

Grid Resilience Assessment Case Study for Korean Power System Using a Quantitative Index

전력망 복원력 평가지표를 적용한 국내 전력망 사례연구

Jaegul Lee · Solyoung Jung · Yongseung Lee · Seungshan Oh · Moonsung Bae · Jeonghoon Shin

이재걸* · 정솔영* · 이용승* · 오승찬* · 배문성* · 신정훈†

Abstract

In this paper, previous studies on the method of quantitatively evaluating the grid resilience were investigated. The grid resilience of the test system was evaluated for the large-scale forest fire scenario by applying the some selected grid resilience evaluation methodologies. In addition, the effectiveness of each countermeasure to minimize the power supply disruption due to large-scale forest fires was evaluated as an improvement in the level of grid resilience. The contribution of this paper is a quantitative evaluation of the resilience of the Korean power grid for large-scale forest fire scenarios, and through this, we found that the evaluation indicators developed in previous studies are partially insufficient in evaluating the resilience of the Korean power grid.

Key Words

Power Grid Resilience, Resilience Curve, Electricity Interruption Cost Function, Quantitative Evaluation Method

1. 서론

사전적으로 “복원력(復元力)”이란 물체가 변형되었을 때, 그 물체를 본디의 상태로 되돌리려고 하는 힘이라고 정의되며 전력망에서도 이와 같은 개념으로 복원력에 대한 개념이 도입되고 있다.

최근 이상기후와 대규모 재난/재해의 증가로 전력망 복원력(Grid Resilience)의 평가 및 관리에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. Grid Resilience는 국가, 전력회사 또는 기관에 따라서 다소 상이하게 정의하고 있지만 큰 틀에서는 동일한 방향성을 갖고 있다[1~2]. 즉, 발생확률은 낮지만 발생 시 영향이 큰(High Impact Low Frequency, HILF) 외부적인 충격(이벤트)의 발생에 대비한 사전적인 준비, 공급지장이 발생하는 경우 그 피해를 최소화하는 대응, 그리고 피해를 신속하게 회복 및 원상복구 시키는 능력으로 정의가 된다. Grid Resilience는 기존의 전력망 계획과 운영에 대한 신뢰도(Reliability)와는 상이한 개념으로 향후 두 개의 개념을 병행 적용할 필요가 있다[3].

Grid Resilience에 대한 정량적인 분석을 위한 다수의 선행 연구가 수행되었으나 HILF 이벤트의 종류와 피해 발생의 형

태가 다양하며 시간에 따른 변화가 포함되기 때문에 하나의 숫자로 복원력을 평가하기가 어렵다. 이 때문에 복원력 곡선(Resilience Curve)의 개념을 적용하여 전력망 복원력의 수준을 표현하는 것이 일반적인 방법이다[4].

복원력 수준을 정량적으로 평가하는 것은 특정 이벤트에 대한 피해 수준을 평가하는 목적도 있으나 대응 수단별로 피해 저감의 효과를 분석하기 위한 목적도 있다. 또 다른 선행 연구에서는 복원력에 대한 수준을 하나의 지표로 산정하는 노력이 있었다[5~14]. 그중 Resilience Curve를 기반으로 한 FLEP 평가지표와 등가 피해 면적 분석 방법을 본 논문에서는 적용하여 국내 전력망에서 발생할 수 있는 이벤트에 대한 분석을 수행하였다.

FLEP는 평가하는 4가지 요소의 영문 명칭의 앞자리 F(How Fast), L(How Low), E(How Extensive) 그리고 P(How Promptly)를 따서 명명한 평가지표이다.

본 논문에서는 한국 전력망의 특성을 일부분 포함하고 있는 Test System에 선행 연구에서 제안된 복원력 평가지표를 적용하여 한국 전력망에서 발생할 수 있는 극한의 HILF 이벤트 중에 대규모 산불 발생 및 대응 수단별 시나리오에 대한 복원력 수준을 정량적으로 평가하였다.

† Corresponding Author : KEPCO Research Institute, Korea

E-mail : shin.jeonghoon@kepcor.co.kr
<https://orcid.org/0000-0003-1750-7943>

* KEPCO Research Institute, Korea
<https://orcid.org/0000-0001-8916-8456>
<https://orcid.org/0000-0002-3052-5444>
<https://orcid.org/0000-0003-4823-823X>

<https://orcid.org/0000-0003-2339-4439>
<https://orcid.org/0000-0002-2263-4384>

Received : May. 22, 2024 Revised : Jul. 26, 2024 Accepted : Aug. 7, 2024

본 논문은 우리나라에서 지속 증가하고 있는 대규모 산불과 산불확산 대응 수단을 고려한 시나리오를 개발하고 선행 연구에서 제안한 평가지표를 이용하여 각 시나리오에 대한 복원력을 정량적으로 평가했다는 것에 기술적 의미가 있다.

본 논문의 2장에서는 전력망 복원력의 개념을 설명하고 3장에서는 복원력 평가지표에 대한 선행연구의 내용을 분석하고 정량적 분석 방법론을 수립하였다. 그리고 마지막 4장에서는 Test System을 대상으로 대규모 산불 발생에 대한 복원력 평가 사례연구를 수행하였다.

2. 전력망 복원력의 개념

Grid Resilience에 대한 정의는 아래의 표 1과 같이 국가나 기관에 따라서 조금씩 다르지만, 공통적으로 예방, 회복 그리고 적응에 대한 개념을 담고 있다[1]. 즉, 전력망 내/외부적인 충격 발생에 대비한 사전적인 준비, 충격으로 인해 공급장치가 발생하는 경우 그 피해를 최소화하는 대응, 그리고 피해를 신속하게 회복 및 원상복구 시키는 전력망의 능력으로 정의가 된다. 국내에서는 아직 Grid Resilience에 대한 정의가 공식적으로 이루어진 연구가 없었으며 Grid Resilience의 정량적 평가 및 관리 체계가 부재한 상태이다.

표 1 국가 및 기관별 Grid Resilience 정의

Table 1 Defining Grid Resilience by Country & Institution

기관명	Grid Resilience 정의
미국 전력 연구소 (Electric Power Research Institute, EPRI)	Power system resilience in terms of three elements : Prevention, Recovery, and Survivability
북미 전력 신뢰도 기구 (North America Electric Reliability Corporation, NERC)	Power system resilience as to prepare and plan, absorb, recover, and adapt to adverse events
영국 에너지 연구소 (United Kingdom Energy Research Center, UKERC)	Power system resilience is the capability of an energy system to tolerate disturbance and to continue to deliver affordable energy service to consumers.

Grid Resilience는 Reliability를 대체하기 위한 개념이 아니며 상호보완적인 개념으로 이해할 수 있다[2].

3. 평가지표 및 방법론

3.1 복원력 곡선(Resilience Curve)

Grid Resilience의 정량적 평가는 국가나 기관에 따라 다양한 방법이 연구되고 있으나 대부분이 Resilience Curve를 이용하거나 이를 기반으로 한 분석 방법을 적용하고 있다.

Resilience Curve는 모양에 따라서 삼각형(Triangle)과 사다리꼴(Trapezoid)로 구분할 수 있다[4]. 참고문헌에 따르면 삼각형 모양의 Resilience Curve는 단일 설비에 대한 복원력을 평가하는데 적합하며 사각형 모양의 Resilience Curve는 시스템에 대한 평가에 적합하다고 설명하고 있기 때문에 본 연구에서는

두 가지 Resilience Curve 중 시스템의 복원력 평가에 적합한 것으로 알려진 사다리꼴 모양 Resilience Curve를 적용했다.

그림 1에서 Resilience Curve의 가로축은 시간의 변화를 의미하며 세로축은 다양한 전력망의 성능지표들을 적용할 수 있는데 여기에서는 전력 공급률로 가정하고 예시를 설명하고자 한다. 여기에서 전력 공급률은 전력수요량 실제 공급가능량의 비율을 표현한 것이다. 아래의 수식 1은 전력 공급률(Power Supply Rate, PSR)의 개념을 나타낸 식이다.

$$PSR = \frac{PS_{real}}{PD} \quad (1)$$

여기에서, PSR : 전력 공급률

PS_{real} : 실제 공급가능량 [GWh]

PD : 전력수요량 [GWh]

Resilience Curve의 A점에서 극한의 이벤트가 발생하여 전력 공급 지장이 일부 발생하게 되면 아래의 그림과 같이 전력 공급률이 B점까지 감소하게 된다.

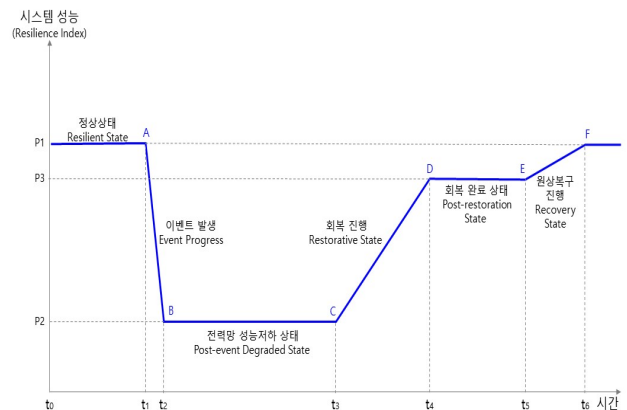


그림 1 Trapezoid Resilience Curve 예시 (이벤트 발생 시)

Fig. 1 Trapezoid Resilience Curve Example

공급지장이 일정 시간 지속된 이후 C점부터 회복을 진행하면서 전력 공급이 순차적으로 회복되어 D점까지 회복된다. 하지만 근본적인 피해가 원상복구 되지 않은 상태에서는 전력 공급률이 100%까지 회복되지 않을 수 있고 설비 피해의 원상복구를 통해서 E점에서 100%까지 전력 공급률을 높여 F점까지 도달하게 된다. A~F까지의 면적이 해당 이벤트에 대한 전력망 복원력으로 정의될 수 있으나 전력망의 복원력을 하나의 지수로 평가하기 어렵기 때문에 Resilience Curve를 이용하여 전력망의 복원력 수준을 표현하는 것이 일반적이다.

3.2 복원력 평가지표

전력망 복원력 평가지표에 관해서 다양한 선행 연구가 있었으며 평가지표의 측정 방식에 따라서 속성 기반의 측정 방식 (Attributes-based metrics)과 성능 기반의 측정 방식

(Performance-based metrics)으로 구분한 사례가 있다[5~7]. 속성 기반의 측정 방식은 현재 상태에 대비하여 시스템 복원력이 높아지는가 낮아지는지를 특성별로 표현하는 지표이며, 성능 기반의 측정 방식은 현재 시스템의 복원력이 어느 수준인지를 표현할 수 있다. 또한, 3가지 저항성(Resistancy), 회복성(Recovery) 그리고 복원성(Resilience)의 평가 항목으로 구분하여 평가하는 것을 제안하는 선행 연구도 있다[8]. 저항성 평가 지표는 전체 시스템 전력수요와 공급지장이 발생하지 않은 수용가에 공급된 전력의 합에 대한 비율로 정하였다. 회복성 평가 지표는 공급지장이 발생한 수용가가 공급을 요구하는 전체 전력수요의 합과 회복된 수용가에 공급이 예상되는 에너지에 대한 비율로 정의하였다. 그리고 마지막으로 복원력 평가 지표는 총 시스템 전력수요와 공급이 예상되는 전력량의 비율로 정의하였다. 또 다른 연구에서는 극한 이벤트 발생 이후 시스템 복원력을 정량화 하기 위한 평가지표로 시스템 응동의 속도와 회복의 효율 그리고 경제성을 기반으로 정의하였다[9]. 실제 전력수요 대비 복구된 전력수요의 비율로 복원력 평가지표를 정의한 사례도 있는데 이는 마이크로그리드(MG)에 대한 적용에 국한된 연구이다[10~11]. 또 다른 선행 연구에서는 시스템 복원력을 평가하기 위해 재난/재해에 대한 전력망의 피해 정도를 시간에 대한 함수로 표현한 Resilience Curve 자체를 이용하는 것을 제안하였다[12]. Resilience Curve는 측정방식에 따른 구분 방법으로는 성능 기반 측정방식으로 구분할 수 있다.

본 논문에서는 새로운 평가지표를 제안하지는 않았으며 선행 연구에서 제안한 평가지표를 활용하여 우리 전력망의 복원력을 정량적으로 평가하였다. 본 논문에서는 FLEP로 약칭되는 평가지표를 제안한 선행 연구에 주목하고 이 평가지표를 적용하였다[13]. FLEP 평가지표를 적용한 이유는 Resilience Curve를 이용하여 이벤트 발생 이후 단계별로 전력망 성능의 변화를 정량적인 평가를 할 수 있다는 장점 때문이다. 이전 연구를 통해서 제안된 평가지표는 매우 단편적인 평가만 가능하기 때문에 본 연구에서는 적용하지 않았다.

F(How Fast)와 L(How Low)은 1단계(고장 발생)에서 얼마나 빠르게 얼마나 낮게 곡선이 변화할 것인지를 나타내며, E(How Extensive)는 고장 발생 이후 2단계(피해지속)에서 얼마나 피해발생이 지속될 것인지를 나타낸다. 그리고 P(How Promptly)는 3단계(회복 과정)에서 얼마나 빨리 피해가 회복하는지를 나타낸다.

상기 그림 1의 Resilience Curve 예시를 이용하여 FLEP 각 항목 지표는 다음의 수식 2-5와 같이 정의하였다.

$$I_F = \frac{\frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100}{t_2 - t_1} \quad [\%/Hr] \quad (2)$$

$$I_L = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

$$I_E = t_3 - t_2 \quad [Hr] \quad (4)$$

$$I_P = \frac{\frac{P_3 - P_2}{P_1} \times 100}{t_4 - t_3} \quad [\%/Hr] \quad (5)$$

여기에서 I_F : 전력망 성능저하 속도 평가지표 [%/Hr]
 I_L : 전력망 성능저하 수준 평가지표 [%]
 I_E : 전력망 성능저하 유지 시간 평가지표 [Hr]
 I_P : 전력망 성능 회복 속도 평가지표 [%/Hr]
 P_1 : 정상 상태의 전력망 성능 수준
 P_2 : 고장 지속 상태의 전력망 성능 수준
 P_3 : 회복 이후의 전력망 성능 수준
 t_1 : 이벤트 발생 전력망 성능저하 개시 시점 [t]
 t_2 : 전력망 성능저하 완료 시점 [t]
 t_3 : 전력망 성능 회복 개시 시점 [t]
 t_4 : 전력망 성능 회복 완료 시점 [t]

등가 피해 면적 분석 방법(EDA, Equivalent Damage Area)은 복잡한 형태의 Resilience Curve의 피해 면적을 세로가 1.0 크기의 직사각형 모양으로 등가화하고 직사각형의 가로 길이(지속시간)를 표현하는 방식으로 본 논문에서 보조적인 평가 수단으로 제안한 것이다. 이 평가지표는 피해 발생의 형태는 알 수 없으나 다수의 시나리오 직관적으로 피해의 규모를 비교할 수 있다는 장점을 갖는다.

3.3 평가 방법론

아래의 그림 2는 전력망 복원력의 정량적 평가 방법론을 순서도로 표현한 것이다.

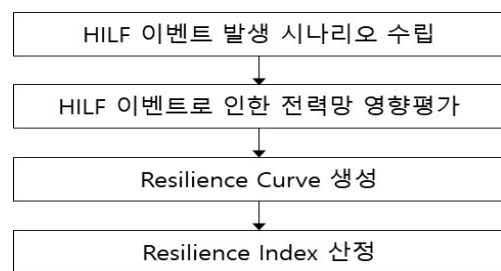


그림 2 Grid Resilience 평가 방법론 순서도
 Fig. 2 Grid Resilience Assessment Workflow

우선 HILF 이벤트 발생에 대한 시나리오를 수립한다. HILF 이벤트는 재난/재해, 사이버 테러 등 다양한 종류를 고려할 수 있는데 우리나라에서 발생하였거나 향후 발생이 가능한 상황을 고려할 수 있다.

HILF 이벤트 시나리오 중 분석 대상으로 선정된 시나리오에 대하여 발생 시 전력망에서의 영향을 평가한다. 여기에는 과거 유사한 이벤트로 인한 전력망의 영향 범위, 정도 등이

참고될 수 있으며, 설비의 안전도나 노후 상태 등을 고려한 설비 단위 고장 발생 위험 요인 분석 및 고장과급 분석의 결과를 활용할 수 있다. 상기 두 단계의 분석에 대한 수학적 모델과 데이터가 부재한 상태로 추가적인 연구가 필요하다. 이 때문에 본 논문에서는 이러한 분석 대신 가정을 통한 시나리오를 구성하였다.

Resilience Curve는 3.1절에서 설명한 바와 같이 시나리오별로 시간 변화에 따른 전력 공급률의 변화를 분석하여 평면상에 표현한다. Resilience Curve 중 회복과 원상복구 단계는 해석적인 접근이 어렵기 때문에 일정한 시간과 속도를 가정하여 모든 시나리오에 동일하게 적용하였다.

Resilience Curve는 2차원 평면상에서 전력망의 성능저하를 표현할 수는 있으나 정량적으로 표현하는 데는 한계가 존재하기 때문에 마지막 분석 단계에서는 FLEP 평가지표와 등가 피해 면적을 산정하여 복원력의 수준을 정량화 한다.

본 논문에서 제안한 상기의 평가 방법론을 4장 사례연구에서 적용하여 분석을 수행하였다.

4. 사례연구

4.1 Test System

본 논문에서는 국내 전력계통의 특성을 일부 포함하는 Test System을 구성하여 사례연구에 적용하였는데 Test System의 구성은 아래 그림 3과 같다. Test System은 동해안 지역(발전지역)의 대규모 발전단지와 수도권(도시지역)의 대규모 수요간 대용량 송전선로가 산악지역을 경과하는 구성으로 대규모 산불 시나리오에 대한 복원력 평가에 적합하도록 구성하였다.

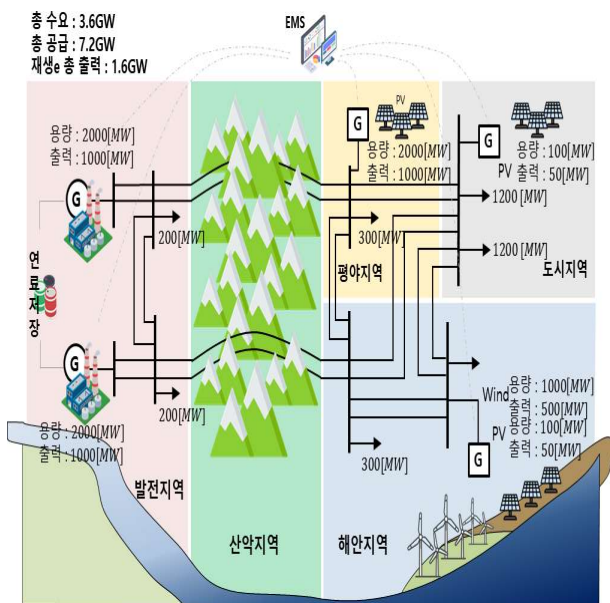


그림 3 전력망 복원력 평가를 위한 Test System 개념도
Fig. 3 Test System Concept for Power Grid Resilience Evaluation Case Study

Test System은 전력수요가 3.6GW, 총 공급설비용량 7.2GW(LNG 화력발전설비용량 4GW + 재생e 발전설비용량 3.2GW), 재생e 발전출력 1.6GW 그리고 화력발전 출력 2GW로 구성하였다. 발전지역에서 생산된 전력은 산악지역을 거치는 장거리 송전선로를 통해 도시지역의 수용가에 공급된다. 또한 해안지역에는 풍력발전이 집중되어 있으며 평야지역에는 태양광발전이 집중되어 있다. 전력수요의 66%인 2.4GW는 도시지역에 집중되어 있으며 나머지 수요는 평야지역과 해안지역에 분산되어 있다.

Test System의 송전전압은 345kV이며 송전선로의 회선당 송전선로 용량은 ACSR 480mm2 기준으로 2,173MW로 적용하였다.

본 Test System은 국내 전력망의 발전력 및 수요 편중으로 인한 대용량 송전의 이슈와 향후 재생e의 비중 증가와 지역 편중적인 개발의 특성이 전력망의 복원력이 미치는 영향을 검토할 수 있도록 하였다.

아래의 표 2는 계통해석 프로그램인 PSS/E의 상정고장 해석의 결과인데 모든 시나리오가 신뢰도 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 본 사례연구에서는 선로 과부하 및 전압 유지 기준의 만족여부를 검토하였다. 여기에서 전압의 경우 현행 “전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준”의 2장 6조 전압 유지 범위($\pm 5\%$) 및 과부하의 경우 “전력시장운영규칙”의 [별표 3] 전력계통 운영기준, 4.0 계통검토시 안정유지 기준(150%이하 유지)을 적용하였습니다. 즉, 본 Test System은 신뢰도의 관점에서 문제 없이 운영될 수 있는 상태임을 확인하였다.

표 2 Test System에 대한 안정도(N-1 상정고장) 검토 결과

Table 2 Voltage and Overload Review Results for the Test System

고장 선로	안정도 평가결과	고장 선로	안정도 평가결과
B300-B400 2회선	기준만족	B600-B700 2회선	기준만족
B300-B500 2회선	기준만족	B600-B800 2회선	기준만족
B400-B600 2회선	기준만족	B700-B800 2회선	기준만족
B500-B700 2회선	기준만족		

4.2 HILF 이벤트 대응 수단 시나리오 및 전력망 영향

4.1에서 설명한 Test System에 대한 Grid Resilience의 평가를 위하여 산악지역에 대형산불 발생 시나리오와 대응 수단별 시나리오를 아래의 표 3과 같이 가정하였다.

기본 시나리오인 S1의 경우 별다른 대응 수단이 없는 현재 상황을 고려한 것이며, S2의 경우 현재 한국전력공사에서 개발하고 있는 산불 감시 시스템이 도입된 것을 가정한 것이다. S3의 경우 논의는 되고 있으나 현실성이 낮은 대안으로 평가되는 산불확산 방지선 확대 구축을 고려한 것이며 S4의 경우 산악지역을 우회하는 선로를 추가 건설하는 시나리오로 현실적으로 어려운 대안이지만 효과는 확실할 것으로 기대되기 때

문에 마지막 시나리오로 고려하였다.

표 3 Grid Resilience 평가를 위한 HILF 이벤트 시나리오

Table 3 Event Scenarios for Grid Resilience Assessment

번호	HILF 이벤트	대응수단	전력망 영향
S1	산악지역 대형산불 발생	-	산악지역 경과 송전선로 개방(18시간 지속)에 따른 송전용량 부족 및 이에 따른 공급지장 발생
S2	산악지역 대형산불 발생	산불 감시 시스템 도입	산불 감시 정보 활용한 신속한 송전선로 재투입으로 공급지장 지속시간 최소화
S3	산악지역 대형산불 발생	산불 확산 방지선 구축	산악지역 경과 송전선로 일부 개방으로 부분적 송전용량 부족 발생 (공급지장 미발생)
S4	산악지역 대형산불 발생	우회선로 건설	우회 송전선로를 통한 안정적인 송전 가능 (공급지장 미발생)

산악지역 대형산불 발생 시나리오(S1)에서 가정한 전제는 다음과 같다. 산악지역의 산불이 06시에 발생하여 익일 06시 까지 24시간 지속되었으며 산불 발생 6시간 이후인 12시에 산악 지역을 경과하는 송전선로 2개 루트 중 4회선이 개방되어 화력발전 단지와 도시지역을 연결하는 송전용량을 모두 상실하게 되면서 도시지역에 공급지장이 발생한다. 18시 일몰 이후 1.1GW의 태양광발전 출력이 상실되면서 추가로 공급지장이 증가한다. 익일 06시 산불 진화 직후 송전선로가 정상적으로 복구되어 2.5GW의 부하에 전력을 공급하였으며 0.6GW의 부하의 경우 12시간 이후 전력공급이 재개되었다. 단, Grid Resilience를 평가하는 기간의 전력수요는 최대수요로 동일 적용하였는데 이는 Grid Resilience 평가 결과에 대한 이해도를 높이기 위한 것이다.

산악지역 대형산불 발생(산불 감시 시스템 도입) 시나리오(S2)에서 가정한 전제는 다음과 같다. HILF 이벤트 발생 시나리오는 S1과 동일, 2개 루트의 송전선로가 동시에 개방되지만 산불 감시 정보를 활용하여 송전선로 개방 6시간 만에 1개 루트의 송전선로에 재투입이 성공하여 공급지장 지속시간을 최소화한다.

산악지역 대형산불 발생(산불 확산 방지선 구축) 시나리오(S3)에서 가정한 전제는 다음과 같다. HILF 이벤트 발생 시나리오는 S1과 동일, 송전선로 경과지 사이에 산불확산 방지선을 구축하여 두 개의 송전선로 루트가 동시에 개방되는 것을 방지하여 산불이 발생한 구역에 대한 송전선로 1개 루트만 개방되는 것을 가정하였다. 전전 상태를 유지한 송전선로 1개 루트의 송전용량으로 전력을 공급할 수 있기 때문에 공급지장이 발생하지 않는다. 단, 산악지역 전체에 대한 산불 확산 방지선 구축 및 운영에 큰 비용이 수반되며 산림훼손이 불가피하다는 대응 수단의 단점이 있다.

산악지역 대형산불 발생(우회 선로 건설) 시나리오(S4)에서 가정한 전제는 다음과 같다. HILF 이벤트 발생 시나리오는 S1

과 동일, 산악지역을 우회하는 송전선로를 건설하여 산불의 발생 시에도 발전지역의 발전량을 도시지역으로 송전할 수 있기 때문에 공급지장이 발생하지 않는다. 단, 산악지역을 우회하거나 지중화된 추가적인 송전선로의 건설이 필요하기 때문에 막대한 건설비용이 수반되며 상시 이용률이 낮아지는 대응 수단의 단점이 있다.

4.3 Resilience Curve 생성 결과

상기 표 3의 각 시나리오(S1~S4)에 대한 Resilience Curve를 아래의 그림 4~7과 같이 산출하였다. Resilience Curve에서 y축은 단위가 없어 별도로 표시하지 않았다.

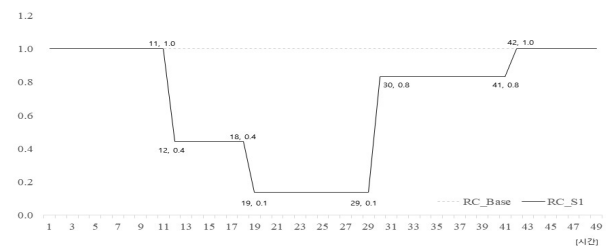


그림 4 시나리오 S1에 대한 Resilience Curve 산정 결과

Fig. 4 Resilience Curve for Scenario S1

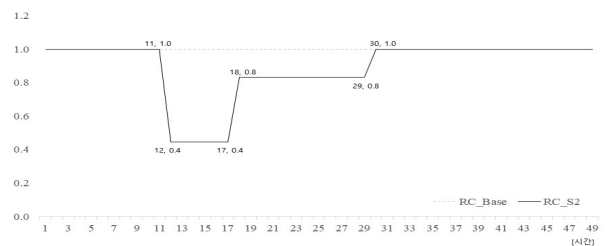


그림 5 시나리오 S2에 대한 Resilience Curve 산정 결과

Fig. 5 Resilience Curve for Scenario S2



그림 6 시나리오 S3에 대한 Resilience Curve 산정 결과

Fig. 6 Resilience Curve for Scenario S3



그림 7 시나리오 S4에 대한 Resilience Curve 산정 결과

Fig. 7 Resilience Curve for Scenario S4

시나리오별 Resilience Curve 산정 결과를 비교해 보면 대형 산불 발생에 대한 대응 수단이 없는 시나리오(S1)에 EDA가 가장 넓으며 대응 수단을 적용하면 EDA가 감소(S2) 또는 “0”이 되는(S3, S4) 것을 확인할 수 있다. 하지만 Resilience Curve만으로 전력망의 복원력 수준과 대응수단 적용에 대한 효과를 정량적으로 표현할 수는 없기 때문에 평가지표를 활용한 정량적 평가가 필요한 것이다.

4.4 평가지표 계산 결과

각 시나리오(S1~S4)에 대한 FLEP 및 등가 피해 면적의 평가지표는 아래의 표 4와 같이 계산되었다.

표 4 시나리오별 FLPE 및 등가 피해 면적 평가지표 산정 결과
Table 4 Assessment Results of FLPE and EDA index by Scenario

구분	산정 결과				단위
	S1	S2	S3	S4	
F (How Fast)	43.1	55.6	0.0	0.0	[%/Hour]
L (How Low)	86.1	55.6	0.0	0.0	[%]
E (How Extensive)	18.0	6.0	0.0	0.0	[Hours]
P (How Promptly)	12.0	12.0	0.0	0.0	[%/Hour]
EDA (Equivalent Damage Area)	15.4	5.3	0.0	0.0	[Hours]

시나리오 S1과 S2에 대한 각 평가지표 계산 결과, S1이 더욱 큰 피해(L)가 오래 지속(E)되는 것으로 나타났으며 회복의 속도(P)는 동일한 것으로 평가된다. 다만 평가지표 F의 경우 S1이 S2보다 낮게 산정되었는데 이유는 S1이 2시간에 걸쳐서 피해가 확산되었기 때문에 시간별 피해 확산 속도가 낮게 평가되었기 때문이다. 나머지 시나리오 S3, S4는 피해가 발생하지 않았기 때문에 모든 지표가 산정되지 않는다.

EDA의 경우, S1은 15.4 S2는 5.3으로 1/3수준으로 피해 수준이 감소 되는 것으로 산정되었으며 나머지 시나리오 S3, S4는 0.0으로 산정되었다.

평가지표 산정 결과 S3와 S4가 피해의 발생을 완전히 방지할 수 있는 대응수단을 포함한 시나리오로 판단할 수 있으나, 4.2절에서 언급한 바와 같이 S3와 S4는 막대한 비용이 수반되고 대규모의 산림훼손이 불가피하기 때문에 현실적인 대안이 아닐 수 있다. 현실성을 고려하였을 때 S2가 적절한 비용이 수반되면서 피해규모를 낮추어 줄 수 있는 시나리오로 평가된다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 연구에서 제안된 전력망 복원력의 평가 방법을 우리나라의 특성을 일부 반영한 Test System에 적용하여 대규모 산불 발생 및 대응 수단별 시나리오에 대한 정량적 평가를 수행하였다. 시나리오별로 Resilience Curve와 이를 기반으로 한 FLPE 평가지표 그리고 등가 피해면적법 등의 방법을 이용하여 정량적인 복원력 평가를 수행한 결과 대규모

산불로 인한 피해의 규모를 정량화 할 수 있었으며 대응 수단별 개선의 정도를 정량화 할 수 있었다.

그림 4에서 그림 7까지 시나리오별 Resilience Curve 산정 결과를 살펴보면 대응 수단이 고려되지 않는 경우(S1)에 산불이 완전히 소화될 때까지 송전선로의 재투입이 어렵기 때문에 일몰 이후 태양광 발전력의 추가적인 상실로 인한 시스템 성능 저하까지 더해져 피해의 정도가 가장 크고 지속시간이 가장 긴 것을 알 수 있다. 이에 비해 산불 감시 시스템을 도입하여 산불 진행의 상황을 실시간으로 감시하여 대응하는 경우(S2) 송전선로 중 일부를 빠르게 재투입함으로써 신속한 회복이 가능한 것으로 분석되었다.

산불확산 방지선의 구축(S3)이나 우회 선로의 추가 건설(S4) 대안의 경우 대규모 산불이 발생하더라도 산불이 두 개의 송전 선로에 동시에 영향을 주지 않거나 우회 선로가 확보되기 때문에 시스템의 성능이 저하되지 않는 결과를 얻었다.

표 4의 FLEP 지표 비교 결과, S3와 S4는 지표자체가 0으로 산정되었기 때문에 가장 우수한 것으로 나타났으나 S1과 S2의 경우 지표별로 우열이 다른 결과(F지수는 S1이 우수, L과 E지수는 S2가 우수, P지수는 동일)를 확인할 수가 있었으며 이는 Resilience Curve의 형태에 따른 차이인 것으로 분석되었다. 이러한 이유에서 등가 피해 면적(EDA)를 산정하여 보조적인 지표로 사용할 필요가 있다.

본 논문의 기술적 기여도는 선행 연구에서 제안한 FLEP 복원력 평가지표가 우리나라 전력 계통의 특성을 반영한 복원력의 정량적 평가에 적합함을 분석하고 보조적인 지표로써 EDA를 추가 활용하는 정량화 지표의 조합을 제안하였다는 것이다.

상기 정량적 평가지표는 시나리오별 소요 비용의 규모와 현실성을 포함하지 못하기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 국내 실계통에 대한 분석을 위한 틀개발과 다양한 HILF 이벤트 시나리오 개발도 필요하며 향후 연구를 통하여 개발된 내용은 후속 논문으로 발표할 계획이다.

References

- [1] Lin, J. -H.; Wu, Y. -K. Review of Power System Resilience Concept, Assessment, and Enhancement Measures. Appl. Sci. 2024, 14, 1428. <https://doi.org/10.3390/app14041428>
- [2] NREL, Adapting Existing Energy Planning, Simulation, and Operational Models for Resilience Analysis, TP-6A20-74241, Feb 2020, <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74241.pdf>
- [3] Jaegul Lee, “Evaluation and Management System of Resilience of Power Grid Resilience to Extreme Climate and External Impact,” The Korean Institute of Electrical Engineers Magazine, vol. 73, no. 5, May 2024.
- [4] Vega Penagos, C.A.; Diaz, J.L.; Rodriguez-Martinez, O.F.; Andrade, F.; Luna, A.C. Metrics and Strategies Used in Power Grid Resilience. Energies 2024, 17, 168. <https://doi.org/10.3390/en17010168>

- [5] E. Vugrin, A. Castillo, and C. Silva-Monroy, "Resilience metrics for the electric power system: A performance-based approach," Sandia Nat. Laboratories, Albuquerque, NM, USA, Tech. Rep. SAND2017-1493, 2017.
- [6] M. Panteli, and P. Mancarella, "The grid: Stronger, bigger, smarter?: Presenting a conceptual framework of power system resilience," IEEE Power Energy Mag., vol. 13, no. 3, pp. 58~66, May 2015.
- [7] J. Watson, R. Guttromson, and C. Silva-Monroy, "Conceptual framework for developing resilience metrics for the electricity, oil, and gas sectors in the United States," Sandia Nat. Laboratories, Albuquerque, NM, USA, Tech. Rep. SAND2014-18019, 2014.
- [8] S. Mousavizadeh, M. Haghifam, and M. Shariatkah, "A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources," Appl. Energy, vol. 211, pp. 443~460, Feb. 2018.
- [9] H. Zhang, Z. Bie, G. Li, and Y. Lin, "Assessment method and metrics of power system resilience after disasters," J. Eng., vol. 2019, no. 16, pp. 880~883, 2019.
- [10] A. Hussain, V. -H. Bui, and H. -M. Kim, "Resilience-oriented optimal operation of networked hybrid microgrids," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 1, pp. 204~215, Jan. 2019.
- [11] A. Hussain, A. Oulis Rousis, I. Konstantelos, G. Strbac, J. Jeon, and H. Kim, "Impact of uncertainties on resilient operation of microgrids: A data-driven approach," IEEE Access, vol. 7, pp. 14924~14937, Jan. 2019.
- [12] M. Panteli, and P. Mancarella, "The grid: Stronger, bigger, smarter?: Presenting a conceptual framework of power system resilience," IEEE Power Energy Mag., vol. 13, no. 3, pp. 58~66, May 2015.
- [13] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziargyriou, "Power systems resilience assessment: Hardening and smart operational enhancement strategies," Proc. IEEE, vol. 105, no. 7, pp. 1202~1213, Jul. 2017.
- [14] T. -H. Yoo and H. Park, "Modeling of Power System Resilience During a Catastrophic Disaster and Application of the Model," in IEEE Access, vol. 12, pp. 81550~81566, 2024.

저자소개



이재걸 (Jaegul Lee)

He received his B.S. and Ph.D. degrees from Incheon National University (Incheon, Korea) and Korea University (Seoul, Korea) in 2004 and 2024, respectively. Currently, he is a Principal Researcher at the Research Institute of Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Daejeon, Korea. His research interests include power systems and energy storage mix.



정슬영 (Solyoung Jung)

She received her B.S and M.S degrees in Electrical Engineering from SangMyung Univ, Seoul, Korea in 2015 and 2017, respectively. Currently, she is a Senior Researcher at the Research Institute of Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Daejeon, Korea. Her research interests include power system analysis, renewable energy integration study and FACTS planning.



이용승 (Yongseung Lee)

He received M.Sc. degree in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, Korea in 2016. He entered KEPCO Research Institute in 2016. His research interests are power system analysis and generation constraint assessment.



오승찬 (Seungchan Oh)

He received his B.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Korea University, Seoul, Korea, in 2011 and 2018, respectively. Currently, he is a Senior Researcher at the Research Institute of Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Daejeon, Korea. His research interests include power systems analysis transmission hosting capacity, and HVDC operation strategy.



배문성 (Moonsung Bae)

He received M.S and Ph.D degrees in electrical engineering on Korea University, Seoul. He is now working on KEPCO Research Institute since 2017 and main research interests are power system and market analysis, power system operation, renewable energy connection.



신정훈 (Jeonghoon Shin)

He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Kyungpook National University, Daegu, Korea, in 1993, 1995, and 2006, respectively. Since 1995, he has been with Korea Electric Power Corporation Research Institute (KEPRI), the research institute of Korea Electric Power Corporation. He is currently a Chief Researcher and leads the Power System Research Laboratory in KEPRI. From March 2003 to February 2004, he was a Visiting Scholar in EPRI(Electric Power Research Institute), Palo Alto, CA, USA. His research interests include IBR integration into power systems, wide area monitoring, protection and control systems based on synchro-phasor data, real-time digital simulations, and dynamic stability studies.