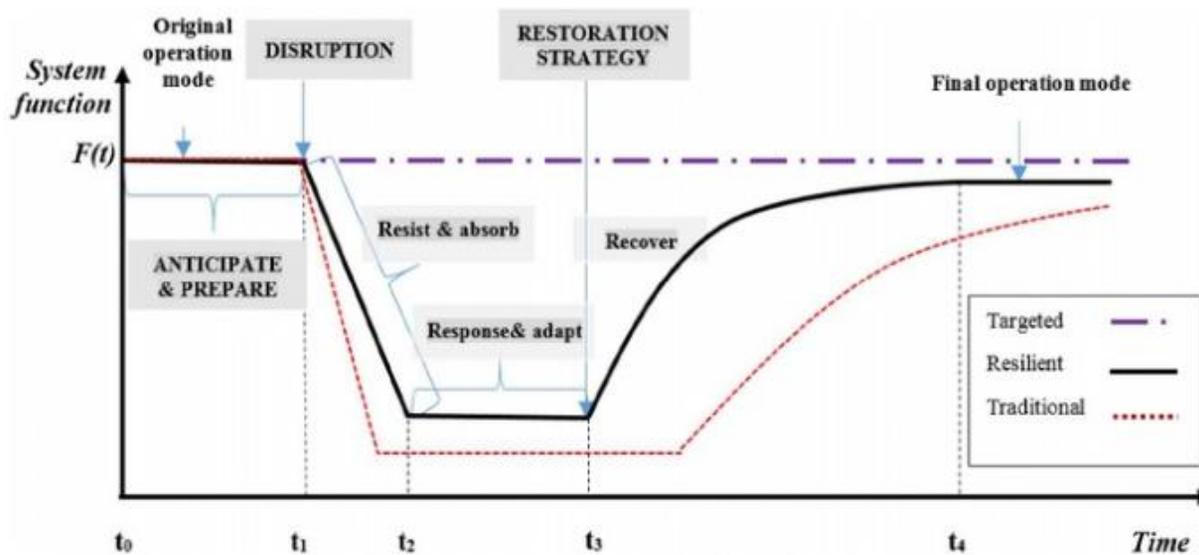


Outlook of Grid Resilience and its Development Direction

전력망 회복력 기술 동향 및 개발 방향

Yu-jin Kwon
 권유진, 한국전력공사



회복력(Resilience)은 일반적으로 다양한 대내외 충격으로 인한 피해를 극복하고 시스템 기능을 회복하는 능력을 일컫는 용어[1, 2]로, 시스템에 발생하는 각종 불안정성을 극복하고자 기존 상태를 유지하려는 역량까지 포괄하는 개념이다. 최근 국제적으로 빈번한 초대형 재난들이 연이어 발생함에 따라 국제기구나 각국 정부의 미래 대응 전략 수립 시 활발한 논의가 이루어지고 있다.

2011년 3월, 진도 9 레벨의 강 지진과 지진해일로 인한 사상 최악의 방사능 누출사고라고 일컫는 일본 후쿠시마 원전사고와, 2010년 국제 해커 집단에 의한 이란 핵시설 마비 등 산업시설 작동 교란을 유도 시킨 스텝스넷(stuxnet) 사이버 공격, 그리고 2017년 9월 미국령 푸에르토리코 허리케인 재해로 인한 최

대, 최장기간의 전력난까지, 전력 인프라에 대한 다양한 원인으로 인한 직간접적인 정전 피해가 발생하였고, 이는 최소 천명에서 수 백만명 이상을 대상으로 재산 및 인명에 피해를 입혔다고 집계하고 있다.

1. 전력망에서의 회복력(Resilience)의 정의

전력망에서의 회복력은 정전 피해를 최소화하기 위해 전력 시스템에서 발생할 수 있는 각종 불안정성을 최대한 극복하고자 하는 사전 대처능력과 정전사고 발생 시 피해를 최소화하고자 시행하는 대응 및 복구 능력을 모두 포괄적으로 일컫는다.[3]



저자 권유진 | 한국전력공사 전력연구원 융복합프로젝트연구소 신재생연계연구팀

권유진 선임연구원은 2009년 IBM Korea 한국지사 연구소에 입사하여 차세대 의료정보시스템 개인정보보호 관련 연구원으로 재직하였으며, 2012년 한국전력공사 전력연구원에 입사하여 제어시스템과 스마트그리드 정보보안 전문가로 활동하였다. 2017년부터 2019년 3월까지 미국 EPRI(Electric Power Research Institute) 전력연구소에 파견되어 해외 공동연구를 수행한 후, 전력연구원 연구전략실로 복귀하여 대외협력 업무를 담당하였다. 현재는 융복합프로젝트연구소 신재생연계연구팀에서 신재생 발전의 계통 연계 시 통신과 보안 연구를 수행 중이다.

회복력은 크게 4단계로 나뉘는데, 진행경과에 따라 재난 예상 및 사전대비(Anticipate& Prepare) 단계, 피해 방어 및 흡수(Resist & Absorb) 단계, 사고 대응 및 대안 마련(Response & Adapt) 단계, 사고 복구(Recover) 단계로 구분한다.

그림 2에서 진한 검정색 선은 회복력이 있는 전력시스템을 가리키는 것으로, 일반전력시스템 (빨간 점선)에 비하여 시스템 기능과 운영능력 $F(t)$ 이 상대적으로 적게 저하되고, 시간적으로도 신속하게 원상복구에 이르는 것을 확인할 수 있다.

먼저, 정전 등의 사고나 재난 피해에 대한 예측 능력과 사전 대비 능력을 갖추기 위해서는 1단계 $t_0 \sim t_1$ 구간에서 기상정보 예측시스템이나 피해 예측 의사결정시스템을 구축하여 사전 대비 및 분석 방법을 철저히 수립하는 방안이 가능하다.

이어서 정전 피해가 t_1 시점에 발생했을 시, 충격을 흡수하고 운영시스템에서 이를 방어하는 능력을 갖추기 위하여 2단계 $t_1 \sim t_2$ 구간에서 시스템 강화(System hardening) 전략을 수립하는 것이 가능하다. 대표적인 시스템 강화 전략으로는, 백업 시스템(주-예비 시스템) 구축, 보안 취약점 관리, 사용자 인증 및 제어 권한 구분, 가상환경 구축 등이 있다.[4] 이러한 방안을 도입할 경우, 사고가 발생한 이후에도 $t_1 \sim t_2$ 구간에서 시스템 기능과 운영능력이 상대적으로 적게 저하되었음을 확인할 수 있다.

전력망에서는 문제가 발생한 구간을 확인하거나, 새로운 계통 운영 비상 전략을 수립하는 작업을 $t_2 \sim t_3$ 구간에서 수행하는데 이를 3단계 피해 방어 및 흡수 단계로 간주한다. 이를 통해 문제가 발생한 일부 구간을 계통에서 절제하거나, 새로운 계통 운영 비상 전략을 시행하고 재난에서 원상 복구시키는 작업을 마지막 $t_3 \sim t_4$ 구간에서 수행하는데 이를 4단계 사고 대응 및 대안 마련 단계로 부른다.

최근 연구결과에 따르면, 전력망에서의 회복력을 강화하기 위해서는 기존과는 완전히 차별화된 새로운 계통과 전력 인프라의 설계와 운영 목표를 수립해야 한다는 목소리가 높아지고 있다. 기존에 운영 중인 계통 내에서 일부 시스템 강화방안을 적용하거나 피해 예측 시스템을 구축한다고 해서 얻을 수 있는 효과와 대응책에 한계가 있다는 것이 전문가들의 의견이다[5]. 전력 인프라와 같은 핵심기반시설의 경우, 희박한 확률로 발생하는 각종 테러 사고나 초대형 재난 등 극한의 상황까지도 고려한 회복력 강화 전략을 수립해야 하는데, 이는 갈수록 고도화된 의도적인 공격이나 예측이 불가능한 초대형 재난피해 등으로 인하여 전력 회사 입장에서는 새로운 관점에서 더욱 심도 깊고 다각화된 방안을 모색해야 하는 시점이라고 판단된다.

2. 관련 연구 현황

Resiliency Active R&D Project Update 자료에 의하면, 미국 EPRI에서는 전력망 회복력과 관련하여 7대 대응 연구 분야를 선정해 다양한 관점에서 연구를 수행하고 있으며 2019년 5월 개최된 EPRI/NATF Resilience Summit 행사를 통해 연구결과가 소개되었다[6].



Fig. 1. 각종 재난에 의한 전력망의 회복력

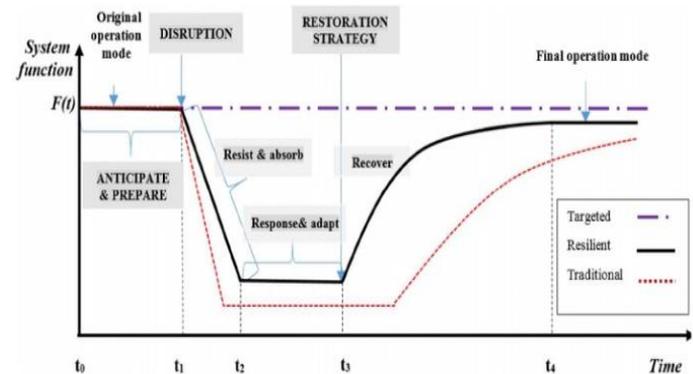


Fig. 2. 재난 발생경과에 따른 전력망 회복력 단계 구분

- ① 악천후(Severe weather),
- ② 사이버 공격(악성코드, 랜섬웨어)
- ③ 물리적 공격(비인가 구역 침입, 드론을 이용한 정찰, 총격)
- ④ 전자기 펄스(EMP)
- ⑤ 전자파 교란(IEMI 1)
- ⑥ 지상 기반 미사일 방어(GMD 2)
- ⑦ 비상 통신(Emergency communication)

¹ IEMI: Intentional Electromagnetic Interference, 의도적인 전자파 교란으로, GPS 신호나 무선 수신을 교란시키는 공격

² GMD: Ground-based Midcourse Defense, 미국의 대륙간 탄도 미사일 방어 시스템의 핵심으로 비행 단계에 요격하는 시스템

EPRI Resiliency-Security-Related Research Programs



Figure 3. 회복력 관련 연구 현황

2-1. 악천후(Severe Weather)

지구촌 곳곳에서 지구온난화와 기후변화로 인한 기상이변을 경험하고 있다. 지구 평균온도가 점진적으로 오르는 현상이 지구 온난화라면 기후변화는 기후 패턴이 예전처럼 예측 가능하지 않은 상황을 통틀어 일컫는 말이다. 지난 겨울 북반구에서는 한파와 폭설이 몰아치는 기상이변으로 곤욕을 치른 한편, 남반구는 폭염이 몰아쳤다. 호주 시드니의 경우 1939년 기상관측 시작 이후 가장 높은 47.3도까지 기온이 치솟았다고 한다.

이러한 급격한 기상이변 현상에 주목하고 기후전문가들을 활용하여 기후변화에 의한 전력망 이상 징후에 대한 진단과 장단기 변화 예측을 위하여 전국 전력망 종합 조사를 실시 하고 있다. 매년 미국 내 50개 주에서 발생한 기상이변을 분석하고 기상데이터를 관리하며 국가 전력망 회복력 강화 정책 수립에 활용하고 있다.

2-2. 사이버 공격(Cyber Attack)

사이버 공격이나 시스템에 내장된 보안취약점으로 인해 발생할 수 있는 각종 사이버 보안사고에 대비하고자 사이버보안 프로그램을 통해 보안위험지표(Risk Metric) 측정, 보안위협 대응(Threat Management), 디지털 포렌식 연구를 비롯한 다양한 연구를 수행 중이다.[7]

또한 NERC GridEx 미국 전력사 연합 사이버 모의 공격 훈련을 지원하여, EPRI 회원사들의 사이버 공격 대응능력을 향상시키고, 사이버 공격 분석 전문가간의 인적교류를 도모하고 있다. 차기 훈련은 제6차 GridEx로 21년 말 시행계획이다.[8]

2-3. 물리적 공격(Physical Attack)

발전소, 변전소 등 비인가 구역에 외부인이 무단 침입하거나 드론을 이용한 불법 정찰을 하고 충격 사고가 발생하는 등 다양한 물리적 공격사례들이 미국 전력사 현장에 발생하고 있다. 이를 위하여 실시간 충격이나 드론의 비행을 탐지할 수 있는 상용기술들을 조사하고, 전력망에 적용 가능한 핵심기술과 제품 군을 선별하는 연구가 진행되고 있다.

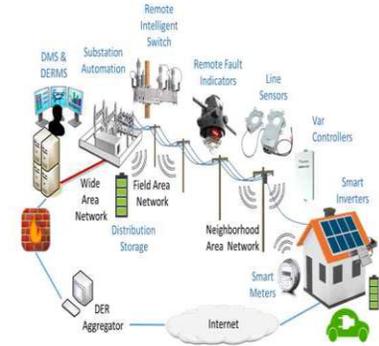
2-4. 전자기 펄스(EMP)

EMP(Electromagnetic Pulse) 현상은 매우 짧은 시간에 강력하게 발생하는 대량의 전자기파로 인해, 과전압 및 과전류가 발생하여 모든 전자장비와 기반시설의 회로를 녹여 복구가 불가능하다

Industry Trends Impacting Cyber Security Risk

Transmission & Distribution

- Operations and Maintenance
 - Real-time situational awareness
 - Dynamic supply / demand balancing with DER (DERMS)
 - Mobile workforce
 - Increased automation and communications



Increasing Security Threats

- Increasingly numerous and advanced cyber security threats targeting electric utilities
- Deployment and rapid maturing of malware focusing on power delivery systems

Figure 4. 사이버 공격 송배전망 위험분석



Fig.5. 물리적 공격 드론을 이용한 정찰

록 무력화시키는 재해로 미국 전력회사도 관심이 크다. 이에 EPRI에서는 DOE산하 국립연구소들과의 협력을 통해 전자기파의 종류(E1, E2, E3)에 따라 영향을 받을 가능성이 있는 전력설비를 구분하고, 전력사들이 합의한 우선순위에 따라 EMP 방호 대책을 수립하는 연구를 수행 중이다.

주로 IED장비와 SCADA 시스템, 그리고 통신설비와 제어센터가 E1 파장에 의한 피해를 입을 것으로 예측하여, E1 파장으로 인

E3: Transformer Failure Assessment

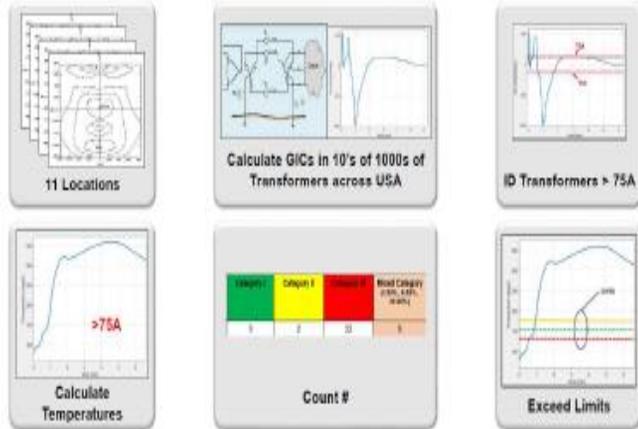


Fig. 6. 전자기 펄스(EMP)



Fig. 7. 비상통신 장비

한 장비 파괴나 정전 피해를 최소화하기 위한 방호 기술을 연구한다. 또한 E3 파장에 의하여 변압기의 고장이 발생하거나 전압이 충돌하는 피해 등이 가능하며, 이를 투자비용 대비 가장 효과적으로 예방할 수 있는 기술을 제시하고, 전력사에 시연을 통해 대책을 강구할 수 있도록 돕는다.

2-5. 비상 통신(Emergency Communication)

초대형 재난으로 인해 통신 기지국이 타격을 입고, 전기와 유무선 통신 연락이 모두 두절되었을 시 전력사가 갖추어야 하는 비상 통신 체계에 대하여 EPRI에서는 Black Sky Communications 프로젝트를 통해 연구 중이다. [10] 배터리나 태양 전지를 사용하여 고주파(HF)나 초고주파(UHF) 안테나를 가동시켜, 아마추어 무선선을 이용한 교신을 시도한다.

한편 NATF 북미 송전 협회와 공동연구 중인 Spare Tire 프로젝트를 통해 초대형 재난이 발생했을 때 가장 먼저 복구되어야 할



Figure 8. 제 5 차 한미 에너지안보 대화

영역으로 북미 전력사들은 비상 통신을 꼽았으며, 외부와의 음성통화가 1순위, SCADA 시스템 복구가 2순위, 원격제어와 통신을 위한 ICCP 시스템 복구가 3순위로 결정되었다. 미국 뉴욕주에 위치한 ConEdison 전력사 내부 SCADA 시스템에서 실증시험을 수행한 결과, 고주파(HF) 안테나를 이용해 SCADA 비상가동을 시행할 수 있었으나 현실적으로는 많은 기능과 성능의 제약사항이 있고, 주파수 대역에 따라 잡음이 발생하여 음성통화도 일시적으로 매끄럽지 않음을 확인했다.

3. 결론 및 시사점

전력망의 회복력 강화를 위해서는 예방, 생존, 복원의 3가지 전략이 모두 필요하다. 먼저 예방(Prevention)을 위해서는 시설 설계, 구현, 검사, 유지보수 등 설비 운영의 모든 단계에 재난 안전 대비책을 점검하고 강화하는 노력이 검토되어야 한다. 이후 생존(Survivability)을 위하여, 정전 발생 시 비상 전력 구동으로 핵심 시설의 전력공급을 유지하고 비상 통신을 가동하여 신속히 재난사고를 전파할 수 있는 방안이 마련되어야 한다. 마지막으로 복원(Restoration)을 위해서는 전력 설비나 서비스를 이전의 상태로 회복시키고, 정상적으로 재구동 하는 기술적, 정책적 논의가 필요하다.

현재 미국 내 주 관심사는 재난 발생 이후의 '복원' 관련 정책과 기술에 가장 초점을 맞추고 있다. 특히 복원에 소요되는 시간과 비용 대비 전력 인프라를 복원시키는 최적의 기술을 확보하는 것이 시급하다고 판단된다. 지난 6월, 워싱턴 DC에서 개최된 제5차 한미 에너지안보 대화(S. Korea - US Energy Security Dialogue)에서도 미국 정부는 전력망 복원에 대한 연구와 투자를 활발히 진행 중임을 확인할 수 있었다. 미국령 푸에르토리코는 허리케인 피해로 인해 재해 발생 후 3개월 동안 전력 인프라의 약 60%만 복원된 것으로 파악되었다. 이와 관련하여 대정전 사고 이후 복구기술을 검토하고 악천후를 대비한 전력망 복원 정책에 대한 논의를 지속하기로 합의했다.

사이버 회복력과 관련하여서는 NERC(북미 전력계통 신뢰도 관리기구)에서 주관하고 있는 E-ISAC(Electricity Information

Sharing and Analysis Center) 전력 사이버 정보공유 센터[12]를 통해 미국 FBI에서 분석한 최신 보안 공격의 세부 정보와 탐지 규칙(Signature)을 미국 전력사에게 무상으로 공유할 뿐 아니라 해외 전력사와도 상호적으로 정보를 연계하고 공유할 것을 논의하였

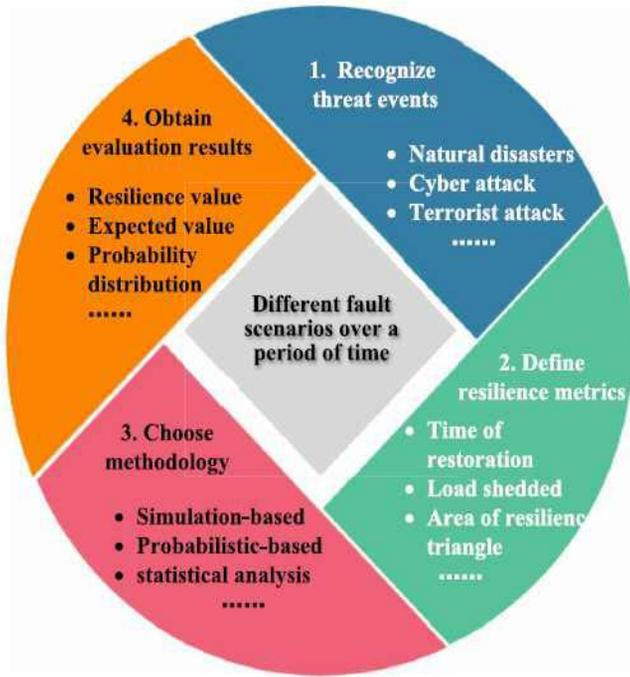


Fig. 3. 전력망 회복력 프레임워크 [3]

다. 또한 NERC GridEx 제5차 미국 전력사 연합 사이버 모의 훈련에 참여하여 한전과 발전 자회사의 사이버 공격 대응능력을 향상시키고 사이버 공격 분석 전문가간의 인적교류를 도모하는 방안을 논의하였다.

갈수록 고도화된 의도적인 공격이나 예측이 불가능한 초대형 재난피해 등으로 인하여 전력사들 입장에서는 새로운 관점에서 더욱 심도 깊고 다각화된 방안을 모색해야 한다. 전력망에서의 회복력을 강화하기 위하여 기존과는 완전히 차별화된 새로운 계통과 전력 인프라의 설계와 운영 목표를 수립해야 한다. 또한 전력망 주요 회복력 대응 분야별 복원 기술을 전반적으로 검토하고 응용할 필요가 있다고 판단된다.

References

- [1] C. S. Holling, "Resilience and stability of ecological systems," *Ecology*, vol. 4, no. 1, pp. 1-3, 1973.
- [2] Third UN World Conference on Disaster Risk Reduction, United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), Sendai, Japan, 2015.
- [3] IEEE Invited Paper Vol 105, No 7, 'A Study on the Power System Resilience' '17. 7.
- [4] <https://techterms.com/definition/systemhardening>
- [5] D. W. Cooke, *The Resilience of the Electric Power Delivery System in Response to Terrorism and Natural Disasters: Summary of a Workshop*. Washington, DC, USA, 2013
- [6] EPRI Resiliency Active R&D Project Update, '18. 5. 22
- [7] EPRI Resiliency Security, TAG Project, Ralph King, '18.5.22
- [8] <https://www.nerc.com/pa/CI/CIPOutreach/Pages/GridEX.aspx>
- [9] EPRI/NATF Transmission Resiliency Summit, EMP Presentation, Andrew Phillips
- [10] EPRI/NATF Transmission Resiliency Summit, EPRI Black Sky Communications, Tim Godfrey
<http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2018/06/11/0200000000A KR20180611117700014.HTML>
- [12] E-ISAC <https://www.eisac.com>