RCF-PWM을 이용한 IPMSM 기반 차세대 고속철도 구동 인버터 시스템의 소음원 고조파 저감

Noise Harmonic Reduction of IPMSM Based Next Generation High Speed Railway System using RCF-PWM

김성제¹ · 진강환¹ · 이상현¹ · 김윤호^{1*}

Sung-Je Kim · Kang-Hwan Jin · Sang-Hyun Lee · Yoon-Ho Kim

Abstract In this paper, The next Generation High Speed Railway Inverter system using RCF-PWM(Random Carrier Frequency Pulse Width Modulation) was developed to reduce electromagnetic noise. RCF-PWM method is randomized the switching frequency in the range between Semiconductor switching devices' maximum switching frequency and minimum switching frequency, Simulation program has been built using MATLAB/Simulink to verify the validity of study. Finally, the simulation results of Next Generation High Speed Railway inverter system using the RCF method was compared with the conventional SVPWM method.

Keywords : Speed Railway System, Random Carrier Frequency PWM, Harmonic Spectrum

초 록 본 논문에서는 차세대 고속철도 구동 인버터 시스템의 고조파로 인한 전자기적 소음을 줄이기 위해 RCF-PWM(Random Carrier Frequency Pulse Width Modulation)을 적용한 인버터 구동시스템을 개발하였다. RCF-PWM 방식은 인버터 스위칭 주파수를 전력용 반도체의 최대 스위칭 주파수와 최소 스위칭 주파수 사이에서 임의적으로 변화시키며 PWM을 수행하는 방법이다. 본 연구의 타당성을 확인하기위해서 RCF-PWM이 적용된 차세대 고속전철 시스템을 설계하여 MATLAB/Simulink 기반의 시뮬레이터를 개발하고 이를 이용하여 일정한 스위칭 주파수를 사용하는 정규적인 SVPWM 방식과 RCF-PWM 방식의 시험결과를 비교 분석하였다.

주요어 : 고속철도시스템, 랜덤 캐리어 주파수 PWM, 고조파 스펙트럼

1. 서 론

국내 고속철도 분야에서는 영업속도 370km/h, 시험 최고 속도 400km/h 급 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Machine)이 적용된 차세대 고속철도시스템을 개발하고 있다. 현재 고속철도 구동 인버터 시스템은 일정한 스위칭 주파수를 갖는 PWM 방식을 사용한다. 일정한 주파수를 갖는 PWM은 전력변환 시 전류제어의 주기를 일정하게 함으로써 전류제어기의 디지털화를 용이하게 하는 장점을 갖고 있으나, 고조파 성분이 스위칭 주파수의 정수배에 해당되는 대역에 집중 되어 토크맥동과 전자기적 가청 스위칭 소음을 유발하는 단점이 있다 [1,2]. 이를 해결하기 위하여 도입된 방법으로 RPWM(Random Pulse Width Modulation) 방식이 있다. RPWM 방식은 주파수 및 펄스 위치를 제한 범위 내에서 랜덤하게 변경시키는 방식으로 특정 주파수대역에 집중된 고조파를 넓은 대역으로 분산시킨다. 이러한 방식을 적용할 경우 EMI, 기계 진동

및 소음 저감에 효과가 있다.[3]

RPWM 방식은 그 기법에 따라 매우 다양한 형태의 것이 시도 되었는데 매 샘플링 주기마다 스위칭 주파수를 랜덤하게 변조하는 RCF(Random Carrier Frequency)-PWM과 매 샘플링 주기를 일정하게 유지하면서 변조 구간 내에서 펄스의 위치를 랜덤하게 결정해주는 RPP(Random Pulse Position)-PWM으로 크게 분류된다[4,5].

본 논문에서는 RCF-PWM이 적용된 차세대 고속전철 시스템을 설계하여 Matlab/Simulink 기반의 시뮬레이터를 개발하고 이를 이용하여 일정한 스위칭 주파수를 사용하는 정규적인 SVPWM 방식과 RCF-PWM 방식의 시험결과를 비교 분석한다.

2. IPMSM에 적용된 차세대 고속철도 구동시스템

2.1 추진 제어장치 회로 구성

일반적으로 철도차량의 추진 제어장치는 변압기, 컨버터, 인버터, 전동기와 주변 장치로 구성된다. 그림 1은 차세대 고속철도에 적용 될 1개의 인버터가 1대의 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)를 제어하는(1C1M) 추진 제어장치 회

*교신저자 : 중앙대학교 공과대학 전자전기공학부
E-mail : yhkim@cau.ac.kr

¹중앙대학교 공과대학 전자전기공학부

Fig. 1 Traction control system circuit

로도를 나타낸다. 2개의 변압기와 2개의 컨버터가 병렬로 연결되고 그 출력에 4개의 인버터가 병렬로 연결된 구조를 갖는다. 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

2.2.1 매입형 영구자석 동기전동기 특징 및 수학적 모델링

영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 있는 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 고속 운전 시에도 기계적으로 강인하며, 유효 공극을 작게 할 수 있기 때문에 약계자 제어가 비교적 용이하다. 이러한 이유로 고속 운전을 위한 영구자석 동기전동기로는 IPMSM이 주로 사용된다 [6].

영구자석 동기전동기의 3상 고정자 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{as} &= R_s i_{as}(t) + \frac{d\lambda_{as}(t)}{dt} \\ V_{bs} &= R_s i_{bs}(t) + \frac{d\lambda_{bs}(t)}{dt} \\ V_{cs} &= R_s i_{cs}(t) + \frac{d\lambda_{cs}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, v_{as}, v_{bs}, v_{cs} : 3상 고정자 전압

R_s : 고정자 저항

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : 3상 고정자 전류

$\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs}$: 고정자 전자속

식 (1)의 전압 방정식은 자기인덕턴스, 다른 상과 쇄교하는 상호 인덕턴스, 그리고 회전자의 자속에 의한 상호 인덕턴스로 이루어진다. 식 (1)를 역기전력이 포함된 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$v_{abx} = R_s i_{abx} + \frac{d}{dt}(L_{abx}(\theta_r) i_{abx}) + e_{abx} \quad (2)$$

IPMSM의 3상 고정자 전압방정식을 2상 정좌표계의 전압방정식으로 좌표 변환하면 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{dq}(\theta_r) \\ L_{qd}(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} - \omega_r \phi_f \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

자속 쇄교값은 회전자 위치함수와 관련되며, 인덕턴스항에는 회전자가 비돌극형인 SPMSM과는 달리 회전자 위치의 2배 함수와 관련 있을 뿐만 아니라 2상 각각에 상호 간섭항이 존재한다.

회전자를 기준으로 한 동기좌표계에서는 좌표축이 동기속도로 회전하고 있으므로 동기속도로 회전하고 있는 고정자의 전압과 전류벡터는 회전자 축에서 볼 때 직류 값과 같이 일정 값으로 된다. 회전자의 위치에 관련된 항은 모두 상수 값이 되므로 수식을 간략화 할 수 있게 되며 2상 동기좌표계 전압방정식은 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_{ds} \frac{d}{dt} & -\omega_r L_{qs} \\ \omega_r L_{ds} & R_s + L_{qs} \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, ω_r : 동기 각속도

v_{ds}^r, v_{qs}^r : 동기좌표계 d,q축 고정자 전압

i_{ds}^r, i_{qs}^r : 동기좌표계 d,q축 고정자 전류

L_{ds}, L_{qs} : 동기좌표계 d,q축 인덕턴스

R_s : 고정자 저항

ϕ_f : 영구자석에 의한 쇄교자속

매입형 영구자석 동기전동기의 토크식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3P}{22} (\phi_f i_{qs}^r + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r i_{qs}^r) \quad (5)$$

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 자속성분 $L_{ds} i_{ds}^r$ 와 $L_{qs} i_{qs}^r$ 에 각각에 수직인 전류성분 i_{ds}^r, i_{qs}^r 가 작용하여 발생하는 토크, 즉 d,q축의 돌극성($L_{qs} > L_{ds}$)에 의한 자기저항 토크(reluctance torque) 성분이다.

2.2.2 매입형 영구자석 동기전동기의 가변속 운전 특성

IPMSM의 가변속 구동은 VVVF 제어 즉 주파수와 전압

Fig. 2 Torque-speed curve of variable speed operation

의 가변을 통해 이루어지며 속도 범위는 대개 그림 2와 같은 정토크 영역(Constant Torque)과 정출력 영역(Constant Power) 두 영역으로 나뉘어진다. 일반적으로 정토크 영역에서는 단위전류당 최대토크제어(MTPA Control)를 통해서 높은 기동토크를 얻고 정출력 영역에서는 약계자 제어(Field Weakening Control)를 통해서 운전 속도 범위를 확장할 수 있다[7-9].

2.2.3 벡터제어 시스템 구성

그림 3은 IPMSM의 벡터 제어 시스템 블록도를 나타낸다. 이는 속도제어기와 전류제어기, 단위전류당 최대토크제어 및 약계자 제어기, 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.

Fig. 3 Vector control system of IPMSM

3. RCF-PWM의 특징 및 적용방안

3.1 RPWM(Random Pulse Width Modulation)

고속철도 구동 인버터 시스템은 일정한 주파수로 스위칭하는 PWM방식을 사용하고 있다. 이 방식은 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 대역에서 강한 고조파 성분이 나타나는데 이는 전자기적 소음과 진동을 유발한다. 이에 대한 해결 방안으로 고속철도 구동 인버터 시스템에 RPWM 방식을 적용한다. RPWM 방식은 랜덤 수를 이용하여 펄스의 위치나 스위칭 주파수를 랜덤하게 변경 함으로써 특정 주파수 대역에 집중된 고조파 성분을 광대역화 시킬 수 있다.

Fig. 4 Spectra characteristic of (a) fixed frequency PWM, (b) random frequency PWM

일정한 주파수로 스위칭하는 PWM 방식과 RPWM 방식을 적용한 인버터 출력 전류 고조파 스펙트럼의 특징은 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 일정한 주파수로 동작 시켰을 때 스위칭에 의한 고조파가 특정 주파수대에 집중되어 있는 상태를 나타낸다. RPWM 방식은 그림 4(b)와 같이 전자기적 소음원인 특정 주파수대에 집중된 고조파를 넓은 대역에 분산 시킨다.

3.2 RCF-PWM의 특징

RCF-PWM(Random Pulse Width Modulation) 방식은 인버터 스위칭 주파수를 전력용 반도체의 최대 스위칭 주파수와 전동기의 동특성으로부터 요구되는 최소 스위칭 주파수 사이에서 임의적으로 변화시키며 PWM을 수행하는 방식으로 삼각파 캐리어의 주파수를 매 스위칭 구간마다 랜덤하게 변경시킨다.

일정한 스위칭 주파수를 갖는 PWM은 그림 5(a)와 같이 일정한 주기를 가지는 삼각파 캐리어와 지령파의 비교를 통하여 동일 지령일 경우 그림 5(b)와 같이 같은 주기에 같은 크기의 펄스를 생성한다. 이에 비해 RCF-PWM 방식은 그림 6(a)와 같이 랜덤한 주기를 가지는 삼각파 캐리어를 생성하고 지령파의 비교를 통하여 그림 6(b)와 같은 매번 다른 크기의 펄스를 생성한다.

릴럭턴스 토크가 영구자석에 의한 토크와 더해져서 더 큰 출력 토크를 얻을 수 있다.

Fig. 5 Fixed PWM

Fig. 6 RCF PWM

3.2 RCF-PWM 적용 방안

본 논문에서는 캐리어 주파수를 매 스위칭 구간마다 랜덤하게 변경시킴으로써 고정주파수 PWM에 의한 특정 주파수 대역에 집중된 고조파를 광대역으로 분포 시키는 RCF-PWM 방식을 SVPWM 기반으로 구현한다. SVPWM은 주어진 인버터 직류 전압 하에서 전압 이용률이 높아 가장 큰 교류

전압을 얻을 수 있고 변조된 출력 전압이 인가된 경우 부하전류에 포함된 고조파가 다른 종류의 전압변조 방식 보다 적은 장점이 있다

일정한 주파수를 갖는 삼각파 형태의 캐리어 신호를 사용하는 기존 SVPWM 방식과 달리 RCF방식은 랜덤한 주파수를 갖는 캐리어 신호를 사용하게 된다. 이를 MATLAB/Simulink 프로그램을 이용하여 그림 7과 같이 랜덤 캐리어를 발생시키는 시뮬레이터를 구현하였다.

RCF방식은 랜덤 수를 사용하여 삼각파의 주파수를 변경하는 방식이므로, 캐리어 주파수 입력부와 캐리어 주파수의 몇 % 제한 내에서 랜덤한 주파수를 발생할 것 인지를 결정하는 퍼센트 입력부 및 삼각파의 꼭지점을 중앙으로 유지하기 위한 입력부가 필요하다. 랜덤 수 발생기는 -1에서 1사이에서 선택되도록 설정하였으며 퍼센트 입력부의 캐리어 주파수 변동제한 값에 이를 곱하여 S-function 블록으로 랜덤 주파수를 가지는 캐리어 파형을 생성하였다.

그림 8(a)는 구현한 랜덤 캐리어 발생 시뮬레이터에 고속철도에 사용되고 있는 스위칭 주파수(650Hz)를 적용하고 주파수 변동 제한 $\pm 50\%$ 가 적용된 RCF 파형과 지령 전압을

Fig. 7 RCF Carrier block using MATLAB/Simulink

(a) Space Vector RCF($\pm 50\%$)

(b) Generated Pulse

Fig. 8 Space Vector Based RCF-PWM

나타내고 있다. 캐리어 파형은 그림에서처럼 주기가 랜덤하게 변화하는 것을 볼 수 있다. $650 \pm 50\%$ 의 캐리어 파형은 325Hz~975Hz의 범위에서 캐리어 파형이 생성되고, 지령의 비교를 통하여 그림 8(b)와 같은 게이트 펄스가 생성된다.

4. 차세대 고속철도 시스템 시뮬레이션

4.1 IPMSM의 사양과 시뮬레이션

본 논문에서는 그림 9와 같이 MATLAB/Simulink를 이용하여 차세대 고속철도의 견인 전동기 구동 시스템을 구현하였다. 차세대 고속철도 시스템에 적용 예정인 표 1의 전동기 파라미터를 이용하여 IPMSM을 모델링 하였다. 인버터 변조방식은 일정한 스위칭 주파수를 사용하는 SVPWM방식과 RCF-PWM 방식을 각각 적용하고 인버터 DC전압 2800V, 스위칭 주파수 650Hz, 스위치로는 IGBT를 사용하였다.

차세대 고속철도 구동 시스템은 크게 속도제어기, 최대토크 및 약계자 제어기, 전류제어기, 전향보상기, 좌표변환기, 2레벨 인버터, IPMSM 등으로 구성된다.

차세대 고속철도 시스템 시뮬레이터를 통하여 지령속도 600rpm, 1500rpm을 인가하여 정규적인 변조 방식(SVPWM)과 RCF-PWM 방식의 고조파 스펙트럼을 비교 분석 한다. RCF-PWM 방식은 고정 스위칭 주파수(650Hz)를 기준으로 주파수 변동 제한에 따라 고조파 저감 성능을 알아보기 위하여 $\pm 10\%$, $\pm 30\%$, $\pm 50\%$ 의 주파수 변동 제한을 적용하여 동작하게 하였다.

Fig. 9 Total system block diagram using Matlab simulink

Table 1 IPMSM parameter

Parameter	Value
Power rating [kW]	410
Phase current rating [Apk]	188
Phase voltage rating [Vpk]	1760
R_s [Ω]	0.08161
L_d [H]	0.009846
L_q [H]	0.035627
Flux linkage [Wb]	2.5707
Inertia [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	1.33815
Pole	4

4.2 지령속도 600rpm 경우

그림 10은 차세대 고속철도 시스템의 지령속도 600rpm에 대한 시뮬레이션 결과 파형을 나타낸다. 그림 10(a)는 지령속도에 대한 추종속도를 나타내며 정규적인 SVPWM 방식과 RCF-PWM 방식 각각 속도 추종 시간의 차이는 않았으며, 그림 10(b)는 출력 상전류를 나타낸다. 그림 10(c)~10(f)는 정규적인 SVPWM 방식과 RCF-PWM($\pm 10\%$, $\pm 30\%$, $\pm 50\%$) 방식에 따른 출력 상전류의 고조파 스펙트럼을 나타낸다. 그림 10(c)의 정규적인 SVPWM 방식의 고조파 스펙트럼을 기준으로 RCF 방식의 스펙트럼을 비교 분석해 보면, 그림 10(d)의 RCF($\pm 10\%$) PWM 방식의 고조파 성분 최대치는 정규적인 SVPWM 방식의 고조파 성분 최대치에 비해 67.4% 감소, 그림 10(e)의 RCF($\pm 30\%$) PWM 방식은 82.6% 감소, 그림 10(f)의 RCF($\pm 50\%$) PWM 방식은 76.0%가 감소하였다. 시뮬레이션 결과를 종합하여 살펴보면, 주파수 변동 제한 $\pm 10\%$, $\pm 30\%$, $\pm 50\%$ 를 갖는 RCF-PWM 방식 모두 고정스위칭 주파수로 동작하는 정규적인 SVPWM 방식보다 집중된 고조파 성분을 크게 감소시키는 결과를 나타내었다. 그 중에서도 주파수 변동 제한 $\pm 30\%$ 를 갖는 RCF-PWM 방식이 정규적인 SVPWM 방식에 의한 집중된 고조파 성분을 줄

이는데 가장 좋은 성능을 나타내고 있음을 확인하였다.

4.3 지령속도 1500rpm 경우

그림 11은 차세대 고속철도 시스템의 지령속도 1500rpm에 대한 시뮬레이션 결과 파형을 나타낸다. 그림 11(a)는 지령속도에 대한 추종속도를, 그림 11(b)는 출력 상전류를 나타낸다. 그림 11(c)~11(f)는 정규적인 SVPWM 방식과 RCF-PWM($\pm 10\%$, $\pm 30\%$, $\pm 50\%$) 방식에 따른 출력 상전류의 고조파 스펙트럼을 나타낸다. 그림 11(c)의 정규적인 SVPWM 방식의 고조파 스펙트럼을 기준으로 RCF 방식의 스펙트럼을 비교 분석해 보면, 그림 11(d)의 RCF($\pm 10\%$) PWM 방식의 고조파 성분 최대치는 정규적인 SVPWM 방식의 고조파 성분 최대치에 비해 73.2% 감소, 그림 11(e)의 RCF($\pm 30\%$) PWM 방식은 80.5% 감소, 그림 11(f)의 RCF($\pm 50\%$) PWM 방식은 78.0%가 감소하였다. 시뮬레이션 결과를 종합하여 살펴보면, 주파수 변동 제한 $\pm 10\%$, $\pm 30\%$, $\pm 50\%$ 를 갖는 RCF-PWM 방식 모두 고정스위칭 주파수로 동작하는 정규적인 SVPWM 방식보다 집중된 고조파 성분을 크게 감소시키는 결과를 나타내었다. 그 중에서도 주파수 변동 제한 $\pm 30\%$ 를 갖는 RCF-PWM 방식이 정규적인 SVPWM 방식에 의한 집

(a) Reference and Real Speed (x:Time[s], y:speed[rpm])

(b) Output Current (x:Time[s], y:[A])

(c) Regular SVPWM Spectrum

(d) RCF($\pm 10\%$) Spectrum

(e) RCF ($\pm 30\%$) Spectrum

(f) RCF($\pm 50\%$) Spectrum

Fig. 10. Operating characteristics of Reference Speed 600RPM

Fig. 11. Operating characteristics of Reference Speed 1500RPM

중된 고조파 성분을 줄이는데 가장 좋은 성능을 나타내고 있음을 확인하였다.

령속도 600rpm과 1500rpm 조건 모두 가장 좋은 성능을 내는 것을 확인 하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 실제 적용 예정인 IPMSM 및 인버터 사양을 적용한 차세대 고속철도 구동 시스템을 모델링하고 정규적인SVPWM 방식과RCF-PWM 방식을 적용하여 지령속도 600rpm과 1500rpm경우 출력 상 전류를 대상으로 고조파 스펙트럼을 비교 분석하였다.

600rpm의 경우 고조파 성분 최대치를 정규적인 SVPWM 방식 대비 RCF(±10%) PWM 방식은 67.4% 감소, RCF(±30%) PWM 방식은 82.6% 감소, RCF(±50%) PWM 방식은 76.0%가 감소할 수 있었다. 또한, 1500rpm 경우도 정규적인 SVPWM 방식 대비 RCF(±10%) PWM 방식은 73.2% 감소, RCF(±30%) PWM 방식은 80.5% 감소, RCF(±50%) PWM 방식은 78.0%가 감소하였다.

주파수 변동 제한(±10%, ±30%, ±50%)를 갖는 RCF-PWM 방식 모두 정규적인 SVPWM에 의해 발생한 특정 주파수에 집중된 고조파 성분을 67%이상 감소시켜 인버터 동작에 의한 전자기적 소음을 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 그 중 ±30%까지의 주파수 변동 제한을 갖는 RCF-PWM 방식이 지

후 기

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

참고문헌

- [1] C.M. Liaw, Y.M. Lin, C.H. Wu, K.I. Hwu (2000) Analysis, Design, and Implementation of a Random Frequency PWM Inverter, *IEEE Transaction on Power Electronics*, 15(5), pp. 843-854.
- [2] Y.S. Lai (1999) New Random Technique of Inverter Control for Common Mode Voltage Reduction of Inverter-Fed Induction Motor Drivers, *IEEE Transaction on Power Electronics*, 14(4), pp. 1139-1146.
- [3] A.M. Trzynadlowski, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, R.L. Kirlin, S. Legowski (1994) "Random Pulse Width Modulation Techniques for Converter-Fed Drive Systems – A Review", *IEEE Trans. on IA*, 30(5), pp. 1166-1175.
- [4] K.K. Tse, H.S.-H., Chung, S.Y. Huo, H.C. So (2000) Analysis

- and spectral characteristics of a spread-spectrum technique for conducted EMI suppression, *Power Electronics, IEEE Transactions*, 15(2), Mar.
- [5] Michael M. Bech, Frede Blaabjerg, John K. Pedersen (2000) Random Modulation Techniques with Fixed Switching Frequency for Three-Phase Power Converters, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 15(4).
- [6] M.N. Uddin, T.S. Radwan, G.H. George, M.A. Rahman (2000) Performance of current controllers for VSI-fed IPMSM drive, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, pp. 1531-1538.
- [7] S.M. Kim, Y.D. Yoon, S.K. Sul, K. Ide, K. Tomita (2010) Parameter Independent Maximum Torque per Ampere(MTPA) Control of IPM Machine Based on Signal Injection, *Twenty-Fifth Annual IEEE*.
- [8] M. Zordan, P. Vas, M. Rashed, S. Bolognani, M. Zigliotto (2000) Field-weakening in vector controlled and DTC PMSM drives, a comparative analysis, *Power Electronics and Variable Speed Drives*, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 475), pp. 493-499.
- [9] S.H. Kwon, K.H. Jin, S.J. Kim, T.H. Lee, Y.H. Kim (2012) IPMSM Drive using NPC 3-Level Inverters for the Next Generation High Speed Railway System, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(2), pp. 129-134.

접수일(2012년 4월 27일), 수정일(2012년 5월 30일),
게재확정일(2012년 6월 8일)