

연료전지 하이브리드 자동차의 에너지 운용전략에 관한 기술조사

Survey on Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles

이남수* · 정구민** · 안현식*** · 김도현***

(Nam-Su Lee · Gu-Min Jeong · Hyun-Sik Ahn · Do-Hyun Kim)

Abstract - The fuel cell system has inherent limitation such as slow response time and low fuel economy especially at the low power region, and thus, the battery system has come to be used to compensate for the fuel cell system. This type of hybrid configuration has many advantages, however, the energy management strategy is essentially required. The work in this paper presents survey on recent power management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles. For three power management strategies: basic control method, object function-based control method, and fuzzy logic-based control method, each strategy is reviewed and discussed with other strategy.

Key Words :Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles, Energy Management Strategy, Fuzzy Logic Control, SOC배터리 시스템에 의해 공급된다. 연료전지 자동차 시스템

1. 서 론

최근 수송 분야에서 화석연료의 고갈문제, 환경공해문제 그리고 지구 온난화 문제 등을 해결하기 위해서 저공해 및 무공해 자동차에 대한 연구와 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히, 연료전지를 동력원으로 사용하는 연료전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle : FCEV)는 물 이외의 배출물이 없다는 면에서 많은 관심을 끌고 있다. 최근에는 연료전지와 배터리를 조합한 하이브리드 방식을 이용함으로써 두 동력원의 특성을 효과적으로 활용하는 최적의 형태를 사용할 수 있게 되었는데 이러한 형태를 연료전지 하이브리드 자동차(Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle : FCHEV)라고 한다. 이 경우에는 저부하에서 고부하까지의 출력 요구에 대응하여 연료전지를 고효율의 영역에서 작동시킬 수 있으며, 차량의 감속 시 열에너지로 소비되었던 계통에너지를 회수할 수 있어 연비를 향상시킬 수 있다. 그러나 하이브리드 방식의 자동차는 주행상황에 따라 요구되는 동력을 두 개의 동력원에 어떻게 나눠서 분담시켜야 할지를 결정하는 에너지 운용전략이 필요하게 된다.

하이브리드형 자동차의 에너지 운용전략에 대한 연구는 '내연기관-배터리 하이브리드형'에 대하여 연구되기 시작하여 최근 '연료전지-배터리 하이브리드형'에 대한 확장연구가 진행중이다. 기본적인 에너지 운용전략으로는 모드별 운전 전략과 정적 에너지 운용전략이 있으며, 더욱 효율적인 에너지 운용을 위해서 목적함수 기반의 최적제어방식과 퍼지논리 기반의 지능제어 방식을 이용한 에너지 운용전략이 제안되고 있다.

본 논문에서는 이미 개발되었거나 활발히 연구되고 있는 FCHEV의 에너지 운용전략에 대해서 개괄적으로 설명하고 현재 진행되고 있는 연구들을 주제별로 분석한다. 2장에서는 FCHEV의 기본구성에 대하여 살펴보고, 3장에서는 연료전지와 배터리로 구성된 하이브리드 전력원에 대한 기본 특성 및 각 운용전략에 대하여 기술한다. 4장에서는 본 논문의 결론과 추후 연구 사항이 제시된다.

2. FCHEV의 시스템 구성

FCHEV는 그림 1과 같은 하이브리드 방식의 자동차 구성을 갖는다. 수소 연료는 연료전지 시스템에 의해 전기적인 에너지로 변환된다. 연료전지에 의해 생산된 전기적인 에너지는 구동모터로 전달되거나 배터리로 흡수된다. DC/DC 컨버터는 배터리 시스템과 연료전지 시스템의 연계와 전력변환을 위하여 사용된다. 연료전지에 의해 생산된 에너지는 컨버터를 통해 배터리에 충전되기도 하고 배터리와 함께 구동모터로 에너지를 전달한다. 전달되거나 배터리를 충전시키기 위한 경우 바퀴에 전달되는 모든 동력은 전기모터에 의해 공급되어지며, 전기모터에 공급되는 전류는 연료전지 시스템 및

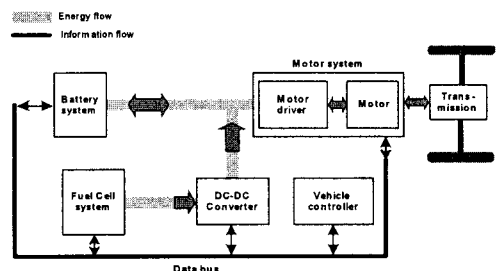


그림 1. FCHEV의 에너지 및 신호 흐름.

저자 소개

* 國民大學校 電子工學科 碩士課程

** 國民大學校 電子情報通信工學科 助教授 · 工博, 交信著者

*** 國民大學校 電子情報通信工學科 教授 · 工博

의 모든 구성요소들은 데이터 버스를 통해 통신한다. 전달되는 데이터들은 배터리 전압, 감/가속 명령 값, 모터 전류, 배터리 전류, 연료전지 스택 전류와 그 밖의 구성요소 간 최적의 상호작용에 필요한 값들이다.

3. FCHEV의 에너지 운용전략

연료전지 하이브리드 차량의 효율적인 에너지 운용을 위하여 가능한 한 다음과 같이 몇 가지 조건을 만족시키며 하이브리드 전력원을 동작시켜야 한다. 우선, 연료전지 시스템을 그림 2에 표시된 에너지 변환 효율이 우수한 구간에서만 동작시킨다. 또한, 배터리 시스템에 저장된 에너지의 사용은 충/방전 손실을 고려하여 가능한 한 그 사용을 지양한다. 이와 동시에 배터리의 과도한 충/방전으로 인한 수명저하를 방지하기 위해 배터리 SOC(State Of Charge)가 기준 범위 안에 유지되도록 해야 한다. 그러나 위에서 첫번째 조건에 따라 연료전지 시스템을 에너지 효율이 최대인 한 지점에서만 동작시키면 차량에 요구되는 에너지와 실제 공급된 에너지 간의 차이가 발생할 때마다 배터리 시스템의 빈번한 충/방전이 발생하게 된다. 따라서 차량의 연비를 증가시키기 위해서는 위의 두 가지 조건을 적절하게 상호절충 시키는 것이 필요하다.

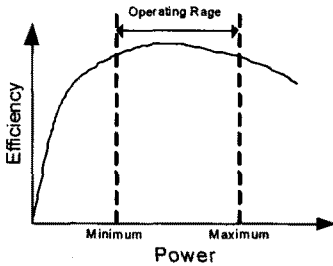


그림 2. 연료전지 시스템의 효율곡선.

3.1 기본적인 에너지 운용전략

FCHEV의 전력원을 운용하는 가장 기본적인 방법은 모드별 에너지 운용전략과 정적 운용전략이 있다. 모드별 에너지 운용전략은 차량에서 요구되는 에너지와 배터리 SOC 상황에 따라 동작모드를 결정하고 이에 따라 연료전지와 배터리의 사용을 결정하는 방법이다[1-3]. 모드별 전력원의 에너지 흐름도는 그림 3과 같다. 연료전지 시스템은 적은 전력 구간에서는 효율이 나쁘기 때문에 적은 전력이 요구되는 모드에서는 배터리만 동작하고, 감속 시 발생하는 회생제동 에너지는 배터리로 저장된다. 평균적인 전력이 요구되는 모드에서는 연료전지와 배터리가 같이 전력을 공급하기도 하고 배터리 SOC가 낮을 경우는 연료전지의 출력이 배터리에 저장되기도 한다. 많은 전력이 요구되는 모드에서는 연료전지와 배터리가 동시에 동작하여 요구 전력을 공급한다.

모드별 에너지 운용전략 이외의 기본적인 에너지 운용전략으로는 배터리 전류와 SOC에 기준 값을 두고, 이에 따라 연료전지의 출력이 몇 단계로 조절되는 정적(Static) 에너지 운용전략이 있다. 기본적인 에너지 운용전략은 제어 알고리즘이 간단하여 FCHEV의 초기모델에 사용되었으나 고정된 기준 값을 사용함으로써 연비의 개선에 한계가 있고, 연료전지

나 배터리의 효율 특성 파라미터가 변할 경우 성능에 큰 영향을 미치는 문제점이 있다.

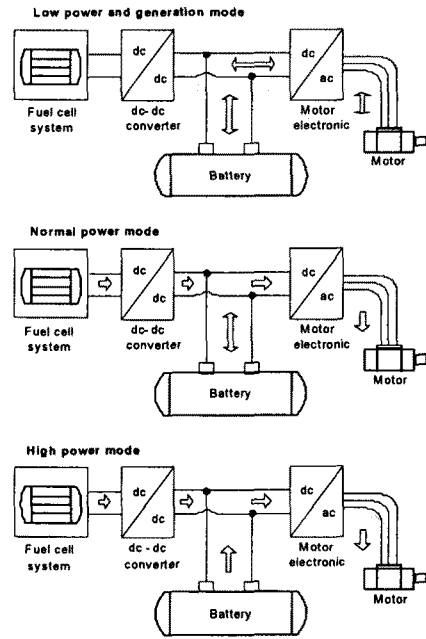


그림 3. 모드별 에너지 흐름도.

3.2 목적함수 기반의 에너지 운용전략

목적함수 기반의 에너지 운용전략은 HEV(Hybrid Electric Vehicles)의 에너지 운용전략으로 개발되었으며, 최근 들어 FCHEV에도 적용되고 있다[5-8]. 이 방법은 식 (1)과 같이 전체 주행 사이클에서 사용된 수소 소모량이 최소가 되도록 하이브리드 전력원을 운용하는 전략이다. 그러나 식 (1)의 경우 전체 주행 사이클에 대한 정보를 미리 알아야 하기 때문에 실제 차량에 구현될 수 없다. 따라서 식 (2)와 같이 매시간 증가 연료 소모량을 최소화 하는 방식으로 하이브리드 전력원을 운용해야 한다. 증가 연료 사용율을 나타내는 비용함수 $\dot{m}_{f,eqn}$ 은 식 (3)과 같이 연료전지에서의 실제 연료 사용율인 $\dot{m}_{f,fc}(t)$ 와 배터리에서의 증가 연료 사용율인 $\dot{m}_{f,bat}$ 의 합으로 나타낼 수 있다[6].

$$\text{Min } \sum \dot{m}_{f,fc}(t) \quad (1)$$

$$\sum \text{Min } \dot{m}_{f,eqn}(t) \quad \forall t \quad (2)$$

$$\dot{m}_{f,eqn} = \dot{m}_{f,fc} + \dot{m}_{f,bat} \quad (3)$$

목적함수 기반의 에너지 운용전략은 식 (4)와 같이 목적함수를 만들어 연료 소모량 이외에 배터리 SOC 및 차량 가속 파라미터를 고려할 경우 각 요소에 대한 성능도 개선할 수 있는 장점이 있다[8]. 목적함수 기반의 에너지 운용전략은 목적함수 계산 시 다양한 주행 상황에 따라 바뀌는 DC-DC 컨버터 및 배터리 등의 효율을 온라인상으로 계산할 수 없기 때문에 이에 대한 값을 미리 가정해야 한다는 단점이 있다.

$$OBJ(t) = FC(t) * W_{FC} + S * W_S + A * W_A \quad (4)$$

여기서 W_{FC} , W_S 및 W_A 는 각각 연료 소모량, 배터리 SOC 및 가속 파라미터에 대한 가중치를 나타낸다.

3.3 퍼지논리 기반의 에너지 운용전략

퍼지로직 기반의 에너지 운용전략 또한 초기에는 HEV 용도로 개발 되었으며, 최근 들어 FCHEV에 적용되어 사용되고 있다[9-14]. 퍼지로직 기반의 에너지 운용전략은 온라인으로 측정 가능한 데이터를 이용하여 동력분배를 결정하므로 시스템의 모델링 오차 등에 의한 영향을 크게 받지 않는다. 또한 이 방식의 경우에는 퍼지로직 제어기의 입력력 선정과 규칙베이스의 설계방식에 따라 그 성능이 결정된다. HEV의 경우 퍼지로직 제어기의 입력으로 운전자의 감/가속 신호, 구동모터와 차량의 속도 및 배터리의 SOC 등이 선정되고, 출력으로는 모터와 엔진의 구동신호 등이 선정된다. FCHEV의 경우는 퍼지로직 제어기의 입력으로 운전자의 감/가속 신호, 배터리 SOC 및 전류, 차량 속도 등이 선정되고, 출력으로는 연료전지의 구동신호가 선정된다. 그림 4는 퍼지로직을 이용한 전력분배 제어시스템의 구조를 나타낸다.

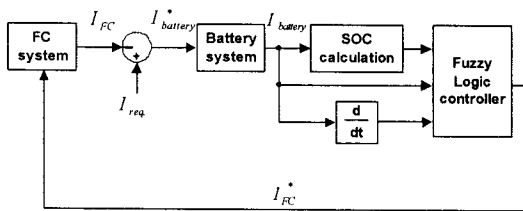


그림 4. 퍼지로직을 이용한 전력분배 제어시스템[14].

차량에서 요구되는 전류 I_{req} 와 실제 연료전지 출력전류 I_{FC} 와의 차이에 따라 배터리 측에 요구되는 전류 $I_{battery}^*$ 가 계산되고, 배터리 충/방전 효율을 고려하여 실제 배터리 전류 $I_{battery}$ 가 계산된다. $I_{battery}$, SOC 및 $d/dt(I_{battery})$ 가 퍼지논리 제어기의 입력이 되며, 연료전지에 요구되는 전류 I_{FC}^* 가 출력으로 계산된다. 퍼지로직 제어기에 사용되는 소속함수 및 규칙베이스는 FCHEV 시스템의 특성에 맞춰 조정한다.

4. 결론

본 논문에서는 FCHEV의 연비를 향상하기 위한 에너지 운용전략들에 대한 기술 조사를 수행하였다. 기본적인 에너지 운용전략으로는 모드별 에너지 운용전략과 정적, 에너지 운용전략이 있으며, 좀 더 효율적인 에너지 운용전략으로는 목적함수 기반의 에너지 운용전략과 퍼지로직 기반의 에너지 운용전략이 있다. 각 에너지 운용전략의 기본적인 알고리즘에 대한 조사를 하였으며, 장단점도 살펴보았다. 효율적인 에너지 운용전략을 개발하기 위해선 선정된 연료전지와 배터리 특성과 FCHEV의 시스템 구성에 따라 적절한 에너지 운용전략 선택이 중요하고 제어 파라미터의 지능적인 조정이 요구된다.

참고 문헌

- [1] T. Matsumoto, N. Watanabe, H. Sugiura and T. Ishikawa, "Development of fuel-cell hybrid vehicle," *SAE 2002-01-0096*, 2002.
- [2] Jin-Hwan Jung, Young-Kook Lee, Jung-Hong Joo and Ho-Gi Kim, "Power control strategy for fuel cell hybrid electric vehicles," *SAE 2003-01-1136*, 2003.
- [3] C. Park, K. Oh, D. Kim and H. Kim, "Development of fuel cell hybrid electric vehicle performance simulator," *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 287-295, 2004.
- [4] N. S. Lee, S. Y. Shim, H. S. Ahn, J. Y. Choi, I. Choy, and D. H. Kim, "Modeling and an efficient combined control strategy for fuel cell electric vehicles," *Proc. of ICCAS*, Bangkok, 2004.
- [5] D. H. Choi and H. S. Kim, "An operation algorithm for a 2 shaft parallel type hybrid electric vehicle for optimal fuel economy," *Trans. KSAE*, Vol. 9, No. 5, pp. 122-130, 2001.
- [6] G. Paganelli, Y. Guezennec and G. Rizzoni, "Optimizing control strategy for hybrid fuel cell vehicle," *SAE 2002-01-0102*, 2002.
- [7] H. Jo, J. Lee and Y. Park, "A development of parallel type hybrid drivetrain system for transit bus part3 : optimal driving control algorithm," *Trans. KSAE*, Vol. 7, No. 6, pp. 182-197, 1999.
- [8] L. Buie, M. Fry, P. Fussey and C. Mitts, "An application of cost based power management control strategies to hybrid fuel cell vehicles," *SAE 2004-01-1299*, 2004.
- [9] H. D. Lee and S. K. Sul, "Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 4, pp. 625-632, 1998.
- [10] B. M. Baumann, G. Washington, B. C. Glenn, and G. Rizzoni, "Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 58-72, 2000.
- [11] A. Rajagopalan, G. Washington, G. Rizzoni, and Y. Guezennec, "Development of fuzzy logic and neural network control and advanced emissions modeling for parallel hybrid vehicles," The Ohio-State University, 2001.
- [12] N. J. Schouten, M. A. Salman and N. A. Kheir, "Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 400-468, 2002.
- [13] S. H. Choi, S. W. Kwon, N. W. Lee and T. W. Lim, "Design of fuzzy logic power distribution controller for fuel cell hybrid vehicles," *Proc. of FISITA*, Barcelona, 2004.
- [14] N. S. Lee, B. J. Ahn, H. S. Ahn, G. M. Jeong and D. H. Kim, "Improvement of fuel economy using fuzzy logic-based power distribution control strategy for a FCHEV," *Proc. of IPC-13*, Gyeongju, 2005.