

## 제주도 풍력발전 점유율 증가에 따른 발전 설비 이용률 분석 연구

박진우\*, 표기찬\*, 최정현\*, 문승일\*, 이성규\*\*  
 서울대학교\*, 한국전력공사\*\*

### Impact on Thermal Generator's Operation of Increased Wind Power Penetration in Jeju Island

Jin-Woo Park\*, Gi-Chan Pyo\*, Jung-Hyun Choi\*, Seung-Il Moon\*, Sung-Kyu Lee\*\*  
 Seoul National University\*, Korea Electric Power Corporation\*\*

**Abstract** - 풍력발전을 활성화하기 위한 정부차원의 노력과 제주 지자체의 의지, 그리고 새로운 사업 기회를 찾기 위한 풍력발전 사업자들의 의향 등으로 현재 제주 지역에는 많은 풍력발전의 증가가 예상되고 있다. 동시에 향후 3~4년 안에 예정되어 있는 제주 계통의 여러 변화들 - 대형 LNG 발전소의 신설 및 신규 HVDC의 건설 - 등과 맞물려 풍력발전 증가에 따른 영향을 분석해볼 필요가 있다. 본 연구에서는 2012년 제주 계통의 변화를 예상해보고 여러 시나리오에 걸쳐 발전 설비를 운영하는 조합을 선정해보았다. 그리고 각 경우의 발전설비 이용률을 검토해 보았다.

#### 1. 서 론

제주 계통은 2008년 예상부하가 최대 600MW 최소 300MW의 소규모 계통이다. 본 연구에서는 제주 계통에 향후 예상되는 가장 큰 변화인 풍력발전의 점유율 증가가 계통 운영 방식을 어떻게 변화시킬지를 검토해보았다.

현재 제주 계통의 풍력발전 활성화를 위해 관련 연구가 진행중이며, 그 결과 제주 계통은 현행 방식 하에서는 HVDC의 운전 여부에 따라 풍력발전의 설치 가능용량이 달리 제한되며, 그 양은 HVDC가 정상 운전할 경우 약 120MW, Overhaul 기간 중에는 약 60MW로 산정된 바 있다.

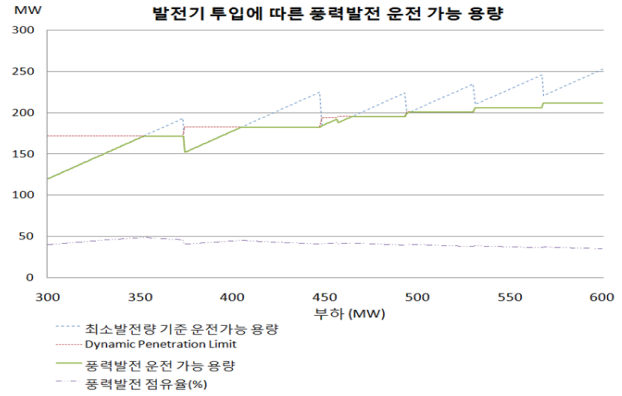
현재 계통 연계 기준이 제정되지 않았으며, 신규 예상 설비들(LNG발전소, 신규 HVDC 등)의 계획 검토 단계에서 풍력발전 점유율 증가로 인해 발생할 여러 가지 문제들을 고려하지 않았기 때문에 현 상태에서 풍력발전을 대규모로 수용하는 데는 어려움이 따른다.[1] 하지만, 계통 연계 기준이 제정되고 풍력발전단지 제어를 통해 유효전력 출력을 계통 운영자가 일정 수준 제어할 수 있게 된 상황을 가정한다면, 산정된 한계용량 이상의 풍력발전 설비를 건설하고 필요한 시기에 출력을 제한할 수 있다면, 설치 용량 자체의 제약은 무의미해질 수 있다. 특히 출력 제어를 고려할 경우 계통 부하가 증가할수록 풍력발전의 운전이 허용되는 용량이 더욱 늘어남을 밝힌 바 있다. 본 논문은 [1]논문의 연구 결과의 후속적인 연구로 신규 설비로 인해 예상되는 제주 계통의 여러 가지 변화의 시나리오를 선정하고 각 경우의 경제성 분석을 수행해 본 결과를 담고 있다.

이를 위해 제주 계통 발전기의 Unit-commitment 및 Dispatch 방식을 수정하여 적용해보았고 1년 동안의 가상의 제주 계통 설비들의 시간별 운전 패턴을 예측하여 가상 운전을 수행해보았다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 부하별 풍력발전설비 운전 가능 용량

그림 1은 발전기 투입에 따른 풍력발전 운전 가능 용량을 분석한 결과이다.[1] 크게 두 가지 기준에 의해 풍력발전의 운전 가능용량을 산정하였는데 그 두 가지 기준은 각각 최소발전량 기준과 Dynamic penetration limit이다. 최소발전량 기준은 계통에 일정 수준의 동기발전기가 투입되어 있을 경우 이들 발전기는 최소발전량 이하로 출력을 줄일 수 없기 때문에 풍력발전량이 늘어나는 데에 제약조건이 됨을 의미한다. 다음으로 Dynamic penetration limit의 경우 풍력발전의 갑작스러운 변동이 기존 계통의 동기발전기에 의해 얼마나 동적으로 안정적으로 흡수될 수 있는지에 관련된 것으로, 외국의 경우 동기발전력 정격의 약 15~30% 수준에서 풍력발전의 운전용량을 제한하고 있다[2]. 본 연구에서는 계통 시뮬레이션을 통해 제주 계통의 Dynamic penetration limit을 산정한 바 있다. 결국, 두 가지 기준에서 공히 풍력발전의 운전가능용량을 결정하는 제일 큰 요소는 해당 부하에서 동기발전기가 총 투입되어 운전중인 대수가 된다. 화력 발전기의 경우 냉각기동의 경우 최소 3~4시간이 소요되기 때문에 발전기 투입대수 및 조합은 최소 24시간 전에는 결정되어야 하는 것으로 고려하였다. 풍력발전설비의 운전 가능용량은 두 가지 기준에 의한 값 중 최소값을 선택하게 된다.



<그림 1> 발전기 투입에 따른 풍력발전 운전 가능 용량

##### 2.2 부하 예측 및 풍력발전량 예측

부하 예측과 풍력발전량 예측은 보통 과거의 데이터 및 각종 변화 등을 반영하여 복잡한 예측의 과정을 거친다. 특히 풍력발전량의 경우 그 지역의 풍속 데이터에 대한 Weibull distribution function을 구하고 이를 통해 확률적으로 접근하는 방법이 주로 사용된다.[3] 하지만, 제주 지역의 관련 데이터를 얻기가 힘들고 본 연구에서는 확실적인 접근 보다는 매 시간 단위의 raw data가 필요한 만큼, 2006년 부하 및 풍력발전 측정 데이터를 Scale up해서 이용하는 방법을 택하였다. 부하의 경우 2006년 연간 1시간단위 부하패턴을 기본으로 장기 수급계획에서 예상하는 제주 계통의 2012년 부하의 최대, 최소량에 맞게 Scale up하였다. 한편, 풍력발전량의 예측의 경우 지역적인 패턴을 고려하기 위해 제주 서부지역의 한경풍력발전단지와 동부의 행원 풍력발전단지의 데이터를 사용하였다. Sliding window를 이용하여 Smoothing 효과를 반영하였으며, 실제 설치 예정인 풍력발전단지를 대상으로 지역적으로 나누어 Scale up하는 방법을 사용하였다. 이렇게 생성된 부하 및 풍력발전량 데이터를 바탕으로 앞서 적용하기로 한 부하별 풍력발전설비 운전 가능용량이 넘지 않는 수준의 풍력발전량은 계통에서 우선적으로 받아주는 것을 가정하였다. 즉 급전 우선순위가 최우선으로 적용되게 된다.

##### 2.3 발전기 Unit Commitment 와 Dispatch 원칙

발전기 Unit commitment는 하루(24시간)전 익일의 최대부하를 감당할 수 있는 발전기를 투입하는 것을 원칙으로 하였다. 발전기 Unit commitment의 경우 여러 가지 원칙이 있을 수 있고, 또한 실제적인 운영상의 특징이 반영되는 부분이지만, 본 연구에서는 풍력발전의 투입을 최대한 고려하기 위해 발전기 UC의 단위를 하루 전으로 정하였다. 급전 우선순위는 운전 가능용량 이하의 풍력발전단지를 0순위로 적용하고, HVDC의 송전량이 다음 순위를 점하는 것으로 고려하였다. 그 다음부터는 발전기의 Merit order에 의해 급전용량을 조절하였다. 단, 투입된 발전기는 최소발전량 이상으로 운전해야하기 때문에, 각 발전기의 최소발전량은 우선적으로 급전에 이용된다.

##### 2.4 시나리오 선정

본 연구에서 가정한 2012년의 계통 운영 시나리오는 다음과 같다.

- 1) 풍력발전설비 증가가 계통 운영에 미치는 영향 - 풍력발전 설비 용량 250MW, 350MW, 450MW, 500MW 수준으로 증가시켰을 때의 경우를 살펴본다.
- 2) LNG 발전소 건설 - 현재 계획 중인 300MW의 LNG 발전소가 건설된 경우의 영향을 살펴본다.
- 3) 신규 HVDC 설비 + LNG 발전소 건설 - 계획중인 모든 설비가

건설되는 경우를 살펴본다. 이 경우 제주 지역은 부하량에 비해 발전량이 지나치게 많아지는 문제가 발생한다. 또한, 이 경우 두 기의 HVDC 설비와 LNG발전소만으로도 제주 부하를 감당할 수 있어 Unit Commitment 상에서 다른 제주 계통의 동기발전기들이 투입되지 않는 상황이 발생한다. 하지만, DC-AC 연계 계통의 안정 운영을 위해서는 Effective Inertia Constant을 3.0s 이상으로 유지할 필요가 있다.[4] 따라서 계통 관성 유지를 위한 일정 수의 발전소 투입이 필요하다.

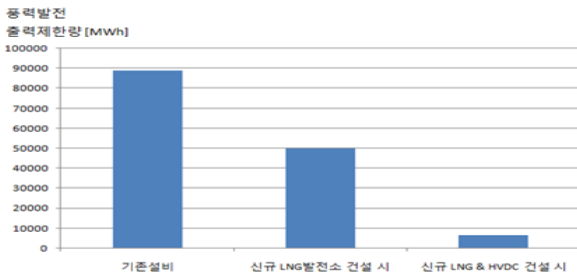
## 2.5 모의결과 분석

### 2.5.1 풍력 발전량 증가에 따른 출력 제한 사례 검토

출력 제한 시간 및 제한량이 증가하는 것은 당연한 결과이다. 물론 풍력발전을 최우선적으로 고려하고 풍력발전 사업을 직접 수행하는 사업자 입장에서 고려해 볼 때, 실제 제한되는 풍력발전량은 그 자체로 발전 수의 감소를 의미하기 때문에 가장 중요한 요소가 될 수 있다.

현재 설비 건설 신청이 접수된 약 250MW의 경우 2012년에는 실제 제한량이 총 발전량의 약 0.59%에 불과하며 그 제한 시간도 7.2일 정도에 불과하다. 한편, 풍력발전설치량이 350MW, 450MW, 500MW로 증가할 경우 제한량의 비율은 각각 4.82%, 12.64%, 16.86%로 증가하며, 제한 시간 역시 41일, 81일, 98일로 증가하는 것을 알 수 있다. 물론 실제 500MW 정도로 설비가 증가할 시점이 되면 부하 증가에 따라 현실적인 제한량은 더욱 감소할 수 있을 것이다. 현 시점의 풍력발전 증가 추세를 감안해 볼 때 더욱 중요한 것은 출력제어를 위한 규정 제정 및 설비 구축에 드는 비용 등이 될 것이다.

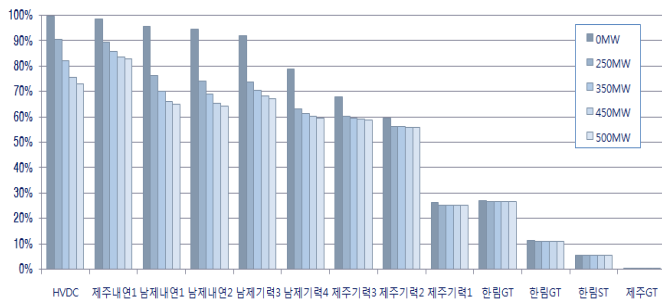
한편, 신규 설비들이 풍력발전 제한량에 어떤 변화를 가져오는 지를 살펴보면, 다음 그림 2에서 볼 수 있듯, 각 풍력발전설비 건설 Case에 대한 출력제한량을 평균한 값을 시나리오 별로 비교해보면, 신규 LNG 발전소의 건설과 신규 HVDC의 건설에 의해 풍력발전 출력제한이 상당 부분 줄어들 수 있다. 이는 신규 LNG발전소의 최소발전량이 작으며 HVDC 역시 역송전 등의 방법을 통해 풍력발전의 문제를 일정수준 해결해 줄 수 있기 때문이다. 단, 이는 풍력발전만을 고려했을 때 해당되는 부분이며, 경제적인 측면의 고려 역시 필요하다. 신규 LNG발전소 건설의 경우 특히 기존 발전기를 대체해버리는 방향으로 운영이 될 것으로 예상되며, 이 경우 기존 발전설비의 이용률은 급감하게 될 것이다.



〈그림 2〉 풍력발전 증가에 따른 출력 제한 사례

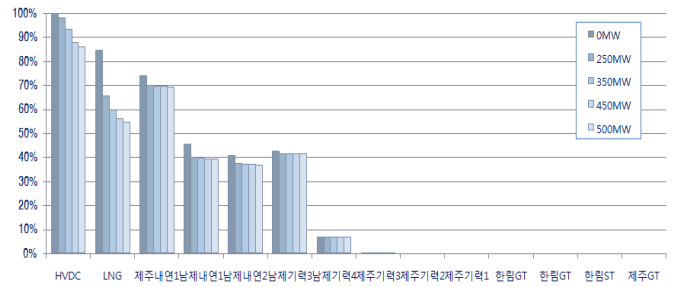
### 2.5.2 풍력 발전량 증가에 따른 발전 설비 이용률의 변화

그림 3은 시나리오 1)에서 풍력발전 설비가 증가함에 따라 전반적인 발전설비 이용률의 감소 경향을 보여준다. 특히 Merit order가 낮은 발전기들은 최소발전량만을 내며 비효율적으로 운전하게 되는 것을 볼 수 있다. 발전기는 일반적으로 연료 효율이 정격 근처에서 가장 높다는 점을 고려해 볼 때, 이와 같은 비용은 풍력발전 활성화를 우선적으로 고려할 경우 발생하는 부대비용으로 볼 수 있다.

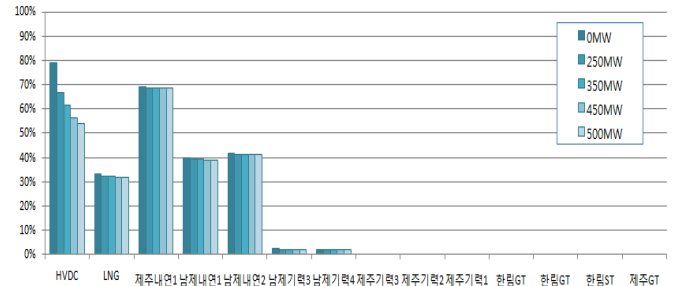


〈그림 3〉 시나리오 1-풍력발전량 증가에 따른 발전 설비 이용률

그림 4는 신규 LNG 발전소 건설로 인해 발전기 이용률이 더욱 감소하는 결과를 보여준다. 특히 제주 기력 3호기 이하의 낮은 순위 발전기는 발전 기회 자체가 없어지는 것을 볼 수 있다.



〈그림 4〉 시나리오 2-LNG 설비 건설에 따른 발전기 이용률 변화



〈그림 5〉 시나리오 3-신규 LNG+HVDC 건설시 발전기 이용률 변화

그림 5의 경우 신규 LNG + HVDC 설비가 건설된 경우 발전기 이용률을 보여준다. 이 경우 새로 신설한 100MW급 설비인 남제 기력 3호기 및 4호기의 이용률마저도 급감하는 것을 볼 수 있다. 이는 설비의 비효율적인 이용을 의미하며 제주 부하 대비 과도한 설비로 인해 기인하는 것이다.

### 2.5.3 제주 계통의 안정적인 발전을 위한 제한

제주 계통의 현 상황은 풍력발전의 증가 및 신규 LNG설비 증설, 신규 HVDC의 건설 등 계통 부하에 비해 과도한 설비 증가가 예상되어 기존 설비들의 이용효율이 급격하게 감소될 것이 예상된다. 신재생 에너지 지원의 증가라는 국가적인 목표를 위해 제주 계통 풍력발전을 활성화하는 것을 추진하려면, 이러한 제주 계통에 내재된 문제도 해결해 줄 필요가 있다. 우선적으로 고려해 볼 수 있는 것이 신규 HVDC의 양방향 송전을 적극적으로 활용하는 방법이다. 단, 제주 계통의 발전기를 더욱 이용하기 위해 신규 HVDC의 역방향 송전을 고려하는 것은 경제 논리상 어폐가 있으며, 풍력발전의 활성화에는 기여할 수 있을 것이다. 신규 LNG 설비의 경우 제주 도민의 LNG 시설에 대한 요구가 그 바탕에 있는 만큼 건설의 당위성이 있긴 하지만, 그 건설 시점에 대한 고려 및 설비 용량에 대한 고려는 필요해 보인다.

## 3. 결 론

본 논문은 제주계통의 풍력설비 한계운전용량 및 계통운영방안 연구에서 수행된 한계용량 산정 및 제주 계통 풍력발전 활성화 방안 검토 과정에서 경제적 분석을 수행한 결과를 담고 있다. 제주 계통에 많은 신규 설비 및 풍력발전설비의 증가가 예상되는 만큼, 기존 설비들의 이용률이 급감한 것을 살펴본다. 제주 계통의 과도한 설비는 기존 설비의 비효율적인 이용을 초래하게 된다. 하지만, 이는 각각의 설비가 모두 나름의 필요성을 가진만큼 이를 효율적으로 이용하기 위한 방안 마련이 필요한 시점이다. 또한 이를 위한 비용은 국가적인 차원에서 해결할 필요가 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Jin-woo Park, Young-ho Park, Seung-il Moon, "Instantaneous Wind Power Penetration in Jeju Island", 2008 IEEE PES general meeting, Pittsburgh, US
- [2] Stavros A. Papathanassiou, and Nikos G. Boulaxis, "Power limitations and energy yield evaluation for wind farms operating in island systems" Renewable Energy Volume 31, Issue 4, pp 457-479, April 2006.
- [3] A.I. Tsouchnikas, N.D. Hatziaargyriou, "Probabilistic Analysis of Isolated Power Systems with Wind Power Penetration Limitations," presented at the 9<sup>th</sup> Int.Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Stockholm, Sweden, 2006
- [4] Prabha Kunder, Power system stability and control, John McGraw-Hill, 1994, p.532