creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학박사 학위논문

소비자 행동 패턴을 고려한 Vehicle-to-Grid 기술의 경제적 가치 평가 및 최적 운영전략

Economic Evaluation and Optimal Operation Strategy of Vehicle-to-Grid Technology based on Users' Behavior Pattern Data

2021 년 8 월

서울대학교 대학원

산업공학과

여 상 민

소비자 행동 패턴을 고려한 Vehicle-to-Grid 기술의 경제적 가치 평가 및 최적 운영전략

Economic Evaluation and Optimal Operation Strategy of Vehicle-to-Grid Technology based on Users' Behavior Pattern Data

지도교수 이 덕 주

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2021 년 7 월

서울대학교 대학원

산업공학과

여 상 민

여상민의 공학박사 학위논문을 인준함

2021 년 7월

위 원 장 _____ 홍 유 석 _____

부위원장 _____ 이 덕 주 _____

위 원 _____ 장 우 진 _____

위 원 _____ 김 종 화 _____

위 원 _____ 김 태 구 _____

초록

전기자동차를 비롯한 친환경 자동차는 환경오염 문제 특히 온실가스배출 문제에 큰 도움이 된다. 그 중에서도 전기자동차가 가장 보편적인 기술이 되어가고 확산이 이루어져가고 있다. 하지만 이러한 전기자동차의 확산은 장점만이 있는 것이 아니라 단점 역시 존재한다. 본 논문에서는 환경문제를 해결할 수 있는 전기자동차가 확산되었을 경우에 발생하는 문제들에 대해 알아보고 이를 해결할 수 있는 기법들과 그것들에 대한 경제성을 평가한다. 특히 이러한 문제 해결에 도움이 되는 Vehicle-to-Grid(V2G) 기술에 대해 알아보고 한국 사용자의 실제 행동 데이터를 활용하여 최적 운영 전략을 도출하고 경제적 가치와 투자 모형을 제시한다. 사용자 행동 패턴 데이터를 통해 전기자동차 사용자의 시간별 전기 사용량, 차량 운행 시간, 가정용 충전 가능 시간 등의 결과를 도출할 수 있는 모델을 개발한다. 사용자의 시간별 전기 사용량은 각 시간에 하는 행동에 따라 사용하는 가전제품이 다르기 때문에 이를 통해 도출할 수 있다. 차량 운행 시간을 통해 전기자동차 충전 수요를 알 수 있고 행동이 이루어지는 위치를 통해 가정용 충전 가능 시간을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 전기 요금 정책이 시간별로 고정된 상황에서 세가지 충전 전략에 대해서 각 사용자의 전기 요금을 비교하여 최적 충전 전략을 도출한다. 이를 통해 다양한 충전 전략이 전체 전력망과 사용자 전기 요금에 미치는 영향을 알아보고 최적 충전 전략으로 인한 효과를 확인한다. 이러한 사용자 행동 패턴 데이터를 바탕으로 전기 요금 정책이 고정된 정책이 아닌 스마트 그리드 상에서 사용자의 전체 전기 사용량에 따른 실시간 가격 정책인 상황에서 각 사용자의 최적 전기자동차 충전 전략을 도출하는 모델을 제시한다. 사용자들이 자신의 전기 소비 스케줄을 공유하고 전력 공급자가 이에 따라 시간대별 전기 요금을 실시간으로 결정할 경우 각 사용자들의 전기 요금은 자신의 전기 소비 스케줄만이 고려되는 것이 아니라 스마트 그리드 상의

다른 사용자의 전기 소비 스케줄에도 영향을 받는다. 이러한 상황은 게임 상황으로 표현이 가능하고 각 사용자는 자신의 보수를 최대화하는 선택을 하게 될 것이고 이러한 상황에서 내쉬 균형을 찾는 알고리즘과 모델을 개발한다. 이를 통해 최적 전기자동차 충전 스케줄링 알고리즘의 경제적 가치를 평가한다. 이러한 과정을 단순한 스마트 그리드에 더해 V2G 기술이 도입되어 전기자동차가 에너지 저장 장치로 사용될 경우 최적 전기자동차 충방전 스케줄링을 도출하고 이를 통해 추가로 절약되는 요금을 바탕으로 V2G 기술의 경제적 가치를 평가한다. 전력망과 전기자동차 사용자에게 이득이 될 수 있는 V2G 기술은 미비한 전기자동차 보급과 다양한 이유로 널리 사용되고 있지는 않다. 이러한 상황에서 V2G 기술의 도입이 사용자에게 실제로 이익을 발생시키는 지에 대한 경제성 평가를 위해 현금 할인 기법과 실물 옵션 기법 방법을 활용한 모델을 개발한다. 특히 실물 옵션 모형은 변동성을 고려하기 때문에 현금 할인 기법을 통한 의사 결정보다 좀 더 유연한 도입 시기 선택이 가능하고 높은 가치를 가진다. 이러한 특성은 아직 보급이 충분하지 못하여 미래의 현금 흐름의 불확실성이 큰 V2G 기술에 적용하기에 적합하다. 이러한 모델을 통해 다양하게 주어진 상황에서 각 사용자의 V2G 도입으로 인한 경제성 평가와 이에 따른 도입여부에 대한 투자 의사 결정을 한다.

주요어: 경제성 평가, 게임 이론, 실물 옵션, 인프라 투자, 전기자동차, V2G, 시뮬레이션, 최적화, 산업공학

학번: 2016-37577

목차

초록 **i**

목차 **iii**

표 목차 **vi**

그림 목차 **viii**

제 1 장 서론 **1**

1.1 연구 배경 및 필요성 1

1.2 연구의 목적 5

1.3 논문구성 9

제 2 장 기존 연구 및 배경 **10**

2.1 기술 현황 10

2.1 기존 논문 연구 14

제 3 장 소비자 행동 패턴 데이터 기반 전기자동차의 최적 충전 전략 **23**

3.1 서론 23
3.2 모델 26
3.3 시뮬레이션 34
3.4 소결 56

제 4 장 전기자동차 최적 충전 스케줄링과 Vehicle-to-Grid 기술의 경제적 가치 평가: 게임이론적 접근 58

4.1 서론 58
4.2 모델 62
4.3 시뮬레이션 75
4.4 결과 77
4.5 소결 87

제 5 장 전기 가격 변동성을 고려한 V2G 기술 투자 모형: 실물 옵션적 접근결론 89

5.1 서론 89
5.2 모델 91
5.3 시뮬레이션 96
5.4 소결 111

제 6 장 결론 113

6.1 연구 결과 및 기여 113

6.2 후속 연구 116

참고문헌 **118**

Abstract **132**

감사의 글 **135**

표 목차

Table 3.1: 행동 분류 35
Table 3.2: 전자 기기 유형 38
Table 3.3: 매개변수 값 40
Table 3.4 평균 사용자 행동 시간 44
Table 3.5: 대표 사용자 행동 시간 45
Table 3.6: 시간대 47
Table 3.7: 전기 가격(원) 47
Table 3.8: 각 사용장의 일일 전기 요금과 최적 충전 전략 48
Table 3.9: 최적 전략 비율 49
Table 3.10: 전략별 사용자 행동 시간 50
Table 3.11: 전략 간 비용 차이 51
Table 3.12: Peak to average ratio 54
Table 3.13: 확산 정도에 따른 전력 시스템 영향 55
Table 4.1: 시간대별 전력 부하 75
Table 4.2: 비용 함수 76
Table 4.3: 전기 요금과 변화량 78
Table 4.4: 전체 사용자 전기 요금과 변화량 80
Table 5.1: 옵션 가격에 대한 이항 격자(단위: 천 원) 99
Table 5.2: 최적 옵션 의사 결정(V: V2G 도입, W: 대기) 100

Table 5.3: 옵션 가격에 대한 이항 격자-높은 변동성(단위: 천 원) ····· 103
Table 5.4: 최적 옵션 의사 결정-높은 변동성(V: V2G 도입, W: 대기) ····· 104
Table 5.5: 옵션 가격에 대한 이항 격자-낮은 변동성(단위: 천 원) ····· 107
Table 5.6: 최적 옵션 의사 결정-낮은 변동성(V: V2G 도입, W: 대기) ····· 108
Table 5.7: 결과 비교 ····· 110

그림 목차

Figure 1.1: 연구 목적 8
Figure 3.1 가전제품 예시 27
Figure 3.2: 시간별 활동에 참여하는 사용자 수 37
Figure 3.3: 시간별 활동에 참여하는 사용자 수(요약) 37
Figure 3.4: 가전제품 일일 전력 소비량 41
Figure 3.5 주택용 전력소비 41
Figure 3.6: 충전 전략 별 충전량 43
Figure 3.7 대표 사용자 행동 패턴 46
Figure 3.8 대표 사용자의 가전제품 전기 사용 46
Figure 3.9: 계절별 충전 전략에 따른 전체 사용자 전기 요금 52
Figure 3.10: 총 전력 소비 53
Figure 3.11: 확산에 따른 PAR 55
Figure 4.1: 시스템 구조 63
Figure 4.2: 시간별 전기 사용 77
Figure 4.3: 전체 소비자 시간별 전기 사용 79
Figure 4.4: 최적 충전 전략으로 인한 요금 변화량 분포 81
Figure 4.5: V2G 도입으로 인한 요금 변화량 분포 81
Figure 4.6: 최적 충전 전략으로 인한 변화량 83
Figure 4.7: V2G 기술 도입으로 인한 변화량 84
Figure 5.1: SMP QQ plot 92

Figure 5.2: 이항결정나무 94
Figure 5.3: 순현재가치 분포 97
Figure 5.4: 옵션가치분포 101
Figure 5.5: 옵션가치분포-높은 변동성 105
Figure 5.6: 옵션가치분포-낮은 변동성 109

제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

전 세계적으로 온실가스 배출을 비롯한 환경오염은 큰 문제로 떠오르고 있다. 기존의 연구에 따르면 온실효과의 60%이상이 화석 연료로 인해 발생한다고 한다(Achtnicht 2012). 이러한 화석 연료로 인한 환경 오염 중 자동차에서 나오는 이산화탄소가 큰 비중을 차지한다. 이러한 환경오염에 대처하기 위해 전세계적으로 자동차 산업 분야에서 많은 노력이 이루어지고 있다. 특히 전기자동차(EV: Electric Vehicle)는 충전에 필요로 하는 모든 전기를 화석연료로 생산하는 경우에도 기존의 내연기관 자동차보다 전체 차량 사용 주기 동안 배출하는 온실가스는 적다(Meisterling and Samaras 2008). 이러한 이유 때문에 여러 국가에서 기존의 내연기관 자동차의 연료 효율 개선보다는 친환경 자동차인 플러그인 하이브리드 전기자동차(PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle)이나 전기자동차 기술 개발과 보급에 힘쓰고 있다. 한국 역시 아직은 낮은 친환경 자동차 보급률을 보이고 있지만 25년까지 283만대, 30년까지 785만대 보급을 목표로 하고 있다. 또한 한국의 자동차 생산 회사들 역시 내연기관 자동차의 다음 세대로 친환경 자동차에 대한 개발에 힘을 쓰고 있고 다양한 상용 전기자동차가 나오고 있다. 이러한 상황을 고려해 볼 때 전기자동차의 확산은 필요하고 아직은 높은 차량 가격과 기반 시설 부족으로 인해 확산이 더디지만 언젠가는 이루어질 것이다.

한국은 산업의 발전과 전자 기기 사용의 증가로 인해 에너지 사용량은 해마다 늘어가고 있다. 특히 멀지 않은 과거는 물론 현재도 전력 사용량이 많아지는 여름과

겨울에 전력 예비율이 문제가 되고 있다. 또한 한국은 원자력 발전과 화석연료 발전의 비중을 줄이고 신재생에너지 발전의 비중을 늘이고자 한다. 이러한 움직임은 전기 생산량 저하와 전기 생산 비용 증가를 가져올 수 있다. 이러한 상황에서 친환경 자동차의 증가는 전력 수요의 증가를 가져오게 된다. 이는 국가 전력망에 큰 부담이 된다. 이러한 전체적인 전기 수요의 증가는 전기 생산 비용의 증가로 이어지고 개인의 전력 사용량 증가와 더불어 개인의 전기 요금 상승에 영향을 미친다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 방법이 제시되고 있고 그러한 방법 중 하나는 전기자동차의 최적 충전과 더 나아가 방전까지 고려하는 전기자동차의 최적 운영 전략이다.

개인의 최적 전기자동차 운영 전략을 도출하기 위해서는 개인의 행동에 대한 정보가 필요하다. 개인의 행동 패턴 데이터를 통해 차량 운행 시간을 알 수 있고 전기자동차 충전 수요와 전력망 연결 가능 시간에 대한 정보를 얻을 수 있다. 또한 행동 데이터를 통해 시간별 집에서 사용하는 가전제품의 전기 사용량을 유추할 수 있다. 이러한 행동 패턴 데이터는 개인마다 다르고 따라서 최적 운영 전략 역시 개인마다 다르다.

전력 과부하와 전기 요금의 증가를 완화하기 위해서는 이러한 개인의 행동 데이터를 활용하여 통제되지 않은 충전이 아닌 자동화된 장치를 통한 통제된 최적 충전 전략이 필요하다. 이러한 것은 사용자가 직접 할 수 없기 때문에 이를 가능하기 하기 위해서는 전기자동차의 충전은 스마트 그리드 상에서 이루어지고 연결된 스케줄러를 통해 충전이 통제되어야 한다.

이러한 스마트 그리드에서 전기자동차는 단순한 운행수단이 아니라 에너지 저장 장치(ESS: Energy Storage System)로 사용이 가능하다. 이렇게 배터리를 가진 친환경

자동차를 전력망과 연계하여 상호 통신을 가능하게 하고 배터리의 잉여전력을 전력망이나 사용자가 필요할 때 방전이 가능하도록 하는 것을 Vehicle-to-grid(V2G)라고 한다. V2G의 개념과 관련기술은 미국에서 1997년에 처음 제안된 것으로 전기자동차는 전력공급원으로서 역할을 하게 된다. 본 논문에서는 V2G는 Vehicle-to-Home(V2H), Vehicle-to-Building(V2B), Vehicle-to-Device(V2D)를 포괄하는 개념으로 사용한다.

V2G 기술의 핵심적인 사항은 전력망에 필요한 에너지 저장 장치를 기존에 존재하는 전기자동차의 배터리를 활용한다는 것이다. 이러한 V2G 기술은 개인적, 사회적, 기술적 이득을 가져온다. 구체적으로는 주파수 제어를 통해 전력망에 도움이 되고, 에너지 피크 수요 감소에 도움이 되고, 신재생에너지 활용에 도움이 된다. 또한 에너지 생산 비용을 낮출 뿐만 아니라 사용자의 전기 요금 절약에도 도움이 되고 에너지에 대한 탄력성과 에너지 운송 요금 절약을 가져온다. 이는 단기적으로는 경제적 이득을 가져오는 기회가 되고 장기적으로는 에너지 시스템의 안정성에 도움이 된다. 이러한 이득은 결국 사회적 이득 이외에도 V2G 시스템에 참여하는 모든 참여자에게 이득을 가져온다. 전기자동차 소유자가 이득을 얻을 경우 전기자동차 확산을 촉진 시키고 또한 최적 충전 전략 도입으로 이러한 확산이 전력망에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.

사용자의 행동 패턴 데이터를 기반으로 다양한 상황에서 각 사용자는 최적 충전 전략을 도출할 수 있다. 여기서 다양한 상황은 가격 정책이 결정되어 있는 경우나 실시간 가격 결정이 되는 경우 이외에도 V2G 기술이 도입된 상황 등을 뜻한다. 이러한 상황에서 기술 도입으로 얻어지는 경제적 이득은 도입한 기술에 대해 경제적 평가를 가능하게 한다. 현금 할인 기법이나 실물 옵션 기법을 사용한 경제성 평가에

따라 사용자는 기술에 대한 투자 의사 결정을 내린다. 이러한 결정을 통해 경제적 이득을 얻는 전기자동차 사용자가 증가할수록 전기자동차 확산은 도움이 되고 환경 오염 물질 배출량을 줄일 수 있다. 또한 최적 전기자동차 운영 전략을 통해 전기자동차 확산이 가져올 수 있는 문제점들을 줄일 수 있다.

1.2 연구의 목적

전기자동차의 확산은 환경오염 문제에 도움이 되지만 국가 차원의 전력망 과부하와 사용자 전기 요금의 증가와 같은 사회적 개인적 문제를 발생시킨다. 본 논문에서는 이러한 문제를 줄일 수 있는 여러가지 방법을 제시하고 전기자동차 확산에 도움이 될 수 있는 V2G 기술의 최적 운영전략을 도출하고 더 나아가 이를 통해 V2G 기술의 경제적 가치를 고려한 V2G 인프라에 대한 투자 모형을 개발하고 이를 실제 한국 사용자 데이터에 적용하고자 한다.

이러한 것이 가능하기 위해서는 전기자동차 사용자의 시간별 전기 사용량, 전기자동차 충전 수요, 가정용 충전 가능 시간 등의 정보가 필요하다. 이러한 정보는 사용자 행동 패턴 데이터를 통해 도출이 가능하다. 사용자가 자신의 전기자동차를 이용해 이동하는 시간을 통해 충전 수요를 예측하고 사용자의 행동 패턴을 활동과 그에 따른 전자 기기의 사용으로 전환 가능하다면 시간별 가전제품 전기 사용량에 대한 정보를 얻을 수 있다. 따라서 첫째로 이러한 결과를 도출할 수 있는 모델을 수립하고 실제 설문조사를 통해 수집된 한국 사용자의 행동 패턴 데이터에 적용한다. 이렇게 개발된 모델을 바탕으로 한국의 현재 정적인 전기 요금 체계에서 다양한 전기자동차 충전 전략에 따른 시간별 전기 사용량과 사용자의 전기 요금의 변화에 대해 살펴보고 각기 다른 행동 패턴을 지니는 사용자의 최적 충전 전략을 도출하고 최적 충전 전략 도출에 의한 효과를 알아보고자 한다.

둘째로 전기 가격 정책이 정적인 상황인 아닌 실시간 전기 사용량에 따라 전기 요금이 달라지는 실시간 전기 가격 정책을 가진 스마트 그리드 상에서 전기자동차의 충전 전략에 대한 모델을 개발하고자 한다. 실시간 전기 사용량에 따라 전기 요금이 다르기 때문에 각 사용자의 전기 요금은 자신의 전기 소비 스케줄뿐만 아니라 다른

사용자의 전기 요금 스케줄에도 영향을 받는다. 이는 게임 모형으로 표현 가능하기 때문에 이러한 게임 모형과 게임 모형의 최적해 도출 알고리즘 개발하여 각 사용자의 전기자동차 최적 충전 전략에 따른 최적 전기 소비 스케줄을 도출하고자 한다. 이러한 최적 충전 스케줄링의 가치는 통제되지 않은 충전이 이뤄졌을 때의 전기 요금과의 비교를 통해서 도출 가능하다. 더 나아가 스마트 그리드 상에서 전기자동차를 에너지 저장 장치로 이용할 수 있는 V2G 기술이 도입이 이루어진 상황에 대한 게임 모형을 개발하고 이를 알고리즘을 통해 최적해인 최적 전기자동차 충방전 스케줄을 구하고자 한다. 기존의 스마트 그리드에서 최적 충전 스케줄링을 통해 얻어진 전기 요금과 V2G 기술이 도입된 경우에 최적 충방전 스케줄링이 이루어진 상황에서의 전기 요금을 비교한다면 각 사용자의 V2G 기술 도입에 대한 가치 평가가 가능하다. 이러한 효과는 각기 다른 전기 소모량과 전기자동차 충전 수요를 가진 사용자마다 다를 것이다. 이러한 모델에 앞에서 개발된 사용자 행동 패턴 기반 모델의 결과값을 활용하여 한국 전기자동차 사용자들의 최적 충전 스케줄링의 가치와 V2G 기술의 가치를 평가하고자 한다.

셋째로 앞에서 도출된 V2G 기술의 가치를 활용하여 전기자동차 사용자가 V2G 기술에 대한 투자 의사 결정 모형을 개발하고자 한다. 전통적인 경제성 평가 방법인 현금 흐름 할인(DCF: Discounted Cash Flow) 기법을 활용한 투자 의사 결정과 더불어 실물 옵션(Real Options) 기법을 활용한 투자 의사 결정을 내릴 수 있는 모델을 개발한다. V2G 기술은 아직 널리 보급이 되지 않은 기술로 얻을 수 있는 이득에 대한 과거 데이터가 많지 않을 뿐만 아니라 그 이득은 전기 가격의 변동성에 영향을 많이 받는다. 이러한 상황에서 전기 가격이 변동성을 가지고 투자 의사 결정이 유연한 유연한 실물 옵션 투자 기법은 현금 흐름 할인 기법보다 유용할 것이다.

이러한 두 모델의 비교를 통해 실물 옵션 투자 모형의 가치 역시 평가하고자 한다. 개발된 모델을 앞에서 개발한 V2G 기술이 도입에 따른 경제적 가치 모델을 통해 나온 결과를 적용하여 한국 전기자동차 사용자들의 V2G 기술 투자 의사 결정을 알아보고자 한다.

이러한 본 논문의 목적을 도식화하면 Figure 1.1와 같다.

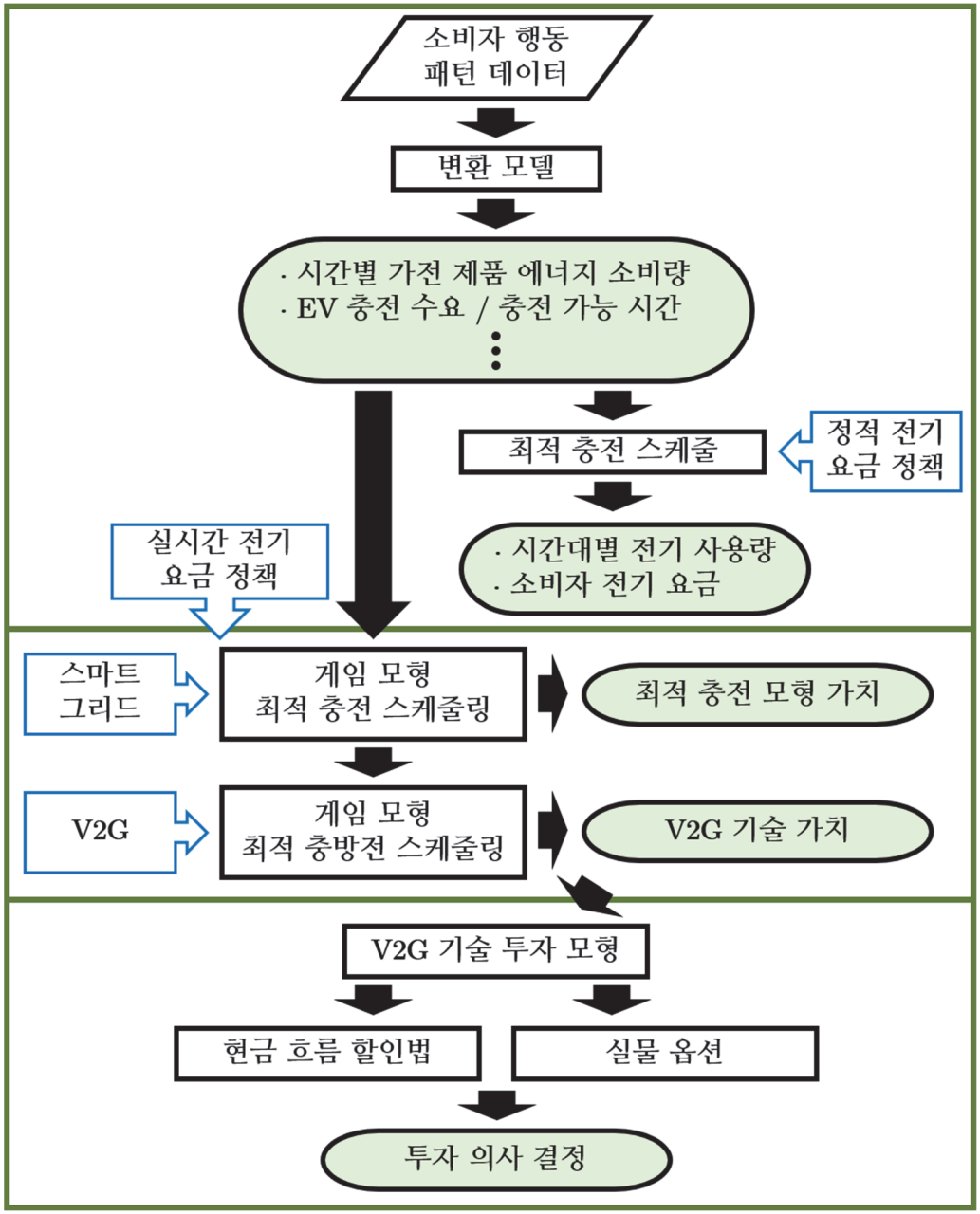


Figure 1.1: 연구 목적

1.3 논문구성

본 논문은 6장으로 구성된다. 제2장에서는 기존 연구 현황과 연구 배경에 관해 살펴본다. 제3장에서는 소비자 행동 패턴 데이터 기반 전기자동차의 최적 충전 전략 도출과 그 효과에 대한 연구를 살펴본다. 제4장에서는 전기자동차 최적 충전 스케줄링과 V2G 기술의 경제적 가치를 평가할 수 있는 모델을 개발하고 이에 대한 결과를 제시한다. 제5장에서는 전기 가격 변동성을 고려한 V2G 기술 투자 모형을 개발하고 결과를 살펴본다. 마지막으로 제6장에서는 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

제 2 장 기존 연구 및 배경

2.1 기술 현황

친환경 자동차가 환경 문제 해결에 대한 대안으로 떠오른 이후로 플러그인 하이브리드 전기자동차를 비롯하여 전기자동차와 수소 전기자동차 등이 개발되었다. 특히 전기자동차 기술은 많이 발달하였고 상용화된 차량이 많이 나오고 있는 있지만 높은 가격과 기반 시설 부족으로 인해 확산에는 한계를 보인다.

전기자동차를 단순한 이동수단이 아닌 에너지 저장 장치로 사용하여 전기자동차의 활용을 극대화하는 기술이 V2G이다. V2G가 적용되기 이전의 기술적인 단계로는 사람이 직접 충전을 통제하는 V0G와 컨트롤러를 통해 직접 충전이 통제되는 V1G 단계로 나눌 수 있다(Jones et al. 2021). 세부적이고 정확하게 나누면 V2G는 전기자동차에서 전력망으로 다시 전력을 보내는 기술이고 이 외에도 전기자동차에서 집으로 전기를 보내는 V2H, 전기자동차에서 건물로 전기를 보내는 V2B, 전기자동차에서 전자기기로 전기를 보내는 V2D 등으로 활용이 가능하다. V2G 기술의 구현의 핵심 기술은 V2G용 전기차, 양방향 전력전송이 가능한 충전기, 전기자동차와 전력망 사이의 충방전량을 대상으로 하는 전력거래 시장이다(기초전력연구원 2016). V2G 기술이 소개된 것은 1997년도이지만 아직은 널리 보급되지는 못하였다. 하지만 전 세계적으로 V2G 기술을 활용할 수 있는 방법에 대한 개발과 실증연구가 많이 이루어지고 있고 이에 따라 시장 규모도 크게 확대될 것이라 예상된다.

이러한 V2G 기술이 도입되기 위해서는 전기자동차의 확산과 기반 시설 구축과 같은 물리적인 조건 외에도 전력 소매 시장 조성 등의 정책적인 측면 역시 필요하다.

이러한 V2G 기술이 도입이 된다면 에너지 저장 장치 도입이 주는 효과와 마찬가지로 전기자동차 사용자의 전기 요금 절약을 비롯하여 국가 전력망 피크 부하 관리에 도움이 된다.

2.1.1 국내 기술 현황

국내의 전기자동차 보급상황은 국토교통부 자료에 따르면 2019년 기준 0.4% 미만에 불과하다. 전기자동차의 보급률이 가파르게 오르고 있지만 아직은 보급률이 미미한 상태이고 V2G 관련된 시장은 존재하지 않는다.

대신 기초전력연구원에서 한국전력에서 구축해준 운영 시스템을 바탕으로 2014년 말부터 2015년 12월 까지 V2G 테스트베드를 구축하여 수행하는 시범사업이 진행되었다(기초전력연구원 2016). 전기자동차 '쏘울'이 사용되었고 전기자동차에서 방전된 에너지는 전력망이 아닌 연계된 건물에서 사용되는 형태로 구축장소는 서울대학교와 광주과학기술원이었다. 운영 방법은 고도화된 스케줄링 기법을 사용하지는 않고 심야시간에는 충전을 수행하고 미리 지정된 방전 시간에 방전이 이루어지거나 전기자동차 사용자가 직접 신호를 주면 충방전이 일어나는 형태였다. 실증 결과로는 전기자동차 운행이 많이 않았던 서울대학교에서 전기자동차 운행이 잦았던 광주과학기술원에서 보다 방전된 양이 더 크고 효과가 좋았다.

그 이외에도 제주도는 2017년 기준 전기자동차의 보급이 1만 4천대를 초과하였고 충전 인프라가 잘 갖춰져 있고 V2G 기술에 대한 기술개발은 과거 제주 스마트 그리드 실증사업을 통해 이미 구현과 실증이 완료되었다. 하지만 V2G를 실제로 시행하기 위해서는 선결되어야 하는 과제가 있다(김현철 2017). 또한 한국전력공사가 2017년부터 부산에서 V2G 기술을 도입해 활용할 수 있는 업무용 전기자동차를 운행 중이다.

이외에도 현대자동차에서 최근에 출시한 아이오닉5 모델과 기아자동차 EV6 모델은 Vehicle-to-Load(V2L) 기술을 제공한다. 이는 배터리에 저장된 전기를 전력망으로 보낼 수 있는 기술은 아니지만 차량 실내와 실외에서 다양한 전자기기를 가정에서와같이 연결하여 배터리에 저장된 전기를 활용하여 사용할 수 있는 기술이다. 현재 최대 제공 소비전력은 3.6kW이다(한국자동차연구원 2021).

2.1.2 해외 기술 현황

현재 전기자동차 시장이 가장 큰 곳은 미국이다. 미국에서 몇몇개의 주는 이미 V2G와 관련된 제도를 시행하고 있다. 델라웨어 주는 전력망에 연결된 전기자동차가 전력망에 역전송 할 때 충전할 때의 요금 만큼을 받으며 시간별 요금제를 따른다(기초전력연구원 2016). 또한 소비자가 신재생에너지 발전을 통해 전기를 생산하고 이를 전력회사에 팔 수 있는 넷미터링(Net metering) 제도 역시 운영하고 있다. 캘리포니아 주 같은 경우에는 2014년에 V2G를 포함한 VGI(Vehicle-Grid Integration)에 대한 로드맵을 세우고 시행 중이다. 로드맵의 내용에는 VGI에 대한 유형과 각 유형별 요금과 운영 방법에 대해서 정의하고 있다. 미국 카네기 멜론 대학에서는 V2G를 통하여 얻을 수 있는 잠재적 경제성을 평가하였다. 전기자동차 사용자와 사회적 효용을 모두 고려할 경우 사용자는 일년 동안 평균적으로 $140에서 $250의 전기 요금의의 이익을 보고 사회적으로는 전기자동차 1대당 연간 8$의 수익이 난다(Peterson, Whitacre, and Apt 2010).

일본 역시 전기자동차 시장이 크고 V2G 기술에 대한 관심도가 높다. 2012년부터 닛산에서는 V2G 기술이 적용된 전기자동차 LEAF를 개발하고 운행 중이다(기초전력연구원 2016). 또한 닛산에서는 전기자동차를 전력망에 연결하여 배터리에 저장된 전기를 활용하여 전력망을 안정화하는 'Nissan Energy' 계획을

발표하고 추진중이다. 혼다 역시 FCX 클라리티라는 모델을 출시하여 V2G 기술에 대한 실험을 하였고 도요타의 경우에도 V2G 기술이 도입된 프리우스를 개발 중에 있다. 일본 정부 차원에서도 외부에 전력이 공급 가능한 전기자동차 구매에 2만 엔의 보조금을 추가 지급하는 등 에너지 저장 장치로의 전기자동차 역할에 관심을 가지고 있다(한국자동차연구원 2021).

프랑스 역시 V2G 기술에 대해 관심을 가지고 있고 전기 요금의 절약 보다는 수요와 공급의 균형과 전압 레벨 유지를 통한 전력망의 주파수 유지가 주요한 목표이다(Kempton, Perez, and Petit 2014). 이러한 주파수를 안정적으로 유지하기 위해서는 적은 양의 전기를 거래하는 시장참여자들도 참여할 수 있는 시장이 존재하여야 하고 시장 참여자들 간에 적절한 이익 분배가 이뤄져야 한다.

2.2 기존 논문 연구

2.2.1 소비자 행동 패턴과 전기자동차 최적 충전 전략

많은 연구들이 전기자동차가 전력 시스템에 미치는 영향에 관해서 이루어졌다. 플러그인 하이브리드 전기자동차나 전기자동차의 충전으로 인한 추가적인 전기 사용은 주거용 전력망에 영향을 주고 특히 전력망에 대한 투자 금액과 에너지 손실을 가져온다(Clement-Nyns, Haesen, and Driesen 2010; Pieltain Fernández et al. 2011). 통제되지 않은 상황에서 플러그인 하이브리드 전기자동차 증가는 피크 부하의 1.5배 증가를 가져온다. 만약 60%가 차량이 플러그인 하이브리드 전기자동차라면 전력망에 대한 투자금액은 15% 증가하고 에너지 손실은 40% 발생한다. 이러한 플러그인 하이브리드 전기자동차와 전기자동차의 확산에 따른 효과는 (Taylor et al. 2010; Elyasibakhtiari et al. 2015) 에서도 연구되었는데 이러한 전기자동차 충전은 전력망 시스템에 위상 불균형과 같은 여러가지 뚜렷한 영향을 미치는 것을 실시간 시뮬레이션 분석으로 알 수 있었다. 2030년까지 북유럽 국가의 전력시스템에 대한 전기자동차의 대규모 보급의 영향에 대한 연구에서는 연료와 탄소배출 가격에 따라 그 효과가 다름을 알 수 있었다(Hedegaard et al. 2012). 전기자동차의 폭넓은 보급은 전력 손실과 전력 공급 부족 등의 전력망의 안정성에도 문제를 발생 시키고 이를 해결 하기 위한 방안으로 다년 확장 계획법 등 여러가지 방법이 존재한다(Božič and Pantoš 2015; Zeng et al. 2017). 또한 전기자동차의 보급이 많이 이루어지게 되면 전력 수요와 공급이 맞지 않게 되고 이로 인해 전력망의 전압도 문제가 생긴다(Putrus et al. 2009). 전기자동차의 시간대별 충전 수요는 지역의 특성과 요일에 따라서 달라진다는 것을 (Xing et al. 2019)에서 전기자동차 운행 데이터를 통해 보여줬다.

충전이 통제되지 않은 경우 이러한 문제는 더 크게 발생하는데 특히 피크 전력에 대한 영향은 플러그인 하이브리드 전기자동차의 충전이 통제 되지 않았을 때 크게 나타나고 이러한 통제되지 않은 충전의 영향에 대해서는 출퇴근 데이터를 이용한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해서 확인 할 수 있다(Geth et al. 2010; Lojowska et al. 2011; Muratori 2018). 모든 자동차가 전기자동차로 대체 되었을 경우 사용자의 충전이 통제되지 않으면 거주지의 피크 전력 수요는 50% 이상 증가하게 된다.

전기자동차 충전 전략과 그 효과에 대한 다양한 연구가 이루어졌다. 시간대별로 충전 요금이 다를 때 시뮬레이션을 통해 연구한 결과 최적 충전 전략은 전기자동차의 충전 요금을 51.52% 까지 절약할 수 있다(Cao et al. 2012). 이러한 전기자동차의 최적 충전 전략은 충전 장소, 충전 시설, 최적화 목표와 목적에 따라 달라진다(Rahman et al. 2016). 네 가지의 충전전략이 (Qian et al. 2011)에서 제시 되었는데; 첫 번째는 통제되지 않은 충전으로 모든 사람이 같은 시간에 충전을 시작하고, 두 번째는 저녁시간에 충전을 시작하고, 세 번째는 정규 분포에 따라 심야 시간에 충전을 시작하고, 마지막은 앞의 세 개의 전략이 혼합된 전략이다. 이 연구에서 각 충전 전략별로 전력 시스템의 부하와 각 사용자의 전기 요금을 비교하였지만 사용자 행동 데이터를 활용하지 않았고 최적 충전 전략 도출은 이루어지지 않았다. 다양한 종류의 전기자동차를 대상으로 시뮬레이션을 통한 자동화되고 효율적인 계획된 충전을 위한 방법 역시 연구되었다(Torres-Sanz et al. 2018). 배전망에서 단계별 최적화 기법을 통해 전기자동차 충전 전략을 찾고 이에 따른 소비자 만족도에 대한 연구가 이루어졌는데 소비자 만족도는 80.7%에서 97.7%로 증가하였고 전력망의 손실 금액도 30%이상 줄고 환경 비용도 줄어 드는 것을 볼 수 있다(Zhu et al. 2018). 피크 수요와 전압 변동과 에너지 손실을 줄일 수 있는 새로운 스마트 부하 관리 방법과 전력망의

신뢰성과 사용자의 복지를 고려한 플러그인 하이브리드 전기자동차 충전 위험 관리 기법도 연구 되었다(Masoum et al. 2011; Hashemi-Dezaki et al. 2015). 전기자동차의 저속 및 고속 충전을 동시에 고려한 에너지 관리를 할 수 있는 다단계 확률적 모델은 (Khalkhali and Hosseinian 2020)에서 제시되었는데 그 결과 프레임워크가 고속 충전을 조절할 때 전력 공급자의 비용뿐만 아니라 저속 충전 요금 역시 줄어들었다. 전기자동차의 충전 스케줄을 위한 단기 최적 컨트롤러와 마이크로 그리드 상에서 최대 수요 전력을 줄이기 위한 이차 계획법을 활용한 스마트 에너지 통제 전략 대한 연구가 이루어졌고 이를 통해 구해지는 최대 수요 전력을 비교 평가하였다 (Wenzel et al. 2018; Mets et al. 2010). 전력 시장에서 시간별 가격을 고려한 지능형 전기자동차 충전 방법은 (Cao et al. 2012)에서 충전 전력 요금 조절을 통한 전기자동차 충전을 최적화하는 방법은 (Clairand, Rodriguez-Garcia, and Alvarez-Bel 2018)에서 연구되었다. 이외에도 전기자동차 충전 비용과 거리를 고려한 최적 충전소를 찾는 스마트 충전 전략이나 전기자동차 충전소에 도입했을 경우의 동적 충전 시스템이 연구되었지만 충전소에서의 충전만을 고려하고 가정용 충전을 고려하지는 않았다(Moghaddam et al. 2017; Y. Zhang and Cai 2018).

최적 충전 전략 선택에 영향을 주는 다른 전자 기기 사용에 대한 연구는 다음과 같이 이루어졌다. 행동 패턴에 대한 설문 데이터를 사용하여 전자 기기 사용을 도출하기 위한 모델을 개발한 결과 모델 기반의 가정 에너지 소비 시뮬레이션 결과와 실제 가정 전력 사용이 유사했다(Capasso et al. 1994). 사용자 행동 조사 데이터로부터 행동을 아홉 가지로 분류하고 이를 통해 마르코프 연쇄 모델을 통해 시간대별 전기 사용량을 유추해내는 프레임워크는 (Widén and Wäckelgård 2010)에서 소개되었고 이는 실제 가정의 전기 사용량을 잘 표현해주었다. 이러한 에너지 소비를 알기 위해

가구 구성원의 에너지 소비 활동을 기반으로 주거용 건물에 대한 에너지 수요를 구하거나 미국 노동 통계국 데이터를 사용하여 여러 개인으로 구성된 가정의 주거 전력 소비에 대한 시뮬레이션 모델도 개발되었다(Subbiah et al. 2013; Muratori et al. 2013). 기존의 활동 기반 수요 모델에서 사회 기술적 가정의 한계를 극복하는 방법은 (McKenna et al. 2017)에서 제시되었다.

또한 사용자 행동 패턴 데이터와 전기자동차 사용에 관한 연구 역시 존재하는데, 미국의 차량 여행 데이터로부터 플러그인 하이브리드 전기자동차의 충전 수요를 도출해 다양한 충전 전략이 전력 부하 프로필에 미치는 영향에 대한 연구와 사용자 행동 데이터를 통해 플러그인 하이브리드 전기자동차의 충전과 전자 기기의 전력 사용량을 도출해 시간대별 총 전력 사용량을 예측한 모델이 존재하지만 다양한 충전 전략을 고려하지는 않았다(Weiller 2011; Grahn et al. 2013).

2.2.2 전기자동차 최적 충전 스케줄링과 Vehicle-to-Grid 기술의 경제적 가치 평가: 게임이론적 접근

다양한 전력망의 문제를 해결할 수 있는 방안 중 하나는 스마트 그리드이다. 스마트 그리드는 전력망과 통신 네트워크가 융합된 지능형 전력망으로 네트워크속도와 연산속도가 하루가 다르게 발전하고 있는 현재 좋은 해결책이 될 것이다. 스마트 그리드 상에서 효용성을 최대화하는 실시간 가격 결정 알고리즘이 적용이 된다면 이를 통해 전력분산을 통해 공급자와 소비자 모두 이익을 볼 수 있다(Samadi et al., 2010). 이러한 스마트 그리드의 가격 결정 모델에 게임 이론적 방법을 적용한 효과는 (Saad et al. 2012)에서는 제시하였다. 이러한 게임 이론을 활용하여 스마트 그리드에서 사용자의 에너지 소비 스케줄이 결정 될 경우와 이러한 스마트 그리드에서 에너지

저장 장치가 도입된 경우에 사용자의 소비 스케줄이 결정 될 경우 효과에 대한 모델도 개발 됐다(Mohsenian-Rad et al. 2010; Yeo et al. 2015). 게임 이론이 적용된 모델에서는 전기요금은 18% 감소 하고 평균 전력 사용량 대비 피크 전력 사용량 비율을 뜻하는 PAR(Peak to Average Ratio)는 17% 감소하는 것을 볼 수 있었고 에너지 저장 장치가 도입된 경우에는 전기요금은 최대 17%, PAR는 22% 추가로 감소하였다. (Wade et al. 2010)에서는 스마트 그리드에 에너지 저장 장치가 도입될 경우 장점을 14개 제시하였다.

이러한 스마트 그리드 상에서 에너지 저장 장치의 역할을 전기자동차가 하는 기술이 V2G이다. 이러한 V2G 기술을 도입 함에 따라 얻을 수 있는 경제적인 효과들에 대해 다양한 연구가 이루어졌다(Singh and Tiwari 2020; Nworgu et al. 2016; Noel and McCormack 2014). V2G가 도입 되었을 경우 두가지 충전 전략에 따라 각각 5.5%와 6.7%의 경제적 이득이 있다(Singh and Tiwari 2020). V2G를 설치할 경우 실제 운영에 따라서 경제적 이득과 경제적 손실이 모두 나올 수 있지만 적절한 수학적 모델을 사용할 경우 경제적 이득이 나타난다(Nworgu et al. 2016). 통학 버스가 디젤 엔진 통학 버스가 아닌 V2G가 가능한 전기 통학 버스일 경우 5년간 얻을 수 있는 이익의 순현재가치는 좌석당 6070달러이다(Noel and McCormack 2014).

이러한 V2G 상황에서 최적 에너지 소비 스케줄링 문제는 중요하다. 다양한 방법을 활용한 스마트 그리드 상에 V2G로 이용 가능한 전기자동차가 있을 경우 최적 충전 스케줄에 대해 연구 되었는데, 특히 전기자동차 소유자의 충전 요금을 절약할 수 있는 알고리즘이나 사용자, 공급자 정부 모두에게 혜택을 줄 수 있는 최적화 된 충전 알고리즘이 제시 되었고 이러한 최적 운영을 통해 하루에 261.9파운드의 이득이 생겼다(Mets et al. 2011; S. Das, Acharjee, and Bhattacharya 2020; Amamra and

Marco 2019; Sortomme and El-Sharkawi 2011). V2G 상황에서 전기 충전 부하의 피크를 낮추는 것, 전력 손실과 전압 변동을 낮추는 것을 목표로 하는 다목적 최적화 전략이 제시되었다(Huang, Fang and Deng, 2020). V2G와 재생에너지 발전이 같이 존재하는 마이크로 그리드 상황 하에서 전기자동차 운영에 대한 연구, 특히 풍력 발전을 포함한 전력망에서 V2G 기능이 포함된 플러그인 하이브리드 전기자동차의 최적 운영에 대한 연구도 진행되었다(Battistelli, Baringo, and Conejo 2012; Kavousi-Fard, Niknam, and Fotuhi-Firuzabad 2015). 플러그인 하이브리드 전기자동차가 에너지 저장 장치로 쓰이는 마이크로 그리드에서 전기자동차의 최적 충전 전략을 비롯하여 다양한 신재생에너지의 최적 생산 전략 역시 알고리즘을 통해서 도출될 수 있다(Kamankesh, Agelidis, and Kavousi-Fard 2016).

이러한 V2G를 포함한 스마트 그리드 상황에서는 사용자가 서로에게 영향을 미치는 경우가 많다. 이러한 상황은 게임 문제로 표현이 가능하다. 이러한 상황을 Stackelberg 게임을 활용한 전력 시스템에 유연성을 제공하는 V2G 운영 전략은 (J. Zhang et al. 2020)에서 제시하였다. 전력망, 전기자동차, 태양열 에너지, 에너지 저장 장치 간의 게임을 통해 운영이 이루어진다면 에너지나 비용 측면 모두에서 이익이 되는 운영이 가능하고 전력망과 플러그인 하이브리드 전기자동차 사용자에게 모두 이득을 주는 협동 게임 모델이 개발되었다(H. S. Das et al. 2020; Yu et al. 2014).

2.2.3 전기 가격 변동성을 고려한 V2G 기술 투자 모형: 실물 옵션적 접근

V2G는 아직 전세계적으로 보급이 많이 이루어지지 않아 관련 연구가 많지 않지만 관련 정책에 관한 연구와 참여자 별 경제성 평가에 대해 이루어졌다.(Sovacool et al. 2020; Li et al. 2020; Gough et al. 2017; Zhao, Noori, and Tatari 2016; De Los Ríos et al. 2012; Y. Kim and Lee 2015).

어떤 종류의 참여자, 이해관계자, 사업 모델, 시스템이 V2G를 활성화 시킬 수 있는 가에 대해서는 (Sovacool et al. 2020)에서 연구되었다. 전문가와 사용자를 대상으로 한 설문조사와 관련 문헌 연구를 통해 V2G에 대한 1차, 2차 사업 모델의 이해관계자를 정의하고 12개의 이해관계자와 이에 부합하는 사업 시장을 확인했다. 각 비즈니스 모델을 장비, 전력망, 대중교통 운영자, 재생에너지 생산자, 2차 시장 이렇게 5개로 분류 후 각각에 대한 비즈니스 모델의 차이점 분석 후 이에 대한 정책 방안을 제안하였다. 에너지 피크를 대비해 전력을 비축해두는 시장에서 전기자동차 이용자, 전력망 운영 회사, 전력 발전 회사를 포함한 모든 참여자의 V2G 기술에 대한 비용 편익 분석이 상하이를 대상으로 이루어졌다(Li et al. 2020). 각 참여자 별로 비용 편익 모델을 제시하고 상하이의 실제 에너지 데이터와 네 종류의 전기자동차를 기반으로 시뮬레이션 분석과 민감도 분석이 이루어졌다. 그 결과 총 수익의 경우 전력 발전 회사가 가장 크며, 전력망 운영 회사는 항상 음수가 나왔다. 이를 통해 V2G 기술 도입을 위해서는 공정한 시정 분배 구조가 필요하다는 것을 알 수 있다. V2G 서비스가 전력이 빌딩내에서 소비하는 상황, 단기적으로 저장하는 상황, 전력 도매 시장에 판매하는 상황 각각에 대해서 실증 데이터 기반 V2G의 경제성 평가는 (Gough et al. 2017)에서 이루어졌다. 실제 데이터 기반으로 시뮬레이션 모델을 수립 후 차량 소유주와 건물에 대한 이익 분석과 민감도 분석이 수행됐다. 전력 도매 시장에 판매하는 경우 순현재가로 이득이 최대 8,400파운드 발생하는 것을 보였고 전체 순이익은 V2G로 인한 배터리 성능 저하 비용에 큰 영향을 받는다는 것을 보였다. 전기 트럭에 V2G 기술을 적용하였을 경우 잠재적 이득과 온실가스 감축 효과에 대한 평가도 이루어졌다(Zhao, Noori, and Tatari 2016). V2G 기술의 지속성, 필요성, 서비스 시장의 현재 상황에 대해 제시하였고 V2G 기술의 경제적, 환경적

분석 도구를 개발하였다. 각 매개변수의 가능한 범위 데이터를 통하여 소유 총비용을 도출하였고 온실가스 배출량을 계산하였고 이러한 연구의 결과로 전기 트럭의 V2G 서비스로 경제적 수익과 온실가스 배출 감축을 이룰 수 있음을 알 수 있다. 기존의 내연기관자동차, 전기자동차, 수소전지자동차의 투자 비용, 인프라 비용, 운영 비용, 전력망 이윤의 10년 현금 흐름에 대한 모델을 개발하여 기존의 내연기관자동차 보다 비용 면에서 유리한 V2G 기술에 대한 이윤 평가는 (De Los Ríos et al. 2012)에서 이루어졌다. 250대의 운송 서비스에 사용되는 자동차를 가정하고 이에 대해 시뮬레이션과 민감도 분석이 수행되었다. 내연기관자동차 대비 친환경 자동차가 더 낮은 비용으로 운영이 가능하고 특히 V2G 기술에서 나온 이윤으로 총 소유 비용의 11%까지 수익을 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 반면에 V2G 기술로 연평균 21만원의 수익이 발생하지만, V2G를 적용한 전기자동차와 내연기관자동차의 총소유비용을 데이터를 통해 도출하고 이를 비교 분석한 결과 총 소유 비용은 내연기관자동차보다 10.2%높다는 연구도 있다(Y. Kim and Lee 2015). 또한 마이크로 그리드 상에서 V2G 설비의 최적 입지와 사이즈를 결정 하는 모델도 연구되었다(Almehizia and Snodgrass 2018). 두단계로 이루어진 확률 최적화 문제로 모델 수립 후 이에 대한 솔루션 도출 방법을 제시하였다. 시뮬레이션 대상은 각각 14개, 37개 노드의 버스 시스템에 대해 이루어졌고 불확실성, 투자회수기간, 시장가격 변동성 등에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이를 통해 V2G에 대한 투자는 마이크로 그리드의 경제성을 개선시킬 수 있음을 보였다.

전통적인 경제성 평가 방법인 현금 흐름 할인 기법보다 유연한 의사결정이 가능하고 다양한 변동성을 고려하기 때문에 경제적 가치 평가가 더 현실적으로 이루어지는 실물 옵션 기법을 기술의 가치평가와 적용 시점에 활용한 연구 역시

다양하게 이루어졌다(Davis and Owens 2003; Siddiqui, Marnay, and Wiser 2007; K. T. Kim, Lee, and Park 2014; Moon and Lee 2019). 재생에너지의 R&D의 최적 투자에 대해서 연속 변수 실물 옵션을 활용한 연구는 (Davis and Owens 2003)에서 이루어졌고 실물 옵션의 이항모형 방법론을 활용하여 연구 개발 포기, 연구 개발 지속, 연구 개발 적용 이러한 세 가지 옵션을 가지는 R&D에 관련한 최적 투자 방법은 (Siddiqui, Marnay, and Wiser 2007)에서 제시 되었다. 이러한 실물 옵션 모델을 활용한 한국의 풍력발전에 대한 경제성 평가에 관한 연구와 연료 가격 변동성을 고려한 전기자동차 도입 시기와 경제성 평가 역시 이루어졌다(K. T. Kim, Lee, and Park 2014; Moon and Lee 2019).

제 3 장 소비자 행동 패턴 데이터 기반 전기자동차의 최적 충전 전략

3.1 서론

앞에서 언급했듯이 전기자동차는 내연기관 자동차의 온실가스 배출 절감 효과 등 다양한 환경문제의 해결방안으로 주목을 받고 있다. 따라서 전기자동차의 확산은 불가피 하다. 하지만 이러한 전기자동차의 확산은 전기자동차 충전으로 인해 전력 수요의 증가를 가져온다. 이러한 관점에서 전기자동차로 인한 전력수요의 증가로 인한 문제는 전기자동차의 충전이 통제되지 않았을 때 더 많이 나타난다. 그렇기 때문에 전기자동차가 전력 시스템에 어떻게 영향을 주는지는 사용자의 충전 전략에 따라 달라진다. 또한 보통 전기 가격은 시간대 마다 다르기 때문에 충전 전략은 전기자동차 사용자의 전기 요금에도 영향을 미친다. 특히 전자 기기 사용과 전기자동차 충전에 사용되는 전력을 합한 전체 전력 사용량의 피크 전력이 높아지면 전력 생산 비용이 증가할 것이고 이로 인해 전체 사용자의 전기 요금 및 개인의 전기 요금 역시 증가할 것이다. 제2장에서 살펴본 바와 같이 이를 해결하기 위한 다양한 연구들이 진행됐다. 하지만 기존의 연구들에서는 최적화의 목적이 전력 시스템이고 전력 생산 비용이나 사용자 전기 요금은 고려하지 않았다(Masoum et al. 2011; Hashemi-Dezaki et al. 2015; Wenzel et al. 2018; Mets et al. 2010). 또한 (Sortomme and El-Sharkawi 2011; Kamankesh, Agelidis, and Kavousi-Fard 2016; Cao et al. 2012) 에서는 전기자동차 최적 충전 전략을 정할 때 다른 전자기기의 전력 사용을 고려하지 않았다. 전기자동차

충전으로 인한 영향은 충전 패턴에 따라 달라지기 때문에 비용을 절감하려는 사용자를 비롯한 전력 시스템 부하를 관리하는 국가 차원에서도 적절한 충전 전략이 중요하다. 가정에서는 전기자동차 충전과 더불어 가전제품도 많은 전기를 사용한다. 이러한 전기자동차의 가정용 충전에 대한 최적의 충전 전략을 찾기 위해서는 가정에서의 가전제품 사용도 고려해야 하지만 기존 연구에서는 그러한 연구가 존재하지 않는다.

전기자동차 사용과 가정용 전자 기기 사용은 모두 사용자 행동 패턴과 관련이 있다. 따라서 전자 기기 사용 수요와 행동 패턴과의 관계에 대해서는 연구가 되어 왔고, 또한 사용자 행동 데이터를 통한 전기자동차 사용에 관한 연구도 진행되었다.

현실적인 관점에서는 다른 전자 기기의 전기 사용량을 포함한 총 전력 수요를 고려하여 전기자동차의 최적 충전 전략을 결정하는 것이 중요하지만, 대부분의 기존 연구에서는 사용자의 행동 데이터를 기반으로 한 가전제품의 전기 사용량을 활용한 전기자동차의 최적 충전 전략을 제시하지 못했다. 본 연구의 목적은 사용자 행동 데이터를 기반으로 전력 사용 수요를 도출하고 다양한 전기자동차 충전 전략에 따른 가정용 전력 시스템의 피크 부하에 주는 영향과 사용자의 전기 요금에 미치는 영향을 평가하고 각 사용자의 행동 패턴에 따른 최적의 충전 전략을 도출하는 시뮬레이션 모델의 개발이다. 이를 위해 국가에서 실시한 설문조사를 통해 얻어진 실제 한국 사용자의 행동 데이터를 활용한다. 이러한 데이터를 다양한 실제 행동 데이터를 분류한 후 이를 통해 시간대별 가정의 전자 기기의 전기 사용량과 전기자동차 사용 시간을 파악한다. 이러한 전기자동차 사용 시간을 통해 전기자동차의 충전 수요가 결정된다. 이렇게 결정된 전자 기기의 전기 사용과 전기자동차 운행 시간을 바탕으로 세가지 충전 전략에 따른 사용자의 전기 요금 변화와 국가 전력 시스템에 미치는 영향을 알아본다. 또한 각 사용자가 자신의 요금을 최소화하는 최적의 충전 전략을

선택했을 경우 그 영향에 대해서 알아본다.

3.1.1 구성

제3장의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 3.2에서는 전자 기기의 전력 수요와 전기자동차 충전에 대한 모델을 제시한다. 3.3에서는 한국의 사용자 행동 데이터에 대한 분석이 이루어진다. 3.4에서는 소결론을 제시한다.

3.2 모델

3.2.1 가전제품에 대한 전력 수요

전기자동차를 소유한 사용자는 총 N_m 명 존재하고 각 사용자 m 은 자신의 행동 패턴과 그에 따른 가전제품의 전기 사용량을 고려하여 가장 경제적인 충전 방법을 찾는다. 하루는 총 T 시간으로 나누어 지고 각 시간 $t \in \{1,2,...,T\}$ 에 각 사용자는 분류된 행동 $A = \{1,...,N_A\}$ 에서 한가지 행동을 한다. 이때 사용자 m 이 시간 t 에 하는 행동은 a_m^t 이다.

전체 가전제품의 종류의 개수는 N_E 이고 사용자가 사용할 수 있는 전자기기의 집합은 $E = \{1,...,N_E\}$ 이다. 각 시간 t 에 어떠한 전자 기기를 이용하는지는 사용자 m 의 행동 a_m^t 에 따라 달라진다. 본 연구에서는 모델의 단순화를 위해 가전제품을 전기 사용 패턴에 따라 다섯 개로 분류한다: (1) 첫번째 유형인 'A형'은 사용자의 행동과 무관하게 일정한 전력 수요를 가지고 있는 제품이다; (2) 두번째 유형인 'B형'은 전력 수요가 사용자의 행동과 연관될 뿐만 아니라 시간대별로 다른 기기이다; (3) 세번째 유형인 'C형'은 특정 행동이 일어날 때만 사용되는 기기이다; (4) 네번째 유형인 'D형'은 전자 기기의 사용이 특정 행동이 끝난 이후에 일어난다; (5) 다섯 번째 유형인 'E형'은 사용되지 않을 때도 대기전력이 필요하고 관련된 행동이 이루어질 때에 더 많은 전력 수요를 가지는 기기이다. Figure 3.1은 다섯 종류의 전자기기가 어떻게 전기를 사용하는지를 나타낸다.

냉장고와 같은 'A형' 전자 기기들은 사용자가 어떠한 행동을 하는 지와 상관없이 항상 작동이 된다. 이러한 기기 중 일부는 주기적인 전력 수요가 있기 때문에 전력 사용이 시간에 따라 항상 일정하지 않을 수 있지만 모델의 단순화를 위해 항상 같은

양의 전력 P_e 를 사용한다고 가정한다. 사용자 행동과 시간에 따라서 달라지는 'B형' 전자 기기의 경우에는 사용되지 않을 경우에는 아무런 전기를 소비하지 않지만 사용될 경우에는 사용되는 시간에 따라서 $P_{e,\tau}$ 만큼은 전력을 소비한다. 이러한 기기의 예로는 조명이 있다. 사용자 행동이 이루어지는 동안만 전기를 사용하는 'C형' 전자 기기는 P_e 의 전력을 사용하는 동안 일정하게 필요로 한다. 이러한 기기의 예로는 조리도구들로 요리가 이루어지는 동안 기기가 사용이 되고 전력을 소비한다. 이와는 다르게 'D형' 기기는 행동이 끝난 뒤 기기의 사용이 이루어진다. 이러한 기기의 예로는 세탁기가 있고 행동이 끝난 직후부터 K 시간동안 P_e 만큼의 전력을 소비한다. 마지막으로 'E형' 전자 기기는 'C형' 기기의 일반화된 형태라고 할 수 있다. 이러한 기기는 'C형'와 같이 P_e 만큼의 전력을 행동이 이루어지는 동안 사용하고 행동이 이루어지지 않는 동안에도 대기전력 $P_{e,standby}$ 만큼을 소비한다. 이러한 기기의 예로는 컴퓨터가 있다.

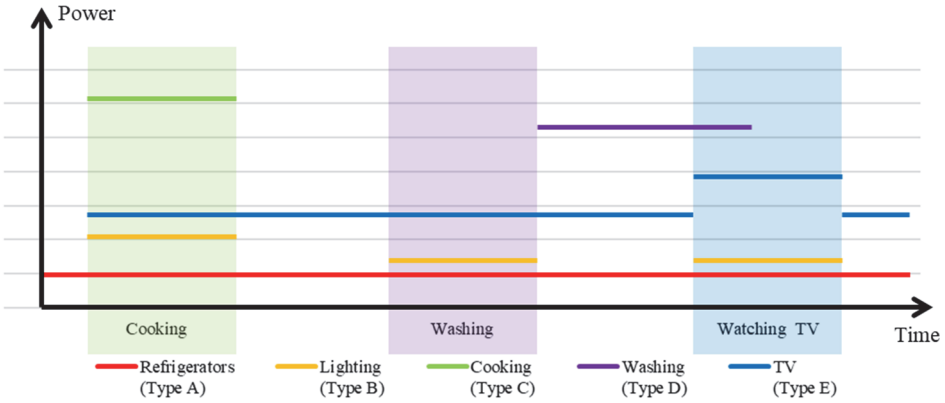


Figure 3.1 가전제품 예시

사용자 m 의 시간 t 에서 가전제품에 대한 전력 수요를 $D^t_{Appliance,m}$ 이라고 한다면 이는 각 전자 기기들의 전력 소모의 합이므로 다음과 같이 표현 가능하다:

$$
\begin{aligned}
&D^t_{Appliance,m} = \sum_{e=1}^{N_E} P^t_e \times \alpha^t_{e,m}, \\
&\text{where } P^t_e = \begin{cases} P_{e,\tau} & \text{if } e \text{ is time dependent type,} \\ P_{e,standby} & \text{if } e \text{ is 'type E' and in standby,} \\ p_e & else \end{cases} \\
&\alpha^t_{e,m} = \begin{cases} 1 & \text{if } e \text{ is using power,} \\ 0 & \text{else.} \end{cases}
\end{aligned}
\tag{3.1}
$$

전체 사용자의 시간 t 에서 가전제품에 대한 전력 수요 $D^t_{Appliance}$ 는 전체 사용자들의 가전제품으로 인한 전기 사용량의 합이고 하루 동안의 전체 사용자의 가전제품에 대한 전력 수요 $D_{Appliance}$ 는 전체 사용자의 모든 시간에서의 전기 사용량의 합이기 때문에 다음과 같이 표현 가능하다:

$$
\begin{aligned}
D^t_{Appliance} &= \sum_{m=1}^{N_m} D^t_{Appliance,m} \\
D_{Appliance} &= \sum_{t=1}^{T} D^t_{Appliance}
\end{aligned}
\tag{3.2}
$$

3.2.2 전기자동차 충전 수요와 전략

본 모델에서 사용자 행동 중에는 차량을 이용한 이동이 있고 전기자동차는 사용자가 이러한 행동을 할 때 배터리에서 전기를 소모한다. 평균 운행 속도가 $v\ (km/h)$ 이고 에너지 효율이 $c\ (km/kWh)$ 일 때 전기자동차는 운행될 때 소모되는

전력 P_{EV} 는 다음과 같다:

$$P_{EV} = \frac{v}{c} \tag{3.3}$$

사용자 m 이 하루에 Δ_m 시간만큼 운전을 하면 전기자동차의 하루 전기 소비량 V_m 은 다음과 같다:

$$V_m = P_{EV} \times \Delta_m \tag{3.4}$$

전기자동차 사용자의 충전에 대한 가정은 다음과 같다: 전기자동차 사용자는 집에서 저속 충전기로 최대한 충전을 하고 만약에 필요한 전기를 집에서 모두 충전하지 못했을 경우 밖에서 고속 충전을 한다. 전기자동차는 항상 최대로 충전이 되고 따라서 하루 충전량은 전기자동차 운행으로 사용된 전기 소비량 V_m 과 동일하다. 사용자는 집에서 하루에 한번만 충전을 하고 충전 시작 시간 t^{ω}_{start} 와 충전 종료 시간 t^{ω}_{end} 은 충전 전략 ω 와 사용자 행동에 따라 달라진다. 따라서 사용자 m 의 집에서의 충전 시간 $T^{\omega}_{home,m}$ 은 다음과 같이 표현된다:

$$T^{\omega}_{home,m} = t^{\omega}_{end} - t^{\omega}_{start} \tag{3.5}$$

위와 같은 가정에 의해 하루에 전기자동차 운행으로 쓰는 전력량은 하루 전체 충전량과 같고 저속 충전 전력이 P_{slow} , 고속 충전 전력이 P_{fast} , 집밖에서의 고속 충전 시간이 $T^{\omega}_{away,m}$ 일 때, 다음과 같이 표현된다:

$$V_m = P_{slow} \times T^{\omega}_{home,m} + P_{fast} \times T^{\omega}_{away,m} \tag{3.6}$$

본 논문에서는 (Kamankesh, Agelidis, and Kavousi-Fard 2016)을 토대로 세가지 충전 전략을 사용한다. 첫번째는 충전 전략 $\omega = 1$ 은 집에 도착하는 대로 충전을 시작하는 전략으로 *'charging as soon as returning' (CAR)* 이다. 첫번째 충전 전략은 충전이 통제되지 않는 상태에서도 이루어지는 충전 방법으로 충전 전략을 고민하지 않는 사용자는 이러한 충전을 하게 된다. 이는 마지막에 집에 들어온 즉시 전기자동차를 충전기에 연결하는 방법으로 아무런 통제가 이루어지지 않고 전기 가격에 대한 고려를 하지 않을 경우에 이루어지는 전략이다. 본 연구에서는 *CAR* 전략에서는 하루에 집에 여러 번 돌아올 경우 마지막 돌아오는 경우가 충전 시작 시간이라고 가정했다. 따라서 *CAR* 전략의 충전 시작 시간은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} &t^{\omega=1}_{start} = \max[t_{arrive}], \\ &\text{where } t_{arrive} \text{ is the arrival time of the EV} \end{aligned} \tag{3.7}$$

두번째 충전 전략 $\omega = 2$ 은 *'charging at night' (CAN)* 전략으로 사용자가 피크 시간이 아닌 21시에서 24시 사이에 충전을 시작하는 것이다. 이러한 충전전략에서 사용자가 21시 이전에 집에 도착한다면 21시와 24시 사이에 무작위로 충전을 시작하고 21시 이후에 도착한다면 도착시간 t_{arrive} 와 24시 사이에 무작위로 충전을 시작한다. 따라서 *CAN* 전략에서는 충전 시작 시간은 확률 변수이고 확률 밀도 함수로 균등분포를 따른다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다:

$$f(t_{start}^{\omega=2}) = \frac{1}{b-a},\ a \le t_{start}^{\omega=2} \le b,$$
$$\text{where } a = \max\left[21,\ t_{arrive}\right],\ b = 24 \tag{3.8}$$

세번째 충전 전략 $\omega = 3$ 은 *'charging when sleeping' (CWS)* 전략으로 충전 시작 시간은 평균 1시 표준편차 3시간인 정규분포를 따른다. 따라서 충전 시작 시간의 확률 밀도 함수는 다음과 같다:

$$f(t_{start}^{\omega=3}) = \frac{1}{3\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t_{start}^{\omega=3}-1}{3}\right)^2\right)} \tag{3.9}$$

이처럼 충전 시작 시간이 정해지면 충전은 사용자가 충전 가능한 시간 내에서 최대로 충전 수요량을 충족시킨다. 따라서 사용자 m 의 시간 t 에서 충전 전략 ω 에 따른 전기자동차 충전량 $D_{EV,\omega,m}^{t}$ 은 다음과 계산 가능하다:

$$D_{EV,\omega,m}^{t} \le P_{slow} \times \varepsilon_{\omega,m}^{t},$$
$$\text{where } \varepsilon_{m}^{t} = \begin{cases} 1 & \text{if } t_{start}^{\omega} \le t \le t_{end}^{\omega}, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{3.10}$$

사용자의 행동데이터로부터 가전제품 전기 사용량이 계산되고 충전 전략에 따른 전기자동차 충전량이 정해지게 되면 사용자 m 의 시간 t 에서 충전 전략 ω 을 선택했을 때 전체 전기 사용량 $D_{Total,\omega,m}^{t}$ 은 가전제품이 사용하는 전기 사용량과 전기자동차 충전량의 합이기 때문에 다음과 같다:

$$D^t_{Total,\omega,m} = D^t_{Appliance,m} + D^t_{EV,\omega,m} \tag{3.11}$$

만약 전력 공급자의 전기 공급에 부족이 없다면 사용자 m 은 각 t 시간에 원하는 수요만큼을 사용할 수 있을 것이다. 따라서 t 시간의 전기 요금이 π^t 이고, 고속 충전 요금이 π^{fast} 일 때 사용자 m 이 전략 ω 으로 충전했을 때 하루 전기 요금 $B_{\omega,m}$ 은 다음과 같이 계산된다:

$$B_{\omega,m} = \sum_{t=1}^{T}\left(D^t_{Total,\omega,m} \times \pi^t\right) + \left(P_{fast} \times T^{\omega}_{away,m} \times \pi^{fast}\right) \tag{3.12}$$

사용자 m 의 각 충전 전략 별 전기 요금 $B_{\omega,m}$ 는 가정용 전기 요금과 고속 충전 요금을 더한 것으로 각 사용자의 최적 충전 전략 ω^*_m 은 자신의 전기 요금 $B_{\omega,m}$ 을 최소화하는 전략이다:

$$\omega^*_m = \arg\min_{\omega}[B_{\omega,m}] \tag{3.13}$$

이러한 최적 충전 전략은 전기 요금 $B_{\omega,m}$ 이 사용자의 행동과 연관되어 있기 때문에 사용자 별로 다를 것이다. 모든 가정의 전기자동차에 대한 하루 충전 수요 D_{EV} 는 각 사용자의 시간대별 충전량을 합산하여 계산할 수 있다:

$$D_{EV} = \sum_{m=1}^{N_m}\sum_{t=1}^{T} D^t_{EV,\omega^*_m,m} \tag{3.14}$$

마지막으로 하루 전체 가정의 전기 수요량은 가전제품이 사용하는 전기 사용량과

전기자동차 충전으로 사용되는 전기 사용량의 합이기 때문에 식 (3.2) 와 식 (3.14)를 더해 다음과 같이 계산 가능하다:

$$D_{Total} = D_{Appliance} + D_{EV} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_m}(D^t_{Appliance,m} + D^t_{EV,\omega^*_m,m}) \tag{3.15}$$

3.3 분석

3.3.1 사용자 행동 데이터

본 연구는 사용자의 실제 행동 데이터를 통계청에서 이루어진 '2014 생활시간조사'로부터 사용하였다(통계청 2014). 총 53,976일에 대한 데이터로 각 데이터는 인구 통계학적 정보를 비롯하여 사용자의 행동과 행동이 이루어지는 위치를 10분단위로 보여준다. 따라서 논문에서 다룬 데이터 요소는 7백 7십만개 이상이다. 사용자 행동은 이동을 포함한 415개로 나누어지고 행위장소 및 이동수단은 9개로 나누어진다. 본 논문에서는 이렇게 주어진 53,976개의 데이터는 한국 사용자를 대표하는 사람들이고 전체 구성원은 이러한 사람들로 균등하게 분포 되어있다고 가정한다.

모델에서 T 시간으로 나누어져 있는 사용자 행동데이터는 행동의 다양성 때문에 모든 행동을 바로 전기 사용량으로 바꿔주는 것은 어렵다. 따라서 사용자 행동 데이터를 N_A 개의 행동으로 분류한다. 각 사용자 m 는 각 시간 t 에 한가지 행동만을 한다고 가정했다. 사용자 m 은 행동 집합 A 중 하나의 행동 $a \in A$ 를 한다. 따라서 사용자 m 의 시간 t 에서의 행동 $a_m^t = a$ 이다.

본 논문에서 각 사용자의 행동은 한국인이 가장 많이 하는 행동 11개로 분류하였고 따라서 전체 행동의 개수 $N_A = 11$ 이다. 구체적인 것은 Table 3.1에 나타난다. 사용자 행동은 크게 주거지에서의 활동, 밖에서의 활동, 이동으로 나눌 수 있다. 본 연구는 가정용 전력 시스템에 집중하기 때문에 주거지에서의 활동을 세분화된 행동으로 나누었다 $2 \le a \le 8$. 하지만 이러한 분류가 모든 활동을 다 포함하지는 못하기 때문에 기타 활동 $a = 9$ 를 추가하였다. 또한 주거지에서의 활동에

집중하기 때문에 밖에서 일어나는 모든 활동은 외출 $a=1$로 표현된다. 마지막으로 본 연구에서는 자동차 운행이 중요한 부분을 차지하기 때문에 이동은 자동차로 이동하는 것과 $a=10$, 기타 이동수단으로 이동하는 것 $a=11$으로 나누어 행동 분류에 반영된다.

Table 3.1: 행동 분류

Code(a)	행동
1	외출
2	수면
3	요리
4	설거지
5	세탁
6	TV 시청
7	컴퓨터 사용
8	음악 감상
9	기타 활동
10	자동차로 이동
11	기타 이동

본 연구에서는 사용한 전체사용자 데이터 수는 53,977명이다. 이 모든 사용자는 각각 자신만의 행동 패턴을 가지고 있고 각각의 전기 사용량을 가진다. 아래에 서술할

각 활동에 참여하는 사용자 수와 전자 기기 에너지 사용량은 전체 53,977명을 바탕으로 이루어진다. 이는 전체 국가의 가정용 전력망의 부하를 알아보기 위해서는 전체 사용자의 전기 사용이 필요하기 때문이다. 이 중 전기자동차를 소유하고 집에서 충전이 가능한 사용자는 18,505명이다. 전기자동차 충전에 관한 분석은 이러한 18,505명에 대해서 이루어진다.

Figure 3.2는 앞에서 설명한 분류를 기반으로 각 시간대에 각 활동에 참여하는 사용자 수를 보여준다. Figure 3.3은 Figure 3.2의 간단한 버전이다. 당연한 결과지만 대부분의 사람들이 낮에는 집을 비우고 나머지 시간에는 집에 있으며 밤에는 잠을 잔다. 식사와 관련된 활동인 '요리'와 '설거지'는 보통 아침, 정오, 저녁에 이루어진다. '세탁'은 보통 아침에 이루어지고 'TV 시청', '컴퓨터 사용', '음악 감상'등의 여가 활동은 보통 퇴근 후 저녁에 이루어진다. 전반적으로 아침과 저녁, 특히 대부분이 직장에서 돌아오는 시간인 18시 이후에 많은 주거 활동이 발생한다.

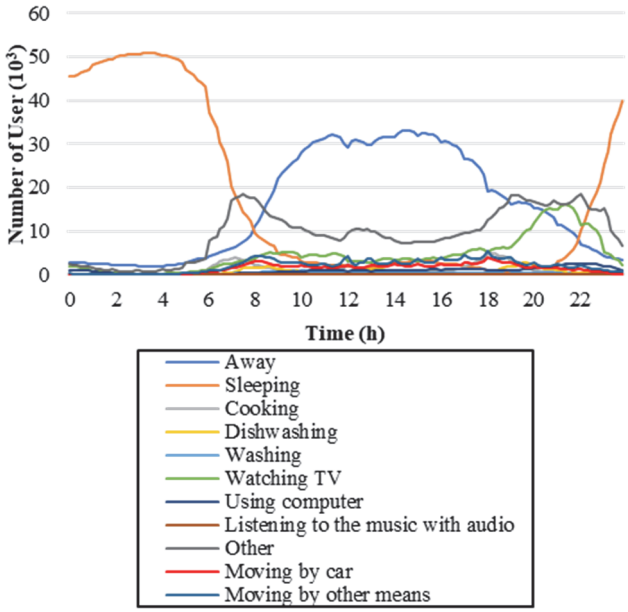


Figure 3.2: 시간별 활동에 참여하는 사용자 수

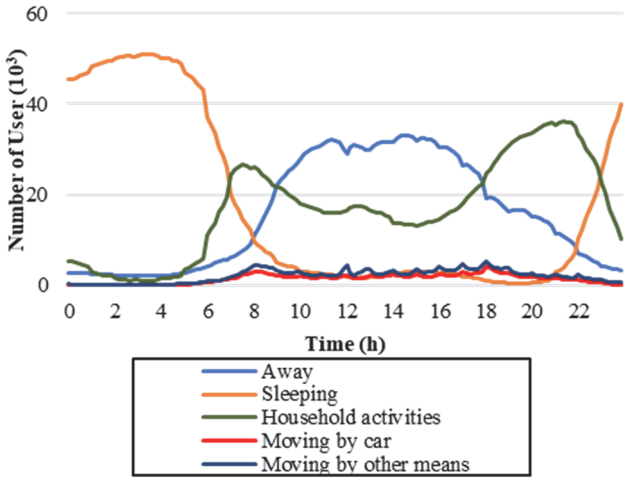


Figure 3.3: 시간별 활동에 참여하는 사용자 수(요약)

3.3.2 사용자 활동에 따른 전력 소비량 추정

3.3.2.1 전자 기기

이 모델에서는 한국에서 보급률이 높은 대표적인 가전제품 8개를 고려한다. 각 전자 기기는 자신의 유형을 가지고 있고 이러한 유형에 따른 전기 소비를 한다. 각 전자 기기에 대한 설명은 Table 3.2에 있다.

Table 3.2: 전자 기기 유형

Code(e)	Appliance	Type	a
1	냉장고	Type A	
2	조명 기구	Type B	2-9
3	조리 도구	Type C	3
4	식기 세척기	Type D	4
5	세탁기	Type D	5
6	TV	Type E	6
7	컴퓨터	Type E	7
8	오디오	Type E	8
9	기타 기기	Type C	9

냉장고와 같이 품목을 차갑게 유지하는 데 사용되는 가전제품은 항상 켜져 있어야

하기 때문에 전기 사용량은 사용자 활동에 영향을 받지 않고 일정한 전력 수요를 가진다. 조명 기구는 집 밖에서 이루어지는 활동을 제외한 모든 활동에 필요하지만 시간과 상황에 따라 필요한 밝기가 다르기 때문에 전기 사용량 또한 다르다 따라서 밤에 쓰는 전력 $P_{lighting,night}$ 과 낮에 쓰는 전력 $P_{lighting,day}$ 으로 나누어진다. 또한 사용자가 잠을 자는 동안에는 다른 활동들에 비해 밝을 필요가 없기 때문에 전력 소모는 그보다 작은 $P_{lighting,sleep}$ 만큼 이루어진다. 전자레인지나 오븐과 같이 많은 종류의 기기들이 요리에 사용되기 때문에 각 사용자는 요리에 대해 개별적으로 특정한 전력 수요를 가지지만 (Widén et al. 2009)에 따르면 모든 사용자의 조리기구가 동일한 전력 수요를 갖는다고 가정하더라도 결과에는 큰 차이가 없다. 이러한 기기들은 사용자가 요리를 하는 동안에만 전기를 사용하기 때문에 'C형' 가전제품이다. 세탁기와 식기 세척기는 일반적으로 활동이 완료된 후 작동을 시작하기 때문에 그 때 전력 수요 발생하는 'D형' 가전제품이다. TV, 컴퓨터, 오디오 등의 여가용 기기는 사용자가 관련 활동을 할 때 사용되고 또한 대기시에도 대기전력을 소비하는 'E형' 가전제품이다. 앞에서도 언급했듯이 8개의 활동이 집에서 이루어지는 모든 활동을 다 표현하지 못하기 때문에 여기에 속하지 않는 기타 활동에 필요한 기타 전자 기기 항목을 추가한다. 구체적인 매개 변수 특성 값은 (Widén and Wäckelgård 2010)를 참조하였고 Table 3.3과 같다.

이러한 매개 변수 값을 식 (3.1) 에 대입하면 각 사용자의 시간대별 가전제품에 대한 전력 수요를 알 수 있다. Figure 3.4는 모든 사용자의 시간대별 가전제품의 전력 수요를 합한 값을 보여준다. 아침시간(08:00-10:00)과 저녁시간(20:00-22:00)에 많은 전력이 소비되는 것을 볼 수 있다.

Figure 3.5은 한국전력공사에서 제공하는 주택용 전력소비계수이다. 이는 본 연구에서 추정하는 하루 전기 패턴과는 완전히 같은 모습을 보이지는 않는다. 이는

냉난방기기를 비롯하여 고려하지 전자기기들이 존재하고 매개변수 값의 차이에 의해서 발생한 것으로 보인다. 하지만 실제 사용량과 모델을 통해 도출된 전기 사용량 모두 유사한 시간에 피크 부하를 가진다.

Table 3.3: 매개변수 값

Parameter	Value	Parameter	Value
P_{cold}	10 (W)	$K_{washing}$	130 (min)
$P_{lighting,sleep}$	12 (W)	$P_{tv,on}$	100 (W)
$P_{lighting,day}$	40 (W)	$P_{tv,stanby}$	20 (W)
$P_{lighting,night}$	104 (W)	$P_{computer,on}$	100 (W)
$P_{cooking,on}$	1500 (W)	$P_{computer,standby}$	40 (W)
$P_{dishwashing,on}$	1225 (W)	$P_{stereo,on}$	30 (W)
$K_{dishwashing}$	150 (min)	$P_{stereo,stanby}$	6 (W)
$P_{washing,on}$	404 (W)	$P_{\mathrm{additional},on}$	11 (W)

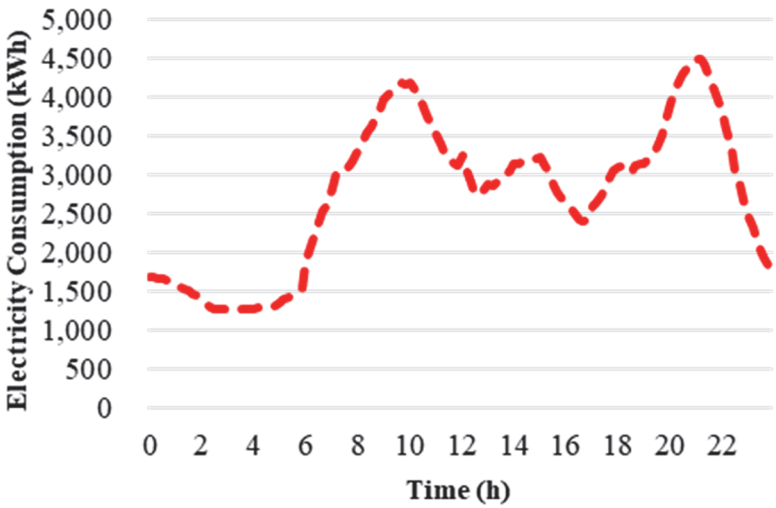


Figure 3.4: 가전제품 일일 전력 소비량

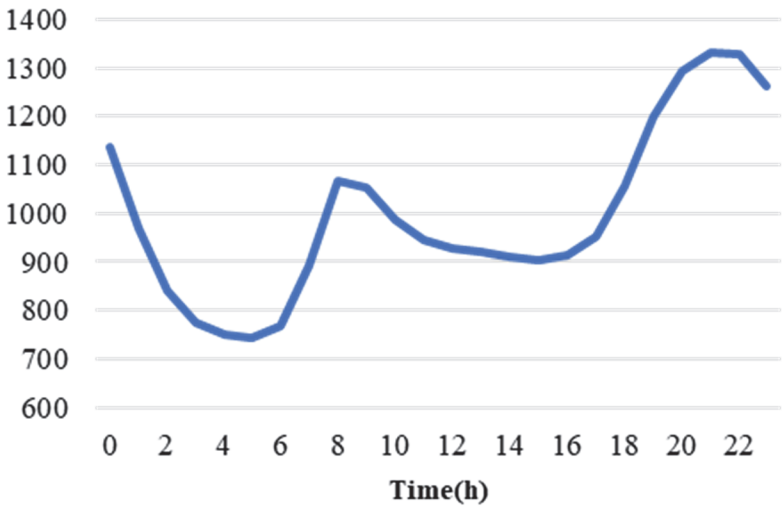


Figure 3.5 주택용 전력소비

3.3.2.2 전기자동차 최적 충전 전략 선택

한국 교통 연구원에 따르면 한국의 평균 주행 속도는 $v = 31.33 km/h$ 이고 한국에서 가장 많이 팔린 전기자동차인 현대자동차 아이오닉을 기준으로 전기자동차의 에너지 효율은 $c = 6.3 km/kWh$ 이다. 한국 환경 공단에 따르면 저속 충전기의 전력은 $P_{slow} = 7$ kW 이고 고속 충전기의 전력은 $P_{fast} = 50$ kW 이다. 이를 통해 전기자동차가 소비하는 전력은 $P_{EV} = v/c = 4.973 kW$ 와 같이 계산이 되고 사용자의 운전을 통한 하루 전기 소비량은 식 (3.3)과 식 (3.4)로부터 $V_m = 4.973 kW \times \Delta_m$ 로 계산된다.

만약 전기자동차의 충전 전략이 CAR인 경우에는 충전 시작 시간 t_{start}^{ω} 은 하루 중 집에 돌아오는 마지막 시간이다. 그에 반해 CAN전략과 CWS전략의 충전 시작 시간은 확률 분포를 따른다. 따라서 본 논문에서는 몬테 카를로 시뮬레이션을 사용하여 각 사용자의 평균 충전량을 결정한다. 각 사용자는 시뮬레이션의 각 반복마다 확률 분포에 따른 충전 시작 시간이 정해진다. 이렇게 충전 시작 시간이 정해지면 자신의 행동 패턴과 충전에 대한 수요로부터 충전 종료 시간과 가정에서 이루어지는 저속 충전량이 정해지게 된다. 이를 통해 각 사용자의 각 시간별 충전 시간을 알 수 있다. 이러한 반복은 각 사용자의 시간별 충전 시간이 일정한 값으로 수렴할 때까지 반복된다. 이러한 반복적인 시뮬레이션을 통해 전체 사용자의 충전 전략별 시간별 전기 사용량이 도출된다.

Figure 3.6는 모든 사용자가 같은 충전 전략 ω 를 선택했을 때 시간대별 총 전기자동차 충전량 $\sum_{m=1}^{N_m} D_{EV,\omega,m}^{t}$ 을 보여준다. 이러한 분석에는 집에 주차를 하지 않거나 전기자동차를 운행하지 않는 사용자는 가정용 충전이 불가능하기 때문에 제외하였다. 모든 사용자의 충전이 통제되지 않는 CAR전략 상황에서는 대부분의 사용자가 퇴근하는 시간은 19시 무렵에 충전이 몰렸다. 하지만 CAN전략에서는 조금

더 늦은 21시에서 24시 사이에 대부분의 충전이 이루어졌고 *CWS*전략에서는 대부분의 충전이 1시에서 4시 사이에 이루어졌다.

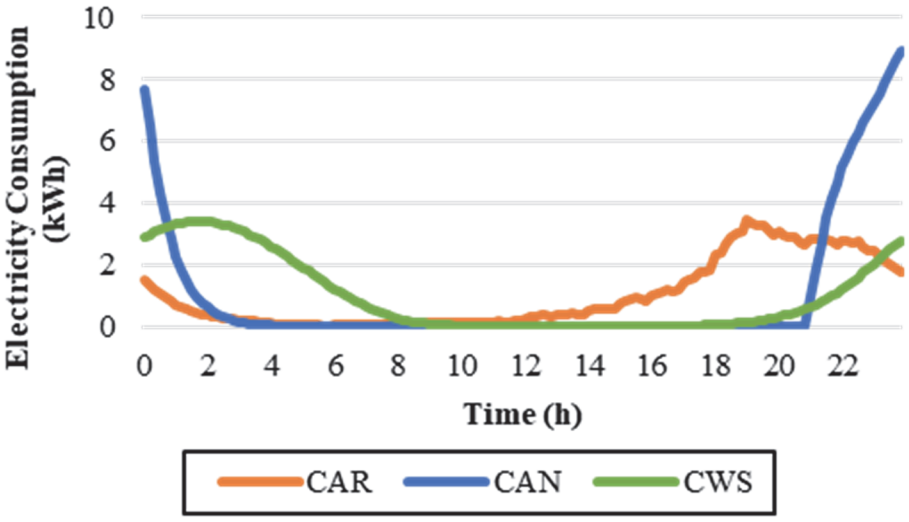


Figure 3.6: 충전 전략 별 충전량

사용자의 전기자동차의 충전과 가장 관련된 사용자 행동은 차량을 이용하는 시간과 집에서 충전이 가능한 시간이다. 따라서 Table 3.4에서는 가정에서 전기자동차 충전이 가능한 18,505명의 행동 패턴을 집에서 보내는 시간, 차량 운행 시간, 밖에서 보내는 시간 이렇게 세가지로 나누어 정리하였다. 사용자는 평균적으로 집에서 57.9%의 시간을 집에서 보내고 6.7%의 시간을 운전을 하고 35.4%의 시간을 밖에서 보낸다.

Table 3.4 평균 사용자 행동 시간

장소	비율(%)
집에서 보내는 시간	57.9
운전 시간	6.7
밖에서 보내는 시간	35.4

사용자들의 최적 충전 전략은 자신의 전기 요금을 최소화하는 전략이다. 사용자의 행동 패턴에 따른 최적 충전 전략을 살펴보기 위해 가정에서 전기자동차 충전이 가능한 18,505명 중에서 3명의 대표적인 사용자를 선택한다. 첫번째 사용자는 사용자의 행동 시간 분포가 사용자들의 평균과 유사한 사용자이다. 두번째 사용자는 첫번째 사용자에 비해 집에 머무는 시간이 적고 밖에 있는 시간이 많고 특히 운행 시간이 많은 사용자이다. 세번째 사용자는 집에서 보내는 시간과 운전 시간과 밖에서 보내는 시간 모두 첫번째와 두번째 사용자의 중간인 사용자이다. 이러한 각 대표 사용자가 집에서 머무는 시간. 집밖에서 보내는 시간, 차를 운전하는 시간의 분포는 Table 3.5와 같다.

Table 3.5: 대표 사용자 행동 시간

장소	비율(%)		
	User 1	User 2	User 3
집에서 보내는 시간	60.4	38.2	50.0
운전 시간	5.6	13.9	7.6
밖에서 보내는 시간	34.0	47.9	42.4

Figure 3.7은 3명의 사용자의 구체적인 행동 패턴을 나타낸다. Figure 3.7.(a)에서 볼 수 있듯이 첫번째 사용자는 아침과 저녁 때 출퇴근시 차량을 이용하고 나머지 시간은 집에서 시간을 보내는 행동 패턴을 보인다. 이는 대다수의 한국 사용자의 생활 패턴이다. Figure 3.7.(b)에서 나타나는 두번째 사용자의 행동 패턴은 차량을 많이 이용하고 밖에 있는 시간이 많은 특징을 보인다. 세번째 사용자의 생활 패턴은 Figure 3.7.(c)와 같이 나타나는데 첫번째 사용자보다는 차량을 많이 이용하고 두번째 사용자보다는 차량을 덜 이용한다. 낮에는 집에 있고 늦게 나가서 밤늦게 들어오는 생활 패턴을 보인다. 이러한 사용자의 행동 패턴의 특성을 통해 Figure 3.8과 같은 시간별 가전제품 사용에 따른 전력 소비량 $D^{t}_{Appliance,m}$을 계산할 수 있다.

Figure 3.7 대표 사용자 행동 패턴

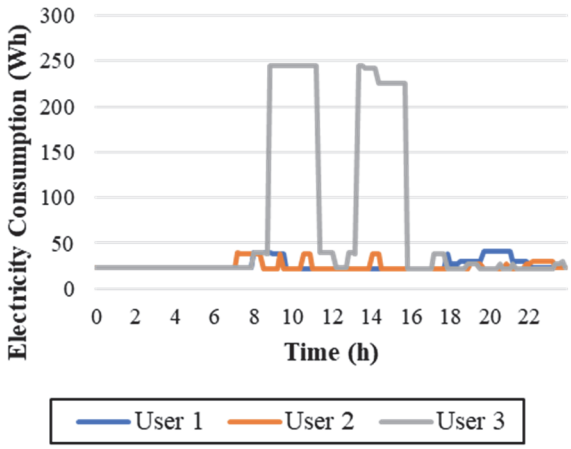


Figure 3.8 대표 사용자의 가전제품 전기 사용

본 연구에서는 사용자의 전기 요금을 계산하기 위해서 한국 전력 공사의 전기 요금을 사용한다. 한국 전력 공사는 Table 3.6와 같이 시간대를 구분하고 Table 3.7와 같이 시간대별 전기 요금을 부과한다.

Table 3.6: 시간대

시간대	여름 (6월- 8월)	봄, 가을 (3월-5월, 9월-10월)	겨울 (11월-2월)
낮은 부하	23:00–09:00	23:00–09:00	23:00–09:00
중간 부하	09:00–10:00 12:00–13:00 17:00–23:00	09:00–10:00 12:00–13:00 17:00–23:00	09:00–10:00 12:00–17:00 20:00–22:00
피크 부하	10:00–12:00 13:00–17:00	10:00–12:00 13:00–17:00	10:00–12:00 17:00–20:00 22:00–23:00

Table 3.7: 전기 가격(원)

시간대	여름	봄, 가을	겨울
낮은 부하	57.6	58.7	80.7
중간 부하	145.3	70.5	128.2
피크 부하	232.5	75.4	190.8

이를 통해서 각 사용자의 전기자동차 충전 전략 별 시간대별 전체 전기 사용량 $D^{t}_{Total,\omega,m}$ 을 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 값을 식 (3.12)를 활용하여 각 사용자의 고속 충전 비용을 포함한 충전 전략 별 전기 요금 $B_{\omega,m}$ 을 계산할 수 있고 이를 통해 요금을 최소화하는 최적 충전 전략 ω^{*}_{m} 을 도출할 수 있다. Table 3.8은 이러한 과정을 통해 각 사용자의 충전 전략별 요금을 보여주고 최적 충전 전략을 보여준다. 각 사용자의 최적 충전 전략은 첫번째 사용자는 *CWS*, 두번째 사용자는 *CAN*, 세번째 사용자는 *CAR*이다.

Table 3.8: 각 사용장의 일일 전기 요금과 최적 충전 전략

충전 전략	User 1 (원)	User 2 (원)	User 3 (원)
CAR	854	1458	**599***
CAN	637	**1164***	600
CWS	**506***	1186	605

이러한 최적 충전 전략을 선택하는 과정을 모든 사용자들에게 적용할 수 있다. 한국의 전기 요금은 계절별로 다르기 때문에 계절에 따라 최적의 충전 전략은 바뀔 수 있다. 이러한 최적 충전 전략 선택의 전략간 비율은 Table 3.9와 같다. 모든 계절에 대해서 사용자의 75%이상이 *CWS* 전략이 최적 전략으로 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 다른 시간대 보다 전기를 덜 사용하고 전기 가격이 낮은 시간에 충전을 시작하는 경향이 있기 때문이다. 실제로 대부분의 한국 사용자는 비슷한 시간에 출근하고

비슷한 시간에 퇴근을 하고 사용자는 집에 돌아온 후에 일반적으로 여러 가전제품을 사용하는 활동을 한다. 이는 행동 시간에 대한 비율이 가장 평균에 가까운 첫번째 대표 사용자의 패턴이다. 이러한 대다수의 행동 패턴으로 인해 저녁은 전기 가격이 높은 피크 시간이 된다. 따라서 *CAR* 전략이나 *CAN* 전략으로 충전을 하게 되면 대다수의 사용자가 전기 요금이 높은 비슷한 시간에 충전을 시작하게 된다. 봄과 가을에 *CWS* 전략이 최적 충전 전략 중 차지하는 비중이 여름과 겨울에 비해 상대적을 낮은 이유는 해당 계절은 피크 시간과 아닌 시간 간의 전기 요금의 차이가 여름이나 겨울보다 작기 때문이다.

Table 3.9: 최적 전략 비율

전략	*CAR*	*CAN*	*CWS*
여름	5.77%	9.91%	84.32%
봄, 가을	6.13%	17.81%	76.06%
겨울	6.30%	8.37%	85.33%

각각의 세가지 전략이 최적 충전 전략이 사용자들의 특성을 분류한 것은 Table 3.10와 같다. *CAR*이 최적 충전 전략이 사용자들은 세번째 대표 사용자와 유사하게 대체적으로 집에서 있는 시간은 중간 정도이고 밖에서 있는 시간이 많고 운전시간은 많은 편은 아니다. *CAN*이 최적 충전 전략인 사용자들은 두번째 대표 사용자와

유사하게 운전시간이 다른 두 전략이 최적 충전 전략인 사용자들에 비해 많고 집에서 보내는 시간이 적다. 마지막으로 가장 많은 비율을 차지하는 *CWS*가 최적 전략인 사용자들은 첫번째 대표 사용자와 유사하게 집에서 보내는 시간이 길고 운전시간이 짧은 것을 알 수 있다. 이는 첫번째 대표 사용자가 한국 사용자 중 대다수를 차지하는 일정한 시간에 출퇴근하는 사용자였던 것과 같이 많은 일반적인 사용자들은 *CWS*가 최적 충전 전략이 되는 것을 알 수 있다.

Table 3.10: 전략별 사용자 행동 시간

장소	비율(%)		
	CAR	*CAN*	*CWS*
집에서 보내는 시간	51.3	46.0	59.7
운전 시간	6.4	9.9	6.3
밖에서 보내는 시간	42.3	44.1	34.0

전체 사용자가 모두 같은 충전 전략을 선택했을 경우 충전 전략 간에 비용 차이는 Table 3.11와 같다. 통제되지 않은 충전 전략으로 다른 충전 전략과의 비교에 대한 기준점이 되는 *CAR* 전략은 다른 두 전략과 비교했을 때 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이에 비해 *CWS*와 *CAS*는 큰 차이가 나지 않고 특히 봄과 가을에는 차이가 3.8%에 불과하기 때문에 전기요금 정책에 따라서 선택이 바뀔 가능성이 높다.

Table 3.11: 전략 간 비용 차이

전략	*CAN* - *CAR*	*CWS* - *CAR*	*CWS* - *CAS*
여름	-34.2%	-48.4%	-21.5%
봄, 가을	-6.7%	-10.2%	-3.8%
겨울	-21.2%	-35.9%	-18.6%

세가지 충전 전략 중 *CAR*은 집에 돌아온 즉시 충전기에 연결하여 충전을 시작하는 전략이다. 이는 충전을 자동으로 조절 할 수 있는 장치가 없는 경우나 아무런 통제를 받지 않는 충전 전략으로 현재 대부분의 경우에 이루어지고 있는 충전이기 때문에 이를 기준으로 최적 충전 전략과의 차이를 알아본다. Figure 3.9은 모든 사용자가 통제되지 않은 전략인 *CAR*을 선택하는 대신 최적의 충전 전략을 선택했을 경우 각 계절에 따라 총 사용자의 하루 전기 요금이 얼마나 절감되는지 보여준다. 구체적인 수치로 보면 여름에는 49.93%, 겨울에는 37.07%, 봄과 가을에는 13.09% 절약이 된다. 이를 1년 단위로 살펴보면 34.83%의 요금 절약이 이뤄지는 것을 알 수 있다. 여름과 겨울의 최적 충전 전략 선택에 따른 전기 요금의 차이는 봄과 가을보다 크다. 이는 전체 적인 전력 수요가 봄과 가을보다 여름과 겨울에 더 높기 때문에 한국 전력 공사는 여름과 겨울 피크 시간대의 전기 가격을 높이 책정을 하기 때문이다. 따라서 전기자동차 보급에 따른 전기 요금의 증가와 피크 수요의 증가는 최적 충전 전략을 통해 효과를 볼 수 있다.

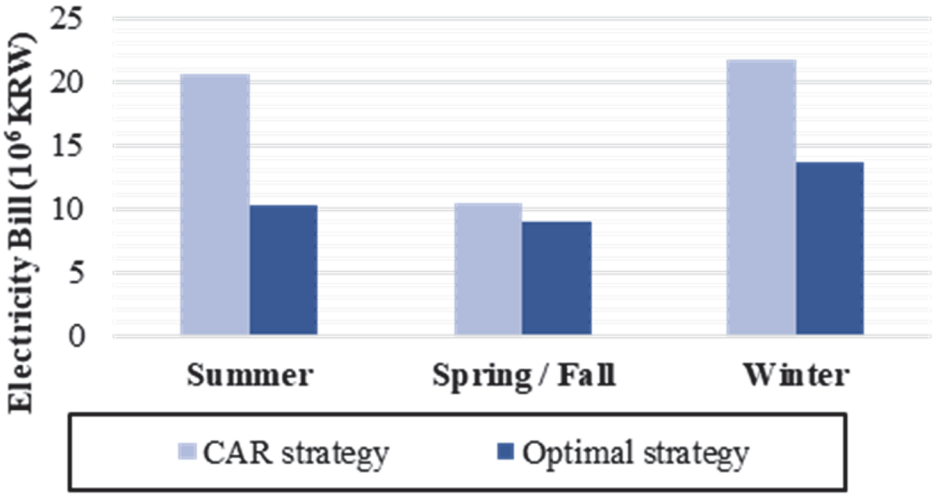


Figure 3.9: 계절별 충전 전략에 따른 전체 사용자 전기 요금

3.3.2.3 총 전력 소비

Figure 3.10는 전체 사용자의 하루 동안의 총 전력 소비량을 시간대별로 보여준다. 이는 $\sum_{m=1}^{N_m}(D^t_{Appliance,m} + D^t_{EV,\omega^*_m,m})$ 와 같이 계산이 된다. 전기자동차 도입으로 인해 가정에서의 전력 소비는 전체적으로 37% 증가하였다. 가전제품들이 대부분 아침이나 저녁에 사용이 되기 때문에 만약 사용자가 통제되지 않은 CAR 전략을 사용했을 경우 많은 사용자가 저녁때 충전을 하기 때문에 전력 시스템의 피크 부하에 큰 영향을 미치게 된다.

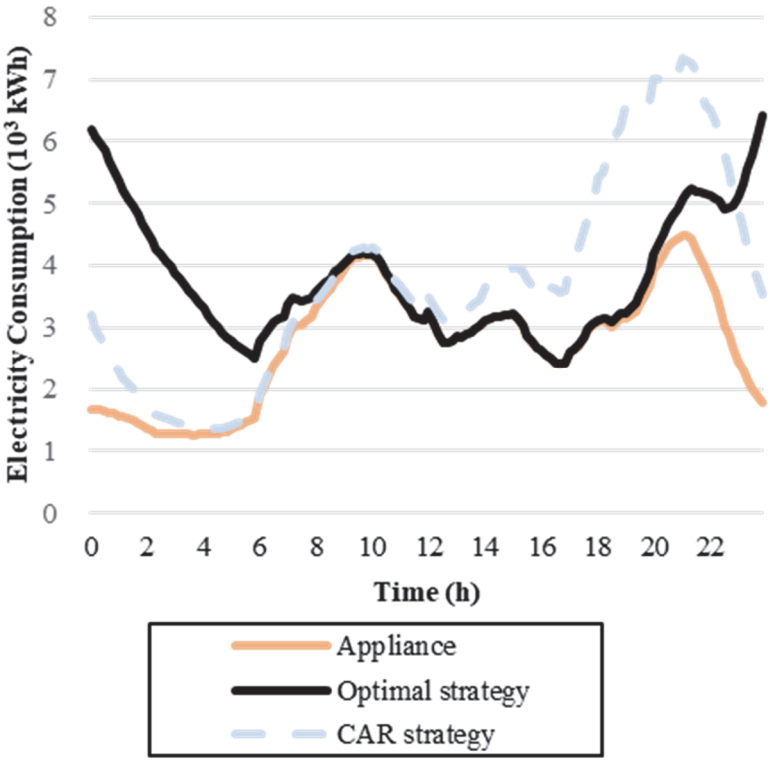


Figure 3.10: 총 전력 소비

Table 3.12은 전기자동차 충전이 있을 경우와 없을 경우에 대해 PAR를 보여준다. 전기자동차가 없을 때 PAR은 1.63이고 사용자가 최적 충전 전략을 선택했을 경우 4.3%가 증가한 1.70이 되는 것을 볼 수 있다. 하지만 만약 모든 사용자가 통제되지 않은 *CAR*전략을 사용했을 경우 PAR은 1.95로 약 19.6%로 증가하게 됨을 알 수 있다. 따라서 최적 충전 전략을 선택하는 것은 전기자동차 충전 수요가 국가 전력망에 미치는 영향을 고려해볼 때 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

Table 3.12: Peak to average ratio

전략	PAR
Appliances only	1.63
Optimal strategy	1.70
CAR strategy	1.95

3.3.3 민감도 분석

전기자동차가 사회 전반적으로 영향을 미치는 것은 결국 전기자동차의 보급률과 관련이 클 것이다. 따라서 전기자동차 보급률과 그에 따른 전력시스템에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 Table 3.13와 같이 보급률에 따른 PAR변화를 알아보고 이를 Figure 3.11과 같이 나타냈다. 10%만이 보급이 된다고 하더라도 전체 전략량은 3.67% 증가하지만 충전이 통제되지 않는 경우에는 PAR이 증가하는 것을 알 수 있다. 만약 전기자동차가 70%보급이 된 경우 전체 전기 사용량은 21.4% 증가하는데 *CAR*전략을 택할 경우 PAR가 1.63에서 1.87로 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 최적 충전 전략을 택할 경우 PAR은 1.45에 불과하다. 보급률이 늘어날수록 전력 소비량은 당연히 증가를 하고 전력시스템에 과부하를 가져올 수 있다. 하지만 모든 보급률에 대해 전기자동차의 충전이 통제되지 않았을 경우 보다 최적 충전 전략을 택했을 경우에는 PAR가 낮아지며 전력시스템의 과부하 문제에 도움이 되는 것을 알 수 있다.

Table 3.13: 확산 정도에 따른 전력 시스템 영향

전기자동차 비율	PAR (Appliance)	PAR (CAR)	PAR (Optimal)	전체 전력량 증가
10%	1.63	1.67	1.59	3.67%
25%		1.73	1.55	8.86%
40%		1.78	1.50	13.46%
55%		1.83	1.47	17.62%
70%		1.87	1.45	21.40%
85%		1.91	1.58	24.84%
100%		1.95	1.70	28.00%

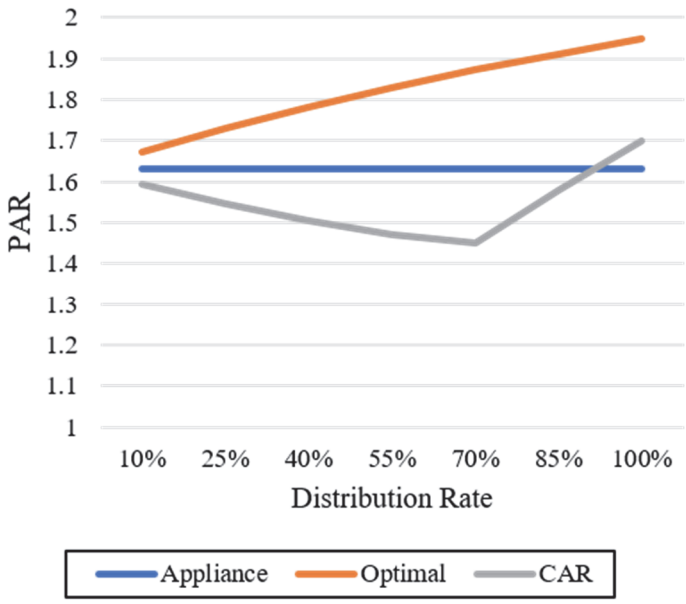


Figure 3.11: 확산에 따른 PAR

3.4 소결

제3장에서는 한국에서 실시한 설문 조사의 행동 패턴 데이터를 바탕으로 각 사용자의 가전제품의 전력 소비량을 도출하였다. 사용자마다 고유의 행동 패턴이 있기 때문에 시간별 전력 소비량은 각각 다르다. 그럼에도 대부분의 한국 사용자은 아침에 출근을 하고 저녁에 집으로 돌아가는 생활 패턴을 가지고 있기 때문에 낮에는 가전제품을 적게 사용하고, 출근 전 시간과 퇴근 후 잠자리에 들기 전 저녁에는 가정에서 많은 활동을 하고 많은 가전제품을 사용하기 때문에 많은 전기를 사용하는 것을 볼 수 있다.

또한 행동 데이터를 분석하여 전기자동차를 이용한 이동 시간을 계산하고 이를 바탕으로 각 사용자의 전기자동차 충전 수요를 도출하였다. 이를 통해 전기자동차 충전이 전력 시스템에 미치는 영향을 살펴보았다. 전기자동차가 널리 보급이 된다면 전체 전력 소비량은 물론 PAR가 모두 증가한다. 특히 통제되지 않은 충전 전략인 *CAR* 충전 전략은 집에 돌아오자 마자 충전을 시작한다. 이 때문에 한국 사용자는 대부분 비슷한 시간에 집으로 돌아오고 그 시간은 대부분의 사용자가 많은 양의 전기를 소비하는 시간이며 전기 가격이 비싼 시간이다. 이것은 사용자의 높은 전기 요금과 높은 전력 피크 수요를 유발한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 행동 패턴이 각기 다른 각 사용자 별로 다양한 충전 전략 간의 전기 요금을 비교하여 자신의 요금을 최소화하는 최적 충전 전략을 도출했다. 각 사용자의 고유의 행동 패턴은 모든 사용자가 각기 다른 시간대 별 가전제품 사용, 전기자동차 충전 수요, 집에서 전기자동차 충전이 가능한 시간을 가지고 있다는 것을 의미한다. 따라서 각 사용자의 최적 충전 전략은 행동 패턴에 따라 달라지게 된다. 계절마다 전기 요금 정책이 다르기 때문에 계절에 따라서 각

개인의 최적 충전 전략은 다를 수 있고 그 영향이 다르지만 모든 사용자가 최적 충전 전략을 택했을 경우 전체 사용자의 요금은 통제되지 않은 충전이 이루어질 때보다 작다. 또한 전력의 피크 수요를 낮추기 때문에 PAR가 낮아져서 국가 전력망에 도움이 된다.

제 4 장 전기자동차 최적 충전 스케줄링과 Vehicle-to-Grid 기술의 경제적 가치 평가: 게임 이론적 접근

4.1 서론

전기자동차의 확산은 이루어질 것이고 이러한 전기자동차의 확산이 전력시스템에 영향을 미치는 영향은 제3장에서 알아보았다. 제3장에서 다룬 최적 충전 전략 도출은 전기 요금 정책이 정해져 있는 경우에 대해서 다루었다.

전기자동차의 증가를 비롯하여 다양한 기술발전으로 인한 생산 공장 증가와 전자기기 사용의 증가는 전기에 대한 수요를 증가시켰다. 또한 과거와는 다르게 신재생에너지가 전기 생산에 차지하는 비중의 증가로 다양한 전력원에서 전기를 생산하게 되었다. 이러한 전력망에서의 이슈들을 해결하기 위한 방안 중 하나가 스마트 그리드이다.

이러한 스마트 그리드가 효과적으로 운영이 되기 위한 중요한 요소는 에너지 저장 장치이다. 에너지 저장 장치가 스마트 그리드에 적용되면 더욱 큰 사회적 경제적 효과를 가지고 온다. 스마트 그리드 상의 소비자와 공급자가 서로 상호작용을 할 때 에너지 저장 장치의 도입은 전체 에너지 사용량이 적고 가격이 낮을 때 에너지를 에너지 저장 장치에 저장하고 이를 피크 시간대에 사용하는 방식으로 에너지 효율성을 높일 수 있기 때문이다.

하지만 에너지 저장 장치는 초기 설치비용 및 유지비용이 존재하기 때문에 이를 가지고 있는 가정의 수는 한정적이고 실질적인 이득을 보기까지는 긴 시간이 걸린다. 반면에 전기자동차의 배터리 역시 스마트 그리드 상에서 에너지 저장 장치 역할이 가능하다. 이렇게 배터리를 포함한 친환경 자동차가 전력망에 연결되어 에너지 저장 장치 역할을 하는 시스템을 V2G라 하며 사용자가 전기자동차를 에너지 저장 장치로 사용하였을 경우 에너지 저장 장치를 사용했을 때와 마찬가지로 경제적 사회적 효과를 볼 수 있다.

이러한 에너지 저장 장치가 포함된 스마트 그리드에서 에너지 저장 장치의 효율을 최대화하기 위해서는 최적 운영 전략이 필요하다. 더욱이 집에 설치되어 언제든지 이용이 가능한 기존의 에너지 저장 장치를 포함한 스마트 그리드가 아닌 차량 운행으로 인한 제약이 생기는 V2G 상황에서는 이러한 최적 충전 전략을 찾는 것이 좀 더 복잡하다.

스마트 그리드와 V2G 기술은 보통 하나 이상의 전력 공급자들과 여러 전력 소비자들로 이루어진 시스템이고 전체 사용자의 전기 사용량에 따라 전기 가격이 달라지기 때문에 각자의 에너지 소비 스케줄은 서로에게 영향을 미친다. 이러한 상황에서 각자 최적의 에너지 소비 스케줄링 문제는 게임 모형으로 표현이 가능하다.

이러한 최적 충전 전략 선택 문제는 단순히 한 사용자가 자신의 최적 충전 전략을 택하면 되는 상황보다 개인의 충전 전략이 서로의 전기 요금에 영향을 미치는 상황에서 복잡하고 중요하다. 이와 같이 스마트 그리드 상에 전기자동차가 연결되어 사용자들에게 전력 공급을 해주는 전력 공급자와 사용자들이 망으로 연결된 상황에서 전기자동차의 최적 충전 전략 도출을 하는 것은 중요하고 전기자동차가 단순한 이동 수단이 아닌 에너지 저장 장치로 사용되는 V2G 시스템에서는 특히 중요하고 복잡한

문제가 된다.

다양한 이유로 전기자동차의 확산은 이루어 질 것이다. 이러한 전기자동차의 증가는 전력 시스템의 과부하를 가져오고, 소비 전기 생산비용 증가와 전기 사용의 증가는 사용자의 전기 요금의 증가를 가져온다. 스마트 그리드 시스템 상에서 전기자동차의 충전이 일어난다면 이러한 전기자동차 충전으로 발생하는 문제를 해결하기 위해서는 다른 사용자와 자신의 전기 사용량을 고려한 최적 충전 전략 도출을 위한 모델이 필요하다. 또한 전기자동차가 에너지 저장 장치의 역할을 하는 V2G 기술은 이러한 문제 해결에 더욱 도움이 되고 V2G 상황에서의 최적 충방전 스케줄링은 더 중요하게 강조된다.

이 논문의 목적은 한국의 실제 행동데이터를 기반으로 사용자의 충전 전략이 서로의 요금에 영향을 미치는 스마트 그리드 상에서 전기자동차의 최적 충전 스케줄링의 가치를 평가하고 여기에 V2G 기술의 가치를 평가하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 스마트 그리드 상에서 최적 충전 스케줄링을 도출하는 모형을 개발하고 이를 통해 나온 최적 충전 스케줄링을 최적 충전 스케줄링을 하지 않았을 경우와 비교해서 최적 충전 스케줄링의 경제적 가치를 평가한다. 또한 V2G 기술이 도입되었을 경우에 대한 모델을 개발하고 이를 통해 최적 충방전 스케줄링을 도출하고 이를 단순한 최적 충전 스케줄링 상황과 비교해 경제성을 평가한다. 이를 위해 전체 사용자의 시간별 전력사용량이 개인 전기 요금에 영향을 미치는 게임 모델을 개발하고 각자의 최적 충전 전략인 내쉬 균형을 도출하는 알고리즘을 개발하고 이를 통해 실제 행동 데이터에 적용하여 최적 충전 전략과 최적 충방전 전략 도출을 통해 경제적 효과에 대해 알아본다.

4.1.1 구성

제4장의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 4.2에서는 이러한 문제를 풀기 위한 시스템 모델, 게임 모델을, 알고리즘, 경제성 평가 모델을 정의한다. 4.3에서는 실제 데이터를 기반으로 시뮬레이션을 수행한다. 4.4에서는 시뮬레이션 결과에 대한 분석이 이뤄지고 4.5에서는 소결론을 제시한다.

4.2 모델

4.2.1 시스템 모델

본 연구에서 네트워크는 소비자가 서로 연결 정보를 전달하는 스마트 그리드 모형을 가정한다. 이러한 스마트 그리드는 하나의 전력 공급자가 여러 소비자가 연결된 소비자 네트워크에 요금 정책을 알려주고 전기를 공급해준다. 전력 공급자는 시간 별 전체 전력 소비량에 영향을 받는 실시간 가격 정책을 가지고 있다. 각각의 소비자는 이러한 요금 정책을 바탕으로 전기자동차의 가정용 충전 내지 충방전 스케줄을 결정한다. 이렇게 각자 결정한 전기자동차 가정용 에너지 소비 스케줄에 따라 전체 소비자들의 시간대 별 전기 사용량이 전력 공급자에게 전달이 되고 이렇게 전달된 정보를 바탕으로 공급자는 가격을 결정하고 이에 따라 소비자는 다시 에너지 소비 스케줄을 변경하는 과정을 반복적으로 거치며 모든 사용자가 더 이상 에너지 소비 스케줄을 변경하지 않는 최적해에 도달한다.

이를 위해 각 가정은 에너지 소비 스케줄러(ECS: Energy Consumption Scheduler)를 포함한 스마트 미터와 전기자동차 충전 장치를 소유하고 스마트 그리드 네트워크 상에서 연결이 되어 있다. 여기서는 본 논문의 제3장에서 다뤄졌던 시스템과는 다르게 각 가정은 에너지 소비 스케줄러를 포함하고 있기 때문에 자동차가 스마트 그리드 네트워크에 연결되어 있다면 하루에도 여러 번 충전이 가능한 상황이다. 이러한 상황에서 각 가정은 자신의 전기 사용량 이외에도 나머지 사용자들의 시간대별 전기사용량을 알 수가 있다고 가정한다. V2G 기술이 도입될 경우 단순한 충전만이 이루어지는 것이 아닌 충방전을 가능하게 하는 인프라가 구축되어야 하고 이는 소비자의 몫이다. 이러한 상황을 그림으로 나타내면 Figure 4.1와 같다.

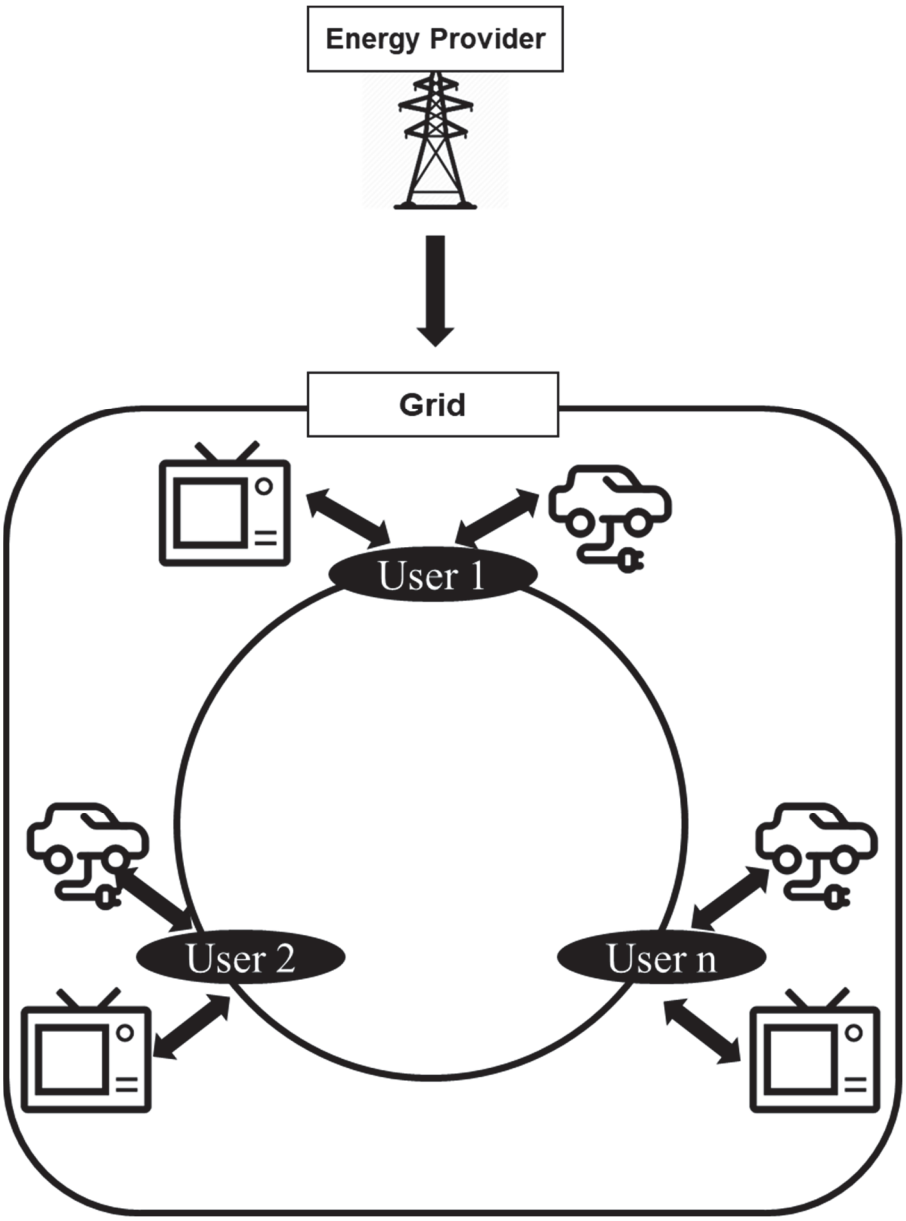


Figure 4.1: 시스템 구조

실제 V2G 기술은 전력을 방전할 때 전력망의 다른 사용자에게 전기를 팔거나 전력공급자에게 다시 팔 수 있는 기술이다. 이를 위해서는 전력 시장이 형성되어야 하고 관련 정책이 뒷받침되어야 한다. 하지만 현재 한국은 아직 그런 여건이 되지 못하기 때문에 본 논문의 제4장과 제5장에서는 스마트 그리드에 참여하는 사용자는 자신의 주차공간이 있고 그곳에 에너지 컨트롤러와 V2G 인프라를 설치할 수 있는 사용자로 가정한다. 또한 V2G 기술은 전력망에 방전되는 것이 아니라 각 사용자의 집으로 방전되는 것만 가능하고 각 사용자는 전기자동차 이외의 에너지 저장 장치는 가지고 있지 않다고 가정한다.

일반적인 스마트 그리드 상에서의 전기자동차는 운송 수단의 역할만을 하기 때문에 충전만이 필요하고 가능하지만 V2G 기술이 도입된 상황에서는 전기자동차는 충전뿐만 아니라 다른 가전제품의 전기 사용을 위해 방전도 가능하다. 이를 표현하기 위한 구체적인 모델은 다음과 같다. 사용자의 가전제품 사용과 전기자동차 이용은 제3장에서 소개한 모델을 기반으로 한다.

스마트 그리드 상에서 전체 사용자의 수는 N 명이고 이에 대한 집합은 다음과 같다:

$$n \in \mathbf{N} = \{1, 2, 3, ..., N\} \tag{4.1}$$

하루는 다음과 같은 총 T 시간으로 나누어 진다.

$$t \in \mathbf{T} = \{1, 2, 3, ..., T\} \tag{4.2}$$

각 사용자 n 는 t 시간에 활동 집합 $\mathbf{A} = \{1, ..., A\}$ 에 속하는 한가지 활동 $a \in \mathbf{A}$ 를

하고 그에 따라 사용되는 전기 a_n^t 가 정해진다. 사용자 n 의 t 시간에서 전기자동차 운행 상태는 다음과 같이 표현이 된다:

$$r_n^t = \begin{cases} 1 & \text{if user is driving;} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{4.3}$$

전기자동차는 운행이 되는 t 시간에 시간 단위만큼 최대로 운전했을 때 소비하는 전기의 양을 V 라고 하면 사용자 n 이 t 시간에 EV운행을 통해 소비되는 전기 d_n^t 는 다음과 같다:

$$\begin{aligned} 0 \le d_n^t \le V \quad & \text{if } r_n^t = 1; \\ d_n^t = 0 \quad & \text{otherwise.} \end{aligned} \tag{4.4}$$

따라서 사용자 n 의 하루 전기자동차 충전 수요 D_n 은 다음과 같이 계산이 가능하다:

$$D_n = \sum_{t=1}^{T} d_n^t \tag{4.5}$$

사용자 n 의 t 시간에서의 위치 l_n^t 는 다음과 같다:

$$l_n^t = \begin{cases} 1 & \text{if user at home;} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{4.6}$$

사용자 n 의 t 시간에 가정에서 이루어지는 전기자동차 충방전량이 x_n^t 이고

전기자동차는 단위 시간당 최대 M 만큼 충전이 가능하다고 가정하자. 이러한 전기자동차의 충방전량의 범위는 V2G 기술의 도입 여부에 따라 달라질 것이다. V2G 기술이 아닌 단순 충전만이 가능한 상황에서는 다음과 같다:

$$0 \le x_n^t \le M \tag{4.7}$$

전기자동차 충방전량 x_n^t 이 양수라는 것은 전기자동차의 배터리에 전기를 충전한다는 것이다. 반대로 음수가 된다는 것은 전기자동차의 배터리에서 전기를 방전한다는 것이다. 본 논문에서 가정한 V2G 기술은 전력망으로 전기를 방전하는 것이 아니라 자신의 가전제품 사용에만 이용할 수 있다고 가정하였기 때문에 V2G 상황에서 가전제품은 전력 공급자가 아닌 전기자동차 배터리에서 전력을 공급받을 수 있다. 따라서 충방전이 가능한 상황에서는 전기자동차는 최대 t 시간에 쓰는 다른 전자기기의 전기 사용량만큼을 방전할 수 있기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$-a_n^t \le x_n^t \le M \tag{4.8}$$

따라서 사용자 n 의 t 시간에 전기자동차 배터리의 충전 상태를 s_n^t 라고 하면 전기자동차 배터리의 충전 상태에 영향을 주는 것은 전기자동차 운행과 충방전이다. 전기자동차가 운행을 하거나 방전을 할 경우 전기자동차의 배터리는 줄어들게 되고 충전을 하게 될 경우 배터리에 저장된 전기는 늘어나게 된다:

$$s_n^t = s_n^{t-1} - d_n^t + x_n^t \tag{4.9}$$

따라서 사용자 n 의 하루 전체 충전량은 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$X_n = \sum_{t=1}^{T} \mathbf{x}_n, \text{ where } \mathbf{x}_n = \left\{ x_n^t \right\} = \left\{ x_n^1, x_n^2, \cdots, x_n^T \right\} \tag{4.10}$$

따라서 사용자 n 의 t 시간에서의 전기사용량 e_n^t 는 전자 기기 사용량과 전기자동차 충방전량을 더한 값이고 다음과 같다:

$$e_n^t = a_n^t + x_n^t \tag{4.11}$$

따라서 시간 t 에서 전체 사용자의 전기 사용량 E^t 은 다음과 같이 표현 할 수 있다:

$$E^t = \sum_{n=1}^{N} e_n^t = \sum_{n=1}^{N} (a_n^t + x_n^t) \tag{4.12}$$

본 연구에서 전기 공급자가 책정하는 전기 가격은 시간대에 따라 변하는 실시간 요금제 방식이다. 그리고 이러한 요금은 해당 시간대의 전력 수요를 충족시킬 수 있는 공급량을 생산하는 데 소요되는 비용에 근거해서 결정된다. 전기 가격은 전기 사용량이 증가할수록 높은 가격이 책정되고 한국을 비롯한 많은 국가에서 사용되는 누진 요금제를 반영하여 가격이 상승하는 비율도 전기 사용량이 많아질수록 커진다. 따라서 전기 생산에 필요한 비용만큼을 사용자 전체에게 부과하고 시간당 전체 전기 사용량이 많아질수록 한계 비용 및 평균 비용이 증가한다. 이러한 전력 공급자의 비용 함수 $C^t(E^t)$ 는 다음과 같은 성질을 따른다:

$$
\begin{aligned}
&C^t\left(E^t\right) \le C^t\left(E^t+\alpha\right),\ \text{if } \alpha>0 \\
&C^t\left(\theta E^t+\left(1-\theta\right)E^{t*}\right) < \theta C^t\left(E^t\right)+\left(1-\theta\right)C^t\left(E^{t*}\right),\ \text{if } 0<\theta<1 \text{ and } E^t \ne E^{t*}
\end{aligned}
\tag{4.13}
$$

이러한 생산 비용 함수는 증가 함수이면서 강볼록 함수의 성질을 만족하게 된다. 이것은 한계 비용과 평균 비용이 총 전략 사용량이 증가함에 따라 증가하기 위한 조건이다.

4.2.2 게임 모델

본 연구에서 소비자들이 자신의 전기자동차 충방전 스케줄을 결정하게 되면 에너지 공급자는 이러한 에너지 수요를 충족시키기 위한 공급에 필요한 전력량에 해당하는 비용을 소비자들에게 부과한다.

사용자 n 의 충전 스케줄이 $\mathbf{x}_n$ 일 때 다른 사용자들의 충전 스케줄을 $\mathbf{x}_{-n}$ 이라고 하자. 사용자 n 의 전기 요금은 전기자동차 충전 스케줄에 따른 함수이다. 전력 공급자가 이윤을 남기지 않고 전력 생산 비용을 소비자에게 전기 가격으로 부과한다고 가정하고 각 사용자는 총 전기 생산 비용 중 전체 전기 소비량 중 자신이 소비한 비율 만큼을 부담한다고 가정한다. 따라서 t 시간에서 전체 전기 생산 비용은 $C^t\left(E^t\right)$ 이고 사용자 n 이 소비하는 전기는 e_n^t 이기 때문에 부담하는 요금 b_n^t 는 다음과 같다:

$$
b_n^t = C^t\left(E^t\right) \times \frac{e_n^t}{E^t} \tag{4.14}
$$

따라서 사용자 n 의 하루 전기 요금 B_n 은 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$B_n = \sum_{t=1}^{T} b_n^t \tag{4.15}$$

합리적 소비자는 자신의 전기 요금을 최소화하는 충전 스케줄을 선택할 것이다. t 시간의 전체 에너지 수요는 $\mathbf{x}_n$ 과 $\mathbf{x}_{-n}$ 에 대한 함수이기 때문에 목적함수는 다음과 같이 표현이 가능하다:

$$B_n = B_n(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{-n}) \tag{4.16}$$

따라서 사용자 n 의 목적식은 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\begin{aligned} &\min_{\mathbf{x}_n} B_n\left(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{-n}\right) = \sum_t b_n^t\left(e_n^t, e_{-n}^t\right) \\ &= \sum_t C^t\left(E^t\right) \times \frac{e_n^t}{E^t} = \sum_h C^h\left(e_n^t + e_{-n}^t\right) \frac{e_n^t}{e_n^t + e_{-n}^t} \\ &= \sum_h C^h\left(a_n^t + x_n^t + e_{-n}^t\right) \frac{a_n^t + x_n^t}{a_n^t + x_n^t + e_{-n}^t} \end{aligned} \tag{4.17}$$

그리고 제약식은 전기자동차가 충전만 가능한 상황에서 최적 충전 전략을 찾는 경우와 충방전이 가능한 V2G상황에서 최적 충방전 전략을 찾는 경우에 따라 각각 다르다. 전기자동차가 충전만 가능한 상황에서는 하루 전체 충전량은 충전 수요보다 크거나 같아야 한다. 또한 충전은 전기자동차가 집에 있을 때만 가능하고 시간별 충전량은 최대 충전량을 넘을 수 없다. 이를 제약식으로 표현하면 다음과 같다:

$$
\begin{aligned}
&D_n \le \sum_{t=1}^{T} x_n^t \\
&0 \le x_n^t \le M \text{ if } l_n^t = 1 \text{ else } x_n^t = 0
\end{aligned}
\tag{4.18}
$$

전기자동차가 충반전이 가능한 V2G 상황에서 역시 하루 전체 충방전량의 합은 충전 수요보다 크거나 같아야 한다. 또한 충방전은 전기자동차가 집에 있을 때만 가능하고 시간별 충전량은 최대 충전량을 넘을 수 없고 방전량은 그 시간에 사용하는 전자 제품 전기 사용량을 넘을 수 없다. 또한 배터리 용량을 넘어서는 충전이나 배터리 상태가 0보다 작아지는 경우는 존재하면 안된다. 이를 제약식으로 표현하면 다음과 같다:

$$
\begin{aligned}
&D_n \le \sum_{t=1}^{T} x_n^t \\
&-a_n^t \le x_n^t \le M \text{ if } l_n^t = 1 \text{ else } x_n^t = 0 \\
&0 < \forall s_n^t \le K_n
\end{aligned}
\tag{4.19}
$$

최적화 목적함수의 모형을 살펴보면, 목적함수의 값이 전기자동차 충전 스케줄에 대한 본인의 의사결정에만 영향을 받는 것이 아니라 다른 소비자들의 의사결정에도 영향을 받는다. 따라서 이는 단순한 개인의 최적화 문제가 아닌 상대방의 선택에 영향을 받는 게임이론적 의사결정 문제 상황이다. 따라서 최적 충방전 스케줄링 문제를 풀기 위해 다음과 같은 게임 모형을 정의한다.

충방전 스케줄링 게임

참가자(Players): 전력망의 소비자, $n \in \mathbf{N}$

전략(Strategy): 전기자동차 충방전 스케줄, $\mathbf{x}_n = \{x_n^t\}$

보수(Payoff): 참가자 전기 요금의 음수값, $U_n = -B_n = -\sum_{t=1}^{T} b_n^t$

본 연구가 가정하고 있는 것과 같이 비용함수가 강볼록함수인 경우 최소화 문제(4.17)는 유일한 최적해를 가지고 있다. 또한 볼록 최적화(Convex optimization) 문제이기 때문에 적절한 볼록 계획법(Convex programming) 기법을 선택한다면 그 해를 찾을 수 있다.

이러한 형태의 게임은 반드시 균형해가 존재한다(Fudenberg and Tirole 1991). 즉 모든 소비자들의 최적 충전 스케줄 벡터집합이 내쉬 균형이 되기 위한 필요충분조건은 다음과 같다:

정리 4.1: 만약 모든 보수 함수가 강볼록함수이고 증가함수라면 충전 스케줄링 게임은 항상 유일한 내쉬 균형이 존재한다.

증명: 게임의 보수 함수가 강볼록함수이고 증가함수인 함수에 관한 함수이기 때문에 보수 함수 역시 강볼록함수이고 증가함수이다. 본 연구가 다루는 게임에서는 보수 함수는 비용 함수에 관한 함수이고 비용 함수는 강볼록함수인 증가함수이기 때문에 보수 함수 역시 그러한 성질을 만족한다.

정리 4.2: 유일한 내쉬 균형은 모든 소비자들에게 최적 솔루션이다

증명: 이러한 상황에서 $\left(\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*, \cdots, \mathbf{x}_N^*\right)$ 이 내쉬 균형일때 내쉬 균형 정의에 의해 $\overline{b_n}\left(\mathbf{x}_n^*, \mathbf{x}_{-n}^*\right) \le \overline{b_n}\left(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{-n}^*\right)$ 은 모든 전략에 대해 성립한다. 따라서 $\mathbf{x}_n^*$ 은 모든 플레이어에 대해 최적 해이다.

4.2.3 최적화 알고리즘

이러한 소비자간의 게임의 최적해를 도출하기 위해서 다음과 같은 알고리즘을 사용한다.

Algorithm 1 Iterative Algorithm for Optimal Solution

Initialize x_n, $\forall n \in \mathbf{N}$

While no user update their schedule **do**

  For every user **do**

    Solve local optimization problem

    If user changes schedule **Then**

      Update x_n and broadcast to other user

    End if

  End for

End while

최적해 도출 알고리즘은 각 개인이 최적화를 반복하는 형태이다. 초기화된 스케줄은 통제되지 않은 충전이 이루어졌을 경우의 에너지 소비 스케줄이다. 소비자는 자신의 비용을 최소화하는 최적화 문제를 풀어 최적 충방전 스케줄을 도출하고 이것이 이전 스케줄과 다를 경우 바뀐 스케줄을 다른 소비자에게 전달한다. 모든 소비자가

이러한 과정을 차례대로 거치고 나서 스케줄이 갱신된 소비자가 있다면 전체 소비자에 대해 반복이 다시 이루어진다. 각 반복 과정에서 충전 전략을 선택하는 순서는 매 반복 과정마다 무작위로 달라진다. 모든 사용자가 자신의 충전 스케줄을 바꾸지 않는 경우 최적해에 도달하였기 때문에 반복과 알고리즘이 종료되고 이때의 모두의 충전 스케줄이 내쉬 균형점이다.

4.2.4 경제적 효과

전기자동차의 최적 충방전 스케줄은 제시된 게임 모델과 알고리즘으로 도출이 가능하다는 것을 확인했다. 이를 바탕으로 최적 충전 스케줄링 도출 알고리즘에 대한 경제적 효과와 V2G 기술 도입에 대한 경제적 효과를 도출할 수 있다. 사용자 n 이 스마트 그리드 상에서 집에 돌아온 즉시 충전을 하는 통제되지 않은 충전이 이루어졌을 때의 전기 요금을 B_n^u 이라 하고, 스마트 그리드 상에서 최적 충전 스케줄에 따라 충전이 이루어졌을 경우의 전기 요금을 B_n^* , V2G 기술이 도입되고 이때의 최적 충방전 스케줄에 따라 충방전이 이루어졌을 경우의 전기 요금을 B_n^{**} 이라고 하자.

그렇다면 최적 스케줄링의 경제적 가치 $R_{n,c}^y$ 와 V2G 기술의 경제적 가치 $R_{n,v}^y$ 는 다음과 같다:

$$\begin{aligned} R_{n,c}^y &= B_n^* - B_n^u \\ R_{n,v}^y &= B_n^{**} - B_n^* \end{aligned} \tag{4.20}$$

여기서 y 의 의미는 최적 스케줄 도출을 통해 계산한 경제적 가치는 하루 단위의 단기적 경제 효과만을 고려하기 때문에 하루를 의미한다. 하지만 경제적 가치를

평가하기 위해서는 차량의 경제적 수명 기간 동안을 고려해야 하기 때문에 만약 할인율이 r, 전기자동차의 경제적 수명이 Y 라면 각각의 경제적 가치는 다음과 같은 현금 흐름 할인 기법을 통해 다음과 같이 계산 가능하다:

$$
\begin{aligned}
R_{n,c} &= \sum_{y=1}^{Y} \frac{R_{n,c}^{y}}{(1+r)^{y}} \\
R_{n,v} &= \sum_{y=1}^{Y} \frac{R_{n,v}^{y}}{(1+r)^{y}}
\end{aligned}
\tag{4.21}
$$

이렇게 계산된 최적 스케줄링 도출에 대한 경제적 이득과 V2G 기술의 경제적 이득은 다양한 경제적 의사 결정에 사용 가능하다.

4.3 시뮬레이션

본 시뮬레이션은 제3장에서 사용된 사용자의 실제 행동 패턴 데이터를 바탕으로 이루어진다. 행동데이터를 8개의 집에서의 활동과 2개의 이동 그리고 외출로 나눈 결과를 바탕으로 시간별 집에서의 행동과 가전제품에 대한 전기 수요를 도출한다. 이를 바탕으로 전력 수요의 변화와 요금의 변화를 알아본다.

제3장과 마찬가지로 시간은 10분 단위로 나누어져 있기 때문에 $T = 144$ 이고 전체 사용자 데이터 중 집에서 충전이 불가능 하거나 자동차를 소유하지 않은 사용자를 제외한 18,505명 중 무작위로 각기 다른 200명을 선택하여 200명으로 이루어진 스마트 그리드 시스템을 가정한다.

전력 공급자의 전력 생산 비용 함수는 피크 부하 시간, 중간 부하 시간, 낮은 부하 시간 이렇게 3가지 시간으로 나누어 계산하였다. 구체적인 시간은 Table 4.1과 같다.

Table 4.1: 시간대별 전력 부하

부하	시간
낮은 부하	23:00–09:00
중간 부하	09:00–10:00 12:00–13:00 17:00–23:00
피크 부하	10:00–12:00 13:00–17:00

위에서 가정한 증가함수인 강볼록함수 조건을 만족시키기 위해 전력 생산 비용 함수는 이차함수의 형태를 가진다고 가정한다. 각 시간별 비용 함수는 Table 4.2와 같다.

Table 4.2: 비용 함수

부하	비용 함수
낮은 부하	$C^t\left(E^t\right)=5(E^t)^2$
중간 부하	$C^t\left(E^t\right)=14(E^t)^2$
피크 부하	$C^t\left(E^t\right)=28(E^t)^2$

4.4 결과

4.4.1 전력 사용과 전기 요금 변화

시뮬레이션을 통해 최적 해를 찾은 200명중 대표적인 사용자 한 명의 전기 사용은 Figure 4.2와 같다. 충전이 통제되지 않는 경우 저녁 시간에 집에 돌아오자마자 충전을 하는 것을 알 수 있다. 이러한 충전은 전기 요금을 증가시킬 뿐만 아니라 전력망에도 영향을 줄 것이다. 최적 충전 전략을 도출하여 적용되면 다양한 시간대에 전기자동차 충전이 이루어지는 것을 볼 수 있다. V2G 상황에서는 야간에 전기자동차 운행에 필요한 전력 이외에 추가 전력을 충전하고 이를 낮 시간대에 다른 전자 기기 사용에 사용하여 일부 낮 시간대에는 가전제품을 사용함에도 전력 공급자로부터 전기를 공급받지 않는 것을 확인할 수 있다.

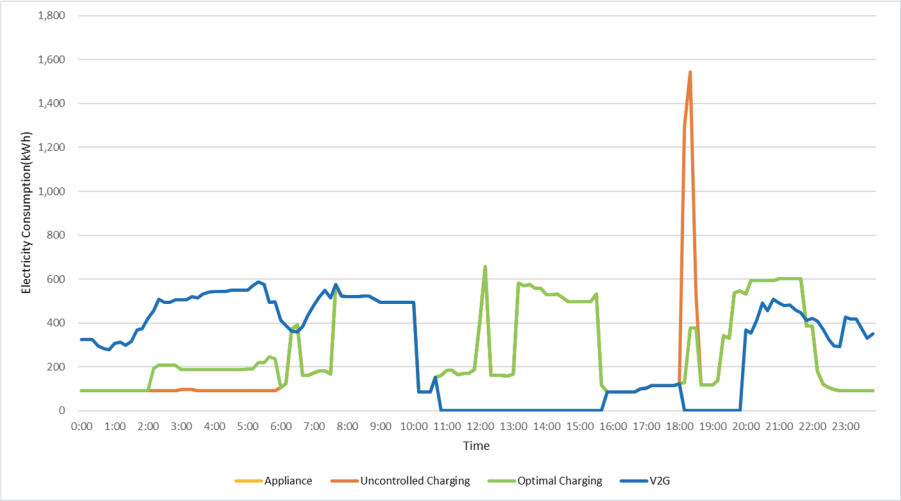


Figure 4.2: 시간별 전기 사용

예시로 든 사용자의 하루 전기 요금 변화는 Table 4.3와 같다. 전체 소비자의 에너지 소비를 고려한 최적 충전이 이루어졌을 경우 22%의 전기 요금 절약이 이루어지는 것을 알 수 있는데 V2G 상황에서는 최적 충전이 이루어졌을 때보다 51%의 요금이 추가로 줄어드는 것을 알 수 있다.

Table 4.3: 전기 요금과 변화량

상황	요금(원)	변화량
Uncontrolled Charging	5,847	
Optimal Charging	4,575	-22%
V2G	2,246	-51%

모든 소비자가 최적해를 도출했을 때 시간대별 전력 사용량의 합은 Figure 4.3 와 같다. 전자 기기의 사용은 밤에는 적고 낮, 특히 아침과 저녁에 많이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 상황에서 집에 돌아오자마자 충전을 하는 통제되지 않은 충전을 하면 저녁 시간에 전체 전력 수요가 많아 지는 것을 알 수 있다. 최적 충전이 이루어지게 되면 대부분의 충전은 가격이 낮고 전력 사용량이 적은 시간인 밤시간에 이루어지고 다른 시간에는 거의 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 V2G 기술이 도입된 상황에서 더 확실하게 나타난다. V2G 기술이 적용되는 상황에서는 낮 시간대의 전력 공급자로부터 받는 전기 양이 전자 기기 사용량보다 작은 것을 확인할 수 있는데, 이는 전기 가격이 낮은 부하 시간인 밤 시간에 최대한 많은 충전이 이루어지고 낮 시간에 이렇게 충전된 전기를 다른 전자 기기 사용에

이용하는 것을 알 수 있다. 피크 부하 역시 통제되지 않은 충전보다는 최적 충전 상황과 V2G 기술이 도입된 상황에서 더 낮은 것을 알 수 있다.

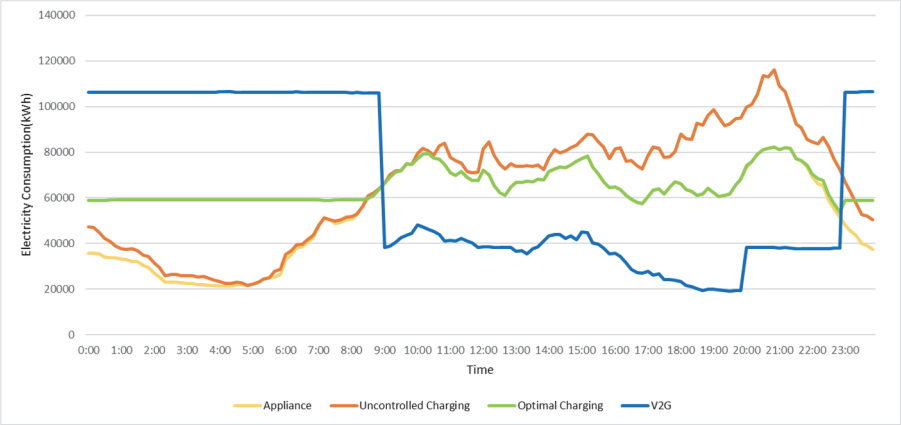


Figure 4.3: 전체 소비자 시간별 전기 사용

이러한 최적 충전 전략 도출을 통한 경제적 이득은 Table 4.4와 같다. 전기자동차의 충전이 통제되지 않고 집에 돌아온 즉시 충전되는 경우와 비교하였을 때 스마트 그리드 상에서 최적 충전 알고리즘을 통해 최적 충전이 이루어졌을 경우 전체 사용자의 하루 전기 요금은 375,071원 절약되는 것을 볼 수 있다. 이는 27%가 절약된 금액으로 이 것을 사용자 한 명의 평균 1년 금액으로 환산하면 684,505원이 절약되는 것이다.

이러한 최적 충전이 이루어진 경우와 비교해서 V2G 기술이 도입된 상황에서 최적 충방전이 이루어진 경우 단순히 스마트 그리드에서 최적 충전이 이루어졌을 때보다 43%가 절약되고 이는 하루에 435,633원이다. 이를 사용자 한 명의 평균 1년 절약 금액으로 환산하면 795,030원이다.

Table 4.4: 전체 사용자 전기 요금과 변화량

상황	요금(원)	변화량
Uncontrolled Charging	1,399,003	
Optimal Charging	1,023,931	-27%
V2G	588,299	-43%

각 사용자가 최적 충전 전략 도출로 전기 요금이 얼마나 줄어드는지에 대한 분포는 Figure 4.4와 같다. 분포를 살펴보면 15%에서 30% 구간에 많은 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 최적 충전 전략 알고리즘 도입으로 인해 각 사용자는 자신의 행동 패턴에 따라 다르지만 최대 약 50%, 최소 약 5% 요금이 줄어드는 효과를 갖는 것을 알 수 있다.

이러한 분포를 V2G 기술 도입으로 인한 효과에 대해 알아보면 Figure 4.5와 같다. 분포를 살펴보면 32%에서 57% 구간에 많은 사용자가 있는 것을 알 수 있다. V2G 도입으로 각 사용자는 자신의 행동 패턴에 따라 차이가 있지만 최대 약 62%, 최소 약 7% 요금이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 전체적으로 단순한 최적 충전 전략 도입에 따른 전기 요금 절약 효과보다 그에 더해 V2G로 인해 절약되는 효과가 큰 경향을 보임을 알 수 있다.

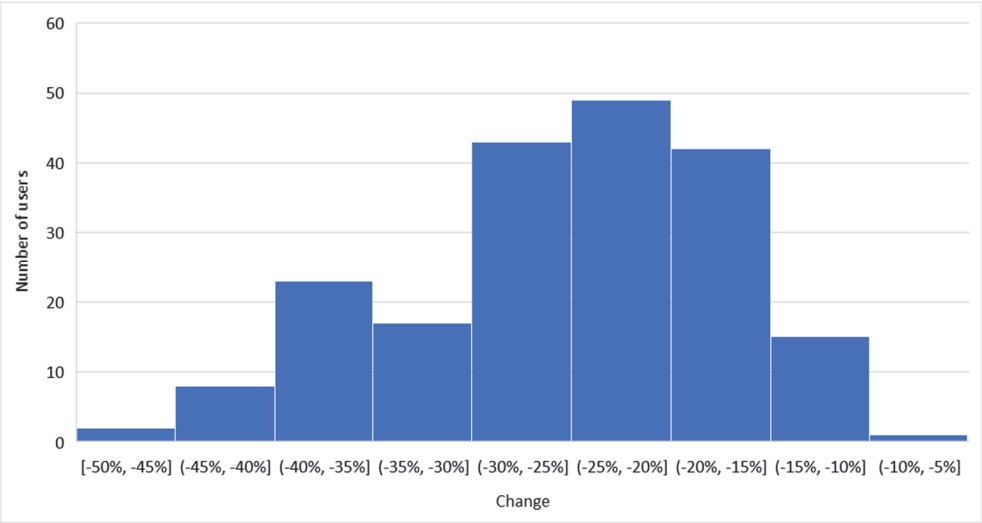


Figure 4.4: 최적 충전 전략으로 인한 요금 변화량 분포

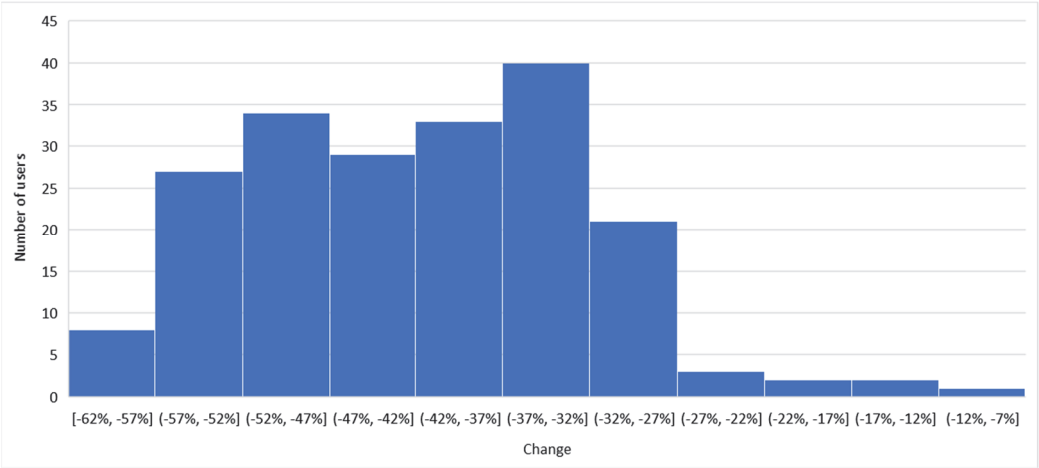
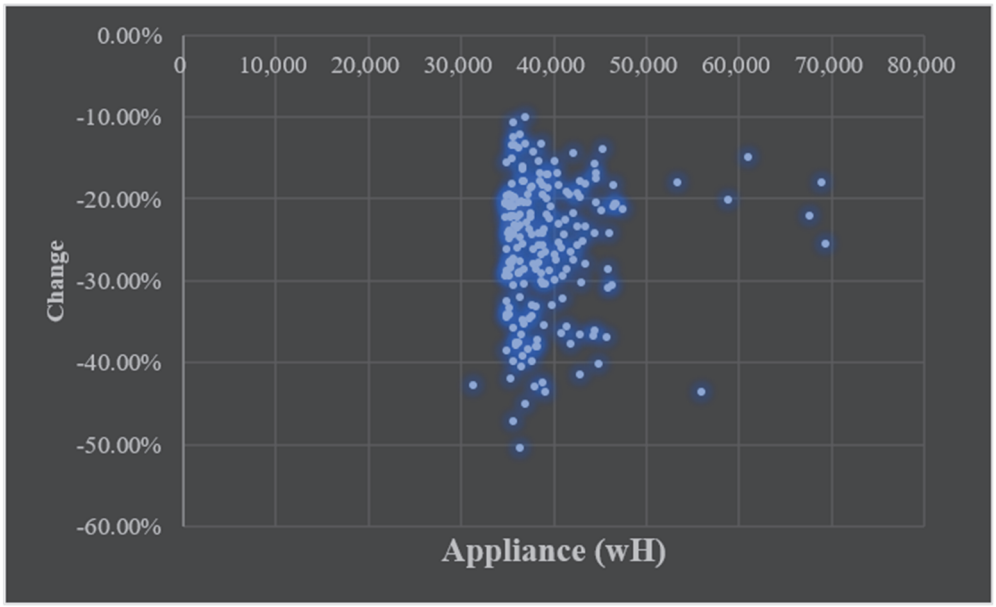


Figure 4.5: V2G 도입으로 인한 요금 변화량 분포

각 소비자가 스마트 그리드 상에서 최적 충전 전략에 따라 충전을 하였을 경우 충전이 통제되지 않았을 때에 비해 절약되는 비율을 전자 기기 사용량과 전기자동차

운행 거리와의 관계로 보여준 것이 Figure 4.6이다. 전자 기기 사용량과 최적 충전 전략의 효과 사이에는 상관성이 보이지 않지만 운행 거리와 최전 충전 전략으로 인한 효과 사이에는 상관성이 존재한다. 대체적으로 운행 거리가 클수록 최적 충전 전략으로 인한 효과가 크다. 이는 운행 거리가 클수록 전기자동차로 인한 전력 소비량과 충전 수요량이 크고 이로 인해 최적 충전 전략으로부터 받는 영향이 크기 때문이다.

V2G 기술이 도입되었을 경우 각 소비자가 최적 충방전 스케줄을 따라 에너지 소비가 이루어질 경우 단순 최적 충전 스케줄링 상황보다 절약되는 요금 비율을 전자 기기 사용량과 운행 거리와의 관계로 보여준 것이 Figure 4.7이다. 이 역시 전자 기기 사용량과 V2G 기술 도입을 인한 효과 간에는 상관성을 찾기 힘들지만 운행 거리와 V2G 기술 도입 효과 사이에는 상관성이 있다. 단순한 스마트 그리드에서 최적 충전 전략을 선택 시 나타나는 효과와는 반대로 운행거리가 길수록 V2G 기술 도입 효과는 적다. 이는 운행 거리가 많을 수록 차량이 집에 주차된 시간이 적어서 에너지 저장 장치로 사용될 시간이 적고 또한 운행으로 인해 필요한 전기가 많기 때문에 다른 전자 기기를 위해 충전할 배터리 여유분 역시 적기 때문이다



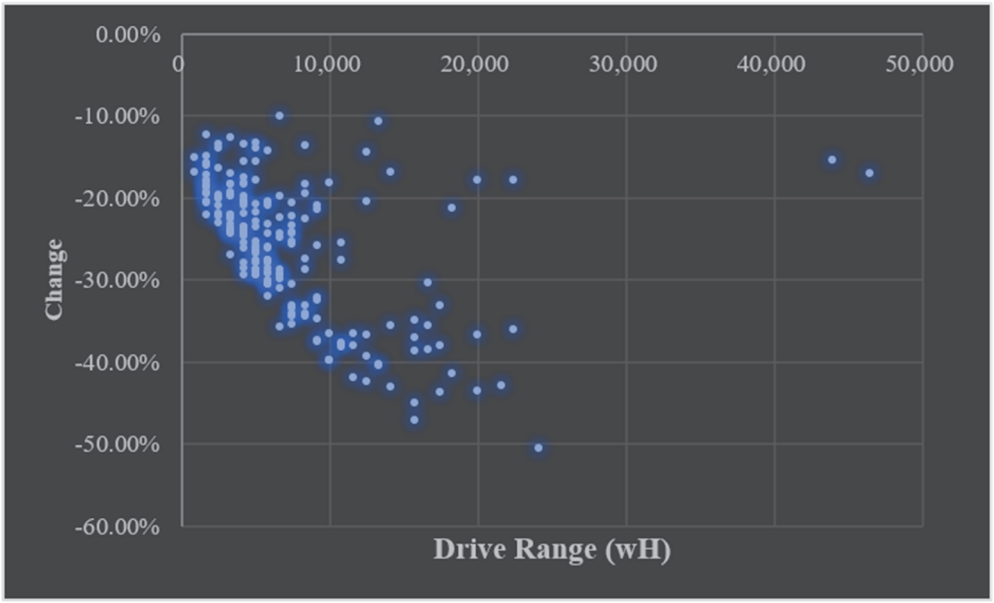
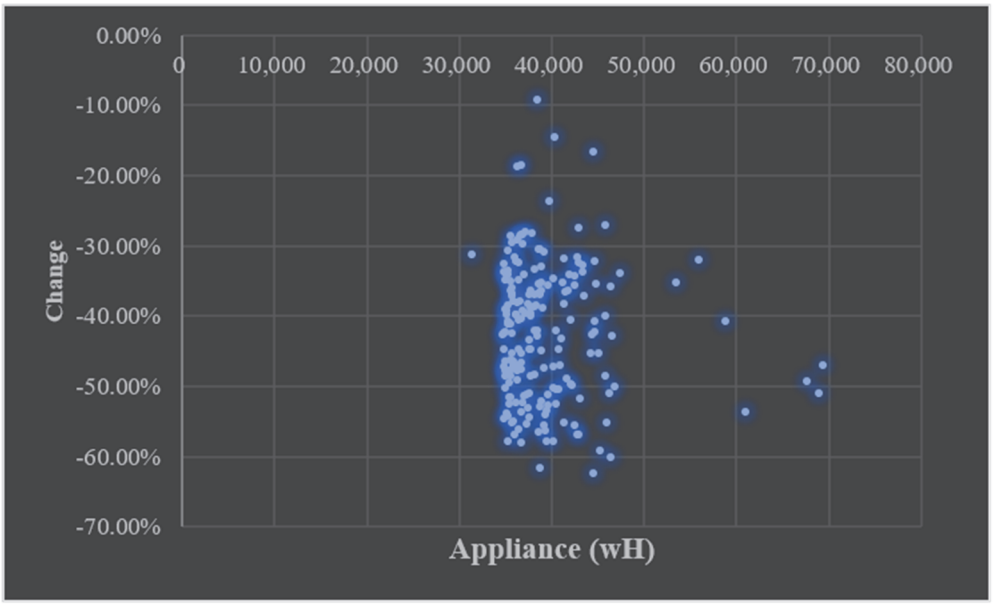


Figure 4.6: 최적 충전 전략으로 인한 변화량



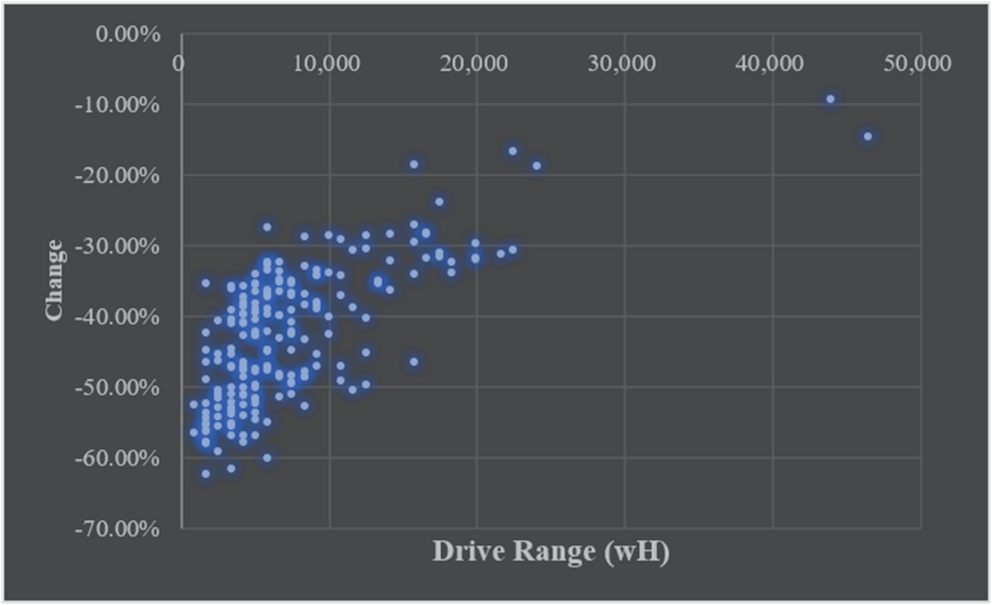


Figure 4.7: V2G 기술 도입으로 인한 변화량

4.4.2 경제적 효과

경제적 효과는 계산의 편의성과 현실성 반영을 위해 시간 y 의 단위는 하루가 아닌 1년 단위로 계산을 한다. 스마트 그리드 상에서 충전이 통제되지 않는 상황인 전기자동차가 집에 돌아오자 마자 충전을 시작하는 경우보다 알고리즘을 통한 최적 충전이 이루어질 때 전체 사용자들이 평균적으로 1년동안 절약할 수 있는 금액 $R_{n,c}^{y}$ 는 684,505원이다. 이를 통해 사용자 한 명이 최적 충전 전략을 통해 얻을 수 있는 경제적 효과 $R_{n,c}$ 는 식 (4.21)를 통해 계산할 수 있다. 전기자동차 수명 Y 는 10년, 할인율 r 은 한국 2021년 6월 기준 10년 국채 금리인 2.1%를 사용한다. 계산 결과는 다음과 같다:

$$R_{n,c} = \sum_{y=1}^{10} \frac{684505}{(1+0.021)^{y}} = 6116579 \tag{4.22}$$

전기자동차를 10년 사용하였을 경우 최적 충전 전략 선택으로 얻을 수 있는 소비자의 평균 경제적 이득은 6,116,579원이다. 이는 전체 200명 사용자가 10년간 12억 이상의 이득을 얻을 수 있는 것이다. 마찬가지로 이러한 최적 충전이 이루어지는 상황에서 V2G 기술이 도입되어 최적 충전이 이루어진다면 이로 인해 얻을 수 있는 경제 효과 $R_{n,v}$ 의 계산 결과는 다음과 같다:

$$R_{n,v} = \sum_{y=1}^{10} \frac{795030}{(1+0.021)^{y}} = 7104202 \tag{4.23}$$

계산 결과에서 볼 수 있듯이 전기자동차를 10년 소유하고 V2G 기술을 적용한

경우 전기자동차 사용자가 추가로 얻을 수 있는 경제적 효과는 1인당 평균적으로 7,104,202원이다. 이를 전체 200명의 사용자의 입장에서 보면 10년간 14억 이상의 이득을 얻을 수 있는 것이다.

4.5 소결

본 연구에서는 전기자동차 충방전 스케줄이 자신의 전기 요금뿐만 아니라 다른 사용자의 요금에도 영향을 미치는 스마트 그리드 상에서 이루어질 때, 더 나아가 V2G 기술이 도입된 경우에 각각 최적 충방전 스케줄링을 도출하는 모델을 개발하고 이에 대한 최적해를 찾을 수 있는 알고리즘을 제안하고 이를 활용해 경제적 가치를 계산하고자 하였다. 통제되지 않은 충전이 아닌 소비자들의 시간대별 전기 사용량을 이용하여 최적 충방전 스케줄링을 할 수 있는 스마트 그리드 상에서의 상황을 통해 충전 부하를 피크 시간대에서 다른 시간대로 이동하는 효과를 가질 것으로 기대하고 더 나아가 V2G 기술이 도입되었을 경우에는 전기 가격이 낮은 시간대에 전기를 저장해서 전기 가격이 높은 시간대에 그 전력을 사용하는 효과를 보여줄 것이라 기대하였다. 이를 분석적으로 확인하기 위해 한 명의 전력 공급자와 다수의 소비자로 구성되어 있는 스마트 그리드 시스템에서의 개별 소비자의 최적 충방전 스케줄링 문제를 해결하기 위한 게임 이론을 활용한 모형을 개발하고, 이러한 게임 모형의 최적해인 내쉬 균형을 구하는 알고리즘 개발을 하였다. 이러한 모델을 실제 행동 데이터에 적용한 시뮬레이션을 수행하였다.

실험 결과는 예상했던 것과 같이 최적 충방전 스케줄링을 통해 피크 시간대에 몰리던 충전이 다른 시간대로 이동하면서 전력망의 피크 부하를 낮추고 각 소비자의 전기 요금을 절약하는 효과를 보여준다. 또한 V2G 기술이 도입이 될 경우 전기 가격이 싼 낮은 부하 시간대에 전기를 저장하고 이를 높은 전기 가격을 갖는 피크 시간대에 다른 전자 기기에 이용함으로 전기자동차가 단순한 이동수단이 아닌 에너지 저장 장치로 사용될 경우 전기 가격을 절약할 수 있는 것을 보여주었다.

이러한 최적 스케줄링 알고리즘과 V2G 기술의 도입은 다양한 환경문제로 인해서

전기자동차 확산이 필요한 상황에서 전기 수요 증가로 인한 전력망의 과부하 문제를 완화시켜 줄 수 있을 뿐만 아니라 전기자동차 확산을 저해하는 높은 차량 가격에 대한 한가지 해결책이 될 수 있을 것이다.

제 5 장 전기 가격 변동성을 고려한 V2G 기술 투자 모형: 실물 옵션적 접근

5.1 서론

전기자동차의 확산의 필요성과 문제점 그리고 이를 해결할 수 있는 최적 충방전 스케줄링 문제에 대해서 제3장과 제4장에서 살펴보았다. 전기자동차의 확산은 환경문제를 해결하기 위해서 필요하고 이러한 전기자동차의 확산과 친환경 자동차 산업을 육성하려는 여러 움직임이 있다. 해외를 비롯해서 국내에서도 다양한 보조금 정책을 통해서 이러한 움직임을 보여주고 있다. 하지만 이러한 움직임에도 불구하고 아직은 높은 전기자동차의 가격과 인프라 부족으로 인해 확산이 더딘 상태이다.

이러한 전기자동차를 단순한 이동수단이 아닌 에너지 저장 장치로 사용할 수 있는 V2G 기술은 전기자동차의 활용을 극대화하기 위한 대표적인 기술 중 하나이다. 국내에서도 V2G 기술의 도입은 기술적으로 가능해졌으나 아직 인프라 부족과 전기자동차 보급 부족 등으로 인해 활성화되지 않은 상황이다. 이러한 상황에서 V2G 기술의 도입이 소비자에게 가져오는 경제적 효과를 예측할 수 있다면 전기자동차의 보급과 V2G 인프라의 보급에 도움이 될 것이다.

V2G 기술의 경제적 가치는 전기자동차의 충방전과 관련이 있기 때문에 전기 가격에 따라 가장 크게 달라질 것이다. 또한 전기 가격은 화석 연료의 가격 변동성과 신재생에너지로의 전환 등 다양한 이유로 높은 변동성을 가지고 있다. 이렇게 가치의 변동성이 큰 상황에서의 경제적 평가는 전통적인 경제성 평가 방법인 현금 흐름 할인

기법보다는 실물 옵션 기법이 적합하다.

하지만 전기자동차 사용자의 입장에서의 V2G 기술의 도입에 관한 경제성 평가에 대한 연구는 아직 제대로 이루어지지 않고 있다. 특히 V2G 기술의 경제성 평가와 최적 투자 시점에 관하여 실물 옵션의 관점에서 접근한 연구는 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 V2G 기술에 대한 경제성 평가를 현금 흐름 할인법과 전기 가격 변동성을 고려한 실물 옵션 방법론으로 접근하고자 한다.

이를 위해 V2G 기술의 경제적 가치를 다양한 사용자에 대해 현금 흐름 할인 기법을 통해 알아보고 이를 전기 가격을 변동성으로 가지는 실물 옵션 모형을 개발하여 대양한 상황에서 경제적 가치에 대해 비교분석을 하고자 한다.

5.1.1 구성

제5장의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 5.2에서는 현금 흐름 할인 모델과 실물 옵션 모델을 제시한다. 5.3에서는 이를 활용한 분석이 이루어지고, 5.4에서는 소결론을 제시한다.

5.2 모델

5.2.1 현금 흐름 할인 모델

전기자동차 사용자가 제4장에서와 같이 스마트 그리드에 연결되어 최적 충전이 이루어지는 상황에서 V2G 기술 도입에 대한 경제적 가치를 평가하기 위해 가장 보편적인 모델인 현금 흐름 할인 모델을 통해 순현재가치(NPV: Net Present Value)를 계산하고자 한다.

이러한 현금 흐름 할인 모델을 통해 순현재가치를 구하기 위해서는 현재와 미래의 현금 흐름이 필요하다. 전기자동차의 기대 수명이 T 일 때 t 시점에 V2G 기술 도입으로 얻는 이득을 R^t , 할인율을 d , V2G 인프라 도입비용을 C 라고 하면 순현재가치는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$NPV = \sum_{t=1}^{T} \frac{R^t}{(1+d)^t} - C \tag{5.1}$$

5.2.2 실물 옵션(Real Option) 모델

실물 옵션 모델은 전기자동차 사용자가 전기 가격 변동성을 고려한 경제성 평가를 하고 V2G 기술을 도입할지 그리고 도입한다면 언제 도입을 할지 결정하는 문제에 사용될 수 있다. 전기자동차를 보유한 사용자는 각 결정 노드에서 V2G 기술을 도입할지 아니면 기다릴지를 결정하게 된다. 이러한 상황에서 V2G 기술의 경제적 가치에 가장 큰 영향을 미치는 것은 전기 가격이다. 이러한 전기 가격이 기하 브라우니안 모션(GBM: Geometric Brownian Motion)을 따르는 지 알아보기 위해

한국의 전력시장가격인 계통한계가격(SMP: System Marginal Price)를 통해 검정하였다. 2010년 1월에서 2021년 6월까지의 월별 계통한계가격의 로그 수익률이 정규 분포를 따르는 지에 대해 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk Test)과 콜로고로프-스미르노프 검정(Kolmogorov-Smirnov Test)을 수행한 결과 두가지 검정에서 모두 정규 분포를 따르는 것으로 확인된다. 이에 관한 Q-Q Plot(Quantile-Quantile Plot)은 Figure 5.1와 같다.

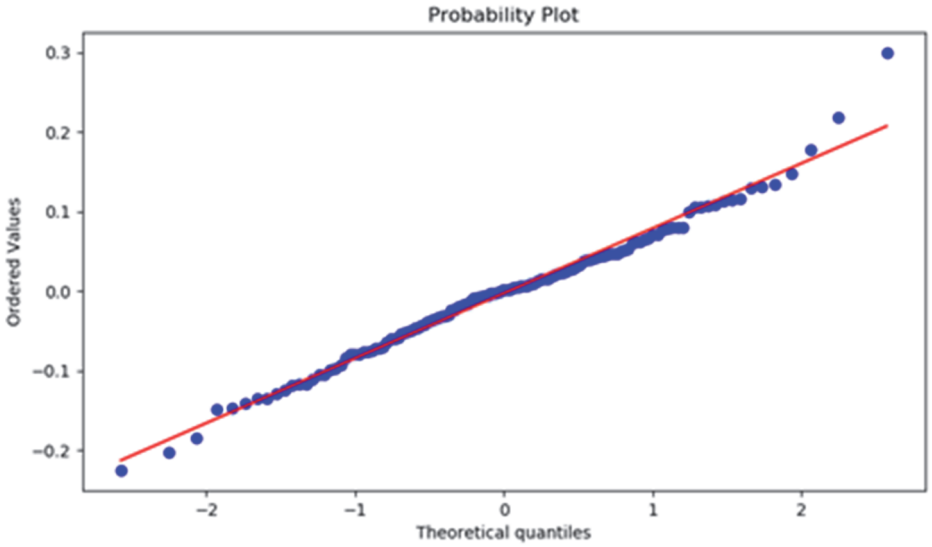


Figure 5.1: SMP QQ plot

따라서 전기 가격은 기하 브라우니안 모션을 따른다고 가정할 수 있고 추세항은 없다고 가정하였다. 이러한 상황에서 t 시점에서의 전기가격 $P(t,i)$ 는 i 번 전기 가격이 상승한 경우를 뜻한다. 전기 가격은 p 의 확률로 U 의 비율로 상승하고 $(1-p)$ 의 확률로 D 의 비율로 하락한다. 만약 무위험이자율이 r , 전기 가격 변동성이 σ 라면

각 변수는 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$
\begin{aligned}
U &= e^{\sigma} \\
D &= \frac{1}{U} = e^{-\sigma} \\
p &= \frac{e^{r} - D}{U - D}
\end{aligned}
\tag{5.2}
$$

따라서 t 시점의 전기가격 $P(t,i)$는 다음과 같이 계산이 된다.

$$
P(t,i) = U^{i} D^{t-i} P(0,0) \tag{5.3}
$$

전기자동차 사용자는 결정 노드에서는 V2G 기술을 도입을 할지 도입을 하지 않고 기다릴지를 결정을 한다. 만약 V2G 기술을 도입한다면 의사결정은 종료가 된다. 하지만 도입을 하지 않고 대기를 한다면 전기 가격은 변동성에 의해 오르거나 내릴 것이다. 각 시점에서 사용자는 다시 V2G 기술을 도입할지 대기를 할지 결정을 한다. 이러한 의사결정 과정은 전기자동차 차량 내용 연수만큼 이뤄진다고 가정한다. 본 논문에서 이루어지는 의사결정나무를 도식화한 것이 Figure 5.2이다.

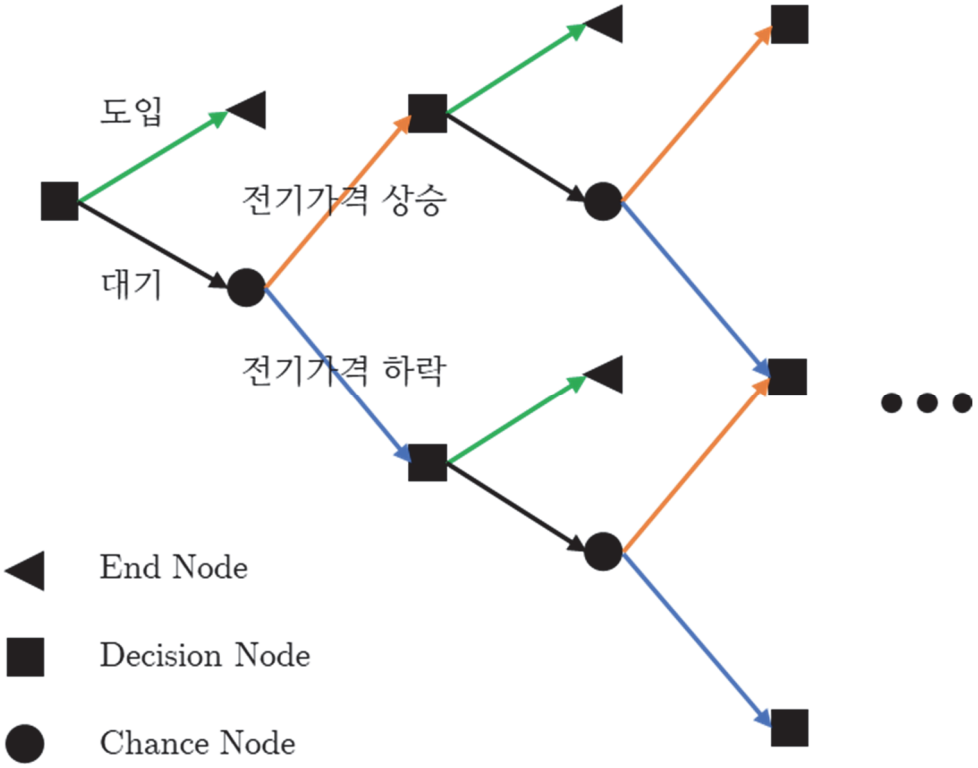


Figure 5.2: 이항결정나무

본 연구에서 시장은 완전하다고 가정하고 만약 t 시점에 V2G 기술을 도입하게 된다면 남은 기간 동안의 평균 전기 가격은 $P(t,i)$ 와 동일하게 된다. 이런 상황에서 t 시점에 V2G를 도입해서 T 까지의 V2G로 얻는 이득을 $R(t,i)$ 라고 정의한다. V2G 도입 옵션의 t 시점 i 상황에 대한 가격 $V(t,i)$ 는 다음과 같다:

$$V(t,i) = \max(\Pi_V, \Pi_W) \tag{5.4}$$

여기에서 Π_V 는 V2G를 도입했을 때 T 시점까지 얻을 수 있는 이익의

순현재가치와 같고 V2G 기술 도입비용이 C 일 때 다음과 같이 계산이 가능하다:

$$\Pi_V = R(t,i) - C \tag{5.5}$$

두번째 항인 Π_W 는 V2G 기술을 도입하지 않고 대기하는 경우로 $t+1$ 시간에 얻을 수 있는 기대 이익의 t 시점의 가치와 같고 다음과 같이 표현 가능하다:

$$\Pi_w = \frac{pV(t+1,i+1) + (1-p)V(t+1,i)}{1+r} \tag{5.6}$$

식 (5.4)에 의하면 옵션의 가치는 선택 가능한 옵션의 손익인 식 (5.5)와 식 (5.6)을 비교하며 최대값을 선택하게 된다. 이러한 과정을 후진귀납법(Backward Induction)을 사용하여 계산이 가능하고 이에 따른 옵션의 최종가치는 다음과 같다:

$$V(0,0) = \max \begin{Bmatrix} R(0,0) - C; \\ \dfrac{pV(1,1) + (1-p)V(1,0)}{1+r} \end{Bmatrix} \tag{5.7}$$

5.3 분석

5.3.1 분석 데이터

본 연구에서 사용되는 데이터는 제3장에서 사용된 사용자 행동 데이터를 기반으로 제4장에서 개발된 V2G 기술의 경제적 가치 평가 모형을 통해 나온 결과값을 사용할 것이다. V2G 기술의 투자 모형에 제4장에서 도출된 무작위로 선택된 200명의 사용자의 V2G 기술 도입으로 인한 경제적 이득 결과를 적용한다. 이러한 과정을 V2G 기술 도입으로 인한 평균적인 사용자의 경제적 이득에 대해 적용 해서 결과를 평가하고 이를 각 개별 사용자들에 대해서도 적용한다.

모델에 사용되는 변수 값으로 무위험 이자율 r 은 2021년 6월 기준 한국 10년 국채 금리인 2.1%을 사용한다. 실물 옵션 모형에서 사용 되는 전기 가격에 대한 변동성은 (Mayer and Trück 2018)에서 도출된 한국 전기가격의 변동성 26%을 기준으로 높은 변동성을 갖는 36%의 경우와 낮은 변동성을 갖는 16%의 경우에 대해서 알아본다. 본 논문 제4장과 마찬가지로 스마트 그리드에 참여하는 전기자동차 사용자는 자신의 개인 주차 공간이 있고 관련된 충전 인프라를 설치하여 사용할 수 있는 사용자를 가정한다. 따라서 본 논문 에서 사용 되는 전기자동차 사용자의 V2G 기술 설치 가격은 관련 V2G 충방전 인프라를 설치하는 비용으로 5,883,787원이다(Gough et al. 2017).

5.3.2 할인현금모형 분석 결과

제4장에서 나온 결과에 따르면 V2G 기술 도입으로 1년동안 전기자동차 사용자 한 명이 평균적으로 절약할 수 있는 금액은 795,030원이다. 이에 대한 10년 동안 전기

자동차를 이용하였을 때 절약할 수 있는 금액을 현금할인 모형인 식 (5.1)에 이를 대입하면 순현재가치는 1,220,415원임을 알 수 있다.

$$NPV = \sum_{t=1}^{10} \frac{795030}{(1+0.021)^t} - 5883787 = 1220415 \tag{5.8}$$

순현재가치가 양수인 1,220,415원 이기 때문에 그리드 상에 존재하는 200명의 사용자들 중 평균적인 사용자는 V2G 기술의 도입을 통해 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이를 행동 패턴이 각기 다른 모든 사용자들에게 적용시키면 각 사용자의 순현재가치의 분포는 Figure 5.3와 같다.

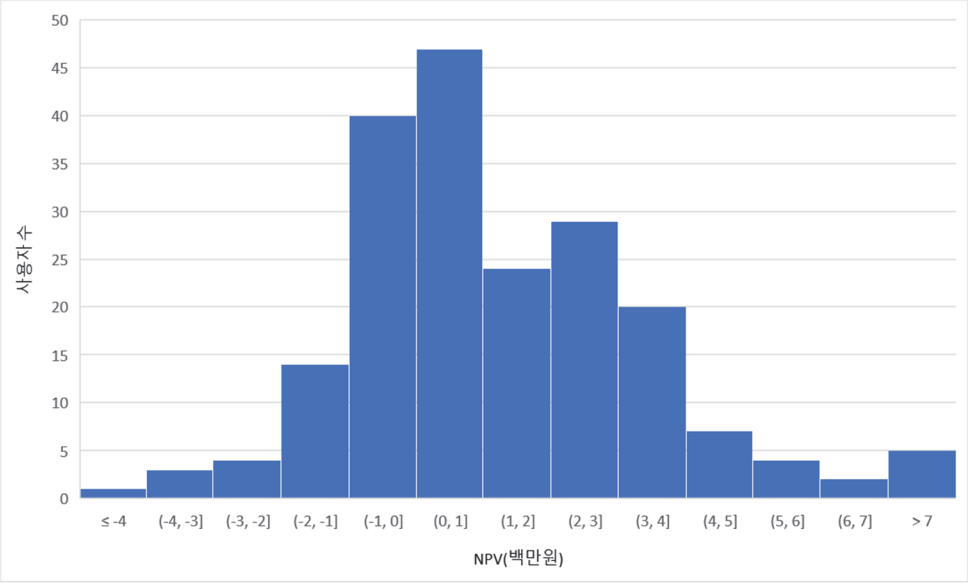


Figure 5.3: 순현재가치 분포

총 200명의 사용자 중 138명이 순현재가치 값이 양수이고 각 개인 별로 최대

10,105,694원, 최소 -4,237,457원의 순현재가치 값을 가진다. 따라서 사용자가 현금 흐름 할인 기법을 통해 의사 결정을 내리는 상황에서 정부가 모든 사용자의 V2G 도입을 유도하기 위해서는 4,237,457원 이상의 정부 보조금이 필요하고 90% 이상의 V2G 도입을 유도하기 위해서는 1,135,273원 이상의 정부 보조금이 필요하다. 또한 순현재가치가 음수인 사용자는 현금 흐름 할인 법에 따라 의사 결정을 한다면 V2G를 도입하지 않을 것이기 때문에 나머지 V2G를 도입한 138명의 경제적 이득은 전체 305,142,287원이 된다.

5.3.3 실물 옵션 모형 분석 결과

실물 옵션 모형에서 가장 중요한 변수는 변동성이다. 본 연구에서는 전기가격이 변동성을 가지고 있고, 기준 변동성인 26%를 기준으로 높은 변동성과 낮은 변동성을 보이는 경우 모두에 대해서 평균적인 사용자와 각각의 사용자에 대해 실물 옵션을 활용하여 투자 의사 결정을 내린다.

5.3.3.1 기준 변동성($\sigma = 26\%$)

변동성이 $\sigma = 26\%$ 인 상황에서는 식 (5.2)를 통해 이러한 변동성에서는 전기가격의 상승률과 하락률과 상승 확률이 각각 $U = 1.297, D = 0.771, p = 47.57\%$ 의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이 때 평균적인 사용자가 V2G 도입 시 얻을 수 있는 가치인 1년에 절약되는 금액 795,030원을 기준으로 실물 옵션을 통해 가치를 계산하는 과정은 Table 5.1과 같다.

Table 5.1: 옵션 가격에 대한 이항 격자(단위: 천 원)

옵션	d \ t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V2G	0	1220	2320	3473	4622	5672	6473	6803	6327	4564	821
Wait		1132	1728	2389	3149	3767	4021	3655	2295	382	0
V2G	1		-1006	-321	362	986	1463	1659	1376	328	-1898
Wait			100	214	459	682	773	641	153	0	0
V2G	2			-2577	-2170	-1800	-1516	-1400	-1568	-2191	-3514
Wait				0	0	0	0	0	0	0	0
V2G	3				-3676	-3456	-3287	-3218	-3318	-3688	-4475
Wait					0	0	0	0	0	0	0
V2G	4					-4440	-4340	-4299	-4358	-4579	-5046
Wait						0	0	0	0	0	0
V2G	5						-4966	-4942	-4977	-5108	-5386
Wait							0	0	0	0	0
V2G	6							-5324	-5345	-5422	-5588
Wait								0	0	0	0
V2G	7								-5563	-5610	-5708
Wait									0	0	0
V2G	8									-5721	-5779
Wait										0	0
V2G	9										-5822
Wait											0

이는 각 단계에서 전기 가격별 V2G 기술의 도입할 경우 손익과 도입을 연기했을 경우의 손익을 격자로 나타낸 것으로 각 시점에서는 음영이 들어간 곳의 손익이 높기 때문에 선택을 하게 된다. 각 단계의 최적 선택은 Table 5.2와 같다. 마지막 시간에서부터 앞으로 가격을 역산하여 구하는 실물 옵션 방법으로 계산한 V2G 기술의 가치는 1,220,415원으로 할인현금모형으로 계산한 값과 같다.

Table 5.2: 최적 옵션 의사 결정(V: V2G 도입, W: 대기)

t \ d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
1		W	W	W	V	V	V	V	V	W
2			W	W	W	W	W	W	W	W
3				W	W	W	W	W	W	W
4					W	W	W	W	W	W
5						W	W	W	W	W
6							W	W	W	W
7								W	W	W
8									W	W
9										W

이러한 옵션을 통한 의사결정을 각 200명의 사용자에 대해 적용하면 V2G 기술의 실물 옵션 가치는 Figure 5.4과 같은 분포를 보인다.

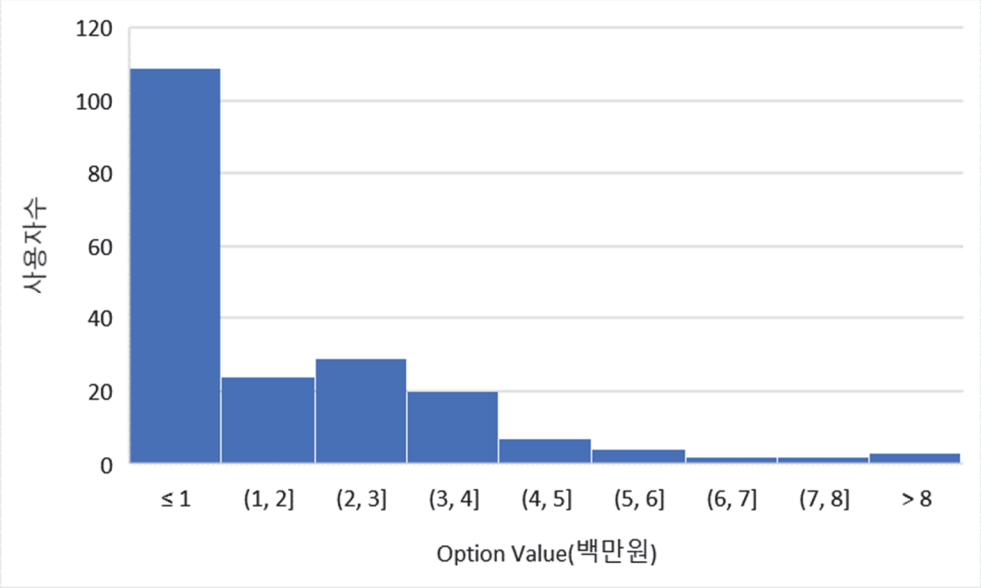


Figure 5.4: 옵션가치분포

구체적인 값을 살펴보면 각 개인 별로 최대 10,105,694원, 최소 0원의 옵션가치를 가진다. 현금 흐름 할인 기법과 다르게 실물 옵션의 특성상 선택 노드에서 가치가 0보다 작은 경우에는 선택이 되지 않기 때문에 옵션가치는 음수 값이 나오지 않는다. 할인 현금 기법을 통한 경제성 평가로 의사결정을 내리는 경우 V2G 기술을 도입하는 사용자수가 138명에 불과했지만 실물 옵션 기법으로 경제성 평가 후 의사결정을 내리면 10년중 언젠가는 V2G를 도입하는 사용자의 수는 195명이다. 이러한 195명의 V2G 기술 도입으로 얻어지는 총 이득의 현재가치는 327,587,338원이다.

5.3.3.2 높은 변동성($\sigma = 36\%$)

전기가격의 변동성이 높아졌을 경우에 $\sigma = 36\%$ 인 상황에서 식 (5.2)를 통해 이러한 변동성에서는 전기 가격의 상승률과 하락률과 상승 확률이 값이 각각 $U = 1.433, D = 0.698, p = 43.98\%$ 로 계산된다. 이 때 평균적인 사용자가 V2G 기술 도입 시 얻을 수 있는 경제적 가치인 795,030원을 기준으로 위와 같은 과정을 반복하였다. 이를 통해 실물 옵션 가치를 계산하는 과정은 Table 5.3과 같다.

Table 5.3: 옵션 가격에 대한 이항 격자-높은 변동성(단위: 천 원)

옵션	d \ t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V2G	0	1220	3183	5545	8297	11355	14490	17232	18706	17368	10607
Wait		1481	2644	4167	6267	8454	10368	11397	10463	5745	0
V2G	1		-1471	-321	1019	2507	4033	5368	6085	5434	2143
Wait			200	465	1080	1737	2312	2621	2341	923	0
V2G	2			-3176	-2524	-1800	-1057	-407	-58	-375	-1977
Wait				0	0	0	0	0	0	0	0
V2G	3				-4248	-3896	-3534	-3218	-3048	-3202	-3982
Wait					0	0	0	0	0	0	0
V2G	4					-4916	-4740	-4586	-4503	-4579	-4958
Wait						0	0	0	0	0	0
V2G	5						-5327	-5252	-5212	-5248	-5433
Wait							0	0	0	0	0
V2G	6							-5576	-5557	-5575	-5664
Wait								0	0	0	0
V2G	7								-5725	-5733	-5777
Wait									0	0	0
V2G	8									-5811	-5832
Wait										0	0
V2G	9										-5858
Wait											0

변동성이 높을 경우 V2G 기술의 옵션 가치는 1,480,965원으로 할인현금기법으로 계산했을 경우나 보통의 변동성을 지닌 옵션의 가치인 1,220,415원보다 높은 것을 알 수 있다. 각 단계의 최적 선택은 Table 5.4와 같다. 이 경우 보통의 변동성인 경우와 다르게 1차년도에는 바로 V2G를 도입하는 것은 아님을 알 수 있다.

Table 5.4: 최적 옵션 의사 결정-높은 변동성(V: V2G 도입, W: 대기)

t \ d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	W	V	V	V	V	V	V	V	V	V
1		W	W	W	V	V	V	V	V	V
2			W	W	W	W	W	W	W	W
3				W	W	W	W	W	W	W
4					W	W	W	W	W	W
5						W	W	W	W	W
6							W	W	W	W
7								W	W	W
8									W	W
9										W

이러한 높은 변동성 상황에서도 위와 마찬가지로 옵션 가치를 통한 경제성 평가와

이를 바탕으로 이루어지는 의사결정을 각 200명의 사용자에 대해 적용하면 V2G 기술의 가치는 Figure 5.5와 같은 분포를 보인다.

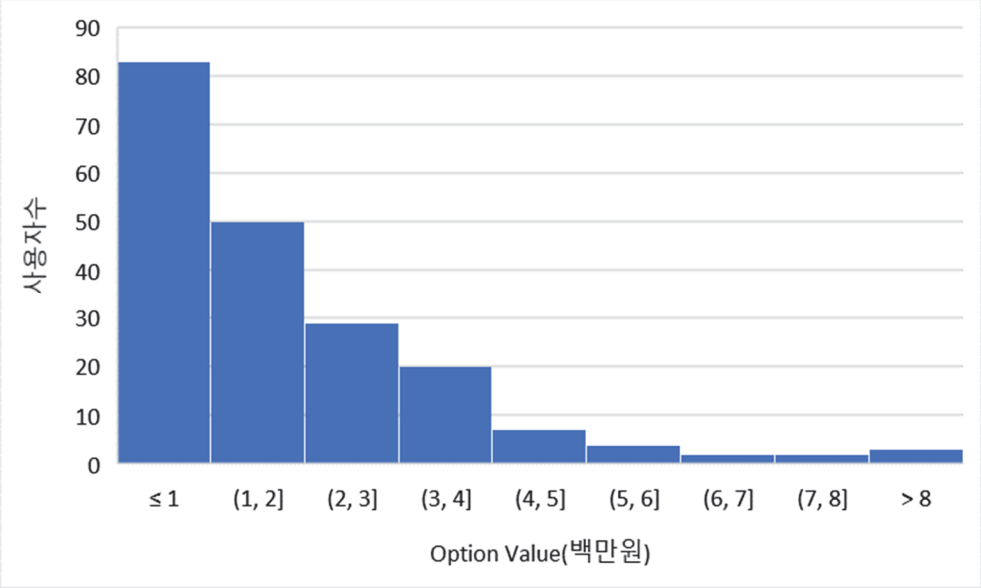


Figure 5.5: 옵션가치분포-높은 변동성

구체적인 값을 살펴보면 이 상황에서도 각 개인 별로 최대 10,105,694원, 최소 0원의 옵션가치를 가진다. 반면에 보통의 변동성에서 언젠가는 V2G 기술을 도입하는 사용자의 수는 195명이지만 높은 변동성에서는 199명이다. 이러한 199명의 V2G 기술 도입으로 얻어지는 총 이득의 현재가치는 363,254,379원이다.

5.3.3.3 낮은 변동성($\sigma = 16\%$)

전기가격의 변동성이 낮아진 $\sigma = 16\%$ 인 상황에서 식 (5.2)를 통해 전기 가격의 상승률과 하락률과 상승 확률이 각각 $U = 1.1735, D = 0.8521, p = 52.61\%$ 의 값을

갖는다. 이 때 평균적인 사용자가 V2G 기술 도입 시 얻을 수 있는 경제적 이득인 795,030원을 기준으로 같은 과정을 반복한다. 이를 통해 실물 옵션 가치를 계산하는 과정은 Table 5.5와 같다.

Table 5.5: 옵션 가격에 대한 이항 격자-낮은 변동성(단위: 천 원)

옵션	t / d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V2G	0	1220	1539	1777	1899	1862	1611	1079	180	-1189	-3158
Wait		793	916	979	959	830	556	93	0	0	0
V2G	1		-494	-321	-232	-259	-441	-828	-1481	-2475	-3904
Wait			0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2G	2			-1844	-1780	-1800	-1932	-2213	-2686	-3408	-4446
Wait				0	0	0	0	0	0	0	0
V2G	3				-2904	-2918	-3014	-3218	-3562	-4086	-4840
Wait					0	0	0	0	0	0	0
V2G	4					-3730	-3800	-3948	-4198	-4579	-5126
Wait						0	0	0	0	0	0
V2G	5						-4371	-4478	-4660	-4936	-5333
Wait							0	0	0	0	0
V2G	6							-4863	-4995	-5196	-5484
Wait								0	0	0	0
V2G	7								-5238	-5384	-5594
Wait									0	0	0
V2G	8									-5521	-5673
Wait										0	0
V2G	9										-5731
Wait											0

변동성이 낮을 경우 옵션의 가치는 1,220,415원으로 할인현금기법으로 계산한 1,220,415원과 같은 것을 알 수 있다. 각 단계의 최적 선택은 Table 5.6와 같다.

Table 5.6: 최적 옵션 의사 결정-낮은 변동성(V: V2G 도입, W: 대기)

t \ d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	W	V	V	V	V	V	V	V	V	V
1		W	W	W	V	V	V	V	V	V
2			W	W	W	W	W	W	W	W
3				W	W	W	W	W	W	W
4					W	W	W	W	W	W
5						W	W	W	W	W
6							W	W	W	W
7								W	W	W
8									W	W
9										W

이러한 낮은 변동성 상황에서 옵션의 가치를 통한 의사결정을 각 200명의 사용자에 대해 적용하면 V2G 기술의 가치는 Figure 5.6와 같은 분포를 보인다.

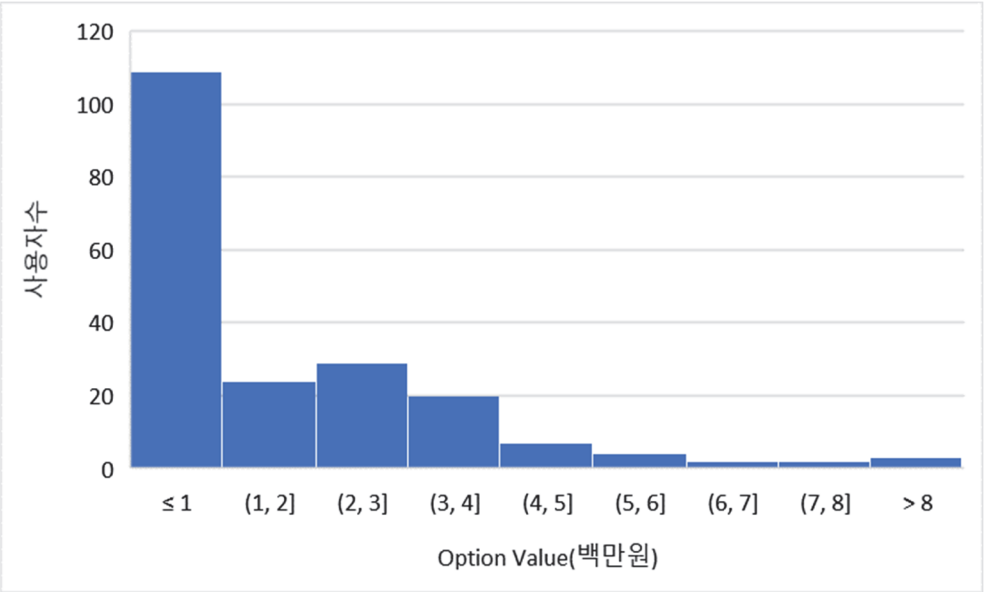


Figure 5.6: 옵션가치분포-낮은 변동성

낮은 변동성을 가질 때 각 개인에 대한 실물 옵션 가치에 대해 살펴보면 이 상황에서 역시 각 개인 별로 최대 10,105,694원, 최소 0원의 옵션가치를 가진다. 반면에 보통의 변동성에서 언젠가는 V2G를 도입하는 사용자의 수는 195명이지만 낮은 변동성에서는 160명으로 이는 전체 인원중 80%의 인원이다. 이러한 160명의 V2G도입으로 얻어지는 총 이득의 현재가치는 307,263,677원이다. 이와 같은 내용을 정리하면 Table 5.7와 같다.

Table 5.7: 결과 비교

부하	평균적 사용자 가치(원)	V2G 도입 비율	총 이득(원)
현금 흐름 할인 기법	1,220,415	69%	305,142,287
실물 옵션(보통 변동성)	1,220,415	97.5%	327,587,338
실물 옵션(높은 변동성)	1,480,965	99.5%	363,254,379
실물 옵션(낮은 변동성)	1,220,415	80%	307,263,677

평균적 사용자의 경제적 가치를 살펴보면 높은 변동성을 지니는 경우를 제외하고는 같은 가치를 보인다. 이는 옵션의 가치는 변동성이 클수록 커지기 때문이다. 각 개인의 의사결정에 적용했을 경우에는 V2G 기술의 도입 비율은 실물 옵션의 경우에 항상 더 높았다. 이는 실물 옵션은 의사 결정이 유연하기 때문에 현금 흐름 할인 기법보다 높은 가치를 지닌다.

5.4 소결

본 연구에서는 제3장과 제4장에서 도출된 결과 값을 바탕으로 각 사용자의 충방전 스케줄링이 서로의 전기 가격에 영향을 주는 스마트 그리드에서 V2G 기술에 대한 투자 의사 결정 모형을 개발하였다. 투자 의사 결정 모형에 사용되는 경제성 평가 방법으로는 현금 흐름 할인 기법과 실물 옵션 기법이 모두 이용이 된다. 제4장에서 사용된 각각 다른 행동 패턴을 가진 200명으로 구성된 스마트 그리드 시스템을 가정하였고 각기 다른 행동 패턴을 가졌기 때문에 V2G 기술의 도입으로 인한 효과 역시 각각 다름은 제4장에서 확인할 수 있었고 투자 모형 역시 다른 결과를 낼 것이다.

먼저 V2G도입으로 1년동안 평균적인 한 사용자가 얻을 수 있는 이득인 795,030원을 바탕으로 10년 동안 전기자동차 사용을 하는 분석을 한 결과 현금 흐름 할인 기법으로는 경제적 이득의 순현재가치가 1,220,415원이라는 것을 알 수 있다.

실물 옵션 기법은 변동성이 중요한 요소로 본 연구에서는 V2G도입에 가장 큰 영향을 주는 전기 가격이 변동성을 갖는 모델을 사용한다. 변동성은 보통의 변동성과 높은 변동성, 낮은 변동성으로 나누어 살펴보았는데 보통의 변동성과 낮은 변동성에서는 평균적 사용자의 경제적 이득은 현금 흐름 할인법과 마찬가지로 1,220,415원의 가치를 지니는 것을 알 수 있다. 반면에 높은 변동성의 경우에는 그보다 높은 1,480,965원의 경제적 가치를 가진다. 이는 실물 옵션 기법은 현금 흐름 할인 기법보다 유연한 의사결정이 가능하고 또한 변동성이 높을수록 그 가치는 커지기 때문이다.

평균적인 이득뿐만 아니라 이러한 두 가지 기법을 전체 사용자 200명에 대해 각각 알아본 결과에서도 이러한 것이 드러난다. 현금 흐름 할인 기법을 사용하였을 경우 각 사용자의 경제적가치가 음수가 나오는 경우가 생긴다. 이러한 현금 흐름 할인

기법으로 각 사용자가 도입에 대한 판단을 한다면 순현재가치가 음수인 경우는 도입을 하지 않을 것이다. 전체사용자가 현금 흐름 할인법으로 의사결정을 하게 된다면 전체사용자 중 69%의 사용자가 V2G 기술을 도입하고 총 305,142,287원의 이득이 도입한 사용자들에게 생긴다. 이에 반해 보통의 변동성의 상황에서는 97.5%의 사용자가 첫 해가 아닐지라도 V2G 기술을 도입하고 총 327,587,338원의 이득을 가진다. 낮은 변동성의 경우에서도 이러한 효과를 볼 수 있는데 도입 비율은 80%로 올라가고 총 이득도 307,263,677원이 된다. 높은 변동성을 갖는 경우에는 이러한 옵션평가로 인한 효과가 극대화되는데 V2G 기술의 도입비율은 99.5%이고 전체 사용자가 얻게 되는 총 이득은 363,254,379원이 된다.

유연한 의사결정을 할 수 있는 실물 옵션 기법으로 의사결정을 하게 될 경우 현금 흐름 할인 기법으로 의사결정을 하게 되는 경우보다 각 개인이 갖게 되는 경제적 이득이 더 커지게 따라서 도입하는 비율도 더 커지게 된다. 이는 실물 옵션 기법을 통한 가치 평가로 더 많은 사용자가 V2G도입을 통해 이득을 보게 되고 이는 결국 전기자동차의 증가와 전력망 부하의 감소를 가져오게 된다. 특히 전기 가격의 변동성이 커진다면 이러한 옵션의 가치는 증가하게 된다.

제 6 장 결론

6.1 연구 결과 및 기여

본 논문은 실제 한국 사용자의 행동 패턴 데이터를 기반으로 V2G 기술의 경제적 평가를 통한 사용자의 V2G 기술 투자에 대한 모형을 제시한다.

이를 위해 제3장에서는 사용자 행동 패턴 데이터를 이용하여 사용자의 시간별 가전제품 전기 사용량과 전기자동차 사용 시간과 전기자동차 가정내 충전 가능 시간을 사용자별로 도출을 한다. 이를 통해 통제되지 않은 충전 전략을 포함한 세 가지 충전 전략에 대해서 각 사용자의 시간별 전기 사용량과 전기 요금을 계산한다. 이를 통해 전기자동차의 확산이 국가 전력망과 사용자 전기 요금에 미치는 영향을 알아본다. 또한 세가지 전략 중 각 사용자가 자신의 요금을 최소화하는 최적 전략을 선택했을 경우 그 영향을 알아본다. 기존의 연구들은 사용자의 행동 패턴을 통해 전기자동차 사용과 충전을 도출하지 않았고 단순히 가정용 전력을 도출하였다. 또한 전기자동차를 고려한다고 해도 다양한 충전 전략에 대한 효과를 알아보지는 않았다. 따라서 이 모델의 기존 모델과의 차별성은 실제 행동 데이터를 기반으로 전기자동차 확산이 전력망에 미치는 영향을 알아보고 최적 충전 전략을 도출한다는 것이다. 그 결과로 모든 사용자가 최적 충전 전략을 선택했을 경우는 충전이 통제되지 않은 경우보다 PAR이 1.95에서 1.7로 낮아지고 전기 요금은 평균적으로 34.83%의 절약이 이뤄진다. 이를 통해 충전 전략의 선택은 전력망과 전기 요금 모두에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

제4장에서는 제3장에서 도출한 데이터를 기반으로 각 사용자의 충방전 스케줄이

서로에게 영향을 미치는 게임 상황에서 최적 충방전 스케줄링 모델을 개발하고 이를 통해 V2G 기술의 경제적 가치를 평가한다. 제2장과는 다르게 모든 사용자는 스마트 그리드로 연결이 되어 있고 서로의 전기 사용 스케줄을 공유한다. 이러한 스케줄을 통해 시간별 전기 사용량을 결정되면 이는 전력 공급자에게 전달이 되고 전력 공급자는 가격 정책을 소비자들에게 알려주고 소비자들은 다시 이에 따라 전기 사용 스케줄을 결정을 한다. 이러한 시간별 전기 요금은 실시간 요금 결정제를 택하고 시간별 전체 사용자의 전기 사용량이 증가함에 따라 평균 요금과 한계 요금이 증가하는 형태를 지닌다. 따라서 각 사용자의 전기자동차 충전 스케줄은 자신의 행동 패턴뿐만 아니라 스마트 그리드 상의 다른 사용자의 전기 사용량에도 영향을 받는다. 이러한 상황은 게임 모형으로 구현 가능하다. 나아가 단순한 스마트 그리드 상에서의 충전만 가능한 모델이 아닌 전기자동차가 에너지 저장 장치로 사용되는 V2G 기술이 도입되었을 경우 전기자동차의 최적 충방전 스케줄을 결정하고 이를 통해 절약되는 전기 요금을 통해 V2G 기술의 경제적 가치를 평가한다. 기존의 연구와의 차별성은 스마트 그리드 상의 전력 소비자가 게임 상황 하에서 단순한 전기자동차 충전이나 단순한 에너지 저장 장치 활용이 아닌 V2G 상황에서의 최적 충방전 스케줄을 도출하는 모델과 알고리즘을 개발하고 이를 실제 한국 행동 데이터에 적용해 V2G 기술의 경제적 가치 평가가 이루어진다는 점이다. 시뮬레이션 결과는 스마트 그리드에서의 최적 충전 알고리즘 도입으로 의한 각 사용자의 평균적 이익은 6,115,579원이고 여기에 더해 V2G 기술이 도입되었을 경우에는 평균적으로 7,104,202원의 이익을 더 본다.

제5장에서는 각 전기자동차 사용자가 V2G 기술의 경제적 평가를 통해 V2G 기술을 도입하는 의사 결정 모델을 현금 흐름 할인 기법과 실물 옵션 모형을 기반으로

개발하였다. 이를 위해 실물 옵션 모형에서는 V2G 기술의 경제적 효과에 가장 중요한 요소인 전기 가격의 변동성을 고려한다. 기존 연구와의 차별성은 V2G 기술에 대한 투자에 대해 경제성 평가가 이루어진 연구는 거의 없고 특히 실물 옵션을 활용한 모델은 존재하지 않지만 본 연구에서는 실물 옵션 기법을 활용하여 V2G 기술에 대한 투자 결정 모형을 개발한다는 점이다. V2G 기술이 개발된 지는 오래되었지만 활성화는 거의 안되어 있는 상태이기 때문에 현금 흐름과 미래에 대한 불확실성이 크기 때문에 실물 옵션을 통한 접근법이 필요하다. 현금 흐름 할인 기법을 통해 의사결정을 내렸을 경우에는 69%의 사용자가 V2G 기술을 도입하는 데에 반해 실물 옵션 방법을 사용할 경우 변동성에 따라 80%에서 99.5%의 사용자가 V2G 기술을 도입하는 것을 알 수 있다. 이러한 V2G 기술의 도입으로 인한 경제적 가치 역시 전체 사용자가 현금 흐름 할인법으로 했을 경우 총 305,142,287원의 가치가 있지만 실물 옵션을 활용한 경우에는 307,263,677원에서 363,254,379원의 이득을 보인다.

6.2 후속 연구

본 논문에서는 실제 소비자 행동 패턴 데이터 기반으로 전기 사용량과 사용자 상태를 도출하고 이를 통해 전기자동차의 최적 충방전 스케줄링을 찾고 이를 통해 다양한 경제성 평가를 한다. 본 논문의 모든 의사 결정과 경제성 분석은 전기 가격에 크게 좌우된다. 이는 실제 전기 가격을 반영한다는 장점이 있지만 전기 가격에 변화에 결과가 크게 변할 수 있다. 실물 옵션을 활용한 모델에서는 이러한 이유로 전기 가격이 변동성을 가지는 모델을 고려하였고 다양한 변동성에 대한 결과를 분석하였다. 추후 연구에서는 좀 더 다양한 전기 가격 정책과 가격 상황에 대한 연구가 이루어질 필요가 있다.

또한 본 논문 제3장에서 가정한 행동 패턴 데이터를 통해 가전제품 전기 사용량을 예측하는 모델은 실제 전기 사용량과의 차이가 존재하였다. 이를 해결 하기 위해서는 활동 분류의 세분화와 매개 변수 값의 조정과 최신 데이터 활용을 통해 좀 더 실제 전기 사용량에 가깝게 발전 시킬 수 있다.

전기자동차 사용자는 스마트 그리드 상에서 전기자동차의 충방전 스케줄링만을 결정하지만 이에 더해 단순한 충방전 전략뿐만 아니라 다른 가전제품의 사용 시간 스케줄링도 가능하다. 이를 위해서는 사용자 행동 패턴 데이터를 몇 개의 활동으로 분류하고 이를 통해 사용되는 전자 기기를 결정하는 과정에서 다른 시간에도 할 수 있는 활동과 쓰일 수 있는 전자 기기들과 꼭 정해진 시간에 행해야만 하는 활동과 쓰여야만 하는 전자기기로 분류할 수 있다. 이러한 상황이 된다면 전기자동차 충전 스케줄링뿐만 아니라 전체적인 에너지 소비 스케줄링이 가능하고 이를 통해 스마트 그리드와 V2G의 경제적 효과는 더욱 커질 것이라고 판단된다.

이에 더해 스마트 그리드 상에서 전기자동차가 에너지 저장 장치로 사용되는

V2G 상황에서 전기자동차에 저장된 에너지는 속한 가정의 다른 가전제품을 이용하는 데에만 사용된다고 가정하였다. 이는 아직 한국에서는 전기 소비자가 전기를 전력망에 속하는 다른 사용자에게 팔거나 전기 공급자에게 팔거나 하는 거래가 활성화가 되지 않았기 때문에 한 가정이다. 하지만 이러한 것은 기술적으로 가능하고 V2G가 활성화된다면 한국에서도 실제 관련 시장이 생길 것이다. 따라서 전기자동차의 배터리가 에너지 저장 장치로서 활용되는 경우 다양한 방전이 가능하다면 V2G 기술의 가치는 더 올라갈 뿐만 아니라 전력망 부하 관리에도 더욱 도움이 될 것이라 판단된다.

본 논문 제4장과 제5장에서 다룬 상황에서는 스마트 그리드와 V2G 시스템에 참여하는 사용자는 자신의 주차 공간을 가지고 있고 V2G 인프라를 자신이 설치할 수 있고 설치에 필요한 비용을 사용자가 부담하는 상황을 가정하였다. 이러한 V2G 인프라 설치에 대한 투자는 사회의 전체의 효용과 전기자동차 보급을 활성화하기 위한 국가 전체의 인프라 투자 문제로 확장 가능하다.

이렇게 도출된 V2G의 경제적 가치 평가를 위해 실물옵션 방법을 적용하였는데 단순히 전기 가격만이 변동성으로 갖는 모델이 아닌 다양한 변동성을 갖는 실물 옵션 모형을 통해 좀 더 구체적인 모델을 개발이 가능할 것이다. 또한 모든 V2G 기술의 가격 평가에 있어서 전기자동차의 배터리의 수명과 교체 비용 같은 운영 비용을 고려하지 않았고 전력망의 피크 수요 감소로 인한 전력 공급자가 얻을 수 있는 이득과 환경오염 개선을 통한 사회적 이익 등을 고려한 전체 효용성을 판단하는 모델로 확장 가능 할 것이라 판단된다.

참고 문헌

Achtnicht, Martin. 2012. "German Car Buyers' Willingness to Pay to Reduce CO2 Emissions." *Climatic Change* 113 (3–4): 679–97. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0362-8.

Almehizia, Abdullah A., and J. M. Snodgrass. 2018. "Investigation of V2G Economical Viability." *2018 IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2018* 2018-Febru: 1–6. https://doi.org/10.1109/TPEC.2018.8312048.

Amamra, Sid Ali, and James Marco. 2019. "Vehicle-to-Grid Aggregator to Support Power Grid and Reduce Electric Vehicle Charging Cost." *IEEE Access* 7: 178528–38. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958664.

Battistelli, C., L. Baringo, and A. J. Conejo. 2012. "Optimal Energy Management of Small Electric Energy Systems Including V2G Facilities and Renewable Energy Sources." *Electric Power Systems Research* 92: 50–59. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.06.002.

Božič, Dušan, and Miloš Pantoš. 2015. "Impact of Electric-Drive Vehicles on Power System Reliability." *Energy* 83: 511–20. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.055.

Cao, Yijia, Shengwei Tang, Canbing Li, Peng Zhang, Yi Tan, Zhikun Zhang, and

Junxiong Li. 2012. "An Optimized EV Charging Model Considering TOU Price and SOC Curve." *IEEE Transactions on Smart Grid* 3 (1): 388–93. https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2159630.

Capasso, A., W. Grattieri, R. Lamedica, and A. Prudenzi. 1994. "A Bottom-up Approach to Residential Load Modeling." *IEEE Transactions on Power Systems* 9 (2): 957–64. https://doi.org/10.1109/59.317650.

Clairand, Jean Michel, Javier Rodriguez-Garcia, and Carlos Alvarez-Bel. 2018. "Smart Charging for Electric Vehicle Aggregators Considering Users' Preferences." *IEEE Access* 6: 54624–35. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872725.

Clement-Nyns, Kristien, Edwin Haesen, and Johan Driesen. 2010. "The Impact of Charging Plug-in Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid." *IEEE Transactions on Power Systems* 25 (1): 371–80. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2036481.

Das, Himadry Shekhar, Shuhui Li, Md Fahim F. Chowdhury, and Tonmoy Ghosh. 2020. "Game Theoretical Energy Management of EV Fast Charging Station with V2G Capability." *PECon 2020 - 2020 IEEE International Conference on Power and Energy*, 344–49. https://doi.org/10.1109/PECon48942.2020.9314460.

Das, Sourav, Parimal Acharjee, and Aniruddha Bhattacharya. 2020. "Charging Scheduling of Electric Vehicle Incorporating Grid-to-Vehicle (G2V) and Vehicle-to-Grid (V2G) Technology Considering in Smart-Grid." *IEEE Transactions on*

Industry Applications 57 (2): 1688–1702. https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3041808.

Davis, Graham A., and Brandon Owens. 2003. "Optimizing the Level of Renewable Electric R&D Expenditures Using Real Options Analysis." *Energy Policy* 31 (15): 1589–1608. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00225-2.

Elyasibakhtiari, Kiyan, Maher A. Azzouz, Elham Akhavan Rezai, and E. F. El-Saadany. 2015. "Real-Time Analysis of Voltage and Current in Low-Voltage Grid Due to Electric Vehicles' Charging." *International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2015*, 3–7. https://doi.org/10.1109/SEGE.2015.7324607.

Fudenberg, Drew, and Jean Tirole. 1991. *Game Theory*. Cambridge, MA, USA.: MIT Press.

Geth, Frederik, Koen Willekens, Kristien Clement, Johan Driesen, and Sven De Breucker. 2010. "Impact-Analysis of the Charging of Plug-in Hybrid Vehicles on the Production Park in Belgium." *Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON*, 425–30. https://doi.org/10.1109/MELCON.2010.5476243.

Gough, Rebecca, Charles Dickerson, Paul Rowley, and Chris Walsh. 2017. "Vehicle-to-Grid Feasibility: A Techno-Economic Analysis of EV-Based Energy Storage." *Applied Energy* 192: 12–23. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.102.

Grahn, Pia, Joakim Munkhammar, Joakim Widen, Karin Alvehag, and Lennart Soder.

2013. "PHEV Home-Charging Model Based on Residential Activity Patterns." *IEEE Transactions on Power Systems* 28 (3): 2507–15. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2230193.

Hashemi-Dezaki, Hamed, Mohsen Hamzeh, Hossein Askarian-Abyaneh, and Homayoun Haeri-Khiavi. 2015. "Risk Management of Smart Grids Based on Managed Charging of PHEVs and Vehicle-to-Grid Strategy Using Monte Carlo Simulation." *Energy Conversion and Management* 100: 262–76. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.015.

Hedegaard, Karsten, Hans Ravn, Nina Juul, and Peter Meibom. 2012. "Effects of Electric Vehicles on Power Systems in Northern Europe." *Energy* 48 (1): 356–68. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.012.

Jones, Laura, Kathryn Lucas-Healey, Björn Sturmberg, Hugo Temby, and Monirul Islam. 2021. "The A to Z of V2G," no. January. https://apo.org.au/sites/default/files/resource-files/2021-02/apo-nid311127.pdf.

Kamankesh, Hamidreza, Vassilios G. Agelidis, and Abdollah Kavousi-Fard. 2016. "Optimal Scheduling of Renewable Micro-Grids Considering Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Demand." *Energy* 100: 285–97. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.063.

Kavousi-Fard, Abdollah, Taher Niknam, and Mahmud Fotuhi-Firuzabad. 2015. "Stochastic Reconfiguration and Optimal Coordination of V2G Plug-in Electric

Vehicles Considering Correlated Wind Power Generation." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 6 (3): 822–30. https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2409814.

Kempton, Willett, Yannick Perez, and Marc Petit. 2014. "Public Policy for Electric Vehicles and for Vehicle to Grid Power." *Revue d'Economie Industrielle* 148 (4): 263–90. https://doi.org/10.4000/rei.5999.

Khalkhali, Hassan, and Seyed Hossein Hosseinian. 2020. "Multi-Stage Stochastic Framework for Simultaneous Energy Management of Slow and Fast Charge Electric Vehicles in a Restructured Smart Parking Lot." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 116 (September 2019): 105540. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105540.

Kim, Kyung Taek, Deok Joo Lee, and Sung Joon Park. 2014. "Evaluation of R&D Investments in Wind Power in Korea Using Real Option." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40: 335–47. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.165.

Kim, Younghwan, and Jae-Seung Lee. 2015. "Study on the Application of V2G for Electric Vehicles in Korea Using Total Cost of Ownership Analysis." *Journal of Energy Engineering* 24 (2): 129–43. https://doi.org/10.5855/energy.2015.24.2.129.

Li, Xinzhou, Yitong Tan, Xinxin Liu, Qiangqiang Liao, Bo Sun, Guangyu Cao, Cheng Li, Xiu Yang, and Zhiqin Wang. 2020. "A Cost-Benefit Analysis of V2G Electric

Vehicles Supporting Peak Shaving in Shanghai." *Electric Power Systems Research* 179 (October 2019): 106058. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106058.

Lojowska, Alicja, Dorota Kurowicka, Georgios Papaefthymiou, and Lou Van Der Sluis. 2011. "From Transportation Patterns to Power Demand: Stochastic Modeling of Uncontrolled Domestic Charging of Electric Vehicles." *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–7. https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039187.

Los Ríos, A. De, J. Goentzel, K. E. Nordstrom, and C. W. Siegert. 2012. "Economic Analysis of Vehicle-to-Grid (V2G)-Enabled Fleets Participating in the Regulation Service Market." *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT 2012*, 1–8. https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175658.

Masoum, A.S., S. Deilami, P.S. Moses, M.A.S. Masoum, and A. Abu-Siada. 2011. "Smart Load Management of Plug-in Electric Vehicles in Distribution and Residential Networks with Charging Stations for Peak Shaving and Loss Minimisation Considering Voltage Regulation." *IET Generation, Transmission & Distribution* 5 (8): 877. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0574.

Mayer, Klaus, and Stefan Trück. 2018. "Electricity Markets around the World." *Journal of Commodity Markets* 9 (February): 77–100. https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2018.02.001.

McKenna, Eoghan, Sarah Higginson, Philipp Grunewald, and Sarah J. Darby. 2017. "Simulating Residential Demand Response: Improving Socio-Technical

Assumptions in Activity-Based Models of Energy Demand." *Energy Efficiency*, 1–15. https://doi.org/10.1007/s12053-017-9525-4.

Meisterling, Kyle, and Constantine Samaras. 2008. "Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles : Implications for Policy." *Environmental Science and Technology* 42 (9): 3170–76. http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es702178s.

Mets, Kevin, Tom Verschueren, Wouter Haerick, Chris Develder, F. De Turck, and Filip De Turck. 2010. "Optimizing Smart Energy Control Strategies for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging." *2010 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops*, 293–99. https://doi.org/10.1109/NOMSW.2010.5486561.

Mets, Kevin, Tom Verschueren, Filip De Turck, and Chris Develder. 2011. "Exploiting V2G to Optimize Residential Energy Consumption with Electrical Vehicle (Dis)Charging." *2011 IEEE 1st International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation, SGMS 2011*, 7–12. https://doi.org/10.1109/SGMS.2011.6089203.

Moghaddam, Zeinab, Iftekhar Ahmad, Daryoush Habibi, and Quoc Viet Phung. 2017. "Smart Charging Strategy for Electric Vehicle Charging Stations." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 4 (1): 76–88. https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2753403.

Mohsenian-Rad, Amir Hamed, Vincent W.S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober,

and Alberto Leon-Garcia. 2010. "Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid." *IEEE Transactions on Smart Grid* 1 (3): 320–31. https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2089069.

Moon, Saedaseul, and Deok Joo Lee. 2019. "An Optimal Electric Vehicle Investment Model for Consumers Using Total Cost of Ownership: A Real Option Approach." *Applied Energy* 253 (November 2018): 113494. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113494.

Muratori, Matteo. 2018. "Impact of Uncoordinated Plug-in Electric Vehicle Charging on Residential Power Demand." *Nature Energy* 3 (3): 193–201. https://doi.org/10.1038/s41560-017-0074-z.

Muratori, Matteo, Matthew C. Roberts, Ramteen Sioshansi, Vincenzo Marano, and Giorgio Rizzoni. 2013. "A Highly Resolved Modeling Technique to Simulate Residential Power Demand." *Applied Energy* 107: 465–73. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.057.

Noel, Lance, and Regina McCormack. 2014. "A Cost Benefit Analysis of a V2G-Capable Electric School Bus Compared to a Traditional Diesel School Bus." *Applied Energy* 126 (August): 246–55. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.04.009.

Nworgu, Okezie A., Uwakwe C. Chukwu, Chika G. Okezie, and Ngozi B. Chukwu.

2016. “Economic Prospects and Market Operations of V2G in Electric Distribution Network.” In *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 1–5. IEEE. https://doi.org/10.1109/TDC.2016.7519938.

Peterson, Scott B., J. F. Whitacre, and Jay Apt. 2010. “The Economics of Using Plug-in Hybrid Electric Vehicle Battery Packs for Grid Storage.” *Journal of Power Sources* 195 (8): 2377–84. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.09.070.

Pieltain Fernández, Luis, Tomás Gómez San Román, Rafael Cossent, Carlos Mateo Domingo, and Pablo Frías. 2011. “Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks.” *IEEE Transactions on Power Systems* 26 (1): 206–13. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2049133.

Putrus, G. A., P. Suwanapingkarl, D. Johnston, E. C. Bentley, and M. Narayana. 2009. “Impact of Electric Vehicles on Power Distribution Networks.” *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC ’09*, 827–31. https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289760.

Qian, Kejun, Chengke Zhou, Malcolm Allan, and Yue Yuan. 2011. “Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems.” *IEEE Transactions on Power Systems* 26 (2): 802–10. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2057456.

Rahman, Imran, Pandian M. Vasant, Balbir Singh Mahinder Singh, M. Abdullah-Al-

Wadud, and Nadia Adnan. 2016. "Review of Recent Trends in Optimization Techniques for Plug-in Hybrid, and Electric Vehicle Charging Infrastructures." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58: 1039–47. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.353.

Saad, Walid, Zhu Han, H. Vincent Poor, and Tamer Başar. 2012. "Game-Theoretic Methods for the Smart Grid: An Overview of Microgrid Systems, Demand-Side Management, and Smart Grid Communications." *IEEE Signal Processing Magazine* 29 (5): 86–105. https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2186410.

Siddiqui, Afzal S., Chris Marnay, and Ryan H. Wiser. 2007. "Real Options Valuation of US Federal Renewable Energy Research, Development, Demonstration, and Deployment." *Energy Policy* 35 (1): 265–79. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.019.

Singh, Jyotsna, and Rajive Tiwari. 2020. "Cost Benefit Analysis for V2G Implementation of Electric Vehicles in Distribution System." *IEEE Transactions on Industry Applications* 56 (5): 5963–73. https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2986185.

Sortomme, Eric, and Mohamed A. El-Sharkawi. 2011. "Optimal Charging Strategies for Unidirectional Vehicle-to-Grid." *IEEE Transactions on Smart Grid* 2 (1): 119–26. https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2090910.

Sovacool, Benjamin K., Johannes Kester, Lance Noel, and Gerardo Zarazua de Rubens.

2020. "Actors, Business Models, and Innovation Activity Systems for Vehicle-to-Grid (V2G) Technology: A Comprehensive Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131 (June): 109963. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109963.

Subbiah, R., K. Lum, A. Marathe, and M. Marathe. 2013. "Activity Based Energy Demand Modeling for Residential Buildings." In *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1–6. IEEE. https://doi.org/10.1109/ISGT.2013.6497822.

Taylor, Jason, Arindam Maitra, Mark Alexander, Daniel Brooks, and Mark Duvall. 2010. "Evaluations of Plug-in Electric Vehicle Distribution System Impacts." *IEEE PES General Meeting, PES 2010*, 1–6. https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589538.

Torres-Sanz, Vicente, Julio A. Sanguesa, Francisco J. Martinez, Piedad Garrido, and Johann M. Marquez-Barja. 2018. "Enhancing the Charging Process of Electric Vehicles at Residential Homes." *IEEE Access* 6: 22875–88. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2829158.

Wade, N. S., P. C. Taylor, P. D. Lang, and P. R. Jones. 2010. "Evaluating the Benefits of an Electrical Energy Storage System in a Future Smart Grid." *Energy Policy* 38 (11): 7180–88. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.045.

Weiller, Claire. 2011. "Plug-in Hybrid Electric Vehicle Impacts on Hourly Electricity Demand in the United States." *Energy Policy* 39 (6): 3766–78.

https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.005.

Wenzel, George, Matias Negrete-Pincetic, Daniel E. Olivares, Jason MacDonald, and Duncan S. Callaway. 2018. "Real-Time Charging Strategies for an Electric Vehicle Aggregator to Provide Ancillary Services." *IEEE Transactions on Smart Grid* 9 (5): 5141–51. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2681961.

Widén, Joakim, Magdalena Lundh, Iana Vassileva, Erik Dahlquist, Kajsa Ellegård, and Ewa Wäckelgård. 2009. "Constructing Load Profiles for Household Electricity and Hot Water from Time-Use Data—Modelling Approach and Validation." *Energy and Buildings* 41 (7): 753–68. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2009.02.013.

Widén, Joakim, and Ewa Wäckelgård. 2010. "A High-Resolution Stochastic Model of Domestic Activity Patterns and Electricity Demand." *Applied Energy* 87 (6): 1880–92. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.006.

Xing, Qiang, Zhong Chen, Ziqi Zhang, Xueliang Huang, Zhaoying Leng, Kehui Sun, Yanxi Chen, and Haiwei Wang. 2019. "Charging Demand Forecasting Model for Electric Vehicles Based on Online Ride-Hailing Trip Data." *IEEE Access* 7: 137390–409. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940597.

Yeo, Sangmin, Deok-Joo Lee, Taegu Kim, and Hyung-Sik Oh. 2015. "Optimal Energy Consumption Scheduling in Smart-Grid Considering Storage Appliance : A Game-Theoretic Approach." 대한산업공학회지 41 (5): 414–24.

http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06525092.

Yu, Rong, Jiefei Ding, Weifeng Zhong, Yi Liu, and Shengli Xie. 2014. "PHEV Charging and Discharging Cooperation in V2G Networks: A Coalition Game Approach." *IEEE Internet of Things Journal* 1 (6): 578–89. https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2363834.

Zeng, Bo, Jiahuan Feng, Jianhua Zhang, and Zongqi Liu. 2017. "An Optimal Integrated Planning Method for Supporting Growing Penetration of Electric Vehicles in Distribution Systems." *Energy* 126: 273–84. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.014.

Zhang, Jin, Liang Che, Lei Wang, and Udaya K. Madawala. 2020. "Game-Theory Based V2G Coordination Strategy for Providing Ramping Flexibility in Power Systems." *Energies* 13 (18). https://doi.org/10.3390/en13195008.

Zhang, Yongmin, and Lin Cai. 2018. "Dynamic Charging Scheduling for EV Parking Lots with Photovoltaic Power System." *IEEE Access* 6: 56995–5. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2873286.

Zhao, Yang, Mehdi Noori, and Omer Tatari. 2016. "Vehicle to Grid Regulation Services of Electric Delivery Trucks: Economic and Environmental Benefit Analysis." *Applied Energy* 170: 161–75. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.097.

Zhu, Xiaojun, Haiteng Han, Shan Gao, Qingxin Shi, Hantao Cui, and Guoqiang Zu.

2018. “A Multi-Stage Optimization Approach for Active Distribution Network Scheduling Considering Coordinated Electrical Vehicle Charging Strategy.” *IEEE Access* 6: 50117–30. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2868606.

기초전력연구원. 2016. “V2G(Vehicle to Grid) 실증 분석을 통한 활성화 방안 연구.”

김현철. 2017. “전력연동망(V2G) 사업의 국내·외 동향과 시사점.” 제주연구원 정책이슈브리프 281.

통계청. 2014. “생활시간조사이용자 가이드라인,” 1–191.

한국자동차연구원. 2021. “전기차 배터리의 새로운 역할.” Vol. 57.

Abstract

Economic Evaluation and Optimal Operation Strategy of Vehicle-to-Grid Technology based on Users' Behavior Pattern Data

Sangmin Yeo
Department of Industrial Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Eco-friendly vehicles, such as plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and electric vehicles (EVs), are becoming increasingly common as a response to mitigate the environmental problems associated with fossil fuel use. The increasing number of EVs has both advantages and disadvantages. The aims of this paper are to identify potential problems resulting from the large-scale diffusion of EVs, investigate methods to reduce these problems, and develop a model for economic analysis. In particular, vehicle-to-grid (V2G) technology is explored as a way to help solve these problems, and optimal EV charging scheduling strategies and economic values for V2G are derived using actual behavior pattern data of Korean

users. On this basis, an optimal investment model is proposed. From user behavior pattern data, electricity consumption by time, EV operation time, and the available time for EV home charging can be derived. Behavior pattern data can be used to derive users' electricity consumption by time because household appliance use depends on activities. Based on the driving time of the EV, charging demand can be calculated, and information on individuals' location by time makes it possible to determine the time for home charging. Based on these results, the optimal charging strategy is derived by comparing the electricity bills of each user for three different charging strategies, with the electricity rate policy fixed by time. The impact of different charging strategies on the power grid and user electricity bill is examined, and the effects of the optimal charging strategy are evaluated. Based on the user behavior pattern data, a model is developed for determining the optimal EV charging strategy for each user with a real-time electricity rate policy according to users' total electricity use on a smart grid system. When users share their electricity consumption schedule and the electricity provider determines the electricity rate in real time from users' total electricity use, each user's electricity bill is affected both by his or her own electricity consumption schedule and by the electricity consumption schedule of the other users on the smart grid system. This situation can be formulated as a game theory situation, and each user will make a decision that maximizes his or her payoff. An algorithm for finding the Nash equilibrium in this game model is developed. Through this, the economic value of the optimal EV charging scheduling algorithm for a smart grid system is evaluated. When V2G technology is introduced into this smart grid system, where EVs can be used as an energy storage system, the optimal EV charging/discharging scheduling is derived, and the economic value of the V2G technology is evaluated. V2G technology, which can help mitigate the problems of

power grid overload problem and EV users' electricity bills, is not widely used yet for reasons including the low market share of EVs. In this situation, an economic analysis model for V2G technology adoption using the discounted cash flow method and real options method is proposed. Since the real options model considers volatility, it enables more flexible decision-making and has a higher value than the discount cash flow model. These attributes of real options are suitable for the adoption of V2G technology, which has a highly uncertain future cash flow. Through this model, under various circumstances, each user conducts an economic analysis of V2G technology and decides upon investing in V2G adoption.

Keywords: Economic analysis, Game theory, Real options, Infrastructure investment, Electric vehicle, Vehicle-to-Grid, Simulation, Optimization, Industrial engineering

Student Number: 2016-37577