

# 직렬형 하이브리드 전기 자동차의 최적 연비 제어 및 전력제어

유현재\* 설승기\* 김상민\*\* 박용호\*\*

\*서울대학교 \*\*삼성테크윈

## Power Flow Control and Optimal Fuel Efficiency Control for a Series Hybrid Electric Vehicle

Hyunjae Yoo\*, Seung-Ki Sul\*, Sang-Min Kim\*\* and Yongho Park\*\*

\*Seoul National University \*\*Samsung Techwin

### ABSTRACT

본 논문에서는 엔진, 발전기, 견인 전동기, 배터리, 전력 변환기로 구성된 직렬형 하이브리드 전기 자동차의 최적 효율 운전 및 통합 전력제어에 관해 논의한다. 제안된 시스템의 엔진은 최적 효율 운전을 위해 부하에 따라 가변속(Variable Speed) 운전되며, 속도를 가변하여도 필요한 전력을 순시적으로 제어할 수 있다. 또한 자동차가 요구하는 다양하고 순시적인 전력의 변동에 대응할 뿐만 아니라 엔진의 연료 효율 및 배터리의 수명을 고려하여 엔진과 배터리의 전력을 적절히 분배하여 공급할 수 있는 통합 전력제어 방법에 관해서도 논의한다. 제안된 통합 전력제어 알고리즘의 유용성은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 1. 서론

직렬형 하이브리드 전기 자동차는 엔진-발전기와 배터리 등의 보조 동력원을 이용하여 전력을 공급하여 성능 및 효율을 높일 수 있다. 이러한 직렬형 하이브리드 전기 자동차의 성능 및 효율을 향상시키려는 많은 연구가 있었다.<sup>[1,2]</sup> 그러나 참고문헌[1, 2]의 연구는 엔진의 효율적인 운전을 고려하지 않았으므로 직렬형 하이브리드 시스템이 가질 수 있는 연비 향상의 가능성이 무시되었다. 참고문헌 [3]에서는 엔진의 속도를 가변하면서 슈퍼캐패시터와 배터리를 이용하여 차량의 다양한 요구 성능을 만족시켰지만, 엔진의 운전점이 출력에 따라 정해져 버리므로 부하에 따른 최적 효율 운전점에서 운전이 불가능하였다. 본 논문에서는 부하에 따른 엔진의 최적 효율 운전점을 사전에(off-line) 찾아서 운전하기 위한 시스템 구성과 엔진을 가변속 운전하면서도 보조 에너지원인 배터리의 전력을 적절히 활용하여 급격한 부하 변동에도 대응할 수 있는 제어 방법에 대해 제안하고자 한다.

### 2. 전력 시스템 구성

제안된 시스템은 그림 1에 나타난 것처럼 6개의 차륜에 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMM)를 견인전동기로 사용하며 주 동력원으로 13마력 가솔린엔진을, 보조동력원으로 5kWh 용량의 리튬폴리머 배터리를 채용하였다. 엔진의 기계적인 출력은 직결되어 있는 발전기에 의해 전기적인 출력으로 변환되며, 3상 PWM 컨버터를 이용하여 직류전원으로 변환된다. 배터리의 충방전을 위한 전력변환장치로는 그림 1에 나타나 있는 3 병렬

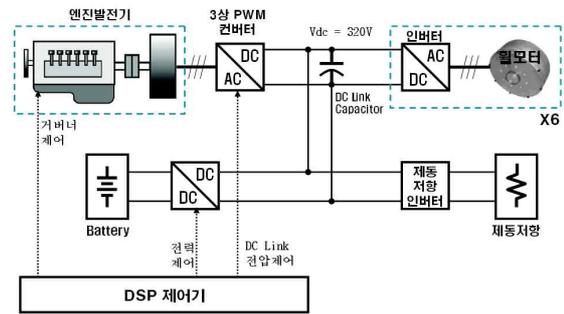


그림 1 전체 시스템 개요

Fig. 1 Overall power system configuration

2상환(Two Quadrant) DC-DC 컨버터를 적용하였다. 이러한 구조는 양방향 DC-DC 컨버터 3개를 병렬 연결한 후 각각 회로의 스위칭 동작이 120도씩 위상차이를 가지도록 함으로써 배터리의 충방전 전류 맥동을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다.<sup>[4]</sup>

### 3. 구동시스템 요구 성능 및 사양

아래 표 1에는 차량의 기계적 사양들을 보여준다. 또한 차량을 구동하기 위해 필요한 힘은 아래 식 (1)로부터 구할 수 있다.

표 1 차량의 기계적 사양

Table 1 Mechanical Specifications of the Vehicle

제정수	기호	수치	단위
차량 총 중량	m	1500	kg
바퀴 반경	r	260	mm
질량 정수(mass factor)	$\delta$	1.05	
구름(Rolling) 저항	$\mu$	0.02	
끌림(Drag) 계수	$C_d$	1.0	
단면적	A	0.75	m <sup>2</sup>

$$F = \mu mg + 0.5\rho C_d A v^2 + \delta ma \quad (1)$$

표 2 구동 시스템 요구 성능 및 사양

Table 2 Specifications of the performance

차량 최고 속도	50[km/h]
구동 전동기 기저 속도	800[r/min]
구동 전동기 최고 속도	4800[r/min]
평지 최고 가속 시간	15[s]

또한 표 2에는 제안된 구동 시스템의 요구 성능 및 사양이 나타나 있다. 위의 사양들을 토대로 제안된 시스템을 정지 상태에서 바퀴의 접지를 고려한 최대 힘으로 최고 속도까지 가속할 때 필요한 전력 및 에너지의 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 나타내면 아래 그림과 같다. 그림에서 0.2초 이내에 부하가 급격히 증가하여 정격 출력에 도달하므로 가변속 운전시 엔진의 기계적인(느린) 응답을 반드시 고려하여야 함을 알 수 있다.

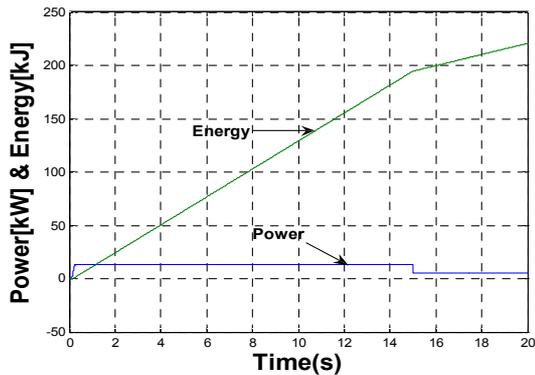


그림 2 최대 가속 시 필요한 전력, 에너지  
Fig. 2 Power, energy requirements at the maximum acceleration

#### 4. 제어 알고리즘

제안된 시스템은 두 개의 에너지원이 부하를 공유하는 형태이다. 그러므로 부하가 요구하는 전력을 두 개의 에너지원에서 순서적으로 잘 분배하여 공급해 주어야 시스템의 안정된 동작이 가능하고 또한 전체 시스템의 효율적인 운전이 가능하게 된다. 그림 3에 전체 시스템 전력 제어의 개요가 나타나있다. 평균 전력을 담당하도록 설계한 엔진-발전기가 직류단 전압을

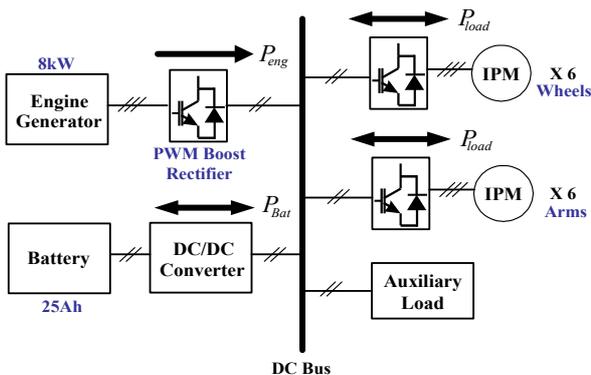


그림 3 전체 전력 제어 개요  
Fig. 3 Overall power flow control

일정하게 제어하며, 순시적인 전력 변동 및 최대 전력 요구는 배터리를 이용한 전력 제어로 보조해준다. 또한 엔진은 부하에 따라 가변속 운전을 하여 추가적인 효율 향상을 얻을 수 있다. 안정적인 직류단 전압이 유지되면 부하 전동기들은 각각의 전동기 구동용 인버터에 의해 토크를 순서적으로 제어될 수 있게 된다. 구체적인 전력 제어 방법은 다음 절에서 각각 살펴본다.

##### 4.1 엔진 가변속 제어

엔진을 부하에 따라 가장 효율적인 운전점에서 운전하게 되면 불필요한 연료 소모를 줄일 수 있다. 부하가 없을 때는 엔진을 대기 상태(idle state) 또는 효율적인 운전 속도에 두었다가 부하가 증가하면 그 부하의 크기에 대응하여 적절히 엔진의

속도를 증가시켜 준다. 그러려면 먼저 부하에 따른 엔진의 효율 운전점을 사전에 찾아 두어야 한다. 아래 그림 4에 엔진 발전기 속도 제어 블록이 나타나 있다. 부하에 따른 최적 속도 지령값을 사전에 작성해둔 참조표등에서 얻고 엔진과 직결된 발전기 속도를 측정하여 속도제어를 수행하게 된다. 속도 제어기는 일반적인 비례적분 제어기이며 제어기 출력값은 주파수 값으로 변환되어 구동기(actuator)로 입력된다.

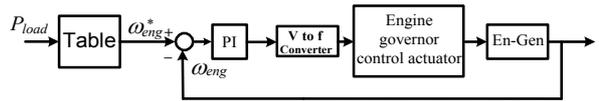


그림 4 엔진 발전기 속도 제어  
Fig. 4 Variable speed control of the engine-generator

##### 4.2 3상 PWM 승압형 컨버터를 이용한 직류단 전압제어

일반적인 3상 승압형 컨버터를 이용한 직류단 전압제어 블록이 아래 그림에 나타나 있다. 전력분 전류인 q축 전류를 제어함으로써 직류단 전압을 제어할 수 있게 된다.

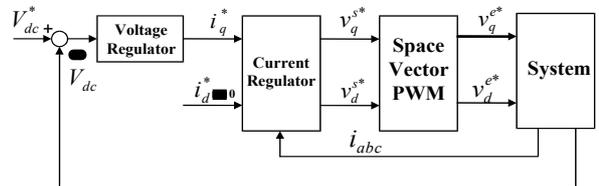


그림 5 직류단 전압 제어 블록  
Fig. 5 DC-link voltage regulation

##### 4.3 배터리 전력제어

부하 급변 시 입력력간의 전력 불균형은 배터리의 전력을 이용하여 보완하여 줄 수 있으며, 배터리의 전력 제어는 일반적인 DC/DC 컨버터의 전류제어기를 이용하여 구현할 수 있다. 전류 제어기의 전류 지령은 배터리 전력 지령을 배터리 전압으로 나눈 값으로 아래 식 (2)와 같이 줄 수 있다.

$$i_{bat}^* = \frac{P_{bat}^*}{V_{bat}} \quad (2)$$

##### 4.4 통합 전력제어

부하가 급변할 때도 직류단 전압이 일정 범위내로 변동하며, 또한 배터리의 수명 등을 고려하여 엔진의 출력을 최대한 활용하는 것이 전체 시스템 전력 제어의 목표이다. 기본적으로 엔진의 속도는 효율을 고려해 부하가 없을 때는 낮은 속도에서 운전하고, 부하가 급변하거나 엔진 발전기 최대 출력 이상의 부하가 순서적으로 필요할 때는 배터리를 이용하여 부족분의 전력을 보상한다. 그림 6에 직류단 전압 변동을 일정 허용치내로 유지하면서 동시에 엔진의 출력을 최대한 활용할 수 있는 제어 알고리즘이 블록도로 표시되어 있다. 부하가 급격히 증가하여 그림 4에서 얻은 엔진 발전기 속도 지령을 실제 속도가

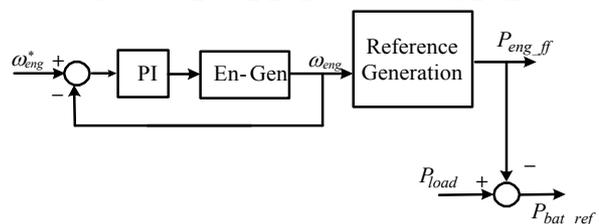


그림 6 제안된 배터리 전력 지령 생성 알고리즘  
Fig. 6 Proposed battery power reference generation

정해진 시간 이내에 추종하지 못하게 되면 직류단 전압의 제어가 이루어지지 않으므로, 엔진 발전기의 실제 속도를 측정하여 그 속도에서 엔진 발전기가 공급할 수 있는 적정 출력을 참조 표로부터 얻어서 부하 전력에서 그 값을 뺀 만큼을 배터리 전력 지령으로 주면 엔진 발전기는 직류단 전압 제어를 위해 자연스럽게 그 전력을 공급하게 된다.

### 5. 시뮬레이션 결과

제안된 시스템과 알고리즘을 평가하기 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 전체 전력제어 시스템의 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다. 표 3에 시뮬레이션 조건 및 시스템의 제정수들이 나타나 있다.

표 3 시뮬레이션 조건 및 시스템 제정수들  
Table 3 Simulation conditions and system parameters

엔진 발전기 최대 출력	7.5[kW]
엔진 발전기 최대 속도	3600[r/min]
엔진 발전기 전체 관성	0.03[kg·m <sup>2</sup> ]
엔진 발전기 전체 마찰	0.02[Nm/(rad/s)]
배터리 정격 전압	200~250[V]
배터리 정격 전류	25[A]
부하	3.35kW(전동기1대)*6
직류단 전압 지령	320[V]
직류단 전압 변동	스텝 부하 인가시 15%이내

엔진은 효율을 고려하여 가변속 운전하였으며, 평상시에는 대기 상태(idle state)에 있다가 부하가 증가하면, 부하 증가에 따라 선형적으로 속도 지령을 증가시켰다.

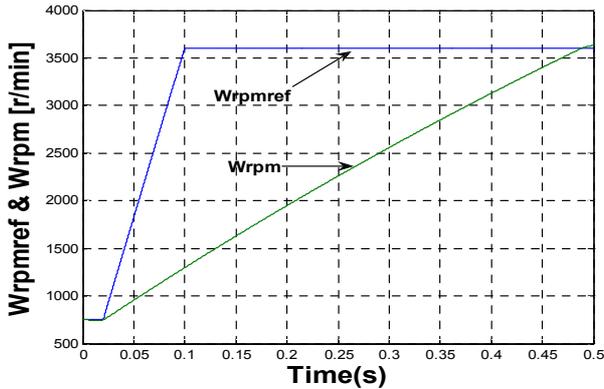
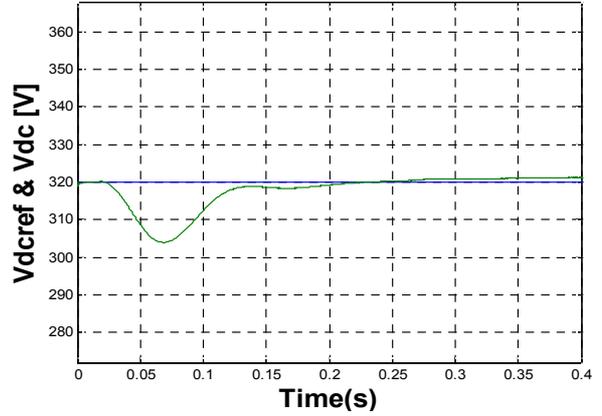


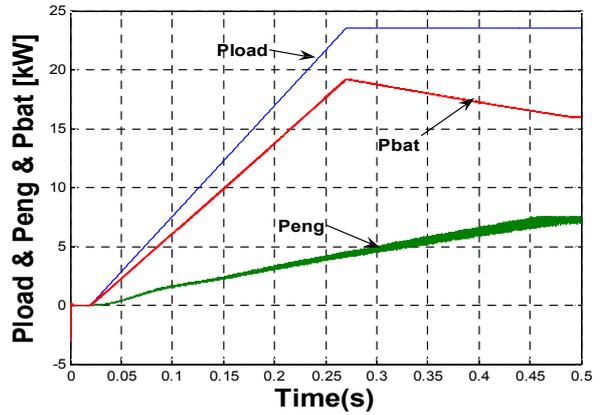
그림 7 엔진 속도 제어 성능  
Fig. 7 Engine speed control performance

엔진은 관성과 마찰을 이용하여 1차 시스템으로 모델링 하였다. 앞에서 살펴보았듯이 0.2초 이내에 정격 출력까지 부하가 빠르게 증가하므로 엔진 속도 지령은 그에 대응하여 빠르게 상승하지만, 실제 속도는 엔진의 동특성에 의해 지령을 주어진 시간 내에 추종하지 못하는 것을 위 그림을 통해 알 수 있다.

그림 8은 제안된 전력 제어 방법의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 직류단 전압도 변동 범위 규정치 이내로 잘 제어되며, 엔진의 출력도 시스템 기동 시부터 실제 속도에 따라 잘 활용되고 있음을 알 수 있다. 그러므로 제안된 전력 제어 방법은 엔진을 효율 향상을 위해 엔진 발전기를 가변속 운전하면서도 직류단 전압 제어 성능 뿐 아니라, 엔진 발전기의 출력 활용도 면에서도 기존의 방법들에 비해 우수함을 알 수 있다.



(a) 직류단 전압 제어



(b) 부하 전력, 엔진 전력, 배터리 전력

그림 8 제안된 전력 제어 성능

Fig. 8 Proposed power flow control performance

### 6. 결론

본 논문에서는 엔진을 효율적인 운전점으로 가변속 운전하면서도 부하의 요구 조건에 항상 대응할 수 있는 직렬형 하이브리드 동력 시스템과 그에 적합한 전력제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 전력 제어 알고리즘에 의해 시스템의 효율, 엔진의 활용도 및 동특성이 향상됨을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] H. Yap, N. Schofield, C. Bingham, "Hybrid energy/power sources for electric vehicle traction systems," IEE Conf. PEMD pp. 61-66, 2004.
- [2] W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol and A. Rufer, "Design and control of a supercapacitor storage system for traction application," IEEE Conf. IAS, pp. 2013-2020. 2005.
- [3] H. Yoo, S. Sul, J. Jeong, and Y. Park, "System integration and power flow management algorithm for a series hybrid electric vehicle using super-capacitors and batteries," IEEE Conf. APEC, Feb., 2007, pp. 1032-1037.
- [4] S. Kim, S. Sul, "Control of Rubber Tyred Gantry Crane with Energy Storage Based on Supercapacitor Bank", IEEE Trans. on Power Electronics, Sep, 2006, pp 1420-1427.