

새로운 3상 랜덤 펄스 위치 PWM기법에 의한 EPLD기반의 모터 속도제어 시스템

김회근*^o 위석오* 임영철* 정영국** 나석환***

*전남대학교 전기공학과 **대불대학교 전기공학과 *** (주)하우 무선데이터 통신연구소

EPLD based Induction Motor Drives with a New Three-Phase Randomized Pulse Position PWM Scheme

*^o Hoe-Geun Kim *Seog-Oh Wi *Young-Cheol Lim

Young-Gook Jung *Seok-Hwan Na

*Chonnam National University **Daebul University ***How Inc.

ABSTRACT

In this paper, EPLD(Erasable Programmable Logic Device) based induction motor drives with a SRP-PWM(Separately Randomized Pulse Position PWM) is proposed. In the proposed RPWM (Random PWM), each of three phase pulses is located randomly in each switching interval. Based on the space vector modulation technique, the duty ratio of the pulses is calculated. To verify the validity of the proposed RPWM, the experimental study was tried. Along with the randomization of PWM pulses, the space vector modulation is also executed in the TMS320C31 DSP(Digital Signal Processor). The experimental results show that the voltage and switching noise harmonics are spread to a wide band area. Also, the performance of the proposed SRP-PWM and the conventional SVM-PWM are nearly the same from the viewpoint of the v/f constant control.

1. 서 론

전력전자 변환 시스템에서 출력을 제어하기 위하여 사용하는 PWM기법은 잡음전력을 스위칭 주파수의 정수 배에 집중시켜 인버터 구동 시스템의 직류링크 고조파 전류와 가청 스위칭 소음 및 모터의 토크 맥동 등을 유발하고 있다[1-2]. PWM 스위칭 주파수가 특정 주파수에 집중되는 문제점을 해결하기 위해, PWM의 스위칭 주파수를 특정하게 고정시키지 않고 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어지도록 하는 RPWM에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. RPWM 기법은 랜덤 함수에 의해 인버터의 매 스위칭 순간마다 다른 스위칭 주파수로 온 또는 오프 되도록 하여, 인버터의 출력전압과 전류의 고조파 및 모터의 전자기적 소음의 스펙트럼이 광대역으로 분산되는 효과가 있다.

이러한 RPWM에 관한 연구로는, 삼각파 주파수를 랜덤

하게 변조하는 삼각파에 의한 RFPWM (Random Frequency PWM)[3-4], 속도 지령치 전압 공간벡터가 인가되는 스위칭 구간의 시간을 랜덤하게 제어하는 공간 벡터에 의한 RFPWM[5-6]이 있다. 또한 한 변조 구간에서 충분한 수의 랜덤수를 발생시켜 지령치 듀티비와 비교하여 지령치가 발생된 랜덤수 보다 더 큰 경우에 스위칭 온하여 결국 지령치 듀티비에 해당하는 펄스 온 시간을 갖도록 하는 RSPWM(Random Switching PWM)[7], 매 스위칭 구간의 시간은 일정하지만 펄스의 위치를 변조구간 내의 앞 또는 뒤에 랜덤하게 변경시키는 LLPWM (Lead-Lag PWM)[8-9]등이 보고되고 있다.

그런데 삼각파 방식의 RFPWM은 캐리어를 발생시키기 위한 아날로그회로가 요구될 뿐만 아니라, 공간벡터 변조방식에 비해 인버터의 최대 변조지수가 낮다는 단점이 있으며, 공간벡터 방식의 RFPWM은 제어 알고리즘의 요구되는 계산량에 따라 최대 스위칭 주파수가 매우 민감하게 제한을 받는다는 단점이 있다. 또한 RSPWM은 매우 높은 스위칭 주파수를 요구하므로 전력소자 선택에 제한을 주며, LLPWM은 간단히 구현할 수 있는 장점이 있는 반면 스펙트럼을 광대역에 고루 분포시키는 데는 한계가 있다.

본 연구에서는 각 상별로 펄스 위치를 랜덤하게 하므로써 모터구동장치의 가청 소음을 저감시킬 수 있는 새로운 방식의 3상 RPWM을 제안하였으며, 그 타당성을 검증하기 위한 EPLD기반의 모터 속도제어 시스템을 구현하였다. 공간벡터 변조에 의해 각 변조 구간에서의 듀티비를 구하였으며, 공간벡터 RPWM의 발생은 TMS320C31 DSP에 의하였으며 균일한 분포를 갖는 랜덤 발생함수를 이용하여 각 상의 펄스를 랜덤하게 배치하였다. 부하가 있는 상태에서 유도모터의 v/f 일정제어의 성능을 SVM과 제안된 SRP-PWM과 비교 실험한 결과, v/f일정제어의 성능은 모두 동일함을 확인할 수 있었다. 그러나 제안된 방법은 모터의 전압 및 소음 스펙트럼의 관점에서 광대역화 효과가 SVM에 비하여 훨씬 우수하였다.

2. 제안된 3상 RPWM 기법

본 연구에서 제안하는 새로운 RPWM 기법은 펄스의 위치를 각상별로 랜덤하게 하는 것이다. 그림 1(a)는 종전의 SVM-PWM의 스위칭 패턴이며 T_s 는 샘플링 주기를 나타내고 있다. 그림 1(b)는 본 연구에서 제안된 RPWM의 스위칭 기법을 나타낸 것이다. 제안된 RPWM 방식은 변조구간 내의 어느 위치에도 펄스를 배치할 수 있으며 또한 매 변조구간에서 펄스의 위치가 랜덤하기 때문에 스펙트럼 분포의 효과가 매우 크다.

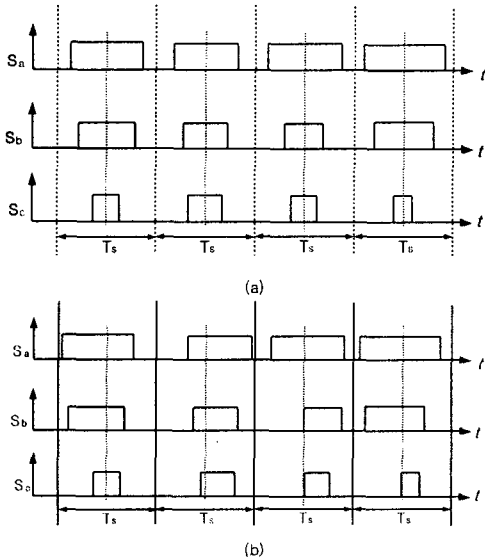


그림 1 SVM-PWM과 제안된 SRP-PWM의 스위칭 패턴

(a) SVM-PWM (b) SRP-PWM

Fig.1 Switching pattern with SVM-PWM and proposed SRP-PWM

(a) SVM-PWM (b) SRP-PWM

3. 공간벡터 변조에 기반한 펄스위치 랜덤화

공간벡터 변조에 의하여 매 제어 구간마다 각 상의 펄스의 듀티비가 구해지면 제안된 RPWM을 수행하기 위하여 펄스의 위치를 랜덤하게 하는 작업이 필요하다. 랜덤 발생 기법[1-2]에 의하여 생성된 랜덤수를 펄스가 위치할 수 있는 범위 안에 들도록 공간을 재설정한다. 각 펄스들이 위치 할 수 있는 범위는 현재의 지령치 전압벡터가 6개의 섹터 중 어느 위치에 있는가에 따라 달라진다. 만일 공간벡터상의 섹터1에 지령치 공간벡터가 있어서 벡터 U_1, U_2 가 시분할로 인가되어야 할 때 각 3상 펄스의 상대적인 크기와 펄스가 위치할 수 있는 영역을 그림 2에 나타낸다. 이 경우 a상 펄스가 위치 할 수 있는 범위는 변조지수가 1이라고 가정하면, 변조 구간내의 어느 위치에도 올 수 있으며, b상 펄스는 a상 펄스의 한계를 벗어나지 않는 범위 내에 위치해야 하며, 마찬가지로 c상 펄스도 b상 펄스의 한계를 벗어나지 않는 범위 내에 들어야 한다. 만일 어느 하나의 펄스라도 한계를 벗어난다면 3상 펄스의 조합에 따라 결정된 스위칭 상태가 변경되므로 전혀 다른 스위칭을 추가로 하게 된다.

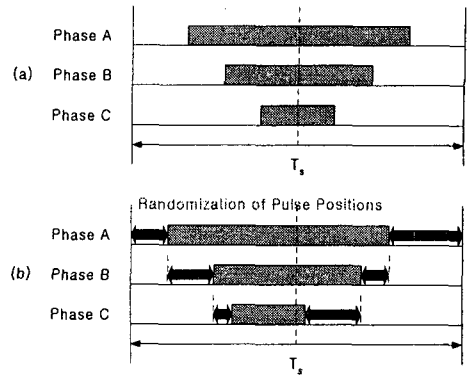


그림 2 각상의 펄스에 대한 위치 범위 (a) SVM-PWM (b) SRP-PWM

Fig.2 Range for each phase pulse (a) SVM-PWM (b) SRP-PWM

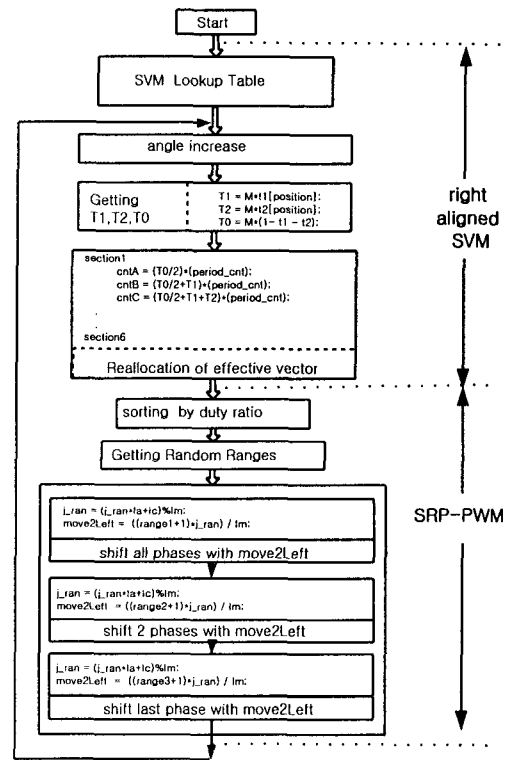


그림 3 SVM-PWM과 SRP-PWM의 구현 알고리즘

Fig.3 Implementation algorithm of SVM-PWM and SRP-PWM

본 연구에서 구현된 SRP-PWM는 우측정렬 SVM을 통하여 얻어진 펄스의 위치를 좌측으로 어느 정도 변위시킬 것인가를 랜덤함수를 사용하여 구현한다. 이를 위해 각 상별로 듀티비 별로 정렬하고 가장 듀티비가 큰 상부터 영벡터 범위 내에서 랜덤수를 발생시켜 영벡터 인가시간 범위내에서 펄스를 랜덤하게 위치시킨다. 나머지 두상도 차례대로 지령벡터가 흐트러지지 않는 펄스 범위에서 위치를 랜덤하게 재배치시키면 SRP-PWM을 구현할 수 있다.

4. 시스템 구성 및 결과

4.1 시스템 구성

EPLD로 구현된 3상 랜덤 펄스 위치 PWM 발생장치

와 M/T속도계측장치를 이용하여 모터의 속도제어를 행하였다. 모터의 속도제어는 v/f 일정제어에 의거하고 있으며 제어 알고리즘으로는 산업현장에서 가장 많이 사용되는 PI제어를 사용하였다.

그림 4는 시스템의 전체적인 구성도이다. 3상 전원을 정류시켜 전압원 인버터를 사용하여 전동기를 구동하는 구조이며 TMS320C31 DSP를 사용하여 전체적인 알고리즘을 수행하였다. DSP보드에 장착된 EPLD로는 Altera사의 EPF8452ALC84-4를 사용하였고, 디지털 회로의 하드웨어 디버깅시 PC의 병렬포트에 연결된 Altera사의 byteblaster를 사용하여 SRAM방식의 EPLD를 설정하였다. 하드웨어 디버깅이 모두 끝난 상태에서는 PC로부터 다운로드하여 설정하지 않고, Altera사에서 공급되는 Configuration ROM인 EPC1064PC8에 롬화시켜, 전원 인가시 자동으로 롬에서 EPLD로 회로 데이터가 설정되도록 하였다.

그림 4(b)는 v/f 일정제어를 행하였을 때의 제어 구성도이다. DSP에서는 속도루프를 소프트웨어적으로 구현하고 있다. 지령 속도와 M/T속도 측정부에서 얻어진 속도의 차이인 속도오차는 PID제어기의 제어입력이 되고, PID제어기는 지령 동기 주파수를 출력하며, v/f 일정 제어기는 지령 주파수에 따라 전압을 다르게 지령한다. 얻어진 지령 주파수와 전압을 이용하여 매 제어 주기마다 지령 공간전압벡터가 얻어지고 공간전압벡터 변

조법을 통하여 3상의 펄스 듀티비가 계산된다. 계산된 듀티비는 EPLD에 구현된 PWM 발생기에 의해 디지털 듀티비 값을 펄스 파형으로 변환된다. 이 펄스 파형이 IPM(Intelligent Power Module)의 게이트에 인가되면 원하는 지령 전압이 구현된다.

제안된 SRP-PWM에 의해 EPLD기반 인버터는 2HP의 주 모터를 속도 제어하고 있으며 주 모터의 정격전류와 정격토크는 5.9A와 0.85N-m이다. 부하로는 주 모터와 직결된 1HP의 유도모터인데, 이 부하모터의 속도를 조절하여 주 모터에 인가되는 부하량을 제어하고 있다. 주 모터의 %부하는 전류용량을 기준으로 할 때, 주 모터의 정격부하에 대해 50%로 하였다.

표 1 모터와 부하의 사양

Table 1 Specifications of motor and load

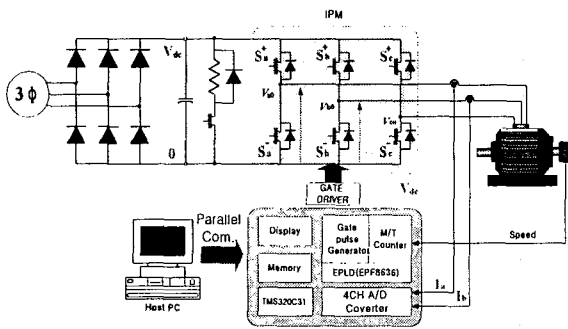
Motor	<ul style="list-style-type: none"> · 3 phase, squirrel cage type induction motor · 1.5kw(2HP),4pole,220v/380v,5.9A/3.4A · Torque : 0.85N-m · Speed : 1730rpm(slip=3.8%)
Load	<ul style="list-style-type: none"> · 3phase, squirrel cage type induction motor · 4pole,0.75KW(1HP),220v/380v,3.5A/2.0A

본 연구에서 인버터로 구동되는 유도모터의 스위칭 소음의 파워 스펙트럼을 얻기 위한 실험은 6면이 모드 흡음제로 밀폐되도록 특별하게 설계된 무향실(無響室)에서 수행되었으며, 측정 장비로는 소음 및 진동신호에 대한 분석이 가능한 전용 측정기 「OROS」를 사용하였다. 실험 결과의 분석에 사용된 데이터는 유도모터로부터 측면 방향으로 0.3m 떨어진 곳에서 얻은 값을 사용하였다.

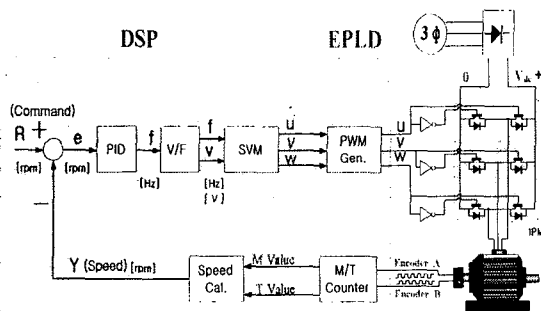
4.2 실험 결과 및 고찰

부하가 있는 상태에서 유도모터를 40Hz의 지령속도, 2kHz의 스위칭 주파수로 페루프 속도제어 하였을 때, 종전의 SVM-PWM방식과 제안된 SRP-PWM방식에 따른 모터의 선간전압과 소음 스펙트럼을 그림 5와 그림 6에 각각 나타내었다. 그림 5는 SVM-PWM의 경우이며, 그림 6은 제안된 SRP-PWM을 수행한 경우이다.

우선 그림 5(a)로 나타낸 SVM-PWM의 전압스펙트럼은, 스위칭 주파수의 2배 주파수 영역에 고조파의 가장 강한 성분이 있고 스위칭 주파수의 1배 주파수 영역에 두 번째로 강한 고조파 성분이 존재하고 있다. 소음 스펙트럼을 나타내고 있는 그림 5(b)의 경우, 2배 스위칭 주파수에 소음의 가장 강한 성분이 있고 1배 스위칭 주파수에 두 번째로 강한 소음의 성분이 존재함을 알 수 있다. 그래프는 로그 스케일이며 격자 1눈금 당 10dB, 최대70dB, 최소 10dB이다. 그리고 그래프의 주파수 축의 영역은 0 - 20kHz이다. 그리고 스위칭파 상관없는 주파수대인 750Hz 및 1.8kHz대에 약간의 소음성분이 존재함을 알 수 있다.



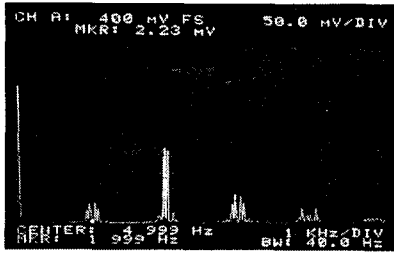
(a) system configuration



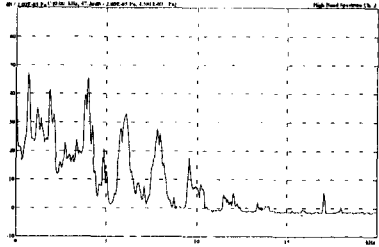
(b) v/f constant control

그림4 실험 시스템

Fig.4 Experimental system



(a)spectrum of the voltage(1kHz/div.)



(b)spectrum of the switching noise (5kHz/div.)

그림 5 SVM-PWM기반의 모터구동시스템

Fig.5 SVM-PWM based motor drives

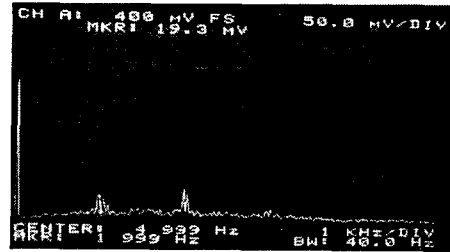
제안된 SRP-PWM를 나타내고 있는 그림 6(a)의 경우, 1배 스위칭 주파수대, 2배 스위칭 주파수대 및 3배 스위칭 주파수대 고조파 성분의 크기가 현격하게 감소되었음을 알 수 있다. 이는 전 구간에서 전압 고조파의 성분이 특정 주파수에 고정되지 않고, 광대역으로 고루 분산되고 있음을 의미하고 있다. 그림 6(b)는 이 경우의 소음 스펙트럼을 나타내고 있다. 전압 스펙트럼과 동일하게 특정 주파수에 집중되어있던 소음의 스펙트럼을 넓은 주파수대로 분산하고 있음을 알 수 있다. 그런데 이 경우 SVM-PWM에서는 작았던 750Hz성분이 상당히 증가하였음을 알 수 있다. 이는 모터의 고유 주파수와 랜덤 주파수가 중첩되어 기계적인 공진을 유발하여 발생한 현상이다.

이와 같이 RPWM에 의해 구동되는 모터의 예기치 못한 공진은 RPWM의 단점으로 지목되고 있는데, Holtzer법[10]에 의하여 공진 주파수를 예측한 후, 지능적 전력밀도 함수에 의하여 해당 공진 주파수만을 상쇄하는 연구[11]가 진행되고 있다.

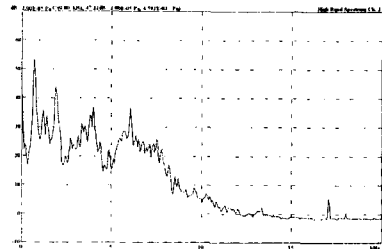
그림 7은 부하가 있는 상태에서 v/f일정제어를 위한 지령치와 속도응답 특성을 나타낸 것이다. 우선 그림 7(a)는 SVM-PWM과 제안된 SRP-PWM에 대한 2kHz의 스위칭 주파수, 500rpm의 속도 지령치에 대한 스텝 응답 특성을 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 SRP-PWM기법을 적용하더라도 유도모터의 과도응답 특성은 종전의 SVM-PWM과 동일함을 알 수 있다. 본 연구의 목적은 과도응답 특성의 개선에 있지 않기 때문에 과도상태의 지연은 고려하지 않아도 된다. 그림 7(b)는 속도를 0~1400rpm까지는 증가시키고 다시 200rpm으로 감소하는 램프 지령치에 대한, 두 방식의 속도응답 특성을 보여주고 있다. 앞의 스텝 지령치와 동일하게 서로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 4단계의 다중 스텝

지령치에 대한 속도응답특성의 결과는 그림 7(c)에 나타나 있다. 스텝과 램프지령치의 응답특성과 동일하게 다중 스텝 지령치도 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

이상으로부터 제안된 SRP-PWM기법은 종전의 SVM-PWM과 비교하여 모터의 가청 스위칭 소음은 현저하게 저감되며, 속도응답 특성은 서로 동일하다는 것을 알 수 있다.



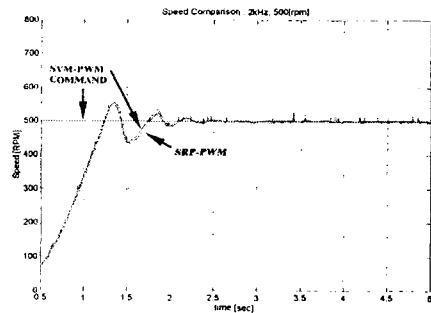
(a)spectrum of the voltage(1kHz/div.)



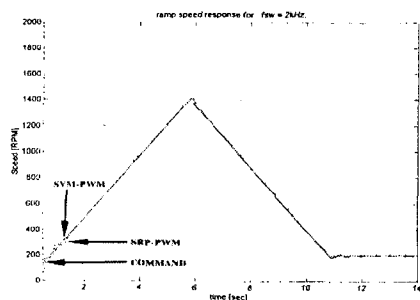
(b)spectrum of the switching noise (5kHz/div.)

그림6 제안된 SRP-PWM기반의 모터구동시스템

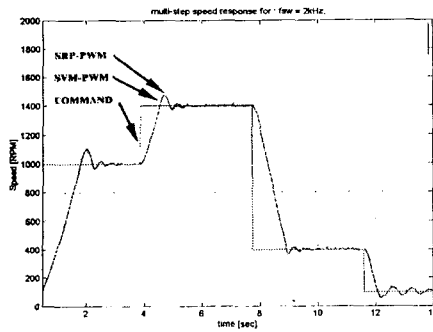
Fig.6 The proposed SRP-PWM based motor drives



(a)step change



(b)ramp change



(c) multi-step change

그림7 SVM-PWM과 SRP-PWM의 속도제어를 위한 과도특성 비교
Fig.7 Measurements of dynamics using SVM-PWM and SRP-PWM

5. 결 론

본 연구에서는 펄스의 위치를 랜덤하게 함으로써 새로운 3상 RPWM을 구현할 수 있는 SRP-PWM방식을 제안하였으며, EPLD기반의 유도모터 속도제어 시스템에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 제안된 SRP-PWM은 매 변조구간마다 각 3상 펄스의 위치를 랜덤하게 배치하여 스위칭 주파수가 일정하지 않다. 그 결과 인버터의 출력 전압과 모터 소음의 불연속적이고 특정 주파수에 집중된 고조파 성분을 광대역의 연속적인 성분으로 분산시킬 수 있었다. 또한 제안된 RPWM 기법을 v/f 속도제어에 적용하더라도 유도모터의 속도응답 특성은 종전의 SVM-PWM과 동일하였다. 결국 제안된 SRP-PWM기법은 종전의 SVM-PWM과 비교하여 모터로부터 발생하는 불쾌한 가청 스위칭 소음은 현저하게 저감되며, 속도응답 성능은 동일하게 유지됨을 알 수 있었다. 제안된 SRP-PWM을 벡터제어 시스템에 적용하는 것이 다음의 연구과제로써 기대된다.

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

참 고 문 헌

- [1] S.H.Na Y.G.Jung, 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.
- [2] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "새로운 2상 랜덤 펄스 위치 PWM기법", 전력전자학회 논문지 제7권 제2호, pp.194-204, 2002.
- [3] 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.

- [4] T.G. Habetler and D. M. Divian, "Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier", IEEE Trans. PE, vol. 6, no. 3, pp. 356-363, 1991.
- [5] F. Blaabjerg and J. K. Pedersen, "Implementation and test of a digital quasi-random modulated SFAVM PWM in a high performance drive system", IEEE IECON'93, pp.265-270.1993.
- [6] A. M. Trzynadlowski, J. K. Pedersen, R. L. Kirlin and S. Legowski, "Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate", IEEE Trans. IA, vol.44, no.2,pp.173-181,1997.
- [7] S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, Hypersonic MOSFET based power inverter with random pulse width modulation, in Conf. Rec, IEEE-IAS Ann. Mtg., pp. 901-903, 1989
- [8] R.L.Kirlin, S.Kwok, S.Legowski and A. M. Trzynadlowski, "Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position", IEEE Trans. PE vol.9, no.5, pp.463-471,1994.
- [9] M.M.Bech, J.K.Pedersen and F.Blaabjerg, "Field-oriented control of an induction motor using random pulse width modulation", IEEE APEC'00, pp.924-931,2000.
- [10] J.K.Pedersen, F.Blaabjerg, "Determination of mechanical resonances in induction motors by random modulation and acoustic measurement", EPE'93, pp.319-324,1993.
- [11] J.K.Pedersen, F.Blaabjerg, "Reduction of acoustical noise emission in ac machines by intelligent distributed random modulation", EPE'93, pp.369-375,1993.