



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](#)

석사학위논문

재생에너지의 변동성 대응을 위한
전력계통의 유연성 자원 필요량 분석

제주대학교 대학원

에너지응용시스템학부 전기공학전공

김민재

2020년 2월

재생에너지의 변동성 대응을 위한 전력계통의 유연성 자원 필요량 분석

지도교수 김 세 호

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2019년 12월

김민재의 공학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____ ㉠

위 원 _____ ㉠

위 원 _____ ㉠

제주대학교 대학원

2019년 12월

Analysis of Flexibility Requirement against
the Variability of Renewable Energy in
Power Systems

Min Jae Kim
(Supervised by professor Se Ho Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2019. 12.

- i -

목 차

그림 목차	iii
표 목차	v
SUMMARY	vi
1. 서 론	1
2. 전력계통의 유연성 및 유연성 자원 분석	3
2.1 재생에너지 현황	3
2.2 재생에너지의 변동성과 유연성 자원의 필요성	5
2.2.1 전력계통의 유연성	5
2.2.2 가변성 재생에너지의 특성	5
2.2.3 유연성 자원의 종류	6
2.2.4 유연성 자원의 필요성	7
2.3 유연성 자원필요량 산정 및 분석	8
2.3.1 순부하 산정	8
2.3.2 이산 푸리에 변환을 통한 유연성 필요량 산정 및 분석	9
3. 사례 연구	12
3.1 적용 모델 계통	12
3.2 유연성 자원 필요량 분석	13
3.2.1 순부하 분석	13
3.2.2 유연성 자원의 필요량	18
3.2.3 가변성 재생에너지의 점유율에 따른 유연성 자원필요량 분석	22
3.3 결과 고찰	30
4. 결 론	31
참 고 문 헌	33

그림 목차

Fig. 1 Annual VRE share in countries and regions, 2018	4
Fig. 2 Number of countries within annual VRE penetration range, historical and projected	4
Fig. 3 General overview of the analysis of flexibility requirements	11
Fig. 4 Average annual values for each hour of the day in 2025	14
Fig. 5 Average annual values for each hour of the day in the spring of 2025 ·	15
Fig. 6 Average annual values for each hour of the day in the summer of 2025 ·	16
Fig. 7 Average annual values for each hour of the day in the fall of 2025 ·	17
Fig. 8 Average annual values for each hour of the day in the winter of 2025 ·	18
Fig. 9 Flexibility requirements for short cycle	19
Fig. 10 Flexibility requirements for long cycle	21
Fig. 11 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in 2025	23
Fig. 12 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in the spring of 2025	24
Fig. 13 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in the summer of 2025	25
Fig. 14 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in the fall of 2025	25
Fig. 15 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in the winter of 2025	26
Fig. 16 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind and PV penetrations in 2025	27
Fig. 17 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind and PV penetrations in the spring of 2025	28
Fig. 18 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind and PV penetrations in the summer of 2025	28

Fig. 19 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind
and PV penetrations in the fall of 2025 29

Fig. 20 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind
and PV penetrations in the winter of 2025 29

표 목 차

Table 1. Resources of power system flexibility	7
Table 2. Flexibility resources categorized based on service duration	10
Table 3. Peak Load and VRE capacity of Jeju in 2025	12
Table 4. Cutoff frequency of band-pass filter	13
Table 5. Percentile of flexibility requirements for short cycle in 2025	19
Table 6. Percentile of flexibility requirements for short cycle in different seasons ..	20
Table 7. Percentile of flexibility requirements for long cycle in 2025	21
Table 8. Percentile of flexibility requirements for long cycle in different seasons ...	22

SUMMARY

The share of wind and solar power has been growing very rapidly in many countries due to renewable energy dissemination policies and falling technology costs. However, as the share of renewable energy is increasing, the intermittent characteristic of renewable energy is increasing, making it difficult to maintain the balance of power supply and demand.

The operator of the power system must control the variation in renewable energy generation through the operation of the power supply facilities for balance of power system. Frequent power fluctuations due to an increased share of renewable energy can put a lot of pressure on the power system, and the flexibility of existing supply facilities in the power system alone may not control the variation in renewable energy. If there is a situation in which the existing supply facilities in the power system cannot cope with fluctuations in renewable energy due to lack of flexible resources, the power system operator often resort to curtailment of renewable energy. However curtailment reduces the capacity factor of solar and wind power and thus negatively affect both their economic attractiveness and system benefits.

From this perspective, this thesis analyzes flexibility requirements in power systems based on the analysis of characteristics of short-cycle and long-cycle variation of net load through discrete Fourier transformations.

1. 서 론

지난 몇 년간 많은 국가에서 지원 정책 및 기술 비용 하락으로 인하여 풍력 및 태양광 발전설비와 같은 가변성 재생에너지(Variable Renewable Energy, VRE) 설비가 매우 빠르게 늘어나고 있다. 전 세계에서 2017년에 신규설치된 재생에너지 발전설비 용량은 178 GW로 재생에너지가 순 설비증설의 70%를 차지하고 있으며 그중에 55%를 태양광 설비가 차지하고 풍력이 29%, 수력이 11%를 차지하였다[1].

가변성 재생에너지설비의 급속한 증가는 변동성과 불확실성을 증가시켜 전력 계통의 운영에 있어 많은 어려움을 초래하고 있다. 재생에너지 발전량 예측 오차의 크기가 증가하여 전력수요와 공급의 균형을 맞추는 과정이 더욱 어려워지고, 일반 화력발전소의 발전 성능에 대한 요구사항이 증가하고 있다[2],[3]. 전력공급량이 수요를 초과하는 경우 계통의 주파수가 증가해 계통에 연결된 회전기기의 회전속도를 증가시켜 기기에 무리를 주고 손상시킬 위험이 있다. 이를 방지하기 위해 계통운영자는 일반 화력발전소의 발전량을 조절해 전력 수요와 공급량의 균형을 유지한다. 그러나 일반 화력발전소의 최소출력 제약으로 인해 출력을 더 감소시킬 수 없는 경우, 화력발전소 대신 가변성 재생에너지설비에 출력제한이 필요한 상황이 발생한다[4],[5].

국내에서도 원자력, 석탄화력을 줄이고 청정에너지 발전을 늘리는 재생에너지 3020 정책을 통해 재생에너지 비중을 늘릴 계획이다. 또한, 제주지역에서도 'Carbon Free Island 2030' 계획을 통해 2030년까지 제주에서 필요한 전력의 100%를 신재생에너지로 공급할 수 있도록 하고 신규 신재생에너지 보급설비의 92%를 태양광과 풍력 발전설비로 충당할 예정이다. 이러한 정책으로 제주지역의 풍력발전과 태양광발전의 점유율이 점차 높아지고 있다. 그러나 전력계통 규모가 제한된 제주계통에서 신재생에너지의 변동성을 감당하지 못해 출력제한 사례가 발생하고 있으며 2016년 6차례의 풍력발전 출력제한에 이어 2017년 16회, 2018년 17회 등 매년 출력제한 횟수가 증가하고 있다[6]-[8].

재생에너지의 점유율 증가로 인한 잦은 출력변동은 전력수급 균형을 유지하기

위해 전력공급설비의 운영으로 상쇄시켜야 한다. 하지만 전력계통 내 기존 발전설비의 유연성만으로 재생에너지의 변동에 대처할 수 없는 상황이 발생하면 재생에너지의 출력제한에 의존할 수밖에 없게 된다. 그리고 재생에너지의 출력제한은 재생에너지 발전설비의 이용률을 감소시켜 재생에너지로 인한 환경적인 이점과 변동비가 적은 재생에너지의 장점을 퇴색시킨다. 따라서 전력계통에서 유연성 문제가 발생한 후 최적 비용의 방안을 찾는 것보다 전력계통의 유연성을 미리 분석해 전력설비의 투자계획을 세우는 것이 훨씬 더 경제적이다[9].

전력계통의 유연성 부족 문제를 해결하기 위해서 풍력발전단지의 예상발전량과 실제 발전량의 차이를 줄이기 위한 적정 에너지 저장장치(Energy Storage System, ESS) 용량 산정에 관한 연구가 진행되었고 재생에너지 출력제약의 효용성을 확인하기 위해 경제성이 분석되기도 했다[10],[11].

본 논문에서는 재생에너지의 변동성을 고려한 유연성 자원 필요량을 분석하였다. 총 부하에서 비중앙급전발전기의 발전량을 차감한 값인 순부하의 특성 분석을 바탕으로 이산 푸리에 변환을 통해 단주기 변동 및 장주기 변동을 분석하였다. 그리고 재생에너지의 점유율 증가에 따른 전력계통 유연성 문제를 최소화하기 위해 ESS 또는 수요반응과 같이 출력변동이 발생했을 때 빠르게 대응할 수 있는 유연성 자원의 필요량을 분석하였다.

2. 전력계통의 유연성 및 유연성 자원 분석

전력계통운영 시 전력수급 균형을 항상 유지하는 것이 중요하다. 하지만 실시간 출력 변동이 큰 재생에너지가 전력계통에 투입될 경우 전력공급량의 변동성과 불확실성에 의해 수 초에서 수 시간의 다양한 변동이 발생하게 된다. 전력계통 유연성이 높을수록 변동성과 불확실성을 더 쉽게 수용할 수 있으나, 계통 유연성이 낮다면 계통에서 수용할 수 있는 변동성과 불확실성이 제한되어 재생에너지의 출력을 제한 시켜야하는 상황이 발생하게 된다. 따라서 수요자원과 에너지 저장장치 등 유연성 자원을 통해 계통의 유연성을 보완하면 공급 신뢰도뿐만 아니라 재생에너지의 수용률도 증대시킬 수 있다.

2.1 재생에너지 현황

초기의 재생에너지는 기후변화에 대응하는 주요 자원으로 인정받아 상대적으로 낮은 경제성에도 불구하고 꾸준히 보급되어 왔고, 현재에는 꾸준한 보급 및 정책 등으로 인하여 기술력 및 가격경쟁력을 확보할 수 있었고 이로 인해 재생에너지 점유율은 더욱더 빠르게 증가하고 있다.

2018년을 기준으로 해외국가 및 지역들의 VRE 점유율을 그림 1에 나타내었다. 덴마크에서는 연간 발전량의 60%를 태양광과 풍력에너지로 공급하고 있으며, 스페인, 포르투갈, 독일, 영국, 아일랜드, 우루과이도 태양광과 풍력발전기가 약 20% 이상의 점유율을 차지하고 있다[13].

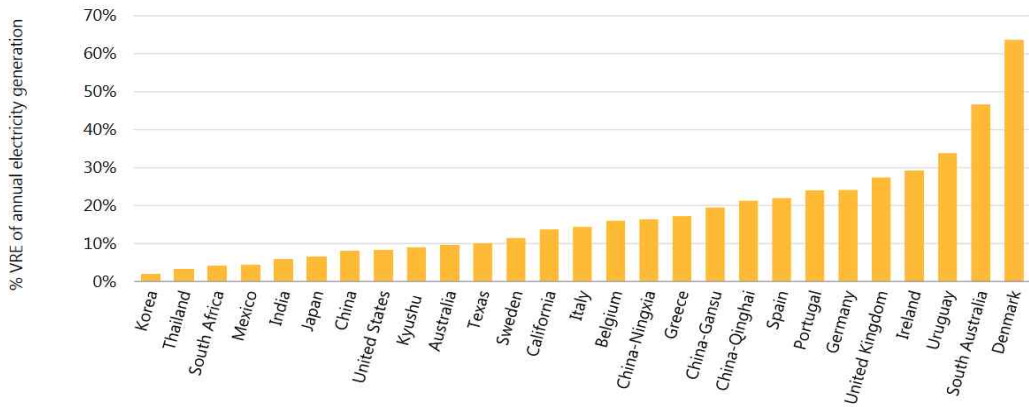


Fig. 1 Annual VRE share in countries and regions, 2018 [13]

가변성 재생에너지 점유율 수준에 따른 예상 국가 수를 그림 2에 나타냈다. 2015년에는 풍력과 태양광의 발전량 점유율이 5% 이상인 국가가 30개국 이상이 었지만 2018년에는 약 50여 개국 이상의 국가들이 5%의 점유율을 넘었다. 또한, 향후 5년 동안 많은 국가의 VRE 점유율은 5~10% 수준에서 10~20% 수준으로 증가할 것으로 예상되며, 20~40%의 점유율을 갖는 국가들도 많아질 것으로 예상되고 있다[13].

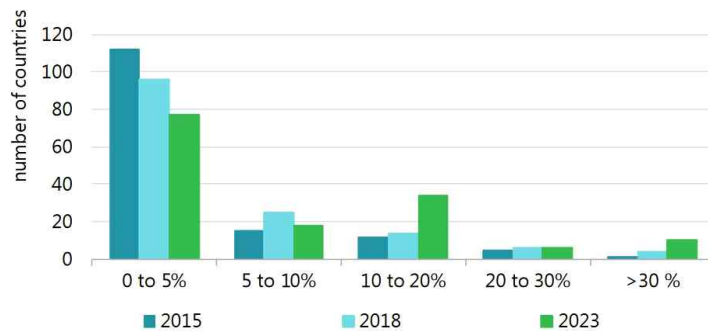


Fig. 2 Number of countries within annual VRE penetration range, historical and projected [13]

국내에서도 ‘재생에너지 3020 정책’을 통해 원자력, 석탄화력을 줄이고 청정에너지 발전을 늘리기 위해 태양광과 풍력발전설비의 보급을 늘리고 있다. 전체 발전량 중 재생에너지의 비중을 20%까지 높일 계획이며 이중 신규설비의 95% 이상을

태양광, 풍력으로 공급할 계획이다. 그리고 국내 여러 지역에서도 태양광 및 풍력발전설비의 보급을 추진하고 있으며 특히 제주지역에서는 ‘Carbon Free Island 2030’ 계획을 통해 2030년까지 제주도 전력수요를 신재생에너지로 100% 공급할 수 있도록 신재생에너지설비 보급을 늘리고 있다. 2018년을 기준으로 국내 계통에 설치된 풍력설비용량은 1,420 MW, 태양광설비용량은 7,130 MW로 총합 8,550 MW의 VRE 설비가 국내 계통에 설치되어있고 발전량 점유율은 3.46%이다. 그리고 2018년을 기준으로 제주계통에 설치된 풍력설비용량은 266 MW, 태양광설비용량은 168 MW로 총합 434 MW의 VRE 설비가 제주계통에 설치되어있고 발전량 점유율은 12.5%이다[6]-[8].

2.2 재생에너지의 변동성과 유연성 자원의 필요성

2.2.1 전력계통의 유연성

전력계통 운영자의 주요 업무 중 하나는 전력공급과 수요의 균형을 항상 유지하는 것이다. 작은 불균형에도 전력계통의 주파수가 크게 변동하고 계통 신뢰도가 저해되기 때문에 항상 공급과 수요의 균형을 맞추는 것이 중요하다. 즉, 전력계통의 유연성은 계통의 전력수요예측을 통한 공급량 제어와 예측하지 못한 변화에 대응할 수 있는 능력을 의미한다[13].

기존에 풍력과 태양광 같은 VRE 설비가 설치되지 않은 계통에서 주요 변동성은 전력수요의 변화였다. 또한, 예상치 못한 발전기의 정지 및 수요 예측 오류로 인한 전력수급의 불균형을 해소하기 위해 계통 보조서비스를 운용하였다.

그러나 계통에 VRE 가 보급되면서 변동성과 불확실성이 증가하고 있다. 풍력과 태양광 에너지는 풍속의 변동 및 태양에너지 변화로 인해 생기는 수초의 변동부터 계절적인 차이로 인해 생기는 수개월의 변동까지 다양한 변화가 발생한다. 따라서 VRE의 특성까지 고려한 전력계통의 유연성은 VRE 발전설비로 인해 발생하는 단기부터 장기까지 다양한 시간 규모의 변동에 대처하여 전력을 안정적으로 공급할 수 있는 능력을 의미한다[9].

2.2.2 가변성 재생에너지의 특성

신재생에너지 중 태양광과 풍력발전은 각각 일사량과 풍속 조건에 의존하여 발전하는 특성으로 VRE로 분류된다. VRE의 특징은 발전 과정에서 환경 오염물질을 배출하지 않고 지속적으로 발전이 가능하다는 큰 장점이 있지만, 전력계통 운영 면에서는 다음과 같은 단점을 지닌다. 첫째, VRE의 출력은 불확실해 예측이 쉽지 않다. 특히 풍력발전의 경우 풍속에 따라 발전하기 때문에 기상상태에 큰 영향을 받는다. 따라서 정밀하게 기상여건을 예측한다 해도 어느 정도 오차를 갖고 있으므로 풍력발전은 항상 불확실성을 갖는다. 둘째, VRE의 출력을 완벽하게 예측할 수 있다 하더라도, 태양광 및 풍력발전의 변동성이 매우 크다. 따라서 VRE의 수용률이 증가할수록 VRE의 불확실성과 변동성은 전력계통에 큰 영향을 미치게 된다[16].

2.2.3 유연성 자원의 종류

전력계통의 유연성 자원은 크게 물리적인 유연성 자원과 구조적인 유연성 자원으로 분류할 수 있다. 물리적인 유연성 자원은 수요 및 발전량의 변화에 대응할 수 있는 자원을 의미한다. 전력수요의 급격한 변화에 대해 전력을 공급할 수 있는 능력과 발전량의 급격한 변화에 따른 전력수요 조절 능력, 공급과 수요 간의 균형을 유지할 수 있는 에너지 저장능력 등이 물리적 자원에 포함된다. 물리적 유연성 자원에는 대표적으로 ESS가 있다.

구조적인 유연성 자원은 계통운영방안 또는 전력시장운영에 따라 물리적인 유연성을 이용할 수 있는 자원이다. 구조적인 유연성 자원에는 전력 시장의 구조와 계통 보조서비스 등이 있다. 구조적인 유연성 자원이 뒷받침되어야 물리적 유연성 자원을 통한 계통운영이 가능하기 때문에 구조적 유연성 자원과 물리적 유연성 자원 간의 연계가 중요하다. 따라서 두 가지의 유연성을 복합적으로 연계한 자원들도 있으며 수요자원이 대표적이다. 각 유연성 자원의 분류를 표 1에 나타내었다[18].

Table 1. Resources of power system flexibility

Category	Resources
Physical flexibility	Flexible conventional units
	Energy storage system
Structural flexibility	Market design improvement
	New ancillary services (Load following, Inertia response)
	Sectoral integration
Physical & Structural flexibility	Demand side flexibility utilization
	Grid interconnection and grid side flexibility
	Greater control over VERs
	Smart grid initiative

2.2.4 유연성 자원의 필요성

전력계통 유연성이 높을수록 변동성과 불확실성을 더 쉽게 수용할 수 있으며 계통 유연성이 낮다면 계통에서 수용할 수 있는 변동성과 불확실성이 제한되어 VRE의 출력제한이 발생하게 된다. 캘리포니아에서는 풍력과 태양광발전량이 급격하게 증가하면서 발전량이 수요를 초과하게 되는 공급과잉이 발생하고 있다. 이때 계통의 발전량을 제한해야하는데 일반 화력발전소의 최소출력제약으로 인해 재생에너지설비에 출력제한이 필요한 상황이 발생하고 있다. 2015년에 VRE 설비의 발전량 중 187,000 MWh 이상의 발전량을 제한했으며 2016년에는 308,000 MWh 이상의 발전량을 제한했다[5]. 또한, 국내에서도 유연성 부족으로 인해 출력제한 사례가 발생하고 있다. 제주지역에서는 주로 경부하 상황에서 풍력발전기의 발전량이 급격하게 증가하는 새벽시간과 태양광발전량이 크게 증가하는 낮에 출력제한이 발생하고 있다[16]. 2016년 6차례 풍력발전 출력제한에 이어 2017년 16회, 2018년 17회 등 매년 출력제한 횟수가 증가하고 있다. 결국,

계통의 유연성이 부족해 재생에너지의 변동에 대처할 수 없는 상황이 발생하면 재생에너지의 출력을 제한할 수밖에 없다. 따라서 수요자원과 ESS 등 유연성 자원을 통해 계통의 유연성을 보완하면 공급 신뢰도뿐만 아니라 VRE의 수용률도 증대시킬 수 있다.

2.3 유연성 자원필요량 산정 및 분석

2.3.1 순부하 산정

순부하는 계통 부하에서 비중앙급발전기의 발전량을 제외한 값이다. 본 논문에서는 VRE의 변동성에 따른 유연성 필요량을 분석하기 위해 비중앙급발전량에는 풍력과 태양광발전만을 포함하였다. 따라서 순부하를 산정하기 위해서 부하 데이터와 풍력 및 태양광 발전설비의 출력량 데이터가 필요하다. 그리고 계통에 대해 분석하기 위해 부하 데이터의 패턴과 재생에너지 출력량 데이터의 패턴을 분석하고자 하는 계통규모에 적용하는 방법을 사용하였다. 먼저 부하 패턴을 구하기 위해 부하율이 사용되었고 풍력 및 태양광 발전패턴을 구하기 위해 설비이용률이 사용되었다.

계통의 부하를 산정하기 위해 부하데이터를 통해서 구한 단위시간별 부하율에 분석하고자 하는 계통의 최대부하를 적용하였다. 그리고 풍력 및 태양광 발전설비의 출력량을 산정하기 위해 재생에너지 출력량 데이터를 통해서 구한 단위시간별 풍력 이용률과 태양광 이용률을 각각 분석하고자 하는 계통의 풍력발전 설비용량과 태양광발전 설비용량에 적용하였다. 따라서 부하율을 통해 산정한 계통부하에서 설비이용률을 통해 산정한 재생에너지 출력량을 빼값이 분석하고자 하는 계통의 순부하가 된다. 순부하 산정을 위한 식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[17].

$$NL(t) = PL \times LF(t) - C_{PV} \times CF_{PV}(t) - C_W \times CF_W(t) \quad (1)$$

여기서, t : 단위시간

NL : 순부하 (MW)

PL : 최대부하 (MW)

LF : 부하율 (%)

C : 풍력(W) 및 태양광(PV)발전 설비용량 (MW)

CF : 풍력(W) 및 태양광(PV)발전 설비이용률 (%)

2.3.2 이산 푸리에 변환을 통한 유연성 필요량 산정 및 분석

유연성 자원들은 각기 다른 특성을 갖고 있으며 그 특성에 따라 응답시간 또한 천차만별이다. 따라서 전체 재생에너지의 변동에 따른 유연성 자원의 필요량을 응답시간에 따라 분리하여 구한다면 각 유연성 자원에 따른 적정 필요량을 산정할 수 있다. 응답시간에 따른 분리는 이산 푸리에 변환을 통해 주파수 대역별로 분리가 가능하다.

푸리에변환은 주로 시계열데이터에 포함된 정확한 주파수를 추정하는데 널리 이용되고 있다. 푸리에 변환은 주기, 비주기 신호를 포함한 모든 신호를 사인함수와 코사인함수의 합성으로 나타내어 시간 영역의 신호를 주파수 영역으로 변환시켜 준다. 이산 푸리에 변환식은 식 (2)와 같이 나타내며 역변환식은 식 (3)과 같다.

$$X_f = \sum_{t=0}^{N-1} x[t] e^{-i2\pi ft/N} \quad f = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$x[t] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{-i2\pi kt/N} \quad t = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

여기서, N : 수열($x[0], x[1], \dots, x[N-1]$)의 데이터 포인트 개수

이산 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환된 신호에서 분석하고자 하는 주파수 범위를 선택한 뒤 대역 필터를 통해 특정 주파수 대역 신호를 분리한다.

대역 필터의 조절을 통해 다양한 주기의 순부하 데이터를 분리해낼 수 있다.

대역 필터의 차단주파수는 다양한 유연성 자원들의 응답시간을 기준으로 설정할 수 있다. 자원의 특성에 따라 용량이 작지만 응답시간이 빨라 크기가 작고 빠른 변동에 적합한 자원이 있고 용량이 크지만 응답시간이 느려 크기가 크고 오랜 시간에 걸친 변동에 적합한 자원이 있다. 따라서 이러한 자원의 응답시간에 따라 차단주파수를 달리 설정할 수 있다. 유연성 자원들의 응답시간에 따른 분류를 표 2에 나타내었다[18].

분리된 주파수 신호를 역푸리에 변환을 통해 시간 영역 신호로 변환한다. 최종적으로 분리해낸 시간 영역 신호를 이용해 유연성 자원의 응답시간에 맞는 필요량을 분석한다. 위에서 설명한 전체적인 유연성 자원 필요량 분석 단계는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. Flexibility resources categorized based on service duration

Duration	Services	Example of technologies
Very short : 1 ms-5 min	Power quality, regulation	Flywheels, DSM(Demand side management)
Short : 5 min-1 hour	Spinning reserve	Flow batteries, DSM PHES(Pumped Hydro Energy System)
	contingency reserve	
	black start	
Intermediate : 1 hour-3 day	Load following,	CAES(Compressed Air Energy Storag) , PHES, DSM
	load leveling/peak shaving/valley filling,	
	transmission curtailment prevention	
	transmission loss reduction	
Long : months	Seasonal shifting	CAES, PHES

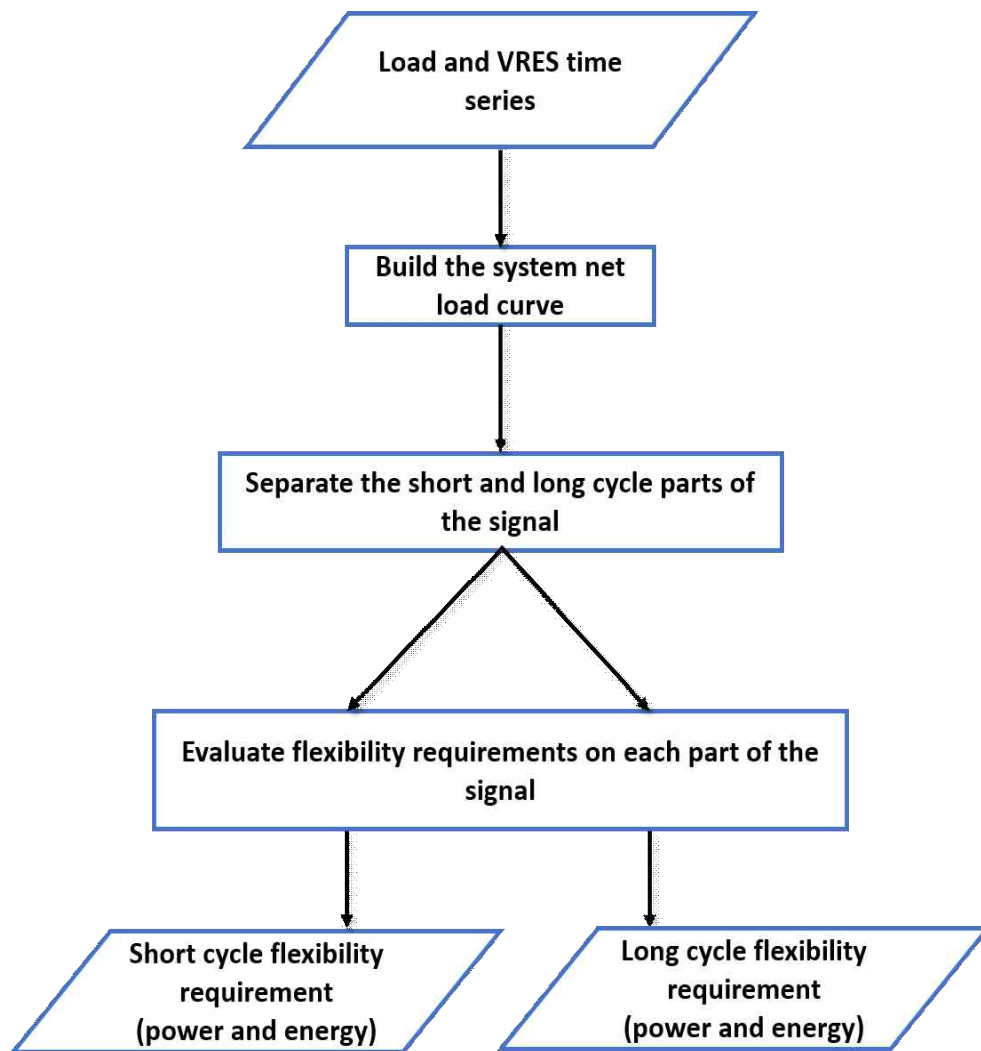


Fig. 3 General overview of the analysis of flexibility requirements

3. 사례 연구

가변성 재생에너지의 변동성이 계통의 유연성에 미치는 영향을 확인하기 위해 풍력과 태양광발전설비가 크게 증가한 제주지역의 데이터가 사용되었다. 일반 화력발전소에서 대응할 수 있는 1시간을 기준으로 단주기와 장주기로 구분하여 유연성 자원의 필요량을 분석하였으며, 풍력과 태양광의 이용률은 계절에 따라 큰 차이가 있으므로 계절별로 나누어 분석을 수행하였다.

3.1 적용 모델 계통

풍력과 태양광발전설비의 변동성이 계통운영에 영향을 주고 있는 제주지역 데이터가 사용되었으며, 제주 전력계통 운영 현황에 대한 보고서와 제8차 전력수급계획을 참고하여 적용계통의 VRE 점유율이 50%를 초과하는 시점인 2025년을 기준으로 하였다[6],[8]. 2017년과 2018년 제주계통 데이터를 통해 부하율과 풍력 및 태양광 이용률을 산출하고 제주지역의 최대수요 및 VRE 설비용량을 가정해 2025년 제주지역의 순부하를 산정하였다.

Table 3. Peak Load and VRE capacity of Jeju in 2025

Category	Value	
Peak load	1,193 MW	
VRE capacity	Wind	1,265 MW
	PV	1,081 MW
	Total	2,366 MW

대역 필터의 차단주파수는 표 2의 분류를 참고하여 응답시간에 따라 설정하였다. 2분에서 1시간의 주기를 갖는 단주기 신호를 분리하기 위해 상한 차단주파수를 2분의 역수인 8.33 mHz와 60분의 역수인 0.278 mHz로 설정하였다. 1시간에서 1일의 주기를 갖는 장주기 신호도 마찬가지로 차단주파수를 설정하여 분리하였다. 전체 대역 필터의 차단주파수는 표 4와 같이 설정하였다.

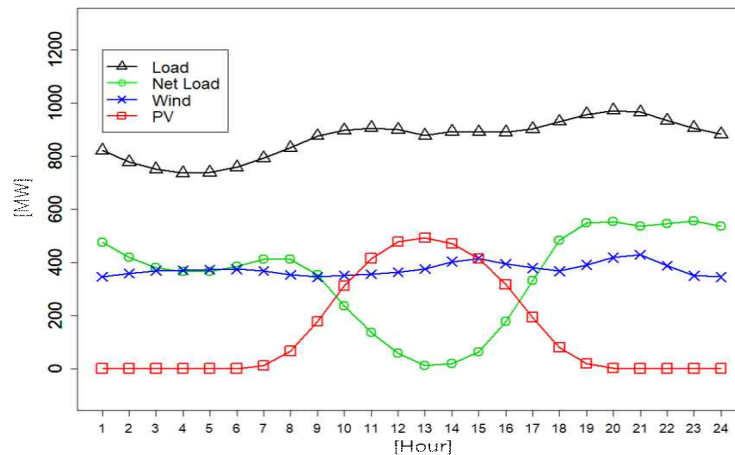
Table 4. Cutoff frequency of band-pass filter

Component	Lower cutoff frequency(mHz)	Upper cutoff frequency(mHz)
Short cycle : 2 min - 1 hour	0.278	8.33
Long cycle : 1 hour - 1 day	0.0116	0.278

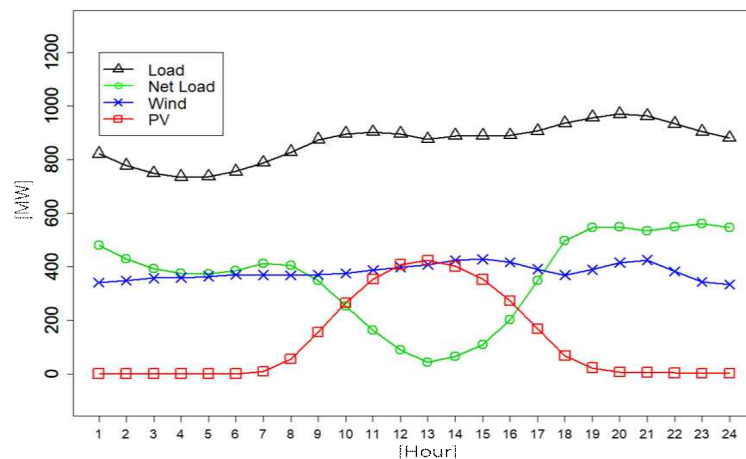
3.2 유연성 자원 필요량 분석

3.2.1 순부하 분석

2025년 전체의 부하와 순부하 및 VRE 발전량의 시간당 평균값에 대해 2017년 데이터와 18년 데이터를 적용한 값을 그림 4에 나타내었다. 17년의 패턴을 적용한 경우 순부하는 8시부터 13시까지 5시간 동안 80 MW/h로 하향 변동했으며, 14시부터 19시까지 5시간 동안 105.8 MW/h로 상향 변동했다. 전체 기간에서 VRE의 발전량이 수요를 초과하는 공급과잉이 발생했는데 공급과잉 발전량은 1년간 562 GWh로 VRE의 2025년 총 발전량의 12.4%이다. 18년 패턴을 적용한 경우 순부하는 8시부터 13시까지 5시간 동안 72.2 MW/h로 하향 변동했으며, 13시부터 18시까지 5시간 동안 90.8 MW/h로 상향 변동이 발생했다. 1년간 공급 과잉 발전량은 444 GWh로 VRE 총발전량의 10.2%이다.



(a) Applying 2017 data

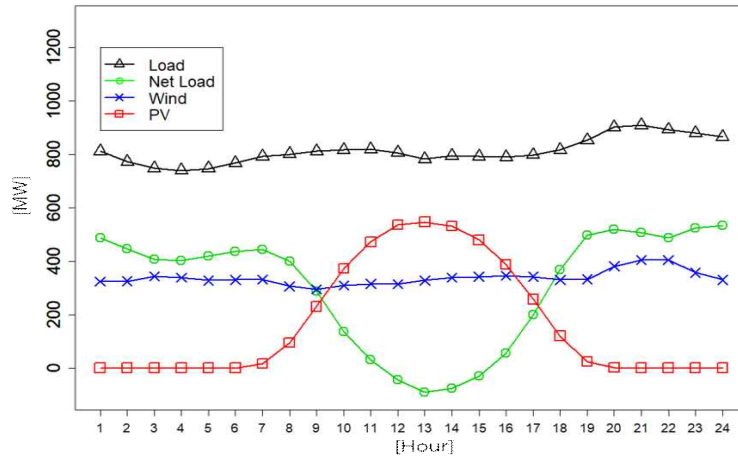


(b) Applying 2018 data

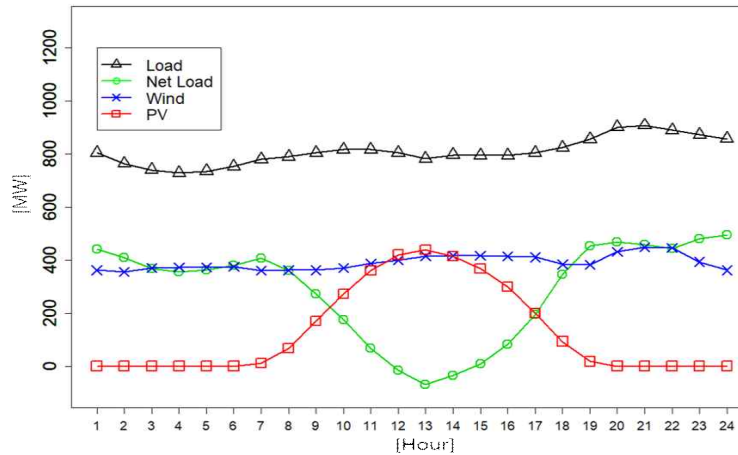
Fig. 4 Average annual values for each hour of the day in 2025

1) 봄(3월~5월)

2025년의 봄철(3월~5월) 부하와 순부하 및 VRE 발전량의 시간당 평균값에 대해 17년 데이터와 18년 데이터를 적용한 값을 그림 5에 나타내었다. 17년의 패턴을 적용한 경우 순부하는 8시부터 13시까지 5시간 동안 98.4 MW/h로 하향 변동했으며, 14시부터 19시까지 5시간 동안 114.8 MW/h로 상향 변동했다. 공급과잉 발전량은 1년간 167 GWh로 VRE의 봄철 총 발전량의 14.9%이다. 18년 패턴을 적용한 경우 순부하는 7시부터 13시까지 6시간 동안 79 MW/h로 하향 변동했으며, 13시부터 19시까지 6시간 동안 87.2 MW/h로 상향 변동이 발생했다. 1년간 공급과잉 발전량은 156 GWh로 VRE의 봄철 총발전량의 13.6%이다.



(a) Applying 2017 data



(b) Applying 2018 data

Fig. 5 Average annual values for each hour of the day in the spring of 2025

2) 여름(6월~8월)

2025년의 여름철(6월~8월) 부하와 순부하 및 VRE 발전량의 시간당 평균값에 대해 17년 데이터와 18년 데이터를 적용한 값을 그림 6에 나타내었다. 17년의 패턴을 적용한 경우 순부하는 8시부터 14시까지 6시간 동안 44.1 MW/h로 하향 변동했으며, 15시부터 19시까지 4시간 동안 118.5 MW/h로 상향 변동했다. 공급과잉 발전량은 18 GWh로 VRE의 여름철 총 발전량의 2.4%이다. 18년 패턴을 적용한 경우 순부하는 7시부터 13시까지 6시간 동안 40.2 MW/h로 하향 변동했으며, 14시부터 20시까지 6시간 동안 87.8 MW/h로 상향 변동이 발생했다. 공급과잉 발전량은 26 GWh로 VRE의 여름철 총발전량의 3.1%이다.

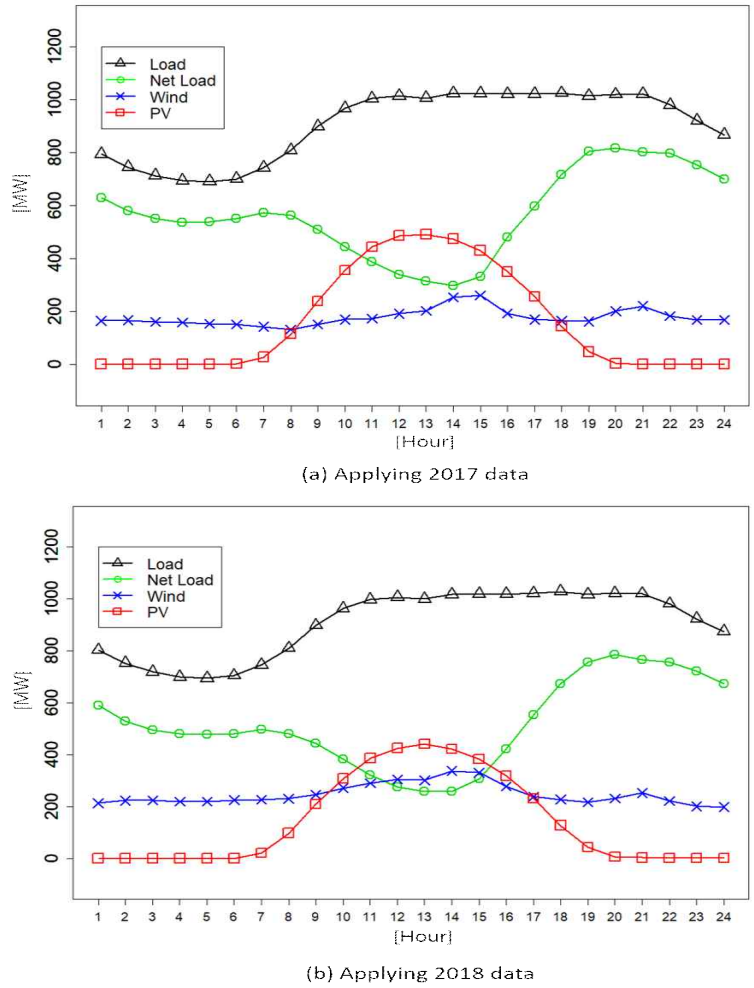
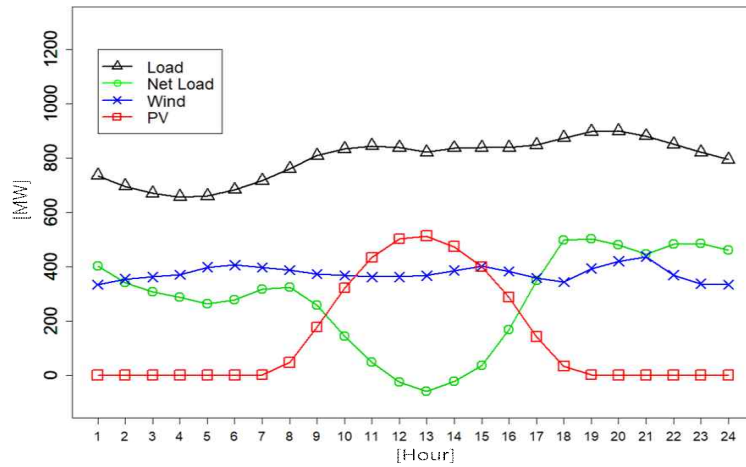


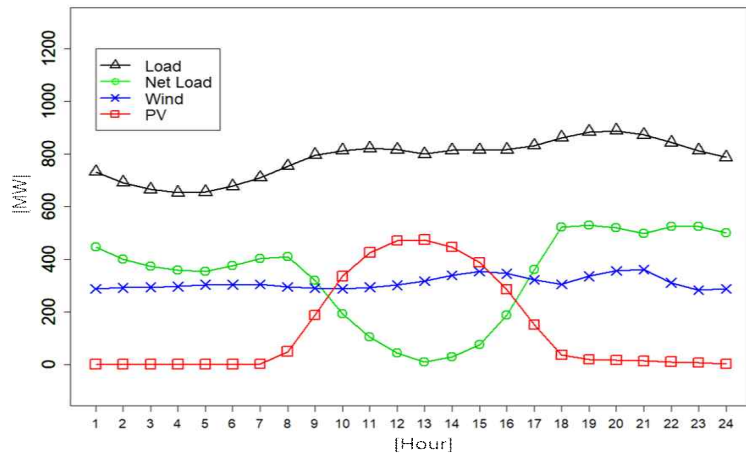
Fig. 6 Average annual values for each hour of the day in the summer of 2025

3) 가을(9월~11월)

2025년의 가을철(9월~11월) 부하와 순부하 및 VRE 발전량의 시간당 평균값에 대해 17년 데이터와 18년 데이터를 적용한 값을 그림 7에 나타내었다. 17년의 패턴을 적용한 경우 순부하는 8시부터 13시까지 5시간 동안 76.8 MW/h로 하향 변동했으며, 14시부터 18시까지 4시간 동안 130 MW/h로 상향 변동했다. 공급과잉 발전량은 171 GWh로 VRE의 가을철 총 발전량의 15.2%이다. 18년 패턴을 적용한 경우 순부하는 8시부터 13시까지 5시간 동안 100.3 MW/h로 하향 변동했으며, 14시부터 18시까지 4시간 동안 123.2 MW/h로 상향 변동이 발생했다. 공급과잉 발전량은 123 GWh로 VRE의 가을철 총발전량의 12.6%이다.



(a) Applying 2017 data

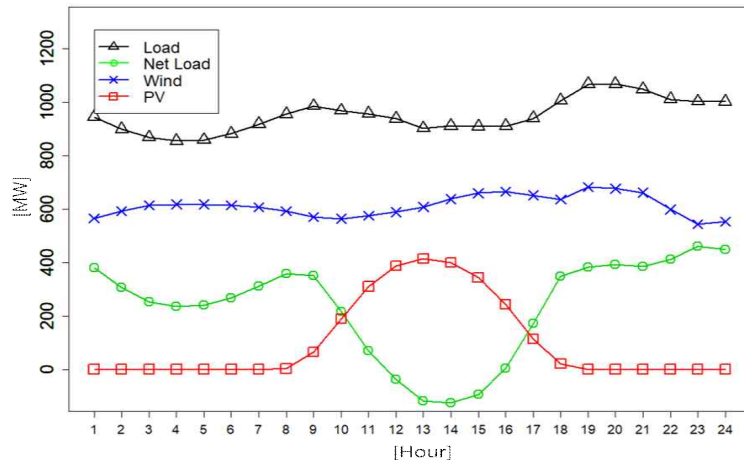


(b) Applying 2018 data

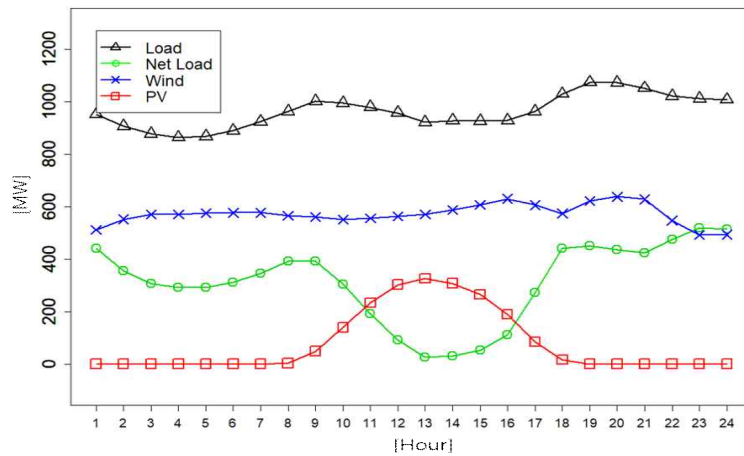
Fig. 7 Average annual values for each hour of the day in the fall of 2025

4) 겨울(12월~2월)

2025년의 겨울철(12월~2월) 부하와 순부하 및 VRE 발전량의 시간당 평균값에 대해 17년 데이터와 18년 데이터를 적용한 값을 그림 8에 나타내었다. 17년의 패턴을 적용한 경우 순부하는 9시부터 13시까지 4시간 동안 117.5 MW/h로 하향 변동했으며, 14시부터 18시까지 4시간 동안 118.5 MW/h로 상향 변동했다. 공급과잉 발전량은 206 GWh로 VRE의 겨울철 총발전량의 13.3%이다. 18년 패턴을 적용한 경우 순부하는 9시부터 13시까지 4시간 동안 92 MW/h로 하향 변동했으며, 15시부터 18시까지 3시간 동안 128.7 MW/h로 상향 변동이 발생했다. 공급과잉 발전량은 139 GWh로 VRE의 겨울철 총발전량의 9.9%이다.



(a) Applying 2017 data



(b) Applying 2018 data

Fig. 8 Average annual values for each hour of the day in the winter of 2025

3.2.2 유연성 자원의 필요량

유연성 자원의 필요량은 17년 데이터와 18년 데이터를 각각 적용한 2025년 순부하를 계절별로 분리하여 단주기와 장주기로 산정하였다. 전력은 하루마다 전력의 최대값을 계산하고 전력량은 하루마다 필요한 전력량의 총량을 계산하였다. 2025년 전체의 단주기 유연성 자원 필요량의 빈도분포와 백분위수를 그림 9와 표 5에 나타내었다. Positive는 신재생에너지의 발전으로 인해 전체계통에서 전력 수급균형을 맞추기 위해 계통에서 부족한 전력으로, 계통에 공급해야 하는 전력

및 전력량이다. 그리고 Negative는 신재생에너지의 발전으로 인해 계통에서 발생한 과잉전력으로, 계통에서 소비하거나 충전해야 하는 전력 및 전력량이다.

빈도분포와 백분위수를 통해 계통으로 공급해야 하는 전력과 소비해야 하는 전력을 비교하면 소비해야 하는 전력이 더 컸으며, 전력량은 서로 비슷한 수준이다. 그리고 전력의 빈도분포를 보면 빈도수가 많은 구간의 값과 극단값이 큰 차이를 보인다. 백분위수를 통해 비교하면 75번째 백분위수와 99번째 백분위수는 약 3배의 차이를 보이고 있다.

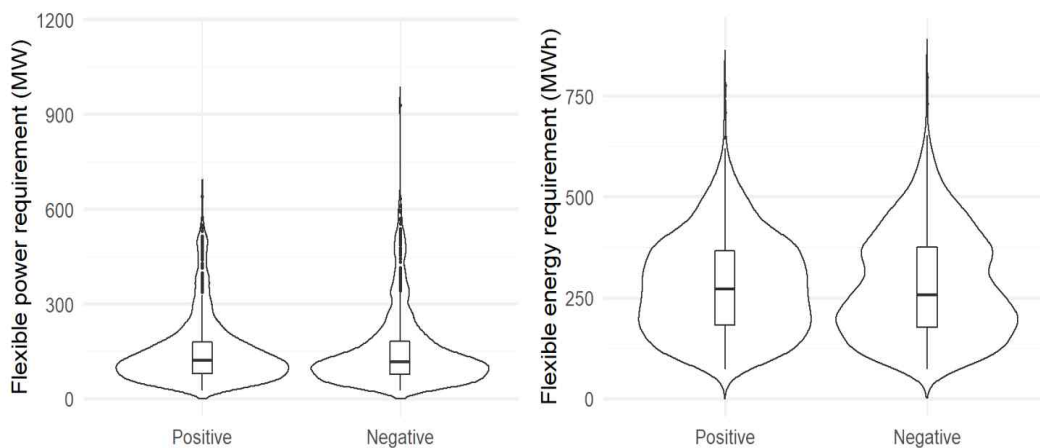


Fig. 9 Flexibility requirements for short cycle in 2025

Table 5. Percentile of flexibility requirements for short cycle in 2025

Percentile	Power[MW]				Energy[MWh]			
	75th	90th	95th	99th	75th	90th	95th	99th
Positive (계통공급)	180	295	388	506	366	439	491	570
Negative (계통소비)	182	326	415	549	375	458	504	601

계절에 따른 특성을 파악하기 위해 사계절을 기준으로 2025년의 순부하를 4개의 구간으로 나누어 각각 단주기 유연성 자원 필요량을 분석하였다. 사계절 모두 전력과 전력량의 빈도분포는 2025년 전체를 분석한 빈도분포 그래프와 유사한 분포를 보였다. 계절에 따른 유연성 필요량은 전력과 전력량 모두 여름에 가장 작았고 겨울에 가장 큰 값을 보였다. 계절에 따른 단주기 유연성 자원필요량의 백분위수를 표 6에 나타냈다.

Table 6. Percentile of flexibility requirements for short cycle in different seasons

	Percentile	Power[MW]				Energy[MWh]			
		75th	90th	95th	99th	75th	90th	95th	99th
Total	Positive (계통공급)	180	295	388	506	366	439	491	570
	Negative (계통소비)	182	326	415	549	375	458	504	601
Spring	Positive (계통공급)	190	266	365	499	353	405	459	569
	Negative (계통소비)	185	349	452	543	361	452	485	578
Summer	Positive (계통공급)	128	183	233	366	279	351	396	514
	Negative (계통소비)	129	234	276	405	281	374	437	498
Fall	Positive (계통공급)	166	320	393	508	357	405	459	512
	Negative (계통소비)	188	310	403	574	370	438	460	550
Winter	Positive (계통공급)	229	372	452	542	433	499	539	621
	Negative (계통소비)	217	392	479	566	437	524	581	668

2025년 전체의 장주기 유연성 자원 필요량의 빈도분포와 백분위수를 그림 10과 표 7에 나타내었다. 빈도분포와 백분위수를 통해 계통으로 공급해야 하는 전력과 소비해야 하는 전력을 비교하면 소비해야 하는 전력이 더 컸으며, 전력량은 계통으로 공급해야 하는 양이 더 컸다.

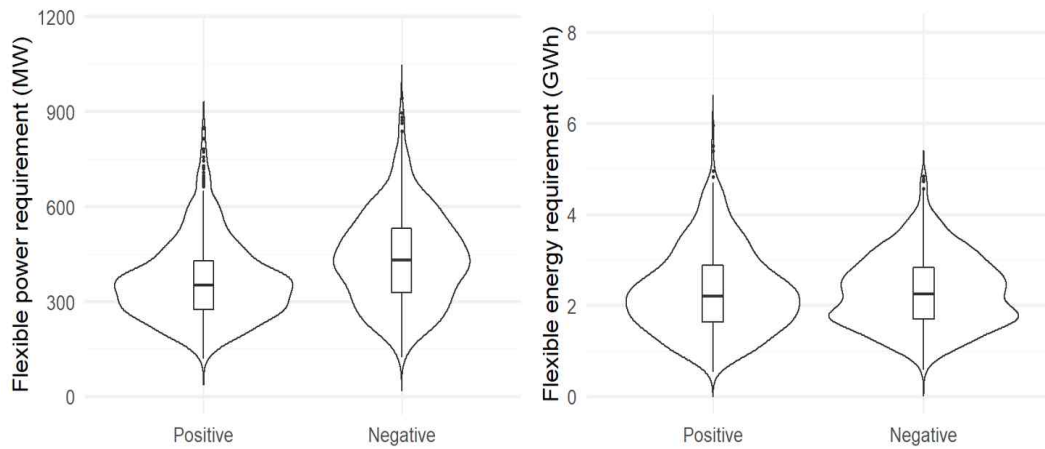


Fig. 10 Flexibility requirements for long cycle in 2025

Table 7. Percentile of flexibility requirements for long cycle in 2025

Percentile	Power[MW]				Energy[GWh]			
	75th	90th	95th	99th	75th	90th	95th	99th
Positive (계통공급)	429	537	608	740	2.87	3.58	4.02	4.64
Negative (계통소비)	530	618	679	827	2.83	3.34	3.68	4.34

계절에 따른 특성을 파악하기 위해 사계절을 기준으로 2025년의 순부하를 4개의 구간으로 나누어 각각 장주기 유연성 자원 필요량을 분석하였다. 사계절 모두 전력과 전력량의 빈도분포는 2025년 전체를 분석한 빈도분포 그래프와 유사한 분포를 보였다. 계절에 따른 유연성 필요량은 전력과 전력량 모두 여름에 가장 작았고 겨울에 가장 큰 값을 보였다. 계절에 따른 단주기 유연성 자원필요량의 백분위수를 표 8에 나타냈다.

Table 8. Percentile of flexibility requirements for long cycle in different seasons

	Percentile	Power[MW]				Energy[GWh]			
		75th	90th	95th	99th	75th	90th	95th	99th
Total	Positive (계통공급)	429	537	608	740	2.87	3.58	4.02	4.64
	Negative (계통소비)	530	618	679	827	2.83	3.34	3.68	4.34
Spring	Positive (계통공급)	463	551	622	773	3.38	4.05	4.31	4.92
	Negative (계통소비)	571	632	689	762	3.22	3.65	3.93	4.30
Summer	Positive (계통공급)	379	418	458	505	2.28	2.75	3.01	3.65
	Negative (계통소비)	431	510	549	637	2.28	2.62	2.79	3.40
Fall	Positive (계통공급)	417	515	583	674	2.76	3.40	3.60	4.52
	Negative (계통소비)	533	629	737	843	2.79	3.33	3.60	4.45
Winter	Positive (계통공급)	486	607	683	795	3.03	3.76	4.27	4.67
	Negative (계통소비)	548	643	714	885	2.94	3.47	3.68	4.46

3.2.3 가변성 재생에너지의 점유율에 따른 유연성 자원 필요량 분석

가변성 재생에너지의 점유율이 유연성 자원 필요량에 미치는 영향을 확인하기 위해 풍력과 태양광의 수요 점유율에 따른 유연성 자원 필요량을 분석하였다. 풍력과 태양광발전 설비의 수요 점유율을 0%에서 50%까지 변화시켜 유연성 자원 필요량을 분석하였다. 점유율을 변화시켜 3.2.2항에서 설명한 방법과 같이 유연성 자원의 필요량을 계산하고 각 점유율에 대한 유연성 자원 필요량을 비교하기 위해 95번째 백분위 수를 기준으로 크기를 비교하였다. 그리고 크기 비교를 위해 전력은 분석계통의 최대수요를 이용해 정규화 하였고 전력량은 수요의 총합을 이용해 정규화 하였다.

2025년에 대해 풍력과 태양광의 점유율에 따른 정규화된 단주기 유연성 자원의 전력 및 전력량을 그림 11에 나타내었다. 계통으로 공급해야 하는 전력은 태양광 점유율에 큰 영향을 받아 풍력 점유율보다 태양광의 점유율이 증가할 때 유연성

자원 필요량이 크게 증가했다. 그 외에는 풍력 설비의 점유율에 큰 영향을 받았다. 그리고 태양광 발전설비에 큰 영향을 받는 경우 태양광 점유율이 15%를 넘어서면 유연성 자원의 필요량이 큰 폭으로 증가하였다. 풍력 발전설비에 큰 영향을 받는 경우 풍력 점유율이 20%를 넘어서면 유연성 자원의 필요량이 큰 폭으로 증가하였다.

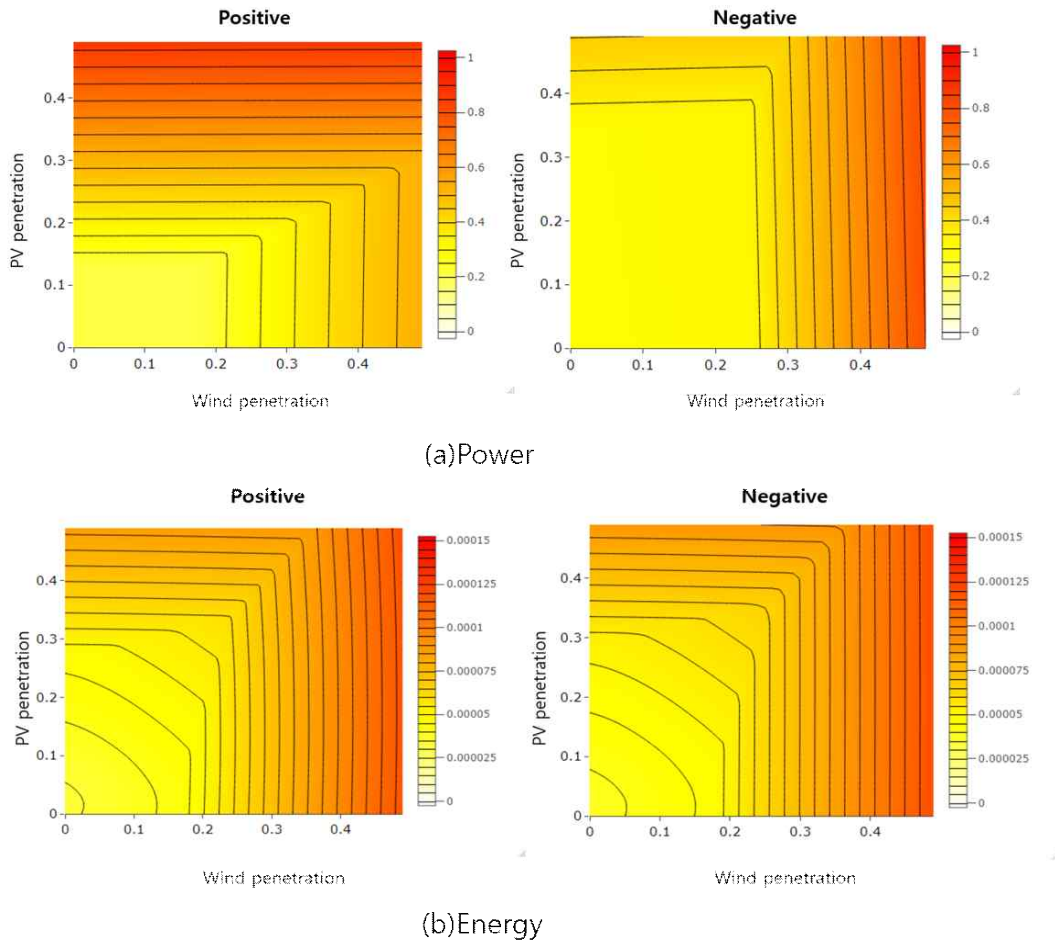


Fig. 11 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in 2025

계절에 따른 특성을 파악하기 위해 사계절을 기준으로 각각 재생에너지의 점유율에 따른 단주기 유연성 자원 필요량을 분석하였다. 사계절 모두 단주기 유연성 필요량은 태양광 점유율보다 풍력 점유율에 조금 더 많은 영향을 받고 있었다. 사계절 중 여름에 재생에너지 점유율 증가에 따른 유연성 자원 필요량의 증가가 가장 작았다. 그리고 봄, 가을, 겨울 순으로 재생에너지의 점유율 증가에 따라 유연성 자원 필요량이 크게 증가했다. 각 계절에서 풍력과 태양광의 점유율에 따른 정규화된 단주기 유연성 자원의 전력 및 전력량을 그림 12-15에 나타내었다.

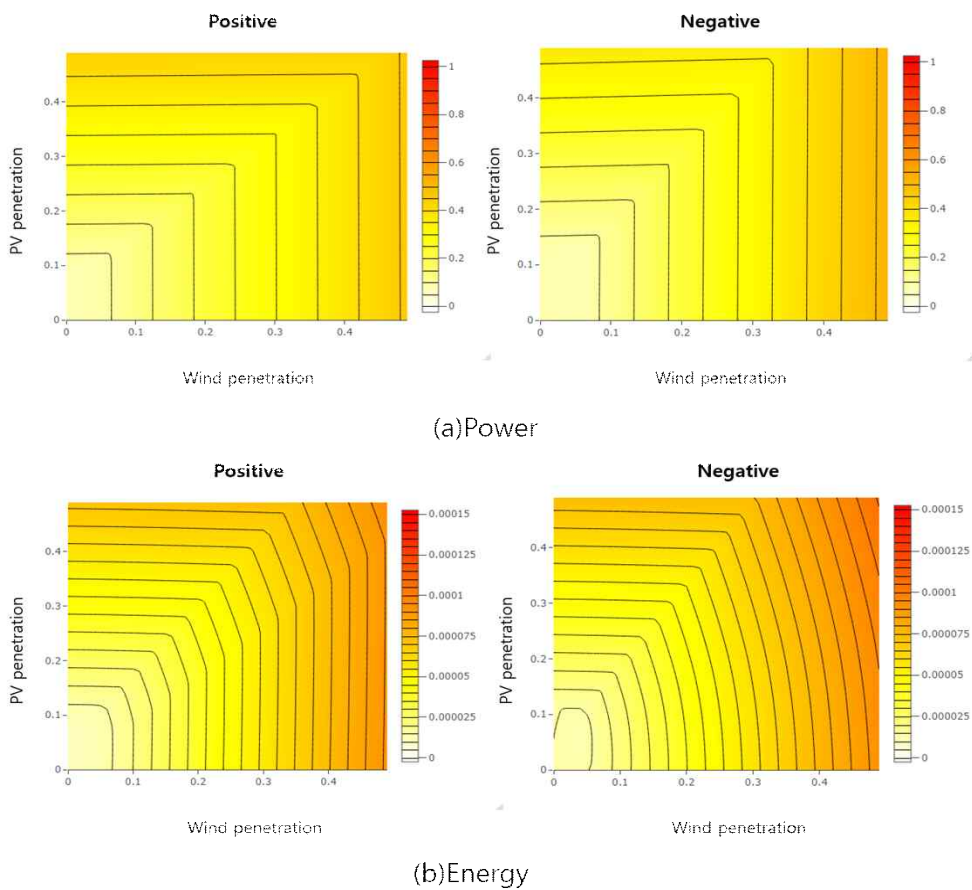
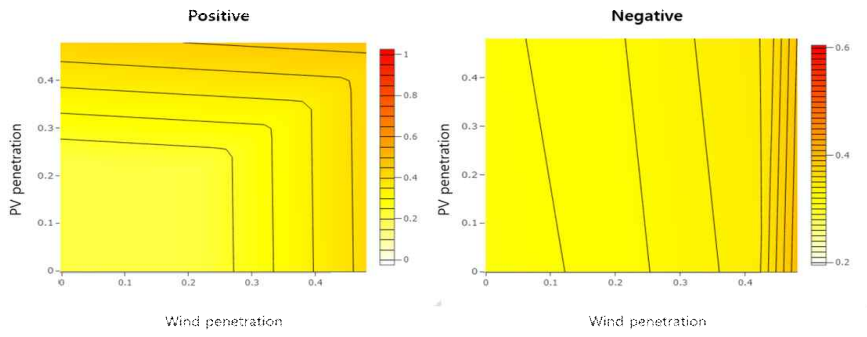
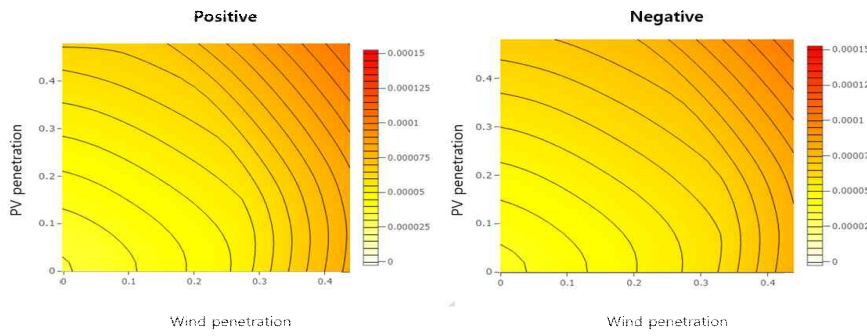


Fig. 12 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in the spring of 2025

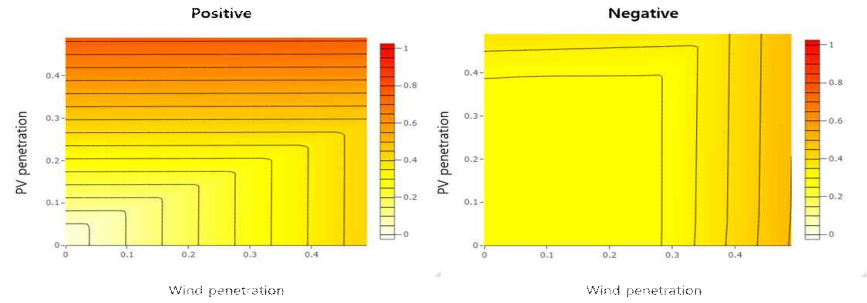


(a)Power

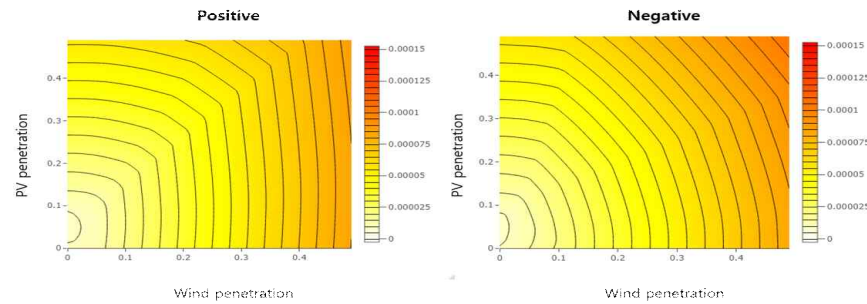


(b)Energy

Fig. 13 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in the summer of 2025



(a)Power



(b)Energy

Fig. 14 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in the fall of 2025

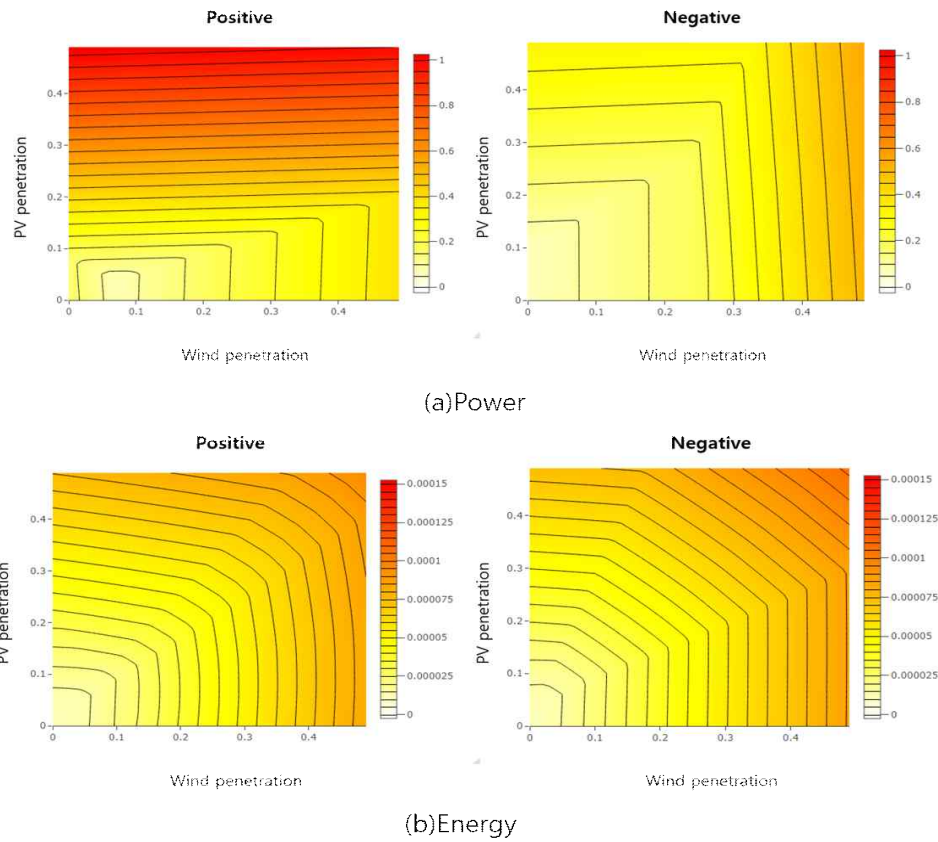


Fig. 15 Normalized flexibility requirements for short cycle in terms of wind and PV penetrations in the winter of 2025

2025년에 대해 풍력과 태양광의 점유율에 따른 정규화된 장주기 유연성 자원의 전력 및 전력량을 그림 16에 나타내었다. 계통으로 공급해야 하는 전력을 제외한 나머지 유연성 자원 필요량은 태양광 점유율에 큰 영향을 받아 태양광의 점유율이 증가할 때 유연성 자원 필요량이 크게 증가했다.

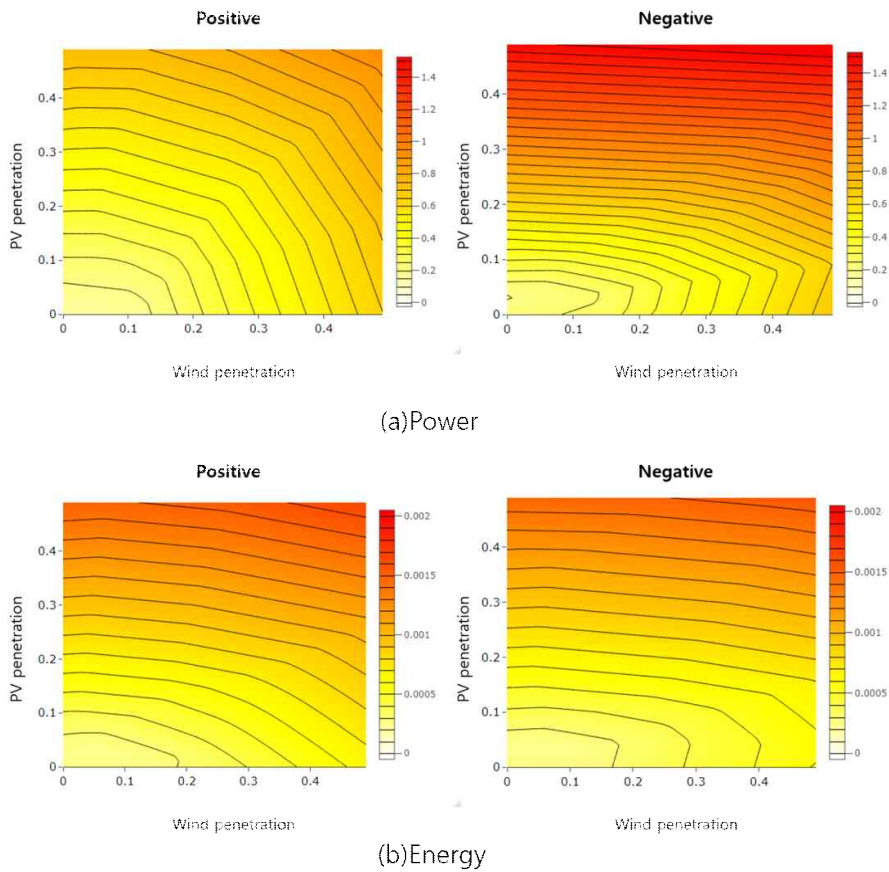


Fig. 16 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind and PV penetrations in 2025

계절에 따른 특성을 파악하기 위해 사계절을 기준으로 각각 재생에너지의 점유율에 따른 단주기 유연성 자원 필요량을 분석하였다. 사계절 모두 장주기 유연성 필요량은 태양광 점유율에 큰 영향을 받고 있었다. 사계절 중 겨울에 재생에너지 점유율 증가에 따른 유연성 자원 필요량의 증가가 가장 많았다. 그리고 사계절 모두 태양광 점유율이 3%미만인 지점에서 태양광 점유율이 증가할수록 유연성 자원 필요량이 감소하는 구간이 발생했다. 각 계절에서 풍력과 태양광의 점유율에 따른 정규화된 단주기 유연성 자원의 전력 및 전력량을 그림 17-20에 나타내었다.

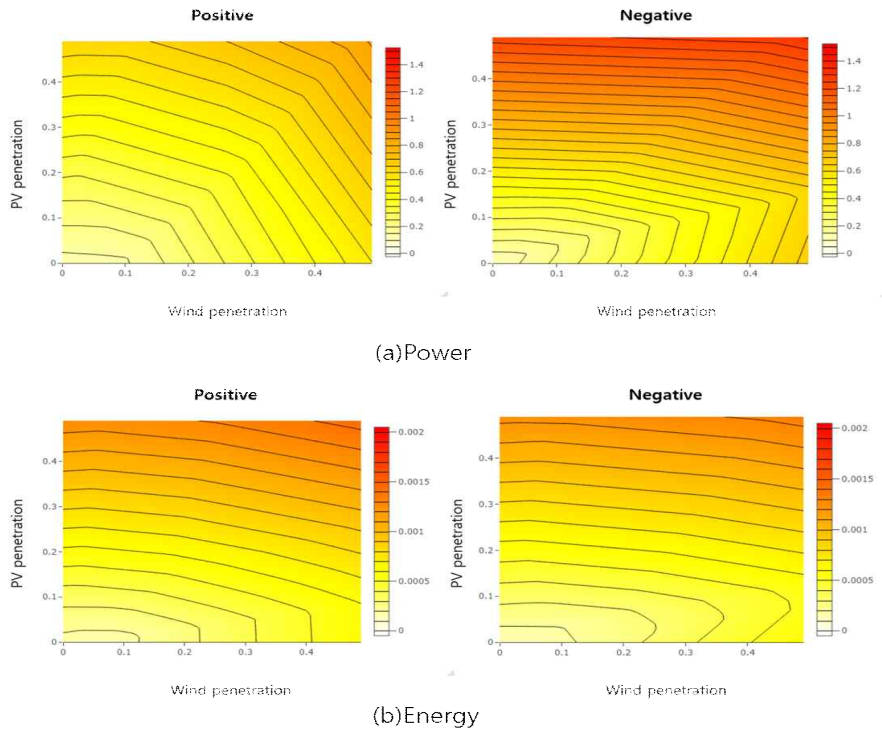


Fig. 17 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind and PV penetrations in the spring of 2025

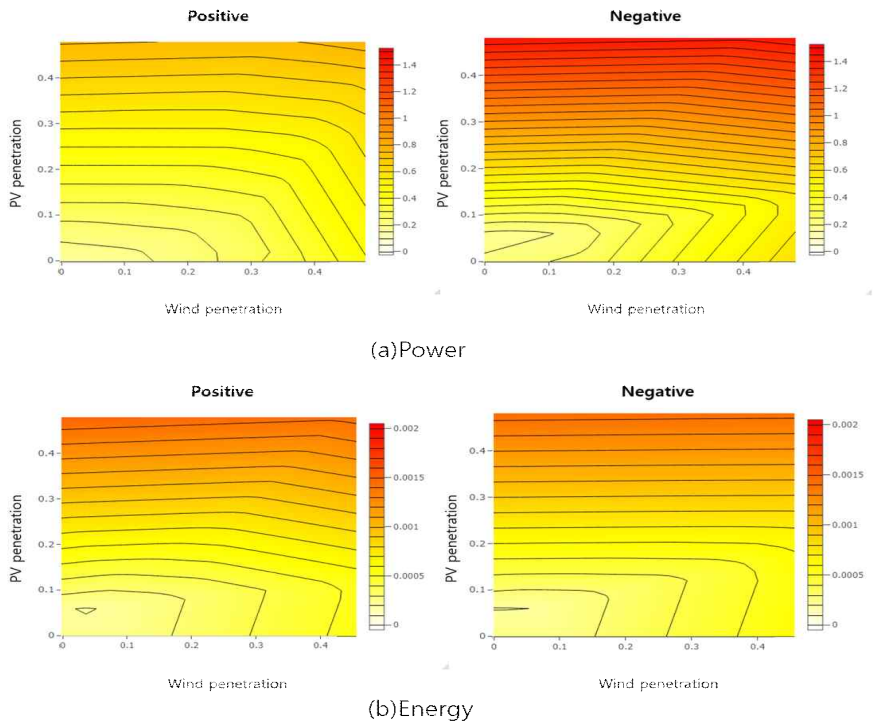


Fig. 18 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind and PV penetrations in the summer of 2025

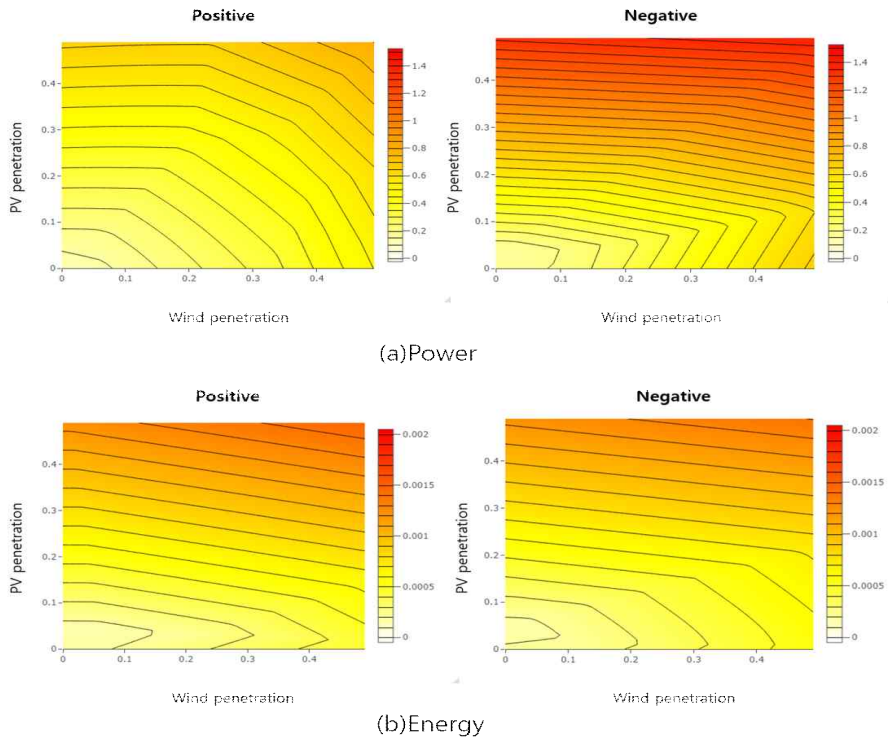


Fig. 19 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind and PV penetrations in the fall of 2025

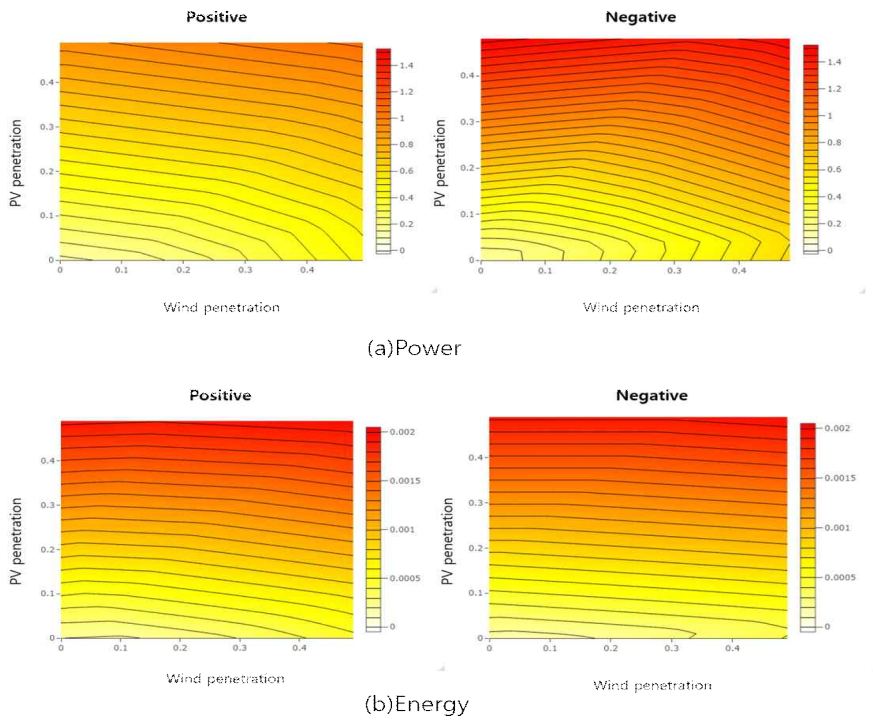


Fig. 20 Normalized flexibility requirements for long cycle in terms of wind and PV penetrations in the winter of 2025

3.3 결과 고찰

재생에너지설비의 보급이 빠르게 늘면서 기존 전력계통의 유연성만으로 재생에너지의 변동에 대응하기 어려워지고 있다. 이러한 전력계통의 유연성 부족에 대비하기 위해 전력수요와 풍력 및 태양광 발전설비의 출력량 데이터를 활용하여 순부하의 특성과 유연성 자원의 필요량을 분석하였다.

재생에너지의 급격한 보급으로 인해 출력제한문제가 발생하고 있는 제주계통 데이터를 토대로 재생에너지설비 점유율이 50%를 초과하는 2025년의 계통을 분석하였다. 순부하를 분석한 결과 순부하의 변동패턴이 태양광 발전패턴과 비슷하게 발생했다. 큰 하향변동 특성이 오전 내내 나타나고 있으며 반대로 오후에는 큰 상향변동이 계속해서 발생해 태양광 발전설비의 발전패턴과 유사함을 확인하였다.

계절에 따라 순부하의 특성을 보면 상향변동률은 사계절 모두 비슷한 수준이었지만 여름철의 경우 하향변동률이 40MW/h 수준으로 나머지 계절의 절반 수준이었다. 여름철에 부하패턴은 오전 내내 증가하는 경향을 보이는데 부하패턴과 태양광발전패턴의 동기화로 인해 순부하 기준의 변동량이 줄어들었음을 확인하였다.

순부하의 변동을 단주기와 장주기로 분리하여 유연성 자원의 필요량을 계산해 빈도분포와 백분위수를 비교하면 출력 필요량은 단주기와 장주기 모두 계통으로 공급해야 하는 전력보다 계통에서 소비해야 하는 전력의 크기가 컸다. 특히 단주기 출력 필요량은 전체 빈도분포와 비교하면 극단값에서 필요량이 크게 증가했다. 이러한 단주기의 큰 변동에 대응하기 위해서는 응답속도가 빠르면서 대전력전송이 가능한 설비의 응답이 필요하다. 전력량은 단주기의 경우 계통에서 소비해야 하는 전력량은 계통으로 공급해야 하는 전력량과 비슷하거나 조금 더 컸다. 장주기의 경우에는 계통으로 공급해야 하는 전력량이 더 컸다.

가변성 재생에너지의 점유율에 따른 유연성 자원필요량을 분석하였다. 유연성 자원의 필요량의 경우 단주기는 풍력발전설비의 점유율에 큰 영향을 받았고 장주기는 태양광 발전설비의 점유율에 큰 영향을 받았다. 또한, 장주기의 유연성 자원필요량은 태양광의 점유율이 3%미만인 지점에서 태양광의 점유율이 증가할수록 유연성 필요량이 줄어드는 구간이 존재해 풍력과 태양광에너지의 변동성이 상쇄됨을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 가변성 재생에너지 발전설비의 이용률과 부하율을 통해 순부하를 산정하고 이산 푸리에 변환을 통해 순부하의 변동성을 단주기와 장주기 성분으로 분리하여 유연성 자원필요량 분석을 수행하였다. 적용계통은 제주지역으로 2017년과 2018년의 풍력과 태양광 발전량 데이터와 수요데이터를 통해 2025년 제주지역의 예상수요와 신재생에너지 보급 계획을 반영하여 2025년의 제주계통의 유연성 자원필요량을 분석하였다.

본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 순부하는 태양광 발전설비의 발전패턴과 비슷하게 변동하며 부하패턴과 재생에너지 발전패턴이 비슷해 동기화되는 경우 순부하의 변동성이 줄어들음을 확인하였다.
- (2) 단주기 유연성 자원은 변동량을 흡수하는 설비와 공급하는 설비를 유사하게 준비하고 단주기의 큰변동에 대응하기 위해 응답시간이 빠르고 대전력전송이 가능한 HVDC(초고압 직류송전, high-voltage direct current)와 같은 설비의 응동이 필요했다.
- (3) 장주기 유연성 자원은 계통에서 흡수해야하는 전력량 보다 계통에 공급해야하는 전력량이 컸기 때문에 전력을 직접 공급할 수 있는 설비가 더 많이 필요했다.
- (4) 풍력과 태양광 설비 각각의 점유율에 따라 유연성 자원필요량이 달라졌으며 풍력과 태양광의 변동성이 서로 상쇄되어 유연성 필요량이 줄어드는 구간이 존재했다.

이상과 같은 결과를 종합해보면 가변성 재생에너지인 풍력과 태양광 에너지의 변동성에 따라 순부하가 크게 변동하며 전력운영 패턴을 바꾸고 있다. 특히 순부하의 변동과 공급과잉 발전량을 비교하면 여름철에 가장 작아 계통운영이 용이한 것을 확인하였다. 따라서 발전설비들과 기타 변동성에 대응하기 위한

유연성 자원들의 유지보수 기간을 계통운영이 용이한 여름철로 옮기는 것이 고려될 것이다. 그리고 재생에너지를 보급할 때 계통의 유연성 상황을 고려할 수 있다면 신규 재생에너지설비의 비율을 적절히 조절해 유연성 자원 필요량을 크게 늘리지 않으면서 재생에너지 보급률을 극대화 시킬 수 있는 계통투자계획이 가능할 것이라 사료된다.

본 논문은 유연성 자원의 필요량을 단주기와 장주기로 나누어서 분석하였다. 이를 바탕으로 기준을 더 세분화하고 풍력과 태양광의 이용률과 더불어 다양한 자원들의 특성과 제약조건을 고려하여 유연성 자원들의 최적화 조합을 찾아 유연성 자원의 계획을 세우는 것이 가능할 것이다. 더 나아가 계통운영 측면에서 효율적인 유연성 자원 계획을 위해 유연성 자원들의 경제성 분석과 서로 다른 자원들의 상충효과에 관한 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] REN21, “Renewable 2018 Global Status Report,” Jun. 2018
- [2] Rogers, J., Fink, S. and Porter, K. “Examples of Wind Energy Curtailment Practices,” US National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, Jan. 2010.
- [3] Bird, L., Cochran, J. and Wang X, “Wind and Solar Energy Curtailment: Experience and Practices in the United States,” US National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, Mar. 2014.
- [4] Denholm, P., O’Connell, M., Brinkman, G. and Jorgenson, J, “Overgeneration from Solar Energy in California. A Field Guide to the Duck Chart,” US National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado. Nov. 2015.
- [5] California ISO, “Impacts of renewable energy on grid operations,” May. 2017
- [6] 산업통상자원부, “제 8차 전력수급기본계획,” 2017
- [7] 제주특별자치도, “Carbon Free Island Jeju by 2030,” 2012
- [8] 전력거래소, “2018년 연간 제주 전력계통 운영실적,” 2018
- [9] International Energy Agency, “Power System Flexibility for the Energy Transition,” Nov. 2018
- [10] Yuri V. Makarov, Pengwei Du, Michael C. W. Kintner-Meyer, Chunlian Jin, and Howard F. Illian, “Sizing Energy Storage to Accommodate High Penetration of Variable Energy Resources,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 3, No. 1, pp. 34-40, Dec. 2011.
- [11] Olson, A., Jones, R. A., Hart, E., and Hargreaves, J., “Renewable Curtailment as a Power System Flexibility Resource,” The Electricity Journal, vol. 27, no. 9, pp. 49-61, Nov. 2014.
- [12] Cochran, J., Miller, M., Zinaman, O., Milligan, M., Arent, D., Palmintier, B., O’Malley, M., Mueller, S., Lannoye, E., Tuohy, A., Kujala, B., Sommer, M., Holttinen, H., Kiviluoma, J., and Soonee, S. K. “Flexibility in 21st Century

- Power Systems,” United States: NREL, 2014.
- [13] International Energy Agency, “Status of Power System Transformation 2019: Power system flexibility,” May. 2019
- [14] 에너지경제연구원., “신재생에너지 보급 확산을 대비한 전력계통 유연성 강화방안 연구,” 2017
- [15] Akrami, A., Doostizadeh, M., and Aminifar, F., “Power System Flexibility: an Overview of Emergence to Evolution,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 7, no. 5, pp. 987-1007, May. 2019.
- [16] Ho-San Myung, Se-Ho Kim, “Analysis of the Load Contribution of Wind Power and Photovoltaic Power to Power System in Jeju,” *KSES*, Vol. 38, No. 1, pp. 13-24, Feb. 2018.
- [17] Chang-Soo Kim. and Da-Yeon Jung., “The Effect of Renewable Generation Expansion on Net Load Variability,” *KIEE*, Vol. 2018, No. 11, pp. 218-220, Nov. 2018.
- [18] Lund, PD., Lindgren, J., Mikkola, J., Salpakari, J., “Review of Energy System Flexibility Measures to Enable High Levels of Variable Renewable Electricity,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 785-807, May. 2015.

감사의 글

대학원 생활은 시작한지 어느덧 2년이라는 시간이 흘렀습니다. 시작한지 엇그제 같은데 어느새 지나버린 2년이라는 시간이 아직도 부족한 점이 많은 저에게는 너무나도 짧게만 느껴집니다.

먼저 석사과정동안 부족한 저에게 성심으로 지도해 주시고 따뜻한 격려와 많은 가르침을 주신 김세호 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 대학원 생활에 있어 전공 지식들과 많은 관심과 사랑을 주신 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김호찬 교수님, 김호민 교수님, 진영규 교수님께도 감사드립니다. 그리고 바쁘신 가운데에도 항상 많은 조언과 격려를 해주시는 전력거래소 김영환 본부장님께도 감사드립니다.

함께 연구실에서 지내면서 많은 도움을 주신 호산이형에게 감사드립니다. 그리고 항상 웃으며 조언과 격려 아낌없이 주신 진홍이형, 지형이형, 상헌이형께도 감사드립니다. 그리고 전기공학과를 위해 과사무실에서 많은 부분을 도와준 태형이형, 경훈이형, 정민이, 현준이에게도 감사 인사드리며 대학원 생활 2년동안 많이 의지하고 도움을 받을 수 있었던 민혁이형에게도 감사드립니다. 또한 석사과정 동안 서로 도우며 배움을 같이한 창우형과 자야누나, 줄라, 몽크, 후릉형, 윤석이, 재형이, 현이, 군호에게도 감사드립니다.

이외에 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나 많습니다. 그 분들의 이름을 되새기지 못함을 죄송하게 생각하며 항상 최선을 다하는 모습으로 보답하겠습니다.

끝으로 속으로는 걱정을 많이 하셨지만 겉으로 내색 한번 안하시고 끝까지 묵묵히 믿어주신 부모님과 동생에게 사랑하고 고맙다는 말씀을 드립니다.

2019년 12월

김민재 드림