

자동차 관련 전력전자기술의 최근동향

문 형 태

((주)만도 책임연구원)

1. 서론

완성차의 연비 향상요구, 친환경 정책, 소비자의 저가 요구 등에 의해 산업계에 머물러 있던 전력 전자 기술은 최근 들어 급속히 자동차 분야로 확산되고 있다. 그리고 최근 수년간 자동차 업계의 화두는 Hybrid Electric Vehicle이었다. 특히 도요타의 THS II를 장착한 2004년형 Prius가 일본 주행 Test 기준 가솔린 1리터당 35km를 주행하고 이러한 기술력이 미국의 환경정책과 맞물려 2002년 12월 누적 12만대 판매이후 2005년에는 10만대를 예상하고 있으며, 이러한 고 연비의 핵심기술은 전동기와 발전기 그리고 엔진의 유연한 제어에 의해 가능해졌다.

또한 유압식이었던 조향 보조장치인 power steering은 일본 업체 Melco의 전동식 power steering의 대량 생산에 따라 완성차의 저가 요구에 부응해 2004년 100만대 이상 생산을 기록하고 있으며 이는 전력전자업계의 완성 기술인 DC motor의 전류 제어기술이 기본이 되고 있다. 또한 고회도 전 조동은 고전압 방전을 이용한 기술로서 DC/DC converter기술이 적용된 것으로 기존의 할로겐 Lamp 비해 높은 직진성, 넓은 대역의 빛의 밝기 때문에 고가임에도 많은 보급이 이루어졌다. 향후 차량제어의 통합화를 위해 Actuator의 운전자와의 기계적 분리를 의미하는 by-wire 기술이 개발 및 안정화 되면 전동기에 의한 제동을 실현하는 EMB(Electro-mechanical Brake)의 적용이 늘어날 것으로 보이며 또한 가솔린 엔진 종류 중 고압의 가솔린을 실린더에 분사하는 direct injection type의 엔진에 적용되는 고압 연료 펌프에 안정적인 연료압력을 유지하기위한 BLDC 구동연료 펌프가

적용 될 예정이다.

본 논문에서는 자동차에 적용이 늘고 있는 전력전자 기술을 HEV, 사시 제품 등을 예로 들어 설명하고 현재의 문제점과 대책 및 향후 전망 등을 간략히 서술한다.

2. 본론

2.1 Hybrid Electric Vehicle

Hybrid Electric Vehicle이란 자동차의 구동원으로 combustion engine과 전기를 다른 하나의 구동원으로 사용하는 vehicle을 말하는 것으로, 현재 Toyota prius, Honda Civic과 Insight 등이 이미 출시되었으며 Chevrolet의 Silverado와 GMC의 Sierra가 출시될 예정이다⁽¹⁾.

그림 1은 세계적으로 가장 많이 팔린 Toyota사의 THS-II의 power train의 외관 및 절개도이다. 전동기와 발전기 그리고 엔진이 동일 축상에 있으나 회전수를 각각 다르게 운전할 수 있도록 유성기어로 연결되어있다.

엔진의 특성상 고속에서 고효율운전이 가능하므로 엔진 구동시는 항상 고속, 일정속을 유지할 수 있도록 발전기의 부하를 조절하고 전동기의 출력축은 차량 구동축과 연결되어 운전자의 감속 의지에 따라 회전한다. 그림 2에서 power split device는 유성 기어의 조합이며 발전기의 축 속도와 전동기의 축속도, 엔진의 축속도는 다음식의 관계를 갖는다.

$$K_m \cdot n_m + K_g \cdot n_g = K_e \cdot n_e \quad (1)$$

여기에서 K_m 은 전동기축에 연결된 기어의 링기어의 톱니

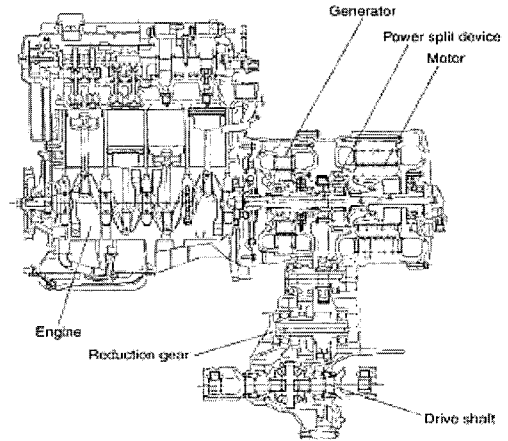
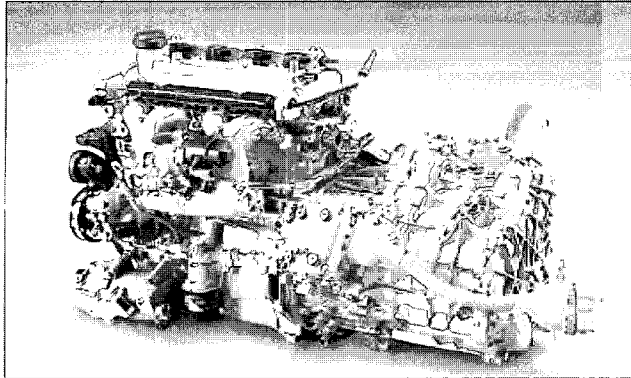


그림 1 THS-II 외관 및 절개도

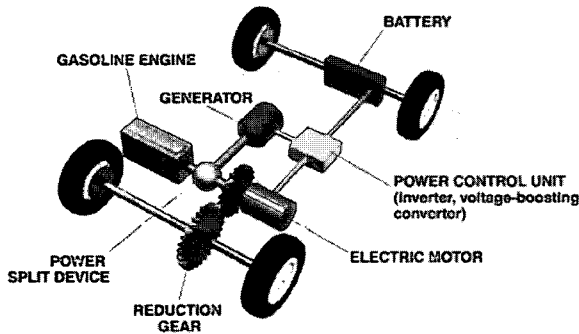


그림 2 THS-II 동력 구조도

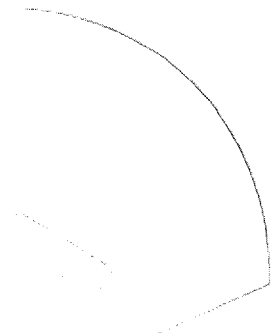


그림 3 THS-II 전동기rotor의 자석 위치

수, K_g 는 발전기 축에 연결된 태양(sun) 기어의 톱니수, K_e 는 엔진에 연결된 유성 기어의 톱니수, n_e 는 엔진의 회전수, n_g 발전기의 회전수, 그리고 n_m 은 전동기의 회전수이다. 이 관계식에서 보는 바와 같이 전동기의 회전수가 주행상태에 따라 바뀌어도 발전기의 발전 상태에 따라 회전 속도를 제어함으로써 엔진은 항상 효율이 좋은 고속영역을 유지할 수 있다.

그림 2는 구동력 흐름을 보기위한 시스템 구성도이며 전동기와 발전기 그리고 엔진의 동작에 따라 여섯가지의 상태로 구분할 수 있다.

1) 시동 및 저속 운전시

엔진은 정지하고 배터리로부터 전력을 받아 전동기로 차축을 구동하여 주행력을 발생

2) 보통 주행시

발전기를 starter로 동작하여 엔진시동을 걸고, 엔진은 발전기를 돌리면서 차축에 구동력을 공급하며, 발전기는 전동기에 전력을 공급

3) 가속시

보통 주행시의 조건에서 배터리로부터 추가 전력을 전동기

에 공급

4) 감속 및 제동시

엔진의 시동은 꺼지고 전동기가 발전기로 동작하여 배터리로 차량의 운동에너지를 전기에너지로 전환 저장

5) 배터리 충전

배터리의 충전 상태를 항상 충분한 상태로 유지하기 위해 차량의 운전상태에 따라 엔진을 구동하여 발전기로 배터리 충전

6) 주행 종료시

엔진 및 전동기 정지

시스템 구성중 Power control unit은 이러한 여섯가지 운전 mode를 적절하게 판단하고 상황에 따라 AC/DC, DC/AC 양방향 전력변환 전류제어를 실시하여 엔진의 상태를 고효율로 유지하도록 고속, 일정 부하상태로 제어한다.

이 시스템에 적용된 전동기는 그림 3과 같이 자석이 회전자 내부에 위치한 interior type permanent magnet synchronous motor로서 구동 및 발전시 회전자의 자기적 비균일에 따른 reluctance를 고려한 토크제어(또는 전류제어)

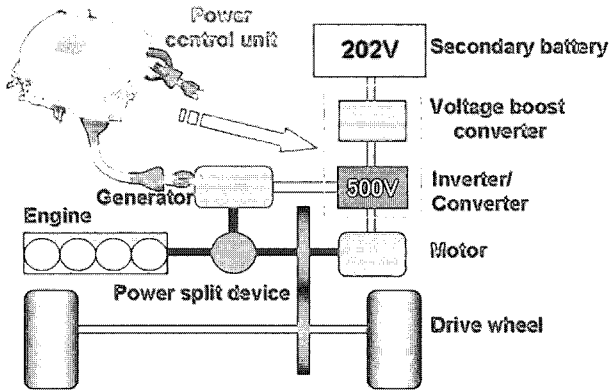


그림 4 THS-II의 전기적 구성 Block Diagram

와 고속 구동을 위한 약자제어가 적용되었으며, 스위칭 방식은 속도에 따라 중저속에서는 PWM, 고속에서는 overmodulation을 적용한 six-step을 적용하여 구동하고 있다. Power control unit는 전동기의 구동 및 발전기의 제어를 위해 500V를 사용하고 배터리에 저장하기 위해 DC/DC 컨버터를 통해 202V로 바꾼다⁽⁴⁾.

이러한 Hybrid vehicle용 전력 시스템을 고효율영역에서 구동하기 위해서 Power control unit는 엔진의 최고 효율상태에 대한 정보를 가지고 발전기의 부하조건을 적절히 조절하는 기술과 엔진의 시동 및 차체 구동시 차축에 걸리는 토크의 충격 및 진동을 억제하는 제어방법의 연구가 진행되었으며⁽⁵⁾, regenerative braking시 최대 충전을 위해 배터리의 상태에 따른 최대 충전 전력등을 조절하고, 제동 장치에 운전자에게 거부감을 느끼게 하지 않을 정도의 제동력이 발생하도록 제동 명령을 만드는 기술들이 연구 되었다.

디젤엔진을 적용한 Hybrid 시스템도 버스 등 대형차를 대상으로 연구되고 있다.

2.2 Electric Power Steering for Passenger Vehicle

Power Steering은 운전자의 조향력을 보조하여 특히 주차시에 운전을 편하게 하는데 목적이 있다. 기존의 power steering은 유압식이 널리 사용되는데, 엔진에 연결된 펌프에 의해 상시적으로 만들어진 유압이 운전자의 조향의사와 타이어의 마찰에 의한 토션바의 비틀림 차이에 의해 방생한 유로를 따라 흐름으로써 운전 보조력이 발생하는 구조이다. 이에 반해 EPS(Electric Power Steering)는 필요시에만 전동기에 전류를 흘려 보조력을 발생시키므로 연비가 개선되고 유압과 이프 등이 없어 유압식에 비해 조립이 간단하다. 이러한 전동식 power steering은 1988년 일본의 Koyo가 최초로 electric power steering을 사용화 한 후로, NSK, Melco, Delphi,

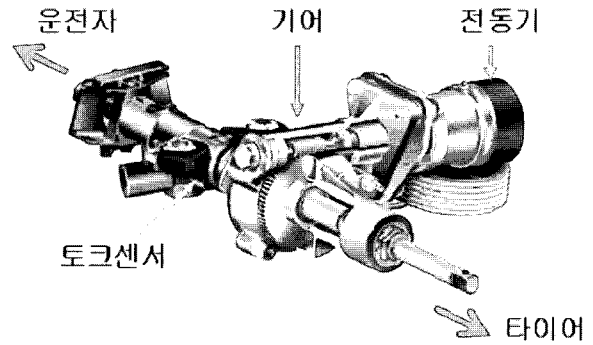


그림 5 Delphi CEPS 단면도

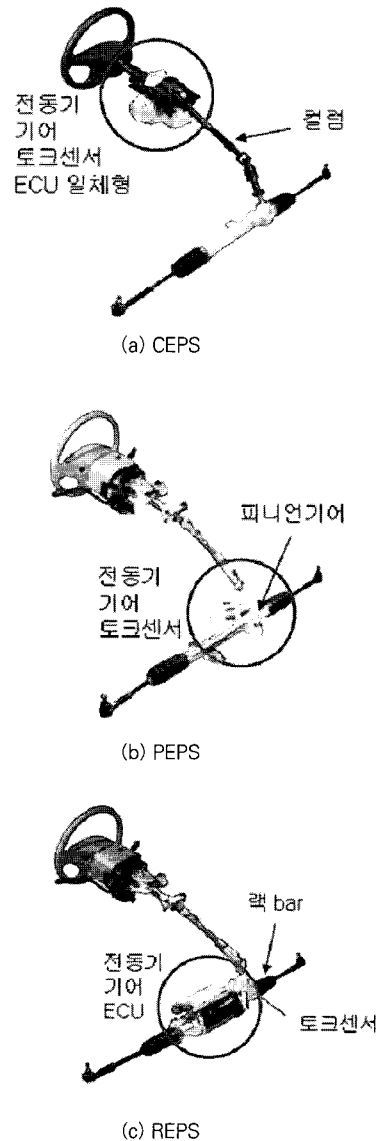


그림 6 Actuator 장착 위치에 따른 EPS 구분⁽⁶⁾

TRW, ZFLS, 등에서 각 회사가 가진 기술을 토대로 경쟁적으로 제품을 출시하였으며 국내에서는 (주)만도가 최초로 양산을 하였다.

기본적인 구성은 그림 5와 같이 운전자의 조향의지를 바퀴의 마찰저항과 운전자의 조향휠 사이의 뒤틀림을 전기적 신호로 바꾸어주는 토크센서, 운전자의 조향력을 보조하기 위한 전동기, 전동기의 토크를 바퀴에 전달하는 기어, 그리고 전동기 제어를 위한 ECU(Electric Control Unit)로 구성되어 있다.

EPS에 사용되는 전동기의 종류는 현재까지는 DC motor가 주류를 이루고 있으나, ZFLS의 유도전동기, TRW의 BLDC 전동도 사용되고 있다. EPS는 이러한 전동기 및 기어의 장착 위치에 따라 CEPS(column Assist Power Steering), PEPS(Pinion Assist Power Steering), REPS(Rack Assist Power Steering)으로 나누어지는데 차량의 전축 하중에 따라 보조할 torque의 힘이 달라지므로 기계적인 한계를 고려하여 actuator의 장착 위치가 결정되어진다.

CEPS는 전동기, ECU 및 토크 센서의 장착위치가 실내이므로 열적인 문제보다는 운전시 소음이 주요 개선 포인트이며 REPS나 PEPS는 Actuator의 장착 위치가 엔진룸이기 때문에 ECPS에 비해 소음 문제보다는 내열기술이 개발의 주요 점이었다.

EPS에 적용되는 전동기 제어방식은 운전자의 운전 느낌을 기존의 유압식 제어 방식을 모사하면서 개선하는 방향으로 발달되어왔다. 전동기의 종류에 관계없이 전압인가 방법으로 PWM을 주로 사용하였으며, 고비율 기어를 사용함에 따라 운전자에게 큰 관성감을 주므로 이를 보완할 수 있는 제어 방법이 꾸준히 연구되었으며, 민감한 운전자의 수감을 보완하기 위해 토크신호에 저주파 필터를 사용하고 저주파 필터를 사용함에 따라 나타나는 전동기의 보타력 지연은 PD제어기 또는 Phase lead-lag 보상기를 적용하는 방법이 사용되었다^{(6),(7)}.

EPS 시스템 특성상 상시 작동이므로 센서나 전동기 기어

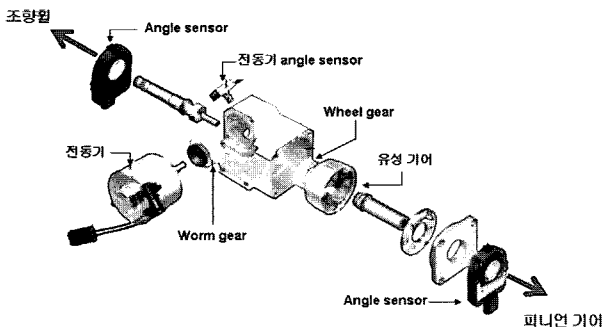


그림 7 AFS 가변 기어 Actuator 구조

의 파손에 따른 오동작을 막는 Failsafe가 강조되어 있으며 향후 센서나 전기 회로에 의한 offset, gain 오차를 방지, 억제 또는 보상하는 기술의 개선이 필요하다⁽⁸⁾.

EPS와 함께 운전자의 운전 편의성 증가와 주행중 안전을 위한 차량 자세제어 및 제동 거리 단축을 위한 하나의 방안으로 개발된 것이 AFS(Active Front Steering)이다.

조향휠과 pinion 기어 사이에 그림 7과 같이 유성기어(또는 하모닉기어)와 같은 기어비 가변 가능한 기어를 삽입하여 운전자의 조향 의지에 대해 타이어의 조향각을 가변하여 운전자에게 안전 및 편리함을 제공하는 장치이다. 전동기를 작동하여 AFS 상하간의 기어비를 조절하여 저속(주차)중 조향시에는 기어비를 크게해 조향휠을 90도 정도만 돌려주어도 타이어는 lock 포지션까지 가게 하여 주차시 운전의 편리성을 높이고 고속 주행시 기어비를 낮게하여 직진성을 확보 하거나 제동 또는 조향시 차량의 자세를 제어하는데 도움을 줌으로써 안정성을 높이는 제어를 구현한다.

이 시스템에서는 전동기의 전류 및 속도를 통해 속도에 따른 기어비를 유연하게 실시 할 수 있는 위치제어가 필요하며, 시스템을 고려한 reference model, Robust control 등이 연구 되었다⁽⁹⁾.

2.3 Electro Mechanical Brake system

기존의 유압식 브레이크에서 없어서는 안 되었던 유압회로와 브레이크오일을 없애고 전기적인 힘만으로 제동을 실현한 것이 EMB(Electro Mechanical Brake)이다. 기존의 전동기 토크 제어기술을 적용하여 브레이크 패드를 빠르고 연속적인 힘으로 제어함으로써 기존의 유압시스템에 비해 제동거리를 줄이고, 페달의 진동을 없애고 소음을 없애는등 기존의 유압식 제동장치에서 가졌던 문제를 해결함과 동시에 페달의 움직임의 다양한 해석으로 더욱 편안하고 최적화된 제동을 할 수 있게 되었다. 이러한 장치는 EPB(Electric parking Brake)로서 동작할 수 있어서 장착 공간을 줄일 수 있으며 조립도 간단하다. 그림 8은 TRW의 EMB의 단면도이다⁽¹⁰⁾.

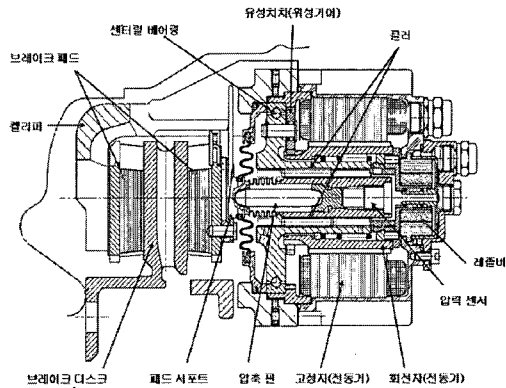


그림 8 Continental Teves 사의 EMB 단면도

짧은 거리에서 큰 토크를 내야 하므로 고정밀의 레졸버를 위치 센서로 사용하였으며 고출력 밀도의 BLAC 전동기를 동력원으로 사용하였다. 회전운동을 직선운동으로 바꾸기 위해 유성기어의 내부에 롤러 베어링을 이용했다.

브레이크 패드에 인가되는 힘을 제어하기 위해 전동기는 전류 제어와 속도제어 루프를 내부에 갖고 있으며 각각 PID제어를 사용했다^[10]. EMB는 기존의 brake 시스템의 기능을 모사하고 전동기의 특성을 더해 차량의 제동 제어에 응용할 수 있도록 제어를 구현한다. 그리고 차량에 있어서 아주 중요한 시스템이므로 기구적 fail이나 제어로직의 lock up 등을 방지 할 수 있는 알고리즘의 개발 및 검증이 필요하다.

2.4 Other Power Electronics in Vehicle

산업에서 기양산 적용되었던 HID 기술이 차량으로 들어와 Hella, Valeo, Koita, 등 해외업체와 (주) HSL, Inlight 등 국내 업체에 의해 Head Lamp에 적용된 제품으로 2004년 약 500만대 이상 생산되었으며 2010년 약 1400만대 이상 소요 될 것으로 보인다.

주요 기술은 12V 차량전원에서 HID Lamp를 ignite하기 위한 20000V의 전압을 만들고 안정기를 통해 일정한 교류를 인가하여 유지시키는 것이다. 차량에 적용하기 위해서는 안정적인 동작과 저가화가 가장 큰 문제이며 특히 진동, 고온, 습도에 견고하고 수명이 길어야 하고 저가화를 위해 소형화해야 하므로 igniter 와 Ballaster 일체형으로 개발이 필요하고 특히 case에 의한 누설 자속을 고려한 DC/AC 인버터 및 igniter의 설계가 필요하다.

3. 결론

차량에서 적용되는 전력전자 기술은 전동기 제어, DC/DC converter, DC/AC inverter 설계 제작 및 제어를 말할 수 있다. 근래에 가장 각광을 받고 있는 HEV에는 전력전자 기술이 HEV기술의 핵심을 이루고 있으며 특히 전동기, 발전기, DC/DC 컨버터 설계, 제작, 제어 및 power management 기술이 이에 해당한다. 또한 샤시 시스템의 전자화에 따라 EPS, AFS, EMB, EPB등 전동기의 적용 범위가 넓어지고 원활한 제어를 위해 차량용으로 제어가 설계 제작 됨으로써 전력전자는 차량제어에 있어서 필수 불가결이 되었다. 향후 자동차의 편의시설의 자동화 및 고성능화를 위해서는 전원 변환기술과 actuator 제어가 단순 on/off에서 복잡하게 변할 것이다. ■

참고 문헌

[1] Robert E. Uhrig, "Using Plug-in Hybrid Vehicles",

The bent of tau beta pi, pp. 13~18, Spring 2005

[2] 조만, "하이브리드자동차기술동향(도요타하이브리드시스템-II를 중심으로)", 기술동향 분석 보고서, 2003.

[3] The new Prius features THS II, Toyota's next-generation hybrid technology, May 2003.

[4] Yoshiaki Ito, Shuji Tomura, Kazunari Moriya, "Vibration-reducing Motor Control for Hybrid Vehicles" R&D Review of Toyota CRDL, Vol.39 No.4(2004.12).

[5] Masayasu Ishiku, "Recent R&D activities of power devices fro hybrid electric vehicles", R&D Review of Toyota CRDL, Vol.39 No.4(2004.12).

[6] Du-Yeol Pang, Bong-Choon Jang, Seong-Cheol Lee, "Steering Wheel Torque Control of Electric Power Steering by PD-Control", ICCAS2005.

[7] Masahiko Kurishige, Takayuki Kifuku, Noriyuki Inoue, Susumu Zeniya and Shigeki Otagaki, "A Control Strategy to Reduce Steering Torque for Stationary Vehicles Equipped with EPS", SAE1999-01-0403.

[8] Eldon G. Leaphart, Barbara J. Czerny, Joseph G. D' Ambrosio, Christopher L. Denlinger and Deron Littlejohn, "Survey of Software Failsafe Techniques for Safety-Critical Automotive Applications", SAE 2005-01-0779.

[9] Scott A. Millsap, E. Harry Law, "Handling Enhancement Due to an Automotivr variable Ratio Electric Power steering system Using Model Reference Robust Tracking Control", SAE 960931.

[10] Idar Petersen, "Wheel Slip Control in ABS Brakes using Gain Scheduled Optimal Control with Constraints", 2003, Ph.d Theses.

[11] Ralf Leiter, "Design and Control of an Electric Parking Brake", SAE2002 2002-01-2583.

〈 저 자 소 개 〉

문형태

1990년 2월 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1993년 2월 만도기계(주) 입사. 2002년 8월 KAIST 전기 및 전자공학부 졸업(공학박). 현재 (주) 만도 중앙연구소 책임 연구원.

