

Random Pulse Position PWM 방식을 적용한 IPMSM 기반 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템의 고조파 저감

(Reducing Harmonics of the Next-generation High-speed Railway Inverter System by
Random Pulse Position Modulation Technique based on Space Vector Modulation)

이상현* · 진강환 · 김성제 · 노애숙 · 김윤호**

(Sang-Hyun Lee · Kang-Hwan Jin · Sung-Je Kim · Ae-Sook Kno · Yoon-Ho Kim)

Abstract

In this paper, The Next Generation High Speed Railway inverter system based on IPMSM drives using Random Pulse Position Modulation is proposed to reduce electromagnetic noise. To verify the validity of study, the simulator for the proposed system is designed and implemented. Simulation program is developed using Matlab/Simulink. The simulation results of the proposed system was compared with the system using conventional method. The results show that the voltage and current harmonics of the proposed Next Generation High Speed Railway Inverter system, significantly decrease and spread into wide band area by the proposed Random Pulse Position modulation technique based on Space Vector Modulation method.

Key Words : High Speed Railway Inverter System, Random Pulse Position Modulation, Matlab/Simulink

1. 서 론

현재 고속철도 구동 인버터 시스템에 사용되는 대용량 전력용 스위치 소자는 고정 주파수로 스위칭 하는 PWM (Pulse Width Modulation) 방식으로 구동된다. 고정 주파수로 스위칭하는 PWM방식은 전력변환 시

전류제어의 주기를 일정하게 함으로써 전류제어기의 디지털화를 용이하게 하는 장점을 갖고 있으나, 잡음 전력을 스위칭 주파수의 정수배에 집중시킨다[1]. 이로 인하여 특정 주파수에 집중된 잡음전력은 해당 주파수의 토크맥동과 부하 측 및 전원 측 인덕턴스에 전자기적 잡음과 가청소음을 유발한다[2].

차세대 고속전철 구동 인버터시스템은 660[Hz]~1[kHz] 대역에서 스위칭 주파수를 선정한다. 스위칭 주파수의 정수배에 집중된 잡음전력은 2[Hz]~20[kHz]의 가청 주파수 대역에 있기 때문에 사람이 느낄 수 있다[3].

고정주파수 PWM 방식으로 인한 스위칭 주파수 정

* 주저자 : 중앙대학교 공과대학 전자전기공학부 석사과정

** 교신저자 : 중앙대학교 공과대학 전자전기공학부 교수
Tel : 02-820-5290

E-mail : yhkim@cau.ac.kr

접수일자 : 2012년 4월 23일

1차심사 : 2012년 5월 1일

심사완료 : 2012년 5월 31일

수배 대역의 특정 주파수에 집중되는 잡음 전력의 문제점을 해결하기 위하여 RPWM (Random Pulse Width Modulation) 방식이 활발히 연구되고 있다 [4-5].

본 논문은 RPWM 방식 중 고정주파수 내에서 펄스의 위치를 랜덤하게 위치시키는 랜덤 펄스 위치 방식 (RPPM : Random Pulse Position Modulation)을 적용한 차세대 고속전철 구동 인버터시스템을 Matlab/Simulink로 모델링하여 기존 고정 주파수 PWM 방식과 비교하여 성능의 우수함을 확인하였다.

2. 차세대 고속전철 시스템 구성

2.1 추진 제어장치 회로 구성

철도 차량 추진 제어장치는 변압기, 컨버터, 인버터, 전동기와 주변 장치로 구성된다. 그림 1은 1개의 인버터가 1대의 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)를 제어하는(1C1M) 추진 제어장치 회로도를 나타낸다. 2개의 변압기와 2개의 컨버터가 병렬로 연결되고 그 출력에 4개의 인버터가 병렬로 연결된 구조를 갖는다. 인버터는 견인 전동기에 가변전압 가변 주파수 전압을 공급하여 요구하는 구동력을 발생시키는 교류 가변속 장치이며 전력변환용 스위칭 소자는 IGBT를 사용한다.

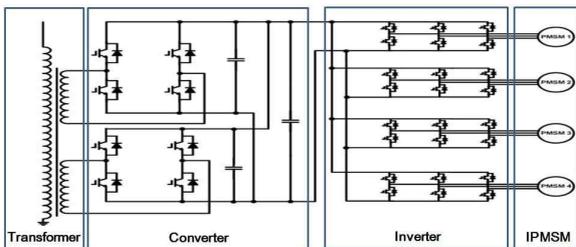


그림 1. 추진제어시스템 회로도
Fig. 1. Traction control system circuit

2.2 영구자석 동기전동기 벡터제어 시스템

IPMSM은 회전자 자속 방향과 관련된 회전 좌표계의 등가 모델로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_{ds} \frac{d}{dt} & -\omega_r L_{qs} \\ \omega_r L_{ds} & R_s + L_{qs} \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 v_{ds}^r, v_{qs}^r : 회전좌표계 d, q축 고정자 전압
 i_{ds}^r, i_{qs}^r : 회전좌표계 d, q축 고정자 전류
 L_{ds}, L_{qs} : 회전좌표계 d, q축 인덕턴스
 R_s : 고정자 저항, ω_r : 전기 각속도
 ϕ_f : 영구자석에 의한 쇄교 자속

IPMSM의 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_f i_{qs}^r + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r i_{qs}^r) \quad (2)$$

첫 번째 항은 회전자 d축에 일치된 자석의 자속과 q축에 일치된 고정자전류의 상호작용에 의하여 발생한 자기토크(Magnetic alignment torque)로서 자속과 q축 전류의 곱에 비례한다. 두 번째 항은 d축과 q축의 전류에 의한 자속성분에 수직인 전류성분 i_{ds}^r, i_{qs}^r 가 작용하여 발생하는 토크, 즉 돌극성($L_{qs} > L_{ds}$)에 의한 자기저항 토크(Reluctance torque) 성분이다.

그림 2는 IPMSM의 벡터 제어 시스템 블록도를 나타낸다. 이는 속도제어기와 전류제어기, PWM 방식을 적용한 인버터와 IPMSM으로 구성되어 있다. 속도 제어기의 출력은 q축 전류 제어기에 입력된다. 전류 제어기는 d축과 q축을 나누어 제어하고 전동기의 역기전력 성분을 전향 보상하여 구성된다 [6-8].

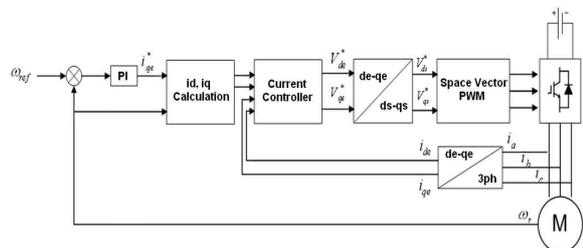


그림 2. IPMSM 벡터제어시스템
Fig. 2. Vector control system of IPMSM

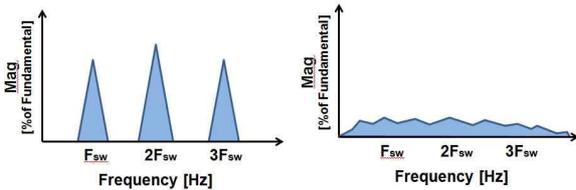
3. 랜덤 펄스 위치 방식

3.1 RPWM

기존 고속전철 구동 인버터 시스템에서는 고정 주파수 PWM(Pulse Width Modulation) 방식을 사용한다. 고정 스위칭 주파수 방식은 특정 주파수 대역에서 전자기적 소음과 진동, EMI 등의 발생 요인이 되는 강한 고조파 성분이 나타난다.

RPWM(Random Pulse Width Modulation) 방식은 강한 고조파 성분이 존재하는 특정 주파수 대역의 고조파를 줄이기 위하여 랜덤 수를 이용하여 PWM 펄스의 위치나 스위칭 주파수를 변경하는 방식이다.

고정 스위칭 주파수 PWM과 RPWM를 적용한 인버터의 출력 전압 및 전류의 고조파 스펙트럼의 특징은 그림 3과 같다. 그림 3 (a)는 일반적인 고정 주파수로 동작 시켰을 때 스위칭에 의한 고조파가 특정 주파수대에 집중되어 있는 상태를 나타낸다. RPWM은 그림 3 (b)과 같이 전자기적 소음원인 특정 주파수대에 집중된 고조파를 넓은 대역에 분산시킨다.



(a) Fixed frequency PWM (b) RPWM

그림 3. 고조파 분석 스펙트럼
Fig. 3. Harmonic spectrum

본 논문에서는 RPWM 방식 중, 스위칭 주기는 고정하고 게이트 펄스의 위치를 주기 내에 무작위로 배치하는 RPPM을 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템에 적용하였다. RPPM은 기존 고정 주파수 PWM으로 발생된 펄스를 랜덤 수를 통하여 펄스의 위치를 결정하게 된다.

그림 4는 3상 인버터의 각 상 별 게이트 펄스의 동작을 나타낸다. 기존 공간 벡터 변조기법의 각 상의 펄스

스 위치는 그림 4 (a)에서처럼 제어 주기의 중심에 위치한다. 공간 벡터 변조 기반 랜덤 펄스 위치 방식은 그림 4 (b)처럼 A상의 펄스폭이 가장 큰 경우 변조 구간 내의 모든 위치에 배치될 수 있으나 B상 펄스는 A상 펄스폭을 벗어나지 않는 범위, C상 펄스는 B상 펄스폭을 벗어나지 않는 범위 내에 위치하도록 동작되어야 한다[9].

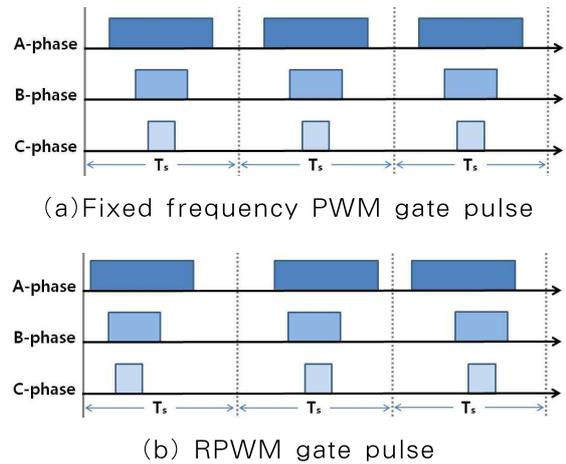


그림 4. 3상 인버터의 게이트 펄스
Fig. 4. Gate pulse of 3 phase inverter

3.2 공간벡터 변조 기법 기반 랜덤 펄스 위치 방식 시뮬레이션 모델 구축

공간벡터 변조 기법 기반 랜덤 펄스 위치 방식(RPPM)을 적용한 차세대 고속전철 시스템의 시뮬레이션 모델을 구현하기 위해서 그림 5와 같은 RPPM 발생기를 설계하였다.

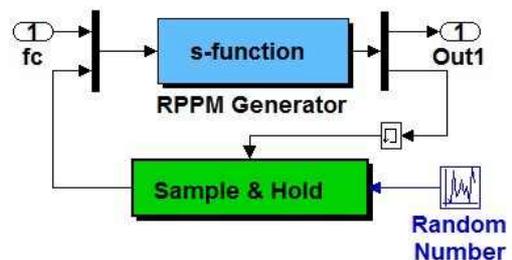
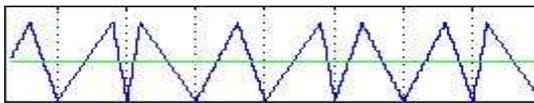


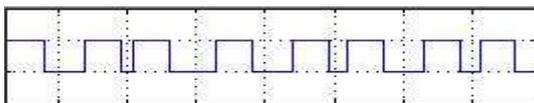
그림 5. RPPM 발생기
Fig. 5. RPPM generator

RPPM 발생기는 RPPM Generator와 Sample & Hold 블록, 랜덤 수 발생기로 구성되어 있다. RPPM Generator는 Matlab/Simulink의 S-function 블록을 사용해서 만들었다. S-function을 이용하면, Matlab/Simulink에서 제공하지 않은 블록을 C 언어나 Matlab 언어로 코딩을 해서 커스텀 블록으로 만들 수 있다.

본 논문에서는 랜덤 펄스 위치 방식의 구현을 위하여 삼각파와 캐리어의 주기는 일정하게 유지하고, 꼭짓점의 위치를 랜덤하게 변형시켜 펄스의 위치를 변경하는 방법을 사용하였다. 그림 6 (a)는 꼭짓점 위치가 랜덤하게 변화하는 랜덤 삼각파와 캐리어와 지령이다. 랜덤 펄스 위치 방식이 적용된 게이트 펄스(그림 6 (b))는 일정한 지령을 인가하였을 경우에도 펄스의 위치가 주기마다 다른 것을 볼 수 있다.



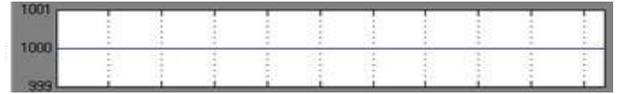
(a) Random triangular carrier and reference



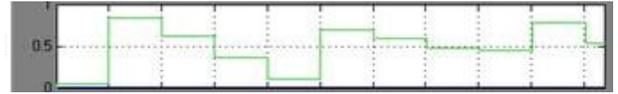
(b) Gate pulse of RPPM

그림 6. RPPM의 게이트 펄스 발생 방법
Fig. 6. Principle of gate pulse with RPPM

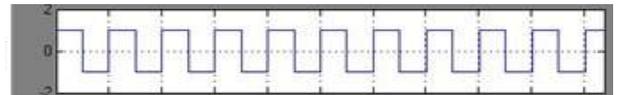
그림 7은 RPPM Generator 블록의 입출력 파형을 보여 주고 있다. RPPM Generator 블록은 스위칭 주파수(그림 7 (a))와 랜덤 수(그림 7 (b))를 입력으로 하여, Trigger 신호(그림 7 (c))와 랜덤 삼각파(그림 7 (d))를 출력한다. 랜덤 삼각파는 랜덤 수에 따라 꼭짓점 위치가 변경된다. 랜덤 수는 0에서 1사이의 값으로, 입력된 랜덤 수에 따라 꼭짓점의 위치가 결정된다. 꼭짓점의 위치는 만약 랜덤 수 0이면 주기 시작지점, 랜덤 수 1이면 주기 마지막 지점에 위치하고, 나머지 0에서 1사이의 값은 주기 내에서 존재하게 된다.



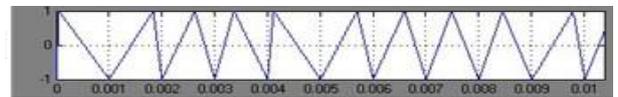
(a) Switching frequency



(b) Random number

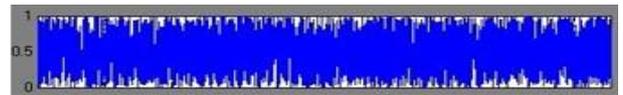


(c) Trigger signal

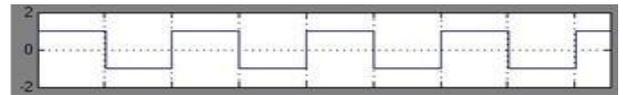


(d) Random triangular carrier and reference

그림 7. RPPM Generator 블록의 입출력 파형
Fig. 7. RPPM Generator Block's I/O waveform



(a) Random number generator's output waveform



(b) Trigger signal



(c) Random number of S&H block's output

그림 8. Sample & Hold 블록의 입출력 파형
Fig. 8. Sample&Hold Block's I/O waveform

그림 8은 Sample & Hold 블록의 입출력 파형을 보여주고 있다. Sample & Hold 블록은 랜덤 수 발생기의 출력파형(그림 8 (a))과 RPPM Generator블록에서 출력으로 나오는 Trigger 신호(그림 8 (b))를 입력으로 가진다. 그림 8 (a)는 랜덤 수 발생기의 출력파형으로 0과 1 사이의 많은 랜덤 수가 발생되는 것을 나타

낸다. 그림 8 (b)의 Trigger 신호는 구형파가 상승(rising)하는 시점에서 랜덤 수를 홀드(Hold)해 준다. 따라서 그림 8 (c)는 Trigger 신호에 의해 홀드(Hold)된 랜덤 수를 나타낸다.

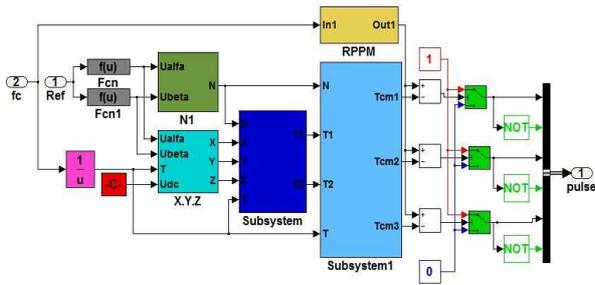
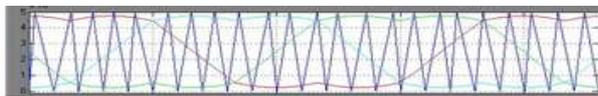
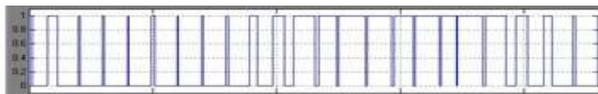


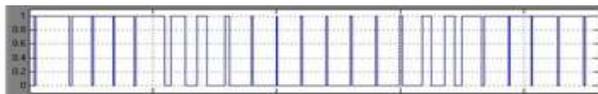
그림 9. 랜덤 펄스 위치 방식이 적용된 공간벡터 변조 블록
Fig. 9. SVM block using RPPM



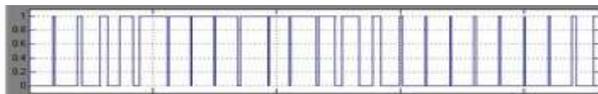
(a) Random triangular wave and reference voltage



(b) A-phase gate pulse



(c) B-phase gate pulse



(d) C-phase gate pulse

그림 10. 공간벡터 변조 기반 랜덤 펄스 위치 방식 펄스
Fig. 10. RPPM gate pulse based on SVM

그림 9는 랜덤 펄스 위치 방식이 적용된 공간벡터 변조 블록이다. RPPM 발생기에서 생성된 랜덤 삼각파와 공간벡터 변조를 거쳐 나온 지령과의 비교를 통하여 그림 10과 같은 게이트 펄스를 생성하게 된다. 그림 10 (a)는 공간벡터 변조 블록에서 나온 각 상의

지령과 랜덤 삼각파이다. 지령과 랜덤 삼각파의 비교를 통하여 A상(그림 10 (b)), B상(그림 10 (c)), C상(그림 10 (d))의 공간벡터 변조 기반 랜덤 펄스 위치 방식의 게이트 펄스를 생성한다.

4. 차세대 고속전철 시스템 시뮬레이션

본 논문에서는 그림 11과 같이 차세대 고속전철에 적용 예정인 표 1의 IPMSM의 파라미터와 인버터 스위칭 주파수 1,000[Hz], DC전압 2,800[V]를 적용하여 차세대 고속철도 구동 인버터 시스템을 모델링하였다.

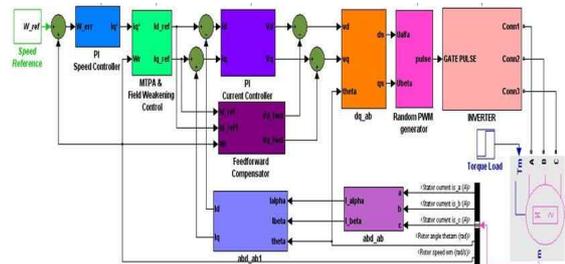


그림 11. RPPM이 적용된 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템 시뮬레이터

Fig. 11. The next-generation high-speed railway inverter system simulator using RPPM

표 1. IPMSM 파라미터
Table 1. IPMSM Parameter

Materials	Properties
Rating Power[kW]	410
Rating Current[Arms]	133
Maximum Speed[rpm]	4530(350kph)
$R_s[\Omega]$	0.08161
$L_d[H]$	0.009846
$L_q[H]$	0.035627
Flux Linkage[Wb]	2.5707
Inertia[$kg \cdot m^2$]	1.33815
Pole[P]	4

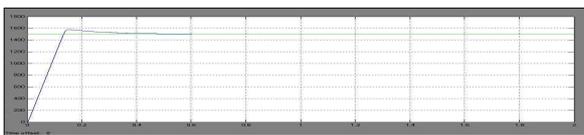
차세대 고속철도 구동 인버터 시스템은 속도제어기, 최대토크 및 약계자 제어기, 전류제어기, 전향보상기, 2 레벨 인버터, IPMSM 등으로 구성된다. 이를 바탕으로 고정주파수 PWM과 RPPM을 각각 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 12는 고정주파수 PWM, 그림 13은 공간벡터 기반 랜덤 펄스 위치 방식이 적용된 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템의 시뮬레이션 결과이다. 차세대 고속철도는 160[km/h] (2,070[rpm])까지 비동기 모드로 PWM을 사용한 인버터 제어가 수행되고 이후 동기 모드로 1 pulse 제어가 수행된다. 따라서 본 논문에서는 PWM이 적용되는 구간인 1,500[rpm]에서 성능 분석을 수행하였다. 지령 속도와 인버터에서 이용할 지령 주파수와의 관계는 식 (3)과 같다.

$$f_{ref} = \frac{rpm \times p}{120} \quad (3)$$

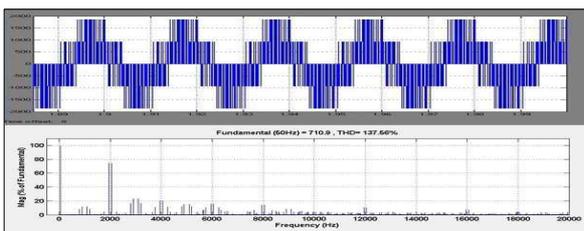
여기서 f_{ref} : 지령 주파수, p : 극수

지령 속도 1,500[rpm]은 식 (3)을 이용하여 지령 주파수로 변환하면 50[Hz]이다. 시뮬레이션 결과는 지령 주파수 50[Hz]의 기본파 크기를 100[%]로 하고 0~20[kHz] 대역의 상대적인 고조파 크기를 분석하였다. 그림 12 (b)의 고정주파수 PWM이 적용된 상전압의 고조파 성분은 스위칭 주파수인 1[kHz] 대역 부근에서 12[%], 2[kHz] 대역 부근에서 74.5[%], 3[kHz] 대역에서 23[%], 4[kHz] 대역에서 20[%]로 스위칭 주파수의 배수에 해당하는 대역에서 주로 나타났다, 특히 스위칭 주파수의 2배수인 대역에서 가장 크게 발생되었다. 그림 13 (b)의 공간벡터 기반 랜덤 펄스 위치 방식이 적용된 상전압의 고조파 성분은 1[kHz]와 2[kHz] 대역에서 19[%] 정도로 나타났으며 전체적으로 5[%] 이하로 전 대역에 분포되는 것을 확인하였다. 그림 12 (c)의 고정주파수 PWM의 상전류 고조파 분석을 살펴보면 1[kHz] 대역에서 0.7[%], 2[kHz] 대역에서 2.65[%], 3[kHz] 대역에서 0.4[%]로 고정주파수 PWM의 상전압의 고조파 분석처럼 스위칭 주파수의 배수 대역에서 고조파 성분들이 강하게 나타남을 볼 수 있다. 그림 13 (c)의 공간벡터 기반 랜덤 펄스 위치 방식의 고조파 분석을 살펴보면 1[kHz] 대역에서 1.27[%] 2[kHz] 대역에서 0.72[%]로 나타났으며, 1[kHz]~3[kHz] 대역에서는 평균적으로 0.18[%]의 고조파 성분들이 전 대역에 분포되어 있으며 그 이상의 주파수 대역에서는 거의 나타나지 않았다.

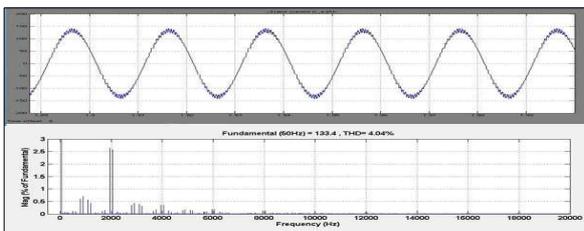
표 2는 고정주파수 PWM 방식과 RPPM 방식의 상전압, 상전류의 THD 분석 결과이다. 고정주파수 PWM의 경우 상전압 THD가 137.56[%], 상전류 THD가 4.04[%]로 분석되었다. RPPM을 적용하고 THD를 분석한 결과 상전압 THD는 17.49[%]로 고정주파수 PWM의 상전압 THD보다 120.07[%] 감소되었고, 상전류 THD는 0.7[%]로 고정주파수 PWM의 상전류 THD보다 3.34[%] 감소되었다.



(a) Reference and real speed



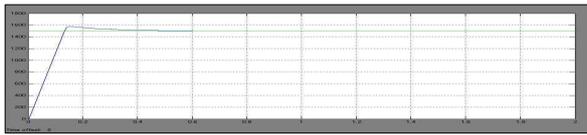
(b) Phase voltage and FFT analysis



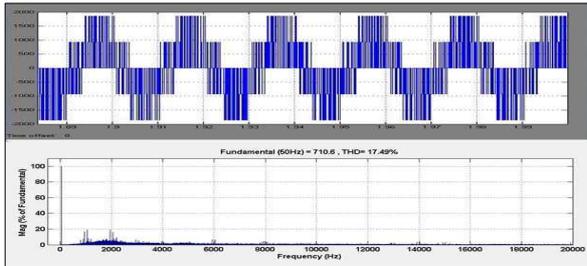
(c) Phase current and FFT analysis

그림 12. 고정주파수 PWM이 적용된 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템 시뮬레이션

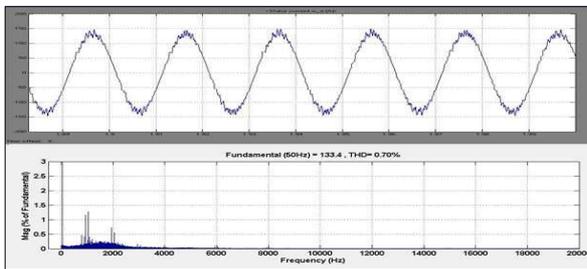
Fig. 12. Simulation of the next-generation high-speed railway inverter system using fixed frequency PWM



(a) Reference and real speed



(b) Phase voltage and FFT analysis



(c) Phase current and FFT analysis

그림 13. RPPM이 적용된 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템 시뮬레이션

Fig. 13. Simulation of the next-generation high-speed railway inverter system using RPPM

표 2. THD 분석 결과

Table 2. Result of THD analysis

	고정 주파수 PWM	RPPM
상전압 THD	137.56[%]	17.49[%]
상전류 THD	4.04[%]	0.70[%]

따라서 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템에 공간 벡터 기반 랜덤 펄스 위치 방식을 적용하면 기존 방식과 비교하여 상전압의 경우 기본파 성분 대비 최대 74.5[%]의 고조파 성분을 19[%]로, 상전류의 경우 최대 2.65[%]의 고조파 성분을 1.27[%]로 줄일 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템을 모델링하고 공간벡터 기반 랜덤 펄스 위치 방식을 적용하여 성능을 분석하였다.

차세대 고속전철에 적용 예정인 인버터 시스템과 IPMSM의 파라미터를 기반으로 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이터를 구현하여 고정주파수를 사용하는 PWM과 공간벡터 기반 랜덤 펄스 위치 방식의 출력 고조파 성분을 비교하였다. 공간벡터 기반 랜덤 펄스 위치 방식을 적용한 차세대 고속전철 시스템의 가장 큰 고조파 성분은 고정주파수를 사용한 공간벡터 PWM 적용에 비해 상전압 75[%], 상전류 52[%] 감소됨을 확인하였고, 고조파 성분의 저감으로 인해 전자 기적 소음이 감소될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원 (과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] C.M. Liaw and Y.M. Lin, C.H. and K.I. Hwu, "Analysis, Design, and Implementation of a Random Frequency PWM Inverter", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 15, No. 5, pp. 843-854, Sep. 2000.
- [2] Y.S. Lai, "New Random Technique of Inverter Control for Common Mode Voltage Reduction of Inverter-Fed Induction Motor Drivers", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 14, No. 4, pp. 1139-1146, Dec. 1999.
- [3] S.H. Na, C.R. Choi, S.H. Yang, K.H. Kim, Y.C. Lim, J.K. Park, "A Real-Time RPWM Inverter for Reduction of Switching Frequency Band Noise in the Induction Motor", KIIEE-Tras., Vol. 22, No. 6, pp. 17-26, Dec. 1997.
- [4] A. M. Trzynadlowski, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, R. L. Kirlin, and S. Legowski, "Random Pulse Width Modulation Techniques for Converter-Fed Drive Systems - A Review", IEEE Trans. on IA, Vol. 30, No. 5, pp. 1166-1175, Sep/Oct. 1994.
- [5] Michael M. Bech, Frede Blaabjerg, and John K. Pedersen, "Random Modulation Techniques with Fixed Switching Frequency for Three-Phase Power Converters", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 15, No. 4, Jul. 2000.
- [6] S.B. Lee, "Closed-Loop Estimation of Permanent Magnet

Synchronous Motor Parameters by PI Controller Gain Tuning”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 21, No. 4, pp. 863-870, Dec. 2006.

- [7] Uddin M.N. Radwan T.S. George G.H. Rahman M.A, “Performance of current controllers for VSI-fed IPMSM drive”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 2, pp. 1018-1025, 1999.
- [8] K.H. Jin, Y.H. Suh, S.H. Lee, Y.H. Kim, “ Sensorless control of the Next Generation High Speed Drive System in low speed region”, KIIEE-Tras, Vol. 25, No. 12, pp. 82-87, Dec. 2011.
- [9] H.W.Van Der Broeck, H.Ch.Skudelny and Stanke, “Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vector”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 24, No. 1, pp. 142-150, Jan. 1988.

◇ 저자소개 ◇



이상현 (李相賢)

1983년 5월 29일생. 2009년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자전기공학부 석사 과정.



진강환 (陳康煥)

1979년 6월 29일생. 2006년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 2008년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.



김성제 (金成濟)

1985년 8월 9일생. 2009년 원광대 전기전자 및 정보통신공학부 졸업. 2011년 중앙대학교 대학원 졸업(석사) 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.



노애숙 (魯愛淑)

1970년 8월 25일생. 1993년 경북대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996~1999년 대우중공업 주임연구원. 1999년~현재 (주)로템 기술연구소 전장품개발팀 책임연구원.



김윤호 (金倫鎬)

1974년 서울대 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M대학 졸업(박사). 2004년 전력전자학회장 역임. 2008년 철도학회 회장 역임. 현재 중앙대 전자전기공학부 교수.