

Global Report

철도용 견인전동기 설계의 양상에 관한 고찰

1. 개요
2. 철도분야에서의 다양한 애플리케이션
3. 전자계 설계
4. 열 및 냉각 설계
5. 절연 시스템 설계
6. 결론

1. 개요

전기적인 견인은 다른 제안된 솔루션(예: 고전적인 증기 추진시스템 및 디젤 전기 엔진)과 비교하여 철도에 가장 효율적인 추진시스템으로 간주된다[1]. 지난 세기 동안 견인 시스템용 전기 구동력[2-3]이 발달하면서 추진시스템 전기화는 여러 철도 사업자들 사이에서 지배적인 해결책이 되었다[4-6]. 경쟁적인 철도 시장에서, 더 높은 성능과 더 낮은 가격의 솔루션에 대한 수요는 높은 체적 대비 토크의 비율을 가진 컴팩트한 구동체계의 개발을 유도하였다. 지난 세기 초 철도 추진시스템의 견인은 직류(dc)와 단상 정류자 전동기였으며, 주로 정지 상태에서 큰 토크 과부하를 발생시킬 수 있는 역량과 단순한 제어에 기인하였다. 수년 동안 소형화가 진전되고 신뢰성이 현저하게 개선되었음에도 불구하고[7-8], 직류 전동기에 대한 시장 지배력은 이제 끝났다고 볼 수 있다. 서로 다른 환경 조건에서 브러시와 정류자의 최소 마모를 통해 최대 속도와 부하 범위에서 스파크 프리 정류를 달성하기 위한 근본적인 어려움은 지난 수십 년 동안 직류 전동기의 개발을 거의 중단시킬 수 있는 이유가 되었다.

따라서 이 글의 요점은 교류 견인전동기에 맞춰진다. 유도전동기는 오늘날 다양한 철도 애플리케이션에서 가장 많이 사용되는 견인전동기다. 유도전동기는 기계적으로 튼튼하고 높은 과부하 능력을 가지고 있다. 또한, 두 개 또는 네 개의 전동기가 한 개의 컨버터에 병렬로 연결되어 있는 다중 드라이브에서 사용할 수 있는 저렴한 비용과 가능성은 열차 설계자와 운영자의 첫 번째 선택된 이유 중 하나이다[9]. 동기전동기 같은 경우[10] 여자(excitation)를 위해 대부분 영구자석(PM)을 사용한다. 영구자석 동기전동기는 영구자석에 의해 생기는 토크의 크기와 회전자 돌극비에 의한 릴럭턴스에 따라 영구자석 보조 동기 릴럭턴스 전동기(PMaSRM)라고 불리는 전동기도 존재한다. PM 기반 전동기는 높은 수준의 효율을 제공하지만, 회전자 설계는 기계적인 측면과 전자기적인 측면 모두 고려해야 한다. 더욱이, 지난 몇 년 동안 동기 릴럭턴스 전동기[16-19]를 철도의 대안적 해결책으로 도입하려는 시도가 있었지만, 지금까지 이렇다 할 성과는 보고되지 않았다. 이는 주로 철도 산업이 신기술에 적응하는 데 있어서 보수적인 것으로 여겨지는 사실뿐만 아니라 이 전동기 구조(topology)의 성능 제약에 기인한다. 철도에서 요구되는 높은 출력밀도 및 토크밀도는 적절하고 효율적인 냉각 방법을 선택할 필요가 있다. 강제 냉각은 견인전동기에 일정한 깨끗한 냉각을 공급하기 위해서 바람직하다. 이 냉각방식은 전동기의 동작이나 환경 조건에 대한 영향을 받기 어려워진다. 그러나 외부 팬과 덕트를 위한 여분의 공간이 필요하게 된다. 자연 냉각방식 견인전동기에서는 샤프트에 설치된 팬이 필요한 냉각을 제공하여 덕트나 (지붕에 설치된) 외부 팬이 불필요해진다. 자연 냉각방식은 비용 대비 효과가 높은 냉각 솔루션으로 많이 생각되고 있다. 단 오염된 환경 하에서 가동되는 메트로 및 저상 경전철에서는 전폐형 구조의 강제 냉각방식이 바람직한 해결책이라고 여겨진다. 이 냉각 구성을 통해 냉각 덕트가 차단될 위험이 줄어든다.

권선 구조에서 사용되는 절연 시스템의 최고 허용 온도는 통상 견인전동기 치수를 결정할 때의 주요 제약이다. 절연시스템에서의 온도저하를 목적으로 한 견인전동기의 설계개선은 설계자가 보다 높은 레벨의 토크밀도로 보다 컴팩트한 전동기를 제공하는 것을 도울 수 있다. 이는 더 작은 크기의 전동기를 사용하거나 더 적은 수의 구동차 축과 컨버터를 전원으로 사용함으로써 열차 수준에서 필요한 성능을 달성할 수 있음을 의미한다. 이는 경쟁이 심한 철도시장에 있어 비용의 관점에서 유리하다. 그 결과 고정자 권선의 제작(potting) 및 열전도도가 높은 절연재료의 사용에 관한 개발은 [21-24]에서 설명하듯이 컴팩트하고, 수익이 높은 제품을 제공하기 위한 중요한 단계라고 생각할 수 있다. 최근, 철도 응용에도 서서히 도입되어 온 반도체 기술의 현저한 진전이 보고되고 있다[25]. 그러나 절연 시스템의 개발에 있어서의 진전은 훨씬 늦다. 절연 시스템 개발에 의해, 기술개발의 불균형이 생겨 반도체의 신기술을 활용하는 것이 과제가 될 가능성이 있다. 잠재적인 문제로서 컨버터에서의 스위칭 주파수가 증가함에 따라 견인전동기에서의 고조파 손실이 대폭 감소한다. 단, 전압 상승 시간의 단축에 대처하기 위하여 보다 굵은 턴-턴 절연을 사용하게 될 경우 슬롯의 점적율이 감소함에 따라 컨버터에 의해 발생 보다 짧은 시간동안 고조파 손실은 권선에서의 보다 높은 구리 손실로 상쇄된다. 이에 따라 향후 수년[30-31] 사이에 새로운 컨버터 기술의 절연시스템 개발을 위한 노력이 기대된다.

2. 철도분야에서의 다양한 애플리케이션

기관차, High Speed Train (HST; 고속열차), Electric Multiple Unit (EMU; 전기식 다중 유닛), 메트로, 경전철 등 견인전동기의 요구 성능은 용도에 따라 다르다. 따라서 용도에 따라 적절한 전동기 사이즈, 전자계 설계 및 냉각 시스템을 선택해야 한다. 기관차는 높은 수준의 동력이 필요한 가속 상태인 경우와 잔류 가속도를 유지할 필요가 있는 경우가 가장 중요한 상황으로 간주된다. 이것에 의해 높은 토크와 출력을 가진 전동기가 필요하게 된다. 고속열차는 기관차에 이어 가장 요구가 까다로운 애플리케이션이다. 따라서 시속 200~400km 범위에서 추진시스템은 전동기의 최고속도 허용 범위인 5000~6000rpm으로 유지하기 위해 낮은 기어비 치수의 기어박스를 갖추어야 한다. 따라서 성능 요건을 충족하기 위해 견인전동기로 높은 수준의 토크를 부여해야 한다. EMU는 중간 수준의 전력 범위에 있으며, 메트로나 경전철용으로 설계된 견인전동기는 EMU에 비해 낮은 수준의 전력을 공급해야 한다. 이는 EMU에 비해 메트로나 경전철의 상대적 중량이 낮은 것이 주요 이유이다. 다음 그림에 철도 용도가 다른 전동기 성능의 전형적인 비교를 나타내었다.

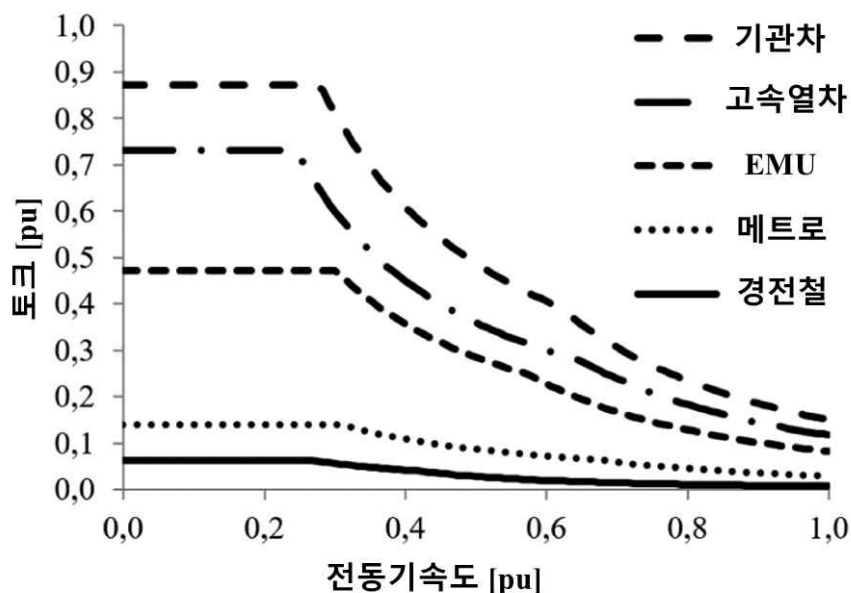


그림 1. 철도 애플리케이션에 따른 견인전동기 성능 비교

3. 전자계 설계

이 항에서는 다양한 유도전동기 구조(topology)에 대해 설명한다. 게다가 철도 시장에 한층 더 공헌할 가능성이 있는 구조형태로서의 PMSRM에 대해 논하여 릴럭턴스 동기전동기와 비교한다.

3.1 유도전동기

유도전동기는 심플한 디자인에 저비용으로 높은 기술을 가진 알루미늄 바나 구리 바가 적용된 회전자로 과거 40년 가까이 철도 추진에서 견인전동기로 우세했던 알루미늄 또는 구리의 선택은 용도에서 냉각 타입 및 퍼포먼스 요건까지 몇 가지 파라미터에 근거하고 있다. 경전철의 예로는 도심이나 교외의 교통 기관으로 사용되는 트램이 있다. 시가지의 노면 전차는 일반적으로 견인전동기가 대량의 먼지와 먼지를 받기 쉬운 저상식이다. 이러한 저상식은 전폐 또는 반폐 전동기가 바람직하다. 또한, 전동기 설계는 전폐형 전동기에서의 회전자 냉각이 어려울 수 있으며, 나아가서는 구리 바가 적용된 회전자는, 회전자에서 생기는 저항 손실이 알루미늄 바가 적용된 회전자보다 꽤 낮다고 생각할 수 있다. 그러나 교외 트램용으로 설계된 견인전동기는 오염의 영향을 받기 어렵고, 그로 인해 회전자와 고정자 부분에 제공되는 능동적인 냉각에 의해 종종 자연 냉각이 이루어진다. 회전자 냉각 향상에 의해 저손실 구리 바

가 적용된 회전자를 알루미늄 바가 적용된 회전자로 교체할 수 있게 되고, 그 결과 제조비용이 대폭 삭감될 수 있다. 컨버터에 의해 공급되는 2개 또는 4개의 전동기를 갖춘 드라이브는 일반적이며, 컨버터 비용을 줄이기 위해 메트로에서 사용되는 추진시스템의 표준적인 해결책이라 생각되고 있다. 여러 개의 전동기를 하나의 컨버터에 병렬로 접속하는 경우의 문제 중 하나는 병렬 전동기로 인한 차륜 크기 차이로 인한 전동기 간 부하 분산이다. 바퀴의 종류 및 경로 특성에 따라 바퀴 간 차이가 0.4%~1.0%포인트가 될 것으로 예상된다. 높은 수준의 회전자 저항으로 설계된 전동기는 병렬로 연결되었을 때 휠 직경 차이에 덜 의존한다. 따라서 알루미늄 바가 적용된 회전자는 메트로에 사용되는 추진시스템에 적합한 회전자 구조로 간주된다. EMU에서는 병렬 전동기의 수가 2개가 되는 경우가 많고, 휠 직경의 차이에 의한 영향은 그다지 명확하지 않다. 최근 에너지 효율이 높은 견인전동기에 투자하는 경향이 강해지고 있다. 구리 바가 적용된 회전자에 대한 추가 투자는 EMU 참여를 위한 37년 내에 에너지 절약을 통해 상쇄될 것으로 예상된다. 물론 이것은 열차의 운행 프로파일과 시스템 아키텍처에 따라 각기 달라진다. 상기 에너지절약은 연해부가 많은 운행프로파일에 비해 보다 높은 속도로 운행하는 노선에서 더욱 두드러진다. 정차거리가 긴 고속열차(시속 200km 이상)에서는 구리 바가 적용된 회전자 타입 유도 전동기가 선호되는 이유다.

3.2 영구자석 전동기

유도전동기와 비교한 PM 전동기의 흥미로운 특징으로, 예를 들면 높은 토크 밀도, 효율성, 약자속 능력 등에 의해, 21세기 초 수 십 년 동안 철도 사업자와 건설업자들은 PM 기술을 철도산업에 적용시키도록 요구하는 경향이 강해졌다[34-36]. 특히 EMU와 고속열차는 이것에 수반해, 2005년부터 2015년에 걸쳐 PM 전동기를 이용한 열차의 수가 현저하게 증가하고 있다. 그러나 최근, PM 기기의 시장은 축소하고 있다. PM 전동기의 주된 비용 요인인 영구자석 가격의 예측이 불투명한 것이 주된 이유의 하나다. 희토류 네오디뮴 자석은 고성능으로 온도 의존성이 비교적 낮기 때문에 열차 용도의 주된 후보라고 생각되고 있다. 장애 시 PM 전동기의 안전성 문제는 이 위험을 줄이기 위해 예를 들어, 브레이크 등의 컴포넌트를 추가하기 때문에 추진시스템의 또 다른 비용 발생 요인으로 작용한다. 또, PM 전동기는 다른 동기전동기와 같이, 병렬 구동에서는 제어할 수 없다. 이는 일반적으로 견인전동기가 병렬로 컨버터에 연결되어 직경이 다른 휠을 구동하기 때문에 속도가 각각 다르기 때문이다. 이는 유도전동기에 의해 처리될 수 있지만, 변환기와 동일한 주파수로 작동하는 영구자석 동기전동기는 이렇게 동작할 수 없다. 따라서 견인전동기 당 하나의 컨버터가 필요하다. 이는 컨버터 유닛의 비용을 증가시킨다. 그러나 고속열차에서는 저속 및 고속 모두에서 필요한 높은 수준의 성능 때문에 PM 전동기에 대한 수요가 여전히 존재한다.

3.3 릴럭턴스 동기전동기

과거 20년간의 릴럭턴스 동기전동기의 개발과 병행해 다른 산업분야와 마찬가지로 철도에서도 이 전동기의 구조[37-38]를 채용하려고 시도되어 왔지만, 릴럭턴스 동기전동기에 근거하는 추진시스템을 갖춘 열차는 아직 운행하고 있지 않다. 여기서 지적되는 주된 이유는 컨버터로부터의 고레벨 전류가 필요한 저역률과 이 전동기 구조에 의해 제공되는 저토크 밀도이다. 또, 철도 용도에 필요한 정전력 속도 범주를 생성하기 위해서 높은 돌극비가 필요한 경우 회전자 구조의 기계적 강도에 대한 염려가 제한 요인으로서 고려된다. 또, 이 전동기의 강한 비선형성으로 인해 토크 및 약자속 능력 측면에서 최고의 성능을 얻기 위해서는 복잡한 제어법이 필요하다.

3.4 다른 전동기 구조의 비교

표 1에서 구조가 다른 전동기 간의 비교를 나타낸다. 이처럼 알루미늄 바가 적용된 회전자의 경우 91%~92%, 구리 바가 적용된 회전자의 경우 91%의 효율을 가진 유도전동기에 비해 효율이 94~96%인 PM 전동기가 더 높다. 이 인수는 토크밀도, 약자속 기능, 역률 등의 기타 파라미터에 적용된다. 그러나 안전성, 비용, 신뢰성의 파라미터에 의해 유도전동기는 철도 업계에서는 여전히 선두에 서 있다.

표 1. 서로 다른 회전자 설계를 가진 철도 견인전동기 간의 비교

전동기 종류	유도전동기 (구리 바)	유도전동기 (알루미늄 바)	영구자석 전동기	릴렉턴스 전동기	보조 영구자석 릴렉턴스 전동기
효율	4	2	10	6	8
토크밀도	6	4	10	4	8
약자속 능력	6	6	10	4	8
역률	6	6	10	2	8
병렬 제어	8	10	2	2	2
비용	6	8	2	10	4
신뢰성	10	10	8	10	8
안전성	10	10	4	10	6

3.5 전자계 설계의 동향

유도전동기는 저비용, 높은 기술 및 신뢰성을 고려하면 적어도 향후 10년간은 전동기 구조의 주류일 것이다. 그러나 비용을 더욱 절감하려는 노력이 진행될 것이고, 전동기를 좀 더 소형화하기 위한 시도가 계속 될 것이다. 비용절감에 주력하는 부분은 주로 구리 바를 적용한 회전자 구조로, 주조 프레임리스 설계가 해결책으로서 선전되고 있지만, 비용절감을 목적으로 한 생산의 최적화에는 더욱 노력이 필요하다. PM 전동기에 대해서는 필요 성능과 최근 이 기술에 대한 영업 전략에 따라, 고가의 희토류 자석을 대량으로 필요로 하는 V자형 IPM(Interior Permanent Magnet)을 사용하게 되었다. 영구자석 비용과 지속적인 변동을 고려할 때 견인전동기 설계자는 이전보다 저항 토크가 더 많이 기여하는 PMaSRM으로 이동함으로써 자석의 양을 줄이려고 노력하는 것으로 보인다. 또한 희토류가 아닌 자석을 가진 전동기를 볼 수 있다[40-41]. 예를 들어 페라이트(ferrite)와 같은 미래에는 볼 수 있지만, 이 경우 PM 전동기의 완전한 재설계가 필요하므로 몇 년이 걸릴 수 있다. Silicon Carbide 기술[25-31]과 같은 전력 변환의 새로운 기술은 레일 적용 시 견인전동기 설계에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 종류의 기술은 더 높은 수준의 스위칭 주파수와 더 적은 냉각 필요성으로 더 높은 수준의 전류를 제공할 수 있다. 이는 기본 및 시간 고조파 손실을 포함한 총 전동기 손실 감소의 설계 최적화 원칙이 제공된 높은 스위칭 주파수로 인해 시간에 따른 고조파 손실이 이미 낮기 때문에 단지 기본 손실의 감소로 변경된다는 것을 의미한다. 이로 인해 회전자와 고정자 모두에서 견인전동기의 전기적인 설계에 상당한 변화가 발생할 수 있다. 또한 낮은 비용으로 높은 수준의 전류를 제공하면 고정자 권선 구성이 달라져 고속에서 더 높은 토크가 가능하다.

4. 열 및 냉각 설계

견인전동기의 냉각시스템 설계는 듀티 사이클에서의 손실 분포에 기초하고 있다. 냉각 설계의 목적은 베어링, 권선, PM 등 중요한 전동기 부분의 온도를 제한하는 것이다. 철도차량 제작 업체에 의해 요구되는 공간 제약 때문에 기계적인 인터페이스도 고려해야 한다. 일반적으로 냉각 시스템은 중요한 전동기 부품이 충분히 열을 방출할 수 있도록 해야 한다. 따라서 용도에 적합한 냉각 방법의 선택은 전동기가 의도하는 역할과 관련된 냉각 방법의 특정 특성에 의존한다.

4.1 외기에 의한 강제 공기 냉각방식

표 2와 같이 EMU용 견인전동기, 기관차, 고속열차용 견인전동기는 일반적으로 프레임 방식 및 프레임리스 방식 모두 강제 냉각방식을 채택하고 있다[42]. 강제 냉각방식 전동기에서는 외부 팬에 의해 설계된 덕트 시스템을 통해 냉각풍이 공급된다. 강제 냉각을 사용하는 이유는 전동기의 동작 포인트에 관계없이 적절한 냉각을 제공함으로써 높은 토크와 출력 수준에 도달할 수 있도록 한다. EMU에서 비용 대비 효과가 높은 해결책은 일반적으로 전동기의 토크 밀도를 증가시킴에 따른 구동 차축의 수 감소에 의존한다. 통상 토크 밀도가 높을수록 권선의 손실이 커져 그것이 연속적이고 보다 견고한 외부 냉각의

필요성을 높여 냉각이 전동기 속도에 의존하는 자연 냉각방식 전동기의 적용성을 제한한다. 고속열차의 속도 범위는 200 ~ 350 kmh 이다. 예를 들어 바퀴지름을 840~920mm라고 가정하고, 회전자의 회전수를 6500rpm 이하로 하면 기어비는 2.6~4.5의 범위가 된다. 이러한 기어 비율로 인해 소정의 견인력을 얻기 위해서는 토크 레벨이 높아지기 때문에 연속적인 외부 냉각이 필요하다. 자연 냉각 전동기의 팬에서 발생하는 이음은 2000rpm 초과 속도 범위에서 발생한다. 강제 냉각방식의 전동기인 경우 이는 문제가 되지 않는다. 그림 2에 기관차 용도의 프레임리스 강제 냉각방식의 전동기를 나타낸다.

표 2. 철도용 견인전동기와 냉각 시스템 비교

냉각방식	외기에 의한 강제 냉각	외기에 의한 자연 냉각	전폐형 자연 냉각
애플리케이션	고속열차, 기관차, EMU	메트로, 경전철	EMU, 경전철
토크밀도	8	6	4~6
최대 속도	10	6	6
냉각 효율	8	6	4~6
공기 분사 소음	8	4	6
공간	4	8	8
직접비	6	8	8
생애 주기 비용	8	4	6



그림 2. 기관차 용도를 위해 설계 및 제조된 프레임리스 강제 냉각방식 견인전동기

4.2 외기에 의한 자연 공기 냉각방식

표 2와 같이 자연 냉각방식 견인전동기[43]와 [44]의 가장 일반적인 용도는 메트로와 경전철이다. 이 냉각 방식에서는 레이디얼 샤프트 마운트 팬을 사용한다. 이 냉각 구조에서는 팬의 설계에 따라 체적 용량이 제한되어 전동기 전체의 압력이 저하된다. 저속(1000rpm 미만)에서 냉각 능력이 저하되고, 고속(4000rpm 초과)에서 소음 수준이 높아지는 단점이 있지만, 외기에 의한 자연 냉각방식이 일반적인 냉각방식이다. 일반적인 지하철의 최고 속도는 80~160kmh로 역 사이의 단시간 통과를 위해서는 정지 상태에서 고속화해야 한다. 따라서 메트로에서 사용하는 견인전동기는 크기, 중량 및 사운드 파워 레벨을 허용 범위 내로 유지하면서 필요한 피크 토크를 공급할 수 있어야 한다. 따라서 냉각회로의 적정한 사이징이 필수적이다. 그림 3에는 메트로 및 고상 LRV용 개방형 자연 냉각방식 전동기가 제시되어 있다. 적절한 기어비를 선택하기 위해서는 전동기의 크기와 중량이 제한적이다. 기어비가 높을수록 전동기 평균 속도가 상승하고, 전동기 냉각 능력이 향상된다. 여기서의 제한 요인은 전동기의 최고 속도이며 전동기 회전 부품에 가해지는 기계적 스트레스의 레벨뿐만 아니라 노이즈 레벨(흡수기의 추가 없이)을 제어하기 위해 허용 범위 내에 두어야 한다. 레이디얼 팬에 대해서는 팬 외경 D의 축소가 바람직하다. 단, 저평균속도일 경우 유량이~D³에서 감소하는데 반해 노이즈 기여가~logD에서 감소하므로 방열영향

을 신중히 고려해야 한다.



그림 3. 메트로 및 경전철 애플리케이션으로 설계된 외기에 의한 자연 냉각방식 전동기

4.3 전폐형 공기 자연 냉각방식

외기에 의한 자연 냉각방식 전동기와는 달리 전폐형 전동기 내의 냉각은 서로 분리된 외부 공기 영역과 내부 공기 영역으로 분할된다. 외부 영역에서는, 레이디얼 샤프트 마운트 팬이 고정자 적층체 [45-46] 내의 덕트를 통해 주위의 공기를 펌프 하기 위해서 자주 사용된다. 내부에서는 회전자 단락링에 설치된 웨이퍼의 환기 작용에 의존하거나 샤프트 마운트 팬을 사용하여 고정자 단부 권선 주위를 공기가 순환한다. 가능한 설정은 다수 있다. 통상, 1개 또는 2개의 팬이 외부환기에 사용되고, 내부냉각에는 1개 또는 2개의 팬이 사용된다. 냉각효율 면에서 전폐형 자연 냉각방식 전동기는 외기에 의한 자연 냉각방식 전동기와 동등하지만, 회전자와 베어링에서는 보다 높은 온도레벨이 기대된다. 설계자가 이러한 냉각방식을 사용하는 이유는 두 가지가 있다. 첫째, 환경 조건이다. 예를 들어 저상이 바람직한 도심 노면전차에서는 대차 밑에서 냉기를 공급해 운전 중 전동기가 다량의 먼지와 기타 입자에 노출된다. 두 번째로, 회전자 구조는, 예를 들면 PM 전동기에서 자속 입자가 금속 부품에 접촉하지 않는 것이 지극히 중요하고, 그렇지 않을 경우 회전자의 고장으로 연결될 가능성이 있다. 그림 4에 저상 경전철용 전폐형 자연 냉각방식 전동기가 제시되어 있다.



그림 4. 경전철 애플리케이션을 위해 설계된 전폐형 자연 냉각방식 전동기

4.4 냉각방식의 비교

표 2에서는 철도 용도로 사용되는 다양한 냉각방식을 비교하였다. 제시된 바와 같이 고준위 토크 밀도 및 또는 고준위 속도가 필요한 고성능 어플리케이션에서는 일정한 냉각과 저준위 소음에 의한 강제 냉각방식을 권장한다. 또, 이 냉각 방법에 대해 열차 지붕으로부터 청정한 공기를 공급함으로써, 견인전동기나 필터의 유지보수가 불필요해져, 생애주기 비용을 저감할 수 있다. 하지만 팬과 강제 냉각방식 전동기 간의 덕트와 외부 팬이 필요하기 때문에, 초기 비용이 낮고 필요한 공간이 적기 때문에 자연 냉각

방식이 선호된다.

4.5 냉각 시스템 개발 동향

자연 냉각방식 전동기의 비용 이점을 고려하면 EMU나 고속철도에 이 냉각 구성을 사용해야 한다. 다만, 앞에서 서술한 최대 속도 및 노이즈 레벨에 대한 기계적인 제약이 이 냉각 구조를 보다 광범위하게 적용하기 위한 제한 요인이 되고 있다. 현재 진행 중인 고강도 견인전동기의 신 합금의 개발과 병행해, 가까운 시일 내에 가동이 개시될 전망이다. 게다가 저 노이즈의 팬 설계는, 지금까지 대부분의 애플리케이션에서 사용되고 있던 표준적인 솔루션을 대체할 것이다. 보다 컴팩트한 디자인이나 냉각 디자인의 자유도가 높아지는 경향은, 향후 수십 년 간 철도 추진시스템에 대한 프레임리스 디자인의 공유를 높일 가능성이 있다. 단, 새로운 규격에서 제안된 제한사항 및 전자기적 적합성 요건에 대한 준거요구로 인해 이 전동기구조의 이점이 크게 감소할 가능성이 있다. 용접 이음매 등 기계 설계의 과부하 시 어려움도 대처해야 할 과제이다. 전동기 핫스팟에서의 열전달을 향상시켜 결과적으로 온도를 저하시키는 것을 목적으로 고열전도성 재료를 견인 용도로 사용할 경우 다른 개발 영역을 주목할 필요도 있다[21-24].

5. 절연 시스템 설계

열차 운전 상태를 나타내는 듀티 사이클에 걸친 열 시뮬레이션을 통해 전동기 온도를 정확하게 예측할 수 있다. 열의 관점에서 보면, 전동기의 중요한 컴포넌트 중 하나는 절연 시스템에 사용되는 재료이다. 철도용으로 설계된 견인전동기에서 다른 재료, 예를 들면 마이카 게 테이프와 함께 다른 함침수지를 채용한다. 폴리머의 종류에 따라 각 수지는 열의 종류, 제조 시의 특성, 비용 등이 다른 기술적 성능에 대하여 장단점을 가진다. 견인 용도로 이용되는 에폭시 게 함침재료 [47-48]은 전형적으로는 열 클래스 180(H)이며, 실리콘 게 수지는 열 클래스 200(C)이다.

5.1 철도 견인에 있어서 절연계의 열 분류

표준 전기기기의 절연 시스템 열 클래스는 허용되는 최고 절대온도를 나타낸다. 예를 들면 열 클래스 H의 전기기기는 기대수명인 20000h를 단축시키지 않으면서 180℃의 권선(절연) 온도에서 동작할 수 있다. 단, 레일 규격 IEC 60349-2 [49]에서는 클래스 H 절연 시스템을 최고 180의 온도 상승으로 작동시킬 수 있다. 즉 절대온도는 220~225℃가 된다. 절연 시스템의 열 클래스는 IEEE 1776 [50] 또는 IEC 60034-18-31 [51] 규격에 따라서 테스트 방법에 따라 결정된다.

5.2 수지에 따른 비교 연구

철도 용도에 사용되는 함침 및 포팅 재료로는 에폭시, 실리콘, 우레탄 폴리머가 가장 일반적이다. 폴리우레탄은 보통 열 클래스가 낮으며(일반적으로는 약 130℃ 미만), 유연성과 내약품성과 내습성이 요구되는 용도로 사용된다. 이 폴리머는 대부분의 기판에 양호한 밀착성을 보이며 Tg(유리가 온도)가 낮아 저온에서도 유연성을 유지한다. 우레탄과 마찬가지로 실리콘도 저 Tg 재료이지만 200℃를 넘는 고온수준에서의 열 안정성이 우수하다. 이 재료의 Tg는 보통 0℃를 훨씬 밑돈다. 즉, 광범위한 온도에 걸쳐 유연성이 있고 열 사이클이나 열 충격 사이의 내 균열성이 중요한 경우에 유용하다. 또한 탄성중합체 재료로서 진동을 감쇄시킨다. 그러나 저 Tg 실리콘은 100ppm/℃ 이상의 범위에서 높은 열팽창을 고려해야 한다. 실리콘은 어느 정도 내습성이 있지만 우레탄에 비해 특히 연료, 용제, 투과액 등의 유기화합물질에 노출되면 저항력이 저하된다. 더욱이 실리콘은 접착 강도가 낮다. 수지를 potting 재료로 사용하는 경우 이 파라미터는 중요하게 간주된다. 에폭시 재료인 Tg는 사용하는 식에 따라 20℃ 미만에서 200℃ 이상까지 폭넓게 변화한다. Tg 이하에서는 에폭시는 강성을 가지며, 열 팽창계수는 35ppm/℃ 미만이며, 보다 높은 충전제 함유량[52-53]을 사용하면 더욱 낮다. 기계적 스트레스 및 함침·포팅 본체의 균열 위험을 최소화하기 위해 절연 동작 온도보다 높은 Tg 및 전동기 구조에 사용되는 재료는 강철(고정자), 구리(도체), 알루미늄(하우징)과 같은 열팽창 계수를 가진 에폭시계 재료를 선택할 것을 권장하는

데, 이들의 열 팽창 계수는 통상 10~25ppm/°C의 범위이다. 에폭시는 또한 대부분의 기판에 대해 높은 수준의 밀착성을 가지며 견고한 재료이므로 포팅과 함침 양쪽의 용도로 사용할 수 있다. 상기의 다른 수지의 비교를 표 3에 나타낸다. 상이한 레일 용도로 사용되는 절연 시스템은 대부분이 C 클래스이며, 경우에 따라서는 H 클래스이기 때문에 고온 지역의 함침 재료의 필요성이 높아진다. 이에 따라 레일 부분에 우레탄의 사용은 매우 제한된다. 가장 많이 사용하는 수지는 실리콘이지만, 에폭시 계 수지는 화학 물질이나 기계적 스트레스를 받을 경우의 품질을 고려하면 보다 견고한 선택지가 된다.

표 3. 상대 수지 재료 성능 요약

	실리콘	에폭시	우레탄
온도 범위	9	7	5
전기적 절연	9	9	7
강성	5	9	5
접착력	5	9	7
처리	7	9	5
화학적 저항성	5	9	7
습기 차단성	7	7	9

5.3 H클래스 에폭시 계 Random 권선

이 권선 구조는 비용 대비 효과가 높을 것으로 보이는 피복 환선을 사용했다. 고정자 슬롯 내의 와이어의 위치가 랜덤하기 때문에 첫 턴의 와이어가 마지막 와이어 근처에 배치될 가능성도 있다. 이로 인해 도체 간의 전압차가 커질 수 있다. 이 권선구성에서 사용하는 절연부품의 특성은 1kV미만의 전압레벨에 대해 랜덤권선의 적용을 제한하는 고전압 인가에는 적합하지 않다. 그러나 말단의 선 길이가 짧을수록 견인전동기 능동부를 위해 보다 많은 공간이 확보되므로 보다 콤팩트한 설계가 가능해진다. 이 권선구성의 또 다른 이점은 회전수를 자유롭게 선택할 수 있다는 것으로 최적의 설계를 얻는데 도움이 된다. 랜덤 권선의 절연 설계에서는 슬롯 라이너가 코일-그랜드 절연체로서 기능한다. 에폭시 계 수지는 통상, 트리클 함침을 이용해 권선에 도포한다. 견고한 함침재를 사용하여 권선을 완전히 덮음으로써 코일을 습기나 오염으로부터 확실히 보호한다. 그러나 이는 각 턴이 충분히 냉각되지 않아 벌크 말단(end) 권선체에 핫스팟을 축적할 수 있기 때문에 권선단부의 냉각에 영향을 준다. 랜덤 권회코일에는 진공압 함침(VPI) 및 침지를 사용할 수도 있다. 단, 품질 및 철도 견인전동기 절연 시스템은 열적, 기계적 및 전기적으로 심한 스트레스를 받으므로 견인 용도로는 디핑을 권장하지 않는다.

5.4 C 클래스 실리콘 계 형권

형권의 권선 시스템에서 사용되는 직사각형의 구리 도체는 일반적으로 폴리이미드 필름으로 덮여 있다. 도체는 소정의 형상으로 배치되어 있으므로 턴 간의 전압차는 양호하게 제어된다. 또한 이 권선 구성에 사용되는 유효한 턴 절연재로 턴 단락이나 권선손상의 리스크를 저감할 수 있다. 코일은 통상 운모계 절연체로 피복되고 고정자 슬롯 안에 배치된다. 이런 종류의 권선구조에는 절연부품 및 동체간의 영역이 충분히 충족되는지 확인하기 위한 VPI 프로세스가 권장된다. 절연 시스템의 각 요소에 프로세스와 함께 사용되는 재료에 따라 이 시스템은 높은 수준의 온도를 얻을 수 있다. 이 절연 시스템은 철도 용도에서의 240~250°C의 취급 온도로 분류된다. 주로 실리콘 계 함침재로 200의 열 클래스를 실현했다. 최근 열 계급이 높은 절연 시스템이 보고된 예를 들면[38], 이 테마에 관한 가일층의 진전이 향후 몇 년간 기대된다. 그러나 이러한 노력은 견인전동기의 설계에 있어서 보다 높은 단열 클래스를 효과적으로 이용하기 위해서 베어링 등의 열적 관점에서 다른 전동기 부품의 온도 레벨을 올리는 것과 조합해야 한다.

5.5 절연 시스템 개발 동향

GTO와 IGBT에 의한 PWM 변환기 적용 초기에는 견인전동기 권선에 보이는 전압레벨과 펄스수에 의해 조기고장이 발생했다. 고장은 기본적으로 권선 절연 시스템의 부분방전의 영향에 의한 것으로, 절연 부품은 시간적으로 열화한다. 이 문제는 절연 소자의 대폭적인 변경으로 해결되었다. 그러나 최근 보고된 파워 반도체의 SiC와 같은 발전으로 스위칭 주파수가 높아져 손실이 적고 일어나는 시간이 짧아질 것으로 예상되고 있다. 이러한 종류의 전압 패턴은 도체 절연 파괴를 일으킬 수 있다. 이들 영향을 특징짓는 동시에 절연시스템의 개선으로 해소하는 것을 목적으로 연구가 실시되었다. 앞서 설명한 바와 같이 새로운 컨버터 기술로 인해 절연 시스템에 대한 스트레스가 증대되고 있다. 열차 추진시스템의 고장을 초래하는 절연 컴포넌트의 바람직하지 않은 붕괴를 피하기 위해 열차운전 중 절연시스템의 온라인감시가 권장되고, 기타 다른 방법이 보고된다[54-57]. 필요한 여분의 부품의 기술성숙도와 비용을 고려하면 제안된 감시방법의 실용적인 실시를 가능함을 위한 가일층의 노력이 필요하나, 이들 시도는 향후 수년간 지속될 것으로 예상된다. 높은 열전도성과 허용되는 절연특성을 가진 포팅재료를 적용함으로써 권취온도를 대폭 저하시켜 견인전동기의 출력밀도를 향상시킬 가능성이 제시되었다. 끝부분 와인딩 포팅 [21]은 냉각이 위치한 하우징에 전동기 핫스팟을 열적으로 접촉한다. 이를 통해 비포트형 전동기 [21-24]와 비교하여 소정의 출력으로 권선온도가 최대 50°C 저하되고, 소정의 온도에서 전력출력이 15~25% 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 글로벌 포팅은 프로세스가 하나의 재료로 하나의 단계에서 관리되는 비용 대비 효과가 높은 솔루션으로 보고된다. 단 철도, 전자 모빌리티, 해양 용도용으로 설계·생산된 견인전동기의 절연 클래스와 사이즈를 고려한 글로벌 포팅의 실전에 대해서는 재료의 선택과 생산방법에 관한 과제가 여전히 존재한다는 점에 유의한다.

6. 결론

철도시장에서 이용 가능한 현재의 견인전동기 구조에 대한 리뷰를 제시하였다. 서로 다른 설계 간의 비교는 각 구성의 장점과 단점을 강조하기 위한 목적으로 이루어졌다. 이 비교는, 철도 세그먼트(segment)내의 각 애플리케이션에 있어서의 요구에 의해 적절히 대응하기 위해서도 행해졌다. 마지막으로 견인전동기의 향후 수년 및 수십 년의 개발 트렌드는 서로 다른 설계 구조 및 절연 시스템에 대해 개별적으로 제시하였다. 전자파 및 냉각 시스템 설계에 있어서 미래의 발전은 적어도 전동기 성능을 개선 또는 유지하면서, 비용 삭감을 가능하게 하는 기술로 향할 것이다. 게다가 설계 이념은 변경되어 철도에 실장되어 있는 새로운 전로 기술과 한층 더 정합하게 되었다. 조만간 전자 모빌리티 부문에서 개발된 개발·생산 기술이 철도에 이전하는 것이 기대되고 있다. 물론 이것은 처음에 철도의 자전력 세그먼트, 예를 들어 경전철에 영향을 준다. 경전철에서는 전기버스와 같은 e모빌리티와 더 많은 성능요구가 관찰된다. 절연 측의 주된 과제는 높은 스위칭 주파수로 설계된 새로운 컨버터에 다시 준거하는 것이다. 높은 시간에 대한 전압의 변화는 도체 간 절연층에 높은 수준의 스트레스를 준다. 새로운 재료나 설계 규칙을 개발해야 한다.

참고문헌

- [1] M. J. Hapeman, J. Long, and D. L. Plette, "Diesel electric locomotive propulsion systems—A look into the future," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-22, no. 3, pp. 495–501, May 1986.
- [2] M. C. Duffy, *Electric Railways 1880–1990*, London, U.K.: The Institution of Engineering and Technology, 2003.
- [3] R. J. Kemp, "Developments in electric traction," *Power Eng. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 71–82, Mar. 1989.
- [4] M. C. Duffy, "Three-phase motor in railway traction," *IEEE Proc. A – Sci., Meas. Tech nol.*, vol. 139, no. 6, pp. 329–337, Nov. 1992.
- [5] A. Steimel, "Electric railway traction in Europe," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 2, no. 6, pp. 6–17, Nov./Dec. 1996.
- [6] A. Steimel, *Electric Traction – Motive Power and Energy Supply, Basics and Practical Experience*, Munich, Germany: Olden bourg Industrie verlag GmbH, 2003.
- [7] G. Lindholm, "60 års utveckling av traktions motorer för linjelok," *ASEA Tidning*, vol. 72, no. 4, pp. 55–64, 1980.
- [8] T. I. Nordin and L. B. A. Magnusson, "Advantages of thyristor locomotives and experience in Sweden," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-8, no. 3, pp. 316–328, May 1972.
- [9] S. Nategh, D. Lindberg, O. Aglen, R. Brammer, and A. Boglietti, "Review and trends in traction motor design: Electromagnetic and cooling system layouts," in *Proc. 13th Int. Conf. Elect. Mach.*, Alex and roupoli, Greece, 2018, pp. 2600–2606.
- [10] S. M. de Pancorbo, G. Ugalde, J. Poza, and A. Egea, "Comparative study between induction motor and synchronous reluctance motor for electrical railway traction applications," in *Proc. 5th Int. Elect. Drives Prod. Conf.*, Nuremberg, Germany, 2015, pp. 1–5.
- [11] D. Yu, X. Y. Huang, Y. T. Fang, and J. Zhang, "Design and comparison of interior permanent magnet synchronous traction motors for high speed railway applications," in *Proc. IEEE Workshop Elect. Mach. Des., Control Diagnosis*, Nottingham, U.K., 2017, pp. 58–62.
- [12] W. Wu, X. Zhu, L. Quan, Y. Du, Z. Xiang, and X. Zhu, "Design and analysis of a hybrid permanent magnet assisted synchronous reluctance motor considering magnetic saliency and PM usage," *IEEE Trans. Appl. Super cond.*, vol. 28, no. 3, pp. 1–6, Apr. 2018.
- [13] K. Yamazaki, S. Tamiya, K. Utsuno, K. Shima, T. Fukami, and M. Sato, "Rotor shape optimization for output maximization of permanent-magnet assisted synchronous machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 4, pp. 3077–3085, Jul./Aug. 2015.
- [14] R. Lohninger, H. Grabner, G. Weiden holzer, S. Silber, and W. Amrhein, "Modeling, simulation, and design of a permanent-magnet-assisted synchronous reluctance machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 196–203, Jan./Feb. 2015.
- [15] W. Zhao, F. Zhao, T. A. Lipo, and B. I. Kwon, "Optimal design of a novel V-type interior permanent magnet motor with assisted barriers for the improvement of torque characteristics," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, pp. 1–4, Nov. 2014.
- [16] R. R. Moghaddam and F. Gyllensten, "Novel high-performance SynRM design method: An easy approach for a complicated rotor topology," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 9, pp. 5058–5065, Sep. 2014.
- [17] R. R. Moghaddam, F. Magnussen, and C. Sadarangani, "Novel rotor design optimization of synchronous reluctance machine for high torque density," in *Proc. 6th IET Int. Conf. Power Electron., Mach. Drives*, Bristol, U.K., 2012, pp. 1–4.

- [18] R. R. Moghaddam, F. Magnussen, and C. Sadarangani, "Theoretical and experimental reevaluation of synchronous reluctance machine," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 1, pp. 6–13, Jan. 2010.
- [19] R. R. Moghaddam, F. Magnussen, and C. Sadarangani, "Novel rotor design optimization of synchronous reluctance machine for low torque ripple," in *Proc. 20th Int. Conf. Elect. Mach.*, Marseille, France, 2012, pp. 720–724.
- [20] S. Nategh, D. Barber, D. Lindberg, A. Boglietti, and O. Aglen, "Review and trends in traction motor design: Primary and secondary insulation systems," in *Proc. 13th Int. Conf. Elect. Mach.*, Alexandroupoli, Greece, 2018, pp. 2607–2612.
- [21] S. Nategh, D. Barber, A. Boglietti, D. Lindberg, O. Aglen, and R. Brammer, "A study on thermal effects of different potting strategies in traction motors," in *Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Syst. Aircraft, Railway, Ship Propulsion Road Veh.*, Nottingham, U.K., 2018, pp. 1–6.
- [22] S. Nategh, A. Krings, O. Wallmark, and M. Leksell, "Evaluation of impregnation materials for thermal management of liquid-cooled electric machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 11, pp. 5956–5965, Nov. 2014.
- [23] H. Li, K.W. Klontz, V. E. Ferrell, and D. Barber, "Thermal models and electrical machine performance improvement using encapsulation material," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 2, pp. 1063–1069, Mar./Apr. 2017.
- [24] S. Nategh, "Thermal analysis and management of high-performance electrical machines," Ph.D. dissertation, Dept. Energy Convers, KTH Royal Inst. Technol., Stockholm, Sweden, Jun. 2013.
- [25] J. Fabre, P. Ladoux, E. Solano, G. Gateau, and J. M. Blaqui re, "MVDC three-wire supply systems for electric railways: Design and test of a full SiC multilevel chopper," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 6, pp. 5820–5830, Nov./Dec. 2017.
- [26] A. Rujas, V. M. López, A. García-Bediaga, A. Berasategi, and T. Nieva, "Influence of SiC technology in a railway traction DC-DC converter design evolution," in *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, Cincinnati, OH, USA, 2017, pp. 931–938.
- [27] A. M rz, R. Horff, M. Helsper, and M. M. Bakran, "Requirements to change from IGBT to Full SiC modules in an on-board railway power supply," in *Proc. 17th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, Geneva, Switzerland, 2015, pp. 1–10.
- [28] M. Brenna, F. Foiadelli, D. Zaninelli, and D. Barlini, "Application prospective of Silicon Carbide (SiC) in railway vehicles," in *Proc. Annu. Conf. Res. Ind.: Need More Effective Technol. Transfer*, Trieste, Italy, 2014, pp. 1–6.
- [29] J. Casarin, P. Ladoux, B. Chauchat, D. Dedecius, and E. Laugt, "Evaluation of high voltage SiC diodes in a medium frequency AC/DC converter for railway traction," in *Proc. Int. Symp. Power Electron. Power Electron., Elect. Drives, Automat. Motion*, Sorrento, Italy, 2012, pp. 1182–1186.
- [30] T. Fuchslueger, H. Ertl, and M.A. Vogel sberger, "Reducing dv/dt of motor inverters by staggered-edge switching of multiple parallel SiC half-bridge cells," in *Proc. Int. Exhib. Conf. Power Electron., Intell. Motion, Renewable Energy Manage.*, Nuremberg, Germany, 2017, pp. 1–8.
- [31] C. Zoeller, M. A. Vogelsberger, T. M. Wolbank, and H. Ertl, "Impact of SiC semiconductors switching transition speed on insulation health state monitoring of traction machines," *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 15, pp. 2769–2775, Dec. 2016.

- [32] A. Setiyoso, H. Hindersyah, A. Purwadi, and A. Rizqiawan, "Design of traction motor 180kW type SCIM for KRL (EMU) Jabodetabek repowering project," in Proc. Int. Conf. Elect. Eng. Comput. Sci., Kuta, Indonesia, 2014, pp. 341–344.
- [33] M. Kondo, R. Ebizuka, and A. Yasunaga, "Rotor design for high efficiency induction motors for railway vehicle traction," in Proc. Int. Conf. Elect. Mach. Syst., Tokyo, Japan, 2009, pp. 1–4.
- [34] H. Zheng, C. Wei, D. Sun, Y. Ren, L. Zeng, and R. Pei, "Rotor design of permanent magnet synchronous reluctance motors in rail traffic vehicle," in Proc. 21st Int. Conf. Elect. Mach. Syst., Jeju, South Korea, 2018, pp. 2762– 2765.
- [35] H. Douglas, F. Schmid, C. Roberts, and S. Hillmansen, "Evaluation of permanent magnet motor energy saving technology for different types of railways," in Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Rail Transp., Birmingham, U.K., 2016, pp. 123–129.
- [36] S. Kreuawan, F. Gillon, F. Moussouni, S. Brisset, and P. Brochet, "Optimal design of traction motor in railway propulsion system," in Proc. Int. Aegean Conf. Elect. Mach. Power Electron., Bodrum, Turkey, 2007, pp. 343–348.
- [37] R. Zhang, F. J. T. E. Ferreira, B. Ge, A. T. de Almeida, and P. Amaro, "Transverse-flux linear switched reluctance motor for semi-magnetic suspending rail vehicle," in Proc. 37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Melbourne, VIC, Australia, 2011, pp. 2066–2071.
- [38] P. S. –. R. French, "Switched reluctance motor drives for rail traction: Relative assessment," IEEE Proc. B – Elect. Power Appl., vol. 131, no. 5, pp. 209–219, Sep. 1984.
- [39] W. Zhao, F. Zhao, T. A. Lipo, and B. I. Kwon, "Optimal design of a novel V-type interior permanent magnet motor with assisted barriers for the improvement of torque characteristics," IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 11, pp. 1–4, Nov. 2014.
- [40] S. S. R. Bonthu, A. Arafat, and S. Choi, "Comparisons of rare-earth and rare-earth-free external rotor permanent magnet assisted synchronous reluctance motors," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 64, no. 12, pp. 9729– 9738, Dec. 2017.
- [41] P. Guglielmi, B. Boazzo, E. Armando, G. Pellegrino, and A. Vagati, "Permanent-magnet minimization in PM-assisted synchronous reluctance motors for wide speed range," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 49, no. 1, pp. 31–41, Jan./Feb. 2013.
- [42] L. Kung, U. Bikle, O. Popp, and R. Jakoby, "Improvement of the cooling performance of symmetrically self-ventilated induction machines in the 2–15MW range," in Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf., Cambridge, MA, USA, 2001, pp. 673–680.
- [43] T. Nakahama, K. Suzuki, S. Hashidume, F. Ishibashi, and M. Hirata, "Cooling airflow in unidirectional ventilated open-type motor for electric vehicles," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 3, pp. 645–651, Sep. 2006.
- [44] J. A. Malumbres, M. Satrustegui, I. Elosegui, and M. Martínez-Iturralde, "Coupled thermal and hydraulic algebraic models for an open self ventilated induction machine," IET Elect. Power Appl., vol. 9, no. 8, pp. 513–522, Sep. 2015.
- [45] T. Jercic et al., "Centrifugal fan design for permanent magnet synchronous motor in a traction application," in Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf., Miami, FL, USA, 2017, pp. 1–7.
- [46] S. Mizuno, S. Noda, M. Matsushita, T. Koyama, and S. Shiraishi, "Development of a totally enclosed fan-cooled traction motor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 49, no. 4, pp. 1508–1514, Jul./Aug. 2013.
- [47] Chemistry and Technology of Epoxy Resins, 1st ed. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, Dec. 1992.

- [48] Epoxy Resins: Synthesis, Applications and Recent Developments, Marcus L. C. Ed. Colechester, U.K.: Nova Science Pub Inc, Aug. 2016.
- [49] Electric Traction – Rotating Electrical Machines for Rail and Road Vehicles – Part 2: Electronic Converter–Fed Alternating Current Motors, IEC 60349–2:2010, Oct. 2010.
- [50] IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Unsealed or Sealed Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Form – Wound Pre–Insulated Stator Coils for Machines Rated 15 000 V and Below, IEEE Standard 1776–2008, Feb. 2009.
- [51] Rotating Electrical Machines – Part 18–31: Functional Evaluation of Insulation Systems – Test Procedures for Form–Wound Windings – Thermal Evaluation and Classification of Insulation Systems Used in Rotating Machines, IEC 60034–18–31, Jun. 2012.
- [52] C. P. Wong and R. S. Bollampally, “Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging,” J. Appl. Polymer Sci., vol. 74, no. 14, pp. 3396–3403, Dec. 1999.
- [53] J. Bicerano, J. F. Douglas, and D. A. Brune, “Model for the viscosity of particle dispersions,” Polymer Rev., vol. 39, no. 4, pp. 561–642, 1999.
- [54] TSADUR Class 250 Insulation System, Traktions systeme Austria (TSA), Wiener Neudorf, Austria, 2016.
- [55] C. Zoeller, M. A. Vogel sberger, R. Fasching, W. Grubelnik, and T. M. Wolbank, “Evaluation and current–response–based identification of insulation degradation for high utilized electrical machines in railway application,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 53, no. 3, pp. 2679–2689, May/Jun. 2017.
- [56] M. A. Vogelsberger, C. Zoeller, T. M. Wolbank, and H. Ertl, “Insulation health state monitoring of traction machines based on online switching transient exploitation,” in Proc. Eur. Int. Exhib. Conf. Power Electron., Intell. Motion, Renewable Energy Energy Manage., Nuremberg, Germany, 2017, pp. 1–6.
- [57] P. Nussbaumer, M. A. Vogel sberger, and T. M. Wolbank, “Induction machine insulation health state monitoring based on online switching transient exploitation,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 3, pp. 1835–1845, Mar. 2015.

<원문제목> A Review on Different Aspects of Traction Motor Design for Railway Applications
 <원문출처> IEEE Transaction on Industry Applications