

멀티 영벡터 선택에 의한 2상 SRP-PWM (MZSRP)기법

김정근^{0*}, 정영국^{**}, 임영철^{*}, 위석오^{***}

*전남대학교 전기공학과, **대불대학교 컴퓨터정보공학부, ***한국천문연구원

2-Phase SRP-PWM (MZSRP)Scheme with the Multi-Zero Vectors Selection

⁰J.G. Kim, ^{**}Y.G. Jung, ^{*} Y.C. Lim, and ^{***}S.O. Wi

^{*}Chonnam National University, ^{**}Daebul University, ^{***}Korea Astronomy Observatory

ABSTRACT

본 연구에서는 종전의 2상 SRP-PWM(Separately Randomized Pulse Position PWM)기법의 문제점을 해결하고자 멀티 영벡터 선택에 의한 2상 SRP-PWM(Multi-Zero Vectors Selection SRP : MZSRP) 기법을 제안하였다. 제안된 2상 MZSRP는 변조지수 M이 0.7보다 크게 되면 영벡터를 V(111)으로 선택하고, 작은 경우에는 V(000)을 선택하는 기법이며, M의 전 영역에 걸쳐서 광대역화된 스펙트럼을 얻을 수가 있다. M의 변화에 따른 모터 전압 및 전류의 스펙트럼을 Matlab/Simulink에 의하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 본 연구의 타당성을 입증할 수 있었다.

1. 서 론

전력전자 변환 시스템에서 출력을 제어하기 위해서 사용되는 PWM기법은, 잡음 전력을 스위칭 주파수의 정수배에 집중시켜 인버터 구동 시스템의 전압 및 전류 고조파와 가청 스위칭 소음을 유발한다^[1, 2]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 낮은 스위칭 주파수를 그대로 유지하면서 스위칭 패턴을 변경하여 가청 스위칭 소음을 완화하는 기법들이 제시되고 있는데, Optimum PWM^[3], RPWM^[1,2,4-7,10] 등이 주목을 받고 있다.

RPWM(random PWM)기법은 PWM 주파수를 랜덤하게 변경하여 소음 전력을 광대역화하는 기법으로, 비교적 최근에 전력전자 분야에서 연구되고 있다. RPWM기법에는 여러 종류가 있으며 특히 랜덤 펄스 위치 PWM기법[1,2,6,7]은 고정 스위칭 주파수를 갖는 펄스의 위치만을 랜덤하게 변경하기 때문에 다른 방식에 비하여 구현이 용이하다는 장점이 있다. 이 방법은 펄스의 위치가 매 변조구간에서 변경되므로 고정된 주파수로 스위칭을 하더라도 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과가 있다. 랜덤 펄스 위치 PWM기법은 RLL(Random Lead-Lag PWM), RCD (Random Centered Distribution PWM), RZV(Random Zero

Vector Distribution PWM), SRP (Separately Randomized Pulse Position PWM) 등으로 구분 가능하다. 랜덤 펄스 위치 RPWM기법은 3상 및 2상으로 구현되고 있으며, 2상은 3상에 비하여 전류 파형이 다소 저하되는 점을 제외하고는 고조파 스펙트럼이나 소음 저감의 특성이 3상 보다 우수하다. 특히 2상은 3상에 비하여 구현이 용이하며 연산 시간을 절약할 수 있다^[8-9].

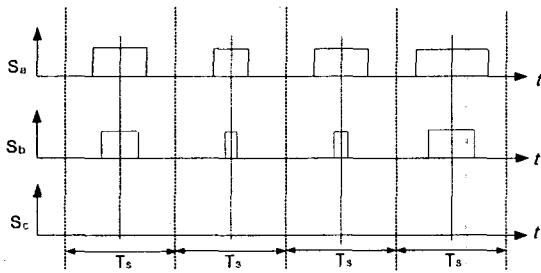
SRP기법^[1,2]은 랜덤하게 배치된 a상의 펄스 범위내에서 나머지 상의 펄스 위치를 서로 독립적으로 랜덤하게 배치할 수 있기 때문에, 고조파 및 소음 저감특성이 다른 방식의 랜덤 펄스 위치 PWM기법에 비하여 우수한 것으로 보고되고 있다. 그러나 이 방법을 2상으로 구현하는 경우^[2], 변조지수 M이 0.8이상으로 되면 고조파 스펙트럼의 광대역화가 만족할 만하게 개선되지 않는다.

따라서 본 연구에서는 이상에서 언급한 종전의 2상 SRP-PWM기법^[2]의 문제점을 해결하기 위해 멀티 영벡터 선택에 의한 2상 SRP-PWM (Multi-Zero Vectors Selection SRP : MZSRP)기법을 제안하였다. 제안된 MZSRP는 변조지수 M이 0.7보다 작게 되면, 종전의 2상 SRP-PWM과 동일하게 V(000)을 영벡터로 사용한다. 그러나 M이 0.7보다 큰 경우에는 V(111)을 영벡터로 선택한다. 2상 SRP-PWM에 영벡터로 V(000)이 적용되는 경우, M이 낮은 영역에서는 스펙트럼의 랜덤 특성이 우수하나, M이 1에 가까울수록 랜덤 특성이 크게 개선되지는 못한다. 그러나 종전의 2상 SRP-PWM의 영벡터로 V(111)이 적용되면, M이 큰 영역에서는 스펙트럼은 랜덤 특성이 우수하게 되며, M이 낮은 영역에서는 이와는 반대 현상이 나타난다. 따라서 이 두가지를 혼합하여 M이 0.7보다 크게 되면, 영벡터를 V(111)으로 선택하고, 낮은 경우에는 V(000)을 선택하게 되면 전 M에 걸쳐서 탁월한 랜덤 특성을 얻을 수 있다. M의 변화에 따른 모터 전압 및 전류의 스펙트럼을 Matlab/Simulink에 의하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 본 연구의 타당성을 입증할 수 있었다.

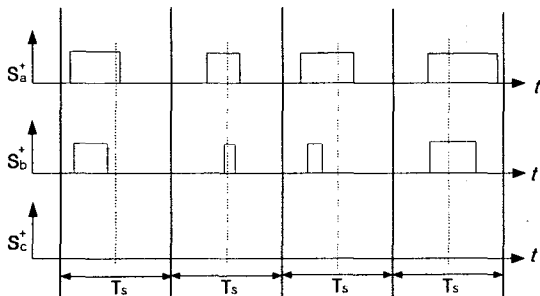
2. 이 론

2.1 2상 SRP-PWM기법^[2]

그림 1(a)는 2상 중앙정렬 SVM(Space Vector Modulation)에 의해 얻어진 펄스를 중앙 정렬하여 4주기 동안을 나타낸 펄스 패턴이다. 여기서 T_s 는 샘플링 주기이다. 그림 1(b)는 2상 SRP-PWM의 스위칭 기법을 나타낸 것이다. 2상 SRP-PWM은 2상 변조 SVM을 기반으로 하기 때문에, 1 샘플링 주기 동안 2개의 상만이 2번의 펄스 교번(commutation)이 이루어져 1 샘플링 주기동안 두 상에만 펄스가 존재하게 된다. 이렇게 얻어진 두개의 펄스는 그 위치를 랜덤하게 정할 수 있는데 각 펄스별로 자유롭게 그 위치를 정할 수 있다. 2상 SRP-PWM은 SVM을 통하여 얻어진 우측 정렬된 두개의 펄스 위치를 좌측으로 어느 정도 변위시킬 것인가를 랜덤하게 지정하는 방법으로 이를 위해 랜덤함수^[1,2]를 사용한다.



(a) center aligned SVM



(b) SRP-PWM

그림 1 2상 공간벡터 PWM
Fig.1 2 Phase Space Vector PWM

2.2 제한된 2상 MZSRP기법

본 연구에서는 변조지수 M 의 변화에 따라 펄스 배치의 자유도를 높이기 위해 선택적으로 영벡터를 취하는 방법을 제시한다. 그림 2는 M 에 따라 영벡터를 $V(000)$ 과 $V(111)$ 으로 선택하기 위한 공간벡터선도를 나타내고 있다. M 이 0.7 미만일 때는 그림 2의 점선 내부인 Region 1에 지령전압벡터가 형성되며, 이때 영벡터로는 $V(000)$ 을 선택하며, M 이 0.7 이상일 때는 점선 육각형

과 실선 육각형 사이인 Region 2에 지령전압벡터가 형성된다. 이때 영벡터로는 $V(111)$ 이 선택된다.

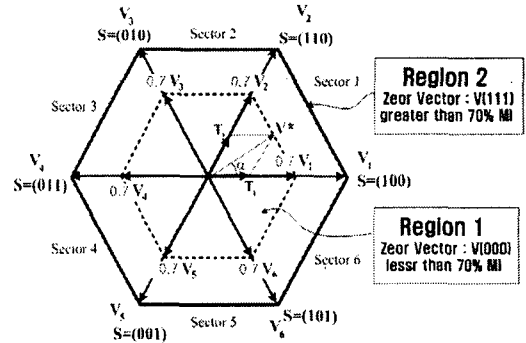


그림 2 RZSRP의 공간 벡터도

Fig.2 Space Vector diagram for the RZSRP

그림 3은 M 이 0.5이하인 경우($M=0.3$), 지령전압벡터가 공간 벡터도의 1번 섹터에 위치할 때의 펄스 파형을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 영벡터로 $V(000)$ 을 사용하였을 때이고, 그림 3(b)는 영벡터로 $V(111)$ 을 선택하였을 경우이다. 서로 동일한 크기와 위상을 갖는 벡터를 표현하고 있지만, 펄스의 위치를 랜덤하게 배치할 수 있는 공간은 영벡터로 $V(000)$ 을 선택한 경우가 더 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 영벡터로 $V(000)$ 을 선택하였을 때, 펄스 위치를 자유롭게 이동시킬 수 있는 공간은 ①+②+③+④이며 $2T_0+T_1$ 으로 표현할 수 있다.

$$T_1 = M \cdot T_s \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right)$$

$$T_2 = M \cdot T_s \cdot \sin \alpha$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2$$

(1)

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

$$2T_0 + T_1 = 2T_s - T_1 - 2T_2$$

$$= T_s \{ 2 - M \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) - 2 \cdot M \cdot \sin \alpha \}$$

(2)

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

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

(3)

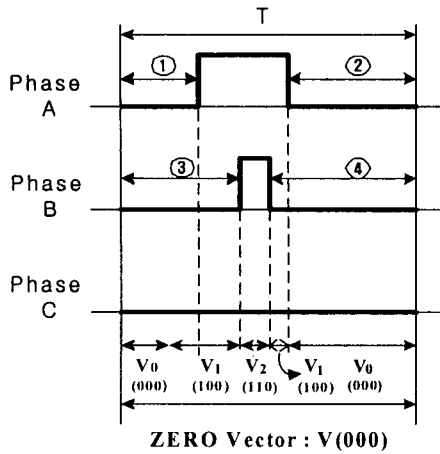
따라서 (2)와 (3)의 차에서 (4)를 구할 수 있다.

$$T_s \{ 2 - 3M \{ \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) + \sin \alpha \} \}$$

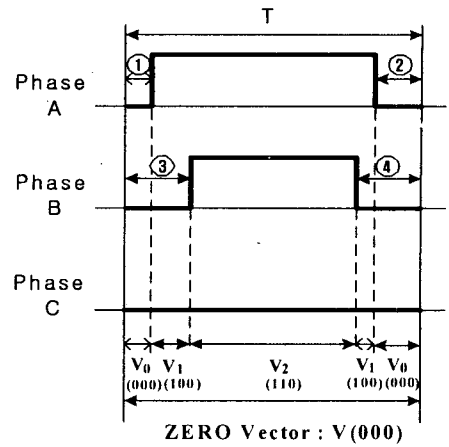
$$= T_s \{ 2 - 3M (\sin \frac{\pi}{3} \cos \alpha - \sin \alpha \cos \frac{\pi}{3} + \sin \alpha) \}$$

$$= T_s \{ 2 - \frac{3}{2} M (\sqrt{3} \cos \alpha + \sin \alpha) \}$$

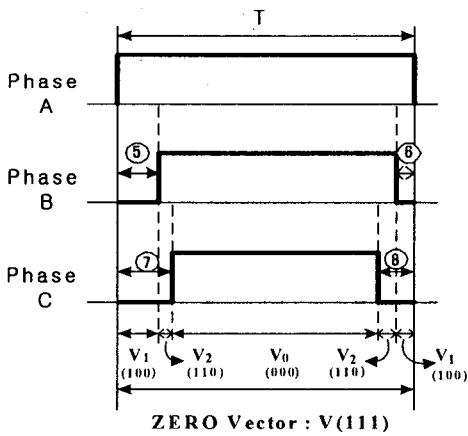
(4)



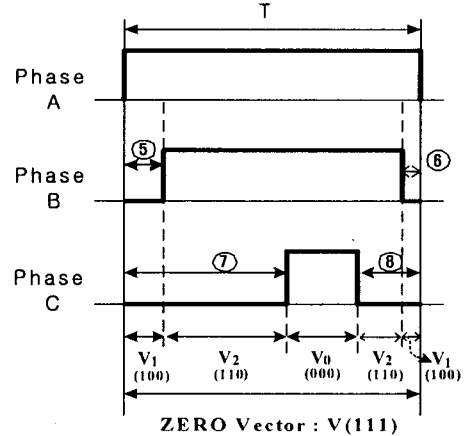
(a) zero vector : $V(000)$



(a) zero vector : $V(000)$



(b) zero vector : $V(111)$



(b) zero vector : $V(111)$

그림3 $M=0.3$ 인 경우, 펄스모양
Fig.3 Pulse patterns in case of $M=0.3$

그림4 $M=0.75$ 인 경우, 펄스모양
Fig.4 Pulse patterns in case of $M=0.75$

여기서 지령전압벡터가 공간벡터도의 1번 섹터에 있으며 T_1 이 T_2 보다 크기 때문에, α 는 $0 - 30^\circ$ 범위에 있다. 영벡터로 $V(000)$ 과 $V(111)$ 중 어떤 것을 선택하여야 펄스 위치 자유도가 더 높을 것인지를 결정하는 임계 변조지수는 지령전압벡터의 지령각 α 에 의존하며, α 에 따라 약 0.67 - 0.77의 범위에서 임계 변조지수가 형성된다. 예를 들어, α 가 0일 때, 임계 변조지수 0.67보다 큰 변조지수의 지령벡터가 필요할 때는 영전압 벡터로 $V(111)$ 을 선택하고, 0.67보다 작을 때는 $V(000)$ 을 선택하게 되면 펄스 위치의 자유도가 높은 펄스 배치가 구할 수 있다. 그림 4는 $M=0.75$ 일 때 영벡터의 종류에 따라 펄스 배치를 도기한 것이다. 영벡터로 $V(111)$ 을 선택했을 경우, 펄스의 자유배치공간 ⑤+⑥+⑦+⑧은, $V(000)$ 을 선택했을 때 얻어진 공간 ①+②+③+④보다 더 크게 됨을 볼 수 있다. 본 연구에서는 $M=0.7$ 을 기준으로 영전압 벡터를 선택하는 방법을 제시한다.

3. 시뮬레이션 모델

본 연구에서 제안된 2상 MZSRP에 의한 모터 전압 및 전류 스펙트럼의 분포를 예측하기 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5는 시뮬레이션 주 모델을 나타내고 있다. 전체 시스템을 위한 모델은 공간벡터 변조 부, 펄스 랜덤화 부, PWM 패턴 발생 부, IPM 인버터 부, 유도모터 부로 구성되어 있다. 유도모터 부는 3상/2상 변환부, d축 연산 부, q축 연산 부, 회전자 부 등으로 구성되어 있다. 이중 공간벡터 변조 부, 펄스 랜덤화 부 및 PWM 패턴 발생 부는 블록도 내부에 기본 제공되는 라이브러리 블록 대신에 S-Function을 사용하여 직접 코딩하였다.

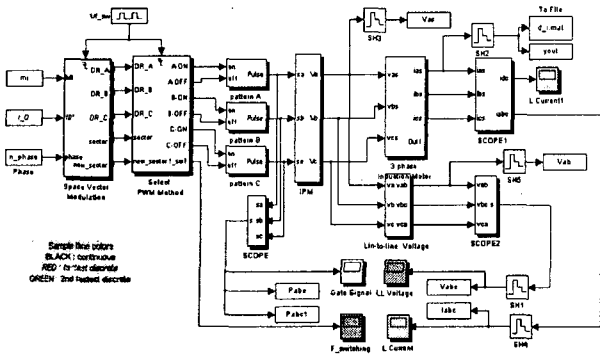


그림 5 시뮬레이션의 주 모델
Fig. 5 Main model of simulation

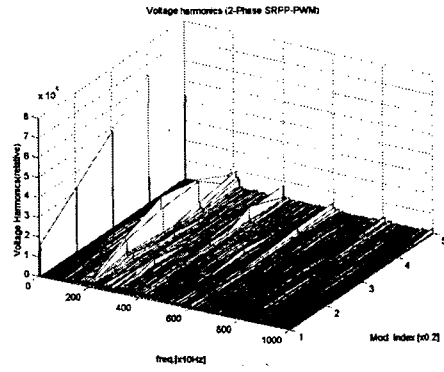
4. 결과 및 고찰

그림 6은 스위칭 주파수 $f_{sw}=2kHz$, 기본 주파수 $f=40Hz$, 변조지수 M 을 0에서 1까지 변화하는 경우에 대한 모터 전압의 스펙트럼을 3차원으로 나타낸 것이다. 우선 그림 6(a)는 영벡터로 $V(000)$ 만을 단일 선택한 종전의 2상 SRP-PWM의 전압 스펙트럼이며, 그림 6(b)는 $V(111)$ 을 단일 선택한 결과이다.

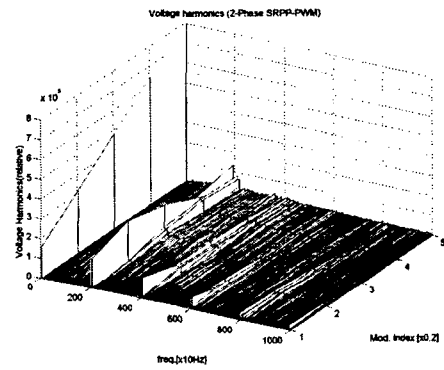
2상 SRP-PWM에 영벡터로 $V(000)$ 이 단일 적용되는 경우를 살펴보면, M 이 낮은 영역에서는 고조파 광대역화 특성은 우수하나, M 이 1에 가까워질수록 스위칭 주파수의 정수배인 고조파가 나타난다. 영벡터로 $V(111)$ 을 단일 선택한 그림 6(b)를 살펴보면 그림 7(a)와는 정반대로 M 이 큰 영역에서는 스펙트럼의 랜덤 특성이 우수하고, M 이 작아질수록 스위칭 주파수의 정수배 고조파가 두드러진다. 그림 6(c)는 본 연구에서 제안된 2상 MZSRP기법이 적용된 3차원 전압 고조파 스펙트럼을 보여주고 있다. M 이 0.7보다 크면 영벡터로 $V(111)$ 을 선택하고, M 이 0.7보다 작은 영역에서는 $V(000)$ 을 선택하게 되면, 전체 M 영역에서 스펙트럼의 광대역화 특성을 얻을 수 있게 됨을 알 수 있다.

그림 7은 $M=0.8$ 일 때, 모터의 3상 전압 파형이며, 그림 8은 모터 전압의 스펙트럼을 보이고 있다. $V(000)$ 을 M 의 전 구간에서 걸쳐 단일 선택하고 있는 그림 8(a)에서와 같이, 종전의 2상 SRP-PWM은 $M=0.8$ 에서는 고조파 스펙트럼의 광대역화가 양호하지 않다. 이는 그림 6(a)에서 이미 살펴본 바와 같이, M 이 큰 영역에서는 스위칭 주파수 $f_{sw}=2kHz$ 의 정수배 고조파가 나타나기 때문이다. 그러나 본 연구에서 제안된 2상 MZSRP는 그림 8(b)에서와 같이 스위칭 주파수의 강한 고조파가 현저하게 감소하고 있으며, 또한 전 구간에서의 고조파 성분은 특정 주파수에 고정되지 않고 넓은 영역에 고루 분포하고 있다. 그림 9는 $M=1$ 인 경우의 전압 고조파 스펙트럼이다. $M=1$ 인 경우라도 $M=0.8$ 의 결과와 유사하게, 전압 고조파 성분들이 모두 광대역화 됨을 알 수

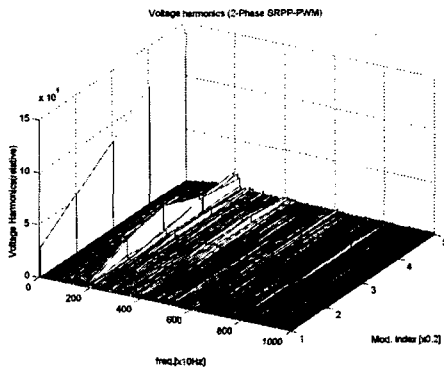
있다. 그림 10은 $M=0.8$ 인 경우, 모터 전류의 파형이다. 그림 10에서와 같이, 종전의 2상 SRP-PWM기법과 제안된 2상 MZSRP기법의 모터 전류의 파형은 동일하다. 그러나 그림 11로 나타낸 전류 고조파 스펙트럼을 살펴보면, 제안된 MZSRP기법은 종전의 방법에 비해 고조파 성분은 특정 주파수에 고정되지 않고 넓은 영역에 고루 분포하고 있다.



(a) SRP-PWM : V(000)

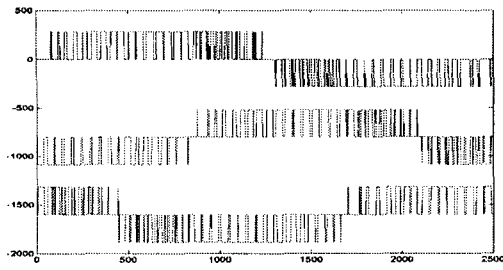


(b) SRP-PWM : V(111)

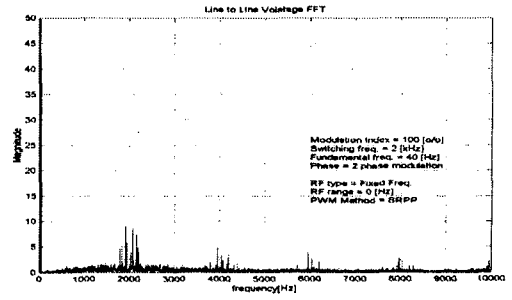


(c) proposed MZSRP

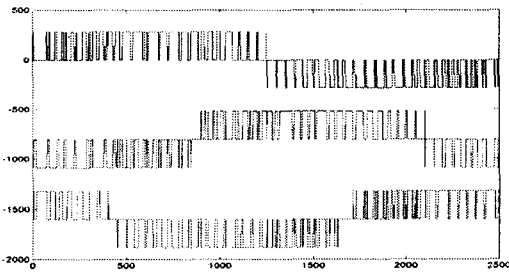
그림6 변조지수 변화에 따른 3차원 전압스펙트럼
Fig.6 3-D voltage spectrum in accordance with variation of modulation index



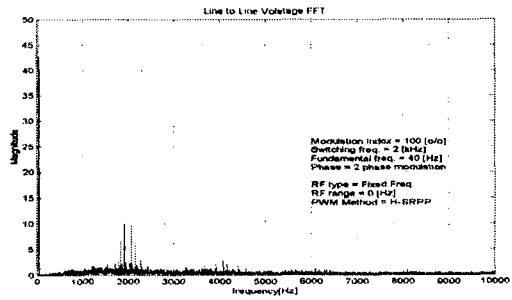
(a) SRP-PWM



(a) SRP-PWM



(b) proposed MZSRP



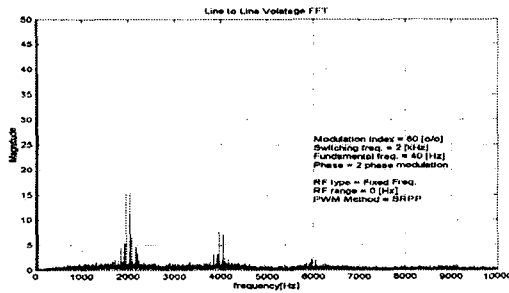
(b) proposed MZSRP

그림7 모터전압 파형(M=0.8)

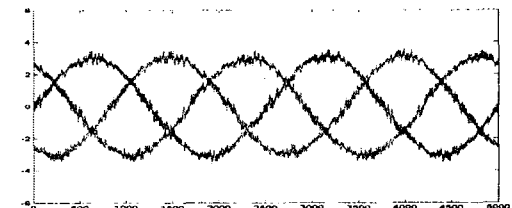
Fig.7 Waveforms of motor voltage(M=0.8)

그림9 모터전압의 스펙트럼(M=1)

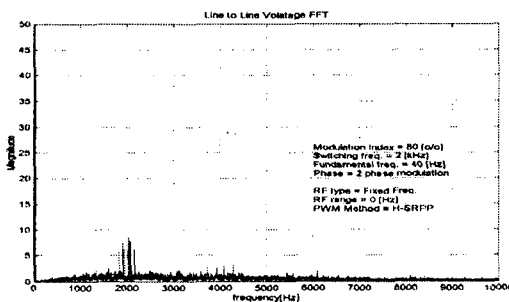
Fig.9 Spectrum of motor voltage(M=1)



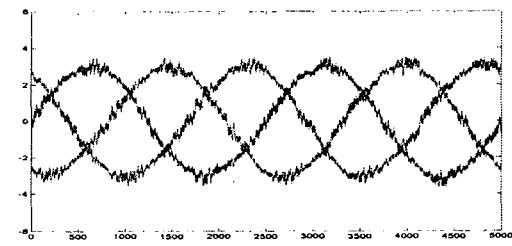
(a) SRP-PWM



(a) SRP-PWM



(b) proposed MZSRP



(b) proposed MZSRP

그림8 모터전압의 스펙트럼(M=0.8)

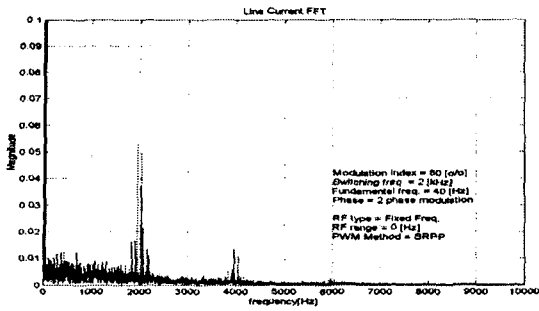
Fig.8 Spectrum of motor voltage (M=0.8)

그림10 모터전류의 스펙트럼(M=0.8)

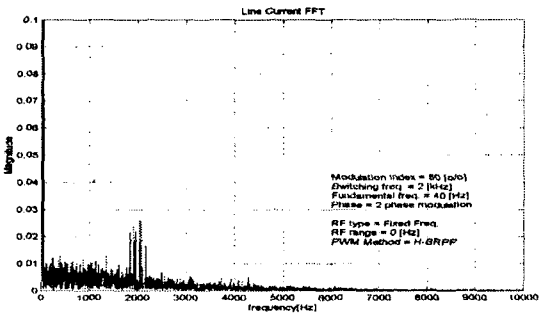
Fig.10 Spectrum of motor current(M=0.8)

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] S.O. Wi, Y.C. Lim, Y.G. Jung and S.H. Na, "A New Two-Phase PWM Scheme with Separately Randomized Pulse Position", in Con. Rec. of ICEE '02, pp. 786-791, 2002.
- [3] 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.
- [4] J.L. Shyu, T.J. Liang and J.F. Chen, "Digitally-controlled PWM inverter modulated by multi-random technique with fixed switching frequency", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 148, no.1, January, pp. 62-68, 2001.
- [5] V. Blasko, M.M. Bech, F. Blaabjerg and K. Pedersen, "A New hybrid random pulse width modulator for industrial drives", in Con. Rec. of IEEE APEC '00, pp. 932-938, 2000.
- [6] 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.
- [7] M.M. Bech, J.K. Pedersen and F. Blaabjerg, "Random modulation techniques width fixed switching frequency for three-phase power converters", in Con. Rec. of IEEE PESC '99, pp. 544-551, 1999.
- [8] S. Halasz and B.T. Huu, "Two-phase PWM technique for inverter fed ac drives", in Con. Rec. of IEEE IECON '97, pp. 688-693, 1997.
- [9] Y.S. Lai, H.C. Huang and C.M. Young, "A New random inverter control technique for motor drive", in Con. Rec. of IEEE APEC '98, pp. 101-107, 1998.
- [10] 위석오, 정영국, 임영철, 양승학 "2상 변조된 랜덤 Lead-Lag PWM기반의 저 스위칭 소음 유도모터 구동 시스템", 전력전자학회 논문지 제8권 제2호, pp. 151-163, 2003.



(a) SRP-PWM



(b) proposed MZSRP

그림11 모터전류의 스펙트럼(M=0.8)
Fig.11 Spectrum of motor current(M=0.8)

5. 결 론

본 연구에서는 중전의 2상 SRP-PWM기법의 문제점을 해결하기 위해 새로운 2상 MZSRP기법을 제안하였다. 제안된 방법은 변조지수 M이 낮은 영역에서는 영벡터를 V(000)로 선택하고, M이 높은 영역에서는 영벡터를 V(111)로 선택하는 다중 영벡터 선택법에 기반을 두고 있다. 본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 제안된 MZSRP 기법을 기반으로 한 모터 구동 시스템을 시뮬레이션 하였다. 그 결과, 모터 전압의 스펙트럼은 M의 전 영역에 걸쳐서 스위칭 주파수를 제외한 전 주파수 영역에서 우수한 광대역 특성을 갖고 있었다. 전류 파형의 관점에서는 제안된 방법과 중전의 방법은 거의 동일하였으나, 전류 스펙트럼의 광대역화 효과는 제안된 방법이 더 우수하였다. 다음의 연구과제로는 실험 시스템을 구성하여 제안된 2상 MZSRP기법의 타당성을 검증하고, 모터 구동 장치로부터 발생하는 가청 소음 저감의 효과를 확인하고자 한다.

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