

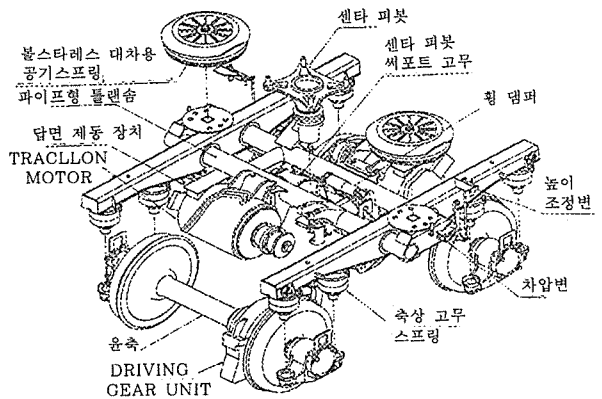
철도차량용 AC 견인전동기 구조와 요소기술

현대중공업(주)
전력전자실
과장 배동진

1. 서론

최근, 자동차의 증가에 따른 도로교통난을 해결하기 위한 대안으로 신교통시스템의 필요성이 날로 증대되고 있는 가운데, 철도차량에 의한 여객과 화물의 수송에 대한 관심이 고조되고 있다.

철도차량(Rolling Stocks)은 차종에 따라 동력차(Locomotive), 객차(Passenger Car), 화차(Wagon), 특수차 등으로 구분되는데, 이를 동력 방식에 따라 전기기관차, 디젤기관차, 전동차, 객차, 화차 등으로 구분하기도 한다. 현재 국내에는 수도권 전철구간 및 지자체가 운영하는 열차는 전동차(Electric Car)이며, 최근에는 도심지 및 인접도시간 근거리 교통수단으로 경전철의 도입이 검토되고 있다. 또, 최근에는 여객과 화물의 장거리 고속수송을 위해 고속전철의 도입이 결정되어 건설 중에 있다. 철도차량 관련산업 중 기술적 근간이 되는 추진시스템의 국산화 개발도 활발히 진행 중이고, 인버터, 견인전동기 등 핵심전장품에 관한 관심도 높아지고 있는 실정이다.



(그림 1) 구동대차부 조립도

본 고에서는 철도차량 견인전동기의 구조와 특징, 설계시 유의점에 대하여 살펴보고, 전동기 출력특성과 신뢰성에 큰 영향을 미치는 구조, 설계 인자에 대하여 고찰해 보기로 한다.

2. 견인전동기 구조

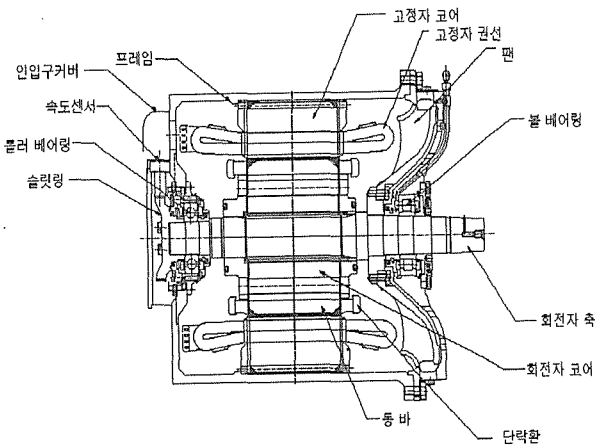
2.1 취부구조

(그림 1)에 견인전동기가 차량의 대차구조에서

부착되는 구조를 보여주고 있다.

견인전동기는 전동차 구동시스템의 한 부분으로 기어상자(Gear Box), 기어커플링(Gear Coupling) 등과 구조상 연계되어 있다. 전동차용 견인전동기는 일반적으로 대차에 설치되며, 기어상자는 차축에 설치되어 대차로 연결된다. 견인전동기의 전원은 인버터에 의해 공급되며 기계적인 출력토크는 기어커플링 및 감속기를 통해 차축, 차륜 등에 전달된다.

견인전동기의 주요부의 구조를 (그림 2)에 나타내었다.



(그림 2) 견인전동기 단면도

2.2 고정자(Stator)

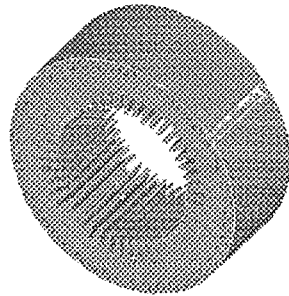
고정자는 고정자프레임(Stator Frame), 적층된 철심(Laminated Stator Core), 권선(Coil Windings) 등으로 구성된다.

고정자 철심은 고투자율을 갖는 규소강판과 SPCC 강판을 적층한 구조로 구성되어 있으며, 주조된 튼튼한 고정자 프레임에 압착되어 있다.

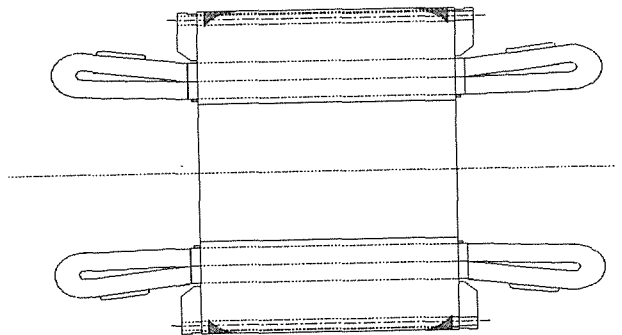
최근에는 전통적인 주물형 고정자프레임을 대신

하여 강판을 용접하여 구조물을 형성하는 용접프레임구조도 출현하고 있으며, 무프레임(Frameless)구조로 적층된 철심에 구조물을 필요부분만 직접 용접하는 형등 경향화를 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다. 고정자 슬롯의 형태는 냉각공기의 원활한 흐름을 위하여 누설구가 높은 구조로 하는 경우도 있다.

고정자 권선은 H중 또는 C200종 절연등급이며, H중인 경우 도체절연은 폴리에스테리미드-DGC인 전착윤모로 절연 되어 있다.



(그림 3) 고정자 코일 구조도



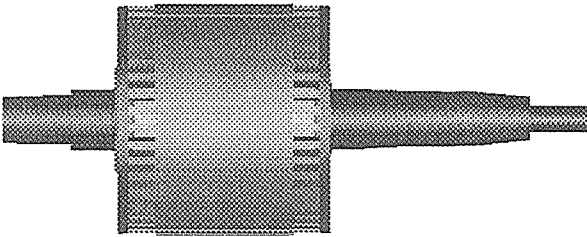
(그림 4) 고정자 철심

또한 코일은 도전성이 우수한 동으로 구성되어 유리운모(Mica Glass)테이프로 절연되었다. 코일

의 끝단은 기계적 보호 및 표면을 완만하게 하기 위하여 유리 포리에스터 테이프로 외부가 감싸져 있으며, 코일의 끝단은 유리섬유로 고정되어 있다. 전체 고정자는 불포화 폴리에스테리미드 수지를 진공, 가압 함침한 시스템이다. 절연시스템의 설계와 제작은 기름과 습기가 스며들지 않으며 높은 내전압, 우수한 열전도 기계적인 강도를 유지하게 해야 한다.

2.3 회전자(Rotor)

(그림 5)에 회전자 구조를 나타내었다. 축재질은 고장력강인 니켈 크롬 몰리브덴강(SCM 계통)을 사용한다. 구동측은 스크류(SCREW)는 나사홈을 두고, 테이퍼를 주어 기어 커플링과 결합이 되는 구조이다.



(그림 5) 회전자

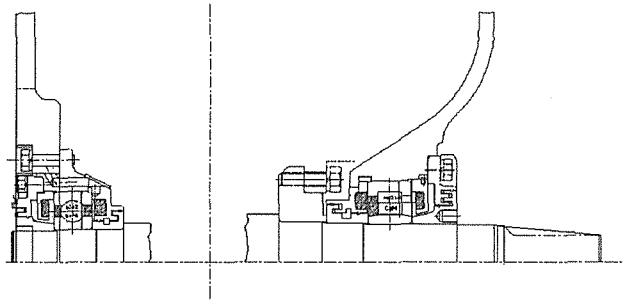
회전자 철심은 고정자와 같은 규소강판을 사용하며 두 개의 Endplate로 용접 고정한다. 회전자 바는 사다리꼴 혹은 직사각형 단면으로 하여 회전자 철심 슬롯에 삽입 되고, 엔드링 및 바 재질은 인버터 구동시 병렬운전, 고속회전시 원심력 및 열응력 등에 우수한 합금동으로 되어 있다.

2.4 베어링(Bearing)

구동측 베어링은 브라켓에 직접 고정되며 구동

커플링의 반작용과 고속회전으로 인한 부하에 견딜수 있는 구조로 되어 있으며 절연 롤러 베어링으로 되어 있다. 반 구동측 베어링은 회전자를 지지하고 구동 커플링으로 인한 축의 추력을 흡수하기 위한 절연 볼 베어링으로 되어 있다.

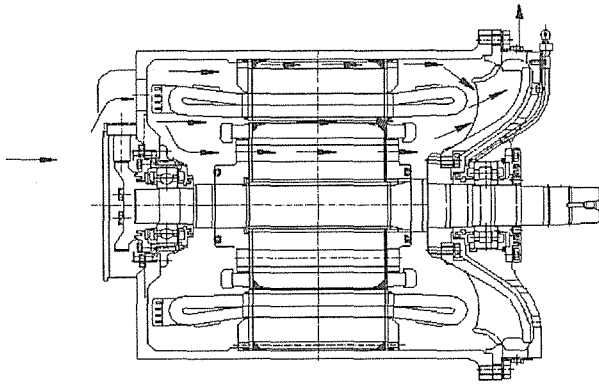
축 전류에 의한 전기적 손상 가능성을 배제, 전식방지에 대한 대책으로 구동측, 반구동측 모두 절연 베어링을 적용하였다.



(그림 6) 베어링 구조도

2.5 냉각시스템(Cooling System)

자기통풍식 냉각구조를 갖는 견인전동기는 전동기 내부에 냉각팬이 설치되어 외부공기를 인입하고 일정한 냉각채널을 통해 전동기에서 발생하는 열을 출구로 이송하는 구조를 갖는다. 냉각채널은 냉각효율을 향상하기 위하여 여러구조를 갖는데, 고정자 철심 적층부에 통풍구(혹은 프레임 냉각채널 구조), 회전자 철심 적층부에 통풍구, 고정자와 회전자 사이의 공극 및 슬롯부 등에 의해 냉각통로를 구성하고 있다. 냉각 팬은 구동측의 회전자 축에 설치, 고정되어 있으며, 고정자, 회전자 및 축수에서 발생하는 열을 냉각하기 위한 냉각공기를 흡입하는 기능을 한다. 냉각 공기는 이물질등이 유입되지 못하도록 설계된다.



(그림 7) 냉각통풍 구조도

2.6 회전속도 검출기

제어를 위한 회전검출기는 반구동축(구동축)에 설치되어 있으며, 무전원의 전자 유도방식을 사용하고 있으며 전동기 회전수 및 회전방향을 검출한다. 회전자 축에 설치된 기어치차 형태의 슬릿링(Slit Ring)의 위치변화에 따라서 회전수를 검출하고, 위상각 차이로 회전방향을 검출한다. 검출한 신호는 인버터 제어장치에 송신되어 전차의 속도 제어에 사용된다.

3. 견인부하용 유도전동기

유도전동기를 차량용 견인부하에 적용할 때는 기존의 직류기보다 많은 장점을 지니게 된다. 이는 정류자 및 브러시가 없으므로 보수 유지면에서 상대적으로 유리하고, 정류자 구조의 단점인 회전속도의 제한이 없기 때문에, 고속운전에 의한 소형·경량화가 가능하다. 또, 주전력 변환장치에서 주회로의 무접점화가 가능하고, 회생제동 기능과 더불어 점착성능을 향상시킬수 있는 등 철도차량용 견인전동기로 채용되고 있는 추세이다.

유도전동기를 인버터로 구동했을때 전원부 전압, 전류에 포함되는 고조파는 유도전동기의 특성에 큰 영향을 미친다. 산업용에 적용되는 가변속 시스템의 인버터의 경우 스위칭 주파수가 높아서 고조파 영향이 상대적으로 미미하지만, 철도차량용 주전동기에 적용되는 경우는 0~6000RPM으로 회전속도가 광범위 하고 입력주파수도 수 Hz ~300Hz 정도이고, 입력과형도 속도에 따라 변하면서 고조파의 영향이 효율, 역율을 악화시키고 맥동토크를 발생시킨다.

유도전동기를 철도차량용으로 적용하고자 할 때 고려해야할 사항을 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> 견인전동기 설계고려 사항

항 목	고 려 사 항
구조적 제약	취부 방식, 취부 공간 제약
전 원 부	인버터 출력전압, 고조파성분
운 행 조 건	운행패턴, 병렬운전 고려
환 경 조 건	사계절 옥외노출, 진동 악조건
설 계	인버터구동, 구조건고성, 절연등급

일반적으로, 가변속으로 구동되는 유도전동기는 전동기의 회전수에 따라 전기적, 기계적 출력특성을 구분지어 설계하고 있다.

전동기 속도에 따른 출력특성에 따라 설계시 유의점을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 정 토크 영역

VVVF 인버터의 경우 일정토크 영역에서는 V/F 일정제어를 통한 일정자속을 유지한다. 이 때, 기동시에는 기동을 위한 전압을 별도로 증가시키는 방법을 사용한다. 설계시에는 정토크 끝단(A)

에서의 자속밀도가 비정상적으로 높아지지 않도록 하여야 하고 이를 위하여 전동기의 철심에서 치폭과 철심의 길이를 적절히 산정하여야 한다.

3.2 정 출력 영역

속도 변화에도 불구하고 출력이 일정한 영역이며 출력-토크 관계식($P=\omega T$)에서 토크는 주파수에 반비례한다. 전동기의 속도가 상승함에 따라 운전토크에 대한 최대토크 여유가 가장 작은 정출력 끝단에서 토크여유가 적당량이 되도록 설계한다. 이 경우 정출력 끝단의 주파수와 토크 여유분에 따라 도체수가 결정되므로 유의하여야 한다.

3.3 특성 영역

특성영역은 전류가 주파수 증가에 따른 임피던스 증가로 제한되는 영역이므로, 이에 따라 토크도 $1/f^2$ 로 감소한다.

3.4 V/F와 전동기 중량

차량의 성능곡성이 주어지면, 전류 제한치를 변경함에 따라 여러 가지 V/F를 선정하여 설계에 적용할 수 있다. 설계시에 V/F 패턴의 기울기가 감소하면 자속량이 감소하므로 견인전동기의 체적을 줄여도 자속에 의한 포화현상을 피할수 있다. 이 때, V/F의 기울기가 지나치게 감소하면 기동전류가 증가하고 기동토크도 부족해지기 때문에 이에 대한 설계상의 고려가 필요하다.

3.5 견인전동기 정격 선정

일반적으로 유도전동기의 정격은 전동기가 전기

적·기계적으로 충분히 안정되게 동작하면서 효율, 역율등 출력특성 면에서도 최고의 성능을 내는 대표값들을 의미한다. 유도전동기의 정격을 나타내는 대표값들은 정격출력, 정격전압, 정격전류, 정격주파수, 정격슬립 등이 있고, 고속전철용 견인전동기와 같은 강제 냉각인 경우 풍량, 유량등을 별도로 표시하기도 하고, 출력특성값으로는 효율, 역율, 토크 등을 표시하게 되어 있다.

산업용에서는 연속 운전시의 정격이 기준이지만, 차량용은 필요에 따라 연속정격, 단시간 정격으로 구분하기도 한다. 철도차량 부하의 특성상 지하철 등 도심 운행 구간에서는 역간 주행시간이 2분 이내이지만, 고속전철의 경우 1시간 이상 운행하는 경우도 있다.

따라서, 철도차량에서는 운행조건에 따른 단시간 정격을 세분화하여 1시간 정격, 30분 정격, 15분 정격 등으로 구분지어 정하기도 한다.

3.6 정격출력(Rated Power)의 결정

정격출력은 정격 전압과 정격 전류의 곱에 역율, 효율을 고려하여 산출하는데 다음의 식에 의한다.

유도전동기의 각상당 정격전압 및 전류를 각각 E_p 와 I_{ph} 로 정의하면, 전동기의 용량(P)은 전동기의 역률($\cos\phi$)과 효율(η)에 대해 식(1)과 같이 표현된다.

$$P=m \cdot E_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos\Phi \cdot \eta \text{ [W]} \dots\dots (1)$$

3.7 정격전압(Rated Voltage)

직류전동기의 경우는 공칭 가선전압(또는 3궤조 전압) 적용시 전동기에 인가되는 최대전압을

정격전압으로 정하여 왔으며, 교류전동기에 대해서도 동일한 전압을 설정한다. 인버터로 유도전동기를 구동하는 경우에 V/F 일정영역에서의 전압과 정출력 영역에서의 전압이 가변적이어서 정격전압으로 공칭 선간전압과 최대전압 2종류를 표시하기도 한다. 고속전철의 경우 대용량 주전력변환장치가 필요하기 때문에 적절한 전력소자의 선정 등 관련사항을 주전력변환장치와 연관해서 결정해 나가야 한다.

3.8 정격전류(Rated Current)

견인전동기에서 정격전류는 기타 정격의 기준이 되는 값이어서 열차운행 조건, 선로 조건, 차량 조건, 냉각 조건 등을 면밀히 검토하여 열적, 기계적, 전기적 특성에 문제가 생기지 않도록 잘 설정해야 한다.

정격전류를 설정하는 방법은 산업용 전동기와 유사하지만, 철도차량 부하를 감안할 때 선로 조건(역간거리, 제한속도, 구배등), 차량 조건(자중, 정원, 승차율, 주행저항), 운전 조건 등으로 열차 주행 시뮬레이션을 실시한 결과에서 소요되는 실효치 전류를 계산하고, 이 값에 약간의 여유분을 두어 설정하는 절차를 거친다.

3.9 정격 주파수(Rated Frequency)

정격주파수는 전동기의 정격회전수를 결정하는 요소로서 범용인버터 구동인 경우 정토크 끝단으로 잡는게 일반적이다. 차량용에서는 정출력 영역 내에서 선정하고 있는데, 초기 교류전동기 구동방식에서는 V/F 일정 영역 종단을 정격속도로 하고 있는 예가 많았으나, 최근에는 표정속도 부근으로

하는 예가 많아지고 있다. 정격주파수 설정방법에 따른 견인전동기 체적의 변화는 거의 없지만 차량의 실주행 이미지를 나타내는 표정속도로 일반화되어 가는 추세이다.

3.10 정격 슬립(Rated Slip)

견인전동기를 병렬운전하는 경우가 많아서 주행 중 차륜경 차이로 인한 제어의 안정성은 정격슬립 값과 밀접한 관계가 있다. 이는 회전자의 온도상승에 직접적인 영향을 미치므로 설계시 정격슬립과 회전자 온도조건을 명확히 설정할 필요가 있다. 정격슬립의 결정에는 회전자 도체의 소재선정에서부터 2차 저항값 설정 및 기계구조적으로 안전할 수 있는 온도변화율까지 고려된 설계를 검토해야 한다.

철도차량용 유도전동기 정격에 관한 시험방법, 온도상승한계는 IEC, JEC, JIS등의 각국 규격에 정해져 있지만, 정격점을 설정하는 방법은 국가별, 기업별로 약간의 차이가 있다. 정격점의 설정은 전동기 구조, 용량, 제품 단가에 관련된 문제이므로 매우 중요한 사항이다. 일반적으로 전술한 V/F종단점이나 표정속도를 많이 설정하는데, 독일규격(DIN)에서는 자기통풍의 경우(지하철용)는 V/F종단점, 강제통풍의 경우(고속전철용)는 V/F종단점과 표정속도와의 사이에서 설정하는 것으로 되어있다.

4. AC 견인전동기 기본설계

차체와 대차구조에서 견인전동기의 체적은 차륜의 크기, 궤간거리, 감속기, 기어 커플링등의 기계요소들간의 조립구조에서 공간상의 제약을 받는다.

견인전동기의 설계에 있어서 가장 먼저 선행되어야 하는 것은 차량의 특성, 주전력 변환장치의 특성 및 전동기의 정격에 부합되는 전자기적 특성, 열적 특성, 성능특성 및 경량화 등을 고려한 최적 설계조건을 선정하는 것이 중요하다. 본 검토에 있어서는 이러한 특성들에 영향을 미치는 주요 요소들에 대해 검토하였으며, 설계 방향을 제시하는데 주안점을 둔다.

4.1 가변속 구동 유도전동기

전력소자의 발전에 따른 인버터의 적용은 고전압, 고출력의 농형 유도전동기의 가변속 구동을 가능하게 했다. 그러나, 인버터에 의한 전원공급은 고조파 성분을 수반하게 되어 자기강판(Magnetic Core)과 도체에 추가적인 손실을 발생하게 된다. 전동기에서 철손 및 동손은 공급주파수와 더불어 증가하는데, 전류와 전압의 합성파에 포함되는 많은 고조파는 이들 손실을 증가시키는 경향이 있다.

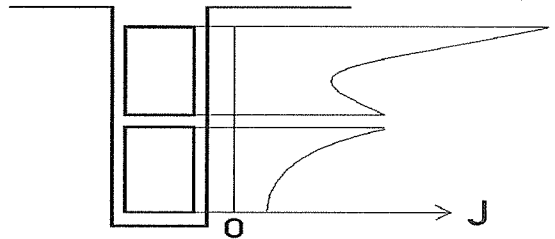
이를 위해서 비정현파 전원에 관련된 주된 손실 원을 알아본다.

가. 표피효과에 의한 고정자 도체의 손실

슬롯높이에 따라 변하는 횡축자계의 존재는 도체높이에 따른 전류밀도의 불균일 분포의 원인이 된다. 예로써, (그림 8)은 슬롯당 2개의 바(bar)로 된 코일에 있어 전류밀도의 모양을 나타낸다. 이 현상은 도체의 저항증가처럼 즉, 줄(joule)손실증가를 외부적으로 나타낸다.

나. 순환전류에 의한 고정자 도체의 손실

한 슬롯에서 다른 것 위에 어느 하나가 병렬로 배치된 도체가 있을때, 도체사이에서 보상전류 때



(그림 8) 고정자 코일의 전류밀도 분포

문에 각도체에서 표피효과는 더 많이 발생한다. 그 영향은 표피효과나 와전류에 의한 손실의 증가에 기인한 손실과 동일하므로 직류저항 증가로 볼 수 있다.

다. 철 손

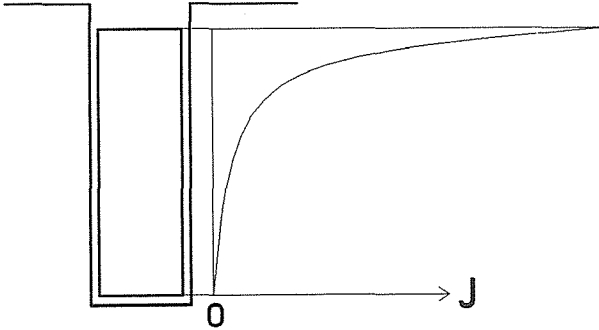
철손은 히스테리시스 손실과 와전류손실로 이루어진다. 일반적으로, 철손의 증가는 동손의 증가에 비해 낮다. 견인전동기에서 사용하는 전기 강판은 저손실의 강판 사용이 필요하지만 가격적인 측면도 고려해야 하고 특히 인버터로 구동되면서 추가되는 손실을 이론적으로 정립하여 정확한 철손해석을 하는 과정이 필요하다.

라. 회전자의 추가손실

표피효과의 영향은 고정자처럼 회전자에도 농형 회전자의 저항 증가로 나타나는데 이는 높은 주파수에서 바(bar)의 전류집중이 주는 결과는(그림 9)와 같다. 그러나 (그림 9)에서 나타나듯이 주파수에 따른 저항의 증가법칙의 경향이 고정자 도체와는 다른 양상을 보이고 있다.

산업전동기에서는 기동토크를 높이려면 심구효과를 이용하여 슬롯폭이 좁고 깊은 도체를 사용하였으나, 인버터로 구동되는 전동기는 손실을 줄이고 최대 토크를 높이기 위해서 덜 깊고 폭이 넓

은 바를 사용한다.



(그림 9) 회전자 바에서 전류밀도 분포

Z_{ph} : 상당 직렬도체수

$$K : \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot k_w \right)$$

AC : 전기장하 $\left(\frac{mZ_{ph}I_{ph}}{p} \right)$

Φ : 자기장하 (= $p\Phi$)

로 표현되어 전기장하(AC), 자기장하(Φ), 그리고 주파수의 곱의 형태로 나타난다.

나. 장하의 분배

전동기의 용량에 대한 식(3)에서 전기장하와 자기장하를 어떻게 분배 하느냐에 따라 전기장하형 및 자기장하형으로 전동기를 분류할 수 있다. 여기서 전동기를 전기장하형 혹은 자기장하형으로 구분하는 것은 절대적인 기준은 아니고 동일용량인 2대이상의 전동기를 비교했을 때, 어느쪽이 다른한쪽에 비해 더 전기장하(혹은, 자기장하)에 가깝다는 상대적인 기준이 된다.

전기장하형과 자기장하형 전동기의 특징을 비교하면 다음 <표 2>와 같다.

다. 비장하와 전동기의 소형경량화

전동기를 소형경량화는 단순히 전기장하를 어떻게 결정하느냐에 따라 결정되지 않는다. 동일한 장하비로 전기장하와 자기장하를 분배하더라도, 전기비장하 및 자기비장하로 정의된 값들에 의해 전동기의 크기 및 중량이 결정된다.

식(3)으로부터

$$\begin{aligned} \frac{P}{\eta \cdot \cos\Phi} &= \frac{\pi}{\sqrt{2}} \left(\frac{mZ_{ph}I_{ph}}{p} \right) \cdot (p\Phi) \cdot \frac{n_s p}{2} \cdot k_w \\ &= \frac{\Phi}{2\sqrt{2}} \cdot k_w \cdot (\pi Dac) \cdot (\pi DLB_{av}) \cdot n_s \end{aligned}$$

4.2 전기장하와 자기장하

가. 전기장하 및 자기장하

식(1)에서, 각상당 정격전압을 1차권선의 전압 강하를 무시하고 유기기전력의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$E_{ph} = \sqrt{2\pi} \cdot f \cdot T_{ph} \cdot \Phi \cdot k_w [V] \dots\dots (2)$$

T_{ph} : 상당 직렬턴수

Φ : 극당자속량

k_w : 권선계수

식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \frac{P}{\eta \cdot \cos\Phi} &= \\ &= \sqrt{2} \pi \cdot \left(\frac{mT_{ph}I_{ph}}{p} \right) \cdot (p\Phi) \cdot f \cdot k_w \\ &= \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{mZ_{ph}I_{ph}}{p} \right) \cdot (p\Phi) \cdot f \cdot k_w \\ &= K \cdot AC \cdot \Phi \cdot f \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

p : 극수

〈표 2〉

전기장하형과 자기장하형 전동기의 특징

구 분	전 기 장 하 형	자 기 장 하 형
도체수	大	小
내부인덕턴스	大	小
정동토크	小	大
제어특성	정출력 영역 작을 때	정출력 영역 클 때
중량 및 크기	소형경량	대형중량
역률 및 효율	중고속에서 낮음	저속에서 낮음
냉 각	온도 상승이 높다	온도 상승이 낮다
적용사례	지하철, 경전철	고속전철

$$= (1.11 \pi^2 ac B_{av} k_w) (D^2 L) n_s$$

$$= C_0 \cdot D^2 \cdot L \cdot n_s \dots\dots\dots (4)$$

D : 고정자 내경
L : 적층폭

$$ac : \text{전기비장하} \left(= \frac{mZ_{ph} I_{ph}}{\pi D} \right)$$

$$B_{av} : \text{자기비장하} \left(= \frac{p \Phi}{\pi DL} \right)$$

$$n_s : \text{회전수} \left(= \frac{2f}{p} [\text{rev/s}] \right)$$

$$C_0 : \text{출력상수} (= 1.11 \pi^2 ac B_{av} k_w)$$

출력상수 C_0 는

$$C_0 = \frac{kVA}{D^2 L n_s} \dots\dots\dots (5)$$

과 같이 표현할 수 있다.

전동기의 유효부피는 $D^2 L$ 에 비례하고, 정격토크 오크는 kVA/n_s 에 비례한다. 그렇기 때문에 출력상수는 단위 부피당 정격 토크 오크에 비례하는 요소이다.

전동기의 중량 및 부피는 정격회전수(n_s) 및 출

력계수가 증가하면 감소한다. 여기서 출력계수는 전기비장하와 자기비장하의 곱으로 표현되므로, 전동기의 소형경량화를 위해서는 이 값들을 가능한 한 최대한으로 설계할 필요가 있다. 그러나 이 비장하들을 너무 높게 설계하면 역률, 효율, 온도 상승과 같은 전동기의 성능이 저하되므로, 요구되는 전동기의 성능을 만족하는 수준에서 이 요소들을 최대한 크게 설계하는 것이 전동기의 소형경량화의 핵심이다.

4.3 철심재질변화에 따른 특성

전기적에너지를 기계적에너지로 변환하는데 있어서 매개체역활을 하는 자기적에너지의 효율적인 활용이 중요하며 이러한 자기적에너지를 저장, 변환하는 철심의 선택은 전동기의 성능 및 경제적인 설계에 있어서 매우 중요한 요소이다.

본 검토에 있어서 정현파전원을 입력으로 한 철심재질에 따른 특성 해석 결과, 손실로 인한 온도 상승의 차이가 많이 발생하며, 실제로 인버터전원으로 구동할 경우에는 고조파 손실에 의해 더 많

은 차이를 발생시킬 것으로 예상하고 설계해야 한다.

4.4 바와 엔드링 재질변화에 따른 특성

견인전동기에서 바와 엔드링은 회전자측의 폐회로를 형성하여 전류를 흐르게 하므로서 고정자측의 전류와의 상호작용에 의해 전동기특성을 나타내는 중요한 요소이다. 바와 엔드링은 견인전동기에 사용될 경우 요구하는 전기적인 특성뿐만 아니라 열적인 특성, 진동나 충격에도 견딜 수 있는 기계적인 특성에도 만족되어야 한다. 여기서는, 전동기에 사용중인 바와 엔드링 재질들의 성분, 특성들을 비교함으로써 철도차량용 견인전동기에 적당한 재질을 선택하는데 기준을 알아본다.

〈표 3〉에 회전자바의 물리적특성을 나타내었다. 내진성 측면에서는 차량의 진동에 견딜 수 있는

기계적으로 견고한 구조가 좋다. 즉 인장강도, 연신율, 항복강도가 좋을수록 내진성에 유리하다.

1대의 전압형인버터로 복수대의 전동기를 병렬 운전(1C4M, 1C2M) 했을때, 전동기 각각의 슬립-토크 특성이 차이가 나면 토크 불평형이 발생하는데 그 영향은 2차저항의 변화에 가장 크게 영향을 받는다.

따라서, 병렬운전시 운전특성을 개선하기 위해서는 2차도체(로터바)의 온도에 따른 저항율의 변화가 적은 재질, 즉 온도변화계수가 적은 2차도체가 좋다. 일본 회사의 경우 황동이나 단동을 쓰는 경향이 있다.

차륜경차와 정격슬립 측면에서는, 차륜경에 차이가 있는 경우 각 전동기는 서로 다른 속도(slip)로 회전하여 토크 불평형이 발생하고, 큰 토크의 차륜이 점착한계를 넘으면 공회전이 발생하여 점착효율이 저하한다.

〈표 3〉

회전자바의 물리적 특성

구 분		일 본 식	유 럽 식
바	재 질	황동 : CuZn	크롬동 : CuCr
	도전율 [%]	26%	75% 이상
	인장강도 [kg/mm ²]	42 이상	42 이상
	온도계수 [1/°C]	0.00146	0.00315
엔드링	재 질	무산소동	지르코늄동
	도 전 율	95%	75% 이상
	인장강도 [kg/mm ²]	22 - 28	43 이상
	온도계수 [1/°C]	0.0038	0.00315

전동기의 온도상승측면을 고려하면 차륜경 차이에 의한 토크와 전류의 불평형은 역행시와 회생시 특성이 역전되는데 역행과 회생을 반복하면 열적

으로 평균화되는데 〈표 4〉에 차륜경차에 의한 토크와 전류영향을 나타내었다.

(표 4) 차륜경차와 전동기 토크 전류

동일 인버터로 구동되는 전동기	역 행 (주행)		회 생 (제동)	
	전 류	토크	전 류	토크
차 륜 경 大	大	大	大	大
차 륜 경 小	小	小	小	小

또, 역행시만 고려한 경우에도 아래와 같은 특성으로 인해 역시 열적으로 평균화 되는 방향이 되기 때문에 불평형이 증가하지는 않는다.

차륜경이 큰쪽의 전류가 증가하고 이에 따라 온도상승이 증가하고 2차 저항이 증가한다. 2차 저항이 커지게 되면 슬립-토크 특성이 동일 슬립에 대해 전류와 토크가 감소한다.(이와 같은 경우 위에서 가정된 슬립-토크 특성은 동일하지 않고 2차저항의 변화율에 비례하여 토크불평형이 발생한다.) 따라서, 전류가 감소하므로 발생하는 열량이 작아져서 온도상승도 감소하게 된다.

정격슬립은 차륜경차에 의한 토크불평형과 회전자의 온도상승을 고려하여 결정한다. 전동기 효율은 정격슬립이 작을수록 좋지만 이 경우 토크불평형은 크게 된다. 토크불평형은 대략적으로 슬립에 반비례하고 차륜 경차에 비례한다. 전동기 체적이 같고 자기회로 형상이 동일한 경우 2차 도체(로터바)의 종류에 따라 2차 저항, 온도계수 등의 변화가 있는데 토크불평형을 최소화하려면 전동기 효율을 만족하는 조건에서 2차도체의 저항율이 크고 온도계수가 작을수록 유리하다.

또한 차량운전시 차륜경에 의한 토크불평형은 위에서 언급된 것처럼 2차도체의 저항율이 크고 온도계수가 작을수록 좋지만, 마찰력측면 즉 눈, 비 등에 의해 선로의 노면이 미끄러운 경우 슬립이 큰 전동기는 속도변동이 크게 되어 심한 경우 운전시 차량이 덜컹거리는 현상이 있을 수 있다.

따라서, 정격슬립 및 토크불평형은 2차도체와 매우 밀접한 관계를 갖는데, 현실적으로 허용한도를 명확하게 규정짓는 것은 불가능하지만, 차량시스템과 전동기와의 관계, 인버터 제어능력 등을 고려하여 결정해야 한다.

(표 5)는 종래에 제작됐던 차륜경차와 정격슬립의 실예이다.

(표 5) 차륜경차와 정격슬립의 예

(실 적)	A	B	C	D
차륜경관리한계	11mm	11mm	6mm	3mm
정격 슬립	3.9%	3.0%	2.5%	1.5%
최대토크불평형	15%	19%	15%	12%

견인전동기는 운전속도 범위가 넓고 고속운전되기 때문에, 회전자는 고속 회전시의 원심력과 열응력에 대해 충분한 강도를 가지는 구조가 되어야 한다. 또한 기계적으로 충분한 강도를 갖는다 하여도 2차도체와 엔드링간의 용접상태가 나쁘면 고속회전시 문제를 일으킬 우려가 있으므로 실제 제작을 고려한 용접상황도 충분히 고려해야 한다.

또한 전기적인 특성은 인버터 구동 전동기에서 회전자 동손을 감소시키고 최대출력을 높이기 위하여 단면적을 감소시키거나 저항을 감소시키는 선에서 소재를 선택해야 한다. 재질에 따른 전기적특성을 고려하면 oxygen free copper, electrolytic tough pitch copper, fire refined tough pitch copper에서 가장 우수한 전기적 특성이 나타나지만, copper chromium, copper chromium zirconium과 차이가 많이 나지 않으며 인장강도나 연신률 등의 기계적인 특성에 있어서 우수한 특성을 나타내고 있다.

결국 바와 엔드링의 선정은 시스템 특성과 부합한 전동기의 특성과 관련 되어 있으며, 전기적 특성(Slip 포함), 열적인 특성 및 기계적인 특성을 조합한 최적의 선택이 되어야 한다.

4.5 절연설계

전동기에 있어서 절연이란 구조, 재료, 냉각 등의 복합적인 기능을 하지만, 기기설계 및 수명을 지배하는 주요한 요인으로 작용하여 직, 간접적으로 기기의 성능 및 효율에도 영향을 미친다.

일반적으로 전동기의 손실은 거의 대부분 열로 변환되기 때문에 발열량의 적정한 분산구조와 내열성 한계내에서 유지될 수 있는 최적의 절연 상태와 절연 재료를 선택하므로써 전동기의 단위 체적당의 용량 증가와 수명을 연장시킬 수 있다. 따라서 절연 기술은 철도차량용 견인전동기에 있어서 핵심 기술중의 하나이다.

고정자 절연에는 동각선의 소선절연, 동선과 동선, 코아와 동선 사이의 절연으로 구분될 수 있으며 이중에서 코아와 동선 사이의 절연이 가장 중요하다. 유도전동기에서의 코아와 동선 사이의 절연은 1차적으로 절연 TAPE 및 절연지로 한후, 2차적으로 레진에 의한 진공 함침한다. 이때 절연 재료는 허용 온도 상승에 따른 내열 등급에 따라서 선택해야 하며, 손실증 많은 비중을 차지하고 있는 동손을 줄이기 위해 한정된 SLOT내에 많은 량의 동선을 넣을 수 있도록 절연지 두께를 줄이는 동시에 전기적, 기계적인 내구성을 고려하여 선정하여야 한다.

차량용 유도 전동기의 온도 상승 한도는 IEC 349-2에 언급되어 있으며 고정자 권선의 온도상승분이 H CLASS는 180K, 200 CLASS는

200K로 규정하고 있으며, 이처럼 차량용 유도 전동기는 일반 산업용보다 높게 설정되는데 이는 다음의 사항을 고려해야 한다.

차량용에서는 전운전 시간에 대한 최대부하 시간의 비율이 작지만 저속에서 냉각용량이 떨어짐을 고려해서 정격 온도 상승을 높게 취한다.

온도 상승 한도를 높게 해서라도 소형, 경량화를 도모한다.

실주행시는 차량 주행시의 풍량의 영향으로 정지 상태의 실험시보다 주행시에 프레임의 냉각효과가 커서 온도 상승이 낮게 된다.

따라서 철도차량용 견인전동기의 경우 소형, 경량화 및 신뢰성 향상 측면에서 H CLASS 이상의 절연 등급의 선정이 필요하다고 할 수 있다.

전동기의 손실은 주로 열로 발산되고, 발산된 열은 절연 재료를 통하여 외부로 방출된다. 따라서 외부로의 열 방출이 효과적으로 일어나기 위하여 절연 재료가 갖추어야할 특성은 절연성의 고유기능을 유지하면서 열 전도성은 커야 한다.

(표 6) 절연등급별 절연 구성

구 분	H CLASS	200 CLASS
소선 절연	H-DGC	KAPTON
대지 절연	MICA KAPTON	GLASS MICA
	KAPTON	GLASS-NOMEX
슬롯LINER	NOMEX 410	NOMEX 410
층간 절연	NOMEX 410	NOMEX 410
함침수지	에폭시/ 폴리에스테리미드	실리콘

진공 가압 함침(Vacuum Pressure Impregnation)은 현재까지 함침 절연의 방법중 가장 좋은 방식으로 알려져 있는 것으로 성형 코일을 절연,

코아에 삽입한 후 절연 코일과 코아를 일체로 하여 예비 가열하여 습기를 완전히 제거하고, 함침 탱크에 넣어 진공, 탈기 및 함침 레진 주입후 진공 탈기, 가압 함침을 함으로써 슬롯부는 물론 결선 부에도 약점이 없는 균일한 양질의 절연층을 형성하는 것이다. 특히 코일과 슬롯간, 철심 적층 사이에 공기층이 완전히 제거되고, 코일의 절연층에 있는 기포에도 열전달이 좋은 레진을 진공, 가압 처리하여 완전히 충전 시킴으로써 방열성이 우수하게 되며 코일 절연의 신뢰성이 높은 절연 시스템을 보장할 수 있다.

동일한 조건하에서 바니쉬의 함침 처리 조건만 다른 경우, 즉 함침전에 수분을 충분히 제거하지 않거나 또는 함침 시간을 단축할 때 부분적으로 기포가 존재하며, 기포는 열전달의 방해 요소로 작용하여 온도상승의 효과로 작용되고 이는 효율의 감소를 초래하게 된다.

따라서 사용 함침 레진에 따라서 레진의 점도, 진공시간, 진공도, 가압시간, 가열 건조시간 등을 조정하여 최적의 함침조건을 설정해야 하며 이를 정량적으로 점검하기 위해서는 정전용량, 유전정접 등을 측정하여 검사한다.

철도차량용 견인전동기 함침 레진은 절연 파괴 강도, 점도, 내열성, 절연 저항, 열 전도도 및 경제성, 작업성을 고려하여 최적의 절연 시스템을 구성하는 것이 중요하다.

절연기술은 내열 한도내에서 절연재료의 적절한 선정, 진공함침 기준설정 및 함침기술이 중요한 부분을 차지하며, 철도차량용 견인전동기의 절연 설계에 있어서는 견인전동기의 온도상승 및 냉각 시스템도 고려하여 최적의 절연시스템의 선정이 필요하다.

5. 결 론

철도차량용 유도전동기를 개발하는데 있어 고려해야 될 사항을 구조와 요소기술 관점에서 살펴보았다. 철도차량용 견인전동기는 일반산업용과는 달리 고도의 신뢰성을 요구하는 특징이 있어서 설계 단계에서 고려해야 할 사항이 많다. 견인전동기의 설계에 있어서 가장 먼저 선행되어야 하는 것은 차량의 특성, 주전력 변환장치의 특성 및 전동기의 정격에 부합되는 전자기적 특성, 열적 특성, 성능특성 및 경량화 등을 고려한 최적 설계조건을 선정하는 것이 중요하다.

특히, 설계단계에서 견인전동기의 제작사항, 시험법, 소재선택 등 면밀한 검토를 통하여 신뢰성을 확보하는 과정이 필수적이라고 하겠다. 현재, 국내에는 견인용 유도전동기 독자 개발의 초기단계에 있으나 그동안의 제작경험과 설계경험을 토대로 신뢰성을 확보해 나가면 가까운 시일내에 개발선진국과의 격차를 줄여 나가리라고 확신한다.