전기자동차의 충전부하 모델링 및 충전 시나리오에 따른 전력계통 평가

Evaluation of the Charging effects of Plug-in Electrical Vehicles on Power Systems, taking Into account Optimal Charging Scenarios

문 상 근* · 곽 형 근** · 김 진 오†
(Sang-Keun Moon · Jin-O Kim)

Abstract - Electric Vehicles(EVs) and Plug-in Hybrid Electric Vehicles(PHEVs) which have the grid connection capability, represent an important power system issue of charging demands. Analyzing impacts EVs charging demands of the power system such as increased peak demands, developed by means of modeling a stochastic distribution of charging and a demand dispatch calculation. Optimization processes proposed to determine optimal demand distribution portions so that charging costs and demand can possibly be managed. In order to solve the problems due to increasing charging demand at the peak time, alternative electricity rate such as Time-of-Use(TOU) rate has been in effect since last year. The TOU rate would in practice change the tendencies of charging time at the peak time. Nevertheless, since it focus only minimizing costs of charging from owners of the EVs, loads would be concentrated at times which have a lowest charging rate and would form a new peak load. The purpose of this paper is that to suggest a scenario of load leveling for a power system operator side. In case study results, the vehicles as regular load with time constraints, battery charging patterns and changed daily demand in the charging areas are investigated and optimization results are analyzed regarding cost and operation aspects by determining optimal demand distribution portions.

Key Words : Electric vehicles, Charging scenarios, Optimization, Risk analysis, DSM

1. 서 론

전기자동차의 가장 큰 특징은 전력계통에 연계되는 것이다. 높은 배터리의 용량을 가지는 플러그인 하이브리드 자동차(PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle)는 기존의 하이브리드 자동차와 다르게 충전을 위해 계통에 접속된다. 기술력이 진보됨에 따라서 플러그인 하이브리드 자동차는 전기에너지만으로 구동되는 Full Electric Vehicle(EV)로 전환될 것이다. 증가하는 신재생에너지 기술과 함께 전기자동차는 차세대 기술로서 전력인프라에 큰 비중을 차지할 것으로 예상된다.

충전부하의 증가는 전력부하피크 증가 등의 문제점을 수반하므로 전기자동차의 충전부하를 제어하기 위한 방법들이 연구되고 있는데, 크게는 전력계통의 안정을 고려하는 방법[1,5]과 가격신호를 통한 충전시간의 이동을 유도하는 방법[2], 최적화 방법을 이용한 자동충전제어[3] 등이 있다. 이와 같은 충전부하제어 방법들은 전력시스템 상태를 비롯하여 가격 및 제어신호를 전달할 수 있는 AMI(advanced metering infrastructure)와 제어기기를 통하여 수행될 것이

며, 이러한 방법의 적용에 있어서는 각 전기자동차 소유자들의 부하제어참여가 필요하다. 이는 계통운영자(ISO: Independent System Operator) 또는 전력부하관리사업자(LA: Load aggregator)를 통해 각 전기자동차 소유자간의 계약을 통하여 제어될 것이다[1].

본 논문에서는 새로운 전력계통 부하 및 시나리오에 따른 계통 영향을 연구하였다. 전기자동차 배터리 충전 부하를 일반적인 전력부하로 모델링하여 시간별 충전부하를 계산하고, 차량 통계자료를 통해 전기자동차의 보급에 따른 부하를 산출하였다. 계산된 충전용량은 부하곡선에 부하증가량으로 합산되고 이를 통해 피크부하 및 사례계통의 영향을 평가하게 된다. 실제로 전력부하곡선의 피크증가와 같은 제반문제들을 예방하기 위해서 전력사용패턴을 변화를 목적으로 하는 계시별 요금제(TOU: Time-of-Use)의 형태를 가지는 전기자동차 충전요금제와 같은 제도가 실시되고 있다. 하지만 비용최소화라는 측면에서 볼 때 가격이 낮은 구간에 충전부하가 밀집함에 따라서 피크부하가 새롭게 증가하는 양상을 보이게 될 것이다. 따라서 비용적접근만이 아닌 전력부하의 안정을 통한 계통효율향상을 목적으로 하는 새로운 시나리오를 제안하고 이에 따른 결과를 도출하였다.

충전부하 제어를 위한 최적화방법으로는 전기자동차 사용자집단의 비용최적화(Cost Optimization)와 시스템운영자 측면인 부하평준화 최적화(Load-leveling Optimization)를 제시하였다. 이를 통해 충전부하량 증가에 따른 부하변동을 반영하였으며, 충전부하구조에 따른 최적할당과정에 필요한 지수를 계산하였다. 시간에 따른 전력요금인 계시별 요금제

* 준 회원 : 한양대학교 전기공학과 석사

** 정 회원 : 한양대학교 전기공학과 박사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 한양대학교 전기제어생체공학부 교수

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2011년 12월 12일

최종완료 : 2012년 5월 23일

만을 반영하는 사용자 비용최적화에서 유도하지 못하는 충전부하에 대하여, 전체부하증가를 고려하는 새로운 지수가 적용된 최적화를 통해 시스템 계획에 적용될 수 있도록 하였다. 각 충전패턴에 따른 시나리오를 제시하여 충전부하의 변동성을 고려하였으며, 마지막으로 전기자동차 소유자 입장의 비용최적화 및 계통운영자 입장의 부하평준화 시나리오를 제약이 없는 충전시나리오와 비교하였다.

2. 전기자동차 충전부하 모델링

국내에 등록된 전체차량에서 자가용은 약 95%에 달하며 이 중 승용차가 약 72%를 차지한다[7]. 따라서 전기자동차 사용자의 경향성을 충전부하패턴으로 적용하기 위해 출퇴근 시간을 비롯한 주거단지 도착시간을 나타내는 주행패턴 데이터를 분석한다. 이러한 예측과정을 통해 충전시작시간의 확률밀도함수를 선정하고 전기자동차의 특성데이터 및 수량을 토대로 하는 충전부하를 계산한다. 계산된 부하는 대상 부하곡선에 추가되며, 마지막으로 각 시나리오와 결과에 따른 최적 시나리오를 통한 결과를 도출하는 과정으로 구성되었다. 그림 1에 모델링 프로세스를 간략하게 나타내었다.

그림 1 충전 부하 모델링 과정

Fig. 1 Schematic process for charging demand modeling and scenarios

2.1 충전부하 예측

전기자동차 사용자는 운행을 통해 방전된 배터리를 충전하기 위해 일간 차량운행이 끝나는 퇴근시간 이후에 전력망에 접속하는 것을 가정으로 한다. 따라서 주거단지 운행 통계자료로부터 충전시작시간을 예측하였다. 미국도로교통안전국 NHTS(National Household Travel Survey, 2011[8])에서 조사된 일간 주행 패턴 통계데이터를 이용하여 주거단지로 도착하는 시간 표본 358,848의 빈도 분석을 실시하고 이에 따른 확률분포를 계산하였다. 그림 2에는 일간 도착시간 빈도를 누적한 히스토그램을 나타내었다. 확률도의 오차를 줄이기 위하여 24시 이후의 시간을 나타내는 표본데이터 축의 변환과정을 병행하였다.

정리된 표본데이터의 확률도 검정을 통해 직선과의 상관계수가 가장 높은 분포를 선정한다. 이를 통해 도착시간 분포에 대한 와이불분포(Weibull distribution)를 선정하였다.

그림 2 도착시간 분포

Fig. 2 Histogram for arrival time in residential area

선정된 분포 표본에 대한 모집단의 모수를 추정하기 위해 최소제곱법(LSE, Least Square Estimate)과 최대우도법(MLE, Maximum likelihood estimate) 중 표본크기가 큰 경우에 더 정밀하게 추정할 수 있는 최대우도법을 사용하여 모수를 추정하였다. 따라서 형상모수 $\alpha = 4.715$ 와 척도모수 $\beta = 1736$ 을 가지는 와이불 분포함수로 하루 동안의 시간구간 t ($1 \leq t \leq 24$)에서 충전시작시간을 나타내는 식은 (1)과 같다. 전기자동차의 도착시간을 충전시작 시간으로 고려할 때 다음 확률밀도를 가지는 충전패턴을 적용할 수 있다.

$$a(t) = \frac{kt^{\beta-1}e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^k}}{\beta^k} \quad (1)$$

2.2 충전부하 계산

충전을 위해 전력망에 접속된 전기자동차와 연계점 사이에서는 충전기 및 충전스탠드를 통한 전력이동이 이루어진다. 충전기 및 배터리 충전용량으로부터 소모되는 전력부하량을 산출하고, 전기자동차 보급률과 대상 위치별 밀도에 따른 계산된 차량수를 도입하여 시간별 충전시작에 따른 부하량을 계산하였다. 여기에 충전시작 확률밀도함수 $a(t)$ 를 이용해 식(2)과 같이 시간별 충전부하를 계산한다.

$$L_t^c = a(t) \cdot E^c \cdot \{n^v \cdot \varphi^{EV}\}, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

where,

L_t^c : total charging demand at time t

$a(t)$: probability of start charging at time t ,

$$0 \leq a(t) \leq 1$$

E^c : charging demand of a charger

n^v : total number of vehicles

φ^{EV} : penetration of EVs

이 때, 충전 확률밀도함수를 $a(t)$ 로 정의한다. 여기서 E^c 는 충전에 소모되는 전력량, n^v 는 계산 시점에서의 전체 차량 수, ϕ^{EV} 는 전기자동차의 보급률을 나타낸다. 전체시간 T에서, L_i^c 는 시작시점 충전부하이다. 전기자동차에 충전에 소모되는 전력량 및 배터리 특성이 동일하다고 가정하였을 때, 그림 3와 같은 형태의 시간별 충전부하를 계산하는 것이 가능하다.

그림 3 시간별 충전부하

Fig. 3 Start charging demand calculation results at hourly time intervals

전기자동차는 충전을 시작하면 보유하는 배터리의 용량이 최대가 될 때까지 충전을 지속한다. 연속충전은 배터리의 수명 및 효율, 사용자 제어에 대한 부분이 고려된다[3]. 배터리의 용량상태(SOC: State of Charge)를 고려한 충전시간에 따라 식 (2)의 시간별 충전부하에 시간별로 연속되는 충전부하와 다음시간에 시작되는 충전부하를 함께 고려하여 각 시간의 전체 충전부하를 계산한다.

그림 4 연속충전 계산

Fig. 4 demand calculation processes for continuously charging

추가되는 연속충전부하는 식 (3)같은 형태로 계산한다. 각 시간은 행 구간으로 연속되며, 배터리가 완충되기 까지 연속되는 시간은 열 구간으로 더해진다.

$$\mathbf{L}_{t,d}^c = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{1,d}^c \\ \mathbf{L}_{2,d}^c \\ \mathbf{L}_{3,d}^c \\ \vdots \\ \mathbf{L}_{24,d}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1,1}^c & L_{24,2}^c & \cdots & L_{3,d-1}^c & L_{2,d}^c \\ L_{2,1}^c & L_{1,2}^c & \cdots & L_{4,d-1}^c & L_{3,d}^c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{23,1}^c & L_{22,2}^c & \cdots & L_{1,d-1}^c & L_{24,d}^c \\ L_{24,1}^c & L_{23,2}^c & \cdots & L_{2,d-1}^c & L_{1,d}^c \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, d 는 연속충전이 고려된 각 시간을 나타내며 SOC가 최대가 되는 충전시간(SOC full charging time)을 나타낸다. 이는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, λ^{SOC} 는 배터리 SOC의 %비율, C^{EV} 는 대상 전기자동차의 배터리 용량이다.

$$d = \frac{(1 - \lambda^{SOC}) \cdot C^{EV}}{E^c} \quad (4)$$

충전에 비용적인 측면에서 제한이 존재하지 않을 경우 계통에 접속하는 순간부터 우선적으로 충전이 실시될 것이다. 이러한 패턴에 따라 전기자동차의 배터리 특성을 동일한 것으로 가정하고, 계산된 충전부하와 평균주행시간의 특성을 가정하였을 때의 연속 충전시간을 산출할 수 있다. 그림 5는 산출된 일간 충전부하를 나타내고 있다. 총 충전부하는 각 시간별로 누적되는 부하의 합으로 계산한다.

그림 5 계산된 전체 충전부하

Fig. 5 Calculated total charging demands

3. 충전 시나리오

계시별 요금제에서의 비용최적화는 실제로 계통 부하의 변동에 관련 없이 최저비용시간에 충전부하가 집중되는 현상을 수반한다. 여기에 전기자동차의 보급률이 증가함에 따라 새로운 피크를 형성하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 계통운영자는 부하곡선의 완만화를 통해서 충전부하를 제어하는 계통 계획을 설계하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 비용최적화와 함께 부하평준화(Load-leveling)가 고려된 새로운 최적화 방법을 제안한다.

3.1 목적 함수

전기자동차 충전비용은 전력요금이 적용되어 산출된다. 전기자동차의 충전 시 가장 가격이 낮은 시점에서 충전을 실시하는 방법의 충전비용 최소화를 수행한다. 이에 대한 목적함수는 다음과 같다.

$$\min_{r_t} \sum_{t=1}^T \{w_t \cdot p_t\} \cdot L_t^c \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{t=1}^T r_t = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T (L_t^b + L_t^c) \leq L^{\lim} \quad (7)$$

$$L_t^c \leq L_t^{\lim} \quad (8)$$

여기서, p_t 는 계시별요금제에 따른 시간별 전력가격이며, r_t ($0 \leq r \leq 1$)는 식(1)에 해당하는 충전시작 전기자동차의 비율이다. L_t^b 는 계통부하를 나타내며, $L^{\lim}$ 는 계통한계용량과 시간당 충전시작용량의 한계치이다. 식(5)에서는 비용최소 최적화를 수행하며, 최대 충전시작시간만을 제약조건만을 가진다.

3.1 비용최소화 시나리오

충전비용을 최소화 하는 시나리오의 적용을 위해 부하가 중치 $w = 1$ 을 대입하고 계시별요금제에서의 충전부하 최적화를 수행한다. 이를 통해 전기자동차 충전은 시간별 순차적으로 충전에 참여하는 것으로 고려한다. 시간별 충전량이 결정되면 최대 충전까지 충·방전의 반복으로 배터리 수명감소를 발생시키지 않는 연속충전으로 총 충전부하를 계산한다.

3.2 부하평준화 시나리오

부하평준화 시나리오는 충전부하가 일정수준이상 증가하였을 때 부하가중치를 통한 비용과 부하와의 중요도를 판단하고 부하중요도 지수가 추가된 충전우선순위를 결정한다. 부하가중치를 결정하는 중요도지수는 부하 및 비용적 측면을 동시에 고려하여 결정한다. 계시별 요금제는 비용최적화를 통한 비용최소지점을 우선적으로 선택하므로 부하증가에 따른 충전부하의 유도가 어렵다. 따라서 기존 부하최적화에서 시간별 부하수준을 함께 고려할 수 있는 가중치(Load weighting factor)를 적용한 목적함수를 제안한다. 적용된 부하 가중치는 다음과 같다.

$$w_t = \frac{(L_t^b + \Delta L_t^c)^\alpha}{\sum_{t=1}^{24} L_t} \quad (9)$$

여기서 w 는 부하가중치(load-weighting factor), α 는 시

간별 부하크기의 중요도를 결정하는 중요도지수(importance factor), ΔL_t^c 는 충전 부하 변동량(changed charging loads)이다. 본 논문에서 부하의 중요도(α)를 지수증가시키는 방법으로 충전우선순위를 변경한다. 이 방법을 통해서 다양하게 변동되는 부하패턴에 대한 충전우선순위를 결정할 수 있다.

부하최적화는 전력시스템운영자 측면에서 수행되어 충전 부하의 이동을 직접 또는 자동 제어하는 것으로 가정한다. 이에 1시간 단위 분할충전을 고려하는 시간별 반복 최적화 프로세스를 적용하였다. 충전 지속시간 d 에 따른 각 시간별 충전최적용량 산출과정은 그림 6에 나타내었다. 각 단계별 중요도 지수 α 는 지속시간 최적화 수행단계마다 새롭게 계산된다.

그림 6 부하평준화 시나리오 Flow chart

Fig. 6 Flow chart of a load-leveling scenario considered with charging cost changing

가격과 부하를 동시에 고려하여 최적화를 시행하므로 어느 쪽에 중요도를 줄 것인가를 결정하여야 한다. 그 정도를 결정하는 것이 충전우선순위 결정과정이며, 시간당 분배되는 부하에 따른 충전구간의 수를 적용하여 시간구간에 정해진 수요량을 채운다. 계산된 용량이 우선순위임을 확인하기 위해 식 (10)의 방법으로 순위를 비교하며, 조건을 만족할 때 변동된 부하에 따른 충전비용이 제약 내에 있는지 확인하여 최대 부하이동점으로 결정하도록 하였다

$$|w_t^{rank} - w_t \cdot p_t^{rank}| < \Lambda \quad (10)$$

여기서 Λ 는 제약 구간별 정수값(an integer number of section limitation)이다. 부하가중치 w 는 시간별 부하로 나타내며, 여기서 결정되는 우선순위가 w_t^{rank} 이다. 여기에 가격을

나타내는 계시별 요금과 가중치의 곱으로 결정되는 순위인 $(w_i \cdot p_i)^{rank}$ 와 비교한다. 제약구간 내에서의 최적화가 수렴하지 않을 시 α 를 증가하는 방법으로 계산된다. 이후 총 반복 시간 d 에 도달할 때까지의 각 시간별 α 를 반복하여 결정하며, 본 논문에서는 최대용량제약에 따라서 5 구간으로 가정하고 계산을 수행하였다. 그림 7은 부하만을 고려한 가중치의 충전우선순위 W_i^{rank} 와 가격과 부하를 동시에 고려한 순위 $(w_i \cdot p_i)^{rank}$ 를 나타내고 있다. 그림 8에서는 중요도 지수 α 가 증가함에 따른 충전우선순위의 변동을 나타내었다. 이를 통해서 중요도 지수에 따라서 부하가 높은 구간에서의 우선순위가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7 부하 및 부하와 비용가중치의 순위비교
Fig. 7 Comparisons of weight and weight-cost priorities

그림 8 중요도 지수에 따른 충전우선순위의 변동
Fig. 8 Charging priority variations according to the importance factor

4. 사례 연구

사례연구에서는 본 논문에서 제안한 전기자동차 충전시나리오를 사례 계통 및 부하곡선에 적용하였다. 계절별로 상이한 패턴에 따른 전기차량의 연도별 보급률을 고려한 결과를 도출하였으며, 여기서 취합된 데이터를 사례 계통에서 시뮬레이션하고, PSS/E를 통하여 계통 상태를 평가하여 최적의 시나리오를 결정한다.

4.1 사례 계통

다수의 방전된 전기자동차가 같은 시점에 충전을 시작할 경우에 발생하는 계통문제를 평가하기 위해 주거단지의 일간 전력부하패턴을 선정하여 연구를 진행하였다. 시간별 소모

전력 부하통계(국가통계포털, 2006년 주택용 일형별 부하곡선)의 하계와 동계의 부하패턴에 사례연구를 수행하였다. 겨울의 가정용 부하곡선은 16시 전후로 부하가 감소하는 구간이 존재하며, 이를 통해 부하수준을 고려한 부하변동 효과를 검증한다. 이를 통해 특정 부하 패턴에서도 적용 가능한 최적화 전략을 구상한다.

전체 전기자동차가 2020년에 약 9%의 보급률을 가지게 될 것이라고 예상할 때[11], 국지적인 1%의 규모를 가지는 계통에서 예상되는 전기자동차의 대수는 약 16,146대가 된다. 대상이 되는 전기자동차는 16.4kWh의 배터리용량을 가지는 국내 전기차량을 대상으로 하였다. 차량의 부착된 리튬이온 배터리는 선형적인 충전특성을 보이므로 1일 평균주행거리(35.5km[7])로 부터 평균 6시간의 충전되는 것으로 계산하였다. 계시별 요금은 2010년 8월부터 실시된 '전기자동차 충전전력 전기요금'을 적용하였다.

표 1 전기자동차 충전요금 (계시별 요금제)

Table 1 Time-of-Use electricity rate for electric vehicle charging

	겨울		여름	
	비용 [₩/kWh]	시간[h]	비용 [₩/kWh]	시간[h]
경부하	71.7	23-9	51.2	23-9
중간부하	113.8	12-16,20,21	129.1	9-10,12,17-22
최대부하	169.5	10-11,17-19,22	206.5	11,13-16

사례연구에서는 IEEE 30-버스 계통을 대상으로 대상별 계통영향을 모의하였다. 국내 전력계통 기준에 따른 평가를 수행하기 위해 154kV와 22.9kV가 적용된 사례계통으로 모의를 실시하였다. 변압기 2차 측의 배전선로구간을 주거단지 구간으로 가정하고 구역간 부하증가에 따른 평가를 수행하였다.

4.2 시나리오별 부하곡선

4.2.1 비제어 충전 시나리오

전기자동차의 보급률이 9%에서 14%까지에 해당하는 전기자동차 충전부하가 포함된 전력부하곡선을 그림 10에 나타내었다. 충전부하가 저녁시간에 집중됨에 따라서 전력부하피크가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 기존피크부하를 가지고 있는 여름과 겨울의 피크부하는 각각 비슷한 수준으로 증가하는 형태를 보이고 있다. 전력피크는 겨울부하에서 20시 165MW로 약 20%의 피크부하가 증가하는 것으로 나타났다.

4.2.2 비용 최적화 시나리오

그림 11은 전기자동차 사용자입장에서의 비용최적화 결과를 나타내었다. 계시별 요금에 따라 비용이 낮은 시간대인 23시에서 9시까지의 충전부하가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이 시간으로 충전시간이 이동되었음을 알 수 있다. 이에

그림 9 IEEE 30-Bus 사례계통
Fig. 9 IEEE 30-Bus Test system

그림 10 충전부하가 고려된 전력부하곡선 (겨울, 여름)
Fig. 10 Load profiles with charging loads during winter and summer

그림 11 비용최적화 시나리오에 따른 전력부하곡선 (겨울, 여름)
Fig. 11 Load profiles with Cost-optimal charging scenario during winter and summer

다른 충전비용은 21,479천원으로, 비제어 시나리오에 비해 총 43.8%가 감소한 결과를 나타내었다. 하지만 보급률이 9%에서 14%로 증가함에 따라서 전력량은 같은 시간대에 증첩되어 새로운 피크부하(겨울 24시, 144MW)를 형성하게 된다. 이러한 문제는 계시별요금제에 따른 최적시나리오가

부하변동을 정확히 반영하기 어렵다는 것을 나타낸다.

4.2.3 부하평준화 시나리오

부하평준화는 충전부하가 일정수준이상 증가하였을 때 부하중치를 통한 비용과 부하크기와 중요도를 계산하고 부하중요도 지수가 추가된 충전우선순위를 결정한다. 그림 12는 각각 보급률 9%와 14%에 대한 충전부하증가량을 나타낸다. 중요도 지수 α 는 시간에 따른 반복 계산으로 결정되고, 부하전력증가에 따라 부하가 낮은 구역으로 부하이동이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해, 계통영향을 주는 전력피크 및 부하집중현상이 해소된 결과를 나타내었다. 제약이 적을수록 부하이동비용은 비용최적화에 비해 커지게 된다. 하지만 충전부하가 이동될수록 전력가격이 높은 시간대의 충전이 이루어지므로 충전가격은 상승된다. 이는 부하평준화를 통해서 전체 발전비용을 감소시키는 결과를 통해 해소할 수 있을 것이다.

그림 12 부하평준화 시나리오에 따른 전력부하곡선 (겨울, 여름)
Fig. 12 Load profiles with Load-weighted optimal charging scenario during winter

4.3 시나리오에 따른 계통상태 변화

일반적으로 계통의 상태평가를 위하여 버스의 전압변동, 발전기의 유·무효전력출력량, 선로의 조류분담 및 제약이 고려된다[12]. 본 논문에서는 발전량과 부하량의 변화에 따른 전압 변화율을 통하여 시나리오에 따른 계통의 위험도를 확인하였다. 계통의 시점별 상태변동은 최적시나리오에 따라 최소화 된다. 각 시나리오에서 피크부하 시간구간을 대상으로 설비의 변동폭을 모의하였다.

전력계통의 전압 유지범위는 송전계통 및 배전계통전압에 따라 다른 기준이 적용된다. 그 범위는 약 5%~10% 내외이며, 전기사업법과 설비이용규정에 따라서 표 같은 전압 유지범위를 기준으로 하고 있다[13].

표 2 공칭전압별 계통 전압 기준

Table 2 Voltage rating and range of each area

Area	공칭전압(kV)	전압 유지 범위(kV)	
		Max	Min
1	154	139	169
2	22.9	20.8	23.8

표 3 시나리오별 피크시점 부하량 및 충전부하

Table 3 Peak and charging loads according to charging scenarios

부하량[MW]	비제어	비용	부하평준화
피크부하	165.2639	144.439	138.6088
충전부하	27.18279	20.40476	0

그림 13 시나리오별 버스전압 변동

Fig. 13 Bus voltage variations by charging scenarios

표 3의 피크시점에서의 겨울철 부하를 대상으로 계통상태를 산정하면, 각 시나리오에 따른 전압변동폭을 확인할 수 있으며 이에 따른 결과를 그림 13에 표시하였다. 전압기준 0.9 p.u. 이하로 감소하는 부분에서 설비의 위험도를 확인할 수 있으며, 비제어 시나리오에서 배전계통을 구성하는 대부분의 버스가 기준전압 이하로 감소하는 결과를 나타내고 있다.

그림 14에는 기준별 계통전압을 도식화하였다. 상대적으로 어두운 부분이 전압강하분이 큰 영역을 나타낸다. 이러한 결과를 통해서 시간별 충전제어를 통한 비용과 안정부분을 동시에 만족시킬 수 있는 시나리오로 부하평준화를 선택할 수 있음을 본 논문을 통해 검증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 전기자동차의 충전부하증가에 따른 전력계통의 영향을 분석하고 비용과 계통안정을 고려하는 시나리오를 제안하였다. 전기자동차의 일괄적 충전패턴은 장기적인 전력시스템 운영측면에서 볼 때 반드시 제어가 되어야 하는 부분이며, 또한 실시간 가격 및 정보교환이 가능한 전력계통 인프라 내에서는 충분히 실현 가능한 기술이라고 할 수 있다. 각 시나리오에 따라 변동하는 비용적 측면과 계통상태 변화를 고려할 때, 제안한 방법을 통한 최적 시나리오의 선택으로 비용절감 및 계통안정이라는 효과를 동시에 얻을 수 있다는 것을 확인하였고, 최종적으로 부하제어를 수행하기 위한 적절한 기준을 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

위와 같은 부하제어를 실시하기 위해서는 실제로 계통운영자의 전일발전계획 등에 반영되어 수요반응 프로그램의 실시와 전기자동차 사용자의 프로그램 참여가 가장 중요한 변수로 작용할 것이다.

그림 14 시나리오별 버스전압 변동 (Contour map)

Fig. 14 Contour maps of bus voltage variations by charging scenarios

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2011-0025829)

참 고 문 헌

- [1] "Technology Roadmap Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles" OECD/IEA, 2009
- [2] A. Joao, M. Pedeo, S. Pilipe, et al. "Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System" Vol. 99, No. 1, January 2011
- [3] S. Shengnan, Z. Tianshu, P. Manisa and R. Saifur, "Impact of TOU Rates on Distribution Load Shapes in a Smart Grid with PHEV Penetration", IEEE PES, 2010
- [4] K. Qian, C. Zhou, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems" IEEE Trans. on power systems, 2010
- [5] M. Caramanis, "Management of Electric Vehicle Charging to Mitigate Renewable Generation Intermittency and Distribution Network Congestion" IEEE Conf. on Decision and Control, 2009
- [6] J. Taylor, A. Maitra, M. Alexander, D. Brooks and M. Duvall, "Evaluation of the Impact of Plug-in Electric Vehicle Loading on Distribution System Operations" IEEE PES, 2010

- [7] Korea transport database, KTDB. <http://www.ktdb.go.kr>, 2009
- [8] National Household Travel Survey, NHTS Data Center, <http://nhts.ornl.gov/>, 2009
- [9] J. Vlachogiannis, "Probabilistic Constrained Load Flow Considering Integration of Wind Power Generation and Electric Vehicles," IEEE Trans. on power systems, 2009
- [10] M.Galus, G. Andersson, "Integration of Plug-In Hybrid Electric Vehicles into Energy Networks," IEEE conf. Power Tech, 2009
- [11] "Modelling Load Shifting Using Electric Vehicles in a Smart Grid Environment," OECD/IEA, 2010
- [12] Ruiz, P.A.; Sauer, P.W.; "Voltage and Reactive Power Estimation for Contingency Analysis Using Sensitivities" Power Systems, IEEE Trans. on Volume 22, Issue 2, pp.639-647, May 2007
- [13] 송·배전용전기설비 이용규정, 전압유지범위(제6조), KEPCO, 2010. 6

저 자 소 개

문 상 군 (文 相 勤)

1982년 9월 5일생. 2010년 2월 경원대학교
전기정보공학과 졸업.
한양대학교 대학원 전기공학과 석사.

곽 형 군 (郭 炯 根)

2006년 한양대 전기공학과 졸업. 2009년
동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재
동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 02-2220-0347
E-mail : venice53@hanyang.ac.kr

김 진 오 (金 鎭 吾)

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업.
1983년 2월 동대학원 전기공학과 졸업
(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학
교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대
학교 전기생체공학부 교수.