한국신·재생에너지학회 2008년도 추계학술대회논문집 pp.349~352

플러그인 하이브리드 전기자동차의 스마트 충전에 관한 연구

*노 철우[1], 김 민수[2]

Study on the Smart Charging for Plug-in Hybrid Electric Vehicle

*Chul Woo Roh, Min Soo Kim

Key words : PHEV(플러그인 하이브리드 전기자동차), Smart charging strategy(스마트 충전 전략), Simulation(시뮬레이션)

Abstract : The most concerning issue in these days is the energy crisis by increasing threat of global warming and depletion of natural resources. In the situations, the Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) is drawing attention from many countries for the next generation's car which has higher fuel efficiency and lower environmental impact. This paper presents simulation results about the limit capacity of central power-grid which doesn't have enough surplus electric power for charging PHEVs. Therefore, this paper also presents a smart charging system that can charge the PHEVs with a function of distributing demands of charging. The smart charging system is an agent facility between the government and consumer, which can recommend the best time to charge the battery of PHEVs by the lowest energy cost. This function of choosing time-slots is the technical system for the government which wants to control the consumption rate of electric power for PHEVs. Finally, this paper presents the economic feasibility of PHEVs from the two kinds of price system, midnight electric price and home electric price.

Nomenclature

D_{charge} : total demand of power to charge PHEV, MWh
$N_{classes}$: number of cars for each classes of LDV fleet
B_{33}: battery capacity of PHEV33 for each classes of LDV fleet, kWh
$\epsilon_{round-trip}$: efficiency of the battery charging over a round-trip of full charge and discharge cycle, %
SC: surplus capacity in existing power-grids, MWh
CL: capacity liit of existing power-grid, MW
SL: system load, MW

subscript

PHEV: plug-in hybrid electric vehicle
LDV: low duty vehicle
CV: conventional vehicle

1. 서 론

플러그인 하이브리드 전기자동차(Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)는 기존의 하이브리드 전기자동차(Hybrid electric vehicle, HEV)에서 저속/저토크 구간의 동력원으로만 적용되던 배터리의 용량과 성능을 향상시킴으로써, 차량 주행의 상당부분을 배터리의 전기에너지로만 운행할 수 있도록 설계한 것이다. 따라서 PHEV는 일정 구간 동안 내연기관 구동을 전혀 하지 않고, 배터리의 전력만으로 주행할 수 있다. 결과적으로 PHEV는 기존 HEV에 비해 배터리의 용량을 크게 확장시켰을 뿐만 아니라 충전전력을 외부 전원망으로부터 공급받을 수 있도록 차량에 외부 전원 접속구가 장착되었다.

기존의 HEV는 배터리의 역할이 내연기관의 최적 운전, 또는 제동 시 비산에너지의 효율적 이용을 위한 사용목적으로 제한되었던 반면, PHEV의 경우는 차량의 구동에너지 공급을 위한 주요 에너지 공급원으로써 배터리의 역할이 크게 강화된 것이다. 더욱이, 기존 HEV에 적용되었던 특유의

1) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : keiyas11@snu.ac.kr
Tel : (02)880-1648 Fax : (02)873-2178
2) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : minskim@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8362 Fax : (02)873-2178

하이브리드 동력전달제어 기능이 PHEV에도 그대로 적용될 수 있어 고연비성능을 그대로 유지시켰음은 물론, 내연기관을 구동하지 않고 전력 만으로의 장거리 주행을 가능케 함으로써 화석연료의 사용을 최소화시킬 수 있다.

한편, PHEV의 본격적인 시장침투(Market penetration)는 2010년 이후로 예견되고 있다. 이에 따라, PHEV 충전전력 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다. 대부분의 충전전력수요가 접근이 용이한 기존의 중앙 전력망으로의 접속을 시도하려고 할 것으로 예측되기 때문에, 현재의 중앙 전력망이 과연 어느 정도까지 PHEV의 충전 전력수요를 견디어 낼 수 있는지가 향후 PHEV의 대중화를 위한 자동차 및 전력 관련 산업계의 주요 관심사이다.

본 연구에서는 이러한 PHEV의 본격적인 대중화를 앞두고, 현재의(2007년 12월) 승용차 대수를 기준하여 기존 내연기관 차량이 PHEV로 교체되었을 때 발생하는 전력량과 중앙전력망의 PHEV 충전전력 공급 한계를 시뮬레이션 해보고, 이를 위한 스마트 충전시스템의 필요성을 제기한다. 특히 실제 PHEV가 등장하였을 경우 발생하는 현 요금제도의 문제를 고찰한 후, 향후 PHEV의 대중화에 따른 요금제도 및 인텔리전트 전력망의 필요성을 제기한다.

2. PHEV 시장침투에 따른 전력수급모델

2.1 PHEV 모델링

PHEV는 내연기관을 구동하지 않고, 차량 내 배터리만으로 주행할 수 있는 거리, 즉 20, 30, 40, 60 마일(miles)등의 배터리 용량별 클래스를 주행거리단위로 분류하여, PHEV20, PHEV40 등으로 칭하는 것이 통상이다.[1]

본 연구에서는 2006년 12월의 우리나라 승용차 평균 일일 주행거리가 약 53 km, 즉 33 마일 정도의 거리임을 고려하여, 본 연구에 적용된 각종 PHEV의 클래스를 33으로 설정하고, PHEV33의 각종 성능에 기준하여 계산하였다. 일부 단계에서는 시뮬레이션의 상세한 분석을 위하여 PHEV0, 20, 60 단계로 분류 적용하였다. Table 1은 본 시뮬레이션에 적용된 PHEV33의 콤팩트카(compact car) 성능기준데이터이다.[1)]

Table 1 Power train specification of PHEV33

	Vehicle	Unit	PHEV33
Compact Car	Engine Peak Power	kW	38
	Motor Rated Power	kW	45
	Battery Rated Capacity	kWh	8.6
	Vehicle Mass	kg	1321
Mid-size SUV	Engine Peak Power	kW	88
	Motor Rated Power	kW	86
	Battery Rated Capacity	kWh	12.5
	Vehicle Mass	kg	2449
Full-size SUV	Engine Peak Power	kW	107
	Motor Rated Power	kW	104
	Battery Rated Capacity	kWh	15.2
	Vehicle Mass	kg	2875

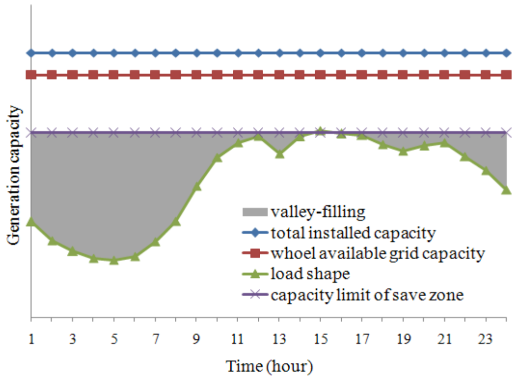

Fig 1. the valley-filling model with summer peak load shape.

2.2 Valley-filling 모델

valley-filling 모델은 현재 존재하는 전력망의 추가 발전 또는 발전소의 추가 증설이 없다는 가정 하에, 24시간 내 사용가능한 잉여전력을 모두 활용하였을 경우 충족시킬 수 있는 PHEV의 충전전력수요를 계산하여, 전력망이 최대한으로 공급할 수 있는 PHEV의 전력망 접속허용 가능 대수를 순수한 기술적 요인만으로 도출하는 방법이다.[3)]

본 연구에서는, 이러한 valley-filling 모델의 적용대상을 크게 두 개의 24시간 시스템에 집중시켰다. 이는 1 년, 즉 8760시간 모두를 시뮬레이션 하고 최적화시키기 위해 필요한 고도의 모델링 코스트를 줄이기 위해서다. 이를 위해 여름과 겨울의 전형적인 피크전력 발생일의 부하양상을 연구에 적용하였다. 이 두 조건은 중앙전력망이 연중 가장 낮은 예비율을 갖게 되는 가혹조건이기 때문에, 잉여전력이 비교적 증가하는 두 조건 이외의 날들을 포함하여 현재의 중앙전력망이 공급할 수 있는 PHEV의 충전수요에 대한 한계 능력을 평가하기에 적합하다고 판단된다. 실제로, 봄과 가을의 전력량은 통상적으로 여름과 겨울에 비해 감소하는 양상을 보인다.

Fig 1 은 valley-filling 모델의 여름철 적용의 예를 나타낸 것이다.[4)] 전력이 안정적으로 유지되기 위한 최소한의 예비율을 용량한계영역(capacity limit of safe zone)의 상한으로 설정하고, 음영으로 표시된 부분을 PHEV 충전전력을 위한 전력량으로 계산하였다.

2.3 PHEV 시장침투의 기술적 한계

한 국가 내 전(全) PHEV의 충전 전력 수요를 계산하기 위해 식 (1)과 같은 계산을 수행하였다.

$$D_{charge} = \sum^{classes} \left[\frac{N_{classes} \cdot B_{33} \cdot \epsilon_{round-trip}}{\epsilon_{charger}} \right] \quad (1)$$

PHEV를 충전시키기 위한 중앙전력망으로의 접속 및 전력소비는 중앙전력망 내 존재하는 잉여전력의 범위 내에서 허용되어야 한다. 또한, 전력품질을 고려할 경우, 잉여전력의 전량을 사용할 수 없으므로, 일중(日中) 피크전력을 상한(上限)으로 기준하여 잉여전력량(surplus capacity, SC)을 계산하였다. 잉여전력량은 식(2)와 같다.

$$SC = \sum^{1\,day} (CL - SL) \quad (2)$$

본 연구에서는 PHEV 시장침투의 '기술적 가능성(technical potential)'을 중앙전력망의 예비율로 공급할 수 있는 PHEV33 클래스의 전력망 최대 접속 대수로 정의하였다.

Table 2 에는 PHEV의 시장침투로 인한 전력 공급적 측면에서의 기술적 한계를, 2007년 12월의 전국 승용차 대수인 1210만대를 100%로 기준하였을 때의 비율로 나타내었다. PHEV가 시장에 등장하고, 이에 따라 현재의 내연기관 차량들이 PHEV로 차츰 교체될 경우, 현재의 잉여전력량으로는 일부 계절에서 현 승용차 총 대수의 31% 이하의 PHEV에만 충전전력을 공급할 수 있다. 특히 시간대에 따라 편차가 큰 전력 부하패턴 특성과 저장할 수 없는 전력 자체의 특성 을 고려해야 한다. 따라서 PHEV의 시장이 형성됨에 따라 전력 수요가 폭증할 것에 대비하기 위하여 국가적 차원에서 합리적인 PHEV 충전 전략 및 시스템을 미리 갖추어 놓을 필요성이 있다고 판단된다.

3. 스마트 충전 전략

3.1 충전시간대

PHEV 사용자가 중앙 전력망 혹은 분산발전 시스템과 연계된 전력망을 통해 충전을 시도하는 시간대는 일반적으로 오후 10시부터 익일 오전 6시 사이의 시간대로, PHEV 사용자의 70%가 이 시간대에 충전을 시도할 것으로 예측된다.[3] 이 시간대는 사용자의 취침시간에 맞춰 차량의 충전이 이루어질 것으로 분석되기 때문이다.

심야 시간대의 충전은 취침에 따른 주택 및 상업용 빌딩의 전력수요가 최저가 되는 시간대이므로 중앙전력망의 잉여전력을 효과적으로 사용할 수 있는 여지를 제공하고, 분산발전 시스템과의 연계를 통해 잉여 발전 출력을 이용한 PHEV 충전을 가능케 한다. 따라서 스마트 충전시스템은 일정 패턴을 갖고 변동하는 전력망의 부하와 그에 따른 잉여전력을 PHEV 사용자가 효과적으로 이용할 수 있도록 전력수요와 공급을 조정하는데 1차적 목적이 있다. Table 3 는 본 연구에 적용된, PHEV0, 20, 60 클래스의 충전조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Technical potential of PHEV penetration

Total Number of Vehicles	24-hour valley filling		6pm~6am valley filling	
	summer	winter	summer	winter
	Technical potential in %			
12.1 mil.	102	57	74	31

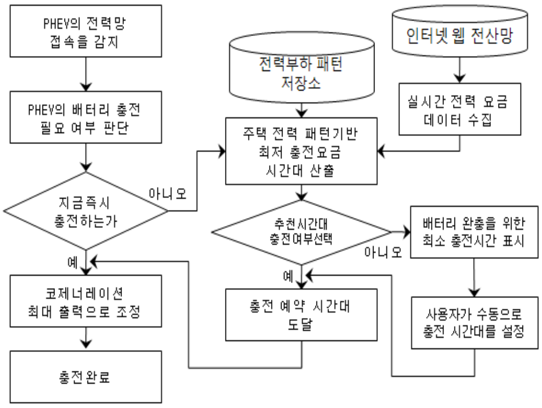

Fig. 2 Flow Chart of Smart Charging System

3.2 충전 전략의 순서도

충전전략의 순서도는 Fig 2와 같다. 우선적으로 PHEV가 충전을 위한 전력망에 연결되었다는 신호가 감지된 경우, 배터리의 충전 필요여부에 대한 판단이 내려진다. 이후, 사용자에게 지금 즉시 충전할 것인지 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 추천시간대에 충전하길 원하는 경우, 제어 로직은 주택 내 전력 패턴데이터와, 인터넷 웹 전산망을 통해 전송되는 실시간 전력 요금데이터를 이용하여 PHEV 충전 예상요금을 산출한다. 따라서 본 연구의 시스템이 적용되기 위해서는 인텔리전트 전력망의 구축을 선결과제로 한다.

시간대 별로 충전 예상요금이 산출되면, 사용자는 가장 낮은 요금으로 충전이 가능한 시간대를 택하거나, 사용자의 라이프 패턴에 따른 충전시간대를 임의로 설정한다. 이에 따라 충전 시스템은 선택된 시간대까지 대기한다. 선택된 시간대에 도달하면 코제너레이션 시스템 출력을 최대

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
Battery Rated Capacity(kWh)	2.20	5.10	15.40

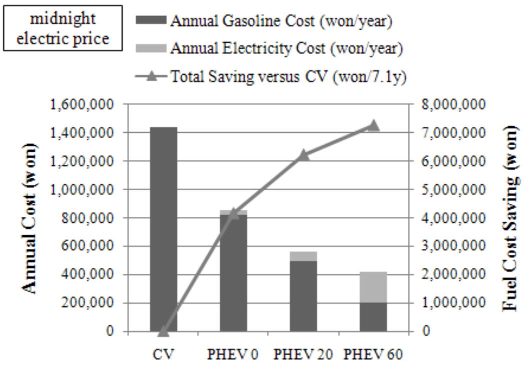

Fig. 3 Annual Economic Assessment of PHEV (standard midnight electric price)

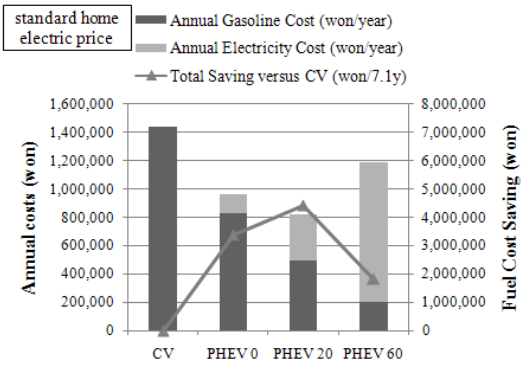

Fig. 4 Annual Economic Assessment of PHEV (standard home electric price)

출력으로 조정하여 잉여전력 및 수전전력을 이용하여 PHEV를 충전한다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

PHEV 충전을 위한 에너지 요금은 중앙전력망으로부터 수전하는 전력요금이 주를 이룬다. 일부 분산발전과 연계된 경우에는 전력을 생산하기 위한 1차 에너지 요금을 더한 값으로 정의될 수 있다. 본 연구에서는 중앙전력망으로부터의 수전전력요금을 계산하기 위하여 크게 2가지, 즉 심야전력과 가정용 저압요금제를 기준하여 계산하였다. 이는 PHEV 승용차의 대다수 사용자가 주택에서 충전을 시도할 것으로 추정되기 때문이다.

Fig. 3 과 Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 심야전력요금의 경우에는 전력으로 달릴 수 있는 주행거리가 늘어날수록 경제성이 증가하지만, 가정용 요금제의 경우에는 누진제의 영향으로 전력을 많이 사용함에 따라 경제성 저하가 발생한다. 따라서 PHEV의 대중화를 위해서는, PHEV 자체의 가격상승을 보상할 수 있을 정도로 경제성을 확보해 주는 세제지원은 물론, PHEV를 위한 특별 전력요금제도에 대한 연구가 필수적이라고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는, PHEV의 대중화에 따른 충전전력의 수요증가에 대비하여, 현재의 중앙전력망이 보유한 잉여전력량으로 충전할 수 있는 PHEV의 한계 대수를 시뮬레이션 하였으며, 그 결과 일부 계절에서는 현재 승용차 대수의 30% 이상이 PHEV로 전환되었을 때, 충전이 불가능한 상황이 올 수 있음을 제시하였다. 따라서 PHEV 대중화를 위한 선결과제는 다음과 같다.

(1) 충전전력 수요와 이에 따른 전력 공급의 효과적 분배 시스템을 가능케 하는 인텔리전트 전력망과 스마트 충전시스템이 마련되어야 한다.

(2) 특히, 중앙전력망 내 예비율이 낮은 일부 계절 및 시간대에는 PHEV 충전수요가 일시에 몰려 전력망의 안전성을 심각하게 위협할 우려가 있으므로, 이에 대한 적절한 기술 대책이 연구되어야 한다.

(3) 심야전력제도와 주택용 누진요금제에 대하여 PHEV0, PHEV20, PHEV60 클래스의 연료비 절감효과과 상이하기 때문에 주택용 누진요금제를 PHEV 충전에 사용하기 어렵다고 판단된다. 따라서 PHEV의 경제성을 보장해 줄 수 있는 특별요금제의 신설 및 연구가 필요하다.

References

[1] R. Graham., 2001, Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Option, Report of EPRI, RP01-1000349
[2] The Statistical Data of Annual Transportation Research Report, 2007, Korea Transportation Safety Authority.(website: http://www.kosta.or.kr/)
[3] Denholm, P., and W. Short. 2006. An Evaluation of Utility System Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-in Hybrid Electric Vehicles. Technical Report NREL/TP-620-40293. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
[4] The Statistical Data of Annual Electricity Research Report, 2007, The Korea Electric Power Corporation (website: http://www.kepco.or.kr/)