

북미 배전계통에서의 플러그인 전기자동차에 대한 계통영향 평가

국경수^{1*}, 아린담 마이트라¹
¹미국 전력연구소

Impact Evaluation of Plug-in Electric Vehicle Loading on Distribution Systems in North America

Kyung Soo Kook^{1*} and Arindam Maitra¹

¹Electric Power Research Institute

요약 본 논문은 최근 북미 지역을 중심으로 상용화에 대한 기대가 높아지고 있는 플러그인 하이브리드 전기자동차가 배터리의 충전을 위해 전기에너지 배전망에 직접 접속될 때 나타날 수 있는 설비의 과부하 및 전압문제 등에 대한 평가방법을 제안하고 실제 계통에 대한 평가결과를 분석한다. 플러그인 하이브리드 전기자동차가 일반 가정에서 충전되기 시작할 경우 전기에너지 배전계통은 가정에서 사용되어 오던 기존의 전기제품보다 훨씬 많은 전력을 소모하는 새로운 부하에 전력을 공급하게 되는 만큼 이를 배전계통의 설비계획에 반영하기 위한 모델링과 절차가 요구된다. 본 논문에서는 미국 전력연구소에서 북미지역의 전력회사들과 함께 수행하고 있는 관련 연구 과제를 소개하며 OpenDSS 프로그램을 통해 배전계통과 플러그인 전기자동차의 충전부하를 모델링하고 충전시각과 전기자동차 배터리 형태에 따른 다양한 시나리오를 적용하여 배전계통에 대한 플러그인 전기자동차 충전부하의 영향을 분석한다.

Abstract This paper proposes the process for evaluating the impact of charging the PHEV(Plug-In Hybrid Electric Vehicle) on the distribution systems, and analyzes the study results employing the actual systems as the PHEV is highly expected to increase in the automobile industries in North America in the near future. Since the charging load of the PHEV directly connected to the distribution systems would consume electric power much more than any other existing electric product of residential customers, the new modeling and process would be required to consider the PHEV in distribution systems planning. The EPRI(Electric Power Research Institute) is collaboratively conducting the impact study of PHEV on the distribution systems with power utilities in North America. This study models distribution systems and the charging load of the PHEV using OpenDSS software, and analyzes the impact of PHEV on the distribution systems by assuming various scenarios with different charging time and PHEV types.

Key Words : Plug-In Hybrid Electric Vehicle(PHEV), Distribution System, Open Source Distribution System Simulator(OpenDSS), Battery Charging

1. 서론

최근 화석연료의 가격불안이 가중되고 온실가스 배출권 관리강화와 같은 환경오염방지를 위한 적극적인 활동들이 구체화되면서 현대사회의 필수품이면서도 대표적인 이산화탄소 배출원인 자동차에도 연료비가 저렴하고 환경오염물질의 배출을 혁신적으로 개선할 수 있는 전기자

동차에 대한 관심이 더욱 집중되고 있다. 더욱이, 전기자동차 상용화의 한계로 지적되어오던 배터리 기술이 최근 급속히 발달함에 따라 전기자동차의 주행성능도 급격히 개선되면서 기존의 자동차를 충분히 대체할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 특히 미국은 이러한 전기자동차 분야를 미래 핵심 산업으로 인식하여 제반 기술을 개발하고 상용화의 인프라 구축을 위해 각종 부양책을 제안

*교신저자 : 국경수(wkook@epri.com)

접수일 09년 06월 24일

수정일 09년 09월 07일

계재확정일 09년 09월 16일

하고 있으며 최근 경기침체의 직격탄을 맞은 자동차 제조업체들 또한 불황을 타개하고 향후 자동차 시장의 재편에서 우위를 차지하기 위해 전기자동차의 개발에 전력을 다하고 있어 전기자동차의 본격적인 상용화가 도래할 것으로 예상된다.

전기자동차는 크게 현재도 시판되고 있는 하이브리드 형태와 북미를 중심으로 최근 집중적으로 개발되고 있는 플러그인 하이브리드(PHEV) 형태가 있는데 두 형태 모두 화석연료에 의한 동력과 전기에너지에 의한 동력을 모두 갖추면서도 하이브리드 형태는 전기에너지를 저장하는 배터리를 자동차 내부적으로만 충전하도록 하는 반면 플러그인 하이브리드 형태는 외부전원을 통해서 충전을 할 수 있다. 향후 수년간은 이러한 하이브리드 형태의 전기자동차들이 주로 생산될 것으로 예상되며 배터리의 성능향상과 전기충전소와 같은 전기자동차 인프라의 구축에 따라 순수하게 전기에너지만을 동력으로 하는 전기자동차 세대로 전환될 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 배전계통의 중단기 계획에서 다루어 질수 있는 하이브리드 형태의 플러그인 전기자동차를 대상으로 한다.

북미의 경우 플러그인 하이브리드 전기자동차의 상용화에 대한 기대가 높아짐에 따라 플러그인 전기자동차의 충전이 직접적으로 이루어질 가능성이 높다. 따라서 전기에너지 배전망을 운영하는 전력회사들에서도 이를 대비하기 위한 움직임이 본격화 되었으며 미국 전력회사들이 공동으로 설립한 비영리 연구소인 전력연구소(Electric Power Research Institute)의 주관으로 배전계통에 대한 플러그인 하이브리드 전기자동차의 영향평가를 수행하고 있다. 현재 미국 및 캐나다의 15여개 전력회사들이 이러한 연구에 이미 참여하고 있으며 참여 회사의 수가 점점 증가되고 있다.

본 논문에서는 이를 위한 배전계통과 플러그인 전기자동차의 모델링을 제안하고 플러그인 전기자동차의 시장점유율과 접속위치, 충전시각 등을 다양한 시나리오 별로 가정하여 전기자동차가 기존 배전계통을 통해 일반 가정에서 충전될 때 배전계통의 부하율, 전압 분포 등에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 실제계를 이용하여 평가한다.

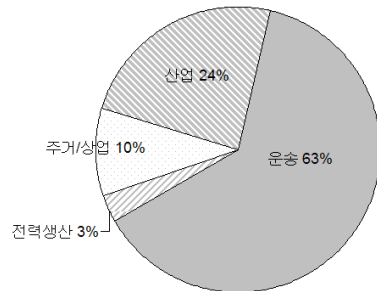
플러그인 전기자동차의 시장점유율이 근시일내에 급속히 증가하지는 않을 것으로 예측되기 때문에 배전계통에 미치는 영향도 전체적으로는 크지 않을 수 있겠으나 배전계통의 특성상 지형적으로는 집중적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되며 이러한 전기자동차의 배전계통 영향 평가가 수립되면 배전계통의 계획측면에서 지속적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

화석연료의 해외 의존도가 어느 나라 보다 높고 자동차용 연료 가격이 매우 높으며 자동차 산업의 북미 수출

의존도가 높은 한국의 경우에도 이러한 플러그인 하이브리드 전기자동차에 대한 기술적 및 소비적 수요가 높게 예상되는 만큼 이를 미리 대비하기 위한 수요예측 및 배전계통계획 측면에서의 계통영향 평가가 필요할 것으로 생각되며 북미 배전계통에서 선행되고 있는 이러한 유사 연구들이 좋은 벤치마크가 될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 플러그인 전기자동차의 전망과 활용

미국의 경우 운송 분야가 그림 1과 같이 국내 전체 석유수요의 절반 이상을 차지하고 있는 만큼 전기자동차의 상용화는 환경문제뿐만 아니라 에너지에 대한 국가의 대외 의존도까지도 획기적으로 개선할 것으로 기대하고 있다[1].



[그림 1] 미국의 분야별 석유수요 (2004년 기준)

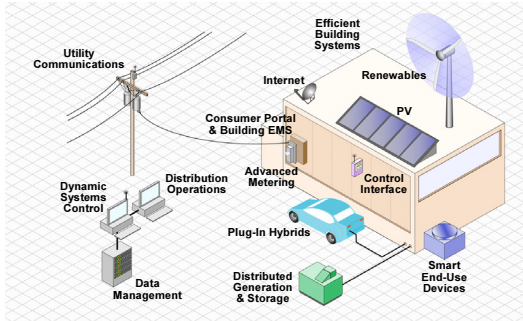
북미의 플러그인 전기자동차에 대한 시장조사에 의하면 표 1과 같이 관련기술의 개발과 석유가격에 따라 2050년까지 PHEV가 신규자동차 시장의 20[%]에서 80[%]까지를 차지할 것으로 예상되며 이로 인해 최대 연간 약 2에서 5억 톤의 온실가스 배출을 감소시킬 수 있을 것으로 조사되었다[2].

[표 1] 플러그인 전기자동차의 시나리오별 신규자동차 시장점유율 예측(2050년)

2050년 시나리오별 신규 자동차 시장점유	자동차 유형			
	기존차량	하이브리드	PHEV	
플러그인	저	56[%]	24[%]	20[%]
전기자동차시장 진입 시나리오	중	14[%]	24[%]	62[%]
	고	5[%]	15[%]	80[%]

또한 최근 관심이 집중되고 있는 지능형전력망(Smart Grid) 환경에서는 그림 2와 같이 소비자들의 PHEV충전을 효율적으로 조정하고 충전이 완료된 차량에 대해서는 일종의 분산전원으로도 활용함으로써 풍력이나 태양열과 같은 신재생 에너지 출력의 간헐성을 보완해줄 수 있는 보조서비

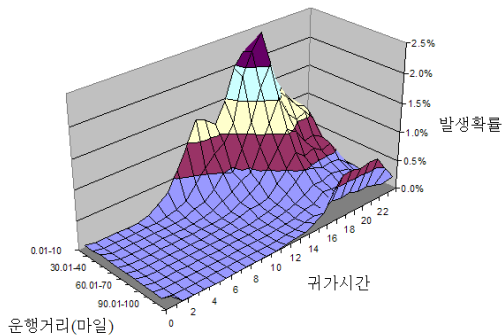
스 전원으로 활용하거나 전기의 소매가격에 대한 소비자의 응답성을 높이기 위한 가정의 전력 저장 장치로도 활용될 수 있을 것으로 기대되고 있다[4-6].



[그림 2] 스마트 그리드 적용 예[3]

3. 플러그인 하이브리드 전기자동차 모델

플러그인 하이브리드 전기자동차의 모델링은 채용된 배터리의 종류나 충전장치의 효율 등에 따른 자동차별 충전 특성을 기준으로, 소비자 유형별 예상구매 비율과 충전 예상 시각 등을 고려한 시나리오별로 이루어질 수 있다. 이때 배터리의 충전에 소요되는 전력량은 배터리의 잔여 전력량에 따라 달라질 것이며 잔여 전력량은 차량의 운행거리와 관계가 있는데 이는 다시 운전자의 귀가시간과 깊은 상관관계가 있는 것으로 나타난다. 다음 그림 3은 자동차 운행거리와 귀가시간에 대해 미국 National Household Travel Survey(NHTS)가 발표한 통계의 예를 보이는 것으로 40마일 미만으로 운행 한 뒤 오후 6시 경에 귀가하는 경우가 가장 많은 것을 볼 수 있다[7,8].



[그림 3] 자동차 운행거리와 귀가시간의 상관관계

플러그인 전기자동차의 경우 대부분의 사용자들이 귀가 즉시 자동차의 충전을 시작하여 총 배터리 용량까지 충전을 할 것으로 예측되기 때문에 이러한 귀가시간에 대한 통계를 전기자동차의 충전시작시각으로 적용할 수 있다.

한편, 향후 지능형 전력망의 환경에서는 플러그인 전기자동차를 임시적인 전력 공급원(충전된 전력을 전력망으로 주입)으로 이용 하는 것이 제안되고 있는데 이를 위해서는 선행되어야 할 조건들이 많기 때문에 현재의 배전계통을 평가대상으로 하는 본 논문에서는 전기자동차의 충전만을 고려한 전력부하로써만 모델링 한다.

3.1 플러그인 전기자동차의 충전 특성

플러그인 전기자동차의 충전시스템은 여전히 개발이 진행 중이지만 전력망에 직접 접속하여 차량의 배터리를 충전하기 때문에 정격에 있어서 기존 전력설비의 정격을 고려하게 될 것으로 예측된다. 북미의 경우 전력설비의 일반적인 정격이 다음 표 2와 같음으로 충전시스템 또한 120/240[V]의 전압을 기본으로 12/32[A]의 전류 크기 이내로 정해 질 것으로 판단된다[7].

[표 2] 전력설비 정격(북미)

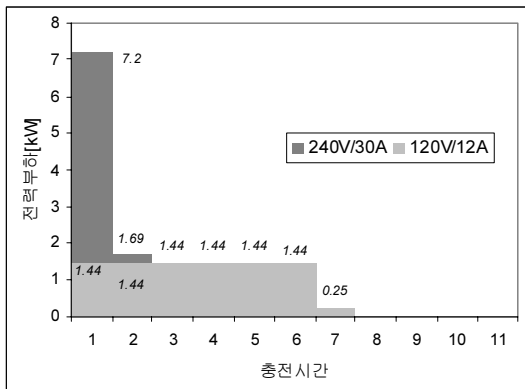
충전방법	정격전압 (볼트)	최대전류 (암페어)	차단기정격 (암페어)
AC Level 1	120[V], 1phase	12[A]/16[A]	15[A]/20[A]
AC Level 2	208-240[V], 1phase	32[A]/80[A]	40[A]/100[A]

현재 SAE가 플러그인 자동차의 충전장치에 대한 표준화 작업(J1772)을 수행하고 있으며 2009년 가을까지는 최종결과가 발표 될 것으로 기대된다[9][10]. 여기에는 GM, Chrysler, Ford, Toyota, Honda, Nissan, Tesla와 같은 자동차 제조사들이 참여하고 있으며 일본의 자동차 연구소(JARI)도 참여하고 있는데 미국과 일본을 중심으로 이루어지고 있는 이러한 충전장치는 단상을 기준으로 전압과 전력 값에 따라 다음 표 3과 같이 세 단계로 분류될 것으로 보인다[7,9].

[표 3] PHEV 모델의 예상 정격

형태	전력 단위
Level 1: 120 교류 전압	1.2 ~ 2.0[kW]
Level 2 (low): 208-240[V] 교류 전압	2.8 ~ 3.8[kW]
Level 2: (high): 208-240[V] 교류 전압	6 ~ 15[kW]
Level 3: 208-240[V] 교류 전압	>15 ~ 96[kW]
Level 3: DC Charging: 600[V] 직류전압	>15 ~ 240[kW]

플러그인 전기자동차의 충전특성은 앞에서 기술한바와 같이 다양한 요소에 의해 결정 되겠지만 시간단위의 전력부하 모델은 충전 시간동안 전력의 값이 일정하게 지속되는 정 전력 모델이며 전력단위에 따라 그 전력값과 충전시간이 정해 질것이다. 플러그인 전기자동차의 배터리 용량으로는 4~15[kWh] 수준이 고려되고 있는데 보수적으로 계산하여 배터리 용량의 50[%] 정도가 실제 사용될 수 있다고 가정할 때 8[kWh] 용량을 기준으로 하면 다음 2가지 정격별 충전특성을 가정해 볼 수 있다. 또한 충전기에서는 10[%]의 손실을 가정하였다.



[그림 4] 전기 자동차의 충전특성 예(8[kWh], 90[%] 충전 효율)

따라서 본 논문에서는 그림 4와 같이 240[V]/ 30[A]와 120[V]/12[A]의 두 가지 충전특성으로 플러그인 전기자동차의 충전을 모델링 하였는데 정격전력 (120[V]/12[A]의 경우 1.44[kW], 240[V]/30[A]의 경우 7.2[kW])으로 충전 후 마지막 1시간동안 나머지 용량이 충전되는 것으로 가정하여 마지막 1시간 동안의 충전전력(kW)은 다음과 같이 설정되었다.

120[V]/12[A]의 경우:

$$(8[\text{kWh}]-120[\text{V}]\times 12\text{A}\times 6\text{h}\times 0.9)\times 0.9 = 0.25[\text{kW}] \quad (1)$$

240[V]/30[A]의 경우:

$$(8[\text{kWh}]-240[\text{V}]\times 30\text{A}\times 1\text{h}\times 0.9)\times 0.9 = 1.69[\text{kW}] \quad (2)$$

3.2 플러그인 전기자동차의 대수

플러그인 하이브리드 전기자동차는 2010년에 본격적으로 자동차 시장에 진출될 것으로 예상되고 있다. 현재는 하이브리드형 전기자동차가 2010년 기준으로 신규자동차 시장의 15[%] 정도를 점유할 것으로 보이지만 2015년경에는

플러그인 하이브리드 전기자동차가 10[%]정도의 신규자동차 시장을 차지할 수 있을 것으로 예상되고 있으며 표 1에서와 같이 2050년을 전후로는 플러그인 전기자동차의 신규자동차 시장점유율이 적게는 20[%]에서 많게는 80[%]까지로 예상되고 있다[2].

본 논문에서 분석되고 있는 배전계통에 대해서는 배전계통이 전력을 공급하고 있는 소비자수를 기준으로 정부의 교통관련 당국이 보유하고 있는 가구별 자동차 보유대수에 대한 통계자료를 활용하여 해당 배전계통내의 총 자동차 대수를 가정한 후 이에 대한 플러그인 전기자동차의 비율을 적용하여 다음 식(3)과 같이 총 플러그인 전기자동차의 대수를 가정하였다.

피더 내 PHEV 수=

$$(\text{피더 내 주거용 부하의 전력소비자(가구)수} \times (\text{PHEV 보급율}) \times (\text{피더 소재 지역의 자동차 수}) / (\text{피더 소재 지역의 가구 수})) \quad (3)$$

또한, 본 논문에서 분석하는 배전계통이 중단지 계획을 위한 것으로 가정하여 플러그인 전기자동차의 비율을 최대 20[%]까지 만으로 가정하되 2[%]부터 2[%]씩 증가시켜가면서 다양한 시나리오를 적용하였다. 또한 배전계통에 대한 영향평가에서는 플러그인 전기자동차부하의 접속위치도 중요한데 본 논문에서는 자동차 보유의 일반성을 감안하여 무작위로 그 접속위치를 가정하되 그 비율이 증가됨에 따라서 낮은 비율에서의 접속위치가 높은 비율에서의 접속위치에 모두 포함되도록 가정하여 배전계통에 대한 상대적인 영향평가가 가능하도록 하였다. 표 4는 이러한 예를 나타낸다.

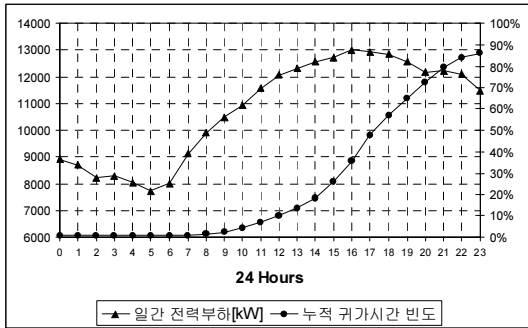
[표 3] 피더 내의 PHEV접속 예

PHEV 비율	2[%]	4[%]	...	18[%]	20[%]
소비자#1	PHEV	PHEV	...	PHEV	PHEV
소비자#2	×	×	...	×	×
소비자#3	×	×	...	PHEV	PHEV
소비자#4	×	×	...	×	×
...
소비자#N-2	×	PHEV	...	PHEV	PHEV
소비자#N-1	×	×	...	PHEV	PHEV
소비자#N	×	×	...	×	PHEV

3.3 플러그인 전기자동차의 충전시간

본 논문에서는 플러그인 전기자동차의 운전자들이 귀가와 동시에 충전을 시작하는 것으로 가정한다. 지능형 전력망의 환경에서 전기 자동차의 충전에 대한 별도의 프로그램

이 만들어 진다면 전기자동차의 충전시간이 운전자들의 귀가시간과 많이 달라질 수도 있겠으나 현재로서는 휴대폰이나 디지털카메라와 같이 충전지에 의해 동작되는 전자제품의 사용 시에 흔히 나타나듯이 사용 후 귀가 시에 즉시 충전을 시작하는 것으로 가정하였다. 한편, 자동차 운전자들의 귀가시간에 대한 NHTS의 통계를 살펴보면 북미의 경우 생활패턴에 따라 오후 5-6시 사이에 가장 많은 차량들이 운행을 종료하고 이후 저녁시간이 그 외 대부분의 귀가시간을 차지한다. 또한, 이는 전력부하의 일간 변동패턴과도 상관관계를 가지는 것으로 주거지역의 경우 사람들이 귀가하여 난방과 조리를 시작하는 저녁시간이 첨두부하로 나타나는 것과 관계가 있다.



[그림 5] 귀가시간과 일간전력부하 변동의 비교

따라서 배전계통에 대한 플러그인 전기자동차 충전부하의 영향을 평가하는 본 논문에서는 해당 배전계통에서의 일간 전력부하 패턴을 기준으로 첨두부하 시각을 산정한 후 이때 모든 플러그인 전기자동차가 동시에 충전되는 것을 가장 가혹한 경우로 가정하였다. 이는 앞에서 기술한대로 전기자동차 운전자들이 귀가와 동시에 충전을 시작하고 이러한 귀가시간이 전기에너지 사용의 일간 패턴으로 나타나는 것을 고려할 때 배전계통에 대한 플러그인 전기자동차 충전부하의 영향을 가혹한 조건에서 보수적인 방법으로 평가하는 것이 될 것이며 이는 다양한 조건에서도 신뢰성이 우선시 되어야 하는 전력공급시스템의 평가에서 일반적인 접근 방법이라고 볼 수 있다.

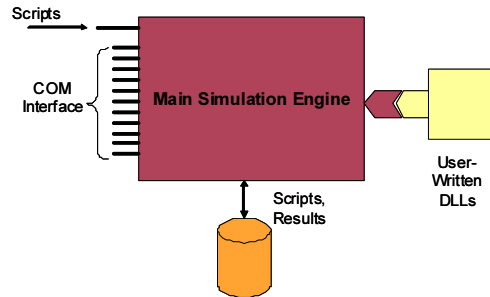
4. Open DSS를 이용한 배전계통 모델

4.1 Open Source Distribution System Simulator

Open Source Distribution System Simulator (OpenDSS)는 1997년 미국 Electrotek Concepts사에 의해 분산전원을

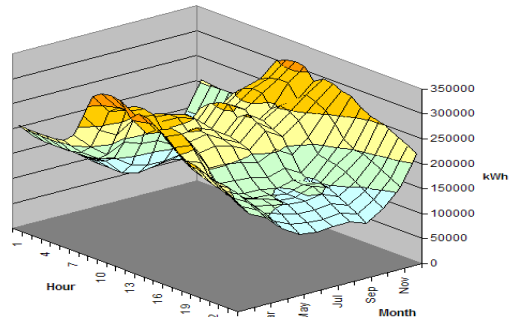
고려한 배전계통 계획을 지원하기 위해 개발이 시작되어 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute)로 인수되는 과정을 거치며 10여년 이상 동안 배전계통 해석프로그램으로 사용되어 오고 있는 전력 배전계통 해석을 위한 전문 프로그램이다. 특히 2008년 9월에는 최근 관심이 높아지고 있는 지능형 전력망(Smart Grid)의 관련 연구에서 새로운 알고리즘이나 제어기법을 분석할 수 있는 배전계통해석 프로그램을 제공하기 위해 프로그램의 코드와 그 사용이 공개되어 누구나 제한 없이 이용이 가능하게 되었다[12].

OpenDSS 프로그램은 마이크로소프트 윈도우즈 환경에서 실행되며 델파이 언어로 프로그램 되었고 전력 배전계통 해석에서 공통적으로 수행되는 거의 모든 주파수 영역을 지원하여 조류계산 뿐만 아니라 단락회로, 하모닉스 및 동적 해석도 수행할 수 있다. 또한 그림 6과 같이 component object model(COM)과 스크립트 인터페이스를 통해 외부 프로그램으로 구동이 가능하여 해석여건에 따라 방대한 해석절차가 최적으로 구현될 수 있는 장점이 있다[12][13]. 이러한 기능의 대표적인 예로써는 MATLAB과 Microsoft Excel을 통해 OpenDSS 프로그램을 실행하는 것이 있다.



[그림 6] 외부 프로그램과의 인터페이스

다음 그림 7은 이러한 OpenDSS의 기능을 이용하여 배전계통의 시간별 연중 조류계산에서 부하변동 결과를 도식화하여 나타낸 것이다.



[그림 7] OpenDSS를 이용한 배전계통 해석결과

미국 전력연구소에서는 다양한 배전계통 관련 연구에서 OpenDSS를 기본적으로 사용해 오고 있으며 플러그인 전기자동차의 계통영향 평가에서도 검토대상계통의 상세모델링과 전기자동차의 모델링을 위해 OpenDSS를 사용하였다.

4.2 배전계통의 모델링

하이브리드 전기자동차의 배전계통 영향평가를 위해서는 평가대상인 배전계통의 정확한 모델링이 전제되어야 한다. 본 논문에서는 이러한 배전계통 영향평가를 단일 피더별로 수행하는 것으로 가정하여 동일변전소에서 전력을 공급받는 다른 피더들은 등가의 단일 부하로 모델링하고 검토대상인 피더에 대해서는 변전소 변압기의 2차 측에서부터 1차 배전선과 주상변압기 및 2차 배전선, 그리고 수용가에 이르기까지 상세히 모델링한 후 시간별 연중 부하에 대한 모의 해석결과와 실제 계측치를 비교함으로써 회로모델을 검증하여 Base Case를 확정하였다.

배전계통은 각 전력회사의 특성과 여건에 따라 고유의 형태로 모델링 되는 것이 일반적이다. 하이브리드인 전기자동차의 배전계통 영향평가에 참여하고 있는 다양한 전력회사들도 계통 데이터를 CymDis, WindMil, Synergiee, FeederAll, GIS 등과 같은 다양한 형태로 관리하고 있으며 본 연구에서는 이를 모두 OpenDSS 프로그램의 형식으로 변경하여 분석하였다.

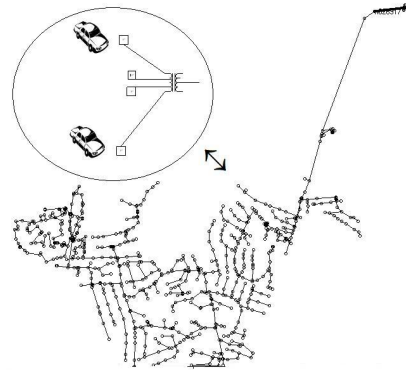
또한, 각 전력부하에 대해서는 전력회사가 가정용, 산업용, 상업용과 같은 부하 형태별로 보유하고 있는 시간별 연간 부하 프로파일을 활용하여 각 수용가별로 시간별 연간 부하를 모델링 하였다. 표 5는 이러한 모델링 파라미터를 전력설비별로 요약하였다.

[표 4] 배전계통 모델링 파라미터

전력설	모델링 파라미터
변전소	단락회로 등가저항, 부하시 탭 절환기 설정
변전소 변압기	변압기 정격(MVA), 전압비, 등가저항, Phase, 결선방식
1차/2차 배전선	시작모선, 끝모선, 단위 길이당 등가저항(또는 도체명), 선로 총 길이, Phase
주상변압기	변압기 정격(MVA), 전압비, 저항, Phase, 결선방식, 무부하 저항
부하	수용가 형태, 부하 종류, 접속위치, 부하역률, 접속전압
캐패시터	설치위치, 설치용량, 제어방식 및 설정

한편, 플러그인 하이브리드 전기자동차의 계통연계전압을 120/240[V]로 가정하기 위해 주거용 주상변압기의 2차

측은 상전압을 120[V]하는 중앙탭 접지의 개방 델타구조로 모델링하여 120[V]와 240[V]가 모두 접속될 수 있도록 하였다. 그림 8은 이와 같은 전기자동차 부하의 접속모델링의 도식적 개요를 나타낸다.



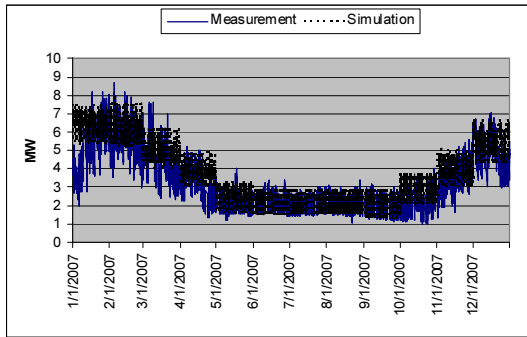
[그림 8] 배전계통에 대한 전기자동차 접속 모델

4. 사례연구

본 절에서는 북미 배전계통에 대해 이루어진 플러그인 전기자동차 충전부하의 영향평가 결과를 분석한다. 배전계통은 주거형태의 소비자가 주로 거주하는 전형적인 피더를 선택하였으며 OpenDSS 프로그램에서 배전계통이 모델링된 후 연간 부하변동에 대한 계측치와 모의해석결과와의 비교를 통해 모델을 검증 하였다. 플러그인 전기자동차의 부하모델은 정전력 부하의 형태로 120[V]/12[A]와 240[V]/30[A]의 두 종류에 대해 침투부하시간을 기준으로 배전계통에 접속하여 설비부하율의 변동과 배전망 설비들에 대한 감도를 분석하였다.

4.1 배전계통 모델링

분석대상 배전계통은 44.5 MVA의 변전소 변압기를 통해 전력을 공급받고 있는 8개의 피더 중 하나이며 총 101개의 주상변압기가 있고 95[%]의 전력부하가 주거용에 해당된다. 동일 변전소를 통해 전력을 공급받은 다른 피더들은 해당 피더에서의 연간 전력부하 측정치를 이용하여 등가부하로 모델링하고 검토대상 피더에 대해서는 1차 및 2차 배전선로와 주상변압기를 포함한 모든 가용 자료를 활용하여 OpenDSS 프로그램으로 상세히 모델링 하였다. 그림 9는 이러한 기준모델에서 분석대상 피더에 대한 연간 부하의 측정치와 모의해석 결과를 비교한 것이다.



[그림 9] 배전계통 모델링의 검증

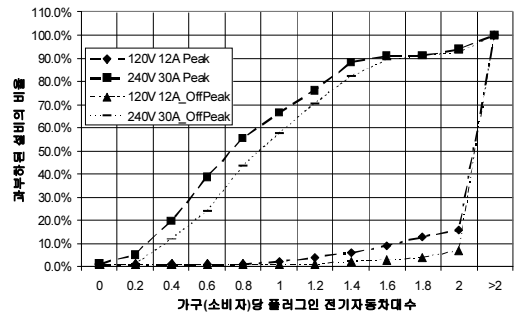
4.2 설비 부하율 분석

배전계통 설비의 부하율에 대한 플러그인 전기자동차 충전부하의 영향 평가지수로써 각 설비가 추가로 공급 가능한 플러그인 전기자동차의 대수를 이용한 각 전력설비의 용량 예비력을 사용하였다. 즉, 설비용량의 예비력 자체는 그 정격에 따라 의미가 달라지고 소비자 접속단에 연결될 전기자동차의 전력부하는 배전계통의 말단에서 변전소에 가까운 상위단계로 갈수록 설비부하율에 대한 직접적인 영향이 줄어들어 들 것이기 때문에 설비용량 예비력을 다음 식을 사용하여 평가하였다.

$$CM_{PHEV} = \frac{I_{rated} - I_{load}}{I_{PHEV}} * \frac{1}{\text{소비자수}} \quad (4)$$

단, CM_{PHEV} 은 플러그인 전기자동차의 추가가능 접속개수로 나타낸 설비의 용량여유, I_{rated} 는 설비의 정격전류, I_{load} 는 설비의 기존 부하전류, I_{PHEV} 는 플러그인 전기자동차의 부하전류, 소비자수는 해당설비를 통해 전력을 공급받는 소지자수를 나타낸다.

그림 10은 이러한 CM_{PHEV} 을 이용한 주상변압기의 부하율을 연중 침두부하시간을 기준으로 평가한 결과를 나타낸 것이며 120[V]의 정격을 사용하는 플러그인 전기자동차의 경우 가구당 2대의 충전이 이루어지더라도 과부하된 주상 변압기의 비율이 20%미만으로 유지되고 있으며 240[V]의 정격을 사용하는 경우에는 가구당 충전대수가 1대만을 초과 하더라도 70%에 근접하는 주상변압기들에 과부하가 발생하는 것으로 나타났다. 그림 10에서 비침두시(off-peak)는 침두부하일의 침두부하 시 부하의 80%정도의 부하시를 기준으로 한 것으로 침두부하 시 결과와의 비교를 위해 검토되었다.

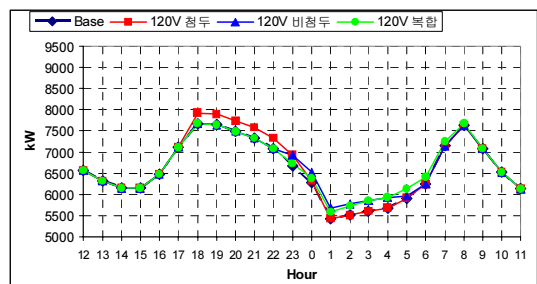


[그림 10] 주상변압기 부하율 영향평가

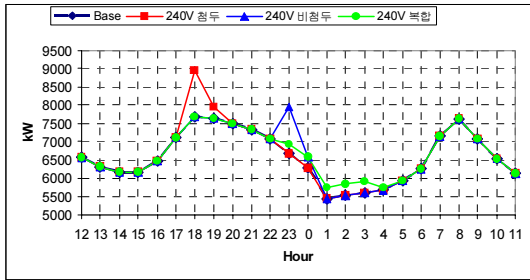
4.3 배전 전력망의 감도 분석

본 절에서는 플러그인 하이브리드 전기자동차의 시장점유율이 증가함에 따라 배전계통 설비의 부하율이 어떻게 달라지는지를 평가한다. 이를 위해 무작위로 선정된 주거용 부하 접속점에 120[V]/12[A] 또는 240[V]/30[A] 형태의 전기자동차 충전부하를 접속하고 전기자동차의 보유율을 2[%]에서 20[%]까지 2[%]단위로 증가시키면서 피더내 설비의 부하율과 모션전압의 변동을 분석하였다. 이를 통해 전기자동차 충전부하 도입에 따른 배전계통의 취약설비를 찾아내어 배전계통 계획 시에 반영할 수 있을 것으로 기대된다. 실제 전기자동차 부하의 접속위치나 보급율은 많은 변수가 있을 수 있겠으나 본 절에서 검토된 결과는 임의의 전기자동차 보급율에서 배전계통에 대한 가장 가혹한 시나리오로 활용될 수 있을 것이다.

다음 그림 11, 그림 12는 전기자동차의 보급을 10[%]에 대하여 전기자동차 충전부하의 충전시간에 따른 침두부하일 피더의 부하 변동을 나타낸다. 전기자동차의 충전은 배터리가 모두 방전된 상태에서 모든 전기자동차가 동시에 충전량을 충전하는 가장 가혹한 조건을 가정하였다. 충전시간은 연중 침두부하일 침두부하 시(오후 6시)와 당일 비침두부하시(오후 11시), 그리고 전기자동차가 20[%]씩 5시간 동안 충전을 시작하는 복합시간으로 가정하였다.



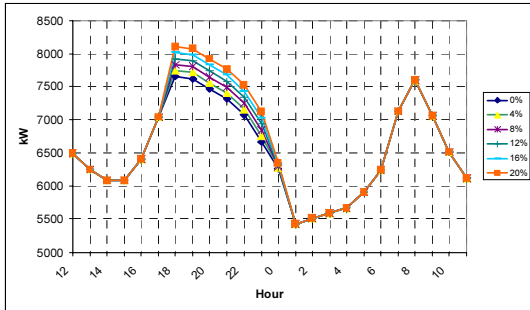
[그림 11] PHEV(120[V]/12[A])의 충전시간에 따른 피더 부하율 변동



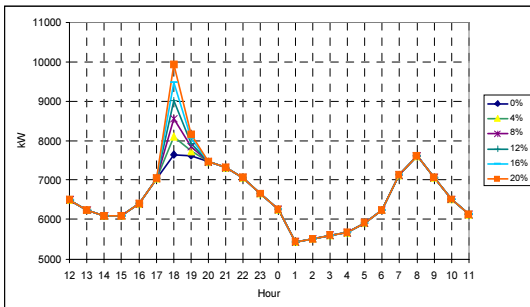
[그림 12] PHEV(240[V]/30[A])의 충전시간에 따른 피더 부하율 변동

그림 11, 그림 12에서 충전전류가 큰 240[V]/30[A] 정격 차량량의 충전은 피더 전체의 부하에도 큰 변동을 가져옴을 알 수 있다.

그림 13과 그림 14는 120[V]/12[A]와 240[V]/30[A] 형태의 전기자동차대수의 보급율이 2[%]에서 20[%]까지 4[%]씩 증가됨에 따라 침투부하일 피더의 부하 변동을 나타낸다. 그림 14에서와 같이 전기자동차의 보급율이 20[%]까지 상승하게 되면 피더의 총 부하량이 최대 30[%]이상 증가될 수 있는 것으로 나타났다.

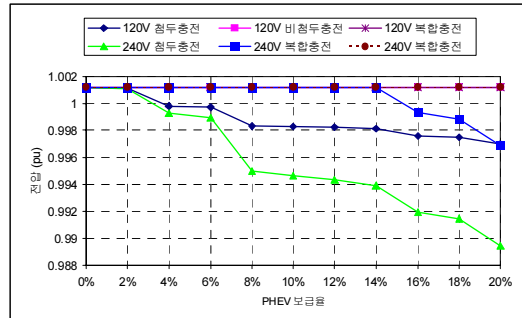


[그림 13] PHEV(120[V]/12[A]) 충전량에 따른 침투 부하 일의 피더 부하 변동



[그림 14] PHEV(240[V]/30[A]) 충전 량에 따른 침투부하 일의 피더 부하 변동

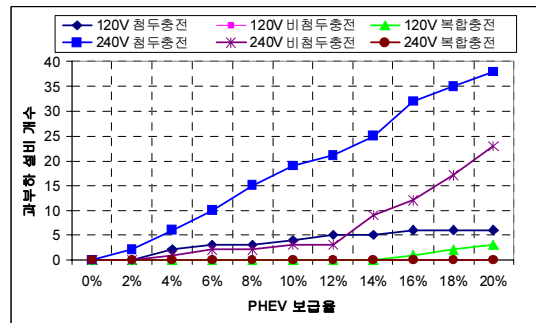
그림 15는 이러한 다양한 전기자동차의 충전시나리오별 모션 전압의 최저치를 나타낸다.



[그림 15] PHEV 보급율에 따른 충전시나리오별 피더 최저 전압의 변동

전기자동차의 충전부하는 유효전력만을 사용하기 때문에 배전계통의 무효전력의 수급에 부정적인 영향을 줄 것으로 예상되나 그림 15에서와 같이 그 영향은 미미한 것으로 나타났으며 이는 전기자동차의 충전부하가 배전 계통 내에 고르게 분포되기 때문일 것으로 판단된다.

또한, 그림 16은 전기자동차의 보급율에 증가함에 따라 배전계통에 나타날 수 있는 과부하 설비의 개수를 나타낸다.



[그림 16] PHEV 보급율에 따른 충전시나리오별 피더내 과부하 설비개수(정격기준)

그림 16에서 알 수 있듯이 정격전류 용량이 큰 전기자동차 모델의 충전 시에 설비의 과부하가 크게 증가하며 240[V]/12[A]형태의 비침투 시각 충전시나리오에서 알 수 있듯이 기준계통의 설비 부하율에 따라 설비 과부하율이 급격히 증가되는 전기자동차의 보급율(그림 16의 경우, 12[%] 이상)이 나타날 수 있다. 또한 그림 16에서와 같이 같은 전기자동차의 보급율에 대해서 충전 자동차의 수를 20[%]씩 5시

간에 걸쳐 충전하는 복합충전의 경우 과부하 설비의 개수를 급격히 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있듯이 향후 지능형 전력망 환경에서 전기자동차의 충전시간을 조절함으로써 배전계통에 대한 전기자동차 충전부하의 영향을 완충하는 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 최근 복미 배전계통을 중심으로 활발히 진행되고 있는 플러그인 하이브리드 전기자동차 충전부하의 배전계통에 대한 영향평가를 소개하고, 이를 바탕으로 플러그인 하이브리드 전기자동차를 배전계통의 계획측면에서 고려하기 위한 모델링을 제안하였으며 실제 배전계통을 이용한 분석결과를 검토하였다. 또한 배전 실제통 해석에 널리 사용되고 있고 최근 그 사용이 개방된 OpenDSS 프로그램을 소개하고 분석에 사용하였다. 본 논문에서 제안된 배전계통 영향평가는 주어진 조건에서 가장 가혹한 상태를 평가하는 확정론적 방법에 가까운 것으로서 중단기 배전계통 계획에 활용할 수 있을 것으로 판단되며 실제통을 활용한 사례 연구 분석을 통해 새로운 가용용 대용량 전력부하인 플러그인 전기자동차를 배전계통 해석에서 고려하기 위해 요구되는 최소한의 데이터와 분석방법을 확인할 수 있었다. 향후, 전기자동차의 보급율이나 접속위치 등을 좀 더 유연하게 고려할 수 있는 확률적인 접근 방법에 대한 연구도 필요할 것으로 판단되며 전기자동차의 구매의사에 대한 소비자의 실제 여론조사 결과들을 접목하는 노력 등이 필요할 것이다. 또한, 본 논문에서 제안된 모델링을 활용하여 지능형 전력망환경에서의 플러그인 전기자동차의 활용방안을 검토할 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

본 논문의 작성을 위해 협조해 준 미국 전력연구소의 Daniel Brooks, Jason Taylor에게 감사드립니다.

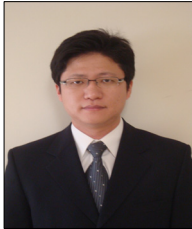
참고문헌

[1] "Annual Energy Review", Energy Information Administration, June 2008
 [2] "Environmental Assessment of Plug-in Hybrid Electric Vehicles Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions," EPRI TR-1015325, July 2007.
 [3] <http://www.smartgrid.epri.com/>

[4] M. Duvall, "Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options for Compact Sedan and Sport Utility Vehicles," EPRI, Palo Alto, CA, Final Report 1006892, 2002.
 [5] M. Duvall, "Electricity as an Alternative Fuel: Rethinking Off-Peak Charging," EPRI, Palo Alto, CA, Plug-in HEV workshop. 2003.
 [6] M. Duvall, "Advanced Batteries for Electric Drive Vehicles. A Technology and Cost-Effectiveness Assessment for Battery Electric Vehicles, Power Assist Hybrid Electric Vehicles, and Plug-in Hybrid Electric Vehicles," EPRI, Palo Alto, CA, Final Report. 1009299, 2004.
 [7] A. Maitra, Kyung Soo Kook, Angelo Giumento, Jason Taylor, Daniel Brooks, Marcus Alexander, Mark Duvall, Evaluation of PEV Loading Characteristics on Hydro-Quebec's Distribution System Operations, EVS24, Stavanger, Norway, May 13-16, 2009.
 [8] J. Taylor, A. Maitra, M. Alexander, D. Brooks, M. Duvall, Evaluation of the impact of PEV Loading on Distribution system operations, IEEE Power Engineering Society, Calgary, July, 2009.
 [9] SAE International, <http://www.sae.org>
 [10] Electric Vehicle Conductive Charge Coupler, SAE J1772, Recommended Practice, Draft Document in progress 2009.
 [11] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, <http://www.fhwa.dot.gov/ctpp/jtw/contents.htm>
 [12] OpenDSS Manual and Reference Guide, OpenDSS_6_2_1 [Online]. Available: <http://sourceforge.net/projects/electricdss/>.
 [13] T. E. McDermott, "An Open Source Distribution System Simulator," in Proc. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Quebec CANADA.
 [14] M. K. Meyers, K. Schneider, R. Pratt, "Impacts Assessment of Plug-in Hybrid Vehicles on Electric Utilities and Regional US Power Grids Part 1: Technical Analysis," Pacific Northwest National Laboratory, Nov 2007.

국 경 수(Kyung Soo Kook)

[정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학사)
- 1998년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2004년 7월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 2007년 5월 : 미국 버지니아 공대 전기공학과(공학박사)
- 2007년 5월 ~ 현재 : 미국 전력연구소(EPRI) 선임연구원

<관심분야>

전력시스템 모델링 및 해석, 플러그인 전기자동차, 신재생 에너지, 지능형 전력망

아린담 마이트라(Arindam Maitra)

[정회원]



- 1995년 5월 : 인도 R.E.C. Nagpur 대학 전기공학과(공학사)
- 1997년 5월 : 미국 미시시피 주립대학 전기공학과(공학석사)
- 2002년 5월 : 미국 미시시피 주립대학 전기공학과(공학박사)
- 2002년 5월 ~ 2006년 12월 : 미국 EPRI-PEAC 선임연구원
- 2007년 1월 ~ 현재 : 미국 전력연구소(EPRI) 프로젝트 매니저

<관심분야>

플러그인 전기자동차, 고효율 변압기, 부하모델링, 지능형 전력망