

# IPMSM 파라미터 변동에 따른 차세대 고속전철 시스템의 운전 특성 고찰

## Operation Characteristics Investigation of the Next Generation High Speed Railway System with respect to IPMSM Parameter Variation

박동규\*      서용훈\*      이상현\*      진강환\*      김윤호†  
Dong-Kyu Park      Yong-Hun Suh      Sang-Hyun Lee      Kang-Hwan Jin      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 drive 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 effect of IPMSM parameter variations to the system operation characteristics of the multi inverter drive high speed train system are investigated. The parallel connected inverter input-output characteristics are analyzed to the parameter mismatches of IPMSM using the 1C1M control simulator based on Matlab/Simulink.

---

### 국문요약

국내의 차세대 고속전철 시스템은 동력 분산식으로 개발 중이며 모터 속도 제어를 위하여 벡터 제어 기법을 사용한다. 현재 유도 전동기 구동 인버터 시스템이 널리 사용되고 있으나 영구자석 동기전동기의 효율, 소음 감소 및 유지보수 등의 장점으로 인해 유도 전동기 구동 시스템의 대체 후보로 크게 각광을 받고 있다. 차세대 고속전철은 2대의 컨버터와 4대의 인버터, 4개의 견인 전동기로 구성되어 있으며 각각의 전동기는 인버터에 직접적으로 연결되어 있다.

본 논문에서는 차세대 고속전철 구동용 다중 인버터의 IPMSM 파라미터 변동에 따른 특성을 고찰한다. 병렬 연결된 인버터 입출력 특성이 Matlab/Simulink를 기반으로 하는 1C1M 제어 시뮬레이터를 사용하여 IPMSM 파라미터 불일치에 따른 인버터의 입출력 특성을 분석한다.

---

† 교신저자, 중앙대학교  
E-mail : yhkim@cau.ac.kr  
\* 중앙대학교, 전자전기공학부

## 1. 서 론

기존 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 회전자의 기계적 견고함이 우수한 장점으로 인해 견인전동기 응용으로 크게 각광을 받고 있다.[1~3]

기존 고속전철은 1대의 인버터가 견인전동기 4대를 병렬로 연결하여 제어하는 방식이었다. 차세대 고속전철에서는 동력 분산식으로 2대의 컨버터와 4대의 인버터부로 구성된 주변환 장치에서 4대의 인버터 각각에 4대의 견인전동기가 1:1로 연결되는 1C1M 방식을 채용하고 있다. 이는 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 파라미터 변동에 따른 특성을 고찰한다. 먼저 IPMSM 구동 시스템의 속도별 운전 특성에 따라 단위 전류당 최대 토크 제어(MTPA)와 약계자 제어(Feil weakening control) 기법을 적용하여 속도제어를 수행한다[4-8]. 그리고 병렬 연결된 인버터 입출력 특성이 Matlab/Simulink를 기반으로 하는 1C1M 제어 시뮬레이터를 사용하여 IPMSM 파라미터 불일치에 따른 인버터의 입출력 특성을 분석한다.

## 2. 고속전철의 추진제어 시스템

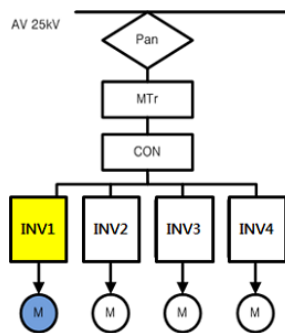


그림 1. 1C1M 제어

Fig 1. 1C1M control

그림 1은 인버터 1대가 견인전동기 1대를 개별적으로 제어하는 동력 분산형 구동시스템의 개념도이다. 이 제어방식은 1대의 견인전동기를 인버터 1대가 각각 독립적으로 구동시키므로 하나의 전동기축에서 발생하는 공전이 다른 전동기축에 영향을 미치지 않으며, 하나의 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 고장 시에 고장 난 인버터를 OFF하고 운전할 수 있으므로 차량시스템의 안정성 면에서 집중제어 방식에 비해 우수한 성능을 발휘할 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 VVVF제어 즉 주파수와 전압의 가변을 통해 이루어지며 운전영역에 따른 제어방법은 전류 크기와 전류 위상각을 제어하는 방법을 많이 사용한다. 매입형 영구자석 동기전동기의 운전영역은 그림 2에 나타난 것과 같이 일정토크 영역(Constant Torque Region)과 일정출력 영역(Constant Power Region) 두 영역으로 나누어진다.

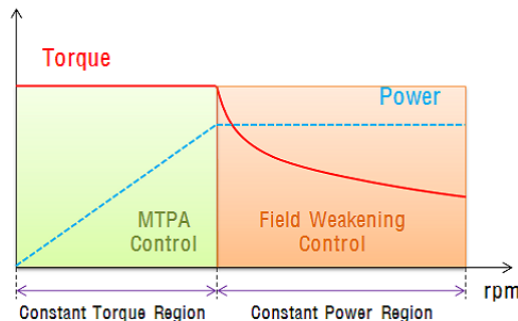


Fig 2. Torque-speed curve of variable speed operation

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

기준속도 이하의 영역인 일정토크 영역에서 전동기의 토크는 인버터 전류에 의해 제한되며 주어진 전류 제한에서 출력토크가 최대가 되는 d, q축 전류로 제어한다면 전동기의 동특성을 빠르게 할 수 있다.

최대토크제어는 동일한 전류를 사용하여 최대의 토크를 발생시킬 수 있는 방식으로 벡터 제어시의 q축 전류에 의한 발생 토크뿐만 아니라 매입형 영구자석 동기전동기에 존재하는 릴럭턴스 토크를 이용하기 위한 최적의 제어방식이라 할 수 있다. 매입형 영구자석 동기전동기는 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 차이로 생기는 릴럭턴스토크가 존재한다. 따라서  $i_{ds}^*$ 를 0보다 작은 값으로 제어를 하면 릴럭턴스토크가 영구자석에 의한 토크와 더해져 더 큰 토크를 얻을 수가 있다.

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

역기전력이 큰 고속 운전 영역이자 기준속도 이상의 영역인 일정출력 영역에서는 전류제어를 위한 여유 전압이 부족하여 전동기가 발생할 수 있는 최대토크는  $I_{smax}$ 보다는 이용 가능한 최대전압  $V_{smax}$ 에 의해 제한된다. 역기전력이 큰 정격속도 근처의 운전 영역에서는 고정자 저항에 대한 전압강하 성분은 무시할 만하므로 매입형 영구자석 동기전동기의 정상상태 고정자 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{ds}^r = -\omega_r L_q i_{qs}^r \quad (1)$$

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

일정토크 영역에서는 전압의 제한조건은 없고 전류 제한조건만 고려하면 되지만 일정출력 영역에서는 전압과 전류가 동시에 제한된다. 이러한 관계식을 수식으로 표현하면 식 (3)과 식 (4)로 표현할 수 있다.

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

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

이 식들로부터 일정출력 영역 운전인 약계자 제어가 시작되어야 할 기준속도는 식 (5)로 표현할 수 있다.

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

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

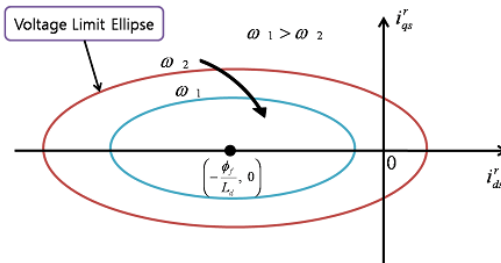


그림 3. 속도에 따른 전압제한 타원

Fig 3. A voltage limit ellipse with respect to speed

#### 4. 모의시험

##### 4.1 모의시험을 위한 시스템 구성

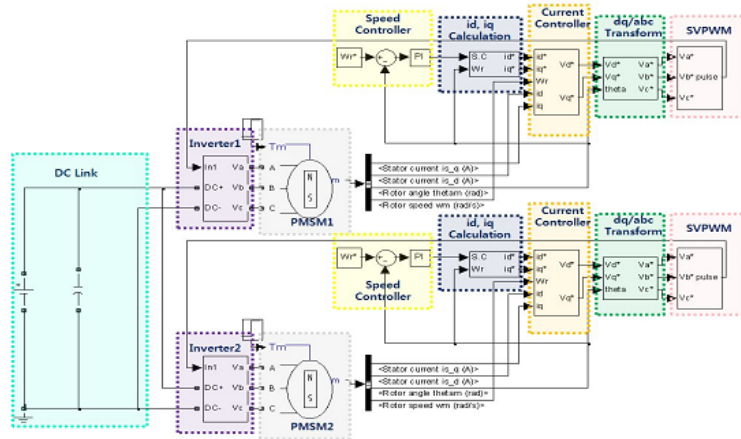


그림 4. Matlab/Simulink를 이용한 고속전철의 견인전동기 구동시스템(1C1M)

Fig 4. Matlab/Simulink simulation block diagram(1C1M)

표 2. 인버터 사양

Table 2. Inverter specification

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

표 1. IPMSM 파라미터

Table 1. IPMSM parameters

장치	항목	내용
IPMSM	정격 출력[kW]	410
	정격 상전압[Vpk]	1760
	정격 전류[Apk]	188
	$R_s$ [ $\Omega$ ]	0.08161
	$L_d$ [H]	0.009846
	$L_q$ [H]	0.035627
	Pole	4
	Flux linkage [Wb]	2.5707
	Inertia [ $J(kg \cdot m^2)$ ]	1.33815

표 3. IGBT, DIODE 파라미터

Table 3. IGBT, DIODE parameters

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

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(Field 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.

차세대 고속전철의 영업 속도인 350[km/h]에서의 전동기 분당 회전수인 약 4500[rpm]의 지령 속도와 부하 토크 860[Nm]를 인가한 후 모의시험을 수행하였다.

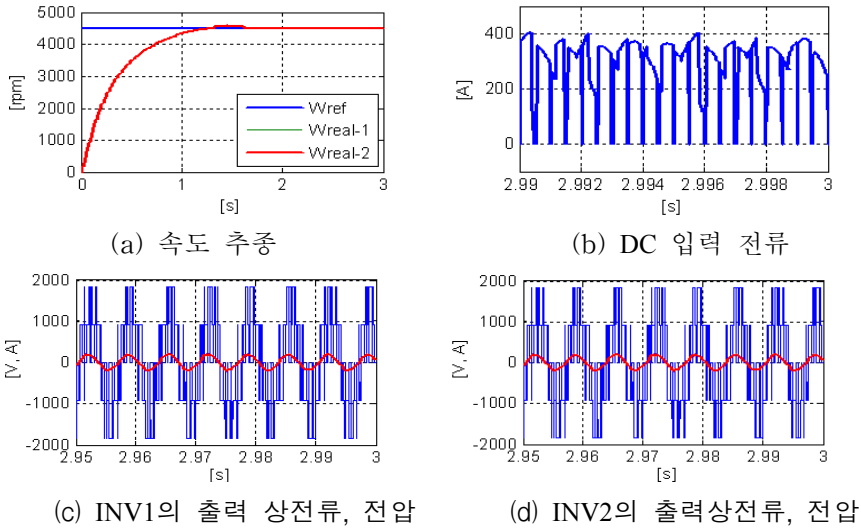


그림 5. IPMSM 파라미터가 동일할 경우 입출력 파형

Fig 5. Simulation result of same IPMSM parameter

그림 5는 각 IPMSM 모터에 표 3에 주어진 파라미터를 동일하게 적용하여 수행된 모의 시험 결과이다. 그림 5(a)의 속도 추종 파형을 보면 지령속도 인가 후 약 1.4초 후에 지령속도 4500rpm에 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.

#### 4.2 파라미터 변동에 따른 시스템 성능 분석

실제 시스템에 적용될 IPMSM 모터 파라미터 값은 정확하게 일치하기 어렵다. 따라서 2대의 인버터에 연결될 두 대의 전동기의 파라미터 불일치 상황을 만들어 모의시험을 수행하였다. IPMSM은 기본적으로 영구자석의 전기자 쇄교자속  $\psi_a$ 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 쇄교자속  $\psi_a$
- (b) IPMSM의  $L_d$  : d-axis inductance,  $L_q$  : q-axis inductance
- (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. 인버터 1에 연결된 IPMSM의 파라미터 값은 기준값으로 두고 인버터 2에 연결된 IPMSM의 파라미터를 변동하여 모의시험이 수행되었다.

그림 6은 쇄교자속의 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 4500rpm에 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 4는 모의시험의 결과를 표로 정리한 것이다.

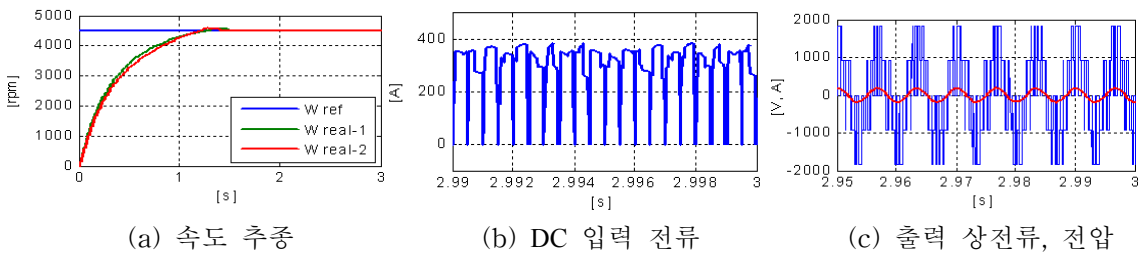


그림 6 쇄교자속 -12% 입출력파형

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

표 4. 쇄교자속 -12%시의 모의시험 결과

Table 4. 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]		1214	1193
	Val[V]		1062	1010
	Va의 THD[%]		55.38	62.87
	Ia[A]		133.00	132.60
	Ial[A]		132.90	131.90
	Ia의 THD[%]		3.88	10.32
	cos $\phi$		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 7은 쇄교자속, 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.

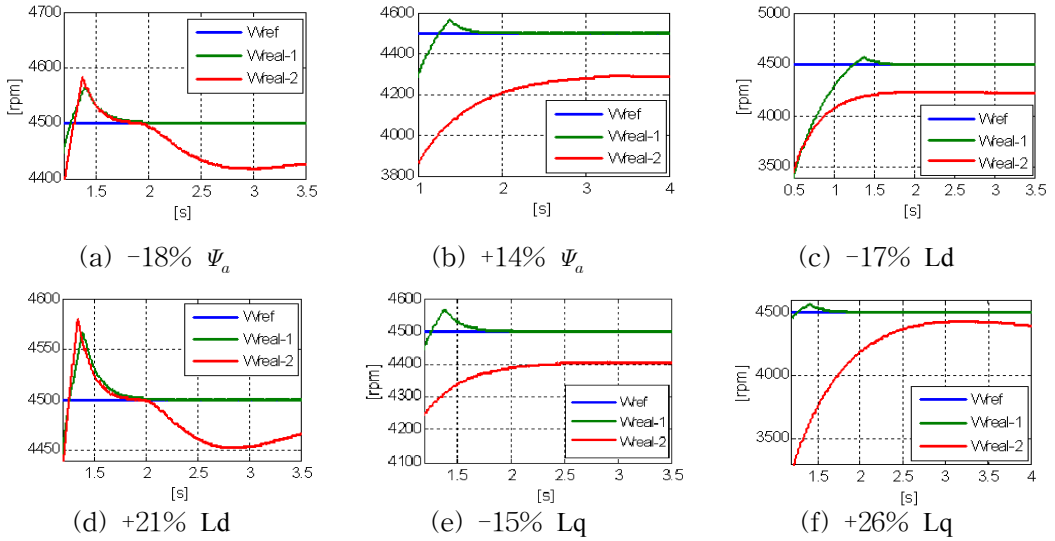


그림 7. 모의시험에 따른 속도 추종 파형  
 Fig 7. Speed tracking performance in Simulation

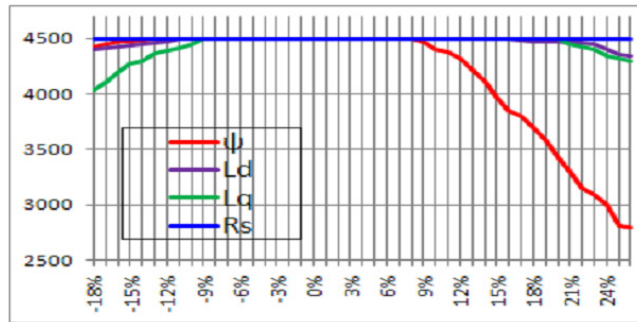


그림 8. IPMSM 파라미터 변동에 따른 속도 추종성  
 Fig 8. Speed tracking performance pursuant to the IPMSM parameter

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

## 5. 결론

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. 또



한 병렬 연결된 인버터에 건인전동기의 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 단위 전류당 최대토크 제어 방식과 약계자 제어 기법을 적용하여, 4500[rpm]까지의 속도 제어를 수행하였다.
- 2) IPMSM의 파라미터 기준값 대비 %변동에 따른 모의시험 결과는 기준값 대비 -12%~+8%의 쇄교자속, -11%~+15%의 Ld, -9%~+20%의 Lq, -50%~+50%의 고정자 저항값 내에서 속도 제어가 성공적으로 수행될 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호07차세대고속철도 A01)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.