

전동차용 AC견인전동기 설계기술

배 동진^o, 이 정일, 김 남해, 김 근웅*, 윤 종학*, 이 기호*
 현대중공업(주) 마북리 연구소, *대우중공업(주) 철차연구소

Design Technologies of AC Traction Motor for Rolling Stocks

Dongjin Bae, Jung-il Lee, Namhae Kim, K.W. Kim*, J.H.Yoon*, K.H. Lee*
 Mabook-Ri Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co. *Daewoo Heavy Industries Co.

Abstract - Some design technologies of AC traction motor for rolling stocks are presented. AC Traction motors for rolling stocks are operated in worst conditions such as frequent mechanical vibrations, compact design with limited mounting space, severe thermal stress at outside, driven with nonsinusoidal voltage waveform inverters, and so on. Therefore, design procedures must be carefully investigated in the viewpoint of theoretically and practical use. Design procedure contains, the motor size determination, electromagnetic circuit design, insulation system design, vibrations and thermal expansion of rotor bars, temperature rise, as well as output characteristics.

하지만, 철도차량용 주전동기에 적용되는 경우는 0~5000RPM으로 회전속도가 광범위하고 입력주파수도 수 Hz ~ 300Hz 정도이고, 입력파형도 속도에 따라 변하면서 고조파의 영향이 효율, 역율을 악화시키고 맥동토크를 발생시킨다.

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

표 1 견인전동기 설계고려 사항

항 목	고 려 사 항
구조적 제약	취부 방식, 취부 공간 제약
전원부	인버터 출력전압, 고조파성분
운행조건	운행패턴, 병렬운전 고려
환경 조건	사계절 옥외노출, 진동 악조건
전기기계설계	인버터구동, 구조건고성, 절연등급

1. 서 론

최근, 자동차의 증가에 따른 도로교통난을 해결하기 위한 대안으로 신교통시스템의 필요성이 날로 증대되고 있는 가운데, 철도차량에 의한 여객과 화물의 수송에 대한 관심이 고조되고 있다. 현재 국내에는, 수도권 전철 구간 및 지자체가 운영하는 열차는 전동차(Electric Car)이며, 최근에는 도심지 및 인접도시간 근거리 교통 수단으로 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.

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

2. 본 론

2.1 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 미미

그림 1에 전동차용 견인전동기의 단면도를 예시하였다. 유도전동기 일반구조에 속도검출을 위한 센서가 있고, 구조적 견고성을 위한 클램프등이 특징적이다.

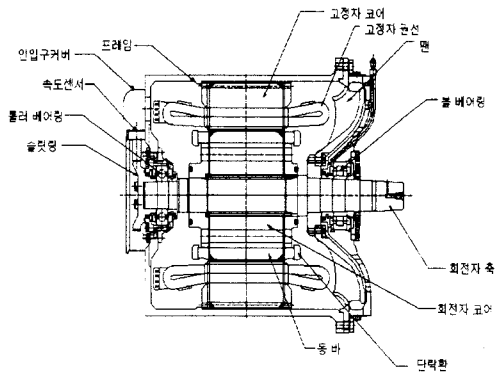


그림 1 견인전동기 단면도

2.2 견인전동기 정격 선정

일반적으로 유도전동기의 정격은 전동기가 전기적·기계적으로 충분히 안정되게 동작하면서 효율, 역율등 출력 특성 면에서도 최고의 성능을 내는 대표값들을 의미한다. 유도전동기의 정격을 나타내는 대표값들로는 정격출력, 정격전압, 정격전류, 정격주파수, 정격슬립 등이 있고, 고속전철용 견인전동기와 같은 강제 냉각인 경우 풍량; 유량 등을 별도로 표시하기도 하고, 출력특성값으로는 효율, 역율, 토크 등을 표시하게 되어 있다.

산업용에서는 연속 운전시의 정격이 기준이지만, 차량

용은 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.

견인전동기 용량을 설계특성에 따라 수식화하면

$$\frac{P}{\eta \cdot \cos \phi} = \sqrt{2} \pi \cdot \left(\frac{m T_{ph} I_{ph}}{p} \right) \cdot (p \phi) \cdot f \cdot k_u$$

$$= \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{m Z_{ph} I_{ph}}{p} \right) \cdot (p \phi) \cdot f \cdot k_u \quad (1)$$

$$= K \cdot AC \cdot \phi \cdot f$$

p : 극수

Z_{ph} : 상당 직렬도체수

K : ($= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot k_u$)

AC : 전기장하 ($= \frac{m Z_{ph} I_{ph}}{p}$)

φ : 자기장하 ($= p \phi$)

로 표현되어 전기장하(AC), 자기장하(φ), 그리고 주파수의 곱의 형태로 나타난다. 설계비중에 따라 전기장하형과 자기장하형 전동기로 나뉘는데 이들의 특징을 비교하면 다음 표2와 같다.

표 2 전기장하형과 자기장하형 전동기

구 분	전기장하형	자기장하형
도체수	大	小
내부인덕턴스	大	小
정동토크	小	大
제어특성	정출력영역작을때	정출력 영역 클때
중량 및 크기	소형경량	대형중량
역률 및 효율	중고속에서 낮음	저속에서 낮음
냉각	온도상승이 높다	온도상승이 낮다
적용사례	지하철, 경전철	고속전철

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

산업용 유도기와는 달리 가변속운전의 경우 운전주파수보다 훨씬 많은 스위칭이 필요하는데 이결과로 시간간조파의 발생이 되고, 이 때 고조파는 동손 및 철손증가가 수반되어 추가온도상승의 원인이 된다. 실제로 인버전원으로 구동할 경우에는 고조파 손실에 의해 더 많은 차이를 발생시킬 것으로 예상하고 설계해야 한다.

2.3 바와 엔드링 재질변화에 따른 특성

회전자바와 엔드링은 견인전동기에 사용될 경우 요구하는 전기적인 특성뿐만 아니라 열적인 특성, 진동나 충격에도 견딜수 있는 기계적인 특성에도 만족되어야 한다. 여기서는, 전동기에 사용중인 바와 엔드링 재질들의 성분, 특성들을 비교함으로써 철도차량용 견인전동기에 적당한 재질을 선택하는데 기준을 알아본다.

표3에 회전자바의 물리적특성을 나타내었다.

표 3 회전자바,엔드링의 물리적 특성

구 분	일본식	유럽식	
회전자바	재 질	황동:CuZn	크롬동:CuCr
	도전율 [%]	26 %	75 % 이상
	인장강도 [kg/mm ²]	42 이상	42 이상
	온도계수[1/℃]	0.00146	0.00315
엔드링	재 질	무산소동	지르코늄동
	도전율	95 %	75 % 이상
	인장강도 [kg/mm ²]	22 - 28	43 이상
온도계수[1/℃]	0.0038	0.00315	

내진성 측면에서는 차량의 진동에 견딜수 있는 기계적으로 견고한 구조가 좋다. 즉 인장강도, 연신율,항복강도가 좋을수록 내진성에 유리하다.

1대의 전압형인버터로 복수대의 전동기를 병렬운전(1C4M,1C2M) 했을 때, 전동기 각각의 슬립-토크 특성이 차이가 나면 토크 불평형이 발생하는데 그 영향은 2차저항의 변화에 가장 크게 영향을 받는다. 따라서, 병렬운전시 운전특성을 개선하기 위해서는 2차도체의 온도에 따른 저항율의 변화가 적은 재질, 즉 온도변화계수가 적은 2차도체가 좋다. 일본의 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 접촉각계를 넘으면 공회전이 발생하여 접촉효율이 저하한다.

전동기의 온도상승측면을 고려하면 차륜경 차이에 의한 토크와 전류의 불평형은 역행시와 회생시 특성이 역전되는데 역행과 회생을 반복하면 열적으로 평균화되는데 표 4에 차륜경차에 의한 토크와 전류영향을 나타내었다.

표 4 차륜경차와 전동기 토크, 전류

동일 인버터로 구동되는전동기	역행(주행)		회생(제동)	
	전류	토크	전류	토크
차륜경 大	大	大	小	小
차륜경 小	小	小	大	大

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 2차저항이 증가한다. 2차 저항이 커지게 되면 슬립-토크 특성이 동일 슬립에 대해 전류와 토크가 감소한다. (이와 같은 경우 위에서 가장된 슬립-토크 특성은 동일하지 않고 2차저항의 변화율에 비례하여 토크 불평형이 발생한다.) 따라서, 전류가 감소하므로 발생하는 열량이 작아져서 온도상승도 감소하게 된다.

정격슬립은 차륜경차에 의한 토크불평형과 회전자바의 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 로터바의 종류에 따라 2차 저항, 온도계수 등의 변화가 있는데 토크불평형을 최소화하려면 전동기 효율을 만족하는 조건에서 2차도체의 저항율이 크고 온도계수가 작을수록 유리하다.

또한 차량운전시 차륜경에 의한 토크블평형은 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 토크블평형은 2차도체와 매우 밀접한 관계를 갖는데, 현실적으로 허용한도를 명확하게 규정짓는 것은 불가능하지만, 차량시스템과 전동기와와의 관계, 인버터 제어능력 등을 고려하여 결정해야 한다.

표 5는 종래에 제작됐던 차륜경차와 정격슬립의 실예이다.

표 5 차륜경차와 정격슬립의 예

구분	A	B	C	D
차륜경관리한계	11mm	11mm	6 mm	3 mm
정격 슬립	3.9 %	3.0 %	2.5 %	1.5 %
최대토크블평형	15 %	19 %	15 %	12 %

건인전동기는 운전속도 범위가 넓고 고속운전되기 때문에, 회전자는 고속 회전의 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 제작을고려한 용접상황도 충분히 고려해야 한다.

또한 전기적인 특성은 인버터 구동 전동기에서 회전자 동손을 감소시키고 최대출력을 높이기 위하여 단면적을 감소시키거나 저항을 감소시키는 선에서 소재를 선택해야 한다. 결국 바와 엔드링의 선정은 시스템 특성과 부합한 전동기의 특성과 관련 되어 있으며, 전기적, 열적 특성 및 구조적인 특성을 고려해야 한다.

2.4 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 절연상태와 절연 재료를 선택함으로써 전동기의 단위 체적당의 용량 증가와 수명을 연장시킬 수 있다. 따라서 절연 기술은 철도차량용 건인전동기에 있어서 핵심 기술중의 하나이다.

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

차량용 유도 전동기의 온도 상승 한도는 국제규격으로 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 정

격 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 건인전동기의 경우 소형, 경량화 및 신뢰성 향상 측면에서 H CLASS 이상의 절연 등급의 선정이 필요하다고 할 수 있다.

전동기의 손실은 주로 열로 발생되고, 발생된 열은 절연 재료를 통하여 외부로 방출된다. 따라서 외부로의 열 방출이 효과적으로 일어나기 위하여 절연 재료가 갖추어야 할 특성은 절연성의 고유 기능을 유지하면서 열 전도성은 커야 한다.

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 예비가열하여 습기를 완전히 제거하고, 함침 탱크에 넣어 진공, 탈기 및 함침 레진 주입후 진공 탈기, 가압 함침을 함으로써 슬롯부는 물론 결선부에도 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 충전시킴으로써 방열성이 우수하게 되며 코일 절연의 신뢰성이 높은 절연 시스템을 보장할 수 있다.

동일한 조건하에서 바니쉬의 함침 처리 조건만 다를 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.

철도차량용 건인전동기 함침 레진은 절연 파괴 강도, 점도, 내열성, 절연 저항, 열 전도도 및 경제성, 작업성을 고려하여 최적의 절연 시스템을 구성해야 한다.

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

3. 결 론

철도차량용 유도전동기를 개발하는데 있어 고려해야할 사항을 요소기술 관점에서 살펴보았다. 철도차량용 건인전동기는 일반산업용과는 달리 고도의 신뢰성을 요구하는 특징이 있어서 설계단계에서 고려해야할 사항이 많다. 건인전동기의 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 건인전동기의 제작사항, 시험법, 소재선택 등 면밀한 검토를 통하여 신뢰성을 확보하는 과정이 필수적이라고 하겠다. 현재, 국내에는 건인용 유도전동기 독자 개발의 초기단계에 있으나 그동안의 제작경험과 설계경험을 토대로 신뢰성을 확보해 나가면 가까운 시일내에 개발선진국과의 격차를 줄여나가라라고 확신한다.

참고문헌

[1] G7 고속전철 건인전동기 개발, 연차보고서, 통상산업부, 1997

[2] 배동진, "철도차량용 AC건인전동기의 구조와 요소기술", pp.56-68, 전기공업, 1998.4월호