

변조지수에 따라 영벡터를 선택하는 2상 RCD-PWM (MZRCDD)기법의 전압 및 전류 파워 스펙트럼

오승열*, 정영국**, 임영철*, 위석오***

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

Power Spectrum of 2-Phase MZRCDD Scheme Selecting the Zero Vectors in Accordance with Modulation Index

*S.Y. Oh, **Y.G. Jung, * Y.C. Lim, and ***S.O. Wi

*Chonnam National University, **Daebul University, ***Korea Astronomy Observatory

ABSTRACT

영벡터로 V(000)이 적용된 종전의 2상 RCD-PWM (Random Centered Distribution PWM)은 변조지수 M이 1에 가까울수록, 모터 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화 효과가 증가되지 않는 단점이 있다. 본 연구에서는 M에 따라서 영벡터를 선택하는 2상 MZRCDD(Multi-Zero Vectors RCD)기법을 제안하였다. 2상 MZRCDD기법은 M이 0.7보다 크게 되면 영벡터로 V(111)을 선택하고, 작은 경우에는 V(000)을 선택하여, M의 전 영역에 걸쳐서 스펙트럼의 광대역화를 이룰 수 있는 방법이다. 본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 Matlab/Simulink에 의하여 시뮬레이션을 수행하였다. M의 변화에 따른 모터 전압 및 전류의 스펙트럼을 검토하였으며, M과 무관하게 모터 전압 및 전류 스펙트럼이 광대역으로 선형화된 분포를 얻을 수 있었다.

1. 서 론

최근 들어 스위칭 주파수의 고조파를 저감시키는 PWM 방법으로써, PWM의 스위칭 주파수를 특정하게 고정시키지 않고 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어 지도록 하는 RPWM(Random PWM)에 대한 연구가 진행중이다. RPWM은 인버터의 출력전압과 전류에 포함되어 있는 고조파 스펙트럼을 넓은 주파수 영역으로 고루 분산시켜서 모터의 가청 스위칭 소음이 사람에게 주는 불쾌감을 저감시키는 PWM방식이다^[1-3].

RPWM기법 중 랜덤 펄스 위치 PWM기법^[4-7]은 고정된 주파수로 스위칭을 하더라도 펄스의 위치가 매 변조 구간에서 변경되므로 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖고 있으며, 구현이 용이하다는 장점이 있다. 이 방식은 RLL(Random Lead-Lag PWM), RCD (Random Centered Distribution PWM), RZV(Random Zero Vector Distribution PWM), SRP (Separately Randomized Pulse Position PWM)등이 있다. 특히 RCD-PWM^[5]은 중앙 정렬된 3상 또는 2상 펄스를 펄스간 중앙 정렬은 유지하면서 펄스의 중앙선을 변조

구간에서 랜덤하게 선택하는 방법이다. 이 방법은 전압 및 소음 스펙트럼의 광대역화에 효과가 있으며, 랜덤 펄스 위치 PWM의 가장 초기 버전인 RLL-PWM에 비하여 랜덤 자유도가 넓으며 전류 리플도 향상된다. 그러나 RCD를 2상으로 구현하는 경우, 변조지수 M이 0.8보다 크게 하면, 전압 및 소음 스펙트럼은 특정 주파수에 고정되지 않고 넓은 영역에 고루 분포하는 랜덤 특성을 잘 보이지 못하게 된다.

본 연구에서는 변조지수 M에 따라서 영벡터를 선택하는 2상 MZRCDD(Multi-Zero Vectors RCD)기법을 제안하였다. 제안된 MZRCDD는 변조지수 M이 0.7보다 작은 경우에는 영벡터로 종전과 같은 V(000)를 사용하고 있다. 그러나 M이 0.7보다 크게 되면 V(111)을 영벡터로 선택한다. 영벡터로 V(000)이 적용된 종전의 2상 RCD-PWM은 M이 0.8보다 작은 영역에서의 모터 전압 및 소음 스펙트럼의 광대역화 효과는 양호하다. 그러나 M이 1에 가깝게 될수록, 스펙트럼의 랜덤화 효과가 증가되지 않는 단점이 있다. 한편 영벡터로 V(111)이 2상 RCD-PWM에 적용되면, M이 큰 영역으로 갈수록 랜덤 특성은 우수하게 되고, M이 낮은 영역에서는 이와는 반대 현상이 나타난다. 따라서 이 두가지 영벡터를 혼합하여 M이 0.7보다 크면 영벡터로 V(111)을 선택하고 적은 경우에는 V(000)을 선택하게 되면, M의 전 영역에 걸쳐서 현격한 스펙트럼의 광대역화 효과를 얻을 수 있다.

본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 Matlab/Simulink에 의하여 시뮬레이션을 수행하였다. M의 변화에 따른 모터 전압 및 전류의 스펙트럼을 검토하였으며, M의 전 영역에서 모터 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화 효과를 얻을 수 있었다.

2. 영벡터 선택에 의한 2상 MZRCDD기법

본 연구에서는 변조지수 M의 변화에 따라 펄스 배치의 자유도를 높이기 위해 선택적으로 영벡터를 취하는

방법을 제시한다. 그림 1은 M에 따라 영벡터를 $V(000)$ 과 $V(111)$ 을 선택하는 경우의 공간 벡터도를 나타낸다. M이 0.7 미만일 때는 그림 1의 점선 내부인 Region 1에 지령전압벡터가 형성되며 이때 영벡터로는 $V(000)$ 을 선택하며, M이 0.7 이상일 때는 점선 육각형과 실선 육각형 사이인 Region 2에 지령전압벡터가 형성된다. 이때 영벡터는 $V(111)$ 이 선택된다.

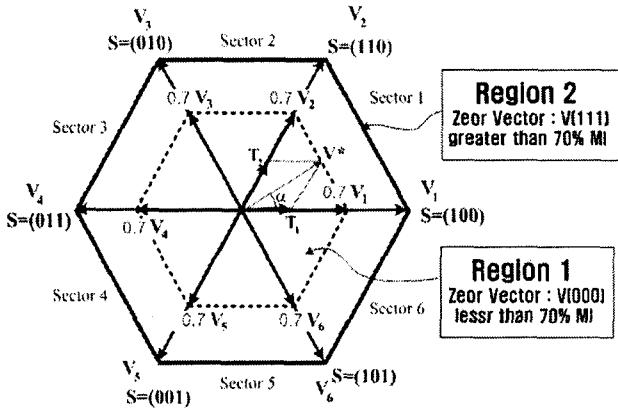


그림1 RZRC의 공간 벡터도
Fig.1 Space Vector diagram for the RZRC

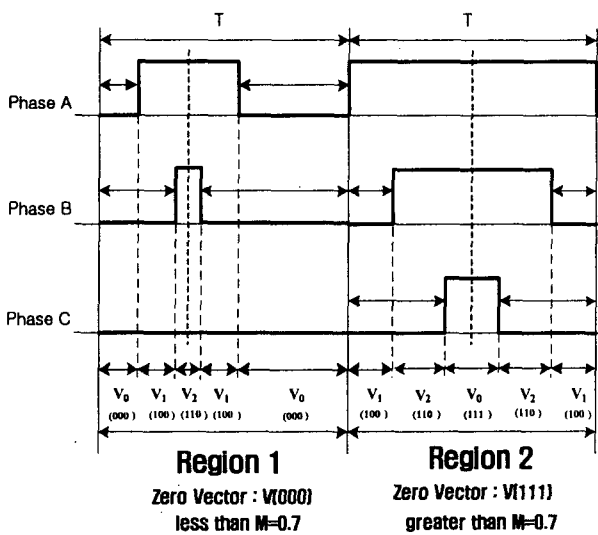
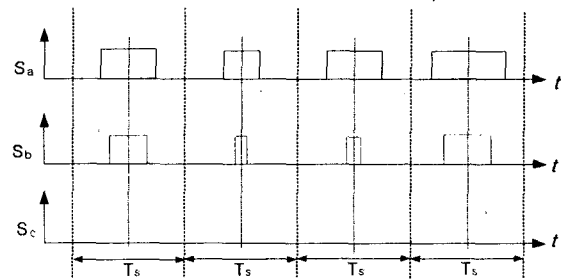


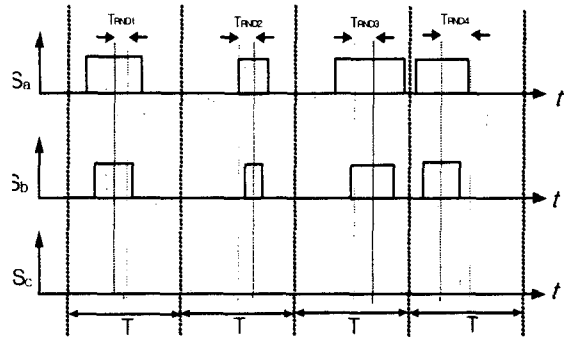
그림2 영벡터 선택에 따른 MZRCD 펄스모양
Fig.2 MZRCD pulse patterns in accordance with the zero vectors selection

그림 2는 M과 영벡터 선택에 따른 제안된 방법의 펄스모양을 나타내고 있다. 그림 2의 Region 1은 $M=0.7$ 이하인 경우, 영벡터를 $V(000)$ 으로 선택하였을 때의 펄스모양이며, 지령전압벡터가 공간 벡터도의 1번 섹터에 위치할 때이다. 그림 2의 Region 2는 $M=0.7$ 이상이 되어 영벡터로 $V(111)$ 을 선택하였을 때이다. 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. 영벡터로 $V(000)$ 과 $V(111)$ 중 어떤 것을 선택하여야 펄스 위치 자유도가 더 높을 것인지를 결정하는 임계 변조지수는 지령전압벡터의 지령각 α 에 의존적이며, α 에 따라 약 0.67 - 0.77의 범위에서 임계 변조지수가 형성된다. 본 연구에서는 $M=0.7$ 을 기준으로 영전압 벡터를 선택하는 방법을 제시한다.



(a) center aligned SVM



(b) MZRCD

그림 3 2상 공간벡터 PWM
Fig.3. 2 Phase Space Vector PWM

그림 3(a)는 2상 중앙정렬 SVM(Space Vector Modulation)에 의해 얻어진 펄스를 나타내고 있으며, 그림 3(b)는 2상 MZRCD기법에 의한 펄스를 4주기 동안을 도시한 것이다. 여기서 T_s 는 샘플링 주기를 나타내고 있다. 2상 MZRCD기법은 그림4에서 나타낸 바와 같이 우측 정렬된 2상 펄스를 중앙으로 정렬시킨 후, 변조 구간의 중앙에서 펄스들을 좌우로 위치시키는 방법으로 구현 가능하다. 여기서 중앙 정렬된 펄스 폭의 변위 T_{RND} 는 랜덤수 발생기^[1,4,6]를 통하여 결정되기 때문에 변위 T_{RND} 는 랜덤한 값을 갖게 된다. 랜덤수의 발생 범위는 영벡터의 유지 시간 $T_{a,on}$ 의 범위에서 이루어져야 하는 조건을 만족하여야 한다. 2상 MZRCD 방법은 1 변조 구간 내에 두 개의 펄스만이 존재하며 이들 펄스는 항상 같은 변위 만큼 이동 할 수 있다. 이렇게 변위할 수 있는 랜덤 변

위는 영 벡터가 인가되는 시간 범위 내에서 결정된다. 두개의 펄스 중앙이 랜덤하게 결정된 변위 만큼 동시에 이동하게 되면, 영벡터와 두개의 유효벡터가 인가되는 각각의 시간에는 변함이 없음을 알 수 있다. 랜덤 펄스 위치 PWM기법은 스위칭 주파수는 고정되어져 있으나, 펄스의 위치가 매 변조구간에서 변경되므로 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖게 된다. 이를 유효 스위칭 주파수라 한다.

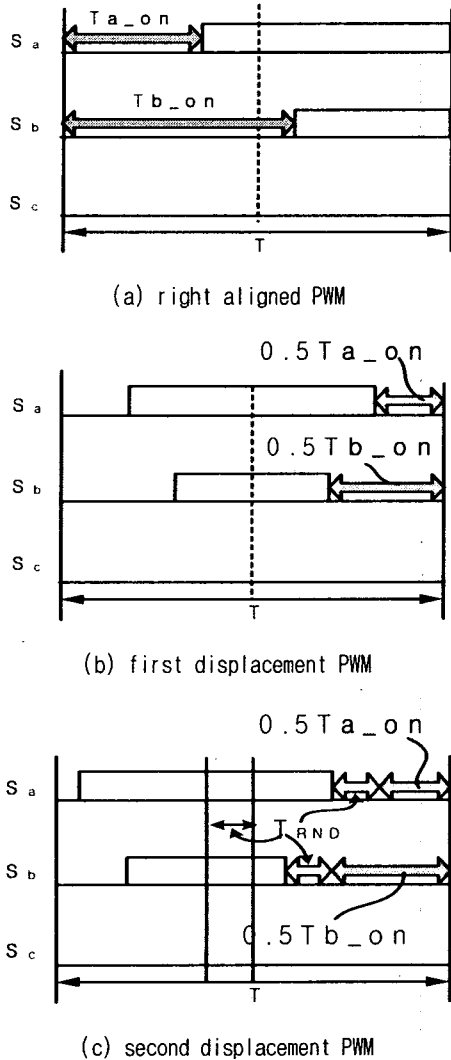


그림 4 2상 MZRCDC의 발생 과정
Fig.4 The procedure of 2 phase MZRCDC generation

그림 5는 제안된 2상 MZSRP기법을 구현하기 위한 흐름도이다. 제안된 기법을 구현하기 위해서는 우선 우측 정렬된 2상 SVM을 구현하고, 이를 바탕으로 펄스 위치를 우측 정렬, 또는 좌측 정렬을 행하여야 한다. 이를 구현하기 위해 SVM기법에 의해 얻어진 유효벡터 인가시간 T_1 , T_2 와 영벡터 인가시간 T_0 를 적절히 재배치해야 한다.

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

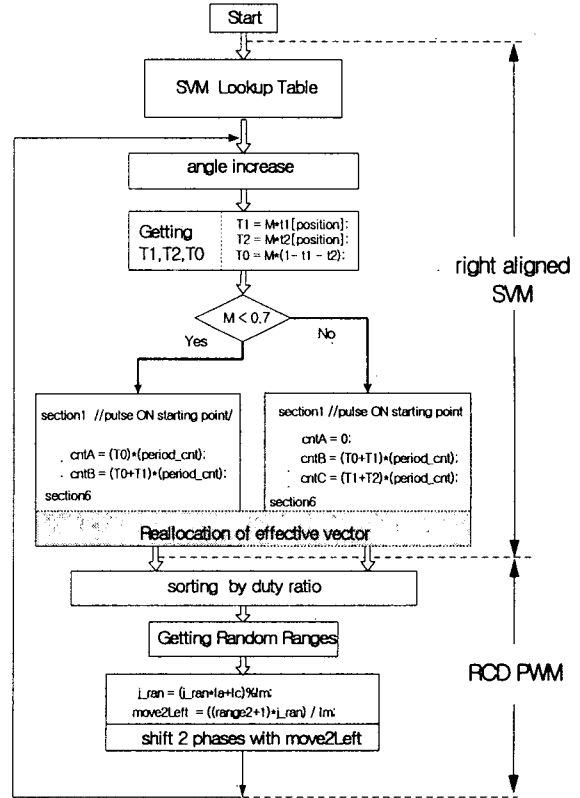


그림 5 2상 MZRCDC의 구현
Fig.5 Implementation of 2 phase MZRCDC

SVM은 벡터 공간상의 2개의 유효 스위칭 벡터의 시간적인 합성을 통하여 벡터 공간상의 전압지령을 자유롭게 구현할 수 있는 변조기법이다. 유효벡터 인가시간 T_1 , T_2 를 구하기 위해 사용되는 초월함수는 알고리즘 상에서 많은 시간이 소요되기 때문에 지령 벡터의 각도에 따른 T_1 , T_2 의 비율을 초기화 과정에서 구하고, PWM을 발생시키기 위한 알고리즘 내에서 변조지수 M 을 곱하여 2개의 유효벡터들의 인가 시간을 구해낸다. 그런데 실제의 각 상의 펄스는 한 제어 주기동안 한번의 온과 한번의 오프만을 행하여 스위칭 회수를 최소화하여야 한다. 이를 위해서 T_0 , T_1 , T_2 의 배치를 적절히 행하여야 한다.

가장 간단한 펄스배치 방법인 우측 정렬된 PWM 펄스를 구현하기 위해서는, 지령벡터가 홀수 섹터에 있으면, T_0 , T_1 , T_2 의 순서의 배치, 짝수 섹터이면, T_0 , T_2 , T_1 순서의 배치를 하여야 한다. 이렇게, 섹터의 홀수 및 짝수 여부에 따라 지령벡터의 합성순서를 재배치하여야 쉽게 각 상별 듀티비를 구할 수 있다. 본 연구에서 제안된 2상 MZRCDC는 SVM에 의해 얻어진 T_0 , T_1 , T_2 의

재배열 방법에 의해 얻어질 수 있다. 우측정렬을 선택할 것인가, 좌측정렬을 선택할 것인가에 대한 선택은 랜덤함수에 의해 결정되며, 우측정렬, 좌측 정렬 여부에 관계없이 구현된 PWM 펄스는 지령 전압벡터 구현에 충실하면서 랜덤 PWM 효과를 잘 나타내게 된다.

3. 결과 및 고찰

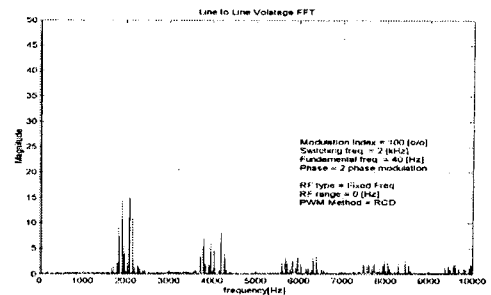
제안된 2상 MZRCD에 의한 모터의 전압 및 전류 스펙트럼의 분포를 예측하기 위해 Matlab/ Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표1에 본 연구의 시뮬레이션 조건을 나타내었다. 전체 시스템을 위한 모델은 공간벡터 변조부, 펄스위치 랜덤화 부, PWM 패턴 발생부, IPM 인버터 부, 유도모터 부로 구성되어 있다. 유도모터 부는 3상/2상 변환부, d축 연산부, q축 연산부, 회전자부 등으로 구성되어 있다. 이 중 공간벡터 변조부, 펄스 위치 랜덤화 부 및 PWM 패턴 발생부는 블록도 내부에 기본 제공되는 라이브러리 블록 대신에 S-Function을 사용하여 직접 코딩되었다.

표 1 시뮬레이션 조건

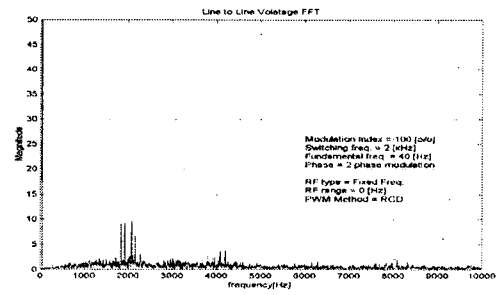
Table 1. Simulation conditions

시뮬레이션 S/W	Matlab 5.1/Simulink 2.1
스위칭 주파수 f_{sw}	2kHz
기본 주파수 f	40Hz
PWM기법	Multi-Zero vector RCD
모터 정격 및 상수	정격 : 60Hz, 200V, 1hp 고정자저항 : 3.35 ohm 회전자저항 : 1.99 ohm 인덕턴스 : 163.73mH 누설인덕턴스 : 6.94mH 관성계수 : 0.1kgm^2

모터를 무부하, 40Hz의 지령속도, 2kHz의 스위칭 주파수로 오픈 루프 운전하였을 때의 전압에 대한 고조파의 스펙트럼을 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 먼저 그림 6은 M=1인 경우의 결과로서, 종전의 2상 RCD-PWM방법은 M=1에서 거의 스펙트럼의 광대역화를 이루지 못하고 있다. 그러나 제안된 2상 MZRCD방법은 스위칭 주파수 2kHz에서의 스펙트럼 감소 뿐 아니라 스위칭 주파수의 정수배 고조파 성분을 광대역으로 랜덤하게 분산시키고 있음을 관찰할 수 있다. 그림7은 M=0.3인 경우이며, 제안된 방법과 종전의 방법은 전압 스펙트럼의 분포가 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 이는 제안된 방법은 M이 작은 영역에서는 종전의 방법과 동일하게 영벡터를 V(000)로 선택하기 때문에 나타나는 현상이다.

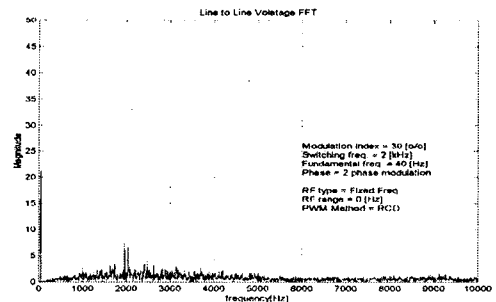


(a) RCD-PWM

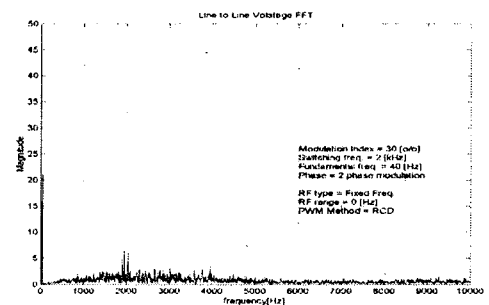


(b) proposed MZRCD

그림6 모터전압의 스펙트럼(M=1)
Fig.6 Spectrum of motor voltage (M=1)

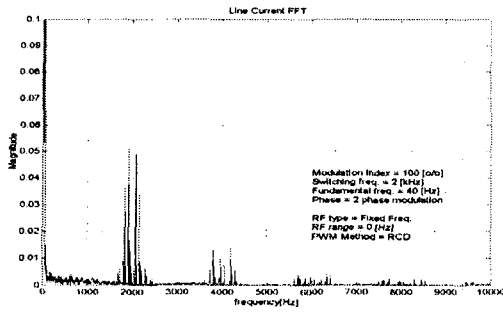


(a) RCD-PWM

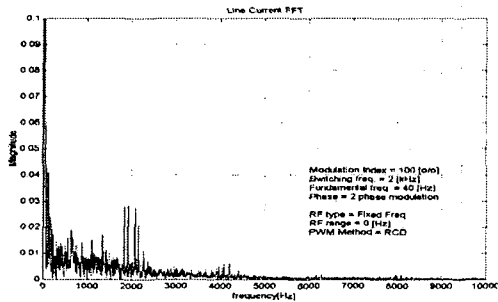


(b) proposed MZRCD

그림7 모터전압의 스펙트럼(M=0.3)
Fig.7 Spectrum of motor voltage (M=0.3)



(a) RCD-PWM

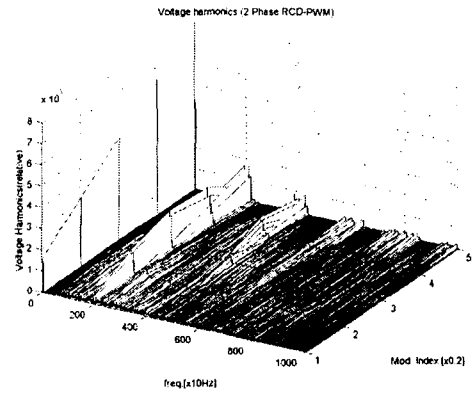


(b) proposed MZRC

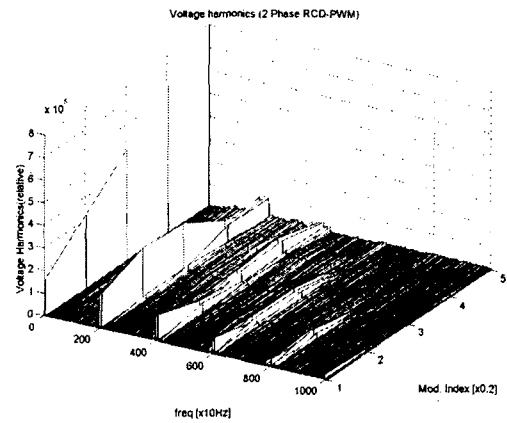
그림8 모터전류의 스펙트럼(M=1)
Fig.8 Spectrum of motor current(M=1)

그림 8은 M=1인 경우, 모터 전류의 고조파 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림8(a)로 부터 종전의 방법은 2kHz 스위칭 주파수 및 그 정수배 성분들이 충분히 광대역으로 분산 억제되지 못함을 알 수 있다. 그러나 그림8(b)에서와 같이 제안된 MZSRP기법은 전류 스펙트럼의 강한 이산적인 성분들을 광대역으로 분산시킬 수 있다.

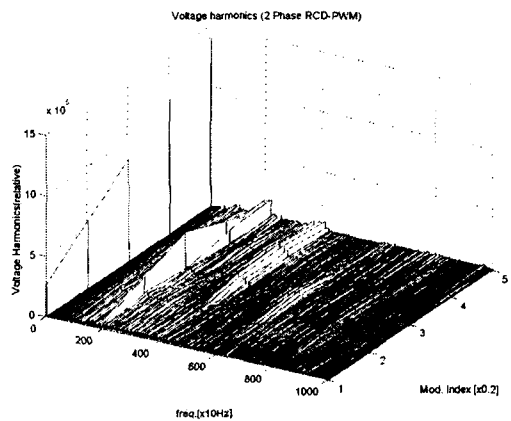
그림 9는 변조지수 M의 변화에 따라 전압 스펙트럼을 3차원으로 나타낸 것이다. 그림 9(a)는 종전의 2상 RCD-PWM에 의한 3차원 전압 스펙트럼을 나타낸 것으로, 그림 6(a)에서 이미 살펴본 바와 같이 M=1에 가까워질수록 스펙트럼의 광대역 효과가 감소됨을 알 수 있다. 즉 그림 9(a)는 M의 전 구간에 걸쳐 영벡터로 V(000)를 선택하기 때문에 M=1에 가까울수록 스위칭 주파수의 정수배 성분이 강하게 나타나게 된다. 그림 9(b)는 M의 전 구간에 걸쳐서 영벡터 V(000) 대신에 V(111)을 선택한 경우를 보여주고 있다. 2상 RCD-PWM에 영벡터 V(111)이 적용되면, V(000)이 적용된 경우와 반대의 현상이 생김을 알 수 있다. 즉 M=1에 가까운 영역에서 스위칭 주파수의 정수배 성분은 감소하고, 멀어질수록 증가한다는 것이다. 그림 9(c)는 본 연구에서 제안된 2상 MZRC기법을 적용한 결과이다. 종전의 방법과 비교하여 스펙트럼의 평탄화 특성이 현격하게 개선됨을 볼 수 있다.



(a) RCD-PWM : V(000)



(b) RCD-PWM : V(111)



(c) proposed MZRC

그림9 변조지수 변화에 따른 3차원 전압스펙트럼
Fig.9 3-D voltage spectrum in accordance with variation of modulation index

4. 결 론

종전의 2상 RCD-PWM은 변조지수 M이 1에 가까운 영역일수록, 모터 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화

효과가 감소되는 문제점이 있었다. 본 연구에서는 M의 변화에 따른 영벡터 선택에 의해 이상의 문제점을 해결하였다. 본 연구에서 제안된 2상 MZRC기법은 M이 0.7보다 크게 되면 영벡터로 V(111)을 선택하고, 적은 경우에는 V(000)을 선택하는 방법으로, M의 전 영역에 걸쳐서 탁월한 스펙트럼의 광대역화 효과를 얻을 수 있었다. 본 연구의 타당성은 Matlab/Simulink에 의하여 수행되었으며, M의 변화에 무관하게 모터 전압 및 전류 스펙트럼이 광대역으로 선형화된 분포를 함을 확인할 수 있었다. 차후에 2상 MZRC기반의 모터 구동 시스템을 제작하여, 실험적 방법으로 타당성을 입증하고자 하며, 효율과 전류 맥동의 정량적인 분석이 기대된다.

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

참 고 문 헌

- [1] H.G. Kim, Y.C. Lim, Y.G. Jung and S.H. Na, "Implementation of a DSP controlled random switching frequency PWM inverter for industrial drives", in Con. Rec. of ICEE '02, pp. 575-580, 2002.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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 space vector PWM", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 149, no. 3, May, pp. 195-200, 2002.
- [5] 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.
- [6] M.M. Bech, J.K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "Field-oriented control of an induction motor using random pulse width modulation", in Con. Rec IEEE APEC '00, pp. 924-931, 2000.
- [7] 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 Con. Rec. of ICEE '02, pp. 780-785, 2002.