

Determining the Proper Capacity of Electric Vehicle Charging Station

홍준희* · 최중인** · 이종현*** · 남영우†
 (Junhee Hong · Jung In Choi · Jong-Hyun Lee · Young Woo Nam)

Abstract - The problem of determining the proper capacity of electric vehicle charging station is studied in the presented paper. Based on the expected arrival rate and the expected charging time, we calculate the proper capacity that guarantees electric vehicles get service better than a given lower bound which is termed the loss of charging probability. The problem is studied by using certain queueing models. We first formulate the problem as a queueless model of type M/M/n/n, known as the Erlang loss system. And then the M/M/n/K type queueing model is formulated to consider the parking space constraint. Results of the study may be used for designing the electric vehicle charging station.

Key Words : Electric vehicle charging station, Capacity of charging station, Queueing model

1. 서론

최근의 세계적인 환경규제 강화 및 에너지 비용 절감 추세에 따라 환경 친화적인 전기자동차(EV, Electric Vehicle)에 대한 요구가 증가되고 있다. 미국과 유럽의 경우 대기보존법 제정에 의하여 EV의 보급이 의무화되고 있는 상황이며[1], 우리나라에서도 저탄소 녹색성장의 일환으로 그린카에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되고 있다.

EV의 보급 확대를 위해서는 충전 인프라의 구축이 필수적이다. 가정용 충전설비를 비롯하여 언제 어디서나 EV를 충전할 수 있도록 많은 충전소가 설치되어야 한다.

본 논문에서는 EV 충전소 설치를 위해서 반드시 선행되어야 하는 충전소의 적정용량을 산정하는 방법을 제안하고자 한다. 본 논문은 충전소의 적정용량 산정 문제를 네트워크 트래픽 해석[2], 콜센터 문제[3] 등에 널리 사용되는 대기행렬 모델을 이용하여 정식화하였다.

충전소에 도착하는 EV의 평균 도착률 및 평균 충전시간이 주어졌을 때 정해진 충전지장률을 만족하는데 필요한 충전기 수를 구하고, 여기에 개별 충전기 용량을 곱하여 충전소의 충전용량을 산정한다. 충전지장률(Loss of Charging Probability)은 EV가 충전소에 도착하였을 때, 모든 충전기가 점유되어 있어서 즉시 충전할 수 없는 확률로 정의된다. EV 도입 초기 단계에서는 EV의 보급을 확대하기 위해서 충전지장률이 충전소 설계의 주요한 요소로 고려될 것으로

예상된다.

본 논문은 먼저 Erlang Loss System으로 알려져 있는 M/M/n/n 타입으로 충전소 용량 산정 문제를 정식화하였다. 이 모델은 대기열이 없는 것으로 가용한 충전기가 없는 경우에 신규 도착하는 EV는 즉시 다른 충전소를 찾아 떠난다.

다음으로 유한한 대기열이 있는 모델인 M/M/n/K 타입으로 문제를 정식화하였다. M/M/n/K 타입은 기존의 주차장에 설치되는 주차식 충전소의 용량 산정에 적합한 모델로서 신규 도착하는 EV는 가용 충전기가 없으면 대기열에서 기다리고, 가용한 대기열도 없으면 다른 충전소를 찾아 떠나게 된다.

2. 문제 정의

본 논문에서 대상으로 하는 충전소의 대기행렬 모델은 그림 1과 같다. EV가 충전소에 도착하여 가용한 충전기가 있으면 충전서비스를 받고, 그렇지 않으면 대기열에서 기다린다. 가용한 대기열이 없는 경우에는 다른 충전소를 찾아 떠나게 된다. 문제 정식화를 위해 다음을 가정한다.

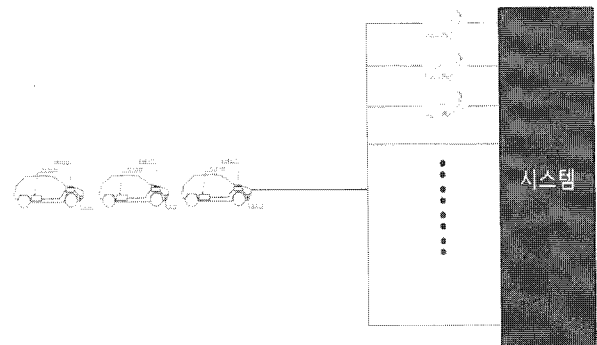


그림 1 충전소의 차량 대기식 모델
 Fig. 1 Queueing model for EV charging station

* 정회원 : 경원대학교 전기공학과 부교수·공박
 ** 종신회원 : 경원대학교 전기공학과 교수·공박
 *** 정회원 : 경원대학교 전기공학과 박사과정
 † 교신저자, 정회원 : 경원대학교 정보통신공학과 조교수·공박
 E-mail : ywnam@kyungwon.ac.kr
 접수일자 : 2009년 6월 12일
 최종완료 : 2009년 8월 22일

- 1) 충전소를 사용할 수 있는 EV의 수는 무한하다.
- 2) EV은 포아송 분포로 충전소에 도착하며, 평균 도착률은 λ [대/시간]이다.
- 3) EV의 평균 충전시간은 $1/\mu$ [시간]이며, 지수 분포를 따른다.
- 4) EV 간에는 상호 독립적이다.
- 5) 충전소는 동일한 용량의 충전기로 구성되어 있다.

가정 2), 3)의 평균 도착률과 평균 충전시간의 곱으로 정의되는 제공부하(offered load)는 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$a = \frac{\lambda}{\mu} \text{ [erlang]} \quad (1)$$

여기서 *erlang*은 트래픽 이론에서 사용되는 트래픽 단위로서 단위시간(1시간) 동안 하나의 통신선로가 계속해서 점유될 때의 트래픽양이다[4]. 충전소의 경우에는 하나의 충전기가 1시간동안 충전할 수 있는 에너지를 1 *erlang*이라 할 수 있다. 본 논문에서는 *a*를 충전소의 충전트래픽이라고 정의한다.

가정 3)에서 평균 충전시간은 식 (2)와 같이 평균 충전에너지와 충전기 용량에 의해 결정된다.

$$\frac{1}{\mu} = \frac{C_{energy}}{C_{rate}} \quad (2)$$

여기서 C_{energy} , C_{rate} 는 각각 평균 충전에너지[kWh]와 충전기 용량[kW]이며, 손실은 없다고 가정한다. μ 는 충전기의 서비스율로서 단위시간(1시간) 동안 하나의 충전기에서 충전을 받을 수 있는 EV의 수를 의미한다.

3. 충전소 적정용량 결정

3.1 M/M/n/n 타입 (Erlang Loss System)

M/M/n/n 타입 모델은 Erlang Loss System이라고도 하며, 그림 1에서 대기열이 없는 모델이 된다. 충전소에는 동일한 서비스율 μ 를 갖는 *n*개의 충전기가 존재한다. 도착하는 고객들은 가용한 충전기 중에서 아무것이나 무작위로 골라 충전서비스를 받으며, 가용 충전기가 없으면 고객은 다른 충전소를 찾아가게 된다.

이 모델은 식 (3)와 같은 생성소멸 과정을 가진다[5].

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \lambda, (0 \leq i \leq n-1) \\ \mu_i &= i\mu, (1 \leq i \leq n) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 *i*는 충전소 내에 있는 EV 수를 나타내며, λ_i, μ_i 는 각각 이때의 생성률(birth rate), 소멸률(death rate)을 나타낸다.

따라서 생성소멸과정의 안정상태에서의 해로부터 다음을 얻는다.

$$P_i = \frac{a^i}{i!} \sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!} \quad (0 \leq i \leq n) \quad (4)$$

여기서 P_i 는 충전소 내에 *i*대의 EV가 있을 확률이다.

충전지장률은 새로 도착하는 EV가 충전을 할 수 없는 확률로 충전소 내에 *n*대의 EV가 존재하여 모든 충전기를 점유하고 있을 확률이 된다. 즉 식 (5)와 같다.

$$B(n, a) = P_n = \frac{\frac{a^n}{n!}}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!}} \quad (5)$$

여기서 $B(n, a)$ 는 M/M/n/n 타입에 대한 충전지장률이며, 열량 손실 공식(Erlang loss formula) 또는 열량 B 공식(Erlang B formula)이라고 부른다[5].

3.2 M/M/n/K 타입

M/M/n/K 타입 모델은 동일한 서비스율 μ 를 갖는 *n*개의 충전기와 K-*n*개의 대기열이 있는 것이다. 도착하는 고객들은 가용한 충전기 중에서 아무것이나 랜덤으로 골라 충전서비스를 받으며, 가용 충전기가 없으면 고객은 대기열에서 기다리게 된다. 대기열도 없으면 다른 충전소를 찾아 떠나게 된다.

이러한 모델은 식 (6)와 같은 생성률, 소멸률을 갖는 생성소멸 과정을 가진다.

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \lambda, (0 \leq i \leq K-1) \\ \mu_i &= \begin{cases} i\mu, & (1 \leq i \leq n-1) \\ n\mu, & (n \leq i \leq K) \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 생성소멸과정의 안정상태에서의 해로부터 다음을 얻는다.

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{n-1} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^n}{n!} \left(\frac{1-\rho^{K-n+1}}{1-\rho} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

$$P_i = \begin{cases} \frac{a^i}{i!} P_0 & (1 \leq i \leq n) \\ \frac{a^i}{n! n^{i-n}} P_0 & (n+1 \leq i \leq K) \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $\rho = a/n$ 이다.

충전지장률은 충전소 내의 EV수가 $n \leq i \leq K$ 일 확률이므로, 식 (9)와 같다.

$$D(a, n, K) = \sum_{i=n}^K P_i = \frac{\frac{a^n}{n!} \left(\frac{1-\rho^{K-n+1}}{1-\rho} \right)}{\sum_{k=0}^{n-1} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^n}{n!} \left(\frac{1-\rho^{K-n+1}}{1-\rho} \right)} \quad (9)$$

표 1 레벨 2, 3에 대한 충전시간

Table 1 Average charging time

| | 레벨2 | 레벨3 |
|-------------|-----------------|-----------------|
| 전압/전류 | 240VAC 단상 / 32A | 480VAC 3상 / 80A |
| 충전기용량 [kW] | 7.68 | 66.5 |
| 평균충전시간 [시간] | 0.57 (34분) | 0.066 (4분) |

표 2 도착률에 따른 충전트래픽

Table 2 Charging traffic vs. arrival rate

| 도착률 [대/시간] | 레벨 2 충전트래픽 [erlang] | 레벨 3 충전트래픽 [erlang] |
|------------|---------------------|---------------------|
| 30 | 17.1 | 1.98 |
| 60 | 34.2 | 3.96 |
| 90 | 51.3 | 5.94 |
| 120 | 68.4 | 7.92 |
| 150 | 85.5 | 9.90 |
| 180 | 102.6 | 11.88 |
| 210 | 119.7 | 13.86 |
| 240 | 136.8 | 15.84 |
| 270 | 153.9 | 17.82 |
| 300 | 171.0 | 19.80 |

여기서 $D(n,a,K)$ 는 M/M/n/K 타입에 대한 충전지장률이 다.

이 모델은 K대를 수용할 수 있는 기존의 주차장에 주차식 충전소를 설치하는 경우에 충전소 용량을 결정하는데 적용할 수 있다.

3.3 용량 결정

식(5), (9)는 신규 도착하는 EV의 충전지장률을 충전소에 가해지는 충전트래픽과 충전기 수의 함수로 나타낸 식이다. 따라서 이들 식으로부터 충전트래픽이 정해졌을 때 특정한 충전지장률을 만족하기 위해 필요한 충전기 수를 구할 수 있다. 충전기 수가 결정되면 충전소의 충전용량($C_{station}$)은 다음 식과 같다.

$$C_{station} = nC_{rate} \tag{10}$$

4. 사례 연구

본 논문에서 제안한 충전소 적정용량 산정 방법에 대한 이해를 위해 간단한 사례연구를 수행하였다.

EV 충전소의 충전 레벨은 3종류로 구분되고 있는데, 사례연구에서는 레벨 2, 3을 대상으로 한다[6]. 레벨 1, 2는 각각 120V, 240V 단상전원을 사용한다. 레벨 1은 상업용 충전소에는 적합하지 않으며, 레벨 2는 가정용 충전 또는 상업용 충전소에 모두 적용할 수 있다. 레벨 3은 급속 충전을 위한

표 3 M/M/n/n 타입의 도착률, 충전지장률에 따른 충전기수

Table 3 Number of charger vs. arrival rate & loss of charging probability for M/M/n/n type

| 충전지장률 [%] | 레벨2 | | | | 레벨3 | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
| | 0.1 | 1 | 5 | 10 | 0.1 | 1 | 5 | 10 |
| 30 | 31 | 27 | 23 | 20 | 8 | 7 | 5 | 4 |
| 60 | 53 | 47 | 40 | 36 | 12 | 10 | 8 | 7 |
| 90 | 73 | 66 | 58 | 52 | 15 | 13 | 10 | 9 |
| 120 | 93 | 84 | 75 | 68 | 18 | 15 | 12 | 11 |
| 150 | 113 | 102 | 91 | 84 | 21 | 18 | 15 | 13 |
| 180 | 132 | 121 | 108 | 100 | 24 | 20 | 17 | 15 |
| 210 | 151 | 139 | 125 | 115 | 27 | 23 | 19 | 17 |
| 240 | 170 | 157 | 142 | 131 | 29 | 25 | 21 | 19 |
| 270 | 189 | 175 | 158 | 146 | 32 | 28 | 23 | 21 |
| 300 | 207 | 192 | 175 | 162 | 35 | 30 | 25 | 23 |

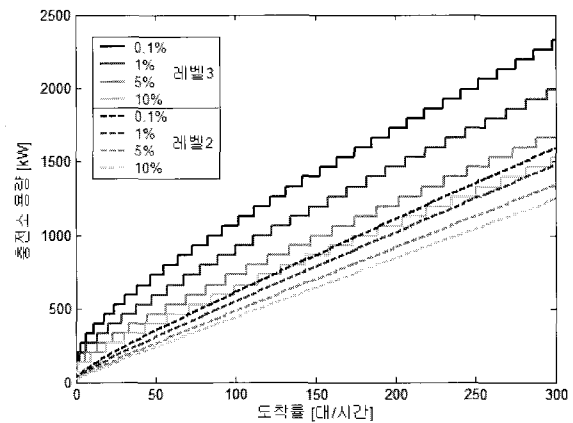


그림 2 M/M/n/n 타입의 도착률에 따른 충전소 용량

Fig. 2 Station capacity vs. arrival rate for M/M/n/n type

것으로 480V 3상 전원을 사용한다. 따라서 레벨 3은 주유소식 상업용 충전소에 가장 적합한 충전레벨이다.

평균 충전시간을 계산하기 위한 평균 충전에너지는 4.4 kWh로 가정하였다. 이는 GM에서 2010년 양산할 예정인 시보레 볼트(Chevrolet Volt)의 유효 배터리 용량(8.8 kWh)의 절반에 해당하는 수치이다[7]. 그리고 충전기용량은 레벨 2, 3에 해당하는 240VAC 단상/32A, 480VAC 3상/80A로 가정하였다. 따라서 식 (2)를 이용하여 평균 충전에너지 4.4 kWh에 대한 각 레벨의 충전시간을 계산하면 표 1과 같다.

표 2는 도착률에 따른 레벨 2, 3의 충전트래픽을 나타낸 것으로 식 (1)에 의해 계산된다.

4.1 M/M/n/n 타입

표 2에 나타난 충전트래픽에 대해서 0.1%, 1%, 5%, 10%의 충전지장률을 만족하기 위한 필요 충전기 수를 계산하면 표 3과 같다. 도착률이 클수록 그리고 충전지장률이 작을수록 많은 수의 충전기가 필요하다. 그리고 레벨 3보다 레벨 2의 충전기수가 훨씬 많은데, 이는 레벨 3의 충전시간이 짧으므로 당연한 결과라 할 수 있다.

표 4 M/M/n/K 타입의 도착률, 충전지장률에 따른 충전기수
 Table 4 Number of charger vs. arrival rate & loss of charging probability for M/M/n/K type

| 충전지장률 [%] | 레벨2 | | | | 레벨3 | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
| | 0.1 | 1 | 5 | 10 | 0.1 | 1 | 5 | 10 |
| 30 | 32 | 29 | 26 | 24 | 9 | 7 | 6 | 5 |
| 60 | 55 | 50 | 46 | 44 | 12 | 10 | 9 | 8 |
| 90 | 76 | 70 | 65 | 63 | 16 | 13 | 11 | 10 |
| 120 | 97 | 90 | 84 | 82 | 19 | 16 | 14 | 13 |
| 150 | 117 | 110 | 103 | 100 | 22 | 19 | 17 | 15 |
| 180 | 137 | 129 | 122 | 119 | 25 | 22 | 19 | 18 |
| 210 | 157 | 148 | 141 | 137 | 28 | 24 | 22 | 20 |
| 240 | 176 | 167 | 159 | 155 | 31 | 27 | 24 | 23 |
| 270 | 196 | 186 | 178 | 173 | 33 | 30 | 26 | 25 |
| 300 | 215 | 205 | 196 | 192 | 36 | 32 | 29 | 27 |

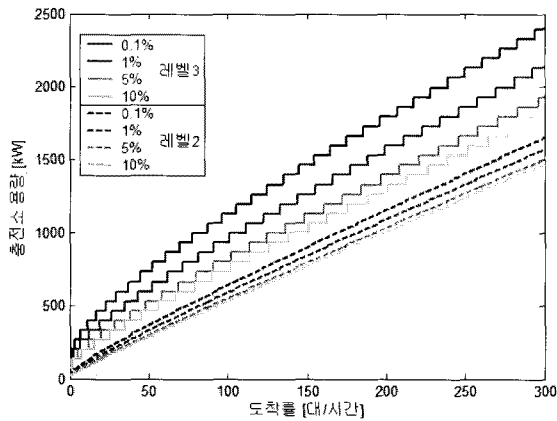


그림 3 M/M/n/K 타입의 도착률에 따른 충전소 용량
 Fig. 3 Station capacity vs. arrival rate for M/M/n/K type

식 (10)으로부터 충전소의 충전용량을 계산할 수 있다. 예를 들어서, 도착률이 120[대/시간]이고 충전지장률이 5%인 경우에 레벨 2, 3의 충전소는 각각 75, 12개의 충전기가 필요하다. 레벨 2, 3에 대한 개별 충전기 용량이 각각 7.68, 66.5 이므로, 결과적으로 충전소의 충전용량은 각각 $75 \times 7.68 = 576kW$, $12 \times 66.5 = 798kW$ 로 결정된다. 동일한 도착률, 충전지장률인 경우에 레벨 3 충전소는 레벨 2 충전소보다 작은 수의 충전기가 필요하지만, 충전소의 충전용량은 더 크게 된다. 그림 2는 도착률 및 충전지장률에 따른 레벨 2, 3의 충전소 용량을 나타낸 그림이다.

4.2 M/M/n/K 타입

300대의 주차공간이 있는 주차장에 충전설비를 설치하는 경우(K=300), 필요한 충전기를 계산하였다. 표 4는 M/M/n/K 타입에 대한 충전기 수를 계산한 것이다. M/M/n/n 타입과 비교하여 충전기 수가 조금 더 많음을 확인할 수 있다. M/M/n/K 타입은 M/M/n/n 타입과는 달리 대기열에 대기하는 차량이 있으므로 동일한 충전지장률을 유지하기 위해서 더 많은 충전기수가 필요하게 된다.

그림 3은 도착률 및 충전지장률에 따른 레벨 2, 3의 충전소 용량을 나타낸 그림이다.

4. 결 론

본 논문에서는 네트워크 트래픽 해석, 콜센터 문제 등에 널리 사용되는 대기행렬 모델을 이용하여 EV 충전소의 적정용량을 산정하는 방법을 제안하였다.

충전소 용량산정 문제를 Erlang loss system으로 알려져 있는 대기열이 없는 모델인 M/M/n/n 타입과 유한한 대기열이 있는 M/M/n/K 타입으로 모델링하였다.

충전소에 가해지는 충전트래픽에 대해서 충전지장률을 만족하는 필요 충전기 수를 먼저 결정하고, 개별 충전기 용량을 곱하여 충전소의 충전용량을 산정하였다. 충전기 수는 충전소가 수용할 수 있는 EV 대수와 같으며, 이는 충전소가 차지하는 면적을 의미한다. 따라서 M/M/n/n 타입은 충전소의 면적 제약이 없는 경우에 적용 가능하고, M/M/n/K 타입은 면적 제약으로 수용가능 EV 대수가 K인 경우에 적합한 모델이다.

본 논문에서 제안한 방법으로 산정한 충전기의 수는 동일한 조건에서 레벨 3보다 레벨 2가 훨씬 많게 된다. 이는 레벨 2 충전소에 필요로 하는 주차 면적이 더 크음을 의미한다. 그러나 충전소 용량은 레벨 3 충전소가 레벨 2 충전소보다 더 크음을 알 수 있다. 다시 말해서 충전소의 충전기용량을 크게 하면 충전소의 면적을 줄일 수 있는 반면, 충전설비 용량은 커지게 된다.

본 논문에서 제안한 방법에서 주요한 변수는 EV 도착률과 충전시간의 곱으로 정의되는 충전트래픽이다. EV의 도착률은 전체 차량 대수와 EV의 보급률, 충전소 분포 정도에 의해 영향을 받고, 충전시간은 배터리 충전률 및 충전기 특성에 의해 결정된다. 따라서 보다 현실적이고 실용적인 결과를 도출하기 위해서는 미래의 어느 시점에 대해 전체 차량 대수와 EV의 보급률, 충전소 분포 정도, 배터리의 충전률 및 충전기 특성을 적절히 추정하여 충전소의 용량을 결정하는 것이 필요하며, 이에 대한 추가적인 연구가 뒤따라야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 경원대학교와 지식경제부 전력산업연구개발사업 중대형 전략과제(R-2005-1-369-001)의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Public law 109-58-AUG. 8, 2005, "Energy Policy Act of 2005"
 [2] Jim W. Roberts, "Traffic Theory and the Internet", IEEE Communications Magazine, Jan. 2001,
 [3] G. Koole and A. Mandelbaum, "Queueing Models of Call Centers: An Introduction," Technical Report 2001-7, Dept. of Stochastics, Vrije Universiteit

Amsterdam, 2001.

- [4] Moshe Zukerman, "Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models," available online: <http://www.ee.unimelb.edu.au/staff/mzu/classnotes.pdf>
- [5] R.B. Cooper, Introduction to Queueing Theory, second ed. North-Holland, 1981.
- [6] "Installation guide for Electric Vehicle Charging Equipment", Massachusetts Division of Energy Resources, Sep. 2000
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet_Volt

저 자 소 개



홍 준 희 (洪 俊 熹)

1963년 3월 1일생. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~현재 경원대학교 전기공학과 부교수.



최 중 인 (崔 重 仁)

1956년 10월 7일생. 1979년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 졸업. 1987년 미국 MIT 졸업(공박, 계측제어전공). 1993년~현재 경원대학교 전기공학과 정교수.



이 중 현 (李 種 賢)

1979년 7월 2일생. 2006년 경원대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



남 영 우 (南 瑛 祐)

1975년 1월 6일생. 1996년 서울대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 2006년 동대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공박). 2005년~2009년 LS산전 선임연구원. 현재 경원대학교 정보통신공학과 조교수.