

電氣自動車の 驅動制御技術

자동차의 배출가스가 가져오는 대기오염문제로, 배출가스를 배출하지 않는 장점이 있는 전기자동차의 도입이 계획되고 있는 한편, 세계의 자동차관련메이커들은 꾸준히 개발·개량을 추진하고 있다. 그 기술은 착실하게 진전되어 近距離域 내에서의 교통수단으로서의 實用域에 이르고 있으며 앞으로 실용화를 위한 시험이 본격화될 것으로 보인다. 三菱電機(株)에서는 보다 고성능의 전기자동차의 실용화를 위하여 유도전동기와 선진 구동제어 기술의 연구·개발에 진력하여 유도전동기와 선진 구동제어기술을 조합한 구동시스템을 개발하였다.

유도전동기는 고속화, 냉각의 水冷化, 스테이터절연의 高耐熱化, 저손실코어材의 적용 등으로 소형·경량화를 기하였다. 컨트롤러는 인버터의 파워素子에 구동·보호회로를 내장한 IPM(Intelligent Power Module)을 채용하고 모터의 냉각수를 공용하는 수냉방식을 채용하여 소형화하였다. 제어부는 고속·고기능 1칩 CPU(Central Processing Unit)를 채용하고 유도모터의 高 효율화와 토크제어의 高應答·高精度化를 양립시킨 高 효율·고응답벡터제어를 적용하였다. 또한 속도센서의 생략으로 코스트저감과 신뢰성의 향상을 위한 속도센서리스제어의 적용을 검토하고 있다. 이상으로 소형·경량·고효율·저코스트를 조화시킨 고성능의 전기자동차구동시스템을 실현하였다.

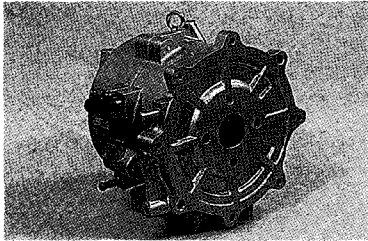
1. 머리말

전기자동차는 종래의 內燃엔진차와 비교하여 배출가스, 소음, 에너지의 이용효율, 에너지원의 다양화 등의 면에서 우수하다.

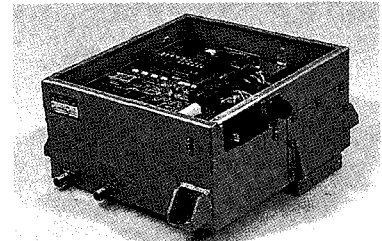
이를 널리 보급하기 위해서는 에너지밀도가 높은 배터리

의 실현을 비롯하여 성능면의 과제와 충전설비의 인프라정비, 코스트 등 해결하여야 할 과제도 많으며, 환경보호가 강조됨과 함께 그 보급이 요망되고 있다.

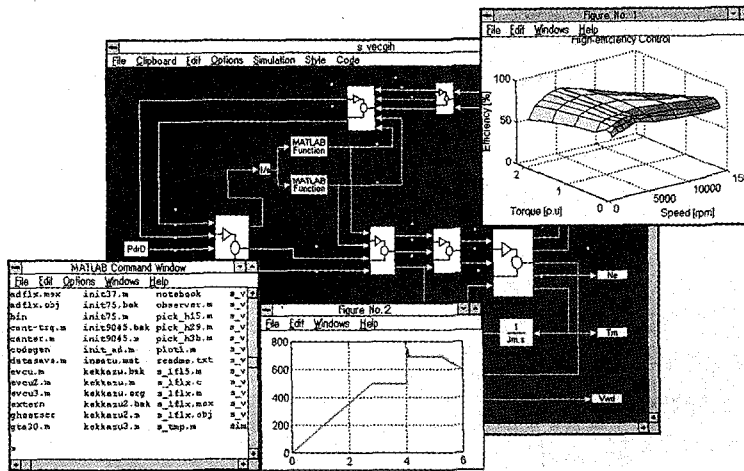
동사에서는 오랫동안 배양해 온 모터 및 파워일렉트로닉스



(a) 모 터



(b) 콘트롤러



(c) 고효율 벡터제어의 MATLAB에 의한 시뮬레이션

(주) "MATLAB"는 미국 The MathWorks, Inc.의 등록상표이다.

전기자동차의 구동시스템

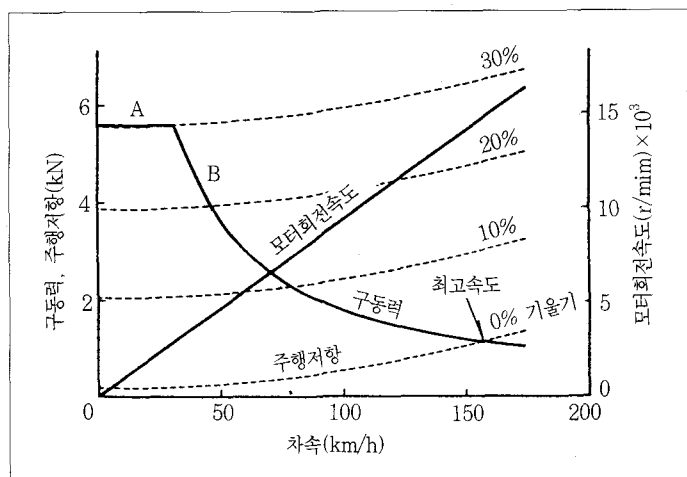
수냉방식의 유도모터와 IPM인버터를 채용하고, 고효율·고응답벡터 제어를 적용하여 실용성이 높은 구동시스템을 실현하였다

제어기술을 결합하여 보다 고성능의 전기자동차 구동시스템의 실현을 위한 개발에 더욱 노력하고 있다.

여기서는 구동시스템의 제어기술을 중심으로 개발상황을 기술한다.

2. 驅動시스템에 필요한 性能

그림 1은 전기자동차의 주행성능곡선을 나타낸 것이다. 모터에 요구되는 구동력은 소요기울기의 각도에 요하는 低速域의 高토크, 平坦路에서의 목표최고속도를 만족시키는 高速域토크, 그리고 가속성능에 관여하는



<그림 1> 주행성능곡선

주로 低~中速域토크이다. 이들의 요구토크성능은 본래 모터가 갖는 토크특성과 잘 합치되는 것으로 그림의 굵은 선으로 나타낸 定토크域(A)와 定出力域(B)의 최대토크곡선으로 흡수할 수 있다. 따라서 엔진에서 필요로 하는 기어체인지가 필요없게(시프트레스) 할 수가 있다. 전기자동차에서는 이 특성을 살려 固定減速기어의 채용을 목표로 하는 것이 일반적이므로 넓은 회전속도 범위가 요구된다.

구동시스템에 필요한 성능요소를 종합하면 다음과 같다.

- ① 居住性, 走行性能 향상을 위하여 소형·경량일 것.
- ② 시프트레스를 가능케 하기 위하여 회전속도범위가 넓을 것.
- ③ 배터리의 유한에너지를 유효활용하기 위하여 고효율일 것.
- ④ 토크制御性(正轉·逆轉, 力行·回生)이 좋을 것.
- ⑤ 자동차의 환경조건에 적합한 신뢰성이 있을 것.
- ⑥ 보급을 위하여 저코스트일 것.

3. 驅動시스템의 構成

3.1 모터

모터는 3상 농형 유도방식을 채용하였다. 유도모터는 전기자동차의 구동모터로서 필요한 요소인 ① 용적 및 질량, ② 회전속도 ③ 효율, ④ 제어성, ⑤ 신뢰성, ⑥ 코스트에서 밸런스가 취해진 소위 코스트퍼포먼스가 우수하다. 특히 로터의 구조가 견고하고 弱界磁制御에 의한 고속화가 용이한 점 때문에 감속기어비를 크게 함으로써 모터의 최대토크를 상대적으로 제어할 수가 있어 모터의 소형화와 전류저감에 의한 인버터의 소형화를 기하기 쉬운 장점이 있다.

냉각은 강제공냉방식과 수냉방식을 비교검토하여 소형·경량이고 냉각효율이 우수한 수냉방식을 선택하였다. 냉각계의 補機를 포함한 평가결과 수냉방식은 공냉방식에 비하여 質量을 20%, 용적을 30% 저감할 수 있고 또한 補機

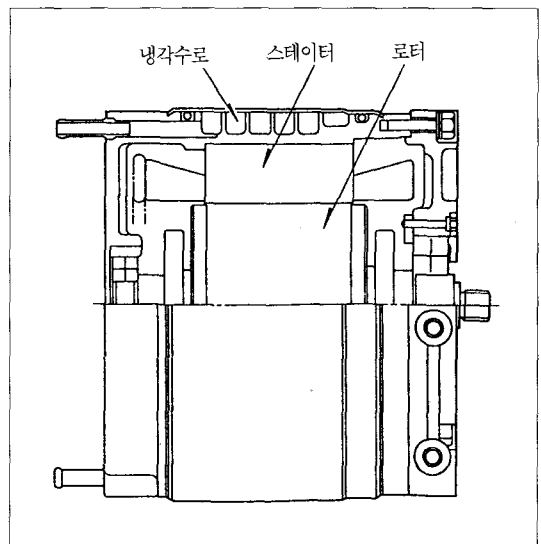
의 소요전력이 1/4로 되는 것을 확인하였다. 그리고 인버터의 파워소자부의 수냉계와 모터의 냉각계통을 공통으로 함으로써 시스템의 整合을 도모하였다. 또한 수냉방식은 공냉방식에 비하여 모터구조의 밀폐화가 용이하며 자동차의 내수성·내진에성의 환경조건에 적합토록 하기 쉬운 이점도 있다. 개발한 저기자동차용 유도모터의 구조를 그림 2에 표시한다.

스테이터용 저손실코어材 및 고내열전연재의 채용과 권선의 고밀도화, 하우징재료의 경량화에 의하여 일반산업용 모터와 비교하여 동일출력으로 약 1/3로 소형·경량화할 수가 있었다.

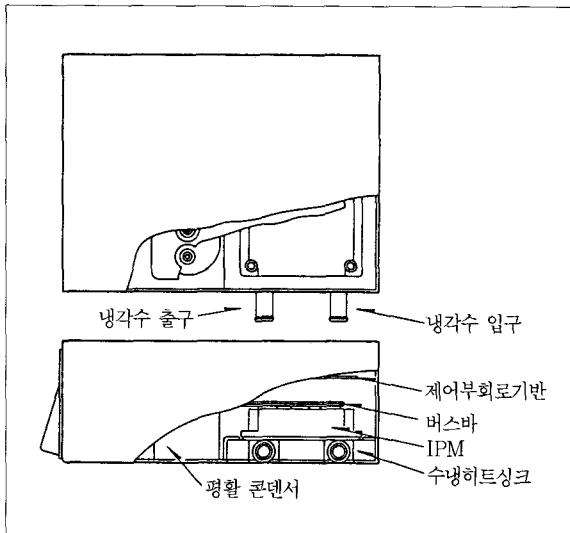
3.2 컨트롤러

전기자동차의 모터컨트롤러에 대하여도 전기자동차에 요구되는 요구성능을 만족시키기 위한 하드웨어를 개발하였다.

컨트롤러의 인버터부는 일반적으로 파워소자, 구동회로, 보호회로, 평활콘덴서, 스나바회로로 구성된다. 동사에서는



〈그림 2〉 유도모터의 구조



〈그림 3〉 콘덴서 컨트롤러의 구조

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)파워소자를 고기능화한 IPM을 채용하여 파워소자, 구동회로, 보호회로를 일체화하였다. 또한 平板비스바와 平滑콘덴서의 최적배치에 의하여 노이즈상쇄효과를 향상시킴으로써 스나바회로를 생략할 수 있었다. 또 모터특성과 IPM특성을 매칭시킴으로써 IPM을 소형으로 구성하였다.

컨트롤러의 제어부는 모든 주행조건에서 최적한 주행토크指수를 연산하는 토크 지령연산부와 토크지령·전압·전류 등을 입력으로 하여 고효율제어·속도센서레스 제어 연산으로 적절한 3상印加 전압을 출력하는 모터제어부로 구성된다.

이 제어부는 1칩의 고기능CPU로 실현하고 모터定數·제어定數 등은 플래시메모리를 채용함으로써 제어용하드웨어부의 표준화를 기하였다.

냉각에는 유닛을 밀폐구조로 하기 쉬운 수냉방식을 채용하여 모터의 上流에 배치

하고 있다(그림 3 참조).

이상과 같은 구성으로 IGBT를 개별적으로 배치한 유닛과 비교하여 용적에서 50%, 질량에서 45%의 개선을 기하였다.

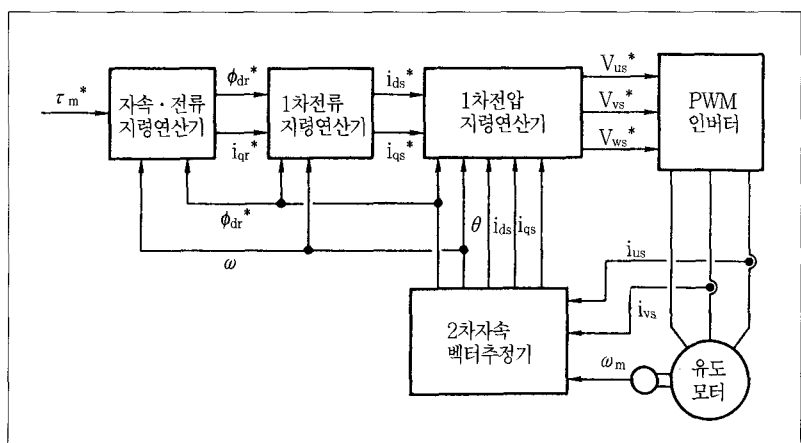
4. 制御技術

전기자동차의 구동시스템에는 고훈답·고정도 토크제어, 고효율화, 그리고 속도센서의 생략에 의한 신뢰성 향상 등을 실현하기 위하여 여러 가지 제어기술이 요구된다.

이하 주요 제어기술에 대하여 기술한다.

4.1 高效率·高應答 벡터制御

유도모터의 고훈답토크제어를 실현하기 위하여 동사 독자적인 슬립주파수제어형 벡터제어를 적용하였다. 이 방식은 유도모터의 1차측 회로모델을 이용하여 모터속도를 추정함과 동시에 1차전류로부터 2차자속벡터를 추정하고 또한 이 벡터에 동기한 회전좌표축(d-q축)상에서 유도모터의 여자전류와 토크전류를 피드백제어하는 것이다. 이에 의하여 정지상태에서 定出力운전영역까지의 광범위한 속도영역에서 매끄럽고 또한 고훈답의 토크제어특성을 얻을 수 있다. 이 벡터



〈그림 4〉 고효율벡터 제어계의 블록도

제어는 고응답·고정도의 토크제어특성이 요구되는 철강압연기용 유도모터 구동시스템에의 적용을 비롯하여 수많은 사용실적이 있다.

다음으로 유도모터의 최고효율구동조건은 모터의 전압·전류방정식에서 "2차자속벡터의 진폭 ϕ_{dr} 에 대한 2차전류의 q 축성분 i_{qr} 의 비 i_{qr}/ϕ_{dr} 의 값이 모터정수와 1차주파수로 결정되는 소정의 함수치와 일치하는 것"으로 하여 도출된다. 한편 유도모터의 발생토크 τ_m 는 i_{qr} 와 ϕ_{dr} 의 곱에 비례한다. 그래서 상기한 최고효율조건을 만족시키면서 토크지령에 응하여 i_{qr} 와 ϕ_{dr} 을 배분하면 고효율이며 또한 고응답의 벡터제어가 가능하게 된다.

이 제어원리에 기초한 벡터제어계의 블록도를 그림 4에 표시한다. 여기서는 자속·전류지령 연산기에 의한 토크지령에서 최고효율구동조건에 기초하여 i_{qr} 와 ϕ_{dr} 각각의 지령이 연산된다. 또한 1차 전류지령연산기에 의하여 이들 지령으로부터 여자전류지령 i_{ds}^* 와 토크전류지령 i_{qs}^* 가 연산되고 2차자속벡터추정기와 1차전압지령기에 의하여 i_{ds} 와 i_{qs} 가 각각의 지령에 추종하도록 벡터제어가 행하여진

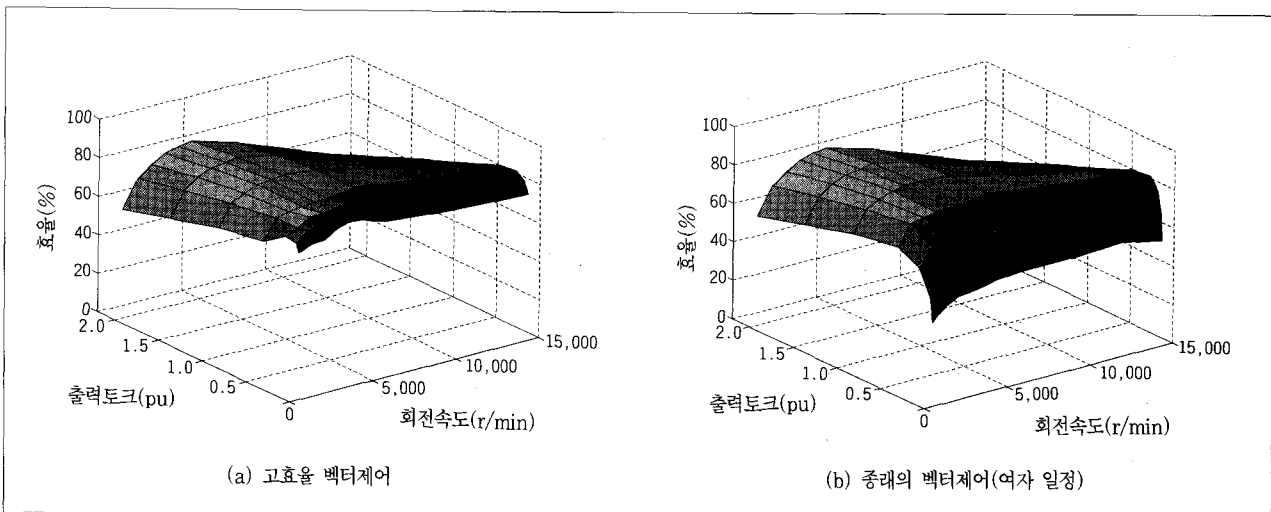
다.

각 토크·회전속도역에서의 종래제어 방식과 이 제어 방식의 모터효율에 대하여 실험결과를 그림 5에 표시한다.

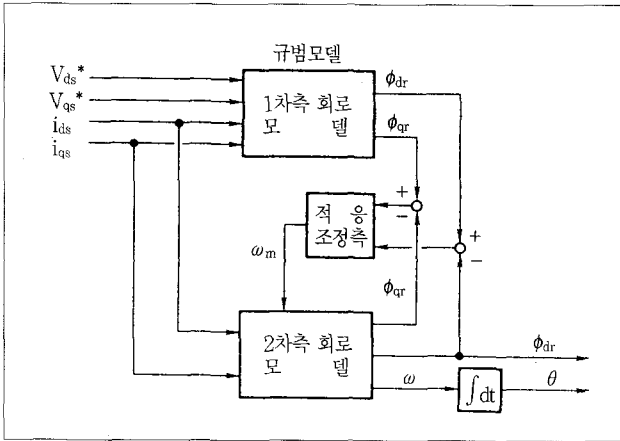
이 제어방식에 의한 모터효율의 개선은 특히 저토크域에 있어서 현저하며 종래의 제어방식에 비하여 최대 35포인트를 개선할 수 있었다. 일반주행시에 운전빈도가 높은 영역에서의 모터효율이 향상됨으로써 1充電當 주행거리의 伸長에 기여하게 된다. 또 모터의 발열량이 감소함으로써 모터의 출력향상, 소형화를 기하였다.

4.2 速度센서리스 制御

벡터제어의 적용으로 고응답의 토크제어특성을 얻을 수 있으나, 벡터제어의 결점은 모터의 속도센서가 필요하게 되는 것이다. 이 때문에 속도센서를 사용하지 않는 소위 속도센서리스 벡터제어의 개발이 활발하게 추진되고 있다. 최근에는 제어기술의 발전과 고속연산프로세서의



〈그림 5〉 모터 효율특성



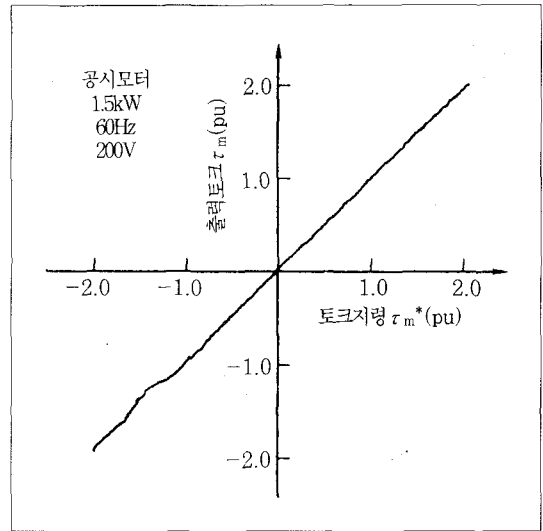
〈그림 6〉 2차 자속벡터 同定器의 블록도

채용으로 속도센서레스 벡터제어의 제어능력이 향상되고 이 제어를 적용한 범용인버터가 시장에 등장하기 시작하였다.

그러나 저속회생운전시에 토크의 직선성이 열화한다고 하는 과제가 남아 있다. 그 때문에 전기자동차의 구동시스템에 속도센서레스 벡터제어를 적용한 경우 저속주행시의 전기브레이크력이 부족한 경우가 있다.

그래서 이 문제를 해결하기 위하여 규범모델적용제어를 적용한 2차자속벡터 同定器를 개발하였다. 이 同定器는 그림 6에 표시하는 것과 같이 유도모터의 1차속 회로모델(規範모델)을 사용하여 구한 2차자속벡터연산치와 2차속 회로 모델을 사용하여 구한 2차자속벡터 同定値가 일치되도록 2차속 회로모델에 필요한 모터속도 ω_m 을 適應調整則을 이용하여 同定하는 것이다. 또한 적응조정칙을 연구함으로써 저속회생시의 2차자속벡터의 推定精度의 향상을 실현하였다. 이 同定器를 그림 4의 2차자속벡터추정기와 바꾸어 놓음으로써 속도센서레스 벡터제어계를 얻을 수 있다.

그림 7에 이 제어계의 저속회생시의 토크제어특성을 표



〈그림 7〉 토크 제어특성(2%속도시)

시한다. 그림에서 회생시에도 거의 직선의 토크특성을 얻고 있음을 알 수 있다.

5. 맺음말

이상 三菱電機가 연구하여 온 전기자동차용구동시스템의 개발상황에 대하여 기술하였다.

자동차의 대기오염문제에 대한 유력한 해결책으로서 전기자동차에의 기대는 크다. 앞으로도 전기자동차를 현재의 자동차 사회에 적응시켜 널리 보급시키기 위하여 성능·코스트·편리성 등에의 기술개발이 각 방면에서 추진될 것으로 생각된다. 동사도 이에 일조가 되도록 기술개발을 추진해 나가고자 한다.

이 원고는 일본 三菱電機技報를 번역, 전재한 것입니다. 본고의 저작권은 三菱電機(株)에 있고 번역책임은 대한전기협회에 있습니다.