



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](#)

공학박사 학위논문

ESS를 이용한 에너지 차익거래가
시장참여자 후생과 투자전략에
미치는 단기영향 분석

Short-term Effects of Energy Arbitrage with
ESS on Market Participants' Welfare and
Investment Strategies

2017년 08월

서울대학교 대학원

전기·컴퓨터 공학부

김 형 익

ESS를 이용한 에너지 차익거래가
시장참여자 후생과 투자전략에
미치는 단기영향 분석

지도교수 윤 용 태

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2017년 08월

서울대학교 대학원
전기·컴퓨터 공학부
김 형 익

김형익의 박사 학위논문을 인준함
2017년 08월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

전통적으로 전력계통은 시시각각 변화하는 수요를 공급이 맞추는 형태로 운영되어 왔으며 이를 위해 피크수요보다 높은 수준의 공급설비를 갖추어야 했다. 하지만 최근 연구들은 수요 측의 적절한 변화가 공급 측의 변화보다 더욱 경제적이 될 수 있음을 증명하였고, 수요의 평탄화는 단기적으로 운영비용의 절감의 효과가, 장기적으로는 설비 증설의 지연 및 회피의 효과가 있는 것으로 알려져 왔다. 이와 같은 긍정적인 효과에도 불구하고 아직 수요 측의 변화는 활발히 이뤄지지 못하고 있는 실정인데 이는 수요 변화의 유인이 소비자의 효용변화보다 혹은 저장비용보다 크지 않았기 때문이다. 그에 반해, 최근 에너지 저장장치의 가격은 점차 낮아지고 있고, 또한 신재생 에너지원과 같은 간헐적 전원의 증가로 전력가격의 변동성이 증가함에 따라 에너지 저장장치를 이용한 수요의 변화가 주목받고 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 에너지 저장장치를 이용한 에너지 차익거래의 운영과 투자에 관한 연구들은 충분히 이뤄지지 않고 있으며, 특히 에너지 차익거래로 인한 전력시장의 가격변화가 에너지 차익거래의 가치와 시장참여자의 후생

에 미치는 영향 분석 및 이에 따른 시장참여자별 저장장치 투자전략에 대한 연구가 부족하였다.

본 연구에서는 현재 저장장치 소유자가 수요변화를 위해 어떤 유인을 받고 있는지를 확인하고, 그 유인에 대한 에너지 저장장치의 운영전략이 경제성을 확보하였는지 평가하였다. 또한 무위험거래와 저장비용을 고려한 에너지 차익거래의 두 기간 모델을 이용한 단기분석을 통해 다양한 시장 환경에서 시장참여자들의 최적 저장장치 투자전략을 도출하였다.

사회후생을 최대로 하는 저장장치 투자량과 비교하여 소비자는 더 많은 양을, 생산자와 상업저장장치소유자는 더 적은 양의 저장장치를 투자하려는 경향이 있음을 확인하였다. 뿐만 아니라 자유로운 투자가 가능한 환경에서는 오직 소비자만이 저장장치에 투자하는 것을 다중 에이전트 비협조게임의 내쉬균형 도출을 통해 확인하였다. 이로 인해 독과점의 판매사업자가 도매시장의 수요 측에서 에너지 저장장치를 이용하여 불합리한 시장지배력을 발휘할 가능성이 있는데, 이를 완화시키는 방안으로 판매부문의 경쟁 도입 및 무위험거래 비율 증가가 효과가 있음을 확인하였다.

주요어 : 내쉬균형, 에너지 저장장치, 에너지 차익거래, 투자전략, 후
생분석.

학 번 : 2011-20825

목 차

초록	i
목차	iv
그림목차	viii
표목차	xi
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 논문의 개요 및 구성	8
제 2 장 수요변화와 사회후생	10
2.1 에너지 저장장치와 수요변화	10
2.1.1 전력계통에서의 수요변화	10
2.1.2 수요변화의 효과	11
2.1.3 수요변화의 유인	12
2.1.4 ESS를 이용한 수요변화	17
2.1.5 에너지 차익거래	18
2.2 사회후생	21
2.2.1 후생경제학	21
2.2.2 시장참여자의 생산과 소비전략	22
2.2.3 소비자 잉여, 생산자 잉여 그리고 사회후생	23
2.2.4 연구 내 사회후생	25

제 3 장	전력가격/전기요금 하에서 ESS 운영의 경제성 평가	27
3.1	모델 구성 및 정식화	28
3.1.1	TOU 하에서 ESO의 ESS 운영전략 모델	28
3.1.2	SMP 하에서 ESO의 ESS 운영전략 모델	35
3.1.3	ESS 열화비용	36
3.2	사례연구	38
3.2.1	TOU 하에서 ESS 운영의 경제성 평가	38
3.2.2	SMP 하에서 ESS 운영의 경제성 평가	54
3.3	국내 에너지 차익거래의 가치평가	56
3.4	소결론	64
제 4 장	에너지 차익거래용 ESS의 투자유인 및 최적 투자전략	67
4.1	두 기간 모델과 시장참여자의 후생 분석	68
4.1.1	시장참여자 정의	69
4.1.2	두 기간 모델 과 시장참여자의 후생변화	78
4.1.3	ESO가 가격수용자일 때의 이론적 고찰	93
4.2	다양한 시장구조 하에서 시장참여자별 ESS 투자전략	103
4.2.1	시장 환경 설정 및 가정	103
4.2.2	시장참여자별 후생 변화	106
4.2.3	시장구조의 설명 및 연구의 의의	109

4.2.4	구조 1: 수직통합구조	111
4.2.5	구조 2: 발전, 판매부문이 분리된 구조에서의 각 부문 별 시장참여자의 투자전략 (단일 에이전트의 n-참여자 비협조게임)	113
4.2.6	구조 3: 발전, 판매부문이 분리된 구조에서의 시장참 여자별 투자전략 (다중 에이전트의 n-참여자 비협조게 임)	122
4.3	사례연구	132
4.3.1	사례연구 데이터	132
4.3.2	구조 1: 수직통합구조	133
4.3.3	구조 2: 발전, 판매부문이 분리된 구조에서의 각 부문 별 시장참여자의 투자전략 (단일 에이전트의 n-참여자 비협조게임)	138
4.3.4	구조 3: 발전, 판매부문이 분리된 구조에서의 시장참 여자별 투자전략 (다중 에이전트의 n-참여자 비협조게 임)	150
4.4	소결론	155
제 5 장	결론	158
참고문헌	162
부록	172

부록 1. 내쉬균형과 최적반응함수	171
부록 2. n-참여자 비협조게임의 내쉬균형 도출과정 ..	174
부록 3. 구조 3에서 시장참여자 수에 따른 각 시장참여 자별 최적 ESS 투자량 도출	185
Abstract	188

그 립 목 차

[그림 2.1]	전력도매시장의 공급곡선과 수요곡선, 전력가격의 결정	13
[그림 2.2]	공급곡선과 수요곡선, 생산자잉여와 소비자 잉여	24
[그림 3.1]	전력량요금요율, 계통한계가격(SMP), 계통 전체부하의 패턴 비교 (2015년 1월 평균)	31
[그림 3.2]	도시철도부하, 일반부하, 전력량요금요율의 하루 패턴 비교	39
[그림 3.3]	충방전 사이클의 분리(decoupling) [46]: (a) 기존 충방 전 사이클, (b) 분리된 충방전 사이클	44
[그림 3.4]	기본요금 최소화를 위한 ESS 운영 결과 (CASE 2): (a) ESS 운영 전후 계측 전력, (b) ESS 출력과 SoC	48
[그림 3.5]	기본요금 및 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영 결 과 (CASE 3): (a) ESS 운영 전후 계측 전력, (b) ESS 출력과 SoC	49
[그림 3.6]	ESS 운영 전략이 열화에 미치는 영향: (a) SoC, (b) 누적열화수준	51
[그림 3.7]	CASE 별 총비용 비교	53
[그림 3.8]	ESS 저장가능시간에 따른 SMP 하에서의 국내 에너지 차익거래 가치 (2009년-2016년)	57
[그림 3.9]	ESS 저장가능시간에 따른 SMP 하에서의 국내 에너지	

차익거래 한계 가치 (2009년-2016년)	57
[그림 3.10] ESS 저장가능시간에 따른 TOU 하에서의 국내 에너지 차익거래 가치	61
[그림 3.11] ESS 저장가능시간에 따른 TOU 하에서의 국내 에너지 차익거래 한계 가치	61
[그림 4.1] ESS 소유 구조 및 시장참여자별 에너지 차익거래를 위한 운영 방안	70
[그림 4.2] 생산자의 ESS 운영 방안: (a) G_t 와 S_t 의 관계, (b) ESS 충방전량 ($\rho_{t_1} < \rho_{t_2}$)	74
[그림 4.3] MSO의 ESS 운영 방안: (a) S_t 와 C_t 의 관계, (b) ESS 충방전량 ($\rho_{t_1} < \rho_{t_2}$)	75
[그림 4.4] 소비자의 ESS 운영 방안: (a) C_t 와 D_t 의 관계, (b) ESS 충방전량 ($\rho_{t_1} < \rho_{t_2}$)	77
[그림 4.5] ESS(1GW/1GWh)의 에너지 차익거래에 따른 SMP 변화 (2015년 7월 23일)	79
[그림 4.6] ESS를 이용한 에너지 차익거래의 두 기간 모델	82
[그림 4.7] 에너지 차익거래로 인한 각 시장참여자의 후생변화	84
[그림 4.8] 무위험거래를 고려한 두 기간 모델과 이에 따른 각 시장참여자의 후생변화	88
[그림 4.9] 소매요금제(TOU) 하에서의 에너지 차익거래 두 기간 모델	94
[그림 4.10] SMP 하에서의 에너지 차익거래 두 기간 모델 (ESO	

가 가격수용자일 때)	98
[그림 4.11] 국내 2016년의 실제 예측수요와 SMP의 관계	105
[그림 4.12] PJM 2006년 6월의 수요와 전력가격의 관계	105
[그림 4.13] 에너지 차익거래용 ESS 투자량에 따른 각 시장참여 자의 후생변화	107
[그림 4.14] 시장구조 개념도 및 시장참여자별 경쟁 구조: (a) 구 조 1. 수직통합구조, (b) 구조 2. 발전, 판매 부문이 분리된 구조에서 각 부문별 경쟁, (c) 구조 3. 발전, 판매 부문이 분리된 구조에서 자유로운 경쟁	111
[그림 4.15] ESS 투자량에 따른 사례 1의 후생변화와 후생변화에 저장비용이 미치는 영향: (a) 후생변화, (b) 한계후생 변화	135
[그림 4.16] 두 소비자(c^1, c^2)의 최적반응함수와 내쉬균형 (구조 2)	142
[그림 4.17] 두 생산자(p^1, p^2)의 최적반응함수와 내쉬균형 (구조 2)	144
[그림 4.18] 두 MSO(m^1, m^2)의 최적반응함수와 내쉬균형 (구조 2)	145
[그림 4.19] ESS 투자량에 따른 각 시장참여자의 투자전략의 후 생변화와 후생변화에 무위험거래 비율이 미치는 영 향	148
[그림 4.20] MSO와 소비자의 최적반응곡선과 무위험거래 비율에 따른 내쉬균형영역	154

표 목 차

[표 3.1]	ESS 열화에 미치는 요인 분류	41
[표 3.2]	ESS 사양	46
[표 3.3]	ESS 열화모델 파라미터값	46
[표 3.4]	도시철도공사 적용 전기요금 요율 (산업용 갑, 고압 A, 선택 II)	47
[표 3.5]	전략별 ESS 운영의 결과	52
[표 3.6]	ESS 저장가능시간에 따른 국내 에너지 차익거래 가치 (2009년-2016년)	58
[표 3.7]	ESS 저장가능시간에 따른 국내 에너지 차익거래 한계 가치 (2009년-2016년)	59
[표 4.1]	소매시장과 도매시장에서의 각 시장참여자의 대표적인 형태	78
[표 4.2]	무위험거래와 ESS 비용을 고려한 제안한 두 기간 모델에서의 에너지 차익거래에 따른 각 시장참여자의 후생변화	92
[표 4.3]	사례연구를 위한 시장파라미터와 ESS 파라미터의 기준 값	132
[표 4.4]	수직통합구조에서의 최적 ESS 투자량 (구조 1, 사회후생 최대화)	134
[표 4.5]	MSO의 최적 ESS 투자량 (구조 2)	140
[표 4.6]	생산자의 최적 ESS 투자량 (구조 2, 음의 투자가 가능한	

경우)	140
[표 4.7] 소비자의 최적 ESS 투자량 (구조 2)	141
[표 4.8] 참여자 수에 따른 MSO의 최적 ESS 투자량 (구조 2)	147
[표 4.9] 참여자 수에 따른 생산자의 최적 ESS 투자량 (구조 2)	147
[표 4.10] 참여자 수에 따른 소비자의 최적 ESS 투자량 (구조 2)	147
[표 4.11] 모든 시장참여자의 자유로운 투자가 가능한 경우의 최 적 ESS 투자량 (구조 3)	151
[표 4.12] 무위험거래 비율에 따른 시장참여자별 최적 ESS 투자 량	152
[표 A3.1] 시장참여자 수에 따른 각 시장참여자별 최적 ESS 투 자량 (1개의 소비자만 있는 경우, $Z=1$)	186
[표 A3.2] 시장참여자 수에 따른 각 시장참여자별 최적 ESS 투 자량 (10개의 소비자가 있는 경우, $Z=10$)	186
[표 A3.3] 시장참여자 수에 따른 각 시장참여자별 최적 ESS 투 자량 (100개의 소비자가 있는 경우, $Z=100$)	186
[표 A3.4] 시장참여자 수에 따른 각 시장참여자별 최적 ESS 투 자량 (무한개의 소비자가 있는 경우, $Z=\infty$)	186

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목적

전기는 비경합성(non-rivalry)과 배제불가능성(non-excludability)의 요건을 갖추지 못함에도 불구하고 공공재적 성질을 갖는 재화이다. 또한 수요가 가격에 비탄력적이며, 대규모의 전기 저장을 경제적으로 해오지 못했다. 이런 특성으로 인해 전통적으로 수급균형은 공급 측에서 변화하는 수요를 맞추는 형태로 이루어져왔고, 이를 위해 피크수요보다 높은 수준의 공급설비를 보유하여야 했다. 하지만 다양한 연구를 통해 수요 측의 적절한 변화는 공급 측의 변화보다 더욱 경제적일 수 있음이 확인하였다 [1]. 수요평탄화(load flattening)로 대표되는 다양한 수요변화는 단기간으로는 운영비용의 감소를, 장기적으로는 공급설비 증설의 지연 및 회피의 효과가 있다 [2-4]. 이와 같은 효과로 인해 다양한 방법으로 수요를 변화시키기 위한 노력들이 진행되고 있지만, 수요의 가격 비탄력성으로 인해 그 효과가 미미한 편이다. 또한 소비자들의 실제 전력사용량 변화로 인해 필연적으로 감소하는 효용은 금전화하기가 어려워 관련 연구가 어려운 상황이다.

그에 반해, 에너지 저장장치 (energy storage system, ESS)를 이용한

수요의 이동(load shifting)은 다양한 신호에 대하여 속응이 가능하며, 실제 소비자의 전력사용량의 변화 없이 수요변화의 혜택을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 즉, 소비자의 실제 전력사용량에는 변화가 없기 때문에 소비자는 ESS를 이용한 수요의 변화에도 불구하고 효용이 변화하지 않는다. 이와 같이 소비자 효용의 감소 없이 수요변화를 정확하게 수행할 수 있다는 장점에도 불구하고, 아직까지는 높은 수준의 투자비용[5], 환경문제, 설치장소의 제약 [6-7] 등으로 인해 적극적인 ESS의 도입이 이뤄지지 않고 있다. 하지만 ESS의 가격은 갈수록 낮아지고 있고, 신재생 에너지원과 같은 간헐적 설비들의 증가로 인해 전력 가격의 변동성은 커지고 있어 [8], ESS를 이용한 수요의 변화는 향후 더욱 주목받을 것으로 기대된다.

수요평탄화로 인한 시스템 전체에 미치는 긍정적인 영향에도 불구하고, 에너지 저장장치 소유자 (energy storage owner, ESO)는 자신의 이익만을 위해 ESS를 운영 할 것이다. 이는 ESO에게 적절한 유인이 있어야만 ESS를 통한 수요평탄화가 이루어질 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 계통운영자와 ESO의 목적이 일치하지 않는 경우, ESO를 유인하는 문제가 최근 이슈가 되고 있다 [9].

본 연구는 ESO가 수요평탄화를 위해 어떻게 ESS를 운영하도록 할 것인지, 또 어떻게 ESS에 투자하도록 할 것인지에 대한 시사점을 제공한다. 이를 위해, ESO가 현재 어떤 유인을 받고 있으며, 그 유인에 대해

여 어떻게 ESS를 운영하는 것이 최적인지 알아보고, 다양한 유인들에 의한 ESS 운영의 경제성을 평가해보고자 하였다. 이와 관련하여 에너지 비용을 줄이기 위한 목적의 ESS 운영전략에 대한 다양한 기존 연구들이 있었다 [5, 10-17]. ESS 활용을 통한 비용감소의 효과 및 기술적 가능성은 확인하였지만, 투자대비 수익률 확보는 높은 ESS 투자비용에 의해 아직 어려운 상황임을 밝힌 연구들이 있었다 [5, 10-12]. 기존 연구들의 경우, ESS 운영 전략에 집중한 나머지 ESS 투자 및 운영비용에 대하여는 고려하지 않거나, 고려하였더라도 운영 전략에 따라 ESS의 수명이 변화하여 달라질 수 있는 열화비용의 변화를 고려하지 않아, ESS 투자 비용을 과소평가 하였거나, 열화비용이 최적전략 도출에 미치는 영향을 간과하였다 [10, 13-15]. 또한, 소매요금제 하에서의 수요변화의 유인은 일반적으로 개별피크부하를 줄여 기본요금을 줄이는 피크절감 (peak shaving)과, 전체피크부하를 줄여 전력량요금을 감소하는 에너지 차익거래로 나뉘는데, 연구에 사용하는 부하의 패턴이 전체부하 패턴과 비슷하거나 동일하여 ESS의 최적 운영 전략의 결과가 어떤 유인으로 인해 결정된 것인지 구분하기 어려운 문제가 있었다 [10, 15-17]. 이와 같은 기존 연구들의 문제점들을 보완하기 위해, 본 연구에서는 운영전략에 따른 열화비용을 계산하고, 대상 부하도 일반부하와는 다른 도시철도부하를 이용하여 명확하게 경제성을 평가할 수 있도록 하였다. 그밖에도, 다양한 시장에서의 다양한 저장장치의 활용 및 경제성 연구 [18-26], 에너지 차

익거래의 가능성에 대한 일반적인 연구들도 있었다 [27-29]. 에너지 차익거래의 가치는 각 나라마다, 또 시장마다 다르게 나타나며, 이는 에너지 차익거래를 위해 ESS를 투자하는 투자자들에게는 중요한 정보가 된다. 다양한 시장에서의 에너지 차익거래의 가치평가가 많이 진행되었지만 [6, 30-33], 다수의 연구들은 ESO를 가격수용자(price-taker)로 가정하고 결과를 도출하였다. 하지만 ESS가 에너지 차익거래로 경제성을 확보하여 대량으로 계통에서 운영될 경우, ESS의 운영으로 인한 수요의 변화가 전력가격의 변화를 가져올 것이므로 그 영향을 고려한 연구가 필요할 것으로 보인다. 뿐만 아니라, 아직까지 국내 시장에서의 에너지 차익거래의 가치평가에 대한 연구는 충분히 이뤄지지 않고 있다.

또한, 본 연구에서는 ESS가 에너지 차익거래로 경제성을 확보하였을 경우, 시장참여자별 ESS 투자 유인을 분석하고, 최적 ESS 투자량을 도출하고자 하였다. 관련 기존 연구들로, 에너지 차익거래용 ESS가 시장참여자들의 후생과 사회후생에 미치는 영향을 분석한 연구들이 있었다 [30, 34-36]. 이 연구들은 앞서 소개한 ESO를 가격수용자로 가정하였던 기존연구들과는 달리 ESS의 운영이 전력가격에 미치는 영향을 고려하고, 그에 따른 후생을 분석하였다는 점에서 큰 의의를 갖는다. ESS의 충전과 방전의 두 상황을 단순한 두 기간 모델을 이용하여 분석하는 방법을 [30]에서 제안하였고, 이 모델을 이용하여 에너지 차익거래가 생산자와 소비자의 잉여와 그에 따른 사회후생에 미치는 영향을 분석하는 방법

을 소개하였다. 이를 기반으로 [34]에서는 2010년 PJM의 하루 전 시장에서 다양한 타입의 ESS가 투자비용 대비 사회후생이 얼마만큼 증가였는지를 비교함으로써 경제성을 평가하고자 하였다. 또한 양수발전기가 부하로 사용될 때와 발전설비로 사용될 때 각각의 소비자와 생산자의 후생변화를 확인하는 연구도 있었다 [35]. [30, 34, 35]는 특정 시장에서 특정 타입의 ESS가 사회후생에 미치는 영향을 분석하고 경제성을 평가하였는데 그 공헌이 있지만 ESS의 소유 구조 및 투자에 관하여는 고려하지 못했다는 한계점이 있다. 이에 [36]은 ESS의 소유 및 운영 구조를 생산자, 소비자, 제 3의 투자자로 구분하고, 두 기간 모델을 이용하여 시장참여자들의 후생변화를 분석하였다. 또한 사회후생을 최대화하기 위한 각 시장참여자들의 최적 ESS 소유 조합을 도출하였다. 하지만 실제 시장참여자들이 ESS를 이용하여 에너지 차익거래를 할 경우의, 각기 다른 후생변화로 인한 투자유인 및 투자전략에 관한 분석은 이루어지지 않았으며 [30, 34-36], 사회후생을 최대화하기 위한 최적 ESS 투자량뿐만 아니라 각 시장참여자의 투자량 역시 ESS의 저장비용에 의해 결정됨에도 불구하고, 기존 연구에서는 단순히 경계조건을 제약에 넣음으로써 계통 내 ESS 투자량을 가정하였다 [34, 36]. 또한 사회후생 최대를 위해 ESS 소유량 조합을 유인하기 위해 발생하는 추가적인 사회비용으로 인해 최적 투자점이 변화할 수 있음에도 기존 모델은 이를 반영하지 못하였다.

본 연구에서는 현재 ESO가 전력가격 혹은 소매요금제 하에서 에너지

요금을 최소화하기 위한 최적 ESS 운영전략을 정식화하고, 각 전략의 결과로 인해 달라지는 ESS 열화비용을 계산하여 운영 전략 별 경제성을 평가하였다. 그리고 현재 국내의 SMP와 TOU 요금제의 에너지 차익거래 가치를 평가함으로써, ESS를 이용한 에너지 차익거래가 경제성을 확보하기 위한 ESS 비용의 수준을 가늠할 수 있도록 하였다.

또한, 에너지 차익거래용 ESS가 경제성을 확보했을 경우를 가정하여, 다양한 시장구조에서의 시장참여자별 최적 ESS 투자량을 도출하였다. 이를 위해, [30, 36]의 두 기간 모델에 저장비용과 무위험거래를 고려한 개선된 모델을 제안하고, 이 모델을 이용하여 에너지 차익거래용 ESS 투자에 따른 시장참여자별 후생 변화와 에너지 차익거래의 가치변화를 분석하였다. 분석한 후생변화를 기반으로 기존 연구에서 고려되지 않았던 각 시장참여자들의 ESS 투자유인 분석 및 투자전략을 도출하였다. 둘 이상의 시장참여자가 다른 시장참여자와 담합 없이 비협조 경쟁을 통해 최적 ESS 투자량을 결정하는 경우의 해를 구하기 위해, n-참여자 비협조게임의 내쉬균형을 구하였다. 여러 유형의 다수의 시장참여자의 비협조게임 해를 찾기 위해 각 시장참여자의 목적함수는 MCP (mixed complementarity problem)으로 정식화하였고, GAMS의 PATH solver를 이용하여 내쉬균형점을 도출하였다. 국내 전력계통의 실정을 고려한 사례연구를 통해 에너지 차익거래용 ESS가 경제성을 확보하여 대량으로 투자가 가능해질 경우, 그 결과가 시장에 미치는 결과를 예측하여 시사

점을 도출하였다.

본 연구는 다양한 에너지 저장장치의 활용 중, 에너지 차익거래에 국한하여 운영되는 ESS에 관한 연구이며, ESS의 에너지 차익거래가 계통에 미치는 경제적 효과로 설비구성에 영향을 주지 않는 기간, 즉 단기간의 영향만을 고려하였음을 서론에서 먼저 밝힌다.

1.2 논문의 개요 및 구성

제 1 장에서는 본 연구의 필요성 및 목적, 논문의 구성을 설명하였다.

제 2 장에서는 본 연구에서 다루는 에너지 저장장치를 이용한 수요변화와 그에 따른 후생분석에 관한 배경을 소개하였다. 수요변화의 효과와 유인, 에너지 저장장치를 이용한 수요변화의 특징 및 장점에 대하여 설명하고 본 연구에서 말하는 에너지 차익거래의 의미에 대하여 설명하였다. 또한, 후생경제학에 대한 소개와 시장참여자들의 후생 및 사회후생에 대하여 설명하고, 본 연구에서 다루는 사회후생의 의미와 범위에 대하여 소개하였다.

제 3 장에서는 가격에 응동하는 ESS의 운영전략에 따른 경제성을 평가하였다. 현재의 에너지 저장장치 소유자가 가격신호에 응동하여 어떻게 ESS를 운영하는 것이 최적인지를 도출하기 위해, ESS 운영을 통한 에너지 비용의 감소뿐만 아니라 운영전략에 따라 발생하는 ESS의 열화 비용을 계산하였다. 추가로 실제 데이터를 이용하여 국내 에너지 차익거래의 가치도 평가하였다.

제 4 장에서는 다양한 시장구조 하에서 시장참여자별 에너지 차익거래용 ESS의 최적 투자전략을 도출하였다. 에너지 차익거래로 인해 변화한 전력가격이 에너지 차익거래의 가치와 시장참여자의 후생에 미치는 영향을 분석하고, 이를 고려하여 다양한 시장 환경에서의 시장참여자별

투자전략을 도출하였고, 그 결과를 분석하였다.

제 5 장에서는 본 연구를 통한 에너지 차익거래 운영 및 투자전략의 결과, 연구의 의의, 한계점 및 시사점을 설명하였다.

제 2 장 수요변화와 사회후생

2.1 에너지 저장장치와 수요변화

2.1.1 전력계통에서의 수요변화

시시각각 변화하는 전력수요에 안정적이고 경제적으로 전력을 공급하는 것은 전력계통 운영의 가장 중요한 목표이다. 전기는 비경합성(non-rivalry)과 배제불가능성(non-excludability)의 요건을 갖추지 못함에도 불구하고 공공재적 성질을 갖는 재화이다. 이로 인해, 전력계통은 전통적으로 공급 측이 변화하는 수요에 맞추는 방식으로 수급균형을 유지하여 왔고, 이를 위해 피크수요 보다 더욱 많은 공급설비를 갖추어 왔다. 하지만 갈수록 낮아지는 부하율(load factor)¹⁾은 경제적인 운영을 방해하는 요인이 되고, 이는 모두 소비자에게 비용으로 부담되고 있다 [2].

수요의 변동이 적을수록, 즉 수요가 평탄할수록 계통의 운영은 경제적이며, 최근 다양한 연구를 통해 적절한 수요 측의 변화가 공급 측의 변화보다 더욱 경제적일 수 있음을 확인하였다 [1, 2].

1) 부하율(load factor)은 다음과 같이 정의된다.

$$f_{load} = \frac{\text{average load}}{\text{maximum load in given period}}$$

그럼에도 불구하고, 전력계통은 아직까지 수요를 변화시키기에 충분한 유인을 제공하지 못하고 있으며, 수요는 일반적으로 전력가격에도 비탄력적으로 알려져 있다. 하지만 원격검침인프라 시스템 (advanced metering infrastructure, AMI) 등, 기술의 발달로 인해 수요의 변화를 위한 기술적인 토대가 마련되고 있으며, 다양한 방법으로 수요의 변화를 위한 노력이 진행되고 있다.

전력계통의 경제적인 운영을 위한 수요변화의 종류는 피크감소 (peak shaving), 부하이동 (load shifting), 오프피크충대 (valley filling) 등이 있으며, 이와 같은 수요변화는 수요평탄화 (load flattening)로 대표된다.

2.1.2 수요변화의 효과

전력계통의 경제적인 운영을 위한 수요의 변화 (수요평탄화)는 전력계통 전체에 다양한 영향을 미친다. 수요평탄화는 신뢰성 확보의 효과가 있을 뿐 아니라 [1], 경제적으로도 다음과 같은 영향이 있다 [1, 2, 37, 38].

수요평탄화의 경제적인 영향으로, 1) 피크부하의 감소로 인해 과도한 설비투자를 회피하거나 지연시킬 수 있다. 2) 설비 가동률의 증가는 유희설비 비용을 감소시키며, 평균 전력공급 비용을 감소시킨다. 3) 도매시

장의 가격증가를 억제시킨다. 이는 소비자의 부담을 감소시킬 뿐만 아니라 시장 지배력을 감소시킨다. 4) 전력가격의 평탄화로 인해 발전 측에서 소비 측으로 부가 이동한다.

이와 같은 수요변화의 영향은 단기적으로는 운영비용을 감소시키며, 지속적으로 수요평탄화가 이뤄질 경우, 장기적으로 설비구성을 변화시킨다. 본 연구에서는 장기영향, 즉 설비의 변화는 고려하지 않고, 단기적인 영향만을 고려하여 연구를 진행하였다.

2.1.3 수요변화의 유인

2.1.2에서 수요변화가 시스템 전체에 미치는 긍정적인 영향을 확인하였지만, 이 효과가 수요를 변화시키는 당사자에게 모두 전달되는 것은 아니며, 실제 전력사용량을 변화시키는 당사자는 수요를 변화시켰을 때 자신에게 돌아올 이익만을 고려하여 수요변화에 참여할 것이다.

소비자는 어떤 상품에 대하여 소비를 통해 얻는 효용이 비용보다 크면 소비를 하고, 이는 전력의 소비에서도 마찬가지이다. 이와 같은 원리로, 소비자는 자신의 전력사용량을 변경시키며 얻는 효용의 증가가 변경시키기 위한 비용보다 더 크다면 기꺼이 전력사용량을 변화시킬 것이다. 이 때, 다양한 수요변화의 유인 신호에 대한 수요의 반응 방법은 다음 세 가지로 구분된다 [1]: 1) 수요 감축 (reduce), 2) 수요이동 (shift), 3)

자가 발전기 이용 (on-site generation).

본 절에서는 여러 수요변화 유인 중 가격을 신호로 하는 유인인, 계통 한계가격(system marginal price, SMP)과 소매요금제 중 계시별 요금제 (time-of-use tariff, TOU tariff)에 대하여 소개한다.

2.1.3.1 도매시장의 전력가격 - 계통한계가격(SMP)

전력도매시장의 전력가격인 SMP는 여타 상품과 같이 시장원리에 의해 공급곡선과 수요곡선이 만나는 점에서 결정된다 (그림 2.1).

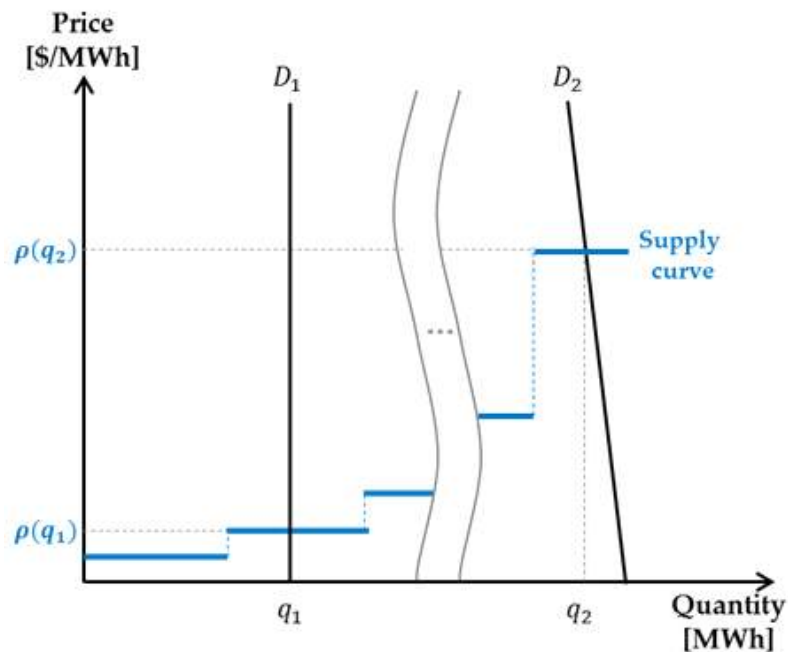


그림 2.1 전력도매시장의 공급곡선과 수요곡선, 전력가격의 결정

공급곡선은 전력가격과 공급량의 관계를 나타내는 곡선이다. 전력계통의 공급곡선은 발전사업자들의 가격과 용량의 입찰을 통해서 만들어진다. 완전경쟁 시장의 경우 모든 발전사업자는 자신의 한계변동비로 입찰할 것이며, 한국과 같은 변동비반영시장 (cost-based pool, CBP)의 경우 발전사업자는 용량만을 입찰하고, 입찰가격은 미리 조사된 각 발전설비의 변동비로 결정된다. 이로 인해, 실제 전력시장의 공급곡선은 우상향하는 불연속형태의 곡선이 된다 (그림 2.1의 파란선).

수요곡선은 전력가격과 수요량의 관계를 나타낸다. 일반적인 상품의 경우, 상품의 가격이 증가함에 따라 구매의향이 줄어들어 우하향하는 형태의 그래프를 가진다. 하지만 전력의 경우, 일반적으로 수요가 가격에 비탄력적으로 알려져 있어 가격에 대하여 수평으로(그림 2.1의 D1) 혹은 수평에 가깝게(그림 2.1의 D2) 그려진다.

위와 같은 형태의 수요-공급곡선으로 인해 시시각각 변하는 수요곡선과 그 시점의 참여 발전기의 공급곡선이 만나는 지점에서 전력가격이 결정된다. 수요가 많을수록 더 높은 수준의 가격 (그림 2.1의 $\rho(q_2)$)이 형성되고, 반대로 수요가 적은 경우 전력가격은 낮아진다 (그림 2.1의 $\rho(q_1)$).

이처럼 도매시장의 경우, 시장원리에 의해 시간별로 (수요의 수준에 따라) 전력가격은 다르게 형성되고, 이는 소비자에게 수요를 변화시킬 금전적 유인을 제공한다.

2.1.3.2 소매요금제 - 계시별요금제 (TOU)

소매 단에서의 수요변화를 위한 유인은, 도매시장에서의 가격 변동성을 반영하거나 혹은 신뢰도 유지를 위해 의도적으로 만들어진 신호로 인해 이루어지며, 이는 수요반응(demand response, DR) 프로그램으로 잘 알려져 있다.

미연방 에너지 규제 위원회 (Federal Energy Regulatory Commission, FERC)에서는 수요반응을 다음과 같이 정의한다 [2]. “전력공급이 불안정하거나 도매시장의 가격상승이 예상되는 시점에, 가격이나 인센티브 등의 수요 감축 시그널에 의해, 수요 측 자원이 반응하여, 전력사용량을 기존 소비패턴에서 변화시키는 것을 수요반응이라고 한다.”

수요반응 프로그램의 종류로 1) 인센티브 기반 수요반응 (incentive-based demand response)과 2) 가격 기반 수요반응 (price-based demand response)이 있다. 인센티브 기반 수요반응은 일반적으로 신뢰도 유지를 위하여 필요시 수요 감축 신호를 보내고, 수요반응 참여자가 신호에 맞게 수요를 변화시킬 경우 그에 합당한 인센티브를 지급하는 방식이다. 그에 반해 가격 기반 수요반응은 경제성을 위한 프로그램으로 시간별로 다른 요율이 적용되는 요금제를 이용하여 수요의 변화를 유인한다.

다양한 소매요금제 중, TOU 요금제는 일반적으로 2부 요금제 (two-part tariff)로 구성된다 [39-42]. 이 요금제는 기본요금과 전력량요

금 혹은 사용량요금으로 구성되며, 각각의 요금은 일반적으로 고정비용과 변동비용을 회수하기 위한 목적이 있다. 수요변화 유인의 효과로 기본요금은 부하의 개별 피크를 감소할 유인을 제공하며, 이는 공급설비뿐만 아니라 송변전, 배전설비의 증설을 지연시키거나 회피시키는 효과가 있다. 전력량요금은 전력도매시장의 가격 변동성을 반영하여 설계되며 사용량에 대하여 각 시점의 요율을 적용하여 부과되며, 이는 전체부하의 피크를 감축시키며 또한 운영비용을 절감하는 효과가 있다. TOU 요금제의 요율은 판매사업자가 설계한다. 설계된 소매요금은 다른 판매사업자의 요금제와의 경쟁을 통해, 혹은 규제기관에 의한 규제를 통해 적절한 수준을 유지한다.

본 연구에서는 소매단의 수요변화 연구를 위해 소매요금제 중 TOU 요금제만을 고려하였다. 인센티브 기반 수요반응은 신뢰도를 위한 프로그램이기 때문에 연구범위에서 제외하였다. 또한, 가격 기반 수요반응, 즉 소매요금제 중, 시간대별 차등요율이 적용되지 않는 단일요금제 (uniform price)와 도매시장의 가격변동성이 실시간으로 반영되는 실시간요금제 (real-time pricing)는 고려하지 않았다. 이는 단일요금제의 경우, 매시간 동일한 요율이 적용되어 소비자의 수요이동을 유인하지 못하기 때문이며, 실시간요금제의 경우, 실시간으로 도매시장의 가격변동성이 반영되기 때문에 이는 도매시장에서의 SMP 하에서의 수요변화와 유사한 결과를 가져올 것으로 보았기 때문이다.

2.1.4 ESS를 이용한 수요변화

수요 측의 변화를 통한 수요의 평탄화는 다양한 긍정적인 효과가 있으며, 이를 위한 유인이 존재함에도 불구하고, 수요의 가격에 대한 비탄력적 특성으로 인해 수요변화가 어려운 실정이다. 또한, 소비자의 전력사용량의 변화는 필연적으로 효율 감소를 수반하는 문제가 존재한다.

하지만 최근 많은 연구에서 ESS의 운영을 통한 수요반응이 효과적으로 이뤄짐을 확인하였다 [5, 10-17]. ESS를 통한 수요의 이동은 경제적 이익을 제공해 줘도 불구하고, 소비자는 아무런 효율의 변화가 없다는 장점이 있다. 이는 ESS가 유인에 따라 ESS를 충전 혹은 방전하는 것이 계통 입장에서는 수요가 변화한 것으로 보이지만, 소비자는 기존 전력사용량 그대로 전력을 사용하기 때문이다. 이는 ESS가 수요에 가격 탄력성을 부여하는 효과가 있는데, 이는 수요곡선의 기울기를 변화시키는 것이 아니라 수요곡선을 이동(shift) 시키는 형태로 가격탄력성을 부여한다. 하지만 아직까지는 ESS의 높은 투자비로 인하여 ESS를 이용한 수요의 변화가 경제성을 확보할 수 있을지는 많은 연구와 실증을 통해 확인되고 있다.

기존의 수요 변화는, 수요를 변화함에 따른 이익이 그로 인한 후생의 감소보다 클 경우 이루어졌다면, ESS를 이용한 수요의 변화는 수요변화로 인한 경제적 이익이 저장비용에 비해 클 경우 이루어 질 것이다. 전

력사용량의 변화에 따라 변화하는 소비자의 후생은 금전화하기 매우 어려워, 수요 변화에 의한 이익 대비 비용의 계산이 매우 어려웠다. 하지만 ESS를 통한 수요변화가 소비자의 후생에 영향을 미치지 않는다는 특징은 수요변화에 따른 득과 실이 각각 전력사용비용의 감소와 ESS 투자, 운영비이므로 쉽게 계산할 수 있다. 이로 인해 ESS를 이용한 수요의 변화는 더욱 용이하고 정확한 경제성 평가가 가능하다.

또한 최근 기술의 발달로 인해 저장장치의 가격은 갈수록 낮아지고 있고, 신재생에너지원과 같이 변동성이 큰 설비들의 증가로 인해 가격변동성이 증가하고 있다. 이로 인해 ESS는 수요 변화를 위한 기대되는 방법 중 하나로 많은 주목을 받고 있다.

2.1.5 에너지 차익거래

시간별로 다른 전력도매시장의 전력가격 혹은 소매요금제의 요율과 같은 유인에 의해 ESS를 운영할 경우, 그 결과는 전력계통의 입장과 ESO의 입장에서 각각 다음과 같이 해석할 수 있다. 전력계통의 입장에서는 수요가 높은 시간대의 수요를 낮은 시간대로 이동시키기 때문에 수요평탄화의 결과를 가져오고, ESO의 입장에서는 전력 가격(요율)이 낮은 시간대에 충전하여 가격(요율)이 높은 시간대에 방전함으로써 경제적인 이익을 얻을 수 있다. 이와 같이 동일한 ESS의 운영이 수요의 평탄

화와 에너지 차익거래로 동시에 해석될 수 있는 이유는, 수요의 패턴과 전력가격 혹은 요율의 패턴이 유사하기 때문이다. 본 연구는 ESO의 입장에서 운영과 투자에 관한 연구이므로 이와 같은 ESS의 운영을 수요평탄화가 아닌 에너지 차익거래로 표현한다.

본 연구에서 사용하는 용어 ‘에너지 차익거래 (energy arbitrage)’는 동일한 전력도매시장 (하루 전 시장, 실시간 시장) 내에서, 혹은 동일한 소매요금제 하에서 다른 두 시점의 전력가격 혹은 전기요금요율이 다른 경우, 가격(요율)이 낮은 시점에 전기를 저장하였다가 가격(요율)이 높은 시점에 방전하여 경제적 이득을 취하는 것을 말하며, 여기서 말하는 에너지는 전기를 의미한다.

하지만 실제 경제학에서 차익거래 (혹은 재정거래, arbitrage)는 동일한 상품이 다른 두 시장에서 다른 가치를 가질 때, 시세가 낮은 시장에서 구매하여 시세가 높은 시장에 판매함으로써 이익을 얻는 행위를 의미한다. 이와 같은 경제학적 정의로 봤을 때 ‘에너지 차익거래’의 용어는 다음과 같은 문제점을 갖는다. 첫째로, 동일한 시장 내의 상품이라 하더라도 다른 두 시점에서 생산된 전력은 동일한 상품으로 볼 수 없으며, 둘째, 본 에너지 차익거래는 동일한 시장 내에서의 재정거래를 의미한다. 그러므로 엄밀한 의미에서는 이와 같은 ESS의 운영을 차익거래라고 보기 어렵다. 하지만 이미 많은 기존의 연구[6, 22, 30, 36]에서 이와 같은 ESS의 운영을 ‘에너지 차익거래’라고 사용하고 있으므로, 본 연구에서도

기존 연구와의 통일성을 위하여 동일한 용어를 사용하였음을 밝힌다.

2.2 사회후생

2.2.1 후생경제학

1920년 피구 (A. C. Pigou)의 저서 「후생경제학 (The Economics of Welfare)」이 기초가 된 후생경제학은 어떤 정책의 도입이나 시장 환경의 변화가 국민들의 복지 혹은 사회의 후생에 어떤 영향을 미치는지를 분석하고 연구하는 경제학 분야이다. 다시 말해, 정책이나 시장 환경의 변화의 목표가 사회 전체의 후생을 극대화시키는 것으로 보고, 사회 후생을 극대화 시키는 조건을 연구하는 경제학 분야를 말하며 규범경제학 (Normative Economics)라고도 한다.

후생경제학에서는 효율성과 공평성을 중요한 요건으로 보며, 시장 참여자의 후생을 일률적으로 증대시킬 수 있는 여지가 있는 상태를 비효율적인 상태로 규정하고, 여지가 없는 상태를 효율적 상태로 규정한다. 후생경제학에서는 시장의 상태 및 정책이 반영된 결과가 효율적이 될 수 있도록 하는 방안을 모색한다. 동시에 사회 전체의 자원 분배 문제에서 공평한 분배에 대하여도 중요하게 고려하고 있으며²⁾, 이 때 공평함을 어떻게 설정하는 것이 바람직한가에 대하여는 경제학 내에서도 끊임없는 논의가 이뤄지고 있다.

2) 본 연구의 4장에서는 효율성 증대를 최대로 하는 ESS의 투자량을 사회후생을 최대화하는 전략이라고 해석하였다. 즉, 공평성에 대하여는 고려하지 않고, 효율성만을 고려하여 사회후생을 분석하였음을 밝힌다.

2.2.2 시장참여자의 생산과 소비전략

현물시장에서 생산자 i 의 이익은 자신이 생산한 전력의 판매수익에서 생산하는데 필요한 생산비용을 뺀 식 (2.1)과 같고 생산자의 생산전략은 자신의 이익이 최대가 되는 조건, 즉 식 (2.2)를 만족하는 q_i 에서 결정된다 [48].

$$profit_i^P = \rho \cdot q_i - C(q_i) \quad (2.1)$$

$$\rho - \frac{dC(q_i)}{dq_i} = 0 \quad (2.2)$$

여기서,

$profit_i^P$: 생산자 i 의 이익 [원],

ρ : 전력현물시장에서의 전력가격 [원/kWh],

q_i : 생산자 i 의 전력생산량 [kWh],

$C(q_i)$: 전력량 q_i 를 생산하기 위한 비용 [원]이다.

즉, 생산자는 한계비용이 시장가격과 같아질 때까지 생산, 판매한다.

소비자 j 의 이익은 소비함으로써 얻는 효용에서 소비를 위해 지불한 비용을 뺀 식 (2.3)과 같고 소비자의 소비전략은 자신의 이익이 최대가 되는 조건, 즉 식 (2.4)를 만족하는 q_j 에서 결정된다.

$$profit_j^C = U(q_j) - \rho \cdot q_j \quad (2.3)$$

$$\frac{dU(q_j)}{dq_j} - \rho = 0 \quad (2.4)$$

여기서,

$profit_j^C$: 소비자 j 의 이익 [원],

$U(q_j)$: 소비자 j 가 전력량 q_j 를 소비함으로써 얻는 효용 [원]

이다.

즉, 소비자는 한계효용이 시장가격과 같아질 때까지 재화를 소비한다.

2.2.3 소비자 잉여, 생산자 잉여 그리고 사회후생

하나의 시장에서, 모든 생산자와 소비자가 시장에 참여함으로써 얻는 이득을 각각 생산자잉여(supplier's surplus)와 소비자잉여(customer's surplus)라 한다. 생산자잉여는 더 낮은 가격으로도 생산, 판매하고 싶은 의사가 있는 재화를 그 가격보다 높은 수준으로 판매하였을 때 얻는 이익을 말하며, 반면 소비자잉여는 더 비싼 금액을 지불하고라도 구매할 의사가 있는 재화를 더 낮은 금액으로 구매하였을 때의 이익을 말한다. 그리고 생산자 잉여와 소비자 잉여를 합한 값을 사회후생(social welfare)이라고 한다. 이를 그림으로 나타내면 그림 2.2와 같다. 공급곡선

(supply curve)은 가격이 높아짐에 따라 공급의사가 높아지므로 우상향하는 형태의 그래프로 그려지고, 반대로 수요곡선(demand curve)은 가격이 높아짐에 따라 지불의사가 낮아지므로 우하향하는 형태의 그래프로 표현이 가능하다. 이 때 시장 균형은 두 곡선이 만나는 지점인 가격 ρ^* 과 거래량 q^* 에서 결정된다. 생산자잉여와 소비자잉여는 각 곡선과 시장 균형가격에 의해 결정되며, 그림에 표현한 영역과 같다.

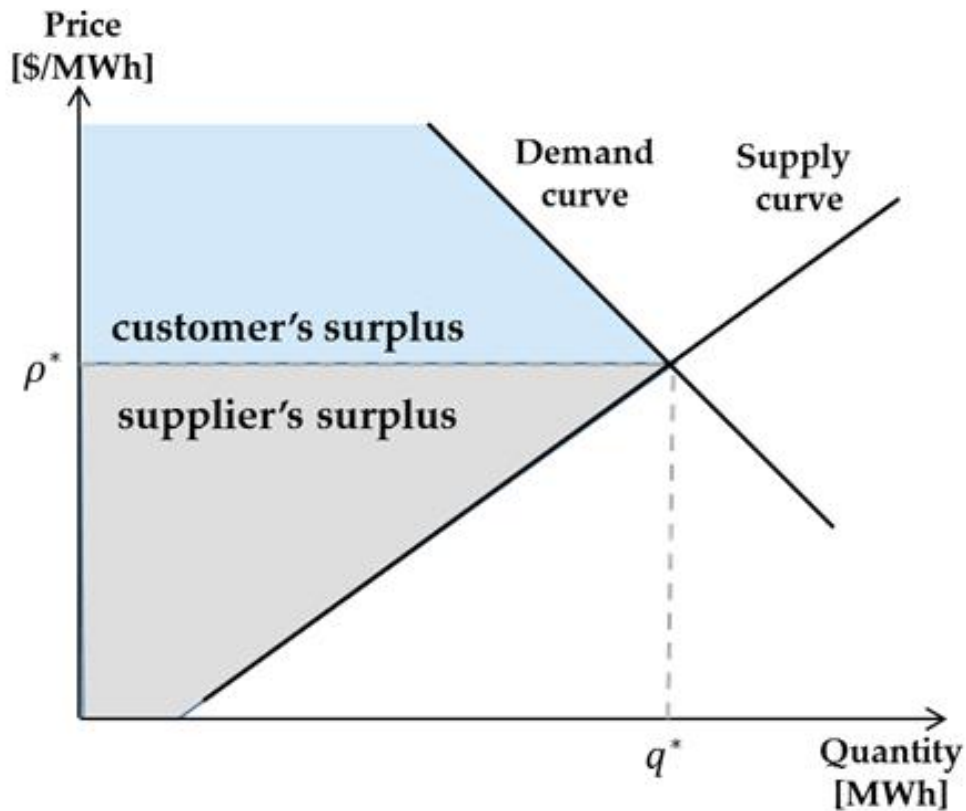


그림 2.2 공급곡선과 수요곡선, 생산자잉여와 소비자 잉여

2.2.4 연구 내 사회후생

본 연구에서는 에너지 차익거래용 ESS에 대하여 운영전략의 경제성 평가 및 다양한 시장구조 하에서 각각의 시장참여자가 자신의 이익을 최대화하기 위한 ESS 투자전략을 확인하고자 하였다. 이 때 각 투자전략 결과의 의미 및 시사점을 도출하기 위해 사회후생을 최대화하는 수준의 ESS 투자량 역시 도출한다. 이 결과는 사회후생을 최대화하는 정책의 지향점으로서의 의미가 있지만, 본 연구의 목적이 사회후생을 최대로 하는 ESS 투자 유인을 위한 정책의 제안이 아니므로 후생경제학에서 주요 요소로 고려하는 효율성과 공평성 중 공평성에 대하여는 고려하지 않았다.

또한 본 연구에서 사용한 사회후생은 기존의 전통 경제학에서의 사회후생에 관한 관점과는 다음과 같은 차이가 있음을 밝힌다.

첫째, 본 연구에서는 ESS를 이용한 에너지 차익거래의 단기영향만을 고려하여 사회후생을 분석하였다. 기존의 경제학에서는 사회후생을 분석할 때, 특정 정책 및 현상이 미치는 영향에 의한 시장의 변화가 완전히 균형을 이룬 후의 결과를 이용하여 분석하였다. 즉, 오랜 시간이 걸리더라도 그 영향이 완전히 반영된 후의 상황과의 사회후생을 비교 및 분석을 한다. 하지만 본 연구에서는 장기영향 (설비구성의 변화 등)은 고려하지 않고 단기영향의 사회후생만을 분석하였다. 이는 기존 경제학의 사회

후생 분석의 개념에서 봤을 때, 적절하지 못한 분석방법으로 평가될 수 있다. 하지만 최근 에너지 차익거래용 ESS의 운영으로 인한 단기영향만을 고려하여 사회후생을 분석하는 연구들이 진행되고 있다[30, 34-36]. 또한, 실제 설비구성의 변화는 ESS의 운영뿐만 아니라 수요의 증감, 환경적 이슈, 정책적 영향 등 매우 복합적인 영향을 받아 결정되므로, 설비구성의 변화의 예측은 매우 어려운 실정이다. 그러므로 본 연구에서는, 최근 기존 연구들의 흐름에 따라, 그리고 장기영향 고려의 어려움으로 인해 단기영향만을 고려하여 사회후생을 분석하였고, 전통적인 경제학에서 말하는 사회후생과는 차이가 있음을 밝힌다.

둘째, 본 연구에서는 ESS 투자비용을 고려하여 후생을 분석하였다. 후생경제학에서는 ‘효율성 증진’뿐만 아니라 ‘자원의 공평한 분배’도 중요한 목표이다. 그러므로 추진 정책이 비용 대비 효율성 증진(후생의 증가) 효과가 떨어지더라도, 그 결과가 자원의 공평한 분배에 효과가 있다면 바람직한 정책으로 간주되어진다. 즉, 정책을 결정할 때 경제적 비용만을 고려하지 않으며, 고려하지 않는 경우도 다수 존재한다. 하지만 본 연구의 목표는 ‘사회후생을 최대화 하는 ESS 투자량의 도출’이 아닌, 에너지 차익거래용 ESS가 경제성을 확보하였을 경우 ‘각 시장참여자들의 최적 ESS 투자량 도출’이므로, 각 시장참여자들의 ESS 투자 의사결정에서의 투자비용은 합당한 고려대상이라 판단하였다.

제 3 장 전력가격/전기요금 하에서

ESS 운영의 경제성 평가

본 장에서는 이미 ESS를 소유한 ESO가 전력가격 및 요금으로부터 어떤 유인을 받고 있는지, 그리고 그 유인에 응동하여 자신의 이익을 최대화하기 위해 어떻게 ESS를 운영하는 것이 최적인지 알아보았다.

ESS를 이용한 에너지비용 최소화는 ESS의 다양한 활용 방법 중 하나로, ESO가 적용받는 전력가격 혹은 전기요금의 구조 및 수준에 따라 그 운영 전략이 달라진다.

도매시장에서의 전력가격인 SMP와 소매전기요금 중 하나인 TOU 하에서 비용 최소화를 위한 ESS 최적 운영에 관한 연구를 진행하였다. 이를 위해, 현재의 전력가격과 요금제가 어떤 수요변화의 유인을 제공하는지를 SMP, TOU, 부하의 관계 분석을 통해 확인해본다. 뿐만 아니라 ESS 운영에 따른 열화비용을 함께 고려하여 ESO가 에너지 비용 최소화뿐만 아니라 ESS 투자비용도 함께 고려한 ESS 최적 운영전략을 도출할 수 있도록 하였다.

추가로, 국내의 SMP와 TOU의 에너지 차익거래 가치를 평가함으로써, ESS를 이용한 에너지 차익거래의 경제성을 평가 및 예측해본다.

3.1 모델 구성 및 정식화

3.1.1 TOU 하에서 ESO의 ESS 운영전략 모델

3.1.1.1 소매요금제의 구조

본 연구에서는 다양한 소매요금제 중 계시별요금제(TOU)를 대상 요금제로 선정하였다. 그 외 대표적인 소매요금제인 단일요금제, 실시간요금제는 본 연구에서는 제외한다. 그 이유는 2.1.3.2에서 설명한 것과 같이 단일요금제는 시간별로 차등요금을 부과하지 않아 소비자로 하여금 수요 변화의 유인을 제공하지 못하며, 실시간요금제는 도매시장의 SMP의 변동성을 실시간으로 소매시장에 반영하여 그 결과가 SMP 하에서의 ESO의 전략과 비슷한 경향을 가질 것으로 예상되기 때문이다.

TOU 요금제는 1)기본요금(demand charges)과 2)전력량요금 혹은 사용량요금(energy charges)으로 구성된다. 일반적으로 각각의 요금은 전력공급을 위한 고정비와 변동비를 회수하기 위한 목적으로 설계되나, 실제로는 그 경계가 모호한 실정이다.

국내의 산업용 TOU 요금제 역시 기본요금과 전력량요금으로 구성된다. 기본요금은 기본요금요율[원/kW]에 전력적용전력[kW]를 곱한 값으

로 부과된다. 이 때 기본요금의 ‘전력적용전력’은 검침 당월을 포함한 직전 12개월 중 12월분, 1월분, 2월분, 7월분, 8월분, 9월분 및 당월분의 최대수요전력 중 가장 큰 최대수요 전력으로 결정되고, 전력량요금은 계절별(여름, 봄·가을, 겨울), 부하시간대별(경부하, 중간부하, 최대부하시간대) 9단계의 단위요금이 적용된다. 기본요금의 요금 수준과 전력량요금의 시간대 별 요금 수준은 선택한 요금제에 따라 다르게 적용된다.

판매사업자로부터 소비자에게 매달 부과되는 TOU 요금 C_{TOU} 는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$C_{TOU} = \sum_{m=1}^M (\rho_{base} \cdot q_m^{max}) + \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (\rho_{m,d,t} \cdot q_{m,d,t}) \quad (3.1)$$

여기서,

t, d, m : 각각 하루 중 과금 간격, 일, 월의 시간 인덱스,

T, D, M : 각각 하루 중 과금 간격, 일, 월의 최종값

ρ_{base} : 기본요금요율 [원/kW],

q_m^{max} : m월의 요금적용전력 [kW],

$\rho_{m,d,t}$: m월 d일 t 시점의 전력량요금요율 [원/kWh],

$q_{m,d,t}$: m월 d일 t 시점의 수요 [kWh]

를 각각 나타낸다.

수식 (3.1)의 첫 번째 항은 기본요금을 나타내며, 요금적용전력 q_m^{max} 에 기본요금요율 ρ_{base} 의 곱으로 표현하였고, 한 달에 한번만 부과된다. 두 번째 항은 전력량요금을 나타내며, 과금 간격 별로 그 시점의 수요량 $q_{m,d,t}$ 에 전력량요금요율 $\rho_{m,d,t}$ 를 곱하여 계산한다.

3.1.1.2 TOU 요금제의 수요변화 유인 및 ESO의 ESS 운영전략

앞서 살펴본 TOU 요금제의 구조로 인해 ESS를 소유한 소비자는 두 가지 종류의 에너지비용 감축 방안을 고려해 볼 수 있다.

첫째, 자신의 피크 부하를 다른 시간대로 이동시켜 요금적용전력을 줄임으로써 기본요금을 줄일 수 있다.

둘째, 전력량요금요율이 높은 시간대의 부하를 요율이 낮은 시간대로 이동시켜 에너지 차익거래를 통해 전력량요금을 줄일 수 있다.

기본요금은 요금적용전력, 즉 개별 소비자의 피크부하에 비례하여 요금을 부과하여 ESS를 소유한 최종소비자의 개별피크부하를 낮추는 유인을 제공한다. 반면에 전력량요금은 시간대별로 다른 전력량요금요율을 적용하여 에너지 차익거래로 ESS가 운영되도록 유인하며 이는 최종소비자의 개별피크부하가 아닌 계통 전체부하의 피크를 줄이도록 유인을 제공한다. 이는 전력량요금요율이 계통 전체부하와 높은 양의 상관관계에 있는 계통한계가격(SMP)의 변동성을 반영할 수 있도록 판매사업자에 의

해 결정되기 때문이다. 실제로 국내 2015년 1월 평일의 SMP 평균과 계통 전체부하 평균, 산업용 TOU 요금제의 전력량요금요율의 패턴이 매우 유사한 것을 확인할 수 있었다 (그림 3.1).

즉, 기본요금은 개별 소비자의 피크부하 감소의 유인을 제공하며, 이는 소비자의 부하패턴에 따라 ESS의 운영전략이 달라짐을 의미한다. 반면, 전력량요금은 에너지 차익거래의 유인을 제공하며, 이는 소비자의 부하패턴이 아닌 전력량요금요율의 패턴, 즉 계통 전체부하의 패턴에 따라 ESS의 운영전략이 달라진다.

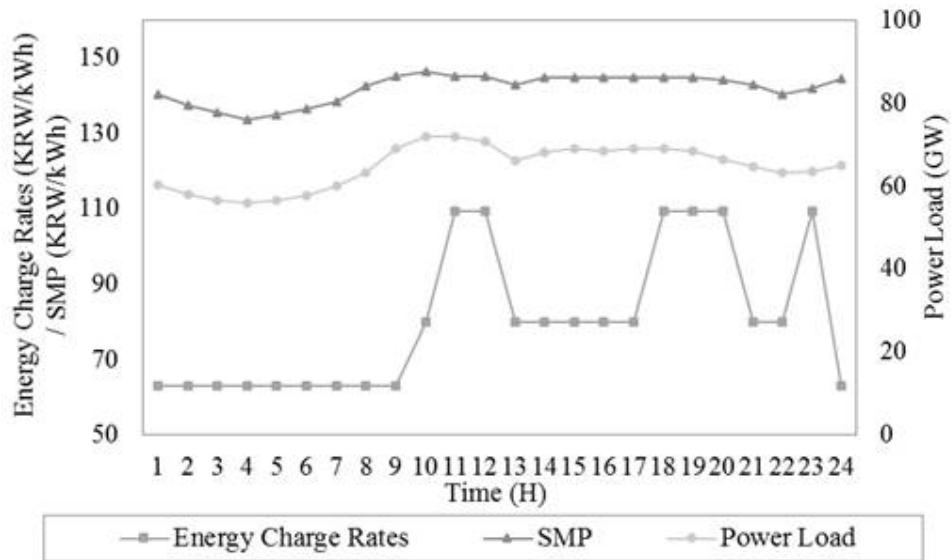


그림 3.1 전력량요금요율, 계통한계가격(SMP), 계통 전체부하의 패턴 비교 (2015년 1월 평균)

TOU 요금제 하에서의 ESS를 소유한 최종소비자의 에너지 비용을 줄이기 위한 ESS 운영 전략은 앞서 살펴본 두 가지 비용감축 방안을 조합

하여 총 4가지로 구성할 수 있다.

CASE 1: ESS 없이 운영

CASE 2: ESS가 기본요금만을 최소화하는 운영전략

CASE 3: ESS가 기본요금과 전력량요금을 모두 최소화하는 운영전략

CASE 4: ESS가 전력량요금만을 최소화하는 운영전략

위 4가지 전략은 아래와 같이 수리적 모델로 정식화가 가능하다.

목적함수

CASE 2:

$$\min_{ESS_{m,d,t}^{ch}, ESS_{m,d,t}^{dis}} \left\{ \sum_{m=1}^M (\rho_{base} \cdot q_m^{max}) \right\} \quad (3.2)$$

CASE 3:

$$\min_{ESS_{m,d,t}^{ch}, ESS_{m,d,t}^{dis}} \left\{ \sum_{m=1}^M \rho_{base} \cdot q_m^{max} + \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \rho_{m,d,t} \cdot q_{m,d,t} \right\} \quad (3.3)$$

CASE 4:

$$\min_{ESS_{m,d,t}^{ch}, ESS_{m,d,t}^{dis}} \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (\rho_{m,d,t} \cdot q_{m,d,t}) \right\} \quad (3.4)$$

위 목적함수들은 아래와 같은 제약조건을 만족하는 $ESS_{m,d,t}^{ch}$, $ESS_{m,d,t}^{dis}$ 를 찾는 문제를 풀어 최적 운영전략을 찾는다.

제약조건

$$SoC_{m,d,t} = (1 - \omega) \cdot SoC_{m,d,t-\Delta t} + (\eta \cdot ESS_{m,d,t}^{ch} - ESS_{m,d,t}^{dis}) \cdot \Delta t, \quad \forall m,d,t \quad (3.5)$$

$$q_{m,d,t} = demand_{m,d,t} + ESS_{m,d,t}^{ch} - ESS_{m,d,t}^{dis}, \quad \forall m,d,t \quad (3.6)$$

$$SoC_{m,d,t=0} = SoC_{m,d,t=T} = 0.2(SoC^{max} - SoC^{min}), \quad \forall m,d \quad (3.7)$$

$$0 \leq ESS_{m,d,t}^{ch}, ESS_{m,d,t}^{dis} \leq ESS^{max}, \quad \forall m,d,t \quad (3.8)$$

$$SoC^{min} \leq SoC_{m,d,t} \leq SoC^{max}, \quad \forall m,d,t \quad (3.9)$$

$$q_{m,d,t} \geq 0, \quad \forall m,d,t \quad (3.10)$$

여기서,

$SoC_{m,d,t}$: m월 d일 t시점의 충전상태 (State of charge, SoC) [kWh],

ω, η : 각각 ESS의 자체방전율, 충방전효율 [pu],

$ESS_{m,d,t}^{ch}, ESS_{m,d,t}^{dis}$: 각각 m월 d일 t시점의 ESS 충전, 방전량 [kW]

$demand_{m,d,t}$: m월 d일 t시점의 ESS 운영 전 소비자의 전력사용량 [kW],

SoC^{max}, SoC^{min} : 각각 SoC의 최댓값, 최솟값 [kWh],

ESS^{max} : ESS의 출력 최댓값 [kW]

을 각각 나타낸다.

식 (3.5)는 ESS의 충전 혹은 방전으로 인한 SoC의 변화를 보여주는 SoC 연속조건식이다. 이 때 시간이 지남에 따른 자체방전과 충전과 방전을 하며 생기는 손실을 나타내는 충방전효율을 각각 w 와 η 로 표현하였다. 식 (3.6)은 예측 전력(수요)과 실제 전력사용량, ESS의 충방전의 관계를 나타낸 제약조건이며, 과금은 예측된 전력인 $q_{m,d,t}$ 를 기준으로 부과된다. 식 (3.7)은 하루 단위로 운영하는 ESS의 경계조건(boundary conditions)을 나타내며, ESS의 운영시점과 끝 시점에는 동일한 충전상태를 유지하도록 하였다. 본 연구에서는 경험적 최적 운영을 위해 최대 SoC 대비 20%의 값을 시작시점과 끝 시점의 SoC로 설정하였다. 식 (3.8)과 식 (3.9)는 각각 ESS의 PCS 출력과 배터리의 운영범위 제약조건이다. 마지막으로 식 (3.10)은 소매단의 최종소비자가 저장한 전력을 메인계통으로 재판매 할 수 없음을 나타내는 제약조건이다. 즉, 매 시점의 ESS 방전량은 그 시점의 소비자 수요보다 더 클 수 없다.

3.1.2 SMP 하에서 ESO의 ESS 운영전략 모델

도매시장의 시장참여자들은 시간별로 다른 값으로 결정되는 계통한계 가격(SMP)에 따라서 에너지 차익거래의 유인을 받는다. 기본요금과 전력량요금으로 구성되었던, 앞서 3.1.1에서 살펴본 TOU 요금제와는 달리 SMP는 시간별 차등 가격만을 갖는 구조이다. 그러므로 ESS를 소유한 시장참여자는 전력가격이 낮은 시간대의 전력을 구매하여 가격이 높은 시간대에 판매함으로써 에너지 차익거래를 통한 이익을 얻을 수 있다.

이와 같은 ESO의 전략은 에너지 차익거래 이익의 최대화로 아래와 같이 수식화가 가능하다.

$$\pi^* = \max_{ESS_t^{ch}, ESS_t^{dis}} \left\{ \sum_{t=1}^T \rho_t \cdot (ESS_t^{dis} - ESS_t^{ch}) \cdot \Delta t \right\} \quad (3.11)$$

여기서

ρ_t : t시점의 계통한계가격[원/kWh]

이며, 제약조건은 식 (3.5)-(3.9)와 동일하게 적용 가능하다.

도매시장에서의 ESS 운영전략은 개별 수요 패턴의 영향을 받지 않으며, 오직 SMP의 영향만을 받는다. 이 때, 시간 단위는 SMP의 단위인 한 시간이므로 TOU 요금제 하에서의 ESS 운영과는 달리 기본 시간 인

텍스를 t 로 간략하게 표현하였고 이는 제약조건에도 동일하게 적용하였다.

3.1.3 ESS 열화비용

앞서 3.1.1과 3.1.2에서는 각각 TOU 요금제와 SMP 하에서의 유인별 ESS 운영전략을 제안하고 수리적으로 모델링하였다. 이 운영전략의 결과를 ESO가 ESS를 운영함으로써 감축할 수 있는 에너지 비용을 도출할 것이다.

3.1.3에서는 3.1.1과 3.1.2에서 제안한 운영전략으로 ESS를 운영시 발생하는 ESS의 열화비용의 정의와 계산방법을 소개한다. ESS 열화비용을 고려함으로써 각 운영전략의 경제성을 평가할 수 있을 뿐만 아니라, ESO는 ESS의 운영을 통한 편익과 ESS의 열화비용을 고려한 최적 운영전략을 찾을 수 있다.

본 연구에서는 ESS의 열화비용을 다음과 같이 정의, 계산하였다. 전체 ESS 투자비 중, 설비의 운영으로 인해 열화된 설비의 가치를 말한다. 즉, 전체 ESS 투자비에 설비의 총 수명 대비 운영으로 인해 줄어든 수명의 곱으로 표현된다 (수식 (3.12)).

$$C_{deg} = IC_{ESS} \times \left(\frac{\tau_{\Delta t}}{\tau_{life}} \right) \quad (3.12)$$

여기서

IC_{ESS} : ESS 설비의 총 투자비 [원]

$\tau_{\Delta t}$: Δt 동안 줄어든 ESS의 수명 [시간]

τ_{life} : ESS의 총 수명 [시간]

이다.

3.2 사례연구

3.2.1 TOU 하에서 ESS 운영의 경제성 평가

앞서 ESO가 전기요금을 감축할 목적으로, TOU 요금제 구조에 따라 총 4가지 ESS 운영전략을 제안하였다. 본 사례연구에서는 앞서 살펴본 운영전략을 토대로 실제 ESO가 적용받는 전기요금제에 따라 어떻게 ESS를 운영하든지 알아보고, 그 결과를 통해 ESO의 최적 ESS 운영전략을 확인, 각 운영전략의 경제성을 평가해본다. 이 때 ESO의 총비용을 확인하기 위해 리튬이온(Li-ion) 배터리를 사용한 ESS의 열화모델을 사용하여 사례연구에 적용하였다.

3.2.1.1 대상부하 분석: 도시철도 부하

기본요금과 전력량요금의 최소화는 각각 최종소비자의 개별피크부하와 계통 전체부하의 피크를 감축시킬 유인을 제공한다. 기존 연구들은 대상부하로 계통 전체부하와 비슷한 부하패턴을 갖는 부하를 선정하여 사례연구를 함으로써 CASE 2-4의 결과가 모두 비슷한 결과를 나타냈다.

본 사례연구에서는 대상부하로 도시철도부하를 선정하였다. 그 이유는

도시철도부하는 일반부하³⁾와 부하피크 시점이 달라 ESS 운영 유인의 구분이 용이하기 때문이다. (그림 3.2)

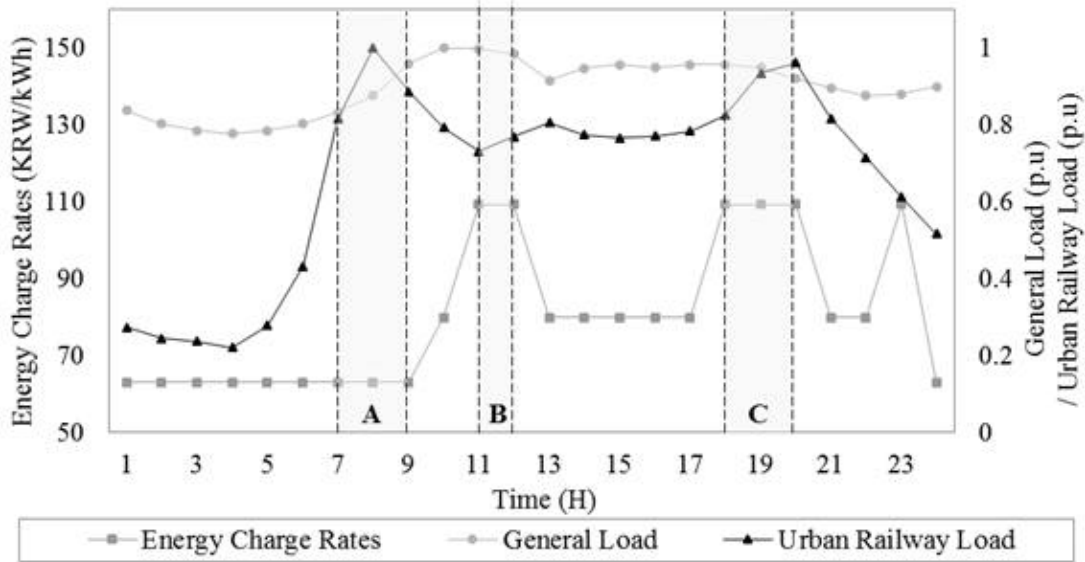


그림 3.2 도시철도부하, 일반부하, 전력량요금요율의 하루 패턴 비교

그림 3.2는 도시철도부하와 일반부하의 전형적인 하루 수요를 나타낸 그림이다. 도시철도부하는 2015년 1월 12일의 대한민국 남광주역사의 실제 데이터를 도시하였고, 일반부하는 2015년 1월 평일의 계통 전체부하의 평균데이터를 이용하여 도시하였다. 두 그래프는 쉬운 비교를 위해 최댓값을 1로 하여 정규화 하였다.

도시철도 부하는 일반부하와 비교하여 피크발생시간, 피크지속시간, 부하변동률, 피크부하시간 예측의 정확성에서 차별성을 갖는다.: (1) 일

3) 본 연구에서는 도시철도부하의 특징의 설명을 위해 계통 전체부하와 동일한 패턴을 갖는 부하패턴을 편의를 위해 ‘일반부하’로 구분하여 사용하였다.

반부하의 피크시점은 일과/업무시간 (오전 11시-12시, 오후 1시-5시)에 발생하는데 반해, 도시철도부하는 출퇴근시간인 오전 7시-9시와 오후 6시-8시에 피크가 발생한다.; (2) 피크지속시간은 도시철도부하가 일반부하보다 짧은 경향이 있다.; (3) 열차가 운행하지 않는 새벽에는 최소부하만이 전력을 소비하기 때문에 일반부하에 비해 도시철도부하의 피크와 오프피크부하의 차이가 훨씬 크다.; (4) 도시철도부하의 피크는 운행열차의 수와 공조 및 냉난방(heating ventilation air conditioning, HVAC)에 매우 큰 영향을 받으므로 열차 운영계획에 따라 쉽게 예측이 가능하다.

이와 같은 특성 중, 큰 부하변동, 짧은 피크지속시간은 ESS 용량대비 피크부하 감소에 큰 효과가 있는 특징이며 [43], 피크시점의 예측이 용이한 특징은 실제 ESS 운영에 있어서 ESS 충방전 시점을 결정하는데 매우 유리하다.

3.2.1.2 ESS 열화모델

사례연구에서는 남광주역사에 1MW/2MWh 용량의 리튬이온 배터리가 설치되어 운영되고 있는 상황을 가정하였다.

ESS의 높은 투자비용은 ESS의 운영전략에 영향을 미치며, 무분별한 ESS의 운영은 대체비용을 야기할 가능성이 있어 오히려 ESO의 손해를 불러올 수 있다. ESS가 운영되는 기간 동안의 투자비용은 전체 투자비

용을 수명으로 나눈 ESS 열화비용으로서 고려가 가능하며, ESO는 열화 비용까지 고려한 ESS 운영전략을 선택하여 더욱 경제적으로 ESS 운영을 할 수 있다.

ESS의 열화에 영향을 주는 요소로는 시간에 따른 열화(calendar aging)와 충방전 사이클에 의한 열화(cycle aging)로 구분이 가능하다 [6]. 시간에 따른 열화는 시간, 충전상태(SoC_t), 온도의 영향을 받고, 충방전 사이클에 의한 열화는 시간, 충전상태(SoC_t), 온도뿐만 아니라 충방전 사이클의 크기(SoC_{dev}), 전압, 전류의 영향을 받는다.

표 3.1 ESS 열화에 미치는 요인 분류

ESS 열화의 구분	관련 열화요소
시간에 따른 열화 (calendar aging)	시간, SoC_t , 온도
충방전 사이클에 의한 열화 (cycle aging)	시간, SoC_t , 온도, SoC_{dev} , 전압, 전류

본 사례연구에서 사용한 ESS 열화모델[44]는 균열전파이론(Crack propagation theory)에 기반하여, 다양한 열화요소들에 대한 영향을 지수 형태로 표현한 열화모델이다. 또한 다양한 형태의 임의적인(arbitrary) 충방전 사이클의 혼합운영도 반영할 수 있도록 하였으며, 열화에 영향을 미치는 요소로 충방전 사이클의 평균값(SoC_{avg}), 크기(SoC_{dev}), 온도, 시간을 고려하였다.

충방전 사이클의 평균값과 사이클의 크기는 아래와 같이 각각 표현한 다(식 (3.13)-(3.14)).

$$SoC_{avg} = \int_0^{\tau} SoC(t) dt / \tau \quad (3.13)$$

$$SoC_{dev} = 2 \sqrt{3 \int_0^{\tau} (SoC(t) - SoC_{avg})^2 dt / \tau} \quad (3.14)$$

ESS의 열화 L 은 아래와 같은 모델로 표현된다 (식 (3.15)-(3.18)).

$$L_1 = K_{CO} \cdot N \cdot \exp \left\{ (SoC_{dev} - 1) \cdot \frac{T_{ref}}{K_{ex} \cdot T_B} \right\} + \frac{0.2\tau}{\tau_{life}} \quad (3.15)$$

$$L_2 = L_1 \cdot \exp \{ 4 \cdot K_{SoC} \cdot (SoC_{avg} - 0.5) \} \cdot (1 - L) \quad (3.16)$$

$$L_3 = L_2 \cdot \exp \left\{ K_T \cdot (T_B - T_{ref}) \cdot \frac{T_{ref}}{T_B} \right\} \quad (3.17)$$

$$L(J) = \sum_{j=1}^J L_3(j) \quad (3.18)$$

여기서,

J : j 번째 사이클 시간 간격의 집합,

N : 총 유효 충방전 사이클 수 ($N = \int_0^{\tau} |I(t)| dt / 2Q_n$),

$I(t)$: 충전 전류,

Q_n : 배터리의 정격전하량,

$K_{\omega}, K_{ex}, K_{SoC}, K_T$: 배터리 스펙 파라미터,

T_{ref}, T_B : 각각 배터리의 기준온도, 운영온도,

τ_{life} : 총 수명 시간

이다.

L 은 열화가 일어나지 않았을 때 0의 값을 가지며, 완전히 열화 되었을 때 1이다. 일반적으로 80%의 저장장치의 건강상태 (state-of-health, SoH)에서 수명을 다한 것으로 간주하며, 이는 $L=0.2$ 로 표현이 가능하다.

다양한 형태의 충전 사이클들 중, 하나의 사이클은 열화의 선형적 특성에 의해 [45]에서 제안한 것처럼 그림 3.3과 같이 결정할 수 있으며, 각 사이클에 의한 열화비용은 열화의 정도에 ESS의 투자비를 곱함으로써 식 (3.19)과 같이 구할 수 있다.

$$C_{deg}(j) = IC_{ESS} \cdot \left(\frac{L_3(j)}{0.2} \right) \quad (3.19)$$

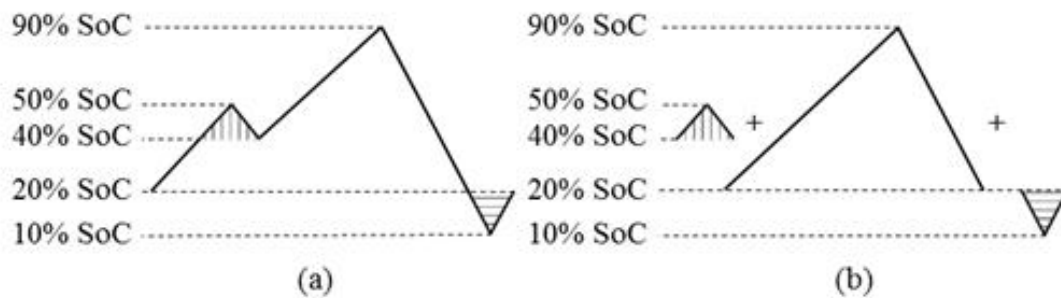


그림 3.3 충전 사이클의 분리(decoupling) [46]: (a) 기존 충전 사이클, (b) 분리된 충전 사이클

3.2.1.3 ESO의 최적 ESS 운영전략

그림 3.2의 도시철도부하의 일일부하패턴의 경우, 일반부하와 비교하여 다른 패턴을 갖는데, 이로 인해 ESO의 운영전략을 좀 더 명확히 설명이 가능하다. 이를 그림 3.2의 A, B, C영역으로 구분하여 설명한다.

전체 전력부하와 동일한 부하패턴을 갖는 일반부하의 ESO는 자신의 부하의 피크시점과 요금제의 효율이 높은 시점이 동일하기 때문에 (그림 3.2의 B, C 영역), 그 시점의 부하를 부하가 낮은 시점으로 이동함으로써 전기요금 감축한다. 즉, ESO는 B, C영역의 수요를 이동시킴으로써 기본요금과 전력량요금을 동시에 감축이 가능하고, 이는 CASE 2-4의 전략이 유사한 결과를 가져올 것이다.

반면에 도시철도부하의 경우, 피크부하 감축을 통한 기본요금 절감을 위해서는 그림 3.2의 A, C 영역의 부하를 줄이려고 할 것이고 (CASE

2), 요금제의 효율이 높은 B, C 영역의 부하를 요금이 낮은 시점으로 이동시킴으로써 전력량요금을 줄일 것 이다 (CASE 4). 전기요금 최소화를 위해 기본요금뿐만 아니라 전력량요금까지 감축할 목적으로 ESS를 운영할 경우, B, C 영역뿐만 아니라 A의 영역까지 함께 요금제 효율이 낮고, 개별 수요도 높지 않은 시점에서의 부하이동이 필요하다 (CASE 3).

3.2.1.4 관련 데이터 및 가정

시뮬레이션의 부하데이터는 대한민국 남광주역사의 2014년 7월부터 2015년 4월까지의 실제데이터를 이용하여 스케일을 수정하여 1년분의 데이터로 사용하였다. 이 데이터는 15분 단위로 측정되어 하루에 총 96개의 time step을 갖는다.

요금적용전력의 계산을 위해서는 전기요금 부과 월을 기준 직전 12개월의 데이터가 필요하다. 본 시뮬레이션에서는 1년 중의 최대 피크부하가 매월 요금적용전력이라고 가정하였다.

도시철도부하에는 1MW/2MWh의 리튬이온(Li-Ion) 배터리가 설치되어 비용최소화를 위해 운영된다고 가정하였고, 이 때 배터리의 사양은 아래 표 3.2와 같고, ESS의 가격은 10억 원 (PCS 1MW 당 2억 원, 저장장치 1MWh 당 4억 원)으로 가정하였다. ESS 열화 모델의 파라미터는 표 3.3과 같이 설정하였다 [44].

표 3.2 ESS 사양

구분	값	단위	관련 파라미터
PCS용량	1,000	[kW]	$ESS^{\max} = 1,000$
배터리용량	2,000	[kWh]	$ESS^{\text{cap}} = 2,000$
SoC 최소 운영범위	10	[%]	$SoC^{\min} = 200^*$
SoC 최대 운영범위	90	[%]	$SoC^{\max} = 1,800$
충방전효율	90	[%]	$\eta = 0.9$
충방전속도	0.5	[c]	-
자체방전을	0	[%]	$\omega = 0$

* $2000kWh \times 10[\%] / 100 = 200kWh$.

표 3.3 ESS 열화모델 파라미터값

구분	값	구분	값
K_{CO}	0.0000366	K_T	0.0693
K_{ex}	0.717	T_{ref}	303
K_{SoC}	0.916	T_B	303

만약 각 ESS 운영전략에 따른 최적 ESS 용량을 결정한다면 ESO의 이익을 더욱 극대화할 수 있을 것이다. 하지만, 본 연구는 ESS의 최적 용량을 선정하는 것이 목적이 아닌, 최적 운영전략을 도출하는 것이므로 모든 전략에 동일한 용량의 ESS가 설치되었다고 가정하였다. 최적 전략을 결정한 후에 최적용량을 결정함으로써 ESO는 자신의 투자와 운영에 더욱 합리적인 선택을 할 수 있을 것이다.

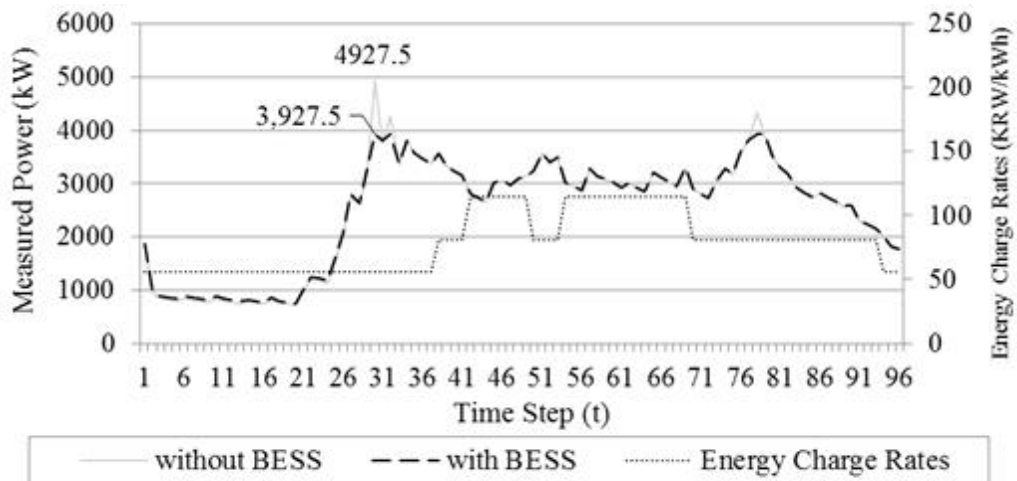
도시철도공사의 남광주역사는 산업용 갑, 고압 A, 선택 II 요금을 적용받으며 그 때의 요율은 아래 표 3.4와 같다 [46].

표 3.4 도시철도공사 적용 전기요금 요율 (산업용 갑, 고압 A, 선택 II)

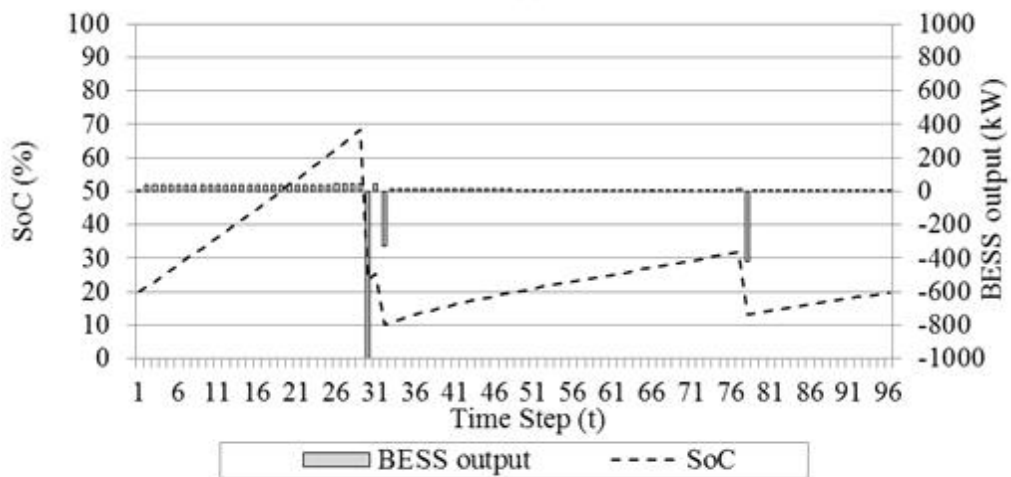
구분	기본요금요율 (원/kW)	전력량요금요율 (원/kWh)		
		여름철	봄·가을철	겨울철
경부하시간대	7,470	55.6	55.6	63.0
중간부하시간대		81.4	60.4	79.9
최대부하시간대		114.9	79.6	109.3

3.2.1.5 결과

그림 3.4와 그림 3.5는 ESO의 운영전략 중 각각 CASE 2와 CASE 3의 운영결과 중 2014년 7월 23일 하루의 결과를 나타낸 것이다. 각 그림 중 (a)는 ESS 운영 전후의 계측된 부하를 나타내었고, 결과 해석의 용이성을 위해 TOU의 전력량요금요율도 함께 표시하였다. 각 그림 중 (b)는 같은 날의 ESS의 출력과 SoC를 도시하였다.



(a)

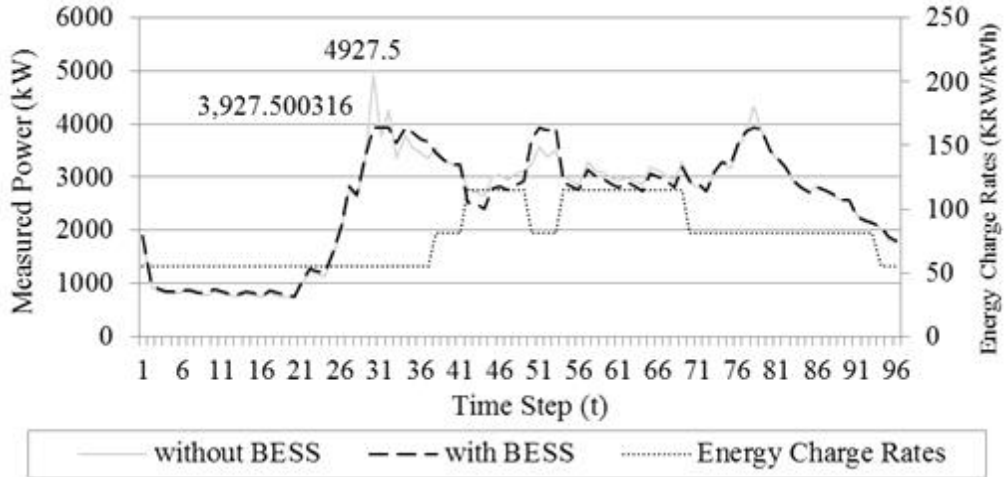


(b)

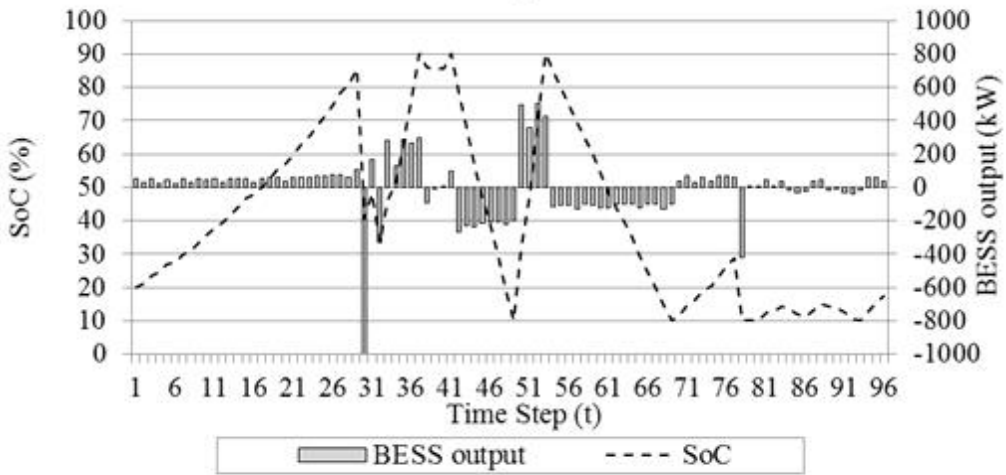
그림 3.4 기본요금 최소화를 위한 ESS 운영 결과 (CASE 2):
(a) ESS 운영 전후 계측 전력, (b) ESS 출력과 SoC

CASE 2의 ESS 운영 결과, 4,927.5 kW이었던 기존 피크부하가 3,927.5 kW로 줄어든 것을 확인할 수 있고, 새로운 피크부하를 유지하기 위해 퇴근시간대에도 부하이동을 통한 피크부하 감소가 있었음을 확인할 수 있었다. 기본요금 최소화만을 위한 운영전략인 CASE 2는 전력량요

금요일에는 응동하지 않음을 확인할 수 있었고, 부하 패턴과 규모에 따라 하루에 한번 혹은 두 번의 충방전 사이클이 발생함을 알 수 있었다.



(a)



(b)

그림 3.5 기본요금 및 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영 결과 (CASE 3): (a) ESS 운영 전후 계측 전력, (b) ESS 출력과 SoC

CASE 2와는 달리 CASE 3은 자신의 피크부하 뿐만 아니라 전력량요

금요일에도 응동하여 효율이 높은 시간대의 부하를 낮은 시간대로 이동시키는 운영을 함을 확인 할 수 있었다 (그림 3.5 (a)). ESS의 운영으로 결정된 새로운 피크부하는 약 3927.5 kW로 CASE 2에 비해 0.316 W 상승하였고, 이는 피크부하의 감소보다 전력량요금효율에 응동하는 것이 더욱 경제적일 것이라고 판단했기 때문이다. 전력량요금효율이 최대부하 시간대인 구간 41-48과 53-68에서는 각각 약 200 kW와 100 kW의 방전을 하는 것을 확인할 수 있다. ESS의 최대 PCS 출력인 1,000 kW 보다 낮은 값으로 방전하는 이유는 배터리의 용량이 충분하지 않기 때문이다. 이는 운영전략에 맞는 최적 ESS 용량 산정을 통해 더욱 효율적으로 운영할 수 있게 할 수 있다. CASE 2에 비해 더욱 많이 ESS를 사용하는 CASE 3은 그 결과 더욱 큰 열화비용을 야기할 것으로 예상된다.

그림 3.6 (a)는 CASE 2와 CASE 3의 운영에 따른 SoC의 변화를 백분율로 나타낸 그림이다. 해성의 용이성을 위하여 계절별로 일주일 동안의 SoC 변화를 연결하여 도시하였다 (4주, 2688 time steps). 그림 3.6 (b)는 해당 기간 동안의 각 전략별 ESS의 누적 열화 정도를 나타낸 그래프이다. 예상했던 것처럼 더욱 높은 빈도로 ESS를 사용했던 CASE 3의 경우가 더욱 빠르게 열화가 진행되는 것을 확인할 수 있다.

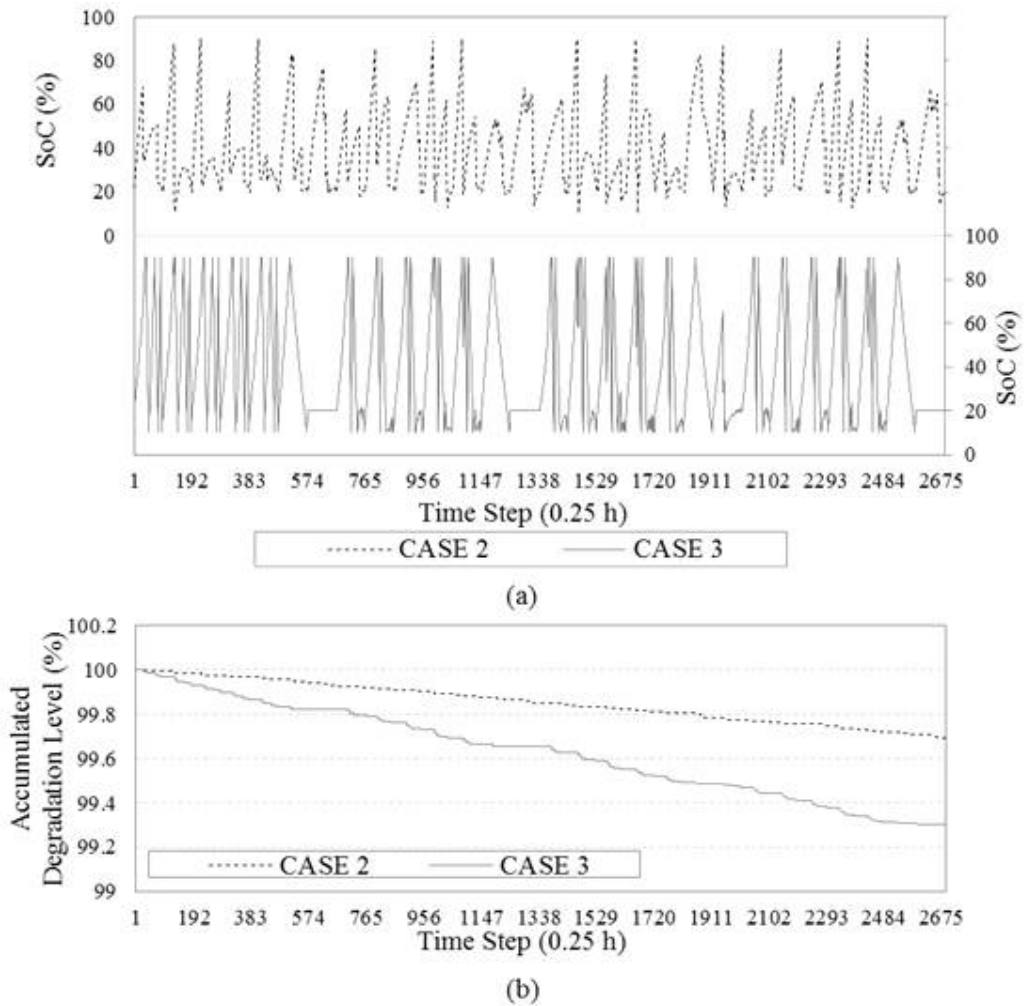


그림 3.6 ESS 운영 전략이 열화에 미치는 영향: (a) SoC, (b) 누적 열화수준

제안한 운영전략들의 경제성 평가 (전기요금, 연간 ESS 투자비), 연간 ESS 열화수준, ESS 예상 수명의 결과를 표 3.5에 나타내었다. 4가지의 전략 중 전기요금이 최소인 값과 총 비용이 최소인 값은 음영으로 강조하여 표기하였다.

표 3.5 전략별 ESS 운영의 결과

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
기본요금 (천원)	441,701	325,061	352,061	441,699
전력량요금 (천원)	1,335,481	1,335,540	1,327,069	1,326,965
전기요금 (천원)	1,777,182	1,687,601	1,679,130	1,768,664
연간 ESS 투자비 (천원)	0.0	66,667	144,837	99,751
총 비용 (천원)	1,777,182	1,754,267	1,823,967	1,868,415
연간 ESS 열화 수준 (%)	-	4.00	14.48	9.98
ESS 예상 수명 (년)	-	15 (25.02) ⁴⁾	6.90	10.02

결과에서 알 수 있듯이 CASE 3이 전기요금을 가장 많이 절감하였지만, 총 비용을 고려하였을 때 CASE 2보다 비경제적인 것을 확인할 수 있다. 이는 CASE 3이 CASE 2 보다 ESS를 더욱 많이 사용하여 짧아진 ESS 수명이 연간 ESS 비용을 상승시켰기 때문이다. 이는 두 전략의 연간 ESS 열화수준과 ESS 예상 수명을 통해 확인이 가능하다. TOU 하에서의 에너지 차익거래의 결과는 CASE 4를 통해서 확인이 가능한데, 그 결과 에너지 차익거래를 통한 이익보다 ESS 투자비가 더욱 커져서 ESS

4) CASE 2의 경우, 연간 열화수준이 약 4%로 열화만을 고려한다면 약 25년 정도의 수명을 갖는 것으로 계산할 수 있지만, 실제 Li-Ion 배터리 ESS의 사용 기간에 따른 수명 (calendar life)을 고려하여 예상수명을 15년으로 예측하였다.

를 운영하는 것이 오히려 ESS를 사용하지 않은 것보다 더욱 손해인 것을 확인할 수 있다. 각 전략별 전기요금과 연간 ESS 투자비를 함께 도시하면 그림 3.7과 같다.

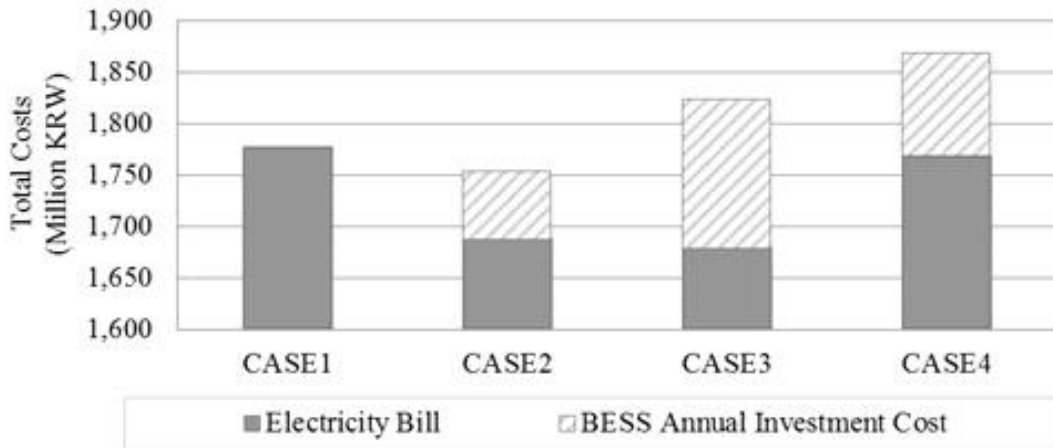


그림 3.7 CASE 별 총비용 비교

결과적으로 ESO는 자신에게 가장 유리한 CASE 2, 즉 기본요금 최소화만을 위한 운영전략을 자신의 최적 전략으로 선택할 것이다. 본 시뮬레이션의 결과를 토대로 계산해보면, ESS의 투자비용이 현재 대비 약 8.5% 수준일 때 에너지 차익거래는 경제성을 갖게 되며, 투자자의 수익률(rate of return, ROR)을 고려하면 리튬이온 배터리의 가격은 더욱 낮아져야 할 것이다.

3.2.2 SMP 하에서 ESS 운영의 경제성 평가

기본요금과 전력량요금으로 구성된 소매단의 TOU 요금제와는 달리, 도매시장의 전력가격은 각 시간의 수요량과 공급량에 의해 결정된 가격 하나만이 적용된다. SMP 하에서 ESS를 운영하는 ESO는 낮은 SMP 시간대의 전력을 구매하여 가격이 높은 시간대로 이동하여 에너지 차익거래의 이익을 얻을 수 있도록 운영을 할 것이며, 이는 3.2.1에서와 달리 개별 수요의 패턴을 고려할 유인이 없이 오직 전력가격만을 고려하여 ESS 운영 전략의 결정이 가능하다.

A. 관련 데이터 및 가정

도매시장에서 에너지 차익거래의 시장참여자로 발전사업자, 판매사업자, 차익거래자 (merchant storage owner, MSO)로 한정하여 가정하였다. 그 외 TSO (transmission system operator), DSO (distribution system operator) 등의 시장참여자는 이익을 추구하는 집단이 아니므로 차익거래에는 참여하지 않을 것으로 가정하였다. 또한 ESO는 SMP의 완벽한 예측이 가능하다고 가정하였다.

SMP 데이터는 3.2.1과의 비교를 위해 2015년 대한민국의 실제 계통한계가격 데이터를 이용하였고, 에너지 차익거래용 ESS의 소유자(ESO)는

에너지 차익거래를 위해 1MW/2MWh의 ESS를 소유하고 있다고 가정하였다.

B. 결과

ESO는 1MW/2MWh의 ESS를 이용하여 연간 약 996만원의 에너지 차익거래 이익을 얻을 수 있었다 (2015년 SMP 기준). 하지만 이 때 발생한 ESS의 연간 열화비용은 약 12,400만원으로 오히려 ESS의 투자비용이 에너지 차익거래에 따른 이익보다 높아 오히려 ESS에 투자, 운영하지 않는 것이 더욱 경제적인 전략임을 예상할 수 있다. 즉, 국내 도매시장의 SMP 하에서 1MW/2MWh의 Li-Ion ESS를 이용한 에너지 차익거래가 경제성을 갖지 못함을 보여준다.

3.3 국내 에너지 차익거래의 가치평가

3.2절에서는 사례연구를 통해 국내의 TOU 요금제, SMP 하에서의 ESS 운영전략의 경제성을 평가하였다. 하지만 이 사례연구에서는 대상 ESS를 1MW/2MWh 용량의 Li-Ion ESS로 한정했다는 한계가 있다. 3.3절에서는 이와 같은 한계점을 보완하기 위해, ESS의 경제성평가가 아닌 에너지 차익거래의 가치를 평가하였다. 즉, 국내 도매시장의 SMP 및 소매시장의 TOU 요금제 하에서 ESS를 에너지 차익거래로 사용하였을 경우의 연간 예상 수익을 평가해 보았다.

ESO는 ESS를 에너지 차익거래만을 위하여 사용한다고 가정하였고, 이론적인 에너지 차익거래의 가치를 평가하기 위해 ESO는 전력가격을 완전히 예측 가능하다고 가정하였다. 또한, ESS의 충방전효율은 90%인 것으로 가정하였다.

ESS의 저장가능시간 (hours of storage)에 대하여 연간 에너지 차익거래의 가치를 평가하였는데, 저장가능시간은 저장장치의 출력용량 대비 에너지저장용량을 의미한다. 즉, 출력용량으로 충전을 계속하였을 때 저장 가능한 시간, 혹은 반대로 완충상태의 ESS를 출력용량으로 방전을 계속하였을 때 방전이 가능한 시간을 의미한다.

국내의 2009년부터 2016년의 연간 에너지 차익거래의 가치와 그 한계 가치를 각각 그림 3.8과 그림 3.9에 도시하였고, 상세한 값은 표 3.6과 표 3.7에 각각 정리하였다. 이 때, 에너지 차익거래를 위한 저장장치의 운영으로 인한 전력가격의 변화는 고려하지 않았다.

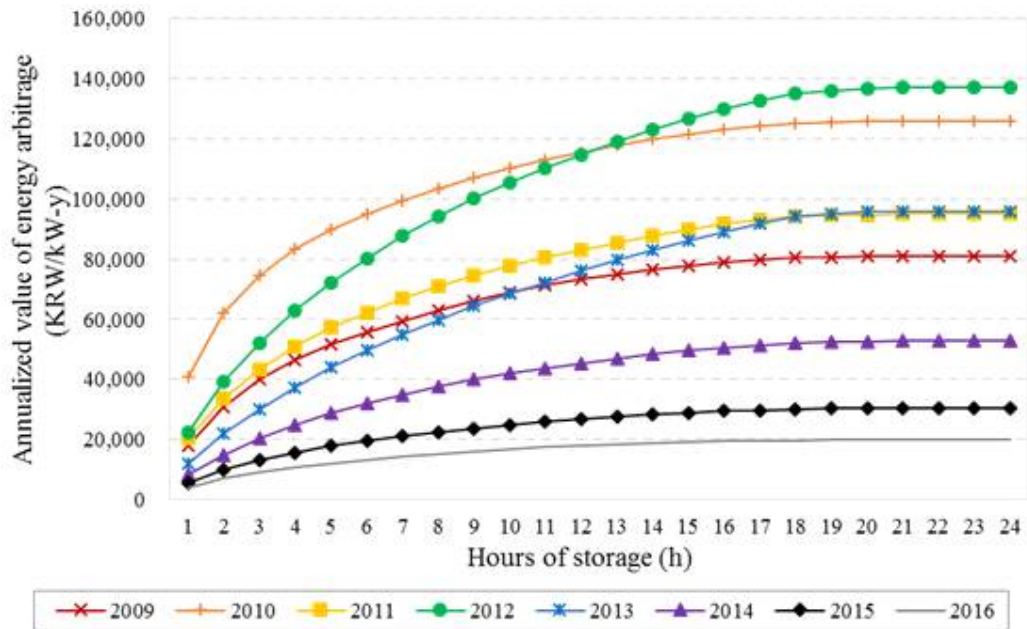


그림 3.8 ESS 저장가능시간에 따른 SMP 하에서의 국내 에너지 차익거래 가치 (2009년-2016년)

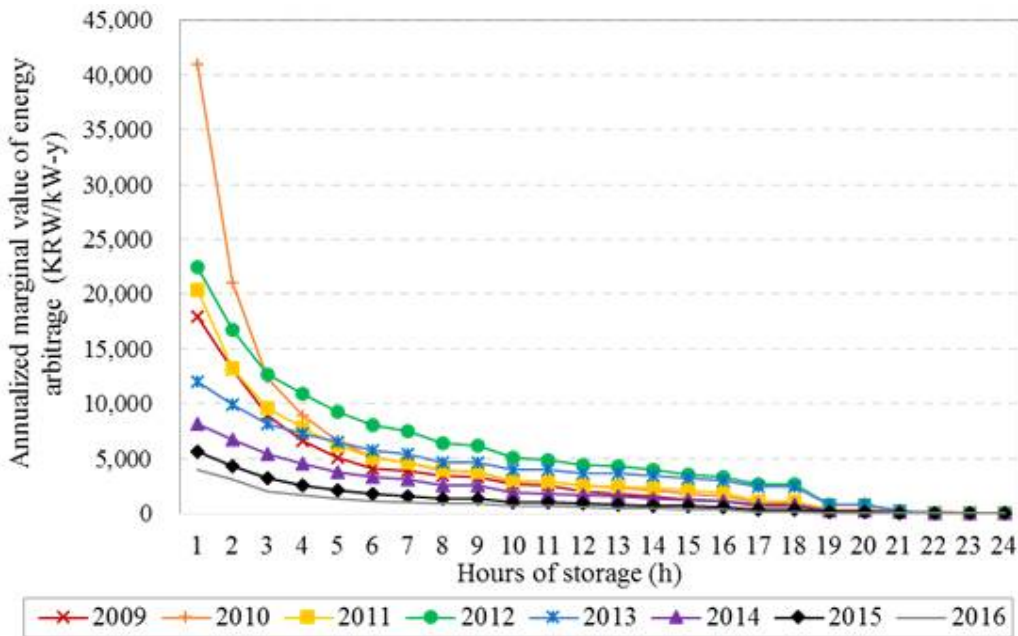


그림 3.9 ESS 저장가능시간에 따른 SMP 하에서의 국내 에너지 차익거래 한계 가치 (2009년-2016년)

표 3.6 ESS 저장가능시간에 따른 국내 에너지 차익거래 가치 (2009년
-2016년)

(원/kW-y)

저장 가능 시간	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	TOU
1	17,987	40,984	20,354	22,460	12,060	8,187	5,671	3,942	18,312
2	31,052	62,079	33,606	39,242	21,994	14,960	9,962	7,015	31,309
3	39,949	74,430	43,154	51,967	30,128	20,338	13,145	9,050	40,393
4	46,602	83,311	50,948	62,865	37,448	24,883	15,740	10,674	47,020
5	51,662	89,918	57,175	72,162	43,911	28,680	17,830	12,037	52,805
6	55,719	95,004	62,245	80,207	49,669	31,969	19,559	13,174	57,155
7	59,539	99,608	66,912	87,736	55,116	35,056	21,159	14,225	59,114
8	62,949	103,489	70,855	94,174	59,806	37,651	22,496	15,154	61,073
9	66,305	107,250	74,648	100,370	64,402	40,204	23,801	16,060	63,032
10	68,941	110,157	77,644	105,482	68,415	42,036	24,846	16,780	64,991
11	71,465	112,984	80,547	110,376	72,344	43,829	25,880	17,468	66,950
12	73,428	115,473	83,118	114,836	76,021	45,452	26,760	18,016	68,909
13	75,194	117,849	85,582	119,161	79,618	46,982	27,585	18,506	70,868
14	76,694	119,920	87,863	123,101	83,013	48,339	28,310	18,915	72,827
15	77,937	121,686	89,961	126,658	86,208	49,548	28,938	19,251	74,786
16	79,049	123,252	91,823	129,994	89,221	50,653	29,494	19,537	76,745
17	79,769	124,216	92,977	132,672	91,686	51,443	29,831	19,673	78,704
18	80,488	125,179	94,131	135,349	94,151	52,233	30,168	19,809	80,662
19	80,685	125,508	94,465	136,125	94,932	52,468	30,270	19,847	82,621
20	80,881	125,838	94,798	136,901	95,713	52,703	30,372	19,885	84,580
21	80,981	125,945	94,894	137,120	95,941	52,801	30,420	19,902	85,070
22	81,050	125,977	94,910	137,153	95,984	52,855	30,450	19,911	85,070
23	81,085	125,996	94,919	137,176	96,017	52,892	30,466	19,917	85,070
24	81,086	126,003	94,922	137,187	96,040	52,913	30,470	19,921	85,070

표 3.7 ESS 저장가능시간에 따른 국내 에너지 차익거래 한계 가치
(2009년-2016년)

(원/kW-y)

저장 가능 시간	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	TOU
1	17,987	40,984	20,354	22,460	12,060	8,187	5,671	3,942	18,312
2	13,065	21,095	13,252	16,782	9,934	6,773	4,292	3,074	12,998
3	8,897	12,350	9,548	12,726	8,134	5,378	3,183	2,035	9,084
4	6,653	8,881	7,794	10,898	7,320	4,545	2,595	1,623	6,627
5	5,060	6,607	6,226	9,297	6,463	3,798	2,090	1,363	5,785
6	4,057	5,087	5,071	8,045	5,758	3,288	1,729	1,138	4,350
7	3,820	4,604	4,667	7,529	5,447	3,087	1,600	1,050	1,959
8	3,409	3,880	3,943	6,438	4,690	2,595	1,337	930	1,959
9	3,356	3,761	3,794	6,196	4,596	2,553	1,305	906	1,959
10	2,637	2,907	2,995	5,112	4,013	1,832	1,045	720	1,959
11	2,523	2,827	2,903	4,894	3,929	1,793	1,034	688	1,959
12	1,963	2,489	2,571	4,461	3,677	1,624	880	547	1,959
13	1,766	2,376	2,464	4,325	3,596	1,529	825	490	1,959
14	1,500	2,070	2,281	3,940	3,395	1,357	725	409	1,959
15	1,243	1,767	2,098	3,556	3,195	1,209	628	336	1,959
16	1,112	1,566	1,862	3,337	3,013	1,105	556	286	1,959
17	719	963	1,154	2,678	2,465	790	337	136	1,959
18	719	963	1,154	2,678	2,465	790	337	136	1,959
19	196	330	334	776	781	235	102	38	1,959
20	196	330	334	776	781	235	102	38	1,959
21	100	107	95	219	227	99	48	16	490
22	68	32	16	34	43	53	30	9	0
23	35	20	10	22	33	37	16	6	0
24	2	7	3	11	23	21	4	3	0

도매시장의 SMP 하에서의 에너지 차익거래의 가치는 평가 시점의 발전설비 현황 및 수요에 따라서 차이가 있는데, 국내의 경우에는 전력수급상황이 좋지 않았던 2009년부터 2012년 사이에 에너지 차익거래의 가치가 더 높은 것으로 확인할 수 있다. 또한 저장가능시간이 길수록 에너지 차익거래의 가치는 증가하지만, 약 15시간 이후부터는 저장시간의 증가가 에너지 차익거래 가치의 증가에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

한계 가치가 가장 높은 한 시간의 저장가능시간을 갖는 ESS를 이용하여(1kW/1kWh) 에너지 차익거래에 참여했을 경우, 연간 최소 5,671원(2015년)에서 최대 40,984원(2010년)의 수익을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 에너지 차익거래의 가치가 크게 차이가 나는 이유는 2013년 이후 국내에 많은 발전설비들이 추가 설치되어 많은 예비력의 확보로 인해 SMP의 평균가격이 감소했을 뿐만 아니라 수요에 따른 편차도 줄어들었기 때문이다.

마찬가지로 국내 TOU 요금제 하에서의 에너지 차익거래의 가치와 그 한계 가치를 평가하였고, 이를 각각 그림 3.10과 그림 3.11에 도시하고, 상세한 값은 표 3.6과 표 3.7에 정리하였다. 대상 TOU는 산업용 갑, 고압 A, 선택 II 요금을 적용하였으며, 이 요금제의 효율은 표 3.4와 같다.

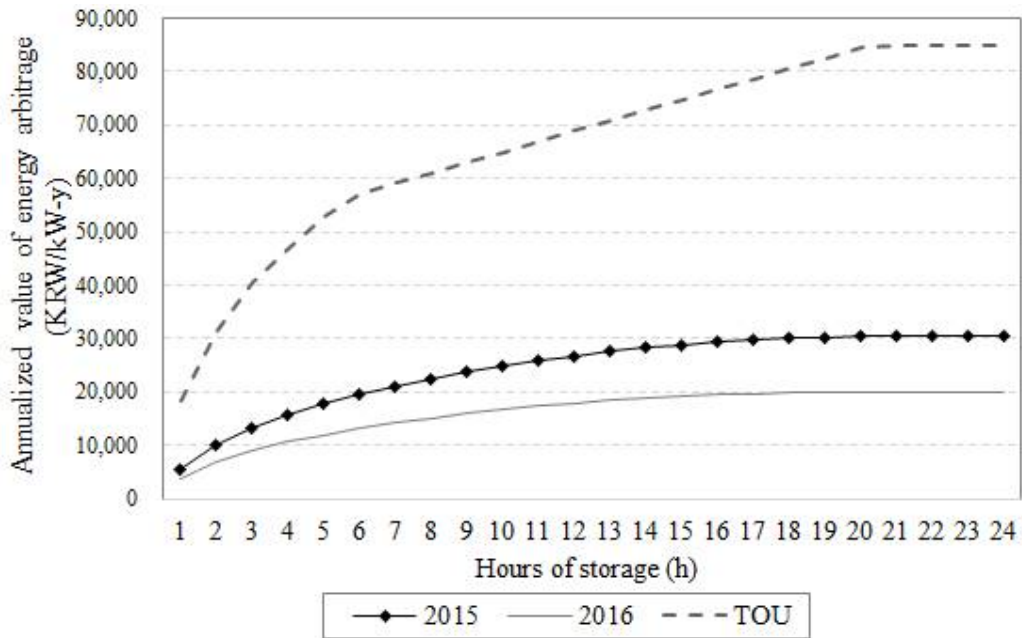


그림 3.10 ESS 저장가능시간에 따른 TOU 하에서의 국내 에너지 차익거래 가치

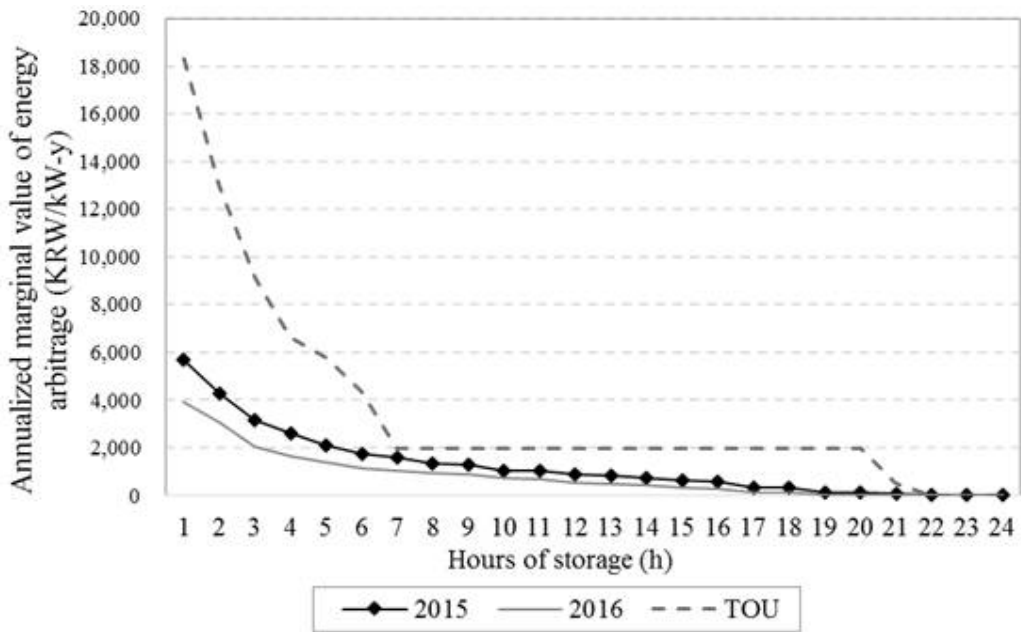


그림 3.11 ESS 저장가능시간에 따른 TOU 하에서의 국내 에너지 차익거래 한계 가치

1kW/1kWh의 ESS는 TOU 요금제 하에서 연간 약 18,000원의 에너지 차익거래 수익을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 하루 중, 경부하시간대와 최대부하시간대의 전기요금요율의 차이가 최대 59.3 [원/kWh] (여름)까지 나는 TOU 요금제가, 평일 하루 중 SMP의 최대편차가 약 10-50원 정도인 SMP에 비해 (2015, 2016년 기준) 더욱 큰 에너지 차익거래 가치를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

ESS가 에너지 차익거래로 경제성을 확보하기 위해서는 ESS의 연간 투자 및 운영비용이 에너지 차익거래 수익보다 더 낮아야 할 것이다. 또한 투자자의 내부수익률 (internal rate of return, IRR)을 고려한다면 ESS 비용은 더욱 낮아지거나 혹은 수명이 더욱 길어져야 할 것이다.

일반적으로 에너지 차익거래 등과 같이 장기간 수요이동에 유리한 것으로 알려진 양수발전 (pumped hydroelectric storage) 혹은 압축공기에너지저장장치 (compressed air energy storage, CAES)는 미국 7개의 실시간 전력시장 (real-time market)에서 10% 정도의 내부수익률을 확보할 수 있다는 가능성이 연구되었다 [6]. 하지만, 이와 같은 ESS는 설치공간이 매우 제한적이며, 환경의 문제로 추가 건설에 제약이 존재하거나 (양수발전), 방전을 위해 천연가스를 사용하는 CAES는 연료가격에 그 비용이 민감하게 반응할 수 있는 문제가 존재한다. 이와 같은 이유로, 양수발전과 CAES는 대규모 투자에는 어려움이 존재한다 [7].

그에 반해 전력을 화학적으로 저장하는 배터리 형태의 ESS는 아직

에너지 차익거래를 위하여 쓰이기엔 비용이 비싸지만, 현재 전기자동차용 배터리 연구 등 꾸준한 연구와 대량생산으로 인해 그 비용이 급격히 낮아지고 있다. 만일 배터리형태의 ESS (battery energy storage system, BESS)가 경제성만 갖추게 된다면, 공간의 제약, 환경의 제약 없이 대규모로 투자가 가능할 것으로 기대된다.

3.4 소결론

3장에서는 현재 ESO가 전력시장 및 요금제로부터 어떤 수요변화 유인을 받고 있는지 알아보고, 그 유인에 대하여 어떻게 ESS 운영전략을 세우는지 확인하였다. 또한 실제 과거 데이터를 이용하여 국내 에너지 차익거래의 가치평가를 해보았다.

ESO의 수요변화의 유인으로 도매시장의 SMP와 소매요금제(TOU)가 존재하며, TOU 요금제의 기본요금은 개별수요의 피크를 감축할 유인을, 전력량요금은 전체부하의 피크시점에 해당하는 부하를 오프피크시점으로 이동시키려는 유인을 제공한다. 후자의 경우 소매요금제의 시간별 차등요율에 대한 에너지 차익거래를 의미한다. 도매시장의 SMP의 경우, 소매요금제의 전력량요금과 같이 전력의 시장가격이 높은 시간대의 부하를 낮은 시간대로 이동시키려는 유인이 존재하고, 이는 마찬가지로 에너지 차익거래를 의미한다.

이에 응동하여, ESO는 자신의 에너지 비용을 최소화하기 위한 ESS 운영전략을 구축할 수 있다. 에너지 차익거래만을 통해 에너지 비용을 최소화하는 도매시장에서의 ESS 운영 전략과 달리, TOU 하에서는 기본요금 최소화, 전력량요금 최소화, 기본요금과 전력량요금 모두를 최소화하는 방법 등의 운영전략이 존재한다. 하지만 ESS 운영을 통한 수익 대비 ESS 투자 및 운영비용이 더욱 많이 든다면 그 ESS 운영은 결코 최

적의 결과가 될 수 없다. ESS의 열화비용을 고려한 최적 ESS 운영결과는 TOU 하에서는 기본요금만을 최소화하도록 ESS에 투자, 운영하는 것이고, SMP 하에서는 에너지 비용 절약을 위한 ESS를 운영하지 않는 것임을 확인하였다. 다시 말해, TOU 하에서 ESS를 이용한 기본요금의 감축은 경제성을 확보함에 반해, TOU, SMP 모두 에너지 차익거래로는 경제성을 확보하지 못했음을 의미한다. 1MW/2MWh 리튬이온(Li-Ion) 배터리 기준, TOU 하에서의 에너지 차익거래는 현재 대비 약 8.5%, SMP 하에서의 에너지 차익거래는 현재 대비 약 8.0% 수준에서 경제성을 확보할 수 있는 것을 확인하였다. ESO의 수익을 고려한다면 ESS의 가격은 더욱 낮아져야 할 것이다.

국내의 2009년부터 2016년의 실제 데이터와 해당기간의 TOU 요금제를 이용하여 에너지 차익거래의 가치를 평가하였다. 그 결과 1kW/1kWh ESS를 이용하여, SMP는 연간 최소 약 4,000원에서 최대 약 41,000원까지의 수익을 얻을 수 있었고, TOU는 연간 약 18,000원의 수익을 얻을 수 있음을 확인하였다. 에너지 차익거래를 위한 ESS의 연가화환(annualized) 투자, 운영비용이 에너지 차익거래의 가치보다 낮아지면 투자자들은 ESS에 투자할 것이다. 양수발전과 CAES와 같은 ESS는 타 실시간 전력시장에서 경제성을 낼 수 있다는 가능성의 연구가 있음에도 불구하고, 공간적인 제약, 환경 문제, 연료문제 등으로 향후 대량 투자는 어려움이 있는 실정이다. 반면 화학적으로 전기를 저장하는 형태인

BESS의 경우, 경제성이 확보된다면 대량 투자가 가능해질 것으로 보이며, 현재 많은 연구과 대량생산으로 인해 그 비용이 급격히 낮아지고 있어, 에너지 차익거래로서의 역할도 기대되고 있다.

제 4 장 시장참여자별 에너지 차익거래용 ESS

투자유인 및 최적 투자전략

ESS를 통한 에너지 차익거래는 ESS 투자자 혹은 소유자에게 차익거래의 수익을 제공할 뿐만 아니라, 전력시장 참여자들의 후생에 변화를 가져올 수 있다. 에너지 차익거래의 결과, 즉 수요평탄화가 가져오는 단기 영향은 시장참여자에 따라 혜택이 되기도, 손해가 되기도 한다. 이는 시장참여자에 따라 다른 유인으로 ESS 투자전략을 구축할 원인이 된다.

4장에서는 에너지 차익거래용 ESS의 투자 및 운영이 시장참여자들의 후생에 미치는 영향을 분석함으로써, 다양한 시장구조 환경 하에서 시장참여자들의 ESS 투자 유인을 분석하고, 그에 따른 ESS 최적 투자 수준을 두 기간 모델을 통해 확인해보고자 한다. 둘 이상의 시장참여자가 비협조적인 경쟁을 통해 ESS에 투자하는 경우는 게임이론을 이용하여 n-참여자의 비협조게임의 내쉬균형을 통해 시장참여자별 최적 ESS 투자량을 확인하였다.

4.1 두 기간 모델과 시장참여자의 후생 분석

ESS를 이용한 에너지 차익거래가 시장참여자들의 후생에 미치는 영향을 명확하고 직관적으로 분석하기 위해, 두 기간 모델을 사용하였다. 두 기간 모델은 ESS 운영 전후의 후생변화를 충전과 방전을 하는 두 시점의 수리적인 모델로 표현한 것이다. 본 절에서는 ESS를 이용한 에너지 차익거래가 전력도매시장의 가격결정에 영향을 미치는 경우의 시장참여자의 후생 변화와 에너지 차익거래 가치의 감소를 확인하고, 1) 선도거래, 쌍무계약 등 전력풀에서 거래되지 않는 전력량과 2) ESS의 가격을 반영한 모델의 제안을 통해 좀 더 현실을 잘 반영할 수 있도록 하였다.

본 절을 포함하여, 이후 설명하는 후생(welfare)은 행복, 효용 등과 같이 금전화가 어려운 형태의 후생은 고려하지 않고, 오직 화폐의 형태로 표현이 가능한 경제적 후생(economic welfare)만을 의미한다. 이와 같이 시장참여자들의 후생을 경제적 후생만으로 고려할 수 있는 이유는 ESS를 이용한 에너지 차익거래가 시장참여자들의 전력소비에 따른 효용에 변화를 주지 않기 때문이며, 이에 대하여는 두 기간 모델을 통하여 더욱 자세히 설명한다.

4.1.1 시장참여자 정의

본 연구에서는 에너지 차익거래로 인해 후생에 영향을 받는 시장참여자 1) 생산자(producer 혹은 supplier), 2) 소비자(customer 혹은 consumer), 3) 상업저장장치소유자(merchant storage owner, 이하 MSO)/독립저장장치운영자(stand-alone storage operator), 3가지 종류로 구분, 사용하였다 [36, 47]. 여기서 MSO는 생산자 혹은 소비자가 아닌 제3의 시장참여자로서 에너지 차익거래의 이익을 목적으로 ESS에 투자, 운영하는 시장참여자라고 말한다. 앞서 사용하던 용어 ESO와 MSO는 다음과 같은 차이점을 가지며, 본 연구에서는 두 용어를 구분하여 사용하였다. ESO는 에너지 저장장치 소유자를 의미하며, ESS 소유자가 어떤 형태로 시장에 참여하느냐와 상관없이 ESS를 소유, 운영할 경우 ESO로 규정한다. 즉 생산자, 소비자, MSO 모두 ESS를 소유하기만 하면 ESO라고 할 수 있다. 반면에 MSO는 ESO의 시장참여 형태에 따른 구분이다. 즉, 생산자 혹은 소비자가 아닌 시장참여자가 ESS를 소유한 경우에만 MSO로 규정된다.

모든 시장참여자는 자신의 이익에 따라 ESS를 소유, 운영할 수 있으며, 그 구조는 아래 그림 4.1과 같이 표현이 가능하다. 이 때, E_t^P, E_t^S, E_t^C 는 양수면 방전, 음수면 충전하는 것으로 표현하였다.

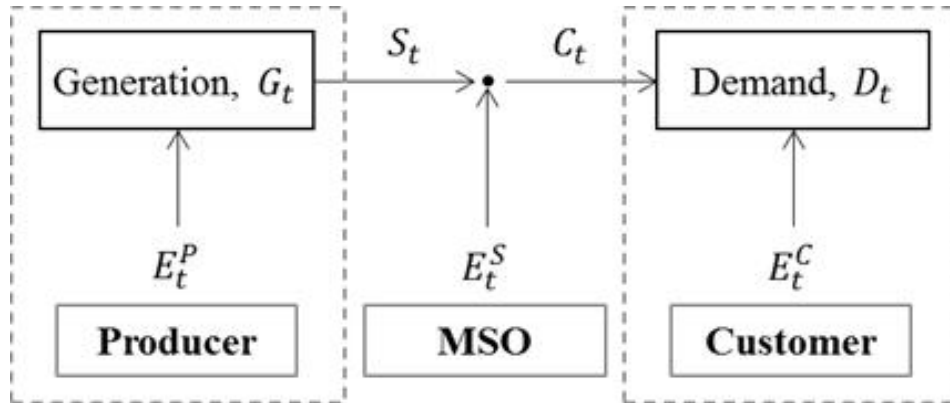


그림 4.1 ESS 소유 구조 및 시장참여자별 에너지 차익거래를 위한 운영 방안

생산자는 t 시점의 자신의 발전량 G_t 와 생산자가 소유한 ESS의 방전량 E_t^P 의 합 만큼 계통에 공급하고, 생산자로부터 전력계통에 공급되는 전력량 S_t 는 다음과 같이 정의된다.

$$S_t = G_t + E_t^P \quad (4.1)$$

소비자는 t 시점의 자신의 수요 D_t 와 소비자가 소유한 ESS의 충전량 $-E_t^C$ 의 합 만큼 계통으로부터 공급받고, 소비자가 전력계통으로부터 공급받는 전력량 C_t 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_t = D_t - E_t^C \quad (4.2)$$

MSO는 t 시점의 생산자로부터 공급된 전력량 S_t 와 MSO가 소유한

ESS의 방전량 E_t^S 을 합한 C_t 만큼 소비자에게 공급 가능하다. 이는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$S_t + E_t^S = C_t \quad (4.3)$$

전력시장에서 전력가격의 결정은 S_t 와 C_t 에 의해 결정된다.

t시점의 계통 전체의 발전량, 소비량, ESS의 방전량의 관계식은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$G_t + E_t^P + E_t^S + E_t^C = D_t \quad (4.4)$$

t시점에서의 각 시장참여자별 이익(profit)은 수익(revenue)과 비용(cost)의 차로 표현할 수 있다. ESS는 배터리 용량의 제약으로 인해 충전 혹은 방전만을 계속할 수 없으므로, 전략에 맞게 충전과 방전 시점 및 양을 결정해야 한다. 즉, ESS 운영모델은 다기간 모델로 모델링되어야 한다.

ESS를 소유한 생산자, 소비자, MSO는, 자신의 이익을 최대화하기 위한 ESS의 운영전략으로 모두 동일하게 에너지 차익거래를 한다는 것을 확인하였다. 이 때, 생산자는 자신의 기존 발전량을, 소비자는 자신의 기존 수요를 변화시킬 수 없다고 가정하였다. 4.1.1절의 나머지는 모든 시장참여자가 동일한 ESS 운영전략을 갖는 이유를 설명한다.

t시점의 ESS 운영으로 인한 생산자 이익(수식 (4.5))과 T 기간 동안의 생산자가 소유한 ESS의 운영전략(수식 (4.6))은 각각 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\pi_t^P &= \rho_t \cdot (G_t + E_t^P) - MC_t \cdot G_t \\ &= (\rho_t - MC_t) \cdot G_t + \rho_t \cdot E_t^P\end{aligned}\quad (4.5)$$

$$\max_{E_t^P} \left\{ \sum_{t=1}^T \pi_t^P \right\} = \max_{E_t^P} \left\{ \sum_{t=1}^T (\rho_t \cdot E_t^P) \right\}\quad (4.6)$$

$$\sum_{t=1}^T E_t^P = 0\quad (4.7)$$

여기서

T : ESS 운영 기간,

ρ_t : t시점의 전력가격 [원/kWh].

MC_t : t시점의 전력생산 한계비용 [원/kWh]

를 의미한다.

수식 (4.5)의 첫 번째 항은 생산자가 전력시장에 자신의 생산량(G_t)과 ESS 충방전량(E_t^P)을 판매하여 얻는 이익을 의미하며, 두 번째 항은 생산비용을 생산량(G_t)과 한계비용(MC_t)의 곱으로 표현한 것이다.

전력가격은 도매시장에서 전력의 공급량(S_t)과 소비량(C_t)에 따라 결정된다. 한계가격(MC_t)은 한단위의 전력량을 추가 생산하기 위해 생산자가 지불하는 비용으로, 항상 일정한 값을 갖는다고 가정한다. 이와 같은

가정 하에서 수식 (4.5)의 첫 번째 항은 생산자의 ESS 운영전략 결정시 영향을 미치지 않는 항이 되어 수식 (4.6)과 같이 쓸 수 있다. ESS의 방전을 위해서는 충전이 필요하므로, 운영기간 T 동안의 충전량과 방전량이 동일해야한다는 제약조건 (수식 (4.7))을 포함하였다. 그 외에 ESS의 출력제약과 배터리용량제약은 따로 표기하지 않았다.

생산자가 소유한 ESS의 운영으로 인한 G_t 와 S_t , E_t^P 는 아래 그림 4.2와 같이 표현이 가능하다. 전력가격이 다른 두 시점에 대하여 표현하였고, t_1 시점의 전력가격이 t_2 시점의 전력가격보다 낮다고 가정하였다 ($\rho_{t_1} < \rho_{t_2}$). 생산자가 전력가격에 응동하여 ESS를 운영하였을 경우의 G_t 와 S_t 의 관계 (그림 4.2(a))와, 이때의 ESS 충방전량 (그림 4.2(b))을 표현하였다. ESS 충전량은 δ 로 표현하였고, 충전과 방전사이의 효율을 η 로 표현하였다. 즉, 생산자는 전력가격이 낮은 t_1 시점에 ESS를 충전함으로써 출력량(G_{t_1})보다 낮은 전력량을 계통에 공급(S_{t_1})하고, 반대로 전력가격이 높은 t_2 시점에 ESS에 충전했던 전력을 방전($\eta\delta$)함으로써 출력량(G_{t_2})보다 많은 전력을 계통에 공급(S_{t_2})하여 에너지 차익거래의 이익을 얻는다.

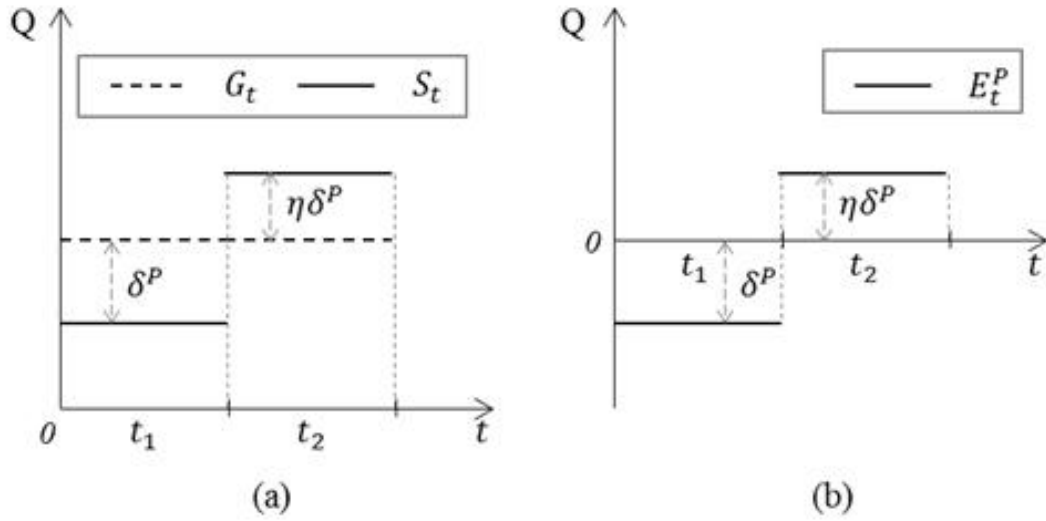


그림 4.2 생산자의 ESS 운영 방안: (a) G_t 와 S_t 의 관계, (b) ESS 충전 전략 ($\rho_{t_1} < \rho_{t_2}$)

비슷하게 t시점의 ESS 운영으로 인한 MSO 이익(수식 (4.8))과 T 기간 동안의 MSO가 소유한 ESS의 운영전략(수식 (4.9))은 각각 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\pi_t^S &= \rho_t \cdot (C_t - S_t) \\ &= \rho_t \cdot E_t^S\end{aligned}\quad (4.8)$$

$$\max_{E_t^S} \left\{ \sum_{t=1}^T \pi_t^S \right\} = \max_{E_t^S} \left\{ \sum_{t=1}^T (\rho_t \cdot E_t^S) \right\}\quad (4.9)$$

$$\sum_{t=1}^T E_t^S = 0\quad (4.10)$$

MSO가 소유한 ESS의 운영으로 인한 S_t 와 C_t , E_t^S 는 아래 그림 4.3과 같이 표현이 가능하다. MSO가 전력가격에 응동하여 ESS를 운영하였을 경우의 S_t 와 C_t 의 관계 (그림 4.3(a))와, 이때의 ESS 충방전량 (그림 4.3(b))을 표현하였다. 즉, MSO는 전력가격이 낮은 t_1 시점에 ESS를 충전함으로써 생산자로부터의 공급량(S_{t_1})보다 적은 전력을 소비자에게 공급(C_{t_1})하고, 반대로 전력가격이 높은 t_2 시점에 ESS에 충전했던 전력을 방전($\eta\delta$)함으로써 생산자로부터의 공급량(G_{t_2})보다 많은 전력을 소비자에게 공급(C_{t_2})하여 에너지 차익거래의 이익을 얻는다.

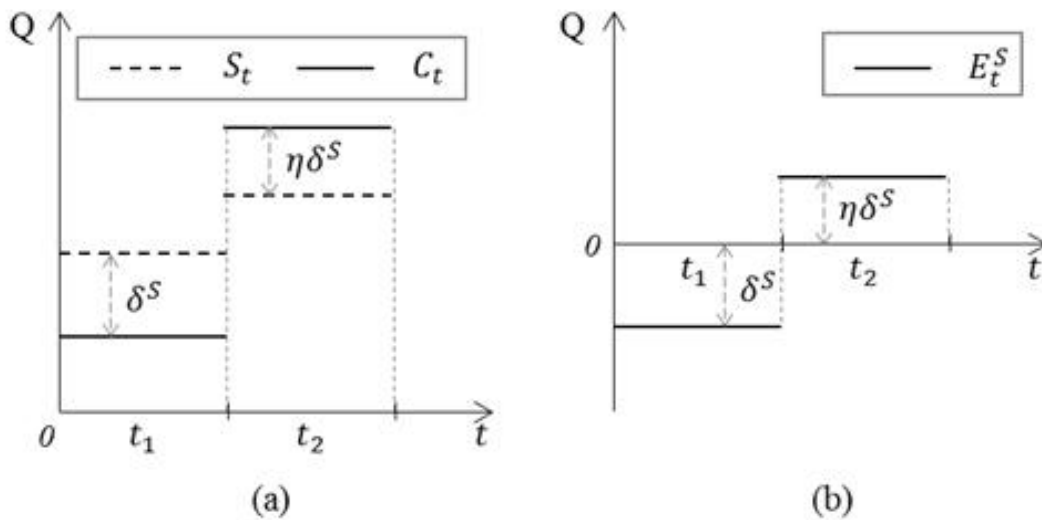


그림 4.3 MSO의 ESS 운영 방안: (a) S_t 와 C_t 의 관계, (b) ESS 충방전량 ($\rho_{t_1} < \rho_{t_2}$)

마찬가지로, t시점의 ESS 운영으로 인한 소비자 이익(수식 (4.11))과 T 기간 동안의 소비자가 소유한 ESS의 운영전략(수식 (4.12))은 각각 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 \pi_t^C &= U_t \cdot D_t - \rho_t \cdot C_t \\
 &= U_t \cdot D_t - \rho_t \cdot (D_t - E_t^C) \\
 &= (U_t - \rho_t) \cdot D_t + \rho_t \cdot E_t^C
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

$$\max_{E_t^C} \left\{ \sum_{t=1}^T \pi_t^C \right\} = \max_{E_t^C} \left\{ \sum_{t=1}^T (\rho_t \cdot E_t^C) \right\} \tag{4.12}$$

$$\sum_{t=1}^T E_t^C = 0 \tag{4.13}$$

여기서

U_t : 금전화 된 t시점의 고객의 한계효용 [원/kWh]

을 의미한다.

수식 (4.11)의 첫 번째 항은 소비자가 소비를 통해 얻는 효용을 나타내며 소비량(D_t)과 한계효용(U_t)의 곱으로 나타내었고, 두 번째 항은 소비를 위해 시장에 지불하는 비용을 의미하며 실제 소비량(D_t)에서 ESS 충방전량(E_t^C , 충전일 경우 양수)을 뺀 값에 시장가격(ρ_t)를 곱한 형태로 표현하였다.

고객은 ESS 운영에도 불구하고 자신의 소비량에는 변화가 없으므로

효용의 변화는 존재하지 않는다. 그러므로 수식 (4.11)의 첫 번째 항은 ESS 운영전략에서 고려되지 않고 수식 (4.12)와 같이 표현이 가능하다.

소비자가 소유한 ESS의 운영으로 인한 C_t 와 D_t , E_t^C 는 아래 그림 4.4와 같이 표현이 가능하다. 소비자가 전력가격에 응동하여 ESS를 운영하였을 경우의 C_t 와 D_t 의 관계 (그림 4.4(a))와, 이때의 ESS 충방전량 (그림 4.4(b))을 표현하였다. 즉, 소비자는 전력가격이 낮은 t_1 시점에 ESS를 충전함으로써 수요량(D_{t_1})보다 많은 전력량을 계통에서 공급(C_{t_1})받고, 반대로 전력가격이 높은 t_2 시점에 ESS에 충전했던 전력을 방전($\eta\delta$)함으로써 수요량(D_{t_2})보다 적은 전력을 계통에서 공급(C_{t_2})받아 에너지 차이거래의 이익을 얻는다.

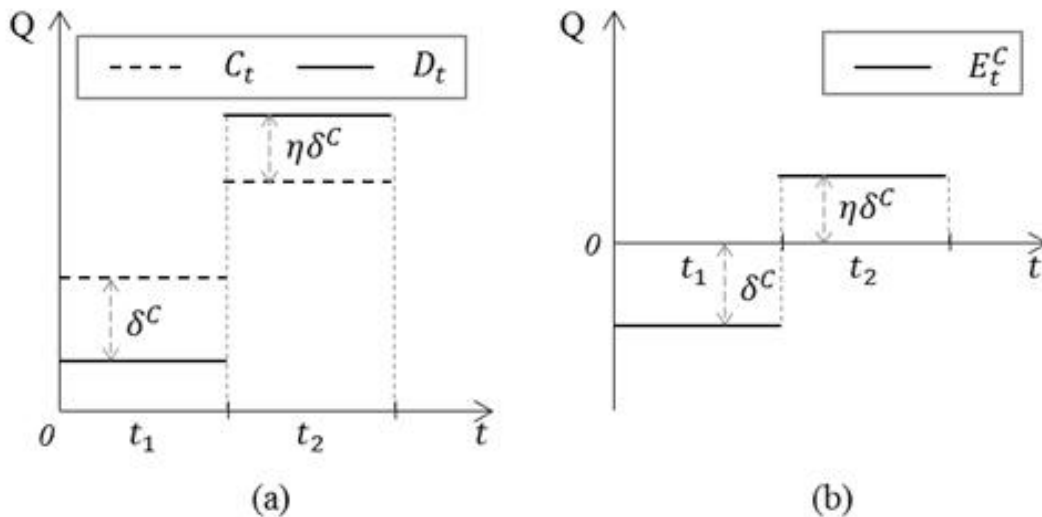


그림 4.4 소비자의 ESS 운영 방안: (a) C_t 와 D_t 의 관계, (b) ESS 충방전량 ($\rho_{t_1} < \rho_{t_2}$)

수식 (4.7), (4.10), (4.13)에서 확인 할 수 있듯이, 에너지 차익거래의 이익을 최대화하기 위한 ESS 운영전략은 시장참여자 별 차별 없이 동일한 전략을 갖는 것을 확인할 수 있다.

도매시장과 소매시장에서의 각 시장참여자의 대표적인 형태는 다음 표 4.1과 같다.

표 4.1 소매시장과 도매시장에서의 각 시장참여자의 대표적인 형태

시장참여자	도매시장	소매시장
생산자	발전사업자	판매사업자
소비자	판매사업자, 대규모소비자	최종소비자
MSO	생산자, 소비자가 아닌 누구나	생산자, 소비자가 아닌 누구나

4.1.2 두 기간 모델과 시장참여자의 후생변화

4.1.2.1 에너지 차익거래에 따른 후생의 변화

기존의 많은 연구들과 같이 ESO를 가격수용자로 고려한다면 ESS를

이용한 에너지 차익거래를 통해 후생이 변화하는 시장참여자는 에너지 차익거래를 통한 이익을 직접적으로 얻는 ESS 운영자뿐일 것이다. 하지만 에너지 차익거래를 위한 ESS의 투자량이 전체 수요에 유의미한 변화를 줄만큼 증가하거나, 혹은 대형 ESS가 에너지 차익거래를 위해 투자된다면 전력가격에 영향을 미칠 만큼 수요가 변화할 것이다. 그림 4.5는 2015년 7월 23일의 수요에 에너지 차익거래를 위한 1GW/1GWh 용량의 ESS가 설치, 운영되었을 경우의 SMP의 변화를 예측한 것이다. 이 때 수요와 SMP의 관계는 해당 시기의 실제 데이터를 이용한 선형근사모델을 이용하였다.

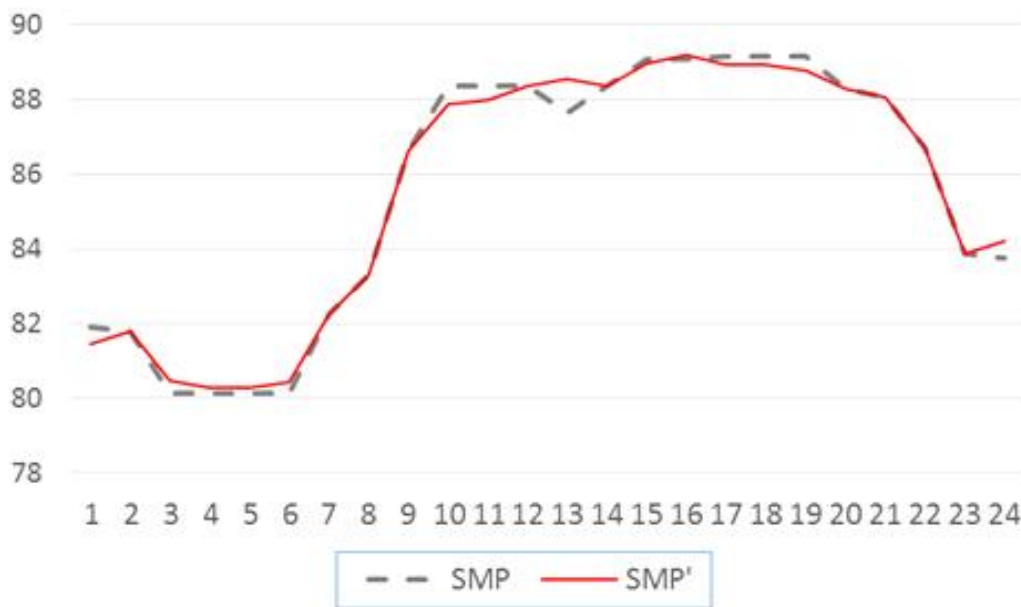


그림 4.5 ESS(1GW/1GWh)의 에너지 차익거래에 따른 SMP 변화 (2015년 7월 23일)

이와 같은 전력가격의 변화는 1) 에너지 차익거래의 가치를 감소시킬 뿐만 아니라, 2) 전력가격의 변화로 인한 외부 효과로 다른 시장참여자의 후생을 변화시킨다.

전력가격이 낮은 시점의 수요를 높이고, 반대로 전력가격이 높은 시점의 수요를 낮춤으로써, 각 시간대의 전력가격은 각각 증가, 감소할 것이다. 그리고 이는 두 시점의 전력가격의 차이를 줄여 에너지 차익거래의 가치를 감소시킨다. 또한 낮아진 전력가격은 해당 소비자들의 후생을 증가시키는 반면, 높아진 전력가격은 해당 생산자들의 후생을 증가시킨다.

정리하면, ESS를 통한 에너지 차익거래의 양이 전력가격을 변화시킬 만큼 증가한다면, 에너지 차익거래의 기대 가치는 감소하고, 에너지 차익거래 참여 여부와 관계없이 시장참여자들의 후생이 변화한다. 이는 다음 절의 두 기간 모델을 통해 수리적으로 확인할 수 있다.

4.1.2.2 두 기간 모델

본 연구에서는 ESS의 에너지 차익거래시 시장참여자의 후생 변화를 분석하기 위해 전력가격이 다른 두 시점의 에너지 차익거래를 모델링한 두 기간 모델을 사용하였다.

두 기간 모델은 ESS의 에너지 차익거래를 설명하기 위한 가장 단순한 단기간의 모델이며, 동시에 직관적으로 에너지 차익거래의 효과를 설

명할 수 있는 모델이다. 그 이유는 ESS는 어느 한 시점에서만 본다면 발전설비로도 수요로도 해석할 수 있지만, 방전을 위해서는 사전에 반드시 충전이 필요한 설비이다. 즉, ESS의 용량의 제약은 무한한 방전 혹은 충전이 불가하므로 충전과 방전의 쌍(pair)을 모두 고려한 다기간 모델로 고려해야한다. 그러므로 두 기간 모델은 에너지 차익거래를 한 번의 충전과 한 번의 방전으로, 최소한의 쌍을 이용하여 그 효과를 분석하기 위한 모델이다. 에너지 차익거래를 통한 후생의 변화분석을 위해 에너지 차익거래 전의 후생과 에너지 차익거래 후의 후생으로 구분, 비교한다.

두 기간 모델(그림 4.6)은 하나의 공급곡선과 총 4개의 수요곡선을 동시에 하나의 그래프에 그려서 표현할 수 있고, 이 때 공급곡선과 4개의 수요곡선이 각각 만나는 4개의 교차점은 각 상황 및 시점에서의 시장가격을 결정한다. 4개의 수요곡선은 에너지 차익거래 전의 두 곡선 (D_1, D_2)과 에너지 차익거래 후의 두 곡선(D_1^{new}, D_2^{new})의 짝으로 구분할 수 있다. 시점 1의 수요곡선 D_1 과 시점 2의 수요곡선 D_2 는 수요에 대하여 수직인 점선으로 그려지며 그 때의 수요는 각각 q_1, q_2 이다. 에너지 차익거래는 낮은 전력가격의 시점 1에 충전하고 반대로 높은 가격의 시점 2에는 방전하는 것을 의미하며, 그 때 충전량은 δ , 방전량은 $\eta\delta$ 로 표현하였다. η 는 충방전효율을 나타낸다. 이와 같은 충전과 방전을 통해 수정된 수요곡선은 실선으로 표현하였고, 그 때의 수요는 각각 $q_1 + \delta$,

$q_2 - \eta\delta$ 이다.

이 때, D_1^{new}, D_2^{new} 는 실제 소비자의 전력사용량이 아닌 수요(계측전력)를 의미하며, 실제 소비자의 전력사용량은 에너지 차익거래 전과 후 모두 D_1, D_2 와 같다. 즉, ESS를 이용한 에너지 차익거래는 소비자의 수요(판매 혹은 구매전력량)을 변화시키기는 하지만 실제 사용량에는 변화를 가져오지 않는다. 이로 인해 소비자는 에너지 차익거래에도 불구하고 효율의 변화가 없다.

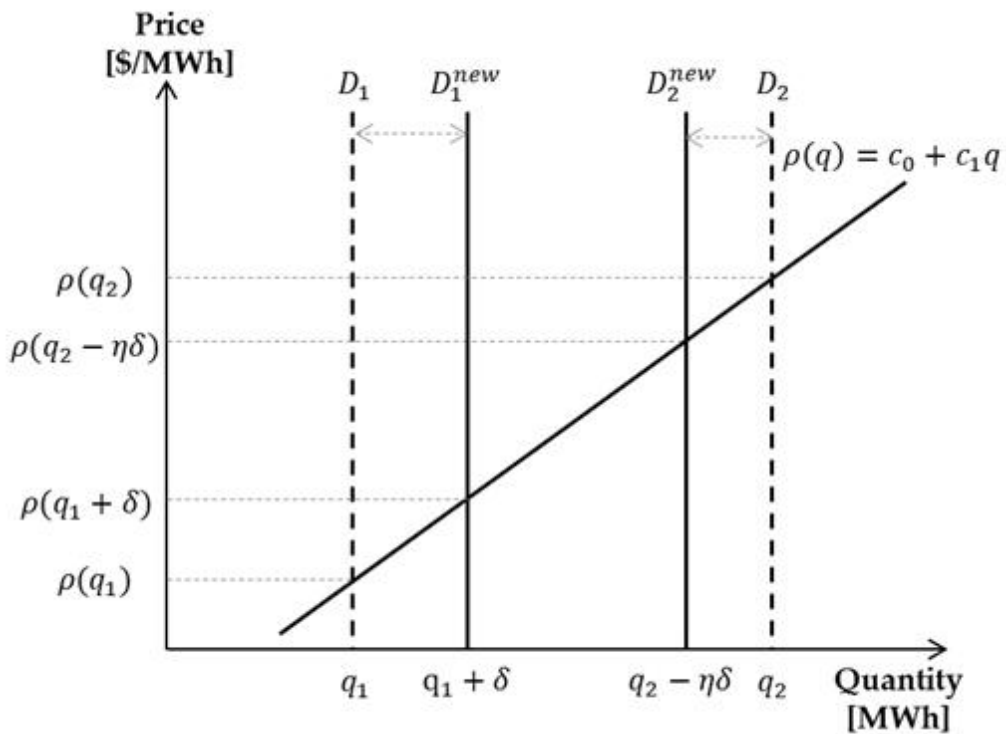


그림 4.6 ESS를 이용한 에너지 차익거래의 두 기간 모델

A. 기존 모델

ESS 에너지 차익거래의 두 기간 모델의 기본은 R. Sioshansi의 연구 [36]을 참고하였다.

시장참여자별 후생 변화는 에너지 차익거래 후의 두 시점에서의 후생에서 에너지 차익거래 전의 두 시점의 후생을 빼줌으로써 구할 수 있으며, 그 결과는 아래와 같이 정리가 가능하다 [36].

$$\Delta CS = c_1(\eta q_2 - q_1) \cdot \delta \quad (4.14)$$

$$\Delta PS = c_1(q_1 - \eta q_2) \cdot \delta + \frac{1}{2}c_1(1 + \eta^2) \cdot \delta^2 \quad (4.15)$$

$$\Delta ES = \{c_0(\eta - 1) + c_1(\eta q_2 - q_1)\} \cdot \delta - \{c_1(1 + \eta^2)\} \cdot \delta^2 \quad (4.16)$$

여기서,

ΔCS : 에너지 차익거래로 인한 소비자의 후생 변화 [원],

ΔPS : 에너지 차익거래로 인한 생산자의 후생 변화 [원],

ΔES : 에너지 차익거래로 인한 저장장치 소유자의 후생 변화,

c_0, c_1 : 공급곡선의 계수 [원/kWh], [원/kWh²],

η : 에너지 저장장치의 충방전효율 [pu],

q_1, q_2 : 각각 시점 1, 2의 기존 수요량 [MWh],

δ : 에너지 저장장치의 충전량 [MWh],

과 같다.

그림 4.7은 두 기간 모델에서 각 시장참여자들의 후생변화를 영역으로 표시한 그림이다.

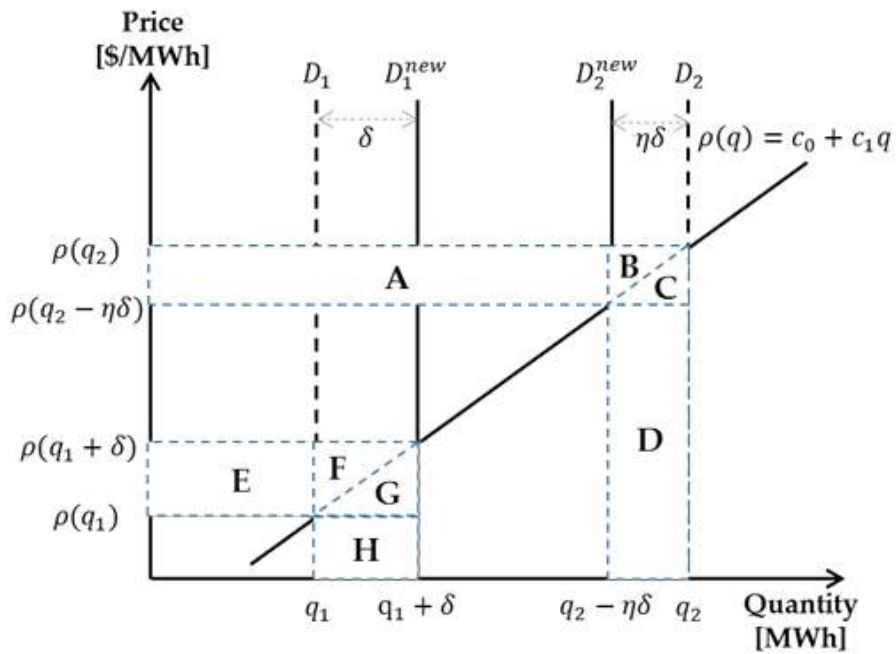


그림 4.7 에너지 차익거래로 인한 각 시장참여자의 후생변화

그림에서 각 시장참여자들의 후생변화는 소비자, 생산자, ESO 각각 순서대로 $(A+B+C-E)$, $(E+F-A-B)$, $(D-F-G-H)$ 이다.

B. 제안한 모델

기존 모델의 경우 선도계약, 쌍무계약 등의 거래를 통해 전력시장에서의 전력가격 위험을 회피한 참여자를 고려하지 않고 있으며, 또한 ESS 투자 및 운영전략에 매우 중요한 영향을 미치는 ESS의 비용에 대한 반영이 되어있지 않았다. 본 연구에서는 전력도매시장 외에서 거래되는 전력거래의 비율과 ESS의 비용이 시장참여자별 후생에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 기존의 두 기간 모델에서 위 두 고려요소를 반영한 모델을 제안하였다.

먼저 ESS의 비용은 저장장치의 소유자가 부담하는 것으로 반영하였다. 소비자와 생산자의 후생의 변화에는 ESS 비용이 영향을 미치지 않으므로 소비자와 생산자의 후생 변화는 각각 기존모델 수식 (4.14), (4.15)와 동일하며, ESO의 후생 변화는 다음 수식 (4.17)과 같이 표현된다.

$$\Delta ES = \{c_0(\eta - 1) + c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess}\} \cdot \delta - \{c_1(1 + \eta^2)\} \cdot \delta^2 \quad (4.17)$$

여기서,

c_{ess} : 에너지 저장장치의 비용 상수 [원/MWh]

와 같다. 이 때, 에너지 저장장치의 비용 상수 c_{ess} 는 1MW/1MWh 용량

의 ESS가 완전한 충방전을 한 사이클 하였을 때 소요되는 비용을 의미하며, 총 투자비용을 이용하여 한 번의 완전한 충방전으로 인한 열화비용을 계산함으로써 구할 수 있다. ESS 가격은 용량에 선형적으로 비례한다고 가정하였다[6, 49, 50].

본 연구는 1) ESS 투자, 운영량이 시장참여자의 후생에 미치는 영향, 혹은 2) 시장참여자들의 후생 최대화를 위한 최적 ESS 투자량을 결정하는 연구이므로, 해석의 용이성을 위해 식 (4.14),(4.15),(4.17)에서 δ 를 제외한 독립변수들을 다음과 같이 치환하였다.

$$\Delta CS = A \cdot \delta \quad (4.18)$$

$$\Delta PS = -A \cdot \delta + B \cdot \delta^2 \quad (4.19)$$

$$\Delta ES = (A - C - c_{ess}) \cdot \delta - 2B \cdot \delta^2 \quad (4.20)$$

여기서,

$$A = c_1(\eta q_2 - q_1), \quad (4.21)$$

$$B = \frac{1}{2}c_1(1 + \eta^2), \quad (4.22)$$

$$C = c_0(1 - \eta) \quad (4.23)$$

와 같다.

실제로는 시장참여자의 모두가 전력가격의 변화의 영향을 받는 것은 아니다. 기존모델은 시장참여자의 후생 분석시 모든 전력의 거래가 시장을 통해 거래되는 것으로 가정하였다. 그래서 에너지 차익거래에 의한 전력가격의 변화가 모든 생산자와 소비자의 거래 가격에 영향을 미쳐 후생을 변화시켰다고 가정한 것이다. 하지만 실제로 시장 참여자들은 가격위험을 회피할 목적으로 선도계약 혹은 쌍무계약을 통해 거래를 한다. 즉, 이와 같은 무위험거래⁵⁾를 통해 전력을 판매 혹은 구매하는 시장참여자들은 에너지 차익거래로 인한 전력가격 변화에 따른 영향을 받지 않는다. 그러므로 무위험거래의 비율을 반영한 모델은 에너지 차익거래로 인한 가격변화가 시장참여자에게 미치는 외부효과의 수준을 현실과 좀 더 유사하게 반영할 수 있다. 뿐만 아니라 무위험 거래가 시장참여자들의 ESS 투자에 미치는 영향도 확인할 수 있게 한다.

앞서 살펴본 두 기간 모델에 무위험거래를 반영하면 그림 4.8과 같다. 시점 1과 시점 2의 기존수요(q_1, q_2) 대비 무위험거래의 비율을 각각 w_1, w_2 으로 표현하였다. 비록 무위험거래를 통한 전력거래량이 시장에 참여하는 거래량과 가격에 영향을 미치지만, 본 연구에서는 무위험거래의 비율이 시장가격에는 영향을 미치지 않는다고 가정하였다⁶⁾. 그림 4.7과 비

5) 본 연구에서는 편의를 위해 가격위험을 회피하기 위한 시장참여자들의 선도계약 혹은 쌍무계약 등의 계약을 ‘무위험거래 (risk-free contract)’라고 명명하여 사용하였다.

6) 현물시장뿐만 아니라 선도시장도 둘 이상의 참여자가 경쟁시 가격이 하락하고, 완전경쟁으로 갈수록 경쟁가격에 근접한다.

교하여, 무위험거래를 통한 각 시장참여자의 후생변화는 다음과 같이 변화하였다. 소비자의 경우 $[(A+B+C-RFC2)-(E-RFC1)]$, 즉 $(A'+B+C-E')$ 로, 생산자의 경우 $[(E+F-RFC1)-(A+B-RFC2)]$, 즉 $(E'+F-A'-B)$ 로 변화하였고, ESO의 경우는 ESS 비용을 반영하여 $(D-F-G-H)-(c_{ess} \cdot \delta)$ 와 같다.

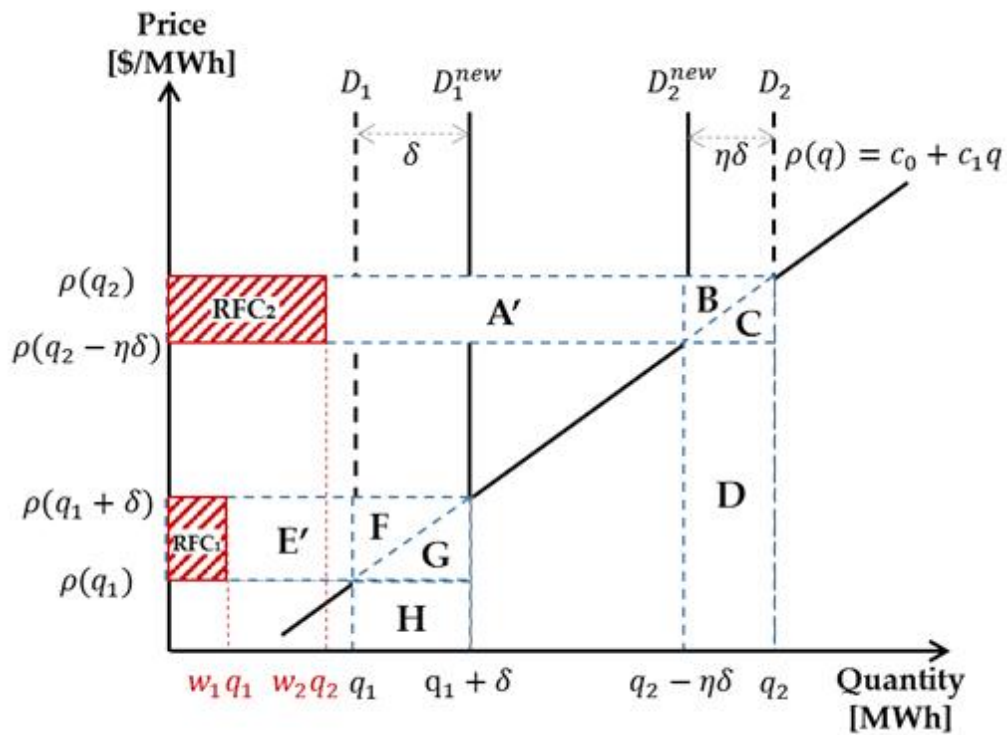


그림 4.8 무위험거래를 고려한 두 기간 모델과 이에 따른 각 시장 참여자의 후생변화

무위험거래와 ESS 비용을 고려한 두 기간 모델의 수리적 형태는 다음과 같은 과정을 통하여 도출할 수 있다.

수식 (4.24)-(4.27)은 각각 시점 1의 차익거래 전, 후의 소비자 후생, 시점 2의 차익거래 전, 후의 소비자 후생을 계산한 것이다. 후생은 2.2.3의 소비자 잉여를 나타내는 영역을 계산하는 방법으로 구할 수 있었다.

$$CS_1 = \int_{\rho(q_1)}^{\infty} (1-w_1)q_1 d\rho \quad (4.24)$$

$$CS_1^{new} = \int_{\rho(q_1+\delta)}^{\infty} (1-w_1)q_1 d\rho \quad (4.25)$$

$$CS_2 = \int_{\rho(q_2)}^{\infty} (1-w_2)q_2 d\rho \quad (4.26)$$

$$CS_2^{new} = \int_{\rho(q_2-\eta\delta)}^{\infty} (1-w_2)q_2 d\rho \quad (4.27)$$

ESS 에너지 차익거래에 의한 소비자 후생의 변화는 수식 (4.24)-(4.27)를 이용하여 수식 (4.28)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta CS &= (CS_1^{new} + CS_2^{new}) - (CS_1 + CS_2) \\ &\text{or } (CS_1^{new} - CS_1) + (CS_2^{new} - CS_2) \\ &= \left(\int_{\rho(q_1+\delta)}^{\rho(q_1)} q_1 d\rho \right) \cdot (1-w_1) + \left(\int_{\rho(q_2-\eta\delta)}^{\rho(q_2)} q_2 d\rho \right) \cdot (1-w_2) \\ &= c_1 \{ \eta q_2 (1-w_2) - q_1 (1-w_1) \} \cdot \delta \\ &= A' \cdot \delta, \quad A' = c_1 \{ \eta q_2 (1-w_2) - q_1 (1-w_1) \} \end{aligned} \quad (4.28)$$

수식 (4.28)에 표현한 것처럼 무위험거래가 고려된 경우 역시 δ 를 고려한 독립변수(w 포함)를 치환하면 수식 (4.18)과 동일한 형태로 표현이 가능하고, 이 때 $A' = c_1\{\eta q_2(1-w_2) - q_1(1-w_1)\}$ 와 같다.

만약 두 시점의 수요량 대비 무위험거래 비율이 동일 할 경우 ($w_1 = w_2$), 소비자 후생의 변화는 아래 수식 (4.29)와 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \Delta CS &= c_1(\eta q_2 - q_1)(1-w) \cdot \delta, & \text{if } w_1 = w_2 \\ &= A(1-w) \cdot \delta \end{aligned} \quad (4.29)$$

수식 (4.30)-(4.33)은 각각 시점 1의 차익거래 전, 후의 생산자 후생, 시점 2의 차익거래 전, 후의 생산자 후생을 계산한 것이다. 후생은 2.2.3의 생산자 잉여를 나타내는 영역을 계산하는 방법으로 구할 수 있었다.

$$PS_1 = \int_0^{\rho(q_1)} q(\rho) d\rho - \int_0^{\rho(q_1)} w_1 q_1 d\rho \quad (4.30)$$

$$PS_1^{new} = \int_0^{\rho(q_1+\delta)} q(\rho) d\rho - \int_0^{\rho(q_1+\delta)} w_1 q_1 d\rho \quad (4.31)$$

$$PS_2 = \int_0^{\rho(q_2)} q(\rho) d\rho - \int_0^{\rho(q_2)} w_2 q_2 d\rho \quad (4.32)$$

$$PS_2^{new} = \int_0^{\rho(q_2 - \eta\delta)} q(\rho) d\rho - \int_0^{\rho(q_2 - \eta\delta)} w_2 q_2 d\rho \quad (4.33)$$

ESS 에너지 차익거래에 의한 생산자 후생의 변화는 수식 (4.30)

-(4.33)을 이용하여 수식 (4.34)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta PS &= (PS_1^{new} - PS_1) + (PS_2^{new} - PS_2) \\ &= c_1 \{q_1(1-w_1) - \eta q_2(1-w_2)\} \cdot \delta + \frac{1}{2} c_1 (1+\eta^2) \cdot \delta^2 \quad (4.34) \\ &= -A' \cdot \delta + B \cdot \delta^2 \end{aligned}$$

만약 두 시점의 수요량 대비 무위험거래 비율이 동일 할 경우 ($w_1 = w_2$), 생산자 후생의 변화는 아래 수식 (4.35)과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \Delta PS &= c_1 (q_1 - \eta q_2) (1-w) \cdot \delta + \frac{1}{2} c_1 (1+\eta^2) \cdot \delta^2, \text{ if } w_1 = w_2 \\ &= -A(1-w) \cdot \delta + B \cdot \delta^2 \end{aligned} \quad (4.35)$$

MSO의 후생은 무위험거래 수준에는 영향을 받지 않는다. MSO는 생산자 혹은 소비자가 아니면서 ESS를 소유하여 에너지 차익거래의 이익

을 추구하는 시장참여자이기 때문이다. 그러므로 MSO는 무위험거래를 고려하기 전과 동일한 후생변화를 가지며 이를 다시 쓰면 수식 (4.36)과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta ES &= \{c_o(\eta-1) + c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess}\} \cdot \delta - \{c_1(1+\eta^2)\} \cdot \delta^2 \\ &= \{(A-C) - c_{ess}\} \cdot \delta - 2B \cdot \delta^2\end{aligned}\tag{4.36}$$

무위험거래와 ESS의 비용을 고려한 두 기간 모델에서 에너지 차익거래에 의한 각 시장참여자의 후생변화는 아래 표 4.2와 같이 정리할 수 있다.

표 4.2 무위험거래와 ESS 비용을 고려한 제안한 두 기간 모델에서의 에너지 차익거래에 따른 각 시장참여자의 후생변화

시장 참여자	에너지 차익거래에 따른 시장참여자의 후생 변화
소비자	$\begin{aligned}\Delta CS &= c_1\{\eta q_2(1-w_2) - q_1(1-w_1)\} \cdot \delta \\ &= c_1(\eta q_2 - q_1)(1-w) \cdot \delta, \quad \text{if } w_1 = w_2\end{aligned}$
생산자	$\begin{aligned}\Delta PS &= c_1\{q_1(1-w_1) - \eta q_2(1-w_2)\} \cdot \delta + \frac{1}{2}c_1(1+\eta^2) \cdot \delta^2 \\ &= c_1(q_1 - \eta q_2)(1-w) \cdot \delta + \frac{1}{2}c_1(1+\eta^2) \cdot \delta^2, \quad \text{if } w_1 = w_2\end{aligned}$
MSO	$\Delta ES = \{c_o(\eta-1) + c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess}\} \cdot \delta - \{c_1(1+\eta^2)\} \cdot \delta^2$

4.1.3 ESO가 가격수용자일 때의 이론적 고찰

기존의 많은 연구들에서는 ESS를 가격수용자(price-taker)로 가정하고 최적 운영 혹은 최적 투자량을 결정하였다. 이는 소규모의 ESS 운영이 수요의 변화에 미치는 영향은 미미할 것으로 보고 가격변화에 대한 고려 없이 최적전략 수립에 집중하기 위해서이다. 본 절에서는 에너지 차익거래용 ESS의 소유자가 전력시장에서의 가격수용자일 때, 즉 ESS의 운영이 전력가격 혹은 전기요금에 영향을 미치지 못한다고 가정하였을 때의 시장참여자별 투자전략에 대해 알아보았다. 이를 통해, 4.2절의 본격적인 연구 진행에 앞서, 도매시장에서의 기존 가정 (ESO를 가격수용자로 가정)의 타당성 검토 및 소매요금제 하에서의 ESS 에너지 차익거래에 대한 분석을 이론적으로 접근해 보고자 한다.

4.1.3.1 TOU 하에서의 시장참여자별 ESS 투자전략

TOU 요금제를 통한 전력거래 환경(소매시장)에서의 시장참여자별 에너지 차익거래용 ESS 투자전략을 알아본다.

소매시장에서의 시장참여자, 즉, 소비자, 생산자, 에너지 차익거래자는 각각 최종소비자(End-user), 판매사업자(retailer), MSO로 대표된다.

판매사업자는 도매시장에서 전력을 구매하여 자신이 설계한 전기요금
 효율로 최종소비자에게 전력을 판매한다. 이 때, 판매사업자가 최종소비
 자에게 제공하는 전기요금(r_t)은 수요와 상관없이 고정된 효율 이다.

기존수요곡선(D_1, D_2)은 ESO가 두 시점의 전기요금 차이에 유인을 받
 아 ESS를 이용하여 에너지 차익거래를 할 경우 변화한다. 요금이 낮은
 시점 1에 δ 만큼 저장하고, 요금이 높은 시점 2에 $\eta\delta$ 만큼 방전하였을 경
 우 각 수요곡선은 D_1^{new}, D_2^{new} 가 되며 그림 4.9와 같이 표현이 가능하다.

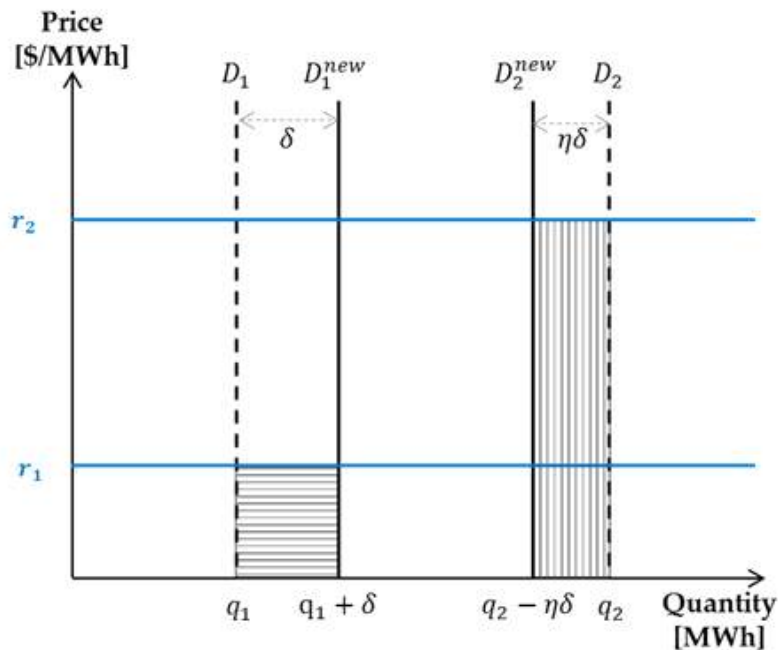


그림 4.9 소매요금제(TOU) 하에서의 에너지 차익거래 두 기간 모델

소매시장에서의 에너지 차익거래에 따른 시장참여자별 후생의 변화는
 다음과 같다.

최종소비자의 에너지 차익거래로 인한 후생의 변화는 수식 (4.37)과 같다. 최종소비자의 실제 전력사용량에는 변화가 없어 효용의 변화가 없고, 수요의 이동에 따른 요금의 변화가 없으므로 비용의 변화가 없어 후생이 변화하지 않는다.

$$\Delta EUS = \int_{r_1}^{r_1} q_1 d\rho + \int_{r_2}^{r_2} q_2 d\rho = 0 \quad (4.37)$$

수식 (4.37)의 첫 번째 항은 시점 1에서의 에너지 차익거래 전, 후의 후생 변화를 계산한 것이고, 두 번째 항은 마찬가지로 시점 2에서의 후생변화를 나타낸 것이다. 이 때, 에너지 차익거래를 통해 수요가 변화하였음에도 불구하고, 전기요금 효율은 시점 1에서는 모두 r_1 이고, 시점 2에서는 모두 r_2 이기 때문에 수식의 적분의 시작과 끝이 같은 값이 된다.

낮은 효율에 전기를 저장하였다가(δ), 요금 효율이 높은 시점에 방전하여($\eta\delta$) 경제적 이익을 얻는 MSO의 에너지 차익거래로 인한 후생의 변화는 그림 4.9에 빗금으로 표현이 가능하다. 세로 빗금 부분에서 가로 빗금 부분을 뺀 만큼의 효용이 증가하며, ESS 비용을 저장비용상수를 이용하여 표현하여 정리하면 수식 (4.38)과 같다.

$$\Delta ES = (\eta r_2 - r_1 - c_{ess}) \cdot \delta \quad (4.38)$$

판매사업자의 경우, 소매시장에서의 전력 판매자로서 에너지 차익거래로 인한 ESS의 이익은 자신의 판매 손실로 이어지므로 에너지 차익거래를 위한 ESS에 투자하지 않을 것이다. 그러므로 본 연구에서는 소매시장 내의 생산자인 판매사업자는 ESS 투자자로 고려하지 않았다.

에너지 차익거래에 따른 최종소비자와 차익거래자의 후생 변화가 수식 (4.37)-(4.38)과 같을 때, 시장참여자들은 자신의 후생 변화와 ESS 투자를 통한 에너지 차익거래 이익의 합이 최대가 되도록 ESS에 투자할 것이다. 수식 (4.37)에서도 확인 한 것과 같이 최종소비자는 후생변화가 없기 때문에, 최종소비자와 MSO의 ESS 최적투자 전략은 수식 (4.39)의 목적함수와 같이 동일하다.

최종소비자와 MSO의 최적 ESS 투자전략

$$\begin{aligned} & \max_{\delta} (\Delta ES) \\ & = \max_{\delta} \{(\eta r_2 - r_1 - c_{ess}) \cdot \delta\} \end{aligned} \quad (4.39)$$

수식 (4.39)에서의 ESS 투자량 δ 의 계수인 η, r_2, r_1, c_{ess} 는 상수이므로, 만약 ESS의 충방전효율을 고려한 두 시점의 전기요금 효율의 차이 $(\eta r_2 - r_1)$ 가 한 사이클의 충방전을 위한 비용(c_{ess})보다 클 경우, 즉 $(\eta r_2 - r_1) > c_{ess}$ 를 만족한다면, 최종소비자와 MSO는 무한대로 ESS를

투자하여 무한한 수익을 얻으려 할 것이다.

만약 최종소비자와 MSO가 가능한 많은 ESS에 투자하여 큰 수익을 얻을 경우, 판매사업자는 그에 상응하는 큰 손해를 입게 된다. 그러므로 전기요금의 요율 설계자인 판매사업자는 소매시장에서의 에너지 차익거래가 경제성을 확보하지 못하도록 요금을 설계할 것이다.

4.1.3.2 SMP 하에서의 시장참여자별 ESS 투자전략

전력 도매시장에서 ESS의 에너지 차익거래가 전력가격에 영향을 미치지 않을 때, 각 시장참여자별 ESS 투자전략에 대해 알아본다. 일반적으로 전력도매시장에서의 ESO가 가격수용자로 가정되는 이유는 소규모 ESS의 운영이 전력가격에 영향을 미칠 만큼의 영향을 주지 못하는 것에 기인한다. 실제로 전력시장의 공급곡선은 불연속적인 형태로 표현할 수 있으며, 이 형태는 발전사업자들의 입찰가격과 발전설비의 용량에 의해 결정된다. 이때의 ESS를 이용한 에너지 차익거래 모형은 그림 4.10과 같고, 공급곡선을 제외한 요소들은 앞서 설명한 그림 4.9와 동일하다.

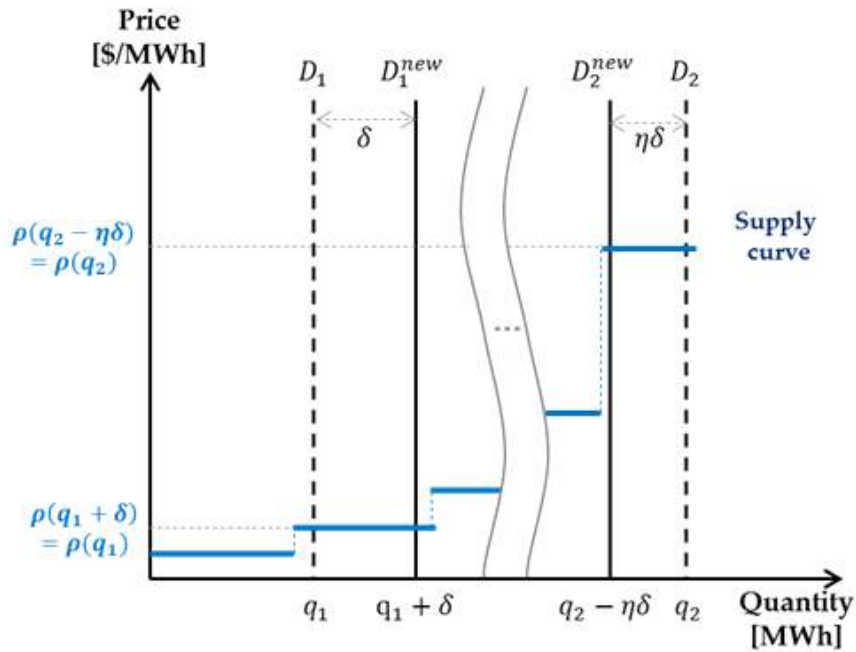


그림 4.10 SMP 하에서의 에너지 차익거래 두 기간 모델 (ESO가 가격수용자일 때)

도매시장에서의 에너지 차익거래용 ESS의 운영이 전력가격에 영향을 미치지 않을 경우의 에너지 차익거래에 따른 시장참여자별 후생의 변화는 다음과 같다.

소비자의 도매시장에서의 에너지 차익거래로 인한 후생의 변화는 수식 (4.40)과 같고, 이 때 ESO는 가격수용자로 수요변화 전후의 전력가격이 같으므로 ($\rho(q_1) = \rho(q_1 + \delta), \rho(q_2) = \rho(q_2 - \eta\delta)$), 소비자는 ESS의 운영에 따른 후생의 변화가 없다.

$$\Delta CS = \left(\int_{\rho(q_1+\delta)}^{\rho(q_1)} q_1 d\rho + \int_{\rho(q_2-\eta\delta)}^{\rho(q_2)} q_2 d\rho \right) \cdot (1-\omega) = 0 \quad (4.40)$$

생산자의 후생 변화는 수식 (4.41)과 같고, 역시 수요변화 전후의 전력 가격이 같으므로 $(\rho(q_1) = \rho(q_1+\delta), \rho(q_2) = \rho(q_2-\eta\delta))$, 생산자의 후생 변화는 없다.

$$\Delta PS = \int_{\rho(q_1)}^{\rho(q_1+\delta)} q(\rho) d\rho + \int_{\rho(q_2)}^{\rho(q_2-\eta\delta)} q(\rho) d\rho = 0 \quad (4.41)$$

에너지 저장장치 소유자는 낮은 가격에 전력을 저장하였다가, 높은 가격에 방전하여 에너지 차익거래 이익을 얻으며, 저장비용까지 고려한 후생의 변화를 정리하면 수식 (4.42)와 같다.

$$\Delta ES = \{ \eta \rho(q_2) - \rho(q_1) - c_{ess} \} \cdot \delta \quad (4.42)$$

에너지 차익거래에 따른 각 시장참여자의 후생 변화가 수식 (4.40)-(4.42)와 같을 때, 시장참여자들은 자신의 후생 변화와 ESS 투자를 통한 에너지 차익거래 이익의 합이 최대가 되도록 ESS에 투자 할 것이다. 수식 (4.40), (4.41)에서 확인 한 것과 같이 소비자와 생산자는 후생변화가 없기 때문에 모든 시장참여자들은 MSO의 ESS 투자 전략과 동일하게 수식 (4.42) 목적함수에 의해 ESS에 투자한다.

소비자의 최적 ESS 투자전략

$$\begin{aligned}\max_{\delta} (\Delta CS + \Delta ES) &= \max_{\delta} (\Delta ES) \\ &= \max_{\delta} [\{\eta\rho(q_2) - \rho(q_1) - c_{ess}\} \cdot \delta]\end{aligned}\tag{4.43}$$

생산자의 최적 ESS 투자전략

$$\begin{aligned}\max_{\delta} (\Delta PS + \Delta ES) &= \max_{\delta} (\Delta ES) \\ &= \max_{\delta} [\{\eta\rho(q_2) - \rho(q_1) - c_{ess}\} \cdot \delta]\end{aligned}\tag{4.44}$$

MSO의 최적 ESS 투자전략

$$\max_{\delta} (\Delta ES) = \max_{\delta} [\{\eta\rho(q_2) - \rho(q_1) - c_{ess}\} \cdot \delta]\tag{4.45}$$

수식 (4.43)-(4.45)와 같이 ESO가 가격수용자일 때 모든 시장참여자는 동일한 ESS 투자전략을 갖는다. 수식에서 확인할 수 있듯이 목적함수가 ESS 투자량 δ 에 선형 비례하는 1차식의 형태이기 때문에 $[\eta\rho(q_2) - \rho(q_1)] - c_{ess}$ 가 양수라면 모든 시장참여자는 가능한 많은 ESS에 투자하려 할 것이다. 다시 말해, 총방전효율을 고려한 두 시점의 가격차보다 저장비용이 더 낮다면 모든 시장참여자들은 가능한 한 많은 ESS에 투자하여 자신의 수익을 극대화하려 할 것이다.

$$\delta^* = \begin{cases} \infty, & \text{if } \eta\rho(q_2) - \rho(q_1) > c_{ess} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.46)$$

하지만 ESS의 투자량이 무한히 많아진다면, ESS의 운영이 수요에 유의미한 영향을 미칠 것이고, 이는 전력가격에 영향을 줄 것이다. 그러므로 에너지 차익거래용 ESS의 경우에는 ESO를 가격수용자로 고려하는 것이 적절하지 않다.

4.1.3.3 소결론

계시별 요금제와 같이 실시간으로 도매시장의 변동성을 반영하지 못하는 요금제의 경우, 시간별 차등요금의 차이보다 저장 비용이 적어지는 시점부터 최종소비자와 차익거래자는 에너지 차익거래용 ESS에 무한히 투자할 것이고, 이는 판매사업자에 큰 손해를 야기한다. 그러므로 판매사업자는 소매시장에서 에너지 차익거래용 ESS가 경제성을 확보할 수 없도록 소매요금 요율을 설계할 것이다. 결국 고정된 요금으로 전력을 제공하는 소매시장에서는 에너지 차익거래는 이론적으로 불가할 것이다.

도매시장의 경우, 기존의 연구들처럼 ESO가 가격수용자라고 가정할 경우, 모든 시장참여자가 무한대로 에너지 차익거래용 ESS에 투자할 것으로 예상된다. 이는 전력가격 변화에 따른 에너지 차익거래의 가치감소와 외부효과가 반영되지 않고, 오직 에너지 차익거래에 따른 이익만이

투자전략에 반영되었기 때문이다. 하지만 ESS가 무한대로 투자된다면 전체 수요는 크게 변화할 것이며, 더 이상 ESO를 가격수용자로 보기 어렵다.

정리하면, ESS의 운영으로 인한 수요의 변화가 각 시장의 가격변화에 영향을 미치지 않고 (ESO가 가격수용자이고), 에너지 차익거래용 ESS가 경제성을 확보한다면 모든 시장참여자는 모두 각 시장에서 최대한 많은 ESS를 투자하는 것이 이론적 최적 투자전략임을 확인하였다. 하지만 ESS의 투자량의 증가로 인해 ESS 총방전량이 전체 수요량에 유의미한 변화를 야기한다면 더 이상 ESO를 가격수용자로 볼 수 없고, ESS의 운영은 전력가격에 영향을 미칠 것이다. 그리고 변화된 전력가격은 에너지 차익거래 가치에 영향을 미쳐 ESS 투자자들이 적정 수준으로 ESS에 투자하도록 할 것으로 예상된다.

에너지 차익거래가 시장에 미치는 영향 및 최적 ESS 투자량의 정확한 도출을 위해서는 ESO를 가격수용자로 보지 않고, ESS의 운영으로 인한 수요 변화가 가져오는 전력가격의 변화, 그로인한 시장참여자들의 후생의 변화(외부 효과)에 대한 영향까지 함께 고려하여야 한다.

4.2 다양한 시장구조 하에서 시장참여자별 ESS 투자 전략

앞서 4.1.3에서 살펴 본 것과 같이, 에너지 차익거래를 위한 ESS의 운영이 전력가격 혹은 전기요금 요율에 영향을 미치지 않을 경우, 시장참여자들은 무한히 많은 ESS를 투자하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 더 이상 ESO가 가격수용자가 아님을 의미하므로 기존의 가정이 적절하지 않음을 의미한다. 본 절에서는 도매시장에서의 ESS 투자 및 운영이 전력가격에 영향을 미칠 때의 시장참여자들의 최적 ESS 투자전략을 알아본다.

4.2.1 시장 환경 설정 및 가정

4.2.1에서는 연구 대상이 되는 시장 환경과 가정에 대하여 설명한다.

전력도매시장에는 세 가지 타입의 시장참여자 생산자, 소비자, MSO가 있다고 하였고, 각 시장참여자들은 자신의 이익을 최대화하기 위해 에너지 차익거래용 ESS에 투자, 운영한다고 가정하였다. 도매시장에서의 생산자는 발전사업자, 소비자는 판매사업자가 대표된다. 각 시장참여자들 이상 존재할 경우, 각 부문(타입)의 시장참여자들은 서로 대칭적인

(symmetric) 시장참여자로 가정하였다. 이 가정으로 인해 각 부문의 N 개의 시장참여자들은 각각 각 부문 전체 생산량 혹은 수요량의 1/N 만큼 균일하게 분할되고, 동일한 ESS 투자전략을 가진다. 또한 ESS의 투자 없이 다른 사람들의 ESS 투자로 인한 외부효과의 이익만을 취하는 무임승차(free riding)의 문제는 본 가정으로 인해 고려되지 않는다.

전력 도매시장의 전력가격은 공급곡선과 수요곡선이 만나는 점에서 결정된다고 가정하였고, 이 때 무위험거래의 비율이 전력가격에는 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 전력수요는 가격에 완전 비탄력적이며 [37], 공급곡선의 부하-가격 관계는 선형 우상향인 것으로 가정하였다 [30, 36]. 공급곡선을 선형으로 가정한 이유는 실제 수요와 전력가격의 과거 데이터를 분석해 본 결과 수요와 전력가격의 관계는 계절별로 선형의 경향성을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4.11은 국내 2016년의 실제 예측수요와 SMP 데이터를, 그림 4.12는 PJM의 2006년 6월의 실제 데이터를 도시한 것으로 수요와 전력가격이 계절별로 선형의 관계를 나타내는 것을 확인할 수 있었다 [30]. 본 연구에서는 공급곡선을 $\rho(q) = c_0 + c_1q$ 로 가정하여 모델링하였다.

뿐만 아니라, 모든 시장참여자는 같은 가격의 ESS에 노출되어 있으며, 투자량에 대한 제약은 없다고 가정하였다. 투자되는 ESS의 비용은 규모에 대하여 선형 비례한다고 가정하였다 [6, 49, 50].

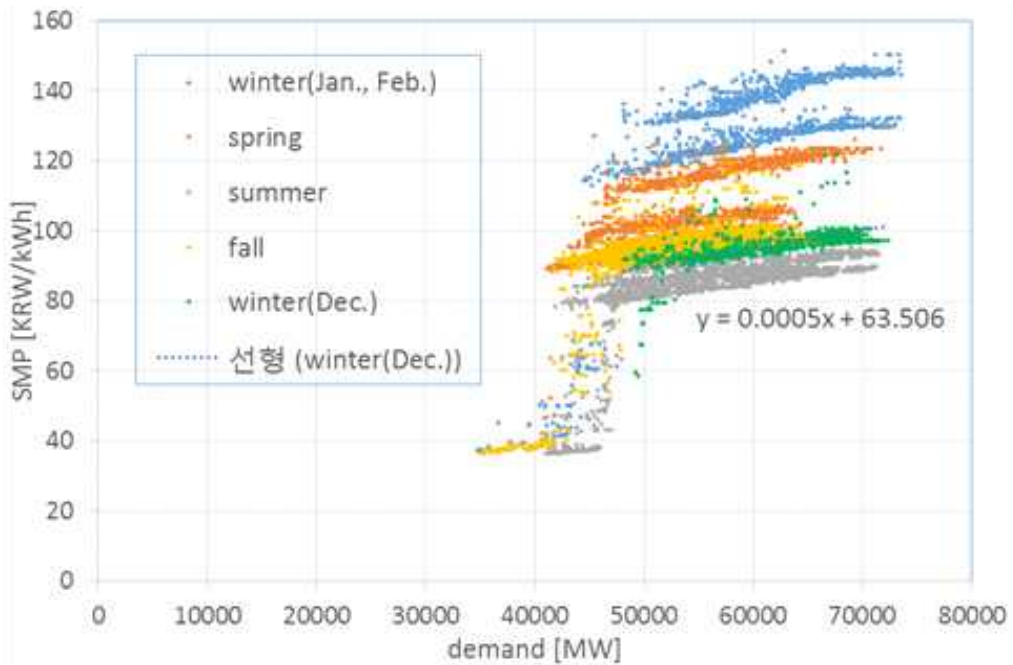


그림 4.11 국내 2016년의 실제 예측수요와 SMP의 관계

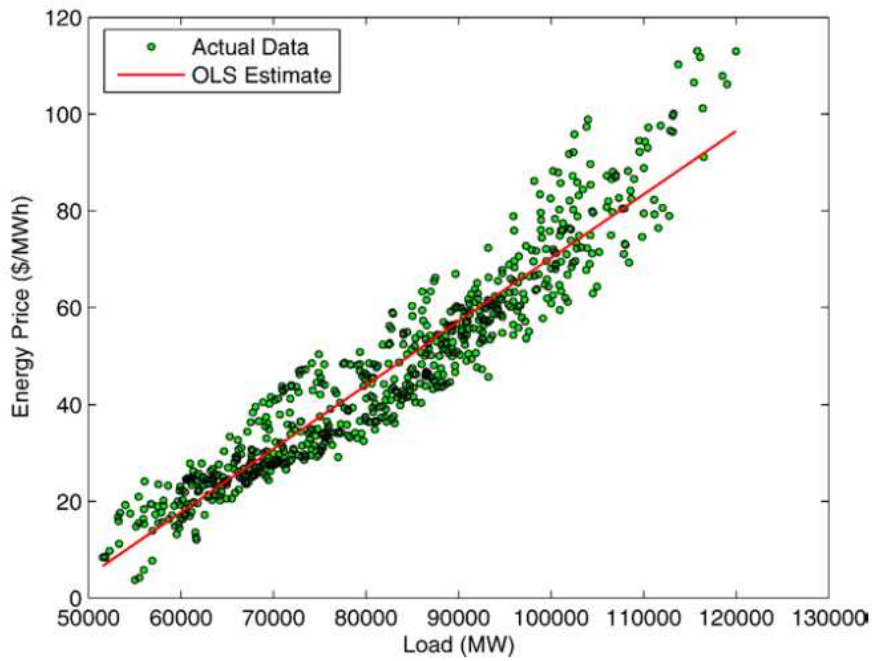


그림 4.12 PJM 2006년 6월의 수요와 전력가격의 관계 [30]

4.2.2 시장참여자별 후생 변화

도매시장에서의 ESS를 이용한 에너지 차익거래로 인한 소비자, 생산자, MSO의 후생 변화는 각각 4.1.2.2 B에서 구한 것과 같이 수식 (4.29), (4.35), (4.36)로 표현이 가능하며 편의를 위해 다시 정리하였다. 각 시점의 기존 전체수요 대비 무위험거래 비율 w_1, w_2 는 동일하다고 가정하였다 ($w_1 = w_2 = w$).

$$\begin{aligned}\Delta CS &= c_1(\eta q_2 - q_1)(1-w) \cdot \delta \\ &= A(1-w) \cdot \delta\end{aligned}\quad (4.29)$$

$$\begin{aligned}\Delta PS &= c_1(q_1 - \eta q_2)(1-w) \cdot \delta + \frac{1}{2}c_1(1+\eta^2) \cdot \delta^2 \\ &= -A(1-w) \cdot \delta + B \cdot \delta^2\end{aligned}\quad (4.35)$$

$$\begin{aligned}\Delta ES &= \{c_o(\eta-1) + c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess}\} \cdot \delta - \{c_1(1+\eta^2)\} \cdot \delta^2 \\ &= (A - C - c_{ess}) \cdot \delta - 2B \cdot \delta^2\end{aligned}\quad (4.36)$$

이 때, 치환한 값 A, B, C는 수식 (4.21)-(4.23)과 같다.

$$A = c_1(\eta q_2 - q_1), \quad (4.21)$$

$$B = \frac{1}{2}c_1(1+\eta^2), \quad (4.22)$$

$$C = c_o(1-\eta) \quad (4.23)$$

에너지 차익거래용 ESS 투자량에 따른 각 시장참여자의 후생변화는 그림 4.13과 같이 표현된다.

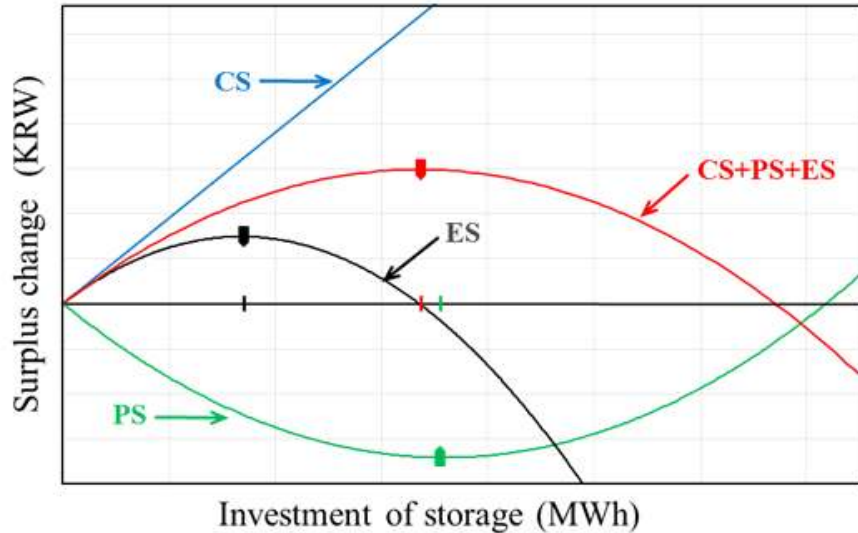


그림 4.13 에너지 차익거래용 ESS 투자량에 따른 각 시장참여자의 후생변화

ESS 운영에 의한 수요의 변화가 에너지 차익거래의 가치를 감소시키고, 다양한 시장참여자들의 후생에도 영향을 준다. 그러므로 각 시장참여자는 시장 구조에 따라, 자신의 시장참여 형태에 따라 각기 다른 ESS 투자 유인을 받는다.

소비자의 경우 (그림 4.13의 CS, 파란선), 에너지 차익거래에도 불구하고 자신의 전력사용량에는 변화가 없고, 자신의 전체 수요량에 적용되는 전력가격의 변화에만 영향을 받는다. 즉, 에너지 차익거래에 참여하는

ESS가 증가할수록 사용하는 전력량의 변화 없이, 수요가 많을 때 (시점 2)는 전력가격이 낮아지고 반대로 수요가 적을 때 (시점 1)는 전력가격이 높아지는 영향을 받는다. 이 때, 전력가격이 낮아지는 혜택을 받는 수요량 (시점 2)이 전력가격이 높아져 손해를 보는 수요량 (시점 1)보다 항상 많으므로, 소비자의 후생은 ESS의 증가에 따라 선형으로 증가한다. 이 때 증가의 기울기는 두 시점의 부하 차에 ESS의 충방전효율을 곱한 값이 결정한다.

생산자의 경우 (그림 4.13의 PS, 초록선), 전력가격에 영향을 받는 소비량이 일정했던 소비자와는 달리, 가격의 변화에 영향을 받는 생산량이 변화한다. 충전량 δ 로 인한 가격의 증가와 그 때의 수요의 증가 ($q_1 + \delta$)의 공급만큼 이익을 보지만, 반대로 방전량 $\eta\delta$ 로 인한 가격의 감소와 그 때의 수요의 감소 ($q_2 - \eta\delta$)의 공급만큼 손해를 본다. 그로 인해 전자의 이익의 증가량이 후자의 손해 감소량보다 커지는 시점에 생산자의 후생변화는 최솟값을 가지며, 그 이익과 손해가 같아지는 시점에 생산자의 후생변화는 0이 된다.

ESO의 경우 (그림 4.13의 ES, 검은선), ESS 투자량이 많아질수록, 차익거래에 참여하는 양의 증가로 수익은 늘어나는 경향이 있지만, 동시에 가격 완만화 효과 (price smoothing effect)로 인해 에너지 차익거래의 가치가 줄어들어 이익이 줄어든다. 그러므로 그림과 같은 형태의 후생변화 그래프를 나타낼 수 있다.

4.2.3 시장 구조의 설명 및 연구의 의의

본 연구에서는 총 세 가지 형태의 시장구조에 대하여 각 시장참여자들의 최적 ESS 투자전략을 도출하였다: 1) 구조 1. 수직통합구조, 2) 구조 2. 발전, 판매 부문이 분리된 구조에서 각 부문별 투자 경쟁을 할 경우, 3) 구조 3. 발전, 판매 부문이 분리된 구조에서 모든 시장참여자가 동시에 자유롭게 투자하는 경우.

구조 1은 하나의 시장참여자가 생산자이자 소비자, ESS 투자자인 수직통합구조인 경우를 나타내며, 이 결과는 수직통합구조의 유틸리티의 최적 ESS 투자량을 구할 수 있다는 의미도 있지만, 동시에 사회후생을 최대화하는 최적 ESS 투자량을 구할 수 있다는 의미가 있다. 이 값은 정책적 지향점이 될 것이며, 또한 구조 2, 3의 결과값과의 비교를 위해 사용된다.

구조 2는 발전, 판매 부문이 분리된 구조에서 각 부문의 시장참여자들끼리 경쟁을 할 경우에 대하여 분석하였다. 이와 같은 시장 환경은 규제를 통해 어느 특정 시장참여자에게만 ESS 투자를 허용할 경우에 이뤄질 수 있는 특수한 경우에 해당한다. 본 연구에서는 구조 2에서 각 시장참여자들의 투자경향을 확인하고, 시장참여자의 수와 무위험거래 비율이 시장참여자별 투자전략에 미치는 영향을 분석하는데 본 구조의 분석이 의미가 있다.

구조 3은 발전, 판매 부문이 분리된 구조라는 점에서는 구조 2와 동일하지만, 구조 2와는 달리 모든 시장참여자가 자유롭게 경쟁하며 ESS에 투자하는 경우에 대한 분석이다. 규제와 제약이 없는 경우, 실제 시장 환경을 반영할 수 있다는 것에 그 의의가 있다. 즉, 시장참여자들은 자신과 같은 부문의 시장참여자들 뿐만 아니라 다른 타입의 시장참여자들의 투자전략까지 고려한 자신의 최적 ESS 투자 전략을 구상하여야 한다.

그림 4.14는 세 가지 구조의 개념도를 나타낸 그림이다. (a)는 생산자, 소비자, ESO가 하나의 시장참여자임을 표현한 것이고, 하나의 시장참여자이기 때문에 경쟁 및 게임이 존재하지 않는다. (b)는 구조 2를 나타낸 그림으로 생산자, 소비자, MSO의 수가 각각 M, Z, N개인 경우를 표현하였다. 각 부문별로 경쟁하기 때문에 각 부문은 분리하여 표현하였고, 빨간 화살표를 이용하여 각 시장참여자가 경쟁 혹은 게임해야하는 참여자를 표현하였다. (c)는 구조 3을 나타낸 그림으로, 모든 시장참여자가 동시에 자유로운 경쟁을 통해 ESS 투자전략을 갖는 경우를 표현하였다. 빨간 화살표를 이용하여 두 번째 소비자가 경쟁 혹은 게임해야하는 참여자를 표현하였다.

○ : 생산자 □ : 소비자 △ : MSO (ESO)

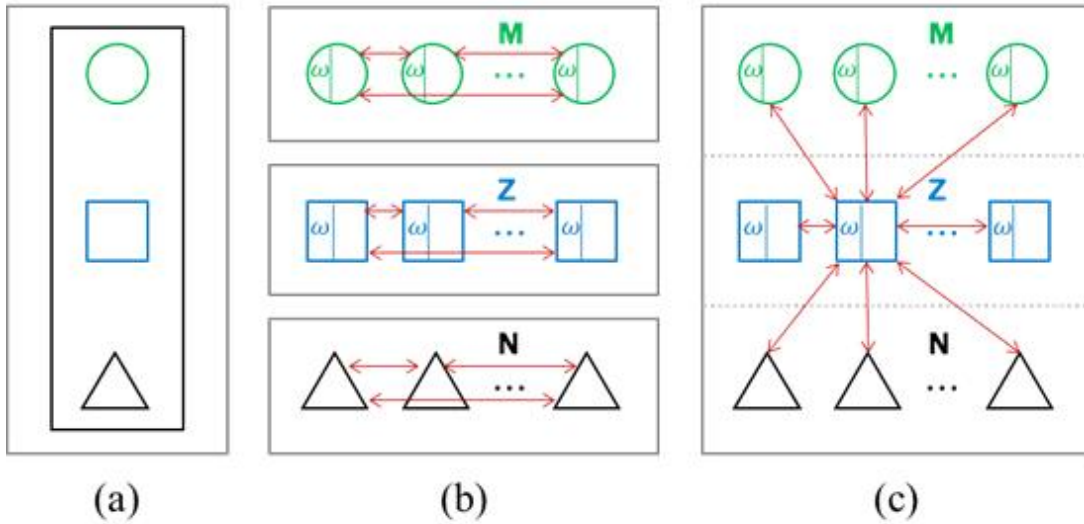


그림 4.14 시장구조 개념도 및 시장참여자별 경쟁 구조: (a) 구조 1. 수직통합구조, (b) 구조 2. 발전, 판매 부문이 분리된 구조에서 각 부문별 경쟁, (c) 구조 3. 발전, 판매 부문이 분리된 구조에서 자유로운 경쟁

4.2.4 구조 1: 수직통합구조

구조 1은 수직통합구조의 전력시장 형태를 모의하였다. 즉, 도매시장에서의 전력 공급부터 판매까지 모두 하나의 시장참여자가 담당하는 구조이다. 실제로 많은 나라에서 전력의 규모의 경제와 공공부분으로서의 규제 등의 특수성에 의해 수직통합구조 형태의 전력시장 구조를 하고 있거나 과거에 해왔다.

수직통합구조에서의 전력회사의 최적 ESS 투자 전략은 생산자, 소비

자, ESS 투자자 후생의 합이 최대가 되도록 하는 투자량을 찾는 것이 된다. 이는 수식 (4.29), (4.35), (4.36)을 이용하여 수식 (4.47)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \max_{\delta^W} (\Delta CS + \Delta PS + \Delta ES) \\ & = \max_{\delta^W} \{ (A - C - c_{ess}) \cdot \delta - B \cdot \delta^2 \} \end{aligned} \quad (4.47)$$

수직통합 전력회사의 최적 ESS 투자 전략은 무위험거래 비율 w 의 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 생산자와 소비자가 하나의 시장참여자기 때문에 가격 위험에 노출되지 않기 때문이다.

수식 (4.47)로부터 최적 투자량을 구하면 다음과 같다.

$$\delta^W = \begin{cases} \frac{A - C - c_{ess}}{2B}, & \text{if } A - C > c_{ess} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.48)$$

수식 (4.47)은 모든 시장참여자들의 후생의 합을 최대화하는 것으로, 이는 사회후생 최대화를 위한 투자 전략과 동일하다. 즉, 구조 1은 수직통합 전력회사의 최적 ESS 투자 전략이자, 사회 후생을 최대화하기 위한 정책의 지향점이기도 하다.

본 연구에서 구조 1의 결과는 다른 사례들의 결과와의 비교를 위한 기준으로 활용한다.

4.2.5 구조 2: 발전, 판매부문이 분리된 구조에서의 각 부문별 시장참여자의 투자전략 (단일 에이전트의 n-참여자 비협조게임)

구조 2에서는 구조 1의 수직통합구조 형태에서 발전부문과 판매부문이 분리되어있는 전력산업구조에서의 시장참여자별 ESS 투자전략에 대하여 알아본다. 이를 통해 도매시장에서의 생산자와 소비자를 분리된 참여자로 보고, 각 시장참여자가 자신의 후생을 최대화하기 위한 ESS 투자전략을 수립하는 방법을 알아본다. 구조 2는 이어 연구할 구조 3과 비교하여, 투자전략의 수립시 다른 시장참여자군의 투자전략에 대한 고려가 없이 자신이 속한 시장참여자군의 ESS 투자만을 고려하여 최적전략을 수립하는 것에 차이가 있다.

각 시장참여자군의 참여자 수가 투자전략에 미치는 영향을 알아보기 위하여 게임이론을 시용하였다. 자신이 아닌 다른 시장참여자의 ESS 투자가 자신의 투자전략에 영향을 미치기 때문에, 다른 시장참여자의 투자전략을 고려하여 자신의 투자전략을 수립한다. 이는 n-참여자의 비협조게임 (n-player non-cooperative game)으로 고려할 수 있다. 게임이론과 내쉬균형, 최적반응함수의 설명은 부록 1에 수록하였다. 본 구조에서는 A) 각 부문에 하나의 시장참여자만 있는 경우 (독점), B) 소수의 시장참여자가 있는 경우 (과점), C) 무한히 많은 시장참여자가 있는 경우 (완전경쟁)로 구분하여 분석이 가능하다.

각 부문에 시장참여자가 둘 이상일 경우, 각 부문 시장참여자의 최적 ESS 투자전략 모델은 다음과 같다. 이 때, N개의 MSO, M개의 생산자, Z개의 소비자는 같은 부문(타입)의 시장참여자들과 서로 대칭적인 (symmetric) 시장참여자로 가정하였다.

MSO

MSO i 의 후생이 최대가 되도록 하는 최적 ESS 투자점을 찾는 목적 함수는 수식 (4.49)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\delta_i} \pi_S(\delta_i, \delta_{-i}) \\ & = \max_{\delta_i} \langle [\eta\{c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta_i - \eta\delta_{-i})\} - \{c_0 + c_1(q_1 + \delta_i + \delta_{-i})\} - c_{ess}] \cdot \delta_i \rangle \end{aligned} \quad (4.49)$$

여기서,

π_S : ESS를 이용한 에너지 차익거래로 인한 MSO i 의 이익

δ_i, δ_{-i} : 각각 MSO i 의, MSO i 외 같은 부문 내 참여자의 ESS 투자량을 의미한다.

MSO i 의 ESS 투자량(δ_i) 뿐만 아니라, 다른 MSO들의 ESS 투자량 (δ_{-i})의 합이 전력가격에 영향을 미치고, 그 전력가격의 영향 중, MSO i 에게 미치는 영향은 전체 영향 중 $1/N$ 에 해당하므로 식 마지막에 δ_i 를

급해줌으로써 반영하였다.

MSO i 가 자신 외의 시장참여자들과 내쉬균형을 이루는 최적 ESS 투자량을 구하는 세부 내용은 부록 2.1에 수록하였다.

서로 대칭적인 N 개의 시장참여자가 자신의 이익을 최대화하기 위한 전략의 내쉬균형 결과로, N 개의 MSO의 최적 ESS 투자량의 총합은 다음과 같다.

$$\delta^{SS} = \begin{cases} 0, & \text{if } c_0(\eta-1) + c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess} < 0 \\ \frac{N}{N+1} \left(\frac{c_0(\eta-1) + c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess}}{c_1(1+\eta^2)} \right), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.50)$$

이를 해석의 용이성을 위해 앞서 치환한 방법으로 간략화하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta^{SS} = \begin{cases} 0, & \text{if } A - C - c_{ess} < 0 \\ \frac{N}{N+1} \left(\frac{A - C - c_{ess}}{2B} \right), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.51)$$

MSO i 의 최적 ESS 투자량은 다음과 같다.

$$\delta^{SS_i} = \begin{cases} 0, & \text{if } A - C - c_{ess} < 0 \\ \frac{1}{N+1} \left(\frac{A - C - c_{ess}}{2B} \right), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.52)$$

생산자

에너지 차익거래용 ESS의 운영은 에너지 차익거래 이익뿐만 아니라 시장참여자들의 후생에도 영향을 미치는 것을 앞서 확인하였다. 즉, 생산자는 자신이 투자, 운영하지 않은 에너지 차익거래용 ESS로 인해 자신의 후생에 변화가 생길 수 있다. 생산자 후생의 변화는 다음과 같이 표현하였다.

$$\Delta PS = c_1(q_1 - \eta q_2) \cdot (1 - \omega) \cdot \delta + \frac{1}{2}c_1(1 + \eta^2) \cdot \delta^2 \quad (4.53)$$

생산자 j 의 후생이 최대가 되도록 하는 최적 ESS 투자량을 찾는 목적 함수는 수식 (4.54)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\delta_j} \pi_P(\delta_j, \delta_{-j}) &= \max_{\delta_j} \left\{ \pi_S(\delta_j, \delta_{-j}) + \frac{1}{M} \Delta PS(\delta_j, \delta_{-j}) \right\} \\ &= \max_{\delta_j} \left[\left[\eta \{c_0 + c_1(q_2 - \eta \delta_j - \eta \delta_{-j})\} - \{c_0 + c_1(q_1 + \delta_j + \delta_{-j})\} - c_{ess} \right] \cdot \delta_j \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{M} \left\{ c_1(q_1 - \eta q_2)(1 - \omega)(\delta_j + \delta_{-j}) + \frac{1}{2}c_1(1 + \eta^2)(\delta_j + \delta_{-j})^2 \right\} \right] \end{aligned} \quad (4.54)$$

여기서,

π_P : ESS를 이용한 에너지 차익거래로 인한 생산자 j 의 이익

δ_j, δ_{-j} : 각각 생산자 j 의, 생산자 j 외 같은 부문 내 참여자의 ESS 투자량을 의미한다.

생산자 j 는 ESS를 이용한 에너지 차익거래 중 자신이 얻을 수 있는 이익 (첫 번째 항)과 외부효과 중 자신에게 영향을 미치는 후생변화 (두 번째 항)의 합을 최대로 하는 ESS 투자량을 결정한다. 이 때, MSO와 마찬가지로 전력가격은 자신의 ESS 투자량(δ_j) 뿐만 아니라 다른 생산자의 ESS 투자량(δ_{-j})의 합의 영향을 받고, 그 가격 중 생산자 j 에게 미치는 영향은 전체 중 $1/M$ 에 해당하므로 δ_j 를 곱하여 반영하였다. 외부효과의 경우도 마찬가지로 총 외부효과 중, 생산자 j 에게 미치는 영향은 $1/M$ 이므로 외부효과 수식 (4.53)에 $1/M$ 을 곱하여 나타내었다.

최적 투자량을 구하는 방법의 세부 내용은 부록 2.2에 수록하였다.

서로 대칭적인 M 개의 시장참여자가 자신의 이익을 최대화하기 위한 전략의 내쉬균형 결과로, M 개의 생산자의 최적 ESS 투자량의 총합은 다음과 같다.

$$\delta^{SP} = \begin{cases} 0, & \text{if } c_0(\eta-1) + \frac{M+w-1}{M} \{c_1(\eta q_2 - q_1)\} - c_{ess} < 0 \\ \frac{c_0(\eta-1) + \frac{M+w-1}{M} \{c_1(\eta q_2 - q_1)\} - c_{ess}}{c_1(1+\eta^2)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.55)$$

이를 해석의 용이성을 위해 앞서 치환한 방법으로 간략화하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta^{SP} = \begin{cases} 0, & \text{if } \frac{M+w-1}{M}A - C - c_{ess} < 0 \\ \frac{\frac{M+w-1}{M}A - C - c_{ess}}{2B}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4.56)$$

생산자 j 의 최적 ESS 투자량은 다음과 같다.

$$\delta_j^{SP} = \begin{cases} 0, & \text{if } \frac{M+w-1}{M}A - C - c_{ess} < 0 \\ \frac{1}{M} \left(\frac{\frac{M+w-1}{M}A - C - c_{ess}}{2B} \right), & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4.57)$$

소비자

소비자도 생산자와 같은 방식으로 최적 ESS 투자량을 구할 수 있다.

소비자 역시 자신이 투자, 운영하지 않은 에너지 차익거래용 ESS로 인해 자신의 후생에 변화가 생길 수 있다. 소비자 후생의 변화는 다음과 같이 표현하였다.

$$\Delta CS = c_1(\eta q_2 - q_1)(1 - w) \cdot \delta \quad (4.58)$$

소비자 k 의 후생이 최대가 되도록 하는 최적 ESS 투자량을 찾는 목적함수는 수식 (4.59)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\delta_k} \pi_C(\delta_k, \delta_{-k}) &= \max_{\delta_k} \left\{ \pi_S(\delta_k, \delta_{-k}) + \frac{1}{Z} \Delta CS(\delta_k, \delta_{-k}) \right\} \\ &= \max_{\delta_k} \left[\eta \{c_0 + c_1(q_2 - \eta \delta_k - \eta \delta_{-k})\} - \{c_0 + c_1(q_1 + \delta_k + \delta_{-k})\} - c_{ess} \right] \cdot \delta_k \\ &\quad \left[+ \frac{1}{Z} \{c_1(\eta q_2 - q_1)(1 - w_2)(\delta_k + \delta_{-k})\} \right] \end{aligned} \quad (4.59)$$

여기서,

π_C : ESS를 이용한 에너지 차익거래로 인한 소비자 k 의 이익

δ_k, δ_{-k} : 각각 소비자 k 의, 소비자 k 외 같은 부문 내 참여자의 ESS 투자량을 의미한다.

소비자 k 는 ESS를 이용한 에너지 차익거래 중 자신이 얻을 수 있는 이익 (첫 번째 항)과 외부효과 중 자신에게 영향을 미치는 후생변화 (두 번째 항)의 합을 최대로 하는 ESS 투자량을 결정한다. 이 때, MSO와 마찬가지로 전력가격은 자신의 ESS 투자량(δ_k) 뿐만 아니라 다른 소비자의 ESS 투자량(δ_{-k})의 합의 영향을 받고, 그 가격 중 소비자 k 에게 미치는 영향은 전체 중 $1/Z$ 에 해당하므로 δ_k 를 곱하여 반영하였다. 외부효과의 경우도 마찬가지로 총 외부효과 중, 소비자 k 에게 미치는 영향은 $1/Z$ 이므로 외부효과 수식 (4.58)에 $1/Z$ 을 곱하여 나타내었다.

최적 투자량을 구하는 방법의 세부 내용은 부록 2.3에 수록하였다.

서로 대칭적인 Z 개의 시장참여자가 자신의 이익을 최대화하기 위한 전략의 내쉬균형 결과로, Z 개의 소비자의 최적 ESS 투자량의 총합은 다음과 같다.

$$\delta^{SC} = \begin{cases} 0, & \text{if } c_0(\eta-1) + \frac{Z-w+1}{Z}c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess} < 0 \\ \frac{c_0(\eta-1) + \frac{Z-w+1}{Z}c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess}}{\frac{Z+1}{Z}c_1(1+\eta^2)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.60)$$

이를 해석의 용이성을 위해 앞서 치환한 방법으로 간략화하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta^{SC} = \begin{cases} 0, & \text{if } \frac{Z-w+1}{Z}A - C - c_{ess} < 0 \\ \frac{\frac{Z-w+1}{Z}A - C - c_{ess}}{\frac{Z+1}{Z} \cdot 2B}, & \text{otherwise} \end{cases}, \text{otherwise}$$

(4.61)

소비자 k 의 최적 ESS 투자량은 다음과 같다.

$$\delta_k = \begin{cases} 0, & \text{if } \frac{Z-w+1}{Z}A - C - c_{ess} < 0 \\ \frac{1}{Z} \left(\frac{\frac{Z-w+1}{Z}A - C - c_{ess}}{\frac{Z+1}{Z} \cdot 2B} \right), & \text{otherwise} \end{cases}$$

(4.62)

만약 각 부문별 시장참여자의 수가 무한히 많을 경우 (완전 경쟁), 즉 $N \rightarrow \infty, M \rightarrow \infty, Z \rightarrow \infty$ 의 경우의 각 부문별 최적 ESS 투자량의 총 합은 모두 같아지며, 이는 사회후생최대화 (수직통합구조 형태)를 위한 최적 ESS 투자량(δ^W)과 동일하다. 이는 수식 (4.51), (4.66), (4.61)을 수식 (4.48)과 비교함으로써 수식을 통해 확인할 수 있다.

$$\delta_{N \rightarrow \infty}^{SS} = \delta_{M \rightarrow \infty}^{SP} = \delta_{Z \rightarrow \infty}^{SC} = \delta^W$$

실제로 전력산업의 특수성으로 인해 무한히 많은 시장참여자의 시장 진입은 어렵지만, 만약 완전경쟁이 가능해진다면 시장참여자들은 사회후생이 최대가 되도록 ESS에 투자한다는 것을 수식을 통해 유추할 수 있다.

4.2.6 구조 3: 발전, 판매부문이 분리된 구조에서의 시장참여자별 투자전략 (다중에이전트의 n-참여자 비협조게임)

구조 2에서는 각 부문별 다수의 시장참여자가 존재할 경우, 같은 부문 내의 시장참여자들 끼리의 게임을 통해 최적 ESS 투자전략을 찾는 방법을 확인하였다. 구조 3에서는 구조 2에서 확장하여 각 부문별 다수의 시장참여자가 존재할 때, 같은 부문에 국한하지 않고 모든 시장참여자의 ESS 투자를 고려하였을 경우의 각 시장참여자별 ESS 최적 투자전략을 알아보고자 한다. 이는 모든 시장참여자가 자유롭게 ESS를 이용하여 에너지 차익거래에 참여가 가능할 때, 서로의 전략을 고려한 최적 ESS 투자의 내쉬균형을 찾는 문제이며, 정부 및 규제기관의 보조 및 규제가 없는 경우의 실제 시장에서 어떤 시장참여자가 얼마만큼의 ESS를 투자하는지 예측할 수 있도록 한다.

시장참여자들의 최적 ESS 투자량은 다른 참여자의 투자량에 영향을 받으며, 그 다른 참여자의 투자량 역시 다른 참여자의 투자량에 영향을

받는다. 즉, 모든 참여자들은 자신의 투자량을 결정할 때 다른 참여자의 투자량을 고려하여 결정한다. 이는 상보문제로, 본 연구의 경우는 MCP (mixed complementarity problem)로 정식화하여 풀었다.

각 시장참여자별 최적 ESS 투자전략의 모델은 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

MSO

MSO i 는 소비자 혹은 생산자가 아니므로 오직 에너지 차익거래의 이익을 최대화하기 위한 전략을 수립할 것이다. 이 때 에너지 차익거래의 이익은 투자, 운영된 ESS양에 따라 결정되며, 자신이 투자한 ESS양 뿐만 아니라 시장 내 모든 시장참여자들이 투자한 ESS의 운영에 의해서도 영향을 받는다. MSO i 의 최적 ESS 투자량을 찾는 목적함수는 수식 (4.63)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\delta_i^S} \pi_{S_i}(\delta_i^S, \delta_{-i}^S) \\ & = \max_{\delta_i^S} \langle [\eta\{c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta_i^S - \eta\delta_{-i}^S)\} - \{c_0 + c_1(q_1 + \delta_i^S + \delta_{-i}^S)\} - c_{ess}] \cdot \delta_i^S \rangle \end{aligned} \quad (4.63)$$

여기서,

π_{S_i} : ESS를 이용한 에너지 차익거래로 인한 MSO i 의 이익,

$\delta_i^S, \delta_{-i}^S$: 각각 MSO i 의, MSO i 외 모든 시장참여자의 ESS 투자량

을 의미한다.

최적 투자량을 구하는 세부 과정은 구조 2에서의 과정과 동일하다.

모든 시장참여자가 자유롭게 ESS에 투자 가능하고 N 개의 대칭적인 MSO가 존재하는 시장구조에서 MSO의 총 최적 ESS 투자량 δ^S 는 수식 (4.64)와 같다.

$$\delta^S = \begin{cases} 0, & \text{if } \begin{cases} c_0(\eta-1) + c_1(\eta q_2 - q_1) \\ -(\delta^P + \delta^C)c_1(1+\eta^2) - c_{ess} \end{cases} < 0 \\ \frac{N}{N+1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{c_0(\eta-1) + c_1(\eta q_2 - q_1)}{c_1(1+\eta^2)} \\ + \frac{-(\delta^P + \delta^C)c_1(1+\eta^2) - c_{ess}}{c_1(1+\eta^2)} \end{array} \right\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.64)$$

해석의 용이성을 위해 앞서 정리한 것과 같이 치환하면 수식 (4.65)와 같다.

$$\delta^S = \begin{cases} 0, & \text{if } A - C - (\delta^P + \delta^C) \cdot 2B - c_{ess} < 0 \\ \frac{N}{N+1} \left\{ \frac{A - C - c_{ess}}{2B} - (\delta^P + \delta^C) \right\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.65)$$

MSO i 의 최적 ESS 투자량 δ_i^S 는 수식 (4.66)과 같다.

$$\delta_i^S = \begin{cases} 0, & \text{if } A - C - (\delta^P + \delta^C) \cdot 2B - c_{ess} < 0 \\ \frac{1}{N+1} \left\{ \frac{A - C - c_{ess}}{2B} - (\delta^P + \delta^C) \right\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.66)$$

MCP 모델을 위한 목적함수 수식 (4.63)의 제1계 필요조건 (first order necessary condition)과 상보관계조건(complementarity condition)은 각각 수식 (4.67), (4.68)과 같다.

$$c_0(\eta - 1) - (\delta^P + \delta^C)c_1(1 + \eta^2) + c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess} + \lambda^S - \frac{N+1}{N}c_1(1 + \eta^2)\delta^S = 0 \quad (4.67)$$

$$\lambda^S \geq 0 \perp \delta^S \geq 0 \quad (4.68)$$

여기서, λ^S 는 MSO의 에너지 차이거래용 ESS 투자량의 최소조건 (lower-bound)에 해당하는 라그랑지안 승수 (Lagrangean multiplier)를 의미한다.

생산자

생산자 j 는 에너지 차이거래의 이익과 에너지 차이거래용 ESS의 투자 및 운영으로 인한 자신의 후생의 변화의 합을 최대화하기 위한 전략을

수립할 것이다. 이 때 에너지 차익거래의 이익과 자신의 후생은 투자, 운영된 ESS양에 따라 결정되며, 자신이 투자한 ESS양 뿐만 아니라 시장 내 모든 시장참여자들이 투자한 ESS의 운영에 의해서도 영향을 받는다. 생산자 j 의 최적 ESS 투자량을 찾는 목적함수는 수식 (4.69)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\delta_j^P} \pi_{P_j}(\delta_j^P, \delta_{-j}^P) \\ & = \max_{\delta_j^P} \left[\left[\eta \{c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta_j^P - \eta\delta_{-j}^P)\} - \{c_0 + c_1(q_1 + \delta_j^P + \delta_{-j}^P)\} - c_{ess} \right] \cdot \delta_j^P \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{M} \left[c_1 \{q_1(1-w_1) - \eta q_2(1-w_2)\} (\delta_j^P + \delta_{-j}^P) + \frac{1}{2} c_1 (1+\eta^2) (\delta_j^P + \delta_{-i}^P)^2 \right] \right] \end{aligned} \quad (4.69)$$

여기서,

π_{P_j} : ESS를 이용한 에너지 차익거래로 인한 생산자 j 의 이익,

$\delta_j^P, \delta_{-j}^P$: 각각 생산자 j 의, 생산자 j 외 모든 시장참여자의 ESS 투자량을 의미한다.

최적 투자량을 구하는 세부 과정은 구조 2에서의 과정과 동일하다.

모든 시장참여자가 자유롭게 ESS에 투자 가능하고 M개의 대칭적인 생산자가 존재하는 시장구조에서 생산자의 총 최적 ESS 투자량 δ^P 는 수식 (4.70)과 같다.

$$\delta^P = \begin{cases} 0, & \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \frac{M+w-1}{M} c_1 (\eta q_2 - q_1) + c_0 (\eta - 1) \\ - \frac{M-1}{M} (\delta^S + \delta^C) c_1 (1 + \eta^2) - c_{ess} \end{array} \right\} < 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{\frac{M+w-1}{M} c_1 (\eta q_2 - q_1) + c_0 (\eta - 1)}{c_1 (1 + \eta^2)} \\ + \frac{- \frac{M-1}{M} (\delta^S + \delta^C) c_1 (1 + \eta^2) - c_{ess}}{c_1 (1 + \eta^2)} \end{array} \right\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.70)$$

해석의 용이성을 위해 앞서 정리한 것과 같이 치환하면 수식 (4.71)과 같다.

$$\delta^P = \begin{cases} 0, & \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \frac{M+w-1}{M} A - C \\ - \frac{M-1}{M} (\delta^S + \delta^C) \cdot 2B - c_{ess} \end{array} \right\} < 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{\frac{M+w-1}{M} A - C - c_{ess}}{2B} \\ - \frac{M-1}{M} (\delta^S + \delta^C) \end{array} \right\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.71)$$

생산자 j 의 최적 ESS 투자량 δ_j^P 는 수식 (4.72)와 같다.

$$\delta_j^P = \begin{cases} 0, & \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \frac{M+w-1}{M}A - C \\ -\frac{M-1}{M}(\delta^S + \delta^C) \cdot 2B - c_{ess} \end{array} \right\} < 0 \\ \frac{1}{M} \left\{ \begin{array}{l} \frac{M+w-1}{M}A - C - c_{ess} \\ 2B \\ -\frac{M-1}{M}(\delta^S + \delta^C) \end{array} \right\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.72)$$

MCP 모델을 위한 목적함수 수식 (4.69)의 제1계 필요조건과 상보관계 조건은 각각 수식 (4.73), (4.74)와 같다.

$$\frac{M+w-1}{M}c_1(\eta q_2 - q_1) - c_0(1-\eta) - c_{ess} + \lambda^P - \frac{M-1}{M}c_1(1+\eta^2)(\delta^S + \delta^C) - c_1(1+\eta^2)\delta^P = 0 \quad (4.73)$$

$$\lambda^P \geq 0 \perp \delta^P \geq 0 \quad (4.74)$$

여기서, λ^P 는 생산자의 에너지 차익거래용 ESS 투자량의 최소조건에 해당하는 라그랑지안 승수를 의미한다.

소비자

소비자 k 는 에너지 차익거래의 이익과 에너지 차익거래용 ESS의 투자 및 운영으로 인한 자신의 후생의 변화의 합을 최대화하기 위한 전략을 수립할 것이다. 이 때 에너지 차익거래의 이익과 자신의 후생은 투자,

운영된 ESS양에 따라 결정되며, 자신이 투자한 ESS양 뿐만 아니라 시장 내 모든 시장참여자들이 투자한 ESS의 운영에 의해서도 영향을 받는다. 소비자 k 의 최적 ESS 투자량을 찾는 목적함수는 수식 (4.75)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\delta_k^C} \pi_{C_k}(\delta_k^C, \delta_{-k}^C) \\ & = \max_{\delta_k^C} \left[\left[\eta \{c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta_k^C - \eta\delta_{-k}^C)\} - \{c_0 + c_1(q_1 + \delta_k^C + \delta_{-k}^C)\} - c_{ess} \right] \cdot \delta_k^C \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{Z} [c_1 \{ \eta q_2 (1 - w_2) - q_1 (1 - w_1) \} (\delta_k^C + \delta_{-k}^C)] \right] \end{aligned} \quad (4.75)$$

여기서,

π_{C_k} : ESS를 이용한 에너지 차이거래로 인한 소비자 k 의 이익,

$\delta_k^C, \delta_{-k}^C$: 각각 소비자 k 의, 소비자 k 외 모든 시장참여자의 ESS 투자량을 의미한다.

최적 투자량을 구하는 세부 과정은 구조 2에서의 과정과 동일하다.

모든 시장참여자가 자유롭게 ESS에 투자 가능하고 Z 개의 대칭적인 소비자가 존재하는 시장구조에서 소비자의 총 최적 ESS 투자량 δ^C 는 수식 (4.76)과 같다.

$$\delta^C = \begin{cases} 0, & \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \frac{Z-w+1}{Z}c_1(\eta q_2 - q_1) + c_0(\eta-1) \\ -(\delta^S + \delta^C)c_1(1+\eta^2) - c_{ess} \end{array} \right\} < 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{\frac{Z-w+1}{Z}c_1(\eta q_2 - q_1) + c_0(\eta-1) - c_{ess}}{\frac{Z+1}{Z}c_1(1+\eta^2)} \\ -\frac{Z}{Z+1}(\delta^S + \delta^C)c_1(1+\eta^2), \end{array} \right\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.76)$$

해석의 용이성을 위해 앞서 정리한 것과 같이 치환하면 수식 (4.77)과 같다.

$$\delta^C = \begin{cases} 0, & \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \frac{Z-w+1}{Z}A - C \\ -(\delta^S + \delta^P) \cdot 2B - c_{ess} \end{array} \right\} < 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{\frac{Z-w+1}{Z}A - C - c_{ess}}{\frac{Z+1}{Z} \cdot 2B} \\ -\frac{Z}{Z+1}(\delta^S + \delta^P) \end{array} \right\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.77)$$

소비자 k 의 최적 ESS 투자량 δ_k^C 는 수식 (4.78)과 같다.

$$\delta_k^C = \begin{cases} 0, & \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \frac{Z-w+1}{Z}A - C \\ -(\delta^S + \delta^C) \cdot 2B - c_{ess} \end{array} \right\} < 0 \\ \frac{1}{Z} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\frac{Z-w+1}{Z}A - C - c_{ess}}{\frac{Z+1}{Z} \cdot 2B} \\ -\frac{Z}{Z+1}(\delta^S + \delta^P) \end{array} \right\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.78)$$

MCP 모델을 위한 목적함수 수식 (4.75)의 제1계 필요조건과 상보관계 조건은 각각 수식 (4.79), (4.80)과 같다.

$$\frac{Z-w+1}{Z}c_1(\eta q_2 - q_1) - c_0(1-\eta) - c_{ess} - c_1(1+\eta^2)(\delta^S + \delta^P) - \frac{Z+1}{Z}c_1(1+\eta^2)\delta^C + \lambda^C = 0 \quad (4.79)$$

$$\lambda^C \geq 0 \perp \delta^C \geq 0 \quad (4.80)$$

여기서, λ^C 는 소비자의 에너지 차익거래용 ESS 투자량의 최소조건에 해당하는 라그랑지안 승수를 의미한다.

4.3 사례연구

4.3.1 사례연구 데이터

본 연구에서는 사례연구를 통하여 다양한 시장구조에서 각 시장참여자들의 최적 ESS 투자점을 구하였다. 또한 시장환경과 적용하는 ESS 특성이 최적 투자량에 미치는 영향도 확인하였다.

시장 파라미터와 ESS 파라미터의 기준값은 아래 표와 같다. (표 4.3)

표 4.3 사례연구를 위한 시장파라미터와 ESS 파라미터의 기준값

파라미터		기준값	단위
시장 파라미터	c_0	19,000	[원/MWh]
	c_1	2.2	[원/MWh ²]
	q_1	50,000	[MWh]
	q_2	70,000	[MWh]
ESS 파라미터	η	0.9	[pu]
	c_{ess}	10,000	[원/MWh]

시장 파라미터 중 공급곡선의 c_0 , c_1 는 2011년 겨울 한국의 실제 전체 전력수요와 SMP를 이용, 근사화하여 구하였고, 각 시점의 수요값 q_1 , q_2 는 해당시점의 평일 하루 중 피크시점과 오프피크 시점의 수요값을 참조

하여 적용하였다. 2011년 이후에는 국내 예비력이 크게 증가하여 피크시점과 오프피크시점의 SMP 가격차이가 크지 않아, 명확한 사례연구를 위하여 2011년 데이터를 이용하여 파라미터를 추출하였다. ESS 파라미터 중 충방전 효율 η 는 0.9로, 에너지 저장장치 비용 상수 c_{ess} 는 가정한 값을 사용하였다.

4.3.2 구조 1: 수직통합구조

구조 1의 사례연구에서는 시장에 하나의 수직통합 형태의 유틸리티가 존재하는 경우, 이 유틸리티의 최적 투자수준을 확인하였다. 이 수직통합 구조의 유틸리티는 발전부터 판매까지 하나의 기관이 담당하므로 에너지 차익거래로 인한 생산자의 후생변화와 소비자의 후생변화, 그리고 투자한 저장장치로 인한 수익의 총합이 최대가 되도록 ESS에 투자할 것이다. 이는 앞서 표현한 수식 (4.47)과 같다. 수식 (4.48)을 통해 구해진 수직통합 유틸리티의 최적 ESS 투자량은 약 4,194 [MWh]이며, 이 때 증가한 이 유틸리티의 후생은 약 3,500만원 정도이다. 수직통합 유틸리티의 최적 ESS 투자량 및 투자시 부문별 후생의 변화는 표 4.4에 자세히 정리하였다.

표 4.4 수직통합구조에서의 최적 ESS 투자량 (구조 1, 사회후생최대화)

최적 ESS 투자량, δ^W (MWh)					
4193.87					
전력가격 (원/kWh)					
$\rho(q_1)$	129.00	$\rho(q_1 + \delta^W)$	138.23	증감	+ 9.23
$\rho(q_2)$	173.00	$\rho(q_2 - \eta\delta^W)$	164.70	증감	- 8.30
후생변화 (천원)					
ESO	0				
생산자	- 84,926				
소비자	+ 119,945				
총 사회후생변화	+ 35,019				

약 4.2 [GWh]의 투자된 ESS로 인한 전력가격의 변화는 시점 1, 2에서 각각 9.23 [원/kWh] 증가, 8.30 [원/kWh] 감소하였고, 이로 인한 소비자의 후생은 약 1억 2천만원 증가, 생산자의 후생은 약 8천 5백만원 감소하였다. ESS의 에너지 차이거래로 인해 생산자의 감소한 후생은 모두 소비자에게로 이동한 것이다 (후생 이동, welfare transfer).

동일한 시장 환경에서 수직통합 유틸리티의 최적 ESS 투자량은 ESS의 투자 및 운영비에 따라 결정되며, 위 결과는 저장비용상수 c_{ess} 가 10,000 [원/MWh] 일 때의 결과를 나타내었다. 저장비용이 각 시장참여자의 최적 ESS 투자량에 미치는 영향을 그림 4.15에 나타내었다.

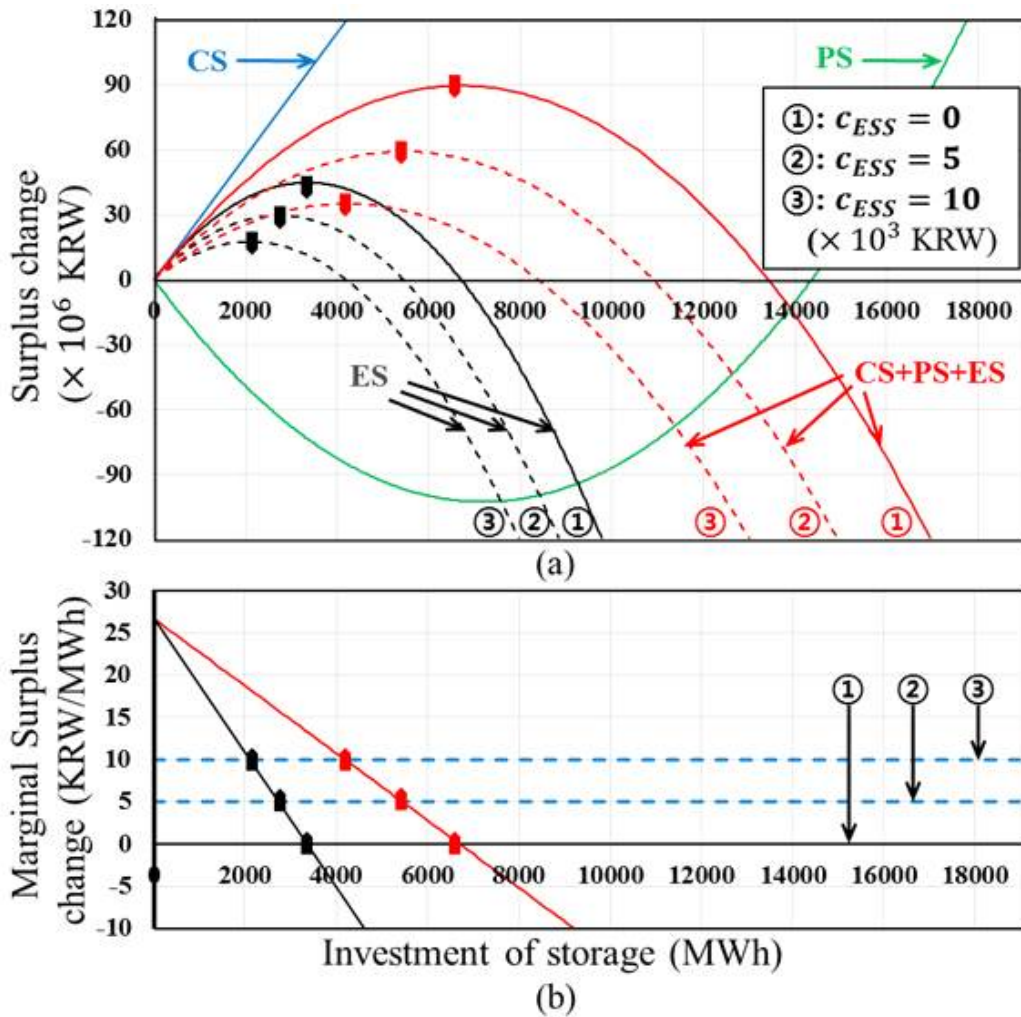


그림 4.15 ESS 투자량에 따른 사례 1의 후생변화와 후생변화에 저장비용이 미치는 영향: (a) 후생변화, (b) 한계후생변화

그림 4.15 (a)는 ESS 양에 따른 각 시장참여자들의 후생 변화와, 그때의 수직통합 유틸리티의 후생변화를 나타내었다. 저장비용 상수 c_{ess} 가 각각 ① 0 [원/kWh], ② 5,000 [원/MWh], ③ 10,000 [원/MWh]일 때의 후생의 변화도 함께 도시하였다. 그림 4.15 (b)는 ESO와 수직통합 유틸리티의 ESS 양에 따른 한계후생변화를 나타내었다. 저장비용은 저장장

치를 소유하는 ESO의 후생에만 영향을 미치고 소비자와 생산자의 후생에는 영향을 미치지 않는다. 저장비용의 증가는 에너지 차익거래용 ESS의 투자로 인한 ESO의 후생을 감소시키며 (①→③), 이는 수직통합 유틸리티의 후생변화 곡선에도 동일한 영향을 준다. 다시 말해, 에너지 차익거래용 ESS는 ESS의 가격이 낮아짐에 따라 더욱 많이 투자를 하도록 유인할 것이며, 이는 더욱 많은 후생의 증가를 가져온다. 수식 (4.48)에서 확인할 수 있듯이 저장비용이 ESS의 충방전 효율을 반영한 두 시점의 전력가격 차이보다 작아지는 시점인 26,700 [원/MWh] 보다 낮아지면 수직통합 유틸리티는 에너지 차익거래용 ESS에 투자를 시작한다.

본 사례의 결과는 시장 내 존재하는 소비자, 생산자, 저장장치 소유자의 후생의 합을 최대로 하는 ESS 투자량을 찾은 결과이므로, 앞서 설명한 것과 같이 사회후생을 최대화하는 투자점과 동일하다. 사회후생을 최대로 하기 위한 이 결과는 정책입안자 및 규제기관의 정책을 추진하는데 가이드라인이 될 수 있을 것이다.

수직통합 유틸리티의 경우, 생산자이자 동시에 소비자이므로 쌍무계약 혹은 선도계약과 같은 무위험거래의 영향을 받지 않는다. 하지만 수직통합구조가 아닌 경우, 무위험 거래가 존재할 수 있다. 이 경우, 사회후생을 최대화하는 최적 ESS의 양에는 변화가 없지만, 이 때 생산자와 소비자의 후생변화는 무위험 거래의 양에 따라 달라질 수 있다. 무위험 거래로 인한 전력가격의 변화로 얻는 생산자의 후생 감소량은 정확히 소비자

의 후생 증가량과 같다. 즉, 생산자로부터 소비자로 이동하는 후생의 양에는 영향을 미치지 않지만 전체 후생의 증가량 (welfare gain)은 수직통합 구조의 결과와 동일하다.

추가적으로 본 사례연구에서는, 1년간 에너지 차익거래용 ESS에 투자, 운영 할 경우의 총 사회후생의 변화를 도출하여, ESS 투자가 사회 전체적으로 가져올 후생 증가량의 직관적인 이해를 돕고자 하였다. 위 사례연구에서는 오프피크의 수요가 50,000 MWh, 온피크 수요가 70,000 MWh인 상황의 두 기간 모델의 결과로, 단 한 번의 에너지 차익거래로 사회후생의 약 3천 500만원 증가하는 것을 확인하였다. 이를 1년으로 확장하여, 연간 사회후생의 증가를 도출하였다. 연간 사회후생의 증가를 도출하기 위해, 2016년 실제 국내 수요데이터를 이용하였고, 하루 한번 에너지 차익거래를 한다고 가정하였으며, ESO는 완벽한 수요예측이 가능하다고 가정하고, ESS의 자체방전은 고려하지 않았다. 매일 다른 최대수요와 최소수요의 값으로 인해, 각각의 날짜에 가장 최적인 ESS 투자량은 매일 달라진다. 그러므로 휴리스틱 방법을 이용하여 연간 사회후생을 최대화하는 ESS 투자량을 도출하였다. 그 결과 약 5,000 MWh의 ESS에 투자하는 것이 연간 사회후생을 가장 많이 증가시키는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 투자한 ESS를 이용, 에너지 차익거래로 수익이 생기는 날에만 운영한 결과 (210일 운영), 연간 사회후생이 약 776억원 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 이는 ESS 투자에 충분한 유인이 될 것으로

로 기대된다.

하지만 위 결과는 앞서 설명한 것과 같이 ESS의 저장비용을 현재의 저장비용 보다 크게 낮은 수준으로 가정한 경우의 결과 (저장비용상수를 10,000원/MWh로 가정)로 현재의 현황을 정확히 반영하지는 못하고 있다. 또한 공급곡선이 선형이고, ESO가 완벽한 수요예측이 가능하다고 가정하여 구한 이론적인 결과값이므로 그 수치보다는, ESS를 이용한 에너지 차익거래가 계통에 미치는 영향에 대한 방법론적, 체제적 접근에 본 연구의 의의를 두는 것이 더욱 바람직하다.

4.3.3 구조 2: 발전, 판매부문이 분리된 구조에서의 각 부문별 시장참여자의 투자 전략 (단일 에이전트의 n-참여자 비협조 게임)

두 번째 사례에서는 발전과 판매부문이 분리된 전력시장 구조에서, 각 부문의 최적 ESS 투자량을 구해보았다. 즉, 생산자, 소비자, 혹은 MSO가 각각 자신의 후생을 최대화하기 위한 최적 ESS 투자량이 얼마인지 도출하여, 구조 1에서 알아본 사회후생을 최대로 하는 ESS 투자량과 비교해 보았다. 또한, 각 시장참여자의 최적 ESS 투자량이 각 부문에 참여하는 시장참여자의 수와 무위험 거래 비율에 어떤 영향을 받는지 확인해보았다.

각 부문에 참여하는 시장참여자의 수가 최적 ESS 투자량에 미치는

영향을 알아보기 위해 다음과 같이 3가지 경우로 나누어 사례연구를 진행하였다: A) 하나의 시장참여자가 있는 경우 (독점), B) 소수의 시장참여자의 경우 (복점, 과점), C) 무한한 참여자가 있는 경우 (완전경쟁)

A. 각 부문에 하나의 시장참여자만 있는 경우 (독점)

각 부문에 하나의 시장참여자만 있는 경우, 즉 하나의 MSO, 하나의 생산자, 하나의 소비자가 존재하는 경우의 각 시장참여자의 최적 ESS 투자량은 수식 (4.48), (4.46), (4.43)으로 부터 각각 2,096.64 [MWh], 0 [MWh], 5,688.10 [MWh] 이다. 만약 ESS 투자량은 양수여야 한다는 가정이 없었다면, 생산자의 최적 ESS 투자량은 -2,988.45 [MWh]로, 이는 생산자가 자신의 이익을 최대화하기 위해선 약 3 [GWh]의 ESS를 설치하여 에너지 차익거래와 반대로 ESS를 운영하는 것을 의미한다. 즉, 높은 가격 시간대 (시점 2)에 충전하여 가격이 낮은 시간대 (시점 1)에 방전함으로써 ESS 운영에 따른 손해를 감수하고 생산자의 후생을 증가시키려 하는 것이다. 하지만 이는 본 연구에서는 고려하지 않았다.

각 시장참여자의 최적 ESS 투자량에 따른 시장 가격의 변화와 시장 참여자별 후생의 변화는 표 4.5-4.7을 통해 정리하였다. 생산자의 경우, ESS 투자량이 양의 값이어야 한다는 가정이 없는 경우를 정리하였다.

표 4.5 MSO의 최적 ESS 투자량 (구조 2)

최적 ESS 투자량, δ^S (MWh)					
2096.64					
전력가격 (원/kWh)					
$\rho(q_1)$	129.00	$\rho(q_1 + \delta^S)$	133.61	증감	+ 4.61
$\rho(q_2)$	173.00	$\rho(q_2 - \eta\delta^S)$	168.85	증감	- 4.15
후생변화 (원)					
ESO	17,509				
생산자	- 51,218				
소비자	59,972				
총 사회후생변화	26,264				

표 4.6 생산자의 최적 ESS 투자량 (구조 2, 음의 투자가 가능한 경우)

최적 ESS 투자량, δ^P (MWh)					
-2,988.45					
전력가격 (원/kWh)					
$\rho(q_1)$	129.00	$\rho(q_1 + \delta^P)$	122.43	증감	- 6.57
$\rho(q_2)$	173.00	$\rho(q_2 - \eta\delta^P)$	178.91	증감	+ 5.91
후생변화 (천원)					
생산자 + ESO	17,781 (103,251 - 85,470)				
소비자	- 85,470				
총 사회후생변화	- 67,688				

표 4.7 소비자의 최적 ESS 투자량 (구조 2)

최적 ESS 투자량, δ^C (MWh)					
5,688.10					
전력가격 (원/kWh)					
$\rho(q_1)$	129.00	$\rho(q_1 + \delta^C)$	141.51	증감	+ 12.51
$\rho(q_2)$	173.00	$\rho(q_2 - \eta\delta^C)$	161.74	증감	- 11.26
후생변화 (천원)					
소비자 + ESO		128,835 (162,680 - 33,844)			
생산자		- 98,262			
총 사회후생변화		30,574			

본 사례에서의 결과값들은 둘 이상의 시장참여자가 담합하여 협조게임을 통해 최적값을 구했을 경우의 각 부문별 총 투자량과 각각 동일하다.

B. 각 부문에 소수의 시장참여자가 있는 경우 (복점, 과점)

만약 각 부문에 둘 이상의 시장참여자가 있는 경우, 각 시장참여자는 최적 ESS 투자량을 결정하기 위해, 같은 부문 내 다른 시장참여자의 ESS 투자량을 고려하여야 한다. 시장 내 담합이 불가하여 각 시장참여자들이 경쟁하며 최적 ESS 투자량을 결정한다면, 이는 n-참여자 비협조

게임으로 고려할 수 있고, 그 결과는 독점인 경우의 값과는 다를 것이다.

같은 부문 내 둘 이상의 시장참여자가 있는 경우, 시장참여자의 투자량이 달라지는 과정을 두 시장참여자의 최적반응함수와 그 반응함수로 인한 내쉬균형점을 통해 설명이 가능하다. 이는 쿠르노모델 (Cournot model)의 변형된 형태로 설명이 가능한데, 쿠르노모델이 수량이 가격을 결정하는 시장에서, 이익 최대화를 위한 수량결정 게임의 모델이라면, 본 연구에서는 ESS 투자량이 후생변화를 결정하는 시장에서, 후생 최대화를 위한 투자량 결정의 게임모델이다. 그림 4.16은 두 개의 소비자 c^1 , c^2 의 최적반응함수를 나타낸 그림이다.

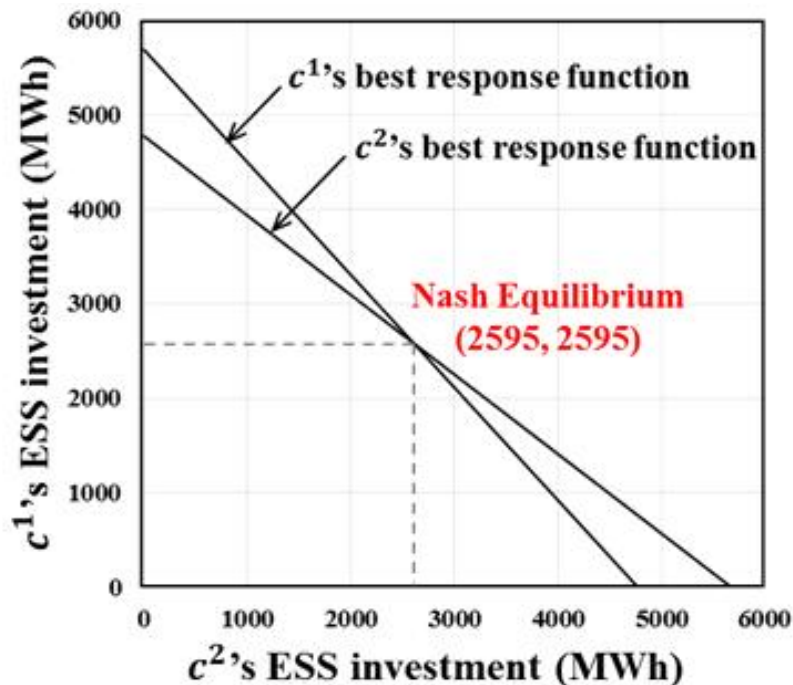


그림 4.16 두 소비자(c^1, c^2)의 최적반응함수와 내쉬균형 (구조 2)

각 최적반응곡선은 다른 투자자의 특정 ESS 투자량에 대한 자신의 최적 투자량을 나타낸다. 어느 한 투자자의 투자량이 결정되면, 그 투자량에 대하여 상대 투자자의 최적 투자량이 결정되고, 이 결정량이 다시 기존 투자자의 투자량에 영향을 미치기를 반복하면서 두 선이 만나는 지점에서 균형을 이루게 된다. 이 때, 두 선이 만나는 지점이 각 투자자의 최적 투자량이 된다.

그림에서 알 수 있듯이, 두 소비자의 최적 ESS 투자량의 합은 하나의 참여자만 있었던 독점인 경우의 최적 투자량보다 작아짐을 알 수 있다. 이는 소비자 수의 증가는 각 소비자의 시장 내 거래량을 줄어들게 (절반으로) 만들어 에너지 차익거래로 인한 소비자 후생 증가의 외부효과가 감소되기 때문이다. 이와 같은 현상은 소비자의 수가 더욱 증가할수록 동일한 양상을 보인다.

이와 동일한 방법으로 생산자의 경우도 해석할 수 있다. 두 생산자가 존재하는 경우, 각 생산자 p^1 , p^2 의 최적 반응곡선과 두 생산자의 최적 투자량은 그림 4.17과 같이 나타난다.

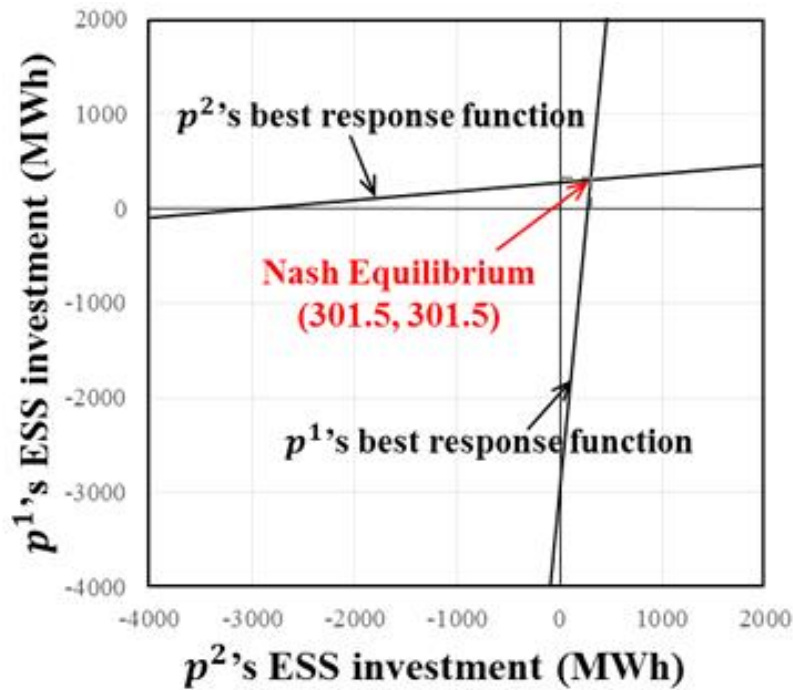


그림 4.17 두 생산자(p^1, p^2)의 최적반응함수와 내쉬균형 (구조 2)

생산자의 경우, 소비자와 마찬가지로 생산자의 수가 늘어남에 따라 가격의 변화로 인한 외부효과의 영향을 받는 각 생산자의 거래량이 줄어든다. 하지만 소비자와는 반대로, 줄어든 거래량으로 인해 후생 감소의 영향이 작아지므로 더 많은 ESS 투자 유인을 받게 된다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 독점일 경우 최적 투자량이 음의 값 (약 -3 [GWh])인 것에 비하여, 복점인 경우 각각 약 302 [MWh]의 ESS에 투자하여 에너지 차익거래에 참여하는 것을 확인할 수 있다. 생산자의 수가 더 늘어난다면 생산자 역시 활발히 에너지 차익거래에 참가할 것으로 기대된다.

그림 4.18은 두 MSO가 존재하는 경우의 MSO m^1 , m^2 의 최적반응함수를 나타내었다.

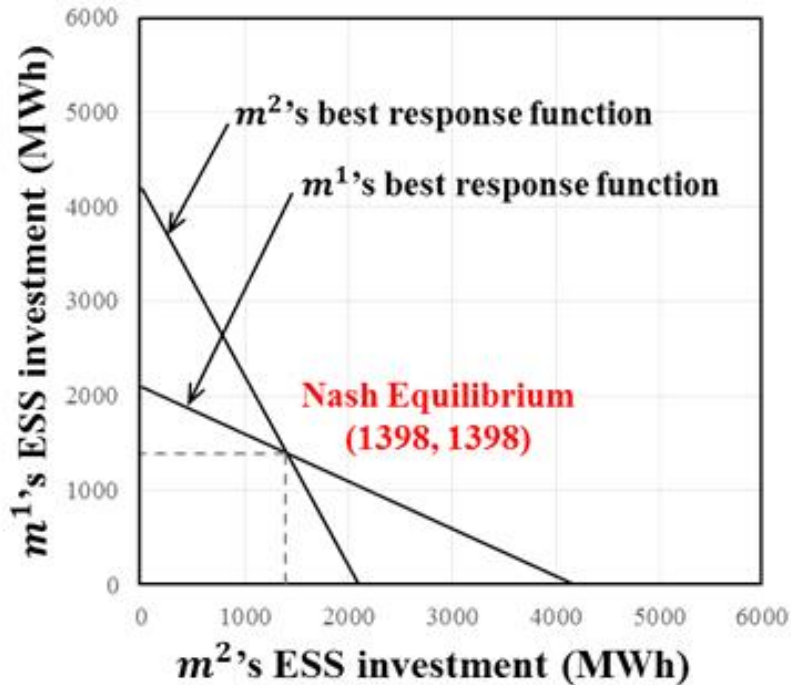


그림 4.18 두 MSO(m^1, m^2)의 최적반응함수와 내쉬균형 (구조 2)

MSO의 경우도 마찬가지로, MSO의 수가 증가할수록 변화한 전력가격에 의한 에너지 차익거래의 가치 감소가 각 MSO에게 미치는 영향이 줄어들어 총 투자량이 증가한다.

복점일 경우의 각 부문별 최적 ESS 투자량의 변화를 셋 이상의 시장 참여자로 확장할 경우, 수식 (4.51), (4.56), (4.61) 혹은 MCP문제를 통해 최적해를 구할 수 있으며, 그 결과는 표 4.8, 4.9, 4.10에 한 번에 정리하여 비교하였다.

C. 완전경쟁인 경우 (무한대의 시장참여자)

만약 각 부문에 무한대의 시장참여자가 있는 경우의 각 부문별 최적 ESS 투자량의 총합은 수식 (4.51), (4.56), (4.61) 혹은 MCP 문제의 풀이를 통해 구해보면 모두 4,193.87 [MWh]인 것을 확인할 수 있었다. 이는 시장참여자가 무한대로 늘어난다면 각 생산자 혹은 소비자가 받는 에너지 차익거래로 인한 외부효과가 0으로 수렴하기 때문이다. 다시 말해, 시장참여자의 수가 많아질수록 생산자와 소비자는 외부효과의 영향을 덜 받게 되고, 외부효과의 영향이 작아질수록 생산자와 소비자는 MSO에 가까운 후생변화를 겪게 된다. 그렇게 시장참여자의 수가 무한대가 되면, 외부효과가 전혀 없어지고, 생산자와 소비자는 MSO의 투자전략과 동일한 전략을 갖게 된다. MSO의 경우에는 시장참여자의 수가 늘어날수록, 각 MSO가 받는 에너지 차익거래 가치의 감소효과의 영향이 작아진다. 점차 참여자의 수가 증가하여 참여자가 무한대로 늘어나게 되면, 각 시장참여자가 받는 차익거래 가치 감소효과는 0으로 수렴하고, 부하는 평탄화가 이루어질 것이다. 이와 같은 상태에서는 모든 시장참여자가 동일하므로, 효율성과 공평한 분배의 측면에서 가장 바람직한 상태, 즉 사회 후생이 최대가 된 상태로 접근하게 된다.

MSO, 생산자, 소비자 각각의 시장참여자 수에 따른 최적 ESS 투자량을 정리하면 각각 표 4.8, 4.9, 4.10과 같다.

표 4.8 참여자 수에 따른 MSO의 최적 ESS 투자량 (구조 2)

최적 ESS 투자량 [MWh]	MSO의 시장참여자 수 (N)				
	1	2	10	100	∞
δ^{SS}	2,097	2,796	3,813	4,152	4,194

표 4.9 참여자 수에 따른 생산자의 최적 ESS 투자량 (구조 2)

최적 ESS 투자량 [MWh]	생산자의 시장참여자 수 (M)				
	1	2	10	100	∞
δ^{SP}	-2,988	603	3,476	4,122	4,194

표 4.10 참여자 수에 따른 소비자의 최적 ESS 투자량 (구조 2)

최적 ESS 투자량 [MWh]	소비자의 시장참여자 수 (Z)				
	1	2	10	100	∞
δ^{SC}	5,688	5,190	4,466	4,223	4,194

표에서 확인할 수 있듯이, MSO와 생산자는 사회후생 최대를 위한 ESS 투자량 δ^W 에 비해 같거나 더 적게 투자하고, 반대로 소비자의 경우 같거나 더 많이 투자하는 경향이 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 경향은 기존 두 기간 모델을 이용하여 [36]에서 수학적으로 증명하였으며, 무위험거래와 ESS 비용을 고려한 본 모델에서도 동일한 경향성을 확인할 수 있었다.

전체 수요 대비 무위험거래의 비율이 각 시장참여자의 최적 투자량에 미치는 영향을 알아보았다. 그림 4.19는 무위험거래 비율의 변화에 따른 각 시장참여자의 후생변화 함수를 나타내었다.

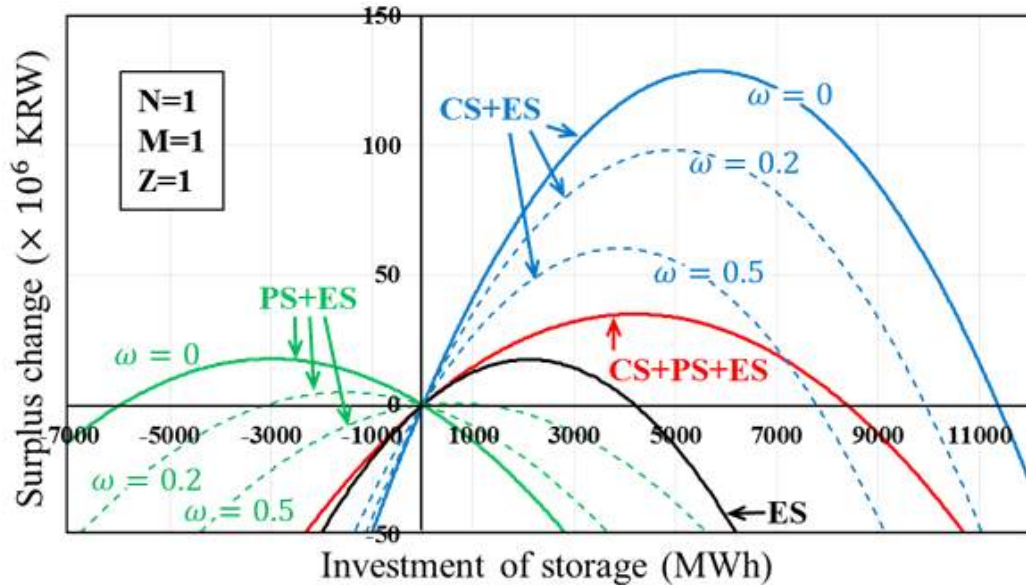


그림 4.19 ESS 투자량에 따른 각 시장참여자의 투자전략의 후생변화와 후생변화에 무위험거래 비율이 미치는 영향

무위험거래 비율의 증가는 소비자의 최적 ESS 투자량은 줄이고, 생산자의 최적 ESS 투자량은 증가시키는 것을 확인할 수 있다. 에너지 차익 거래에 의한 가격의 변화가 생산자와 소비자에게 각각 후생 감소, 후생 증가의 영향을 주었는데, 생산자와 소비자는 무위험 거래를 통해 그 영향을 줄일 수 있기 때문이다. 이 때, 생산자의 후생 감소가 줄어든 양과 소비자의 후생 증가가 줄어든 양은 정확히 같으므로, 즉 무위험거래는

전체 후생의 변화를 야기하는 것이 아니라 소비자로부터 생산자로 이동 하던 후생의 양을 변화시키는 것이다. 반면 무위험거래의 비율이 전력시장의 가격에 영향을 미치지 않는다면 MSO의 후생변화에는 영향을 미치지 않는다. 그러므로 무위험거래의 비율은 사회후생을 최대화 하는 투자량에도 영향을 미치지 않는다.

무위험거래 비율의 증가는 시장참여자의 증가로 인한 각 시장참여자의 최적 ESS 투자량의 변화와 유사한 효과를 갖는다. 하지만 두 사례의 차이점은 무위험거래의 경우 MSO는 영향을 받지 않는다는 것이다.

이 결과는 부문별 시장참여자의 수를 변화시킬 수 없을 때, 장외거래와 같은 무위험거래량의 변화가 각 시장참여자의 투자량을 변화시킬 수 있음을 시사한다.

추가로, 에너지 차익거래용 ESS가 시장참여자들에게 투자유인을 제공하기 위한 ESS의 저장비용의 수준을 제시한다. 표 4.8-4.10의 결과는 저장비용을 10,000원/MWh로 가정한 사례연구의 결과이며, 저장비용이 달라지면 그 결과값도 달라질 것이다. 각 시장참여자가 ESS의 저장비용이 얼마일 때 에너지 차익거래용 ESS에 투자를 시작할 것인지를 계산해 본 결과, 소비자는 약 55,000원/MWh ($Z=1$ 기준), MSO는 약 26,700원/MWh ($N=1$ 기준) 이하부터 ESS 투자를 시작하는 것을 확인하였다. 이는 다음과 같이 해석이 가능하다. 외부효과를 고려하지 않은 경우, 즉,

에너지 차익거래만을 고려하였을 경우의 ESS가 경제성을 확보하는 시점은 ESS의 1회 충방전에 들어가는 저장비용이 약 26,700원 이하 일 때이다. 또한 소비자의 경우, 에너지 차익거래로 인한 외부효과의 이익으로 인해 그 보다 높은 약 55,000원/MWh의 저장비용을 갖는 ESS가 있으면 투자를 시작하게 된다. 현재 동일 용량의 Li-Ion 타입 ESS의 투자비용(약 6억원)과 비교하면, 비용이 현재 대비 약 17.8% (MSO), 약 36.7% (소비자) 수준으로 낮아지면 투자유인을 제공할 수 있을 것으로 기대된다 (Li-Ion 배터리의 충방전 수명을 4,000회로 가정시).

4.3.4 구조 3: 발전, 판매부문이 분리된 구조에서의 시장참여자별 투자 전략 (다중에이전트의 n-참여자 비협조게임)

모든 시장참여자가 자유롭게 ESS에 투자할 수 있을 때, 각 시장참여자의 최적 ESS 투자량을 확인하였다. 이와 같은 경우에 시장참여자는 자신의 최적 ESS 투자량을 결정할 때, 같은 부문 내 다른 시장참여자의 ESS 투자량뿐만 아니라 다른 부문의 시장참여자의 ESS 투자량 까지도 함께 고려하여야 한다.

수식 (4.67), (4.68), (4.73), (4.74), (4.79), (4.80)의 MCP형태의 문제를 GAMS의 PATH solver를 이용하여 각 시장참여자의 최적 ESS 투자점을 구하였다 [51, 52].

본 사례연구에서는 국내 전력시장의 현황을 반영하여 여섯 개의 생산자와 하나의 소비자를 가정하였다. 또한 열 개의 MSO가 에너지 차익거래를 통해 수익을 얻고자 ESS에 투자 및 운영한다고 가정하였다. 만약 시장 내 무위험거래가 없을 경우, MSO, 생산자, 소비자의 최적 ESS 투자량은 각각 0 [MWh], 0 [MWh], 5,688.10 [MWh] 이고, 이때의 전력가격의 변화와 각 시장참여자의 후생변화, 총 사회후생의 변화는 표 4.11과 같고 이는 표 4.7과 동일하다. 표 4.7은 구조 2에서 판매부문이 독점인 경우, 즉 하나의 소비자만이 ESS 투자에 참여할 때의 최적 ESS 투자량의 결과이다.

표 4.11 모든 시장참여자의 자유로운 투자가 가능한 경우의 최적 ESS 투자량 (구조 3)

최적 ESS 투자량, δ^* (MWh)					
5,688.10					
전력가격 (원/kWh)					
$\rho(q_1)$	129.00	$\rho(q_1 + \delta^*)$	141.51	증감	+ 12.51
$\rho(q_2)$	173.00	$\rho(q_2 - \eta\delta^*)$	161.74	증감	- 11.26
후생변화 (천원)					
소비자 + ESO	128,835 (162,680 - 33,844)				
생산자	- 98,262				
총 사회후생변화	30,574				

결과에서 확인할 수 있듯이 자유로운 ESS 투자가 가능할 경우, 오직 소비자만이 ESS에 투자할 것이며⁷⁾, 이 때 많은 후생이 생산자로부터 소비자로 이동하는 것을 확인하였다. 생산자는 큰 후생이 감소함에도 불구하고 ESS에 투자하지 않는 것이 최선이며, MSO는 시장에 진입하지 않을 것이다. 이로 인해, 약 5.7 [GWh]의 ESS를 투자한 단일 소비자는 ESS를 운영함으로써 주로 공급 측에서만 고려되던 시장지배력을 발휘할 수 있게 된다. 실제 최종소비자가 아닌 판매사업자 (도매시장의 소비자)의 시장지배력은 불합리한 이익을 야기할 수 있으므로 완화되어야 한다. 판매부문의 시장참여자를 늘려, 각 시장참여자의 경쟁 및 견제를 통한 시장지배력 완화가 불가할 경우, 시장 내 무위험거래량의 증가가 다른 형태의 시장참여자를 ESS 투자에 유인할 수 있게 한다.

표 4.12 무위험거래 비율에 따른 시장참여자별 최적 ESS 투자량

최적 ESS 투자량 [MWh]	무위험거래 비율 (ω)					
	0	0.2	<u>0.4167</u>	0.6	0.8	1
δ^S	0	0	2.166	646.616	1349.78	1877.853
δ^P	0	0	1.331	397.207	829.151	1064.117
δ^C	5688.096	4969.864	4188.829	2609.989	1050.813	0
총합	5688.096	4969.864	4192.326	3653.812	3229.744	2941.970

7) 이는 각 시장참여자들의 수를 유한한 범위 내에서 진행한 사례연구 결과에서도 동일한 결과를 가져오는 것을 확인하였고, 이 결과는 부록 3에 수록하였다.

표 4.12는 전체 거래량 중 무위험거래를 통한 거래량의 비율에 따른 시장참여자들의 최적 ESS 투자량을 도출한 결과이다. 무위험거래가 없는 경우에는 최적반응곡선의 교점, 즉 내쉬균형점이 생산자와 MSO의 ESS 투자량이 음인 지점에서 형성되므로, 생산자와 MSO의 ESS 투자량이 0일 때의 소비자의 최적 투자량인 5,688 [MWh]가 제약조건 하에서의 내쉬균형점이 된다. 무위험거래가 점차 늘어갈수록, 생산자와 MSO의 최적 ESS 투자량은 증가함에 반해 소비자의 최적 투자량은 감소한다. 무위험거래의 비율이 약 41.67 %일 때까지 오직 소비자만이 ESS에 투자하다가 약 41.67%에서 생산자와 MSO는 ESS에 투자를 시작한다. 즉, 오직 소비자만이 ESS에 투자하는 것이 내쉬균형이었던 시장에 무위험거래량의 증가로 인하여 다른 타입의 시장참여자(생산자, MSO)의 ESS 투자유인을 발생시키는 것이다.

또한, 실제의 시장 환경에서 생산자가 ESS를 통한 에너지 차익거래에 참여할 경우, 발전 측의 시장지배력 발휘의 문제가 될 수 있다. 그로인해 생산자의 ESS 투자가 정책적으로 불가할 경우의 무위험거래에 따른 소비자와 MSO의 최적 투자점을 알아보면 다음과 같다. 그림 4.22은 생산자의 ESS 투자량 δ^P 를 0으로 고정하였을 경우의 소비자와 MSO의 최적 반응함수를 나타낸 것이다.

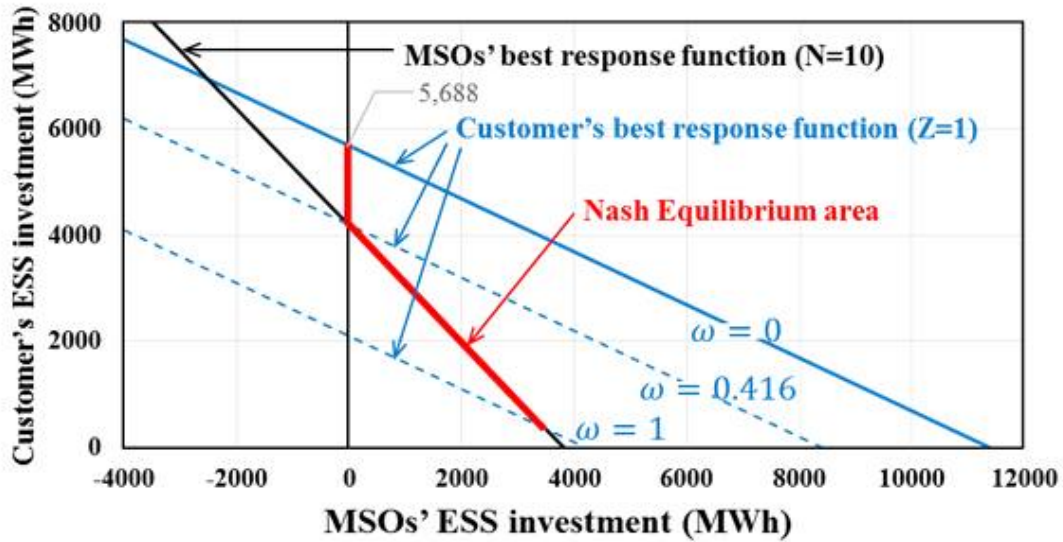


그림 4.20 MSO와 소비자의 최적반응곡선과 무위험거래 비율에 따른 내쉬균형영역

MSO는 무위험거래에 영향을 받지 않고, 소비자는 무위험거래의 비율에 따라 반응곡선이 변하며 새로운 내쉬균형을 이루는 것을 확인할 수 있다. 이 경우도 마찬가지로 무위험거래의 비율이 약 41.6 %가 되면 MSO는 ESS에 투자를 시작한다.

이처럼 동일한 시장구조 하에서 무위험거래의 비율은 각 시장참여자의 에너지 차익거래요 ESS의 투자량에 영향을 미치며, 한국과 같이 판매부문이 독점인 경우, 무위험거래 비율의 증가는 다른 시장참여자의 ESS 투자를 유도하여 판매사업자의 시장지배력을 완화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4.4 소결론

ESS를 이용한 에너지 차익거래로 인해 발생한 전력가격의 변화는 에너지 차익거래의 가치를 감소시킬 뿐만 아니라 시장참여자의 후생에도 영향을 미친다. 시장참여자의 후생변화는 총 거래량 중 시장을 통해 거래하는 양에 비례할 것이고, 이는 다시 말해 무위험거래의 비율에 영향을 받는다. 또한 최적 ESS 투자량은 ESS의 가격에도 영향을 받는다.

본 연구에서는 기존의 두 기간 모델을 발전시켜 ESS의 가격과 무위험거래의 비율을 반영한 모델을 제안하였다. 본 모델을 이용하여 에너지 차익거래가 시장참여자들의 후생에 미치는 영향을 분석하고, 다양한 시장구조 및 환경에 따른 시장참여자들의 최적 ESS 투자량을 도출하였다.

TOU 요금제 하에서의 에너지 차익거래는, ESS의 운영이 전기요금에 영향을 미치지 않기 때문에 시장참여자들의 후생에 변화가 없고 또한 에너지 차익거래의 가치가 감소하지 않는다. 그로 인해, 최종소비자와 차익거래자는 에너지 차익거래용 ESS가 경제성을 확보하기 시작하면 최대한 많은 ESS에 투자하여 큰 이익을 얻으려 할 것이다. 소매요금의 설계자인 판매사업자는 이로 인한 자신의 막대한 손해를 방지하기 위해 소매요금 하에서의 에너지 차익거래용 ESS가 경제성을 확보하지 않도록 소매요금을 설계할 것이므로 소매시장에서는 ESS를 이용한 에너지 차익거래가 불가할 것이다.

비슷하게, ESO가 가격수용자라고 가정한 전력도매시장에서 SMP를 이용한 에너지 차익거래의 경우, 모든 시장참여자가 ESS에 투자하여 무한대의 이익을 얻으려 할 것이므로 이는 더 이상 ESO가 가격수용자라고 보기 어렵다. 그러므로 ESS를 이용한 에너지 차익거래의 연구는 ESO가 가격수용자라는 가정은 적합하지 않다.

ESS의 에너지 차익거래로 인한 SMP의 변화를 고려한 전력도매시장에서의 최적 ESS 투자전략 분석은 1) 수직통합구조, 2) 발전, 판매 부문이 분리된 구조 - 단일에이전트의 n-참여자 비협조게임, 3) 발전, 판매 부문이 분리된 구조 - 다중에이전트의 n-참여자 비협조게임에 대하여 진행하였다. 시장참여자 수의 증가로 인해 완전경쟁으로 다가갈수록 각 시장참여자 그룹의 최적 투자량은 사회후생을 최대화하는 방향으로 근접함을 확인하였다. 또한 MSO와 생산자는 사회후생을 최대화하는 ESS 투자량에 비해 더 적게 투자하는 경향이 있고, 반대로 소비자는 더 많이 투자하려 하는 것을 확인하였다. 모든 시장참여자가 자유롭게 ESS에 투자가 가능한 경우, 무위험거래가 없다면 오직 소비자만이 에너지 차익거래용 ESS에 투자하고, 다른 형태의 시장참여자들은 투자하지 않는 것이 최선임을 보았다. 이로 인해, 국내와 같이 단일 판매사업자가 존재하는 경우 판매사업자는 ESS를 이용하여 시장지배력을 가질 것으로 보인다. 소비자의 시장참여자의 수를 늘려 판매사업자간의 경쟁을 통한 시장지배력 완화, 혹은 무위험거래 비율의 증가를 통한 다른 형태의 시장참여자

의 ESS 투자를 유인하여 판매사업자의 시장지배력을 완화시킬 수 있음을 확인하였다.

제 5 장 결론

ESS 가격의 하락과 신재생 에너지원과 같은 간헐적 전력공급설비의 증가로 인한 전력가격 변동성의 증가가 ESS를 이용한 에너지 차익거래의 가능성을 열어줌에 따라, 본 연구에서는 ESS를 이용한 에너지 차익거래의 경제성 평가와 시장참여자들의 ESS의 투자전략에 관한 연구를 진행하였다.

먼저, 현재 전력시장과 요금제가 ESO를 어떻게 유인하고 있는지, 그리고 이에 응동하여 ESO는 어떻게 ESS를 운영하고 있는지를 확인하였다. 에너지 비용 최소화를 위한 ESS 운영전략을 정식화하고, 운영전략에 따라 달라지는 ESS의 열화비용을 계산하여 ESS를 이용한 에너지 차익거래의 경제성을 평가하였다.

ESS의 에너지 차익거래로 인한 전력가격의 변화가, 에너지 차익거래의 가치와 시장참여자의 후생에 미치는 영향을 분석하였다. 뿐만 아니라 다양한 구조에서의 시장참여자별 최적 ESS 투자 전략을 확인하였다. 이를 위해 ESS의 비용과 무위험거래를 포함한 에너지 차익거래의 두 기간 모델을 제안하고, 이 모델을 이용하여 각 시장참여자별 투자전략을 정식화하였다. 수직통합구조의 투자전략, 발전과 판매부문이 분리된 구조에서의 부문별 투자전략, 발전과 판매부문이 분리된 구조에서 시장참여자의

동시 투자시 투자전략을 확인하였다. 둘 이상의 시장참여자가 동시에 ESS에 투자가 가능한 경우에 대하여는 게임이론을 이용, n-참여자 비협조게임의 내쉬균형을 MCP 문제로 정식화 후 GAMS의 PATH solver를 이용하여 도출하였다.

본 논문은 두 기간의 단순한 모델을 사용, 단기영향만을 분석하였을 뿐만 아니라, ESS의 운영 목적을 에너지 차익거래에 한정 지었다는 한계가 있다. 즉, 단기영향만의 분석으로 ESS 투자 및 운영의 완전한 영향 (설비구성의 변화 등과 같은 장기영향)을 고려하지 않았으며, 신재생 에너지 출력안정화, 주파수 조정 등과 같은 다른 용도의 ESS 운영을 위한 ESS 투자량은 고려하지 않고 있다. 그럼에도 불구하고 ESS가 에너지 차익거래로 경제성을 확보하였을 경우, 다양한 시장 환경에서 각 시장참여자별 ESS 투자 유인 분석 및 투자 전략의 가능성을 확인해 보았다는 점에서 의의가 있다. 본 논문의 결론과 그에 따른 시사점은 다음과 같다.

첫째, 에너지 차익거래용 ESS의 증가로 인해 전력가격이 변화하게 될 경우, 에너지 차익거래의 가치와 시장참여자의 후생이 변화하는 것을 확인하였다. 이로 인하여 시장참여자별 ESS 투자 전략은 달라진다. 그 결과 사회후생을 최대로 하는 ESS 투자량과 비교하여 소비자는 더 많이, 생산자와 MSO는 더 적게 투자하려는 경향을 확인하였다.

둘째, 모든 시장참여자가 자유롭게 ESS를 투자할 수 있는 경우의 각

시장참여자별 최적 ESS 투자량을 각 투자전략의 내쉬균형을 이용하여 도출하였다. 그 결과, 가격위험 회피를 위한 무위험거래가 없고, 완전경쟁이 아닌 경우, 오직 소비자만이 ESS에 투자하는 것을 확인하였다. 국내와 같이 단일 판매사업자 (전력도매시장의 소비자)이거나 혹은 과점인 경우, 판매사업자는 ESS의 운영을 통해 시장지배력을 발휘할 가능성이 생기게 된다.

셋째, 무위험거래 비율의 증가를 통해 다른 시장참여자의 ESS 투자를 유인할 수 있음을 보였다. 소비자 외의 다른 시장참여자의 ESS 투자를 유인하기 위한 방법으로 무위험거래의 비율의 변화가 효과가 있음을 확인하였고, 그 비율별 시장참여자별 투자의 내쉬균형점을 도출하였다.

넷째, 판매사업자의 시장지배력 완화를 위한 판매부문의 경쟁과 무위험거래의 필요성을 확인하였다. 독과점의 판매사업자가 ESS의 운영을 통해 부당한 이익을 취하는 것을 방지하기 위하여, 판매부문의 경쟁을 통한 같은 시장참여자간의 경쟁, 혹은 무위험거래의 증가를 통한 다른 시장참여자의 ESS 투자유인을 통한 경쟁이 시장지배력을 완화시킬 수 있을 것이다.

그 외에도, BESS는 그 높은 비용과 짧은 수명으로 인해, 에너지 차익거래로는 현재 경제성을 확보하지 못함을 보였고, 소매요금제에서의 에너지 차익거래는 판매사업자가 ESS를 통한 에너지 차익거래가 불가능하도록 요금을 설계할 것임을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 모델은 두 시점에 한정된 모델로, 그 이상의 확장을 위해서는 모델의 수정이 필요하다. 또한, 수요평탄화로 인한 장기영향까지 고려하게 되면 설비의 구성이 변화하여 본 연구의 결과도 달라질 것이다. 하지만, 본 논문은 ESS 에너지 차익거래의 체제적 접근으로서 ESS 투자량이 전력계통에 미치는 영향을 다루었으며, 사회후생을 최대로 하는 ESS 투자량 도출을 통한 정책적 가이드라인의 제공과 독과점 형태의 판매사업자의 시장지배력 완화를 위한 연구의 기반이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Albadi, Mohamed H., and E. F. El-Saadany, "A summary of demand response in electricity markets," *Electric power systems research*, vol.78, no.11, pp.1989–1996, 2008
- [2] J. G. Kassakian, et al., *The future of the electric grid*, Cambridge, MA:MIT, 2011, pp.143–167.
- [3] Pierluigi Siano, "Demand response and smart grids–A survey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.30, pp.461–478, Nov. 2014.
- [4] Q. Qdr, "Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them," US department of energy, Feb. 2006.
- [5] H. Kim, J. H. Heo, J. Y. Park, and Y. T. Yoon, "Impact of Battery Energy Storage System Operation Strategy on Power System: An Urban Railway Load Case under a Time-of-Use Tariff," *Energies*, vol.10, no.1, Jan. 2017.
- [6] K. Bradbury, L. Pratson, and D. Patiño-Echeverri, "Economic viability of energy storage systems based on price arbitrage

- potential in real-time US electricity markets," *Applied Energy*, vol.114, pp.512-519, Feb. 2014.
- [7] Yang, Chi-Jen, and Robert B. Jackson, "Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.15, no.1, pp.839-844, 2011
- [8] Bullough, Chris, et al., "Advanced adiabatic compressed air energy storage for the integration of wind energy," *Proceedings of the European Wind Energy Conference, EWEC. Vol. 22. 2004.*
- [9] Kirschen, D, et al., "Energy Storage Procurement in Vertically-Integrated and Competitive Market Environments," In *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, Boston, MA, USA, 17 - 21 July 2016.*
- [10] Su, Wei-Fu, Shyh-Jier Huang, and Chin-E. Lin, "Economic analysis for demand-side hybrid photovoltaic and battery energy storage system," *IEEE Trans Industry Applications*, vol.37, no.1, pp.171-177, 2001.
- [11] Oudalov, Alexdandre, et al., "Value analysis of battery energy storage applications in power systems," *Power Systems Conference and Exposition, PSCE'06., 2006 IEEE PES., IEEE, 2006.*

- [12] Khani, Hadi, Mohammad R. Dadash Zadeh, and Ravi Seethapathy, "Large-scale energy storage deployment in ontario utilizing time-of-use and wholesale electricity prices: An economic analysis," In Proceedings of Cigre Conference, 2014.
- [13] Oudalov, A., Cherkaoui, R., and Beguin, A., "Sizing and optimal operation of battery energy storage system for peak shaving application," In Proceedings of the IEEE Lausanne Powertech, Lausanne, Switzerland, pp. 621 - 625, Jul. 2007.
- [14] Dusonchet, L., et al., "An optimal operating strategy for combined RES-based generators and electric storage systems for load shifting applications," Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Fourth International Conference on. IEEE, 2013.
- [15] Lee, T.-Y., and Chen, N., "Determination of optimal contract capacities and optimal sizes of battery energy storage systems for time-of-use rates industrial customers," IEEE Trans Energy Convers, vol.10, pp.562 - 568, 2005.
- [16] Ko, Rakkyung, Seongbae Kong, and Sung Kwan Joo, "Mixed integer programming (MIP)-based energy storage system scheduling method for reducing the electricity purchasing cost in

an urban railroad system," *Trans Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.64, no.7, pp.1125-1129, 2015.

- [17] Lee, T.-Y., "Operating schedule of battery energy storage system in a time-of-use rate industrial user with wind turbine generators: A multipass iteration particle swarm optimization approach," *IEEE Trans Energy Convers.*, vol.22, pp.774 - 782, 2007.
- [18] Kazempour, S. J., Moghaddam, M. P., Haghifam, M. R., and Yousefi, G. R., "Electric energy storage systems in a market-based economy: comparison of emerging and traditional technologies," *Renew Energy*, vol.34, no.12, pp.2630 - 2639, 2009.
- [19] Kazempour, S. J., Moghaddam, M. P., "Economic viability of NaS battery plant in a competitive electricity market," In *Proceedings of 2009 International conference on clean electrical power*, pp.453 - 459, 2009.
- [20] Moghaddam, I. G., and Saeidian, A., "Self scheduling program for a VRB energy storage in a competitive electricity market," In *Proceedings of 2010 International conference on power system technology (POWERCON)*, pp.1 - 6, 2010.
- [21] He X, et al., "Compressed air energy storage multi-stream value assessment on the French energy market," *PowerTech*, 2011 IEEE

- Trondheim, pp.1 - 6, 2011.
- [22] Drury, E., Denholm, P., and Sioshansi, R., “The value of compressed air energy storage in energy and reserve markets,” *Energy*, vol.36, no.8, pp.4959 - 4973, 2011.
- [23] Sioshansi, R., Denholm, P., and Jenkin T., “A comparative analysis of the value of pure and hybrid electricity storage,” *Energy Economics*, vol.33, no.1, pp.56 - 66, 2011.
- [24] Hessami, M.-A., and Bowly, D. R., “Economic feasibility and optimisation of an energy storage system for Portland Wind Farm (Victoria, Australia),” *Applied Energy*, vol.88, no.8, pp.2755 - 2763, 2011.
- [25] McKenna, E., McManus, M., Cooper, S., and Thomson, M., “Economic and environmental impact of lead - acid batteries in grid-connected domestic PV systems,” *Applied Energy*, vol.104, pp.239 - 249, 2013.
- [26] Walawalkar, R., and Apt, J., *Market analysis of emerging electric energy storage systems*, DOE/NETL, 2008.
- [27] Eyer, J. M., Iannucci, J. J., and Corey, G. P., *Energy storage benefits and market analysis handbook: a study for the DOE energy storage systems program*, SAND2004-6177, Sandia

National Laboratories, 2004.

- [28] Schoenung, S., and Eyer, J., *Benefit/cost framework for evaluating modular energy storage - a study for the DOE energy storage system program*, Sandia report SAND, vol.978, 2008.
- [29] Eyer, J. M., and Corey, G. P., *Energy storage for the electricity grid: benefits and market potential assessment guide*, SAND 2010-0815, Sandia National Laboratories, 2010.
- [30] Sioshansi, Ramteen, et al., "Estimating the value of electricity storage in PJM: Arbitrage and some welfare effects," *Energy economics*, vol.31, no.2, pp.269-277, 2009.
- [31] Figueiredo, F. Cristina, Peter C. Flynn, and Edgar A. Cabral, "The economics of energy storage in 14 deregulated power markets," *Energy Studies Review*, vol.14, no.2, pp.131, 2006.
- [32] Zafirakis, Dimitrios, et al., "The value of arbitrage for energy storage: evidence from European electricity markets," *Applied Energy*, vol.184, pp.971-986, 2016.
- [33] Hu, Weihao, Zhe Chen, and Birgitte Bak-Jensen, "Optimal operation strategy of battery energy storage system to real-time electricity price in Denmark," *IEEE Power and Energy Society*

General Meeting, 2010.

- [34] Lueken, Roger, and Jay Apt, "The effects of bulk electricity storage on the PJM market," *Energy Systems*, vol.5, no.4, pp.677-704, 2014.
- [35] Kanakasabapathy, P., "Economic impact of pumped storage power plant on social welfare of electricity market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.45, no.1, pp.187-193, 2013.
- [36] R. Sioshansi, "Welfare impacts of electricity storage and the implications of ownership structure," *The Energy Journal*, vol.31, no.2, pp.173-198, 2010.
- [37] Qdr, Q., *Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them*, US department of energy, 2006.
- [38] Braithwait, Steven, Daniel G. Hansen, and Laurence D. Kirsch., *Incentives and rate designs for efficiency and demand response*, LBNL-60132, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006.
- [39] Lewis, W. Arthur., "The two-part tariff," *Economica*, vol.8, no.31, pp.249-270, 1941.
- [40] Feldstein, Martin S., "Equity and efficiency in public sector

pricing: the optimal two-part tariff," *The Quarterly Journal of Economics*, pp.176-187, 1972.

[41] Ng, Yew-Kwang, and Mendel Weisser, "Optimal pricing with a budget constraint-The case of the two-part tariff," *The Review of Economic Studies*, vol.41, no.3, pp.337-345, 1974.

[42] Schlereth, Christian, Tanja Stepanchuk, and Bernd Skiera, "Optimization and analysis of the profitability of tariff structures with two-part tariffs," *European Journal of Operational Research*, vol.206, no.3, pp.691-701, 2010.

[43] Park, W.G. *Study on Development Situation and Improvement Plan of Energy Storage System (ESS) for Management of Peak-Power Applicable to Railway Substation*, Master's Thesis, Hanyang University, Seoul, Korea, Feb. 2015.

[44] Milner, A., "Modeling lithium ion battery degradation in electric vehicles," In *Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES)*, Waltham, MA, USA, pp. 348 - 356, 27 - 29 September 2010.

[45] Wang, Y., Lin, X., Xie, Q., Chang, N., and Pedram, M., "Minimizing state-of-health degradation in hybrid electrical

energy storage systems with arbitrary source and load profiles,”
In Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe
Conference and Exhibition (DATE), Dresden, Germany, pp. 1-4,
24 - 28 Mar. 2014.

- [46] Korea Electric Power Corporation. Available online:
[http://home.kepco.co.kr/kepco/EN/F/htmlView/ENFBHP00103.do?](http://home.kepco.co.kr/kepco/EN/F/htmlView/ENFBHP00103.do?menuCd=EN060201)
menuCd=EN060201 (accessed on 23 May 2017)
- [47] N. Gast, J. Y. L. Boudec, A. Proutière, and D. C. Tomozei,
“Impact of storage on the efficiency and prices in real-time
electricity markets,” in Proceedings of the fourth international
conference on Future energy systems, Berkeley, USA, Jan. 2013.
- [48] Lee, Ho-Chul, *Study on demand response program design for
improving social welfare*, Ph.D's Thesis, Seoul National
University, Seoul, Korea, Feb. 2012.
- [49] Chen, Haisheng, et al., “Progress in electrical energy storage
system: A critical review,” *Progress in Natural Science*, vol.19,
no..3, pp.291-312, 2009.
- [50] Schoenung, Susan M., and William V. Hassenzuhl., *Long vs.
short-term energy storage: sensitivity analysis*, No.
SAND2007-4253, Sandia National Laboratories, 2007.

- [51] S. P. Dirkse, and M. C. Ferris, “The path solver: a nonmonotone stabilization scheme for mixed complementarity problems,” *Optimization Methods and Software*, vol.5, no.2, pp.123–156, 1995.
- [52] M. C. Ferris, and T. S. Munson, “Complementarity problems in GAMS and the PATH solver,” *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol.24, no.2, pp.165–188, Feb. 2000.

부 록

부록 1. 내쉬균형과 최적반응함수

둘 이상의 이성적 의사결정자 간의 경쟁 혹은 협조가 의사결정에 미치는 영향을 수학적으로 연구하는 분야를 게임이론이라고 한다. 이 때, 둘 이상의 참여자가 담합하지 않고 개별의 이익만을 고려하여 의사결정을 하는 경우의 게임을 비협조 게임 (non-cooperative game)이라고 한다. 이와 같은 비협조 게임에서 각각의 참여자가 자신의 이익만을 고려한 최적 전략이 균형을 이룬 상황을 내쉬균형 (Nash equilibrium)이라고 하며, 참가자 중 누구도 자신의 전략만을 수정하여 자신의 이익을 더 이상 증가시킬 수 없는 상태를 의미한다. 이를 수학적으로 설명하면 다음과 같다. i 명의 참가자가 존재하는 게임의 내쉬균형을 식으로 표현하면 식 (A1.1)과 같다.

$$\pi_i(x_i^*, X_{-i}^*) \geq \pi_i(x_i, X_{-i}^*), \quad \forall x_i \in S_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{A1.1})$$

식 (A1.1)에서 x_i 는 참가자 i 가 선택한 전략을, S_i 는 x_i 가 될 수 있는

모든 전략의 집합을 의미한다. X_{-i} 는 참가자 i 를 제외한 모든 참가자들이 선택한 전략을 벡터로 나타낸 것으로 식 (A1.2)와 같다.

$$X_{-i} = \{x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n\} \quad (\text{A1.2})$$

x_i^* 및 X_{-i}^* 는 다양한 전략 중 내쉬균형에서의 전략을 의미한다. 즉 식 (A1.2)는 모든 x_i 에 대하여 x_i^* 가 더 높거나 같은 이윤을 보장한다. 이때 다른 참가자들은 X_{-i}^* 를 선택하고 있으므로 모든 참가자가 각자 자신의 이익을 극대화하는 선택을 하고 있는 것을 의미한다. 따라서 내쉬균형에서는 어떤 참여자도 자신의 전략을 수정하여 이익을 증가시킬 수 없다.

최적반응 (best response)은 상대방의 전략을 알고 있다면 그 전략에 대응하여 자신의 이익을 최대로 할 수 있는 최적의 전략을 의미한다. 최적반응함수는 상대방의 전략을 변수로 하여 자신의 최적 전략을 함수의 형태로 나타낸 것이다. 둘 이상의 참여자의 최적반응함수는 하나의 전략 공간에 도시할 수 있으며, 내쉬균형은 전략 공간상에서 최적 반응함수의 교점으로 나타난다. 최적 반응 함수의 교점에서는 모든 참여자가 주어진 상대방의 전략에 대해 최선의 선택을 하고 있음을 의미하고 이는 내쉬균형의 정의에 부합한다.

부록 2. n-참여자 비협조게임의 내쉬균형 도출 과정

둘 이상의 참여자가 비협조게임을 할 때의 내쉬균형 값을 도출하기 위하여 MCP 형태의 문제로 구성하고 최적화 틀을 이용하여 풀 수도 있지만, 구조 2와 같이 같은 부문 내의 서로 대칭적인(symmetric) 참여자들이 경쟁에 참여 할 경우, 아래와 같은 과정을 통하여 최적해를 도출할 수 있다. 본 과정은 서로 대칭적인 참여자의 내쉬균형 도출을 위해 [36]에서 사용한 방법을 사용하였다.

부록 2.1 MSO의 내쉬균형 (구조 2)

구조 2와 같이 N개의 MSO가 자신의 이익을 최대화하기 위해 에너지 차익거래용 ESS에 투자할 경우, MSO i 는 에너지 차익거래 수익에서 저장비용을 뺀 값이 최대가 되도록 ESS에 투자할 것이며, 이때의 에너지 차익거래 수익은 MSO i 의 소유 ESS δ_i 와 다른 MSO i 를 제외한 MSO들의 소유 ESS δ_{-i} 의 합에 의해 결정된다. MSO i 의 목적함수는 식 (A2.1.1)과 같다.

$$\begin{aligned}
& \max_{\delta_i} \pi_S(\delta_i, \delta_{-i}) \\
& = \max_{\delta_i} [\{\eta[c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta_i - \eta\delta_{-i})] - [c_0 + c_1(q_1 + \delta_i + \delta_{-i})] - c_{ess}\} \cdot \delta_i]
\end{aligned} \tag{A2.1.1}$$

$\lambda_i \geq 0$ 을 MSO i 의 최소조건을 위한 라그랑지안 승수 (Lagrangean multiplier)하고 할 때, MSO i 의 목적함수 라그랑지함수와 일계필요조건은 각각 식 (A2.1.2), (A2.1.3)과 같다.

$$\mathcal{L} = \pi_S(\delta_i, \delta_{-i}) + \lambda_i \delta_i \tag{A2.1.2}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \delta_i} = \eta [c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta^S)] - [c_0 + c_1(q_1 + \delta^S)] - c_1(1 + \eta^2)\delta_i - c_{ess} + \lambda_i = 0 \tag{A2.1.3}$$

MSO 참여자들은 각각 서로 대칭적이라고 가정하였으므로, 동일한 전략을 갖는 MSO j 의 일계필요조건과의 차가 0이어야 한다. 이는 다음 식 (A2.1.4)와 같고, 동일한 내쉬균형점을 갖는다는 증명과정은 다음과 같다.

$$(1 + \eta^2)c_1(\delta_j - \delta_i) + \lambda_i - \lambda_j = 0 \tag{A2.1.4}$$

경우 1. $\delta_i = 0$ 인 경우

MSO i 가 ESS에 투자하지 않으면, 상보적 관계에 있는 라그랑지안 승수는 $\lambda_i \geq 0$ 와 같고 식 (A2.1.2)는 식 (A2.1.5)과 같다.

$$(1 + \eta^2)c_1\delta_j + \lambda_i - \lambda_j = 0 \quad (\text{A2.1.5})$$

만약 MSO j 의 투자량이 MSO i 와 달리 $\delta_j > 0$ 이라면, MSO j 의 라그랑지안 승수는 0이어야 하므로, 위 조건은 만족되지 않는다. 그러므로 $\delta_i = 0$ 인 경우, $\delta_j = 0$ 여야 하므로 두 참여자의 전략은 동일하다.

경우 2. $\delta_i > 0$ 인 경우

MSO i 의 ESS투자량이 0이 아닌 양수일 경우, 상보적 관계에 있는 라그랑지안 승수는 $\lambda_i = 0$ 과 같고, 식(A2.1.2)는 식 (A2.1.6)과 같다.

$$(1 + \eta^2)c_1(\delta_j - \delta_i) - \lambda_j = 0 \quad (\text{A2.1.6})$$

위 식이 0을 만족하기 위해서는 $\delta_j = \delta_i$ 이고, $\lambda_j = 0$ 이어야 한다. 그러므로 이 경우도 두 참여자의 전략이 동일 한 것으로 확인할 수 있다.

위 두 가지 경우를 통해 두 대칭적인 참여자는 동일한 내쉬균형을 가지는 것을 확인하였고, MSO i 의 최적투자량 δ_i 와 N 개의 MSO의 최적 균형투자량 δ^S 의 관계 (식 (A2.1.7))를 이용하여 목적함수의 일계필요조건 (식 (A2.1.3))은 식 (A2.1.8)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\delta_i = \frac{\delta^S}{N} \quad (\text{A2.1.7})$$

$$\eta [c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta^S)] - [c_0 + c_1(q_1 + \delta^S)] - c_1(1 + \eta^2)\frac{\delta^S}{N} - c_{ess} + \lambda = 0 \quad (\text{A2.1.8})$$

이를 이용하여 N 개의 MSO의 최적 균형투자량 δ^S 는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\delta^S = \begin{cases} 0, & \text{if } c_0(\eta - 1) + c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess} < 0 \\ \frac{N}{N+1} \frac{c_0(\eta - 1) + c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess}}{c_1(1 + \eta^2)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A2.1.9})$$

이를 치환하여 정리하면 아래와 같다.

$$\delta^S = \begin{cases} 0, & \text{if } (A - C) - c_{ess} < 0 \\ \frac{N}{N+1} \frac{(A - C) - c_{ess}}{2B}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A2.1.10})$$

MSO i 의 최적 내쉬균형 투자점은 아래와 같다.

$$\delta_i = \begin{cases} 0, & \text{if } (A-C) - c_{ess} < 0 \\ \frac{1}{N+1} \frac{(A-C) - c_{ess}}{2B}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A2.1.11})$$

부록 2.2 생산자의 내쉬균형 (구조 2)

구조 2와 같이 N 개의 생산자가 자신의 이익을 최대화하기 위해 에너지 차익거래용 ESS에 투자할 경우, 생산자 i 는 에너지 차익거래 수익에서 저장비용을 뺀 값과 에너지 차익거래로 인해 변화하는 생산자의 후생 중 자신에게 영향을 미치는 후생변화량의 합이 최대가 되도록 ESS에 투자할 것이며, 이때의 에너지 차익거래 수익과 후생변화에 미치는 영향은 생산자 i 의 소유 ESS δ_i 와 생산자 i 를 제외한 다른 생산자들의 소유 ESS δ_{-i} 의 합에 의해 결정된다. 생산자 i 의 목적함수는 식 (A2.2.1)과 같다.

$$\begin{aligned}
\max_{\delta_i} \pi_P(\delta_i, \delta_{-i}) &= \max_{\delta_i} \left[\pi_S(\delta_i, \delta_{-i}) + \frac{1}{N} \Delta PS(\delta_i, \delta_{-i}) \right] \\
&= \max_{\delta_i} \left[\left\{ \eta [c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta_i - \eta\delta_{-i})] - [c_0 + c_1(q_1 + \delta_i + \delta_{-i})] - c_{ess} \right\} \cdot \delta_i \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{N} \left\{ c_1 [q_1(1-w_1) - \eta q_2(1-w_2)] (\delta_i + \delta_{-i}) + \frac{1}{2} c_1 (1+\eta^2) (\delta_i + \delta_{-i})^2 \right\} \right]
\end{aligned} \tag{A2.2.1}$$

$\lambda_i \geq 0$ 을 생산자 i 의 최소조건을 위한 라그랑지안 승수라고 할 때, 생산자 i 의 목적함수의 라그랑지함수와 일계필요조건은 각각 식 (A2.2.2), (A2.2.3)과 같다.

$$\mathcal{L} = \pi_P(\delta_i, \delta_{-i}) + \lambda_i \delta_i \tag{A2.2.2}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \delta_i} &= \left[\eta [c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta^P)] - [c_0 + c_1(q_1 + \delta^P)] - c_1(1+\eta^2)\delta_i - c_{ess} \right] = 0 \\
&\quad \left[+ \frac{1}{N} \left\{ c_1 [q_1(1-w_1) - \eta q_2(1-w_2)] + c_1(1+\eta^2)\delta^P \right\} + \lambda_i \right]
\end{aligned} \tag{A2.2.3}$$

이 때, 생산자의 후생변화는 4.1.3절에서 구한 식 (4.38)을 이용하였고, 아래에 다시 한 번 정리하였다.

$$\Delta PS = c_1 [q_1(1-w_1) - \eta q_2(1-w_2)] \cdot \delta + \frac{1}{2} c_1 (1+\eta^2) \cdot \delta^2 \tag{4.38}$$

대칭의 생산자 i 와 생산자 j 의 내쉬균형도 대칭적으로 동일해야 함은 부록 3.1과 동일한 방법으로 증명이 가능하다.

생산자 i 의 최적투자량 δ_i 와 N 개의 생산자의 최적 균형투자량 δ^P 의 관계 (식 (A2.2.4))를 이용하여 목적함수의 일계필요조건 (식 (A2.2.3))은 식 (A2.2.5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\delta_i = \frac{\delta^P}{N} \quad (\text{A2.2.4})$$

$$\left[\begin{array}{l} \eta [c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta^P)] - [c_0 + c_1(q_1 + \delta^P)] - c_1(1 + \eta^2)\frac{\delta^P}{N} - c_{ess} \\ + \frac{1}{N} \{c_1[q_1(1 - w_1) - \eta q_2(1 - w_2)] + c_1(1 + \eta^2)\delta^P\} + \lambda \end{array} \right] = 0 \quad (\text{A2.2.5})$$

이를 이용하여 N 개의 생산자의 최적 균형투자량 δ^P 는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\delta^P = \begin{cases} 0, & \text{if } c_0(\eta - 1) + \frac{N + w - 1}{N}c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess} < 0 \\ \frac{c_0(\eta - 1) + \frac{N + w - 1}{N}c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess}}{c_1(1 + \eta^2)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A2.2.6})$$

이를 치환하여 정리하면 아래와 같다.

$$\delta^P = \begin{cases} 0, & \text{if } (\frac{N+w-1}{N}A - C) - c_{ess} < 0 \\ \frac{(\frac{N+w-1}{N}A - C) - c_{ess}}{2B}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (\text{A2.2.7})$$

생산자 i 의 최적 내쉬균형 투자점은 아래와 같다.

$$\delta_i = \begin{cases} 0, & \text{if } (\frac{N+w-1}{N}A - C) - c_{ess} < 0 \\ \frac{1}{N} \frac{(\frac{N+w-1}{N}A - C) - c_{ess}}{2B}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (\text{A2.2.8})$$

부록 2.3 소비자의 내쉬균형 (구조 2)

구조 2와 같이 N 개의 소비자가 자신의 이익을 최대화하기 위해 에너지 차익거래용 ESS에 투자할 경우, 소비자 i 는 에너지 차익거래 수익에서 저장비용을 뺀 값과 에너지 차익거래로 인해 변화하는 소비자의 후생 중 자신에게 영향을 미치는 후생변화량의 합이 최대가 되도록 ESS에 투자할 것이며, 이때의 에너지 차익거래 수익과 후생변화에 미치는 영향은 소비자 i 의 소유 ESS δ_i 와 소비자 i 를 제외한 다른 소비자들의 소유

ESS δ_{-i} 의 합에 의해 결정된다. 소비자 i 의 목적함수는 식 (A2.3.1)과 같다.

$$\begin{aligned} \max_{\delta_i} \pi_C(\delta_i, \delta_{-i}) &= \max_{\delta_i} \left[\pi_S(\delta_i, \delta_{-i}) + \frac{1}{N} \Delta CS(\delta_i, \delta_{-i}) \right] \\ &= \max_{\delta_i} \left[\left\{ \eta [c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta_i - \eta\delta_{-i})] - [c_0 + c_1(q_1 + \delta_i + \delta_{-i})] - c_{ess} \right\} \cdot \delta_i \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{N} \{c_1[\eta q_2(1 - w_2) - q_1(1 - w_1)](\delta_i + \delta_{-i})\} \right] \end{aligned} \quad (\text{A2.2.1})$$

$\lambda_i \geq 0$ 을 소비자 i 의 최소조건을 위한 라그랑지안 승수라고 할 때, 소비자 i 의 목적함수의 라그랑지함수와 일계필요조건은 각각 식 (A2.3.2), (A2.3.3)과 같다.

$$\mathcal{L} = \pi_C(\delta_i, \delta_{-i}) + \lambda_i \delta_i \quad (\text{A2.2.2})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \delta_i} = \left[\begin{aligned} &\eta [c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta^C)] - [c_0 + c_1(q_1 + \delta^C)] - c_1(1 + \eta^2)\delta_i - c_{ess} \\ &+ \frac{1}{N} \{c_1[\eta q_2(1 - w_2) - q_1(1 - w_1)]\} + \lambda_i \end{aligned} \right] = 0 \quad (\text{A2.2.3})$$

이 때, 소비자의 후생변화는 4.1.3절에서 구한 식 (4.31)을 이용하였고, 아래에 다시 한 번 정리하였다.

$$\Delta CS = c_1 [(\eta q_2(1 - w_2) - q_1(1 - w_1))] \cdot \delta \quad (4.31)$$

대칭의 소비자 i 와 소비자 j 의 내쉬균형도 대칭적으로 동일해야 함은 부록 3.1과 동일한 방법으로 증명이 가능하다.

소비자 i 의 최적투자량 δ_i 와 N 개의 소비자의 최적 균형투자량 δ^C 의 관계 (식 (A2.3.4))를 이용하여 목적함수의 일계필요조건 (식 (A2.3.3))은 식 (A2.3.5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\delta_i = \frac{\delta^C}{N} \quad (\text{A2.3.4})$$

$$\left[\begin{aligned} & \eta [c_0 + c_1(q_2 - \eta\delta^C)] - [c_0 + c_1(q_1 + \delta^C)] - c_1(1 + \eta^2) \frac{\delta^C}{N} - c_{ess} \\ & + \frac{1}{N} \{c_1[\eta q_2(1 - w_2) - q_1(1 - w_1)]\} + \lambda \end{aligned} \right] = 0 \quad (\text{A2.3.5})$$

이를 이용하여 N 개의 소비자의 최적 균형투자량 δ^C 는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\delta^C = \begin{cases} 0, & \text{if } c_0(\eta - 1) + \frac{N - w + 1}{N} c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess} < 0 \\ \frac{c_0(\eta - 1) + \frac{N - w + 1}{N} c_1(\eta q_2 - q_1) - c_{ess}}{\frac{N + 1}{N} c_1(1 + \eta^2)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A2.3.6})$$

이를 치환하여 정리하면 아래와 같다.

$$\delta^C = \begin{cases} 0, & \text{if } (\frac{N-w+1}{N}A - C) - c_{ess} < 0 \\ \frac{(\frac{N-w+1}{N}A - C) - c_{ess}}{\frac{N+1}{N} \cdot 2B}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A2.3.7})$$

소비자 i 의 최적 내쉬균형 투자점은 아래와 같다.

$$\delta_i = \begin{cases} 0, & \text{if } (\frac{N-w+1}{N}A - C) - c_{ess} < 0 \\ \frac{1}{N} \frac{(\frac{N-w+1}{N}A - C) - c_{ess}}{\frac{N+1}{N} \cdot 2B}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A2.3.8})$$

부록 3. 구조 3에서 시장참여자 수에 따른 각 시장참여자별 최적 ESS 투자량 도출

구조 3과 같이 발전부문과 판매부문이 분리되고, 모든 시장참여자들이 자유롭게 에너지 차익거래용 ESS에 투자할 수 있는 환경에서, 각 시장참여자들의 수(N, M, Z)에 따른 시장참여자들의 최적 ESS 투자량의 내쉬균형점을 도출하였다.

본문의 사례연구에서는 한국과 유사한 시장 환경에 대한 분석을 위해 10개의 MSO, 6개의 생산자, 1개의 소비자 (N=10, M=6, Z=1)를 가정하였고, 그 결과 오직 소비자만이 ESS에 투자하는 것을 확인하였다. 부록에서는 시장참여자들의 수를 변화시키며 다양한 경우의 ESS 최적 투자량을 도출해 보았고, 그 결과는 아래 표 A3.1-A3.4에 정리하였다. 세 가지 타입의 시장참여자군이 존재하므로, 표에 정리하기 위하여 소비자 수 (Z)를 1, 10, 100, 무한대로 변화시키며 각기 다른 표에 정리하였고, MSO, 생산자, 소비자의 최적 ESS 투자량 순으로 표 안에 정리하였다.

$$(\delta^S / \delta^P / \delta^C)$$

표 A3.1 시장참여자 수에 따른 각 시장참여자별 최적 ESS 투자량
(1개의 소비자만 있는 경우, Z=1)

$\delta^S / \delta^P / \delta^C$ [MWh]		MSO의 시장참여자 수		
		1	10	100
생산자의 시장참여자 수	1	0 / 0 / 5688	0 / 0 / 5688	0 / 0 / 5688
	10	0 / 0 / 5688	0 / 0 / 5688	0 / 0 / 5688
	100	0 / 0 / 5688	0 / 0 / 5688	0 / 0 / 5688

표 A3.2 시장참여자 수에 따른 각 시장참여자별 최적 ESS 투자량
(10개의 소비자가 있는 경우, Z=10)

$\delta^S / \delta^P / \delta^C$ [MWh]		MSO의 시장참여자 수		
		1	10	100
생산자의 시장참여자 수	1	0 / 0 / 4466	0 / 0 / 4466	0 / 0 / 4466
	10	0 / 0 / 4466	0 / 0 / 4466	0 / 0 / 4466
	100	0 / 0 / 4466	0 / 0 / 4466	0 / 0 / 4466

표 A3.3 시장참여자 수에 따른 각 시장참여자별 최적 ESS 투자량
(100개의 소비자가 있는 경우, Z=100)

$\delta^S / \delta^P / \delta^C$ [MWh]		MSO의 시장참여자 수		
		1	10	100
생산자의 시장참여자 수	1	0 / 0 / 4223	0 / 0 / 4223	0 / 0 / 4223
	10	0 / 0 / 4223	0 / 0 / 4223	0 / 0 / 4223
	100	0 / 0 / 4223	0 / 0 / 4223	0 / 0 / 4223

표 A3.4 시장참여자 수에 따른 각 시장참여자별 최적 ESS 투자량
(무한개의 소비자가 있는 경우, Z=∞)

$\delta^S / \delta^P / \delta^C$ [MWh]		MSO의 시장참여자 수		
		1	10	100
생산자의 시장참여자 수	1	0 / 0 / 4194	0 / 0 / 4194	0 / 0 / 4194
	10	0 / 0 / 4194	0 / 0 / 4194	0 / 0 / 4194
	100	0 / 0 / 4194	0 / 0 / 4194	0 / 0 / 4194

결과에서 확인할 수 있듯이, 소비자의 수가 유한한 경우 ($Z \neq \infty$), 다른 타입의 시장참여자 수 (N, M)와 관계없이 소비자만이 투자한다는 것을 확인할 수 있고, 이 때 투자량은 소비자의 수(Z)에 의해 결정되는 것을 확인하였다.

또한 소비자의 수가 무한하고 ($Z = \infty$), MSO와 생산자의 소비자의 수가 유한할 경우라면 ($N \neq \infty, M \neq \infty$), 역시 소비자만이 투자하는 것을 확인할 수 있었고, 마찬가지로 투자량은 소비자 수 (Z)에 의해 결정되어 사회후생을 최대로 하는 투자량인 4.194MWh를 투자한다는 것을 확인하였다. 하지만 모든 시장 참여자의 수가 무한대인, 완전경쟁시장의 환경에서는 각 시장참여자의 최적 투자량은 각각 1048 / 1048 / 1048 MWh (MSO / 생산자 / 소비자)인 것을 추가적으로 확인하였다. 자유로운 투자환경에서 완전경쟁이 이뤄진다면 모든 시장참여자군은 동일한 용량의 ESS에 투자할 유인을 받지만, 그 내쉬균형점은 사회후생을 최대화하기 위한 투자량 4194 MWh보다는 다소 적은 3144 MWh를 투자한다는 것을 확인하였다.

Abstract

Short-term Effects of Energy Arbitrage with ESS on Market Participants' Welfare and Investment Strategies

Hyeongig Kim

Department of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

In contrast to traditional philosophy that electricity demands should be fully supplied only by controlling generation units, many previous studies show that appropriate changes of demand are more efficient. System load flattening provides system-wide benefits, which reduce operational costs in the short-term, and defer the construction of additional supply units in the long-term. Nonetheless, power

demand is generally inelastic in terms of price and thus not effectively responsive to price incentives. In contrast, by owning energy storage systems (ESSs), every energy storage owner (ESO) is able to be price-elastic and demand can be changed without reduction of the customer's utility because the amount of power actually consumed by customers does not change. Furthermore, as the costs of ESS have decreased and the price volatility of the electricity market has increased, many studies have been conducted on energy arbitrage using ESSs. However, there is a lack of research on welfare analysis by market participants, especially in relation to ESS investment strategy.

In this study, the existing two-period model which can analyze effects of energy arbitrage with ESS is modified in consideration of the ESS cost and risk-free contracts. We analyze the impacts of ESS for energy arbitrage on the changes in the welfare of market participants and determined the optimal amount of ESS investment for three types of ESS investors in different market structures. When the prices of electricity begin to change by energy arbitrage using ESS, the value of energy arbitrage is reduced, and the welfare of market participants changes due to the external effects of energy

arbitrage. Thus, each market participant is incentivized differently to invest in ESS. The optimal amounts of ESS investment are determined by the ratio of risk-free contracts to total demand and the costs of storing. When more than two players exist in the same sector, the players non-cooperatively compete. Compared with the case that maximizes social welfare, the case when the players in only one sector are allowed to invest in ESS, the customers tend to over-invest in ESS, whereas the MSOs and producers under-invest in ESS. In addition, when every player can invest in ESS at the same time in the competitive wholesale market structure (which is simulated reflecting Korean circumstances), only the customers are willing to invest in ESS. This study confirms that significant welfare is transferred from the producers to the customers, and customers are able to exercise market power by operating ESS. We conclude that an increase in the number of customers and/or risk-free contracts encourages other market participants to invest in ESS, which reduce customers' market power.

keywords : energy arbitrage, energy storage system, investment strategy, Nash equilibrium, social welfare

Student Number : 2011-20825