

신재생 에너지를 사용하는 특정 지역에서 공급 신뢰도 유지를 위한 연구

정영기* 이동우*, 문승일*
서울대학교 전기컴퓨터 공학부*

A study of Maintaining supply reliability of small isoated power systems using renewable energy

Young-kee Jung*, Dong-Woo Lee*, Seung-Il Moon*
Seoul National University*

Abstract - Photovoltaics and wind energy sources are being increased recognised as cost effective generation sources in small isolated power systems(SIPS) primarily supplied by costly diesel fuel. Deterministic and probabilistic techniques are combined using a system well-being approach to provide useful reliability indices for SIPS containing renewable energy. An evaluation of the contribution from photovoltaics and wind energy sources to SIPS reliability is presented. The practicality and effectiveness of the methodology is illustrated by a case study.

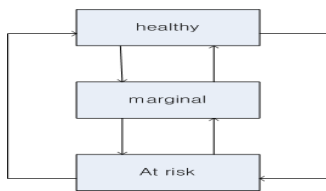
1. 서 론

풍력 발전기(이하 WTG)와 태양광(PV) 시스템은 SIPS에서 비싼 디젤 연료에 비해 비용이 거의 소모되지 않는다. 하지만 이러한 신재생 에너지원과 관련된 이익의 평가는 시스템의 신뢰도 평가를 반드시 필요로 한다. 불확실한 공급 특성을 갖는 태양광과 풍력 에너지의 비용/이익 분석은 신뢰도 평가 없이는 불완전하다. 계획하는 발전용량의 확장이 원하는 단계만큼 신뢰도를 유지하는가를 평가하기 위해 신뢰도 기술이 필요하다. 여기서는 풍력과 태양광 에너지를 포함하는 발전 시스템의 신뢰도를 분석한다.

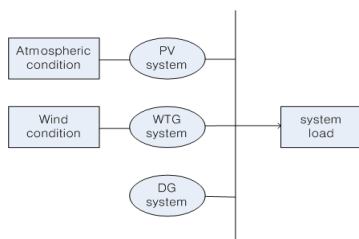
2. 신뢰도 평가

신재생 에너지원의 신뢰도 평가는 그동안 무시되어 왔다. 이는 신재생 에너지원이 전체 발전 용량의 작은 부분만을 차지했기 때문이다. 하지만, 계속적으로 증가하는 신재생 에너지로 인해 신재생 에너지원의 신뢰도는 더 이상 피할수 없는 문제가 되고 있다.

Well-being method[1]는 확률론적 평가 구조에 결정론적 평가 기준을 결합하고 신재생 에너지를 포함하는 SIPS에서 공급 적정도(Adequacy)문제를 해결한다. 이는 그림 1에서처럼 시스템 동작 상태의 정의를 통해 알 수 있다. 즉, 계통의 상태를 Healthy/Marginal/Risk 로 구분하고, 이 3가지 상태는 계통의 가장 큰 발전기가 outage가 발생 시에 계통이 만족스럽게 작동하는가(Healthy state), 그렇지 않은가(Marginal/Risk state)로 구분하고, 다시 최대 용량 발전기의 outage가 없을 경우, 계통이 만족스러운 수행을 할 때 Marginal state로 분류하였다. 결정론적 평가 기준 내에서 시스템의 동작과 관련된 안전성은 신재생 에너지를 포함하는 SIPS의 유용한 공급 적정도 지표로 사용된다.



〈그림 1〉system well-being model



〈그림 2〉Reliability evaluation model

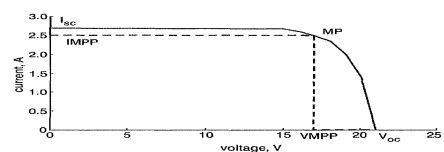
3. 신뢰도 평가 모델

신재생 에너지를 포함하는 전력 시스템의 공급 적정도 평가는 3단계로 발전해 왔다. 첫 번째로 기상 상태 데이터를 산출하고 두 번째 단계에서는 신재생 에너지원으로 생산된 전력을 계산하고 세 번째 단계에서는 원하는 공급 적정도를 얻기위해 시스템 부하 데이터와 결합한다. 평가 모델은 그림 2와 같다.

3.1 태양광 시스템 모델링

특정 지역에서 일사량의 양은 곧 태양광 발전량을 의미한다. 신뢰도를 위한 PV 평가를 위해서 시간별 데이터가 필요한데, WATGEN[2]라는 프로그램이 시간별 기상 데이터를 산출하기 위해 사용된다. simulation program은 [3,4]에서 시간별 통합 데이터를, [5]에서 시간별 주변 온도 데이터를 구할 수 있다.

PV cell의 출력량은 전류와 전압(I-V)곡선으로부터 평가한다. 곡선 안의 직사각형 면적은 최대 출력량을 뜻하고 곡선은 일사량 증가에 따라 위쪽으로 이동(전류의 증가)하고 온도의 감소에 따라 우측으로 이동(전압의 증가)한다. simulation program은 복사량을 분석하고 총 복사량을 계산한다. program은 I-V 곡선을 사용하여 최대 출력량을 계산하고 이는 다시 cell 온도에 영향을 준다. cell 온도의 새로운 값은 출력량과 표면의 열손실 함수로 다시 계산되고, 이렇게 반복적인 출력량의 계산과 cell 온도는 특정 시간에서 일정한 출력량을 산출할 수 있도록 한다.



〈그림 3〉 PV cell 1-5 characteristic

3.2 풍력 시스템 모델링

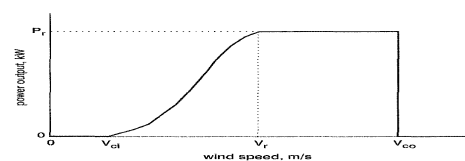
특정 지역에서 풍속은 바람으로부터 얻을 수 있는 에너지의 양을 의미한다. 방정식 1을 사용해서 풍속 SW_t 가 시간 t에서 평균 풍속 μ_t 와 표준 편차 σ_t 에 의해 얻어진다.

$$SW_t = \mu_t + \sigma_t * y_t \quad (1)$$

연속한 데이터 y_t 는 방정식 2에서 연속하는 풍속 모델을 위해 사용된다.

$$y_t = \psi_1 y_{t-1} + \psi_2 y_{t-2} + \dots + \psi_n y_{t-n} + \alpha_t - \theta_1 \alpha_{t-1} - \theta_2 \alpha_{t-2} - \dots - \theta_n \alpha_{t-n} \quad (2)$$

평균 풍속에 대한 출력량을 나타내는 출력 곡선은 그림 4와 같다. 풍력 터빈은 cut-in 속도인 V_{ci} 에서 발전을 시작하고 풍속이 V_{cr} 에서 정격 풍속 V_r 까지 증가함에 따라 출력량이 비선형적으로 증가한다. 풍속이 V_r 부터 안전을 위해 WTG가 shut-down하는 cut-out 속도 V_{co} 까지 정격 출력량 P_r 을 생산한다. 시간별로 생산되는 출력량은 WTG의 출력 곡선을 사용하여 풍속 데이터로부터 계산한다.



〈그림 4〉 Power curve of WTG

3.3 전체 시스템 평가

기존의 SIPS를 위해 개발된 Monte Carlo 시뮬레이션 방법[6]은 태양광과 풍력 에너지원을 포함할 수 있도록 이 연구에서 변경되었다. 각 발전기의 outage는 방정식 3과 4에서 고장률과 수리율을 simulation하여 산출한다.

$$\text{up time} = -\text{MTTF} * \ln(x_1) \quad (3)$$

$$\text{down time} = -\text{MTTR} * \ln(x_2) \quad (4)$$

MTTF와 MTTR은 고장과 수리의 평균 시간이고 x_i 는 0과 1사이의 수이다.

신재생 에너지원에서 생산된 출력량을 기존 발전기의 출력량과 결합하여 새로운 발전기 모델을 만든다. 여기서 산출된 값은 다시 시간별 부하(hourly load)와 healthy/marginal/risk state를 구분하는 결정론적 평가 기준과 비교된다. 시스템의 health/risk index는 방정식 5-7을 통해 평가되고, 여기서 n(H)는 healthy state, n(R)은 risk state의 수를 의미한다.

$$\text{healthy state probability } P(H) = \frac{\sum_{i=1}^{n(H)} t(H)_i}{N * \text{year} \in h} \quad (5)$$

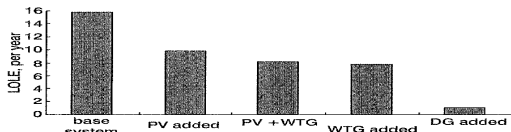
$$\text{loss of healthy expectation(LOHE)} = [1 - P(H)] * \text{year in } h \quad (6)$$

$$\text{loss of load expectation(LOLE)}[10] = \frac{\sum_{i=1}^{n(R)} t(R)_i}{N} \quad (7)$$

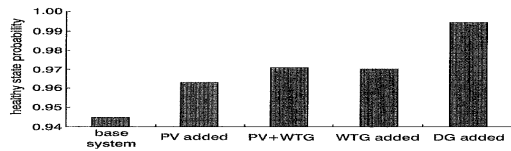
N : 가상화된 총 년수

4. 신뢰도 평가 모델 적용

전체 시스템 공급 적정도 평가 과정에서 평가 모델은 통합 구조로 함께 연결되고 software tool에서 수행된다. 기본 발전기 시스템은 특정 기상 조건 하에서 존재한다고 가정하고, 시스템 risk와 health state는 그림 5와 6에서 비교된다. 이는 40kW 용량을 가진 기본 발전기가 다음과 같은 발전기들과 결합된 경우이다. : 하나의 40kW 디젤 발전기, 4개의 10kW 풍력 발전기, 50kW PV array, 그리고 2개의 10kW 풍력 발전기와 25kW PV array



<그림 5> System risk with different energy sources added to base system



<그림 6> System health with different energy sources added to base system

그림 5와 6은 신뢰도가 어떠한 에너지원이 추가되더라도 향상될 수 있음을 보여준다. 하지만 추가되는 용량이 같더라도 추가되는 에너지원 종류에 따라 신뢰도 향상도는 모두 다르다. 기존의 발전기는 주어진 용량에서 신재생 발전기보다 훨씬 우수한 신뢰도를 보인다. 또한 PV와 WTG의 신뢰도는 시스템이 위치한 기상 상황에 따라 크게 달라진다.

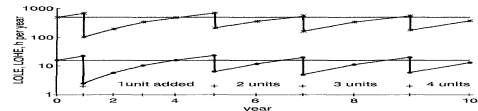
5. 시스템 신뢰도 유지

발전기의 추가 설치에 증가하는 수용가를 충족할 수 있다. 시스템 설계자는 최고 이익을 위해 가장 좋은 에너지원을 설치해야 한다. 표 1과 같이 증가하는 부하를 충족하기 위해 기본 발전기에 신재생 에너지 발전기를 결합하여 연구를 진행하였다.

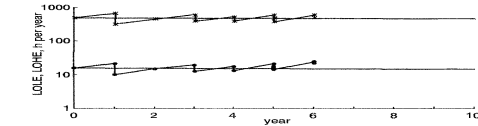
<표 1> Annual peak load forecast for example system

| Year | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| PL(kW) | 60 | 66 | 73 | 80 | 88 | 97 | 107 | 118 | 130 | 143 | 157 |

시스템의 LOLE와 LOHE는 각각 15.73과 484.63y/yr이다. 공급 적정도를 요구하기 위해 요구되는 디젤 발전기는 그림 7에서 보여지고, 이는 시스템 신뢰도를 위해 발전기가 1,5,7,9년에 추가로 설치되어야 함을 보여준다. SIPS에서 디젤 발전기의 설치에 시스템의 공급 적정도 차원에서 중요한 변수가 된다.



<그림 7> Adding diesel units to maintain reliability

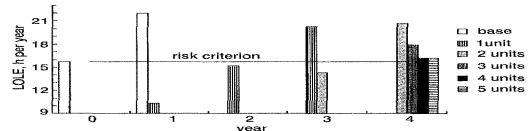


<그림 8> Adding WTG units to maintain reliability

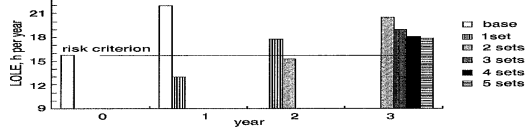
그림 8은 부하가 증가함에 따라 이를 충족하는 필요한 WTG의 추가량을 나타내고 있다. 여기서 발전기가 1,3,4년에 추가되어야 하고 원하는 신뢰도는 WTG가 아무리 추가된다 할지라도 6년째에는 이를 수 없음을 보여준다. 그림 9는 시스템의 risk가 1년과 3년에 WTG를 추가함으로써 risk기준 이하까지 유지됨을 보인다. 하지만, 4년째는 풍력 발전기를 더 추가한다 할지라도 risk 기준 초과를 피할 수 없다. 즉, 시스템의 신뢰도는 WTG의 추가만으로는 3년까지만 유지가 가능하다.

그림 10은 부하 증가에 따라 추가되는 PV array의 상관관계를 보이고 있다. 시스템의 신뢰도는 2년 후에는 추가되는 PV array만으로는 LOLE=15.73h/yr 기준 이상으로 유지될 수 없음을 알 수 있다.

그림 8-10까지의 결과는 신재생 에너지의 추가만으로는 원하는 신뢰도를 얻을 수 없음을 보이고 있다. 아무리 많은 PV array가 추가된다 할지라도 밤에는 에너지를 얻을 수 없는 한계를 갖고, 바람이 일정하게 불지 않는다는 특성 때문에 WTG의 추가는 원하는 공급 적정도를 유지할 수 없다. 따라서 기존 발전기는 시스템 신뢰도 유지를 위해 신재생 발전기를 적절하게 설치해야 한다.



<그림 9> Adding WTG units considering an operating constraints



<그림 10> Adding PV array sets to maintain reliability

6. 결론 및 추후 연구 과제

위 연구는 SIPS에서 PV와 WTG를 포함하는 Monte Carlo 시뮬레이션 방법을 사용한 신뢰도 평가 방법을 제시하였다. 연구 결과는 기존의 발전기는 신재생 발전기보다 더 높은 신뢰도를 제공함을 보인다. 신재생 에너지원이 시스템의 동작 비용을 상당히 줄일 수 있으나, 자체만으로는 원하는 시스템 신뢰도를 제공할 수 없다. PV나 WTG 에너지원은 원하는 신뢰도 유지를 위해 기존 발전기와 적절히 결합되어야 한다.

신재생 에너지원의 신뢰도를 더 정확히 평가하기 위해서 여러 경우를 적용해야 할 것이며, 앞으로 더 많은 test 시스템을 통하여 신재생 에너지원의 신뢰도 평가를 수행할 계획이다.

[참고 문헌]

- [1] BILLINTON, R., 'Capacity reserve assessment using system well-being analysis', IEEE Trans. May 1999 pp. 433-438
- [2] Wastun Simulation Laboratory: 'WATGEN user's manual'. University of Waterloo, August 1992
- [3] GRAHAM, V.A., HOLLANDS, K.G.T.: and UNNY, T.E.: ' A time series model for Kt with application to global synthetic weather generation', Sol. Energy, 1998, pp. 83-92
- [4] GRAHAM, V.A., HOLLANDS, K.G.T.: ' A method to generate synthetic hourly solar radiation globally', 1990, pp 333-341
- [5] HOLLANDS, K.G.T., D'ANDREA, L.J. and MORRISON, I.D.: 'Effect of random fluctuations in ambient air temperature on solar system performance', 1989, pp. 335-338
- [6] BILLINTON, R., and KARKLR.: 'Application of Monte Carlo simulation to generating system well-being analysis', IEEE Trans. Power Syst., 1989 pp. 1172-1177