Hybrid RPWM을 적용한 IPMSM 기반 차세대 고속전철 인버터 구동 시스템의 소음원 고조파 저감

Reducing Noise Source Harmonics of the Next-Generation High-Speed Railway Inverter System Using Hybrid RPWM Technique

이 상 현* · 진 강 환** · 김 성 제** · 박 영 호*** · 김 윤 호†
(Sang-Hyun Lee · Kang-Hwan Jin · Sung-Je Kim · Young-Ho Park · Yoon-Ho Kim)

Abstract - In this paper, The Next Generation High Speed Railway inverter system using Hybrid Random Pulse Width Modulation (Hybrid RPWM) is proposed to reduce electromagnetic noise. To verify the validity of study, simulation results of the Next Generation High Speed Railway Inverter system using the proposed method was compared with the system using conventional method. A simulation program is developed using Matlab/Simulink. The results show that the voltage and current harmonics of the Next Generation High Speed Railway Inverter system using Hybrid RPWM significantly decrease and spread into wide band area.

Key Words : High speed railway inverter system, Random pulse width modulation, Matlab/simulink

1. 서 론

현재의 고속전철 구동 인버터 시스템은 고정 주파수로 스위칭 하는 PWM (Pulse Width Modulation) 방식으로 구동된다. 고정 주파수를 갖는 PWM은 전력변환 시 전류제어의 주기를 일정하게 함으로써 전류제어의 디지털화를 용이하게 하는 장점을 갖고 있으나, 특정 주파수대역에 집중된 고조파 성분들이 생성된다.[1] 집중된 고조파 성분들은 해당 주파수의 토크맥동과 부하 측 및 전원 측에 전자기적 잡음과 가청소음을 유발한다.[2] 이러한 고정주파수 PWM 방식의 문제점을 해결하기 위하여 RPWM (Random Pulse Width Modulation) 방식이 활발히 연구되고 있다.[3]

본 논문에서는 차세대 고속전철 시스템에서 발생하는 전자기적 소음의 발생요소인 특정 주파수에 집중되는 고조파 성분들을 저감하기 위해 Hybrid RPWM을 적용한 IPMSM 기반 차세대 고속전철 구동 인버터시스템을 제안한다. 적용된 Hybrid RPWM은 특정 주기 내에서 펄스의 위치가 랜덤하게 위치하는 방식과 주기가 랜덤하게 변화하는 방식이 함께 수행되는 특징을 갖는다.[4] 본 연구의 타당성을 확인하기 위하여 Matlab/Simulink 기반으로 모델링한 차세대 고속전철 인버터 구동 시스템에 Hybrid RPWM을 적용하여 시뮬레이터를 구현하고 이를 이용 모의시험 하여 기존 방식과 비교 분석하였다.

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 회로도도를 나타낸다. 추진 제어 장치는 변압기와 2개의 컨버터가 병렬로 연결되고 그 출력에 4개의 인버터가 병렬로 연결된 구조를 갖는다.

그림 1 추진제어시스템 회로도

Fig. 1 Traction control system circuit

인버터는 건인 전동기에 가변전압 가변 주파수 전압을 공급하여 요구하는 구동력을 발생시키는 교류 가변속 장치이며 주전력 소자는 IGBT를 사용한다.

2.2 매입형 영구자석 동기전동기 벡터제어 시스템

현재 고속전철의 건인 전동기는 구조적으로 잔고장과 유지보수 비용이 적고, 용량 대비 제조원가가 저렴한 유도전동기로 주로 개발되어 적용되었다. 그러나 유도전동기는 충분한 용량 확보를 위해 크기를 줄이는데 한계가 있고 효율 또한 제한적이다. 이러한 유도 전동기의 단점을 보완하기 위하여 차세대 고속전철의 건인 전동기는 매입형 영구자석 동기 전동기를 대상으로 시제품과 차량용으로 설계되고 있다.

* 준 회 원 : 중앙대 공과대학 전자전기공학부 석사과정

** 정 회 원 : 중앙대 공과대학 전자전기공학부 박사과정

*** 정 회 원 : 현대 로템 기술연구소 책임연구원

† 교신저자, 정회원 : 중앙대 공과대학 전자전기공학부 교수

E-mail : yhkim@cau.ac.kr

접수일자 : 2012년 4월 21일

최종완료 : 2012년 6월 18일

매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 자속 방향과 관련된 회전 좌표계의 등가 모델은 식 (1)과 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 는 회전좌표계 d,q축 고정자 전압, i_{ds}^r, i_{qs}^r 는 회전좌표계 d, q축 고정자 전류, L_{ds}, L_{qs} 는 회전좌표계 d, q축 인덕턴스, R_s 는 고정자 저항이고, ω_r 은 전기 각속도, ϕ_f 는 영구자석에 의한 쇄교 자속이다.

그림 2 매입형 영구자석 동기전동기 벡터제어시스템
Fig. 2 Vector control system of IPMSM

그림 2는 차세대 고속전철 시스템의 매입형 영구자석 동기전동기의 벡터 제어 시스템 블록도를 나타낸다. 이는 속도제어기와 전류제어기, PWM 방식을 적용한 인버터와 매입형 영구자석 동기전동기로 구성되어 있다. 속도 제어기의 출력은 q축 전류 제어기에 입력된다. 전류 제어기는 d축과 q축을 나누어 제어하고 전동기의 역기전력 성분을 전향 보상하는 방식으로 구성된다.[5][6]

3. Hybrid RPWM 적용 방안

고속전철 구동 인버터 시스템은 고정 주파수로 스위칭 하는 PWM방식을 사용한다. 고정 스위칭 주파수 방식은 전자기적 소음 및 EMI의 원인이 되는 특정 주파수 대역에 집중된 고조파 성분이 생성된다. 특정 주파수 대역의 고조파 성분을 저감하기 위해서 고속전철 구동 인버터 시스템에 RPWM방식을 적용하였다. RPWM 방식은 특정 주파수 대역에 집중된 고조파 성분들을 줄이기 위하여 랜덤 수를 이용하여 펄스의 위치나 스위칭 주파수를 변경하는 방식이다.

고정 스위칭 주파수 PWM과 RPWM를 적용한 인버터의 출력 전압 및 전류 스펙트럼의 특징은 그림 3과 같다.

그림 3 고조파 분석 스펙트럼
(a) 고정 주파수 PWM 방식
(b) RPWM 방식

Fig. 3 Harmonic spectrum
(a) Fixed frequency PWM Method
(b) RPWM method

그림 3(a)는 일반적인 고정 주파수로 동작시켰을 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. RPWM 방식은 생성하는 방식에 따라 스위칭 주파수를 일정하게 고정시키지 않고 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어지도록 하는 랜덤 캐리어 방식[7]과 고정주파수 내에서 펄스의 위치를 랜덤하게 위치시키는 랜덤 펄스 위치 방식[8]으로 나눌 수 있다.

본 논문에서는 두 방식이 혼합된 Hybrid RPWM을 차세대 고속전철 구동 인버터시스템에 적용하였다.

3.1 랜덤 캐리어 방식

랜덤 캐리어 방식은 스위칭 주파수를 임의적으로 변경하는 방식이다. 일반적인 고정 주파수 PWM은 그림 4(a)와 같이 일정한 주기를 가지는 삼각파 캐리어와 지령파의 비교를 통하여 동일 지령일 경우 그림 4(b)와 같이 같은 주기에 같은 크기의 펄스를 가진다.

그림 4 고정 캐리어 주파수의 게이트 펄스 발생 방법

- (a) 고정 삼각파 캐리어와 지령
- (b) 게이트 펄스

Fig. 4 Principle of gate pulse generation with fixed carrier frequency

- (a) Fixed carrier and reference
- (b) Gate pulse

랜덤 캐리어 방식을 사용하기 위해서는 랜덤 스위칭 주파수의 범위를 정해주어야 한다. 랜덤 스위칭 주파수 범위는 넓을수록 고조파 성분들의 분산효과가 크지만, 전력변환용 스위치는 실제로 온/오프 딜레이 시간이 있기 때문에 적정 범위를 정해 주어야 한다. 본 논문에서의 랜덤 스위칭 주파수의 범위는 고정 스위칭 주파수 1kHz에서 $\pm 50\%$ (500~1500Hz)의 범위를 선정하여 그림 5(a)와 같은 무작위로 주기가 변하는 랜덤 삼각파 캐리어를 생성하였다. 랜덤 삼각파 캐리어는 지령 값과의 비교를 통해 그림 5(b)와 같은 펄스가 생성된다.

그림 5 랜덤 캐리어 주파수의 게이트 펄스 발생 방법

- (a) 랜덤 삼각파 캐리어와 지령
- (b) 게이트 펄스

Fig. 5 Principle of gate pulse with random frequency
(a) Random carrier and reference
(b) Gate pulse

3.2 랜덤 펄스 위치 방식

랜덤 펄스 위치 방식은 PWM 방식에서 주기의 가운데에 위치한 펄스의 위치를 임의적으로 변경하여 RPWM을 생성하는 방법으로 본 논문에서는 펄스의 위치를 스위칭 주기 앞이나 뒷부분에 위치하도록 하는 RLL(Random Lead-Lag) 방식을 적용하였다.

그림 6은 RLL 방식을 적용하여 스위칭 소자의 게이트 펄스를 생성하는 방법을 나타내고 있다. RLL 방식을 적용하기 위해서 정상 톱니파와 역상 톱니파를 사용하였다. 정상 톱니파와 지령과의 비교(그림 6(a))로 펄스의 위치는 앞부분(그림 6(b))에 위치하고, 역상 톱니파와 지령과의 비교(그림 6(c))로 펄스는 뒷부분(그림 6(d))에 위치한다. 이 두 펄스는 랜덤 비트(그림 6(e))를 통해 만약 랜덤비트가 0이면 정상펄스를 선택하고, 1이면 역상 펄스를 선택하게 되어 펄스의 위치가 무작위로 앞과 뒤에 위치하는 그림 6(f)와 같은 RLL 펄스가 생성되게 된다. RLL 방식은 펄스 위치 결정용 랜덤수가 1개만 있으면 되므로 구현이 간단한 장점을 가지고 있다. 하지만 전류파형에 리플 성분이 많아 전류 고조파 스펙트럼의 광대역화가 제대로 이루어지지 않는다.[9]

그림 6 RLL 펄스 발생 방법

- (a) 정상 톱니파 캐리어와 지령 (b) 정상 펄스
(c) 역상 톱니파 캐리어와 지령 (d) 역상 펄스
(e) 랜덤 비트 (f) RLL 펄스

Fig. 6 Principle of RLL pulse generation

- (a) Normal sawtooth carrier and reference
(b) Normal pulse
(c) Inverse sawtooth carrier and reference
(d) Inverse pulse (e) Random bits
(f) RLL pulse

RLL의 문제점을 해결하기 위하여 그림 7과 같이 펄스의 위치를 주기의 중앙에 위치할 것인지, 주기 양 끝에 위치할 것인지 결정하는 랜덤 펄스 위치 방식(RPPM : Random Pulse Position Modulation)으로 변형하였다. 그림 7은 랜덤 펄스 위치 방식을 적용하여 스위칭 소자의 게이트 펄스를 생성하는 방법을 나타내고 있다.

RPPM 방식은 톱니파 대신에 삼각파를 사용하여 펄스를 생성하였다. 정상 삼각파 캐리어(그림 7(a))와 역상 삼각파 캐리어(그림 7(c))를 사용하여 정상펄스(그림 7(b))와 역상펄스(그림 7(d))를 생성한다. 이 두 펄스는 랜덤 비트(그림 7(e))를 통해 만약 랜덤비트가 0이면 정상펄스를 선택하고, 1이면 역상 펄스를 선택하게 된다. RPPM 방식을 사용하면 정상펄스에서 역상펄스로 바뀌는 순간 적용된 스위칭 주파

수의 2배의 스위칭 주파수로 동작을 하나, 랜덤비트가 변하지 않으면 스위칭 주파수는 고정된 형식으로 인버터가 동작하기 때문에 고정 주파수 성분에 의한 고조파의 영향이 존재하게 된다.

이러한 고정 주파수 성분에 의한 고조파 성분의 영향을 제거하기 위하여 랜덤 캐리어 방식을 접합하여 Hybrid RPWM 방식을 생성하였다.

그림 7 RPPM 펄스 발생 방법

- (a) 정상 삼각파 캐리어와 지령 (b) 정상 펄스
(c) 역상 삼각파 캐리어와 지령 (d) 역상 펄스
(e) 랜덤 비트 (f) RPPM 펄스

Fig. 7 Principle of RPPM pulse generation

- (a) Normal triangular carrier and reference
(b) Normal pulse
(c) Inverse triangular carrier and reference
(d) Inverse pulse (e) Random bits
(f) RPPM pulse

3.3 Hybrid RPWM 방식

Hybrid RPWM 방식은 위의 랜덤 캐리어 방식과 랜덤 펄스 위치 방식을 혼합하여 생성하였다. 그림 8은 Hybrid RPWM 방식을 적용하여 스위칭 소자의 게이트 펄스를 생성하는 방법을 나타내고 있다.

그림 8 Hybrid RPWM 펄스 발생 방법

- (a) 정상 캐리어와 지령 (b) 정상 펄스
(c) 역상 캐리어와 지령 (d) 역상 펄스
(e) 랜덤 비트 (f) Hybrid RPWM 펄스

Fig. 8 Principle of Hybrid RPWM pulse

- (a) Normal carrier and reference
(b) Normal pulse
(c) Inverse carrier and reference
(d) Inverse pulse (e) Random bits
(f) Hybrid RPWM pulse

랜덤 캐리어 방식이 적용된 정상 삼각파 캐리어(그림 8(a))와 역상 삼각파 캐리어(그림 8(c))를 사용하여 정상펄스(그림 8(b))와 역상 펄스(그림 8(d))를 생성한다. 이 두 펄스는 랜덤 비트(그림 8(e))를 통해 만약 랜덤비트가 0이면 정상펄스를 선택하고, 1이면 역상 펄스를 선택하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 그림 8(f)와 같은 Hybrid RPWM 펄스가 생성된다.

Hybrid RPWM 방식은 고정 주파수 캐리어가 발생하는 특정 주파수대의 스펙트럼을 광대역으로 분산시키는 효과가 큰 장점을 가진다.

4. IPMSM 기반 차세대 고속전철 구동 시스템 시뮬레이터 설계, 구현 및 모의시험 결과

4.1 Hybrid RPWM 시뮬레이션 모델 구축

Hybrid RPWM을 적용한 차세대 고속전철 시스템의 시뮬레이션 모델을 구현하기 위해서 그림 9와 같은 Hybrid RPWM 발생기를 설계하였다. Hybrid RPWM 발생기는 RCF_gen블록, Sample&Hold블록, Random Bit블록, Select블록으로 구성되어 있으며 지정된 스위칭 주파수(fs)와 랜덤 스위칭 주파수 범위를 결정시켜 주는 %블록을 입력으로 가진다. RCF_gen블록과 Select블록은 Matlab/Simulink의 S-function을 사용해서 만들었다. S-function을 이용하면, Matlab/Simulink에서 제공하지 않은 블록을 Matlab 언어나 C언어로 코딩을 해서 커스텀 블록으로 만들 수 있다.

그림 9 Hybrid RPWM 발생기

Fig. 9 Hybrid RPWM generator

본 논문에서는 정상 삼각파와 역상 삼각파의 주기를 변경하여 랜덤 캐리어 방식을 생성하고, 랜덤 비트를 이용하여 Hybrid RPWM를 구현하였다. 주기가 임의적으로 변화하는 삼각파를 생성하기 위해 Sample&Hold 블록을 사용하여 한 주기 동안 일정한 랜덤 수가 적용되고 주기가 끝날 때 새로운 주기를 결정할 랜덤 수가 발생하도록 하였다.

그림 10은 RCF_gen 블록의 입출력 파형을 보여 주고 있다. RCF_gen 블록은 랜덤 스위칭 주파수를 입력으로 하여 랜덤한 주기를 가지는 랜덤 삼각파 캐리어와 Trigger 신호를 출력한다. RCF_gen에서 생성된 랜덤 삼각파 캐리어는 정상 캐리어로 랜덤 삼각파 캐리어를 역 변환한 역상 캐리어를 Select 블록의 입력으로 들어간다.

그림 11은 Sample & Hold 블록의 입출력 파형을 보여주고 있다. Sample & Hold 블록은 랜덤 수 발생기의 출력파형(그림 11(a))과 RCF_gen블록에서 출력으로 나오는 Trigger 신호(그림 11(b))를 입력으로 가진다. 그림 11(a)는

그림 10 RCF_gen 블록의 입출력 파형

- (a) 랜덤 스위칭 주파수
- (b) 랜덤 삼각파 캐리어
- (c) Trigger 신호

Fig. 10 RCF_gen block's input/output waveform

- (a) Random switching frequency
- (b) Random triangular carrier
- (c) Trigger signal

랜덤 수 발생기의 출력파형으로 1과 -1 사이의 많은 랜덤 수가 발생하는 것을 나타낸다. 그림 11(b)의 Trigger 신호는 구형파가 상승(rising)하는 시점에서 랜덤 수를 홀드(Hold)해 준다. 따라서 그림 11(c)는 Trigger 신호에 의해 홀드(Hold)된 랜덤 수를 나타낸다. 그림 11(d)은 홀드(Hold)된 랜덤수를 이용하여 생성된 랜덤 주파수를 나타낸다.

그림 11 Sample & Hold 블록의 입출력 파형

- (a) 랜덤 수 발생기의 출력 파형
- (b) Trigger 신호
- (c) Sample & Hold 블록을 통과한 후의 랜덤 수
- (d) 랜덤 주파수

Fig. 11 Sample&Hold block's input/output waveform

- (a) Random number generator's output waveform
- (b) Trigger signal
- (c) Random number of Sample&Hold block's output
- (d) Random Frequency

그림 12는 Select 블록의 입출력 파형을 보여 주고 있다. Select 블록은 정상 캐리어(그림 12(a)), 역상 캐리어(그림 12(b)), 랜덤 비트(그림 12(c))를 입력으로 하여, 그림 12(d)와 같은 Hybrid RPWM 캐리어를 출력하게 된다. Hybrid RPWM 캐리어는 랜덤 비트가 0일 경우 정상 캐리어를 출력하고, 랜덤 비트가 1일 경우 역상 캐리어를 출력하는 방식으로 생성된다.

그림 13은 Hybrid RPWM이 적용된 공간벡터 변조 블록이다. Hybrid RPWM 발생기에서 생성된 랜덤 삼각파와 공간벡터 변조를 거쳐 나온 지령과의 비교를 통하여 그림 13

그림 12 Select 블록의 입출력 파형

- (a) 정상 캐리어 (b) 역상 캐리어
(c) 랜덤 비트 (d) Hybrid RPWM 캐리어

Fig. 12 Select block's input/output waveform

- (a) Normal carrier (b) Inverse carrier
(c) Random bit (d) Hybrid RPWM carrier

과 같은 게이트 펄스를 생성하게 된다. 그림 13(a)는 공간벡터 변조 블록에서 나온 각 상의 지령과 랜덤 삼각파이다. 지령과 랜덤 삼각파의 비교로 펄스의 위치가 정해지면, A상, B상, C상은 그림 13의 (b), (c), (d)와 같이 공간벡터 변조 기반 Hybrid RPWM의 게이트 펄스가 된다.

그림 13 Hybrid RPWM이 적용된 공간벡터 변조 게이트펄스

- (a) 랜덤 삼각파와 각상의 지령 파형
(b) A 상 게이트 펄스
(c) B 상 게이트 펄스
(d) C 상 게이트 펄스

Fig. 13 Space Vector modulation gate pulse by Hybrid RPWM

- (a) Random triangular wave and reference of each phase
(b) Gate pulse of phase A
(c) Gate pulse of phase B
(d) Gate pulse of phase C

4.2 차세대 고속전철 시스템 시뮬레이션

본 논문에서는 차세대 고속전철 시제차량에 적용 예정인 표 1과 표 2에서 나타난 IPMSM과 전력용 소자의 파라미터를 적용하고 인버터 스위칭 주파수 500~1500Hz, DC전압 2800V로 동작하는 차세대 고속전철 인버터 시스템을 그림 14와 같이 모델링하였다. 차세대 고속전철 구동 시스템은 속도제어기, 최대토크 및 약계자 제어기, 전류제어기, 전향보

상기, 2 레벨 인버터, IPMSM 등으로 구성된다.

시뮬레이션은 고정 주파수 PWM과 Hybrid RPWM을 차세대 고속전철 인버터시스템에 적용하여 출력 전류 및 고조파 분석 결과를 비교 분석하였다.

표 1 전력용 소자 파라미터

Table 1 Power device parameter

항목	내용
IGBT	Resistance[Ω]
	Forward voltage[V]
	Inductance[H]
	Current 10% fall time
DIODE	Resistance[Ω]
	Forward voltage[V]

표 2 영구자석동기전동기 파라미터

Table 2 IPMSM parameter

항목	내용
정격 출력[kW]	410
정격 상전압[Vpk]	1760
정격 전류[Apk]	188
R_s [Ω]	0.08161
L_d [H]	0.009846
L_q [H]	0.035627
Pole	4
Flux linkage [Wb]	2.5707
Inertia [J(kg·m ²)]	1.33815

그림 14 Hybrid RPWM이 적용된 차세대 고속전철 시뮬레이터

Fig. 14 The next-generation high-speed Railway Inverter System simulator by Hybrid RPWM

차세대 고속전철은 약 160km/h (2070rpm) 정도까지 비동기 모드로 PWM을 사용한 인버터 제어가 수행되고 이후 동기 모드로 1 pulse 제어가 수행된다. 따라서 본 논문에서는 PWM이 적용되는 구간인 500rpm, 1000rpm, 1500rpm, 2000rpm에서 상전류의 고조파 분석을 통해 성능 분석을 수행하였다. 지령 속도와 인버터에서 이용할 지령 주파수와 관계는 식 (2)와 같다.

$$f_{ref} = \frac{rpm \times p}{120} \quad (2)$$

여기서 f_{ref} 는 지령 주파수이고, p 는 극수를 나타낸다.

그림 15는 고정주파수 PWM, 그림 16은 Hybrid RPWM이 적용된 차세대 고속전철 시스템의 속도에 따른 상전류 및 고조파 분석 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과는 상전류 기본파를 100%로 하고 20kHz의 가칭주파수 대역까지 상대적인 고조파 크기를 분석하였다.

그림 15를 살펴보면 스위칭 주파수의 배수 대역에 고조파 성분이 집중됨을 볼 수 있다. 고조파가 가장 크게 집중되어 있는 주파수 대역은 2kHz 대역으로, 500rpm에서는 상전류 기본파 크기의 2.5%, 1000rpm에서는 3.9%, 1500rpm에서는

2.7%, 2000rpm에서는 2.3%로 분석되었다. 하지만 Hybrid RPWM을 적용된 그림 16을 살펴보면, 스위칭 주파수의 정수배에 집중된 고조파 성분들이 넓은 대역으로 분산되는 것을 확인할 수 있다. 500rpm에서는 0.9%이하, 1000rpm에서는 2%이하, 1500rpm에서는 1.1%이하, 2000rpm에서는 1.3% 이하로 고조파 성분이 분산되었다.

차세대 고속전철 구동 시스템에 Hybrid RPWM을 적용하여 기존 고정주파수 PWM 방식과 구동 속도에 따른 고조파 분석을 비교하였다. 시뮬레이션 결과 기존의 고정주파수 PWM 방식을 사용한 차세대 고속전철 구동 시스템은 스위칭 주파수의 배수에 해당하는 주파수대역에 고조파 성분이 강하게 나타나고, 특히 스위칭 주파수의 2배 대역에서 가장

(a) 500 rpm

(b) 1000 rpm

(c) 1500 rpm

(d) 2000 rpm

그림 15 고정 주파수 PWM 적용 차세대 고속전철 시뮬레이션 결과

Fig. 15 Simulation result of the next-generation high-speed Railway Inverter System by fixed frequency PWM

(a) 500 rpm

(b) 1000 rpm

(c) 1500 rpm

(d) 2000 rpm

그림 16 Hybrid RPWM 적용 차세대 고속전철 시뮬레이션 결과

Fig. 16 Simulation result of the next-generation high-speed Railway Inverter System by Hybrid RPWM

강하게 나타났다. Hybrid RPWM을 적용한 차세대 고속전철 시스템은 THD가 약간 증가하였으나 기존의 고정주파수 PWM 적용에 비해 집중된 최대 고조파 성분의 크기는 감소되고, 넓은 대역으로 분산되었음을 확인하였다. 이러한 집중된 최대 고조파 성분의 크기 감소로 인해 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템의 전자기적 소음이 저감될 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결 론

현재의 고속전철 구동 인버터 시스템은 고정 주파수로 스위칭 하는 PWM (Pulse Width Modulation) 방식으로 구동된다. 고정 주파수를 갖는 PWM은 전력변환 시 전류제어의 주기를 일정하게 함으로써 전류제어기의 디지털화를 용이하게 하는 장점을 갖고 있으나, 특정 주파수대역에 집중된 고조파 성분들이 생성되며, 집중된 고조파 성분들은 해당 주파수의 토크맥동과 부하 측 및 전원 측에 전자기적 잡음과 가청소음을 유발한다.

본 논문에서는 차세대 고속전철 시스템에서 발생하는 전자기적 소음의 발생요인인 특정 주파수에 집중되는 고조파 성분들을 저감하기 위해 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어지도록 하는 랜덤 캐리어 방식과 고정주파수 내에서 펄스의 위치를 랜덤하게 위치시키는 랜덤 펄스 위치 방식을 결합한 Hybrid RPWM (Hybrid Random Pulse Position Modulation) 방식이 적용된 IPMSM 기반 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템을 제안하고, Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이터를 구현하여 고정주파수 PWM 방식이 적용된 기존의 시스템과 성능을 비교, 분석하였다.

Hybrid RPWM을 적용한 차세대 고속전철 시스템은 기존의 고정주파수 PWM 적용에 비해 상전류에서 발생하는 최대 고조파 성분의 크기는 감소되고, 넓은 대역으로 분산되었음을 확인하였다. 이러한 집중된 고조파 성분의 저감으로 인해 차세대 고속전철 구동 인버터 시스템의 전자기적 소음이 저감될 수 있을 것으로 예상된다. 향후 입력전압 변동, 외부외란 등 다양한 경우에 대한 연구를 통하여 안정성에 대한 추가연구를 수행할 것이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [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, 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, 1999.

- [3] 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.
- [4] K.S. Kim, Y.G. Jung, and Y.C. Lim, "A New Hybrid Random PWM Scheme", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 24, No. 1, Jan. 2009.
- [5] Seok-Beom 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.
- [6] Uddin M.N. Radwan T.S. George G.H. Rahman M.A, "Performance of current controllers for VSI-fed IPMSM drive", IEEE Trans. on IA, Vol. 36, pp. 1531-1538, 2000.
- [7] Tse, K.K., Chung, H.S.-H., Huo, S.Y., So, H.C, "Analysis and spectral characteristics of a spread-spectrum technique for conducted EMI suppression", Power Electronics, IEEE Trans on Vol. 15, No. 2 Mar. 2000.
- [8] 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, July. 2000.
- [9] R. Lynn Kirlin, S. Kwok, S. Legowski, and A.M. Trzynadlowski, "Power spectra of a PWM inverter with Randomized Pulse Position", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 9, No. 5, Sep. 1994.

저 자 소 개

이 상 현 (李 相 賢)

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

진 강 환 (陳 康 煥)

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

김 성 제 (金 成 濟)

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

박 영 호 (朴 永 浩)

1967년 1월 8일생. 1992년 동국대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 현대 로템(주) 기술연구소 책임연구원

김 윤 호 (金 倫 鎬)

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