

# 다중 인버터 구동 고속전철 시스템의 IPMSM 파라미터 변동에 따른 운전 특성 고찰

논 문
60P-4-6

## Investigation of the IPMSM Parameter Variation Effect to the System Operation Characteristics of the Multi Inverter Driven High Speed Train System

박 동 규\* · 진 강 환\*\* · 장 진 영\*\*\* · 김 성 제\*\* · 김 윤 호†  
(Dong-Kyu Park · Kang-Hwan Jin · Chin-Young Chang · Sung-Je Kim · Yoon-Ho Kim)

**Abstract** - The next generation domestic high speed railway system is a power distributed type and uses vector control method for motor speed control. Nowadays, inverter driven induction motor system is widely used. However, recently PMSM drives are deeply considered as a alternative candidate instead of an induction motor driven system due to their advantages in efficiency, noise reduction and maintenance.

The next-generation high-speed train is composed of 2 converter units, 4 inverter units, and 4 Traction Motor units. Each motor is connected to the inverter directly. In this paper, the effects of IPMSM parameter variation to the system operation characteristics of the multi inverter driven high speed train system are investigated. The parallel connected inverter input-output characteristics are analyzed to the parameter mismatches of the IPMSM in ICIM control using Matlab/Simulink, then the reliability of the simulation results are verified through experimental results.

**Key Words** : Multi Inverter, IPMSM Parameter, High Speed Train

### 1. 서 론

기존의 고속전철 시스템에 쓰이던 유도전동기는 용량 대비 제조원가가 낮은 장점이 있지만 충분한 용량 확보를 위해 크기를 줄이는 데 한계가 있고 효율 또한 제한적인 단점이 있다. 이에 비해 영구자석 동기전동기는 계자에 해당되는 자속 성분이 외부 전원에 의하지 않고 영구 자석에 의해 공급되어 전력 소모를 최소화하여 전체 시스템의 효율 향상을 기대할 수 있으며 유효 공극이 작아 전기자 반작용 효과가 좋은 장점이 있다. 또한 소형, 경량화 및 유지보수 비용 절감 등의 이점이 있으며, 영구 자석이 회전자에 매입되어 있어 고속 동작에서의 영구 자석의 이탈과 같은 문제가 제거되어 회전자의 기계적 견고함이 우수하여 견인전동기 응용으로 크게 각광을 받고 있다.[1-3]

기존의 고속전철은 1대의 인버터가 견인전동기 4대를 병렬로 연결하여 제어하는 방식이었으나, 차세대 고속전철에서는 동력 분산식으로서 2대의 컨버터와 4대의 인버터부로 구성된 주변환장치에서 4대의 인버터 각각에 4대의 견인전동기가 1:1로 연결되는 1C1M(1 Controller 1 Motor) 방식을 채용하고 있어 각각의 전동기를 현 운행상황 및 운전 지령에 맞게 최적의 속도로 구동시키는 것이 효율적이며, 특히

저속에서 정확한 열차 제어가 가능하다. 다만 2대 이상의 인버터와 견인전동기가 병렬로 연결되어 있으므로 인버터 제어 변수 및 파라미터 변동에 따라 인버터의 입력단과 출력단의 특성이 달라질 수 있다.

본 논문에서는 차세대 고속전철 다중 인버터 구동 시스템의 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) 파라미터 변동에 따른 특성을 고찰한다. 먼저 IPMSM 구동 시스템의 속도별 운전 특성에 따라 단위 전류당 최대 토크 제어(Maximum Torque Per Ampere)와 약제자 제어(Feil Weakening Control) 기법을 적용하여 속도제어를 수행한다[4-9]. 그리고 병렬 연결된 인버터에 견인전동기의 파라미터 불일치에 따른 인버터의 입출력 특성을 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이터를 통해 분석하고, 실험을 통해 시뮬레이터의 신뢰성을 검증한다.

### 2. 고속전철의 추진제어 시스템

#### 2.1 견인전동기 제어방식

철도차량의 견인전동기를 제어하기 위한 방법은 전력반도체 소자의 발전과 경제적인 측면에서 많은 변천을 거듭해왔다. 최근에는 IGBT 소자의 발전으로 시스템의 소형·경량화, 효율향상, 저소음화, 점착성능 등의 성능향상을 가져왔으며 견인전동기를 제어하기 위해 일괄제어 및 개별제어와 같은 여러 가지 형태로 개발 및 운용되고 있다.

시스템 구성은 제어장치와 연결된 모터의 수에 따라 1C1M(1 controller 1 motor), 1C2M(1 controller 2 motor) 및 1C4M(1 controller 4 motor) 등으로 구성되어 있으며, 하나의 제어 장치를 통해 하나 혹은 다수의 모터를 병렬 구동하는 구조로 이루어져 있다.

\* 준 회원 : 중앙대학교 재생에너지학과 석사과정

\*\* 정 회원 : 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정

\*\*\* 종신회원 : 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정

† 교신저자, 종신회원 : 중앙대학교 전자전기공학부 교수 · 공박

E-mail : yhkim@cau.ac.kr

접수일자 : 2011년 7월 27일

최종완료 : 2011년 9월 6일

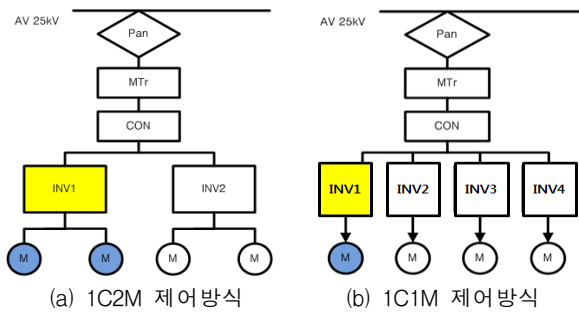


그림 1 제어방식의 비교  
Fig. 1 comparison of control method

2.2 2Motor 제어방식

2Motor 제어방식은 그림 1 (a)와 같이 1대의 인버터로 2대의 견인전동기를 병렬로 연결하여 제어하는 방법이다. 한 전동기 축에서 공전이 발생할 경우 2구동축 단위의 재점착 제어가 되기 때문에 공전축의 토크 제어가 어렵고, 다른 축의 전동기에도 영향을 주게 되어 재점착 성능이 1Motor 제어방식에 비해 떨어진다. 또한 인버터 한 대의 고장시 동시에 견인전동기 1대의 구동이 불가능하게 되므로 차량 시스템의 안정성 측면에서도 불리하다. 그러나 제어 측면에서 볼 때 주회로 구성이 간단하고 중량 및 부피를 감소할 수 있고 유지보수, 경제성 측면에서 장점이 있다.

2.3 1Motor 제어방식

인버터 1대가 견인전동기 1대를 개별적으로 제어하는 방식으로, 그림 1 (b)와 같이 전력반도체 소자의 발달로 인하여 고성능 제어의 구현이 가능하다. 이 제어방식은 1대의 견인전동기를 인버터 1대가 각각 독립적으로 구동시키므로 한전동기 축에서 발생하는 공전이 다른 전동기 축에 영향을 미치지 않으며, 한 축에서 공전이 발생하더라도 다른 축에는 영향을 미치지 않으므로 우수한 재점착 제어가 가능하다. 또한 각각의 인버터를 독립적으로 제어하기 때문에 고정밀도의 토크 제어가 가능하며, 한 대의 인버터 고장시에 고장난 인버터를 OFF하고 운전할 수 있으므로 차량시스템의 안정성 면에서 집중제어 방식에 비해 우수한 성능을 발휘할 수 있다. 그러나 개별적인 제어 구성에 따른 주회로 구성소자 및 관련 부품의 증대에 따른 유지보수와 가격 상승의 문제가 대두될 수 있다.

3. IPMSM의 가변속 운전 특성

매입형 영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자 내부에 매입된 구조로 자기저항에 의한 토크(Reluctance Torque)가 존재하고 이 토크를 영구자석에 의한 토크(Magnetic Torque)와 같이 사용함으로써 단위체적당 큰 토크를 얻을 수 있는 장점이 있다.

매입형 영구자석 동기전동기의 가변속 구동은 VVVF 제어 즉 주파수와 전압의 가변을 통해 이루어지며 운전영역에 따른 제어방법은 전류 크기와 전류 위상각을 제어하는 방법을 많이 사용한다. 매입형 영구자석 동기전동기의 운전영역은 그림 2와 같이 일정토크 영역(Constant Torque Region)과

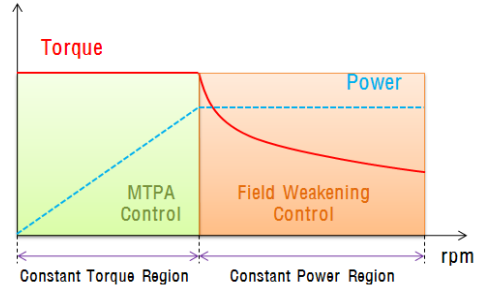


그림 2 가변속 운전 토크-속도 곡선  
Fig. 2 Torque-speed curve of variable speed operation

일정출력 영역(Constant Power Region) 두 영역으로 나뉘어진다.

3.1 일정토크 영역( $\omega_r \leq \omega_{base}$ )

일정토크 영역에서 전동기의 토크는 인버터 전류에 의해 제한되며 주어진 전류 제한에서 출력토크가 최대가 되는 d, q축 전류로 제한한다면 전동기의 동특성을 빠르게 할 수 있다. d, q축 전류는 3상 교류 전류의 제어를 용이하게 하기 위해 clark 변환과 park 변환을 이용하여 얻어진 회전좌표축(d축, q축)의 전류를 의미한다.

최대토크제어는 동일한 전류를 사용하여 최대의 토크를 발생시킬 수 있는 방식으로 벡터 제어시의 q축 전류에 의한 발생토크 뿐만 아니라 매입형 영구자석 동기전동기에 존재하는 릴럭턴스 토크를 이용하기 위한 최적의 제어방식이라 할 수 있다. 매입형 영구자석 동기전동기의 릴럭턴스 토크를 이용하기 위하여 d축 전류를 0보다 작은 값으로 제어하면 릴럭턴스 토크가 영구자석에 의한 토크와 더해져 최대 토크 제어가 가능하게 된다[10-11].

3.2 일정출력 영역( $\omega_r \leq \omega_{base}$ )

저속의 운전 영역에서 전동기가 출력할 수 있는 최대 토크는 허용 가능한 최대 전류  $I_{smax}$  에 의해서 제한된다. 그러나 역기전력이 큰 고속 운전 영역에서는 전류 제어를 위한 여유 전압이 부족하여 이용 가능한 최대 전압  $V_{smax}$  이 고려되어야 한다. 역기전력이 큰 정격속도 근처 고정자 저항에 대한 전압강하 성분은 무시할 만하므로 매입형 영구자석 동기전동기의 정상상태 고정자 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{ds}^r = -\omega_r L_q i_{qs}^r \tag{1}$$

$$v_{qs}^r = \omega_r L_d i_{ds}^r + \omega_r \phi_f \tag{2}$$

여기서  $v_{ds}^r, v_{qs}^r$  : 회전좌표계 d, q축 고정자 전압

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

$L_d, L_q$  : 회전좌표계 d, q축 인덕턴스

$\omega_r$  : 전기 각속도

$\phi_f$  : 영구자석에 의한 쇠교자속

일정토크 영역에서는 전압의 제한조건은 없고 전류 제한 조건만 고려하면 되지만 일정출력 영역에서는 전압과 전류

가 동시에 제한된다. 이러한 관계식을 수식으로 표현하면 식 (3)과 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$v_{ds}^2 + v_{qs}^2 \leq V_{smax}^2 \quad (3)$$

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{smar}^2 \quad (4)$$

이 식들로부터 일정출력 영역 운전인 약계자 제어가 시작되어야 할 기준속도( $\omega_{base}$ )는 다음 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\omega_{base} = \frac{V_{smax}}{\sqrt{(L_d I_{ds}^* + \phi_f)^2 + (L_q I_{qs}^*)^2}} \quad (5)$$

d축, q축 전류를 기준으로 동기좌표계 상에서 전압에 대한 제한조건이 고려된 전압제한 타원은 그림 3과 같다.

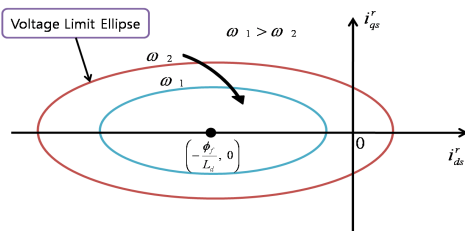


그림 3 속도에 따른 전압제한 타원  
Fig. 3 A voltage limit ellipse with respect to speed

#### 4. 모의시험

##### 4.1 모의시험을 위한 시스템 구성

본 논문에서는 그림 4와 같이 Matlab/Simulink를 이용하여 고속전철의 IPMSM 구동 시스템의 속도별 운전 특성에 따라 단위 전류당 최대 토크 제어(MTPA)와 약계자 제어(Feil weakening control) 기법을 적용하여 1C1M의 속도제어 시스템을 구현하였다. 표 1, 표 2와 표 3은 차세대 고속전철 시스템에 적용 예정인 매입형 영구자석 동기기와 인버터 및 IGBT, 다이오드 소자의 사양을 나타내며 이를 적용하여 모의시험 시스템을 모델링하였다.

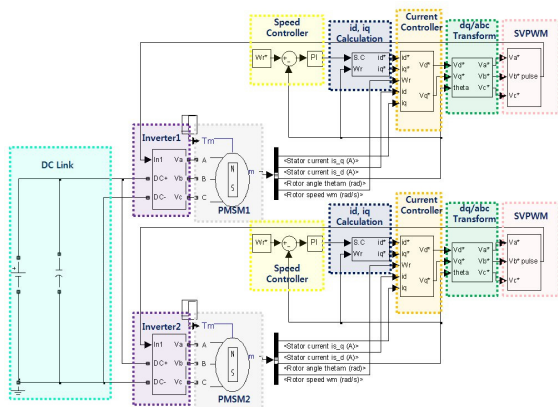


그림 4 Matlab/Simulink를 이용한 고속전철의 견인전동기 구동시스템(1C1M)  
Fig. 4 Matlab/Simulink simulation block diagram(1C1M)

표 1 IPMSM 파라미터

Table 1 IPMSM parameters

장치	항목	내용
IPMSM	정격 출력[kW]	410
	정격 상전압[V <sub>pk</sub> ]	1,760
	정격 전류[A <sub>pk</sub> ]	188
	R <sub>s</sub> [Ω]	0.08161
	L <sub>d</sub> [H]	0.009846
	L <sub>q</sub> [H]	0.035627
	Pole	4
	Flux linkage [Wb]	2.5707
	Inertia [J(kg·m <sup>2</sup> )]	1.33815

표 2 인버터 사양

Table 2 Inverter specification

장치	항목	내용	
인버터	전기적 사양	용량	512kVA
		입력측	정격전압 정격전류
	출력측	출력전압	AC 0~2,180V
		출력전류	135A
	시스템 사양	구성	1C1M
		전력 소자	IGBT
제어 방식		VVVF	

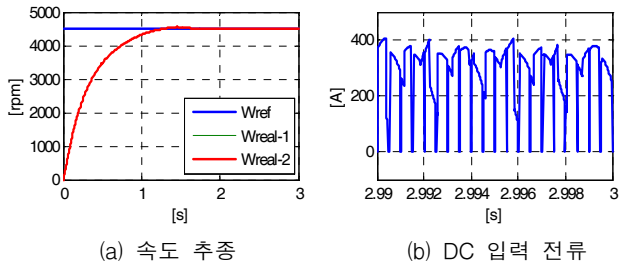
표 3 IGBT, DIODE 파라미터

Table 3 IGBT, DIODE parameters

Component	Parameter	Value
IGBT	Resistance	0.0136[Ω]
	Inductance	5e-9[H]
	Forward voltage	1[V]
	Current 10% fall time	0.5e-6[s]
DIODE	Resistance	0.012[Ω]
	Inductance	5e-9[H]
	Forward voltage	0.8[V]
	Current tail time	0.5e-6[s]

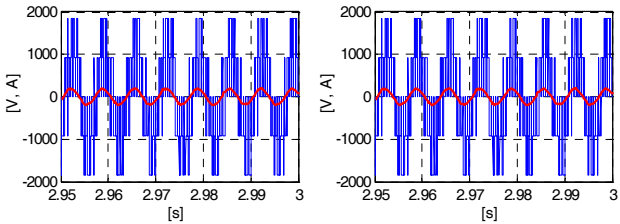
차세대 고속전철의 영업 속도인 350[km/h]에서의 전동기 분당 회전수인 약 4,500[rpm]의 지령 속도와 부하 토크 860[Nm]를 인가한 후 모의시험을 수행하였다.

그림 5는 각 IPMSM 모터에 표 3에 주어진 파라미터를 동일하게 적용하여 수행된 모의시험 결과이다. 그림 5(a)의 속도 추종 파형을 보면 지령속도 인가 후 약 1.4초 후에 지령속도 4,500rpm에 도달하여 안정된 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5 (b)는 인버터의 입력전류를 확대하여 보여주고 있다. 그림 5 (c), (d)는 인버터 각각의 출력 상전류, 전압 파형이다. 표 4는 모의시험의 결과를 표로 정리한 것이다.



(a) 속도 추종

(b) DC 입력 전류



(c) INV1의 출력 상전류, 전압 (d) INV2의 출력상전류, 전압

그림 5 IPMSM 파라미터가 동일할 경우 입출력 파형  
Fig. 5 Simulation result of same IPMSM parameter

표 4 파라미터가 같을 때 입출력 결과

Table 4 Simulation result of same IPMSM parameter

항목		DC link	INV 1	INV 2
속도 도달 시간 [s]			1.40	1.40
입력측	Idc 평균값[A]	292.20	146.10	146.10
	Idc 실효값[A]	310.90	155.80	155.80
	리플율[%]	36.34	37.04	37.04
출력측	Va[V <sub>rms</sub> ]		1211	1211
	Va1[V <sub>rms</sub> ]		1069	1069
	Va의 THD[%]		53.23	53.23
	Ia[A <sub>rms</sub> ]		131.70	131.70
	Ia1[A <sub>rms</sub> ]		131.60	131.60
	Ia의 THD[%]		3.90	3.90
	cosφ		0.957	0.957
입력전력[kW]		818.16	409.08	409.08
출력전력[kW]		807.79	403.89	403.89
효율[%]		98.73	98.73	98.73

4.2 파라미터 변동에 따른 시스템 성능 분석

실제 시스템에 적용될 IPMSM 모터 파라미터 값은 정확하게 일치하기 어렵다. 따라서 2대의 인버터에 연결될 두대의 전동기의 파라미터 불일치 상황을 만들어 모의시험을 수행하였다. IPMSM은 기본적으로 영구자석의 전기자 쇠교자속  $\Psi_a$ 와 d, q축 인덕턴스인  $L_d$ 와  $L_q$ , 고정자 저항  $R_s$ 로 표현된다.  $\Psi_a$ 는 마그네틱 토크에 기여하고,  $L_d$ 와  $L_q$ 는 돌극차  $L_d-L_q$ 에 의한 릴럭턴스 토크에 영향을 미치는 파라미터이다. 따라서 변화시킬 변수는 다음과 같다.

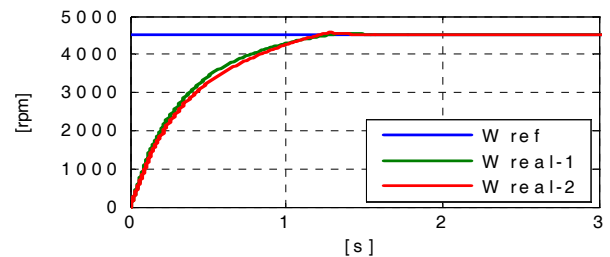
- a. IPMSM의 쇠교자속  $\Psi_a$
- b. IPMSM의  $L_d$ 와  $L_q$

c. IPMSM의 고정자 저항  $R_s$

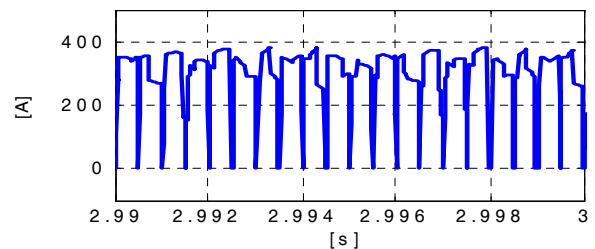
본 논문에서는 표 3에 나타낸 IPMSM의 파라미터  $\Psi_a=2.5707$ ,  $L_d=0.009846$ ,  $L_q=0.035627$ ,  $R_s=0.08161$ 을 기준값으로 하고 각 파라미터를 변화시켜 최대 속도 도달 가능 변동 폭을 분석하였다. 인버터1에 연결된 IPMSM의 파라미터 값은 기준값으로 두고 인버터2에 연결된 IPMSM의 파라미터를 변동하여 모의시험이 수행되었다.

그림 6은 쇠교자속의 기준값에서 -12% 감소한  $\Psi_a=2.262216$ 의 값을 가질 때의 파형을 나타낸다. 그림 6 (a)의 속도 추종 파형을 보면 두 대의 IPMSM 모두 지령속도 인가 후 약 1.4초 후에 지령속도 4,500rpm에 도달하여 안정된 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6 (b)는 DC링크단 전류, 즉 인버터 입력전류를 확대하여 보여주고 있다. 그림 6 (c)는 인버터 각각의 출력 상전류, 전압 파형이다. 표 5는 모의시험의 결과를 표로 정리한 것이다.

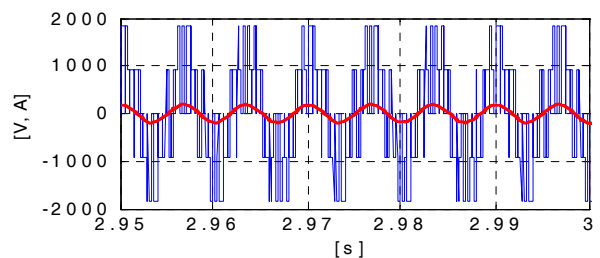
그림 7은 쇠교자속, d축 인덕턴스, q축 인덕턴스의 변동에 따른 속도 추종 실패 사례를 나타내는 모의시험 결과이다. 파형들을 살펴보면 속도에 도달하였어도 지령속도로 유지되지 못하는 경우와 지령속도까지 도달하지 못하는 경우로 나타났다.



(a) 속도 추종



(b) DC 입력 전류



(c) 출력 상전류, 전압

그림 6 쇠교자속 -12% 입출력파형

Fig. 6 Simulation result of -12%  $\Psi_a$

표 5 쇄교자속 -12%시의 모의시험 결과

Table 5 Simulation result of -12%  $\Psi_a$

항목	DC link	INV 1	INV 2	
속도 도달 시간 [s]		1.40	1.40	
입력측	Idc 평균값[A]	295.70	147.40	148.30
	Idc 실효값[A]	313.60	157.50	160.00
	리플율[%]	35.32	37.65	40.50
출력측	Va[V <sub>rms</sub> ]		1214	1193
	Va1[V <sub>rms</sub> ]		1062	1010
	Va의 THD[%]		55.38	62.87
	Ia[A <sub>rms</sub> ]		133.00	132.60
	Ia1[A <sub>rms</sub> ]		132.90	131.90
	Ia의 THD[%]		3.88	10.32
cos $\theta$		0.962	0.991	
입력전력[kW]	827.96	412.72	415.24	
출력전력[kW]	803.51	407.33	396.18	
효율[%]	97.05	98.69	95.41	

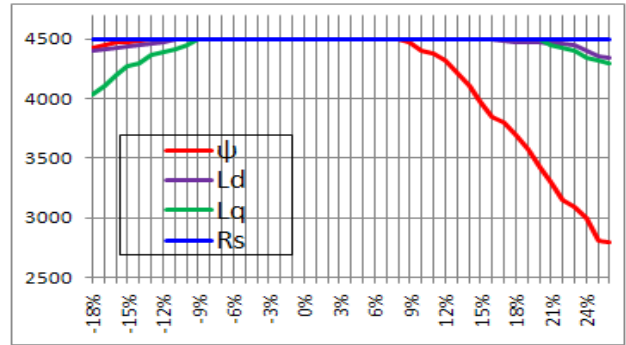


그림 8 IPMSM 파라미터 변동에 따른 속도 추종성

Fig. 8 Speed tracking performance pursuant to the IPMSM parameter

라미터 변동에 따른 결과는 기준값 대비 -12%~+8%의 쇄교자속, -11%~+15%의 Ld, -9%~+20%의 Lq, -50%~+50%의 고정자 저항값 내에서 기준 속도에 4,500[rpm]에 도달하므로, 속도 제어가 수행될 수 있음을 확인하였다.

### 5. 실험

차세대 고속철도에 적용될 IPMSM 파라미터 변동에 따른 특성 고찰을 위해 사용된 시뮬레이터의 성능을 검증하기 위해 병렬형 인버터 축소모델을 구축하고 실험을 통하여 모의시험 결과와 비교하여 신뢰성을 확보하고자 한다.

그림 9는 실제 제작된 실험장치의 사진이다. 전체적인 구조를 보면 DC-Link단에 인버터 2대가 병렬로 연결되어 삼상 교류 전원을 발생시키는 구조이고, 각 인버터에 R-L 부하를 연결하여 구성하였다. 인버터의 입력전압은 100[V], 스위칭 주파수는 1000[Hz], Modulation Index는 0.9로 설정하였다. 스위칭 소자는 IGBT를 사용하였고 Power Analyzer-PM3000을 이용하여 입출력 특성을 분석하였다. 인버터 1과 인버터 2에 각각 연결된 부하는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{INV1의 부하 } R_a &= 11.70[\Omega] \quad L_a = 1.28[mH] \\ R_b &= 11.39[\Omega] \quad L_b = 1.26[mH] \\ R_c &= 11.50[\Omega] \quad L_c = 1.24[mH] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{INV2의 부하 } R_a &= 11.87[\Omega] \quad L_a = 1.21[mH] \\ R_b &= 11.60[\Omega] \quad L_b = 1.27[mH] \\ R_c &= 11.76[\Omega] \quad L_c = 1.20[mH] \end{aligned}$$

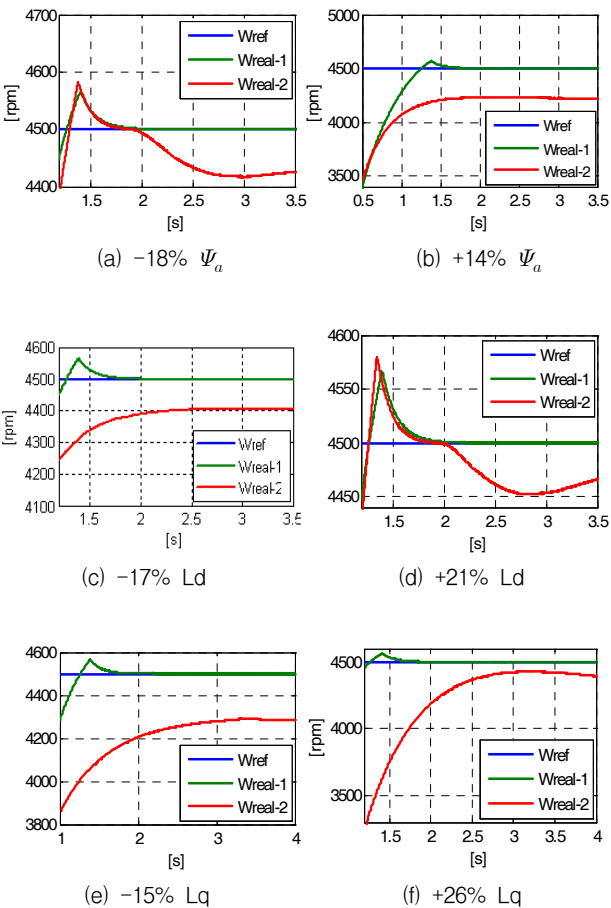


그림 7 모의시험에 따른 속도 추종 파형

Fig. 7 Speed tracking performance in Simulation

그림 8은 모의시험을 통하여 얻어진 IPMSM의 파라미터 기준값 대비 % 변동에 따른 도달 가능 속도를 나타낸다. 파

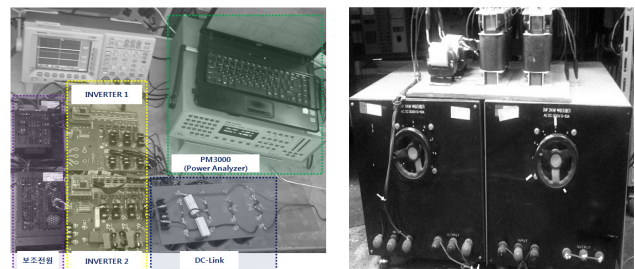


그림 9 실험용 병렬 인버터 시스템(왼쪽)과 부하(오른쪽)

Fig 9 Experiment Inverter system(left side), load(right side)

그림 10 (a)와 (b) 파형은 인버터1과 2의 입력 전압과 전류를 각각 나타낸다. 인버터1의 입력 전류의 평균값은 3.75[A], 리플율은 51.03[%]이고 인버터2의 입력 전류의 평균값은 3.72[A], 리플율은 49.45[%]이다. 그림 10 (c)와 (d) 파형은 인버터1과 2의 출력 상전압, 상전류 파형을 각각 나타낸다. 그림 10 (e), (f)는 출력 상전류의 FFT 분석 파형이다. 인버터의 입출력 특성을 표 6에 정리하였다. 표 6에서,

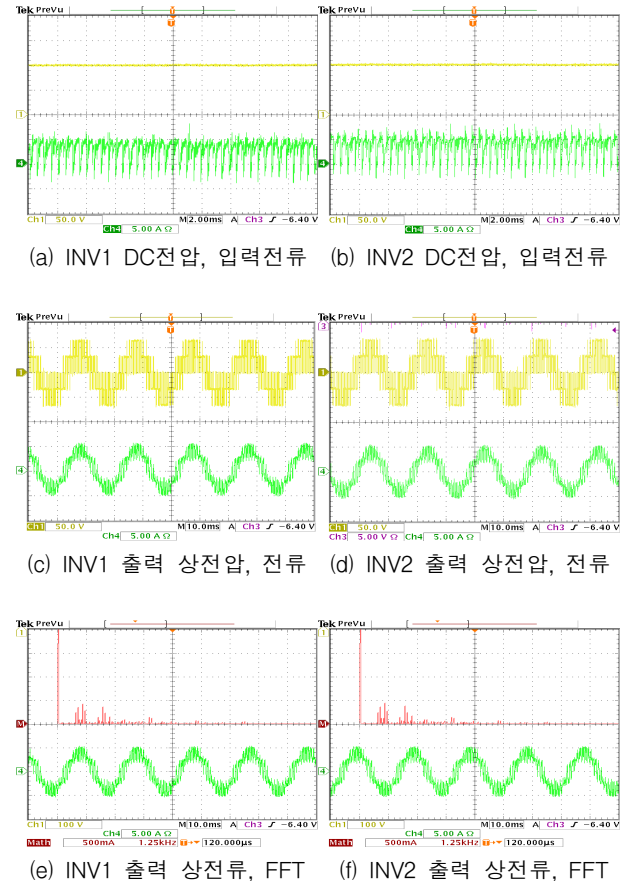


그림 10 부하가 같을 경우 인버터 입출력 파형

Fig. 10 Input and output waveforms of same resistance

표 6 부하가 같을 경우 인버터의 출력 특성  
Table 6 Input and output Table of same resistance

항 목	INV 1		INV 2	
	실험	모의 시험	실험	모의 시험
입력 전류 평균값 [A]	3.75	3.81	3.72	3.79
출력 상전압 [V <sub>rms</sub> ]	42.6	43.2	42.63	42.7
상전압의 기본파[V <sub>rms</sub> ]	35.5	35.9	35.51	35.6
상전압의 THD [%]	66.33	66.93	66.42	66.23
출력 상전류 [A <sub>rms</sub> ]	3.12	3.20	3.10	3.18
상전류의 기본파[A <sub>rms</sub> ]	3.03	3.06	2.97	3.04
상전류의 THD [%]	32.87	30.59	33.9	30.69
기본파 역율 (cosθ)	0.998	0.999	0.998	0.999
효율 [%]	85.87	86.41	84.88	85.66

모의시험 결과는 축소모델 시험장치의 시험조건과 동일하게 시뮬레이터에 설정하여 수행된 결과이다. 표 6을 살펴보면, 실제 실험 결과와 시뮬레이터를 이용한 모의시험의 결과 값이 거의 일치하는 것을 확인하였으므로, 4장에서 수행된 차세대 고속철도 구동 IPMSM 파라미터 변동에 따른 특성에 대한 결과는 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 차세대 고속전철 다중 인버터 구동 시스템의 전동기 파라미터의 특성에 대한 연구를 수행하였다.

먼저 IPMSM 구동 시스템의 속도별 운전 특성에 따라 단위 전류당 최대 토크 제어(MTPA)와 약계자 제어(Field weakening control) 기법을 적용하여 속도제어를 수행하였다. 또한 병렬 연결된 인버터에 견인전동기의 파라미터 불일치에 따른 인버터의 입출력 특성을 모의시험 프로그램인 Matlab/Simulink를 통해 분석하였고, 실험을 통해 검증하였다.

본 논문에서 얻어진 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 차세대 고속전철에 적용 예정인 인버터와 IPMSM의 파라미터를 기반으로 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이터를 구현하여 단위전류당 최대토크 제어 방식과 약계자 제어 기법을 적용하여, 4,500[rpm]까지의 속도 제어를 수행하였다.
- 2) IPMSM의 파라미터 기준값 대비 % 변동에 따른 모의 시험 결과는 기준값 대비 -12%~+8%의 쇄교자속, -11%~+15%의 Ld, -9%~+20%의 Lq, -50%~+50%의 고정자 저항값 내에서 속도 제어가 수행될 수 있음을 확인하였다.
- 3) 분석에 사용된 시뮬레이터의 성능을 검증하기 위하여 병렬형 인버터 축소모델을 구축하여 시험결과를 비교하였다. 실제실험 결과와 모의시험 결과가 거의 일치하는 것을 확인하여 차세대 고속철도 구동 IPMSM 파라미터 변동에 따른 특성에 대한 모의시험 결과가 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김형철, 최재호, “열차 추진제어장치의 알고리즘에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집 제10권 제1호 2007, pp. 51 ~56
- [2] Busco B. Marino P. Porzio M. Schiavo R. Vasca F. “Digital control and simulation for power electronic apparatus in dual voltage railway locomotive”, IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 18, pp. 1146 - 1157, 2003.
- [3] 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 36, 2000, pp. 1531 ~ 1538

- [4] S. M. Kim, Y. D. Yoon, S. K. Sul, K. Ide and K. Tomita, "Parameter Independent Maximum Torque per Ampere(MTPA) Control of IPM Machine Based on Signal Injection", 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE
- [5] F. Tahami, H. Nademi and M. Rezaei, "A high-performance vector-controlled PMSM drive with maximum torque per ampere operation", IEEE 2nd International PEC 2008, pp. 254-258.
- [6] Bianchi N. Bolognani S. "Parameters and volt-ampere ratings of a synchronous motor drive for flux-weakening applications", IEEE Transactions on Power Electronic, Vol. 12, pp. 895 - 903, 1997.
- [7] Morimoto S. Sanada M. Takeda Y, "Effects and Compensation of Magnetic Saturation in Flux-Weakening Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 30 Issue: 6. 1994.
- [8] Simanek J. Novak J. Cerny O. Dolecek R. "FOC and flux weakening for traction drive with permanent magnet synchronous motor", Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on. pp. 753 - 758, 2008.
- [9] Eilenberger, A, Schroedl, M, Demmelmayr, F, Troyer, M, " Short-circuit-proofed outer rotor PMSM with a wide field weakening range for high efficiency traction applications ", Industrial Electronics, IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, pp. 1294 - 1297, 2009.
- [10] 이광운, "저분해능 위치센서를 갖는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 전류센서 없는 단위 전류 당 최대 토크 제어", 전력전자학회 논문지 vol. 14, no.3, 2009, pp. 204 ~ 210
- [11] 김성민, 설승기, "실시간 신호 주입을 이용한 매입형 영구자석 동기 전동기의 단위 전류당 최대 토크 제어", 전력전자학회 논문지, vol. 15, no. 2, 2010, pp. 142-149

## 저 자 소 개



### 박 동 규 (朴 東 奎)

2008년 철도대 철도차량전기과 졸업. 현재 중앙대 재생에너지학과 대학원 석사과정.  
E-mail : beater09@nate.com



### 진 강 환 (陳 康 煥)

2006년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 2008년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.  
E-mail : bd20b@hanmail.net



### 장 진 영 (張 珍 榮)

2006년 철도대 철도차량전기과 졸업. 2010년 중앙대 전자전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.  
E-mail : ccy9247@hanmail.net



### 김 성 제 (金 成 濟)

1985년 8월 9일생 2009년 원광대 전기전자 및 정보공학부 졸업. 2011년 중앙대 전자전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.  
E-mail : optimaco@nate.com



### 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.  
E-mail : yhkim@cau.ac.kr