

개선된 Randomized Pulse Position PWM기법을 이용한 3상 유도 전동기의 고조파 영향

• 하상목, 한우용, 이창구, 김병우
• 전북대학교 전자정보공학부, 전주공업대학 전기과

Improved Randomized Pulse Position PWM Scheme Based on The three-phase Indu- Drive To Reduce the Harmonic Effect

• Sang-mok Ha, Woo-yong Han, Chang-goo Lee, Byung-woo Kim
Chonbuk Univ., Jeonju Technical College, Electrical Engineering & Science Research In

Abstract- In this paper, RFRPP(Random Frequency Randomized Pulse Position) PWM for three-phase voltage-controlled inverters is proposed. The LLPWM(Lead-Lag PWM) technique is that three switching pulses are located randomly back and forth in each switching interval. But with the restriction of random distribution, the harmonic spectrum cannot be dispersedly and continuously distributed. This paper calculates the duty ratio of the switching pulse firstly. Second, the switching pulses are located randomly in the switching interval. Third, the fixed switching frequency of the space vector modulation is randomly varied. To verify the validity of the proposed technique, simulation study is tried using Matlab/Simulink. When a proposed technique is employed, the harmonic spectrum of the inverter output voltage varies from one cycle to the next and the EMI(Electromagnetic Interference) and resonant vibration are greatly alleviated.

1. 서 론

교류전동기의 인버터 구동시스템에서 PWM(Pulse Width Modulation)기법은 가장 널리 쓰이는 대표적인 전력변환 기법중의 하나이다. PWM 기법의 성능은 직류 링크의 전압을 선형적으로 사용할 수 있는 정도로 평가 될 수 있다. 이런 관점에서 SVPWM(Space Vector PWM)기법이 다른 PWM 기법보다 우수하다고 알려져 있다.

그러나 SVPWM 기법은 고정스위칭 주파수 방식이기 때문에, 스위칭주파수가 커질수록 스위칭주파수와 그의 정수 배에 해당되는 특정대역에서는 고조파의 분포가 현저하게 증가하게 된다[1]. 이처럼 증가된 고조파에 의해 시스템에는 전자기적 소음, 기계적 진동 등의 문제가 발생하게 된다[2].

이와 같은 특정대역에 분포하는 고조파영향의 저감을 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 예로, 인버터의 스위칭이 부하조건에 따라 임의적인 변동을 줄 수 있는 히스테리시스 전류제어에 관한 연구[3], 소음 및 진동에 특히 영향을 미치는 저차 고조파를 저감하기 위한 최적 Optimal PWM 방식 등이 연구되어 왔다.

그러나 최근에는 스위칭 주파수를 고정시키지 않고 랜덤하게 변화하여, 고조파 스펙트럼 분포를 광대역화 시키는 RPWM에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[4]. RPWM기법은 인버터의 매 스위칭 순간마다 랜덤함수에 의해서 스위칭 주파수를 랜덤하게 변화시킴으로써 특정 대역의 고조파 분포를 연속적으로 널리 분포시키는 방식이다.

RPWM기법의 종류는 다음과 같다. RFPWM(Random Frequency PWM), RPPWM(Randomized pulse Position PWM), RSPWM(Randomized Switching PWM)기법 등이 있다. RFPWM기법에는 기준 삼각 파형의 주파수를

랜덤하게 변화시키는 방법과, 공간벡터변조기법의 스위칭 구간을 랜덤하게 변화시키는 방법이 있다. RPPWM기법에는 스위칭 펄스를 변조구간 내에 위치시키는 방법에 따라서 LLPWM (Lead-Lag PWM)기법[5]과 RPPPWM(Randomized Pulse Position PWM)기법이 있다. RSPWM기법은 변조구간 내에서 미리 계산된 충분한 랜덤수를 발생 시켜서 이를 기준값과 비교하여 스위칭 하는 기법이다[6].

그러나 삼각파 RFPWM기법은 랜덤수를 발생시키기 위한 애날로그회로가 요구되는 단점이 있으며, 공간벡터변조방식의 RFPWM기법은 알고리즘 계산량에 따라 최대스위칭주파수가 민감하게 반응하는 단점이 있다. RPPWM기법은 간단하게 구현할 수 있는 장점이 있으나 고조파의 분포를 광대역화 시키는 데는 한계가 있으며 [7], RSPWM기법은 높은 스위칭 주파수를 요구하므로 스위칭소자 선택에 제한이 가해진다는 단점이 있다.

본 논문에서는 Random Frequency Randomized Pulse Position PWM기법을 제안하였다. 첫째, 공간벡터변조방식의 고정스위칭 주파수를 랜덤수 발생기를 이용해서 일정한 범위 내에서 랜덤하게 변화시킴으로써 공간벡터변조방식의 단점인 스위칭주파수대의 고조파의 분포를 저감하였다. 둘째, 공간벡터변조방식에서 계산된 듀티비를 랜덤하게 위치시키는 RPPPWM기법을 적용하여 스위칭 주파수와 그의 정수 배에서 발생하는 이상적인 고조파의 분포를 연속적인 형태로 변화시켰다. 위의 두 가지 방법을 통해서 고조파에 의해서 발생되는 기계적 진동 및 소음의 저감을 극대화 시켰다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해서 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. RPWM 기법

2.1 제안한 RPWM기법

본 논문에서 제안하는 개선된 RPPPWM기법은 첫째, 공간벡터변조방식에 의해서 스위칭 시간을 계산한다. 그러나 공간벡터변조방식의 고정스위칭 방식 대신, 스위칭 시간에 랜덤 수를 적용시켜 가변성을 부여한다. 둘째, 일정한 스위칭 구간에서 펄스의 위치를 랜덤하게 적용시키는 RPP(Randomized Pulse Position)기법을 동시에 본 시스템에 적용시킨다.

그림 1-(a)는 SVPWM방식의 스위칭 기법을 나타낸 것이다. SVPWM 방식은 고정스위칭 주파수로 동작하므로 스위칭 대역에서 발생하는 고조파에 의한 영향을 받게 된다. 그림 1-(b)는 RSPWM방식의 스위칭 기법을 나타내었다. 매 스위칭 구간마다 스위칭 주파수가 변화됨을 알 수 있다. 그림 1-(c)는 RPPWM방식을 나타낸다. SVPWM 방식과 스위칭 구간은 일정하지만 스위칭 펄스가 랜덤하게 위치함을 알 수가 있다.

본 논문에서 제안한 방식의 스위칭 패턴을 그림 2에 나타내었다. 그림 1과 비교해서 스위칭 구간이 고정되지 않고 스위칭 순간마다 가변 됨을 알 수가 있다. 그리고 펄스의 위치도, 가변 되는 스위칭구간마다 랜덤하게 위

치한다는 것을 알 수가 있다.

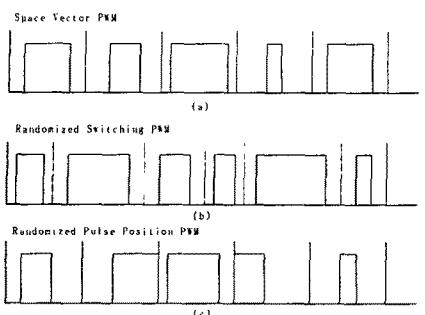


그림 1 기존의 PWM 기법

(a) SVPWM (b) RSPWM (c) RPPWM

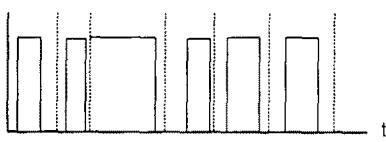


그림 2 제안한 RPWM 기법의 스위칭 패턴

2.1.1 Randomized Switching Pattern

스위칭 주파수에 랜덤 한 변화를 주기 위해서는 스위칭 소자의 손실을 고려해야 한다. 즉 스위칭 주파수(f)는 $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$ 의 범위 안에 있어야 한다. 확률밀도 함수 $p(f)$ 가 위의 범위 안에서 균일하게 분포할 때

$$p(f) = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} = \frac{1}{\Delta f} \quad f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (1)$$

$p(f)$ = f 의 확률밀도 함수

f = 스위칭 주파수

f_{\min} = 최소 스위칭 주파수

f_{\max} = 최대 스위칭 주파수

는 (1)식처럼 정의된다. 즉 스위칭 주파수(f)는 확률밀도 함수 $p(f)$ 가 균일하다는 조건 하에 식(1)을 만족하는 범위 내에서 랜덤하게 선택할 수 있다. 스위칭 구간(T)은 $T=1/f$ 이고 확률 변환식을 이용하면,

$$p(T) = \frac{1}{\Delta f T^2} = \frac{1}{f_{\max}^2} \leq T \leq \frac{1}{f_{\min}^2} \quad (2)$$

식(2)에 의해서 스위칭구간의 평균값(T_{avg})과 스위칭 주파수의 평균값(f_{avg})은 식(3)과 (4)로 유도할 수 있다.

$$T_{avg} = \int_{-\infty}^{+\infty} P(T) T dT = \frac{1}{\Delta f} \int_{\frac{1}{f_{\max}}}^{\frac{1}{f_{\min}}} \frac{1}{T^2} T dT = \frac{1}{\Delta f} \ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (3)$$

$$f_{avg} = \frac{1}{T_{avg}} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\ln \left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right)} = \frac{\Delta f}{\ln \left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right)} \quad (4)$$

결과적으로 아래의 식(5)에 의해서

$$f_{\min} = \frac{\Delta f}{e^{\frac{\Delta f}{f_{avg}}} - 1} \quad f_{\max} = \frac{\Delta f}{1 - e^{-\frac{\Delta f}{f_{avg}}}} \quad (5)$$

스위칭 손실을 고려한 스위칭주파수의 최대값 및 최소값을 정할 수 있다. 본 논문에서는 Matlab/Simulink의 랜덤수 발생기를 통해서 정규분포된 랜덤수를 스위칭 주파수의 가변성에 적용하였다.

2.2 Randomized Pulse Position PWM 기법

고정스위칭방식의 SVPWM방식에서 계산된 듀티비를 각각의 스위칭 구간에 랜덤 하게 위치시킬 수 있다. 랜덤 하게 위치하는 스위칭 펄스는 결과적으로 스위칭 주파수가 가변 되는 효과를 가져온다. Randomized Pulse Position PWM기법에는 스위칭 펄스가 위치하는 방식에 따라서 Lead-Lag 기법, RPP기법 등이 있다. 본 논문에서는 이를 방식 중에서 펄스의 위치를 변조구간내의 임의의 위치에 랜덤 하게 위치하는 RPPPWM기법을 적용하였다. 스위칭 주파수의 최대값 및 최소값은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{\max} = \frac{1}{T_{\min}} = \frac{1}{T_s * M \left(\frac{\sin(\frac{\pi}{3} - \alpha)}{\sin \frac{\pi}{3}} \right)} \quad (6)$$

$$f_{\min} = \frac{1}{T_{\max}} = \frac{1}{T_s \left(2 - M \frac{\sin(\frac{\pi}{3}) - \sin \alpha}{\sin \frac{\pi}{3}} \right)} \quad (7)$$

여기서 T_s = 변조구간

M = 변조지수

2.2.1 랜덤수의 적용

가변스위칭 패턴에서 계산된 듀티비를 랜덤 하게 위치시키기 위해서는 이를 결정할 수 있는 랜덤함수가 필요하다. 랜덤함수는 균일한 분포를 갖어야 하고, 발생된 랜덤 수는 시스템의 특성을 충족할 수 있도록 충분한 범위에서 발생할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 기존의 RPPPWM기법에서 사용된 랜덤 수를 적용하였다.

첫째, 0부터 im 사이의 정수를 다음 식에 의해서 발생시킨다.

$$jran = (jran * ia + ic) \% im \quad (8)$$

둘째, 0에서 1사이의 랜덤한 실수는,

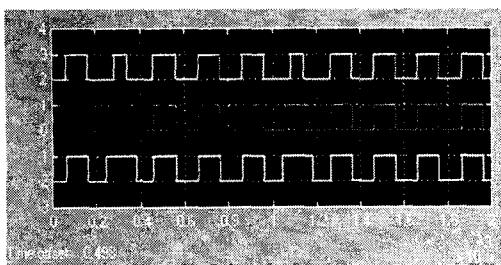
$$ran = \frac{(float)jran}{(float)im} \quad (9)$$

위의 식(9)에 의해서 결정할 수 있다.

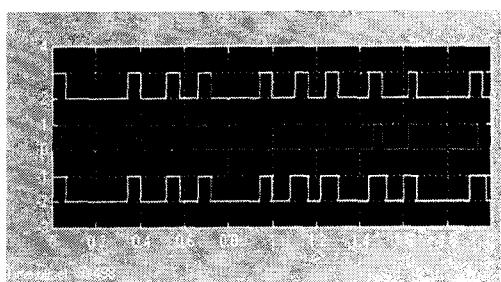
3. 시뮬레이션 결과

3.1 PWM 펄스 패턴도

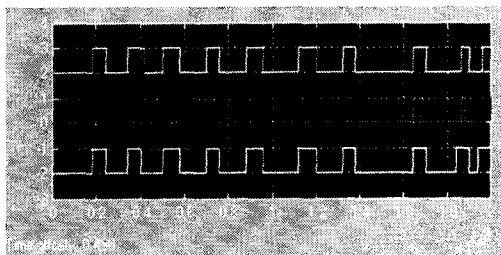
Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 Space Vector PWM, Randomized Pulse Position PWM, Random frequency + Random Position PWM 기법들 각각의 스위칭 펄스 패턴은 아래 그림 3과 같다. 그림 3에서 알 수 있는 것처럼 제안한 랜덤 기법은 일정한 대역에서 가변 되는 스위칭기법을 적용한 Randomized Pulse Position기법을 적용하였음을 알 수가 있다.



(a) SVPWM



(b) RPPPWM



(c) (RF + RPP)PWM

그림 3 PWM 패턴도

3.2 선간 전압의 고조파 스펙트럼 분포도

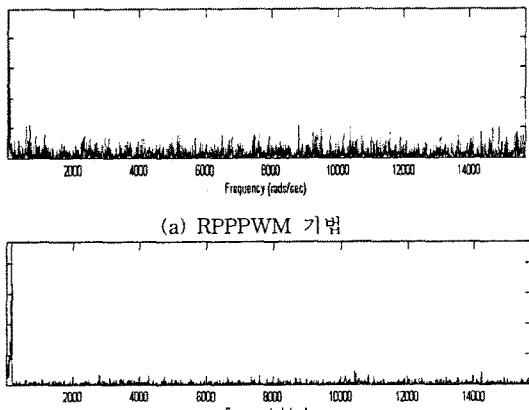


그림 4 선간 전압의 고조파 스펙트럼

위의 그림 4에서 (a)의 기법은 기본주파수 60HZ와 5KHZ의 스위칭 주파수로 동작할 때의 선간 전압의 고조파 스펙트럼 분포도이다. 스위칭 대역과 그의 정수배의 대역에서 여전히 연속적으로 분포되지 못한 고조파 블러스터가 존재하는 것을 알 수가 있다. (b)의 그림은 제안한 기법을 적용시킨 결과로서, (a)의 경우보다 연속적으로 분포되는 고조파의 분포를 볼 수가 있다.

4. 결 론

대부분의 교류기(ac-machines)에서는 18kHz이하의 낮은 스위칭 주파수에서 저차 고조파에 의한 문제가 발생하게 된다. 즉 가정소음, 기계적 진동 등이 그 예이다. 이와 같은 고조파 적손성을 개선시키고자 본 논문에서 제안한 기법은 다음과 같다. 첫째, 공간벡터 변조기법에 가변스위칭 기법을 적용하였다. 웨던한 스위칭에 대해서 샘플링 시간을 감소시킬 수 있고, 이에 따라서 스위칭 주파수를 증가시킬 수 있으므로 스위칭 손실을 감소시킬 수 있다. 둘째, 랜덤스위칭에 대해서 계산된 스위칭 펄스를 웨던하게 위치하게 함으로써, 스위칭 대역에 집중적으로 분포하는 고조파의 분포를 연속적인 형태로 널리 분포시켰다. 위의 두 가지 기법을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 스펙트럼 분포의 그림에서 알 수 있는 것처럼 고조파의 분포가 현저하게 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] C.M.Liau and Y.M.Lin,C.H. and K.I.Hwu, "Analysis, Design, and Implementation of a Random Frequency PWM Inverter", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.15, NO.5, pp.843-854, SEPTEMBER 2000.
- [2] Y.S.Lai, "New Random Technique of Inverter Control for Common Mode Voltage Reduction of Inverter Fed Induction Motor Drives", IEEE Transaction on Energy Conversion, VOL.14, NO.4, pp.1139-1146, December 1999.
- [3] B.J.KANG and C.M.Liau, "Random Hysteresis PWM Inverter With Robust Spectrum Shaping", IEEE TRANSACTION ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEM, VOL.37, NO.2, pp.619-629, APRIL 2001.
- [4] BOR REN LIN, "Implementation of Nondeterministic Pulsewidth Modulation for Inverter Drives", IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEM, VOL.36, NO.2, pp.482-490, APRIL 2000.
- [5] R.Lynn Kirlin and Sam Kwok and Stanislaw Legowski and Andrzej M.Trzynadlowski, "Power Spectra of a PWM Inverter with Randomized Pulse Position", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.9, NO.9, SEPTEMBER 1994.
- [6] Cursino Brandao Jacobina and Antonio Marcus Nogueira and Edison Roberto Cabral da Silva and Andrzej M.Trzynadlowski, "Current Control for Induction Motor Drives Using Random PWM", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.45, NO.5, pp.704-712, OCTOBER 1998.
- [7] Seok-Hwan Na and Young-Gook Jung and Young-Cheol Lim, "A New Space Vector Random PWM Scheme for INVERTER Fed Drive Systems", THE TRANSACTIONS OF THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, VOL.6, NO.6, pp.525-537, DECEMBER 2001.