

EV 파워트레인에서 IPMSM의 토크 제어를 통한 에너지 변환에 관한 연구

백수황*

A study on Energy Conversion through Torque Control of IPMSM in EV Powertrain

Soo-Whang Baek*

요 약

본 연구에서는 전기 자동차(EV : Electric Vehicle) 파워트레인의 에너지 변환 특성과 설계를 수행하였다. 그리고 EV 파워트레인의 동력원으로서 영구자석 매입형 동기 모터(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)를 대상으로 하였으며 제어를 수행하였다. IPMSM을 구동하기 위해서는 두 가지 영역인 일정한 토크와 일정한 출력(약제자) 영역이 사용되며, IPMSM을 위한 제어 시스템의 설계는 d-q 레퍼런스 프레임(벡터 제어)을 바탕으로 구성하였다. IPMSM의 두 영역에서 나타나는 모터 토크의 정적 특성을 결정하기 위해 IPMSM의 토크제어 시스템과 d축 전류 제어 시스템을 제안 및 구현하였다. 특성해석을 위해서 Matlab-Simulink 소프트웨어를 사용하였다. 최종적으로 실제 차량 사양을 기준으로 EV 차량 레벨 조건으로 변경하여 파워트레인 모델에 IPMSM을 적용하였으며 제안된 제어 시스템의 시뮬레이션 결과를 수행했고 특성을 분석하였다.

ABSTRACT

In this study, the energy conversion characteristics and design of electric vehicle (EV: Electric Vehicle) powertrain were performed. An interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) was targeted as a power source for the EV powertrain, and control was performed. In order to drive the IPMSM, two regions are considered: a constant torque and a constant output (field-weakening) region. The design of the control system for IPMSM was constructed based on the d-q reference frame (vector control). To determine the static characteristics of motor torque appearing in two areas of IPMSM, a torque control system and a d axis current control system of IPMSM were implemented and proposed. Matlab-Simulink software was used for characteristic analysis. Finally, by applying IPMSM to the powertrain model under the actual EV vehicle level conditions, simulation results of the proposed control system were performed and characteristics were analyzed.

키워드

PMSM, Field weakening, Constant torque, Control system, Electric vehicle
연구 자석 동기모터, 약제자, 정토크, 제어 시스템, 전기 자동차

* 교신저자 : 상명대학교 휴먼지능로봇공학과
• 접수일 : 2021. 08. 10
• 수정완료일 : 2021. 09. 13
• 게재확정일 : 2021. 10. 17

• Received : Aug. 10, 2021, Revised : Sep. 13, 2021, Accepted : Oct. 17, 2021
• Corresponding Author : Soo-Whang Baek
Dept. Human Intelligence and Robot Eng., Sangmyung University,
Email : swbaek@smu.ac.kr

I. 서 론

오늘날 중요한 에너지 변환 형태의 하나인 전기에서 기계로의 에너지 변환에 사용되는 전기기기는 대부분의 동력 시스템에 널리 적용되고 있으며, 최근 산업과 자동차 분야에 널리 적용되고 있다. 특히 전기모터를 적용한 전기자동차의 동력원인 견인용 모터에 사용되고 있다[1-3].

EV 파워트레인에는 고효율의 장점을 갖는 영구자석 동기 모터(PMSM)가 주로 사용되고 있다. PMSM 모터는 회전자에 있는 자석의 모양과 위치가 다르다. EV의 경우 특히 영구자석 매입형(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) 또는 표면자석형(SPMSM : Surface-mount Permanent Magnet Synchronous Motor)방식이 주로 사용된다. 그중에 IPMSM 모터는 SPMSM 대비 회전자의 형상에 따라 자기적 비대칭성을 가지게 되어 톨턴스 토크를 추가적으로 활용할 수 있는 장점이 있다[4-5].

이러한 IPMSM의 장점은 다음과 같다. 모터의 체적 대비 높은 출력에 의한 고효율, 브러시 없음, 주로 고정자에서 손실 발생 및 회전자에서 무시해도 될 정도의 손실, 효과적인 냉각 가능, 낮은 회전자 관성 모멘트로 인한 향상된 제어성능, 고속에서도 약계자 제어를 통한 유리한 운전영역. 반면에 IPMSM의 단점은 유도 전동기에 비해 높은 가격과 고온에서 영구자석의 감자특성을 고려해야 하므로 보다 효과적인 냉각이 요구되어진다[6-7].

그러나 고효율 특성을 갖는 우수한 장점에 의해 EV 파워트레인 및 차량 전장 애플리케이션으로서 빠르게 비중이 증가하고 있으며, 실제로 Toyota(Lexus), Nissan, Renault, BMW, Honda와 같은 전 세계 자동차 업체의 EV 및 HEV에 널리 사용되고 있다 [8-9].

IPMSM의 원활한 제어를 위해서는 정토크 및 정출력(약계자 제어)에 해당되는 두 영역 제어를 수행해야 하며 IPMSM의 정출력 영역을 효과적으로 제어하는 것이 기존연구들의 관심사였다. 피드백 선형화를 기반으로 하는 약계자 연산에 관한 연구, IPMSM의 제어성능을 향상하기 위해 가변 q축 전압 제어와 VAC(Voltage Angle Control) 방식과 각속도의 계단식 제어가 연구되어왔다[10-11].

본 연구의 목적은 정토크 영역과 정출력 영역(약계

자) 동안 모터가 동작하는 범위에서 전류 i_{sd} 와 i_{sq} 을 결정하는 원리를 제시하는 것이다. 이를 통해 IPMSM, 특히 EV의 파워트레인을 위한 제어 시스템으로 확장하여 설계할 수 있다. PMSM의 두 영역 토크 제어를 위한 d 및 q 축의 기준 전류 계산, EV에서 IPMSM 제어를 위한 응용, PI 제어기 설정 선택에 대한 접근 방식이 고찰되었다. 최종적으로 Fisker Karma 차량의 파라미터를 기반으로 EV에 대한 시뮬레이션을 수행하였고 연구 결과의 유용성을 확인한다.

II. IPMSM 레벨의 제어 시스템

일반적으로 IPMSM의 운전영역은 두 개의 작동 영역으로 구분되는 것이 특징이다. 정출력 영역에서는 정토크 영역보다 빠른 회전속도로 구동할 수 있지만 동시에 토크는 정격보다 낮아지는 특징을 갖는다. 차량용 IPMSM은 고속회전의 성능이 중요하기 때문에 약계자 제어를 활용하여 고속운전 영역을 증대시킨다.

본 연구에서는 IPMSM의 구동 시스템에서 수학적 모델을 작성하기 위해 선형 자화 특성을 가정하였고 파형의 첫 번째 고조파(기본파) 성분만 고려되었다. 생성된 동적 모델은 캐스캐이드 구조 및 파라미터 최적화 제어에 사용되었다.

2.1 IPMSM의 동작 특성

이 장에서는 표 1의 IPMSM의 파라미터를 사용하여 IPMSM에 대한 특성을 해석한다. IPMSM의 d축과 q축 인덕턴스는($L_{sd} < L_{sq}$)차이를 갖는다.

표 1. IPMSM의 파라미터 목록
Table 1. List of IPMSM parameters

Item	Value	Unit
Rated power (P)	145	kW
Rated torque (M)	380	Nm
Rated speed (ω)	3600	rpm
Rated voltage (U)	640	V
Rated current (I)	303.5	A
Number of pole pairs (N)	4	-
Moment of inertia (J)	0.195	kgm ²

그림 1에 제시된 IPMSM의 제어특성은 145kW의 출력을 가진 모터의 정격 특성에 기준하여 계산하였

으며 이 모터는 EV의 파워트레인을 메인 드라이브에 사용할 수 있다. 계산은 Matlab의 기본 함수와 많은 변수의 비선형 방정식을 푸는 데 유용하게 사용되는 내장 fsolve 함수를 사용하였다.

템의 제어기로서 토크 및 전류 제어기를 사용하였다. 입력력형의 평활화를 위해 각 제어기의 입력에 프리 필터가 존재하며, 각속도에 의존하는 IPMSM 토크 제어 시스템은 d, q축 레퍼런스 시스템을 기준으로 구현되었으므로 Clarke 및 Park 변환은 무시되었다.

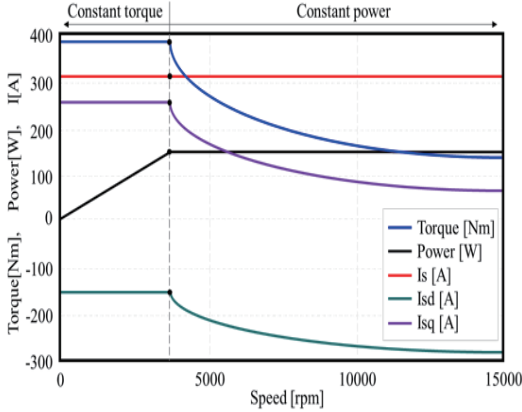


그림 1. IPMSM의 제어특성($i_{sd} \neq 0$).
Fig. 1 Control characteristics of IPMSM ($i_{sd} \neq 0$)

IPMSM의 경우 정토크와 정출력에 해당하는 2영역 모터 제어의 특성을 올바르게 결정해야 한다. 정토크 제어를 위해서는 d축 고정자 전류 i_{sd} 가 0과 달라야 하며, 이 경우 i_{sd} 는 -160A이며, q축 고정자 전류 i_{sq} 가 고정자 전류 i_s 값과 달라야 두 조건이 동시에 충족된다. 이것은 모터의 동기화를 위한 릴럭턴스 및 마그네틱 토크의 생성을 의미한다. 고정자의 자속은 식 (1)에 의해 결정된다.

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{sd}^2 + \psi_{sq}^2} \quad (1)$$

여기서 ψ_{sd} 는 d축 고정자 자속, ψ_{sq} 는 q축 고정자 자속을 의미한다.

2.2 EV용 PMSM의 토크 및 전류 제어기

d축에 있는 고정자의 토크 및 전류 제어기는 제어 시스템을 설계하기 위해 적절하게 선택할 필요가 있다. 제어기의 파라미터는 단순화된 PMSM의 모델을 활용하여 결정되었다. d, q축 변환 프레임을 통해 IPMSM 모터 제어 시스템의 모델링이 시뮬레이션을 위해 구성되었으며, 그림 2에 EV 애플리케이션 및 IPMSM 제어 시스템의 구성도를 나타냈다. 이 시스

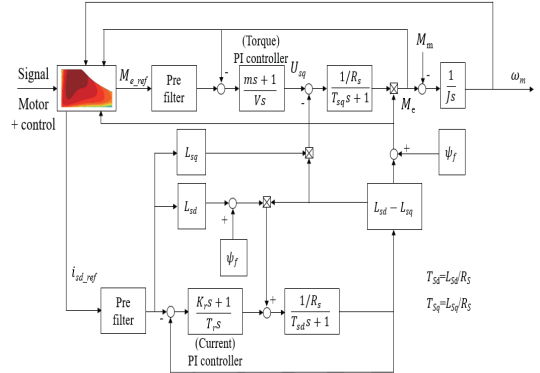


그림 2. EV 애플리케이션 및 IPMSM 모터 제어 시스템의 개략도
Fig. 2 Schematic diagram of the IPMSM motor control system and EV application

하중 토크 M_m 는 도로 하중, 총 구름 저항 F_r , 공기역학적 항력 F_{DF} , 경사면 저항 F_g 을 이용하여 계산된다. 따라서 총 도로 하중 F_T 는 식 (2)와 같고 이를 구성하는 변수들을 식 (3)~식 (6)에 나타냈다.

$$F_T(t) = F_r(t) + F_{DF}(t) + F_g(t) \quad (2)$$

$$F_r = f_r m_2 g \quad (3)$$

$$f_r = f_0 \left(1 + \frac{3.6v}{161} \right) \quad (4)$$

$$F_{DF} = \frac{1}{2} \rho C_d A (v + v_w)^2 \quad (5)$$

$$F_g = m_2 g \sin(\alpha) \quad (6)$$

여기서 구름 계수 f_0 는 콘크리트 도로의 경우 0.01을 적용하며, m_2 는 자동차와 승객의 질량의 합, ρ 는 공기 밀도, C_d 는 항력 계수, A 는 자동차 정면의 면적,

v 는 자동차의 속도, v_w 는 바람의 속도, a 는 기울기를 나타낸다. 따라서 기어비가 G 이고 d_w 가 휠 직경이고 ΔM 이 기어의 쿨롱 마찰이면 기계적 부하 토크(M_m)는 식 (7)과 같다.

$$M_m = \Delta M + \frac{M'}{G}, \quad M' = \frac{F_T d_w}{2} \quad (7)$$

또한, 전체 관성 모멘트 J 는 모터 축(모터 샤프트)으로부터 계산된 3개의 항의 합으로서 식 (8)과 같이 표현된다.

$$J = J_1 + m_2 \frac{d_w^2}{4G^2} + J_2 \quad (8)$$

여기서 J_1 은 IPMSM의 관성 모멘트이고, J_2 는 휠(림 및 타이어), 브레이크 디스크, 샤프트의 관성 모멘트를 의미한다.

토크 제어기의 파라미터를 결정하기 위해 IPMSM을 선형화하고 단순화된 개별 여자 DC 모터로 설정했다. 그림 3은 모터의 단순화된 수학적 모델에 대한 전자기 토크 제어 시스템을 나타낸다.

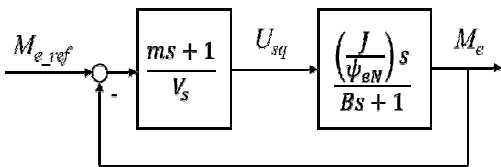


그림 3. 단순화된 IPMSM의 전자기 토크 제어 시스템의 개략도

Fig. 3 Schematic diagram of the electromagnetic torque control system of the simplified IPMSM

그림 3의 변수 중 B 는 d축의 정격 전류 i_{sdN} 에 대한 전자기계 시간 상수를 의미하며, ψ_{eN} 은 d축의 정격 전류 i_{sdN} 에 대한 자속을 의미하며 각각 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$B = J \frac{R_s}{\psi_{eN}^2} \quad (9)$$

$$\psi_{eN} = \psi_f + (L_{sd} - L_{sq})i_{sLN} \quad (10)$$

토크 제어기는 PI형으로 게인은 m/V , 적분시간은 L/V 이다. 여기서 제어기 파라미터 m 과 V 는 식 (11), 식 (12)와 같다.

$$m = J_1 \frac{R_s}{\psi_{eN}^2} \quad (11)$$

$$V = \frac{J_1}{\psi_{eN}^2} \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

PI 제어기는 d축의 전류 제어회로에 사용되었으며, 전류제어용 제어기 파라미터를 결정하기 위한 시스템의 개략도를 그림 4에 나타냈다.

실질점은 모터의 전자기 토크와 d축의 고정자 전류이다. 회전자 내부에 자석이 있는 모터를 시뮬레이션하려면 d축 고정자 전류 i_{sd} 의 초기값이 필요하며, i_{sd} 는 정토크 영역에서는 일정하고 0과 다르다($i_{sd} \neq 0$).

이를 통해 정적 특성을 결정하는 시뮬레이션에 사용할 값을 계산할 수 있으며 정토크 영역의 d축 및 q축의 전류는 각각 다음과 같다 ($i_{sd} = -160A$, $i_{sq} = 258A$).

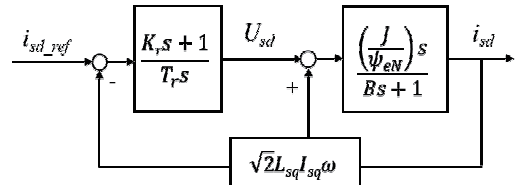


그림 4. IPMSM의 d축 전류 제어 시스템의 개략도

Fig. 4 Schematic diagram of the current control system in the d axis of the IPMSM

그림 4의 IPMSM 모터의 제어기 파라미터 T_r 과 K_r 은 식 (13), 식 (14)와 같다.

$$T_r = \frac{1}{R_s} \cdot 10^{-6} \quad (13)$$

$$K_r = T_{sd} - \sqrt{2} T_r L_{sq} I_s \omega \quad (14)$$

III. EV 조건 레벨의 시뮬레이션

본 논문에서는 실제 차량의 파라미터를 이용하여 EV 조건 레벨의 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2에 나타난 Fisker Karma 차량의 파라미터¹⁾를 기반으로 2개의 IPMSM 모터를 EV 파워트레인에 사용하는 조건으로 간주하여 Matlab-Simulink 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 원래의 Fisker Karma는 HEV이며 두 개의 견인용 모터, 엔진이 장착되어 있으나 엔진을 배제하고 2개의 모터가 760Nm을 발휘하도록 병렬 운전으로 구동되도록 수정이 필요하였다. 본 연구에서는 IPMSM 1대의 전자기 토크 정격이 380Nm을 발휘하는 조건으로 고려되었으나 토크특성에 2배를 취하면 IPMSM 성능의 경향을 가늠할 수 있다.

표 2. Fisker Karma 차량 파라미터
Table 2. Fisker Karma vehicle parameters

Items	Value	Unit
Vehicle mass (m_2)	2540	kg
Aerodynamic drag coefficient (C_d)	0.313	-
Gear ratio (G)	6.254	-
Tires 255/35R22 wheel diameter (d_w)	0.7373	m
Frontal area of the vehicle (A)	2.47	m ²

제어기의 파라미터는 전술한 식 (11)~식 (14)를 활용하여 Matlab-Simulink 환경에서 그림 2의 제어 시스템을 토대로 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 100초간의 해석결과를 얻었으며 Fisker Karma의 성능을 그림 5에 나타냈다.

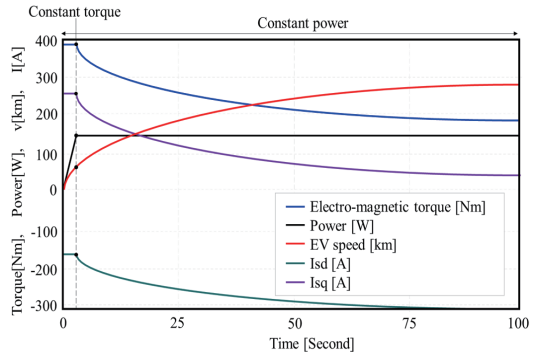


그림 5. Fisker Karma의 IPMSM 성능
Fig. 5 IPMSM Performance of Fisker Karma

제시된 결과에서 차량은 5인 탑승기준 390kg을 포함하여 전체중량 2,930kg의 하중으로 주행하는 것으로 가정했으며 이론상 차량의 최고 속도는 280km/h이다. 그리고 최고 속도까지 가속하는 조건으로 해석이 수행되었기 때문에 IPMSM의 정토크 운전의 영역은 매우 짧고 대부분 정출력 운전영역 조건임을 알 수 있다. IPMSM의 토크는 식 (11)에 의해 자동차 바퀴의 견인력(F_T)로 변환된다.

$$F_T = (M_e - \Delta M) \frac{2G}{d_w} \quad (11)$$

이 시뮬레이션 수행을 통해 자동차 바퀴에 작용하는 견인력 특성을 그림 6에 나타냈으며, 노면 저항특성(F_r)도 같이 나타내어 EV 구동 제어 시스템의 올바른 설계를 확인할 수 있었다.

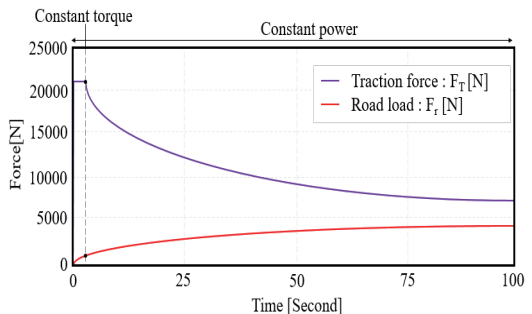


그림 6. 차량에 작용하는 힘(자동차 바퀴의 견인력)
Fig. 6 The force acting on the vehicle (Traction force of the car's wheels)

1) Fisker Automotive Inc., "Fisker Karma", <https://www.auto-brochures.com/fisker.html>, 2013 Fisker Karma PDF Brochure, 2013.

IV. 결론

EV에서 전기 에너지를 기계로 변환하는 주요 구성 요소인 IPMSM의 구동 및 차량레벨의 제어특성 분석을 수행하였다. IPMSM의 제어는 토크 제어기와 전류 제어기 및 2개의 프리필터, 기준 신호 생성기를 사용하며, d, q 회전좌표계를 통해 수행되었다. PI 제어기의 파라미터는 d축의 전자기 토크와 고정자 전류를 제어하는데 사용되며 IPMSM의 모터 모델 간략화를 통해 수행되었다. 이 방법의 장점은 제어기의 파라미터를 간단하게 결정할 수 있다. 마지막으로 Fisker Karma EV 차량 레벨 환경에서의 차량가속도 역학 시뮬레이션을 통해 특성을 확인하였다. 향후, 파라미터의 정확성을 향상하기 위해 비선형성, 온도 등 환경조건이 반영된 파라미터와 실제 드라이빙 사이클을 적용하면 보다 정확한 특성 예측이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1061567).

References

- [1] H. Cho and W. Kim, "Sensorless control of high-speed BLDC," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 3, June, 2020, pp. 503-512.
- [2] N. Cho, "Implementation of a senseless position controller capable of multi-turn detection in a turret servo system," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 1, Feb. 2021, pp. 37-44.
- [3] J. Lim and D. Lee, "A technology trend and analysis of electric vehicle wireless charging system," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 2, Apr. 2021, pp. 255-260.
- [4] J. Yang and S. Kwak, "Design of brushless DC motor speed control system for handpieces," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 6, June 2016, pp. 597-604.
- [5] M. Rahman and H. Rahman, "Performance of newly developed integrated space conditioning

- and domestic water heating device," *J. of Energy & Environment*, vol. 3, no. 1, 2011, pp. 23-27.
- [6] M. Kang, L. Guo, H. Wang, Z. Wang, and C. Xia, "An improved rotor cooling structure of IPMSM," In *Proc. 22nd Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Harbin, China, Aug. 2019, pp. 1-6.
- [7] J. Kim, "A study on the optimum selection of the power factor compensation condenser according to the improved efficiency of induction motor," *The Trans. of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 65, no. 7, July 2016, pp. 1311-1315.
- [8] G. Du, W. Cao, S. Hu, Z. Lin, and T. Yuan, "Design and assessment of an electric vehicle powertrain model based on real-world driving and charging cycles," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, Feb. 2019, pp. 1178-1187.
- [9] R. Cheng, T. Rodemann, M. Fischer, M. Olhofer, and Y. Jin, "Evolutionary many-objective optimization of hybrid electric vehicle control: from general optimization to preference articulation," *IEEE Trans. Emerging Topics in Computational Intelligence*, vol. 1, no. 2, Apr. 2017, pp. 97-111.
- [10] K. Zhou, M. Ai, D. Sun, N. Jin, and X. Wu, "Field weakening operation control strategies of PMSM based on feedback linearization," *Energies*, vol. 12, no. 23, 2019, pp. 1-18.
- [11] L. Wei, L. Hui, and W. Chao, "Study on flux-weakening control based on single current regulator for PMSM," In *Proc. IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, China, 2014, pp. 1-3.

저자 소개

백수황(Soo-Whang Baek)



2005년 한양대학교 전자컴퓨터공학부 졸업(공학사)

2012년 한양대학교 대학원 전자전기 제어계측공학과 석박사통합과정 졸업(공학박사)

2012년~2016년 현대캐피코 기술연구원 책임연구원

2016년~2020년 호남대학교 미래자동차공학부 교수

2020년 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 교수

※ 관심분야 : 친환경미래자동차, 자동차전자제어, 전기기기시스템