

# 차세대전동차용 직접구동전동기 개발

## Development of Direct Drive Motor for Next Generation Train

김길동†, 이한민\*, 이장무\* 오세찬\*\* 정의진\*  
Gildong Kim, Hanmin Lee, Changmu Lee, Sehchan Oh Euijin Joung,

### ABSTRACT

As a drive system for next generation train, we have been making research and development of a direct drive traction motor system without the conventional reduction gear. This traction motor is expected to have many advantages such as low noise, reduced maintenance, and energy saving. Due to the demand for high-output motors in the limited space between the wheels, open-ventilating traction motors with gear box have been widely used for many years.

However, a conventional open-ventilating traction motor is necessary periodical disassembly to remove the accumulated dust from open-air ventilation. Reducing this burden, as well as increasing energy efficiency and reducing noise, would benefit the next generation of traction motors. To address these needs, KRRI have been developing a fully enclosed type direct drive motor(DDM) with high-efficiency permanent magnet for the next generation train.

### 1. 서 론

철도차량용 구동전동기로서는 유도전동기가 현재 주로 이용되고 있으나, 이보다 한 층 더 높은 메인 터턴스 프리, 전동기 효율, 에너지 절약, 저소음, 경량화에 대한 요구가 높아지고 있다. 전동차용 전동기는 대차내 한정된 공간 내에서 큰 출력을 요구받기 때문에 바깥공기를 주전동기 내부로 유입하여 냉각하는 방식(자기통풍방식)이 주류이다. 이 방식은 외부공기와 함께 먼지가 침투하기 때문에 정기적으로 분해정소가 필요하다. 최근 유지보수경감, 분해주기연장 등의 유지보수 향상에 대한 요구가 높아지고 있다. 따라서 영구자석 전동기는 냉각비중이 작아 소형 대출력에 유리하고 차축에 일체화시킴으로 감속장치 필요 없어 감속기에 의한 손실을 줄일 수 있으며, 전동기 회전수가 기존보다 줄어들어 들기 때문에 베어링의 부담과 모터의 소음을 줄일 수 있고, 전폐 자냉방식으로 전동기를 개발하기 때문에 유지보수비용을 줄일 수 있다.

### 2. 직접구동견인전동기

#### 2.1 직접구동견인전동기 개요

1980년대 인버터를 이용한 철도차량용 구동시스템은 널리 실용화되어, 직류전동기를 대신하여 유도전동기가 사용하게 되었다. 인버터 제어 기술이 가속화 되어 영구자석동기전동기도 철도차량구동에 적용이 가능하다는 가능성이 나오기 시작했다. 그러나 비교적 대 출력인 철도용에 영구자석동기전동기를 이

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 차세대전동차연구단장  
E-mail : gdkim@krri.re.kr  
TEL : (031)460-5710 FAX : (031)460-5809

\* 정희원, 한국철도기술연구원 차세대전동차연구단 선임연구원

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원 차세대전동차연구단 주임연구원

용이 가능해 지기 위해서는 영구자석 재료의 진보가 필수적이다. 1982년 발명된 Nd-Fe-B 자석은 높은 자석밀도와 내열성을 가지고 있어 철도용 구동시스템으로 영구자석동기전동기 사용이 가능해 졌다. 따라서 차세대용 전동기개발에도 Nd-Fe-B계자석을 적용하였다. 영구자석동기전동기는 냉각하중이 작아 소형 대출력에 유리하고, 소형 경량화가 요구되는 차륜일체형 주전동기(Direct Drive Motor, DDM) 개발에 적용이 가능하였다. 기존의 전동차 구동방식은 주전동기의 축 출력이 직접 차륜에 전달하는 것이 아니라, 기어박스를 통하여 동력 전달하는 간접구동방식을 그림1.(b)에서 보여주고 있다. 직접 구동 방식은 차륜과 전동기를 일체화하여 축 출력을 직접 차륜에 전달하는 것으로, 그림1.(a) 보여준다. DDM전동기는 전동기들 차축에 일체화시킴으로 감속장치가 필요 없어 감속기에 의한 손실을 줄일 수 있으며, 전동기의 회전수가 기존에 비해 줄어들기 때문에 베어링의 부담과 모터의 소음이 줄어들게 된다. 이 영구자석 전동기는 에너지 효율이 좋아 에너지 절약을 도모하는 것 외에, 전제 자냉 방식으로 개발하기 때문에 전동기 내부 청소도 불필요해 유지보수비용을 줄일 수 있다. 다음 표 1.에 기존유도전동기와 직접구동전동기의 특성을 비교하였다

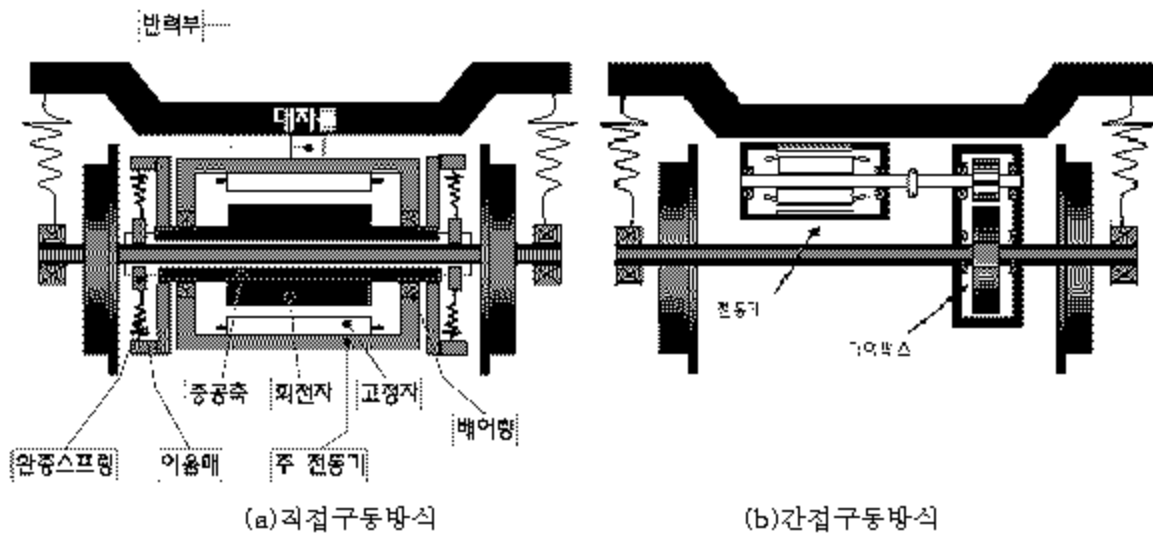


그림 1. 차세대 견인전동기 특징

도표 1. 유도전동기와 직접구동전동기 비교

	유도전동기	직접구동전동기	비교
형식	3상 농형유도전동기	영구자석 동기전동기	·기어박스 없이 견인전동기들 차축에 직접 연결
구동 방식	간접구동방식	직접구동방식	
냉각방식	외부공기유입,자기동풍	밀폐형 자기냉각방식	·기어박스 제거로 2.5% 효율 향상
극수	4극	10극	·기존대비 10%이상 에너지 소비
정격출력	200 kW	좌동	저감(약 4,000kWh)
공극길이(mm)	1.7	좌동	·유지보수기간 3배 연장
절연방식	200 Class	좌동	·전동기 회전속도감소에 따른 소음 저감(15dB 저감)
회전속도	최대 5780 rpm	최대 885 rpm	·밀폐형 구조
기어박스	있음	없음	
효율	92%	97%	·영구자석 사용, 회전자코일제거
유지보수	3년 단위 중정비	9년 무유지보수	·기어박스 제거

## 2.2 DDM 전동기 구조

기존 주전동기는 소형 경량화를 위해 일반적으로 흡입식 통풍냉각방식을 하고 있으나, 통풍에 수반되는 소음문제가 발생하기도하고, 분해청소가 필요하다는 문제가 있다. 따라서 전폐구조를 가진 영구자석 전동기 단면도를 그림 2.에서 보여주고 있다. 직접구동전동기는 냉각하중이 작은 영구자석을 이용하여 전동기출력을 향상하였으며, 소음과 유지보수 문제를 해결하는 것이 가능해 졌다. 또 고효율의 영구자석 동기전동기를 이용하는 것으로 소비전력의 저감도 가능하다. 차세대 전동차용으로 차륜일체형 직접구동 전동기를 개발하여, 종래의 자기통풍식 유도전동기와 동등이상의 출력을 얻을 수 있는 전폐형 영구자석 전동기를 개발 하였다.

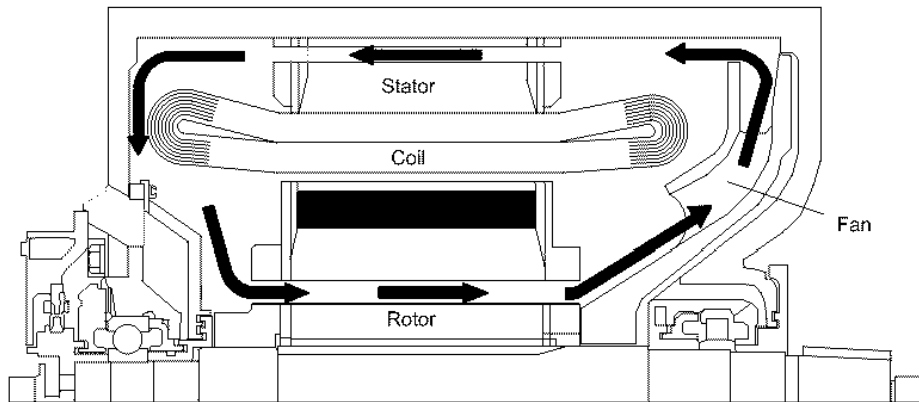


그림 2. 차세대 견인전동기 단면도

## 2.3 견인전동기 특성

전동차용 견인전동기는 전동차의 운전특성을 고려하여 구조적 강건성, 높은 출력 및 토크, 넓은 운전 속도영역, 우수한 내환경성(내진, 내열 등), 고효율 운전제어 등의 다양한 성능을 만족해야 한다. 이와 같은 특징에 부합할 수 있는 영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자에 매입되어 있어 구조적으로 안정성이 크며, 자기적 돌극성이 좋아 넓은 속도영역 운전을 위한 약계자제어성과 출력, 토크 밀도가 우수하여 고효율 운전이 가능하다. 정격출력에 대해서는 주행시물레이션을 토대로 아침 및 저녁 혼잡할 때의 운전 등 여러 조건을 고려하여 표2. 같이 보여주고 있다. 그림 3.에 나타낸 것과 같이 정토크 영역과 정출력 영역으로 나눌 수 있다. 일반적으로 정토크영역은 최대토크 제어를 통해서 높은 기동 토크를 얻고 정출력 영역에서는 전류 제어를 통해 운전속도 범위를 확장 할 수 있다. 차세대 전동차의 직접 구동용 운전제어 영역별 특성곡선을 보여주고 있다.

도표 2. 직접구동전동기 주요사양

구동방식	직접구동방식
정격	200kw/220kw(1시간)
최대토크	12,359Nm,(0~320rpm)
최고회전수	884rpm
냉각방식	전폐자기냉각
영구자석	Nd-Fe-B계
자석배치	내부매입구조
검출방식	레졸버
질량	1200kg

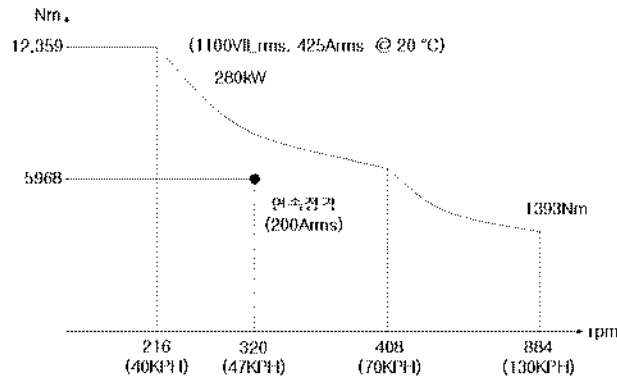


그림 3. 차세대 견인전동기 견인특성 곡선

매입형 영구자석동기전동기는 자석이 Rotor core 내부에 있어 Stator 권선에서 발생하는 열의 영향을 직접적으로 받지 않으므로 온도 상승에 의한 영구자석의 감자(demagnetization) 가능성이 적어 보다 열악한 환경에서도 운전이 가능하고, 자석이 Rotor core 내부에 있어 원심력에 의하여 영구자석이 이탈되는 것이 방지되어 보다 높은 속도에서도 운전이 가능하다. 표면 부착형 영구자석 동기전동기에 비해 등가적인 공극이 작아 Stator 인덕턴스가 커져 전기자 반작용의 효과가 크다. 따라서 Stator 전류를 이용하여 공극 자속을 감소시킬 수 있어 일정 출력 영역에서 약계자 운전이 가능하다. 또한 발생 토크는 영구자석에 의한 토크와 인덕턴스의 차이에 의한 토크의 합으로 나타나므로 d축 전류를 제어하여 킬러턴스 토크를 적절히 이용함으로써 전동기의 속도-출력 특성을 개선할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 전동기 설계

#### 3.1 전동기 모델의 크기 및 형상 결정

전동기 외형은 가능한 사이즈[ $\phi 624$ , L410] 기준으로 토크특성 분석결과를 통해 내부치수 및 공극길이를 결정하고 토크분석을 위해 Stator 내외경을 결정하기 위해 전류밀도[ $J=4, 4.5, 5(A/mm^2)$ ]와 Stator 외경[ $\phi 620 \sim \phi 680$ ]을 변경하면서 토크특성을 분석하는 방법을 수행하였다. DDM 성능 사양을 만족하는 극수별[8~16극], 슬롯수[60~90슬롯], 자석형상별 10종의 모델을 설계하여 사용되는 자석량[ $Br=1.2T$ ], 전압입력조건(1100V), 코일전류밀도(4.5Arms/mm<sup>2</sup>) 등을 동일하게 유지하여 평가항목[최대 및 연속토크, 전압여유, 무부하 BMF의 THD]을 만족하는 설계안을 표3. 제시하고 자석형상이 다른 3종의 모델을 추가적으로 설계하여 성능을 비교하였다.

도표 3. 전동기 설계를 위한 극수별, 슬롯수별 모델

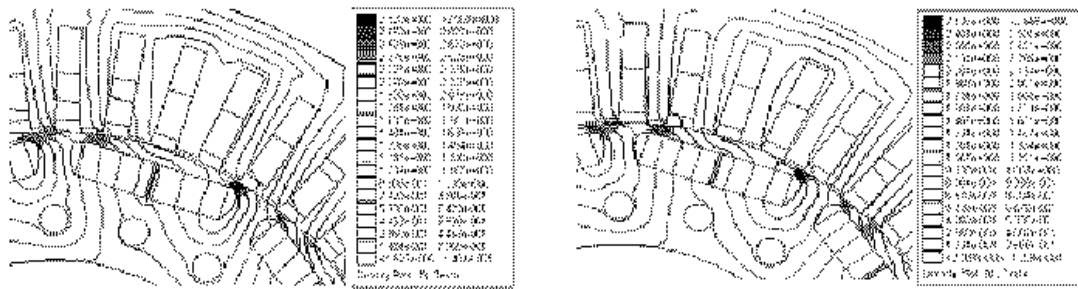
모델번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
극수	8	8	10	10	10	10	12	12	16	16	10	10	10
자석형상	V형	—형	V형	V형	—형	—형	V형	—형	V형	—형	V형 3PM	V형 2PM	V형 4PM
슬롯수	72	72	60	90	60	90	72	72	96	96	90	90	90

#### 3.2 설계 모델

앞서 결정된 형상을 검토한 결과 10극 90슬롯의 경우 제작성이 떨어져 개선설계를 통해 10극 60슬롯, —형 자석구조(2PM)로 선정하였다. 10극 60슬롯의 설계결과 open slot구조로 인한 무부하 BMF의 THD가 높고(17.9%) 선간BMF 파형의 왜곡이 심하였다. Harmonics에 의한 손실은 열 발생 및 기기의 효율을 감소시키며 또한 토크의 맥동을 크게 하므로 Harmonics 저감에 유리한 분수슬롯으로 재설계 하였으며, 모델 사이징은 정수슬롯 모델[10극 60슬롯]과 NI 및 자석사용량을 동일하게 하였다.

### 3.3. 해석 결과

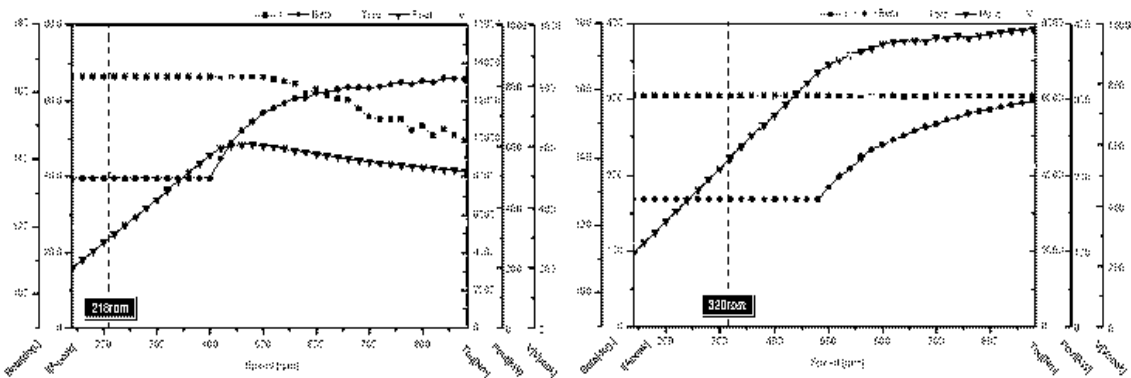
설계된 직접구동 영구자석 동기전동기의 자속밀도분포 및 토크-속도곡선을 그림4. 그림 5.에 나타내었다. 그림4. 순시정격 및 연속정격에서 자속밀도 분포 결과로 자석사이의 센터포스트나 자석과 회전자 표면사이의 브릿지에서 순시정격에서 최대 2.8T, 연속정격에서 2.5T정도로 국부적인 포화가 심하였다. 철손해석은 회전자를 한주기동안 회전시키면서 모든 요소별 자속밀도의 변화량을 주파수 분석하여 주파수별 자속밀도의 크기를 추출하여 철손을 계산하였다. 철손은 최대출력에서 1,021W, 연속출력에서 731W로 직접구동전동기는 최대속도가 높지 않아 영구자석에 미치는 열적인 감자의 우려가 덜하였다.



(a) 자속밀도분포(순시정격)

(b) 자속밀도분포(연속정격)

그림 4. 자속밀도 분포



(a) 순시정격[470A] 출력특성

(b) 연속정격[215A] 출력특성

그림 5. DDM의 실제 토크 vs 속도 곡선

### 4. 직접구동전동기 제작 및 시험

그림 6. 직접구동전동기를 제작완료 하여 1차 개발품 시험을 진행하였다. Rotor는 철심에 통풍 홀을 적용하여 냉각특성이 향상되도록 제작하였고, 고정자는 Stator Core특성, 전동기의 특성, 손실, 온도상승, 가격 등을 고려하여 설계하였다. 통풍 홀은 1열로 모서리 4개소에 설치하여 Rotor의 통풍 홀을 통과한 공기가 Stator 내부를 지나는 순환시스템을 형성하도록 하였다. Housing C.S.는 베어링을 지지하며, Stator 권선의 상호결선을 위한 공간을 확보하여 전동기 내부 공기가 원활히 순환될 수 있도록 냉각구조 포함되도록 하였다. 외부공기의 유출입이 없는 전동기의 구조 특성상 발생된 내부열을 외부로 전달하기 위해서 공기를 순환시키기 위해 내부 Fan을 적용하고, 속도 및 위치 센서용 레졸버 속도 및 위치검출을 수행하도록 하였다. 직접구동전동기는 200kW급 매입형 영구자석 직접구동 동기전동기로 1차 시제품 제작이 완료되어 추진제어시험설비에 DDM 시험용 증속기설비를 설치하여 개발시험을 진행하였다. 1차 시험결과 전부하 시험에서 온도상승은(200K)기준치 만족하였고, 영구자석의 최대상승온도도 안정된 모습을 보였고, 온도상승 후 냉 상태에서 시험결과 영구자석의 감자현상은 발생하지 않았고,

전동기의 최대토크가 설계치 12.359Nm를 만족시켰다.

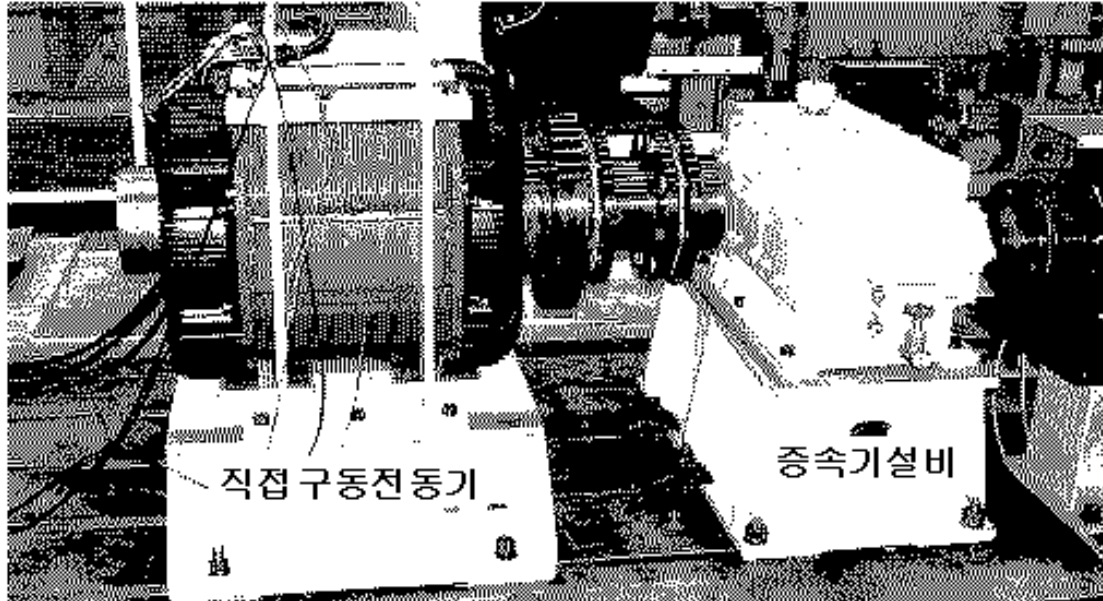


그림 6. DDM 시험용 증속기 설비

## 5. 결 론

차세대 전동차용 직접구동전동기에 개발 내용 및 특징에 대해 설명하였다. 영구자석형 직접구동전동기가 상용화되면 기존전동기에 비해 고효율화가 가능하기 때문에 에너지비용을 줄일 수 있고, 유지보수가 기존대비 약3배 이상 연장이 가능하고, 소음도 기존대비 20dB저소음화를 기대할 수 있고, 레귤버 방식을 이용하여 위치검출하기 때문에 Zero속도까지 속도제어가 가능하며 공기제동을 사용하지 않고도 정지가 가능하다. 직접구동전동기는 200kW급 매입형 영구자석 직접구동 동기전동기로 1차 시제품 제작이 완료되어 개발시험을 완료하였다. 전동기의 최대토크가 설계치 12.359Nm를 만족시켰으며 온도시험에서도 영구자석의 최대상승온도는 110℃정도로 안정된 수치를 보였고, 특성시험결과 효율이 200RPM 속도에서 97.9% 효율이 향상되는 것을 확인하였다. 고정자코일의 최대온도가 약 170℃로 측정되었다. 1차 설계데이터와 1차 시험 결과를 토대로 경량화, 냉각구조의 개선 등 DDM 보완설계를 통하여 2차시제품을 제작하고 단품시험 및 조합시험을 통하여 차세대전동차에 사용될 직접구동전동기를 개발할 예정이다

## 참고문헌

- [1] Kondo Minoru (近藤 稔), "車両駆動用永久磁石同期電動機の開発", 鉄道総研月刊発表会講演要旨, pp1~4
- [2] Matsuoka Koichi (松岡 孝一), Hata Hiroshi (秦 広), Sato Kiyoshi (佐藤 潔), Kondo Keiichiro (近藤 圭一郎), Tokuda Noriaki (徳田 憲暲), Ishige Makoto (石毛 真), Hata Tadashi (畑 正), Sato Shinya (佐藤 真哉), "次世代通勤電車用直接駆動式主電動機システムの開発", No.97-13 日本機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集(鉄道シンポジウム編) [1997-7.28~30. 東京]
- [3] Kaba Hirishi (蒲 浩志), Ishihara Tsutoshi (石原 綱), Shirahara Shigetomo (白石 茂智), "高効率な車両駆動システムの開発 -在来線用全閉永久磁石同期電動機と回転角センサレス制御の開発-", JREA 2006年 Vol.49 No.7, pp31745~31748
- [4] Satoshi, Kadowaki, Kiyoshi, Ohishi, Shinobu Yasukawa, Takashi Sano., "Anti-skid Re-adhesion

control Based on Disturbance observer considering Air brake for electric commuter train,"  
Advanced Motion Control, 2004. The 8th IEEE International Workshop Advanced Motion  
Control, March, 2004, pp. 607 ~ 612.