

철도차량용 영구자석 전동기 효과

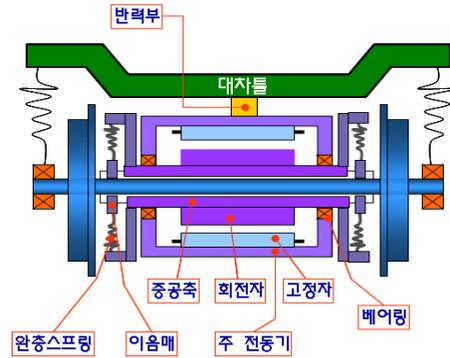
김길동*, 이한민*, 오세찬*, 정의진*
한국철도기술연구원*

Effect of Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Traction Motors

Gil-Dong Kim*, Gil-Dong Lee, Seh-Chan Oh, Eui-Jin Joung
Korea Railroad Research Institute*

Abstract - 최근 철도 차량의 대부분은 인버터 제어에 의한 유도전동기를 채택하여, 많은 사용상의 이점을 내고 있다. 하지만 이 인버터 제어는 장치의 소형 경량화, 저비용화의 관점에서, 1대의 인버터로 복수의 유도전동기를 구동하는 방식이 주류이다. 최근, 고성능화로 영구자석을 사용한 동기전동기는 산업용, 전기 자동차용과 모든 분야에서 주목을 받아, 소형·경량·고효율의 특징을 살려서 유도전동기를 대신하여 고성능 모터의 주역이 되고 있다. 본 논문에서는 철도 차량용 주전동기로 이 영구자석 직접구동전동기를 개발하여 기존 유도전동기와 비교하여 성능을 평가 하였다. 실험을 통해 영구자석 직접구동전동기는 기존 유도전동기에 비해 고 효율화, 유지보수성 향상 등의 효과가 있음을 알 수 있다.

을 줄일 수 있다. 기존전동기대비 비교특성을 표 1에서 보여준다.



〈그림 1〉 영구자석형 직접구동 견인전동기

1. 서 론

철도차량 분야에서는 여전히 많은 차량에 직류전동기가 사용되고 있지만, 최근에 제조된 차량의 대부분은 인버터 제어에 의한 유도전동기를 채택하여, 많은 사용상의 이점을 내고 있다. 현재, 이 인버터 제어는 장치의 소형 경량화, 저비용화의 관점에서, 1대의 인버터로 복수의 유도전동기를 구동하는 방식이 주류이다. 최근, 고성능화로 영구자석을 사용한 동기전동기는 산업용, 전기 자동차용과 모든 분야에서 주목을 받아, 소형·경량·고효율의 특징을 살려서 유도전동기를 대신하여 고성능 모터의 주역이 되고 있다.

〈표 1〉 유도전동기와 직접구동전동기 비교

| | 유도전동기 | 직접구동전동기 |
|------|-------------|------------|
| 형식 | 유도전동기 | 영구자석동기전동기 |
| 구동방식 | 간접구동방식 | 직접구동방식 |
| 냉각방식 | 외부공기유입 | 자기냉각방식 |
| 극수 | 4극 | 10극 |
| 정격출력 | 200 kW | 200 kW |
| 회전속도 | 최대 5780 rpm | 최대 885 rpm |
| 기어박스 | 있음 | 없음 |
| 효율 | 92% | 97% |
| 유지보수 | 3년 단위 중정비 | 9년 무유지보수 |

본 논문은 철도 차량용 주전동기로 이 영구자석 직접구동전동기를 개발하여 성능을 평가 하였다. 특히 효율은 한정된 스페이스에서 유도전동기에서는 실험 곤란한 수치가 뚜렷하게 큰 폭으로 개선되었고, 차량에서는 운전시 필요한 소비전력 요금과 유지보수 비용이 모든 수명기간에 필요로 하는 비용 중에서 큰 비율을 차지한다. 이 때문에, 고효율적인 영구자석식 직접구동전동기는 소비 전력의 절감 면에서 실용상의 효과가 크다는 점이 주목을 받고 있다. 또, 유지보수 면에서는 고효율을 이용한 전폐화는 기내의 먼지 부착 방지 대책이나 베어링·윤활유의 한층 더 장기 수명화와 더불어, 보수의 경감·청소해체 주기를 연장할 수 있을 가능성이 있다.

더구나 최근 지구 환경 문제가 대두되는 시점에서, 다른 교통기관과 비교하여 효율이 좋은 철도차량에서도 더욱 더 에너지 소비 절감 및 저소음 등의 요구가 높아질 것이 예상된다.

2. 영구자석 직접구동 견인전동기

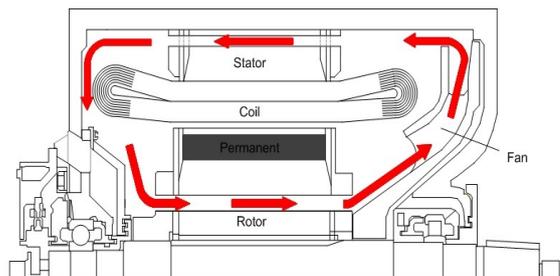
2.1 영구자석 직접구동 견인전동기 개요

철도차량에 영구자석동기전동기를 이용이 가능해 지기 위해서는 영구자석 재료의 진보가 필수적이다. 1982년 발명된 Nd-Fe-B 자석은 높은 자석밀도와 내열성을 가지고 있어 영구자석동기전동기 사용이 가능해졌다. 따라서 영구자석용 직접구동전동기 개발에 Nd-Fe-B계자석을 적용하였다. 영구자석동기전동기는 유도전동기와 같이 회전자에서 전류가 흘러 발열하는 일이 없기 때문에 냉각하중이 작아 소형 대출력에 유리하다. 그 때문에 소형 경량화가 강하게 요구되는 차량일체형 주전동기(Direct Drive Motor, DDM) 개발에 적용이 가능하였다.

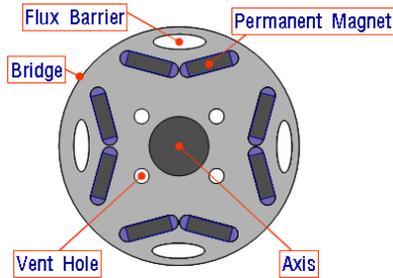
직접구동방식은 기존의 기어박스를 통하여 동력을 전달하는 간접구동방식과 달리 차륜과 전동기를 일체화하여 축 출력을 직접 차륜에 전달하는 것으로 그림 1과 같다. 전동기를 차축에 일체화시킴으로 감속장치가 필요 없어 감속기에 의한 손실을 줄일 수 있으며, 전동기의 회전수가 기존 유도전동기의 약 1/7로 줄어들기 때문에 베어링의 부담과 모터의 소음이 줄어들게 된다. 그러나 모터의 회전력(Torque)은 기존 유도전동기와 비교하여 7배가 필요하다. 이 영구자석 전동기는 회전자의 발열이 적고, 에너지 효율이 좋아 에너지 절약을 도모하는 것 외에, 전폐 자냉 방식으로 개발하기 때문에 전동기 내부 청소도 불필요해 유지보수비용

2.2 영구자석 견인전동기 구조

기존 견인전동기는 소형 경량화를 위해 일반적으로 흡입식 통풍냉각방식을 하고 있으나, 통풍에 수반되는 소음문제가 발생하기도하고, 분해 청소가 필요하다는 문제가 있다. 따라서 전폐구조를 가진 영구자석전동기 단면도를 그림 2에서 보여주고 있고, 직접구동전동기는 회전자에 영구자석이 매입자석구조를 하고 회전자 단면을 그림 3에 보여주고 있다.



〈그림 2〉 차세대 견인전동기 단면도



<그림 3> 영구자석 전동기 회전자 구조



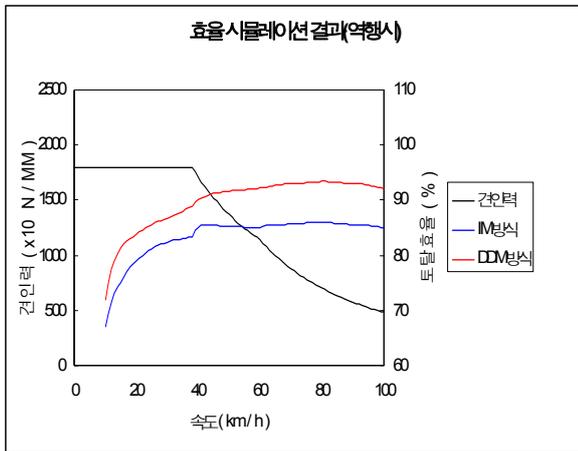
<그림 5> DDM 시험용 증속기 설비

2.3 영구자석 견인전동기 사양

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 속도 영역 운전을 위한 약계자제어성과 출력, 토크 밀도가 우수하여 고효율 운전이 가능하다. 견인출력에 대해서는 주행시물레이선결과 그림 4와같이 토달 효율이 기존방식에 비해 높은 것이므로 확인되었고, 전동기주요사양은 표 2와 같다.

<표 2> 유도전동기와 직접구동전동기 비교

| 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 4> 역행시 견인특성효율

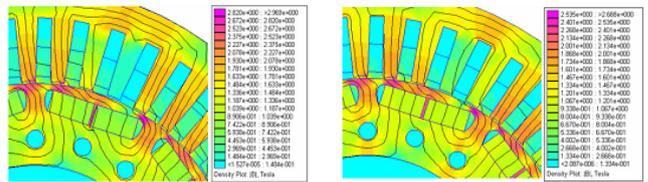
4. 직접구동전동기 시험

4.1 직접구동전동기용 시험설비 제작

그림 5와 같이 직접구동전동기를 제작완료 하여 1차 개발품 시험을 진행하였다. 직접구동전동기는 200kW급 매입형 영구자석 직접구동 동기전동기로 1차 시작품 제작이 완료되어 추진제어시험설비에 DDM 시험용 증속기설비를 설치하여 개발시험을 진행하였다. 1차 시험결과 전부 시험에서 온도상승은(200K)기준치 만족하였고, 영구자석의 최대상승 온도도 안정된 모습을 보였고, 온도상승 후 냉 상태에서 시험결과 영구자석의 감자현상은 발생하지 않았고, 전동기의 최대토크가 설계치 12,359Nm를 만족시켰다.

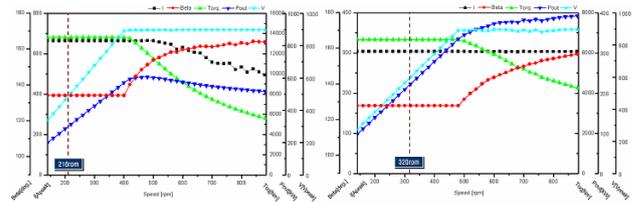
4.2 해석결과

설계된 직접구동 영구자석 동기전동기의 자속밀도분포 및 토크-속도 곡선을 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 순시정격 및 연속정격에서 자속 밀도 분포 결과로 자석사이의 센터포스트나 자석과 회전자 표면사이의 브릿지에서 순시정격에서 최대 2.8T, 연속정격에서 2.5T정도로 국부적인 포화가 심하였다. 철손해석은 회전자와 한주기동안 회전자시킴전 모든 요소별 자속밀도의 변화량을 주파수 분석하여 주파수별 자속밀도의 크기를 추출하여 철손을 계산하였다.



(a) 자속밀도분포(순시정격) (b) 자속밀도분포(연속정격)

<그림 6> 자속 밀도 분포



(a) 순시정격[470A] 출력특성 (b) 연속정격[215A] 출력특성

<그림 7> 설계 토크 및 속도 곡선

5. 결 론

차세대 전동차용 직접구동전동기에 개발 내용에 대해 설명하였다. 영구자석형 직접구동전동기가 상용화되면 기존전동기에 비해 고효율화가 가능하기 때문에 에너지비용을 줄일 수 있고, 유지보수가 기존대비 약3 배 이상 연장이 가능하고, 소음도 기존대비 20dB저소음화를 기대할 수 있고, 냉각 방식의 선택 폭이 넓어져 유지보수성이 개선할 수 있고, 레졸버 방식에 따라 저속 위치검출하기 때문에 Zero속도까지 속도제어가 가능하다. 직접구동전동기는 1차 시작품 제작이 완료되어 개발시험을 완료하였다. 전동기의 최대토크가 설계치 12,359Nm를 만족시켰으며 특성 시험결과 효율이 200RPM 속도에서 97.9% 효율이 향상되는 것을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Kondo Minoru (近藤 稔), "車兩驅動用永久磁石同期電動機の開發", 鐵道總研月刊發表會講演要旨, pp1~4.
 [2] 김길동, 이한민, 이장무, 오세찬, 정의진, "차세대전동차용 직접구동 전동기 개발", 한국철도학회 춘계학술대회, May, 2009.
 [3] 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.