

고정 스위칭 주파수를 갖는 3상 및 2상 RCD-PWM의 파워 스펙트럼 비교

김정근^{o*}, 정영국^{**}, 임영철^{*}, 양형열^{*}, 위석오^{***}

^{*}전남대학교 전기공학과, ^{**}대불대학교 컴퓨터정보공학부, ^{***}한국천문연구원

A Comparative Study on the Power Spectrum of Three-Phase and Two-Phase RCD-PWM Scheme with Fixed Switching Frequency

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

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

ABSTRACT

The objective of this paper is to investigate the power spectrum of a three-phase and a two-phase RCD (Random Pulse Centered Displacement) PWM scheme. The two-phase or three-phase pulses of RCD-PWM scheme are mutually center-aligned as in SVM(Space Vector Modulation), but the common pulse center is displaced randomly from the middle of the period. To verify the validity of the proposed two-phase RCD-PWM scheme, the power spectra of the output voltage, the d.c link current in the inverter drives and the radiated acoustic noise are experimentally investigated. And, the performance of the proposed two-phase RCD-PWM scheme was compared and discussed with the conventional three-phase RCD-PWM scheme.

1. 서 론

현재 산업현장의 전력전자 변환장치에 사용되고 있는 확정적인 주파수를 갖는 PWM기법은 전력 변환시 잡음 전력을 특정 주파수에 집중시켜서 전자기적 잡음과 가청 소음을 유발하게 한다. 또한, 시스템의 직류 링크단에 고조파 전류를 발생함으로써 전원측에 EMI (Electro-magnetic interference)를 발생하기도 한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 최근에 와서 비 확정적 PWM 또는 RPWM (Random PWM)방법이 연구되고 있다. 이 방법은 인버터로 구동되는 모터로부터 발생하는 가청 스위칭 소음의 전력을 광대역 주파수 영역으로 확산함으로써 불쾌감을 주는 소음을 저감하고 있다^[1-3].

RPWM기법은 매 샘플링 주기마다 스위칭 주파수를 랜덤하게 변조하는 RSF-PWM (Random Switching

Frequency PWM)^[4-5]과 매 샘플링 주기를 일정하게 유지하면서 변조구간 내에서 펄스의 위치를 랜덤하게 결정해줌으로써 실제적인 유효 스위칭 주파수를 랜덤하게 해주는 RPP-PWM (Random Pulse Position PWM)[1-3][6-7]등으로 분류될 수 있다. 이 중에서 공간벡터 방식의 RSF-PWM은 전압 지령부와 스위칭 부를 동기화하려면 제어 알고리즘의 연산시간이 스위칭 주파수의 최대값을 제한하는 요소로 작용하게 된다. 이는 복잡한 제어루프를 이 방식으로 구성하는 경우, 최대 스위칭 주파수는 어느 한계를 갖는다는 문제점이 있다.

한편 RPP-PWM기법은 펄스의 위치만을 랜덤하게 변경하여 RPWM 효과를 나타내는 방법이다. 이 방법은 펄스의 위치가 매 변조 구간에서 변경되므로 고정된 주파수로 스위칭을 하더라도 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖고 있다. RPP-PWM 기법은 RLL(Random Lead-Lag) PWM, RCD (Random Centered Distribution) PWM, RZV (Random Zero Vector Distribution) PWM, SRP (Separately Randomized Pulse Position) PWM등 여러 방법에 의해 구현이 가능하다.

본 연구에서는 3상 RCD-PWM기법에 비하여 구현이 용이하고, 스위칭 주파수의 정수배 스펙트럼의 광대역화와 선형화의 효과가 우수한 고정 스위칭 주파수로 동작하는 2상 RCD-PWM을 제안하였다. 종전의 3상 RCD-PWM과 제안된 2상 RCD-PWM을 구현하기 위하여, 16비트 고성능 마이크로 컨트롤러 SAB-C167이 사용되었다. SAB-C167에 의하여 각 변조 구간에서의 듀티비를 구한 후, 선형 랜덤 발생기를 이용하여 균일한 확률 분포로 각 상의 펄스의 위치를 재배치하였다. 제안된 2상 RCD-PWM에 의한 모터 전압과 인버터 직류 링크 전류의 파워 스펙트럼 및 모터의 가청 스위칭 소음 효과를 종전의 3상 RCD-PWM과 비교 검토하였다.

2. 본 론

RCD-PWM은 중앙 정렬된 3상 펄스를 펄스간 중앙 정렬은 유지하면서 펄스의 중앙선을 변조 구간에서 랜덤하게 선택하는 RPP-PWM방법이다. 그림1은 이 방법을 나타내고 있으며 RPP-PWM의 가장 초기 버전인 RLL-PWM에 비하여 랜덤 자유도가 넓은 특성을 보이며, 전류 리플도 향상된 방법이다.

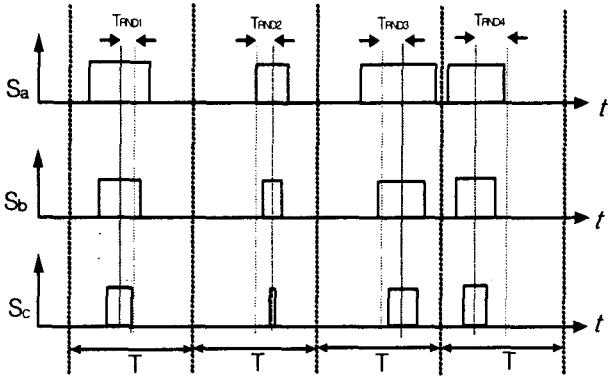


그림1 종전의 3상 RCD-PWM 각상의 펄스
Fig.1 Each phase pulse with conventional three-phase RCD-PWM

그림 2는 그림 1의 3상 RCD-PWM방법을 2상 SVM에 적용한 것이다. 제안된 2상 RCD-PWM기법은 우측 정렬된 2상 펄스를 중앙으로 정렬시킨 후, 변조 구간의 중앙에서 펄스들을 좌우로 위치시키는 방법으로 구현 가능하다. 여기서 중앙 정렬된 펄스의 변위 T_{RND} 는 랜덤수 발생기[1-3]를 통하여 결정되기 때문에 변위 T_{RND} 는 랜덤한 값을 갖게 된다. 랜덤수의 발생 범위는 영벡터 $V(000)$ 의 유지 시간의 범위에서 이루어져야 하는 조건을 만족하여야 한다. 2상 RCD-PWM 방법은 1 변조 구간 내에 두 개의 펄스만이 존재하며 이들 펄스는 항상 같은 변위 만큼 이동 할 수 있다.

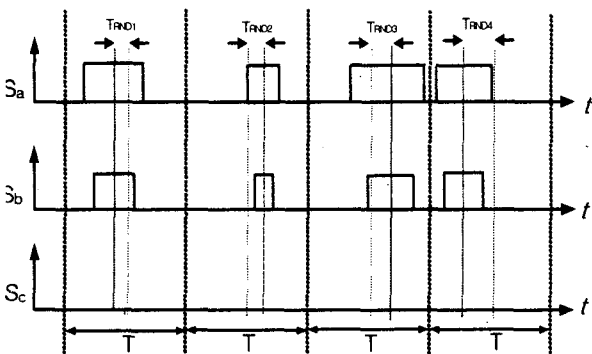
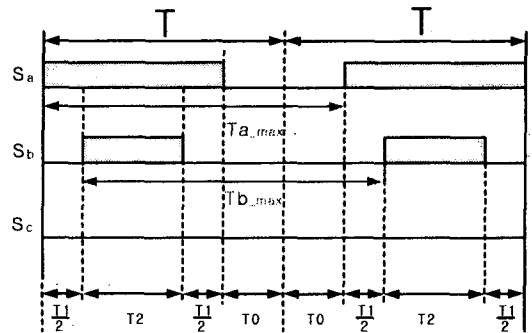


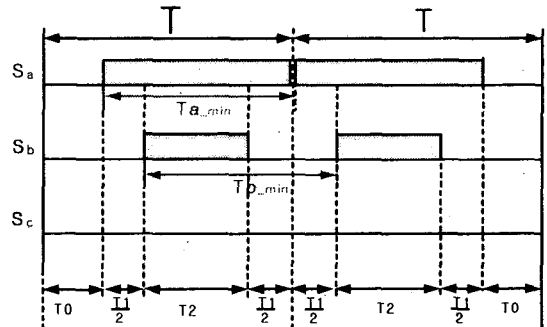
그림2 제안된 2상 RCD-PWM 각상의 펄스
Fig.2 Each phase pulse with the proposed two-phase RCD-PWM

이렇게 변위할 수 있는 랜덤 변위는 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. 2상 RCD-PWM방식은 3상에 비하여 전류 맥동이 다소 증가하는 하지만 샘플링 시간 T를 줄여서 PWM 스위칭 주파수를 올릴 수 있고, 또한 제어 주기를 줄일 수 있다는 장점이 있다^[8-9].

RCD-PWM과 같은 종류의 RPP-PWM기법은 스위칭 주파수는 고정되어져 있으나, 펄스의 위치가 매 변조 구간에서 변경되므로 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖게 된다. 이를 유효 스위칭 주파수라고 하는데, 유효 스위칭 주파수의 최대값 $T_{(abc)_{max}}$ 과 최소값 $T_{(abc)_{min}}$ 은 식 (1)과 식 (2)로 표현할 수 있다.



(a) maximum effective switching frequency



(b) minimum effective switching frequency

그림3 최대 및 최소 유효스위칭 주파수
Fig.3 Maximum and minimum effective switching frequency

$$T_{a_{max}} = \frac{T_1}{2} + T_2 + \frac{T_1}{2} + T_0 + T_0 = T + T_0$$

$$T_{b_{max}} = T_2 + \frac{T_1}{2} + T_0 + T_0 + \frac{T_1}{2} = T + T_0 \quad (1)$$

$$T_{a_{min}} = \frac{T_1}{2} + T_2 + \frac{T_1}{2} = T - T_0$$

$$T_{b_{min}} = T_2 + \frac{T_1}{2} + \frac{T_1}{2} = T - T_0 \quad (2)$$

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구의 내용은 주로 PWM 발생기법에 있으므로 응답성이 좋은 고성능의 페루프 제어 대신에 간단한 개루프 전압제어 방식을 택하였다. 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 뿐 아니라 C167 포트 출력은 바로 IPM을 게이팅 할 수 있는 신호이다. 즉 PLD를 사용하지 않고 C167에 내장된 CAP/COM(Capture/Compare)기능을 사용하여 저 비용의 전력제어장치를 구현하였다.

제안된 2상 RCD-PWM기법의 타당성을 검증하기 위하여 3상 유도 모터를 무부하, 40Hz의 지령속도, 변조지수 $M = 0.7$, 2kHz의 고정 스위칭 주파수로 오픈 루프 운전하였다.

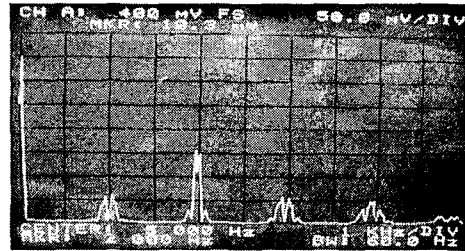
3.1 모터 전압의 파워 스펙트럼

그림 4는 실험에 의한 모터 전압의 파워 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 3상 중앙정렬 SVM은 스위칭 주파수의 2배 주파수 4kHz에서 가장 강한 고조파 성분이 있다. 그리고 스위칭 주파수와 스위칭 주파수의 정수배 주파수에서 비슷한 분포의 고조파 성분이 존재한다. 그림 4(b)로 나타낸 2상 중앙정렬 SVM은 스위칭 주파수 2kHz에서 가장 강한 고조파 성분이 있고, 2배의 스위칭 주파수 4kHz에서 다음으로 강한 고조파 성분이 있다.

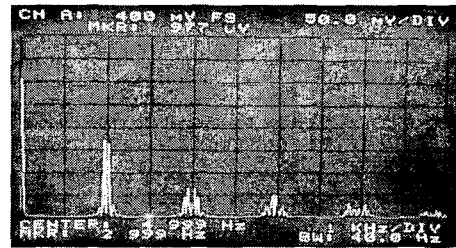
그림 4(c)는 종전의 3상 RCD-PWM의 전압 파워 스펙트럼으로서 그림 4(a)와 비교하여 보면 스위칭 주파수의 2배 주파수 성분은 약간 줄어들었으며 스펙트럼의 광대역화가 다소 이루어진 것으로 보인다. 그림 4(d)는 본 연구에서 제안된 2상 RCD-PWM의 경우로서 그림 4(b)와 비교해 보면 스위칭 주파수 2kHz에서의 고조파 성분이 많이 감소되고 있다. 또한 전 구간에서의 고조파 성분은 특정 주파수에 고정되지 않고 넓은 영역에 고루 분포되고 있어, 2kHz 스위칭 주파수를 제외한 구간에서 거의 이상적인 랜덤 특성을 보이고 있다.

3.2 인버터 직류링크 전류의 파워 스펙트럼

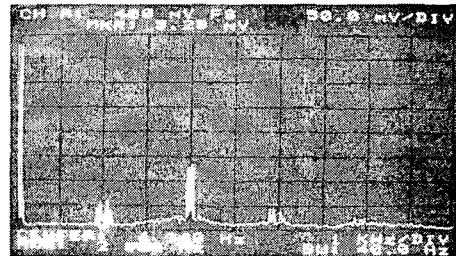
인버터 응용 장치들은 출력전압과 동일하게 직류링크 전류에도 특정 스위칭 주파수의 고조파가 발생된다. 직류 고조파 전류는 인버터의 전원계통에 EMI를 유도하므로 인버터의 입력전원에는 EMI필터 등을 부착하는 경우가 많다. 그림 5는 인버터 직류 링크 전류의 파워 스펙트럼을 보여 주고 있다. 그림 5(d)로 나타낸 2상 RCD-PWM기법은 종전의 3상 RCD-PWM의 결과인



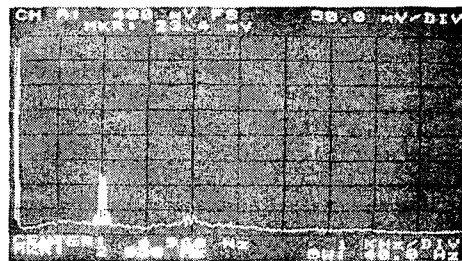
(a) 3 phase SVM



(b) 2 phase SVM



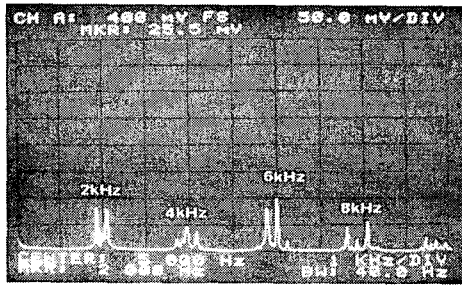
(c) 3 phase RCD



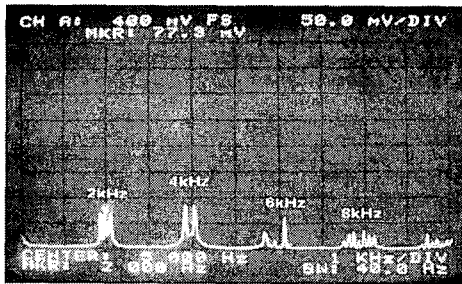
(d) 2 phase RCD

그림4 실험에 의한 모터 전압의 파워 스펙트럼 (1kHz/div.)
Fig.4 Experimental power spectrum of motor voltage (1kHz/div.)

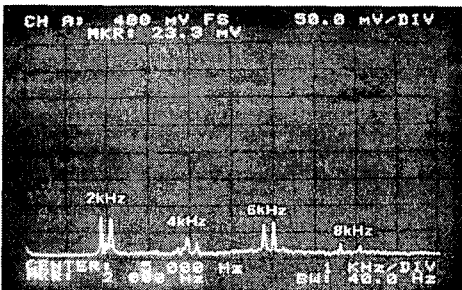
그림 5(c)와 비교하여 스위칭 주파수에서의 고조파 성분을 제외하고는 전 구간에 걸쳐 매우 양호한 주파수 확산 분포를 보이고 있다. 이러한 결과로부터 인버터 전원 측에 부착된 EMI필터의 정격은 감소될 수 있다.



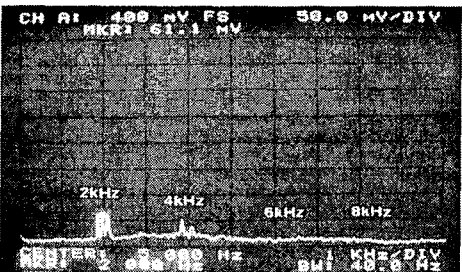
(a) 3 phase SVM



(b) 2 phase SVM



(c) 3 phase RCD



(d) 2 phase RCD

그림 5 실험에 의한 인버터 직류전류의 파워 스펙트럼 (1kHz/div.)

Fig. 5 Experimental power spectrum of inverter dc link current (1kHz/div.)

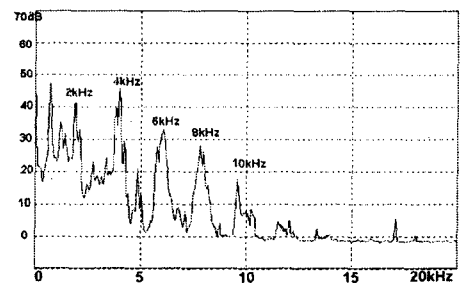
3.3 가청 스위칭 소음의 파워 스펙트럼

본 연구에서 인버터에 의해 구동되는 유도 모터의 스

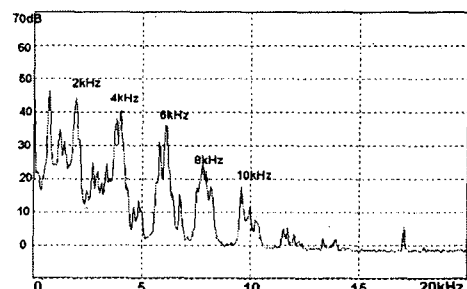
위칭 소음의 파워 스펙트럼을 얻기 위한 실험은 특별히 설계된 6면이 모드 흡음제로 밀폐되어 있는 무향실에서 수행되었으며, 측정 장비로는 소음 및 진동신호에 대한 분석이 가능한 전용 측정기 「OROS-25」를 사용하였다. 실험 결과의 분석에 사용된 데이터는 유도 모터로부터 측면 25cm 떨어진 곳에 설치된 마이크로로부터 측정된 값을 50초간 평균하여 얻은 값을 사용하였다.

그림 6은 각 방식에 따른 모터의 가청소음 파워 스펙트럼을 나타내고 있다. 먼저 그림 6(a)와 그림 6(b)는 3상 및 2상 중앙정렬 SVM을 수행한 결과인데, 그림 4(a)와(b)로 나타낸 모터 전압의 파워 스펙트럼과 유사하게 스위칭 주파수의 정수배 분포의 소음이 발생되고 있다. 그림 6(c)는 종전의 3상 RCD-PWM의 가청 소음 스펙트럼의 결과로서 스위칭 주파수의 2배의 주파수의 스펙트럼을 제외하고는 비교적 이산적인 성분이 완화되어져 있다.

그림 6(d)는 제안된 2상 RCD-PWM의 가청 소음 스펙트럼의 결과이다. 그림 4(c)로 나타낸 종전의 방법과 비교해 보면, 스위칭 주파수의 2배인 4kHz 주파수 성분이 현저하게 감소되어져 있고 또한 6kHz, 8kHz, 10kHz 소음 성분도 종전의 방법에 비교하여 많이 감소되었음을 알 수 있다. 이는 인간이 소음에 대해 가장 고통을 느끼는 1-6kHz범위에서 종전의 방법보다 소음 스펙트럼의 분포가 선형화 되어져 있음을 알 수 있다. 결국 제안된 방법은 전압의 파워 스펙트럼과 유사하게 스위칭 주파수 2kHz에서의 강한 소음을 제외하면, 전체적으로 이산적인 소음 스펙트럼이 상당히 완화되어져 있음을 알 수 있다.



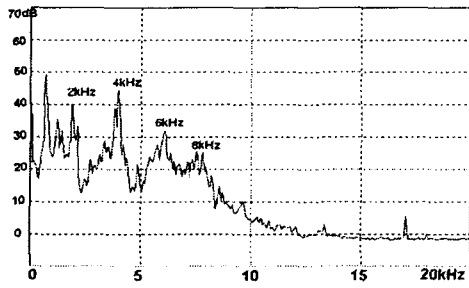
(a) 3 phase SVM



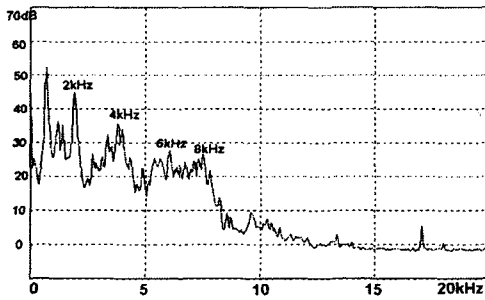
(b) 2 phase SVM

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] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "모터 구동 장치의 가청 스위칭 소음 저감을 위한 2상 및 3상 랜덤 펄스 위치 PWM기법의 성능 비교", 전력전자학회 논문지 제7권 제3호, pp. 224-236, 2002.
- [3] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "모터 구동 장치의 가청 소음 저감을 위한 새로운 3상 Lead-Lag 랜덤 펄스 위치 PWM기법", 대한전기학회 논문지 제50B권 제7호, pp. 387-398, 2002.
- [4] F. Blaabjerg and J. K. Pedersen, "Digital implemented random modulation strategies for ac and switched reluctance drives", in Con. Rec. of IEEE IECON'93, pp. 676-682. 1993.
- [5] C.M. Liaw and Y.M. Lin, "Random slope PWM inverter using existing system background noise : analysis, design and implementaion", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 147, no.1, pp.45-54, 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.



(c) 3 phase RCM



(d) 2 phase RCD

그림 6 실험에 의한 가청소음의 파워 스펙트럼 (5kHz/div.)
Fig. 6 Experimental power spectrum of audible acoustic noise (5kHz/div.)

4. 결 론

본 연구에서는 새로운 2상 RCD-PWM기법을 제시하고 종전의 3상 RCD-PWM기법과 파워 스펙트럼을 비교 고찰하였다. 제안된 2상 RCD-RPWM은 2상 중앙정렬된 SVM펄스를 펄스간 중앙정렬을 유지하면서 펄스의 중앙선을 변조구간에서 랜덤하게 배치하기 때문에 스위칭 주파수가 일정하지 않다. 그 결과 모터의 전압, 직류링크 전류의 불연속적이고 강한 고조파 성분을 광대역의 연속적인 성분으로 분산시킬 수 있었다. 따라서 제안된 2상 RCD-PWM 방식은 인버터 구동 모터의 가청 스위칭 소음을 줄이는 데 탁월한 효과가 있었다. 제안된 2상 RCD-PWM기법에 의한 인버터의 직류링크 전류의 파워 스펙트럼의 광대역화는 인버터 전원 측에 부착된 EMI필터의 정격을 감소할 수 있는 가능성을 제시하였다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터 연구비 지원에 의하여 연구된 결과임.