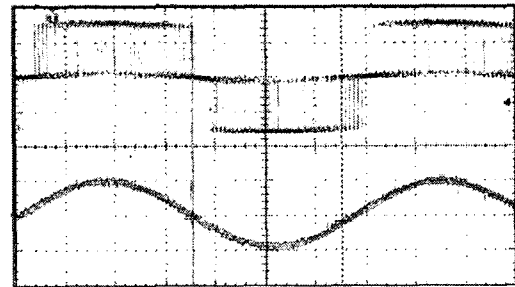
0부터 0.99까지 M을 변화할 때, 각 스위칭 방법에 대한 모터 전압의 3차원적인 시뮬레이션 결과를 그림 10에 나타내었다. 시뮬레이션 조건은  $f=40Hz$ ,  $f_{sw}=3kHz$ 인 경우이다. 영 벡터 V(000)만을 사용하는 종전의 2상 SRP기법은 그림 10(a)에서 보는 바와 같이 M이 0.7보다 낮은 영역에서는 광대역 고조파 분산 특성이 양호하다. 그러나 M이 0.7보다 큰 영역에서는 고조파 스펙트럼의 광대역화 특성은 개선되지 않음을 알 수 있다.

한편 영 벡터로 V(111)을 선택하는 경우,  $M > 0.7$  조건에 대한 고조파 스펙트럼의 광대역화 특성은 그림 10(b)에서 보는 바와 같이 매우 양호하다.

그림 10(c)는 이상에서 언급한 두 영 벡터 방식의 장점을 혼합하여, M이 0.7미만인 영역에서는 V(000)을 취하고 M이 0.7이상에서는 V(111)을 선택한 2상 DZSRP기법의 결과이다. 그림 10(c)에서 보는 바와 같이 M의 전 구간에서 고조파의 광대역화 효과는 다른 방식에 비하여 매우 우수함을 알 수 있다.



(a) SRP

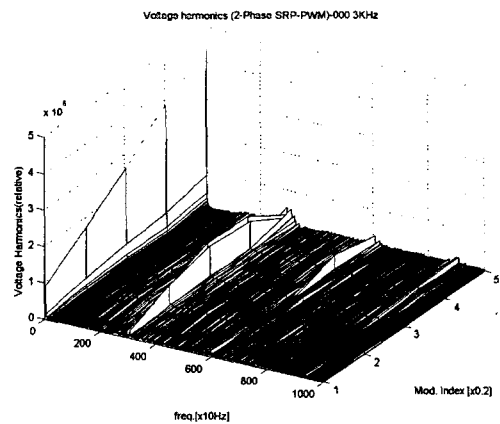


(b) Proposed DZSRP

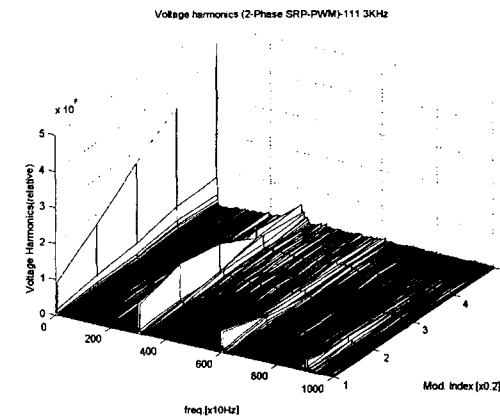
그림 9 측정된 모터 전압 및 전류 파형

( $f_{sw}=3kHz$ ,  $M=0.9$ ,  $200v/div.$ ,  $0.5A/div.$ )

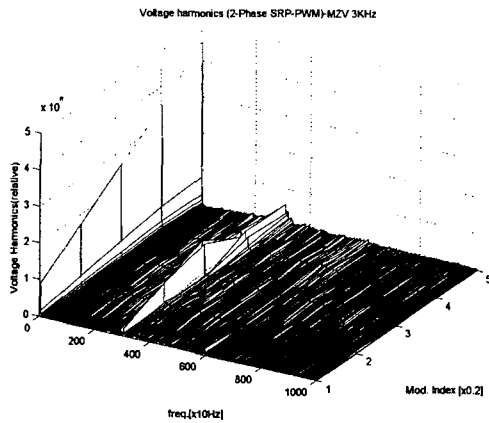
Fig. 9 Measured waveforms of motor voltage and current( $f_{sw}=3kHz$ ,  $M=0.9$ ,  $200v/div.$ ,  $0.5A/div.$ )



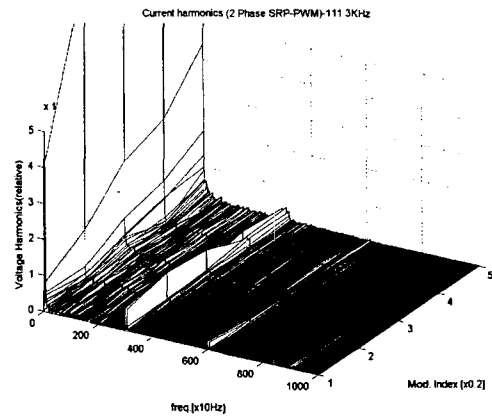
(a) SRP : V(000)



(b) SRP : V(111)



(c) Proposed DZSRP



(b) SRP : V(111)

그림 10 M의 변화에 따른 3-D 전압 스펙트럼 ( $f_{sw}=3kHz$ )

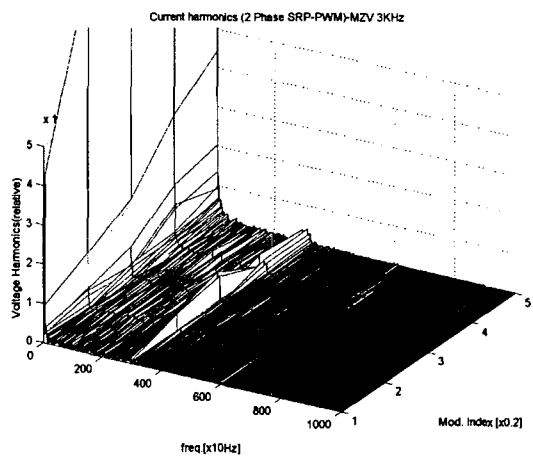
Fig. 10 3-D voltage spectra in accordance with variation of M ( $f_{sw}=3kHz$ )

3.3. M의 변화에 따른 3-D 전류 스펙트럼

그림 11은 그림 10과 동일한 조건 하에서 나타낸 모터 전류의 3차원인 고조파 스펙트럼이다. V(000)를 영 벡터로만 사용하고 있는 종전의 SRP가 M이 0.7보다 높은 영역에서 고조파 분산 효과가 저하되는 문제점을 제안된 방식으로 해결 가능함을 보이고 있다. 또한 그림 11의 3차원 전류 스펙트럼은 그림 10으로 나타낸 3차원 전압 스펙트럼 분포와 거의 동일한 형태를 보이고 있다.

3.4. 모터 전압 스펙트럼

모터 전압에 대한 2차원적인 고조파 스펙트럼을 그림 12부터 그림 17에 나타내었다. 우선 그림 12와 그림 13은 M=0.9인 경우의 스펙트럼 결과로서, 이때 그림 12(a)와 그림 13(a)는 종전의 SRP를 수행한 결과이고, 그림 12(b)와 그림 13(b)는 본 연구에서 제안한 DZSRP를 수행한 경우이다. 시뮬레이션 결과와 실험결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



(c) Proposed DZSRP

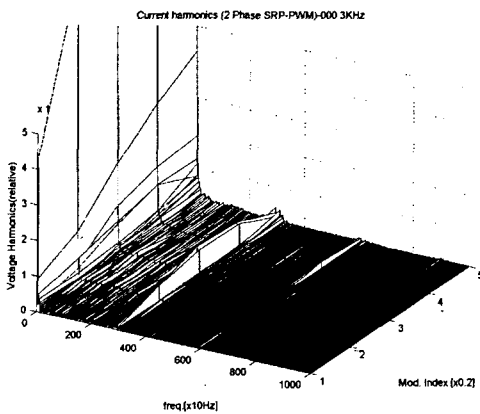
그림 11 M의 변화에 따른 3-D 전류 스펙트럼 ( $f_{sw}=3kHz$ )

Fig. 11 3-D current spectra in accordance with variation of M ( $f_{sw}=3kHz$ )

그림 12(a)와 그림 13(a)의 경우, 3kHz 스위칭 주파수에서 가장 강한 고조파 성분이 있고, 2배의 주파수(6kHz)에 두 번째로 강한 고조파 성분이, 3배의 주파수(9kHz)에서 3번째로 강한 고조파 성분이 존재하는 2상 RPWM의 전형적인 모습을 보이고 있다. 그림 12(b)와 그림 13(b)의 경우 2배 스위칭 주파수 및 3배 스위칭 주파수의 고조파 성분은 백색 잡음의 분포를 보이며, 1배 주파수는 종전의 방법과 비교하여 크기가 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 종전의 방법에서는 조금 밖에 존재하지 않았던 고조파 스펙트럼의 연속치 성분을 제안된 방법에 의해 많이 존재시킬 수 있음을 보여 준다.

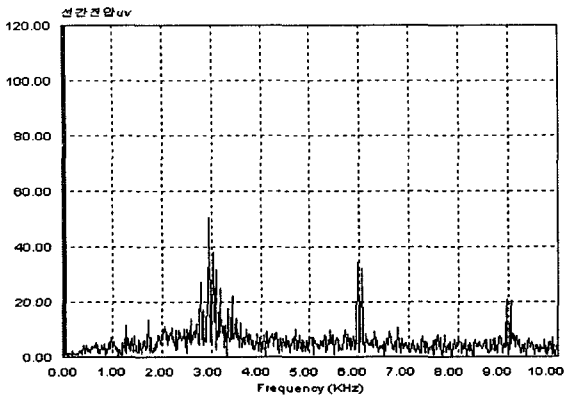
그림 14와 그림 15는 M=0.7인 임계 변조지수  $M_c$ 를 적용한 결과이다. 그림 14와 그림 15에서 보는 바와 같이 영 벡터로 V(000)을 적용한 종전의 방법과 V(111)을 적용한 제안된 방법은 (4)-(5)와 그림 7에서 예측한 바와 같이 거의 유사한 고조파 스펙트럼의 분포를 보이고 있다.

그림 16과 그림 17은 M이 0.7미만인 조건에 부합되는 M=0.4에 대한 전압 스펙트럼의 시뮬레이션 및 실험 결과이

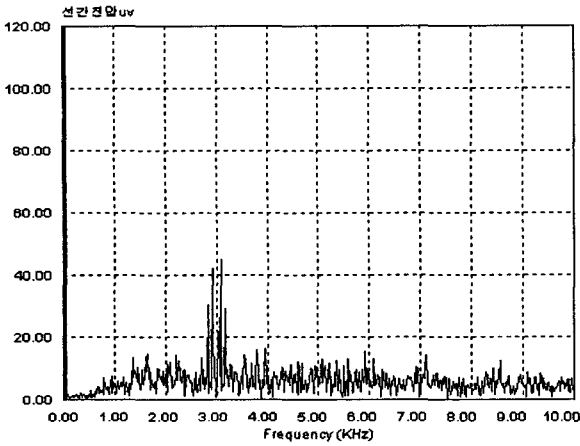


(a) SRP : V(000)

다. 0.4에서는 종전의 방법과 제안된 방법이 영 벡터로 모두 V(000)을 사용하기 때문에 동일한 결과가 나타난다.



(a) SRP



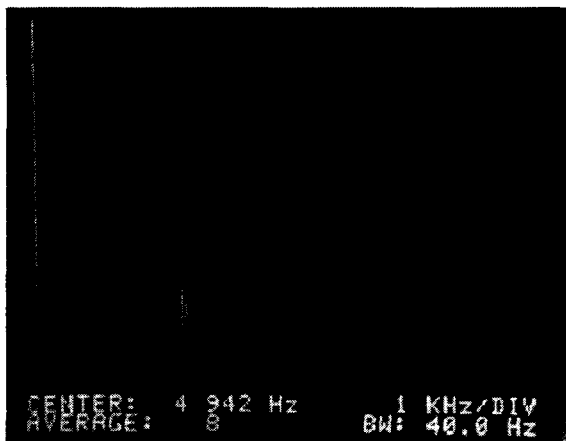
(b) Proposed DZSRP

그림 12 모터 전압의 시뮬레이션 스펙트럼

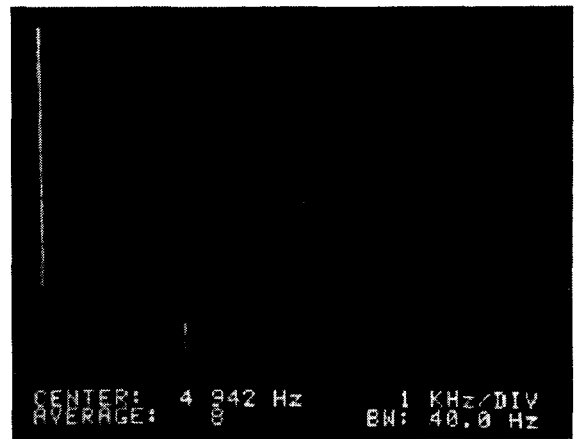
( $f_{sw}=3\text{kHz}$ ,  $M=0.9$ )

Fig. 12 Simulated spectra of motor voltage

( $f_{sw}=3\text{kHz}$ ,  $M=0.9$ )



(a) SRP



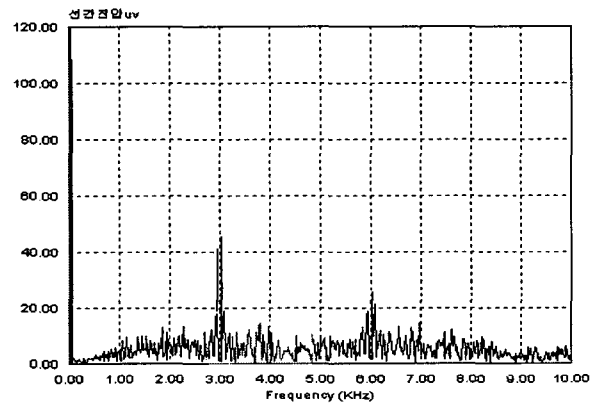
(b) Proposed DZSRP

그림 13 측정된 모터 전압의 스펙트럼

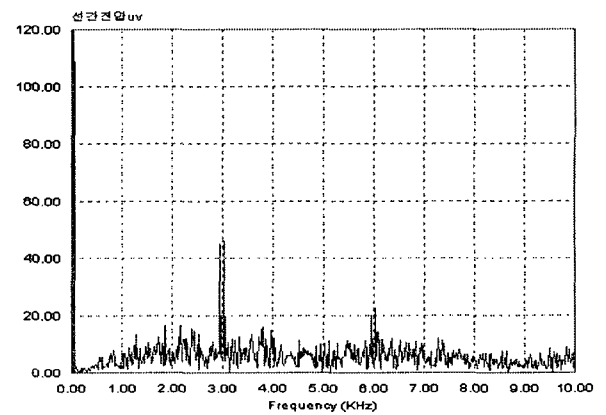
( $f_{sw}=3\text{kHz}$ ,  $M=0.9$ )

Fig. 13 Measured spectra of motor voltage

( $f_{sw}=3\text{kHz}$ ,  $M=0.9$ )



(a) SRP



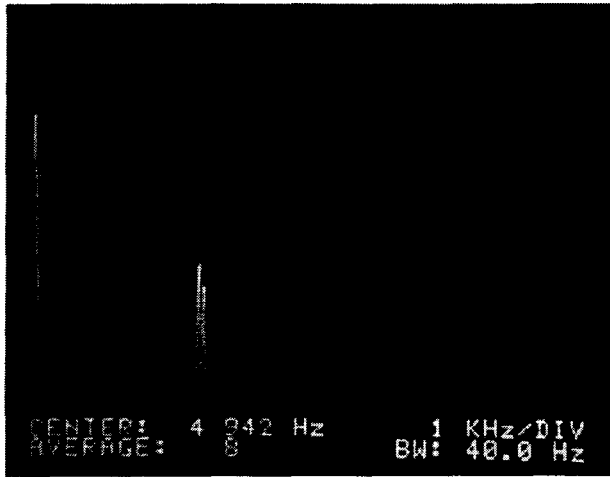
(b) Proposed DZSRP

그림 14 모터 전압의 시뮬레이션 스펙트럼

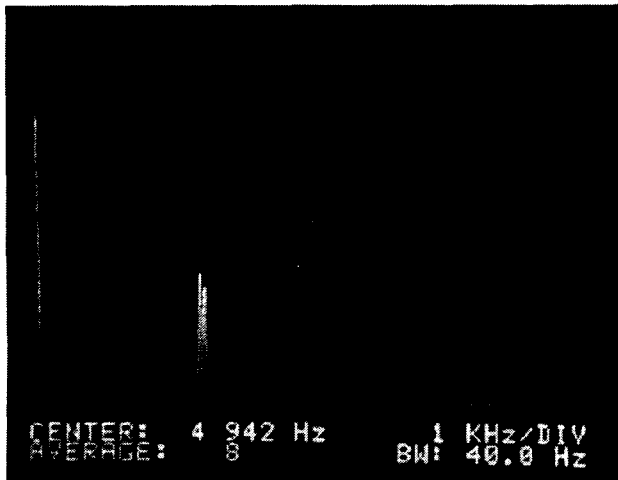
( $f_{sw}=3\text{kHz}$ ,  $M=0.7$ )

Fig. 14 Simulated spectra of motor voltage

( $f_{sw}=3\text{kHz}$ ,  $M=0.7$ )



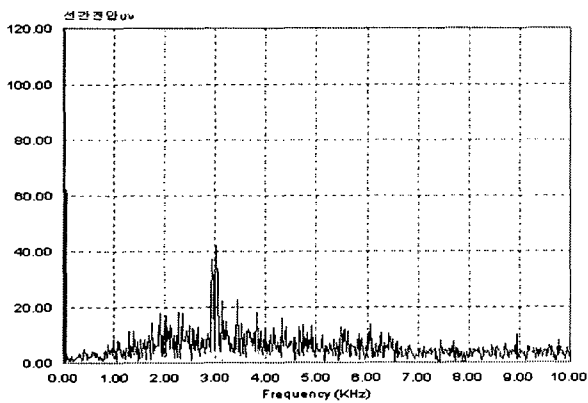
(a) SRP



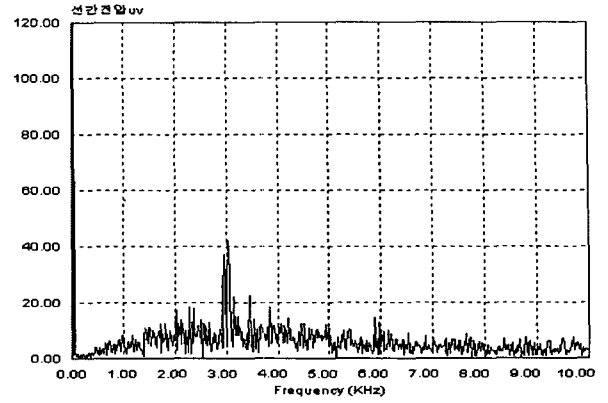
(b) Proposed DZSRP

그림 15 측정된 모터 전압의 스펙트럼  
( $f_{sw}=3\text{kHz}, M=0.7$ )

Fig. 15 Measured spectra of motor voltage  
( $f_{sw}=3\text{kHz}, M=0.7$ )



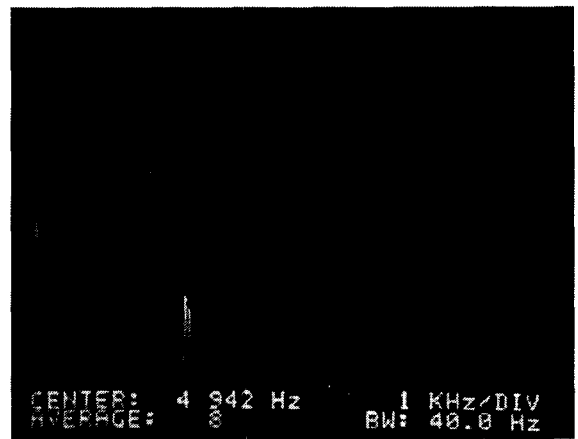
(a) SRP



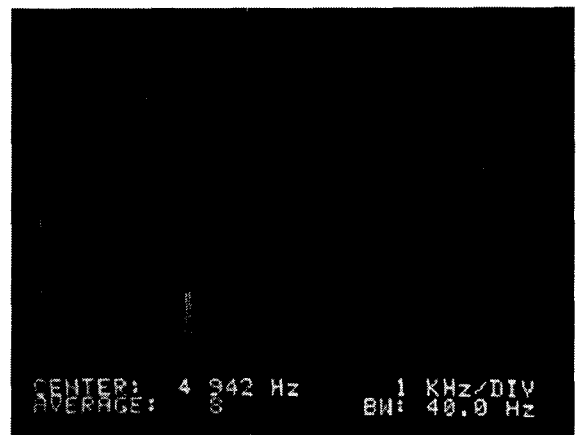
(b) Proposed DZSRP

그림 16 모터 전압의 시뮬레이션 스펙트럼  
( $f_{sw}=3\text{kHz}, M=0.4$ )

Fig. 16 Simulated spectra of motor voltage  
( $f_{sw}=3\text{kHz}, M=0.4$ )



(a) SRP



(b) Proposed DZSRP

그림 17 측정된 모터 전압의 스펙트럼  
( $f_{sw}=3\text{kHz}, M=0.4$ )

Fig. 17 Measured spectra of motor voltage  
( $f_{sw}=3\text{kHz}, M=0.4$ )

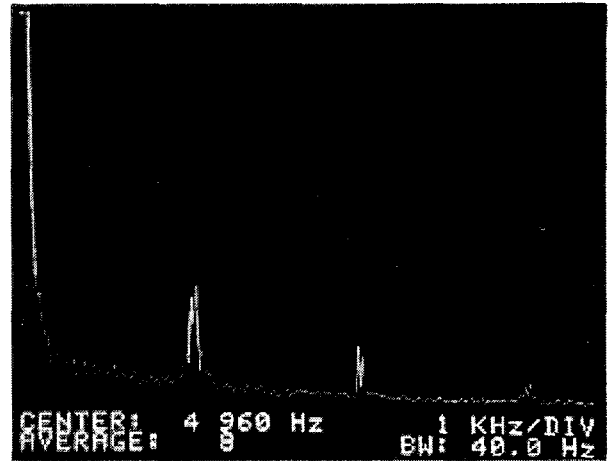


### 3.5. 모터 전류 스펙트럼

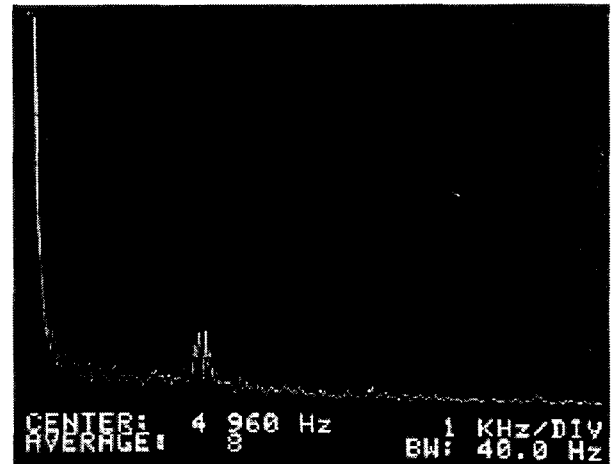
그림 18-그림 23은 모터 전류의 고조파 스펙트럼에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과로서 서로 잘 일치하고 있음 보여 준다. 종전의 SRP와 본 연구에서 제안한 DZSRP의 전류 고조파 스펙트럼은 그림 12-그림 17에서 이미 살펴본 전압의 스펙트럼 분포와 거의 비슷한 형태를 보이고 있다.

그림 18과 그림 19는  $M=0.9$ 인 경우의 전류 스펙트럼 결과인데, 종전의 방법과 비교하여 1 배 스위칭 주파수에서의 고조파는 많이 저감되고 있고 특히 2배, 3배 스위칭 주파수의 고조파는 완전히 광대역화가 되어져 있다.

그림 20과 그림 21은  $M=0.7$ 인 임계 변조지수인 경우의 결과로서 영 벡터로  $V(000)$ 을 적용한 경우와  $V(111)$ 을 적용한 경우, 서로 유사한 스펙트럼의 분포를 보임을 알 수 있다. 그림 22와 그림 23은  $M=0.4$ 인 경우로서 전압 스펙트럼과 유사하게 서로 동일한 결과를 나타내고 있다.



(a) SRP



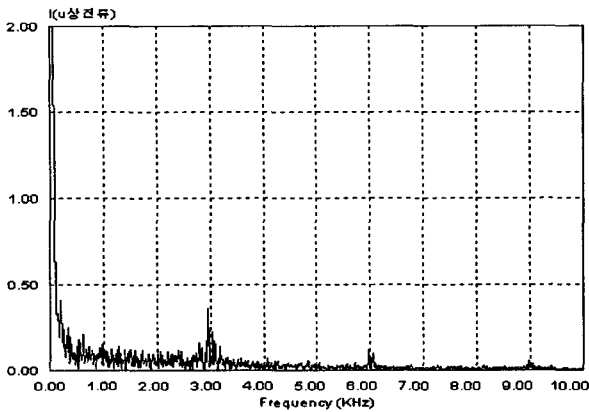
(b) Proposed DZSRP

그림 19 측정된 모터 전류의 스펙트럼

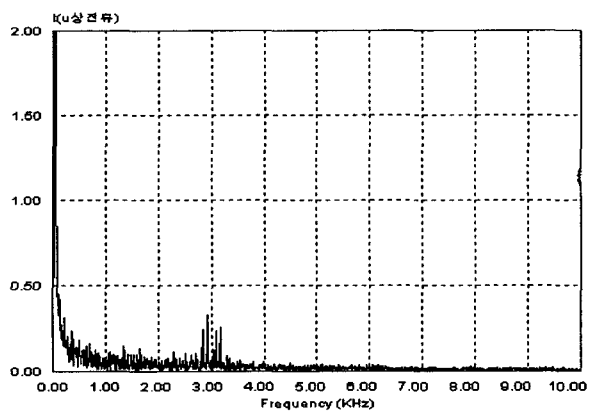
( $f_{sw}=3kHz, M=0.9$ )

Fig. 19 Measured spectra of motor current

( $f_{sw}=3kHz, M=0.9$ )



(a) SRP



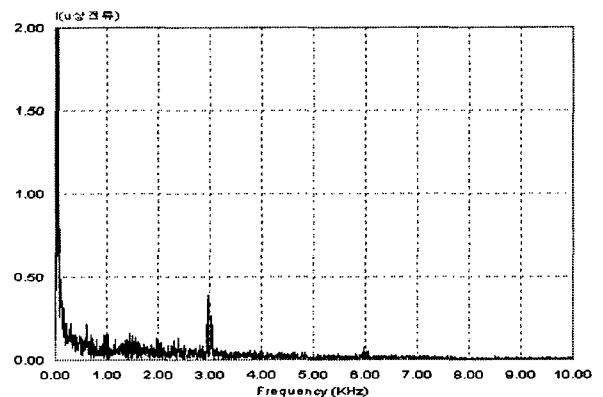
(b) Proposed DZSRP

그림 18 모터 전류의 시뮬레이션 스펙트럼

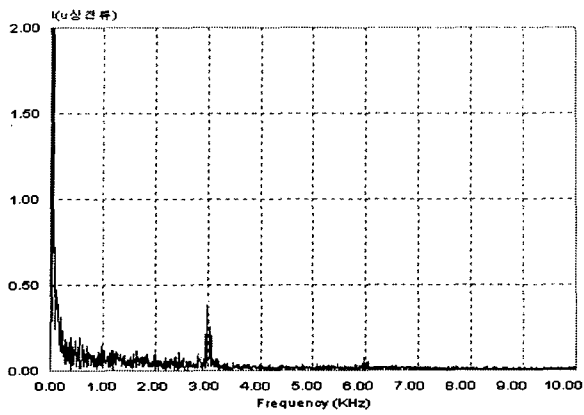
( $f_{sw}=3kHz, M=0.9$ )

Fig. 18 Simulated spectra of motor current

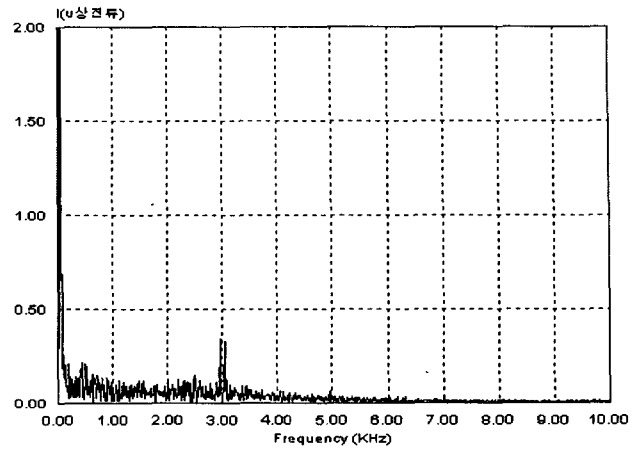
( $f_{sw}=3kHz, M=0.9$ )



(a) SRP

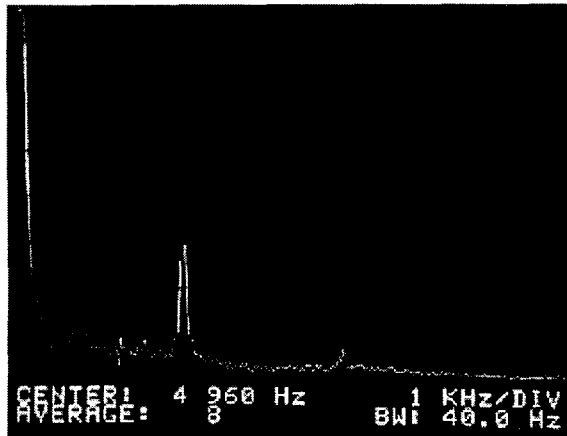


(b) Proposed DZSRP

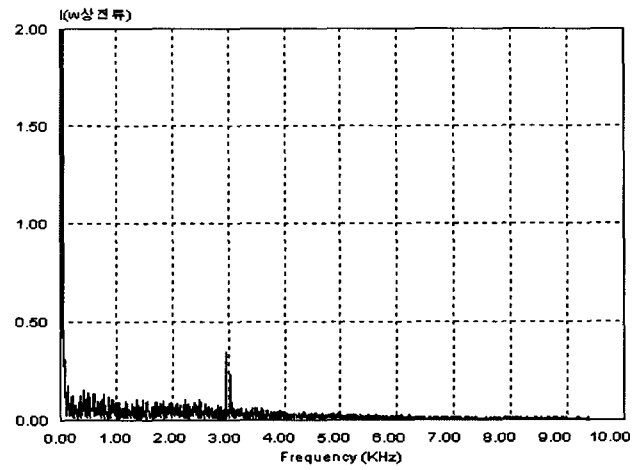


(a) SRP

그림 20 모터 전류의 시뮬레이션 스펙트럼 ( $f_{sw}=3kHz, M=0.7$ )  
 Fig. 20 Simulated spectra of motor current ( $f_{sw}=3kHz, M=0.7$ )



(a) SRP



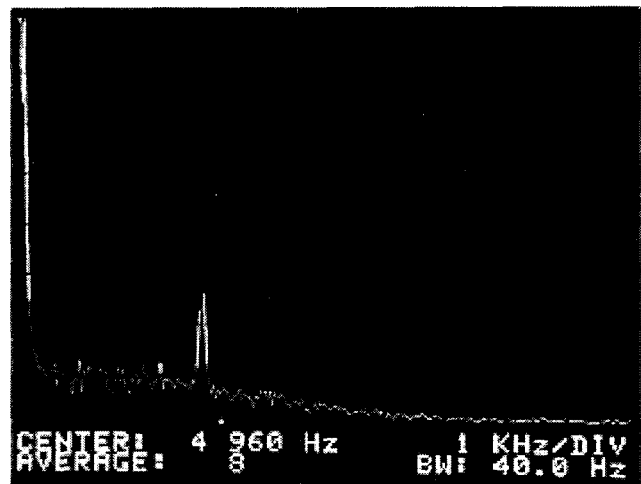
(b) Proposed DZSRP

그림 22 모터 전류의 시뮬레이션 스펙트럼 ( $f_{sw}=3kHz, M=0.4$ )  
 Fig. 22 Simulated spectra of motor current ( $f_{sw}=3kHz, M=0.4$ )

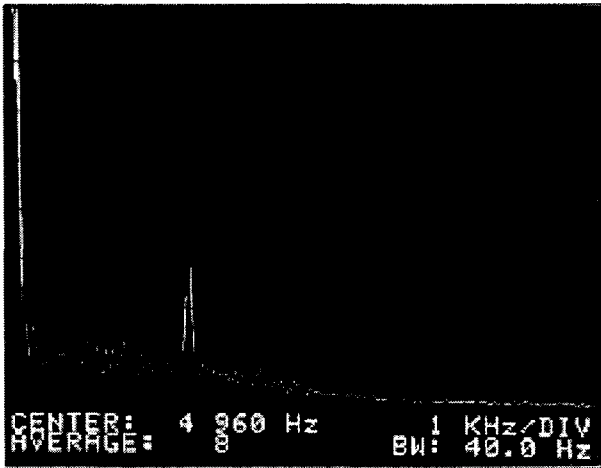


(b) Proposed DZSRP

그림 21 측정된 모터 전류의 스펙트럼  
 ( $f_{sw}=3kHz, M=0.7$ )  
 Fig. 21 Measured spectra of motor current  
 ( $f_{sw}=3kHz, M=0.7$ )



(a) SRP



(b) Proposed DZSRP

그림 23 측정된 모터 전류의 스펙트럼  
( $f_{sw}=3\text{kHz}, M=0.4$ )

Fig. 23 Measured spectra of motor current  
( $f_{sw}=3\text{kHz}, M=0.4$ )

#### 4. 결 론

본 연구에서는 종전의 2상 변조 SRP기법의 문제점을 해결하기 위해, 새로운 2상 변조 DZSRP기법을 제안하였다. 제안된 방법은 변조지수 M이 0.7보다 낮은 영역에서는 영 벡터로 V(000)을 선택하고, 0.7보다 높은 영역에서는 영 벡터로 V(111)을 선택하는 2중 영벡터 선택 모드를 갖고 있다.

본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 하였으며, 3상 유도 모터 구동 시스템을 제작하여 실험을 하였다. 그 결과, 모터 선간전압의 스펙트럼은 M의 전 영역에 걸쳐서, 스펙트럼의 우수한 광대역화 특성을 갖고 있었다. 전류 파형의 관점에서는 제안된 방법과 종전의 방법은 거의 동일하였으나, 전류 스펙트럼의 광대역화 효과는 제안된 방법이 더 우수하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 '전남대 고품질 전기전자 부품 및 시스템 연구센터'의 연구비 지원에 의하여 연구된 결과임.

#### 참 고 문 헌

[1] 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. Ind. Applicat., vol. 30, no. 5, pp.1166-1174, 1994.  
[2] I. Takahashi and H. Mochikawa, "Optimum PWM

waveforms of an Inverter for decreasing acoustic noise of an induction motor", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.22, no.5, pp.828-834, 1986.  
[3] R. L. Kirlin, S. Kwok, S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, "Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position", IEEE Trans. Power Electron., vol.9, no.5, pp.463-471, 1994.  
[4] 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.  
[5] 위석오, 정영국, 임영철, 나석환, "모터구동장치의 가청 스위칭 저감을 위한 2상 및 3상 랜덤 펄스 위치 PWM기법의 성능비교", 전력전자논문집, 제7권, 제3호, pp. 224-236, 2002.  
[6] 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. 195-202, 2002.  
[7] S. H. Na, Y. C. Lim, Y. H. Chang and S. H. Yang, "Reduction of audible switching noise in induction motor drives using random position PWM", ICPE'98(SEOUL), 1998, pp. 316-320.  
[8] 임영철, 나석환, "Random Position PWM을 이용한 유도전동기의 가청 스위칭 소음 저감", 전력전자논문집, 제3권, 제4호, pp. 287-297, 1998.  
[9] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "새로운 2상 랜덤 펄스 위치 PWM기법", 전력전자논문집, 제7권, 제2호, pp. 194 -204, 2002.  
[10] 김희근, 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "새로운 3상 랜덤 펄스 위치 PWM기법에 의한 EPLD기반의 모터 속도제어 시스템", 전력전자학회논문집, 2002, pp. 308-312  
[11] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "2상 및 3상 변조된 각상별 랜덤 펄스위치 펄스폭 변조기법", 전력전자학회논문집, 2002, pp. 347-354.  
[12] 정영국, 위석오, 임영철, 양승학 "고정 스위칭 주파수를 갖는 2상 공간벡터 SRP-PWM기법을 적용한 인버터구동 시스템", 전력전자논문집, 제8권, 제3호, pp. 230-238, 2003.  
[13] S.O. Wi, Y.C. Lim, Y.G. Jung, and S.H. Na, "Separately randomized pulse position PWM technique with fixed switching frequency for power electronics converters", in Proc. ICEE'02, 2002, pp. 780-785.  
[14] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "모터 구동장치의 가청 소음 저감을 위한 새로운 3상 Lead-Lag 랜덤 펄스 위치 PWM기법", 대한전기학회논문집, 51B-7-8, pp. 387-398, 2002.  
[15] 위석오, 정영국, 임영철, "유도모터의 스위칭 소음 저감을 위한 2상 및 3상 RCD-PWM기법의 파워 스펙트럼", 전력전자학회논문집, 9-2-12, pp. 3178-186,

2004.

[16] 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, pp.932-938, 2000.

저 자 소 개



김 정 근(金 汀 根)

1974년 6월 4일생. 2001년 대불대 전기공학과 졸업. 2004년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국 과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 연구원

Tel : 062)530-0656

E-mail : rgbcolor@netian.com



정 영 국(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 컴퓨터정보공학부 조교수.

Tel : 061)469-1263

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



오 승 열(吳 承 烈)

1975년 5월 16일생. 2002년 호남대 전기공학과 졸업. 2004년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 호남대학교 시간강사. 현재 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 연구원

Tel : 062)530-0656

E-mail : osy5334@empal.com



임 영 철(任 永 徹)

1953년 4월 23일생. 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.

Tel : 062)530-1743

E-mail : yclim@chonnam.ac.kr