

소외전력망의 태풍 동반 강풍 확률론적 안전성 평가

김건규*^{ORCID} · 광신영**^{ORCID} · 임승현***^{ORCID} · 진승섭****^{ORCID}

Kim, Gungyu*^{ORCID}, Kwag, Shinyoung**^{ORCID}, Eem, Seunghyun***^{ORCID}, Jin, Seung-Seop****^{ORCID}

Probabilistic Safety Assessment of Offsite Power System Under Typhoon-induced High Wind

ABSTRACT

Recently, the intensity and frequency of typhoons have been increasing due to climate change, and typhoons can cause a loss of offsite power (LOOP) at nuclear power plants (NPPs). Therefore, it is necessary to prepare for typhoon-induced high winds through the probabilistic safety assessment (PSA) of offsite power systems. However, research on PSA for offsite power system in NPPs under typhoon-induced high winds is still lacking. In this study, PSA was performed for offsite power systems subjected to typhoon-induced high winds at the Kori NPP site, which has experienced frequent damages to its offsite power system among NPP sites in Korea. In order to perform PSA for typhoon-induced high winds in offsite power systems, the typhoon hazard at Kori NPP site was derived using logic tree and Monte Carlo simulation. Utilizing the fragility of components constituting the power system, performed a fragility analysis of the power system. Lastly, the probability that offsite power system will not be able to supply power to the NPP was derived.

Keywords : Probabilistic Safety Assessment (PSA), Off-site power system, Loss of offsite power (LOOP), Typhoon induced high winds, Risk

초 록

최근 기후변화로 인해 태풍의 강도와 빈도가 증가하고 있으며, 태풍은 원자력발전소의 소외전원상실(LOOP)을 발생시킬 수 있다. 따라서, 태풍 동반 강풍에 대한 소외전력망의 확률론적 안전성 평가(PSA)를 통한 대비가 필요하다. 하지만, 원자력발전소의 소외전력망에 대한 태풍 동반 강풍 PSA 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 국내원전부지 중 소외전력망의 피해가 잦았던 고리원전부지를 대상으로 소외전력망의 태풍 동반 강풍에 의한 PSA를 수행하였다. 태풍 동반 강풍에 의한 소외전력망의 PSA를 수행하기 위해 고리원전부지의 태풍재해도를 Logic Tree와 Monte Carlo Simulation을 활용하여 도출하였다. 전력망을 구성하는 요소의 취약도를 활용하여 전력망의 취약도 분석을 수행하였다. 최종적으로 소외전력망이 원자력발전소에 전력을 공급하지 못할 확률을 정량적으로 분석하였다.

검색어 : 확률론적 안전성 평가, 소외전력망, 소외전원상실, 태풍 동반 강풍, 리스크

1. 서론

‘한국 기후변화 평가보고서 2020’에 따르면 태풍의 강도와 빈도는 지속적으로 증가하는 추세이다(Kim et al., 2020). 태풍 동반 강풍은 전력망을 파손시킬 수 있으며, 이로 인해 원자력발전소에 외부전력을 공급하지 못하여 원자력발전소에 소외전원상실 사건(LOOP:

* 경북대학교 융복합시스템공학과 박사과정, 공학석사 (Kyungpook National University · gungyu819@knu.ac.kr)

** 정회원 · 국립한밭대학교 건설환경공학과, 부교수 (Hanbat National University · skwag@hanbat.ac.kr)

*** 정회원 · 교신저자 · 경북대학교 융복합시스템공학과 부교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · eemsh@knu.ac.kr)

**** 정회원 · 세종대학교 건설환경공학과, 조교수 (Sejong University · seungsab@sejong.ac.kr)

Received December 7, 2023/ revised January 26, 2024/ accepted January 28, 2024

Loss of Offsite Power)을 유발할 수 있다(Choun and Kim, 2019; Wang et al., 2020). 미국 Turkey Point NPP에서는 허리케인 (Andrew, 1992)으로 인해 5일간 LOOP 사건이 발생한 사례가 있었다(Kopytko and Perkins, 2011). Waterford NPP에서 허리케인(Katrina, 2005)으로 인해 4일간 LOOP 사건이 발생하였다(Hansen, 2007). 국내의 경우 고리원자력발전소에서 태풍(베라호, 1986)으로 인해 송전선로의 고장으로 원자료가 정지 및 LOOP 사건이 있었으며, 태풍(마이삭, 2020)으로 인해 LOOP 사건이 발생하지는 않았지만, 원자로 자동정지 및 비상디젤발전기가 자동으로 가동되는 사건이 있었다(KINS, 2023). 한국에서는 원자력발전소의 외부사건이 1978년 4월부터 2021년 6월까지 총 70건 발생하였으며 그중 소외전원에 대한 사건은 21건이며, 강풍/태풍에 의한 사건이 11건으로 가장 많았다(KINS, 2023). 따라서, 태풍 동반 강풍으로 인해 원자력발전소에 LOOP 사건이 발생할 수 있어 소외전원의 확률론적 안전성 평가가 필요하다.

확률론적 안전성 평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment)는 잠재적으로 발생할 수 있는 재해에 대해 대상 시스템의 안전성을 평가하는 방법이다(Kim, 2017). 강풍에 대한 PSA와 전력망과 관련된 연구로는 Kančev et al.(2007)과 Oliva(2019)에 의한 전력 시스템에 관한 PSA의 연구를 수행하였다(Kančev et al., 2007; Oliva, 2019). Salman and Li(2017)는 전력망에 대한 확률론적 지진 안전성 평가 방법론에 관한 연구를 수행하였다(Salman and Li, 2017). Wang et al.(2020)은 원자력발전소에 대한 태풍 동반 강풍에 대한 PSA 연구를 수행하였다(Wang et al., 2020). 그러나, 원자력발전소의 전력을 공급하는 소외전력망에 대한 태풍 동반 강풍에 의한 PSA 연구는 미흡하다.

본 연구에서는 원자력발전소의 소외전력망에 대한 태풍 동반 강풍의 PSA를 수행하였다. 대상 원자력발전소는 태풍으로 인한 소외전원의 피해가 많이 발생한 고리원자력발전소의 소외전력망이다(KINS, 2023). 태풍 동반 강풍의 PSA를 수행하기 위한 고리원전 부지의 태풍재해도를 Choun and Kim(2019)의 방법을 활용하여 도출하였다(Choun and Kim, 2019). 소외전력망을 구성하고 전력망을 구성하는 요소의 취약도는 Ravindra의 연구를 활용하였다(Ravindra, 1993). 이후, 전력망의 구성요소간 완전독립으로 가정하여 전력망의 취약도를 도출하였다(Eem et al., 2023). 마지막으로 태풍재해도와 전력망의 취약도를 활용하여 소외전력망이 원자력발전소에 전력을 공급하지 못할 확률을 분석하였다.

2. 전력망의 태풍 동반 강풍 확률론적 안전성 평가 방법

태풍 동반 강풍에 의한 소외전력망의 PSA는 다음과 같은 방법으로 수행한다. 먼저, 해당부지의 태풍재해도를 도출하고, 전력망의

구성요소에 대한 강풍취약도 분석을 수행한다. 이후, 전력망 구성요소의 강풍취약도를 활용하여 전력망의 강풍취약도를 분석한다. 마지막으로, 태풍재해도와 전력망의 강풍취약도의 컨볼루션하여 리스크를 도출한다. 따라서, 태풍 동반 강풍에 의한 소외전력망의 PSA를 수행하기 위해서는 해당부지의 태풍재해도와 전력망의 구성요소에 대한 강풍취약도가 필요하다. 태풍 동반 강풍의 재해도는 Choun and Kim(2019)의 방법을 활용하여 미국 NRC(2011)에서 요구하는 원자력발전소의 허리케인 설계기준인 연 초과 확률 1×10^{-7} 에 해당하는 풍속까지 도출하였다(US NRC, 2011; Choun and Kim, 2019). 또한, 소외전력망의 강풍에 의한 취약도 평가를 수행하기 위한 전력망을 구성하는 요소의 취약도는 Ravindra의 원자력발전소의 SSCs에 대한 취약도를 제시하는 연구에서 제공하는 식을 활용하였다. 최종적으로, Eq. (1)을 활용하여 태풍 동반 강풍에 의한 소외전력망이 원자력발전소에 전력을 공급하지 못할 확률을 도출하였다. 대상 부지로 선정된 고리원전부지에 대하여 태풍 동반 강풍의 재해도 분석과 소외전력망의 취약도 분석을 수행하였다.

$$Risk = \int_{-\infty}^{\infty} P_f(V) \left| \frac{dH(V)}{dV} \right| dV \quad (1)$$

여기서, V 는 풍속의 강도, $P_f(V)$ 는 전력망의 태풍 동반 강풍의 취약도 곡선, $H(V)$ 는 태풍 동반 강풍 재해도 곡선이다.

2.1 태풍재해도 분석 방법

Choun and Kim(2019)은 인식론적 불확실성을 줄이기 위해 Logic Tree와 MCS를 활용하여 한반도의 서해안에 있는 한빛 원전부지의 태풍재해도를 분석하는 연구를 수행하였고, 본 연구에서도 고리 원전부지에 대하여 같은 방법을 활용하여 태풍재해도를 도출하였다(Choun and Kim, 2019). 일반적으로 바람장 모델은 Holland 모델을 주로 사용한다(Holland, 1980). Holland 모델은 Gradient wind speed ($V_g(r)$)를 도출할 수 있으며, 이 모델은 Eq. (2)에 나타냈다(Holland, 1980). Gradient wind speed를 도출하기 위해서는 중심기압차(Δp), Radial of Maximum Wind (RMW), 기압 프로파일 계수(B), 태풍 중심과의 거리(r)가 필요하다. Logic tree는 주요 매개변수의 확률분포모델과 확률분포의 가중치로 구성된다.

$$V_g(r) = \sqrt{\frac{f^2 r^2}{4} + \frac{B \Delta p}{\rho} \left(\frac{r_{MW}}{r}\right)^B \exp\left(-\left(\frac{r_{MW}}{r}\right)^B\right) - \frac{fr}{2}} \quad (2)$$

여기서, $V_g(r)$ 는 태풍의 중심에서 r 만큼 떨어진 곳의 경고도 풍속, f 는 코리올리 파라미터($f=2\Omega \sin \psi$, 여기서 Ω 는 지구의 회전 각속도($\Omega=7.929 \times 10^{-5}$ rad/s), ψ 는 위도($^\circ$)), ρ 는 공기밀도($\rho=1.15$

kg/m³), Δ*p*는 중심기압차(hPa), *r_{MW}*는 태풍 중심에서 최대풍속이 발생한 지점까지의 거리(km), *B*는 기압프로파일 계수이다.

주요 매개변수의 확률분포 모델은 다음과 같이 정의하였다: 중심기압차는 Weibull과 Lognormal 분포, RMW 모델은 Vickery et al.(2000)의 *r_{MW}*와 *r_{MW}*±2σ (표준 편차), 기압프로파일 계수의 모델은 Holland(0.7)과 Powell et al.(2005) 모델, 태풍 중심과의 거리는 Uniform 분포를 사용하였다(Vickery et al., 2000; Holland, 1980; Powell et al., 2005). RMW의 Vickery et al. (2000) 모델은 Eq. (3)에 나타냈다(Vickery et al., 2000).

$$\ln(r_{MW}) = 2.636 - 0.00005086\Delta p^2 + 0.0394899\psi \quad (3a)$$

$$\sigma_{\ln(r_{MW})} = 0.3778 \quad (3b)$$

여기서, Δ*p*는 중심기압차(hPa), ψ는 위도(°), *r_{MW}*는 태풍 중심에서 최대풍속이 발생한 지점까지의 거리(km)이다.

기압 프로파일 계수에 관한 Powell et al.(2005)의 모델은 Eq. (4)에 나타냈다. 확률분포모델의 가중치는 실제 관측데이터의 통계분석을 기반으로 결정하였다. 중심기압차는 Weibull과 Lognormal 분포로 설정하였으며, 가중치는 관측데이터와의 오차를 고려하여 결정하였다. RMW에 대한 Vickery et al.(2000) 모델의 가중치는 일관되게 설정하였다. 기압 프로파일 계수의 가중치는 Holland(0.7)과 Powell et al.(2005) 모델을 사용하여 각 모델의 Gradient Wind Speed를 도출하였다. 각 Gradient Wind Speed 모델에 가중치를 주어 관측데이터(RMW, 34 kt 및 50 kt의 반경)를 가장 잘 일치하도록 설정하였다.

$$B = 1.881093 - 0.005567r_{MW} - 0.010917\psi \quad (4)$$

여기서, *r_{MW}*는 태풍 중심에서 최대풍속이 발생한 지점까지의 거리(km), ψ는 위도(°), *B*는 기압 프로파일 계수이다.

바람장 모델을 통해 도출된 풍속은 Gradient Wind Speed를 나타낸다. 그러나, 지면 근처에서는 마찰력으로 인해 평균풍속이 감소한다. 송전탑의 내풍해석을 위해서는 지표면으로부터 10 m 높이의 10분 평균풍속이 필요하다(KEPCO, 2013). 지표면으로부터 10 m의 풍속 도출하기 위해 Vickery and Twisdale 모델을 활용하였다(Vickery and Twisdale, 1995). Vickery and Twisdale의 모델은 Eq. (5)에 나타냈다(Vickery and Twisdale, 1995).

$$V_s = \begin{cases} 0.825 \cdot V_g & r \leq 2r_{mw} \\ (0.9 - 0.375 \cdot (r/r_{mw} - 2)) \cdot V_g & 2r_{mw} < r < 4r_{mw} \\ 0.75 \cdot V_g & r \leq 4r_{mw} \end{cases} \quad (5)$$

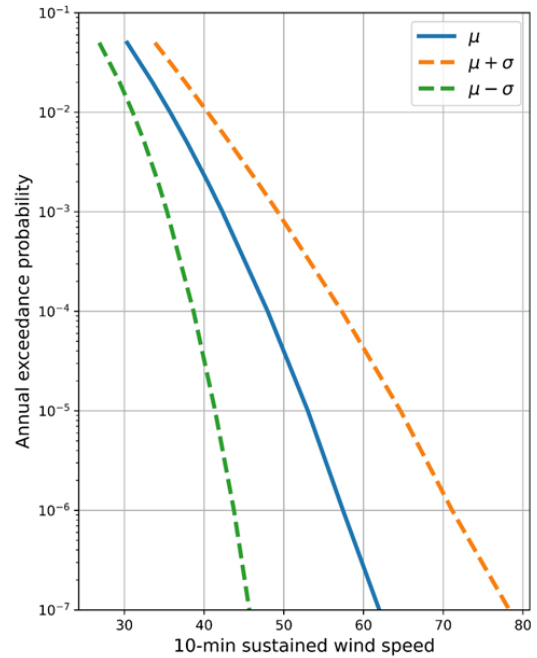


Fig. 1. Logic Tree Configuration Results by Kori Site

여기서, *V_s*는 수면 위 10 m 최대 평균풍속, *V_g*는 경고도 풍속, *r_{MW}*는 태풍 중심에서 최대풍속이 발생한 지점까지의 거리(km)이다.

고리원전부지의 Logic Tree를 활용하여 연초과확률 1×10⁻⁷에 해당하는 풍속을 도출하기 위해 MCS 횟수를 1×10⁷회 이상 수행하였다. 태풍재해도의 결과는 지표면 10 m에서의 10분 평균풍속을 나타낸다. Fig. 1은 고리원전부지의 태풍재해도 곡선을 나타내며, 태풍재해도의 재현주기가 길어질수록 분산이 증가하는 경향을 보였다. 고리원전부지의 태풍재해도는 1×10⁻⁷에 해당하는 평균재해도의 풍속은 61.98 m/s가 도출되었다.

2.2 전력망의 취약도 도출 방법

2.2.1 전력망의 구축

전력망은 송전탑, 송전선로, 발전소, 변전소 등으로 구성되어 있다. An et al.(2018)와 Zhang and Xie(2019)의 태풍 동반 강풍에 의한 전력망의 고장모드를 분석한 연구에서 다양한 원인이 있었으며, 송전탑의 파괴가 주된 원인으로 분석되었다(An et al., 2018; Zhang and Xie, 2019). 전력망의 복합 재해(지진, 허리케인)에 대한 연구에서는 변전소와 발전소는 강풍보다 지진에 취약하며, 송전탑은 지진보다 바람에 취약하다는 연구 결과를 도출하였다(Salman and Li, 2017). 본 연구에서는 태풍 동반 강풍에 대해 송전탑이 가장 취약한 요소로 고려하였으며, 변전소와 발전소는 태풍 동반 강풍에 의해 파손되지 않는다고 가정하였다.

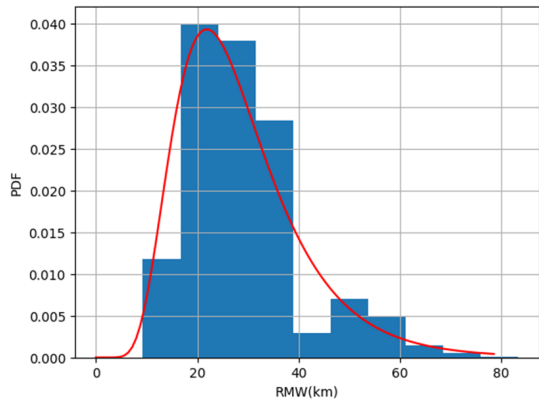


Fig. 2. Probability Density Function of RMW

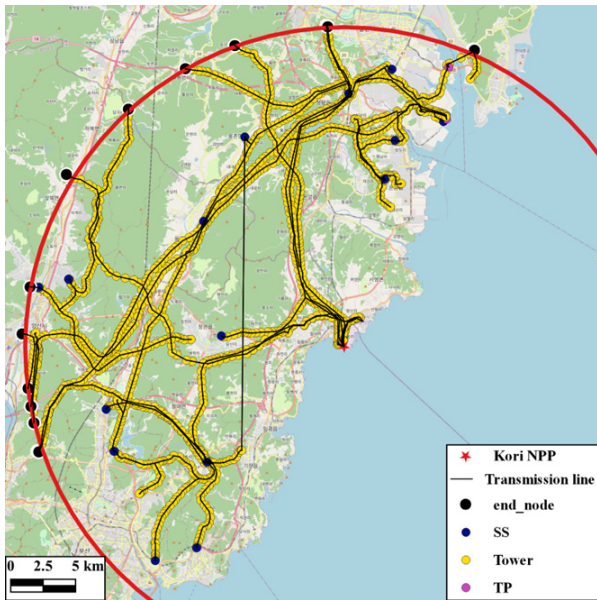


Fig. 3. Offsite Power System Constructed at the Kori NPP

소외전력망의 구성하는 데에 있어 전국의 전력망을 모두 구성하는 것은 효율적이지 못하다. 관심부지를 기준으로 태풍 동반 강풍에 의한 전력망의 영향반경을 설정하여 전력망을 구축하였다. 영향반경은 태풍데이터에서 최대풍속이 44 m/s 이상인 태풍에 대해 최대 풍속반경(RMW) 데이터를 추출하였다. 추출한 RMW데이터의 분포를 Fig. 2에 나타냈으며, RMW 분포의 평균은 26.17 km이다. 따라서, 고리원전부지에서 RMW 분포의 평균보다 더 넓은 30 km 반경으로 소외전력망을 구성하였다. Fig. 3에서는 구성된 전력망을 나타냈으며, 전력망 구성요소의 개수는 총 1,520개이다. 관심 범위 밖의 전력망 구성요소는 파손되지 않는다고 가정하였다.

2.2.2 전력망 구성요소의 취약도

강풍에 의한 전력망의 취약도를 평가하기 위해서는 전력망을

구성하는 요소에 대한 강풍취약도가 필요하다. 송전탑의 취약도는 Ravindra(1993)의 연구에서 제시된 원자력발전소의 SSCs에 대한 강풍취약도를 활용하였으며, Eq. (6)에 나타내었다(Ravindra, 1993).

$$V_m = \sqrt{1.1 \cdot 1.2 \cdot V_d^2}, \beta_r = 0.1, \beta_u = 0.15 \quad (6)$$

여기서, V_m 은 풍속의 중앙값, V_d 는 설계 풍속, β_r 은 랜덤성 대수표준편차, β_u 는 불확실성의 대수표준편차이다.

국내 가공송전용 철탑의 설계기준(DS-1111)에서 제시하는 지역구분에 따른 설계 풍속과 Ravindra에서 제시한 식을 활용하여 송전탑의 강풍취약도를 도출하였다(KEPCO, 2013). DS-1111에서 제공하는 설계기준 풍속 및 기준속도압을 Table 1에 나타냈으며, 기준속도압 및 최대풍속은 지상 10 m에서의 값을 표준으로 한다.

Table 1. Velocity Pressure and Maximum Wind Speed by Region Category (KEPCO, 2013)

Region category	Velocity pressure (kg/m ²)	Maximum wind speed (m/s)		Gust factor
		10-min average	3-sec Gust	
I	117	40.0	54.0	1.35
II	100	36.6	50.0	1.37
III	76	31.7	43.7	1.38

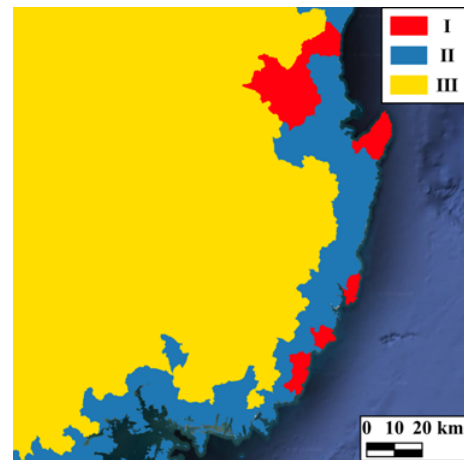


Fig. 4. Regional Classifications in DS-1111 (KEPCO, 2013)

Table 2. Fragility of Transmission Towers in the PSA of the Power System

Region category	V_m Estimation (m/s) 10-min average	β_c Estimation
I	48	0.136
II	43.92	
III	38.04	

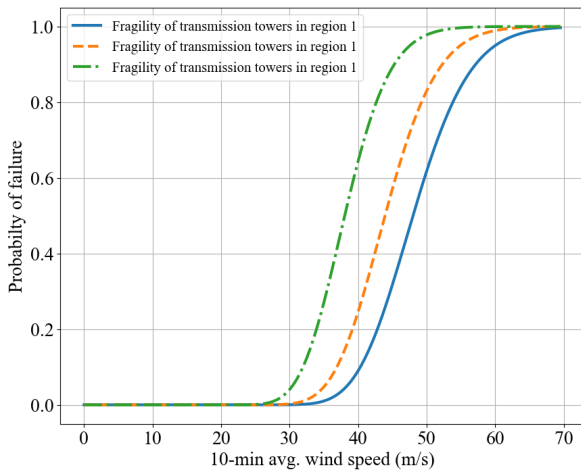


Fig. 5. Fragility Curves of Transmission Towers Based on Regional Classification

태풍재해도와 컨벌루션하기 위해 설계기준풍속을 10분 평균풍속을 사용하였다. Fig. 4은 DS-1111에서 제시한 고리부지인근의 지역구분을 나타내었다. 송전탑의 강풍취약도는 DS-1111의 지역구분에 따라 Table 2와 같이 설정하였다(Ravindra, 1993; KEPCO, 2013). Fig. 5은 각 지역구분별 송전탑의 취약도 곡선을 나타냈다.

3. 전력망의 확률론적 안전성 평가 결과

고리원전부지의 소외전력망을 대상으로 태풍 동반 강풍에 의한 PSA를 실시하여 정량적인 리스크를 도출하였다. 송전탑 간의 손상 확률은 서로 독립이라고 가정하였다. 소외전력망을 모두 네트워크 형태로 구성하며, 네트워크로 구성된 전력망 구성요소들의 연결성을 고려하여 전력망의 취약도를 도출하였다(Eem et al., 2023). 전력망의 취약도 곡선은 Fig. 6에 나타내었다. HCLPF(High

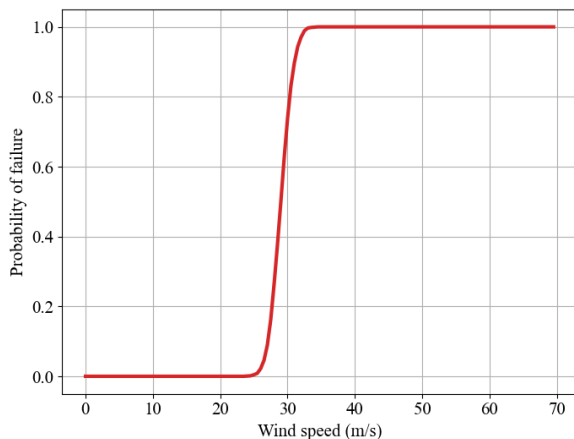


Fig. 6. Fragility Curve of the Power System

Confidence of Low Probability of Failure)는 25.59 m/s가 도출되었으며, V_m 은 29.02 m/s, β_c 는 0.05가 도출되었다.

태풍 동반 강풍에 의한 소외전력망의 PSA를 통해 고리원전부지 인근 소외전력망이 원자력발전소에 전력을 공급하지 못할 확률은 $4.8 \times 10^{-2}/\text{yr}$ 로 도출되었다. 따라서, PSA방법을 활용한 소외전력망의 태풍 동반 강풍 PSA를 통해 정량적인 리스크 결과를 제공할 수 있다. 평가 과정에서 전력망의 구성요소 간의 강풍에 의한 손상 상관성을 독립으로 가정하여 평가를 수행하였다. 하지만 태풍 동반 강풍에 의해 다수의 송전탑이 동시에 피해가 발생한 사례를 통해 송전탑 간의 손상확률의 상관계수를 고려한 PSA가 합리적인 리스크를 도출할 수 있을 것으로 판단된다(An et al., 2018; Zhang and Xie, 2019).

4. 결론





국내의 원자력발전소에서는 소외전력망과 관련된 외부사건 중 태풍/강풍에 의한 사건이 가장 많았다. 또한, 최근 기후변화와 지구 온난화로 인해 태풍의 강도와 빈도가 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 따라서 태풍에 의해 원자력발전소 LOOP 사건을 유발할 확률이 증가하고 있다. 태풍으로 인한 원자력발전소의 안전한 운영을 위해, 소외전력망의 안전성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 국내 원자력발전소 중 태풍으로 인한 피해가 잦았던 고리원자력발전소의 소외전력망에 대한 태풍 동반 강풍에 의한 PSA를 수행하였다. 태풍 동반 강풍에 의한 PSA의 수행을 위해 Logic Tree와 MCS를 활용하여 태풍재해도를 도출하였다. 또한, 태풍 동반 강풍에 의한 전력망의 구성요소 중에서 송전탑의 영향이 크다고 가정하여 전력망의 취약도를 도출하였다. 고리원자력발전소의 소외전력망에 대한 태풍 동반 강풍 PSA를 통해 소외전력망이 고리원전부지에 전력을 공급하지 못할 확률을 분석하였다. 분석 결과, 소외전력망이 고리원전부지에 전력을 공급하지 못할 확률은 $4.8 \times 10^{-2}/\text{yr}$ 의 리스크가 도출되었다. 원자력발전소의 소외전력망에 대한 태풍 동반 강풍에 의한 PSA를 통해 원자력발전소의 안정적인 운영에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgements

This work was partly supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government(MOTIE)(No. 20224B10200050) and National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (Ministry of Science and ICT) (No. RS-2022-00154571).

This paper has been written by modifying and supplementing the KSCE 2023 CONVENTION paper.

ORCID

Gungyu Kim  <https://orcid.org/0009-0001-3948-9291>
 Shinyoung Kwag  <https://orcid.org/0000-0003-4793-7776>
 Seunghyun Eem  <https://orcid.org/0000-0001-9776-5429>
 Seung-Seop Jin  <https://orcid.org/0000-0002-8652-3333>

References

- An, L., Wu, J., Zhang, Z. and Zhang, R. (2018). "Failure analysis of a lattice transmission tower collapse due to the super typhoon Rammasan in July 2014 in Hainan Province, China." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, Vol. 182, pp. 295-307, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.10.005>.
- Choun, Y. S. and Kim, M. K. (2019). "Logic tree approach for probabilistic typhoon wind hazard assessment." *Nuclear Engineering and Technology*, Korean Nuclear Society, Vol. 51, No. 2, pp. 607-617, <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.11.006>.
- Eem, S. H., Kwag, S. Y. and Hahm, D. G. (2023). "Development of network safety assessment methodology for loss of off-site power system." *Proceedings of Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Korea Nuclear Society, Jeju, Korea.
- Hansen, T. (2007). "Surviving a hurricane." *Power Engineering*, PennWell Publishing Corp., Vol. 111, No. 6, pp. 10-12.
- Holland, G. J. (1980). "An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes." *Monthly Weather Review*, AMS, Vol. 108, No. 8, pp. 1212-1218, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2).
- Kančev, D., Čausevski, A., Čepin, M. and Volkanovski, A. (2007). "Application of probabilistic safety assessment for macedonian electric power system." *Proceedings of International Conference Nuclear Energy for New Europe 2007*, Nuclear Society of Slovenia, Ljubljana.
- Kim, M. K. (2017). "Safety of nuclear power plant according to the 912 gyeongju earthquake in 2016." *KSCE Magazine*, KSCE, Vol. 65, No. 4, pp. 31-35 (in Korean).
- Kim, N. W., Lee, J. W., Joo, G. H. and Kim, S. H. (2020). "Korean Climate Change Assessment Report 2020 (The scientific basis for climate change)." Korea Meteorological Administration (in Korean).
- Kopytko, N. and Perkins, J. (2011). "Climate change, nuclear power, and the adaptation-mitigation dilemma." *Energy Policy*, Elsevier, Vol. 39, No. 1, pp. 318-333, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.046>.
- Korea Electric Power Corporation (KEPCO) (2013). *For over haed transmission tower design standard*, DS-1111 (in Korean).
- Korea Institute of Nuclear Safety (KINS) (2023). *Safety information by sector*, Available at: <https://nsc.nssc.go.kr/information/reguDataActive.do?nscDtaTyCode=nppAccient> (Accessed: August 20, 2023) (in Korean).
- Oliva, J. J. R. (2019). "The application of probabilistic safety assessment to electric transmission systems." *Ingeniería Energética*, Vol. 40, No. 1, pp. 63-72.
- Powell, M., Soukup, G., Cocke, S., Gulati, S., Morisseau-Leroy, N., Hamid, S., Dorst, N. and Axe, L. (2005). "State of florida hurricane loss projection model: Atmospheric science component." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, Vol. 93, No. 8, pp. 651-674, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.05.008>.
- Ravindra, M. K. (1993). "State-of-the-art and current research activities in extreme winds relating to design and evaluation of nuclear power plants." *The Tornado: Its structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, AGU, Vol. 79, pp. 389-397, <https://doi.org/10.1029/GM079p0389>.
- Salman, A. M. and Li, Y. (2017). "A probabilistic framework for seismic risk assessment of electric power systems." *Procedia Engineering*, Elsevier, Vol. 199, pp. 1187-1192, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.324>.
- US Nuclear Regulatory Commission (US NRC) (2011). *Design-basis hurricane and hurricane missiles for nuclear power plants*, regulatory guide 1.221, NRC, USA.
- Vickery, P. J., Skerlj, P. F. and Twisdale, L. A. (2000). "Simulation of hurricane risk in the US using empirical track model." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 10, pp. 1222-1237, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:10\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:10(1222)).
- Vickery, P. J. and Twisdale, L. A. (1995). "Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 11, pp. 1700-1709, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:11\(1700\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:11(1700)).
- Wang, H., Liang, X., Zhang, X. and Feng, B. (2020). "Study on high wind hazard probability risk assessment methods of nuclear power plant." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 467, No. 1, 012075, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012075>.
- Zhang, J. and Xie, Q. (2019). "Failure analysis of transmission tower subjected to strong wind load." *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 160, pp. 271-279, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.05.041>.