

풍력발전기를 포함하는 전력계통에서의 신뢰도 기반 HVDC 확충계획

Probabilistic Reliability Based HVDC Expansion Planning of Power System Including Wind Turbine Generators

오 웅 진* · 이 연 찬* · 최 재 석[†] · 윤 용 범** · 김 찬 기** · 임 진 택***
(Ungjin Oh · Yeonchan Lee · Jaeseok Choi · Yongbeum Yoon · Chan-Ki Kim · Jintaek Lim)

Abstract - New methodology for probabilistic reliability based grid expansion planning of HVDC in power system including Wind Turbine Generators(WTG) is developed in this paper. This problem is focused on scenario based optimal selection technique to decide best connection bus of new transmission lines of HVDC in view point of adequacy reliability in power system including WTG. This requires two kinds of modeling and simulation for reliability evaluation. One is how is reliability evaluation model and simulation of WTG. Another is to develop a failure model of HVDC. First, reliability evaluation of power system including WTG needs multi-state simulation methodology because of intermittent characteristics of wind speed and nonlinear generation curve of WTG. Reliability methodology of power system including WTG has already been developed with considering multi-state simulation over the years in the world. The multi-state model already developed by authors is used for WTG reliability simulation in this study. Second, the power system including HVDC includes AC/DC converter and DC/AC inverter substation. The substation is composed of a lot of thyristor devices, in which devices have possibility of failure occurrence in potential. Failure model of AC/DC converter and DC/AC inverter substation in order to simulate HVDC reliability is newly proposed in this paper. Furthermore, this problem should be formulated in hierarchical level II(HLII) reliability evaluation because of best bus choice problem for connecting new HVDC and transmission lines consideration. HLII reliability simulation technique is not simple but difficult and complex. CmRel program, which is adequacy reliability evaluation program developed by authors, is extended and developed for this study. Using proposed method, new HVDC connected bus point is able to be decided at best reliability level successfully. Methodology proposed in this paper is applied to small sized model power system.

Key Words : High Voltage Direct Current(HVDC), Wind Turbine Generator(WTG), HLII probabilistic reliability, HVDC expansion planning

1. 서 론

최근 전 세계적으로 스마트그리드의 활성화 및 슈퍼그리드의 현실화 그리고 신재생 에너지 발전원의 계통연계 급속화 등에서 발생하는 계통상의 신뢰도, 안정도 및 품질유지 문제점의 해결책 중 하나로 HVDC(High Voltage Direct Current)가 케이블 기술 및 AC/DC/AC 변환장치들의 급격한 기술발달로 전력계통 전면에 등장하게 되었다[1]. 확률론적 신뢰도에 기반한 HVDC 확충계획에 관한 근래의 국외연구로는 북유럽의 NORDIC 연구 및 캐나다 밴쿠버시와 밴쿠버섬과의 HVDC 타당성 조사 연구 등이 있다

[2-7]. 특히 캐나다 밴쿠버의 HVDC 연구는 공급지장비라는 경제성평가까지 내포하고 있으며 이는 앞으로 시사하는 바가 크다. HVDC를 기존의 전력계통에 투입한다는 것은 AC/DC/AC 변환장치들을 피할 수 없다. 이러한 변환장치들은 수많은 사이리스터로 구성되어있으며 이들 부품(Devices)들은 복잡하게 연결되어있으므로 상대적으로 고장율이 높다. 따라서 HVDC를 갖는 전력계통의 신뢰도를 평가한다는 것은 이들 AC/DC/AC 변환장치로 구성된 변환소의 고장율을 무시할 수 없으며 변환의 고장율을 평가하는 모델을 작성함이 선행조건이다. 그러나 HVDC를 고려한 확률론적인 신뢰도 평가에 관한 국내 연구는 거의 찾아볼 수 없는 실정이다.

한편, 신재생 에너지 발전원 중 하나인 풍력발전기(WTG; Wind Turbine Generator)는 간헐적이면서 통상 와이블 확률분포를 갖는 불확실성이 큰 풍속을 자원으로 삼고 있으므로 그 출력 또한 비슷한 특성을 지니며 인위적인 출력 제어가 곤란한 발전원이다. 나아가 풍력발전기 출력도 풍속에 따라서 출력시작(Cut-in), 정격출력(Rated), 출력종단점(Cut-out) 등이 존재하는 비선형적 특성을 지닌다. 이를 고려한 전력계통의 신뢰도 평가는

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Eng., RIGET, ERI, Gyeongsang National University, Republic of Korea.
E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Eng., Gyeongsang National University, Republic of Korea.

** KEPRI(KEPCO Research Institute), Republic of Korea.

***Dept. of Unmanned Aerial Vehicle, International University of Korea, Republic of Korea.

Received : September 18, 2017; Accepted : December 4, 2017

기존의 2개 상태로 모델링하여 처리하는 일반적인 발전기와는 다른 다개 상태의 출력모형으로 모델링하여야 한다.

풍력발전기 출력의 불확실성 및 기존발전기와 송전선로의 사고확률 그리고 HVDC의 사고확률까지 고려한 기본적인 방법은 이미 제시한바 있다[8-12]. 본 논문에서는 최근 급격히 부상하고 있는 HVDC의 확충계획을 신뢰도 관점에서 수립하는 방법을 제안하였다. 그리고 제안한 방법은 소규모 모델계통에 적용하여 그 효용성을 검증하였다.

2. HLII 유효부하 및 신뢰도 지수평가

2.1 HLII (Hierarchical level II)

HVDC 확충계획은 송전망계획의 하나이다. 그러므로 송전망까지 포함한 HLII에서의 신뢰도 평가가 필요하며 이는 쉽지 않다. 아래의 그림은 전력계통의 신뢰도평가를 위한 계층구조를 나타낸 것이다.

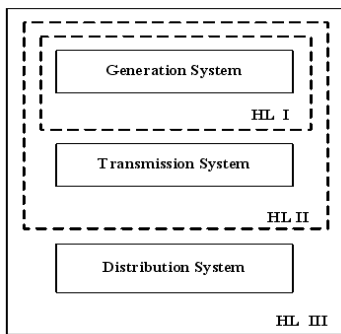


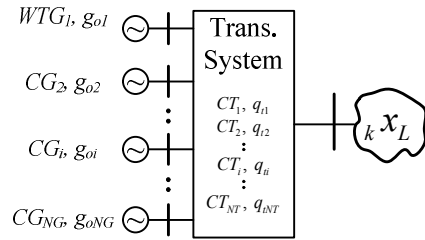
그림 1 전력계통의 신뢰도평가를 위한 계층구조
Fig. 1 Hierarchical structure for reliability evaluation of power system

그림 2는 발전계통 및 송전선로의 사고율등과 같은 불확실성까지 고려한 HLII에서의 신뢰도를 평가하기 위한 유효부하모델이다[8-12].

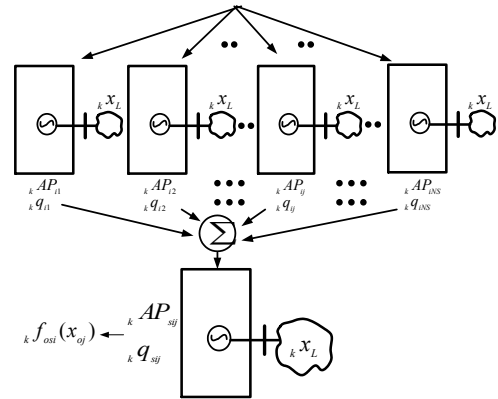
여기서 각 변수의 정의는 아래와 같다.

- CG, CT : 발전기 및 송전선로의 용량
- q, q_j : 각각 발전기와 송전선로의 사고율
- AP_{ij} : 임의의 부하지점에 용량
- kf_{osi} : k 부하지점에서의 #1 발전기부터 # i 발전기까지 운전된 경우의 종합적인 가상발전기(Synthesized fictitious generator)의 사고용량확률분포함수

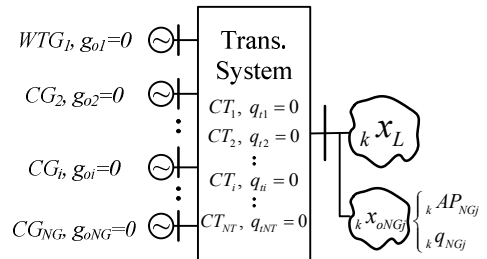
식 (1)과 같은 확률변수를 도입하고 WTG 출력의 불확실성을 다개상태로 모델링하면 HLII에서의 유효부하지속곡선은 식 (2)와 같다[8, 10]. (WTG의 다개상태 확률모형 및 이의 모의는 참고문헌 [10]을 참조 바람.)



(a) 풍력발전기를 포함한 실제 계통의 모델
(a) Actual system



(b) 풍력발전기를 고려한 계통의 가상 등가 발전기
(b) Synthesized fictitious equivalent generator



(c) 유효부하모델로 등가화 된 계통
(c) Equivalent system

그림 2 HLII에서의 복합 전력계통의 유효부하모델
Fig. 2 Composite power system effective load model at HLII

$$kx_e = kx_L + \sum_{j=1}^{NS} kx_{oj} \quad (1)$$

단,

- kx_e : k 부하지점에서 복합전력계통의 유효부하 확률변수
- kx_L : k 부하지점에서 확률적 계통부하의 확률변수
- kx_{oj} : k 부하지점에서 j 번째 사고 상태에서의 최대공급전력에 의한 확률적사고부하의 확률변수
- NS : 계통상태의 총 수

$$\begin{aligned}
 {}_k\Phi_i &= {}_k\Phi_{i-1} \otimes {}_k f_{osi} \\
 &= (1 - \sum_{n=1}^{NS} {}_k q_{ni}) {}_k\Phi_{i-1}(x) + \sum_{n=1}^{NS} {}_k q_{ni} {}_k\Phi_{i-1}(x - {}_k C_{ni})
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서,

x : 유효부하 Φ 의 확률변수

${}_k C_{ni}$: k 부하지점에서 가상발전기 상태 n 에서의 정전용량

${}_k q_{ni}$: k 부하지점에서 가상발전기 상태 n 에서의 사고확률

2.2 HLII의 모션 및 계통 신뢰도지수

2.2.1 모션별 신뢰도지수

k 모션에서의 유효부하속곡선 ${}_k\Phi_{NG}(x)$ 을 사용하여 # k 모션의 신뢰도지수인 공급지장시간기대치(LOLE _{k}), 공급지장에너지기대치(EENS _{k}) 및 EIR(Energy Index of Reliability)을 식 (3), 식 (4) 및 식 (5)처럼 구할 수 있다. 여기서, DENG _{k} 는 # k 모션에서의 총 부하에너지(Demand Energy)이다.

$$LOLE_k = {}_k\Phi_{NG}(x)|_{x=AP_k} \quad [\text{hours/yr}] \tag{3}$$

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k + L_{v_k}} {}_k\Phi_{NG}(x) dx \quad [\text{MWh/yr}] \tag{4}$$

$$EIR_k = 1 - EENS_k / DENG_k \quad [\text{pu}] \tag{5}$$

2.2.2 계통 신뢰도지수

계통전체의 EENS_{HLII}와 ELC_{HLII}(Expected load curtailed)는 식 (6) 및 식 (7)에 보인 것처럼 각각 모션별 EENS _{k} 합 및 ELC _{k} 합과 동일하다. 따라서 계통전체의 LOLEHLII는 식 (8)처럼 등가적으로 정식화된다[11].

$$EENS_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} EENS_k \quad [\text{MWh/yr}] \tag{6}$$

$$ELC_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} ELC_k \quad [\text{MW/cur.yr}] \tag{7}$$

$$LOLE_{HLII} = EENS_{HLII} / ELC_{HLII} \quad [\text{hours/yr}] \tag{8}$$

$$EIR_k = 1 - EENS_k / DENG_k \quad [\text{pu}] \tag{9}$$

여기서, NL : 총모션수

ELC _{k} : Expected load curtailed (=EENS _{k} /LOLE _{k})

DENG _{k} : # k 모션의 Demand energy [MWh]

3. 풍력발전기(WTG) 신뢰도 평가모델

3.1 풍력발전기의 다개상태 출력모델

풍력발전원의 출력은 풍속에 크게 의존한다. 전형적으로 풍력발전원의 실제 출력은 어느 이상의 풍속에서 출력을 내기 시작하

여 정규풍속에 도달하면 그때부터 정격출력을 발생하며, 또한 어느 이상의 풍속에서는 자체기보호를 위하여 전력을 발생하지 않는다. 그림 3은 이의 특성곡선을 보인 것이며, 출력은 식 (10)처럼 산정된다.[2-3, 11]

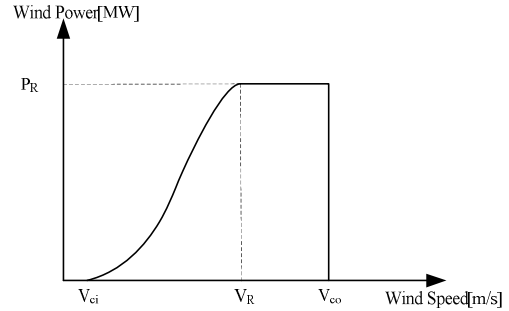


그림 3 풍력발전기의 전형적인 출력특성곡선

Fig. 3 A typical power output model of wind turbine generators (WTG)

$$\begin{aligned}
 P_i &= 0, & 0 \leq SW_{bi} < V_{ci} \\
 &= P_R \times (A + B \times V_i + C \times V_i^2), & V_{ci} \leq V_i < V_R \\
 &= P_R, & V_R \leq V_i < V_{co} \\
 &= 0, & V_{co} \leq V_i
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

단, P_i : 풍속 # i 의 대표 풍속 V_{0i} 에 해당하는 풍력발전원의 출력 [kW]

V_{ci} : 출력시작점 풍속(The cut-in speed) [m/sec]

V_R : 정격출력풍속(The rated speed) [m/sec]

V_{co} : 출력종단점 풍속(The cut-out speed) [m/sec]

P_R : 정격출력 [MW]

3.2 풍속모델

실제 풍속의 확률분포는 정규확률분포에 가까운 Weibull확률분포로 나타나는 것으로 알려져 있으며 그 모형은 이미 개발되어져 있다. 본 논문에서는 공통풍속모델(Common wind speed model)을 사용하기로 한다. 이는 실용적이며 합리적이라고 이미 알려져 있다. 그림 4는 공통풍속모형의 확률밀도함수이다. 풍속의

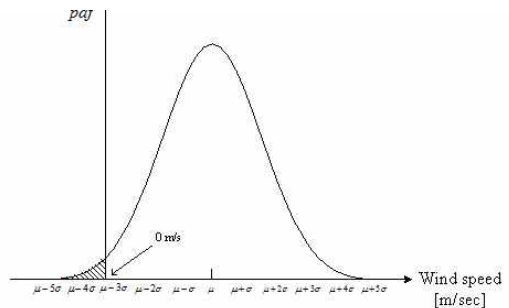


그림 4 풍속모델의 확률분포함수

Fig. 4 The common wind speed model

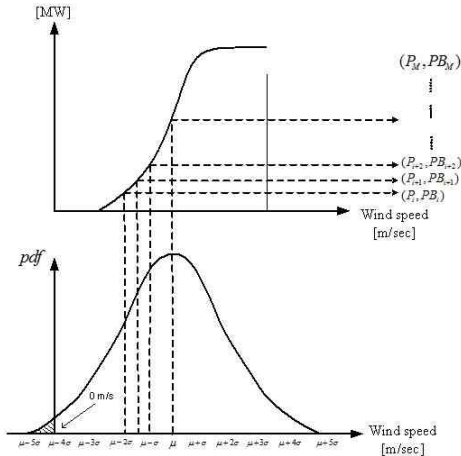


그림 5 풍력발전기의 출력특성곡선과 풍속모델의 결합모습
Fig. 5 Components of a model describing the power output states of a WTG and the corresponding probabilities

평균과 표준편차를 갖는 정규확률분포로 가정하였다. 여기서 빗금으로 나타낸 음의 부분은 측정하는 지점의 기준한 방향의 풍속의 반대방향을 의미한다.

3.3 풍력발전기의 다개상태 출력모델

그림 5은 풍력발전기의 전형적인 출력특성곡선과 풍속모델의 확률분포함수를 결합하여 그림 6과 같은 풍력발전기의 출력에 따른 확률의 선형그래프를 그릴 수 있다.

- 여기서, P_M : 풍속 M [m/sec]에 대한 풍력발전기의 출력
- PB_M : 풍속 M [m/sec]에 대한 풍속 모델의 확률
- μ : 풍속의 평균 [m/sec]
- σ : 풍속의 표준편차 [m/sec]

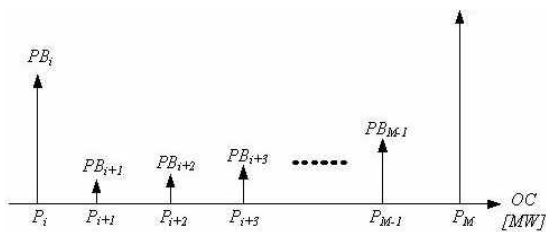


그림 6 풍력발전기 출력과 확률의 선형그래프
Fig. 6 Linear graph of power and probability of WTG

그림 6에서 보이는 것처럼 출력에 따른 확률을 얻을 수 있으며 이를 그림 7 및 식 (11), 식 (12)와 같이 선형보간법을 이용하여 동일 출력간격으로 재작성 한다.

$$PB_k = \left(\frac{P_{k+1} - P_i}{\Delta P} \right) \times PB_i \quad (11)$$

$$PB_{k+1} = \left(\frac{P_i - P_k}{\Delta P} \right) \times PB_i \quad (12)$$

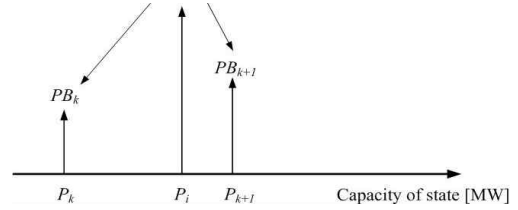


그림 7 풍력발전기의 출력에 따른 확률을 등간격으로 조정하기 위한 선형 보간법의 도식화
Fig. 7 Graph using linear interpolation according to Fig. 6 for same interval

그림 8은 이와 같이 하여 얻어진 전형적인 풍력발전기의 다개상태 확률분포함수를 보인 것이고 식 (13)을 만족한다. 여기서 NS를 풍력발전기의 운전상태의 수라고 하면 정격출력은 P_{NS-1} 이다.

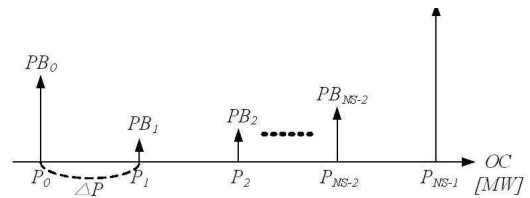


그림 8 등간격으로 조정한 전형적인 풍력발전기 출력의 다개상태 확률분포 함수
Fig. 8 The typical multi states probability distribution function of WTG output using Fig. 7

$$\Delta P = P_i - P_{i-1} = P_{i+1} - P_i \quad (\text{단, } i = 1, 2, \dots, NS-2) \quad (13)$$

그림 8과 같은 풍력발전기의 다개상태 모델을 가용용량확률분포함수라 한다. 이를 이용하여 풍력발전기의 사고용량 확률분포 함수(f_{osi})를 얻을 수 있으며 그림 9의 유효부하지속곡선(Φ)을 구하는 식 (14)에 의해 신뢰도 평가를 할 수가 있다.

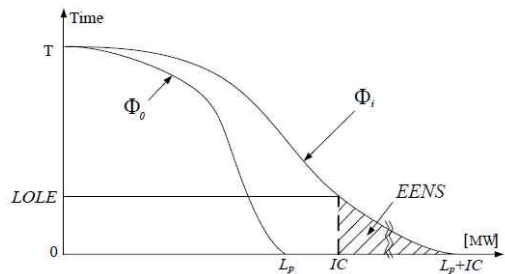


그림 9 전형적인 유효부하지속곡선
Fig. 9 A typical Effective load duration curve

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \Phi_{i-1} \otimes f_{osi} \\ &= \left(1 - \sum_{j=1}^{NS} q_{ij} \right) \Phi_{i-1}(x) + \sum_{j=1}^{NS} q_{ij} \Phi_{i-1}(x - C_{ij}) \end{aligned} \quad (14)$$

- 여기서, \otimes : 상승적분을 의미하는 연산자
- Φ_0 : 원래의 부하지속곡선(LDC)
- Φ_{i-1} : #1에서 #i-1 발전기까지 고려한 유효부하지속 곡선
- f_{osi} : #i 발전기의 사고용량확률분포 함수
- NS : 발전기의 상태의 수
- C_{ij} : #i 발전기의 #j 상태의 사고용량 [MW]
- q_{ij} : #i 발전기의 #j 상태의 사고확률

4. HVDC의 신뢰도 평가모델

그림 10은 HVDC를 구성하는 요소들의 신뢰도 평가를 위한 구조도이다. 여기서 λ_{ct} , μ_{ct} , λ_{cs} , μ_{cs} 및 λ_{DCL} , μ_{DCL} 은 각각 HVDC양단간에 설치된 컨버터, 인버터 및 HVDC 케이블 자체의 고장율(Failure rate) 및 복구율(Repair rate)이다. 그런데 이들의 사고확률(q)은 각각 $q_{ct} = \lambda_{ct} / (\lambda_{ct} + \mu_{ct})$, $q_{DCL} = \lambda_{DCL} / (\lambda_{DCL} + \mu_{DCL})$, $q_{cs} = \lambda_{cs} / (\lambda_{cs} + \mu_{cs})$ 이므로, 가용확률(p)은 각각 $p_{ct} = (1 - q_{ct})$, $p_{DCL} = (1 - q_{DCL})$, $p_{cs} = (1 - q_{cs})$ 처럼 되고 그러므로 HVDC 전체의 사고확률

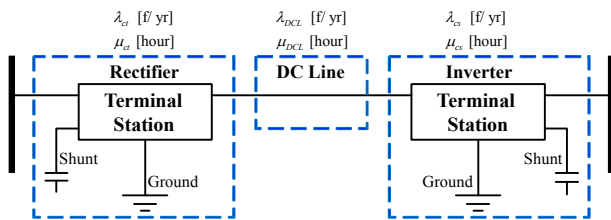


그림 10 HVDC의 신뢰도 평가모형
Fig. 10 Reliability Evaluation Model of HVDC

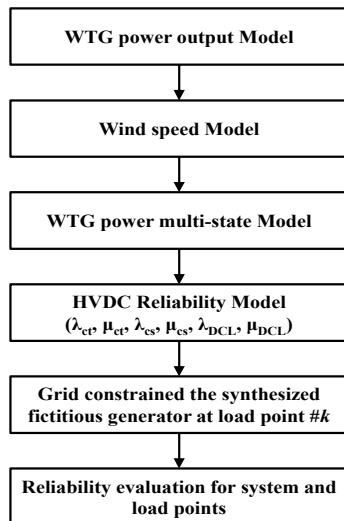


그림 11 WTG를 포함하고 HVDC를 갖는 HLI에서의 신뢰도 평가 흐름도
Fig. 11 Reliability assessment flow chart in HLI with WTG and HVDC

은 이들이 직렬연결이므로 식 (15)처럼 정식화 된다.

$$FOR_{HVDC} = q_{HVDC} = (1 - p_{ct} \times p_{DCL} \times p_{cs}) = (1 - (1 - \lambda_{ct} / (\lambda_{ct} + \mu_{ct})) (1 - \lambda_{DCL} / (\lambda_{DCL} + \mu_{DCL})) (\lambda_{cs} / (\lambda_{cs} + \mu_{cs}))) \quad (15)$$

5. 계산 흐름도

본 연구에서 제안하는 WTG를 포함하고 HVDC를 갖는 HLI에서의 신뢰도 평가 흐름도이다.

6. 사례연구

6.1 대상계통 및 입력데이터

본 연구에서 제안한 신뢰도 평가방법의 효용성을 검증하기 위해 그림 12와 같이 제주도와 유사한 소규모 전력계통을 이용하였다[11]. 여기서 최고부하는 681[MW]이며, 모선수는 11개, 부하지점은 7곳으로 모의하였다. 모든 모선에서의 부하형태는 그림 13과 동일한 것으로 가정하였다. 또한, 표 1은 대상계통의 전원 구성을 나타낸 것으로 석탄화력 3기, LNG화력 1기, 유류 2기이며 풍력발전기는 3단지로 구성된다. 또한 외부계통과 연계하는 HVDC는 세 개의 연계선을 가정하였으며 #1 연계선은 이미 설치되어 있고 #2, #3연계선은 설치예정인 것으로 가정하였다.

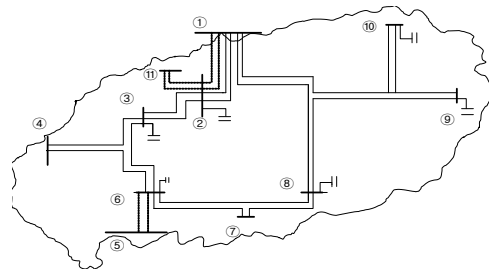


그림 12 신뢰도 평가를 위한 모델계통
Fig. 12 Model system for reliability evaluation

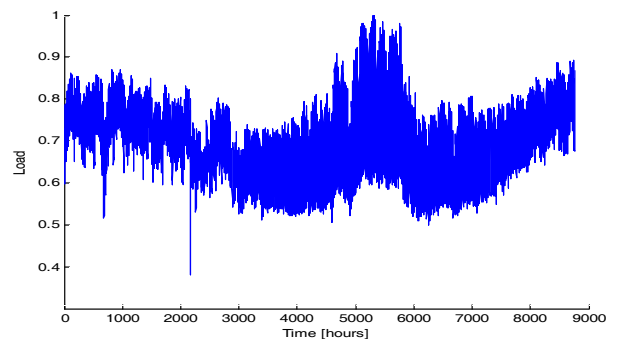


그림 13 대상계통의 부하패턴
Fig. 13 The load variation curve of power system

표 1 입력 발전기

Table 1 Input generator

	발전기수(발전단지수)	발전용량
풍력발전단지	3	100
HVDC	3	550
석탄화력	3	185
LNG화력(G/T+S/T)	1	70
유류	2	50
합계	12	955

6.2 HVDC #2연계선 추가시 신뢰도 변화

본 연구실에서 개발한 HLII에서의 신뢰도 평가 프로그램인 ComRel을 이용하여 신뢰도 측면에서 비교분석하였다. 표 2는 200MW×2회선 규모의 HVDC #2연계선 추가시의 신뢰도 평가결과를 나타낸 것이다. 비록 실제통과는 다소 거리가 있지만 #2 HVDC는 모선 11에 연계된 것이 공급신뢰도 관점에서 최적 연계점을 선택하였다고 평가된다.

표 2 HVDC #2연계선 추가에 따른 신뢰도 변화

Table 2 Reliability based on the HVDC #2 line addition

구 분	No HVDC		모선 11에 HVDC 추가시
	Grid not constrained	Grid constrained	
LOLE [hours/year]	1.26	6.89307	0.097253
EENS [MWh/year]	44.52	3587.35	55.283
EIR [pu]	0.99999	0.999222	0.999989

표 3은 #2 HVDC를 #1 HVDC의 연계지점인 모선 1 그리고 모선 4, 모선 10 및 기 건설연계지점 모선 11과 연계할 경우에 대하여 제안하는 방법을 사용하여 공급신뢰도를 평가한 결과이다. 표 3에서 보이는 바와 같이 기 연계지점이 상대적으로 타 연계지점보다 매우 우수함을 알 수 있다. 따라서 모선 11이 본토와의 거리도 제일 가까우며 경제적일 뿐만 아니라 공급신뢰도 측면에서도 매우 좋은 선정이라고 판단된다.

표 3 후보 연계모선에 대한 신뢰도 평가결과

Table 3 Reliability evaluation results for candidate linkage bus

구 분	New HVDC			
	Bus #1	Bus #4	Bus #10	Bus #11
LOLE [hours/year]	0.403583	0.403584	0.397534	0.097253
EENS [MWh/year]	231.596	231.596	228.625	55.283
EIR [pu]	0.99954	0.99954	0.99955	0.999989

6.3 HVDC #3연계선 추가시 신뢰도

HVDC 2회선 건설에 따른 계통모의를 통해 신뢰도를 평가하였다. 모의 시나리오의 모선을 기준으로 LOLE, EENS, EIR와 같은 신뢰도 평가를 진행하였다. 모의 결과는 표 4와 같다.

표 4 각 모선별 신뢰도 평가 결과

Table 4 Reliability evaluation result

접속 모선	#3 HVDC 연계 안함	Bus #1	Bus #2	Bus #3	Bus #10	Bus #11
LOLE [Hrs/year]	0.097253	0.010996	0.011004	0.010996	0.010669	0.002811
EENS [MWh/year]	55.283	6.29677	6.30115	6.29677	6.12603	1.58159
EIR [PU]	0.999989	0.999999	0.999999	0.999999	0.999999	1

6.3.1 #3 HVDC 연계유무에 따른 공급신뢰도 효과

표 4를 살펴보면 #3 HVDC를 연계하면 공급신뢰도 측면에서 LOLE가 0.002811[Hrs/year]로써 연계를 하지 않은 경우보다 거의 10배 이상 공급신뢰도는 좋아짐을 알 수 있다.

6.3.2 #3 HVDC 적정 연계지점의 선정

그림 14~그림 16은 표 4를 각 평가기준에 따라 모선별로 그려본 것이다. 그림에서 보이듯이 모든 경우에서 모선 11이 가장 우수한 것을 볼 수 있다. 그러나 #3과 #11 HVDC는 현존의 #1 HVDC를 횡단하여야 하는 해저 건설등의 제약조건상 어려움이 있으므로 연계모선 1 혹은 10 중에 선택하여 연계하여야 하지만, 연계모선 1 또한 현존의 #1 HVDC와의 협조된 건설상의 어려움이 존재하므로 연계모선 10에 연계함이 합리적이면서 우수한 것으로 사료된다.

또한 그림 16에서 알 수 있듯이 EIR의 경우 연계모선 11이 최소 0.999999[pu] 이상으로 모든 연계모선에서 매우 우수한 신뢰도를 확보할 수 있는 것으로 확인된다.

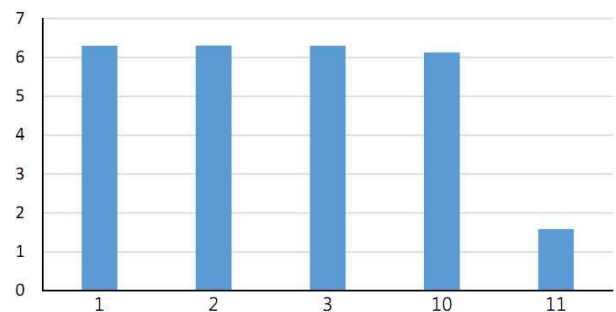


그림 14 각 연계모선별 계통의 EENS [MWh/year]

Fig. 14 EENS of each connected system

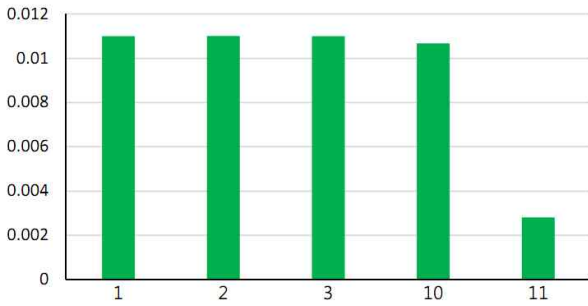


그림 15 각 연계모선별 계통의 LOLE [Hrs/year]

Fig. 15 LOLE of each connected system

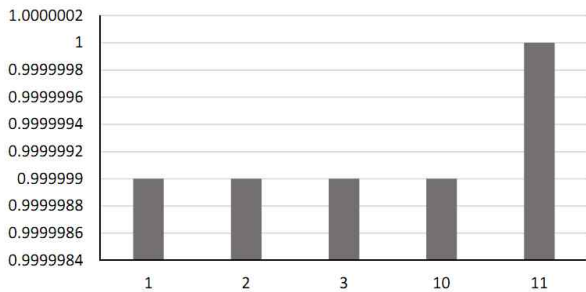


그림 16 각 연계모선별 계통의 EIR [pu]

Fig. 16 EIR of each connected system

7. 결 론

전력계통에서의 HVDC 설비가 증가함에 따라 이를 고려한 공급신뢰도 평가 중요성이 높아지고 있다. 특히, HVDC는 대부분 대규모 전력을 수송하기 위한 기간계통에 위치하고 있어 이를 포함한 신뢰도 평가가 주요관심사로 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 그동안 간략 방법으로 개발한 HLII에서의 신뢰도 평가 프로그램인 ComRel을 이용하여 HVDC의 확충계획을 신뢰도 관점에서 수립하는 방법을 제안하였다. 그리고 제안한 방법은 소규모 모델계통을 대상으로 HVDC 연계선로의 추가에 따른 신뢰도를 평가함으로써 그 효용성을 검증하였다. 여기서는 기존발전기와 송전선로의 사고확률 그리고 HVDC의 사고확률 등을 고려했을 뿐만 아니라 출력의 변동성이 매우 큰 풍력발전기의 출력의 불확실성도 고려하였다. 이를 통하여 신재생에너지발전원의 계통연계를 고려한 HVDC의 확충전략 수립에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

하지만 본 연구는 연중 대표일 부하곡선만을 대상으로 모의하였으며 발전비용 및 건설비용을 제외한 신뢰도만을 평가한 내용이다. 따라서 차후 보다 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다. 특히, 본 평가프로그램은 풍력발전기의 불확실성 뿐만 아니라 동시에 송전망까지 고려한 신재생에너지발전원을 포함한 HLII 수준의 신뢰도평가 프로그램이므로 각 모선별 신뢰도 지수가 얻어질 수 있다. 그러므로 보다 상세한 신설에 따른 HVDC의 효과를 평가할 수 있으며 이에 대한 후속 연구가 이어지기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국남동발전 현장기술평가 과제 및 2017년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(NO.20174030201440)

References

- [1] Chan-Ki Kim, Vijay K. Sood, Gil-Soo Jang, Seong-Joo Lim and Seok-Jin Lee, "HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems", Wiley-IEEE Press, Apr. 2009. (ISBN 978-0-0470-82295-1)
- [2] D. A. Waterworth, C. P. Arnold and N. R. Watson, "Reliability assessment technique for HVdc systems", IPENZ Transactions, Vol.25, No.1, Nov. 1998.
- [3] Wenyuan Li, "Expected Energy Not Served (EENS) Study for Vancouver Island Transmission Reinforcement Project", Report-BCTC, Jan. 2006.
- [4] Osama Swaitti, "Assessing the Impacts of Increasing Penetration of HVDC Lines on Power System Reliability", KTH Royal Institute of Technology, May 2007.
- [5] J. Setreus and L. Bertling, "Introduction to HVDC technology for reliable electrical power systems", PMAPS 2008, May 2008.
- [6] ABB Report, "HVDC: technology for energy efficiency and grid reliability".
- [7] Les Brand, Ranil de Silva, Errol Bebbington and Kalyan Chilukuri, "Grid West Project HVDC Technology Review", PSC, Dec. 2014.
- [8] Kyeonghee Cho, Jeongje Park and Jaeseok Choi, "Probabilistic Reliability Based Grid Expansion Planning of Power System Including Wind Turbine Generators", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 7, No. 5, pp. 698-704, 2012.
- [9] Jaeseok Choi, Trungtin Tran, A. (Rahim) A. El- Keib, Robert Thomas, HyungSeon Oh and R. Billinton, "A Method for Transmission System Expansion Planning Considering Probabilistic Reliability Criteria", IEEE Trans. on Power System, Vol. 20, No. 3, pp. 1606-1615, Aug. 2005.
- [10] Jaeseok Choi, "Power System Reliability Evaluation Engineering", G&U Press, 2013.
- [11] Jaeseok Choi, Jintaek Lim and Kwang Y. Lee, "DSM Considered Probabilistic Reliability Evaluation and an Information System for Power Systems Including Wind Turbine Generators", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 4, No. 1, pp. 425-432, Mar. 2013.

- [12] Jaeseok Choi, "Power System Expansion Planning under New Environment", Green Press, 2016.
- [13] Kyeonghee Cho, Jaeseok Choi, "Web based Online Real-time Reliability Integrated Information System in Composite Power System Considering Wind Turbine Generators", KIEE, Vol. 60, No. 7, pp. 1305~1313, Jul. 2011.

저 자 소 개



오 응 진 (Ungjin Oh)

1985년 7월 6일생. 2013년 경상대 전기공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016~동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 055-772-1715
 E-mail : vkdlskf@nate.com
 ORCID ID : 0000-0001-9105-1791



이 연 찬 (Yeonchan Lee)

1987년 1월 5일생. 2013년 경상대 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015~동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 055-772-1715
 E-mail : kkng1914@gnu.ac.kr
 ORCID ID : 0000-0002-4503-3696



최 재 석 (Jaeseok Choi)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 전기 공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년~현재 경상대 전기공학과 교수.

Tel : 055-772-1715
 Fax : 055-772-1719
 E-mail : jschoi@gnu.ac.kr
 ORCID ID : 0000-0003-0867-6251



윤 용 범 (Yongbeum Yoon)

1958년 9월 28일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전 졸업(박사). 현재 한전 전력연구원 차세대 송변전 연구소장.

E-mail : ybyoon@kepco.co.kr
 ORCID ID : 0000-0002-3287-9342



김 찬 기 (Chan-Ki Kim)

1991년 서울과학기술대 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사). 1996년~현재 한전 전력연구원 책임연구원.

E-mail : chankikim@kepco.co.kr



임 진 택 (Jintaek Lim)

1985년 8월 1일생. 2011년 경상대 전기 공학과 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2015년~현재 한국국제대 조교수.

Tel : 055-751-7972
 E-mail : jtl31223@naver.com
 ORCID ID : 0000-0001-5192-0825