

신개념 하이브리드 동력장치 개발

김남욱*, 윤영민, 하승범, 임원식, 박영일, 이장무

Development of a new hybrid power system

Namwook Kim, Youngmin Yoon, Seungbum Ha, Wonsik Lim, Youngil Park, Jangmoo Lee

Abstract In this paper, a new drive system(SHS) for hybrid electric vehicle is proposed. As dual rotor hybrid electric vehicle using planetary gearsets, the SHS has the advantages of both series and parallel systems. The output speed and torque of SHS can be determined at specific point regardless of the engine's operating point. When the size of generator which is used in SHS is same as in THS, the SHS has more activities of engine control due to the ability that is operated in lower speed range. To maximize the performance of system, we carried out optimization for the three parameters that are engine, motor1 and motor2. As the result of the optimization, we confirmed the SHS is more preferable to THS in fuel consumption and acceleration area.

Key words HEV(하이브리드 전기자동차), Dual Rotor Motor(듀얼로터모터), Planetary gear(유성기어), SHS(Seoul National University Hybrid System), THS(Toyota Hybrid System)

* 서울대학교 기계항공공학부
 ■ E-mail : alde@vib.snu.ac.kr ■ Tel : (02)880-8050

1. 서론

도요타의 THS(Toyota Hybrid System)는 성공적으로 상용화된 하이브리드 시스템으로 효율과 성능면에서 단연 우수한 시스템으로 인정받고 있다. 그러나 THS가 완성도 높은 시스템일지라도 기술적으로 가장 우수한 시스템인가는 단정지을 수 없다. SHS(SNU Hybrid System)는 THS가 가지고 있는 장단점을 분석하고 THS와는 구조적으로 다른 시스템을 개발한다는 목표를 가지고 만들어진 시스템이다. 논문에서는 SHS와 THS의 상대적인 장단점을 기술하고, 해석적인 방법을 이용하여 두 시스템의 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

2. SHS의 소개

SHS의 동력 분배는 유성기어에 의해 이루어지는데 엔진은 유성기어의 캐리어(carrier)에 연결되어 있고 이너로터는 선기어(sun)에, 아웃로터는 링기어(ring)에 연결되어 있다. 엔진의 출력은 캐리어로 전달되고 제너레이터의 출력은 선기어로 전달된다. 각각의 동력원으로부터 유성기어로 전달된 동력은 유성기어의 동특성으로 인해 동력 분기가 이루어지고 이 때, 링기어로 출력된 동력이 차체에 전달된다(Figure 1). THS의 경우 링기어에서 출력된 동력과 모터의 동력이 합쳐져 차체에 전달되지만 SHS는 링기어에서 제너레이터의 토크가 전달되면서 기계적인 동력의 흐름이 다소 변하게 된다.(Figure 1,2) 이러한 물리적인 현상을 고찰하면, 전기적인 에너지로의 전환을 거치는 직렬형과 기계적으로 전달되는 병렬형으로 하이브리드 동

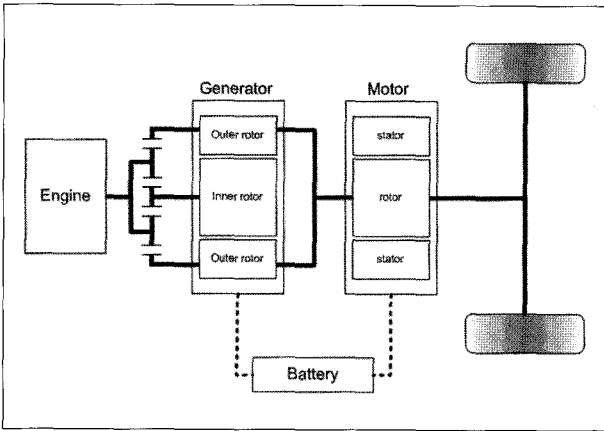


Figure 1. Scheme of SHS vehicle

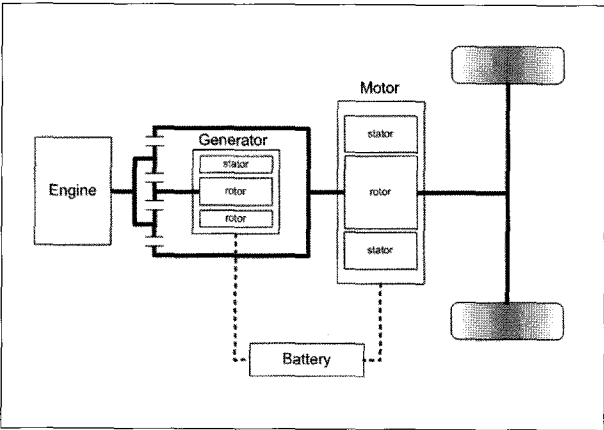


Figure 2. Scheme of THS vehicle

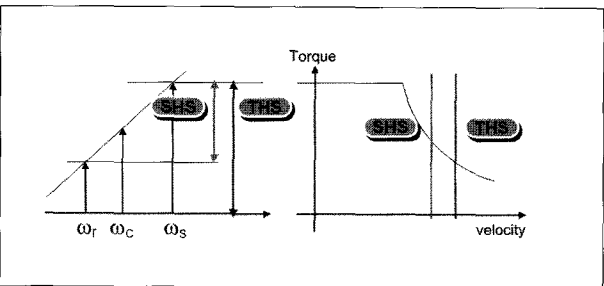


Figure 3. Generator speed comparator between THS and SHS

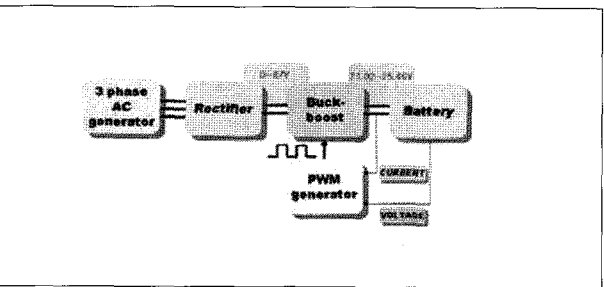


Figure 4. DC-DC Converter.

력 전달을 정의할 때, SHS의 경우 제너레이터의 동력 일부가 링기어에 물리적인 토크 동력으로 전달되므로 결과적으로 직렬형 동력 전달량이 줄어들게 되는 효과를 얻을 수 있다. 기계 에너지와 전기 에너지 간의 전환 효율을 고려할 때, 직렬형 경로의 동력 전달이 상대적으로 줄어드는 것은 그만큼 에너지 전환을 줄일 수 있고, 전체의 시스템 효율을 향상시킬 수 있는 여지를 만들 수 있다. 제너레이터, 엔진 그리고 모터의 각 속도는 서로 구속되어 있고 모터의 속도는 차량의 속도에 비례하며, 제너레이터의 속도 제어를 통해 엔진과 출력축간의 속도비를 결정할 수 있으므로 유성기어는 토크분배장치 뿐만 아니라 전기적인 무단변속장치의 역할도 동시에 수행한다.

2.1 구성요소

SHS는 크게 주 동력원인 엔진과 유성기어, 두개의 구동/발전용 모터(듀얼로터시스템), 모터 컨트롤러, 인버터, 직류변환장치 등으로 구성되어 있다.

2.2.1 듀얼로터시스템

듀얼로터시스템은 내부의 영구자석 로터와 외부의 기자력을 유도하는 로터, 그리고 스테이터로 구성되어 있다. 기존의 THS 시스템에서 선기어로 전달된 동력이 모두 제너레이터의 발전 동력으로 소모되었다면 SHS는 선기어로 전달된 토크를 그대로 링기어에 전달한다. 이 때, 제너레이터의 상대 속도가 감소된다. 이로 인해 SHS는 THS보다 좀더 낮은 영역에서 제너레이터를 작동할 수 있다. 같은 이유로 THS와 같은 용량의 제너레이터를 사용할 경우 엔진을 제어하기 위한 토크 값을 증대시킬 수 있다.(Figure 3)

2.1.2 배터리 및 DC-DC 컨버터

배터리는 8V 전압의 셀 3개를 직렬로 연결하여 24V로 정하였다. 배터리의 개회로전압은 완전충전 시에는 25.46V이고 완전 방전 시에는 23.02V이다. DC-DC 컨버터는 임의의 DC전압을 원하는 DC전압으로 변환하는 것이므로 승압 또는 강압을 할 수 있는데 본 차량에서는 승압과 강압 둘 다 할 수 있는 벡-부스트(buck-boost) 타입의 DC-DC 컨버터를 설계하였고 Figure 4와 같다.

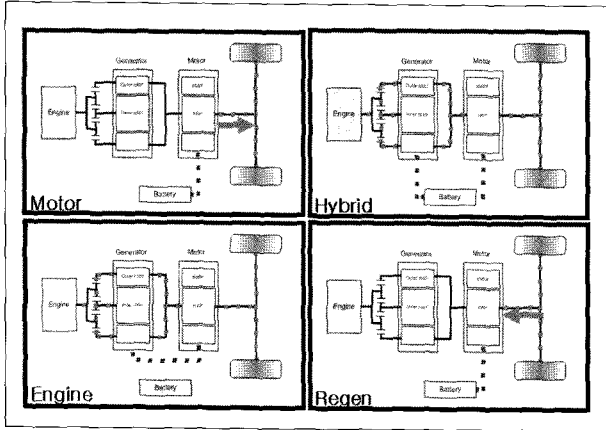


Figure 5. Mode realization

백-부스트는 출력전압의 크기를 변화시킬 뿐만 아니라 출력 전압의 극성을 반전하는 것이 가능하다. 제너레이터로부터 발전된 3상 전원은 정류기를 거쳐 DC전원으로 바뀌는데 이를 PWM의 Duty ratio를 제어하여 배터리의 SOC에 따라 지속적으로 충전될 수 있도록 하는 알고리즘을 가지고 있다. 이 때, Duty ratio는 배터리 양단의 전압과 전류를 측정하여 피드백된 값을 이용하여 제한한다.

2.2 모드구현

SHS에서는 기본적인 모터 모드와 엔진 모드, 하이브리드 모드 및 회생제동 모드 등이 구현 가능하다. 모터모드에서는 유성기어의 특성으로 인해 엔진에 부하토크가 영향을 주지 않고 배터리의 동력만으로 모터를 구동한다. 하이브리드 모드는 엔진과 모터가 동시에 동력을 발생하며 이 때 제너레이터는 주로 발전기 역할과 엔진의 최적주행을 위한 보조 구동 역할을 한다. 엔진모드는 엔진에서 차체와 제너레이터로, 제너레이터에서 모터로 동력이 전달되는 구조를 통해 구현된다. 또한 제동시 회생제동 에너지가 모터를 통해 배터리로 저장되는 회생제동모드를 구현할 수 있다.(Figure 5)

3. 동력 전달계 성능평가

3.1 동력 전달 효율 해석

동특성을 배제한 정상상태만을 고려하였을 때 차량의 토크는

$$T_{out} = T_{mot2} + T_r + T_{mot1} \quad (1)$$

$$T_{mot2} + T_r + T_5 = T_{mot2} + T_e$$

$$T_e = \frac{1+R}{R} T_r = (1+R)T_5 \quad (2)$$

아웃터와 엔진에 의해서 결정되고 (1), (2)와 같이 표현된다.

여기서 R은 링기어비를 나타낸다. 차량의 속도는 식 (3)으로 나타낼 수 있고 식 (4) ~ (8)에서는 SHS의 파워 및 효율관계식을 나타내고 있다.

$$\omega_{out} = \omega_r = \left\{ \frac{1+R}{R} \omega_c - \frac{1}{R} \omega_5 \right\} \quad (3)$$

$$= \omega_e - \frac{1}{R+1} (\omega_5 - \omega_r) = \omega_e \frac{1}{R+1} (\omega_{rml})$$

$$(1+R) \cdot \omega_e = \omega_5 + R \cdot \omega_r \quad (4)$$

$$SR = \frac{\omega_e}{\omega_r} = \frac{R}{1+R} + \frac{1}{1+R} \cdot \frac{\omega_5}{\omega_r} \quad (5)$$

SR은 출력 속도에 대한 엔진 속도인 감속비를 나타내며, 배터리의 동력 지원을 고려하지 않은 효율을 고려하면 다음과 같다.

$$P_m = \eta_g \eta_m P_s \quad (6)$$

$$P_{out} = P_r + P_m = P_r + \eta_g \eta_m P_s \\ = (1 - \eta_m \eta_g) T_e \cdot \omega_r + \eta_m \eta_g \cdot T_e \cdot \omega_e \quad (7)$$

P_m 은 모터의 파워,

$$\eta_{system} = \frac{P_{out}}{P_e} = (1 - \eta_m \eta_g) \cdot \frac{1}{SR} + \eta_m \eta_g \quad (8)$$

THS에 대한 효율을 같은 방법으로 구하면 식 (9)과 같다.

$$\eta_{system} = \frac{P_{out}}{P_e} = (1 - \eta_m \eta_g) \frac{R}{1+R} \cdot \frac{1}{SR} + \eta_m \eta_g \quad (9)$$

식 8)과 9)에서 알 수 있듯이 SHS의 효율에 $\frac{R}{1+R}$ 항이

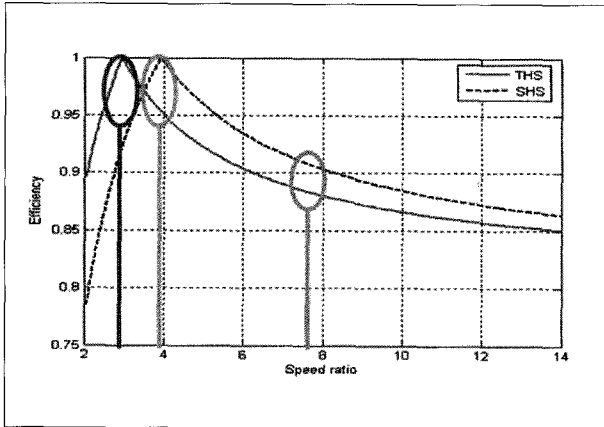


Figure 6. The efficiency vs. speed ratio

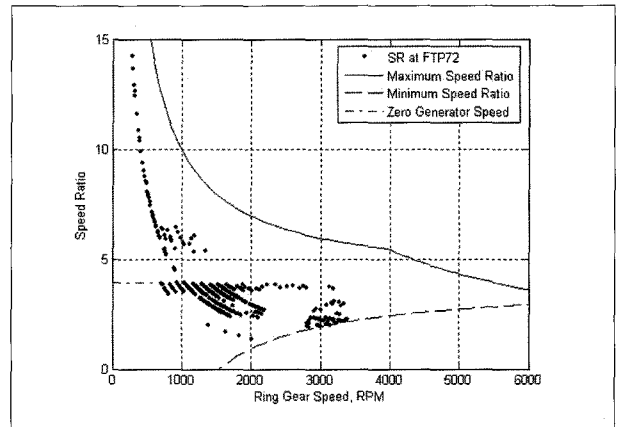


Figure 8. Operating point at FTP72 cycle.

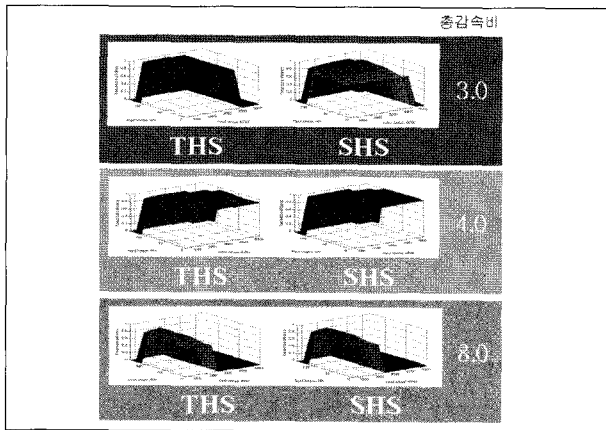


Figure 7. Analysis of net efficiency of SHS

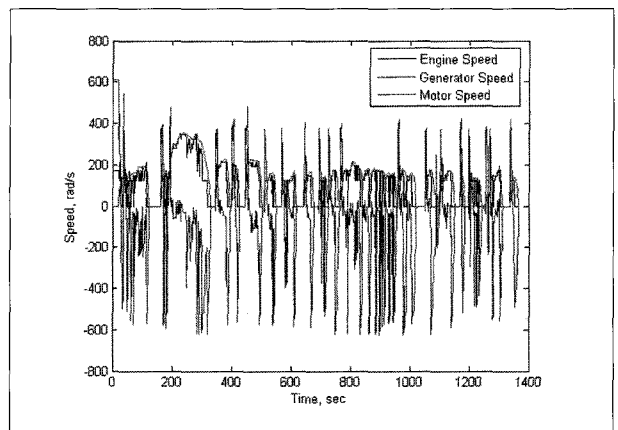


Figure 9. Results of a optimized simulation.

없기 때문에 효율이 향상된다.

앞 서 언급했듯이 SHS는 THS와 달리 유성기어의 링기어와 선기어의 상대속도가 제너레이터의 속도로 결정되므로 상대적으로 직렬형 경로의 에너지 전환이 작아진다. 이 때문에 에너지 전환 손실을 줄일 수 있는 이점이 있고 효율을 향상시킬 수 있는 여지가 발생하는 것이다.

Figure 6과 Figure 7은 시스템 동력 전달 효율 분석을 위해 파워 어시스트를 배제하고 구한 감속비에 따른 효율 그래프이다. 낮은 감속비에서 THS의 효율이 우수하나 감속비가 증가하여 얻어지는 대부분의 영역에서는 SHS의 효율이 우수하게 나타난다.

Figure 8은 FTP72 주행모드에서 시스템 속도비 분석을 하였다. 무단 변속 기구로서의 동력 전달 효율을 해석을 하였을 때 THS(20.03km/liter)에 비해 SHS(20.95km/liter)가 4.6%

우수함을 확인할 수 있었고 가속성능은 0~100kph로 가속하는데 10.5sec가 걸렸다.

3.2 용량 매칭

시스템의 성능을 극대화하기 위해 최적화 프로그램 isight를 이용하여 MG1, MG2, 종감속비 등 3개 파라미터에 대한 최적화를 수행하였다. 엔진의 용량은 60kW, 모터 1은 26.38kW, 모터 2는 27.07kW, 종감속비는 3.931이며 시뮬레이션 차량의 질량은 1220kg이다.

3.3 연비 및 가속성능 예측 시뮬레이션

Figure 9에서 등가연비 개념을 도입하여 주행 전후의 SOC를 같은 조건으로 수행한 시뮬레이션 결과이다. 최적제어를 통해 시스템의 하이브리드 효과 및 시스템 최적화 효과 즉 연비 및 가속성능을 평가하였다.

4. 결론

본 논문에서는 듀얼모터를 이용한 새로운 하이브리드 동력 전달시스템(SHS)을 제안하였다. SHS는 직렬형과 병렬형의 하이브리드 차량의 장점을 동시에 가지고 있고 무엇보다도 엔진을 차량의 속도에 관계없이 독립적으로 운전 시킬 수 있고 THS보다 좀 더 낮은 영역에서 제너레이터를 작동시킬 수 있기 때문에 같은 용량의 제너레이터를 사용할 경우 엔진을 좀 능동적으로 제어 할 수 있는 장점이 있다. 또한 낮은 감속비에서 THS의 효율이 우수하나 감속비가 증가하여 얻어지는 대부분의 영역에서는 SHS의 효율이 우수하게 나타나는 결과를 얻었다.

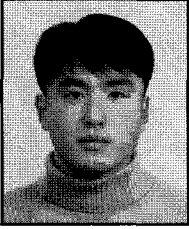
해석적으로 FTP 72에서 연비는 SHS가 THS보다 4.6%가 우수한 것으로 나타났고, 최적화를 바탕으로 FTP75 주행 모드

에서 SHS의 평가 성능 시뮬레이션을 수행하여 23.4km/liter의 연비와 10.5초의 가속 성능이 얻었다. 결론적으로 SHS는 기존의 시스템에 비해 최적 성능이 향상되는 시스템이라고 볼 수 있다.

References

- (1) Y.K.Chin and J.Soulard, "A permanent magnet synchronous motor for traction application of electric vehicles", IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC, Madison, Wisconsin, USA, June 2003
- (2) Y.K.Chin and J.Soulard, "Modeling of Iron Losses in Permanent Magnet Synchronous Motors with Field-Weakening Capability for Electric Vehicles", International Journal of Automotive Technology(IJAT), Volume 4, Number 2, pp.87-94, June 2003

김남욱



2003년 서울대학교 기계항공공학부 공학사

현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정
(E-mail ; alde@vib.snu.ac.kr)

윤영민



2006년 서울대학교 기계항공공학부 공학석사

현재 현대자동차 연구원
(E-mail ; mechajang@mailvib.snu.ac.kr)

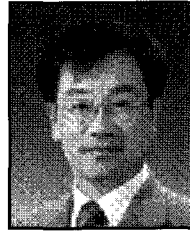
하승범



2005년 서울대학교 기계항공공학부 공학사

현재 서울대학교 기계항공공학부 석박통합과정
(E-mail ; with2you@vib.snu.ac.kr)

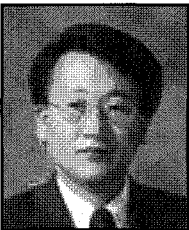
박영일



1991년 서울대학교 기계설계학과 공학박사

현재 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 교수
(E-mail ; yipark@snut.ac.kr)

임원식



1995년 서울대학교 기계설계학과 공학박사

현재 서울산업대학교 자동차공학과 교수
(E-mail ; limws@snut.ac.kr)

이장무



1967년 서울대학교 기계공학과 학사
1975년 아이오와주립대학교 기계역학박사

현재 서울대학교 기계항공공학부 교수
(E-mail ; leejm@snu.ac.kr)