

Grid Resilience 기술 전문 Workshop

전력망 복원력 향상을 위한 연쇄사고 파급 및 완화 모형 개발

2024. 4. 25.

이화여자대학교
기후에너지시스템공학과
허진

1. 연쇄 사고(Cascading Outage) 기반 대규모 정전 사례
2. 연쇄 사고 (Cascading Outage) 모형 개발
3. 사고 파급 완화(Mitigation) 모형 개발
4. 연쇄 사고 (Cascading Outage) 시각화 모형 개발

연쇄 사고(고장 파급)에 따른 최근 광역 정전 사례

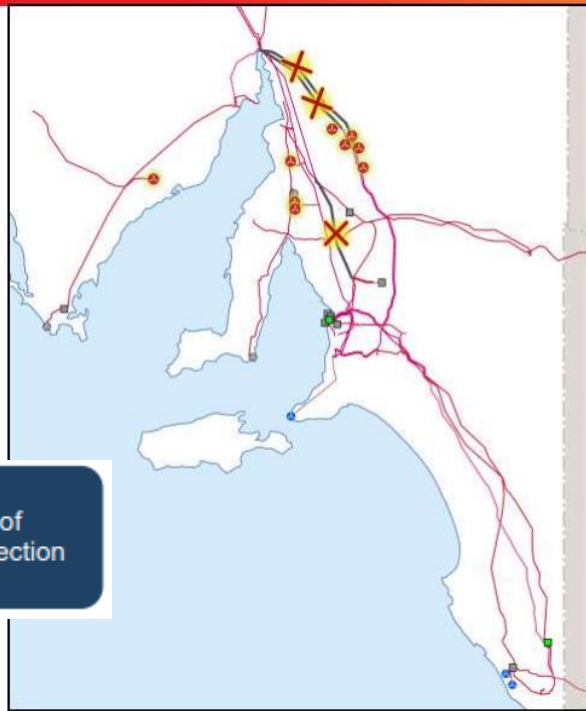
South Australia 대규모 정전 발생 : 2016년 9월 28일

Loss of three
transmission
lines

Multiple faults

Wind farm
protection
triggered

Operation of loss of
synchronism protection

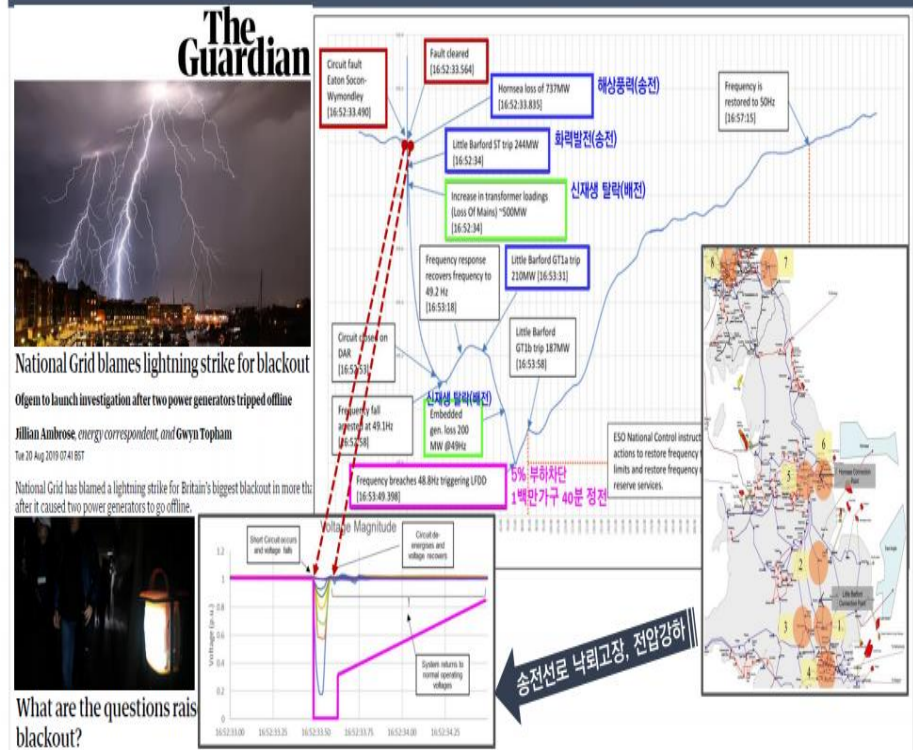


Key Contributors to the Black System

- 1) Inability to form a viable Island
- 2) Loss of Transmission Lines
- 3) Inability of wind farms to ride-through multiple faults
- 4) High Wind Speed
- 5) Loss of synchronism between SA and VIC systems

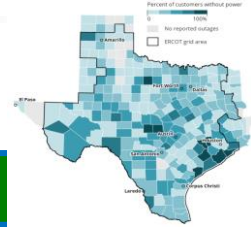
- 1) 낙뢰로 400kV 송전선로 지락 고장 ⇒ 순간(80ms) 전압강하 ⇒ 발전소 탈락 ⇒ 주파수 저하
- 2) 전력계통 고장으로 주파수 저하 ⇒ 화력발전소 및 재생에너지 발전소 연속 계통 탈락 ⇒ 대규모 정전

영국 대규모 정전 발생 : 2019년 8월 9일 16:52



Extreme Weather Events- Resilience 모형 구축

Texas의 겨울 폭풍(winter storm) (2021년 2월 13일 ~ 2월 17일)



폭풍 전 타임라인(pre-storm timeline)

2월 8일

2월 10일

2월 11일

2월 14일

2월 8일 - 2월 11일

- ERCOT은 2/11-02/16에 예상되는 극한 추위에 대한 공지, 경보 및 주의보(Notice, Advisory, and Watch)를 발표함

2월 11일

- ERCOT은 극한 추위로 인해 기록적인 전력 사용이 예상된다고 발표함 (2/15(월) 아침 피크 수요 예상)
 - "발전기는 예상되는 추위에 대비하여 연료 공급, 계획 정전(planned outages) 검토 및 겨울 내부화 절차 시행을 포함한 설비를 준비하는 데 필요한 조치를 취하도록 요청 받음"
- 전력 시설(electric utilities)에서 국지적 순환정전(circuit outage) 발생

폭풍 후 타임라인(post-storm timeline)

2월 14일

2월 15일

2월 18일

2월 19일

2월 14일

- ERCOT에서 에너지 절약 요청 (2/14-02/16)
- 오후 6-7시: 겨울 피크 수요를 69,150MW로 설정 (여름 피크 74,820MW)

2월 15일

- 자정(00:17): 에너지 비상 경보(Energy Emergency Alert, EEA)에 들어옴
- 오전 01:25 : EEA3, 순환정전(rotating outages)
 - 10,500 MW의 부하 차단(load shed)
 - 극한 기상조건으로 인해 연료 유형 전반에 걸쳐 많은 발전기가 offline되어 사용 불가해짐
 - ~34,000 MW의 발전기가 시스템에서 강제로 차단됨

2월 18일 - 2월 19일

- 2/18: 전력이 대부분 복구됨
- 2/19: 긴급 상황 종료

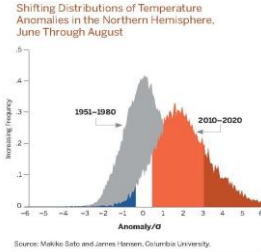
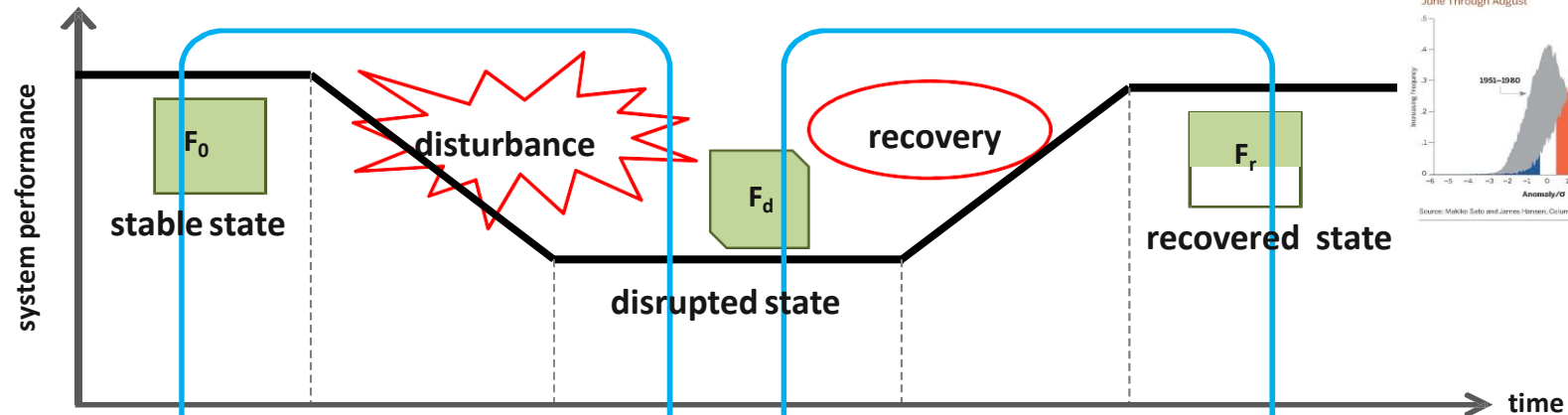
전력망 복원력(Grid Resilience) 기반 구축 필요

전력망 복원력(Grid Resilience) Framework 기반 구축

Reliability

Resilience

- ▶ Grid Resilience 정량적 평가 지수 및 강인한 전력망(Strong Grid) 구축



- Weather-Related Power Outage DB Modeling & Quantified Model of Cascading Outages
- Probabilistic Model of Cascading Outages
- Influence Graph Model of Cascading Outages

Cascading Outage Model



Optimal Design for Cascading Outage Mitigation

System Restoration Model



Optimal Restoration for System Resilience

- Multi-Direction & Sequential Restoration Process
- IBR Application (blackstart)
- Pareto-Optimality
- Heuristic Searching and Recovery Strategy

- ▶ **Reliability** = Meet standards of service based on historical statistics of load and generation
- ▶ **Resilience** = Maintain acceptable levels of service during reasonably possible **high-impact, low-frequency** scenarios beyond just historical patterns, and reducing consequences and recovering quickly when service is interrupted

연쇄 사고 개념의 신뢰도 기준 반영

■ Definition in NERC's Glossary of Terms

“The uncontrolled **successive loss of system elements** triggered by an incident at any location. Cascading results in widespread electric service interruption that cannot be restrained from sequentially spreading beyond an area predetermined by studies.”

■ Requirements in NERC TPL-001-4 (Transmission System Planning Performance Requirement)

- Requires evaluation of possible actions for **potential cascading caused by extreme events**

■ Tools Used for Cascading Analysis (ERCOT ISO)

- **Potential Cascading Modes (PCM)**: Screening study and load shedding analysis
 - **PowerWorld Simulator**: Detailed analysis of the select contingencies
-

국내 계통 환경에 적합한 연쇄 사고 모형 개발

■ Cascading Outage Process

- 초기 사고(Initial disturbance) 이후, 선로 및 전압이 relay trigger 한계를 초과하여 조류계산이 수렴되는 경우 요소를 트립(Trip) 함
- 연쇄사고(Cascading Outage) 모의 종료 조건에 도달할 때까지 요소를 계속 Trip 함
- 시스템 연쇄사고 결과를 통해 누적된 부하 손실(Expected Energy Not Served, EENS)을 산정함

국내 계통 환경에 적합한 AC 조류 계산 기반의 연쇄 사고 모형 개발

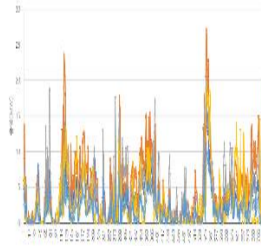
■ Advanced Tools Used for Cascading & Mitigation Analysis

- 재생E 포함 **게시 별 DB기반 Base Case** 연계 **AC 전력 조류(Power Flow)** 연쇄 사고 모형 구현(Python-PSS/E)
- **Markovian Chain 기반** 취약 선로 선정 및 **연쇄 사고 완화(Mitigation) 시나리오** 모형 구현(R 코드)
- **Story Telling & Influence Graph** 기반 연쇄 사고 파급 시각화 모형 구현(R 코드)

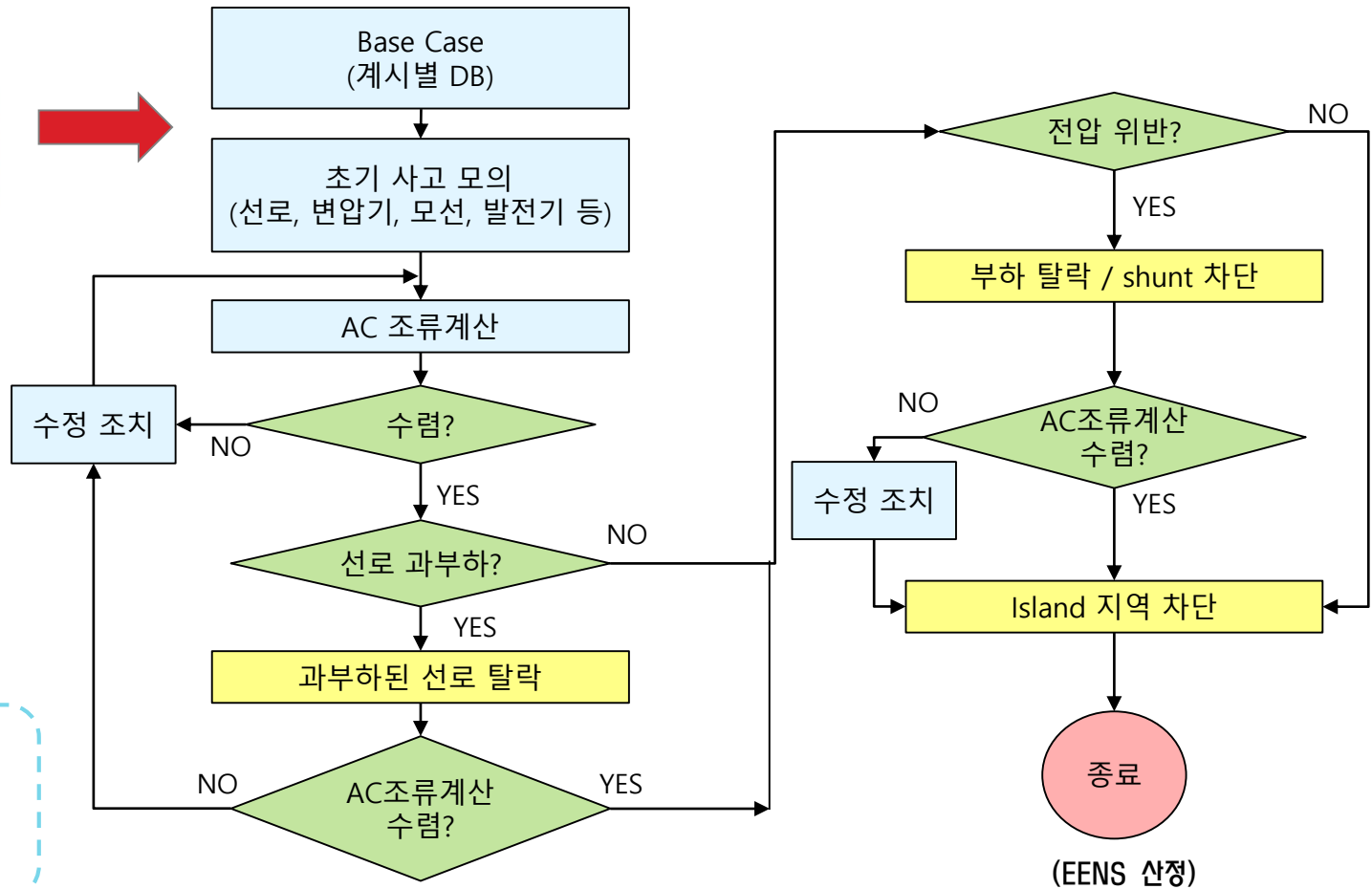
AC Power Flow 기반 연쇄사고 모형(1 / 3)

AC Power Flow 기반 연쇄사고 모형 구현

AC Power Flow 기반 연쇄사고 모형



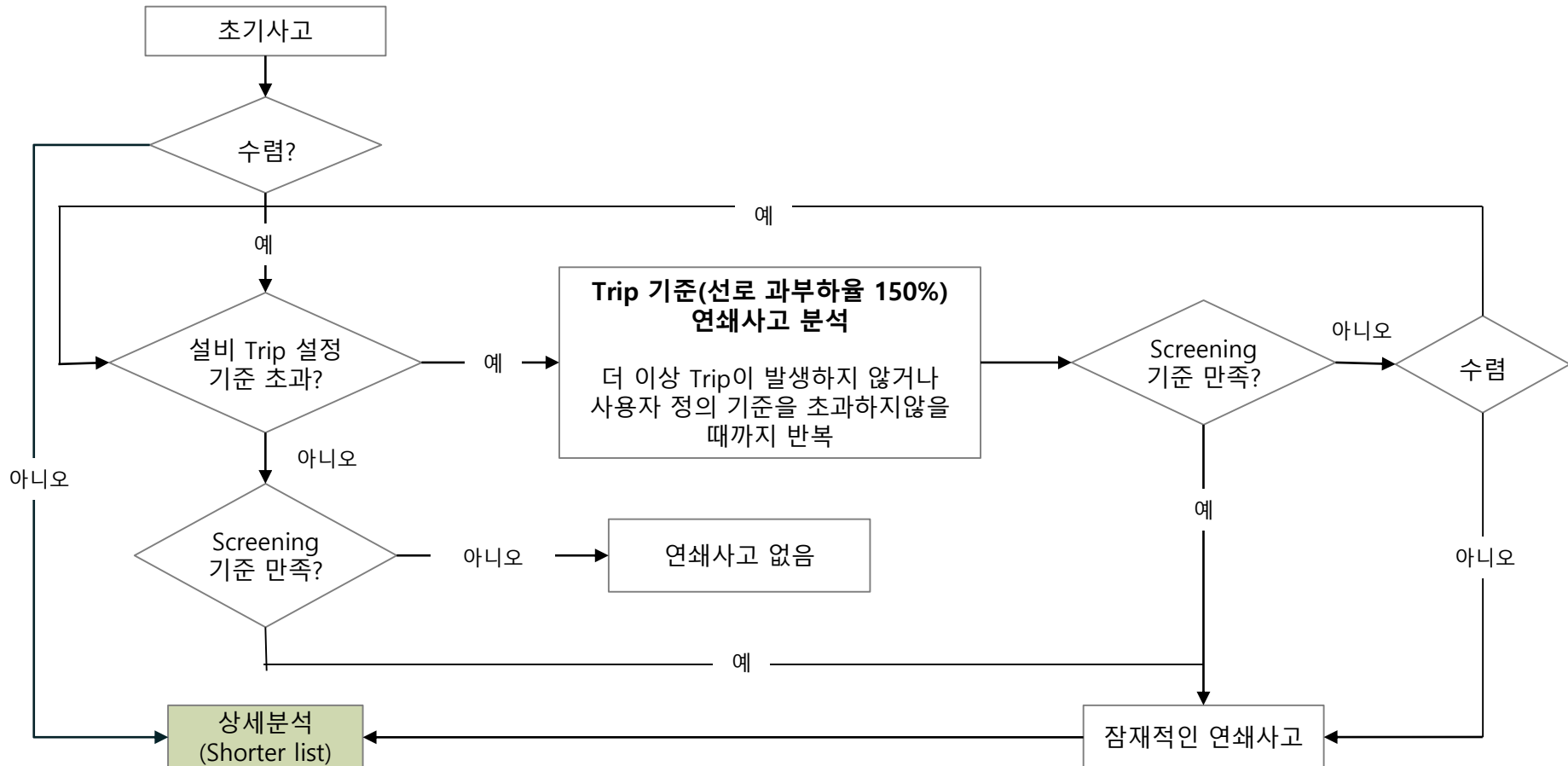
재생E 모델링 적용
(계시별 DB 적용)



AC Power Flow 기반 연쇄사고 모형(2/3)

연쇄사고 모형 개발: Screening Process

연쇄사고 모형 적용을 위한 초기사고 정의(Initial Disturbance Screening)



Markovian Influence Graph 기반 완화방안(1 / 3)

Markovian Influence Graph 기반 연쇄사고 완화(Mitigation) 방안 구현

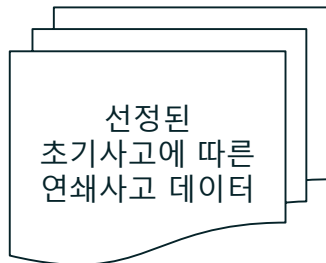
Markovian Influence Graph 기반 완화방안 수립

- ▶ Markov Chain의 전이행렬 추정 후 Markovian Influence Graph 구현

연쇄사고 데이터 분석

Markov Chain의 전이행렬 추정

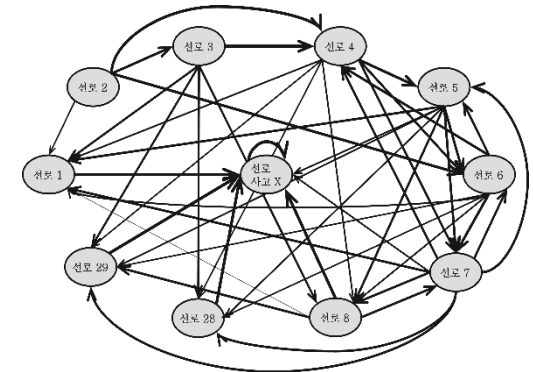
Markovian Influence Graph 구현



$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ u & & Q & \end{bmatrix}$$

u : 정지 확률의 열벡터. $u[i] = P[i, 0]$

Q : 비정지 확률을 포함하는 전이상태 간의 전이확률의 부분 행렬



- ▶ Markov chain의 전이행렬 구조

- state 0은 연쇄사고가 중지하여 선로 사고가 없음을 나타내며 $P[0,0] = 1$ 임
- P 의 첫번째 행은 항상 e_0' 이므로 전이확률은 u 및 Q 임
- P 의 행과 열은 0에서 $|S|-1$ 까지 인덱싱 됨
- Q 의 행과 열은 1에서 $|S|-1$ 까지 인덱싱됨

e_0 : 열벡터 $(1, 0, 0, \dots, 0)'$

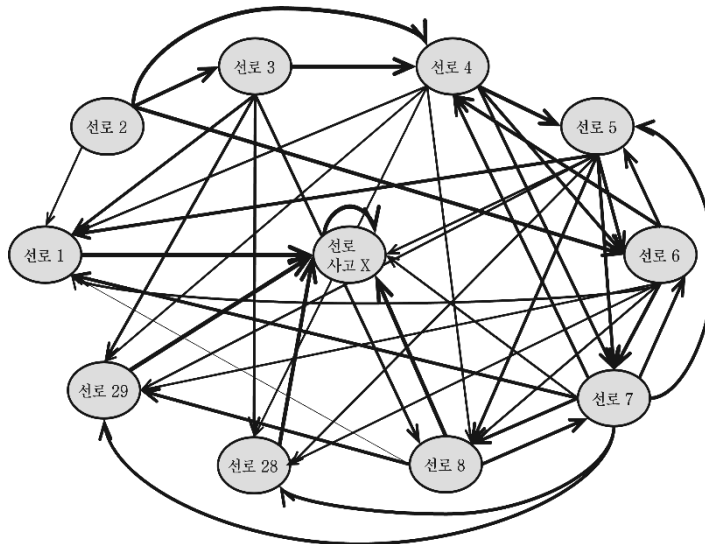
$|S|$: state의 수

Markovian Influence Graph 기반 완화방안(2/3)

Markovian Influence Graph 기반 연쇄사고 완화(Mitigation) 방안 구현

Markovian Influence Graph 구현 결과

- ▶ Markov Chain의 전이행렬 추정 후 Markovian Influence Graph 구현
 - 연쇄사고 데이터에 33가지의 선로사고 및 선로사고 없음으로 이뤄진 34개의 state가 있을 때 전이행렬은 34×34 정방행렬(square matrix)임
- ▶ 전이행렬 추정 후 초기사고가 "선로 2"일 때 연쇄사고 파급에서 발생하는 11개의 state를 중심으로 Markovian influence graph의 일부분을 나타냄
 - 전이확률이 클수록 edge의 굵기가 두꺼움



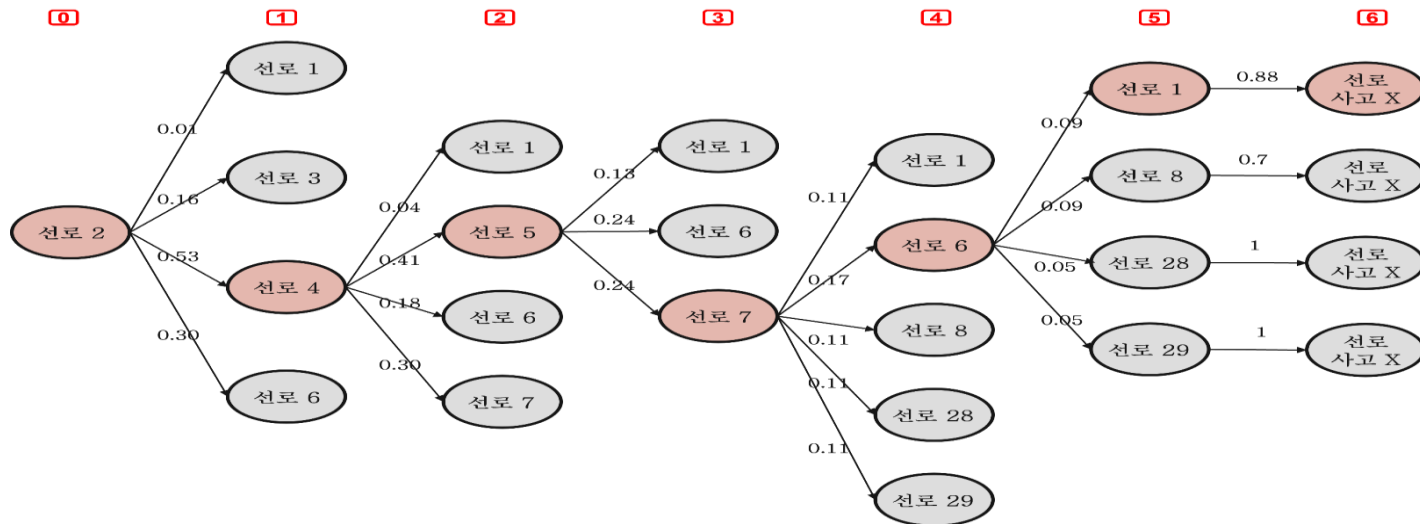
State	선로명
선로사고 없음	-
선로 1	오성CC1-송탄1
선로 2	서안성1-신시흥3#2
선로 3	서안성3-안성1
선로 4	안동1-풍산1
선로 5	상주1-점촌1
선로 6	평해1-울진1
선로 7	송탄1-안성1
선로 8	송탄1-소사별1
선로 28	안성1-소사별1
선로 29	서안성 MTR#1-서안성 MTR#2

Markovian Influence Graph 기반 완화방안(3/3)

Markovian Influence Graph 기반 연쇄사고 완화(Mitigation) 방안 구현

Markov Chain 기반 완화(mitigation) 시나리오

- ▶ Markov Chain의 전이확률 기반 완화 시나리오

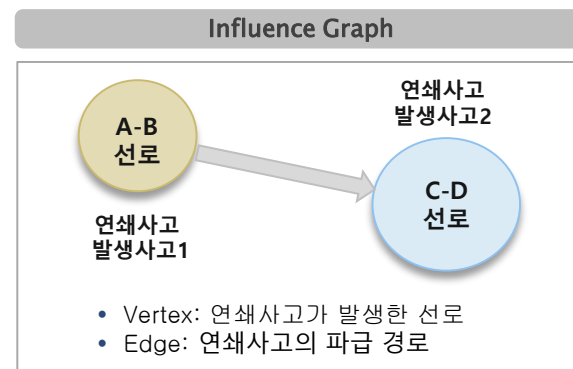
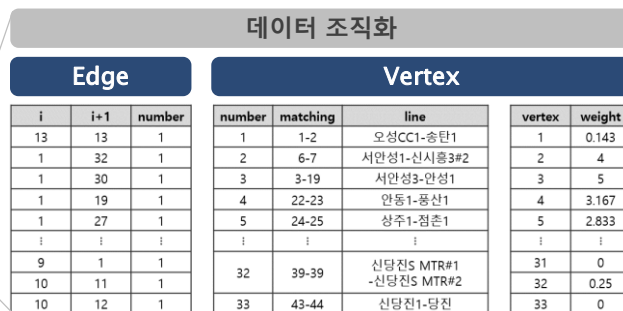
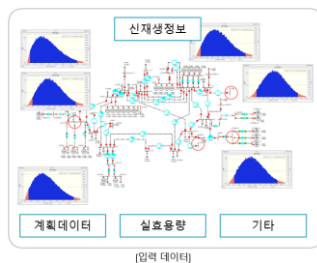
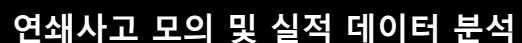


- 연쇄사고 발생의 주요 연결을 trip시키는 방법으로 연쇄사고를 완화할 수 있으며, 연쇄사고 발생의 주요 연결 선로를 Markov chain의 전이확률이 가장 높은 state라고 가정함
- 초기사고가 "선로 2"일 때 주요 연결 선로를 "선로 4"라고 판단할 수 있으며 "선로 4"를 trip 시켜 연쇄사고 파급을 완화 할 수 있으며, 연쇄사고 종료까지 generation 0부터 generation 6까지 나타남
- 연쇄사고 데이터를 기반으로 초기사고로 "선로2"가 사고나는 경우 generation 1에선 선로 1, 선로 3, 선로 4, 선로 6의 사고가 발생함
- 현재 generation의 state에서 다음 generation의 state로의 가장 높은 전이확률을 가지는 state를 중심으로 연쇄사고 파급을 나타냄 (빨간색 원)

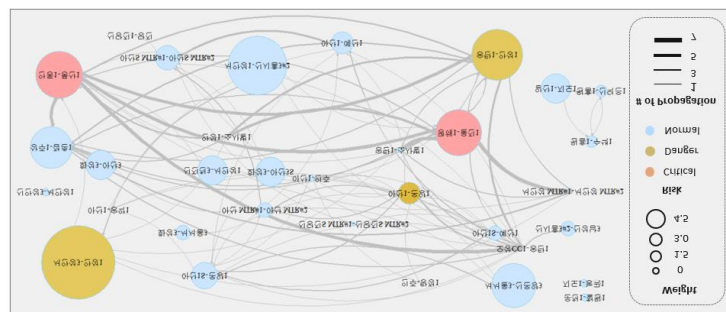
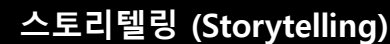
연쇄 사고 파급 모형 시각화 개발(1 / 3)

연쇄사고 파급 모형 시각화 분석

연쇄사고 파급 모형 시각화 개요: Story Telling 기반 시각화 기법



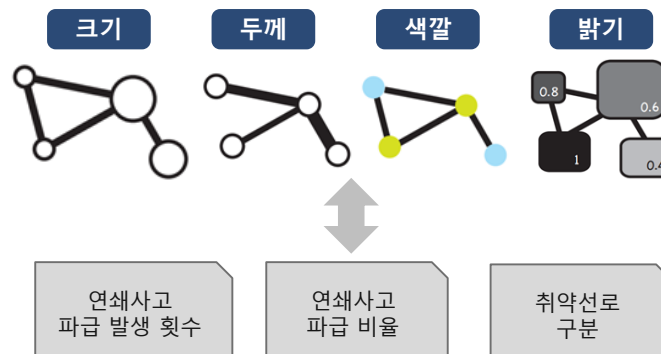
Advanced Cascading Outage Modeling & Analysis



“lgraph”
라이브러리



Version 4.1.3

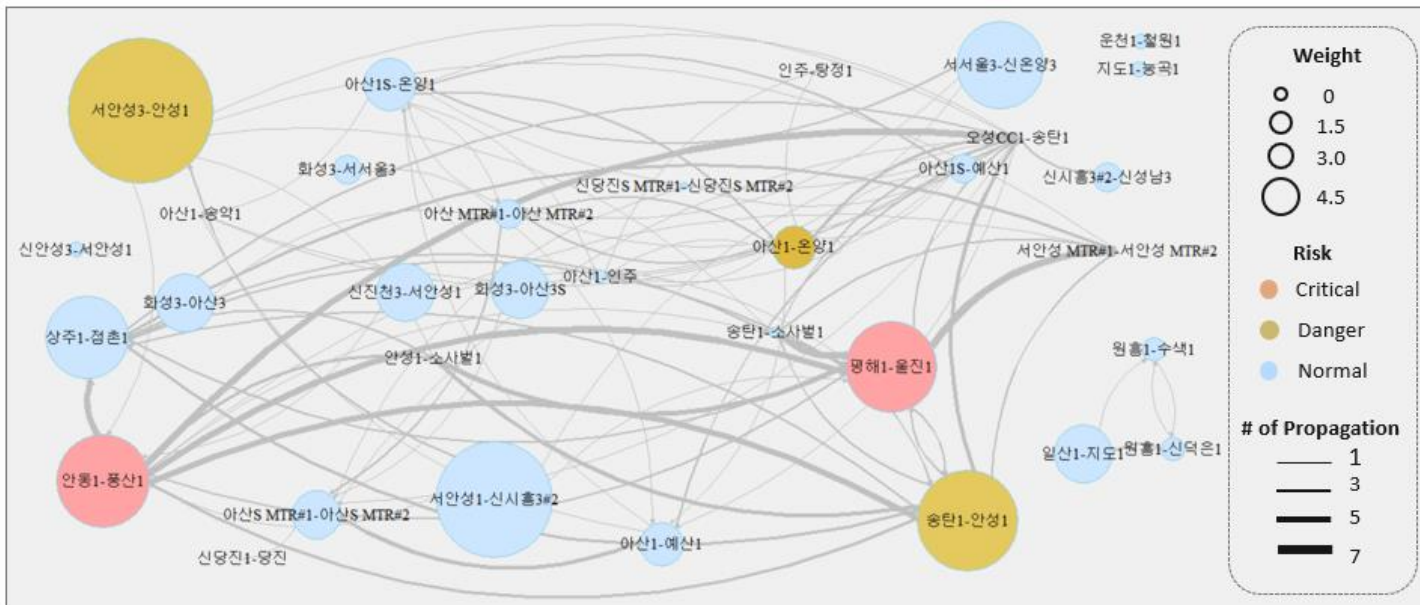


연쇄 사고 파급 모형 시각화 개발(2/3)

연쇄사고 파급 모형의 시각화 모형 구현

연쇄사고 시각화 방안 제안 (구현 1)

- R 프로그래밍의 "igraph" 라이브러리 내 "tkplot" 함수를 활용한 시각화 방안



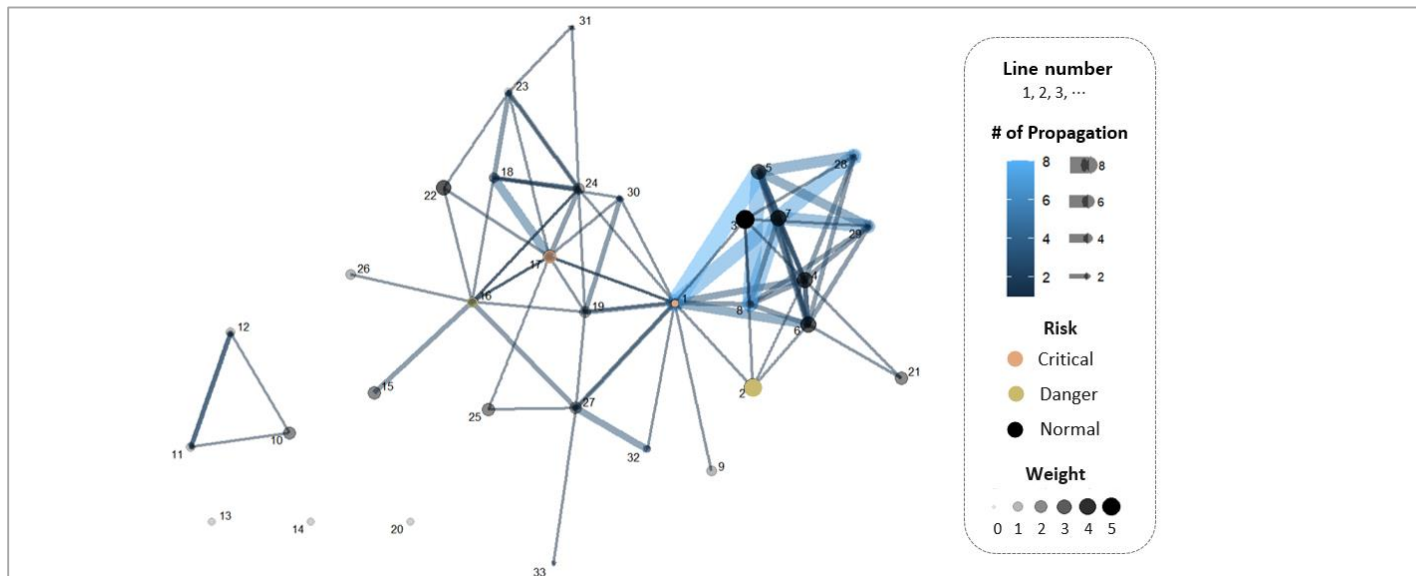
항목	요소	설명	시각화 개요
Vertex	크기	연쇄사고 발생 event의 파급 비율 (weight)	0 ○ ○ ○ ○ 5
	색깔	취약선로 구분	○ Critical ● Danger ● Normal
Edge	두께	이전 사고(i)에서 이후 사고(i+1)로 파급된 횟수	1 — — — — 8

연쇄 사고 파급 모형 시각화 개발(3/3)

연쇄사고 파급 모형의 시각화 모형 구현

연쇄사고 시각화 방안 제안 (구현 2)

- ▶ R 프로그래밍의 "igraph" 라이브러리 내 "ggraph" 함수를 활용한 시각화 방안



항목	요소	설명	시각화 개요
Vertex	크기, 밝기	연쇄사고 발생 event의 파급 비율 (weight)	0 5
	색깔	취약선로 구분	Critical Danger Normal
Edge	두께, 밝기	이전 사고(i)에서 이후 사고(i+1)로 파급된 횟수	1 8

감사합니다!

