creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

재생 에너지 수용성 증대를 위한 ESS의 경제적 효과 분석

Economic Analysis of ESS for Increasing Hosting Capacity

2021년 2월

서울대학교 대학원
전기정보공학부
여 형 우

재생 에너지 수용성 증대를 위한 ESS의 경제적 효과 분석

지도 교수 문 승 일

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2021년 2월

서울대학교 대학원
전기정보공학부
여 형 우

여형우의 공학석사 학위논문을 인준함
2021년 2월

위 원 장 윤 용 태 (인)
부위원장 문 승 일 (인)
위 원 한 승 용 (인)

초 록

향후 계통에서 재생에너지의 발전 비중이 증가하는 것은 필연적이다. 기존의 발전원과는 달리 재생에너지의 출력의 불확실성 및 제어가 어렵다. 이에 재생에너지에 대한 계통 접속 규정을 별도로 지정하고, 접속가능한 용량도 별도로 산정하고 있다.

현재 계통에서 전기 품질이나 신뢰도에 악영향을 끼치지 않고 연계 가능한 재생에너지 용량을 산정하는 것은 계통의 안정적인 운영을 위하여 필수적이다. 본 논문에서는 계통의 선로 증설 및 ESS의 설치를 고려한 재생에너지 수용률을 산정하는 방안을 제안하였다. 이를 통하여 선로 증설과 ESS 설치 시 발생하는 비용과 변화되는 재생에너지 수용률을 구하였다. 설치 조건에 따라 달라지는 전체 설치 비용과 재생에너지 수용률의 변화를 산정하여, 경제적인 방법으로 재생에너지 수용성을 높이는 방안을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

ESS 설치를 통하여 계통의 수용률의 증가 및 비용을 산정하였다. 기존의 선로 증설을 통한 수용률의 증가와 비용과 비용을 비교하여 기존의 선로 증설보다 ESS를 통한 수용률 증가가 경제적임을 검증하였다. ESS를 이용하여 달성 가능한 최대 수용률을 확인하였다. 그래서 수용률이 낮은 초기에는 선로의 증설 보다 ESS의 설치가 경제적임을 확인하였다. 하지만 특정 수용률 이후에는 선로의 증설과 ESS의 설치가 병행되어야 더 높은 수용률을 달성할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

주요어 : 재생 에너지 수용률, 선로증설, ESS, 경제성 비교

학 번 : 2019-26219

목 차

제 1 장 서 론 1

제 1 절 연구의 배경 1

제 2 절 연구의 내용 3

제 3 절 논문의 구성 4

제 4 절 논문에서 사용되는 주요 파라미터 정의 5

제 2 장 수용성 산정 및 문제 정식화 7

제 1 절 수용성 산정 방법 7

제 2 절 문제 정식화 9

2.2.1 선형화 구현 방법 9

2.2.2 목적함수 13

2.2.3 제약 조건 14

제 3 절 수용률 산정 방식 15

제 3 장 선로 증설을 통한 수용률 변화 검증 19

제 1 절 대상 계통에 대한 설명 19

제 2 절 기본 계통의 수용률 계산 24

제 3 절 선로 증설을 고려한 계통의 수용률 계산 25

제 4 장 ESS를 통한 수용률 변화 검증 30

제 1 절 ESS를 고려한 계통의 수용률 계산 30

제 2 절 ESS 위치 변경한 계통의 수용률 계산 35

제 3 절 ESS를 전 모선에 설치한 계통의 수용률 계산 37

제 4 절 ESS와 OLTC 고려한 계통의 수용률 계산 40

제 5 절 ESS와 선로 증설 고려한 계통의 수용률 계산 42

제 5 장 케이스별 결과 비교 분석 46

제 1 절 ESS의 효과 분석 46

제 2 절 동일 수용률 달성 기준 결과 분석 46

제 3 절 케이스별 최소 비용 곡선 비교 48

제 4 절 재생에너지 위치 변경 후 비용 곡선 비교 50

제 6 장 결 론 및 향 후 과 제 52
제 1 절 연구 결과 52
제 2 절 향 후 과제 53
참고 문헌 54
Abstract 55

표 목차

[표 1] 논문에 사용된 주요 파라미터 및 변수 6
[표 2] Hosting capacity 영향 요소 7
[표 3] 선로 증설 및 ESS 용량 증설 가격 18
[표 4] 시뮬레이션 계통도 선로 정보 20
[표 5] 시뮬레이션 계통 선종 정보 20
[표 6] 시뮬레이션 계통 부하 정보 21
[표 7] 시뮬레이션 계통 신재생 기본 발전량 22
[표 8] 시뮬레이션 케이스 산정 23
[표 9] 선로 증설 없이 달성 가능한 최대 수용률 46
[표 10] 10% 수용률 달성을 위한 비용 비교 47
[표 11] 15% 수용률 달성을 위한 비용 비교 47
[표 12] 20% 수용률 달성을 위한 비용 비교 47
[표 13] 25% 수용률 달성을 위한 비용 비교 48
[표 14] 30% 수용률 달성을 위한 비용 비교 48

그림 목차

[그림 1] ESS의 충방전 그림 12
[그림 2] 수용률 산정 순서도 16
[그림 3] 시뮬레이션 계통도 19
[그림 4] 시뮬레이션 계통 시간대별 부하 비율 21
[그림 5] 시뮬레이션 계통 시간대별 재생에너지 발전 비중 22
[그림 6] 시뮬레이션 사용 시간대별 SMP 가격 23
[그림 7] 기본 계통의 전압 24
[그림 8] 기본 계통의 선로 부하율 25
[그림 9] 선로 증설을 고려한 계통의 전압 26
[그림 10] 선로 증설을 고려한 계통의 선로 부하율 27
[그림 11] 선로 증설을 고려한 계통의 수용률/비용 28
[그림 12] 선로 증설을 고려한 계통의 비용 곡선 28
[그림 13] 선로증설을 최대 4개로 고려한 계통의 비용 곡선 29
[그림 14] ESS 기본 용량을 적용한 계통의 전압 31
[그림 15] ESS 기본 용량을 적용한 계통의 선로 부하율 31
[그림 16] ESS 기본 용량을 적용한 계통의 SOC 32
[그림 17] ESS 용량 변화를 반영한 계통의 전압 33
[그림 18] ESS 용량 변화를 반영한 계통의 선로 부하율 33
[그림 19] ESS 용량 변화를 반영한 계통의 SOC 34
[그림 20] ESS 용량 변화를 반영한 계통의 비용 곡선 34
[그림 21] ESS 위치 변화를 반영한 계통의 전압 35
[그림 22] ESS 위치 변경한 계통의 선로 부하율 36
[그림 23] ESS 위치 변경한 계통의 SOC 36
[그림 24] ESS 위치 변경한 계통의 비용 곡선 37
[그림 25] ESS 전 모선에 설치한 게통의 전압 38

[그림 26] ESS 전 모선에 설치한 계통의 선로 부하율 38
[그림 27] ESS 전 모선에 설치한 계통의 SOC 39
[그림 28] ESS 전 모선에 설치한 계통의 비용 곡선..... 39
[그림 29] ESS와 OLTC를 고려한 계통의 전압..... 40
[그림 30] ESS와 OLTC를 고려한 계통의 선로 부하율 41
[그림 31] ESS와 OLTC를 고려한 계통의 SOC 41
[그림 32] ESS와 OLTC를 고려한 계통의 비용 곡선 42
[그림 33] ESS 및 선로 증설을 고려한 계통의 전압..... 43
[그림 34] ESS 및 선로 증설을 고려한 계통의 선로 부하율 44
[그림 35] ESS 및 선로 증설을 고려한 계통의 SOC 44
[그림 36] ESS 및 선로 증설을 고려한 계통의 비용 곡선..... 45
[그림 37] 전체 케이스의 비용 곡선 비교 49
[그림 38] 전체 케이스의 비용 곡선 확대 49
[그림 39] 재생에너지 발전원과 ESS 추가한 계통 변경 50
[그림 40] 계통 변경 후 비용 곡선..... 51

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

국내에서는 RE 3020 등의 정책을 통하여 지속적으로 재생에너지의 비중을 높이려는 정책이 시행되고 있다. RE3020은 2030년까지 전체 전기 발전량의 20%를 신재생에너지를 통하여 달성하려는 계획이다. RE3020에는 풍력, 태양광 발전량을 키운다는 발전원단의 계획은 존재하지만, 증가되는 재생 에너지 발전량을 어떻게 계통에 접속한다는 계획은 포함되어 있지 않다.

기존의 출력이 제어가능한 동기 발전기와는 다르게 풍력 및 태양광 발전은 출력의 불확실성과 출력의 제어가 어려운 특징이 있다. 그래서 재생 에너지 발전원에 대해서는 별도의 규격 및 규정으로 계통 접속을 정의하고 있다.

2014년부터 2019년까지 접속 신청한 태양광 발전 접속현황을 살펴보면, 전체 신청 현황 93,000중 55%인 51,150건만 접속이 완료되었고, 45%인 48,850건은 계통 접속이 지연되고 있다. 계통 접속 지연 사유로는 송배전 설비의 부족이 26%로 반이상으로 차지하고 있다.[1] 송배전 설비의 부족으로 태양광 발전의 접속지연이 누적되게 되면 향후 RE3020을 안정적으로 달성하는 것은 불가능하게 된다.

2020년 2월, 한국전력에서는 이와 같은 신재생 접속 문제를

해결하기 위하여, 배전선로의 태양광 접속 허용 기준을 일반 배전선로의 경우는 10MW에서 12MW로, 대용량 배전 선로의 경우는 15MW에서 18MW로 상향 조정하였다.[2] 추가적으로 2020년 11월 재생에너지 특별 대책 전담조직을 신설하여, 관련 문제를 해결하고자 하고 있다. 하지만 기본적인 해결책으로 배전 계통의 증설 및 규정 변경을 통하여 해결하고자 하고 있다.[3]

재생에너지 발전 비중이 높은 유럽 및 미국에서는 이미 태양광 등 다양한 재생에너지 발전원의 수용성의 문제가 발생하고 있으며, 계통에 접속 가능한 재생에너지의 양을 측정하고 증가시키기 위하여 DER Hosting Capacity (분산전원 수용량)에 대한 연구가 진행되고 있다.

국내에서 현재 적용되고 있는 변압기 및 선로의 용량에 따라서 Hosting capacity를 간단하게 결정하는 것이 아니라, 기술적으로 계통에 연결 가능한 분산자원의 양을 정확하게 산정하는 것을 시작으로, 경제적으로 Hosting capacity를 키우는 방안이 연구되어야 한다. 해외에서는 Hosting capacity를 키우기 위하여 계통의 PV의 인버터에 무효전력 제어 기능을 통하여 Hosting capacity를 키우거나[4], 전기차의 충전시간을 조절하여 Hosting capacity를 키우는 연구[5]가 진행되고 있다. 계통의 연결지점에 에너지 저장 장치인 ESS(Energy storage system)을 이용하여 Hosting capacity를 키우는 연구가 진행되고 있다.[6]

향후 재생에너지 비중이 계통에서 차지하는 비중이 늘어날수록 계통에 접속이 가능한 용량인 Hosting capacity을 정확하게 산정하고,

이를 키우는 방법에 대한 기술적 연구가 필요하다. 그리고 큰 Hosting capacity를 가지기 위한 기술적 해결책과 함께, 경제적으로 적용가능한 해결책 함께 찾아서 비교 검토하는 과정이 필요하다.

제 2 절 연구의 내용

선행 연구의 내용 및 주요 사항

1절에서 살펴본 바와 같이 재생에너지의 계통 연계를 위하여는 현재 수용가능한 Hosting capacity를 정의하고 산정하는 것이 필요하다. 이후 선로, 변압기, ESS 등의 설치를 통한 물리적 조건을 바꾸었을 때 Hosting capacity(재생에너지 수용량)의 변화량을 산정하는 것이 필요하다.

선행 논문에서는 큰 계통에 연결, OLTC 동작, 재생에너지의 유효전력 감발, 수요 관리, 무효전력 제어를 통하여 증가시키는 방안에 대하여 제안되어 있다.[6] 다양한 논문에서 각각의 방법에 대하여 증가하는 재생에너지 수용량을 산정하고 개선되는 크기를 보여주고 있다.

본 논문에서 제안하는 바

본 논문에서는 주어진 계통에서 선로 증설 및 ESS 설치를 통한 재생에너지 수용성을 산정 방안을 제안하고, 개별 경우의 비용을 산정하고자 한다. 이를 통하여 개별 동작에 대하여 비용을 비교하고 가장 경제적이고 실현 가능한 해결책을 제안하고자 한다.

이를 위하여 주어진 계통에서 하루 기준 24시간을 기준으로 부하

및 재생에너지 발전량을 모의하고, 재생에너지 발전량을 조금씩 증가시키며 계통에서 수용가능한 재생 에너지 수용률을 산정하였다. 다수의 모선과 시간을 고려한 비선형의 조류계산을 풀게 되면, 개별 조류 계산에 많은 시간이 필요하고, 최적화 문제를 산정하기 어렵기 때문에 모든 조건을 선형화하였다.

선로 증설 및 ESS 설치 조건에 따라 달라지는 수용량의 변화를 확인하였고 개별 경우의 비용도 산정하여, 수용률 증가와 투자 비용에 따른 경제성을 분석하였다.

본 논문의 결과에 따르면 선로의 증설을 통하여 달성할 수 있는 수용률의 한계가 낮으며, ESS만 이용한 경우는 특정 용량이상에서는 ESS 용량 추가에 따른 수용률의 증가를 불가능하다.

이를 통하여 재생 에너지의 비중이 낮은 초기에는 선로 증설을 고려하지 않고, ESS 설치 용량을 키워가면서 수용성을 높이는 것이 경제적임을 확인할 수 있었다. 추가적으로 시뮬레이션 계통 기준 수용률이 25%이상일 경우에는 ESS 설치뿐 아니라 선로 증설도 함께 고려하는 것이 경제적임을 확인할 수 있었다.

제 3 절 논문의 구성

본 석사 학위 논문의 구성은 다음과 같다.

2장에서는 수용률 산정 방안에 대하여 정의하고, 계통 변화시 산정할 수 잇는 수용률에 대하여 정의하였다. 최적화 문제 및 향후 계통

계획 문제에 적용을 위하여 전체 조건을 선형화하여 표현하였다.

3장에서는 시뮬레이션 대상 계통을 설명하고, 선로 증설을 통한 재생 에너지 수용률의 변화에 대하여 살펴본다. 이를 통하여 계통의 증설로 인해 도달할 수 있는 최대 수용률을 확인하고, 향후 ESS 운영시 함께 고려될 선로 증설의 경우의 수도 산정하였다.

4장에서는 계통에 ESS를 추가했을 경우, 수용률 변화에 대하여 모의하였다. ESS 용량을 변경하거나, ESS 설치 위치를 변경하면서 수용률 변화를 확인하였고, 전 모선에 ESS를 설치하였을 때와 OLTC 동작을 통한 수용률의 변화를 확인하였다. 최종적으로 선로 증설과 ESS 용량 증가를 동시에 고려한 경우의 수용률 변화와 경제성을 비교하였다.

5장에서는 3장과 4장에서 구한 다양한 케이스의 데이터를 정리하고 비교 분석하였다. 이를 통하여 ESS의 효과 및 동일 수용성을 달성하기 위한 경제적인 방안을 정리하였다. 추가적으로 계통을 변경하여 수용률을 100% 달성할 수 있는 방법도 확인하였다.

마지막으로 6장에서는 본 학위 논문의 결론을 정리하고, 재생 에너지 수용률 향상을 위한 ESS의 효과 및 경제성 분석에 대한 추가적인 연구에 관한 논의가 기술되었다.

제 4 절 논문에서 사용되는 주요 파라미터 정의

본 학위 논문에는 선형화를 위하여 다양한 변수 및 파라미터가 정의된다. 이에 주요 변수 및 파라미터를 서론에서 아래와 같이 정의한다.

[표 1] 논문에 사용된 주요 파라미터 및 변수

구분	표시	의미
Sets	L	set of lines
	B	set of bus
	TR	set of transformers
	T	set of time
	S	set of storage
Index	∧	index for calculated variables
	m, n	index of bus
	t	index of time stage
	P	active power
	Q	reactive power
	C	cost
	$\boldsymbol{\eta_{out}}$	discharging efficiency
	$\boldsymbol{\eta_{in}}$	charging efficiency
	SOC	state of charge
Parameter	$\boldsymbol{b_{mn}}$	susceptance of line mn
	$\boldsymbol{g_{mn}}$	conductance of line mn
	$\boldsymbol{r_{mn}}$	resistance of line mn
Variable	PL	active power flow
	QL	reactive power flow
	G	generation
	D	demand
	$\boldsymbol{V_m}$	voltage magnitude at bus m
	$\boldsymbol{\theta_m}$	voltage angle at bus m
Integer variable	$\boldsymbol{\omega}$	ESS charging integer (0,1)

제 2 장 수용성 산정 및 문제 정식화

제 1 절 수용성 산정 방법

재생 에너지 수용성을 산정하는 방식은 다양하다. 기본적으로 개별 국가의 규정에 따라 산정할 수 있고, 또는 기술적인 운영 및 계산을 통하여 산정이 가능하다. 이에 CIGRE의 [7]에서 재생에너지 수용성(Hosting capacity)에 영향을 미치는 요소를 아래의 표와 같이 크게 4가지로 세부기준 16가지로 구분하였다.

[표 2] Hosting capacity 영향 요소

열적 허용용량	전기품질/전압	보호 협조	신뢰도/안전
변전소 주변압기	전압변동율	보호기기 부 동작	단독운전
특고압계통 전선	규정전압 유지범위	보호기기 오동작	계통운영 유연성
배전용 변압기	전압조정 제어영향	고장전류 증가	(선로전환 등)
저압계통 전선	탭 제어기 영향	역조류 영향	보상설비 제어성능

금번 논문에서는 계통의 증설 및 ESS의 설치의 관점에서 수용성을 판단하기 위하여 변압기 및 전선과 관련된 열적 허용 용량 및 규정전압 유지범위를 포함하는 전기 품질의 관점에서 산정하고 분석하였다. 계통의 운영적 영향요소인 보호 협조나 신뢰도/안전의 부분은 고려하지 않았다.

한국 전력 보고서[8]에 따르면 수용성 증가 방안도 크게 3가지

구분해 볼 수 있다. 첫번째로는 물리적인 변화를 주는 계통보강으로 전선의 대용량화, 상위계통 연계, 변압기 증설, SVR 추가, 보호기기 교체 등이 있다. 두번째로는 운영기술을 개선하는 방법으로 전압조정 기능 개선, 보호기기 협조 정정 등이 있다. 마지막으로 기술적인 솔루션을 별도로 적용하는 무효전력제어, 유효전력 제어, ESS활용, PV 발전소 입지 최적화 등이 있다.

금번 논문에서는 계통보강 방법에서 선로의 증설과 기술적인 솔루션에서 ESS의 활용을 적용하고 비교하였다. 추가로 금번 논문에서는 Hosting capacity를 재생 에너지 수용률로 용어를 통일하여 사용할 것이며, 수용률 수치에 대한 산정 방식은 (2,1)과 같이 RE3020에서 사용한 재생에너지 발전량을 기준으로 수용률을 정의하였다.

$$\textbf{수용률} = \frac{\textbf{재생에너지 발전량}(\boldsymbol{Mwh})}{\textbf{전체 발전량}(\boldsymbol{Mwh})} \times \mathbf{100}(\%) \qquad \textbf{(2.1)}$$

제 2 절 문제 정식화

2.2.1 선형화 구현 방법

시간단위로 변화하는 Load 및 재생에너지 발전량에 따라 선로 및 모선 전압의 범위를 산출하기 위해서는 조류계산은 필수적이다. 이에 추가로 전체 시간에서 ESS의 충방전 운영을 고려하기 위해서는 누적된 조류 계산이 필수적이다. 이에 많은 양의 조류 계산을 적합한 정확도로 빠르게 하는 것이 무엇보다 중요하다.

이를 위하여 기존의 비선형적 특성을 가지는 AC 조류계산의 특징을 살펴보면, 모선 수와 시간에 관련된 비선형 연립 방정식을 풀어야 한다. 이때 모선의 숫자 및 시간 단위가 많아질수록 기하급수적으로 많은 시간이 필요로 하며, 해를 찾지 못하는 경우가 생길 수 있다. 그래서 금번 논문에서는 비 선형적인 특징을 가지는 AC 조류계산을 선형화하여 문제를 풀이하였다.

선형화된 조류방정식을 푸는 방식은 대표적으로 AC 전압을 DC 전압으로 근사하여 푸는 DC 조류계산이 있다. 이때 가정은 모든 모선의 전압은 1로 근사하고, 전압의 차이는 0($\Delta V_m = 0$)으로 보고, 인접한 각도의 차이도 작아서 Sin 및 Cos 함수를 선형으로 근사하여 $\sin(\boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{\theta}_n) \approx \boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{\theta}_n$, $\cos(\boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{\theta}_n) \approx 1$ 풀 수 있는 가정을 적용한다. 그 결과 기존에 비선형 식으로 표현되었던, 두 모선간 흐르는 유효전력을

$\mathbf{PL}_{mn} = -b_{mn}(\boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{\theta}_n)$으로 간략화 하여 풀 수 있다. 하지만 이 방법은 산은 빠르지만, 오차가 크기 때문에 금번 논문에서는 사용하지 않았다.

논문에 사용한 선형화된 조류계산의 경우는 선행 연구[9]에 따라 아래 가정을 바탕으로 운전점 전압을 가진 선형 조류계산을 진행하였다.

AC 조류계산의 경우 두 모선 간의 유효전력의 양을 정리하면 (2.2)으로 표현되며, 무효전력 양은 (2.3)으로 표현된다.

$$\mathbf{PL}_{mn} = g_{mn}V_m^2 - g_{mn}V_mV_n\cos(\theta_m - \theta_n) - b_{mn}V_mV_n\sin(\theta_m - \theta_n), \forall\, mn \in L \quad (2.2)$$

$$QL_{mn} = -b_{mn}V_m^2 - b_{mn}V_mV_n\cos(\theta_m - \theta_n) - g_{mn}V_mV_n\sin(\theta_m - \theta_n), \forall\, mn \in L \quad (2.3)$$

이때 각 모선의 전압과 각도를 Slack 모선을 기준으로 한 편차로 표현하면 (2.4), (2.5) 형태로 정리할 수 있다.

$$V_m = V_{slack} + \Delta V_m,\ \forall\, m \in B \quad (2.4)$$

$$\theta_m = \theta_{slack} + \Delta\theta_m,\ \forall\, m \in B \quad (2.5)$$

인접한 두 모선의 각도 차이가 작다는 가정을 한다면 (2.6), (2.7)의 수식으로 각도와 연관되 내용을 선형화 할 수 있다.

$$\sin(\theta_m - \theta_n) \approx \theta_m - \theta_n = \Delta\theta_m - \Delta\theta_n,\ \forall\, mn \in L \quad (2.6)$$

$$\cos(\theta_m - \theta_n) \approx 1,\quad \forall\, mn \in L \quad (2.7)$$

인접한 두 모선이 전압과 각도의 차이가 작다는 가정을 적용한다면, 작은 두 개의 곱은 (2.8)과 같이 0으로 근사할 수 있다.

$$\Delta V_m\Delta\theta_m = \Delta V_m\Delta\theta_n = \Delta V_n\Delta\theta_m = \Delta V_n\Delta\theta_n \approx 0,\ \forall\, mn \in L \quad (2.8)$$

이를 반영하면 (2.2), (2.3)의 식은 (2.9), (2.10)의 식으로 바뀐다.

$$\mathbf{PL}_{mn} = g_{mn}(1 + \Delta V_m)(\Delta V_m - \Delta V_n) - b_{mn}(\Delta\theta_m - \Delta\theta_n),\ \forall\, mn \in L \quad (2.9)$$

$$\boldsymbol{QL_{mn}} = -\boldsymbol{b_{mn}}(\mathbf{1}+\Delta\boldsymbol{V_m})(\Delta\boldsymbol{V_m}-\Delta\boldsymbol{V_n})-\boldsymbol{g_{mn}}(\Delta\boldsymbol{\theta_m}-\Delta\boldsymbol{\theta_n}), \forall\, \boldsymbol{mn} \in \boldsymbol{L} \quad (2.10)$$

만약 조류의 선로 손실이 없다면 $\mathbf{PL}_{\boldsymbol{mn}} = \boldsymbol{PL_{nm}}$ 이 만족한다. 이를 적용하면 $\Delta V_m(\Delta V_m - \Delta V_n) \approx 0$ 이 되어서 (2.9)의 수식은 (2.11)을 식으로 간략화 할 수 있다.

$$\mathbf{PL}_{\boldsymbol{mn}} = \boldsymbol{g_{mn}}(\Delta\boldsymbol{V_m}-\Delta\boldsymbol{V_n})-\boldsymbol{b_{mn}}(\Delta\boldsymbol{\theta_m}-\Delta\boldsymbol{\theta_n}) \ , \forall\, \boldsymbol{mn} \in \boldsymbol{L} \quad (2.11)$$

하지만 선로 손실을 무시한다면, 오차가 발생하기 때문에, 선로 손실을 고려한 선형 조류계산을 풀기 위해서는 ESS 운영이 없을 때를 기준으로 AC 조류 계산을 수행하여 운전점의 전압을 구한다. 그리고 개별 모선별로 구한 운전점의 값을 적용하여 $\Delta\hat{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{m}}$ 의 값에 상수로 기입하여 조류 계산을 수행한다.

최종적으로 운전점의 전압을 기준으로 다른 변수들의 정보는 모두 선형화 된 (2.12)과 (2.13)을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{PL}_{\boldsymbol{mn}} = \boldsymbol{g_{mn}}(\mathbf{1}+\Delta\hat{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{m}})(\Delta\boldsymbol{V_m}-\Delta\boldsymbol{V_n})-\boldsymbol{b_{mn}}(\Delta\boldsymbol{\theta_m}-\Delta\boldsymbol{\theta_n}) \ , \forall\, \boldsymbol{mn} \in \boldsymbol{L} \quad (2.12)$$

$$\boldsymbol{QL_{mn}} = -\boldsymbol{b_{mn}}(\mathbf{1}+\Delta\hat{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{m}})(\Delta\boldsymbol{V_m}-\Delta\boldsymbol{V_n})-\boldsymbol{g_{mn}}(\Delta\boldsymbol{\theta_m}-\Delta\boldsymbol{\theta_n}) \ , \forall\, \boldsymbol{mn} \in \boldsymbol{L} \quad (2.13)$$

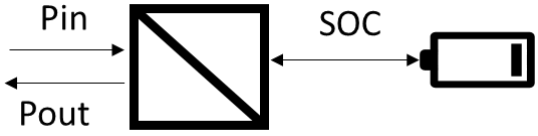
이와 같이 선로 간의 선형화된 유효전력와 무효전력의 수식을 이용하여 향후 조류계산을 진행하였다.

선로의 용량은 기본적으로 선로에 흐르는 전류의 크기에 따라 정해지게 된다. 실제 전율의 크기를 구하기 위해서는, 유효 무효전력을 모두 고려하여야 한다. 유효/무효전력을 모두 고려하게 되면, 전류의 크기에 제곱 부분이 생겨서 비선형으로 수식이 전개된다. 재생 에너지 발전량에 따라서 변경되는 요소는 유효전력이라는 특징과 선로의 길이가

짧을 경우 유효 전력이 선로의 허용 전류에 큰 영향을 주는 특징을 반영하였다. 이를 이용하여 금번 논문에서는 선로별 허용 전류를 유효전력의 값으로 치환하고, 앞서 조류계산의 과정에서 선형화된 선로 간의 흐르는 유효전력이 값을 기준으로 선로의 허용 유효전력을 값과 비교하여 선로 부하율을 판단하였다.

변압기의 용량도 선로의 용량과 마찬가지로, 변압기의 열적 용량에 큰 영향을 끼치는 유효전력의 양을 기준으로 최대값을 지정하고, 변압기 양단에 흐르는 유효전력의 양이 변압기의 부하율을 판단하였다. 금번 논문에서는 변압기의 용량을 초과하는 경우가 존재하지 않아서 실제 결과에는 반영하지 않았다.

ESS의 충방전 특징을 반영한 선형화를 위하여 SOC 산정 공식을 (2.14)와 같이 적용하였다.



[그림 1] ESS의 충방전 그림

$$\mathrm{SOC}_{t+1} = \mathbf{SOC}_t + \boldsymbol{\omega_t} \cdot \boldsymbol{\eta_{in}} \cdot \boldsymbol{P_{in.t}} + \boldsymbol{\omega_t} \cdot \boldsymbol{\eta_{out}} \cdot \boldsymbol{P_{out.t}} \qquad (2.14)$$

특정 시간에 충전 또는 방전 하나만 진행하기 위하여 정수 변수($\boldsymbol{\omega_t}$)를 도입하였다. 정수 변수 $\boldsymbol{\omega_t}$=0 인 경우는 ESS가 방전을 하거나, 아무 동작을 하지 않는다. 정수 변수 $\boldsymbol{\omega_t}$=1인 경우는 ESS가

충전을 하거나, 아무 동작을 하지 않다. 이 변수가 적용되지 않았을 때에는 선로에서 더 많은 유효전력을 흡수하거나, 공급하기 위하여 ESS 자체가 손실을 내는 결과를 볼 수 있다.

ESS의 충방전 손실을 고려한 계수 $\boldsymbol{\eta_{in}}$, $\boldsymbol{\eta_{out}}$ 을 도입하여 ESS가 동작할수록 전체 계통의 필요 유효 전력이 커지도록 고려하였다. 실제 ESS 동작없이 계통이 안정적으로 동작한다면 ESS는 동작하지 않는 것도 확인 할 수 있었다. ESS와 계통 간에 주고받는 전력은 $\boldsymbol{P_{in.t}}$, $\boldsymbol{P_{out.t}}$ 으로 표현하여 최소값은 0이고, 최대값은 ESS의 출력 용량으로 설정하였다.

2.2.2 목적함수

금번 논문에서는 외부 계통에서 들어오는 유효전력의 값을 고려하여, 최소 비용으로 계통을 운영하는 것을 목적으로 목적함수를 설정하였다. 시간대별 계통 한계가격(SMP: system marginal price)를 설정하고, 이에 외부 계통에서 받아들이는 유효전력을 곱하여 이 값을 최소화하도록 (2.15)와 같이 목적 함수를 설정하였다.

이때 SMP는 전력거래소의 19년 제주도의 연 평균 시간대별 SMP를 적용하였다.

$$\boldsymbol{Objective\ function\ =\ Min}(-\sum_{t=0}^{t=T}\mathbf{SMP}_t \cdot \boldsymbol{P_t^{slack}}) \qquad (2.15)$$

2.2.3 제약 조건

금번 논문의 최적화 관련 제약조건은 크게 조류제약 조건, 선로 및 변압기 용량 제약 조건, 전압 제약조건, ESS 제약조건으로 나뉘어 진다.

조류 제약 조건은 2.2.1에서 설명한 선형화 방법을 바탕으로 하여 수식으로 정리된다.

(2.16)은 개별 모선의 유효전력의 합은 모선의 ESS 발전량, 연결된 선로를 통한 유효전력 전달, 모선의 발전량의 합은 모선의 부하의 합과 같다. (2.17)은 개별 모선의 무효전력의 균형을 의미한다.

$$\sum_{s\in S} \boldsymbol{P_m^S} + \sum_{n\in L_m} \boldsymbol{PL_{mn}} + \boldsymbol{P_m^G} = \boldsymbol{P_m^D}\ ,\ \forall\, \boldsymbol{m} \in \boldsymbol{B} \tag{2.16}$$

$$\sum_{s\in S} \boldsymbol{Q_m^S} + \sum_{n\in L_m} \boldsymbol{QL_{mn}} + \boldsymbol{Q_m^G} = \boldsymbol{Q_m^D}\ ,\ \forall\, \boldsymbol{m} \in \boldsymbol{B} \tag{2.17}$$

(2.18), (2.19) 는 연결된 두 모선의 유효전력과 무효전력의 양을 선형화 하여 구한 값을 의미한다.

$$\mathbf{PL}_{mn} = \boldsymbol{g_{mn}}(\mathbf{1} + \Delta\widehat{\boldsymbol{V}}_m)(\Delta \boldsymbol{V_m} - \Delta \boldsymbol{V_n}) - \boldsymbol{b_{mn}}(\Delta\boldsymbol{\theta_m} - \Delta\boldsymbol{\theta_n})\ ,\ \forall\, \boldsymbol{mn} \in \boldsymbol{L} \tag{2.18}$$

$$\boldsymbol{Q}\mathbf{L}_{mn} = -\boldsymbol{b_{mn}}(\mathbf{1} + \Delta\widehat{\boldsymbol{V}}_m)(\Delta \boldsymbol{V_m} - \Delta \boldsymbol{V_n}) - \boldsymbol{g_{mn}}(\Delta\boldsymbol{\theta_m} - \Delta\boldsymbol{\theta_n})\ ,\ \forall\, \boldsymbol{mn} \in \boldsymbol{L} \tag{2.19}$$

(2.20)은 선로의 최대 유효 전력의 값을 정의하고, 유효전력의 방향에 따라서 양수와 음수의 범위를 가진다. (2.21)은 변압기의 유효전력 용량을 기준으로 제약조건으로 적용된다.

$$-\mathbf{PL}_{mn}^{max} \le \mathbf{PL}_{mn} \le \mathbf{PL}_{mn}^{max}\ ,\ \forall\, \boldsymbol{mn} \in \boldsymbol{L} \tag{2.20}$$

$$-\boldsymbol{TR_m^{max}} \le \boldsymbol{TR_m} \le \boldsymbol{TR_m^{max}}\ ,\ \forall\, \boldsymbol{m} \in \boldsymbol{T} \tag{2.21}$$

개별 모선 별 전압의 범위 및 제약 조건은 아래와 같다, 개별 모선의 전압 편차를 반영하여 (2.22), (2.23)을 정의하고, 전체 편차를

반영한 결과를 (2.24)의 형태의 부등식 제약조건으로 적용한다.

$$\Delta V_m^{min} = V_m^{min} - 1\ ,\ \forall\, m \in B \tag{2.22}$$

$$\Delta V_m^{max} = V_m^{max} - 1\ ,\ \forall\, m \in B \tag{2.23}$$

$$\Delta V_m^{min} \le \Delta V_m \le \Delta V_m^{max},\ \forall\, m \in B \tag{2.24}$$

ESS의 운전과 관련된 제약조건은 아래의 수식과 같다. (2.25)에서 안정적인 운영을 위한 SOC의 범위를 지정하고, (2.26) 식을 통하여 개별 시간의 SOC 값을 정의한다. (2.24) 식을 통하여 시작과 끝의 SOC 값을 최소값 0.2로 적용한다. 시뮬레이션에서는 태양광 발전을 시작하는 8 시각을 기준으로 최소값을 만족하도록 적용하였다.

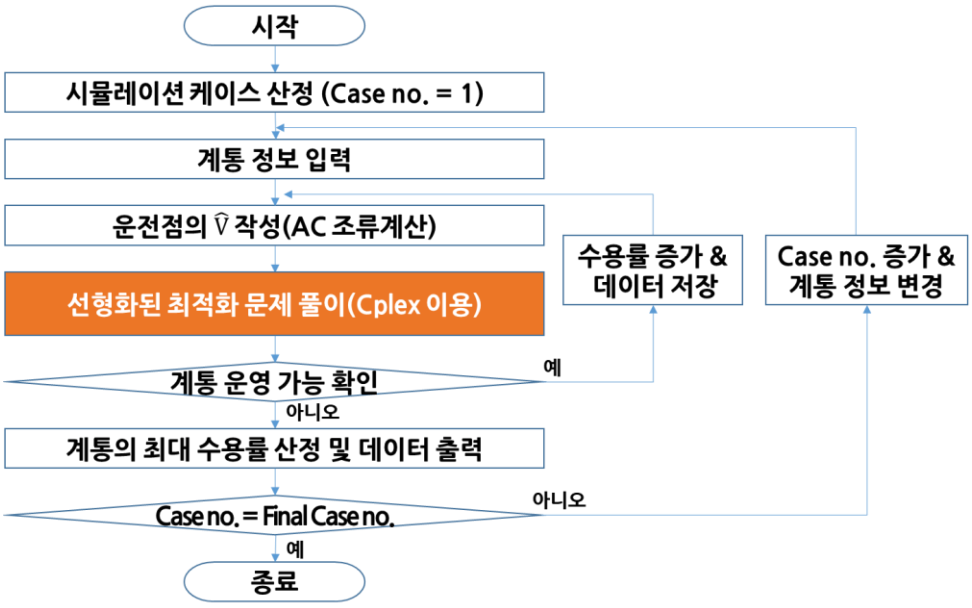
$$0.2 \le \mathrm{SOC}_m \le 0.9\ ,\ \forall\, m \in S \tag{2.25}$$

$$\mathrm{SOC}_{t+1} = \mathrm{SOC}_t + \omega_t \cdot \eta_{in} \cdot P_{in.t} + \omega_t \cdot \eta_{out} \cdot P_{out.t} \tag{2.26}$$

$$\mathrm{SOC}_m^{t=0} = \mathrm{SOC}_m^{t=T} = \mathrm{SOC}_m^{min}\ ,\ \forall\, m \in S \tag{2.24}$$

제 3 절 수용률 산정 방식

각기 다른 조건의 계통에서 수용률을 산정하기 위하여는 그림 2와 같은 순서도에 따라서 수용률을 산정한다. 먼저 정해진 조건에 따라서 계통 정보를 입력한다. 계통 조건에 따른 다양한 변경 사항에 대하여 개별적으로 계통 입력 정보를 바꿔 가면서 순서도 과정을 반복한다.



[그림 2] 수용률 산정 순서도

정해진 계통의 조건에서 ESS의 운전을 포함하지 않고, 조류계산을 수행한다. 이를 통하여 선로의 손실을 고려한 선형화 조류계산에서 사용하는 전압 편차의 운전점을 지정한다.

2절에서 정의된 방식을 기준으로 Python의 최적화 Tool인 Cplex를 이용하여 정수가 포함된 선형 최적화 문제를 풀이한다. 최적화를 통하여 구한 계통의 전압, 선로 부하, ESS의 운전 조건을 저장하고 수용율을 1 스텝 증가시킨다. 금번 시뮬레이션에서 수용률 변화의 1스텝의 기준으로 풍력 발전의 총량과 태양광 발전의 총량을 비교해보면 약 50배의 차이가 나기 때문에, 태양광 발전은 자기 발전량만큼 증가시키고, 풍력 발전의 경우는 1/50 만큼 발전량을 증가시켰다.

이를 통해서 해가 존재하는 최대의 태양광 및 풍력의 발전량을

산정하고 그 때의 값을 저장하고 출력한다, 계통의 조건에 따라서 계통 정보를 바꾸고 다시 앞의 과정을 반복하여 결과를 저장한다.

개별 계통의 특징에 따른 선로 증가길이와 ESS 증가용량을 구할 수 있다. 이에 각각 구한 값에 NREL에서 구한 아래 [표3]의 값을 적용하여 설치 비용을 산정하였다.

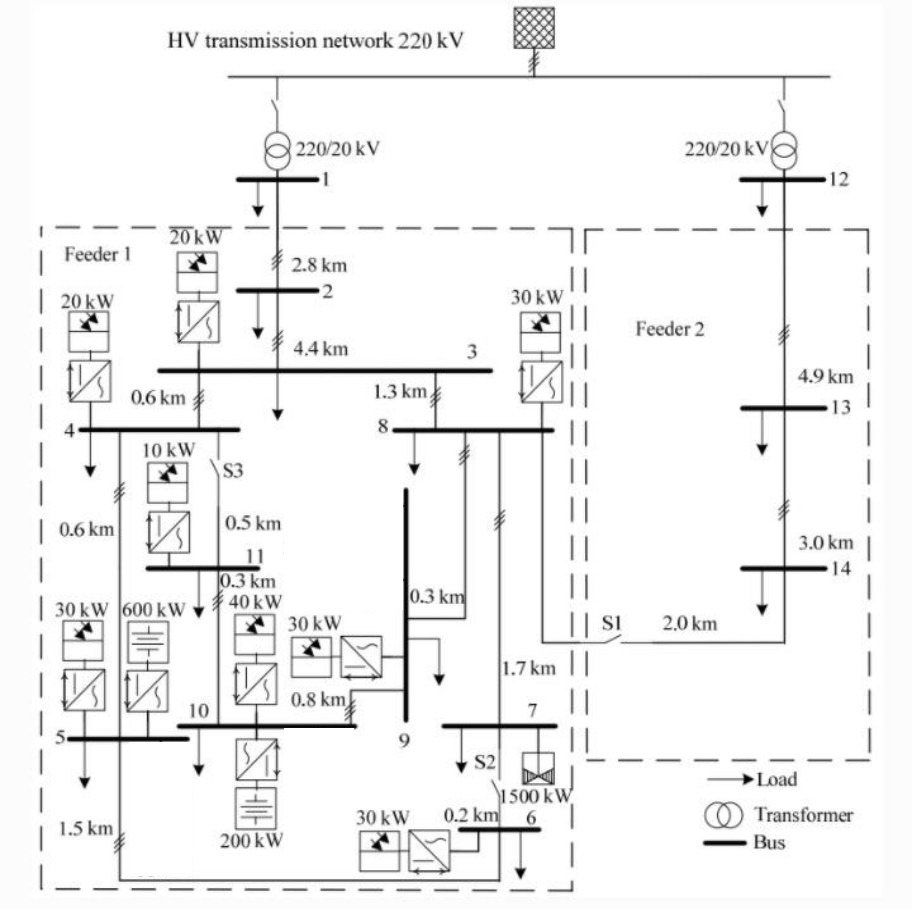
[표 3] 선로 증설 및 ESS 용량 증설 가격

내용	NREL 항목	단위 변환 전	단위 변환 후
Line 증설	25kV class circuit line extension, new construction	106.77 USD/ft	0.350 M.USD/km
ESS 증설	Front-of-the-meter Storage	1,660 USD/kWh	1.660 M.USD/MWh

제 3 장 선로 증설을 통한 수용률 변화 검증

제 1 절 대상 계통에 대한 설명

금번 논문의 대상 계통으로는 CIGRE[10]에서 Reference로 진행한 MV 계통을 사용하였다. 관련 계통의 단선도는 그림과 같다.



[그림 3] 시뮬레이션 계통도

모선 수: Slack 1개 포함 15모선

변압기: 110kV/20kV 25MVA 변압기 2대

계통의 선로 및 부하, 재생 에너지 발전량은 CIGRE 계통의 정보를 아래 표와 같이 정리하여 사용하였다. 이 과정에서 SMP는 제주 계통의 가격을 적용하여 반영하였다.

[표 4] 시뮬레이션 계통도 선로 정보

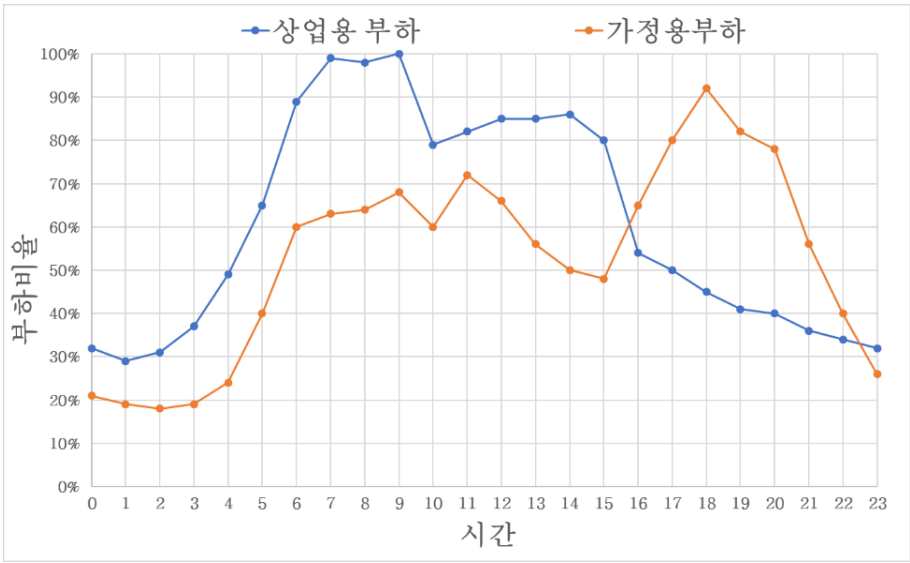
No.	From Bus	To Bus	Length(km)	Type
1	1	2	2.28	CABLE
2	2	3	4.42	CABLE
3	3	4	0.61	CABLE
4	4	5	0.56	CABLE
5	5	6	1.54	CABLE
6	7	8	1.67	CABLE
7	8	9	0.32	CABLE
8	9	10	0.77	CABLE
9	10	11	0.33	CABLE
10	3	8	1.30	CABLE
11	12	13	4.89	OHL
12	13	14	2.99	OHL
13	6	7	0.24	CABLE
14	11	4	0.49	CABLE
15	14	8	2.00	OHL

[표 5] 시뮬레이션 계통 선종 정보

	Capacitance of the line	Resistance of the line	Inductance of the line	Max thermal current
Unit	Nano Farad per km	Ohm per km	Ohm per km	kilo Ampere
CABLE	151.1749	0.501	0.716	0.145
OHL	10.0967	0.510	0.366	0.195

[표 6] 시뮬레이션 계통 부하 정보

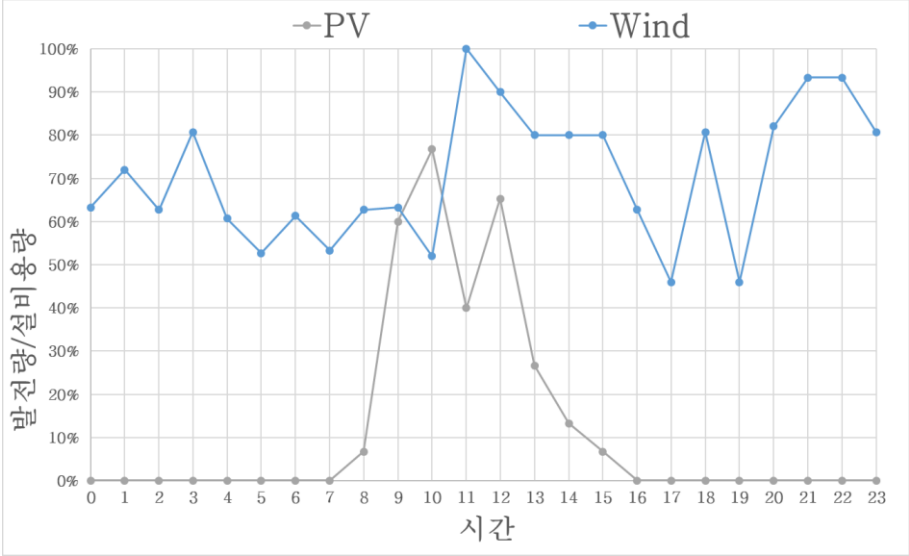
No.	Bus	Sn_mva	Cos_phi	Q-mode	Type
1	1	15.300	0.98	inductive	Residential
2	3	0.285	0.97	inductive	Residential
3	4	0.445	0.97	inductive	Residential
4	5	0.750	0.97	inductive	Residential
5	6	0.565	0.97	inductive	Residential
6	8	0.605	0.97	inductive	Residential
7	10	0.490	0.97	inductive	Residential
8	11	0.340	0.97	inductive	Residential
9	12	15.300	0.98	inductive	Residential
10	14	0.215	0.97	inductive	Residential
11	1	5.100	0.95	inductive	Commercial
12	3	0.265	0.85	inductive	Commercial
13	7	0.090	0.85	inductive	Commercial
14	9	0.675	0.85	inductive	Commercial
15	10	0.080	0.85	inductive	Commercial
16	12	5.280	0.95	inductive	Commercial
17	13	0.040	0.85	inductive	Commercial
18	14	0.390	0.85	inductive	Commercial



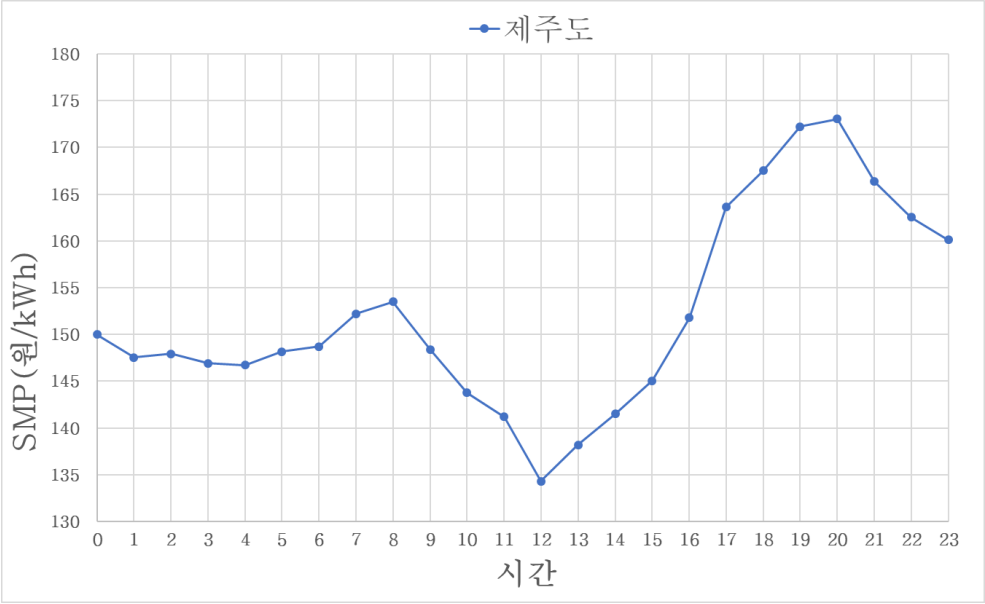
[그림 4] 시뮬레이션 계통 시간대별 부하 비율

[표 7] 시뮬레이션 계통 신재생 기본 발전량

No.	Bus	P_mw	Q_mvar	Sn_mva	Type
1	3	0.020	0	0.020	Photovoltaic
2	4	0.020	0	0.020	Photovoltaic
3	5	0.030	0	0.030	Photovoltaic
4	6	0.030	0	0.030	Photovoltaic
5	8	0.030	0	0.030	Photovoltaic
6	9	0.030	0	0.030	Photovoltaic
7	10	0.040	0	0.040	Photovoltaic
8	11	0.100	0	0.010	Photovoltaic
9	7	1.500	0	1.500	Wind Turbine



[그림 5] 시뮬레이션 계통 시간대별 재생에너지 발전 비중



[그림 6] 시뮬레이션 사용 시간대별 SMP 가격

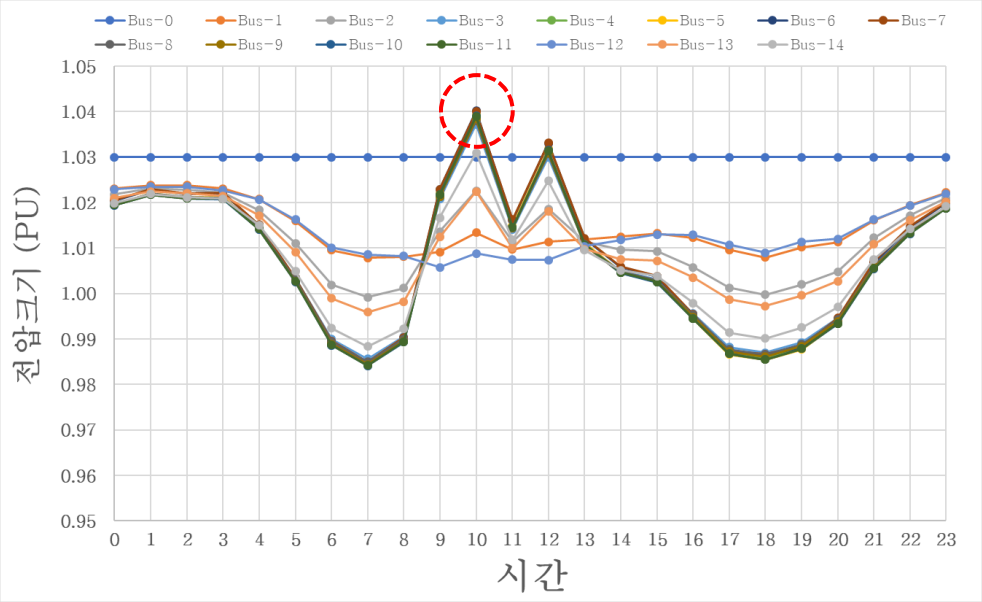
선로 증설 및 ESS의 설치 위치 및 용량 증가에 대한 수용률의 변화를 보기 위하여 아래와 시뮬레이션 케이스를 산정하여 결과를 비교하였다.

[표 8] 시뮬레이션 케이스 산정

No.	조건	변경 요소	위치
0	기본 계통의 수용률	X	3장 2절
1	선로증설을 고려한 계통의 수용률	선로 증설	3장 3절
2	ESS를 기본 설치 계통의 수용률	X	4장 1절
3	ESS 용량 변화를 고려한 계통의 수용률	ESS 용량	4장 1절
4	ESS 위치 변경을 고려한 계통의 수용률	ESS 용량	4장 2절
5	ESS 추가 설치 고려한 계통의 수용률	ESS 용량	4장 3절
6	ESS, OLTC를 고려한 계통의 수용률	ESS 용량	4장 4절
7	ESS, 선로증설을 고려한 계통의 수용률	ESS 용량, 선로 증설	5장 1절

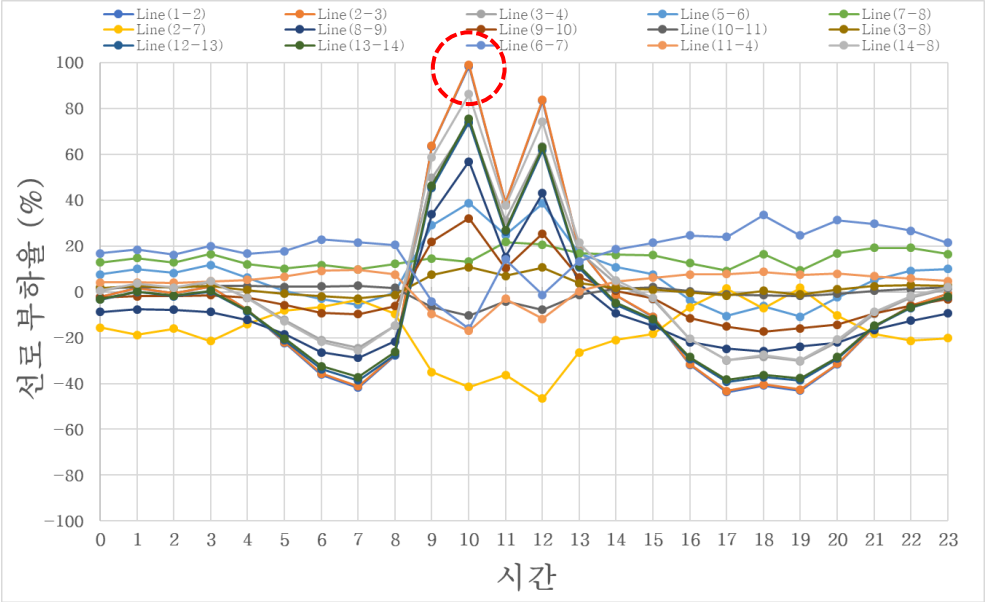
제 2 절 기본 계통의 수용률 계산

선로 증설도 없고, ESS의 설치도 없는 기본 계통의 최대 수용률을 보기 위하여, 재생 에너지 발전량을 해가 존재하는 부분까지 키워 보았다. 이 경우에 해가 존재하는 최대 수용률은 9.8%가 나오는 것을 확인할 수 있었다. 그림 7은 최대 수용률이 발생한 경우의 전체 모선의 전압 프로파일을 나타낸다. 태양광 발전량이 많은 10시에서 고전압을 보였고, 하지만 최대 전압인 1.05에는 도달하지 않는 것을 볼 수 있다.



[그림 7] 기본 계통의 전압

그림 2는 최대 수용률이 발생한 경우의 전체 선로 부하율을 나타낸다. 고전압이 발생했던 10번 시간대에서 2번 모선에서 3번 모선으로 흐르는 선로에서 선로 부하율이 100%가 됨을 확인할 수 있다.



[그림 8] 기본 계통의 선로 부하율

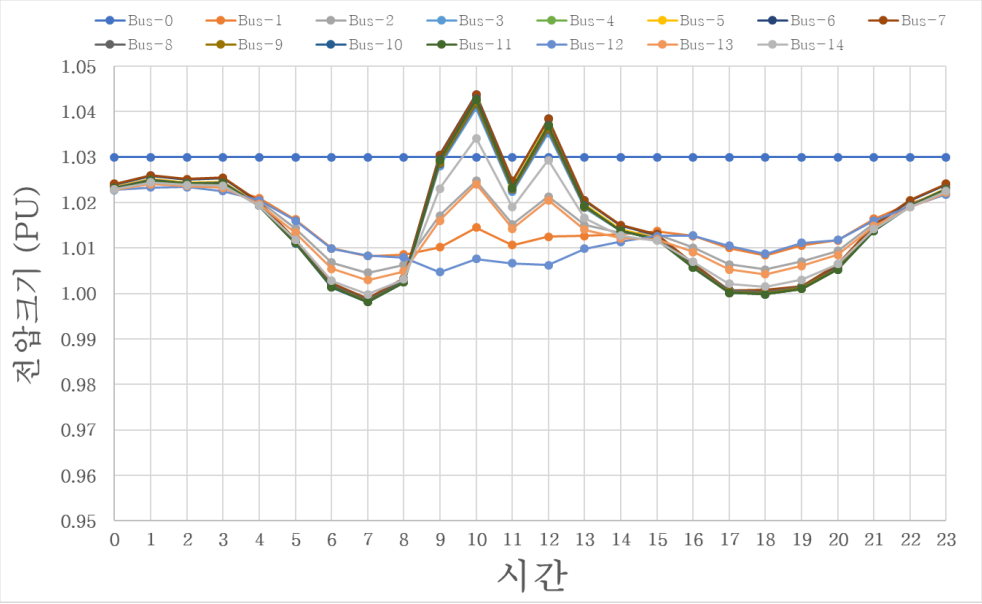
그림 7과 그림 8의 결과를 종합해보면, ESS의 설치가 없는 기본 계통에서는 선로 과부하로 인하여 최대 수용률이 정해진다는 것을 알 수 있다. 계통의 구성에 따라 선로 과부하 또는 모선의 과전압 또는 저전압으로 인하여 최대 수용률이 정해질 것이다. 계통의 최대 수용률이 나오는 경우를 파악하고 이를 해소해 준다면 더 높은 계통의 수용율을 구할 수 있다.

제 3 절 선로 증설을 고려한 계통의 수용률 계산

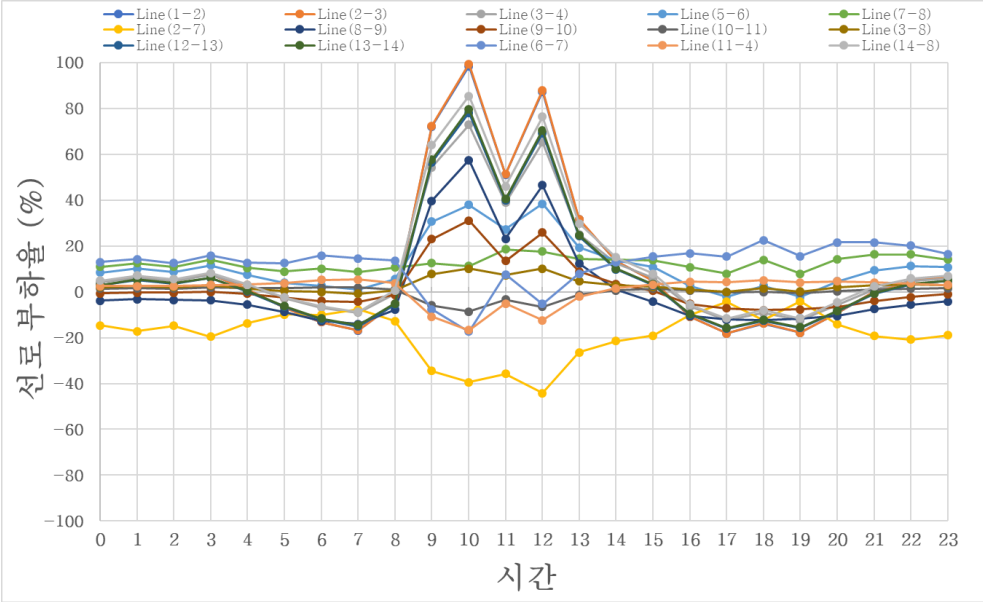
3장 2절에서 살펴본 선로 증설이 없는 최대 수용률에서 선로를 1개씩 증가해가면서 각각의 수용률을 구해보았다. 이 경우 각 선로별

최대 선로 증설의 개수를 하나로 지정하고, 선로의 증설의 경우의 수를 고려해서 실험하였다.

모든 선로가 1개씩 증설되었을 때 16.5%의 최대 수용률을 구할 수 있었다. 선로 증설이 없는 기본 계통의 최대 수용률 9.8%에서 6.7% 증가함을 알 수 있다. 최대 수용률이 나오는 조건도 동일하게 최대 전압이 아닌 2번과 3번 모선이 연결되 선로에서 선로 부하율의 최대값으로 인하여 수용률이 정해지는 것을 알 수 있다.



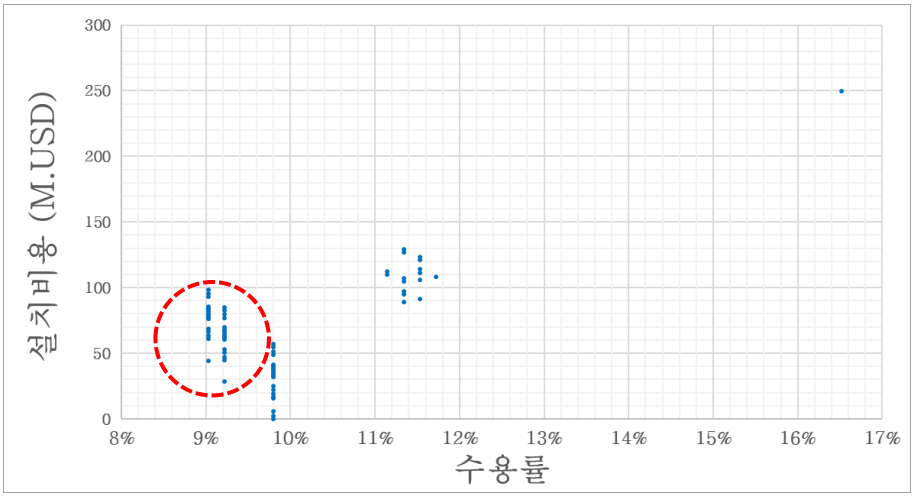
[그림 9] 선로 증설을 고려한 계통의 전압



[그림 10] 선로 증설을 고려한 계통의 선로 부하율

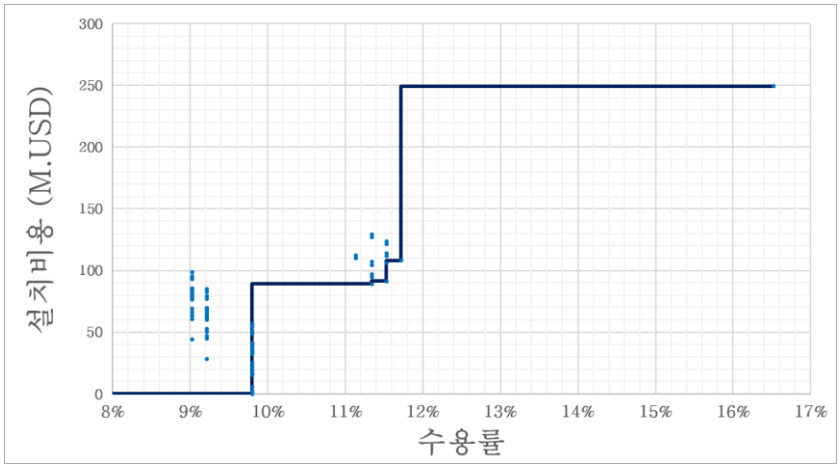
이를 통하여 기존 계통의 선로 증설에서 모든 선로를 비례적으로 키운다면, 동일한 선로 또는 모선의 전압에서 문제가 일으킴을 알 수 있다.

그림 11은 선로 증설 경우에 따른 비용을 산정하여 하나의 그래프에 표현하였다. 특이한 점은 특정 선로를 증설할 경우 오히려 계통의 수용률이 낮게 나온 결과이다. 이는 선로 증설로 인한 조류 흐름의 변경으로 최대 수용률을 낮추는 결과도 가져올 수 있다.



[그림 11] 선로 증설을 고려한 계통의 수용률/비용

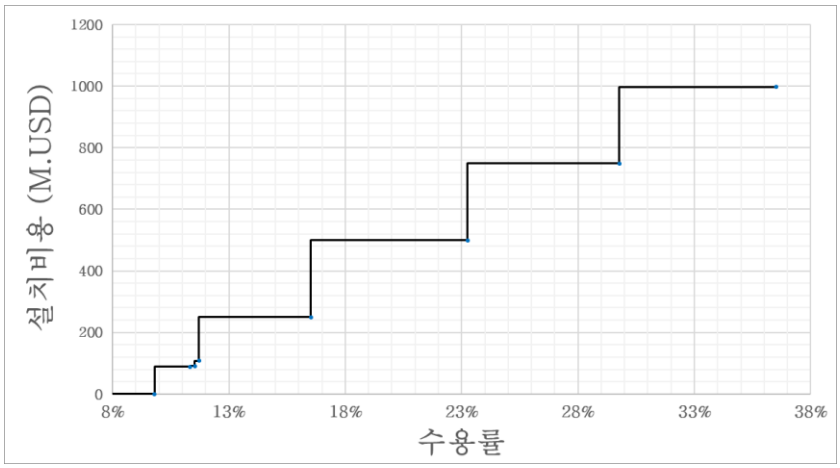
그림 11에서 개별 수용률을 달성하기 위한 최소 비용을 산정해서 이어보면 그림 12와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 12를 살펴본다면 선로 증설만 고려했을 때, 특정 수용률을 달성하기 위한 비용을 알 수 있다. 수용률에 대한 설치 비용의 곡선은 선형적으로 비용이 증가하는 것이 아닌, 계단형태로 비용이 증가함을 알 수 있다.



[그림 12] 선로 증설을 고려한 계통의 비용 곡선

추가적으로 선로 증설을 최대 4개까지 증설이 가능하다고 가정하면

수용률은 36.5%까지 증가시킬 수 있다는 것을 그림 13을 통하여 확인할 수 있었다. 이 경우는 물리적으로 불가능하다고 판단이 되어, 최종 결과 비교에는 적용하지 않았다.



[그림 13] 선로증설을 최대 4개로 고려한 계통의 비용 곡선

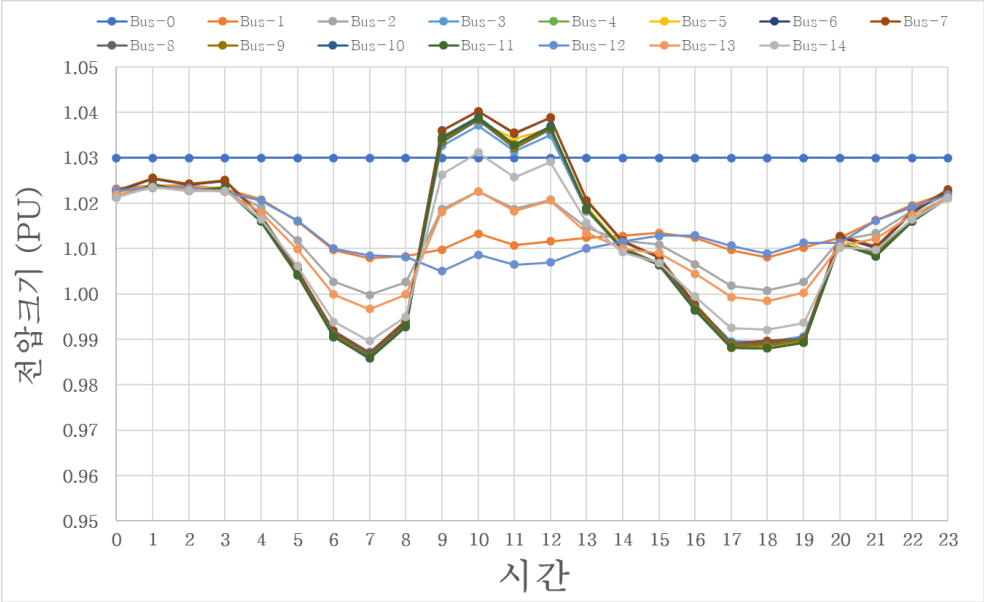
제 4 장 ESS를 통한 수용률 변화 검증

4장에서는 ESS의 추가한 계통의 수용률 변화를 살펴볼 것이다. 1절에서는 기본적인 ESS의 위치에서 용량 변화를 반영한 결과를 확인하고, 2절에서는 ESS의 위치를 변경하여 조건에서 용량을 변화시킨 결과를 확인하였다. 1절과 2절의 비교를 통하여 ESS 위치에 따른 최대 수용률의 변화를 확인할 수 있다. 3절에서는 전 모선에 ESS를 설치하여 수용률의 변화를 확인하였다. 4절에서는 기본적인 ESS의 위치 및 용량 변화에서 연계점의 전압을 변경시키는 OLTC 동작을 가정하여 수용률의 변화를 확인하였다. 5절에서는 기본적인 ESS의 위치 및 용량에서 선로 증설까지 고려한 복합적인 결과를 비교하였다.

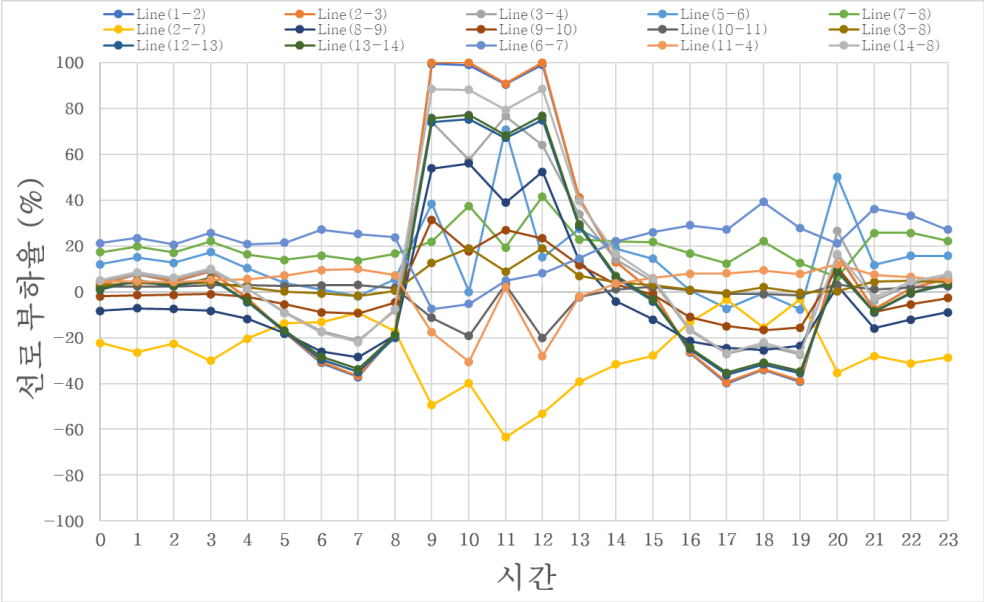
제 1 절 ESS를 고려한 계통의 수용률 계산

기본 계통에서 5번 모선에 600kW, 10번 모선에 200kW ESS를 설치하고 동작을 확인하였다. ESS를 적용한 계통의 최대 수용률은 13.1%로 확인하였다. 이는 ESS가 없는 기본 계통의 수용률 9.8%에서 3.4%가 증가되었음을 확인할 수 있다.

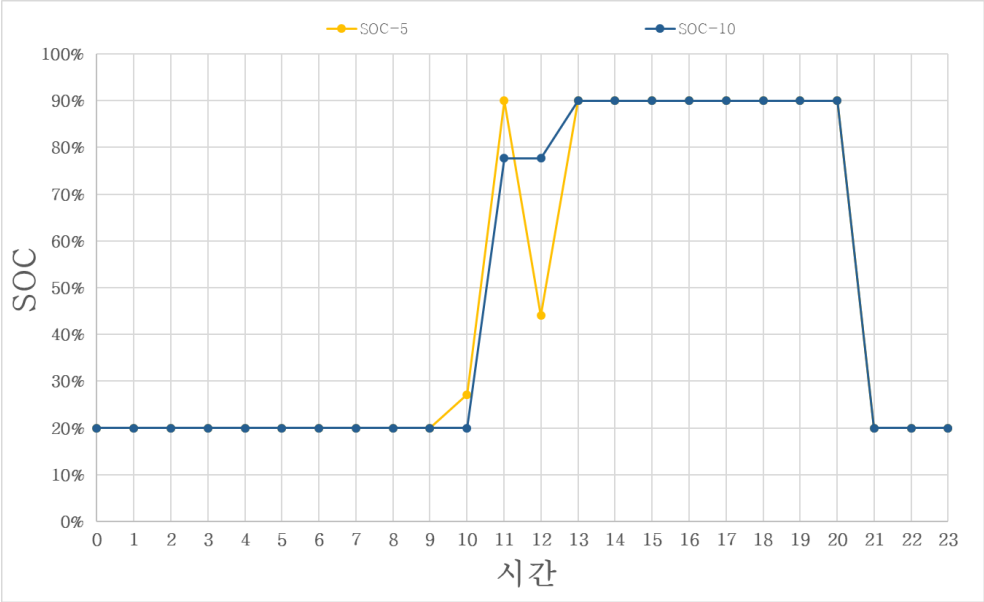
기존 계통의 선로 부하율과 비교해보면, ESS가 충/방전 동작으로 인하여 선로의 활용도를 높여주게 되어 계통의 최대 수용률이 증가함을 확인할 수 있었다.



[그림 14] ESS 기본 용량을 적용한 계통의 전압



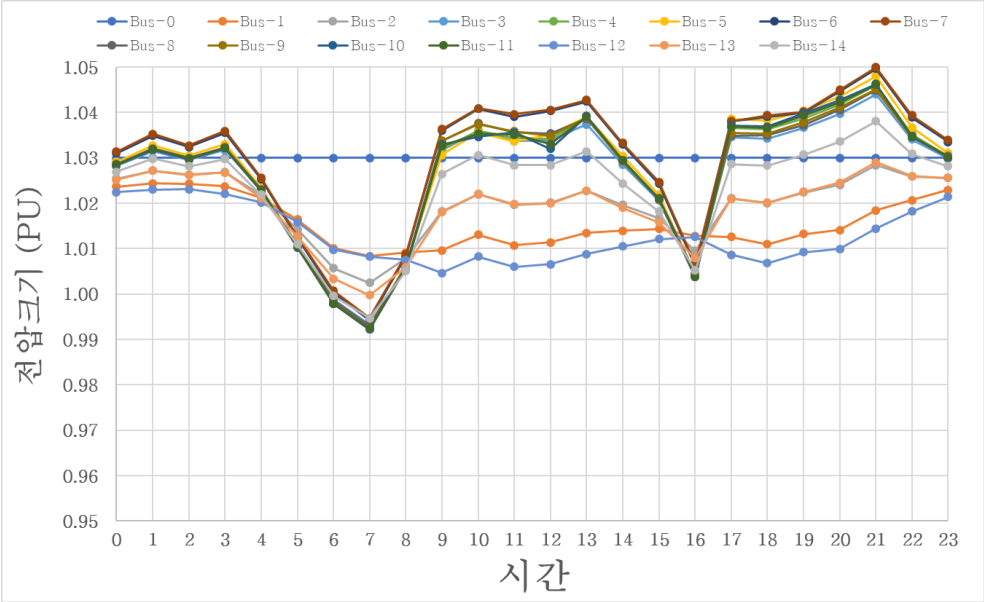
[그림 15] ESS 기본 용량을 적용한 계통의 선로 부하율



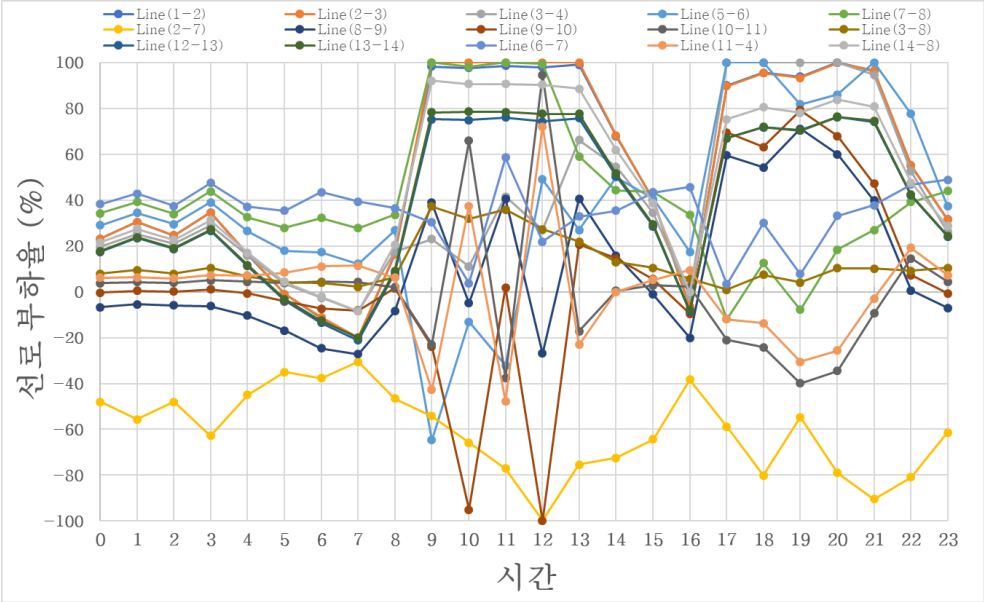
[그림 16] ESS 기본 용량을 적용한 계통의 SOC

추가적으로 ESS의 용량을 키워가면서 최대 수용률을 확인하였다. 이 경우 최대 수용률은 25.5%까지 증가함을 확인하였다. 그림 18을 살펴보면 대부분의 선로에서 부하율의 최대에 근접함을 확인할 수 있었다.

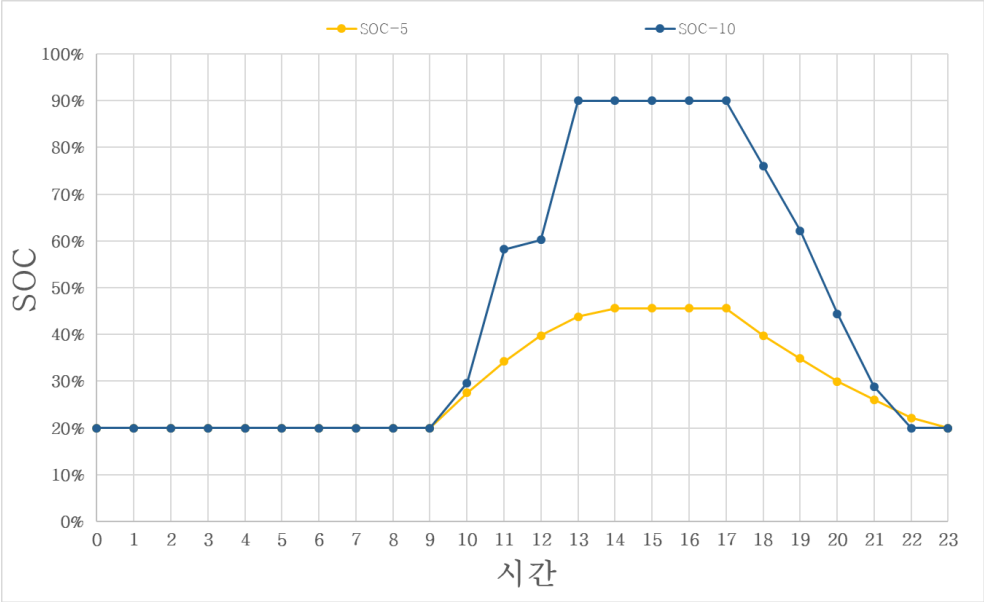
선로의 증설없이 ESS의 용량만 키워서 달성할 수 있는 최대 수용률 경우의 전압, 선로 부하율, ESS의 SOC를 살펴보게 되면 10번 모선에 설치된 ESS는 전체 용량을 충방전 하지만 5번 모선에 설치된 ESS는 용량을 일부만 충방전 함을 알 수 있다. 이 결과 21번 시간대에서 모선 7번에서 고전압이 발생하고, 대부분의 시간대에서 선로 부하율의 최대 또는 최소를 만족하는 것을 알 수 있다. 이 솔루션은 이상적으로는 적용이 가능하나, 현실적으로는 적용이 어려워 보인다.



[그림 17] ESS 용량 변화를 반영한 계통의 전압

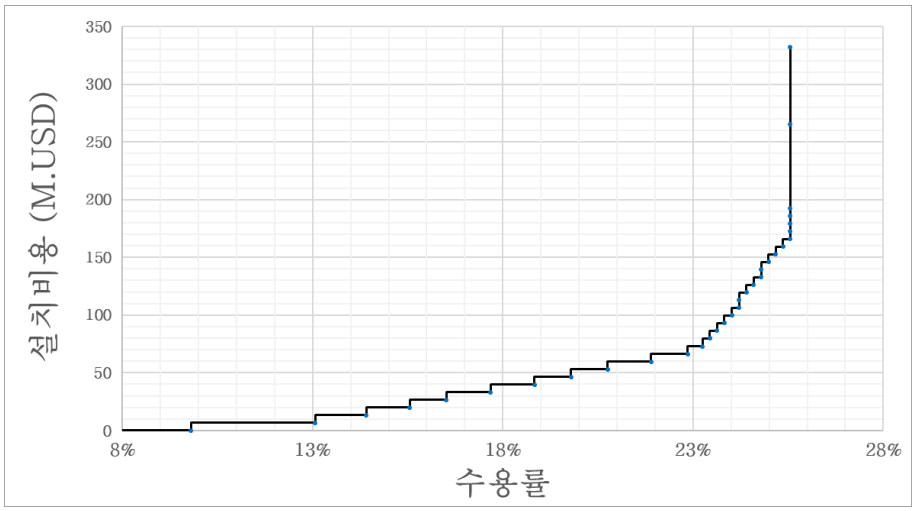


[그림 18] ESS 용량 변화를 반영한 계통의 선로 부하율



[그림 19] ESS 용량 변화를 반영한 계통의 SOC

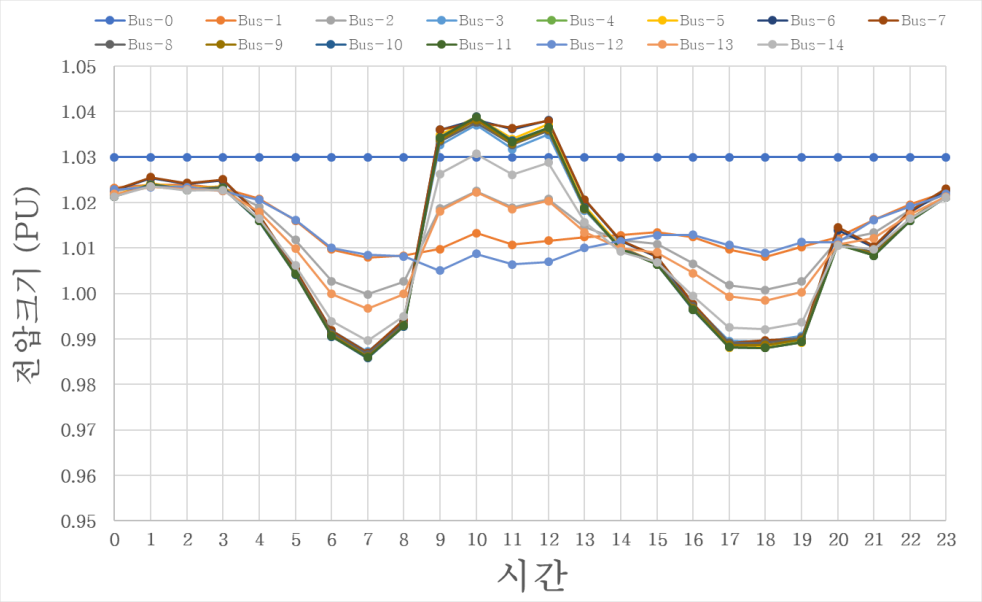
ESS의 용량을 키워가면서 수용률의 변화를 보게 되면, 어느 순간 수용률이 증가하지 않는 부분을 확인할 수 있다. 이는 선로의 증설 없이는 달성할 수 있는 최대 수용률이 있음을 알 수 있다.



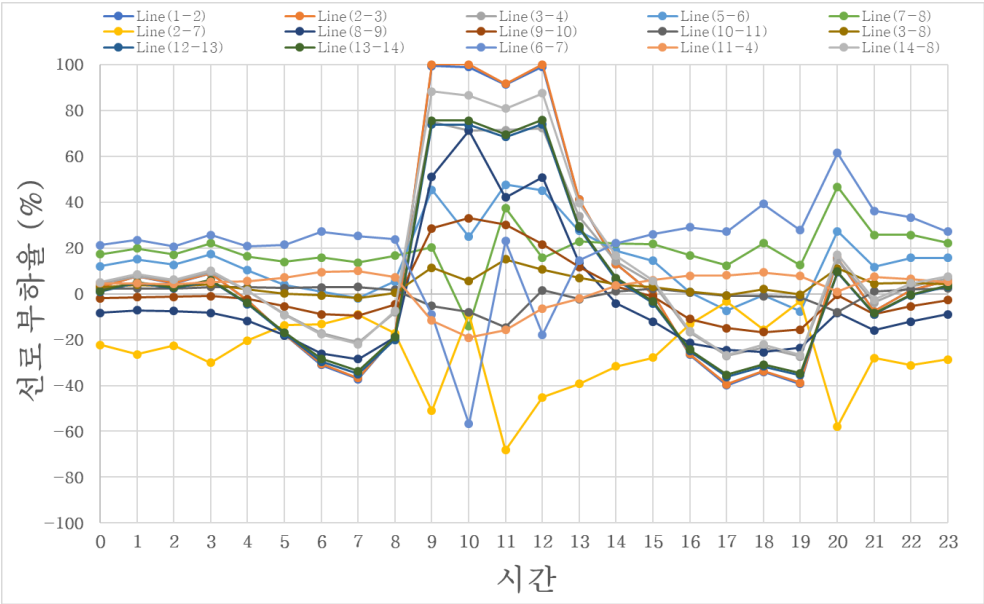
[그림 20] ESS 용량 변화를 반영한 계통의 비용 곡선

제 2 절 ESS 위치 변경한 계통의 수용률 계산

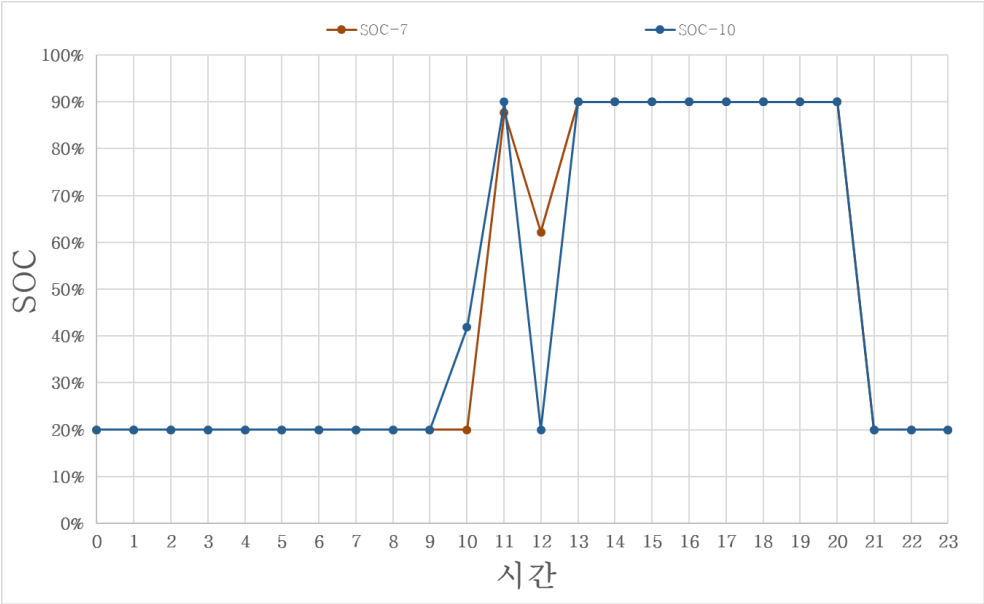
ESS의 위치에 따른 수용률의 변화를 알아보기 위하여 1절에서 설치된 5번 모선의 ESS를 7번 모선으로 옮겨서 동일한 과정을 반복하였다. ESS의 위치를 변경한 결과 최대 수용률이 23.3%가 됨을 확인할 수 있었다. 이는 ESS를 5번 모선에 설치하여 얻을 수 있는 25.5% 보다 작은 값이다. 최대 수용률이 발생한 조건도 기존과 유사하게 2에서 3번으로 연결되는 선로의 부하가 최대가 되는 경우이다. 두 결과를 비교하면, 동일 용량의 ESS라도 설치 위치에 따라서 최대 수용률의 결과가 다르게 나올 수 있음을 확인할 수 있었다.



[그림 21] ESS 위치 변화를 반영한 계통의 전압



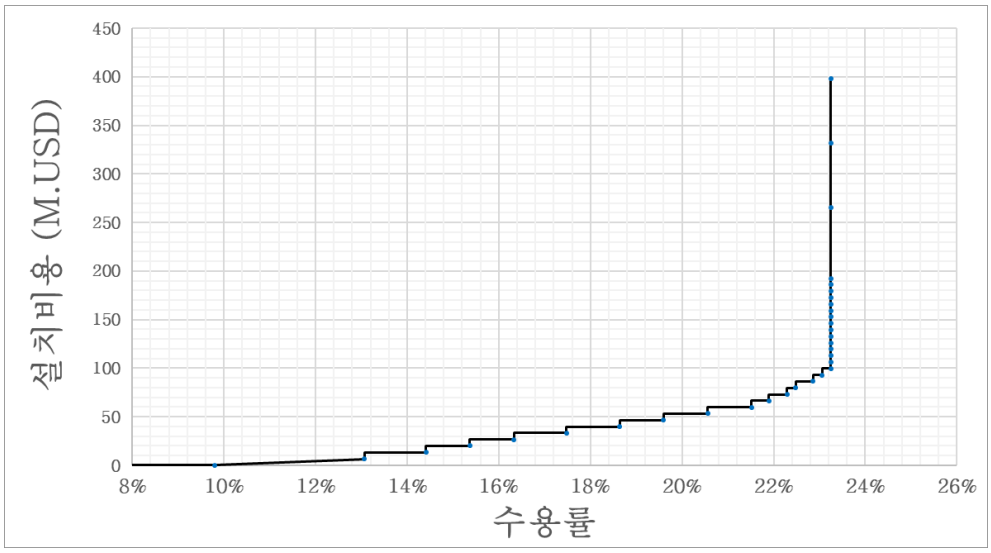
[그림 22] ESS 위치 변경한 계통의 선로 부하율



[그림 23] ESS 위치 변경한 계통의 SOC

ESS의 용량을 키워가면서 수용률의 변화를 보게 되면, 23.2 %

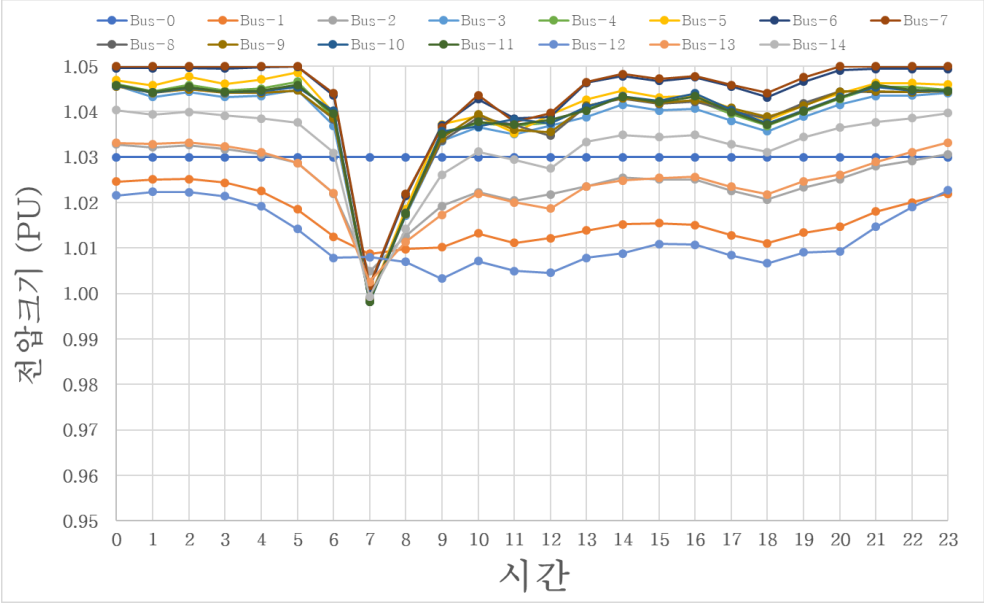
이상의 수용률이 증가하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 ESS가 특정 모선에 설치되었을 경우는 최대 키울 수 있는 수용율이 있음을 확인 할 수 있었다.



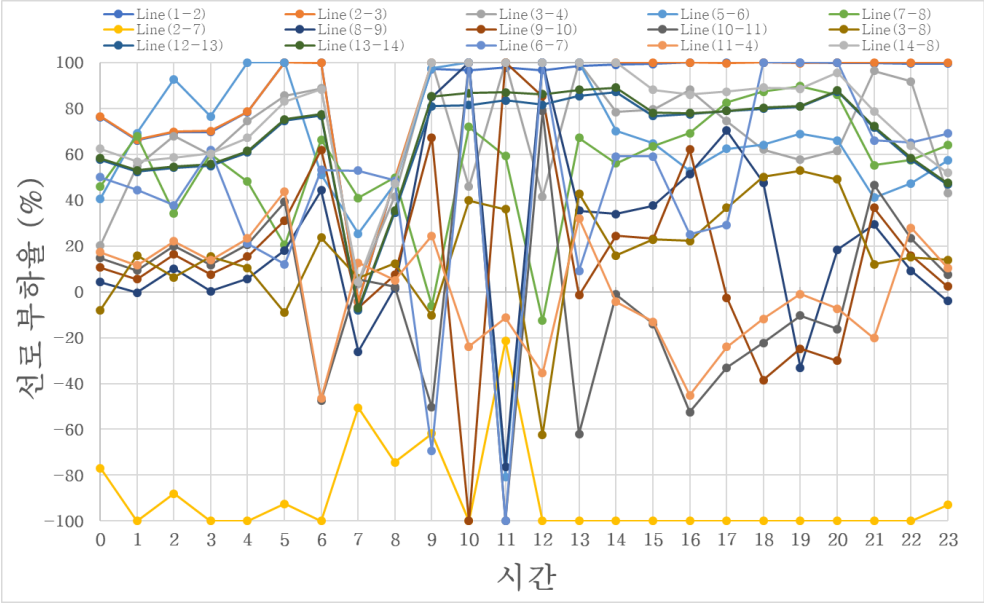
[그림 24] ESS 위치 변경한 계통의 비용 곡선

제 3 절 ESS를 전 모선에 설치한 계통의 수용률 계산

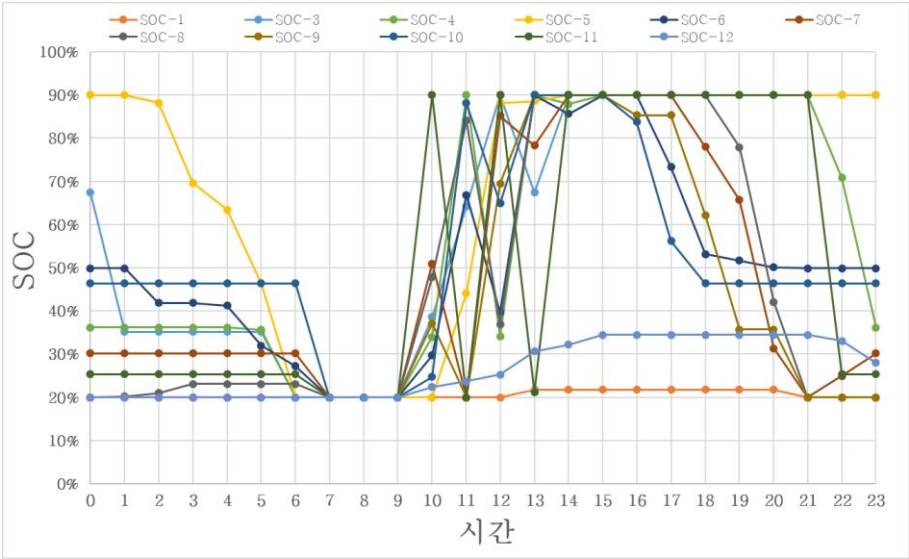
1절과 2절에서 ESS의 설치에 따른 최대 수용률의 변화를 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 전 모선에 ESS가 설치된다는 가정으로 시뮬레이션을 수행하였다. 개별 모선의 ESS 용량을 개별 모선의 Net Load와 비례하는 용량으로 산정하였고, 이를 키워가면서 최대 수용률을 계산해보았다. 이 결과 최대 수용률을 37.3%까지 계산할 수 있었다. 그림 25, 26의 결과를 보면 계통의 전압, 선로 부하율을 제약조건을 모두 피하기 위하여 ESS가 충방전 시기를 조절하는 것을 볼 수 있다.



[그림 25] ESS 전 모선에 설치한 계통의 전압

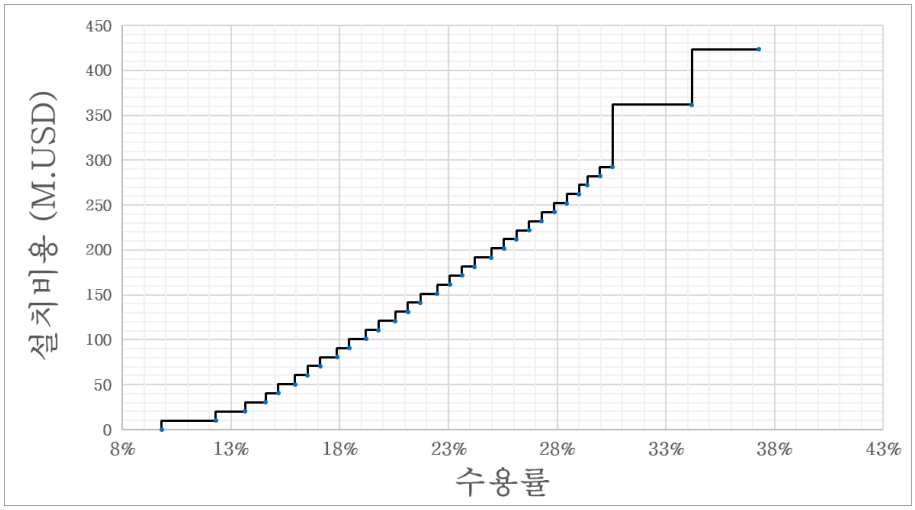


[그림 26] ESS 전 모선에 설치한 개통의 선로 부하율



[그림 27] ESS 전 모선에 설치한 계통의 SOC

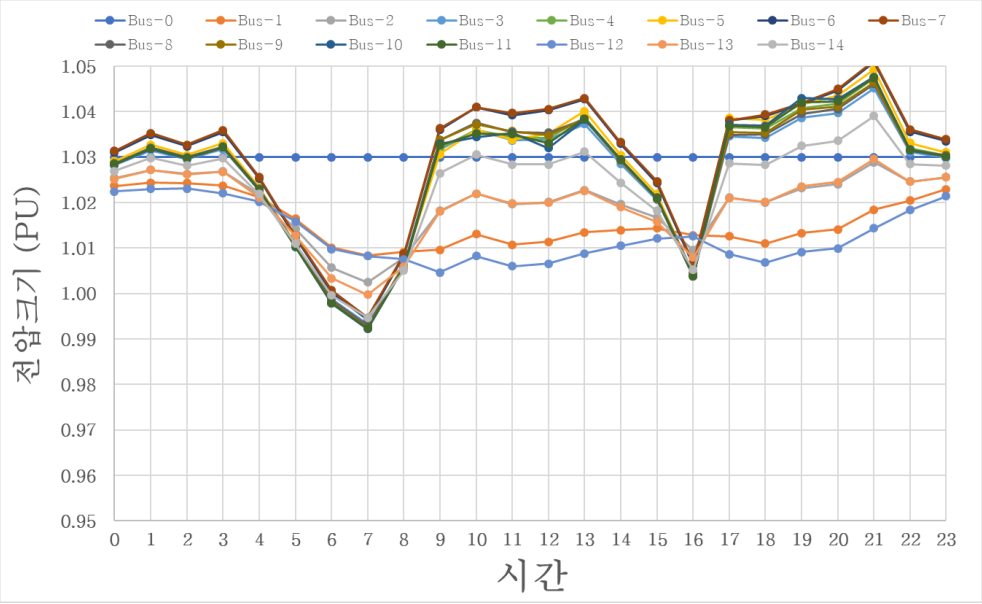
ESS 가 특정 모선에 설치되어 있다면 계통의 최대의 수용률이 정해지지만, ESS가 전 모선에 설치된 계통의 최대 수용률은 컴퓨터의 계산 시간의 초과로 인하여 37.3%이상의 결과는 확인할 수 없었다.



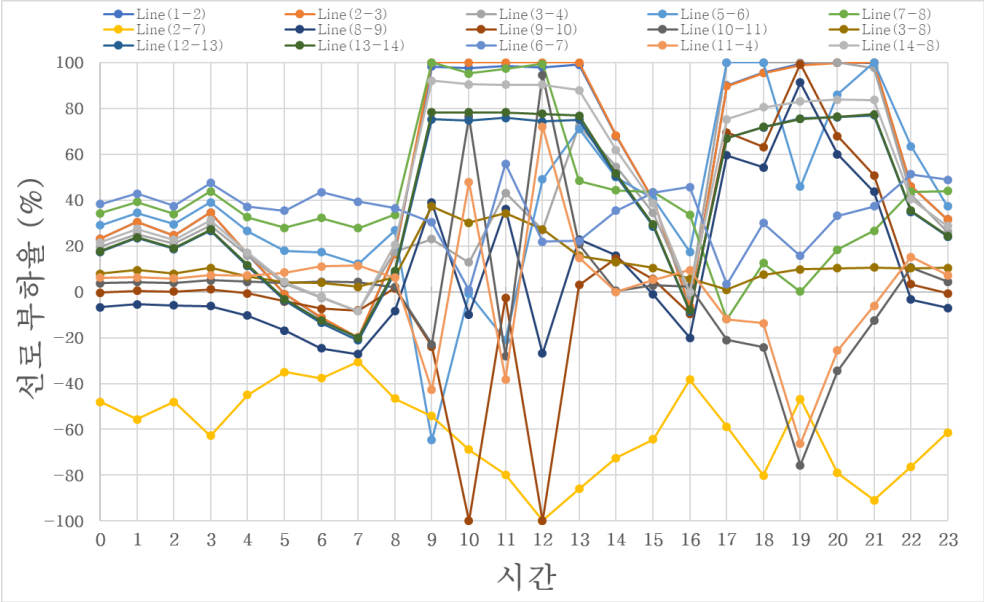
[그림 28] ESS 전 모선에 설치한 계통의 비용 곡선

제 4 절 ESS와 OLTC 고려한 계통의 수용률 계산

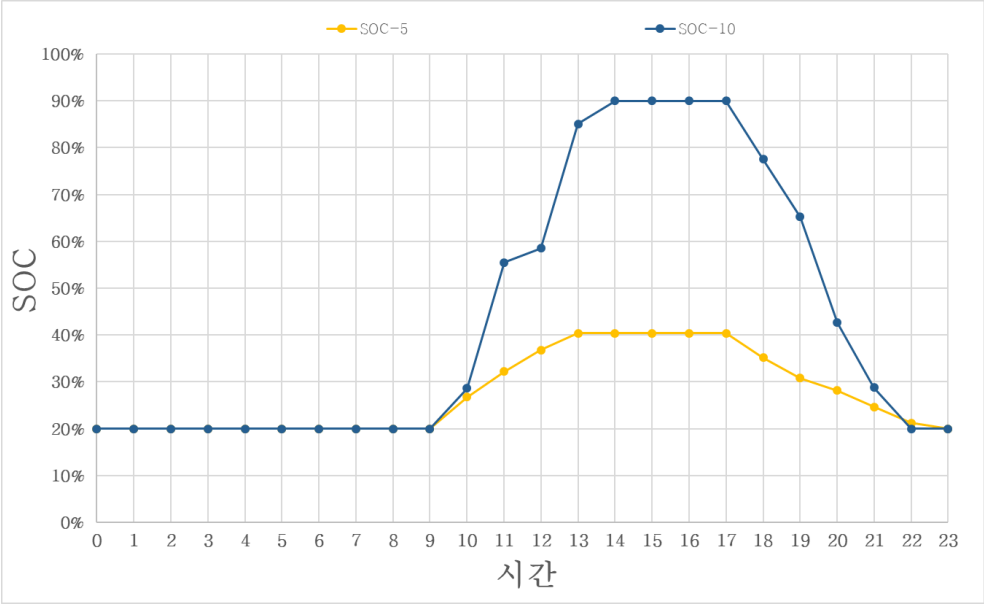
지금까지 외부 계통과 연계된 변압기의 전압은 1.03 pu 였다. 이를 OLTC 동작을 통하여 1.00 pu로 변경하였을 때의 결과를 시뮬레이션 해보았다. 이 결과 최대 수용률을 25.5%를 확인 할 수 있었다. 이는 OLTC를 적용하지 않고, ESS의 용량만 키웠을 때 달성할 수 있는 25.5%와 동일함을 알 수 있었다. 이는 ESS를 설치했을 때 과전압 문제보다 선로 부하율의 큰 계통이기 때문에 발생한 결과로 볼 수 있다.



[그림 29] ESS와 OLTC를 고려한 계통의 전압



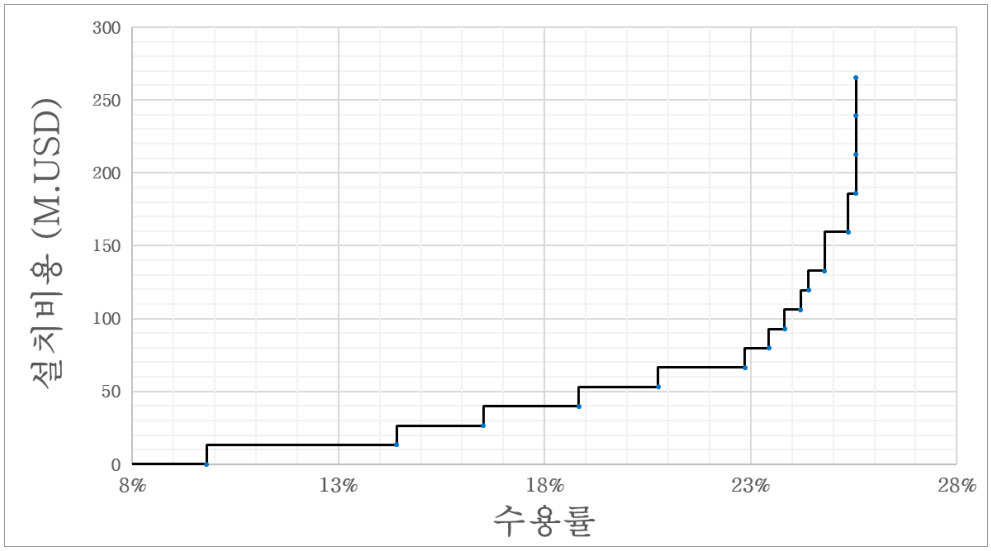
[그림 30] ESS와 OLTC를 고려한 계통의 선로 부하율



[그림 31] ESS와 OLTC를 고려한 계통의 SOC

이때의 OLTC를 사용하여 전압을 낮춘 경우와 낮추지 않은 경우의 비용 곡선을 비교한 결과, 최대 수용률 기준으로 OLTC 동작을 하지

않은 ESS 설치 비용은 166 M.USD 이고, OLTC를 적용하였을 때 ESS의 설치 비용이 185 M.USD임을 확인할 수 있었다. OLTC 동작을 통하여 계통의 수용성이 커지는 경우는 최대 수용률의 선정 조건이 고전압에서 문제가 되는 경우에 효과적이며, 선로 부하량을 통하여 최대 수용률이 정해지는 시뮬레이션 계통에서는 큰 효과가 없음을 알 수 있다.



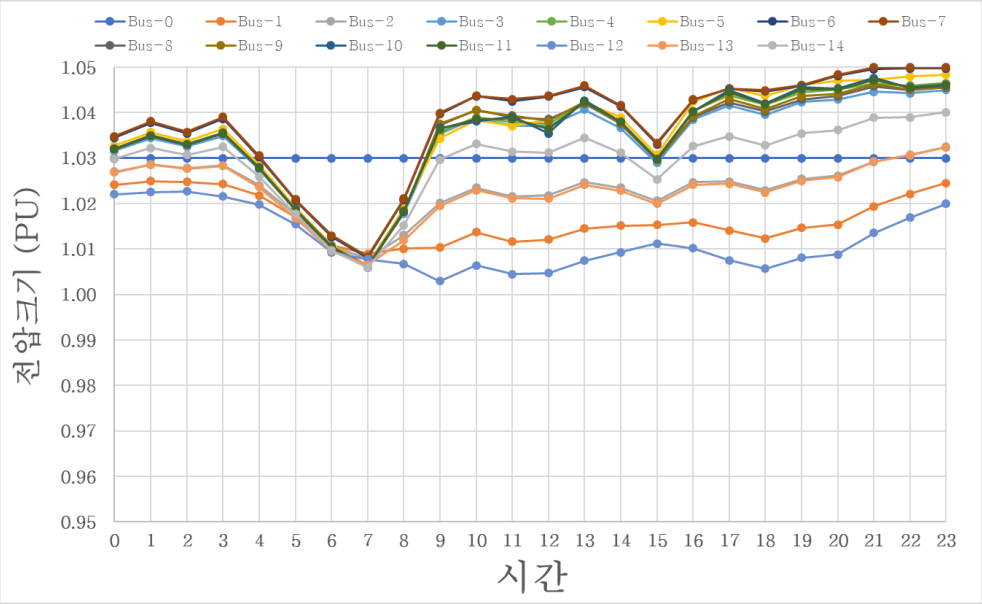
[그림 32] ESS와 OLTC를 고려한 계통의 비용 곡선

제 5 절 ESS와 선로 증설 고려한 계통의 수용률 계산

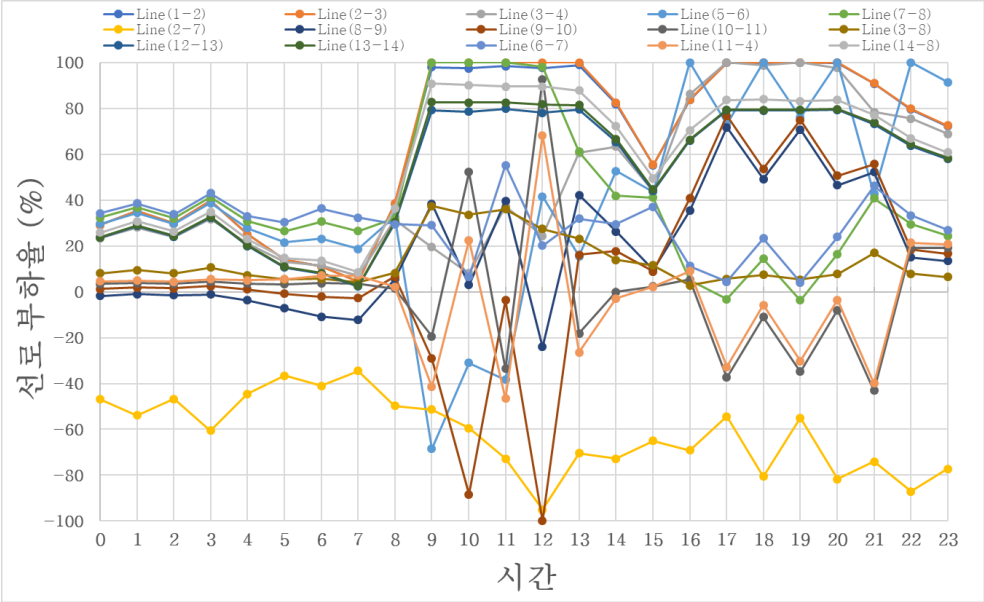
최종적으로 선로의 증설과 ESS의 용량을 모두 고려하여 동일 시뮬레이션을 반복해 보았다. 모든 선로는 증설하고, 최대 47.8%까지 수용률을 달성하는 것을 확인할 수 있었다. 선로를 증설하였을 때의

수용률 16.5%와 비교해보면 약 3배정도의 수용률의 최대치가 증가하였고, ESS의 용량만 고려한 최대 수용률 13.1% 대비하여 4배 정도 수용률이 증가함을 확인할 수 있었다.

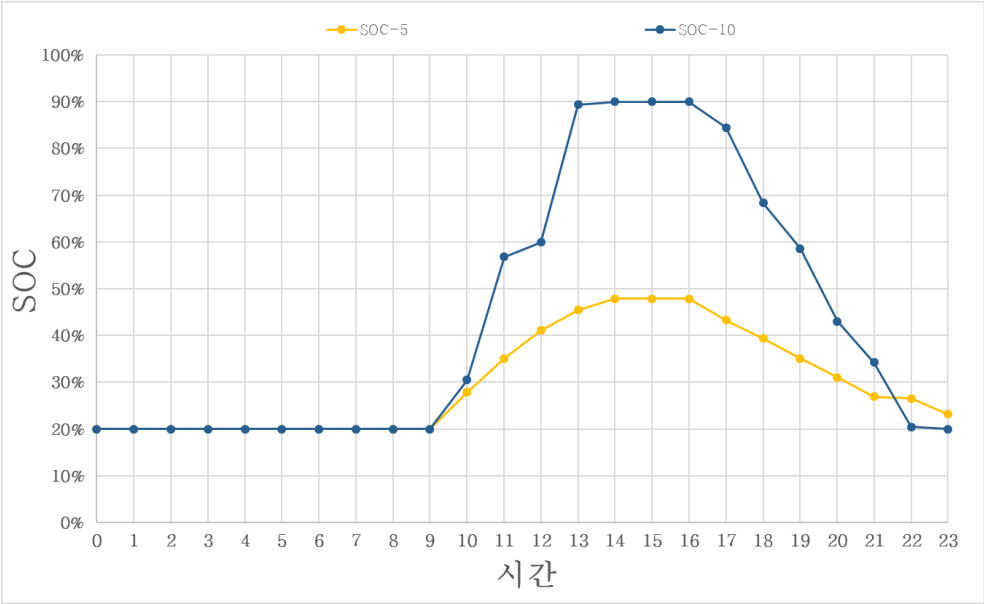
계통의 전압 및 선로 부하율의 그래프를 살펴보면 대부분의 경우에서 선로의 제한 범위와 근접하게 동작함을 확인할 수 있다.



[그림 33] ESS 및 선로 증설을 고려한 계통의 전압

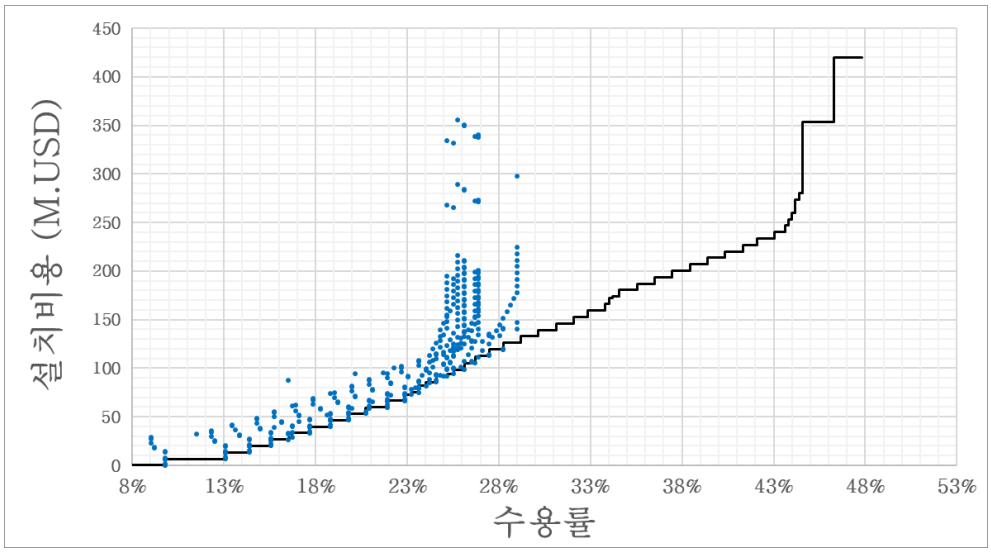


[그림 34] ESS 및 선로 증설을 고려한 계통의 선로 부하율



[그림 35] ESS 및 선로 증설을 고려한 계통의 SOC

계통의 증설과 ESS의 증설을 모두 반영한 설치 비용 곡선을 그려보면 특정 수용률까지는 선로를 증설하지 않는 조건의 설치비용을 따라가다 선로 증설을 고려한 결과가 나오는 것을 확인할 수 있다.



[그림 36] ESS 및 선로 증설을 고려한 계통의 비용 곡선

제 5 장 케이스별 결과 비교 분석

제 1 절 ESS의 효과 분석

선로 증설을 고려하지 않는 조건에서 ESS 설치의 케이스를 통하여 분석할 수 있는 최대 수용률 및 비용은 표 7과 같다.

[표 9] 선로 증설 없이 달성 가능한 최대 수용률

	기본 계통	ESS 설치	ESS 이동	ESS 전모선	OLTC 고려
최대 수용률 (%)	9.8	25.5	23.3	37.3	25.5
ESS 비용 (M.USD)	0	166	398	423	186
총 비용 (M.USD)	0	166	398	423	186

제 2 절 동일 수용률 달성 기준 결과 분석

특정 수용률을 달성하기 위한 여러 조건의 비용을 정리해 보았다. 수용률 요구사항이 20%를 넘어가기 전에는 ESS의 설치만으로도 Line 증설없이 최소의 비용을 달성하는 것을 볼 수 있다. 하지만 25%이상의 수용률 달성을 위해서는 Line 증설을 함께 고려한 경우에서 최소의 비용으로 원하는 수용률을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

[표 10] 10% 수용률 달성을 위한 비용 비교

수용률 10%	기본 계통	선로 증설	ESS 설치	ESS 이동	ESS 전모선	OLTC 고려	ESS, Line
Line 비용 (M.USD)	불가	31.2	0	0	0	0	0
ESS 비용 (M.USD)	불가	0	6.6	6.6	10.1	13.3	6.6
총 비용 (M.USD)	불가	31.2	6.6	6.6	10.1	13.3	6.6

[표 11] 15% 수용률 달성을 위한 비용 비교

수용률 15%	기본 계통	선로 증설	ESS 설치	ESS 이동	ESS 전모선	OLTC 고려	ESS, Line
Line 비용 (M.USD)	불가	87.4	0	0	0	0	0
ESS 비용 (M.USD)	불가	0	19.9	19.9	40.3	26.6	19.9
총 비용 (M.USD)	불가	87.4	19.9	19.9	40.3	26.6	19.9

[표 12] 20% 수용률 달성을 위한 비용 비교

수용률 20%	기본 계통	선로 증설	ESS 설치	ESS 이동	ESS 전모선	OLTC 고려	ESS, Line
Line 비용 (M.USD)	불가	불가	0	0	0	0	0
ESS 비용 (M.USD)	불가	불가	53.1	53.1	121	53.1	53.1
총 비용 (M.USD)	불가	불가	53.1	53.1	121	53.1	53.1

[표 13] 25% 수용률 달성을 위한 비용 비교

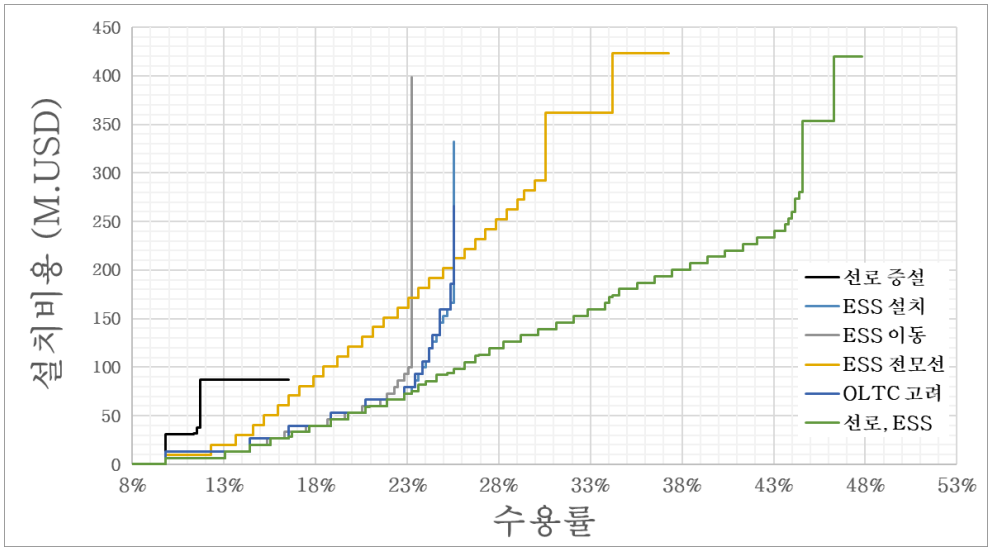
수용률 25%	기본 계통	선로 증설	ESS 설치	ESS 이동	ESS 전모선	OLTC 고려	ESS, Line
Line 비용 (M.USD)	불가	불가	0	불가	0	0	32.1
ESS 비용 (M.USD)	불가	불가	153	불가	202	159	59.7
총 비용 (M.USD)	불가	불가	153	불가	202	159	91.8

[표 14] 30% 수용률 달성을 위한 비용 비교

수용률 30%	기본 계통	선로 증설	ESS 설치	ESS 이동	ESS 전모선	OLTC 고려	ESS, Line
Line 비용 (M.USD)	불가	불가	불가	불가	0	불가	13
ESS 비용 (M.USD)	불가	불가	불가	불가	292	불가	119
총 비용 (M.USD)	불가	불가	불가	불가	292	불가	132

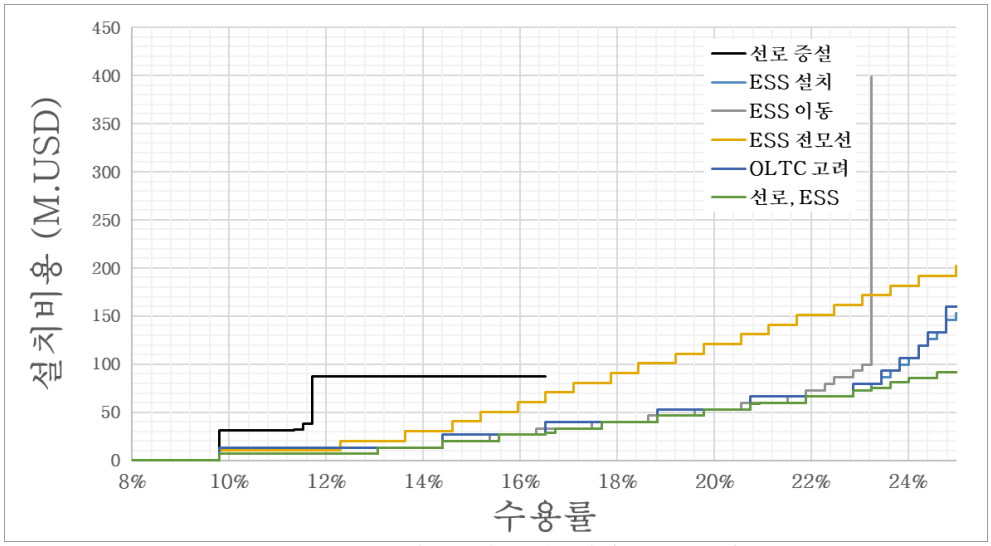
제 3 절 케이스별 최소 비용 곡선 비교

지금까지 ESS를 적용한 다양한 케이스에 대하여 최대 수용률을 산정하고, 그때의 비용도 비교해보았다. 그림 37은 이 결과를 하나의 그림으로 표현한 내용이다. 전 범위에서 선로 증설과 ESS의 증설을 함께 고려한 경우 최소의 비용으로 동일 수용률을 달성할 수 있음을 확인할 수 있었다. 선로 증설만으로는 달성할 수 있는 최대 수용률이 낮음을 확인할 수 있었다.



[그림 37] 전체 케이스의 비용 곡선 비교

그림 38은 최대 수용률인 25% 이하의 부분을 확대한 그림이다. 이 그래프를 보면 23% 이하의 최대 수용률 범위에서는 ESS만 설치한 경우도 최소의 설치비용과 유사함을 알 수 있다.

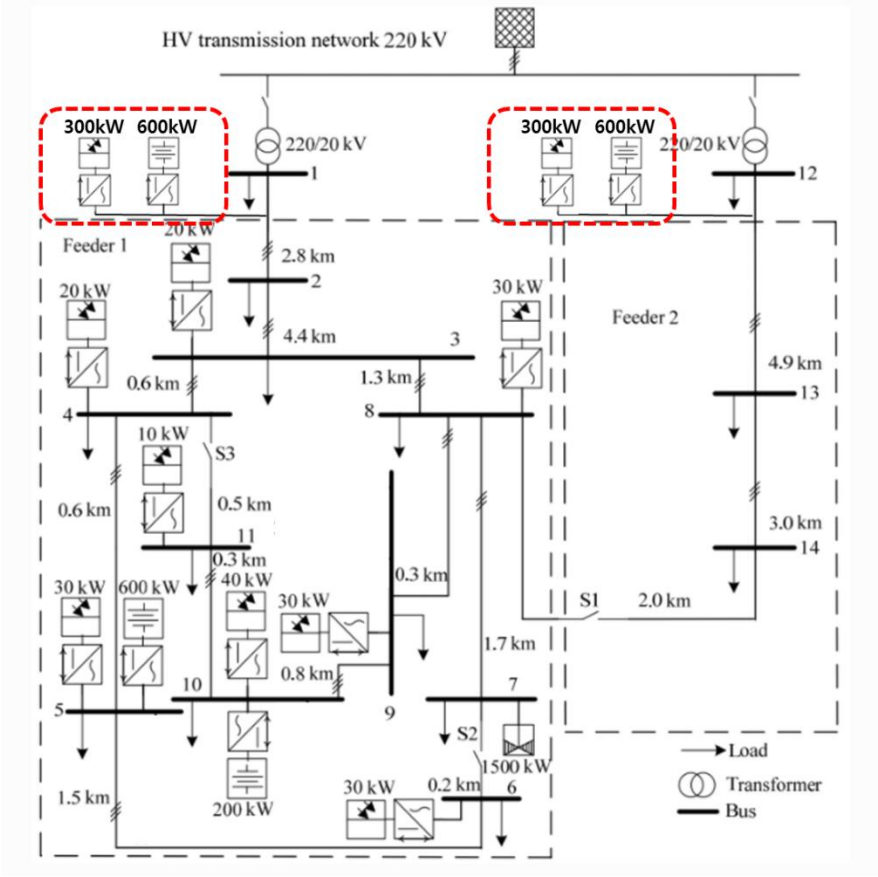


[그림 38] 전체 케이스의 비용 곡선 확대

제 4 절 재생에너지 위치 변경 후 비용 곡선 비교

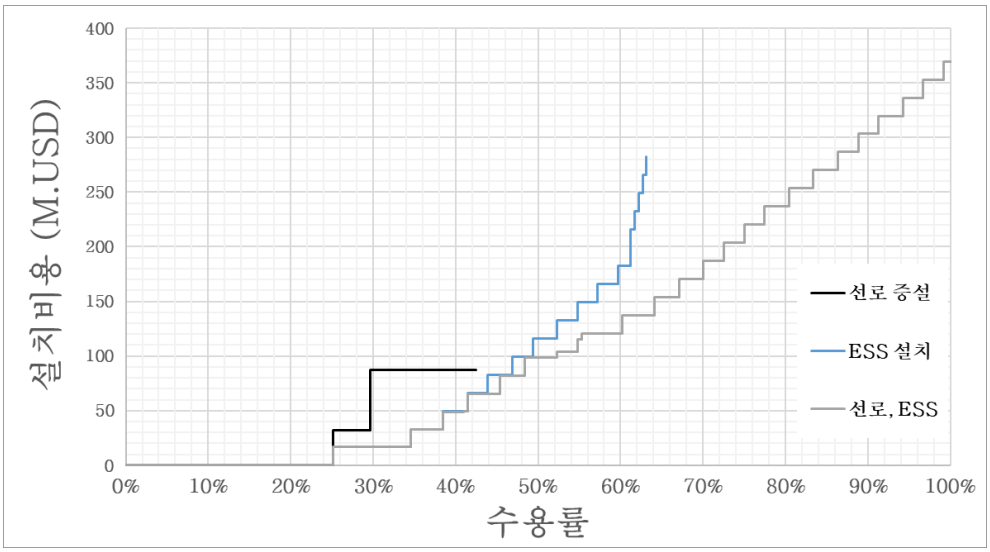
지금까지는 계통에서 주어진 조건을 바탕으로 수용성에 대한 비용을 산정해 보았다. 하지만 대상계통의 특징인 많은 부하가 있는 1번과 12번 모선에는 재생에너지 부하가 없기 때문에 1번과 12번 모선으로 가는 선로의 과부하가 발생하여 재생에너지 수용율을 48%까지만 달성할 수 있었다.

이를 해결하기 위하여 [그림 39] 과 같이 대상 계통의 큰 부하를 차지하고 있는 1번 12번 모선에 PV와 ESS를 추가로 설치하였다.



[그림 39] 재생에너지 발전원과 ESS 추가한 계통 변경

계통의 [그림 39]과 같이 변경한 상태에서 선로 증설, ESS의 설치, 선로 및 ESS의 설치를 비교하였다.



[그림 40] 계통 변경 후 비용 곡선

[그림 40]과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 개별적으로 살펴보면 선로의 증설이 없을 경우는 25.2%의 수용률을 달성하고, 선로증설을 통하여 최대 42.4%의 수용률을 달성할 수 있었다. ESS의 설치 용량을 키워가면서 살펴보게 되면 최대 63.2%의 수용률을 달성할 수 있었다.

선로 및 ESS의 크기를 모두 고려할 경우는 최대 100%까지 수용률을 달성할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 실제 계통의 수용률을 키우기 위해서는 선로의 보강, ESS의 설치도 중요하지만 부하와 재생에너지의 발전량의 위치도 함께 고려되어야 함을 확인할 수 있었다.

제 6 장 결 론 및 향 후 과 제

세계적으로 그린 뉴딜 및 탄소제로화를 위하여 계통에 재생에너지의 비중이 늘어나는 비중이 나는 것은 자명하다. 이에 대한 계통의 재생에너지 수용률을 키우기 위한 연구를 진행하였다. 금번 논문을 통하여 주어진 계통에서 최대 수용률을 산정할 수 있었다. 본 장에서는 논문의 연구 결과 및 향후 과제에 대하여 기술한다.

제 1 절 연구 결과

금번 학위 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 주어진 계통의 수용성을 구하기 위한 선형화된 방식으로 수식을 전개하였다. 이를 통하여 AC 조류계산을 통해서는 풀기 어려운 ESS의 운영을 반영한 최적화문제를 풀 수 있었다.

둘째, 주어진 계통의 데이터를 반영하여 구한 최대의 수용률을 구한 결과에서 선로의 증설 및 ESS의 용량 증가에 대한 결과를 구할 수 있었다. 이를 통하여 다양한 방식의 수용률을 증가시킬 수 있는 방법에 대한 비교의 틀을 마련하였다.

셋째, 다양한 케이스를 분석함으로써 특정 수용률 달성을 위한 최적의 방안을 제시하였다. 금번 계통을 기준으로 하면 수용률이 25%이하일 경우는 선로의 증설보다는 ESS의 용량 증대를 통한

수용률의 상승이 경제적이고, 25% 이상의 수용률이 요구되는 경우에는 선로 증설과 ESS의 용량 설치를 병행하는 것이 경제적임을 확인 할 수 있었다.

넷째, 주어진 계통에서 기술적으로 달성할 수 없는 수용률의 경우는 부하와 재생에너지 위치의 불일치로 인하여 발생하고 이를 재생에너지 설치 위치 변경으로 보완할 수 있음을 추가로 확인하였다.

제 2 절 향 후 과제

실제 현장에서 적용된 설치비를 반영하여 정해진 국가의 계통에 대하여 현실성 있는 결과를 만들고자 한다, 이를 통하여 계통의 수용률 향상을 위하여, 단순한 계통 증설이 아닌 ESS를 이용한 실제 경제성을 검증하고자 한다.

금번 논문을 통하여 여러가지 경우를 통한 결과를 비교하여 수용률을 달성하기 위한 최저 비용을 구할 수 있었다. ESS 설치 위치 및 용량에 따라서 비용에 대한 효과가 다름을 확인할 수 있었다. 향후 동일 용량의 ESS의 설치 위치에 따른 수용률의 확인을 비교하여, 금번 논문을 통하여 작성된 수용률 산정의 방식을 이용하여 동일 용량의 ESS에서 수용률 최대화를 위한 최적의 ESS 위치를 산정하고자 한다.

참고 문헌

[1] 김상화 의원실, "최근 10년간 태양광발전소 계통연계 신청건수 및 완료건수," 2019.

[2] 산업통상자원부, "태양광발전 계통 접속 허용기준 20% 확대," 2020.02.

[3] 전력신문, "한전, 신재생 계통연계 확대를 위한 특별대책 시행," 2020.11.

[4] J. Seuss, M. J. Reno, R. J. Broderick, and S. Grijalva, "Improving distribution network PV hosting capacity via smart inverter reactive power support," in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 26-30 July 2015 2015, pp. 1-5,

[5] M. Kamruzzaman and M. Benidris, "A Smart Charging Strategy for Electric Vehicles to Increase their Hosting Capacity in Distribution Systems," in *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, 13-15 Oct. 2019 2019, pp. 1-6,

[6] P. H. Divshali and L. Söder, "Improvement of RES hosting capacity using a central energy storage system," in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 26-29 Sept. 2017 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGTEurope.2017.8260102.

[7] CIGRE, "Capacity of Distribution Feeders for Hosting DER," *CIGRE,* vol. 586, 2014.06.

[8] 조성수 책임, "《분산전원 수용확대 방안》 Feeder's DER Hosting Capacity," *한전 전력연구원,* 2018.10.31.

[9] M. Alturki, A. Khodaei, A. Paaso, and S. Bahramirad, "Optimization-based distribution grid hosting capacity calculations," *Applied Energy,* vol. 219, pp. 350-360, 2018/06/01/ 2018,

[10] C. C6.04, "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources " 2014.04.

Abstract

Economic analysis of ESS for increasing hosting capacity

Hyungwoo Yeo
Electrical and Computer Engineering
The Graduate School
Seoul National University

In the future, the penetration of renewable energy has been increased in power system. Unlike conventional power system, renewable energy is difficult to control and it has uncertainty output. Considering these situations, the grid code and acceptable capacity called hosting capacity for renewable energy are individually specified.

It is essential to calculate the hosting capacity without adversely affecting the quality or reliability of power system. In this paper, it was proposed to calculate the hosting capacity considering the expansion of the transmission line and the installation of ESS. The cost and hosting capacity are calculated considering expansion of lines and installation of ESS. The hosting capacity and installation cost has been simulated for various cases, and proposed an economical answer to achieve hosting capacity.

Through installation of ESS, the increased hosting capacity and installation cost were calculated. It was verified that the increase of hosting capacity through ESS is more economical than the existing expansion of lines. The maximum hosting capacity though ESS is also calculated. Therefore, it was confirmed that the installation of ESS is

more economical than the extension of the line in the early stage when the required hosting capacity is low. However, after certain hosting capacity, it was verified that higher hosting capacity could be achieved with extension of line and the installation of ESS together.

Keywords : Hosting capacity, expansion of line, ESS, economic analysis
Student Number : 2019-26219