

멀티 캐리어 Random PWM기법을 적용한 멀티 레벨 인버터의 파워 스펙트럼

°김종남 °오승렬 °임영철 °정영국
 '전남대학교 전기공학과 °'대불대학교 컴퓨터정보공학부

Power spectrum of a Multi-Level Inverter Employing a Multi-Carrier Random PWM Method

J.N. Kim° S.Y. Oh° Y.C. Lim° Y.G. Jung°
 °Chonnam National University °°Daebul University

Abstract - 본 연구에서는 멀티 레벨 인버터의 파워 스펙트럼을 광대역으로 분산시키기 위한 멀티 캐리어 Random PWM기법을 제안하였다. PD(phase disposition)방식 및 H(hybrid)방식의 멀티 캐리어 Random PWM을 단상 cascade H-브리지 멀티 레벨 인버터와 3상 hybrid 멀티 레벨 인버터에 적용하였다. 각 방식에 따른 출력 전압/전류 파형 및 고조파 스펙트럼을 PSIM에 의하여 확인 하였으며, 제안된 방식의 타당성을 입증할 수 있었다.

1. 서 론

멀티 레벨 인버터는 대용량 교류 모터 구동용 뿐 만 아니라 전력계통에서 요구되는 고압 대용량 인버터 시스템의 구현에 매우 적합한 전력전자 변환기이다. 멀티 레벨 인버터는 동일한 정격을 갖는 2-레벨 인버터와 비교하여 낮은 dv/dt 와 저 스위칭 주파수 그리고 저 정격의 스위칭 소자라도 대용량의 전력 변환 시스템을 구현할 수 있는 장점이 있다. 또한 전압 레벨의 증가에 따라서 보다 작은 스위칭 주파수에서도 양호한 출력의 고조파 특성을 얻을 수 있으며, EMI (electromagnetic interference) 문제 역시 해결 가능하다[1]. 멀티 레벨 인버터는 NPC(neutral point clamped)방식과 flying capacitor 방식 그리고 단상 H-브릿지로 구성된 cascade 방식으로 구분된다[2-3].

이와 같은 멀티 레벨 인버터의 펄스폭 변조를 위해서 일반적으로 멀티 캐리어 PWM 기법과 공간벡터 기법이 적용하고 있다. 특히 멀티 캐리어 방식은 구현과 캐리어 배치에 대한 이해가 쉽기 때문에 일반화 되어져 가는 추세이다. 멀티 캐리어 PWM기법은 기준파와 비교하는 고정 주파수 캐리어의 배치 방법에 따라서 APOD (alternative phase opposition disposition), POD (phase opposition disposition), PD(phase disposition), H(hybrid), PS (phase shifted)등으로 분류 가능하다 [2-4]. 그러나 고정 주파수 캐리어 PWM 기반의 멀티 레벨 인버터는 스위칭 주파수의 정수배 측대 고조파를 출력 전압과 전류에 발생하여, 교류 모터 구동시스템의 경우에는 스위칭 소음 문제를 발생하기도 한다[5-7].

본 연구에서는 이상의 문제점을 해결하기 위하여 멀티 캐리어 PWM 기반의 멀티 레벨 인버터[8-10]에 Random 주파수 캐리어 PWM기법을 적용하여 출력 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화 특성을 개선하였다. 단상 5-레벨 cascade 인버터에 PD와 H방식의 멀티 캐리어 Random PWM기법을 적용한 결과, H방식은 PD 방식보다 고조파 스펙트럼의 광대역화 특성이 우수하였다. 또한 PD방식을 master로 동작하는 대용량의 구형 파 인버터와 slave로 동작하는 소용량의 PWM인버터로 구성된 3상 hybrid형 멀티 레벨 인버터에 적용하였으며, PSIM에 의하여 고조파 스펙트럼의 광대역화 특성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 고정 주파수의 멀티 캐리어 PWM기법[2-4]

그림 1은 고정 주파수를 갖는 멀티 캐리어 PWM발생 원리를 설명하고 있다. 기준 정현파와 고정 주파수의 캐리어를 다단으로 비교하여 해당 캐리어 수만큼의 PWM 펄스를 발생한다. 그림 2는 이 원리를 이용한 여러 종류의 PWM방식을 나타낸 것이다. 우선 그림 1(a)는 APOD방식, 그림 1(b)는 POD방식, 그림 1(c)는 PD 방식, 그림 1(d)는 H방식 그리고 그림 1(e)는 PS방식이다. 각 방식은 5-레벨을 기준으로 할 때, APOD는 각각의 캐리어가 반대 위상으로 교차 배치되고 있으며, POD는 기준파의 위쪽 캐리어와 아래쪽 캐리어가 반대 위상이다. 그리고 PD방식은 모든 캐리어는 서로 동일한 위상의 배치를 갖고 있으며, H방식은 위쪽 2캐리어와 아래쪽 2캐리어를 한 그룹으로 하여 각각 위상이 반대이며 서로 중첩되어져 있다. 마지막으로 PS방식은 각각의 캐리어가 90°위상 차로 배치된 형태이다.

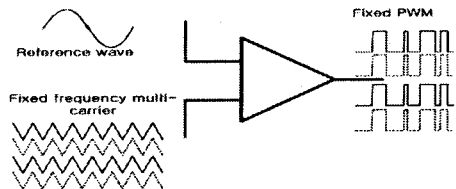
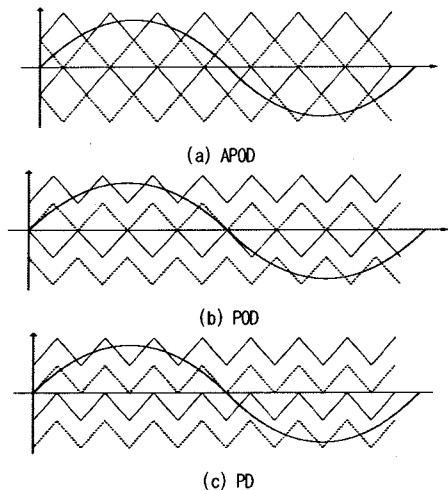


그림 1 고정 주파수의 멀티 캐리어 PWM
 Fig.1 fixed frequency multi-carrier PWM



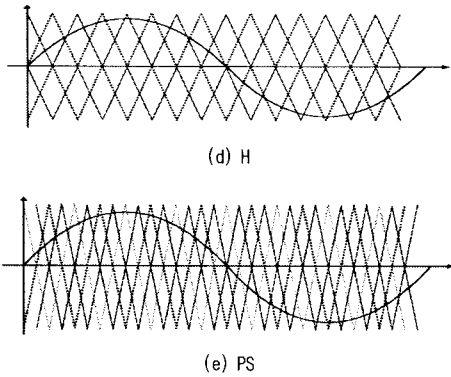


그림 2 고정 주파수의 멀티 캐리어 PWM방식
Fig.2 The family of fixed frequency multi- carrier PWM

2.2 제안된 멀티 캐리어 Random PWM기법

그림 3은 본 연구에서 제안된 Random 캐리어 주파수 PWM기법을 나타낸 것이다. 사실상 APOD, POD 그리고 PD등은 서로 비슷한 위상 배치를 하고 있으며 또한 Random PWM을 적용한 후의 파워 스펙트럼이 거의 동일하기 때문에, 구현의 관점에서 용이한 PD법을 이들 대표로 다루기로 한다. H방식은 앞의 방식들과는 캐리어의 배치법이 상이하며 따라서 본 연구에서는 PD와 H방식 2종류만을 멀티 캐리어 Random PWM기법에 적용한다. 멀티 캐리어 Random PWM기법은 종전의 고정 주파수 방식과 구조적으로 동일하다. 그러나 그림 3(b),(c)에서 보듯이 캐리어의 주파수가 매 주기마다 랜덤하게 변하기 때문에 출력 전압 또는 전류에는 특정 주파수의 고조파가 집중되지 않고, 광대역으로 분산된다. 따라서 Random PWM을 적용하기 전과 후의 전체 고조파 에너지는 동일하다.

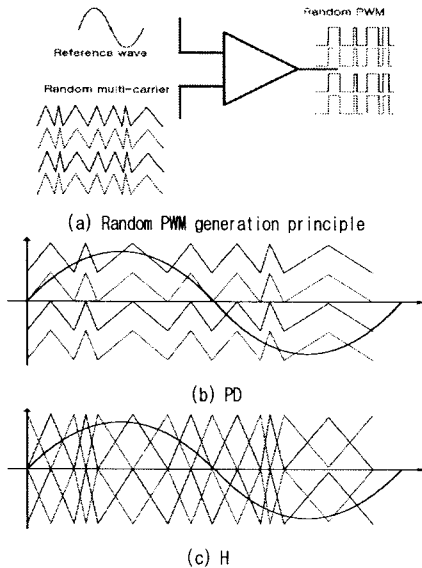


그림 3 제안된 멀티 캐리어 Random PWM
Fig.3 The proposed multi- carrier random PWM

3. 시스템 구성 및 결과 고찰

그림 4와 그림 5는 본 연구에서 제안된 PD와 H방식의 Random PWM기법을 적용한 단상 5-레벨 cascade 인버터와 3상 hybrid 인버터를 각각 나타내고 있다. 단상 cascade 인버터는 H-브리지 4개가 직렬로 연결되어

있으며, 각각의 출력은 변압기로 연결되어져 있다. 변압기 2차측 총 출력은 H-브리지 각각의 출력의 합과 같다. 변압기는 그림 4가 태양광 발전이나 무정전 전원장치와 같이 직류전원 V_d 가 일정한 경우, 권선비 a 를 조절하여 교류 출력 V_o 을 가변할 수 있으며, 또한 변압기 1차측과 2차측의 절연 효과도 얻을 수 있다. 본 연구에서는 각 H-브리지 cell 직류전압은 24v 배터리를 사용하였다.

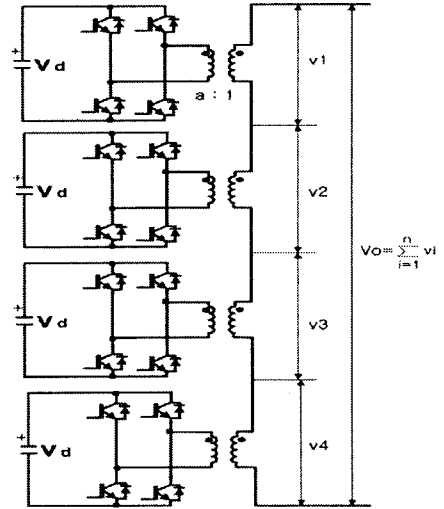


그림 4 단상 5-레벨 cascade 인버터
Fig.4 single phase 5-level cascaded inverter

그림 5는 고압 대용량 시스템에 적합한 3상 hybrid 멀티 레벨 인버터를 나타내고 있다. 이 인버터는 master 인버터와 slave인버터로 구성되어 있는데, master인버터는 일반적으로 GTO 소자로 구성되어 있으며, 구현과의 고전압 레벨을 결정하고 있다. 또한 slave인버터는 IGBT등에 의하여 저전압 고주파수의 PWM 레벨을 결정한다. slave인버터는 3-레벨 NPC 인버터를 사용하고 있다. 출력 변압기 1차 측은 Δ 결선이며 2차 측은 Y결선이며, 이 방식의 직류전원은 100v 배터리를 사용하고 있다.

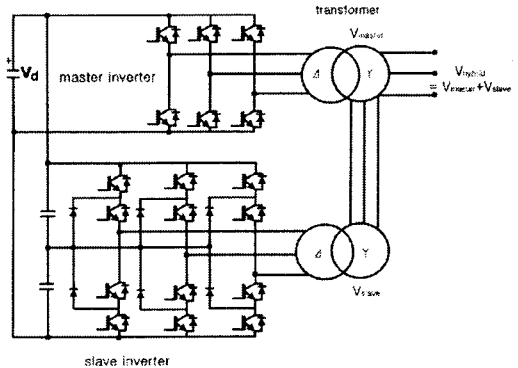


그림 5 3상 hybrid 멀티 레벨 인버터
Fig.5 3-phase hybrid multi-level inverter

3.1 단상 5-레벨 cascade 인버터

3.1.1 고정 주파수 기법

그림 6은 PD방식의 고정 주파수 PWM을 그림 4로 나타낸 단상 cascade H-브리지 인버터에 적용한 결과이다. 그림 7(b)의 전압 및 전류 스펙트럼 분석 결과를 살펴보면, PD방식 고정 주파수 PWM의 경우는 전압과

전류에 3kHz 스위칭 주파수의 1배 고조파, 2배 고조파, 3배 고조파 등 정수배 고조파의 최대 성분이 존재하고 있다. 그림 8과 그림 9는 H방식을 적용한 것으로 전류파형이 PD방식보다 양호하며 스펙트럼은 PD방식과는 다른 분포를 하고 있음을 알 수 있다. 즉 3kHz 스위칭 주파수 성분은 거의 존재하지 않으며 대신 2배 주파수, 4배 주파수의 최대 성분이 분포를 하고 있다. 각 스펙트럼의 x축은 주파수(KHz)를 나타내며 5kHz/div.의 스케일을 갖는다.

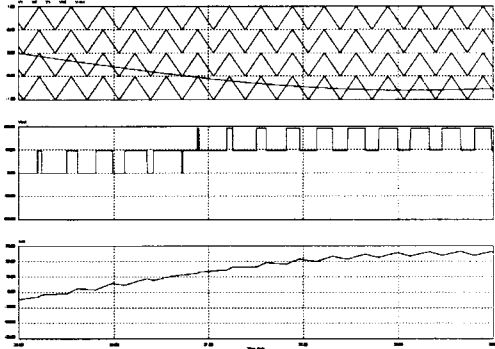
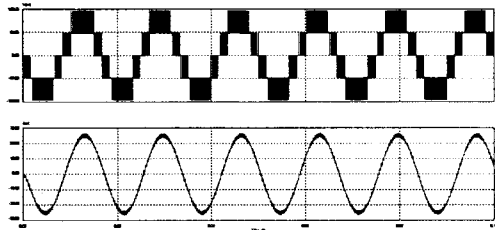
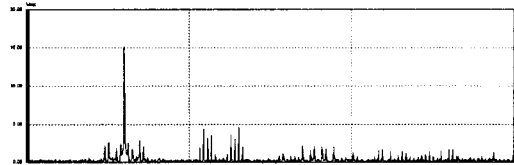


그림 6 PD 방식의 고정 주파수 PWM(캐리어, 전압, 전류)
Fig.6 PD type fixed frequency PWM
(carrier, voltage, current)



(a) voltage and current



(b) voltage and current spectrum

그림 7 PD 방식의 고정 주파수 PWM(파형 및 스펙트럼)

Fig.7 PD type fixed frequency PWM
(waveforms and spectrum)

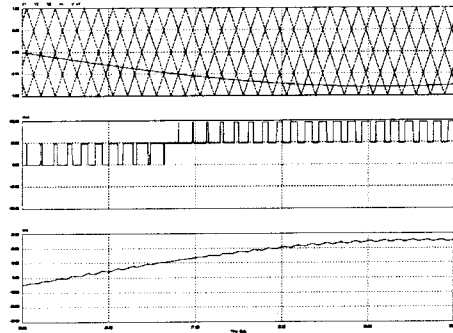
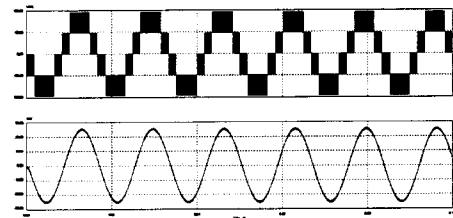
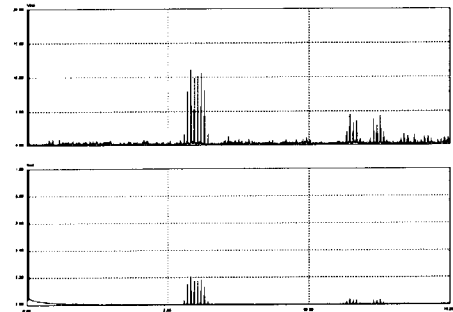


그림 8 H 방식의 고정 주파수 PWM(캐리어, 전압, 전류)
Fig.8 H type fixed frequency PWM
(carrier, voltage, current)



(a) voltage and current



(b) voltage and current spectrum

그림 9 H 방식의 고정 주파수 PWM(파형 및 스펙트럼)
Fig.9 H type fixed frequency PWM
(waveforms and spectrum)

3.1.2 Random PWM기법

그림 10과 그림 11은 그림 4의 시스템에 그림 3(b)를 적용한 결과이다. 캐리어는 중심 주파수 3kHz를 기준으로 하여 $\pm 2\text{kHz}$ 대역폭을 갖는 삼각파를 사용하고 있다. 그림 10에서 보는 바와 같이 PD방식 Random PWM은 그림 6과 비교하여 전압 펄스가 랜덤한 분포를 나타내고있다. 따라서 그림 11(b)에서와 같이 전압 및 전류의 스펙트럼 분포 역시 광대역으로 분포됨을 알 수 있다. 그림 12와 그림 13은 H방식의 Random PWM을 적용한 결과이다. 앞에서 언급한 방법 중에 전류파형이 가장 좋으며, 또한 그림 13(b)에서 보는 바와 같이 고조파 스펙트럼은 임의의 주파수대에 집중되지 않고 가장 광대역화 분포되어져 있다.

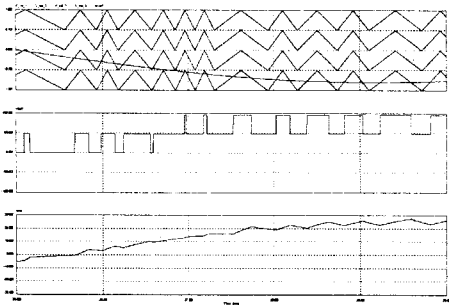
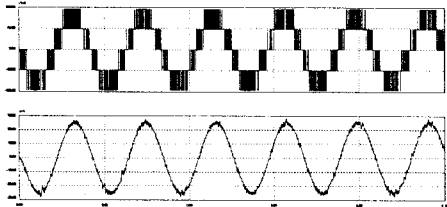
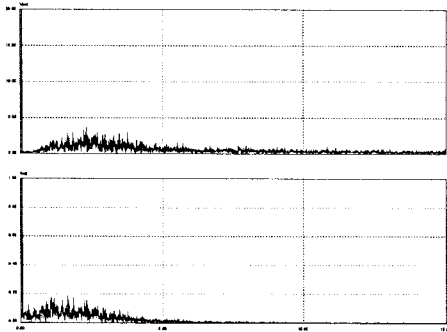


그림 10 PD 방식의 Random PWM(캐리어, 전압, 전류)
 Fig.6 PD type Random PWM
 (carrier, voltage, current)



(a) voltage and current



(b) voltage and current spectrum

그림 11 PD 방식의 Random PWM(파형 및 스펙트럼)
 Fig.11 PD type Random PWM
 (waveforms and spectrum)

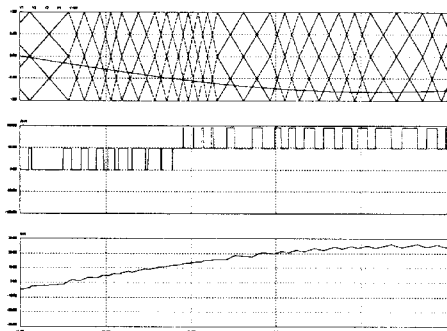
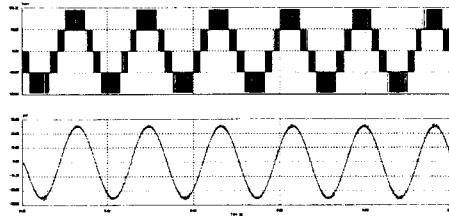
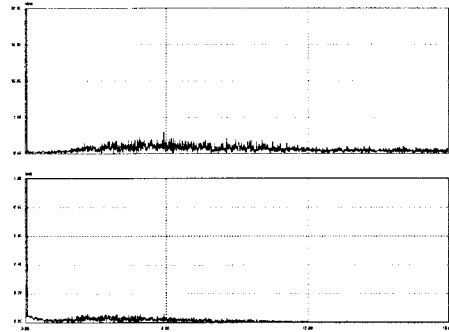


그림 12 H 방식의 Random PWM(캐리어, 전압, 전류)
 Fig.12 H type Random PWM
 (carrier, voltage, current)



(a) voltage and current

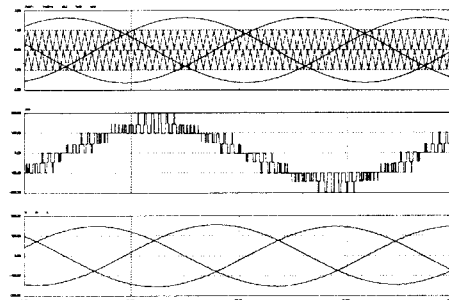


(b) voltage and current spectrum

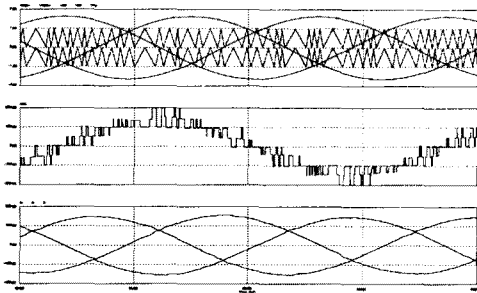
그림 13 H 방식의 Random PWM(파형 및 스펙트럼)
 Fig.13 H type Random PWM
 (waveforms and spectrum)

3.2 3상 하이브리드 멀티 레벨 인버터

그림 14는 PD방식을 그림 5의 3상 hybrid 인버터에 적용한 경우의 캐리어, hybrid 출력전압 그리고 3상 전류파형을 중전의 방식과 제안된 방법을 서로 비교한 결과이다. 그림 15는 그림 5로 나타난 hybrid 인버터의 hybrid 출력전압, master전압 및 slave전압을 각각 나타낸 것이다. 그림 14(b)와 그림 15(b)에서 보듯이 고정 주파수 방식에 비하여 Random 방식은 랜덤한 전압 펄스 분포를 하고 있다. 이 결과는 그림 16으로 나타난 hybrid 출력전압과 전류의 스펙트럼을 보면 더욱 명확함을 알 수 있다. 즉 그림 7(b)의 단상 PD의 결과와 동일하게 3상 hybrid 인버터에 적용한 PD방식은 3kHz의 스위칭 주파수의 정수배의 측대 고조파가 존재하고 있다. 각 스펙트럼의 x축은 주파수를 나타내며 5kHz/div.의 크기를 갖고 있다. 그러나 Random 기법을 적용한 PD방식은 강한 고조파 성분을 광대역의 주파수 대로 분산함을 알 수 있다. 이상으로부터 멀티 캐리어 Random PWM기법을 고압 대전력용 모터 구동시스템에 적용하는 경우, 모터의 가청 스위칭 소음과 진동의 저감 효과도 있을 것으로 생각된다.



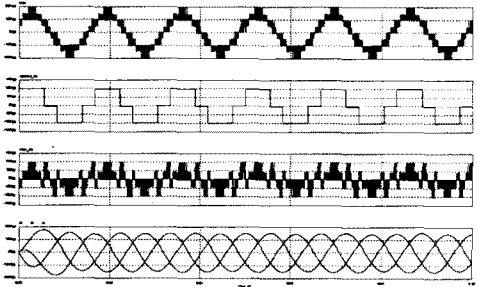
(a) fixed frequency



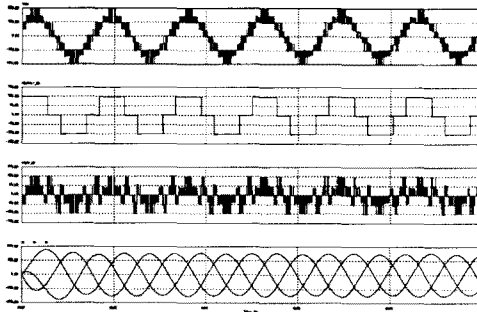
(b) random carrier frequency

그림 14 PD방식의 캐리어, hybrid 출력전압 및 전류

Fig.14 PD type carrier, hybrid output voltage and current



(a) fixed frequency



(b) random carrier frequency

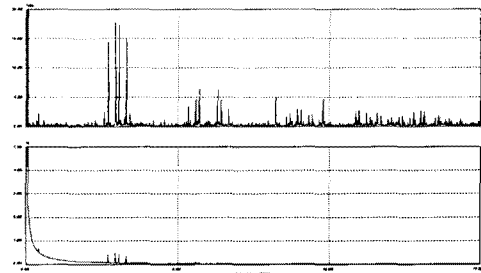
그림 15 PD방식의 hybrid 출력전압, master전압, slave 전압 및 전류

Fig.15 PD type hybrid output voltage, master voltage, slave voltage and current

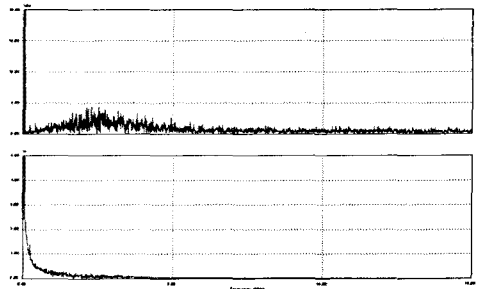
4. 결 론

본 연구에서는 멀티 캐리어 Random PWM기법 중 대표적인 몇가지 방법을 단상 cascade H-브리지 인버터와 3상 hybrid 멀티 레벨 인버터에 적용하였다. 종전의 APOD, POD방식은 캐리어의 배치와 랜덤 적용 후의 스펙트럼의 분포가 거의 유사하기 때문에 캐리어 배치가 간단한 PD방식과 H방식을 Random PWM기법에 적용하였다. H방식은 전류의 파형과 스펙트럼의 광대역화 특성이 PD방식보다 우수하였다. 3상 hybrid 멀티레벨 인버터에 PD방식 random PWM 기법을 적용한 결과, 고정 주파수 PWM방식보다 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화 분산효과가 우수하였다. 제안된 방법을 고압 대용량의 모터 구동 및 전인 시스템에 적용하면 가정 스위칭 소음 저감의 효과가 있으리라 기대된다.

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



(a) fixed frequency



(b) random carrier frequency

그림 16 PD방식의 hybrid 출력전압과 전류의 스펙트럼

Fig.16 PD type hybrid output voltage and current spectrum

[참 고 문 헌]

- [1]김준성,김태진,강대옥,현동성, "출력 상전압을 이용한 멀티-캐리어 PWM기법의 간단한 고조파 분석방법",대한전기학회 논문지, 52B-7-8, pp.352-359, 2003.
- [2]V.G. Agelidis and M. Calis, "Application specific harmonic performance evaluation of multicarrier PWM techniques", in Proc. IEEE PESC'98, 1998, pp.172-178.
- [3]H.Wang, R. Zhao, Y. Deng and X. He, "Novel carrier based PWM methods for multilevel inverter", in Proc. IEEE IECON'03, 2003, pp.2777-2787.
- [4]D.G. Holmes and T.A. Lipo, Pulse width modulation for power converters-principles and practice, A John Wiley & Sons,INC., publication, 2003.
- [5] 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 PWM", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol.149, no.3, May, pp.195-202, 2002.
- [6]K. Borisov and A. Trzynaldowski, "Experimental investigation of a naval propulsion drive model with PWM based attenuation of the acoustic and electromagnetic noise", in Conf. Rec. of IEEE IECON'03, 2003, pp.12-17.
- [7] K.A. Almarri, J.C. Balda and K. Carr, "Optimized selection of the random PWM switching frequencies in a limited pool", in Conf. Rec. IEEE APEC'00, 2000, pp.569-573.
- [8]Y. Shrivastava and S.Y. Hui, "Analysis of random PWM switching methods for three-level power inverters", IEEE Trans., Power Electron., vol.14, no.6, pp.1156-1163, 1999.
- [9]C.K. Lee, S.Y.H. Hui and H.S.H. Chung, "A Random voltage vector switching scheme for 3-level inverters", in Conf. Rec. IEEE PESC'00, 2000, pp.27-32.
- [10]Y. Shrivastava, C.K. Lee, S.Y. Hui and H.S.H. Chung, "Comparison of RPWM and PWM space vector switching schemes for 3-level power inverters", in Conf. Rec. IEEE PESC'01, 2001, pp.138-145.