

Global Report

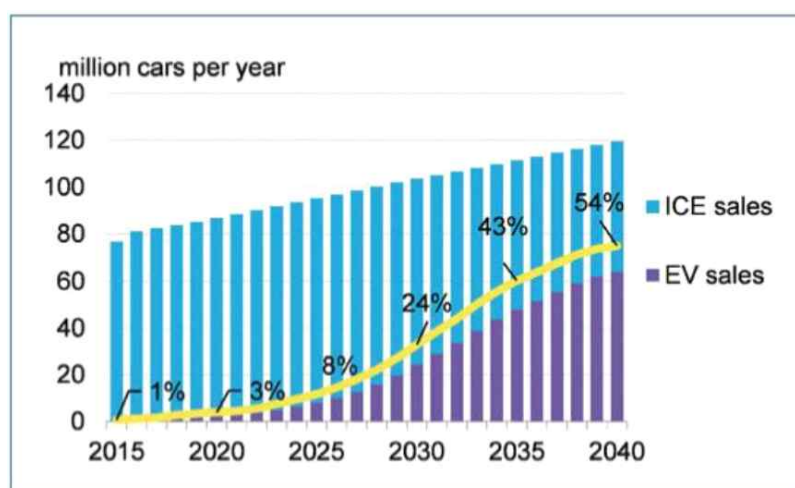
동기 릴렉턴스 전동기 : 전기자동차를 위한 희토류 없는 솔루션

1. 서론
2. 전기자동차용 견인전동기의 기본 특성
3. 영구자석형 동기전동기
4. 동기 릴렉턴스 전동기
5. 전기자동차 견인시스템을 위한 새로운
솔루션
6. 결론

1. 서론

내연기관(Internal Combustion Engine, ICE)이 환경에 미치는 영향은 자동차 시장에서 내연기관 추진 시스템을 대체 추진시스템으로 대체하려는 노력으로 이어졌으며, 그중 전동기(전기모터)가 주요 후보가 되었다. <그림 1>에서 보는 바와 같이, 최근 전기자동차 시장은 호황을 누리고 있으며, 향후 20년 동안 전기자동차의 판매량은 기존 내연기관 자동차의 판매량을 능가하여 급증할 것으로 예상된다.

에너지 저장 및 파워 트레인과 관련된 새로운 기술들은 전기자동차 시장의 발전에 중요한 역할을 하고 있다. 견인전동기 레벨에 있어서, 주요 구성품과 혁신적인 재료는 현재의 견인전동기 설계에 통합되어야 한다. 최근 전기재료, 전력전자, 제어시스템의 발전과 더불어 혁신적인 견인전동기 기술의 채택은 새로운 에너지 효율적이고 성능이 뛰어난 파워트레인 개발에 기여하고 있다.



<그림 1. 전기차 판매 동향(블룸버그 신에너지 금융)>

2. 전기자동차용 견인전동기의 기본 특성

전기자동차용 견인전동기의 요구 사항은 산업 응용 분야에서 사용되는 기존의 전동기와 다르다. 가장 도전적인 사항은 확장된 운전속도 범위에서 전동기의 크기를 줄이고, 동시에 효율을 높여야 하는 것이다. 우수한 과부하 특성 및 넓은 운전속도 범위 기능 확보를 위해 견인전동기는 일반적으로 고정자 코어 주변을 수냉식 재킷으로 감싸는 수냉각 방식을 채택하게 된다. 전기자동차용 견인전동기의 기본 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 일반적으로 높은 비출력 및 비토크 특성 확보
- ② 매우 넓은 속도 범위에서의 운전 가능성 확보
- ③ 넓은 토크와 운전 속도 범위에 고효율 확보
- ④ 넓은 범위의 정출력 운전 능력 확보
- ⑤ 차량 운영 환경에 대한 높은 신뢰성과 견고성
- ⑥ 합리적인 비용

전기자동차는 다양한 주행 조건에서 넓은 토크-속도 범위에서 동작되기 때문에, 견인전동기 설계는 차량의 주행 사이클 (예 : WLTP, NEDC, UDDS) 전반에서 전체적인 에너지 절약을 달성하는 것을 목표로 해야 한다. 그렇기 때문에 전기자동차 분야에서는 고효율밀도, 고효율 및 저비용 추진시스템 개발에 대한 많은 요구가 있다. 이 분야의 연구는 최근 몇 년 동안 집중되어 왔으며, 다양한 유형의 견인전동기가 연구되고 제안되어 왔다. 하지만, 대부분의 전기자동차용 견인전동기 솔루션은 희토류 자석을 사용하는 영구자석(Permanent magnet, PM) 기술에 의존해왔다. <표 1>은 유럽 및 미국 시장의 기존 전기자

동차 기술에 있어서 견인전동기에 대한 기술 솔루션을 요약한 내용이다. <표 1>에서 보는 바와 같이, 대부분의 전기자동차 메이커들이 견인전동기로 희토류 자석을 사용하는 영구자석형 동기전동기를 채택하고 있으며, 최대 회전속도도 10,000 rpm 이상을 선택하고 있다.

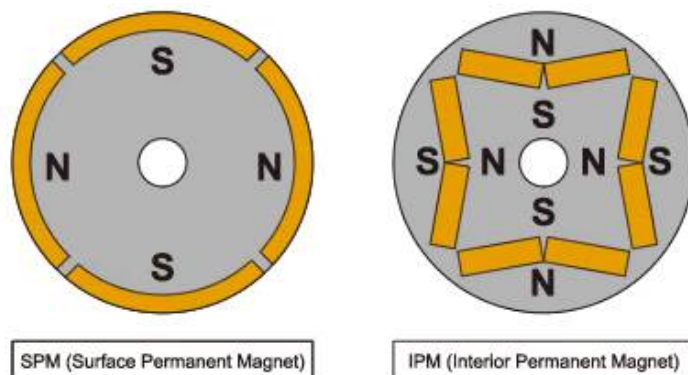
<표 1 : 유럽 및 미국 시장의 전기자동차용 견인전동기 기술>

차량	견인전동기 타입	회전자 재질	최대 회전속도 [rpm]
Audi e-tron	유도전동기	AL 도체바	~10,000
BMW i3	영구자석형 동기전동기	희토류계 영구자석	11,400
Chevrolet Volt	영구자석형 동기전동기	희토류계 영구자석	8,900
Hyundai e-Kona	영구자석형 동기전동기	희토류계 영구자석	11,000
Jaguar I-Pace	영구자석형 동기전동기	페라이트/희토류계 영구자석	13,000
Mercedes EQC	영구자석형 동기전동기	희토류계 영구자석	~10,000
Nissan Leaf	영구자석형 동기전동기	희토류계 영구자석	10,500
Renault Zoe	동기전동기	권선형 회전자	11,300
Tesla S	유도전동기	Cu 도체바	16,000

3. 영구자석형 동기전동기

전기자동차용 견인전동기로 영구자석형 동기전동기가 가장 매력적이며, 영구자석형 동기전동기의 주요 장점은 본질적으로 타 전동기 대비 고효율, 고회전속도 및 높은 신뢰성이다. 영구자석형 전동기는 상대적으로 제어하기 쉽고 암페어 당 최대토크 제어 및 최적의 넓은 속도 영역에서의 운전 측면에서 우수한 성능을 보여준다. 전동기의 회전자에서 영구자석의 위치에 따라 다양한 유형의 영구자석형 전동기가 제안되며, <그림 2>에서 보는 바와 같이, 영구자석의 회전자 표면 부착형 또는 내부 삽입형 구조로 분류할 수 있다.

하지만, 전기자동차 기술이 대량 생산을 앞두고 있는 시점에서 시장에서의 영구자석용 희토류계 원자재의 높은 가격 변동성은 영구자석의 장기적인 가용성을 불확실하게 만든다. 또한 영구자석형 동기전동기는 전동기의 성능을 제한하는 몇 가지 기술적 단점을 가지고 있는데, 그 중 대표적인 것이 전동기의 동작 온도가 허용 조건을 초과하는 경우 희토류계 영구자석에서 감자 현상이 발생하게 되며, 이는 전동기의 성능 저하로 이어진다. 따라서 최근에는 전기자동차용 견인전동기로 희토류계 영구자석을 사용하지 않는 전동기 또는 사용량을 줄인 영구자석형 전동기를 포함하는 대체 솔루션에 대한 관심이 증가하고 있다.



<그림 2. 영구자석형 동기전동기의 회전자 분류(좌측 : 표면부착형, 우측 : 내부 삽입형)>

4. 동기 릴럭턴스 전동기

동기식 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor, SynRM)는 최근 몇 년간 산업 분야에서 큰 관심을 받고 있으며, 단순하고 견고한 구조로 인해 전기 및 하이브리드 자동차용 견인전동기로 유효한 대안이 되어왔다. 동기식 릴럭턴스 전동기의 주요 장점은 회전자 도체바에서의 손실이나 영구자석에서의 손실이 없기 때문에 동일한 크기의 유도전동기 보다 높은 연속 토크를 갖는다는 것이다. 동기식 릴럭턴스 전동기의 중요한 특성은 다음과 같다.

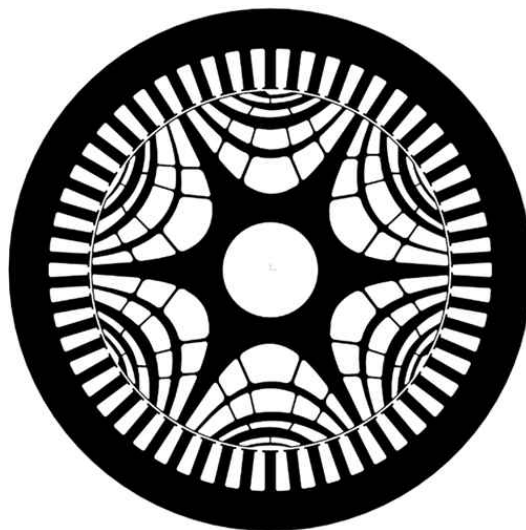
- ① 동기식 릴럭턴스 전동기의 회전자 제작비용은 영구자석형 전동기나 유도전동기보다 잠재적으로 저렴하다.
- ② 영구자석형 전동기 대비 비토크는 허용 가능한 수준이며, 영구자석을 사용하지 않기 때문에 회전자 온도 상승에 영향을 받지 않는다.
- ③ 유도전동기 대비 자속지향제어 알고리즘이 더 간단하다.

기존에 동기식 릴럭턴스 전동기는 일반적으로 영구자석형 전동기 대비 낮은 비(최대)출력과 비(최대)토크, 높은 동작 소음 및 낮은 역률을 가진 것으로 알려져 있다. 하지만 이러한 단점에도 불구하고, 동기식 릴럭턴스 전동기는 최적화된 회전자 설계를 통해서 높은 토크 밀도와 고효율 특성을 얻을 수 있다. 동기식 릴럭턴스 전동기에서 비출력 특성은 회전자 운전 속도와 자속 약화 영역을 증가시켜 향상시킬 수 있다. 그럼에도 불구하고 동기식 릴럭턴스 전동기의 성능 개선을 위한 최적의 형상 설계는 고속 운전 영역에서 회전자의 구조적 안전성을 확보할 수 있는 방향으로 진행되어야 한다.

5. 전기자동차 파워트레인 시스템을 위한 새로운 솔루션

L' Aquila 대학의 산업-정보공학 및 경제학과로 구성된 연구 그룹은 자동차 응용 분야를 위한 혁신적인 전동기의 설계, 시제품 제작 및 성능시험 분야에서 수년 동안 연구를 진행해왔다. 이 그룹은 최근 저비용 전기자동차 파워트레인 시스템 제작을 위해서 희토류계 영구자석을 사용하지 않는 전기구동시스템인 "ReFreeDrive"라는 이름의 H2020-GV 유럽 프로젝트에 참여하고 있다. 이 프로젝트는 전기자동차용 차세대 파워트레인 개발을 통해 희토류계 영구자석의 사용을 피하는데 기여하고, 저비용 제조 기술에 초점을 맞추면서 대량생산을 위한 산업적 타당성을 확보하는데 초점을 맞추고 있다. 이 프로젝트의 목표는 희토류계 영구자석을 사용하지 않는 브러시리스 AC 전동기 기반의 전기자동차 동력견인시스템용 새로운 솔루션을 연구하고 개발하는 것이다. 이 프로젝트 내에서 견인전동기 토폴로지의 개발을 통해 비교 기준으로 사용된 최근 전기자동차(Tesla Model S60)와 비교하여 비출력, 출력밀도 및 효율 측면에서 앞선 성능을 달성하였다. "ReFreeDrive" 프로젝트 컨소시엄은 유럽 6개국의 13개 파트너로 구성되어 있으며, L' Aquila 대학 팀은 프리미엄급 전기자동차용 고속 동기 릴럭턴스 전동기(최대 200kW급 용량)의 설계를 담당했다. 연구 목표는 <표 2>에서 제시하는 요구 사항을 충족할 수 있는 수냉각 방식 동기 릴럭턴스 전동기를 설계하는 것이었다.

프리미엄급 전기자동차용 고속 동기 릴럭턴스 전동기를 설계하는 방법에는 목표 부품 비용을 고려하면서 원하는 모터 성능을 일치시키기 위한 복잡한 최적화 프로세스가 필요했다. 설계 개선을 위해 특정 크기를 정하는 절차와 최적화 알고리즘이 사용되었으며, 제안된 솔루션은 "유체 형상" 자속 장벽과 방사형 리브가 있는 혁신적인 회전자 코어 구조를 도출하였다. <그림 3>은 설계가 완료된 6극을 가지는 동기 릴럭턴스 전동기의 고정자와 회전자 코어 단면을 보여준다. 비대칭 모양의 회전자에는 세그먼트를 축 및 횡방향으로 서로 연결하는 여러 개의 "리브"가 있으며, 이러한 "리브"를 이용한 연결은 고속 회전 시 회전력이 회전자에 가해질 때 회전자 구조에서 충분한 기계적 강성을 유지시켜 준다. 회전자 리브의 최적 위치 및 최적 두께는 기계 분야의 유한요소 소프트웨어와 연동된 "토폴로지 최적화 프로그램"에 의해 도출되었으며, 최적화 프로그램에 적용된 알고리즘은 회전자 코어에서 발생하는 응력을 견디기 위해 기구적 부분(리브)에 요구되는 최적화된 질량의 크기와 위치를 도출한다.



<그림 3. 200kW급 동기식 릴럭턴스 전동기의 고정자와 회전자 코어 단면>

<표 2 : 프리미엄급 전기자동차용 고속 동기 릴럭턴스 전동기 요구 사항>

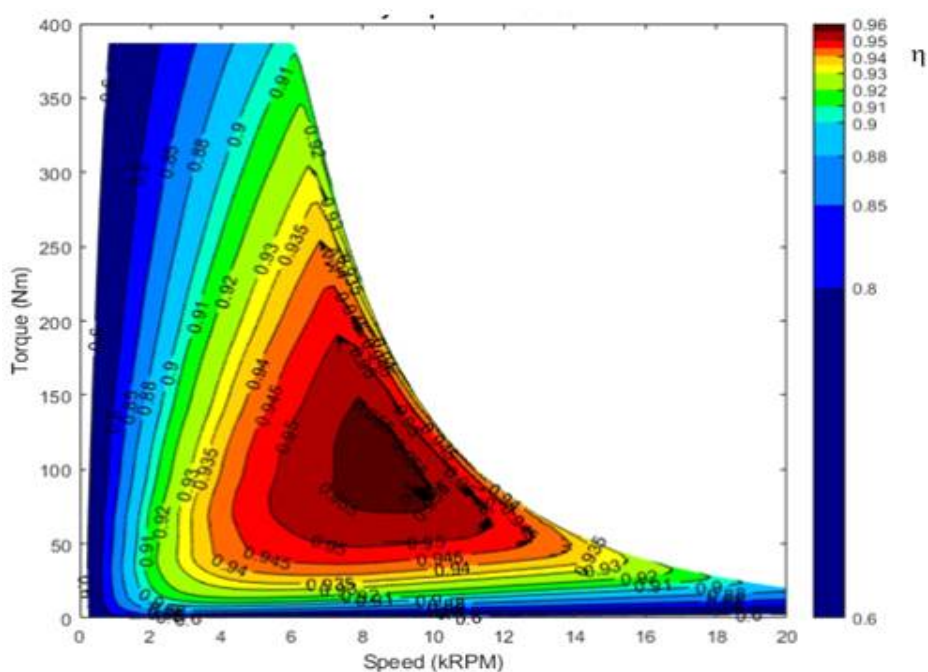
요구사항	단위	값
DC 전압	V	800
비최대 출력	kW/kg	>4.0
최대 출력 밀도	kW/lit	>8.0
기저 속도	rpm	5,000
최대 출력@기저속도(30초)	kW	200
최대 속도	rpm	18,000
연속출력@최대속도	kW	50
최대 효율	%	>95
전동기 질량	kg	<48
고정자 외경	mm	230
적층 길이	mm	200

최대 출력 및 연속 출력에서의 동기 릴럭턴스 전동기의 성능은 <표 3>에 정리되어 있으며, <그림 4>는 모터구동 모드에서의 효율맵을 보여준다. <표 3>과 <그림 4>에서 보는 바와 같이, 6,200rpm에서 최대 출력은 약 250kW이며, 최대 효율은 약 96%이고, 최대 토크는 383Nm이다. 최대 속도(18,000rpm)에서 최대 출력은 56kW이며, 이러한 성능은 표 2에서 주어진 요구 사항을 완전히 충족한다. <그림 5>는 최대 속도(18,000 rpm)에서의 기계적 등가 응력맵을 보여준다. <그림 5>에서 보는 바와 같이, 회전자의 응력 분석 결과는 만족스럽고, 회전자 구조가 고속에서 기계적 응력을 충분히 견딜 수 있고, 선택한 전기강판의 기계적 한계를 충족함을 확인할 수 있었다.

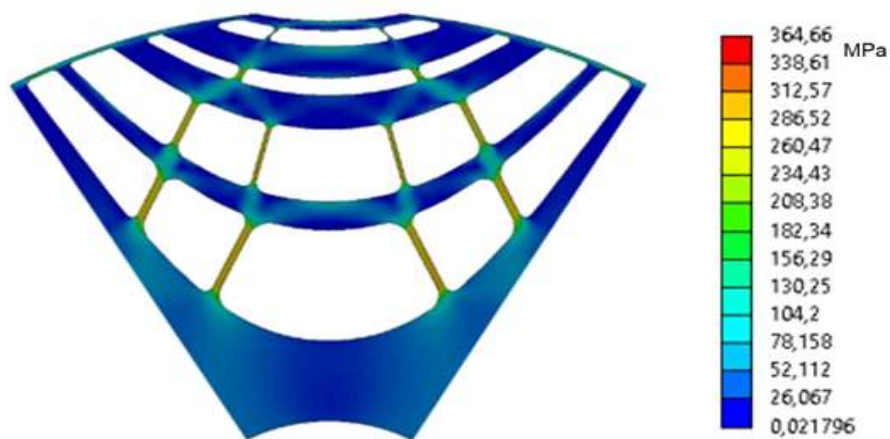
저출력 동기 릴럭턴스 전동기(최대 75kW급 출력)의 경우, 제조비용을 줄이기 위해서 200kW급 설계에서 고정자 권선과 코어 적층 길이만을 변경하는 방법으로 확장하였다. 200kW급과 75kW급 두 개의 시작품이 제작되었으며, <그림 6>는 실제 제작된 75kW급과 200kW급 용량의 동기 릴럭턴스 전동기의 고정자와 회전자 코어를 보여준다. 추가적으로 전력전자 부분은 전동기 냉각시스템을 공유하는 동기 릴럭턴스 전동기 하우징과의 직접적인 통합을 위해 R13 Technology (L' Aquila spin-off 대학)에 의해 설계되었다. 이 프로젝트에서 개발된 전기자동차용 파워트레인(75kW급과 200kW급)은 테스트 벤치 및 차량 시연설비에서의 실제 주행 조건에 맞추어 시험될 예정이다.

<표 3 : 동기 릴럭턴스 전동기의 성능>

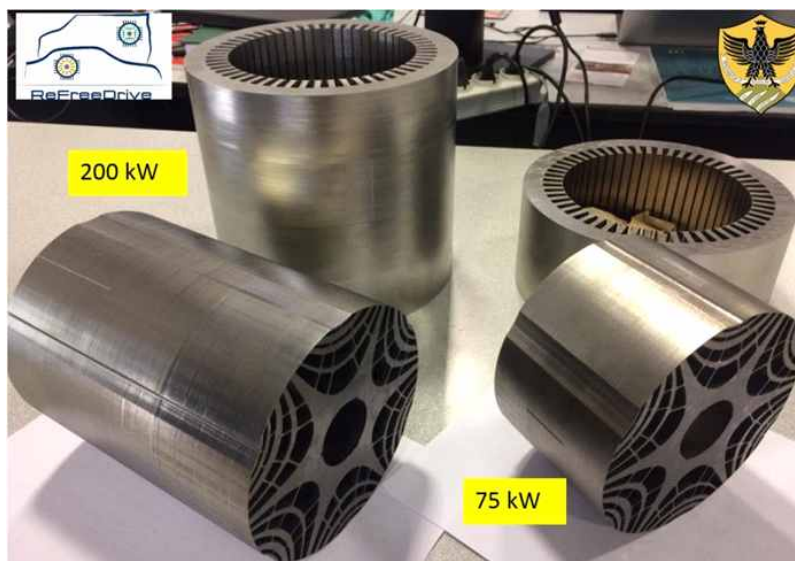
성능	단위	최대출력 (30초)	연속출력(S1 Duty)
상전류	$A_{\max}$	700	177
상전압	$V_{\max}$	338	415
속도	rpm	4,980	18,000
평균 토크	Nm	383	30
출력	kW	200	56
동손	W	22,350	1,430
철손	W	800	1,770
역률		0.63	0.60
토크리플(회전자스큐 No)	%	15	25



<그림 4. 동기 릴럭턴스 전동기의 효율맵>



<그림 5. 동기 릴럭턴스 전동기 회전자(1극)의 18000rpm에서 기계적 응력 분포도>



<그림 6. 용량별 동기 릴럭턴스 전동기 시작품의 고정자 및 회전자 코어>

6. 결론

최근 전기자동차 시장의 호황과 더불어 에너지 저장 및 파워 트레인과 관련된 새로운 기술들은 전기자동차 시장의 발전에 중요한 역할을 하고 있다. 전기재료, 전력전자, 제어시스템의 발전과 더불어 혁신적인 견인전동기 기술의 채택은 고효율 고성능의 파워트레인 개발에 기여하고 있다. 최근 전기자동차용 견인전동기로 유도전동기와 영구자석형 동기전동기 기술이 주로 적용되고 있으며, 사이즈 대비 높은 출력밀도를 요구하는 프리미엄급 전기자동차에는 주로 희토류계 영구자석형 동기전동기가 적용되고 있다. 하지만, 영구자석용 희토류계 원자재의 시장에서의 높은 가격 변동성에 따른 영구자석의 장기적인 가용성의 불확실성과 희토류계 영구자석의 고온 조건에서의 낮은 신뢰성으로 인해, 최근 많은 전기자동차 메이커들은 전기자동차용 차세대 견인전동기로 희토류계 영구자석을 사용하지 않는 전동기 또는 사용량을 줄인 영구자석형 전동기로의 대체 솔루션을 찾는 연구에 관심을 두고 있다. 이러한 측면에서 보면 새로운 대안으로 동기 릴럭턴스 전동기가 적당할 것이며, L' Aquila 대학 연구팀의 프리미엄급 전기자동차용 200kW급 고속 동기 릴럭턴스 전동기 개발 연구는 향후 전기자동차 시장에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 향후 전기자동차에 동기 릴럭턴스 전동기 적용이 본격화 된다면, 희토류계 영구자석에 의존했던 견인전동기 시장에 큰 변화가 있을 것으로 예상되며, 전기자동차 뿐만 아니라 철도, 선박용 추진시스템으로의 적용 범위 확장도 기대된다.

<원문제목> Synchronous reluctance motor : A rare-earth free solution for electric vehicles

<원문출처> Electric Motor Engineering, No.1, March 2020.