

# 멀티 영벡터를 갖는 2상 랜덤 중앙 분포 변조기법의 파워 스펙트럼

오승열<sup>o\*</sup> 김정근<sup>\*</sup> 임영철<sup>\*</sup> 양형렬<sup>\*</sup> 정영국<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>전남대학교 전기공학과 <sup>\*\*</sup>대불대학교 컴퓨터정보공학부

## Power Spectrum of 2 Phase Random Centered Distribution Modulation Scheme with Multi Zero Vector

<sup>o\*</sup>S.Y. Oh, <sup>\*</sup>J.G. Kim, <sup>\*</sup>Y.C. Lim, <sup>\*</sup>H.Y. Yang, and <sup>\*\*</sup>Y.G. Jung

<sup>\*</sup>Chonnam National University, <sup>\*\*</sup>Daebul University

### ABSTRACT

본 연구에서는 변조지수 M이 큰 영역에서는 고조파 스펙트럼의 광대역화 효과가 저하되는 2상 랜덤 중앙 정렬 변조기법(Random Centered Distribution PWM : RCD)기법의 문제점을 해결하고자 멀티 영벡터 2상 RCD(Multi Zero Vector RCD : MZRCD) 변조기법을 제안하였다. 제안된 2상 MZRCD기법은 변조지수 M=0.7을 기준으로 하여 M이 0.7보다 큰 영역에서는 영벡터를 V(111)로 선택하고, 0.7보다 작은 영역에서는 V(000)을 선택한다. 제안된 방법을 유도모터 구동 시스템에 적용해 본 결과, M이 0.7이상인 영역에서도 모터의 전압/전류 및 소음 스펙트럼의 광대역화 특성이 종전의 방법에 비하여 우수함을 확인할 수 있었다.

### 1. 서 론

현재 산업 현장의 유도모터 구동장치에 사용되고 있는 PWM기법은 전력 변환시에 잡음 전력을 특정 주파수에 집중시켜서 전자기적 잡음(EMI)과 스위칭 소음을 유발하게 한다[1-2]. 유도모터 구동장치로부터 발생하는 스위칭 소음을 저감하기 위한 가장 간단한 방법은 우선 PWM 스위칭 주파수를 18kHz 이상으로 증가하는 것이다. 그러나 이는 노이즈 문제는 어느 정도 해결될 수는 있어도 인버터의 손실을 증가시키는 원인이 된다[3]. 최근에 들어 저 스위칭 주파수로 PWM 인버터를 구동하면서도 모터의 스위칭 소음을 저감할 수 있는 RPWM(Random PWM) 방법[3-7]이 연구되고 있다.

RPWM기법 중 RCD(Random Centered Distribution PWM)[3]는 중앙 정렬된 3상 펄스 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 RLL에 비하여 랜덤 자유도가 넓으며 전류 맥동이 양호하다. 영벡터로 V(000)이 적용된 종전의 2상 RCD[7]는 변조지수 M이 0.7보다 작은 영역에서의 모터 전압 및 소음 스펙트럼의 광대역화 효과는 양호하다. 그러나 M이 0.7 이상이

되면, 고조파 스펙트럼의 랜덤화 효과가 증가되지 않는 단점이 있다. 한편 영벡터로 V(111)이 2상 RCD에 적용되면, M이 0.7보다 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 연구에서는 이상에서 언급한 바와 같이 변조지수 M의 전 영역에 걸쳐서 현격한 스펙트럼의 광대역화 효과를 얻을 수 있는 멀티 영벡터 2상 RCD 변조기법(Multi-Zero Vectors RCD: MZRCD)을 제안하였다. 본 연구의 타당성을 입증하기 위하여, 16비트 고성능 마이크로 컨트롤러 SAB-C167을 기반으로 실험이 수행되었다. SAB-C167에 의하여 각 변조구간에서의 듀티비를 구한 후, 선형 랜덤 발생기[5]를 이용하여 균일한 확률 분포로 각 상의 펄스의 위치를 재배치하였다. M의 변화에 따른 모터 전압 및 전류 그리고 스위칭 소음의 스펙트럼을 검토하였으며, 제안된 방법은 M의 전 영역에서 모터 전압/전류 및 스위칭 소음 스펙트럼의 광대역화 효과를 얻을 수 있었다.

### 2. 이론

그림1(a)는 2상 중앙정렬 SVM(Space Vector Modulation)에 의해 얻어진 펄스를 나타내고 있으며, 그림1(b)는 2상 RCD기법에 의한 펄스를 4주기 동안을 도시한 것이다. 여기서 T는 샘플링 주기를 나타내고 있다. 2상 RCD기법은 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[5]를 통하여 결정되기 때문에 변위  $T_{RND}$ 는 랜덤한 값을 갖게 된다. 랜덤수의 발생 범위는 영벡터의 유지 시간의 범위에서 이루어져야 하는 조건을 만족하여야 한다.

2상 RCD 방법은 1 변조 구간 내에 두 개의 펄스만이 존재하며 이들 펄스는 항상 같은 변위 만큼 이동할 수 있다. 이렇게 변위할 수 있는 랜덤 변위  $T_{RND}$ 는 영벡터가 인가되는 시간 범위 내에서 결정된다. 두개의 펄스 중량이 랜덤하게 결정된 변위 만큼 동시에 이동하게 되면, 영벡터와 두개의 유효벡터가 인가되는 각각의 시간에는 변함이 없음을 알 수 있다. RCD기법은 스위칭 주파수는 고정되어져 있으나, 펄스의 위치가 매 변조구간에서 변경되므로 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖게 된다.

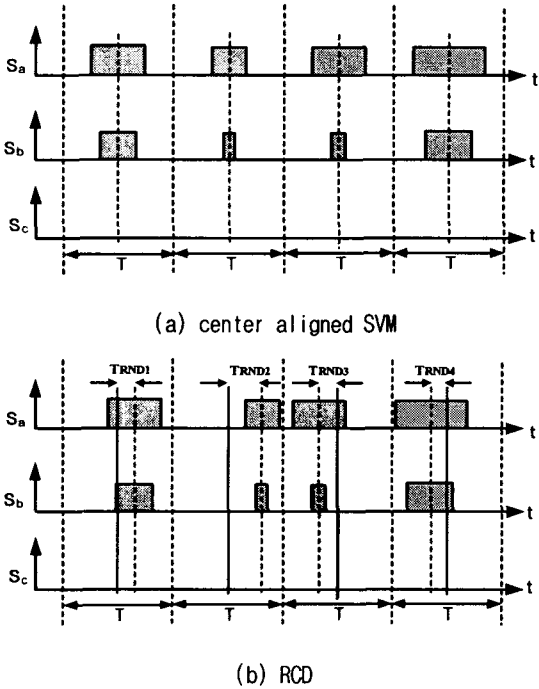


그림 1 2상 공간벡터 PWM  
Fig.1 2 Phase Space Vector PWM

이상의 2상 RCD 변조기법은 그림2에서 보는 바와 같이 M이 0.7보다 낮은 영역에서는 일반적으로 양호한 고조파 광대역 분산 특성을 갖는다. 그러나 M이 0.7보다 크게되면 고조파 스펙트럼의 광대역화 특성은 현저하게 저하된다. 한편 영벡터로 V(111)을 선택하여 2상 RCD를 구현하는 경우,  $M > 0.7$  조건에 대한 고조파 스펙트럼의 광대역화 분산특성은 그림2에서와 같이 양호하다. 따라서  $M = 0.7$ 을 기준으로 하여,  $M \leq 0.7$  영역에서는 점선으로 나타낸 종전의 2상 RCD기법을 적용하고,  $M > 0.7$  영역에서는 영벡터 V(111)의 점선 영역을 선택하면, M의 전 영역에서 고조파 스펙트럼의 광대역화가 가능한 2상 RCD 변조기법을 구현할 수 있게 된다. V(000)과 V(111)의 점선 영역의 합이 새로운 2상 RCD기법에 의한 고조파 분포로 결정되는 것이다. 그림2로 나타낸 영벡터 선택 RCD변조기법에 대한 전압 벡터를 그림3에 나타내었다. M이 0.7 보다 작은 경

우에는 그림3의 점선 내부인 영역 1에서 지령 전압 벡터가 형성되며 이때 영벡터로 V(000)을 선택한다. M이 0.7 보다 큰 경우에는 점선 육각형과 실선 육각형 사이의 영역 2에서 지령 전압 벡터가 형성되며, 영벡터로는 V(111)을 선택한다.

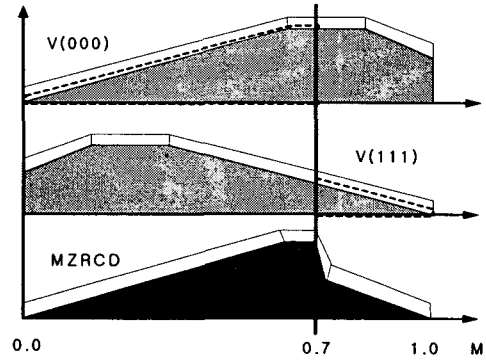


그림 2 영벡터 선택과 스펙트럼 크기  
Fig.2 Zero vector selection and spectrum amplitude

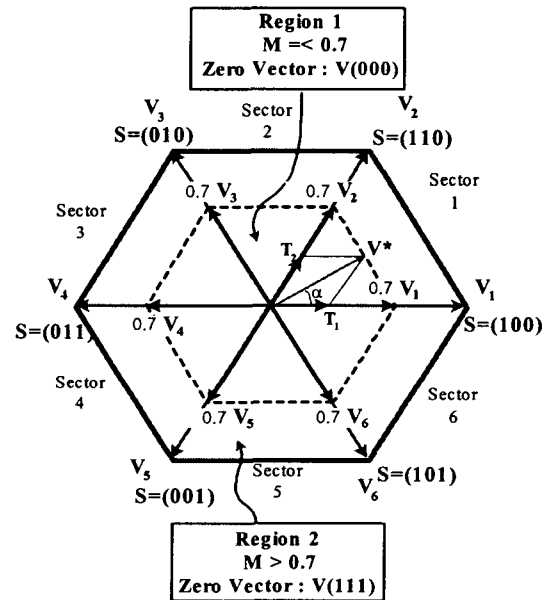


그림3 MZRCD의 전압 벡터도  
Fig.3 Voltage vector diagram for the MZRCD

그림 4는 M과 영벡터 선택에 따른 제안된 방법의 펄스모양을 나타내고 있다. 그림4의 영역 1은 M이 0.7이하로 되는 경우, 영벡터로 V(000)을 선택하였을 때의 펄스모양을 나타내고 있으며, 지령 전압 벡터가 그림3의 전압 벡터도의 1번 섹터에 위치할 때이다. 그림4의 영역 2는 M이 0.7보다 큰 경우, 영벡터로 V(111)을 선택하였을 때의 PWM 패턴이다. 서로 동일한 크기와 위상을 갖는 벡터를 표현하고 있지만, 펄스의 위치를 랜덤하게 배치할 수 있는 공간은 영벡터로 V(000)을 선택

### 3. 시스템 구현 및 실험 결과

본 연구의 타당성을 검증하기 위한 시스템은 C167 마이크로 콘트롤러 보드, IPM 인버터, 1.5kW 유도모터, 제어 프로그램 그리고 호스트 프로그램등으로 구성되어 있다. 공간벡터 변조 및 랜덤수 발생등의 모든 연산은 C167내의 제어 프로그램에 의하여 수행될 뿐만 아니라 C167 포트 출력은 바로 IPM을 게이팅 할 수 있는 신호이다.

한 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.

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

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

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

한편 영벡터를 V(111)을 선택하였을 때, 펄스를 자유롭게 배치할 수 있는 공간⑤+⑥+⑦+⑧은  $2T_1+T_2$ 이며, 수식으로 표현하면 (3)과 같다.

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

따라서 (2)와 (3)의 차에서 (4)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} &T_s \{2 - 3M \{ \sin\left(\frac{\pi}{3}-\alpha\right) + \sin\alpha \} \} \\ &= T_s \{2 - 3M (\sin\frac{\pi}{3} \cos\alpha - \sin\alpha \cos\frac{\pi}{3} + \sin\alpha) \} \\ &= T_s \{2 - \frac{3}{2} M (\sqrt{3} \cos\alpha + \sin\alpha) \} \end{aligned} \quad (4)$$

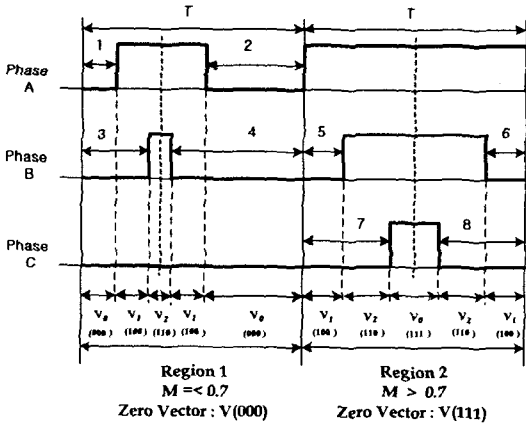
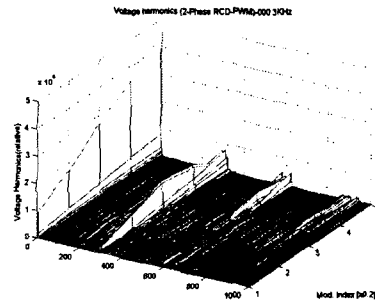
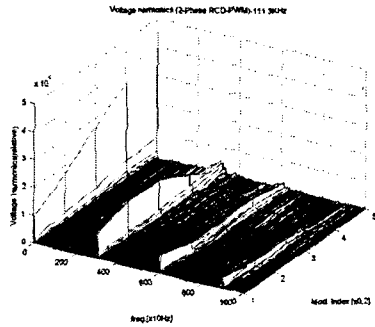


그림4 영벡터에 따른 2상 MZRC D 펄스모양  
Fig.4 Two phase MZRC D pulse patterns in accordance with the zero vectors

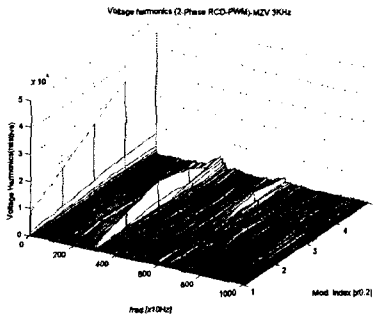
영벡터로 V(000)과 V(111)중 어떤 것을 선택하여야 펄스 위치 자유도가 더 높을 것인지를 결정하는 임계 변조지수는 지령 전압 벡터의 지령각  $\alpha$ 에 의존적이며,  $\alpha$ 에 따라 약 0.67 - 0.77의 범위에서 임계 변조지수가 형성된다. 본 연구에서는  $M=0.7$ 을 기준으로 영 전압 벡터를 선택하는 방법을 제시한다.



(a) RCD : V(000)



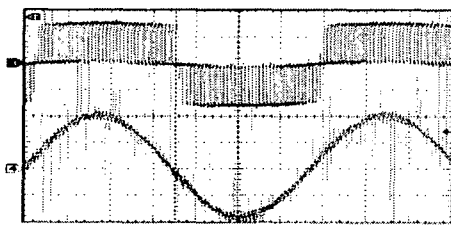
(b) RCD : V(111)



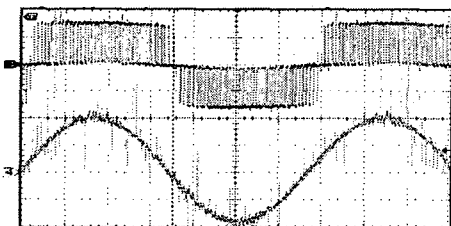
(c) proposed MZRC D

그림5 변조지수에 따른 3차원전압스펙트럼  
Fig.5 3-D voltage spectrum in accordance with variation of modulation index

그림5는 모터를 무부하, 40Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 오픈 루프 운전하였을 때, 변조지수 M의 변화에 따라 전압 스펙트럼을 3차원으로 나타낸 것이다. 그림5(a)는 종전의 2상 RCD에 의한 3차원 전압 스펙트럼을 나타낸 것으로, M이 1에 가까워질수록 스펙트럼의 광대역 효과가 감소되고 있다. 즉 그림5(a)는 M의 전 구간에 걸쳐 영벡터로 V(000)를 선택하기 때문에 M=1에 가까울수록 스위칭 주파수의 정수배 성분이 강하게 나타나게 된다. 그림5(b)는 M의 전 구간에 걸쳐서 영벡터 V(000) 대신에 V(111)을 선택한 경우를 보여주고 있다. 2상 RCD에 영벡터 V(111)이 적용되면, V(000)이 적용된 종전의 경우와 반대의 현상이 생김을 알 수 있다. 즉 M이 1에 가까운 영역에서 스위칭 주파수의 정수배 성분은 감소하고, 멀어질수록 증가한다는 것이다. 그림5(c)는 본 연구에서 제안된 2상 MZRCR 기법을 적용한 결과이다. V(00)과 V(111)의 장점을 취하고 있기 때문에 종전의 2상 RCD와 비교하여 스펙트럼의 평탄화 특성이 현격하게 개선됨을 볼 수 있다.



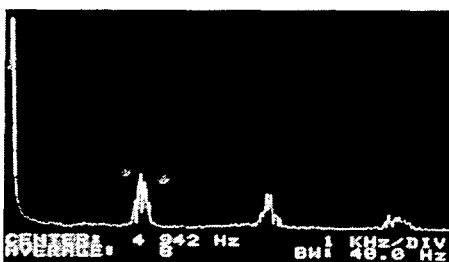
(a) RCD : V(000)



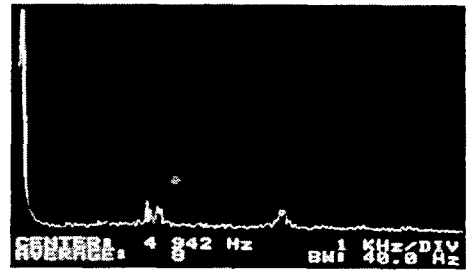
(b) proposed MZRCR

그림6 모터 전압 및 전류파형  
(200v/div., 1A/div. M=0.9)

Fig.6 Waveforms of motor voltage and current (200v/div., 1A/div. M=0.9)



(a) RCD : V(000)



(b) proposed MZRCR

그림7 모터의 전압 스펙트럼

(1kHz/div. M=0.9)

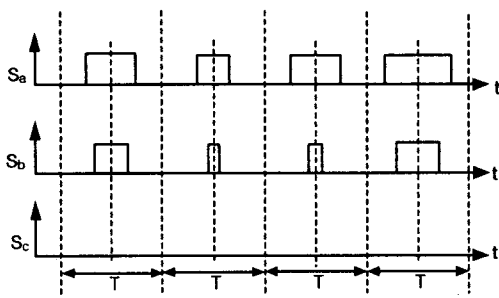
Fig.7 Spectrum of motor voltage

(1kHz/div. M=0.9)

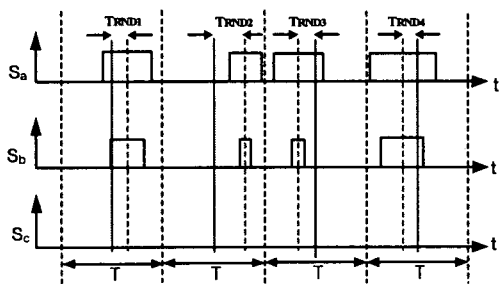
그림6은 종전의 방법과 제안된 방법에 의한 모터 전압과 전류 파형을 나타내고 있다. 제안된 방법의 전류는 최대치에 존재하는 약간의 맥동을 제외하고는 종전의 방법과 전류 파형이 유사하다.

그림7은 그림6에서 나타낸 모터 전압 파형에 대한 고조파 스펙트럼 분석 결과이다. 먼저 그림7(a)는 M=0.9인 경우, 종전의 2상 RCD의 결과이고, 그림7(b)는 제안된 방법의 결과이다. 종전의 RCD기법은 M=0.9에서 거의 스펙트럼의 광대역화를 이루지 못하고 있다. 그러나 제안된 2상 MZRCR 방법은 스위칭 주파수 3kHz에서의 고조파 스펙트럼 감소 뿐 만 아니라 스위칭 주파수의 정수배 고조파 성분을 광대역으로 랜덤하게 분산시키고 있음을 관찰할 수 있다.

그림8은 모터 전류의 고조파 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림8(a)로 부터 종전의 방법은 3kHz 스위칭 주파수 및 그 정수배 성분들이 충분히 광대역으로 분산 억제되지 못함을 알 수 있다. 그러나 제안된 MZSRP 기법은 그림8(b)에서 보는 바와 같이 전류 스펙트럼의 강한 이산적인 성분들을 광대역으로 분산시킬 수 있다. 그림9는 종전의 2상 RCD와 제안된 2상 MZRCR을 인버터 구동 유도모터에 적용한 결과, 유도모터로부터 발생하는 스위칭 소음의 스펙트럼을  $f_{sw}=3kHz$ 이며  $M=0.9$ 의 조건 하에서 각각 측정한 것이다. 먼저 그림9(a)는 종전의 2상 RCD의 스위칭 소음 스펙트럼을 보여주는 것으로, 3kHz-12kHz사이에서 스위칭 주파수 3kHz의 정수배의 매우 강한 소음 스펙트럼이 이산적인 분포를 하고 있다. 그림9(b)는 제안된 방법에 의한 스위칭 소음 스펙트럼의 결과이다. 제안된 방법은 6kHz 부터 12kHz사이에서 종전의 방법보다 현저하게 선형화된 소음 스펙트럼을 보이고 있다. 특히 스위칭 주파수 3kHz와 4배 스위칭 주파수 12kHz에서의 소음 스펙트럼은 제안된 방법을 적용하기 전과 동일하게 보이나, 3kHz-5kHz와 10kHz-12kHz 주파수대에서 종전의 방법과 비교하여 보다 선형적인 분포로 변화되었음을 알 수 있다.



(a) center aligned SVM



(b) RCD

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

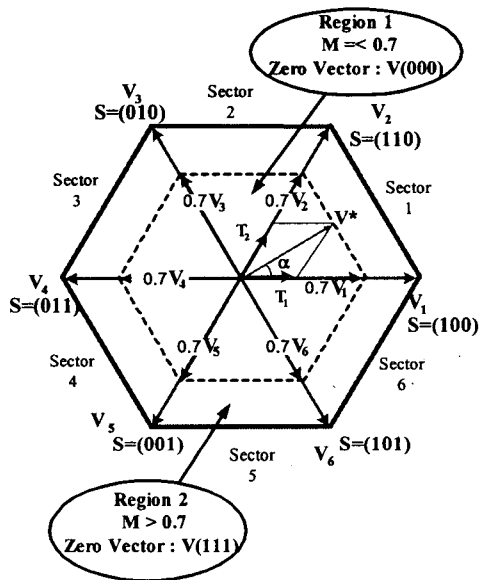


그림2 RZRC의 전압 벡터도  
Fig.2 Voltage vector diagram for the RZRC

2상 RCD 방법은 1 변조 구간 내에 두 개의 펄스만이 존재하며 이들 펄스는 항상 같은 변위 만큼 이동할 수 있다. 이렇게 변위할 수 있는 랜덤 변위  $T_{RND}$ 는 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. RCD기법은 스위

칭 주파수는 고정되어져 있으나, 펄스의 위치가 매 변조구간에서 변경되므로 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖게 된다.

그림2는 본 연구에서 제안된 MZRC변조기법에 대한 전압 벡터를 나타내고 있다. 변조지수  $M$ 이 0.7 보다 작은 경우에는 그림2의 점선 내부인 영역 1에서 지령 전압 벡터가 형성되며 이때 영벡터로  $V(000)$ 을 선택한다.  $M$ 이 0.7 보다 큰 경우에는 점선 육각형과 실선 육각형 사이인 영역 2에서 지령 전압 벡터가 형성되며, 영벡터로는  $V(111)$ 을 선택한다.

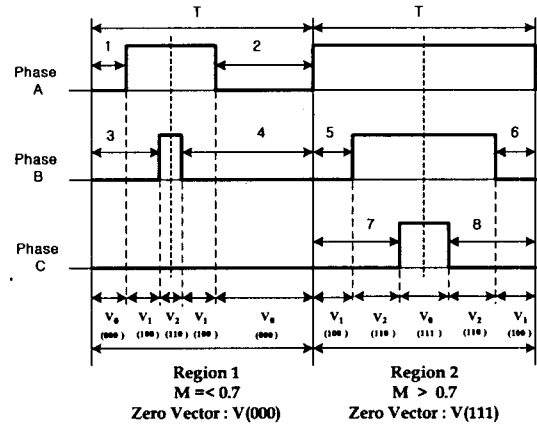


그림3 영벡터에 따른 2상 MZRC 펄스모양  
Fig.3 Two phase MZRC pulse patterns in accordance with the zero vectors

그림3은  $M$ 과 영벡터 선택에 따른 제안된 방법의 펄스모양을 나타내고 있다. 그림3의 영역 1은  $M$ 이 0.7이하로 되는 경우, 영벡터로  $V(000)$ 을 선택하였을 때의 펄스모양을 나타내고 있으며, 지령 전압 벡터가 그림2의 전압 벡터도의 1번 섹터에 위치할 때이다. 그림3의 영역 2는  $M$ 이 0.7보다 큰 경우, 영벡터로  $V(111)$ 을 선택하였을 때의 PWM 패턴이다. 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 지령 전압 벡터의 지령각  $\alpha$ 에 의존적이며,  $\alpha$ 에 따라 약 0.67 - 0.77의 범위에서 임계 변조지수가 형성된다. 본 연구에서는  $M=0.7$ 을 기준으로 영 전압 벡터를 선택하는 방법을 제시한다.

### 3. 시뮬레이션 과정 및 모델링

제안된 Random PWM에 의한 모터 전압 및 전류 스펙트럼의 분포를 예측하기 위해 전력전자전용 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서 제안