

전력계통 관점의 Resilience 개념 소개

2024. 4. 25

한국전력공사 전력연구원
전력계통연구소 계통해석팀

이 재 걸 팀장/책임연구원

Jaegul.lee@kepc.co.kr



Contents

- I 전력망 복원력(Grid Resilience) 이란?
- II 필요성
- III 국내외 기술 동향
- IV 복원력 적용방안 및 기대효과



I. 전력망 복원력 이란?

(Grid Resilience)

Renovate **KEPRI**, Innovate Future

1. 전력망 복원력이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

복원력의 사전적 의미

복원력 復元力 +

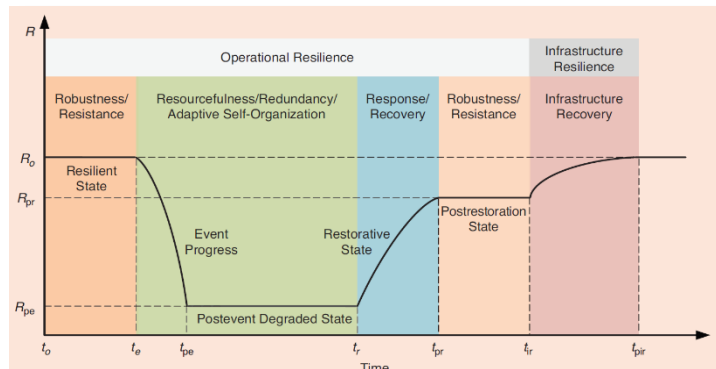
1. 명사 물리 물체가 변형되었을 때, 그 물체를 본디의 상태로 되돌리려고 하는 힘.
2. 명사 물리 평형을 유지하던 선박 따위가 외부의 힘을 받아서 기울어졌을 때, 중력과 부력 따위의 외부 힘이 우...

유의어 복원모멘트

출처 : 네이버, 표준국어대사전

전력계통 복원력 (Grid Resilience)

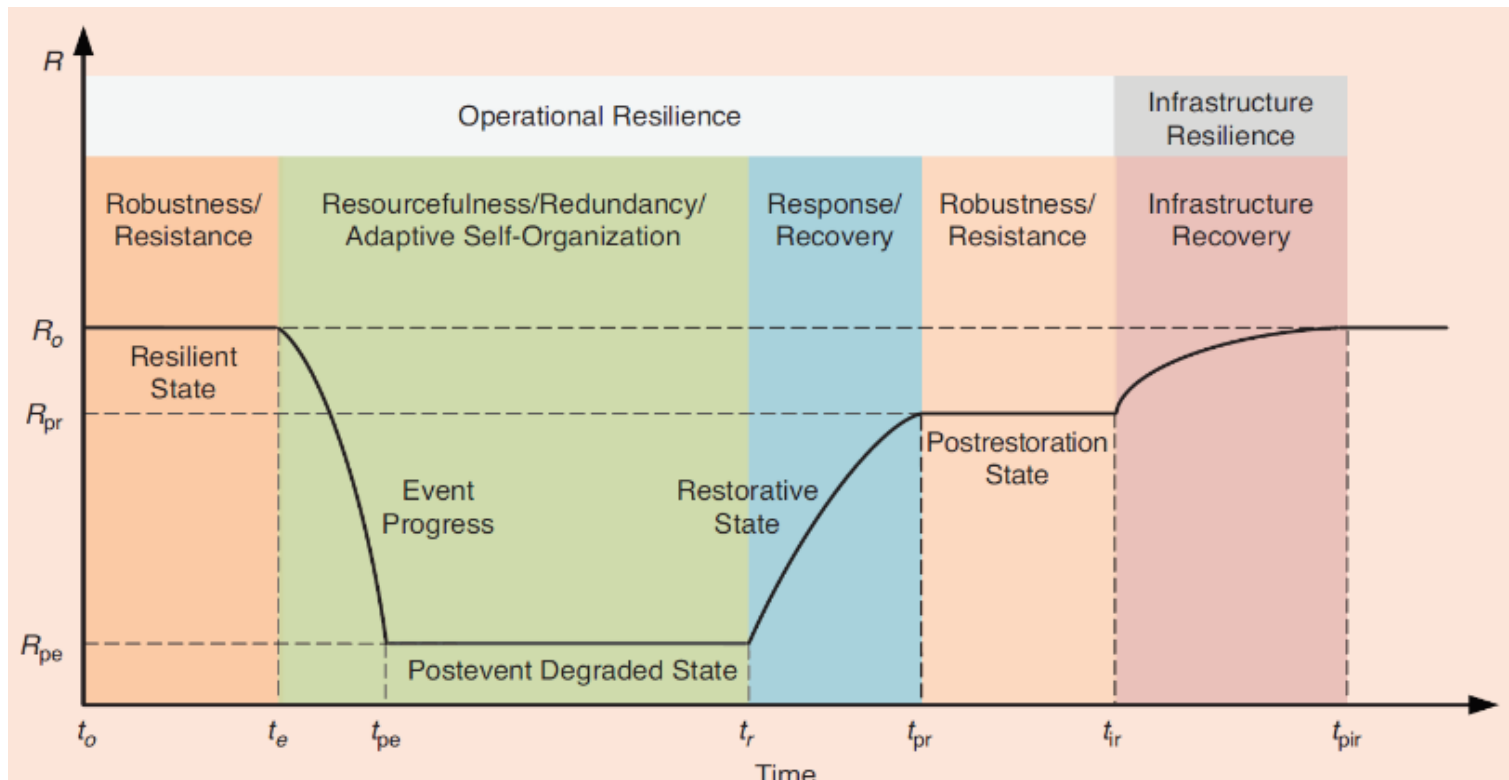
다양한 위험(Hazard)에 대해 전력 공급 체계에서 발생할 수 있는 피해(Risk)를 최소화하고 피해가 발생하는 경우 대응하고 신속하게 피해를 복구 할 수 있는 전력계통의 능력을 의미



The Concept of Resiliency Curve during an Extreme Event (Panteli & Mancarella, 2015)

1. 전력망 복원력 이란?

The Concept of Resiliency Curve during an Extreme Event (Panteli & Mancarella, 2015)

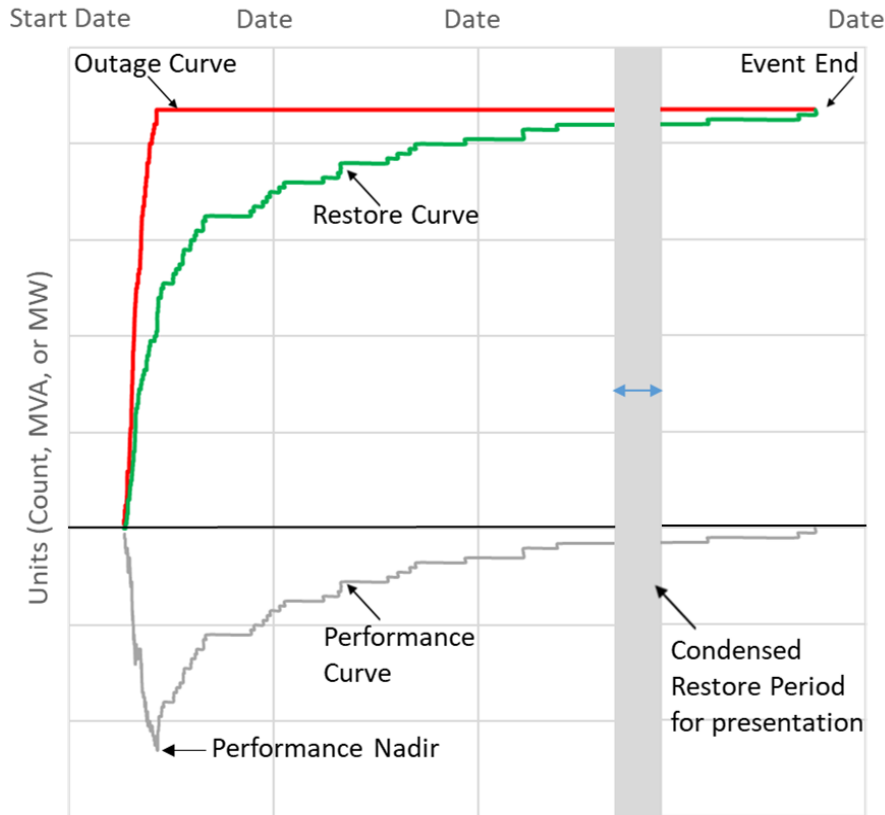


1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력망 복원력 평가항목 (예시)

- 이벤트 규모(정전수, 송전/발전 용량)
- 정전 처리 기간
- 정전률
- 첫 번째 복원 시간
- 총 복구 소요일(MVA-일)
- 최대 정전수(최대 동시 중단)
- 순간 복원률
- 이벤트 기간
- 상당한 복원 수준에 도달하는 데 소요되는 시간
(정전수의 95% 또는 용량의 95%)



1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 신뢰도 vs 복원력

신뢰도 (Reliability)

일정 규모의 설비 고장이 발생하는
경우 전력계통이 허용범위 내에서
운영이 가능한가를 평가

- 상정 고장 : 설비 이중 고장 (N-2)
- 판단 기준 : 전력계통 신뢰도 기준
- 고려 범위 : 전력설비

복원력 (Resilience)

발생 주기는 낮지만 영향이 큰 (HILF*)
극한의 이벤트가 발생하는 경우
전력계통의 영향을 평가하는 방법

* High-Impact, Low-Frequency

- 상정 고장 : HILF* 극한 이벤트
- 판단 기준 : 피해의 범위 및 지속시간,
회복 및 원상 복구 소요시간
- 고려 범위 : 전력생산 전 주기 설비

1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 신뢰도 vs 복원력

Reliability

The ability to **meet the electricity needs** of end-use customers, even when events reduce the amount of available electricity

Uncertainty associated with fluctuating load and generation, fuel availability, and failure of assets **under normal operating conditions**

Seconds to hours

Concentrated area
(e.g., one facility, campus, or neighborhood)

Losses largely limited to **unserved load for a subset of customers**



Definition



Event Characteristics



Outage Duration



Spatial Extent



Economic Losses

Resilience

The ability to **anticipate, prepare for, and adapt to changing conditions** and **withstand, respond to, and recover rapidly from disruptions**

Low-probability, high-consequence events that represent black-sky operating conditions and apply stress to a system over a large scale

Days to months

Large geographic region
(e.g., states, regions, or islands)

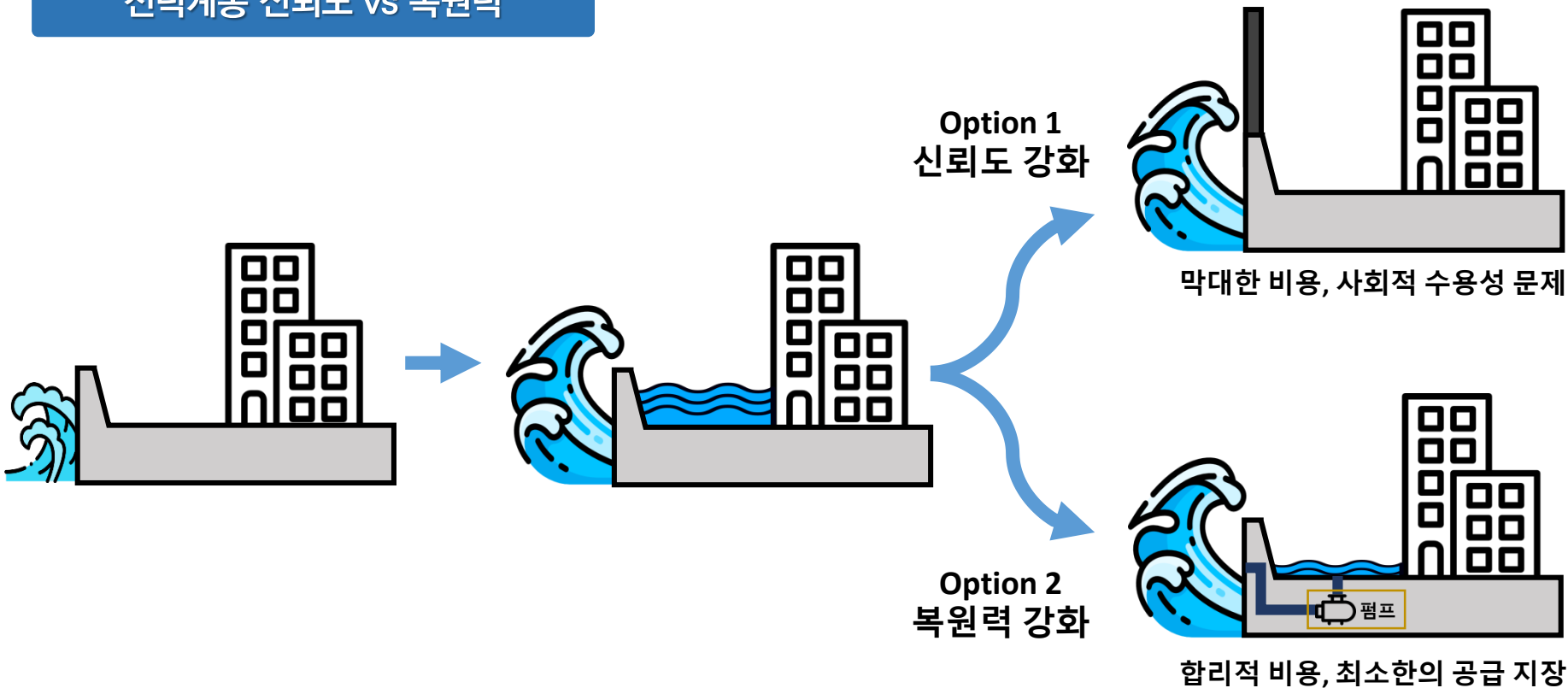
Losses arising from both **lost load and cascading impacts to the economy** (such as degraded water quality or delivery due to power loss)

NREL, Understanding Resilience Valuation for Energy Systems : An Overview of the NYSERDA-NREL Research Collaboration (2023)

1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

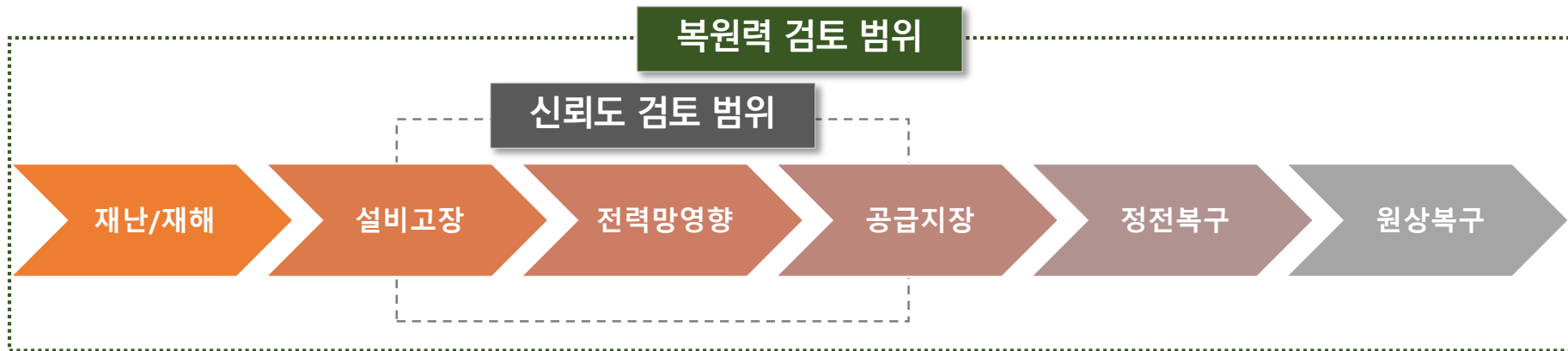
전력계통 신뢰도 vs 복원력



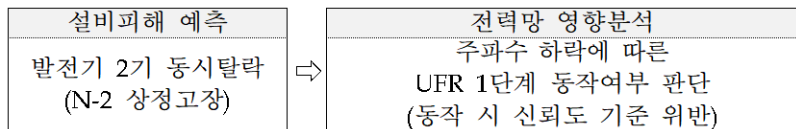
1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

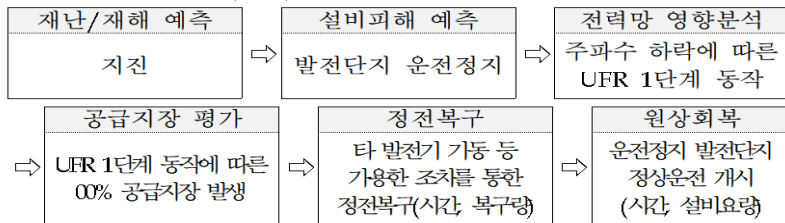
전력계통 복원력 평가 범위



[신뢰도 평가 방식 (예시)]



[복원력 평가 방식 (예시)]

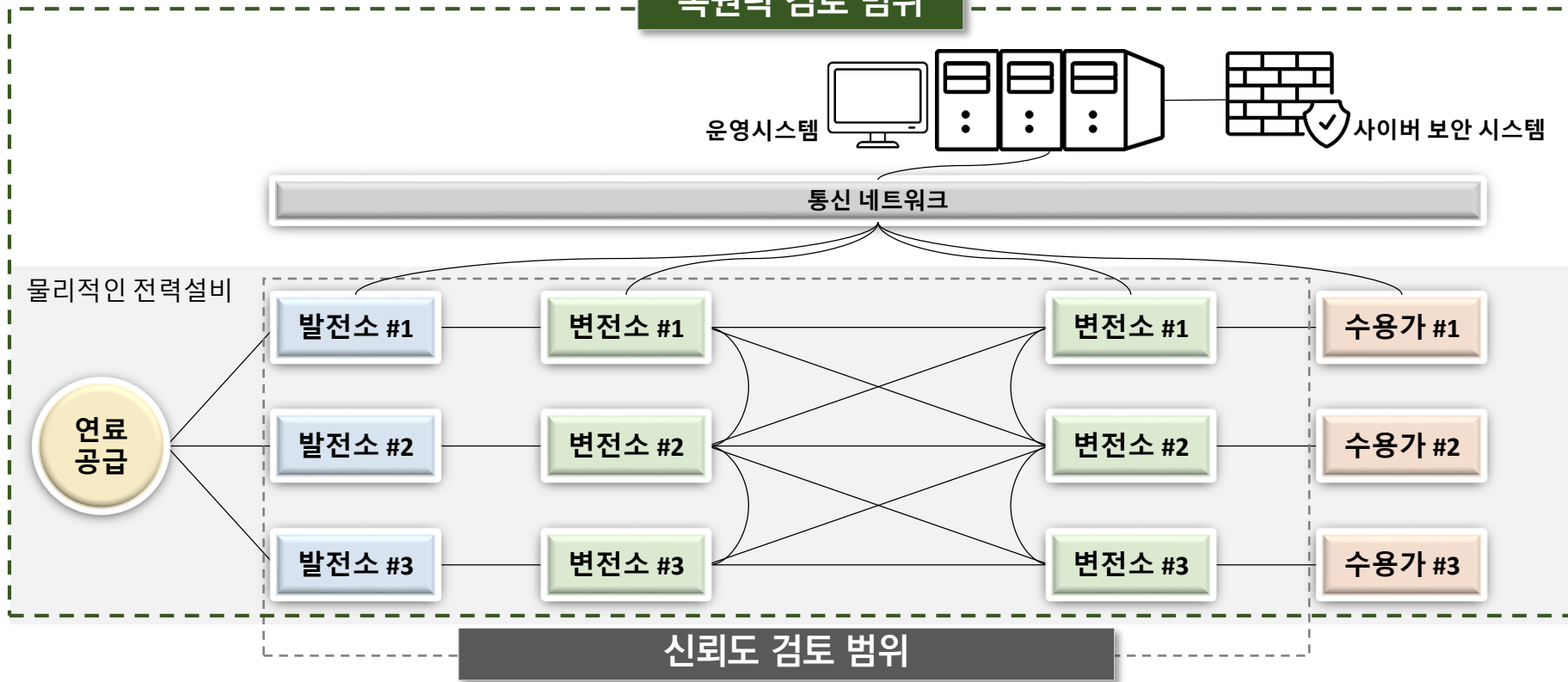


1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 복원력 평가 범위

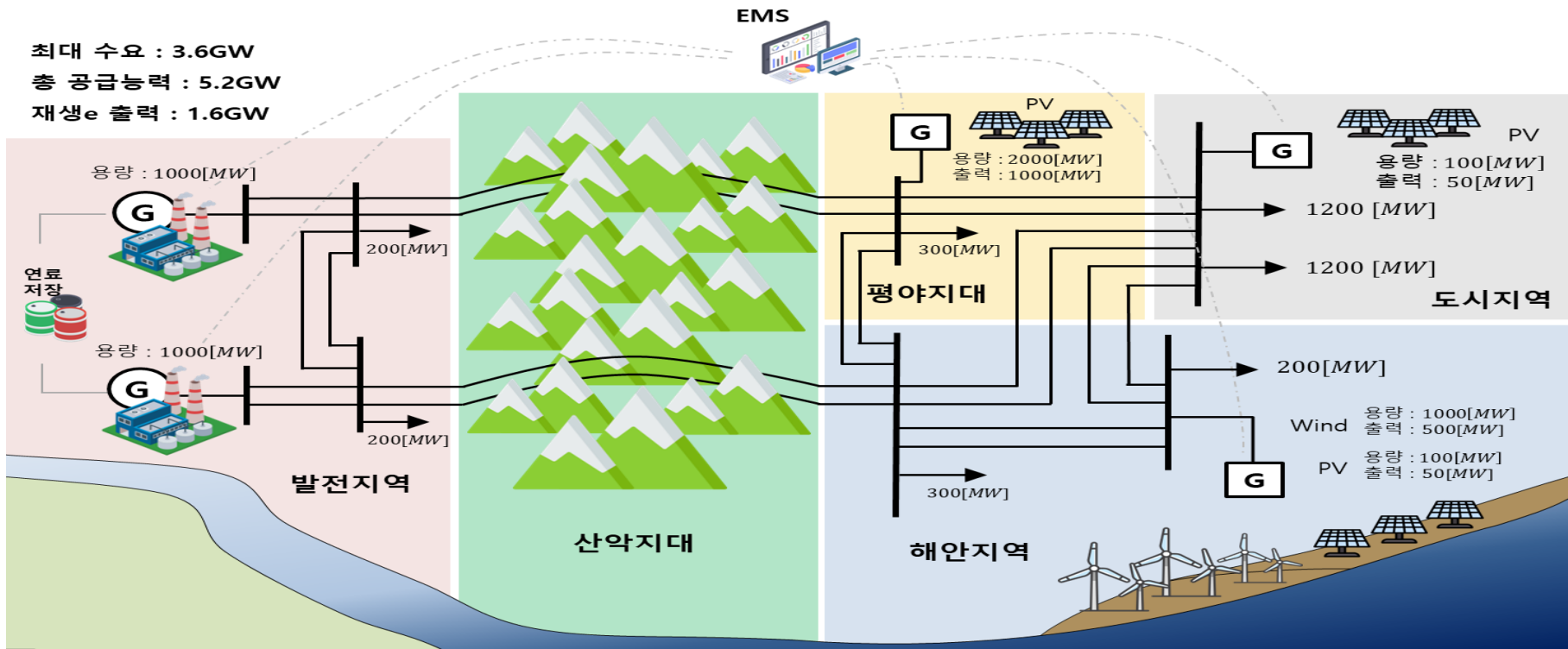
복원력 검토 범위



1. 전력망 복원력 이란?

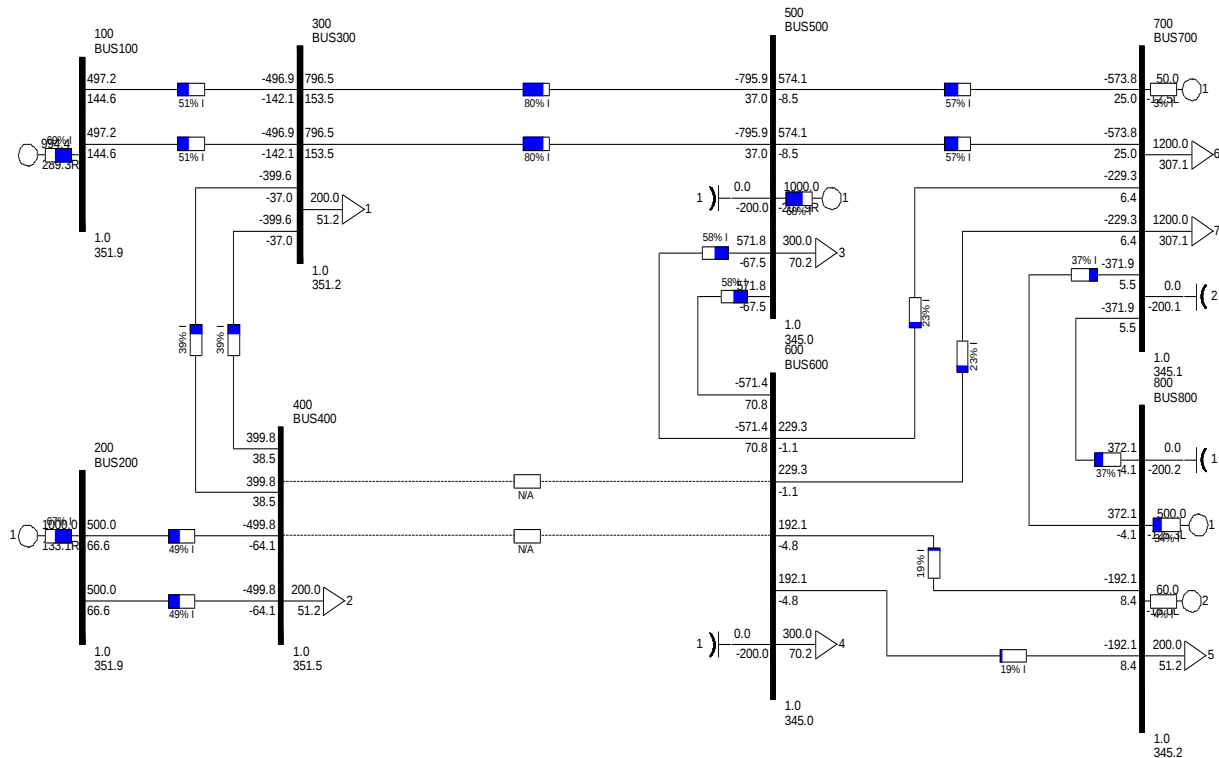
- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 복원력의 예시 - Resilience Curve Test System



1. 전력망 복원력 이란?

전력계통 복원력의 예시 - Resilience Curve Test System



신뢰도 기준의 관점에서 안정한 전력망
N-1 상정고장 고려 시 모든 경우 안정

상정고장	안정여부
송전선로 Bus 300-500 2회선	안정
송전선로 Bus 400-600 2회선	안정
송전선로 Bus 500-700 2회선	안정
송전선로 Bus 600-800 2회선	안정
송전선로 Bus 600-700 2회선	안정

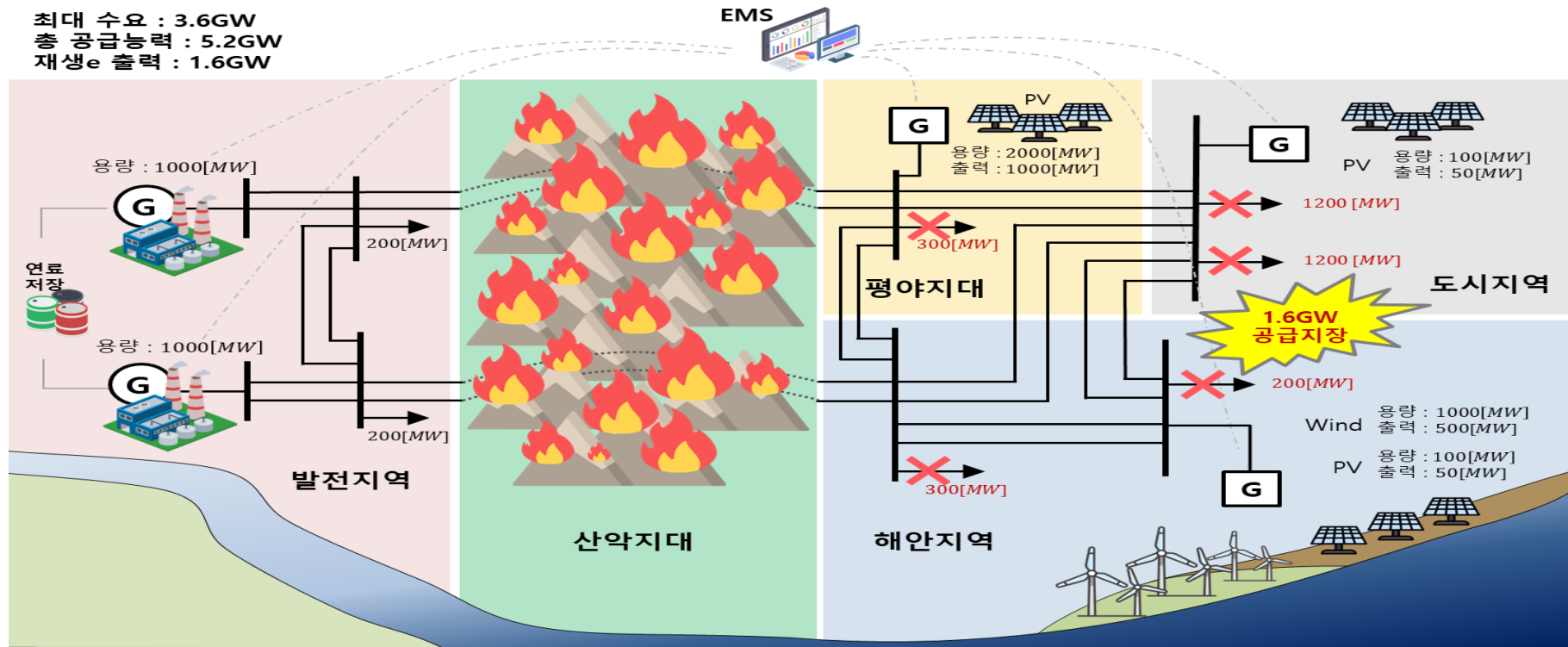
1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 복원력의 예시 - Resilience Curve Test System

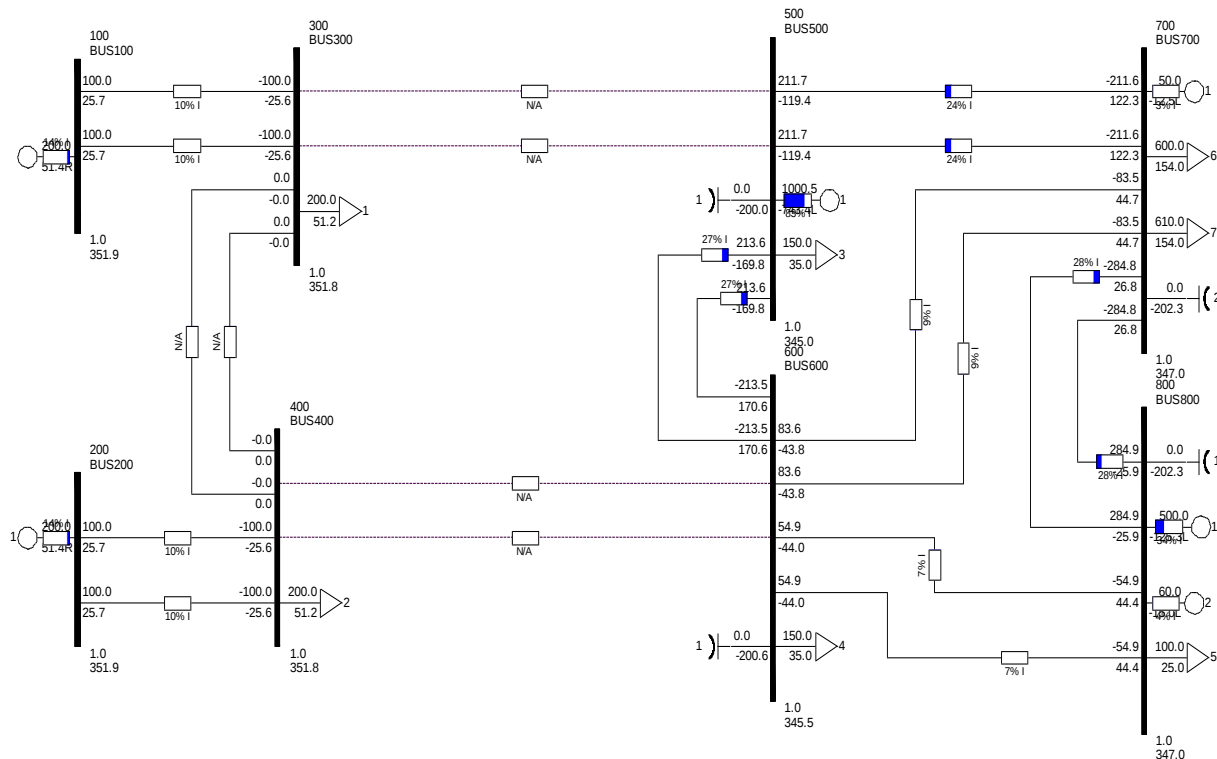
산악지대 대형산불 발생 시나리오

최대 수요 : 3.6GW
총 공급능력 : 5.2GW
재생e 출력 : 1.6GW



- KEPCO – A Smart Energy Creator -

대형 산불로 인한 N-2 고려 시
도시, 해안, 평야지역 등에
1.6GW 대규모 공급지장 발생



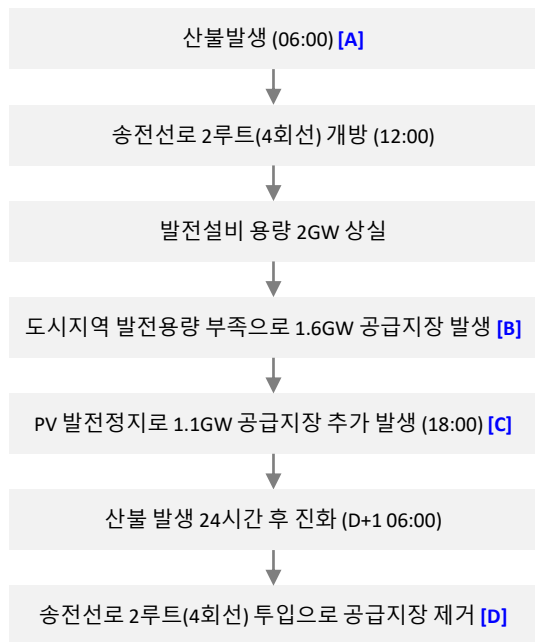
1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 복원력의 예시 - Resilience Curve Test System

산악지대 대형산불 발생 시나리오

시나리오 1 : 대형 산불로 송전선로 2루트(4회선) 개방, 도시지역 Resilience Curve



전력공급비율 [%]

System
Performance
Index

1.000

0.500

0.250

06:00

12:00

18:00

24:00

D+1 06:00

시간 [Hours]

[A]

[B]

[C]

[D]

대형 산불로 인한 도시지역 전력망의 복원력 평가 지수(예시)

- $12.006 = (1 - 0.333) \times 18\text{시간}$

- 영향 발생 지속시간 : 18시간

- 전력공급비율 : 평균 0.333 = $(0.500 \times 6\text{시간} + 0.250 \times 12\text{시간}) / 18\text{시간}$

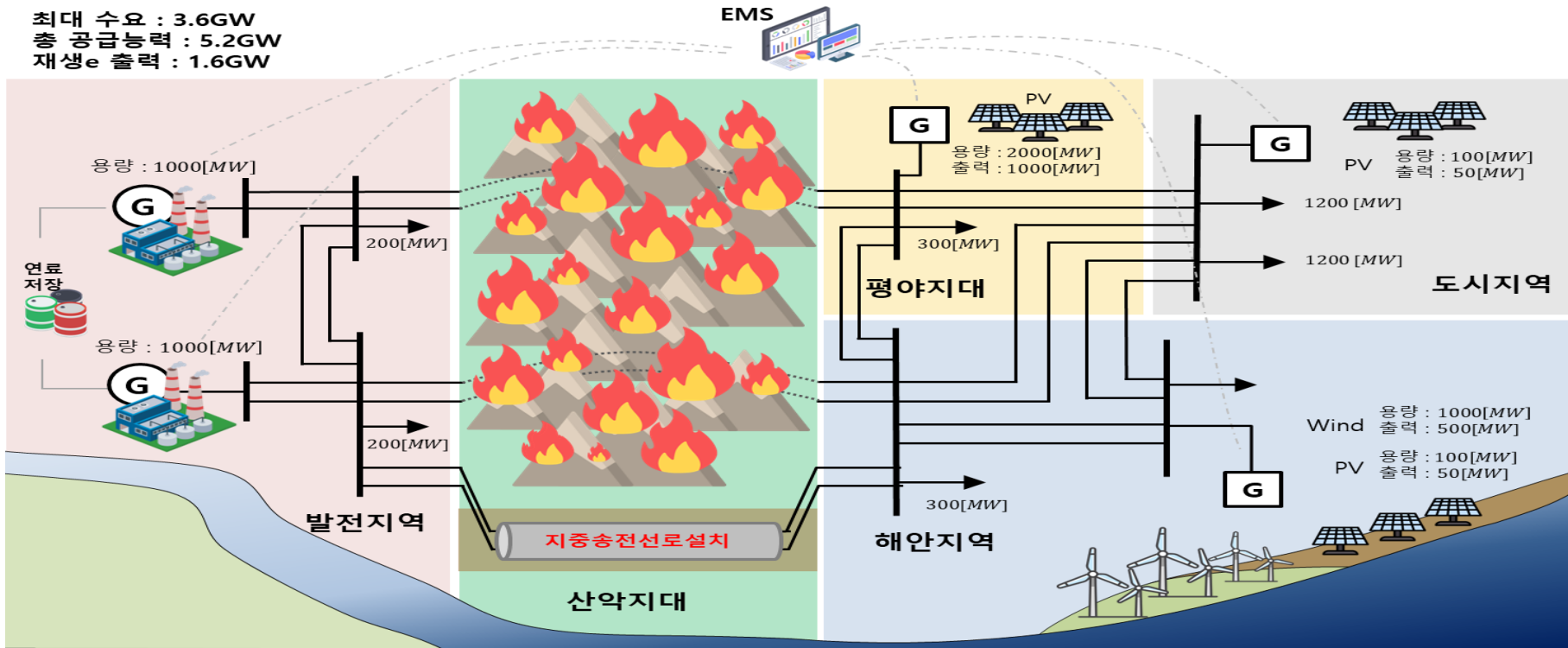
1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 복원력의 예시 - Resilience Curve Test System

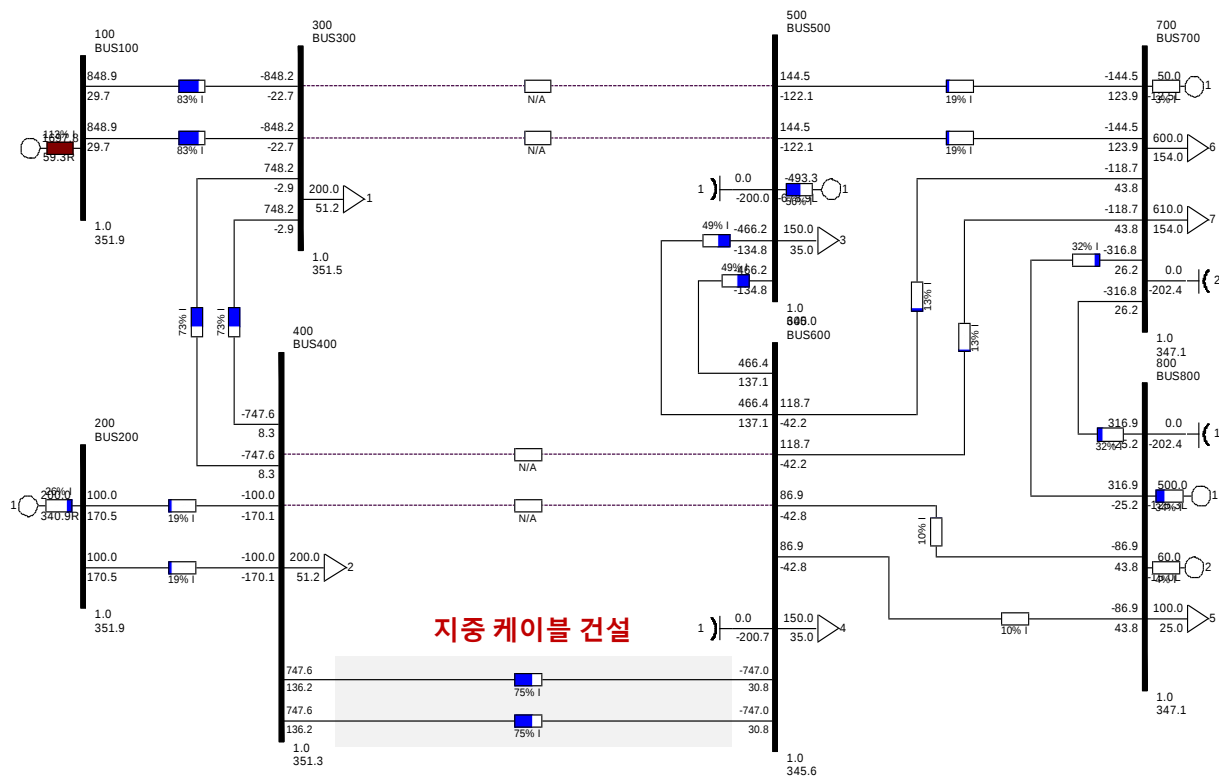
산불 시나리오 + 지중 케이블 추가건설

최대 수요 : 3.6GW
총 공급능력 : 5.2GW
재생e 출력 : 1.6GW



- KEPCO – A Smart Energy Creator -

산불 시나리오 + 지중 케이블 추가건설



대형 산불에 대비하여
산악지역을 통과하는
지중 케이블 건설 시
대규모 공급지장 발생 방지 가능

하지만 HILF 이벤트를 대비한
막대한 투자비 발생과
상시 이용률 저하로
투자 효율성이 매우 낮음

현실적인 대안이 되기 어려움

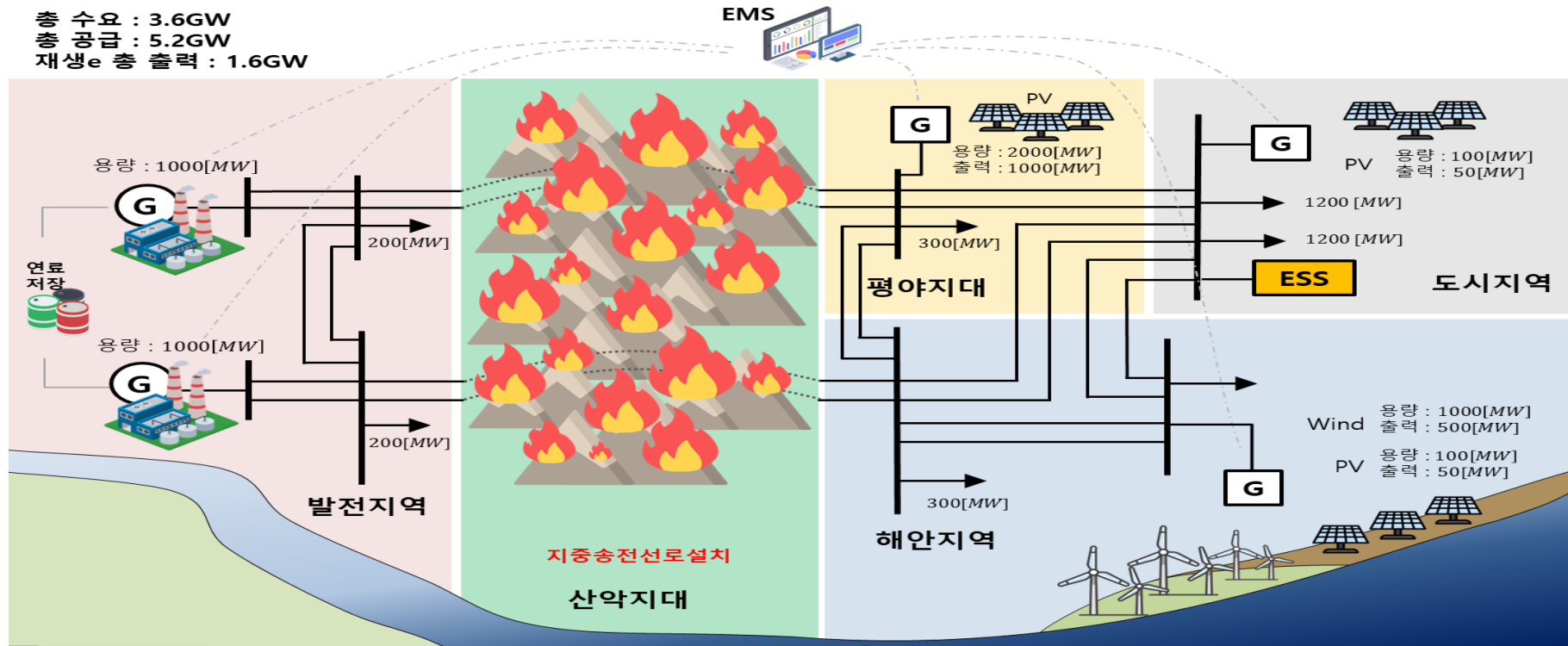
1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 복원력의 예시 - Resilience Curve Test System

산불 시나리오 + 대용량 ESS 적용

총 수요 : 3.6GW
총 공급 : 5.2GW
재생e 총 출력 : 1.6GW



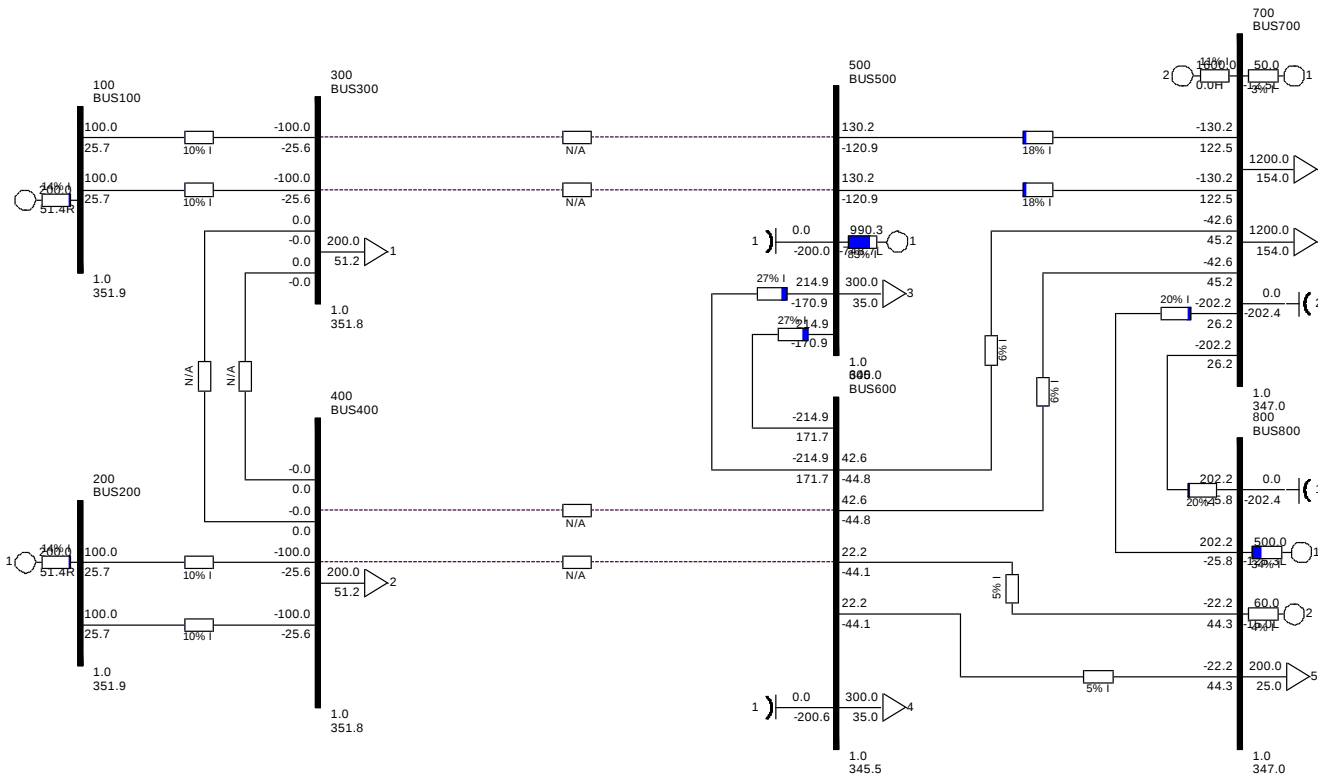
1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 복원력의 예시 - Resilience Curve Test System

산불 시나리오 + 대용량 ESS 적용

대형 산불에 대비하여
평야 또는 도시지역에
1.6GW ESS 건설 시
일부 공급 지장 발생 감소 가능



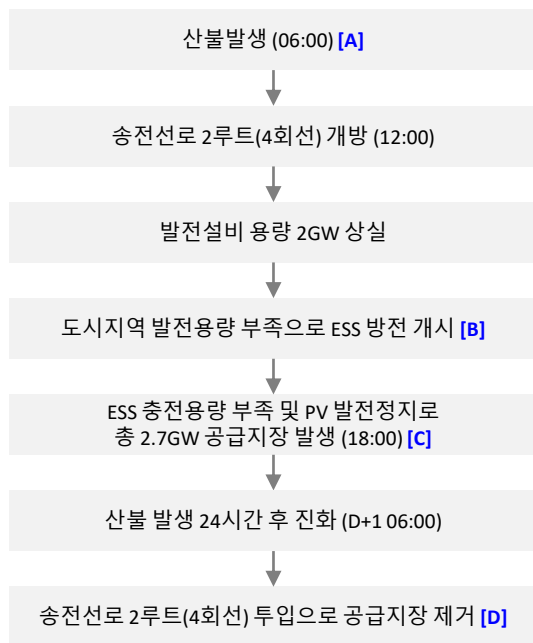
1. 전력망 복원력 이란?

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력계통 복원력의 예시 - Resilience Curve Test System

산악지대 대형산불 발생 시나리오

시나리오 1-1 : 대형 산불로 송전선로 2루트(4회선) 개방 + 1.6GW(9.6GWh) ESS 고려, 도시지역 Resilience Curve



전력공급비율 [%]

System
Performance
Index

1.000

0.500

0.250

06:00

12:00

18:00

24:00

D+1 06:00

시간 [Hours]

[A]

[D]

ESS 방전

대형 산불로 인한 도시지역 전력망의 복원력 평가 지수(예시)

- 9.000 = (1 - 0.250) × 12시간

- 영향 발생 지속시간 : 12시간

- 전력공급비율 : 평균 0.250 = (0.250 × 12시간) / 12시간

II. 전력망 복원력 연구의 필요성

Renovate **KEPRI**, Innovate Future

2. 전력망 복원력 연구의 필요성

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

환경변화 (1) - 재해/재난 증가 (해외)

구 분		재난개요	피해규모
	산불	■ [발생] 2020년 8월 15일 ■ [지역] 美 서부 캘리포니아 전역 ■ [원인] 고온건조 및 강풍 → 대형화재	- 약 8,500건 화재 발생 (180만 ha) (피해규모 약 \$1조 8080억, 사망자 31명) - 州 전력비상사태선언 → 정전조치 시행
	태풍	■ [발생] 2021년 8월 29일 ■ [지역] 美 남동부(루이지애나, 뉴올리언스 州) ■ [원인] 지구온난화 → 태풍세력 강화	- 폭우, 홍수 등 추가피해 발생 (67명 사망, 100조원 피해 발생) - 뉴올리언스 전역 62만 가구 정전 발생
	이상기온	■ [발생] 2023년 12월 8일 ■ [지역] 사우스오스트레일리아 州 등 ■ [원인] 이상고온, 마른번개, 100km/h 강풍	- 하루 17건 대형 산불 발생 - 수요증가 → 배전망 과부하 → 정전 발생
	홍수	■ [발생] 2019년 11월 12일 ■ [지역] 이탈리아 북동부 베니스 ■ [원인] 해수면 상승 → 도시 범람	- 수위 상승(해발 1.87m), 도시 85% 침수 (총 10억 유로 피해 추정) - 침수에 의한 감전사고 사망자 발생

2. 전력망 복원력 연구의 필요성

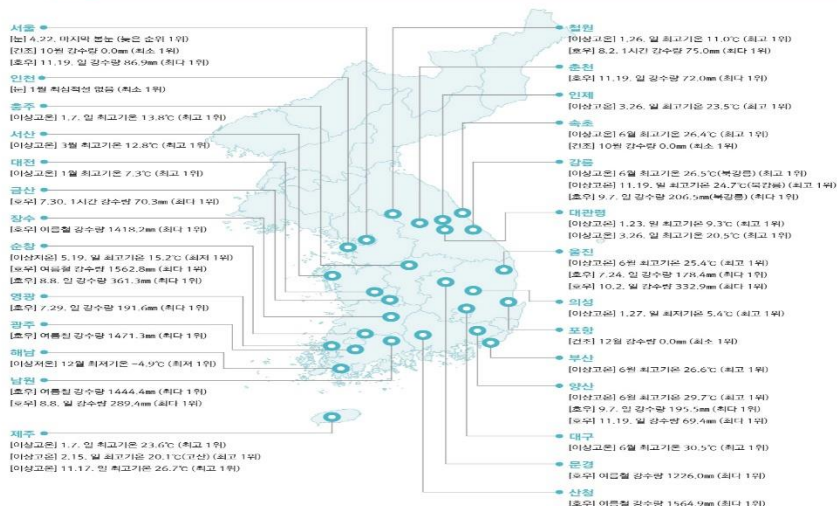
- KEPCO - A Smart Energy Creator -

환경변화 (1) - 재해/재난 증가 (국내)

제2장 2020년 이상기후

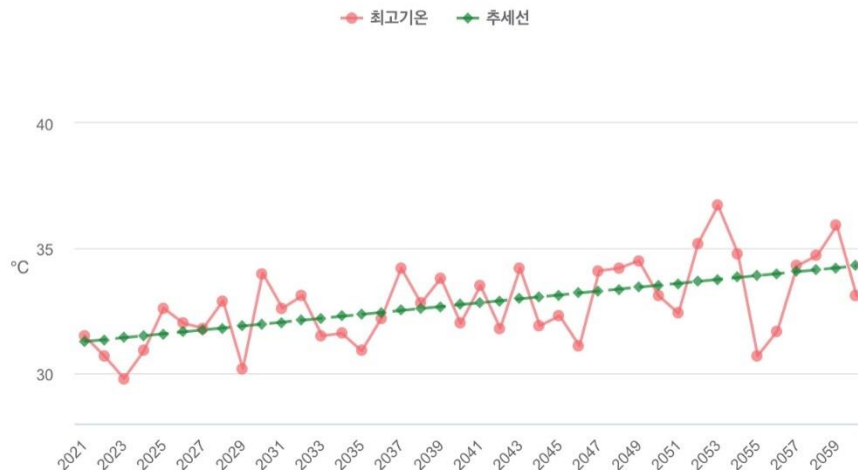
2020년 이상기후 보고서

2020년 우리나라 이상기후



최고기온, RCP8.5, 전국, 2021~2060년(8월), 전망정보

경향성: +0.77°C/10년



고성 산불('19.4), 경주 지진('16.9), 태풍 마이삭('20.8) 등 이상기후 및 대형 재난 증가

2. 전력망 복원력 연구의 필요성

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

환경변화 (2) - 계통안정도 여유 저하



단계	신재생에너지 발전량 비중	기술적 이슈	대응과제	육지
1	0~3%	· 재생에너지의 영향이 거의 없을 · 접속점 인근 국지적 계통에 영향 발생	· Grid Code 개정 고려 · 국지적 계통영향 검토	-
2	3~15%	· 재생E 용량이 계통운영에 영향을 줌	· Grid Code 개정 · 발전제약 완화 노력 · 출력 예측시스템 개발	현재 ~'26년
3	15~25%	· 계통운영의 불확실성/변동성 증가 심화 · 최소 관성 전력량 운영	· 재생에너지 감시/예측/제어 시스템 · 유연성 자원 확대 중요 · 확률론적 계통해석 기술	'27년 ~'33년
4	25~50%	· 재생E 100%로 운영되는 Net-Zero 발생 · 전력계통 안정도에 크게 영향을 미치는 상황 · ESS 등 대규모 전력계통 설비보장 요구 증가	· 관성 확보 최우선 과제 · 재생E가 계통에 유/무효전력, 관성제공 · 전력망 DC분할 고려	'34년 ~'45년
5	50%~	· 잉여전력 및 대규모 출력조정 발생 · 계절에 따라 수급부족 현상 발생	· 부하 전기화 · P2G	'45년~

(IEA 'Power system transformation' 에서)

인버터 기반 신재생e 증가
[태양광, 풍력, 연료전지]

일반 발전기 대체
[신재생e 수용량 ↑, 동기발전기 ↓]

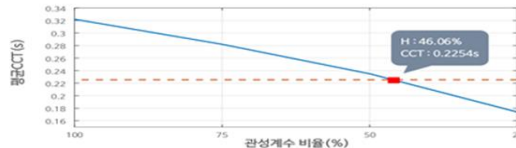
계통강건도 약화
[관성, 동기화력, 단락용량 ↓]

계통 안정도 저하
[주파수, 위상각, 전압안정도 ↓]

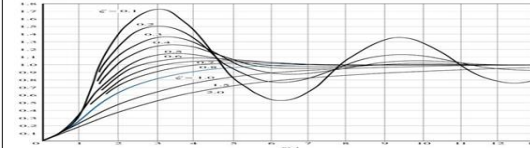
주파수 안정도 저하



임계고장시간 감소



미소신호 안정도 저하



2. 전력망 복원력 연구의 필요성

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

Grid Resilience 평가 및 관리 기술의 필요성

재해/재난 증가, 계통안정도 여유의 감소 그리고 사회적 책임의 강화에 따른
강인한 전력망(Strong Power Grid)의 중요성 부각

원인 [Reasons]		해결책 [Solutions]
① 재난/재해증가	○ 이상기온에 따른 자연재난 증가 ○ 물리적/사이버 테러 위험 증가	Grid Resilience 증대를 통한 강인한 전력망 구축
② 계통안정도 여유감소	○ 재생E 비중 증가로 인한 계통안정도 저하 ○ 전력설비 확충 지연에 따른 계통안정도 저하	
③ 사회적 책임 강화	○ “중대재해처벌법” 제정 등 재해와 관련한 사회적 책임과 처벌 강화	

2. 전력망 복원력 연구의 필요성

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

Grid Resilience 평가 및 관리 기술의 필요성

강인한 전력망(Resilient Power Grid)이란,

공급 지장이 절대 발생하지 않는 전력망을 의미하는 것은 아님.

공급 지장 발생 가능성을 예측하여 발생 시 피해 규모를 최소화하고
빠른 회복과 원상복구가 가능한 전력망을 의미함.



2. 전력망 복원력 연구의 필요성

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

Grid Resilience 평가 및 관리 기술의 필요성



출처 : "극한기후변화로 인한 전력망 복구성 향상을 위한 연구" 사업계획서, 전력산업기초연구, 2017

III. 국내외 기술 동향

Renovate **KEPRI**, Innovate Future

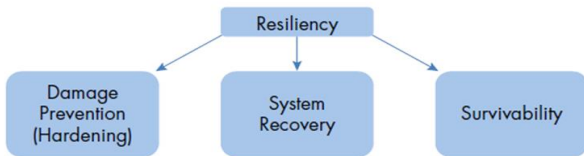
3. 국내외 기술 동향

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

국외 기술 동향

EPRI (美)

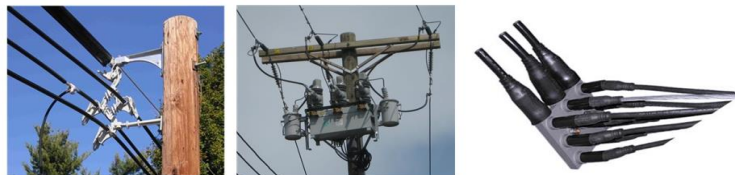
- Resilient system investment framework(RSIF) 개발
 - HILF 이벤트에 따른 송전설비 영향 및 피해 평가



[레질리언스 구성도]

Con Edition (美)

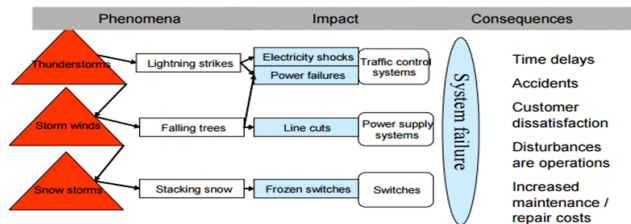
- 전력망 강화 프로그램 운영 : 설비보수
 - 풍력,수목 / 홍수, 태풍 대응 관리



[전주 부속설비 강화하여 고장복구시간 단축 사례]

EU

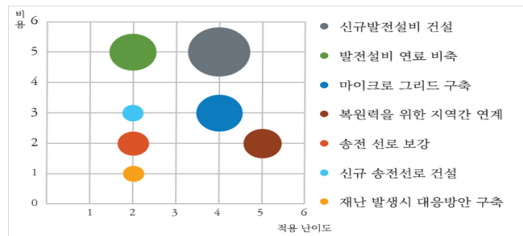
- RAIN(Risk Analysis of Infrastructure Networks in Response to Extreme Weather) Project ('14~'17)
 - 재난상황 발생시 피해상황예측 및 신속 복구



[재난 모의실험 프로그램]

NREL (美)

- Response to Extreme Weather) Project ('14~'17)
 - 중요 지역별 재난과 계통 취약성을 평가/분석
 - 복원력 향상 방안 및 우선순위 제공



[리스크 완화방안 우선순위]

3. 국내외 기술 동향

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

국외 기술 동향 (NREL)

What is resilience?

The ability to anticipate, prepare for, and adapt to changing conditions and withstand, respond to, and recover rapidly from disruptions through adaptable and holistic planning and technical solutions.



Applications of Measuring and Valuing Resilience in Energy Systems

Sean Ericson, Nicholas Grue, Eliza Hotchkiss, and Maxwell Brown

National Renewable Energy Laboratory

NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy
Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
Operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC

This report is available at no cost from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) at www.nrel.gov/publications.

Contract No. DE-AC36-08GO28308

Technical Report
NREL/TP-5R00-83841
August 2023



POWER SECTOR RESILIENCE PLANNING GUIDEBOOK

A Self-Guided Reference for Practitioners

Sherry Stout, Nathan Lee, Sadie Cox, and James Elsworth
U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory

Jennifer Leisch
United States Agency for International Development

www.resilient-energy.org | www.nrel.gov/usaid-partnership



3. 국내외 기술 동향

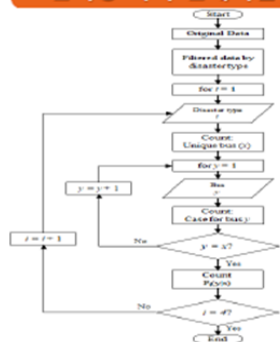
- KEPCO - A Smart Energy Creator -

국내 기술 동향

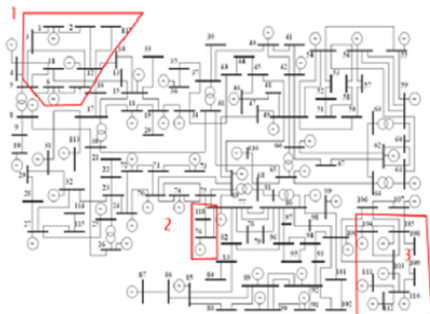
극한 기후변화로 인한 전력망 복구성 향상을 위한 연구 (17.05~20.4 / 2억)

[개요] 극한 기후변화로 인한 전력망 손실 최소화를 위한 재난대응 알고리즘 개발

전력망 최적 연계기술 개발



버스 고장 확률 산정 알고리즘



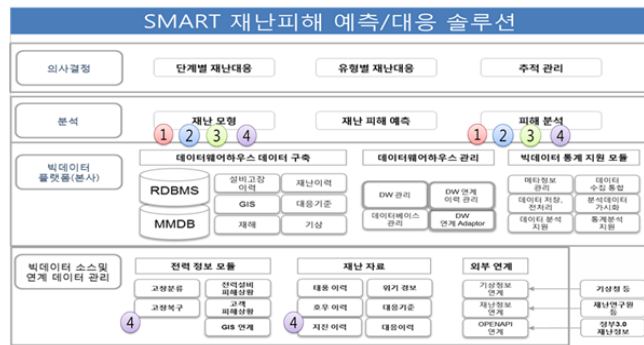
전력망 최적 연계기술 테스트시스템 및 고장변환지역

- 전력망 시뮬레이터 구축 / 최적연계 알고리즘 개발

※ 전력산업 기초연구 : 아주대학교 정재성 교수

SMART 재난피해 예측 및 대응 알고리즘 개발 (16.12~18.5 / 책임 최민희 / 15억)

[개요] 재난 유형별 피해 예측 모형 개발
- 재난 모의훈련 및 평가체계 구축



- 1 급경사지 송변전설비 재해위험도 평가 및 방재시스템 구축(태풍/호우)
- 2 기상재해에 따른 전력설비 고장피해 분석 및 예측기술 시범개발(태풍)
- 3 지진발생시 변전소 후속대응절차 수립 연구(지진)
- 4 전력설비 지진피해대응 지진정보 제공 기반 구축(지진)

[안전보건처 재난관리시스템 연계 솔루션 개념도]

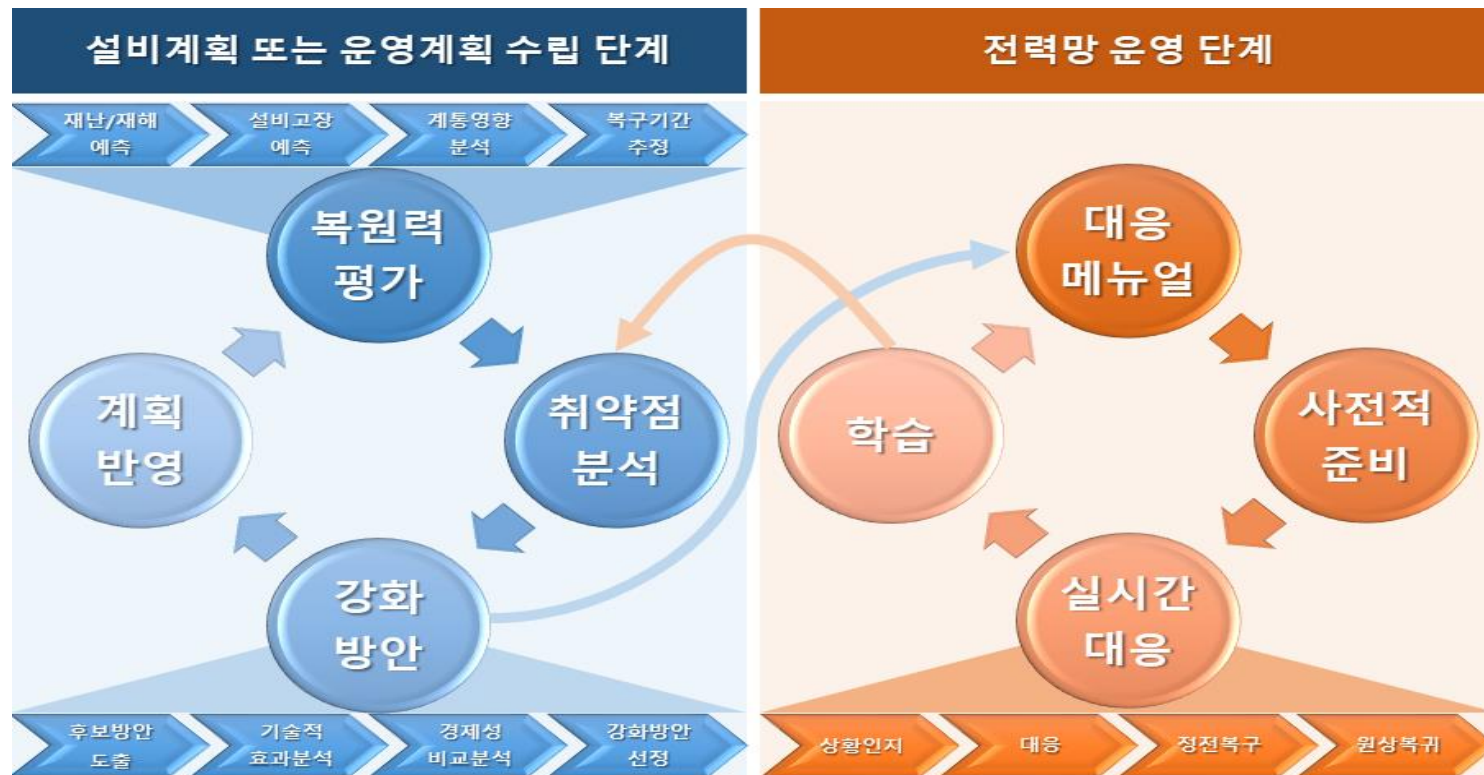
IV. 복원력 적용방안 및 기대효과

Renovate **KEPRI**, Innovate Future

4. 복원력 적용방안 및 기대효과

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

전력망 복원력 관리 방안



4. 복원력 적용방안 및 기대효과

- KEPCO - A Smart Energy Creator -

기대효과

극한의 기후변화에 대한 적응, 재생e 중심의 전력공급 체계 구축 및 외부 충격으로 인한 피해를 최소화 할 수 있는 **강인한 전력망**(Resilient Power Grid) **구축** 가능

- 극한의 기후변화와 재생e 불확실성을 고려하여 전력공급 전 주기(연료공급-발전-송전-배전-소비)에 대한 취약점 보완 가능
- 전력망 운영 시스템에 대한 사이버 공격 등 외부 충격으로 인한 피해 규모와 회복능력을 평가하여 취약한 부분을 사전에 보완 가능
- HILF 이벤트 발생 이후, 대응 결과에 대한 학습을 통해 전력망의 복원력 강화 가능

감사합니다

Thank You For Listening

