

오성철 · 하회두

한국전기연구소 전기자동차개발팀

1. 서 론

전기자동차 구동용 전동기는 Battery로부터 공급되는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하여 자동차를 구동시키는 핵심부품으로 Battery에 한정적으로 저장되어 있는 에너지를 이용하기 때문에 일충전 주행거리를 증가시키기 위하여 효율이 높아야 하고 한정된 공간에 장착되어야 하기 때문에 소형경량화가 대단히 중요하며 승차감 증대를 위하여는 소음과 진동이 적어야 하고 무보수, 장수명으로 신뢰성이 높아야 한다.

전기자동차의 성능평가에 있어서 주요 Parameter는 ①최고속도, ②가속성능, ③일충전 주행거리의 세 가지로 크게 볼 수 있으며 전동기와의 관계는 표 1에서 볼 수 있다.

2. 전동기의 종류

전기자동차용 전동기는 제어가 쉬운 직류 직권전동기가 제일 먼저 사용되었으며 종래의 직

류전동기가 가장 많이 이용되고 있다.

그러나 직류전동기는 출력비(kW/kg)가 낮고 부피가 크며 Brush로 인한 단점 때문에 Brush가 없는 Brushless 직류전동기, 유도전동기, 동기전동기 등의 사용에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 출력밀도의 증대와 효율 향상을 위하여 특수 Type Motor(Outer Rotor Type, Disk Type, Double Cylinder Type 등)에 대한 연구도 대단히 활발하다.

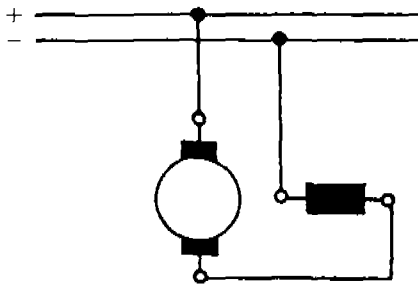
가. 직류전동기

전기자동차에 사용되는 직류전동기에는 직권

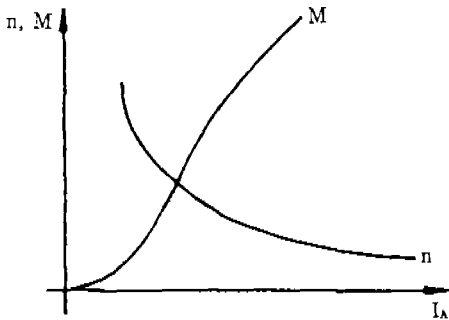
<표 1> 전기자동차의 주요 Parameter와 구동계와의 관계

	효 율	소 형 경 량	과 부 하
가 속 성		0	□
일충전주행거리	□	□	
최 고 속 도		0	

주: □ : 상관 관계의 중요도



<그림 1> 직류직권전동기



<그림 2> 직권전동기의 전류증가에 따른 회전수, Torque 곡선

전동기, 분권전동기 및 타여자전동기가 있다.

직권전동기는 그림 1에서와 같이 계자권선과 전기자권선이 직렬로 연결되어 있기 때문에 전기자전류가 계자에서의 자속발생에 큰 영향을 미친다. 따라서 큰 부하가 걸리게 되면 자연스럽게 회전수가 떨어지고 전류가 증가하여 많은 자속을 발생시키고 부하가 감소하면 전류가 감소하여 자속 발생이 줄어들게 되어 높은 회전수에 달하게 된다(그림 2 참조). 이러한 특성은 기동시에 많은 힘을 필요로 하고 주행시에는 큰 힘보다는 높은 회전수를 필요로 하는 전기자동차의 주행특성과 일치하여 별도의 제어장치없이 전기자동차에 이용할 수 있었기 때문에 직류전동기중 가장 먼저 이용되었다.

그러나 직권전동기는 무부하 상태에서 전압을 가하면 회전수가 무한정 상승하여 Brush, Bearing 등에 손상을 입히기 때문에 분권전동

<표 2> 직류 직권전동기를 사용한 전기자동차

회 사 명	모 델 명	출 력	동판능력	최고속
Suzuki	Cervo E V	10 kW	0.4	80 km/h
Daihatsu	Hijet VAN	14 kW	0.32	70 km/h
Daihatsu	BC-7	5 kW	0.18	45 km/h
Suzuki	Every Super	10 kW	0.35	65 km/h
Nissan	EV Guide II	7.5kW	0.13	16 km/h

기를 사용하게 되었다.

직류 직권전동기를 사용한 전기자동차의 예를 표 2에 표시하였다.

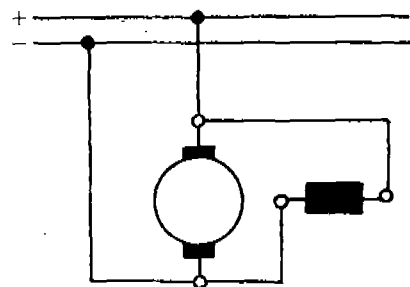
나. 직류 분권전동기

직류 분권전동기는 그림 3에서 보는 것과 같이 전기자권선과 계자권선이 병렬로 연결되어 있기 때문에 회전수나 부하의 변동이 계자전류에 큰 영향을 미치지 않는다. 전동기의 회전수, Torque제어는 전기자와 계자전류를 따로 제어하여 필요한 주행 Pattern을 얻는다.

직류 분권전동기를 사용한 전기자동차의 예를 표 3에 표시하였다.

다. 직류 타여자전동기

타여자전동기는 그림 4에서 보는 것과 같이 전기자권선의 전원과 계자권선의 전원이 완전히 분리되어 서로 영향을 받지 않으며 부하의



<그림 3> 직류분권전동기

<표 3> 직류분권전동기를 장착한 전기자동차

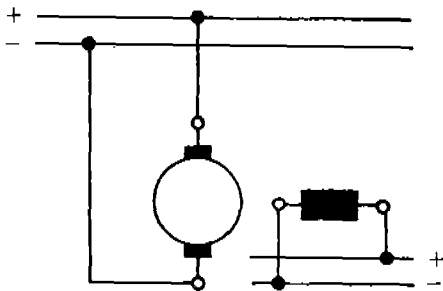
회 사 명	모 델 명	출 력	등판능력	최고시속
Mazda	Electric Bongo	12 kW	0.3	75 km/h
관서전력	Rugger EV	20 kW	0.4	90 km/h
VW	Jetta	20 kW		120 km/h
구주전력	Kyuden VAN	22 kW	0.33	84 km/h
Mitsubishi	Mini. Cab EV	12.5 kW	0.3	70 km/h
동북전력	Cold Condition	12 kW	0.18	90 km/h
Nissan	EV President	12 kW	0.19	40 km/h
Suzuki	Every Super	14 kW	0.45	75 km/h
GES	City Stromer	12 kW		100 km/h
Mitsubishi	Electric Lancer	20 kW	0.3	110 km/h

증가에 따른 회전수의 변화가 적다. 타여자 전동기에서도 분권전동기에서와 같이 전기자전류와 계자전류를 따로 제어한다. 타여자 전동기에는 계자권선형과 계자 Magnet형이 있으며 Brushless 전동기도 타여자전동기에 속한다(표 4 참조).

라. Brushless 직류전동기

Brushless 전동기는 Brush가 있는 전동기에 비해서 다음과 같은 장점이 있다.

- Commutator가 없기 때문에 소형 경량이



<그림 4> 직류 타여자전동기

<표 4> 직류 타여자전동기를 장착한 전기자동차(계자 권선형)

회 사 명	모 델 명	출 력	등판능력	최고시속
Renault	Master	30 kW	80 km/h	80 km/h
Bedford	Bedford CF-II	40 kW	80 km/h	80 km/h
Soleq	EV Cort	37 kW	0.3 km/h	70 km/h
PSA	C 25 Combi	20 kW	-	80 km/h
동경전력	Electric Jetta	13.5 kW	0.34 km/h	120 km/h
GM	G-VAN	5×4 kW	-	110 km/h

다.

- 출력비가 높다.
- 수명이 길고 보수가 필요없다.
- 소음이 적다.
- 회전자가 영구자석으로 회전자 손실이 없다.
- 효율이 높다.

이상과 같은 장점 때문에 Brushless 전동기를 전기자동차에 장착하고자 하는 연구가 대단히 활발하며 Brushless 전동기에는 Rotor-In, Rotor-Out, Double Cylinder, Disc-type Motor 등이 있다.

(1) Rotor-In Type 전동기

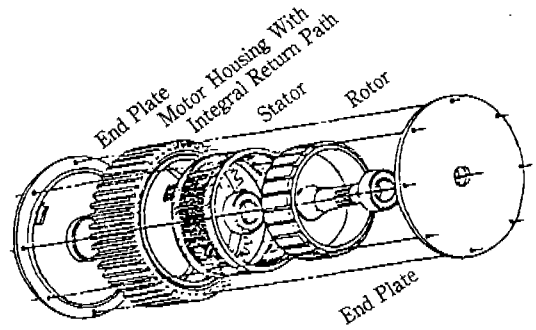
Rotor-In Type 전동기는 종래의 직류전동기와 같은 모양으로서 회전자를 영구자석으로 대체하고 Stator의 계자권선을 전기자권선으로 대체하여 계자권선의 전류의 방향을 반도체 소자를 이용하여 바꾸어 주는 가장 흔히 볼 수 있는 전동기이며 Brushless전동기를 장착한 전기자동차는 다음 표 5 와 같다.

(2) Rotor-Out Type 전동기

Rotor-Out Type 전동기는 장착공간을 최소화하기 위하여 바퀴에 전동기를 장착하여 회전자와 Tire가 일체가 된 Direct-Drive방식의 Wheel in Motor이다. Rotor-Out Type 전동기

<표 5> Brushless Motor 장착 전기자동차 현황

회 사 명	모 델 명	출 력	등판능력	최고시속
중부전력	Dream Mini	3.5×2kW	0.26	80km/h
Honda	Honda CUVES	0.58kW	0.21	60km/h
전기스쿠터 R & D	ES600	0.6 kW	0.25	53km/h
Tokyo R & D	E24B	0.6 kW	0.13	42km/h



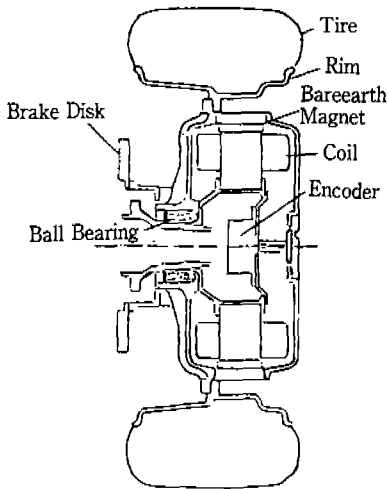
<그림 6> Unique Mobility사의 BLDC Double Cylinder Motor

는 Direct-Drive방식이기 때문에 Transmission과 Differential Gear가 없이 직접 동력이 전달되기 때문에 자체 중량을 대폭 감소시킬 수가 있으며 Transmission에서 발생하는 손실도 없는 장점이 있으나 현재로서는 저속영역에서 효율이 좋지 않기 때문에 개선연구를 하고 있다.

그림 5의 Motor를 장착한 동경전력에서 개발한 IZA는 최고속도 176km/h, 일충전 주행거리 548km/h이다.

(3) Double Cylinder Type 전동기

Double Cylinder Type 전동기는 그림 6에서



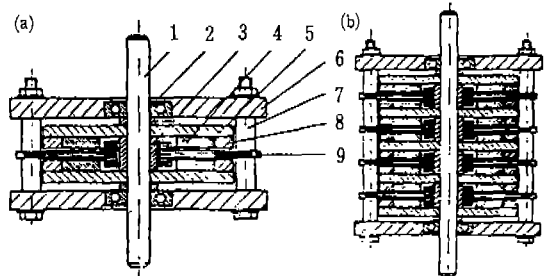
<그림 5> 바퀴에 직접 장착된 Outer-Rotor Type BLDC Motor(IZA)

보는 것과 같이 Housing이 Yoke로 사용되며 Housing과 회전자 사이에 Slotless, Ironless 공극권선이 위치한다. 회전자와 Housing이 두 개의 Cylinder로 보이기 때문에 Double Cylinder Type이라고 하며 출력비가 대단히 높은 장점이 있다.

그림 6은 Unique Mobility사의 Double Cylinder Motor로서 높은 출력비를 나타내고 있다.

(4) Disc Type 전동기

Disc-Type 전동기는 그림 7과 같이 축방향의 길이가 짧아 장착공간이 축방향으로 좁은 공간에 유리하며 출력밀도가 높다. 자속의 흐름이



- 1. Shaft 2. Bearing 3. Bushing 4. Magnet 5. Yoke
- 6. Housing 7. Bolt 8. Ring 9. Winding

(a) Single Disc-Type Motor (b) Multy Disc-Type Motor

<그림 7> Disc-Type 전동기

축방향으로 흐르기 때문에 Axial Field Motor 라고도 하며 큰 힘을 필요로 할 때는 그림 7 과 같이 Multi Type으로 만들기도 한다.

(5) 유도 전동기

견고하고 값이 싸서 여러 산업분야에서 애용 되고 있는 유도전동기는 복잡한 제어와 부수적 인 전력변환장치의 필요 때문에 전기자동차 전 동기로써 활약을 하지 못하고 제어성능이 양호 한 직류전동기의 뒷편에 있었으나 제어기법의 개발과 제어소자의 발달로 전기자동차용 전동 기로서 각광을 받기 시작하고 있다.

유도전동기를 장착한 전기자동차의 국내외 현황을 보면 표 6 과 같다.

(6) Synchronous Motor

동기전동기는 Rotor에 권선형과 영구자석형

<표 6> 유도전동기 장착 전기자동차 현황

회 사 명	모 델 명	출 력	등판능력	최고시속
Toyota	Townace Van	20 kW	0.3	85 km/h
Nissan	FEV	10.2 kW	0.35	130 km/h
중부전력	Chuden Electric Van	20 kW	0.3	85 km/h
KERI	KOEV 01	8.5 kW	0.2	50 km/h
BMW	E2	15 kW	0.33	120 km/h
GM	Impact	43 kW		120 km/h

<표 7> Synchronous 전동기를 장착한 전기자동차

회 사 명	모 델 명	출 력	등판능력	최고시속
Honkong Uni	Mini EV	3 kW	0.26	30 km/h
Nissan March	March EV-II	15 kW	0.3	70 km/h

이 있는데 권선형은 크고 복잡하며 가격도 비싸 기 때문에 전기자동차용 전동기로는 고려되지 않고 있다. 영구자석을 사용하는 PM Synchronous Motor는 효율이 높고 부피가 작으 며 가격도 비교적 저렴하다. 특히 Disk Type Motor는 출력밀도가 높고 효율이 높은 장점이 있기 때문에 전기자동차용 전동기로 연구를 하 는 연구소가 많이 있다.

3. 전동기의 종류별 비교

전기자동차에 사용되고 있는 전동기의 종류 별 장단점을 비교하면 표 8 과 같다.

표 9 에 전기자동차용 전동기에 대한 요구사 항 및 종류별 전동기의 사양 만족도를 나타내었 다.

<표 8> 전동기 종류별 비교 (1)

Motor Type	Weight(lb)	Efficiency	Relative Cost
DC Brushed	218	0.84	1.0
AC Induction	100	0.9	0.26
PM Synchron	100	0.92	0.26
PM Disc	75	0.93	0.20

<표 8> 전동기 종류별 비교 (2)

전동기 종류	DC Series	AC Shunt	AC Induction	AC PM Synchron	DC Brushless
장 점	· 제어가 용이하다.	· 제어가 용이하다. · 기어가 필요없다. · 기 어 부 착 시 Amature Control 생략 가능	· 보수가 필요없다. · 출력비가 높다.	· 효율이 높다. · 출력비가 높다. · 역률이 높다.	· 보수가 필요없다. · 출력비가 높다. · AC 전동기에 비 하여 제어가 용 이하다.
단 점	· 기어가 필요하다. · Brush 보수가 필 요	· 가격이 비싸다. · Brush 보수가 필 요	· 제어가 복잡하고 전 장 품 무 계 를 고 려 하 여 야 한 다.	· 전동기 제작이 비 교 적 복 잡	· 고성능 영구자석 가격이 비싸다.

<표 9> 전기자동차용 전동기에 대한 요구사항 및 종류별 전동기의 사양 만족도

Motor	요 구 사 항			
	Special Power Output	Starting Torque	Efficiency	Costs
DC Motor	Low	Acceptable	Unsatisfact	Unsatisfact
3Phase Motor	Adequate	Adequate	Satisfactory	Unsatisfact
Permanent Magnet Motor	Very High	Low	Good	Unsatisfact
Brushless DC Motor	High	High	Very Good	Satisfact

4. 국내외 기술개발 현황

가. 국외 기술개발 동향

전기자동차용 전동기를 개발하고 있는 나라는 독일, 일본, 미국이 가장 활발하며 실험실적 연구는 이태리, 홍콩, 오스트레일리아, 프랑스, 중국 등에서도 매우 활발하다. 전동기 종류별 개발회사, 연구소는 다음 표10과 같다.

독일과 일본은 이미 고속전철 견인전동기와 Servo Motor 등에 이용되는 전동기의 설계, 제작, 시험평가 및 운전 Pattern에 따른 Simulation 기술을 확보하고 있으며 냉각기술, 특수 Type 전동기의 개발연구에 많은 투자를 하고

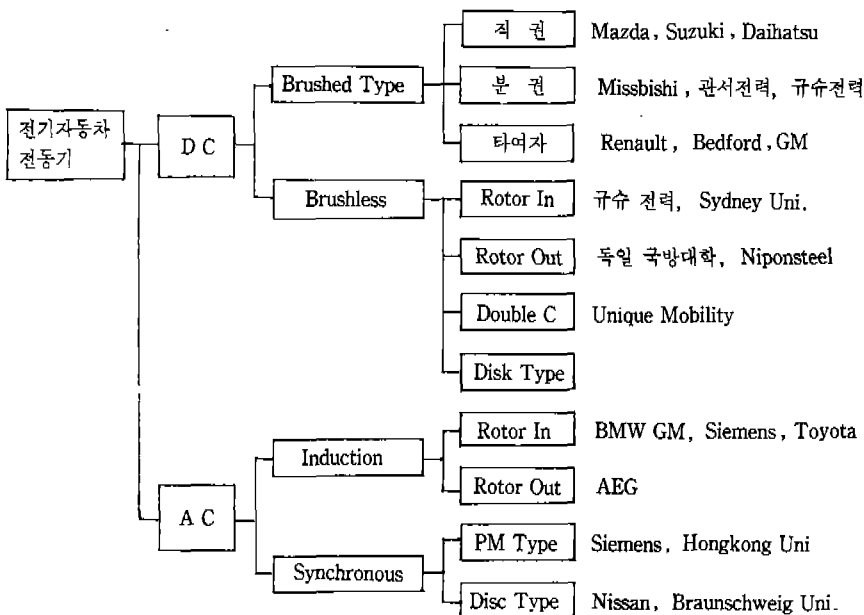
있다.

나. 국내 기술 동향

국내에서는 지게차, Golf Car, 휠체어 등에 사용되는 직류전동기를 제작하고 있으며 유도전동기는 산업용으로서 이천전기, 효성중공업, 현대중전기, 금성사 등에서 제작하고 있다. 제작기술과 제작설비는 매우 좋은 것으로 판단되고 있다.

Brushless DC 전동기는 소형, 가전용으로 삼성전기, 삼성전자, 성신, 한국서보, 금성사 등에서 제작하고 있으나 설계기술이 부족하고 고

<표10> 전동기 종류별 개발회사 및 연구소 현황



성능 Magnet는 전량 수입에 의존하고 있으며 대용량 반도체소자 역시 국산화가 되어 있지 않은 상태이다.

유도전동기는 생산기술 및 인력이 있는 상태로 핵심기술의 개발에 집중하면 곧 세계적인 수준에 도달할 수 있을 것으로 판단되며, Brushless DC Motor, PM Synchronous Motor 등은 타산업에의 파급효과 및 향후 개발 가능성을 생각할 때 연구개발을 조금도 소홀히 할 수 없는 품목이라 하겠다.

표11에 국내외 기술수준을 비교하여 나타냈으며 표12에 전기자동차용 전동기의 핵심기술 및 개발 내용을 표시하였다.

다. 전기자동차용 전동기의 국산화

전기자동차용 전동기의 국산화 및 고성능화를 위하여 국내외 여건과 전기자동차의 요구사항을 검토한 결과 유도전동기와 Brushless DC 전동기를 연구개발하여야 할 것이라는 결론에도달하였으며 선정 이유는 표13과 같다.

5. 전기자동차용 제어기

전기자동차용 구동방식으로는 사용 전동기에 따라 크게 직류 구동시스템과 교류 구동시스

템으로 분류하며 이들의 특성을 분석하여 전기자동차에 적합한 최적의 구동 방식을 분석하고자 한다.

가. 직류 구동시스템의 특성

<표12> 전기자동차용 전동기의 핵심 기술 및 개발내용

	개 발 내 용
소 형 경 량 화	· 전류밀도 증가에 의한 고효율화 · 특수 Type 개발을 통한 고효율화 · 특수 Type 개발에 의한 기계적 동력 전달장치 제거(Direct Drive 방식) · 특수소재사용(Permanent Magnet, Aluminum Housing 등)
고 효 율 화	· 전기, 자기 회로 최적 설계, 주행 Pattern을 고려한 설계 · 특수소재를 이용한 저손실 추구
진동및소음저감	· Torque Ripple 저감 · 자계 해석을 통한 자기회로의 최적설계 및 포화 방지 · Slot Combination
Cost 저 감	· Permanent Magnet 국산화 유도 및 수요 창출, 대량생산 · 연구개발비 지원
신 리 성	· 열전달 해석 및 냉각효과 증대 · 무정류자화를 통한 무부수성

<표11> 국내외 기술 수준 비교

전동기 종류	국 외	국 내
AC 유도전동기	· 설계, 제작, 시험, 평가, 독자적인 기술 확보 · 출력밀도 향상을 위한 냉각방식, 특수 Type 개발연구	· 설계기술 낮음 · 제작기술 높음 · 출력밀도 향상에 대한 연구 없음
DC Brushless Motor	· 실차시험단계 설계, 제작, 시험, 평가, 독자적인 기술 확보 · 출력밀도 향상을 위한 특수 Type 개발 연구 · 실차시험단계	· 연구시작단계 · 설계 및 제작 기초 연구단계 · 기술체후로 기반기술 습득단계 · 특수 Type 개발연구 없음 · G7 Project로 활성화 기대

<표13> 전동기 종류 및 선정배경

전동기 종류	선 정 배 경	비 고
유도전동기 추진 시스템	· 회전자에 권선이 없어 제작이 용이하다. · Brushless로 무부수성 · 열악한 환경에 강인하다. · 국내 제작기술이 높다. · 가격이 저렴하다.	· 전장품 무게를 고려하여야 한다. · 특수 Type 개발이 필요하다. · 제어가 비교적 어렵다.
Brushless DC Motor	· 출력밀도가 높다. · 회전자가 영구자석으로 제작이 용이 · 보수성 양호 · 효율이 높다 · 제어가 용이하다. · 제어 영역이 넓다. · 타산업에 파급효과가 크다.	· 고성능 Magnet의 국산화 · 특수 Type 연구개발 필요

전기자동차용 전동기로서는 최근에 이르기까지 직류전동기가 주로 사용되었으며 이는 대부분 직권 또는 분권전동기를 적용하여 왔다. 직권전동기는 기동토크가 크며 차량 구동에 적합한 특성을 가지고 있어 오래전부터 전기자동차에 사용되고 있다.

또한 직류 분권전동기도 반도체에 의한 제어 기술의 향상에 따라서 계자를 독립적으로 제어하기 때문에 광범위하게 임의의 출력특성이 나오므로 전기자동차에의 응용이 적합하여 널리 이용되어 왔다. 이들 전기동기의 제어는 극소형의 차량이나 저속차에서 저항제어방식이 채용되고 있으나 보통은 반도체에 의한 초퍼제어방식이 채용되고 있다.

초퍼제어방식은 대전력용의 사이리스터나 트랜지스터를 이용하여 전동기의 전기자 또는 계자에의 공급전압을 조정해서 전동기를 제어하는 방식이다. 전동기 및 제어장치도 엔진에 비해서 어렵고 효율향상과 더불어 소형·경량화를 추구하여야 한다.

나. 교류 구동시스템의 특성

교류전동기 시스템은 직류전동기 시스템보다 매우 복잡하므로 복잡한 제어를 필요로 하지만 반도체 기술의 진보에 의해 실용 가능성이 높아지고 보수의 용이 및 성능향상면에서 외국에서는 직류구동방식과 병행해서 교류구동방식을 적극 검토하고 있다.

(1) 일반현황

전동기의 가변속제어에는 종래부터 직류전동기가 널리 이용되어 왔지만 브러시 및 정류자의 보수성 등에 문제가 있으므로 전력반도체 및 제어기술의 진보에 따라 교류전동기를 이용한 가변속 구동방식의 보급이 확대되고 있다. 즉 보수가 용이하기 때문에 소형·경량 등 신뢰성면에서 직류전동기보다도 제조의 합리화가 쉬운 유도전동기와 최근 발전되고 있는 Power Electronics 기술을 이용한 주파수변환 제어기

술과의 연계에 의해서 교류전동기의 가변속제어가 실용화되고 있다.

사이리스터(Thyristor)의 개발이 계속되고 있으며 먼저 MG장치를 대신하여 전원장치로서 인버터(Inverter)가 실용화되고 있고 따라서 상용주파수 이상의 교류전원에 의한 교류전동기(동기전동기 및 유도전동기)의 구동에 이용되고 있다. 또 석유파동을 계기로 팬(Fan), 블로어(Blower) 등에 교류가변속 구동장치의 적용이 널리 확대되어 왔고 최근에는 가정용의 콤프레서(Compressor) 등 소형기기에의 채용도 확대되고 있다.

이것은 종래에 거의 일정 속도로 운전되고 있는 팬 등으로 유량 등을 제어하는 방식으로는 전동기의 동작점의 관점에서 효율이 낮은 상태에서 운전되므로 소요유량 등에 조합시켜서 효율이 좋은 상태에서 운전하도록 하여 에너지를 절약하고 있다. 이 경우 동적(Dynamic)특성은 중요하지 않다. 양호한 가변속 제어를 필요로 하는 곳에서는 직류전동기가 이용되며 산업용 직류기 중에 공작기계 등의 분야에 있어서 직류전동기와 거의 동등 이상의 제어성능을 갖춘 교류전동기 시스템의 채용이 최근에 이르러 활발히 진행되고 있다. 이는 직류전동기의 보수문제의 해결을 위하여 Thyristor, GTO, Power TR 등의 전력반도체소자 및 Analog, Digital의 집적회로기술과 제어기술의 Microcomputer화에 의해서 가능하게 되었다. 산업용의 각종 분야에서는 전압과 주파수 및 출력면에서 전기자동차와의 관계가 유사한 공작기계분야에 중점을 두고 분석하였다.

(2) 교류전동기 시스템의 검토

전기자동차용과 같은 정도의 출력영역을 갖는 시스템은 거의 대부분 산업용 공작기계용에 널리 보급되어 있으며 전기자동차용의 교류전동기 시스템의 실현에 대해서는 기본적인 문제는 아니지만 전기자동차 고유의 문제인 전지성능과 차량과의 관계가 문제이다. 보수라는 점에

서 명확하게 직류전동기 시스템보다 유리하지만 성능향상과의 관점이 중요한 문제이므로 승용 전기자동차에 대한 차량의 구상계획을 기초로 검토하여야 한다.

교류전동기 시스템에서는 직류전동기 시스템과는 다르게 정류문제로부터 회전속도의 제약이 없으므로 전동기 회전속도를 높이는 경우 또는 주회로의 전류 암(Arm)의 수가 6개의 암으로 증가하고 무엇보다도 각 암의 전력반도체소자에 흐르는 전류가 증가하는 것과 소자의 총숫자면에서 직류전동기 시스템보다도 매우 큰 전류용량을 필요로 하기 때문에 전류치의 저감이 크다는 문제가 있으므로 전지전압을 높이는 경우도 검토하여야 한다.

㉞ 전동기방식

동기전동기, 유도전동기 및 특수구조 전동기를 고려했던 연구의 예가 있지만 구조가 간단하고, 양호한 보수성, 장래 보급에서의 합리화된 양산 가능성까지 고려했을 경우 3상 유도전동기가 적합한 것으로 보고되었다. 유도전동기 방식은 제어상으로 복잡하지만 산업용으로 널리 보급되어 있는 실정이므로 전기자동차용으로서 갖는 고유의 문제만을 고려하여야 하고 그외에는 일반 교류전동기 방식과 같이 정도의 차이는 있지만 공히 발생하는 문제이므로 제어기술로서 극복할 수 있다.

㉟ 기본 제어방식

현재까지는 교류 가변속 구동장치에 있어서 각종 제어방식과 금후의 가능성도 포함한 결과를 검토하여야 하고 동작기계용 등에서 주로 사용되고 있는 방식은 Power 트랜지스터용 인버터방식을 기초로 하여 전기자동차용에 있어서도 운전조작성 등에서 직류전동기와 같이 동적(Dynamic) 제어성능이 양호한 것으로 추정되므로 같은 방법으로 Vector 연산제어방식을 채용하는 것이 좋다. 파형의 관점에서 PWM변조는 적합하지만 트랜지스터의 베이스 제어손실 등을 고려하면 변조 캐리어주파수를 어느 정도 이상으로 높일 필요는 없다. 회생제동은 교류전

동기 시스템에 있어서도 가능하다.

㊱ 변환주파수와 전동기 극수

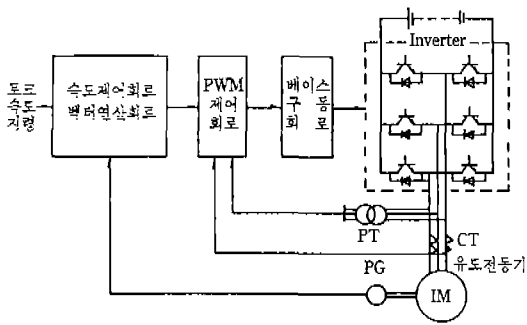
최고 회전속도에 있어서는 직류전동기 시스템에 대한 계획이 4,500~6,000rpm에 대하여 9,000rpm 정도까지도 검토되었지만 변환주파수와 전동기 극수의 설정에 대해서 연구된 결과 전동기로서는 4극기가 가장 제작하기 쉽고 중량, 크기면에서도 유리하지만 변환주파수를 높이면 그것에 각 PWM Carrier 주파수도 높게 할 필요가 있고 Vector 제어방식을 채용하는 것보다 고속의 Vector연산이 필요하여 제어부담이 증가한다는 문제가 있으므로 최고 변환주파수는 150~200Hz로서 4,500~6,000rpm의 경우에 대해서는 4극을 9,000rpm 정도인 경우에는 2극을 채용하는 것이 종합적으로 비교했을 때 유리하다는 결론이 나왔다.

㊲ 주요 성능지표에 있어서 검토

상기 연구결과를 토대로 승용 전기자동차에 대한 차량의 구상계획에 대해서 그림 8에 나타난 바와 같이 시스템 구성의 중량, 체적, 손실 등의 주요 성능지표를 검토하여 그 결과를 표 14에 나타냈다.

유도전동기 방식은 전동기 자체가 직류전동기 시스템보다 매우 소형경량화라는 이점이 있지만 제어장치부에 전력반도체를 6개의 암으로 구성하여야 하고 또 제어가 복잡하므로 직류전동기 시스템에 비해 불리하다. 그러나 회전속도를 높임으로써 전동기의 중량을 줄일 수 있다. 회전속도가 상승하는 경우에는 차량의 감속기를 변화시킬 필요가 있으므로 이 경우의 중량차는 표 14에 나타내고 있다. 전압을 높이는 방식에 의해서는 변환장치 전류용량의 감소효과가 크므로 공칭전압을 144V로 하여 전동기의 최고 회전속도를 9,000rpm 정도로 하면 직류전동기 시스템과 같이 매우 작은 중량까지 가능하지만 제어장치 체적면에서는 결정적으로 불리하다. 특히 크기의 제약조건이 민감한 승용차용로서는 중요한 문제가 된다.

40km/h의 정속주행점에서는 소요되는 제어전



<그림 8> 교류 구동시스템

력의 증대가 직류전동기 방식보다도 효율이 약간 나쁜 것은 불가피한 일이며 또 토크가 큰 동작영역에서는 더욱 심하다. 또 속도 토크 관계에서 교류전동기 시스템과 직류전동기 시스템을 비교하면 전동기의 입력전류 순시치가 증대되는 것을 얻을 수 없으므로 직류전동기 시스템 이상에 전지의 V-I특성과의 관계는 중요하고 토크가 클 경우에는 손실도 증가하게 되며 96V계의 연축전지에서 22~24kW의 최대출력을 내는 것은 매우 곤란하다. 이 점에서 차량안전의 문제가 있지만 전압을 높이는 것이 좋다. 파워 트랜지스터에 있어서는 고전압화되기 때문에 적절한 스너버(Snubber)설계의 최적화로서 전지전압이 200V 이상일 때도 큰 문제는 안된다. 따라서 96V계 연축전지에서는 25%의 구배등판시의 속도가 만족할 정도의 값에 도달하지 않을 가능성이 있고, 또 가속 성능에 있어서도 열악하다. 코스트면에 있어서는 실제의 개발시작품

을 만드는데 비교지수를 산출하는 것은 매우 어렵지만 소요되는 전력반도체의 전류용량의 대폭적인 증가요소와 제어내용에 따라 다르며 전동기 부분의 코스트를 저하시킴으로써 이들 문제를 커버하고 있고 예측하건대 장래에는 많이 줄일 수 있는 요소라 말할 수 있다. 전자잡음, 전자잡음면에서는 본질적으로 초핑하는 전류와 이들 회수의 증대하는 점에서 불리하므로 차량에의 장착상의 배려가 한층 중요하다.

앞서 기술한 각 관점에서 보수라는 관점을 제외하고는 교류전동 시스템이 직류전동기 시스템보다도 유리하다고 말할 수 없지만 일본의 EV기연에서는 직류전동기 시스템의 각종 성능향상에 많은 연구개발을 하고 있고 미국에서는 Eaton사, GE사 등에서 교류전동기 시스템에 대한 연구를 활발히 하고 있는 것으로 보고되었으며 이들 요소를 비교분석한 결과들을 표14에 나타내었다.

㉞ 전지와와의 관계

앞서 기술한 바와 같이 전력반도체소자의 용량을 적게 하기 위해서는 전압을 140~200V 정도로 하는 것이 가장 유리하고, 또 초핑하는 전류가 상대적으로 증가하므로 전지의 전압-전류특성이 좋아야 한다. 즉, 내부저항이 작고, 또 과전류 내량이 클 필요가 있으며 PWM변조 방식에서 초핑하는 주파수가 크므로 기생손실을 억제하는 점에서도 전지의 인덕턴스가 작을 필요가 있다.

㉞ 종합 검토

<표14> 교류전동기시스템의 주요 성능 지표

항 목	시 스템	교 류 전 동 기 시 스템				직 류 전 동 기 시 스템	
	전 원 전 압	96V	96V	144V	144V	96V	96V
전 동 기 (M)	최고회전수 rpm	4,500	9,000	4,500	9,000	4,500	6,000
	중 량 (kg)	52~ 54	48~52	51~53	47~51	60~62	65~ 67
제어장치 (M)	중 량 (kg)	45~ 50	-	40~45	-	34~35	34~ 35
	체 적 (l)	40~ 60	-	35~55	-	23~28	23~ 28
중 합 효 율 (M.C) (%)		73~ 74	72~73	74~75	73~74	75~ 76	75~ 76
중 량 (M+C) (kg)		97~104	93~102+감속기	92~99	88~97+감속기	94~97	99~102

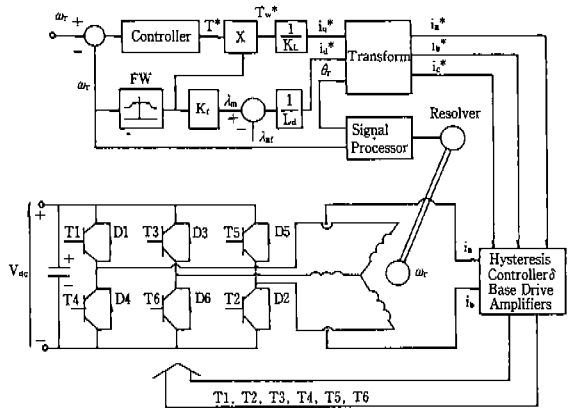
전기자동차용으로 교류전동기 시스템은 직류전동기 시스템에 비하여 보수가 용이하다는 이점이 있지만 중량, 크기, 코스트, 효율 등 기본적으로 중요한 점에 문제가 있고 차량탑재성도 미약하다. 한편 산업용에는 교류전동기 시스템의 채용이 급속도로 이루어지고 있으며 앞서 기술한 점들을 극복하기 위해서는 하드웨어, 소프트웨어 측면에서 기술성과의 트랜스화를 하도록 하여야 한다. 그러나 이들 기술도 현재로서는 변혁기이므로 유동적이다. 반면에 전력반도체소자 및 집적회로기술, 제어기술 등의 발전은 급속히 이루어지고 있어 전기자동차용의 보급이 확대되리라 사료된다. 현재 전기자동차용의 추진시스템은 견인력만으로 결정할 수 없다. 또 전지의 성능향상의 문제가 있고 직접적으로는 관련기술의 발전을 예측할 수 있어야만 한다. 그리고 구체적인 전기자동차용 교류전동기의 개발 시작연구는 관련요소가 발전의 단계에 도달한 점에서 재검토하여 결정해도 늦지 않고 또 기술의 효율적인 트랜스화라는 점에서도 좋은 방법이라고 사료된다.

다. 교류구동 시스템의 사례

교류구동 시스템의 사례로서 서보 구동이 가능한 BLDC 전동기 및 유도전동기 구동방식의 특성을 분석하여 전기자동차에 적용하기 위한 기술적 요소를 분석한다.

(1) 영구자석형 전동기의 구동방식

그림 9는 구동시스템에 본질적으로 적합한 구동방식으로 속도 서보를 나타냈다. 기준속도와 실제속도의 에러는 토크 명령치로 구해지며 그 토크 명령치는 고정자 전류 명령치를 얻기 위해서 폐환의 의미로 사용된다. 회전자의 위치 피드백은 고정자 전류 명령치를 상전류 명령치로 바꾸기 위해 두 명령치의 구동이 필요하다. 각 구동을 위해 필요한 위치 정보는 얼마간 차이가 있다. 전류제어 측면에서는 Hysteresis 또는 PWM 전류제어기는 일정 토크영역에서 기



<그림 9> PM 전동기의 구동시스템

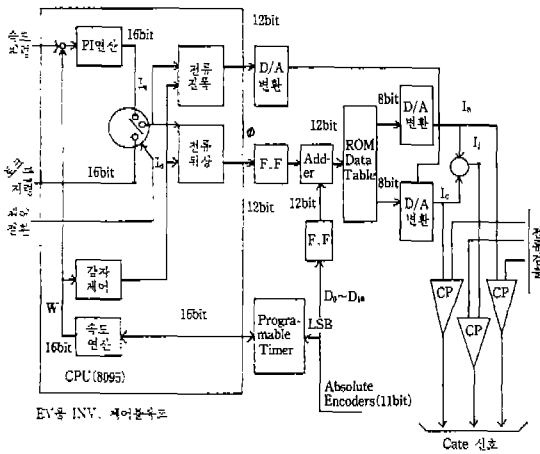
준 명령치가 가능한 한 전동기에 근접하게 흐르는 실제전류에 도달하도록 유지하는데 사용된다. 즉 전류 폐환은 이를 위하여 사용된다. 전류제어의 실제 로직은 매우 다양하다. 전류제어기와 베이스 구동증폭기를 포함하는 전체적인 전력전자부분의 회로는 스위칭 소자에 따라 결정된다. 폐환은 Position Feedback 소자와 폐환 방식에 따라 다르며 이는 고정자 전류 벡터로부터 상전류를 얻기 위해서 필요하다.

㉞ IZA의 구동 Controller

동경전력에서 개발한 Wheel-In-Motor Type의 BLDC 전동기의 구동을 위한 Controller의 블록도는 그림 10과 같다. 구동시스템의 특징은 다음과 같다.

- ① 주회로 소자의 IGBT채용
- ② Direct Drive 구동을 위한 속도 및 토크 제어기능
- ㉞ 미국의 UNIQ Mobility System

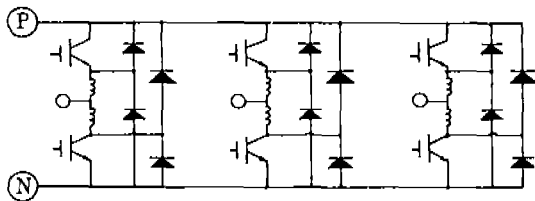
UNIQ 전동기는 BLDC 전동기를 채택하고 있으며 브러시에 의해서 기계적으로 정류되는 것보다 전력 반도체 소자에 의해서 전기적으로 정류를 하고 있다. 전기적인 정류(Commutation)는 Logic Controller에 의해서 전동기의 권선에 전류를 공급함으로써 전동기의 속도와 토크를 제어하고 있다.



<그림10> IZA의 구동 Controller

구동 컨트롤러의 개발특성은 특별히 설계된 전동기에 적합하도록 되어 있고 이 전동기는 매우 낮은 인덕턴스(2~20 μ H), 낮은 저항(1~200 m ohm)과 매우 높은 정류주파수(3kHz) 특성을 가진다. 스위칭 소자로서는 스위칭 손실을 고려하여 IGBT와 Power MOSFET를 사용하였고 스위칭 기술은 IGBT와 Power MOSFET 소자에 PWM 제어를 하고 있다. 그 이유는 전동기 권선 인덕턴스의 매우 낮은 레벨에 기인하는 전동기와 구동 컨트롤러에 전류 리플을 줄이기 위해서이다.

UNIQ사의 인버터 주회로도는 그림11과 같이 구성된다. 그림11은 기본적인 주회로로서 4상한 동작을 하고 있다. 즉 정/역회전, 역행/회생 모드를 모두 가지고 있다. 이들 모드는 각각의 컨트롤러내에 포함된 로직 카드에 의해서 제어되



<그림11> 인버터의 주회로

고 조작시에는 -10V에서 +10V까지 아날로그 전압으로 제어하게 되어 있다. 피드백 제어를 하는데 있어서 Hall효과 센서를 이용하며 속도 제어를 하고 있다.

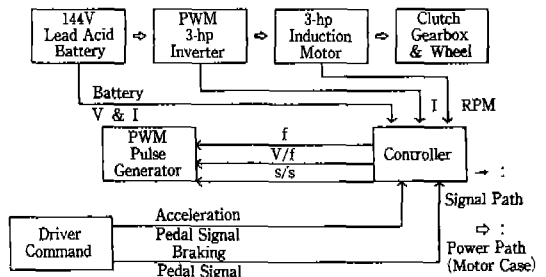
로직 카드에 있어서는 전동기와 컨트롤러를 과열로부터 보호하기 위하여 특별히 회로를 삽입하였고 전동기 권선과 구동 컨트롤러의 방열 온도를 감지하여 과열되면 구동 컨트롤러내의 전류 제한회로가 동작하도록 하였다.

개발품은 전동기가 50kW이고 컨트롤러는 150 mm(H)×319 mm(W)×685 mm(L)이고 무게는 약 20 kg이 된다.

(2) 유도전동기 구동시스템

유도전동기 구동시스템은 실용화에 가장 근접한 시스템으로 평가받고 있다. 그러나, Nissan의 FEV나 GM의 Impact 등의 제어기에 대한 자료가 미비하므로 Hongkong 대학에서 Prototype으로 개발한 유도전동기 구동 Controller의 특성은 다음과 같다. 표15는 EV의 특성을 나타내고 있다.

그림12는 전체적인 시스템의 블록도를 나타내고 있다. 전지 전압은 연축전지(144V)로부터 받은 입력 전압을 PWM 3상 인버터를 통하여 3상 유도전동기를 구동시킨다. 이 방식은 미국의 Unique Mobility사와는 달리 유도전동기를 이용하고 있다. 구동 컨트롤러에서는 전지의 전압, 전류를 감지하고 또한 유도기의 속도를 연산한 후 원하는 속도 명령을 지령한다.



<그림12> 시스템의 블록도

<표15> 개발 전기자동차의 특성

항 목	특 성
차 량 무 게	1110 kg(전지 포함)
등 판 능 력	36%
가 속 시 간	10초 (0~40 km/h)
일 총 전 거 리	100 km (40 km/h 정속)
최 고 속 도	80 km/h
전 지 시 스템	연속전지, 144V (12*12V), 105Ah
인버터	
-방 식	PWM Power TR
-출력 전압	15~100V
-출력 주파수	4~100Hz
-출력 전류	200A 이상
전 동 기	11kW, 100V, 3상 2극 유도기

그림13은 컨트롤러의 제어신호 블록도를 나타내고 있다. 2개의 신호는 구동장치에 의해서 주어지는데, 첫째는 요구되는 동기전동기 RPM (W_r)을 결정하는 가속 페달 신호이고 나머지 하나는 요구되는 제동력을 결정하는 제동 페달 신호이다.

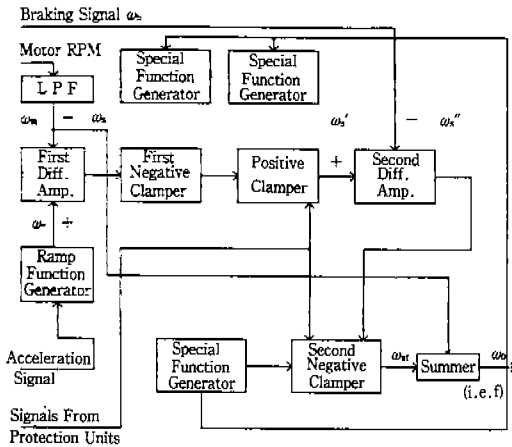
가속 입력시에 모든 미소한 변화 신호를 평활한 신호로 바꾸는 램프 펄스 발생기가 쓰이며 그 장치는 W_r 과 전동기의 W_m 과의 차이를 검지할 수 있다. 즉 결과는 $W_s = W_r - W_m$ 이고 이것은 요구되는 토크와 관련된다. 저역 필터 (LPF)는 속도계에서 발생하는 리플을 제거하는데 이용되고 확실하게 동작하도록 전동기가

<표16> 일본의 전기자동차 구동방식

차 명·형 식 (회 사 명)	전 동 기			제 어 방 식
	종 류	정격출력	전 압	
Nissan FEV (Nissan Motor Co.)	교류유도전동기	20 kW	200V	IGBT Inverter
Nissan Cedric EV (Nissan Motor Co.)	교류유도전동기	20 kW	200V	IGBT Inverter
Tohoku MYLD 동북전력(株)	직류분권전동기	12 kW	120V	Thy. Chopper
DREAM MINI 중부전력(株)	브러시레스 직류전동기	3.5kW	240V	Tr. Chopper
IZA 동경전력/동경 R & D Co.	브러시레스 직류전동기	6.8kW	288V	Tr. Chopper
TOYOTA TOWNACE EV 도요다 자동차(株)	교류 농형 유도전동기	20 kW	120V	Tr. Inverter
PRESIDENT EV Nisan Motor Co.	직류분권전동기	12 kW	100V	Thy. & Tr. Chopper
MAZDA EV(방송중계) Mazda Motor Co.	직류분권전동기	12 kW	90V	Thy. & Tr. Chopper
CO-OP EV 2000 Co-Op EV/Isuzu Co.	직류분권전동기	33 kW	108V	Tr. Chopper
Chubu Electric Van 중부전력(株)	교류 농형 유도전동기	20 kW	120V	Tr. Inverter
Electric JETTA 동경전력(株)	직류타력전동기	13.5kW	90V	Thy. & Tr. Chopper
Suzuki Every Super-Multi Roof, Suzuki Co.	직류분권전동기	14 kW	125V	MOS FET Chopper
Daihatsu Hijet Van Daihatsu Motor Co.	직류분권전동기	14 kW	112V	Tr. Chopper
Daihatsu Rugger EV 관서전력(株)	직류분권전동기	20 kW	120V	Tr. Chopper

<표17> 미국의 전기자동차 구동방식

특성	Kubvan	Electric Pickup	Electrotransporter	Griffon
전동기 종류	직류직권전동기	타여자 직류전동기	타여자 직류전동기	타여자 직류전동기
정격kW(hp)	13.4(18)	18(24)	17(23)	40(54)
무게kg(lb)	47.6(105)	88(195)	93(205)	137(302)
제조	Prestolite	Siemens	Siemens	Lucas CAV
제어장치 전기자	Series SCR Chopper	Series Resistor & Contactor	SCR Chopper	SCR Chopper
계자	-	TR. Chopper	TR. Chopper	TR. Chopper
최대전류	420A	300A	320A	350A
제조자	Cable Form	EHV Systems	Siemens	Lucas Aerospace
차량제조사	Grumman-Olson Sturgis, Mich.	South Coast Tch. Gil- bertsville, PA	Volkswagen Wolfsburg, Germany	GM Bedford Luton, England



<그림13> 제어장치의 블록도

허용할 수 있는 T-S 영역(1.5 P.U. 정격 토크와 1.5 P.U. 정격 전력)에 있게 한다.

ω_s 신호는 두 개의 클램프 회로를 통하여 Positive와 Negative의 최대허용값에서의 슬립을 제한하도록 한다. 이 최대 허용할 수 있는 슬립은 동기 주파수에 의존한다. 그러므로 2개의 클램프의 입력은 동기 주파수 ω_0 의 최종 출력치가 된다. 클램프는 전지의 과전압, 인버터의 과부하 등의 보호회로부터 입력 신호를 받는다. 보호회로부터는 허용할 수 있는 최대의 슬립을 감소시킬 수 있고 그래서 정상적인 동작

이 시작된다. 또한 어떠한 경우에도 2개의 클램프는 동작하지 않으며 일반적인 경우에는 Positive 클램프가 동작하게 된다. 반면에 Negative 클램프는 회생시에 동작하는 경우가 된다. 클램프 단의 ω_s 값은 제동 페달 신호에서 ω_s 를 ω_b 로 표현되고 그래서 제동 페달 신호의 영향이 슬립 주파수를 감소시킨다. 다시 ω_s 는 두번째 Negative 클램프를 통과하여야 하고 인버터와 전동기의 용량내에서 요구되는 회생 제동력을 확실하게 하도록 한다. 그리고 허용할 수 있는 최대 Negative 슬립은 주파수에 의존하며 보호회로부터 제어하에 있게 된다. 허용할 수 있는 Negative 슬립값은 제동의 원활성에 달려 있다. 최종출력 ω_{sf} 는 전동기의 출력 ω_m 의 전류치를 더함으로써 전동기의 동기 명령치(ω_0)가 구해진다. 이때 발진기는 요구되는 전동기의 동기 주파수를 발진하게 된다.

PWM 인버터와 유도전동기 구동시스템이 앞으로 전기자동차용 구동 컨트롤러의 주축이 되리라 예측되고 이 방식의 장점인 강인성, 신뢰성, 소형경량화, 고효율화 및 저가격 측면에서 이에 대한 연구가 활발히 진행되리라 사료된다.

표16 및 표17에 일본 세계 각국에서 현재까지 개발된 전기자동차의 구동방식에 대해서 정리하였다.