

## 울릉도 계통에 대한 플라이휠 최적 용량 산정에 관한 연구

최승원\*, 이한상\*, 이정필\*\*, 한상철\*\*, 성태현\*\*, 한영희\*\*, 장길수\*  
고려대학교\*, 전력연구원\*\*

### A Study on Optimal Flywheel Capacity Estimation for Ulleung-do Power System

Seongwon Choi\*, Hansang Lee\*, Jungpil Lee\*\*, Sangchul Han\*\*, Taehyun Sung\*\*, Youngheui Han\*\*, Gilsoo Jang\*  
Korea University\*, KEPRI\*\*

**Abstract** - This paper is about optimal flywheel capacity estimation for Ulleung-do power system. The power system of Ulleung-do has some differences with other island power system in Korea. It includes wind generator, hydro-generators as well as diesel generators. There are some problems on 600kW wind generator. Because of frequent drop of wind generator, the Ulleung-do power system have been threatened on frequency. The power frequency is 60Hz, and it should be between 59.9 and 60.1Hz. However, since the electrical inertia is small and the weight of wind generation is relatively high, generator drop of wind generation might make the power frequency out of boundary.

In this paper, the flywheel energy storage system is assumed to be installed on Ulleung-do power system. Then, the maximum wind generation capacity and the optimal superconducting flywheel energy storage system capacity is estimated by the transient stability simulations.

#### 1. 서 론

전력계통의 운영은 안정도와 신뢰도의 확보를 기반으로 경제성을 추구하는 것이 가장 바람직하다. 전기에너지의 활용도 측면에서 고려할 때, 계통의 안정도와 신뢰도가 경제성에 우선한다는 것에는 의심의 여지가 없다. 그러나 교토협약에 의거한 환경 문제의 중요성이 대두되고 있고, 유가 폭등에 따른 발전비용의 급증에 따라 신·재생에너지의 활용 필요성이 증가하고 있다. 전력계통 운영자 입장에서, 신·재생에너지원, 특히 풍력발전 또는 태양광 발전의 경우 오히려 안정성을 해치는 요소로 작용할 소지가 크다는 데에 문제점이 있다.

한전계통은 육지 계통에만 국한되어 있지 않다. 제주도과 같이 육지와 거리가 멀더라도 부하량이 커서 육지계통과 연계되어 있는 섬 지역을 제외하고 한전계통과 따로 분리되어 운영되고 있는 도서지역 계통이 많다. 2006년 9월 기준으로, 발전설비용량이 3MW를 초과하는 도서계통으로는 울릉도, 백령도, 연평도, 위도, 흑산도, 거문도가 있고, 그 이외에 소용량의 도서계통은 약 30여 개에 달한다. 전체 도서계통의 발전용량의 합은 56MW에 달한다. 그 중 가장 큰 도서계통은 10.9MW의 발전용량을 보유하고 있는 울릉도 계통이다. 특히 울릉도 전력계통의 가장 큰 특징은 디젤 발전과 더불어 수력발전과 풍력발전의 혼합형태를 가지고 있다는 데에 있다.

육지와 분리되어 운영되는 도서계통은 각각 수 백 kW에서 수 MW의 용량으로 운전되기 때문에 대규모 발전시설이 설치되어 운영할 수가 없다. 이에 사용되는 것이 디젤 발전인데, 이것은 발전단가가 비싸고 유가 변동에 민감한 발전 형태라고 알 수 있다. 지속적인 유가 증가에 대하여 발전단가를 증가를 억제하기 위한 방안으로 풍력발전의 도입을 들 수 있다. 그러나 풍력발전은 계통의 안정성을 저해하고 전력공급 신뢰도를 해친다는 점에서 풍력발전 설비만의 추가는 바람직하지 않다고 할 수 있다. 풍력발전과 같은 인위적 출력제어가 불가능할 발전원의 투입에 대하여 안정도를 유지하기 위한 방안으로 제안되는 것이 에너지 저장장치이다. 특히 울릉도 계통의 경우, 풍력 발전원의 탈락에 대하여 다른 발전원의 출력 대응시간에 대한 보상이 가능할 만큼의 빠른 동작이 요구되고 충분한 양의 에너지 저장 성능을 가져야 하는 경우, 초전도 플라이휠 에너지 저장장치가 가장 적합할 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서는 이미 풍력발전이 설치되어 운영 중인 울릉도 계통에 대한 과도안정도 해석을 수행함으로써 현재 설치된 풍력발전의 안정도를 해석하였다. 또한 풍력발전의 비중을 변화시켜 해석을 수행하여 울릉도 계통에 포함될 수 있는 최대 풍력발전량을 산정하였다. 마지막으로, 현재 운전 중인 풍력발전량과 모의를 통하여 산정된 최대 풍력발전량을 바탕으로 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 설치에 대한 최적 설치 용량을 산정하였다.

#### 2. 울릉도 전력계통

울릉도 계통의 일일부하는 최소 1,400kW에서 최대 3,856kW로 변동하고 있으며, 이러한 부하는 울릉 내연, 남양 내연, 그리고 추산 수력에 의하여 공급되고 있다. 또한 현재 울릉도 계통과 연계되어 운전 중인 600kW급 풍력발전이 있다. 그러나 풍력발전의 용량은 울릉도 계통 용량을 고려할 때 그 규모가 크고, 잦은 고장으로 인하여 계통에 투입하지 못하는 경우가 더 많기 때문에, 과도 안정도 해석을 통하여 문제점을 분석하고 대책을 수립할 필요가 있다.

#### 2.1 조류계산

울릉도 계통을 두 가지 상태 즉, 중부하(3.856MW)와 경부하(1.460MW) 상태에 대하여 조류계산을 수행한다.

##### 2.1.1 중부하 case

울릉도의 계통 상태가 중부하 상태인 경우에 대한 조류계산을 수행한다. 풍력발전은 600kW의 출력을 담당하고 있다. 이에 대한 결과는 표 1과 2에 나타내었다.

표 1. 발전기 모선의 조류계산 결과(중부하-600 case)

모선번호	모선명	전압	유효전력	무효전력
1	남양내연	1.025 ∠ 0.0	1211	621
6	울릉내연	1.025 ∠ 0.4	1920	808
10	추산수력2	1.025 ∠ 3.4	79	54.3
11	추산수력1	1.025 ∠ 3.6	226	152
16	풍력	1.045 ∠ 5.9	600	-85

표 2. 부하 모선의 조류계산 결과(중부하-600 case)

모선번호	모선명	전압	유효전력	무효전력
3	군립	0.965 ∠ -2.8	528	230
4	도동	0.961 ∠ -1.8	933	440
7	저동	0.980 ∠ -1.2	1220	610
8	부대	0.998 ∠ -1.4	637	270
13	천부	1.018 ∠ 2.6	197	138
14	현포	1.049 ∠ 4.4	79	139
15	태하	1.021 ∠ -1.6	262	66

##### 2.1.2 경부하 case

울릉도의 계통 상태가 경부하 상태인 경우에 대한 조류계산을 수행한다. 풍력발전은 600kW의 출력을 담당하고 있다. 이에 대한 결과는 표 3과 4에 나타내었다.

표 3. 발전기 모선의 조류계산 결과(경부하-350 case)

모선번호	모선명	전압	유효전력	무효전력
1	남양내연	1.000 ∠ 0.0	488	216
6	울릉내연	0.001 ∠ 1.2	350	535
10	추산수력2	1.005 ∠ 4.9	50	5.4
11	추산수력1	1.005 ∠ 5.5	378	8.7
16	풍력	1.004 ∠ 6.7	350	-50

표 4. 부하 모선의 조류계산 결과(경부하-350 case)

모선번호	모선명	전압	유효전력	무효전력
3	군립	0.954 ∠ -1.9	320	100
4	도동	0.978 ∠ 0.3	360	110
7	저동	0.989 ∠ 0.7	300	10
8	부대	0.987 ∠ -0.1	210	40
13	천부	1.007 ∠ 4.8	90	140
14	현포	1.007 ∠ 5.7	50	140
15	태하	0.989 ∠ -0.9	130	0

3. 사례연구

울릉도 전력계통에서 풍력발전기 용량별 탈락에 대한 과도안정도 해석을 수행하였다. 0.5초 시점에 풍력발전기 탈락을 상정하여 다이내믹 시뮬레이션을 수행하였으며, 각 발전기의 상대적 위상차, 전기적 출력, 계통 주파수를 10초간 모니터링하여 나타내었다.

3.1 중부하-600kW case

울릉도 계통의 부하량이 중부하 상태이며, 풍력발전기에 의하여 600kW의 출력이 공급되고 있는 케이스에 대한 다이내믹 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 1은 4기 발전기의 출력변화를 나타내고, 그림 2는 계통의 주파수 변동을 나타낸다. 표 5는 남양내연 발전기를 기준으로 한 상대적 위상각을 나타낸다.

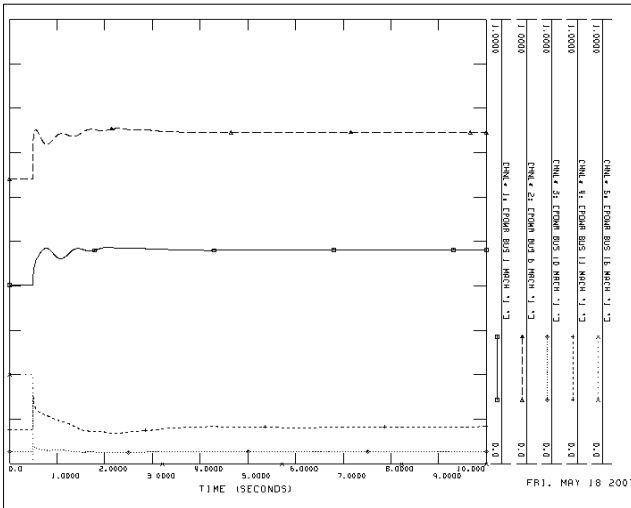


그림 1. 발전기 출력(중부하-600 case)

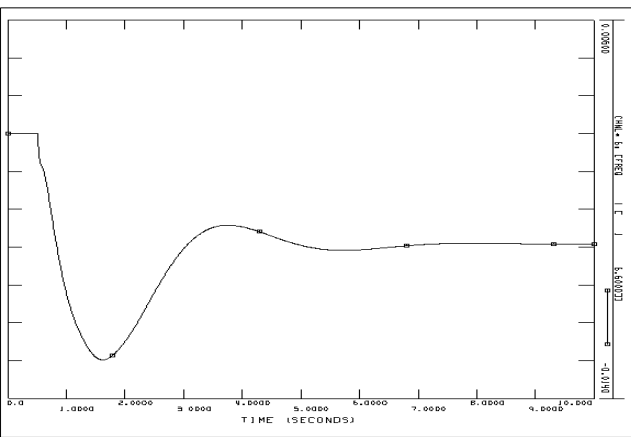


그림 2. 계통 주파수 변동(중부하-600 case)

표 5. 발전기 남양내연 기준 상대위상각 (중부하-600 case) - degree

발전소	초기 위상각	10초 시점 위상각	위상차
울릉내연	5.52	-0.5	6.02
추산수력2	-13.8	-32.0	18.20
추산수력1	-21.5	-39.84	18.34

3.2 경부하-350kW case

울릉도 계통의 부하량이 경부하 상태이며, 풍력발전기에 의하여 350kW의 출력이 공급되고 있는 케이스에 대한 다이내믹 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 4기 발전기의 출력변화를 나타내고, 그림 4는 계통의 주파수 변동을 나타낸다. 표 6은 남양내연 발전기를 기준으로 한 상대적 위상각을 나타낸다.

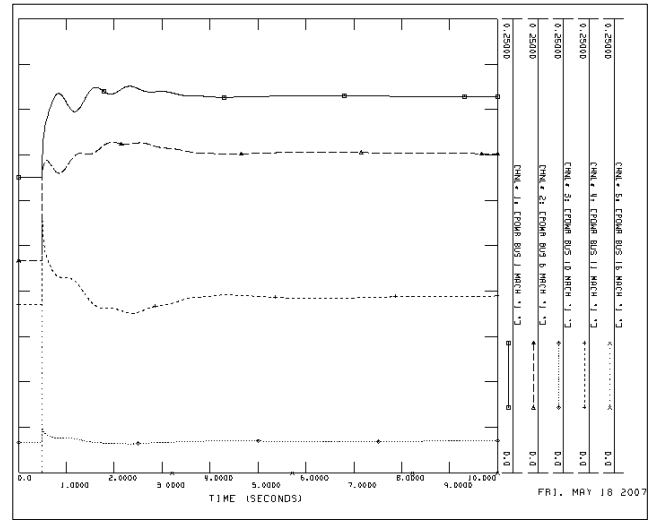


그림 3. 발전기 출력(경부하-350 case)

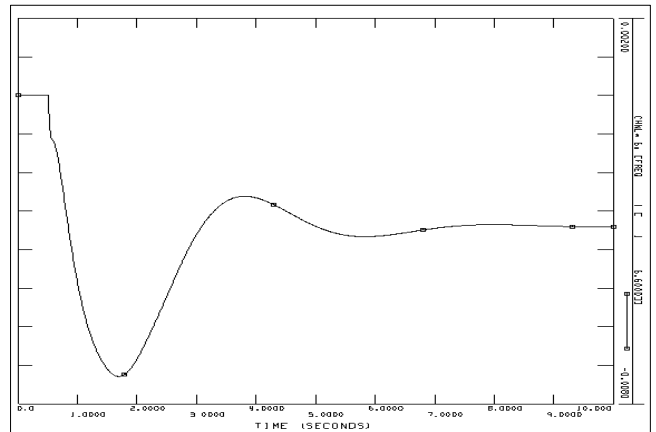


그림 4. 계통 주파수 변동(경부하-350 case)

표 6. 발전기 남양내연 기준 상대위상각 (경부하-350 case) - degree

발전소	초기 위상각	10초 시점 위상각	위상차
울릉내연	-9.12	-12.8	3.68
추산수력2	-1.76	-15.4	13.64
추산수력1	-2.24	-16.0	13.76

4. 결론

울릉도 계통에서 풍력발전기 탈락에 대한 과도안정도 해석을 수행하였다. 모의 결과에 따르면, 경부하시 풍력발전기로부터 350kW 전력의 유입이 가능하다는 결론과 계통 규모를 고려할 때 350kW의 계통 유입이 가능하다고 판단할 수 있다. 또한 최대 풍력 발전량인 600kW의 유입을 모의할 경우, 중부하 상태에서는 풍력발전기의 탈락에 따른 주파수 변동을 여타 발전기의 응답을 통하여 충분히 억제할 수 있으나, 경부하 상태인 경우 주파수 변동이 극심하여 과도안정도를 고려할 때 풍력발전기가 최대 출력으로 동작할 수 없을 것으로 판단된다. 이는 최대 풍력 출력을 600kW로 전제한 상태에서 풍력이 탈락한 경우에도 250kW를 공급할 수 있는 에너지 저장장치가 필요함을 의미한다. 또한 250kW가 얼마간 공급되어야 하는가의 문제는 상세 검토를 통해 산정될 수 있지만, 주파수 변동 추이를 고려할 때 0.5초의 지속시간이 요구될 것으로 판단된다. 그러나 이것은 0.5초 이후에 울릉도 발전기들이 필요 부하를 부담할 수 있을 정도의 발전력 여유가 있다는 전제이며, 이러한 발전력 마진의 확보는 부족할 경우 향후 발전계획을 통해 보장되어야 한다.