

1 kW 급 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템이 설치된 주택 내 플러그인 하이브리드 자동차의 스마트 충전전략 연구

노 철 우, 김 민 수[†]

서울대학교 기계항공공학부, *서울대학교 기계항공공학부

A Study on the Strategy of Smart Charging System to Charge the PHEV in the House Which has a 1 kW Fuel Cell Cogeneration System

Chul Woo Roh, Min Soo Kim[†]

ABSTRACT: Cause of struggling to escape from dependency of fossil fuels, the fuel cell and the Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) draw attention in the all of the world. Especially, the Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) systems have been anticipated for next generation's energy supplying system, and we can predict the PHEV will enlarge the market share in the next few years to reduce not only the air pollution in the metropolis but the fuel-expenses of commuters. This paper presents simulation results about the strategy of smart charging system for PHEV in the residential house which has 1 kW PEMFC cogeneration system. The smart charging system has a function of recommending the best time to charge the battery of PHEV by the lowest energy cost. The simulated energy cost for charging the battery based on the electricity demand data pattern in the house. The house which floor area is 132 m² (40 pyeong.). In these conditions, the annual gasoline, electricity, and total energy cost to fuel the PHEV versus Conventional Vehicle (CV) have been simulated in terms of cars' average life span in Korea.

Key words: PEFC(고분자 전해질 연료전지), Cogeneration(열병합발전), PHEV(플러그인 하이브리드 자동차), Smart charging strategy(스마트 충전 전략), Simulation(시뮬레이션)

기 호 설 명

CV : Conventional vehicle
 PHEV : Plug-in hybrid electric vehicle

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-2-880-8362; fax: +82-2-883-0179
 E-mail address: minskim@snu.ac.kr

1. 서론

지구 온난화와 고유가 및 자원 확보의 위기는 향후 에너지의 안정적 확보를 위한 국제적 정세의 큰 변화를 예고하고 있다. 이를 위하여, 선진 각국은 석유의존경제에서 탈피하고자 신재생에너지를 발굴하고 이를 적절히 활용하기 위해 매진해 왔다.

이러한 세계적 흐름과 함께 최근의 대표적 연구흐름은 첫째, 전력과 열에너지 공급 면에서, 기

존의 대규모 발전 방식에서 벗어나 전력과 열을 동시에 공급할 수 있는 연료전지 코제너레이션 시스템이 주목받고 있다. 둘째로, 자동차의 동력원 측면에서는 기존 내연기관의 효율 한계를 극복하고, 연비 향상을 위해, 배터리를 보조 동력원으로 이용한 하이브리드 자동차 시스템이 주목받고 있다.

특히, 자동차의 경우, 주행 방법 측면에서 많은 변화가 예고된다. 기존 하이브리드 차량에서는 회생제동과 엔진소형화를 위해 배터리는 동력 보조장치로 사용되었다. 그러나 최근 우리나라 곳곳에 배설된 고품질의 전력망과 하이브리드 자동차 기술이 융합되면서, 엔진 동력의 도움을 전혀 받지 않은 채, 배터리 충전 전량(全量)만으로 시내 주행하는 방식의 플러그인 하이브리드(PHEV) 자동차가 곧 시장의 주류로 등장하게 될 것으로 예측되고 있다.

이에 본 연구에서는 차세대 에너지 공급시스템으로 주목받고 있는 가정용 연료전지 1 kW 급 코제너레이션 시스템이 설치된 주택에서, 사용자가 플러그인 하이브리드 자동차를 충전하고자 할 때, 사용자의 전력 사용 패턴 데이터를 이용하여, 가장 적은 비용으로 차량의 배터리를 충전시킬 수 있는 일련의 판단 및 제어로직을 연구하였다.

더하여 이러한 충전전략을 이용해 PHEV 충전에 소요되는 연간 전력 및 가스요금을 산출하였고, 우리나라 차량의 평균 수명을 기준으로 한 기존 가솔린 차량 대비 경제성을 연료비 절감효과로 분석하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 연료전지 코제너레이션 시스템 구성

2.1.1 연료전지 성능

연료전지 스택의 전극면적은 225 cm²이며, 스택의 작동 조건은 대기압에서 80℃로 작동한다. 시스템에는 출력 조절기능이 있어, 사용자의 요구 혹은 제어부의 판단에 따라 시스템 출력을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 PHEV 배터리 충전을 위한 전력이 소요될 경우 코제너레이션 시스템을 최대 출력으로 조정하여, 배터리 충전을 위한 에너지를 조달받도록 하였다.

연료전지 코제너레이션 시스템을 이용한

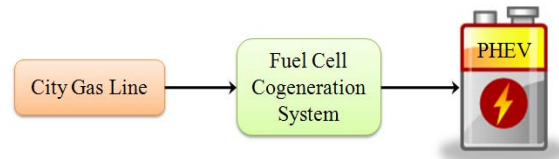


Fig. 1 Scheme of Energy Conversion

PHEV 충전은 Fig. 1과 같은 에너지 흐름을 갖는다. 천연가스를 주성분으로 하는 도시가스의 1차 에너지가 연료전지를 통해 배터리에 잠재적(potential) 전기에너지로 전환 및 저장된다. 이때 연료전지에서 전력으로 변환되고 남은 폐열은 저장조에 저장되어 난방 및 급탕에 사용된다.

2.1.2 전력변환기 성능

전력변환기의 경우, DC/DC 컨버터 및 DC/AC 인버터의 통합효율을 고려해야 하며, 이에 따른 최근의 실험 데이터로는 500~900 W의 범위에서, 85%에서 90%로 상대적으로 높고, 나머지 영역에서는 80~85% 수준이다.⁽²⁾ 본 연구에서는 전 구간에서 전력변환효율을 90%로 상정하였다.

2.1.3 주변운전장치 (BOP)

본 연구에서는 주변운전장치, 즉 연료전지 스택의 원활한 구동을 위해 필요한 냉각수 순환 및 온도 제어 장치, 공기와 연료 공급 장치에 소비되는 총 소비전력을 최종 출력단에서 얻고자 하는 시스템 용량의 20%에 달하는 전력량으로 상정하였다.

2.2 요금제도 및 주택면적

코제너레이션 시스템이 설치되는 주택의 바닥면적은 주택의 에너지 수요를 예측하는 중요한 척도이다. 일반적으로 바닥면적의 증가에 따라 가정 내 전력 및 열수요는 비례하여 증가한다. 그러나 전력 요금은 누진제로 인하여 전력사용량이 증가할수록, 기하급수적으로 증가한다.

2.2.1 전력 및 가스 요금제도

본 연구에서는 수전 전력망으로부터 수전 받는 전력의 요금 제도를 크게 2가지로 나누어 시뮬레이션 하였다. 첫째, 가정용 저압요금제로서, 일반적인 가정용 전력요금제이며, 누진제가 적용된다.

Table 1 City Gas Cost

소매요금	요금 (원)	
열병합용	동절기(12,1,2,3월)	571.51
	하절기(5,6,7,8월)	552.71
	기타월(4,9,10,11월)	564.91

둘째, 별도 설비를 이용하여 심야전력제를 이용하는 경우로서, 2008년 1월 기점으로 인상된 요금을 적용하였다.⁽⁷⁾ 가스 요금의 경우에는 Table 1과 같이 2008년도 1월 1일 고시된 서울지역 요금을 적용하였다.⁽⁷⁾

2.2.2 주택면적 및 에너지 사용 패턴

바닥면적 132 m²의 주택을 대상으로 시뮬레이션 하였으며, 지역 난방공사와 한국전력에서 제공하는 바닥면적에 따른 계절별, 시간별 전력 사용 데이터를 이용하였다.⁽⁵⁾

2.3 플러그인 하이브리드 차량(PHEV) 모델링

2.3.1 차량 성능

플러그인 하이브리드 차량은 크게 Table 2와 같이 3가지로 분류된다. 이때, Table 2의 각 동력 관련 수치는 차중량 1300 kg 가량의 콤팩트카(Compact car) 기준으로 하였다.⁽¹⁾

PHEV0의 경우, 차량의 배터리를 주택 혹은 상업용 건물에서 충전하나, 충전된 배터리 에너지만으로는 운행하지 않는다. 대신 하이브리드 차량 특유의 회생제동과, 엔진과 배터리 간의 동력 분배 제어를 통해 차량의 전체적인 운행 효율을 높여 주행한다.

PHEV20의 경우, 차량의 배터리를 주택 혹은 상업용 건물에서 충전한 후, 엔진 동력의 보조를 받지 않고, 충전된 배터리 전량으로 20 miles (약 32 km)를 운행한다.

Table 2 Classification of PHEV

	PHEV0	PHEV20	PHEV60
Engine Peak Power(kW)	53.00	41.00	32.00
Motor Rated Power(kW)	23.00	37.00	61.00
Battery Rated Capacity(kWh)	2.20	5.10	15.40

Table 3 Specification of Charging in PHEV

	PHEV 0	PHEV 20	PHEV 60
Charging Voltage (V)	120	120	240
Charging Current (A)	12	12	40
Charging Efficiency	1.1	1.1	1.1

PHEV60의 경우, 역시 차량 배터리를 주택 혹은 상업용 건물에서 충전한 후, 충전된 배터리 전량으로 60 miles (약 97 km)를 운행한다.

일반적으로 우리나라 도시 통근자의 일평균 주행거리는 약 50 km (33 miles)정도로서,⁽⁴⁾ PHEV 전체를 대표하는 차량의 배터리 용량 기준은 PHEV33으로 본다. 그러나 본 연구에서는 PHEV 사용자의 실질적 경제적 이익을 보다 세부적으로 분석하기 위하여 PHEV0, PHEV20, PHEV60 각각에 대하여 시뮬레이션 하였다.

2.3.2 배터리 충전 전압 및 전류

본 연구에서는 PHEV의 배터리 충전 전압 및 전류를 Table 3과 같이 가정하였다. PHEV0와 PHEV20은 기존 가정의 전력망으로 충전 전력이 공급 가능하나, PHEV60의 경우에는 충전을 위한 특별한 전력 설비가 추가되어야 하는 경우가 있다. 이때 추가되는 설치비용은 100만원 내외로 산정한다.

2.4 PHEV 충전전략

2.4.1 충전 시간대

PHEV 사용자가 가정 내 전력망을 통해 차량의 충전을 시도하는 시간대는 대개 오후 10시부터 다음날 아침 6시 사이의 시간대로, PHEV 사용자의 70%가 이 시간대에 충전을 시도할 것으로 예측된다.⁽¹⁾

이는 사용자의 취침시간에 맞춰 차량의 충전이 이루어지기 때문이며, 동시에 이 시간대는 취침에 따른 가정 내 전력 수요의 최저구간이 형성되는 때이기도 하다. 즉, PHEV 차량이 충전되는 시간대는 가정 내 전력 수요가 낮아지면서 연료 전지 코제너레이션 시스템이 최저 출력 상태로 가동되어 시스템의 잉여 발전출력을 최대화 할 수 있는 시간대이다.

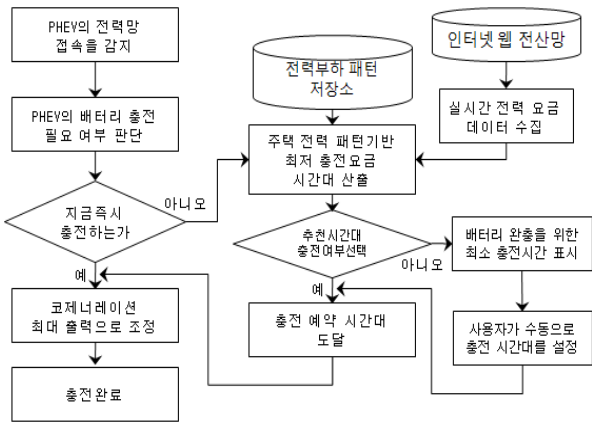


Fig. 2 Flow Chart of Smart Charging System

2.4.2 충전 전략의 순서도

충전 전략의 순서도를 Fig. 2에 나타내었다. 우선적으로 PHEV가 충전을 위한 전력망에 연결되었다는 신호가 감지된 경우, 배터리의 충전이 필요한지에 대한 판단이 내려진다. 이 후, 사용자에게 지금 즉시 충전할지에 대한 선택을 요구한다.

사용자가 지금 즉시 충전하길 원하는 경우, 주택 내 코제너레이션 시스템의 발전량을 최고로 조정하여 PHEV를 충전하기 위한 전력을 생산한다. 반면에, 지금 당장 충전하지 않고, 스마트 충전 알고리즘에서 제시하는 추천 시간대에 충전하길 원하는 경우, 제어 로직은 주택 내 전력 패턴 데이터와, 인터넷 웹 전산망을 통해 다운로드되는 실시간 전력 요금데이터를 이용하여 PHEV 충전 예상요금을 산출한다.

시간대 별로 충전 예상요금이 산출되면, 사용자는 가장 적은 요금으로 충전이 가능한 시간대를 택하거나, 사용자의 라이프 패턴에 따른 충전 시간대를 임의로 설정한다. 이에 따라 충전 시스템은 선택된 시간대까지 대기한다. 선택된 시간대에 도달하면 코제너레이션 시스템 출력을 최대 출력으로 조정하여 잉여전력 및 수전전력을 이용하여 PHEV를 충전한다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 잉여 발전 전력량과 PHEV 충전 기여도

본 연구에서 적용한 132 m²의 주택에 1 kW급 연료전지 코제너레이션 시스템을 설치하였을

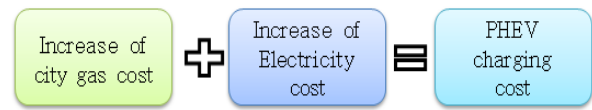


Fig. 3 Energy Cost to charge the PHEV

때 발생하는 취침 시간대(오후 10시~익일 오전 6시)의 잉여 발전 전력량으로는 PHEV 충전에 필요한 전력량을 100% 감당할 수 없기 때문에, 중앙 전력망으로부터 수전을 받아야 하며, 이때 수전 전력량은 계통 연계 효율을 고려하여, 배터리 충전에 필요한 전력량과 잉여전력량의 차이로 계산한다. 이때 잉여 발전 전력량의 PHEV의 배터리 충전 기여도는 Table 4와 같다.

3.2 PHEV 충전을 위한 에너지 요금

PHEV 충전을 위한 에너지 요금은 Fig. 3과 같이 크게 2가지이다. 첫째는, 코제너레이션 시스템이 PHEV충전을 위해 발전을 시행하면서 소모되는 도시가스의 요금 인상분이고, 둘째는 코제너레이션 시스템으로 모자란 전력을 보충하기 위해 실시되는 수전에 대한 전기요금 인상분이다.

본 연구에서는 전술하였듯이 심야전력과 가정용 저압요금제를 기준하여 시뮬레이션 하였다. Fig. 4는 PHEV를 충전하기 위해 요구되는 에너지 요금의 시뮬레이션 결과이다.

PHEV0의 경우, 가정용 저압요금제와 심야전력 요금제 간의 요금 차이가 크지 않으나, PHEV20부터는 주택용 요금제와 심야전력 요금제 간에 PHEV 충전 요금 차이가 크게 발생한다. PHEV60의 경우에는 심야전력요금제와 가정용 요금제 간에 2배가량의 요금차이가 있다. 이는 가정용 요금제의 경우, 심야전력에는 없는 누진제의 효과가 있기 때문으로 분석된다. 이러한 특징은 PHEV 소유자가 차량을 이용하는 전 기간에 걸쳐 경제성에 큰 영향을 미치기 때문에, 향후 PHEV 사용자에게는 심야전력 설비를 위해 추가 자금을 투자해야 할지, 기존의 가정용 요금

Table 4 Attribution of Surplus Power

	PHEV0	PHEV20	PHEV60
잉여발전량의 충전기여도(%)	42.2	42.2	6.25

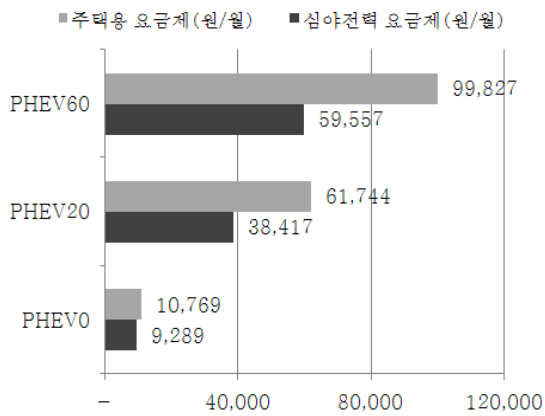


Fig. 4 Monthly Energy Cost to Charge

제에 준한 전력을 그대로 사용할지에 대한 판단이 요구될 것이다.

3.3 PHEV의 연간 경제성 분석

Table 5는 우리나라 자가용 운전자의 일반적인 통계를 기준으로, PHEV의 연간 주행거리와 이에 따른 경제효과를 심야전력요금제에 기준하여 시뮬레이션 한 결과이다.

PHEV0의 경우 연간 46만원, PHEV20의 경우 연간 48만원, PHEV60의 경우 연간 53만원의 연료비 절감효과가 있을 것으로 계산되었다. 이는 우리나라 차량 교체주기를 6.3년으로 보았을 때,

Table 5 Annual Economic Assessment of PHEV (standard midnight electric price)

	CV*	PHEV0	PHEV20	PHEV60
Annual city electric kilometers	-	-	6,700	12,563
Annual city gasoline kilometers	16,750	16,750	10,050	4,187
Annual gasolines used (liter)	802	458	273	110
Annual electricity used (kWh)	-	883.3	2,047.7	6,183.1
Gasoline cost, (won/liter)	1,600	1,600	1,600	1,600
Annual gasoline costs(won/year)	128,3513	733,436	436,834	175,575
Annual electricity costs(won/year)	0	89,179	368,800	571,751
Fuel cost saving versus CV		460,899	477,879	536,187

* CV: Conventional Vehicle

PHEV0의 경우 290만원, PHEV20의 경우 300만원, PHEV60의 경우 330만원의 연료비 절감효과를 예상할 수 있다. 이는 향후 기존 가솔린엔진 차량 대비 PHEV의 가격 상승 상한을 제시하는 수치이다.

반면에, Table 6의 경우와 같이, 일반 가정용 요금제로 시뮬레이션 할 경우, 누진제에 따른 경제성 악화로 PHEV60이 PHEV0보다 경제성이 떨어질 수 있다. 이러한 점은 PHEV가 본격적으로 도입될 경우, CO₂ 저감효과와 도시 공기질 향상에 기여도가 더 높은 PHEV20과 PHEV60의 경제성을 확보해주기 위해 PHEV 관련 특별 전력 요금제를 마련하거나, 인센티브를 통한 보조가 실시되어야 할 필요성을 보여주고 있다.

3.3 자동차 에너지원으로서의 천연가스

연료전지 코제너레이션 시스템을 이용하여 PHEV를 충전하는 기술은 천연가스 활용의 유연성을 제공한다. 현재 천연가스를 자동차의 동력원으로 사용하는 방법은 고가의 천연가스 엔진을 이용하여, 화학에너지를 직접 동력 에너지로 전환한다. 그러나 PHEV를 연료전지 코제너레이션 시스템으로 충전하면 천연가스의 에너지를 배터리에 잠재적 전기에너지로 변환한 후, 이를 동력 에너지로 이용하는 것이기 때문에 기존 천연가스 엔진의 소형화 문제와 천연가스 충전탱크의 안전

Table 6 Annual Economic Assessment of PHEV (standard home electric price)

	CV	PHEV0	PHEV20	PHEV60
Annual city electric kilometers	-	-	6,700	12,563
Annual city gasoline kilometers	16,750	16,750	10,050	4,187
Annual gasolines used (liter)	802	458	273	110
Annual electricity used (kWh)	-	883.3	2,047.7	6,183.1
Gasoline cost, (won/liter)	1,600	1,600	1,600	1,600
Annual gasoline costs(won/year)	1,283,513	733,436	436,834	175,575
Annual electricity costs(won/year)	-	103,386	592,747	958,343
Fuel cost saving versus CV	-	446,692	253,932	149,595

* CV: Conventional Vehicle

Table 7 Natural Gas Consumption of PHEV

	Natural gas consumption per unit driving distances (m ³ /km)
Natural gas engine	0.079
PHEV charged by fuel cell	0.058

성 문제를 동시에 해결할 수 있는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 Table 7과 같이 단위 주행 거리 당 요구되는 각 동력방식의 천연가스 소모량을 산출하여 두 방식의 에너지 효율을 분석하였다. 이때 천연가스엔진은 현재 콤팩트카(Compact Car) 기준으로 출시된 유레가 없으므로, 연비 계산 시 기존 버스용도의 천연가스 엔진의 그것에 차중량(vehicle weight)당 연비를 감안하여 비례 산출하였다.⁽³⁾ PHEV의 연비가 천연가스 엔진의 그것 보다 높게 산출되었으며, 이는 하이브리드차량 특유의 동력제어방식에 따른 높은 연비에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 연료전지 코제너레이션 시스템이 설치된 주택에서, PHEV를 충전 할 경우, 심야전력제와 주택용 저압요금제 각각에 관하여 충전요금과 이에 따른 경제성을 시뮬레이션 하였다. 심야전력설비를 이용할 경우, PHEV는 매년 약 50만원의 연료비 절감효과를 거둘 수 있으며, 우리나라 차량 평균교환주기인 6.3년 동안 300만원의 연료비 절감효과를 거둘 수 있다. 반면에, 주택용 요금제의 경우, PHEV0에서는 심야전력과 비슷한 연료비절감효과를 거두지만, PHEV20과 PHEV60의 경우에는 누진제의 영향으로 오히려 경제성이 PHEV0보다 낮아질 수 있다.

후 기

본 연구는 차세대 연료전지 통합시스템의 지능

형 운전 및 열관리 기술 개발을 위한 국가지정연구실(NRL)사업 및 마이크로열시스템연구센터의 지원으로 진행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. R. Graham., 2001, Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options, Report of EPRI, RP01-1000349
2. Kong, N. W., Um, S. K., Yu, S. P., Kim, M. J., Lee, J. H., Lee, W. Y., 2006, Integrated Simulation Study of a Residential PEFC-Based Cogeneration System Using Backward Energy Flow Management Schemes, Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting, pp. 1728-1733.
3. Zhou K., Ferreira, J. A., De Hann, S. W. H., 2007, Optimal Energy Management Strategy and System Sizing Method for Stand-alone Photovoltaic Hydrogen Systems, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 477-489
4. The Statistical Data of Annual Transportation Research Report, 2007, Korea Transportation Safety Authority. (website: <http://www.kosta.or.kr/>)
5. The Statistical Data of Annual Electricity Research Report, 2007, The Korea Electric Power Corporation. (website: <http://www.kepco.or.kr/>)
6. The Statistical Data of Annual Electricity Exchange Report, 2007, The Korea Power Exchange. (website: <http://www.kpx.or.kr/>)
7. The Korea Price Information, 2008, (website: <http://www.kpi.or.kr/>)