



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](#)

공학전문석사 학위 연구보고서

배전계통운영자의 에너지저장장치
예비력 옵션에 대한 가치 연구

A Study on the Value of Energy Storage
System as Reserve Options to Distribution
System Operators

2022 년 2 월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

김 현 수

배전계통운영자의 에너지저장장치 예비력 옵션에 대한 가치 연구

A Study on the Value of Energy Storage
System as Reserve Options to Distribution
System Operators

지도교수 윤 용 태

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
2022 년 2 월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
김 현 수

김현수의 공학전문석사 학위논문을 인준함
2022 년 2 월

위 원 장 김 국 현 (인)

부위원장 윤 용 태 (인)

위 원 곽 우 영 (인)

국문초록

전력산업은 망을 기반으로 한 자연 독점의 형태로 오랜 시간 운영되어 왔다. 이러한 독점 산업은 발전, 송·변전, 배전, 판매 까지 한 회사가 일괄로 운영하는 수직·통합적인 방식으로 운영되어 왔다. 하지만 이러한 독점 구조도 에너지 사용의 효율화를 위해, 1980년대 영국에서부터 에너지 자유화가 본격화 되었다. 현재 전 세계의 많은 국가들이 에너지 시장 자유화를 다양한 단계와 형태로 구축 하고 있다. 전 세계적으로 이러한 변화 속에서 제도적 측면에서 전력 시스템의 분권화에 대한 이야기가 논의되고 있다.

이러한 산업의 변화에 따라 분산형전원은 크게 늘고 있다. 앞으로 계통 운영자는 더 많은 분산형전원을 계통에 연계하기 위해 미래의 전력계통은 ANM(Active Network Management)방식을 이용할 것이다. ANM 방식의 주요 기능 중 하나는 배전계통운영자가 신재생에너지의 출력을 실시간으로 제어하는 것이다. 기존의 "Fit and forget" 방식으로는 분산형전원을 계통에 한정적으로 밖에 수용할 수 없기 때문에, 수요와 분산형전원 전체를 TSO가 관리 하는 것이 아닌, 다수의 DSO가 분산형전원을 관리하고, 순 부하를 예측하는 분권화 된 배전 계통을 운영하는 형태로 변화해야 할 것이다.

기존 전력 도매 시장에서는 판매 사업자가 하루 전 전력 수요를 예측하여 에너지를 입찰하고, 발전 사업자는 에너지를 판매한다. 이 때 시스

템 운영자는 계통 운영 시 발생할 수 있는 불균형을 해소하기 위해 보조 서비스 시장을 이용하여 예비력을 사전에 확보한다. 이 때 사용 되는 비용이 수급균형 비용이다. 수급균형 비용은 중 수급균형 용량 비용의 경우는 계통 운영자가 비용 사회화 원칙에 따라 BRP(Balancing Responsible Party)가 에너지를 판매 혹은 매입한 량에 비례하여 비용을 배분하게 된다. 이는 판매 사업자의 불균형량에 비례하여 배분하지 않는 것을 의미한다. BRP의 불균형 발생 유무나 불균형량의 규모에 관계없이 비용을 부과하다보니 적극적인 계통균형 유지에 대한 BRP의 참여를 이끌어 낼 인센티브가 부족하다.

에너지 시장에서 PXFC 시장 개념은 비용 인과 원칙에 따라 불균형 비용을 비용 유발자가 부담하는 것을 원칙으로 하는 방법으로 제안되었다. 기존 전력 시장과 다르게 PXFC 시장에서 TSO가 DSO에게 수급균형에 대한 책임과 비용 부담을 전가하여, TSO에게 부담되는 과도한 계통 운영에 대한 어려움을 다수의 DSO에게 분산하는 효과를 갖게 된다.

DSO는 수급균형의 의무를 이행하기 위해 밴드 형태의 예비력을 TSO에게 구입하여 수급균형을 유지해야 한다. 본 연구에서는 예비력과 같은 역할을 수행할 수 있는 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System)를 DSO의 수급균형의 역할로 사용 하는 것을 상정한다. 본 연구에서는 이러한 에너지저장장치를 DSO의 수급균형책 옵션으로 사용하고, 이 때 이 에너지저장장치 옵션의 가치에 대해서 산정한다.

주요어 : 배전계통운영자, PXFC, 에너지저장장치, 실물옵션

학 번 : 2019-22202

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경 및 목적	1
제 2 절 논문의 개요 및 구성	5
제 2 장 전력 시장과 투자가치 평가법	6
제 1 절 전력 시장 구조 동향	6
제 2 절 전력 시장의 수급 균형 비용	9
제 3 절 투자가치 평가법	13
제 3 장 DSO의 수급균형	16
제 1 절 DSO의 예비력	16
제 2 절 DSO의 비용 함수	19
제 4 장 에너지저장장치 옵션 가치분석	21
제 1 절 시뮬레이션 데이터	21
제 2 절 시뮬레이션 시나리오	25
제 3 절 시뮬레이션 알고리즘	32
제 4 절 시뮬레이션 결과	37
제 5 장 결 론	50
참고문헌	52
Abstract	55

표 목 차

[표 3-1] 각 변수의 정의	20
[표 4-1] 시뮬레이션 목표	31
[표 4-2] 예비력 조합 예시	33
[표 4-3] 식 4-4의 변수에 대한 정의	39
[표 4-4] 에너지저장장치 관련 자료	40
[표 4-5] 에너지저장장치 사업 비용 (2018년도 단가 기준) ...	41
[표 4-6] 에너지저장장치 사업 비용 (2025년도 단가 기준) ...	41
[표 4-7] 에너지저장장치 사업 수익	42
[표 4-8] 에너지저장장치 사업 현금 흐름	43
[표 4-9] 조건을 모두 만족하는 경우의 수	46
[표 4-10] 에너지저장장치 가치 산정 예시	47
[표 4-11] 에너지저장장치 옵션 가치 산정 결과	49

그 립 목 차

[그림 2-1] Active Network Management 개요	8
[그림 2-2] 기존 도매 시장의 수급균형 비용 할당	10
[그림 2-3] PXFC 밴드 계약의 개념도	11
[그림 2-4] PXFC 시장의 수급균형 비용 할당	12
[그림 2-5] 순현재가치법 계산식	13
[그림 3-1] DSO의 에너지저장장치 예비력 이용	17
[그림 3-2] DSO의 에너지저장장치 옵션 행사	18
[그림 4-1] 피크부하 대비 시간대별 부하율	21

[그림 4-2] 태양광 설비용량 대비 시간대별 발전율	22
[그림 4-3] 풍력 설비용량 대비 시간대별 발전율	22
[그림 4-4] 난수 생성을 통한 수요 데이터	23
[그림 4-5] 난수 생성을 통한 태양광 발전 데이터	24
[그림 4-6] 난수 생성을 통한 풍력 발전 데이터	24
[그림 4-7] 시뮬레이션 시나리오 개요	25
[그림 4-8] 실제 순부하와 예측 순부하간 비교	26
[그림 4-9] 일간 불균형량 예시	26
[그림 4-10] 수급균형책 단가 비교에 따른 예비력 선택 ...	28
[그림 4-11] 밴드 최소 구입률 변화에 따른 수급균형책 변화 ...	30
[그림 4-12] 피보나치 수열 예시	32
[그림 4-13] 다이나믹 프로그래밍의 시뮬레이션 경우의 수 ...	34
[그림 4-14] 그리디 알고리즘의 오류 예시	34
[그림 4-15] DSO의 수급균형 방식 예시	35
[그림 4-16] 경우의 수별 DSO의 예비력 구입 총 비용	37
[그림 4-17] 경우의 수별 DSO의 에너지저장장치 옵션 수요 ...	38
[그림 4-18] 에너지저장장치 사업자 NPV (2018년도 단가 기준) ...	43
[그림 4-19] 에너지저장장치 사업자 NPV (2025년도 단가 기준) ...	44
[그림 4-20] 1년간 에너지저장장치 옵션의 가치	45
[그림 4-21] 에너지저장장치 옵션의 가치(2018년도 단가 기준) ...	48
[그림 4-22] 에너지저장장치 옵션의 가치(2025년도 단가 기준) ...	48

제 1 장 서 론

제 1절 연구 배경 및 목적

전력산업은 망을 기반으로 한 자연 독점의 형태로 오랜 시간 운영되어 왔다. 이러한 독점 산업은 발전, 송·변전, 배전, 판매 까지 한 회사가 통합으로 운영하는 수직·통합적인 방식으로 운영되어 왔다. 하지만 이러한 독점구조도 1980년대 영국에서부터 에너지 자유화가 본격화 되었고, 현재 전 세계의 많은 국가들이 에너지 시장 자유화를 다양한 단계와 형태로 운영 중이다. 전 세계적으로 이러한 제도 변화 중에서도 전력 시스템의 분권화에 대한 이야기가 논의되고 있다.[1]

분산형전원의 증가는 선로의 과전압 현상 및 선로 열적허용용량 위반 등 계통 운영 시 문제를 일으킬 수 있다[2]. 그래서 전력 회사는 위와 같은 문제를 회피하기 위해 분산형전원 연계 시 "Fit and forget" 방식을 사용하고 있다. 이는 출력이 일정한 발전원에는 합리적이지만, 태양광 발전과 같이 간헐적인 출력 특성을 갖는 발전원에는 비효율적인 방식이다. 앞으로 더 많은 분산형전원을 계통에 연계하기 위해 미래의 전력 계통은 ANM(Active Network Management)방식을 채택할 것이다. ANM 방식의 주요 기능 중 하나는 계통운영자가 신재생에너지의 출력을 실시간으로 제어하는 것이다. 그러나 이에선 제도적 개선이 불가피하다. 더불어 위와 같은 "Fit and forget" 방식으로는 분산형전원을 배전계통에 한정적으로 밖에 수용할 수 없기 때문에, 수많은 분산형전원이 연계

되었을 때 하나의 TSO가 운영 하는 것이 아닌, 다수의 DSO가 개별 분산형전원의 출력을 제어하여, 배전 계통을 운영하는 형태로 변화해야 할 것이다.[3]

기존 전력 도매 시장에서는 판매 사업자가 하루 전 전력 수요를 예측하여 에너지를 입찰하고, 발전 사업자는 에너지를 판매한다. 이 때 시스템 운영자는 계통 운영 시 발생할 수 있는 불균형을 해소하기 위해 보조 서비스 시장을 이용하여 예비력을 사전에 확보한다. 이 때 사용 되는 비용이 수급균형 비용이다. 수급균형 비용은 수급균형 에너지 비용, 수급균형 용량 비용 2가지로 나누어 볼 수 있다. 수급균형 에너지 비용 할당의 경우 계통 밸런싱의 책임을 갖고 있는 발전사업자, 판매사업자와 같은 BRP(Balancing Responsible Party)가 불균형이 발생하게 되면 불균형 량에 해당하는 그에 대한 페널티 비용을 지불하는 형태이다. 즉 수급균형 에너지 비용의 할당은 비용 유발자 원칙에 근거한다고 볼 수 있다. 다음으로 수급균형 용량 비용의 경우는 계통 운영자가 비용 사회화 원칙에 따라 BRP가 에너지를 판매 혹은 매입한 량에 비례하여 비용을 배분하게 된다. 이는 판매 사업자의 불균형량에 비례하여 배분하지 않는 것을 의미한다. BRP의 불균형 발생 유무나 불균형량의 규모에 관계없이 비용을 부과하다보니 적극적인 계통균형 유지에 대한 BRP의 참여를 이끌어 낼 인센티브가 부족하다.[4]

에너지 시장에서 PXFC 시장 개념이 처음 도입 된 것은 소규모의 주거용 고객과 대규모의 철강 회사 고객의 동일한 수급균형 비용이 청구된다는 것에서부터 시작하였다. 이를 토대로 비용 인과 원칙에 따라 불

균형 비용을 비용 유발자가 부담하는 것을 원칙으로 하는 방법으로 제안되었다.[8]

기존 전력 시장과 다르게 PXFC 시장에서 DSO는 최적의 수급균형을 위해 에너지 입찰과 밴드 예비력 구입 등에 신중을 기할 것이며, 이는 TSO가 DSO에게 수급균형에 대한 책임과 비용 부담을 전가하여, TSO에게 부담되는 과도한 계통 운영에 대한 어려움을 다수의 DSO에게 분산하는 효과를 갖게 된다.[5]

TSO는 수급균형의 의무를 DSO에게 분권화 한다. 이로 인해 DSO는 수급균형의 의무를 이행하기 위해 밴드 형태의 예비력을 TSO에게 구입하여 수급균형을 유지해야 한다. 본 연구에서는 예비력과 같은 역할을 수행할 수 있는 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System)를 DSO의 수급균형의 역할로 사용 하는 것을 상정한다. 에너지저장장치는 신재생에너지의 한 종류로서 전력을 저장하고, 충전 및 방전 할 수 있는 시스템을 의미한다. DSO는 예비력 밴드만을 이용해 수급 균형을 달성할 수도 있지만, 에너지저장장치의 충·방전 구입 단가가 밴드의 단가보다 저렴하다면 DSO는 에너지저장장치를 이용하여 수급 불균형을 해소하게 될 것이다. DSO는 에너지저장장치를 이용해 즉각적인 예비력으로 사용할 수 있고, 에너지저장장치를 개별 보유하면 소요되는 투자, 운용비용을 줄일 수 있어 에너지저장장치 구입 단가가 적정하다면 DSO에게 경제적인 수급균형책이 될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 에너지저장장치를 DSO의 수급균형책의 옵션으로 사용하는 것을 가정하였다.

본 연구의 시뮬레이션에서는 DSO를 배전선로 1회선을 운영하는 관리

자로 가정하고, 다수의 DSO와 에너지저장장치 사업자가 계통에 연계 된 것으로 설정하였다. 이 때 DSO의 수요·발전 데이터는 난수 생성을 통해 매 시간마다 데이터를 만들었으며, 이를 이용하여 DSO가 발생시키는 불균형량을 산출하였다. DSO는 수급균형의 안정성을 높이기 위해 예비력 밴드는 일정 비율을 최소 구매하는 것으로 가정하고, 나머지 불균형량은 밴드, 에너지저장장치, 페널티 지불 중 가장 저렴한 것을 선택하는 것을 상황으로 상정하였다.

시뮬레이션에서는 에너지저장장치 구입 단가와 밴드 최소 구입률은 변수로 두어 각 케이스마다 1년간의 DSO의 예비력 구입 최소금액과 에너지저장장치 옵션에 대한 수요를 결과로 산출하였다. DSO의 예비력 구입 최소금액의 산출을 위한 시뮬레이션은 그리디 알고리즘을 기반으로 코드를 작성하였다. 하지만 이는 DSO의 입장에서만 에너지저장장치 옵션 이용에 대한 효과를 분석한 것이다 보니, 에너지저장장치 사업자의 입장에서 현금흐름할인법을 적용해 에너지저장장치 사업이 수익성이 발생하는지를 추가로 확인하였다. 이를 기반으로 DSO의 에너지저장장치 수요가 발생하고, 에너지저장장치 사업자의 수익성이 발생하는, 두 가지 상황이 모두 만족하는 경우에서만 DSO의 에너지저장장치 옵션의 가치를 시뮬레이션을 통해 산정하였다.

제 2절 논문의 개요 및 구성

본 연구에서는 DSO의 수급균형책으로 에너지저장장치 예비력 옵션을 사용하고, 이때 이 옵션의 가치에 대하여 시뮬레이션을 통해 확인한다. 시뮬레이션은 에너지저장장치 구입 단가와 밴드 최소 구입률 별로 DSO의 예비력 구입 금액이 최소가 되는 상황을 찾고, 에너지저장장치 사업자의 입장에서 수익성을 검증한 후, DSO의 에너지저장장치 옵션에 대한 가치를 구하는 것을 목적으로 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다.

제 1장에서는 본 논문의 배경 및 내용 그리고 논문의 구성 및 개요에 대해 살펴본다.

제 2장에서는 전력 시장 구조 동향, 전력 시장의 수급 균형 비용, 투자 가치 평가법에 대한 조사 결과를 소개한다.

제 3장에서는 DSO가 수급균형을 이루기 위해 사용하는 예비력을 설명하고, 이를 이용한 DSO의 예비력 비용함수에 대해서 설명한다.

제 4장에서는 시뮬레이션에 사용하는 데이터, 시뮬레이션을 구현하는 그리디 알고리즘에 대해 설명하고, DSO의 에너지저장장치 옵션 가치 산정을 위한 관련 시뮬레이션 결과를 설명할 것이다.

제 5장에서는 본 연구의 연구사항을 종합 정리하고, 향후 연구사항을 제시하였다.

제 2 장 전력 시장과 투자가치 평가법

제 1절 전력 시장 구조 동향

1. 전력 시장의 자유화

전력산업은 망을 기반으로 한 자연 독점의 형태로 오랜 시간 운영되어 왔다. 이러한 독점의 형태는 민간독점과 국가독점의 형태가 대표적이다. 민간독점의 경우는 미국과 일본 같이 특정 지역을 기반으로 독점하여, 정부의 규제에 대해 통제를 받는 방식이다. 국가 독점의 경우는 영국, 프랑스, 그리고 우리나라의 한국전력공사와 같이 국영 전력회사가 한 나라의 전체 네트워크 산업을 독점하여 운영하는 방식이다. 이러한 독점 산업은 발전⇒송·변전⇒배전⇒판매 까지 한 회사가 통합으로 운영하는 수직·통합적인 방식으로 운영되어 왔다. 하지만 이러한 독점구조도 1980년대 영국에서부터 에너지 자유화가 본격화 되었고, 현재 전세계의 많은 국가들이 에너지 시장 자유화를 다양한 단계와 형태로 운영 중이다. 대표적으로 일본의 경우 2016년도 4월에 소매 시장을 전면 자유화 하였다. 이러한 전력 시장 소매 경쟁은 에너지 효율을 높이기 위한 것이 주된 목적이었다. 우리나라 또한 분산형전원의 증가로 인해 앞으로 전력 시장과 제도 변화의 필요성이 높아질 것이다. 특히 이러한 제도 변화 중에서도 계통의 효율적인 운영을 위해 전력 시스템의 분권화에 대한 이야기가 논의되고 있다.[1]

2. 배전계통운영자의 필요성

분산형전원의 폭발 적인 증가는 특정 배전선로의 과전압 현상 및 선로 열적허용용량 위반으로 인해 선로 단선, 전력기기 소손과 같은 배전계통 운영 문제를 일으킬 수 있다 [2]. 그래서 전력 회사는 위와 같은 문제를 회피하기 위해 분산형전원 연계 시 "Fit and forget" 방식을 사용하고 있다. 이는 출력이 일정한 발전원에는 합리적이지만, 태양광 발전과 같이 간헐적인 출력 특성을 갖는 발전원에는 비효율적인 방식이다. 그러나 전력 계통에 안정성을 확보하기 위해 상대적으로 적은 빈도로 발생하는 최악의 상황을 상정하고 분산형전원 연계를 허가 하고 있다. 이렇다보니 더 많은 양의 분산형전원을 연계할 수 있음에도 불구하고 연계를 제한하고 있는 상황이다. 앞으로 더 많은 분산형전원을 계통에 연계하기 위해 미래의 전력계통은 그림 2-1과 같은 ANM(Active Network Management)방식을 채택할 것이다. ANM 방식의 주요 기능 중 하나는 배전계통운영자(DSO, Distribution System Operator)가 신재생에너지의 출력을 실시간으로 제어하는 것이다. 이러한 방법을 통해 계통 운영의 유연성을 확보하고, 기저 발전원의 사용량을 줄이는 장점까지 나타날 것이다. 그러나 이에선 제도적 개선이 불가피하다. 더불어 위와 같은 "Fit and forget" 방식으로는 분산형전원을 배전계통에 한정적으로 밖에 수용할 수 없기 때문에, 수십 만개의 분산형전원을 많은 수의 DSO가 개별 분산형전원의 출력을 제어하여 배전 계통을 운영하는 형태로 변화해야 할 것이다. [3]

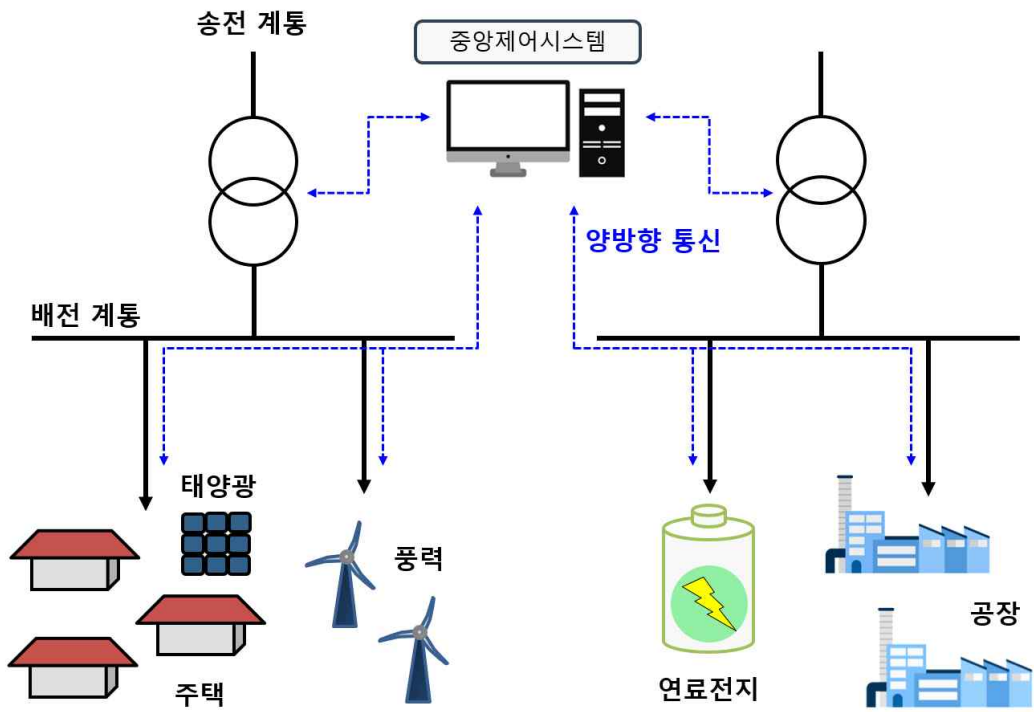


그림 2-1. Active Network Management 개요

제 2절 전력 시장의 수급 균형 비용

1. 기존의 전력 도매 시장

기존 전력 도매 시장에서는 판매 사업자가 하루 전 전력 수요를 예측하여 에너지를 입찰하고, 발전 사업자는 에너지를 판매한다. 이 때 시스템 운영자는 계통 운영 시 발생할 수 있는 불균형을 해소하기 위해 보조 서비스 시장을 이용하여 예비력을 사전에 확보한다. 이 때 사용 되는 비용이 수급균형 비용이다. 수급균형 비용은 수급균형 에너지 비용, 수급균형 용량 비용 2가지로 나누어 볼 수 있다. 수급균형 에너지 비용 할당의 경우 계통 밸런싱의 책임을 갖고 있는 발전사업자, 판매사업자와 같은 BRP(Balancing Responsible Party)가 불균형이 발생하게 되면 불균형량에 해당하는 그에 대한 페널티 비용을 지불하는 형태이다. 즉 수급균형 에너지 비용의 할당은 비용 유발자 원칙에 근거한다고 볼 수 있다. 다음으로 수급균형 용량 비용의 경우는 계통 운영자가 비용 사회화 원칙에 따라 BRP가 에너지를 판매 혹은 매입한 량에 비례하여 비용을 배분하게 된다. 이는 판매 사업자의 불균형량에 비례하여 배분하지 않는 것을 의미한다. BRP의 불균형 발생 유무나 불균형량의 규모에 관계없이 비용을 부과하다보니 적극적인 계통 균형 유지에 대한 BRP의 참여를 이끌어 낼 인센티브가 부족하다. 그림 2-2는 위에서 설명한 기존 도매 시장의 수급균형 비용 할당 방식을 나타낸다.[4]

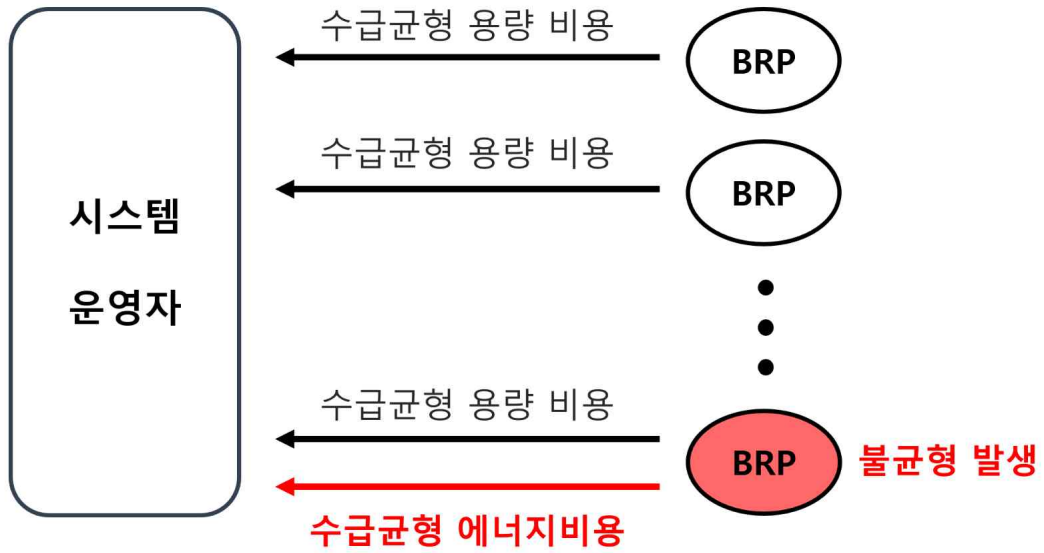


그림 2-2. 기존 도매 시장의 수급균형 비용 할당[4]

2. PXFC 시장

에너지 시장에서 PXFC 시장 개념이 처음 도입 된 것은 소규모의 주거용 고객과 대규모의 철강 회사 고객의 동일한 수급균형 비용이 청구된다는 것에서부터 시작하였다. 비용 인과 원칙에 따라 불균형 비용을 비용 유발자가 부담하는 것을 원칙으로 하는 방법으로 제안되었다.[8]

PXFC 밴드 계약은 TSO와 DSO간의 불균형에 대한 사전 계약이다. DSO는 TSO에게 밴드 가격[₩/MW]과 밴드 입찰 용량[MW]에 따라 사전에 비용을 지불한다. 이 때 DSO의 실제 에너지 사용량이 밴드를 위반하지 않는다면 수급균형을 이루었다고 볼 수 있다.[5]

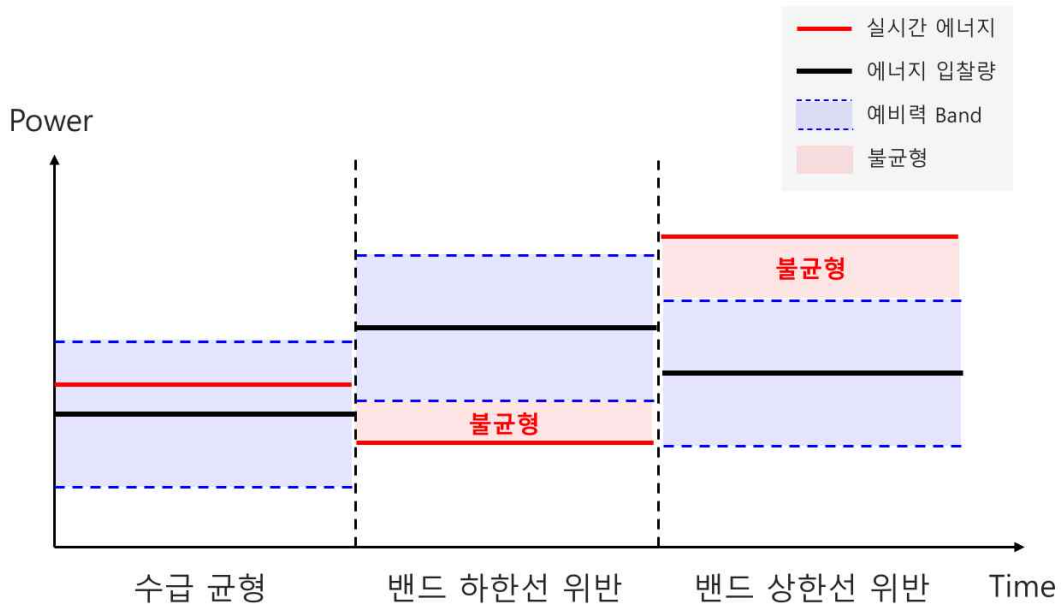


그림 2-3. PXFC 밴드 계약의 개념도 [5]

그림 2-3에서 볼 수 있듯, DSO는 실시간 에너지가 에너지 입찰량에서 예비력 밴드의 상·하한 범위내에 위치하도록 에너지 시장에 참여한다. 만약 에너지의 상·하한 범위를 위반할 시 DSO는 TSO에게 수급 불균형량에 대한 페널티 비용을 지불해야 하며, 이 비용은 예비력 밴드 구입비용보다 훨씬 큰 비용이 될 것이다. 그렇다보니 DSO의 수급균형 참여를 적극적으로 유도할 수 있다. 하지만, 페널티 단가가 과도해지면 DSO의 보수적인 에너지 입찰을 유도하게 되므로 이는 사회적 비용 낭비로 이어지게 된다. 반대로 페널티 단가가 과소해지면 DSO는 예비력 구입을 통한 수급 균형을 유지하는 것 보다 페널티 비용을 지불하는 것이 더 경제적이므로 이는 계통의 심각한 불균형을 야기하게 된다.

이러한 PXFC 시장에서 DSO는 최적의 수급균형을 위해 에너지 입찰

과 밴드 예비력 구입 등에 신중을 기할 것이며, 이는 TSO가 DSO에게
 수급균형에 대한 책임과 비용 부담을 전가하여, TSO에게 부담되는 과도
 한 계통 운영에 대한 어려움을 다수의 DSO에게 분산하는 효과를 갖게
 된다. 그림 2-4는 PXFC 시장의 수급균형 비용 할당 방식을 나타낸
 다.[5]

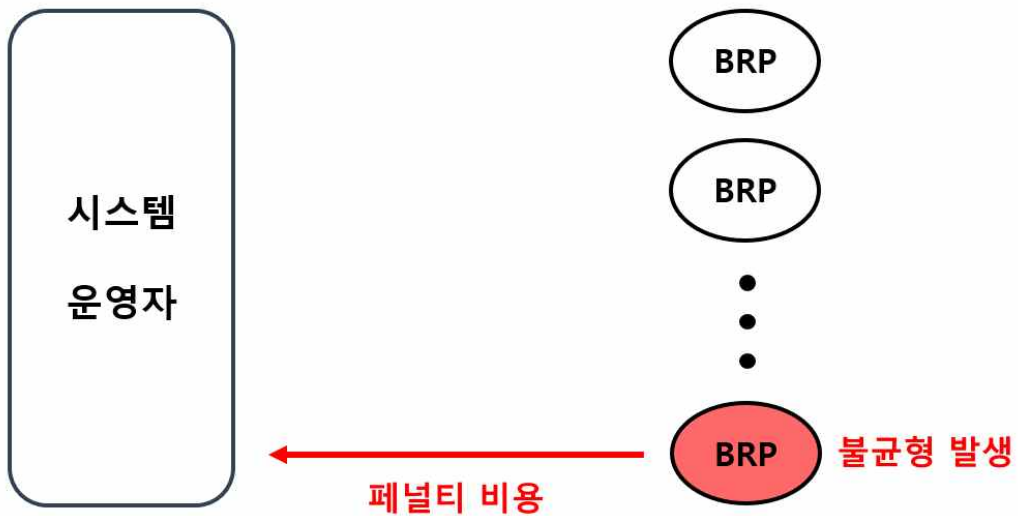


그림 2-4. PXFC 시장의 수급균형 비용 할당 [5]

제 3절 투자가치 평가법

1. 현금흐름할인법(Discounted Cash Flow)

보통 기업에서 투자나 프로젝트 착수 전에 해당 사업의 미래 가치를 현재 기준으로 산정하는 기법을 현금흐름할인법이라 한다. 이 기법은 사업의 미래의 예측된 현금 흐름을 할인율을 적용하여 현재의 가치로 환산한 후, 해당 사업의 투자 비용과의 차액 비교를 통해 투자 가능성을 판별하게 된다. 현금흐름할인법에서 대표적으로 사용하는 순현재가치법(NPV, Net Present Value)의 계산식은 그림 2-5와 같다. 이러한 순현재가치가 0보다 크게 되면 사업 투자의 타당성이 있다고 본다.[9]

NPV = \sum 미래 현금흐름의 현재가치 - 투자비 현재가치

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+r)^t}$$

- CF_t : t시점에서의 현금흐름
- I_t : t시점에서의 투자비
- r : 사회적 할인율

그림 2-5. 순현재가치법 계산식

2. 실물옵션분석법

실물옵션이란 금융상품에서 옵션의 개념에서 착안하여 만들어졌으며, 금융상품이 아닌 프로젝트나 실물 자산의 가치를 산정하기 위해 사용한다. 여기서 옵션은 정해진 기간 동안에 기초자산을 미리 계약한 옵션 금액으로 구입하거나 판매할 수 있는 권리를 의미한다. 옵션 만기일 전에 기초자산을 판매하는 것을 풋 옵션(Put Option), 옵션 만기일 전에 기초자산을 구입하는 것을 콜 옵션(Call Option)이라 한다. 옵션의 행사를 만기일내에 아무 때나 할 수 있는 것을 아메리칸 옵션이라 부르며, 만기일에만 행사 할 수 있는 것을 유러피안 옵션이라고 부른다. 옵션은 계약이행을 행사할 수 있는 권리이며, 옵션을 행사하지 않는 것은 옵션 구매자의 선택이다.[10]

앞서 이야기한 현금흐름할인법의 경우 해당 프로젝트에 대한 사업 가치를 미래의 변수를 고려하지 않은 채 판단한다는 한계점이 존재한다. 이와 반대로 실물옵션분석법의 경우는 프로젝트 진행 중 발생할 수 있는 변수들을 고려하여 프로젝트의 가치를 산정하기 때문에 조금 더 정확한 가치평가법이라고 볼 수 있다. 이러한 유연성이 반영된 실물옵션분석법의 가치에서 기존의 현금흐름할인법의 가치를 빼 값이 옵션 가치, 즉 옵션 프리미엄이라고 볼 수 있다.[9]

본 연구에서는 DSO가 아메리칸 콜 옵션의 형태를 갖는 에너지저장장치 옵션을 구입하게 된다. DSO는 매 시간마다 에너지저장장치 옵션을 구입할 수 있으며 만기 시점은 에너지 저장장치의 설비 수명으로 보았

다. DSO는 매 시간마다 밴드, 페널티 단가와 에너지저장장치 옵션의 행사가격을 비교하게 된다. 이 때 에너지저장장치 옵션의 행사가격이 밴드, 페널티 단가보다 저렴하게 되면, DSO는 옵션을 행사하여 차액만큼의 이익 실현을 이루게 된다. 만약 반대의 경우라면 DSO는 옵션을 행사하지 않는다.

제 3 장 DSO의 수급균형

제 1절 DSO의 예비력

앞서 2.2.2장에서 얘기했듯이 DSO는 수급균형의 의무를 이행하기 위해 밴드 형태의 예비력을 TSO에게 구입하여 수급균형을 유지해야 한다. 본 연구에서는 예비력과 같은 역할을 수행할 수 있는 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System)를 DSO의 수급균형의 역할로 사용하는 것을 상정한다. 에너지저장장치는 신재생에너지의 한 종류로서 전력을 저장하고, 충전 및 방전 할 수 있는 시스템을 의미한다. 전력변환시스템(PCS, Power Conditioning System)과 배터리가 주요 자재로 구성되어 있다.

이러한 에너지저장장치 사업은 현재는 특정 고객이 자신의 전력 수요 관리를 위해 사용하는 경우가 많다. 보통 경부하시에 전력을 충전하고, 중부하시에 전력을 방전하여 피크를 상쇄하는 방식이다. 다른 용도로는 송전급에서 주파수 조정용으로 에너지저장장치를 사용한다. 이는 기존의 주파수 조정을 위한 발전소의 발전기보다 응답 속도가 빠른 에너지저장장치를 계통의 주파수 유지를 위해 사용하는 형태이다.

향후 PXFC 시장에서는 그림 3-1과 같이 많은 수의 DSO가 각자의 관할 계통에 수급균형을 위해 힘 쓸 것이다. 이 때 예비력 밴드만을 이용해 수급 균형을 달성 할 수도 있지만, 에너지저장장치의 충·방전 구입

단가가 밴드 구입 단가보다 저렴하다면 DSO는 에너지저장장치를 이용하여 수급 불균형을 해소하게 될 것이다. DSO는 에너지저장장치를 이용해 즉각적인 예비력으로 사용을 이룰 수 있고, 에너지저장장치를 개별 보유하면 소요되는 투자·운영비를 줄일 수 있어 에너지저장장치 구입 단가가 적정하다면 DSO에게 경제적인 방식이 될 수 있다.

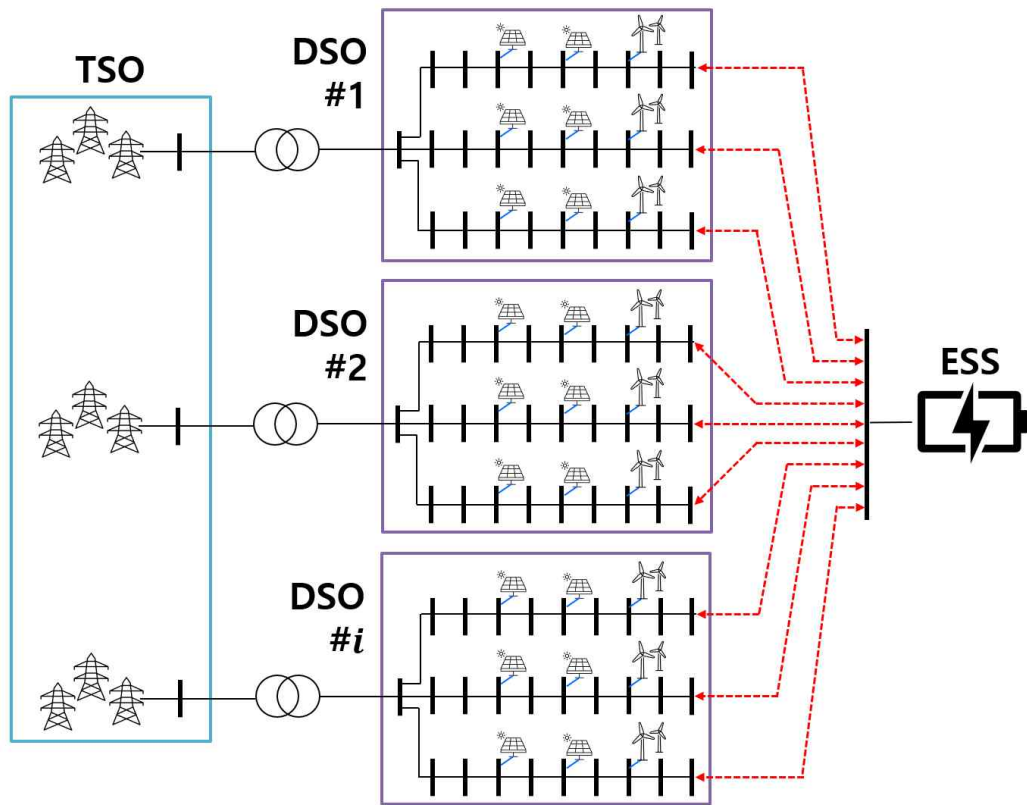


그림 3-1. DSO의 에너지저장장치 예비력 이용

이러한 상황이라면 DSO는 수급균형을 해소하는데 밴드 구입, 페널티 지불에 추가로 에너지저장장치를 하나의 옵션으로 사용할 수 있다. 앞서

옵션의 개념을 설명했지만, 옵션은 기초 자산을 구입하거나 판매할 수 있는 권리이다. 그림 3-2와 같이 에너지저장장치 옵션의 옵션 계약 기간을 설비 수명으로 보고, 설비 수명내에서 시간 단위로 총·방전량을 DSO가 구입할 수 있다면 이는 아메리칸 콜 옵션의 형태로 볼 수 있다.

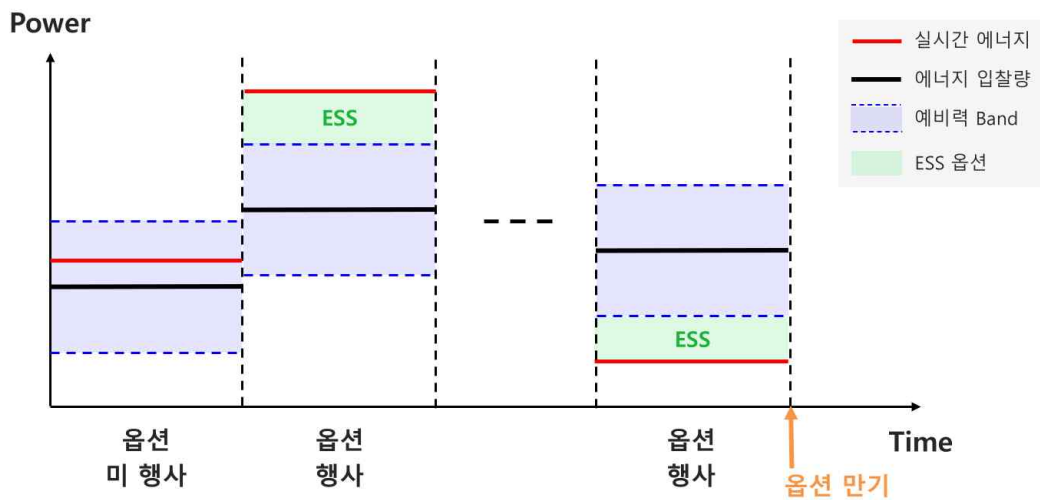


그림 3-2. DSO의 에너지저장장치 옵션 행사

제 2절 DSO의 비용 함수

위 3.1절의 내용에서 보듯이, DSO는 TSO와의 수급균형을 위해 아래의 세 가지 항목을 사용할 수 있다.

- ① 밴드 구매
- ② 에너지저장장치 활용
- ③ 페널티 지불

밴드는 DSO가 PXFC 시장이 마감되기 전에 입찰가를 결정하여 구입량을 입찰하고, 이 때 DSO는 밴드 단가를 사전에 알 수 없다. TSO는 이러한 입찰된 자료를 토대로 수급 불균형에 따른 페널티 비용, 밴드의 판매 수익, 예비력 구입 비용 등 수급균형 비용에 따라 장 마감 후에 밴드 판매 단가를 공개한다. 따라서 DSO는 수요를 예측하고, 불균형량을 추정하여 최적의 밴드 입찰량을 결정해야 할 것이다. [5]

에너지저장장치는 DSO가 제3의 시장참여자인 에너지저장장치 사업자에게 옵션의 형태로 에너지저장장치 사용 계약을 하는 것으로 가정한다. 에너지저장장치 사업자는 DSO의 수요를 높이고, 가격경쟁력을 높이기 위해 밴드 구입 단가보다 저렴한 가격을 제시하려고 노력할 것이다. 본 연구에서는 에너지저장장치의 구입 단가는 옵션 계약 만기일까지 일정한 단가를 유지한다고 가정하였다.

마지막으로 불균형량에 대한 페널티 비용 지불은 계통 불균형에 대한 비용 부과로 TSO는 계통 불균형의 책임을 DSO에게 분산시켜 불균형을 회피해야 할 것이다. TSO는 DSO의 적극적인 수급균형 참여를 위해 페널티 단가를 밴드, 에너지저장장치 단가 및 에너지 가격 보다 높은 일정 수준으로 설정할 것이다.

위의 세 가지 옵션에 대하여 DSO가 수급균형을 위해 사용하는 비용을 함수로 표현하면 식 3-1과 같다. 식 3-1의 각 변수의 정의는 표 3-1에 정리하였다.

$$f_{\text{cost}} = \lambda_{ESS}P_{ESS} + 2\lambda_{Band}P_{Band} + \lambda_{Penalty}P_{Penalty} \quad (3-1)$$

표 3-1. 각 변수의 정의

항목	내용	단위
λ_{ESS}	에너지저장장치 옵션 구입 단가	[원/kWh]
P_{ESS}	에너지저장장치 옵션 구입량	[kWh]
λ_{Band}	밴드 구입 단가	[원/kW]
$2P_{Band}$	밴드 구입량 (밴드 상·하한 구입으로 2배)	[kW]
$\lambda_{penalty}$	페널티 비용 단가	[원/kWh]
$P_{penalty}$	불균형 발생량	[kWh]

제 4 장 에너지저장장치 옵션 가치 분석

본 장에서는 앞서 이야기한 DSO가 수급균형을 달성하기 위해, 밴드뿐만 아니라 에너지저장장치 사업자를 이용하는 시나리오를 다양한 데이터를 기반으로 상정한다. 이를 앞서 언급한 식 3-1를 이용하여, DSO의 입장에서 바라본 에너지저장장치의 옵션 가치를 구해본다.

제 1절 시뮬레이션 데이터

시뮬레이션에서 사용하는 데이터의 종류는 수요, 태양광 발전량, 풍력 발전량 3가지이다. 이 중 수요 데이터는 한국전력거래소의 전력수요 예측 자료 값을 사용하였으며, 이를 해당 날짜의 피크부하 대비 각 시간대별 부하율로 나타내었다. 자료의 날짜는 2021년 7월 19일이다. 해당 수요 데이터는 그림 4-1과 같다.



그림 4-1. 피크부하 대비 시간대별 부하율 [11]

다음으로 태양광 발전량과 풍력 발전량의 경우 핀란드의 송전 시스템 운영자인 FINGRID사의 자료를 사용하였다. 두 데이터는 모두 매 시간마다 예측한 발전 용량을 제공하며, 시뮬레이션에서는 발전 설비 용량 대비 발전율을 사용하였다. 자료의 날짜는 수요데이터와 동일하게 2021년 7월 19일 이다. 해당 태양광, 풍력 발전관련 데이터는 그림 4-2, 4-3과 같다.

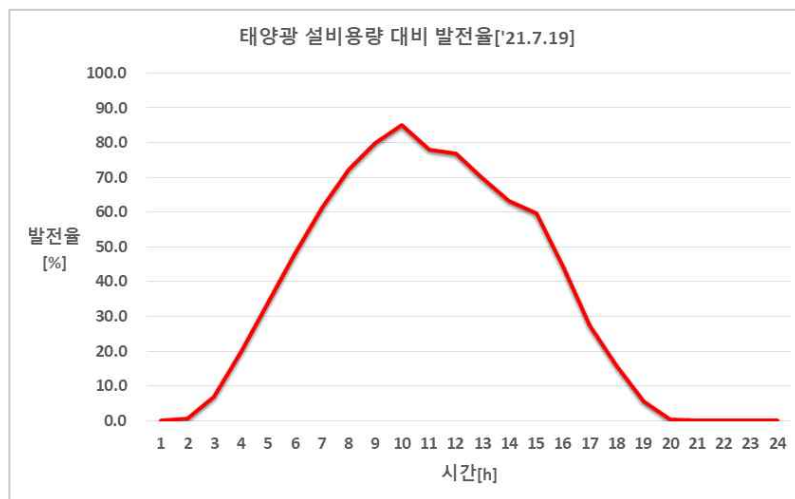


그림 4-2. 태양광 설비용량 대비 시간대별 발전율 [12]

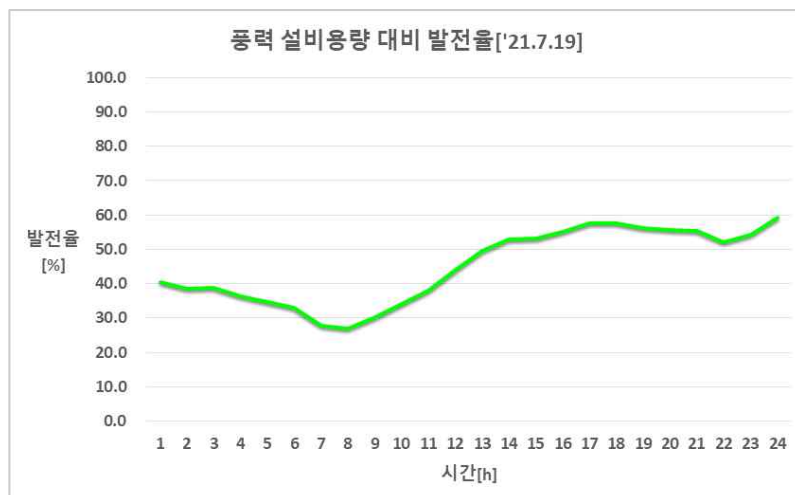


그림 4-3. 풍력 설비용량 대비 시간대별 발전율 [12]

위에서 얻은 수요, 태양광 발전, 풍력 발전 데이터에 대해서 난수 생성을 통해 2020년, 366일, 8,784시간에 대해서 각 항목 별로 8,784개의 난수 값을 생성한다. 이 때 수요는 $\pm 5\%$ 범위 내에서 난수를 생성하고, 상대적으로 변동성이 큰 태양광, 풍력 발전은 $\pm 10\%$ 범위 내에서 그림 4-4, 4-5, 4-6과 같이 난수를 생성하였다. 시뮬레이션에서는 이 값을 실제 데이터와 하루 전 예측 값으로 가정하고 사용하였다.

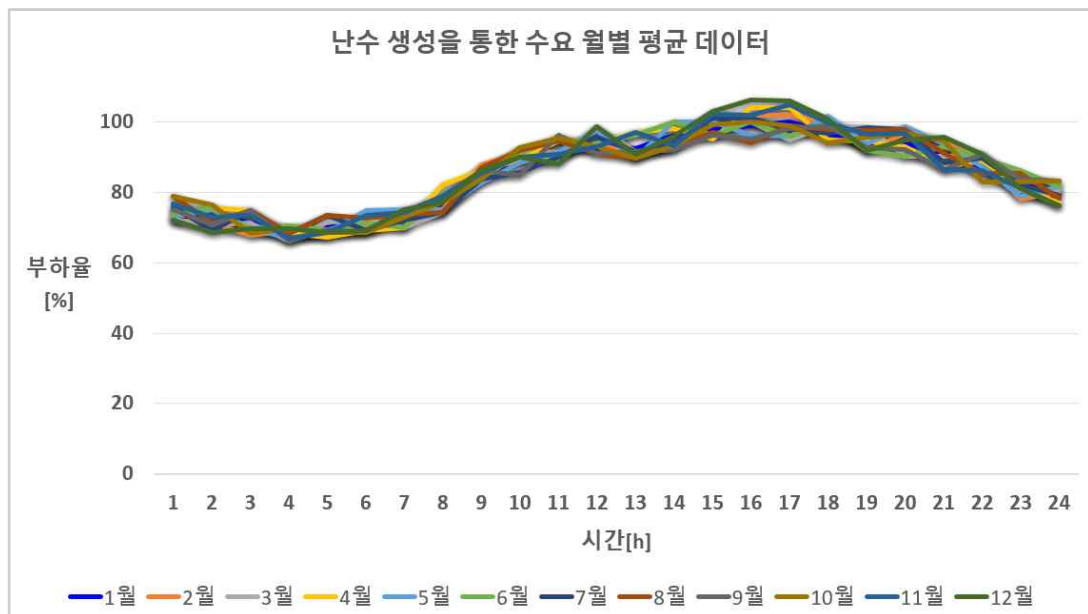


그림 4-4. 난수 생성을 통한 수요 데이터

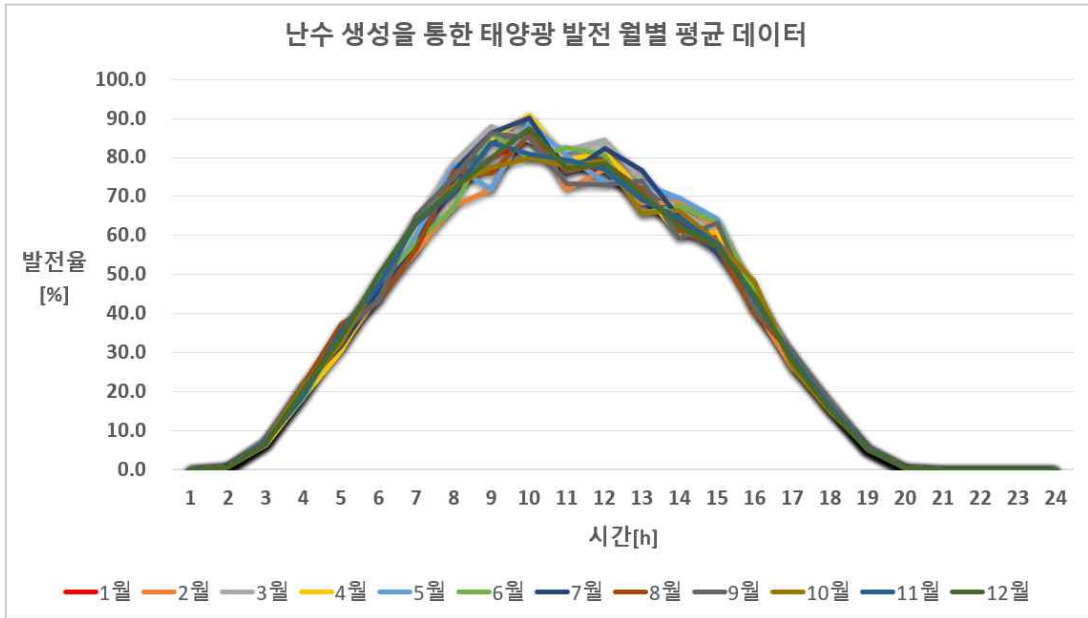


그림 4-5. 난수 생성을 통한 태양광 발전 데이터

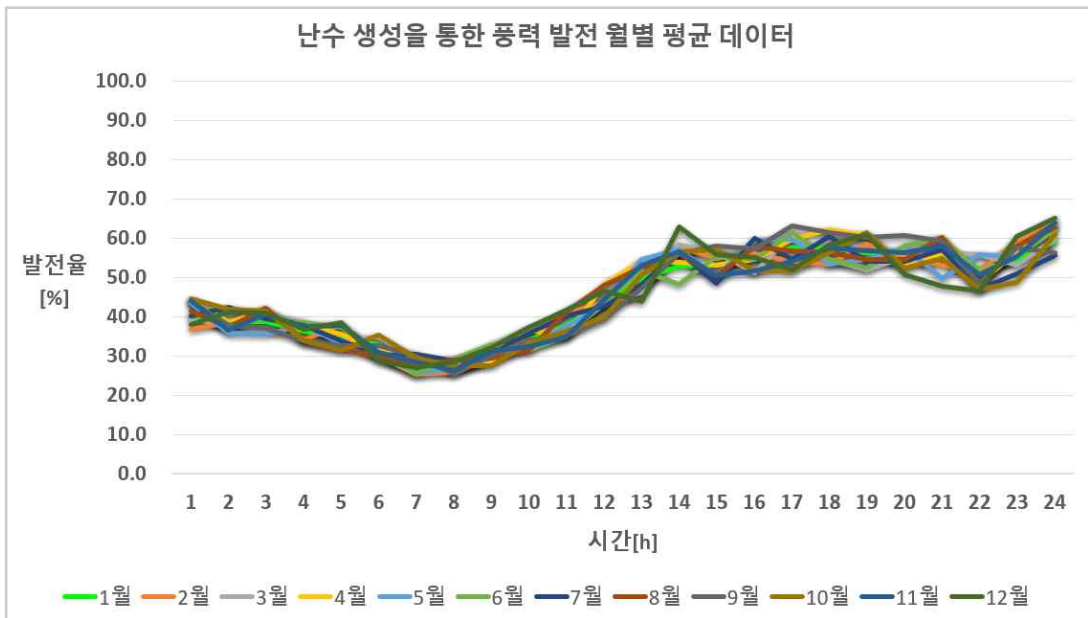


그림 4-6. 난수 생성을 통한 풍력 발전 데이터

제 2절 시뮬레이션 시나리오

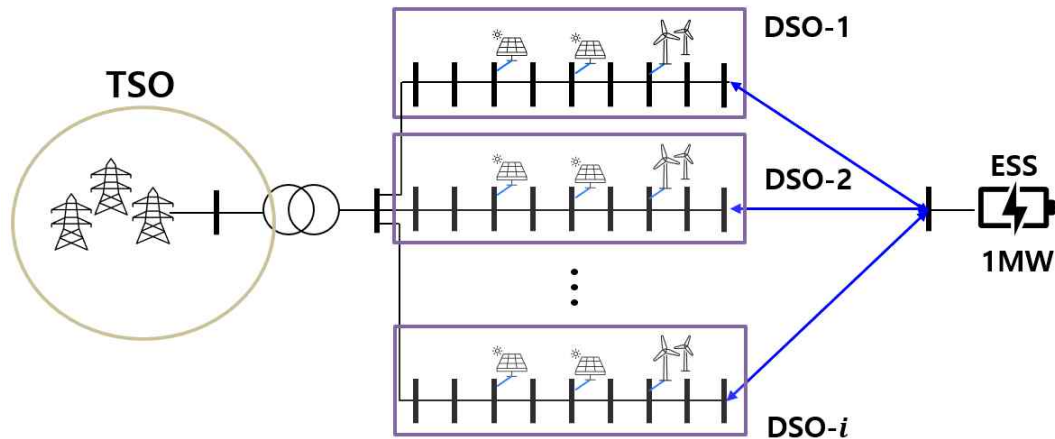


그림 4-7. 시뮬레이션 시나리오 개요

시뮬레이션은 그림 4-7과 같이 DSO를 배전선로 1회선을 운영하는 관리자로 가정하고, 배전선로에 피크 부하 8MW, 태양광 발전 3MW, 풍력 발전 2MW가 연계 된 것으로 한다. 이 때 에너지저장장치 사업자는 1MW의 설비용량을 갖춘 것으로 한다. 앞서 4.1절의 2020년 1년간의 데이터 값을 이용하여 순 부하 값을 8,784개의 매 시간마다 계산한다.

아래의 그림 4-8은 데이터 값 중 특정 날짜의 순 부하를 그래프로 표현한 것이다. 실제 순부하와 예측 순부하간의 차이인 불균형량은 그림 4-9와 같다.

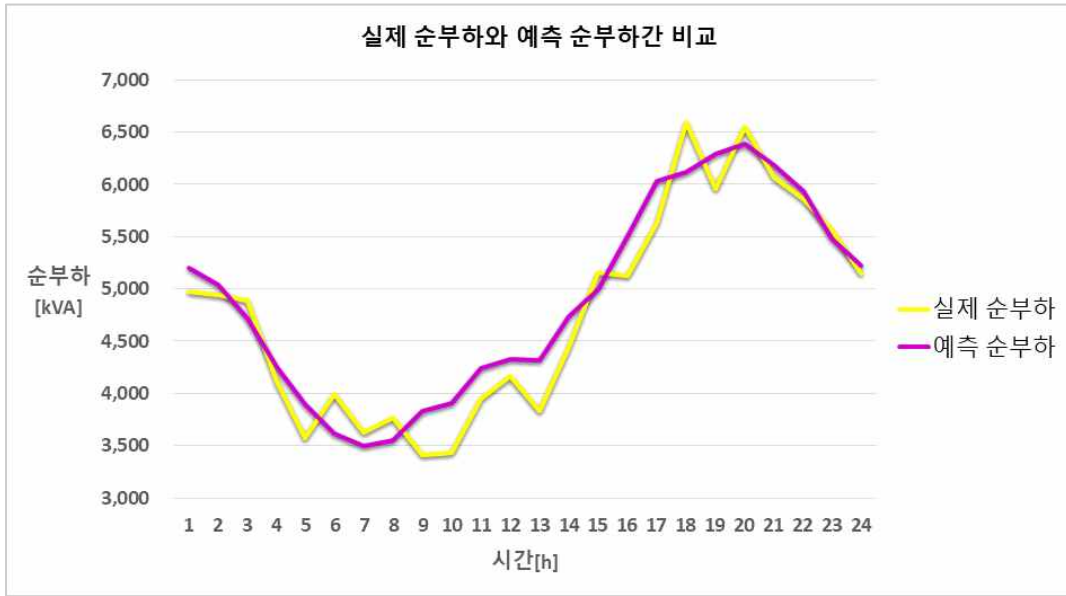


그림 4-8. 실제 순부하와 예측 순부하간 비교

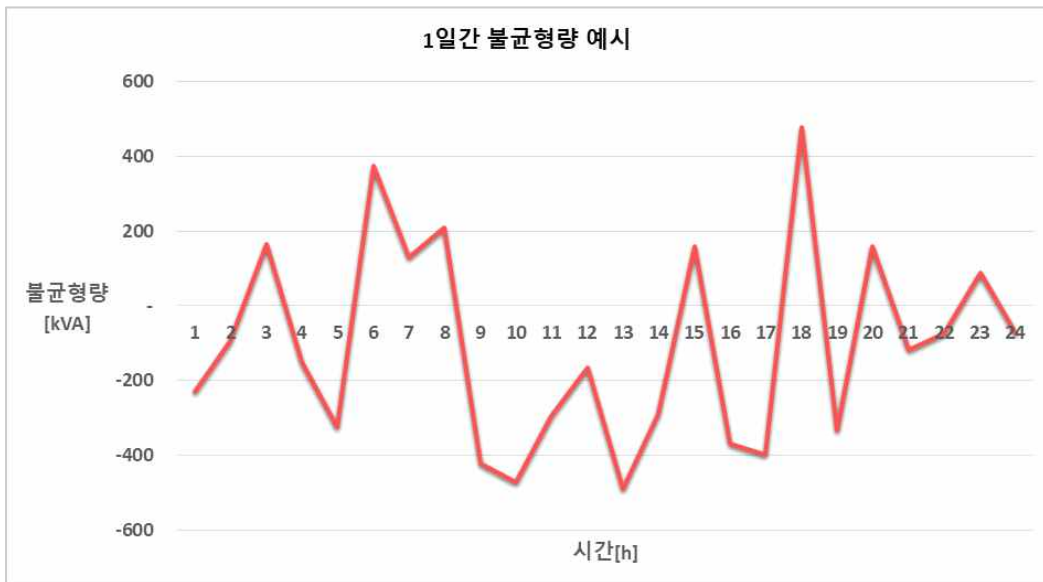


그림 4-9. 일간 불균형량 예시

배전선로 1회선에 대한 366일간의 일 평균 불균형량은 202.5[kVA]로 계산되었다. 이는 불균형량의 절대 값에 대한 평균이다. 시뮬레이션에서 DSO는 이러한 불균형량을 밴드, 에너지저장장치 옵션, 페널티 지불로 해결할 것이다. 다수의 DSO에서 불균형량이 일시에 발생하더라도 양의 값을 갖는 불균형량(예측 순부하 과다)과 음의 값을 갖는 불균형량(예측 순부하 부족)이 각 DSO마다 불규칙하게 발생하게 될 것이다. 이 경우 어떤 DSO는 에너지저장장치 사업자에게 충전을 요청할 것이고, 어떤 DSO는 에너지저장장치 사업자에게 방전을 요청하게 될 것이다. 이는 에너지저장장치 사업자의 부하가 상쇄되는 상황이 상당 수 존재할 것임을 예상할 수 있다. 시뮬레이션에서 에너지저장장치 사업자의 설비 규모는 1MW로 하였다. 이에 따라 5개의 DSO가 자신들의 일평균 불균형량의 합과 비슷한 규모의 에너지저장장치 옵션을 계약한 것으로 설정하였다.

시뮬레이션에서 DSO는 수급 균형을 달성하기 위해 밴드, 에너지저장장치, 불균형 페널티 중 하나를 선택한다. 이 때 DSO는 배전계통운영자로서 최적의 수급 균형을 달성하면서도, 경제적인 계통 운영을 목표로 해야 한다. 그렇기 때문에 지나치게 안정 지향적으로 과도한 예비력을 확보한다면 비경제적인 계통운영이 되기 때문에 최소한의 금액으로 적절한 예비력 확보를 이루려 노력 할 것이다. 위 사항을 시뮬레이션에서 사용할 식 4-1로 표현하였다.

$$\min \sum_{t=1}^{8784} [\lambda_{ESS} P_{ESS}^t + 2\lambda_{Band}^t P_{Band}^t + \lambda_{Penalty} P_{Penalty}^t] \quad (4-1)$$

위 식 4-1에 따라 DSO는 2020년의 8,784개의 매시간 마다 계산된 불균형 량에 대하여 밴드, 에너지저장장치, 불균형 페널티 중 가장 저렴한 해결책을 그림 4-10과 같이 선택한다. 에너지저장장치의 구입 단가는 시뮬레이션에서 변수로 설정하였다. 밴드 가격은 FINGRID의 하루 전 에너지 가격 자료와 동일하게 설정하였다. 이는 밴드 구입 단가가 에너지 가격보다 높게 되면 DSO의 밴드 구입을 유도할 요인이 줄어들게 되는 것을 고려하였다.[8] 다음으로 페널티 단가는 DSO가 수급균형에 적극적으로 참여할 수 있도록 정전비용에 준하도록 한다. 이 때 정전비용은 3,243원/kWh를 사용하였다.[13] 이를 통해 연간 DSO의 수급균형 비용이 최소가 되는 값을 구하고, 이 때 에너지저장장치 사업의 수요 또한 구한다.

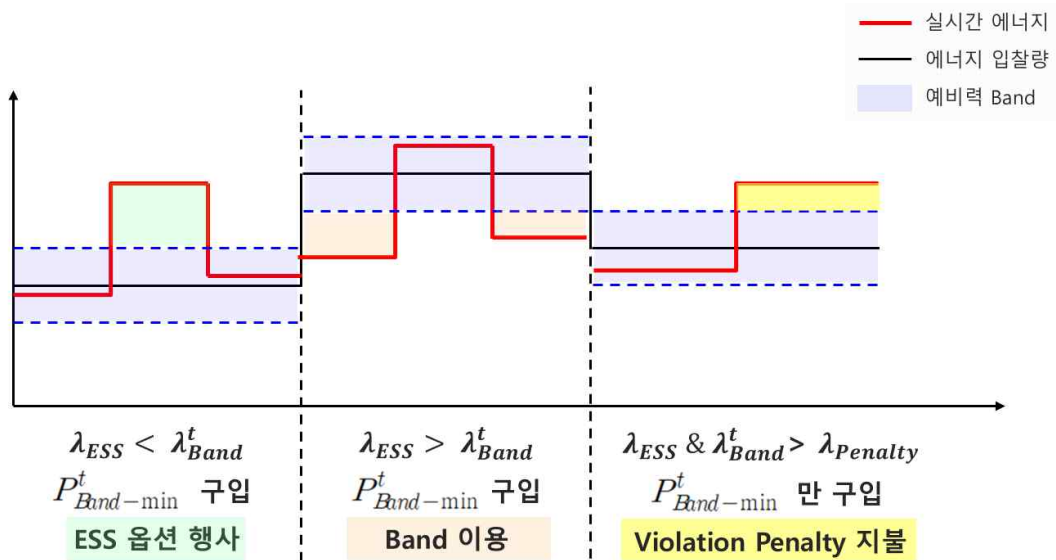


그림 4-10. 수급균형책 단가 비교에 따른 예비력 선택

시뮬레이션의 제약조건으로는 두 가지를 설정하였다. 첫째는 매시간마다 발생한 불균형 량이 밴드, 에너지저장장치, 불균형 페널티의 합과 동일하다는 것이다. 이 내용은 아래 식 4-2로 정리하였다.

$$P_{ESS}^t + P_{Band}^t + P_{penalty}^t = P_{Imbalance}^t (= |P_{Real-time}^t - P_{Bid}^t|) \quad (4-2)$$

두 번째 조건으로 DSO는 불균형 량 해소를 위해 최소한의 밴드를 매시간 일정량 이상을 구입한다는 것을 설정하였다. DSO는 수급 균형을 하루 전에 예측하기 때문에, 정확한 불균형 량은 사전에 인지 할 수가 없다. 이러한 불확실한 상황 하에서 예비력을 여유 있게 확보하지 않으면 수급 불균형량이 발생할 수 있고, 이 때 지불하는 페널티 단가는 밴드, 에너지저장장치 단가에 비해 너무 크기 때문에, DSO는 경제적인 계통운영을 위해서도 예비력을 어느 정도 여유 있게 확보해야 한다. 이를 고려하여 DSO는 매 시간마다 밴드 구입량을 순 부하의 일정 퍼센트 량 이상 확보 하는 것을 조건으로 설정하였다. 이는 식 4-3로 표현된다.

$$P_{Band}^t \geq P_{Band-min}^t (= P_{net-load}^t \times n\%) \quad (4-3)$$

위 식 4-3에서의 밴드 최소 구입률 $n\%$ 에 따라서 DSO의 수급균형 비용에 큰 변화가 생긴다. 밴드 단가가 비싼 시간대에 $n\%$ 가 높다면, 이는 비경제적인 선택이 될 것이다. 하지만 $n\%$ 가 낮아 밴드 단가가 저렴한 시간대임에도 에너지저장장치 옵션을 구입한다면, 이 또한 비경제적인

선택이다. 그렇기 때문에 DSO는 적절한 밴드 최소 구입률에서 저렴한 예비력을 선택하는 것이 가장 경제적인 것이다. 이러한 상황을 아래 그림 4-11에서 나타내었다.

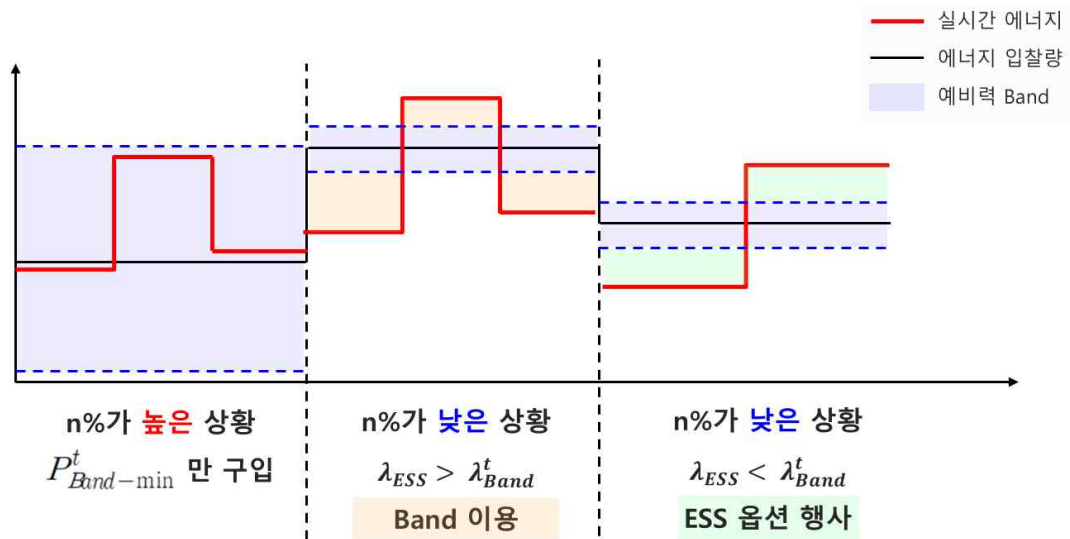


그림 4-11. 밴드 최소 구입률 변화에 따른 수급균형책 변화

위에서 서술한 내용들을 종합하여 시뮬레이션의 변수와 목표를 표 4-1에 작성하였다. 밴드 최소 구입률 $n\%$ 는 0%부터 0.1% 단위로 10.0%까지 변수로 설정하였고, 에너지저장장치 옵션 구입 단가 λ_{ESS} 는 1원부터 1원 단위로 200원까지 설정하였다. 위 20,200가지의 밴드 최소 구입률과 에너지저장장치 옵션 구입 단가 조합에 대해 DSO의 수급 균형 비용 최솟값과 에너지저장장치 옵션의 수요량을 시뮬레이션에서 구하고자 한다.

표 4-1. 시뮬레이션 목표

$n\%$ λ_{ESS}	0%	0.1%	...	9.9%	10.0%
1원	$\min \Sigma [f_{cost}]$	$\min \Sigma [f_{cost}]$		$\min \Sigma [f_{cost}]$	$\min \Sigma [f_{cost}]$
	ΣP_{ESS}	ΣP_{ESS}		ΣP_{ESS}	ΣP_{ESS}
2원	$\min \Sigma [f_{cost}]$	$\min \Sigma [f_{cost}]$		$\min \Sigma [f_{cost}]$	$\min \Sigma [f_{cost}]$
	ΣP_{ESS}	ΣP_{ESS}		ΣP_{ESS}	ΣP_{ESS}
⋮					
199원	$\min \Sigma [f_{cost}]$	$\min \Sigma [f_{cost}]$		$\min \Sigma [f_{cost}]$	$\min \Sigma [f_{cost}]$
	ΣP_{ESS}	ΣP_{ESS}		ΣP_{ESS}	ΣP_{ESS}
200원	$\min \Sigma [f_{cost}]$	$\min \Sigma [f_{cost}]$		$\min \Sigma [f_{cost}]$	$\min \Sigma [f_{cost}]$
	ΣP_{ESS}	ΣP_{ESS}		ΣP_{ESS}	ΣP_{ESS}

제 3절 시뮬레이션 알고리즘

1. 동적 최적화(Dynamic Programming)

Dynamic Programming은 최적화 문제를 해결하는 방식 중 하나이다. 글로벌한 문제를 부분 문제로 나누어 푸는 형태로, 대표적인 예로는 피보나치수열이 있다. Dynamic Programming은 그림 4-12와 같이 반복되는 부분 문제의 구조를 갖는 문제에 적합하며, 이를 통해 연산 횟수를 크게 줄일 수 있다. 보통 문제가 점화식의 형태로 표현되는 경우가 많으며, 문제에서 발생할 수 있는 모든 경우의 수를 계산하여 결과를 도출하기 때문에 정확한 값을 도출하지만, 모든 경우의 수를 확인하기에 시간 복잡도가 높다.[14]

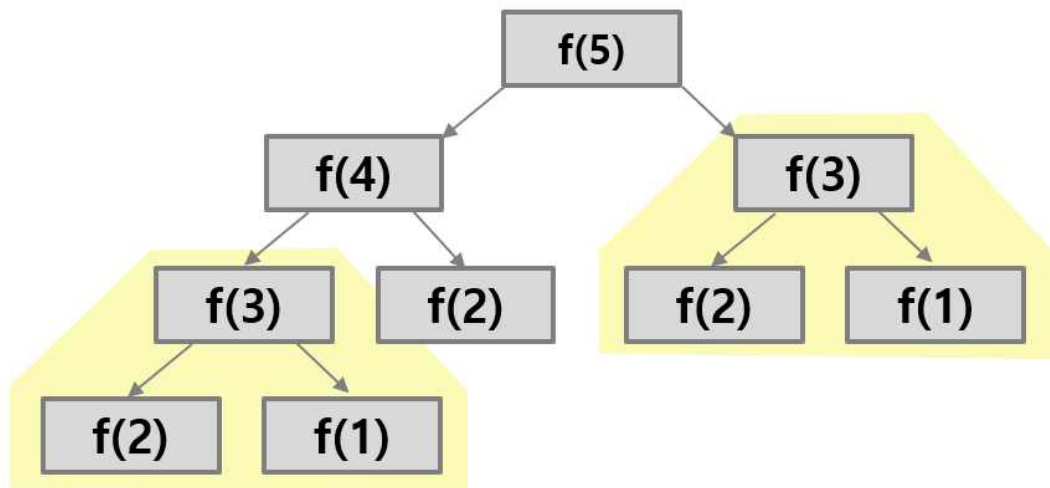


그림 4-12. 피보나치수열 예시

구현하고자 하는 시뮬레이션에서는 DSO가 8,784개의 매 시간마다 밴드, 에너지저장장치, 페널티 지불을 조합하여 가장 경제적인 방식으로 수급균형 문제를 해결한다. 이 때 각 항목의 이용 여부, 사용량 조합에 따라 수많은 조합을 구성할 수 있을 것이다. 단순히 아래 표 4-2와 같이 3가지의 경우만 조합으로 사용한다고 가정하여 보자.

표 4-2. 예비력 조합 예시

순 번	P_{band}^t	P_{ESS}^t	$P_{penalty}^t$
1	$P_{imbalance}^t$	0	0
2	0	$P_{imbalance}^t$	0
3	0	0	$P_{imbalance}^t$

시뮬레이션에서는 DSO가 8,784개의 매 시간마다 위 3가지 조합 중 하나를 선택하는 전체 경우의 수에 대하여 가장 저렴한 예비력 비용을 사용하는 경우를 찾아야 한다. 이 때 예비력 비용 함수에 대한 전체 경우의 수는 그림 4-13에서 보듯이 3^{8784} 개 이다. 3^{30} 은 약 205조로 앞서 말한 3가지의 한정적인 조합이여도 전체 경우의 수는 시뮬레이션으로 구현하기에는 지나치게 큰 경우의 수 임을 알 수 있다. 더불어 DSO가 매 시간마다 선택할 수 있는 수급 균형 해결책의 조합은 앞서 언급한 3가지보다 훨씬 많기 때문에, 다이내믹 프로그래밍으로는 해당 시뮬레이션을 구현하기가 어려움을 알 수 있다.

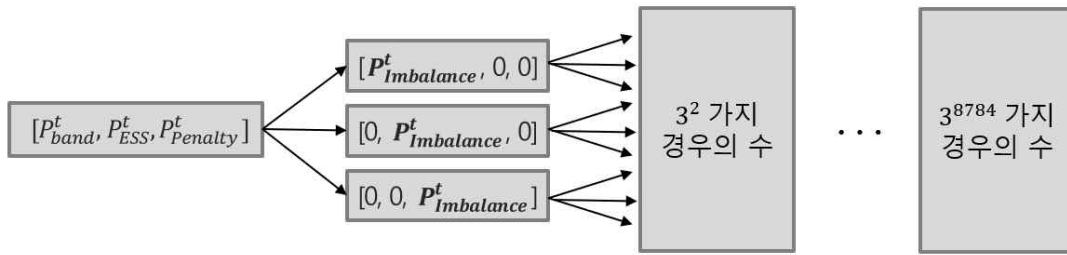


그림 4-13. 다이내믹 프로그래밍의 시뮬레이션 경우의 수

2. 탐욕법 (Greedy Algorithm)

Greedy Algorithm은 탐욕법이라고 불리며, 최적화 문제를 해결하는 기법 중 하나이다. 앞서 Dynamic Programming은 문제를 풀 때 발생하는 모든 경우의 수를 다 확인하기에 지나치게 많은 문제에서는 한계점이 나타났었다. 이러한 한계점을 보완하는 하나의 최적화 기법으로 그리디 알고리즘을 사용할 수 있다. Greedy Algorithm은 Dynamic Programming과 달리 모든 경우를 살펴 최적해를 찾지 않고, 각 단계별 최적해를 구하고 이를 통해 전체 문제의 최적해를 계산한다.[15]

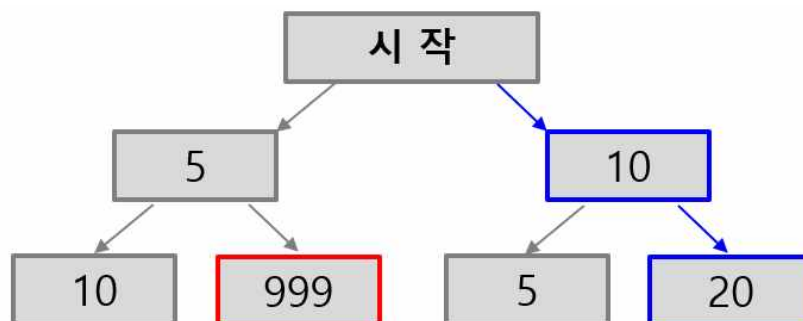


그림 4-14. 그리디 알고리즘의 오류 예시

이러한 Greedy Algorithm의 문제점은 모든 경우의 수를 살피지 않는 것이다. 그렇다 보니 그림 4-14와 같은 오류를 범해 최적 해를 구하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 그림 4-14와 같은 오류를 범하지 않기 위해, Greedy Algorithm의 적용을 위해선 아래의 2가지 조건이 필요하다.[15]

- ① 독립적 선택 속성 : 앞선 선택이 뒤의 선택에 영향을 미치지 않음
- ② 최적 부분 구조 : 전체 문제의 최적해가 모든 부분 문제에서도 최적해

시뮬레이션에서 DSO는 매 시간마다 그림 4-15와 같이 다양한 형태로 수급균형을 이루게 된다. 이 때 각 t마다 DSO는 $P_{Band-min}^t$ 을 제외하고 부족한 불균형 량 $P_{imbalance}^t$ 에 대해서 λ_{band}^t , λ_{ESS}^t , $\lambda_{penalty}^t$ 세 가지 중 가장 저렴한 한 가지를 선택 하게 된다. 만약 $P_{Band-min}^t$ 이 $P_{imbalance}^t$ 값보다 크다면 추가적인 수급균형 해결책을 구입할 필요는 없다.

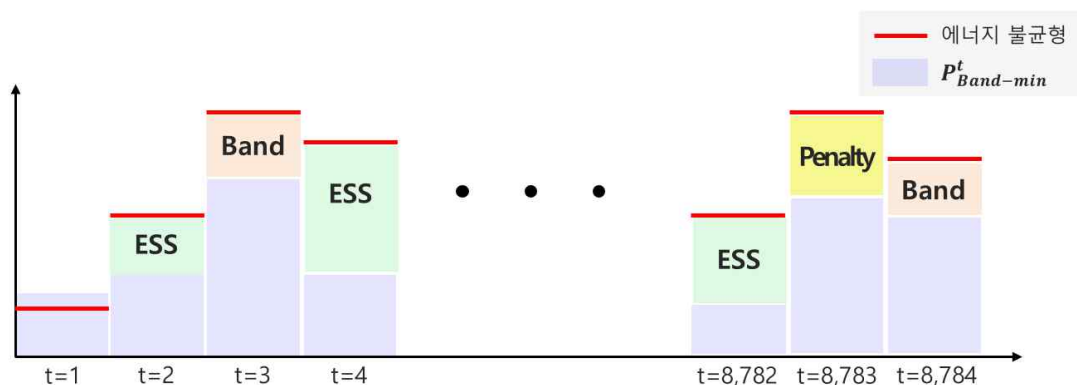


그림 4-15. DSO의 수급균형 방식 예시

시뮬레이션의 문제는 매시간에서 한 선택의 결과가 다른 시간에 한 선택의 결과에 대해서 영향을 끼치지 않는 독립적인 구조를 가지며, 매 시간마다 최적의 수급균형책을 선택하는 부분 최적 값이 전체의 수급균형 비용을 최소화 하게 하는 전체 최적 값을 갖게 하는 최적 부분 구조의 요건도 갖추고 있다. 위 내용을 토대로 시뮬레이션은 Greedy Algorithm 기반으로 수행되었다.

제 4절 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 MATLAB R2021a를 이용하여 진행하였다.

1. DSO의 예비력 구입비용 시뮬레이션

표 4-1의 20,200가지 경우의 수에 대해서 각 경우의 수마다 DSO가 수급균형을 이루기 위해 사용하는 예비력 구입비용이 최소가 되는 값을 아래 그림 4-16과 같이 산출하였다.

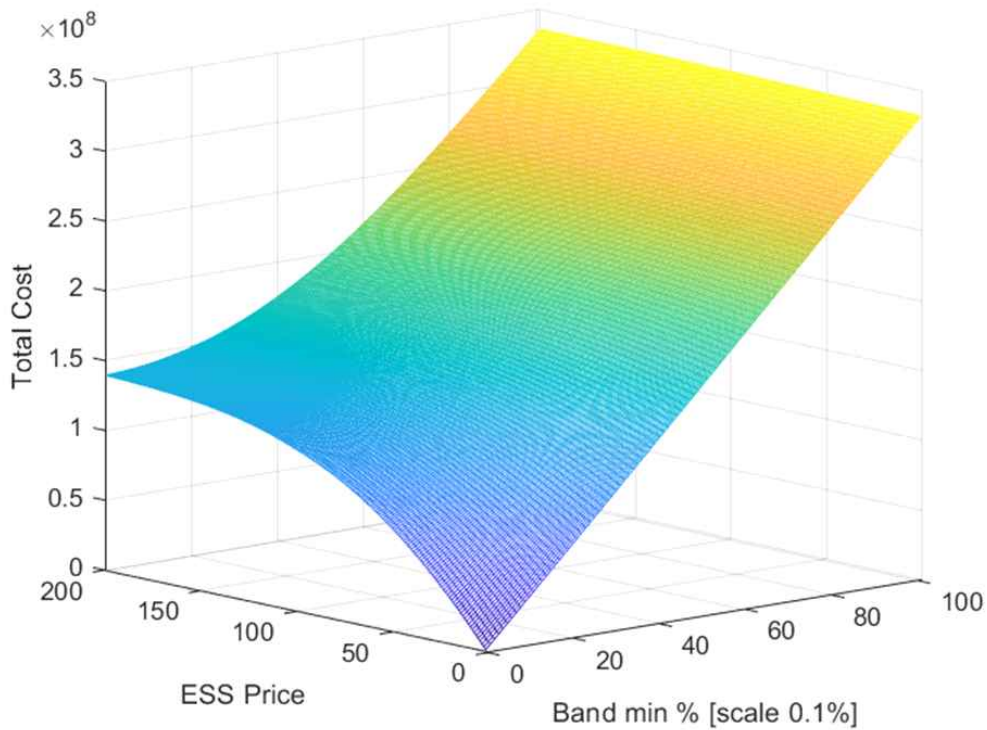


그림 4-16. 경우의 수별 DSO의 예비력 구입 총 비용

에너지저장장치 옵션 구입 단가 λ_{ESS} 가 낮을수록, 밴드 최소 구입률 $n\%$ 가 낮을수록 DSO의 예비력 구입비용은 작아지는 것을 알 수 있었다. 동일한 에너지저장장치 옵션 구입 단가를 가질 땐, 밴드 최소 구입률이 높아질수록 총 소요비용이 증가함을 보였다.

다음으로 20,200가지 경우의 수에 대해서 DSO의 에너지저장장치 옵션 수요를 산출하였고, 이는 그림 4-17과 같이 나타난다. 20,200가지 경우의 수 모두에서 DSO의 에너지저장장치 옵션에 대한 수요가 발생함을 확인하였다. 또한, 에너지저장장치 옵션 구입 단가 λ_{ESS} 가 낮을수록, 밴드 최소 구입률 $n\%$ 가 낮을수록 DSO의 에너지저장장치 옵션 수요는 커지는 것을 알 수 있었다.

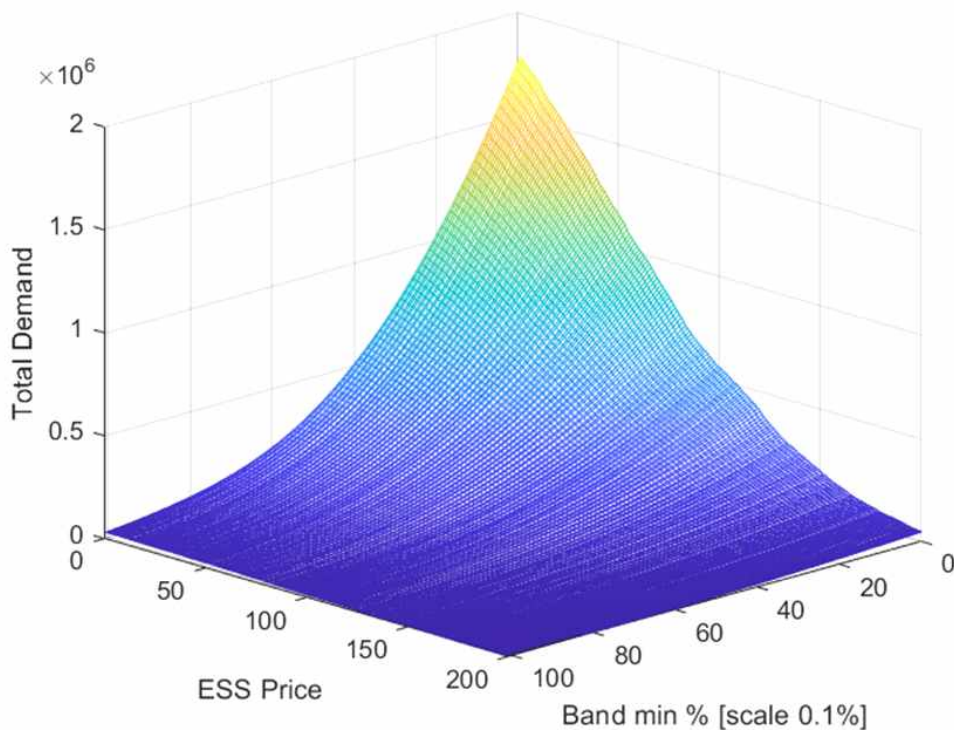


그림 4-17. 경우의 수별 DSO의 에너지저장장치 옵션 수요

2. 에너지저장장치 사업자 입장에서의 현금흐름할인법

앞선 시뮬레이션에서 DSO는 모든 경우의 수에 대해서 에너지저장장치 옵션에 대한 수요가 발생함을 확인하였다. 그렇다면 20,200가지 모든 경우의 수에 대해서 에너지저장장치 사업자의 입장에서 현금흐름할인법을 통해 사업의 수익성이 발생되는지를 확인하고자 한다.

$$ESS_{profit} = \sum_{t,i} q_{ess}^{t,i} \times \lambda_{ESS} - CAPEX - \sum_t (OPEX_{fixed} + OPEX_{variable}) \quad (4-4)$$

식 4-4는 에너지저장장치 사업자 입장에서의 현금흐름을 나타낸다. 식에 사용된 변수는 표 4-3에 정의하였다.

표 4-3. 식 4-4의 변수에 대한 정의

항목	내용
i	DSO 지수 (1~ i)
t	시간 지수
$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i}$	에너지저장장치 옵션 수요 총량
λ_{ESS}	에너지저장장치 판매 단가
$CAPEX$	에너지저장장치 설비투자비
$\sum_t (OPEX_{fixed} + OPEX_{variable})$	에너지저장장치 고정·변동 운영비

위 식 4-4에 사용할 에너지저장장치관련 데이터는 표 4-4를 참고하였다.[8]

표 4-4. 에너지저장장치 관련 자료 [8]

구분	단가	단위	비고
ESS 설비투자비	1,876	dollar/kW	'18년 기준
	1,446		'25년 기준
고정 유지보수비	10	dollar/kW-year	'18년 기준
	8		'25년 기준
변동 유지보수비	0.12	cents/kW-year	
환율	1,153.77	원/dollar	'21.7.19기준
사회적 할인율	4.5	%	
설비 수명	10	Years	
PCS 출력	1,000	kW	시뮬레이션 조건
배터리 용량	4,000	kWh	

에너지저장장치 비용 관련 자료 중 에너지저장장치의 단가는 2018년도 단가와 2025년도 단가를 모두 이용하여, 에너지저장장치 단가 변화에 따른 시뮬레이션 결과 비교를 위해 사용하였다. 각 단가별 순현재가치를 구하기 위해 먼저 비용을 표 4-5, 표 4-6에 나타내었다.

표 4-5. 에너지저장장치 사업 비용 (2018년도 단가 기준)

Year	비 용 (단위 : 원)		
	ESS 설비투자비	고정 유지보수비	변동 유지보수비
0	2,164,472,520	11,537,700	1,385
1	0	11,040,861	1,325
2	0	10,565,417	1,268
3	0	10,110,447	1,213
4	0	9,675,069	1,161
5	0	9,258,439	1,111
6	0	8,859,751	1,063
7	0	8,478,230	1,017
8	0	8,113,139	974
9	0	7,763,769	932
소 계	2,164,472,520	95,402,824	11,448
총 계	2,259,886,792		

표 4-6. 에너지저장장치 사업 비용 (2025년도 단가 기준)

Year	비 용 (단위 : 원)		
	ESS 설비투자비	고정 유지보수비	변동 유지보수비
0	1,668,351,420	9,230,160	1,385
1	0	8,832,689	1,325
2	0	8,452,334	1,268
3	0	8,088,358	1,213
4	0	7,740,055	1,161
5	0	7,406,752	1,111
6	0	7,087,801	1,063
7	0	6,782,584	1,017
8	0	6,490,511	974
9	0	6,211,016	932
소 계	1,668,351,420	76,322,259	11,448
총 계	1,744,685,128		

다음으로 수익은 아래의 표 4-7에 따라 계산하였다.

표 4-7. 에너지저장장치 사업 수익

Year	수 익			비고
	단가 (원/kWh)	판매용량 (kWh)	판매 금액(원)	
0	$1 \leq \lambda_{ESS} \leq 200$ (단 λ_{ESS} 는 양의 정수)	$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i}$	$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i} \times \lambda_{ESS}$	DR : 사회적 할인율
1		$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i}$	$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i} \times \lambda_{ESS} \times \frac{1}{1+DR}$	
2		$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i}$	$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i} \times \lambda_{ESS} \times \left(\frac{1}{1+DR}\right)^2$	
3		$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i}$	$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i} \times \lambda_{ESS} \times \left(\frac{1}{1+DR}\right)^3$	
⋮		⋮		
9		$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i}$	$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i} \times \lambda_{ESS} \times \left(\frac{1}{1+DR}\right)^9$	
합계	-		$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i} \times \lambda_{ESS} \times 8.269$	

위 비용과 수익에 대하여 순현재가치를 아래 표 4-8과 같이 구할 수 있다. 이를 앞선 시뮬레이션 경우의 수 20,200가지에 모두 적용하여 에너지저장장치 사업자의 투자 수익성이 발현되는 경우(순현재가치가 0보다 큰 경우)를 계산해본다.

표 4-8. 에너지저장장치 사업 현금 흐름

항 목	수 익(A)	비 용(B)	NPV(=A-B)
내 용	$\sum_{t,i} q_{ess}^{t,i} \times \lambda_{ESS} \times 8.269$	2,259,886,792 (’18년도)	결과 값 > 0 (수익성 有)
		1,744,685,128 (’25년도)	

에너지저장장치 사업자의 입장에서 현금흐름할인법을 통해 순현재가치를 20,200가지 경우의 수에 대하여 계산하면 에너지저장장치 단가별로 그림 4-18, 4-19와 같다. 2018년도의 에너지저장장치 단가에서는 1,831가지 경우의 수, 2025년도의 에너지저장장치 단가에서는 2,844가지 경우의 수에서 사업의 타당성이 발생하였다.

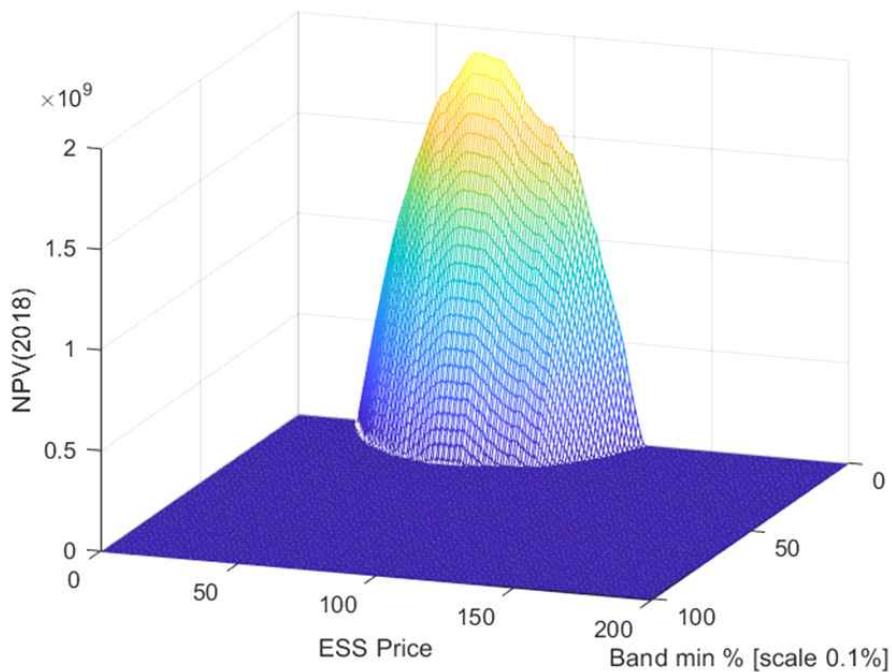


그림 4-18. 에너지저장장치 사업자 NPV (2018년도 단가 기준)

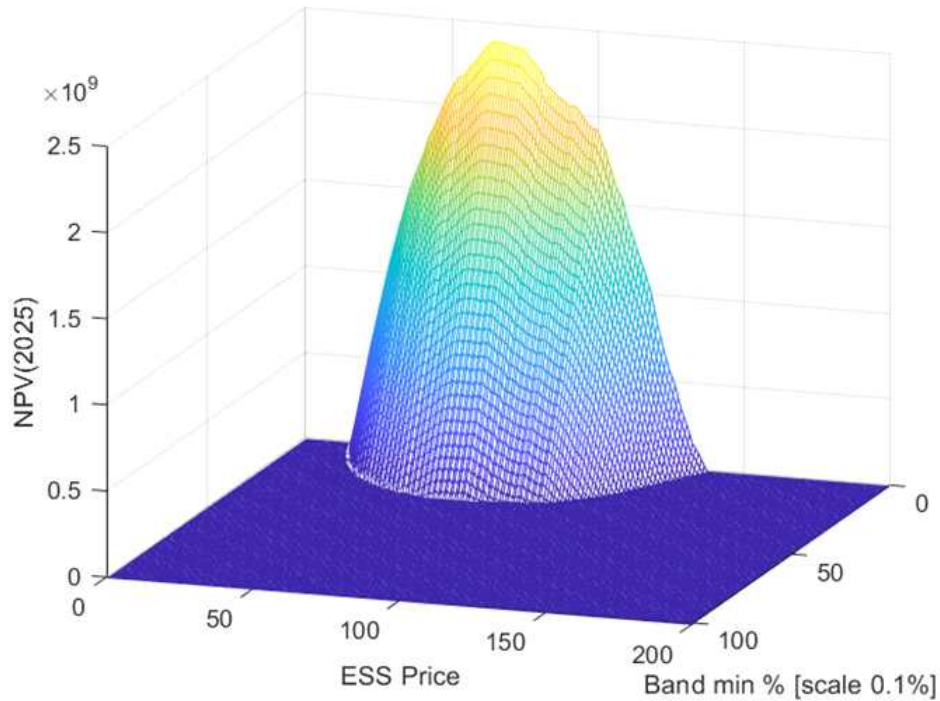


그림 4-19. 에너지저장장치 사업자 NPV (2025년도 단가 기준)

3. DSO의 에너지저장장치 옵션에 대한 가치 산정

4.1절에서 DSO는 시뮬레이션의 모든 경우의 수에서 에너지저장장치 옵션 수요가 발생하였다. 이는 에너지저장장치 옵션을 사용할 때 DSO의 수급균형 총 비용이 더 적어짐을 뜻하며, 이 차액은 에너지저장장치 옵션에 대한 가치라고 볼 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 식 4-5와 같다. 이를 경우의 수 20,200가지에 대하여, 2020년도의 데이터 1년간의 에너지저장장치 옵션의 가치를 산정하면 그림 4-20과 같다.

$$ESS \text{ Option Value} = \min(\Sigma f)_{\text{without ESS}} - \min(\Sigma f)_{\text{with ESS}} \quad (4-5)$$

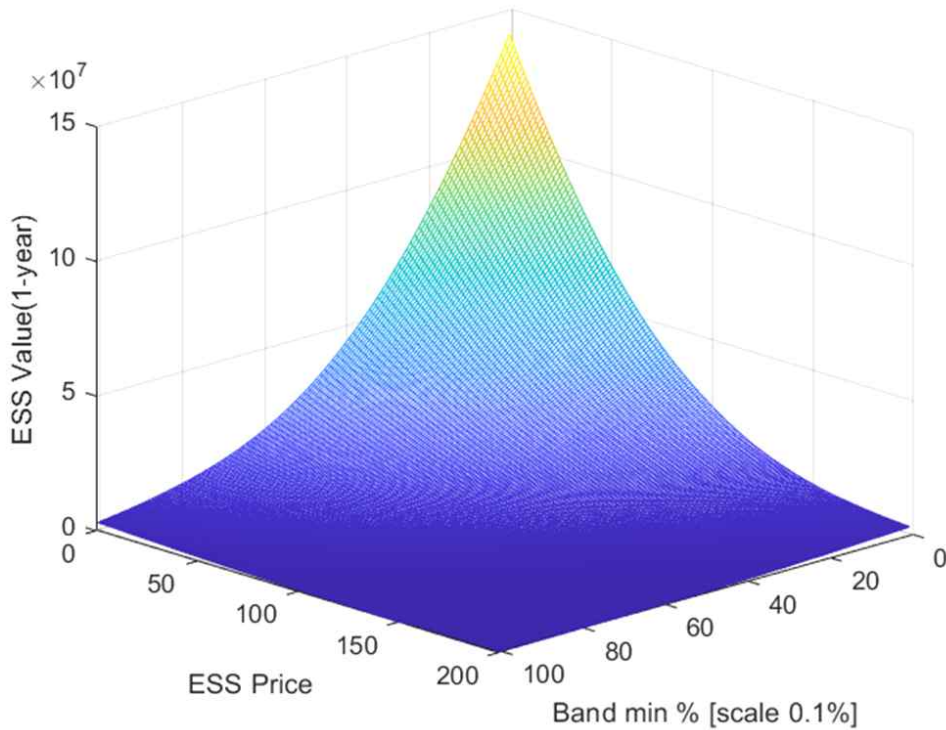


그림 4-20. 1년간 에너지저장장치 옵션의 가치

4.1절에서는 DSO의 입장에서 모든 경우의 수에서 에너지저장장치 옵션 수요가 발생하는 것을 확인하였고, 위 그림 4-20에서는 DSO의 입장에서 에너지저장장치 옵션의 가치가 모든 경우의 수에서 발생하는 것을 확인하였다. 그러나 4.2절에서 보았듯이 에너지저장장치 사업자의 입장에서 사업의 경제성이 확보되는 경우의 수는 전체 경우의 수보다 훨씬 적은 수임을 확인하였다. DSO의 입장에서 에너지저장장치 옵션의 가치는 모든 경우의 수에서 발생하였으나, 에너지저장장치 사업자의 수익성이 확보되지 않는다면 이는 실제 가치가 없는 경우라 볼 수 있다. 그러므로 아래 조건 2개를 동시에 만족하는 경우의 수에 대해서만 에너지저

장장치 옵션의 가치를 산정해본다.

$$\textcircled{1} [\min(\Sigma f)_{without ESS} - \min(\Sigma f)_{with ESS}]_{t = first year} > 0$$

② 에너지저장장치 사업자의 입장에서 순현재가치가 0보다 큰 경우

위 두 개의 조건을 모두 만족하는 경우의 수는 표 4-9와 같다. 2018년도 단가에서는 에너지저장장치 구입 단가는 23~126원의 분포를, 밴드 최소 구입률은 0~2.3%의 분포를 보였다. 그리고 2025년도 단가에서는 에너지저장장치 구입 단가는 17~137원의 분포를, 밴드 최소 구입률은 0~3.1%의 분포를 보였다.

표 4-9. 조건을 모두 만족하는 경우의 수

'18년도 단가 기준							
CASE Number	1	2	3	...	1,829	1,830	1,831
ESS 단가 λ_{ESS} [단위 : 원]	23	24	25		75	76	78
밴드 최소 구입률 $n\%$ [단위 : %]	0	0	0		2.3	2.3	2.3
'25년도 단가 기준							
CASE Number	1	2	3	...	2,842	2,843	2,844
ESS 단가 λ_{ESS} [단위 : 원]	17	18	19		78	80	82
밴드 최소 구입률 $n\%$ [단위 : %]	0	0	0		3.1	3.1	3.1

위 경우의 수에 대해서 식 4-6과 같이 에너지저장장치 옵션의 계약 기간으로 에너지저장장치의 설비 수명을 사용하고, 매년 발생하는 에너지저장장치 옵션 가치를 할인한 후 합산한다. 예시로 하나의 경우의 수에 대해서 계산 값을 표 4-10에 나타내었다.

$$ESS\ Option\ Value = \sum_0^{ESS\ life} \left(\frac{1}{1+DR}\right)^k [\min(\Sigma f)_{without\ ESS} - \min(\Sigma f)_{with\ ESS}] \quad (4-6)$$

표 4-10. 에너지저장장치 가치 산정 예시

Year	$\min(\Sigma f)_{without\ ESS}$ (= A)	$\min(\Sigma f)_{with\ ESS}$ (= B)	ESS Value (A - B)	비고
0	142,922,669	62,186,456	80,736,213	$\lambda_{ESS} = 40$ $n\% = 0\%$
1	136,768,104	59,508,571	77,259,534	
2	130,878,569	56,946,001	73,932,568	
3	125,242,649	54,493,780	70,748,869	
4	119,849,425	52,147,158	67,702,267	
5	114,688,445	49,901,587	64,786,858	
6	109,749,708	47,752,715	61,996,994	
7	105,023,644	45,696,378	59,327,267	
8	100,501,095	43,728,591	56,772,504	
9	96,173,297	41,845,542	54,327,755	
총계	1,181,797,606	514,206,779	667,590,828	

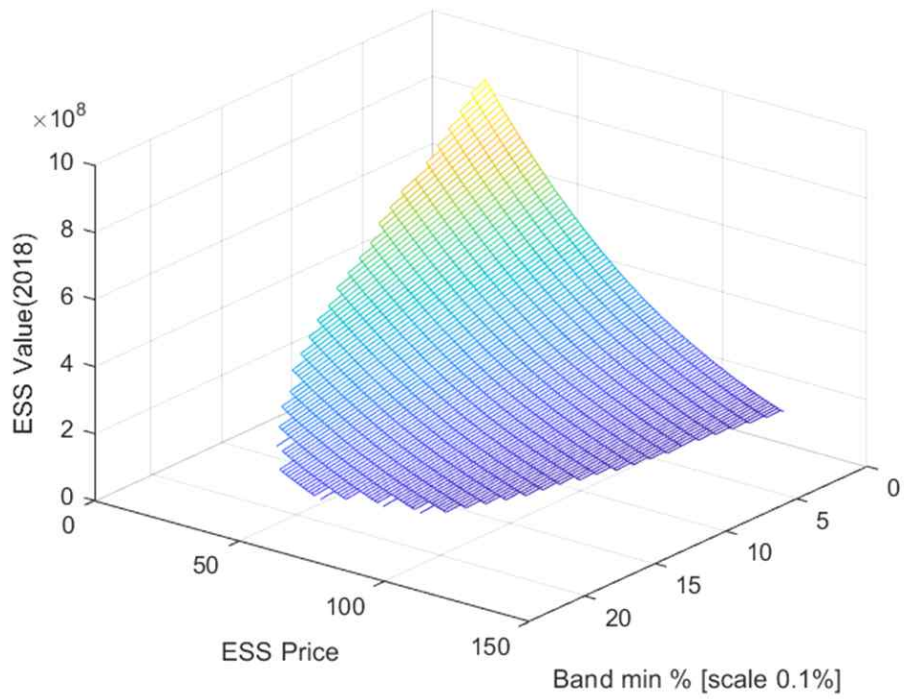


그림 4-21. 에너지저장장치 옵션의 가치(2018년도 단가 기준)

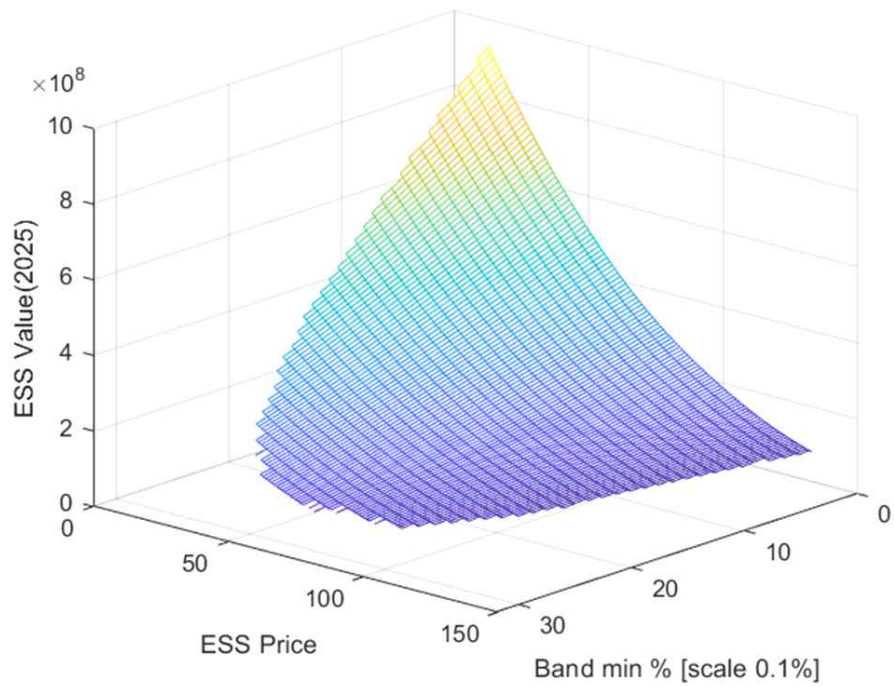


그림 4-22. 에너지저장장치 옵션의 가치(2025년도 단가 기준)

에너지저장장치 2018년도 단가와 2025년도 단가에 대하여 에너지저장장치 옵션 가치를 산정하면 그림 4-21, 4-22와 같다. 결과 값을 표로 정리하면 표 4-11과 같다. 2018년도 1,813건의 경우의 수에서 에너지저장장치 구입 단가의 평균값은 73.9원, 2025년도 2,844건의 경우의 수에서 에너지저장장치 구입 단가의 평균 값은 75.1원으로 산출되었다. 이는 밴드의 1년간 평균 가격인 38.4원과 1.92배, 1.95배의 차이를 보였다.

표 4-11. 에너지저장장치 옵션 가치 산정 결과

기준	최대 값	최소 값	평균 값
2018	865,680,847	121,138,012	324,442,085
2025	943,027,858	91,904,217	300,219,200

제 5 장 결 론

전 세계적으로 분산형전원의 급격한 증가로 인해 계통 불균형이 야기되고 있고, 수급균형의 책임에 대한 분권화의 논의가 본격적으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 TSO가 DSO에게 수급균형의 의무를 나누어준 PXFC 시장을 가정하였다. 이 때 DSO의 예비력 중 하나로 에너지저장장치 옵션을 사용하고, 이 에너지저장장치 옵션의 가치를 시뮬레이션으로 산정하였다.

시뮬레이션에서 DSO의 에너지저장장치 옵션 수요는 $n\%$, λ_{ESS} 조합 20,200가지 모든 경우의 수에서 발생하는 것을 확인하였다. 이는 밴드로만 불균형을 해소하는 것 보다 밴드와 에너지저장장치의 혼합을 통한 불균형 해소가 DSO에게는 더 경제적인 것을 알 수 있다.

다음으로 에너지저장장치 사업자의 입장에서 현금흐름할인법을 이용하여 에너지저장장치 사업의 순현재가치를 계산 하였다. 시뮬레이션 전체 경우의 수에서 에너지저장장치 2018년도 단가 기준으로는 9%, 2025년도 단가 기준으로는 14.1%가 순현재가치가 0보다 큼을 확인하였다.

DSO의 에너지저장장치 옵션 수요가 발생하고, 에너지저장장치 사업자의 순현재가치가 0보다 큰 두 조건을 모두 만족하는 케이스에 대해서 에너지저장장치 옵션 가치를 산정하였다. 1MW의 에너지저장장치 옵션 평균 가치는 322백만원(2018년도), 300백만원(2025년도)이었다. 그리고 에너지저장장치의 가격이 낮아질수록, 에너지저장장치 옵션의 가치가

발생하는 경우의 수가 많아지는 것 또한 확인하였다.

본 연구에서는 수급균형 비용을 비용 유발자 원칙으로 분배시키는 PXFC 시장에서의 옵션 가격 책정을 통해 에너지저장장치 옵션의 가치를 산정하였다. DSO의 입장에서 수급 불균형 해소를 위해 예비력 확보 비용 최소화 과정을 그리디 알고리즘으로 구현하여 DSO의 수급 균형 비용 최적해를 나타내었다.

DSO의 입장에서는 에너지저장장치 옵션 도입에 대한 가치가 모든 경우의 수에서 발생하는 것을 확인하였다. 이와 반대로, 에너지저장장치 사업자의 입장에서는 수익성이 확보 되지 않는 케이스가 있었으며, 향후 PXFC 시장에서는 이러한 DSO의 입장과 에너지저장장치 사업자의 입장에 절충점에서 에너지저장장치 옵션 계약이 이루어지고, 적정한 에너지저장장치 옵션 단가 등이 결정 될 것으로 생각된다.

또한, 앞으로의 연구에서는 본 연구에서 반영하지 않았던 PXFC 시장에서 에너지저장장치 설비 운용 대한 인건비 등을 반영하는 연구가 필요할 것이고, 본 연구에서는 DSO가 모든 시간대에 동일한 최소 밴드 구입률을 구입하는 것으로 설정하였으나, 실제 DSO가 계통을 운영한다면 과거 데이터에 기반 하여 변동성이 큰 시간대에 최소 밴드 구입률을 더 높게 할당하는 등의 전략적 선택을 취할 것이다. 향후 연구에서는 이러한 내용을 고려하여 에너지저장장치 옵션의 가치를 산정할 필요성이 있다.

참 고 문 헌

- [1] Jung-min Yoo, "The task of expanding distributed energy resources and improving the market structure", Seoul Energy Corporation, 2018.
- [2] Hye-ji Kim, "Analysis of Energy Curtailment Considering PV and Load Characteristics for Increasing Hosting Capacity in Distribution System", Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Feb. 2020.
- [3] L. F. Ochoa, C. J. Dent, and G. P. Harrison, "Distribution network capacity assessment: Variable DG and active networks", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no.1, pp. 87-95, 2010.
- [4] Hye-yoon Song, "Optimal Scheduling of Critical Peak Pricing for a Power Retailer Based on the Multi-Stage Stochastic Analysis Under Day-ahead Imbalance Band Market", Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Aug. 2020.
- [5] Seung-Wan Kim, "A devolved scheme of active distribution system operator for utilizing flexibility options under market environment", Ph.D. Thesis, Department of Electrical and

- Computer Engineering, Seoul National University, Feb. 2018.
- [6] Yong-Hyun Song, "Day-ahead Imbalance Band Market Operation of Transmission System Operator Considering Devolution of Balancing Responsibility", Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Aug. 2019.
- [7] U.S. Department of Energy HydroWIREs, "Energy Storage Technology and Cost Characterization Report", 2019.
- [8] M. Ilic, P. Skantze, C.N. Yu, L. Fink, J. Cardell, "Power Exchange for Frequency Control (PXFC)", IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting, pp. 809-819, 1999.
- [9] Sun-Hoo Ihm, "Re-evaluation of Economic Feasibility of Boryeong Dam Conduit Construction Project using Real Option Analysis", Master Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Feb. 2018.
- [10] Dong-Jin Kang, Byung-Rok Song, Jeong-Hyun Rho, "Economic Feasibility Study of the Road Project Using Real Options Analysis", The Korea Spatial Planning Review, pp 41-62, 2012
- [11] "Korea Power Exchange Official Website", Korea Power

- Exchange, [Online]. Available: <http://www.kpx.or.kr/>
- [12] "FINGRID Official Website", FINGRID, [Online]. Available: <https://www.fingrid.fi/en/>
- [13] Tae-Hun Lim, Bok-Mahn Jung, Jea-Hoon Jung, You-Rim Choi, Yong-Ha Kim, "Assessmnet of Interruption Costs on the Domestic Business Types through Microscopic Approach", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 33(11), pp 11-17, 2019.
- [14] Richard Bellman, "Dynamic Programming", Dover Publications, 2003.
- [15] Meenakshi, Kamal Rawat, "Dynamic Programming Complete Conquest", BPB Pubilcation India and Hanbit Media, 2019.

Abstract

A Study on the Value of Energy Storage System as Reserve Options to Distribution System Operators

Hyun Soo, Kim

Department of Engineering Practice
Graduate School of Engineering Practice
Seoul National University

The power industry has been operating for a long time in the form of a network-based natural monopoly. This monopoly industry has been operated in a vertical and integrated way, in which one company manages power generation \Rightarrow transmission \Rightarrow distribution \Rightarrow sales. However, even in this monopoly structure, energy liberalization began in earnest in the UK in the

1980s, and many countries around the world are currently operating energy market liberalization in various stages and forms. Among these institutional changes around the world, the story of decentralization of the power system is being discussed.

In order to connect more distributed power sources to the grid in the future, the power system of the future will adopt the Active Network Management (ANM) method. One of the main functions of the ANM method is that the distribution system operator controls the output of renewable energy in real time. However, institutional improvement is inevitable for this. Because distributed power can only be accommodated in the distribution system with the existing "fit and forget" method, a large number of distributed power sources are not operated by TSO, but multiple DSOs control the output of individual distributed power sources. Therefore, it will have to change to the form of operating the distribution system.

In the existing electricity wholesale market, the sales operator predicts the electricity demand one day in advance and bids for energy, and the power generation operator sells the energy. At this time, the system operator secures reserve power in advance by using the auxiliary service market to resolve the imbalance that may occur during system operation. The cost used in this

case is the supply–demand balance cost. In the case of balanced supply and demand cost, the system operator distributes the cost in proportion to the amount of energy sold or purchased by the BRP according to the cost socialization principle. This means that the distribution is not in proportion to the disproportionate amount of the seller. Incentives to induce BRP's participation in actively maintaining systemic balance are insufficient because charges are imposed regardless of the presence or absence of imbalance in BRP or the size of the amount of imbalance.

In the energy market, the PXFC market concept has been proposed as a method in which the cost inducer bears the disproportionate cost according to the cost causality principle. Unlike the existing electricity market, in the PXFC market, the TSO transfers the responsibility and cost burden for the supply–demand balance to the DSO, which has the effect of distributing the difficulty of excessive system operation borne by the TSO to a large number of DSOs.

The TSO decentralizes the supply–demand balance obligation to the DSO, and the DSO must maintain the supply–demand balance by purchasing a band–type reserve from the TSO to fulfill the supply–demand balance obligation. In this study, it is assumed that an energy storage system (ESS) that can perform

the same role as a reserve power is used as the role of supply–demand balance of DSO. In this study, such an energy storage device is used as an option for DSO's supply–demand balance policy, and the value of this energy storage device option is calculated at this time.

**Keywords : Distribution System Operator, PXFC, Energy
Storage System, Real Option**

Student Number : 2019–22202